TS5-1

Tracing nutrient sources contributing to harmful algal blooms and other ecological problems in aquatic systems using a multi-isotope approach

Carol Kendall¹

¹United States Geological Survey, Menlo Park, California, USA (emeritus)

Keywords: nutrients, isotopes, harmful algal blooms, water pollution, ecosystem health

ABSTRACT

Excess nutrients from anthropogenic sources to lakes and other water bodies can cause significant problems for ecosystem health and for the usefulness of the water body for drinking water, recreation, and other purposes. Solutions for these environmental problems are difficult to determine because there are usually many different land-uses that contribute nutrients and organic matter to the ecosystem. In recent years, numerous studies have shown that stable isotopic techniques – particularly multi-isotope approaches piggybacked onto routine monitoring programs -- are a powerful tool for determining sources of nutrients contributing to ecological problems because different kinds of nutrients and kinds of dissolved and particulate organic matter derived from different sources and land uses often have distinctively different isotopic compositions.

The basis for using isotopes to determine the sources of nutrients and other solutes to algae and bacteria is that autotrophic organisms preferentially assimilate the lower-mass isotopes of dissolved solutes. Hence, a comparison of the isotopic compositions of the organisms and the solutes from different sources allows estimation of the relative contributions of different specific nutrient and solute sources to the organisms. And since different nutrient and other solute sources frequently have distinctive compositions, the relative contributions from these different sources can often be reliably determined. This presentation will present an overview of the "state of the science" regarding the ability of isotopes to distinguish point and non-point anthropogenic impacts at various spatial scales, provide suggestions for successful pilot studies, and outline guidelines for future monitoring programs in biologically active and human-impacted systems.

From leaves to lakes: Revealing the nitrogen dynamics in catchment ecosystems using stable isotope techniques

Nobuhito Ohte¹, Ken'ichi Osaka², Kazuo Isobe³ and Ichiro Tayasu⁴

¹Kyoto University, ²The University of Shiga Prefecture, ³The University of Tokyo, ⁴Research Institute for Humanity and

Nature

Keywords: NO3- isotopes, microbial denitrifier method, terrestrial ecosystem, microbial ecology

ABSTRACT

The measurement of nitrogen (N) and oxygen (O) isotope values of dissolved nitrate (NO₃⁻) has been used for water quality surveys since 1980s. Isotope information of various origins of NO₃⁻ has been compiled for many different ecosystems. In the beginning of 2000s, the development of the microbial denitrifier method for this measurement has made its throughput higher dramatically. As this method requires a tiny amount of sample volume, it allows us to execute spatiotemporally high resolution and simultaneous measurements of N and O isotopes of NO₃⁻. Using this technique, we have been able to reveal the details of transformation and movement of NO₃⁻ and related N compounds in various ecosystems. We have applied this method to describe the transformation of N in the surface of plants, litter layers, soils and groundwater zones, and used for identifying the origins of NO₃⁻ in river catchment. Here, we described how we have approached to the N dynamics in various scales of ecosystems using this isotope technique and discussed the future directions of this study area and associate methodologies applicable to reveal the new insights of N dynamics in terrestrial ecosystems. Combined approach with microbial ecological investigations may provide synergetic effects for mechanistic understandings of N dynamics of terrestrial ecosystems.

1. INTRODUCTION

The measurement of nitrogen (N) and oxygen (O) isotope values of dissolved nitrate (NO₃⁻) has been used for water quality surveys since 1980s. Isotope information of various origins of NO₃⁻ has been compiled systematically for many different ecosystems by Kendall^[1]. The typical ranges of δ^{15} N and δ^{18} O of NO₃⁻ from various sources was illustrated in her review chapter. This δ^{15} N- δ^{-18} O plot, the so-called "Kendall Plot", has been referred for identifying origins of NO₃⁻ and for detecting the effect of denitrification in various case studies in past two decades.

In the beginning of 2000s, the microbial denitrifier method was proposed for this measurement (Sigman et al. ^[2]; Casciotti et al. ^[3]). This method has made its throughput higher dramatically. As this method requires a tiny amount of sample volume, it allows us to execute spatiotemporally high resolution and simultaneous measurements of N and O isotopes of NO_3^- . Using this technique, we have been able to reveal the details of transformation and movement of NO_3^- and related N compounds in various ecosystems. The new method has been applied to understand the microbial and physical mechanisms behind the spatiotemporal changes of NO_3^- abundance in various ecosystems including rivers (e.g. Ohte et al.^[4]; Johannsen et al.^[5]), lakes (e.g. Finlay et

al.^[6]) and oceans (e.g. Wankel et al.^[7]). The Kendall plot was updated by adding the NO₃⁻ data for atmospheric depositions using the microbial denitrifier method^[8].

The advantages of this method requiring a small amount of sample are not only to allow us to increase the spatiotemporal resolution, but also to allow us to apply this method to small-scale phenomena in terrestrial ecosystems. For example, we can measure the δ^{15} N and δ^{18} O of NO₃⁻ in throughfall, stem flow and soil waters, which has usually been difficult to collect sufficient sample volume for the previous method, such as the silver nitrate method. Consequently, more detailed understandings on N dynamics along the elemental hydrological processes has become possible (e.g. Osaka et al.^[9]; Shi et al.^{[10],[11]}).

This paper is aiming to describe usefulness of and applicability to wide range of scales of N dynamics in terrestrial ecosystems; from a small-scale plot in a forested ecosystem to river, lake and catchment ecosystems. From a leaf surface to a lake, various N transformations and related biogeochemical phenomena occur in a catchment ecosystem which consists of multiple ecosystems such as forests agricultural fields and streams, and NO_3^- is one of the most important N compounds for evaluating the nutrient status and linkages

of ecosystems. Additionally, we tried to propose new approaches associated with isotope measurements of NO_3^- to elucidate more insights of N dynamics in terrestrial ecosystems.

2. IN THE FORESTED ECOSYSTEMS

 NO_3^- is one of the most important bioavailable nutrients in the temperate forest ecosystem. Its major sources are atmospheric deposition and microbial production. As there is significant difference of the $\delta^{18}O$ value between atmospheric and microbially produced NO_3^- , a $\delta^{18}O$ value can be used for evaluating the relative contribution of those two sources.

Shi et al.^[10] have monitored NO₃⁻ isotope changes during the processes that rain touches and passes thorough a canopy, or flows on the surface of tree body, and then infiltrates into soil profile (Fig. 1). The δ^{18} O values of rain, throughfall (TF), stem flow (SF) waters were significantly higher than those of soil waters even at shallowest part. In the organic soil layer (OH), the δ^{18} O was occasionally close to that of atmospheric deposition and close to that of soil waters. These suggest that the NO₃⁻ derived by the atmospheric deposition was quickly replaced by the one produced by microbial activities

Cryptomeria japonica, growing season



especially in the organic

Fig. 1 The δ^{18} O values of NO₃⁻ in rainfall (rain),

throughfall (TF), stem flow (SF), the organic horizon (OH), and soil water (SW; 10, 30, and 70 cm depths) during the growing at the *Cryptomeria japonica and Quercus acutissima* stands. Box plots with different lowercase letters indicate significant differences among sample types. (Shi et al.^[10]).

soil layer. In the same forest ecosystem, The N transformations (mineralization, nitrification and immobilization) were significantly more active in the OH layer than the mineral soils underneath the OH layer (Shi et al.^[11]). These implied that the NO_3^- replacement was made by co-occurrence of the immobilization of the atmospheric NO_3^- and the active nitrification in same layer.

In addition to above, it is worthy to note that the δ^{18} O of NO₃⁻ in stem flow waters was lower than those of rain and throughfall waters especially in the *Q. acutissima* stand. Considering that the stem flow water contacts with leaves and bark surface, the replace or addition of NO₃⁻ by the microbial activities occurred on the tree surfaces.

In the groundwater body, denitrification may affect the isotope values of NO₃⁻. Osaka et al.^[9] demonstrated for a small headwater catchment in central Japan that the δ^{15} N of NO₃⁻ in the subsurface groundwater increased during flowing from the slope side to the stream riparian zone, while the δ^{18} O of NO₃⁻ did not change significantly. The increase of δ^{15} N was explained by an isotope enrichment with the denitrification in the water-saturated soil layers. On the not significant increase in the δ^{18} O, Osaka et al.^[9] hypothesized the co-occurrence of nitrification and denitrification within a similar hydrological zone in the relatively shallow part of the groundwater body.

3. IN THE RIVER CATCHMENTS

For the streams in headwater catchments, the major NO_3^- sources are basically soil layers and groundwater aquifers. Generally, the population density increases toward the downstream regions in a lager river catchment. Agricultural fields and industrial areas may also increase from the mid-stream regions. This social situation supplies multiple anthropogenic sources of NO_3^- load into rivers.

The riverine changes of the δ^{15} N and δ^{18} O of NO₃⁻ and NO₃⁻ concentration of two similar scale rivers (catchment area: 300-400 km²) in the central Japan demonstrated that the isotope values of NO₃⁻ indicated the geographical points where the anthropogenic NO₃⁻ input occurred and increased (Fig. 2). In the case of the Yasu river in Fig. 2, the parallel increase of δ^{15} N and NO₃⁻ concentration begging from the midstream part indicated the NO₃⁻

originated from the septic wastewater was discharge from the residential areas of the midstream part of the catchment, while δ^{15} N and NO₃⁻ concentration did not increase with river flow through the midstream part of the Ado river having no intensive residential areas (Ohte et al.^[12]).

4. **TOWARDS NEW STRATEGIES** Yasu River Ado River NO₁⁻ concentration (µM) 100 100 80 80 60 60 40 -40 20 20 0 0N 0 0 10 50 0 10 20 30 40 50 60 10 10 2 8 ê 8642 "ON-N. 9 4 "ON-No 2 0 0 -2 -2 0 10 20 30 40 50 60 10 20 0 30 40 50 60 6"O-NO, (%) î 6 6 4 4 "ONO 2 2 0 -2 .2 0 10 20 30 40 10 20 30 40 50 50 60 60 dwater (km) Dist ce from the headwater (km) Tributaries 0 Main steer

The isotopic measurements of NO_3^- as a method to know Fig. 2 Riverine distributions of $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$ of NO_3^- and NO_3^- concentration in two rivers in central Japan (Ohte et al.^[12]).

the origins of N for the river and lake ecosystems have already well developed for a broad usage in research and operational works. The applications for those needs will continue in the field of environmental sciences.

On the other hand, it will be possible that new targets will be created in the field of the N dynamics in spatially small-scale ecosystems using isotope techniques. This is because the denitrifier method can be applied to a small volume samples as we mentioned in the introductory section. For the spatially specific processes in the forested ecosystems as introduced in the chapter 2, both qualitative and quantitative information on microbial activities is highly useful for interpretation of the changes in δ^{15} N and δ^{18} O of NO₃⁻ and NO₃⁻ abundance.

The attempts to link microbiological community dynamics with N biogeochemistry have performed in the several case studies in forest ecosystems (Isobe and Ohte^[13]). But, more detailed information on related microbiological community dynamics are still needed from the in-situ condition. Not only the DNA presence, but also the information from RNA- or protein-based

analysis for the field samples can be provide more mechanistic understanding of N dynamics. These efforts combined with N isotopic measurements should also contribute to more realistic model predictions of the N cycle.

REFERENCES

- Kendall, C. 1998. Isotope Tracers in Catchment Hydrology, pp. 519-576, Elsevier, Amsterdam.
- [2] Sigman, D.M., Casciotti, K.L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M. and Böhlke, J.K. 2001. A Bacterial Method for the Nitrogen Isotopic Analysis of Nitrate in Seawater and Freshwater. Analytical Chemistry 73(17), 4145-4153, doi:10.1021/ac010088e.
- [3] Casciotti, K.L., Sigman, D.M., Hastings, M.G., Böhlke, J.K. and Hilkert, A. 2002. Measurement of the Oxygen Isotopic Composition of Nitrate in Seawater and Freshwater Using the Denitrifier Method. Analytical Chemistry 74(19), 4905-4912, doi:10.1021/ac020113w.
- [4] Ohte, N., Sebestyen, S.D., Shanley, J.B., Doctor, D.H., Kendall, C., Wankel, S.D. and Boyer, E.W. 2004. Tracing sources of nitrate in snowmelt runoff using a high-resolution isotopic technique. Geophysical Research Letters 31(21), n/a-n/a, doi:10.1029/2004GL020908.
- [5] Johannsen, A., Dähnke, K. and Emeis, K. 2008. Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea. Organic Geochemistry 39(12), 1678-1689, doi: 10.1016/j.orggeochem.2008.03.004.
- [6] Finlay, J.C., Sterner, R.W. and Kumar, S. 2007. Isotopic evidence for in-lake production of accumulating nitrate in Lake Superior. Ecological Applications 17(8), 2323-2332, doi: 10.1890/07-0245.1.
- [7] Wankel, S.D., Kendall, C., Pennington, J.T., Chavez, F.P. and Paytan, A. 2007. Nitrification in the euphotic zone as evidenced by nitrate dual isotopic composition: Observations from Monterey Bay, California. Global Biogeochemical Cycles 21(2), doi: 10.1029/2006GB002723.
- [8] Kendall, C., Elliott, E.M. and Wankel, S.D. 2008. Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science. Michener, R. and Lajtha, K. (eds).
- [9] Osaka, K.i., Ohte, N., Koba, K., Yoshimizu, C., Katsuyama, M., Tani, M., Tayasu, I. and Nagata, T. 2010. Hydrological influences on spatiotemporal variations of δ15N and δ18O of nitrate in a forested headwater catchment in central Japan: Denitrification plays a critical role in groundwater. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 115(G2), doi: 10.1029/2009JG000977.
- [10] Shi, J., Ohte, N., Tokuchi, N., Imamura, N., Nagayama, M., Oda, T. and Suzuki, M. 2014. Nitrate isotopic composition reveals nitrogen deposition and transformation dynamics along the canopy–soil continuum of a suburban forest in Japan. Rapid Communications in Mass Spectrometry 28(23), 2539-2549, doi: 10.1002/rcm.7050.
- [11] Shi, J., Ohte, N., Tokuchi, N., Isobe, K., Urakawa, R., Imamura, N., Oda, T. and Suzuki, M. 2015. Soil nitrogen transformation dynamics in a suburban forest near Tokyo

Metropolitan Area under high nitrogen deposition: A case study using stable isotope tracer techniques. Bulletin of University of Tokyo Forest 132, 17-34.

- [12] Ohte, N., Tayasu, I., Kohzu, A., Yoshimizu, C., Osaka, K.i., Makabe, A., Koba, K., Yoshida, N. and Nagata, T. 2010. Spatial distribution of nitrate sources of rivers in the Lake Biwa watershed, Japan: Controlling factors revealed by nitrogen and oxygen isotope values. Water Resources Research 46(7), doi: 10.1029/2009WR007871.
- [13] Isobe, K. and Ohte, N. 2014. Ecological Perspectives on Microbes Involved in N-Cycling. Microbes and Environments 29(1), 4-16, doi:10.1264/jsme2.ME13159.

Identification of Nitrate Sources in Groundwaters of Silang-Sta. Rosa Subwatershed: Towards the Watershed Governance

Osbert Leo A. Privaldos^{1,2}, Ken'ichi Osaka³, Yoshitoshi Uehara⁴, Satoshi Asano⁵, Lei Fujiyoshi⁴,

Chikage Yoshimizu⁴, Ichiro Tayasu⁴, Adelina C. Santos-Borja¹, Maria Pythias B. Espino², Noboru Okuda⁴

¹Laguna Lake Development Authority, National Ecology Center, East Avenue, Diliman, Quezon City 1100, Philippines

²Institute of Chemistry, University of the Philippines, Diliman, Quezon City 1101, Philippines

³The University of Shiga Prefecture, 2500 Hassakocho, Hikone, Shiga Prefecture P.O. Box 522-0057, Japan

⁴Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-Ku, Kyoto P.O. Box 603-8047, Japan

⁵Lake Biwa Environmental Research Institute, 5-34 Yanagasaki, Otsu, Shiga Prefecture P.O. Box 520-0022, Japan

Keywords: groundwater, nitrogen pollution, nitrate stable isotopes, denitrifier method, Silang-Sta. Rosa subwatershed

ABSTRACT

Water quality degradation caused by contamination of nitrate from various sources has become a worldwide environmental problem. Stable isotopes of nitrate-nitrogen ($\delta^{15}N$) and oxygen ($\delta^{18}O$) have been used to trace nitrate sources in the hydrosphere. In Silang-Sta. Rosa subwatershed of Laguna de Bay, the Philippines, in which sewage systems have not yet developed well, groundwater nitrate pollution is a matter of great concern to the society. Here, we conducted nitrate $\delta^{15}N$ - $\delta^{18}O$ stable isotope analysis with a denitrifier method to identify the source of nitrate pollution in the groundwaters during the dry and wet seasons. Biplots of the nitrate $\delta^{15}N$ - $\delta^{18}O$ values suggest that the groundwater nitrate isotope signatures in a hot spot of nitrate pollution are imprinted by those of fertilizers as well as manure/septic wastes. Principal component analysis for groundwater trace element also reveals that groundwaters in the polluted area are derived from the upstream cropland. These results suggest that chemical fertilizers can be one of the major sources of groundwater nitrate pollution in this watershed. The use of this isotope technique aids for the practice of watershed governance, in which variety of stakeholders are involved in mitigation of the nitrate pollution through the integration of local and scientific knowledge.

1. INTRODUCTION

The water quality of groundwater, as one of the sources for drinking water, is threatened by nitrate (NO₃⁻) contamination. Nitrate in groundwater comes from several sources such as agricultural activities and atmospheric deposition. These NO₃⁻ sources have distinct stable isotope signatures (δ^{15} N-NO₃⁻ and δ^{18} O-NO₃⁻)^[1]. Identifying the sources of NO₃⁻ in groundwater is an initial step in the development of management practices to guarantee long-term protection. This will prevent further deterioration of the quality of groundwater.

The ground waters in Silang-Sta. Rosa subwatershed of Laguna de Bay watershed were studied. Silang-Sta. Rosa subwatershed (*see* Figure 1) is an urban ecosystem with different land use types such as residential, commercial, and industrial. This subwatershed is located at the western portion of the lake basin. The increasing demand for land use change to attain economic development in the subwatershed is due to its close proximity to Metro Manila and the abundance of quality groundwater in the area. In Sta. Rosa City, higher economic returns are achieved by conversion of farmland to non-agricultural uses. This negatively affects agricultural production. The headwaters of the subwatershed located in Silang, Cavite with its sloping nature are threatened because of the on-going urban sprawl in the uplands. This results in the occurrence of frequent soil erosion and surface run-off^[2].

This research was supported by the project (D06-14200119), Research Institute for Humanity and Nature (RIHN).





2. METHOD

Ground water samples in the Silang-Sta. Rosa subwatershed were collected from determined sites in September 2016 (wet season) and in March 2018 (dry season). *In-situ* parameters such as pH, temperature, and electrical conductivity were measured using portable sensors. Samples were filtered using 0.22 μ m cellulose-acetate filter papers, stored in pre-washed 100-mL polyethylene bottles, and kept in the refrigerator at 4°C to minimize microbial activity. These were brought to RIHN in Kyoto, Japan and kept frozen.

The identification of nitrate stable isotopes (δ^{15} N-NO₃⁻ and δ^{18} O-NO₃⁻) was conducted using the denitrifier method that utilizes an aerobic bacterium with a denitrifying strain called *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *Aureofaciens* ATCC 13985.³⁴ The nitrous oxide (N₂O) gas produced was simultaneously measured for the (δ^{15} N-NO₃⁻ and δ^{18} O-NO₃⁻ values using PAL-Precon-Gas Bench-Delta Plus^{XP} isotope ratio mass spectrometer at RIHN. The concentrations of the major ions and metals in the groundwater samples were analyzed in RIHN using an ion chromatograph (ThermoFisher Scientific Dionex ICS-3000) and an inductively coupled plasma – mass spectrometer (Agilent

Technologies 7500 Series), respectively.

3. RESULTS

Figure 2 shows the map of decreasing NO₃⁻ concentrations from upstream to downstream in the groundwaters of Silang-Sta. Rosa subwatershed.





4. DISCUSSION

The groundwaters in Silang-Sta. Rosa subwatershed have NO_3^- that originates from fertilizers and manure/septic wastes from the upstream/midstream and mid-stream/downstream, respectively. This comes from the fertilizers used in agriculture in the upstream area and in some downstream parts of the study site. The increasing land use changes in the downstream from farmland to commercial and industrial activities affects the natural cycling of nitrogen. The chemical contamination alters the biogeochemical processes from upstream to downstream.

The nitrate concentrations in the ground water samples conformed to the Philippine National Standards for Drinking Water of 50 mg/L except for the sample collected in Barangay Sto. Domingo during the wet season sampling. Barangay Sto. Domingo is considered to be a hotspot because of the high NO₃⁻ concentrations relative to the surrounding area.

5. CONCLUSION

The ground waters in Silang-Sta. Rosa subwatershed were assessed to identify the NO₃⁻ sources using the denitrifier method for the wet and dry seasons. The NO₃⁻ sources for the study site are fertilizers and manure/septic wastes.

This initial assessment of the groundwater for the identification of NO_3^- sources in Silang-Sta. Rosa subwatershed using stable isotope analysis is important in understanding of the impacts of NO_3^- contamination and in the development of watershed governance to control NO_3^- pollution.

Understanding the sources and biogeochemical cycling of nitrate in the groundwater can throw light on proper eutrophication control measures. With this study, it provides a scientific data that could help in developing policies in the implementation and pollution strategies to promote a more sustainable watershed management in Laguna de Bay.

Ions contamination specifically the nitrate cannot be categorically defined due to the limited data. But by employing a new technique called stable isotope analysis that requires less frequency of sampling, provides an avenue for the regulatory agencies such as LLDA to have a better understanding of the sources of nitrate.

REFERENCES

- Stoewer, M. M., Knöller, K., and Stumpp, C.: Tracing freshwater nitrate sources in pre-alpine groundwater catchments using environmental tracers, Journal of Hydrology, Volume 524, pp. 753-767, 2015.
- [2] Engay-Gutierrez, K. G.: Land cover change in the Silang-Santa Rosa river subwatershed, Laguna, Philippines, Journal of Environmental Science and Management, Volume 18(1), pp. 34-46, 2015.
- [3] Sigman, D. M., Casciotti, K. L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M., Bo, J. K., and Supe, Ä. N.: A bacterial method for the

nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater, Analytical Chemistry, Volume 73(17), pp. 4145-4153, 2001.

[4] Casciotti, K. L., Sigman, D. M., Hastings, M. G., Bohlke, J. K., and Hilkert, A.: Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method, Analytical Chemistry, Volume 74, pp. 4905-4912, 2002.

硝酸イオンの窒素及び酸素安定同位体比を用いた 茨城県鉾田川流域地下水の窒素負荷源の推定

箭田佐衣子¹,中島泰弘^{1,2},松森堅治³,板橋 直^{1,4},平野七恵¹,大内孝雄^{5,6},吉川省子¹,江口定夫¹
□農研機構 農業環境変動研究センター,²農研機構 高度解析センター,³農研機構 西日本農業研究センター,⁴現 農林 水産省 農林水産技術会議事務局,⁵茨城県霞ケ浦環境科学センター,⁶現 茨城県県民生活環境部環境対策課

キーワード:霞ヶ浦に係る水質保全計画(第7期),施設園芸,水田,堆肥,脱窒,養豚

抄録

霞ヶ浦北浦に流入する茨城県鉾田川流域(53 km²)は、畜産及び施設園芸が盛んで窒素負荷量が大きい。鉾田 川流域内の井戸 (n = 60)を対象に硝酸イオン(NO₃⁻)濃度を測定したところ、平均値±標準偏差は 9.4±4.2 mg N L⁻¹ であった(NO₃⁻等水質環境基準:10 mg N L⁻¹)。地下水中 NO₃⁻の窒素(δ^{15} N_{NO3})及び酸素(δ^{18} O_{NO3})安定同位体比 (7.9±1.9‰及び 1.2±1.2‰)から、主な N 負荷源は化学肥料及び家畜排泄物の混合物と推定された。三区分した サブ流域毎の δ^{15} N_{NO3}- δ^{18} O_{NO3}プロットの分布範囲は概ね一致し、流域全体で化学肥料と家畜排泄物が併用されて いる可能性が示唆された。全データの δ^{15} N_{NO3}- δ^{18} O_{NO3}プロットの一次回帰直線の傾きは 0.42 であり、一部の NO₃⁻ は脱窒の影響を受けたものであることが示された。以上より、NO₃⁻による地下水汚染を防止する上で、化学肥料と家 畜排泄物の両方の削減の必要性が示された。

1. はじめに

「泳げる霞ヶ浦・遊べる河川」の実現に向け、霞ヶ浦 に係る水質保全計画(第7期)の水質保全目標値 (COD:7.8 mg L⁻¹、全窒素:1.1 mg N L⁻¹、全りん:0.090 mg P L⁻¹)が策定された[1]。霞ヶ浦(220 km²)の主要流 入河川のうち、茨城県鉾田川は硝酸イオン(NO₃⁻)等の 窒素(N)濃度が最も高く、この10年間で水質環境基準 (10 mg N L⁻¹)の超過がみられるようになった[2]。

この理由として、近年、鉾田川流域では畜産及び施 設園芸の集約化が進み、流域内における1日あたりN 負荷量は畜産が262kg、畑地が87.5kg、生活排水が 87.6kgあり(平成17年)、とくに畜産排泄物の適正な管 理と利用が推進されてきた[3]ことが挙げられる。これに 関連し、鉾田川河川水中のNに着目した研究が多くあ る一方で、鉾田市の調査(平成28年)でNO3⁻等による 地下水汚染例が報告されている[4]にもかかわらず、地 下水についての知見が乏しい。鉾田川流域では、水田 や施設畑の灌漑に主に地下水が使用されていることか ら、安定的な農業生産の為には地下水中Nの実態把 握と汚染対策は重要である。

地下水への NO₃⁻汚染を論じる際には、科学的な根拠に基づく汚染源の特定が必要である。一般的に、Nの起源や脱窒・混合の度合いによって NO₃⁻の酸素とNの安定同位体比($\delta^{15}N_{NO3} \ge \delta^{18}O_{NO3}$)の値が異なることが知られており[5]、試験管から地球規模での N 動態評

価に用いられている。霞ヶ浦流域では、筑波山麓水田 集水域での N 動態評価に河川水中の $\delta^{15}N_{NO3}$ と $\delta^{18}O_{NO3}$ 値が用いられた[6]。本研究は、鉾田川流域の 地下水中 $\delta^{15}N_{NO3}$ と $\delta^{18}O_{NO3}$ 値に基づき、家畜排泄物や 化学肥料等の地下水への N 負荷源、ならびに硝化や 脱窒等の N 動態が当流域内の NO₃-による地下水汚染 に与える影響を評価することを目的とした。



図1;採水地点

2. 方法

茨城県鉾田川流域(53 km²)を3つのサブ流域(上流1、 上流2、下流)に区分し、計60箇所の井戸で地下水を 採取した(2014~2016年)(図1)。河川水は、2014年に 鉾田川本流(下流部の飯名橋近傍)で採取した。水試 料中の NO_3 -濃度はイオンクロマトグラフ法で測定し、 $\delta^{15}N_{NO3} \geq \delta^{18}O_{NO3}$ 値は脱窒菌法[5]により求めた。

3. 結果

全地下水 (n = 60) の NO₃⁻濃度は 9.4±4.2 mg N L⁻¹、 δ^{15} N_{NO3} は 7.9±1.9‰、 δ^{18} O_{NO3} は 1.2±1.2‰で、河川水 (n = 1) は 6.5 mg N L⁻¹、3.4‰、4.4‰だった(図 2)。

各サブ流域の地下水の NO₃⁻濃度は、上流 1 が 9.8±5.2(n = 41)、上流 2 が 8.8±7.6(n = 8)、下流が 8.5±5.1 mg N L⁻¹(n = 11)で、水質環境基準超過率は それぞれ 46%、25%、42%だった。 δ^{15} N_{NO3}は、上流 1 が 8.3±2.3‰、上流 2 が 7.2±1.9‰、下流が 6.9±4.0‰で、 δ^{18} O_{NO3}はそれぞれ 1.4±1.4‰、0.5±1.4‰、1.2±3.0‰で あり、いずれも有意差は認められなかった。

4. 考察

4.1 鉾田川流域におけるN負荷源

地下水への N 負荷源には大気降下物、化学肥料、 畜産排泄物や生活排水等があり、鉾田川流域では人 間活動の影響が明らかである。人為的な N 負荷源の $\delta^{15}N_{NO3}$ 値は、化学肥料が-4~+4‰、畜産排泄物が+10 ~+20‰、生活排水が+8~+15‰とされる[7] [8]。鉾田川 流域の全地下水のうち、 $\delta^{15}N_{NO3}$ 値 4‰以下の値は 3 地 点 (NO₃⁻濃度:0.1~9.6 mg N L⁻¹)のみで検出され (図 2)、NO₃⁻の起源が化学肥料 N のみに由来するとは考え にくい。さらに、計 47 地点の地下水が、化学肥料 N と有 機物 (家畜排泄物と生活排水) N の間の範囲 ($\delta^{15}N_{NO3}$: 4~10‰)に分布した。また、前述のように、畜産由来 N



図2;地下水の δ¹⁵NN03-δ¹⁸ON03 プロット

負荷量は生活排水Nの約3倍あり、生活排水が汚水処 理施設に集められて浄化されるのに対し、家畜排泄物 は堆肥化されて農地等に面的に散布される。したがっ て、これらを考え併せると、化学肥料Nと畜産排泄物N の混合物に由来するNが鉾田川流域の地下水におけ る主なN負荷源と考えられる。また上流1、上流2及び 下流の $\delta^{15}N_{NO3}-\delta^{18}O_{NO3}$ プロット分布範囲は概ね一致し、 全流域の地下水中NO3⁻の起源は類似と考えられた。

全地下水の $\delta^{15}N_{NO3}$ 値のヒストグラムは、5.00±0.73‰ (n = 14、Group1)、7.14±0.57‰ (n = 26、Group 2)、 10.7±2.40‰ (n = 20、Group 3)に三分した(図3)。Group 2($\delta^{15}N_{NO3}$ 値 6~8‰)の度数が突出し、かつ $\delta^{18}O_{NO3}$ 値 がほぼ同じ(0.61±1.07‰)だったことから、鉾田川流域 全体で同様の肥培管理(化学肥料と家畜排泄物の併 用率)が実施されていると推察された。グループ別の $\delta^{15}N_{NO3} - \delta^{18}O_{NO3}$ プロットをみると、Group 3 では傾き 0.59 の直線が得られ、脱窒に伴う同位体分別($\delta^{15}N_{NO3}$ と $\delta^{18}O_{NO3}$ 同位体比増加)の影響が示された(図 3(c))。 しかし、NO₃ ~濃度(10.6±7.2 mg N L⁻¹)は有意差は無い ものの他より高く、脱窒による地下水中 NO₃-の浄化傾 向は認められなかった。

4.2 鉾田川流域におけるN循環

全地下水の δ¹⁵N_{NO3}-δ¹⁸O_{NO3}プロットを一次回帰した結 果、傾き 0.42 の直線が得られ、流域内における脱窒の 傾向が示された(図 2)。サブ流域別にみると、上流 2 と



図3;地下水の $\delta^{15}N_{NO3}$ 値のヒストグラム、及びグループ 別の $\delta^{15}N_{NO3}-\delta^{18}O_{NO3}$ プロット(a) Group1、(b) Group2 及び(c) Group3

比較し上流 1 及び下流でより脱窒傾向が示され、各サ ブ流域の土地利用に占める水田面積率(上流1:9.7%、 上流2:7.4%、下流:11.3%)と合致した。地下水を採水 した井戸の深さが判っているもの(n=19)について、 深さを海抜標高に換算すると $-26m \sim +42m$ であり、 $-21 \sim +22m$ の広範囲に水環境基準値を超過する地 下水が分布した(図4)。井戸の深さとNO₃-濃度、なら びに $\delta^{15}N_{NO3} \geq \delta^{18}O_{NO3}$ 値との間には統計的に有意な相 関関係は認められなかった。鉾田川流域は、砂層と粘 土層で形成される鹿島台地と関東ローム層からなり 透水性が高い[9]。このため、土壌に負荷された N の



図4;井戸の水面標高別の地下水の(a) NO3⁻濃度、 (b) δ¹⁵NNO3 及び(c) δ¹⁸ONO3

うち、作物が吸収しきれなかった余剰のNが、地層 内で顕著な脱窒を受けること無く地下水面に到達す る場合が多くあると考えられた。また、霞ヶ浦(北 浦)の周辺地域は地下70m深さで霞ヶ浦基底面の沖 積層と連続しており[9]、鉾田川流域の地下流動系に 到達したNは、霞ヶ浦湖盆の水頭圧を受けて地下水 帯に滞留する傾向があると考えられた。

5. 結論

鉾田川流域の地下水のδ¹⁵N_{NO3}とδ¹⁸O_{NO3}値から、 N負荷源は主に化学肥料と家畜排泄物の混合物であ ると考えられた。水田等への地下水灌漑によるN浄 化(脱窒)の可能性も示唆されたが、顕著なNO₃-濃度低下は認められなかった。鉾田川流域における 適切な肥培管理の重要性は従来から指摘されてきた が、本研究により、化学肥料と家畜排泄物の両方の 削減が必要であることが安定同位体分析結果に基づ き初めて明示された。

引用文献

- 茨城県・栃木県・千葉県: 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画 (第7期), pp.4-6, 2017
- [2] 茨城県: 公共用水域の水質等測定結果, 2017
- [3] 茨城県: 平成 18 年度流出水対策モデル計画策定調査事 業, pp.31-32, 2006
- [4] 鉾田市: 鉾田市環境基本計画, pp.37-37, 2016
- [5] Carol Kendall: Tracing nitrogen sources and cycling in catchments, in Isotope Tracers in Catchment Hydrology, pp.519-576, 1998
- [6] Saeko Yada, Yasuhiro Nakajima, Sunao Itahashi, Kei Asada, Seiko Yoshikawa and Sadao Eguchi: Procedure for rapid determination of δ¹⁵N and δ¹⁸O values of nitrate: development and application to an irrigated rice paddy watershed, Water Science and Technology, 73(9), 2108-2118, 2016
- [7] Carol Kendall, Emily M. Elliott, and Scott D. Wankel: Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems, In Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, 2nd Edition, pp.375-449, 2007
- [8] 李 盛源,保坂 亜紀子,田瀬 則雄:家畜排せつ物の素掘 り廃棄ピットが地下水水質に及ぼす影響,地下水学会誌, 51(1), 3-14, 2009
- [9] 井内美郎, 斎藤文紀: 霞ヶ浦, 海跡湖の地史-3, Urban Kubota, 32, 56-63, 1993

茨城県霞ケ浦流域における大気アンモニア濃度の広域観測

堅田 元喜¹,久保田 智大¹,黒田 久雄¹,福島 慶太郎²,中里 亮治¹,松本 俊一³,中川 圭太³, 北見 康子³,菊地 哲郎³,渡邊 未来⁴,今村 直広⁵

1茨城大学,2京都大学,3茨城県霞ケ浦環境科学センター,4国立環境研究所,5森林総合研究所

キーワード:広域的大気環境の影響,窒素・りん循環,点源及び面源汚染

抄録

農業・畜産系から放出された大気アンモニア(NH₃)の沈着は,放出源の周辺に窒素負荷をもたらすが,その負荷量を 決める NH₃ 濃度の観測データは国内では限定的であり,流域への窒素の負荷量を推計する上で不確実な要因となっ ている。このことを背景に,2017 年 6 月から茨城県霞ケ浦流域に分布する 13 地点を対象に,拡散型パッシブサンプラ ーとイオンクロマトグラフィーを用いた NH₃ 濃度の観測網の整備を進めている。観測された月平均 NH₃ 濃度の大きさや 変動傾向は地点ごとに異なり,特に,観測地点の近傍に畜舎などの放出源が想定される場所では,濃度の変動幅が 大きいことが示された。今後,本研究の広域観測を継続することによって,NH₃ の沈着がもたらす霞ケ浦流域や窒素飽 和が起こっている筑波山の森林への窒素負荷量の推計を目指す。

1. はじめに

農業活動に伴う施肥や家畜ふん尿などから発生する 大気アンモニアガス(NH₃)は、降雨に取り込まれて落下 する湿性沈着や大気乱流により下方へ輸送され樹木の 葉などへと直接吸着する乾性沈着を通じて、特に放出 源の近傍に大量の窒素を負荷する^[1]。乾性沈着量の推 計には NH₃ 濃度のデータが必要であるが、大気汚染物 質ではない NH₃ には環境基準や監視体制が存在せず、 データは限定的である。また、NH₃の発生源は局所的 かつ広く分布しているため、その大気中の挙動を把 握するためには流域への負荷を意識した広域的な NH₃濃度の観測網が必要である。

本研究では、農業・畜産系発生源が広く分布する茨 城県霞ケ浦流域を対象に、NH3 濃度の多地点観測を実 施する。得られた結果を公表されている NH3 の排出イン ベントリデータと比較し、濃度変動の要因を解析する。

2. 方法

Figure 1 は、本研究で実施する対象地域を示す。観 測地点は、次の13 地点である:Ami(茨城大学阿見キャ ンパス)、Ushiku(牛久自然観察の森)、Kakioka(石岡市 柿岡)、Itako(茨城大学広域水圏環境科学教育研究セ ンター)、IKESC(茨城県霞ケ浦環境科学センター)、 Tsuchiura(土浦保健所)、Nishiura(西浦湖心)、Inashiki (稲敷合同庁舎)、Hokota(鉾田合同庁舎)、Tokusyuku (鉾田市徳宿), Mt. Tsukuba(国立環境研究所筑波山森 林試験地), Chiyoda(森林総合研究所千代田試験地), Omitama(小美玉市倉数)。観測地点を選定する上では, 同図に示した大気汚染物質の総合排出インベントリー EAGrid2000-Japan^[2]による1km 解像度のNH₃の年間 排出量分布を参考にした。EAGrid2000-Japan では,国 内で最大規模の排出源は農業・畜産系由来であると推 計されている。



Fig. 1 Sampling locations of NH₃ concentration in Kasumigaura basin in Ibaraki Prefecture, Japan. Shaded areas show the 1-km resolution emission inventory of NH₃ from revised EAGrid2000-Japan^[2].

NH₃ 濃度の観測には、大気汚染物質の観測に広く利用されている拡散型パッシブサンプラー(小川商会製)を用いた。このサンプラーを4週間おきに回収した後、ろ紙に吸着したアンモニウム(NH4⁺)成分をイオンクロマト グラフィー(ThermoFisher Scientific 製 Integrion, CS16) で分析し、暴露時間とその期間の平均気温を用いて NH₃ 濃度に換算した。暴露時間中の平均気温は、観測 点に近い気象庁アメダス(つくば館野、土浦、鉾田、鹿 島)の1時間値を用いて計算した。

本稿では、Fig. 1のNos. 1-4にそれぞれ位置するAmi (2017 年 6 月以降), Ushiku (2017 年 7 月以降), Kakioka (2017 年 8 月以降) および Itako (2018 年 1 月以 降)の観測結果を解析した。その他の地点 (Nos. 5-13, Fig.1)には、2018 年 4 月から 5 月にかけて順次サンプラ ーの設置作業を行い、観測を進めている。

3. 結果と考察

Figure 2 は, Ami, Ushiku, Kakioka および Itako の 4 地点で観測した NH₃ 濃度の経時変化である。すべての 地点でデータが利用可能な 2018 年 1 月における濃度 の大小関係は,下記のようであった:Ushiku(12 ppb)> Kakioka=Ami(3 ppb)>Itako(2 ppb)。



Fig. 2 Temporal changes in measured monthly NH₃ concentration at Nos. 1–4 in Fig. 1 from 1 June 2017 to 4 February 2018.

Itako を除く上記 3 地点のうち、Ushiku では、月ごとの NH3 濃度が他の地点より広い範囲(1–15 ppb)で変化し ていた。その原因として、Ushiku の観測地点から南東方 向 130 m離れた場所にある養豚・堆肥製造工場を発生 源としたNH₃の風下方向への揮散が考えられる。実際に, 土浦アメダスの風向データから観測地点が工場の風下 になった割合を計算すると,風下割合と濃度との間には 弱い正の相関がみられた(図略)。また Ushiku の近傍で は比較的大きい年間 NH₃排出量(5000–10000 kg km⁻²) も推計されており(No. 2, Fig. 1),観測地点を含む 130 m 範囲での NH₃ の大気拡散過程が濃度の経時変動を決 めていた可能性がある。

2017 年 8 月から 10 月の夏から秋にかけて, Kakioka の NH₃ 濃度は Ami に比べて常に高い値を示した。 Kakioka では, この周辺に分布する NH₃ の排出源(No. 3, Fig. 1)から揮散した NH₃の影響により濃度が増加した 可能性がある。Kakioka の近くには, 2018 年 4 月から観 測を開始した Mt. Tsukuba (No. 11)があり, この森林では 高い窒素負荷により河川水の硝酸イオンが増加した状 態が続く「窒素飽和現象」が古くから観測されている^[3]。 今後, 霞ケ浦流域や Mt. Tsukuba での NH₃ 濃度の観測 とその結果に基づく乾性沈着量の推計を進める必要が ある。

謝辞

EAGrid2000-Japan のデジタルデータは,計量計画研 究所の福井 哲央氏に提供いただいた。牛久自然観察 森への機材設置の際には,職員の補助を本研究の一部 は,日本学術振興会科学技術人材育成費補助金(卓 越研究員事業)ならびに科研費補助金基盤研究(B) (一般)(課題番号 17H01868)の助成を受けて実施した。

引用文献

- J. Shen, D. Chen, M. Bai, J. Sun, T. Coates, S.K. Lam, Y. Li: Ammonia deposition in the neighbourhood of an intensive cattle feedlot in Victoria, Australia, Scientific Reports, Vol. 6, pp. 32793, 2016.
- [2] 福井哲央, 國領和夫, 馬場剛, 神成陽容: 大気汚染物質 排出インベントリーEAGrid2000-Japan の年次更新, 大気 環境学会誌 Vol. 49, pp. 117–125, 2014.
- [3] M. Watanabe, S. Miura, S. Hasegawa, M.K. Koshikawa, T. Takamatsu, A. Kohzu, A. Imai, S. Hayashi: Coniferous coverage as well as catchment steepness influences local stream nitrate concentrations within a nitrogen-saturated forest in central Japan, Science of The Total Environment, Vol. 636, pp. 539–546, 2018.

牛舎周辺のアンモニア濃度と負荷量の局所空間分布に関する調査

久保田 智大¹, 堅田 元喜², 福島 慶太郎³, 黒田 久雄⁴

¹茨城大学大学院農学研究科,²茨城大学地球変動適応科学研究機関(ICAS),³京都大学生態学研究センター, ⁴茨城大学農学部

キーワード:大気アンモニア,アンモニア濃度,牛舎,揮散,パッシブ法,乾性沈着

抄録

大気中のアンモニアガス(NH₃)は、大気乱流により下方へ輸送され樹木の葉などに直接吸着する乾性沈着によって流 域へ窒素を負荷する。この量を推計することは、農業・畜産系のNH₃発生源が広く分布する茨城県霞ヶ浦流域への窒 素負荷量を把握する上で重要である。本研究では、畜産由来のNH₃濃度と乾性沈着量の空間分布の傾向を調べるた めに、茨城大学が所有する牛舎内およびその周辺でパッシブ法を用いたNH₃濃度の多点観測と降水採取によるアン モニウム(NH₄⁺)の湿性沈着量の観測を行った。乾性沈着量は、気象データを用いた抵抗モデルにより計算した沈着 速度とNH₃濃度との積によって推計した。風向とNH₃濃度の観測値の関係を解析した結果、観測地点が牛舎の風下 になった割合に比例してNH₃濃度が増加することがわかった。また、NH₃の乾性沈着量は、降水に含まれるNH₄⁺の湿 性沈着量の31%に達することが明らかとなった。

1. はじめに

人間活動に伴い生成するアンモニウムイオン(NH4⁺) や硝酸イオン(NO3⁻)などの反応性の高い窒素(反応性 窒素)は、河川を通じて湖沼へ流入し、世界各地で環境 悪化を引き起こしている^[1]。特に、反応性窒素が流域を 通して湖沼や海に流入し、アオコや赤潮(大量の植物プ ランクトン)を発生させる富栄養化が問題となっている^[2]。 茨城県では、霞ヶ浦(特に、北浦)で夏季を中心にアオ コの発生が観測されており、周辺地域の良好な環境や 水質への悪影響が懸念されている^[3]。

反応性窒素の一つである大気アンモニアガス(NH₃) は、家畜やその排泄物などの発生源から大気へと放出 (揮散)する。そして、雨や雪に取り込まれて地表へ落下 する湿性沈着と大気乱流により下方へ輸送され樹木の 葉などに直接吸着する乾性沈着を通じて流域に窒素を 負荷する。特に、NH₃は発生源の近傍(およそ1 km 範 囲)で高濃度となり、乾性沈着によって大量の窒素を負 荷することが報告されているが^{[4][5]}、NH₃濃度の観測例 は限られており、濃度の空間分布を決定づける気象要 因も明らかにされていない。また、NH₃の乾性沈着量を 推計することは、その発生源となる農業・畜産関係の施 設が広く分布している霞ヶ浦流域への窒素負荷量を正 確に把握する上でも重要である。

本研究では,茨城大学農学部附属国際フィールド農

学センター(IFC)の牛舎周辺で NH₃ 濃度の多点観測を 実施し,その空間分布を定める要因を明らかにする。さ らに,その結果に基づいて牛舎近傍の NH₃の乾性沈着 量を推計し,降水採取により観測した NH₄⁺湿性沈着量 と比較する。

2. 方法

Fig.1 に、IFC での NH₃ 濃度と湿性沈着の観測地点を 示す。牛舎内外の NH₃ 濃度の観測には、大気汚染物質 の観測に広く用いられている拡散型パッシブサンプラー (小川商会製)を用いた。また、湿性沈着量の観測には、 ポリエチレン製ボトルと漏斗を組み合わせて自作したバ ルクサンプラーを用いた。パッシブサンプラーとバルクサ ンプラーを用いた観測期間は、それぞれ 2017 年 5 月か ら 2018 年 2 月および 2017 年 8 月から 2018 年 2 月であ った。回収した大気および降水試料中の NH₄⁺を、イオン クロマトグラフィー (ThermoFisher Scientific 製 Integrion、 CS16)で分析した。

NH₃ 濃度と風向の関係を調べるため, IFC で常時観 測されている 16 方位の風向の1時間値を用いて, 観測 期間内に発生源の風下に観測地点が含まれる割合を風 下割合 (percentage of leeward)と定義した。発生源であ る牛舎の形状が複雑であるため, Fig.2 に示すように, 発生源の大きさを直径 70 m(牛舎の南北方向 90 m, 東 西方向 50 m の平均値)の円とみなし,風下方向の2本の接線からそれぞれ 22.5°(16 方位の方位間隔)の範囲に観測点が含まれる場合を風下に位置するとした。

乾性沈着量は、パッシブサンプラーによるNH3濃度の 観測値と、乾性沈着の速度を空気力学的抵抗、準層流 抵抗、表面抵抗の合成抵抗としてみなした抵抗モデル ^[6]によるNH3の沈着速度との積で沈着量を計算する推 計法(インファレンシャル法)から求めた。地表面状態を 表すパラメータには、典型的な農地の値を用いた。観測 期間中の乾性沈着量は、観測したNH3濃度と気象デー タ、抵抗モデルにより1時間ごとの沈着量を積算して求 めた。抵抗モデルの入力データには、日射量と気温・気 圧・風向および風速は、それぞれアメダス(つくば)とIFC で観測された1時間値を用いた。



Fig. 1 Sampling locations of NH₃ concentration and bulk precipitation in IFC. The latter was measured at two locations before and after 27 September 2017.
Background was obtained from © 2018 Google Map.





3. 結果と考察

観測期間中の全地点の NH₃ 濃度の時系列変化を Fig.3に示す。牛舎内のNH₃濃度は200-400 ppbv, その 他の地点では 2-10 ppbv で変動していた。牛舎内の NH₃濃度は, 2017 年 10 月から 11 月に高かった。一 方, D, E および F 地点の濃度は 1-5 ppbv であった。 A 地点では 2017 年 8 月から 11 月頃, B および C 地 点では 2018 年 1 月から 2 月に 5-10 ppbv まで増加し, D, E および F 地点より高い時期があった。牛舎内の NH₃濃度は, 牛舎外の NH₃濃度の 60-120 倍であった。

パッシブ法を用いた野外における NH₃ 濃度の過去の 観測では,都市部で 1.0–1.5 ppbv^{[7][8][9]},山間地で 0.2– 1.0 ppbv^{[7][8][9]},畜産地域で 1.5–5.5 ppbv^[9]が報告され ている。本研究で観測された全期間全地点の NH₃ 濃度 の変動範囲と平均値は 1–10 および 3.7 ppbv であり,上 述した畜産地域の観測結果に近かった。また,牛舎から 50 m風下の A 地点の NH₃ 濃度は,牛舎を除くその他の 地点よりも常に高く,牛舎から揮散した NH₃ の影響を受 けやすかったと考えられる。また,その影響は 50 m 以上 離れると低下し, NH₃ が高濃度になる範囲は限定的であ ることがわかった。

Fig.4に,牛舎から580m範囲の6地点で観測された NH₃濃度とそれらが牛舎の風下になった割合(風下割合) の関係を示す。その結果,上述した範囲では,風下割合 に比例して NH₃濃度が有意に増加する関係がみられた (n=34, R²=0.621, p<0.001)。牛舎から最も離れたF地点 では,直線関係を下回る値が2点観測された(Fig.4)。こ の原因としては,牛舎から風下方向に流れるNH₃ガスの 軌道が,建物の影響などによりF地点に到達する手前で 反れた可能性が考えられる。また,NH₃濃度に影響を及 ぼす可能性のある他の気象要素(風速,気温,降雨期 間)についても調べたが,相関は見られなかった(図略)。 このことから,牛舎近傍の月平均のNH₃濃度の局所的な 空間分布は,風向によってほぼ説明できると考えられ る。

NH₃ 濃度の観測値を用いて, 牛舎の風下 50 m 地点 の NH₃の乾性沈着量をインファレンシャル法で推計した ところ, 2017 年 8 月から 2018 年 2 月の NH₃の積算値は 0.64 kgN ha⁻¹であった。一方, 同期間の NH₄⁺の湿性沈 着量は 2.06 kgN ha⁻¹であり, 乾性沈着による NH₃ 負荷 量が湿性沈着量の31%に達することが明らかになった。 この結果は,流域への窒素負荷量を推計するうえで NH3の乾性沈着量は無視できないことを意味しており, 継続的な観測によって年間の乾性沈着量を推計する必 要がある。









4. 結論

拡散型パッシブサンプラーを用いて,茨城大学の保 有する牛舎内外で月平均の NH₃ 濃度の多地点観測を 行い,その局所的な空間分布を調べた。その結果,観 測期間中の牛舎の風下になった割合によって,発生源 から 580 m 範囲の NH₃ 濃度の空間分布を説明できるこ とがわかった。また,牛舎の 50 m 風下での NH₃ の乾性 沈着量の推計値は, NH₄⁺の湿性沈着量の 31%になるこ とが明らかとなった。

謝辞

本研究を行うにあたり, 茨城大学 IFC の小松崎 将一 教授, 伊藤 竜太郎氏, 路川 強氏, 髙橋 是成氏には, 観測機材の周辺環境の整備や農場の管理情報の提供 に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。 研究の一部は, 日本学術振興会科学技術人材育成費 補助金 (卓越研究員事業)ならびに科研費補助金基盤 研究(B)(一般)(課題番号 17H01868)の助成を受けて 実施した。

引用文献

[1] 吉良竜夫: 世界の湖の環境問題, 人間環境科学 Vol.7, pp. 1-15, 1998.

[2] 新藤純子:人間活動に伴う窒素負荷の増大と生態系影響, 地球環境 Vol.9 No.1, pp.3-10, 2004.

[3] 茨城県,栃木県,千葉県: 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計 画(第7期), pp.1-35, 2017.

http://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/kasumigaura/lake /documents/7honbun.pdf (2018/4/19 アクセス確認済み)

[4] 寳示戸雅之,林健太郎,村野健太郎,森昭憲: 集約的畜
 産地帯における大気中アンモニア濃度の実態,日本土壌肥料学
 雑誌 Vol.77 No.1, pp.53-57, 2006.

[5] J. Shen, D. Chen, M. Bai, J. Sun, T. Coates, S.K. Lam, Y. Li: Ammonia deposition in the neighbourhood of an intensive cattle feedlot in Victoria, Australia, Scientific Reports, Vol. 6, pp. 32793, 2016.

[6] M.L. Wesely, B.B. Hicks: A review of the current status of knowledge on dry deposition, Atmospheric Environment 34, pp.2261-2282,2000.

[7] 北村洋子, 佐久間隆, 小泉俊一, 木戸一博, 加賀谷秀樹: パッシブサンプラーによる県内の大気汚染状況, 宮城県保健 環境センター年報 No.25, pp.84-87, 2007.

[8] 高橋雅昭,武直子,大泉毅,家合浩明: パッシブ法を用いた新潟県内における大気汚染物質濃度観測,新潟県保健環境科学研究所年報 Vol.23, pp.75-81, 2008.

[9] 横山新紀: 千葉県における窒素化合物実態調査, 全国環境研会誌 Vol.39 No.1, pp.31-38, 2014.

17th World Lake Conference, Lake Kasumigaura, Ibaraki, Japan, 2018

O5-5

巴川・鉾田川流域における地下水の硝酸態窒素による汚染状況

及びその要因

菊地 哲郎¹, 大内 孝雄^{1,2}, 高津 文人³, 福島 武彦¹ ¹茨城県霞ケ浦環境科学センター, ²(現)茨城県環境対策課, ³国立環境研究所

キーワード:窒素・りん循環, 点源及び面源汚染, 土地利用管理

抄録

畑地での野菜類の栽培並びに畜産が広く行われている巴川・鉾田川流域(茨城県)では、地下水の硝酸態 窒素(NO₃-N)及び亜硝酸態窒素(NO₂-N)濃度が環境基準値(10 mg/L)を超える井戸の存在が1998年以降 続けて認められている。本研究では、2016年11月に同流域内にある8地点の井戸で地下水水質調査を実施 し、NO₃-Nによる汚染状況及び要因について検討した。5地点でNO₃-N及びNO₂-N濃度が環境基準値を上回 り、特に巴川上流域の2地点では20 mg/L以上の高い値を示した。また、4地点では2009年以降環境基準値 を継続して超過しており、最近2年間ではほぼ横ばいあるいは上昇傾向で推移している。地下水の水質組成 並びに硝酸イオンの窒素安定同位体比の分析結果から、10 mg/L以上の NO₃-N が検出された地点では、いずれも 畑地に施用された硫酸塩化成肥料や家畜排せつ物が NO₃-N の主な汚染要因となっていると推定された。

1. はじめに

北浦(茨城県)の主要流入河川である巴川及び鉾田 川の流域では,畑地での野菜類の栽培並びに畜産が 広く行われている。一方,畑地に施用された化成肥料 や土壌に還元された家畜排せつ物(堆肥を含む)等に 由来す硝酸態窒素(NO₃-N)が溶脱し,地下水を汚染 する問題が各地で顕在化している。^[1]巴川・鉾田川流 域でも,NO₃-N 及び亜硝酸態窒素(NO₂-N)濃度が環 境基準値(10 mg/L)を超える井戸の存在が 1998 年以 降続けて認められている。^[2]

本研究では、巴川・鉾田川流域内にある8地点の井 戸を対象に地下水水質調査を実施し、その結果を元に NO₃-Nによる汚染状況及び要因について検討した。

2. 方法

2.1. 採水

調査井戸の位置を図 1 に, 井戸のタイプ及び深さを 表 1 にそれぞれ示す。W1~W4 及び W7 では, NO₃-N 及び NO₂-N 濃度が環境基準値を 2008 年以降継続して 超過している。また, W5 及び W6 は W4 の半径約 300 m 以内に位置している。調査は 2016 年 11 月に実施し た。採水した試料は実験室に持ち帰り, 孔径 0.45 μmの メンブランフィルターでろ過した後, 次に示す水質分析 に供した。

2.2. 水質分析

NO₃-N, NO₂-N 及びアンモニア態窒素(NH₄-N)の各



図 1. 調査井戸

 濃度を、オートアナライザー(ビーエルテック、
 QuAAtro)を用いて定量した。また、主要陽イオン (ナトリウム(Na⁺)、カリウム(K⁺)、カルシウム(Ca²⁺)、
 マグネシウム(Mg²⁺))及び陰イオン(塩化物(Cl)、
 硫酸(SO₄²⁻))の各濃度を、イオンクロマトグラフィー
 (Dionex, ICS-2000)を用いて定量した。

上記のろ液を孔径 0.22 μ m のシリンジフィルター でさらにろ過した試料について, 硝酸イオン(NO₃⁻) の窒素安定同位体比(δ^{15} N-NO₃⁻)を脱窒菌法^[3-5]に より測定した。測定には, 自動前処理ライン^[6]を連 結させた同位体比質量分析計(Thermo Finnigan, Delta plus Advantage)を用いた。

井戸悉号	タイプ	深さ	NO ₃ -N		
	/ -/	(m)	(mg/L)		
W1	打込	(不明)	15.44		
W2	打込	(不明)	13.60		
W3	打込	60	17.05		
W4	掘抜	26	8.61		
W5	打込	(不明)	8.80		
W6	打込	(不明)	3.05		
W7	打込	(不明)	22.30		
W8	掘抜	20	20.41		

表 1. 調査井戸のタイプ, 深さ及び硝酸態窒素 (NO₃-N) 濃度

*井戸のタイプ及び深さは、茨城県環境対策課からの提供情報。

3. 結果及び考察

3.1. NO₃-N 濃度の空間分布及び経年変化

各井戸における地下水中NO₃-N濃度を,表1に示す。 W1~W3, W7及びW8で10 mg/Lを超過し,最高濃度 は22 mg/L(W7)であった。一方,W4とそれに隣接する 2 つの井戸(W5,W6)においては,W4とW5でNO₃-N 濃度がほぼ同じであったのに対し,W6ではその半分以 下(3.0 mg/L)であった。なお,いずれの井戸においても, NO₂-N 濃度は NO₃-N 濃度の 0.07%以下と低かった。

W1 ~ W4 及び W7 における 2008 年以降の NO₃-N 及び NO₂-N 濃度の経年変化を,図2に示す。鉾田川流 域内の W1 並びに巴川中~下流域の左岸側に位置する W2 ~ W4 では、2011 ~ 2014 年にかけて濃度が低下 したが、それ以降はほぼ横ばいまたは上昇傾向で推移 している。一方、巴川上流域に位置する W7 では、2010 ~ 2011 年にかけて大きく上昇し、それ以降はほぼ横ば いで推移している。

3.2. ヘキサダイアグラムによる汚染要因の推定

各井戸における地下水のヘキサダイアグラムを, 図3に示す。

NO₃-N 濃度が最も低かった W6 はきれいな菱形に 近い Ca-HCO₃型の水質組成を示し、土壌・岩石由来 のイオン成分が基本となっていると考えられる。^[1] 一方、W6 に隣接する W4 及び W5 では Na⁺が他のイ オン成分と比べて濃度が高く、Na-Cl 型と見なせる ことから、生活系(浄化槽)排水の影響が示唆され る。^[1]

NO₃-N 濃度が 10 mg/L を超えた W1~W3 及び W7 ではいずれも Ca-(SO₄ + NO₃)型の水質組成を示した。 一般に,畑地に硫酸アンモニウム(硫安)等の硫酸







*炭酸水素イオン(HCO₃⁻)の等量濃度は、主要陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, アンモニウム(NH₄⁺))の等量濃度の和から主要陰イオン(Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻)の等量濃度の和を差し引いた値に等しいと仮定して算出 した。

図 3. 各調査井戸における地下水のヘキサダイアグラム

塩化成肥料や苦土石灰(土壌改良材)が施用された 場合,その影響を受ける地下水は自然状態のものと 比べて NO_3 , SO_4^2 , Ca^{2+} 及び Mg^{2+} が増加すると考 えられること $^{[1,7]}$ から,これらの井戸における NO_3 -N 汚染の要因の一つとして,畑地に施用された硫酸塩 化学肥料が考えられる。また,これらの井戸では HCO_3 濃度も低いが,これは畑地に大量に施用され た化成肥料や家畜排せつ物由来の NH_4^+ の硝化によ り消費されたためと考えられる^[1]。これに対し,同 じく NO₃-N 濃度が 10 mg/L を超えた W8 では, NO₃⁻ 濃度に対して SO₄²-濃度が低く, Ca-NO₃ 型となって いた。家畜排せつ物による汚染の場合, NO₃-N 濃度 の上昇に対して SO₄²-濃度の変化が小さいことが報 告されていること^[8]から,同地点における NO₃-N の 汚染要因として家畜排せつ物の寄与が大きいと推察 される。

3.3. δ¹⁵N-NO₃-に基づく NO₃-N の起源の推定

各井戸における地下水の δ^{15} N-NO₃を, NO₃-Nの起 源となる化成肥料,土壌,家畜排せつ物並びにし尿・ 下水に含まれる窒素の安定同位体比(δ¹⁵N)の文献 値^[9, 10, 他]と併せて図 4 に示す。W1 及び W2 の δ^{15} N-NO₃は3.3~3.8‰と低く, 化成肥料(-6.1~3.6‰) 起源の寄与が大きいと考えられた。これに対し、W3, W7 及び W8 では 7.7~15.5‰と高い値を示し、ヘキ サダイアグラムからの知見を併せると、家畜排せつ 物 (3.1~23.2‰) 起源の寄与が大きいと推定された。 一方, W4 及び W5 の δ^{15} N-NO₃-は 5.0 ~ 5.6‰と比 較的低く, ヘキサダイアグラムから示唆された生活 系排水(し尿・下水: 7.4~13.7‰)よりも低かった。 これらの井戸は畑地と住宅地とが混在する地域に位 置することから,NO3-Nの起源としては畑地に施用 された化成肥料の寄与がより大きいものと推察され る。

4. 結論

畑作並びに畜産が盛んに行われている巴川・鉾田川 流域における地下水の NO₃-N 汚染の状況及び要因に ついて把握することを目的に,同流域内の 8 地点の井 戸で地下水水質調査を行い,以下の結果を得た。

- ・5 地点で NO₃-N 及び NO₂-N 濃度が環境基準値を上回り,特に巴川上流域の2 地点では20 mg/L 以上の高い値を示した。
- ・地下水の水質組成及び δ^{15} N-NO₃の分析結果から, 10 mg/L 以上の NO₃-N が検出された地点では、いず れも畑地に施用された硫酸塩化成肥料や家畜排せ つ物が NO₃-N の主な汚染要因となっていると推定さ れた。

流域内の広い範囲で環境基準値を超える濃度の NO₃-N 及び NO₂-N が検出されたことから、今後より多く の地点で地下水を採取し、同様の水質分析を行うこと により、地下水における NO₃-N の濃度分布を詳細に把 握するとともに、その汚染要因について検討する必 要がある。



*各起源のエラーバーはδ¹⁵Nの文献値^{9,10,他}のとり得る範囲を,*は 中央値をそれぞれ表す。

図 4. 各調査井戸における硝酸イオンの窒素安定同位体 比(δ¹⁵N-NO₃⁻),並びに各起源の窒素安定同位体比

引用文献

- [1] 田瀬則雄: 硝酸・亜硝酸性窒素による地下水汚染の現状 と動向, 環境管理 Vol. 40 No. 3, pp. 255-263, 2004.
- [2] 茨城県:公共用水域及び地下水の水質測定結果.
- [3] D. M. Sigman, K. L. Cascotti, M. Andrean, C. Barford, M. Galanter, J. K. Böhlke: A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater, Anal. Chem. Vol. 73, pp. 4145-4153, 2001.
- [4] K. L. Cascotti, D. M. Sigman, M. Galanter, J. K. Böhlke, A. Hilkert: Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method, Anal. Chem. Vol. 74, pp. 4905-4912, 2002.
- [5] 由水千景,大手信人:分析の自動化・高速化一硝酸イオン分析を例に一,流域環境評価と安定同位体(永田俊, 宮島利宏編),京都大学学術出版会,pp. 376-387,2008.
- [6] 高津文人, 今井章雄, 中島泰弘, 小松一弘, 川崎伸之, 佐藤貴之: 硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比測定の ための自作による安価な自動前処理ラインの開発, RADIOISOTOPES Vol. 60, pp. 231-240, 2011.
- [7] 環境省: 硝酸性窒素による地下水汚染対策マニュアル, 2016.
- [8] 三上秀敏,高田雅之,三島啓雄:地下水硝酸汚染に係わる汚染源簡易判定の手順,北海道環境科学研究センター所報 Vol. 35, pp. 27-34, 2009.
- [9] D. Xue, J. Botte, B. De Baets, F. Accoe, A. Nestler, P. Tayler, O. Van Cleemput, M. Berglund, P. Boeckx: Present limitation and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater, Water Res. Vol. 43, pp. 1159-1170, 2009.
- [10] W. J. Choi, J. H. Kwak, S. S. Lim, H. J. Park, S. X. Chang, S. M. Lee, M. A. Arshad, S. I. Yun, H. Y. Kim: Synthetic fertilizer and livestock manure differently affect δ15N in the agricultural landscape: A review, Agric. Ecosyst. Environ. Vol. 237, pp. 1-15, 2017.

園芸品目における改善施肥技術適用時の窒素フットプリントの仮想窒素係 数とその硝酸態窒素溶脱指標としての有効性

郷内 武¹·寺門 巌¹·江口定夫²

1茨城県農業総合センター園芸研究所,2農研機構農業環境変動研究センター

キーワード:窒素フットプリント,窒素溶脱,仮想窒素係数

抄録

作物栽培において窒素は必須多量元素である一方で、多投入は環境負荷の原因となり得る。これまで茨城県では生産コスト削減と環境負荷低減の面から改善施肥技術を開発してきた。本研究では茨城県の園芸品目における施肥改善技術ごとのデータベース化と、窒素フットプリント内の重要な指標値である仮想窒素係数(VNF)の計算を行った。また、VNFが地下水への窒素負荷指標として有効かどうか検討するため、VNFと硝酸態窒素溶脱量との関係について検討した。その結果、葉菜類においては改善施肥により VNFと硝酸態窒素溶脱量が低下する傾向があり、両者には比例関係が認められた。一方、根菜類では改善施肥適用時にも硝酸態窒素溶脱量が低下しない事例も認められ、VNFとの関係は判然としなかった。以上のように VNF を地下水への負荷指標として用いる際には品目ごとの特徴を把握することが重要と思われた。

1. はじめに

作物栽培において窒素は最も重要な必須多量元素 である一方で、多投入は環境負荷の原因となり得る。肥 料として投入される窒素はいわゆる反応性窒素(Nr:N₂ を除く窒素化合物すべて)であり、大気圏内の窒素循環 の中において形態を変化させながら存在している^[1]。施 肥窒素のうち作物に利用されなかった余剰窒素は、水 圏に対しては硝酸態窒素(NO₃-N)、大気圏に対して は温室効果ガスである一酸化二窒素(N₂O)等の形態で 環境に負荷を与える。

過去の農業研究において、施肥技術開発等により環 境負荷を低減する試みが多く行われてきたが、多くの場 合これらの取組みは特定の形態のNrを対象として研究 されており、事例を並列に検討することが困難であった。 窒素負荷がもたらす環境影響を評価する新たな指標と して、窒素フットプリントがある。窒素フットプリントの定義 は、「個人(または組織、国など)の資源消費の結果とし て環境中に排出される反応性窒素の総量」である^[2]。作 物生産の窒素フットプリント(N-Calculator 法)は、食糧 消費窒素あたりの環境中へのNrロス量を示す仮想窒 素係数(VNF: Virtual Nitrogen Factor)に基づき算出さ れる^[2]。VNF は当該作物の生産から消費までのプロセ スにおいて環境中に放出されるNr量を、消費Nr量で 除した値であり^[3]、各国への適用が進んでいる

そこで本研究では、茨城県の園芸品目における窒素 フットプリント計算の適用性を評価するため、過去の窒 素動態に関する調査結果のデータベース化と VNF 等 の算出を行った。また、窒素フットプリント計算で使用さ れる VNF が地下水への窒素負荷指標として有効である か検討するために、VNF と硝酸態窒素溶脱量との関係 について検討した。

2. 方法

(1)窒素動態に関する既往の調査データの収集、デー タベース化

VNF算出等の窒素負荷指標の検討に資するため、茨 城県の園芸品目における過去の窒素動態に関する調 査事例のデータベース化を行った。データベースの対 象文献は、日本土壌肥料学雑誌、茨城県園芸研究所 研究報告、茨城県園芸研究所試験成績書である。デー タベースの内容は文献情報、負荷量情報、調査情報、 営農情報、各指標とし、各事例の VNF 計算シートに個 票として添付するとともに、総合した整理票を作成した (表1)。

(2)既往の調査データに対する窒素負荷指標の適用

収集した窒素動態に関するデータベースを基に、慣 行および改善施肥を行った場合の VNF 等の各指標と 硝酸態窒素溶脱量の変化について評価した。評価の 対象となる調査データは、施肥量および収穫物の窒素 含量等の VNF 算出に必要な項目と、硝酸態窒素溶脱 量の両方が含まれる事例とした。慣行施肥と改善施肥 法実施時の VNF および硝酸態窒素溶脱量の違いにつ いては、データを葉菜類、根菜類、果樹類に区分して

表1 データ	ベースの内容
	論文タイトル・資料名
文献情報	公表年
	著者名
	収録雑誌名
	巻号
	ページ
	測定期間
自荷量情報	硝酸態窒素溶脱量(kgN/期間)
州市 王问天	一酸化二窒素排出量(kgN/期間)
	その他
	調査場所
	調査年・期間
調査情報	調査頻度
	灌溉水調查
	降水調査
	浸透水調査
	作物
	慣行農法・改善農法の別
	改善農法の種類 た四県(小学四次日) N/10)
	施肥量(化字肥料 $kgN/10a$)
	施肥量(堆肥kgN/10a)
営農情報	施肥童(計kgN/10a)
	有機物の種類
	収重(kg/10a)
	調聚物 至素百重(kgN/10a)
	その他窒素情報
	<u>土壌の種類</u>
	NUE1'(施肥→吸収)
I. a. low	NUE2(吸収→収穫物)
指標	NUE3(収穫物→流通)
	NUE4(流通→摂食)
	VNF ²

2)VNF(Virtual Nitrogen Factor): 仮想窒素係数

評価した。また、VNF と硝酸態窒素溶脱量との関係の 評価は品目ごとに行った。

3. 結果

(1)窒素動態に関する既往の調査データの収集、デー タベース化

現在までのところ、15 文献、83 事例を整備しており、 引き続きデータベース作成を行っている。調査データと 既存の標準データ(日本食品標準成分表(文部科学 省)、バイオマス成分データベース(農研機構))を用い ることで、窒素利用効率(NUE:吸収・利用窒素量/窒 素供給量)および VNF が算出可能な事例はそれぞれ 71 事例、73 事例と、収集事例の多くを占めた。VNF の 算出にあたって、減肥や有機物の連用事例において投 入窒素よりも作物吸収窒素が大きいことにより負値とな る場合が 13 事例でみられた。

(2)既往の調査データに対する窒素負荷指標の適用

収集した窒素動態に関するデータベースを基に、慣 行および改善施肥を行った場合の VNF と硝酸態窒素



図1 葉菜類における慣行および改善施肥法実施時の VNFと硝酸態窒素溶脱量の違い

垂線は上端が第三四分位数+1.5×四分位範囲の最大値、下端が第一四分位数 -1.5×四分位範囲の最小値を示す。×は平均値、○は外れ値を示す。

溶脱量の変化について評価した(図1)。葉菜類の例で は、各種改善施肥を実施すると VNF および硝酸態窒



図2 ネギおよびキャベツにおける VNF と硝酸態窒 素溶脱量の関係

素溶脱量が小さくなる傾向がみられた。また、キャベツと ネギの場合、VNF と硝酸態窒素溶脱量の関係は比例 する傾向がみられ、これらの品目においては VNF が地 下水に対する影響指標として利用できる可能性が示唆 された(図2)。ただし、この比例関係は同一試験条件 (圃場、有機物の種類、施肥資材等)で成り立つため、 異なる品目および試験条件での利用にあたっては注意 する必要がある。

一方、根菜類においては、改善施肥により投入窒素 量が減少するため VNF が低下するが、硝酸態窒素溶 脱量が低下する事例は少なかった(データ省略)。ナガ イモの事例では VNF と硝酸態窒素溶脱量との間に有 意な相関関係は認められず、地下水への窒素負荷指 標として利用できないと考えられる。

果樹類で VNF が算出可能な事例はニホンナシのみ であった。ニホンナシの調査データは施肥、窒素吸収 量、硝酸態窒素溶脱、一酸化二窒素排出、土壌炭素含 量など非常に詳細であり、VNF と硝酸態窒素溶脱量と の間には高い相関関係が認められた(データ省略)。

4. 考察

本研究では、これまで個別の研究で評価されてきた 窒素動態に関するデータを、VNF のような指標を用い て並列に評価するためのデータベース作成を行ってい る。収集した各事例は調査項目も様々であり、NUE およ び VNF をこのデータのみで算出することは困難なケー スが多い。これらについては既存の標準データを活用 して、指標の算出を行った。例えば、食品の廃棄率は 日本食品標準成分表(文部科学省)、植物体の窒素含 量はバイオマス成分データベース(農研機構)から引用 した。このように既存のデータを用いることで指標の算 出が可能となる事例が多くあり、推定手法として有効と 思われた。

VNF の算出にあたって負値となる事例がみられ、こ れらの多くが減肥や有機物連用により投入窒素を削減 する事例であった。現在用いている計算方法は土壌由 来窒素の変化を考慮しておらず、作物栽培におけるい わゆる肥料成分の持越しが反映されないスキームとなっ ている。堆肥の連用により施肥窒素の削減が可能な事 例は多くあり^[4,5,6]、連作に対応した VNF の計算方法が 必要である。食糧消費窒素に対する土壌蓄積窒素の寄 与を評価する手法として Soil Mining Factor がある^[7]。 Soil Mining Factor は作物の窒素吸収量のうち土壌由 来分(=無窒素区における窒素吸収量)を食糧消費窒 素量で除した値である。VNF と合わせて Soil Mining Factor のような指標を用いることで、土壌蓄積窒素の影 響を表現できる可能性がある。

今回収集した各事例は必ずしも環境負荷に関する調 査データ(硝酸態窒素溶脱等)があるわけではなく、そ のような場合において VNF 等の指標が負荷の指標とし て有効であるかどうかを検討した。収集データの範囲に おいては、葉菜類は VNF が硝酸態窒素溶脱量をよく反 映しており、指標として有効であった。しかし、根菜類に おいては有意な相関は見られなかった。これは、硝酸 態窒素溶脱量が環境中への放出窒素に占める割合が 異なることによるものと思われる。葉菜類は全体的に多 肥傾向になりがちで改善施肥技術の効果が高いことが 要因の一つと考えられる。一方根菜類は慣行施肥量が 比較的少なく、改善施肥による窒素削減効果が小さい ケースが多い。このように品目ごとの特徴を把握すること で指標をより有効に活用できるものと思われた。

他の硝酸態窒素溶脱量の推定法として、数値モデル (例えば、LEACHM モデル)の利用が挙げられる。 LEACHMモデルは土壌中の水や窒素の動態を長期予 測するモデルで、国内土壌への適用を目的に改良が 進められている^[8,9]。現在のところ VNF 等の指標がカバ ーできない土壌窒素蓄積の動態などがモデルにより推 定できれば、その結果を窒素フットプリントや VNF の計 算にフィードバックすることで実態に近い窒素負荷指標 を得ることができるものと思われる。

5. 結論

茨城県における窒素動態に関する調査研究成果に ついてデータベース化を実施し、VNF等の窒素負荷指 標の算出を行った。このデータベースに基づき、窒素負 荷指標と地下水への硝酸態窒素溶脱量との関係につ いて検討した結果、葉菜類においては改善施肥により VNF と硝酸態窒素溶脱量が共に低下する傾向が認め られ、両者には比例関係が認められた。一方、根菜類 では改善施肥適用時にも硝酸態窒素溶脱量が低下し ない事例も認められ、両者の関係は判然としなかった。

引用文献

- Galloway, J.N., Aber, j. d., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., and Cosby, B. J.: The nitrogen cascade, *Bioscience*, 53, 341-356, 2003.
- [2] 種田あずさ・柴田英明・江口定夫・廣野祐平・仁科一哉・ 内田義崇,地球規模での窒素循環管理に向けた窒素フ ットプリント研究の最新動向-国際ワークショップ参 加報告-,日本生態学会誌,67,189-196,2017
- [3] Leach, A. M., Galloway, J.N., Bleeker, A., Erisman, J. W., Khon, R., and Kitzes, J.: A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment, *Environ. Dev.*, 1, 40-66, 2012.
- [4] 三好明宏・桑名健夫・西口真嗣・吉倉惇一郎,施設軟弱 野菜に施用した牛糞堆肥由来窒素の吸収利用, 土肥誌, 72,558-561,2001.
- [5] 徳永哲夫・木村靖,雨よけトマト栽培における施用有機 物の肥効を考慮した施肥法,山口農試研報,53,30-34, 2002.
- [6] 林哲央・日笠裕治,北海道の施設トマト栽培における牛 糞堆肥連用時の窒素施肥量の削減, 土肥誌, 88, 234-237, 2017.
- [7] Hutton, M. O., Leach, A. M., Leip, A., Galloway, J.N., Bekunda, M., Sullivan, C., and Lesschen, J. P.: Toward a nitrogen footprint calculator for Tanzania, *Environ. Res. Lett.*, 12, 034016, 2017.
- [8] Asada, K., Eguchi, S., Tsunekawa, A., Tsuji, M., Itahashi, S., and Katou, H.: Predicting nitrogen leaching with the modified LEACHM model: Validation in soils receiving long-term application of animal manure composts, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 39, 209-225, 2015.
- [9] Asada, K., Eguchi, S., Urakawa, R., Itahashi, S., Matsumaru, T., Aoki, K., Nakamura, K., and Katou, H.: Modifying the LEACHM model for process-based prediction of nitrate leaching from cropped Andosols, *Plant Soil*, 373, 609-625, 2013.

Utilization of cover crops for soil and water conservation

Yingting Gong¹, Peiran Li¹ and Masakazu Komatsuzaki²

¹Graduate School of Agriculture, Ibaraki University, ²Center for International Field Agriculture Research and Education

Keywords: cover crop, carbon, Nitrogen, soil and water conservation

ABSTRACT

Residual fertilizer nitrogen (N) in soil represents a potential environmental contaminant because of the risk of nitrogen leaching into ground water. Winter cover crops can conserve residual soil N. Soil organic carbon (SOC) has various roles in producing crops and improving their environment. Cover crop is a potential method for conserving or increasing SOC. However, the effectiveness of utilization of cover crops for soil and water conservation has not been clear yet. This study compared dry matter (DM), N content, N accumulation, soil organic C and N in different soil layers (0-2.5, 2.5-7.5, 7.5-15 and 15-30 cm) among different cover crops, including fallow (native weeds), hairy vetch (legume cover crop) and rye (grass cover crop) in soybean production to investigate the effect of cover crops on C and N dynamics in agroecosystem. The results showed that rye had significantly higher dry matter than fallow and hairy vetch, and it also had the highest N accumulation. However N content in rye was significantly lowest, there was no significant difference between fallow and hairy vetch. Soil organic C and N content were higher in rye and hairy vetch compared to fallow in each depth. Soil organic C and N content were significantly higher in 0-2.5 and 2.5-7.5 in relative to 7.5-15 and 15-30 cm layers. These results indicated that cover crops can improve N accumulation and increase soil organic C and N content, it should help inorganic fertilizer of farm.

1. INTRODUCTION

Lake Kasumigaura is a eutrophic lake in Japan. Because it is important to reduce the N load from diffuse nonpoint sources to improve water quality, the local government encourages farmers in the Lake Kasumigaura basin to reduce their use of inorganic fertilizers through a soil nutrient management program called the "eco-friendly farming system." Cover crop is one of the management method. Cover crops can reduce nonpoint source pollution caused by nutrients and agricultural chemicals. In particular, non-leguminous cover crops have been shown to prevent leaching of nitrogen into groundwater by accumulating excess soil N in upland dry fields. Nonleguminous cover crops grown in winter are an effective tool for managing inorganic N in these soils in the spring because these winter cover crops retain residual soil N remaining after the summer crop harvest^[1]. Legume cover crops fix both C and N in plant by increasing biomass production. SOC can be increased by elevating biomass production, practicing crop rotation including cover crops. The objectives of this study were to (1) determine the difference of soil organic C and N between with and without cover crop, (2) investigate the effect of cover crops on N accumulation.

2. METHOD

The experiment was conducted at the Center for

International Field Agriculture Research and Education, Ibaraki University, Japan. This site was established in 2002 for research on tillage and cover crop systems. It was a split plot design with 4 replication, consisting of two tillage methods, three cover crops (fallow, hairy vetch and rye) and two potassium fertilizer input levels. In this report, only one of the factors-cover crop was discussed for carbon and nitrogen problems. Cover crops in 2016 were harvested on 27th may, 2017 by using 0.25 m² quadrat sampling, 2017. Oven-dried weight were measured as biomass. Carbon and nitrogen content of cover crops were measured by C/N corder (Samika chemical analysis service, Ltd.NC 900). Soil samples were took in October 2016 by hand with a steel cylinder. The samples were divided into 4 layers (0-2.5, 2.5-7.5, 7.5-15 and 15-30 cm) for the measurement of soil organic carbon and nitrogen by C/N coder. Data were statistically by ANOVA (StateView, SAS Institute).

3. RESULTS

Dry matters were significantly different among three cover crops. Rye had the highest value, which was 5.8 times and 3.3 times higher than fallow and hairy vetch, respectively (Fig.1). Fig.2 showed fallow and hairy vetch had higher N content, which were significantly higher than rye treatment. As for N accumulation, rye and hairy vetch were superior to fallow treatment. They were 72.38% and 55.34% higher than fallow (Fig.3). Soil organic C and N content gradually decreased with the depths. Soil surface (0-2.5cm) had the highest soil organic C and N content. Significant differences were observed in 0-2.5 and



2.5-7.5 cm depth in relative to the other depths. Cover crops treatments showed higher soil organic C and N than fallow in each depth. But no significant difference was found between rye and hairy vetch (Fig.4 and Fig.5).

4. DISCUSSION

Rye had the highest biomass, the lowest N content, and the



highest N accumulation. Even though fallow and hairy vetch had significant higher N content than rye, actually, the difference between biomass plays a more important role in N accumulation. Dry matter and N content of plant should be took into consideration at the same time when thinking about conserving residual soil N. Biomass retention results in higher organic C and N content in surface soil (0-7.5cm). Rye and hairy vetch had no significant difference in N accumulation and soil C, N content of each depth. N accumulation amount may closely connect to the effect of cover crops on soil C and N enhancement. Soil C and N content were higher at each depth in cover crop treatments compared to fallow (native weeds).

5. CONCLUSION

Rye and hairy vetch had higher amount of N accumulation than fallow. Moreover, soil organic C and N content were higher at rye treatment and hairy vetch in each depth from 0-30 cm than fallow. Cover crops showed excellent ability to scavenge soil nitrogen and improve soil nutrient to reduce the addition of fertilizer input.

REFERENCES

 M.Komatsuzaki and M.G.Wagger: Nitrogen recovery by cover crops in relation to time of plating and growth termination, Soil and Water Conservation Society, Vol. 70, pp. 385-398, 2015.

Improvement of nitrogen removal rate estimation method for wetlands focused on temperature factors

LIN Xiaolan¹, KURODA Hisao², YOSHIDA Koshi² and MAEDA Shigeya²

¹The United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, ²College of Agriculture, Ibaraki University

Keywords: wetland, nitrogen removal rate, temperature factor

ABSTRACT

The nitrogen removal equation for paddy fields is that R = a*C. Where is the nitrogen removal rate(R), nitrate nitrogen concentration(C) and nitrogen removal coefficient (a). "a" is $a = 0.00002*Temperature(T)^2 + 0.005$ under light condition. This equation is an empirical formula obtained under constant temperature test. We investigated the temperature of nitrogen removal coefficient for practical applications. The investigation was carried out almost every week from January 2015 to December 2016. Investigated items are flow rates (inlet / outlet), T-N concentrations and water temperatures (inlet, center, outlet), and soil temperatures (at central part, 1 cm interval in the depth direction to 10 cm). We also used AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) temperature data about 10 km away from the site. The results of the investigation showed that nitrogen removal rate was more related to soil temperature of 10 cm depth or the average integrated time temperature from AMeDAS temperature data than the water temperature at the time of investigation. Calculating the nitrogen removal rate at this temperature will reduce the error. Therefore, it was calculated by multiplying the average integrated time temperature of the nitrogen removal rate temperature of the nitrogen removal equation by the temperature factor. As a result, the best result was obtained when the average integrated time temperature (light condition) and the temperature factor 1.3 are used.

1. INTRODUCTION

In Lake Kasumigaura basin, research on nitrogen load calculation in paddy fields/wetlands has been carried out for many years. Because paddy fields/wetlands have nitrogen removal capability, so examining the parameters of nitrogen removal function of paddy fields/wetlands soils is indispensable for calculating environmental impacts. Tabuchi (1993, 2005) and Hirano (2007) proposed calculation equations for nitrogen removal rate of paddy soils as follows.

 $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{X} \cdots (1)$

Where is, **R** is nitrogen removal rate (g m⁻² d⁻¹), **F** is vegetation factor (range: 1~4), **P** is water flow factor (range: 0~1), **a** is nitrogen removal coefficient, **X** is nitrogen concentration.

In addition, "a" is a function of temperature(T) as follow.

```
Dark condition : a=0.000011 · T<sup>2</sup>+0.005 ···(2)
Light condition: a=0.00002 · T<sup>2</sup>+0.005 ···(3)
```

Tabuchi carried out experiments under two light conditions in a temperature-controlled chamber. The nitrogen removal equation shows that the nitrogen removal rate has temperature and concentration dependence. When we use this equation so far, we have substituted the water temperature at the survey time into T. However, it was not a temperature considering the daily temperature change in the field.

Therefore, the purpose of this study is to show the adapted temperature when using the nitrogen removal equation in fields. We examined appropriate temperature to use for the above equations and made the equation more generic.

2. METHOD

2.1 Test plot description

This research was under taken at the O area in Ami town, Ibaraki prefecture in Japan. In this study area, there are upland fields and forests on the plateaus, and the lowlands are paddy fields.

This study area has been maintained as an experimental paddy field for studies of the nitrogen removal for more than 20 years. The test plot is a non-vegetation plot under flooded in all year. The test plot size is 25 m * 1.4 m. Depth

of flooding is $5 \sim 6$ cm. There is no subsurface infiltration in this area.

2.2 Measurement item

The investigation was carried out almost every week from January 2015 to December 2016. Investigated items are flow rate (inlet / outlet), T-N (total nitrogen concentration) and water temperatures (inlet, center, outlet), and soil temperatures (at central part, 1 cm interval in the depth direction to 10 cm). We measured water temperatures and soil temperature by the Sanitary Thermo TP-100MR waterproof handy thermometer. We used a measuring cylinder to measure the water amount. The inflow water amount was the water amount per second.

We also used AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) temperature data about 10 km away from this site. We calculated the average integrated time temperature from the temperature data of AMeDAS.

Using these results, the nitrogen removal rate estimation by the nitrogen removal equation was analyzed. The nitrogen removal rate was calculated by substituting the outlet water temperature, the central water temperature, and the soil temperature every from 1 to 10 cm into the temperature term in the nitrogen removal coefficient.

Inflow load, outflow load and nitrogen removal rate were calculated by following equations.

 $L_{IN} = A_{IN} \cdot C_{IN} \cdots (4)$ $L_{OUT} = A_{OUT} \cdot C_{OUT} \cdots (5)$ $R = (L_{IN} + L_R - L_{OUT}) / 35 / 1000 \cdots (6)$

Where is, L_{IN} is Inflow load (mg d⁻¹), A_{IN} is inflow amount (L d⁻¹), C_{IN} is inflow T-N concentration (mg L⁻¹), L_{OUT} is Outflow load (mg d⁻¹), A_{OUT} is outflow amount (L d⁻¹), C_{OUT} is outflow T-N concentration (mg L⁻¹), L_R is rainfall load (mg d⁻¹), and the study site area was 35 m².

We calculated evapotranspiration by Penman-Monteith equation (Miura et al., 1993). We selected dates of dayaverage temperatures (°C), the highest and lowest temperatures (°C), sunlight hours (h), wind speeds (m s⁻¹) from AMeDAS Tsuchiura. And we selected relative humidity dates (%) from aero logical observatory.

Tabuchi suggested the temperature range of nitrogen removal formal was from 10° C to 40° C. Considering practicality in field, we also used other temperatures for analysis.

RESULTS Field survey

We collected 82 samples during two years. The average of the inflow nitrogen concentration in the test plot was 5.4 (± 1.5) mg L⁻¹ (**Fig. 1**), and the average of the nitrogen removal rate was 0.095 (± 0.130) g m⁻² d⁻¹. The average of water temperature in the test plot was 21.2 (± 19.0) °C (**Fig. 2**). Also, the fluctuations in temperature and nitrogen removal rate were similar.



Fig. 1 Total nitrogen concentration of inflow and outflow.



Fig. 2 Changes in water temperature and nitrogen removal rate.

3.2 Analysis

3.2.1 The R² value

Water temperatures (center), soil temperatures and the average integrated time temperatures were substituted into Equation (2) and Equation (3). The correlation (R^2 value) between the calculated value of the nitrogen removal rate and the observed value was compared at each temperature.

When we used soil temperatures in both equations, it was almost the same R^2 value at underground 10 cm. In addition, when we used the average integrated time temperatures, it was almost the same R^2 value from 14 hours ago. The correlation was the highest when using 10 cm depth soil temperature or the average integrated time temperature from 40 hours ago (**Fig. 3**).





Fig. 3 (a) The R^2 value between calculated values and observed values of nitrogen removal rate when using $0 \sim$ 10 cm depth soil temperature. -1 cm was the water temperature. (b) The R^2 value between calculated values and observed values when using average integrated time temperatures.

4. **DISCUSSION**

4.1 Applicable temperature

From the results, we considered the soil temperature and the average integrated time temperature was more accurately for the nitrogen removal equation than water temperature. Because the nitrogen removal equation was obtained by a temperature-controlled experiment, it was desirable to use a temperature with less fluctuation. The value of soil temperatures (median: 18.6°C, maximum: 29.4°C) or the average integrated time temperatures (40 hours ago, median: 17.5°C, maximum: 29.2°C) was less scatter than Water temperatures (median: 21.7°C, maximum: 40.2°C).

4.1 Temperature factor

The nitrogen removal equation was an expression made on the premise of substituting the temperature at the time of survey. The average integrated time temperature or the soil temperature is lower than the water temperature at survey time. Calculating the nitrogen removal rate at this temperature will reduce the result. Therefore, it was calculated by multiplying the average integrated time temperature of the nitrogen removal equation by the temperature factor "D" (equations 7 and 8). As a result, the best result was obtained when the temperature factor was 1.3.

$$R = (0.000011 \cdot (D \cdot T)^2 + 0.005) \cdot X \cdots (7)$$

$$R = (0.00002 \cdot (D \cdot T)^2 + 0.005) \cdot X \cdots (8)$$

5. CONCLUSION

From this study, we found the following.

- 1) The observed nitrogen removal rate was more related to the soil temperature at 10 cm depth or the AMeDAS average integrated time temperatures than the water temperature at the time of survey. From this result, it was found that there is a possibility that estimation of nitrogen removal rate can be well estimated using meteorological observation data even if there is no measured value.
- 2) It is better to use the nitrogen removal coefficient in the light condition.
- 3) When calculating the nitrogen removal rate using weather observation data, a temperature factor is required. This value was in the range of about 1.2 to 1.3 from this result.

REFERENCES

- Takeshi MIURA and Rintaro OKUNO: Detailed description of calculation of potential evapotranspiration using the Penman equation, Transactions of the Agricultural Engineering Society, Japan, 164, pp. 157-163, 1993.
- [2] Toshio TABUHI, Yasuji SHINODA and Hisao KURODA: Experiment on nitrogen removal in the flooded paddy field, Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan, 61 (12), pp. 1123-1128, 1993.
- [3] Toshio TABUCHI, Hisao KURODA, Akiko IKENOBE and Mayumi HIRANO: Influence of flow rate on nitrate removal in flow process, Jpn. Soc. Soil Phys., 99, pp. 73-83, 2005.
- [4] Mayumi HIRANO: A study of light effects on nitrogen removal capability of wetland soil, doctoral thesis, TUAT, 2007.

Verification of a Simple Watershed Land-use model to estimate the Net Nutrient Loads from Non-point Sources to Rivers

Seiko Yoshikawa, Yuta Shimizu, Kenji Matsumori

National Agriculture and Food Research Organization(NARO), Japan

Keywords: land-use model, specific load factor, non-point source, nitrogen, phosphorus

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the impact of land-use on total-nitrogen and total-phosphorus concentrations in river water (R-N and R-P). The study area consisted of 13 watersheds covering about half of Hokkaido, and 12 watersheds covering about half of Tohoku and those 12 sub basins in Japan. We estimated N and P specific load factors, which showed the magnitude of the upland fields, paddy fields, forests and urban land-use contributions to R-N and R-P. The N and P specific load factors were gained as partial regression coefficients using a multiple regression analysis of the R-N and R-P concentrations and the land-use ratios in each of the watersheds. The results showed that The N specific load factor was -2.4, 2.4, 0.1, and 39.8 for the watersheds in Hokkaido, 2.9, 9.8**, 0.49, and -6.8 for the watersheds in Tohoku, and 1.2, 6.7, 0.4, 4.3 for the sub watersheds in Tohoku for paddy, upland, forest, building site, respectively. The P specific load factors were 0.08, 0.07, 0.02, and 1.4 for the Hokkaido watersheds, 0.20**, 0.23**, 0.00, and 0.01 for the Tohoku watersheds, and 0.15, 0.10, 0.00,and 0.80* for the Tohoku sub watersheds for paddy, upland, forest, building site, respectively (* 5% **, 1% significance). The surplus-N (nitrogen applied to cropland via fertilizer without being absorbed by crops) was found to be gently correlated to R-N by a non-linear curve with a contribution rate R^2 of 0.43 in spite of a simple calculation.

1. INTRODUCTION

Increased nitrate levels in drinking water, eutrophication of closed water bodies, and algal blooms are all major environmental issues in the world^{[1][4]}. It is therefore important to quantify nutrient loads from both non-point sources and point sources. The increasing proportion of cropland area in drainage basins has been found to be strongly correlated with the nitrogen concentration of river water^[3]. Woli et al.^[7] employed regression slope, or the increase in NO₃-N concentration in river water (mg L^{-1}) vs. the increase in the proportion of upland in the drainage watersheds (%), as "the impact factor" to assess stream water quality. They also found a correlation between impact factor and watershed-mean surplus-N (N applied by fertilizer without absorbed by crops), except in watersheds with large point sources of nitrogen. This impact factor can be employed as an index of the land-use characteristics of a watershed. Jordan et al.[2] and Vitousek et al.^[4].found a significant correlation between surplus-N and N concentration in river water. Here, we applied a simple watershed land-use model to quantify the net nutrient loads from non-point sources to rivers. Furthermore, we investigated the relationships between the surplus-N and river-nitrogen (R-N) concentration, and between the surplus-P (P applied by fertilizer without absorbed bv crops) and river-phosphorus (R-P) concentrations.

2. METHODS

The study area was 37 watersheds in Northeastern Japan. It was consisted of 13 watersheds (37,966 km², 45.5%) in Hokkaido Island, and major 12 watersheds (34,047 km², 50.9%) with 12 sub watersheds (3,777 km², 5.6%) as the tributaries in the major watersheds in Tohoku district (Fig. 1). We estimated R-N and R-P specific load factors in four land-use types (upland fields, paddy fields, forests and urban), which represents the magnitude of contribution to R-N and R-P concentrations. The watersheds were delineated based on the datasets of a 50 m digital elevation data (Geospatial Information Authority of Japan, 2001), and watershed/coastal area boundary data (National Land Numerical Information, National Land Agency, 1977) using a Geographic Information System (GIS) (Arc GIS, ESRI Ltd.) (Fig.1). Land-use ratio in each watershed was calculated using land-use subdivision mesh data (National Land Numerical Information, National Land Agency 1997) and boundaries of the delineated watersheds. Landuse was classified into the four categories. R-N and R-P concentrations were obtained from a database of the Measurement Results of Water Quality in Public Waters from FY 2000 to 2009 (Ministry of the Environment, 2000-2009). R-N and R-P concentrations were simply averaged as yearly mean concentrations since the measurements were conducted once a month at each river mouth.

We employed the model of Mochizuki *et al.* ^[3] to estimate R-N and R-P specific load factors for each land use type using the following equation (1).

$$\begin{array}{c}
4\\
C=\Sigma a_i x_i\\
i=1
\end{array}$$
(1)

where C is the watershed-mean R-N or R-P, a_i is the R-N or R-P specific concentration for land-use type *i*, and x_i is the land-use ratio for the land-use type *i*. The a_i was estimated as partial regression coefficients for the multiple regression analysis of the 13 or 12 R-N or R-P concentrations and the land-use ratios of the watersheds. Watershed-mean Surplus-N was estimated based on a statistical table of cropping area that had been prepared for each Prefecture for 72 main crops (MAFF Japanese food information, 2005),application guidelines of fertilizer and manure for main crops and data about nitrogen uptake by crops^[5] for 12 watersheds in Tohoku district. The R-N and R-P concentrations were analyzed in relation to the watershed-mean surplus-N and surplus-P by single regression analysis.

3. RESULTS

The R-N specific load factors were -2.4, 2.4, 0.1, and 39.8 for the watersheds in Hokkaido island (n=13), 2.9, 9.8, 0.49, and -6.8 for the major watersheds in Tohoku district (n=12), and 1.2, 6.7, 0.4, 4.3 for the sub watersheds in Tohoku district (n=12) for paddy field, upland field, forest, and urban, respectively (Table 1). The R-P specific load factors were 0.08, 0.07, 0.02, and 1.4 for the watersheds in Hokkaido island, 0.20, 0.23, 0.00, and 0.01 for the major watersheds in Tohoku district, and 0.15, 0.10, 0.00, and 0.80 for the sub watersheds in Tohoku district for paddy field, upland field, forest, and urban, respectively. The R-N and R-P load factors were highest for urban in Hokkaido island. The highest factor was found in upland field in Tohoku district. The dependencies of the R-N and R-P load factors to size of the watershed were not significant. The estimated concentrations coincided relatively well with the measured ones(Fig.2). The estimated breakdown of the applied N and P as fertilizers for each crop are shown in Fig. 3. Almost half or less amount of applied N, and only small part of applied P were found to be absorbed by crops. The surplus-N was gently correlated to the R-N concentration with a contribution rate $R^2=0.43$ (Fig.4). This result suggests that the N applied artificially in fertilizer to croplands without being absorbed by crops themselves could be an important contributor to the N pollution in river water. However, poor relationship was found between the surplus-P and R-P.



Fig. 1 Investigated Watersheds left: Hokkaido 13 watersheds right: Tohoku 12 watersheds and 12 sub watersheds

Table 1	Land-Use S	pecific Load	Factors
---------	------------	--------------	---------

Nitrogen	Hokkaido 13 watersheds	Tohoku 12 watersheds	Tohoku 12 sub watersheds	
Paddy Upland Forest Urban(Building)	-2.38 2.39 0.12 39.8	2.91 9.79 ** 0.49 -6.76	1.24 6.71 0.42 4.29	
determination coeff., significance(P value)	0.88 P<0.01	0.90 P<0.01	0.73 P<0.01	
Phosphorus	Hokkaido 13 watersheds	Tohoku 12 watersheds	Tohoku 12 sub watersheds	
Phosphorus Paddy	Hokkaido 13 watersheds 0.084	Tohoku 12 watersheds 0.203 **	Tohoku 12 sub watersheds 0.157	
Phosphorus Paddy Upland	Hokkaido 13 watersheds 0.084 0.073	Tohoku 12 watersheds 0.203 ** 0.232 **	Tohoku 12 sub watersheds 0.157 0.104	
Phosphorus Paddy Upland Forest	Hokkaido 13 watersheds 0.084 0.073 0.015	Tohoku 12 watersheds 0.203 ** 0.232 ** 0.003	Tohoku 12 sub watersheds 0.157 0.104 0.001	
Phosphorus Paddy Upland Forest Urban(Building)	Hokkaido 13 watersheds 0.084 0.073 0.015 1.37	Tohoku 12 watersheds 0.203 ** 0.232 ** 0.003 -0.013	Tohoku 12 sub watersheds 0.157 0.104 0.001 0.798 *	

*5%significance **1%significance



Fig. 2 Measured and Estimated N and P Concentrations



Fig. 3 Estimated Applied N and P as fertilizers for each crop (based on [5])



Fig. 4 Relationship between Surplus-N, P and River-N, P

4. DISCUSSION

The minus values of the land-use specific load factor mean "purification" type. The values without asterisk include uncertainty. However, roughly speaking, N specific load factors for urban and upland were larger than those for paddy and forest, and P specific load factors for urban were larger than paddy and upland, and much larger than forest. The N and P specific load factors for paddy and upland were larger in Tohoku district than in Hokkaido district. The reason that the surplus-P was not correlated to R-P was supposed to be reduced from the large phosphorus adsorption ability of Andosols which spread widely in Tohoku district. In this and the previous paper^{[3][8]}, we propose a simple method to determine the specific load factors for different land-use types. The model has a simple framework and does not need special data. The model proposed here needs at least the same number of watersheds as the number of land-use types, and its applicability could be improved in cases where the loads from point sources are not large.

5. CONCLUSION

We propose a simple method to determine the specific load factors for different land-use types. We applied the method to evaluate the impact of land-use on total-nitrogen and total-phosphorus concentrations in river water in Hokkaido and Tohoku districts. The model was thought to be useful to estimate the change in N and P concentrations in river water resulted from land-use change.

REFERENCES

- [1] Burt TP, Heathwaite AL, Trudgill ST: Nitrate: Processes, Patterns and Management. John Wiley & Sons Ltd, p.444, 1993.
- [2] Jordan TE, Correll DL, Weller DE: Effect of agriculture on discharges of nutrients from coastal plain watersheds of Chesapeake Bay. J. Environ. Qual. 26, 838-848, 1997.
- [3] Mochizuki H, Takahashi H, Yoshikawa S: Development of prediction model for water quality in watersheds based on proportion of area by land use. *People and Environm.* 39(3),2-8 (in Japanese with English summary), 2013.
- [4] Nagumo T, Woli, KP, Hatano R: Evaluating contributions of point and non-point sources of nitrogen pollution in stream water in a rural area of central Hokkaido. *Soil Sci. Plant Nutri.* 50,109-117, 2004.
- [5] Nishio M:A method to assess the risk of nitrate pollution of groundwater by the nitrogen fertilization Load from the individual crop species. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 72, 522-528 (in Japanese with English summary), 2001.
- [6] Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GD, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG: Human alteration of the global nitrogen cycle: Source and consequences, *Ecol. Appl.*, 7, 737-750, 1997.
- [7] Woli KP, Nagumo T, Kuramochi K, Hatano R: Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas. *Sci. Total Environm.*, 329,61-74, 2004.
- [8] Yoshikawa S, Takahashi H, Sasada Y, Mochizuki H : Impact of land use on nitrogen concentration in groundwater and river water, *Soil Sci. Plant Nutri.* 61,898-909, 2015.

Evaluation of Nutrient Load Reduction by Precision Water Management from Paddy Field in Lake Inbanuma Watershed

Koshi Yoshida¹, Toshiaki Iida² Shigeya Maeda¹ and Hisao Kuroda¹

¹Ibaraki University, ²The University of Tokyo

Keywords: water environmental conservation, nitrogen runoff, phosphorus runoff, automatic irrigation

ABSTRACT

In this study, the impact of nutrient load reduction by precision water management was evaluated to improve the water environment of Lake Inbanuma. Kashima district, which was managed by Inbanuma land improvement district, was selected for the test site. Water, nitrogen and phosphorus concentration was monitored at Iino pumping station and paddy drainage. From the monitoring data, water balance and nutrients balance were estimated. As a result, precision water management by automatic irrigator can reduce 65% of irrigation water, 58% of nitrogen load and 43% of phosphorus load.

1. INTRODUCTION

Irrigation water is essential for food production especially in paddy rice, and much water was withdrawn from water sources compare to other water use sector ^[1]. In Japan, water delivery system for agriculture was highlydeveloped and managed by land improvement district^[2]. The 1st priority of irrigation is water supply to avoid the water stress, however, saving a labor input for agricultural land management such as weed control also the important factor. Therefore, farmers want to input much water for their paddy to save a labor cost ^[3]. However, much irrigation water leads much energy consumption for pumping, as a result, water fee also increases. In addition, increase of drainage water cause a much nutrient effluent to downstream water environment^{[4][5]}. Historically, water delivery system in paddy agriculture has been supplyoriented system. However recent innovation of field monitoring or automatic regulation system will change it to demand-oriented system. In this study, the impact of precision water management by auto irrigator was evaluated to improve the water management system in paddy without the additional labor input.



Fig.1 Outline of study area

2. STUDY AREA

For the test site, Kashima district was selected which was managed by Inbanuma land improvement district and having 46.1 ha benefit area (Fig.1). Fig.2 shows the monitoring paddy fields having 6.48 ha. All of these paddy fields were cultivated by same farmer group. Irrigation water was pumped up from Inbanuma lake, and water from paddy was drained to Inbanuma again flowing through Kashima river. In this paddy fields, open type drainage canal was not existed, and subsurface drainage system was installed in all paddies so that all drained water, which was percolated through paddy soil layer and overflowed from paddy outlet, gathers to drain pipe. Inbanuma lake is closed water area and eutrophic lake [6][7]. Therefore, drainage water from paddy fields was one of the pollution sources. Although drainage water from paddy have relatively low nutrient concentration compare to that from upland, drainage water amount is larger. Therefore, nutrient load from paddy fields could not be negligible for the conservation of lake water environment.



Fig.2 Monitoring paddy fields

3. FIELD MEASUREMENT

To evaluate the water balance such as how much water was irrigated, evaporated and drained, paddy water level was monitored in hourly basis at 3 paddies by using HOBO U20 water level loggers (Onset Co. Ltd.). Water quality at Iino pumping station and paddy drainage pipe was measured in daily basis (at noon) such as soil sediment (SS), total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃-N), ammonium nitrogen(NH4-N), chemical oxygen demand (COD) and total phosphorous (TP). Meteorological data also measured at Iino pumping station for calculating evapotranspiration. Measured items were rainfall, solar radiation, wind speed, air temperature, relative humidity and atmospheric pressure. Rice variety was Momiroman which was not for human food but for livestock feeding. Observation period was from 4 /Jun/2012 to 22/Sep/2014 for 3 years, but only irrigation periods. A questionnaire to the farmer also conducted to grasp the fertilizer input or land management practices.

Fig.3 shows the variation of rainfall, paddy water depth, TN and TP concentration of in and outflow at paddy field during observation period. In 2012, paddy water depth was controlled relatively deep, so the amount of drained water also became larger than 2013-2014. Much drained water leads much TN and TP concentration in 2012.

4. RESULT AND DISCUSSION

The pollution load through surface runoff can be reduced by controlling the surface drainage water volume ^{[8][9]}. Such water management leads water and irrigation cost saving, and pollution load to downstream water environment also can be reduced. For saving water and farmer's labor input, automatic irrigation system was developed and introduced in some irrigation district. Fig. 4 shows schematized description of float auto irrigator. Farmers just set the target water level and auto irrigator supply water until float level increase at target depth. In this study, the effect of this auto irrigation system on water saving and nutrient load reduction was estimated and compared with conventional water management case.







Fig.3 Variation of rainfall, water depth, TN and TP concentration of observed paddy during irrigated period (2012-2014)

		Nitrogen				Phosphorus			
		Conventional		with Auto	Auto Irrigator Conv		ntional	with Auto Irrigator	
		(kg∕ha)	(%)	(kg∕ha)	(%)	(kg∕ha)	(%)	(kg∕ha)	(%)
INPUT	rainfall	7	4	7	4	0	0	0	0
	irrigation	39	20	15	9	8	12	3	5
	fertilizer	154	77	154	88	58	88	58	95
	Total	200	100	176	100	66	100	61	100
OUTPUT	surface runoff	26	13	0	0	4	6	0	0
	percolation	10	5	12	7	3	5	3	5
	harvest	101	51	101	57	19	29	19	31
	removal, absorbed	63	32	63	36	40	61	39	64
	Total	200	100	176	100	66	100	61	100

Table1 Annual averaged nitrogen and phosphorus balance in irrigation period during 2012-2014

From observed data, water balance was estimated during 2012-2014. At the monitoring paddy fields, 2045mm/year water was pumped up for irrigation and 53% of supplied water was released by surface drainage from paddy outlet in current situation. Therefore, there was still large possibility to save water by introducing elaborated water management system to reduce surface drainage water ^[8]. With installing auto irrigator case, the water saving effect was about 1335mm (65%) and energy consumption for pumping also can be saved. As a result, farmer can save water fee which farmer pay to land improvement district for the maintenance and operation of water delivery facilities.

Table1 shows annual averaged nitrogen and phosphorus balance in irrigation period during 2012-2014. Generally, in the conventional paddy field, 90-120 kg/ha nitrogen was recommended in food rice cultivation. However, much nitrogen was fertilized in this monitoring paddy compared with conventional one. Because, in feed rice cultivation, farmers do not need to pay attention to a taste of rice, therefore much amount of fertilizer was input to increase the rice biomass. In addition, farmer can get manure in free from livestock sector by exchanging the rice straw. Estimated nitrogen and phosphorus loads from paddy were 36 kgN/ha and 7 kgP/ha. In Inbanuma watershed, there are 7,370 ha paddy field so that about 265 ton nitrogen and 52 ton phosphorus were flow into the Inbanuma lake from all paddy fields. With auto irrigator case, nitrogen and phosphorus load reduction were expected as 21 kgN/ha(58%) and 3 kgP/ha(43%).

5. CONCLUSION

In this study, field monitoring was conducted to grasp the current condition of water and nutrients balance in the paddy field. Large amount of irrigation water and nutrient fertilizer were inputted in monitoring paddy of Kashima district, because feed rice was cultivated in this paddy. And high input of water and nutrients leads much effluent load to downstream water environment. Recently, feed rice paddy area is increasing under the governmental regulation policy. Therefore, water pollution in closed type lake may become worse if feed rice paddy spread widely. Auto irrigation system is effective to save irrigation water input and pumping energy consumption and to conserve the water environment without more farmer's labor input for water management.

REFERENCES

- [1] Cantrell, R.P., 2004, Challenges and opportunities for ricebased farming in the International Year of Rice and beyond. Editorial, Paddy and Water Environ, 2: 1-4.
- [2] Iida, T., M. Kimura, K. Yoshida, N. Kubo, T. Yokoi, 2013, Investigation of paddy field irrigation activities by farmers aiming for demand-oriented irrigation service, Proceeding of PAWEES 2013, Thailand.
- [3] Watanabe T., 1999, Advanced paddy field engineering, The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering
- [4] Clemmens, A.J., R.G. Allen, and C.M. Burt., 2008, Technical Concepts Related to Conservation of Irrigation and Rainwater in Agricultural Systems, Water Resources Research Vol. 44:16.
- [5] Sadler, E.J., R.G. Evans, K.C. Stone, and C.R. Camp., 2005, Opportunities for Conservation with Precision Irrigation, Journal of Soil and Water Conservation Vol. 60, No. 6:371-379.
- [6] S. Nakamura, K. Motohashi, H. Kubota, Y. Masuoka, K. Hayashi, T. Yuasa and T. Shoji, 2008, A new approach in water quality improvement of Lake Inba-numa using submerged plants, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol.8:645-646.
- [7] HAYASHI K., YUASA T., NAKAMURA S., MYSIAKE K., ONO F., OGURA H. and UEHARA H., 2009, Integrated Watershed Management for Restoration of Lake Inba-numa and its Watershed, 13th World Lake Conference, S17-5.
- [8] Hanson, B. R., and J. E. Ayars, 2002, Strategies for reducing subsurface drainage in irrigated agriculture through improved irrigation, Irrig. Drain. Syst., 16(4):261-277.
- [9] Rice, R. C., D. J. Hunsaker, F. J. Adamsen, and A. J. Clemmens, 2001, Irrigation and nitrate movement evaluation in conventional and alternate furrow irrigated cotton, Trans. ASAE, 44(3):555–568.

Analysis of Water and Nutrient Movement in a Cyclic Irrigation System to Paddy Fields

TAKAHIRO ISHIKAWA¹, TOSHIAKI IIDA¹, MASAOMI KIMURA¹, HIROKI MINAKAWA², and NARITAKA KUBO¹

¹Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, ² Kanto Regional Agricultural Administration Office, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

Keywords: cyclic irrigation, paddy field, nutrient load, lake environment, drainage canal

ABSTRACT

Imbanuma at Chiba Prefecture has had a serious problem of water quality deterioration in recent years. In order to improve the circumstances, cyclic irrigation is proposed to be one of feasible measures. In a cyclic irrigation system, drainage water discharged from paddy fields is pumped and reused as irrigation water. Cyclic irrigation is expected to decrease the nutrient load because it decreases the amount of water flowing into the downstream lake, and because some of the nutrient in drainage water would be returned to the paddy field. The purpose of this study is to evaluate quantitatively the effect of the cyclic irrigation system on the nutrient load for Imbanuma. Three research approaches were conducted in this study. First, the record of the main pump and the map of the drainage canal network were analyzed. It was revealed that fifty-one percent of the total irrigation water was reused and that fifty-seven percent of paddy fields returned to the main pump. Second, a water movement model was developed which consists of tank models representing the paddy fields and the background catchment and a drainage canal model. This model roughly reproduced the observed water level in the downstream drainage canal, but further improvement seemed necessary. Third, the relations between water quality and precipitation of farming activities were analyzed using water quality data observed monthly. It was suggested that more frequent observation is necessary to clarify the water and nutrient movement in the system.

1. INTRODUCTION

Imbanuma is located about 50 km east of the center of Tokyo. The total water surface is about 9.43 km2. The area of Imbanuma basin is about 487 km2, most of which had been covered by forest and agricultural land but is rapidly urbanized recently to have population more than 780 thousand within the basin. The lake is well known by its deterioration of water quality in recent years. As one of the options to improve the lake environment, cyclic irrigation was adopted for irrigation to paddy fields surrounding the lake and started in 2015. In the cyclic irrigation system, drainage water from paddy fields is pumped from the downstream drainage canal and reused as irrigation water. Cyclic irrigation is expected to decrease the nutrient load to the lake because it decrease the amount of drainage water to the lake, and because some of the nutrient load may be consumed at paddy fields.

The purpose of this study is evaluation of the effect of the cyclic irrigation to paddy fields on variation in the discharge and the nutrient load to the downstream drainage canal

2. MATERIALS AND METHOD

2.1 Research field

To construct the new cyclic irrigation system, many old pump stations are consolidated into new six pump stations. Two of the pump stations have been already in operation, and the others are under or before construction. The area whose irrigation water is supplied by one of the two pump stations in operation was selected as the study area.

2.2 Analysis of irrigation water

The operation records of the main pump for the cyclic irrigation was analyzed, referring to the irrigation pipe network to each paddy field plot.

2.3 Making hydrological model

A model which represents the water movement in the basin during the cyclic irrigation was proposed. With pump operation data and meteorological data as input to the model, the variation of the observed water level at the downstream drainage canal was acceptably reproduced by the model output. **2.4 Analysis of water quality** The relation between nutrient concentration variation in the drainage canal and the occurrence of precipitation and fertilization was analyzed.

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1 Analysis of irrigation water

It was found that the drainage water from 57 percent of the paddy field area receiving the irrigation water from the pump returned to the pump again and that 51 percent of the total irrigation water returned to the pump to be reused as irrigation water again. To compare with former study of cyclic irrigation in Japan^{[1][2]}, this ratio is higher in such irrigation system which is adopted for environmental improvement.

3.2 Making hydrological model

The 2 layered tank models for paddy fields and for background basins and the model of the downstream drainage canal was adopted in the model.Figure1 shows schematic diagram of this model and parameter values. This model has two features. One is that height of hall of paddy-field-surface-tank is available according to farmer's water management. The other is that drainage canal is connected with ground water tanks of both paddy field and background. It interpret that water in drainage canal and groundwater has relationship, if water level in canal come down water will flow from under-ground by water level difference between canal and under-ground.

It is admitted, however, that there is still some room for improvement in the model structure as well as the model parameter values.

3.3 Relation between T-N concentration of discharged water in drainage canal and rainfall

N day cumulative precipitation is cumulative

height of rainfall from sampling day to N day before sampling day. For example from following sample in Table1, each cumulative precipitation is displayed like Table2.

Date	Rainfall(mm)
2017/5/4	0
2017/5/5	5.3
2017/5/6	11.5
2017/5/7	0
2017/5/8	4
2017/5/9	0
2017/5/10(Sampling Day)	0

Table2,	Each	day	cumulative	precipitation	of
		ex	xample data		

T			
N day	Cumulative		
	precipitation		
	(mm)		
Three	4		
Five	15.5		
Seven	20.8		

Figure2 shows that relationship between three, five and seven day cumulative precipitation and T-N concentration of the samples. One sample data is stacked with as day is increased. From this figure, we know that there is no point plotted at where both of T-N concentration and N day cumulative precipitation are high. And point are gathered in where value of T-N concentration is nearly 1.5mg/L. So we discussed T-N concentration is attenuated by rainfall.



Fig1.Schematic diagram of the proposed model

3.4 A comparison between irrigation water and discharged water about T-N concentration

To compare between irrigation water and discharged water, T-N concentration of discharged water is lower than one of irrigation water at most data.(Figure3) So it can be said that paddy field in this area can reduce the T-N concentration of water. But at this analysis it is not considered that there is time lag between flowing into paddy field and draining off from paddy field.

4. CONCLUSION

This research's conclusive purpose is to reveal movement of water and to reveal movement of water quality.

But sampling in this research was done three times in a month at most. For this purpose sampling should be done more frequently.

REFERENCES

- Kabin Kan, Akira Kudo, Mattashi Izumi: Experimental Study of the Water Management and Outflow Load on Paddy Field in Low-lying Area, Bull. Fac. Agric.& Life Sci. Hirosaki Univ. No.10:1-11,2007
- [2] Ryoichi Kaneki, Masahisa Nakamura, Minekazu Izumi, Yasuhiko Himeno., Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan 71(9), 829-834, 2003



Fig2, Relation between T-N concentration and N day cumulative precipitation



Fig3, Comparison between irrigation water and discharged water
霞ヶ浦新利根川流域における湖沼と水田地帯の水環境保全に向けた 循環灌漑の適用可能性

加藤 亮¹,池田周平¹,直江次男² ¹東京農工大学,²農林水産省関東農政局

キーワード:水田,循環灌漑,水質浄化,シナリオ分析

抄録

霞ヶ浦に代表されるように、宅地と農業地域を流域内に持つ湖沼の水環境は、生活排水の対策が進んだことにより一 時期改善が見られたが、その後、横ばい傾向を示している。これは、農地に施用された余剰肥料等の影響や、土壌に 蓄積した窒素やリンなどの汚濁負荷の影響が長期に渡り継続しているためではないかと考えられている。したがって、 湖沼のさらなる水環境の改善のためには、農業排水の対策が期待されており、水田地帯における循環灌漑は、その対 策の一つと考えられている。そこで、霞ヶ浦流域内の新利根川土地改良区を対象に、循環灌漑を導入した場合の、水 質浄化効果と、ブロック内の負荷の蓄積がどの程度になるかを検討するため、1時間単位で水位と EC を測定し、それ に基づき水収支と物質収支を明らかにし、循環灌漑を導入する場合のシナリオ分析を実施した。測定期間は2017年1 月~12 月である。

1. はじめに

新利根川沿岸地区は,霞ヶ浦流域南部,利根川左岸 に位置する低平地水田を中心とした灌漑地区である。灌 漑用水,排水とも揚水機場を必要とする。また,排水に おいては,地区の常時排水機能も担っており,灌漑期, 非灌漑期を問わず洪水対策としての排水管理を用水管 理と併せて土地改良区が実施しているのが特徴である。

特に、本地区は霞ヶ浦流域内に立地していることから、 水質保全(窒素、リン、有機物)が重要視されている。さ らには、経年変化等による施設の老朽化が進んでおり、 用排水機場等の施設の更新が待たれている状況である が、施設の更新時には、農村周辺の環境保全や洪水対 策といった公益性をより考慮し、持続的な農村社会シス テムに寄与することが望まれている。

一般に水質保全や、農業からの汚濁負荷を軽減する 手法として、農業用水の観点からは循環灌漑が提案さ れている^[1]。すなわち、水田排水を灌漑用水として再利 用し、水質保全や節水型の水利用となる循環灌漑シス テムである^{[2][3]}。ただし、水田排水が、灌漑用水として適 当であるかどうか、水量はどの程度確保できるか、どの 程度の浄化効果を期待することができるか等の検討が 必要である。

以上から、本調査は、まずは水田灌漑における主排 水路の水質を調査対象とし、水収支、物質収支を明らか にすることを目的とする。この知見に基づき,本地区と霞 ヶ浦流域への物質循環の適正化に資する,循環灌漑の 水管理の効果について検討する。

2. 方法

新利根川沿岸地区は茨城県の南部に位置し,新利 根川沿岸に展開する農業地域であり,関係市町村は 稲敷市(旧新利根村、旧東村、旧江戸崎町、旧桜川村) 及び河内町からなる。受益面積は用水、排水改良を合 わせて 7,030ha (水田 6,770ha、畑 260ha)である。

今回調査対象とした金江津地区(Fig.1)は,用水源お よび排水先とも新利根川である。用水機場を通じて,パ イプラインで水田圃場へ直接水が配分され,新利根川と



Fig.1 新利根川沿岸地区および測定地点

利根川との間に位置する中央排水路(Fig.2)に水が集ま り,排水機場(Fig.3)によって,新利根川に排水される。 低平地の干拓地であることから,排水機場は周辺の洪 水排水のため,設定水位を超えると稼動することとなる。

太田金江津用水機場は, 揚水後, 一度太田配水槽に 貯水され, その後重力で各水田圃場に配分していく。用 水はパイプライン化されており, 揚水から配水の段階で の排水の混入はほぼ無い状態であり, 新利根川の比較 的良好な水質が灌漑に利用可能である。また, 土地改 良区内の土地利用はほぼ水田であり, 一部, ハス田等 が散在する。管内では, 農家の住宅もあり, 合併浄化槽 または, 集落排水, 流域下水道が混在する。

図中の太田金江津用水機場, 十平用水機場, 金江津 排水機場にて, 水位と EC の連続モニタリング装置を設 置した。水位計(Onset 社, Hobo U20L 04), EC 計 (Onset 社, Hobo U24-001)を太田金江津用水機場と金 江津排水機場に, 十平機場にはEC計のみを設置した。 補正用の大気圧計は, 金江津排水機場に設置した。ま た, ポンプ稼働量については, 各機場の管理月報からま とめた。

金江津排水機場の排水面積全体は水田面積で 1,670ha, 流域としてみると 2,020ha を持っているが, 太 田用水機場から金江津排水機場までのブロックは, その うちの 930ha である。流域としては Google Earth を用い て面積を測定したところ, 980ha であった。

気象データは,降雨量については気象庁の「江戸崎」 観測所,蒸発散量の推定のための項目については「筑 波(館野)」のデータを利用した。

他の水質項目については、窒素、リンについても2ヶ 月に一回の頻度で測定した。どちらも各機場において、 マニュアルで採水し、本学の実験機器にて分析を行っ た。窒素については、全窒素、全リンについては JISK102 に準拠した方法にて分光光度計(UVmini1240, Shimadzu 社)で測定した。硝酸態窒素、リン酸態リンはイ オンクロマトグラフ(HIC-SP, ShimPack A3, Shimadzu 社) を用いて測定した。

金江津排水機場から太田用水機場までのブロックを 一つの境界とし、水収支、物質収支を求める。灌漑期に おいては、降雨量、灌漑用水量を流入とし、蒸発散量、 排水揚水量を流出して求める。流入と流出の差は差分と なり、ブロック内での貯留もしくは系外損失(地下浸透ま たは横浸透)として扱う。物質収支は、各流入、流出項 目に水質項目を乗じて求める。本報告では、EC に着目 して EC 負荷量(フラックス)の収支を求める。

$$\Delta S = R + \sum In - ET - Out \tag{1}$$

ここで、ΔS は流域貯留の変動量、R は降雨量、In は太 田用水機場、十平用水機場の流入量(m3/d)、ET は蒸 発散量、Out は金江津排水機場量(m3/d)となる。降雨 量、蒸発散量は(mm)であるがブロック面積 980ha を乗 じて、流量に換算した。

上式の結果を用いて, EC 負荷(フラックス)の収支を 求めた。

$$\Delta ECL = ECLin - ECLout \tag{2}$$

$$ECLin = R \cdot ECrain + \sum In \cdot ECin + \Delta S \cdot ECavr (3)$$
$$ECLout = Out \cdot ECout$$
(4)

ここで、 ΔECL はブロック内の貯留量変化を、ECLin、 ECLout は流入負荷、流出負荷の合計である。ECrainは 降雨の EC, ECin は各機場の測定された EC, ECavr は 本来は上流ブロックからの流入 EC を表すが、測定機器 の設置の制限上、今回は金江津の EC の期別平均値を 用いる。

3. 結果

金江津排水機場の水位とECの変動結果を示す。 金江津排水機場は,洪水対策のため常時排水が行わ れており,水位設定でポンプの on/off 制御が行われ ている。そのため,頻繁にポンプが揚水を繰り返すた め,水位変動は常に上下を繰り返している状態であ る。なお,金江津排水機場における,EСの変動は, 灌漑期に減少し,非灌漑期に増大する傾向があった。 特に,1月期にEСが高い数値を示しているが,これ は,降雨が少ないため流域から流出するEС値を希 釈することができなかったためと考えられる。2016 年12月から2017年1月にかけてのEСの変動と降 雨量の関係を見ると,降雨により希釈されている現 象が見受けられる(Fig.2)。



対象ブロックに対して,水収支式を適用した。入力には,2017年の日降雨量,日蒸発散量(ペンマンモンティ



Fig.3 排水ブロックにおける年間水収支

ス式),太田,十平,金江津の揚水量をそれぞれ求めた。 式の差分から,残渣項が残るが,低平地であり地下浸透 としての損失は無視できると考え,上流からの流入量とし て考え, Fig.3 に示す結果が得られた。また,物質収支と しては Table2 の結果が得られた。

このことが示すのは, EC は, 水中における溶存態 イオンの含有量を概ね表す指標である。灌漑期に EC の排出フラックスが減少したのは, 水田の灌漑排水 を通じて, イオンの総量が土壌に吸着し, また植生に

Table 2 EC 負荷収支の概要

				- 単位	$(10^2 \mathrm{S}\mathrm{m}^2)$
	7	記入(ECL ii	7)	流出(ECL out)	残差(ΔECL)
	降雨負荷	用水負荷	上流からの 流入負荷	金江津負荷	ブロック内貯留変化
潘左	357	5,659	9,989	18,815	-2776
进十	平均EC 30				-7.61(日当たり)
灌漑期	122	5,643	4,230	11,090	-1059
(4月1日~9月15日)	平均EC 30		平均EC 529		-6.92(日当たり)
非灌漑期	235	15	5,758	7,725	-1715
(1月1日~3月30日) (9月16日~12月31日)	平均EC 30		平均EC 661		-8.09(日当たり)

よる吸収がすすんだためと考えられる。いわゆる,水田の浄化機能が発揮されたためと考えられる。

4. シナリオ分析

物質収支解析を元に、循環強度を 100%と仮定し、 循環灌漑を実施した際の削減負荷量と排水水質の汚 濁上昇率を算定した。つまり、用水機場からの供給量 を、排水機場から分水することで全てまかなうとし た。流域内の EC の流出状況が循環灌漑の適用前と 同じであると仮定し、エクセルのソルバーを用いて 排水の EC を求めた。削減できる EC 負荷量は、灌 漑期には、循環灌漑が無い場合に新利根川に流出す る 負 荷 量 の 約 64 % (20.3 × 10⁵(Sm²) \rightarrow 7.3 × 10⁵(Sm²))であった。通年で計算しても約 45%の効 果が得られることが示された。一方、灌漑ブロックに 負荷が還元されるため EC の上昇は、平均で 1.8 倍 (灌漑期 EC, 528 (μ S/cm)) \rightarrow 971 (μ S/cm))とな



Fig.4 循環灌漑による EC 負荷削減量

ることが示された。

5. 結論

以上から、循環灌漑による霞ヶ浦への EC の負荷削減 量を示し、同時に、灌漑ブロック内でどの程度 EC が増 加するかについて示すことができた。実際の農家は、EC が高い場合、塩分濃度の上昇を懸念し、収量や品質低 下につながると考えることから、EC が極端に上昇するよ うな循環灌漑の運用は、難しいと考える。循環強度を下 げることにより、霞ヶ浦に対する浄化効果は小さくなるも のの、水田の用水基準として受け入れられる EC 値で、 循環灌漑を運用することは、実現可能である。

今後の課題として、循環強度と EC との間でのトレード オフ関係を明示しながら、循環強度を提言することを考 えたい。また、EC に含まれるカチオンを特定し、塩害を 引き起こすレベルにあるかどうかを測定する必要がある。 EC は連続モニタリングが可能であるので、そのようなカ チオンの挙動と EC の変動との間に関連性を特定すれ ば、リアルタイムの制御にもつながることが期待できる。

引用文献

- [1] 金木亮一,「小講座」循環灌漑,農業農村工学会誌, Vol. 73, No.4, p297, 2005
- [2] 中村 公人, 濱 武英, 三野 徹, 木浜地区の循環灌漑シ ステムによる水質保全効果, 環境技術, Vol. 35, No. 8, pp.558-563, 2006
- [3] 濱 武英,中村 公人,三野 徹,循環灌漑を実施する水田 流域の窒素・リンの物質収支,農業農村工学会論文集, No. 250, pp.91-97, 2007

大潟村における GNSS 直進アシスト田植機を活用した水稲無落水移植による 八郎湖の環境改善①GNSS 直進アシスト田植機の無落水移植試験

長坂 善禎¹,進藤 勇人²,加藤 雅也²,齋藤 雅憲²,近藤 正³,山本 聡史³,藤原 行毅⁴,矢治 幸夫³ ¹農研機構・東北農業研究センター,²秋田県農業試験場,³秋田県立大学,⁴JA 大潟村

キーワード:GNSS, 自動操舵, 水稲, 田植機, 無落水

抄録

秋田県大潟村の八郎潟干拓地残存湖である八郎湖では八郎潟中央干拓地の営農などにより富栄養化が進み、環 境負荷の軽減が課題となっている。代かき後の濁水を水田から排出しなければ環境負荷の低減が図られると考えられ るため、大潟村に RTKGNSS の基準局を設置し、GNSS 直進アシスト田植機によりマーカーなしで、無落水で田植え作 業を行った。条件のよいところでは直進精度±5cm を達成でき、熟練オペレータの作業精度に遜色のない結果を得ら れた、植付けの精度についても、代かき水 30、43mm を落水しない条件で欠株率、植付け深は慣行の落水移植と同等 であった。また、慣行と比べて水稲生育に差はなく、収量や玄米品質の低下もなかった。

1. はじめに

54 年前に我が国第2の湖沼面積を持った八郎潟を 干拓して大潟村が誕生し、昭和48年から農地利用が始 まった。八郎潟の残存湖である八郎湖は、面積がもとの 1/5になり長年の干拓地の営農による肥料成分等の流入 により富栄養化が進み、アオコの大量発生などの問題を 引き起こしている。

田植え前の代かき作業は、耕起後の水田で土塊を攪 拌し、土塊を細かくして地下浸透を防いで水をためやす い状態にし、田植えに最適な土壌条件を実現するため に実施する。代かき後の水田の上層の水(代かき水)に は肥料成分等が含まれているが、これまでの田植え作 業では次の作業行程の目印とするマーカー跡を田 面につける必要があり、作業前に代かき水を排出

(落水)してマーカー跡をつけやすくしている。 この代かき水が八郎湖へ流入することが富栄養化の 原因の一つであると考えられており、代かき後に落水し なければ流入する肥料成分を抑制することができる。し かし、落水しないとマーカー跡をつけることはで きないため、これまで落水しないで移植作業を行 うことは想定されていなかった。

近年になって測位衛星を利用して高精度に位置情報 を得ることができる RTKGNSS を利用した自動操舵装置 がわが国でも北海道を中心に普及しており、都府県の 水田地帯でも一部導入されつつある。報告者らは、この GNSS 自動操舵装置を田植機に装着することで高精度 に直進走行できることから、マーカー不要で落水するこ となく移植作業を可能とする技術開発を進めてきた^[1]。 本研究では、GNSS 自動操舵装置を装着した田植機 (GNSS 直進アシスト田植機)の無落水移植での作業性 能を検討し、直進性、移植精度等を調査したので報告 する。

2. 方法

RTKGNSS の基準局を、秋田県大潟村にある秋田県 立大学大潟キャンパス清新寮屋上(地上約30m)に設置 し、基準局からの補正信号を5W出力のデジタル簡易 無線装置で電波を送信した(図1)。GNSS直進アシ スト田植機の移植作業については、基準局から直線距 離で2km程度離れたほ場A、5km程度離れたほ場B、 3km程度離れたほ場Cで(図2)、合計約17haの実証 試験を行った。

GNSS 直進アシスト田植機(図3)は、K 社製8 条植田 植機に T 社製自動操舵装置を装着しており、基準局か らの補正信号を受信して±2cmの精度で測位することが でき、位置情報のほか進行方位や傾斜も同時に計測し、 操舵ステアリング内蔵のモーターを駆動して自動操舵を 行った。各ほ場毎に操舵のための各種パラメータを調整 し、農家の運転で作業を行った。作業の直進部分は自 動で、旋回および外周の枕地部分は手動で作業を行っ た。GNSS 受信機から出力される位置情報をロガーに記 録し、作業後にデータ処理をして作業軌跡の精度を評 価した。

移植精度および水稲生育への影響は、大潟村現地のA、Bほ場で調査した。さらに、収穫後に収量、玄米品質などを解析した。供試水田は、いずれも重粘土(強グ

ライ土) であり、 区画は A ほ場が 1.2ha、 B ほ場が 2.5ha の水田であった。



図1 RTKGNSS の基準局(清新寮屋上)



図2 試験ほ場の配置



図3 GNSS 直進アシスト田植機

3. 結果及び考察

GNSS 直進アシスト田植機を利用した移植作業作 業の、ほ場 B での往復作業の軌跡を図 4 に作業の状 況を図 5 に示す。行程ごとの作業精度を検証したと ころ、旋回後の作業開始直後 10m を除くと、直進作 業精度は±5cm、目標経路からの偏差は二乗平均平 方根 (RMS) で 2cm であった。条件が悪いところで は±8cm 程度、RMS で 4cm であり、マーカーが見 えない状況でも十分な精度が得られた[2](表1)。



図4 GNSS 直進アシスト田植機の作業軌跡



図5 B ほ場の直進性が高い無落水移植作業

しかし、耕盤の凹凸や明渠跡など土の状態が均一 でないと蛇行することもあり、高精度作業のために は均一なほ場の準備が必要であると考えられた。ま た、B ほ場では基準局からの無線信号が途切れて測 位精度が低下することがあり、田植機の補正信号受 信アンテナの高さを約 1m 上昇させると、その後の 作業において信号の遮断はなくなった。

GNSS 自動操舵を利用したほ場 A およびほ場 B に おける無落水移植の移植精度は、それぞれ落水しな い水深 43mm、30mm の条件で、欠株率 0.7%、0.3%、 植え付け深 33mm、38mm であった^[3]。無落水移植 は落水移植と同等の精度で移植作業が可能であった ^[3](表 2、3)。

表1 B ほ場における直進アシスト田植機の直進精度評価(m)^[2]

行程数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
最大値	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.06	0.03	0.04	0.02
最小値	-0.05	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	-0.03	-0.03
平均	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RMS	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
5cm 以内の割合	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%

表2 A ほ場における移植時の苗と植え付け精度^[3]

	移	移植時の苗		移植明	移植時水深植		本数	植え	植え付け深		欠株率	
	苗 丈 (cm)	葉齡 (葉)	充実度 (mg/cm)	cm	SD	本/株	SD	cm	SD	%	SD	
無落水	11.0	3.8	1 55	4.3	(0.76)	5.4	(0.84)	3.3	(0.34)	0.7	(0.21)	
落水(慣行)	11.2		1.00	-	-	4.7	(0.55)	2.9	(0.55)	0.6	(0.28)	

1)移植時の植込本数・植え付け深、移植時水深は6地点の平均値。欠株率は1000株×6地点の平均値。

表3 B ほ場における移植時の苗と植え付け精度^[3]

	移	移植時の苗		移植	移植時水深		植込本数		植え付け深		欠株率	
	苗 丈 (cm)	葉齢 (葉)	充実度 (mg/cm)	cm	SD	本/株	SD	cm	SD	%	SD	
無落水	10.4	26	0.00	3.0	(1.14)	8.8	(1.01)	3,8	(0.64)	0.3	(0.26)	
落水(慣行)	10.4	3.0	2.33	-	-	8.0	(0.38)	3.7	(0.25)	0.2	(0.21)	
1)移植時の植込本数・植え付け深、移植時水深は6地点の平均値。欠株率は1000株×6地点の平均値。												

その後の無落水移植の生育は、落水移植と大きな 差はなかった。また、無落水移植による坪刈収量は、 A ほ場 63.3kg/a (あきたこまち)、B ほ場 64.5kg/a (トキメキモチ) と慣行の落水移植に対する低下は なく、玄米品質も慣行と同等であった^[3]。

4. 結論

大潟村内に RTKGNSS の基準局を設置し、基準局から 2~5km 離れた水田において農家の運転で GNSS 直 進アシスト田植機による田植え作業を落水することなく 行った。条件のよい場所では作業精度±5cm 以内で作 業できた。耕盤の状態によっては作業精度が低下するこ とがあった。基準局から離れた水田では、補正信号を受 信するアンテナ位置を高くすることで安定して補正信号 を受信することができた。

無落水移植作業の作業精度は、水深 30、43mm では 欠株率はそれぞれ 0.3%、0.7%でと慣行の落水移植と同 等であった。移植後の水稲生育は、慣行と比べ差はなく 収量や玄米品質の低下はみられず、良好な結果を得た。 代かき水を落水しない移植作業の環境負荷軽減効果は 次報に示す。

引用文献

- [1] 長坂善禎,玉城勝彦,齋藤正博:農作業の自動化技術の 現状と基盤整備への期待,水地の知,84(8), pp.681-684, 2016
- [2] 長坂善禎,進藤隼人,齋藤雅憲,加藤雅也,山本聡史,矢 治幸夫:大潟村現地水田における GNSS 直進田植機の無 落水移植時の作業性能について(仮題),農業食料工学会 大会講演, 2018.9.(公表予定)
- [3] 加藤雅也,進藤隼人、齊藤雅哉,長坂善禎,矢治幸夫, 田植時の湛水の有無が水稲の植え付け精度と初期成育に 及ぼす影響(仮題),日本作物学会第246回講演会, 2018.9.(公表予定)

(本研究は生研支援センター「革新的技術開発・緊急展 開事業(うち地域戦略プロジェクト)」の支援を受けて行っ ている。)

大潟村における GNSS 直進アシスト田植機を活用した水稲無落水移植による八郎湖の環境改善②無落水移植による水田排出負荷削減効果

近藤 正¹,長坂 善禎²,進藤 勇人³,加藤 雅也³,齋藤 雅憲³,藤原 行毅⁴,矢治 幸夫¹ ¹秋田県立大学,²農研機構・東北農業研究センター,³秋田県農業試験場,⁴JA 大潟村

キーワード:水田、負荷削減, GNSS, 田植機, 無落水

抄録

人郎潟干拓地残存湖(八郎湖)は、主に農地負荷の影響で富栄養化が進行し毎年アオコが発生する水質汚濁問題が慢性化している。湖へ排出される負荷は 5 月に大きく、主要因は田植え直前の強制落水による代かき濁水の流出で、有効な対策が求められてきた。本報では、田植機に GNSS による直進アシスト機能を装着することで可能となる無落水移植で濁水負荷を軽減できることを報告する。GNSS 直進アシスト機能によりマーカーが不要となり、代かき濁水を田植前に落水せず湛水状態で移植でき、水田排出負荷の抑制になる。流出水対策地区に指定されている八郎潟中央干拓地の水田で、GNSS 直進アシスト田植機を用い無落水移植を行い、水田排出負荷の抑制効果を高精度に測定した。試験年の移植時の排出抑制水深は 25mm 程であったが、比負荷での比較から 5 月の干拓地差引排出負荷量の窒素約 22%、リン約 19%、SS 約 18%の排出削減になると評価された。

1. はじめに

八郎潟干拓地残存湖(八郎湖)は農地排水負荷の影響などにより富栄養化が急速に進行し毎年アオコが発生する水質汚濁問題が慢性化し指定湖沼に指定されている。流出水対策地区に指定されている八郎潟中央干拓地(大潟村)の差引排出負荷量が測定され、1.0×10²km²の水田含む面積1.564×10²km²の干拓地から、窒素(N)は約3×10⁵kg/y、リン(P)は約6×10⁴kg/y、懸濁物質(SS)2×10⁷kg/yの排出があることが判明した^[1]。

特に5月の代かきから田植時に集中した排出があり、 7月、8月のアオコの発生に大きく影響していることが懸 念されている。除草剤散布や土粒子の沈降、乾燥硬化 防止を目的に、代かき後に約10cmの湛水状態で維持 され、7~10日後の田植え前日に強制的に落水される。 強制落水の目的は移植時に次の走行線をマーカーに より泥面に記しづけ田植機による移植を等間隔かつ直 線的に行うことで移植密度を均一にして収量を安定化 することにある。この落水が大きな負荷発生要因となっ ていた(図1)。

GNSS 直進アシスト^[2] 田植機により、移植精度、作業 性や収量の確保・向上が確認された^[3]が、加えてマーカ ー不要で代かき濁水を田植前に落水せず湛水状態で 移植ができることから、水田排出負荷の抑制が期待でき る。そこで八郎潟中央干拓地の水田ほ場で、実際に GNSS 直進アシスト田植機を用い無落水移植を行い、水 田排出負荷量の抑制効果を高精度に測定した。



図1 中央干拓地から八郎湖への濁水の流出 (2004年5月 秋田県八郎湖環境対策室撮影)

2. 方法

試験区として、2区(4ほ場)、1.25ha区2ほ場(Aほ場 落水区(慣行区)、無落水区)、2.5ha区2ほ場(Bほ場 落水区(慣行区)、無落水区)を設定した。各ほ場に水 位計、流量計、減水位計、データロガー、オートサンプ ラーを用い、水田取水および地表排水、田面水位変化 等の水収支、および、流入・流出水に含まれる栄養塩 (窒素:T-N、リン:T-P)と懸濁物質(SS)の濃度を測定し、 負荷量の出入りを求めた。負荷発生要因となる田植え 前の強制落水は、オートサンプラーを用いて10秒~30 分間隔で流量の変化に合わせて地表排水を採水し、 T-N、T-P、SS濃度をJIS K0102工業排水試験法により 測定し、流量との積から高精度に負荷量を求めた。

八郎潟中央干拓地からの負荷量を、用水取水地点と 排水地点で実測し、干拓地の差引排出負荷量(排出負 荷から農業用水などによる流入負荷を差引いた正味の 排出量)を求めることで、水田の負荷抑制量の削減効 果について定量的に評価した。

3. 結果

田植え直前の無落水管理により約 25mm(250m³/ha) の取水量と排水量の節水となった(図 2,3)。これに伴い N 0.9~2.0(平均 1.6)kg/ha、P 0.13~0.37 (平均 0.30) kg/ha、SS 45~233(平均 147)kg/ha の汚濁負荷の排出 が抑制されたと評価できる。 八郎潟中央干拓地から八 郎湖に排出される負荷量を、毎日の排水量と濃度測定 値(図 9)との積から日毎に差引排出負荷量として求め



図2 無落水区の田面水位観測結果



図3 落水区(慣行区)の田面水位観測結果



図4 田植え前の落水時の地表排水中の T-N 濃度



図5 田植え前の落水時の地表排水中のSS 濃度

た(図 11)ところ 2017 年間における中央干拓地 (1.564×10²km²)からの差引排出負荷量は、N: $3.54×10^{5}$ kg/y、P:6.06×10⁴kg/y、SS:2.44×10⁷kg/y となっ た。このうち5月が最も大きく、N:0.744×10⁵kg/y (21.0%)、 P:1.62×10⁴kg/y(26.7%)、SS:0.810×10⁷kg/y (33.2%)で あった。



図6 試験ほ場の流量測定 図7 水田落水の採水



図8 八郎潟中央干拓地の負荷量観測点





図 10 SS 日流入負荷と干拓地日排水負荷:2017 年





4. 考察

慣行水田における水管理では、代かき後の湛水深が 60~100mm に維持され、7 日目に落水し、翌日田植え 時5~10mm程度の地表水を残して移植が行われた。こ れに対し、無落水区では代かき後6日目以降は給水せ ず田面水の蒸発と浸透による減少後、40mm 程度の田 面水深を残して移植された。両調査区の差から少なく 25mmの強制落水の抑制となったことになる。

田植え前の田面水の強制落水では、水尻部の落水 枡への流れが表土を巻き上げで掃流し、高濃度の懸濁 物質を伴って排出され、その濃度は水深の低下とともに 減少する傾向を示した。流出過程での濃度の推移は N:14~2mg/L、P:3~0.5mg/L、SS:2700~170mg/L と 同時期の八郎湖水に比較し大幅に高濃度であった^[4]。 落水区AおよびBの田植え直前の強制落水による負荷 量は、N:2kg/ha、P:0.34kg/ha、SS:115~194 kg/haの

表1 田植え前の落水量、負荷量測定結果(2017年)

		水量 mm	全窒素 kg/ha	全リン kg/ha	SS kg/ha
A 無落水区	推定削減量	25.0	1.7	0.37	233
B無落水区	推定削減量	25.0	0.9	0.13	45
A 落水区	田植前集中落水	47.1	1.9	0.34	194
B落水区	田植前集中落水	29.2	2.0	0.35	115
	平均	31.6	1.6	0.30	147
	最大	47.1	2.0	0.37	233
	最小	25.0	0.9	0.13	45

排出となった。無落水区の落水抑制量を25mmとした場合にも、相応の抑制量と推定された(表1)。

単位ほ場の田植え前の強制落水による実測平均値 を無落水による削減量として、八郎潟中央干拓地の負 荷量測定結果から求めた水田 1ha あたりの比流出負荷 量(単位面積当たりの流出負荷量)とで比較すると、削 減効果は 5 月期の差引排出負荷の N:22%、P:19%、 SS:18%に相当した(図 12)。本技術の普及により大き な負荷削減効果が期待できる。

5. 結論

浄化対策の指定湖沼、八郎湖の流出水対策地区に おける排水と流入水の詳細な負荷量測定を行い、差引 排出負荷量を年間で求めるとともに、中央干拓地の水 田で、実際に GNSS 直進アシスト田植機を用い無落水 移植を行い、水田排出負荷の抑制効果を定量的に評 価した。試験年の移植時の排出抑制水深は25mm程で あったが、比負荷による比較から干拓地の5月の差引 排出負荷量の窒素(N)約22%、リン(P)約19%、懸濁 物質(SS)約18%の排出削減になると推定された。本技 術の普及により大きな負荷削減効果が期待できるものと 結論づけられた。

引用文献

- 近藤正:八郎湖の水文・水環境特性の変遷と課題,水環境学会 誌,33(9),2010
- [2] 長坂善禎,玉城勝彦,齋藤正博:農作業の自動化技術の現状と 基盤整備への期待,水土の知,84(8),pp.681-684,2016
- [3] 長坂善禎,進藤隼人,齋藤雅憲,加藤雅也,山本聡史,矢治幸夫: 大潟村現地水田における GNSS 直進田植機の無落水移植時の作業性能について(仮題),農業食料工学会大会講演, 2018.9.
- [4] 近藤正, 矢治幸夫, 長坂善禎, 進藤勇人, 加藤雅也, 齋藤雅憲, 藤原 行毅, 山本聡史: GNSS 直進アシスト田植機を用いた無落水移植に よる水田排出負荷の抑制, 農業農村工学会大会講演, 2018.9.

(本研究は、生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業 (うち地域戦略プロジェクト)」の支援を受けて、また愛知時計電機 株式会社の研究支援により実施している。)

琵琶湖の保全・再生の視点に立った森林整備指針の策定について

田中 理1

1滋賀県琵琶湖環境部森林政策課

キーワード:水資源の保全,森林保全

抄録

滋賀県の森林は県土の約半分を占め、琵琶湖の水源林として大きな役割を果たしている。この森林では近年、シ カの食害等による林床植生の消失やそれに伴う土壌流出、また、局地的な集中豪雨による山腹崩壊や流木・流出土 砂の発生、といった新たな問題が発生しており、閉鎖性水域である琵琶湖の環境に影響を及ぼしている。一方で、人 工林は利用期を迎え森林資源として充実しつつある。この森林資源を適切に活用し、同時に新たな課題に対応した 森林整備を行っていくため、これまでより一層、琵琶湖の環境に配慮する必要に迫られている。そこで今回、琵琶湖 の保全・再生の視点に立ち、適切に林業生産活動を実施していくため、3つの視点(持続的な資源利用の視点、流 木・流出土砂対策の視点、水源かん養機能維持の視点)に基づく、森林整備の指針を示すこととした。指針では、琵 琶湖の水源林の立地条件等を整理し、森林整備の基本的な考え方を示すとともに、これを実践していくため重視す べきことを記載した。

1. はじめに

滋賀県は中央に位置する琵琶湖とそれを取り囲む 山々から形成されており、降水はほぼすべて琵琶湖に 注ぎ込む地勢となっているため、森林が、琵琶湖の環 境維持に大きな役割を果たしている。

かつては里山林周辺の住民等により活用され管理されることにより、水源としての機能を発揮してきたが、林 業生産活動の低迷等により、適切に管理されずに放置 され、荒廃した森林がみられるようになってきた。

滋賀県では平成16年3月に琵琶湖森林づくり条例を 制定し、また、平成18年3月には県独自課税である琵 琶湖森林づくり県民税による事業を開始し、森林の持 つ多面的機能が持続的に発揮できるよう、手入れの進 まない人工林の間伐など、総合的な施策を行ってきたと ころである。



一方で、戦後植栽された人工林は、利用期を迎え充 実しつつある。しかしその資源は十分に活用されず、森 林の高齢化が進行しているため(図 1)、持続的な資源 利用や森林吸収源対策のための適切な更新が課題と なっている。

さらに近年、森林では、ニホンジカの食害等による林 床植生の消失やそれに伴う土壌流出、生態系の破壊 や、局地的な集中豪雨による山腹崩壊や流木・流出土 砂の発生といった災害リスクの上昇など、新たな問題が 顕在化しつつある。琵琶湖は閉鎖性水域であり、流木 や流出土砂は、漁場環境の悪化など深刻な影響を及 ぼす可能性がある(図 2)。



図 2 琵琶湖に流出した流木

近年の課題に対応し、森林資源を適切に利用してい くためには、行政だけでなく、森林面積の約9割を占め る民有林の所有者や、林業技術者など林業に関わる主 体が、今後の森林づくりの手法について、理解し共有

する必要がある。

今回、有識者の助言を受け、琵琶湖の保全・再生の 視点に立ち、3つの視点(持続的な資源利用の視点、 流木・流出土砂対策の視点、水源かん養機能維持の視 点)に基づく森林づくりの指針を示すこととした。

2. 策定の方法

前述のように、多くの森林が民有林である滋賀県で は、森林所有者の理解が不可欠あり、指針の基本的な 考え方について、わかりやすく表現する必要がある。

そこで、滋賀県の置かれた自然環境や森林立地、災 害の履歴などの現状や課題を整理し、今後、林業生産 活動を行う上での基本的な考え方について検討した。

次に、基本的な考え方を実務に適用するために、必要な情報の入手、評価方法、また、評価の区分毎に、 森林整備において重視すべきことについて検討した。

3. 結果と考察

滋賀県の自然環境等の現状や課題について、次の とおり整理した。

- ・琵琶湖を中心として外側を分水嶺が取り囲む同心円 状の地勢で、河川は延長が短く急勾配、出水しやす く渇水にも見舞われやすい。山に囲まれた地形条件 などから局地的な集中豪雨が発生しやすい。
- 急峻な地形や花崗岩等の風化しやすい地質条件が 相まって、多くの天井川を形成
- ・地震発生と密接な関わりをもつ活断層の分布密度が 高い。
- 土砂災害や水害などが発生しやすいだけでなく、閉 鎖性水域である琵琶湖の生態系や水質に影響しや すい土地条件を備える。
- ・林業生産活動が低迷する中、森林資源の蓄積量は 増加しており、資源を循環利用(「植える→育てる→ 使う→植える」サイクルのこと)し、持続的な森林整備 を行っていく必要がある。

このような滋賀県の独特な地形や近年の豪雨など災 害リスクの上昇を踏まえ、特に保安林のような伐採や開 発の制限の少ない普通林において、"減災"の思想を 取り入れることとし、「適地適業」を、森林整備の基本的 な考え方とした。

「適地適業」は林業と県土保全とを両立する林地利 用を指し、森林資源の循環利用する中で、災害リスクを 踏まえて伐採方法を選択する「適地適伐」と、その土地 の土壌や水分、地形などの条件にあった樹種や植栽方 法を選択する「適地適木」から成る。

また、適地適業を実践していくための判断基準として、 斜面単位で森林の状況を把握し、収益性と災害リスク の評価結果の組み合わせごとに、4つの象限に整理した(図2)。



図 3 収益性と災害リスクを評価した四象限図

収益性や災害リスクの判断には複雑な要素があり、この四象限図を実務に適用するためには、それぞれの軸についてわかりやすい評価方法が必要となる。

収益性については、立木の生育条件として「地位」、 作業効率として「地利」、保育状況として相対幹距比や 形状比などを指標に用いた。

災害リスクについては、人命への直接の影響として 「保全対象からの距離」と、斜面の傾斜、地形や地質等 から判断される「山地の崩れやすさ」を組み合わせて評 価することとした。この際、インターネットから入手可能な 地形図、地質図や CS 立体図(長野県林業総合センタ ーが開発した立体判読図、G 空間センターよりダウンロ ード)、防災情報(ハザードマップ)、滋賀県で作成して いる水源涵養機能評価マップ[1] などを参考にすること とした。

また、各象限において、重視するべき施業方法の例 について整理した(表1)。

次に、森林整備を実践するためのポイントを、3つの 森林づくりの視点ごとに、既存文献を元にまとめた。また、 各視点における森林づくりの実践に向け、現地調査に よる知見を反映することとした。

森林整備を実践するための調査として、持続的な資源利用の視点において、再造林の低コスト化を目指した調査、水源かん養機能維持の視点では、森林植生衰

退度調査(SDR法)[2]を実施した。

表 1 各象限における施業方法の例

象限	施業方法例
Ι	皆伐を避ける。生長の良い木を残し、土壌緊縛
	力の維持を図る。植栽により確実に更新を行う。
П	森林資源の循環利用を推進する。皆伐を行う際
	には伐採箇所の分散に配慮する。
Ш	路網整備等により収益性改善を図ることが可能。
IV	適正な密度管理や林相転換により公益的機能を
	維持する。

再造林の低コスト化を目指した調査では、県内で1箇 所モデル地区を設定し、県産コンテナ苗を用い、伐採と 造林の一貫作業システムの工程調査を実施した。この 調査では、伐採に用いた架線で資材運搬や地拵えを 行うなど、工程の短縮等に向けた実証を行った。今後、 様々な条件での知見を集積し、より滋賀県の実情に則 した、森林の更新の手法を検討する必要がある。

また、森林植生衰退度調査では、5年前と同地点180 箇所で調査を行い、ニホンジカによる植生被害や回復 状況を検証した(図 4)。地域により重点的な被害対策 や捕獲の推進に生かしていくこととしている。



図 4 平成 29 年度植生衰退度調査結果

4. おわりに

今回の指針は、今後、市町村森林整備計画における ゾーニング等に反映し、森林整備に生かされていくこと を想定している。このためには、GISを活用して、既存の 情報を効率よく、正確に得ること、また現地で得られる 情報を見る目が必要となる。考え方の普及啓発や林業 技術者の人材育成を重視するべきと考える。

引用文献

- [1] 小島、谷、川島、岩崎(2014)水源涵養機能評価手法の 開発、滋賀県森林センター業務報告第47号;1-7
- [2] 藤木(2013) ニホンジカによる森林生態系被害の広域評価手法マニュアル、兵庫ワイルドライフモノグラフ4;2-16

Soil Environmental Condition and Vegetation Recovery of the Abandoned Cropland around Komado-Shitsugen Moor, Fukushima Prefecture

Nobuo Sakagami¹, Yong Guo¹, Yusuke Takashima¹, Tomoyasu Nishizawa¹, Kazuhiko Narisawa¹ and Makiko Watanabe²

¹College of Agriculture, Ibaraki University, ²Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

Keywords: abandoned cropland, beech forest, Komado-Shitsugen moor, soil genesis, vegetation management

ABSTRACT

In the area around Komado-Shitsugen moor, beech forest was reclaimed to be the agricultural fields to increasing the vegetable productivity in 1950s and abandoned until 2000. Reforestation activities started from 2000, however, in some area, planted beech trees shows poor growth, and the area is still covered by Japanese pampas grass. In this study, we surveyed soil environmental condition in beech forest area, abandoned cropland area and transit area to reveal the factors inhibit the growth of beech trees. Topographical measurement, vegetation survey and soil sampling were carried out at 10×30 meter quadrat containing forest area, transit area and grassland area. From the edge of forest to the edge of grassland, soil profiles survey was examined in every 10m. At the profile 3, which might be affected by field grading, the top soil under bamboo grass showed relatively brownish color and moderate carbon content. On the contrary, at the profile 4 under the grassland, organic A horizon was not detected and the top soil showed brown color and low carbon content which resembles to the subsurface soil of beech forest. From these results, bamboo grass in transit area was possibility related to the formation of surface A horizon, and naked subsurface soil under the grassland supposedly inhibit the growth of planted young beech trees.

1. INTRODUCTION

In the area around Komado-Shitsugen moor, Fukushima prefecture, Japan, beech forest was reclaimed to be the agricultural fields to increasing the vegetable productivity in 1950s^[1]. Deforestation continued until 1976, and surface soil layer was lost by logging and field grading. Komado-Shitsugen moor was designated as a national natural treasure in 1970, and agricultural activities around the moor was gradually decreased. The catchment area was additionally designated as a national natural treasure by 2000, and the reclaimed cropland was eventually abandoned. Then reforestation activities started in abandoned field. However, in some area, planted beech trees shows poor growth, and the area is still covered by Japanese pampas grass. In this study, we surveyed soil environmental condition in beech forest area, abandoned cropland (grassland) area and transit area (covered by bamboo grass) to reveal the factors inhibit the growth of beech trees.

2. METHOD

Topographical measurement, vegetation survey and soil sampling were carried out at 10×30 meter quadrat containing forest area, transit area and grassland area (Fig. 1). Fig. 2 shows the micro-topography of the quadrat measured. From the edge of forest to the edge of grassland,

soil profiles survey was examined in every 10m (totally 4 profiles).







Fig. 2 Micro-topography of the quadrat

Soil samples were collected from each soil horizons, and then air-dried and sieved under a 2 mm sieve for the soil analyses. Furthermore, the quadrat was subdivided to the sub-quadrat (5×5 m), and the distribution of soil hardness and carbon content at each depth (10cm, 20cm, 30cm) at each nodes.

3. RESULTS and DISCUSSION

Fig. 3-6 shows the soil profiles at the beech forest, transit areas under bamboo grass (one near forest, and one near grassland), and grassland. Organic A horizon (>10cm) was detected at the profile 1 under the forest which was not affected by reclamation. It showed typical forest soil with low pH and high content of total carbon and nitrogen. At the profile 2, surface A horizon was also detected but higher pH comparing to profile 1 was possibly affected by deforestation and vegetation change. At the profile 3, which might be affected by field grading, the top soil under bamboo grass showed relatively brownish color and moderate carbon content. On the contrary, at the profile 4 under the grassland, organic A horizon was not detected and the top soil (BA horizon) showed brown color and low carbon content (<5%) which resembles to the subsurface soil of beech forest. From these results, bamboo grass in transit area was possibility related to the formation of surface A horizon, and naked subsurface soil under the grassland supposedly inhibit the growth of planted young beech trees. We will obtain further information on forest and grassland ecosystem and biogeochemical process of soil formation and vegetation recovery.

		Deprh cm	Soil Color	рН (H ₂ O)	T-C %
A	A	O-11	10YR2/3	3.9	24
В	в	11-19	10YR3/3	4.6	13
c	С	19-50+	10YR4/6	4.7	1.5
Sec. 1					

Fig. 3 Soil profile under beech forest

			Deprh cm	Soll Color	рН (H ₂ O)	т-с %
A		A	0-12	10YR2/2	4.3	21
в 🧱		в	12-21	10YR3/3	4.8	8.5
с	23	С	21-50+	10YR4/6	4.8	3.4
	1					

Fig. 4 Soil profile in transit area (near forest)

A MA		Deprh cm	Soil Color	рН (H ₂ O)	т-с %
	A	0-4	10YR2/3	5.0	15
9.90	С	4-30+	10YR4/6	5.5	4.0
с					
Contraction in the second					

Fig. 5 Soil profile in transit area (near grassland)

and the second		Deprh cm	Soil Color	pH (H ₂ O)	т-с %
BA	BA	0-11	10YR4/3	5.2	4.6
3	в	11-30	10YR4/6	5.4	3.8
	С	30-50+	10YR4/6	5.5	1.8
1 1					

Fig. 6 Soil profile under grassland

REFERENCES

[1] Investigation and Review Committee of Komado Shitsugen Moor Protection: A Research Reports of Komado Shitsugen Moor Protection, 2004. (in Japanese)

Phosphorus Runoff Loads from Paddy Fields and Forested Watersheds in Sengari Reservoir Basin

Masayuki Fujihara¹, Koichi Unami¹, Junichiro Takeuchi¹, Mayuko Ohishi¹, Keiko Hashimoto¹, Hironobu Ueshiro², Taketoshi Shimizu², and Takuya Oda²

> ¹Graduate School of Agriculture, Kyoto University ²Water Quality Examination Laboratory, Kobe City Water Works Bureau

Keywords: phosphorus, paddy, forest, and Sengari reservoir

ABSTRACT

In Sengari Reservoir supplying domestic water to Kobe City, Japan, total phosphorus (TP) concentration remains higher than a prescribed environmental standard value. Field survey was conducted to estimate TP loads emitted from a paddy field and from a forested watershed in the reservoir basin, measuring TP concentration and discharge in an agricultural drainage canal as well as in a mountain stream. The two measurement points were located 6.2 km apart in different sub-catchment basins of the reservoir. Water samples were collected once a week during the irrigation season (from May to mid-September) and also occasionally in rainy days during the non-irrigation season. Data loggers were operated to record water depths with an interval of 10 minutes, to determine the discharges with relevant hydraulic methods. The total TP loads from the paddy field were estimated at 6.0 kg/ha and at 6.2 kg/ha during the irrigation and the non-irrigation seasons, respectively, while that from the forested watershed was estimated at 0.49 kg/ha. As a result of hydrological analysis, it is concluded that less frequent heavy rainfall events cause significant intensification of TP loads both from the paddy field and from the forested watershed.

1. INTRODUCTION

Sengari Reservoir, whose storage volume is 11.6 millions m³, was constructed for supplying domestic water to Kobe City in 1919. The amount of water supplied from the reservoir is 0.119 millions m³ a day. Hatsuka River and Hazu River, whose lengths are 26 km and 9 km, respectively, are major rivers flowing into the reservoir. Catchment area of the reservoir is 94.5 km², extending to 4 cities (Kobe, Sanda, Sasayama, and Takarazuka) and 2 towns (Inagawa and Nose). Around 86% and 10% of the catchment area are forest and paddy fields, respectively.

Total Phosphorus (TP) concentration in the reservoir has been over an environmental standard figure (= 0.01 mg/L) assigned to the reservoir in 2002. Phosphorus is the limiting nutrient in the reservoir. As a first step to set up a countermeasure against water quality degradation in the reservoir, TP runoff loads from a paddy field and a forested watershed have been investigated for several years. This paper presents temporal change of water discharge and phosphorus concentration, on the basis of the results in 2017.

2. STUDY AREA AND METHOD

2.1 Paddy Field

Study field composed of 5 plots for paddy is located along Hazu River and agricultural water is pumped up from the river. Total area of the paddy field is 1.6 ha and it drains water into a drainage channel. A flow gauging weir was set at the end of the drainage channel. Overflow depth at the weir was measured every 10 minutes using a pressure gauge and then the discharge was calculated from an H-Q curve of the weir. Water in the channel and in the river was sampled around 1 week interval during irrigation season, which is from May to mid-September. In non-irrigation season, drainage water was sampled in four rainfall events, since water in the channel flows only when it rains.

2.2 Forested Watershed

Study field for forested watershed is set in a part of Sueyoshi River basin, which is a tributary of Hatsuka River. The area is 111 ha. A pressure gauge was installed at a ground sill in the river and water depth was measured every 10 minutes by the gauge. Water was collected 25 times from May to December and 15 discharge measurements were conducted to make an H-Q curve.

3. RESULTS

3.1 Paddy Field in irrigation season

Figure 1 shows daily discharge, TP, particulate phosphorus (Particulate-P) and dissolved phosphorus (Dissolved-P) concentrations in the drainage channel and TP in the river during irrigation season in 2017. As for the phosphorus concentration, **Figure 1** illustrates that most



Fig.1 Discharge and phosphorus concentration during irrigation season



■ Particulte-P □ Dissolved-P

Fig.2 Phosphorus runoff load during irrigation season

part of TP consists of Dissolved-P. Figure 1 also shows the concentration of TP seems gradually increasing from the beginning of irrigation season to mid-July and then rapidly decreasing toward the end of irrigation season. Average concentration of TP in July is over 2 mg/L and it is reduced to 0.5 mg/L at the end of irrigation season. Since the concentration of TP in the river remains low, it is clear that TP concentration increases during water flows through paddy fields. Maximum discharge was observed on June 10, it seemed to be caused by draining water for preparing rice transplanting. Large discharges observed on July 4 - 5, and September 12 were due to rainfall event. Another large discharge observed on July 16 was caused by large amount of water pumped up from the river, since a pump worked continuously for 8 hours. Total discharge of 5 days above mentioned accounts for half of the total discharge in irrigation season.

Daily phosphorus runoff load calculated from discharge and interpolated phosphorus concentration between consecutive data is illustrated in **Fig.2**. Sum of the loads on June 10, July 4, 5 and July 16, 17, which are the top 5



Fig.3 Relation between TP and precipitation

daily loads, accounts for half of total loads in irrigation season. Total TP load was 6.0 kg/ha, 91% of which was Dissolved-P.

3.2 Paddy Field in non-irrigation season

In non-irrigation season, water and TP runoff from the paddy field occur only when it rains. Thus, we conducted intensive sampling of water during 4 rainfall events and then proposed a relation between precipitation and TP load for the paddy field, as shown in **Fig.3**. The regression curve in **Fig.3** is expressed as

$$TPL = 214\ln(r) - 454 \qquad (r \ge 8.4) \tag{1}$$

where TPL is TP load (g/ha) and r is total precipitation (mm) in a rainfall event.

Using Eq.(1), we calculated TP load in every rainfall event as shown in **Table 1** and estimated total TP load is 6.2 kg/ha, half of which was discharged in 6 rainy days.

3.3 Forested watershed

Figure 4 shows a relation between river discharge and TP concentration, obtained from 24 observations. A linear regression gives the relation expressed below,

$$TP = 0.0316Q + 0.0071 \tag{2}$$

where TP is TP concentration (mg/L) and Q is river discharge (m³/s).

Using Eq. (2), we calculated TP runoff loads from May 8 to December 31, 2017 and illustrate daily TP load with river discharge in **Fig.5**. Maximum river discharge and maximum TP load were observed on October 21-22, when the 21st typhoon hit Sengari Reservoir basin. Half of total TP load, which was 40 kg for about 8 months, was discharged during the flood caused by the typhoon, though 15% of total river discharge was observed at that time. Total load of Particulate-P was about 85% of total TP load, though most of the TP consists of Dissolved-P at a normal flow rate. In addition to that, we estimated one third of the TP runoff load originated from TP in rain, whose concentration was about 0.008mg/L^[1]. With additional observations, we estimated yearly TP load from the

Date in 2017	Rain (mm)	TP(g)	Date in 2017	Rain (mm)	TP(g)
Jan. 8	9.5	27.8	Sep. 17	103	590
Jan. 14-16	43	350	Sep. 28	15.5	133
Jan. 29	11.5	68.7	Oct. 2	70	455
Feb. 5	11.5	68.7	Oct. 6	31	280
Feb. 20	10	38.8	Oct. 15-16	27.5	255
March 15	18	166	Oct. 17	15.5	133
March 21	33	296	Oct. 19	25	235
April 7	15	126	Oct. 21-23	243	722
April 11	13	94.9	Oct. 24-25	11.5	68.7
April 17	94	518	Oct. 28	14.5	118
April 26	41.5	343	Oct. 29	63.5	434
			Nov. 14	15	126
			Nov. 22-23	12	77.8
			Dec. 8-9	18	165
			Dec. 24	33.5	297

Table 1 Precipitation and TP load in non-irrigationseason of 2017

forested watershed at 0.49 kg/ha.

4. DISCUSSION

TP runoff load from the paddy field in irrigation season (134 days) is almost the same as that in non-irrigation season (222 days). This indicates we have to pay attention to reduce the runoff load from paddy field not only during irrigation season, but also during non-irrigation season. Around half of total TP load was discharged in 10 days. This can be said TP load is negligible most of the year. From **Fig.2**, relatively large runoff load was caused by poor water management on June 10 and July 16, then conducting proper water management could reduce the load in irrigation season. For non-irrigation season, installing a low-height plate for controlling drainage at the outlet of each plot could be a measure to reduce the runoff load, which also lead to flood mitigation by paddy field ponding.

As for TP runoff load from the forested watershed, it is difficult to take an effective measure, since half of the load was occurred during flood caused a typhoon. From **Fig.4**, we could make the gradient of the regression line milder by proper forest management to prevent from slope erosion in heavy rain, then it would lead to reduction of TP runoff load.



Fig.4 Relation between river discharge (Q) and TP



Fig.5 TP load and river discharge

5. CONCLUSION

To investigate water and TP runoff loads in the catchment of Sengari Reservoir, where water quality does not satisfy the environmental standard, we conducted field observation in the paddy field and in the forested watershed. Results from the observation revealed that high TP runoff loads both from paddy and forest did not frequently occur but did only in several days a year when it rained heavily. This indicates sum of TP load in several days accounts for major part of the total load.

6. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16K15007.

REFERENCES

 S. Umemoto, Y. Komai and T. Inoue: Nitrogen and Phosphorus Loads in Urban Area and Forested Area by Wet Deposition from Every Rainy Event and Total Deposition, Journal of Japan Society on Water Environment, Vol. 24, pp. 300-307, 2001.

Observation and Modeling of Phosphorus Runoff Loads from Sengari Reservoir Basin

Junichiro Takeuchi¹, Keitaro Goto¹, Baobab K. Kimengich¹, and Masayuki Fujihara¹

¹Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Keywords: phosphorus runoff, landuse, linear multiple regression analysis

ABSTRACT

Sengari Reservoir basin, Hyogo Prefecture, Japan, is an agricultural watershed dominated by a mountainous area, and has a problem of water quality, especially of phosphorus, in Sengari Reservoir. In the basin, temporal and spatial distribution of phosphate-phosphorus (PO₄-P) concentration along the rivers flowing into the reservoir was investigated regularly. From the measured results, it was found that PO₄-P is high during the irrigation period specifically in sub-basins where domestic waste water is treated by septic tanks, although PO₄-P is low throughout the year in sub-basins where domestic waste water is treated in rural sewages. With the measured data and GIS data of landuse and altitude, linear multiple regression models whose explanatory variables are the area ratio of landuse type to the catchment area of a sampling point, the area ratio of the catchment area of the sampling point to the whole area of the sub-basin, and a dummy variable that distinguishes between rural sewage and septic tank sub-basins were formulated. The estimated PO₄-P distribution along rivers shows good agreement with the measured one except for some outliers, and the obtained coefficients imply that Paddy Field and Residential Area are major source of PO₄-P.

1. INTRODUCTION

Excessive nutrients inflow into closed water areas causes water quality degradation and eutrophication, and those cause environmental problems such as water-bloom and red tide. Especially in a case of reservoirs for domestic water, the problem becomes serious because much cost is required to treat water contaminated by cyanobacterium. Sengari Reservoir, which is one for drinking water and is classified into Category II in the environmental standard for lakes, is one of reservoirs having a eutrophic problem. According to Fujiwara (2014)^[1], phosphorus is the limiting factor for reproduction of algae, and more than 90% of TP flowing into the reservoir is in a form of phosphate-phosphorus (PO₄-P). Various countermeasures such as underwater aeration and purification by vegetation has been conducted to reduce phosphorus in the reservoir. However, regardless of the long-term countermeasures, total phosphorus (TP) does not satisfy the standard value 0.01 mg/L.

In the Sengari Reservoir basin, there is no major industrial load source, and most part of environmental load comes from non-point sources such as agricultural fields and forests. Hence, it is difficult to grasp actual condition of the load in the basin. In this study, a regular water quality measurement along rivers flowing into the reservoir was conducted to ascertain the temporal and spatial distribution of PO₄-P, and linear multiple regression models were made to estimate phosphorus load from different items of landuse.

2. METHOD

2.1 Study area

Sengari Reservoir is located in the north of Kobe City, Japan. It has 11.6 millions m³ water storage and supplies 0.119 millions m³ domestic water a day to Kobe City. Two major rivers, Hatsuka River and Hazu River, flow into the reservoir, and total catchment area of the reservoir is 94.5 m². In the present study, the basin is divided into seven



Fig. 1 Sengari Reservoir basin

Sub-basin	Area (km ²)	Forest	Paddy Field	Residential Area	Golf Course	Upland Field	Waste Land	Lake Pond	Others
Hatsuka	60.67	87.52	9.30	1.51	0.77	0.14	0.38	0.14	0.22
Sueyoshi	6.74	86.46	8.76	0.41	4.24	0.00	0.00	0.14	0.00
Hazu	8.41	91.66	8.23	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sasori	5.26	83.93	13.71	1.52	0.51	0.17	0.00	0.00	0.17
Nagatani	3.13	74.77	13.23	2.15	9.85	0.00	0.00	0.00	0.00
Oharano	3.60	70.03	21.16	7.05	0.00	1.26	0.00	0.00	0.50

 Table 1
 Landuse ratio of Sengari Reservoir basin (%)

sub-basins as shown in **Fig. 1**, and water samples were collected in six sub-basins. The six sub-basins are referred to as Hatsuka, Sueyoshi, Hazu, Sasori, Nagatani, and Oharano sub-basins after the rivers passing through each sub-basin. The ratio of the areas occupied by different types of landuse to the whole area of each sub-basin is shown in **Table 1**. Forest is the dominant landuse, and paddy field follows it. The six sub-basins are divided into two groups in regards to domestic waste water treatment. One is the treatment by rural sewages, and the other is one by septic tanks. Hatsuka, Sueyoshi, and Hazu sub-basins belong to a rural sewage group, and Sasori, Nagatani, and Oharano sub-basins to a septic tank group.

2.2 Field Observation

Water samples were collected along the rivers in the six sub-basins regularly, i.e., once a month in the irrigation period and once in two months in the non-irrigation period. Rainy days and days just after rainfall are avoided to obtain data in an ordinary water level. The location of sampling points is shown in **Fig. 1**, and the index for sampling points is given from upstream to downstream in each sub-basin. The concentration of PO₄-P of the collected water samples were measured with Digital Pack Test (DPM-PO4-PD, Kyoritsu Chemical-Check Lab., Corp.) or Photometer (YSI 9500, xylem), and the measuring ranges are 0.03 - 1.00 mg/L and 0.00 - 1.30 mg/L, respectively, with 0.01 mg/L resolution.

2.3 Linear Multiple Regression Model

At first, the following steady model that estimates the PO₄-P concentration at a sampling point is assumed, based on the unit value method.

$$cQ = R \sum_{i} \alpha_{i} c_{i} A_{i} \tag{1}$$

where *c* is the concentration of PO₄-P in the river water at a sampling point, $Q(=\alpha RA)$ is the discharge, *R* is the amount of rainfall, α is the runoff ratio to the rainfall, *A* is the catchment area of the sampling point, and the subscript *i* (\in {forest, paddy field,...}) means a member of the landuse set. The variables without a subscript *i* is the one of the whole catchment area. Being divided by Q and an error term u is added, this model could be regarded as a linear multiple regression model.

$$c = \sum_{i} \beta_i X_i + u \tag{2}$$

where $\beta_i (= \alpha_i c_i / \alpha)$ are the regression coefficients, and $X_i (= A_i / A)$ are the explanatory variables.

In addition, other explanatory variables could be considered in the model. Here, the area ratio to the whole sub-basin^[2] and the dummy variable that represents type of waste water treatment are considered.

$$X_{\text{arearatio}} = A / A_{\text{sub-basin}}$$
 and $X_{\text{dummy}} = \begin{cases} 0 \text{ rural sewage} \\ 1 \text{ septic tank} \end{cases}$ (3)

where $A_{sub-basin}$ is the area of the whole sub-basin to which the objective sampling point belongs. In this study, eight models listed in **Table 2** are tried. In Model 1 and 2 groups, three and four major landuse types are used as the explanatory variables, respectively. The performance of the models is evaluated by AIC (Akaike Information Criteria).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Field Observation

Figure 2 shows the measured PO₄-P concentration. It shows that the concentration is high during the irrigation period (from May to August) especially in the septic tank sub-basins, and that the concentration and the variance in the rural sewage sub-basins are low.

Table 2Multiple regression models

Model	Explanatory variables
1-1	Forest, Paddy Field, Residential Area
1-2	Model 1-1 + area ratio
1-3	Model 1-1 + dummy variable
1-4	Model 1-1 + area ratio, dummy variable
2-1	Forest, Paddy Field, Residential Area, Golf Course
2-2	Model 2-1 + area ratio
2-3	Model 2-1 + dummy variable
2-4	Model 2-1 + area ratio, dummy variable



Fig.2 PO₄-P concentration in Sengari Reservoir basin

3.2 Linear Multiple Regression Model

The obtained model performances (AIC) and coefficients of the multiple regression model are shown in **Table 3**, and generally the model performance becomes good as the number of the explanatory variables increases. But in Model 2 the coefficient for Golf Course is negative, which is an unrealistic result. The obtained coefficients imply that Paddy Field and Residential Area are major sources of PO₄-P. The measured and estimated PO₄-P concentrations along the rivers are shown in **Fig. 3**. These figures show relatively good estimation in the rural sewage sub-basins (from 1 to 50) compared with that in the septic tank subbasins (from 51 to 92). Especially, there are large deviations around 58 and 78. Actually, there is a livestock waste treatment site and there was a cowshed near 58 and 78, respectively.

4. CONCLUSION

In this study, the temporal and spatial distribution of PO₄-P concentration was investigated in the Sengari Reservoir basin, and linear multiple regression models based on the unit value method were formulated. The estimated PO₄-P distribution shows good agreement with the measured one except for some outliers derived from livestock waste.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors express their sincere gratitude to Water Quality Examination Laboratory, Kobe City Water Works Bureau for provision of data. This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16K15007.

REFERENCES

- T. Fujiwara: Phosphorus in Sengari Reservoir, Report of Civil Society for Muko River, Vol. 2, pp. 20-22, 2014 (in Japanese).
- [2] H. Mochizuki, H. Takahashi, and S. Yoshikawa: Development of prediction model for water quality in watersheds based on proportion of area by land use, Human and Environment, Vol. 39, pp. 2-8, 2013.

Table 3	Model	performance a	and	coefficients

 Model	AIC	Forest	Paddy Field	Residential Area	Golf Course	Area Ratio	Dummy Variable
1-1	-298.2	0.034	0.373	0.414	-	-	-
1-2	-306.9	0.051	0.485	0.384	-	-0.048	-
1-3	-312.0	0.027	0.251	0.185	-	-	0.043
1-4	-313.8	0.039	0.345	0.215	-	-0.029	0.034
2-1	-296.5	0.036	0.364	0.412	-0.005	-	-
2-2	-305.4	0.053	0.475	0.382	0.002	-0.049	-
2-3	-318.6	0.036	0.160	0.093	-0.178	-	0.059
3-4	-318.9	0.044	0.239	0.124	-0.151	-0.022	0.050



Fig.3 Measured and estimated PO₄-P concentration

諏訪湖における底質中リン濃度の経年変化

市川雄貴1•吉原茜1•宮原裕一2

'信州大学理学部理学科物質循環学コース・'信州大学山岳科学研究所

キーワード:窒素・りん循環,諏訪湖,下水道,底質

抄録

水質浄化過程にある諏訪湖において、底質中リンの経年変化および湖内でのリンの動態を明らかにすることを目的 として、湖内 22 地点において底質中のリンを形態別に定量した。1970 年代後半の調査結果と比較すると、近年の底 質中リン濃度は約 4 割減少していることが確認された。これは流域での下水道の普及が進み、諏訪湖へのリン負荷量 が減少したためと考えられた。この間に大きく減少したリンは主に非アパタイトリンであった。非アパタイトリンは地点間 での濃度差が大きかった。非アパタイトリンは平均粒径と負の強い相関が認められ、湖内では細かな粒子と共に挙動し ていると推察された。

1. はじめに

水中のリンと窒素は富栄養化に関わる主要な栄養塩 であり、水質浄化のためには、水中のリンおよび窒素濃 度の低減が不可欠である。諏訪湖は長野県中央部に位 置する富栄養湖である。諏訪湖では集水域に下水道が 整備されたことで、湖水中のリン濃度は 2000 年ごろまで は大きく減少し、それ以降は環境基準値(50µg-P/L)と同 程度で推移している(図1)[1]。



図 1. 諏訪湖における季節別の湖水中全リン濃度の経年

変化(宮原, 2018)

底質に含まれる成分の変化は水質よりも遅いが,湖内 でのリンの循環と密接な関係にある。先行研究(宮原ら, 2016)より,湖心の底質中リン濃度が過去と比べ減少し ていることが報告されている[2]。しかし,諏訪湖では湖 全域における底質中リン濃度の変化は明らかになって いない。

本研究では水質浄化過程にある諏訪湖において,湖 全域での底質中リンの分布と経年変化及びリンの湖内 での動態を明らかにすることを目的とし,湖内底質中のリ ンを形態別に定量した。

2. 方法

2016年 9~10 月と2017年 5~6月に湖内 22 地点で エクマンバージ採泥器を使用し,底質を採取した(図 2)。 これら22地点は,1978~1979年に長野県によって調査 された場所である(長野県衛生公害研究所,1982)[3]。



図2. 底質の採取地点

採取した底質は静置後,上澄みを取り除き,75℃で乾燥させた。乾燥試料は小松ら(2009)のリン抽出法に準じ, CDB (citrate-dithionite-bicarbonate), NaOH, HCl溶液を用いてリンの抽出を行い,画分ごとにリン定量を行った[4]。ここで,CDB 抽出無機態リン(鉄結合リン:Fe-P)及び NaOH 抽出無機態リン(アルミニウム結合リン:Al-P)は非アパタイトリン, HCl 抽出無機態リン(カルシウム結合リン:Ca-P)はアパタイトリンとした。

また, 福原らが 1977 年に湖心でコア採取した底質(コ ア長 11cm) についても同様に形態別リンの定量を行っ た。

3. 結果

諏訪湖全域における底質中の全リン濃度の経年変 化をみるために本研究結果を過去の研究結果と比較 した[3]。図3に1978,1979,2016,2017年の全リン 濃度を示した。それぞれの全リン濃度(平均±標準偏 差)は、2902±637、3178±1024、1789±360、1751±422 µg·P/g·dry であった。また、図4には1977年、2016 年秋、2017年春に湖心で採取した試料の形態別リン 濃度に示した。なお、図3において1978、1979年 と、本研究では測定方法が異なるが、図4で示した 本研究の結果と矛盾しない。これらより、近年では 1970年代後半と比べ、表層底質中の全リン濃度がお よそ4割減少していると言える。また、近年では1970 年代後半よりも地点間での全リン濃度のばらつきが 小さくなっていた(図3)。



(1978, 1979年は長野県衛生公害研究所, 1982)





4. 考察

諏訪湖底質中の全リン濃度は 1970 年後半と比べ ると大きく減少していた。諏訪地域における水洗化 率の経年変化を図 5 に,諏訪湖の全リンの発生負荷 量を図 6 に示した[5][6]。諏訪湖へのリン発生負荷量 は下水道が諏訪地域に広く普及し始めた 1986 年か ら 2011 年にかけて 247kg/day から 56kg/day に減少 している。また図 1 に示したように 2000 年以降は 湖水中の全リン濃度が低く維持されていることから, 諏訪湖では湖水と底質間でのリンの循環量が減少し ていると考えられた。

1977 年と比べ近年では非アパタイトリン濃度が 大幅に減少していたことから(図 4), 諏訪湖全域での 全リン濃度の減少には非アパタイトリンの寄与が大 きいと考えられた。また, 非アパタイトリンは平均粒 径と負の相関が見られたことから, 底質内で細かい 粒子として挙動していると考えられた。

下水道が普及したことによりそれまで主なリン供 給源の一つであった生活雑排水が直接諏訪湖へ流入 する事がなくなり,諏訪湖へのリンの負荷量,そして 湖水中の全リン濃度が減少した。このことにより,湖 水と底質との間でのリン循環に関わるアパタイトリ ンの量が減少したのではないかと考えられた。



(第7期)より)

5. 結論

諏訪湖の底質中のリンは 1970 年代後半と比較す ると大きく減少していた。それには諏訪地域におけ る下水道の普及により, 諏訪湖へのリン負荷量, 湖水 中のリン濃度が低下したと考えられる。また, 湖水と 底質でのリンの循環に関わる非アパタイトリンの減 少も認められた。

引用文献

- [1] 宮原裕一,諏訪湖定期調査(2012~2016)の結果,信州大
 学山岳科学研究所,信州大学山地水環境教育センター
 研究報告,第11号,pp8,2018
- [2] 宮原裕一,吉田知可,長野県諏訪湖における水質と底質の経年変化,日本陸水学会第81回大会発表,2016
- [3] 長野県衛生公害研究所,諏訪湖の富栄養化に関する研究, 1982
- [4] 小松伸行,石井裕一,渡邊圭司,本間隆満,北村立実, 根岸正美,岩崎順,富栄養化した霞ケ浦の堆積物に養殖 の痕跡を残すリンの形態と分布,陸水学雑誌,69(3): 193-208,2009
- [5] 諏訪湖流域下水道事務所 <u>https://www.pref.nagano.lg.jp/seikatsuhaisui/infra/suido-denki/gesuido/suwako/index.html</u>, (2018, 5/7 閲覧)
- [6] 環境省,諏訪湖に係る湖沼水質保全計画 平成 29~33 年度(第7期)

<u>https://www.env.go.jp/water/kosyou/keikaku/html/ind</u> <u>ex.html</u>, (2018, 5/7 閲覧)

土壌の粒子状リンの化学形態および藍藻による利用

安達 遥」,橋本 洋平1

1東京農工大学

キーワード:リン循環, 富栄養化, 面源負荷, 生物利用性

抄録

湖沼や海域へのリン・窒素の過剰な流入に伴う富栄養化現象は, 藍藻の大量増殖を誘発し問題となっている. 効果的 な富栄養化対策を実施するためには, リンの排出源の特定が容易である点源負荷だけでなく, 面源負荷に分類される 農地由来のリンにも着目する必要がある. 農地由来のリンは土壌物質に吸着していると考えられるが, 溶存態のリンと は藍藻による利用性が異なる. 本研究では, 土壌由来のリンの存在形態を調べ, 藍藻による利用性を解明することを 目的とした. 土壌の粒径 20~1000 nm の微粒子に存在するリン(粒子状リン)は, 鉄やアルミニウムの鉱物に吸着して存 在することが X 線吸収微細構造法によって明らかになった. また, *Synechococcus* sp.の培養試験によって, 鉄の酸化 物に吸着したリンは, 短期的に藍藻の生育を抑制する可能性が示唆された. したがって, 農地由来のリンの一部は, 酸化鉄鉱物に吸着した形態で湖沼等へ輸送されて, 藍藻の生育に影響を及ぼすと考えられる.

1. はじめに

近年,湖沼や海域へのリン(P)や窒素の過剰な流入に よる富栄養化現象は,藍藻の大量増殖を誘発し,水質 悪化などの環境問題を引き起こしている.日本では,湖 沼の富栄養化問題の解決を目的として法律が制定され, 排出源が特定できる点源負荷を対策の中心に据えてき た.しかし,P 濃度の環境基準の達成率は,50%と依然 低い.その要因として,排出源の特定が難しい面源負荷 への対策が不足していることがあげられる.面源負荷に は農地や山地などが分類される.多くの農地には施肥 により,高濃度の P が蓄積している.先行研究では,山 地など他の面源と比較して,施肥が盛んに行われる農 地に単位土壌当たりの水抽出態 P が多く含まれるという 報告がある^{III}.したがって,単位面積当たりで考えた場 合,農地の土壌を介した人為的な P の供給による水域 への負荷は,他の面源負荷よりも大きいと考えられる.

土壌から水域への P の流出には、土壌の粘土鉱物な どの微粒子に吸着した P が重要になる^[2]. 土壌に存在す る粒子の中でも、粒径が 1~1000 nm 程度の微粒子は、 土壌から水域へ元素を輸送する担体となることが知られ ている. したがって、粒径 1~1000 nm 程度の微粒子に存 在する P(粒子状 P)の生物利用性に着目することで農地 由来の P の負荷を予測できる.しかし, 粒子状 P の生物 利用性に関する既往の研究においては, 土壌由来の複 雑な成分から成る粒子状 P を分画した試料を用いて生 物利用性を評価するものが多く^[3], 粒子状 P を構成する 土壌成分とその成分それぞれの生物利用性については, ほとんど明らかにされていない.本研究では, 農地土壌 から流出する粒子状 P の存在形態を詳細に分析し, そ の代表的な存在形態における生物利用性を明らかにす ることで, 土壌由来の P が流域の環境へ及ぼす影響を 評価することを目的とした.土壌に普遍的に存在する代 表的な酸化鉄鉱物に P を吸着させた試料を調整し, 藍 藻の生育に及ぼす P の利用性を検討した.

2. 方法

2.1. 農地土壤由来の粒子状 P の化学形態

農地土壌として水田の土壌を用いた. 灰色低地土お よび褐色低地土に分類される 6 つの水田土壌から, 粒 径 20~1000 nm 程度の微粒子を分画した. 風乾した土壌 にイオン交換水を添加・振とうして懸濁液とし, 1 µm 孔径 のメンブレンフィルターでろ過して, 粒径 1 µm 以下の粒 子を含むろ液(水抽出画分)を得た. 得られたろ液から超 遠心分離機を用いて, 粒径 20~1000 nm の微粒子を分 離し(粒子状 P), 上澄み液(< 20 nm)を溶存態画分とした. ろ液(<1000 nm)と上澄み液(<20 nm)の各種元素濃度を 測定し、その濃度差から粒子状 P 画分(20~1000 nm)の 元素濃度を算出した.分離した微粒子を凍結乾燥して、 X線吸収微細構造(XAFS)分光法に供試し、粒子状Pお よび鉄の化学形態をバルク土壌とともに特定した.

2.2. 酸化鉄に吸着した P を用いた藍藻培養試験

実験に用いた藍藻は,独立行政法人国立環境研究 所微生物系統保存施設より購入した無菌培養株 Synechococcus sp.の NIES-945 を使用した.培養方法に ついては,同施設の HP 内の記載を参考にした^[4].また 無菌にすべき操作は,バイオクリーンベンチおよびオー トクレーブを用いて行った.本研究中の全ての培養は, 器内温度を 15°C に調整したインキュベーター内で,照 度 1500 lux,明暗周期が 10 時間対 14 時間の光条件下 で行った.

P 飢餓状態で培養後の藍藻 Synechococcus sp.を用 い,Cornell and Schwertmann (2000)の方法で合成した酸 化鉄鉱物(ferrihydrite)に P を吸着した微粒子を P の供 給源とし,この添加量を変えた実験処理を設定した (+FhP 区, +1/2FhP 区).これ以外には,溶存態 P のみ添 加した区(+P 区)および P 無添加区の合計 4 処理区を設 定した.培養開始後,定期的に培養液を採取し,藍藻の 増殖量評価のためにクロロフィル a 濃度を測定した.クロ ロフィル a に関しては,培養液を 0.45 μm ガラス繊維フィ ルターでろ過後,エタノール抽出液を蛍光分析にて求 めた.溶液中の溶存態 P および Fe 濃度, pH および Eh を測定した.

3. 結果

3.1. 農地土壌由来の粒子状 P の濃度

供試土壌の全 P 濃度および粒子状 P 濃度を表 1 に 示した.

表1. 土壌の全 P 濃度および粒子状 P 濃度

	土壤種類	土性	全リン濃度	粒子状リン濃度
			g kg ⁻¹ soil	g kg ⁻¹ colloid
土壤 C	灰色低地土	軽埴土	1.22	1.40
土壤 F	灰色低地土	軽埴土	2.77	0.00
土壤 G	褐色低地土	埴壤土	1.83	2.20
土壤 〇	灰色低地土	埴壤土	1.61	2.30
土壤 T	灰色低地土	砂質壤土	2.04	0.70
土壤 V	灰色低地土	砂質壤土	0.49	0.50

土壌の微粒子中の P 濃度は, それぞれ, 土壌 C(1.4g

kg⁻¹ colloids, 以下単位同), 土壌 F(0.00), 土壌 G(2.20), 土壌 O(2.30), 土壌 T(0.70), 土壌 V(0.50)であった. 土 壌 F および土壌 T を除き, 粒子状 P は, 土壌の全 P 濃 度より 1~1.4 倍程度高い値を示した.

3.2. 農地土壤由来の粒子状 P の化学形態

粒子状 P の化学形態に関して, X 線吸収微細構造 (XAFS)分光法を用いて詳細な分析を行った. 代表とし て土壌 O の結果について示し(図 1), 土壌 G および O の結果について述べる. この方法では, 標準試料(鉄 (Fe), アルミニウム(Al), カルシウム(Ca)鉱物への吸着態) との比較により, 微粒子に含まれる P の化学形態を同定 することができる. なお, 鉄鉱物に吸着した P を総称し て Fe-P, 同様にアルミニウム鉱物については Al-P, カル シウム鉱物については Ca-P と表記した.



XAFS スペクトル

土壌 G および土壌 O の粒子状 P は, Fe や Al 鉱物に 吸着して存在していることが示唆された.土壌 O に関し ては, 微粒子と土壌全体(バルク土壌)で, P の形態に違 いがみられた(図 1). 図 1 において, 実線で示した粒子 状 P のスペクトルの形状は, 2144~2146 eV 付近でバル ク土壌の形状と異なり, Fe-P の形状に近づく傾向がみら れた. このことは, 土壌 O の粒子状 P はバルク土壌中の P と形態が異なること, 鉄鉱物への吸着態の存在割合が 大きいことを示している.

3.3. 酸化鉄に吸着した P を用いた藍藻培養試験

藍藻の培養試験の結果を図 2 に示した. 培養期間中 の最大増殖量(クロロフィル a 濃度)は, +P 区(868 µg L⁻¹) > +1/2 FhP 区(368 µg L⁻¹) > -P 区(351 µg L⁻¹) > +FhP 区 (190 µg L⁻¹)の順に高値を示した. この結果は, 酸化鉄に 吸着した P が存在することによって, 藍藻の増殖量が低 下することを示している. 溶液中の pH は各処理区による 違いが確認された. 培養開始時の pH はそれぞれ, -P 区 (pH 8.1), +P 区(pH 7.6), +1/2FhP 区(pH 7.6), +FhP 区 (pH 6.7)であった.



図 2. 培養期間中の各処理区における クロロフィル a (Chl.a) 濃度

4. 考察

土壌由来の粒子状 P は, Fe や Al 鉱物に吸着した状 態で存在することが分かった(図 1). 土壌 O に関しては, 土壌全体の P と粒子状 P で形態に違いがみられた.こ の結果は, 土壌の P は, 土壌全体を対象とした場合と微 粒子では異なる化学形態で存在することを意味しており, 特に鉄鉱物に吸着した P が水域での移動において重要 であることが示唆された.

藍藻の培養前半において、培養液中のクロロフィル a 濃度は、時間の経過とともに+P 区で明らかに増加する 傾向が見られた(図 2). それ以外の処理区(-P 区、+FhP 区、+1/2FhP 区)においてもクロロフィル a 濃度が増加す る傾向は確認されたが, +P 区以外の処理区における培養期間中の藍藻の最大増殖量は, +P 区の半分以下の 値であった.特に,酸化鉄鉱物に吸着した P を添加した FhP 区のクロロフィル a 濃度に関しては,実験期間を通じ て最も低く推移し,その最大増殖量は, +P 区の 1/4 以下 の値を示した.この結果は,ferrihydrite 吸着態 P の生物 利用性の低さを表しており,既報と一致する結果となっ た^[5].

5. 結論

農地土壌由来の粒子状 P の多くは, 鉄やアルミニウム 鉱物に吸着した形態で存在した.また, 鉄の酸化物に吸 着した P の藍藻による短期利用性は, 溶存態 P と比較し て低かった.本研究により,水田土壌から河川への微粒 子の流出に伴い, P が鉄やアルミニウムの鉱物に吸着し た形で流域へ流出することが示唆された.その中でも, 代表的な粒子状 P の形態として考えられる酸化鉄鉱物 に吸着した P は, 過剰に存在することによって藍藻の生 育を抑制することが示された.ただし,本研究の結果は 30 日程度の短期間で得られたものであり,長期的には この P が溶出することも考えられるため,検証が必要で ある.

引用文献

- Turner B.L., M.A. Kay, and D.T. Westermann.: Colloidal phosphorus in surface runoff and water extracts from semiarid soils of the Western United States., J. Environ. Qual., 33, 1464-1472, 2004.
- [2] Hashimoto, Y., J. Kang., N. Matsuyama, and M. Saigusa, Path analysis of phosphorus retention capacity in allophanic and non-allophanic Andisols, Soil. Sci. Soc. Am. J., 76(2), 441, 2012
- [3] 手塚公裕,佐藤洋一,中村玄正:富栄養湖の藻類増殖に及 ぼす流入浮遊物質からのリン溶出の影響, Journal of Japan Society on Water Environment, pp. 87-92, 2006.
- [4] 国立環境研究所微生物系統保存施設,「継代培養, 培地作成, 凍結保存の方法」および「微生物株取り扱いについて(初 心者用)」, http://mcc.nies.go.jp/, 2016/5 閲覧
- [5] Baken, S., S. Nawara, C. Van Moorleghem, and E. Smolders., Iron colloids reduce the bioavailability of phosphorus to the green alga Raphidocelis subcapitata. Water Res., 59, 198-206, 2014.

Formulation of Multiple 'Resources-from-Biowaste System' Models based on Subcritical Water Reactor

Jun Matsushita¹, Saburo Matsui¹, Norio Sugiura², Tomonao Miyashiro³, Kazunari Yoshimura⁴, Naoko Nakagawa⁵,

¹Research and Development Initiative, Chuo University, ²University of Tsukuba

³G-8 International Trading Co. Ltd., ⁴Global Water Japan, ⁵Rikkyo University

Keywords: resources-from-biowaste, subcritical water reactor, clean cycle. mitigating of eutrophication,

ABSTRACT

Massive biowaste generation causes serious environmental degradation due to low-cost landfill system for its disposal commonly applied in most Asian countries. We assume that an appropriate solution would be formulation of multiple 'resources-from-biowaste system' as an appropriate alternative measures through the accelerated thermal hydrolysis processing based on a subcritical water reactor. Whereas, a wide range of socio-economic benefits could be expected in our society, if well-linked with value-added organic farming, as follows: (1) production of functional compost and recovery of ever-depleted phosphorus resources, (2) heightening of resource efficiency in malfunctioned biowaste management and (3) contribution to mitigating eutrophication in the public waters and so forth. Hereupon, we firstly analyzed functions of the subcritical water reactor, and secondly conducted actual project-based feasibility study on the leading system models formulated by the subcritical water reactor.

INTRODUCTION

As economy grows rapidly in Asia, generation of biowaste increases in every sector, agriculture, industrial and municipal, either. Total amount of the them is estimated as much as 2.6 billion tons a year in 2012, of which Japan accounts for approximately 10% ^[1].

Whereas, the conventional sink for biomass waste disposal relies majorly on low-cost landfill and partly on high-cost incineration technology coupled with no proper clean cycle neither.

In this study, we assume that this core reactor should contribute reduction of pollutant discharge into the public waters due to the current malfunctioned waste management through formulation of multiple 'resources-from-biowaste system' as shown in **Fig**,1, namely (1) high-quality-cattle-feed-from-wood-residues, (2) probiotic/functional organic-fertilizer-from-cattle-excreta, (3) increased-biogas-production-from-sewage-sludge and so forth.

Hereupon, our previous study verified that the accelerated thermal hydrolysis processing by using a subcritical water reactor was quite workable in producing of functional organic fertilizer with affordable cost to formulate valueadded probiotic agro-production model well in Taiwan and China^[2].

Hereupon, we conducted additional project-based study to verify the wide-ranged assumption mentioned-above.



Fig.1 Multiple 'Resources-from-Biowaste System' based on Subcritical Water Reactor

MATERIALS AND METHODS

The method of this study is not laboratory-based, but actual project-based and/or real machine based-experiment.

Firstly, an analysis was conducted on the functions of the subcritical water reactor of batch type to enable accelerated thermal hydrolysis processing, successfully utilized so far to formulate leading 'resources-from-biowaste system' models in several Asian countries. Secondly, verification was made, from technical and socio-economic views, on the feasibility of those system models formulation. And lastly, discussion followed on the appropriate way to promote those multiple systems in the region, where biowaste recycling measures are required toward bettered lake environment conservation.

RESULTS

(1) Analysis on Functions of Subcritical Water Reactor

The subcritical water reactor is practically operated under the subcritical water condition with temperature of 100-200°C and pressure of 1-2 MPa in the pressure vessel. Iron product of ion becomes increased by as high as 30 times to accelerate thermal hydrolysis processing^[3], and to demonstrate useful effects in dissolving polymer structure of biowaste into low molecule materials for the wide range of biowaste within much shorter processing time of 10-60 min.

The types of reactors for such thermal hydrolysis processing are classified into batch type and continuous type both already commercialized in Japan and spreading to Asia ^[4]. Whereas, the batch type is judged to be much superior in its flexible applicability to varied biowaste properties including urban mixed waste against the continuous one, which is applicable only to liquid biowaste such as raw sewage sludge.

(2) Feasibility of 'Resources-from-Biowaste System' Model Formulation

Hereupon, our study focused on workability of the subcritical water reactor of batch type, hereinafter simply called SCW rector, to formulate the following three types of system models. The technical features of the said reactor are summarized in **Fig. 2**.

High-quality-cattle-feed-from-wood-residues

A model plant has been operated since 2016 with a 2-m3 reactor installation in Hokkaido Province, Japan.

From technical views, wood-based coarse cattle feed was

Accelerated Thermal Hydrolysis Reactor for 'Resources-from-Biowaste



Fig. 2 Technical Features of Subcritical Water Reactor (Batch Type)

verified to be produced every 15-20min. operation of the SCW rector per a batch. The product was quite functional enough in stimulating the appetite of tested cattle greatly and strengthening their digestibility as well, and therefore helpful in promoting of high-quality Japanese Wagyu beef production^[5].

From socio-economic views, the product cost including the purchase cost of wood residues was approximately 20-30% cheaper, if compared to international market price of cattle feeds. Therefore, it was clarified that this business model contributed highly to bettered management of the local breeding industry and logging industry as well. In the wake, it was improving the low feed self-sufficiency in the province, which had been highly dependent on imported feeds so far.

<u>Probiotic/functional-organic-fertilizer-from-chicken-feces</u> A model plant has been operated since 2009 with two 2m3 reactor installation in Yilan Province, Taiwan.

From technical views, raw material was proved to be converted speedily into low-molecular organic particulates within 20 min. operation of the SCW reactor per a batch. Then, it was observed that quick composting progressed within 2 weeks. Our bacteria flora analysis using a next generation sequencer revealed that dominant bacterial grope in the end product were almost crop-friendly good micro-organism, such as Actinobacteria^[2].

From socio-economic views, the operation company has obtained the official certificate on its end product as qualified organic fertilizer by the governmental institution. In addition, our hearing survey to local famers clarified that the end product worked successfully, with good microorganism effect combined, to suppress crop impediments due to repeated cultivation in their farmlands, thus making itself more value-added and marketable with price as high as US\$200/ton to well meet the operation cost.

Herewith, similar operation has been commenced since 2014 for pig manure recycling in Jiansue Province, China. Enhanced-Biogas-Production-from-Sewage Sludge

In order to push thermal recycling rate for sewage sludge up more, streamlining of methane fermentation processing becomes the new target in Japan^[6]. On this context, we conducted a comparative test to analyse the biogas generation capability from sewage sludge with/without the accelerated hydrolysis processing by the SCW reactor prior to the methane fermentation.

From technical views, it was revealed that initial acidification phase became quite shortened from around 7 days to only one hour with the accelerated hydrolysis processing. And such effect contributed to shortening of total methane fermentation time of 30-60 days by around 20-30%. In addition, biogas production was increased by 50% or more with the said processing^[7].

From socio-economic views, it was implicated that installation cost of the SCW reactor could be payable enough, since double merits were to be expected, namely construction cost reduction for sludge digestion tank due to the shortened acidification phase and income surplus from the increased biogas production.

DISCUSSION AND CONCLUSION

In accordance with our actual project-based study, it was verified that the SCW reactor was workable enough as the core technology to firmly drive formulation of 3 types of multiple 'resources-from-biowaste system' models forth coupled with technical and/or socio-economic merits. If integrated well, those system models could lead to totalization of food loops and reduction of pollutant discharge as well to mitigate eutrophication in the public waters as shown in **Fig. 3**.

Further scrutinizing of this verification result mentionedabove should be desired on an actual project-basis in lake basins in Asia and other regions in the world.

As a result, it was concluded as follows:

(1) The SCW reactor was proved to be capable enough as a core technology to drive those biowaste recycle system models forth, either material recycling of wood residues and chicken feces or thermal recycling of sewage sludge.

Total Integration in "Resources-from-Biowaste" Model



Fig. 3 Totalized 'Resources-from-Biowaste System' based on Subcritical Water Reactor

- (2) From technical views. the said reactor could accelerate hydrolysis processing effectively to dissolve biowaste into low molecule particulates which were suitable for either material recycle or thermal recycle.
- (3) From socio-economic views, the said reactor could promote formulation of multiple 'resources-frombiowaste system' models with smaller operation cost and higher economic benefits.

REFERENCES

- New Energy Foundation: Estimation of Biomass Amount in Asia, New Energy Foundation, Japan (in Japanese), 2012
- [2] Hiroyuki Ishizaki, Jun Matsushita, Saburo Matsui, Tomonao Miyashiro, et al.: Multiple Biowaste Recycling System linked with Organic/Probiotic Agro-production. Journal of Society for Social Management System 10. Vol. 1. sms15-9652. Issn:2432-552X, 2015
- [3] Hiroyuki Yoshida: Waste Refinery by Subcritical Water, CMC Shuppan Inc. (in Japanese), 2007
- [4] G-8 International Trading Co. Ltd.: Subcritical Water Reactor of Batch Type. <u>www.g8inter.co.jp/index.php</u>? Mitsubishi Nagasaki Kikou Co. ltd.: Subcritical Water Reactor of Continuous Type. (in Japanese) www.mnm.co.jp/products/environment/sewage.html
- [5] Cattle Journal of Japan: White Birch Feed Production by SCW Reactor. Cattle Journal. No. 11. 23-27 (in Japanese), 2016
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of Japan: Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project. (in Japanese) www.nilim.go.jp/lab/bdash/bdash.html
- [7] Tomonao Miyashiro, Norio Sugiura et. al: Highly Efficient Anaerobic Digestion of Refactory Organic Waste Using Subcritical Water Hydrolysis Pre-treatment Process, Japanese Journal of Water Treatment and Biology. 48. 23-27

Water Quality Conservation by Circulative Use of Biomass

Yoshito Yuyama¹, Masato Nakamura¹, Fumiko Oritate¹ and Masaru Yamaoka¹

¹National Agriculture and Food Research Organization

Keywords: biomass, nitrogen and phosphorus cycle, food production

ABSTRACT

Some rural areas have problems of water pollution in lake, pond, river and canal no good for human life, irrigation and ecosystem. Most reasons come from insufficient recycle of nitrogen and phosphorus contained in various biomass and water as well as fertilizing design. Authors have developed diagnosis tool for regional biomass use that show present and planned material balance. Objective feedstock biomass is such as livestock wastes, residues of food and sludge. This study dealt with methane fermentation technology. Katori city of Japan and Thai My village of Vietnam were chosen as case study area and the effect by plan with some scenarios were quantified. The results indicated how the use of chemical fertilizer, disposal and influent load to water bodies decreased by circulative use of biomass. Appropriately designed and managed biomass use system can contribute to water quality conservation, sound material cycle, creation of value-added food production and vitalization of regional economy throughout local production for local consumption.

1. INTRODUCTION

Some rural areas have problems of water pollution in lake, pond, river and canal no good for human life, irrigation and ecosystem. Most reasons come from insufficient recycle of nitrogen and phosphorus contained in various biomass and water as well as fertilizing design. Biomass use has great potential for prevention of global warming, creation of a recycling-oriented society, fostering of sound soil and food production, vitalization of agriculture and rural communities. This paper clarifies effect of biomass use focusing decrease of influent load to water bodies.

2. METHOD

Authors have developed diagnosis tool for regional biomass use ^[1] that show present and planned condition of material balance as shown in Fig.1. Main parameters are raw weight, nitrogen, phosphorus and carbon. Dynamics in farmland is analyzed based previous studies and statistics as shown in Fig.2. Objective feedstock biomass is such as



Fig. 1 Basic diagnosis model of regional biomass use

livestock wastes, residues of food and sludge. They are often converted by composting or methane fermentation technology. This study deals with the latter because it can produce energy and information of methane fermented digested slurry use is not so many. Nakamura et al. compared nitrogen balance for two years by lysimeter test between ammonium sulfate and digested slurry application and showed that the leaching ratios were almost same ^[2].

Two case study areas in Japan and Vietnam are chosen and the effect by plan with some scenarios are quantified.



Fig. 2 Material balance in farmland

	uptake by plant	leaching	N ₂ O volatilization	accumulation to soil, ammonia volatilization etc.
ammonium sulfate	32	46	0.11	22
digested slurry	27	44	0.41	29

3. RESULTS

Katori city, Japan was chosen as case study area where agriculture and livestock industry is prosperous. Scenario for promotion of methane fermentation system was designed as follows:

- 1) 30% of milk cow waste is provided for methane fermentation (presently, composting)
- 2) 24% of pig waste is provided for methane fermentation

(presently, wastewater treatment and composting)

- 3) 3,650t/y of domestic sewage sludge is provided for methane fermentation (presently, disposal)
- 4) 1,825t/y of food industry garbage is provided for methane fermentation (presently, disposal)
- 5) 3,650t/y of household garbage is provided for methane fermentation (presently, disposal)

6) Produced digested slurry is used at farmland

Using feedstock biomass shown in Table 2, 2,828 thousand Nm³/y of biogas, 1,018 MWh/y of surplus power, 5,882 GJ/y of surplus heat and 71,462 t/y of digested slurry were estimated to produce. Table 3 indicated how use of chemical fertilizer, disposal and influent load to water bodies decreased ^[3].

Table 2 Feedstock biomass used for methane fermentation in Katori city

feedstock biomass	raw weight(wet-t/y)	water content(%)
waste of milk cow	11,623	90
waste of pig	58,654	90
domestic sewage sludge	3,650	98
food industry garbage	1,825	80
household garbage	3,650	80
sum	79,402	-

	item	unit	present	senario
area		ha	26	231
agricultural	paddy	ha	7,	130
field	non-paddy	ha	3,	625
population		people	87,	837
	self-use compost	tN/y	150	116
paddy	digested slurry and compost produced at biomass plant	tN/y	-	185
	chemical fertilizer	tN/y	454	316
	self-use compost	tN/y	404	314
non-paddy	digested slurry and compost produced at biomass plant	tN/y		370
	chemical fertilizer	tN/y	194	-
disposal		tN/y	290	219
influent load to water bodies		tN/y	1,120	989
volatilization	1	tN/y	1,310	1,140

Table 3 Effect of promotion of biomass use in Katori city

Thai My village located in Ho Chi Minh city, Vietnam was also chosen as case study area ^[4]. Livestock and rice farming is popular there. 111 households have biogas digesters with capacities of 7.8 ± 1.2 m³ of fermentation tank volume. The main feedstock is pig and milk cow feces and urine mixed with the washing water of livestock farming shed. Biogas is mainly used for cooking in the homes. Most of the digested slurry is discharged to the infiltration pits, river or canal although a little of them is used as fertilizer for plants in yards or non-paddy fields. To overcome water pollution and realize desirable biomass use, the plan was designed as follows:

- All unused livestock excreta are considered feedstock for biogas digester. By increasing the number of biogas digesters, excreta from 10,000 heads of pigs and 60 heads of milk cows becomes the target.
- 2) Digested slurry produced at the digesters is applied to paddy fields as liquid fertilizer.
- 3) Half of the nitrogen contained in the slurry is considered effective for a crop uptake, because the ratio of ammonia nitrogen to total nitrogen is approximately 50%. This portion is assumed to replace the chemical nitrogen fertilizer in paddy fields.

Results were summarized in Tables 4. Influent nitrogen load to water bodies decreased from 122 to 70 t/y. Application rate of nitrogen fertilizer decreased from 250 to 130 kg \cdot ha⁻¹ · y⁻¹ owing to application of digested slurry. Biogas generation rate increased to 330,000 Nm³/y, 8 times larger than the present condition.

Table 4 Effect of promotion of biomass use in Thai My village

(a) Change of nitrogen load to the lower water bodies (t/y)

source	present	plan
manure of livestock	59.1	12.9
digested slurry	5.8	0.0
others	57.4	57.4

b) Chemical f	fertilizer use rate at	paddy fields (t · ha ⁻¹	$\cdot y^{1}$
------------------------	------------------------	------------------------------------	---------------

p	resent	1	plan
raw weight	nitrogen content	raw weight	nitrogen content
2.1	0.25	1.09	0.13

(c) Change of biogas generation from biogas digester (Nm3/y)

source	present	plan
pig manure	39,340	320,452
milk cow manure	731	6,370

4. CONCLUSION

The results of analysis in two study areas indicated how the use of chemical fertilizer, disposal and influent load to water bodies decreased by circulative use of biomass. Methane fermented digested slurry was useful as liquid fertilizer. Diagnosis of soil and fertilizer design are key component. Its effect might come to conservation of ecosystem, because the circulative use of biomass leads environmentally friendly agriculture. Moreover, it would lead mitigation of global warming. In conclusion, it can be said that appropriately designed and managed biomass use system contribute to water quality conservation, sound material cycle, creation of value-added food production and vitalization of regional economy throughout local production for local consumption. This kind of efforts in watershed of a lake should be focused and promoted more strongly. In a region level, systemization of organization, technology, institution, fund and information are essential. Judgement of promotion of the plan should be considered from lifecycle profitability among organizations concerned and sustainability of land use.

REFERENCES

- Yoshito Yuyama et al., Development of Diagnosis Tool on Regional Biomass Use, Transactions of JSIDRE, Vol.266, pp.57-62, 2010
- [2] Masato Nakamura et al., Impacts of Application of Methane Fermentation Digested Liquid on Green House Gas Emissions and Nitrogen Leaching from Upland Field, Transactions of JSIDRE, Vol. 246, pp.17-26, 2009
- [3] Yoshito Yuyama et al., Support Tool for Development of Biomass Town, Hitoshi Nakagawa ed. Agri-forestry Biomass Resources and Regional Use, Yokendo, pp.313-323, 2018
- [4] Fumiko Oritate et al., Regional Diagnosis of Biomass Use in Thai My Village, Vietnam, Tech. Rep. Natl. Inst. Rural Eng., Vol.214, pp.135-162, 2013

05-23

水草バイオマスを汚泥脱水助剤として活用するための基礎的研究

山崎 廉予¹, 岡安 祐司¹, 重村 浩之¹ 1国立研究開発法人 土木研究所

キーワード:水草,下水汚泥,脱水助剤,バイオマス

抄録

河川、湖沼等の公共用水域において異常発生している、水草バイオマスの有効利用方法として、下水汚泥の脱水 助剤としての活用に着目した。そこで本研究では、スズメノヒエおよびオニビシを下水汚泥と混合させた、実験室レベ ルの脱水試験を行った。その結果、スズメノヒエは、汚泥の含水率低減に寄与しないが、脱水汚泥量をほぼ増加させ ずに、水草と汚泥を同時に処分できる可能性を示した。オニビシは、脱水助剤として汚泥の含水率低減に寄与し、脱 水汚泥量を約 80%程度に削減できる可能性を示した。また、琵琶湖南湖で下水道部局により刈取られた水草を下水 処理場で脱水助剤として受け入れた場合、数日以内に処分できる試算結果となった。湖沼等で発生する水草バイオ マスを下水処理場で受け入れ、下水汚泥の脱水助剤として活用する技術は、水草バイオマスの有効利用、下水道事 業における未利用バイオマスの有効活用に資するものであり、かつ経済性で有用な技術である可能性が示唆された。

1. はじめに

近年、河川、湖沼等の公共用水域において、富栄養 化などの原因により水草が異常発生しており^[1]、水域の 水質悪化、悪臭の発生、景観悪化、生物多様性の減少 などに繋がるため、全国的に問題となっている。特に琵 琶湖南湖では、水草(沈水植物)が大量繁茂しており、 船の横行障害など、様々な悪影響をもたらしている^[1]。 琵琶湖で刈取られた水草は、一部堆肥化され、地域住 民に無料配布されている^[2]が、それ以外は焼却処分さ れているのが現状である。水草バイオマスの活用の研 究は、堆肥化、バイオエタノール化、メタン発酵によるエ ネルギー化などがあり、特にメタン発酵は含水率が高い 水草バイオマスを、低エネルギーで、エネルギー回収で きるため、有用な方法と考えられている^{[3][4]}が、実用に は至っていない。

本研究では、水草バイオバスの活用方法として、下 水汚泥の脱水時の脱水助剤としての利用に着目した。 本研究室では、河川等で発生するイネ科の刈草を、下 水汚泥の脱水助剤として有効利用する方法について検 証しており^[5]、汚泥に刈草を混合することにより、脱水後 の汚泥の含水率の低下や、凝集剤添加量の削減の可 能性を見出している。また、河川事業における刈草処分 費や、下水道事業における脱水汚泥の処分費におい ても、削減可能な混合条件があることを試算により示し ている。脱水性向上の原理は、汚泥に固形物を投入す ることで、固形物が汚泥中の空隙を確保することで、汚 泥中に水分の通り道ができ、水分が抜けやすくなる^[6]た めだと考えられる。同様の原理で、繊維質や木質チップ などの地域バイオマスを下水汚泥の脱水助剤として利 用する研究^{[6][7]}も行なわれており、刈草と同じ植物系バ イオマスである水草においても、同様の効果があるので はないかと考え、実験室レベルでの検証を行った。

2. 方法

脱水試験は、下水汚泥、凝集剤、および水草を混合 し、遠心分離機による脱水を行い、脱水後の固形物の 含水率を測定する方法で行った。下水汚泥は、A 処理 場の最初沈殿池の重力濃縮汚泥と、余剰汚泥の機械 濃縮汚泥を1対1で混合したものを用いた。実験に用い た濃縮汚泥の TS(全固形物量)は 2.3% であった。凝 集剤は、カチオン系高分子を用いた。水草は、琵琶湖 南湖において、B 処理場を管理する下水道部局によっ て、敷地の管理の一環として、敷地周縁部において表 層刈取りにより回収されたものを用いた。2016年12月 に、主にスズメノヒエ、2017年7月に、主にオニビシを採 取した。下水道部局で刈取られた水草は、下水処理場 内で1カ月程度天日干しされたのち、一般廃棄物として 処分されている。実験には、1 カ月程度天日干しされた 水草を用いた。スズメノヒエは、ハサミで 10 mm程度に裁 断し、オニビシは、家庭用の小枝粉砕機(MGS-1510Si, ミナト)により、3~5 cm程度に裁断し(図-1)た。実験に用 いた水草の TS は、スズメノヒエが 92%、オニビシが 49% 程度であった。脱水試験に供した凝集剤の添加率は、 汚泥 TS に対して、0%、0.5%、1.5%とし、水草 TS の混 合率は汚泥 TSに対して、0%、10%、30%とした。遠心分 離機の回転速度や運転時間等の脱水試験条件は、刈 草の脱水試験と同様とした^[5]。汚泥よりもTSが高い水草



(10 mm裁断)(粉砕機による粉砕) 図-1 脱水試験に用いた水草

の混合により、含水率は物理的に減少するため、水草 のTS、水分量を差し引くことで、汚泥のみの含水率を試 算した。また、脱水汚泥量は、凝集剤添加率 1.5%、水 草混合率0%での脱水汚泥量を1としたときの各混合条 件での脱水汚泥量を試算し、相対値として示した。

3. 結果

図-2 左図に脱水後の水草混合脱水汚泥の含水率の 結果、図-2 右図に刈草量を差し引いて試算した汚泥中 の含水率の結果を示す。図-2 左図より、TS が高い水草 を下水汚泥に混合することによって、水草混合脱水汚 泥の含水率が減少することが確認できた。図-2右図より、 凝集剤添加率 0%のとき、水草混合により、含水率が減 少する傾向がみられ、水草混合割合が 30%までは、水 草を増加させるほど、含水率の低減効果がみられること が示された。水草混合割合0%と比較して、30%では、ス ズメノヒエでは3.4%、オニビシでは4.5%、脱水汚泥のみ の含水率が減少する試算結果であった。凝集剤を添加 した場合、スズメノヒエでは脱水汚泥のみの含水率の低 減化は、ほぼ見られなかった。これは、凝集剤による含 水率の低減効果が大きいためである。オニビシでは、凝 集剤を添加した場合、混合割合を増やすほど含水率が 低下する結果となった。凝集剤 0.5%の時、水草 0%と比 較して、30%で含水率 4.9%の低減、凝集剤 1.5%の時 は、含水率 6.7%の低減がみられると試算され、水草混 合割合 30%までは、水草混合割合が高いほど、低減効 果も高くなる可能性が示唆された。例えば、凝集剤を 0.5%に削減し、オニビシを 10%混合させることで、脱水 汚泥の含水率を変えずに、凝集剤費の削減および、水 草と汚泥の両方を処分できる可能があることがわかる。

図-3に、凝集剤1.5%、水草混合0%時の脱水汚泥量 を1としたときの、各混合条件における脱水汚泥量の相 対値を示した。これは、凝集剤1.5%、水草混合0%時の 脱水汚泥量を、下水処理場での現状の脱水汚泥量と 仮定して、水草を混合した場合の脱水汚泥量と比較す ることを目的としている。図-2より凝集剤添加率0%の時 は1.5%の時と比較して含水率が10%以上高いため、脱 水汚泥量も2倍程度多いが、図-3より、凝集剤0%でも、 水草を30%混合すれば、スズメノヒエでは1.8倍、オニビ シでは 1.3 倍まで脱水汚泥量を減少させることができる とことがわかる。凝集剤添加率 1.5%では、スズメノヒエを 30%混合した場合、脱水汚泥の汚泥量は、1.1 倍程度 の増加であった。図-2 より、水草混合脱水汚泥の含水 率の低減効果が約 4%あるため、脱水汚泥量をそれほ ど増やさず、スズメノヒエと汚泥を一緒に処分できる可能 性が示された。オニビシを 30%混合した場合、凝集剤 添加率 0.5%の時、汚泥量を 96%、凝集剤 1.5%の時、 汚泥量を 84%に削減できる可能性を示した。汚泥とオ ニビシを同時に処分でき、かつ汚泥量も減少可能となり、 処分費の削減効果も期待できることが示された。

上記の結果より、水草の種類や混合条件によって は、水草を汚泥と混合して脱水することで、凝集剤 費の削減や、脱水汚泥量の低減化が見込まれる可能 性が示された。琵琶湖で刈取った水草を脱水助剤と して利用する処理場として、琵琶湖南湖の湖周辺に 立地する、B(b市)、C、D(c市)、3か所の下水処 理場を想定し、刈取った水草量に対して、処分に掛





図-2 水草混合脱水汚泥と脱水汚泥のみ(試算値)の含水率

かる日数を試算した。水草刈取り量は、下水道部局 による刈取り分とし、湖の管理者によって実施され る刈取り分の100分の1と仮定した。B処理場で受 け入れ可能な水草量は、B 処理場が立地する自治体 b市での下水道部局分とし、H29年度の表層刈取り 量の実績^[8]より、約3.5 tとした。C、D処理場が立 地する自治体 c 市においても同様の考えにより試算 し、約13.2 tとした。脱水機への投入汚泥量は、平 成 27 年度実績より、B 処理場は 1,752 m³/日(TS: 2.8%)、C 処理場は、172.1 m³/日 (TS:4%)、D 処理 場は、208.8m³/日(TS:3.1%)とした^[9]。これらに対 し、水草を10%混合すると仮定し、1日に必要な水 草量を試算した。その結果、B 処理場では、水草が すべてスズメノヒエの場合、5.3t-湿重量/日となり、 2/3 日で処分できると試算された。一方、水草がす べてオニビシの場合、10.0 t-湿重量/日となり、約 1/3日で処分できると試算された。C、D処理場にお いては、スズメノヒエの場合、それぞれの処理場で 0.70 t-湿重量/日、0.75 t-湿重量/日必要となり、約 9日で処分でき、オニビシの場合、1.3 t-湿重量、 1.4 t-湿重量/日必要となり、約5日で処分できる試 算結果であった。以上より、下水道部局による水草 刈取り量は、脱水助剤として活用することで、短期 間で処分ができる可能性が示された。仮に、湖管理 者による水草刈取り量を下水道部局で受け入れた場 合、受け入れる水草量が約100倍となるため、B処 理場では約1~2カ月で処分できる試算であった。一 方、C、D処理場では、1年半~2年半かかると試算 され、水草混合割合を30%に増やした場合、半年~ 9カ月程度で処分可能である試算となった。

脱水汚泥の処分方法として、下水処理場内におい て、焼却炉や炭化炉で処分する場合、焼却灰や燃料 化物は、水草の投入により増加する。水草を 600℃ の恒温炉で1時間加熱した時の灰分の割合は、スズ メノヒエが 5.3%、オニビシが 29%であった。オニビ シの灰分割合が高いのは、水草に土壌が付着してい たためだと考えられる。汚泥の TS に対して水草を 10%混合した場合、灰分は 1.1%程度、30%混合した 場合は、1.2~1.4%程度増加する試算となった。燃料 化の場合は、生成物を売却するため、収入量が増加 する可能性がある。焼却灰を処分する場合は、処分 費が増加する可能性があるが、水草により低位発熱 量が上昇するため、補助燃料量の削減が見込まれる 可能性がある^[5]。これらについては詳細に試算し、 検証する必要がある。

4. 結論

本研究では、バイオマスとしての活用が求められてい る水草に着目し、スズメノヒエ、オニビシの汚泥の脱水 助剤としての有用性を実験室レベルで検証した。その 結果、スズメノヒエは脱水助剤として、汚泥の含水率低 減にほぼ寄与しないが、脱水汚泥量を増やさずに、水 草と汚泥の処分が可能である可能性を示した。オニビ シは、脱水助剤として汚泥の含水率低減に寄与し、汚 泥量も約80%程度に削減できる可能性が示された。

また、琵琶湖南湖で刈取った水草量に対し、下水処 理場において、どの程度の期間で処分可能か試算した。 琵琶湖南湖で刈取られた水草のうち、下水道部局によ る刈取り分を脱水助剤(汚泥 TS に対して水草 TS10% 混合)として活用する場合、10日程度あるいはそれ以下 で処分可能であり、湖管理者による刈取り分も受け入れ る場合は、水草30%混合により1年以内に処分できる試 算結果となった。

湖沼等で発生する水草を下水処理場で受け入れ、 下水汚泥の脱水助剤として活用する技術は、水草バイ オマスの有効利用のみならず、下水道事業においても、 未利用バイオマスの有効活用および経済性の両面で、 有用な技術である可能性が示唆された。

水草バイオマスを有効利用するための課題は、水草 と土壌やゴミとの分別、水草の破砕、運搬、また水草刈 取り量や水草の種類の変動など、いまだ多くあり、今後 は、これらも含めた活用検討が必要である。

謝辞:A 処理場には汚泥の採取、B 処理場には水草の 採取において、多大なるご協力を賜りました。ここに記し て謝意を示します。

引用文献

- [1] 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター:南湖生態系の順応 的管理に関するサイエンスレポート, 2015
- [2] 滋賀県 HP: http://www.pref.shiga.lg.jp/d/saisei/files/ mizukusa/files/yuukouriyou.pdf
- [3] Koyama *et al.*: Anaerobic digestion of submerged macrophytes: Chemical composition and anaerobic digestibility, Ecological Engineering, Vol.15, pp.85-97, 2014
- [4] 岡安ら:水草と下水汚泥の混合嫌気性消化に関する基礎的研究,第 54 回下水道研究発表会講演集, Vol. 54, pp.1093-1095, 2017
- [5] 山崎ら:刈草の汚泥脱水助剤としての利用検討,環境工学 フォーラム論文集, Vol.73, No.7, pp.365-373, 2017
- [6] 高橋ら:繊維状脱水助剤の適用事例報告,第 51 回下水道 研究発表会講演集 Vol.51, pp.979-981, 2014
- [7] 加藤ら:脱水ケーキの低含水率化に関する研究,第50回下 水道研究発表会講演集 Vol.50, pp.982-984, 2013
- [8] 滋賀県 HP:http://www.pref.shiga.lg.jp/d/biwako/mizukusa/ files/h29nobekaisuuzisseki.pdf, 2018
- [9] 日本下水道協会,下水道統計 (第70号),2015

水田に施用した低温メタン発酵消化液の窒素無機化特性

中村 真人¹,日高 平²,山岡 賢¹,折立 文子¹ ¹農業•食品産業技術総合研究機構,²京都大学大学院

キーワード:メタン発酵,消化液,液肥利用,施肥設計,窒素負荷

抄録

生活排水処理施設から排出される汚泥はメタン発酵の原料としての利用が期待されており、大規模下水処理場では 利用されているが、小規模施設ではエネルギー効率が低いため利用が限定的である。発酵温度が通常(35℃)より低 い低温メタン発酵と消化液の液肥利用は、エネルギー効率を改善できる有望な技術であるが、低温条件が消化液の 肥料特性に及ぼす影響は未解明である。そこで本研究では、室内培養試験により、脱水汚泥を原料とする低温メタン 発酵消化液(15, 25, 30℃)の水田施用後の窒素無機化特性を調査した。その結果、消化液中の有機態窒素の無機 化に伴うアンモニア態窒素の増加割合は発酵温度に関わらず小さかった(3~13%)ことから、消化液のアンモニア態窒 素分を考慮して施肥設計すればよく、そうすることで河川や湖沼への窒素負荷が増加する懸念が小さいことが示され た。

1. はじめに

メタン発酵は家畜排せつ物,汚泥,食品廃棄物等を 嫌気条件で処理し,メタン濃度約 60%のガスを取り出す 技術である。生活排水処理施設から排出される汚泥は, メタン発酵の原料としての利用が期待されており,大規 模下水処理施設では利用されているが,小規模施設で は,エネルギー効率が低いことや経済性の問題により, 利用が限定的な状況である。その対策として,発酵温度 が通常(35℃)より低い低温メタン発酵と発酵残渣の消 化液の液肥利用は,エネルギー効率や経済性を改善で きる有望な技術である。

しかしながら、低温条件が消化液の肥料特性に及ぼ す影響は未解明である。また、農地に肥料として施用さ れる窒素のうち、作物に利用されないものの一部は水域 への負荷となる。そのため、作物要求量に合わせて適正 量を施肥し、極力、作物の窒素利用率を高める対応が 基本となる。消化汚泥等の有機性資材の場合には、含 まれる有機態窒素が農地施用後にどの程度無機化し、 作物が利用できる形態の窒素(水田の場合はアンモニ ア態窒素)がどの程度供給されるのか,を把握することが 施肥設計のために不可欠である。

そこで本研究では,室内培養試験により,脱水汚泥を 原料とする低温メタン発酵消化液(15,25,30℃)の水田 土壌施用後の窒素無機化特性を調査した。

2. 方法

培養試験は、南雲ら□を参考にした、中村ら□により行った。試験区として、発酵温度の異なる3種の消化液、 脱水汚泥をそれぞれ施用する試験区(消化液(15℃)区、 消化液(25℃)区、消化液(30℃)区、脱水汚泥区)と資 材を施用しない無施用区を設定した。各資材の成分を 表1に示す。

約60 mLのバイアル瓶に,風乾後2 mmのふるいを通 過させた,農村工学研究部門内の重粘土水田土壌(土 性,全炭素,全窒素,CEC,遊離酸化鉄含量は,それぞ れ HC,17 g/kg,1.2 g/kg,15.4 cmol_/kg および 13.6 g Fe/kg)を乾土あたり5 g,各試験区に資材(脱水汚泥,消 化液)をVS施用量が0.2gとなる量を施用し,脱気した脱 イオン水を総量で10mLになるように加えた後,ブチルゴ

	TS	VS	VS/TS	TC	TN	NH4-N	pН
	(%)	(%)	-	(%)	(%)	(mg/L)	-
脱水汚泥	18	15	0.82	39.0	7.2	1700	-
消化液(15℃)	5.1	3.7	0.73	-	-	1100	7.3
消化液(25℃)	5.5	4.0	0.72	-	-	1100	7.4
消化液(30℃)	5.3	3.7	0.71	-	-	1300	7.4

表1 各資材の成分
ム製の栓で密栓した。その後,気相部分を高純度窒素 (純度 99.9995 %以上)で置換して試験管ミキサーで攪 拌する操作を3回繰り返し、その操作の終了を培養開始 とした。培養期間中,バイアル瓶は、30 ℃に設定した恒 温庫に静置した。培養開始前(バイアル瓶に土壌, 脱イ オン水,資材を入れた直後),および開始後14,70日後 については、各資材から無機化した窒素量を把握する ため, 土壌中のアンモニア態窒素量を測定した。所定の 培養期間経過後の各試験区の土壌に 10%塩化カリウム 溶液 50mL を加え, 100rpm で 30 分間振とうした後, ろ過 した。その後、ろ液のアンモニア態窒素濃度を吸光光度 法四で分析して,土壌中のアンモニア態窒素量を求め, 式(1)を用いて培養 70 日間における各資材由来のアン モニア態窒素の増加率を算定した。この増加率は,70 日間における各資材に含まれる有機態窒素の無機化に 伴うアンモニア熊窒素の増加割合を示し、消化液を用い た作物栽培における施肥設計のための参考情報となる 各資材由来のアンモニア態窒素の増加率(%)

=((各試験区の NH₄-N 量(70 日後)-無施用区の NH₄-N 量(70 日後))/((各試験区の NH₄-N 量(培養前)-無施 用区の NH₄-N 量(培養前))×100 (1)

3. 結果および考察

培養期間中の各試験区の土壌中のアンモニア態窒 素量の推移を図1に示す。培養開始後 2 週間までの土 壌中のアンモニア態窒素の増加に着目すると、消化液 を施用した試験区に比べて脱水汚泥区ではアンモニア 態窒素量が急激に増加しており、脱水汚泥に含まれる 易分解性有機物が施用直後に分解し、それに伴い有機 態窒素の無機化が生じたと考えられる。このことは、メタ ン発酵過程で分解が進み、原料の脱水汚泥に比べて消 化液中の有機物は安定しているためであると考えられる。 したがって、消化液を施用した場合には、たとえ 15℃程 度の低温条件の消化液であっても、新鮮有機物の施用 に伴う土壌微生物による作物への害作用(作物の窒素 飢餓、微生物による作物生育阻害物質の生成等)回を起 こす懸念が小さいことが示唆された。

培養 70 日後の各試験区におけるアンモニア態窒素 の増加率は、脱水汚泥区、消化液(15℃)区、消化液 (25℃)区、消化液(30℃)区でそれぞれ、85、13、5.4、 3.0%であった。発酵温度による違いに着目すると、アン モニア態窒素の増加率は、15℃の条件でやや高い傾向 があるものの、脱水汚泥区の 85%に比べて小さかった。 つまり、発酵温度条件によらず、メタン発酵過程で脱水



汚泥中の有機態窒素の大部分が無機化し,水田土壌 施用後の無機化量が少ないことが示された。このことは, メタン発酵温度に関わらず,消化液には土壌施用後に 遅れて効いてくる窒素(遅効性窒素)は少ないこと,土壌 施用後に無機化し供給されるアンモニア態窒素量が気 温等の気象条件により変動することがなく,施肥設計通 りの肥効を見込めることを意味する。

4. 結論

消化液中の有機態窒素の無機化に伴うアンモニア態 窒素の増加割合は,発酵温度に関わらず少なかった (3~13%)ことから,消化液のアンモニア態窒素分を考慮 して施肥設計すればよいことが示された。つまり,本研究 の結果をもとに,適正な施肥設計を行うことにより,低温 メタン発酵消化液を化学肥料の代わりに使用しても,河 川や湖沼への窒素負荷が増加する懸念が小さいことが 示された。

引用文献

 南雲芳文,小柳 渉,村上圭一,棚橋寿彦,加藤誠二, 安藤 正,土田 徹,加藤直人:酸性デタージェント可 溶有機物量による鶏ふん堆肥,豚ぷん堆肥のメタン発生 ポテンシャルの評価,日本土壌肥料学雑誌,Vol. 82 No. 5, pp. 401-404, 2011.

- [2] 中村真人、山岡賢、折立文子(2017):メタン発酵消化 液の水田への施用がメタン発生に及ぼす影響の室内培 養実験による検証、日本土壌肥料学雑誌、Vol. 88 No. 1, pp. 38-41, 2017.
- [3] 土壤環境分析法編集委員会:土壤環境分析法,博友社, 241-245,1997.
- [4] 西尾道徳:開催にあたって,平成13年度たい肥施用コー ディネーター養成研修講義・実習テキスト(2), 3-4, 2001.

Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in a Small Catchment

Maoheng Zhang^{1,2} and Fangfang Wang¹

¹ School of Geography Science, Nanjing Normal University, ² Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application

Keywords: sediment, persistent organic pollutants, risk assessment and catchment

ABSTRACT

To evaluate the relative ecological risk of harmful pollutants in the sediments of a small catchment, the concentrations of persistent organic pollutants (POPs) in the sediments were measured. Results show concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) were in the range of 2.7~82.2 μ g·kg⁻¹, 0.11 ~ 0.59 μ g·kg⁻¹ and 1.12 ~ 2.83 μ g·kg⁻¹, respectively. A potential negative impact on the ecological environment in the region was found.

1. INTRODUCTION

POPs is a natural or synthetic organic pollutant which is not quickly degraded in the environment. Once enter into the background, the POPs can stay in environmental media (Water, air, soil, sediment and so on) for years or even decades or longer. They can be transported through the atmosphere and water for a long distance to affect the global environment. The sediment is one of their essential fate.

2. METHOD

The sampling site is a closed lake bay and is the only port in the northwest corner of Taihu, with an area of 58 km². Sediment samples were taken with conventional gravity coring equipment (diameter 6 cm). The samples were dried naturally, then remove the animal and plant debris and stones. All natural-dried samples were ground, passed through the 100 mesh sieve. The identification and quantification of PAHs, PCBs and OCPs (DDTs, HCHs) were performed through the gas chromatograph-mass spectrometer manufactured by Shimadzu Corporation of Japan (QP2010 ultra, Japan). The ecological risk of PAHs, PCBs and OCPs was evaluated by environmental quality standards of POPs in the sediments ^[1]. The USEPA has now defined this rule as the national standard.

3. RESULTS

Results show concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) were in the range of 2.7~82.2 μ g·kg⁻¹, 0.11 ~ 0.59 μ g·kg⁻¹ and 1.12 ~ 2.83 μ g·kg⁻¹, respectively. The total PAHs and PCBs at all

sites are below the ERL. The highest concentration of DDTs in the sediments of each sampling sites is close to the ERL value. These findings indicate that no samples contained POPs whose concentration exceed ERM. Therefore, the ecological risk of POPs in the sediments of the small catchment was relatively low.

4. **DISCUSSION**

Because of the regional industrial development, emissions of large amounts of untreated industrial wastewater, the Taihu watershed has become the one of the most serious polluted area. The enterprises in this region should accelerate the transformation of economic development mode, optimize the financial structure, and develop low energy consumption, small pollution industries, vigorously. In addition, companies should improve the sewage treatment facilities.

5. CONCLUSION

- 1) The origins of PAHs were mostly wood and coal combustion.
- 2) PCBs mainly come from industrial production.
- 3) OCPs mainly came from the excessive use of pesticides and fertilizers.
- 4) The ecological risk of POPs in the sediments was relatively low.

REFERENCES

 E.R. Long, D.D. Macdonald, S.L. Smith, F.D. Calder: Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, Journal of Environmental Management, Vol. 19(1), pp. 81-97, 1995.

Long term monitoring of radiocesium in soybean field, Lake Kasumigaura basin

Peiran Li¹, Yingting Gong¹, Masakazu Komatsuzaki²

¹ Graduate School of Agriculture, Ibaraki University ² Center for International Field Agriculture Research and Education

Keywords: radiocesium, soybean, tillage, cover crop

ABSTRACT

The nuclear accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP) occurred as a consequence of the massive earthquake and associated tsunami on March 11, 2011, which was the first nuclear power plant accident in Asia ^[1]. A long term monitoring of radiocesium content in soybean and cover crops was conducted from 2011 to 2017 in soybean field (~170 km from FDNPP), Lake Kasumigaura basin, to clarify the changes of radiocesium in soybean and cover crops. From 2011 to 2017, soybean was cultivated from July to October and cover crops (fallow weeds, FA; rye, RY; and hairy vetch, HV) was cultivated from October to June with three tillage systems (moldboard plow, MP; rotary cultivation, RC; and no tillage, NT). Radiocesium content declined steadily in soybean grain from 2011 to 2014, however, this reduction slowed down from 2014 to 2017. Comparing with in MP and RC, radiocesium content in soybean grain under NT system was consistently higher in every year. Radiocesium content in three kind of cover crops also decreased sharply from 2011 to 2014 and became stable since 2015. Radiocesium content in rye was consistently lower than hairy vetch and fallow weeds. This research revealed that tillage can continuously reduce the radiocesium content in soybean grain for a long term, although in NT system still showed higher radiocesium content in soybean grain in Lake Kasumigaura basin.

1. INTRODUCTION

A large amount of nuclear material was leaked and scattered throughout Japan, at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on March 11, 2011. The farm land in Lake Kasumigaura basin, Ibaraki prefecture was also be polluted seriously^[1].

Radiocesium (Cs) is a radioactive isotope of cesium, the half-life of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs were 30.17y and 2.062y, respectively. It is difficult to remove cesium from the soil due to the tight chelation of clay in soil and cesium ^[2]. So though more than 7 years passed after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, the radiocesium content is still high in farmland. This nuclear accident has different radionuclide movement in agroecosystem compare with Chernobyl Accident in 1986. We focuses the long term radiocesium movement in agroecosystem in Japan especially the relationship between tillage inversion and radiocesium contamination. This information will be important to many country and area where the nuclear power plants are located. Therefore, in this study, we monitored the radiocesium contamination in soybean and cover crops under different agriculture managements from 2011 to 2017. The objectives of this study were to clarify the change of radiocesium content in soybean and cover crops under different tillage systems.

2. METHOD

A 7-years field experiment was conducted from 2011 to 2017 at Center for International Field Agriculture Research and Education $(36^{\circ} 1' 57.7'' N, 140^{\circ} 12')$ 43.6" E) in Ibaraki University, this site located 170km from FDNPP in the Kanto region of Japan. Split plot experimental design with 4 replications was used in this study. Tillage systems (Moldboard Plow: MP, Rotary Cultivation: RC, No Tillage: NT) were the main factors and cover crop species (rye: RY, hairy vetch: HV, fallow: FA) were side factors. Soybean was cultivated from July to October and cover crops was cultivated from October to June from 2011 to 2017. Soybean and cover crop samples were collected by a 0.25 quadrate. Cover crop biomass and soybean yields were calculated. The concentration of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in soybean grain and cover crops were by Ge-semiconductor detector. Transfer determined factors (TF) relating soil concentrations to plant concentrations of contaminants were calculated as follows:

$$TF = \frac{(^{134,137}Cs(Bq kg^{-1} dry weight))_{plant}}{(^{134,137}Cs(Bq kg^{-1} dry weight))_{soil}}$$





Figure.1 radiocesium content in soybean grain under different tillage systems was measured from 2011 to 2017. Error bars correspond to standard error.

Radiocesium content continuously decreased in soybean grain from 2011 to 2014(Figure.1). In NT, radiocesium content decreased from 25.86 to 9.10 Bq/kg; in MP, it even decreased by 4.13 times from 2011 to 2014. However, this tendency slowed down from 2014 to 2017. Radiocesium content only decreased from 6.9 to 5.6 Bq/kg in NT, and no significant difference was observed from 2014 to 2017 in MP. Rradiocesium content in soybean grain had no significantly difference between in MP and RC, while in NT system was consistently about 2 fold higher than those in MP and RC in every single year.



Figure.2 radiocesium content in different cover crop species was measured from 2011 to 2017. Error bars correspond to standard error.

In 2011, radiocesiun content in three kind of cover crops peaked at 428.9 to 5268.2 Bq/kg, which was significantly higher than those in other year (Figure.2). And radiocesium content fell sharply from 2011 to 2014, in fallow weeds, it decreased from 5268.2 to 29.5Bq/kg. Then it became more stable since 2015, no significant difference was observed in fallow weeds since 2015 to 2017. Radiocesium content in different cover crop species was also different, comparing with those in hairy vetch and fallow weeds, radiocesium content in rye was consistently lower from 2011 to 2017. However, the gap between radiocesium content in rye and those in hairy vetch and fallow weeds narrowed considerably over the 7-years period.

4. DISCUSSION

Radiocesium content decreased in soil with each passing year after FDNPP accident, due to the natural decay and migration^[3], therefor the radiocesium in soybean also decreased generally. However, the content of ¹³⁴Cs decreased sharply after several years because of natural decay, and the natural decay of ¹³⁷Cs was slow, so the radiocesium content in soybean become stable from 2014. Comparing with in MP and RC, radiocesium content in soybean grain under NT system was consistently higher in every single year. Because tillage can displace the high contaminated soil into deeper layers, and it can also enhance the formation of Cs-specific edge sites with clay minerals for chelation ^[3]. In 2011, the nuclear materials was contacted with cover crop directly from atmosphere, so the radiocesium content in cover crop in 2011 was significantly higher than other years. Frissel et al.(2002) legume crop had higher radiocesium accumulation ability than other grass crop ^[4], the similar phenomenon was also found in this research.

5. CONCLUSION

After the FDNPP accident, the radiocesium contamination in soybean and cover crops continuously decreased from 2011 to 2014, but this trend gradually slowed down from 2014 to 2017. Legume cover crop had higher radiocesium accumulation ability than grass crop. Tillage can reduce the radiocesium contamination in soybean grain from 2011 to 2017.

REFERENCES

- Otosaka S, Kobayashi T. Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(7):5419-33.
- [2] Yoshida N, Kanda J. Tracking the Fukushima Radionuclides[J]. Science, 2012, 336(6085):1115-6.
- [3] Hoshino Y, Higashi T, Ito T, et al. Tillage can reduce the radiocesium contamination of soybean after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153(2):76-85.
- [4] Frissel MJ, Deb DL, Fathony M, et al. Generic values for soilto-plant transfer factors of radiocesium [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 58(2-3):113-128.

霞ヶ浦周辺環境における薬剤耐性菌の分布

矢用もも,平野明則,松田祐輝,上原研人,今井達也,島袋真,

黒田久雄,太田寛行,西澤智康

茨城大学農学部

キーワード:土地利用管理、食糧生産、薬剤耐性菌、テトラサイクリン、有機質資材

抄録

近年、薬剤耐性菌の自然環境中への流出が問題視されてきている。当研究グループでは霞ヶ浦水域とその周 辺農耕地における薬剤耐性細菌の分布や動態を明らかにすることを目的として、特に安価で感染症に効果があ り、畜産業の現場で飼料添加物として広く利用されているテトラサイクリン(TC)を標的抗生物質として調査 を行った。霞ヶ浦周辺では環境中に一般的であり、優占していると考えられる細菌である Gammaproteobacteria 綱細菌、Betaproteobacteria 綱細菌や Alphaproteobacteria 綱細菌で TC に耐性を示す細菌が多く分離され、さら にそれらが環境中に広く分布していることが明らかとなった。霞ヶ浦周辺の水域・土壌圏生態系に TC 耐性細 菌が拡散していることが顕在化され、それら TC 耐性細菌が定着していることが示唆された。

1. はじめに

霞ヶ浦は茨城県南東部にあり、日本第2位の湖面 積(220 km²)をもつ淡水湖である。霞ヶ浦が位置す る茨城県南東部は養豚業が盛んな地域であり、豚へ の飼料添加物として抗生物質が使用されている。昨 今、飼料添加物の薬剤や家畜体内で増殖した薬剤耐 性菌が糞尿を介して環境中に拡散し、薬剤耐性菌に よる環境汚染が懸念されている。中でもテトラサイ クリン(TC)は安価で一般的な抗生物質として使用 量が多く、医療現場に限らず自然環境中でも耐性菌 が多く報告されている。家畜糞尿中に含まれる薬剤 や薬剤耐性菌が、農耕地への糞尿の資材としての施 用や地下水脈を通して霞ヶ浦流域に拡散している事 が考えられる。

細菌に薬剤耐性能を付与する遺伝子は、トランス ポゾンやプラスミドなどの可動性遺伝因子、また細 菌の接合伝達によって、種の異なる細菌間で拡散す ると報告された^{II}。リボソーム保護タンパク質をコー ドする遺伝子(*tetW、tetM、tetO、tetQ*)によって耐性 能を付与することが知られている。特にトランスポ ゾンに挟まれた*tetW*は、異種の細菌間で伝播するこ とが報告された^{II}。本研究では、霞ヶ浦水域とその周 辺の農耕地における薬剤耐性細菌の分布と動態を明 らかにすることを目的として、霞ヶ浦流域に生息す る抗生物質耐性菌を分離し、その耐性遺伝子の分子 生態学的解析を行った。

2. 方法

2-1. サンプル採取

水試料は茨城県北浦とその上流域の4地点(図1) で2010年4月から2011年2月にかけて1ヶ月に1 回の間隔で柄杓を用いて採取を行い、また2013年5 月にも同地点で同様に採取した。土壌試料は2013年 12月に茨城県南東部の堆肥施用履歴のない畑(休耕 地)、2014年3月に畑地、また2014年9月には畑地 (施設栽培)で表層から10mの土壌層位をボーリン グ採取した。さらに2017年6月、7月、9月に茨城 大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究セン ター(FSC)の田畑圃場で、有機質資材(牛糞堆肥) が施用された施肥区と無施肥区の表層 0-10cm から 土壌を採取した。



図 1. 霞ヶ浦およびサンプル採取地点 LK,水試料採取地点(北浦);CP1-4,水試料採取地点(北浦上流域); FA,ボーリング採取地点(畑地);FO,ボーリング採取地点(林地); RF,土壤採取地点(施肥区);RN,土壤採取地点(無施肥区)

2-2. 細菌数測定とその分離および系統解析

水試料の生菌数測定には、R2A 培地^[3]と NB 培地 を用い、土壌試料には PTYG 培地^[4]を用いて行った。

TC 耐性菌数の測定および分離には、2010-2011 年 採取の水試料については終濃度 0, 30, 60, 90, 120 µg/mL のテトラサイクリン塩酸塩を添加した培地を 用い、それ以外の試料全ては終濃度 0, 20µg/mL のテ トラサイクリン塩酸塩を添加した培地を用いて行っ た。分離された TC 耐性菌から DNA を抽出し^[5]、16S rRNA 遺伝子を標的としたシークエンス解析によっ て系統解析を行い^[5]、MEGA7 を用いて系統樹を作 成した^[6]。

2-3. TC 耐性遺伝子の PCR 増幅

土壌中の TC 耐性遺伝子の検出を目的としてリボ ソーム保護タンパク質をコードする TC 耐性遺伝子 である、tetW、tetM、tetO、tetQを標的にしたプライ マー^[7]を利用し、土壌から抽出した DNA を用いて TC 耐性遺伝子の PCR 増幅を行った。

3. 結果

3-1. TC 耐性細菌の出現率

2010-2011年の2年間の調査では、霞ヶ浦の水域 における TC 耐性細菌の計数および分離の結果、TC 耐性菌数は1.9×10³~2.9×10⁶ CFU/mL であり、生菌 数に占める TC 耐性菌の割合は検出限界以下から 5.78%の間で変動した。7月から9月の夏期において 生菌数に占める TC 耐性菌の割合(出現率)は最大で 約6%であり、他の月では約1%前後であった(図2)。 また、2013年5月の調査では TC 耐性菌の出現率は どの地点においても1%以下であった。

3-2. 水域圏から分離された TC 耐性細菌

霞ヶ浦水域における調査で分離された TC 耐性菌 全 110 株の 16S rRNA 遺伝子解析の結果、105 株がグ ラム陰性菌であり、グラム陽性菌は 5 株のみであっ た。分離されたグラム陰性 TC 耐性菌は Serratia 属、 Chryseobacterium 属、Burkholderia 属など様々な種類 に属していた。そのうち半数以上が Proteobacteria 門 Gammaproteobacteria 綱に属する Serratia marcescens に近縁であった。さらに、Bacteroidetes 門に属する Chryseobacterium 属、Elizabethkingia 属など以前まで Flavobacterium 属に含まれていた魚類の病原菌が多 くを占めることが示された^[8]。



TC 耐性菌の割合の季節変動

3-3. 農耕地土壌から分離した TC 耐性細菌

土壌圏では全72分離菌株について水域と比較して 同じ Proteobacteria 門でも、土壌に広く分布するとさ れる Betaproteobacteria 綱や Alphaproteobacteria 綱に 属する Bradyrhizobium 属や Burkholderia 属、 Xanthomonadaceae 属の細菌などが 87.5%を占めてい ることが示された(表 1)。さらに 2015 年の調査で は、霞ヶ浦流域の土壌中から最大で約 2%の TC 耐性 細菌が検出された。

3-4. TC 耐性遺伝の PCR 増幅

2017 年の農耕地における調査では、有機質資材を 施用している場合と不施用の場合では、施用地で TC 耐性菌の CFU は有意に高い値を示した。さらに、TC 耐性遺伝子領域を標的とした PCR 増幅の結果、有機 質資材には TC 耐性遺伝子の存在が示された。

4. 考察

霞ヶ浦流域では環境水と土壌に TC 耐性菌が広く 分布していることが示唆され、生息する TC 耐性細 菌群集に違いがあることが示された。環境水では Gammaproteobacteria 綱の中でも腸内細菌であり、医 療の現場では日和見感染菌として知られる細菌が多 く分離された^[9]。一方、土壌からは特に Betaproteobacteria 綱や Alphaproteobacteria 綱の土壌 で頻繁に検出される細菌が多く分離された^[10]。いず れのサンプルにおいても検出された細菌は環境中か

Class and Order	Genus	Sites		
		Soil	Water	- I otal number
Alphaproteobacteria				
Rhizobiales	Bradyrhizobium	22	2	24
	Phyllobacterium		1	1
Rhodospirillales	Skermanella	1		1
Caulobacterales	Caulobacter		4	4
Betaproteobacteria				
Burkholderiales	Burkholderia	34	3	37
	Polaromonas	1		1
	Variovorax	5		5
	Burkholderiales bacterium		3	3
Gammaproteobacteria				
Enterobacteriales	Serratia		57	57
	Providencia		3	3
	Enterobacteriales bacterium		5	5
Xanthomonadales	Lysobacter	4		4
	Xanthomonadales bacterium	1	3	4
Pseudomonadales	Pseudomonas		1	1
Bacilli				
Bacillaceae	Bacillus		3	3
	Paenibacillus	2		2
	Bacillaceae bacterium	1	1	2
Flavobacteriales	Chryseobacterium		16	16
	Elizabethkingia		3	3
Actinobacteria				
Actinomycetales	Brevibacterium		1	1
Streptomycetales	Streptomyces	1		1
Sphingobacteria				
Sphingobacteriales	Sphingobacterium		4	4
Total number		72	110	182

表 1. 水域および土壌から分離されたテトラサイクリン耐性細菌

ら高い頻度で分離される。それらの細菌は TC 耐性 能を保持することが明らかとなった。

薬剤耐性遺伝子は比較的他の細菌に伝播しやすく、 TC 耐性遺伝子でもその伝播は確認されている^[2]。環 境中で優占していると考えられる細菌が薬剤耐性遺 伝子をもつことは、未分解の TC 残渣が混入した圃 場で TC 耐性細菌の急激な増殖・拡散の可能性が高 まる^[11]。また、農耕地において施用される有機質資 材に TC 耐性遺伝子が確認されたことから、資材を 農耕地に施用することで土着の TC 耐性能をもたな い細菌でも TC 耐性能を獲得する可能性がある。さ らに、環境中の細菌に留まらず、人間や動物の腸内細 菌や病原菌に TC 耐性遺伝子が伝播することで、医 学的な面でも深刻な問題を引き起こすと懸念される。

5. 結論

本研究から霞ヶ浦のような淡水や霞ヶ浦周辺の農 耕地土壌に生息する TC 耐性細菌の分布および TC 耐 性遺伝子の種類について新たな知見が得られた。今 後、自然環境中における TC 耐性細菌群集の動態や 遺伝子伝播機構に関する研究の継続が必要である。

6. 引用文献

[1] Davies, J. Inactivation of antibiotics and the dissemination f resistance genes. Science 264, 375–382, 1994.

[2]Gevers, D., Huys, G. & Swings, J. In vitro conjugal transfer of

tetracycline resistance from Lactobacillus isolates to other Grampositive bacteria. FEMS Microbiol. Lett. 225, 125–130, 2003.

[3] Reasoner, D. J. & Geldreich, E. E. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water. Appl. Environ. Microbiol. 49, 1–7, 1985.

[4] Brown, M. G. & Balkwill, D. L. Antibiotic resistance in bacteria isolated from the deep terrestrial subsurface. Microb. Ecol. 57, 484–493, 2009.

[5] Nishizawa, T., Komatsuzaki, M., Kaneko, N. & Ohta, H. Archaeal diversity of upland rice field soils assessed by the terminal restriction fragment length polymorphism method combined with real time quantitative-PCR and a clone library analysis. Microbes Environ. 23, 237–243, 2008.

[6] Kumar, S., Stecher, G. & Tamura, K. MEGA7: Molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. Mol Biol Evol 33, 1870–1874, 2016.

[7] Bernardet, J.-F., Hugo, C. & Bruun, B. The genera Chryseobacterium and Elizabethkingia. The prokaryotes, 638–676, 2006.

[8] Yu, VL. Serrada marcescens. Historical perspective and clinical review. New Engl. J. Med. 300, 887–893, 1979.

[9] Salles, JF., van Veen, JA. & van Elsas, JD. Multivariate analyses of *Burkholderia* species in soil: Effect of crop and land use history. Appl. Environ. Microbiol. 70, 4012–4020, 2004.

[10] Aminov, RI., Garrigues-Jeanjean, N. & Mackie, RI. Molecular ecology of tetracycline resistance: Development and validation of primers for detection of tetracycline resistance genes encoding ribosomal protection proteins. Appl. Environ. Microbiol. 67, 22–32, 2001.

[11] Heuer, H., Schmitt, H. & Smalla, K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields. Current Opinion in Microbiology 14, 236–243 (2011).