

## 最近、霞ヶ浦において発生する酸素欠乏の予測について

熊丸 敦郎・渡辺 直樹・外岡 建夫

### 1. はじめに

霞ヶ浦北浦における低酸素水塊の発生は昭和48年以降慢性化しており、網生質養殖業に対してだけでなく、主に底層に棲息するエビ、ハゼ類が酸欠死することで一般漁業にも大きな打撃を与えている。一般漁業への酸欠被害防止については、今後の湖内水質管理行政の動向に係っており、現時点での防止策が見い出せていないのであるが、養殖被害については、現状においても酸欠時に給餌を停止することにより被害を最小限にとどめることが可能であり、溶存酸素量の低下を事前に予測することが被害防止に不可欠となっている。

これまでの湖内酸欠予測に関する研究で、佐々木(1995)は網生質漁場における短期的な溶存酸素量の変化は風向、風速の変化と密接に関係していることを述べている。すなわち、富栄養化が進んだ今日の霞ヶ浦においては、高水温期の無風状態で底層に低酸素水塊が発達し、風が吹き始めるとこの低酸素水が風上側の漁場に移動して被害をもたらすというものである。さらに、内水試が毎年夏期に週2~3回の頻度で実施している湖内酸欠観測の結果から酸素量の変化には2~3週間の周期性が認められることから、風以外の変動要因が有るもの

とみられ、この周期性が何によって起きているかを知ることが予測を行う上で重要である。本来、溶存酸素量の変化を予測するためには、湖内における物質循環および水の流動を総合的、動的に把握する必要があるが、ここでは当面する酸欠被害防止のための短期予測を行うことを目的に、溶存酸素量に関係するとみられる水質項目について、できるだけ頻度を高めて連続測定し、相互の時間的位相のずれ、および相関性を調べることにした。

### 2. 方法

#### 2.1 調査方法

1996年6月27日から10月15日の間、図1に示した内水試前桟橋観測地点(湖岸から100m沖、水深:4.0~4.3m)において、中層の溶存酸素量をDOメーターにより連続測定記録を行うとともに、同年7月19日から10月15日の間、毎朝9時に同地点において水質観測を行った。観測項目は、透明度および中層水温を現場測定、その他の水質項目については中層水を採水した後、実験室内に持ち帰り定量測定した。風向、風速は内水試屋上に設置した風向、風速計により連続測定記録した。なお、牛渡地区養殖漁場においても同年9月26日~10月15日の間で溶存酸素量を同様な方法で連続測定した。

#### (1) 溶存酸素量

YSI製DOメーター、TOA製アナログ記録計(10mm/hr Scan)を用い、中層(水深:2.2m)の溶存酸素量を連続記録した。水温は同DOメーターにより、1日1回、毎朝9時に中層について測定した。なお、溶存酸素量の測定精度を上げるため、センサーに一定流速の中層水を与える装置として、図2に示すエアリフト方式ポンプを観測点に設置した。またDOメーターの隔膜は1週間毎に表面をキムワイプで軽く拭き取りクリーニングし、3週間



図1 観測地点

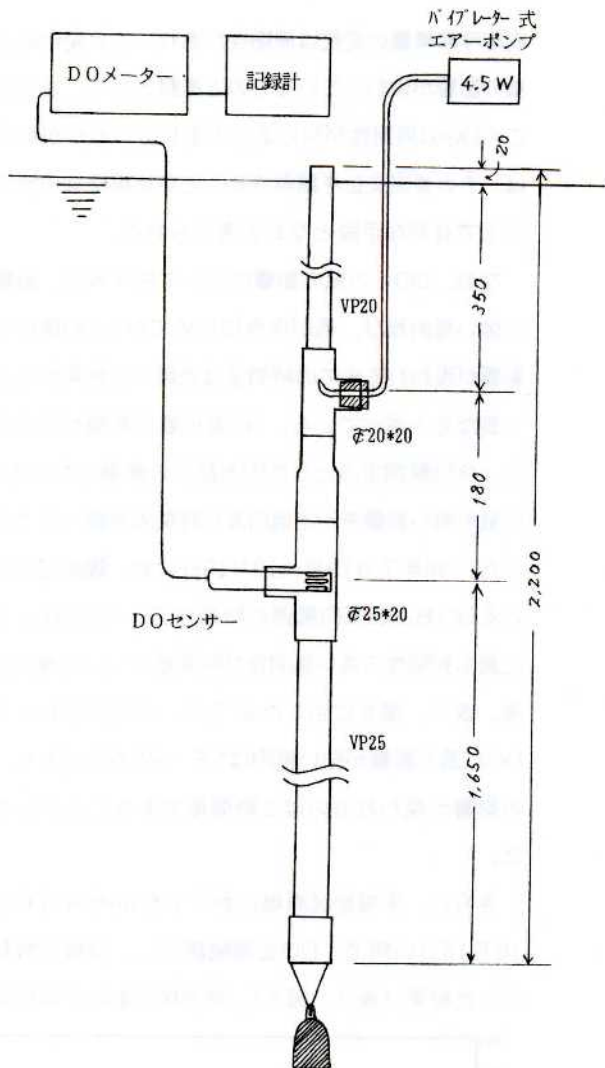


図2 DO測定に用いたエアリフト方式ポンプ

毎に新しいものと交換した。

(2) 風向, 風速

日本エレクトリック・インスルメント社製自記風向風速計 (N-132) による。

(3) その他の水質項目 (1日1回: 9:00に中層採水, 測定)

Chl a Strickland, Parsonsの方法に従い, 試水300mlをフィルター (Whatman GF/C) 濾過し, 95%アセトン10ml中でホモジナイズ, 遠沈抽出後比色定量。〔λ (mμ): 750, 663, 645, 630, およびPhaeophytin測定のため, λ: 650も併せて測定〕

Phaeophytin Lorenzenの方法に従い, 上記Chl a抽出液に1N・HCl 0.1mlを加えた後, 比色定量。〔λ (mμ): 750, 650〕

UV 試水フィルター濾液を紫外吸光測定〔λ (mμ): 192〕

SS 試水 300mlをフィルター (GF/C) 濾過, 75℃24hr乾燥後重量測定。

DIN, DIP 上記濾液をテクニコンオートアナライザーにより定量。

2.2 データの解析

溶存酸素量 (: DO) と風向風速の関係については, 両者とも自記録アナログデータから時間毎に読み取り, 時系列データとした。次に, 風速: v (m/s) を各風向成分として表すため, 方位360度を16等分してN: A=-a, NNE: A=-a+1, NE: A=-a+2, ENE: A=-a+3, E: A=-a+4...とし, 各方位の風速成分: Wを次式により求めた。

$$W = \text{SIN} [(12-A) * 0.125 * \pi] * v$$

ただし, 角度はラジアン表示とし, N-S方向の風速成分とする場合は a=0, NNE-SSW方向の風速成分とする場合は a=1, 続いてNE-SW方向: a=2, ENE-WSW方向: a=3...と順次代入することとする。(例) 北東の風, 風速10mの場合のN-S方向成分風速:  $W_{N-S}$  (m/s) は,

$$a = 0, \text{NE: } A = -a + 2 = 2,$$

$$W_{N-S} = \text{SIN} [(12-2) * 0.125 * \pi] * 10 = -7.071 \text{ となる。}$$

こうして, 時系列の風向風速を各方向成分ごとに数値化したうえで, DOと最も相関性の高い風向及び時間的なずれ (風の影響が何時間後のDO値に反映されるか) を統計的手法により求めた。

DOと風向風速および各水質項目との関係については, 1日1回 (AM9:00) の水質調査に合わせて上記DO, 風向風速時系列データを25時間移動平均したうえで, DOは各日AM9:00の値を, 風向風速は上記解

析結果から得られた時間差を補正した時間の値をそれぞれ用いて各水質項目データとの相関性を調べた。

### 3. 結果及び考察

#### (1) DOと風向風速の関係

DOおよび風向風速の測定記録の結果を図3に示した。なお、図中のDO変化のグラフには風との対応を見るため、72時間移動平均を合わせて示しておいた。また、風向風速のグラフは、過去における観測結果から経験的にここでは南北方向成分として表し、南成分を正の方向に、北成分を負の方向下方に示している。これら両図を比較すると、南成分の風が吹くとDO値が上昇し、北成分の風が吹くとDO値が下降するという、風とDO値の関係が伺える。しかし、細かくみると、必ずしも合わない部分（7月7日～16日、8月5日～13日）があり、この部分について、DO値と風の対応を考慮しながら風の影響を受けない場合の基準となる線を描くと図4に示したような約3週間周期の波形曲線となる。この図であらためてその対応をみると、DOの基準線からの上下変化と風向風速の変化が非常によく対応しており、このことから湖

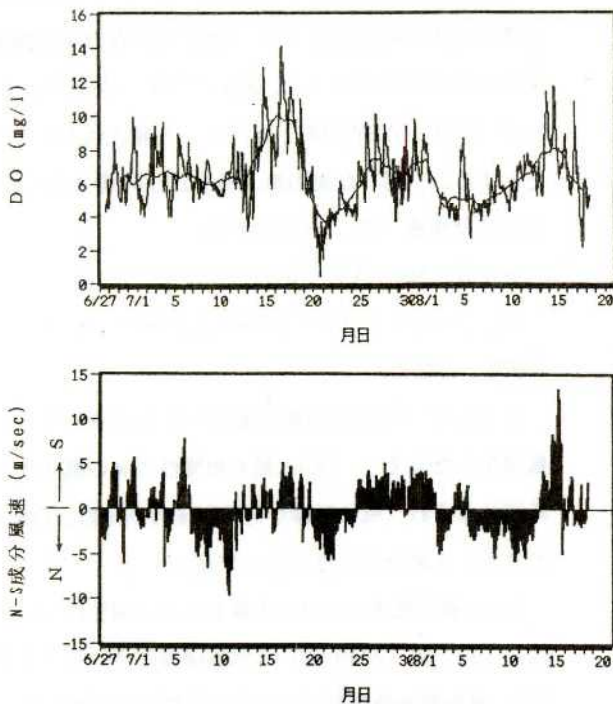


図3 DOおよびN-S成分風速の連続測定結果

内溶存酸素量の変化は周期性があり、この変化の上に風の影響が加わっているものと推察される。さらに、このDOの周期性が何によって生じているかがわかれば、その要因変化を観測することが短期的な予測を行う上で有効な手段となると考えられる。

なお、DOへの風の影響について佐々木は、影響度の強い風向及び、風が吹きはじめてからDO値にその影響が現われるまでの時間差は漁場の立地条件によって異なると述べている。DO変化要因を調べるにあたり、今回観測地点とした内水試前の漁場におけるDOに最も強い影響を示す風向及び時間差を調べることにした。'96年7月19日～10月15日の間、観測地点におけるDOおよび風向風速の時系列データを用い、DOと最も相関性の高い風向及び時間差について調べた結果、表1、図5に示したように、当地点において、DOに最も影響が強い風向はNE-SW方向であり、その影響が現われるのは2時間後であることがわかった。

さらに、牛堀地区漁場においても'96年9月6日～10月15日の間で、DOを連続測定し、同様に解析を行った結果（表2、図6）、同地区においてはESE-

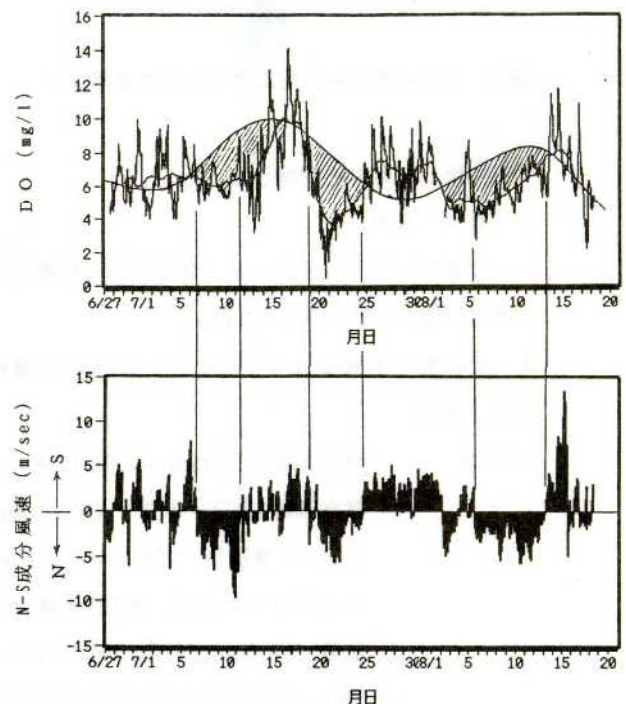


図4 風の影響を除いたDOの推定変動

表1 内水試前におけるDOと風向風速との相関

風向 時間 A	N-S	NNE-SSW	NE-SW	ENE-WSW	E-W	ESE-WNW	SE-NW	SSE-NNW
	0	1	2	3	4	5	6	7
0 hr	0.1336	0.1469	0.1575	0.1524	0.1305	0.0346	0.0075	0.0723
-1 hr	0.1390	0.1648	0.1783	0.1746	0.1358	0.0433	0.0068	0.0782
-2 hr	0.1509	0.1774	0.1910	0.1860	0.1438	0.0445	0.0080	0.0857
-3 hr	0.1580	0.1802	0.1900	0.1808	0.1354	0.0369	0.0118	0.0936
-4 hr	0.1574	0.1735	0.1795	0.1670	0.1280	0.0286	0.0154	0.0966
-5 hr	0.1528	0.1648	0.1671	0.1518	0.1053	0.0212	0.0192	0.0982

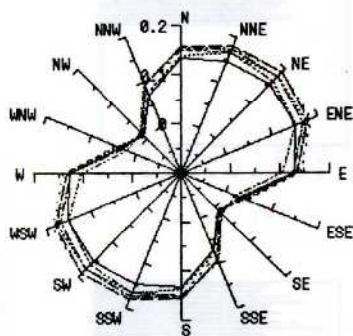


図5 DOと風向風速，時間差との相関性（: R<sup>2</sup>）

WNW, 1時間前の風が最もDOに強い影響を与えることがわかった。また、これら2地点の調査結果から風の影響は漁場によって異なることが再確認された。

(2) 水質観測の結果

'96年7月22日~10月15日の間、同地点において行った水質観測（水温、透明度、SS、Chl a、Phaeophitin a、DIN、DIP、UV他）の結果をDO及びNE-SW成分風向風速とあわせて図7に示した。なお、ここで取り上げた各測定項目は、Chl a、Phaeophitinは植物プランクトンの合成活性、DIN、DIPはその栄養供給、UVは分解のそれぞれ状況を知る目的で選んだ。また、DO測定記録は、9月20日~30日の10日間、台風による停電のため中断し、Phaeophitinの測定は8月10日からの開始となっている。

図7を各項目別にみると、水温は17日から21日の周期で上下しながら、大きくは7月末の30℃をピークに徐々に低下し、10月中旬で19℃となっている。透明度は7月末に110cmのピークを示した他は60~90cmの間を、Chl aは70~120 μg/lの間を、SSは15~30mg/lの間をそれぞれ18~24日の周期で上下変動

表2 牛堀漁場におけるDOと風向風速との相関

風向 時間 A	N-S	NNE-SSW	NE-SW	ENE-WSW	E-W	ESE-WNW	SE-NW	SSE-NNW
	0	1	2	3	4	5	6	7
0 hr	0.1196	0.0736	0.0290	0.0000	0.1024	0.2751	0.2360	0.1722
-1 hr	0.1162	0.0703	0.0267	0.0001	0.1062	0.2752	0.2330	0.1685
-2 hr	0.1112	0.0661	0.0240	0.0004	0.1088	0.2735	0.2280	0.1631
-3 hr	0.1052	0.0613	0.0210	0.0008	0.1133	0.2702	0.2214	0.1564
-4 hr	0.0982	0.0559	0.0179	0.0015	0.1164	0.2651	0.2130	0.1483
-5 hr	0.0915	0.0509	0.0154	0.0024	0.1189	0.2582	0.2031	0.1392

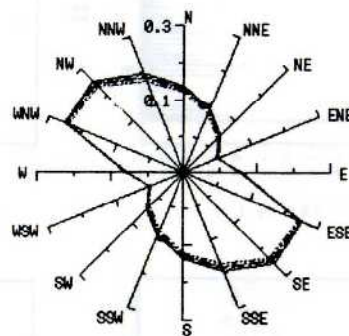


図6 DOと風向風速，時間差との相関性（: R<sup>2</sup>）

している。なお、透明度とSSについては強風時に湖水の濁度が急上昇し、その影響が極端な値となって表れている。Phaeophitin aは15~40 μg/lの間で変動するもののその変化にはChl aにみられるような周期性は認められなかった。また、植物プランクトンの光合成活性を表す指標として用いられるPhaeophitin a/Chl a比についても、その変動に周期性がみられるものの、Chl aのそれとほぼ同じになり、酸欠予測指標としての意義は特に認められなかった。DINについては、明確な周期性はないものの、0.8~0.02mg/lの間で大きく変動しながら大きくは7月20日をピークに9月19日まで漸減傾向を示し、9月20日大雨の以降に再び急上昇、0.4mg/l前後で推移した。

DINの内訳であるNH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nについてみると、7月から9月末の間はDIN中にNH<sub>4</sub>-Nの占める割合の高い日が多いが、10月以降になると急激にNO<sub>3</sub>-Nの比が高くなっている。このことは10月初旬を境として嫌氣的条件から好氣的条件に転じたことを示唆しており、NO<sub>3</sub>-N/DIN比は酸欠発生シーズンの終わりを判断する指標として有意義と思われる。

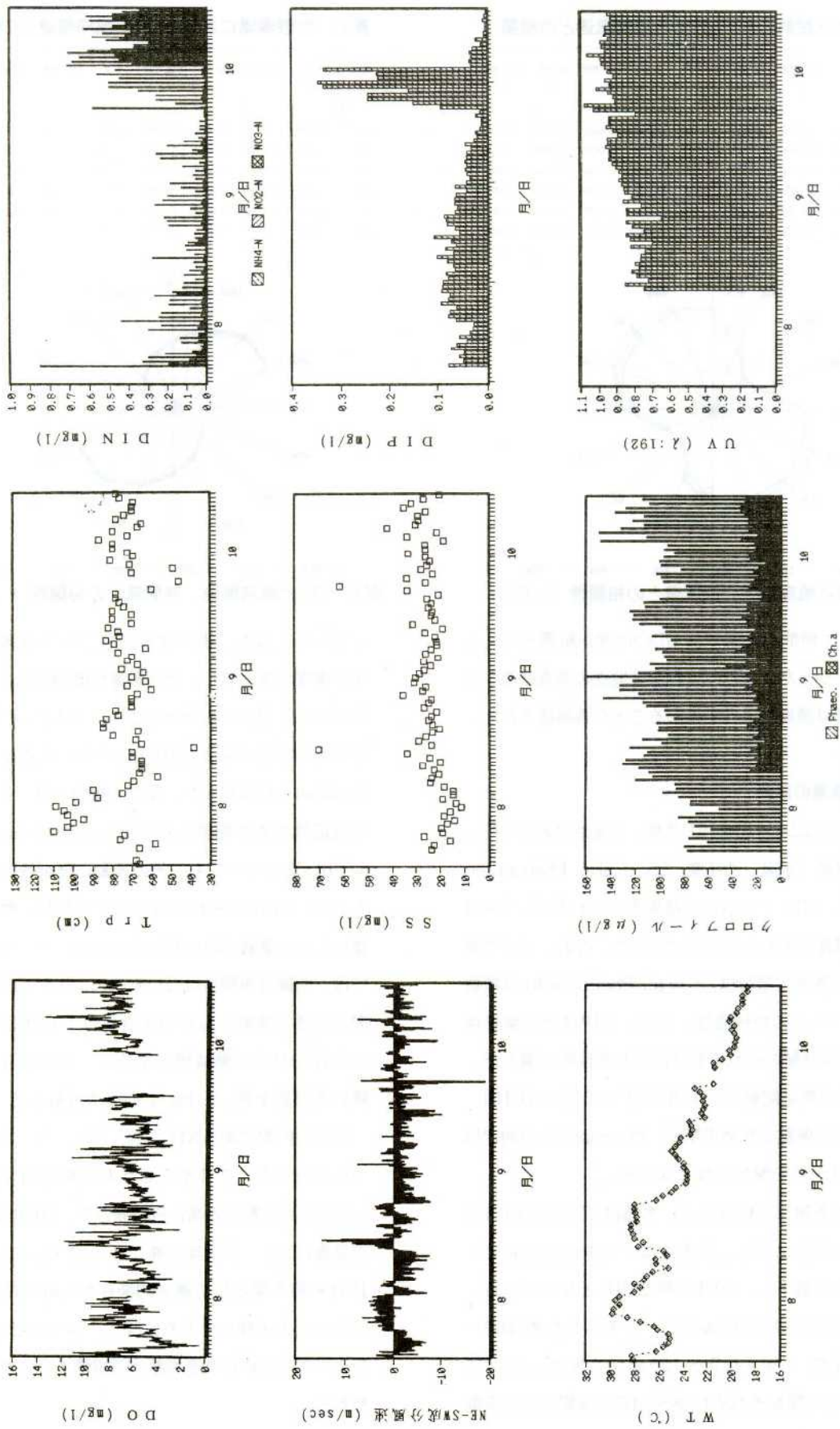


图7 项目别連続測定結果 (内水試前, '96.7/18~10/15)

DIP (PO<sub>4</sub>-P) については、7月20日から9月10日まで0.3~0.8mg/ℓの間で変動するが、DINにみられる激しい変化は認められず、比較的安定して常在している。9月10日からやや減少傾向を示すものの9月20日の大雨以降に急上昇して10日間のピークを形成した後、再び0.3mg/ℓに戻り、以降減少傾向となっている。また、DIN、DIPの変化は、湖内物質循環での溶出及び消費と陸水からの供給が加わってより複雑なものとなっているが、今回の測定期間中、特に7月末から9月末にかけて、DIPはDINに比較して安定的に存在し、常にDINの1/10以上が維持されていることから、夏期の霞ヶ浦においては、多くの場合Nが植物プランクトン発生の制限要因になっているものと判断される。

### (3) 溶存酸素量と各水質項目の関係

DO及び風向風速のデータは1日1回(9:00)測定の水質項目との相関性を求めるため、25時間移動平均した上でDOは移動平均(9:00)の値を、風向風速については、(1)の結果に基づいてNE-SW成分風速、2時間前(7:00)の値を用いた。

各項目について単回帰分析を行った結果、表3に

表3 DO変動要因についての回帰分析結果

	DO	WIND	WT	Chl a	Ph a	Ph/Chl	DIN	DIP	UV
DO		0.3052	0.1339	0.1253	0.0008	0.0542	0.0327	0.0521	0.1623
WIND	0.3052		0.0428	0.0484	0.0013	0.0009	0.0320	0.0041	0.0013
WT	0.1339	0.0428		0.1875	0.1336	0.0505	0.4090	0.0489	0.6640
Chl a	0.1253	0.0484	0.1875		0.0516	0.1249	0.0000	0.0279	0.0022
Ph a	0.0008	0.0013	0.1336	0.0516		0.6749	0.0115	0.1067	0.0898
Ph/Chl	0.0542	0.0009	0.0505	0.1249	0.6749		0.0077	0.0258	0.0652
DIN	0.0327	0.0320	0.4090	0.0000	0.0115	0.0077		0.0000	0.3559
DIP	0.0521	0.0041	0.0189	0.0279	0.1067	0.0258	0.0000		0.0001
UV	0.1623	0.0013	0.6640	0.0022	0.0898	0.0652	0.3559	0.0001	

表4 DOを従属変数、その他の水質項目を独立変数とした重回帰分析の結果

独立変数	R2	X係数	Y切片
X1 : WIND	0.3052	0.3414	6.6791
X1 : WIND X2 : WT	0.5460	0.4055 -0.2043	11.7639
X1 : WIND X2 : Chl a	0.5015	0.5740 0.0507	3.8239
X1 : WIND X2 : UV	0.4173	0.3119 5.6791	1.9339

独立変数	R2	X係数	Y切片
X1 : WIND X2 : WT X3 : Chl a	0.6182	0.4067 -0.1479 0.0193	8.3913
X1 : WIND X2 : WT X3 : Chl a X4 : UV	0.5901	0.3272 -0.0956 0.0243 2.7905	4.0143

示すとおり、DOとの単相関では風(NE-SW)方向成分風速)との相関性が最も高く、つづいてChl a、水温、UV、DIN、DIPの順となった。また、各水質項目相互の相関関係ではUVとWTの相関が最も高く、このことは有機物から溶存有機物への分解が水温と密接に関係していることを表しているものと考えられる。さらに、その結果に基づいて比較的相関係数の高かった項目の組合せによる重回帰分析を行った結果、表4に示すとおり、風、Chl a、水温の組合せによる重相関寄与率: R<sup>2</sup>が0.6182と最も高くなり、回帰式として次式が得られた。

$$DO(mg/\ell) = 0.4067 * W + 0.0193 * C - 0.1479 * T$$

ただし、W: NE-S成分WIND (m/sec), C: Chl a (μg/ℓ), T: WT(℃)

なお、重相関係数を求めるに際して、透明度、SSについては強風時の濁りによる変動があること、及びChl aとの関連性が高いことから、またDIN、DIPについてはほとんど相関性が認められないことにより、対象項目としては適切でないと判断し、ここでは棄却した。

以上のDOと各水質項目との相関性を調べた結果から、湖内定点における溶存酸素量の短期的な変動は風や水温等の気象条件の他に、Chl a量や、溶存有機物量(ここではUV)の変化とも関係があること、さらに湖内Chl aの変動におよそ3週間の周期性が認められることが判明し、Chl aの経日的変化を調べることで、酸欠発生をその数日前に予測することが可能と考えられた。

### (4) クロロフィル a の変動要因について

つぎに、Chl aの変化を予測するため、Chl aと水温、DIN、DIP、UV等の水質項目との相関性について、前述と同様な手法により検討を行った。その結果、表5に示したとおり、いずれも寄与率は高くはないが、Chl aは1日前の水温、同日のNH<sub>4</sub>-N、3日前のNO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nの値と比較的相関性があるものとみられた。さらに、これらについて重回帰分析を

表5 Chl a変動要因についての回帰分析結果

測定日のズレ	WT	DIN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	DIP	UV
0 day	0.1875	0.0000	0.1178	0.0693	0.0586	0.0279	0.0022
-1 day	0.1903	0.0131	0.0255	0.0884	0.0632	0.0250	0.0045
-2 days	0.1706	0.0136	0.0424	0.0935	0.0885	0.0161	0.0192
-3 days	0.1556	0.0380	0.1049	0.1049	0.1061	0.0190	0.0005
-4 days	0.1293	0.0282	0.0498	0.0498	0.0690	0.0121	0.0106

表6 Chl aを従属変数、その他の水質項目を独立変数とした重回帰分析の結果

独立変数	R <sup>2</sup>	X 係数	Y 切片
X1:-1day WT	0.1903	-2.9867	178.30
X1:-1day WT X2: 0dayNH <sub>4</sub> -N	0.3186	-3.2332 -72.823	193.55
X1:-1day WT X2: 0dayNH <sub>4</sub> -N X3:-3dayNO <sub>2</sub> -N	0.3098	-3.3895 -68.607 -133.85	198.71
X1:-1day WT X2: 0dayNH <sub>4</sub> -N X3:-3dayNO <sub>2</sub> -N X4:-3dayNO <sub>3</sub> -N	0.3098	-3.3845 -68.570 -142.96 0.6827	198.61

行ったところ、表6に示したとおり、水温およびNH<sub>4</sub>-Nとの相関性が比較的高く、重相関寄与率：R<sup>2</sup>=0.3186となる次の回帰式が得られた。

$$\text{Chl a } (\mu\text{g}/\ell) = -3.2332 * T - 72.823 * N1$$

ただし、T：1日前のWT (°C)、N1：同日のNH<sub>4</sub>-N (mg/ℓ)

#### 4. 要約

霞ヶ浦北浦における夏期の酸欠発生頻度は年々増加する傾向にあり、網生養殖被害を回避するためには、各漁場での溶存酸素量（：DO）の低下を事前に予測することがより重要になっている。これまでに行われたDO変動予測に関する調査研究において、DOの短期的変化が風向風速と密接な関係があること、さらにDOの変動に風以外の要因とみられる2～3週間の周期性があることが認められている。ここでは短期的なDO変化の予測を目的として、内水試前の漁場において7月～10月の

間、DO、風、および関係水質項目をできるだけ高頻度に連続測定し、相互の相関関係をしらべた結果、次のことがわかった。

- (1) DOと風向風力の連続記録結果を比べてみると、DOの変動は細かくは風の変動と概ね対応しているが、風以外の要因によるとみられる約3週間の周期的変動が認められる。
- (2) 内水試前の漁場において、DOの変化に最も大きな影響のある風向はNE-SWであり、風が吹きはじめてその影響が現われるのは2時間後である。また、こうした風の影響は漁場によって異なっている。
- (3) 夏期水質の推移を測定項目別にみるとDIPは安定的に溶存するのに対してDIN、特にNO<sub>3</sub>-Nは極めて少なくなることがあり、Nが湖内植物プランクトン増殖の制限要因となっている疑いが持たれる。また、NO<sub>3</sub>-N/DIN比の推移が増加に転ずる時期をもって酸欠発生シーズンの終わりを判断しうる。
- (4) 期間中、Chl aは70～120 (μg/ℓ)の間で18～24日の周期的変動をしているものとみられた。
- (5) DOについて風および各水質項目との単回帰分析を行った結果、NE-SW成分風速との相関性が最も高く、つづいてChl a、水温、UV、DIN、DIPの順となった。
- (6) 上記単相関係数の高い項目との重回帰分析を行った結果、風、Chl a、水温の組合せによる重相関寄与率：R<sup>2</sup>が0.6182と最も高く、回帰式として次式が得られた。  
DO (mg/ℓ)=0.4067\*W+0.0193\*C-0.1479\*T  
ただし、W：NE-SW成分WIND (m/sec)、C：Chl a (μg/ℓ)、T：WT (°C)  
このことから、各漁場におけるDOの変動は風、水温といった気象要因の他にChl a量の変化にも関係があるといえる。
- (7) Chl aについて各水質項目との時間的ずれを検討し重回帰分析を行った結果、寄与率（：R<sup>2</sup>=0.3186）は低いが、水温およびNH<sub>4</sub>-Nの組合せで最も相関性が高くなり、次式で表される回帰式を得た。

$$\text{Chl a } (\mu\text{g/l}) = -3.2332 * T - 72.823 * N1$$

ただし、T: 1日目のWT (°C), N1: 同日のNH<sub>4</sub>-N (mg/l)

(8) 以上により、Chl aの経日変化を調べることで、DOの動向が推察され、酸欠発性をその数日前に予測することが可能と考えられた。

### 引用文献

J. H. Strickland, T. R. Parsons (1968) A Practical Handbook of Sea Water Analysis Bd. Canada Bull. No.167, 185.

Lorenzen : Limnol (1967) Oceanogr., 12, 343.

佐々木道也 (1995) 霞ヶ浦北浦の網生質養殖漁場における溶存酸素量について. 茨内水試研報, 31, 49-54

