

# 湖沼におけるDOとpHの連続モニタリング結果を用いた 物質循環，生物代謝特性の評価方法

天 野 耕 二\* 福 島 武 彦\*\* 松 重 一 夫\*\*\*

## Evaluation of the Metabolic Characteristics in Lake Water with Continuously Measured pH and DO data

Koji AMANO\*, Takehiko FUKUSHIMA\*\* and Kazuo MATSUSHIGE\*\*\*

\* Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-77 Japan

\*\* University of Hiroshima, 1-4-1, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739 Japan

\*\*\* National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

### Abstract

The free water method was applied to evaluate dissolved oxygen (DO) and dissolved inorganic carbon (DIC) dynamics and the metabolic characteristics by using continuously measured DO and pH data at the center of Lake Kasumigaura (L.K.) and the South Basin of Lake Biwa (S.B.). The rates of primary production and respiration were determined by subtracting the oxygen and CO<sub>2</sub> fluxes due to air-water gas exchange from the rates of change in the masses of DO and DIC in the Lake. The averaged ratios of air-water gas exchange to change in the masses were 14%(DO) and 20%(DIC) in L.K. and 10%(DO) and 9%(DIC) in S.B. and those ratios were affected by wind velocities. As the results of estimating gross primary production in the daytime (8am.-4pm.), we obtained the averaged DO production rates of 8.0 (S.D. 5.6)  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  in L.K. and 3.2(S.D. 2.0)  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  in S.B. The averaged DIC consumption rates were 4.5(S.D. 2.9)  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  in L.K. and 1.9(S.D. 1.0)  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  in S.B.. The relationships between the metabolic quotients (MQ) and NO<sub>3</sub>-N vs. NH<sub>4</sub>-N ratios in the lake water were verified on the basis of the smoothed time series data by using moving average.

**Key words** : free water method, primary productivity, respiration/decomposition rate, metabolic characteristics

## 1. はじめに

湖沼における一次生産量，呼吸量に関する情報は，水域での物質循環，生態系の活性や構造，富栄養化状態，などを理解，評価する上できわめて重要である<sup>1)</sup>。このような生物化学的な特性を定量的に評価するためには，光合成量や集団での呼吸量を調べる必要がある<sup>2)</sup>。一次生産，呼吸速度については，いわゆる「明瓶・暗瓶法」により測定されることが多いが，ボトル壁面の影響や測定間隔上の問題点を残している<sup>3)</sup>。

このため，水中のDO，pHをセンサー等により連続的に測定して光合成，呼吸量を推定する方法が提案されており，Free water method などと呼ばれている<sup>4)</sup>。この手法は，水域全体での生物活動が評価できること，連続測定を行えば生物活性を短い時間間隔で測定できることなどの長所がある。表面積24m<sup>2</sup>，水深1.5mの屋外実験池において，Free water method に加えて，open box，closed boxを用いたボックス法を適用した一連の研究<sup>5,6)</sup>では，DOと

pHの連続測定データから実験池内の物質循環や生物代謝特性に関する様々な情報が得られることが明らかにされている。

本論文では，実際に霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖の湖心において水質の常時観測を目的としてほぼ1時間間隔で連続的に観測されているDO，pH等のデータを用いて，大気との交換を考慮した上で一次生産や呼吸に伴うDO，DIC（溶存無機態炭素）の変動を評価するとともに，実際の観測値から導かれた呼吸量，一次生産量，DOとDICの変化の比などの指標と水域における物質循環や生物代謝特性の関係について検討する。

## 2. 解析の対象としたデータ

解析に用いたモニタリングデータは，霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖の湖心（草津川沖1.5km）において毎正時に自動観測されている水温，風速，DO，pHである。霞ヶ浦のデータについては，建設省霞ヶ浦工事事務所，琵琶湖のデータについては，滋賀県立衛生環境センターがとりま

\* 立命館大学理工学部 〒525-77 草津市野路東1-1-1

\*\* 広島大学工学部 〒739 東広島市鏡山1-4-1

\*\*\* 国立環境研究所 〒305 つくば市小野川16-2

**Table 1** Statistical characteristics of water quality items at the center of Lake Kasumigaura between April 1992 and March 1993

Variable	Number of Samples	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation
Temperature, °C	7924	4.6	31.3	16.1	7.6
pH	7920	7.3	9.6	8.3	0.5
DO, mM	7920	0.097	0.453	0.312	0.056
DIC, mM	7921	0.384	0.714	0.546	0.072
Alk, mg/L	12	39.2	59.1	53.9	5.4
Chl-a, µg/L	12	29.0	120.0	79.1	25.0
COD, mg/L	12	5.7	9.0	7.2	1.1

**Table 2** Statistical characteristics of water quality items at the center of the South Basin of Lake Biwa between April 1992 and March 1993

Variable	Number of Samples	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation
Temperature, °C	8453	4.9	30.1	16.1	7.3
pH	8450	7.1	9.6	8.3	0.5
DO, mM	8451	0.203	0.403	0.316	0.047
DIC, mM	8450	0.230	0.395	0.301	0.018
Alk, mg/L	12	29.0	30.8	29.9	0.5
Chl-a, µg/L	12	5.3	25.0	12.3	5.8
COD, mg/L	12	2.1	3.7	3.0	0.6

とめたものである。いずれの湖沼においても、自動観測ステーションにおいて表層水がポンプ吸引により採水された後、各種のセンサーや機器により水質が測定されている。また、水質年表<sup>7)</sup>に記載されている毎月のアルカリ度、クロロフィルa(蛍光光度法)、COD(酸性過マンガン酸カリウム法)と気象月報<sup>8,9)</sup>に記載されている毎日の日降雨量も解析に加えた。なお、本論文で解析したデータは、1992年4月1日から1993年3月31日までの1年間のものである。

pH、アルカリ度、水温からDICを算定する方法については、屋外実験池における実験結果の解析<sup>9)</sup>に用いられたものと同様の算定式を用いた。アルカリ度については、実験池における観測<sup>9)</sup>において大降雨による濃度低下以外には変動が小さかったことから、水質年表<sup>7)</sup>に記載されている毎月の測定値を内挿して時間値の算定に用いた。

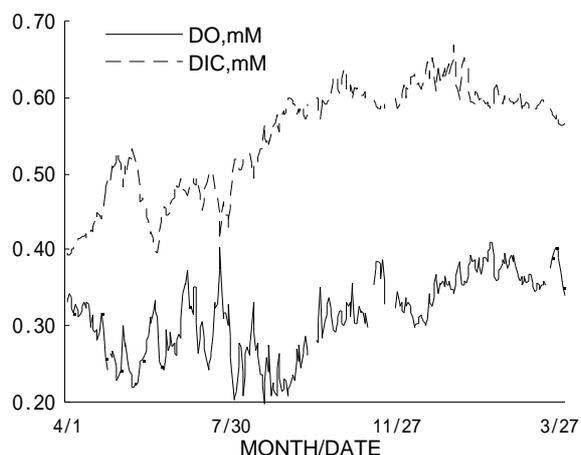
Free water method は水塊でのDOやDICの収支を計算することになるため、大気との交換、水の流入や移流・拡散による物質移動を測定あるいは推定する必要がある。今回対象とした霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖の湖心は水深が4~6mと比較的浅く鉛直方向の混合も速いことから、各種のセンサーが設置されている周辺の水塊を完全混合のボックスと考え、観測されたDOとDICの全変化量から大気との交換量(フラックス)を差し引いたものを生物学的な現象による変化として評価してみた。

### 3. 結果と考察

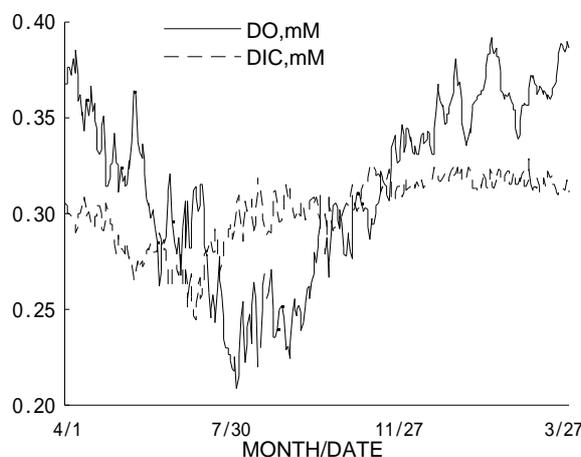
#### 3.1 各観測項目の変動特性

Table 1とTable 2に両湖沼における時間データの基本統計量を示す。水温とpHについては、両湖沼に大きな違いは見られない。霞ヶ浦ではアルカリ度のレベルが琵琶湖南湖と比較して高いため、計算されたDICのレベルもこれを反映して年平均で2倍程度の値となっている。クロロフィルaとCODについても、霞ヶ浦の方が一年を通して琵琶湖南湖よりも4倍程度のレベルで観測されている。

Fig.1とFig.2に両湖沼におけるDOとDICの日データ(時間データを24時間平均したもの)の1年間の変動を示



**Fig. 1** Changes in DO and DIC concentrations (means in 24 hours) at the center of Lake Kasumigaura



**Fig. 2** Changes in DO and DIC concentrations (means in 24 hours) at the center of the South Basin of Lake Biwa

す。両湖沼とも、DOの増加とDICの減少、あるいはその逆といった、連動した変化が多く観測されている。時間データについても、1年を通してDOでは昼間に高く、夜間に下がる傾向が、DICではその逆の傾向が確認できた。

### 3.2 DOとDICの大気交換フラックス

Fig.3に霞ヶ浦における $H_2CO_3$ 濃度（DICと同様に、pH、アルカリ度、水温から算定<sup>9)</sup>）と $CO_2$ の大気平衡濃度（大気中の $CO_2$ 濃度は、つくば山のモニターデータ<sup>10)</sup>から月平均値を用い、ヘンリー定数の温度依存性<sup>11)</sup>を考慮して算定）の日変動を示す。いずれも時間データを24時間平均したものである。春から夏にかけては、5月の一時期を除きpHが高く、DICに占める $H_2CO_3$ の比率が低いことから、水中の $H_2CO_3$ 濃度が大気平衡濃度を下回ることが多かった。秋から冬にかけては、pHの低下に伴って $H_2CO_3$ 濃度が高くなり、大気平衡濃度を上回る日が続いている。これより、霞ヶ浦では、大気中の $CO_2$ が水中に移行する正のDICフラックスが生じた日が一年のうち58%程度の期間であったことが予想される。琵琶湖南湖では、同様の解析結果（大気中の $CO_2$ 濃度は、霞ヶ浦と同じデータを用いた）から、一年のうち85%程度の期間で正のDICフラックスが生じていた。大気中の $CO_2$ 濃度の時間的、空間的な変動から、推定された大気平衡濃度の精度に若干の問題があるものの、Fig.4に示すように、霞ヶ浦における秋期のpHの低下と春期のpHの増大が琵琶湖南湖よりも若干大きいことが年間のDICフラックスの特性に関連していることが示された。

一方、DOについて観測値が飽和濃度（水温から算定<sup>10)</sup>）を下回った日を数えてみると、霞ヶ浦で345日のうち206日、琵琶湖南湖で362日のうち193日であった。両湖沼とも、一年の50~60%の期間において、大気中から水中への正のDOフラックスが生じていたことになる。

大気との交換量は水中濃度と大気平衡濃度（水中の飽和濃度）の差にガス交換係数を乗じて求められる。ガス交換係数については、従来より風の強度を考慮した経験式を用いる推定方法が報告されているが<sup>12-14)</sup>、炭酸物質などのように水中で解離する化学種については単に物理的な混合だけでは説明されない交換速度が存在する場合もあることが指摘されている<sup>15)</sup>。今回は、屋外実験池においてopen box, closed boxを用いたボックス法を適用し

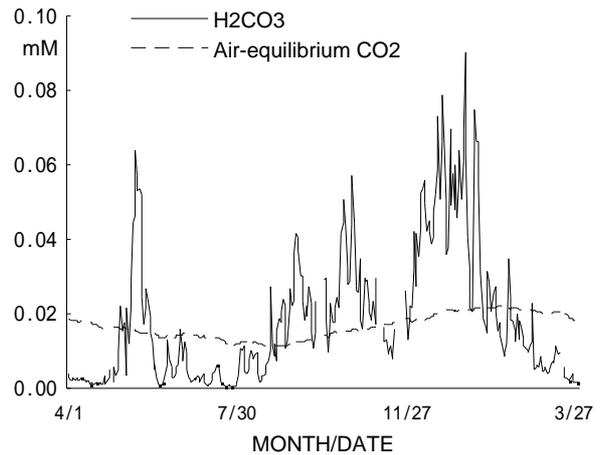


Fig. 3 Changes in  $H_2CO_3$  and Air-equilibrium  $CO_2$  concentrations (means in 24 hours) at the center of Lake Kasumigaura between April 1992 and March 1993

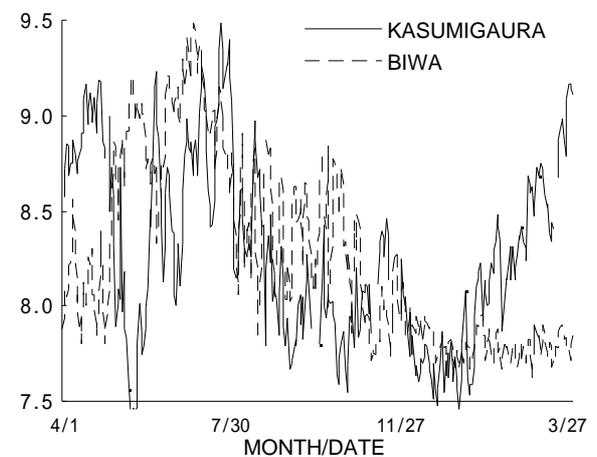


Fig. 4 Changes in pH (means in 24 hours) at the center of Lake Kasumigaura and at the center of the South Basin of Lake Biwa between April 1992 and March 1993

た知見<sup>9)</sup>から導かれた算定式を用いて1時間ごとのガス交換係数を推定し、DOとDICの大気交換フラックスを計算した。

Table 3とTable 4に両湖沼における1時間あたりのDOとDICの全変化量 ( $mM \cdot h^{-1}$ ) および大気交換量 ( $mM \cdot$

Table 3 Statistical characteristics of the rates of change of DO and DIC at the center of Lake Kasumigaura between April 1992 and March 1993

Variable	Number of Sample	Minimum	Maximum	Average of absolute value
DO, mM/h	7864	-0.1250	0.0844	0.0051
DOge, mM/h	7870	-0.0081	0.0493	0.0007
DIC, mM/h	7864	-0.1036	0.1072	0.0025
DICge, mM/h	7865	-0.0074	0.0024	0.0005

ge: gas exchange

Table 4 Statistical characteristics of the rates of change of DO and DIC at the center of the South Basin of Lake Biwa between April 1992 and March 1993

Variable	Number of Sample	Minimum	Maximum	Average of absolute value
DO, mM/h	8419	-0.0188	0.0250	0.0019
DOge, mM/h	8447	-0.0045	0.0059	0.0002
DIC, mM/h	8415	-0.0678	0.0679	0.0017
DICge, mM/h	8445	-0.0047	0.0012	0.0002

ge: gas exchange

$h^{-1}$ , 大気中から水中へのフラックスを正とする)の最小, 最大, 絶対値の平均を示す。琵琶湖南湖では, DO, DIC とともに全変化量の絶対値の平均は $0.002\text{mM} \cdot \text{h}^{-1}$ 程度であることに對して, 霞ヶ浦ではDICについては同様の値ながらDO全変化量の絶対値の平均が $0.005\text{mM} \cdot \text{h}^{-1}$ と極めて高いが目立つ。大気交換量の絶対値の平均については, 琵琶湖南湖では全変化量の絶対値の平均に對して10%程度であったが, 霞ヶ浦では14% (DO), 20% (DIC) となっている。

大気交換量の算定に用いたガス交換係数は風速の1.5乗に比例するため, 観測された風速の値によって交換量は変動する。今回の連続モニタリングデータの場合, 霞ヶ浦では年平均で風速  $4.8$  (標準偏差 $2.8$ )  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 琵琶湖南湖では風速  $2.4$  (標準偏差 $1.9$ )  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  という気象条件の差が全変化量に對する大気交換量の割合に反映されたものと考えられる。霞ヶ浦において, 風速  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上の場合の観測値を除くと, 全変化量の絶対値の平均に對する大気交換量の絶対値の平均の割合は, 12% (DO), 18% (DIC) となり, さらに, 風速  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上の場合の観測値を除くと, 7% (DO), 13% (DIC) となった。

### 3.3 夜間の呼吸によるDOとDICの変化量

DOとDICの変化量から大気との交換量を差し引いたものを生物現象による変化量として評価してみると, 日中は光合成によるDOの増加が続き, 日没以降に呼吸によるDOの減少が続いている日が多く見られ, DICについては, DOとは逆の変動パターンが確認された。

そこで, 各日とも午後8時から翌朝4時までの8時間における生物現象による変化量の合計 (1時間ごとの全変化量から各時間帯の大気交換量を差し引いた値を積算) を3倍したものを1日あたりの呼吸量と仮定した。このような, 1日あたりの呼吸量の日変動を霞ヶ浦のDO (Fig.5) とDIC (Fig.6), 琵琶湖南湖のDO (Fig.7) とDIC (Fig.8) に分けて示す。通常はDOの減少とDICの増加が見られるはずであるが, 霞ヶ浦のDOについては3%, DICについては15%の観測日で逆のパターンを示していた。琵琶湖南湖についてはDOで15%, DICで22%の観測日が逆パターンであった。夜間の平均風速が  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上の日を除いたデータを用いてもこれらの割合は1~2%しか変化しなかったため, 風の影響は大気交換量以外に考慮する必要はないと考えた。逆パターンを示す日の平均水温は年平均値よりも4~5度低く, 呼吸量そのものが小さい場合に多く見られた。DICの方が逆パターンを

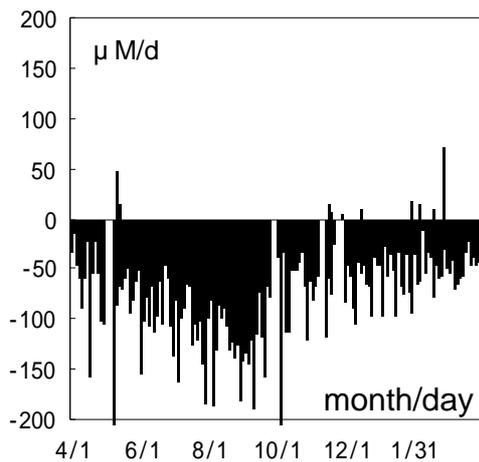


Fig. 5 Changes in respiratory DO (means in 24 hours) at the center of Lake Kasumigaura

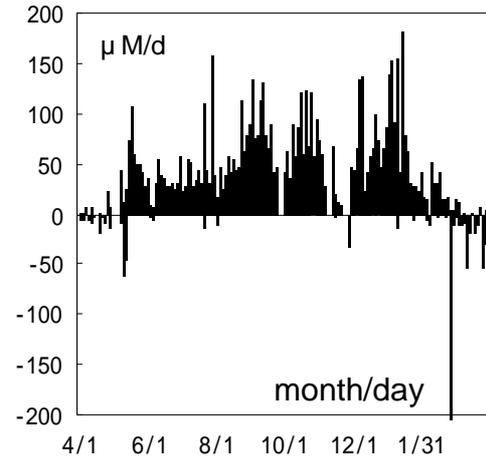


Fig. 6 Changes in respiratory DIC (means in 24 hours) at the center of Lake Kasumigaura

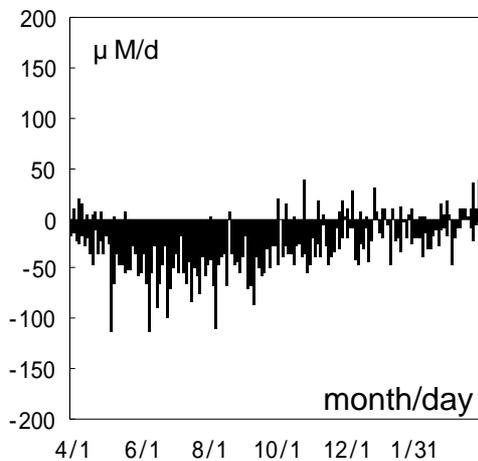


Fig. 7 Changes in respiratory DO (means in 24 hours) at the center of the South Basin of Lake Biwa

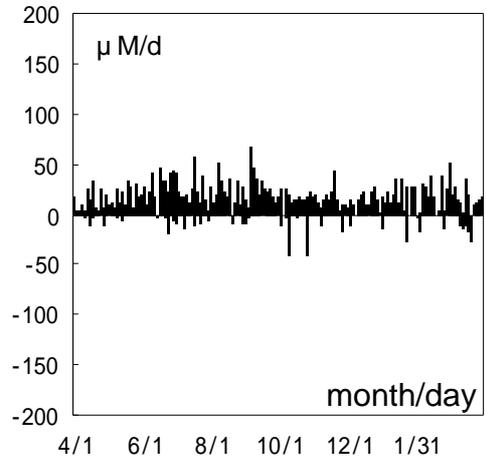


Fig. 8 Changes in respiratory DIC (means in 24 hours) at the center of the South Basin of Lake Biwa

示す割合が高かったのは、pHの時間値が不規則に変動することがDOよりも多くみられたためである。

年平均の呼吸量については、霞ヶ浦についてDOが平均  $-60.5$  (標準偏差42.2)  $\mu\text{M} \cdot \text{d}^{-1}$ , DICが平均  $+32.0$  (同43.2)  $\mu\text{M} \cdot \text{d}^{-1}$ , 琵琶湖南湖についてはDOが平均  $-23.4$  (標準偏差23.9)  $\mu\text{M} \cdot \text{d}^{-1}$ , DICが平均  $+10.8$  (同14.3)  $\mu\text{M} \cdot \text{d}^{-1}$ という呼吸量が得られた。逆パターンを示す日のデータを除いても、年平均値は大きくは変わらなかった。1992年度については、クロロフィルa, CODともに霞ヶ浦湖心の水質は琵琶湖南湖の湖心と比較して年平均で4倍強の値を示しており、水域の生産力や有機物の濃度レベルの差が両湖沼における呼吸量の差として反映されていることがわかる。

つぎに、それぞれの湖沼ごとに呼吸量と有機物の濃度レベルの関係を調べてみた。Fig.9(霞ヶ浦)とFig.10(琵琶湖南湖)に1日あたりの呼吸量の月平均値(DOは、消費速度としての正の値としてプロット)と各月のCOD値(水質年鑑に掲載された環境基準点4地点の平均値)の関係を示す。ここでは、呼吸量はすべて20に温度補正<sup>9)</sup>を行っている。霞ヶ浦では相関係数がDOで0.05, DICで0.30であったが、琵琶湖南湖ではDOで0.72, DICで0.60という高い相関係数が得られた。今回用いた連続モニタリングデータでは霞ヶ浦と琵琶湖南湖の生産力や有機物の濃度レベルの差を実証することはできたが、各湖沼内でのCOD濃度の変動まで関係づけるにはデータ不足であるといえよう。

水中でのDO消費とDIC生産には、バクテリアによる有機物や底泥の分解も関与しているはずであり、実験池における夜間のDO消費とDIC生産の4分の1から半分程度はバクテリアの寄与分であると予想されている<sup>9)</sup>。夜間の呼吸量と各月のクロロフィルa値(同様に、環境基準点4地点の平均値)との関係も調べたが、相関係数は、霞ヶ浦のDOで  $-0.08$ , DICで0.20, 琵琶湖南湖のDOで0.35, DICで0.17とCODの場合よりも有意に低くなった。霞ヶ浦では相関係数そのものが低いため考察することはできないが、クロロフィルaよりも有意に高いCODの相関係数から、琵琶湖南湖における夜間のDOやDICの変化速度が微生物の呼吸だけではなくバクテリアによる有機物や底泥の分解も関与している可能性が確認できた。

また、夜の始めの方が終わりよりも呼吸量大きいことがボトル実験の結果から報告されている<sup>16-18)</sup>、今回の観測値から午前3時~4時(夜の終わり)の呼吸量に対する前日午後8時~9時(夜の始め)の呼吸量の比を計算すると、ゼロに近い呼吸量や逆パターンの存在により、霞ヶ浦のデータの約3割と琵琶湖のデータの約5割が負値および10.0以上の値を示した。10.0以下で正のデータのみに着目すると、霞ヶ浦のDOで平均1.74(標準偏差1.86), DICで平均1.17(同1.29), 琵琶湖南湖のDOで平均1.34(同1.88), DICで平均1.36(同1.36)という値が得られた。データの精度を確認するために午前2時~4時の呼吸量に対する前日午後8時~10時の2時間分の呼吸量の比も計算したが、負値および10.0以上の値の割合や平均値などに有意な差はみられなかった。他のランダムな要因による観測値の精度に若干の問題を残すが、ボトル実験の結果に近い比率で実湖沼における夜の始めと終わりの呼吸量の差を確認することができた。

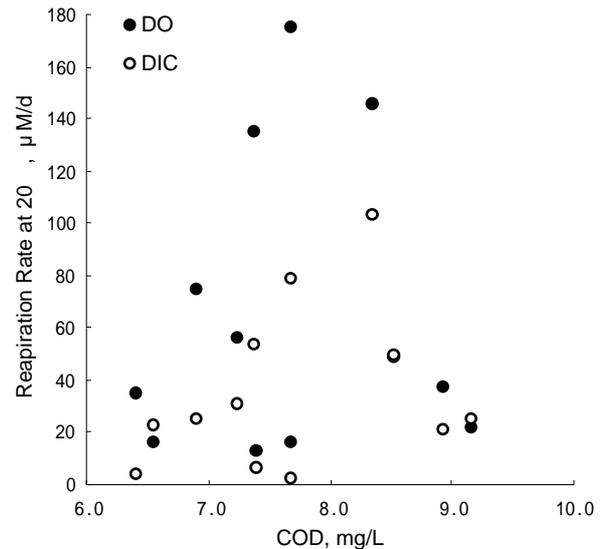


Fig. 9 Respiration rate versus COD concentration in Lake Kasumigaura

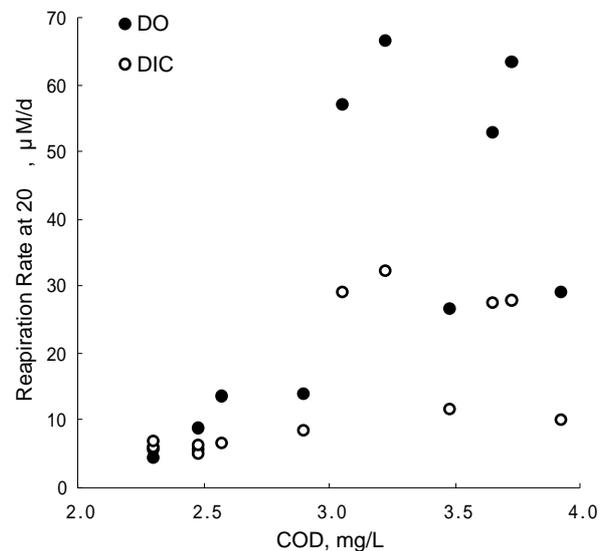


Fig. 10 Respiration rate versus COD concentration in the South Basin of Lake Biwa

夜間と比べ昼間の呼吸速度が大きくなることも指摘されており<sup>16)</sup>、夜間の変化量を積算した1日あたりの呼吸量は真値の4分の3程度に過小評価される可能性がある<sup>9)</sup>とされている。このような、夜間と昼間の呼吸速度の差とバクテリアの寄与分に関する考察から、連続モニタリングデータによる夜間のDOとDICの生物学的な変化量の積算値を用いて1日あたりの呼吸量が推定できると仮定し、昼間の一次生産速度を評価してみる。

#### 3.4 一次生産によるDOとDICの変化量

呼吸速度が昼間も夜間も変化しないと仮定して、各日も午後8時から翌日早朝4時までの8時間における生物現象変化量の合計を8時間呼吸量として昼間(午前8時~午後4時)の生物現象変化量の合計から差し引くことにより、昼間の一次生産等による変化量を計算した。夜間の呼吸量が正常でないデータ(DOが正またはDICが負)を除くと、霞ヶ浦のDOで  $0.6 \sim 30.5 \mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  (全データの82%に

あたる230日分, 平均 8.0, 標準偏差 5.6), DICで -14.4 ~ -0.5  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  (同76%・212日分, 平均 -4.5, 標準偏差 2.9), 琵琶湖南湖のDOで 0.0 ~ 11.2  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  (同77%・255日分, 平均 3.2, 標準偏差 2.0), DICで -6.2 ~ 0.0  $\mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$  (同72%・236日分, 平均 -1.9, 標準偏差 1.0) という変化量が得られた。

このようにして推定された, 一次生産等によるDOの変化量を毎月ごとに平均し, 各月のCOD値とクロロフィルa値(水質年鑑に掲載された環境基準点4地点の平均値)と比較してみた。霞ヶ浦 (Fig.11) については, 若干の時間遅れが見られるが, COD値とDO変化量に一定の関係が認められた(相関係数は 0.29, 2~3カ月時間をずらすと0.6前後)。琵琶湖南湖の場合 (Fig.12) は, 霞ヶ浦のような時間遅れは見られず, 一次生産等による昼間のDOの変化量とCOD値の間に強い関係があることを示している(相関係数は 0.87)。同様の傾向はクロロフィルaについても見られた。DICについては, 両湖沼ともにDOと同様の傾向で逆の関係(一次生産量が負値になるため)が得られている。

データの時間遅れについては, 対象湖沼における流域特性や気象条件等の差も考慮する必要がある。さらには, 1年間のデータしかないことに加えてCODやクロロフィルaの水質指標としての問題点も残るが, 連続モニタリングデータから推定された一次生産量に関する情報が水域の内部生産に関わる有機物の濃度レベルを十分に評価, 予測しうることが示された。

### 3.5 DOとDICの変化量の比

DOの変化とDICの変化の比(モル濃度比)はMQ (Metabolic Quotient), 特に昼間のものはPQ (Photosynthetic Quotient), 夜間のものはRQ (Respiratory Quotient) と呼ばれ, PQは光合成の窒素源や生産される有機物の特性, RQは分解物の内容などを反映するとされている<sup>19-21)</sup>。1日単位のMQは, 大まかには1に近い値をとるが, 水中のNO<sub>3</sub>-N濃度が高い時の方が高めな値, NH<sub>4</sub>-NやDON(溶存有機態窒素)の濃度が高い時には低めの値をとることが多く, 水域での物質循環の特性をマクロに表現する指標であることが報告されている<sup>6)</sup>。

今回の連続モニタリングデータから得られたMQ(全変化量から大気交換量を引いた生物現象による変化量のモル濃度比)は様々な不規則変動要因(急激な気象変化やセンサーの維持管理上の問題等)により大きなばらつきを示した。特に, DOとDICの増減が対応していないために, MQが負になったケースが霞ヶ浦で全データの36%, 琵琶湖南湖で41%もあった。欠測を除くデータから計算された1時間ごとのMQの値が, 0.5~2.0の範囲におさまっていたのは霞ヶ浦, 琵琶湖南湖ともに22%のデータであった。急激な気象条件の変化を考慮して, 日雨量10mm以上, 風速10mm以上のデータを除いても, この割合は有意には変化しなかった。実験池などで観測されているMQの値がほとんど0.5~2.0の範囲におさまっている<sup>6)</sup>ことと比較して, 流れがあり空間的な広がりを持つ実湖沼における時間値から導かれたMQの変動にランダムな要因が多く含まれることは明らかである。

そこで, 前後1時間のデータを加えた3個の測定値の算術平均をとる単純移動平均法で時系列データを平滑化した上で4時間あたりの変化量からMQを求めてみると,

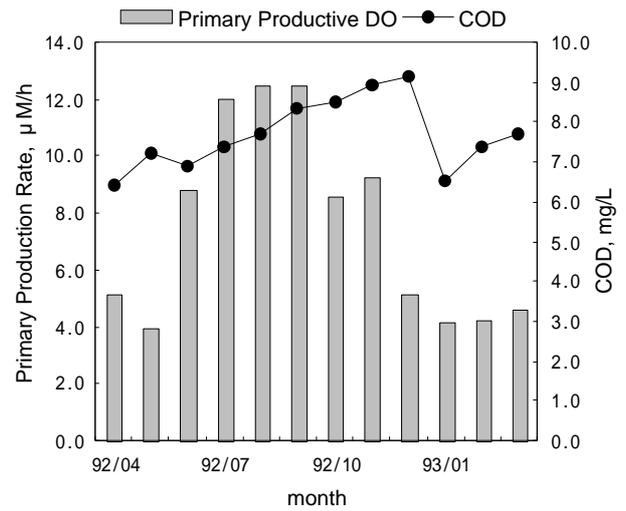


Fig. 11 Changes in specific gross primary productivity and COD concentrations in Lake Kasumigaura

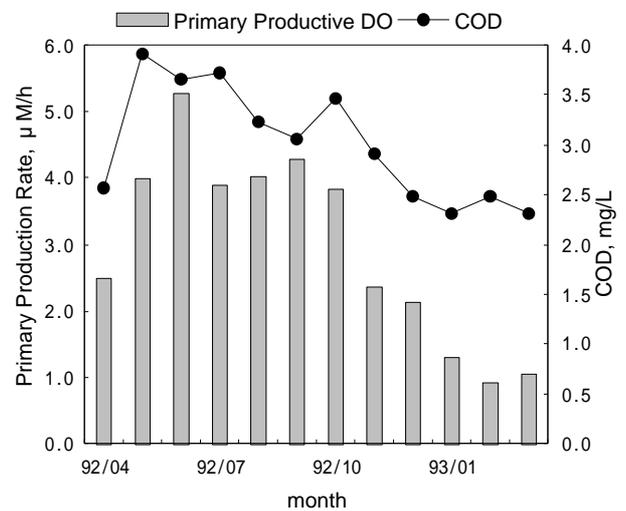


Fig. 12 Changes in specific gross primary productivity and COD concentrations in the South Basin of Lake Biwa

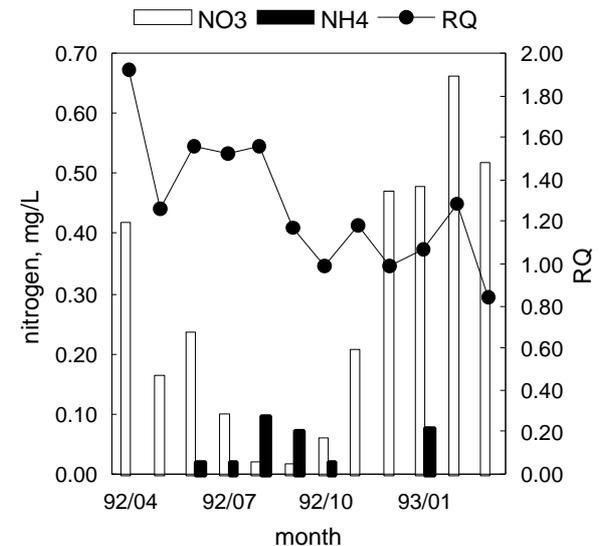


Fig. 13 Changes in RQ (Respiratory Quotient) and concentrations of nitrogenous species in Lake Kasumigaura

霞ヶ浦, 琵琶湖南湖ともに, 36%のデータが, 0.5~2.0の範囲におさまった。このような, 0.5~2.0の範囲で観測されたRQ (20:00~4:00におけるMQ)の平均は霞ヶ浦で1.18 (標準偏差0.43), 琵琶湖南湖では1.29 (標準偏差0.41), PQ (8:00~16:00におけるMQ)の平均は霞ヶ浦で1.23 (標準偏差0.43), 琵琶湖南湖では1.29 (標準偏差0.40)であった。総じて, 霞ヶ浦よりも琵琶湖南湖の方がやや高いMQが得られたが, 1992年度の水質年鑑に掲載された環境基準点4地点の平均値から計算したNH<sub>4</sub>-N/NO<sub>3</sub>-N比の年平均は, 霞ヶ浦の0.72に対して琵琶湖南湖では0.36であり, 既存の報告による傾向と一致している。

Fig.13に霞ヶ浦における月別のNO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N濃度(各月とも環境基準点4地点の平均値)とRQ(0.5~2のデータのみを用いた月別平均値)の季節変動を示す。春から夏にかけてNO<sub>3</sub>-N濃度が減少し, NH<sub>4</sub>-N濃度が増大するとRQも減少しているが, 秋から冬にかけての変動はあまり同調していない。琵琶湖南湖については, 霞ヶ浦ほど明確な関係は見られなかったが, 連続モニタリングデータによるDOの変化とDICの変化の比が水域の物質循環の特性をマクロに表すことがわかった。

#### 4. おわりに

霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖において, センサー等による連続モニタリングで得られたpH, DO等のデータを用いて, 湖沼における物質循環をマクロにモニターする手法について検討した。得られた成果は以下の通りである。

1) DOとDICの変化量から大気との交換量を差し引いたものを生物学的な現象による変化として評価する際に, 風速のレベルの差が全変化量に対する大気交換量の割合(絶対値平均で10%前後)に反映されていた。

2) DOとDICの変化量から大気との交換量を差し引いたものを生物現象による変化量として評価してみると, 日中は光合成によるDOの増加が続き, 日没以降に呼吸によるDOの減少が続いている日が多く見られ, DICについては, 逆の変動パターンが確認された。水域の生産力や有機物の濃度レベルの差が生物現象によるDOやDICの変化量で的確に評価できることがわかった。

3) 夜間の呼吸量については, ボトル実験の結果に近い比率で夜の始めと終わりの呼吸量の差を確認することができた。

4) 夜間(午後8時~翌日午前4時)の呼吸量を昼間(午前8時~午後4時)の生物現象変化量の合計から差し引くことにより, 昼間の一次生産等による変化量を推定した。霞ヶ浦, 琵琶湖南湖ともに一次生産等によるDOの変化量とCOD, クロロフィルaに関係が認められた。時間遅れ等若干の問題は残るが, 連続モニタリングデータから推定された一次生産量に関する情報を用いて水域の内部生産関連の有機物濃度レベルを予測できることが示された。

5) 前後1時間のデータを加えた3個の測定値の算術平均をとる単純移動平均法で時系列データを平滑化した上で4時間あたりの変化量からMQ(DOとDICの変化のモル濃度比)を求めてみると, 霞ヶ浦よりも琵琶湖南湖の方がやや高いMQが得られたが, 水中のNH<sub>4</sub>-N/NO<sub>3</sub>-N比に関連することについては既存の報告による傾向と一致した。

以上のように, 連続モニタリングデータから計算されたDOの変化とDICの変化に関する情報が実際の湖沼における物質循環や生物代謝の特性をマクロに表す方法を提示することができた。一次生産などの現象を詳細に評価するには, 多くの気象情報(日照時間, 日射量等)やセンサーの維持管理状況を考慮してさらにデータを吟味する必要があると考えている。

#### 謝辞

解析に用いた連続モニタリングデータの提供に関して, 建設省霞ヶ浦工事事務所ならびに滋賀県立衛生環境センターの関係各氏のご厚意に御礼申し上げます。

(原稿受付 1997年3月25日)

(原稿受理 1997年11月30日)

#### 参考文献

- 1) Wetzel, R.G. et al. (1972) Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in a temperate hard-water lake, Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 29, Suppl. 185-243.
- 2) オダム E. P. (1974) 生態学の基礎(上), 390pp, 培風館, 東京.
- 3) Welch, H. E. (1968) Use of modified diurnal curves for the measurement of metabolism in standing water, Limnology Oceanography, 13, 679-687.
- 4) Weisburd, R. S. J. and Laws, E.A. (1990) Free water productivity measurements in leaky mariculture ponds, Aquaculture Engineering, 9, 377-404.
- 5) 福島武彦, 松重一夫, R.S.J. Weisburd (1995) DO, pHの連続測定による気液ガス交換, 光合成, 呼吸速度の推定方法について, 水環境学会誌, 18, 279-289.
- 6) 福島武彦, 松重一夫, R.S.J. Weisburd, 秦三和子, 細見正明 (1995) DO, pH連続測定結果をもとにした実験池の物質循環, 生物代謝特性の評価, 水環境学会誌, 18, 755-765.
- 7) 建設省(1994) 平成4年度水質年表
- 8) 茨城県気象月報(1992年4月~1993年3月)
- 9) 滋賀県気象月報(1992年4月~1993年3月)
- 10) 環境庁大気保全局(1996) 平成6年度国設大気測定網測定結果
- 11) 東京天文台編(1994) 理科年表, 1042pp, 丸善, 東京.
- 12) Banks, R.B. and Herrera, F. F.(1977) Effects of wind and rain on surface reaeration, Journal Environmental Engineering Division, ASCE, 103, 489-504.
- 13) Hartman, B. and Hammond, D.E. (1985) Gas exchange in San Francisco Bay, Hydrobiologia, 129, 59-68.
- 14) Wanninkhof, R, Ledwell, J. and Crusius, J.(1991) Gas transfer velocities on lakes measured with sulfur hexafluoride, in Air Water Mass Transfer (Wilhelms, S.C. and Gulliver, J.S. ed.), 441-458, ASCE.
- 15) Smith, S.V.(1985) Physical, chemical and biological characteristics of CO<sub>2</sub> gas flux across the air-water interface, Plant Cell Environment, 8, 387-398.
- 16) Weger, H.G., Herzig, R., Falkowski, P.G. and Turpin, D.H. (1989) Respiratory losses in the light in a marine diatom: measurements by short-term mass spectrometry, Limnol. Oceanogr., 34, 1153-1161.
- 17) Markager, S., Jespersen, A., Madsen, T.V., Berdalet, E. and Weisburd, R. (1992) Diel changes in dark respiration in a plankton community, Hydrobiologia, 238, 119-130.
- 18) Szyper, J. P., Rosenfeld, J. Z., Piedrahita, R. H. and Giovannini, P. (1992) Diel cycles of planktonic respiration rates in briefly incubated water samples from a fertile earthen pond, Limnol. Oceanogr., 37, 1193-1201.
- 19) Williams, P. J. leB and Robertson (1991) Overall planktonic oxygen and carbon dioxide metabolisms: the problem of reconciling observations and calculations of photosynthetic quotients, J. Plankton Res., 13, 153-169.
- 20) Laws, E. A. (1991) Photosynthetic quotients, new production and net community production in the open ocean, Deep-Sea Res., 38, 143-167.
- 21) Cole G. A. (1983) Textbook of limnology, 3rd ed., pp.279-281, Mosby, St. Louis.