

令和2年度 諏訪湖内の流況調査業務

報 告 書

令和3年3月



～ 目 次 ～

1. 業務概要	1-1
1.1 業務目的	1-1
1.2 履行期間	1-1
1.3 業務の構成	1-1
1.4 諏訪湖における貧酸素水塊発生状況の概要	1-3
2. 流向流速等の測定	2-1
2.1 調査の概要	2-1
2.2 風向・風速測定結果	2-13
2.3 流向流速測定結果	2-24
2.4 水温・DO 連続測定結果	2-44
3. 気象状況が湖水の流動に与える影響の考察	3-1
3.1 湖内平面流況の推定	3-1
3.2 風向・風速と流向・流速の相関性について	3-7
3.3 貧酸素予測 AI による今年度の貧酸素水塊発生・解消状況の推定	3-14
4. 本業務のまとめ	4-1
5. 参考資料	5-1
5.1 有識者へのヒアリング	5-1
5.2 湖内流況推定結果	5-5
5.3 事業報告会への出席及び成果の説明	5-75

1. 業務概要

1.1 業務目的

本業務は、諏訪湖における貧酸素水塊の発生メカニズムの解明に向けた基礎データを収集するために、流向流速計を用いて諏訪湖内の水の流れを把握するとともに、諏訪湖上の風向風速等を調査して湖上の気象状況を把握し、湖上の気象状況が湖水の流動に与える影響について考察を行うものである。

1.2 履行期間

本業務の履行期間は、以下の通りである。

自 : 令和2年6月5日(金)

至 : 令和3年3月30日(火)

1.3 業務の構成

本業務の実施フロー及び業務構成・数量を図 1.1、表 1.1 に示す。

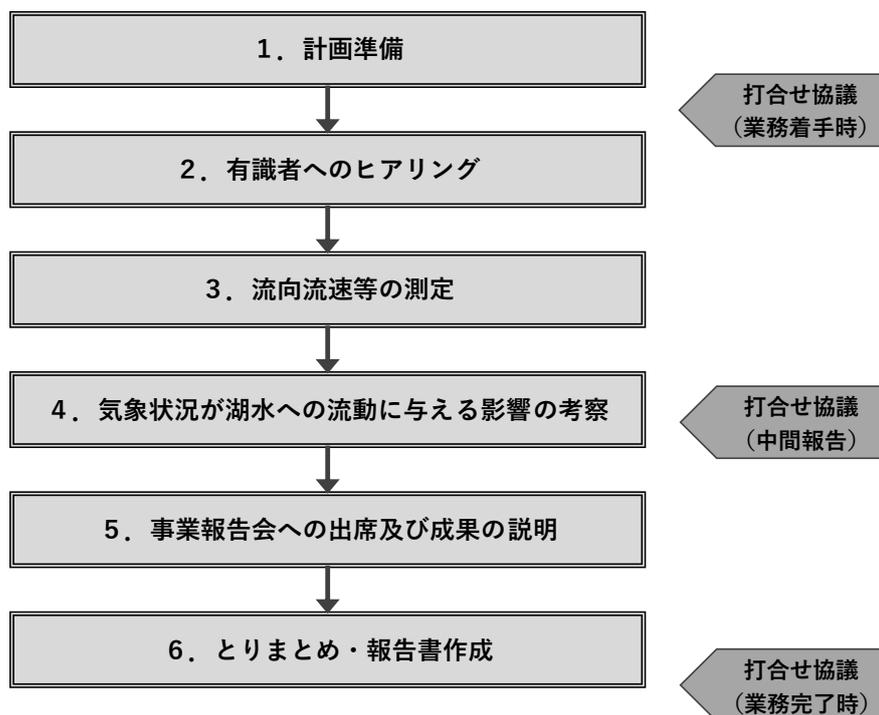


図 1.1 業務実施フロー

表 1.1 業務の構成・数量

項目	数量	単位	摘要
1. 計画準備	1	式	
2. 有識者へのヒアリング	2	回	調査実施前(調査計画)、実施後(調査結果及び考察の妥当性)
3. 流向流速等の測定	1	式	
4. 気象状況が湖水の流動に与える影響の考察	1	式	
5. 事業報告会への出席及び成果の説明	1	回	
6. 打ち合わせ協議	3	回	業務開始時、中間時(10月頃)、業務完了時

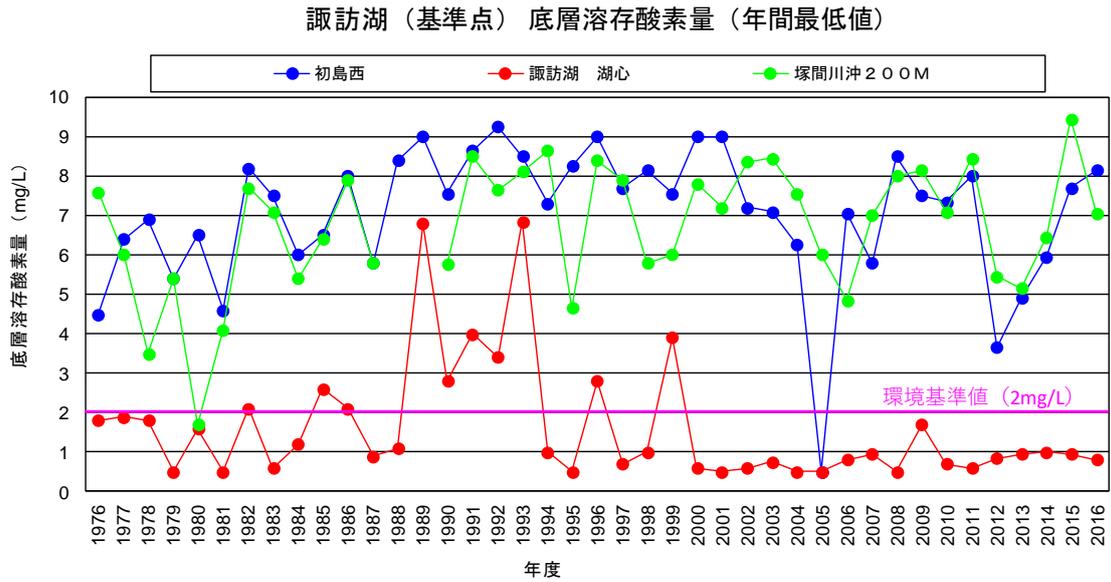
1.4 諏訪湖における貧酸素水塊発生状況の概要

諏訪湖は長野県の中央に位置する県内最大の湖であり、県の文化観光資源として重要な役割を果たすとともに、諏訪地域の歴史・文化を育み、人々の生活や産業を支えてきた、県のシンボルとなっている。1960年代には、社会・経済活動の発展や人口増加に伴い、水質汚濁が進行したため、1970年代頃から、流域下水道の整備や、底泥の浚渫に着手し、1986年（昭和61年）度に湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼となり、7期35年にわたる湖沼水質保全計画により、下水道の整備をはじめとする各種水質保全対策を総合的、かつ計画的に推進してきたところである。

これらの対策により、発生源からの排出負荷量は着実に減少し、水質は改善している一方で、近年は貧酸素水域の拡大や、2016年（平成28年）7月にワカサギ等の大量斃死が発生するなど新たな課題が生じている。

諏訪湖の底層溶存酸素量は、図1.2に示すように湖心では1976年度以降、年間最低値※が2mg/L（2016年3月に追加された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、長野県ホームページ「諏訪湖の溶存酸素（DO）濃度等の調査について」によると、2017年（平成29年）、2018年（平成30年）の湖内6地点の連続測定データでは7月中旬～8月中旬にかけて水深4m以深の層で2mg/L未滿となる状況が断続的に発生しており、湖内21地点の全面調査結果においても溶存酸素濃度の低い面積が広範囲にわたっている状況がみられている（図1.3参照）

※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り評価することが適当とされているため、この考え方をを用いて整理した。



注：1. 底層の値は、湖底から原則 0.5m の地点における測定結果である。

2. 底層溶存酸素量が 0.5mg/L 未満は、0.5mg/L としている。

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 1.2 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

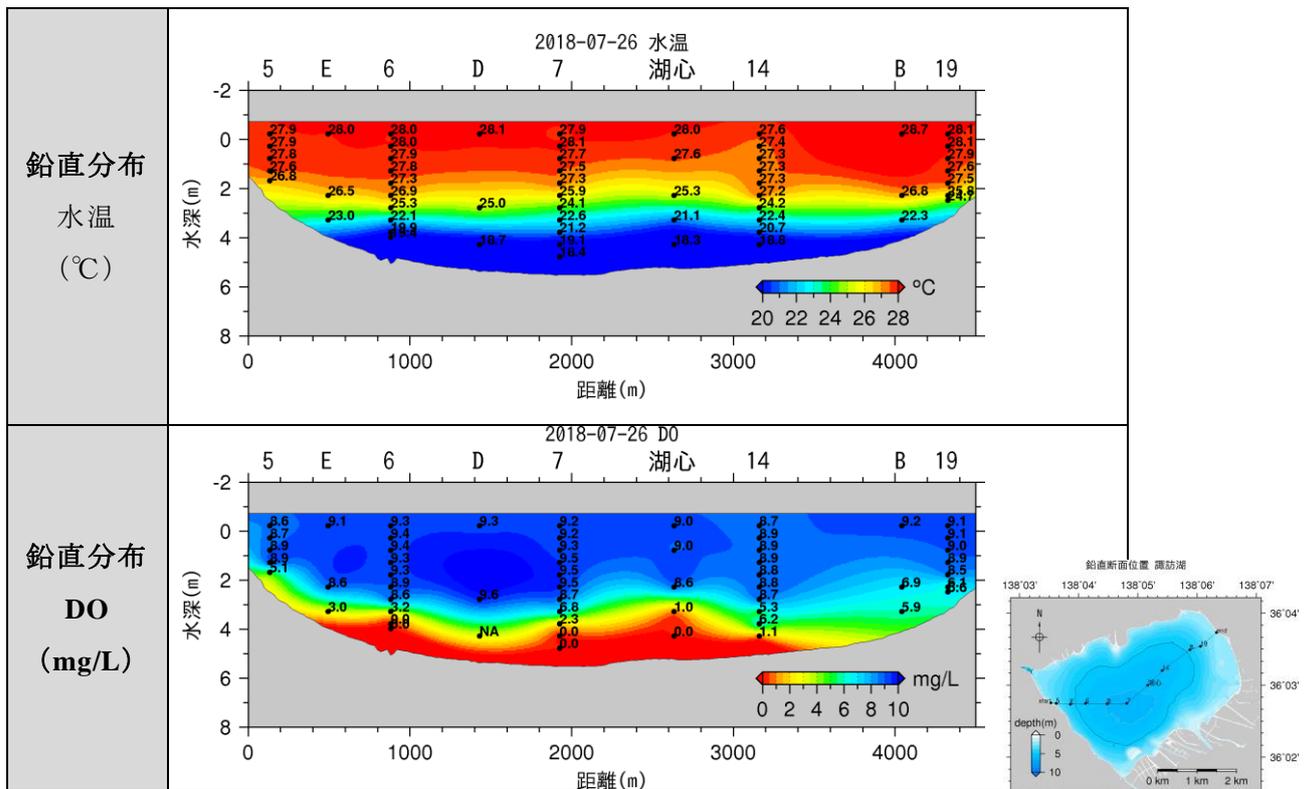


図 1.3 諏訪湖内の水温・DO 鉛直分布（2018 年 7 月 26 日、水温）

出典）令和元年度貧酸素水塊の発生及び拡大条件の分析業務 報告書（令和 2 年 3 月）

これまでの知見によれば、諏訪湖の貧酸素水塊の挙動は、諏訪湖内の水温躍層の発達及び風による水の動きに連動していると考えられている。概略図を図 1.4 に示す。

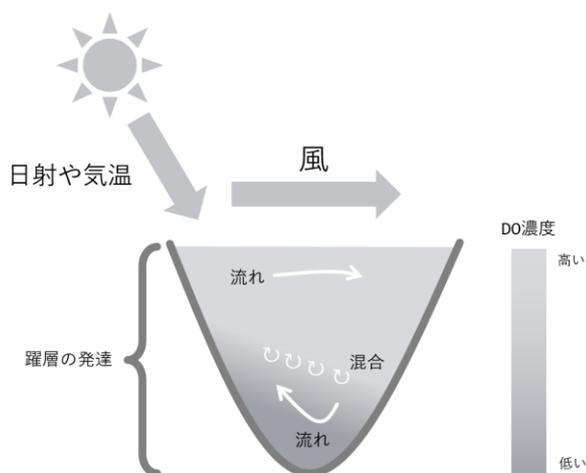


図 1.4 諏訪湖における貧酸素水塊の消長に関する概略図

出典) 令和元年度貧酸素水塊の発生及び拡大条件の分析業務 報告書 (令和 2 年 3 月)

木村 (平成 24 年)¹によれば、湖内 5 地点の湖底近傍における DO 連続測定の結果から、貧酸素水塊の発生・解消に関する時空間特性について以下のような結論が得られている。

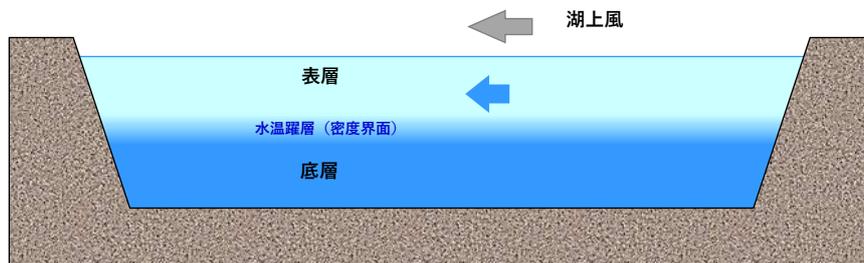
- ✓ 貧酸素状況の解消には強風と降雨が関連
ただし、気温の変動傾向や河川水温、湖水温によって傾向が異なる
- ✓ 3~6m/s 程度の強風が数時間吹いた後に内部セイシュによると思われる貧酸素状態の発生・解消がみられる
- ✓ 7~9m/s 程度の強風が 4 時間程度吹き続けると上下層が混合され貧酸素水塊が解消
晴天弱風時の夜間には強い水面冷却 (一時的に貧酸素水塊解消されることも)

¹ 木村昌嗣・豊田政史・宮原裕一：現地観測に基づく諏訪湖における貧酸素水塊の空間特性の分析，土木学会論文集 B1 (水工学) 71(4), I_769-I774, 2015.

※ 内部セイシュとは

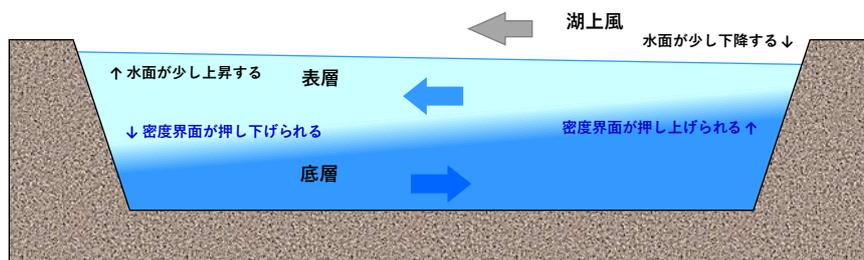
内湾や湖沼などの閉鎖性水域で、風や潮汐などの外力によって生じる水表面の振動をセイシュと呼ぶ。一方、上下層の水温差・塩分差等による密度差のために水域が成層化しているとき、密度界面に生じる振動を内部セイシュと呼ぶ。例えば諏訪湖においては、以下の様なメカニズムで生じると考えられる。

- ① 表層・底層の水温差による密度の違いにより成層化する。このとき、鉛直方向に水温が急変する層の事を水温躍層と呼ぶ。また、水温等による成層を上下2層として模式的に考える時、密度が不連続に変わる上下2層の境界面を密度界面と呼ぶ。

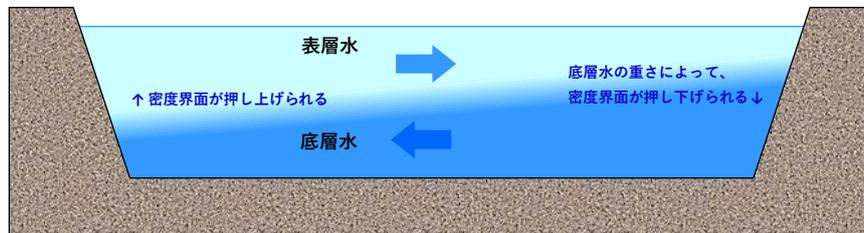


- ② 湖上風によって、表層（水面）の水塊が風下側に流され（吹送流）、湖水位に差が生じる。同時に、風下側の底層水は表層水によって下に押し下げられる。

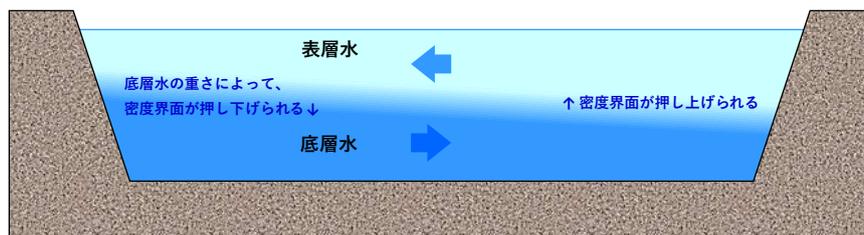
※ 底層水がどのくらい押し下げられるかは、表層と底層の密度差に大きく依存する。例えば、密度差が 1/1000 の場合（水温差で約 5℃）、湖面で 0.1cm の水位差が生じると、密度界面の高さの差は 100cm になる。



- ③ 湖上風が止むと、水面の波速に比べて密度界面の波速が非常に遅いことから、水面の水位差が解消されても密度界面の高さの差はすぐには解消しない。また、底層水は表層水に比べて密度が大きい（重い）ため、この密度差により内部セイシュと呼ばれるゆっくりとした振動が生じる。



- ④ 表層水・底層水の位置関係が、③とは逆の配置になり、③とは逆方向に動き出す。③と④の動きがしばらく繰り返される。



参考) 「水圏の環境」有田正光 編著，東京電機大学出版局，p128-129，1998 年．

- ⑤ 内部セイシュは、密度界面の傾きと表層水・底層水それぞれの運動の双方が解消されるまで継続する。また、②～④において、表層水と底層水は逆方向に流れるため、その摩擦によって密度界面付近では鉛直混合が促進される。

2. 流向流速等の測定

2.1 調査の概要

以下の要件を満たす流向流速計及び測定に必要な付帯設備により諏訪湖内の水の流れを把握するとともに風向風速の測定等により諏訪湖上の気象状況を把握した。

○ 流向流速計の要件

- ・ 諏訪湖内の測定地点において正確な測定ができること。
- ・ 層厚は 0.5m 以内に設定可能であり、かつ 7m 以上の範囲で流速を測定できること。
- ・ 流速測定精度は測定値の $\pm 1\%$ または $\pm 0.5\text{cm/s}$ 以下であること。
- ・ 必要に応じて各機器の設置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。

流向流速計の設置イメージを図 2.1 に示す。上記の要件を満たす流向流速計として、本業務では超音波流速計の 1 つである Nortek 社製の Aquadopp Profiler 2MHz を使用する。Aquadopp Profiler 2MHz の外観、技術仕様及び設置状況の例を図 2.2 に示す。また、風向風速計の技術仕様及び設置イメージを図 2.3 に示す。

測定地点は、1.4 諏訪湖における貧酸素水塊発生状況の概要 に示す諏訪湖の特性を踏まえ、湖内の流動及び諏訪湖上の気象状況を的確に捉えられる地点とし、かつ、測定期間は貧酸素水塊の発生状況を含む 2 ヶ月程度の期間とし、事前に委託者との協議のうえで決定した。流向流速計の設定は測定間隔 10 分、層厚 20cm とし、測定開始後 1 ヶ月程度で機器点検を行った。風向風速計の設定についても、データの記録は 10 分毎とした。

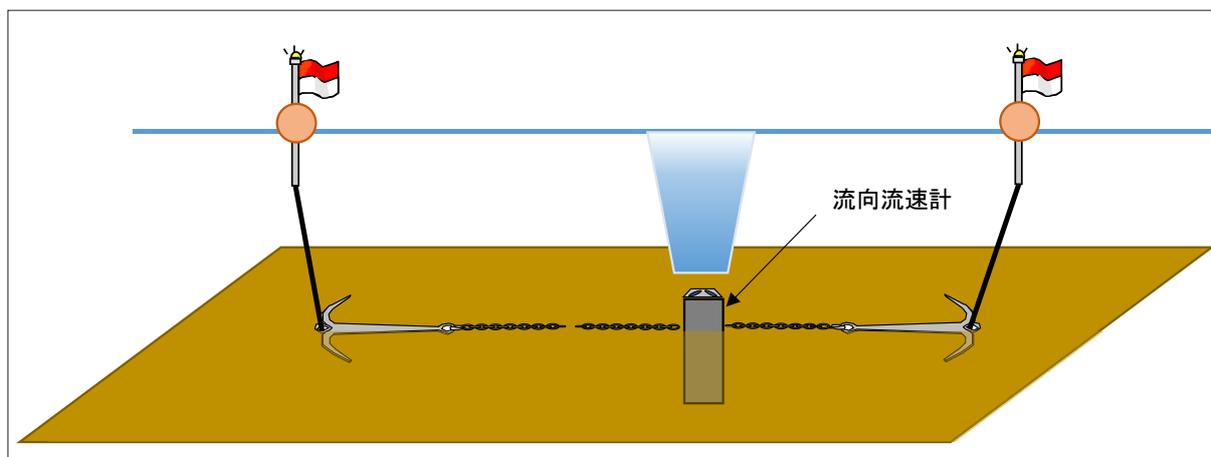
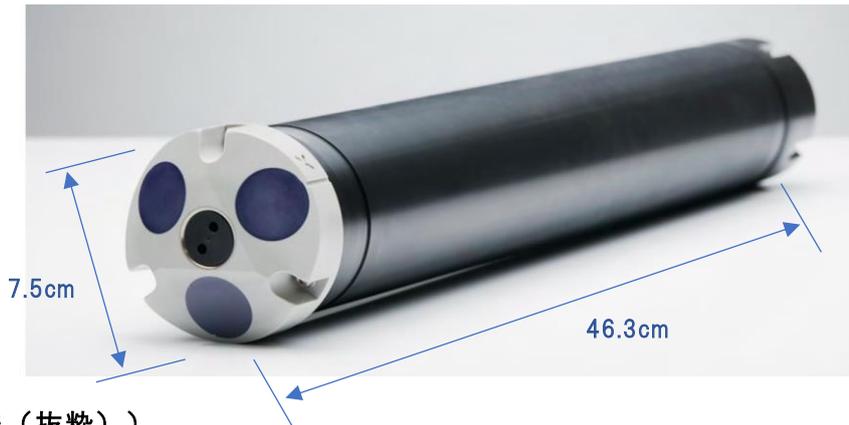


図 2.1 流向流速計の設置方法の案

(外觀)



(技術仕様 (抜粋))

■流速プロファイラー仕様

方式	インコヒーレントドップラー方式			
超音波周波数	400kHz	600kHz	1.0MHz	2.0MHz
鉛直測定限界	60~90m	30~40m	12~20m	4~10m
ビーム数	3	3	3	3
ビーム幅	3.7°	3.0°	3.4°	1.7°
設定層厚	2~8m	1~4m	0.3~4m	0.1~2m
近接不感距離	1.0m~	0.5m~	0.2m~	0.05m~
最大ピング数	3Hz	4Hz	7Hz	23Hz
測定セル数	1~128			
最小サンプリング	1秒			
測定レンジ	0~±10m/s			
測定精度	測定値の±1% ±0.5cm/s			
反射強度範囲	90dB			
反射強度分解能	0.45dB			

■ハードウェア仕様

材質	標準用:テフロンプラスチック・ポリウレタン プラスチック、チタンネジ 深海用:チタン・テフロンプラスチック
寸法	直径75mm、長さ463mm~
質量	標準用:2.2kg(1.2MHz)、2.9kg(600kHz)、 3.4kg(400kHz)、深海用:6~10kg
耐圧性能	標準用:300m、深海用:6,000m

■データロガー仕様

記憶容量	9MB(標準)、4GBSDカード、16GBSDカード
測定間隔	1秒~600秒、間欠測定可
メモリーモード	標準モード(フルデータでストップ) ラップモード(連続上書き)
メモリー内容	日付、時間、プロフィール番号、 3成分流速プロフィール、反射強度、 水温、水圧、傾斜、方位

■搭載センサー仕様

温度	タイプ	サーミスター
	レンジ	-4℃~40℃
	精度	±0.1℃
コンパス	タイプ	磁性抵抗(MR)式
	レンジ	0~360°
	精度	±2°
傾斜	タイプ	電解液式
	レンジ	0~±30°
	精度	±0.2°
水深	タイプ	ピエゾ抵抗式
	レンジ	100m(標準)、他選択可
	精度	±0.5%FS
	分解能	0.005%FS

(設置状況の例)



技術仕様の出典) <https://www.jfe-advantech.co.jp/>

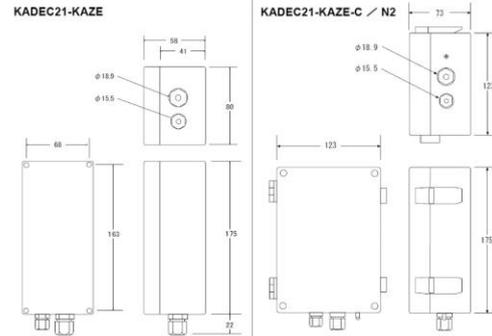
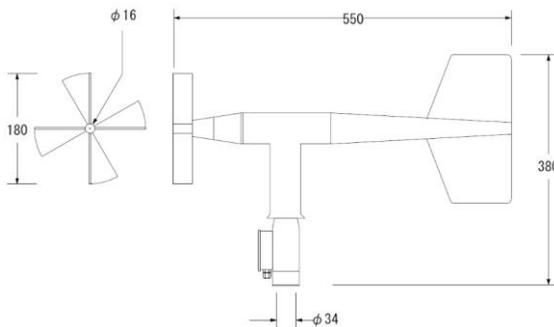
図 2.2 流向流速計 (Aquadopp Profiler 2MHz) の外觀、技術仕様及び設置例

(外観)

風向風速計 :



データロガー :



(技術仕様 (抜粋))

■測定仕様(全モデル共通)

測定インターバル	1~6、10、12、15、20、30秒	1~6、10、20、30分	1~6、8、12、24時間
サンプリング	1秒固定		
データ容量	11要素測定で8,843データ(約368日/1時間) 瞬時風向風速の2要素で48,640データ		
記録内容	平均風向、平均風速(2要素) / 瞬間最大風速、風向、起時(3要素) 移動平均風向、風速、起時(3要素) / 風速標準偏差(NEDO)(1要素) 瞬時値風向、風速(2要素)		

■標準センサ仕様(KDC-S04)

測定範囲	0~90m/s(風速)、0~355°(風向)
検出方法	発信方式(風速)、ポテンシオメータ(風向)
出力範囲	0.098m/s/Hz(風速)、0~10KΩ(風向)
起動風速	0.9m/s、0.9m/s(5°)、1.3m/s(10°)
耐風速	100m/s
寸法/重量/材質	370H×550W/1.0Kg/ABS樹脂、ポリプロピレン

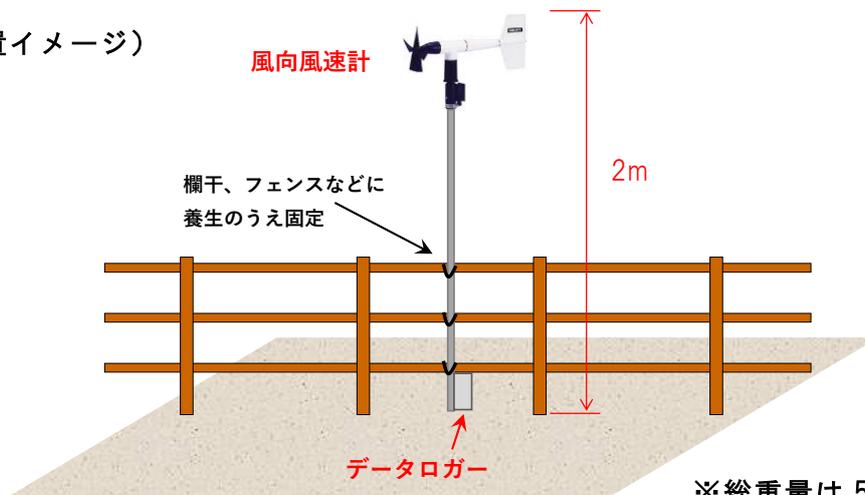
■測定精度(全モデル共通)

測定範囲	風向:0~10KΩ(0~360° /0~10KΩ) 風速:0~1KHz(0~100m/s)
測定精度	風向:±0.2%以内 風速:±0.2m/s
測定分解能	風向:1°(但し16方位記録) 風速:0.1m/s

■センサーケーブル

風向風速ケーブル	NRH-CA-KAZE-3P010 ツイストペア6芯シールドケーブル 10m(別売)
----------	---

(陸上設置イメージ)



※総重量は 5kg 程度。

技術仕様の出典) <http://www.north-one.net/product/kazamuki.html>

図 2.3(1) 風向風速計(KADEC21-KAZE/KDC-S04)の外観、技術仕様及び設置イメージ

(湖心設置イメージ)

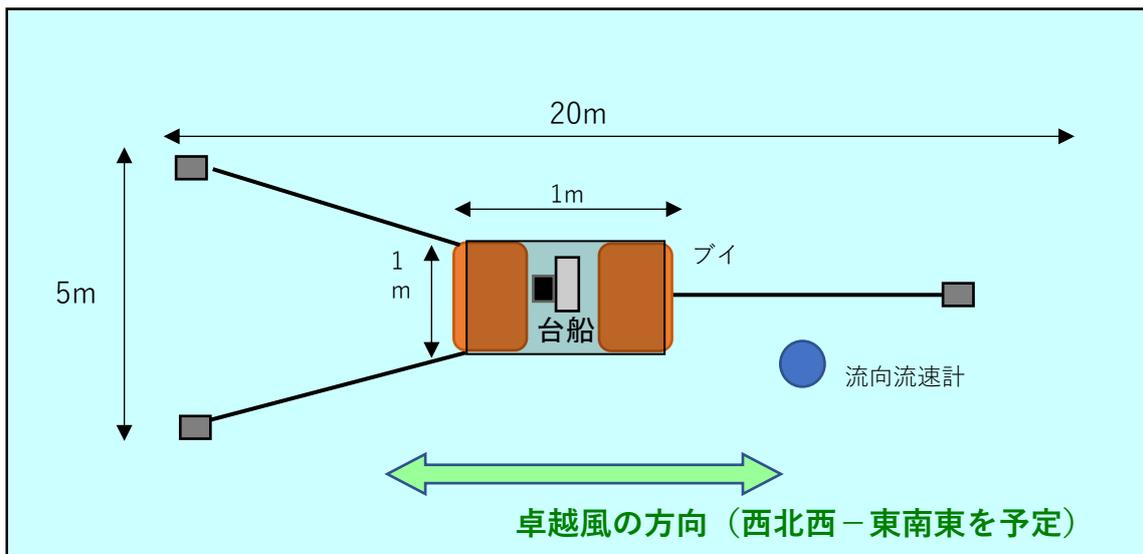
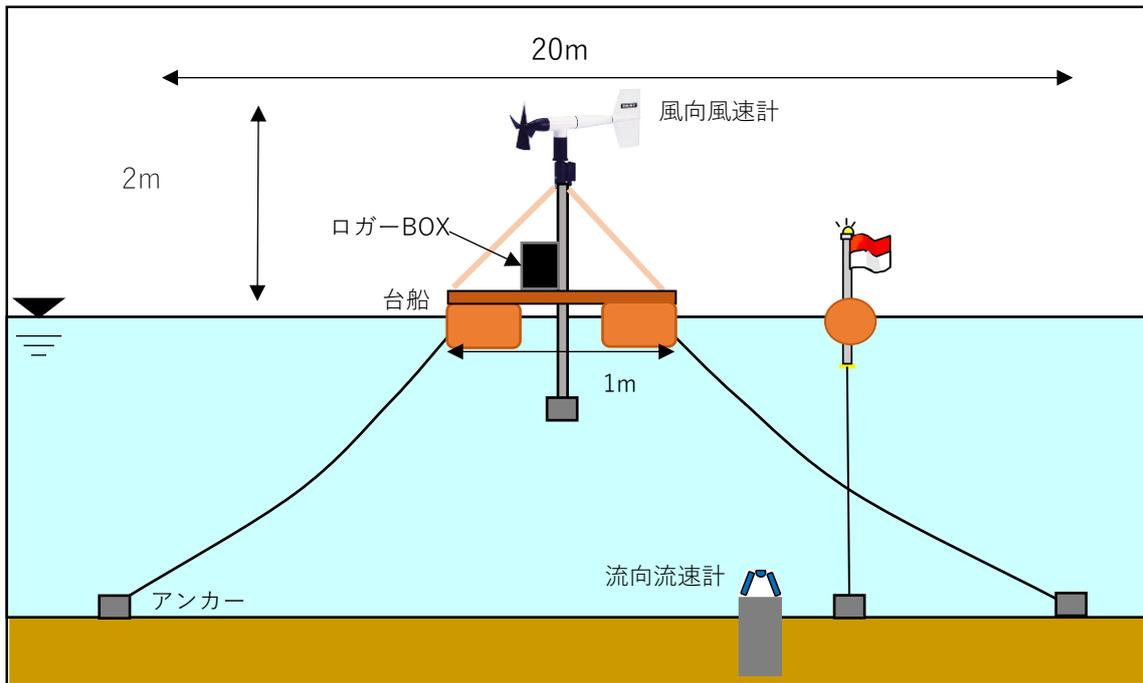


図 2.3(2) 風向風速計 (KADEC21-KAZE/KDC-S04) の外観、技術仕様及び設置イメージ

測定地点を図 2.5 に示す。流向流速計による測定地点は、過年度検討成果における諏訪湖内の各測定地点の重要度を踏まえ、過年度より信州大学が測定している湖心付近のほか湖内 3 地点（諏訪湖北東側（B 地点）、南東側（上川沖）、西側（D 地点））における測定とした。また、風向風速計は、諏訪湖の湖上風の強さ及びその偏りが湖流に与える影響を把握するために、4 地点配置した。このほか、同時期に信州大学による水温・底層 DO 濃度の連続測定が予定されており、図 2.5 にはその測定地点もあわせて示した。

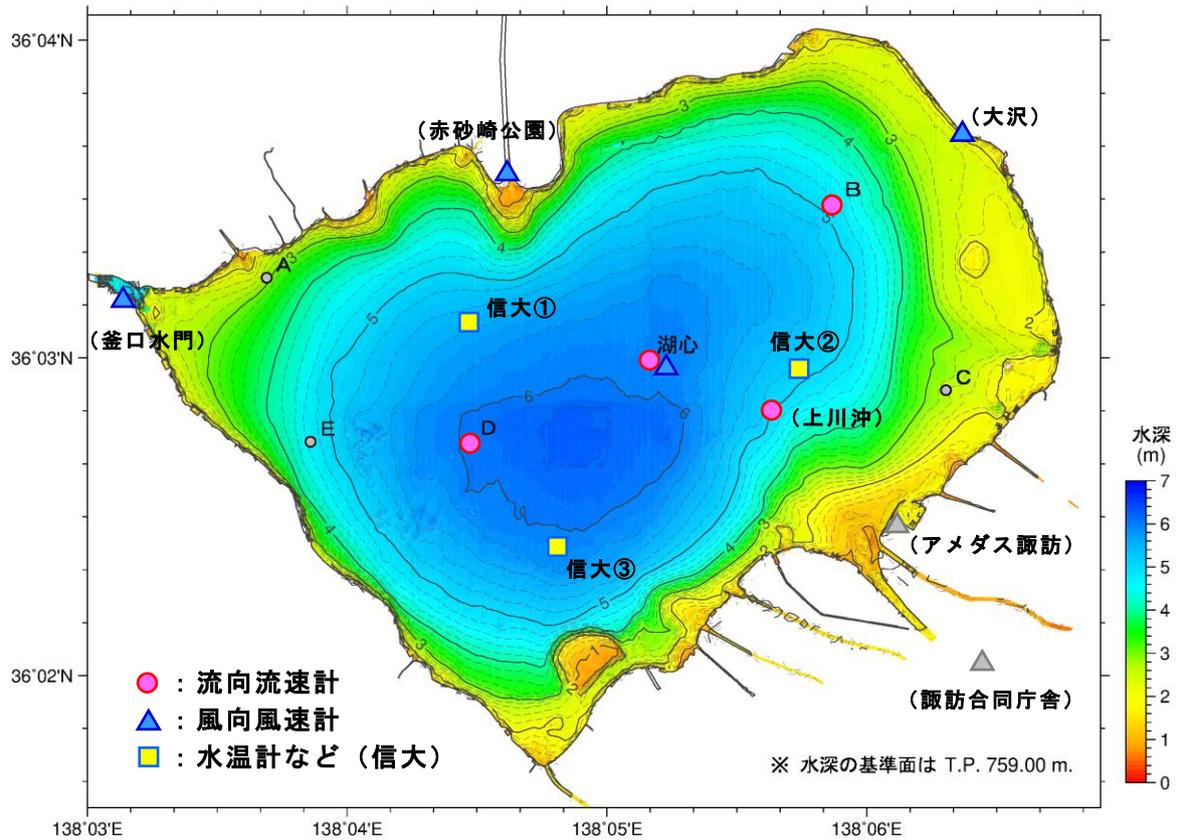
諏訪湖周辺の地形を図 2.4 に示すが、諏訪湖が位置する諏訪盆地は東西を山に挟まれており、塩尻峠－茅野を結ぶ北西－南東方向に開けた地形となっている。ただし、塩尻峠、茅野ともに谷になっており、一方諏訪湖は諏訪盆地に位置するので、湖上で風況が一様であるとは限らず、風況によっては湖内に水平循環流が生じる可能性が考えられる。実際に豊田ら²によって、湖上風の非一様性が湖流に大きく影響していることが示されている。これらを踏まえ、風向風速計の設置位置は、気象庁アメダス観測点である諏訪から離れた 3 地点（大沢、赤砂崎公園、釜口水門）及び湖心において測定を行うものとした。なお、湖心については既存の観測筏の近傍に設置した。

諏訪湖においては、毎年夏期に貧酸素水塊が発達するが、これは湖内の水温成層の生成状況に強く依存すると考えられる。湖心底層の DO 濃度については、毎年 4 月から 7 月にかけて断続的に貧酸素水塊が発生している様子が見られ、また 7 月後半から 8 月にかけて貧酸素状態が継続する様子が見て取れる。このことから、本業務の流向流速計及び風向風速計の測定期間は 7 月及び 8 月を含む 2 か月間（2020 年 7 月 13 日～2020 年 9 月 17 日）とした。



図 2.4 諏訪湖周辺の地形 出典) 国土地理院

² 豊田政史・宮原一道・萩庭康光・寺沢和晃・疋田真・降矢利勝・宮原裕一・富所五郎：諏訪湖における湖上風の非一様性とそれが湖流形成に与える影響，水工学論文集，第 50 巻，pp.1303-1308，2006.



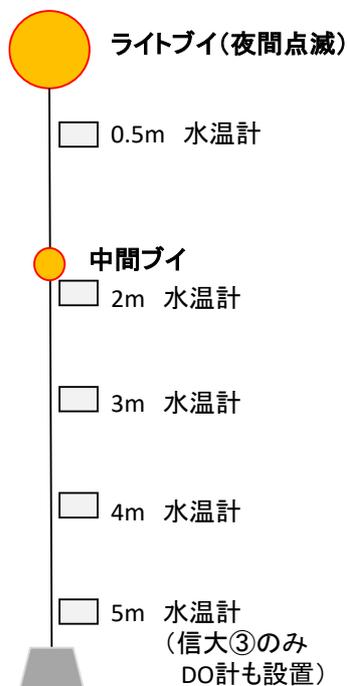
※湖心、地点 A～E 及び信大①～③は、今年度の長野県・信州大学の測定地点である。
各地点の座標は以下の通りである。

測定地点名	測定項目	緯度	経度
湖心	流向流速、風向風速	36° 03′ 00.00″	138° 05′ 10.00″
A	(測定無し)	36° 03′ 15.03″	138° 03′ 42.50″
B	流向流速	36° 03′ 29.38″	138° 05′ 52.86″
C	(測定無し)	36° 02′ 54.42″	138° 06′ 18.06″
D	流向流速	36° 02′ 44.39″	138° 04′ 29.10″
E	(測定無し)	36° 02′ 44.45″	138° 03′ 51.36″
上川沖	流向流速	36° 02′ 50.27″	138° 05′ 38.40″
アメダス諏訪 (風向風速)	(web よりデータ取得)	36° 02′ 28.64″	138° 06′ 06.93″
諏訪合同庁舎	(県よりデータ提供)	36° 02′ 02.22″	138° 06′ 26.79″
釜口水門	風向風速	36° 03′ 11.25″	138° 03′ 08.37″
大沢 (船着き場)	風向風速	36° 03′ 42.50″	138° 06′ 22.20″
赤砂崎公園	風向風速	36° 03′ 34.94″	138° 04′ 36.89″
信大①	(水温 (信大実施))	36° 03′ 06.86″	138° 04′ 28.06″
信大②	(水温 (信大実施))	36° 02′ 58.02″	138° 05′ 44.37″
信大③	(水温、DO (湖底のみ) (信大実施))	36° 02′ 24.53″	138° 04′ 48.57″

図 2.5 流向流速計及び風向風速計による測定地点

なお、信州大学による水温連続測定（信大③では湖底で DO 濃度も測定）のイメージは
図 2.6 の通りである。

ブイを設置し、5水深で水温を10分間隔で測定する。
信大③では、最深部で溶存酸素も測定する。



・測定地点の概要

- 信大①：湖心と長野県A地点との中間点、水深5m以上
- 信大②：湖心と長野県C地点との中間点、水深5m以上
- 信大③：湖心から南西方向、水深5m以上

・測定機器の概要

- 水温計：Onset社 HOBO UA-002-008 もしくは UA-002-064
- DO計（信大③最深部のみ）：Onset社 HOBO U26-001



※信州大学宮原教授提供資料を一部改変

図 2.6 水温の連続測定イメージ(信州大学)

風向風速測定および流向流速測定の作業状況を表 2.1 に、風向風速計の設置状況を写真 2.1 に示す。流向流速計については、2020 年 8 月 12 日に一回引き上げ、陸上においてデータ回収及び点検を行い、翌日 8 月 13 日に同じ地点に再設置した。また、測定期間の開始・終了時点において設置地点の水深を測定し、これと釜口水門³の水位データから設置地点の標高を算出した（表 2.2 参照）。

表 2.1 調査野帳

【第 1 回】

機器名称	設置箇所	設置日時	回収・点検日時	水深・地上高測定		
				測定位置	日時	水深 or 標高
流向流速計	湖心	2020/7/13 12:20	2020/8/12 10:00	河床～水面	2020/7/13 12:20	5.75 m
	上川沖	2020/7/14 10:40	2020/8/12 11:10	河床～水面	2020/7/14 10:05	4.90 m
	地点B	2020/7/14 10:00	2020/8/12 10:50	河床～水面	2020/7/14 9:50	4.70 m
	地点D	2020/7/14 8:50	2020/8/12 10:30	河床～水面	2020/7/14 8:35	5.90 m
風向風速計	湖心	2020/7/13 12:20	2020/8/12 9:50	水面～センサー	—	2.00 m
	大沢	2020/7/13 14:03	2020/8/12 12:00	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 4 m)
	赤砂崎公園	2020/7/13 15:03	2020/8/12 13:00	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 5 m)
	釜口水門	2020/7/13 16:10	2020/8/12 13:20	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 6 m)

【第 2 回】

機器名称	設置箇所	設置日時	回収・点検日時	水深・地上高測定		
				測定位置	日時	水深 or 標高
流向流速計	湖心	2020/8/13 8:50	2020/9/17 10:40	河床～水面	2020/9/17 10:40	5.80 m
	上川沖	2020/8/13 9:10	2020/9/17 9:50	河床～水面	2020/9/17 9:50	4.88 m
	地点B	2020/8/13 8:40	2020/9/17 10:00	河床～水面	2020/9/17 10:00	4.62 m
	地点D	2020/8/13 8:20	2020/9/17 10:20	河床～水面	2020/9/17 10:20	5.86 m
風向風速計	湖心	2020/8/12 10:00	2020/9/17 10:40	水面～センサー	—	2.00 m
	大沢	2020/8/12 12:10	2020/9/17 14:50	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 4 m)
	赤砂崎公園	2020/8/12 13:10	2020/9/17 14:30	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 5 m)
	釜口水門	2020/8/12 13:30	2020/9/17 13:30	地表～センサー	—	2.00 m (湖面より約 6 m)

※風向風速計の湖面からの高さは、国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) による設置箇所の地盤高と湖水位 (T.P.759m) に基づき算定した。

³ 長野県 河川砂防情報ステーション (https://www.persons.sabo-nagano.jp/res/home_person.html)

表 2.2 流向流速計設置地点の標高の算出結果

地点名	測深日時	水深	釜口水門	湖底高		Aquadopp	
			水位	(測深時)	(平均)	センサー位置	センサー水深
湖心	2020/7/13 12:20	5.75 m	0.71 m	-5.04 m	-5.06 m	底上0.1m	-4.96 m
	2020/9/17 10:40	5.80 m	0.73 m	-5.07 m			
上川沖	2020/7/14 10:05	4.90 m	0.72 m	-4.18 m	-4.17 m	底上0.1m	-4.07 m
	2020/9/17 9:50	4.88 m	0.73 m	-4.15 m			
B	2020/7/14 9:50	4.70 m	0.72 m	-3.98 m	-3.94 m	底上0.1m	-3.84 m
	2020/9/17 10:00	4.62 m	0.73 m	-3.89 m			
D	2020/7/14 8:35	5.90 m	0.72 m	-5.18 m	-5.16 m	底上0.1m	-5.06 m
	2020/9/17 10:20	5.86 m	0.73 m	-5.13 m			

※Aquadopp : 流向流速計



写真 2.1(1) 風向風速計の設置状況(湖心)



写真 2.1(2) 風向風速計の設置状況(大沢)



写真 2.1(3) 風向風速計の設置状況(赤砂崎公園)



写真 2.1(4) 風向風速計の設置状況(釜口水門)

測定期間前後の諏訪の気温・降水量・風況を図 2.7 に示す。測定期間の気象の概要は以下の通りであった。

- ・ 7月下旬は、梅雨前線および低気圧の通過のため降雨が続き、特に7月22日は風が比較的強かった。
- ・ 8月中は高気圧に覆われ、天気は晴れが多かった。8月18日の風がやや強くなっていた。
- ・ 8月31日から9月3日にかけて、台風9号の接近（台風は東シナ海を北上し九州に接近、その後も北上を続けた）による降雨及び強風、9月7日から8日も台風10号の接近（台風は奄美大島付近を北上し九州に接近、その後も北上を続け、日本海に抜けた）による強風があった。

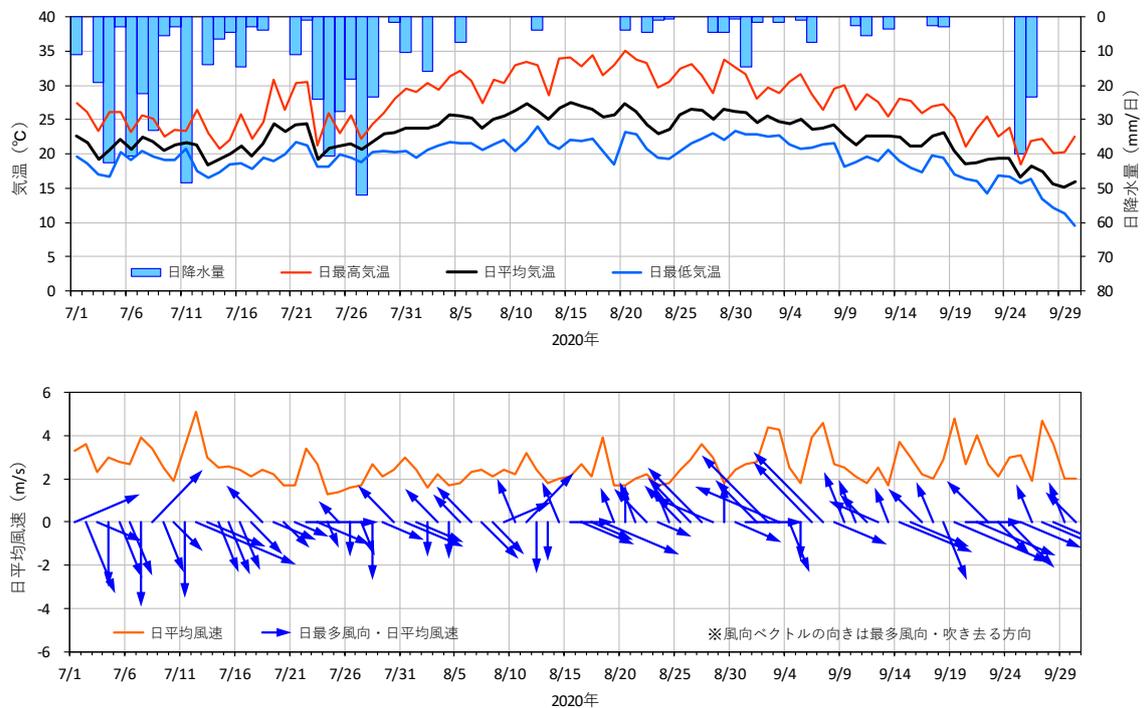


図 2.7 諏訪の気温・降水量・風況(気象庁アメダスデータ、2020年7月～9月)

2.2 風向・風速測定結果

風向・風速測定結果を図 2.8 に、風向・風速測定地点それぞれの風向別風速頻度分布を図 2.9 に示す。各測定地点の風速の東西方向・南北方向成分のパワースペクトルを図 2.10 に示す。なお、本業務で測定を行った地点は 10 分間隔のデータであるのに対し、アメダス諏訪は 1 時間間隔⁴でありデータ数が少ないことに留意する必要がある。また、諏訪合同庁舎のデータは 1 分間隔で取得されており、このデータに対し前 10 分の平均処理を行って解析用のデータとしている。

本業務で設置した風向風速計の水面または地表面からの高さは約 2m である（表 2.1 参照）。アメダス諏訪における観測位置は、気象庁の資料によれば地上 10.8m（湖面上約 12m）であり、また諏訪合同庁舎における観測位置は地上約 30m（湖面上約 32m）である。

風速は風速計の設置高と地表面の凹凸によって大きく変わり、その関係は以下に示す対数則で表される⁵。

$$U(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{z}{\delta} \right)$$

ここで、 $U(z)$ ：地上高 z における風速、 U^* ：摩擦速度（地表面の風による摩擦の大きさを表す指標で、速度の次元を持つ）、 κ ：カルマン定数（ ≈ 0.4 ）、 δ ：相当粗度（地表面の粗さを表すパラメータ）である。

地上高 1000m における風速を 20m/s としたとき、十分開けた地点かつ気象場が安定している場合における地上高と相当粗度に対する風速は表 2.3 の様になる。

表 2.3 標高・相当粗度と風速の関係の例

地物	粗度 δ (m)	(湖面)				(農地・草地)			(森林・住宅地)		(都市)		
		0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1	2	3
地表面からの高さ(m)	50.0	16.75	16.28	15.66	14.80	13.50	12.97	12.63	12.36	11.96	11.38	10.49	9.89
	40.0	16.51	16.01	15.34	14.41	13.02	12.45	12.08	11.80	11.36	10.75	9.80	9.17
	30.0	16.19	15.65	14.92	13.91	12.39	11.78	11.38	11.07	10.60	9.94	8.92	8.26
	20.0	15.75	15.15	14.34	13.20	11.52	10.84	10.39	10.05	9.53	8.81	7.72	7.01
	10.0	15.00	14.29	13.33	12.00	10.02	9.23	8.72	8.33	7.74	6.94	5.77	5.05
	8.0	14.76	14.01	13.01	11.61	9.54	8.72	8.19	7.78	7.18	6.36	5.18	4.47
	6.0	14.45	13.65	12.59	11.12	8.93	8.06	7.51	7.09	6.46	5.63	4.46	3.78
	4.0	14.01	13.15	12.01	10.41	8.06	7.15	6.56	6.13	5.49	4.66	3.54	2.92
	2.0	13.25	12.29	11.00	9.21	6.61	5.63	5.02	4.58	3.95	3.18	2.23	1.76
	1.0	12.50	11.43	10.00	8.02	5.21	4.21	3.62	3.20	2.64	2.01	1.30	0.99
0.5	11.75	10.57	9.00	6.83	3.89	2.94	2.42	2.07	1.63	1.17	0.72	0.53	

⁴ 気象庁 HP の「過去の気象データ検索」においては、各日の 10 分毎の気象データを閲覧できるが、「過去の気象データ・ダウンロード」より連続データとして入手できるのは 1 時間間隔までである。

⁵ 有田正光 編著，岡本博司・小池俊雄・中井正則・福島武彦・藤野毅 著：大気圏の環境 p43，東京電機大学出版局，2000。

本業務の調査においては、風向・風速計を設置した地点は湖上 2m 程度、アメダス諏訪は農地・草地の地上高 10m 程度、諏訪合同庁舎は森林・住宅地の地上高 30m 程度と見なすと、表 2.3 よりいずれも同程度の風速（10m/s 程度）となり、また各測定地点の相当粗度を決定するためには各地点における風速鉛直分布の測定等の詳細な測定および検討が必要となることから、本業務においては風速の補正は行わないこととした。

図 2.9 によれば、湖心の風向・風速はアメダス諏訪及び諏訪合同庁舎の風向・風速に近い分布であった。ただし、諏訪合同庁舎は周辺に遮蔽物が無く、風速計設置地点の標高も高いことから、風向としては南東風が特に卓越しており、また風速も 10m/s 以上の強い風も良く捉えられているのに対し、湖心では風速 8~10m/s 程度までであった。諏訪湖北岸の 3 点（大沢、赤砂崎公園、釜口水門）は風速がさらに弱く、0~2m/s の頻度が多くなっていた。

また、図 2.10 のパワースペクトルによれば、いずれの地点においても 1 日周期の強いピークが見られた。なお、アメダス諏訪のデータは 1 時間毎であるため、他の地点（10 分毎のデータ）に比べてエネルギーが低く算出されている。

※ パワースペクトルとは

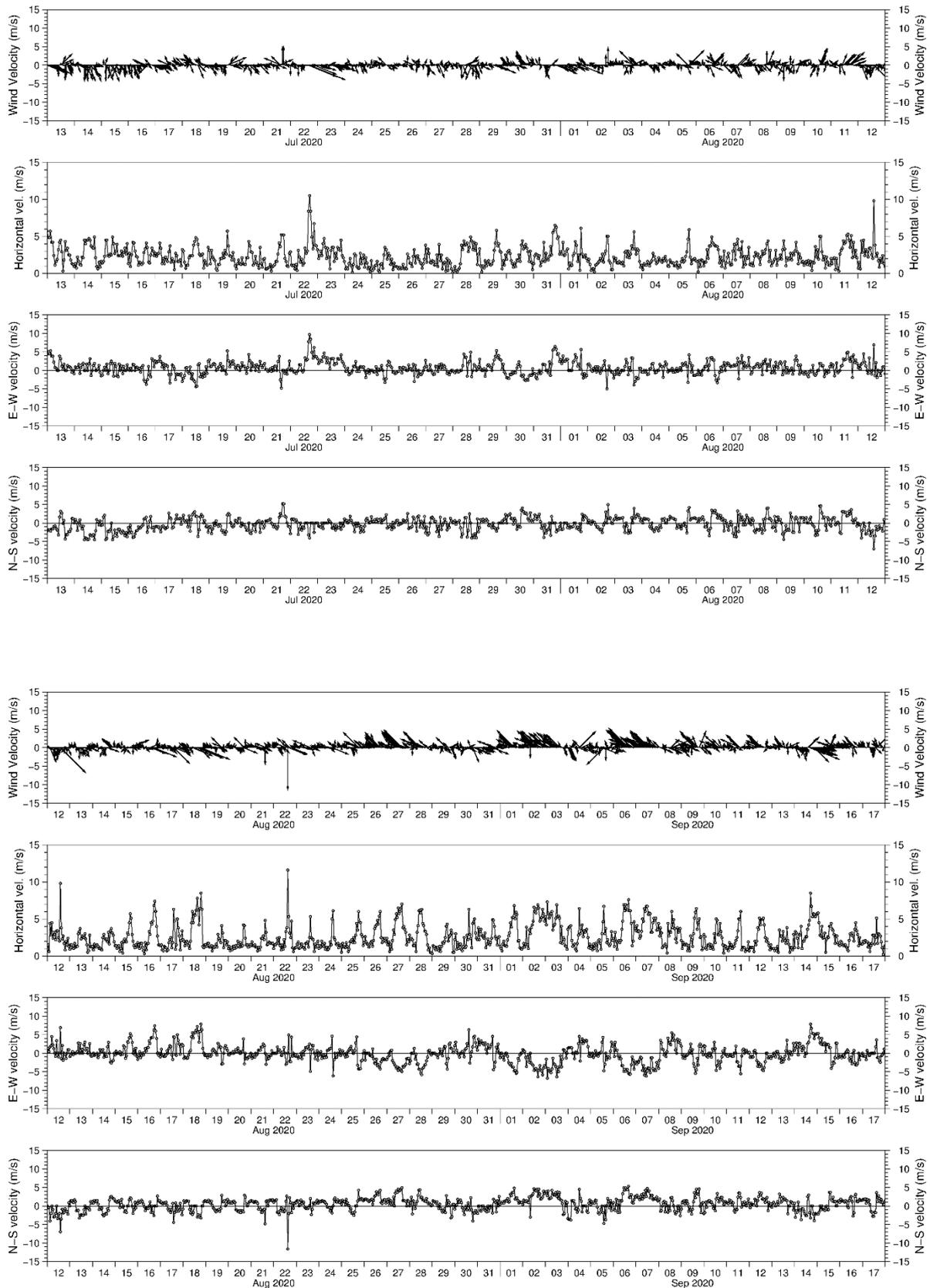
時々刻々と変化する信号をあらかじめ決まった周期（または周波数）の波に分解した場合（フーリエ変換）に、その波の振幅の 2 乗をその周期成分のエネルギー（パワー）といい、周期とエネルギーの分布の関係をパワースペクトルという。

パワースペクトルで、ある周期のパワーが他の周期より突出している場合、その信号はその周期の波で特徴づけられるといえ、その周期を卓越周期と呼ぶ。

風向・風速の測定結果の概要は以下の通りである。

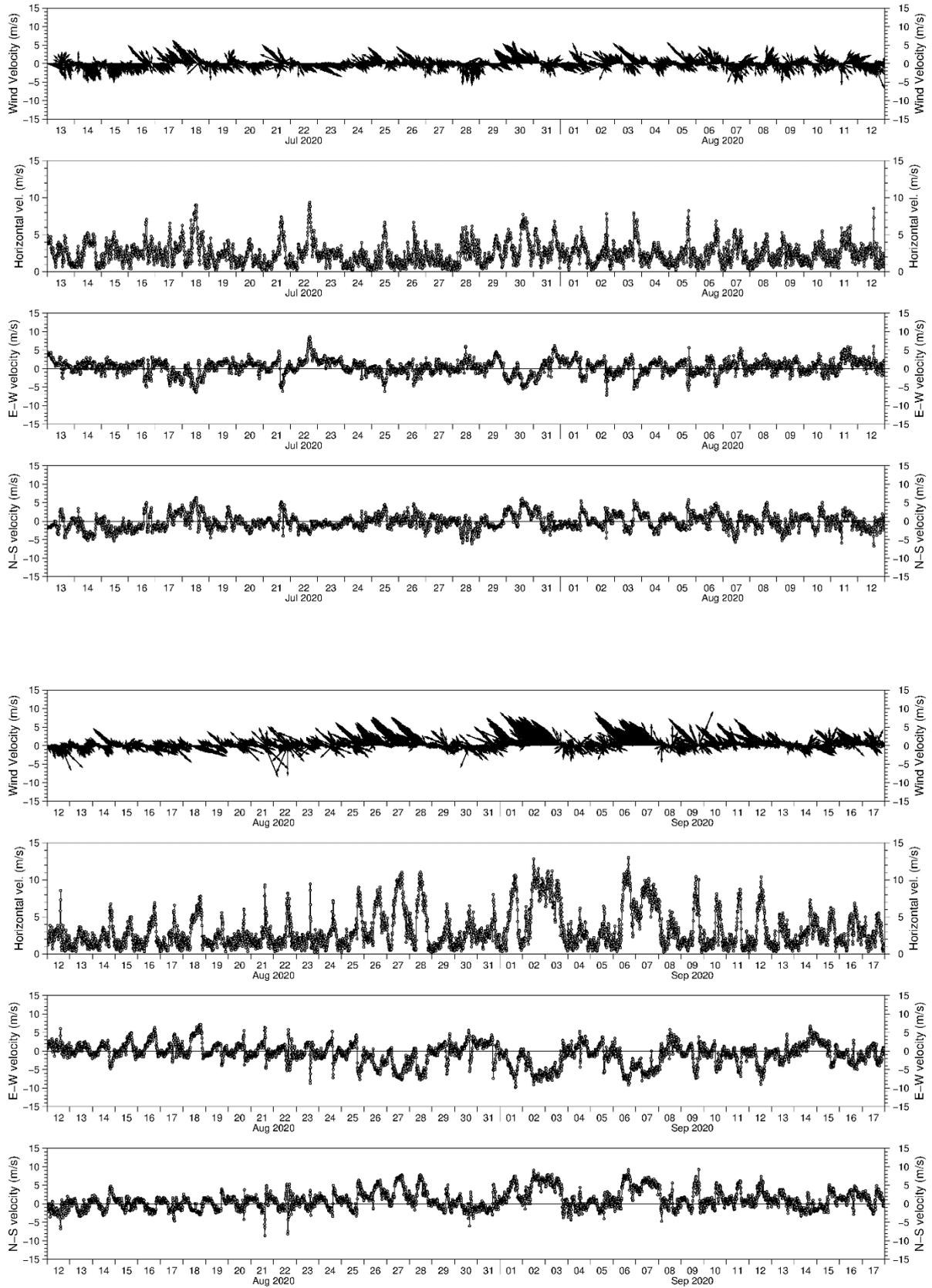
- ・ 図 2.9 によれば、湖心において南東の風及び北北西の風が比較的多く、北東および南西の風は少なかった。釜口水門においては、北北西の風の頻度が特に多く見られた。赤砂崎公園においては、南東~南南東の風や北北西の風その他、北の風も比較的多く見られた。大沢においては、東の風及び西の風が多く、他の地点にお比べ風速も小さかった。諏訪合同庁舎においては、特に南東の風が卓越しており、他の地点に比べて風速も大きかった。アメダスの諏訪地点は、東南東の風および北西の風が多かった。ただし、アメダス地点のみ 1 時間間隔のデータであり、他点との比較においては注意を要する。
- ・ 図 2.8 について、風向・風速測定期間のうち図 2.7 に示した日平均風速が大きく

なっていた7月22日頃、8月18日頃、8月27日頃、9月2日頃、9月6日頃に着目すると、湖心においては風速5～6m/s以上の同じ方向の風が数時間以上継続していた。同様の特徴は諏訪合同庁舎及びアメダス諏訪においても見られた。一方、釜口水門においては、8月27日頃、9月2日頃、9月6日頃は風速5～6m/s以上の一定方向の風が継続していたが、8月18日頃の風向は一定であったが風速は小さく、7月22日頃ははっきりとした特徴はみられなかった。赤砂崎公園・大沢においては、他の地点に比べて風速が弱い結果となった。



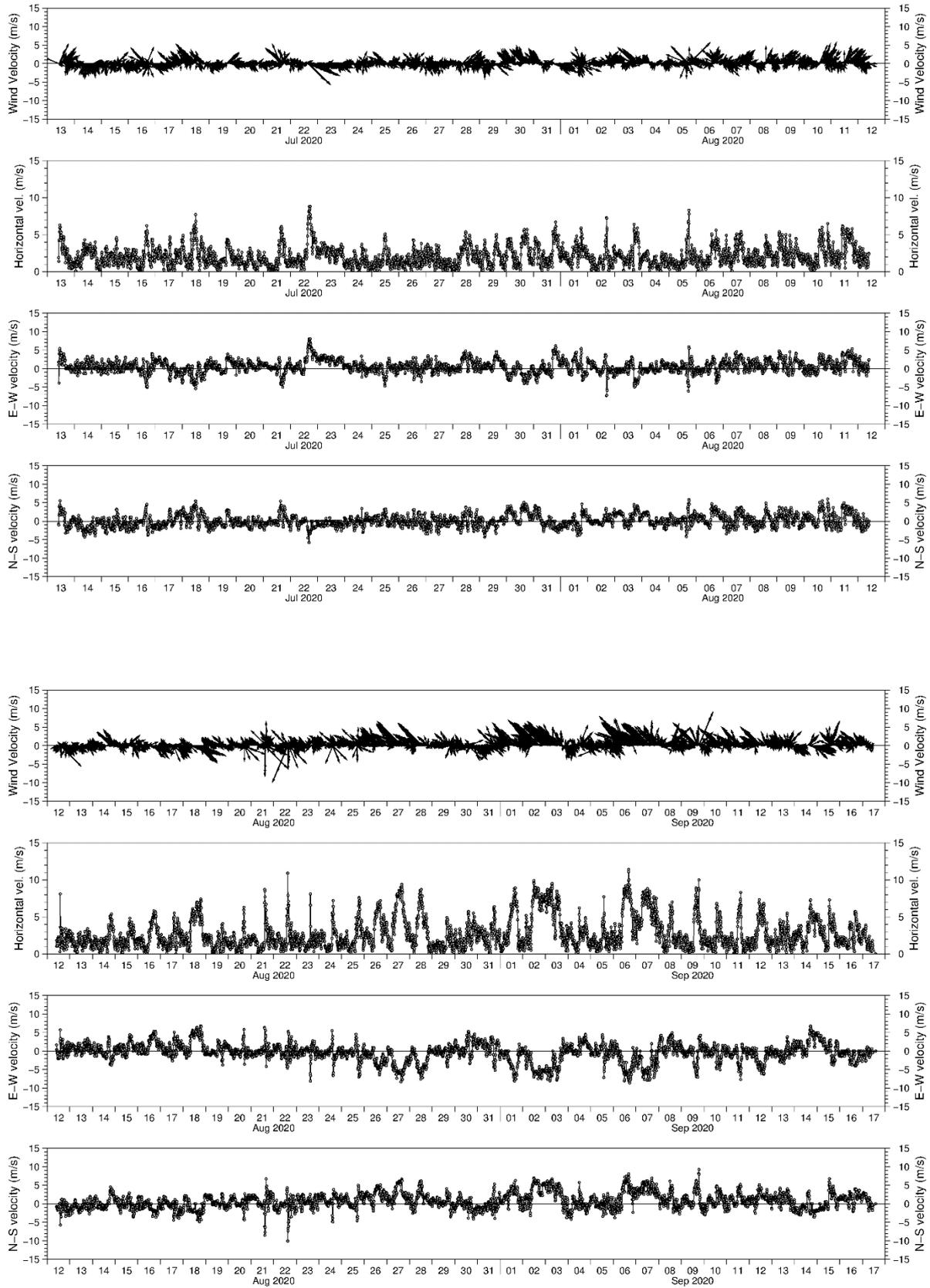
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(1) 風向風速測定結果(アマダス諏訪:気象庁 HP よりデータ入手)



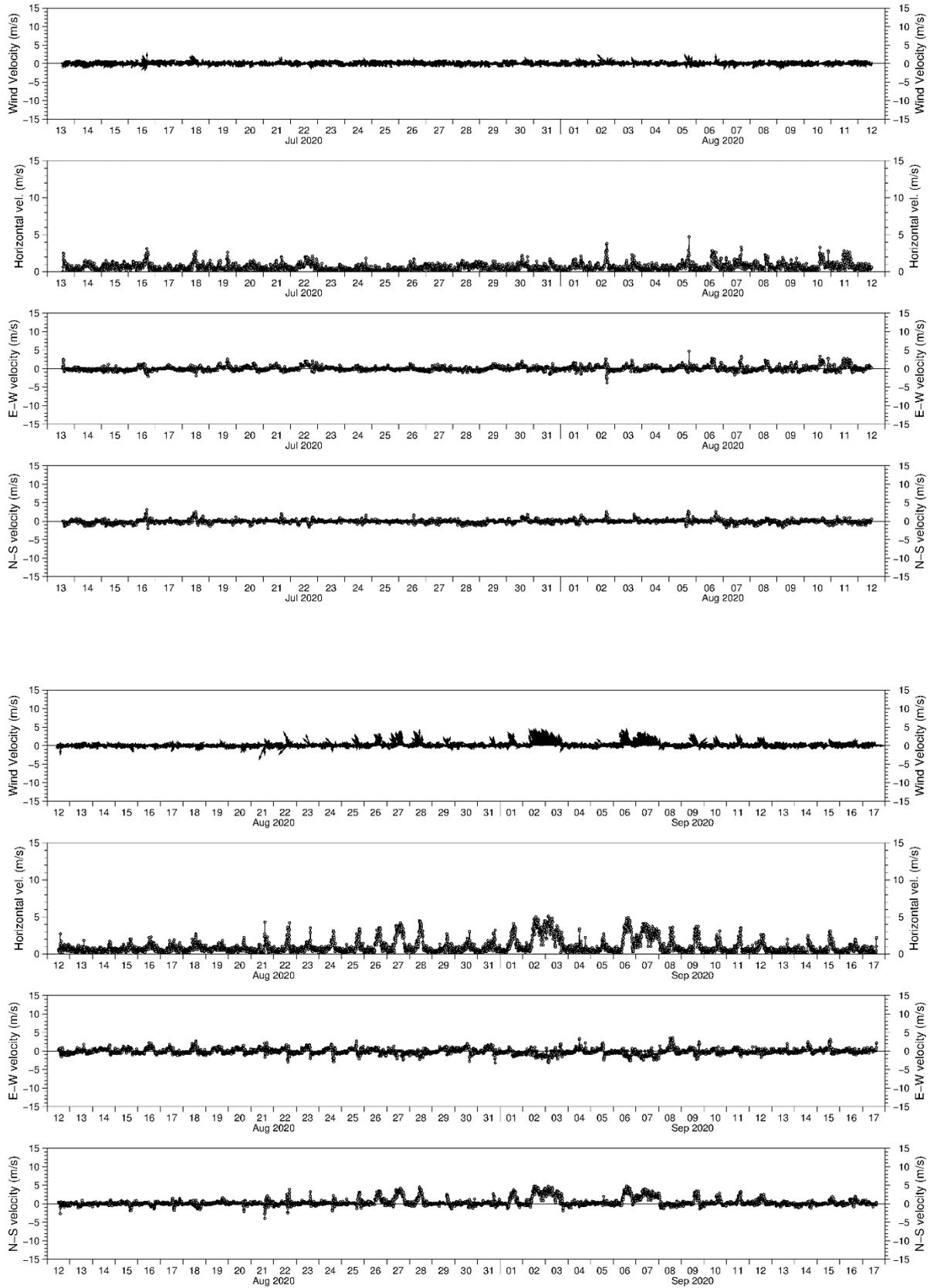
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(2) 風向風速測定結果(諏訪合同庁舎:発注者よりデータ提供)



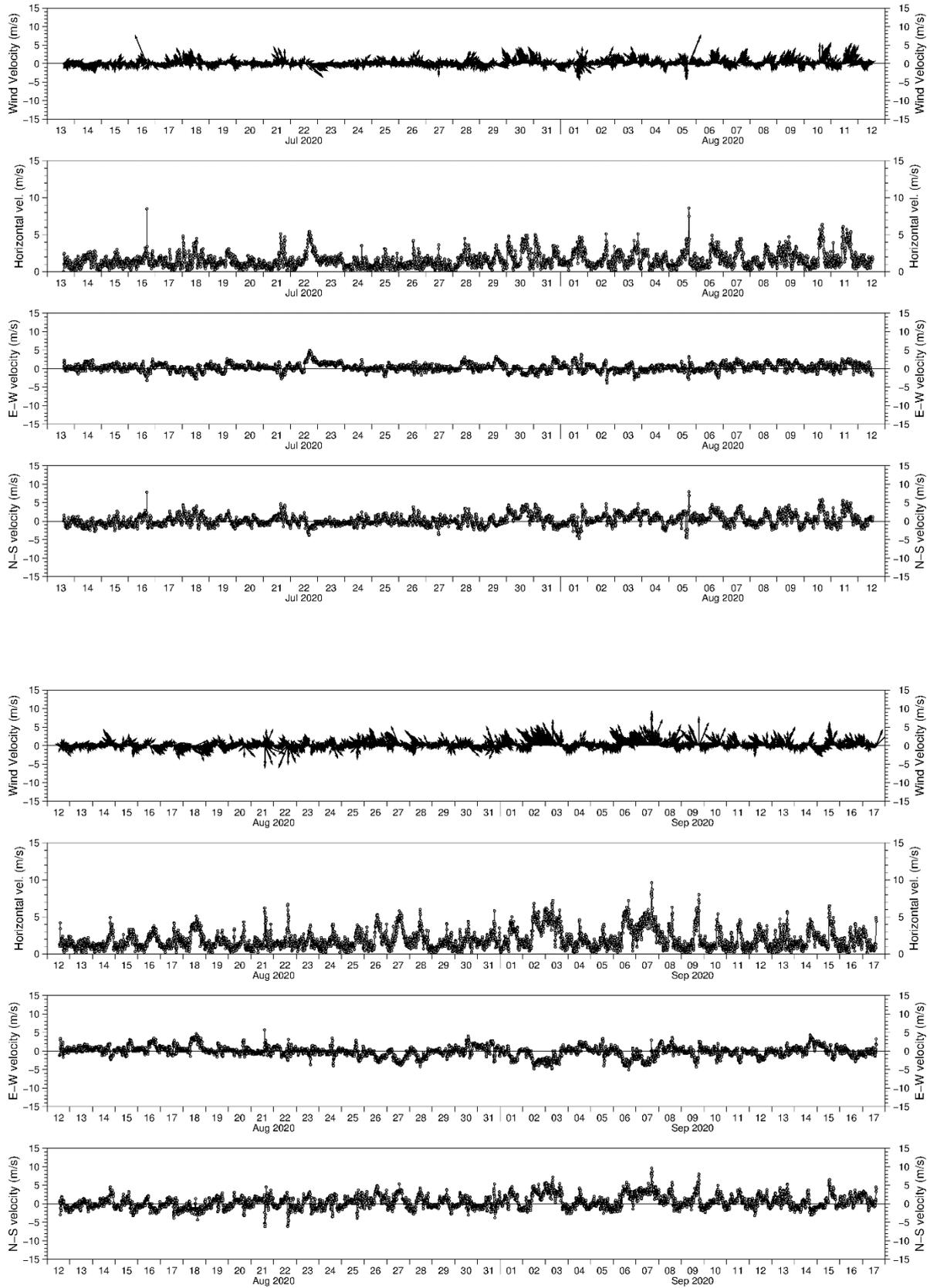
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(3) 風向風速測定結果(湖心)



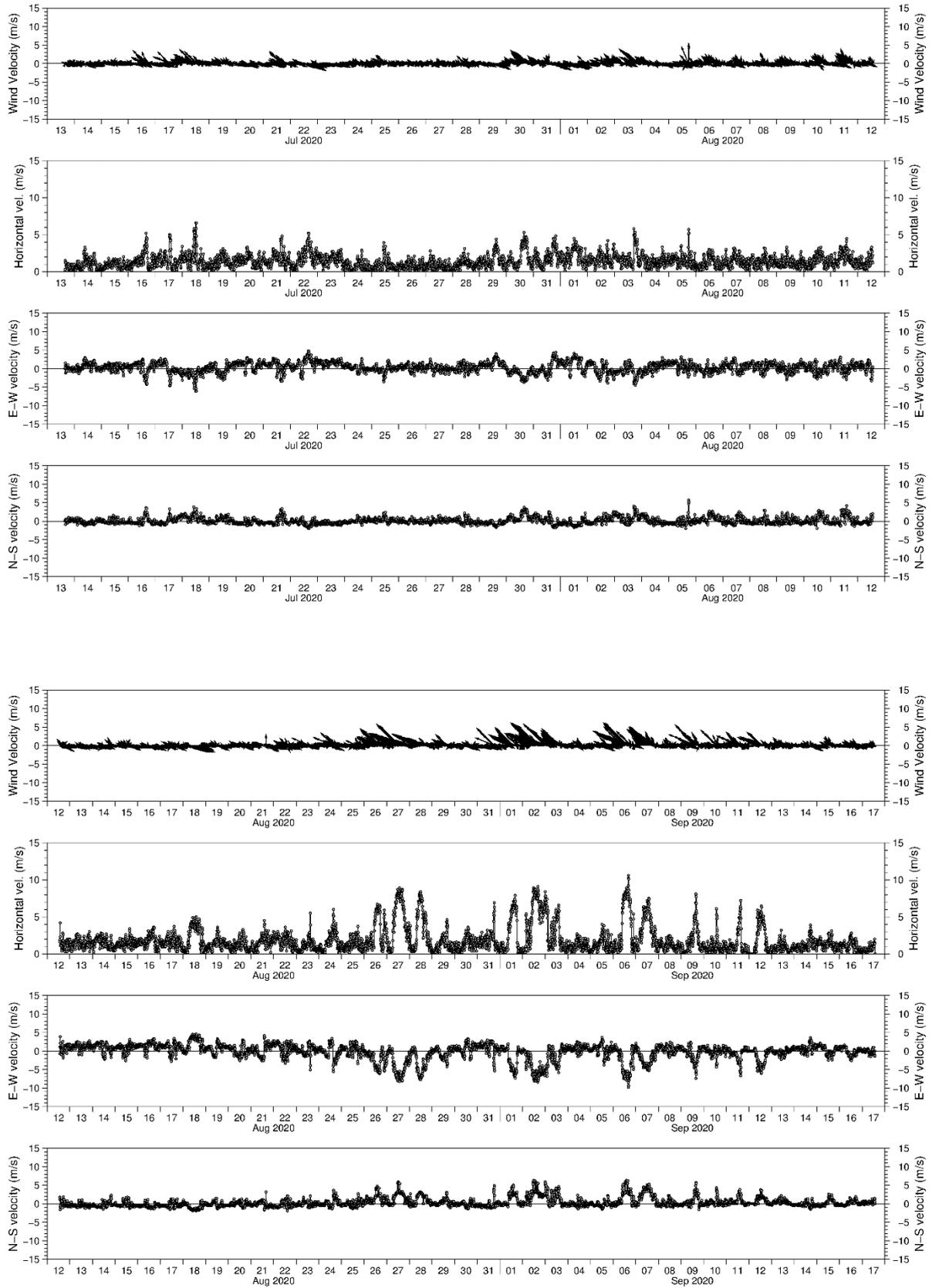
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(4) 風向風速測定結果(大沢)



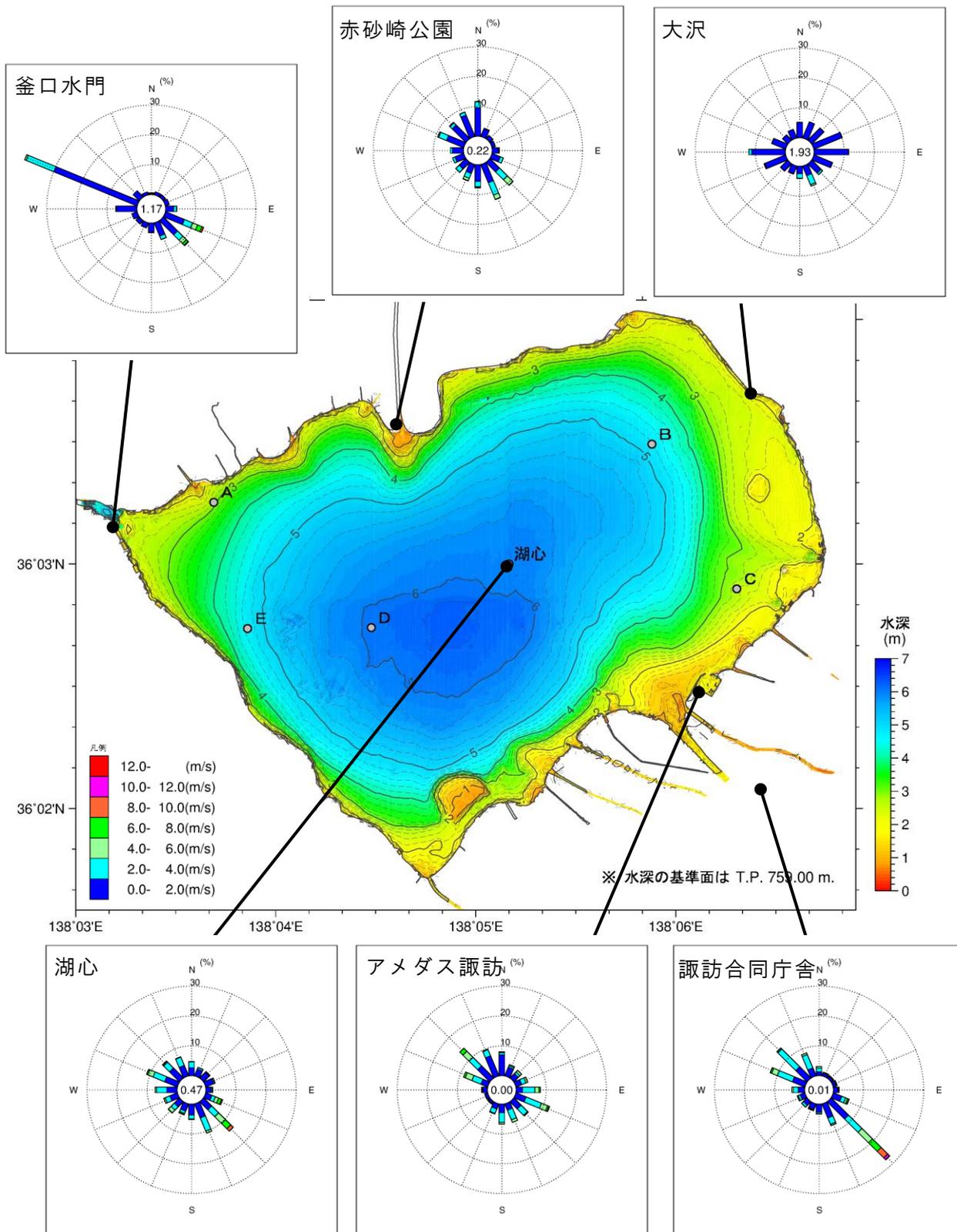
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(5) 風向風速測定結果(赤砂崎公園)



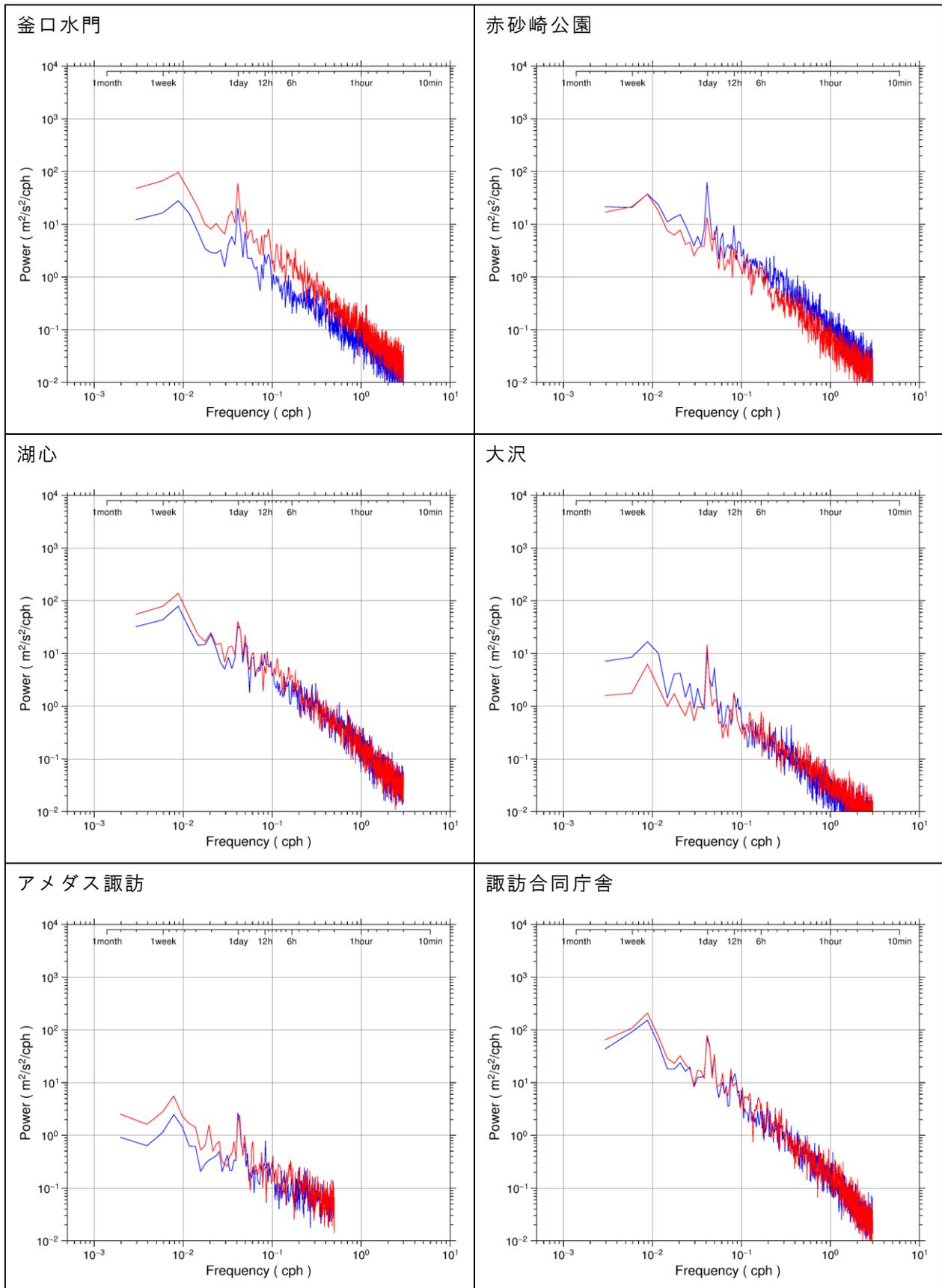
※風向風速ベクトルは風が吹き去る方向とその強さを表す。

図 2.8(6) 風向風速測定結果(釜口水門)



※風向は風が吹いてくる方向、円の中の数字は無風状態の発生頻度(%)を表す。

図 2.9 調査期間中の風向別風速頻度分布(7/13~9/17、単位:%)



※赤：東西方向成分、青：南北方向成分、グラフの横軸は周期(1/h)、縦軸はパワー（またはパワースペクトル密度、その周波数の波がもつエネルギーの強さ）である。

図 2.10 各地点の風速(東西方向・南北方向)のパワースペクトル

2.3 流向流速測定結果

流向流速測定結果を図 2.12 に示す。なお、流向流速計は超音波式であるため、その機械特性上、センサー直近（約 20cm）と水面付近（水深の約 8%に相当する厚さ）に欠測領域が存在する。図の見方は、以下の通りである。

- ・ 各図の横軸は時間、縦軸は標高である。
- ・ 色は流速を表し、青～赤の場合は流速の絶対的な速さ、青～白～赤は流速の東向き・北向き・上向き成分を+（赤）、南向き・西向き・下向きの流速成分を-（青）として描画している。

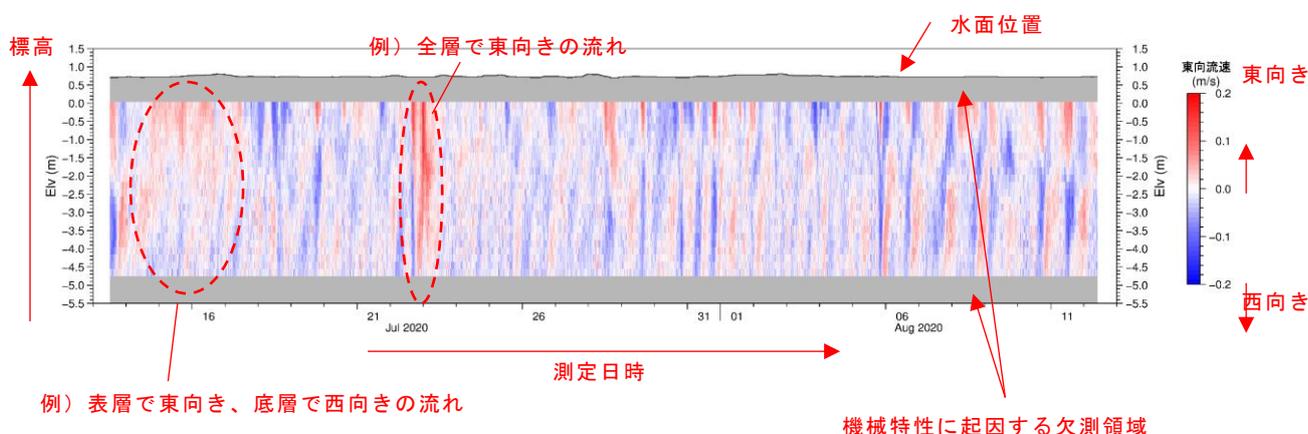


図 2.11 流向流速測定結果の例（湖心、第 1 回、東西成分）

流向・流速測定地点それぞれ表層（水面直下～水深 1m 程度）・中層（1/2 水深前後の層厚 1m 程度）・底層（湖底～底上 1m 程度）の各層の流向別流速頻度分布を図 2.13 に示す。また、各地点の表層（水面直下～水深 1m 程度）、中層（1/2 水深前後の層厚 1m 程度）、底層（湖底～底上 1m 程度）の各層の東西方向流速、南北方向流速それぞれについて、パワースペクトル解析を行った結果を図 2.14 に示す。参考として、流向流速計の点検・回収時に水質鉛直分布を測定しており、その結果を図 2.15 に示す。

図 2.15 によれば、8 月 12 日の機器点検時においては、諏訪湖内は水温成層が見られ、水深 2m 付近より下で低温となっており、水面～湖底の水温差は最大 10℃程度となっていた。濁度は湖底で高くなっていたほか、水深 3～4m 付近でも高くなっていたが、これは同じ水深帯で DO およびクロロフィル a 濃度が高くなっていたことから、植物プランクトンが増殖していたことがその要因と考えられる。DO 濃度は、水深 3～4m 帯では過飽和状態に近い高濃度（13～14mg/L）であったが、湖底では貧酸素状態（2mg/L 以下）となっていた。

図 2.12(1)(2)より、湖心においては東向流速、北向流速共に表層・底層で流向が逆となるような流れ場が時々生じており、また 7 月 22 日頃、8 月 18 日頃、9 月 2 日頃、および 9 月 15 日頃は全層にわたって同じ方向への流れが生じていた。上下 2 層の流れが生じている場合、その流動（振動）はおおむね 1 日周期であり、数日間継続する傾向があった。また、図 2.14 のパワースペクトル解析結果によれば、表層・中層は 1 日周期および半日前後の周期に弱いピークが見られ、底層については 1 日周期の強いピークと半日前後の周期の弱いピークが見られた。

諏訪湖においては、例えば東西方向の長さを $L=5250\text{m}$ 、平均水深を $h=5\text{m}$ と見積もると、第 1 モード ($m=1$) のセイシュ（水面の振動）の周期 T_s は⁶

$$T_s = \frac{2L}{m\sqrt{gh}}$$

より 25 分程度と見積もられる。一方、内部セイシュ（密度界面の振動）の周期 T_i は、上下層の水温差を約 5°C （密度差で $1/1000$ 、すなわち $g' = 0.001g$ ）としたとき

$$T_i = \frac{2L}{m\sqrt{g'h}}$$

より約 0.55 日程度と見積もられる。この概算から、諏訪湖においては 1 日周期の振動は風などの気象に起因する振動、半日程度の周期は内部セイシュによる振動である可能性が考えられた。また、9 月頃からは上下 2 層の流れや半日程度の周期の振動があまり見られないが、これは湖内の水温成層がほぼ解消したため（後述の図 2.16 参照）と考えられた。なお、本業務の流向流速測定は 10 分間隔であり、セイシュによる流動を捉えられる時間解像度ではないため、パワースペクトル解析結果にはセイシュによるピークは表れていない。

図 2.12(3)(4)より、上川沖における 7 月中旬～8 月上旬及び 8 月下旬～9 月上旬では表層の東向流速はマイナス、北向流速も多少のマイナスとなっており、これを合わせると南西～西南西方向への流れが多く生じていた。パワースペクトルでは、表層については 1 日周期の強いピークが、中層は 1 日周期の弱いピークが、底層は 1 日周期および半日前後の周期に弱いピークが見られた。

図 2.12(5)(6)より、地点 B においては、表層は東向きの流れ、底層は南向きの流れが比較的多い傾向がみられた。地点 B は諏訪湖の北東側に位置し、この地点より東側は水深の浅い水域が広がっているため、流向・流速測定結果のみではこの要因を推測することは

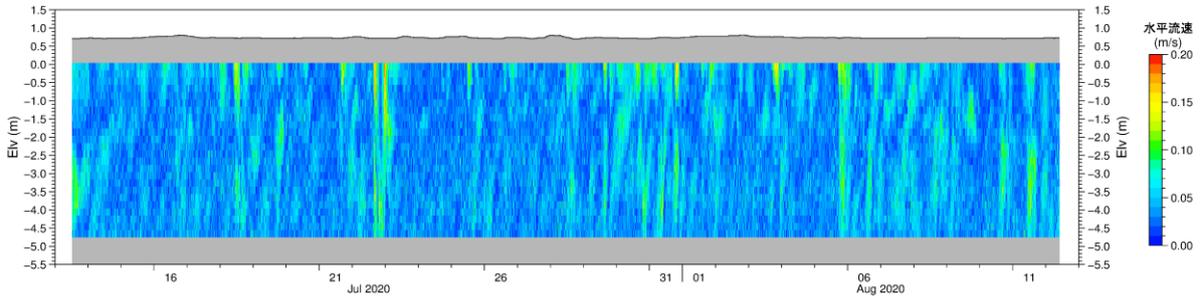
⁶ 有田正光 編著、池田裕一・中井正則・中村由行・道奥康治・村上和男 著：水圏の環境 p128-129, 東京電機大学出版局, 1998.

難しい。パワースペクトルでは、表層および底層については1日周期の強いピークと半日周期の弱いピークが、中層は1日周期の弱いピークが見られた。

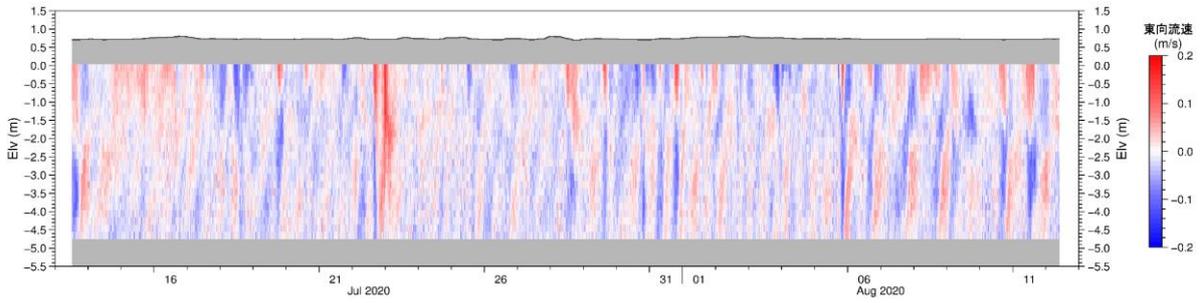
図 2.12(7)(8)より、地点 D においては、表層～中層にかけては北西向きの流れが見られ、底層については明瞭な傾向は見られなかった。地点 D は諏訪湖の西側に位置し、この地点より北西側には釜口水門があるため、地点 D の表層～中層の流動は釜口水門からの放流の影響を受けているものと考えられた。パワースペクトルでは、表層および底層については1日周期のやや強いピークと半日周期の弱いピークが、中層は1日周期と半日周期の弱いピークが見られた。

図 2.13 より、各地点の流向別流速頻度分布から湖内流動の特徴をまとめると、湖心の表層・中層は北西～南東方向の流動が比較的多く、湖心底層及び地点 D は西～南西向きの流れも多く生じていた。上川沖は南西～西南西方向の流れが卓越している一方で東～南向きの流れはほとんど見られなかった。地点 B は、表層は東～北東向きが多く、中層・底層は東～南西向きの流れもやや多くなっていた一方で、北西向きの流れはほとんど見られなかった。

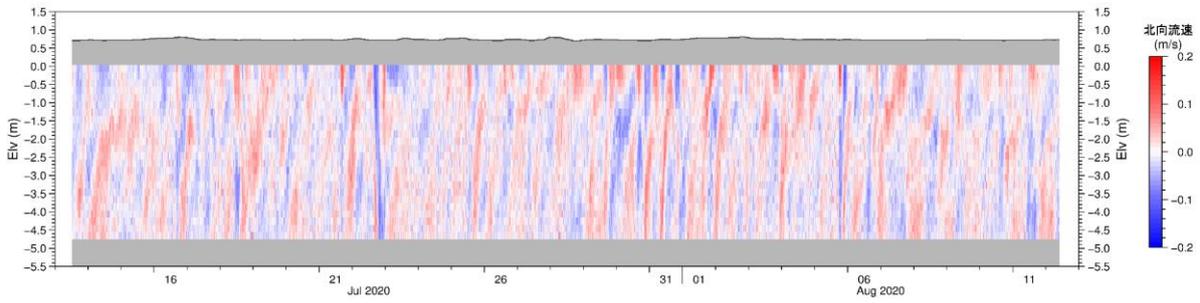
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

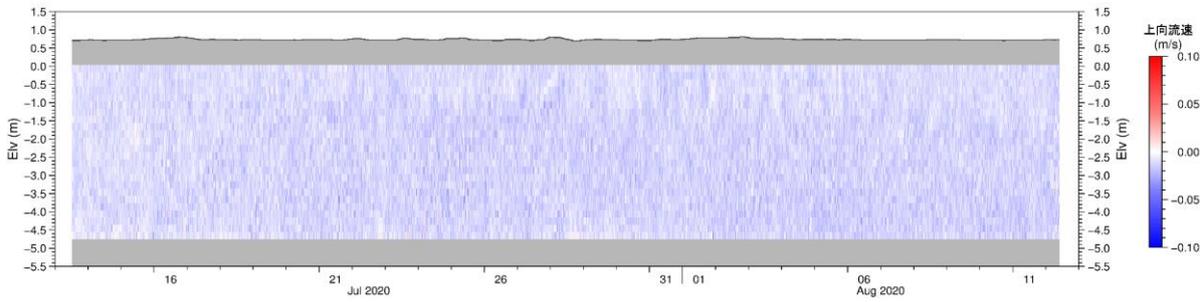
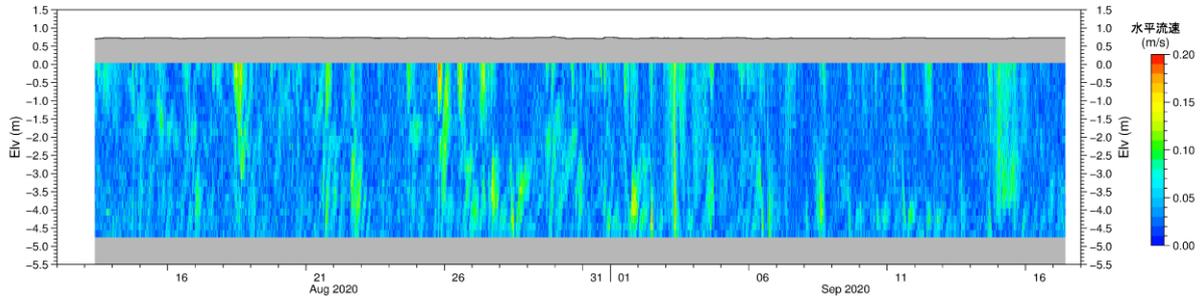
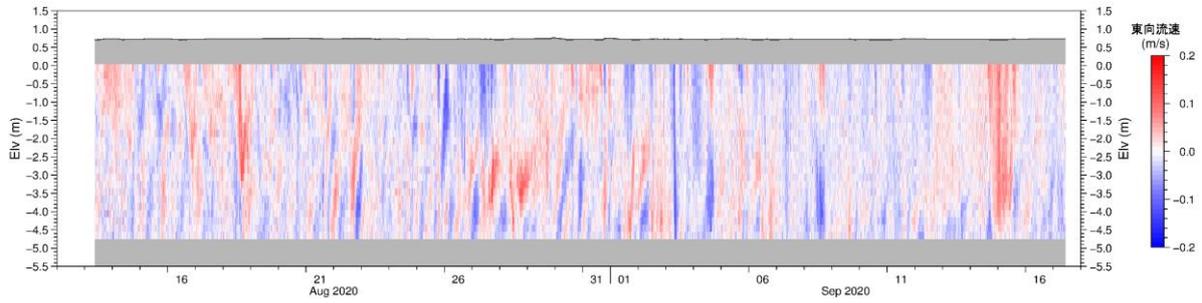


図 2.12(1) 流向流速測定結果(湖心、第1回、7/13~8/12)

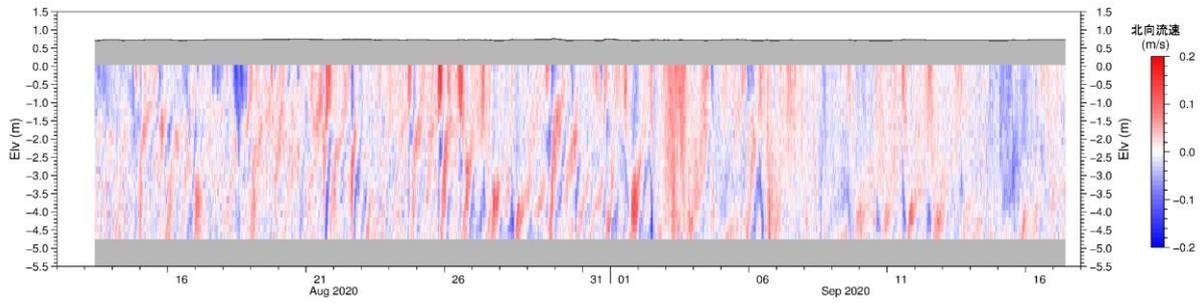
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

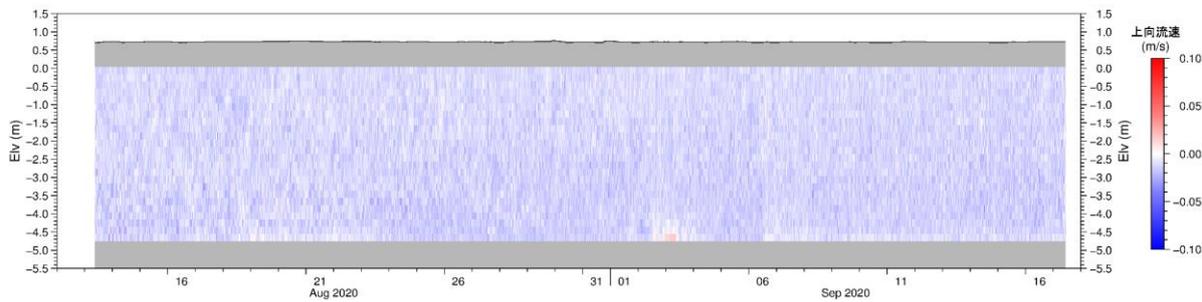
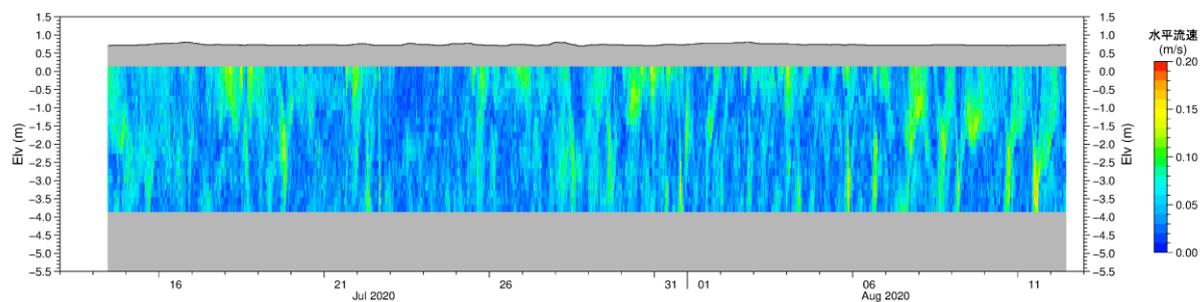
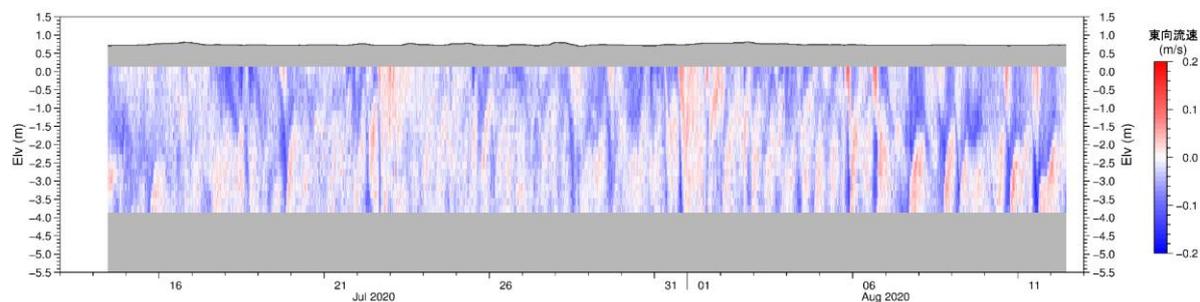


図 2.12(2) 流向流速測定結果(湖心、第 2 回、8/13~9/17)

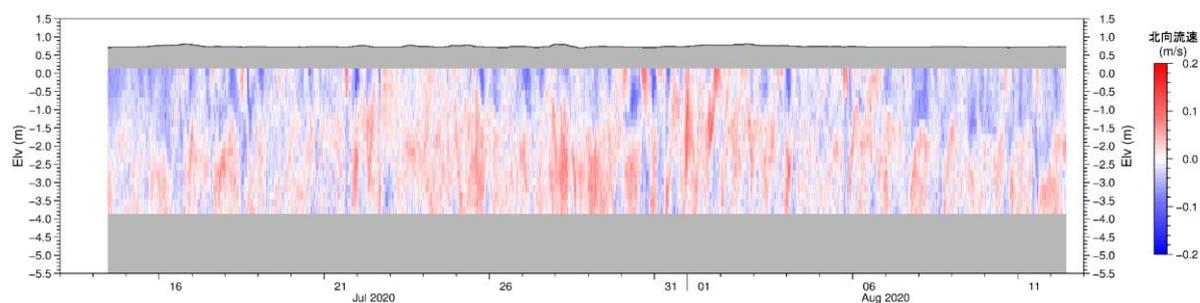
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

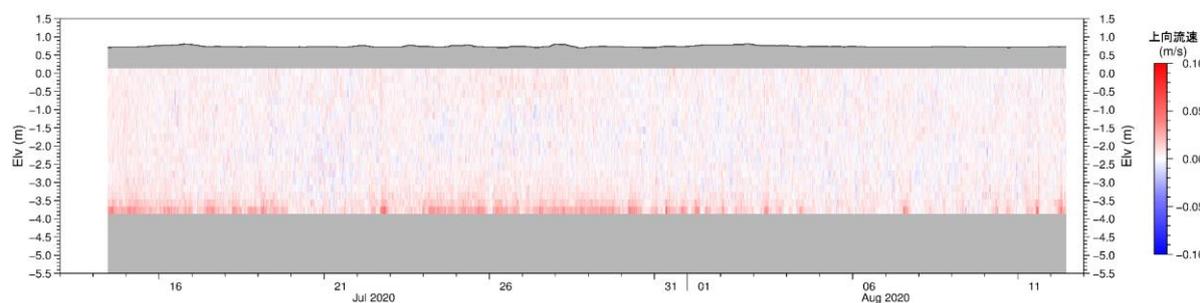
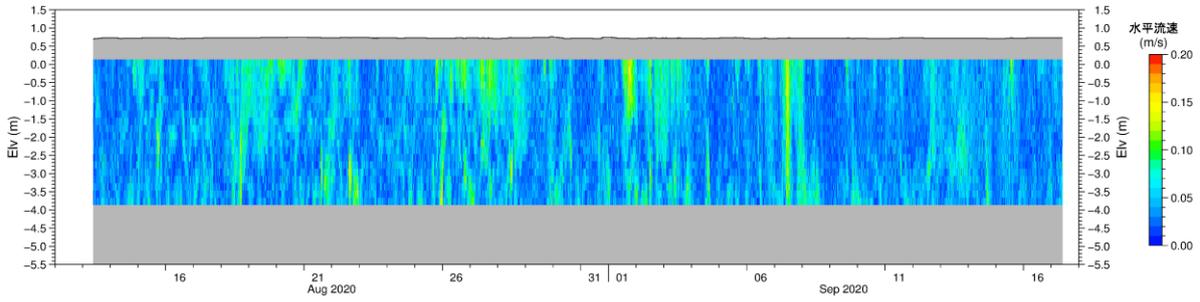
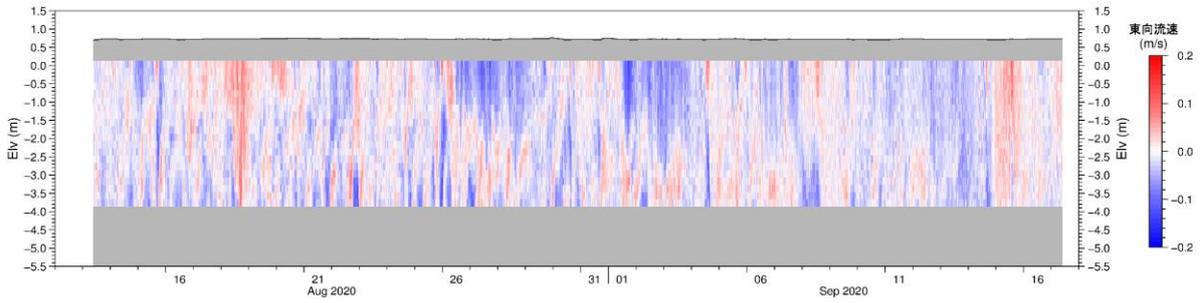


図 2.12(3) 流向流速測定結果(上川沖、第1回、7/14~8/12)

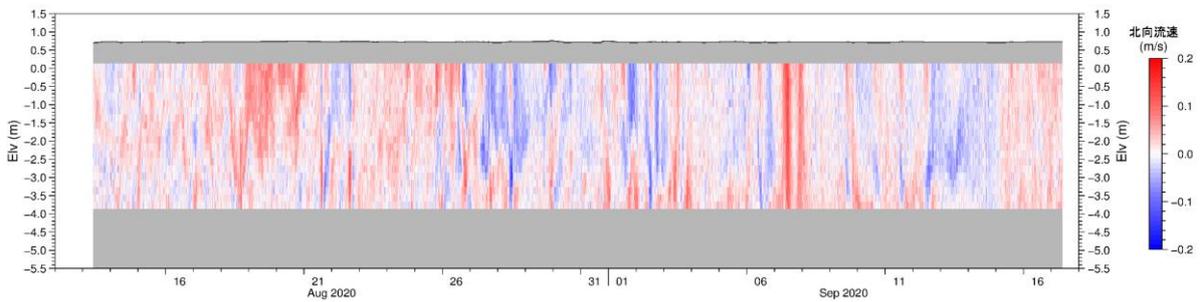
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

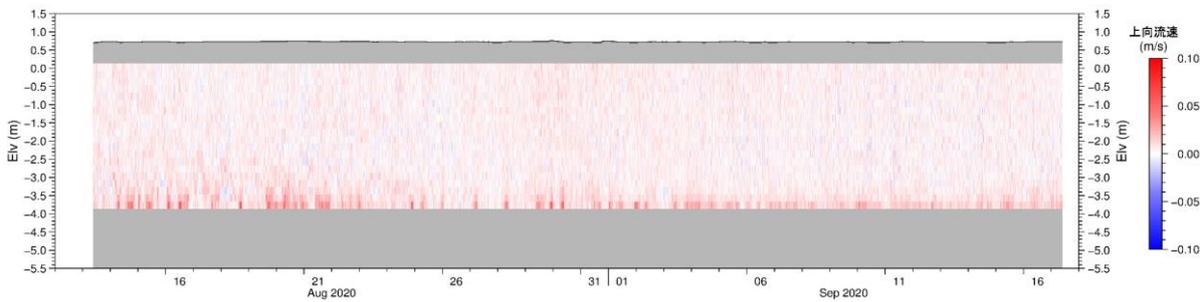
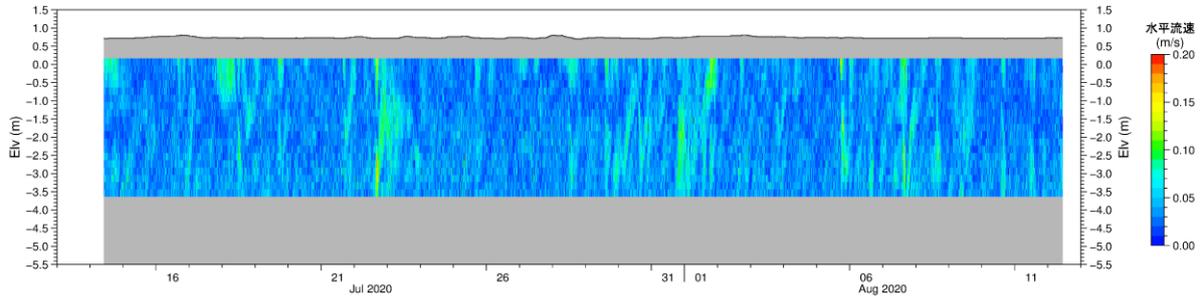
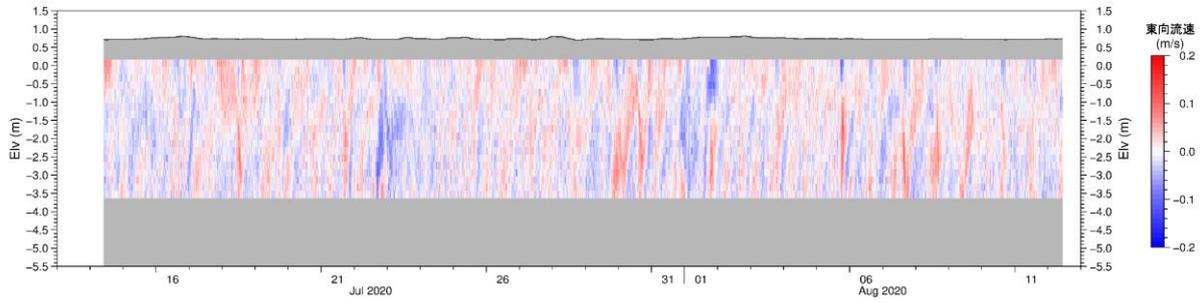


図 2.12(4) 流向流速測定結果(上川沖、第2回、8/13~9/17)

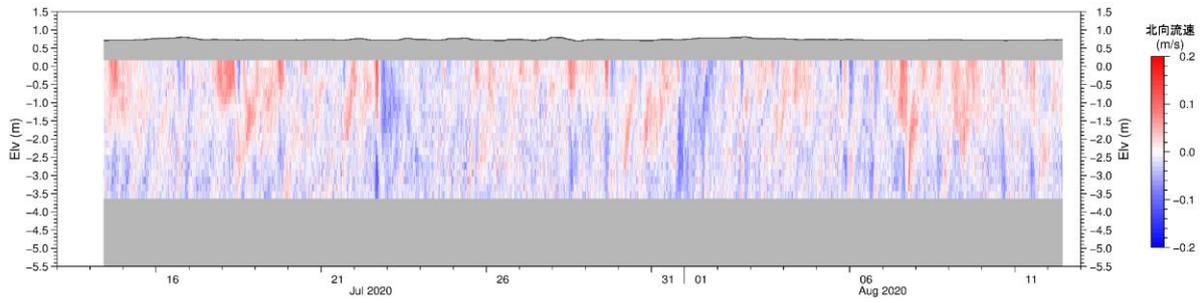
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

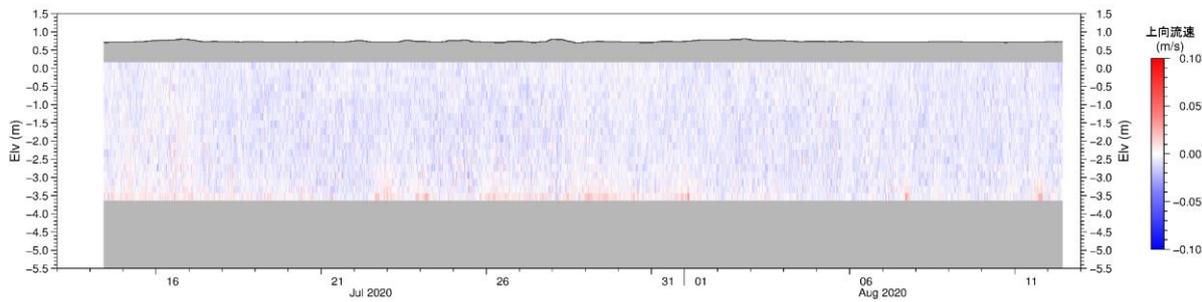
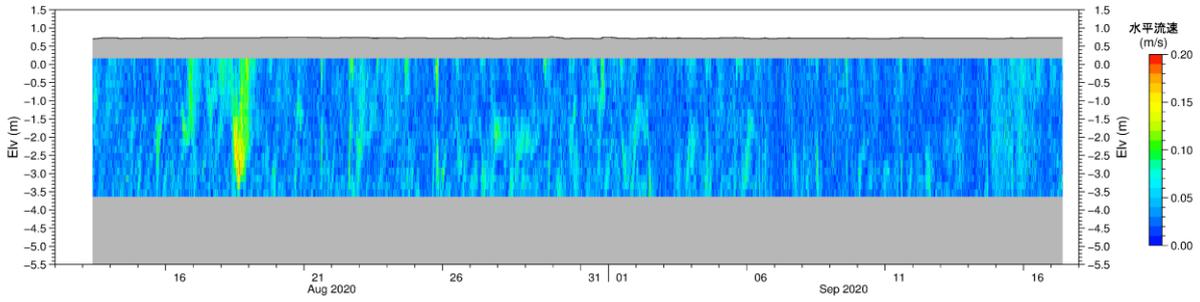
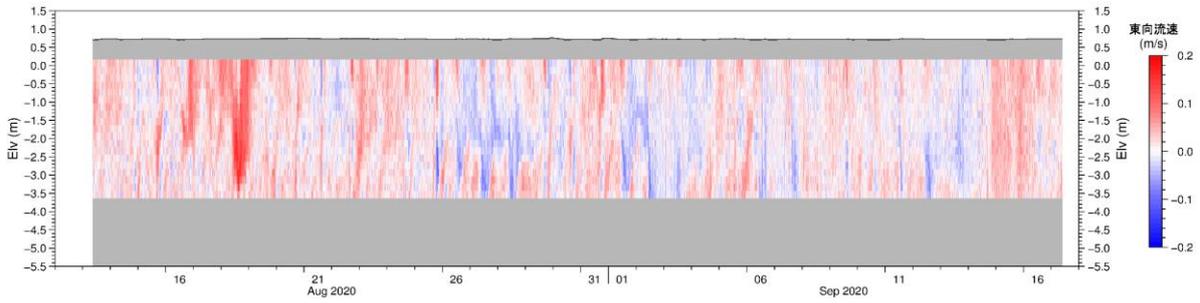


図 2.12(5) 流向流速測定結果(地点 B、第 1 回、7/14~8/12)

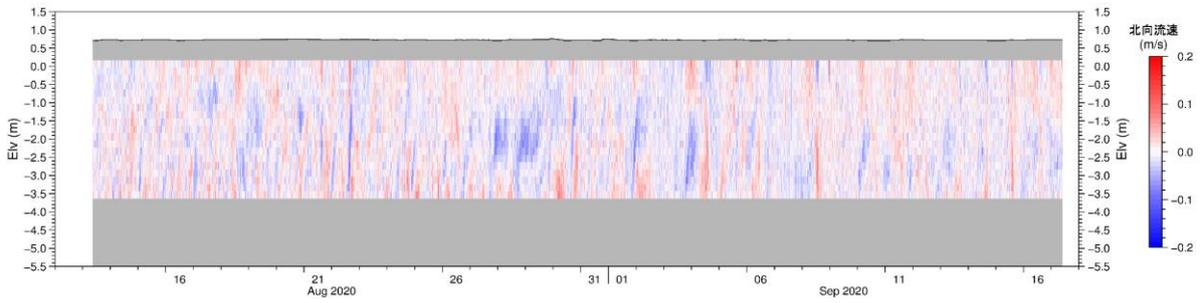
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

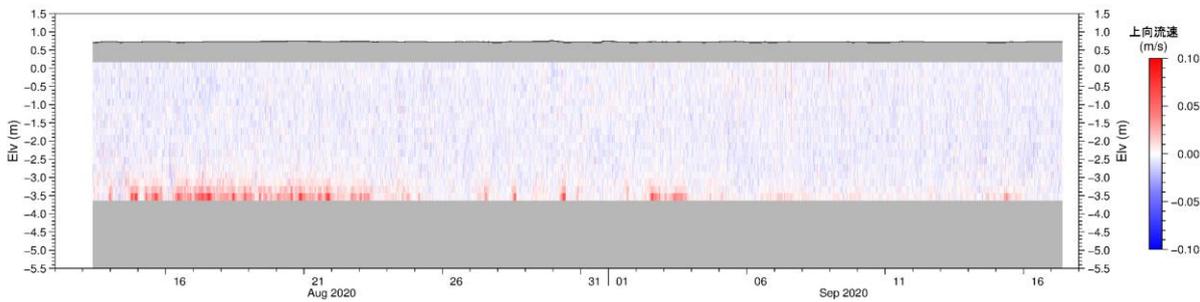
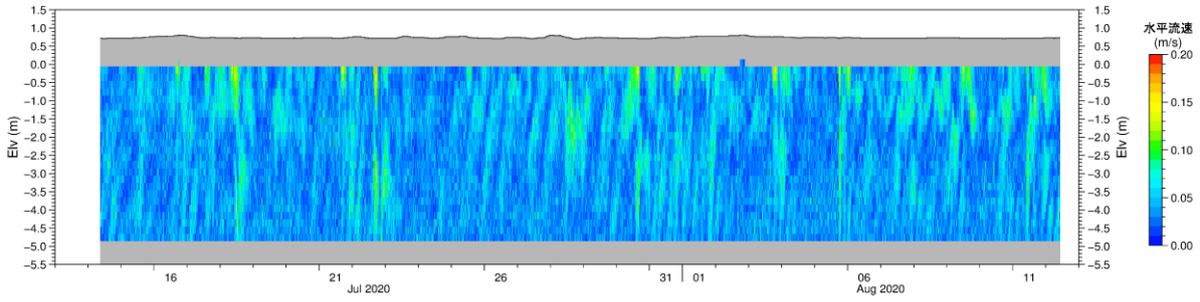
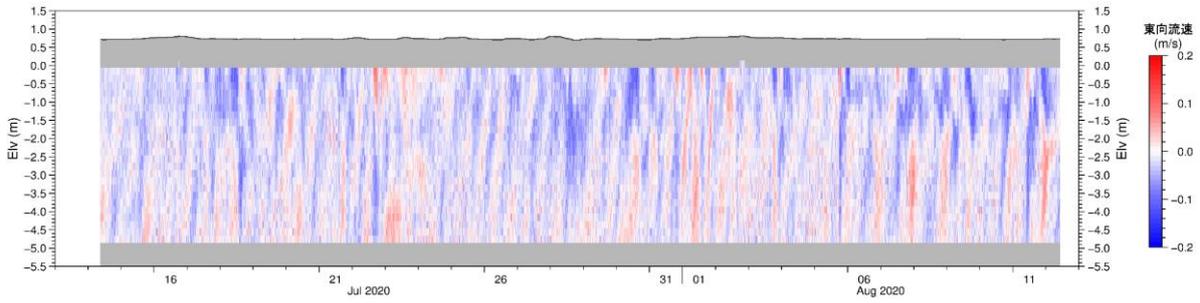


図 2.12(6) 流向流速測定結果(地点 B、第 2 回、8/13~9/17)

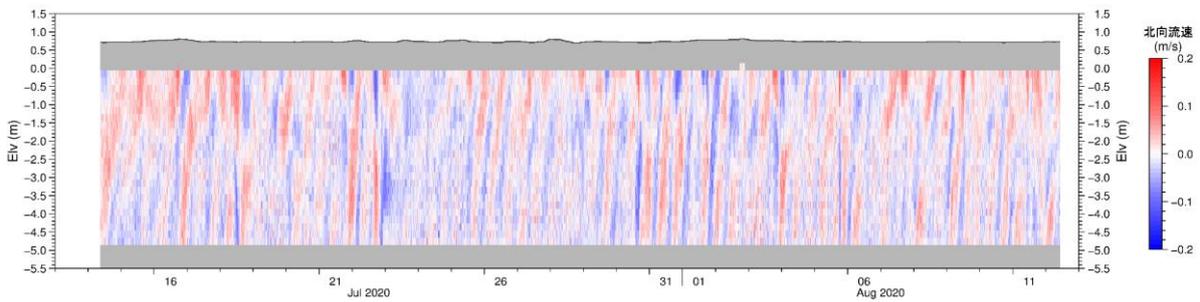
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

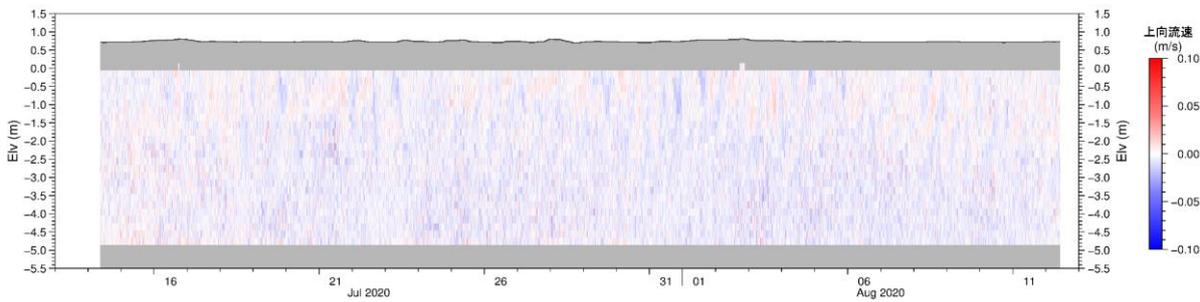
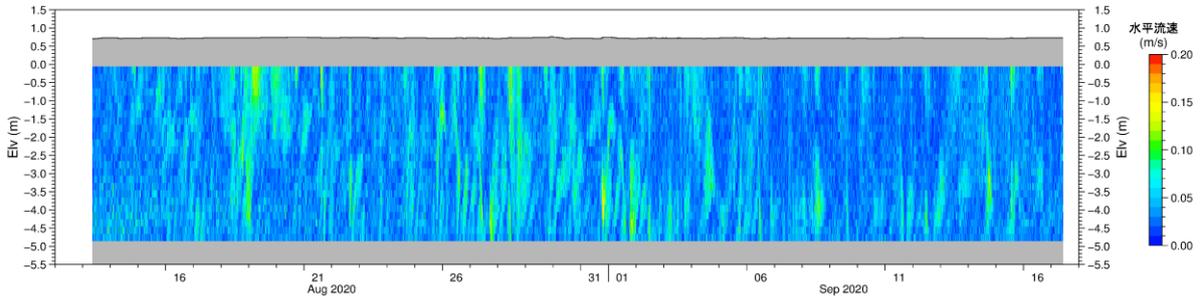
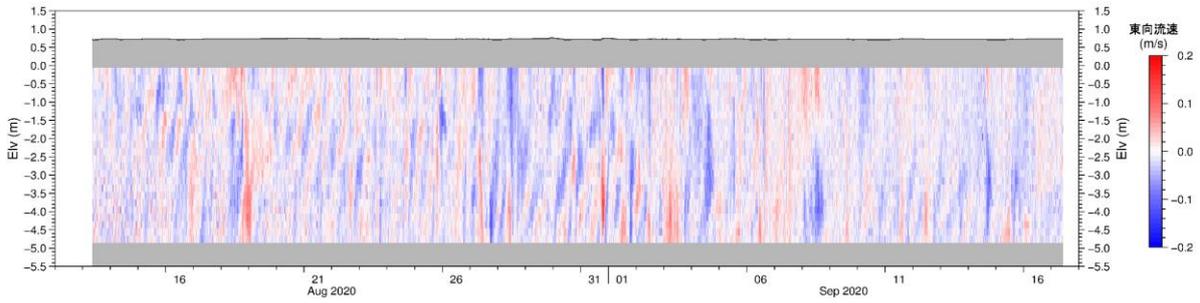


図 2.12(7) 流向流速測定結果(地点 D、第 1 回、7/14~8/12)

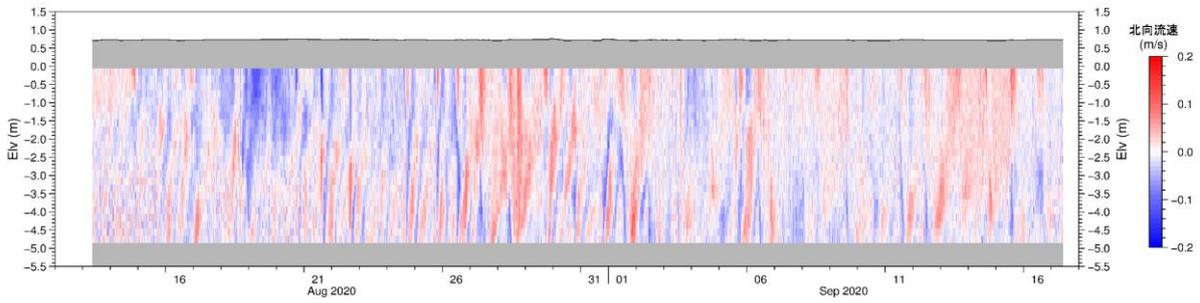
(水平流速)



(水平流速の東西成分(東向き+))



(水平流速の南北成分(北向き+))



(鉛直流速(上向き+))

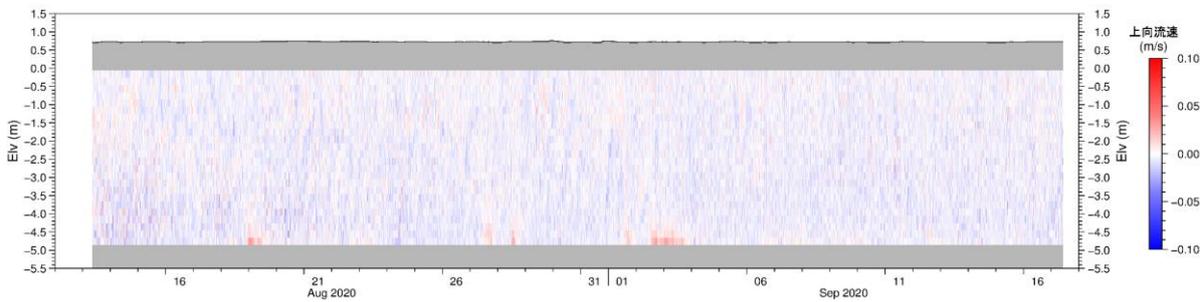
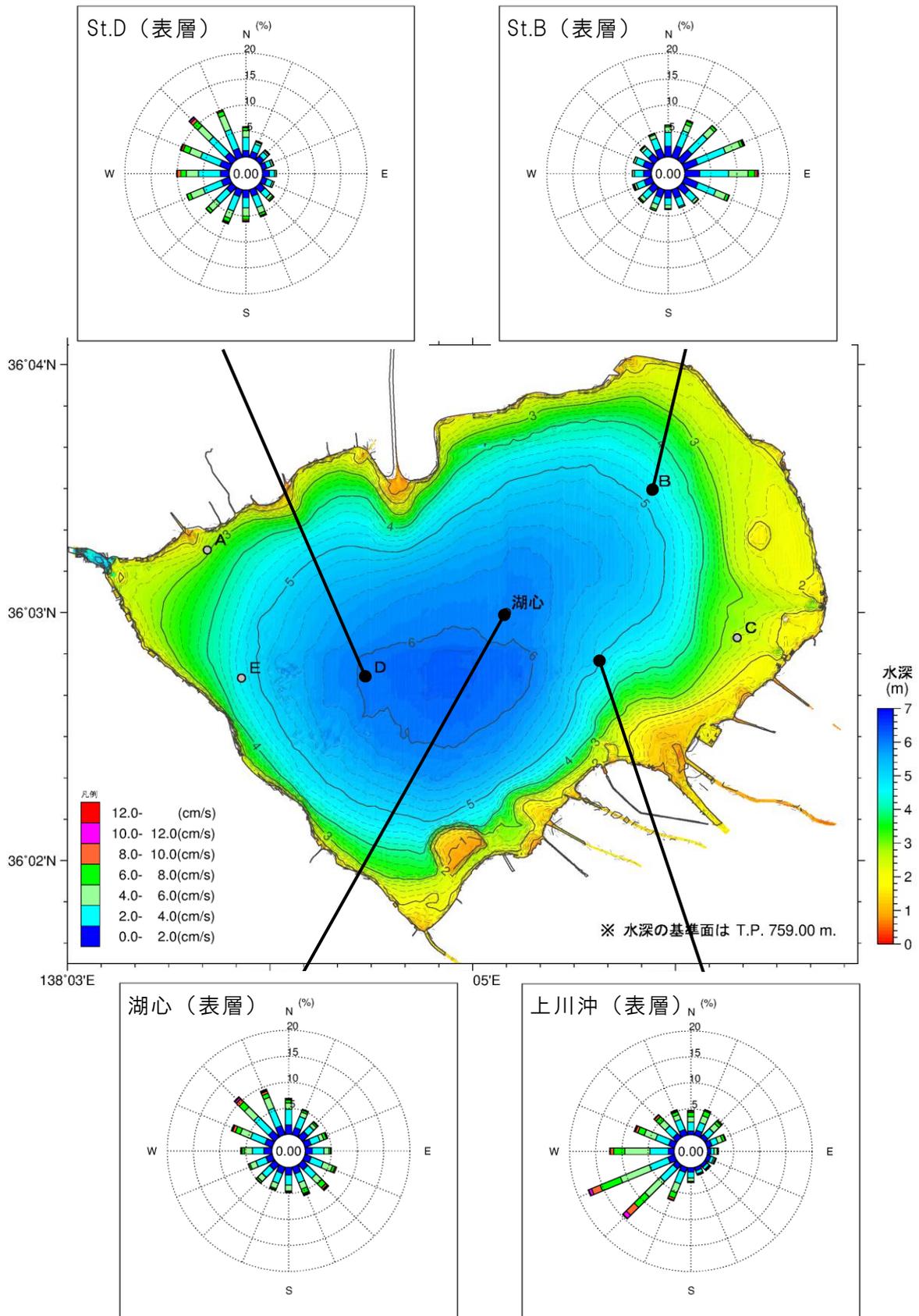
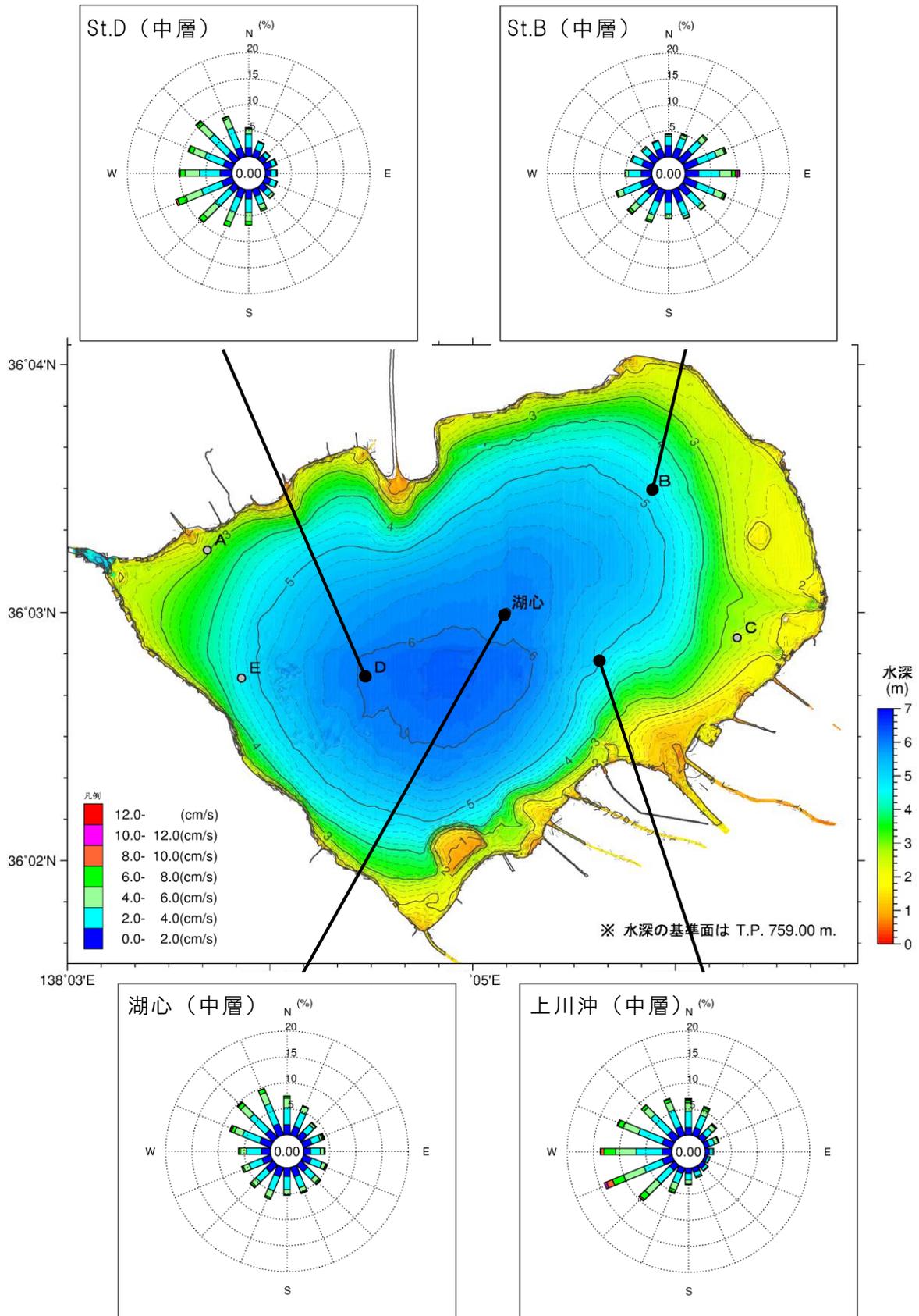


図 2.12(8) 流向流速測定結果(地点 D、第 2 回、8/13~9/17)



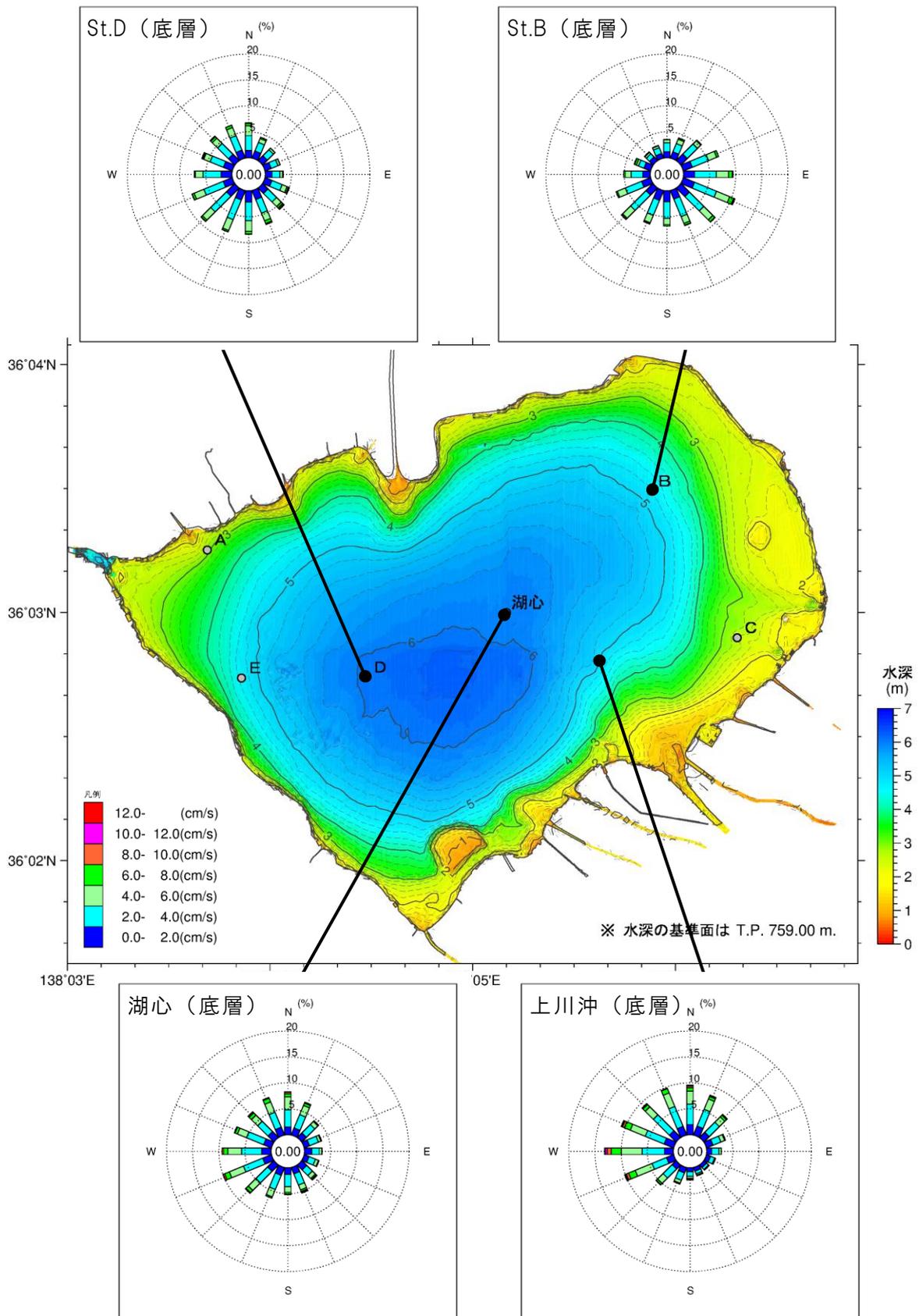
※流向は水が流れ去る方向、円の中の数字は流速ゼロの状態の発生頻度(%)を表す。

図 2.13(1) 調査期間中の流向別頻度分布(7/13~9/17、表層、%)



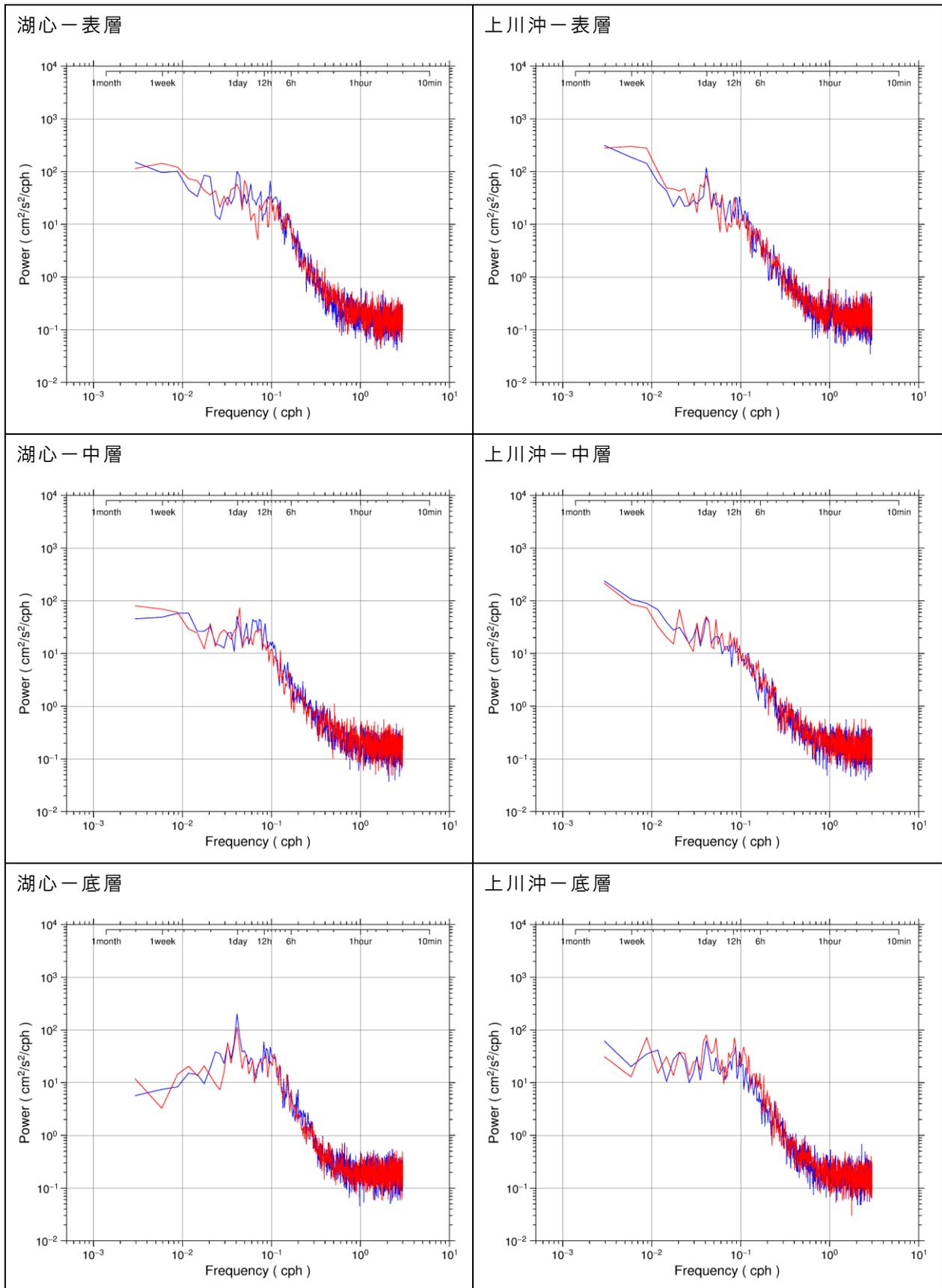
※流向は水が流れ去る方向、円の中の数字は流速ゼロの状態の発生頻度(%)を表す。

図 2.13(2) 調査期間中の流向別頻度分布(7/13~9/17、中層、%)



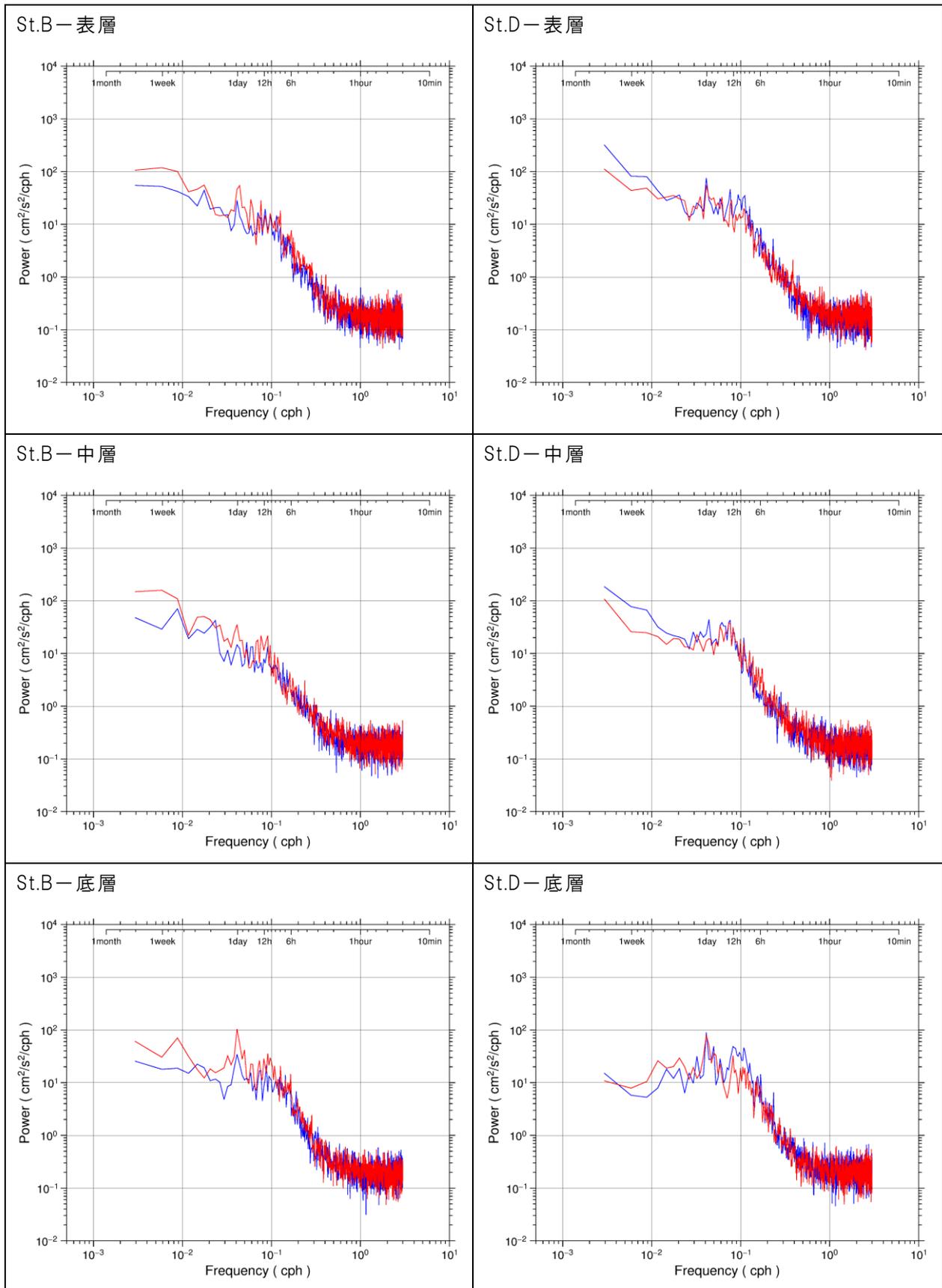
※流向は水が流れ去る方向、円の中の数字は流速ゼロの状態の発生頻度(%)を表す。

図 2.13(3) 調査期間中の流向別頻度分布(7/13~9/17、底層、%)



※赤：東西方向成分、青：南北方向成分、グラフの横軸は周期(1/h)、縦軸はパワー（またはパワースペクトル密度、その周波数の波がもつエネルギーの強さ）である。

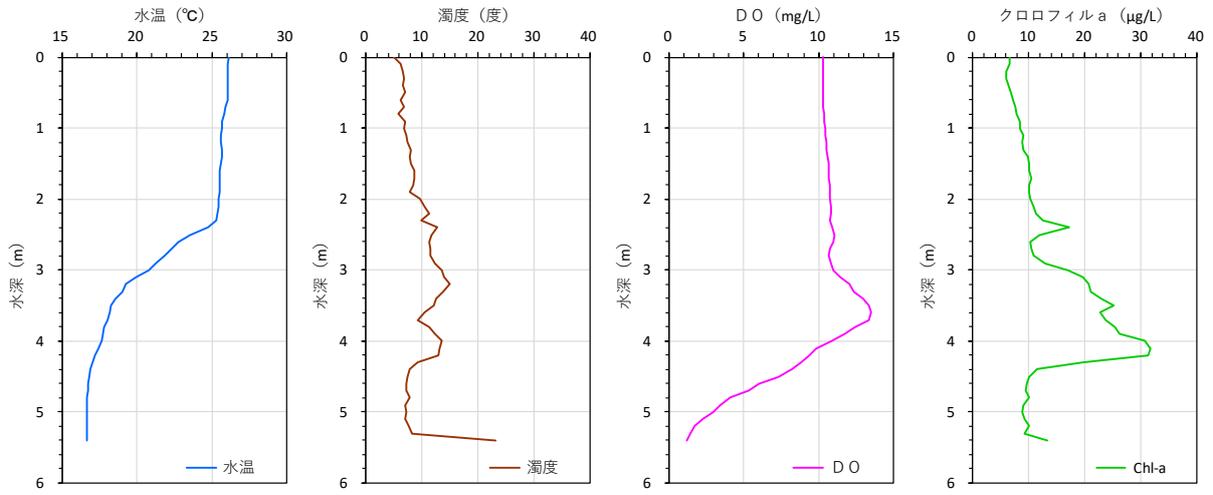
図 2.14(1) 各地点の流速(東西方向・南北方向)のパワースペクトル



※赤：東西方向成分、青：南北方向成分、グラフの横軸は周期(1/h)、縦軸はパワー
 (またはパワースペクトル密度、その周波数の波がもつエネルギーの強さ)である。

図 2.14(2) 各地点の流速(東西方向・南北方向)のパワースペクトル

(湖心)



(上川沖)

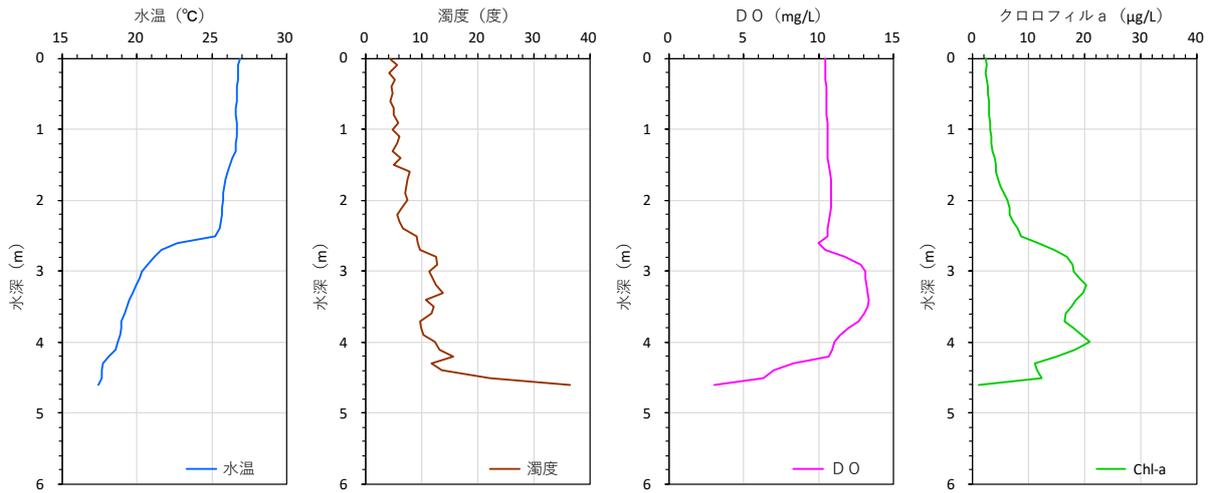
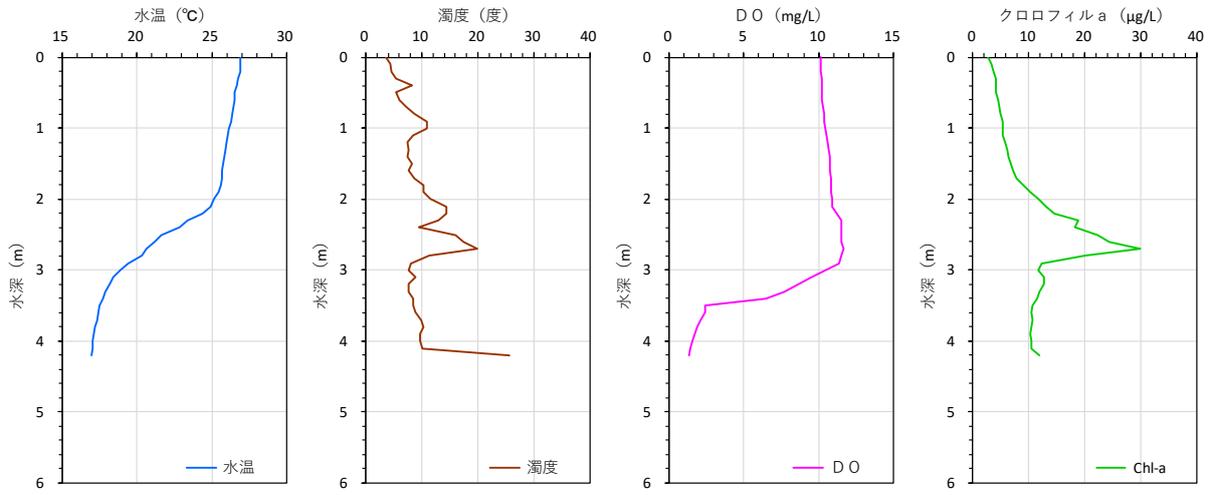


図 2.15(1) 水質鉛直測定結果(2020年8月12日、湖心・上川沖)

(地点 B)



(地点 D)

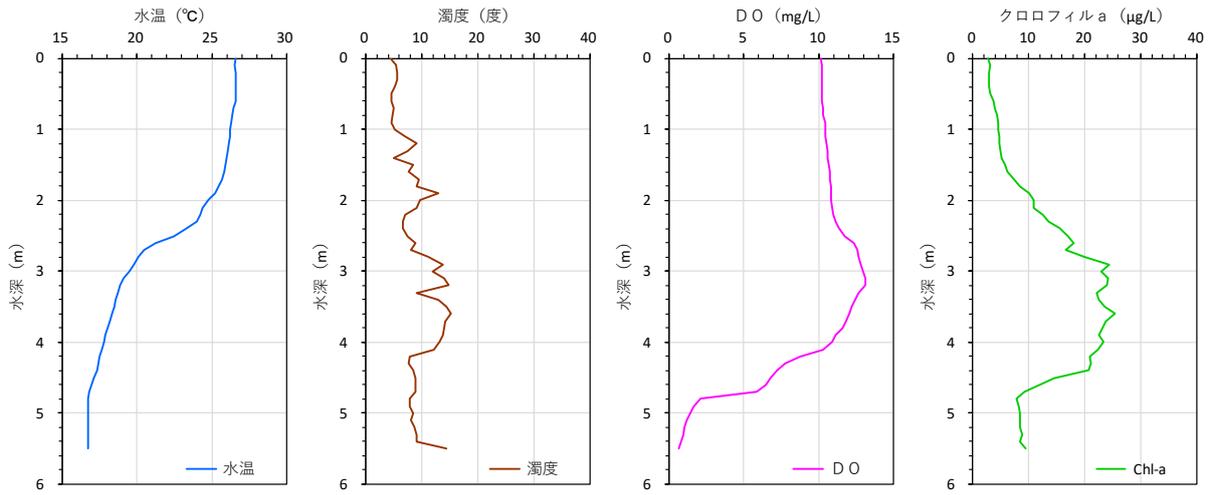
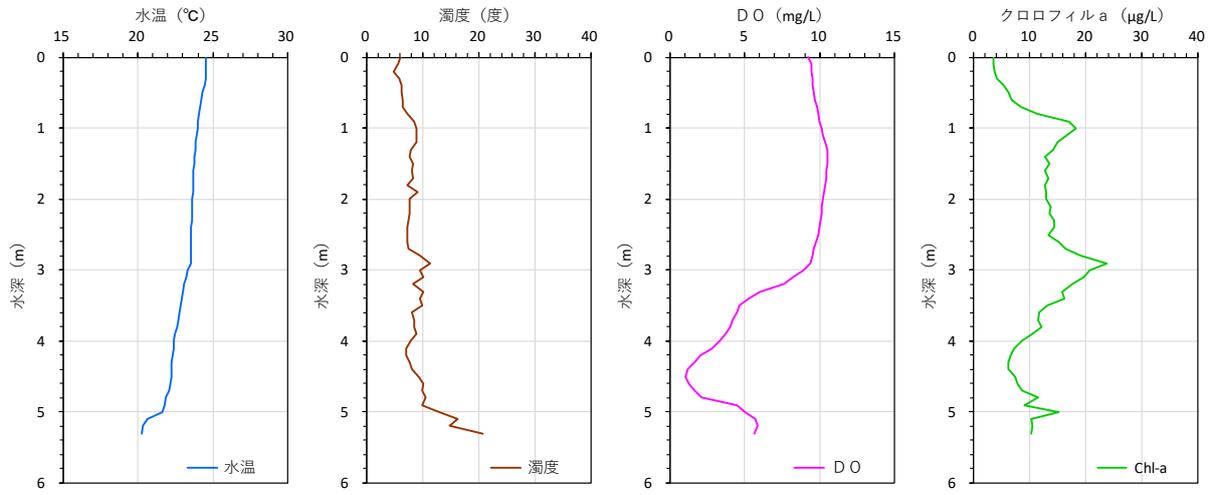


図 2.15(2) 水質鉛直測定結果(2020年8月12日、地点 B・地点 D)

(湖心)



(上川沖)

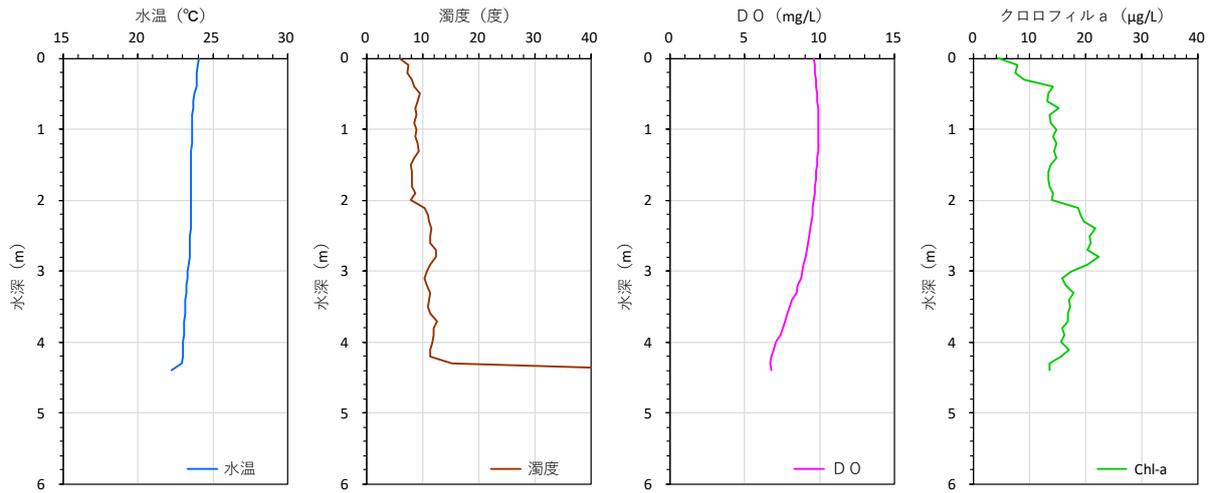
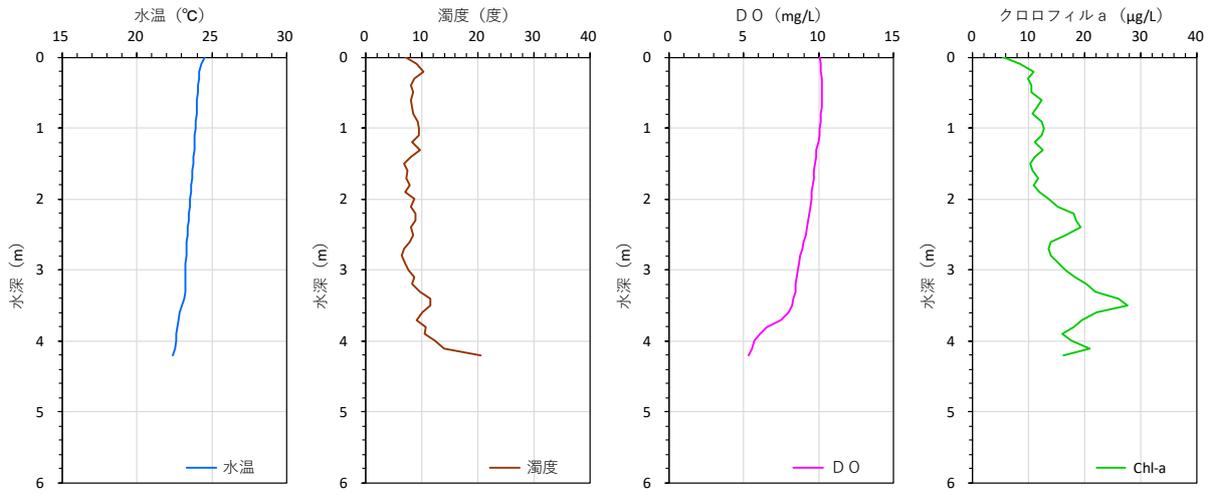


図 2.15(3) 水質鉛直測定結果(2020年9月17日、湖心・上川沖)

(地点 B)



(地点 D)

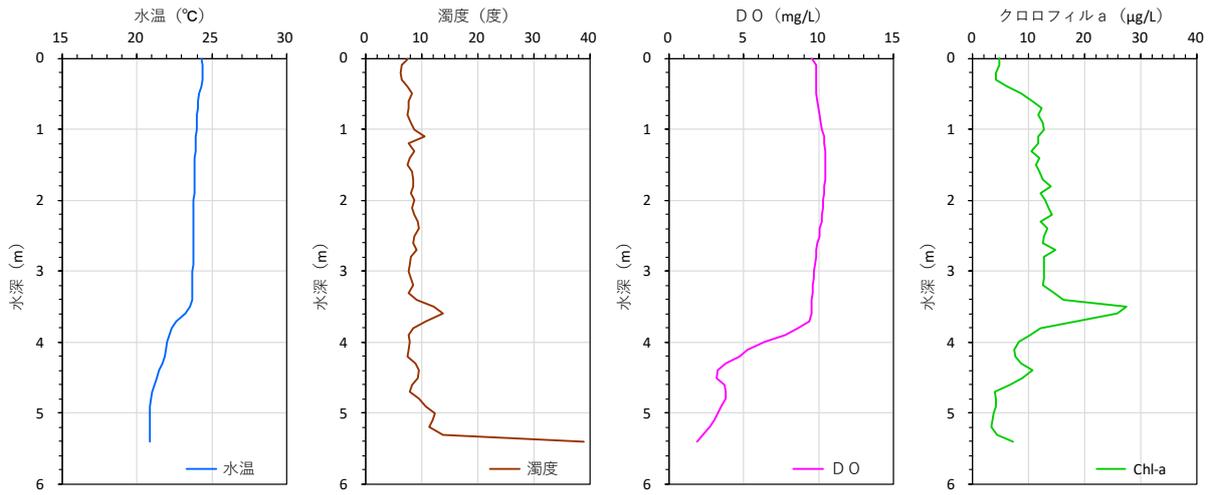


図 2.15(4) 水質鉛直測定結果(2020年9月17日、地点 B・地点 D)

2.4 水温・DO 連続測定結果

発注者及び信州大学から提供された、湖内の水温・DO 連続測定結果を図 2.16 に示す。測定地点および水深は表 2.4 に示すとおりである。

表 2.4 水温・DO 連続測定位置・水深・項目一覧

測定地点	水深	測定項目		
		流向流速	水温	DO
湖心	0.5	－	信州大学	信州大学
	1.5	－	信州大学	信州大学
	3.0	－	信州大学	信州大学
	4.0	－	信州大学	信州大学
	5.0	－	信州大学	信州大学
	全層	いであ	－	－
地点A	0.5	－	長野県	長野県
	2.0	－	長野県	長野県
地点B	0.5	－	長野県	長野県
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	長野県	長野県
	4.0	－	長野県	長野県
全層	いであ	－	－	
地点C	0.5	－	長野県	長野県
	2.0	－	長野県	長野県
地点D	0.5	－	長野県	長野県
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	信州大学	－
	3.5	－	長野県	長野県
	4.0	－	長野県	長野県
	5.0	－	長野県	長野県
	全層	いであ	－	－
地点E	0.5	－	長野県	長野県
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	長野県	長野県
	4.0	－	長野県	長野県
	全層	いであ	－	－
信大①	0.5	－	信州大学	－
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	信州大学	－
	4.0	－	信州大学	－
信大②	0.5	－	信州大学	－
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	信州大学	－
	4.0	－	信州大学	－
信大③	0.5	－	信州大学	－
	2.0	－	信州大学	－
	3.0	－	信州大学	－
	4.0	－	信州大学	－
	5.0	－	信州大学	信州大学
上川沖	全層	いであ	－	－

図 2.16 より、流向・流速測定期間中（7月～9月）の水温・DO 濃度変化の概略は以下の通りである。

- ・7月上旬においては、水面～水深2m 付近までは同じ水温であり、その下に低水温の層が見られた。上下の水温差は約5℃であり、底層の水温は18～19℃程度であった。その後、7月中旬位になると、水深2m の水温も水面より低くなっていた。底層の水温は、7月上旬よりも低く、16℃程度となっていた。7月中旬までのDO 濃度は比較的高い状態を維持しており、また図 2.7 にも示した通り、7月上旬から中旬にかけては梅雨前線による降雨が続いていたことから、降雨によってDO を十分含む冷たい水が諏訪湖に供給され、これが湖底に滞留していたものと推測される。
- ・7月中旬以降は、表層の水温が上昇し、25℃程度まで達した。また、7月22日を除き、湖上風も弱く（図 2.8 参照）、湖流も弱い（図 2.12 参照）状態が続いて

おり、上下層の混合がほとんど生じない状態が続いていたと考えられた。その結果、底層水の DO 濃度は徐々に低下し、7月26日頃には湖心、地点 D および信大③地点の底層で貧酸素状態となった。ただし7月27日頃以降、底層 DO 濃度が上昇しており、これは前線および低気圧接近に伴う降雨の影響で、DO を十分含む冷たい水が諏訪湖に供給されたためと推測される。なお、7月22日は湖上でも風速 6m/s 以上の風が吹いていたが、連吹時間は3時間弱と短かったため、湖水の上下層の混合を促すような流れ場には形成されなかったと考えられる。

- ・ 8月以降は、水深 3m～湖底までの水温はほぼ同程度となり、表層水温は上昇を続け 30℃近くまで達した。上下層の水温差は 12℃に達した。DO については、8月中旬から下旬にかけて、湖心、地点 B、地点 D、地点 E の水深 3～4m 帯の DO 濃度が水面の DO 濃度よりも大きくなっていった一方で、水深 5m はほぼ無酸素状態となっていた。
- ・ 8月26日および27日は、地点 D、信大①地点の水温が鉛直方向にほぼ一様となっており、信大③地点の水深 5m の水温も一時的に上昇した。ただし、湖心その他の測定地点においては、多少の水温変化が見られただけであった。
- ・ 9月2日は、信大②地点を除く各測定地点において、水温が鉛直方向にほぼ一様となり、底層の貧酸素状態も解消した。その後9月中は、水深 5m の水温は水面より 3～5℃程度低くなっており、また断続的に貧酸素状態となっていたが、9月下旬頃には貧酸素状態が全体的に解消されていった。

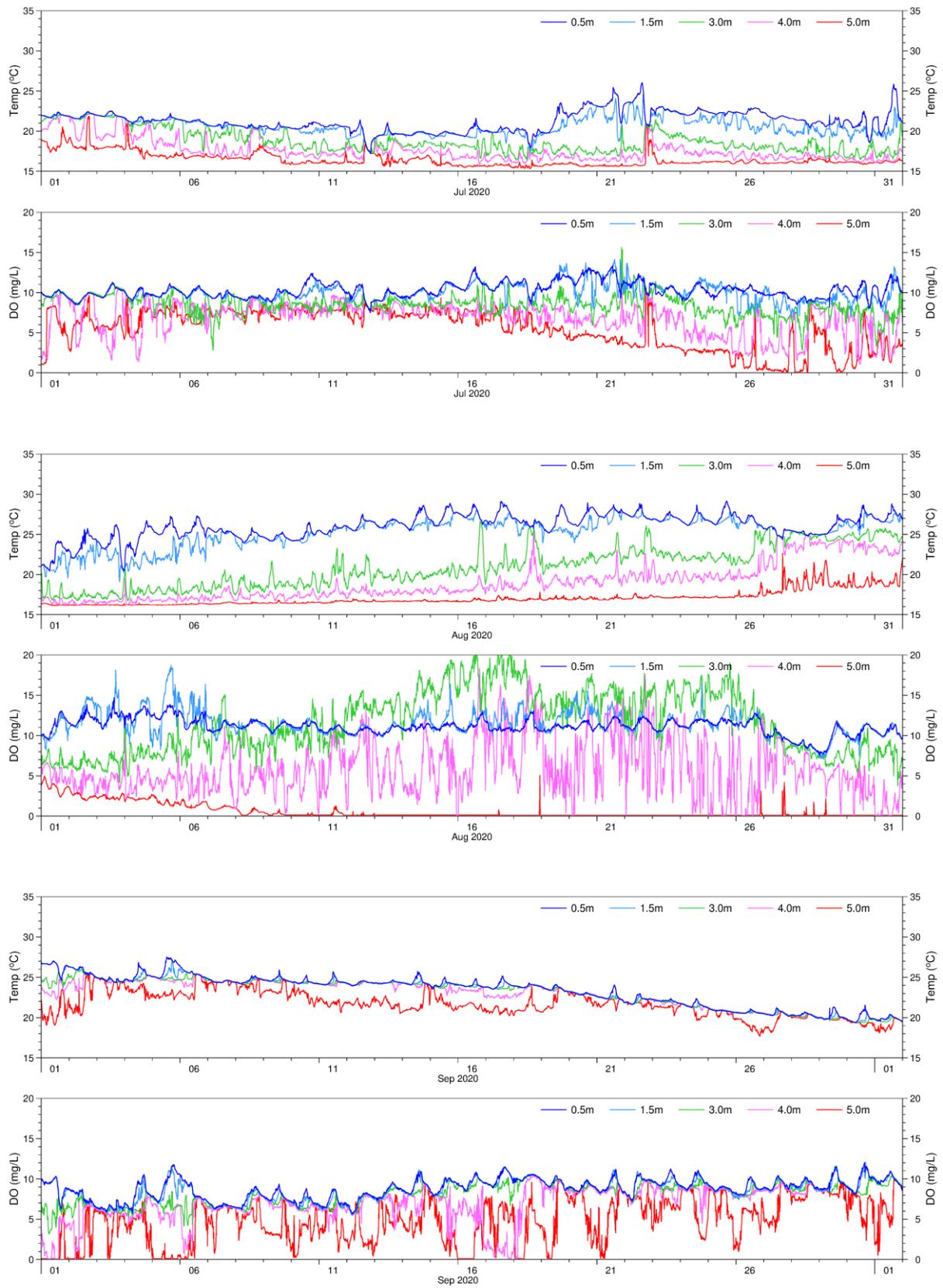


図 2.16(1) 水温・DO 連続測定結果(湖心)

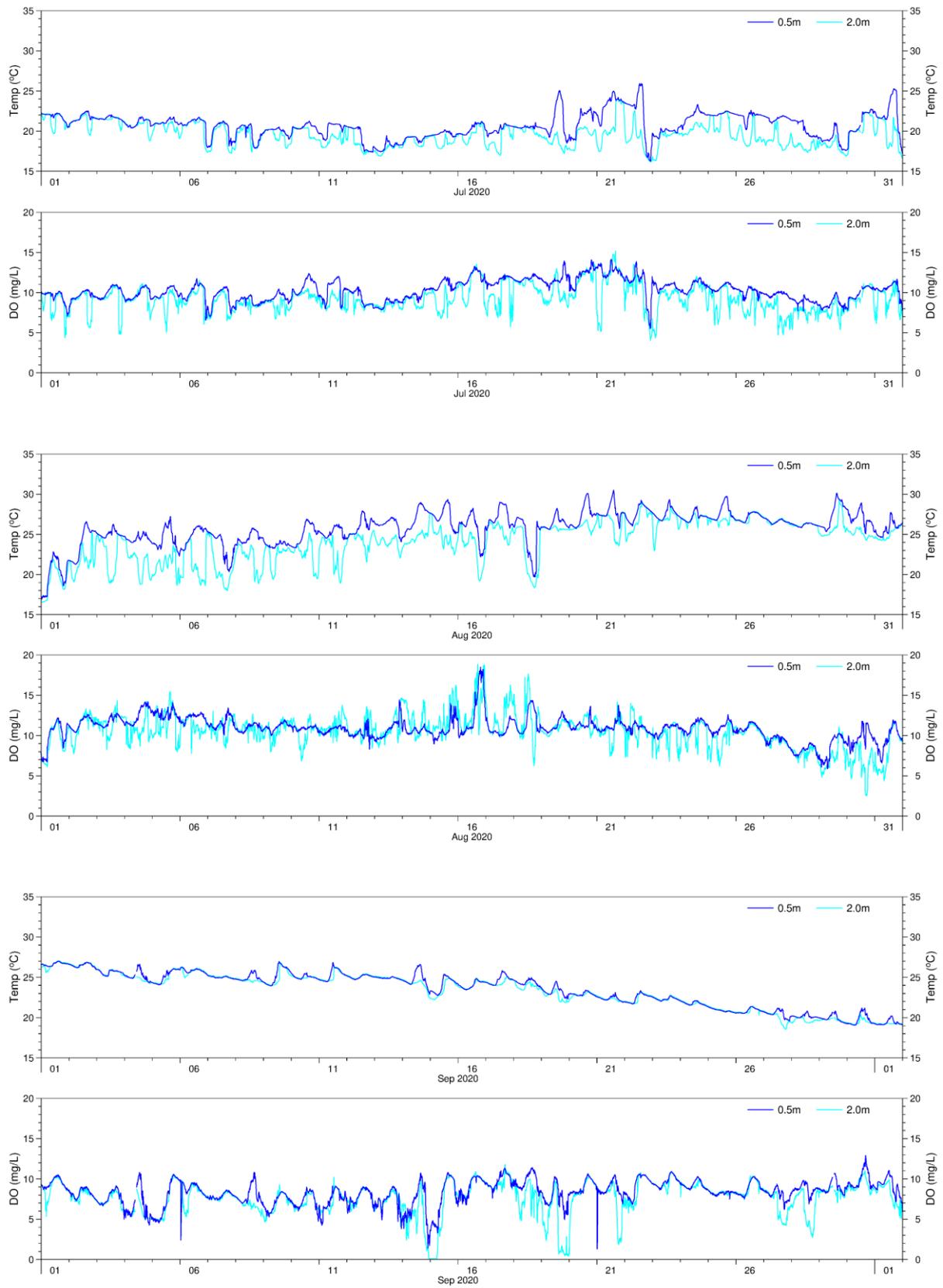


図 2.16(2) 水温・DO 連続測定結果(地点 A)

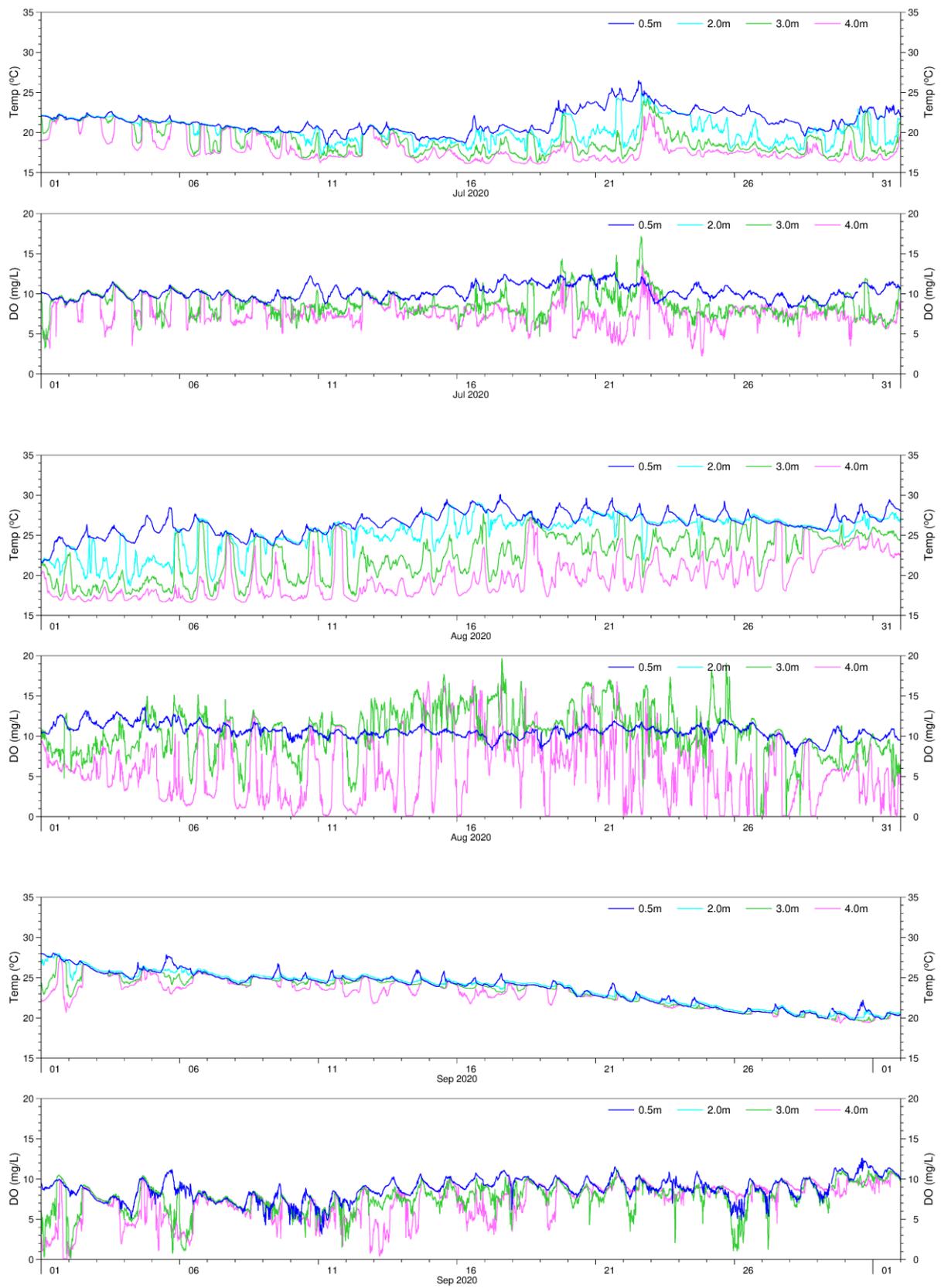


図 2.16(3) 水温・DO 連続測定結果 (地点 B)

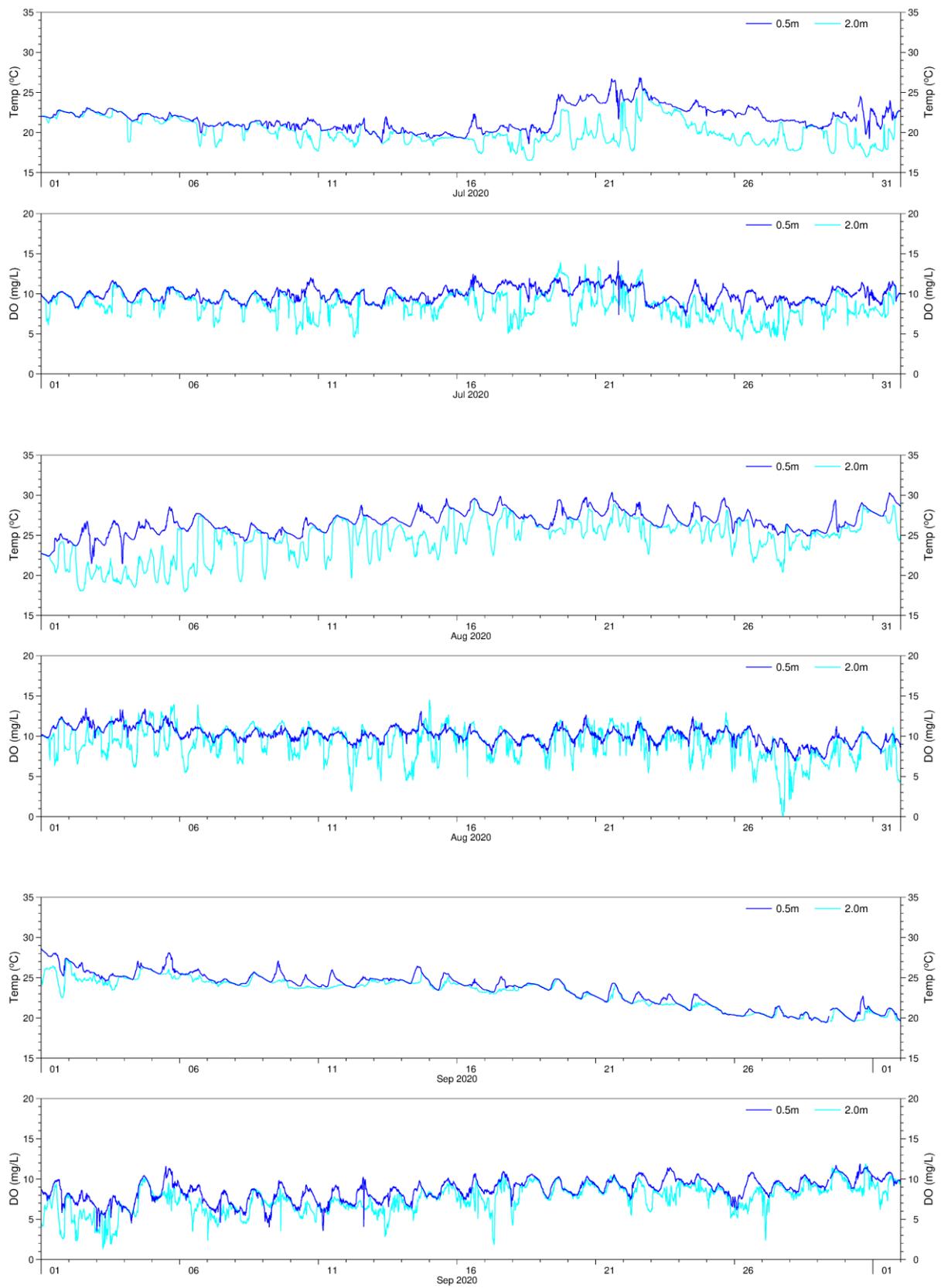


図 2.16(4) 水温・DO 連続測定結果(地点 C)

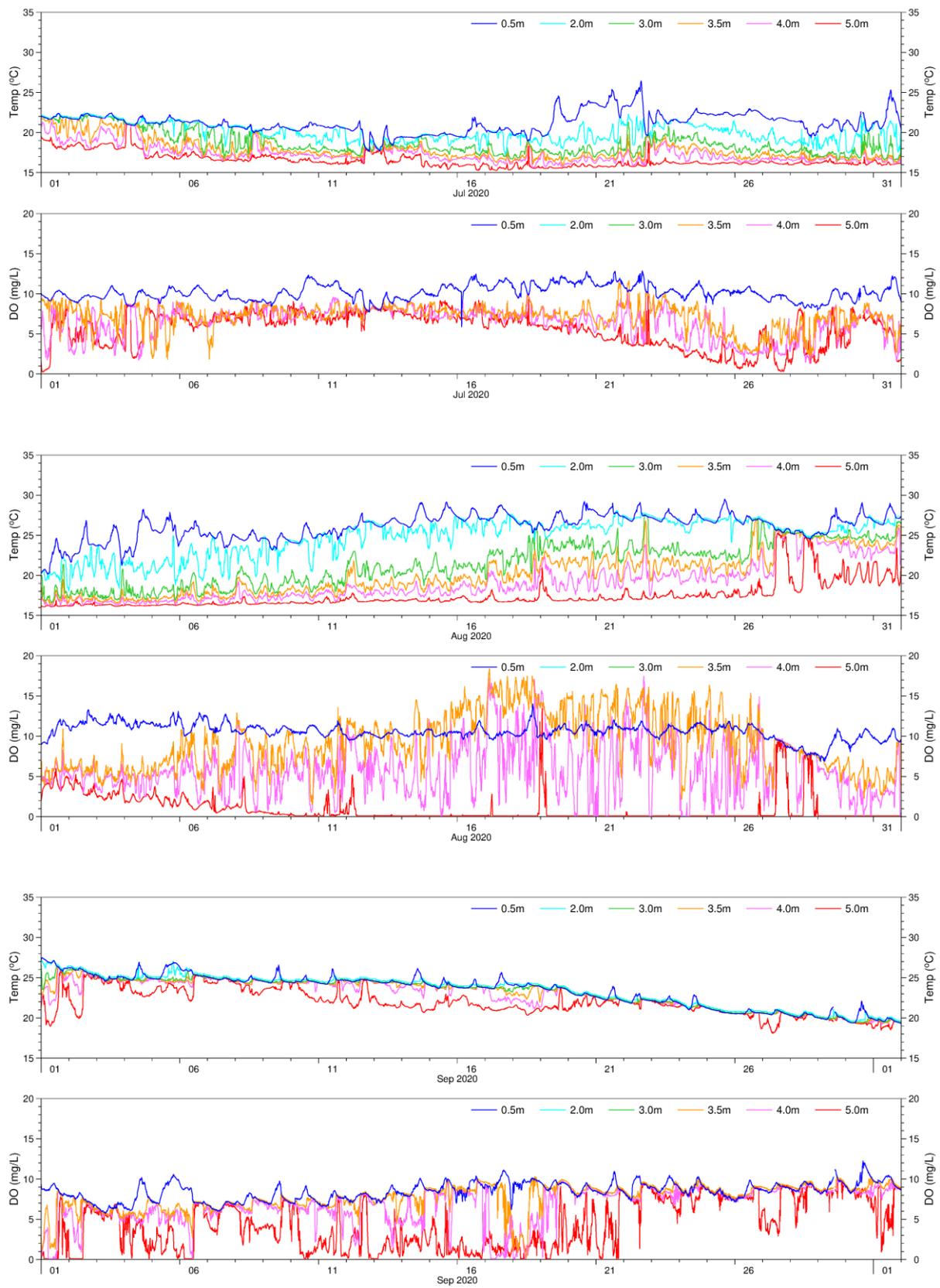


図 2.16(5) 水温・DO 連続測定結果(地点 D)

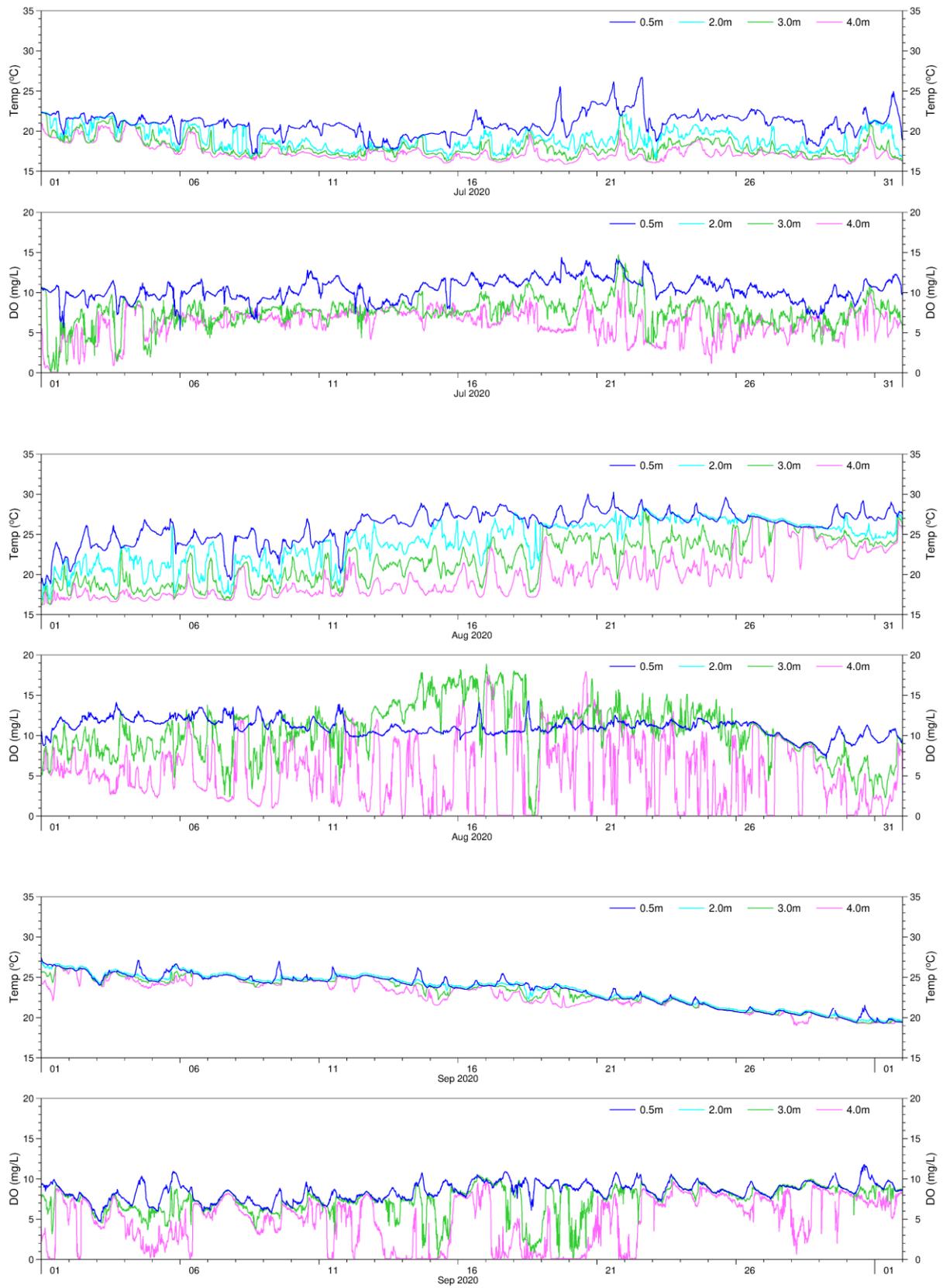


図 2.16(6) 水温・DO 連続測定結果(地点 E)

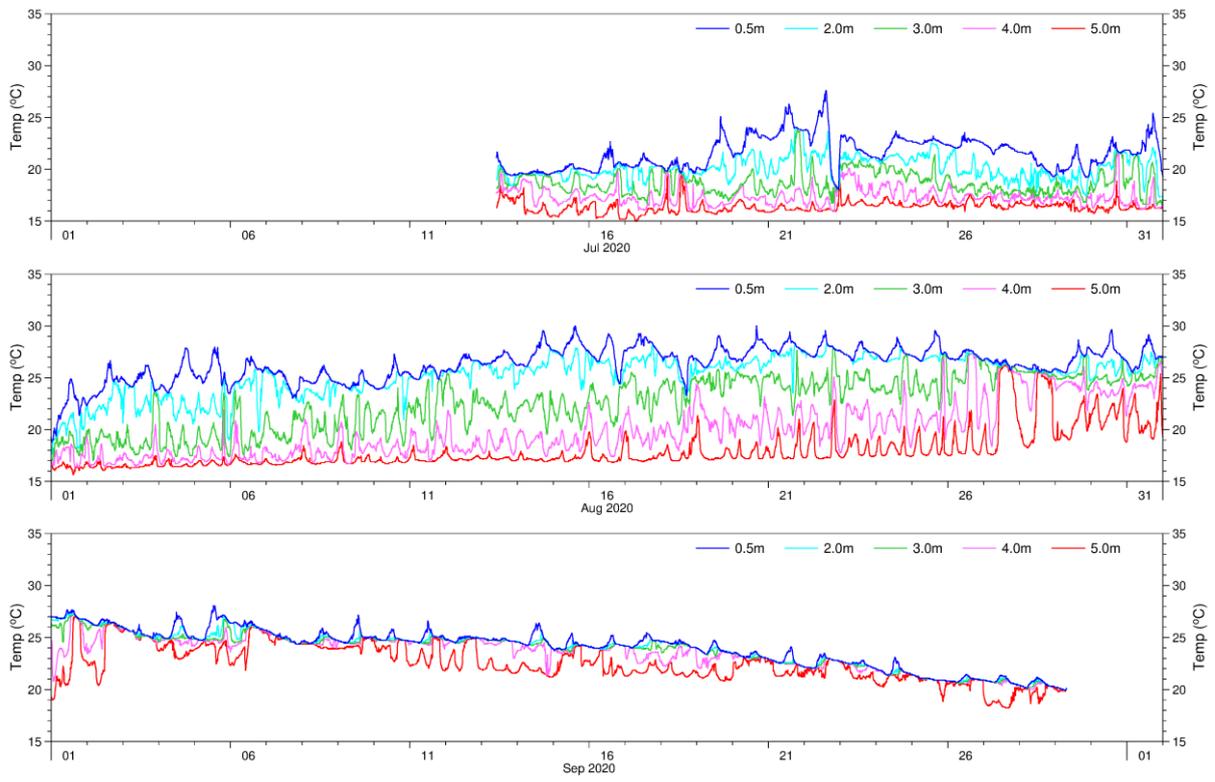


図 2.16(7) 水温連続測定結果 (信大①地点)



図 2.16(8) 水温連続測定結果 (信大②地点)

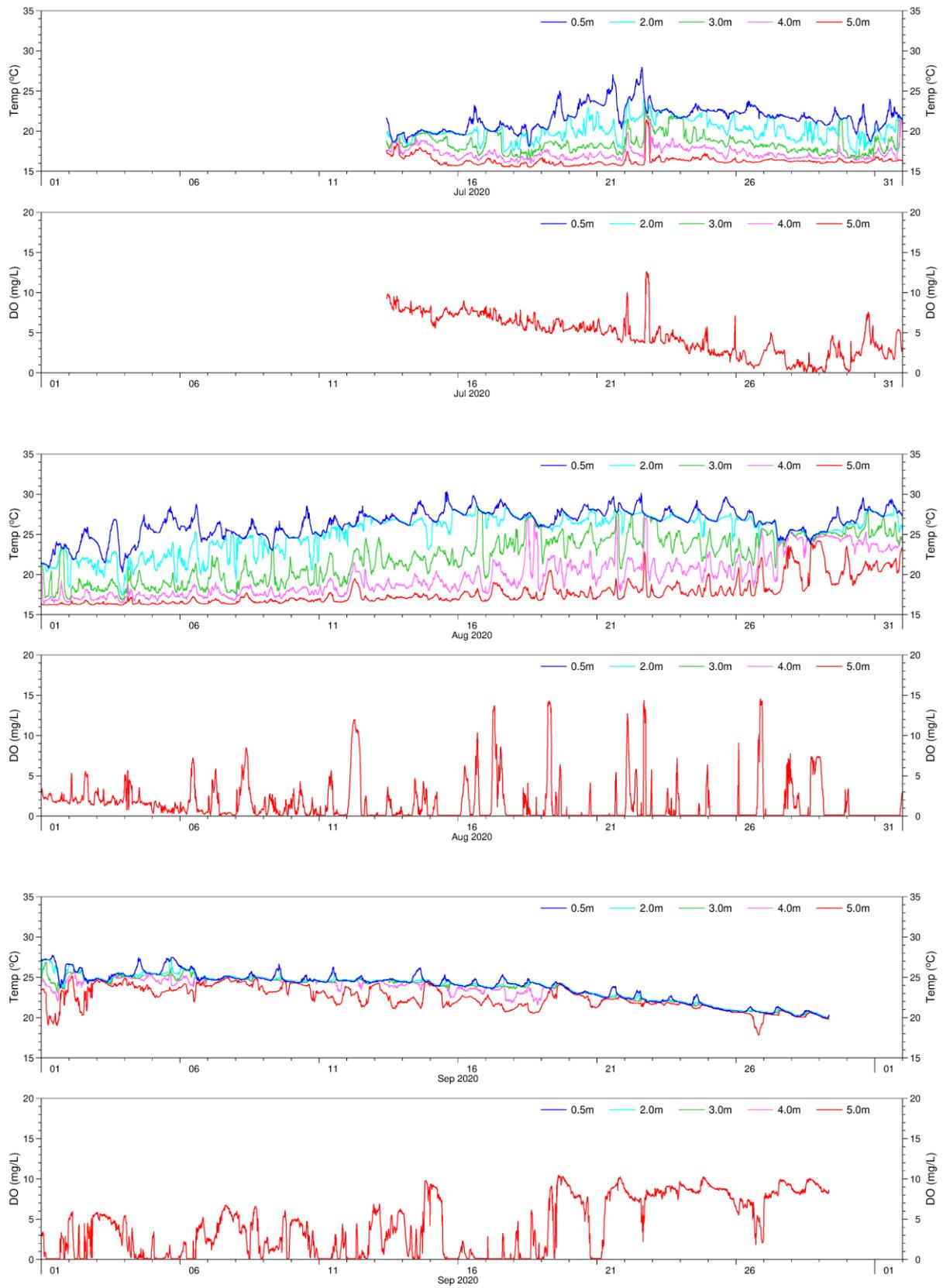


图 2.16(9) 水温連続測定結果(信大③地点)

3. 気象状況が湖水の流動に与える影響の考察

2. 流向流速等の測定の結果や既存の論文等をもとに、湖上の気象状況が湖水の流動に与える影響について考察を行った。

2. 流向流速等の測定で示した本業務の調査方法は、多地点による流況・風況の連続測定であり、湖内流況および湖上風の面的な分布（スナップショット）を得る事は出来ないが、気象イベント等による湖上風分布の概略とそれに対する湖内流動の応答を検討することが出来る。例えば木村ら¹は強風が連続的に作用した場合に内部セイシュが発生し、それが貧酸素水塊の解消に寄与することを指摘しており、また豊田ら²は湖上風の分布が湖内流動に影響を与えていることを指摘しているが、本業務の測定結果を解析し考察することにより、湖上風と内部セイシュを含む湖内流動の関係性を測定結果から明らかにすることが出来るものと考えられる。またこの結果から、水温成層の発達状況に対し、どの程度の風速であれば貧酸素水塊が解消されるか(流動場としては水温成層がほぼ解消する状態)の考察も可能であると考えられる。

3.1 湖内平面流況の推定

本検討においては、まず湖上風と湖内流況の対応関係を考察するための基礎資料として、湖内流況（表層：水深1m帯、底層：水深4m帯）及び水温（底層：水深4m帯）を水平方向に内外挿することにより湖内流況の面的分布の推測を試みた。

まず、湖内の水温・DO連続測定結果との対比として、湖心のDO濃度変化が見られた以下の日時における湖内流動を示す。

（抽出したDO変動イベント）

- ・ 2020/7/25～28 頃：湖心底層で貧酸素化が進行
- ・ 2020/8/26～29 頃：東南～東南東の風が半日程度継続し、諏訪湖西側の測定地点（地点D、地点E、信大①、信大③）の底層で水温・DO濃度の上昇がみられた
- ・ 2020/9/2～3 頃：東南東の風が半日程度継続し、湖内底層の貧酸素状態が解消

上記期間の前後における、湖心の風向風速、流向流速、水温、DO濃度の測定結果を図3.1に示す。図2.8に示した風向風速測定結果、図2.12に示した流向流速測定結果および図2.16に示した水温・DO連続測定結果とあわせて見てみると、まず7月中旬頃から湖内の表層・底層水温差が5℃以上の差が生じており、同時に底層の貧酸素化が進行している様子が見られた。この間は7/22の強風時を除き、流況は上下2層で異なる流れとなっているが、流速自体は数cm/sのオーダーと小さかった。8/27は東南東～南東の風が吹いてお

り、湖心では風速 6m/s 程度以上の風が 9 時間程度継続していた。この時、湖内では上層は北西向き、底層は南東～南南東向きの 2 層の流れが形成され、水温連続測定結果によれば水深 4m 程度までの水温が水面と同じになっていたことから、6m/s 以上の風が連続して吹くことによって、諏訪湖表面から水深 4m 程度までの水塊が混合されたと考えられる。なお、この時は水深 5m の水温に変化は見られたものの、表層水温とは 5℃以上の温度差があったこと、水深 5m の DO 濃度も一時的な変化が生じたのみであったことから、8/27 頃の強風時においては湖底水との混合は生じず、貧酸素水塊は解消されなかったと考えられる。

9/2 頃においても、同様に湖心で風速 7m/s 以上の東南風が 7 時間程度継続した。この時は、水深 5m 帯においても水温・DO 濃度が上昇しており、風によって全層で湖水が混合し、貧酸素水塊が解消したものと考えられた。8/27 との相違点としては、8/26 時点では湖水面～水深 1.5m 帯で 4～5℃程度、そこから水深 5m 帯まで 4～5℃程度の温度差があったのに対し、9/1 時点では湖水面～水深 1.5m 帯の水温差が 2℃程度まで縮小しており、湖水がより混ざりやすい状態であったと考えられる。

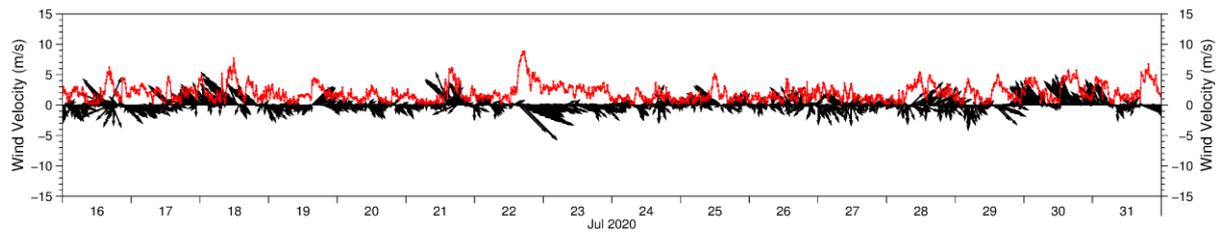
以上の結果から、9 月 2 日の貧酸素水塊解消時の流況イメージを図 3.2 に整理した。また、上記イベント期間の湖内流況推定結果は参考資料に示した。

9 月 2 日の貧酸素水塊解消時の風と湖流の変化の概要は以下の通りである。

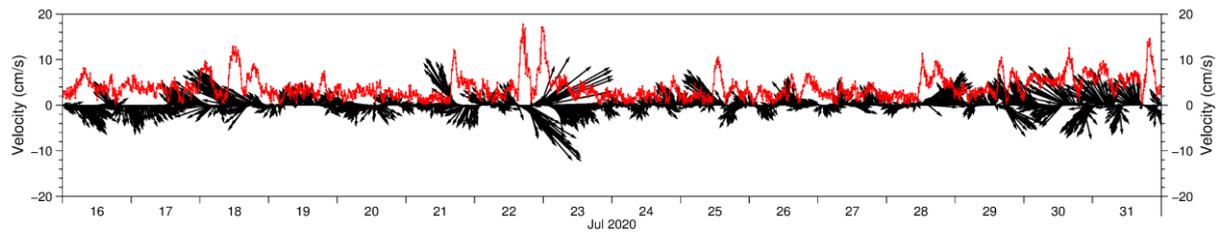
- (9/2 08:00 頃) 風は静穏な状態であり、湖内は水温成層が形成され、底層水内には本酸素水塊が広がっている状態であった。上下層の水温差は 5℃以上であった。
- (9/2 10:00 頃) 南東風が吹き始め、湖心の風速は 6.4m/s であった。湖上風により、表層水が風下側に動き始めた。
- (9/2 12:00 頃) 南東風はさらに強くなり、湖心で風速 9.5m/s となったが、諏訪湖北東部の風は弱いままであった。表層水は北西方向に吹き流され、また諏訪湖北西側の水深 4m 帯の水温が上昇していたことから、北西側に吹き流された表層水が底層水を押し下げたものと考えられた。また、押し下げられた底層水は、諏訪湖の南東～南方向に移動したものと考えられた。
- (9/2 14:00 頃) 南東風は継続しており、湖心の風速は 7.8m/s であった。湖内では、鉛直混合が促進された結果、湖心においては貧酸素状態が解消された。
- (9/2 16:00 頃) 南東風は継続しており、湖心の風速は 7.9m/s であった。湖内では、水温成層がほぼ見られなくなり、上下 2 層流がほとんど見られなくなった結果、湖流はかなり小さくなった。
- (9/2 20:00 頃) 風向きは多少変化し、南南東の風となった。湖心の風速は 7.7m/s と強かったが、湖流は小さいままであった。

(湖心-風向風速)

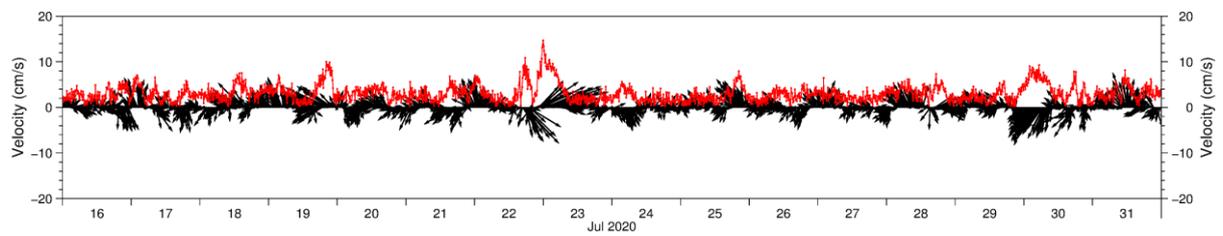
※赤のプロットは風速・流速の絶対値を表す。



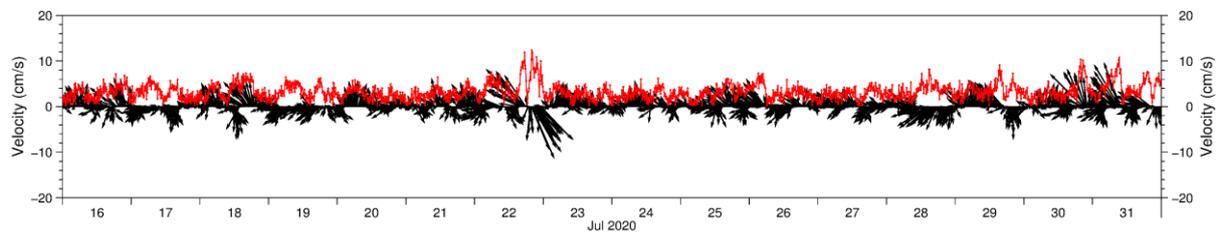
(湖心-流向流速、表層(水面直下～水深 1m 程度))



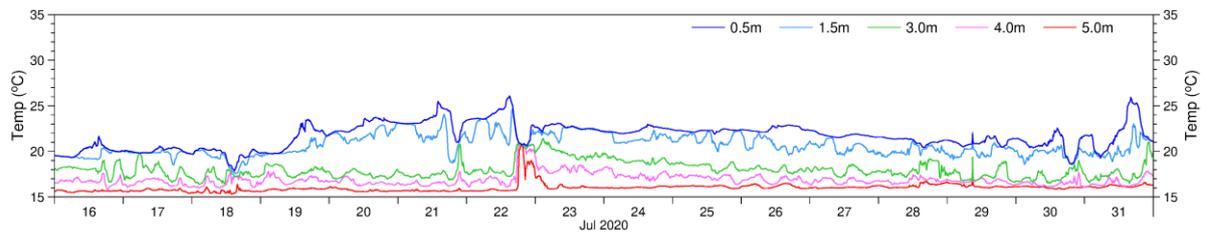
(湖心-流向流速、中層(1/2 水深前後の層厚 1m 程度))



(湖心-流向流速、底層(湖底～底上 1m 程度))



(湖心-各水深の水温)



(湖心-各水深の DO 濃度)

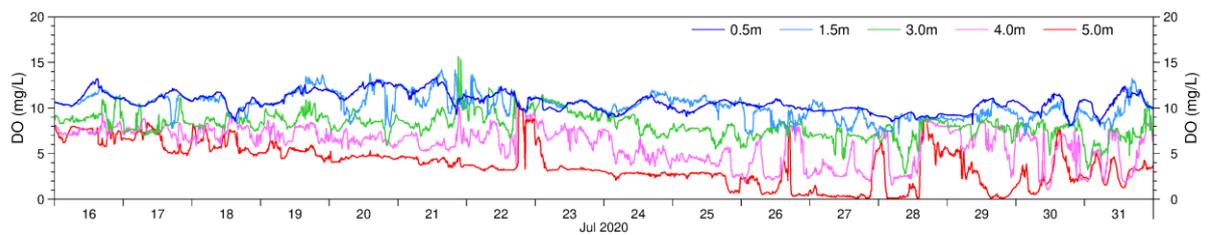
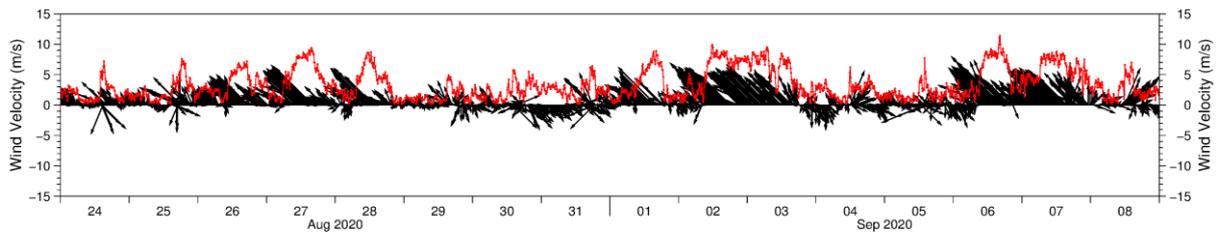


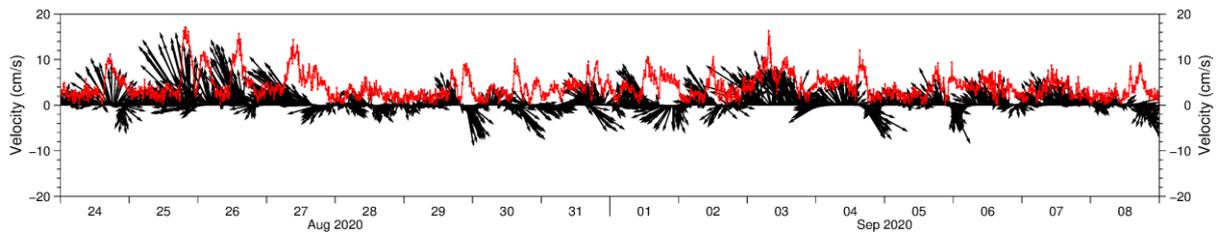
図 3.1(1) 湖心における風向風速、流向流速、水質の測定結果(7/16～7/31)

(湖心-風向風速)

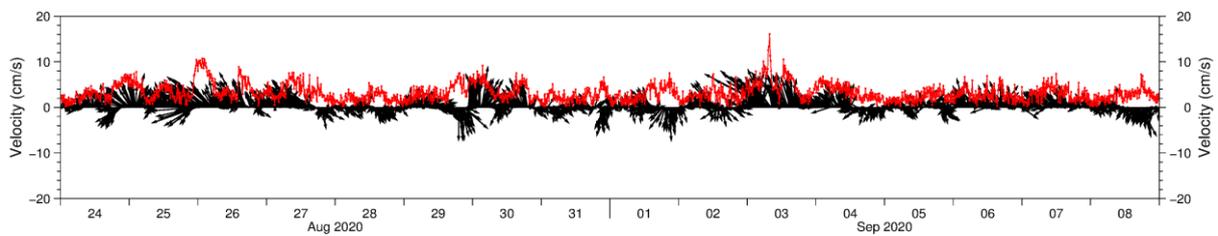
※赤のプロットは風速・流速の絶対値を表す。



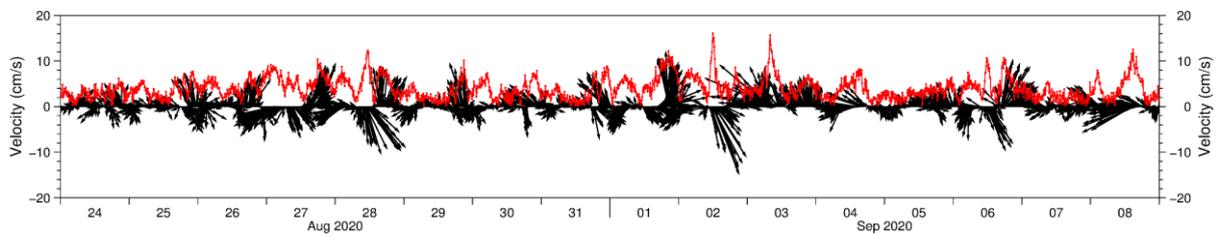
(湖心-流向流速、表層(水面直下~水深 1m 程度))



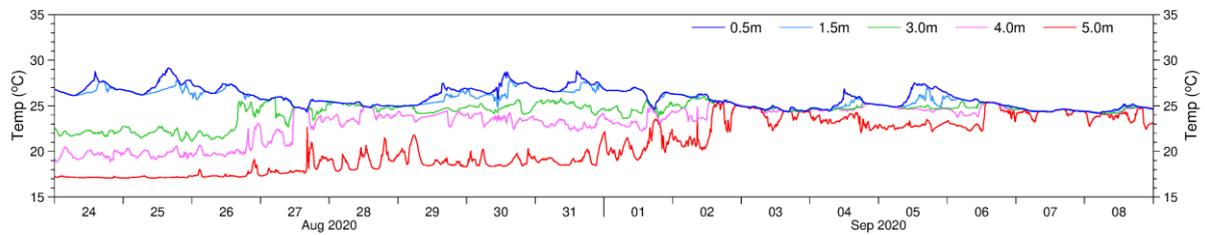
(湖心-流向流速、中層(1/2 水深前後の層厚 1m 程度))



(湖心-流向流速、底層(湖底~底上 1m 程度))



(湖心-各水深の水温)



(湖心-各水深の DO 濃度)

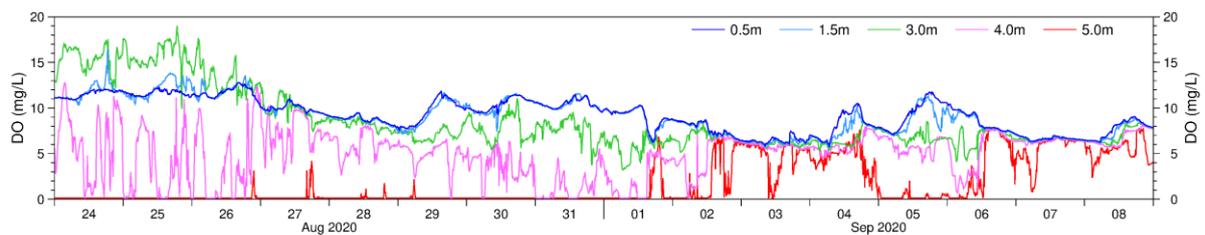


図 3.1(2) 湖心における風向風速、流向流速、水質の測定結果(8/24~9/8)

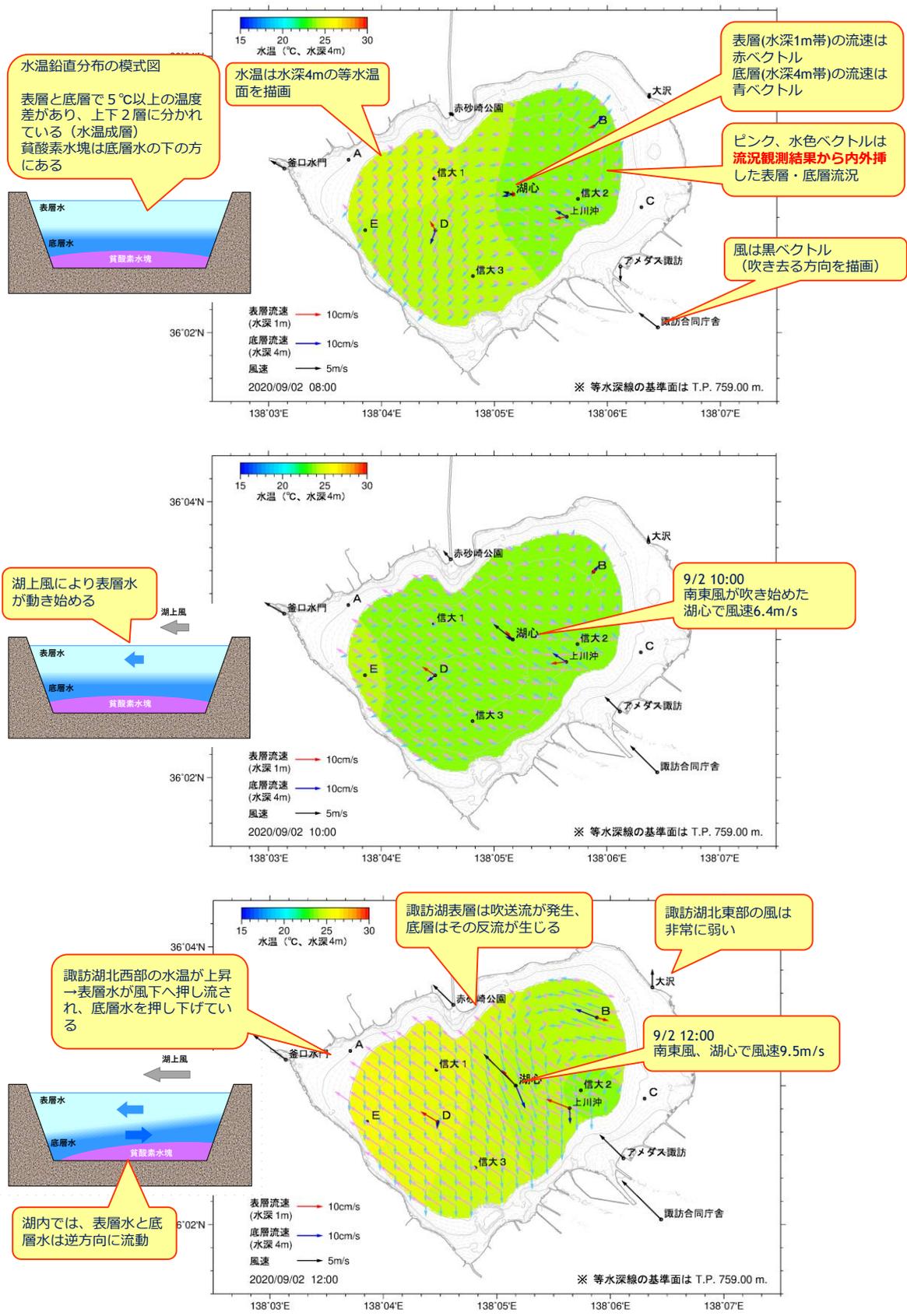


図 3.2(1) 諏訪湖の貧酸素水塊解消時の流況イメージ

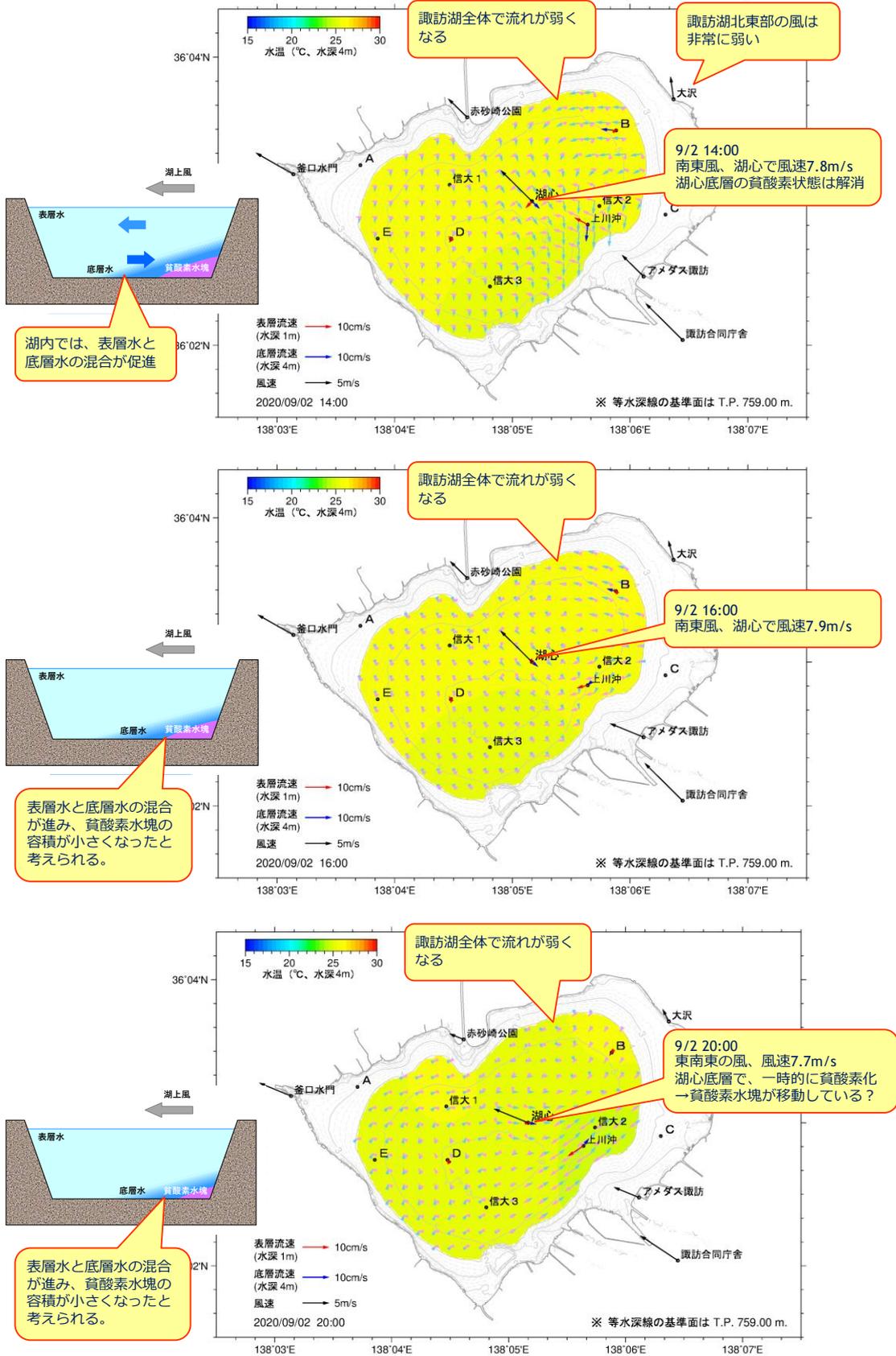


図 3.2(2) 諏訪湖の貧酸素水塊解消時の流況イメージ

3.2 風向・風速と流向・流速の相関性について

湖心の風速の自己相関係数、および湖心風速と諏訪合同庁舎の風速、湖心各層の流速との相互相関係数を図 3.3、図 3.4 に示す。また、湖心の風向に対する諏訪合同庁舎の風向及び湖心各層の流向の出現回数を表 3.1、表 3.2 に示す。なお、自己相関・相互相関の解析は、各地点の 10 分間隔データに対して行っている。

風速の相関係数（図 3.3 参照）及び前述のパワースペクトル（図 2.10 参照）から、諏訪湖及びその周辺の風は 1 日周期の強いピークが見られる結果となった。また、湖心風速と諏訪合同庁舎の風速については、タイムラグ 0 の場合の相互相関係数は 0.83 程度と大きく、パワースペクトルの形状も似通っており、また風向の類似性も高いことから、両者には良い相似関係があるものと考えられる。つまり、湖心風速と諏訪合同庁舎の風速は互いによく似ていると考えられる。

次に、湖心風速と湖内流速との相互相関係数を見ると（図 3.4 参照）、湖心表層流速（水面直下～水深 1m 程度）には約 1 時間、湖心中層流速（1/2 水深前後の層厚 1m 程度）には約 2 時間、湖心底層流速（湖底～底上 1m 程度）には約 0～6 時間までの時間帯で、湖心風速との相関性が高くなっていた。また、湖内流速のスペクトルを見ると（図 2.14 参照）、表層と底層には 1 日周期および半日周期のピークが現れているのに対し、中層はピークが不明瞭であった。これは中層の流動は水温成層の発達状況や表層・底層双方の流動の影響を受け、複雑に変化するためと考えられた。湖心の流向についても、表層は湖心の風向と比較的よく対応していたのに対し、中層・底層の流向は風向との類似性が低い結果となった。つまり、諏訪湖内の表層の流速は風の影響を強く受け、風下方向の流れが生じやすいのに対し、中層・底層は風の向きと異なる方向に流れることが多い結果となっていた。なお、2.3 流向流速測定結果 において検討した結果、湖内流速の 1 日周期成分は湖上風によるもの、半日程度の周期の成分は密度界面における内部セイシュによるものと考えられる。

※自己相関	ある地点の現在時刻のデータと、同じ地点で n 時間シフトした時刻のデータの相関係数。
※相互相関	ある地点の現在時刻のデータと、別の地点で n 時間シフトした時刻のデータの相関係数。

表 3.1 より、湖心の風向（風が吹いてくる方向）と諏訪合同庁舎の風向の関係は非常に関連性が高く、例えば諏訪合同庁舎で南東の風が観測されている場合は、湖心も南東の風（東南東～南南東）の風であった。一方、諏訪合同庁舎で西北西～北西の風である場合、湖心においても西～北北西の風となっているが、風向については多少ばらつきがみられた。

表 3.2 より、湖心の風向と湖心の表層・中層・底層の流向（流れ去る方向）の関係としては、表層については風向と流向の相関性は強く、例えば湖心の風向が南東であれば、表層の流向は西北西～北向きであり、風向が西南西であれば流向は東北東～南南東となりやすい結果となった。一方、中層および底層においては、風向と流向の関係は弱く、特に底層については風向と異なる方向に流れる傾向がみられた。例えば、風向が西北西である場合、底層の流向は西南西～北西、つまり風上方向に流れる傾向があり、風向が南東の場合は底層の流向は南東～西の広い範囲に流れる結果となった。

また、今回の流向・流速測定の結果、図 2.13 に示したように、湖心・地点 D の流向は西～北西、地点 B は東向き、上川沖は西南西向きの流れとなっており、諏訪湖全体として時計回りの水平循環流が形成されていたと考えられる。一方、豊田ら²が実施した移動観測結果（図 3.5 参照）によれば、2004 年 10 月の水温成層がほぼ解消された時期において、アメダス諏訪地点において西北西の風速 7m/s 程度の風が 1 日連吹していたとき、諏訪湖の湖心から南西部の湖上風は西北西～北西、北東部は北北西～北北東の風であり、湖全体で反時計回りの水平循環流が形成されていた。今回の測定結果と豊田らの結果で水平循環流の向きが逆となっていたが、その違いの要因としては、強風連吹時の風向（本業務では主に南東風、豊田らの調査時は北北西）、湖内の水温成層の有無（本業務では 2 成層状態、豊田らの調査時は 10 月であるため水温成層はほぼ解消していたと思われる）が考えられる。

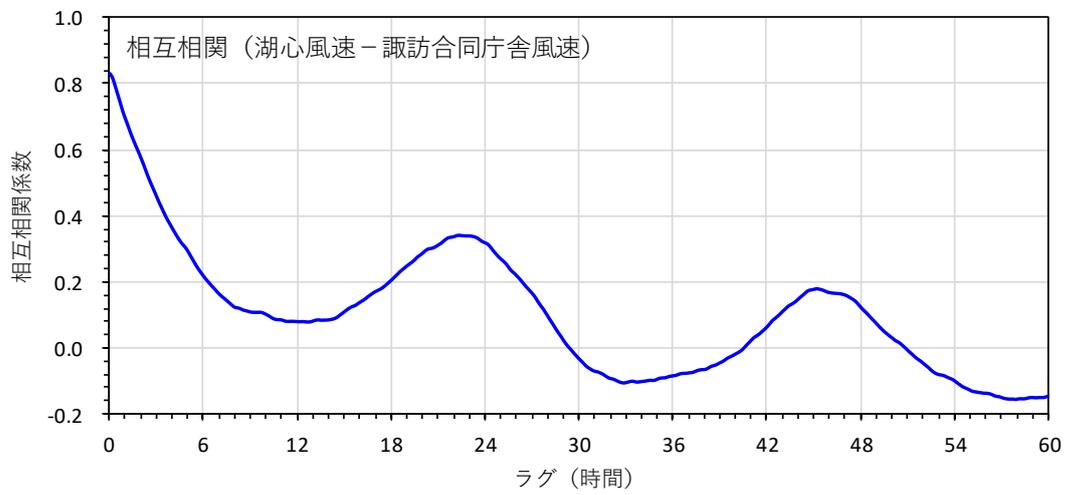
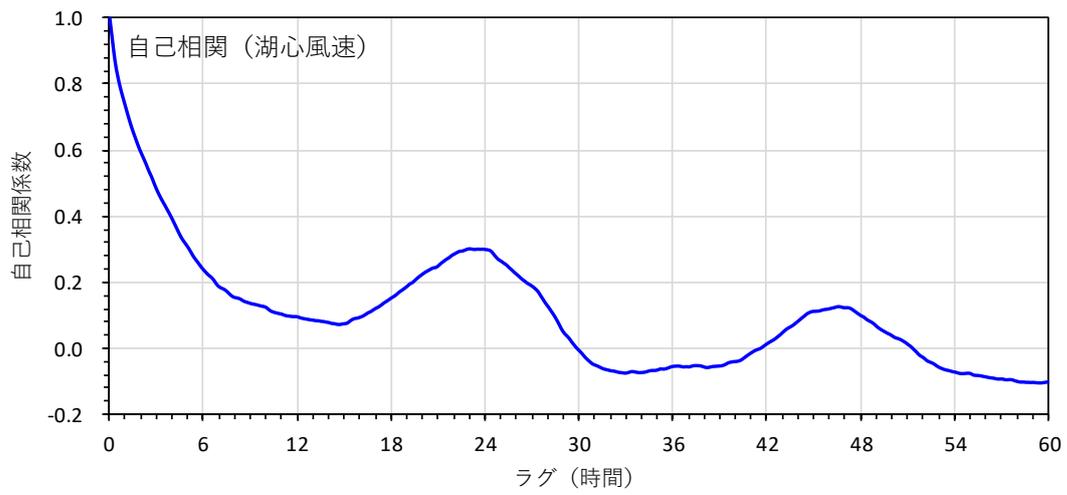


図 3.3 湖心風速の自己相関係数、及び湖心風速と諏訪合同庁舎風速の相互相関係数

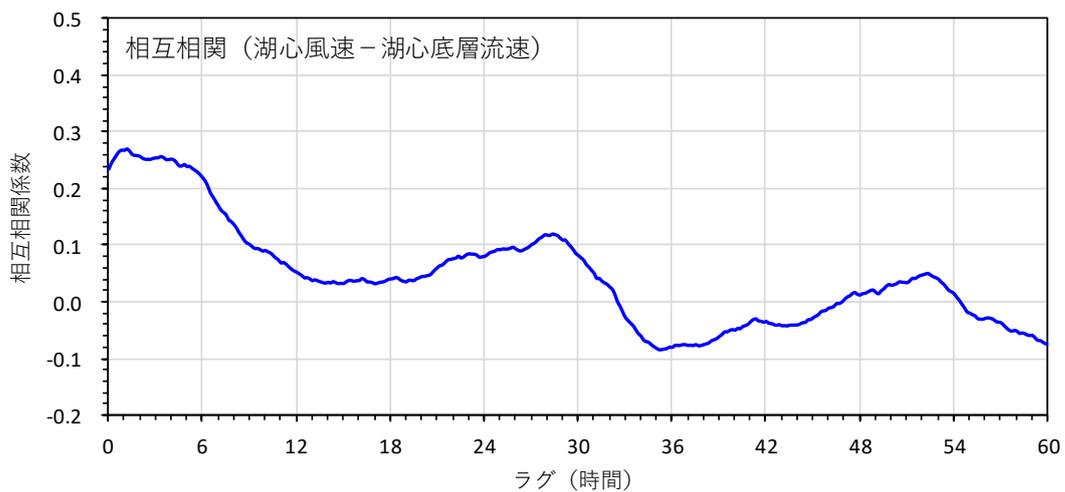
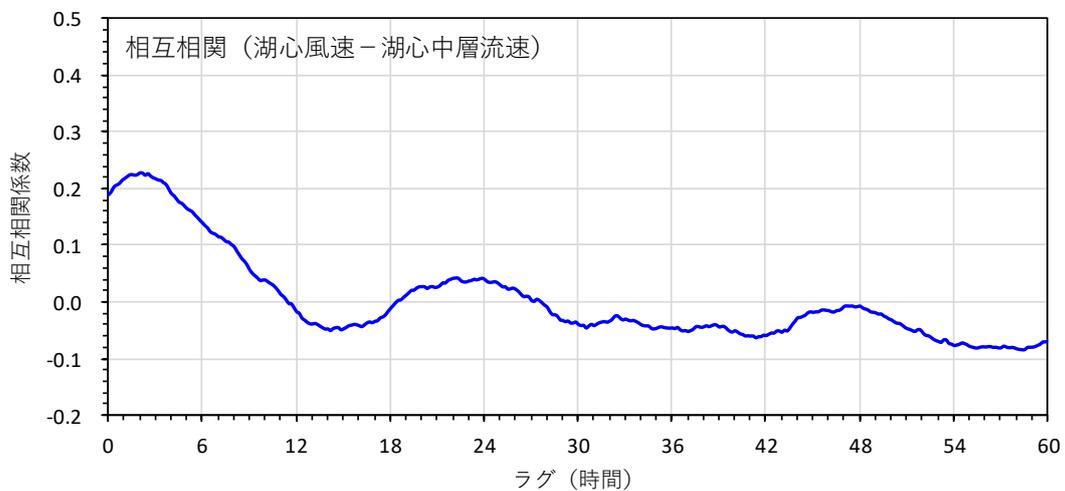
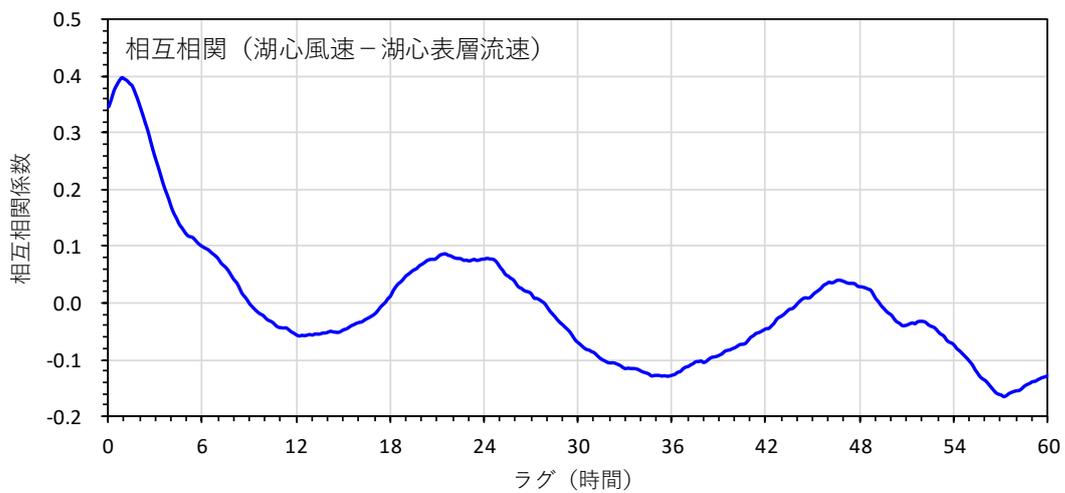


図 3.4 湖心風速と湖心各層の流速の相互相関係数

表 3.1 湖心の風向に対する諏訪合同庁舎の風向の出現回数

		諏訪合同庁舎の風向																
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	合計
湖 心 の 風 向	S	62	22	8	8	11	12	15	6	7	1	3	4	7	19	161	132	478
	SSW	41	44	33	19	18	27	28	10	5	2	1	4	3	22	49	60	366
	SW	28	32	67	75	48	43	38	22	18	10	3	2	8	14	45	36	489
	WSW	24	21	29	41	68	76	62	32	18	6	5	1	5	6	32	24	450
	W	23	20	13	23	65	208	133	38	20	7	3	4	5	15	66	35	678
	WNW	30	17	19	31	71	399	202	56	24	6	3	9	12	24	91	40	1034
	NW	24	15	16	17	33	144	223	82	22	8	13	11	10	29	67	28	742
	NNW	15	17	16	9	24	67	153	134	38	16	12	12	20	28	51	24	636
	N	5	8	11	10	14	28	88	123	45	14	13	13	10	16	22	9	429
	NNE	2	1	3	5	5	12	82	58	36	13	7	4	13	10	11	9	271
	NE	3	3	0	3	4	10	83	93	14	7	11	13	6	13	11	5	279
	ENE	3	1	10	0	8	22	92	69	15	12	9	15	10	18	12	6	302
	E	2	1	1	0	11	18	35	15	7	6	2	12	14	42	27	8	201
	ESE	6	3	3	2	3	18	20	10	9	2	6	9	19	120	317	16	563
	SE	6	7	1	2	7	15	11	4	4	4	3	11	26	104	1061	45	1311
SSE	33	8	7	4	7	10	15	6	2	2	6	6	6	46	577	258	993	
合計	307	220	237	249	397	1109	1280	758	284	116	100	130	174	526	2600	735	9222	

表 3.2(1) 湖心の風向に対する湖心表層の流向の出現回数

		湖心表層の流向																
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合計
湖 心 の 風 向	S	39	32	15	13	25	23	18	16	26	20	35	34	32	46	51	46	471
	SSW	18	19	24	35	28	28	13	9	11	13	13	18	30	29	39	37	364
	SW	35	44	43	52	43	32	14	5	12	19	32	23	26	23	36	49	488
	WSW	30	22	25	50	19	16	28	22	11	21	33	26	29	35	41	39	447
	W	29	26	31	39	35	62	72	70	49	41	23	33	25	32	60	38	665
	WNW	31	34	39	48	62	127	176	123	78	42	43	44	39	41	45	45	1017
	NW	26	19	25	26	39	72	82	66	73	61	40	31	33	43	43	49	728
	NNW	23	14	20	24	42	54	69	65	55	45	43	43	41	30	31	27	626
	N	22	12	15	22	30	36	41	30	29	32	24	23	31	18	20	26	411
	NNE	27	12	12	9	21	21	21	13	9	12	14	9	16	12	27	25	260
	NE	24	21	14	19	8	14	11	21	10	15	5	15	18	22	23	27	267
	ENE	36	23	16	14	9	15	13	17	7	12	13	14	14	25	35	24	287
	E	18	16	17	6	7	10	10	7	9	11	7	6	15	21	25	13	198
	ESE	45	28	12	18	22	14	19	20	15	11	26	35	49	83	108	58	563
	SE	124	60	36	21	32	34	28	26	26	47	52	45	72	191	279	232	1305
SSE	98	89	32	22	27	41	25	25	27	39	55	53	80	117	136	125	991	
合計	625	471	376	418	449	599	640	535	447	441	458	452	550	768	999	860	9088	

※風向は風が吹いてくる方向、流向は水が流れ去る方向

表 3.2(2) 湖心の風向に対する湖心中層の流向の出現回数

		湖心中層の流向																
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合計
湖 心 の 風 向	S	37	20	18	16	17	21	20	30	31	42	39	34	19	46	36	50	476
	SSW	21	19	11	11	7	9	18	26	17	24	32	28	31	29	33	38	354
	SW	24	24	8	15	11	17	24	20	36	50	53	56	51	27	36	30	482
	WSW	26	23	17	14	17	20	19	19	22	28	47	50	33	38	33	40	446
	W	37	30	28	31	28	34	38	39	38	57	40	48	47	66	52	49	662
	WNW	72	45	32	68	45	81	105	67	49	52	60	56	72	68	73	74	1019
	NW	55	33	35	20	46	45	42	45	34	45	36	40	54	60	61	75	726
	NNW	54	49	22	20	37	23	38	30	22	25	36	26	42	61	75	66	626
	N	38	38	21	12	14	17	16	24	19	18	21	18	21	31	52	52	412
	NNE	21	25	16	19	6	13	8	14	20	7	12	14	13	14	27	31	260
	NE	22	21	13	20	13	15	11	16	8	19	16	11	7	19	18	38	267
	ENE	20	35	27	24	9	20	14	9	18	13	10	17	6	21	24	25	292
	E	13	25	14	17	17	11	9	11	10	6	2	9	8	15	16	13	196
	ESE	52	29	25	29	20	33	40	35	23	19	19	21	32	44	68	75	564
	SE	101	76	48	41	30	43	53	72	82	97	77	59	63	137	189	133	1301
SSE	73	58	38	33	49	47	33	39	46	102	71	60	59	92	94	93	987	
合計	666	550	373	390	366	449	488	496	475	604	571	547	558	768	887	882	9070	

表 3.2(3) 湖心の風向に対する湖心底層の流向の出現回数

		湖心底層の流向																
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合計
湖 心 の 風 向	S	56	34	19	11	13	8	11	23	16	29	38	51	44	43	37	43	476
	SSW	30	27	12	7	4	12	4	11	14	28	60	62	37	16	13	26	363
	SW	29	28	11	8	8	5	11	16	40	48	67	65	76	24	20	28	484
	WSW	29	32	23	10	10	6	11	15	26	35	47	46	43	54	30	28	445
	W	47	45	25	22	23	22	16	19	20	40	43	64	79	66	72	61	664
	WNW	79	63	37	29	42	49	42	48	40	65	61	93	107	105	93	67	1020
	NW	71	60	31	27	31	26	22	44	38	31	39	47	63	57	59	79	725
	NNW	83	46	31	23	30	17	14	20	16	30	37	53	58	46	53	65	622
	N	41	42	20	18	14	11	9	12	14	16	30	36	36	34	39	42	414
	NNE	17	11	16	8	10	8	6	8	14	16	30	27	25	18	20	26	260
	NE	17	14	16	10	10	5	16	15	15	16	23	35	30	15	14	15	266
	ENE	20	21	18	16	9	6	7	25	16	16	24	37	23	19	15	16	288
	E	14	9	8	9	6	3	10	13	9	24	14	21	20	19	7	13	199
	ESE	47	55	33	36	20	20	39	43	31	37	30	54	34	27	21	34	561
	SE	79	74	56	52	42	59	113	122	113	90	85	101	95	72	74	82	1309
SSE	102	65	57	37	35	20	35	55	50	63	60	105	85	68	66	87	990	
合計	761	626	413	323	307	277	366	489	472	584	688	897	855	683	633	712	9086	

※風向は風が吹いてくる方向、流向は水が流れ去る方向

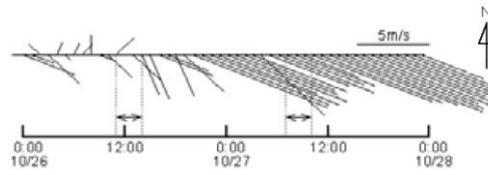


図-3 観測期間中の風速および風向
(諏訪特別地域気象観測所)

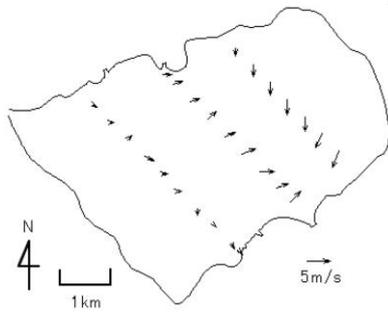


図-4 10月26日の湖上での風の観測結果

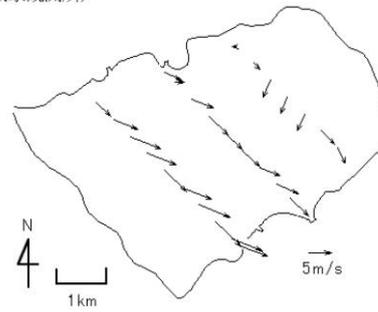
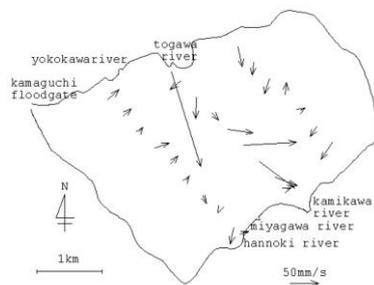
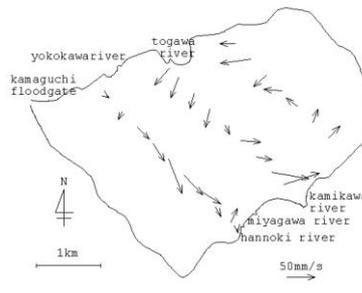


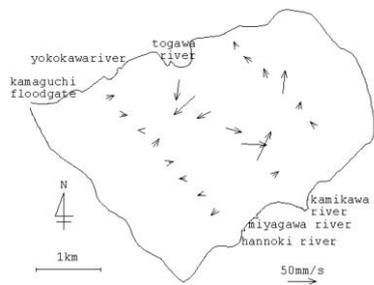
図-5 10月27日の湖上での風の観測結果



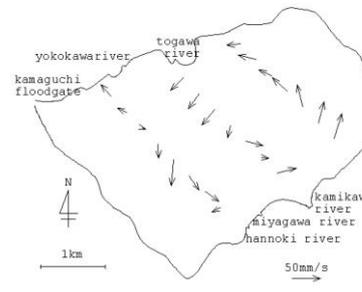
(a) 表層 (水面下0.55m)



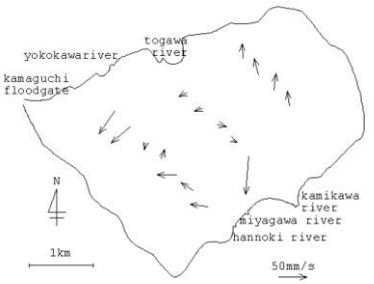
(a) 表層 (水面下0.55m)



(b) 中層 (水面下2.05m)



(b) 中層 (水面下2.05m)



(c) 底層 (水面下4.05m)



(c) 底層 (水面下4.05m)

図-6 10月26日(11:00~14:00)の流速観測結果

図-7 10月27日(7:00~10:00)の流速観測結果

出典) 豊田政史・宮原一道・萩庭康光・寺沢和晃・疋田真・降矢利勝・宮原裕一・富所五郎：諏訪湖における湖上風の非一様性とそれが湖流形成に与える影響，水工学論文集，第50巻，pp.1303-1308，2006。

図 3.5 諏訪湖における湖上風・湖流分布に関する研究事例

3.3 貧酸素予測 AI による今年度の貧酸素水塊発生・解消状況の推定

参考として、過年度業務⁷で構築した貧酸素予測 AI を用い、今年度の貧酸素水塊発生状況について推定した結果を図 3.6 に示す。図 3.6 には、湖心における水温・DO 連続測定結果もあわせて示した。

7 月下旬の貧酸素水塊発生時に関しては、AI による推定においては 7/26 に湖心底層の DO 濃度が 4mg/L を下回るものの 1mg/L 未満とはならず、その後も無酸素状態となるという推定にはならなかった。（今年度の調査結果では、7/26～27 頃から湖心底層は一旦無酸素状態となり、その後少し回復するものの 8/8 頃からは無酸素状態が連続した）

8 月末～9 月上旬の貧酸素水塊解消時に関しても、AI による推定においては 8/26 に湖心底層の DO 濃度が一時的に上昇し、その後 8/29 に 2mg/L を下回った後、8/31 から DO 濃度が緩やかに上昇するような推定結果となった。一方、今年度の調査結果では、8/27 の強風時では底層の DO 濃度は変動せず、9/2 の強風時に貧酸素水塊が一気に解消する結果であった。

このような差異が生じた要因の一つとして、貧酸素予測 AI へ入力する気象データが 1 日毎であり、特に風速は日平均風速を入力する仕様となっているため、貧酸素水塊の発生・消滅が実際の現象に比べて緩やかに推定されたものと考えられる。

⁷ 令和元年度 貧酸素水塊の発生及び拡大条件の分析業務報告書、令和 2 年 3 月、いであ株式会社

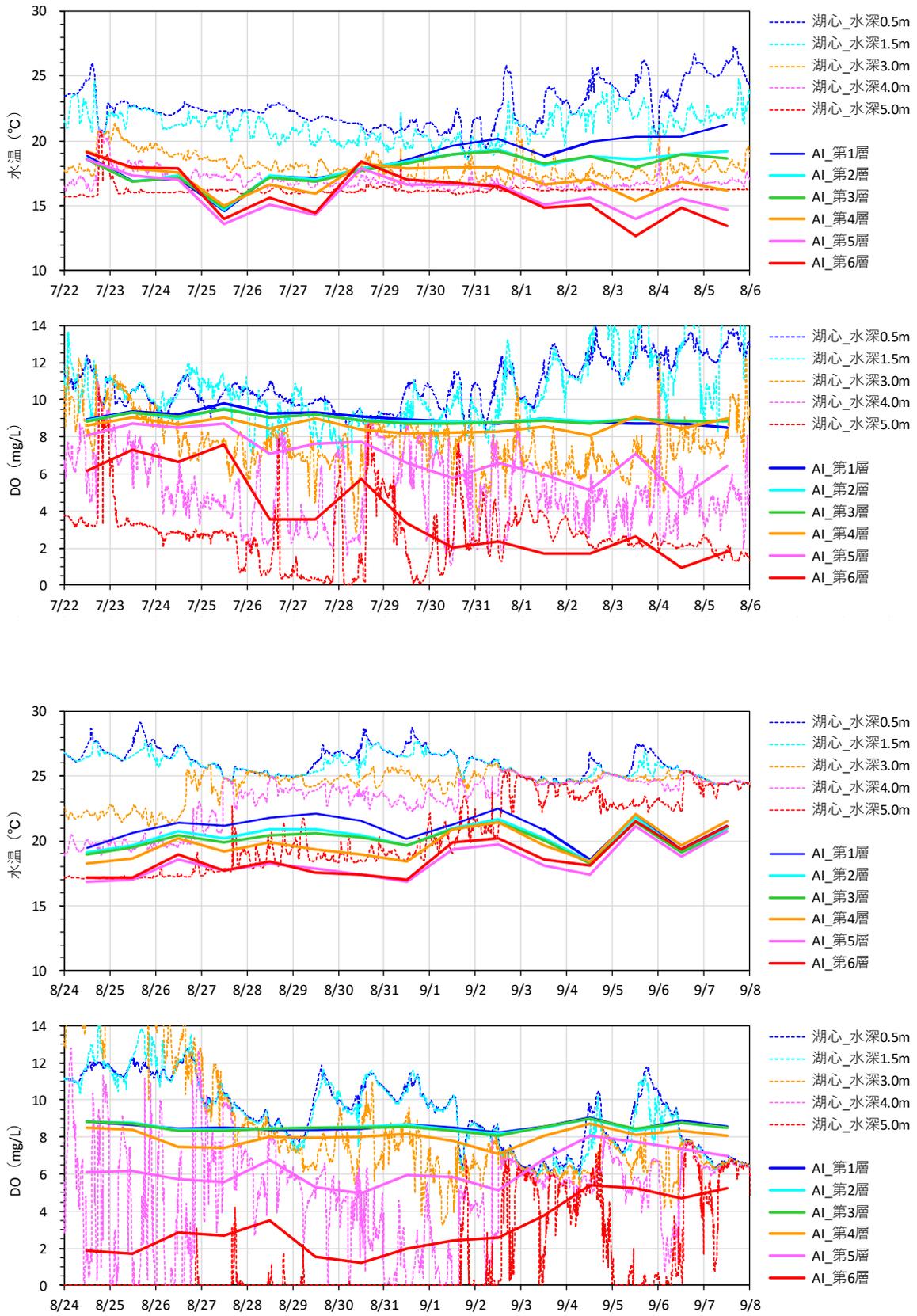


図 3.6 貧酸素予測 AI による湖心水温・DO 濃度変化の推定結果

4. 本業務のまとめ

本業務では、諏訪湖における貧酸素水塊の発生メカニズムの解明に向けて、令和2年7月中旬から9月中旬の2か月間、諏訪湖内の風況・流況調査を行うとともに、長野県および信州大学が測定した水温・DO連続測定データとあわせて整理・解析を行い、湖上の気象状況が湖水の流動および水温・DOの変化に与える影響について検討を行った。

検討結果の概要は以下の通りである。

- ▶ 令和2年度は、7月中旬から底層水のDO濃度が低下しはじめ、7月26日頃には湖心部等の底層で貧酸素状態となり、9月2日頃から解消に向かった。
- ▶ 風向風速測定の結果、諏訪湖北岸は風が非常に弱く、湖心や諏訪合同庁舎の風況とは異なっていた。
- ▶ 流向流速測定の結果、おおむね風速6m/s以上の風が継続すると、表層水は風下方向に、底層水は風上方向に流動する様子が捉えられた。このような流動が、底層水の移動と表層水との混合を促し、底層水の貧酸素状態を解消するものと考えられた。
- ▶ また、湖上の風の分布が一様ではないため、湖水流動も、湖心より北東側では流速が弱く、南西側では強くなる傾向がみられた。

一方で、本業務では流域からの諏訪湖への流入水（河川水・地下水）についての検討はなされていないため、諏訪湖全体の水収支と貧酸素水塊の発生・解消メカニズムとの関連は明らかになっておらず、今後の重要な課題と考えられる。

