

MSB-2 号孔・MSB-4 号孔における 地下水の間隙水圧および水質観測

(2010 年 4 月～2011 年 3 月)

Monitoring of Pore Water Pressure and Groundwater Chemistry
at MSB-2 and MSB-4 Boreholes in the MIU Construction Site
(April, 2010-March, 2011)

萩原 大樹 新宮 信也 栗田 和昭 江口 慶多
堀田 政國 水野 崇

Hiroki HAGIWARA, Shinya SHINGU, Kazuhiro KURITA, Keita EGUCHI
Masakuni HORITA and Takashi MIZUNO

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

MSB-2 号孔・MSB-4 号孔における地下水の間隙水圧および水質観測
(2010 年 4 月～2011 年 3 月)

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
萩原 大樹、新宮 信也^{*1}、栗田 和昭^{*1}、江口 慶多^{*1}、堀田 政國^{*2}、
水野 崇

(2012 年 3 月 9 日受理)

日本原子力研究開発機構は、岐阜県瑞浪市に建設中の瑞浪超深地層研究所において、研究坑道掘削による地下水水質への影響把握を目的とした調査研究を進めている。その一環として、研究用地内において掘削した浅層ボーリング孔（MSB-2 号孔および MSB-4 号孔）に多区間間隙水圧モニタリングシステム（MP システム）を設置して、地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温測定を 2003 年度から月 1 回の頻度で実施している。これまでの観測結果から、研究坑道の掘削に伴い、両観測孔において間隙水圧低下と水質変化が生じていることを確認している。

2010 年度の MSB-2 号孔および MSB-4 号孔における地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温測定結果の概要は、以下の通りである。また、合わせて、広域地下水流動研究において DH-2 号孔で実施している地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温測定の結果を付した。

- ・ 深度 400m 予備ステージ、深度 300m 研究アクセス坑道において実施したボーリング掘削（10MI26 号孔、10MI22 号孔）の影響と考えられる間隙水圧の低下を MSB-2 号孔および MSB-4 号孔で確認した。MSB-2 号孔では、区間 6～区間 10 で最大約 4.5m、また、MSB-4 号孔では区間 7 で最大約 5.3m の低下（全水頭に換算）を確認した。
- ・ 上記の間隙水圧低下に伴う地下水流動状態の変化が原因と考えられる地下水水質の変化を MSB-4 号孔の区間 7 で確認し、塩化物イオン濃度は最大約 20mg/L 減少した。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

※1 技術開発協力員

*1 清水建設株式会社 名古屋支店

*2 清水建設株式会社 技術研究所

Monitoring of Pore Water Pressure and Groundwater Chemistry at MSB-2 and MSB-4
Boreholes in the MIU Construction Site
(April,2010-March,2011)

Hiroki HAGIWARA, Shinya SHINGU*¹, Kazuhiro KURITA*¹, Keita EGUCHI*¹
Masakuni HORITA*² and Takashi MIZUNO

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received March 9, 2012)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been carried out investigations to understand the fluctuation of groundwater chemistry related to the shafts excavation at the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) in Mizunami City, Gifu prefecture, Japan. The data for pore water pressure, water temperature and groundwater chemistry have been provided from two surface-based boreholes, MSB-2 and MSB-4 boreholes, installed a modular multilevel groundwater monitoring system (MP system). The hydrochemical and hydrological monitoring has been conducted once in a month since April 2003.

According to the results in the past six years, the shaft excavation has caused drawdown of the hydraulic head and change in the groundwater chemistry in the MIU construction site.

In this report, the data of the hydraulic and hydrochemical monitoring at the MSB-2 and the MSB-4 boreholes from April 2010 to March 2011 were compiled. Summaries of the monitoring results in the duration are as follows. In addition, hydraulic and hydrochemical monitoring results at the DH-2 borehole as part of Regional Hydrogeological Study (RHS) project, are summarized as an appendix.

- Pore water pressures at intervals from no. 6 to no. 10 in the MSB-2 borehole decreased about 4.5m and no.7 in the MSB-4 borehole decreased about 5.3m. These drawdown would be caused by the borehole drilling conducted at -300m access/research gallery and -400m sub-stage (10MI26、10MI22 boreholes) .
- Change in groundwater chemistry at interval no.7 in the MSB-4 borehole occurred with the decrease in pore water pressure (e.g., about 20 mg/L decrease in chlorine ion concentration) .

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Water Temperature, Groundwater Monitoring, Groundwater Chemistry, Pore Water Pressure

※1 Collaborating Engineer

* 1 Shimizu Corporation, Nagoya Branch, Civil Engineering Department

* 2 Shimizu Corporation, Institute of Technology

目次

1. はじめに.....	1
2. 調査概要.....	2
3. 調査方法.....	7
3.1 間隙水圧・水温測定方法.....	7
3.2 地下水試料の採水方法	7
3.3 水質分析方法.....	9
3.3.1 分析項目	9
3.3.2 地下水試料の前処理、分析方法.....	10
3.4 分析データの品質管理	12
4. 調査結果.....	15
4.1 水質分析結果.....	15
4.2 間隙水圧・水温測定結果.....	15
5. おわりに.....	43
参考文献	44
付録.....	45

CONTENTS

1. Introduction.....	1
2. Outline of investigation	2
3. Methodology	7
3.1 Pore water pressure and temperature measurement.....	7
3.2 Groundwater sampling	7
3.3 Groundwater chemistry analysis	9
3.3.1 Analytical items.....	9
3.3.2 Procedure for analysis.....	10
3.4 Quality management of data	12
4. Result	15
4.1 Groundwater chemistry	15
4.2 Pore water pressure and temperature	15
5. Conclusions	43
References.....	44
Appendix.....	45

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、地層処分技術に関する研究開発のうち深地層の科学的研究（地層科学研究）を進めている。このうち、超深地層研究所計画¹⁾は、結晶質岩（花崗岩）を対象として岐阜県瑞浪市において進めている研究計画である。瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）は、超深地層研究所計画に係わる主要な施設である地上施設と研究坑道からなる。研究坑道は主立坑と換気立坑、二つの水平坑道群（中間ステージおよび最深ステージ）深度 300m における調査研究坑道（深度 300m 研究アクセス坑道）および深度 100m ごとに主立坑と換気立坑をつなぐ予備ステージなどからなる。この研究坑道の掘削による地下水の地球化学特性への影響を把握するため、研究所用地内に掘削され、多区間間隙水圧モニタリングシステム（Westbay Instruments 社製 MP システム、以下 MP システム）が設置されている 2 本の浅層ボーリング孔²⁾（MSB-2 号孔および MSB-4 号孔）を対象に地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温の測定を月 1 回の頻度で実施している。これまでの観測結果より、研究坑道の掘削による研究所用地内における地下水流動場や地下水の地球化学環境の変化が捉えられており^{3),4)}、今後も研究坑道掘削の進捗に伴う地下水水質の変化が予想されるため、継続的に観測を行う予定としている。

本報告書は、2010 年 4 月から 2011 年 3 月までの地下水水質分析および間隙水圧・水温測定の結果をとりまとめたものである。なお、広域地下水流動研究⁵⁾では、MP システムが設置されているボーリング孔である DH-2 号孔において、地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温の測定が実施されている。DH-2 号孔の地下水水質分析結果および間隙水圧・水温測定結果については、合わせて付録 1 にまとめた。

2. 調査概要

図 2-1 に観測孔である MSB-2、MSB-4 号孔の位置を示す。これらを利用して、地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温測定を実施した。図 2-2 に MP システムの概略を、図 2-3 に MP システムを用いたバッチ採水の概要を示す。また、表 2-1 および表 2-2 に各ボーリング孔における観測区間を示す。

MSB-2 号孔および MSB-4 号孔は、ともに 2003 年 7 月より観測を行っている。MSB-2 号孔の区間 3 では、2004 年 10 月以降、MSB-2 号孔の区間 5 では 2006 年 3 月以降、また MSB-4 号孔の区間 4 では、2009 年 3 月以降、MSB-4 号孔の区間 6 では 2010 年 9 月以降に地下水採水が不能になった。採水が不能となった原因としては、研究坑道の掘削の影響で間隙水圧が低下し、採水口ポートに接続したサンプラーボトルに地下水が流入しなくなったためと考えられる。これらの観測区間の間隙水圧は、採水が不能となった時期に負圧が観測されている。なお、MSB-2 号孔の区間 10 では間隙水圧測定用のポートのみが設定されているため、地下水採水作業は行っていない。

本年度は、これらボーリング孔の間隙水圧および水質に影響を与えると考えられる坑内作業が実施された。付録 2 に坑内ボーリング孔の位置、付録 3 に坑内のイベントログ、付録 4 に研究坑道掘削の進捗状況をまとめた。



図 2-1 MSB-2 号孔、MSB-4 号孔の位置図

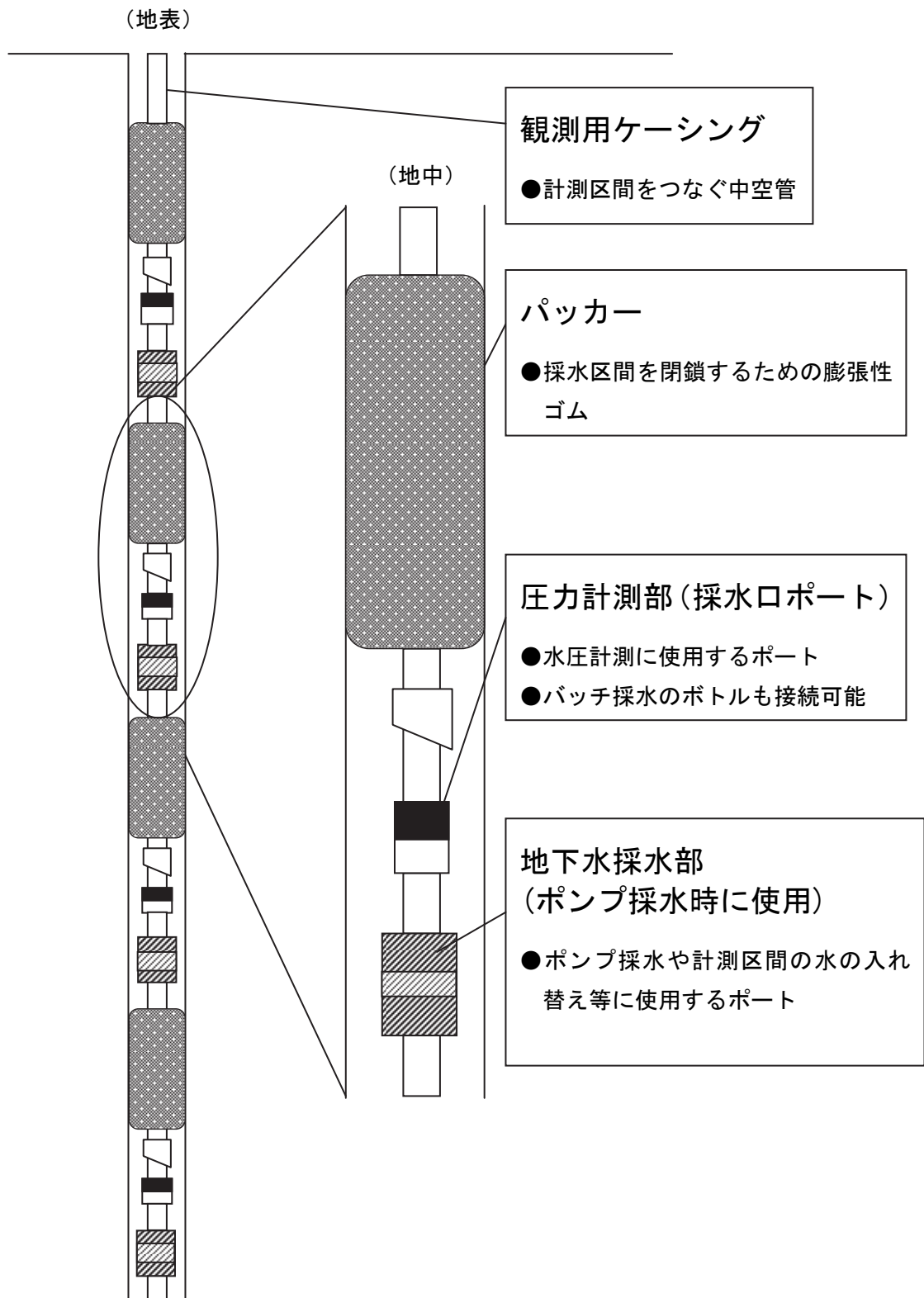


図 2-2 MP システムの概略図⁷⁾

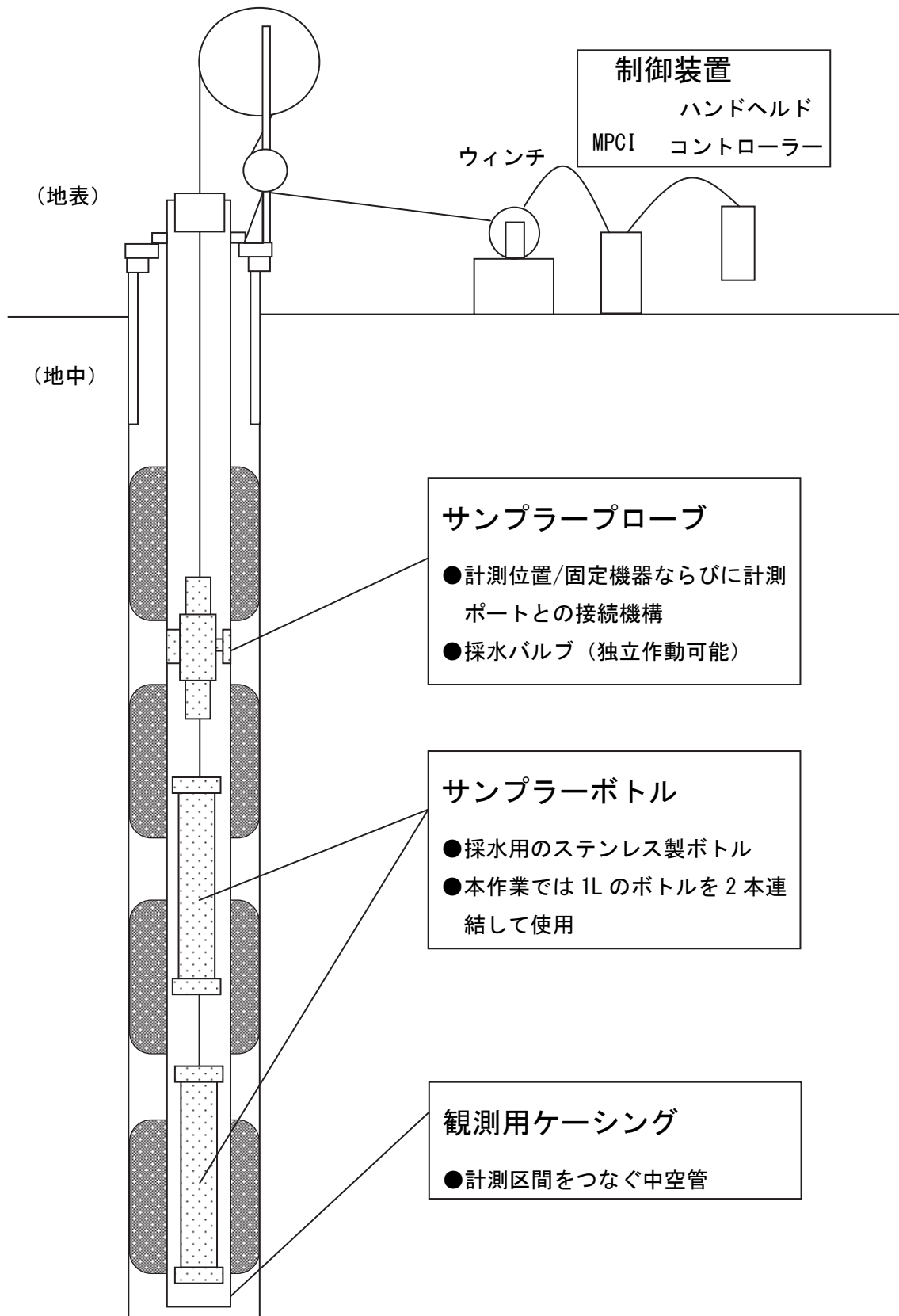


図 2-3 MP システムを用いたバッチ採水の概要⁷⁾

表 2-1 観測区間 (MSB-2 号孔)

区間	標高 (masl) ^{※1}		深度 (mbgl) ^{※2}		地質	
	区間上端	区間下端	区間上端	区間下端	主な地層	
1	179.7	175.8	18.8	22.7	明世累層	戸狩層
2	174.9	159.6	23.6	38.9		月吉層
3	158.7	130.3	39.8	68.2		
4	129.4	121.1	69.1	77.4	本郷累層	
5	120.2	78.3	78.3	120.2	土岐夾炭累層	
6	77.4	68.1	121.1	130.4		
7	67.2	44.8	131.3	153.7		
8	43.9	28.1	154.6	170.4		
9	27.2	23.3	171.3	175.2	花崗岩	
10	22.4	18.5	176.1	180.0		

※1 masl: meter above sea level

※2 mbgl: meter below ground level

表 2-2 観測区間 (MSB-4 号孔)

区間	標高 (masl)		深度 (mbgl)		地質	
	区間上端	区間下端	区間上端	区間下端	主な地層	
1	198.7	188.9	15.8	25.6	明世累層	戸狩層
2	188.0	180.6	26.5	33.9		月吉層
3	179.7	152.4	34.8	62.1		
4	151.5	137.6	63.0	76.9	本郷累層	
5	136.7	132.8	77.8	81.7	土岐夾炭累層	
6	131.9	120.6	82.6	93.9		
7	119.7	115.5	94.8	99.0	花崗岩	

3. 調査方法

3.1 間隙水圧・水温測定方法

間隙水圧および水温の測定は、それぞれのセンサーが内蔵されているサンプラープローブを用い、以下の手順で実施した。

- (1) サンプラープローブにより地上で大気圧および外気温を測定する。
- (2) 圧力計測部までサンプラープローブを降下後、ケーシング内の水圧を確認し、ケーシング内の水位との整合を確認後、圧力計測部にサンプラープローブを接続し、圧力値および水温の変化を観測する。
- (3) 水温がほぼ一定の値を示すことを確認し、区間の水温とする。
- (4) 圧力値を 30 秒毎に継続して測定し、4 回続けて同じ値を示した時点でその値を区間の間隙水圧とする。
- (5) 次の区間までサンプラープローブを降下し、全区間の間隙水圧および水温の測定が終了するまで(2)～(4)の手順を繰り返す。
- (6) 測定した間隙水圧を以下の式⁸⁾に代入し、全水頭を求める。

$$h = z + P / \gamma$$

h: 全水頭 (m)、z: 基準面からの高さ (m)、P: 水の圧力 (kN/m²)、
 γ : 水の単位体積重量 (kN/m³)

3.2 地下水試料の採水方法

地下水の採水は、サンプラーボトルを使用したバッチ式採水を以下の手順で実施した。

- (1) サンプラープローブと容積 1L のサンプラーボトル 2 本をコネクトチューブで接続する。大気との接触による水質の変化を防ぐため、1L のサンプラーボトル内部を窒素置換した後に、真空ポンプで真空にする作業を 3 回繰り返す。
- (2) 採水対象区間深度にサンプラープローブを降ろして圧力計測部のポートに定着させる。間隙水圧の変動から、サンプラープローブへの地下水の流入を判断するため、サンプラープローブの圧力センサーが間隙水圧を計測している事を確認した後、サンプラープローブのバルブを開けて地下水試料を採水する。
- (3) 最初の採水で得られた 1L のサンプラーボトル内の地下水の一部を、地下水試料を保管するためのポリ瓶等の容器の洗浄およびサンプラーボトルの洗浄に使用する。また、大気との接触を低減させるために、pH 計を固定した密閉容器に残りの地下水試料を迅速に移して、現場(地表)で物理化学パラメータ(温度、pH、電気伝導度)を pH 計(堀場製作所製、D-13) および電気伝導度計(堀場製作所、ES-12)を用いて測定する。
- (4) 2 回目以降の地下水試料を分析用試料とする。また、2 回目以降の地下水試料を用いて現場(地表)で試料観察(臭い、色、気泡、沈殿、濁り)を実施する。さ

らに、大気との接触を低減させるために試料採取後直ちに Total-Fe、Fe²⁺、S²⁻を現場（地表）で吸光光度計（HACH 製、DR/2400）を用いて測定する。

3.3 水質分析方法

3.3.1 分析項目

主な水質分析項目および分析方法を表 3.3.1-1 に示す。なお、室内分析は東濃地科学センター分析室（以下、分析室）で行った。

表 3.3.1-1 分析方法

分析項目	分析方法
pH [※]	ガラス電極法 (JIS K 0102)
pH	ガラス電極法 (JIS K 0102)
電気伝導度 [※]	電気伝導度計 (JIS K 0102)
電気伝導度	電気伝導度計 (JIS K 0102)
Na ⁺	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
K ⁺	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Ca ²⁺	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Mg ²⁺	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Sr ²⁺	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Si	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Al	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Total-Fe [※]	吸光光度法 (JIS K 0115)
Total-Fe	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Mn	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
Ti	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
B	ICP発光分光法 (JIS K 0116)
F ⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
Cl ⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
NO ₃ ⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
NO ₂ ⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
Br ⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
PO ₄ ³⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
SO ₄ ²⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K 0127)
CO ₃ ²⁻	滴定法 (JIS K 0102)
HCO ₃ ⁻	滴定法 (JIS K 0102)
Fe ²⁺ [※]	吸光光度法 (JIS K 0115)
Fe ³⁺	Total-Fe値 - Fe ²⁺ 値
S ²⁻ [※]	吸光光度法 (JIS K 0115)
U	ICP質量分析装置 (JIS K 0133)
全炭素	無機炭素+有機炭素
無機炭素	燃焼酸化-赤外吸収法 (JIS K 0102)
有機炭素	燃焼酸化-赤外吸収法 (JIS K 0102)
ナフチオン酸 ナトリウム	高速液体クロマトグラフ法 (JIS K 0124)
ウラニン	高速液体クロマトグラフ法 (JIS K 0124)
アミノG酸	高速液体クロマトグラフ法 (JIS K 0124)

※現場（地表）で分析

3.3.2 地下水試料の前処理、分析方法

(1) pH

現場（地表）では、ガラス電極を用いた pH 計（堀場製作所製、D-13）で測定した。pH 測定中に地下水が大気と接触することを避けるため、採水後直ちに地下水を pH 計が固定された密閉容器に移して測定した。分析室では、大気解放状態で分取した未処理の試料を、ガラス電極を用いた pH 計（東亜 DKK 製、DIGITAL pH METER HM-50V）で測定した。

(2) 電気伝導度

現場（地表）では、導電率電極を用いた電気伝導度計（堀場製作所、ES-12）で測定した。電気伝導度測定中に地下水が大気と接触することを避けるため、採水後直ちに地下水を電気伝導度計が固定された密閉容器に移して測定した。分析室では、大気解放状態で分取した未処理の試料を、電気伝導度計（東亜 DKK 製、マルチ水質計 HM-60 型）を用いて測定した。

(3) F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-}

分析室で、 $0.45\mu m$ のイオンクロマトグラフ用フィルターでろ過後の試料をイオンクロマトグラフ分析装置（日本ダイオネクス製、DX-120）を用いて測定した。

(4) CO_3^{2-} 、 HCO_3^-

分析室で、 $0.45\mu m$ のメンブレンフィルターでろ過後の試料を電位差自動滴定装置（京都電子工業製、AT-510）を用いて測定した。

(5) Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、Si、Al、Total-Fe、Mn、Ti、B

分析室で、50mL の未処理試料に硝酸 0.5 mL を添加し、60 °C に設定された乾燥機内で 10～20 分加温後、懸濁物質がない場合は、そのまま ICP 発光分光分析装置（バリアン製、VISTA MPX）を用いて測定した。懸濁物質が残っている場合は試料を $0.45\mu m$ のメンブレンフィルターでろ過し、ICP 発光分光分析装置（バリアン製、VISTA MPX）を用いて測定した。

(6) TOC、IC、TC

① TOC（全有機炭素）

分析室で、未処理試料に塩酸を添加し、溶存炭酸物質を気化させ、後に残った有機炭素を全有機炭素計（島津製作所製、TOC-V CPH）を用いて測定した。

②IC（無機炭素）

分析室で、未処理試料にりん酸を添加し、溶存炭酸物質を気化させ、全有機炭素計（島津製作所製、TOC-V CPH）を用いて測定した。

③TC（全炭素）

①TOC（全有機炭素）＋②IC（無機炭素）として計算した。

(7) Total-Fe

大気と接触することで化学形が変化するため、現場（地表）で採水後、直ちに吸光光度計（HACH 製、DR/2400）を用いて測定した。

(8) Fe²⁺

大気と接触することで化学形が変化するため、現場（地表）で採水後、直ちに吸光光度計（HACH 製、DR/2400）を用いて測定した。

(9) S²⁻

大気と接触することで化学形が変化するため、現場（地表）で採水後、直ちに吸光光度計（HACH 製、DR/2400）を用いて測定した。

(10) U

分析室で、50mL の未処理試料に、硝酸 0.5mL を添加し、60 °C に設定された乾燥機内で 10～20 分加温した。目視で懸濁物質が確認できない場合は、そのまま測定した。懸濁物質が残っている場合は、試料を 0.45μm のメンブレンフィルターでろ過後、ICP 質量分析装置（セイコーインスツルメンツ製、SPQ-9200）を用いて測定した。

(11) ナフチオン酸ナトリウム、ウラニン、アミノ G 酸

これらの物質は、掘削水の影響を定量的に把握するため、ボーリング孔の掘削時に掘削水へ添加したものである。分析室では、2mL の未処理試料を 0.45μm のメンブレンフィルターでろ過後、高速液体クロマトグラフ（島津製作所製、RF-1500）を用いて測定した。

3.4 分析データの品質管理

(1) 分析データの確認

取得データに関しては、生データのデータシートへの転記ミスの有無、日付等の記載事項の記載ミスの有無を分析担当者およびデータ管理者の複数人で確認した。

(2) イオンバランスを用いた品質確認

試料中に含まれる主要陽イオンと主要陰イオンについて meqL^{-1} で表した数値の和を計算し、陽イオンと陰イオンのバランス（以下、イオンバランス）により分析データの精度を確認した。各分析項目において、分析値に明らかな異常値が出た時やイオンバランスが一定の範囲に入らない時は、分析データに問題があると考えて再分析を行った。イオンバランスの確認の結果、MSB-2 号孔および MSB-4 号孔ともに、Na・Cl 型地下水（両孔ともに区間 4 以深）でイオンバランスの崩れが大きくなった。特に、土岐夾炭累層において、イオンバランスのマイナス方向への崩れが大きく、 Σ 陰イオンを支配している Cl 濃度との相関がみられることから（図 3.4-1、図 3.4-2）、Cl 濃度の分析に関連する誤差がイオンバランスの崩れの要因と考えられる。

なお、本報告書においては、下記①、②、③で示した範囲内⁹⁾の分析結果のみ採用した。

① Σ 陰イオンが $0 \sim 3.0 \text{ meqL}^{-1}$ のとき

$$\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン} = \pm 0.2 \text{ meqL}^{-1} \text{ 以内}$$

② Σ 陰イオンが $3.0 \sim 10.0 \text{ meqL}^{-1}$ のとき

$$\frac{\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン}}{\Sigma \text{陽イオン} + \Sigma \text{陰イオン}} \times 100 = \pm 2 \% \text{ 以内}$$

③ Σ 陰イオンが $10.0 \sim 800 \text{ meqL}^{-1}$ のとき

$$\frac{\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン}}{\Sigma \text{陽イオン} + \Sigma \text{陰イオン}} \times 100 = \pm 2 \sim 5 \% \text{ 以内}$$

※ Σ 陽イオン : Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

Σ 陰イオン : F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-

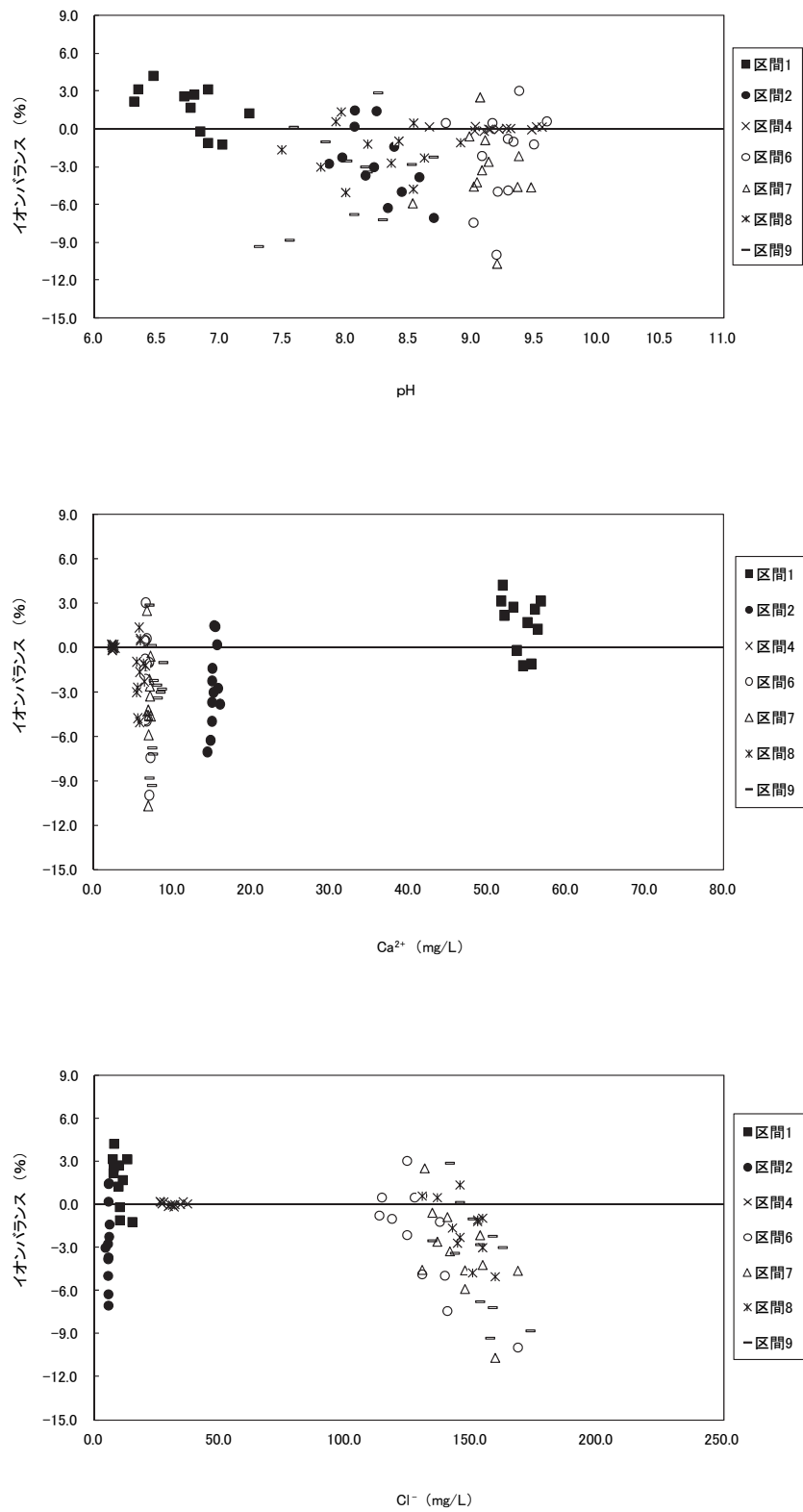


図 3.4-1 イオンバランスの相関図 (MSB-2 号孔)

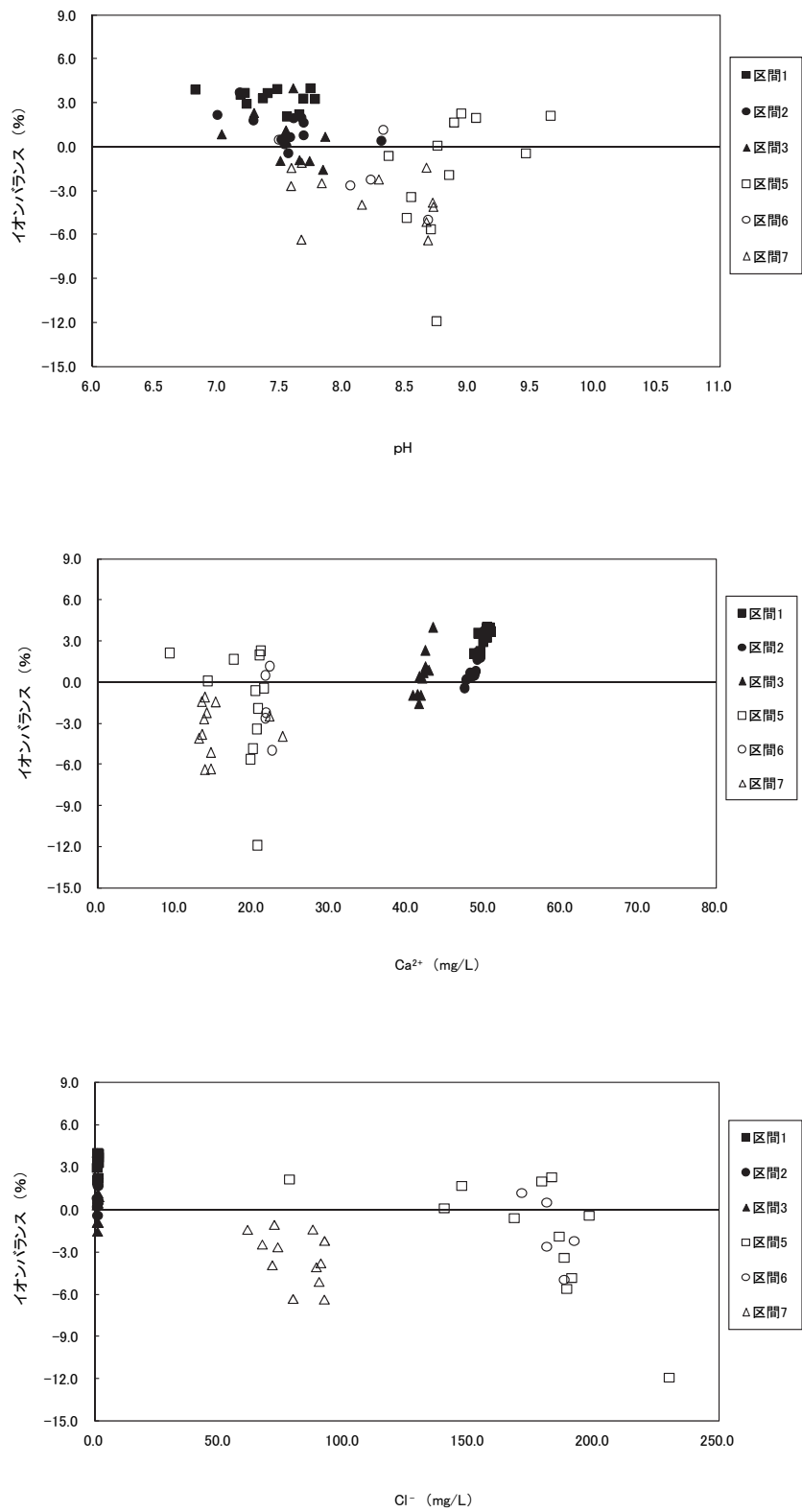


図 3.4-2 イオンバランスの相関図 (MSB-4 号孔)

4. 調査結果

4.1 水質分析結果

MSB-2 号孔および MSB-4 号孔の水質分析結果を図 4.1-1～図 4.1-22 に示す。MSB-2 号孔および MSB-4 号孔の掘削時にトレーサーとして使用した蛍光染料（堆積岩には、ナフチオン酸ナトリウムを濃度 $10\text{mg/L} \pm 10\%$ 、花崗岩にはウラニンを濃度 $0.2\text{mg/L} \pm 10\%$ で添加）は、MSB-2 号孔では未検出であった（図 4.1-3）。MSB-4 号孔ではウラニンが検出されたものの、添加濃度の 2%以下（区間 5 で最大 0.0036mg/L ）であった（図 4.1-13）。

MSB-2 号孔の区間 6～区間 9 において、地下水流動状態の変化の指標として水・岩石反応などによる濃度の変化が起り難い Cl 濃度⁴⁾に着目すると、年間を通して $20 \sim 30\text{mg/L}$ の範囲で変動した（図 4.1-8）。これらの変動時期と研究坑道内でのイベント時期との整合は確認できなかったが、イオンバランスが基準を満たしていないデータを除外したため、研究坑道内のイベントと Cl 濃度の間に相関性が認められなかった可能性も考えられる。一方、MSB-4 号孔の区間 5 および区間 7 では、2010 年 10 月～2011 年 1 月にかけて、溶存成分濃度の変化が見られた（図 4.1-20）。同様に Cl 濃度に着目すると、区間 5 では濃度が上昇し、区間 7 では濃度が減少した（図 4.1-18）。これらの変化は、同時期（2010 年 8 月～11 月）にかけて、深度 300m 研究アクセス坑道のボーリング孔（10MI22 号孔、10MI23 号孔）掘削に伴う湧水（10MI22 号孔：最大約 260L/分 、10MI23 号孔：最大約 130L/分 ）の影響が考えられる。MSB-2 号孔と MSB-4 号孔が受ける擾乱の程度の違いは、両観測孔間に位置する北北西走向の低透水性断層⁶⁾（以下、主立坑断層）の存在から説明可能である。すなわち、主立坑断層の南側に位置する MSB-2 号孔に比べ、主立坑断層の北側に位置する MSB-4 号孔の方が、主立坑断層の北側で実施された 10MI22 号孔および 10MI23 号孔の影響を受けやすいと考えられる。

4.2 間隙水圧・水温測定結果

MSB-2 号孔、MSB-4 号孔の間隙水圧測定値については、3.1（6）で示した式により全水頭を算出した。MSB-2 号孔および MSB-4 号孔における測定結果を図 4.2-1、図 4.2-2 に示す。さらに、採水時に測定している区間圧力値を図 4.2-3、図 4.2-4 に示す。また、間隙水圧測定と同時に行った水温測定結果を図 4.2-5～図 4.2-8 に示す。

MSB-2 号孔の区間 6～区間 10 では、2010 年 12 月以降に全水頭の低下が認められた（図 4.2-1）。2010 年 12 月には深度 400m 予備ステージにおけるボーリング孔（10MI26 号孔）掘削に伴う湧水（最大約 110L/分 ）が発生したことがその原因と考えられる。一方、MSB-4 号孔の区間 7 の 2010 年 9 月の全水頭は、同 8 月と比べ、約 5m 低下した（図 4.2-2）が、区間 6 の 2010 年 9 月の全水頭は、8 月と比べ約 3m 上昇し、その後も全水頭は 8 月と比べて上昇した（図 4.2-2）。MSB-4 号孔の区間 7 における全水頭の低下は、2010 年 8 月に実施した深度 300m 研究アクセス坑道内においてボーリング掘削（10MI22 号孔、

10MI23 号孔) の際の湧水 (最大約 260L/分) の影響と考えられる。また、2010 年 9 月以降、区間 6 においては全水頭が上昇し、2010 年 8 月に採水を実施した時点の全水頭以上にまで回復している。しかし、毎月複数回サンプラーボトルを降下させ、採水を試みたが採水は不能であった。全水頭が上昇しているにも関わらず採水が不能となった原因を推定するため、区間 6 にサンプラーボトルを接続し、採水口ポートを開けた際の区間圧力について検討した。また、区間 6 と比較するため、採水が可能な区間 5 の採水時に測定している区間圧力を確認した。その結果、区間 6 において、採水が不能となった 2010 年 9 月の圧力値は、採水を試みた回数毎に減少した (図 4.2-3)。一方、区間 5 の 2010 年 9 月における圧力値は、2 回目の採水開始時と 1 回目の採水開始時に同程度を示した (図 4.2-4)。これらのことは、区間 5 では採水した場合でも区間に地下水が流入することにより、区間圧力が採水前後で概ね同じ圧力を保っていることを示している。これに対し区間 6 では、区間圧力が低下していることからサンプラーボトルに地下水以外の何らかの物質が流入しているものの、区間内に区間圧力の低下分を補う物質の供給が少ないことを示している。区間 6 の採水作業においてサンプラーボトルに流入した物質は、液体でないことから気体であると考えられるが、採水が可能であった 2010 年 8 月までに S^{2-} や Fe^{2+} が検出され嫌気状態を保持していたことや、2010 年 9 月以降も他の区間の地下水は嫌気状態を維持していることから嫌気性の気体と考えられる。さらに、研究嘱託の角皆潤准教授 (北海道大学) によるサンプラーボトル内の気体の分析結果から、メタンガスの存在が確認された。したがって、区間 6 では採水が不能となった 2010 年 9 月以降、区間内の地下水は採水するために必要な水頭を保っておらず、脱ガス等によって発生した気体が区間に流入し、その圧力を測定することで全水頭の値が見掛け上、上昇していると推定できる。これらの事象を含め、MSB-2 号孔および MSB-4 号孔においては今後も研究坑道の掘削に伴う全水頭の変動が予想されるため、研究坑道の掘削状況を把握しながら、継続的にモニタリングを実施する必要がある。

水温測定結果より、MSB-2 号孔の各区間の水温は、年間を通してほぼ一定の値を示した (図 4.2-5)。MSB-4 号孔においては 2010 年 10 月以降に土岐夾炭累層に位置する区間で、水温が低下した (図 4.2-6)。また、堆積岩に位置する区間では、深度とともに水温が上昇するという傾向が認められた (図 4.2-7、図 4.2-8)。

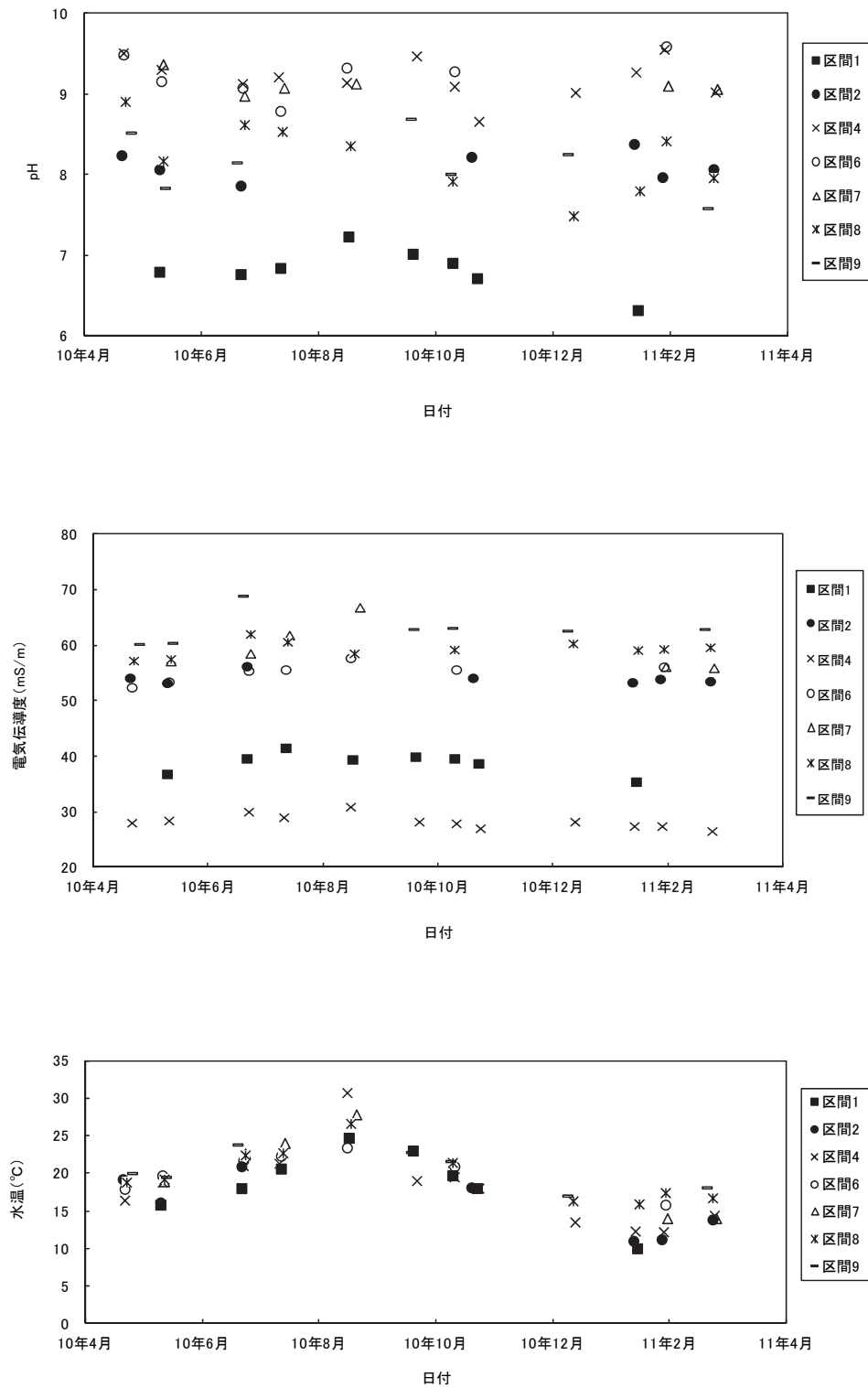


図 4.1-1 現場(地表)での簡易測定による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

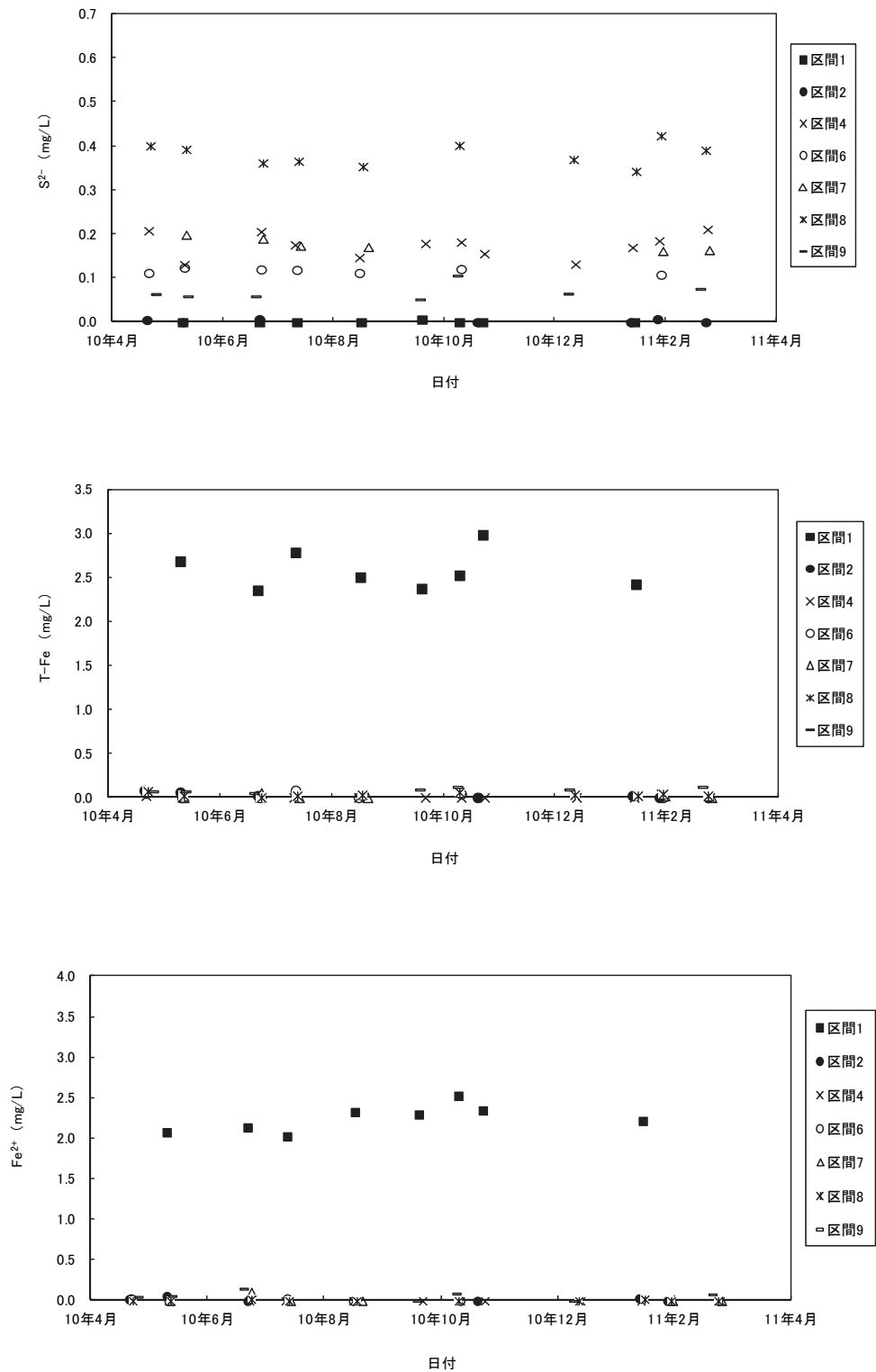


図 4.1-2 現場(地表)での簡易測定による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

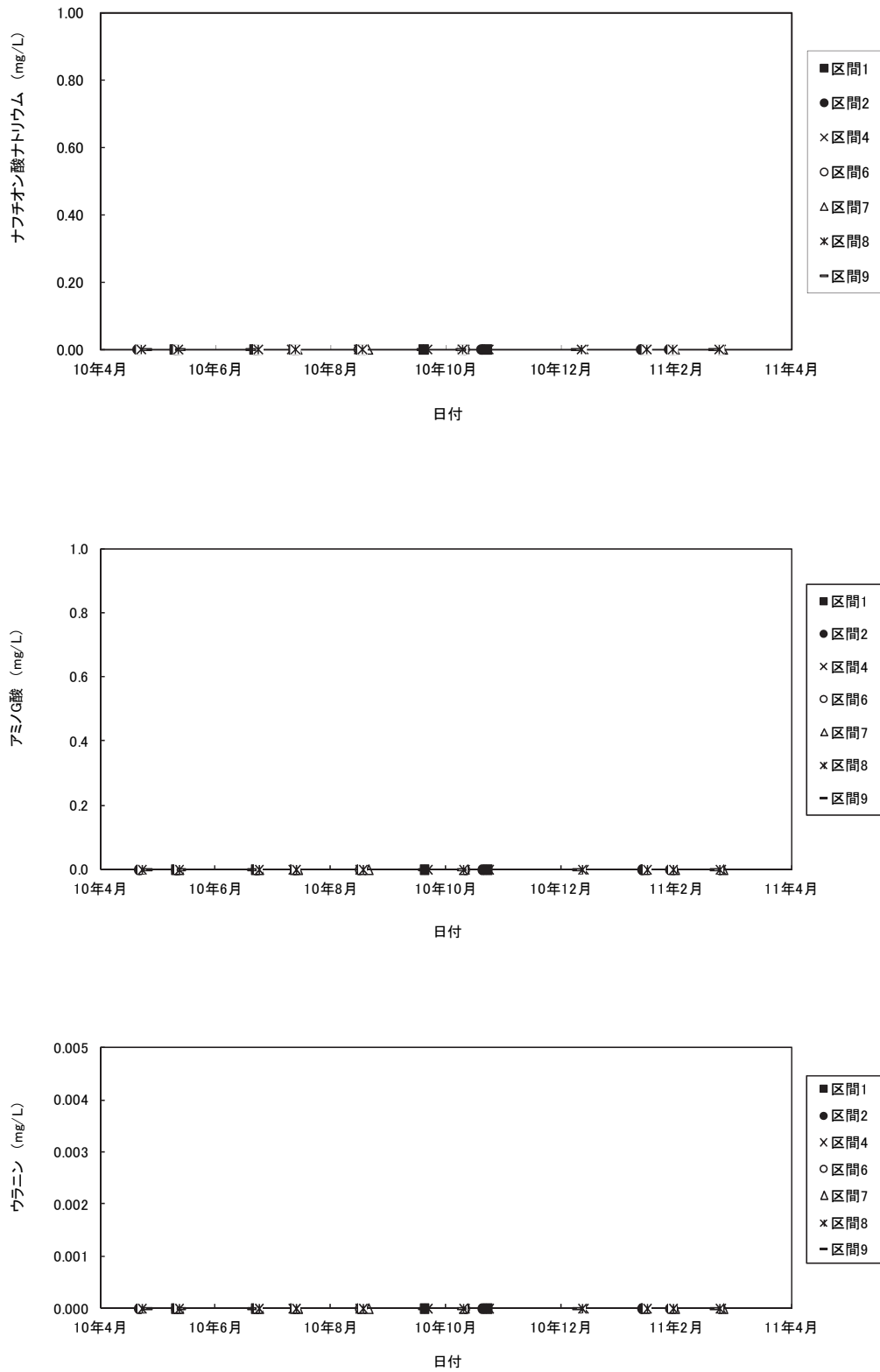


図 4.1-3 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

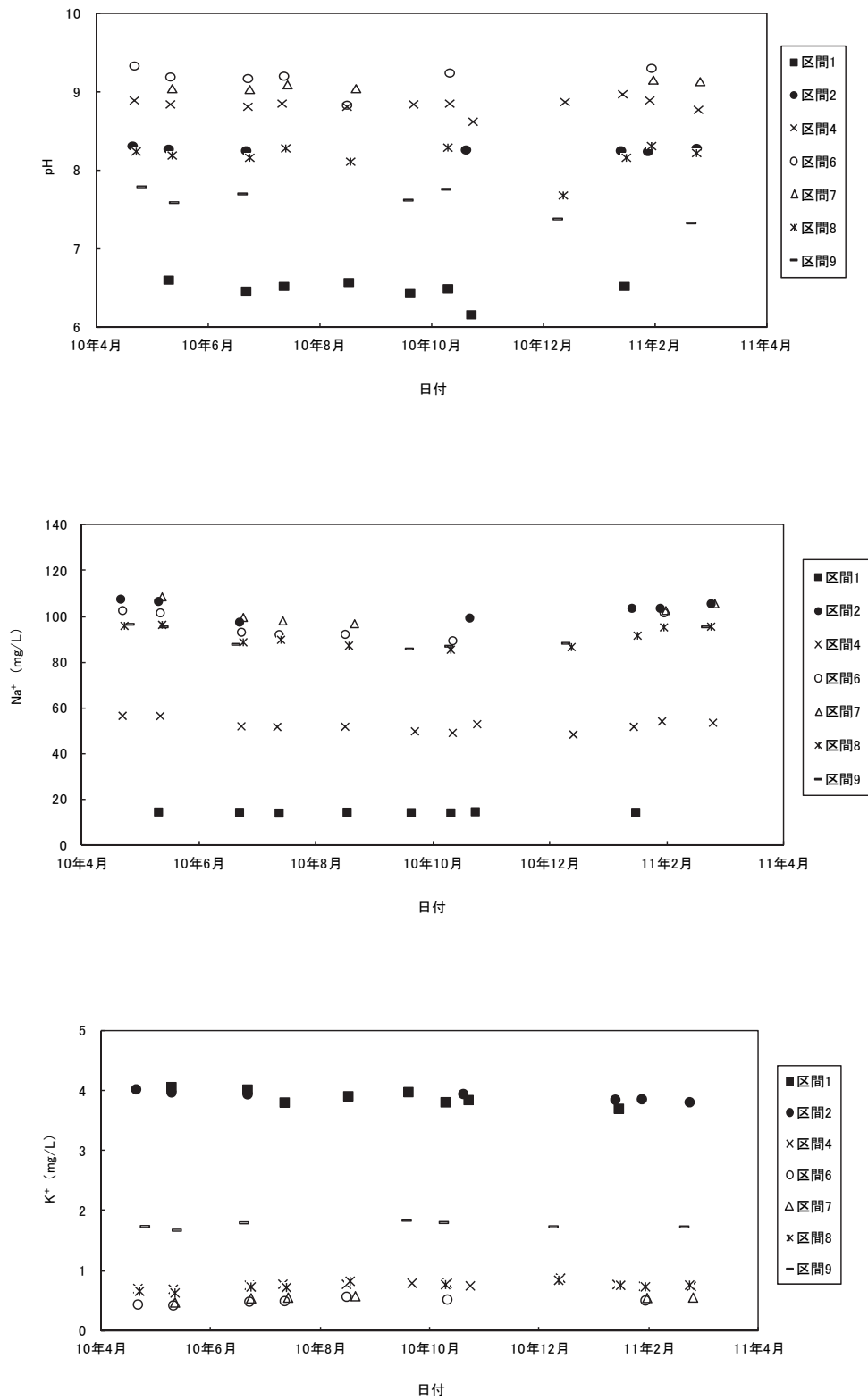


図 4.1-4 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

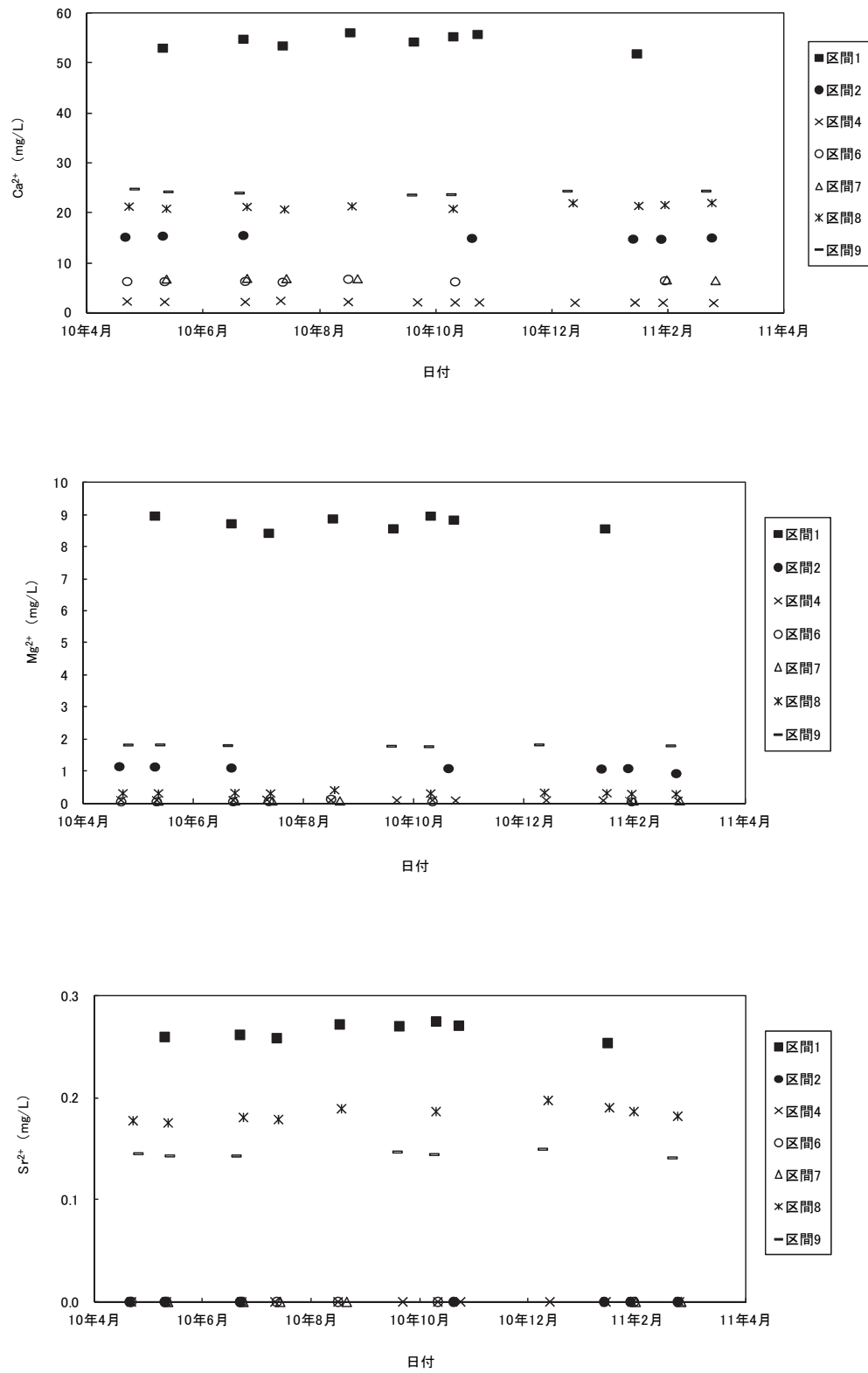


図 4.1-5 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

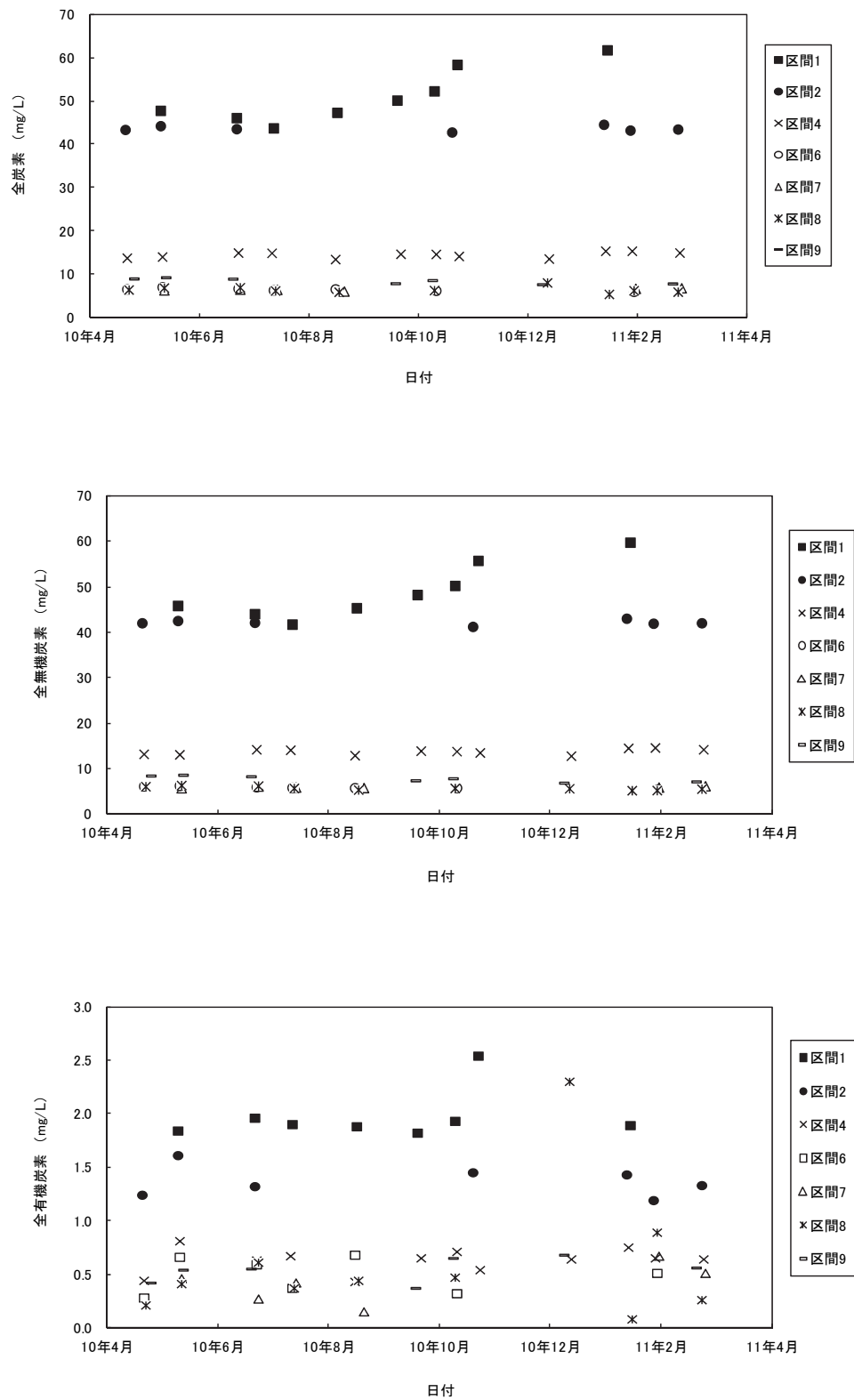


図 4.1-6 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

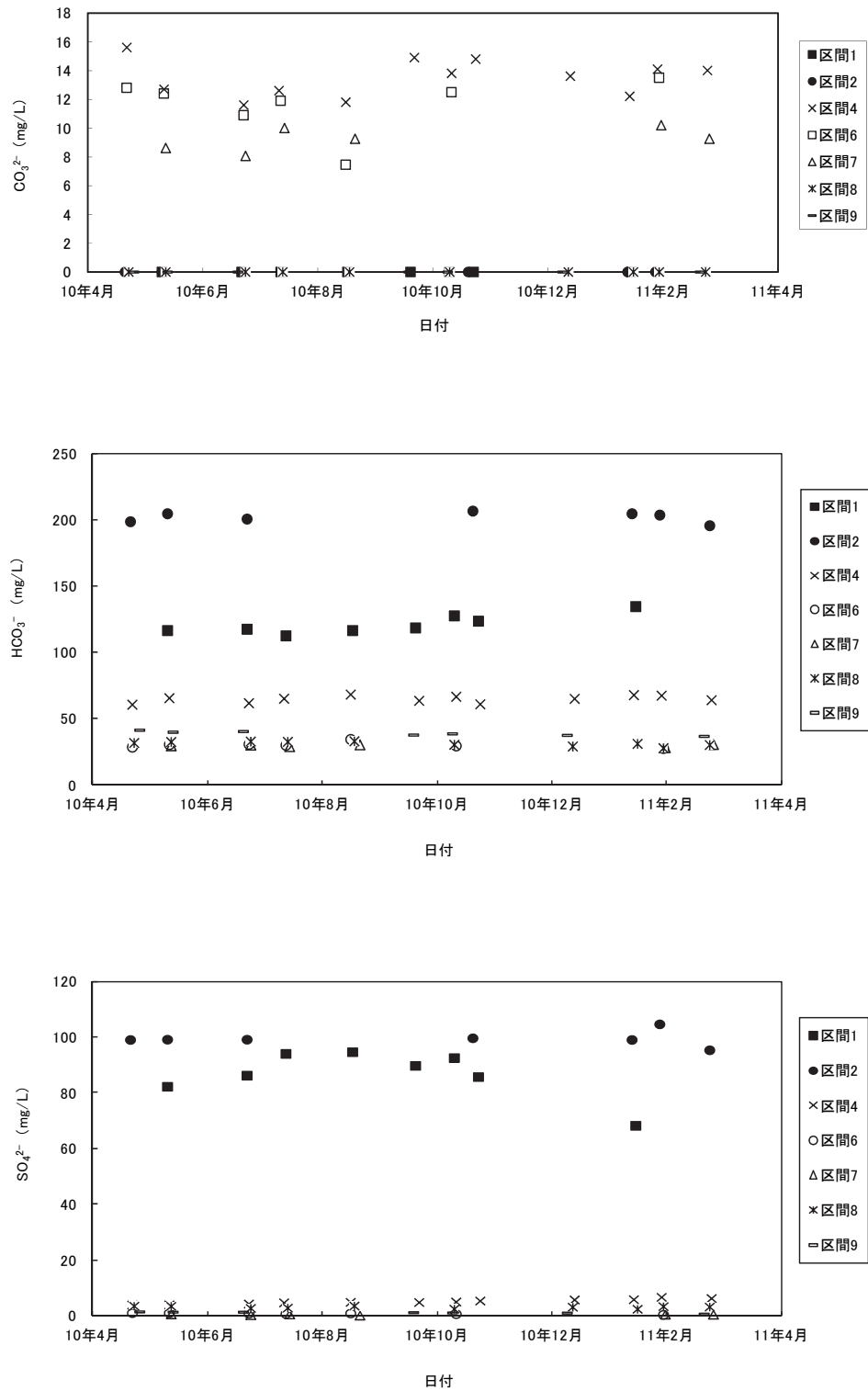


図 4.1-7 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

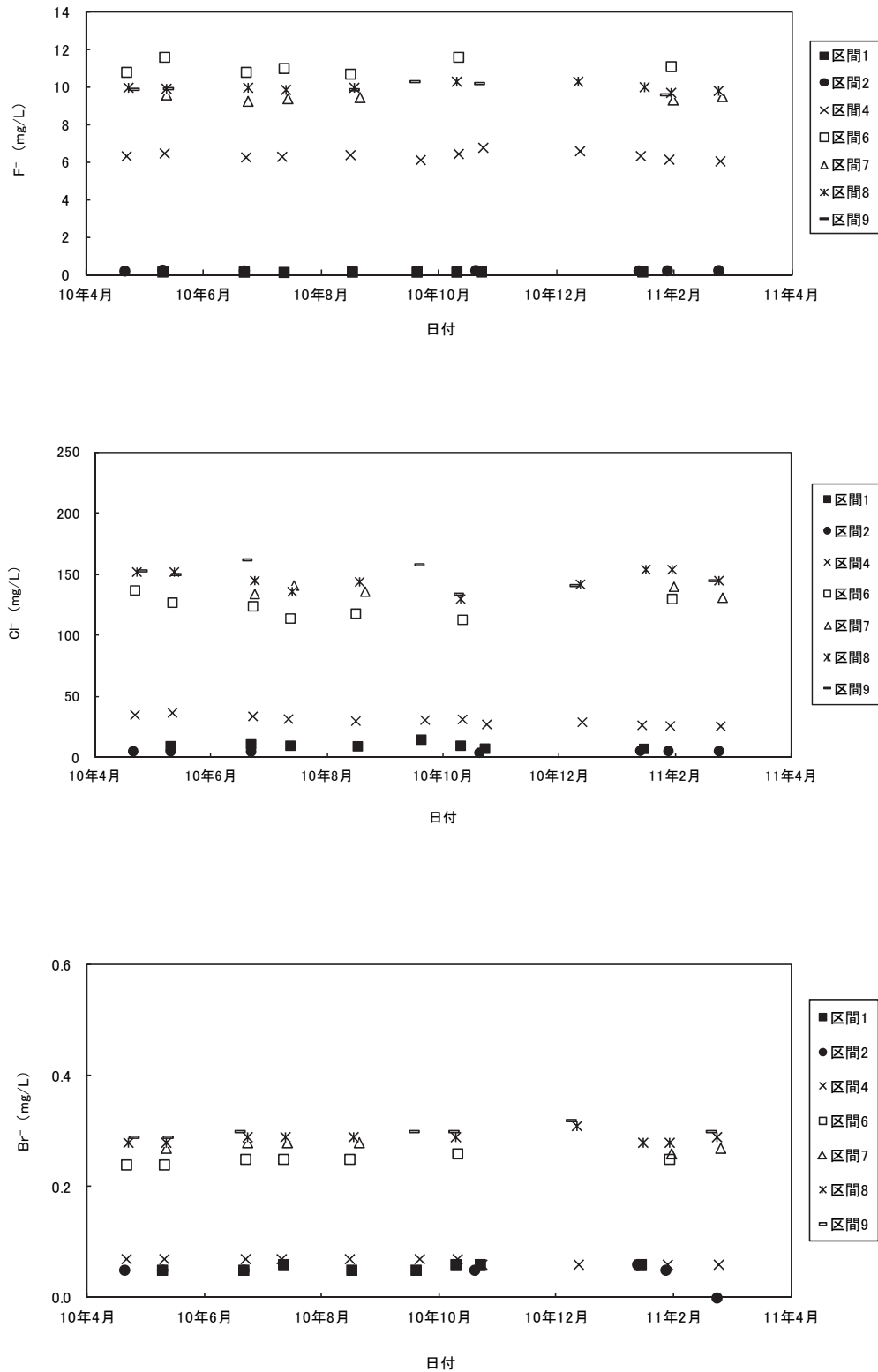


図 4.1-8 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

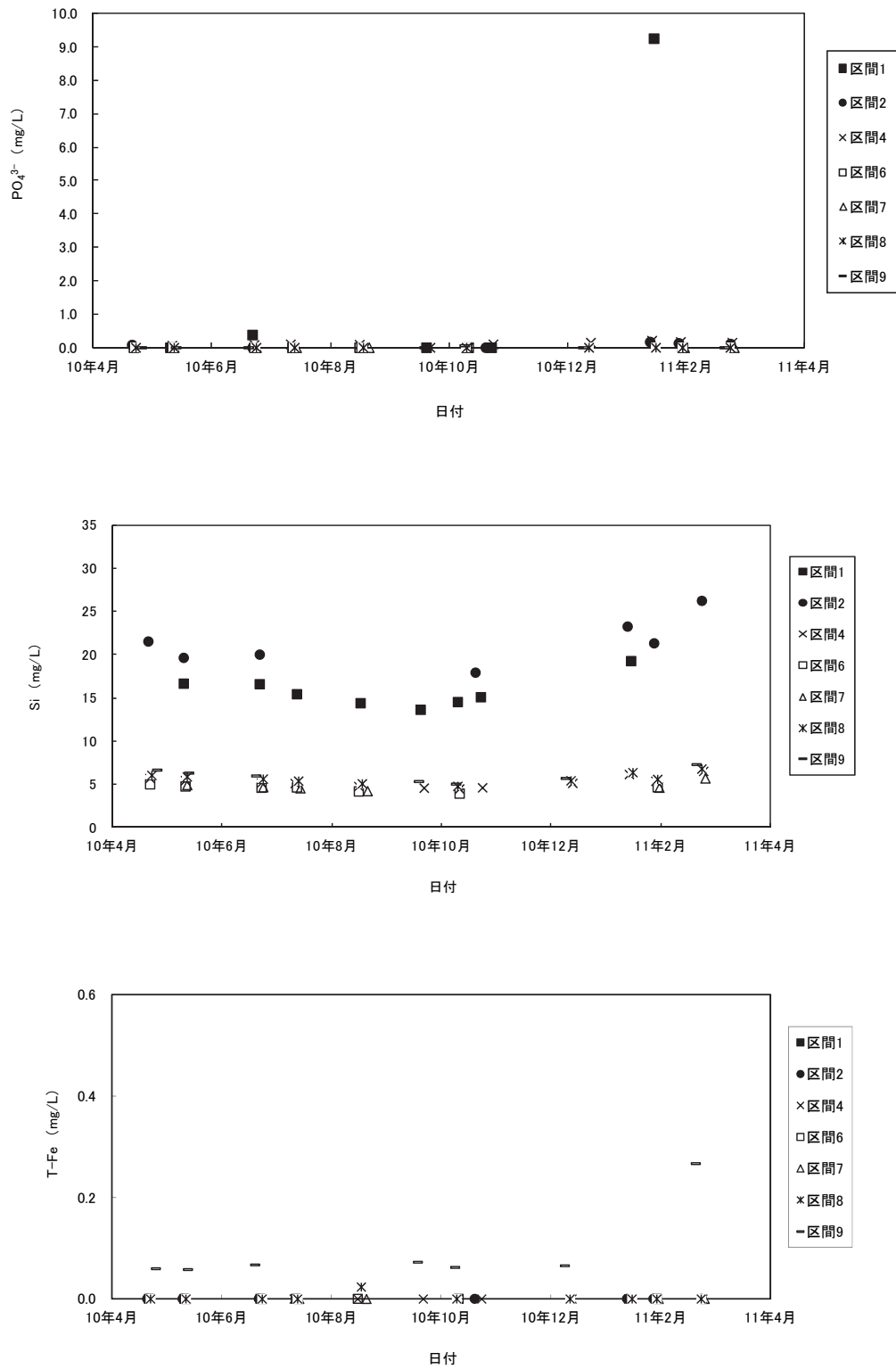


図 4.1-9 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

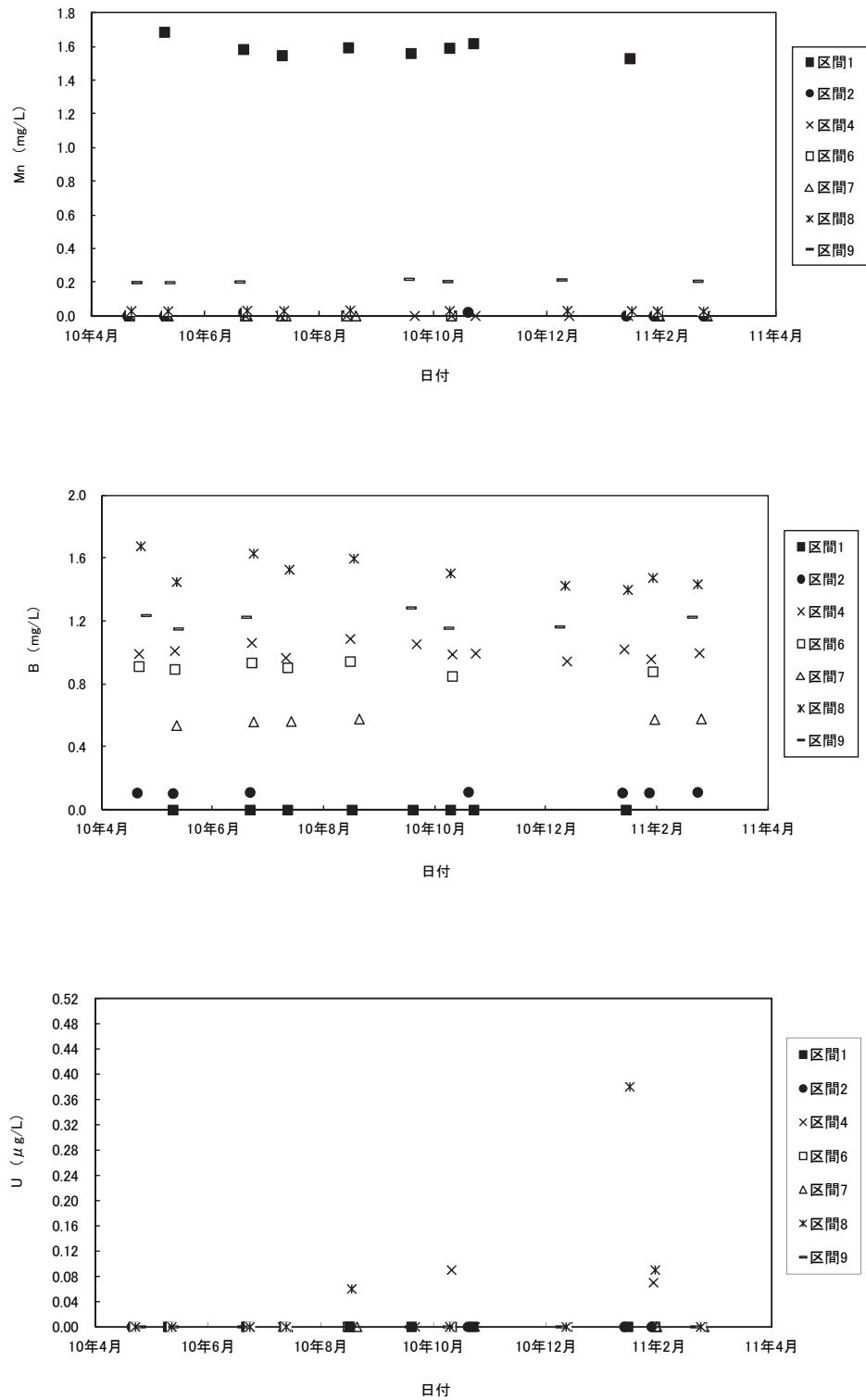


図 4.1-10 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-2 号孔)

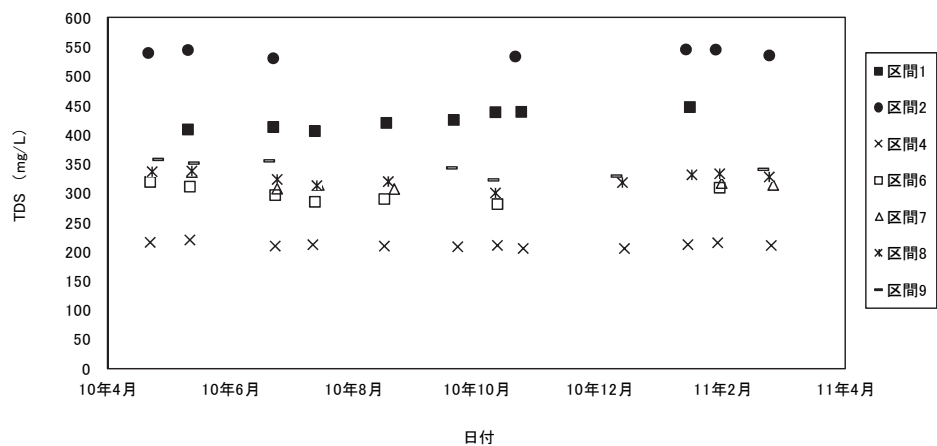


図 4.1-11 分析結果による化学成分濃度の経時変化（MSB-2 号孔）

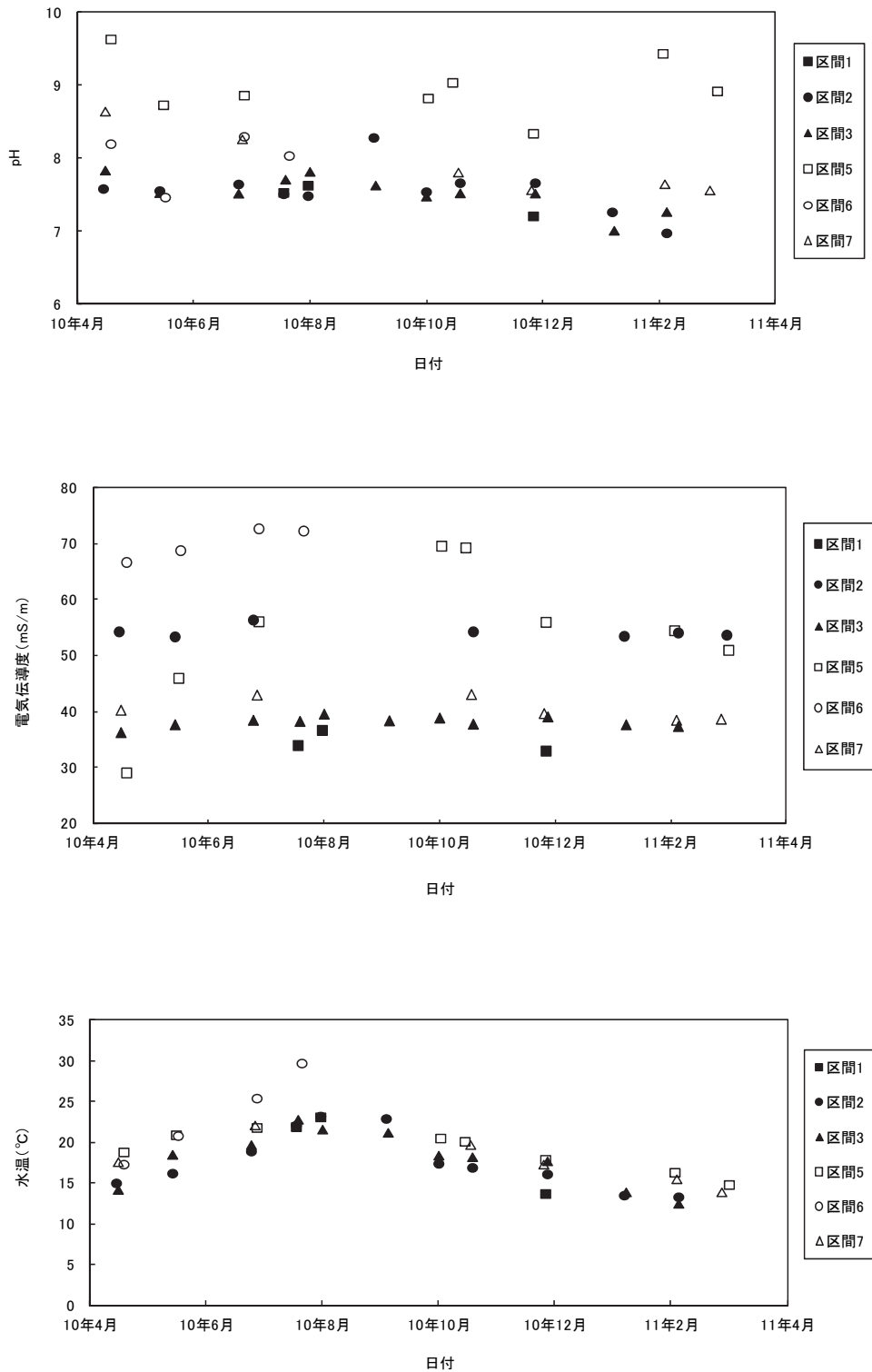


図 4.1-12 現場(地表)での簡易測定による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

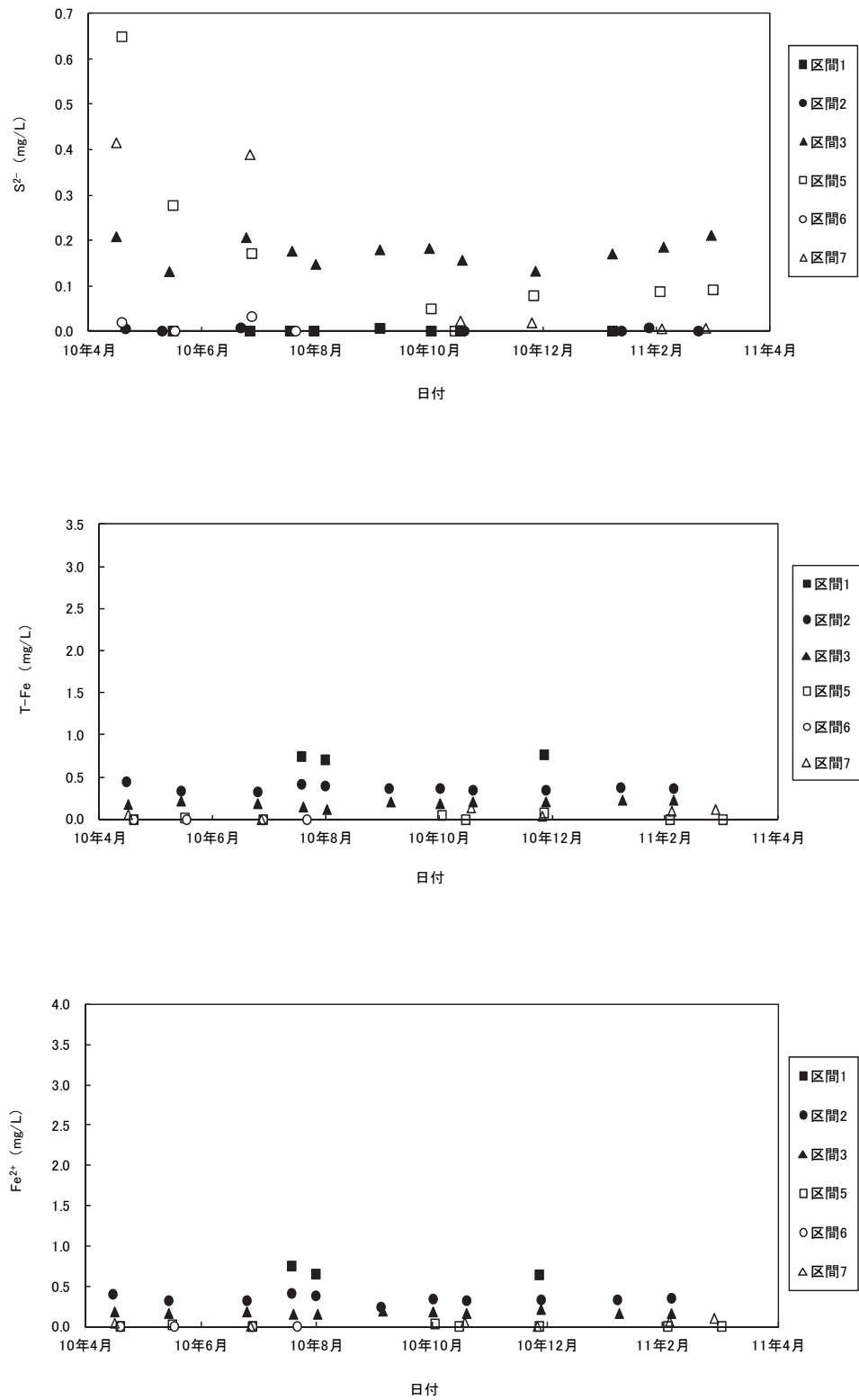


図 4.1-13 現場(地表)での簡易測定による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

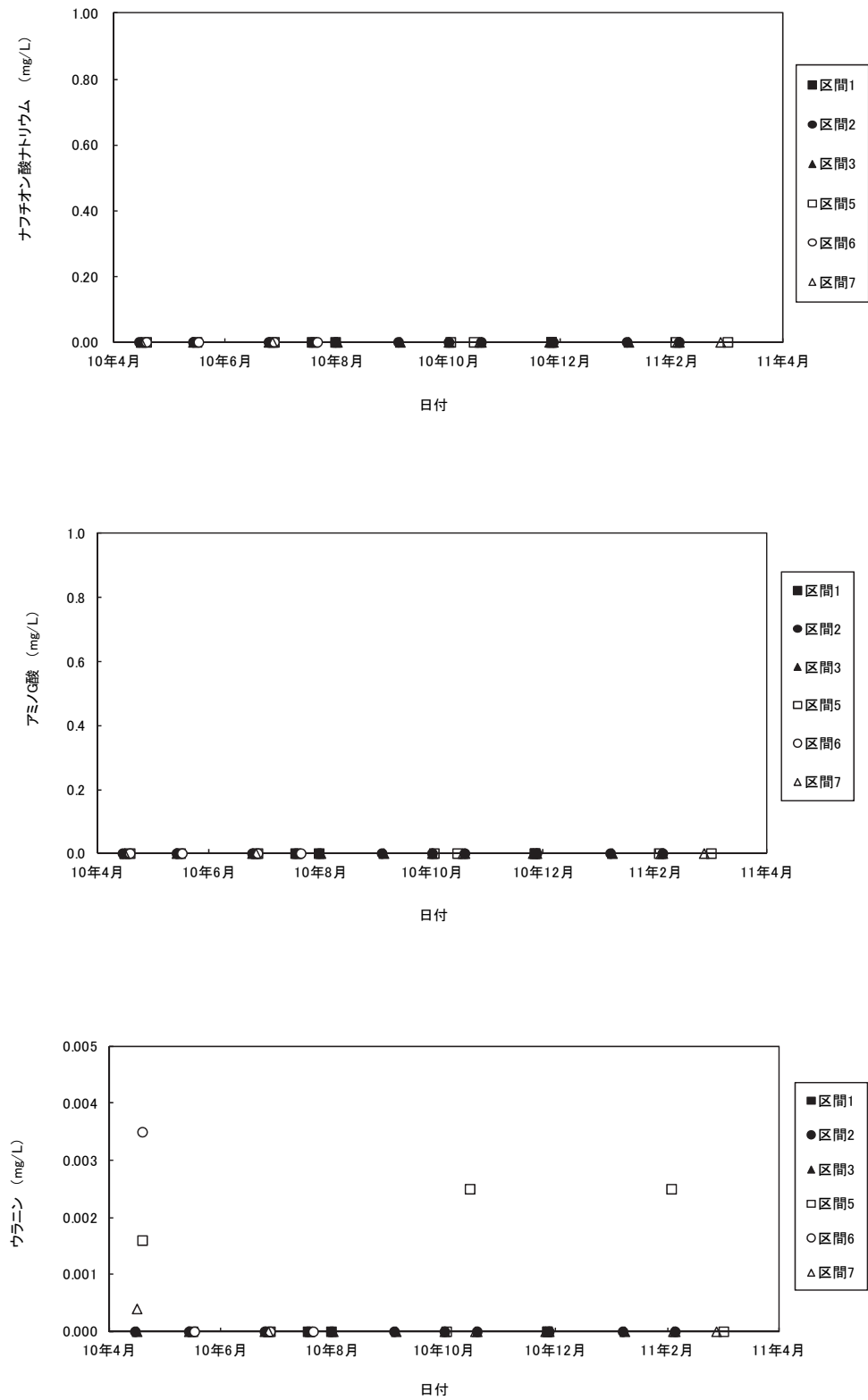


図 4.1-14 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

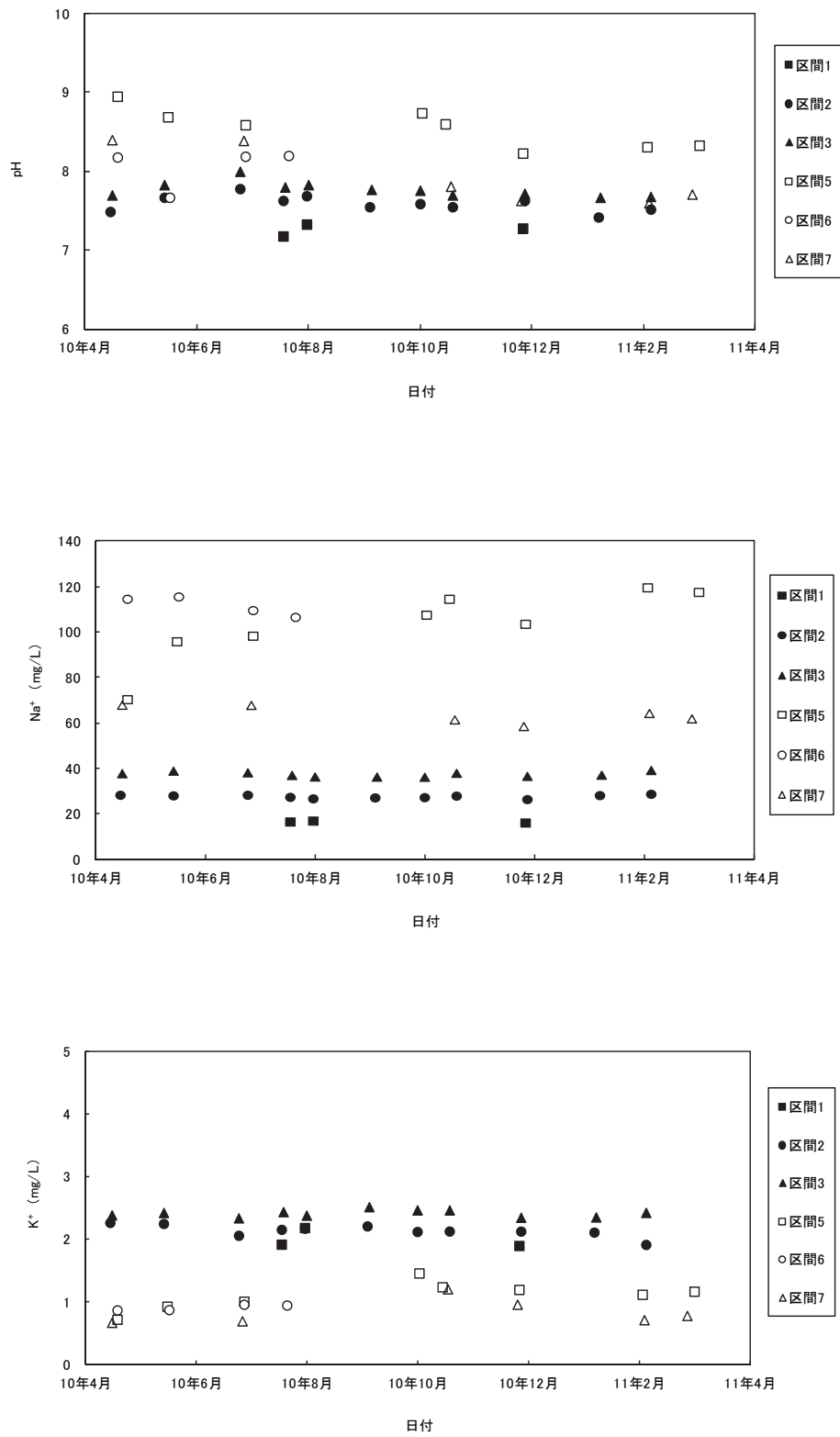


図 4.1-15 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

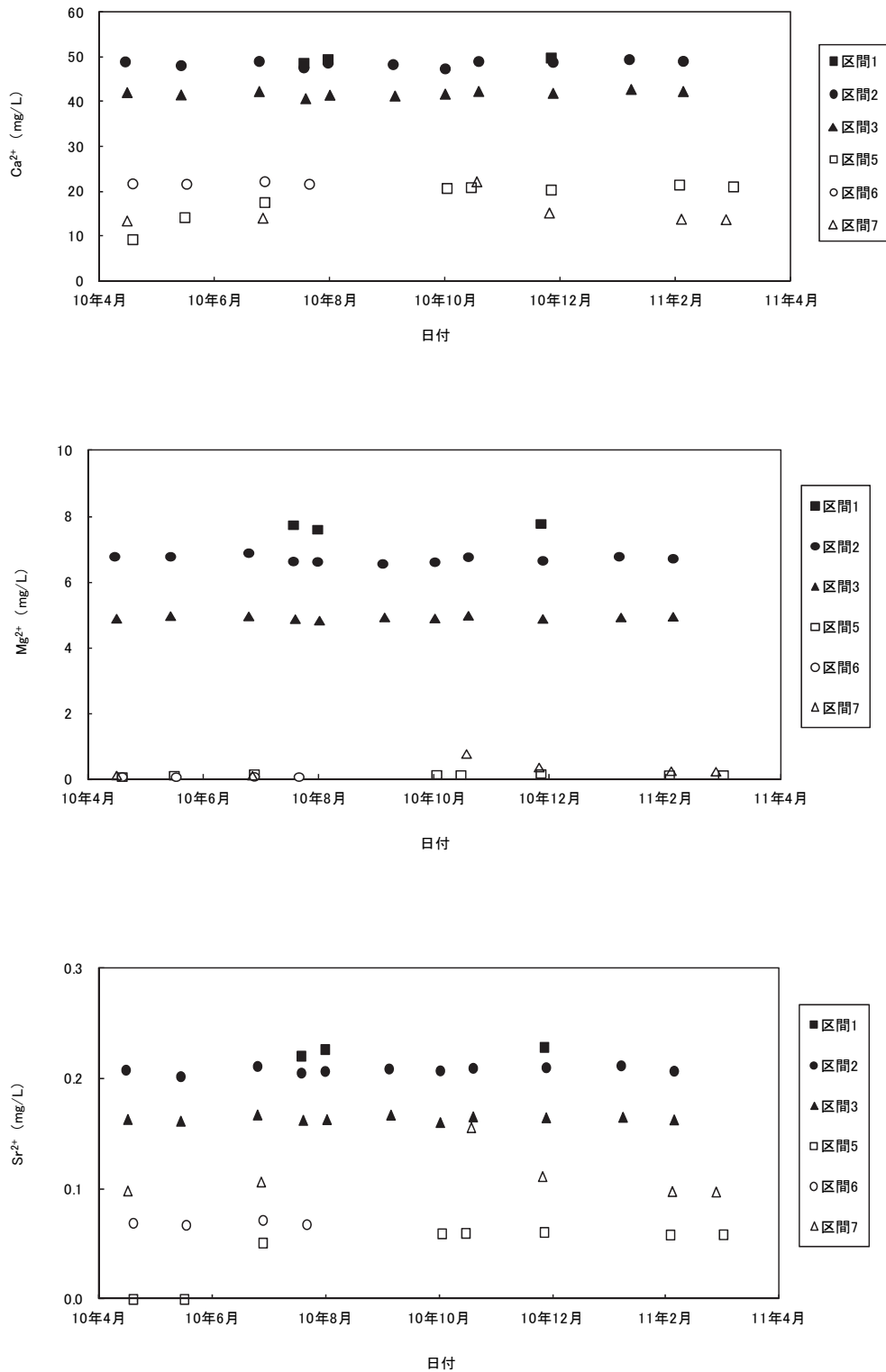


図 4.1-16 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

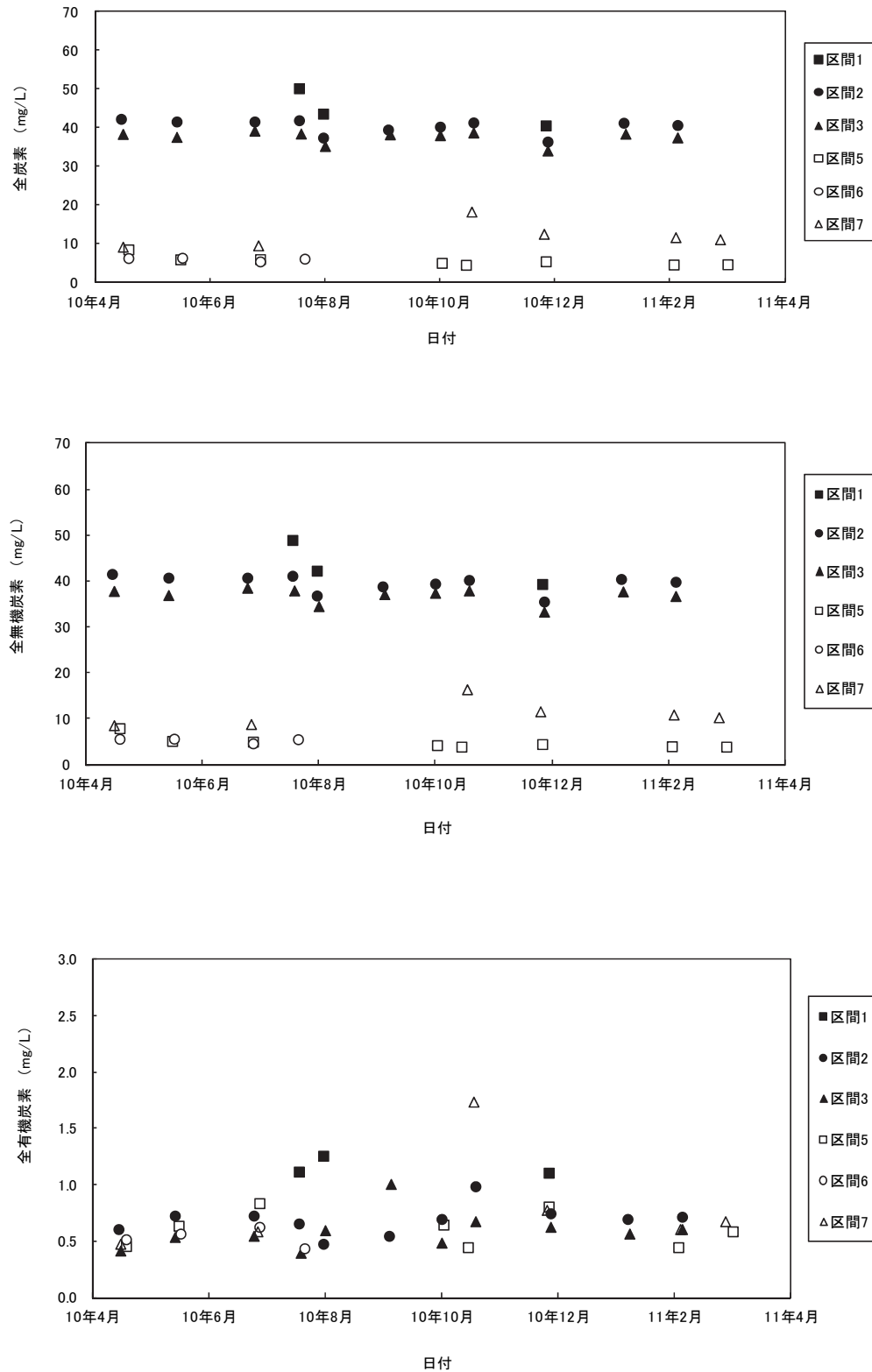


図 4.1-17 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

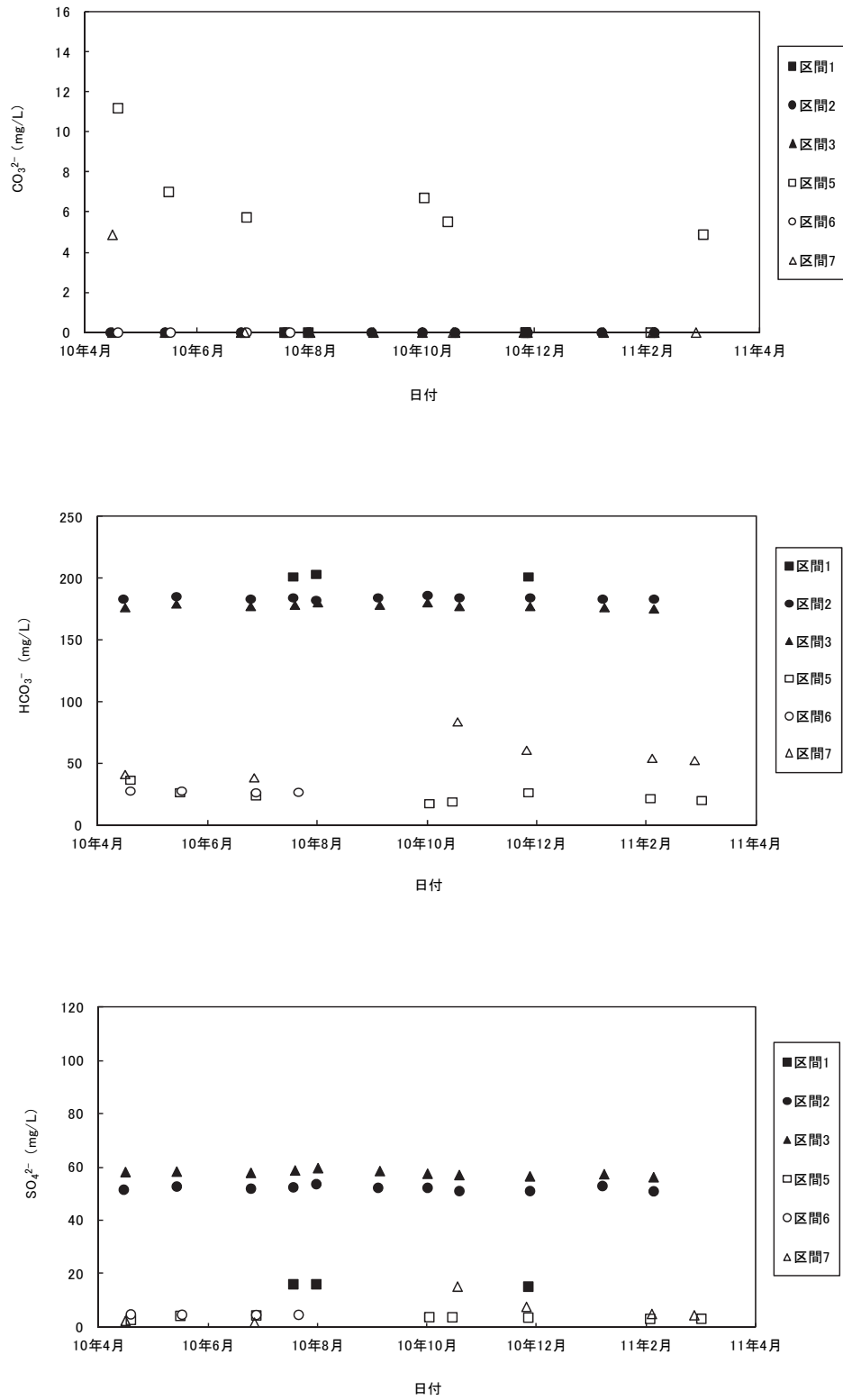


図 4.1-18 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

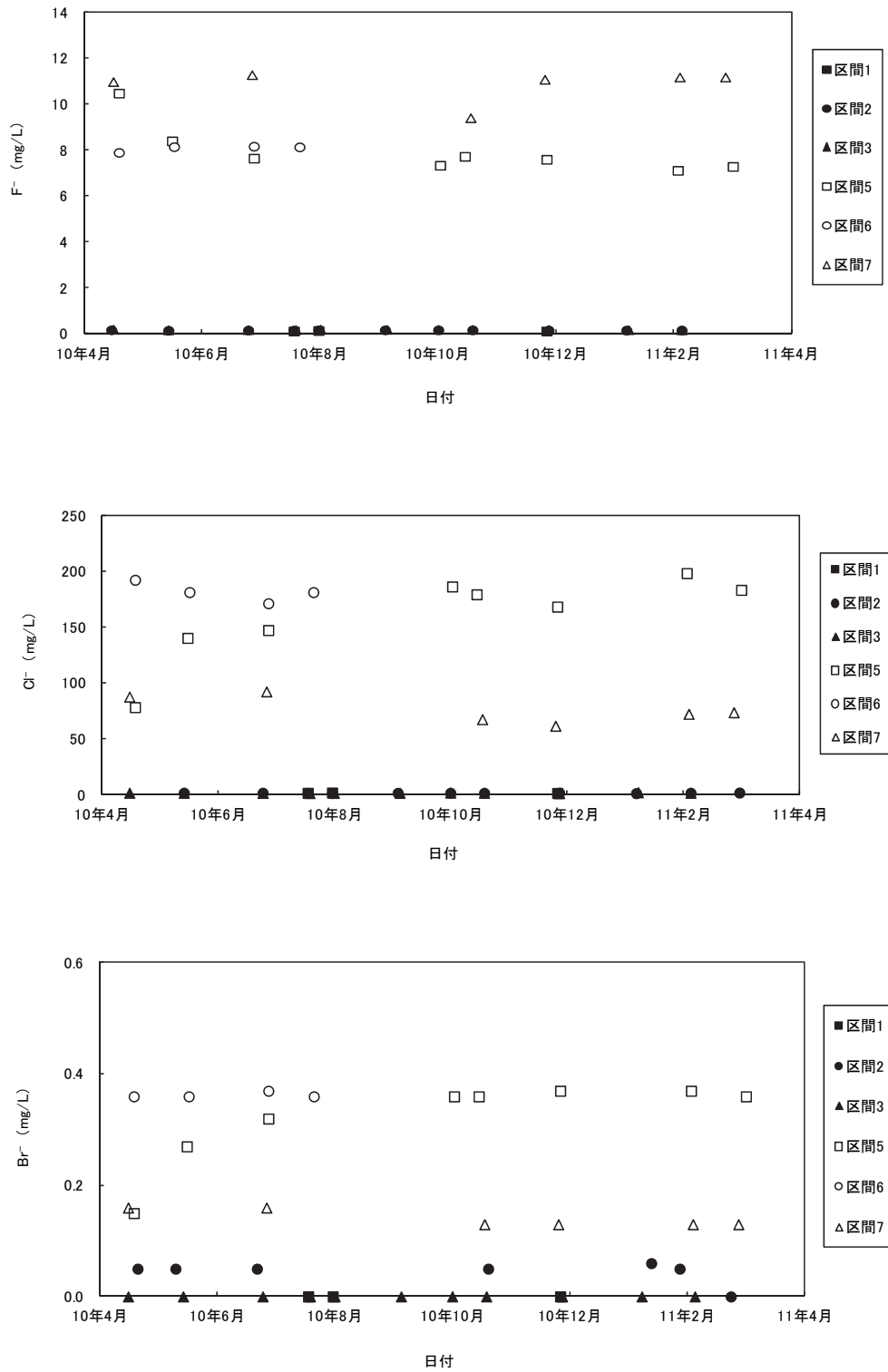


図 4.1-19 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

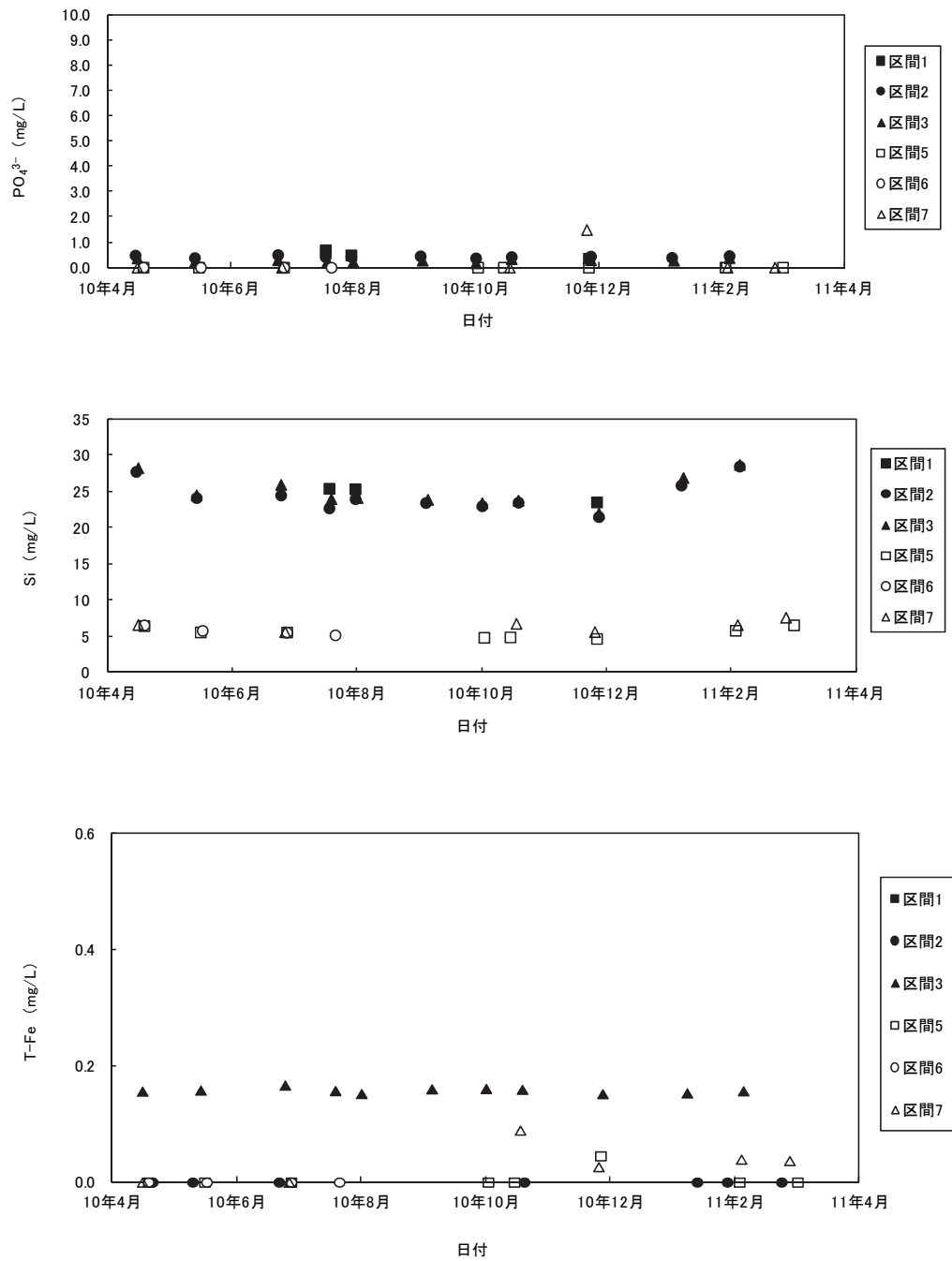


図 4.1-20 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

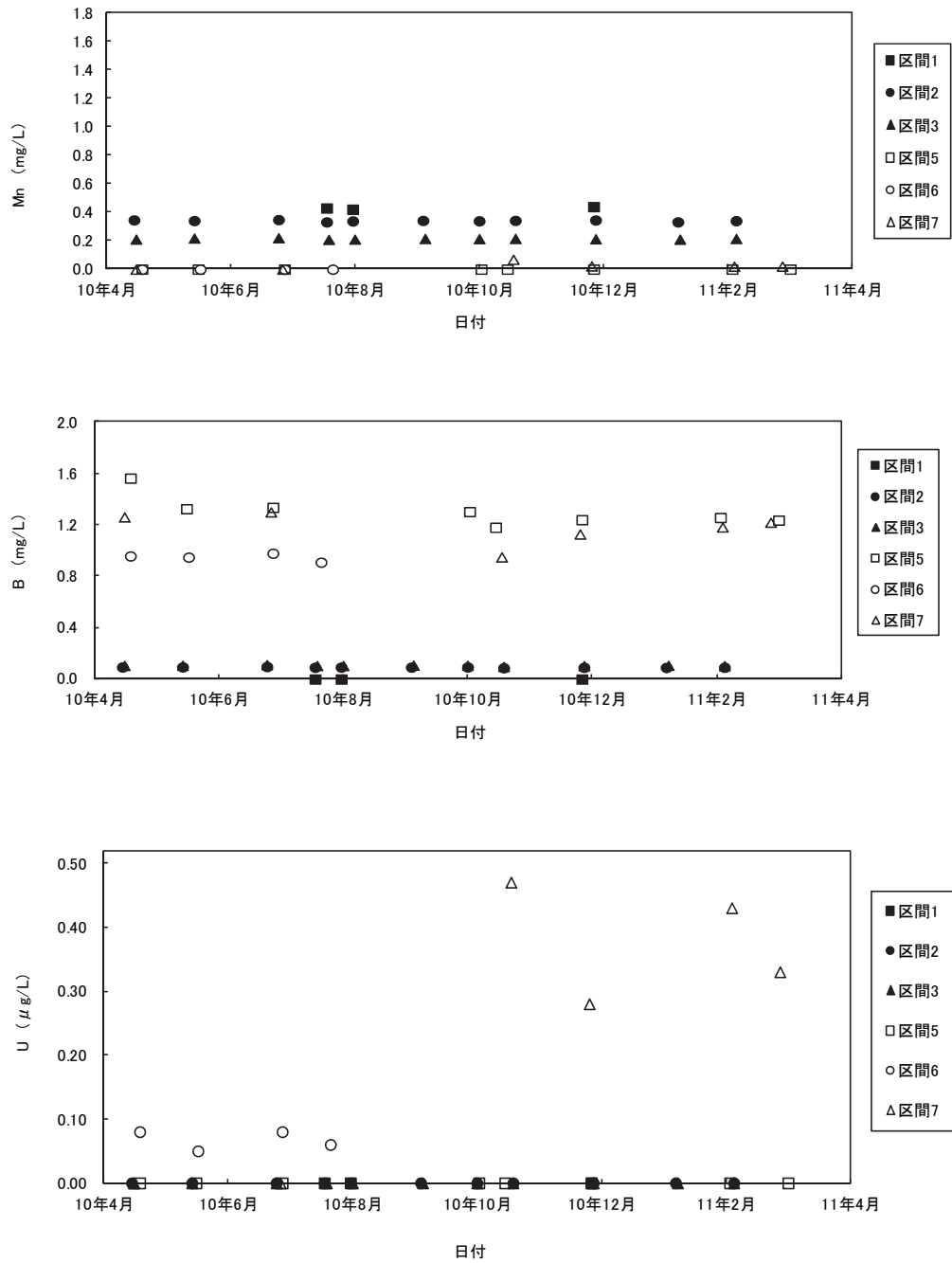


図 4.1-21 分析結果による化学成分濃度の経時変化（MSB-4 号孔）

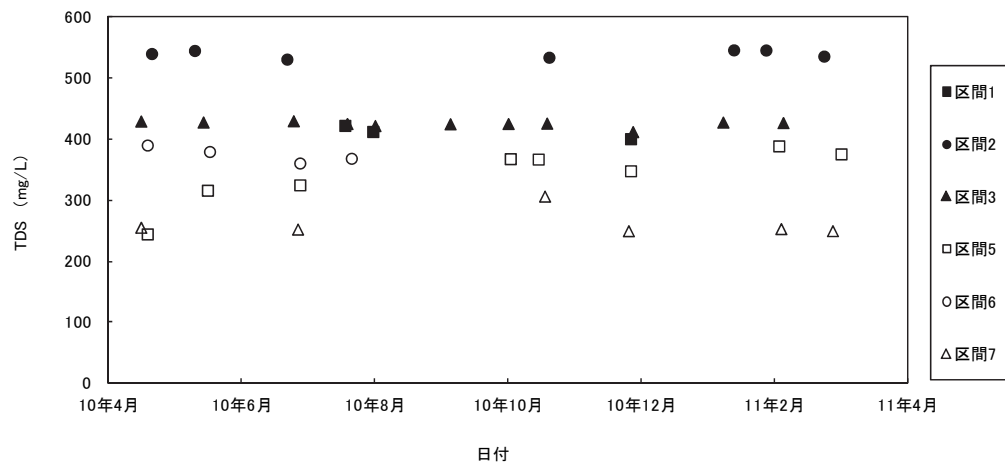


図 4.1-22 分析結果による化学成分濃度の経時変化 (MSB-4 号孔)

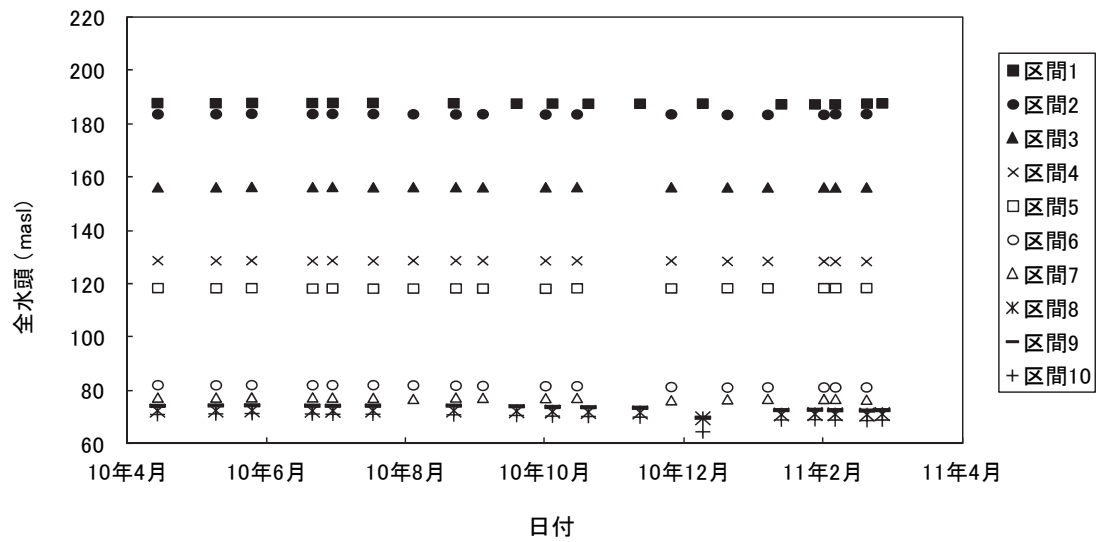


図 4.2-1 水頭の経時変化 (MSB-2 号孔)

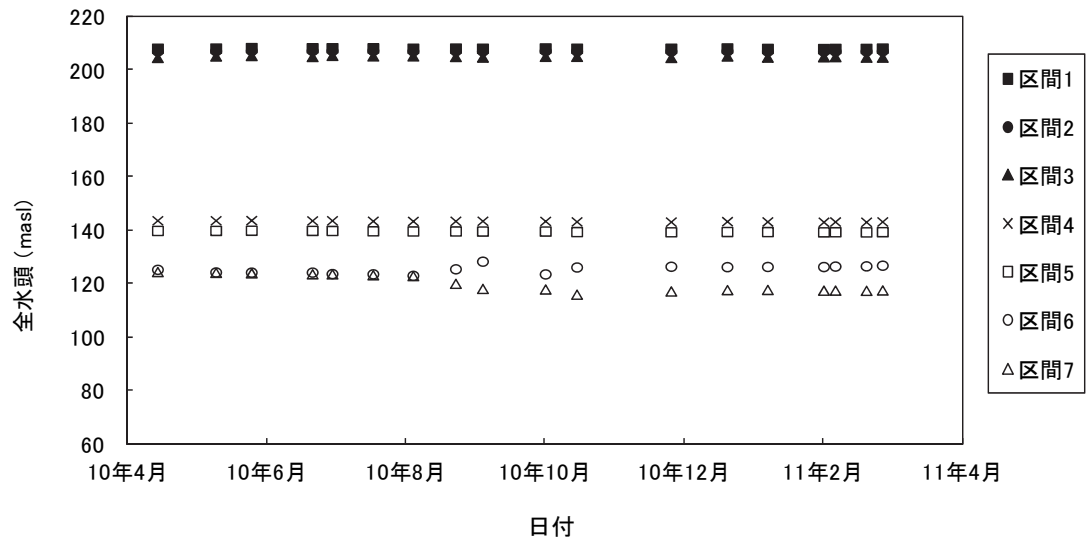


図 4.2-2 水頭の経時変化 (MSB-4 号孔)

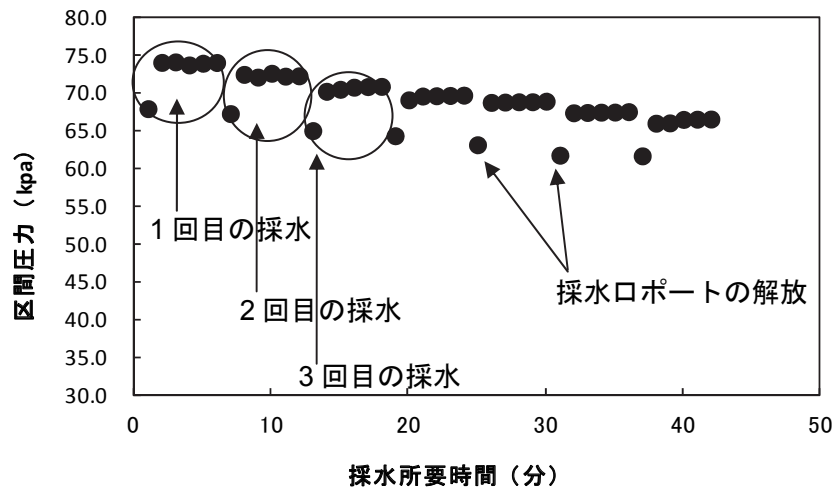


図 4.2-3 採水時の区間圧力の経時変化 (MSB-4 号孔 区間 6 9 月)

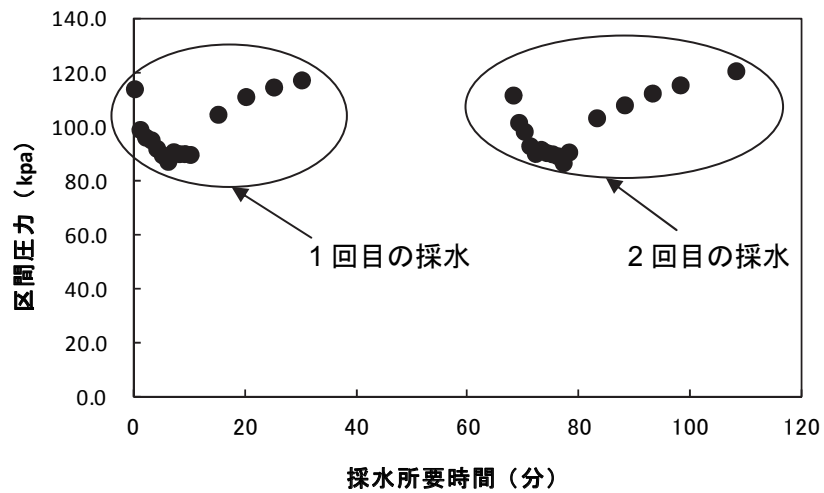


図 4.2-4 採水時の区間圧力の経時変化 (MSB-4 号孔 区間 5 9 月)

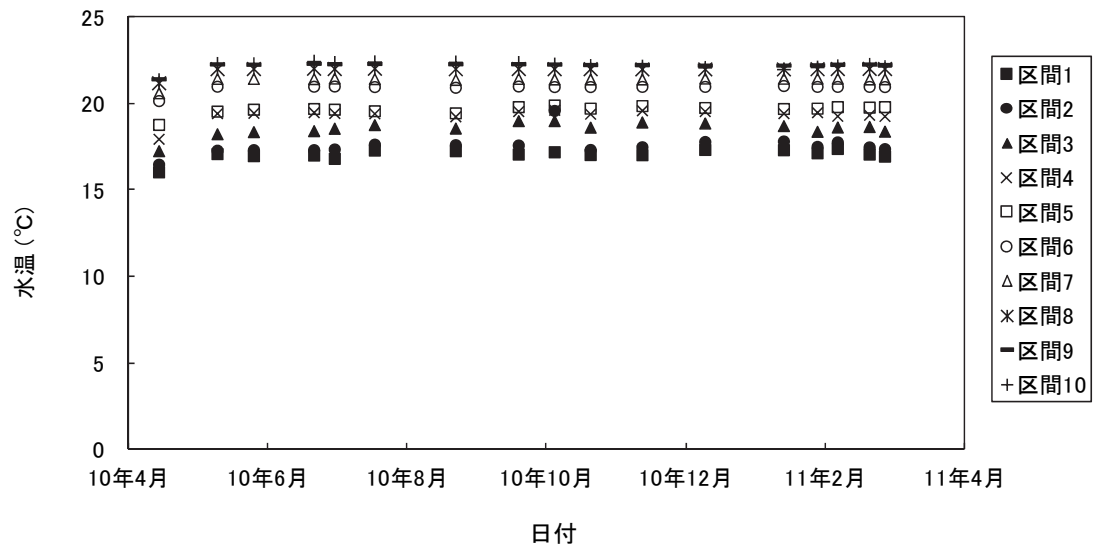


図 4.2-5 水温の経時変化 (MSB-2 号孔)

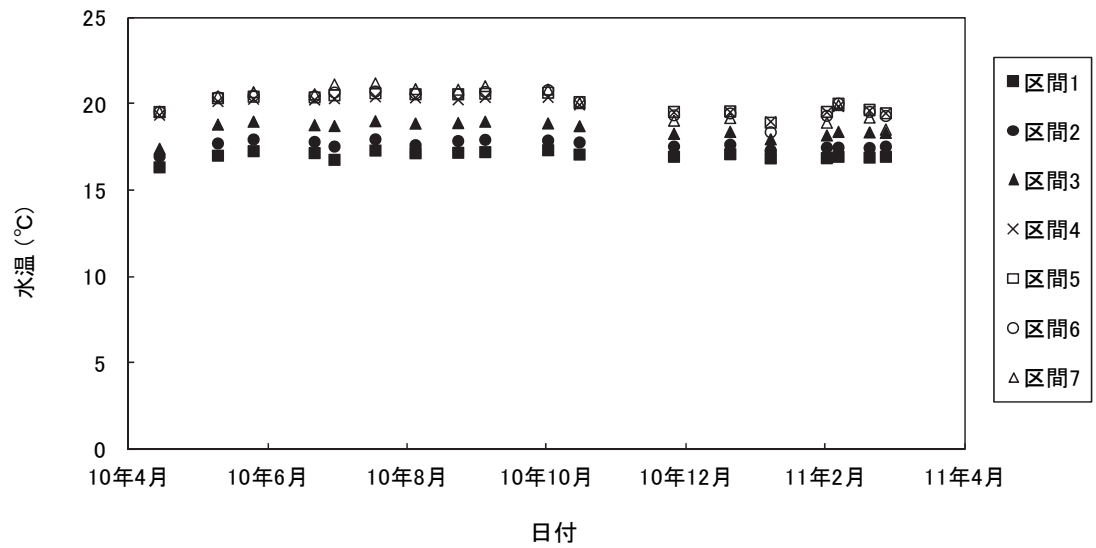


図 4.2-6 水温の経時変化 (MSB-4 号孔)

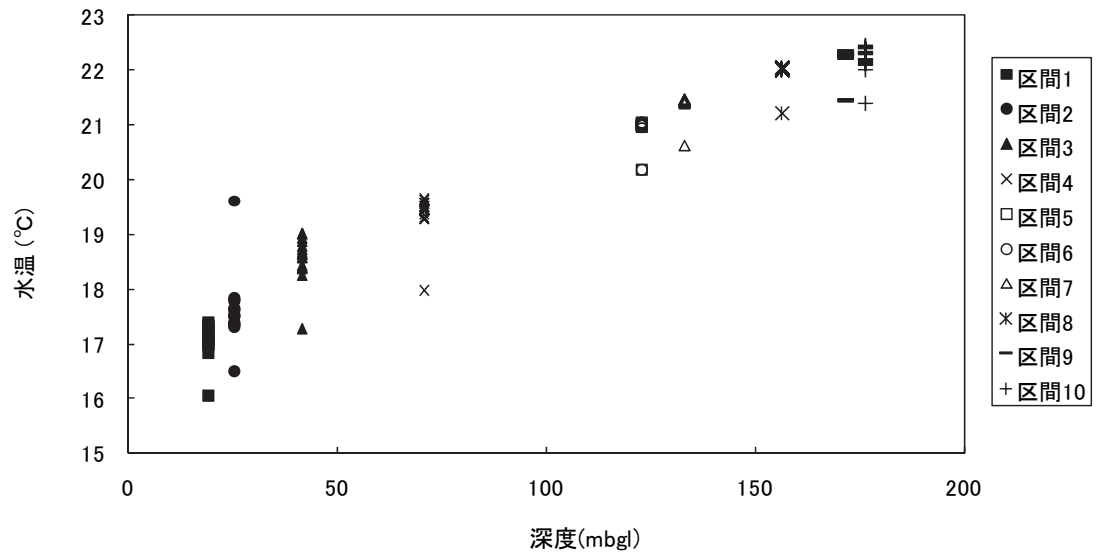


図 4.2-7 水温の深度変化 (MSB-2 号孔)

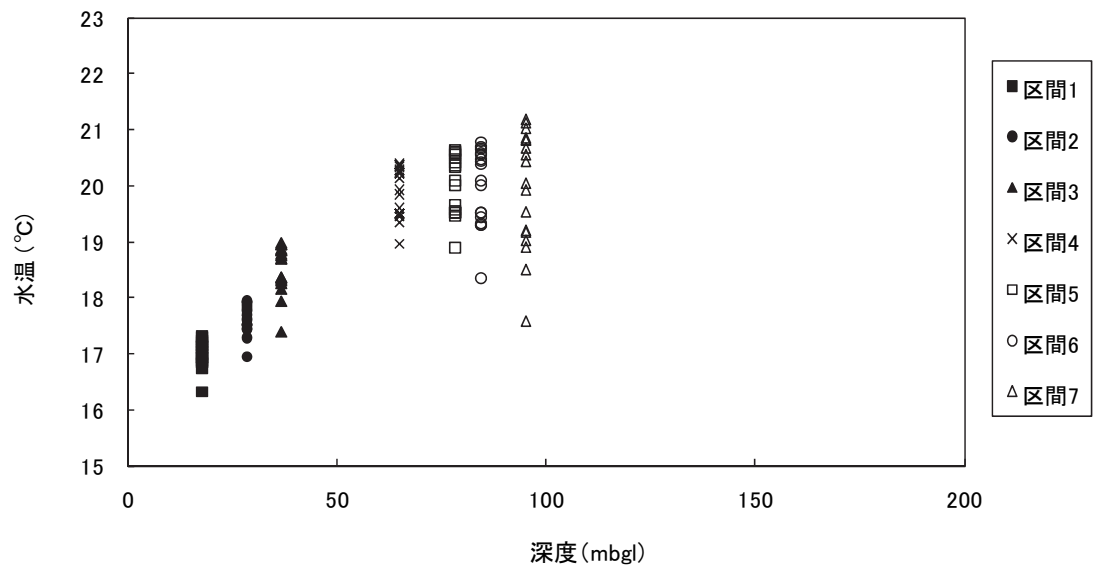


図 4.2-8 水温の深度変化 (MSB-4 号孔)

5. おわりに

本データ集は、研究坑道の掘削による地下水の地球化学特性への影響を把握するため、研究所用地内に掘削された 2 本のボーリング孔 (MSB-2 号孔、MSB-4 号孔) を対象に 2010 年度の地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温の測定結果を整理した。その結果、研究坑道内で実施したボーリング掘削に伴い、地下水の水質および間隙水圧が変動することを確認した。今後も観測を継続し、データの蓄積を図る。

参考文献

- 1) 東濃地科学研究ユニット：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2010-016 (2010).
- 2) Naoki Kumazaki, Koki Ikeda, Junichi Goto, Kei Mukai, Teruki Iwatsuki and Ryoji Furue: “Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site”, JNC TN7400 2003-005 (2003).
- 3) 井岡聖一郎, 古江良治, 岩月輝希: “深層ボーリング孔を用いた岩盤中の地下水の採取方法—地下水の酸化還元状態の把握のために—”, 日本水文科学会誌, 36, 4, (2006).
- 4) 岩月輝希, 天野由記, 井岡聖一郎, 三枝博光, 竹内竜二: “大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化”, 日本原子力学会和文論文誌, 6, 1, p.73-84 (2007).
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団: “広域地下水流動研究基本計画書”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001 (1997).
- 6) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工: “超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043 (2007).
- 7) 萩原大樹, 齋正貴, 竹口真人, 堀田政國, 水野崇: “MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水の間隙水圧および水質観測（2009年4月～2010年3月）”, JAEA-Data/Code 2010-032 (2011).
- 8) M.K.Hubbert: “Theory of ground-water motion”, J. Geol, 48, p. 785–944 (1940).
- 9) 日本分析化学会北海道支部 編: “水の分析—第4版—”, 化学同人 (1996).

付録

付録については、「付録 1: DH-2 号孔地下水水質分析結果および間隙水圧・水温測定結果」、「付録 2: 坑内ボーリング孔位置図」、「付録 3: 研究坑道内イベントログ」、「付録 4: 研究坑道掘削の進捗」として取りまとめた。また、「地下水分析結果」、「間隙水圧・水温測定結果」、「作業記録（地下水採水）」、「作業記録（間隙水圧・水温測定）」を CD-ROM に収め、本報告書に添付した。

This is a blank page.

付録 1

DH-2 号孔地下水水質分析結果および間隙水圧・水温測定結果

This is a blank page.

1. 調査概要

DH-2 号孔では、2010 年 5 月 20 日から 2010 年 6 月 18 日にかけて地下水採水・水質分析および間隙水圧・水温測定を実施した。図 1-1 に DH-2 号孔の位置を示す。DH-2 号孔は、広域地下水流動研究のために 1993 年から 1994 年度にかけて掘削された深度約 500m のボーリング孔であり、MSB-2 号孔および MSB-4 号孔に比べ地下深部の地下水採水が可能である。表 1-2 に観測区間を示す。地下水採水深度については、MP システムの設置後から本調査開始時までには区間内に滞留していた地下水を効率的に取り除くという観点から、採水可能な区間の内、区間体積が最小の深度 301.2～308.2m の区間を対象として採水作業を実施した。



(三枝ほか⁶⁾を編集)

図 1-1 DH-2 号孔の位置図

表 1-2 観測区間 (DH-2 号孔)

区間	標高 (masl ^{※1})		深度 (mbgl ^{※2})		採水の可否	地質
	区間上端	区間下端	区間上端	区間下端		主な地層
1	19.8	-8.0	173.8	201.7	×	花崗岩
2	-8.9	-21.8	202.6	215.5	×	
3	-22.7	-49.1	216.4	242.7	×	
4	-50.0	-98.9	243.6	292.5	×	
5	-99.8	-106.6	293.4	300.3	×	
6	-107.5	-114.6	301.2	308.2	○	
7	-115.5	-143.6	309.1	337.2	○	
8	-144.5	-162.8	338.1	356.5	×	
9	-163.7	-220.6	357.4	414.3	×	
10	-221.5	-250.6	415.2	444.2	○	
11	-251.5	-264.9	445.1	458.5	×	
12	-265.8	-307.5	459.4	501.1	×	

※1 masl: meter above sea level

※2 mbgl: meter below ground level

2. 調査方法

2.1 間隙水圧・水温測定方法

本文中の「3.1 間隙水圧・水温測定方法」を参照。

2.2 地下水試料の採水方法

DH-2 号孔では、本調査の実施前に滞留していた地下水を排除するため、予備排水として、採水区間の区間体積（40L）の 3 倍以上の量（120L 以上）を表 2.2-1 の通り排水した後、本文中の「3.2 地下水試料の採水方法」に示したバッチ式採水を行った。

表 2.2-1 予備排水実績

年月日	排水回数	排水量(L)	累計排水量(L)	年月日	排水回数	排水量(L)	累計排水量(L)
2010/05/27 10:43	1	1.95	1.95	2010/06/09 09:25	51	1.93	98.60
2010/05/27 13:29	2	1.95	3.90	2010/06/09 10:22	52	1.93	100.53
2010/05/27 15:06	3	1.95	5.85	2010/06/09 11:25	53	1.94	102.47
2010/05/28 09:36	4	1.95	7.80	2010/06/09 13:12	54	1.94	104.41
2010/05/28 11:00	5	1.95	9.75	2010/06/09 14:02	55	1.94	106.35
2010/05/28 13:26	6	1.95	11.70	2010/06/09 15:20	56	1.93	108.28
2010/05/28 14:43	7	1.95	13.65	2010/06/10 09:27	57	1.93	110.21
2010/05/28 15:49	8	1.95	15.60	2010/06/10 10:20	58	1.93	112.14
2010/05/31 09:30	9	1.95	17.55	2010/06/10 11:28	59	1.94	114.08
2010/05/31 10:35	10	1.95	19.50	2010/06/10 13:17	60	1.94	116.02
2010/05/31 11:40	11	1.94	21.44	2010/06/10 14:09	61	1.95	117.97
2010/05/31 13:41	12	1.94	23.38	2010/06/10 15:25	62	1.94	119.91
2010/05/31 14:36	13	1.94	25.32	2010/06/11 09:31	63	1.92	121.83
2010/05/31 15:44	14	1.93	27.25	2010/06/11 10:35	64	1.92	123.75
2010/06/01 09:32	15	1.94	29.19	2010/06/11 11:43	65	1.92	125.67
2010/06/01 10:28	16	1.94	31.13	2010/06/11 13:42	66	1.92	127.59
2010/06/01 11:41	17	1.94	33.07	2010/06/11 15:02	67	1.92	129.51
2010/06/01 13:50	18	1.94	35.01	2010/06/14 09:31	68	1.92	131.43
2010/06/01 14:47	19	1.94	36.95	2010/06/14 10:47	69	1.92	133.35
2010/06/01 15:47	20	1.94	38.89	2010/06/14 11:56	70	1.92	135.27
2010/06/02 09:29	21	1.93	40.82	2010/06/14 13:41	71	1.92	137.19
2010/06/02 10:24	22	1.90	42.72	2010/06/14 14:37	72	1.92	139.11
2010/06/02 11:34	23	1.94	44.66	2010/06/14 15:38	73	1.92	141.03
2010/06/02 13:35	24	1.94	46.60	2010/06/15 09:40	74	1.92	142.95
2010/06/02 14:27	25	1.93	48.53	2010/06/15 11:04	75	1.92	144.87
2010/06/02 15:57	26	1.94	50.47	2010/06/15 13:05	76	1.92	146.79
2010/06/03 09:18	27	1.92	52.39	2010/06/15 14:08	77	1.92	148.71
2010/06/03 10:25	28	1.92	54.31	2010/06/15 15:30	78	1.92	150.63
2010/06/03 11:46	29	1.92	56.23	2010/06/16 09:31	79	1.92	152.55
2010/06/03 13:51	30	1.92	58.15	2010/06/16 10:24	80	1.92	154.47
2010/06/03 15:09	31	1.93	60.08	2010/06/16 13:09	81	1.92	156.39
2010/06/03 15:58	32	1.94	62.02	2010/06/16 14:14	82	1.92	158.31
2010/06/04 09:22	33	1.92	63.94	2010/06/16 15:43	83	1.92	160.23
2010/06/04 10:17	34	1.92	65.86	累計排水量(L)			160.23
2010/06/04 11:29	35	1.94	67.80				
2010/06/04 13:18	36	1.94	69.74				
2010/06/04 14:11	37	1.93	71.67				
2010/06/04 15:33	38	1.94	73.61				
2010/06/07 09:32	39	1.92	75.53				
2010/06/07 10:41	40	1.92	77.45				
2010/06/07 11:48	41	1.92	79.37				
2010/06/07 14:02	42	1.92	81.29				
2010/06/07 15:07	43	1.92	83.21				
2010/06/07 16:04	44	1.94	85.15				
2010/06/08 09:31	45	1.92	87.07				
2010/06/08 10:35	46	1.92	88.99				
2010/06/08 11:40	47	1.92	90.91				
2010/06/08 13:23	48	1.92	92.83				
2010/06/08 14:22	49	1.92	94.75				
2010/06/08 15:35	50	1.92	96.67				

2.3 水質分析方法

本文中の「3.3 水質分析方法」を参照。

2.4 分析データの品質管理

(1) 分析データの確認

本文中の「3.4 分析データの品質管理」の(1) 分析データの確認を参照。

(2) イオンバランスを用いた品質確認

DH-2 号孔の地下水におけるイオンバランスは、本文中の「3.4 分析データの品質管理」の(2) イオンバランスを用いた品質確認に参照する計算式の範囲内に入らなかったため、再分析を行ったが範囲外であった。これは、Cl⁻濃度の分析に関連する誤差がイオンバランスの崩れの要因と考えられる。本報告書においては参考値として取り扱うこととした。

3. 調査結果

3.1 水質分析結果

表 3.1-1 に水質分析結果を示す。

表 3.1-1 水質分析結果

区間		6	
採取日		2010/6/16	(再分析)
pH [※]		8.66	—
pH		8.31	—
電気伝導度 [※]	mS/m	72.4	—
水温 [※]	°C	22.0	—
S ²⁻ [※]	mg/L	0.629	—
T-Fe [※]		<0.02	—
Fe ²⁺ [※]		0.02	—
ナフチオン酸 ナトリウム		<0.01	—
アミノG酸		<0.005	—
ウラニン		<0.0002	—
Na ⁺		98.4	99.7
K ⁺		0.77	0.78
Ca ²⁺		27.0	27.4
Mg ²⁺		0.08	0.08
Sr ²⁺		0.25	—
全炭素		6.31	—
全無機炭素		6.16	—
全有機炭素		0.15	—
CO ₃ ²⁻		2.51	4.28
HCO ₃ ⁻		31.0	29.9
アルカリ度		—	—
SO ₄ ²⁻		3.96	3.97
HS ⁻		—	—
S ²⁻		—	—
F ⁻		9.09	9.09
Cl ⁻		195	195
NO ₃ ⁻		<0.05	<0.05
NO ₂ ⁻		<0.05	<0.05
Br ⁻		0.32	0.32
I ⁻		—	—
NH ₄ ⁺		—	—
PO ₄ ³⁻		<0.05	<0.05
Si		5.15	—
Al		<0.05	—
T-Fe		<0.02	—
Fe ²⁺		<0.02	—
Fe ³⁺		0.00	—
Mn		<0.02	—
Ti		<0.01	—
B		1.28	—
U		<0.05	—
TDS		387.4	—
Σ陽イオン	meq/L	5.65	5.73
Σ陰イオン	meq/L	6.56	6.54
イオンバランス	%	-7.45	-6.65

※現場(地表)で分析

3.2 間隙水圧・水温測定結果

DH-2 号孔の間隙水圧測定値は、本文中の 3.1 (6) で示した式により全水頭を算出した。表 3.2-1 および表 3.2-2 に水頭・水温測定結果を示す。

表 3.2-1 水頭測定結果

区間		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定深度(mbgl)		176.00	204.80	218.60	245.90	295.60	303.40	311.40	340.30	359.60	417.40	447.40	461.60
標高(masl)		17.583	-11.172	-24.962	-52.223	-101.996	-109.771	-117.734	-146.715	-165.985	-223.772	-253.737	-268.016
水頭(masl)	2010/5/25	94.179	94.063	94.377	92.989	92.335	92.422	92.493	92.520	92.932	92.826	92.472	93.496

表 3.2-2 水温測定結果

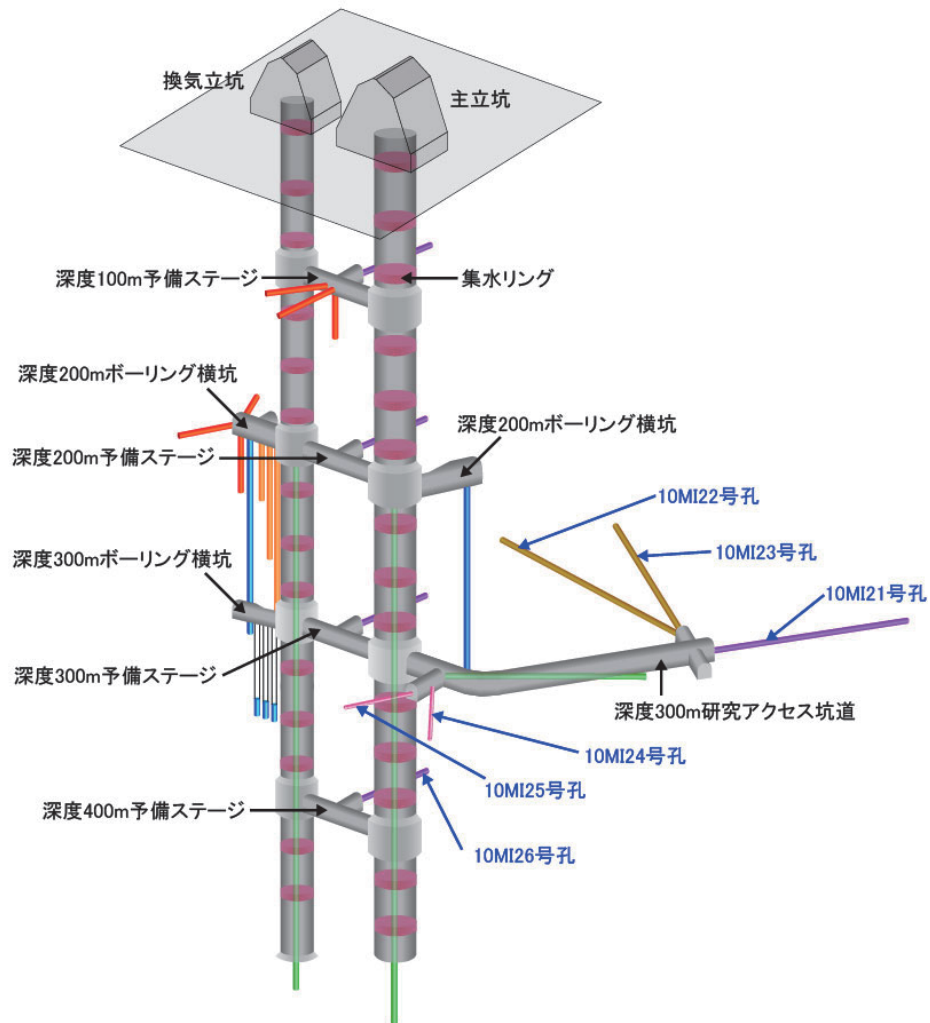
区間		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定深度(mbgl)		176.00	204.80	218.60	245.90	295.60	303.40	311.40	340.30	359.60	417.40	447.40	461.60
標高(masl)		17.583	-11.172	-24.962	-52.223	-101.996	-109.771	-117.734	-146.715	-165.985	-223.772	-253.737	-268.016
水温(℃)	2010/5/25	22.78	23.22	23.61	24.08	24.82	25.07	25.31	25.81	26.15	27.12	27.59	27.83

付録 2

坑内ボーリング孔位置図

This is a blank page.

坑内ボーリング孔位置図



地下水水圧観測ボーリング孔	地下水水質観測ボーリング孔
パイロットボーリング孔	ひずみ計測・先行変位計測ボーリング孔
初期応力測定ボーリング孔	断層・割れ目に関するボーリング孔
岩盤中の物質の移動に関するボーリング孔	平成22年度までの掘削範囲

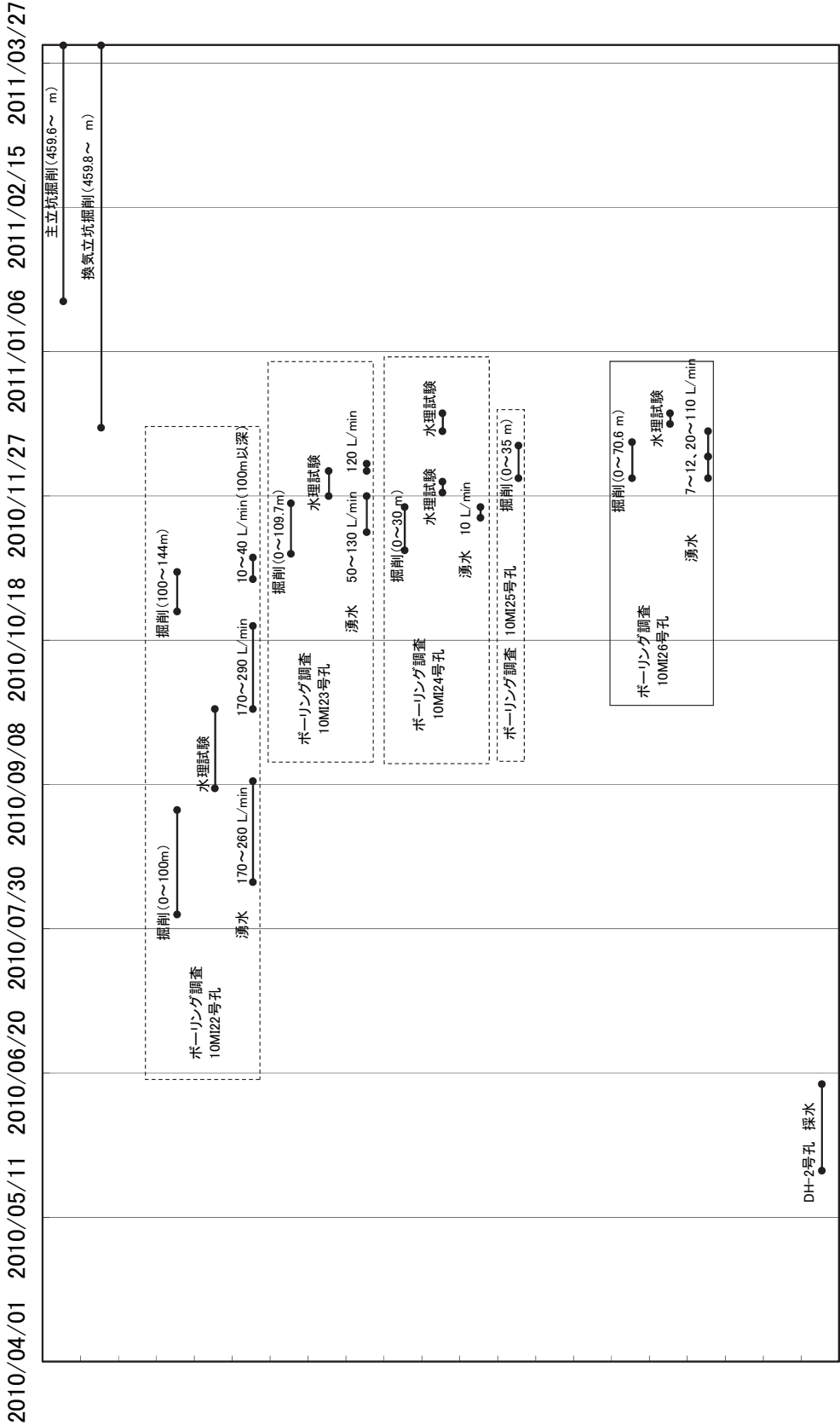
This is a blank page.

付録 3

研究坑道内イベントログ

This is a blank page.

研究坑道内イベントログ

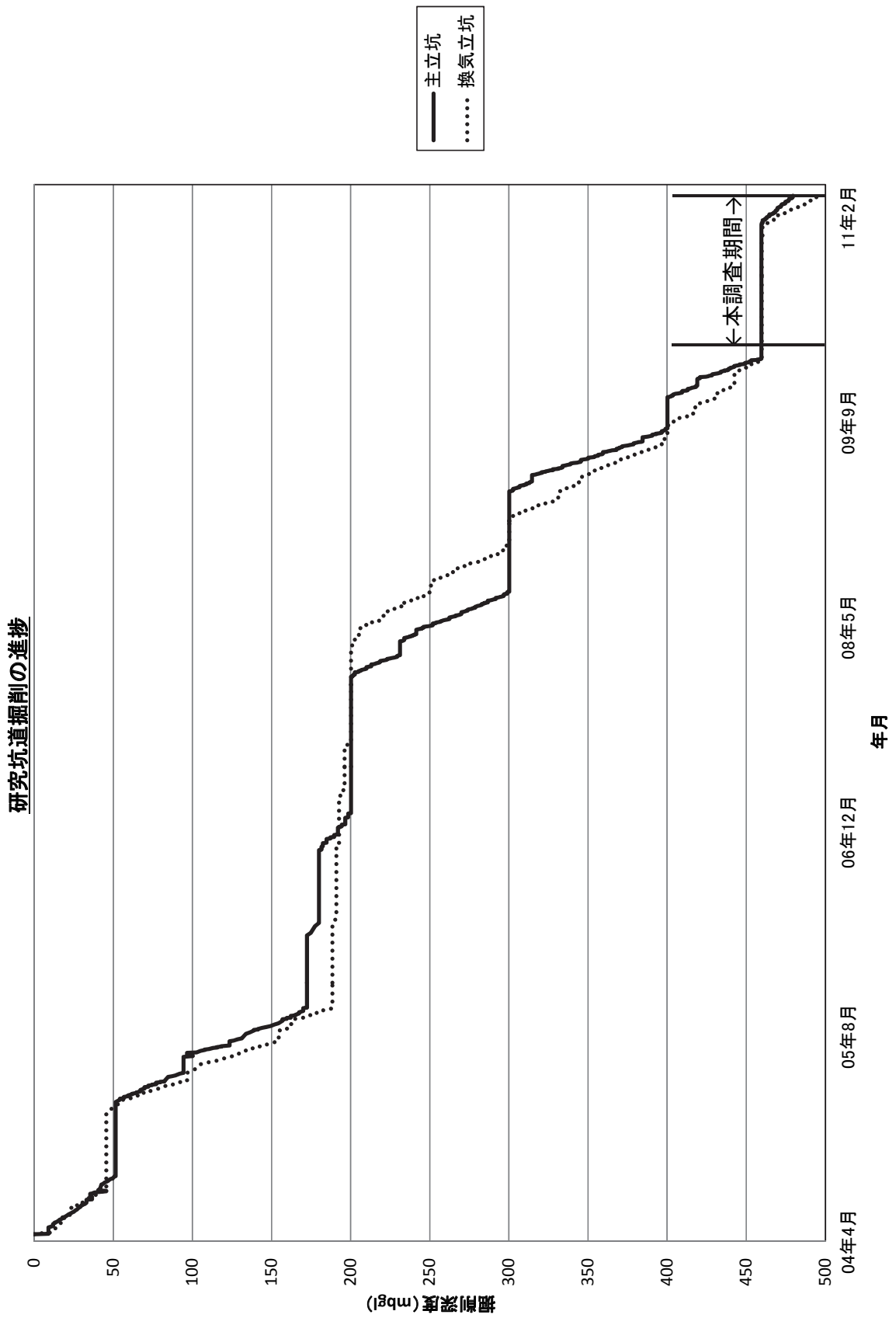


This is a blank page.

付録 4

研究坑道掘削の進捗

This is a blank page.



This is a blank page.

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	ヘルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光照射度	ルーメン	lm		K
放射線量	レントゲン	R	cd sr ^(c)	m ² cd
放射線量	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁻¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ⁻² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

