

新たな水環境基準「底層DO」への対応について

桑野 暁

The Measurement of the Bottom Layer Dissolved Oxygen Using the Optical Sensor in Lakes of Fukui

Satoru KUWANO

1. はじめに

底層溶存酸素量（以下「底層DO」と示す。）は、平成25年8月に環境大臣が中央環境審議会に対して諮問した「水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて」の答申を踏まえて、平成28年3月に「水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件」が告示され、「生活環境の保全に関する環境基準」に追加された。

底層DOの環境基準は、水生生物の生息および再生産の場の確保の観点から生物1～3の三種類の類型に分け、それぞれ4.0 mg/L以上、3.0 mg/L以上、2.0 mg/L以上の基準値が設定されている。

湖沼などの閉鎖性水域における底層DOは、富栄養化による有機物の増加（内部生産）に伴う酸素消費量の増加や水温および塩分躍層の形成による底層への酸素供給の阻害といった様々な要因によって低下すると考えられている。また、貧酸素水塊は、底層を生息域とする水生生物の生息を困難にさせるだけでなく、生物にとって有害な硫化水素を発生させる要因となり、水生生物の大量へい死を引き起こす場合もある。さらに、嫌気的な底質からは栄養塩が溶出し、アオコや赤潮の原因となる植物プランクトンが異常発生することで漁業被害やカビ臭の発生、景観の悪化を招くおそれがある。

本稿では、平成28年3月に溶存酸素量（以下「DO」と示す。）の公定法に追加された光学式センサ法と、従来からの測定法であるよう素滴定法を用いて三方五湖（日向湖、久々子湖、水月湖、菅湖、三方湖の五つの湖の総称）と北潟湖のDOを測定し、福井県内の湖沼における底層DO測定についての対応を検討したので報告する。

2. 方法

2.1 調査地点

調査地点を図1に示す。

調査地点は、三方五湖および北潟湖における水質汚濁防止法第15条第1項に基づく、公共用水域常時監視調査の環境基準点および補助点とした。ただし、橋上から採水を行う流入河川（観音川、はす川）と塩尻橋は本稿の調査地点からは除外した。

2.2 調査水深

表層は、水面から0.5 mの位置とした。

底層は、湖底から0.5 mの位置とした。

ただし、水月湖は、湖水の循環が全層に及ばない部分循環湖であり、7～8 m付近に認められる成層¹⁾の影響で底層は硫化水素を含む無酸素状態の海水が滞留していることや水月湖湖底には年縞と呼ばれる、年代測定において重要な縞模様の堆積物が形成されていることから、水月湖および隣接する菅湖は、底層の代わりに水深5 mの下層を調査水深とした。

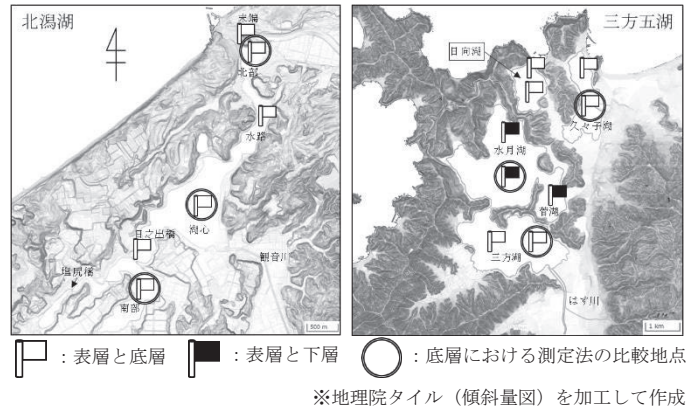


図1 調査地点

2.3 測定方法

2.3.1 DO

2.3.1.1 光学式センサ法

YSI ProDSS ODO 蛍光式DOセンサ（Xylem社）を船上から測定対象の水深まで降下し、指示値が安定するのを待ってから読み取った。

光学式センサ法で測定したDOを以下「ODO」と示す。

2.3.1.2 よう素滴定法

日本工業規格 K 0102 32.1 に基づき測定した。

表層は、表層水を容量200 mLのフラン瓶に採水し、現地で溶存酸素固定を行った後、試験室で滴定を行った。

底層および下層は、理研式万能採水器（宮本理研工業株）を用いて採取した試料を容量200 mLのフラン瓶に静かに注ぎ、表層と同様に溶存酸素固定を行った後、試験室で滴定を行った。

よう素滴定法で測定したDOを以下「IDO」と示す。

2.3.2 水温・塩分

水温および塩分は、YSI ProDSS 電導度・温度（塩分）複合センサー（Xylem社）を用いて測定した。また、測定結果はODO（mg/L）の補正に用いた。

2.3.3 水深

全水深は、ポータブル測深計 PS-7（本多電子株）を用いて測定した。

測定水深は、全水深を基に決定し、YSI ProDSS に搭載している水深計を用いて測定した。

2.4 調査日

2.4.1 三方五湖

平成30年8月2日、10月4日、12月20日、平成31年2月7日

2.4.2 北潟湖

平成30年8月3日、10月18日、12月6日、平成31年2月8日

3. 結果と考察

測定水深および全水深を表 1 に示す。

表 1 測定水深および全水深 (単位: m)

| 湖名 | 地点 | 測定月 | 水深 | | | |
|---------|---------|------|-----|------|------|------|
| | | | 表層 | 底層 | | |
| 日向湖 | 北部 | 8月 | 0.5 | 38.4 | 38.6 | |
| | | 10月 | 0.5 | 37.9 | 37.8 | |
| | | 12月 | 0.5 | 38.0 | 39.0 | |
| | | 2月 | 0.5 | 37.7 | 38.4 | |
| | 南部 | 8月 | 0.5 | 39.2 | 39.5 | |
| | | 10月 | 0.5 | 38.5 | 38.5 | |
| | | 12月 | 0.5 | 38.7 | 40.9 | |
| | | 2月 | 欠測 | 38.8 | 39.8 | |
| | 水月湖 | 北部 | 8月 | 0.5 | 5.3 | 25.9 |
| | | | 10月 | 0.5 | 5.0 | 30.4 |
| | | | 12月 | 0.5 | 5.0 | 28.8 |
| | | | 2月 | 0.5 | 5.0 | 29.7 |
| 南部 | | 8月 | 0.5 | 5.3 | 29.6 | |
| | | 10月 | 0.5 | 5.0 | 32.0 | |
| | | 12月 | 0.5 | 5.0 | 32.0 | |
| | | 2月 | 0.5 | 5.0 | 32.5 | |
| 三方湖 | | 西部 | 8月 | 0.5 | 1.6 | 2.2 |
| | | | 10月 | 0.5 | 1.8 | 2.3 |
| | | | 12月 | 0.5 | 1.8 | 2.3 |
| | | | 2月 | 0.5 | 1.6 | 2.1 |
| | 東部 | 8月 | 0.5 | 1.3 | 1.7 | |
| | | 10月 | 0.5 | 1.4 | 1.9 | |
| | | 12月 | 0.5 | 1.3 | 1.8 | |
| | | 2月 | 0.5 | 1.1 | 1.6 | |
| | 北潟湖(中湖) | 水路 | 8月 | 0.3 | 2.7 | 2.8 |
| | | | 10月 | 0.5 | 2.7 | 2.9 |
| | | | 12月 | 0.5 | 2.2 | 2.7 |
| | | | 2月 | 0.5 | 2.2 | 2.7 |
| 湖心 | | 8月 | 0.3 | 2.9 | 3.0 | |
| | | 10月 | 0.5 | 2.6 | 3.1 | |
| | | 12月 | 0.5 | 2.3 | 2.8 | |
| | | 2月 | 欠測 | 2.4 | 2.9 | |
| 久々子湖 | | 北部 | 8月 | 0.5 | 1.7 | 2.5 |
| | | | 10月 | 0.5 | 2.0 | 2.5 |
| | | | 12月 | 0.5 | 2.1 | 2.6 |
| | | | 2月 | 0.5 | 1.8 | 2.3 |
| | 南部 | 8月 | 0.5 | 1.7 | 2.1 | |
| | | 10月 | 0.5 | 1.5 | 2.2 | |
| | | 12月 | 0.5 | 1.8 | 2.3 | |
| | | 2月 | 0.5 | 1.5 | 2.0 | |
| | 菅湖 | 測定月 | 8月 | 0.5 | 10.4 | 11.8 |
| | | | 10月 | 0.5 | 5.0 | 12.0 |
| | | | 12月 | 0.5 | 4.9 | 12.2 |
| | | | 2月 | 0.5 | 4.8 | 12.0 |
| 北潟湖(北湖) | | 末端 | 8月 | 0.3 | 2.3 | 2.4 |
| | | | 10月 | 欠測 | 欠測 | 2.4 |
| | | | 12月 | 0.5 | 1.5 | 2.0 |
| | | | 2月 | 0.5 | 1.8 | 2.4 |
| | | 北部 | 8月 | 0.3 | 1.5 | 1.7 |
| | | | 10月 | 欠測 | 1.0 | 1.6 |
| | | | 12月 | 0.5 | 0.8 | 1.3 |
| | | | 2月 | 0.5 | 0.8 | 1.4 |
| | 北潟湖(南湖) | 日之出橋 | 8月 | 0.3 | 2.4 | 2.5 |
| | | | 10月 | 0.5 | 2.2 | 2.6 |
| | | | 12月 | 0.5 | 1.8 | 2.3 |
| | | | 2月 | 0.5 | 2.5 | 3.0 |
| 南部 | | 8月 | 0.3 | 2.1 | 2.2 | |
| | | 10月 | 0.5 | 1.7 | 2.2 | |
| | | 12月 | 0.5 | 1.6 | 2.1 | |
| | | 2月 | 0.5 | 1.6 | 2.1 | |

DO は、環境基準(A 類型: 7.5 mg/L 以上、B 類型: 5 mg/L 以上) が設定されているが、底層 DO は、類型指定がまだされていないため、参考として最も厳しい環境基準(生物 1: 4.0 mg/L 以上)と比較して評価した(表 2、3)。

公共用水域水質測定結果の報告について(平成 5 年 3 月 29 日 環水規第 51 号)にならい、有効数字は 2 桁とし、3 桁目以下は切り捨てた。

3. 1 三方五湖

三方五湖の測定結果を図 2 に示す。

2 月のみ、全地点で最も厳しい環境基準(生物 1: 4.0 mg/L 以上)に適合した。また、夏季から冬季へ季節が移るにつれて適合率が増加した(表 2)。

日向湖は、8 月から 12 月の底層 DO が低かった。日向湖では、水温成層が形成されていることが貧酸素化の主な原因と考えられる²⁾。なお、2 月の表層と底層の間に水温と塩分、DO の差はほとんどなく、表層の水温低下に伴い、表層水と底層水の循環(全層循環)が起こった結果、貧酸素状態が解消されたと考えられる。

また、8 月の三方湖西部の表層において、他の地点よりも突出して高い値が示されたが、これは調査時に発生していたアオコによる光合成が影響しているものと考えられる。

3. 2 北潟湖

北潟湖の測定結果を図 3 に示す。

北潟湖は、開田橋(国道 305 号)の水門によって海水の流入を管理している。測定日のうち、8 月と 10 月水門が閉じており、12 月と 2 月は開いていた。

10 月から 2 月にかけて全地点で最も厳しい環境基準(生物 1: 4.0 mg/L 以上)に適合し、三方五湖と比べると夏季

から秋季でも比較的高い値を示した(表 3)。

開田橋の水門の開閉が底層の水質に影響を与えている可能性があり、測定時には水門の開閉状況を記録することが必要であると考えられる。

3. 3 測定法間の比較

表層の ODO と IDO には大きな差は見られなかったが(±0~1.0 mg/L)、底層の ODO と IDO には無視できない差(±0~8.3 mg/L)が生じた地点もあった。

ODO と IDO の相関係数は、表層で $R^2 = 0.9585$ 、底層で $R^2 = 0.5783$ となった(図 4-5)。

表層では ODO が IDO よりも若干高い値を示したが、底層では、逆に IDO の方が高い値を示す傾向があった。また、ODO が低濃度になるほど、ばらつきが大きくなる傾向があった。

3. 4 ODO と IDO に差が生じた要因

ほとんどの地点において、表層で ODO が若干高い値を示した要因については、本調査結果からは推定できないが、測定機器の校正不足などが考えられる。

本調査では、従来から公共用水域常時監視調査の採水に用いてきた理研式万能採水器を用いたが、水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件の施行について(平成 28 年 3 月 30 日 環水大水発第 1603303 号)には、「底面付近で溶存酸素量の変化が大きいことが想定される場合の採水には、横型のバンドン採水器を用いる。」と記載されている。理研式万能採水器はメッセージ不要で簡易に採水ができるものの構造上の特性として、採水器内の水の置換効率が悪いのか、または、経年劣化(導入後 20 年経過)により密閉性が保たれていなかった可能性がある。

久々子湖では、海水が遡上することで生じる潮流や塩分成分層(塩水くさび)が底層の ODO と IDO の差を大きくした要因の一つとして考えられる。8 月や 12 月、2 月の調査時に生じていたと考えられる塩分成分層は、10 月の測定結果からは確認できず、調査を行った 10 月 4 日は、長潮(上弦または下弦の月の 1~2 日後、干満の差が一段と小さくなる)だった³⁻⁴⁾ことから久々子湖の底層の水質は潮汐の影響を大きく受けることが示唆された。

DO が低濃度になるほどばらつきが大きくなる要因としては、大気中の酸素がフラン瓶に試料を移す際に溶け込んだ可能性が考えられる。

4. まとめ

光学式センサ法は、表層でよう素滴定法よりも高い値を示す傾向にあったが、測定法間には強い相関が示されたため DO の測定法は、光学式センサ法に統一しても支障はないと考えられる。しかし、底層でばらつきが大きくなった要因については今後も検証が必要である。

生活環境の保全に関する環境基準は、日間平均値で評価するため、正確な評価を行うためには連続測定を行うことが望ましい。特に DO は、植物プランクトンや水草の呼吸によって夜間に減少しやすく、昼夜の連続測定を行い日間平均値として妥当であるか今後、検証する必要がある。

今後の底層 DO のモニタリング地点は、日向湖北部、久々子湖南部、三方湖東部、北潟湖北部、北潟湖湖心、北潟湖南部の 6 地点とし、適切な類型指定に向けて底層 DO のデータを蓄積していく。

参考文献

- 1) 森 和紀：溶存物質濃度の変動からみた水月湖における湖水の滞留時間, 地理学評論, **48(1)**, 63-71(1975)
- 2) 前川 勉, 白崎 健一, 沢田 稔之佑, 山口 慎一, 宇都宮 高栄, 青木 啓子, 田川 専照, 磯松 幸貞：三方五湖の富栄養化に関する研究 (第 4 報) 湖水の水質の水平分布について, 福井県公害センター年報, **12**, 181-185(1982)

- 3) 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 暦計算室：平成 30 年(2018) 暦要項 朔弦望
<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/yoko/2018/rekiyou183.html>
- 4) 海上保安庁海洋情報部：潮 (大潮・長潮・若潮…) の名前？
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/SODAN/faq/tiden_ame.htm

表 2 底層 ODO の環境基準の適合状況 (三方五湖)

| | 日向湖 | | 久々子湖 | | 水月湖 | | 菅湖 | 三方湖 | | 生物1:4.0 mg/L以上 適合地点数 |
|-----|-----|----|------|----|-----|----|----|-----|----|-------------------------|
| | 北部 | 南部 | 北部 | 南部 | 北部 | 南部 | | 西部 | 東部 | |
| 8月 | × | × | ○ | ○ | × | × | × | × | × | 2 / 9 |
| 10月 | × | × | ○ | ○ | × | × | × | × | × | 3 / 9 |
| 12月 | × | × | ○ | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 6 / 9 |
| 2月 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 9 / 9 |

(適合：○ 不適合：×)

表 3 底層 ODO の環境基準の適合状況 (北潟湖)

| | 北潟湖(北湖) | | 北潟湖(中湖) | | 北潟湖(南湖) | | 生物1:4.0 mg/L以上 適合地点数 |
|-----|---------|----|---------|----|---------|----|-------------------------|
| | 末端 | 北部 | 水路 | 湖心 | 目之出橋 | 南部 | |
| 8月 | ○ | ○ | ○ | × | × | × | 3 / 6 |
| 10月 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 6 / 6 |
| 12月 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 6 / 6 |
| 2月 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 6 / 6 |

(適合：○ 不適合：×)

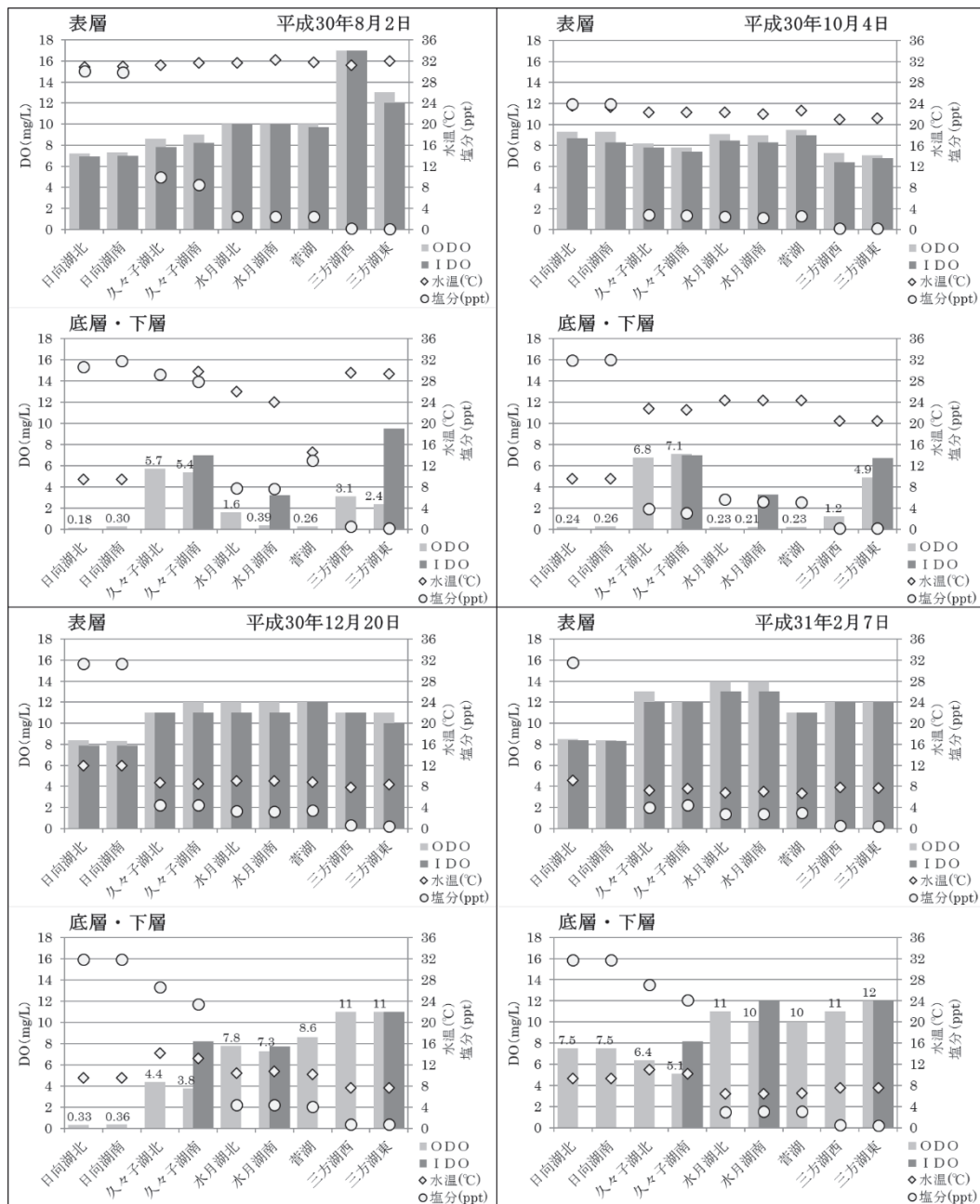


図 2 三方五湖の測定結果 (底層の ODO の値のみ棒グラフ上に示す。)

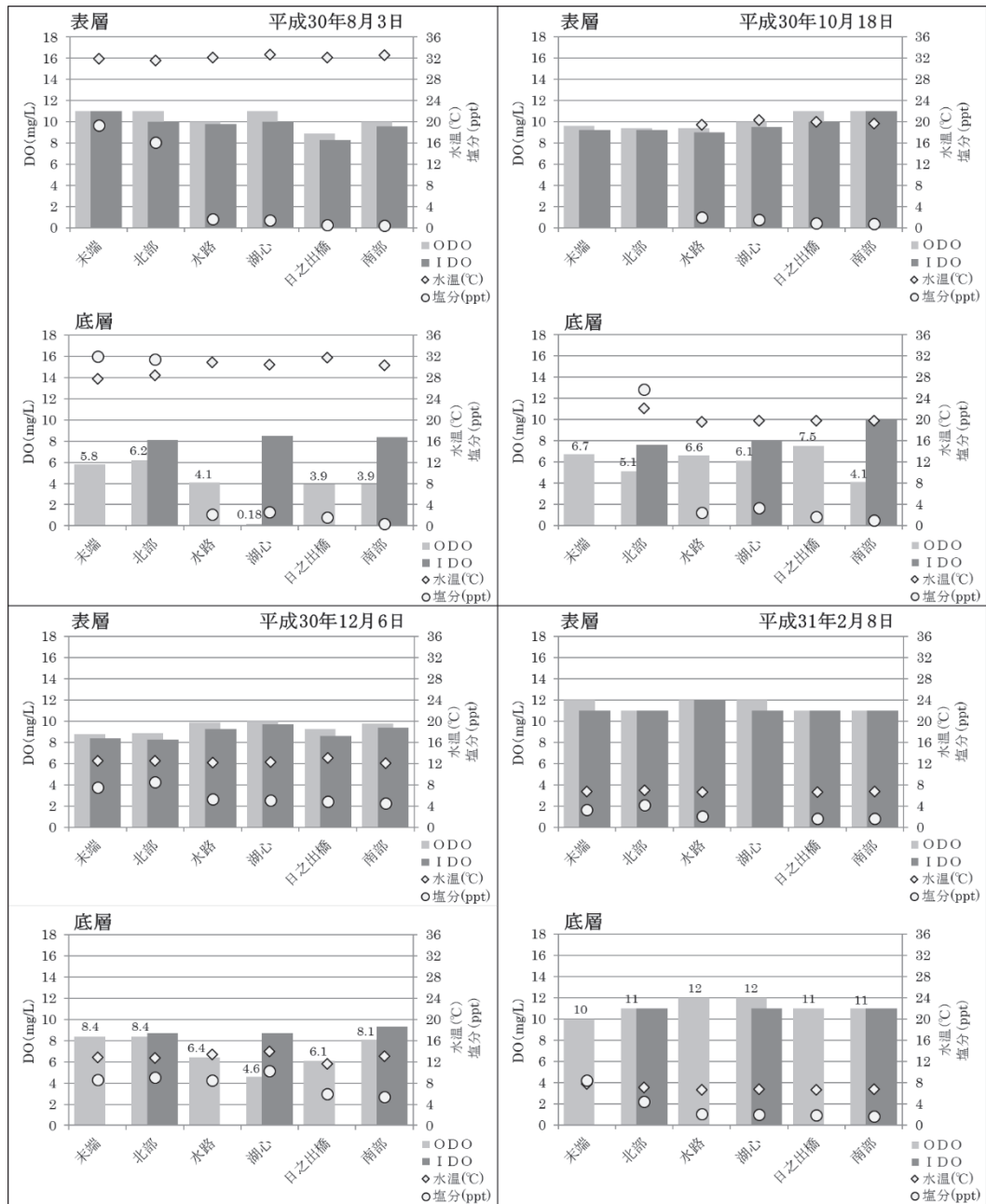


図 3 北潟湖の測定結果 (底層の ODO の値のみ棒グラフ上に表示。)

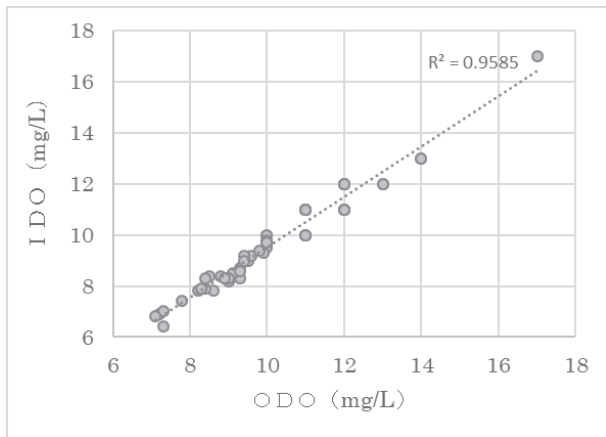


図 4 測定法間の相関図 (表層)

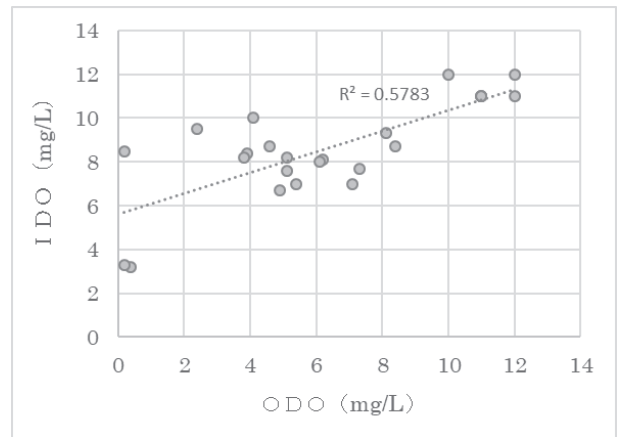


図 5 測定法間の相関図 (底層・下層)