堆積岩地域の特徴を考慮した 地下水流動現象の解明と モデル化に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年2月

前田建設工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ 下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
 核燃料サイクル開発機構
 技術展開部 技術協力課
 電話:029-282-1122(代表)
 ファックス:029-393-7980
 電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2004

堆積岩地域の特徴を考慮した地下水流動現象の解明とモデル化に関する研究 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

井上 博之 石黒 健 久慈 雅栄 吉野尚人

要 旨

本委託業務では、幌延地域における地下深部の特徴を堆積岩地域の特徴の一例として取 り上げ、それらが性能評価上重要となる地下水の流動や移行経路にどのように影響を及ぼ すのかを把握することを目的として、以下の項目の検討を行った。

堆積岩地域における密度流解析手法の研究

幌延地域のモデル化および間隙水圧、塩分濃度に関する基礎検討

地下水流動、地温勾配および岩盤応力変形の連成解析手法に関する基礎研究

堆積岩地域の地下水流動シミュレーション解析の高速化に関する検討

その結果、既往の研究(今井他 2002 など)を参考として、2002 年度までの調査データ を入力データとして盛り込んだ幌延地域の水理地質構造をモデル化した。また、堆積岩地 域における密度流解析手法として多成分多層流解析コード TOUGH2(Karsten Pruess, et al., 1999)の適用性を確認し、岩盤中の異なる塩分濃度や特異な間隙水圧を考慮した解析が 可能であるとの見通しを得た。また、TOUGH2と岩盤応力変形解析コード FLAC3D(Itasca Consulting Group 1997)をカップリングした TOUGH-FLAC(Rutquvist J, et al., 2002) の適用性についても見通しを得た。さらに、大規模な計算に対応するために TOUGH2 の高 速化に関する検討を行い、効率的な高速化の方法と高速化が可能であることを示した。

本報告書は,前田建設工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により 実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室:東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グ ループ

前田建設工業株式会社

Feb, 2004

A study and modeling about ground water flow considering the properties of sedimentary soft rock

(Document Prepared Other Organization, Based on the Trust Contract)

Hiroyuki Inoue , Takeshi Ishiguro , Masayoshi Kuji , Naoto Yoshino

Abstract

In this paper, authors examined the properties of sedimentary soft rock which might affect the groundwater flow rate and flow path in the sedimentary soft rock. As a general sample of sedimentary soft rock, we focused on the rock of HORONOBE area in HOKKAIDO prefecture. Then, following four issues were examined.

1) a study of numerical flow rate analysis considering the difference of water density in the sedimentary soft rock.

2) the hydro-geological modeling of HORONOBE area and a fundamental study of water pressure and saline density in HORONOBE area.

3) a fundamental study of numerical coupling analysis about groundwater flow rate ,the difference of underground temperature, rock pressure and deformation.

4) a study about best performance of numerical flow rate analysis program.

As a result, hydro-geological modeling of HORONOBE area using the information before 2002 as input data was succeeded by using the basic geological model which was made by IMAI et al,. And the applicability of TOUGH2 program as analysis method considering the density difference of underground water in sedimentary soft rock was verified. Then, we will be able to simulate underground flow considering the difference of saline density and specific water pressure in HORONOBE area. In addition, the applicability of TOUGH-FLAC program in which TOUGH2 was coupled with FLAC3D and consider rock pressure and deformation was verified. The best numerical performance of TOUGH2 program was studied in order to deal with large scale simulations. Then, it was shown that efficient method of the best numerical performance about TOUGH2 was possible.

This Work was performed by Maeda Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works Maeda Corporation

1.はじめに	1
2.堆積岩地域における密度流解析手法の研究	2
2.1 研究の目的	2
2 . 2 室内実験	2
2 . 3 数值解析	4
2 . 3 . 1 解析方法	4
2 . 3 . 2 解析結果	5
2 . 4 数値解析結果と実験の比較	38
2 . 5 まとめと今後の課題	45
3. 幌延地域のモデル化および間隙水圧、塩分濃度に関する基礎検討	46
3 . 1 幌延地域の 3 次元水理地質構造のモデル化	46
3 . 1 . 1 研究の位置づけ	46
3 .1 .2 2002 モデルの概要	47
3 . 1 . 3 モデル化作成ツール	52
3.1.4 2002 モデルの取り込み方法	53
3.1.5 モデル化ステップ	57
3.1.6 モデル化検討結果	59
3 . 1 . 7 解析メッシュ化	73
3 . 1 . 8 問題点について	77
3 . 2 塩分濃度及び間隙水圧分布に関する解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	78
3.2.1 目的	78
3 . 2 . 2 解析方法	78
3 . 2 . 3 3次元解析モデル	80
3 . 2 . 4 解析結果	83
3 . 2 . 5 まとめと今後の課題	93
4 . 地下水流動、地温勾配および岩盤応力変形の連成解析手法に関する基礎研究・	94
4.1 研究の目的	94
4.2 解析の方法	94
4.2.1 連成解析の概念	94
4.2.2 基礎方程式	95
4 . 2 . 3 地下水流動と変形の連成	96

	4	. 3 モデルの設定・・・・・・	98
		4 . 3 . 1 基本設定	98
		4 . 3 . 2 地盤材料区分	100
	4	. 4 解析結果	102
	4	5 連成解析の適用性および今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
5	•	堆積岩地域の地下水流動シミュレーション解析の高速化に関する検討	108
	5	・. 1 解析コードの高速化を行なうための手法調査と性能チューニング	108
		5.1.1 ベクトル化とベクトル化の条件	109
		5 . 1 . 2 並列化	113
	5	. 2 性能チューニング後の解析コードの性能評価と例題解析	115
		5 . 2 . 1 TOUGH2P による性能チューニング	115
		5 . 2 . 2 TOUGH2 を高速化する際の検討	117
	5	. 3 大容量データ可視化のための調査・検討	120
6	•	おわりに	122
•		謝辞	124
•		参考文献	125

表目〉	欠
-----	---

表 3.1-1	水理地質一覧表	47
表 3.1-2	各ボーリングの地質境界面深度	57
表 3.1-3	地層境界面の標高比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
表 3.1-4	地層境界面の標高比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
表 3.1-5	地層境界面の標高比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
表 3.2-1	解析に用いた各層の透水係数一覧	82
表 3.2-2	逆解析による透水係数同定結果	87
表 4.3-1	解析に用いた地盤物性値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	101
表 5.1-1	地球シミュレータの基本性能	109
表 5.1-2	代表的な並列マシン	109
表 5.1-3	ベクトル化の対象範囲	111
表 5.2-1	TOUGH2 内のサブルーチンその 1	117
表 5.2-2	TOUGH2 内のサブルーチンその 2	118
表 5.2-3	メインプログラムの中で呼び出されているサブルーチン	118

义	目	次
---	---	---

図 2.2-1 著	密度流実験装置の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
図 2.2-2 冨	電気伝導度計測配置図 ······	3
図 2.3-1 著	密度流解析に用いた格子(左方境界:注水槽,右方境界:排水槽)	- 5
図 2.3-2 7	K位差 10mm における実験の写真と解析濃度分布の比較	6
図 2.3-3(1)	水位差 20mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(60 分~150 分後)	• 7
図 2.3-3(2)	水位差 20mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(180 分後)	8
図 2.3-4(1)	水位差 40mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(30 分~180 分後)	9
図 2.3-4(2)	水位差 40mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(240 分および 270 分後) …	10
図 2.3-5(1)	水位差 50mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(30 分~240 分後)	11
図 2.3-5(2)	水位差 50mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(300 分後)	12
図 2.3-6(1)	水位差 60mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(60 分~240 分後)	13
図 2.3-6(2)	水位差 60mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(300 分および 360 分後) …	14
図 2.3-7(1)	水位差 70mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(60 分~240 分後)	15
図 2.3-7(2)	水位差 70mm における実験の写真と	
	解析濃度分布の比較(300 分および 330 分後) …	16
図 2.3-8(1)	水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 1-10)	17
図 2.3-8(2)	水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 11-20)	18
図 2.3-8(3)	水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 21-30)・・・・・・・・・	19
図 2.3-8(4)	水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 31-40)・・・・・・・・	20
図 2.3-8(5)	水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 41-44)・・・・・・・・・	21
図 2.3-9(1)	水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 1-10)	22
図 2.3-9(2)	水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 11-20)	23
図 2.3-9(3)	水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 21-30)・・・・・・・・・	24
図 2.3-9(4)	水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 31-40)・・・・・・	25
図 2.3-9(5)	水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 41-44)・・・・・・・・・	26
図 2.3-10(1) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較 (測点 1-10)・・・・・・・・・・	27

図 2.3-10	(2) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較(測点 11-20)	28
図 2.3-10	(3) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較(測点 21-30)	29
図 2.3-10	(4) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較(測点 31-40)	30
図 2.3-10	(5) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較(測点 41-44)	31
図 2.3-11	水位差 10mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化	32
図 2.3-12	水位差 20mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化	33
図 2.3-13	水位差 40mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化	34
図 2.3-14	水位差 50mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化	35
図 2.3-15	水位差 60mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化	36
図 2.3-16	水位差 70mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化・・・・・・	37
図 2.4-1	底面から 80mm の線上における	
	30 分ごとの塩分濃度実測および解析結果	39
図 2.4-2	詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 10mm)	40
図 2.4-3	詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 40mm)	41
図 2.4-4	詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 70mm)・・・・・・	42
図 2.4-5	詳細メッシュによる塩分濃度 2.5%コンターの進行状況(水位差 10mm) …	43
図 2.4-6	詳細メッシュによる塩分濃度 2.5%コンターの進行状況(水位差 40mm) …	43
図 2.4-7	詳細メッシュによる塩分濃度 2.5%コンターの進行状況(水位差 70mm) ··	44
図 3.1-1	モデル化範囲位置図	48
図 3.1-2	2002 モデル外観図(今井他 2002)	48
図 3.1-3	2002 モデル側面図(今井他 2002)	49
図 3.1-4	断面位置図(今井他 2002)	49
図 3.1-5	代表断面での水理地質構造(今井他 2002)	50
図 3.1-6	断層付近詳細断面(今井他 2002)	51
図 3.1-7	要素を構成する節点番号	53
図 3.1-8	幌延地区の東西方向の模式地質構造	55
図 3.1-9	地質境界面節点の特定例	56
図 3.1-10	ボーリングデータによる検証と修正の概念	58
図 3.1-11	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J1 断面	59
図 3.1-12	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J7 断面	60
図 3.1-13	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J15 断面	60
図 3.1-14	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J21 断面	60
図 3.1-15	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J31 断面	61
図 3.1-16	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J44 断面	61
図 3.1-17	2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J57 断面	61
図 3.1-18	SK-1,D-1 の位置と断面位置図	62

図 3.1-19	SK-1,D-1 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映前(horonobe-21)…	63
図 3.1-20	SK-1,D-1 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-22)…	63
図 3.1-21	HDB-1,HDB-2 の位置と断面位置図	65
図 3.1-22	HDB-1 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映前(horonobe-31)	66
図 3.1-23	HDB-1 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-32)	66
図 3.1-24	HDB-2 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映前(horonobe-31)	67
図 3.1-25	HDB-2 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-32)	67
図 3.1-26	HDB-3,HDB-4 の位置と断面位置図	69
図 3.1-27	HDB-3 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映前(horonobe-41)	70
図 3.1-28	HDB-3 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-42)	70
図 3.1-29	HDB-4 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映前(horonobe-41)	71
図 3.1-30	HDB-4 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-42)	71
図 3.1-31	HDB-1 を通る地質断面図 ボーリングデータ反映後(horonobe-42)	72
図 3.1-32	horonobe-42 鳥瞰図	73
図 3.1-33	2002 モデル解析メッシュを用いた分割結果	74
図 3.1-34	六面体要素による分割結果(20×20×10)	75
図 3.1-35	六面体要素による分割結果(100×100×20)	76
図 3.2-1	解析に用いた格子分割図	
	(2002 モデルの有限要素法要素分割を TOUGH2 に変換) …	80
図 3.2-2	D-1 孔を含む東西断面における地盤材料分割図	81
図 3.2-3	低透水性層被覆率による透水係数逆解析結果の変化	83
図 3.2-4	低透水性層被覆率を変化させた	
	逆解析結果における D-1 孔沿いの水頭分布 …	84
図 3.2-5	断層の水理地質構造を変化させた場合の	
	D-1 孔深度別の水頭値分布解析結果	86
図 3.2-6	逆解析による D-1 孔沿いの全水頭値分布	87
図 3.2-7	逆解析による HDB-1 孔沿いの全水頭値分布	88
図 3.2-8	逆解析による HDB-2 孔沿いの全水頭値分布	88
図 3.2-9	逆解析による HDB-3 孔沿いの全水頭値分布	89
図 3.2-10	逆解析による HDB-4 孔沿いの全水頭値分布	90
図 3.2-11	逆解析による HDB-5 孔沿いの全水頭値分布	90
図 3.2-12	逆解析による HDB-6 孔沿いの全水頭値分布	91
図 3.2-13	逆解析による HDB-7 孔沿いの全水頭値分布	· 91
図 3.2-14	逆解析による HDB-8 孔沿いの全水頭値分布	92
図 4.2-1	TOUGH-FLAC3D 連成解析におけるデータの流れ	94
図 4.2-2	応力と間隙率の関係に関する模式図	96

図 4.2-3	連成解析における時間ステップとデータの流れ	97
図 4.3-1	解析要素全体図(要素数 22,320)	98
図 4.3-2	立坑周辺の要素拡大図	99
図 4.3-3	解析における地盤材料区分図	100
図 4.4-1	掘削直後における鉛直方向の変位コンター	102
図 4.4-2	掘削による X-方向の変位コンター	103
図 4.4-3	掘削による Y-方向の変位コンター	104
図 4.4-4	連成解析による立坑周辺の掘削に起因する最大せん断ひずみ	
	増分分布(深度 400m 付近、約 100m × 100m 領域) …	105
図 4.4-5	非連成解析による立坑周辺の掘削に起因する最大せん断ひずみ	
	増分分布(深度 400m 付近、約 100m × 100m 領域) …	105
図 4.4-6	立坑および地表面周辺での塑性化領域(赤:塑性化領域)	106
図 4.4-7	立坑および深度 350m 周辺での塑性化領域(赤,緑:塑性化領域)	106
図 5.1-1	スカラ命令とベクトル命令のイメージ	110
図 5.1-2	スカラ実行とベクトル実行の実行時間のイメージ	112
図 5.1-3	並列化のイメージ	113
図 5.1-4	並列化による実行時間短縮のイメージ	113
図 5.1-5	並列化率のイメージ	114
図 5.2-1	並列化の程度と計算時間の関係	115
図 5.2-2	問題規模と性能の関係	116
図 5.2-3	メインプログラム内の CALL 文で呼び出される	
	サブルーチンの消費時間	119
図 5.2-4	CYCIT 内のサブルーチンの消費時間	119

1.はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価においては、地表踏査段階、坑道掘 削段階および坑道を使用した調査段階と進展していく調査の各段階において、調査データ を観察・分析することによりサイトの特徴や特性を把握し、それらを性能評価のための水 理地質構造モデルや地下水流動モデル / 物質移行モデルの構築、およびモデル解析のため のパラメータ設定に適宜反映させることが肝要である。

サイクル機構殿は、処分事業の推進や安全基準等の策定に資するために、幌延地域の新 第三紀の堆積岩を研究対象として深地層の研究施設を建設する計画を進めており、2001 年度(平成 13 年度)から地表からの調査を開始している。幌延の深地層研究は、地表か らの調査段階、坑道を掘削しながら行う調査研究段階、および坑道を利用して行う調査研 究段階の3段階に分けられ、全体で20年程度実施される予定である。研究対象とする幌 延地域の新第三紀堆積岩中には塩水系の地下水と淡水系の地下水が存在し、地下水中には 溶存ガスが含まれていることが確認されている。また、地層中には地表面を大きく越える レベルの高さをもつ間隙水圧で被圧されている場所も確認されている。

本研究では、このような幌延地域における地下深部の特徴を堆積岩地域の特徴の一例として取り上げ、それらが性能評価上重要となる地下水の流動や移行経路にどのように影響 を及ぼすのかを把握することを目的として、

(1) 堆積岩地域における密度流解析手法の研究

(2)幌延地域のモデル化および間隙水圧、塩分濃度に関する基礎検討

(3)地下水流動、地温勾配および岩盤応力変形の連成解析手法に関する基礎研究

を実施する。また、幌延地域のモデル化に関しては、数 km スケールの領域を 3 次元モデルで解析することや連成解析を必要とすることから、

(4)堆積岩地域の地下水流動シミュレーション解析の高速化に関する検討 も併せて実施した。 2. 堆積岩地域における密度流解析手法の研究

2.1 研究の目的

沿岸堆積岩地域における地下水流動、物質移行のモデル化においては、淡水部と塩水部の流動の方向等が異なるため、いわゆる塩水くさびの形成による淡塩境界の位置を的確に予測できる密度流解析手法を持つことが重要な問題である。また、塩分濃度変化による密度分布は、一般的には深度とともに上昇するため、地熱の影響を考慮する際には、いわゆる熱対流を抑制するような影響を及ぼす(Kikkonen 1995 等)。

ここでは、MACRO を用いた淡塩境界形成の室内実験を、Lawrence Berkeley 国立研究所 (以下 LBNL と呼称)が開発した TOUGH2 密度流モジュールを用いた数値解析結果と比較す ることによって、TOUGH2 を用いた密度流解析手法の適用性の検討を行うとともに、次年度 以降の解析、室内実験の課題を抽出する。

なお、本章は LBNL 唐崎建二氏、伊藤一誠氏のご協力により実施している。

2.2 室内実験

密度流の室内実験は、ガラスビーズを充填した断面2次元モデルでの実験結果を用いた。実 験装置の概要を図2.1-1に示す。



図 2.2-1 密度流実験装置の概要

ここでは、左側の淡水注水槽の水位を右側の排水槽と比較して 10mm ~ 70mm の間で段階的 に高く維持し、右側の排水槽中を濃度 5%の塩水で満たすことで、排水槽から塩水を浸入させ ている。排水槽中の塩水はあらかじめ赤色に着色されている。ガラスビーズおよびフィルター としての焼結金属の透水係数は、別途カラム試験から求めている。データは、図 2.2-2 で示さ れた点で毎分自動計測された電気伝導度から換算された塩分濃度、および 30 分間隔で撮影さ れた写真が得られている。



図 2.2-2 電気伝導度計測配置図

2.3 数值解析

2.3.1 解析方法

数値解析は、LBNL で開発された TOUGH2 の密度流モジュールである EWASG (Water-Salt-Gas)(Battistelli et al., 1997)を用いた。EWASG は、液体相中の塩分濃度変化、気体相、温度変化を同時に取り扱うことのできる解析モジュールである。ここでは、成分としては水、NaCl, ガスの3成分を設定し、連続の式とダルシー則に基づき、それぞれの成分の質量保存を定式化している。同時に熱に関しても流体流動による熱の移動と熱伝導による内部エネルギー保存を定式化している。流動に関する基礎方程式と、熱に関する基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \right) = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} div \left(K \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} grad \left(P_{\beta} - \rho_{\beta} gz \right) \right) + \sum_{\beta} div \left(\rho_{\beta} D_{\beta}^{\kappa} grad X_{\beta}^{\kappa} \right)$$
(2.3-1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} + (1 - \phi) \rho_{R} C_{R} T \right) = \sum_{\beta} h_{\beta} div \left(K \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \operatorname{grad} \left(P_{\beta} - \rho_{\beta} g z \right) \right) + \sum_{\beta} div \left(\lambda \operatorname{grad} T \right)$$

$$(2.3-2)$$

ここで、(2.3-1)式中の $S_{\beta}(\beta = g, l)$ はそれぞれ気相、液相の飽和度、 $P_{\beta}(\beta = g, l)$ は気相お よび液相の圧力であり以上の4変数が主要な未知数である。2次的な未知数は、各相の粘性係 数 $\mu_{\beta}(\beta = g, l)$ 、相対浸透率 $k_{r\beta}(\beta = g, l)$ 、密度 $\rho_{\beta}(\beta = g, l)$ である。右辺第1項は相ごとの 流体の移動による移流項であり、右辺第2項は分散項である。液相 - 気相間の圧力である毛管 圧力および相対浸透率は、あらかじめ与えられたモデルによって液相の飽和度から計算される。 また各相の密度、粘性係数は圧力、温度および質量フラクションによって計算される。

また、(2.3-2)中の ρ_R は粒子の単位体積重量、 C_R は粒子の比熱、Tは温度、 u_β は相 β の比内部エネルギー、 h_β は相 β の比エンタルピー、 λ は熱伝導率である。ここでは、1 メッシュ内の粒子と流体は同じ温度と仮定されている。

なお、本解析では、塩分の拡散は影響が小さいことが予想されるためモデルに含まれていない。また分散に関しては、EWASGには含まれていないが、上流法によって数値分散が生じる。

(1)解析モデル

数値解析では、実験装置を断面 2 次元の差分格子に分割して計算を行った。図 2.3-1 に解析 に用いた格子を示す。



図 2.3-1 密度流解析に用いた格子(左方境界:注水槽,右方境界:排水槽)

未知数である圧力、濃度等は格子中心で求められるため、ここでは各濃度観測点が格子中心 となるように水平方向に20(フィルター部分含む)、鉛直方向に10分割を行った。なお、上方 および下方境界は不透水、左方は注水槽(淡水側)の水位に従った圧力固定、塩分濃度0の境界、 右方は排水槽(塩水側)の水位に従った圧力固定、塩分濃度5%の境界として設定した。

2.3.2 解析結果

EWASG の解析によって求められた各水位差における 30 分ごとの濃度変化を図 2.3-2~図 2.3-7 に示す。ここでは、実験によって得られた写真との比較のため、それぞれ対応する結果を 写真と並べた。

また、水位差 10mm,40mm,70mm のケースにおける各濃度観測点での濃度経時変化を図 2.3-8~図 2.3-10 に示す。各点における濃度経時変化データから、塩水フロントの進行と対応 する結果として、各ケースで排水槽中の塩水濃度の半分に当たる 2.5%濃度コンターの進行状況 を、実測データからのものと併記して図 2.3-11~図 2.3.16 に示す。



図 2.3-2 水位差 10mm における実験の写真と解析濃度分布の比較



図 2.3-3(1) 水位差 20mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(60分~150分後)



図 2.3-3(2) 水位差 20mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(180 分後)



図 2.3-4(1) 水位差 40mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(30分~180分後)



図 2.3-4(2) 水位差 40mm における実験の写真と解析濃度分布の比較 (240 分および 270 分後)



図 2.3-5(1) 水位差 50mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(30分~240分後)



図 2.3-5(2) 水位差 50mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(300分後)



図 2.3-6(1) 水位差 60mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(60分~240分後)



図 2.3-6(2) 水位差 60mm における実験の写真と解析濃度分布の比較 (300 分および 360 分後)



図 2.3-7(1) 水位差 70mm における実験の写真と解析濃度分布の比較(60分~240分後)



図 2.3-7(2) 水位差 70mm における実験の写真と解析濃度分布の比較 (300 分および 330 分後)





図 2.3-8 (2) 水位差 10mm における濃度経時変化の比較 (測点 11-20)









図 2.3-9 (1) 水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 1-10)





図 2.3-9 (3) 水位差 40mm における濃度経時変化の比較(測点 21-30)



図 2.3-9 (4) 水位差 40mm における濃度経時変化の比較 (測点 31-40)


- 26 -



図 2.3-10 (1) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較 (測点 1-10)







図 2.3-10 (4) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較 (測点 31-40)



図 2.3-10 (5) 水位差 70mm における濃度経時変化の比較 (測点 41-44)





図 2.3-11 水位差 10mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)





図 2.3-12 水位差 20mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)





図 2.3-13 水位差 40mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)





図 2.3-14 水位差 50mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)





図 2.3-15 水位差 60mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)





図 2.3-16 水位差 70mm における塩分濃度 2.5%コンターの時間変化 (上:実測値から作成、下:解析結果)

2.4 数値解析結果と実験の比較

前節に示した解析結果を見ると、各ケースに関して解析結果の経時的な塩分濃度変化は実測 と比較して立ち上がりが早く、塩分到達後の濃度上昇が遅い傾向を示している。また水頭差が 大きい場合、すなわち流速が大きな場合に、実測においては急激な濃度上昇が見られるのに対 し、解析結果では濃度上昇が緩やかになっている。これから、実測では分散の影響が小さいの に対し、解析結果では数値分散の影響が大きく出ていることが理解される。

濃度 2.5%コンターの進行状況では、実測値ではばらつきが出ているものの、水位差 10mm-40mmのケースでは、実測と解析では大きな誤差は見受けられない。ただし、水頭差が 50mm以上のケースでは、解析結果の進行状況は実測と比較して早い結果を示している。

鉛直方向での塩分濃度分布は、特に水頭差が大きくなるにつれ、実測では装置上部での塩分 濃度は観測されていないが、解析結果では濃度上昇が見られる結果となっている。

塩水くさびの浸入状況の比較のために、底面から 80mm 上部のセンサー列における 30 分ご との塩分濃度分布を、解析と比較して図 2.4-1 に示す。これから、底面近傍においては、水位 差 10mm のケースでは、各時間断面での平均的な濃度の到達距離は実測と解析でほぼ等しくな るが、水位差が大きくなるに従い、解析結果の方が、同じ時間においてより遠方まで到達して いることが示されている。

この理由としては、底面近傍と上部でのビーズの充填状況の違い等、実験条件上の問題も考 えられるが、多くは数値分散の影響と考えられる。数値分散は、一時近似的にはメッシュサイ ズに比例して生じるため、メッシュサイズを2cmの正方形(基本メッシュの1/5)として、水 位差10cm,40cm,70cmの3ケースに関して解析を行った。図2.4-2~図2.4-4に濃度分布解析 結果を、図2.4-5~図2.4-7に濃度2.5%コンターの進行状況を示す。

基本メッシュの解析結果と比較すると、濃度フロント周辺の分散は減少し、実測に近い形状 になっているが、濃度2.5%コンターの進行状況はより加速されている。この実験では粒径の揃 ったガラスビーズを用いているおり、いわゆる機械的分散の影響は小さいと考えられ、実験結 果もそれを支持する結果となっている。したがって、より詳細なメッシュ分割を用いた方が、 分散に関してはより現実的な結果を示していると考えられる。ただし、基本メッシュにおいて も、平均濃度フロントの移行に関しては実験結果と大きく外れたものではない。

- 38 -



図 2.4-1 底面から 80mm の線上における 30 分ごとの塩分濃度実測および解析結果 (黒:実測値,赤:解析結果)



図 2.4-2 詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 10mm)



図 2.4-3 詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 40mm)











図 2.4-4 詳細メッシュによる解析塩分濃度分布(水位差 70mm)



図 2.4-5 詳細メッシュによる塩分濃度 2.5%コンターの進行状況(水位差 10mm)



∆h=40mm, 2.5% Contour movement (Fine Grid)

図 2.4-6 詳細メッシュによる塩分濃度 2.5% コンターの進行状況(水位差 40mm)



図 2.4-7 詳細メッシュによる塩分濃度 2.5% コンターの進行状況(水位差 70mm)

2.5 まとめと今後の課題

以上の解析結果から、TOUGH2 密度流解析を用い、別途計測された物性値を用いた解析に よって、塩水くさび実験結果と比較的近い結果を得ることが可能であった。しかしながら、解 析結果は空間的離散化によって平均濃度フロントの進行速度、フロント近傍での濃度分散状況 において異なる結果を示すため、次段階では詳細メッシュを用いた逆解析によって、ガラスビ ーズの透水係数、間隙率の同定を行うべきであると考えられる。また、実験に関しても、写真 撮影状況からの画像解析による濃度分布の同定等、より詳細な解析が望まれる。

また、TOUGH2 のような一次上流差分を用いると、特に流速が大きい場合における数値分 散の影響が大きいことが示された。実際のサイトスケールで密度流、物質移行の解析を行う場 合、透水係数、動水勾配によって流速が決定されるため、あらかじめモデルから最適なメッシ ュ分割を行うか、あるいは濃度フロント近傍での自動詳細分割等、数値分散を低減させるため の改良が望ましいと考えられる。 3. 幌延地域のモデル化および間隙水圧、塩分濃度に関する基礎検討

3.1 幌延地域の3次元水理地質構造のモデル化

3.1.1 研究の位置づけ

北海道・幌延地域は、新第三紀の堆積岩が広く分布している地域であり、それを堆積岩地域の特徴の一例として取り上げ、深地層の研究施設を建設する計画が進められている。

幌延地域の3次元水理地質構造モデル化に関しては、サイクル機構において2001年度
(平成13年度)に検討された幌延地域の3次元水理地質構造モデル(今井他2002、以下2002モデルと呼称)がある。

2002 モデルは、2000 年度までの調査データ、あるいは公表データに基づいて作成されており、それ以降の調査データは反映されていない。

そこで、この 2002 モデルを基本モデルとして、2001 年度(平成 13 年度)および 2002 年度(平成 14 年度)に取得された試錐調査データ、あるいは 2000 年度(平成 12 年度) 以前に幌延地域を対象として実施された地質環境調査のうち、公開文献データをモデルへ 取り込み、また解析メッシュの細分化を行うことによりモデルの改良を実施するものであ る。 3.1.2 2002 モデルの概要

2002 モデルは、既存の研究成果(今井他 2001)により得られた5 断面の地質断面図を ベースにして、東西、南北ともに約57km、深度5km までの範囲を3次元メッシュ化した ものである。3次元メッシュは東西方向65 要素(66 節点)南北方向60 要素(61 節点) 深度方向20 要素(21 節点)で構成されており、メッシュ総数は78000 要素(84546 節点) となっている。

水理地質は、表 3.1-1 に示すように、合計 11 種類に分割されている。なお、番号に付されている色は、地質を示す各種図面上の色を意味している。

番号	地質名	備考
1	白亜紀層	基盤岩
2	増幌層~古第三紀	
3	稚内層	
4	声問層	
5	勇知層	
6	第四紀層、更別層	
7	大曲断層・側部	主部の両側に幅 50m
8	大曲断層・主部	幅 50m
9	N系断層・側部	主部の両側に幅 50m
1 0	N系断層・主部	幅 50m
1 1	表層堆積物、段丘堆積物	層厚 50m

表 3.1-1 水理地質一覧表

このうち、表層堆積物は地表面から一律 50m の範囲としている。また、大曲断層およびN系断層については、主部と両側に位置する側部をそれぞれ幅 50m としており、断層 全体は 150m の層厚を一律に設定している。

図 3.1-1 に位置図、図 3.1-2 にモデル外観図、図 3.1-3 に東西南北の側面図、図 3.1-4 に 断面位置図、図 3.1-5 に代表的な6 断面の地質断面図、図 3.1-6 に断層付近の詳細図を示 す。



GEORAMA モデル範囲(57km×57km)





図 3.1-2 2002 モデル外観図 (今井他 2002)



(d) 北断面

図 3.1-3 2002 モデル側面図 (今井他 2002)



図 3.1-4 断面位置図 (今井他 2002)



図 3.1-5 代表断面での水理地質構造 (今井他 2002)



図 3.1-6 断層付近詳細断面 (今井他 2002)

3.1.3 モデル化作成ツール

3次元水理地質構造のモデル化にはいくつかの方法があるが、上記のように今後増えて いく調査データをうまくモデルに反映できることが重要である。また、メッシュ数につい ても比較的自由に分割数などを設定できることが望ましい。

2002 モデルは、3次元メッシュ化に当たり専用のメッシュ生成プログラムを作成して構築されており、要素分割パラメータはその都度設定するという汎用性に欠ける作成方法がとられている。このため、今後続々と上がってくる最新の調査データを反映することが容易ではないのが現状である。

また、サイクル機構では3次元地質モデルの可視化に当たり、DYNAMIC GARPHICS 社製 EarthVision を使用している。本ソフトは、地質の微細な表現を得意としており、幌 延地域の地質構造可視化にも使用されている。しかしながら、本ソフトはメッシュ生成に 対応していない。また、複雑なモデルを表現するためにはノウハウが必要となり、誰でも が自由に扱えるものではないきらいがある。

そこで、今回は CRC ソリューションズ製 3 次元地質解析システム「GEORAMA」を用 いてモデル化を実施することとした。GEORAMA の特徴は次のとおりである。

- ・ 3次元的に完全に整合の取れたモデルを作成
- ・ 地質情報を追加することにより、常にモデルのバージョンアップが可能
- ・ 鳥瞰的表示、断面表示、メッシュジェネレートに対応
- PC ベース、Win98 以上で動作
- 作成データは Viewer(free)でどこでも閲覧可能(変更不可)
- ・ 地層の3次元分布を補間する方法としては、最適化原理(例えば、井上 1985、 塩野他1987、小池他1997)を採用

GEORAMA は、地質を地質境界面で囲まれた領域として表現するため、新しい情報を 入力することにより地質境界面を修正することが可能である。メッシュ作成は、地質境界 面分布をベースとして作成されるため、常に両者の整合性が取られているという特徴を有 している。ただし、補間法として最適化原理を採用しているが、3次元の最小二乗法のよ うな処理を行うため、必ずしも入力点を通らない点が問題となる。しかし、後述のように 入力データの確実性を考慮し、確実性の低いデータを削除することにより、その影響を小 さくすることができる。

また、GEORAMA では解析領域は矩形領域に限定されているため、今回は 2002 モデル を包含するように解析領域を設定した。図 3.1-1 に解析領域を合わせて示す。 3.1.4 2002 モデルの取り込み方法

2002 モデルは、3 次元メッシュの数値データがテキストファイルとして供給されており、 各種のテキストエディタで容易に利用できる状態にある。メッシュデータ FEM.data は、 次のような構造を示している。

2002 モデル "FEM.data" のデータフォーマット

1行目:タイトル

2行目:26~30カラム=節点総数(84546)

31~35カラム=要素総数(78000)

5行目より節点座標(節点数だけ繰り返し)

1~5カラム=節点番号

11~25 カラム = ×座標

26~40 カラム= y座標

41~55 カラム = z座標

84551 行目より要素・節点結合関係、物性区分

1~5カラム=要素番号

11~15カラム=物性区分グループ番号

26~30カラム=要素を構成する節点数

31~35 カラム = 要素の節点1の全体での節点番号

36~40 カラム = 要素の節点 2 の全体での節点番号

41~45 カラム=要素の節点3の全体での節点番号

46~50 カラム = 要素の節点 4 の全体での節点番号

51~55 カラム = 要素の節点 5 の全体での節点番号 56~60 カラム = 要素の節点 6 の全体での節点番号

61~65 カラム = 要素の節点 7 の全体での節点番号

66~70 カラム = 要素の節点 8 の全体での節点番号



図 3.1-7 要素を構成する要素内での節点番号

Horono	be GW	/F-3D	Mode	I-2002	2 ver.	1												
1	11	701	3477	35388	845467	8000	0	1	1	0								
1	1	25	33	0	0	0.2	2E-03	0.2	2E-03									
	1.00		1.00								~							
1		-0.7	98181	8E+04	0.60	2744(0E+03	-0.55	575807	E+02								
2		-0.6	73409	1E+04	0.52	7401	0E+03	-0.5	193959	E+02								
3		-0.5	48636	4E+04	0.45	2058	0E+03	-0.47	733888	E+02								
4		-0.4	23863	6E+04	0.37	6715	0E+03	-0.4	190315	E+02								
												-				-		
													節点	座標				
84541		0.1	56079	4E+05	0.52	9893	5E+05	-0.50	000000	E+04	(~ L				1		
84542		0.1	62296	6E+05	0.53	1391	6E+05	-0.50	000000	E+04								
84543		0.1	70586	3E+05	0.53	3389(0E+05	-0.50	000000	E+04								
84544		0.1	78875	9E+05	0.53	5386	5E+05	-0.50	000000	E+04								
84545		0.1	89238	0E+05	0.53	78832	2E+05	-0.50	000000	E+04								
84546		0.1	99600	0E+05	0.54	0380	0E+05	-0.50	000000	E+04								
1	1	11	1	1	8	4027	4028	4094	4093	1	2	68	67					
2	1	11	1	1	8	4028	4029	4095	4094	2	3	69	68					
3	1	11	1	1	8	4029	4030	4096	4095	3	4	70	69					
4	1	11	1	1	8	4030	4031	4097	4096	4	5	71	70					
5	1	11	1	1	8	4031	4032	4098	4097	5	6	72	71					
6	1	11	1	1	8	4032	4033	4099	4098	6	7	73	72					
															\setminus	要素	・節点	Ā
77994	1	1	1	1	88	4473	344748	845408	345398	044780	04488	05148	0513		/ L			
77995	1	1	1	1	88	44748	84475	845418	345408	044880	04498	05158	0514					
77996	1	1	1	1	88	44758	84476	845428	345418	044980	04508	05168	0515					
77997	1	1	1	1	88	44768	844778	845438	345428	045080	04518	05178	0516					
77998	1	1	1	1	88	88447784478845448454380451804528051880517												
77999	1	1	1	1	88	4478	844798	845458	345448	045280	04538	05198	0518					
78000	1	1	1	1	88	44798	84480	845468	345458	045380)4548	05208	0519					

これらのデータは FEM メッシュデータであり、GEORAMA では地層境界面の座標デ ータが必要となるため、このメッシュデータをダイレクトに GEORAMA に取り込むこと はできない。

そこで、2002 モデルを 20 層の平面図に展開し、各平面において地層境界面を特定し、 その3次元座標データをリストから拾い出し、GEORAMA に取り込む方法により行った。 図 3.1-8 に本地域の東西方向の模式地質構造をしめす。地質は、最上位に表層堆積物が 分布し、第四紀層、勇知層、声問層、稚内層、増幌層が順に堆積し、基盤岩として白亜紀 層が領域周辺を包むように分布している。その中を大曲断層とN系断層が縦断する構造と なっている。なお、白亜紀層と他の堆積岩とは不整合構造である。



図3.1-8 幌延地域の東西方向の模式地質構造

そこで、各地層の層序関係を考慮し、第四紀層、勇知層、声問層、稚内層の下面位置、 白亜紀層の上面位置の位置を平面図上で節点番号として特定した。図 3.2-9 に節点の特定 例を示す。図は上が東側、左が北側を示し、東西 65 要素(66 節点)、南北 60 要素(61 節点) を座標を無視して平面上に描いたもので、図中の色は表 3.1-1 とは異なるものの地質区分 を、色が抜けている部分は大曲断層(下側)および N 系断層(上側)を示している。図で は声問層(図中黄色)と稚内層(図中オレンジ色)の境界に位置する節点を声問層の下面 データとして、上から4層目の節点分布から特定している状況である。このようにして、 地質毎に特定した節点番号に対応する座標を3次元座標データリストから抽出し、これを 地層境界面のデータとした。また、各断層は縦断方向に連続した節点で構成されているの で、全てのデータを抽出した。さらに、表層堆積物は最上位の1層目の要素が相当するた め、その節点を全て抽出した。 なお、この段階では地質の折れ曲がり点などは全てピックアップしている。前述のよう に GEORAMA では補間方法の関係で地質境界面が全ての入力点を通ることはできないこ と、および 2002 モデルが FEM メッシュへの離散化の過程で本来の地質分布からは多少 のずれが生じていることから、矛盾がない限り多くのデータを入力することにより、でき るだけ自然な分布になるようにするためである。





図 3.1-9 地質境界面節点の特定例

3.1.5 モデル化ステップ

今回のモデル化は、最新データまで全て入れ込んで、現時点での最新モデルを構築する ことだけが目的ではなく、各調査段階でのモデルが調査データが増えることによりどのよ うに変化していくのか、その過程を追うことも目的としている。

- したがって、モデル化のステップは以下のように設定した。
 - Step.1 2002 モデルの GEORAMA での再現(文献調査段階の位置づけ)
 - Step.2 既存ボーリング(SK-1;地球科学総合研究所 1999,D-1;動燃 1987)による 検証と反映
 - Step.3 2002 年度調査データ(調査ボーリング HDB-1;山本他 2002a,HDB-2;山 本他 2002b)による検証と反映
 - Step.4 2003 年度調査データ(調査ボーリング HDB-3,HDB-4;サイクル機構 2003) による検証と反映

なお、2003 年度の調査では HDB-5 も実施しているが、全てのデータを網羅的に反映さ せる必要がないこともあり、今回のモデル化には取り入れていない。

図 3.1-1 にボーリングデータ位置図を合わせて示す。また、表 3.1-2 に各ボーリングに おける地層境界面の深度を示す。

	Х	у	Z	長さ	第四紀層	勇知層	声問層	稚内層	増幌層他	白亜紀層
SK-1	3905	20975	21.681	4501	-	23	581	1192.4	3026.4	4501以深
D-1	12055	31750	13.560	1355	349.2	886.6	1355以深			
HDB-1	9300	32000	69.102	720	-	-	321	720以深		
HDB-2	13680	27300	42.529	720	-	-	56.69	720以深		
HDB-3	8750	32400	58.192	520	-	-	381.7	520以深		
HDB-4	10140	33460	63.610	520	-	-	128.3	520以深		
HDB-5	10550	32940	76.768	520	-	-	68.5	520以深		

表3.1-2 各ボーリングの地質境界面深度(孔口からの深度)

備考 SK-1 増幌層他 増幌層 1900.9

	"	鬼志別層	2796.5
	"	羽幌層	3026.5
	白亜紀層	函渕層	3778.3
D-1	第四紀層	更別層	349.2

SK-1は穴曲がりしており、最大80m程度の偏距があるが、モデル全体に与える影響は少ないので 純深度のみを入力データとした

また、調査ボーリングによる検証と修正の概念を図 3.1-10 に示す。2002 モデルでは 5 断面を線形補間することにより 3 次元モデルを構築しており、その離散化 FEM メッシュ データを基本形状として今回のモデルを作成している。したがって、モデル化に用いた各 入力データの不確実性は、相対的には高いものと判断される。一方、各ボーリングにより 確認された地質境界面の深度データは、不確実性は全くない。したがって、データの確度 ではボーリングデータが圧倒的に優先されるべきである。

そこで、まずボーリングデータを反映していないモデルでボーリング位置を含む断面図 を作成し、ボーリング柱状図を表示した上で地層境界面の標高の差異を確認する。次に、 ボーリングデータを含んだモデルで断面図を作成、その標高の差異ができるだけ小さくな るように不確実性の高い既存データを削除してモデルを構築することとした。



図 3.1-10 ボーリングデータによる検証と修正の概念

3.1.6 モデル化検討結果

(1) Step.1 2002 モデルの再現

2002 モデルを再現したモデルを horonobe-1 モデルとして構築した。図 3.1-11 ~ 図 3.1-17 においてその結果を 2002 モデルで示されている 7 断面で比較した。なお、この段 階では 2002 モデルは離散化メッシュで示し、horonobe-1 モデルは GEORAMA で作成さ れる連続モデルで示すこととする。これは、もともと 2002 モデルが離散化メッシュを元 データとしている点で horonobe-1 モデルは完全に 2002 モデルを再現しきれないことから、 メッシュ単位で比較することは難しいと考えられるためである。また、2002 モデルの断面 図は今井他(2002)からの抜粋であるが、horonobe-1 の断面図は矩形モデルの断面図であり、 2002 モデルの範囲より広い領域を描いている。そこで、図において 2002 モデルの範囲が 対応するように示した。

図 3.1-11~図 3.1-17 に示すように、全体の傾向としては、horonobe-1 モデルは 2002 モデルを再現することにほぼ成功している。しかしながら、個々の部分で見ると、若干あ わない部分もあり、特に凹凸の激しい部分でやや差異が目立つ。差異がある部分を図中に 青丸で示す。これは、2002 モデルが離散化モデルであるのに対して horonobe-1 が連続モ デルであることから、断面位置の影響を排除することが難しいことも一因となっている。。 ただし、全体としては水理地質構造として大局に影響を与えるほどの差異ではないと考え、 これを基本データとして扱うものとする。



図 3.1-11 2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J1 断面



図 3.1-14 2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J21 断面



図 3.1-15 2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J31 断面





2002 モデル 図 3.1-16 2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J44 断面



図 3.1-17 2002 モデルと horonobe-1 モデルの比較 J57 断面
(2) Step.2 既存ボーリング(SK-1,D-1)による検証と反映

基本データ horonobe-1 に既存ボーリング(SK-1,D-1)を重ねた結果(horonobe-21)を図 3.1-18 に平面図と断面位置図、図 3.1-19 に断面図として示す。2002 モデルは既存ボーリ ングも参照していたこともあり、全体の傾向としては特徴を捉えているが、個々の地層境 界面で見ると標高の差異が認められる。

これに対し、図 3.1-20 に既存ボーリングをデータとして反映した場合(horonobe-22)の 断面図を示す。SK-1 については稚内層下部(図中青丸で示す)および増幌層下部の標高 差が改善され、D-1 については第四紀層、勇知層ともに標高差が改善されている。



図 3.1-18 SK-1, D-1 の位置と断面位置図



図 3.1-19 SK-1,D-1 を通る地質断面図(深度方向 5 倍で表示) ボーリングデータ反映前 (horonobe-21)



図 3.1-20 SK-1,D-1 を通る地質断面図(深度方向 5 倍で表示) ボーリングデータ反映後 (horonobe-22)

表 3.1-3 に断面図においてボーリング地点における画面上で計測される各地層境界面の 標高とボーリング調査での標高を示す。元々の標高の差異が大きい境界面標高、たとえば SK-1 の稚内層下部などでは改善効果が大きいが、標高の差異が小さい境界面標高、たと えば SK-1 の勇知層下部などについては改善効果が小さい状況にある。前述の補間方法と して最適化原理を用いている関係から、ボーリング調査結果とモデルとは完全に一致して いないが、ここでの誤差は 100m 程度である。この誤差の大きさは、モデルの大きさ(57km × 57km × 5km)を考慮すると十分に小さい。また、2002 モデル地層境界面の 1 メッシュの 高さ(深度方向の分解能に相当)は、深度 1100m 付近では 200m 程度、同じく深度 3000m 付近では 350m 程度と、ここで得られた誤差に対して 2 倍から 3.5 倍程度を示し、元デー タに影響されているものと考えられる。ただし、後に述べる立坑予定地点周辺でボーリン グデータが増すと、誤差の大きさはより改善できることから、目的とする水理地質モデル への影響は少ないものと考えられる。

ボーリング名	地層境界面	地層境界面標高		
		horonobe-21	horonobe-22	ボーリング
SK-1	勇知層下部	-9.04	-10.62	-1.32
	声問層下部	-605.70	-599.81	-559.32
	稚内層下部	-1486.21	-1271.22	-1170.72
	増幌層下部	-3125.57	-3090.84	-3004.72
D-1	第四紀層下部	-428.12	-369.67	-335.64
	勇知層下部	-967.49	-915.08	-873.04

表3.1-3 地層境界面の標高比較

(3) Step.3 2002 年度調査データ(HDB-1, HDB-2)による検証と反映

Step.2 の horonobe-22 を基本として、調査ボーリング(HDB-1,HDB-2)を重ねた結果 (horonobe-31)を図 3.1-20 に平面図と断面位置図、図 3.1-21 および図 3.1-23 に断面図とし て示す。特に HDB-1 の声問層下部の地層境界面(図中青丸で示す)の標高が大きく異な る結果となった。

これに対し、図 3.1-22 および図 3.1-24 に調査ボーリングをデータとして入力した場合 (horonobe-32)の断面図を示す。HDB-1 の声問層下部の標高差が改善されているものの、 その差異はまだ大きい。



図 3.1-21 HDB-1, HDB-2 の位置と断面位置図



図 3.1-23 HDB-1 を通る地質断面図(深度方向 5 倍で表示) ボーリングデータ反映後 (horonobe-32)



図 3.1-24 HDB-2 を通る地質断面図(深度方向 5 倍で表示) ボーリングデータ反映前 (horonobe-31)



ボーリングデータ反映後 (horonobe-32)

表 3.1.4 に断面図において各ボーリング地点における画面上で計測される各地層境界面 の標高とボーリング調査での標高を示す。元々の標高の差異が大きい境界面、たとえば HDB-1 の声問層下部の標高では改善効果が大きいが、標高の差異が小さいもの、たとえば HDB-2 の声問層下部の標高については改善効果が小さい状況にある。前述の補間方法とし て最適化原理を用いている関係から、ボーリング調査結果とモデルとは完全に一致してい ないが、HDB-1 では差異は 200m 程度とこれまでで最も大きくなっている。これは、断 層に近い位置で推定データが少ないためと考えられる。ただし、この次のステップにおい て HDB-3 のデータを加えた時点で既存データを再度見直した結果、非常によい結果が得 られている。この結果については後述する。

ボーリング名	地層境界面	地層境界面標高		
		Horonobe-31	horonobe-32	ボーリング
HDB-1	声問層下部	-846.99	-457.63	-251.90
HDB-2	声問層下部	-42.84	-39.28	-14.16

表3.1-4 地層境界面の標高比較

(4) Step.4 2003 年度調査データ(HDB-3, HDB-4)による検証と反映

Step.3 の horonobe-32 を基本として、調査ボーリング(HDB-3,HDB-4)を重ねた結果 (horonobe-41)を図 3.1-26 に平面図と断面位置図、図 3.1-27 に HDB-3 の断面図、図 3.1-29 に HDB-4 の断面図として示す。特に HDB-3 地点の声問層下部の地層境界面(図中青丸で 示す)の標高が大きく異なる結果となった。

これに対し、図 3.1-28 および図 3.1-30 に調査ボーリングをデータとして入力した場合 (horonobe-42)のそれぞれの断面図を示す。HDB-3 および HDB-4 地点の声問層下部の標 高が非常に良く改善されていることがわかる。また、図 3.1-31 に HDB-1 の断面図を示す。 HDB-3 を入力データとしたことにより、近傍の HDB-1 地点の声問層下部の標高(図中青 丸で示す)も改善されたことがわかる。



図 3.1-26 HDB-3, HDB-4 の位置と断面位置図









ボーリングデータ反映後 (horonobe-42)



図 3.1-31 HDB-1 を通る地質断面図(深度方向 5 倍で表示) ボーリングデータ反映後 (horonobe-42)

表 3.1-5 に断面図において各ボーリング地点における画面上で計測される各地層境界面の標高とボーリング調査での標高を示す。本モデルでは地層境界面の標高が非常に良く改善された。前述の補間方法として最適化原理を用いている関係から、ボーリング調査結果とモデルとは完全に一致していないが、標高の誤差は最も大きいもので 23m 程度、立坑予定地周辺となる HDB-3 では 5m 程度と、良い結果をもたらすことができた。

ボーリング名	地層境界面	地層境界面標高		
		Horonobe-41	horonobe-42	ボーリング
HDB-3	声問層下部	-744.71	-318.49	-323.51
HDB-4	声問層下部	-9.21	-55.51	-64.69
HDB-1	声問層下部	-457.63	-228.69	-251.90

表3.1-5 地層境界面の標高比較

3.1.7 解析メッシュ化

上記で作成した地質モデルを解析メッシュに割り当てる。GEORAMA では、3種類の 解析メッシュの作成方法が準備されている。

地層境界面に沿って各地質を分割して作成する

いわゆる6面体要素(直方体要素)を作成し、その重心座標の地質を割り当てる

既に作成されている解析メッシュに対して、新しい地質分布を割り当てる

このうち、の方法は今回のモデルの中の大曲断層、およびN系断層が非常に高角度に 分布するためにうまく形成できない。一方、その他の2種類については、比較的容易に解 析メッシュ形成が可能であり、変更等も容易である。

ここで、図 3.1-32 に horonobe-42 の鳥瞰図、図 3.1-33 に 2002 モデルと同一の解析メ ッシュによる分割結果(縦 60×横 65×深さ 20、要素数 78000)を、図 3.1-34 に6 面体要 素での分割結果(縦 20×横 20×深さ 10、要素数 4000) および図 3.1-34 に同じく6 面体 要素での分割結果(縦 100×横 100×深さ 20、要素数 200000)に示す。なお、図は深さ 方向を5倍に拡大して表示している。また、斜め右上が東方向、斜め左上が北方向に相当 する。

今後、解析の目的等を考慮し、最適な解析メッシュを供給することが可能である。



図 3.1-32 horonobe-42 鳥瞰図(深さ方向 5 倍に拡大)



図 3.1-33 2002 モデル解析メッシュを用いた分割結果(深さ方向5倍に拡大)



図 3.1-34 六面体要素による分割結果(20×20×10) (深さ方向 5 倍に拡大)



図 3.1-35 六面体要素による分割結果(100×100×20) (深さ方向 5倍に拡大)

3.1.8 問題点について

(1)水理地質構造のモデル化

今回は、水理地質構造のモデル化における基本構造として 2002 モデルのメッシュを用 いた。補間の方法や解析領域の取り方等について、2002 モデルを踏襲するためであったが、 一方で次のような問題点がある。

水理地質分布が離散化したモデルを元データとして用いたため、境界面構造が階段 状を示す分布が元となり、それが地質構造の分布に影響を与えている。

水理地質モデル化領域が広いため、各調査ボーリングの結果を誤差なく取り込むこ とが困難である。

これに対し、2002 モデルの元となった5 断面から水理地質構造を再度構築することが解決方法として考えられる。

(2)解析メッシュ作成

解析メッシュの作成については、次のような問題点がある。

大曲断層、N系断層ともにモデル化領域(57km四方)に比べて幅が狭い(50m側 部を入れて150m、比率1/1000以下)ため、解析メッシュ形成に制約を受ける。 上記に関連し、特に自由に六面体要素を作成することは難しい。

これに対し、モデル化領域と断層幅、断層構造等を再評価し、解析の目的などを踏まえ て解析メッシュの作り方を検討していく必要がある。 3.2 間隙水圧分布に関する解析

3.2.1 目的

堆積岩地域においては、掘削時における地層ごとの孔内水位変化が見受けられる場合が多く、 その原因として、地形に起因する水位変化、海水準変動の履歴による変化、ボーリングコア等 では観察されない低透水性層等の構造による変化等さまざまな要因が考えられる。ここでは、 幌延地域のボーリング調査から得られたデータを基に、広域における水理地質モデルの構築を 行うことを目的とした研究を行った。本年度は現状で得られている3本のボーリング孔での間 隙水圧測定結果から、数値逆解析を用いて低透水構造に関する検討を行った。

また、将来的には、間隙水圧分布の再現によって得られた広域地下水流動モデルに関して、 塩分濃度による検証を行う予定であるが、本年度は十分な塩分濃度分布が得られていないため、 予備的な解析として間隙水圧による水理地質構造モデル構築に対する検討を行う。

なお、本節は LBNL 唐崎建二氏、伊藤一誠氏のご協力により実施している。

3.2.2 解析方法

本研究では、地層ごとの水位を観測値として、観測値を再現する透水係数を求めるために、 LBNL が開発した逆解析コード iTOUGH2 (Finsterle,S., and P.Persoff 1997,Finsterles,S., and J.Najita 1998)を用いた。iTOUGH2 は、順解析コードとして同じく LBNL の 3 次元多相浸透 流 - 熱連成解析コード TOUGH2 (Pruess,K et al.,1999)を用いた逆解析コードである。 iTOUGH2 では以下に示す目的関数 |r| を最小とするように、Gauss-Newton 法の一種である Levenberg-Marquardt 法によってパラメータ更新を行っている。

$$\left|\mathbf{r}\right| = \sum \left(\mathbf{H}_{obs} - \mathbf{H}_{cal}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{H}_{abs} は水頭観測値、 \mathbf{H}_{cal} は水頭計算値である。実際には、以下に示すようにパラ

メータ更新ベクトル $\Delta \mathbf{p}_k$ を求めている。

$$\Delta \mathbf{p}_{k} = \left(\mathbf{J}_{k}^{T} \mathbf{C}_{ZZ}^{-1} \mathbf{J}_{k} + \lambda_{k} \mathbf{D}_{k}\right)^{-1} \mathbf{J}_{k}^{T} \mathbf{C}_{ZZ}^{-1} \mathbf{r}_{k} \quad (2)$$

ここで、下付kは逆解析の反復数を示し、 $\mathbf{C}_{_{77}}$ は観測値と計算値の共分散行列(対角行列)

 \mathbf{r}_k は残差ベクトル、 \mathbf{J}_k は以下の式で示される Jacobian 行列である。

$$\mathbf{J}_{k} = -\frac{\partial \mathbf{r}_{k}}{\partial \mathbf{p}_{k}} \quad (3)$$

 D_k は共分散行列と Jacobian 行列から計算される対角行列、 \mathbf{p}_k はパラメータベクトル、 λ

は Levenberg パラメータであり逆解析ステップごとに自動的に減少させる値である。

iTOUGH2 は、あらかじめ反復回数を指定しない場合には、観測値と計算値の残差2乗和が 十分に小さくなるか、パラメータ更新ベクトル△p₄のノルムが十分小さくなった場合に終了す

る。また、実際の逆解析パラメータpとしては透水係数の対数値を採用し、上下の推定限界を 設け、上限あるいは下限に到達した場合は逆解析不能と判定した。

逆解析中の順解析部分の概念モデルとしては、TOUGH2のモジュールの中で、Richardsの 式に基づく等温飽和・不飽和浸透流解析モジュール(EOS9)を用いた。また、計算水位と比較す る観測値としては、D-1、HDB-1 および HDB-2 孔沿いの井戸試験における平衡水位から計算 された全水頭値を用いた。順解析コード TOUGH2 においては、直接定常状態を計算する機能 は付加されていないが、与えられた初期条件からの非定常解析において、各タイムステップに おける Newton-Raphson 法の反復回数が1回で収束した場合には、タイムステップ幅を自動的 に2倍に増加させながら、10タイムステップ連続して反復1回で収束した場合に定常状態に 到達したという判定を行っている。初期タイムステップ幅は1秒から開始したが、結果として、 解析上の時間としては全てのケースで100万年以上となり、十分に定常状態に到達したものと 判断できた。 3.2.3 3次元解析モデル

幌延深地層研究センター周辺地域においては、今井他 2002 において基本的な3次元地下水 流動解析が実施されている。本研究では、2002 モデルを基本モデルとし3次元地下水流動解析 を実施した上で、後述するように基本モデルでは再現が困難であった D-1 および HDB-1,2 孔 沿いの水位観測結果を再現するために、低透水構造を仮定した代替モデル、既往調査では明確 化されていない断層の水理地質構造に関する2種類のモデルを設定して逆解析を実施した。

(1) 基本モデル

本研究では、既存表層地質図、地質断面図等から作成された3次元有限要素法格子分割 (2002 モデル)を、積分型有限差分法データに変換したモデルを基本モデルとして解析を行った。全要素数は78,000 要素、要素の大きさは、平面的には外縁部で約1,000m、中心部で約200m、厚さは最上部で50mから深部で500mまで段階的に増加させた。図3.2-1 に、解析に用いた要素分割図を示す。



図 3.2-1 解析に用いた格子分割図 (2002 モデルの有限要素法要素分割を TOUGH2 に変換)

基本モデルにおいては、特に声問層以深における異常高圧をモデル化するための低透水構 造等の設定は行っていない。図 3.2-2 に D-1 孔を含む東西断面における材料分割を示す。大 曲断層、N 系断層群に関しては、実際のボーリング観測結果は存在しないが、中心部に粘土 化した低透水部を持ち、その両側はき裂の発達した高透水部から構成されるというサンドイ ッチ構造を仮定し、断層横断方向と断層沿いの方向での巨視的な水理的異方性を持ったモデ ルを基本モデルとした。



図 3.2-2 D-1 孔を含む東西断面における地盤材料分割図

境界条件は、側面および底面は不透水境界、上面は陸上に関しては水位を地表面で固定した固定水頭境界、海底に関しては、水位を標高 0m で固定した固定水頭境界とした。

(2)低透水構造および断層の代替モデル

上述した基本モデルでは、声問層における異常高圧再現のための低透水構造を仮定していない。ここでは代替モデルとして声問層上部を低透水とした2種類の低透水構造モデルを想定した。また、断層に関しても、高透水側部-低透水コア部 - 高透水側部というサンドイッチ構造を基本モデルとし、低透水コア部のみのモデルを代替モデルとして想定した。低透水構造に関

しては、声問層上部を完全に被覆したモデルを用いた。

ここで、各層の透水係数は、今井他(2002)における代表値を用いた。表 3.2-1 に地層ごとの 透水係数を示す。

(3) 観測データおよび未知パラメータの設定

HDB-1 孔および HDB-2 孔は、大曲断層の近傍にあたるため、D-1 孔とは異なりボーリング 孔沿いの主要な地層は声問層および稚内層となり、声問層の上位にあたる勇知層は現れない。 したがって、平成 14 年度に行った解析(伊藤他 2004)のように声問層上部に低透水性層を想 定しただけでは、稚内層における間隙水圧を十分に再現できない可能性があると考え、ここで は、声問層上部の低透水性層および稚内層の透水係数を未知パラメータと設定して、逆解析を 実施した。

観測データは、D-1 孔における揚水試験の平衡水位(動燃1987) およびHDB-1 およびHDB-2 の原位置透水試験における平衡水位データ(山本他 2002a,山本他 2002b) を用いた。ただし、 平成14年度の解析ではD-1 孔のデータのみを用いた逆解析を実施しているため、その結果も 本報告書に示す。

Geological Priod	Epoch	Formation	Permeability (original) (m/s)	Permeability (Alternative model) (m/s)
		Surface 1)	2.00E-06	2.00E-06
Quatenery		Quaternery Sediments	1.00E-06	1.00E-06
Neogene	Pliocene	Yuuchi F.	1.00E-07	1.00E-07
	Miocene	F.)	1.00E-09	Fitted with iTOUGH2
		Koetoi F.	1.00E-09	1.00E-09
		Wakkanai F.	1.00E-10	1.00E-10 or Fitted with iTOUGH2
		Masuhoro F.	5.00E-10	5.00E-10
Cretaceous		Cretaceous rock	1.00E-11	1.00E-11
		Oomagari Fault side	1.00E-08	1.0E-08 ²⁾ or 1.0E-10 ³⁾
		Oomagari Fault core	1.00E-10	1.00E-10
		Nukanan Fault side	1.00E-08	1.0E-08 ²⁾ or 1.0E-10 ³⁾
		Nukanan Fault core	1.00E-10	1.00E-10

1) Fixed head elements 2) High permeability sandwich structure model 3) Low permeability fault model

表 3.2-1 解析に用いた各層の透水係数一覧

3.2.4 解析結果

(1) D-1 孔のみを用いた解析結果

D-1 孔の平衡水位のみを観測データとして用いた逆解析では、声問層上部に低透水構造を 想定し、そこからランダムサンプリングで要素の抽出を行い、通常の声問層の材料に再設定す ることで、低透水性層の被覆率を変化させて逆解析を実施した。被覆率による低透水性層透水 係数の逆解析結果を図 3.2-3 に示す。



図 3.2-3 低透水性層被覆率による透水係数逆解析結果の変化

図 3.2-4 にそれぞれの被覆率において、逆解析結果の透水係数が、平均値に最も近い結果 を示したケースにおける D-1 孔沿いの全水頭分布を示す。





結果として、低透水構造より上位における勇知層における全水頭値は、低透水構造の影響 を受けないため、低透水性層を想定しない基本モデルと同様の解析結果となり、実測値を反映 することが出来ないが、声問層における全水頭値に関しては、低透水性の低透水構造を想定す ることで、基本モデルと比較して再現性が向上している。低透水性層の被覆率は、70%までは 逆解析によって実測水頭値を再現する透水係数値を得ることが可能であった。それ以下の被覆 率においては、後述するような原因によって逆解析不能となるケースが増大した。一般的な傾 向として、低透水性層の被覆率が低下するにつれて、逆解析によって求められた低透水性層の 透水係数は低下し、同一被覆率における各モデル間での最適透水係数値のばらつきも大きくな る。今回の解析結果では、被覆率 75%のケースで、最適透水係数の平均値が、声問層の透水 係数と比較して2オーダー低く、ばらつきも上下1オーダーの範囲を示した。実際には、低透 水性層が存在しない箇所の平面位置によって、逆解析が不能となるケースも存在する。これは、 平面的に見た声問層上部面内においても、位置によって D-1 孔の水頭値分布に対する感度のば らつきが存在するため、被覆率が低下することによって、観測値に対する感度が高い部分が未 知数となる低透水性層から除外されることによって、観測値が再現不可能になるためと考えら れる。

一方、被覆率 70%のケースでは、逆に平均透水係数も 75%と比較して高い値を示し、ばら つきも小さい。被覆率 70%の場合には、75%と比較して逆解析不能のケースも増大しており、 ここで示した結果は、逆解析可能ケース 10 ケースの平均値、分散であるため、逆解析可能ケ ースにおいては結果的に低透水部の平面的な位置のばらつきが小さくなっていることが考え られる。

結果として、被覆率 75%程度までは実測値を再現する低透水性層の透水係数が安定して得られることが示された。

また、断層の水理地質構造を、基本モデルで想定したサンドイッチ構造から単なる低透水ゾ ーンのみに変化させ、低透水性層の透水性に対する逆解析を実施した。声問層上部の低透水性 層被覆率は 100%とし、断層はモデル下部境界から地表まで連続しているという設定とした。 ここで、サンドイッチ構造の断層モデルと同様に D-1 孔の水頭値分布を再現する低透水性層の 透水係数を求めることで断層の水理構造設定が低透水性層の最適透水係数および観測値以外 の水頭分布に与える影響に関する定量化を行った。断層を低透水ゾーンとした場合には、低透 水性層の最適透水係数は 6.2×10⁻¹¹m/s となり、サンドイッチ構造での被覆率 100%における 最適透水係数(1.6×10⁻¹⁰m/s)と比較して 1/2 以下の値となっている。これは、サンドイッチ構 造の場合には、涵養域においては高標高部から断層沿いに深部まで鉛直下向きの流れが存在し、 逆に流出域においては深部から地表までの上向きの流れが存在する一方、低透水ゾーンとした 場合には、流動系が断層沿いの高標高部の影響を受けにくくなり、地表面から涵養された地下 水流動が最深部まで到達しないため、流出域における平均的な動水勾配がより緩やかになるた め、低透水性層をより低透水と見積もらない限り、声問層における水頭値が再現できなくなっ ていると考えられる。



Hydraulic Head above surface (m)

図 3.2-5 断層の水理地質構造を変化させた場合の D-1 孔深度別の水頭値分布解析結果

図 3.2-5 に、低透水性層被覆率 100%における両断層モデルの D-1 孔沿いの水頭値分布を示 す。設定した声問層までの水頭値に関しては、両者も同程度の再現性を示しているが、特徴的 な結果としては、声問層以深(稚内層、増幌層)に関して、サンドイッチ構造では、水頭値が 深度増加とともに上昇していくのに対し、低透水ゾーンモデルではほぼ一定の水頭値となって いることである。これは、前述したように、高透水ゾーンの影響により流動系がより深部まで 及んでいるか否かの違いを示していると考えられる。D-1 においてはより深部の実測値は得ら れていないが、近傍のボーリング孔において、増幌層以深において顕著な異常高圧が観測され た例が存在すること(兼清 1999)から、D-1 の結果のみからは高標高部からの涵養がより深 部まで影響を及ぼすサンドイッチ構造の方がより現実に近いモデルと考えられる。

(2) D-1, HDB-1, HDB-2を用いた解析結果

D-1、HDB-1 および HDB-2 のデータを用いた場合の透水係数逆解析結果を表 3.2-2 に示す。

ケース	断層	キャップロック (m/s)	稚内層 (m/s)
1	サンドイッチ	7.92E-11	-
1	低透水	1.26E-11	-
2	サンドイッチ	9.97E-11	9.97E-13
2	低透水	6.29E-11	9.97E-11

表 3.2-2 逆解析による透水係数同定結果

D-1 のデータのみを用いた場合の低透水性層の透水係数はサンドイッチ構造の場合で 10⁻¹⁰m/s オーダーであることから、HDB-1 および 2 の結果を併用することによって低透水性 層の透水係数推定値は低下した。また、稚内層の透水係数を未知数とした場合、断層のサンド イッチ構造を仮定しない場合には、基本モデルと大きな変化は見られないが、サンドイッチ構 造を仮定した場合には、基本モデルの 1/100 の透水係数と見積もられる等、大きな違いが生じ ている。

逆解析によって求められた D-1, HDB-1, HDB-2 孔沿いの全水頭分布を実測値と比較して図 3.2-6~図.3.2-8 に示す。



図 3.2-6 逆解析による D-1 孔沿いの全水頭値分布 (:実測値,黒実線:低透水性層のみ を未知数とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モ デル,赤実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水 性層と稚内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



図 3.2-7 逆解析による HDB-1 孔沿いの全水頭値分布(:実測値,黒実線:低透水性層の みを未知数とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層 モデル,赤実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透 水性層と稚内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



Hydraulic head (EL+m) 図 3.2-8 逆解析による HDB-2 孔沿いの全水頭値分布 (:実測値,黒実線:低透水性層の みを未知数とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層 モデル,赤実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透 水性層と稚内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)

この結果から、HDB-1 および HDB-2 ではまだ十分に実測値を再現できていないことが示 されている。声問層上位に低透水構造を想定するモデルは、D-1 のように勇知層も出現してい る場合には有効であるが、HDB 孔のように声問層が最上位に出現するモデルでは、計算され る全水頭値に対する感度が低くなる。また、特に HDB-1 においては、それぞれの全水頭に対 する解析と実測の差を減少させるために平均的な全水頭値を再現させるような逆解析結果が 得られている。

また、本解析では、その他の HDB 孔に関しても全水頭解析結果が得られている。図 3.2-9 ~ 図 3.2-14 に、HDB-3~HDB-8 孔位置における全水頭分布を示す。



図 3.2-9 逆解析による HDB-3 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



図 3.2-10 逆解析による HDB-4 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数 とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤 実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚 内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



Hydraulic head (EL+m) 図 3.2-11 逆解析による HDB-5 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数 とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤 実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚 内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



図 3.2-12 逆解析による HDB-6 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数 とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤 実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚 内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



Hydraulic head (EL+m) 図 3.2-13 逆解析による HDB-7 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数 とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤 実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚 内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)



図 3.2-14 逆解析による HDB-8 孔沿いの全水頭値分布(黒実線:低透水性層のみを未知数 とした低透水断層モデル,黒点線:低透水性層と稚内層を未知数とした低透水断層モデル,赤 実線:低透水性層のみを未知数としたサンドイッチ構造断層モデル,赤点線:低透水性層と稚 内層を未知数としたサンドイッチ構造断層モデル)

これらの解析結果から、各孔で標高-1000m 以深での全水頭値には、モデルによって比較的 大きな相違が生じる可能性が示された。 3.2.5 まとめと今後の課題

本年度の解析結果から、HDB-1 および HDB-2 の全水頭値再現は、D-1 孔のみの場合と異な り、声問層上位の低透水構造を考慮したのみのモデルで再現することが困難であることが示さ れた。特に、HDB-1 では計算された全水頭値が実測の中間的な値を示している。これに対して は、2 点間の水頭差を未知数とした逆解析を実施することで結果の改善が期待される。また、 HDB-2 の水頭値再現はより困難であり、この原因としては広域のモデルで表現しきれていない 局所的な水理構造の影響が考えられるが、観測値の信頼性の検討も必要である。

また、断層に関しては、本モデルでは2種類のモデルを想定したのみで、透水性は既知とし て取り扱いを行ったが、大曲断層およびヌカナン断層近傍である HDB 孔の水頭分布は断層の 透水性に影響される可能性が高いため、断層の透水係数も未知数とした逆解析が必要となると 考えられる。

また、塩分濃度分布等、逆解析によるモデル化結果と対比するデータの収集、比較が今後必 要となるものと考えられる。 4.地下水流動、地温勾配および岩盤応力変形の連成解析手法に関する基礎研究

4.1 研究の目的

堆積岩地域において立坑等の大規模掘削を行う場合には、地下水の間隙水圧分布が掘削時の 変形に与える影響が無視できない。掘削時には、空洞への漏水と間隙水圧の低下、岩盤の変形 が同時に生じ、地下水流動と変形が直接影響しあう現象が生じている。したがって、地下水の 影響を反映した変形解析には、いわゆる連成解析が必要となる。ここでは、将来的には熱の影 響までを考慮する目的で、TOUGH2を用いた連成解析の適用性に関する基礎検討を行う。

なお、本章は LBNL 唐崎建二氏、伊藤一誠氏のご協力により実施している。

4.2 解析の方法

4.2.1 連成解析の概念

解析は、熱-地下水流動の連成解析が可能な TOUGH2 および熱-変形の連成解析が可能であ る FLAC3D(Itasca Consulting Group 1997)の連成解析手法 TOUGH-FLAC(Rutquvist, Jet al., 2002)を用いた。TOUGH2 に関しては、研究の第一段階として、熱の移動を考慮しない飽 和・不飽和浸透流解析モジュールである EOS9 を用いた。

連成解析では、それぞれの解析手法のデータを1タイムステップことにファイルに出力して、 他方の入力データとして受け渡す形式をとっている。図 4.2-1 に連成解析のデータの流れを示 す。



図 4.2-1 TOUGH-FLAC3D 連成解析におけるデータの流れ

すなわち、TOUGH2からは圧力、飽和度、温度が出力され、FLAC3Dの間隙水圧、温度として入力され、それを用いた変形解析が実施される。また、FLAC3Dからは応力が出力され、TOUGH2において、応力から間隙率、浸透率等が更新され、計算が行われるということが順次繰り返される。

4.2.2 基礎方程式

地下水流動は以下の Richard の式を用いている。

$$\frac{\partial}{\partial t}\phi S_{\ell}\rho_{\ell} = div \left[k\frac{k_{r\ell}}{\mu_{\ell}}\rho_{\ell}grad\left(P_{\ell}+\rho_{\ell}gz\right)\right]$$
(4.1)

ここで、 ϕ は間隙率、 S_{ℓ} は液相の飽和度、 ρ_{ℓ} は液相の密度、kは浸透率、 $k_{r\ell}$ は液相の相対 浸透率、 P_{ℓ} は液相の圧力である。ここで、不飽和の場合には、相対浸透率および圧力は液相の 飽和度から計算される。

一方、FLAC3Dにおける変形は、ラグランジェ法による以下の運動方程式を基礎方程式として計算されている。

$$\nabla \cdot \mathbf{\sigma} + \rho_m \mathbf{g} = \rho_m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \qquad (4.2)$$

ここで、σは全応力テンソル、vは変位速度ベクトルである。ここで、応力と変形の構成関 係は、一般的に

$$\Delta \sigma' = H\left(\sigma', \dot{\varepsilon} \Delta t\right) \quad (4.3)$$

と表せれる。ここで、 σ' は有効応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である。FLAC3Dでは構成関係として、 弾性、弾塑性、粘弾性等が利用可能である。

ここで、ひずみとひずみ速度は以下の式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + {}^{t} \left(\nabla \mathbf{u} \right) \right) \qquad (4.4)$$
$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{v} + {}^{t} \left(\nabla \mathbf{v} \right) \right) \qquad (4.5)$$

また、ひずみは、以下のような各ひずみの合計となる。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_T \tag{4.6}$$

ここで、 \mathcal{E}_{e} は弾性ひずみ、 \mathcal{E}_{n} は塑性ひずみ、 \mathcal{E}_{T} は熱ひずみである。

有効応力は、全応力と間隙水圧から以下のように定義される。

$$\sigma' = \sigma + \mathbf{I}\alpha P \tag{4.7}$$

ここで、PはBiotの有効応力係数であり、岩盤の場合は一般的に1.0に近い値をとる。

4.2.3 地下水流動と変形の連成

地下水流動と変形の連成は、応力および間隙水圧の値の受け渡しによって行われている。間 隙率は、以下の模式図に示すような応力との関係によって、TOUGH2中で計算される。



図 4.2-2 応力と間隙率の関係に関する模式図

実際には、以下の式 (Davis, J.P, and D.K.Davis 1999) によって計算されている。 $\phi = \phi_r + (\phi_0 - \phi_r) \exp(\alpha \sigma'_M)$ (4.8)

ここで、 ϕ_r は残留間隙率、 ϕ_0 は応力 0 における間隙率、 σ_M は中間有効応力である。以上によって求められた間隙率から、Leverett M.C.1941 による関係を用いて浸透率が計算される。

$$k = k_0 \exp\left(c\left(\frac{\phi}{\phi_0} - 1\right)\right)$$
(4.9)

また、不飽和状態における毛管圧力も、間隙率変化によって以下のように修正される。

$$P_{c} = P_{c0} \left(S_{\ell} \right) \frac{\sqrt{k_{0}/\phi_{0}}}{\sqrt{k/\phi}}$$
 (4.10)

両解析の時間ステップ進行における連成の具体的手順は、図 4.2-3 に示すような手順で行われる。



すなわち、TOUGH2 を先行させ、その結果を用いて FLAC3D の解析を行い、そこから求められた応力を用いて次の時間ステップにおける TOUGH2 の解析を行うということを、ステップごとに順次行っている。
4.3 モデルの設定

4.3.1 基本設定

本研究では、TOUGH-FLACの適用性検討のために、幌延深地層研究センターを模擬した簡 単な仮想モデルを設定した。モデルは立坑を中心とした 1/4 領域を対象とし、モデルの大きさ は 3,000m × 3,000m、深度は 2,000m までを対象とした。なお、力学的な境界条件を設定しや すいように、領域の平面的な形状は正方形とし、立坑は 1/4 の円筒としたため、中心の円筒形 から要素を順次変形させて設定した。立坑は、半径 3m、深度 500m の円筒で表現した。

ここでは、将来的な適用性を考慮し、有限要素法の要素を基本データとして使用し、そこから TOUGH2 および FLAC-3D の要素データを個別に生成するコードを開発して用いた。

図 4.3-1 に解析に使用した要素の全体図を示す。また、掘削時の立坑周辺の拡大図を図 4.3-2 に示す。



- 98 -



図 4.3-2 立坑周辺の要素拡大図

上記のモデルに対し、境界条件としては以下の設定を行った。

- ・ 対称面に対しては不透水,変位0
- ・ 上面に対しては大気圧固定
- ・ 下面に対しては不透水、変位0
- ・ 遠方側面に対しては深度に従い間隙水圧、水平方向の応力固定
- ・ 立坑部分に対しては大気圧固定

側面の水平方向応力は、後述するように材料区分を行い単位体積重量が材料ごとに異な るため、単位体積重量の平均値から算出した平均地圧勾配から深度による水平応力を算出 した。また、間隙水圧に関しては、後述する稚内層相当部分以深において間隙水圧上昇が 見られるため、静水圧分布を稚内層以深において、間隙水圧を実測分(圧力水頭 20m 相 当)不連続的に上昇させて設定した。

4.3.2 地盤材料区分

前節で設定したモデルに対し、幌延地区の HDB-1 および HDB-2 の平均深度別地質構造区 分を参考に材料区分を行った。材料としては、声問層、稚内層、増幌層の三層を想定し、声問 層は地表から深度 300m まで、稚内層は深度 300m ~ 深度 1000m まで、増幌層は深度 1000m ~ 2000m までとした。図 4.3-3 に材料区分図を示す。



図 4.3-3 解析における地盤材料区分図

各地盤材料の水理・力学特性は、透水係数に関しては原位置試験結果(今井他 2002)間隙 率に関しては室内実験結果(山本他 2002a、山本他 2002b)から、力学特性に関しては室内実 験結果(山本他 2002a、山本他 2002b)から設定した。増幌層に関する力学特性は試験結果が 存在しないため、稚内層との弾性波速度比から推定した値を用いた。解析に用いた各地盤材料 の物性値を表 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 解析に用いた地盤物性値

水理特性	透水係数	間隙率							
声問層	1.00E-09	0.622							
稚内層	1.00E-10	0.399							
増幌層	5.00E-10	0.25							
力学特性	湿潤密度	E50	ポアソン比	Bulk modulus	Shear modulus	粘着力	内部摩擦角	一軸圧縮強度	一軸引張強度
声問層	1541 kg/m3	947 MPa	0.328	917.6 MPa	356.6 MPa	1.58 MPa	17.6 deg	3.83 MPa	0.383 MPa
声問層 稚内層	1541 kg/m3 1890 kg/m3	947 MPa 3960 MPa	0.328	917.6 MPa 2357 MPa	356.6 MPa 1623 MPa	1.58 MPa 4.86 MPa	17.6 deg 26.1 deg	3.83 MPa 17.1 MPa	0.383 MPa 1.71 MPa

解析の流れは、第一段階として、掘削前段階における力学解析、定常状態での水理解析を実施し、次に連成定常解析を行う。その後に立坑を 500m まで掘削した段階での連成解析を実施した。その場合に間隙水圧の影響は掘削直後に最も大きくなるためにここでは掘削直後の結果を示す。

4.4 解析結果

連成解析の結果として、図 4.4-1 に鉛直方向の変位コンターを、図 4.4-2 および図.4.4-3 に X-および Y-方向の変位コンターを示す。



図 4.4-1 掘削直後における鉛直方向の変位コンター



図 4.4-2 掘削による X-方向の変位コンター



図 4.4-3 掘削による Y-方向の変位コンター

X-および Y-方向の変位コンターからは、不規則な要素形状の影響は現れているものの、掘削 による立坑方向への水平変位は対称に出現していることが示された。また、鉛直方向の変位と しては、地表面および立坑近傍において 10cm 程度の沈下が予測される。ただし、本解析は掘 削段階を考慮せず、かつ吹付工等の補強も考慮していないため、危険側の結果となっている。

図 4.4-4 に連成解析における掘削に起因する立坑周辺の最大せん断ひずみ増分の分布を、図 4.4-5 非連成解析による立坑周辺の最大せん断ひずみ増分分布を示す。図の中心は深度 400m の 位置としている。掘削によってせん断ひずみが発生する領域は両方のケースとも立坑周辺 1m 程度の狭い領域に限られているが、最大せん断ひずみ増分は、間隙水圧を考慮した連成解析で は、非連成の 2 倍以上の値が生じている。

また、図 4.4-6 および図 4.4-7 に立坑周辺における塑性化領域を示す。図 4.4-6 は地表面近傍の塑性化領域を示したものであり、図 4.4-7 は最大せん断ひずみ増分が最大となる深度 350m 付近を示したものである。要素分割の粗さにも影響されるが、最大せん断ひずみ分布と同様に、 立坑周辺 1m 程度の領域が塑性化することが示された。



図 4.4-4 連成解析による立坑周辺の掘削に起因する最大せん断ひずみ増分分布 (深度 400m 付近、約 100m × 100m 領域)



(深度 400m 付近、約 100m × 100m 領域)



図 4.4-6 立坑および地表面周辺での塑性化領域 (赤:塑性化領域)



図 4.4-7 立坑および深度 350m 周辺での塑性化領域 (赤,緑:塑性化領域)

4.5 連成解析の適用性および今後の課題

本年度の解析では、室内実験から求められた変形特性を用いたが、室内実験においては通常 き裂を含まない10cm 程度のコアサンプルが用いられている。しかしながら、幌延地域の地層 を対象とした場合、実際のサイトスケールにおいては、き裂等の影響を無視できず、弾性係数、 強度はアップスケールを行う必要があると考えられる。また、本解析コードにおいては掘削段 階の考慮が可能であり、段階的掘削を考慮することにより立坑周辺の間隙水圧が掘削に従い低 下するという現実的な解析も可能である。

プリプロセッシングに関しては、優れたプリプロセッサが多数存在する3次元 FEM データ を中間ファイルとして、本年度開発を行ったデータ変換プログラムを用いることで、TOUGH2 および FLAC3D のデータをともに作成することが可能であり、例えば幌延地域を対象とした 実際の解析も可能となる。

本年度は予備的な適用性の検討を行ったが、本連成解析手法の適用性に関してはある程度の 確認が可能であった。今後はより定量的な検討として、物性を変化させた場合のパラメトリッ クな解析を実施するとともにより現実的なモデルでの適用性検討を行う予定である。

本解析では、TOUGH2の時間ステップを進めた上で、FLAC3Dによる変形解析を行っているため、完全に陰的な解法となっていない。従って、厳密には変形と地下水流動が完全に連成されてはいない上に、2種類の解析コードを順次走らせるため、解析時間もかなりの時間を要する。理想的にはTOUGH2中に変形を組み込んだ完全連成コードの開発が将来的には望ましい。

5. 堆積岩地域の地下水流動シミュレーション解析の高速化に関する検討

堆積岩地域における地下水流動シミュレーションにおいては、地下水流れの問題に加え て、密度流、熱対流及び岩盤応力変形についての連成問題を解析することが必要になる。 また、地層処分の性能評価対象となる時間空間的な領域を考慮すると、時間領域には数万 年程度の超長期、空間的には数 km ~ 数十 km スケールの 3 次元領域の問題を解析で考慮 することが必要となる。したがって、地層処分の性能評価を行うことを目的として堆積岩 地域の地下水流動シミュレーションを行うには、解析コードの高速化および解析結果を評 価するための大容量データの可視化が不可欠となる。

ここでは、本研究で使用している解析コード TOUGH2 に関して高速化を行なうために 以下の項目について検討した。

解析コードの高速化を行なうための手法調査と性能チューニング

性能チューニング後の解析コードの性能評価と例題解析

大容量データ可視化のための調査・検討

なお、本章の高速化については、(財)高度情報科学研究機構(RIST)東京事業所計算科 学技術第2部の中島研吾氏のご協力により実施している。

5.1 解析コードの高速化を行なうための手法調査と性能チューニング

一般に解析コードの高速化を行うためには、次のような手法が考えられる。

高速ソルバーの導入などの計算効率の向上

PC EWS 大型計算機のようにプラットフォームの変更

ベクトル計算機や並列マシンのような高速化コンピュータの利用

このうち、近年並列マシンの進化が著しい。並列マシンとはプロセッサを複数結合し、 同時並列的に実行させることにより、効率的な計算を目指すものである。現時点(2003 年 11 月)で世界最速の性能を持つコンピュータは、地球シミュレーター(海洋科学技術 センター)であり、表 5.1-1 に示すようにピーク性能は 40 [Tflops] (flops:マイクロプ ロセッサの浮動小数点演算能力を表し、1秒間に浮動小数点演算を何回行なえるかを示す 値。たとえば 10 [Mflops]なら、そのマイクロプロセッサは1秒間に 1000 万回の浮動小数 点演算能力を持つ)である。そこで、本研究では、地球シミュレータを利用することによ り解析コードの高速化を目指すことを念頭において検討を進めた。

並列マシンで解析コードを実行するためには、解析コードのベクトル化もしくは並列化 について検討する必要がある。解析コードに対してベクトル化および並列化を行うことで 解析コードの高速化を行うことを性能チューニングという。ここでは、ベクトル化および 並列化と性能チューニングについて説明する。

理論性能 ピーク性能		(全体)	40 [Tflops]	
		(1ノードあたり)	64 [Gflops]	
		(1プロセッサあたり)	8 [Gflops]	
	主記憶容量	(全体)	10 [TB]	
		(1ノードあたり)	16 [GB]	
実効性能	実効性能		35.86 [Tflops]	
	実行効率		87.5 [%]	
	ノード間データ転送速	度	12.3 [GB/s × 2]	

表5.1-1 地球シミュレータの基本性能

コンピュータ 名	所有機関	所在地	開発元	ピーク性 能(実測)
EARTH	Earth	Yokohama, Japan	NEC	35.86
SIMULATOR	Simulator			[Tflops]
	Center			
ASCI Q	LANL	Los Alamos, USA	HP Alphaserver SC	13.88
				[Tflops]
Virginia	Virginia Tech	Blacksburg, USA	Dual Apple G5 /	10.28
Tech's X			Mellanox	[Tflops]
Tungsten	NCSA	Urbana-Champaign	Dell PowerEdge	9.819
		,USA	1750 / Myrinet	[Tflops]
MPP2	PNNL	Richland, USA	HP rx2600 Itaniumz	8.633
			/ Quadrics	[Tflops]

5.1.1 ベクトル化とベクトル化の条件

DO 文、IF 文、配列文などの中で一つの変数に対してある値を代入し計算した後、次の 変数を代入して計算を繰り返す命令のことをスカラ命令と呼ぶ。これに対して、ループ中 で繰り返される規則的に並んだ配列データ(ベクトルデータ)の演算に対してコンパイラ がベクトル化された命令を適用することをベクトル命令という。図 5.1-1 にスカラ命令お よびベクトル命令のイメージを示す。ベクトル化により計算の実行順序は変更され、スカ ラ命令よりも計算時間が短縮されることにより解析コードは高速化される。



スカラ命令(スカラ加算)の実行イメージ

図 5.1-1 スカラ命令とベクトル命令のイメージ

ベクトル化は全てのループについて可能であるわけではない。ベクトル化を行う条件を以下に列挙する。

ベクトル化に適合する対象範囲 (ループ、文、型、演算) であること

ベクトル化の対象範囲(ループ、文、型、演算)を表 5.1-3 にまとめて示す。

対象となるループ	配列式、DO ループ、DO WHILE ループ、IF 文と GOTO 文によるル
	ープ
対象となるループ	代入文、CONTINUE 文、GOTO 文、CYCLE 文、EXIT 文、IF 文、
中に許される文	CASE 構文(CALL 文、入出力文、ポインタ代入文等は不可)
対象となるデータ	4 バイト、8 バイトの整数型、論理型
の型	単精度、倍精度の実数型・複素数型
	(文字型、4 倍精度、2 バイトの整数型、1 バイトの論理型、構造型は
	不可)
対象となる演算	加減乗除算、べき算、論理演算、関係演算、型変換、組み込み関数
	(利用者定義演算は不可)

表 5.1-3 ベクトル化の対象範囲

配列や変数の定義・引用関係にベクトル化を阻害する依存関係がないこと 以前の繰り返しで定義された配列要素や変数を後の繰り返しで引用するパター ンのとき、ベクトル化を阻害する依存関係がある。また、変数の引用が定義より も先に現れるループや変数の定義が実行されない可能性があるループはベクト ル化できない。

ベクトル化によって性能向上が期待できること

ループ長が十分に長くない場合にはベクトル化によって性能向上が望めない場合がある。また、ベクトル化しても作業配列を使うコスト(メモリアクセスに必要な時間)がベクトル化されて高速化されるよりも高い場合にもベクトル化する 意味はなくなる。

すなわち、ベクトル化により解析コードを高速化するためには、

ベクトル長(ループ長)を大きくしてベクトル命令の効率を高める。

ベクトル化の阻害要因を取り除き、ベクトル化を促進することでベクトル化率を 上げる。

バンクコンフリクト(特定のバンクにアクセスが集中して計算時間が長くなること)を削減することでメモリアクセスを効率化する。

の3点に着目する必要がある。

ここでベクトル化率(図 5.1-2 参照)とは、スカラ実行したときの実行時間に対するベクトル命令で実行可能な部分を表す。しかし、一般にベクトル化率を正確に求めることは困難であるため、ベクトル演算率(ベクトル演算が実行された割合)で代用されることが多い。



性能向上比= $\frac{T_s}{T_v} = \frac{\beta}{\alpha(1-\beta)+\beta}$:ベクトル化率 :ベクトル命令の性能向上比
ベクトル演算率 = $rac{T_{s} \alpha / \beta}{T_{v}} = rac{lpha}{lpha (1 - eta) + eta}$	Ts∶スカラ実行したときの実行時間 Tv∶ベクトル実行したときの実行時間

図 5.1-2 スカラ実行とベクトル実行の実行時間のイメージ

5.1.2 並列化

並列化とは、図 5.1-3 に示すように、1つの仕事をいくつかの小さな仕事に分割することであり、複数のタスク(CPU)で全体の仕事を実行することまでを含めて並列処理とよぶ。 並列処理を行った場合、CPU 時間ではなく、消費時間が短縮されることになる。図 5.1-3 に並列化による実行時間短縮のイメージを示す。





全てのループについて並列化が可能なわけではなく、一般にループの各繰り返しの実行 順序に制約がつくと並列化はできない。以下に並列化が不可能な場合のループを列挙する。 並列化を阻害する依存関係がある場合

> 変数が定義前に引用されている場合や、IF 文で定義された変数が IF 条件外で引 用されている場合や、ループの異なる繰り返しで定義された変数・配列要素を定 義・参照している場合には並列化できない。

並列化を阻害する制御構造がある場合

ループ外への条件分岐があると並列化はできない。

並列化を阻害する文がある場合

入出力文や乱数生成関数呼び出しなどシリアル実行時の実行順序を保たなけれ ば実行結果が変わってしまうものは並列化できない。

なお、並列化の程度を表す指標である並列化率の概念を図 5.1-5 に示す。



5.2 性能チューニング後の解析コードの性能評価と例題解析

解析コード TOUGH2 を性能チューニングするには、膨大な数のループについてベクト ル化および並列化を行う必要があるため、機械的に全てのループをベクトル化・並列化す ることは膨大な時間が必要になる。そのため、本検討では TOUGH2 と同じアルゴリズム を持つ計算コード「TOUGH2P」を作成し、性能チューニングを行った後に解析コードの 性能評価を行うこととした。また、TOUGH2 を高速化する際にどのサブルーチンを重点 的に高速化するべきかについて検討した。

5.2.1 TOUGH2P による性能チューニング

TOUGH2 は任意形状の要素を取り扱うことができるセル中心型有限体積法(直接差分法)であり、各要素の体積、要素間の接続関係などを予め指定する方式をとっている。本検討で作成した TOUGH2P も同様にセル中心型有限体積法に従っている。計算では定常 飽和流としてポアソン方程式を解くことにより流量および水頭を算出する。TOUGH2P は 予め 99%以上のベクトル演算率を達成するようにして作成したため、この TOUGH2P を 使用して、CPU 台数および問題規模を変化させた場合の性能を評価することにより、同様 なアルゴリズムをもつ TOUGH2 の高速化が有意義か否かについて把握できると考えた。 なお、性能チューニングには、前述の地球シミュレータを使用している。

その結果、図 5.2-1 に示すように、TOUGH2P は並列化規模を変えることにより、CPU 台数に対して反比例的に計算時間が短縮されることを確認した。



図 5.2-1 並列化の程度と計算時間の関係

また、図 5.2-2 には問題規模と性能の関係をグラフに表す。ここでの計算は 1CPU のみ 使用しており、ピーク性能は 8[Gflops]となる。図 5.2-2 より、要素数が増えると性能は対 数的に増加し、要素数 100 万個以上の場合で、性能 / ピーク性能は約 25%程度を達成し ていることがわかる。1 ノード 1 自由度の場合、この値は経験的には妥当なものであると 考えられる。



図 5.2-2 問題規模と性能の関係

以上より、TOUGH2Pをチューニングしたことで、高速化は可能であることが確認できた。すなわち、同様な手順でTOUGH2をベクトル化・並列化すれば高速化が可能であるとの見通しを得た。

5.2.2 TOUGH2 を高速化する際の検討

ここでは、TOUGH2 を高速化する際にどの部分を重点的に高速化するべきかについて 検討した。表 5.2-1 および表 5.2-2 に TOUGH2 内のコード全体に含まれるサブルーチン を示す。

ファイル名	t2cg1.f	t2f.f	ma28.f	meshm.f
	10	INPUT	MC20A	MESHM
	FLOP	RFILE	MC20B	RZ2D
	DBCG	pmin	MC13D	WRZ2D
	DCGS	rand	MC13E	PRZ2D
	DCHKW	INDATA	MC22A	GXYZ
	DGMRES	CYCIT	MC24A	NCAR
	DHELS	fgtab	MC21A	PCAR
	DHEQR	MULTI	MC21B	MINC
	DORTH	QU	MA30A	PART
	DPIGMR	phas	MA30D	GEOM
	DS2Y	phasd	MA30B	INVER
	DSILUS	phasf	MA30C	MINCME
	DSLUBC	WF	MA28A	
	DSLUCS	ttab	MA28B	
	DSLUGM	gcor	MA28D	
	DSLUI	CONVER	MA28C	
	DSLUII	WRIFI		
サブルーチン名	DSMTV	FINDER		
	QSZIID			
	secona			
		MC10A		
		PUAP QAT		
		COWAT		
		SIGMA		
		VIS		
		VISW		
		VISS		
		THERC		
		OUTDF		

表 5.2-1 TOUGH2 内のサブルーチンその 1

ファイル名	eos1.f	eos2.f	eos3.f	eos4.f	eos5.f	eos7	eos7r	eos8.f	eos9.f	ewasg.f
	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS
	OUT	HENRY	PP	finds	PP	PP	PP7r	PP	finds	HENRY
	BALLA	SOLUT	VISCO	PVTS	VISCO	VISCO	VISCO	VISCO	OUT	SOLUT
	QLOSS	CO2	OUT	PP	OUT	OUT	OUT	OUT	BALLA	NCG
		VISCO	BALLA	VISCO	BALLA	BALLA	BALLA	BALLA	QLOSS	SATB
		OUT	QLOSS	OUT	QLOSS	QLOSS	QLOSS	QLOSS	MULTI	VISB
		BALLA		BALLA			fgtab			VISH2O
サブルーエンタ		QLOSS		QLOSS			-			COBRI
リノルーテノ石										HALITE
										VISGAS
										TCRIT
										PP
										VISCO
										OUT
		1	1							BALLA
		1	1							QLOSS

表 5.2-2 TOUGH2内のサブルーチンその 2

以下に TOUGH2 内の t2cg1.f の中にあるメインプログラムで呼び出されるサブルーチンを示す。

表 5.2-3 メインプログラムの中で呼び出されているサブルーチン

メ-	インプログ	ブラムの	中で呼	び出され	っている	ナブルーチン	
10	SECOND	INPUT	FLOP	RFILE	INDATA	CYCIT	

まず、TOUGH2 のメインプログラムの CALL 文で呼び出されるサブルーチンの消費時 間を計測した。call 文の前後に call date_and_time 文を挿入して、サブルーチン前後の時 間の差分を算出することで消費時間を算出した。入力データとして、TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 (Preuess et.al.,1999)の sample データ rhp.inp を使用し、モジュール は EOS3 を使用した。

図 5.2-3 にメインプログラム内の CALL 文で呼び出されるサブルーチンの消費時間を示す。同図より、CYCIT でほとんどの時間を消費していることがわかる。



図 5.2-3 メインプログラム内の CALL 文で呼び出されるサブルーチンの消費時間

次に、サブルーチン CYCIT の中に含まれる CALL 文で呼び出されるサブルーチンの消 費時間を図 5.2-4 に示す。



図5.2-4 CYCIT内のサブルーチンの消費時間

消費時間が大きい EOS、LINEQ、MULTI はそれぞれ複数の DO 文を含んでおり、これらの DO 文を並列化およびベクトル化することにより TOUGH2 の高速化は効率よく行えると考えられる。

5.3 大容量データ可視化のための調査・検討

計算結果を可視化するソフトは多数市販されているが、大規模な水理地質構造データや 長期間を対象とした解析結果を可視化するためには、専用の並列可視化ライブラリを使用 する必要がある。ここでは、大規模な水理地質構造データや長期間を対象とした解析結果 を可視化するため一般的な可視化ソフトウエアについて簡単に説明する。

GrADS(Grid Analysis and Display system)

気象、気候研究者の間で最も一般的な2次元の可視化ソフトウェアである。表示だけでな く、コマンド入力による統計処理などのデータの加工やスクリプトの実行による一括処理 が可能である。詳細は下記の URL を参照されたい。

http://grads.iges.org/grads/head.html

Vis5D,Vis5D Stereo

気象分野で3次元可視化を行うソフトウエアである。Vis5 は数値気象モデルで作られるような大規模な5次元の格子データセットをインタラクティブに可視化するシステムである。 3次元格子上にデータの等値面、等高線断面、カラー断面、ボリュームレンダリングなどを表示することができ、リアルタイムの回転や動画表示も可能である。Vis5D Stereo は Vis5 を改良して立体視可能としたものである。

詳細は以下の URL を参照されたい。

http://www.ssec.wisc.edu/~billh/vis5d.html

AVS,AVS/ExpressRV

汎用 3 次元可視化ソフトウエアである。特に AVS/ExpressRV は立体視および専用ボード を用いた高速ボリュームレンダリングが可能である。詳細は以下の URL を参照されたい。 http://www.kgt.co.jp/index.html

ENVI/IDL

様々な画像処理手法、統計解析手法、算術演算手法を駆使して、数値データや画像データ を可視化し、解析していくための汎用アプリケーションである。詳細は以下の URL を参 照されたい。

http://adamnet.co.jp/scs/products/idl/index.html http://adamnet.co.jp/scs/products/envi/index.html

GeoFEM & Hpcmw-PC-Cluster

「GeoFEM」は,構造解析(線形,非線形),伝熱解析,流体解析のための並列有限要素法コードであるとともに,並列 1/0,線形ソルバー,並列可視化など,大規模並列計算に必要

な諸機能を提供するプラットフォームである。プラットフォームとしての機能を使用すれ ば,利用者はPC上で開発された有限要素法(Finite Element Method, FEM)によるシミュ レーションコードをプラグインするだけで,容易に並列コードを開発することが可能であ る。なお、Geo-FEMの基本概念はHpcmw-PC-clusterに引き継がれている。GeoFEM およ び Hpcmw-PC-cluster の詳細については以下の URL を参照されたい。 http://www.fsis.iis.u-tokyo.ac.jp/result/software/index.html http://geofem.tokyo.rist.or.jp/tutorial/vis_tutorial/index_Ja.html

特に、 は地球シミュレータで用いることを念頭に開発されたものであるため、 TOUGH2 の高速化と同時にポスト部分に手を加えて Hpcmw にデータを引き継ぐことに より、可視化ライブラリを用いることが可能である。 6.おわりに

堆積岩地域の特徴を考慮した地下水流動現象の解明とモデル化に関する検討として、北 海道・幌延地域を堆積岩地域の特徴の一例として取り上げ、検討を行った。

密度流解析手法の研究では、密度流実験装置 MACRO の実験結果を TOUGH2 でシミュレートした。その結果、以下の知見を得た。

- 実験結果に対して、解析結果は塩分濃度の立ち上がりが早く、濃度上昇が遅いことなどから数値分散の影響が大きく出ている。
- ・ 濃度 2.5%の進行状況は、水位差 40mm 以下では大きな誤差はないものの、50mm 以上では解析の方が実測よりも早い。
- 塩水くさびの浸入状況を比較すると、水位差 10mm ではほぼ等しいが、水位差が 大きくなるほど解析の方が実測より遠方に到達している。これは、数値分散の影響と考えられる。
- より詳細なメッシュを用いることにより、分散に関しては現実的な結果を示すと 考えられる。
- サイトスケールへの適用では、最適なメッシュ分割、あるいは自動詳細分割や数 値分散低減のための改良が望ましい。

次に、幌延地域の水理地質モデル化では、2002 モデルの離散化データを元データとして 3次元地質解析プログラム GEORAMA でモデルを作成した。モデル化ステップは、次の 段階で行った。

Step.1 2002 モデルの再現(文献調査段階の位置付け)

- Step.2 既存ボーリング(SK-1,D-1)による検証と反映
- Step.3 2001 年度調査ボーリング (HDB-1,2) による検証と反映
- Step.4 2002 年度調査ボーリング(HDB-3,4)による検証と反映

この結果、SK-1 において最大 100m 程度の誤差は残るものの、ほぼ妥当なモデルを作成した。これに基づいて解析メッシュ化を行った。ただし、2002 モデル離散化データを元 データとした影響が残ったこと、およびモデル規模に対して断層幅が小さいことが、解析 メッシュ化に制約を与えるなど、問題点が確認された。

幌延地域の間隙水圧分布に関する検討では、2002 モデルに基づいて D-1、HDB-1、 HDB-2 の実測間隙水圧を iTOUGH2 で逆解析により求めるため、声問層上部の低透水性 層構造、および断層のサンドイッチ構造をモデルとして検討した。その結果、以下の知見 を得た。

- ・ D-1 では声問層に低透水性層を想定することで、全水頭の再現性が向上した。被覆 率 75%程度までは実測値を再現する低透水性層の透水係数が安定して得られる。
- また、断層部をサンドイッチ構造とした場合と、単なる低透水ゾーンとした場合の比較では、低透水ゾーンとした方が最適透水係数はサンドイッチ構造の1/2以下となり、サンドイッチ構造の方がより現実に近いモデルと考えられる。

HDB-1、HDB-2では、十分に実測値を再現することはできなかった。これは、これらの地点では声問層が最上位に出現するため、低透水性層モデルとならないためである。HDB-1では解析値は実測値の中間的な値を示すものの、HDB-2では再現はより困難で、局所的水理構造や観測地の信頼性の検討が必要である。

熱 - 水理 - 応力変形の連成解析では、TOUGH-FLACを用いて、幌延深地層研究センタ ーの立坑仮想 1/4 モデルで検討を行った。その結果、次の知見を得た。

- ・ 掘削段階や補強を考慮しない条件で、沈下約 10cm、せん断ひずみは立坑周辺約 1m、塑性化領域も立坑周辺約 1m と推定される。
- ・ 最大せん断ひずみ増分は、連成解析結果は非連成解析結果の約2倍となっている。
- これらにより、本連成解析の適用性に関してある程度の確認が可能であった。今後、より現実的なモデルでパラメトリックな解析により、適用性検討を行う予定である。
- ・ 本コードは厳密には完全連成ではなく、解析時間もかかるため、理想的には完全 連成コードの開発が望ましい。

地下水流動解析の高速化に関する検討では、高速化の手法等について検討し、以下の知 見を得た。

- ・ 高速化の方法として、並列マシンの利用が最も効果が大きく、並列マシンの現在の世界最速は地球シミュレータ(海洋科学技術センター)である。
- ・ 並列マシンで解析コードを実行するためには、コードをベクトル化および並列化 することが必要である。
- TOUGH2 と同じアルゴリズムでベクトル化、並列化させたコード TOUGH2P を 作成し、地球シミュレータで性能評価を行った。その結果、経験的に妥当な性能 を示し、高速化は可能であるとの見通しを得た。
- TOUG2 を高速化する際、コードのどの部分を重点的に行うべきかを検討し、サブ ルーチン CYCIT 内の EOS、LINEQ、MULTI に限定することができた。
- ・ 可視化ライブラリーを調査し、5種類の候補を抽出した。

・高速化の方法として、並列マシンの利用が最も効果が大きく、並列マシンの現在の これらの研究成果に対して、各研究項目で問題点や課題を示しており、継続して研究を 進めることにより、よりよい成果が得られると考えられる。 ・ 謝辞

本研究を進めるに当たり、TOUGH2 を用いた種々の解析・検討については、LBNL (Lawlence Berkeley National Laboratory)の唐崎建二氏、伊藤一誠氏に担当して頂き、報告書の執筆をお願いした。

また、地下水流動シミュレーション解析の高速化に関する様々な検討においては、(財) 高度情報科学技術研究機構・東京事務所 計算科学技術第2部の中島研吾主任研究員に大 変お世話になった。特に、高速化概念や TOUGH2P の作成、地球シミュレーターを用い た解析では、手取り足取りの指導を頂いた。

ここに記して、感謝する次第である。

・ 参考文献

- Battistelli, A, C. Carole, K. Pruess : "The Simulator TOUGH2/EWASG for Modeling Geothermal Reservoirs with Brines and Non-Condensible Gas ", *Geothermics*, vol.26, No.4, pp.437-464, (1997)
- (株)地球科学総合研究所:"北海道北部地域における地質環境データ収集・整理報告書(核 燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)"、JNC TJ1440 99-005, (1999)
- Davis, J.P., and D.K. Davis : " Stress-dependent permeability characterization and modeling " . *Society of Petroleum Engineers*, SPE Paper No. 56813. (1999)
- 動力炉・核燃料開発事業団:" 貯蔵工学センター立地環境調査 深層ボーリング 報告書 "、 PNC TJ1027 98-012, (1987)

Finsterle, S., and P. Persoff : " Determining permeability of tight rock samples using inverse modeling ", *Water Resources Research*, Vol.33, No.8, pp.1803-1811, (1997)

- Finsterle, S., and J. Najita : "Robust Estimation of Hydrogeologic Model Parameters ", *Water Resources Research,* Vol.34, No.11, pp.2939-2947, (1998)
- 今井久他:" 堆積岩地域における広域地下水流動解析手法に関する検討(核燃料サイクル開 発機構委託研究成果報告書)"、JNC TJ1410 2001-002, (2001)
- 今井久他: "幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討(核燃料サイクル開 発機構業務委託報告書)" JNC TJ1400 2002-004, (2002)
- 井上公:"一般的インバース理論に基づく離散データの平滑化"、情報地質、No.10、pp.105 ~ 134, (1985)

Itasca Consulting Group : "FLAC3D User's Manual ", (1997)

- 伊藤一誠他:" 定常地下水位観測結果を用いた逆解析による堆積岩地域の水理地質構造把握 - 幌延深地層研究計画サイトへの適用 - ",日本応用地質学会誌(投稿中),(2004)
- 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研究開発 平成 14 年度報告 - "、JNC TN1400 2003-004、pp.3-72 ~ 3-74, (2003)
- 兼清豊比古:"北海道北部地域における地質環境データ収集・整理(核燃料サイクル開発機構研究委託内容報告書)", JNC TJ 1440 99-005, (1999)
- 小池克明、大見美智人: "地下構造モデルの構築のための補間法に関する一考察"、情報地 質、VOL.6、No.3、pp.133~146, (1987)
- Kukkonen, I.T. : "Thermal aspects of groundwater circulation in bedrock and its effect on crustal geothermal modeling in Finland, the central Fennoscandian Shield ", *Tectonophysics*, No.244, pp.119-136, (1995)
- Leverett M.C. :" Capillary behavior in porous media ", *Trans. IAME*, No.142, pp.341-358, (1941)
- Pruess, K., et al., : "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 ", Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, p.197, (1999)

Rutquvist, J., et al., : " A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, deformation in fractured porous rock ",*Int. J. of Rock. Mech. And Mining Sci.* No.39, pp.429-442, (2002)

塩野清治他:"最適化原理による地層面の推定法"、情報地質、No.12、pp.197~236, (1987) 山本他:"幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1 孔)(核燃料サイクル開発機 構委託研究成果報告書)"、JNC TJ1400 2002-010, (2002a)

山本他: "幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-2 孔)(核燃料サイクル開発機 構委託研究成果報告書)"、JNC TJ1400 2002-011, (2002b)