

(43) 宍道湖におけるコノシロの大量死発生に関する予測モデルの構築

Establishment of the model for forecasting
for the large amount death of *Konosirus punctatus* in Lake Shinji

浅田純作*, 宇野和男*, 上田 務*, 坂田達彦**, 今井 淳***
Junsaku ASADA, Kazuo UNO, Tutomu UEDA, Tatuhiro SAKATA, Jun IMAI

ABSTRACT; Lake Shinji is the blackish lake, located in the east part of Shimane Prefecture. A large amount death of Gizzard shad (*Konosirus punctatus*) occurred in 1996 in Lake Shinji. Since then, a strange phenomenon such as the death is making an appearance every year. This large amount death is a very serious problem for the fishery and the water quality environment in Lake Shinji.

This research, try to find causes of the death, describes a forecasting model that analyze the relation between the water quality and the large amount death of Gizzard shad. We considered about the hypothesis of the factor of Gizzard shad's death. Thinking about the hypothesis, we paid attention to decreased physical strength of Gizzard shad by the spawning. Additionally, we paid attention to Gizzard shad going up the river from Lake Nakami to Lake Shinji to spawn. And we will try to establish the model for forecasting the large amount of death based on the hypothesis.

KEYWORDS; Lake Shinji, Gizzard shad (*Konosirus punctatus*), water quality

1. はじめに

今日、我々を取り巻く環境は様々な問題に直面しており、無視することの出来ない状況になっている。島根県の東部に位置する宍道湖は、全国第7位の面積(79.1km²)を有する湖で、大橋川を介して中海と連なる我が国の代表的な汽水湖として知られており、中海と共に中国山地を源とする一級河川斐伊川水系の下流域を構成している。この宍道湖においても他の水域と同様に、人間活動や周辺都市化の影響から、その生態系を含む水環境は改善されておらず、ヤマトシジミの大量へい死¹⁾、アユの冷水病問題²⁾、1994年以降のワカサギ不漁³⁾など、多くの問題を抱えている。そのような状況下、1996年より突発的にコノシロの死骸が大量に初夏の宍道湖湖面上で発見された⁴⁾。以降、宍道湖でのコノシロ大量死は毎年発生しており大きな問題となっている。しかし、宍道湖におけるコノシロの生態そのものがほとんど解明されていない。

そこで本研究では、宍道湖に関する諸問題の中からコノシロの大量死を取り上げ、その要因が未解明な状況のもとでの大量死発生の予測を試みる。予測にあたっては、コノシロの大量死と現時点で存在する宍道湖水環境のデータとの関係構造の分析を行い、コノシロの大量死発生予測モデルの構築を行う。

コノシロの大量死は年ごとの発生数に大きな差が生じていること、その発生時期が6・7月に集中していること、などの調査結果⁴⁾を踏まえ、本研究では、それらの大量死に関する特徴や現在分かっているコノシ

*松江工業高等専門学校環境・建設工学科(Department of Civil and Environmental Engineering, Matsue National College of Technology)

**鳥取県庁(Tottori Prefecture)

***京都市役所(Kyoto City)

口の生態などを基に大量死発生のメカニズムを仮説として提案し、その仮説に基づいたモデル構造を構築する。本研究では予測モデルの精度向上を主眼に置くことから、予測モデルで用いる各パラメータについては従来の生物学的な見解に囚われず、試行的に行った複数の計算結果の中から予測精度向上に適したパラメータを採用し、さらに、そのパラメータ値の推定に当たっては、水質など説明変数のカテゴリー分類に対し、モデルの数学的な精度向上を目指した取り扱いを行った。

2. 宍道湖の水環境変化とコノシロのへい死状況

コノシロのへい死状況と水環境の変化の例として、図-1 に 1999 年の日別コノシロへい死確認数⁵⁾と、宍道湖湖心底層域の水環境の変化⁵⁾を示す。コノシロへい死確認数において、1999 年と同様な傾向で 1996 年以後毎年おびただしい数のコノシロの死骸が確認、回収されている。

この大量死の要因の一つとして、夏期の宍道湖における水中の酸素不足が推測されている⁶⁾。そこで、宍道湖湖心底層域の水環境の変化を見ると、図-1 よりコノシロのへい死が確認されている 6~7 月に底層域での溶存酸素濃度(DO)が低く塩分濃度が高い状態になっているのがわかる。したがってコノシロのへい死にそれらが少なからず影響している可能性が考えられる。しかし、同様の水環境の傾向は 8~9 月のコノシロのへい死が確認されていない時期に存在しているというのも事実である。したがって、単に溶存酸素濃度の低下や塩分濃度の増加のみが要因でコノシロがへい死するとは言い難く、他の要因の存在も考えられる。

コノシロのへい死が確認される時期は毎年 6~7 月と限定されており、この時期はコノシロの産卵時期に相当する。産卵後はコノシロの体力が低下すると言われており、このことがへい死の主な原因の一つに考えられている⁶⁾。このことから本研究では、コノシロの体力が産卵により低下している状態の中、湖底の溶存酸素をはじめとする水環境に変化が起これ、コノシロが死亡したと仮定する。

3. 宍道湖の水質によるコノシロの大量死予測モデル

3.1 コノシロのへい死決定モデルの概念

前述の考え方に基づくならば、コノシロには水環境の変化による生死の分岐点となる境界値の存在を仮定することができる。

図-2 はその概念図であり、縦軸にコノシロの体力とその境界値を示している。水質の変化がコノシロのへい死に少なからず影響しているであろうと想定できるが、コノシロのへい死時期と同じような水質状態が、へい死が確認されていない時期にも多々存在しているという事実は、図中の左図によって説明される。すなわち、水質の変化によるダメージはあるものの、コノシロの体力は生死を分ける境界値以上であることから、死には至らず生き続ける状況になる。しかし、産卵による体力低下を考慮すると、図中の右図のようにコノシロの体力は大幅に削られ、これに水質の変化によるダメージが加わることで境界値を下回り、死に至るということが説明される。

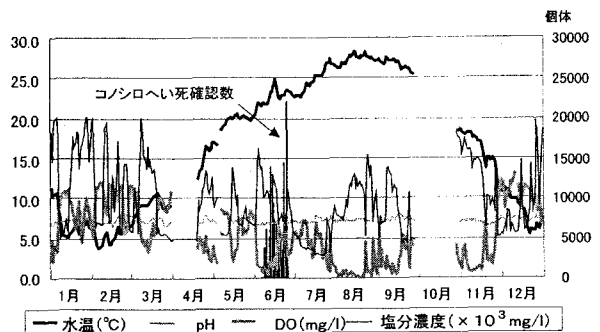
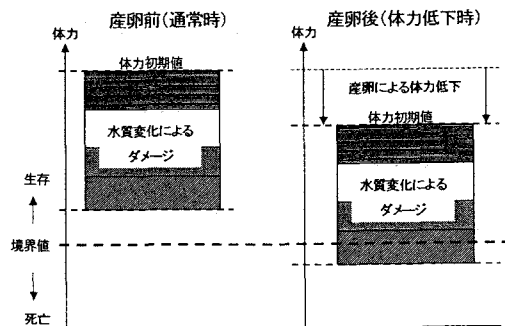


図-1 1999 年コノシロのへい死確認数と水質推移 (底層)



注) 図中の模様分けは、ダメージの複数要因のイメージです。

図-2 コノシロへい死の境界値モデルの概念図

3.2 水質がコノシロのへい死に与える影響と大量死予測モデルの構築

ここでは、前節で述べたコノシロの大量死予測モデルを宍道湖湖心自動観測所の水質データ⁵⁾に基づいて、数量化理論Ⅱ類によって構築する。分析対象年度は、全てのデータが揃っている1997年～2001年までとし、対象年度のうち産卵期と想定される、コノシロの大量死の発生した最も早い日(5/25)から、最も遅い日(7/22)に限定し分析を行った。説明変数としては、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、塩分濃度など湖心(水深約5m)の水質データを表層から底層までの深さによって5段階に分け設定している。ここで水質データは、1時間ごとに計測されたデータを日平均に換算して利用した。なお、本研究では、予測モデルの精度を数学的に向上させることを目的としていること

から、各カテゴリーにおけるサンプルの度数分布をなるべく均等化させる必要があり、水質データのうち水温以外のpH、溶存酸素濃度(DO)、塩分濃度については、底層におけるカテゴリー区分値を、表層・中層とは異なった区分設定としている。

図-3は、その分析結果である。モデルの精度は、相関比が0.4を超えていることから、概ね妥当であり、レンジ、偏相関係数によって大量死確認数に対する各要因の影響の大きさを判断することに問題はないといえる。モデルのパラメータ構成によると、コノシロのへい死に対して、パラメータの中では溶存酸素より水温、塩分濃度の影響が大きく、特に表層・底層域における水温、塩分濃度が大きく関係する計算結果となり、一方、中層の全パラメータ、全層域でのpHはあまり影響していない。

以上の分析による判別境界値が図-2の概念図における境界値に、判別関数による合成変量が体力に相当し、合成変量が境界値を下回れば「死亡」、越えていれば「生存」と判別されることになる。

4. コノシロの遡上を考慮した大量死予測モデル

4.1 コノシロの大量死に対する知見

前章において構築したコノシロの大量死予測モデルは、5月から7月の産卵期のみに大量死が発生しているという現象と、大量死に宍道湖水環境の変化が少なからず影響していることに矛盾はしていない。しかし、年別のコノシロ大量死の現状と予測による大量死発生日数を示す表-1によると、1996年から2001年までの間、へい死が大量に確認されている年とへい死の確認数が極端に少ない年があり、本モデルの精度では十分

説明変数		カテゴリ	度数	スコア		レンジ	偏相関係数(順位)
				値	-1.11.1		
表層	水温(度)	21.0以下	27	0.5396		1.0874	0.1201(5)
		21.1～24.0	132	0.4997			
		24.1以上	147	-0.5478			
	pH	7.6以下	91	0.1899		0.4197	0.0758(8)
		7.7～8.1	127	0.0232			
		8.2以上	88	-0.2298			
DO(mg/l)	7.0以下	81	0.2079		0.4805	0.1242(4)	
	7.1～8.0	105	0.1512				
塩分濃度(mg/l)	8.1以上	120	-0.2726		1.4886	0.1680(3)	
	3000以下	83	1.0022				
	3001～4500	87	-0.1957				
中層	水温(度)	4500以上	136	-0.4864		0.6852	0.0705(9)
		21.0以下	28	0.1321			
		21.1～24.0	136	0.3367			
	pH	24.1以上	142	-0.3485		0.5082	0.1064(6)
		7.6以下	119	-0.2733			
		7.7～8.1	125	0.1436			
DO(mg/l)	8.2以上	62	0.2349		0.1501	0.0424(11)	
	7.0以下	115	-0.0859				
	7.1～8.0	111	0.0641				
塩分濃度(mg/l)	8.1以上	80	0.0345		0.2667	0.0352(12)	
	3000以下	76	-0.1993				
	3001～4500	89	0.0635				
底層	水温(度)	4500以上	141	0.0674		1.2462	0.2512(1)
		21.0以下	40	0.8140			
		21.1～24.0	140	-0.4322			
	pH	24.1以上	126	0.2218		0.2025	0.0491(10)
		7.0以下	129	0.0340			
		7.1～7.5	130	0.0272			
DO(mg/l)	7.6以上	47	-0.1685		0.2992	0.0980(7)	
	3.0以下	127	-0.0441				
	3.1～5.9	102	0.1600				
塩分濃度(mg/l)	6.0以上	77	-0.1392		1.0144	0.2053(2)	
	5000以下	110	0.5063				
	5001～9000	111	-0.1126				
		9001以上	85	-0.5081			
被説明変数		カテゴリ	度数	スコア		判別率	相関比
大量死確認		されている	221	0.4015		72.876	0.4192
		されていない	85	-1.0440			

(図では5段階の深さの内3段階のみ表示)

図-3 数量化理論Ⅱ類による分析結果(1997～2001)

に説明のつかない現象が存在している。この段階のモデルは水環境の変化のみに依存していることから、コノシロの生死には、このモデルで採用されたカテゴリー以外の要因の存在が考えられる。

そこで本研究では、宍道湖にコノシロが遡上してくる年と遡上してこない年があると仮定し、コノシロの遡上に対して何らかの影響力があると考えられる中海から宍道湖への逆流量に着目した。また、宍道湖の水位と逆流量には強い関係があると考えられるため、本研究では、宍道湖の水位を変化させる斐伊川下流域の流量にも着目した。

表-1 コノシロ大量死の現状と
予測による大量死発生日数

年	大量死 確認数	実際の 大量死 発生日数	予測による 大量死 発生日数
1996	119900	18	36
1997	157210	24	37
1998	652	7	20
1999	144590	21	44
2000	207949	37	62
2001	1670	5	30

4.2 コノシロの遡上を考慮した大量死予測モデルの概念

以上の考えに基づき本研究では、図-4 の様な予測モデルを想定した。図中の上部に示すようにコノシロは産卵期になると、宍道湖に遡上するか否かを判断する。その際、コノシロの意志決定を左右する2つの流量が存在し、その流量が遡上に適しているならば遡上し、適していないならばコノシロは遡上を行わない。

従来のモデルと組み合わせて考えると、コノシロは宍道湖に遡上し産卵を行った場合にのみ、産卵による体力低下と水質変化によるダメージによって死に至り、大量死が発生する(Case4)。それ以外のコノシロが産卵期ではない場合(Case1)や宍道湖に遡上しない場合(Case2)、もしくは産卵期であり宍道湖に遡上したが、産卵を行わなかった場合(Case3)については、宍道湖では大量死が発生しないものと説明できる。

4.3 産卵期における大量死予測モデル

ここでは、前章で述べたコノシロの大量死予測モデルを数理化理論Ⅱ類によって構築する。解析データは前章で用いた宍道湖湖心自動観測所の水質データ⁵⁾と松江観測所と大津観測所の流量データ⁵⁾を用い、大橋川逆流量と斐伊川下流流量の流量データ、および表層から底層までの深さによって5段階に分けた、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、塩分濃度など湖心の水質データを説明変数として採用した。

なお、前章と同様に底層におけるカテゴリー区分値を、表層・中層とは異なった区分設定としている。また、分析対象年度は、前章と同様である。

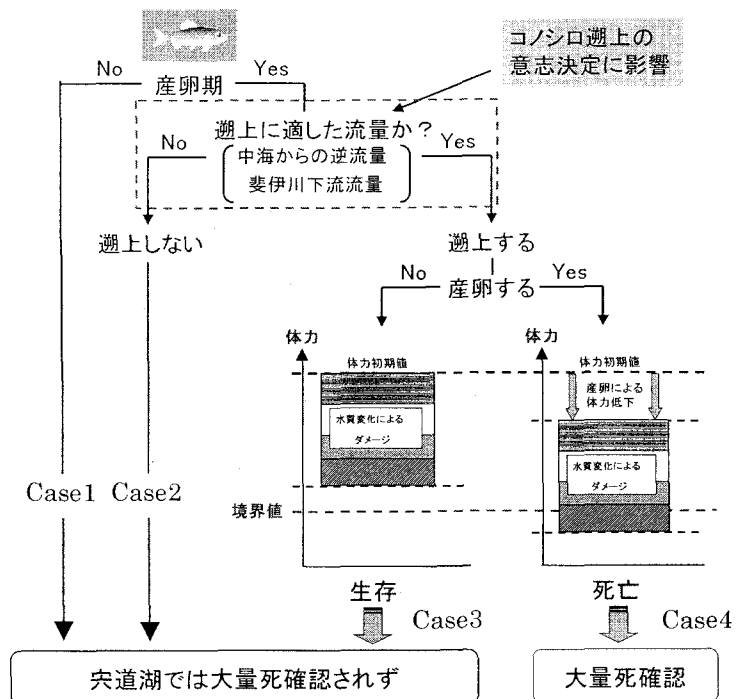


図-4 コノシロ大量死予測モデルの概念図

分析結果を図-5 に示す。ここで、図-5 は、図-4 における産卵期か否かの分岐点において Yes の場合の分析結果である。

図-5 に示すモデルの精度は、相関比が 0.44 と強い関係が認められ、レンジ、偏相関係数によってコノシロ大量死に対する各要因の影響の大きさを判断することに問題はないといえる。図-5 の偏相関係数の順位に着目すると、底層域での水温、塩分濃度、また大橋川逆流量がコノシロの大量死に大きく影響しており、一方、中層域での溶存酸素濃度、塩分濃度、斐伊川下流流量はあまり影響していないことがわかる。

説明変数		カテゴリー	度数	スコア	レンジ	偏相関係数(順位)	
				値 -1.1 1.1			
表層	水温 (度)	21.0以下	27	0.4242		0.8651	0.0952(8)
		21.1~24.0	132	0.4042			
		24.1以上	147	-0.4409			
	pH	7.6以下	91	0.1774		0.4030	0.0807(9)
		7.7~8.1	127	0.0292			
		8.2以上	88	-0.2256			
DO (mg/l)	7.0以下	81	0.2254		0.5135	0.1289(6)	
	7.1~8.0	105	0.1553				
	8.1以上	120	-0.2880				
中層	塩分濃度 (mg/l)	3000以下	83	0.9072		1.2971	0.1790(4)
		3001~4500	87	-0.2559			
		4500以上	136	-0.3899			
	水温 (度)	21.0以下	28	0.2038		0.6965	0.0726(10)
		21.1~24.0	136	0.3352			
		24.1以上	142	-0.3613			
pH	7.6以下	119	-0.3517		0.6311	0.1466(5)	
	7.7~8.1	125	0.1962				
	8.2以上	62	0.2795				
底層	DO (mg/l)	7.0以下	115	-0.1004		0.1774	0.0428(13)
		7.1~8.0	111	0.0486			
		8.1以上	80	0.0769			
	塩分濃度 (mg/l)	3000以下	76	-0.1115		0.1687	0.0255(14)
		3001~4500	89	0.0573			
		4500以上	141	0.0239			
大橋川逆流量	水温 (度)	21.0以下	40	0.7767		1.1438	0.2564(1)
		21.1~24.0	140	-0.3670			
		24.1以上	126	0.1612			
	pH	7.0以下	129	-0.0424		0.1668	0.0556(12)
		7.1~7.5	130	0.0752			
		7.6以上	47	-0.0916			
DO (mg/l)	3.0以下	127	-0.0431		0.3286	0.1128(7)	
	3.1~5.9	102	0.1719				
	6.0以上	77	-0.1567				
斐伊川下流流量	塩分濃度 (mg/l)	5000以下	110	0.4230		0.8062	0.1902(3)
		5001~9000	111	-0.1257			
		9001以上	85	-0.3832			
	大橋川逆流量	0	87	0.3802		0.6850	0.2146(2)
		0.001~100	130	-0.3048			
		100以上	89	0.0736			
斐伊川下流流量	60.000以下	246	0.0381		0.1941	0.0635(11)	
	60.001以上	60	-0.1560				
被説明変数		カテゴリー	度数	スコア		判別率	相関比
大量死確認		されている	221	0.4138		78.776	0.4453
		されていない	85	-1.0760			

(図では5段階の深さの内3段階のみ表示)

図-5 数量化理論Ⅱ類による分析結果 (1997~2001)

4.4 年間を通した予測モデル

ここでは、先述した結果に図-4 における産卵期か否かの分岐点で No

の場合(Case1)を加えて、年間を通しての判別率を算出する。本研究では、数量化理論Ⅱ類の分析による判別境界値が図-4 の概念図 Case3, 4 における境界値に、判別関数による合成変量が体力に相当し、合成変量が境界値を下回れば「死亡」、越えていれば「生存」と判別されることになる。しかし、中には合成変量が境界値を下回り「死亡」と判別されたにもかかわらず、実際は「生存」であった場合があり、このことの説明の一つとして、この場合のコノシロが体力低下のない状態、すなわち産卵前の状態であったであろうと推察される。その場合、図-4 の Case3 における体力は少なくとも、予測モデルにおいて「死亡」と判別されたが実際は「生存」であった場合の合成変量以上に位置すると考えられることから、本研究では境界値とその最小値の差を合成変量に加えることで産卵前の体力初期値の底上げを図った。

次に、判別関数に産卵期とそれ以外の時期に分けるためのダミー変数を導入し、産卵期以外の時期では産卵前と同様に体力初期値の底上げを行った。そして、その判別関数を用い 1997 年から 2001 年までの水質データについて年別に大量死の発生予測を行った。表-2 は、その結果である。表-2 によると、本研究の年間を通しての大量死予測モデルの判別率は 94.7% となっている。

表-2 コノシロの大量死予測モデルによる判別結果

年	判別率	年	判別率
1997	96.3	2000	93.4
1998	92.1	2001	95.5
1999	96.2		
平均		94.7	

表-3 予測の外れ方(判別結果と実際との違い)

判別結果	実際の結果	度数	割合(%)
生存	死亡	8	11.3
死亡	生存	63	88.7
合計		71	100.0

表-4 へい死確認日を基準とした予測が外れた日の分布

	10日前	9日前	8日前	7日前	6日前	5日前	4日前	3日前	2日前	1日前	1日後	2日後	3日後	その他
1997								1	4	3	2			1
1998														17
1999										1	1	1	1	7
2000		1	1		1	2	2	2	3	6				0
2001											1	1		12
合計		1	1		1	2	2	3	7	10	4	2	1	37

4.5 誤判別の要因とモデル精度

本研究のモデルで予測が外れた場合について、予測と実際の違い別に分類したものが表-3 である。表-3 によると、外れ方の傾向は大量死発生(死亡)と予測しながら実際には大量死が確認されていなかった(生存)場合がほとんどである。

この要因の一つとして、予測モデルにおいて「死亡」と判別された場合について、へい死が発生していたにもかかわらず当日にはへい死は確認されず、後日遅れて確認されたために予測が外れていたことが考えられる。そこで、表-4 にへい死確認日を基準として予測が外れた日の分布状況を示す。この表から、1日前、2日前の日数が多く、3日前以前は日数が少ないことが読み取れ、仮定したとおり実際に1日前、2日前においてへい死が発生しているものの確認するには至らず、後日になって確認されたことが説明可能で、現実には、本研究のモデル式は計算結果の精度よりさらに高くなる可能性が推察できる。

5. おわりに

本研究では、コノシロの大量死発生のメカニズムを推定し、それに基づいた予測モデルを構築した結果、概ね妥当な精度のモデルを得ることができた。しかし、1995 年以前にはコノシロの大量死が発生していないなど、本研究のモデルでは説明不可能な事象が存在しており、大量死の発生には本研究で考えた仮説以外の要因が存在する可能性は十分ある。今後は、このような未解決の問題を解明するため、宍道湖の周辺環境も含めた別の視点からの分析が必要であると考えている。

謝辞: 資料の提供および適切な助言をいただいた国土交通省出雲河川事務所の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中村・山根・清川・内田・福井・重本・高橋: 宍道湖におけるシジミ大量へい死対策緊急調査, 平成9年度三刀屋内水面分場事業報告, 1-4-1A, 1998.
- 2) 後藤悦郎: 冷水病対策研究, 平成14年度島根県内水面水産試験場事業報告, pp.139-140, 2003.
- 3) 藤川祐司・持田和男・江角陽司・大北晋也: 宍道湖におけるワカサギ不漁原因の検討とワカサギ、シラウオ資源のモニタリング, 平成14年度島根県内水面水産試験場事業報告, pp.31-42, 2003.
- 4) 藤川祐司・江角陽司・大北晋也: 宍道湖、中海におけるコノシロ大量へい死の原因究明, 平成14年度島根県内水面水産試験場事業報告, pp.71-77, 2003.
- 5) 国土交通省出雲河川事務所 水質保全課より提供
- 6) 例えば、一畑グループ鉄道開業88周年記念事業実行委員会: みんなの宍道湖～自然観察ガイドブック～