

ナノバブルを活用した貧酸素及び底質の改善効果  
検証業務

報 告 書

令和2年3月  
いであ株式会社



— 目 次 —

1. 業務の目的.....	1
2. 履行期間.....	1
3. 業務内容.....	1
3.1 ナノバブル発生装置の設置.....	1
3.2 ナノバブル発生装置の稼働.....	1
3.3 水質及び底質の測定.....	2
3.4 貧酸素及び底質の改善効果の検証.....	2
3.5 検討会の開催.....	3
3.6 事業報告会への出席及び説明.....	3
4. 業務結果.....	4
4.1 検討の背景.....	4
4.2 ナノバブル発生装置について.....	5
4.2.1 ナノバブル発生装置の構造及び特徴.....	5
4.2.2 ナノバブル発生装置の設置位置.....	13
4.2.3 ナノバブル発生装置の設置概要.....	15
4.3 ナノバブル発生装置の稼働及び調査工程.....	19
4.3.1 過年度の底層溶存酸素量の状況.....	19
4.3.2 ナノバブル発生装置の稼働工程.....	28
4.4 ナノバブル発生装置の稼働による貧酸素及び底質の改善効果の検証結果.....	35
4.4.1 測定時における諏訪湖の概況.....	35
4.4.2 底層溶存酸素量：連続測定.....	38
4.4.3 水質（底層溶存酸素量以外）：試験前と試験後の比較.....	65
4.4.4 底質：試験前と試験後の比較.....	69
4.4.5 まとめ.....	73
4.5 他の酸素供給装置を用いた改善手法との比較.....	76
4.6 ナノバブル発生装置に係る総合評価及び課題.....	80



## 1. 業務の目的

本業務は、諏訪湖における底層溶存酸素量の水域類型の指定及び効果的な貧酸素対策の検討に向けて、改善手法のひとつであるナノバブル発生装置の活用による貧酸素及び底質の改善効果等を検証するものである。

併せて、他の機械力を用いた貧酸素対策との比較を行った。

## 2. 履行期間

2019年（令和元年）6月26日（水）～2020年（令和2年）3月27日（金）

## 3. 業務内容

### 3.1 ナノバブル発生装置の設置

下記の「ナノバブル発生装置等の要件」を満たすナノバブル発生装置及び測定に必要な付帯設備を諏訪湖の沖合（水深 5m 以深）に設置した。設置場所については、事前に委託者と協議の上で決定した。（結果は、「4.2.2」（13頁）参照）

#### <ナノバブル発生装置等の要件>

##### 1 ナノバブル発生装置等の要件

- ・夏場の高温や湿度、悪天時の暴風や日照不足等の条件下でも正常に稼働できること。
- ・諏訪湖の水深 5m～6mの湖底上 50cm 以内の底層において、少なくとも1週間以上、酸素の連続供給が可能であること。
- ・1時間あたりの湖内への酸素供給量が定量できること。
- ・発生させるナノバブルは直径 1  $\mu$ m（マイクロメートル）以下の気泡とすること。
- ・必要に応じて各機器の稼働状況が目視等で確認できること。
- ・装置を構成する各機器の名称（品番）、図面、定格能力等が明らかであること。

##### 2 ナノバブル発生装置等の設置に関する要件

- ・台船等に必要な機器一式を据え付け、湖内の特定地点に固定できること。また、台風等による強風や波浪で破損等を生じないこと。
- ・装置の点検、補修、水質測定時等に小型船舶により接近できること。また、小型船舶から作業員が台船等に移り移ること等により、現場作業が可能なこと。

### 3.2 ナノバブル発生装置の稼働

前述「3.1 ナノバブル発生装置の設置」で設置したナノバブル発生装置を稼働させた湖底に酸素を連続供給した。稼働期間は 2019年（令和元年）8月21日（水）17:30～9月6日（金）08:10 の16日間である。

なお、稼働状況の定期的な確認を行い、災害等の予期せぬ事態により連続稼働が困難となった場合に、速やかに委託者と協議の上で対応を決定できる体制で実施した。

（結果は、4.3参照）

### 3.3 水質及び底質の測定

前述「3.2 ナノバブル発生装置の稼働」の稼働前後で水質及び底質がどのように改善されるのか確認するため、表 3.1 に示す要件を満たす測定を実施した。本業務では、ナノバブル発生装置は連続 16 日間稼働した。(測定内容と工程は 4.3.2 参照)

なお、本業務において、湖底面の変化は、実証試験開始時点では湖底が非常に暗かったため把握できなかった。

表 3.1 水質及び底質における測定の要件

<p><b>【水質分析】</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>○測定期間：諏訪湖の貧酸素水塊が拡大する 7 月から 9 月のうち改善効果の検証に必要な期間</li><li>○測定地点・測定水深：湖内の水の流動を考慮し、ナノバブル発生装置が水質及び底質に与える影響を的確に捉えられる地点・水深</li><li>○測定項目：底層溶存酸素量、水温、pH、酸化還元電位、COD（化学的酸素要求量）、その他水質・底質の改善効果の検証に必要な項目</li><li>○測定頻度：項目ごとに水質及び底質の改善効果の検証に必要な頻度であり、底層溶存酸素量と水温については、1 週間以上、1 時間毎の連続測定を 1 回以上実施</li></ul> <p><b>【底質分析】</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>○測定期間：諏訪湖の貧酸素水塊が拡大する 7 月から 9 月のうち改善効果の検証に必要な期間</li><li>○測定地点：ナノバブル発生装置の稼働による底泥の巻き上げや、湖内の水の流動を考慮し、ナノバブル発生装置が底質に与える影響を的確に捉えられる地点</li><li>○測定項目：酸素消費速度 (SOD)、その他改善効果の検証に必要な項目</li><li>○測定頻度：項目ごとに水質及び底質の改善効果の検証に必要な頻度</li></ul> <p><b>【その他】</b></p> <p>ナノバブル発生装置の稼働に伴う底泥の巻き上げ等による湖底面の変化について把握</p>
---

### 3.4 貧酸素及び底質の改善効果の検証

「3.2 ナノバブル発生装置の稼働」の稼働状況及び「3.3 水質及び底質の測定」の測定結果を踏まえて、ナノバブル発生装置の稼働による貧酸素及び底質の改善効果の検証を行うとともに、直接曝気、高濃度酸素水の供給などの他の機械力を用いた貧酸素対策との比較を行った。

なお、他の機械力を用いた貧酸素対策の効果等については、根拠となった文献等を明示するとともに、諏訪湖で稼働させた場合の課題等についても併せて整理した。

(結果は 4.4~4.6 参照)

### 3.5 検討会の開催

検討会は2回開催し、第1回検討会は、ナノバブル発生装置の構造や稼働スケジュール、水質及び底質の測定計画等について事前に意見を聞くために、前述「3.2 ナノバブル発生装置の稼働」及び「3.3 水質及び底質の測定」の測定前に行った。

また、第2回検討会は、前述「3.4 貧酸素及び底質の改善効果の検証」の検証結果の妥当性を評価するとともに、直接曝気、高濃度酸素水の供給など他の機械力を用いた貧酸素対策との比較をするために、前述「3.2 ナノバブル発生装置の稼働」及び「3.3 水質及び底質の測定」の測定後に行った。

検討会委員は表3.2に、検討会の開催概要は表3.3に示すとおりである。

(検討会資料は資料編参照)

表 3.2 検討会委員

(五十音順、敬称略)

No.	氏名	所属	備考
1	兼平 正樹	環境省水・大気環境局水環境課 課長補佐	
2	對馬 育夫	国立研究開発法人土木研究所水環境研究グループ 主任研究員	
3	福島 武彦	茨城県霞ヶ浦環境科学センター センター長	座長
4	本間 健	長野県環境保全研究所水・土壌環境部 部長	
5	宮原 裕一	信州大学理学部附属湖沼高地教育研究センター諏訪臨湖実験所 教授	

表 3.3 検討会の開催状況

開催日時	場所	各検討会の検討内容
第1回検討会 令和元年7月11日(木) 13:00~15:00	JA ビルカンファレンス 4階 401B	(1) ナノバブル発生装置における改善効果 検証の調査計画(案)について
第2回検討会 令和元年11月5日(火) 13:00~16:00	JA ビルカンファレンス 4階 401B	(1) 第1回検討会の指摘と対応 (2) ナノバブル発生装置の稼働による改善 効果の検証結果等について

### 3.6 事業報告会への出席及び説明

ナノバブル発生装置の活用による貧酸素及び底質の改善効果等の検証結果を報告するために、事業報告会を開催した。なお、当初は地域住民を対象に報告会を開催する予定であったが、新型コロナウイルス感染症の感染拡大防止のため、県関係機関の職員のみを対象に報告を行った。開催概要は表3.4に示すとおりである。

表 3.4 事業報告会の開催状況

開催日時	場所	検討内容
令和2年3月24日(火) 13:00~15:00	長野県庁西庁舎2階 パソコン実習室	ナノバブルを活用した貧酸素及び底質の改 善効果検証業務 ・事業報告 ・質疑応答

## 4. 業務結果

### 4.1 検討の背景

底層溶存酸素量は、平成 28 年 3 月に「水質汚濁に係る環境基準」（昭和 46 年環境庁告示第 59 号）により環境基準項目に追加されており、その基準値は表 4.1 に示すとおりである。「水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件」（平成 28 年環境省告示第 37 号）において、底層溶存酸素量の測定は湖底から 1m 以内の底層とされており、現在、長野県では湖底から 0.5m 及び 1m の地点で測定が行われている。本資料に記載したデータは、より湖底に近い湖底上 0.5m 地点の測定結果を用いる。

環境省では、底層溶存酸素量の水域類型の指定の検討が進められている。この検討状況を踏まえ、諏訪湖における底層溶存酸素量の水域類型の指定を検討するために、長野県では諏訪湖の水質等に係る調査の充実を図るとともに、平成 30 年度には「諏訪湖の底層溶存酸素量等情報収集業務」を実施するなど、必要な情報の収集を行っている。

表 4.1 底層溶存酸素量の類型及び基準値

類型	水生生物が生息・再生産する場の適応性	基準値
生物 1	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	4.0mg/L 以上
生物 2	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	3.0mg/L 以上
生物 3	生息段階において貧酸素耐性の高い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域、再生産段階において貧酸素耐性の高い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域又は無生物域を解消する水域	2.0mg/L 以上

資料：「水質汚濁に係る環境基準」（昭和 46 年環境庁告示第 59 号）

## 4.2 ナノバブル発生装置について

### 4.2.1 ナノバブル発生装置の構造及び特徴

ナノバブル（超微細気泡）とは、文字通り小さな気泡を意味し、どの位小さい気泡を超微細気泡と呼ぶべきか日本混相流学会においても様々な意見に分かれている。しかし、物理的な現象から分類するとおおよそ  $50\mu\text{m}$  以下が適当だと考えられている。

現在、ナノバブル（超微細気泡）には様々な特性が言われている。例えば、殺菌能力、洗浄能力、生体活性化能力、成長促進能力、細胞保護能力、熱伝達能力、気化促進能力、環境浄化能力があげられる。

本業務で用いたナノバブル発生装置は株式会社安斉管鉄製の“AZ-FB50A/L”を使用した。

微細気泡（マイクロバブルを含む）の代表的な作り方は、表 4.2 に示すとおりである。“AZ-FB50A/L”は、13 番目に示す『超微細孔式』によりナノバブルを発生させている。なお、表 4.3 に表 4.2 の数種の方式について、特徴とメリット・デメリットを示すが、各方式で使用する個々の機器や装置全体の組み合わせ等により、メリット・デメリットは異なることに留意が必要である。

この“AZ-FB50A/L”から発生するナノバブルの平均粒径は  $84.7\text{nm}$  である（英国 Malvern 社で測定を実施した結果（2017 年 12 月 22 日実施））。

なお、本業務では上昇速度を測定することはできなかったが、マイクロバブルの上昇速度については表 4.4 に示すとおりであり、気泡径  $10\mu\text{m}$  では  $19.6\text{cm/h}$ 、 $1\mu\text{m}$  では  $0.196\text{cm/h}$  と示されている。また、柳瀬ら\*によると、半径  $150\text{nm}$  のナノバブルで  $1.47\text{cm/h}$  と示されている。そこで柳瀬らの上昇速度の算出方法（算出式は下記参照）を参考に本業務で用いたナノバブルの直径を  $84.7\text{nm}$  と仮定して上昇速度を算出した結果、 $0.12\text{cm/h}$  となり、ほとんど上昇しない結果となった。

$$U = \frac{R^2 \rho g}{3\mu}$$

$U$  : 気泡の上昇速度 (m/s)

$R$  : 球の半径 (ナノバブル平均粒径 :  $84.7\text{nm}$ )

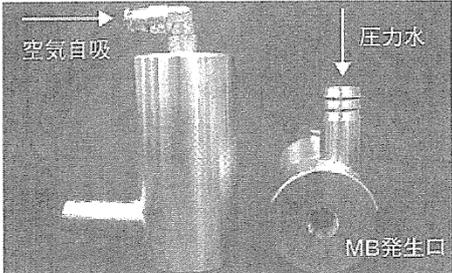
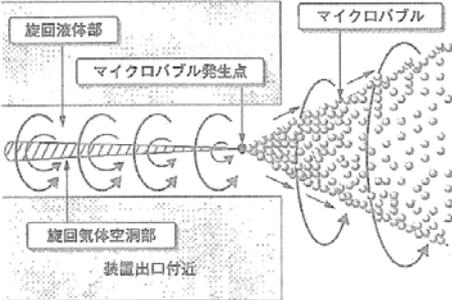
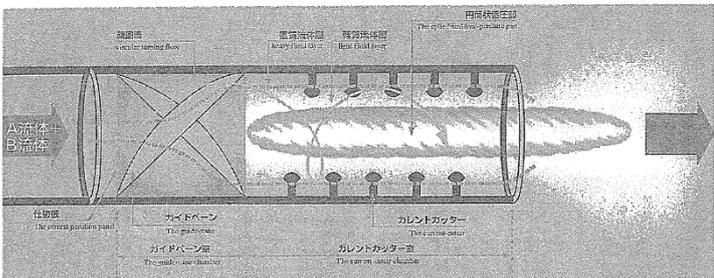
$\rho$  : 水の密度 ( $998.22\text{ kg/m}^3$ )

$g$  : 重力加速度 ( $9.8\text{ m/s}^2$ )

$\mu$  : 空気の粘性係数 ( $1.8 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

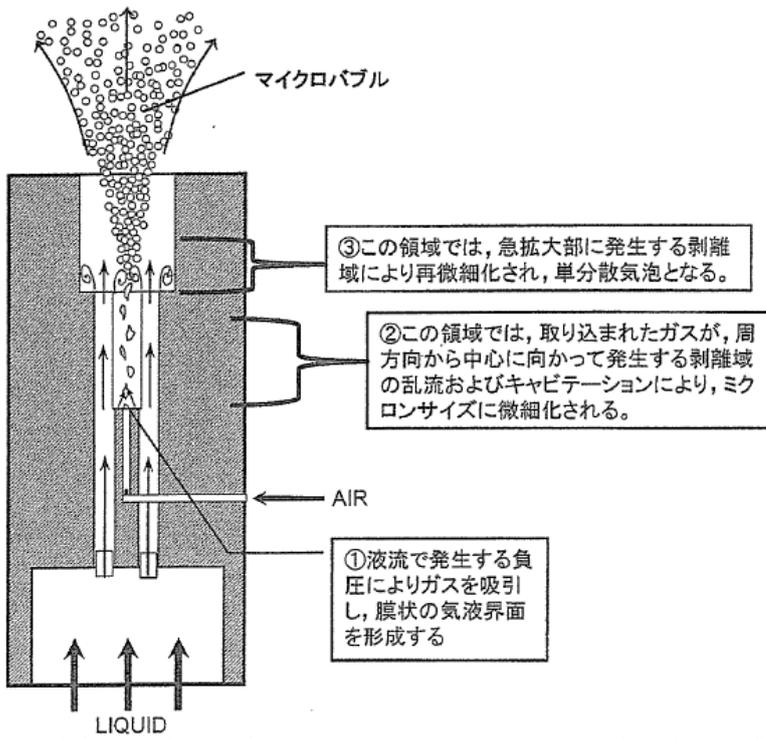
\*柳瀬眞一郎, 松浦宏治, マイクロバブル研究の進展, ながれ 34(2015), 355-362

表 4.2(1) 代表的な超微細気泡の作り方等

No.	方式	気泡の作り方等
1	旋回液流式	<p>参考図 1 に示す円筒型発生器下部の送水口からポンプで液を圧送し（吐出圧：0.2MPa）、装置内部に液旋回流を発生させる。ベルヌーイの定理により、旋回流により生じた装置中心軸の減圧部に空気が自給され、気体旋回流が発生し、参考図 2 のように装置出口付近で切断、粉碎されマイクロバブル化される。</p>  <p>参考図 1 旋回流式装置</p>  <p>参考図 2 マイクロバブル発生装置の概念モデル</p>
2	スタティックミキサー式	<p>スタティックミキサーは可動部分がなく、流体が管内部に固定されたエレメントを通過する際に気体を自給し、混合される。(株)OHR 流体工学研究所製のラインミキサーは参考図 3 に示すように、円筒内部に螺旋流誘導部（ガイドベーン）と管内部に取り付けられたキノコ状の突起（カレントカッター）により螺旋状に流れる気液 2 相流を破碎し、マイクロバブルを発生させる。</p>  <p>参考図 3 (株)OHR 流体工学研究所のラインミキサー概念図</p>

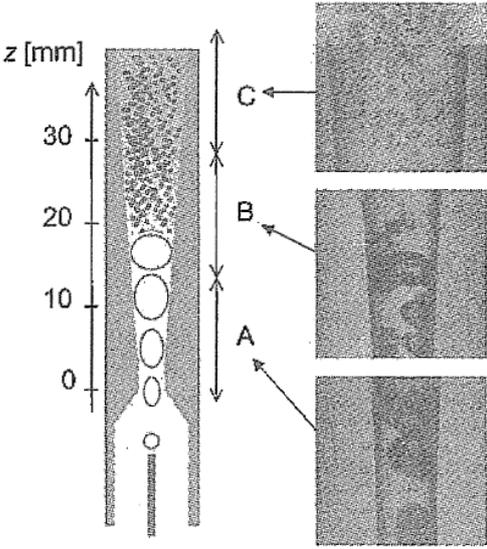
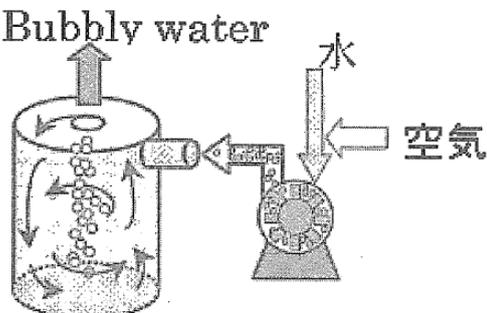
出典：柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術＜普及版＞」株式会社シーエムシー出版, 2015 年

表 4.2(2) 代表的な超微細気泡の作り方

No.	方式	気泡の作り方等
3	エジェクター式	<p>エジェクター式ノズルはアスピレータなどのように流路の縮小による液流速の変化から、ベルヌーイの定理で生じる負圧を利用して気体を吸引する。参考図 4 は (株) オーラテック製のエジェクター式ノズルの概念図で、下流での管路の拡大から気体を吸引し、乱流及びキャビテーションの効果も利用し気体を微細化し、さらに下流の急拡大部で再微細化しマイクロバブルを生成させる。</p>  <p>参考図 4 (株) オーラテック製マイクロバブル発生装置</p>
4	キャビテーション式	<p>キャビテーションは液静圧が局所的にその液温の飽和蒸気圧より低くなり、液体の一部が気化して蒸気泡を発生した後、短時間で圧力が回復し、蒸気泡を壊滅し、マイクロバブルを発生する。</p> <p>船舶のスクリューの回転により、キャビテーション気泡が生成し、スクリューの摩耗の原因となる場合もある。</p>

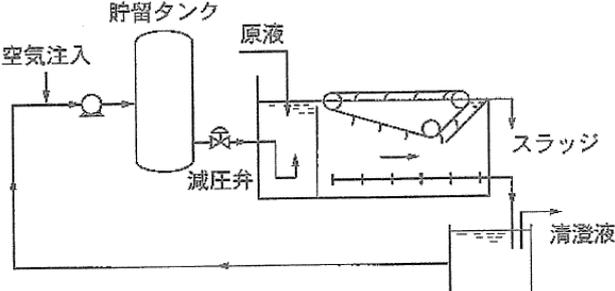
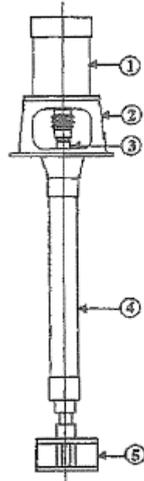
出典：柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術<普及版>」株式会社シーエムシー出版, 2015年

表 4.2(3) 代表的な超微細気泡の作り方

No.	方式	気泡の作り方等
5	ベンチュリー式	<p>参考図 5 に示すように、絞り部に気液を同時に流すと、液流速の急激な変化により生成した衝撃波で大気泡が破碎され、マイクロバブルが発生する。気泡の合体を防ぐため 3-Pentanol を約 50ppm 加えた場合には、気泡径 100 <math>\mu</math>m のマイクロバブルが最も多く生成した。気泡径は液流量の影響を受け、効率よく微細化するためにはある流量を超えている必要がある。</p>  <p>参考図 5 ベンチュリー管内の気泡流の挙動 A:絞り部、B:気泡崩壊部、C:出口</p>
6	遠心ポンプと旋回流式マイクロバブル発生器の組み合わせ	<p>参考図 6 のように含気率が 7~10% でも安定して運転できる遠心ポンプを用い、ポンプの吸引力により空気を自給し、ポンプ出口に旋回流式マイクロバブル発生器を接続した。空気はポンプによる過流攪拌作用とポンプでの昇圧により、水中に加圧溶解する。溶解しきれない空気は旋回流式マイクロバブル発生器でマイクロ化される。さらに、旋回流式マイクロバブル発生器により、螺旋状にマイクロバブルが生成されるため、生成後の気泡合一を防ぐことができる。</p>  <p>参考図 6 遠心ポンプを用いたマイクロバブル発生装置</p>

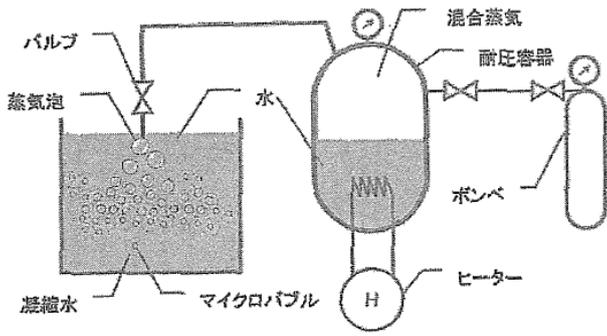
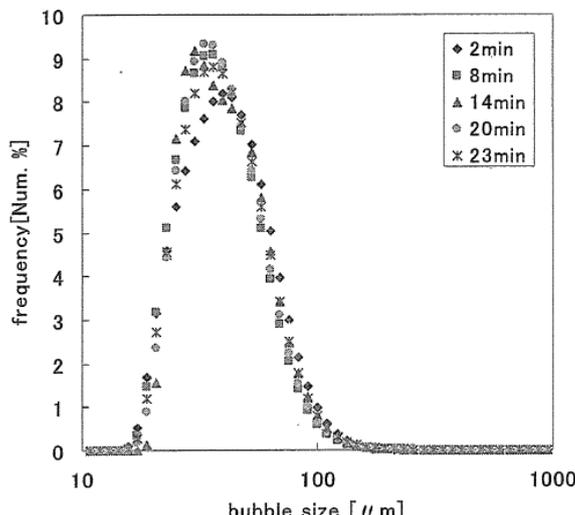
出典：柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術<普及版>」株式会社シーエムシー出版, 2015年

表 4.2(4) 代表的な超微細気泡の作り方

No.	方式	気泡の作り方等
7	加圧溶解式	<p>参考図 7 のように循環式加圧浮上分離装置では、水中に空気を 300~400kPa 程度に加圧して溶解させ、減圧弁を通して水中にフラッシュ操作すると、減圧され過飽和となった空気が排水中にマイクロバブルとなり放出される。</p>  <p>参考図 7 循環式加圧浮上分離装置</p>
8	細孔式	<p>ミリバブル、ミリ・マイクロバブルの生成の際にもよく用いられているが、セラミックスや金属製の多孔質物質、膜やフィルターなどの細孔から気泡を生成させる。孔を小さくすれば、生成気泡径も小さくなるが、孔径の数倍程度の気泡径となる。本法では細孔の目詰まりや圧力損失の増大に対処する必要がある。</p>
9	回転式	<p>参考図 8 に示すように、中心部の焼結体からなるローターを外周部のステーターの中で高速回転させることによりガスを自給させ、平均 50<math>\mu</math>m のマイクロバブルを発生させ、反応晶析を行っている。本法では液ポンプを必要としないメリットがある。</p>  <p>① モーター ② モーターベース ③ ドライブシャフト ④ サポートパイプ ⑤ インペラー</p> <p>参考図 8 自給式マイクロバブル発生装置</p>
10	超音波式	<p>針状の細管から生成する気泡に超音波を照射することにより、シリコン油など高粘度液 (100cP) 中での均一径のマイクロバブル (約 10<math>\mu</math>m) の生成が可能としている。</p>

出典：柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術<普及版>」株式会社シーエムシー出版, 2015年

表 4.2(5) 代表的な超微細気泡の作り方

No.	方式	気泡の作り方等
11	蒸気凝集式	<p>参考図 9 に示すように窒素と水蒸気の混合蒸気を水中に細いノズルから吹き込むと、水蒸気が凝縮し、凝縮しない窒素マイクロバブルが得られるとしている。得られた窒素気泡の平均径は <math>22\mu\text{m}</math> である。気泡径は気体組成、ノズル内径や蒸気噴出速度により変化する。高圧スチームを用いると、ポンプを使用せずに非凝縮性気体のマイクロバブルを作ることができる。</p>  <p>参考図 8 蒸気凝集式マイクロバブル発生装置</p>
12	電気分解法	<p>低周波振動攪拌装置でチタン製の振動羽根を電極として併用し、水の電気分解を行い、電極より生成する気泡に及ぼす低周波振動攪拌の振動数や電解質の影響を実験的に明らかにした。</p> <p>参考図 9 は、<math>0.173\text{mol/L}</math> NaOH 水溶液での電極表面の細孔から生成する気泡径分布の経時変化を示したもので、時間がたっても気泡径分布は変化しない。平均気泡径 <math>35\sim 55\mu\text{m}</math>、気泡存在範囲は <math>15\sim 100\mu\text{m}</math> のマイクロバブルが得られた。</p>  <p>参考図 9 電気分解法による気泡径分布</p>
13	超微細孔式	<p>ナノレベルの微細孔より気相を噴出させ、更に微細孔境界に液流を与えることで気相が微細に切断され超微細気泡を発生させる。</p>

出典：1. 柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術<普及版>」株式会社シーエムシー出版, 2015年

2. 株式会社安斉管鉄資料 (※超微細孔式の記載内容のみ)

表 4.3 代表的な超微細気泡の方式別の特徴とメリット・デメリット

No.	方式	特徴	メリット・デメリット
1	旋回液流式	大きな泡をせん断力により小さな泡へと作り替えていく方法。 水流に高い圧力が必要となり	<b>【メリット】</b> 空気を自吸出来る 装置組み込みが可能 <b>【デメリット】</b> 大型化が困難 ガス移動効率最大 65% 高圧ポンプが必要 高粘度液に不向き 異物を含む液に不向き 連結または循環に不向き
2	エジェクター式	粘度の高い液体や異物の多い液体に使用出来ない場合が多々ある。	
3	ベンチュリー式		
4	加圧溶解式	既に溶けているガス分を泡として析出させる方法。 加圧溶解式には高い水圧とガス圧が必要となる。 超音波方式は超音波の発生装置が必要となる。	<b>【メリット】</b> 中規模装置が可能 多くの実績がある <b>【デメリット】</b> ガス移動効率最大 65% 高圧ポンプが必要 高温液（20度以上）に不向き 超音波式は高価
5	超音波振動		
6	蒸気凝集式	飽和水蒸気にガスを混入させ液中に吹き込み、微細気泡を生成する方法。	<b>【メリット】</b> 大規模装置が可能 <b>【デメリット】</b> 適用範囲が限られている 温度の制約がある
7	超微細孔式	セラミックスなどの超微細孔から直接液中に超微細気泡を生成する方法。	<b>【メリット】</b> あらゆる液体及びガスに適用可能 最高レベルのガス移動効率 ランニングコストが安い <b>【デメリット】</b> ガス供給に圧が必要 半導体の洗浄には不向き

出典：株式会社安齊管鉄資料

表 4.4 水中 (20°C) のマイクロバブルの上昇速度 (Stokes 式による)

気泡径 $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$U$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$U$ [m/h]	レイノルズ数 $Re$
100	5440	19.6	0.513
10	544	0.196	$5.13 \cdot 10^{-4}$
1	0.544	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$5.13 \cdot 10^{-7}$

出典：柘植秀樹監修「マイクロバブル・ナノバブルの最新技術<普及版>」株式会社シーエムシー出版, 2015 年

#### 4.2.2 ナノバブル発生装置の設置位置

ナノバブル発生装置における改善効果を検証するにあたり、設置位置の考え方は表4.5に、装置の設置位置は図4.1に示すとおりである。**装置は水深5.8mの箇所**に設置した。なお、諏訪湖の水深図は図4.2に示すとおりである。

表 4.5 設置位置の考え方

##### 【設定した理由】

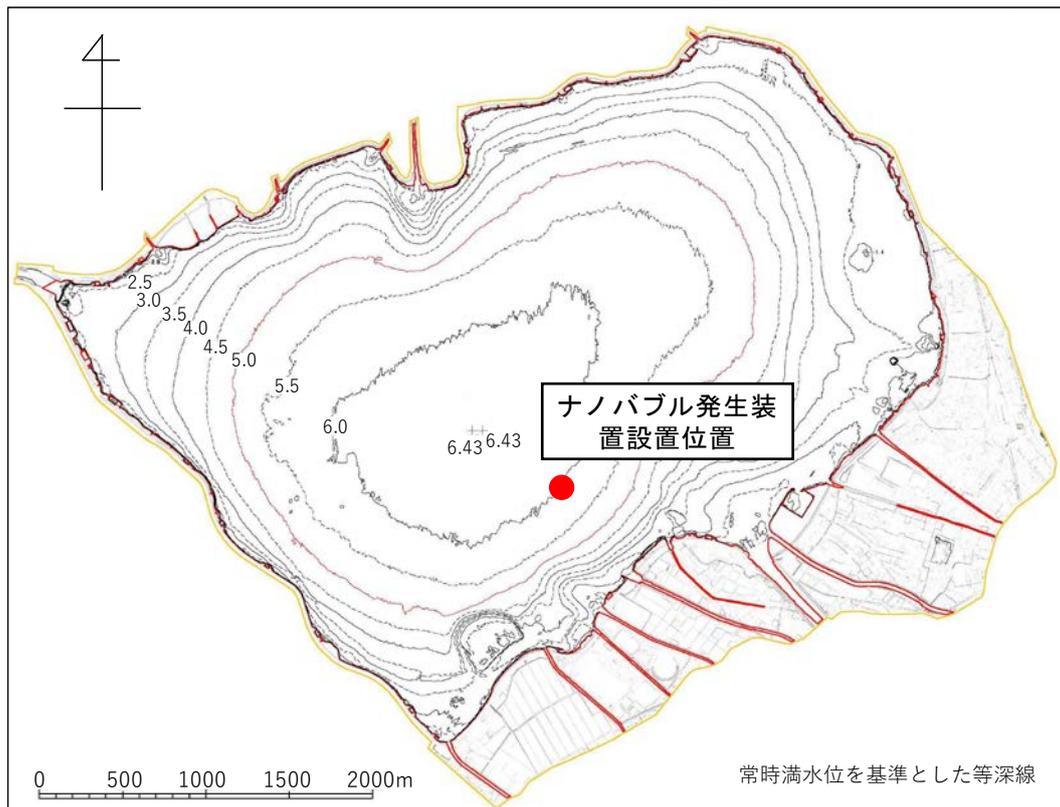
- 平成 30 年度の長野県環境保全研究所の底層溶存酸素量に関する調査結果より、設置位置周辺では 7 月末から湖底上 1.0m～湖底で 2mg/L 未満となっていること（後述「4.3.1 過年度の底層溶存酸素量の状況」参照）
- 平成 30 年度に長野県で底質調査を実施しており、底質の性状が把握されているため、本業務結果との比較が可能であること

●以上のことから、図4.1に示す設置位置で実施した。

なお、設置位置は、設置時に水深、底層溶存酸素量の状況を把握した上で決定した。



図 4.1 設置位置



資料：「平成 29 年度 社会資本整備総合交付金統合河川環境整備事業に伴う測量業務 報告書」（平成 31 年 1 月、朝日航洋株式会社）

図 4.2 諏訪湖の水深図

### 4.2.3 ナノバブル発生装置の設置概要

ナノバブル発生装置等の要件は「3.1 ナノバブル発生装置の設置」(1頁)に示すとおりである。ナノバブル平均粒径が 84.7nm となる装置“AZ-FB50A/L”を使用する。ナノバブル発生装置は図 4.3 のように設置した。台船上に、ナノバブル発生装置、酸素発生装置を設置し、水中ポンプ(水深約 4.5m)で湖水を吸い上げ、ナノバブル発生装置に注水し、酸素発生装置を用いて酸素ガスを補給した上で、ナノバブルを含む湖水を湖底上の散水ノズルより排水する方式とする。なお、装置は発電機によって作動させた。

ナノバブル発生装置の設置及び稼働にあたり、留意点した事項は表 4.6 に示すとおりである。また、ナノバブル発生装置の設置概要図は図 4.4 に示すとおりである。

なお、酸素発生装置からの酸素供給量は最大 8L/min (0.2MPa)、酸素濃度は 80～90%である。計算上は 6.4L/min (8L/min×80%) 程度の酸素が供給される。また、散水ノズルからは、使用したポンプの吐出し量が 0.16m<sup>3</sup>/min であること、諏訪湖の湖水を利用することから、散水ノズルからの酸素供給量は 1 分間当たり 11.4g 以上となる。

使用した機器(ナノバブル発生装置、酸素発生装置及びポンプ)の仕様及び外観は、表 4.7～表 4.9 に示すとおりである。

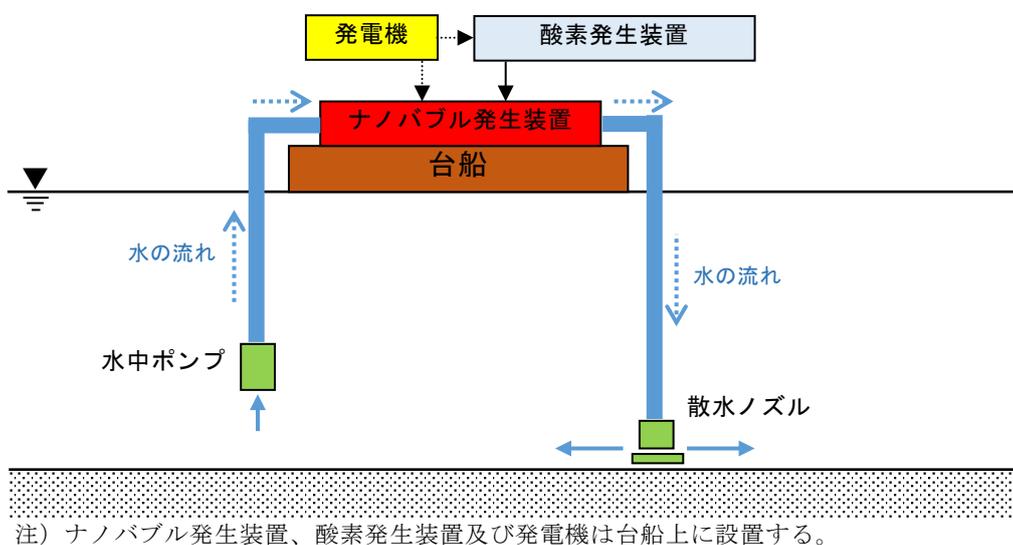


図 4.3 ナノバブル発生装置の設置状況

表 4.6 ナノバブル発生装置の設置・稼働にあたって留意点した事項

留意点	留意した事項
装置が稼働する際のエネルギー源	<p>・「諏訪湖貧酸素及び底質改善効果検証実験 成果報告書」（平成 30 年 12 月 27 日、(株)信州みんなの自然エネルギー）では、太陽光発電による電力供給システムで実施したが、蓄電池の容量、太陽光発電は天候に左右されることから、連続稼働の実施が困難な状況であった。</p> <p>●本業務では、太陽光発電では連続稼働の実施が困難であることから、<b>発電機を用いて連続稼働する方法</b>とした。</p>
湖底に供給する酸素量の増加	<p>・通常の空気では酸素量は少ないため、底層溶存酸素量を増加させるためには酸素発生装置を用いて酸素量を増やす必要がある。なお、「諏訪湖貧酸素及び底質改善効果検証実験 成果報告書」（平成 30 年 12 月 27 日、(株)信州みんなの自然エネルギー）では、エアコンプレッサーに酸素発生装置を組み込み、直接酸素ガスを補給すれば水中の溶存酸素量の増加には効果的であるとの知見がある。</p> <p>●本業務では、上記の知見を踏まえ、<b>酸素発生装置を用いて、直接酸素ガスを補給する方法</b>とした。</p>
湖底の状況を把握した装置の設置	<p>・諏訪湖では長野県の既存調査結果（「平成 29 年度 社会資本整備総合交付金 統合河川環境整備事業に伴う測量業務 報告書」（平成 31 年 1 月 朝日航洋株式会社）によると、水深が浅くなっている（平成 17 年から平成 30 年にかけて最大 0.5m 程度の堆積を確認）。また、堆積状況について浮泥状となっている知見がある。このようなことから、設置個所の状況把握を行った上で、設置する必要がある。</p> <p>●設置に当たっては、<b>底質（浮泥）の状況を把握した上で、浮泥による巻き上げの影響を受けないように湖底上 0.5m 程度に設置</b>した。</p>
散水ノズルの安定性	<p>・散水ノズルからは、吸水された湖水にナノバブルを含ませ散水する。しかし、散水による影響で散水ノズルが不安定になることが想定され、散水ノズルを安定させる必要がある。</p> <p>●<b>散水ノズルは、所定の水深（湖底上 0.5m 程度）になるように、固い管でナノバブル発生装置と繋ぐことより、安定</b>させた。</p>

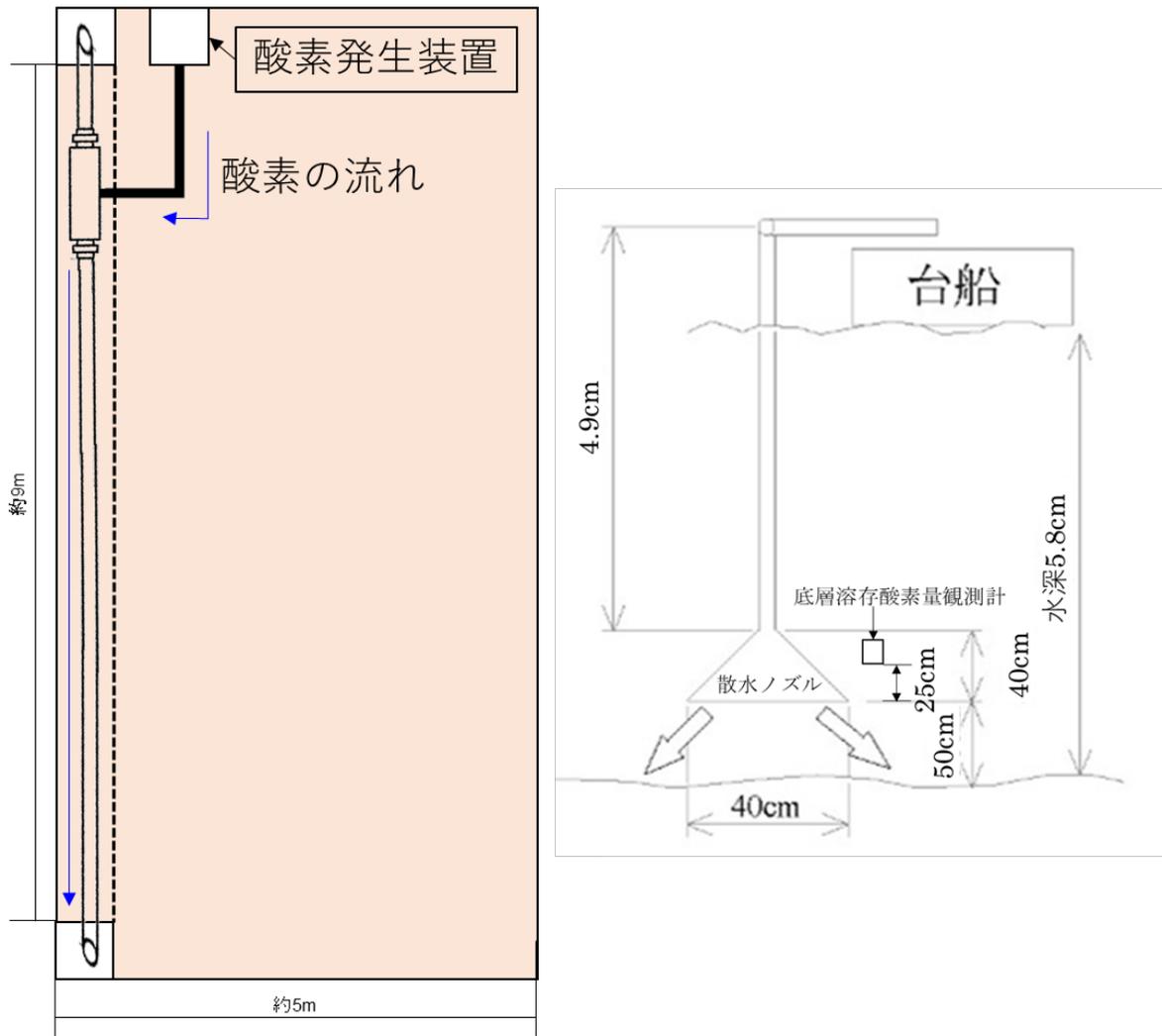


図 4.4 ナノバブル発生装置の設置概要図

表 4.7 ナノバブル発生装置の仕様及び外観

メーカー・機材名	株式会社安斉管鉄製 AZ-FB50A/L
仕様	散布 GAS 量 : 10L/min (最大) 通過水量 : 0.1m <sup>3</sup> ~0.5m <sup>3</sup> 適用水域 : 100m <sup>3</sup>
外観	

表 4.8 酸素発生装置の仕様及び外観

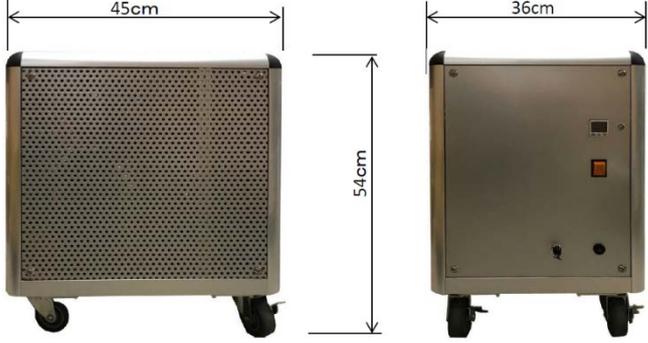
メーカー・機材名	株式会社安斉管鉄製 AZ-02-8L
仕様	酸素供給量：8L/min（最大）0.2Mpa 酸素濃度：80～90% 耐熱性：5～40℃ 体質性：0～80%
外観	

表 4.9 ポンプの仕様及び外観

メーカー・機材名	株式会社鶴見製作所 Tsurumi Pump LB-800
仕様	全揚程：11m 吐出し量：0.16m <sup>3</sup> /min 重量：13.1 kg 異物通過径：6mm
外観	 <p>非自動形 0.75kW</p>

### 4.3 ナノバブル発生装置の稼働及び調査工程

#### 4.3.1 過年度の底層溶存酸素量の状況

諏訪湖の過年度の底層溶存酸素量の状況を確認した。底層溶存酸素量の測定地点は図 4.5 に示すとおりであり、年間最低値は図 4.6 に示すとおりである。

年間最低値の結果から、湖心では 1994 年度以降、年間最低値\*が 2mg/L（環境基準で一番低い基準値）を下回ることが非常に多い状況である。

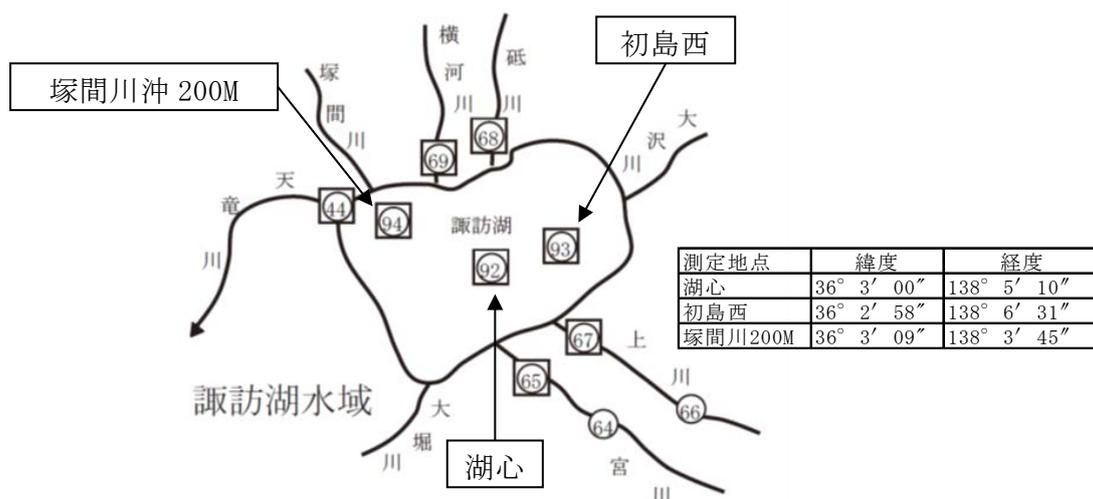
また、水産試験場諏訪支場より、春から秋にかけて週 1、2 回程度、溶存酸素濃度が測定されている。湖心における 2017 年度～2019 年度の底層溶存酸素量の経月変化は図 4.7 に示すとおりである。

湖心の底層溶存酸素量について、3 か年とも 7 月中旬～8 月中旬にかけて 2mg/L 未満となる状況が継続している。また、その期間における湖心の底層溶存酸素量の変動は小さい。8 月下旬から 9 月上旬にかけて、底層溶存酸素量の変動は大きいものの、2mg/L 未満となる状況もみられる。

環境保全研究所より、2018（平成 30）年 5～10 月の期間において月 1 回程度、湖内 21 地点で複数の水深における溶存酸素濃度が測定されている。そのデータを用いた諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果は図 4.8～図 4.14 に示すとおりである。

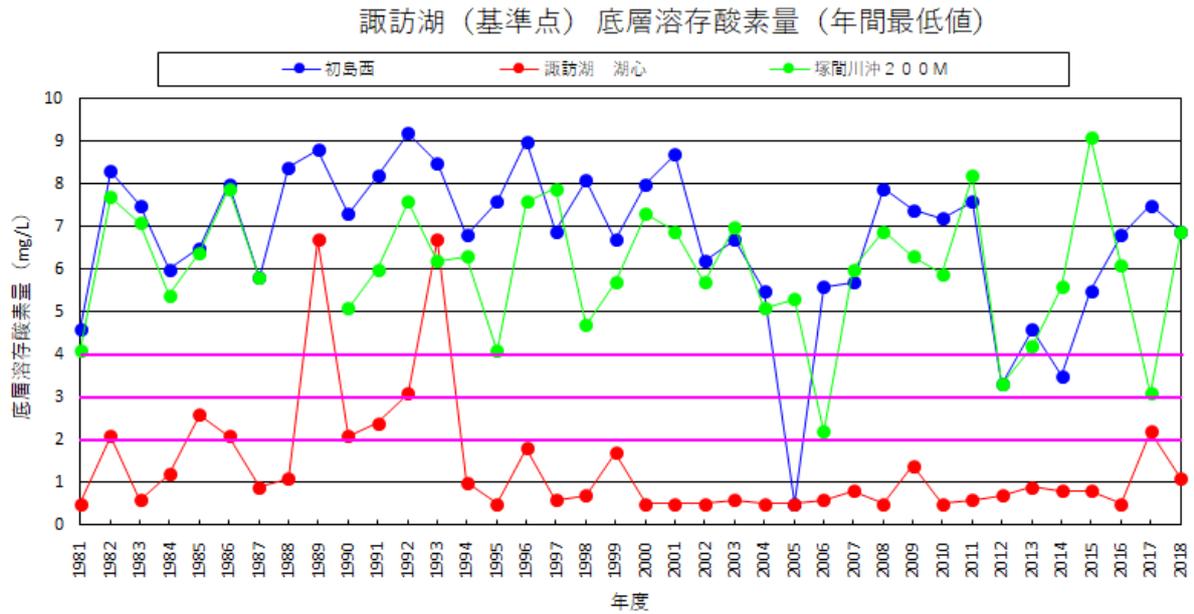
2018（平成 30）年度の調査結果から、水深 4m 層における水平分布の経月変化をみると、5 月末には溶存酸素量の低下傾向が顕著に現れており、6 月にはその傾向がやや緩和されたが、盛夏期に向かって低下が進み、7 月末は調査期間の中で最も溶存酸素量が低下していた。その後、8 月後半にはやや緩和され、10 月には全面的に溶存酸素量は 6mg/L 前後まで回復していた。

※年間最低値：中央環境審議会水環境部会生活環境項目環境基準専門委員会（第 8 回：平成 28 年 9 月 9 日）において、日間平均値の年間最低値による評価することが適当とされているため、この考え方をういて整理した。



資料：「平成 27 年度水質測定計画」（長野県）より作成

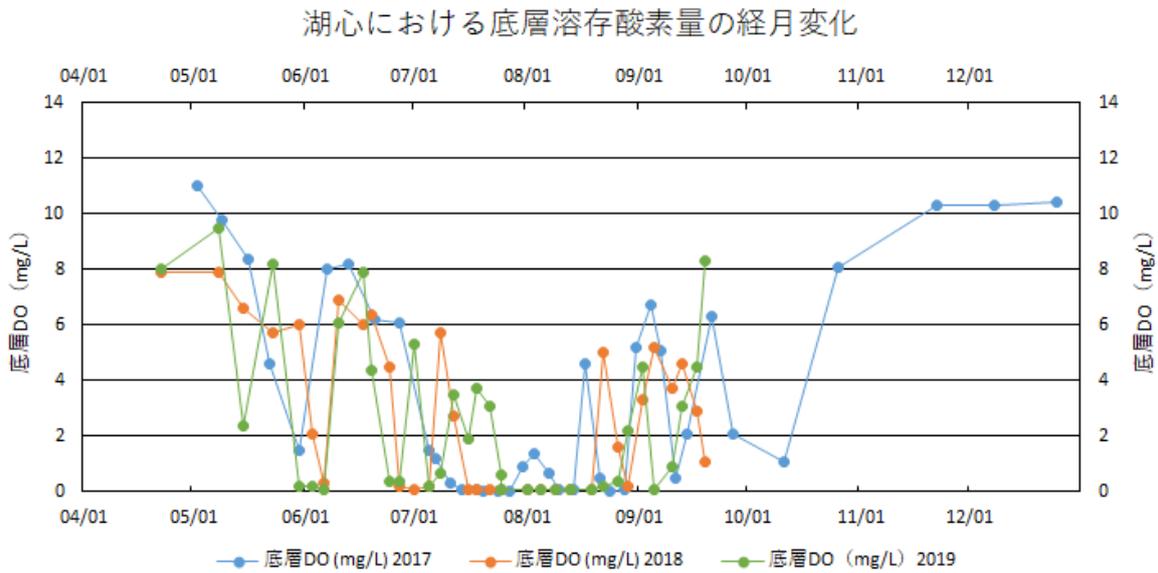
図 4.5 公共用水域水質測定地点



注：1. 底層の値は、湖底から原則 0.5m の地点における観測結果である。  
 2. 0.5mg/L 以下は 0.5 として表示した。

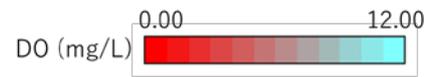
資料：「環境数値データベース」（国立環境研究所）  
 「水環境総合情報サイト」（環境省）より作成

図 4.6 諏訪湖の底層溶存酸素量における年間最低値の経年変化

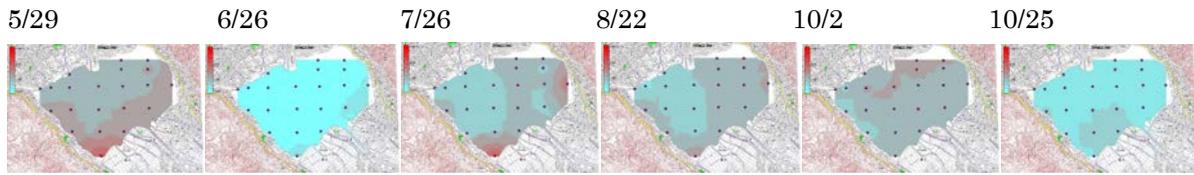


資料：「諏訪湖の溶存酸素（DO）濃度等の調査について」（長野県）より作成

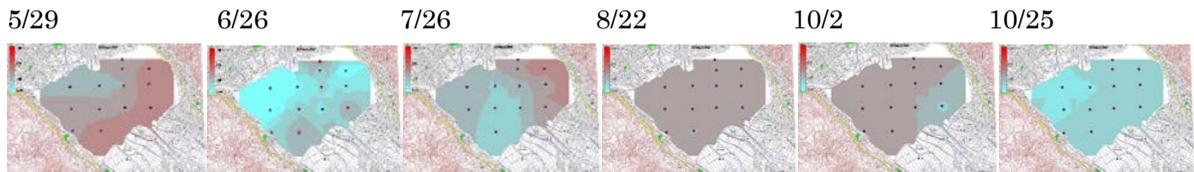
図 4.7 2017 年度～2019 年度湖心の底層溶存酸素量等の経月変化



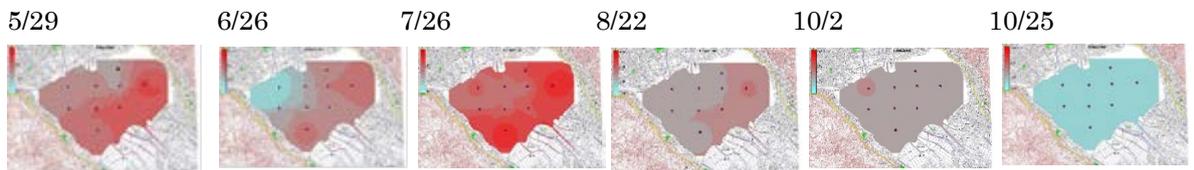
【水深 1 m 層】



【水深 3 m 層】

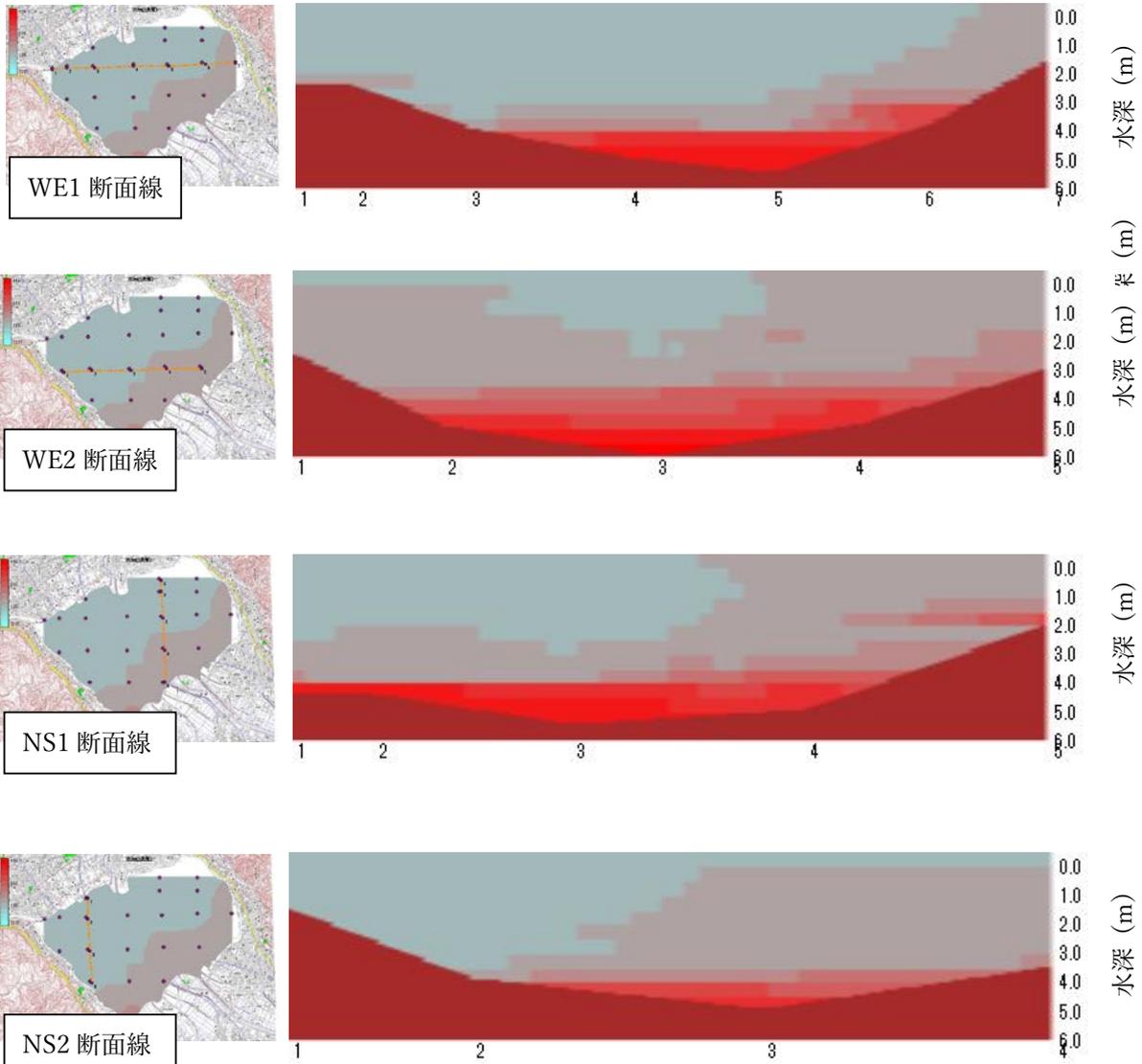
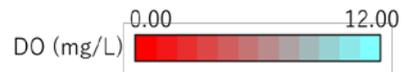


【水深 4 m 層】



備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。  
 2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。  
 資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

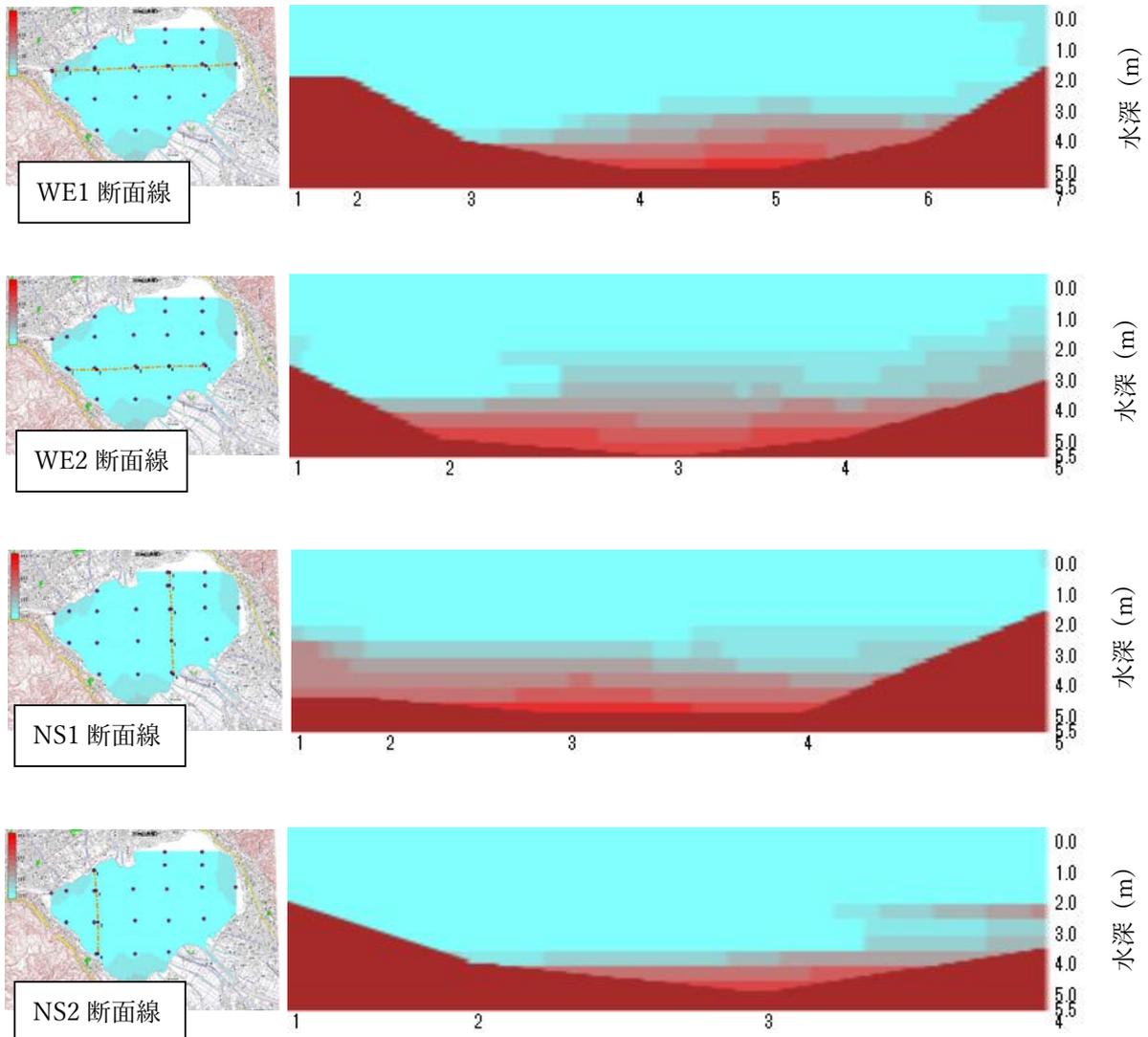
図 4.8 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（水平分布図）：2018 年度



備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。  
 2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。  
 資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

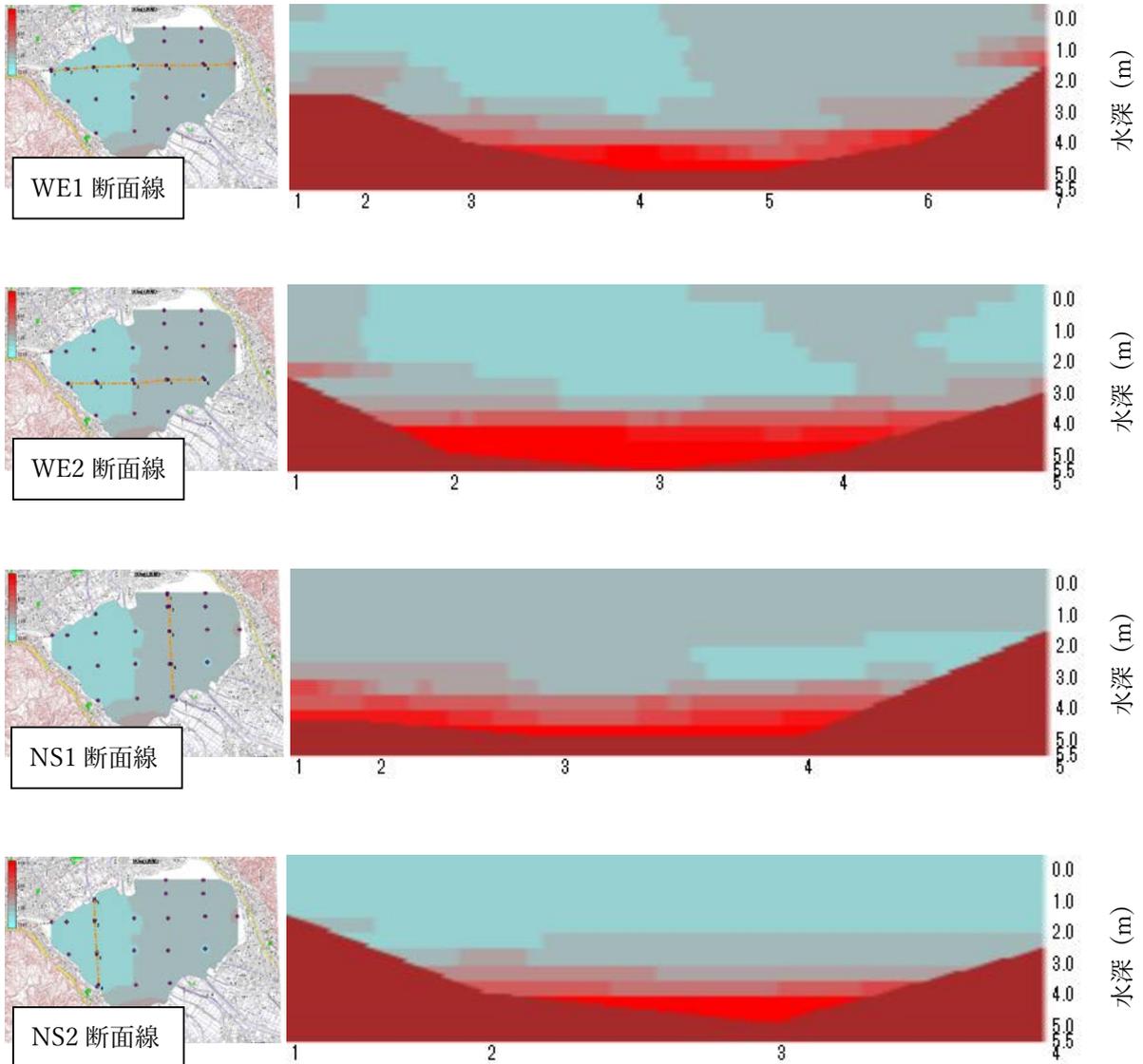
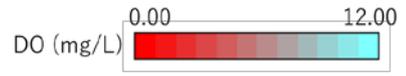
図 4.9 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：5月29日）：2018年度

DO (mg/L) 0.00 12.00



備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。  
 2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。  
 資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

図 4.10 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：6月26日）：2018年度

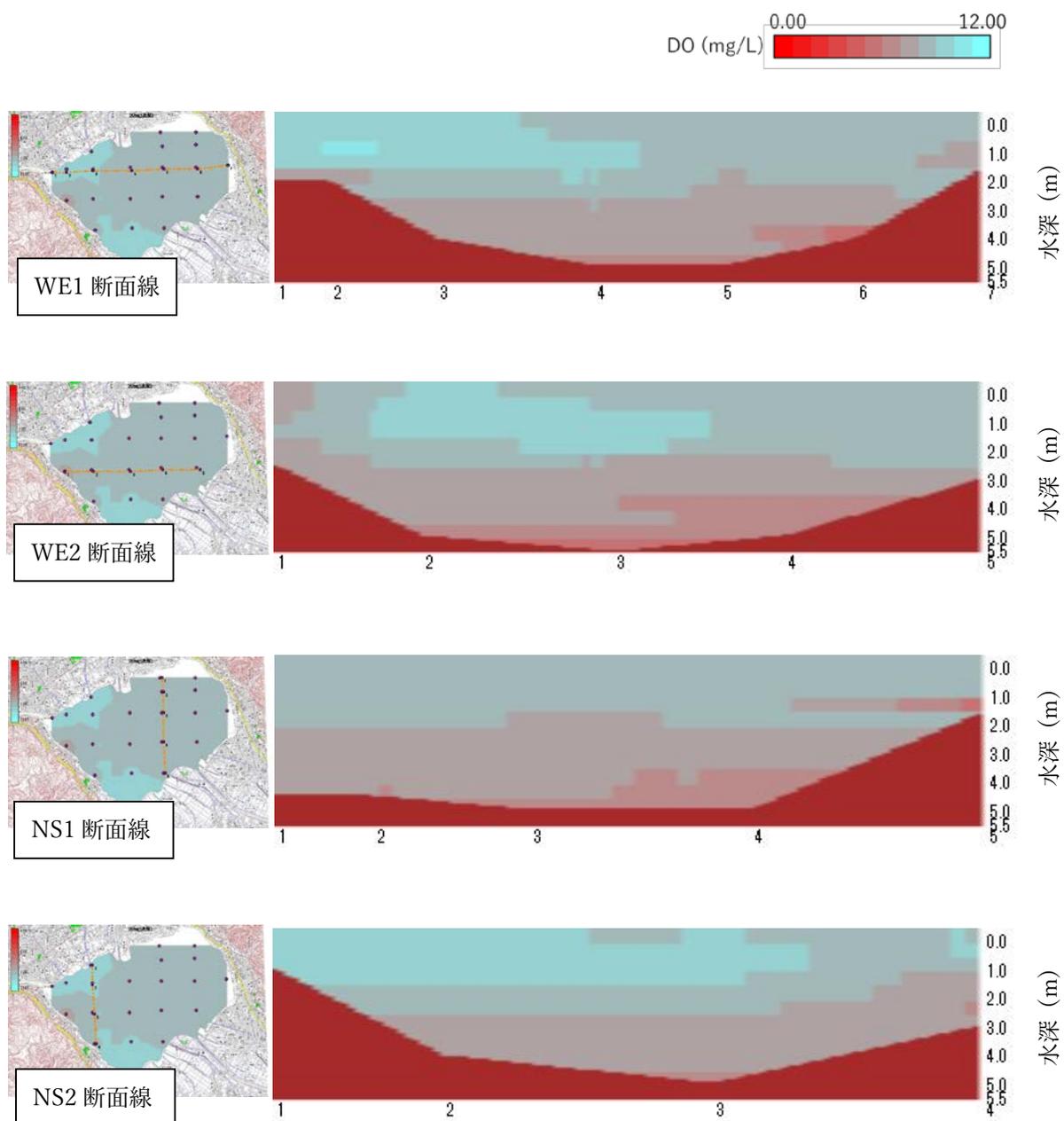


備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。

2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。

資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

図 4.11 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：7月26日）：2018年度

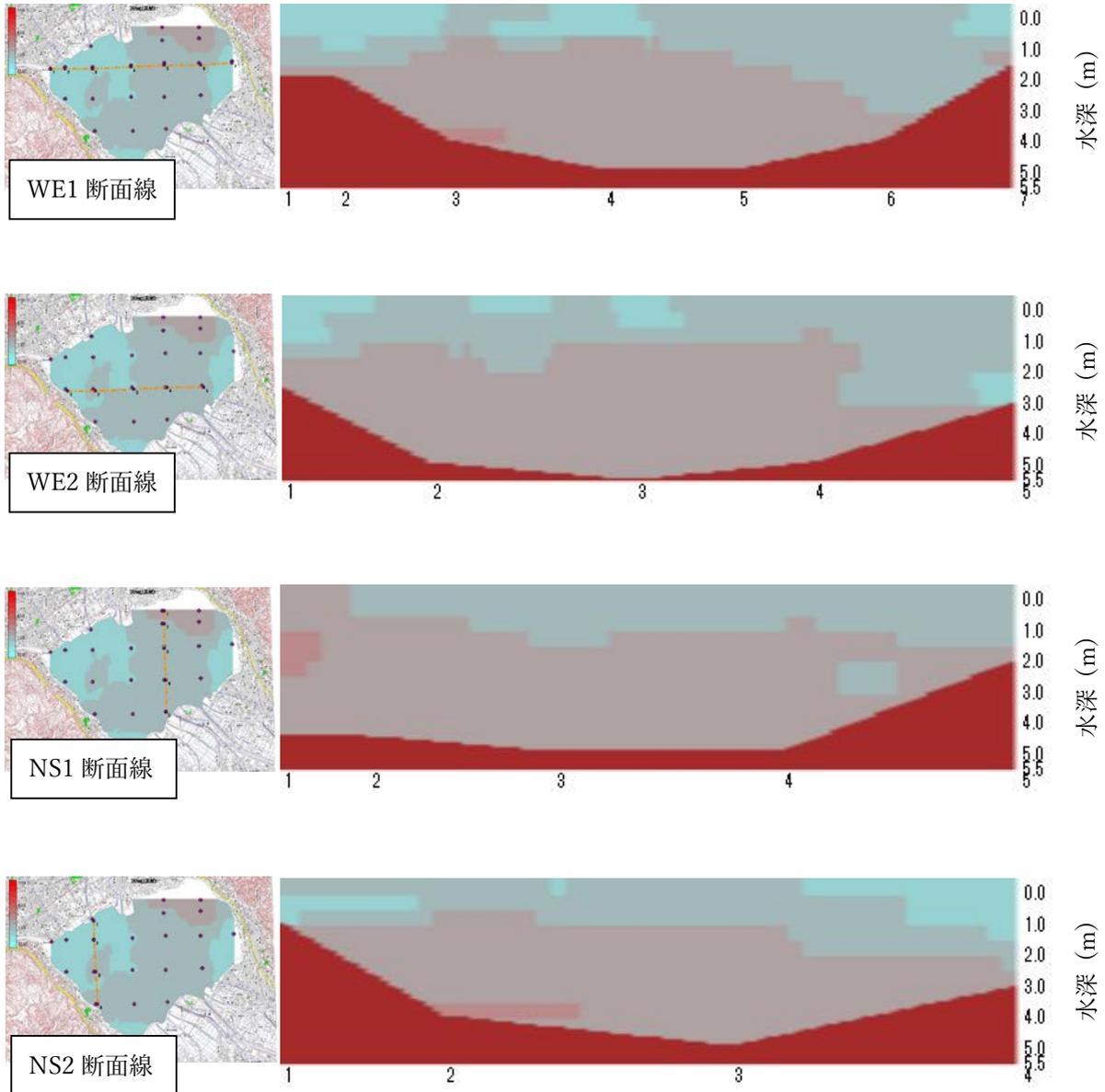
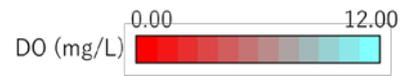


備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。

2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。

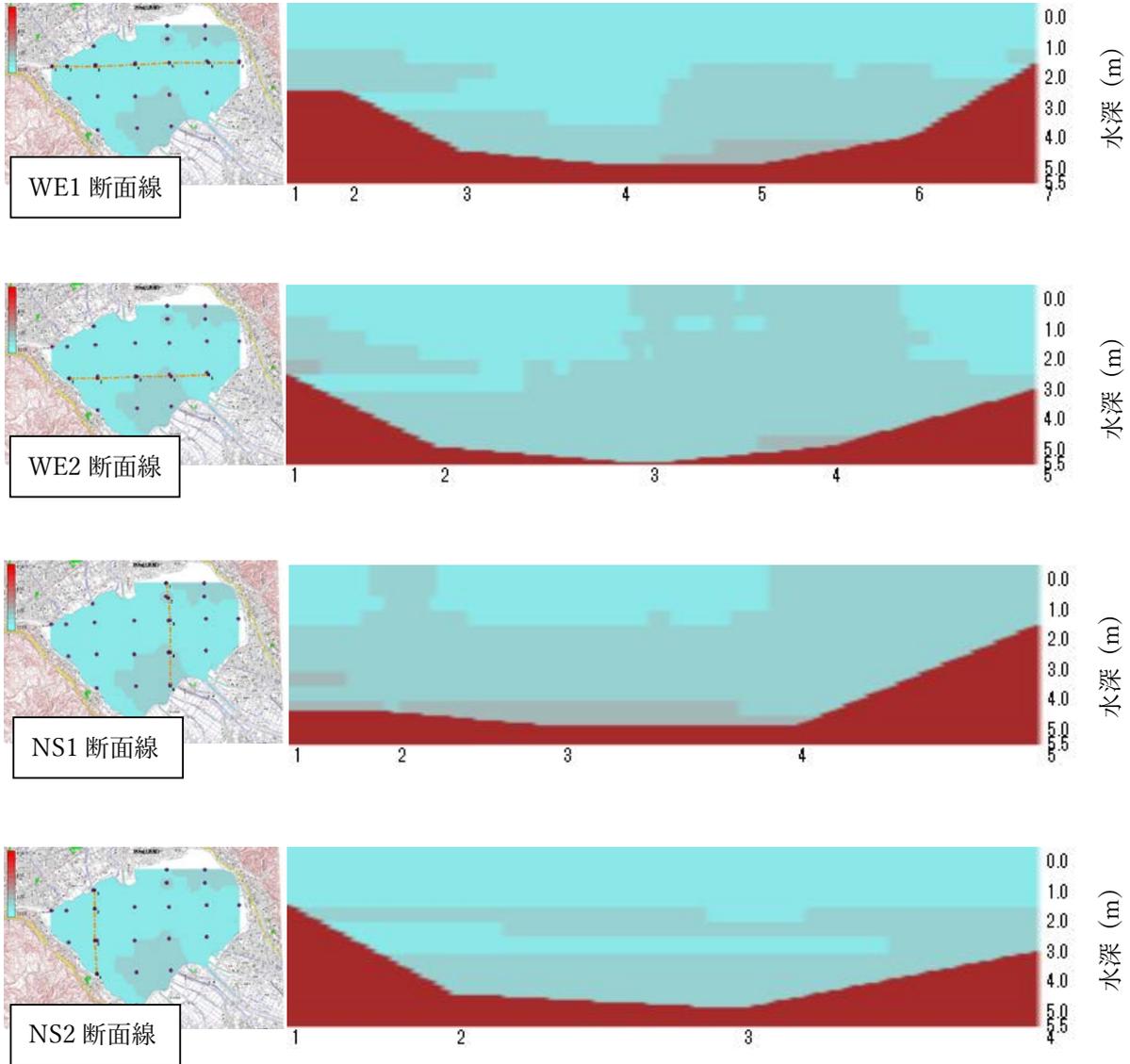
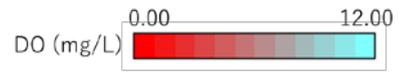
資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

図 4.12 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：8月22日）：2018年度



備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。  
 2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。  
 資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

図 4.13 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：10月2日）：2018年度



備考：1. 水深が層より浅い範囲についても、近似計算による溶存酸素量が図に反映されている。  
 2. 同じ日に全ての地点を測定しているが、測定時間は地点毎に異なる。  
 資料：「溶存酸素濃度全面調査」（環境保全研究所提供）

図 4.14 諏訪湖全体の溶存酸素量の調査結果（断面図：10月25日）：2018年度

#### 4.3.2 ナノバブル発生装置の稼働工程

「4.2 ナノバブル発生装置について」に示した株式会社安斉管鉄製の“AZ-FB50A/L”を稼働させ、約 16 日間連続で湖底に酸素を供給した。稼働時期は「4.3.1 過年度の底層溶存酸素量の状況」を踏まえ、7 月中旬～8 月中旬の期間に実施する予定であったが、漁業者との調整と梅雨が長期間続いたため、2019 年 8 月 21 日（水）17:30～9 月 6 日（金）8:10の期間に実施した。

表 4.6 に示したように、酸素の連続供給にあたって発電機を用いることで連続稼働を確実に行った。加えて底層への酸素供給を確実にするため、散水ノズルは、湖底上 0.5m 程度で安定するようにナノバブル発生装置と固い管でつなぐことにより、散気ノズルのバランスを安定させた。稼働前後の底質の変化について確認を試みたが、湖底付近は視界が非常に悪かったため確認はできなかった。

なお、ナノバブル発生装置の稼働状況の確認は発電機の燃料給油の際(1 日 1 回以上)に行った。

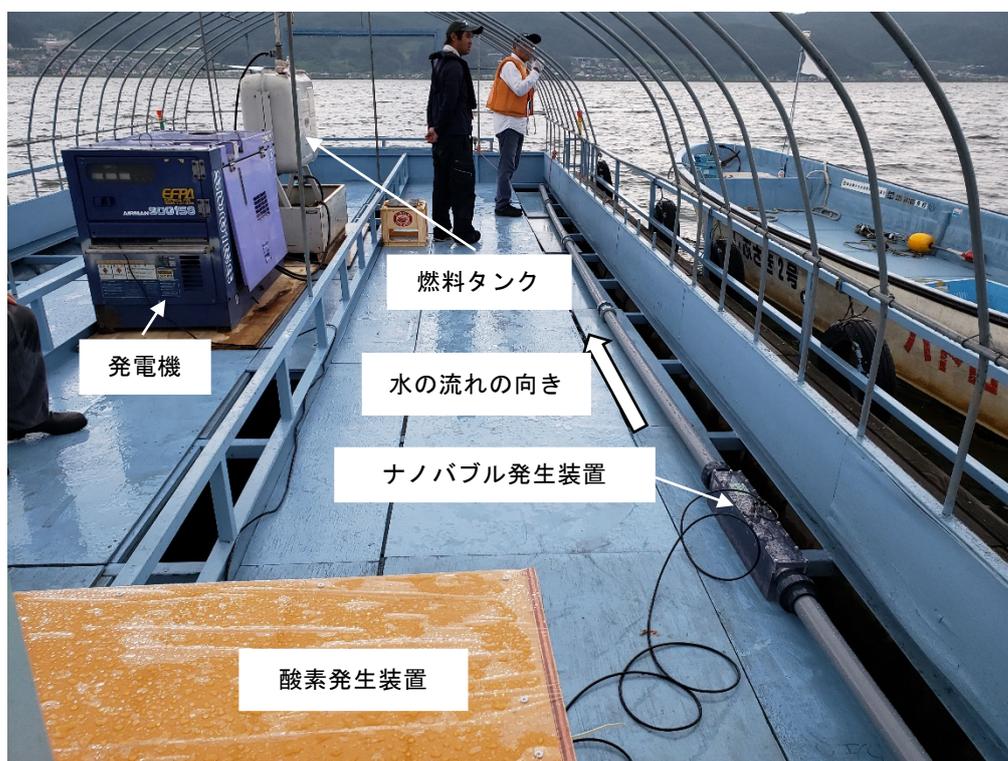


写真 1 ナノバブル発生装置を含めた実験装置全体風景

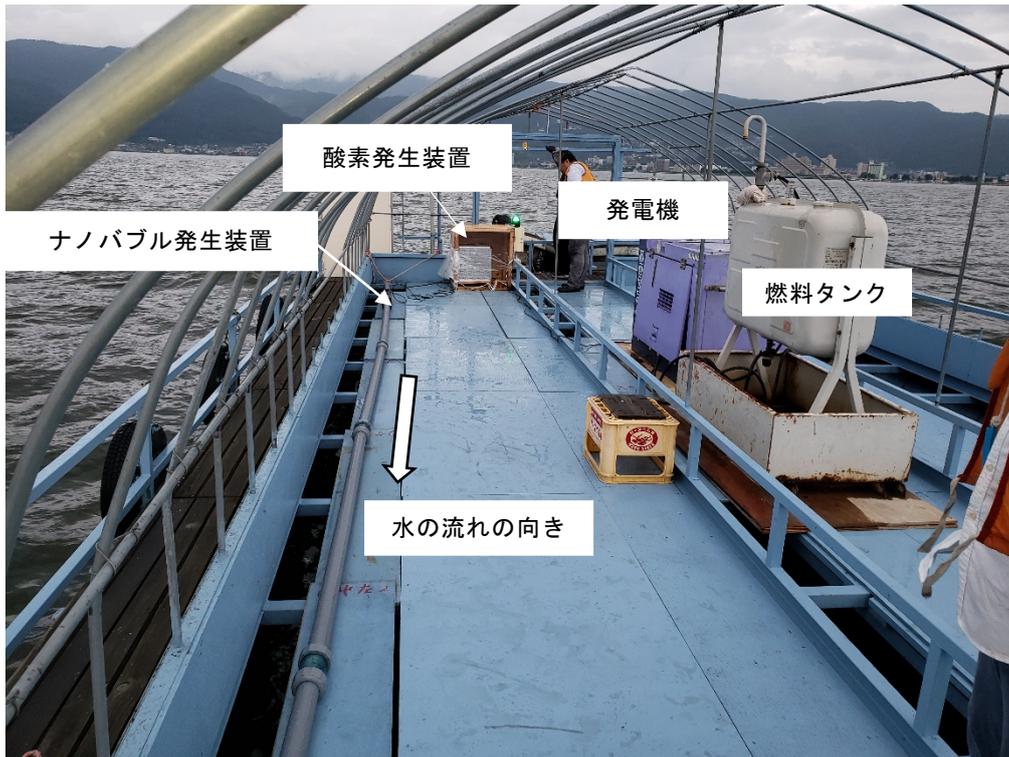


写真2 ナノバブル発生装置を含めた実験装置全体風景



写真3 散水ノズル直上



注) 散気ノズルは、所定水深（湖底上0.5m）となるように管の長さを設定している。

写真4 散気ノズルの外観

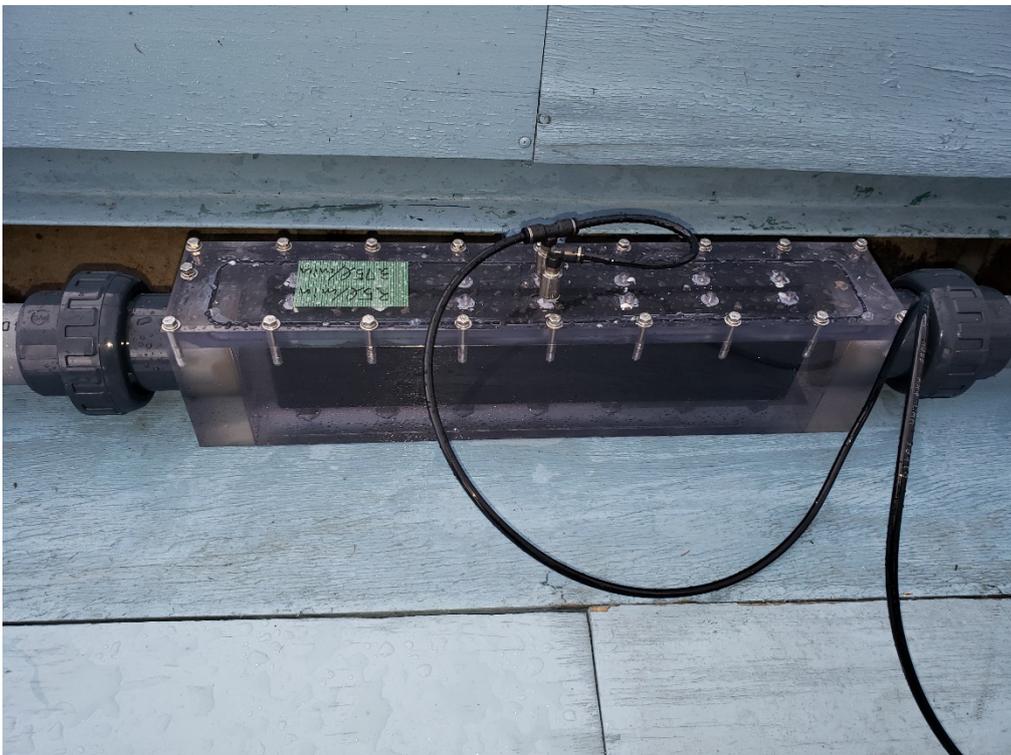


写真5 ナノバブル発生装置



写真6 ナノバブル発生装置の実験装置全景

水質及び底質の測定内容及び工程は表 4. 10、分析方法は表 4. 11、散水ノズルと底層溶存酸素量観測層の配置（再掲）は図 4. 15、地点配置は図 4. 16 に示すとおりである。

**流向・流速について**、湖内の流動は変動することが考えられ、ナノバブル発生装置の稼働による影響範囲は、その流動変化に応じて変化することが想定される。改善効果の検証では、改善効果と流動との関係が必要となることから、検証対照となる測定地点（散水ノズルからのナノバブルの噴出による流れの影響を受けないと想定される箇所）に流向・流速計を上層・下層に設置して連続観測を行い、調査地点付近の流動を把握した。

**測定項目について**、ナノバブル発生装置の稼働による影響は、底層溶存酸素量以外にも及ぶことが想定される。そのため、底層に酸素を供給により、影響を受けると想定される項目として、表 4. 10 に示す項目を選定した。それぞれの項目（底層溶存酸素量、水温以外）の選定した理由は、以下のとおりである。

水質の pH、酸化還元電位は、底層溶存酸素量の低下により低くなるため、ナノバブル発生装置の稼働による影響を受けた範囲では他の地点と比較して高くなることが想定される。COD についてはナノバブル発生装置の稼働による影響でどのような状況になるのかを把握するために選定した。底質の酸素消費速度（SOD）は、酸素の供給により低くなることが想定されるため選定した。

表 4.10 水質及び底質の測定内容及び工程

項目	測定内容	考え方
調査地点	図 4.16 に示す調査地点 14 地点 対照地点：ナノバブルの影響を受けない 1 地点を設置	ナノバブル発生装置が水質及び底質に与える影響を的確に捉えられる地点・水深。
測定層	流向・流速・水温以外：湖底上 0.75m 付近に 1 層 流向・流速・水温：上層（水面下 1m）、下層（底上 1m）の 2 層	
測定項目	底層溶存酸素量：13 地点+1 地点(対照地点) 流向・流速、水温：1 地点(対照地点) 水質（pH、酸化還元電位、COD）：13 地点 底質（強熱減量 <sup>*</sup> 、SOD）：13 地点 （分析方法は表 4.11 に示すとおり）	水質及び底質の改善効果の検証に必要と考えられる項目。
測定頻度	底層溶存酸素量：連続観測 流向・流速、水温：連続観測 水質（pH、酸化還元電位、COD）：ナノバブル発生装置の稼働前及び稼働中各 1 回（計 2 回） 底質（強熱減量 <sup>*</sup> 、SOD）：ナノバブル発生装置の稼働前後に各 1 回（計 2 回）	項目ごとに水質及び底質の改善効果の検証に必要な頻度。底層溶存酸素量と水温については、1 週間、1 時間毎の連続測定を 1 回実施。

2019

項目	8/20	8/21	8/22	～	9/05	9/06
ナノバブル発生装置		●	→	→	→	
底層DO・流速	●	→	→	→	→	●
水質		●			●	
底質		●				●

●：設置・調査

→：稼働

注) 強熱減量は信州大学理学部附属湖沼高地教育研究センター諏訪臨湖実験所 宮原教授のご協力により測定を実施した。

備考：ナノバブル発生装置の効果改善の検討対照の期間は 2019/08/21 0:00～2019/09/06 0:00 とした。また、連続観測は 10 分毎に観測した。

表 4.11 分析方法

項目	分析方法	
流向・流速	電磁流向流速計による測定 ※小型メモリー溶存酸素計による水温・底層溶存酸素量の連続測定も実施	
水質	pH	JIS K 0102(2019) 12.1
	酸化還元電位	底質調査方法(2012) II 4.5 白金電極法
	COD	JIS K 0102(2019) 17
底質	SOD (酸素消費速度) 底質調査方法(2012) I 9 (柱状採泥により底質を採取後、試験で用いる水は諏訪湖の湖水(表層より採取)を用いて、溶存酸素量を 8mg/L 以上になるように調整し、22℃で 24 時間の室内実験を実施。24 時間の酸素消費量より酸素消費速度を算出)	
	強熱減量	底質調査方法(2012) II 4.2

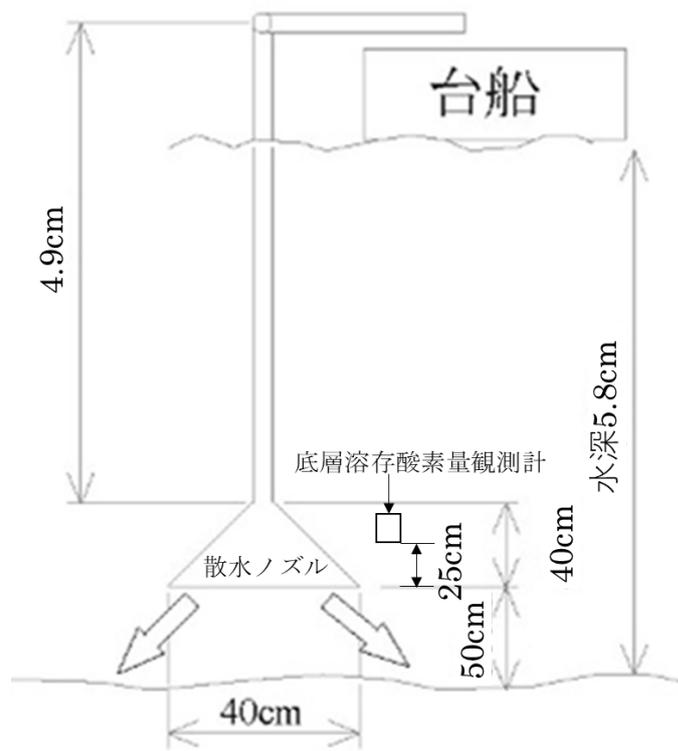
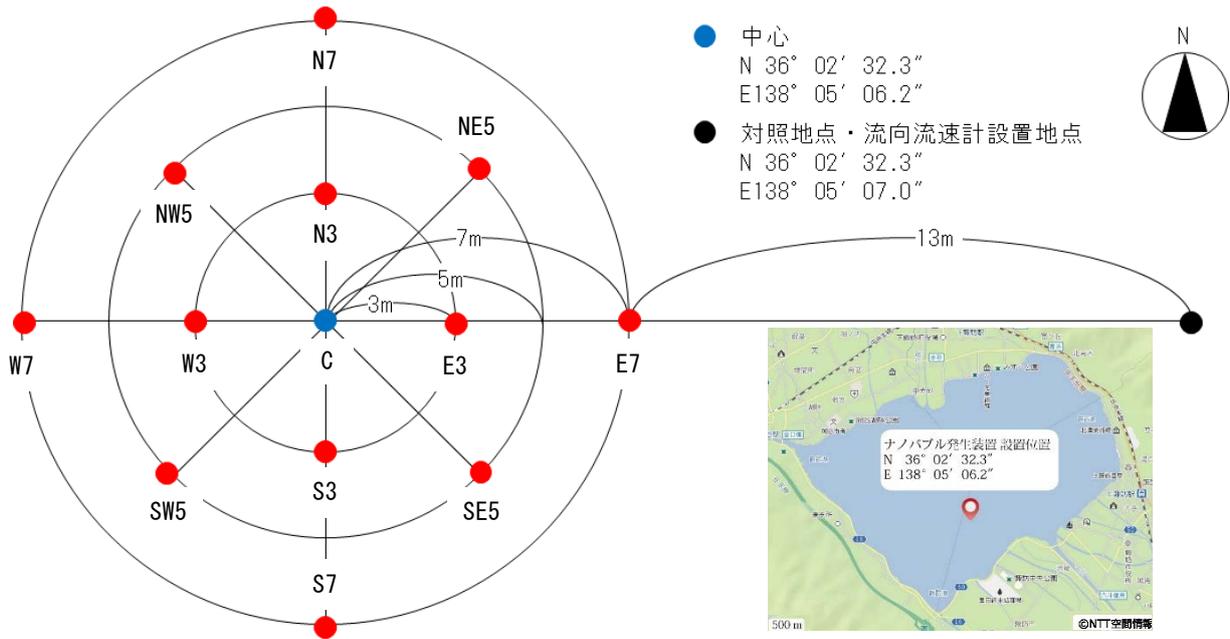


図 4.15 散水ノズルと底層溶存酸素量観測計の配置 (再掲)

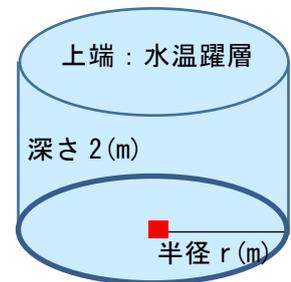


- ※図中の“アルファベット+数字”は地点名を表す。
- ：中心  
N 36° 02' 32.3"  
E 138° 05' 06.2"
  - ：参照地点・流向流速計設置地点  
N 36° 02' 32.3"  
E 138° 05' 07.0"
  - ：調査地点（調査層は1層）
  - ：対照地点（底層溶存酸素量：1層、流向流速・水温：上層と下層）

図 4.16 水質及び底質調査の地点配置

【地点配置根拠】

水温躍層の下層（深さ）2m、半径  $r$  m に酸素が供給されると想定。  
 この時の水柱の体積  $S = 2\pi r^2 (m^3) = 2000\pi r^2 (L)$



ナノバブル発生装置によるガスの供給量：カタログ値最大 10(L/min)  
 酸素発生装置によるガス中の酸素割合：80%~85% (80%と仮定)  
 ナノバブル発生装置による酸素供給量(L)：8(L/min)→480(L/h)  
 ここで酸素 1mol は 22.4L で 32g であるため、1L の酸素は 32/22.4(g)→32,000/22.4(mg)  
 ナノバブル発生装置による酸素供給量(mg)：480×32,000/22.4(mg/h) ≒ 685,714(mg/h)

1 時間で供給した酸素が全て溶解した時、溶存酸素量が 0mg/L から 2mg/L になる水柱の半径  $r$  は、

$$685,714(mg) / 2000\pi r^2(L) = 2(mg/L) \quad \text{より、}$$

$$r = \sqrt{\frac{685,714}{2 \times 2000\pi}} \doteq 7.4(m)$$

以上より、ナノバブル発生装置による効果が大きいと想定される範囲として、調査地点の最大半径を 7m とした。

## 4.4 ナノバブル発生装置の稼働による貧酸素及び底質の改善効果の検証結果

### 4.4.1 測定時における諏訪湖の概況

#### (1) 気象状況

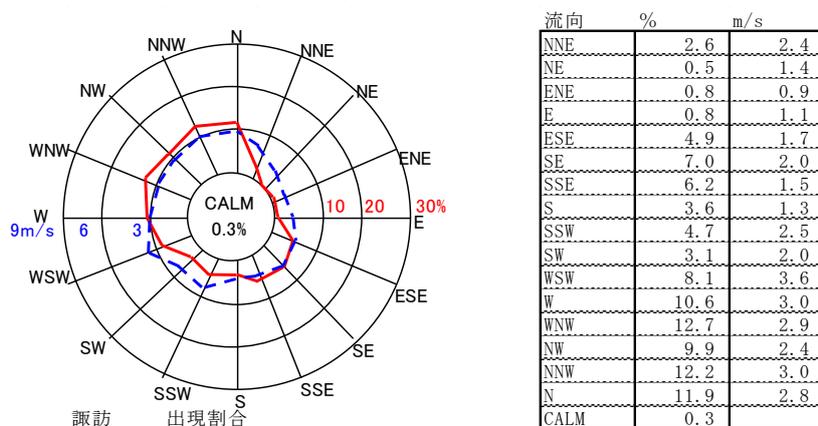
ナノバブル発生装置の稼働期間（2019年8月21日17:30～9月6日8:10）における諏訪特別地域気象観測所（観測所の位置は図4.17参照）の風配図は図4.18、気温と降水量の変遷は図4.19に示すとおりである。

稼働期間において、諏訪特別地域気象観測所の風向・風速は、西～北向きの風が多く出現しており、各方位の平均風速は概ね3m/s以下であった。次に気温は17.5～29.1℃であり、降水量は8月21～23日、8月27～31日、9月4～5日に記録しており、8月23日には1時間当たり9mmの降水量を記録した。



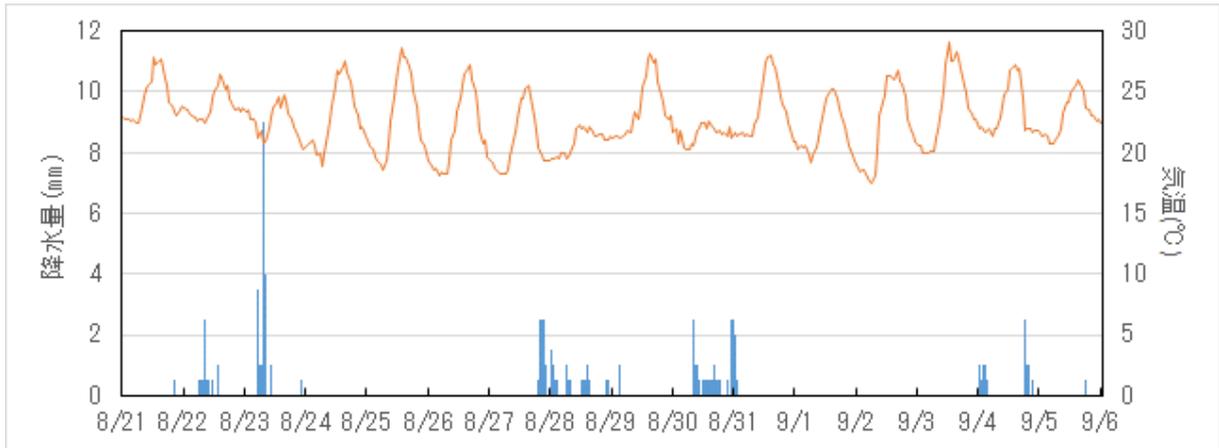
資料：気象庁より作成

図 4.17 諏訪特別地域気象観測所



資料：気象庁 HP より作成

図 4.18 風配図（諏訪特別地域気象観測所）



資料：気象庁 HP より作成

図 4.19 気温と降水量の変遷（諏訪特別地域気象観測所）

(2) 底層溶存酸素量の状況

長野県が実施している諏訪湖溶存酸素濃度等調査における地点は図 4.20 に、湖心及び諏訪市豊田沖における底層溶存酸素量の調査結果は図 4.21 に示すとおりである。

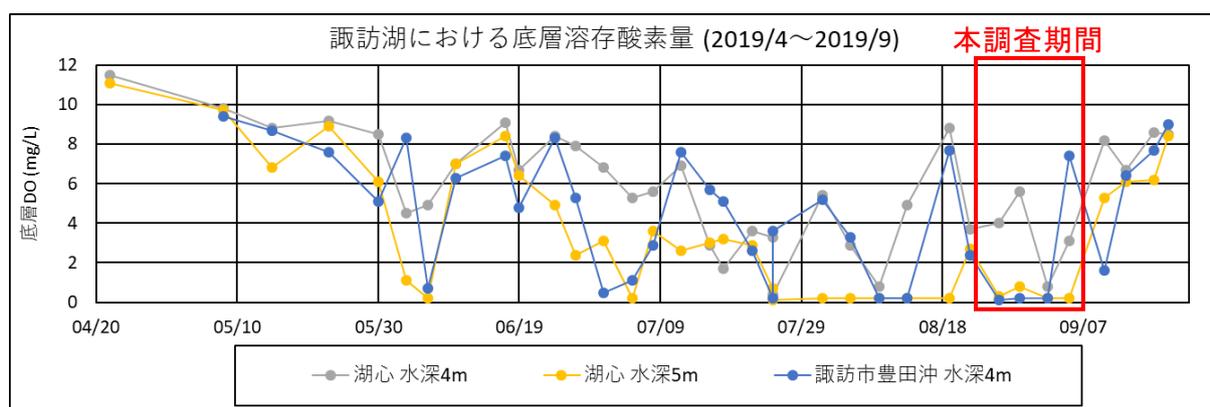
本業務期間（連続観測期間：2019年8月21日～9月6日）については、底層の貧酸素が確認された。なお、この期間は、前述（「4.3.1」（19頁）参照）のように、湖心の底層溶存酸素量の変動は大きいものの、2mg/L未滿の状況が生じている時期である。

※貧酸素とは2.0mg/L未滿とした。



資料：「諏訪湖の溶存酸素（D0）濃度等の調査について」（長野県）より作成

図 4.20 諏訪湖における底層溶存酸素量の調査地点（調査機関：水産試験場諏訪支場）



備考：2019年度の諏訪市豊田沖は水深5.0mであり、湖心は水深5.9mである。水深は調査地点設定時水深であるため、諏訪湖の水位等により変動する。

資料：「諏訪湖の溶存酸素（D0）濃度等の調査について」（長野県）より作成

図 4.21 諏訪湖における底層溶存酸素量（2019/4～2019/9）

#### 4.4.2 底層溶存酸素量：連続測定

##### (1) 連続測定結果の概要

ナノバブル発生装置起動前後の底層溶存酸素量の状況は図 4.22 に示すとおりである。長野県が実施した諏訪湖における底層溶存酸素量の連続観測のうち、D 地点における底層溶存酸素量の状況は図 4.23、ナノバブル発生装置起動前後の諏訪湖の気温、降水量の状況は図 4.24 に示すとおりである。

ナノバブル発生装置起動前まで、調査範囲の底層溶存酸素量は 4mg/L 程度で推移していたが、起動直後、連続測定の中心（以下、地点 C と示す）で底層溶存酸素量がやや増加したものの、その後約 2 時間は対照地点と同程度で低下した。その後、8 月 22 日 0 時付近まで地点 C の底層溶存酸素量、5m 地点及び 7m 地点の最大値は、対照地点より大きい値で推移した。

D 地点の底層溶存酸素量の変動は大きいものの、ナノバブル発生装置起動後に調査範囲でみられた底層溶存酸素量の低下傾向が少し遅れてみられた。

これらは、ナノバブル発生装置起動前は 8 月 19 日の降雨の影響により、上川から溶存酸素量の高い河川水が流れ込んだため、底層溶存酸素量が 4mg/L 程度で推移したものと推測される。その後、気温の上昇等の気象の影響により周辺水域の貧酸素水塊が発生したため、ナノバブル発生装置前後から低下したものと推測される。

なお、D 地点は、調査範囲より上川から離れていることから、底層溶存酸素量が低下する時期が遅れたものの、同様な傾向がみられたものと推測される。

このような状況下であったため、ナノバブル装置稼働後にその効果が明確に表れなかったものと推察される。

地点 C 及び対照地点の底層溶存酸素量の測定結果は図 4.25、地点 C と対照地点の底層溶存酸素量の差は図 4.26 に示すとおりである。また、調査範囲内（7m 範囲内）の底層溶存酸素量の最高値と対照地点の底層溶存酸素量の測定結果は図 4.27、調査範囲内（7m 範囲内）の底層溶存酸素量の最高値と対照地点の底層溶存酸素量の差は図 4.28 に示すとおりである。

測定期間内において、地点 C と対照地点の底層溶存酸素量は 2mg/L 未満の状況もみられる。また、地点 C と対照地点の底層溶存酸素量を比較すると、地点 C の大部分は対照地点の底層溶存酸素量と同等か、それ以上の値を示していた。次に、調査範囲内（7m 範囲内）の底層溶存酸素量の最高値と対照地点の底層溶存酸素量の測定結果を比較すると、地点 C と対照地点の底層溶存酸素量の関係と同様に、調査範囲内（7m 範囲内）の底層溶存酸素量の最高値の大部分は対照地点の底層溶存酸素量と同等か、その値以上を示していた。これらの結果より、調査範囲内ではナノバブル発生装置の効果があつたと推測される。

測定期間における流向流速の傾向は図 4.29 に示すとおりである。底層の流向について、底層はやや東からの流れが多い。

次に、各地点と対照地点の底層溶存酸素量の差と流速との関係は資料編に示すとおりである。

各流向の結果より、流向の下流側に位置する調査地点では顕著な増加がみられず、流向の上流側でも増加する場合がみられることから、流向・流速と底層溶存酸素量の効果の現れた地点に明確な傾向は現れなかった。

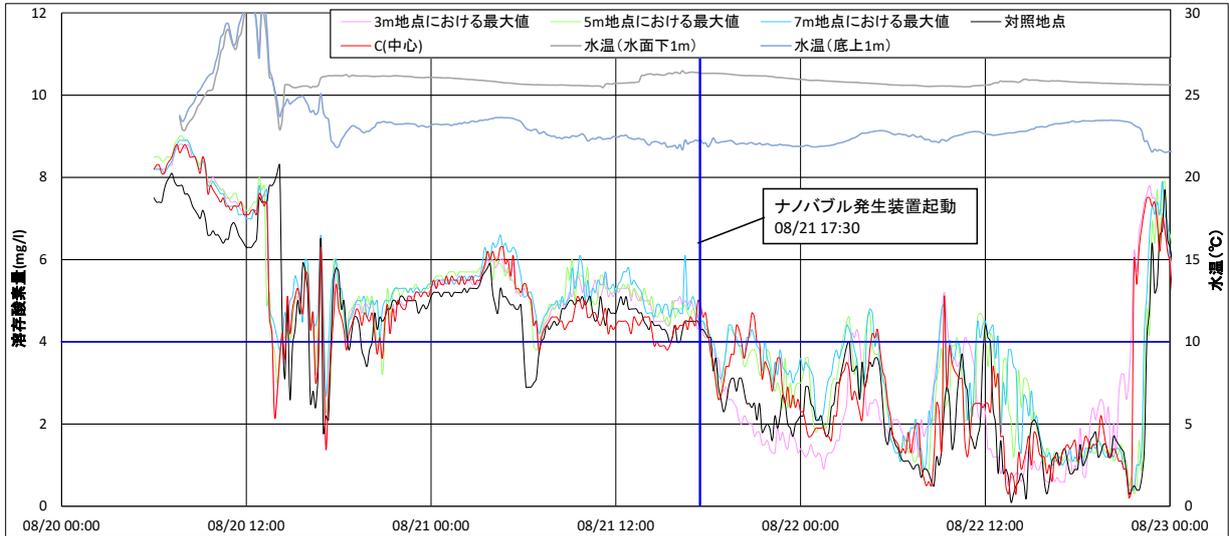
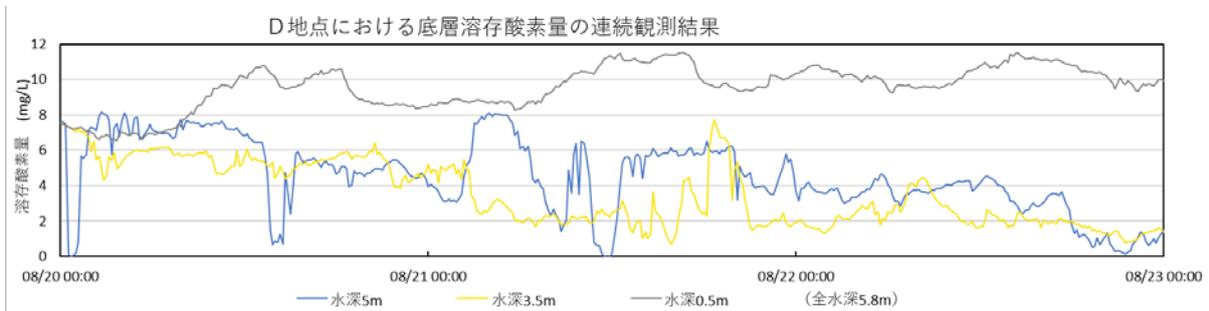
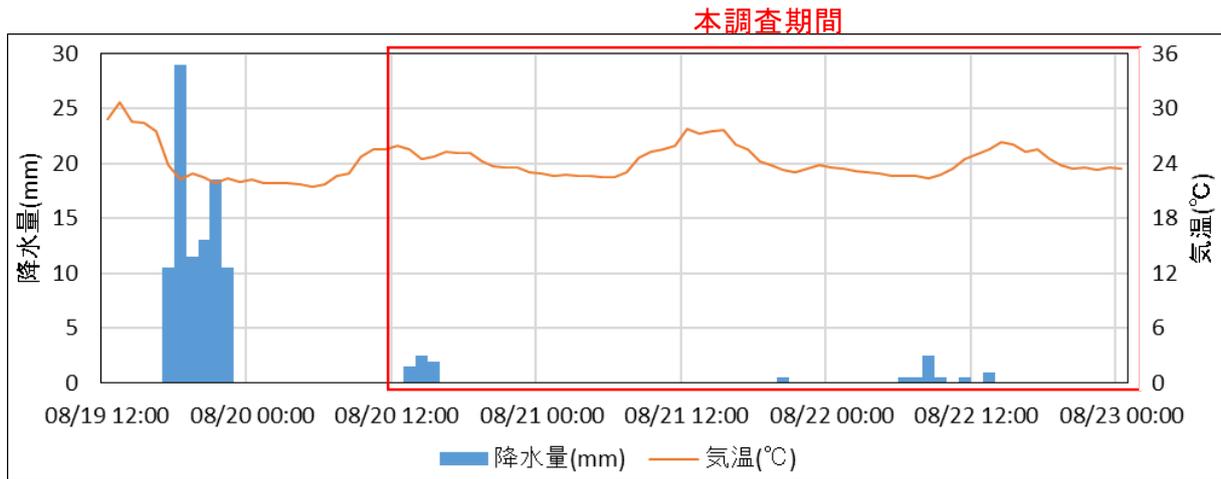


図 4.22 ナノバブル発生装置起動前後の底層溶存酸素量の状況



備考：●は、ナノバブル発生装置設置位置  
資料：長野県提供資料

図 4.23 D地点における底層溶存酸素量の状況



備考：赤枠は図 4.22 の時間帯である。

資料：気象庁より作成

図 4.24 ナノバブル発生装置起動前後の諏訪湖の気温、降水量の状況

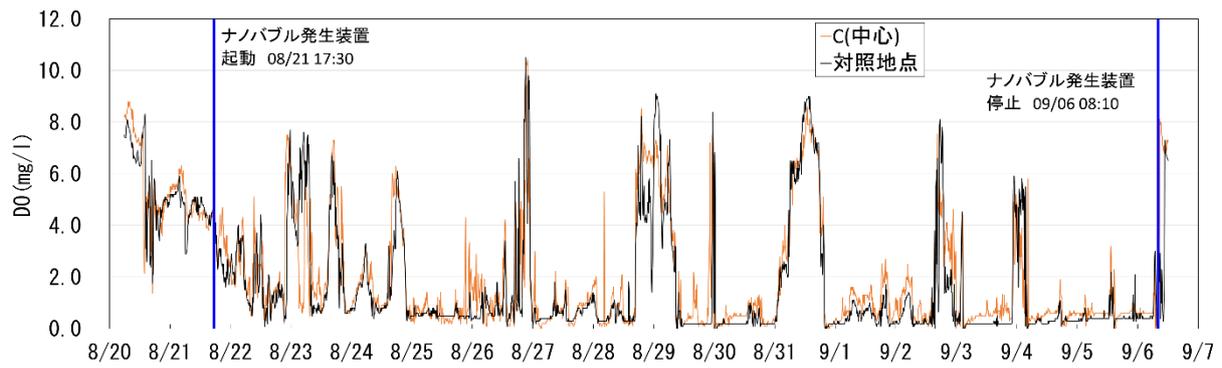


図 4.25 底層溶存酸素量の測定結果 (地点 C と対照地点)

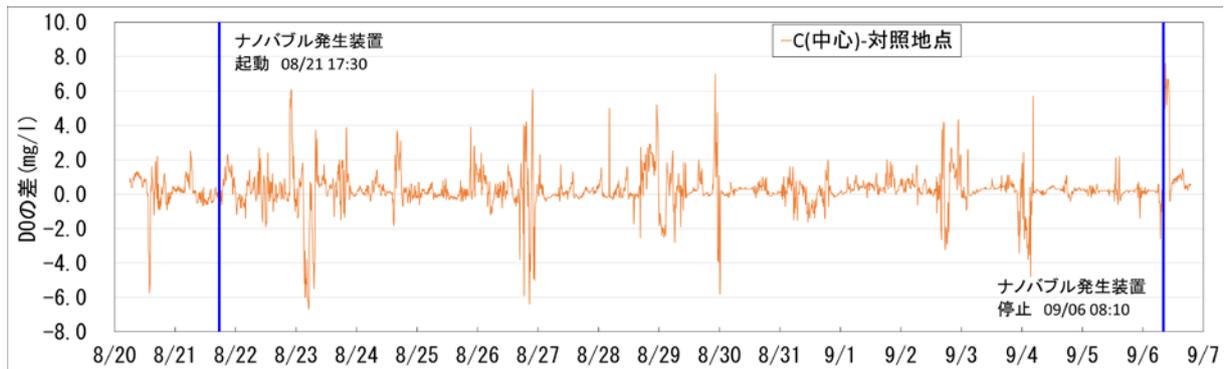


図 4.26 地点 C と対照地点の底層溶存酸素量の差

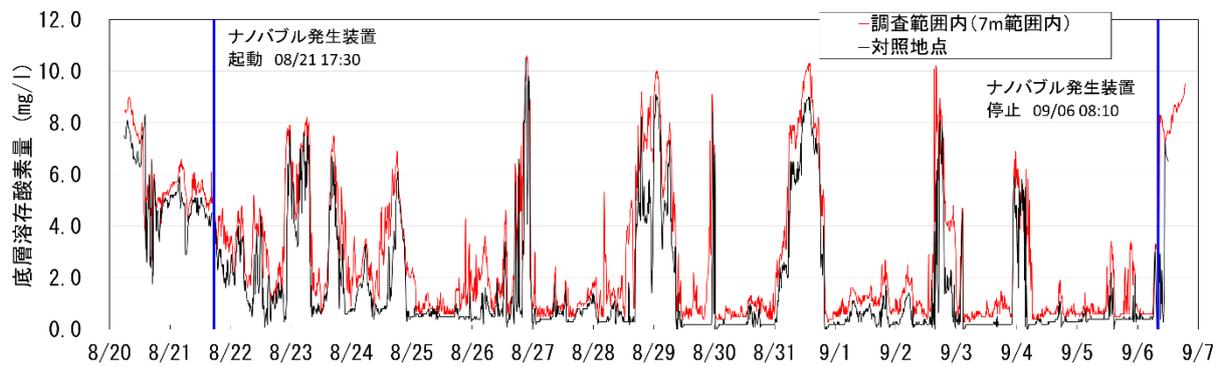
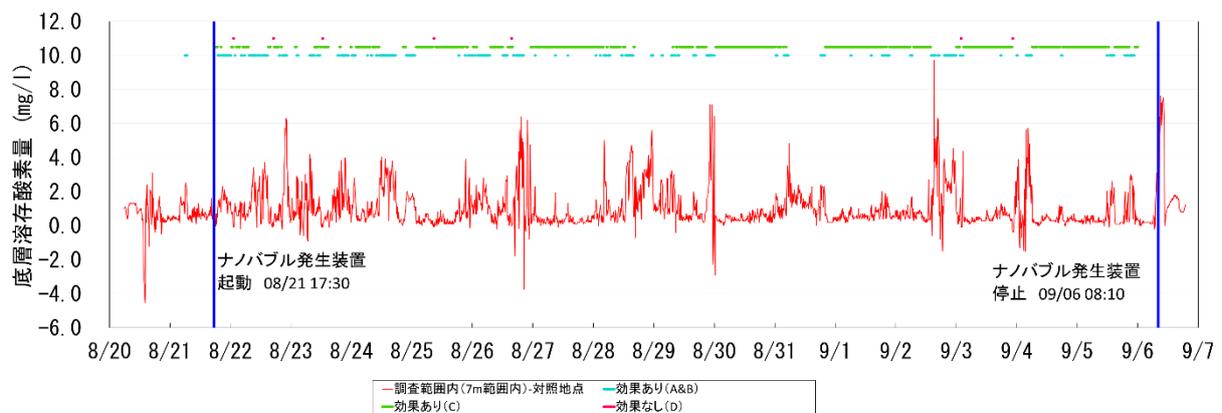
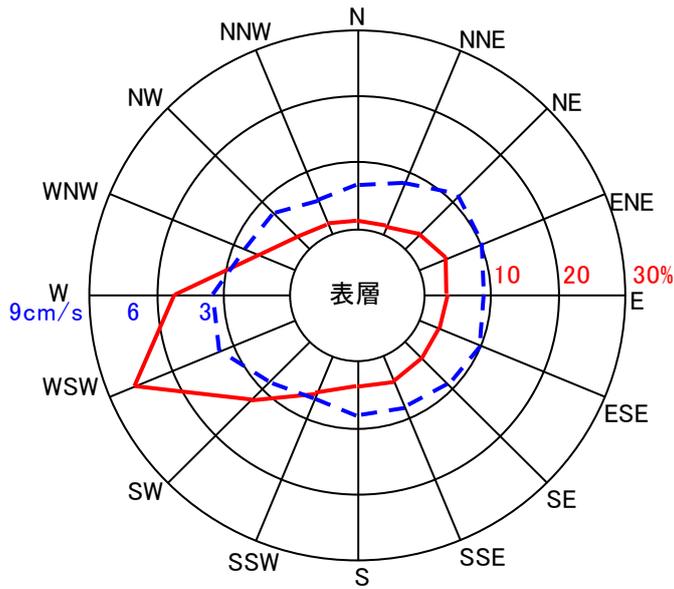


図 4.27 底層溶存酸素量の測定結果 (調査範囲内 (7m 範囲内) 最高値と対照地点)



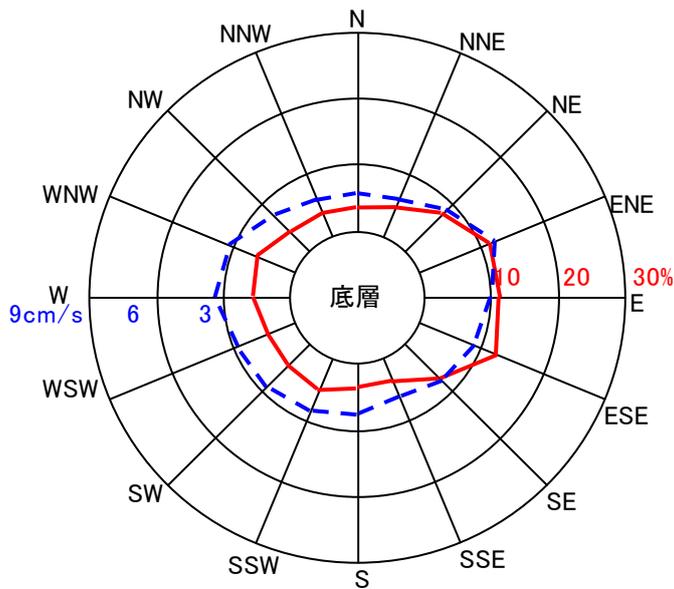
備考：図上部の効果に関する記載は、図 4.30 のフローに記載の A~D を表す。

図 4.28 調査範囲内 (7m 範囲内) 最高値と対照地点の底層溶存酸素量の差



出現割合と平均流速

流向	%	cm/s
NNE	1.2	2.4
NE	3.1	3.4
ENE	4.5	3.1
E	3.5	2.7
ESE	3.3	3.0
SE	3.7	2.8
SSE	4.3	2.6
S	3.9	2.5
SSW	6.1	2.1
SW	12.4	2.6
WSW	26.0	3.7
W	17.3	3.4
WNW	5.8	2.4
NW	2.5	2.2
NNW	1.5	1.6
N	1.0	1.9



出現割合と平均流速

流向	%	cm/s
NNE	4.7	1.8
NE	8.0	2.6
ENE	11.5	3.7
E	11.4	3.0
ESE	12.7	2.7
SE	7.4	2.4
SSE	3.8	1.9
S	3.7	2.3
SSW	5.1	2.6
SW	4.6	2.7
WSW	4.5	2.8
W	5.6	3.4
WNW	6.1	3.2
NW	3.9	2.2
NNW	3.6	1.8
N	3.5	1.7

備考：表層は水面下 1m であり、底層は湖底上 1m である。

図 4.29 流向流速の傾向

## (2) ナノバブル発生装置の効果

ナノバブル発生装置の効果検証フロー及び検証結果の概要は図 4.30 に示すとおりである。また、中心から 3m 地点、中心から 5m 地点及び中心から 7m 地点の効果検証フロー及び検証結果の概要はそれぞれ図 4.31、図 4.32 及び図 4.33 に示すとおりである。

まず、水域前他の溶存酸素量が比較的高い場合は貧酸素の改善効果の確認が困難なため、観測する水域が貧酸素時（対照地点が 4mg/L 未満）のデータ群を抽出し、調査範囲（ナノバブル発生装置の散水ノズルを中心とした 7m の範囲）内の測定結果が対照地点より高いデータ群を「効果あり」として抽出した。

次に、調査範囲内の測定結果と対照地点との測定結果の差が 1mg/L 以上の地点があるデータ群を抽出し、そのデータ群のうち、差が 2mg/L 以上を「効果が大きい」とし、差が 1mg/L 以上 2mg/L 未満を「効果が小さい」として整理した。

調査結果より、調査範囲内のいずれかの地点で対照地点より底層溶存酸素量が高いデータ群（「効果あり」）は全データ群の 80.61%であった。また、中心から 3m 地点、中心から 5m 地点及び中心から 7m 地点の平均値が対照地点より高いデータ群（「効果あり」）は全データ群のそれぞれ 44.86%、51.32%及び 40.78%であった。

次に、「効果あり」のデータ群のうち、1mg/L 以上のデータ群は全データ群の 25.21%であり、「効果が大きい」（差が 2mg/L 以上）は全データ群の 11.41%、「効果が小さい」（差が 1mg/L 以上 2mg/L 未満）は全データ群の 13.80%であった。なお、「効果が大きい」（差が 2mg/L 以上）となった各範囲の割合は、ナノバブル発生装置から 3m 範囲で 2.39%（図 4.31 参照）、5m 範囲で 1.21%（図 4.32 参照）、7m 範囲で 0.43%（図 4.33 参照）であった。

ナノバブル発生装置の稼働期間中の溶存酸素量、水温、流速、気温等の推移は図 4.34、効果がみられた時期の経時変化と平面分布の例は図 4.35～図 4.44、効果がみられなかった時期の調査結果の例は図 4.45～図 4.48 にそれぞれ示すとおりである。また、50 頁に図 4.35～図 4.48 の図の見方を示す。

効果がみられた時期では、流向及び流速に依存するような顕著な傾向はみられなかった。資料編に示すように、流向の下流側で効果がみられる場合もあったが明確な関係はみられなかった。

詳細にみると、図 4.36（8/24 12:20～14:30）では、調査範囲外では貧酸素状態であり、ナノバブル発生装置の効果は主に 3m 範囲を中心に効果がみられている。

図 4.38（8/26 17:50～20:00）では、対照地点の底層溶存酸素量の変動が大きく、調査範囲内でも変動が大きいため、ナノバブル発生装置の効果が明確ではないものの、地点 C（中心）における底層溶存酸素量が高い状況はみられた。

図 4.40（8/28 14:30～16:40）では、図 4.36 と同様に調査範囲外は貧酸素状態であり、ナノバブル発生装置の効果は主に 3m 範囲を中心に効果がみられていた。また 8/28 15:50 以降では調査範囲内への溶存酸素量の低い水の流入により、ナノバブル発

生装置の効果がほとんど現れていない状況であった。

図 4.42 (9/2 19:00~21:10) では、調査範囲外の底層溶存酸素量の変動が大きいいため、ナノバブル発生装置の効果が明確ではないものの、中心における底層溶存酸素量が高い状況はうかがえた。

図 4.44 (9/4 03:00~05:10) では、調査範囲外の底層溶存酸素量の影響と考えられる状況がみられ、9/4 04:00 以降では、調査範囲及びその周囲の水域では貧酸素化が生じており、ナノバブル発生装置の効果は図 4.36 と同様に、主に 3m 範囲を中心に効果がみられていた。

その一方で図 4.46 (8/25 9:10~11:20) 及び図 4.48 (9/5 18:20~20:30) では、調査対象範囲及びその周囲の水域では貧酸素化が生じているが、ナノバブル発生装置の効果はほとんど現れていない。

以上の結果より、以下の事項が推定される。

- ・観測結果を分析した結果、「効果あり」のデータ群のうち、1mg/L 以上のデータ群は全データ群の 25.21%であり、「効果が大きい」（差が 2mg/L 以上）は**全データ群の 11.41%**であった。
- ・ナノバブル発生装置の効果は局所的であり、最も改善効果がみられた範囲は、C 地点（中心）から 3m の範囲であった。
- ・ナノバブル発生装置の散水ノズルからの距離が広がるにつれて溶存酸素量の上昇がみられるデータ群が小さくなることがわかり、7m 範囲内で 2mg/L 以上の効果がみられた割合はわずかであった。このことから、諏訪湖における改善効果の把握にあたって概ね妥当な調査範囲の設定であったことが推察されるが、調査範囲外の影響を受けるため、ナノバブル発生装置の効果と湖水の流動等の他の影響を明確に区分することはできなかった。

また、ナノバブル発生装置の効果の有無が生じた原因としては以下のことが想定される。

- ・調査範囲外の底層溶存酸素量の影響
- ・表層と底層の水温差の影響  
(例えば、調査範囲外の底層溶存酸素量が貧酸素化している場合、流向によってはその影響を受ける場合があった。次に流速が速い場合や水温差が小さい場合も、その効果は現れなかった。)

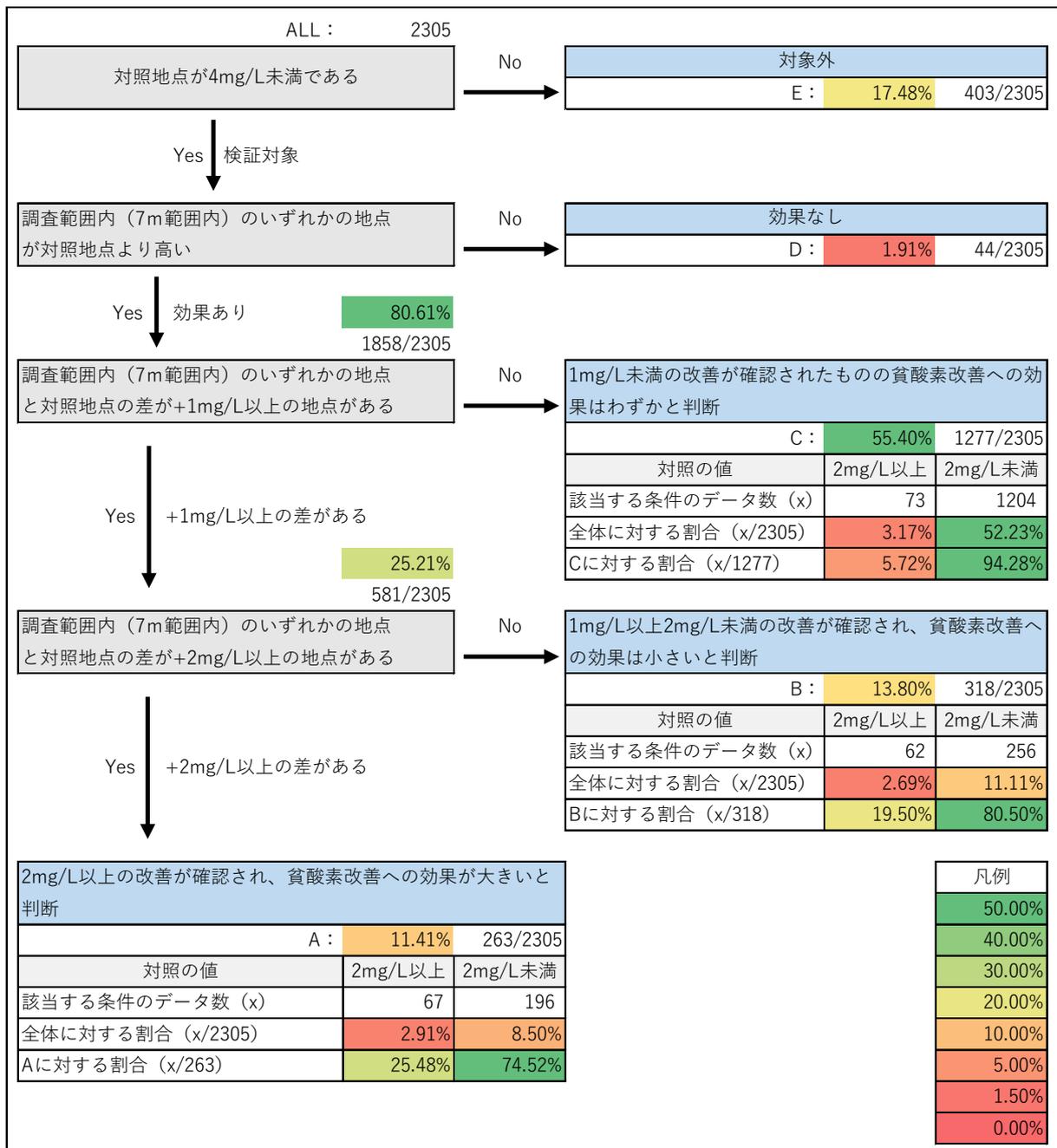


図 4.30 ナノバブル発生装置の効果検証フロー及び検証結果の概要

(各時間の最大値 : 8/21 ~ 9/6)

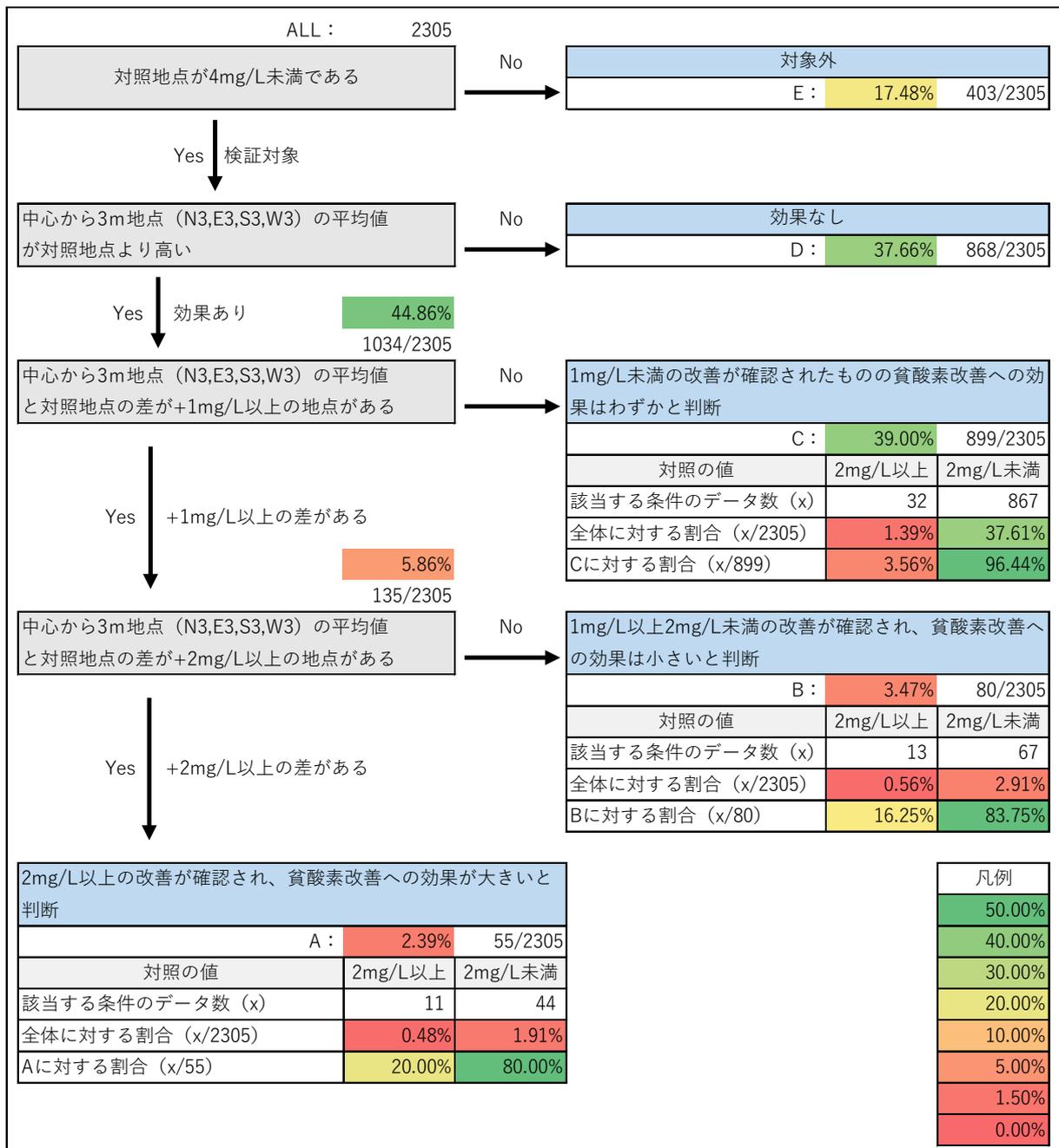


図 4.31 ナノバブル発生装置の効果検証フロー及び検証結果の概要

(各時間の中心から 3m地点の平均値 : 8/21 ~ 9/6)

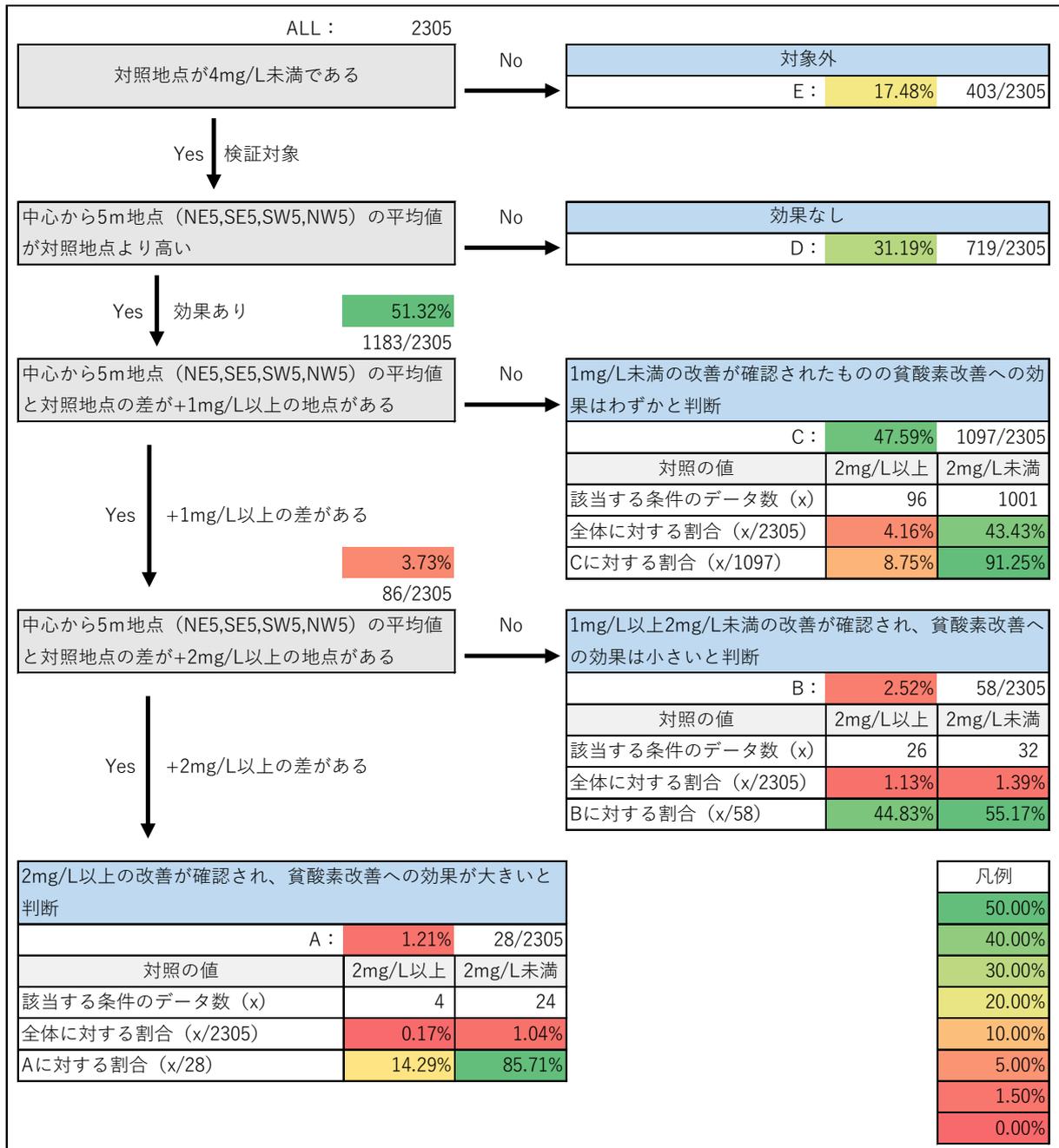


図 4.32 ナノバブル発生装置の効果検証フロー及び検証結果の概要

(各時間の中心から 5m地点の平均値 : 8/21 ~ 9/6)

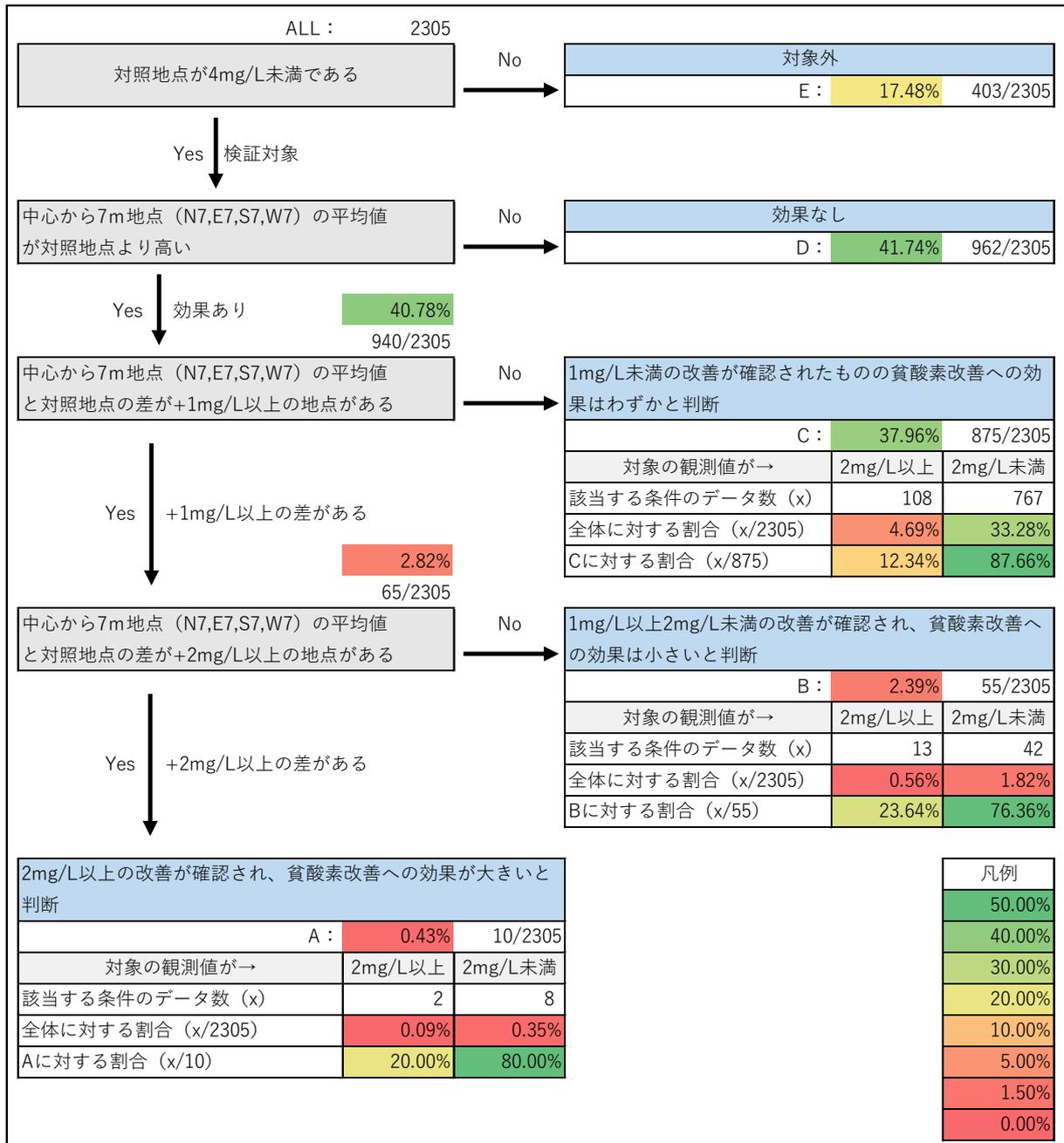
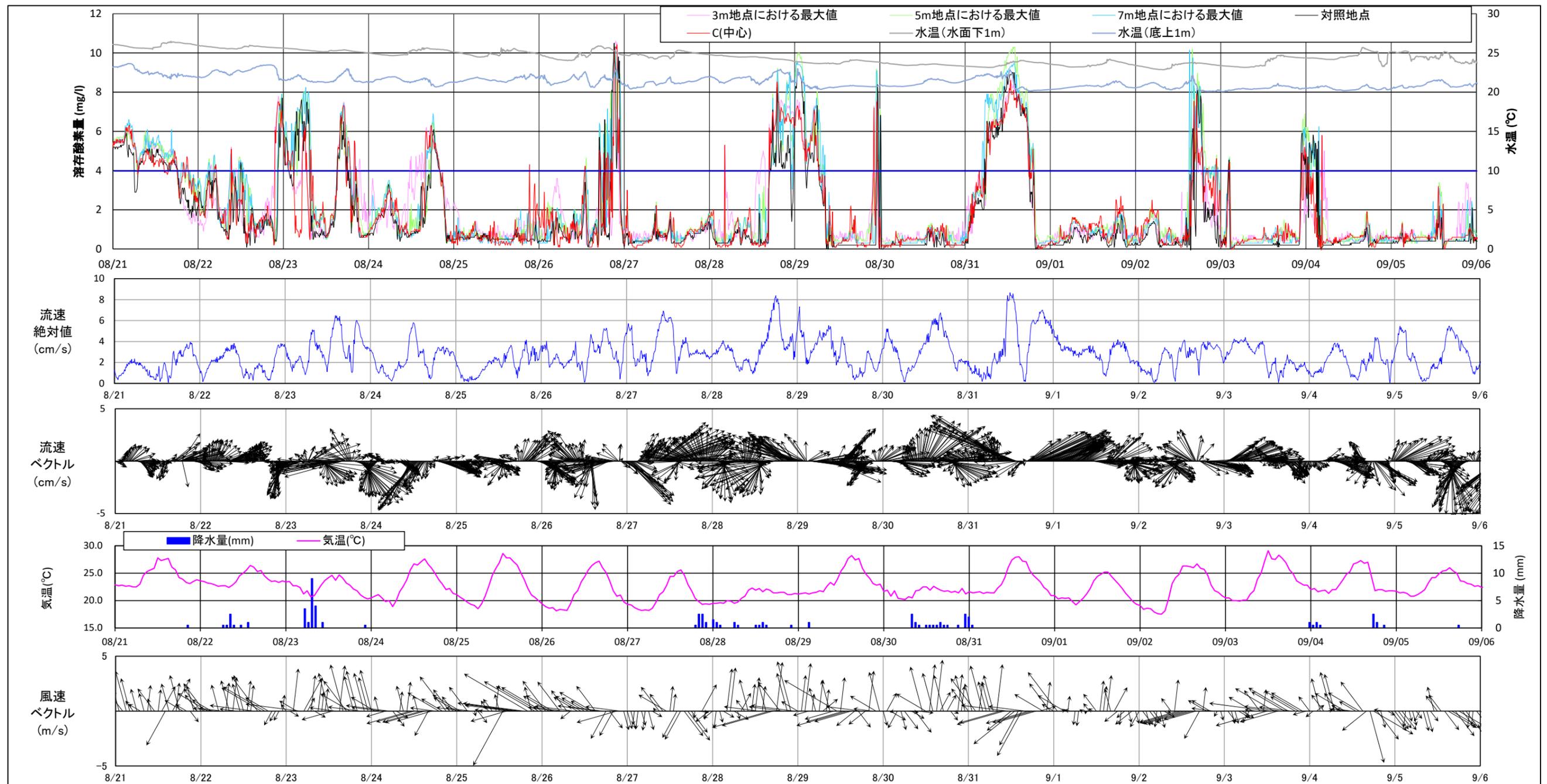


図 4.33 ナノバブル発生装置の効果検証フロー及び検証結果の概要

(各時間の中心から 7m地点の平均値 : 8/21 ~ 9/6)

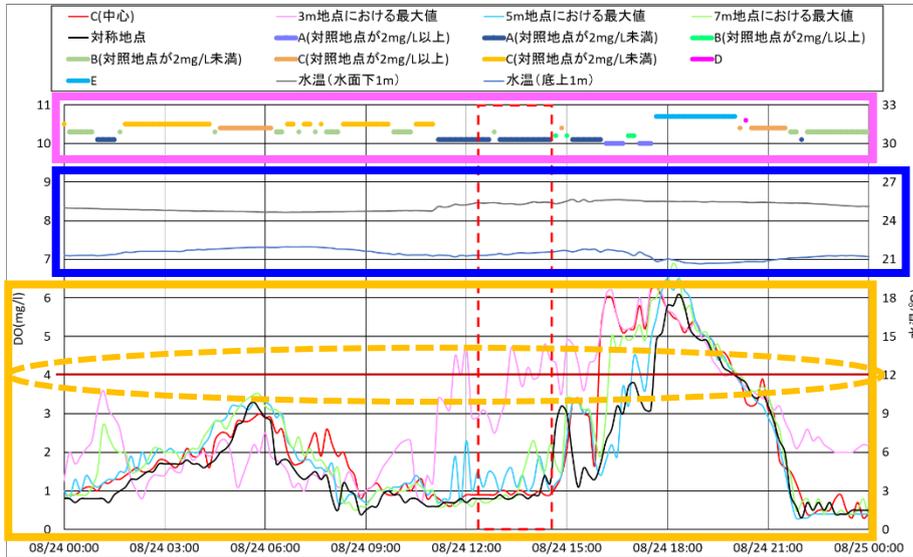


注) 流速絶対値及び流速ベクトルは湖底上1mの観測結果である。

図 4.34 ナノバブル発生装置の稼働期間中の溶存酸素量、水温、流速、気温等の推移 (8/21~9/6)

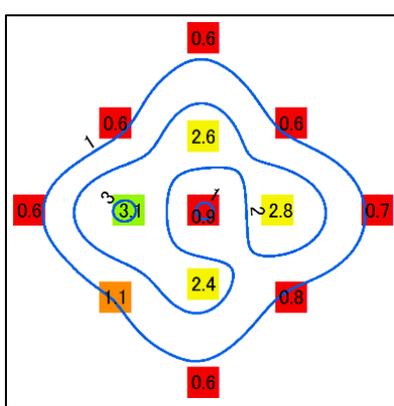
●次ページ以降の図の見方は以下のとおり

- ・ピンクの枠は、図 4.30 に示したフローにおいて調査結果が該当する区分を示す。
- ・「効果が大きい」及び「効果が小さい」の区分はA及びBであり、「効果あり」の区分はC、「効果なし」の区分はDとした。
- ・区分の E は、対照地点が 4mg/L 以上である場合を示し、水域全体の溶存酸素量が比較的高いと考え、対象外とした。

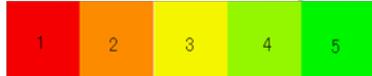


青枠は、表層(水面下1m)と底層(底上1m)における対照地点の水温である。表層と底層の差が大きいほど躍層していた可能性が高く、底層溶存酸素量が低下しやすい水環境となる。

備考：点線の赤枠は次ページに示す平面分布の時間帯である。



底層溶存酸素量 (mg/L)



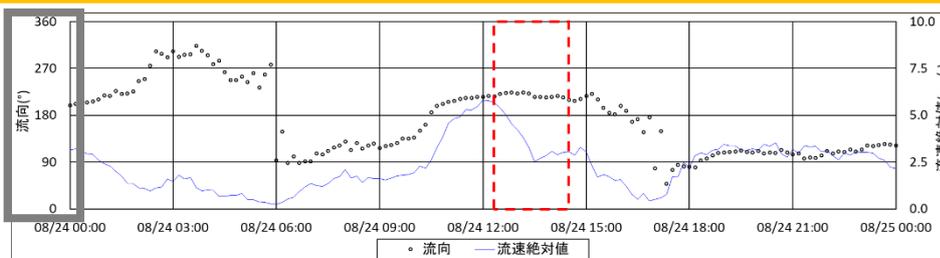
黄色の枠は、底層溶存酸素量の連続観測結果を示している。3m、5m 及び 7m 地点のデータについては、中心からの距離が同じ観測結果における最高値を示す。

黒色の対照地点よりも他の地点が高い底層溶存酸素量を示している時、「効果があり」とした。対照地点との差が大きいほど、ナノバブルの効果があったと考えられる。

赤の線で示している底層溶存酸素量 4mg/L 未満を底層溶存酸素量が低下していると判断する。

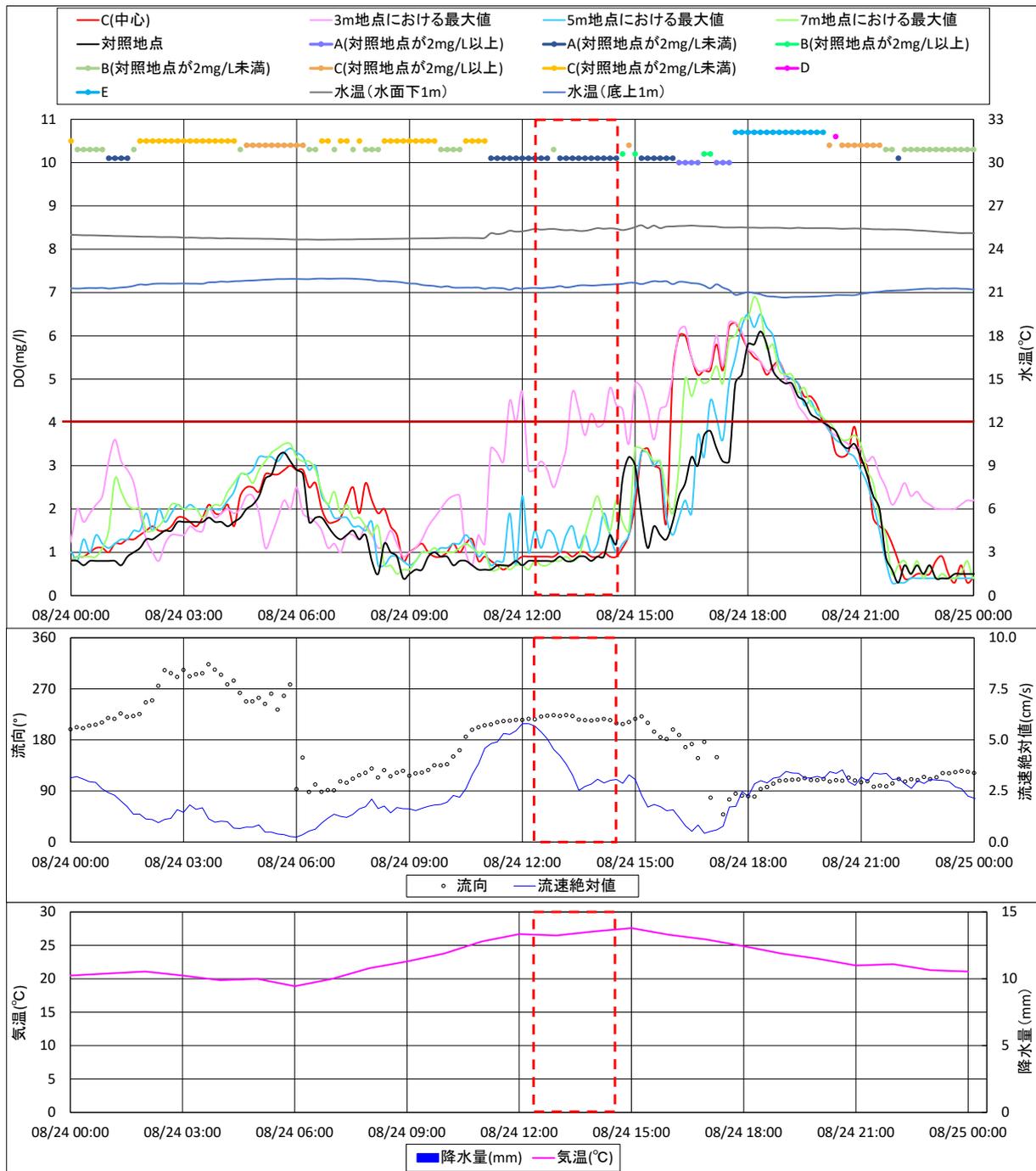
備考：底層溶存酸素量の環境基準において、4mg/L は最も高い基準値である。

3m、5m 及び 7m 地点のデータについて (例：左図参照)  
中心から 3m の調査地点の場合、北 2.6mg/L、東 2.8mg/L、南 2.4mg/L、西 3.1mg/L であれば、中心から西へ 3m 地点の 3.1mg/L が「3m 地点における最大値」として図に反映される。



備考：点線の赤枠は次ページに示す水平分布図の時間帯である。

流向について、灰色の枠で示す軸は、360° 及び 0° が北向きの流れであり、90° が東向きの流れ、180° が南向きの流れ、270° が西向きの流れである。  
なお、図示している流向流速は、対照地点における底上 1m の観測結果である。



備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.35 底層溶存酸素量の経時変化 (8/24~ 8/25) : 効果が大きい

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が 2mg/L 未満と低いことから、3m 範囲を中心に 5m 範囲、7m 範囲の溶存酸素量の上昇はナノバブル発生装置の効果であると考えられる。ただし、C 地点（中心）では溶存酸素量の上昇がみられなかった。

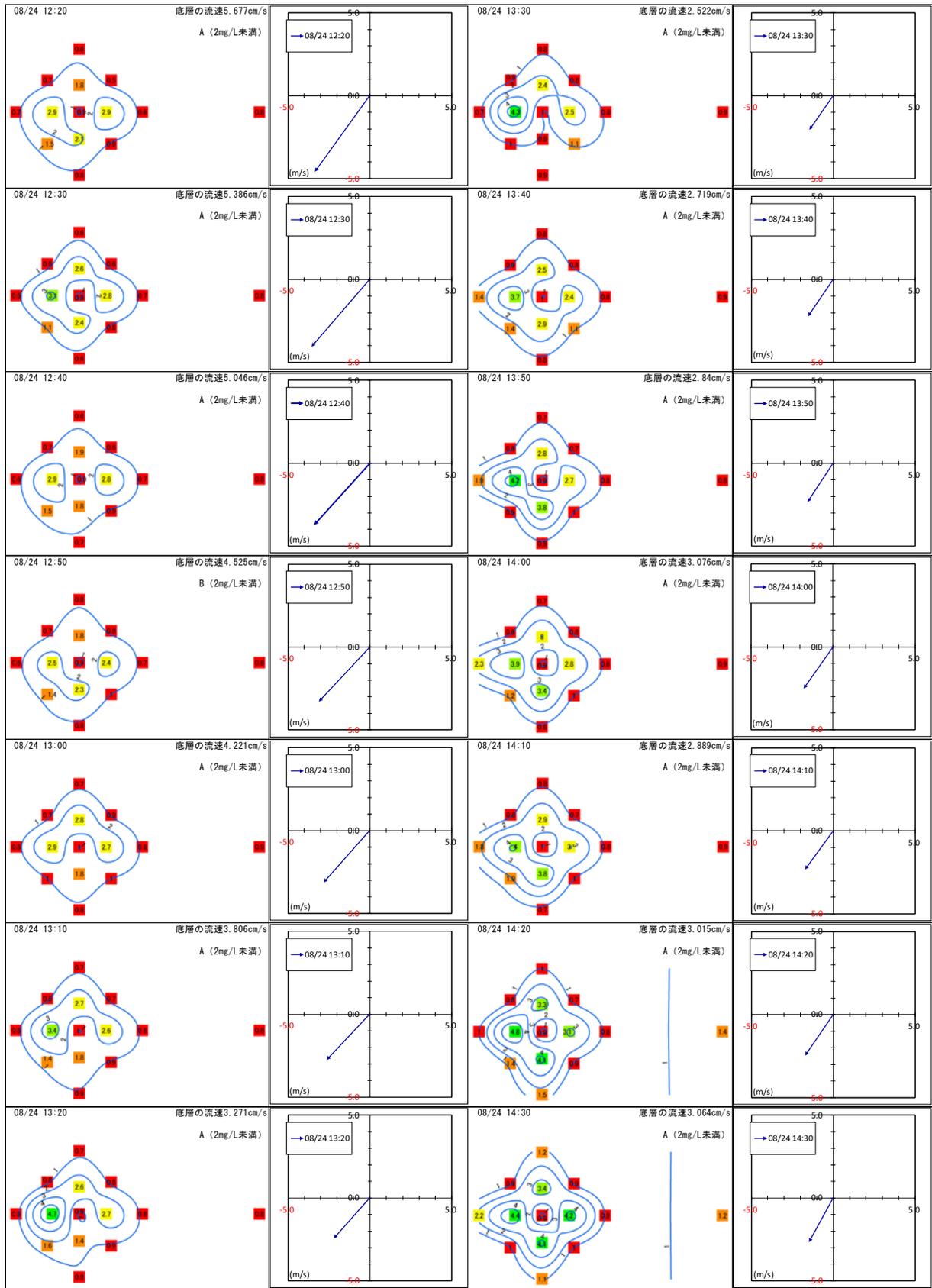
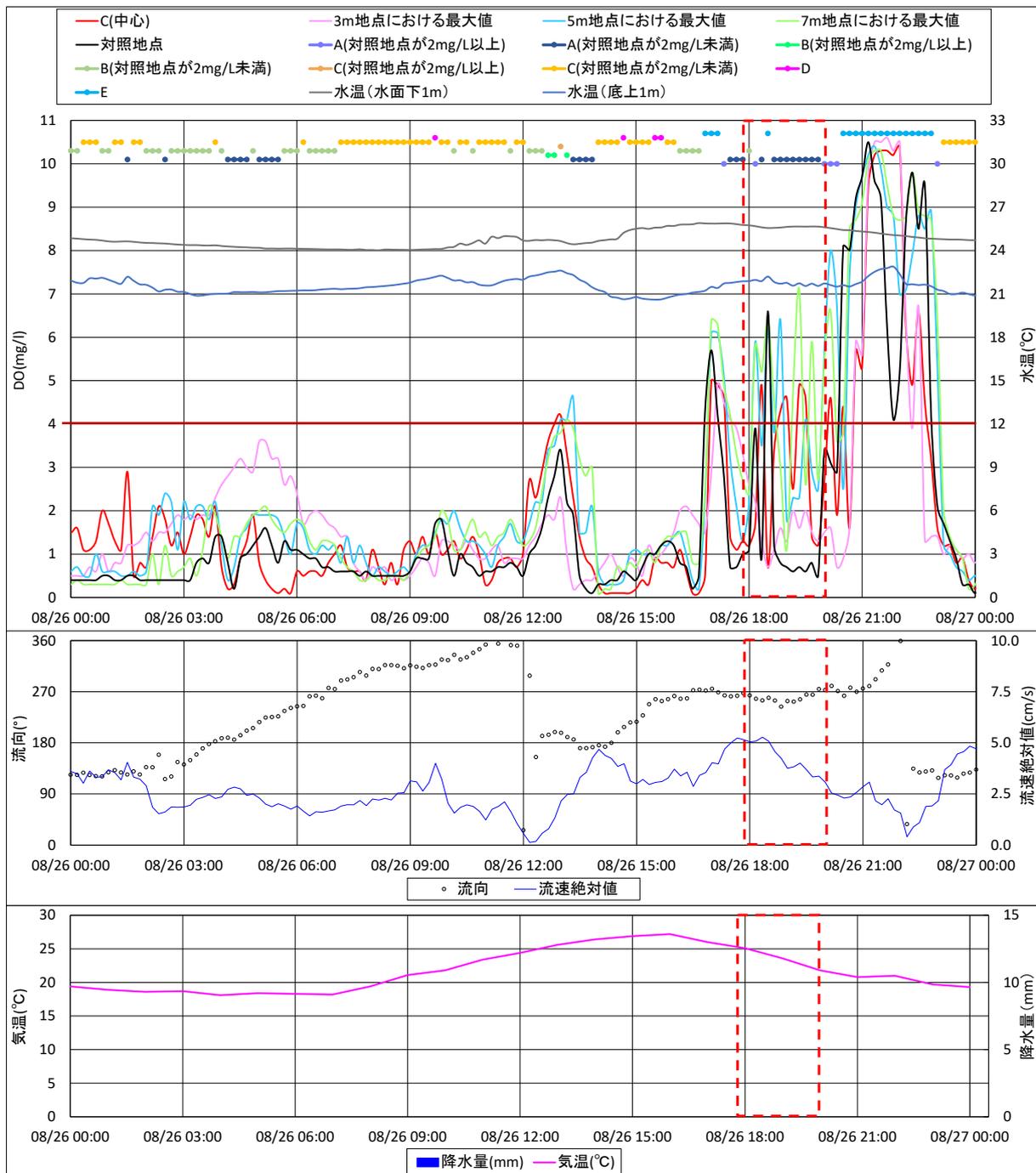


図 4.36 底層溶存酸素量の平面分布  
(8/24 12:20 ~ 8/24 14:30) : 効果が大きい





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.37 底層溶存酸素量の経時変化(8/26 17:00 ~ 8/27 0:00)：効果が大きい

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が短時間に大きく変動することや、溶存酸素量の上昇地点がめまぐるしく移り変わっていることから、ナノバブル発生装置の効果以外の要因（湖水の流動に伴う調査対象範囲外からの酸素供給）も考えられる。なお、C地点（中心）にのみ溶存酸素の上昇がみられる時間もあることから、ナノバブル発生装置の効果がC地点（中心）に現れていると考えられる。

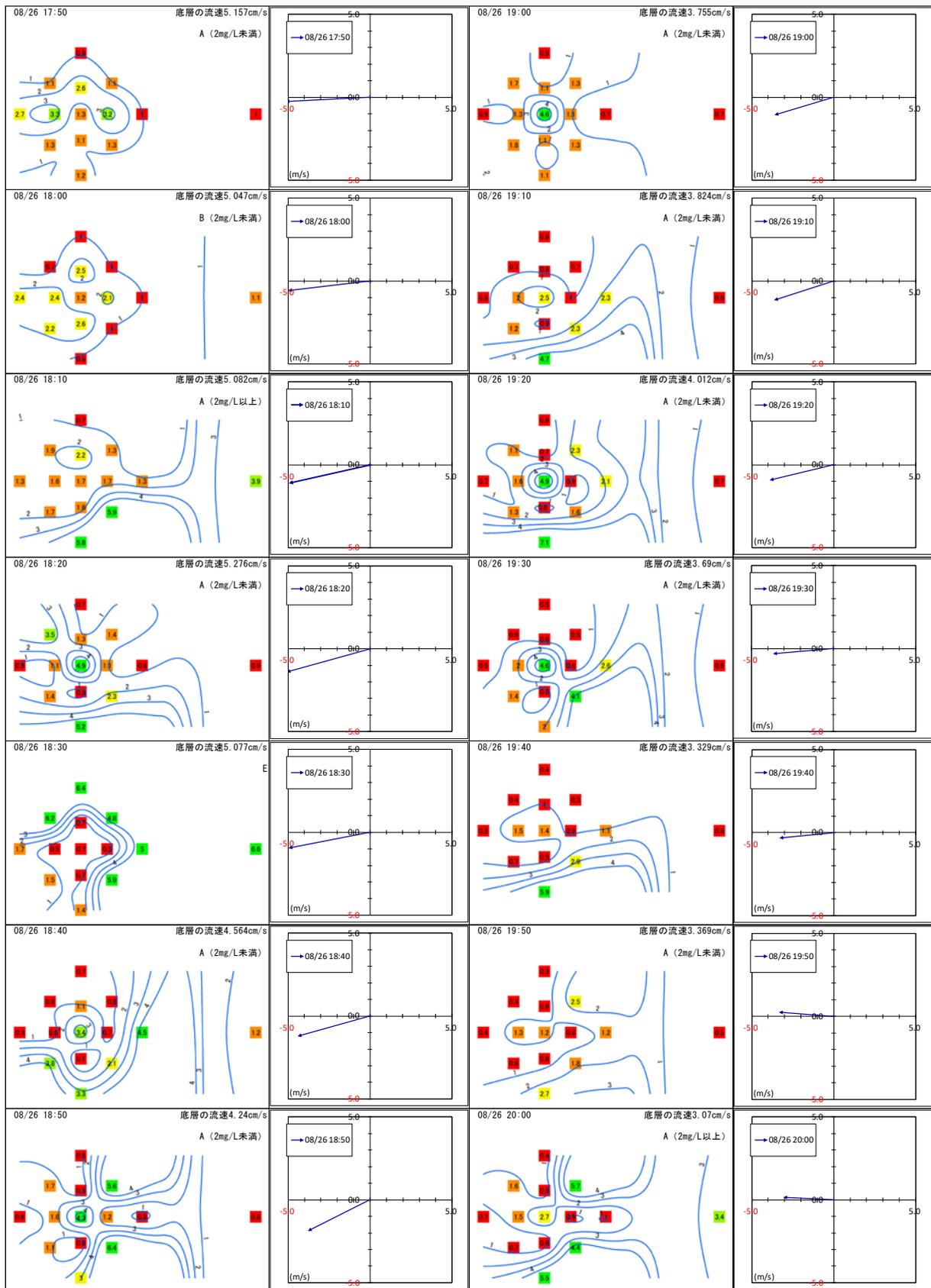
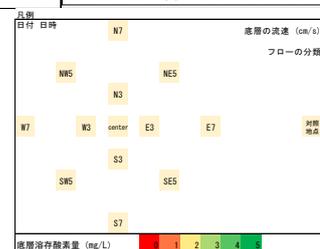
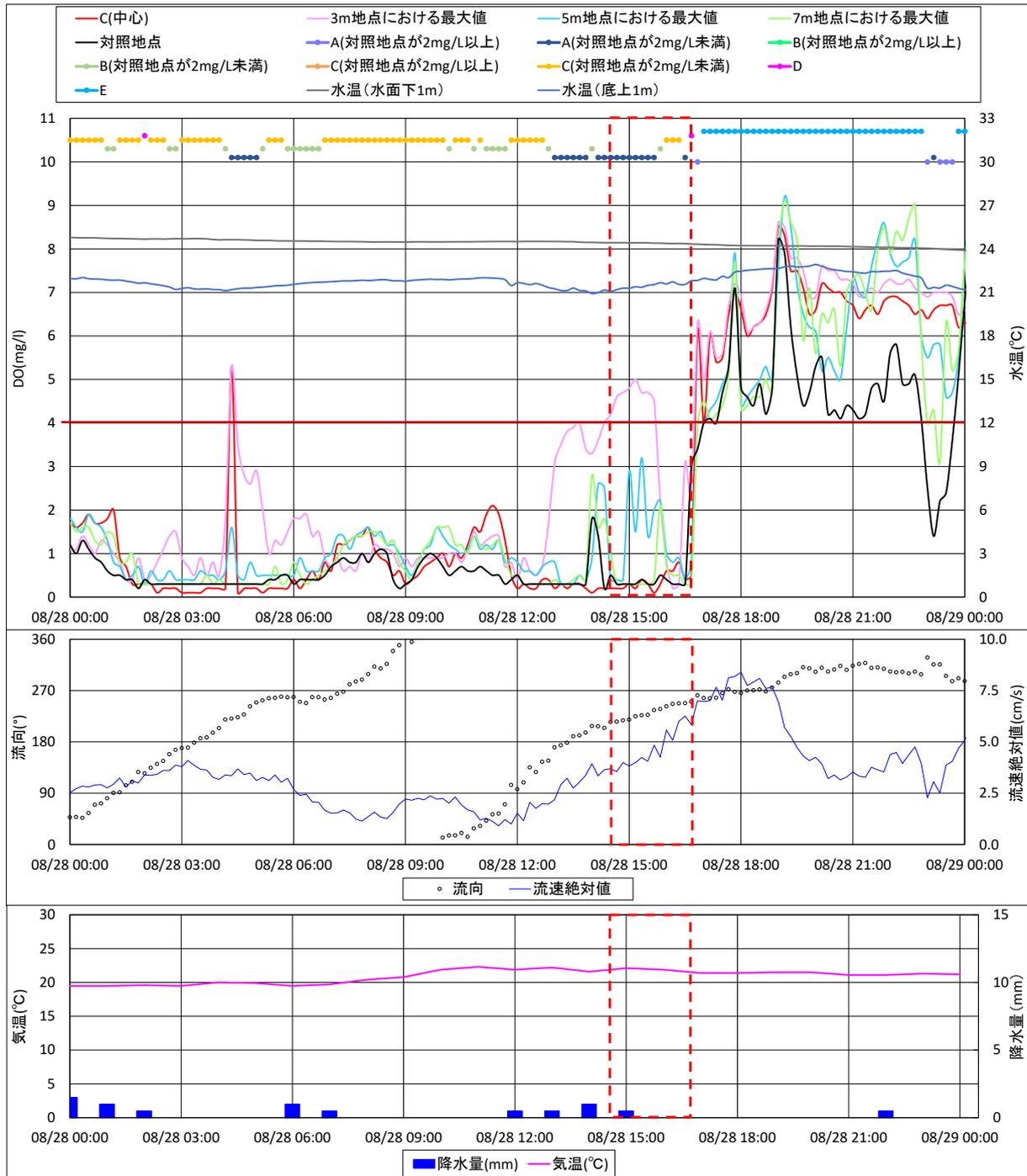


図 4.38 底層溶存酸素量の平面分布  
(8/26 17:50 ~ 8/26 20:00) : 効果大きい





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.39 底層溶存酸素量の経時変化 (8/28 0:00 ~ 8/29 0:00) : 効果有

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が 1 mg/L 以下と低いことから、3m 範囲を中心に、5m 範囲、7m 範囲の溶存酸素量の上昇はナノバブル発生装置の効果であると考えられる。ただし、C 地点（中心）では溶存酸素量の上昇がみられなかった。また、南西向きの流速が徐々に高まっており、15:50 以降の溶存酸素量の低下は湖水の流動（調査範囲内への溶存酸素量の低い水の流入）によりナノバブル発生装置の効果が失われた可能性がある。

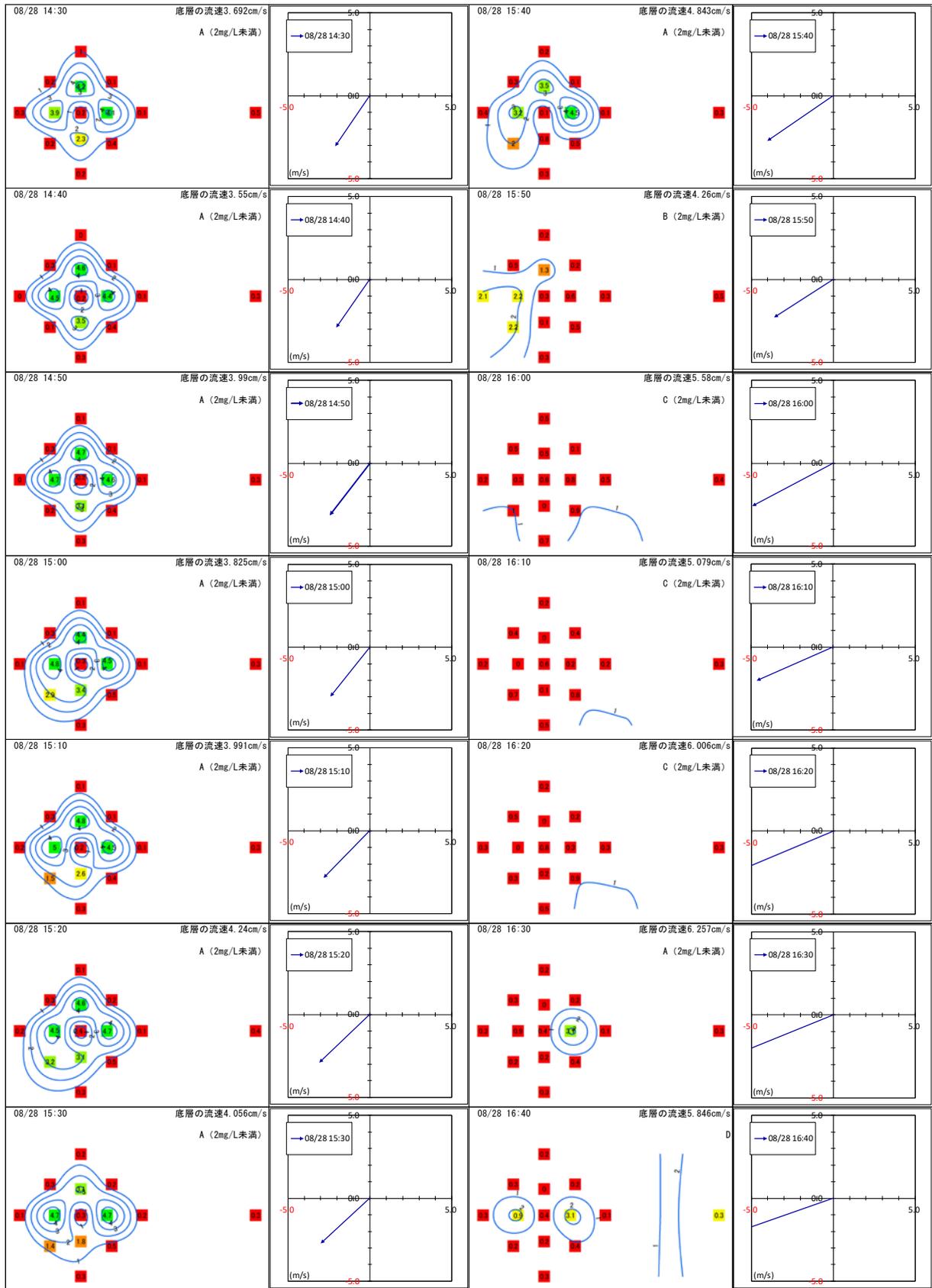
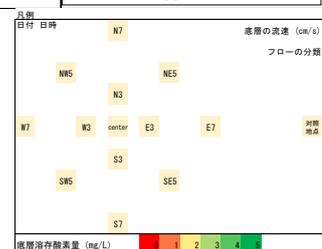
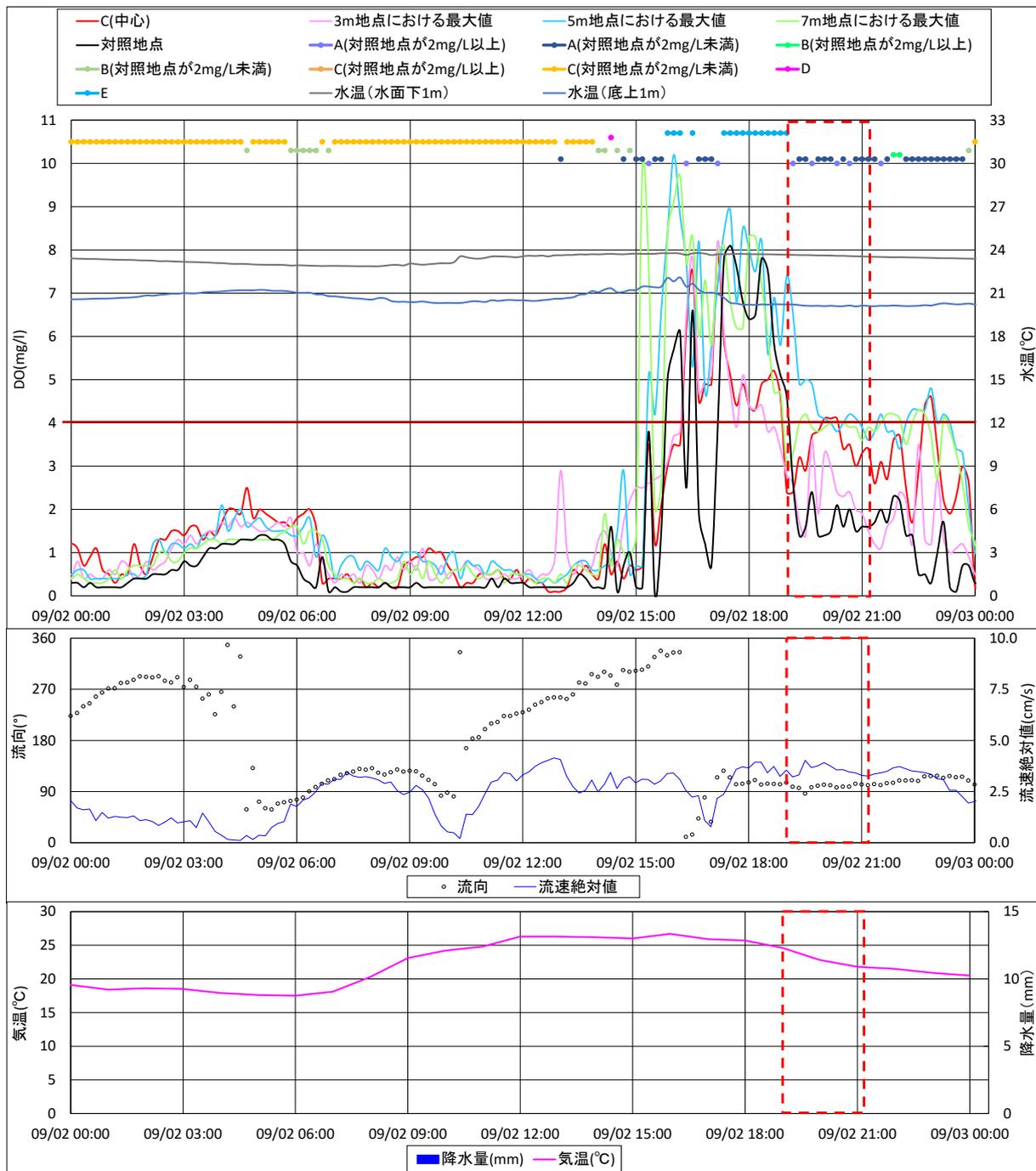


図 4.40 底層溶存酸素量の平面分布  
(8/28 14:30 ~ 8/28 16:40) : 効果大きい





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.41 底層溶存酸素量の経時変化 (9/2 0:00 ~ 9/3 0:00) : 効果が大きい

※：点線の赤枠で示した時間帯では、他の地点に比べて 3m 範囲の溶存酸素量が低い傾向がみられる。流向が東向きであることから、C 地点(中心)より東側の地点はナノバブル発生装置の影響を受けていると考えられるが、その効果は明確ではない。一方、C 地点(中心)より西側の地点では、ナノバブル発生装置の効果以外の影響(湖水の流動に伴う調査対象範囲外からの酸素供給)を受けており、その影響が東側にも及んでいる可能性がある。

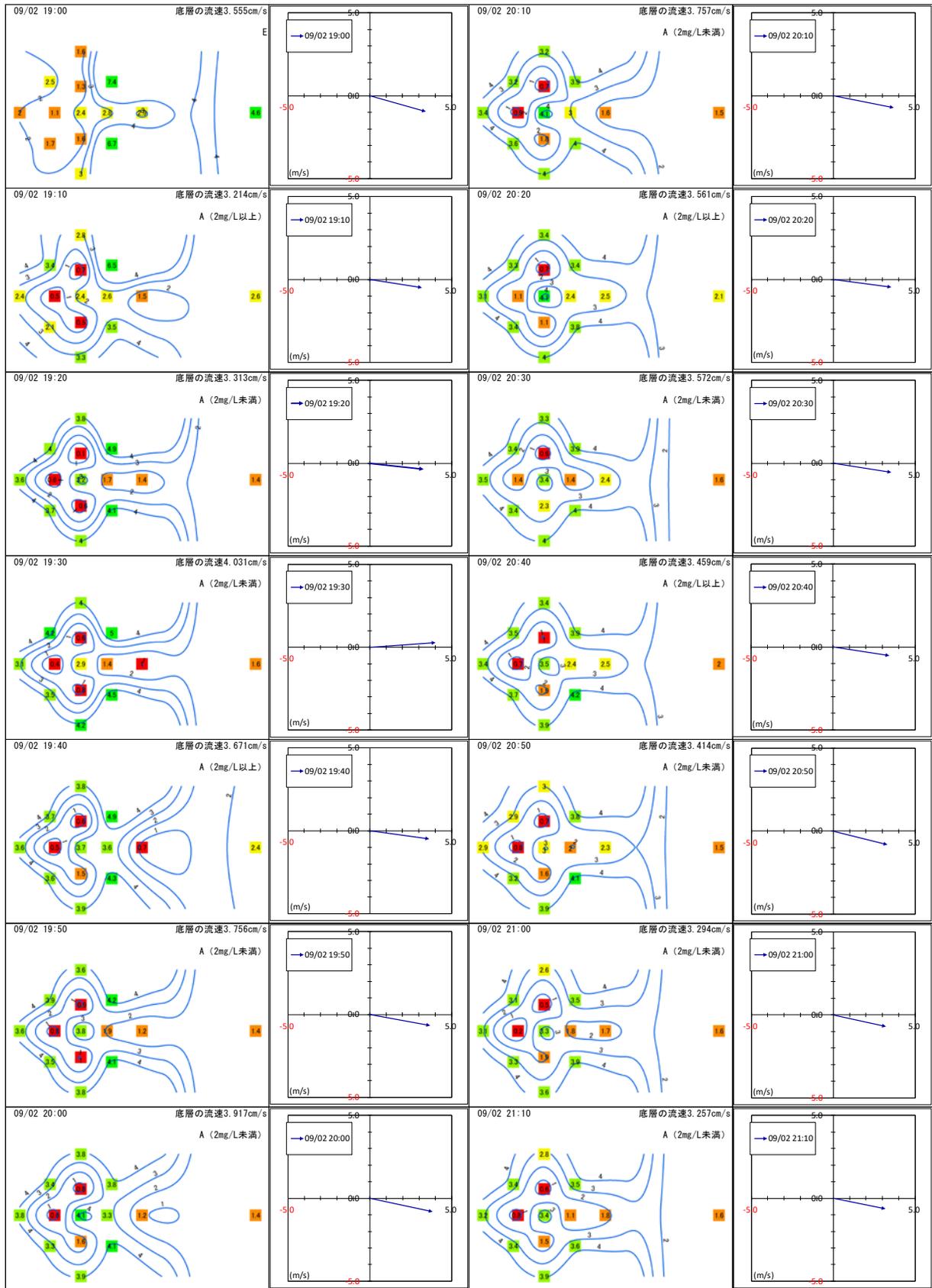
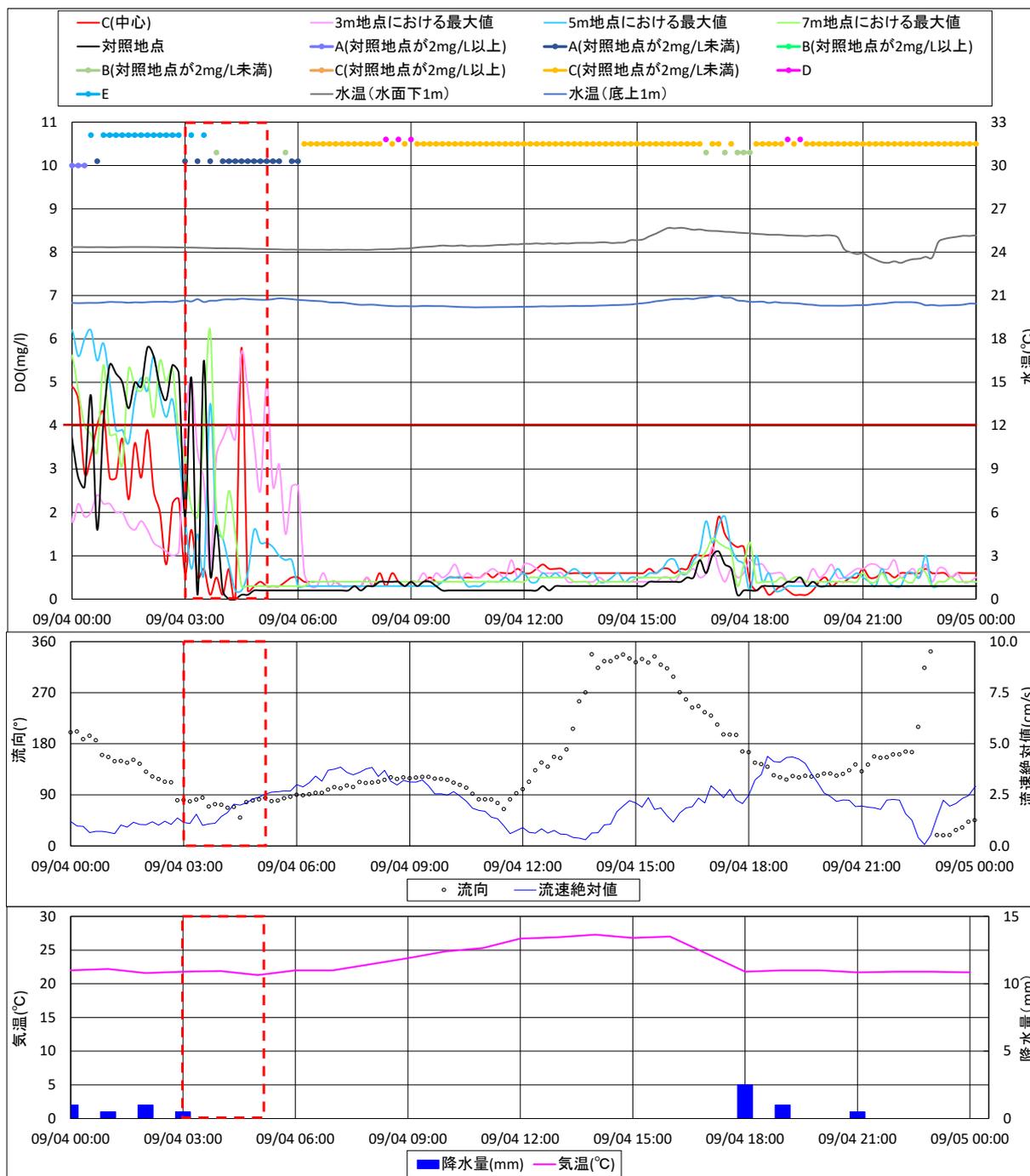


図 4.42 底層溶存酸素量の平面分布  
(9/2 19:00 ~ 9/2 21:10) : 効果大きい





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.43 底層溶存酸素量の経時変化 (9/4 0:00 ~ 9/5 0:00) : 効果が大きい

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が短時間に大きく変動することや、溶存酸素量の上昇地点がめまぐるしく移り変わっていることから、ナノバブル発生装置の効果以外の要因（湖水の流動に伴う調査対象範囲外からの酸素供給）も考えられるが、図 4.47 の点線赤枠の時間帯に比べて流速は少ないことから、3m 範囲の溶存酸素量の上昇はナノバブル発生装置の効果であると考えられる。

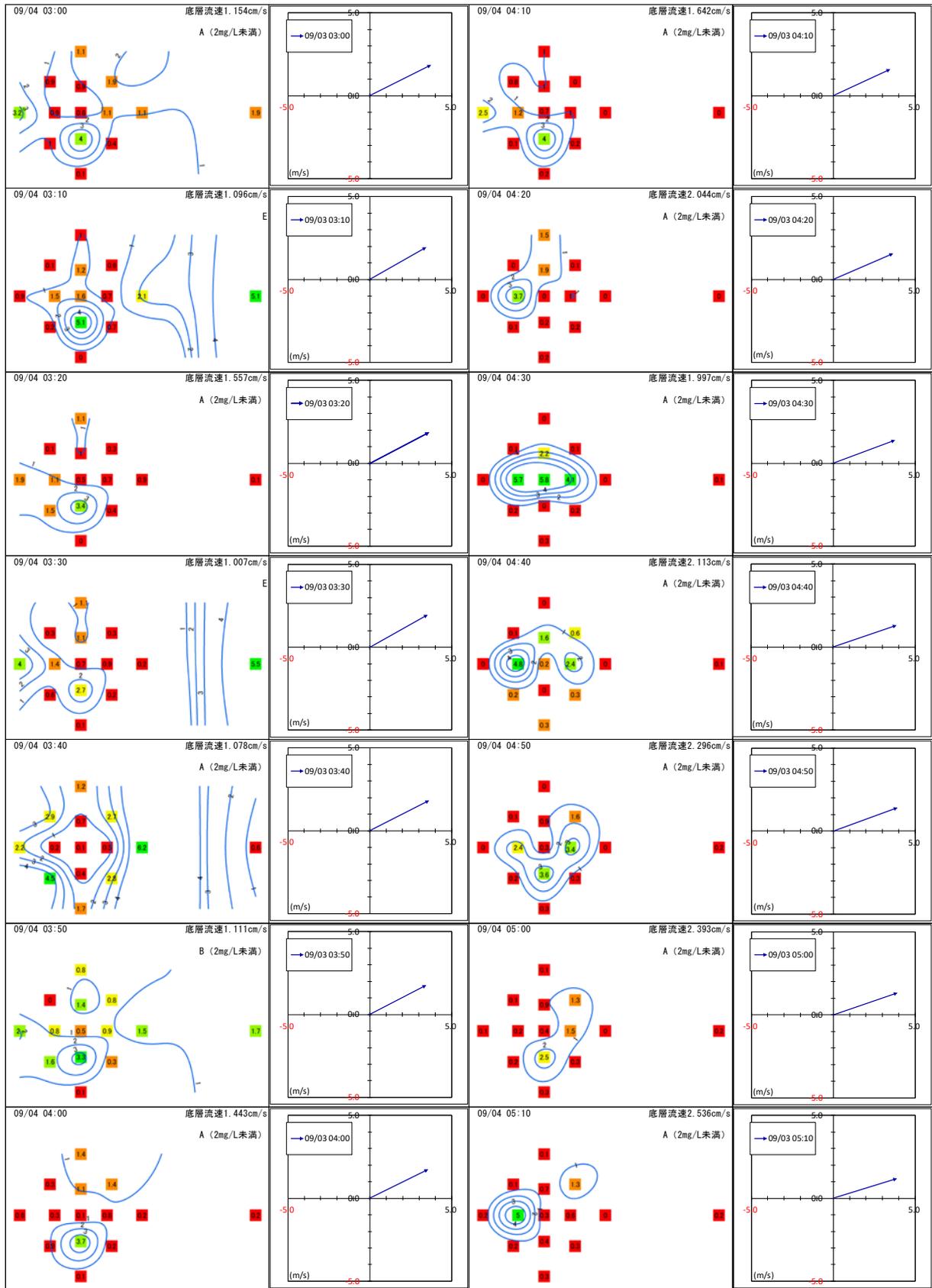
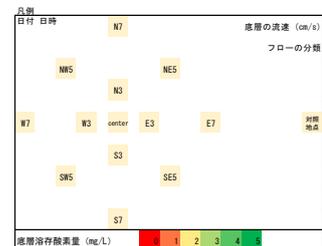
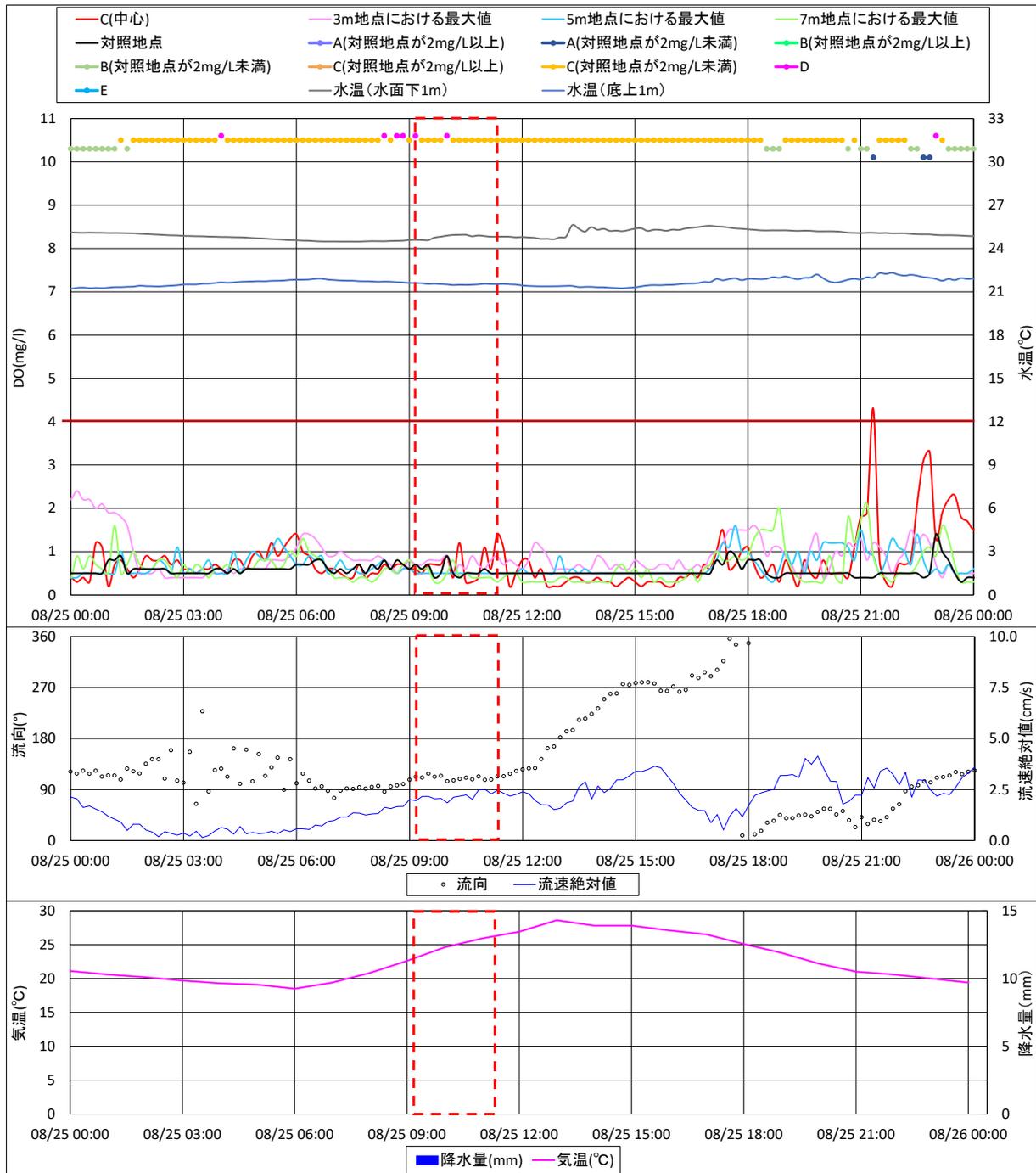


図 4.44 底層溶存酸素量の平面分布  
(9/4 03:00 ~ 9/4 05:10) : 効果大きい





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.45 底層溶存酸素量の経時変化 (8/25 00:00 ~ 8/26 00:00) : 効果なし

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が約 1mg/L 以下と低く、流速も小さいため、C 地点（中心）の溶存酸素の上昇はナノバブル発生装置の効果であると考えられるが、その効果はわずかで広がっていない。

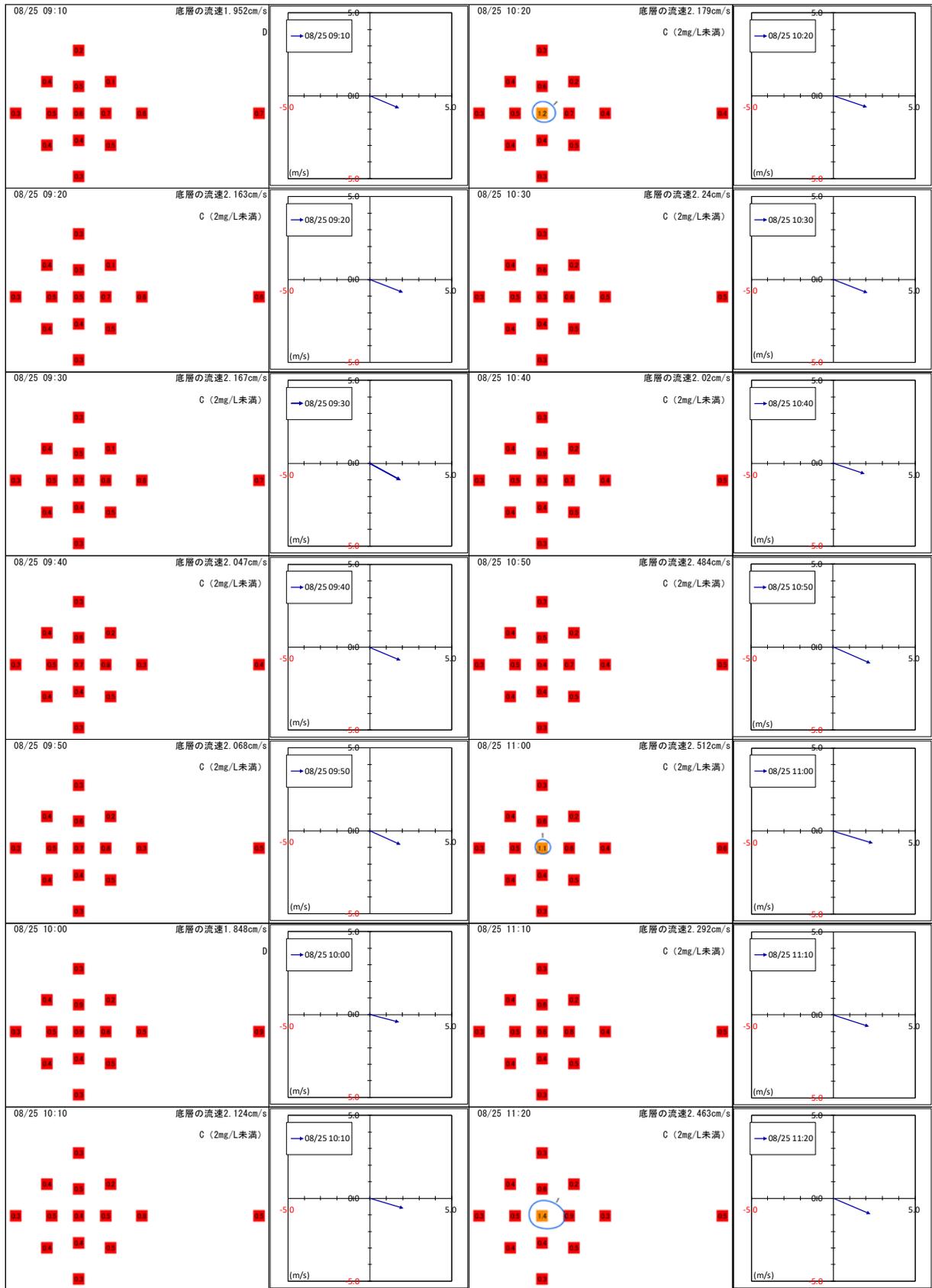
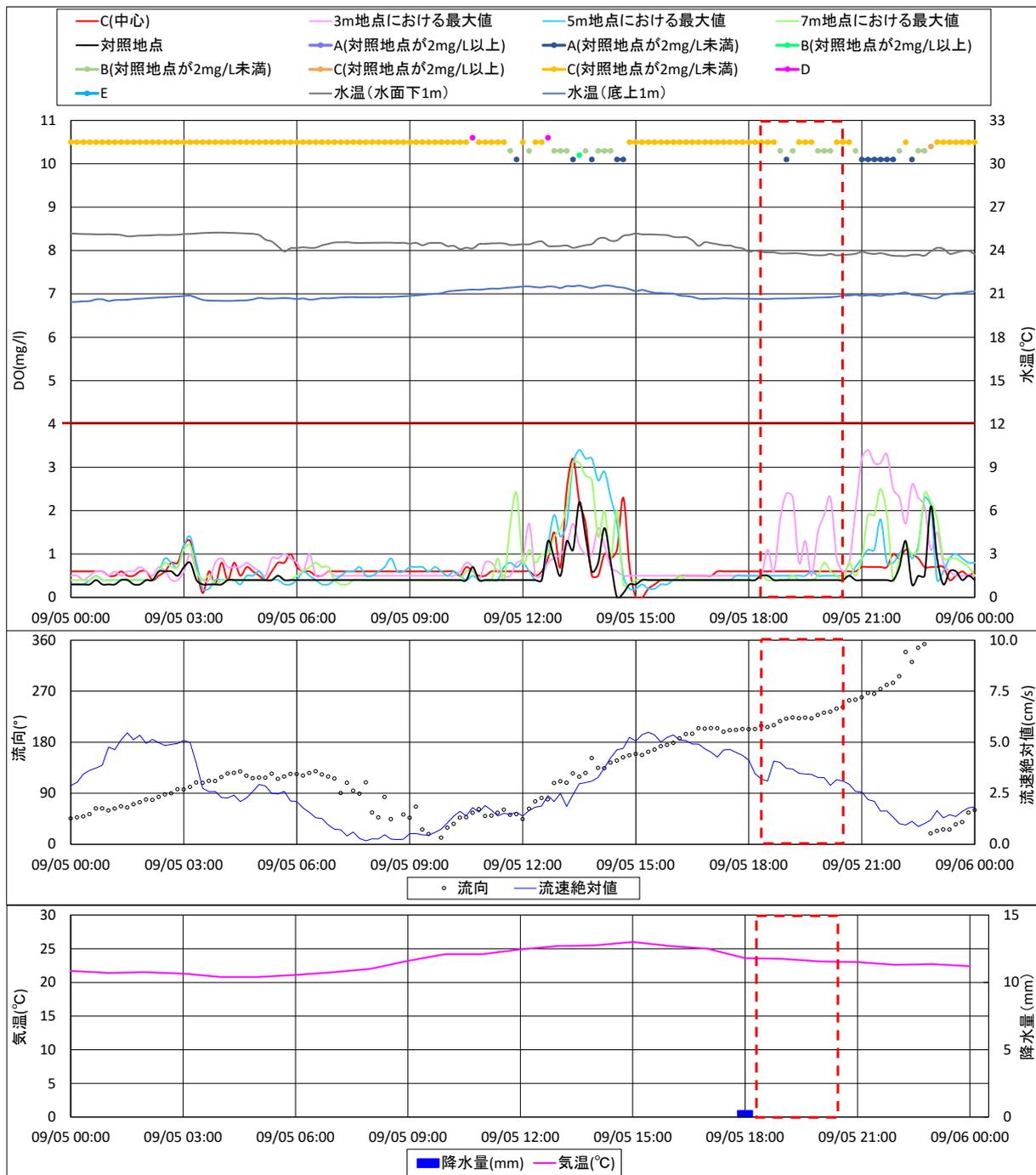


図 4.46 底層溶存酸素量の平面分布  
(8/25 9:10 ~ 8/25 11:20) 効果なし





備考：赤枠は次ページに示す図の時間帯である。

図 4.47 底層溶存酸素量の経時変化 (9/5 0:00 ~ 9/6 0:00) : 効果なし

※：点線の赤枠で示した時間帯では、対照地点の溶存酸素量が約 1mg/L 以下と低く、3 m 範囲の溶存酸素の上昇はナノバブル発生装置の効果であると考えられるが、その効果は極めて限定的であった。

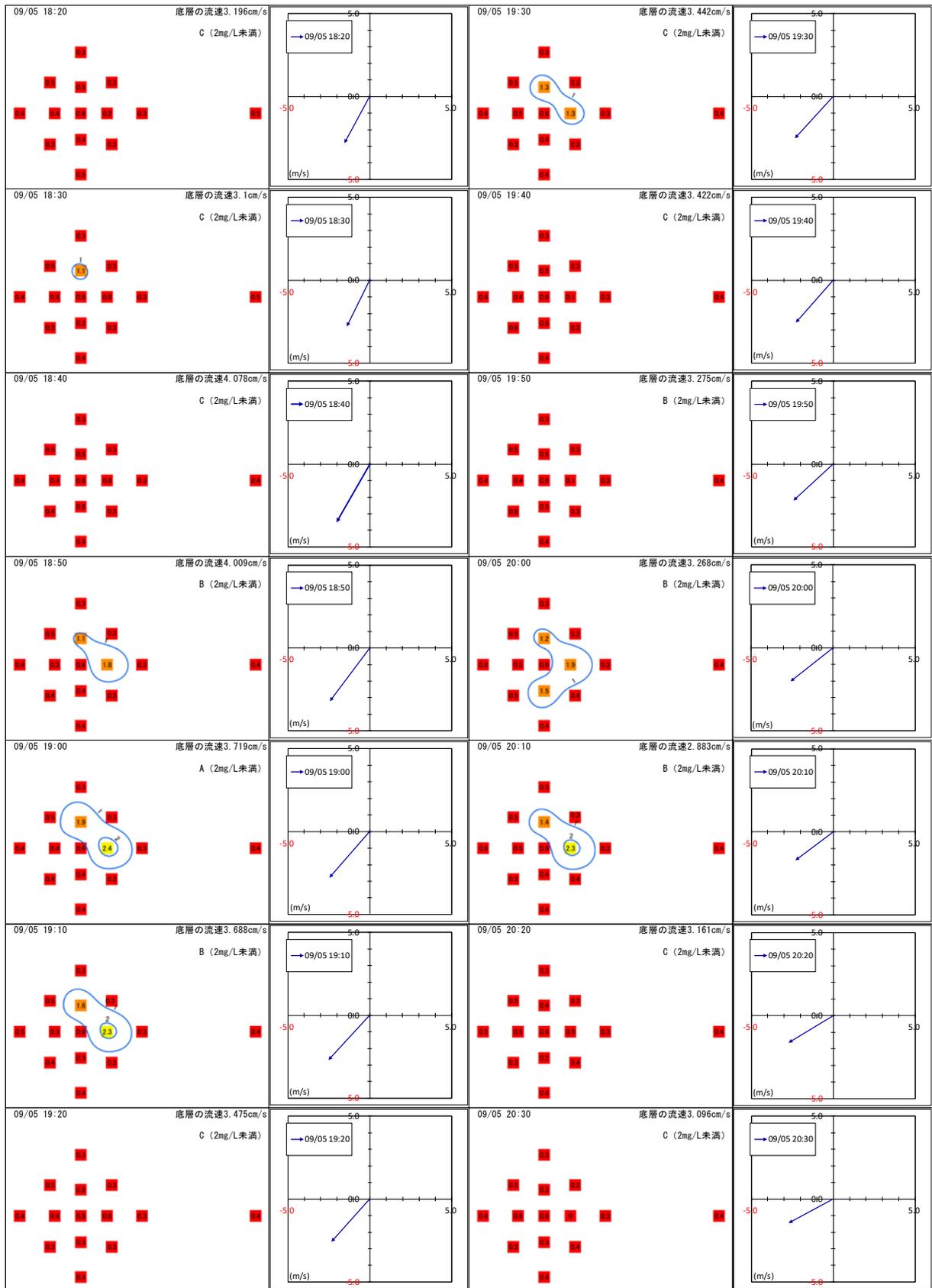
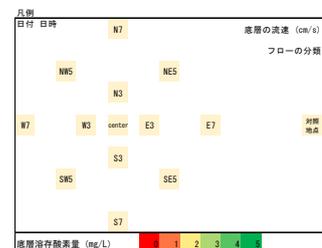


図 4.48 底層溶存酸素量の平面分布  
(9/5 18:20 ~ 9/5 20:30) : 効果なし

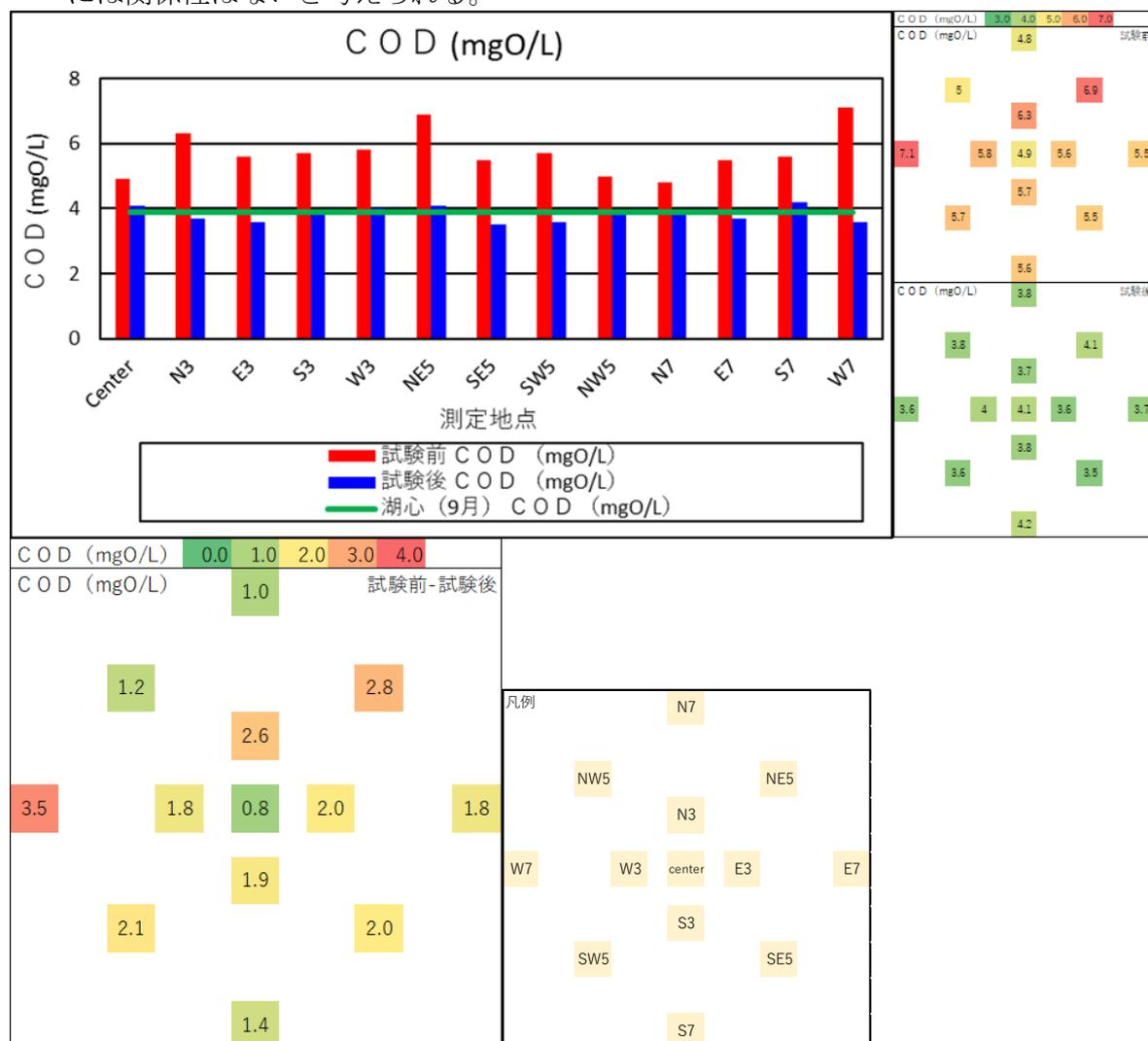


#### 4.4.3 水質（底層溶存酸素量以外）：試験前と試験後の比較

ナノバブル発生装置の実証試験前後の COD の調査結果の比較は図 4.49 に示すとおりである。また、諏訪湖の公共用水域水質測定結果と実証試験前後の COD の比較及び信州大学で実施された湖心の TOC（全有機炭素）及び DOC（溶存有機炭素）の測定結果は図 4.45 に示すとおりである。

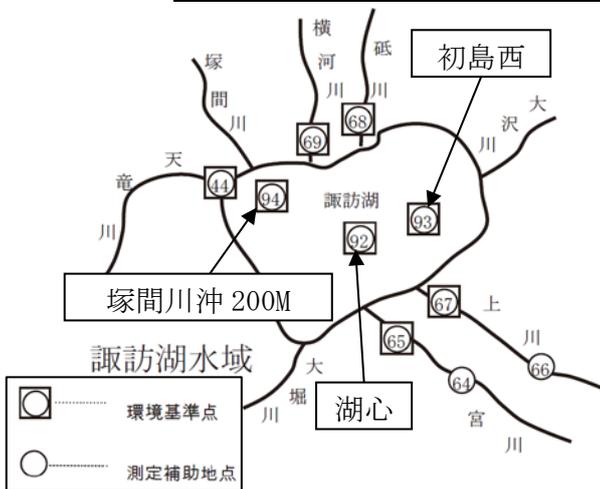
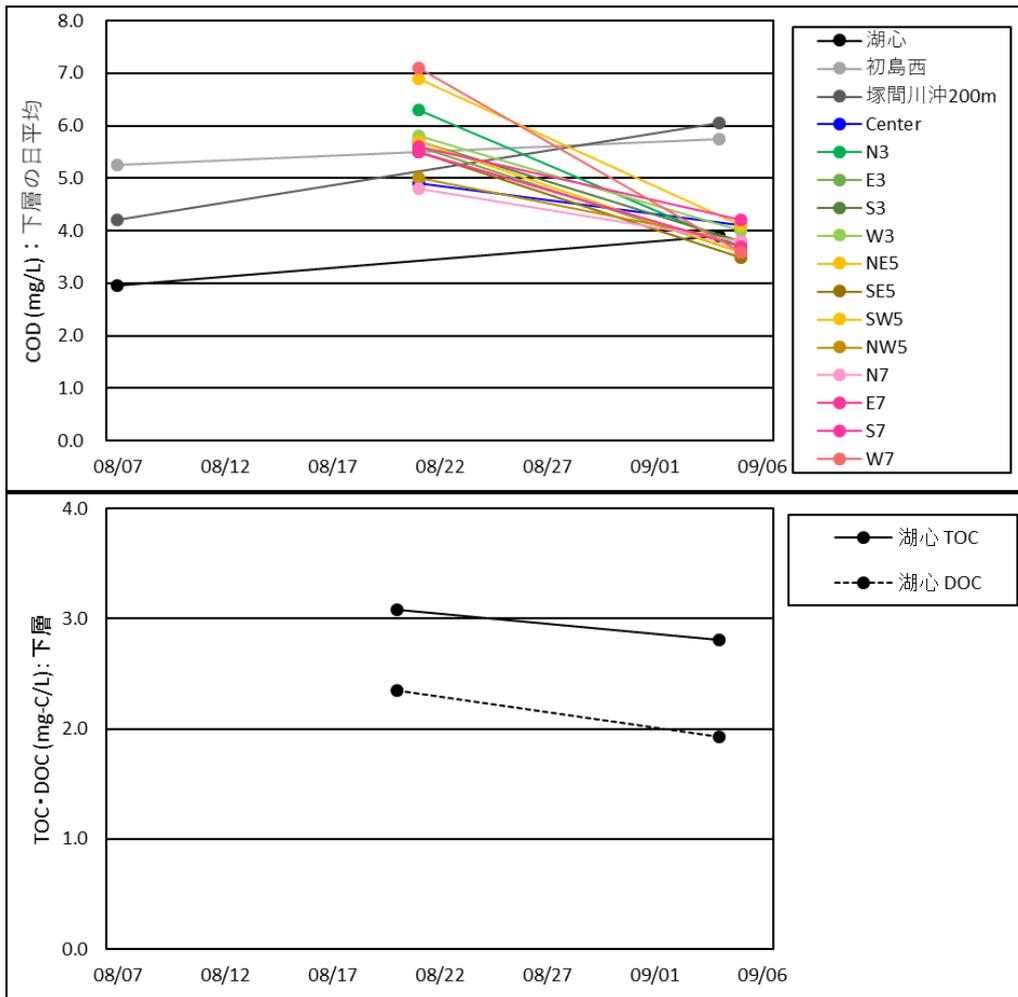
COD は、水温は大きく変化していないが、実証試験前後で低下が認められた。また、ナノバブル発生装置の影響が及ばない湖心の TOC 及び DOC の測定結果においても本業務の期間中に低下が認められた。したがって、この実証試験前後の COD の低下はナノバブル発生装置の稼働による効果ではないと推定される。

ナノバブル発生装置の実証試験前後の pH、酸化還元電位の調査結果の比較は図 4.51 に示すとおりであり、実証試験前後の差が小さいため、ナノバブルの効果とは言い難いと考えられる。また、実証試験前後の酸化還元電位と信州大学で実施された湖心の SS 濃度（浮遊物質量）との関係は図 4.52 に示すとおりであり、酸化還元電位と SS との間には関係性はないと考えられる。



備考：湖心のデータは下層（湖底上 0.5m）の日平均値である。調査は月 1 回で上旬に実施されており、9 月のデータは試験後の調査の 1 日前であった。8 月のデータは試験前と約 2 週間ずれているため、示していない。  
 出典：湖心のデータは、「公共用水域水質調査結果」（長野県）より作成

図 4.49 実証試験前後の COD の比較

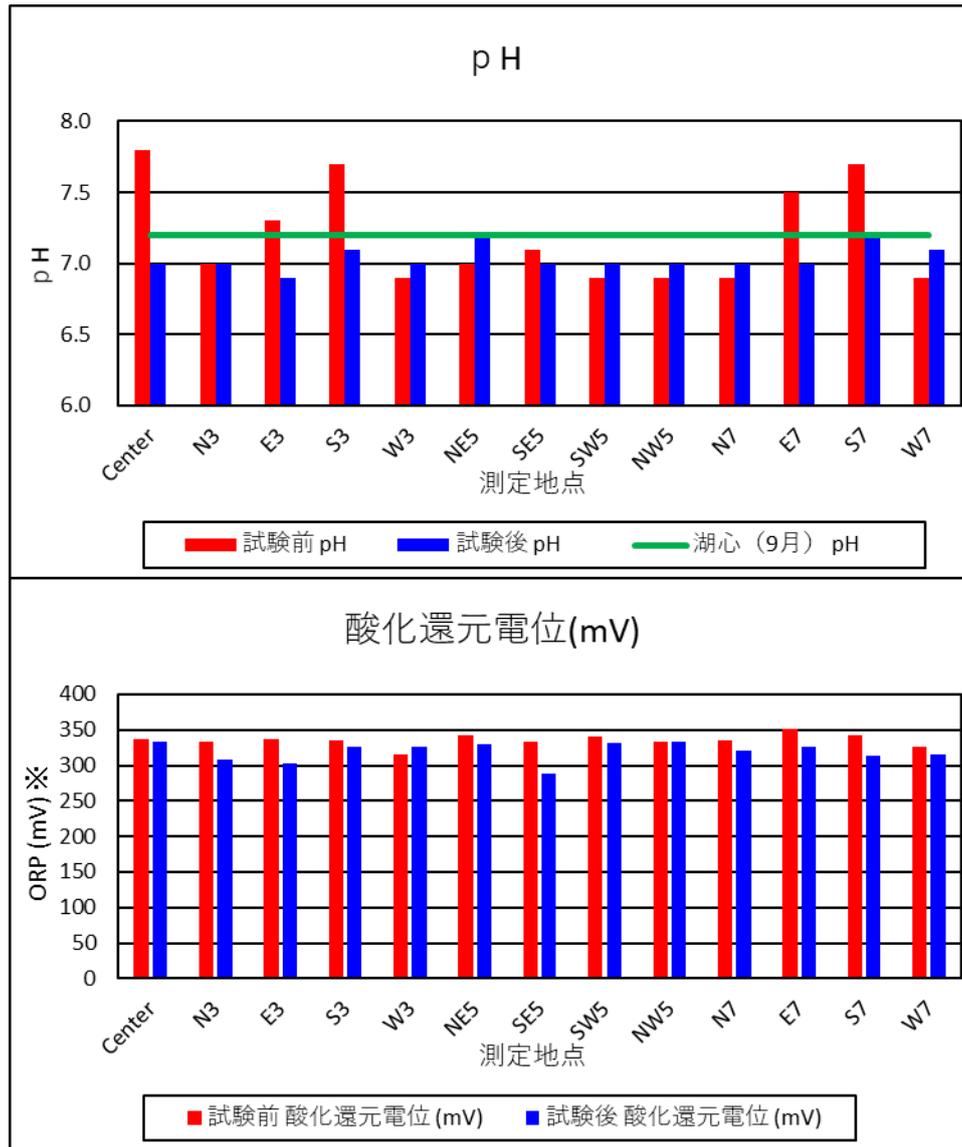


備考：各調査の日付は、下記に示すとおりである。

試料	地点	実証試験前	実証試験後
COD	湖心	8月7日	9月4日
	初島西		
	塚間川沖200m		
	調査範囲 (7mの範囲内)		
TOC	湖心	8月20日	9月4日
DOC	湖心	8月20日	9月4日

出典：湖心・初島西・塚間川 200m のデータは、「公共用水域水質調査結果」(長野県) より作成  
TOC・DOC は、信州大学提供資料より作成

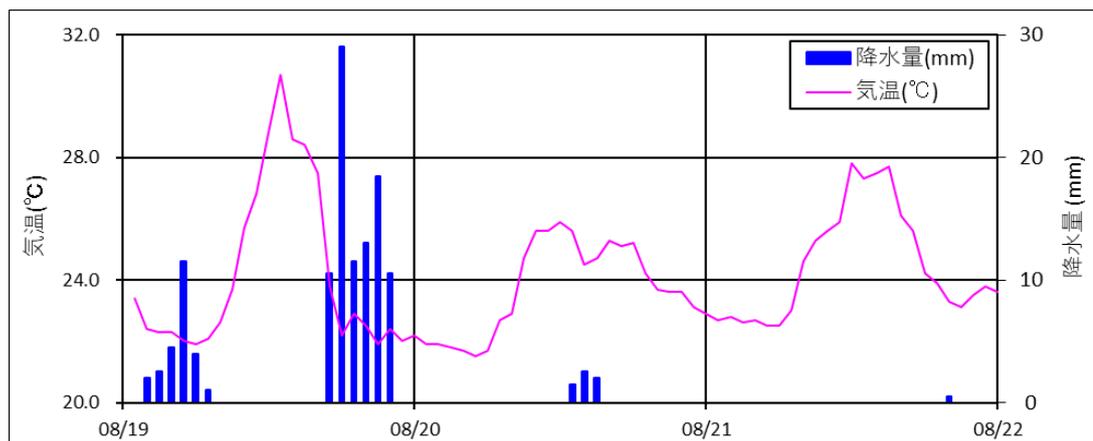
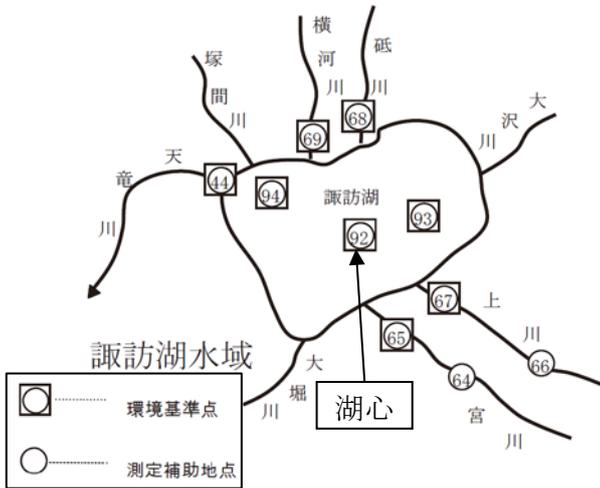
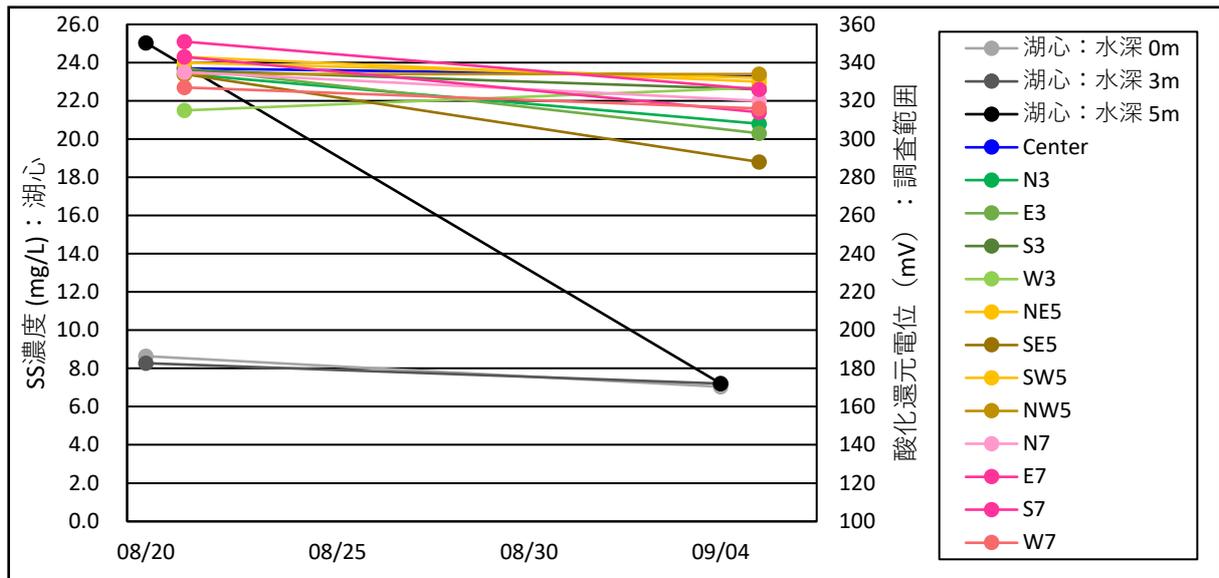
図 4.50 バックグラウンドとの比較 (COD)



備考：湖心のデータは下層（湖底上 0.5m）の日平均値である。湖心での調査は月 1 回で上旬に実施されており、9 月のデータは試験後の調査の 1 日前であった。8 月のデータは試験前と約 2 週間ずれているため、示していない。

出典：湖心のデータは、「公共用水域水質調査結果」（長野県）より作成

図 4.51 実証試験前後の pH 及び酸化還元電位の比較



- 備考：1. 試料について、湖心がSS濃度(mg/L)であり、調査範囲(7mの範囲内)は酸化還元電位(mV)である。また、湖心のSS濃度は8/20と9/4に、調査範囲(7mの範囲内)の酸化還元電位は8/21と9/5に実施した。
2. 調査範囲(7mの範囲内)における水深は、湖底上0.75mである。なお、調査地点の全水深が約5.8mであるため、水深は約5.05mである。
3. 酸化還元電位は2回測定の平均値を報告値とする。
4. 8/19の夜の降水量が多く、河川水流入が増えたため、8/20のSS濃度における調査結果では高い値が検出された。

出典：湖心・初島西・塚間川200Mのデータは、「公共用水域水質調査結果」(長野県)より作成

図 4.52 バックグラウンドとの比較 (SS濃度と酸化還元電位)

#### 4.4.4 底質：試験前と試験後の比較

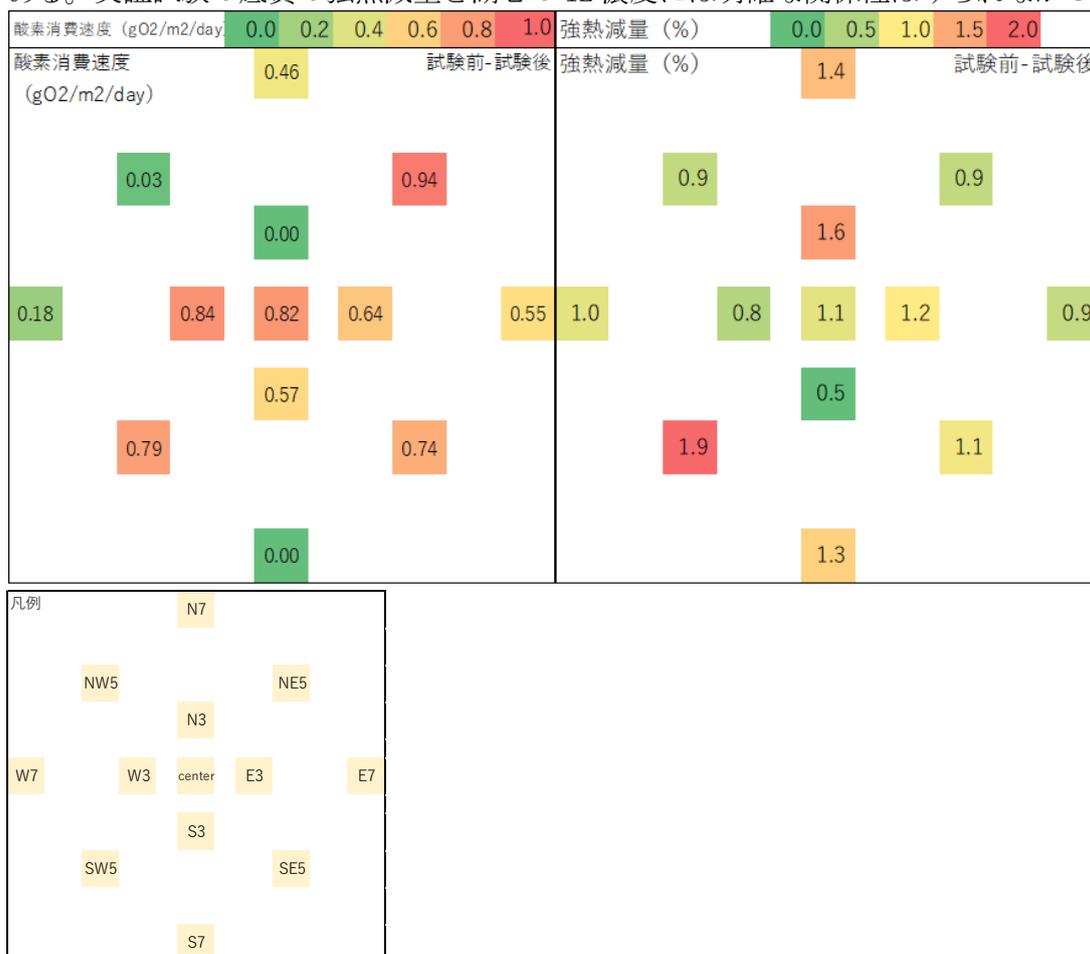
ナノバブル発生装置の実証試験前後の底質の調査結果の比較は図 4.53 に示すとおりである。

酸素消費速度 (SOD) は  $0.00 \sim 2.35 \text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  の減少が見られ、強熱減量は 1%前後ではあるが減少が見られたことから、底質に含まれる有機物の減少が示唆される。

酸素消費量について、 $0.8 \text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  以上の減少が見られた地点は、NE5、W3、center 及び SW5 であった。また、強熱減量について、1.5%以上の減少が見られた地点は、SW5 及び N3 であった。この低下はナノバブル発生装置により酸素が供給されたため、底質中の有機物が分解 (減少) することが示唆されたが、調査対象範囲外からの影響を受けている可能性もある。

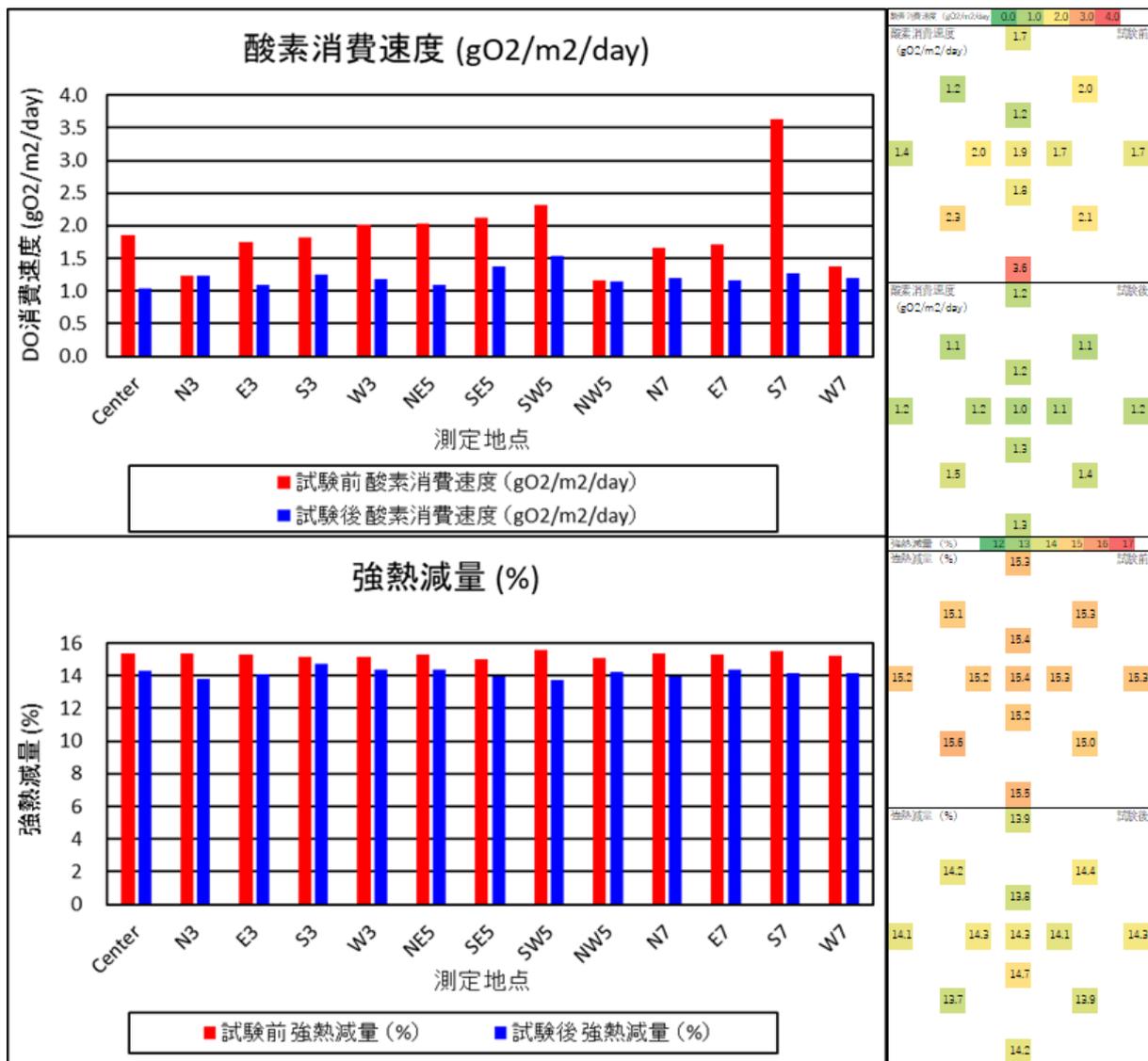
なお、ナノバブル発生装置から発生する水流により底質が移動する等の影響が懸念されたことから、3m地点における水流の流速の試算を行った。その結果は表 4.12 に示すとおりである。試算結果より、3m地点では  $0.03 \text{cm/s}$  となり、湖内の流速 (図 4.29 参照) と比較しても非常に遅いことから、ナノバブル発生装置による影響はほとんどないと考えられる。

次に、湖水の強熱減量 (IL) 濃度と底質の強熱減量との比較は図 4.54 に示すとおりである。実証試験の底質の強熱減量と湖心の IL 濃度には明確な関係性はみられなかった。



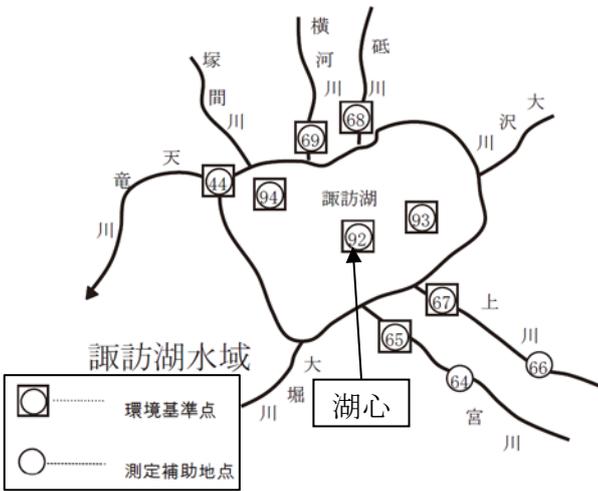
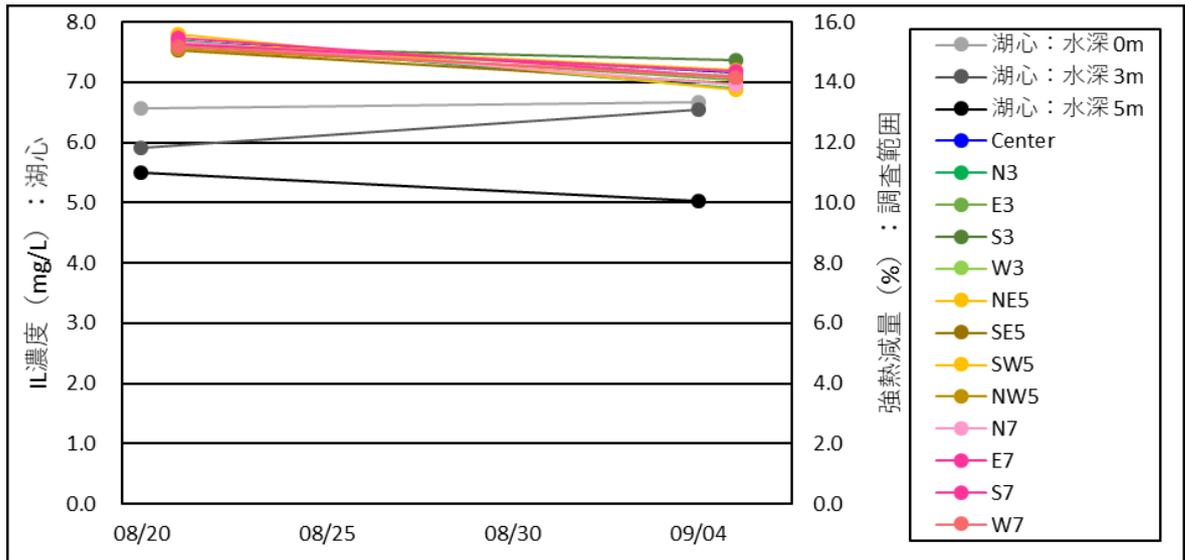
出典：強熱減量は、信州大学提供資料より作成

図 4.53 (1) 実証試験前後の底質の比較



備考：酸化還元電位は2回測定の平均値を報告値とする。  
 出典：強熱減量は、信州大学提供資料より作成

図 4.53 (2) 実証試験前後の底質の比較



- 備考：1. 試料について、湖心がIL濃度 (mg/L) であり、調査範囲 (7mの範囲内) は強熱減量 (%) である。また、湖心のIL濃度は8/20と9/4に、調査範囲 (7mの範囲内) の強熱減量は8/21と9/5に実施した。
2. このIL濃度とは、まず、試料水をろ過後、増量重量はSS量としてろ過量で除してSS濃度とし、そのフィルターを電気炉で強熱し、減少重量をSSの強熱減量(IL)とし、ろ過量で除してしたものである。
3. 調査範囲 (7mの範囲内) における水深は、湖底上0.75mである。なお、調査地点の全水深が約5.8mであるため、水深は約5.05mである。

出典：強熱減量は、信州大学提供資料より作成

図 4.54 湖水の強熱減量 (IL) 濃度と底質の強熱減量との比較

表 4.12 ナノバブル発生装置で発生する水流の流速の試算

	散水ノズル 直近	3m地点
散水面積 (m <sup>2</sup> )	0.13	9.42
流量 (m <sup>3</sup> /min)	0.16	0.16
流速 (cm/sec)	2.12	0.03

備考：1. 散水面積は、散水ノズル直近ではそのノズルの直径を底面とする円柱（高さ 0.5m=湖底からの距離）の側面の面積である。

2. 流量はポンプの吐出し量である。

3. 流速は、流量を散水面積で除した値である。

#### 4.4.5 まとめ

本業務における改善効果の検証結果は以下のとおりである。

##### <底層溶存酸素量>

- ・ナノバブル発生装置の稼働期間中に、調査範囲（7mの範囲）内に対照地点との差が1mg/L以上の地点が1地点以上ある割合は25%程度であった。また、対照地点との差が2mg/L以上の地点が1地点以上ある割合は11%程度であった。
- ・調査結果より、底層溶存酸素量の改善効果は中心から7m程度まで広がっている場合もあるが、主に3m範囲に頻度良く見られた。その効果は流向・流速と底層溶存酸素量との関係に明確な傾向はみられなかった。

##### <底層溶存酸素量以外の水質>

- ・調査範囲内のCODは、実証試験前後で低下したが、他機関（信州大学）が湖心で実施したTOC及びDOCの調査結果において、両項目とも同様の低下傾向が確認されたことから、CODの低下は、ナノバブル発生装置による効果ではないと推定される。
- ・また、pH及び酸化還元電位は、実証試験前後で大きな変化は確認できなかった。

##### <底質>

- ・酸素消費速度及び強熱減量ともに、改善効果（有機物の減少）がみられた。ナノバブルはその特性から底層において漂う可能性があることから、ナノバブルの影響により底質の改善された可能性があることが示唆された。

##### <酸素収支>

- ・他機関（信州大学）が実施した底質の分析結果のうち、8月21日及び9月5日の強熱減量及び含水率は表4.13、有機物分解量は表4.14に示すとおりである。
- ・調査範囲（7m範囲）内の底質における有機物分解量の平均値は69.7g/m<sup>2</sup>であり、16日間の調査範囲内（面積：153.86m<sup>2</sup>）における有機物分解量は10,731gと推計された。この有機物分解量を用いて、有機物の分解で消費された酸素量を算出すると28,616gであった。
- ・次に、水中における酸素消費量について試算する。「諏訪湖貧酸素及び底質改善効果検証実験 成果報告書」（平成30年12月27日、（株）信州みんなの自然エネルギー）に記載の酸素消費速度は1mg/L/dayを用いて算出すると、調査範囲（7m範囲）内の酸素消費量は、層厚を1mとした場合は154g/日、層厚を2mとした場合は308g/日となる。
- ・また、実証試験で底層溶存酸素量の増加分のみの酸素量を算出（調査範囲（7m範囲）内の各調査地点の溶存酸素量と対照地点との差の平均値（マイナスは0とした）に層厚を乗じて算出）した結果、層厚1mの場合は3,986g/日、層厚を2mとした場合は7,973g/日と試算された。
- ・16日間で供給された酸素量は263,314gであることから、有機物の分解で消費された酸素量、水中における酸素消費量、底層溶存酸素量の増加分の酸素量は16日間合計で層

厚 1m の場合は 94,857g、層厚 2m の場合は 161,099g となり、供給された酸素量の余剰分（調査範囲外への流出分も含まれると推測）は層厚 1m の場合は 168,457g（1 日当たり 10,529g/日）、層厚 2m の場合は 102,215g（1 日当たり 6,388g/日）となった（酸素収支は図 4.55 参照）。

- ・上記の結果について、層厚（湖底上からどの程度まで酸素が供給されるか）、水中の酸素消費量は有機物量、生物量により左右されることがあるため、算出した余剰分がすべて調査範囲外に流出したかどうかは明確ではない。

表 4.13 8 月 21 日及び 9 月 5 日の強熱減量及び含水率

調査地点	8月21日	9月5日	調査地点	8月21日	9月5日
	強熱減量 (%)	強熱減量 (%)		含水率 (%)	含水率 (%)
C	15.4	14.3	C	87.70	86.93
N3	15.4	13.8	E3	87.63	88.50
E3	15.3	14.1	S3	87.17	87.67
S3	15.2	14.7	W3	88.39	87.69
W3	15.2	14.3	N3	87.76	87.38
NE5	15.3	14.4	NE5	88.10	87.70
SE5	15.0	13.9	SE5	86.48	88.40
SW5	15.6	13.7	SW5	87.72	88.16
NW5	15.1	14.2	NW5	88.81	87.14
N7	15.3	13.9	E7	87.23	87.81
E7	15.3	14.3	S7	89.05	88.18
S7	15.5	14.2	W7	89.14	89.02
W7	15.2	14.1	N7	87.98	88.10

表 4.14 本業務における有機物分解量

調査地点	8月21日	9月5日	8月21日	9月5日	8月21日	9月5日	8月21日	9月5日	有機物分解量 (g/m <sup>2</sup> )
	含水比 (%)	含水比 (%)	見かけ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	見かけ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	重量深度 (g/m <sup>2</sup> )	重量深度 (g/m <sup>2</sup> )	有機物量 (g/m <sup>2</sup> )	有機物量 (g/m <sup>2</sup> )	
C	713	665	0.133	0.142	6,640	7,089	1,020	1,014	-5.7
E3	708	770	0.134	0.124	6,683	6,177	1,027	851	-176.3
S3	679	711	0.139	0.133	6,951	6,659	1,061	938	-123.0
W3	761	713	0.125	0.133	6,241	6,644	948	978	30.0
N3	717	692	0.132	0.137	6,603	6,829	1,002	980	-22.7
NE5	741	713	0.128	0.133	6,405	6,637	979	955	-24.2
SE5	639	762	0.147	0.125	7,360	6,234	1,107	868	-238.6
SW5	714	745	0.133	0.127	6,629	6,372	1,034	875	-159.0
NW5	794	678	0.120	0.139	5,998	6,967	906	990	83.5
E7	683	720	0.138	0.131	6,916	6,575	1,060	915	-145.6
S7	813	746	0.117	0.127	5,859	6,362	894	913	18.9
W7	821	810	0.116	0.118	5,806	5,879	898	833	-65.7
N7	732	741	0.130	0.128	6,479	6,405	984	906	-78.2
								平均値	-69.7

注 1) 比重は 2.5g/cm<sup>3</sup>、底質の深さを 5cm と仮定した。

2) 含水比=含水率/(100-含水率)×100

3) 見かけの密度=1/(1/比重+含水比/100)

4) 重量深度=見かけの密度×底質の深さ

5) 有機物量=重量深度\*強熱減量

6) 有機物分解量=8月21日有機物量-9月5日有機物量

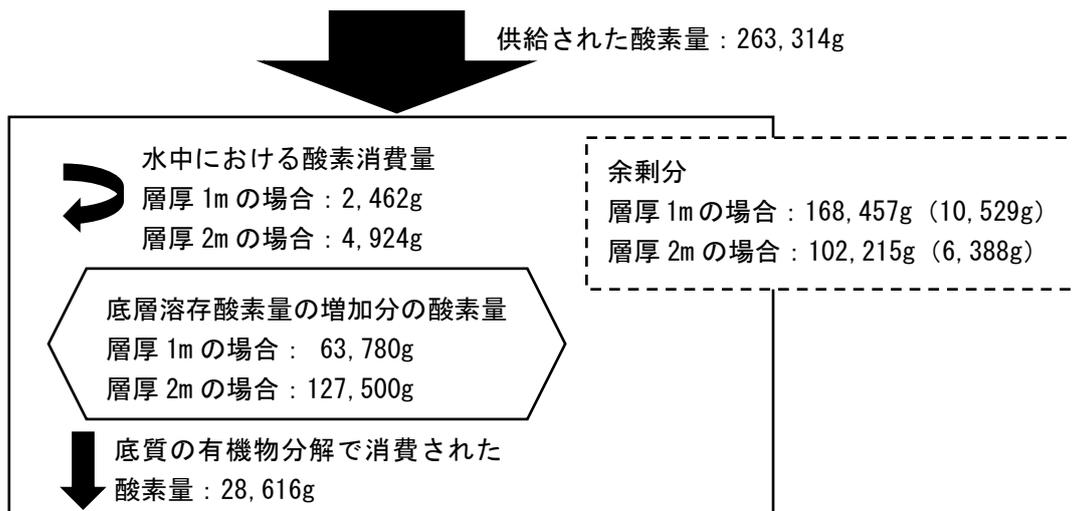


図 4.55 実証試験期間中（16 日間）における酸素収支

#### 4.5 他の酸素供給装置を用いた改善手法との比較

他の機械力を用いた貧酸素対策との比較を行うため、収集した文献における水域名と改善手法の一覧は表 4.15 に、他の機械力を用いた改善手法の概要と酸素供給量の比較は表 4.16 及び表 4.17 に示すとおりである。

表 4.15 収集した文献における水域名と改善対法の一覧

No.	対象水域名	改善対策手法
1	中海（米子湾）	高濃度酸素水供給 WEP システム
2	三瓶ダム湖	高濃度酸素水供給 WEP システム
3	ダム貯水池（名称不明）	高濃度酸素水供給 WEP システム

表 4.16 酸素供給量の比較

No.	1	2	3	本業務
対象水域名	中海（米子湾） [汽水湖]	三瓶ダム湖	ダム貯水池	諏訪湖
改善対策 手法の分類	高濃度酸素水供給 WEP システム			ナノバブル
酸素供給量	103,773kg 2007: 7,915kg, 2008: 46,610kg, 2009: 49,248kg	20,532kg	85,068kg 2008: 17,280kg 2009: 67,788kg ※溶存酸素濃度: 50mg/L と想定して算出	263kg
	154kg/日 (120m <sup>3</sup> /h の装置) 171kg/日 (150m <sup>3</sup> /h の装置)	315kg/日	144kg/日 (120m <sup>3</sup> /h の装置) 108kg/日 (90m <sup>3</sup> /h の装置)	16.5kg/日
稼働期間	2007: 8/5 ~10/1 (延べ 68 日) 2008: 5/16~10/22 (延べ 160 日) 2009: 4/16~10/1 (延べ 169 日)	2006 年 4~7 月 (延べ 87 日)	2008: 8/27~12/24 (延べ 120 日) 2009: 3/31~12/24 (延べ 269 日)	2019 年 8 月 21 日~ 9 月 6 日 (湖底に約 16 日間連続)
溶存酸素の 改善効果	9mg/L =10mg/L-1mg/L	20mg/L =30mg/L-10mg/L	2008 年 1 日後 (St. 1): 30mg/L=30mg/L-0mg/L 13 日後 (水深 20m 以深): 20mg/L 以上 ※装置の上昇に伴い最下 層では 0mg/L まで低下, 装置を最下層に移動後, 約 3 週間後には 10mg/L まで上昇 2009 年 8 日後 (酸素水供給水深): 15mg/L 以上 7/16 (水深 20m 以深): 25mg/L 以上	平均が最大の地点 (SE5): 0.30mg/L=2.24mg/L-1.94mg/L 中心 : 0.26mg/L=2.20mg/L-1.94mg/L 全ての平均: 0.01mg/L=1.95mg/L-1.94mg/L
※1 上記に示しているのは、下記の式に当てはめた場合の値である。 <b>溶存酸素の改善効果 (mg/L)</b> =稼働後の濃度 (mg/L) -稼働前 (又は対照地点) の濃度 (mg/L) ※2 中海、三瓶ダムは諏訪湖と異なり窪地であるため、大きな効果がみられている。				

表 4.17 (1) 他の機械力を用いた改善手法の概要

No.	1	
対象水域名	中海（米子湾）	
対照水域の情報	宍道湖-中海-日本海へと連続した斐伊川水系の一部である。最大幅は約3km、最も狭いところで約0.5km湾入り口から湾奥までおよそ9kmである。 面積 : 92,000,000 m <sup>2</sup> 容積 : 521,000,000 m <sup>3</sup> 平均水深（最小）: 5.4m 平均水深（最大）: 8.4m	
分類	高濃度酸素水供給 WEP システム	
内容	大気から濃度90%以上の酸素ガスを精製する。 底層付近に設置した気液溶解装置へ送られ、底層水と激しく混合・攪拌し、高濃度酸素水を製造する。 気液溶解装置は、2007年には120 m <sup>3</sup> /h仕様を1基、2008年及び2009年には150 m <sup>3</sup> /h仕様を追加設置し、合わせて2基使用した。酸素ガスは気液溶解装置それぞれの仕様に対して4.5N m <sup>3</sup> /h、5.0N m <sup>3</sup> /h供給した。 試験実施区域と比較対象区域は400m程離れており、水深12m程度の丘によって、さえぎられている。	
改善効果	溶存酸素量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験区域では、長期にわたり底層部の溶存酸素量を10mg/L以上に保持した。</li> <li>・2008～2009年では、底層と中層で同時稼働させていたので、底層と中層で溶存酸素量を保持することができた。対象区域では溶存酸素量がほとんど1mg/L以下であるが時折実験区域で供給した高濃度酸素水が潮流の影響を受けた衣装熊手到達することがあった。</li> <li>・2007年度：本装置から供給される高濃度酸素水の拡散速度は2～4mm/s程度であることから、潮流が拡散について支配的な因子となると考えられた。</li> <li>・2008年度：気液溶解装置委が中心とした半径50mの範囲では溶存酸素量が15mg/L以上に上昇した。</li> <li>・2009年度：気液溶解装置を中心とした半径70mの範囲内で溶存酸素量が15mg/L以上に上昇した。この時、層厚が3m程度であった。</li> </ul>
	範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2008年度：半径40mの範囲では溶存酸素量が14mg/L以上に上昇した。</li> <li>・2009年度：半径70mの範囲内で溶存酸素量が14mg/L以上に上昇した。</li> </ul>
	底質	底泥からの溶出抑制効果が認められた。
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SRP（リン酸態リン）濃度の減少が観測された。</li> <li>・脱窒活性の向上とDIN（溶存無機態窒素）の減少が観測された。</li> </ul>
効果がみられなかった項目	情報なし	
改善対策装置（施設）の費用	情報なし	

資料：「高濃度酸素水生成装置を用いる汽水湖貧酸素水塊の水質改善及び湖底の底質改善」（平成22年3月、清家泰（島根大学総合理工学部准教授））

表 4.17 (2) 他の機械力を用いた改善手法の概要

No.	2	
対象水域名	三瓶ダム湖	
対照水域の情報	島根県大田市三瓶町野城高平に位置する。 平均水深 : 10.7 m 最大水深 : 31.0 m 表面積 : 0.23 k m <sup>2</sup> 堆積 : 2,45,000 m <sup>3</sup> 夏季の深水層 (EL : 115m) の面積 : 83,000 m <sup>2</sup>	
分類	高濃度酸素水供給 WEP システム	
内容	10 m <sup>3</sup> /h の酸素ガスを供給できる。 陸上の酸素発生装置から供給される高純度酸素ガス (92%) と水圧条件下で混和され、水温や圧量に応じた溶解量まで酸素を溶かし込む装置。 余剰気泡は内部で分離され、無気泡状態の高濃度酸素水が底層へ供給される。	
改善効果	溶存酸素量	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダムサイトから 600m 上流まで高濃度酸素水が広がった。稼働時期の溶存酸素量は装置付近で 30mg/L であり、最も遠い到達点で 5~10mg/L であった。4 週間後にはダム湖底層全体の 8.7ha の面積を改善した。</li> <li>底層での溶存酸素増加量および消費量と供給酸素量から求めた本装置の酸素溶解効率は 82%~87%と見積もられた。</li> </ul>
	範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>600m 上流まで高濃度酸素水が広がった。</li> <li>3 週間後にはダム湖底層全体の 8.7ha の面積を改善した。</li> </ul>
	底質	情報なし
	その他	情報なし
効果がみられなかった項目	情報なし	
改善対策装置 (施設) の費用	情報なし	

資料：「高濃度酸素供給に伴う三瓶ダム湖底層水の酸素収支に関する研究 増木新吾，相崎守弘，坂本勝弘」  
 (平成 23 年 水環境学会誌 Vol.34, No.9, pp.115-123)

表 4.17 (3) 他の機械力を用いた改善手法の概要

No.		3
対象水域名		ダム貯水池
対照水域の情報		有効貯水量：約 6,400,000 m <sup>3</sup> 最大水深：約 30m 毎年貧酸素水塊が発生する。
分類		高濃度酸素水供給 WEP システム
内容		装置内外で水圧が一致するような構造。 水深の水圧を利用して酸素を溶解するため、吐出後の発砲を伴わない効率的な高濃度酸素水の供給が可能。 酸素発生装置により 90%以上の酸素濃度により酸素供給。 吐出する高濃度酸素水の溶存酸素濃度は 50~70mg/L。 気液溶解装置はダム堤体から 130m 上流と 900m 上流に設置。
改善効果	溶存酸素量	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度酸素水供給装置を用いてダム貯水池へ高濃度酸素水の供給を行った結果、水温躍層を維持したまま底層溶存酸素濃度を効果的に上昇させることが可能であった。</li> <li>ダム堤体から 600m 上流までの地点において、気液溶解装置付近の調査地点と同様の結果が見られたことから、気液溶解装置を適宜上下させることにより、水温躍層下の溶存酸素濃度を回復させることが可能であった。</li> </ul>
	範囲	ダム堤体から 500m 上流までの地点において、気液溶解装置付近の調査地点と同様の結果が見られたことから、底層に吐出された高濃度酸素水は広範囲にわたっていることが確認された。
	底質	情報なし
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度酸素水を供給することで、最下層の溶存態鉄濃度と溶存態ヒ素濃度が低下することが確認された。低下した溶存態鉄や溶存態ヒ素は、最下層の溶存酸素濃度が低下しても顕著な再溶出は見られなかった。また、溶存態鉄と溶存態ヒ素は同じ割合で増減する傾向が見られた。</li> <li>高濃度酸素水を最下層へ十分に供給することにより、溶存態マンガンの濃度を十分に低下させる可能性が示された。</li> <li>溶存態マンガンの濃度を低く保つためには装置の運転方法や藻類の大増殖対策について検討する必要がある。</li> </ul>
効果がみられなかった項目		情報なし
改善対策装置(施設)の費用		情報なし

資料：「ダム湖への高濃度酸素水の供給と金属濃度の低減効果 久岡夏樹，鈴木穰，南山瑞彦，若林健一，増木新吾」（平成 22 年、学会誌「EICA」第 15 巻 第 2・3 合併号）

#### 4.6 ナノバブル発生装置に係る総合評価及び課題

##### ●ナノバブル発生装置の稼働による改善効果等

- ・調査結果より、中心から調査範囲（7m範囲）において局所的な改善がみられた。また、底質の改善効果（酸素消費速度、強熱減量）が示唆された。
- ・しかし、これらの効果が実証試験の調査対象範囲外の影響を受けている可能性は否定できない。
- ・そのため、各調査地点の流向・流速を測定し、調査範囲内外からの水の流出入状況を把握したが、流向・流速と底層溶存酸素量の改善効果との関係は明確にならなかったが、この関係を明確にするためには湖水やナノバブルの流動についてより詳細な調査が必要と考えられる。
- ・加えて、ナノバブル発生装置の稼働による改善効果を更に明確にするためには、底質の分析項目として、強熱減量、含水率等、酸素の収支を算出する際に必要となる分析も必要となるほか、局所的な水域での実証試験もひとつの方法と考えられる。

##### ●他の機械力との改善効果の比較

- ・ナノバブル発生装置の稼働に関する費用（2019年8月21日～9月6日：16日間）は以下のとおりである。

項目	費用（円）：税抜
ナノバブル発生装置及び酸素発生装置の借用費用（設置作業費用含む）	2,500,000
台船、稼働・管理費用（燃料費設置作業費用含む）	1,106,000
合計	3,606,000

注）調査費用、調査結果の取りまとめ費用は含んでいない

- ・水域の状況や稼働日数が異なること、また、他の改善手法の費用に関する情報が収集できなかったことから、費用やエネルギー供給量の比較はできなかった
- ・本業務で実施した諏訪湖でのナノバブル発生装置による改善効果のエリアは限定的（半径7mの面積153.86m<sup>2</sup>）であり、仮に諏訪湖の水深5m以深の水域の面積（13.3km<sup>2</sup>に対して40%程度）に対してナノバブル発生装置により本業務と同様の改善効果を求める場合について試算した結果、ナノバブル発生装置は30,000台以上が必要になり、そのため費用は高額になると想定される。
- ・ただし、底質の改善効果がみられたことから、ナノバブル発生装置により局所的な水域（特に底質環境の改善が必要な水域）に対して、底層溶存酸素量及び底質の改善を図ることは可能と考えられる。

#### ■課題

- ・本業務で使用したナノバブル発生装置も含め他の機械力も同様であるが、底層溶存酸素量の低下が顕著である諏訪湖の湖心を中心とした沖合で底層溶存酸素量の改善対策を実施する場合、装置の電源の確保が課題としてあげられる。
- ・また、改善対策を実施する場合には、漁業への配慮（操業する機関・箇所に装置の設置はしない等）が必要である。