



JAEA-Research

2007-010



JP0750179

JAEA-Research

地層処分における微生物影響評価に関する研究(1)

(共同研究)

Study on Investigation of Microbial Effects for Geological Disposal (1)

(Joint Research)

栃木 善克 吉川 英樹 青木 和弘* 油井 三和
本條 秀子* 萩沼 真之* 川上 泰* 鈴木 和則*

Yoshikatsu TOCHIGI, Hideki YOSHIKAWA, Kazuhiro AOKI*, Mikazu YUI

Hideko HONJOH*, Masashi HAGINUMA*, Yasushi KAWAKAMI* and Kazunori SUZUKI*

地層処分研究開発部門

核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

地層処分における微生物影響評価に関する研究（1）
（共同研究）

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

栃木 善克^{*1}，吉川 英樹，青木 和弘^{*1}，油井 三和
本條 秀子^{*2}，萩沼 真之^{*2}，川上 泰^{*2}，鈴木 和則^{*2}

（2007年1月17日 受理）

本報告では，(独)日本原子力研究開発機構及び(財)産業創造研究所による共同研究「地層処分における微生物影響評価に関する研究」の平成17年度における成果をまとめた。同研究は，地層処分場のバリア性能に及ぼす微生物活動の影響評価技術を高度化し，処分技術の信頼性向上に資することを目的として実施した。

平成17年度は，幌延深地層研究センターの調査フィールドに設けた新規の観測井を利用した地下水・岩石試料採取と化学分析，並びに微生物影響を考慮した数値解析コード（MINT）を使用して既存の観測データを用いた感度解析を実施した。

前者の成果として，水質・微生物代謝活性等の分析を行い，数値解析コードに反映・活用するためのデータを取得したことが挙げられる。後者では，既存の測定データを初期値として感度解析を行い，微生物影響による地下水水質の変化や，地下水水質の変動による微生物活動への影響を評価するための結果を得ることができた。

本研究は，日本原子力研究開発機構と（財）産業創造研究所との共同研究に基づいて実施したものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※1 技術開発協力員

*1 原子力環境整備促進・資金管理センター

*2 （財）産業創造研究所

Study on Investigation of Microbial Effects for Geological Disposal (1)
(Joint Research)

Yoshikatsu TOCHIGI^{*1}, Hideki YOSHIKAWA, Kazuhiro AOKI^{*1}, Mikazu YUI,
Hideko HONJOH^{*2}, Masashi HAGINUMA^{*2},
Yasushi KAWAKAMI^{*2} and Kazunori SUZUKI^{*2}

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 17, 2007)

Results of joint research on fiscal year 2005 between Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and Institute of Research and Innovative (IRI) titled as "Study on investigation of microbial effects for geological disposal" are described in this report. The objective of this study is constructing an advanced method for estimating microbial effects for barrier performance of geological disposal site.

In fiscal year 2005, groundwater and rock core samples were collected from drilled well in observation field near Horonobe Underground Research Center of JAEA and chemical analyses for collected groundwater were carried out. Sensitivity analyses for existing observed data of groundwater with numerical analysis program code 'MINT' considering microbial effects were also carried out.

Microbial cultivation experiments without contamination of drilling water, analyses for chemical component of groundwater and measurements of microbial metabolic activity were carried out to obtain the data to apply for the analysis code.

The sensitivity analysis was performed to examine the effect of the change of groundwater composition (mainly by electron acceptors) by effects of microbial metabolism and the change of microbial activities by the effects of groundwater composition.

Keywords: Microbe, Simulation Code, Geological Disposal

This work has been performed in JAEA as a joint research with Institute of Research and Innovation.

※1 Cooperative staff

* 1 Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC)

* 2 Institute of Research and Innovation

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 背景及び目的.....	1
1.2 実施内容.....	1
2. 研究の内容及び成果.....	3
2.1 微生物特性データの取得方法.....	3
2.1.1 試料採取.....	3
2.1.2 採取試料の化学分析.....	17
2.1.3 採取試料中の微生物代謝活性の測定.....	21
2.2 微生物影響評価モデルの改良.....	23
2.2.1 評価モデル開発の考え方.....	23
2.2.2 解析コードの概要.....	23
2.2.3 今年度の成果.....	28
2.2.4 今後の課題.....	49
3. まとめ.....	50
3.1 微生物特性データの取得方法.....	50
3.2 微生物影響評価モデルの改良.....	50
参考文献.....	51

Contents

1. Introduction 1

1.1 Backgrounds and Objective 1

1.2 Contents 1

2. Contents of Study and Results 3

2.1 Collection and Classification of Specific Data of Microbes 3

2.1.1 Sampling 3

2.1.2 Chemical Analysis of Samples 17

2.1.3 Measurement of Activities of Microbial Metabolism of Samples 21

2.2 Construction of Analysis Model for Examining Microbial Effect 23

2.2.1 Strategy of Developing the Model 23

2.2.2 Characteristic of Analysis Code 23

2.2.3 Results for Fiscal 2005 28

2.2.4 Future Task 49

3. Summary 50

3.1 Collection and Classification of Specific Data of Microbes 50

3.2 Construction of Analysis Model for Examining Microbial Effect 50

References 51

目 次

図 2.1.1-1	採水工程の実施フロー	3
図 2.1.1-2	調査位置平面図	4
図 2.1.1-3	試錐孔概要図	10
図 2.1.1-4	揚水時間, 揚水量とトレーサ濃度の関係	11
図 2.1.1-5	累積揚水量とトレーサ濃度の関係	12
図 2.1.1-6	水質モニタリング結果 (TROLL9000 による)	13
図 2.1.1-7	トレーサ染料と採水試料の蛍光スペクトル	15
図 2.1.1-8	ピストン式サンプラーによる地下水の採水	16
図 2.1.2-1	化学量測定手順フロー	18
図 2.2.1-1	評価モデル開発の考え方	23
図 2.2.2-1	解析結果の時間変化概念図	26
図 2.2.2-2	野外観測結果を基に行ったシミュレーション	27
図 2.2.3-1	解析モデル	30
図 2.2.3-2	各種与条件に対する計算結果 (計算期間; 左:1年, 右:100年)	35
図 2.2.3-3	100年経過までのメタン濃度経時変化 (計算条件 No.11, 17, 18 の比較)	37
図 2.2.3-4	100年経過までの硫酸イオン濃度経時変化 (計算条件 No.11, 17, 18 の比較)	38
図 2.2.3-5	0.01年経過までの溶存酸素, 硝酸イオン濃度経時変化 (計算条件 No.11)	38
図 2.2.3-6	100年経過までの硫酸還元菌の微生物量経時変化 (計算条件 No. 11, 17, 18)	39
図 2.2.3-7	100年経過までのメタン生成菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)	40
図 2.2.3-8	100年経過までの好気性菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)	41
図 2.2.3-9	100年経過までの脱窒菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)	41
図 2.2.3-10	100年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 11)	42
図 2.2.3-11	100年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 17)	42
図 2.2.3-12	100年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 18)	42
図 2.2.3-13	解析ケースごとの有機物濃度変化	43
図 2.2.3-14	微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較 (基準条件)	45
図 2.2.3-15	微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較 (硫酸イオン濃度初期値; 1/10)	45
図 2.2.3-16	微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較 (硫酸イオン濃度初期値; ×10)	45
図 2.2.3-17	硫酸イオン濃度変化に対する生成メタン濃度の比較	46
図 2.2.3-18	微生物量の比較	46

目 次

表 2.1.1-1	試錐孔の位置・標高.....	4
表 2.1.1-2	地下水分析用の試料採取区間等.....	8
表 2.1.2-1	分析項目.....	19
表 2.1.2-2	試料の分析結果.....	20
表 2.1.3-1	1/10NB 培地の組成.....	21
表 2.1.3-2	MPN 法による評価対象と培地.....	21
表 2.1.3-3	評価結果.....	22
表 2.2.2-1	解析対象の内部変数.....	25
表 2.2.3-1	掘削井の地下水水質の評価項目.....	28
表 2.2.3-2	掘削井の有機物・微生物量評価項目.....	29
表 2.2.3-3	基準条件及び感度解析に際して設定する評価パラメータ.....	31
表 2.2.3-4	感度解析の解析ケース（初期条件）一覧.....	32
表 2.2.3-5	解析ケースごとの有機物濃度変化.....	43
表 2.2.3-6	基準条件と解析結果が示唆する安定値の比較.....	47
表 2.2.3-7	硫酸イオン濃度に注目した感度解析結果の比較.....	47

1. はじめに

1.1 背景及び目的

本報告書は、(独)日本原子力研究開発機構（原子力機構）及び(財)産業創造研究所の両者が有する高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の実績を基に、地層処分場のバリア性能に及ぼす微生物活動の影響評価技術を高度化し、処分技術の信頼性向上に資することを目的とした共同研究について、平成17年度の成果を記述するものである。

近年、原位置サンプルの採取・分析・評価研究を通じて、深地層環境においても沿岸海洋又は地表面と同様、微生物が $10^5 \sim 10^6$ cells/mL の密度で存在することが確認されてきている¹⁾。微生物は、電子供与体となる地下水中の溶存有機物と電子受容体を利用して活動・生育に係るエネルギーを得る。このとき微生物が利用する電子受容体の種類は、微生物の種類及び微生物が存在する地下の化学環境（酸化還元電位(Eh)）に影響を受けて変化する。また、微生物は優先して使用する電子受容体に応じて、所定のグループ（代謝群）に分類される。微生物の代謝群の活性を司る、電子受容体濃度を決定する要因としては、微生物の代謝反応や鉱物-水反応等の地球化学に係る作用が考えられる。従来の安全評価においては、深地層環境における地下水中の溶存化学種の決定と地下水水質形成に寄与する要因として、地球化学を中心とした評価が行われてきた。これに対し、本研究では、微生物が地下水化学に与える影響を評価し、従来の評価との比較を行うことを目的とする。

1.2 実施内容

本研究では、微生物影響評価コード“MINT”²⁾(Microbial Influence on Nuclide Transport code)を用い、深地層の原位置環境における微生物活動による影響の定量的な評価を試みた。同コードは、微生物の活性に関わる溶存化学種、微生物の代謝反応と関連性の高い一部の固相-液相間酸化還元反応、各々の微生物群の微生物量・代謝活性、核種移行・微生物の移動などを1次元の時空間で評価することが可能である。

本研究では、MINTの機能を部分的に活用するため、解析による評価地点を地下の1点に限定し、同地点における地下水水質形成に与える微生物影響を評価した。初期条件として、JAEAの幌延深地層研究センター（URL）で取得済みの観測値を選定し、解析の結果として、長時間経過後における地下水水質・微生物量等を評価した。上記の解析・評価結果は、従来の地球化学を中心とした解析・評価結果と比較し、相互の類似点・相違点等を調査した。予想される解析結果として、既に地下水環境が微生物の影響を受けて安定であれば、解析結果と初期値を比較する際の変化量は小さくなる。測定手法に起因する誤差・擾乱など何らかの原因によって、測定値が本来の値とは異なっている場合、逆に解析結果と初期値に大きな差が生じることが推定される。

さらに、MINTが有する、微生物代謝群の活性（電子受容体濃度と微生物量が支配）と地下水中のEhの相関性を考慮した評価機能に着目し、電子受容体濃度を変動パラメータとした感度解析を試行した。予想される解析結果としては、特に活性が高い微生物代謝群が利用する電子受容体濃度の濃度変動に対応して地下水組成の変動が生じることであるため、これを確認することが目的となる。

本研究では、MINT に与える微生物特性データを実測によって取得・整備することも評価の定量性を向上するうえで重要であると位置づけ、研究要素としている。そこで、本報告書では最初に「微生物特性データの取得方法」について論じ、次に「微生物影響評価モデルの改良」について論じる。

2. 研究の内容及び成果

2.1 微生物特性データの取得方法

2.1.1 試料採取

(1) 方法

a. 採水工程

採水工程は図 2.1.1-1 のフローに従って行った。

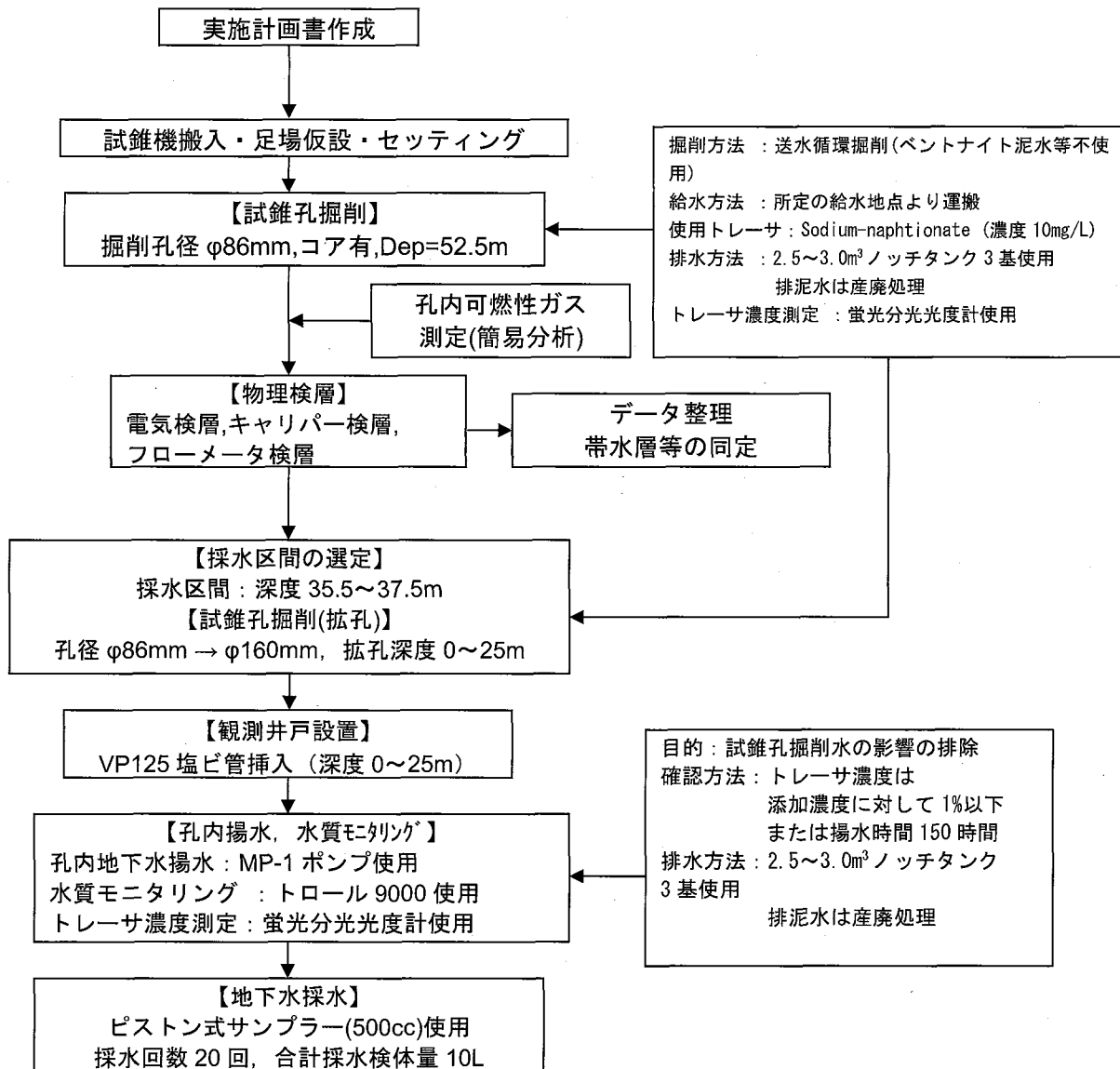


図 2.1.1-1 採水工程の実施フロー

b. 試錐孔掘削

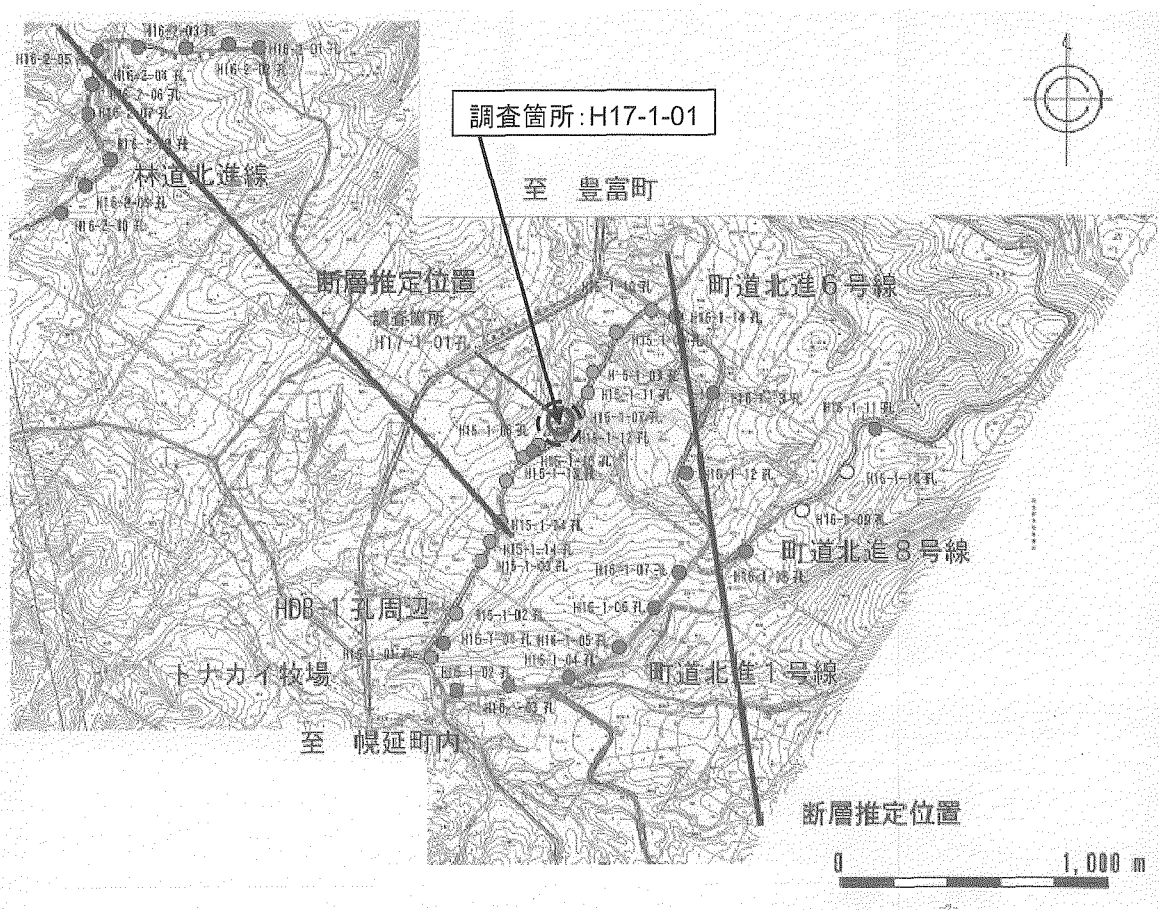
(a) 試錐位置

試錐位置については、これまでに実施されている調査³⁾を基に決定した。

北海道天塩郡幌延町字北進において、試錐位置の孔口の緯度、経度、X-Y座標位置及び標高を掘削開始前に測量した(表 2.1.1-1)。座標は日本測地系、世界測地系の両座標で表記した。また、調査位置の平面図を図 2.1.1-2 に示す。

表 2.1.1-1 試錐孔の位置・標高

孔番号	世界測地系		日本測地系		地盤高(m)
	X座標(m)	Y座標(m)	X座標(m)	Y座標(m)	
H17-1-01	116508.304	-29781.611	116244.913	-29475.879	59.511
	経度	緯度	経度	緯度	
	141°52'19.0"	45°2'52.6"	141°52'32.8"	45°2'44.5"	



(国土地理院 1/25,000 地形図(幌延・本流)を使用)

図 2.1.1-2 調査位置平面図

(b) 試錐孔掘削方法

試錐孔の掘削に用いるボーリングマシンは、足場及び作業場を仮設して設置した。掘削で用いる掘削水は幌延町が有する井戸水を使用した。井戸の揚水期間中は、井戸の地下水位、揚水量と水質（pH、電気伝導度、温度）を測定した。掘削孔径は86mmとし、土砂と強風化岩盤で構成される深度0.0～2.3mまでは無水掘削、深度2.3m以深は清水で掘削し、ベントナイト泥水は掘削時に使用しなかった。送水掘削時はダブルコアチューブを使用し、採取した岩芯は直径約65mmであった。φ86mmで深度50mまで掘削後、掘削ロッドの検尺を実施した。検尺後、物理検層と孔内スライムの沈積区間を確保するため、深度52.5mまで掘削した。掘削及び物理検層から得られた地盤情報を基に、地下水の採水区間を検討し、孔口から深度25.0mまでの区間をφ86mmからφ160mmに拡孔して掘削した。

c. 掘削水の管理及び物理化学パラメータの取得

(a) 掘削水の管理

掘削水は専用のノッチタンク 3 基 (1 基あたり 2.5~3.0m³) に貯水し、ノッチタンクは防水シートで覆い、雨水などの混入を防止する対策を行った。

(b) 掘削水影響評価を目的としたトレーサ添加

掘削の際、採水時の掘削水の影響を把握するために、掘削水中にトレーサとして蛍光染料を添加した。蛍光染料は Sodium-naphtionate(CAS No.130-13-2)を使用した。蛍光染料の濃度の測定は蛍光分光光度計 RF1500 (島津製作所) を用いて蛍光光度法で行った。掘削水及び孔内洗浄水、試験用水などの孔内で使用する水には、蛍光染料を 10mg/L の濃度になるよう添加・調整した。添加後、サンプリングを行い、蛍光染料濃度を測定し、蛍光染料濃度が定められた値に対して±10%の範囲にあることを確認した後に掘削を開始・再開した。また、蛍光染料の添加は掘削作業に使用する直前に行った。掘削中は、2 時間毎にリターン水をサンプリングし、蛍光染料濃度が±10%以上変動する場合は、掘削を一時中断し濃度を調整した。蛍光染料濃度を測定する際には、pH、電気伝導度も同時に測定した。

d. 岩芯の取り扱い

(a) 分析用岩芯の採取

微生物分析用及び間隙水分析用として岩芯を採取した。分析用の岩芯は、できるだけ迅速に脱気し、封入した。

特に微生物分析用に採取した岩芯は、下記の手順で取り扱った。

- 1) 採取区間を送水掘削した。1 回の掘削長はコアチューブの長さなどから 1.5m とした。
- 2) 掘削した岩芯は、汚染を防止するためにコアパックに入ったまま塩化ビニル製パイプのトレイに乗せ、岩芯箱へ一時的に納めた。この時、岩芯に素手で触れないように留意した。
- 3) ガスバーナーで焼いたカッターナイフを用いて、コアパックを開封した。
- 4) スケール、カラーチャート、黒板を添えて、速やかに写真撮影した。
- 5) 岩芯の採取位置と長さは、岩芯の状態の観察結果を基に協議して決定した。1 箇所採取長さは最低 60cm とした。
- 6) 微生物による汚染を防止するために、滅菌手袋を着用し、さらにアルコールで手袋の表面を十分に拭いた。
- 7) 鉄板の表面をガスバーナーで十分に焼いて、岩芯を鉄板上に置いた。直ちに岩芯の表面全体をバーナーで焼き、滅菌した。この際、加熱を均一に行うよう、十分注意を払った。
- 8) 岩芯の封入に使用する袋の内側を消毒用アルコールで十分に拭き、岩芯を袋に入れ、脱気・封入した。封入装置も事前にアルコールで拭いて使用した。

一方、間隙水分析用の岩芯は、岩芯チューブから取り出した後、速やかに写真撮影を行った。岩芯は、岩芯封入用の袋へ入れ、脱気・封入した上で岩芯箱に収納した。岩芯箱の両横側面には、試錐孔名、収納深度区間、箱番号を明記した。

(b) 岩芯の運搬方法

微生物分析用及び間隙水分析用の岩芯は、できるだけ速やかに約 3℃の冷蔵条件下で運搬した。

e. 物理検層

物理検層はフローメータ検層、キャリパー検層、電気検層（ノルマル法）を行った。検層に際しては、掘削終了後に孔内洗浄を行い、可能な限りスライムを排除してから測定を行った。測定区間は、崩壊・逸水対策のためにケーシングを挿入した区間（深度 0～15m）を除く、深度 15～50m の区間とした。検層の測定順序は、検層結果の重要性などを検討した結果、フローメータ検層、キャリパー検層、電気検層の順に実施した。キャリパー検層と電気検層は、デジタルとアナログ（チャート）の両方で記録した。フローメータ検層はデジタルのみで記録した。デジタルは 10cm 間隔で記録できるように測定した。

f. 地下水試料の採水・分析**(a) 地下水試料の採水区間の選定**

地下水の試料採取は 1 箇所、1 区間で実施した。採取区間については、岩芯観察及び物理検層の結果を基に決定した。

(b) 採水区間における揚水作業

採水にあたっては、掘削水の影響を排除するために揚水を行った。揚水は、採水区間の上下にパッカーをかけ、採水区間外部の地下水の混入を防止すると共に、そのパッカー間の地下水を揚水した。揚水時は 1 回/時間の頻度で揚水試料のトレーサ濃度を測定した。

(c) 物理化学パラメータの測定

水質モニタリング装置「TROLL 9000」を用いて、温度、pH、酸化還元電位（ORP; Oxidation Reduction Potential）、電気電導度（EC; Electric Conductivity）、溶存酸素濃度（DO; Dissolved Oxygen）を測定した。

(d) 採水の開始

分析用の地下水の採水は、揚水の蛍光染料濃度低下量が添加量の 1%以下、あるいは正味の揚水時間が十分な時間に達した時点から実施した。実際には、蛍光染料濃度が低下しなかったため、揚水時間が約 130 時間に達した時点で地下水採水を行った。揚水量は約 28m³に達した。

(e) 採水方法及び採水量

微生物分析用試料は、滅菌処理をしたピストン式サンプラー（500mL）を用いて採取した。化学及びガス分析用試料は未滅菌のピストン式サンプラーを用いた。

(2) 分析用岩芯の採取

(a) 化学分析用岩芯の採取

化学分析用岩芯の採取箇所は、岩芯の状態(コア形状, 割れ目など)を考慮し、深度 10m, 20m, 30m, 40m, 50m 付近の中から下記の 5 箇所とした。

- a) 11.00～12.00m (11.00～11.40m, 11.40～12.00m に分割して脱気・封入)
- b) 20.00～20.80m (20.00～20.48m, 20.48～20.80m に分割して脱気・封入)
- c) 31.00～31.65m (31.00～31.38m, 31.38～31.65m に分割して脱気・封入)
- d) 41.00～41.60m (41.00～41.29m, 41.29～41.60m に分割して脱気・封入)
- e) 49.30～49.92m (49.30～49.62m, 49.62～41.92m に分割して脱気・封入)

(b) 微生物分析用岩芯の採取

微生物分析用岩芯の採取箇所も、岩芯の状態(コア形状, 割れ目など)などを考慮し、深度 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m 付近と、可燃性ガスが検出された区間などから、下記の 7 箇所とした。

- a) 24.00～24.30m, 24.90～25.20m
- b) 30.40～30.70m, 30.70～31.00m
- c) 34.17～34.47m, 34.47～34.77m
- d) 36.23～36.35m
- e) 39.77～40.12m, 40.12～40.43m
- f) 45.49～45.89m, 46.00～46.37m
- g) 48.50～48.87m, 49.00～49.30m

(3) 地下水採水・分析の結果

a. 地下水の採水区間の選定

地下水分析用の試料採取区間は、前記の岩芯観察及び物理検層などの結果を基に、表 2.1.1-2 に示すとおりに設定した。

表 2.1.1-2 地下水分析用の試料採取区間等

採水箇所数	1 箇所, 1 区間
採水区間	深度 35.50～37.56m (区間長 2.06m)
遮水パッカー設置区間	
上部パッカー	深度 34.10～35.50m (区間長 1.40m)
下部パッカー	深度 37.56～38.96m (区間長 1.40m)

b. 揚水の実施

揚水条件は、連続揚水で、水位低下量を一定に保つように設定した。しかし、揚水作業時では、ガスが揚水中に多く混入していたため、揚水ポンプが空回りして揚水がストップする時が、数分～数 10 分に 1 回の頻度で多数発生した。ポンプの揚水状況を常時監視して、揚水が断続的にな

ることが極力無いように配慮した。試錐孔の概要図を図 2.1.1-3 に示す。

c. 揚水量と揚水の水質

1日あたりの揚水量は $4.0\sim 6.4\text{m}^3$ となり、最終的に、揚水約 130 時間の累積水量は約 28m^3 に達した。

揚水時間、揚水量とトレーサ濃度の関係を図 2.1.1-4・図 2.1.1-5、水質モニタリング装置(TROLL 9000)で測定した水質データを図 2.1.1-6 に示す。

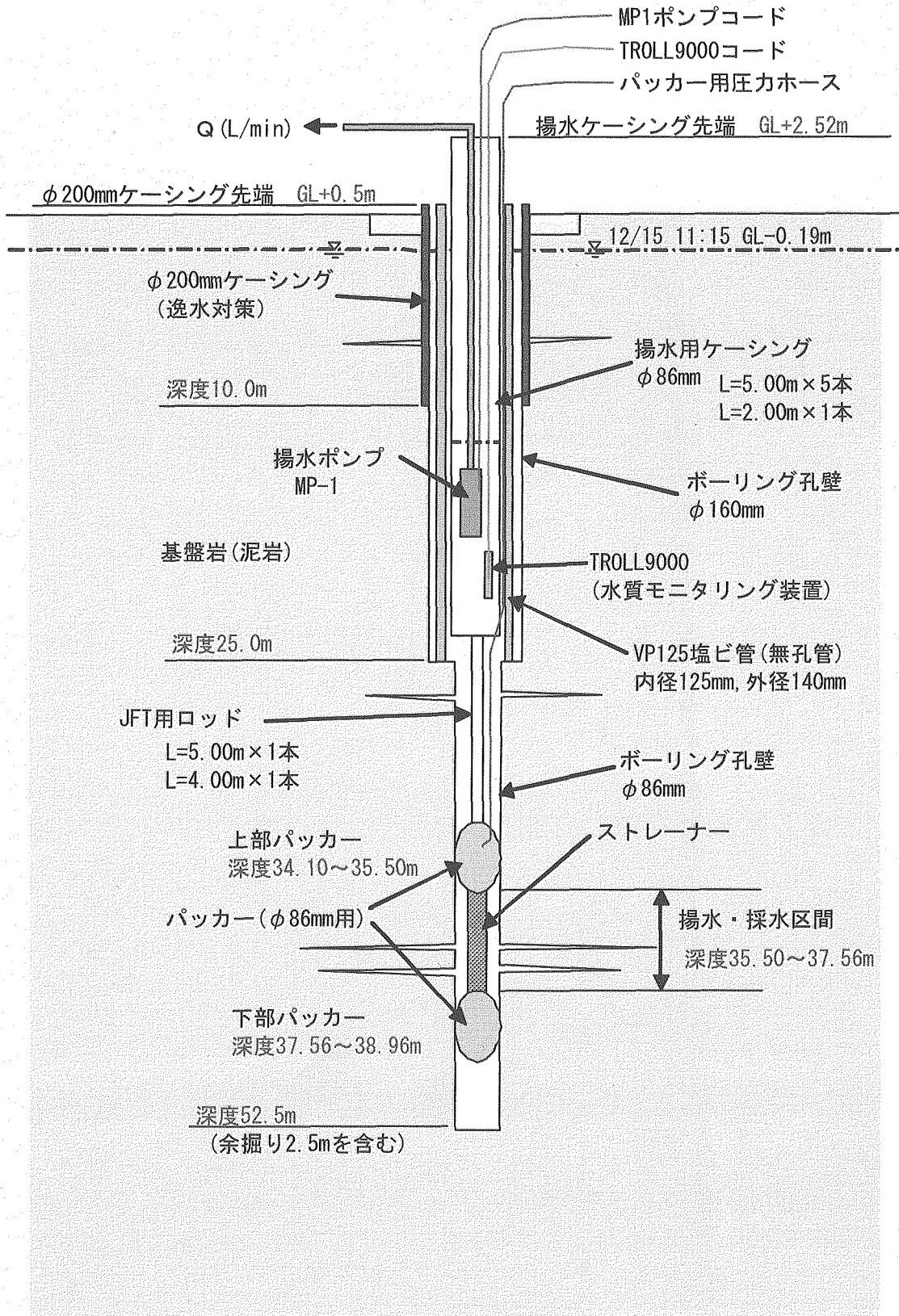
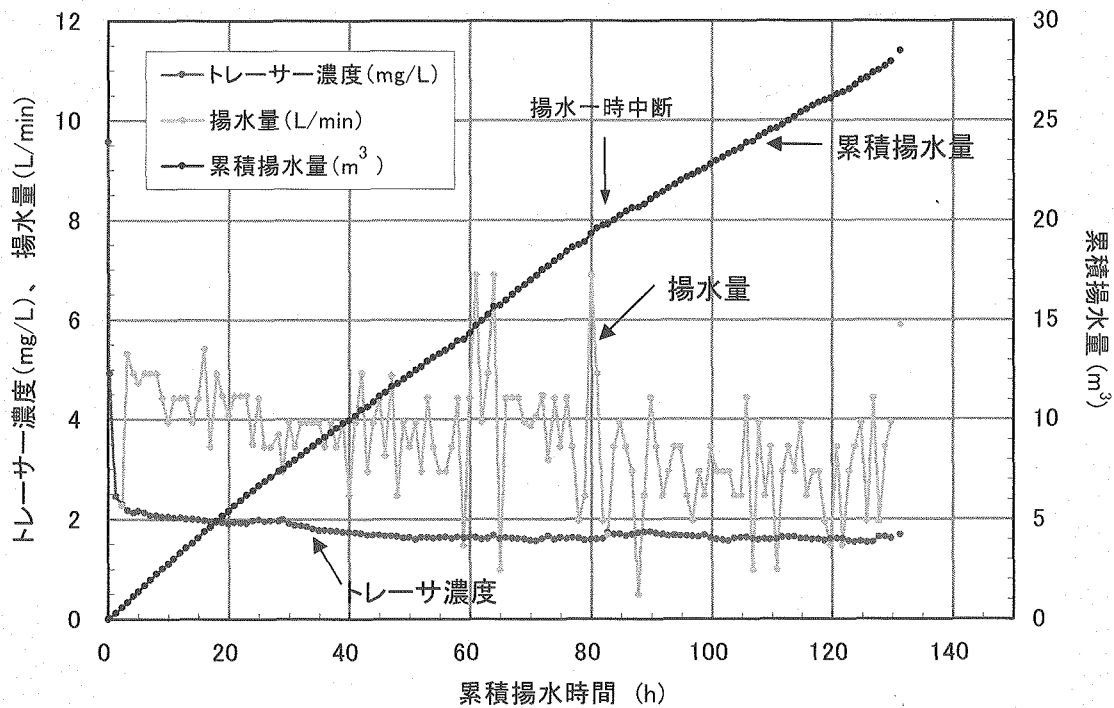
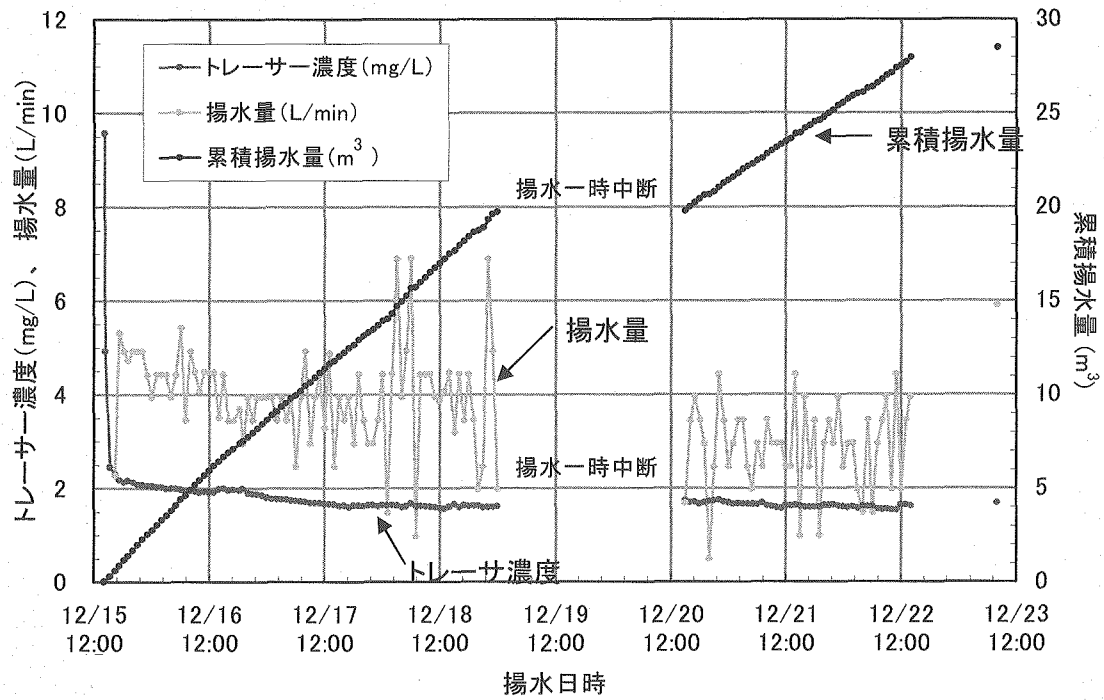


図 2.1.1-3 試錐孔概要図



悪天候と多量の降雪のため、12/19 0:15 に揚水作業を一時中断した。

天候の回復と作業現場の補強を実施後、12/20 14:25 に揚水を再開した中断時間は約 38 時間。

図 2.1.1-4 揚水時間、揚水量とトレーサ濃度の関係

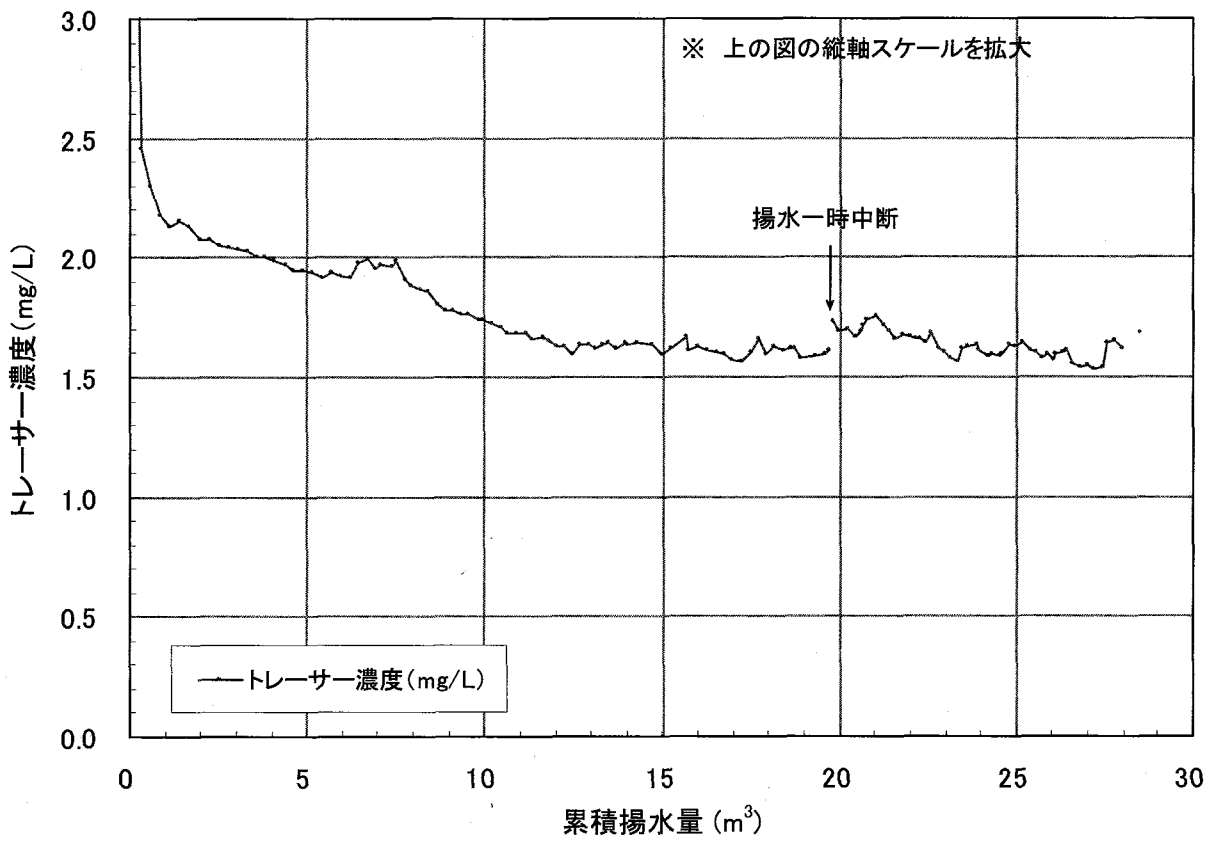
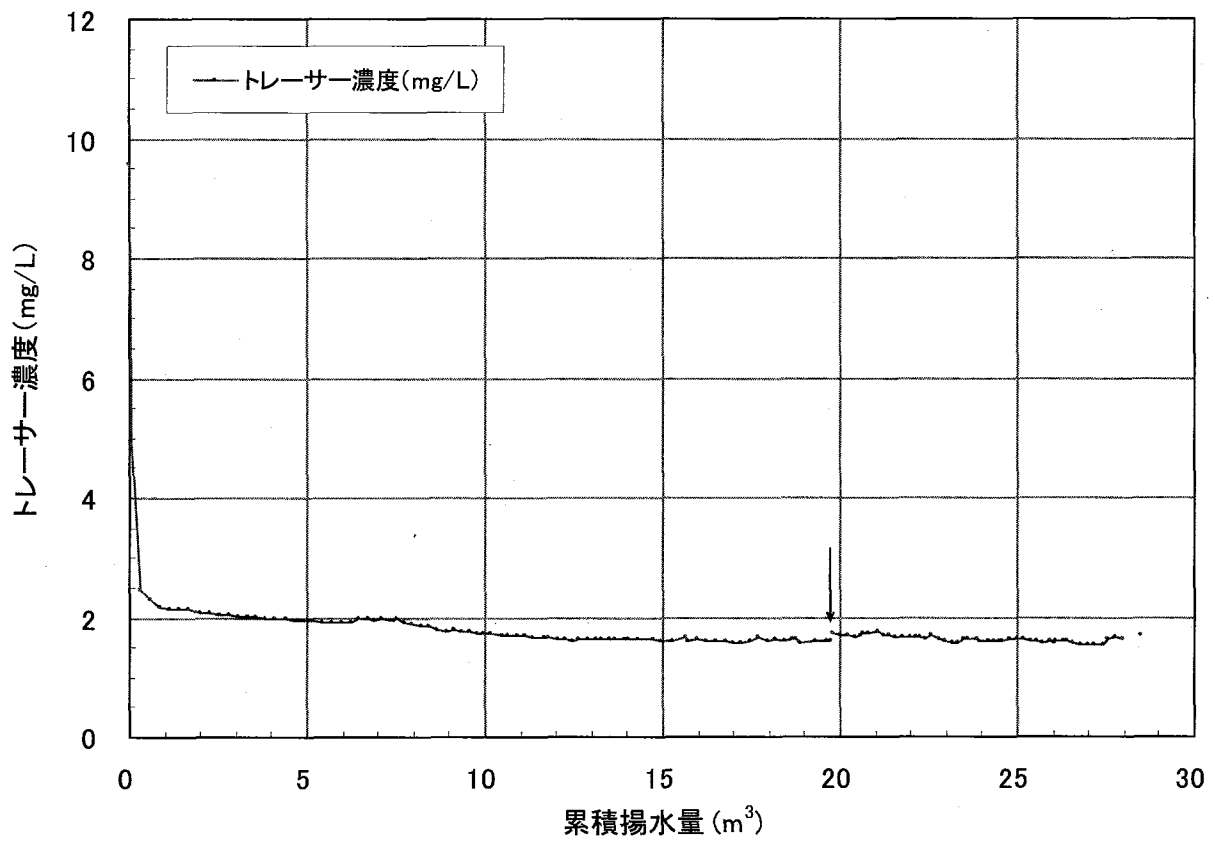


図 2.1.1-5 累積揚水量とトレーサ濃度の関係

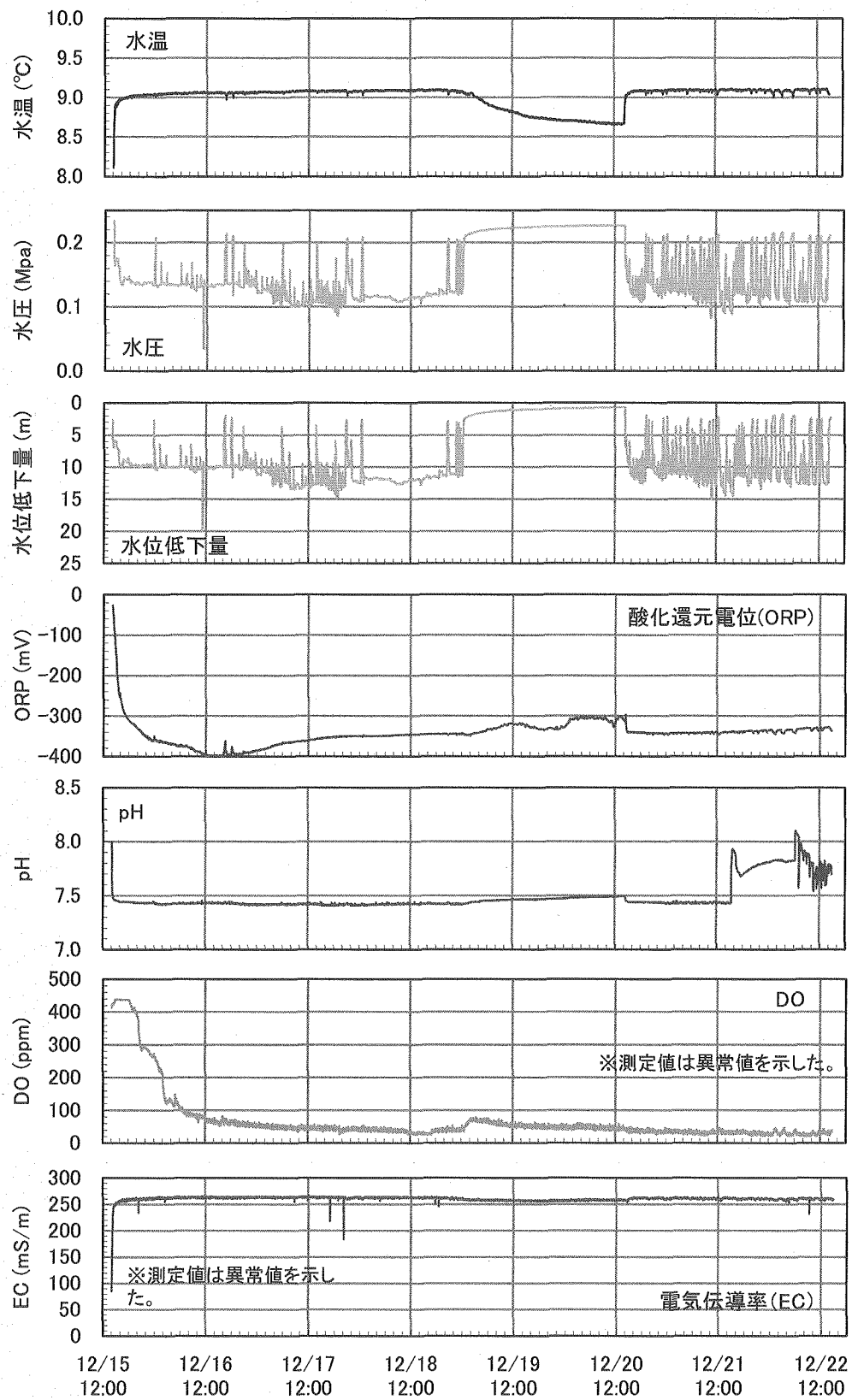


図 2.1.1-6 水質モニタリング結果 (TROLL9000 による)

(a) トレーサ濃度と掘削水残存率

トレーサ濃度は、揚水開始 2 時間後には 2.3mg/L に減少し、試錐孔掘削時のリターン水に含まれる濃度の約 25% に減少した。

揚水開始から約 50 時間が経過した 12/17 夕方までは、トレーサ濃度は少しずつ減少し 1.6 mg/L 前後となった。

その後のトレーサ濃度は、1.5~1.7mg/L の濃度で推移し、低下しないことから、揚水時間が約 130 時間に達した時点で揚水作業を終了した。

深度 34.5m 以深を掘削した時の累積逸水量が約 0.8m³（拡孔作業、孔内洗浄時にも掘削水を使用しているので、合計 1m³程度と推定される）であるのに対し、地下水の累積揚水量は約 28m³ である。逸水量の 28 倍程度は揚水している計算となる。

トレーサ濃度が揚水開始から 50 時間以降では下がらないこと、揚水量が逸水量に対して非常に多いことを考慮すると、蛍光分光光度計（RF1500; 島津製作所）の測定値は、蛍光染料とは別の自然由来の蛍光物質による影響も考えられた。

そこで、採水を実施したのちに揚水中に残存する蛍光物質がトレーサとして用いた染料と同一かを調べるために、トレーサ染料物質と採水の蛍光スペクトルを取り、両者を比較した。結果を図 2.1.1-7 に示す。いずれの試料も同一励起波長（327nm）でのスペクトルで最大の蛍光が得られたが、蛍光のピーク波長が蛍光物質では 430nm 採水試料では 387nm と相当に異なっていることから、採水試料中の蛍光物質は基本的にはトレーサ染料とは別種の物質であることが判明した。従って、採水試料の測定結果に残存した蛍光は、観測井内地下水に含まれる天然由来の物質に因ると推定される。地下水試料にはトレーサの蛍光ピーク波長に微弱な肩があり、トレーサの痕跡と思われるが、極微量と判断された。

以上から、本採水試料からは十分に掘削水の影響は除去されていると判断した。更に上記の評価を確実にするためには、蛍光検出器を使用した液体クロマトグラフィーによる分析を実施し、保持時間が異なることを確認することにより、最終的に別種の物質と判定することができると考える。

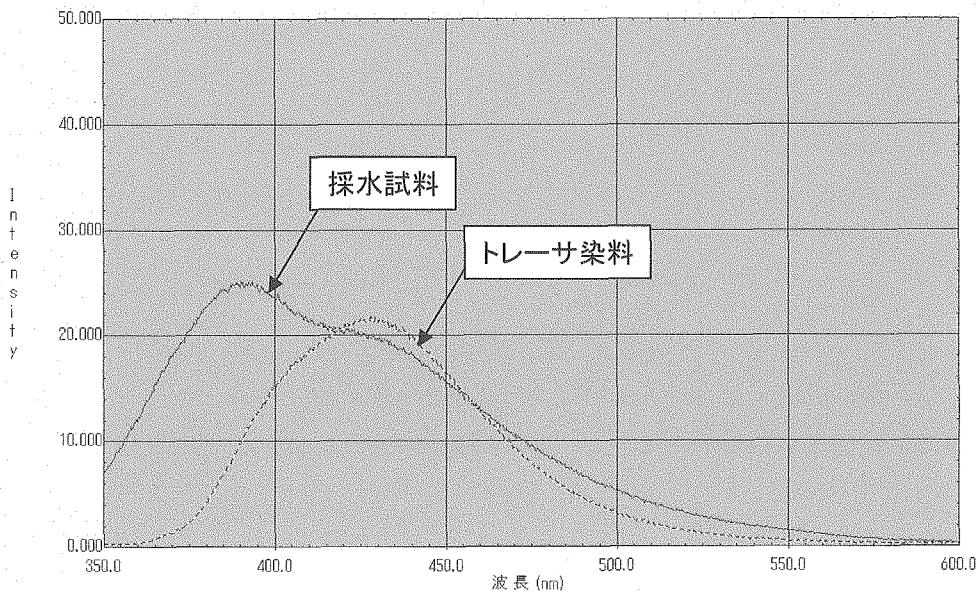


図 2.1.1-7 トレーサ染料と採水試料の蛍光スペクトル

(b) 水温

揚水開始直前の水温は 8.1℃であった。揚水開始後、すぐに高くなり、揚水開始から約 3 時間後に水温は約 9℃に達した。その後の水温も、揚水が停止した時間を除くとほとんど変化せず、約 9.1℃であった。

(c) 水圧と水位低下量

揚水開始直前の地下水位は地表面 (GL ; Ground Level) -0.19m で、水圧は 0.234MPa であった。揚水時の水位低下量を 10m 程度に条件設定したため、水圧は 0.134MPa 程度になるように調整した。実際の揚水期間の水圧は、揚水が頻繁に途切れたため、概ね 0.100~0.135MPa であった。水位低下量は約 10.0~13.5m、地下水位は GL-10.0~13.5m の範囲と計算される。揚水が数分~数 10 分間途切れた場合には、水位が 7~10m ほど (GL-3m 付近まで) 回復した。

(d) ORP (vs NHE)

揚水開始直前の酸化還元電位は約 -25mV であった。揚水開始後、すぐに減少し、揚水開始から約 1 日前後は、400mV まで低下した。その後の酸化還元電位は、揚水が停止した時間を除くとほとんど変化せず、約 -350~-330mV であった。

(e) pH

揚水開始直前の pH は 8.0 であった。揚水開始後、すぐに低下し、揚水開始から約 3 時間後に pH は約 7.4 になった。その後の pH も揚水が停止した時間を除くとほとんど変化せず、約 7.4 で推移したが、値が突然大きくなる現象も見られた。この原因は現時点で不明であるため、今後の検討が必要である。

(f) DO

DO は測定期間全体に渡って非常に高い値を示した。1 気圧、20℃で純水中の飽和溶存酸素量は 8.8mg/L であり、通常今回の結果のように常時この値を超過して観測されることはない。この原因は現時点で不明であるため、今後の検討が必要である。

(g) EC

EC も測定期間全体にわたって非常に高い値を示した。この原因は現時点で不明であるため、今後の検討が必要である。揚水開始から約 3 時間後に EC は約 260mS/m になった。その後も EC は揚水が停止した時間を除くとほとんど変化せず、260mS/m 前後を示した。ポータブル EC を使用した測定では、地上に揚水した地下水試料の EC は 24~25mS/m を示した。(水質モニタリング機の値は約 10 倍である。)

d. 採水の実施

微生物分析用試料と化学分析用試料ともに全てピストン式サンプラー (500cc) を用いて採取した。サンプラーを観測井に導入する操作状況を図 2.1.1-8 に示す。水中ポンプと水質モニタリング機を地上に回収した後、ピストン式サンプラーは 3 インチ揚水ケーシング下端(深度 24.5m)付近の深度 24.0m まで降下させてから試料を採取した。孔内に降下したピストン式サンプラーは、1 回目の採水では約 30 分、2 回目~4 回目では 15 分、5 回目以降では 10 分待機させた後、地上に回収した。採水は合計 20 回行い 10L 採取した。



図 2.1.1-8 ピストン式サンプラーによる地下水の採水

2.1.2 採取試料の化学分析

採取試料のうち、最初に採水試料の化学分析を行った。孔採水の対照試料として、掘削終了間際の掘削水及び掘削に使用した井戸水を用いて分析を行った。

(1) 方法

測定手順フロー図を図 2.1.2-1 に示す。井戸水、掘削水及び孔採水の各試料について、以下の手順で分析を行った。各分析項目とそれらの分析に用いた分析機器等の概略を表 2.1.2-1 に示す。

- a. 各試料を孔径 0.20 μ m のメンブレンフィルターでろ過した。ただし、懸濁物質の多い掘削水は遠心分離機による固液分離 (20,000rpm, 20min) 後にろ過した。試料中の Si を除去するために、各ろ液から 30mL 分取し濃硝酸 300 μ L を添加して pH 1 程度に調整した。
- b. 硝酸を添加した試料は一昼夜静置し、遠心分離機によって液相と沈殿物を分離 (20,000rpm, 20min) して、液相を ICP (Inductively Coupled Plasma; 高周波誘導結合プラズマ) 発光分光分析装置によって表 2.1.2-1 に示した元素の化学量を測定した。
- c. 硝酸を添加しなかった試料については以下の分析を行い、表 2.1.2-1 に示した各元素及びイオンの化学量を測定した。
 - (a) アンモニウムイオン量測定として JIS に記載されるインドフェノール青吸光光度法 (JIS K 0102) ⁴⁾ に準じて、NH₃ 量を測定した。
 - (b) 全有機炭素計 (Total Organic Carbon; TOC 計) によって有機炭素量 (DOC(Dissolved Organic Carbon)=ろ過後の TOC) と無機炭素量 (Inorganic Carbon; IC) を測定した。また、pH による全炭酸の濃度分布表 (JIS K 0101) ⁵⁾ に従ってろ液 pH と IC 測定値より炭酸量、炭酸水素イオン量及び炭酸イオン量を計算した。
 - (c) イオンクロマトグラフィー装置によって各陰イオン量を測定した。
 - (d) ICP 発光分光分析装置によって Si の化学量を測定した。

(2) 結果及び考察

分析結果と各分析に適用した検量線範囲を表 2.1.2-2 に示す。同表に示すように、掘削に使用した井戸水と比較して、掘削終了時の掘削水 (相当量の孔由来の微細岩石を含む) と孔採水ではいずれも約 62mg/L と高い DOC 値を示した。これは、幌延地区の既存孔で得られた分析値の中でも高い値に属する。また、アンモニア濃度も地下水としては高い値を示した。これらは、幌延地区が比較的未熟な泥岩からなるため、生物体由来の未分解有機物等が多く含まれる可能性を示唆している。分析結果を基にした解釈に関しては、今後さらに検討が必要である。

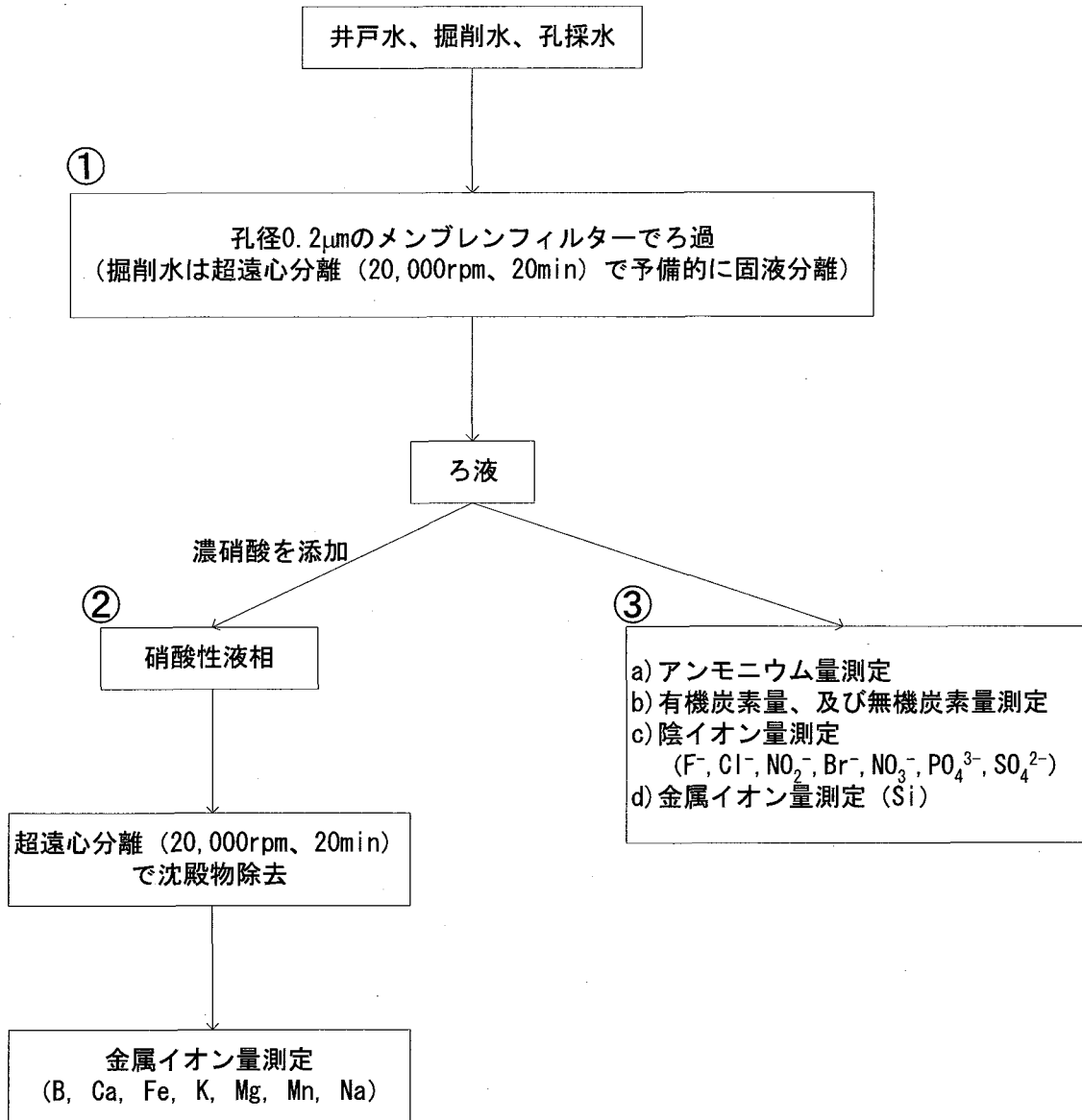


図 2.1.2-1 化学量測定手順フロー

表 2.1.2-1 分析項目

分析装置	機種及び測定条件	分析項目
ICP 発光分光 分析装置	VISTA-PRO(セイコーインスツル(株)製)	B, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si
イオンクロマト グラフィー装置	DX500(日本ダイオネクス(株)製)	F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻
	カラム: IonPac AS14A/AG14A(日本ダイオネクス(株)製)	
	溶離液: 8mmol/L-Na ₂ CO ₃ /1.0mmol/L-NaHCO ₃ 溶液	
	流速: 0.5mL/min	
全有機炭素計	TOC-V CPN((株)島津製作所製)	DOC, IC
紫外可視分光 光度計	UV-2550((株)島津製作所製)	NH ₃
	波長: 630nm	

表 2.1.2-2 試料の分析結果

試料名	井戸水	掘削水	孔探水
温度 (°C)	8	5.6	
ORP (mV vs NHE)	200	158	
Ec (mS/m)	14.2	39.2	374
pH	7.19	3.15	7.70

試料名		井戸水	掘削水	孔探水
Ca ²⁺	(mg/L)	6.0	4.7	21.3
Fe ³⁺	(mg/L)	0.0	4.0	0.0
K ⁺	(mg/L)	1.4	10.3	42.0
Mg ²⁺	(mg/L)	3.3	1.8	9.8
Mn ⁴⁺	(mg/L)	0.0	0.0	0.0
Na ⁺	(mg/L)	16.4	68.5	778.1
NH ₄ ⁺	(mg/L)	0.2	9.5	49.9
Total-Si	(mg/L)	15.9	92.7	24.3
Total-B	(mg/L)	0.0	1.9	34.9
F ⁻	(mg/L)	0.2	0.3	0.0
Cl ⁻	(mg/L)	16.2	30.2	325.4
NO ₂ ⁻	(mg/L)	0.0	0.0	0.0
Br ⁻	(mg/L)	0.0	0.0	0.0
NO ₃ ⁻	(mg/L)	0.6	0.7	0.0
PO ₄ ³⁻	(mg/L)	0.0	0.0	5.0
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	4.4	12.1	0.6
DOC	(mg/L)	4.1	61.9	62.0
全炭酸(TC)	(mg/L)	8.9	34.8	399.1
H ₂ CO ₃	(mg/L)	6.4	3.0	103.1
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	38.7	172.6	1921.7
CO ₃ ²⁻	(mg/L)	0.0	1.5	5.4

*TC: Total Carbon; 全炭素量

2.1.3 採取試料中の微生物代謝活性の測定

採水試料中の微生物を対象として、最初に代謝活性を有する微生物の存在を確認するために、培養法を通じて、各代謝活性を有する菌の生菌数の計測を行った。

(1) 測定方法

寒天平板法を用いて従属栄養好気培養生育菌を測定し、最確数 (Most Probable Number; MPN) 法で従属栄養嫌気培養生育菌、脱窒菌、鉄還元菌、硫酸還元菌の生菌数を計測した。計測方法として「土壌微生物学実験法」⁶⁾に記載された標準的な手法を採用した。使用した培地は下記のとおりである。

嫌気培養については嫌気培養用アネロパックシステム(三菱ガス化学)を用いて嫌気条件にし、9℃のインキュベーター内に静置培養し、約2週間以降に菌の生育の有無を判定した。

a. 寒天平板法による従属栄養好気性培養生菌数測定

寒天平板法でCFU (コロニー形成ユニット) を計測した。

貧栄養の環境を模擬することを目的として、1/10NB 培地 (表 2.1.3-1) に2%の寒天を加えて平板を作り、試料の希釈液 ($10^0 \sim 10^7$) を100 μ Lずつ加え、30℃のインキュベーター内に静置し、数日後にコロニー数を計数した。各濃度について、3連を行った。

表 2.1.3-1 1/10NB 培地の組成

組成	濃度(g/L)
肉エキス	0.5
ペプトン	1.5
NaCl	0.5
K ₂ HPO ₄	0.5

[日本製薬乾燥ブイオン 3g を1L に溶解し、pH7.0 に調整しオートクレーブ (120℃, 20 分) する。]

b. MPN 法による生菌数の測定

48Well の Micro titer plate に定法どおりの培地⁶⁾ (表 2.1.3-2 参照) を1 mL ずつ分注し、採水試料の希釈液 ($10^0 \sim 10^{10}$) を100 μ L ずつ各濃度につき5 連ずつ加えた。生育の判定は定法⁶⁾ 通り行った。

表 2.1.3-2 MPN 法による評価対象と培地

評価対象	培地の種類
従属栄養嫌気性培養生菌数	1/10NB 培地の液体培地
脱窒菌数	Giltay の培地
鉄還元菌数	グルコース, アスパラギン培地
硫酸還元菌数	乳酸利用硫酸還元菌用培地

(2) 結果及び考察

評価結果を表 2.1.3-3 にまとめて示す。好気性菌、嫌気性菌、脱窒菌、鉄還元菌は掘削水、孔採水の両試料から検出された。硫酸還元菌は掘削水試料のみから検出された。孔採水中の好気性菌は井戸水と同様の 10^3 レベルであったが、掘削水では約 300 倍多かった。これは、掘削水は採取後 9 度前後で 2 週間ほど保存していたため、その間に酸素存在下で増殖しやすい菌が、岩石微粒子由来の栄養源を利用して増殖したことが原因となった可能性がある。総じて掘削水試料から検出された菌数が多かった。孔採水試料中の菌数としては、ほぼ他の幌延の試掘孔試料から得られた結果の範囲内であった。硫酸還元菌は検出できなかったが、本試料は約 36m と比較的浅い位置からの採水であったため、硫酸還元菌数が少なかった可能性がある。また、今回 MPN 法の実験方法として、1mL と小容量での培養を行ったが、菌数が少ない場合には培養容量が小さいと MPN としての信頼度が低くなることもあり、より大きな容量での培養実験を行う必要があると考えられる。以上、今回得られた試料には、以前に報告された幌延での地下水における微生物生菌数と同じ程度の生菌の存在が確認できた。⁷⁾

表 2.1.3-3 評価結果

微生物の種類	培養方法	幌延井戸水	H17-1-01 掘削水	H17-1-01 孔採水
好気性菌数 (cfu/mL)	寒天平板培養 (1/10NB 培地)	$7.6 \pm 1.0 \times 10^3$	$1.5 \pm 0.6 \times 10^6$	$5.6 \pm 2.4 \times 10^3$
嫌気性菌数 (個/mL)	MPN (1/10NB 培地)	—	$4.2 \pm 0.9 \times 10^4$	$6.7 \pm 2.7 \times 10^2$
脱窒菌数 (個/mL)	MPN (Giltay の培地)	—	$1.4 \pm 0.8 \times 10^3$	$1.4 \pm 0.3 \times 10^3$
Fe 還元菌数 (個/mL)	MPN (グルコース, アスパラギン培地)	—	$5.9 \pm 3.4 \times 10^2$	$1.7 \pm 0.5 \times 10^1$
硫酸還元菌数 (個/mL)	MPN (乳酸利用 硫酸還元菌用培地)	—	2.0 ± 0.1	0

2.2 微生物影響評価モデルの改良

本項では、微生物影響評価コードの概要、解析の適用例とその結果、幌延深地層研究センターで取得された地下水組成データへ適用した結果等を記述する。

2.2.1 評価モデル開発の考え方

最初に、評価モデルの開発方針に関して、一般的な開発方針を図式化した図 2.2.1-1 を基に記す。基本的な方針としては、中央左から右にかけて記したとおり、現象理解・モデル化・検証と確認・実用に向けた設計・性能情報の反映が挙げられる。

本評価コード(以後 MINT と称する。詳細は 2.2.2 項参照。)の開発は、図 2.2.1-1 に示す現象理解・モデル化の過程を経て進められた。開発における特徴として、コードに記述された基本定数(微生物による代謝反応速度、死滅速度等)は文献調査で得た値の他に、室内試験・原位置評価から得た値を採用していることが挙げられる。

本研究では、2.1 項で述べたとおり、基本定数取得に関わる研究を継続するとともに、MINT による評価機能の数学的な正当性を評価するための「検証」過程、解析結果と現実の系における現象の整合性を確認するための「確認」過程を重視しながら、モデルの改良を進めていく。

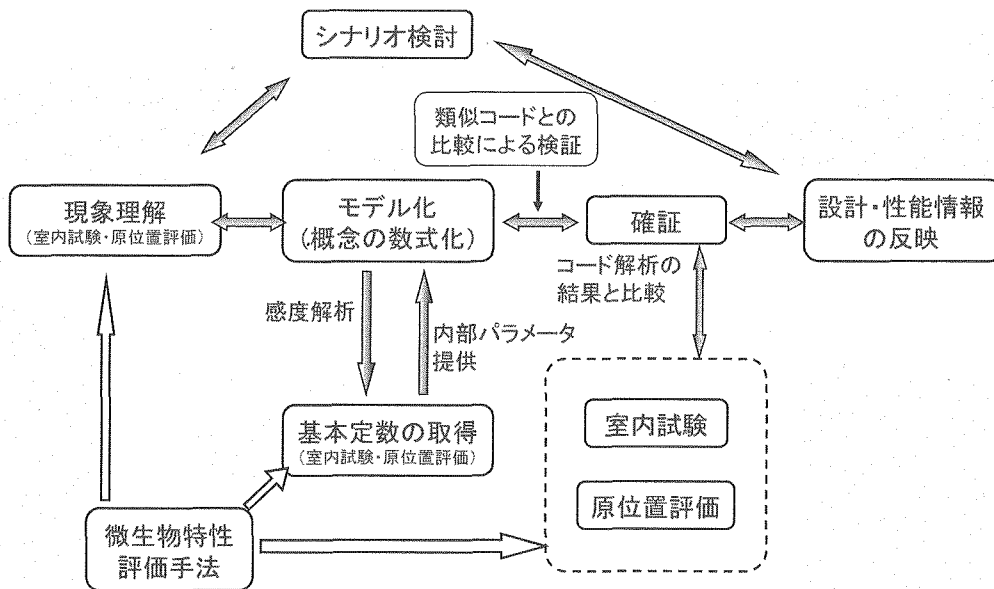


図 2.2.1-1 評価モデル開発の考え方

2.2.2 解析コードの概要

(1) 解析コードの概要

平成 14 年度から平成 16 年度の 3 カ年で実施されたエネルギー総合工学研究所による“革新的実用原子力技術開発提案公募事業「地層処分に及ぼす微生物影響のシミュレーションに関する技術開発」”において、微生物影響と地球化学反応の影響を考慮しつつ、地層処分における安全評価、特に天然バリア中における核種移行評価に適用することを目的とした 1 次元系の解析コードとして MINT が構築された。同コードは米国 Sandia National Laboratory で開発された解析コード BIORXNTRN の概念モデル(Hunter et al., 1998⁸⁾; Wang and Papenguth, 2001⁹⁾)と、微生物の水中での移動に関する概

念モデル(Coraspioglu and Haridas, 1985¹⁰)を参考にモデルが構築され、汎用数学プラットフォームの1つである Mathematica (Wolfram Research, U. S. A.)上にプログラムが記述された。

(2) 解析コードの機能・可能な解析

a. 解析手順

解析は、コード内で以下の手順を経て実施している。

(a) 定数・変数の設定

本解析コードによる解析では、以下の変数を入力パラメータとした。また、表 2.2.2-1 に示す変数を解析対象とした。

- ・初期状態の化学物質の濃度分布 変数群
- ・初期状態の pH の全域の分布 ph
- ・空間分割の単位幅 Δx , 時間分割の単位幅 (time step) Δt
- ・解析範囲とする時間

(b) タイムステップ内の収束計算

各空間セルにおける化学反応・微生物反応の速度 R を算出する。算出に用いる変数は、 Δt だけ前の時間における値を基に算出する。

算出した反応速度を基に、以下の微分方程式を有限差分法で解き、得られた値を基に、各空間セル内の表 2.2.2-1 に示す内部変数を再計算、更新する。

溶存物質：化学・生物反応によるセル内の濃度 $[C]$ 増減，移流 $[V]$ ，分散 $[D]$ を考慮

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} - V_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + R_i \dots\dots\dots (1)$$

固相物質：化学・生物反応によるセル内の増減を考慮

$$\frac{\partial C_j(x,t)}{\partial t} = R_j \dots\dots\dots (2)$$

微生物：セル内の微生物の増減，移流，分散を考慮 (K_{bio}^d : 微生物に対する核種の分配係数)

$$\left(1 + \frac{K_{bio}^d}{\phi}\right) \frac{\partial C_{bio}(x,t)}{\partial t} = D_{bio} \frac{\partial^2 C_{bio}(x,t)}{\partial x^2} - V_{bio} \frac{\partial C_{bio}(x,t)}{\partial x} + R_{bio} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{bio} = Y_j R^{OC} - b_j P_j \dots\dots\dots (4)$$

Y_j : 第 j 群の細胞収率, b_j : 第 j 群の死滅率, P_j : 第 j 群の微生物

(c) 全時間領域の計算

$\Delta t \times 1$ の時間内で収束すれば、次の Δt の収束計算に進み、順次目的とする全時間領域の計算を実行し、解を得る。

表 2.2.2-1 解析対象の内部変数

変数	内容	単位	溶存／固体／収着
o2	溶存酸素	mol/L	溶存
no3	溶存硝酸イオン	mol/L	溶存
mno2	二酸化マンガン	mol/L	固体
feoh3	水酸化鉄 (III)	mol/L	固体
so4	硫酸イオン	mol/L	溶存
tic	無機炭酸 (合計)	mol/L	溶存
oc	溶存有機物	mol/L	溶存
mn2	マンガンイオン (II)	mol/L	溶存
fe3	鉄イオン (III)	mol/L	溶存
tis	硫化物イオン (合計)	mol/L	溶存
ch4	メタン	mol/L	溶存
nh3	溶存アンモニア	mol/L	溶存
n2	溶存窒素ガス	mol/L	溶存
caco3	炭酸カルシウム	mol/L	固体
mnco3	炭酸マンガン (菱マンガン鉱)	mol/L	固体
feco3	炭酸鉄 (II) (菱鉄鉱)	mol/L	固体
fes	硫化鉄	mol/L	固体
biomo2	第 1 群微生物量 (好気性菌)	cells/L	収着
biomno3	第 2 群微生物量 (脱窒菌)	cells/L	収着
biommno2	第 3 群微生物量 (マンガン還元菌)	cells/L	収着
biomfeoh3	第 4 群微生物量 (鉄還元菌)	cells/L	収着
biomso4	第 5 群微生物量 (硫酸還元菌)	cells/L	収着
biomtict	第 6 群微生物量 (メタン生成菌)	cells/L	収着
ph	間隙水の pH	—	—
Δ_e	対イオン濃度総和	mol/L	—
Δ_I	イオン強度	—	—

b. 解析結果の評価方法

解析結果は、図 2.2.2-1 に示すとおり、地下水下流方向の距離に対応した濃度（他に微生物量等）として得られ、これが時間変化していく過程を追従して評価することができる。時間変化量が小さくなり、ほぼ変化しなくなった状態を「準安定」と見なし、その値を与条件に対応した解として採用する。

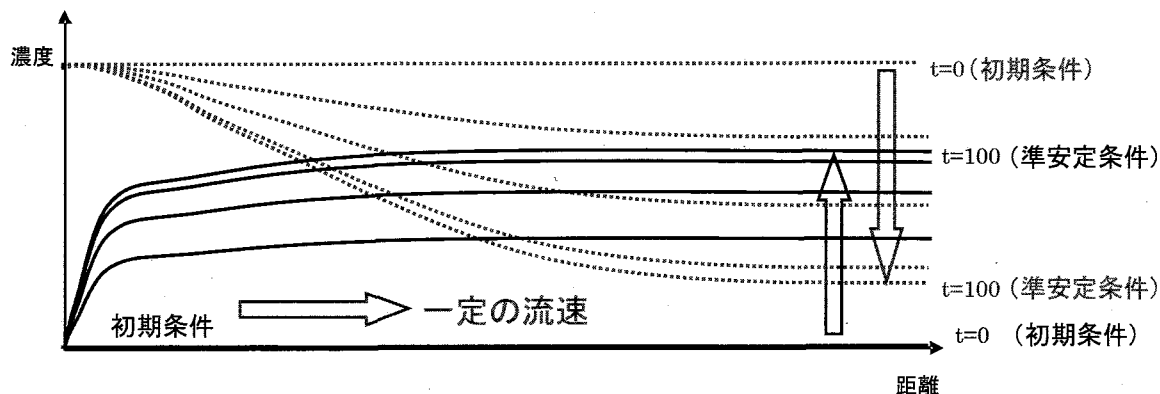


図 2.2.2-1 解析結果の時間変化概念図
(点線：初期値より低い値で安定，実線：初期値より高い値で安定)

(3) 評価例

解析コードによる微生物影響評価の適用性評価として行った解析結果を例示する²⁾。同評価例は、特定の観測井の特定の深度における地下水組成を部分的に評価した例であり、本研究で実施する地下水化学の評価と同等の手法を活用した。

a. 溶存有機物濃度の変動に対応した硫酸イオン濃度の変動

フィールド調査の観測井で観測した溶存有機物と硫酸イオンの濃度の変動を評価することを目的として、MINT を用いた解析が実施された。

潮来市の茨城大学広域水圏センター内の観測井において、2003 年 8 月から 9 月にかけて有機物濃度の減少と共に硫酸イオン濃度の増加が観測された（図 2.2.2-2）。この観測結果を解析コードによる評価と比較することを目的として、以下の解析条件を設定し、解析が実施された。

- ・ 解析の体系として、地下水が飽和した帯水層を想定し、水平に地下水流が存在する一次元の系が設定された
- ・ 2003 年の 3 月から 8 月の観測結果を基に流入する地下水の成分が決定された
- ・ ボーリングコアから得られた全菌数を基に微生物密度が決定された
- ・ 微生物による有機物消費速度には、室内試験の結果が適用された
- ・ 上記の条件が 10 年間維持された後、有機物濃度が初期濃度の 0.1 % まで減少するとし、その後 10 年間の状態変化が評価された

評価の結果、約 2 年間で微生物代謝に伴って硫酸イオン濃度が減少した後、低い濃度レベルを保つ結果が得られた。その後、有機物濃度が減少するに従って硫酸イオン濃度の上昇が見られ、

フィールド調査における有機物濃度の減少と硫酸イオン濃度の増加が同様に再現された。しかし、濃度変化に要する時間は約5年と評価され、観測結果の一ヶ月と比較して長い時間を要することを示唆する結果が得られた。

以上の評価結果から、解析コードMINTは、地下環境の変化に対応した活性微生物群の遷移と各々の微生物量の増減を、地球化学反応の影響を考慮しつつ記述可能であることが確認されたが、解析結果の定量性向上を図るためにはコード内に記述された各種反応係数を実測に基づいて更新することが課題とされた。

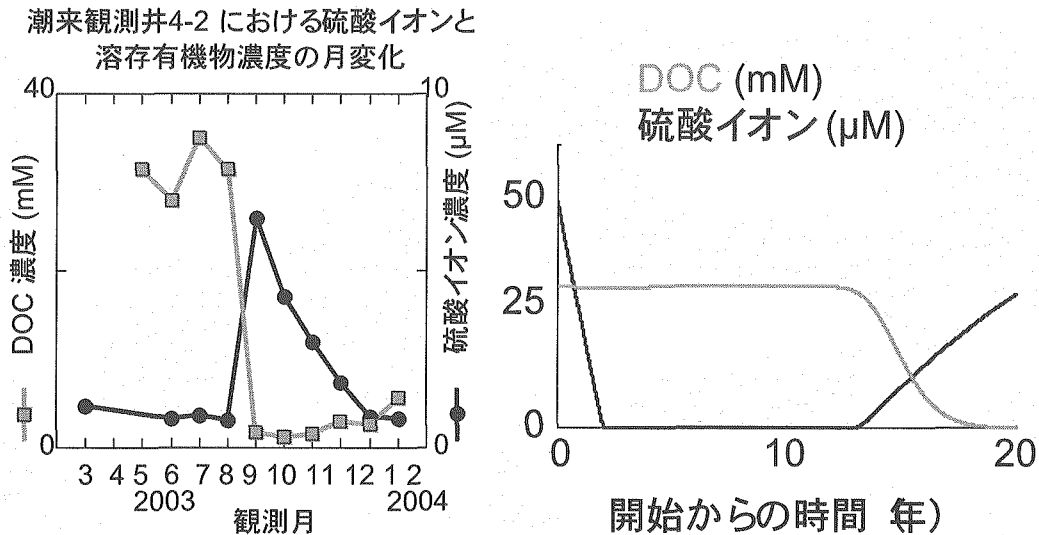


図 2.2.2-2 野外観測結果を基に行ったシミュレーション

左：野外観測で得られた観測井における有機物と硫酸イオンの濃度変化
 右：シミュレーションによって再現された有機物と硫酸イオンの濃度変化

2.2.3 今年度の成果

(1) データの評価・選択

幌延深地層研究センターにおいて、H16年度までに得られた8種類の掘削井、HDB-1～8における地下水水質・微生物量のデータを対象として、データを評価・選択した。

各掘削井の地下水水質及び微生物について分析した項目を表2.2.3-1と表2.2.3-2に示す。

表 2.2.3-1 掘削井の地下水水質の評価項目

評価項目	単位	評価項目	単位
pH	[#]	Fe(III)	[mg/L]
EC (at 25°C)	[mS/m]	Fe(II)	[mg/L]
ORP (Pt)	[mV]	Total-Fe	[mg/L]
ORP (Au)	[mV]	Al ³⁺	[mg/L]
Eh(Pt)	[mV]	F ⁻	[mg/L]
Eh(Au)	[mV]	Cl ⁻	[mg/L]
DO	[mg/L]	Br ⁻	[mg/L]
Tracer	[mg/L]	NO ₃ ⁻	[mg/L]
Temp.	[°C]	NO ₂ ⁻	[mg/L]
Na ⁺	[mg/L]	SO ₄ ²⁻	[mg/L]
K ⁺	[mg/L]	S ²⁻	[mg/L]
NH ₄ ⁺	[mg/L]	H ₂ S	[mg/L]
Li ⁺	[mg/L]	Total-B	[mg/L]
Ca ²⁺	[mg/L]	Total-Be	[mg/L]
Mg ²⁺	[mg/L]	Total-Cr	[mg/L]
Sr ²⁺	[mg/L]	Total-Co	[mg/L]
Se ²⁻	[mg/L]	Total-Ni	[mg/L]
Total-P	[mg/L]	HCO ₃ ⁻	[mg/L]
I ⁻	[mg/L]	CO ₃ ²⁻	[mg/L]
Mn (II)	[mg/L]	M-Alkalinity (CaCO ₃)	[mg/L]
Total Mn	[mg/L]	P-Alkalinity (CaCO ₃)	[mg/L]
dissolved Si	[mg/L]	TOC	[mg/L]
dissolved SiO ₂	[mg/L]	TIC	[mg/L]
Ti ⁴⁺	[mg/L]		

*後述する解析に適用する評価項目を強調表示した

表 2.2.3-2 掘削井の有機物・微生物量評価項目

有機物評価パラメータ	単位	微生物量評価パラメータ	単位
フミン酸	[mg/L]	全菌数	[No./mL]
フルボ酸	[mg/L]	従属(有機)栄養細菌	[CFU/mL]
酢酸	[mg/L]	嫌気性高分子分解菌	[CFU/mL]
蟻酸	[mg/L]	アンモニア酸化菌	[MPN/mL]
		亜硝酸菌	[MPN/mL]
		鉄酸化菌	[MPN/mL]
		硝酸還元菌	[MPN/mL]
		脱窒菌	[MPN/mL]
		硫酸還元菌	[MPN/mL]
		メタン生成菌	[MPN/mL]

*後述する解析に適用する評価項目を強調表示した。解析に適用しない評価パラメータは、主要 6 代謝群以外の微生物による影響の考察が必要な場合に活用することを目的として取得した。

なお、HDB-1 から 8 では、表 2.2.3-1 及び表 2.2.3-2 に示すデータ項目のうち、測定されていない項目もあることから、特に微生物影響を評価するために適当と考えられるデータセットを選定することとした。

選定に際しては、以下の要件を満たすデータセットに注目した。

- ・ 各代謝群の微生物量を評価し、数値を得ている
- ・ 溶存有機物濃度が大きく、微生物の活性を期待できる

上記に適合するデータセットとして、特に掘削井 HDB-6⁷⁾を対象とした一連の評価データに、該当するものが存在した。本解析では、表 2.2.3-1 及び表 2.2.3-2 に示す評価項目から、特に表 2.2.3-3 に示す条件を選定し、これを基準条件として解析に適用することとした。

(2) 感度解析

a. 解析モデル

解析モデルとして、図 2.2.3-1 に示すモデルを採用する。なお、MINT は 1 次元の移流・分散を取り扱うコードであることから、地下水流速を 0 にしたバッチ評価を実施するためにはコードの改造を要する。そこで、本解析では、流速をきわめて遅く（ダルシー流速と同等）設定し、評価時間に対して地下水の移動量を最小限とすることで近似的にバッチ評価と同等の評価を実現している。

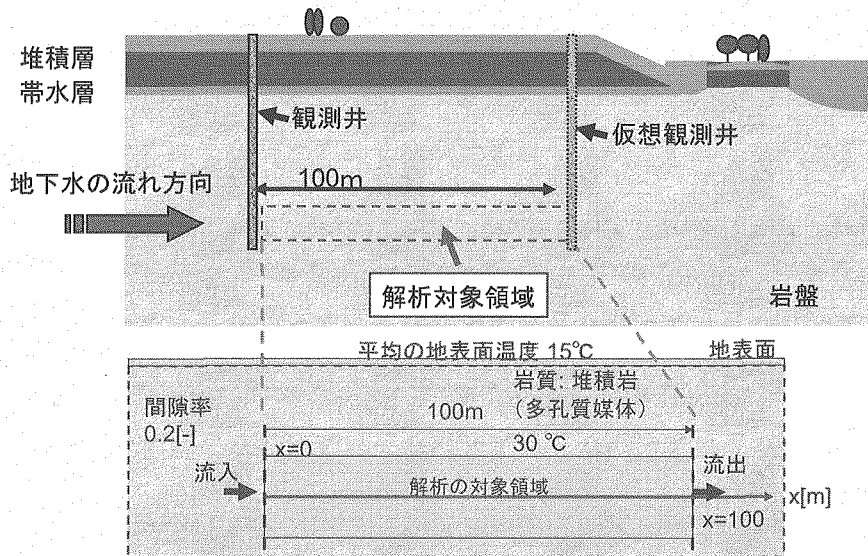


図 2.2.3-1 解析モデル

解析は、以下の手順で実施する。

- (a) 観測井の位置を流入境界（座標 0）とし、横軸に距離、縦軸に濃度・微生物量等を設定
- (b) 初期条件では、距離方向の全領域で、各々一定の値（=HDB-6 の採用値;基準条件）を設定する
- (c) 地下水流入の境界条件は初期条件と同一・不変とする
- (d) 一定流速で距離方向に流下する条件を与えて解析を開始
- (e) 各々の評価値は初期条件から減少又は増加して、ある距離以降は変化が小さくなり、準安定となる

観測井の下流 100m に仮想の観測井を設け、この地点で仮に観測をすると得られる値が解析結果と等価であると仮定し、さらにこの結果が同地下環境において得られる本来の観測値に近い値を示すことが期待される。

解析結果が基準条件となる HDB-6 の観測結果から不変であれば、同観測結果は微生物影響を受けて定常値となっていることを示唆していることになる。また、解析結果が同観測結果と異なれば、その相違点に注目してその原因を考察する必要がある。

b. 解析条件

感度解析に際しては、特に微生物の代謝活性に影響する可能性が高い条件を選び、表 2.2.3-3 に示す評価パラメータを設定した。同表には評価の基準条件と、対応する変動設定を設けており、同条件の下で感度解析を実施した。解析結果の評価値は、設定した計算期間終了時点の値とした。

表 2.2.3-3 基準条件及び感度解析に際して設定する評価パラメータ

評価パラメータ	基準条件	変動設定
計算する期間(年)	1, 100	—
溶存酸素濃度(mg/L(ppm))	0.95	0.01, 4.0, 8.0
硝酸イオン濃度(mg/L)	0.1	0.01, 1.0
硫酸イオン濃度(mg/L)	5.9	0.6, 60
溶存有機物濃度(mg/L)	130	0.013, 0.13, 1.3, 13, 1300

表 2.2.3-4 感度解析の解析ケース（初期条件）一覧

No.	設定条件	計算期間 (年)	Δt (年)	溶存酸素 濃度 (mg/L)	硝酸イオン 濃度 (mg/L)	硫酸イオン 濃度 (mg/L)	溶存有機物 濃度 (mg/L)
1	基準条件 1 年 (HDB-6 実測値)	1	0.01	0.95	0.1	5.9	130
2	酸素濃度変動 (8ppm;大気平衡)	1	0.01	4	0.1	5.9	130
3		1	0.01	8	0.1	5.9	130
4		1	0.01	0.01	0.1	5.9	130
5	硝酸イオン 濃度変動	1	0.01	0.95	0.01	5.9	130
6		1	0.01	0.95	1	5.9	130
7	硫酸イオン 濃度変動	1	0.01	0.95	0.1	0.6	130
8		1	0.01	0.95	0.1	60	130
9	有機物濃度変動	1	0.01	0.95	0.1	5.9	1.3
10		1	0.01	0.95	0.1	5.9	13
11	基準条件 100 年 (HDB-6 実測値)	100	1	0.95	0.1	5.9	130
12	酸素濃度変動 (8ppm;大気平衡)	100	1	4	0.1	5.9	130
13		100	1	8	0.1	5.9	130
14		100	1	0.01	0.1	5.9	130
15	硝酸イオン 濃度変動	100	1	0.95	0.01	5.9	130
16		100	1	0.95	1	5.9	130
17	硫酸イオン 濃度変動	100	1	0.95	0.1	0.6	130
18		100	1	0.95	0.1	60	130
19	有機物濃度変動	100	1	0.95	0.1	5.9	1.3
20		100	1	0.95	0.1	5.9	13
21		100	1	0.95	0.1	5.9	1300
22		100	1	0.95	0.1	5.9	0.13
23		100	1	0.95	0.1	5.9	0.013

* 基準条件から変動させた値を強調表示した

c. 解析結果

解析の初期条件と解析結果を相互に比較することを目的として、図 2.2.3-2 に両者の値を示す。左側のグラフは計算期間 1 年、右のグラフは計算期間 100 年を設定した場合の結果であり、それぞれ最も左側の値は初期条件を示している。横軸の数値は表 2.2.3-4 に示す解析ケースに対応し、縦軸は各々の評価量（濃度・微生物量等）に対応している。

グラフは、解析ケースに応じた解析結果を相互比較するために線グラフとして表示しており、感度解析の与条件に呼応して解析結果に変動が見られる場合には、グラフ形状へ上又は下に凸の形状として反映される。与条件に対して感度の低い結果は、基準条件（解析ケース No.1, 11）と同程度の値を取るため、線グラフ形状が水平となる。なお、このグラフでは後述する重要度が高いと判断されるデータを、同一の色・形状のデータマーカで統一している他、解析コード内で評価している他の値も比較用に併記している。

(a) 計算期間(年)

反応速度が非常に大きい計算要素がある場合には、 Δt を適切に設定しないと正しく評価できない可能性がある。本解析では Δt を 0.01 年（全計算時間；1 年）及び 1 年（全計算時間；100 年）として、1 年経過後における両者の結果を比較したところ、特に Δt に依存する相違点は見られないことが分かった。以上から、100 年の計算期間の設定時においても、本解析コードによる計算が適切に行われていると判断し、100 年経過後の解析結果を感度解析の評価対象とする。

(b) 溶存酸素濃度(mg/L(ppm))

感度解析では、初期の濃度変動に依存することなく、全ての条件下で計算期間 1 年のうちに溶存酸素が全量消費される結果が得られた。

(c) 硝酸イオン濃度(mg/L)

溶存酸素濃度の感度解析結果と同様、初期の濃度変動に依存することなく、全ての条件下で計算期間 1 年のうちに硝酸イオンが全量消費する結果が得られた。

(d) 硫酸イオン濃度(mg/L)

- ・ HDB-6 で得られた硫酸イオン濃度を初期値とした場合

100 年経過後においても、硫酸イオン濃度はほとんど変動しない結果となった。

- ・ HDB-6 で得られた硫酸イオン濃度の 1/10 を初期値とした場合

1 年経過時では変動が小さいが、他の計算結果への影響として、メタン濃度がわずかに（2 倍未満）増加する傾向を示した。

100 年経過後では、硫酸イオン濃度が初期値の 1/50 まで低下して準安定な状態になるとともに、メタン濃度が約 30 倍に増加することを示唆する結果となった。図 2.2.3-2 のグラフ形状にも、各々の値の増減が反映されていることが分かる。

・HDB-6 で得られた硫酸イオン濃度の 10 倍を初期値とした場合

1 年経過後, 100 年経過後のいずれにおいても, 初期値から硫酸イオン濃度の値はほとんど変動していない。しかし, メタン濃度は, HDB-6 で得られたデータを初期値とした場合と比較して, 約 1/10 に減じることを示唆する結果となった。

(e) 溶存有機物濃度(mg/L)

基準条件・感度解析の設定条件, いずれの場合でも時間経過に伴う溶存有機物の濃度変動は非常に小さく, その他解析で得られた値でも変動が非常に小さかった。メタン生成他の微生物活性には必ず電子供与体としてはたらく溶存有機物が寄与していることから, 計算対象とした系では微生物の活動に必要な有機物が十分量存在しており, 今回設定した程度の濃度変動が生じても微生物の活動には影響しないことを示唆していると考えられる。

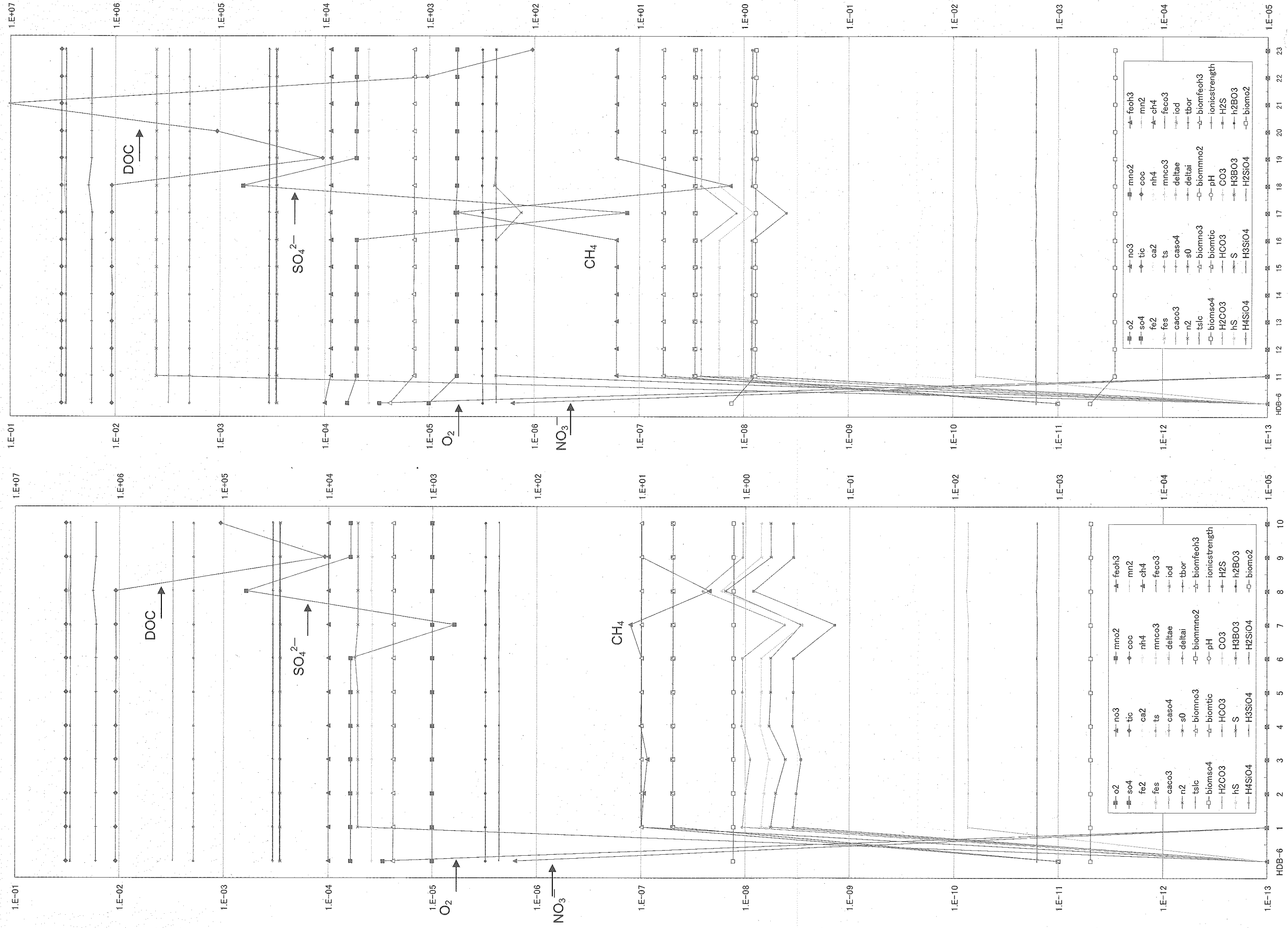


図 2.2.3-2 各種と条件に対する計算結果 (計算期間; 左: 1 年, 右: 100 年)

*1 白抜表示 (微生物量 (例: biomno3, 脱窒菌) と pH) → 右軸に対応
 *2 横軸の定義 (HDB-6: 初期条件, 数値: 感度解析の解析条件(表 2.2.3-4 参照))
 *3 左軸: 単位 [mol/L], 右軸: 単位 [cells/mL]

(f) 各種計算要素の経時変化

各種計算要素に関して、計算開始から 100 年経過後までに見られる経時変化の計算結果を示す。以下に記す各グラフは距離に対応した計算結果と時間経過に伴う変化を 10 年おきに表示しており、変化の方向を矢印で示している。以下、順次メタン濃度 (図 2.2.3-3)、硫酸イオン濃度 (図 2.2.3-4)、溶存酸素と硝酸イオン濃度 (図 2.2.3-5) を図示する。さらに、硫酸還元菌 (図 2.2.3-6)、メタン生成菌 (図 2.2.3-7)、好気性菌 (図 2.2.3-8)、脱窒菌 (図 2.2.3-9) の微生物量を図示する。また、溶存有機物の濃度を解析ケースごとに図 2.2.3-10 から図 2.2.3-12 に示す。

a) 溶存物質

メタン濃度:

初期条件では距離方向全域で濃度 0 であったが、評価開始後すぐに全域で生成した後、漸次増加している。

基準条件 (No.11) と硫酸イオン濃度増加 (No.18) による結果は変化の幅が小さいが、硫酸イオン濃度減少条件 (No.17) では継続的にメタン濃度が増加する傾向が見られる。

No.18 の条件では、基準条件で見られる濃度の約 1/10 で推移することを示唆している。

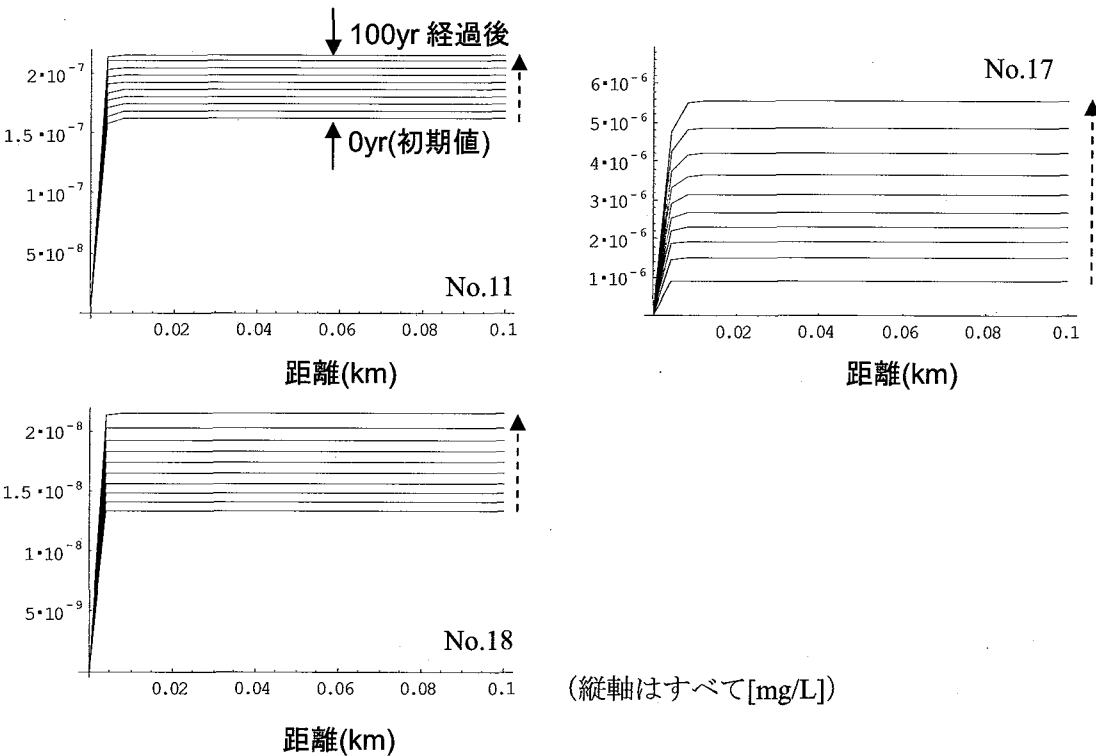


図 2.2.3-3 100 年経過までのメタン濃度経時変化 (計算条件 No.11, 17, 18 の比較)

硫酸イオン濃度:

基準条件 (No.11) と硫酸イオン濃度増加 (No.18) による結果は変化の幅が小さいが、硫酸イオン濃度減少条件 (No.17) では、初期条件から継続的に硫酸イオン濃度が減少していく傾向が見られる。

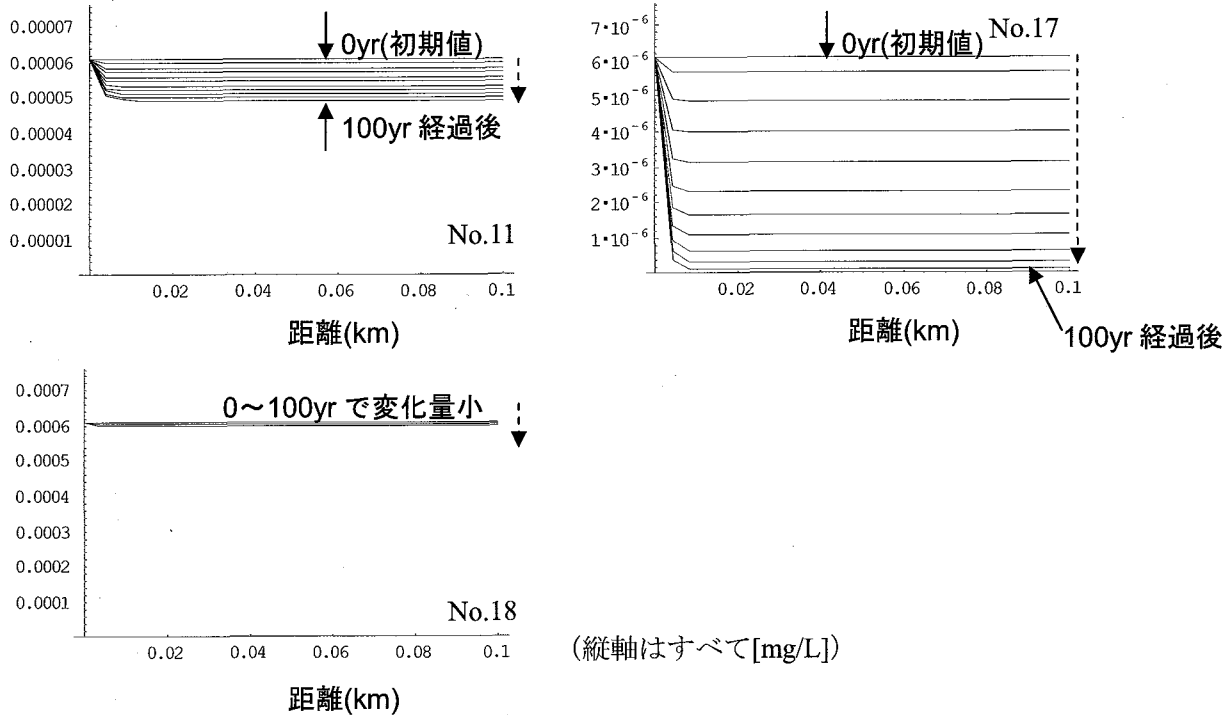


図 2.2.3-4 100 年経過までの硫酸イオン濃度経時変化 (計算条件 No.11, 17, 18 の比較)

溶存酸素・硝酸イオン濃度:

溶存酸素濃度と硝酸イオンの両者とも、解析開始後極めて短時間で全量消費する結果となっている。

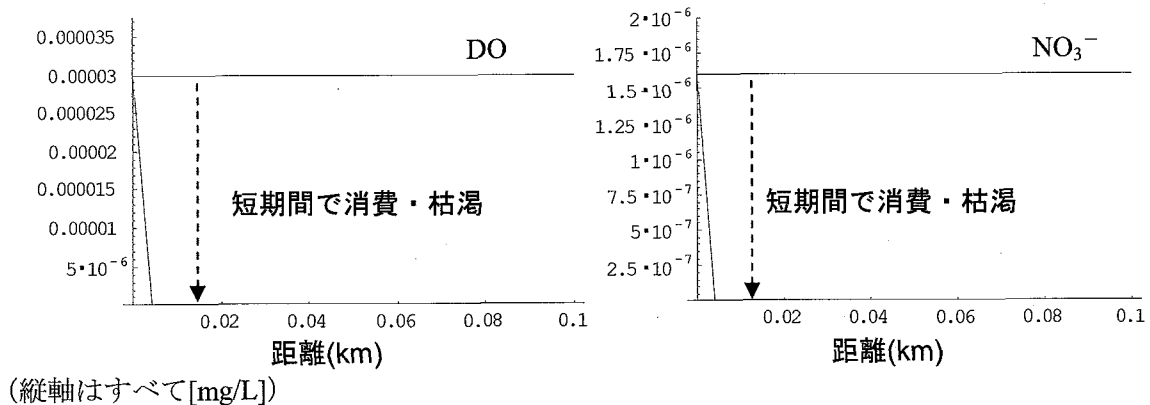


図 2.2.3-5 0.01 年経過までの溶存酸素、硝酸イオン濃度経時変化 (計算条件 No.11)

b) 微生物量

硫酸還元菌:

基準条件 (No.11), 硫酸イオン濃度減少条件 (No.17), 硫酸イオン濃度増加条件 (No.18) のいずれにおいても微生物量の変化傾向に大きな差は見られない。このことから, 前述した条件 No.17 における大幅な硫酸イオン濃度減少は, 微生物量には比例しない微生物活性の変化 (コード内では, 各微生物群の活性係数 (電子受容体濃度等の関数) として定義) に依存していることを示唆している。

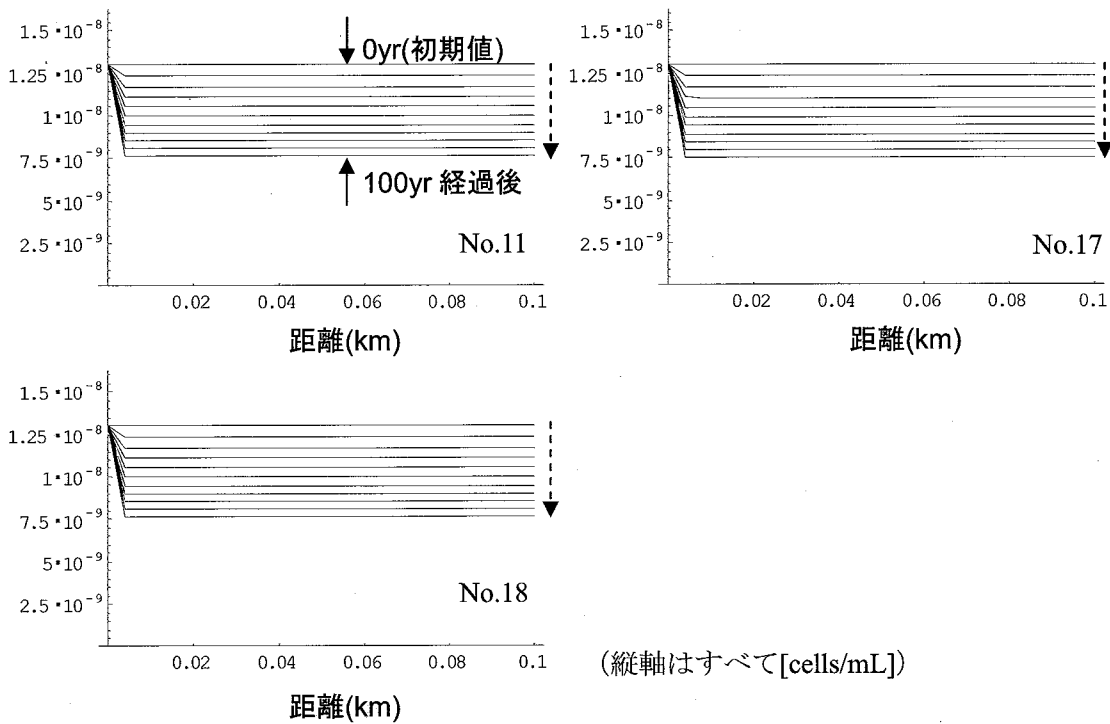


図 2.2.3-6 100 年経過までの硫酸還元菌の微生物量経時変化 (計算条件 No. 11, 17, 18)

メタン生成菌:

硫酸還元菌の結果と同様，基準条件 (No.11)，硫酸イオン濃度減少条件 (No.17)，硫酸イオン濃度増加条件 (No.18) のいずれにおいても微生物量の変化傾向に大きな差は見られない。このことから，前述した条件 No.17 における大幅なメタン生成量の増加及び減少は，微生物量には比例しない微生物活性の増減に依存していることを示唆している。

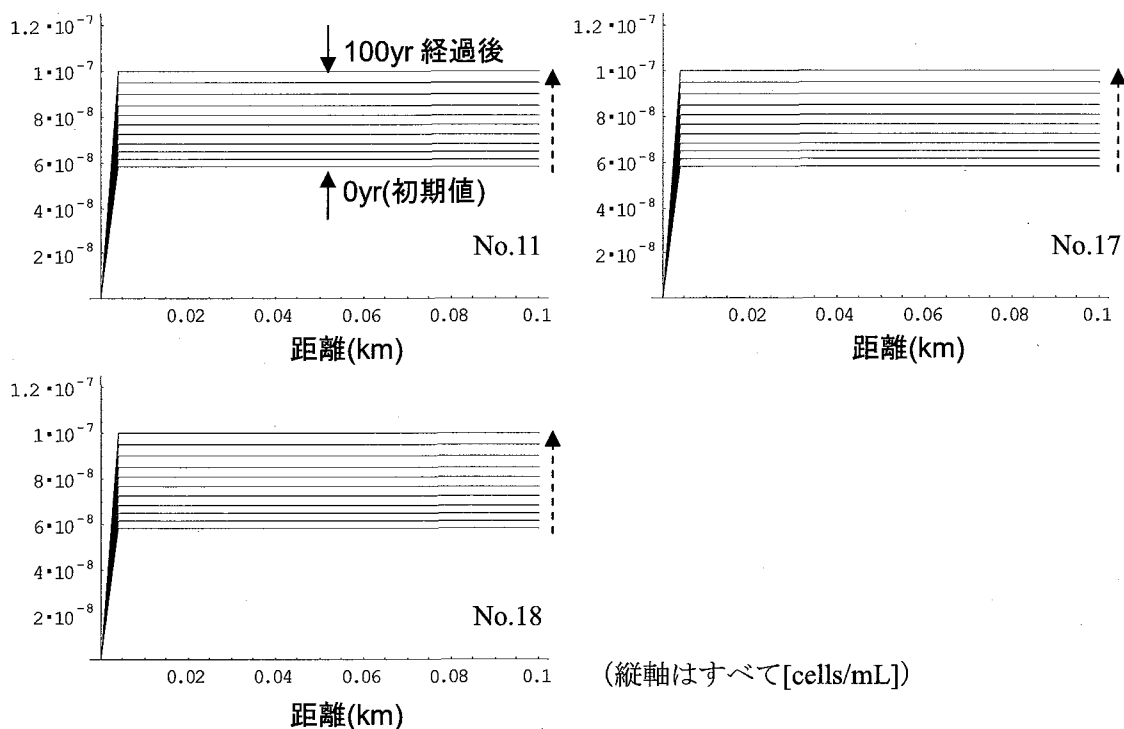


図 2.2.3-7 100 年経過までのメタン生成菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)

好気性菌・脱窒菌:

両者とも時間経過に伴って漸減する傾向を示唆している。溶存酸素・硝酸イオン濃度の急激な減少後に活性を失い、解析コードに設定された死滅率に従って漸減していると推察される。

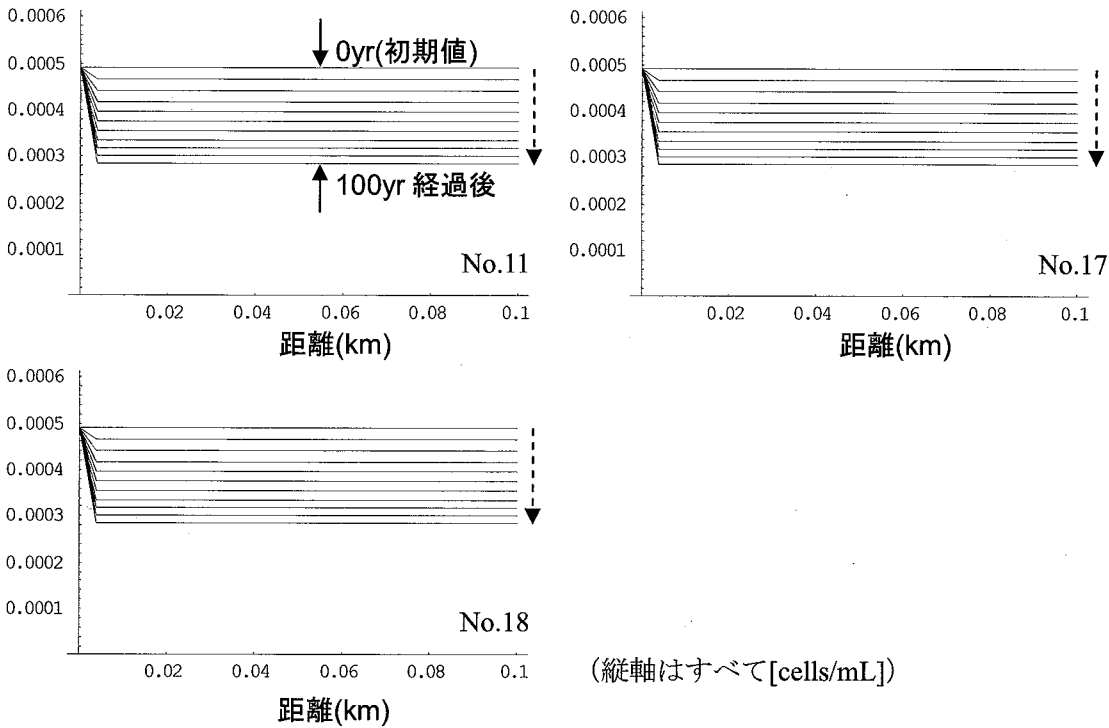


図 2.2.3-8 100 年経過までの好気性菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)

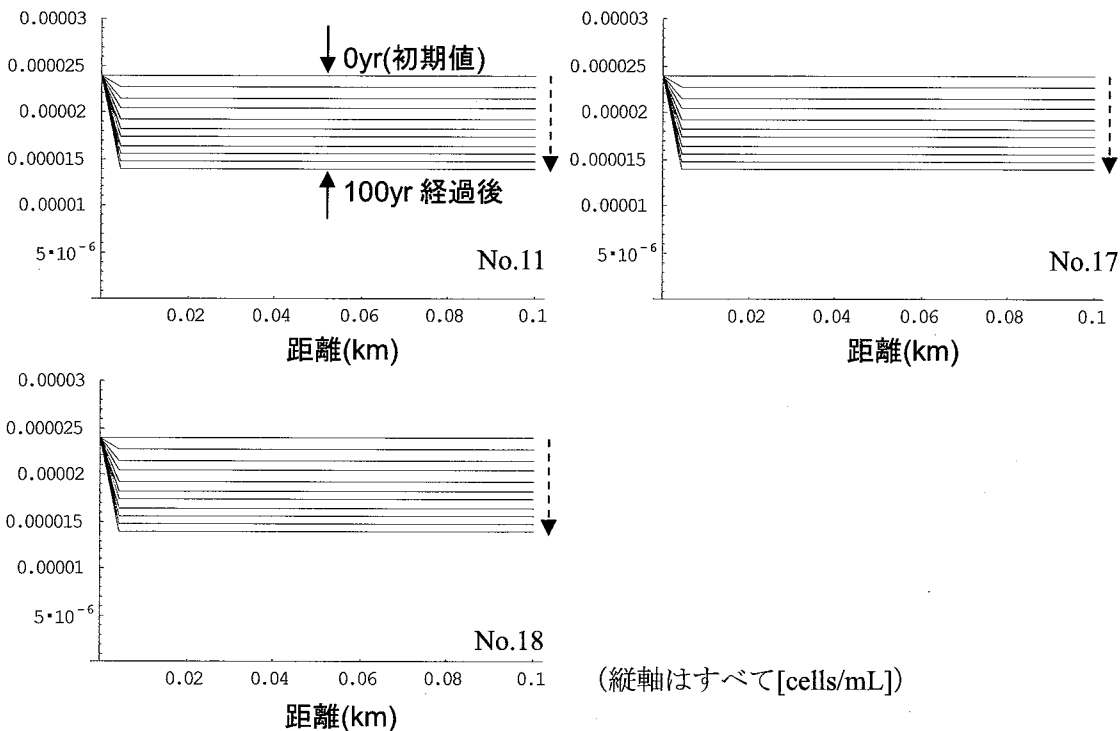


図 2.2.3-9 100 年経過までの脱窒菌の微生物量経時変化 (計算条件 No.11,17,18)

有機物濃度:

硫酸イオン・溶存メタン濃度の変動に伴う有機物濃度の変化を確認するために、基準条件と変動条件 (No.11, No.17, No.18) に対応した濃度変化に注目した。

以下の3条件に基づく図に示すとおり、時間経過に伴う濃度変動がほとんど生じていないことが示唆される結果となった。これは、前述のとおり計算対象とした系では微生物の活動に必要な有機物が十分量存在して、変化量が識別できなくなっている可能性がある。一方で、微生物による有機物分解速度や、有機物総量のうち微生物が有効な電子供与体として使用可能な割合等を含めて再検討の必要があると考える。

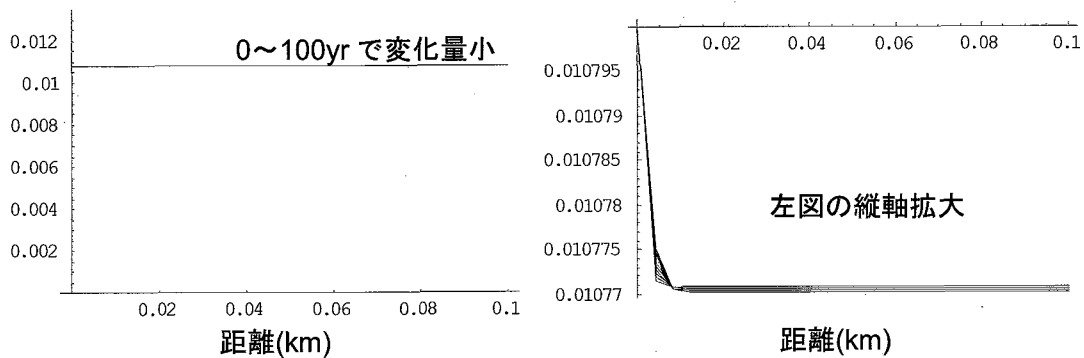


図 2.2.3-10 100 年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 11)

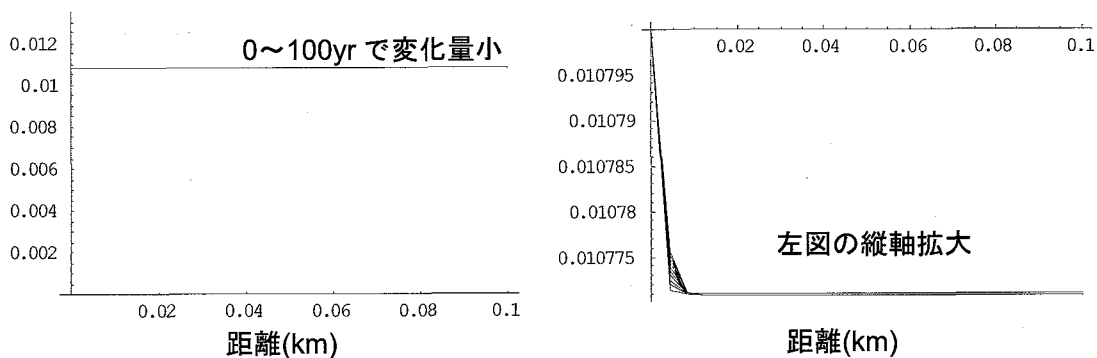


図 2.2.3-11 100 年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 17)

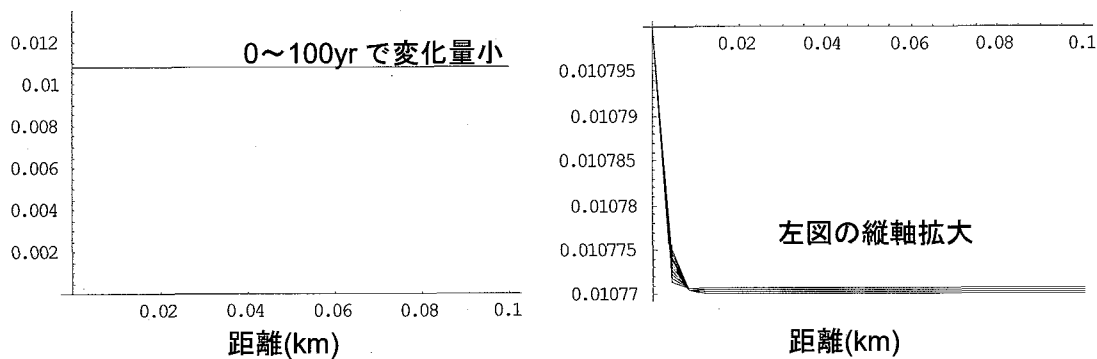


図 2.2.3-12 100 年経過までの溶存有機物濃度変化 (計算条件 No. 18)

(図 2.2.3-10 から図 2.2.3-12 の縦軸はすべて[mg/L])

有機物濃度の変化に関しては、さらに表 2.2.3-5 と図 2.2.3-13 に示すとおり、初期値と 100 年経過後の値を比較したが、初期濃度が最も低い解析ケース No.23 においても、初期値に対する変化分の割合は小さく、非常に少量の有機物のみが有効に使用されたことを示唆する結果となった。但し、電子供与体である有機物濃度の変動が微生物の活性に何らの変化を与えないことには不自然さが残ることから、今後室内試験やテストケースを適用した検証・確認過程を経る必要があると考えている。

表 2.2.3-5 解析ケースごとの有機物濃度変化

ケース No.	11	19	20	21	22	23
初期値	130	1.3(1/100)*	13(1/10) *	1300(×10) *	0.13(1/10 ³) *	0.013(1/10 ⁴) *
100 年後	1.296×10 ²	1.264	12.807	1.2996×10 ³	0.126	1.258×10 ⁻²
差分	0.361	3.61×10 ⁻²	0.193	0.385	4.21×10 ⁻³	4.21×10 ⁻⁴

* 括弧内は No.11 の初期値に対する倍率, ** 単位は[mg/L]

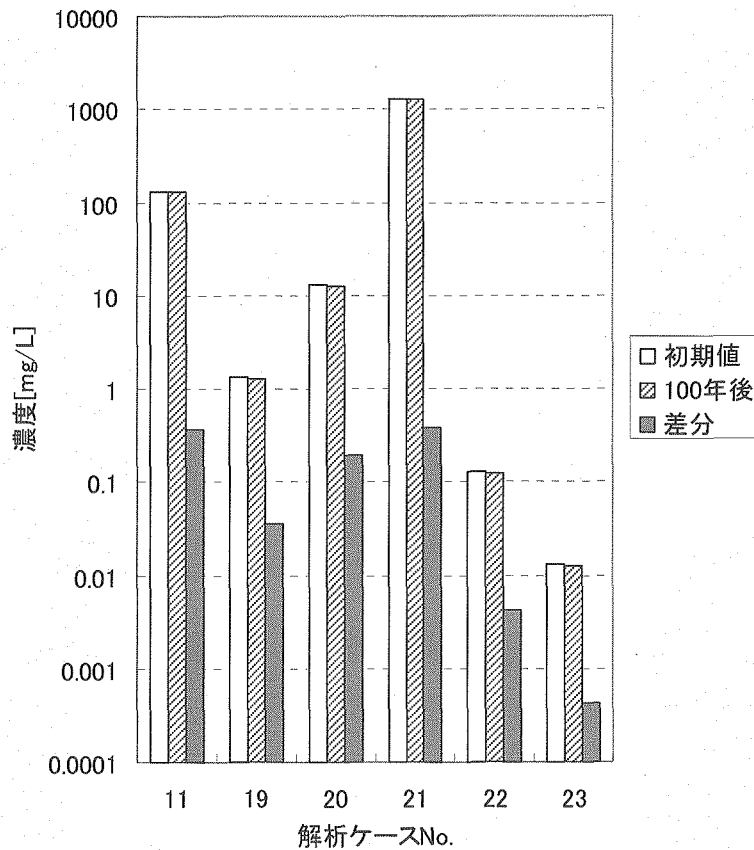


図 2.2.3-13 解析ケースごとの有機物濃度変化

d. 考察

以上から、特に重要と考えられる評価結果を選び、図 2.2.3-14 から図 2.2.3-18 に示す。

図 2.2.3-14 から図 2.2.3-16 に示す解析結果は、基準条件(HDB-6 の実測値)を初期値として解析を実施して求めた準安定状態の値と、硫酸イオン濃度の変動に対する電子受容体・メタン濃度の応答を示している。

図 2.2.3-14 では、初期値と解析結果を比較している。酸素・硝酸イオンが全量消費されていることの他、メタン濃度が上昇する傾向を示していることが特徴的である。その他の評価値の変化量は小さく、同条件下において安定であることを示唆している。メタンの生成は後述(図 2.2.3-18)するメタン生成菌の菌数の増加かつ活性向上に起因すると考えられる、

図 2.2.3-15 と図 2.2.3-16 では、それぞれ初期条件の硫酸イオン濃度を基準条件の 1/10, 10 倍にした場合の初期値と解析結果を比較している。解析の結果、初期条件の硫酸イオン濃度の減少・増加に相反する形でメタン生成量が増加・減少することが特徴的であった。酸素・硝酸イオンが全量消費される点は図 2.2.3-14 に示す結果と同様であった。また解析後の硫酸イオン濃度は、解析前に濃度を低減した場合にはさらに低減する傾向にあり、濃度を増加させた場合には、さらに増加する傾向を示したが、その変化率はメタン生成量の変化率と比較して非常に小さい値を示した。

図 2.2.3-17 は、図 2.2.3-14 から図 2.2.3-16 に示した解析後のメタン濃度を比較している。同図から、初期条件における硫酸イオン濃度減少 (1/10) に応答したメタン生成量増加率は 10 倍を超過しているのに対し、硫酸イオン濃度増加 (10 倍) に対しては、メタン生成量の減少率が約 1/10 に留まっていた。

図 2.2.3-18 では、上記解析における微生物量を比較している。最も特徴的な点は、初期値で観測されなかったメタン生成菌が、全条件で解析後に増加していることである。一方で、解析後における微生物量には相違が見られていないことから、この原因が解析コードのアルゴリズム等に由来するのか否かを今後確認していく必要があると考える。但し、解析コード中で、微生物には代謝群毎に活性度を示す係数を定義しており、微生物量の増減と電子受容体やメタン生成量の増減の傾向は必ずしも一致しないと考えられることから、この点にも留意して再評価が必要であると考えている。

上述した感度解析の結果に見られる傾向を、評価値の増減に関わる微生物群の名称と共に表 2.2.3-6 及び表 2.2.3-7 にまとめた。表 2.2.3-6 は、基準条件 (HDB-6 の測定値から選択；解析の初期条件・境界条件) と 100 年経過後の解析結果を比較し、解析結果が示唆する本来の安定な地下水環境の傾向を明示している。その傾向は、前述のとおり、微生物の代謝反応に伴う酸素及び硝酸イオンの早期の枯渇や、硫酸イオン濃度の減少に呼応した H_2S の増加、メタン生成菌とメタンの増加等に特徴がある。表 2.2.3-7 は、解析結果に高い感度が見られる硫酸イオン濃度の初期濃度と 100 年経過後の解析結果を比較し、硫酸イオン濃度の増減に応答したメタン生成の増減と硫酸イオン濃度自体の増減を明示している。

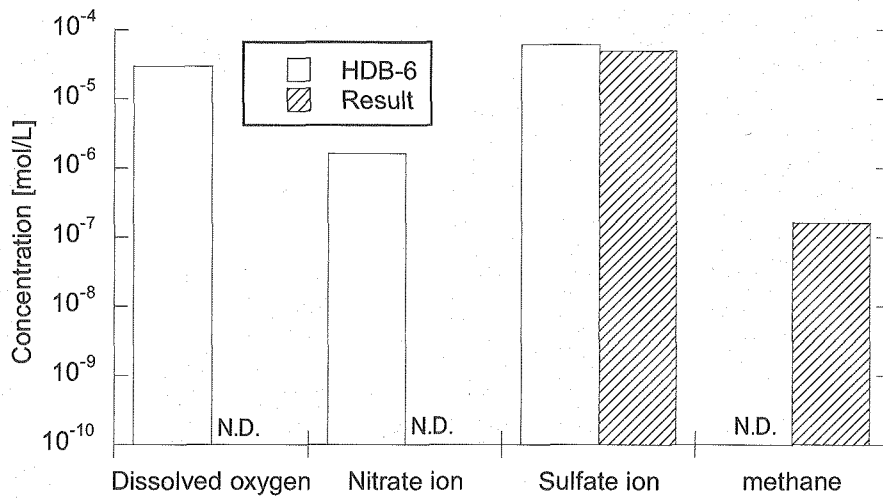


図 2.2.3-14 微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較（基準条件）

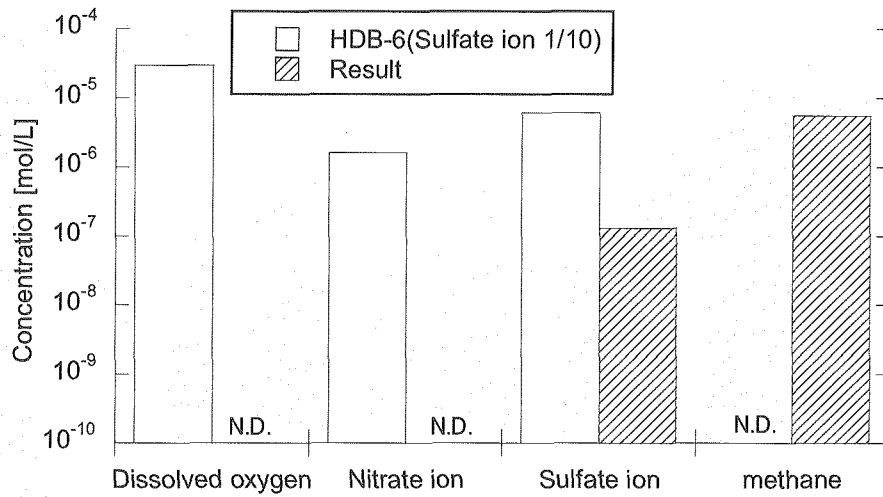


図 2.2.3-15 微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較（硫酸イオン濃度初期値；1/10）

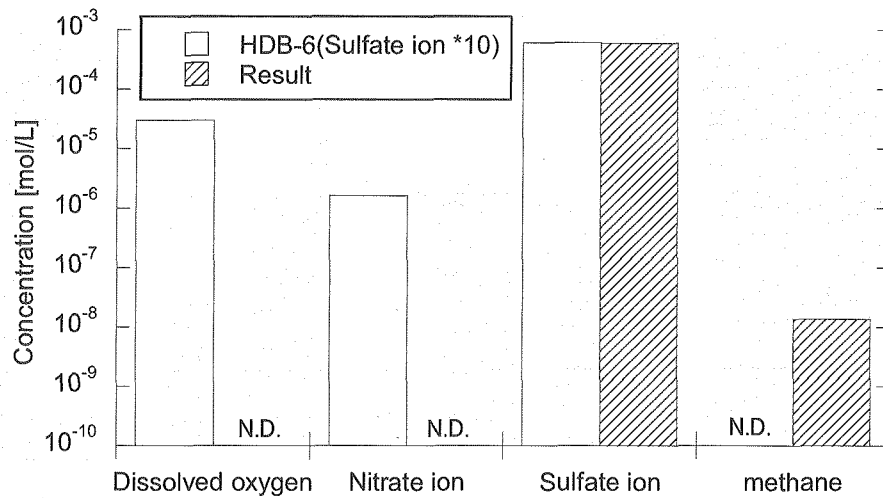


図 2.2.3-16 微生物代謝に係る主要な電子受容体濃度の比較（硫酸イオン濃度初期値；×10）

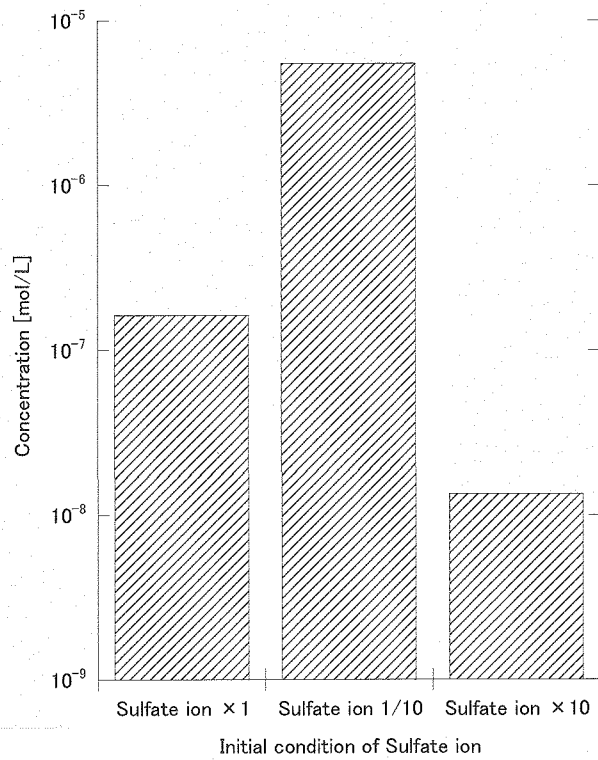


図 2.2.3-17 硫酸イオン濃度変化に対する生成メタン濃度の比較

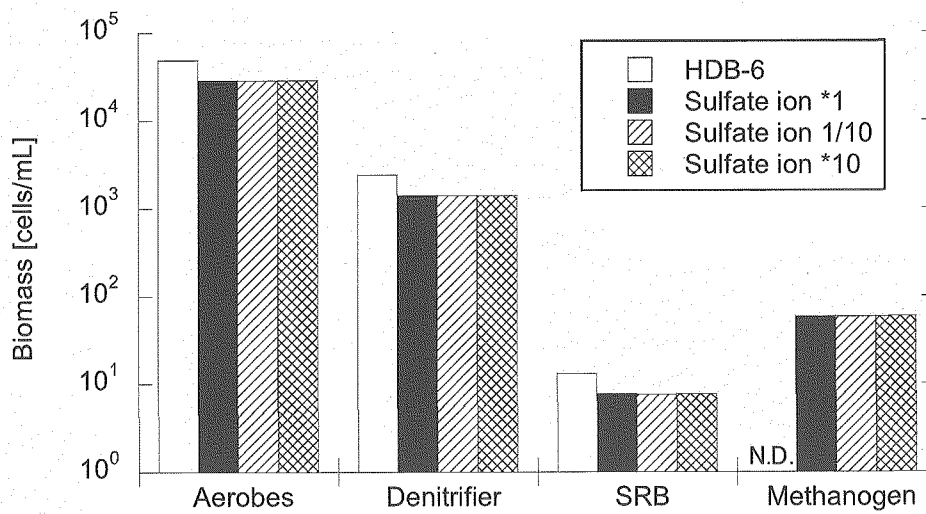


図 2.2.3-18 微生物量の比較

表 2.2.3-6 基準条件と解析結果が示唆する安定値の比較

評価値	関連微生物	Case11		備考
		基準条件	100年後, 100m	
酸素	好気性菌	0.95 [mg/L]	全量消費 ↓	好気性菌が極めて速く酸素を消費
硝酸イオン	脱窒菌	0.1 [mg/L]	全量消費 ↓	脱窒菌が極めて速く硝酸イオンを消費
酸化マンガン	マンガン還元菌	0.869[mg/L]	一定 ⇨	若干消費されるが、ほぼ一定
水酸化鉄	鉄還元菌	10.7[mg/L]	一定 ⇨	若干消費されるが、ほぼ一定
硫酸イオン	硫酸還元菌	5.9 [mg/L]	一定 ⇨	若干消費されるが、ほぼ一定
メタン	メタン生成菌	0 [mg/L]	増加 2.61×10^{-3} [mg/L] ↗	メタン生成可能性を示唆

表 2.2.3-7 硫酸イオン濃度に注目した感度解析結果の比較

評価値	関連微生物	Case11 (基準条件)	Case17 (硫酸イオン 1/10)	Case18 (硫酸イオン 10倍)
酸素	好気性菌	消費 ↓	消費 ↓	消費 ↓
硝酸イオン	脱窒菌	消費 ↓	消費 ↓	消費 ↓
酸化マンガン	マンガン還元菌	ほぼ一定 ⇨	ほぼ一定 ⇨	ほぼ一定 ⇨
水酸化鉄	鉄還元菌	ほぼ一定 ⇨	ほぼ一定 ⇨	ほぼ一定 ⇨
硫酸イオン	硫酸還元菌	若干減少 ↘	若干減少して測定下限値へ ↘	若干減少 ↘
メタン	メタン生成菌	増加 2.61×10^{-3} [mg/L] ↗	8.77×10^{-2} [mg/L] Case11の約30倍に増加 ↑	2.14×10^{-4} [mg/L] Case11の約1/10に低下 ↓

e. まとめ

MINT コードを使用した解析から、初期値に設定した既存の測定値 (HDB-6) は既に擾乱を受けた後の値であり、解析結果から、同環境で本来安定な地下水組成を推定することができた。また、MINT コードから推定される同地下水では、還元性環境が安定であることが推定された。処分場環境における安全評価上、地下水環境の酸化還元電位の評価は重要であると考えられる。また、メタン生成やメタン生成菌の増殖傾向が見られること、硫酸イオン濃度の増減がメタン生成量に影響する傾向が見られたことが特徴的であった。

以上を踏まえつつ、さらに3つの項目に関して考察した結果をまとめる。

従来の評価

地下水水質分析や各種代謝群の微生物量評価から推定された同掘削井の環境は、酸素濃度と脱窒菌の活性が高く、比較的高めの酸化還元電位 (Eh) を有する場と推定することも可能であった。そのため、同評価と解析評価が同一の傾向を示す場合、硝酸イオン濃度又は有機物濃度に微生物影響が律速される結果も予想された。

この原因として、従来地下水試料の評価手法において、化学分析の不確かさや蓄積データ量の不足、微生物の共存を前提としない試料の取り扱いなど、複数の要因が考えられ、結果的に擾乱を含むデータ群が主に評価されたこともその一因であったと考えられる。

解析結果を考慮した評価

上記の実測値を初期条件として実施した解析の結果、HDB-6 は予想された硝酸イオン濃度又は溶存有機物濃度依存ではなく、硫酸イオン濃度依存の環境であることを示唆する結果が得られた。

硫酸イオン濃度の増減に伴って、溶存メタン濃度がそれとは逆に増減した値で準安定となることを示す結果が得られていることから、同地下水環境が、硫酸イオン濃度の増減に伴って微生物由来のメタン生成の増減に影響している可能性を示唆していることが分かった。

考察に際して留意すべき事項

但し、同解析結果の評価に際しては、解析コード内のパラメータとして有機物濃度の生分解度など、HDB-6 の既存データには含まれない値を、所定の文献値としている。評価の定量性・信頼性向上のためには、これらの未測定データの評価が今後重要になると考える。

上述した硫酸イオン濃度変動に対応した溶存メタン濃度変動の可能性についても、その傾向を実測データに見出し得るか否か、可能な限り原位置条件を考慮した正確な評価が必要である。また、他のパラメータに対して同様に評価するためには、複数地点でのサンプル収集とそれぞれの地点における測定値の経時変化などを評価し、解析結果との比較・検証が必要になると考える。

2.2.4 今後の課題

従来よりも微生物影響に係るデータを高い信頼性で評価可能な掘削井の整備を進めると共に、以下の課題に取り組むことにより、解析評価の定量性・信頼性の向上が必要であると考ええる。

- ・ 解析コード MINT に与えるデータの信頼性向上

MINT には、表 2.2.2-1 に示す溶存化学種・微生物量等の変数の他、あらかじめ文献値や室内試験に基づいて得た反応速度係数などの諸定数が定義されている。これらの与条件の信頼性を向上するため、次項以降に示す測定・評価手法の改善の他、MINT が持つ解析モデルの再検討と改善に対して注力が必要であると考ええる。

- ・ 溶存ガス濃度の評価

本研究で評価の対象としている幌延深地層研究センター提供の地下水水質のデータ・微生物量の評価結果にのみ注目すると、同地下水環境は、硝酸イオン濃度、脱窒菌の菌数、Eh などの評価から、脱窒菌支配であると評価されてきた。しかし、本研究で解析コードに同データを設定して計算したところ、硫酸イオンとメタン濃度の相関性を示唆する結果が得られた。

この傾向が原位置で見られるかどうか確認するためには、評価位置におけるメタンを中心とした溶存ガス測定が必要であると判断される。また、測定した溶存ガス濃度を微生物由来として同解析コードで評価するためには、さらに深い位置で生成してから評価地点まで上昇してくるガスの影響等を排除する必要があると考えられる。

- ・ 代謝群毎の微生物の活性に影響する電子受容体に対する信頼性の高い評価手法の検討

本研究で実施した解析では、特に硫酸イオン濃度がメタン生成の律速条件になっている可能性を示唆していたが、地下水中の硫酸イオン濃度は測定下限に近い低濃度であり、有効数字の桁数は小さい。その結果、硫酸イオン濃度の過渡的变化に伴うメタン生成速度の定量性に含まれる誤差が大きくなり、仮に溶存ガス濃度としてメタン濃度が高い信頼性の下で得られたとしても、相関関係を明確に示すことができない可能性がある。現状のデータでも、解析コードで掘削井中の地下水水質及び過渡変化を定性的な傾向として評価することは可能であるが、本研究における解析評価において本来目的としている高い定量性の実現には課題が残る。

- ・ 原位置条件を考慮した評価手法の適用

サンプリングに伴う原位置条件の変化で、地下水水質に影響を与える要素（圧力・酸化還元電位など）を考慮した評価手法を確立していく必要がある。

- ・ 解析コードの検証・確証の実施

解析コードの解析機能の検証・確証を目的として、地球化学計算コード PHREEQC による評価結果との比較や、室内実験系の再現解析を実施し、解析の信頼性・定量性の向上を図る。

3. まとめ

3.1 微生物特性データの取得方法

地層処分における微生物影響について微生物活動の調査方法の確立を目的として、具体的地質試料を用いて、各微生物群の定量方法及び各微生物群による代謝活性など微生物特性データ取得方法の検討を行うための試料採取と採水試料の化学分析を行った。トレーサ蛍光染料と採水試料の蛍光スペクトルの比較により、十分に掘削水の影響が除去された採水試料を得ることができた。さらに、MPN法による微生物培養実験を行い、微生物影響シミュレーションモデルにおける、主要代謝微生物の計測を行った結果、幌延の地下水での過去のデータ範囲に入る結果が得られた。

今年度行った微生物影響を考慮した方法を用いた掘削により、新鮮な試料を得ることができ、これを用いて地盤調査、地質分析、水質分析及び微生物代謝活性の分析を行った。ここで得られた分析結果により、微生物影響シミュレーションモデルによる解析に必要な入力データが得られた。今後はさらに解析に必要なデータを取得するための方法の検討を行なう予定である。

3.2 微生物影響評価モデルの改良

平成16年度までに幌延深地層研究センターで観測された、地下水に関する各種の測定済データを使用して、解析コード(MINT)による微生物共存下で安定な地下水組成評価及び感度解析を実施した。

解析の結果、同地下水環境は酸素・硫酸イオンが早期に微生物に消費されて還元性を示すと共に、共存する微生物群のうち、硫酸還元菌とメタン生成菌の活性が高く、かつ硫酸イオン濃度の変遷に伴って地下水に溶存する微生物由来のメタン濃度が増減する傾向が予測された。

解析前の幌延の測定データから読み取れる同地下水環境は、比較的酸素濃度が高く脱窒菌の活性が最も高い環境であったが、上述の解析ではそれとは異なり、酸素・硝酸イオンの消費に続けてメタン生成菌が活性を持つほど低い酸化還元電位を予測している。

今後の安全評価においても、評価対象系における標準的な地下水環境の設定が重要な位置を占めると考えられるが、本研究の結果、MINTを使用することで従来の地球化学の知見を活用した評価や測定に加え、微生物共存下の地下水環境が評価可能であることを示唆する成果が得られた。

参考文献

- ¹ Karsten Pedersen, 'Microbial life in deep granitic rock', FEMS Microbiology Reviews, Volume 20, Issues 3-4, 399-414 (1997)
- ² エネルギー総合工学研究所(石川島播磨重工業(株), サイクル機構, 吉備国際大, 静岡大, 東京大, Sandia NL の共同プロジェクト): 革新的実用原子力技術開発 平成16年度成果報告書 第16分冊「地層処分に及ぼす微生物影響のシミュレーションに関する技術開発」(2005)
- ³ 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊3 安全評価手法の開発—”, JNC TN1400 2005-016 (2005)
- ⁴ 日本工業標準調査会: “JIS 工業用水試験方法 JIS K 0102”, 日本規格協会, (1998)
- ⁵ 日本工業標準調査会: “JIS 工業用水試験方法 JIS K 0101”, 日本規格協会, (1998)
- ⁶ 土壌微生物研究会: “土壌微生物実験法” 養賢堂, (1997)
- ⁷ 核燃料サイクル開発機構: “幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6,7,8)のうち HDB-6 孔”, JNC TJ5400 2005-004 (2005)
- ⁸ Hunter K. S., Wang Y., and Van Cappellen P.: Kinetic modeling of microbially-driven redox chemistry of subsurface environments: Coupling transport, microbial metabolism and geochemistry. J. Hydrol., 209, 53-80 (1998).
- ⁹ Wang Y. and Papenguth H. W.: Kinetic modeling of microbially-driven redox chemistry of radionuclides in subsurface environments: coupling transport, microbial metabolism and geochemistry. J. Contaminant Hydrol., 47, 297-309 (2001).
- ¹⁰ Corapcioglu, M. Y. and Haridas, A.: Transport and Fate of Microorganisms in Porous-Media - a theoretical Investigation, Journal of Hydrology, 72 (1-2): 149-169 (1984).

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
物質の量	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		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1	1

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	zepto	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	yocto	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光路差	メートル	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー	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, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量で区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ² ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	kg ² ・s ⁻²
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘透率	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 ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・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 ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G =10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe = (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx =10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ¹¹ x
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	1X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 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	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m