

2010年夏季の霞ヶ浦におけるワカサギのへい死の発生と ワカサギの生存可能な上限水温の推定

根本 孝・根本隆夫

Occurrence of dead pond smelt, *Hypomesus nipponensis* in Lake Kasumigaura in August 2010 and estimation of maximum survival water temperature

Takashi NEMOTO, Takao NEMOTO

Abstract

Japan's average temperature from June to August 2010 was recorded the highest since 1898. In Lake Kasumigaura, water temperature also lasted high unusually in this summer. Moreover, dead fish of pond smelt was confirmed in August, which had not seen much in recent years. Field survey was conducted to clarify the relationship between water temperature and fish death. And experiment in tank estimates the maximum survival water temperature for pond smelt.

Under the experiment, water temperature in three tanks with 5 individuals of pond smelt in each tank was changed between 25°C and 31°C. Each temperature was holded for 24 hrs. Each day, water temperature was raised by 2°C and it holded for 1 day. Results showed all pond smelt in tanks was survived under 25 and 27°C, and 8 individuals died in 29°C, but one had survived for 48 hrs in 31°C. Then lethal temperature of pond smelt was estimated to 29.1°C as TLm50.

Field survey suggested that death of pond smelt in Lake Kasumigaura was followed by almost 30 successive days in August under 29°C of water temperature as the lowest during a day, and 3 and 10 successive days under 31°C and over of water temperature as the highest during a day. In addition, the maximum of water temperature in Lake Kasumigaura was recored 33.5°C on 25th August 15:00 at the monitoring site located on center of the lake.

These results suggest pond smelt in Lake Kasumigaura died of lethal higher water temperature for almost 30 successive days.

Key Words: *Hypomesus nipponensis*, Lake Kasumigaura, water temperature, heat shock, death

はじめに

2010年(平成22年)6月から8月の夏の日本の平均気温は我が国が気象統計を開始した1898年以降で最も高い値を記録した。この期間の日本の平均気温の過去30年平年差は+1.64°C,特に8月は+2.25°Cとなり,どちらも過去最高となった(気象庁,2010)。霞ヶ浦でも2010年の夏季は例年になく高水温がつづいたほか,近年見られることのなかったワカサギのへい死が確認された。そこでこの時期のワカサギのへい死事例と高水温の関係を明らかにするため,霞ヶ浦の現地調査を行った。また,飼育実験によりワカサギの高水温時の生存可能範囲を推定した。

方 法

2010年8月25日,ワカサギのへい死魚が浮いているとの

通報をかすみがうら市在住の漁業者から受けて,その状況の聞き取りを同日漁業者から行った。あわせて,ワカサギのへい死状況を確認するため,通報のあった地点の霞ヶ浦湖岸(かすみがうら市牛渡地先)を踏査するとともに,投網(目合40節)による魚類の採捕も試みた。霞ヶ浦の水温および溶存酸素量(DO)は,確認現場付近のかすみがうら市牛渡地先霞ヶ浦で測定した網いけす養殖施設棧橋での測定値(YSI製Model155使用)を用いたほか,湖心観測所での水質自動測定値を参照した(国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所,2010)。また,茨城県内水面水産試験場で継代飼育しているワカサギを用い,水槽実験により生存可能な上限水温の推定を行った。

水槽実験には,屋外コンクリート池において霞ヶ浦の湖水および地下水の混合水を注水して給餌飼育しているワカサギを用いた。水槽実験は,4つのガラス水槽(区画1から区画4,各水槽の容積60リットル)に,地下水の微注

水によるかけ流しの流水下で5尾ずつ収容して行った。実験の開始前4日間のいずれの区画も水温25℃でワカサギを馴致させた。うち1区画は対照として実験期間中、水温を25℃で一定とした。いずれの区画もわずかに配合飼料を投与した。へい死魚の計数は1日1回午前9時に行い、あわせて所定の温度上昇の操作を行った。区画毎の水温の操作は水槽内のワカサギが全てへい死した時点で終了とした。へい死魚はその都度水槽から取り除いた。なお、区画毎の水温変化は次のとおりとした。区画1は24時間毎に2.0℃ずつ上昇させ、27℃、29℃、31℃の水温帯を設定した。区画2は区画1と同様の昇温を行ったうえで、31.0℃まで設定した後、連続してその水温を72時間維持させた。区画3は区画1と同様の昇温を行い、途中29.0℃を96時間継続した後、水温を0.5℃上昇させ29.5℃を24時間、その後1.0℃上昇させて30.5℃を24時間維持させた。

結 果

霞ヶ浦におけるワカサギへい死の状況

聞き取り調査の結果から、2010年8月中旬頃から湖岸の船溜（牛渡漁港など）の静穏域を中心に、へい死して水面に浮いているワカサギが見られるようになった。へい死尾数は概ね1視野で1尾から2尾程度で、水面に漂っているのが湖岸から確認された。ワカサギのへい死は8月中旬以降、連日確認された。2010年8月25日の朝には、それまでになく多くのへい死魚が漂っているのが湖岸から確認された。このときワカサギのへい死魚は1視野で10尾程度ずつのまとまりで漂っていた。

8月25日午前10時にかすみがうら市牛渡付近の霞ヶ浦湖岸域の現地調査を行った。その時点の湖岸の水温、溶存酸素量は、表層で30.8℃、11.2mg/l、底層（水深1.2m）で29.9℃、10.2mg/lであった。このとき水面を漂流していたワカサギを採捕したところ、7尾が採集され、それらはへい死魚6尾とひん死魚1尾であった。へい死したワカサギの体長は45mmから60mmの範囲にあった。いずれの個体も腐敗や鮮度の低下は認められず、死後硬直が認められた。なお、ワカサギ以外の魚種で漂流しているものはなかった。

同時に湖岸から投網を行ったところ、4回の投網でワカサギ33尾が採捕された。体長はへい死魚と同程度であった。いずれも活魚であったが、数尾には尻鰭基部に発赤が認められた。この投網ではワカサギの他、モツゴ、シラウオ、クルマサヨリ、ヌマチチブも活魚で採捕された。

2010年8月の霞ヶ浦の水温、溶存酸素量の推移

内水面水産試験場が養殖業者の協力を得て、かすみがうら市牛渡地先の網いけす養殖施設で夏季3ヶ月間、毎日午前6時に測定している表層（水深0.5m）と底層（水深4.0m）の溶存酸素量記録のうち8月の推移を図1に示した。なお、この測定位置は距岸距離で約150mの位置にあり、ワカサギのへい死を確認した現場付近に位置している。そ

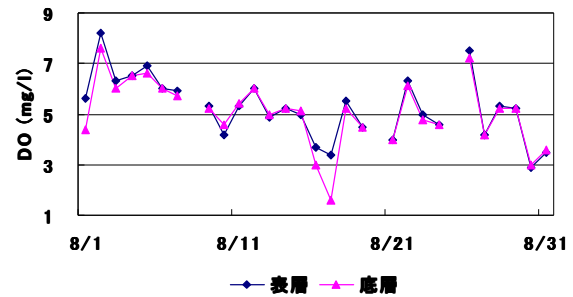


図1. かすみがうら市牛渡地先網いけす養殖施設における溶存酸素量の推移。

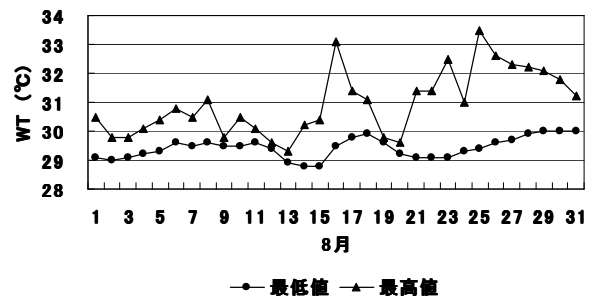


図2. 霞ヶ浦湖心観測所の自動水温測定値の日別最高最低水温の推移。

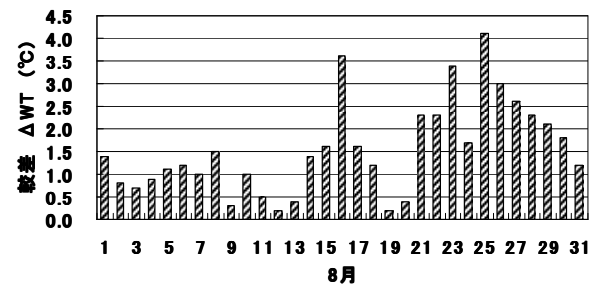


図3. 霞ヶ浦湖心観測所の自動水温測定値の日中較差の推移

の結果、魚介類に生理的变化を引き起こす限界濃度とされる溶存酸素量3.0mg/l（日本水産資源保護協会、2006）を下回る測定値は底層で3回測定されたが、表層の溶存酸素量は常にそれ以上で推移していた。

湖水温の日周変動は日中正午頃が最高水温となることから、国土交通省霞ヶ浦河川事務所湖心観測所で1時間毎に連続自動測定される表層の水温測定値を参照した。そこから2010年（平成22年）8月の日中最高水温と最低水温の推移を図2に、また最高水温と最低水温の日中較差の推移を図3に示した。その結果、8月1ヶ月間の推移は、日別の最低水温は平均 $29.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、最高水温は $30.9 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、日間較差は $1.5 \pm 1.0^\circ\text{C}$ となっていた。さらに、8月16日以降は最高水温が 31.0°C を下回ったのは2日間のみであり、8月25日15時にはこの夏の最高水温 33.5°C に達した。このとき日間較差は 4.1°C に達した。一方、8

月の最低水温は8月14日、15日の未明に記録した28.8°Cであった。

また、網いけす養殖施設で毎日午前6時に観測している表層と底層の水温はそれぞれ平均 $29.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$ と $29.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$ で推移していたことから、8月においては湖岸付近における表層と底層の水温差はほとんどないといえた。

表 1. 過去 24 時間中の水温とその間のへい死尾数の推移

経過日数	区画1		区画2		区画3		区画4	
	水温	尾数	水温	尾数	水温	尾数	水温	尾数
1日目※	25.0	0	25.0	0	25.0	0	25.0	0
2日目	25.0	0	25.0	0	25.0	0	25.0	0
3日目	27.0	0	27.0	0	27.0	0	25.0	0
4日目	29.0	5	29.0	1	29.0	2	25.0	0
5日目			31.0	3	29.0	0	25.0	0
6日目			31.0	0	29.0	0	25.0	0
7日目			31.0	1	29.0	0	25.0	0
8日目					29.5	1	25.0	0
9日目					30.5	2	25.0	0

※ 1日目は試験開始時点の数値を示している。

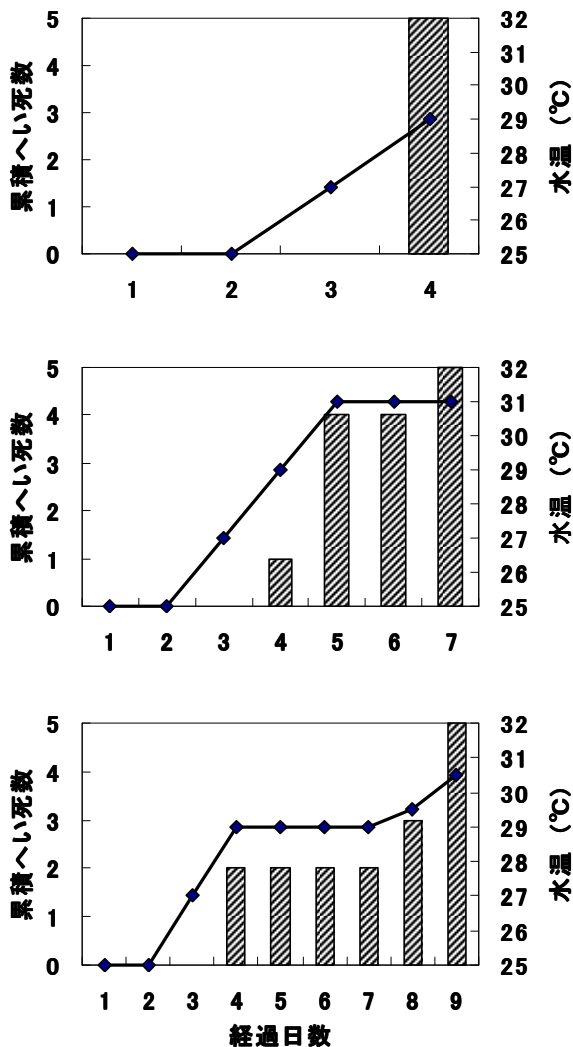


図 4. 飼育水温と累積へい死尾数の推移 (上: 区画 1, 中: 区画 2, 下段: 区画 3).

水槽実験

2.0°C間隔で温度変化区を設定したのは、2010年(平成22年)8月の霞ヶ浦の水温変化が日間較差で平均1.5°C、最高4.1°Cにも及んだことから、現場条件に近い状況を再現しようとしたためである。区画ごと24時間ごとの経過水温とその間のへい死尾数を表1に示した。また区画ごとの水温変化と累積へい死数の経過を図4に示した。

供試魚の大きさは体長の平均±標準偏差は $82.2 \pm 12.3\text{mm}$ 、体重で平均±標準偏差は $5.2 \pm 2.3\text{g}$ である。水温を変化させた区画1から区画3ではいずれも、水温27°Cまではへい死はみられなかったが、水温を27°Cから29°Cに昇温したところでいずれの区画でもへい死が発生した。そのときのへい死は29°Cへ昇温後24時間以内に、区画1では5尾すべてがへい死、区画2では5尾中1尾がへい死、区画3では5尾中2尾がへい死した。

その後、区画2は、31°Cへ昇温後24時間以内にさらに3尾がへい死した。区画2は残る1尾となったところで、昇温せず水温31°Cを持続させたところ、その個体は48時間目までは生存していたが、72時間目までにへい死した。

区画3は、残る3尾となったところで、昇温をせず水温29°Cを96時間経過させたところすべて生存していた。しかしその後昇温幅を違えて、29.5°Cに昇温したところ24時間以内に1尾がへい死し、さらに30.5°Cに昇温したところ24時間以内に残る2尾もへい死した。なお、水温25°Cで一定とした区画4は9日間へい死はなかった。

この結果を、区画毎に所定の水温の経過時間を違えているが、経過時間を考慮せずに水温とへい死の関係を見ると、水温27°Cでは水温変化区の全15尾にへい死はなく、29°Cで8尾へい死、29.5°Cで1尾へい死、30.5°Cで2尾へい死、31.0°Cで4尾へい死となった。また、経過時間と生存の関係を見ると、29.0°Cで96時間生存した個体と、31.0°Cで48時間生存した個体があったことがわかる。

ここで、水温に関するワカサギの半数致死水温 (TL₅₀) (°C) を推定するため、全区画の毎日の観察時点における生存率と水温をもって、ダートロフの方法(農林水産省, 1965)を用いて対数上の直線関係に当てはめた(図5)。その結果、片対数上の50%生残率を半数致死水温として回帰式から算出するとTL₅₀(°C)は29.1°Cとなった。

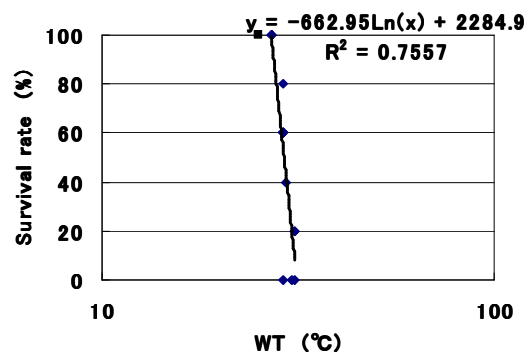


図 5. 水温と 24 時間後の生存率の関係

考 察

へい死したワカサギを確認した地点付近の湖水の溶存酸素量の推移から判断すると、溶存酸素量の状況がワカサギのへい死の要因ではないと考えられる。それは、毎午前6時の溶存酸素量は底層では一時期3.0mg/lを下回ったものの、表層の溶存酸素量が3.0mg/lを下回ることなく貧酸素水塊の形成はなかったことから、この期間の溶存酸素量がワカサギに生理的に大きな影響を与えたとは考えにくいことと、ワカサギの遊泳力を考えれば、より好適な場所への移動は容易とみられることもある。

同時に測定した表層と底層の水温についても水深間に差はほとんどみられていなかった。一方、参照した湖心観測所の位置は、霞ヶ浦の中心で水深7m付近にある。これは流入河川など陸域からの新たな流入水が付近にない条件ならば、同時刻の湖岸の水温は湖心観測所の観測値より高くなるといえよう。したがって、この夏の湖岸の最高水温は基本的に湖心観測所の観測値よりも高かったものと推察される。また、その高水温帯は湖岸ほど表層から底層まで及んでいたと考えられる。よって生存したワカサギの多くは、高水温を忌避し、わずかな温度差であっても比較的低温の層に分布していたものと考えられた。

霞ヶ浦の水温変化の推移と水槽実験の結果を比較すると、2010年8月に入って以降、連日最高水温と日間較差が上昇し、8月8日に水温31.0℃という最高水温の一つのピークをむかえていることから、その頃にはへい死が始まっていたと推察される。熊丸(2003)は水槽実験によるワカサギの呼吸量の測定から26℃以上で代謝異常を起こし、28℃でへい死するとしていることから、天然水域でもその温度付近でへい死が発生したのと考えられる。

また、漁業者の情報によるへい死魚の数量が一段と増加したのが8月25日であったことと、最高水温を記録した日が一致したことも興味深い。事実、8月21日以降の霞ヶ浦の最高水温と日間較差の上昇幅は8月上旬の動きよりも一段と大きいものとなっていたことから、その間の昇温の刺激により8月25日までのへい死魚が増加したといえよう。また、8月25日以降は最高水温が低下に転じ、日間較差も小さくなったことから、8月25日に生存していたワカサギは水温によるへい死は減少したものと推察される。

水槽実験からは半数致死水温(TLm(℃))は29.1℃と推定されたが、魚類の温度耐性はその時点における水温変化の状況によって変化するといえるので一義的には求められないともいえる。また、水温変化に対する耐性が、それぞれの生息水温の経過時間の長短によっても変化することは水槽実験の区画2と3の経過から明らかである。しかし、このTLm値は、水槽実験で示された29.0℃でへい死魚がみられはじめたことと、31.0℃で48時間生存した1個体がみられたことによるものであり、また松原・落合(1955)はワカサギの生存可能範囲の上限温度を30℃としていることも考慮すれば、少なくともワカサギにとって

29℃台の水温は致死的な水温帯であるといえるであろう。しかし、今回の水槽実験で、同一水温でも区画によって生存率が大きく異なったことは、区画の収容尾数と区画数の多寡が影響を及ぼしたのと考えられる。よって、TLm値の精査には、ワカサギの天然水域における分布密度を考慮した水槽収容密度の設定や水槽収容に伴う個体間の干渉作用の有無についても再検討を加えた上で区画を増加させた実験が必要となろう。

この夏の霞ヶ浦の水温の推移は、最低水温でもTLm値や30℃を上回る日数が多かったが、ただちにへい死魚がみられることはなかった。また、水温の推移から推定されるへい死時点とへい死魚が実際に発見されるまでの時間差がみられた。さらに、へい死魚の発見と同時にその付近で生存しているワカサギも採捕された。このことは、霞ヶ浦は常に一樣の水温ではなく生存可能な水温帯の水域が形成されていたことを示唆しているほか、日間最低水温が29℃台で推移している中で局地的に急激な温度変化が生じた刺激によるへい死の発生も示唆している。

これらから、2010年8月の霞ヶ浦でみられたワカサギのへい死の発生要因は、湖心部の表層における測定値で日中の最低水温が29℃を越えるような、ワカサギにとって致死的な水温環境が長期間継続したことに加え、湖心の測定値で最高水温が31℃を超えるような日中の急激な水温上昇による水温刺激が引き金となって発生したのと考えられた。

要 約

- (1)2010年(平成22年)6月から8月夏の日本の平均気温は1898年以降で最も高い値を記録し、霞ヶ浦では8月に、近年見られることのないワカサギのへい死が確認された。
- (2)漁業者によれば、2010年8月中旬から湖岸の静穏域でワカサギのへい死魚が連日散見されるようになり、8月25日朝にはその数量が一段と多くみられた。
- (3)2010年8月の霞ヶ浦の水温は、国土交通省霞ヶ浦河川事務所湖心観測所の表層の水質測定値によれば、日中の最低水温は平均±標準偏差で29.4±0.3℃、最高水温は30.9±1.1℃、日中較差は1.5±1.0℃で推移した。8月25日15時にこの夏の最高水温33.5℃を記録し、このとき日中較差は4.1℃であった。
- (4)15尾のワカサギを5尾づつ収容した3つの水槽の水温を25℃から31℃まで24時間毎に2.0℃づつ昇温させた結果、水温を29℃へ昇温開始後24時間以内ではじめて8尾がへい死した。しかし水温29℃中で96時間、31℃中で48時間生存した個体もあった。
- (5)水温とワカサギの生存の関係を、半数致死水温(TLm(℃))として推定すると29.1℃となった。
- (6)霞ヶ浦で2010年8月にみられたワカサギのへい死要因は、8月の月間最低水温が28.8℃にとどまり、ほぼ1ヶ月間、日間最低水温が29℃台で推移したことに加えて、

最高水温 31℃以上の期間が、連続して 3 日ないし 10 日続いた高水温環境が長期間継続したことによるものといえた。

謝 辞

霞ヶ浦漁業協同組合の安部秀男氏には詳しいワカサギのへい死状況の報告や現地調査に際し多大なるご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。また、同漁協鈴木幸雄氏には、網いけす養殖施設における霞ヶ浦の水温と溶存酸素量の測定に多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

文 献

- 気象庁(2010):平成22(2010)年夏の日本の平均気温について.平成22年9月1日付け報道発表資料.
- 熊丸敦郎(2003):霞ヶ浦における近年のワカサギ資源変動要因について.茨城内水試調研報,38,1-18.
- 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所(2010):霞ヶ浦速報,水質雨量水位(オンライン).
<http://www.kasumi.ktr.mlit.go.jp/scripts/real/index.html>.参照日2010年9月6日.
- 農林水産省(1965):魚類に対する毒性試験法,昭和40年11月25日付け40農政B第2735号農政局長通達.
- 松原千代松・落合明(1955):魚類学(下),水産学全集,19,恒星社厚生閣,東京.
- 日本水産資源保護協会(2006):水産用水基準(2005年版),16-19,東京.