

閉鎖性水域におけるマイクロバブル発生装置を用いた 溶存酸素供給効果の把握

佐々木洋之¹・佐々木 淳²・武田真典³
岡野崇裕³・足立有平⁴

近年, 閉鎖性水域における底層水の貧酸素化を改善する手段として, マイクロバブル発生装置による水質改善技術が注目されている。しかし, 従来行われてきたノズルを直接水面下に下ろす稼動方式では, 気泡の存在による湧昇流が励起されることで, 底層貧酸素水の改善範囲は限られたものになってしまうことが指摘されていた。そこで本研究では, 気泡を除去した形で高酸素水のみを底層に供給できる稼動方式を採用し, その特性を把握するための現地実験および再現計算を行った。その結果, 気泡を除去することで溶存酸素を水平方向の広い範囲に供給できることが分かり, 本装置の基本特性が把握できた。また, 現地への適用性の検討も可能となった。

1. はじめに

近年, 閉鎖性水域において深刻な問題となっている底層水の貧酸素化を改善する手段として, マイクロバブル発生装置 (以下, マイクロバブル) による水質改善技術が注目されており, マイクロバブルは単に溶存酸素濃度 (以下, DO) を高めるのみならず, 生物の生理活性を高めるものとしても注目されている。マイクロバブルの浮上速度は極めて小さいことが知られており, その速度はほぼストークスの法則に従い, 最近ではマイクロバブル発生後の収縮・溶解特性についても明らかになりつつある (例えば, 大成ら, 2006)。このことから高酸素水を長時間底層に留めることで, 効率良く気泡を水中に溶解させ, 底層貧酸素水を広い範囲で改善できることが期待されていた。しかし, 実際には気泡の存在によるある程度の上昇流の発生は避けられず, 従来行われてきたノズルを直接水面下に下ろすマイクロバブルの稼動方式では, 鉛直混合が起きてしまうことで, 結果として底層貧酸素水を改善できる範囲は限られたものになってしまうことが指摘されていた。

本研究では以上の点を踏まえ, 気泡を除去した形で高酸素水のみを貧酸素層に供給できる新しいマイクロバブルの稼動方式を採用し, その効果を検証するための現地実験を閉鎖的な塩水湖である福井県日向湖を対象に行った。また, 数値モデルを用いた現象に忠実な再現計算を行うことにより, 本装置の基本特性の把握と底層貧酸素水改善のための適切な適用方法を提案する。

2. マイクロバブルの現地実験

2005 年 9 月 16 日 10 時 50 分から 9 月 30 日 10 時 50 分までの期間にかけて, 日向湖を対象にマイクロバブルの基礎データを取得するための現地実験を行った。日向湖は若狭湾と水月湖の間に位置し, 水深が最大 38 m 程度で急勾配のすり鉢状の海底地形を有している (図-1)。また, 深さ 10 m から 20 m にかけて密度躍層があり, 躍層下である 20 m 以深がほぼ無酸素化している閉鎖的な塩水湖である (図-2)。現地実験は日向湖南部の水深 38 m の位置にて行った。

現地実験は図-1 に示した箇所に既設されていた約 11 m 四方の 2 つの空き生簀を利用して行った。図-3 のよ

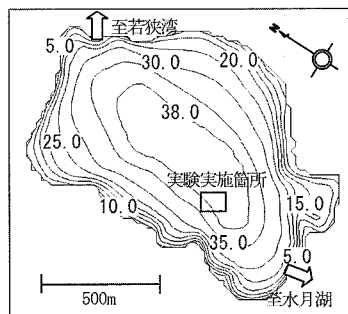


図-1 日向湖水深および実験位置図

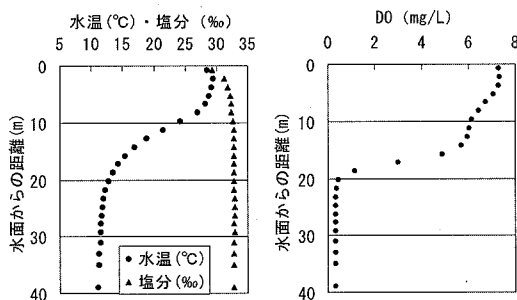


図-2 水温・塩分・DO の鉛直分布 (観測日: 2005 年 8 月 30 日)

1 正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター 調査研究部
2 正会員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創
生部門
3 正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター 研究開発部
4 (株)テトラ 環境事業本部

うに水面下 30 m よりストレーナで吸い上げた水に水面下 1 m にてマイクロバブルを混入させ、シートを介して貧酸素層である水面下 25 m に高酸素水を吐き出す方法を採用した。実験期間中は放出口の直下 1 m とシートの中心より 1.5 m～10 m 離れた箇所において水温・塩分・DO の連続観測を行い、装置より 10 m 離れた箇所までの水質変化を詳細に把握した。また、併せて投げ込み式水質計による移動観測を 1 m ピッチで行った。

本実験で用いたマイクロバブルは(有)バイクリン社の「YJ システム」である。YJ システムは、水中ポンプとの組み合わせにより、通水部を通過する水に吸気管より自吸した空気を混入させ、微細気泡として噴出するものである。また本実験装置の規格は、ポンプ流量 925 L/min, 空気流量 200 L/min, 消費電力 5.5 kW であり、ノズルは YJ-32 型 (ノズル径: 32 mm) を用いた。YJ システムにおける特殊ノズルは、通水部に急縮部が無いことから通水効率が高く、目詰まりが起りにくい等の特徴を有している (足立ら, 2004)。

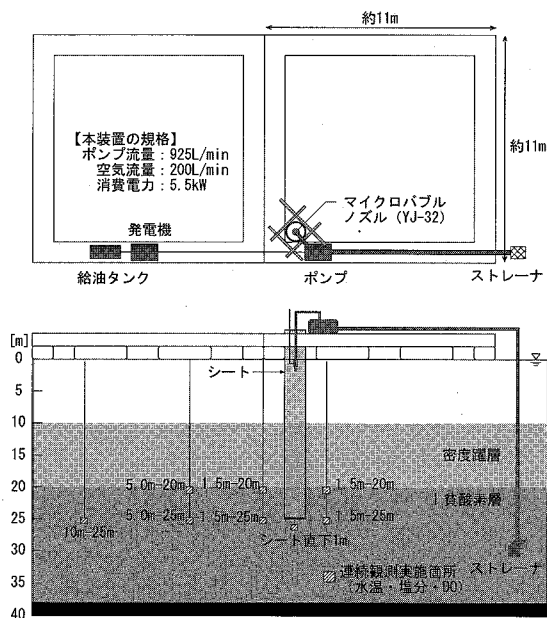


図-3 現地実験概要図

ところで、本実験では図-4 に示すように水面上から放出深度までをシートで覆い、ノズルを表層に設置することでシート内の気泡を大気中へ逃がし、シート下端からは気泡を含まない高酸素水のみが供給される方法を採用した。これによって高酸素水は図-4 のように、等密度層に沿って水平方向に広がり、底層貧酸素水を広い範囲で改善できることが期待される。

なお、本実験の実施状況については佐々木ら (2006a) においても述べられており、併せて参照されたい。著者

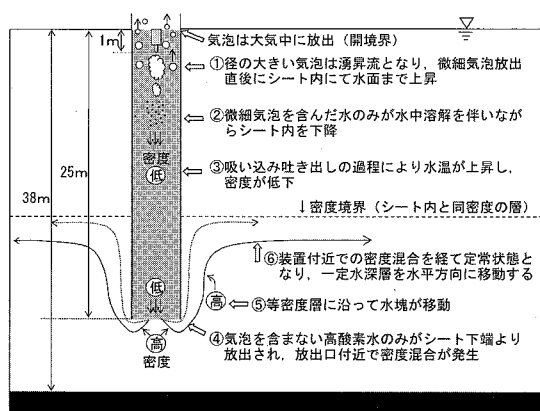


図-4 本装置の流況イメージ図

らは装置稼動後のシート内の酸素飽和度の変化やシート下端において高酸素水が放出される状況を観測し、気泡を含まない高酸素水のみが放出されていたことを確認している。

3. 再現計算の条件設定

(1) 使用モデル

現地観測データを基に、本装置の基本特性を把握するために数値モデルを用いた現象に忠実な再現計算を行う。本研究においては、流動場の解析に準三次元マルチレベルモデルを用い、水質場の解析には低次生態系モデルを用いた。

微細気泡を含む流れ場を解析する場合には浮力の影響が無視できなく、浮力効果を取り入れた流動モデルを用いる必要性が指摘されている (田中ら, 2005)。しかし本計算は、気泡を含まない高酸素水が放出される流況場の再現であることから、準三次元モデルによる解析により評価が可能であると考えられる。なお、図-4 に示したように本実験においてはストレーナより貧酸素水を吸い込み、シート下に高酸素水を吐き出す過程において若干の水温上昇がみられたことから、密度流場を適切に再現する必要がある。密度成層の発達した閉鎖性海域において、準三次元モデルを用いて密度流の解析を行った事例としては金山ら (2004) などがある。

(2) 基本条件の設定

本装置による底層貧酸素水の改善効果を忠実に再現するため、日向湖全体 (以下、大領域) と装置を中心とした 50 m 四方の領域 (以下、小領域) を別々に解析する条件とした。図-1 に示す大領域を 20 m 格子により行い、その計算により得られた結果を境界条件に、小領域を 2 m 格子により行った。なお小領域については、水深を一樣に 38 m とした。

ここで佐々木ら (2006b) は、本実験を行う前の 2005

年8月30日から9月15日の期間にかけて日向湖の現況を把握するための現地調査を行っている。また、大領域を対象とした準三次元モデルによる現況再現計算を行うことにより現況を適切に再現し、水質改善工法を適用した場合の効果予測を適切に行うことができる数値モデルを構築している。

本実験で用いる数値モデルは上記モデルがベースであるが、初期条件の中の水温・塩分・DOについては本実験開始直前に別途実施した移動観測結果を基に鉛直分布を設定し、動植物プランクトン・デトリタス・栄養塩類については同様の設定とした。鉛直方向の層数については現況再現計算よりも更に細かくとり、層厚を25 cm~1 mとして計116層のマルチレベルによる計算を行った。また、小領域の時間間隔は0.5秒とした。

(3) 装置移動条件の設定

図-5に実験期間中に計測した放出口における水温および塩分の時系列を示す。塩分については32.80‰から32.90‰の間で上下変動があり、水温については装置稼働からの時間経過につれて減少する傾向が見られ、下記の近似式が得られた。ストレーナからの吸い込み深度である30 mにおける水温が約11.5℃であることから、吐き出すまでの過程において2℃から3℃程度の水温上昇があったことが分かる。また、DOについては佐々木ら(2006a)により、装置稼働開始より約23分でシート内の水が全て酸素飽和度100%以上の高酸素水に置き換えられたことが確認されており、実験期間中の移動観測においてもシート内の酸素飽和度は常に100%以上であった。

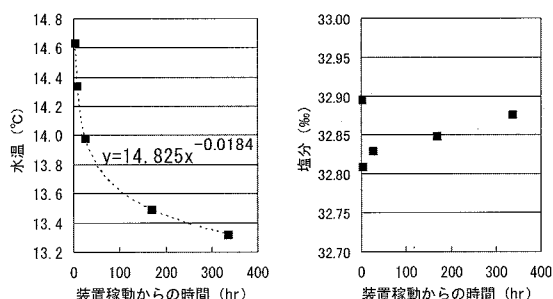


図-5 実験期間中のシート内(放出深度)における水温・塩分

以上より、本マイクロバブル稼働実験の再現計算におけるシート下端より吐き出される高酸素水の条件は、水温については図-5に示す近似式を与え、塩分については32.85‰の一定値とし、DOについては水温と塩分から算出される飽和酸素濃度を毎時与える設定とした。

また本実験下における流況を忠実に再現するために、小領域においては図-6に示すような条件設定を行った。すなわち、計算上では水面下30 mより鉛直方向に水を

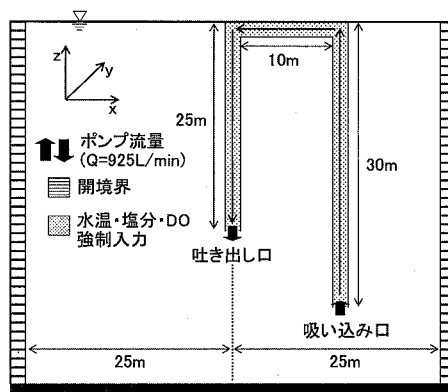


図-6 小領域計算方法イメージ図

吸い込み、水面下25 mに水を吐き出すコの字型の仮想的な管路を設置し、その管路の中に現地観測により得られた水温・塩分・DOを強制的に与える方法を採用した。

4. 実測値と計算結果の比較によるDO供給効果の把握

(1) 本装置の基本特性の把握

前述の条件により小領域の計算を行った結果を以下に示す。図-7にDOの縦断面分布を示す。吐き出し口より上層部に1 mg/L程度にDOが上昇している層が確認され、1日後には境界手前まで伝播しているのが分かる。

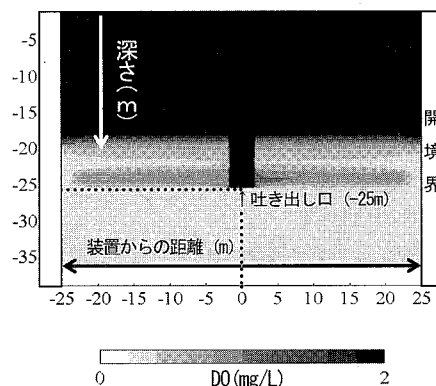


図-7 装置稼働1日後のDO縦断面分布(Y方向)

図-8は、連続観測により得られた結果のうち、水温とDOについて、調査結果と再現計算結果を比較したものである。ここで比較対照とする計算結果について、設定した格子サイズの都合により、装置より1.5 mに対しては2.0 mの結果を、装置より5.0 mに対しては6.0 mの結果を示した。

図-8より、シート直下と水面下25 mの層については水温とDOの双方についてほとんど変動が見られず、水面下20 mにおいて±0.5 mg/L程度のDOの変動が見られた。水面下20 mの調査結果に見られる上下変動

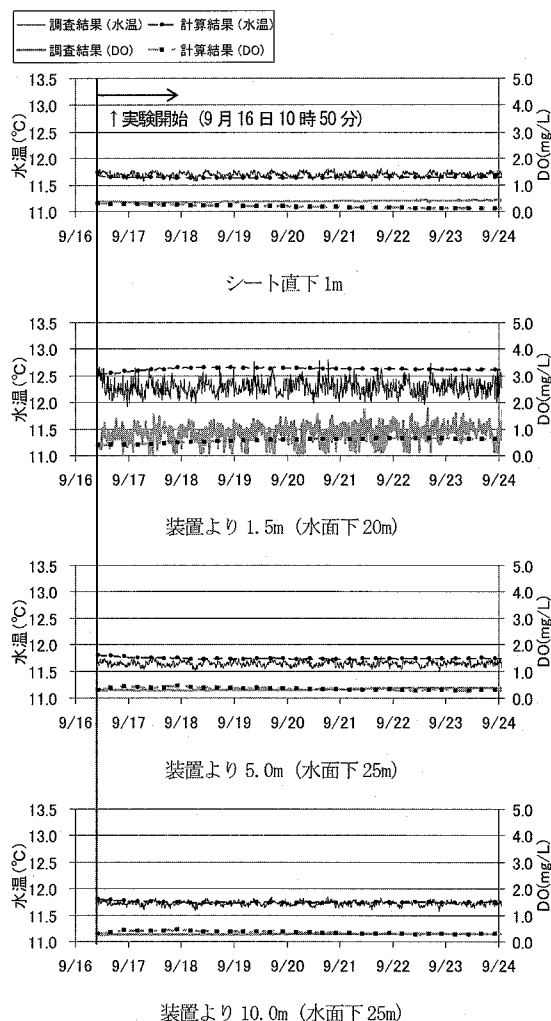


図-8 調査結果と計算結果の比較図

については、装置による効果の他にも、密度躍層付近での水塊の上下や計測機器自体の表層での風や潮汐に伴う上下振動なども考えられる。本数値計算では上下変動に対する再現はできていないが、変動の傾向は概ね再現できている。

なお塩分については鉛直勾配がほとんどないため、どの観測点においてもほぼ一定値で推移し、水温やDOのような変動は確認されなかった。

図-9および図-10は水温・塩分・DOの計算開始より1週間後までの鉛直分布図である。下図について、装置稼働より1週間後に移動観測により計測した結果を併記した。

図-9より、貧酸素層より上層の20m以浅について、調査結果と計算結果に若干のずれが見られるが、密度躍層下の再現については良好である。塩分の調査結果について、深さ20mから25mにかけて見られる上下変動

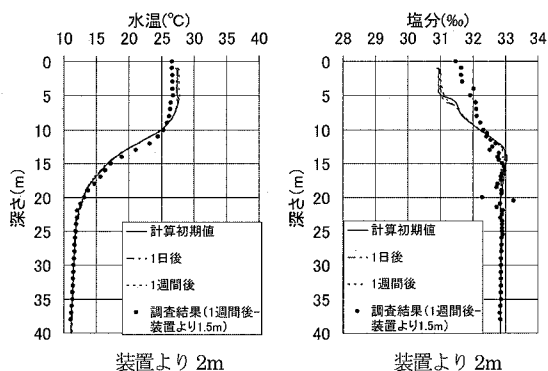


図-9 水温および塩分の鉛直分布図

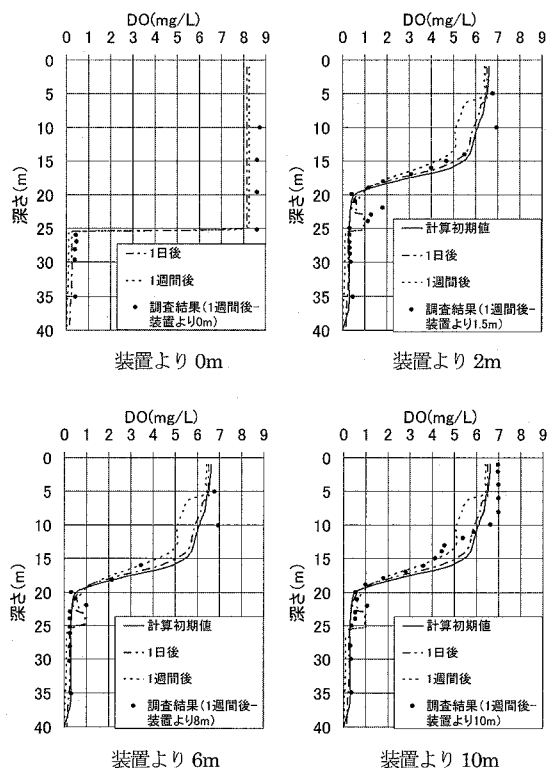


図-10 DOの鉛直分布図

は、シート下端より密度の低い高酸素水が放出されたことによって生じた密度混合の影響により、計測が不安定な状態になったことによるものであると考えられる。

DOについては図-7および図-10より、吐き出し口より上層の24m付近にDOの極大層が見られ、1mg/L程度まで上昇しているのが分かる。調査結果からは本数値計算結果よりやや上層部である22.5m付近にDOの極大層が見られ、装置近傍では最大2mg/L程度まで上昇しているが、装置より離れた場所では1mg/L程度までの上昇に留まっている。本計算は実測値を概ね再現しており、シート下端より密度の低い高酸素水が放出され

たことにより、瞬時に上昇流が発生し、密度混合を伴いながら等密度層に沿って水平方向に水塊が移動していたことが明らかとなった。

(2) 本装置による DO 改善範囲の予測

実測値と計算結果との比較により、本実験下では図-4に示した流動場となっていたことが明らかとなり、本マイクロバブルの稼動方式によって、水平方向の広い範囲に対して確実に DO を供給できることが分かった。

図-11 および図-12 は小領域のスケールを 50 m 四方から 1000 m 四方まで延ばし、再度本実験の再現計算を行った結果である。境界の影響を受けないように開境界は十分に離れた箇所にとり、計算を行った。また、格子サイズは計算の効率化を図るために 2 m から 10 m に変更した。計算時間の都合上、装置稼動より 48 時間後までの計算に留まったが、下記結果は、本装置により数 10 m 先まで DO が供給されていた可能性があることを示している。

シート下端より放出された高酸素水は、等密度層に沿って水中酸素消費を伴いながら、シートを中心に同心円状に拡がっていくことが予想される。しかし底層にも微少ではあるが流れがあることから、移流と拡散の効果により、実際には吐き出し水量による供給速度よりも速く水平方向に拡がっていたものと考えられる。図-12 より、更に計算を進めていけばより DO 改善の効果範囲が拡がることが予測されるが、仮に拡がったとしても DO

の上昇は 1.0 mg/L 程度に留まり、貧酸素を改善するレベルまでは到っていないことが分かる。

今回は装置より 10 m の範囲までしか計測を行わなかったことから、DO の水中酸素消費や移流拡散効果について十分な検証ができなかった。しかし、DO は装置から離れていくに従い次第に濃度と層厚を薄くしながら水平方向に伝播することが分かり、その層厚が 0 m になる地点が本装置による DO 改善範囲の限界であると考えられる。

5. おわりに

本研究で用いた装置により、気泡を含まない高酸素水のみをシート下端から吐き出す新しいマイクロバブルの稼動方式により、狙った層に対して平面的に広い範囲に DO の供給が可能であることを明らかにした。また、数値モデルによって実測値を概ね再現することができ、本装置の基本特性を把握することができた。

DO の上昇は、装置近傍を除けば 1 mg/L 程度までに限られており、本実験の装置規模により日向湖の様な広い領域の貧酸素を改善することは困難であることが分かった。本装置規模であれば、窪地や漁港の泊地等の比較的狭い領域に於いて DO が低下する夏季の停滞期に用いることが適当である等、本装置の適用性の検討が可能となった。

謝辞：本調査は、水産庁「自然エネルギーを利用した水域環境改善委託事業」により実施されたものである。また、本検討の実施にあたっては、(独)水産総合研究センター養殖研究所 生田部長、日本大学 長井助教授、(独)土木研究所寒地土木研究所 山本上席研究員より貴重なご意見とご指導を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 足立有平・綿貫 啓・竹元重博・Leu Tho Bach・鍋田英夫・古川憲治(2004)：マイクロバブルによる湖沼の水質改善に関する研究，水処理技術，第 45 巻，7 号，pp. 303-310。
- 大成博文・都並結依・大成博音・山本孝子(2006)：マイクロバブルの発生機構と収縮特性，水工学論文集，第 50 巻，pp. 1345-1350。
- 金山 進・佐々木洋之・佐々木淳・岡田知也・春谷芳明・城野清治・廣海十朗・中瀬浩太(2004)：密度流を利用した底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1166-1170。
- 佐々木洋之・武田真典・岡野崇裕・佐々木淳・足立有平(2006a)：気泡を除去した新しいマイクロバブル発生装置稼動方式による現地実験，土木学会第 61 回年次学術講演会，No. II-198。
- 佐々木洋之・武田真典・岡野崇裕・佐々木淳(2006b)：日向湖を対象とした現地調査と再現計算による水質予測モデルの構築，平成 18 年度日本水産工学会講演論文集，pp. 283-286。
- 田中陽二・磯部雅彦・鯉淵幸生・五明美智男・大野嘉典(2005)：閉鎖性海域での微細気泡による水質改善効果の数値解析，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1126-1130。

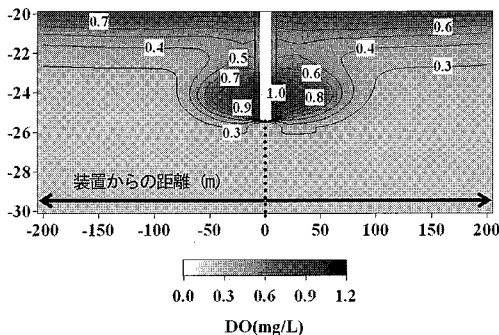


図-11 装置稼動48時間後の DO 縦断面分布 (Y 方向：-20m~30m)

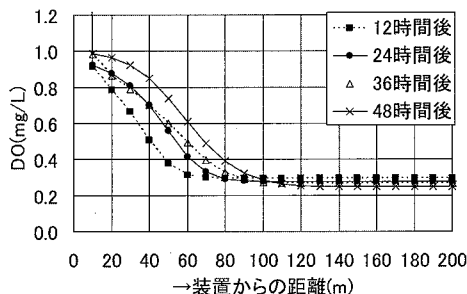


図-12 装置稼動後の深度24mにおける DO 縦断面分布 (+Y 方向)