

レンコン栽培における石灰窒素のアンモニア化特性と窒素肥効の推定

假屋哲朗¹⁾・藤田 裕・小田部 裕²⁾・寺門 巖・飯村 強

(茨城県農業総合センター園芸研究所)

要約

レンコン栽培における石灰窒素の窒素肥効について、反応速度論的解析が可能であり、単純モデル型の一次反応式により地温データから石灰窒素のアンモニア化の過程を評価できることを明らかにした。また、石灰窒素施用時期別のアンモニア化率90%に要する期間は、2月～4月施用の場合は41日～58日、9月～11月施用の場合は22日～46日と推定した。この推定値について、4月に石灰窒素を施用したレンコン圃場において実証した結果、十分に適合した。また、レンコン栽培における春季に施用した石灰窒素の窒素肥効は、慣行肥料の50%程度を見込むことができることを明らかにした。

キーワード：レンコン、石灰窒素、窒素肥効、霞ヶ浦、アンモニア化

1. はじめに

レンコン (*Nelumbo nucifera*) は茨城県の主要な農産物の一つであり、その産地は霞ヶ浦沿岸に集中している。そのため、レンコン圃場からの窒素成分の流出が霞ヶ浦の富栄養化に影響すると懸念されている。レンコン栽培における適正な窒素施肥は、圃場からの窒素流出を低減し、霞ヶ浦への窒素負荷低減に寄与できると考えられる。

茨城県のレンコン栽培体系において、小田部・飯村 (2018) は、レンコンの収量に対する施肥の影響は少なく地域の気象や環境条件が大きく影響している可能性があることを示し、養分収支の考え方を応用して各圃場から持ち出すレンコン収量に応じてその圃場の施肥量を算定する施肥法を開発した。この方法は、各圃場の過去3年程度の収量水準を指標としてその圃場の施肥量を決定できることから、土壌分析等の手間もなく簡便な手法であり、茨城県野菜栽培基準 (茨城県農業総合センター、2016) に掲載され生産者に対する技術指導に活用されている。ただし、この方法は、収量の多少に応じて施肥量を適正化することができるが、各圃場の窒素肥沃度や施肥以外の窒素成分の影響を考慮しておらず、窒素施肥量のさらなる適正化において改良の余地を残している。

一方、茨城県のレンコン産地において、レンコンネモグリセンチュウの加害によってレンコンの表面に黒褐色の斑点や凹凸等の変形を生じる被害 (レンコン黒皮症) が発生し問題となっている (後藤ら、2011)。この線虫害への薬剤防除として、茨城県では石灰窒素を使用するケースが多い。このように茨城県のレンコン産地において、石灰窒素は農薬として用いられているが、石灰窒素に含まれる窒素成分の肥料効果はほとんど考慮されていないのが現状である。

市販の石灰窒素の主化合物は、カルシウムシアナミドであり、湛水条件では植物体に窒素として吸収されるまでにシアナミド、尿素、アンモニアと形を変える。また、水田土壌の窒素代謝は、田面水、土壌表層の酸化層、それ以下の還元層の3層で機能分化しており、脱窒系や無機化・有機化系などが相互に関連して働いている (鳥山、1996)。このように、常時湛水条件のレンコン圃場に施用された石灰窒素の窒素動態は複雑であり、その肥効は十分に明らかになっていない。

土壌中での形態変化を伴う窒素含有資材からの窒素供給に関しては、反応速度論的な解析が有効と考えられ、有機質肥料や被覆尿素を中心に多くの解析例があり (石橋ら、1992; 森次ら、2009; 新良、2010)、畑条件における石灰窒素の分解速度の解析にも用いられている (石橋、2017) が、水田条件での石灰窒素に関しては解析例が報告されていない。

そこで、レンコン栽培における石灰窒素の窒素肥効を明らかにするため、本研究では、石灰窒素について、反

1) 現 茨城県農林水産部産地振興課

2) 現 茨城県農林水産部農業経営課

応速度論的解析によるアンモニア化特性値を求めることにした。その際、この解析による石灰窒素のアンモニア化特性の推定値について、レンコン圃場での実測値と比較した。また、レンコン栽培圃場試験において、慣行肥料の窒素肥効との比較で、石灰窒素の窒素肥効の評価を試みた。

2. 材料および方法

2. 1 湛水条件における石灰窒素（カルシウムシアナミド）のアンモニア化特性

2. 1. 1 温度条件が石灰窒素のアンモニア化に及ぼす影響（恒温器培養試験）

供試土壌は、現地レンコン圃場（茨城県土浦市田村町、中粗粒強グライ土）から採取した水田土壌を用いた。土壌試料は、2mm 目合の篩により粗大有機物を取り除き、湿潤状態のまま実験開始時まで約 2℃で保存したものをを用いた。また、湿潤土を 105℃に設定した定温乾燥機で乾燥させ、水分を求めた。

湿潤土 60g と蒸留水 12ml をインキュベート管（直径 30mm、高さ 120mm）に加え、さらに石灰窒素区は市販の石灰窒素（粒状品、カルシウムシアナミド 55%、窒素全量 20%）を 20mg（石灰窒素 100kg/10a 相当量）に加え、対照区は石灰窒素無添加とした。インキュベート管内の材料をよく混和して土層内の空気を追い出し、プチルゴム栓で密閉した。これを 10℃、20℃、30℃に設定した恒温器内で静置培養した。培養中に発生した管内のガスは定期的に抜いた。培養試験はいずれも 3 反復で行った。

培養開始から 0、3、7、14、28、56、84 日後に、10%塩化カリウム溶液で無機態窒素を抽出し、インドフェノールブルー法（中谷、1981）を採用した気泡分節型連続流れ分析装置（BLTEC 社製、SwAAt）でアンモニア態窒素量を定量した。石灰窒素を混和した土壌のアンモニア態窒素量から対照区のアンモニア態窒素量を差し引いた窒素量をアンモニア化量とし、施用した石灰窒素の全窒素量に占める比率を石灰窒素のアンモニア化率とした。

培養試験の結果は、杉原ら（1986）の開発した反応速度論的解析法によって、培養試験で得られた温度別窒素アンモニア化曲線の重ね合わせを行い、アンモニア化の特性値を得た。なお、この曲線は、単純型、単純並行型、有機・無機化並行型の 3 つに類型化されている。杉原ら（1986）は未風乾土壌では単純型が適用できると報告しているため、本報告も単純型モデルを基本として解析した。

2. 1. 2 圃場条件における石灰窒素のアンモニア化に要する期間の推定

試験 2.1.1 で得られたモデル式により、圃場条件における石灰窒素のアンモニア化に要する期間の推定を行った。推定に必要なパラメータであるレンコン圃場の地温は、県内の主要なレンコン産地 5 か所（土浦市田村町、小美玉市下玉里、行方市繁昌、行方市山田、稲敷市浮島）において、2014 年 1 月～2016 年 12 月まで、土壌の深さ 15cm の位置を自記温度計で測定し、その平均値を用いた。推定に用いた石灰窒素の施用日は、レンコン定植前を想定した 2 月 1 日、3 月 1 日、4 月 1 日と、石灰窒素による線虫防除効果の高い施用時期を想定した 9 月 1 日、10 月 1 日、11 月 1 日とした。得られたモデル式に石灰窒素の施用日からの地温データを代入し、石灰窒素のアンモニア化率が 90%となる暦日とそれに要する日数を求めた。

2. 1. 3 レンコン圃場における石灰窒素のアンモニア化特性（土壌充填筒の圃場埋設試験）

供試レンコン圃場（土浦市田村町）の土壌は中粗粒グライ土である。供試圃場から採取し、2mm 目合の篩により粗大有機物を取り除いた土壌とカルシウムシアナミド試薬（全窒素 19.78%）4.96g（石灰窒素 100kg/10a 相当量）を混和し、底面のみガラス繊維ろ紙で覆った塩ビ製試験筒（内径 25mm、長さ 500mm）に充填した。対照として、同様の方法で土壌のみを充填した試験筒を作成した。これらの試験筒は、供試レンコン圃場の土壌表面と試験筒上面が同じ高さになるようにし、2016 年 4 月 6 日に埋設した。試験筒はいずれも 3 反復とした。

埋設開始から、0、7、14、28、42、70、98、126、154、182 日後に回収し、試験筒内の土壌を 10%塩化カリウム溶液で抽出し、インドフェノールブルー法（中谷、1981）を採用した気泡分節型連続流れ分析装置（BLTEC 社製、SwAAt）でアンモニア態窒素量を定量した。カルシウムシアナミドを混和した土壌のアンモニア態窒素量から対照区のアンモニア態窒素量を差し引いた窒素量をアンモニア化量とし、施用したカルシウムシアナミドの全窒素量に占める比率をカルシウムシアナミドのアンモニア化率とした。

2. 2 レンコン栽培における石灰窒素の窒素肥効

試験は土浦市手野町のレンコン圃場（中粗粒グライ土）において、2018年度と2019年度の2年間実施した。供試圃場の土壤理化学性を表1に示す。レンコン栽培の品種は、県内の主要品種の一つである‘パワー’とした。

供試レンコン圃場の一部を樹脂製の畦畔板（高さ0.6m）を用いて1区画6.72m²に区切り、その枠内に種となるレンコンを2本植え付けた。定植は、2018年4月11日と2019年4月9日に行った。定植後の栽培管理は茨城県野菜栽培基準（茨城県農業総合センター、2016）に準じた。掘り取りは、2018年が10月9日から10月11日、2019年が10月29日から10月30日に実施した。

窒素施肥に関して、肥料の種類や窒素施肥量の異なる4つの処理区を設けた。農家慣行のレンコン専用被覆肥料（レンコンの養分吸収特性に応じた窒素溶出となるように設計；アンモニア態窒素5%、シグモイド型被覆尿素肥料60日タイプ36%、シグモイド型被覆尿素肥料100日タイプ35%、シグモイド型被覆尿素肥料130日タイプ24%）を窒素成分で20kg/10a施用（慣行肥料20kgN区）および10kg/10a施用（慣行肥料10kgN区）と、石灰窒素を窒素成分で20kg/10a施用（石灰窒素区）とした。また、無窒素区を設けた。各区2反復とした。各処理区の石灰施用量を統一するため、石灰窒素区以外の処理区には石灰窒素区とアルカリ分が同量となるように消石灰を施用した。また、リン酸と加里は慣行肥料20kgN区の施肥量（リン酸11kg/10a、加里27kg/10a）を基準とし、すべての処理区の施肥量が同量となるように、リン酸肥料は重焼燐、加里肥料は塩化カリを用いて調整した。

掘り取り調査は、畦畔板で仕切った枠内のレンコンの株全体を掘り上げてよく水洗した後、肥大茎（食用に供する肥大した地下茎）とそれ以外（葉や肥大茎以外の地下茎）に分類し、それぞれの新鮮重を測定した。その後、各部位の一部を植物体分析サンプルとした。分析用サンプルは80℃で48時間以上通風乾燥した後、粉碎して全窒素含量をCNコーダー（Elementar社製、Vario Max）で測定した。

表1 レンコン圃場（土浦市手野町）の土壤の理化学性

pH	EC	NH ₄ -N	可給態 P ₂ O ₅	交換性塩基			CEC	T-N	T-C	遊離 酸化鉄	作土深	仮比重
				K ₂ O	CaO	MgO						
(H ₂ O)	(dS/m)		(mg/100g乾土)				(meq/100g乾土)	(%)		(cm)	(g/cm ³)	
6.2	0.21	4.9	46	30	583	77	34	0.35	6.1	1.2	48	0.43

3. 結果および考察

3. 1 湛水条件における石灰窒素（カルシウムシアナミド）のアンモニア化特性

3. 1. 1 石灰窒素のアンモニア化パターンの推定

石灰窒素（カルシウムシアナミド）を混和した土壤を温度別に湛水培養した結果を図1に示す。石灰窒素のアンモニア化率は、培養温度30℃の場合、培養7日目に54%でありその後培養28日目に90%付近となり収束した。培養温度20℃の場合、培養7日目が30%であり、その後は培養温度30℃と比べてやや低い値で推移した。培養温度10℃の場合、培養28日目が51%、培養84日目が76%であった。このように、石灰窒素のアンモニア化は培養温度の影響を受け、培養温度が高いほど変化速度が速くなった。また、この温度別に湛水培養した石灰窒素のアンモニア化率値は、いずれも速度論的に導かれる単純型の反応モデル式（表2）で算出した推定値とよく適合した。

このように、石灰窒素のアンモニア化率は反応モデル式にうまく当てはまることから、反応速度論に基づく温度変換日数法によるアンモニア化予測が有効であると考えられる。すなわち、石灰窒素のアンモニア化パターンは表2の特性値による一次反応式が適用でき、地温データから石灰窒素のアンモニア化の過程を評価できることを明らかにした。

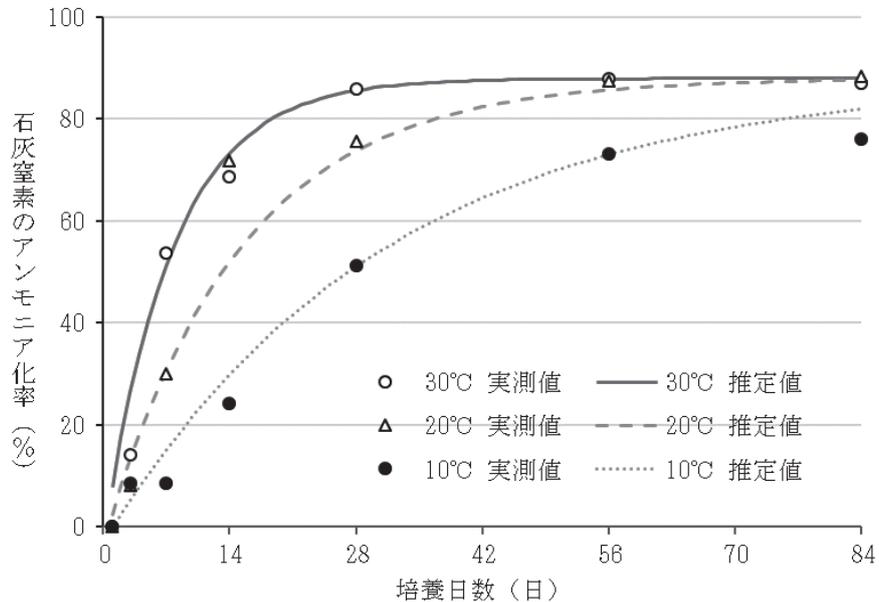


図1 湛水条件における培養温度別の石灰窒素のアンモニア化率の推移と単純型モデルによる近似曲線

表2 湛水土壤に混和した石灰窒素のアンモニア化の反応モデル式と特性値

類型	反応モデル式	特性値 ^{a)}			
		Ea	N ₀	k	b
単純型	アンモニア化率(%)=N ₀ (1-exp(-kt))+b	49765	91.282	0.0938	-3.38

a) Ea : 見かけの活性化エネルギー (Jmol⁻¹)、N₀ : 最大変化率、k : 速度定数 (day⁻¹)、t : 温度変換日数、b : 定数。

3. 1. 2 圃場条件における石灰窒素のアンモニア化に要する期間の推定

県内各地のレンコン圃場の深さ 15cm の日平均地温の推移を図2に示す。日平均地温の年間の平均値は 16.7°C、最高値は 25.9°C、最低値は 7.0°Cであった。この地温データを表2の反応モデル式に代入し、推定した石灰窒素施用日別の石灰窒素のアンモニア化に要する期間を表3に示す。レンコン定植前を想定した2月～4月に石灰窒素を施用した場合、石灰窒素のアンモニア化率90%となるまでの所要日数は41日～58日と推定され、施用時期が早いほど期間中の平均地温値が低く、所要日数が長くなった。一方、9月～11月に石灰窒素を施用した場合、石灰窒素のアンモニア化率90%となるまでの所要日数は22日～46日と推定され、施用時期が早いほど期間中の平均地温値が高く、所要日数が短くなった。

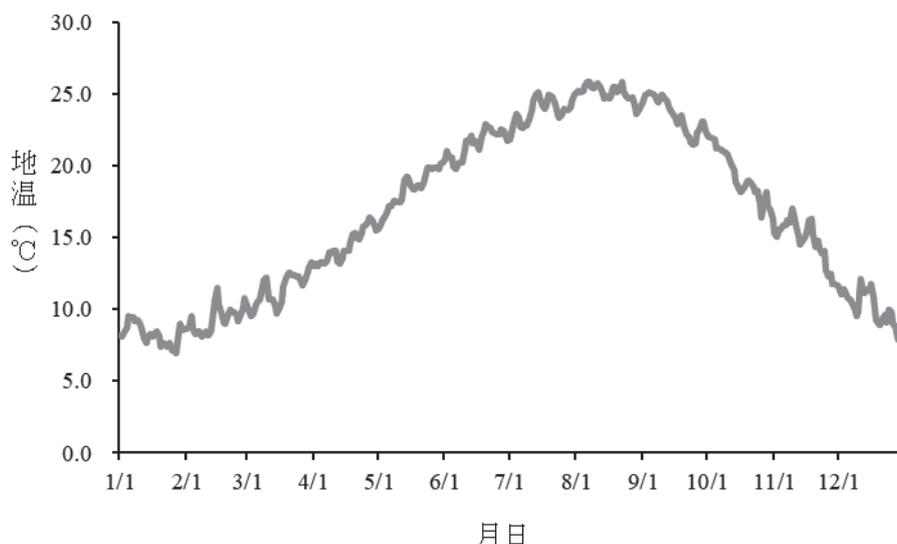


図2 県内レンコン圃場の日平均地温（深さ15cm、2014年1月～2016年12月の平均値）の推移

表3 石灰窒素施用日別の石灰窒素のアンモニア化に要する期間の推定

石灰窒素 施用日 (月日)	アンモニア化率 90%の推定日 (月日)	アンモニア化率 90%までの所要 日数(日)	期間中の 平均地温 (°C)
2月1日	3月31日	58	10.4
3月1日	4月20日	50	12.3
4月1日	5月12日	41	15.1
9月1日	9月23日	22	24.0
10月1日	10月31日	30	19.3
11月1日	12月17日	46	13.4

3. 1. 3 圃場条件における石灰窒素のアンモニア化に要する期間推定の実証

供試圃場に埋設した試験筒内土壌の石灰窒素のアンモニア化率の推移について図3に示す。石灰窒素のアンモニア化率は、埋設後20日目の4月20日に49%、埋設後42日目の5月18日に63%となり収束した。

石灰窒素のアンモニア化率は、実験室内の培養試験では90%程度で収束したのに対し、試験筒を埋設した圃場試験では63%前後に留まった。石灰窒素の主成分であるカルシウムシアンミドは水によく溶けるシアンミドを遊離し、シアンミドは加水分解されて尿素に変化し、さらに尿素は微生物のウレアーゼによってアンモニアに変化する（農村漁村文化協会編、2007）。また、水田土壌中における無機態窒素の形態変化は土壌の酸化還元状態に支配される（川口、1978）。すなわち、湛水下の水田作土の大部分を占める還元層ではアンモニアは酸化されず安定に存在するが、田面水や田面水から酸素が供給される酸化層ではアンモニア態窒素は硝化作用を受け硝酸または亜硝酸となる。また、生成した硝酸・亜硝酸は、一部浸透水と共に溶脱するが、大部分は拡散や水の移動により還元層あるいは酸化層内にある局所的な還元部位に移動し、脱窒作用を受け、窒素ガスまたは一酸化

二窒素となり大気中に揮散する。実験室内の培養試験は、インキュベート管を常に密閉状態にしており、酸素の侵入は極めて少なかったと考えられる。また、管内は垂直方向の水移動がなく、拡散作用によって発生した若干の窒素ガスまたは一酸化二窒素がガス抜きの際に系外に放出されたと考えられる。これらのことから、培養試験のアンモニア化率が90%程度で収束した要因は、施用した窒素の10%程度を培養操作の過程で揮散により失い、残りの90%程度の窒素が石灰窒素からアンモニアに形態変化したためと考えられる。一方、圃場の田面水は大気と接しており、田面水の酸素濃度はインキュベート管よりも高かったと考えられる。そのため、圃場に埋設した試験筒の石灰窒素の分解によるアンモニア態窒素はインキュベート管よりも硝化作用の影響を大きく受け、硝酸や亜硝酸の生成量が培養試験よりも多かったと考えられる。また、圃場では、生成された硝酸や亜硝酸が垂直方向の水移動により還元層に移動して脱窒作用を受け、脱窒で大気中に揮散した窒素量が培養試験よりも多かったと考えられる。さらに、田面水は区切られていないため、田面水に溶けた試験筒内土壌の石灰窒素は水の移動に伴って拡散し、失われた可能性が考えられる。これらの影響により、圃場試験では窒素の損失が培養試験よりも多くなり相対的に試験筒内の窒素の総量が減少したため、見かけ上、石灰窒素のアンモニア化率が63%前後に留まったと考えられる。

試験筒を圃場に埋設（4月6日）した後、石灰窒素のアンモニア化率が収束するまでに42日間を要した。これは、表2の特性値による一次反応式で推定したアンモニア化率90%となるまでの所要日数と極めて近い数値であった。すなわち、反応速度論的解析法を用いて石灰窒素のアンモニア化パターンを推定を行った結果は、実際の圃場におけるアンモニア化パターンとよく一致し、レンコン栽培期間中の石灰窒素のアンモニア化量の変遷を時期別に推定することができると考えられる。

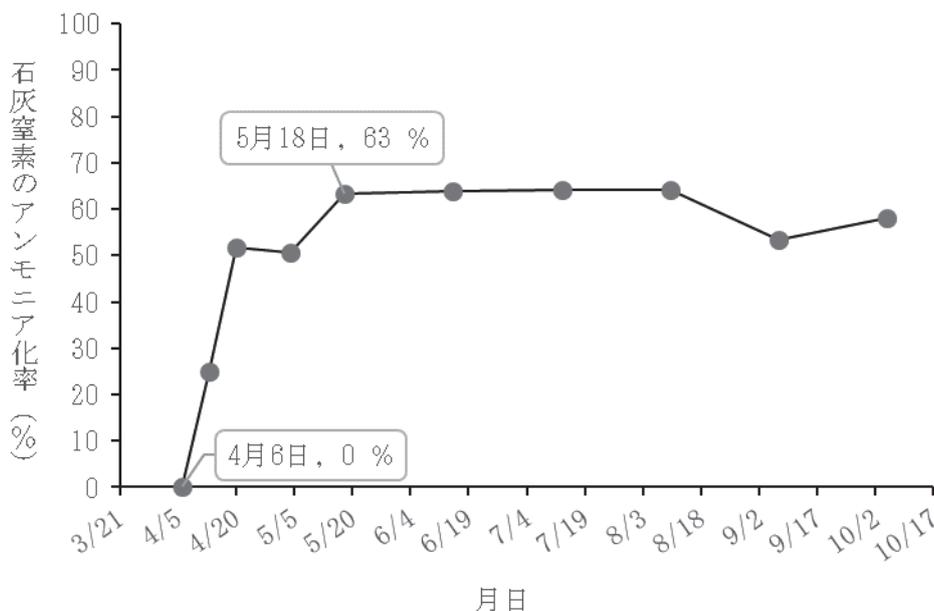


図3 圃場に埋設した石灰窒素のアンモニア化特性 (2016年)

3. 2 レンコン栽培における石灰窒素の窒素肥効

石灰窒素区、慣行肥料20kgN区および慣行肥料10kgN区、無窒素区の総収量および規格別収量を表4に示す。総収量は、慣行肥料20kgN区の4.05Mg/10aが最も多く、無窒素区の2.79Mg/10aが最も少なかった。石灰窒素区の総収量は3.45Mg/10aであり、慣行肥料10kgN区の3.52Mg/10aと同程度であった。レンコンの規格別割合は、石灰窒素区および慣行肥料20kgN区においてL品率の発生が多い傾向であった。

各試験区の窒素吸収量、施肥窒素利用率および慣行肥料と比較した石灰窒素の肥効を表5に示す。窒素吸収量は、慣行肥料20kgN区の17.1kg/10aが最も多く、無窒素区の10.7kg/10aが最も少なかった。石灰窒素区の窒素吸収量は14.7kg/10aであり、慣行肥料10kgN区14.3kg/10aと同程度であった。各試験区の窒素吸収量から無窒素区の窒素吸収量を差し引いて求めた施肥窒素吸収量は、石灰窒素区4.0kg/10a、慣行肥料20kgN区6.4kg/10a、

慣行肥料 10kgN 区 3.6kg/10a であった。また、施肥窒素利用率は、石灰窒素区 19.8%、慣行肥料 20kgN 区 31.8%、慣行肥料 10kgN 区 36.4% であった。慣行肥料の利用率と比較した石灰窒素の利用率として求めた石灰窒素の肥効は、慣行肥料 10kgN 区比 54.2%、慣行肥料 20kgN 区比 62.1% であった。

各試験区の施肥窒素利用率は、19.8%～36.4%の範囲であった。すなわち、レンコンが吸収する窒素は、施肥窒素以上に土壤有機物由来の窒素供給の寄与率が高い。水稻栽培において速効性窒素肥料で全層施肥した場合の基肥窒素の利用率は 32.8% (上野ら、1991) と報告がある。同様に水稻栽培について、長谷川 (1992) は、年間の施肥窒素量のうち、38%が水稻に吸収され、29%が土壤に残存し、20%程度が脱窒し、13%が流出すると推定した。水田土壤は、無機化作用と有機化作用が絶えず並行する特徴的な窒素動態を有している。レンコンと水稻で品目が異なり、またレンコン田が常時湛水に対し水稻は生育中期の水管理により落水期間が認められる点で異なるが、畑作物と比較して、水稻と同様にレンコンが土壤有機物由来の窒素供給の寄与率が高いことは妥当であると考えられる。

レンコンの収量や窒素吸収量について、試験区の中で慣行肥料 20kgN 区が収量 4.05Mg/10a、窒素吸収量 6.4kgN/10a と最も高かった。これは、慣行肥料の窒素溶出がレンコンの養分吸収特性 (小田部・飯村、2015) に応じて設計されており、合理的な施肥法 (小田部・飯村、2018) により窒素供給が最適化できた影響によると考えられる。

また、石灰窒素区は収量 3.45Mg/10a、窒素吸収量 4.0kgN/10a であり、慣行肥料 10kgN 区の収量 3.52Mg/10a や窒素吸収量 3.6kgN/10a とほぼ同等の値であった。このことは、石灰窒素区の窒素投入量 20kgN/10a が慣行肥料 10kgN/10a と同等の肥効を示したと考えられる。他方で、石灰窒素区の施肥窒素利用率を慣行肥料区の施肥窒素利用率で除した「慣行肥料と比較した石灰窒素の肥効」は慣行肥料 10kg 比で 54.2%、慣行肥料 20kg 比で 62.1% であった。これらのことから、レンコン栽培における春季に施用した石灰窒素の窒素肥効は、慣行肥料の 50% 程度を見込むことができると考えられる。

表 4 窒素肥料の種類や窒素施肥量の違いがレンコンの総収量と規格別割合に及ぼす影響

試験区	総収量 (Mg/10a)	規格別割合 (%) ^{a)}			
		L	M	S	2S
石灰窒素区	3.45	16.5	52.7	21.2	9.6
慣行肥料20kgN区	4.05	14.1	54.4	20.3	11.2
慣行肥料10kgN区	3.52	7.3	63.5	18.6	10.7
無窒素区	2.79	9.9	60.3	19.1	10.7

a) 規格別収量は、L 規格：1400g 以上、M 規格：400g 以上 1400g 未満、
S 規格：200g 以上 400g 未満、2S 規格：70g 以上 200g 未満。

表 5 窒素肥料の種類や窒素施肥量の違いがレンコンの窒素吸収量や施肥窒素利用率に及ぼす影響

試験区	窒素 吸収量	施肥 窒素量	施肥窒素 吸収量 ^{a)}	施肥窒素 利用率 ^{b)}	慣行肥料と比較した 石灰窒素の肥効 ^{c)}	
					慣行肥料	慣行肥料
					10kg比	20kg比
					(%)	
石灰窒素区	14.7	20.0	4.0	19.8	54.2	62.1
慣行肥料20kgN区	17.1	20.0	6.4	31.8	-	-
慣行肥料10kgN区	14.3	10.0	3.6	36.4	-	-
無窒素区	10.7	0.0	-	-	-	-

a) 施肥窒素吸収量は、各試験区の窒素吸収量から無窒素区の窒素吸収量を差し引いて求めた。

b) 施肥窒素利用率 = 施肥窒素吸収量 / 施肥窒素量 × 100 とする。

c) 慣行肥料と比較した石灰窒素の肥効 = 石灰窒素区の施肥窒素利用率 / 慣行肥料区の施肥窒素利用率 × 100 とする。

4. おわりに

茨城県では、霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第8期）（茨城県ほか、2022）において、長期ビジョンとして「泳げる霞ヶ浦」（霞ヶ浦の湖水浴場がにぎわっていた昭和40年代前半の状況、COD 5mg/L 台前半）をできる限り早期に実現できるよう目指している。

石灰窒素の施用については、農薬効果のみならず十分な窒素肥料効果があることを生産者にしっかりと周知する必要がある。レンコン田において石灰窒素の窒素肥効を評価しそれに応じて窒素施肥量を削減できれば、生産者にとっては施肥量削減による肥料コスト低減が見込まれ、湖沼環境にとっては窒素流入量を低減できることから、双方にメリットをもたらすことが期待できる。また、今後は、県内レンコン田それぞれの窒素肥沃度をきちんと評価して施肥に反映させる方法を確立し、レンコン田への窒素投入量を必要最低限な量に適正化する必要がある。

引用文献

- 後藤万紀・高木素紀・鹿島哲郎（2011）レンコンネモグリセンチュウ *Hirschmanniella diversa* に対する有効薬剤のスクリーニング. 日本線虫学会第19回大会講演要旨 41 : 52.
- 長谷川清善（1992）水田における窒素の動態と環境への影響評価に関する研究. 滋賀農試特別研究報告 17:1-164.
- 茨城県・栃木県・千葉県（2022）霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第8期）.
https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/kasumigaura/lake/documents/8ki_honbun.pdf（2022年8月31日アクセス）.
- 茨城県農業総合センター（2016）茨城県野菜栽培基準（Ⅲ根菜類、10レンコン）：167-170.
- 石橋英二・金野隆光・木本英照（1992）反応速度論的方法によるコーティング窒素肥料の溶出評価. 日本土壤肥料学雑誌 63 : 664-668.
- 石橋英二（2017）石灰窒素のシアナミドの分解速度 およびタマネギへの追肥効果. 石灰窒素だより 152 : 7-9.
- 川口桂三郎（1978）水田土壌学. 講談社、東京、p.229.
- 森次真一・石橋英二・大家理哉（2009）水稻の感温特性を考慮したシグモイド溶出型被覆尿素の選定法. 日本土壤肥料学雑誌 80 : 49-53.
- 中谷省三（1981）アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）. 日本分析化学会北海道支部編 水の分析-第3版-、化学同人、京都、pp.210-214.
- 新良力也（2010）コメヌカとオカラの湛水培養での窒素無機化特性解析と圃場での窒素放出経過の推定. 日本土壤肥料学雑誌 81 : 511-513.
- 農山漁村文化協会編（2007）肥料・土づくり資材大辞典. 農山漁村文化協会、東京、pp13-14.
- 小田部 裕・飯村 強（2015）茨城県におけるレンコン主要品種の乾物生産および養分吸収特性. 日本土壤肥料学雑誌 86 : 283-289.
- 小田部 裕・飯村 強（2018）収量および養分吸収特性に応じたレンコンの合理的施肥法. 日本土壤肥料学雑誌 89 : 220-226.
- 杉原 進・金野隆光・石井和夫（1986）土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農環研報 1 : 127-166.
- 鳥山和伸（1996）多様な水稻栽培方式における水田土壌肥料研究の現状と方向（1.水田土壌における養分動態研究の進歩、その1-窒素-）. 日本土壤肥料学雑誌 67 : 198-205.
- 上野正夫・熊谷勝巳・富樫政博・田中伸幸（1991）土壌窒素と緩効性被覆肥料を利用した全量基肥施肥技術. 日本土壤肥料学雑誌 62 : 647-653.

Estimation of Ammonification Characteristics and Nitrogen Fertilization Effect of Lime Nitrogen in Lotus Cultivation

Tetsuro KARIYA, Yutaka FUJITA¹, Hiroshi OTABE, Iwao TERAKADO and Tsuyoshi IIMURA

Summary

As a result of submerged culture of lime-nitrogen-mixed soil, it was suggested that ammonification of lime nitrogen was affected by culture temperature. In addition, the ammonification rate values of the lime nitrogen cultured in water well matched the values estimated by the simple reaction model formula derived kinetically. When lime nitrogen was applied in lotus field from February to April, it was estimated that it took 41 to 58 days for the ammonification rate of lime nitrogen to reach 90%. Moreover, it was estimated to be 22 to 46 days when lime nitrogen was applied from September to November. It was evaluated that the nitrogen fertilizer effect of lime nitrogen applied in spring in lotus root cultivation was expected to be about 50% of the conventional chemical fertilizer.

Keywords: Lotus root, lime nitrogen, nitrogen fertilization, Kasumigaura, ammonification

¹ Address: Horticultural Research Institute, Ibaraki Agricultural Center, 3165-1 Ago, Kasama, Ibaraki 319-0292, Japan