

前進的モデルを用いた 不均質性堆積岩評価手法の研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年2月

株式会社地球科学総合研究所

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ください。

〒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：029 282 7980
電子メール：iserv@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

前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

増井泰裕^{*}，川田耕司^{*}，加藤新^{*}，辻隆司^{**}，諏訪部瑞恵^{**}

要 旨

堆積岩分布地域における高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの選定にあたっては、地下水理の挙動に大きな影響を及ぼす地層の岩相(不均質性)分布を正確に推定することが重要である。堆積岩の岩相は、堆積過程において形成された多様な粒度分布や鉱物組成に由来するものであり、限定されたポイントデータの統計的解析手法では、必要とする十分なスケールの空間的特性を得られない可能性が大きい。そのため、堆積岩の不均質性に対応できるスケールで定量的に岩相を把握する手法を開発することが必要である。

本研究は、堆積環境・堆積岩の堆積過程を考慮した前進的モデリングという予測的堆積モデルを用い、幌延地域を対象に堆積岩の岩相分布(不均質特性)を定量的に把握する手法を開発するものである。

まず、幌延地域の堆積岩の堆積システムに関する既往研究データで、同地域における声問層・稚内層を中心とした泥質岩の堆積システムについて考察した。また、幌延深地層研究センターにおいて HDB-1 孔の岩芯を堆積学的観点から調査を行なった。さらに、孔井データ、物理探査データなどの地質データを収集し、孔井の物理検層・コア分析結果により、泥質岩の岩相・圧密特性について解析を行った。また、地震探査データについては、孔井データより地層境界を解釈し、声問層、稚内層の地下構造図、等層厚線図、復元断面図を作成し、幌延地域における声問層、稚内層の堆積システムについての検討を行った。

また、幌延地域の声問層、稚内層を念頭にした堆積岩について、堆積盆スケールでの堆積システムを再現することができる堆積モデリングソフトウェア(基本ソフトウェア)の開発を行った。この基本ソフトウェアは、数値シミュレーションによる堆積岩の三次元分布を予測するものであり、堆積過程モデルと圧密過程モデルからなる。圧密過程のモデルでは、埋没深度より堆積岩の間隙率および透水係数の推定を行うものである。また、今後の改良すべき点についての提案も行った。

本報告書は、株式会社地球科学総合研究所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 処分研究部 システム解析グループ

^{*}(株)地球科学総合研究所，^{**}石油資源開発(株)

Study on evaluation method for heterogeneous sedimentary
rocks based on forward model
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Yasuhiro Masui*, Koji Kawada*, Arata Katoh*, Takashi Tsuji**, Mizue Suwabe**

Abstract

It is very important to estimate the facies distribution of heterogeneous sedimentary rocks for geological disposal of high level radioactive waste. The heterogeneousness of sedimentary rocks is due to variable distribution of grain size and mineral composition. The objective of this study is to establish the evaluation method for heterogeneous sedimentary rocks based on forward model.

This study consisted of geological study for Horonobe area and the development of soft wear for sedimentary model.

Geological study was composed of following items.

1. The sedimentary system for Koetoi and Wakkanai formations in Horonobe area was compiled based on published papers.
2. The cores of HDB-1 were observed mainly from sedimentological view.
3. The facies and compaction property of argillaceous rocks were studied based on physical logs and core analysis data of wells.
4. The structure maps, isochrone maps, isopach maps and restored geological sections were made.

The soft wear for sedimentary model to show sedimentary system on a basin scale was developed. This soft wear estimates the facies distribution and hydraulic conductivity of sedimentary rocks on three dimensions scale by numerical simulation.

Work performed by JGI, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai Works

*JGI, Inc. **Japan Petroleum Exploration Co.

目 次

1	緒言	1
2	幌延地域における地質データの収集	2
3	幌延地域の稚内層・声問層の堆積システム	4
3.1	地質概説	4
3.1.1	地質構造	4
3.1.2	地質層序	5
3.2	稚内層	6
3.2.1	稚内層の堆積相と堆積環境	6
3.2.2	稚内層堆積時の古地形	13
3.2.3	稚内層の堆積システム	16
3.3	声問層	19
3.3.1	声問層の岩相記載	19
3.4	稚内層・声問層の年代と海水準変動の関係	19
3.4.1	稚内層・声問層の年代と対比	19
3.4.2	古気候の推定	22
3.5	まとめ	22
4	地質データ解析	24
4.1	検層解析	24
4.1.1	岩相解析	24
4.1.2	孔井間対比	37
4.2	地震探査記録解釈	41
4.2.1	時間構造図	43
4.2.2	深度構造図	48
4.2.3	等層厚線図	53
4.3	地質構造発達史	56
4.4	声問層，稚内層の岩芯観察	59
4.4.1	目的	59
4.4.2	調査方法	59
4.4.3	調査深度および岩相	60
4.4.4	岩芯観察のまとめ	77
4.5	声問層および稚内層珪藻質泥岩の圧密特性	79
4.5.1	使用データ	79
4.5.2	手法	79
4.5.3	珪藻質岩のかさ密度 (R _{hob})，ガンマ線値 (GR)，深度の関係	80

4.5.4	珪藻質泥岩の間隙率，GR，深度の関係.....	81
4.5.5	間隙径分布	82
4.5.6	珪藻質泥岩の浸透性へ砕屑物含有量とシリカ鉱物の続成転移が及ぼす影響	83
4.5.7	今後の課題	84
5	前進的モデルを用いた堆積モデリングソフトウェアの開発.....	85
5.1	基本ソフトウェアの開発.....	86
5.1.1	ソフトウェアの概念設計.....	86
5.1.2	ソフトウェアの機能設計・コーディング	92
5.1.3	二次堆積分布の検討（予察）.....	100
5.1.4	テストラン	104
5.2	今後の提案.....	117
5.2.1	不均質性評価手法の提案.....	117
5.2.2	基本ソフトウェアについての課題	122
6	結言.....	124
7	参考文献	125
8	付録	付
	付録-1.....	付-1(1)
	付録-2.....	付-2(1)

目 次

図 2-1	孔井，地震探査データ位置図	3
図 3.1-1	稚内層の等層厚線図	5
図 3.1-2	天北・羽幌地域の地質層序表	6
図 3.2-1	タイプ A の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）	8
図 3.2-2	曲淵におけるタイプ A のスケッチ（福沢，1988）	8
図 3.2-3	タイプ B の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）	9
図 3.2-4	タイプ C の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）	10
図 3.2-5	タイプ D の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）	11
図 3.2-6	タイプ E の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）	12
図 3.2-7	タービダイト層と非タービダイト層の厚さの関係	13
図 3.2-8	稚内層の等層厚線図と 5 つの岩相（タイプ A～E）の分布 （福沢，1988 に加筆）	14
図 3.2-9	南西-北東方向の模式断面図	15
図 3.2-10	稚内層の堆積盆復元図と 5 つの岩相（タイプ A～E）の分布 （福沢，1988 に加筆）	16
図 3.2-11	稚内層の堆積システム（福沢，1988）	17
図 3.2-12	流メカニズムに基づく稚内層の堆積システム（福沢，1992）	17
図 3.2-13	層の堆積盆復元図（福沢，1992）	18
図 3.4-1	珪藻層序と FT 年代測定に基づく層序表	20
図 3.4-2	稚内層・声問層の岩相对比図（福沢，1985）	21
図 4.1-1	X 線分析による SiO_2 と Al_2O_3 の関係	25
図 4.1-2	X 線分析による Al_2O_3 の量と検層での GR との関係	25
図 4.1-3	HDB-1 における鉱物組成モードと珪藻の量によるゾーニング	27
図 4.1-4	HDB-2 における鉱物組成モードと珪藻の量によるゾーニング	27
図 4.1-5	X 線分析による Al_2O_3 と Corrected Rhob との関係	28
図 4.1-6	HDB-1 コンポジットログ	30
図 4.1-7	HDB-2 コンポジットログ	31
図 4.1-8	HDB-3 コンポジットログ	32
図 4.1-9	HDB-4 コンポジットログ	33
図 4.1-10	HDB-5 コンポジットログ	34
図 4.1-11(1)	基礎試錐「天北」コンポジットログ その 1	35
図 4.1-11(2)	基礎試錐「天北」コンポジットログ その 2	36
図 4.1-12	パターン 1：概念図と例(HDB-1 孔)	37
図 4.1-13	パターン 2：概念図と例(HDB-1 孔)	38
図 4.1-14	パターン 3：概念図と例(HDB-1 孔)	38
図 4.1-15	パターン 4：概念図と例(HDB-1 孔)	38

図 4.1-16	孔井対比図	40
図 4.2-1	地震探査断面 TP90-1D 深度断面	41
図 4.2-2	地震探査測線と孔（坑）井の位置図	42
図 4.2-3	稚内層基底時間構造図	45
図 4.2-4	声問層基底時間構造図	46
図 4.2-5	勇知層基底時間構造図	47
図 4.2-6	時間 - 深度変換で用いた，時間 - 深度カーブ	48
図 4.2-7	稚内層基底深度構造図	50
図 4.2-8	声問層基底深度構造図	51
図 4.2-9	勇知層基底深度構造図	52
図 4.2-10	稚内層等厚線図	54
図 4.2-11	声問層等厚線図	55
図 4.3-1	基礎試錐「天北」の孔隙率（左）と復元図作成用にそれを用いてキャリブレキャリブレーションをしたコンパクションカーブ	56
図 4.3-2	基礎物理探査「天北」の深度断面図を用いた地質構造発達史復元図	58
図 4.5-1	珪藻質泥岩のかさ密度（ R_{hob} ）とガンマ線値（GR）の深度変化	81
図 4.5-2	珪藻質泥岩の間隙率とガンマ線値（GR）の深度変化	82
図 4.5-3	珪藻質泥岩の間隙径分布（佐藤，2003）	83
図 5.1-1	稚内層の堆積モデル概念図	88
図 5.1-2	時間による海岸線位置移動の概念図	89
図 5.1-3	圧密過程の概念図	90
図 5.1-4	各タイムステップ堆積物の圧密過程概念図	90
図 5.1-5	圧密過程概念図（複数の堆積物種の場合）	91
図 5.1-6	セル分割図	93
図 5.1-7	基本ソフトウェア・フロー図	93
図 5.1-8	Suspension モデル流速情報入力値	102
図 5.1-9	Suspension モデルシミュレーション結果	103
図 5.1-10	基本情報およびイベント堆積位置	105
図 5.1-11	水深・堆積速度グラフ	106
図 5.1-12	海岸線位置・イベント頻度グラフ	106
図 5.1-13	各イベント・堆積物のイベント堆積量	107
図 5.1-14	深度 - 間隙率プロット	108
図 5.1-15	間隙率 - 透水係数プロット	108
図 5.1-16	埋没深度グラフ	109
図 5.1-17	間隙率マップ	109
図 5.1-18	水平透水係数マップ	110
図 5.1-19	垂直透水係数マップ	110
図 5.1-20	堆積物 1（砂質岩）マップ	111

図 5.1-21	堆積物 2 (泥質岩) マップ	111
図 5.1-22	堆積物 3 (珪藻) マップ	112
図 5.1-23	結果断面図 (間隙率): グリッドサイズ感度	115
図 5.1-24	結果断面図 (間隙率): タイムステップ長感度	116
図 5.2-1	比較パラメータ関係図	118
図 5.2-2	不均質性評価概念図	119
図 5.2-3	不均質性評価手法概念図	120

表 目 次

表 3.2-1	稚内層の珪藻質泥岩の分類表（福沢，1988）.....	7
表 4.3-1	復元図作成時に見積もられた CDP ごとの削剥量と各地層の厚さ	57
表 5.1-1	声問層・稚内層堆積システムの構成要素	87
表 5.1-2	入力情報（対象地域および堆積時間）.....	94
表 5.1-3	入力情報（堆積過程）.....	94
表 5.1-4	入力情報（圧密過程）.....	95
表 5.1-5	中間・結果情報	96
表 5.1-6	基本ソフトウェアの関数一覧	100
表 5.1-7	Suspension モデル一般情報入力値	101
表 5.1-8	Suspension モデル堆積物情報入力値	101
表 5.1-9	基本パラメータ情報一覧	104
表 5.1-10	イベント堆積位置情報	105
表 5.1-11	間隙率・透水係数情報	107
表 5.1-12	テストランケース一覧	112
表 5.1-13	実施ケースのセル数，所要時間，必要メモリ	113

写 真 目 次

写真 4.4-1	深度 210.45 ~ 210.52m	泥岩	60
写真 4.4-2	深度 199.00 ~ 199.10m	シルト質泥岩	61
写真 4.4-3	深度 196.00 ~ 196.50m	細粒 ~ 中粒砂岩	61
写真 4.4-4	深度 314.92 ~ 315.00m	シルト質泥岩	62
写真 4.4-5	深度 315.85m	竹輪状の断面を示す生痕化石	63
写真 4.4-6	深度 348.25 ~ 348.45m	シルト質泥岩	64
写真 4.4-7	深度 353.80 ~ 353.90m	シルト質泥岩	64
写真 4.4-8	深度 386.80 ~ 386.88m	シルト質泥岩	65
写真 4.4-9	深度 401.00 ~ 401.10m	シルト質泥岩	66
写真 4.4-10	深度 417.15 ~ 417.25m	シルト質泥岩	67
写真 4.4-11	深度 419.45 ~ 419.55m	シルト質泥岩	67
写真 4.4-12	深度 423.09 ~ 423.22m	シルト質泥岩	68
写真 4.4-13	深度 417.48 ~ 417.62m	シルト質泥岩	68
写真 4.4-14	深度 536.43 ~ 536.55m	シルト質泥岩	69
写真 4.4-15	深度 353.58 ~ 535.68m	シルト質泥岩	69
写真 4.4-16	深度 539.21 ~ 539.31m	シルト質泥岩	70
写真 4.4-17	深度 666.00 ~ 666.10m	シルト質泥岩	71
写真 4.4-18	深度 668.25 ~ 668.32m	シルト質泥岩	71
写真 4.4-19	深度 669.50 ~ 669.62m	シルト質泥岩	72
写真 4.4-20	深度 669.50 ~ 669.62m	シルト質泥岩	72
写真 4.4-21	深度 669.50 ~ 669.62m	シルト質泥岩	73
写真 4.4-22	深度 672.28 ~ 672.43m	シルト質泥岩	74
写真 4.4-23	深度 675.43 ~ 675.56m	シルト質泥岩	74
写真 4.4-24	深度 696.80 ~ 696.90m	シルト質泥岩	75
写真 4.4-25	深度 695.70 ~ 695.80m	シルト質泥岩	76
写真 4.4-26	深度 707.90 ~ 708.00m	シルト質泥岩	76
写真 4.4-27	深度 689.75 ~ 689.85m	泥岩	77

1 緒言

地層中に存在する地下水や物質の挙動は、堆積岩の有する不均質性の程度に依存し大きく異なる。堆積岩の不均質性は、堆積過程において形成された多様な粒度分布や鉱物組成に由来するものであり、堆積岩分布地域において地下水理構造を考えるときには、このような不均質性について把握する必要がある。よって堆積岩の不均質場の特性を定量的に把握する手法を開発することは、サイト特性調査及びそれに基づき実施する性能評価解析において重要な課題である。

従来、堆積岩の不均質性を再現するためには、試錐孔調査などより取得された限定的なデータから堆積相分布を予測し、その背後にある堆積現象を理解する「バックワードモデリング」と呼ばれる手法が一般的に用いられてきた。しかし、この手法では堆積岩の不均質場の特性を把握するために十分な空間的特性分布が得られない可能性がある。

本研究では、十分な空間的スケールを考慮し堆積岩の不均質性状を定量的に把握するために、堆積環境・堆積岩の堆積過程を考慮した「前進的モデリング」という手法を用い、幌延地域を対象に「予測的堆積モデル」を開発することを目的とする。

まず、幌延地域の堆積岩の堆積システムを明らかにするために、

既往研究による同地域の声問層・稚内層の堆積システムの考察

HDB-1 孔の岩芯の堆積学的観点からの再調査

孔井データによる声問層・稚内層の岩相・圧密特性について解析

地震探査データによる声問層、稚内層の地下構造図、等層厚線図、復元断面図を作成し、幌延地域における声問層、稚内層の堆積システムについての考察

を行う。

また、幌延地域の声問層、稚内層を念頭にした堆積岩について、堆積盆スケールでの堆積システムを再現することができる堆積モデリングソフトウェア(基本ソフトウェア)の開発を行う。この基本ソフトウェアは、数値シミュレーションによる堆積岩の三次元分布を予測するものであり、堆積過程モデルと圧密過程モデルからなる。圧密過程のモデルでは、埋没深度より堆積岩の間隙率および透水係数の推定を行うものである。また、今後の改良すべき点についての提案も行う。

2 幌延地域における地質データの収集

サイクル開発機構がこれまでに幌延地域で取得した地質情報以外の孔井，地震探査データについて，可能なかぎり収集し，4章の地質データ解析に資した。

今回入手した孔井，地震探査データは以下の通りである。

孔井データ一覧

孔井名	掘削会社	掘削年	標高 (m)	坑口座標		座標系	掘止め深度 (m)	掘止め層準
				緯度	経度			
基礎試錐天北	通産省	1993	41.7	N45°04'22.5"	E141°52'21.4"	東京系	5,050	上部蝦夷層群
北川口SK 1	石油資源開発	1984	21.7	N44°56'21.9"	E141°48'01.3"	東京系	4,505	上部蝦夷層群
川口R 3	帝国石油	1949	112	N44°56'23.6"	E141°47'14.4"	東京系	2,316	築別層
北進R-1			116.3	N45°02'25.7"	E141°53'12.7"	東京系	1,925	増幌層
大曲R 1.1a	帝国石油	1955	62.8	N45°01'54.2"	E141°53'45.1"	東京系	2,004	増幌層
幌延NR-1		1962	30	N44°58'19.2"	E141°55'27.5"	東京系	1,003	声問層
幌延TC-1	天北化学	1958	5.5	N45°00'33.6"	E141°48'37.3"	東京系	1,501.50	稚内層
豊富R-1	日本石油	1924	20	N45°04'24.5"	E141°50'28.0"	東京系	960.6	増幌層?
豊富R-2	帝国石油	1948	21.3	N45°04'46.0"	E141°50'23.5"	東京系	864	増幌層?
豊富R-3	帝国石油	1957	20	N45°04'08.2"	E141°50'43.8"	東京系	901.3	増幌層?

地震探査データ一覧

調査名	測線名	事業主	調査年
天塩平野	TSOH-A-1	石油公団	1972
豊富～幌延	TMHR-1-2	石油資源	1975
幌延南方	SHRB-1	石油資源	1975
豊富～北川口	TYKT-V-1	石油資源	1977
天塩南方	STSO-A	石油資源	1977
北川口	KTWG-A	石油資源	1977
幌延	HORO-2	石油資源	1983
天北地域(D)	TP90-1D	石油公団	1990
天北'92	T92-1	石油資源	1992
天北浅海域	ST96-2	石油公団	1996
幌延地下構造調査	Line-1.2	サイクル機構	2002

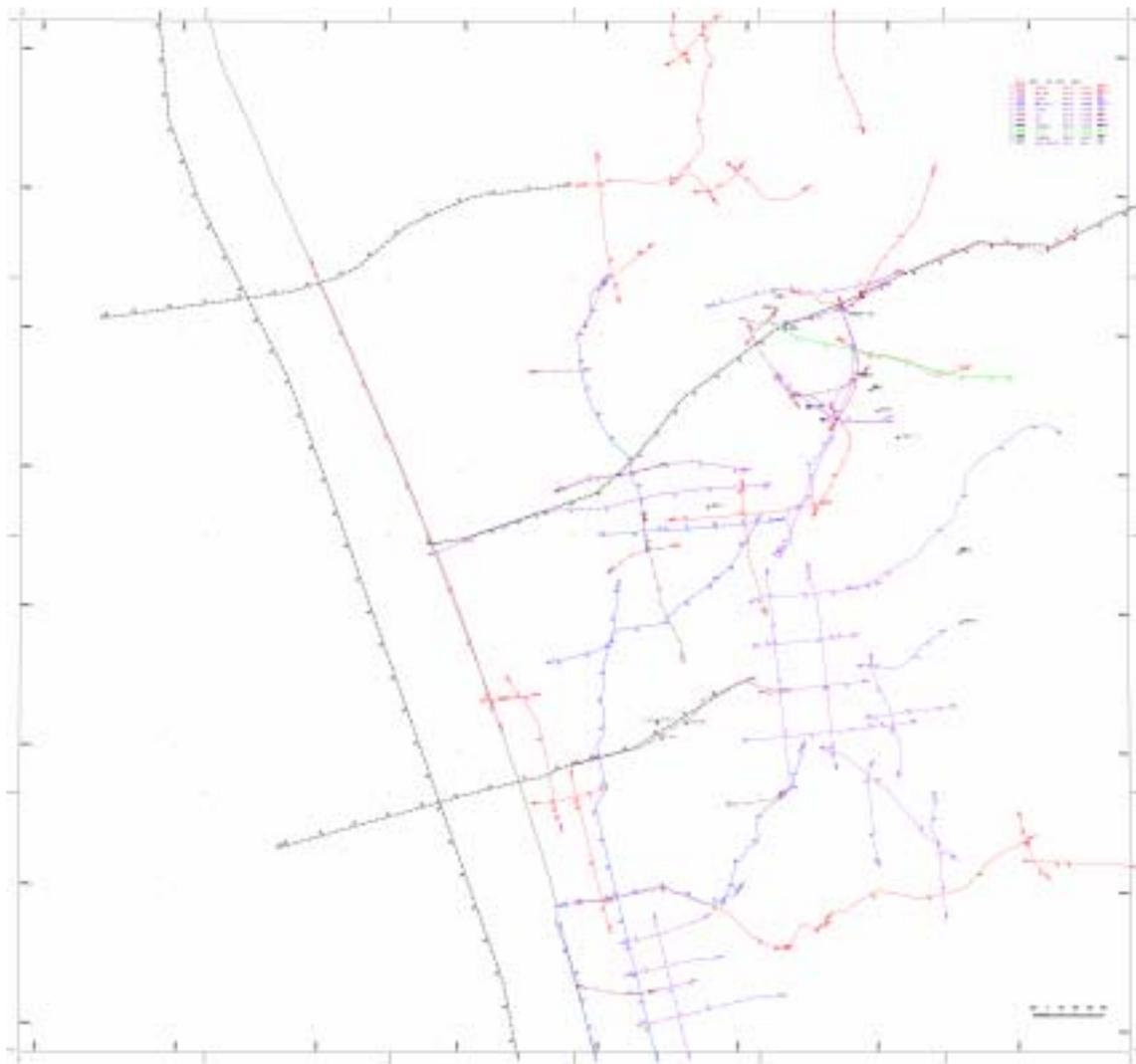


図 2 1 孔井，地震探査データ位置図

3 幌延地域の稚内層・声問層の堆積システム

本章では、幌延地域の堆積盆全体としての堆積システムを理解するために、天北・羽幌地域の稚内層・声問層を詳細に調査してきた福沢仁之氏（都立大理学部教授）の論文を中心に、同層の堆積システムを考察する。

3.1 地質概説

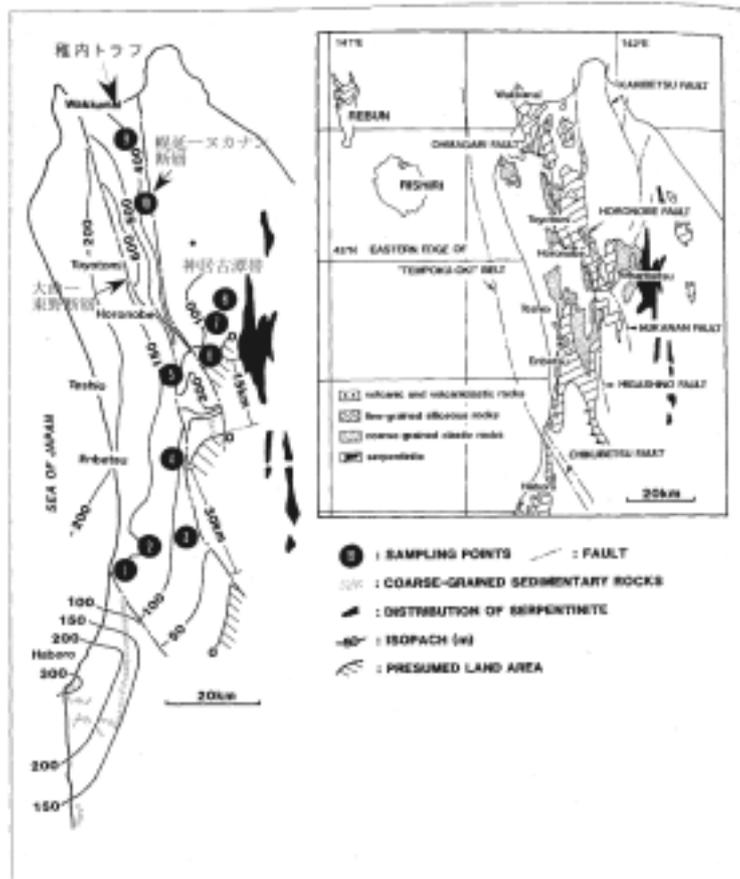
幌延地域の地質構造と同地域に分布する新第三系の層序を福沢(1985)、福沢(1992)に基づき概説する。

3.1.1 地質構造

天北・羽幌地域には、南北性の幌延 - ヌカナン断層と大曲 - 東野断層があり、両断層に挟まれた地域は稚内トラフと呼ばれる。このトラフに平行して東西両側に相対的隆起域がある。東側は“神居古潭帯”の蛇紋岩、西側は遠別南東側の火山砕屑岩からなる（福沢,1992）（図 3.1-1）。

稚内トラフの原型が形成されはじめたのは、日本海拡大開始の時期である。19Ma 頃に日本海拡大が開始し、天北・羽幌地域には西側へひらいた海域が広がった。さらに 16Ma 頃には北見枝幸(きたみえさし)から名寄東方は隆起して陸化し、天北・羽幌地域はトラフ状海盆底となった。これが稚内トラフの原型である。10Ma 頃の稚内層堆積時には、火山活動によって海底地形の起伏が大きくなり、さらにトラフ状海盆は分化し狭くなる。したがって、稚内層とそれに引き続く声問層の分布はこの堆積盆の形状に大きく影響され、トラフ内部では著しく厚くなっている（福沢ほか、1992）。

本調査地域は、この稚内トラフ東側の陸棚斜面～海盆底に相当し、稚内層が相対的厚く堆積している地域である。



Index map and the relationship between sampling localities and the isopach map of the Wakkai Formation.
 1 : Nishimama Coast (金網内海岸), 2 : Furebetogawa (萬達別川), 3 : Takasawa (24号の沢), 4 : Utsugawa (ウツ川), 5 : Nakazugawa (ヌカヅ川), 6 : Tokubetsu (岡東沢), 7 : Sazawa (right) (18輪沢 (右)), 8 : Sazawa (left) (18輪沢 (左)), 9 : Kabuka (樺岡), 10 : Magaribuchi (森岡)

図 3.1-1 稚内層の等層厚線図 (福沢, 1992 に加筆)

3.1.2 地質層序

北海道天北・羽幌地域に分布する上部新第三系の層序, 時代, 堆積環境について, 福沢 (1985), 福沢 (1987), 福沢 (1988), 福沢 (1992), 嵯峨山・保柳 (1993), 木村ほか (1995) に基づき概説する。

天北・羽幌地域の第三系は, 下位から中部中新統増幌層, それを不整合に覆う稚内層, その上に整合的に重なる声問層, 勇知層, 更別層の4層に分けられる (福沢, 1985) (図 3.1-2)。稚内層から更別層にかけて, 上方浅海化を示している。この報告書では, 稚内層, 声問層についてとくに詳しく記す。

上部中新統稚内層は, 上位の上部中新統声問層とは一部指交関係にある (福沢, 1985)。稚内層は, 主に層状珪藻質泥岩から構成される。層状珪藻質泥岩は, 泥岩部

と珪藻質部からなり、一般に碎屑（泥岩）部が珪藻質部に比べて柔らかく、硬軟互層形態を示す。福沢（1988）は、その色調・bioturbationの有無・基底砂岩の有無・層理面の形態・淘汰度・級化構造の有無・葉理形態から、稚内層の層状珪藻質泥岩をタイプ A~E の5つに分類している。声問層は、含珪藻凝灰質塊状泥岩からなるが、タイプ分けはされていない。

AGE	FORMATION	THICKNESS(m)	LITHOLOGY		
NEOGENE	PLIOCENE	SARABETSU	0 400	alternating beds of conglomerate, sandstone and mudstone, intercalated by coal seams	
		YUCHI	0 500	loose fine - medium grained sandstone	
	MIOCENE	late	KOETOI	600 1400	diatomaceous pebbly mudstone and sandy siltstone basal part: tuffaceous fine-medium grained sandstone uppermost part: slumping structure
			WAKKANAI	0 600	siliceous turbiditic mudstone (intercalation of non-siliceous mudstone) basal part: andesitic volcanic breccia and tuffaceous sandstone
		middle	MASUPORO	0 1600	alternating beds of conglomerate, sandstone and mudstone, intercalated by "slumping" beds

Fig. 1. Stratigraphy of the Late Neogene in northern Hokkaido. Modified from FUKUSAWA (1985).

図 3.1-2 天北・羽幌地域の地質層序表（福沢，1987）

3.2 稚内層

福沢（1988）は、稚内層の堆積相区分とそれぞれの堆積環境の推定、さらにそれらの分布様式から稚内層の堆積システムを考察した。以下にその概要を示す。

3.2.1 稚内層の堆積相と堆積環境

稚内層は、主に層状珪藻質泥岩から構成され、塊状泥岩・砂岩・凝灰岩を挟む。基底部に層厚 10~30m の含礫粗粒砂岩をもち、安山岩・砂岩などの礫を含有する。福沢（1988）は、タイプ A~E の5つの堆積相に分類し、堆積環境を推定した。

タイプ A 以外の4つは埋没深度約 1000m 以上を示すオパール CT 帯中のみ認められ、タイプ A はオパール A 帯中のみ認められる。これはタイプ A 以外の4つの硬質薄層の形成がオパール A 帯からオパール CT 帯へのシリカ鉱物の続成転移に伴う岩石硬質化に由来していると推定され、オパール A 帯では肉眼で認めることができない

ためである。しかし、同様の堆積相がオパール A 帯にも存在する可能性は高いと考えられる。以下に福沢(1988)に基づき、稚内層のタイプ A~E を記述する(表 3.2-1)。

表 3.2-1 稚内層の珪藻質泥岩の分類表(福沢, 1988)

LAYERING TYPE	COLOUR	BIOTURBATION	BASAL SAND	BASAL CONTACT	SORTING	GRAIN SIZE	GRADING	LAMINATION	INTERPRETATION
A	I	light-dark	common	present or absent	sharp planer	poor	sand to clay	present	● COMPOSITE ACCUMULATION I: episodes of rapid deposition of terrigenous mud against constant supply of sand II: episodes of rapid deposition of terrigenous sand
	II	dark	rare	rare	sharp planer or irregular	good	sand	absent	
B	I	light	common	absent	sharp planer	moderate to poor	silt to clay	(massive)	● COMPOSITE ACCUMULATION episodes of turbidity current deposition (I) of terrigenous sand and/or mud against constant slow deposition (I) of siliceous tests
	II	dark	rare	common	sharp irregular (erosion)	good	sand to clay	common	
C	I	light	rare	rare	sharp irregular (erosion)	good	sand to clay	rare	● COMPOSITE ACCUMULATION episodes of turbidity current deposition (I) of siliceous tests against constant slow deposition (I) of terrigenous mud ● SEDIMENTARY DIFFERENTIATION depositional separation of siliceous tests (I) and terrigenous mud (II) from a mixture by turbidity current
	II	dark	rare	absent	sharp planer or gradational	moderate to poor	silt to clay	absent	
D	I	dark	rare	present or absent	gradational to sharp planer	moderate to good	silt to clay	absent	● DIAGENETIC DIFFERENTIATION?
	II	light	rare	absent	gradational or sharp planer	good	sand to clay	absent	
E	I	light	rare	absent	sharp planer	good	silt to clay	absent	● COMPOSITE ACCUMULATION episodes of turbidity current deposition (I) of siliceous tests against constant slow deposition (I) of terrigenous mud ● FLUCTUATING PRODUCTION OF SILICA episodes of rapid (I) and slow (II) production of silica-secreting organisms in surface water against constant supply of terrigenous mud
	II	light	?	absent	sharp planer	good	silt to clay	absent	

I: INDURATED LAYER II: NOT INDURATED LAYER

Classification of Neogene bedded siliceous rocks in northern Hokkaido.

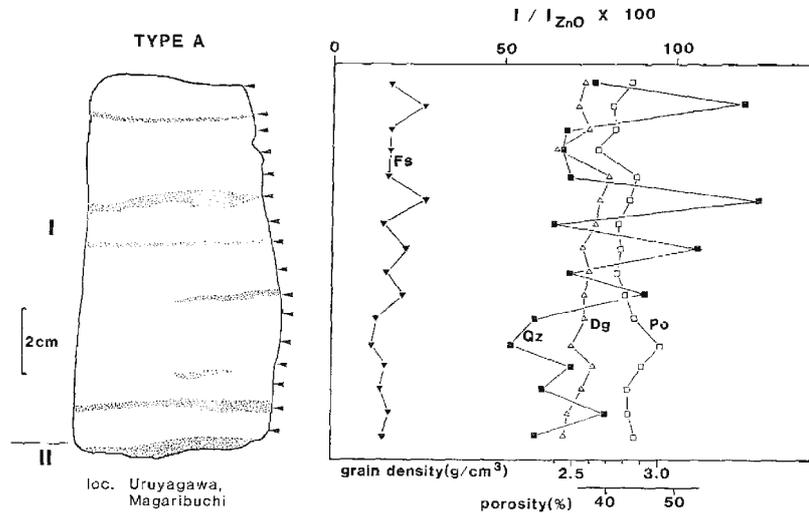
(1) タイプ A

< 堆積相 >

- 灰色～暗灰色の珪藻質細粒砂岩・砂質シルト岩からなる硬質薄層 (I) と、暗灰色細粒砂岩からなる軟質薄層 (II) の互層形態を示す (図 3.2-1)。硬質薄層は、珪藻化石に富む細粒砂岩と砂質シルト岩との細互層からなり、軟質薄層に比べて淘汰が不良である。bioturbation は硬質薄層にのみ認められる。硬質薄層の細粒砂岩中には海緑石が点在し、平行葉理・レンズ状葉理が認められる。曲淵地域のタイプ A では、硬質薄層中の砂質シルト岩の基底部では下位層を削り込み (scour and fill structure) がみられ、この砂質シルト岩には珪藻殻や海綿骨針を多量に含む細礫サイズの粘土質ペレット状小岩片が観察される。この小礫を除くと粒子は上方へ細粒化する (図 3.2-2)。
- 軟質薄層を構成する細粒砂岩中には平行葉理や斜交葉理が認められるが、海緑石や bioturbation は認められない。
- 陸源性碎屑粒子 (石英・長石) の含有量は砂質シルト岩に比べて、硬軟両薄層の細粒砂岩に多い。
- 細粒砂岩に比べて砂質シルト岩の間隙率は大きな値を示し、粒子比重は小さな値

を示す傾向がある。これは比重の大きい石英・長石よりも、細粒粘土鉱物や珪藻質生物殻が多く含まれていることを示す。

- タイプ A は現在のところオパール A 帯にのみ認められ、オパール CT 帯には認められない。



Vertical change of detrital materials, porosity and grain density with a type A sequence. Sample collected at Magaribuchi, Tenpoku region. Fs : feldspar (solid triangles), Qz : quartz (solid squares), Dg : grain density (open triangles), Po : porosity (open squares). I : indurated layer II : not indurated layer. I/I_{ZnO} : intensities of quartz (101), feldspar (002) and opal-CT (101)/intensity of zinc oxide (101). The arrows show horizons of investigated chip-samples, collecting within a sequence.

図 3.2-1 タイプ A の模式図と岩石学的特徴 (福沢, 1988)

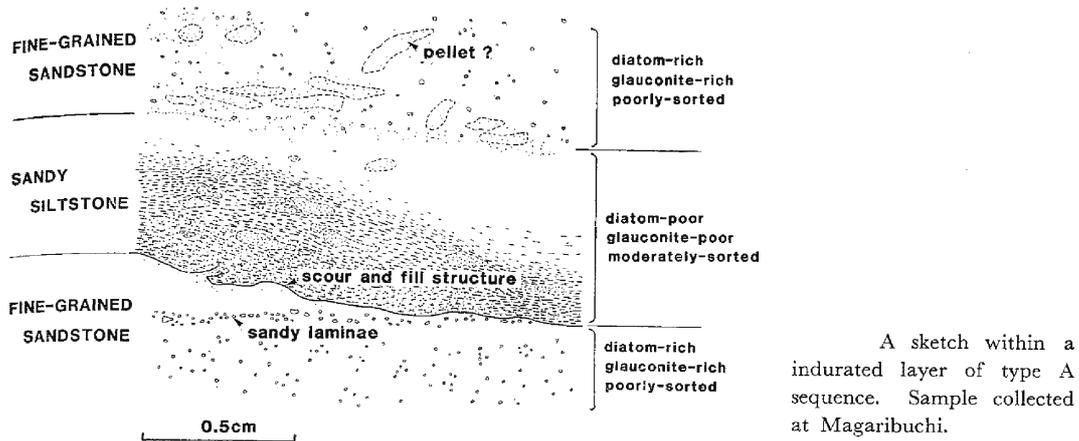


図 3.2-2 曲測におけるタイプ A のスケッチ (福沢, 1988)

< 堆積環境 >

- 海緑石は堆積速度が遅いことを示す指標であることから、海緑石を含む硬質薄層中の珪藻化石に富む細粒砂岩の堆積速度は、硬質薄層の砂質シルト岩と軟質薄層

の細粒砂岩の堆積速度と比べて遅かったものと推定される。

- 硬質薄層の砂質シルト岩は泥質バンクから、軟質薄層の細粒砂岩は陸域から、それぞれ間欠的に流入し、急速に堆積したと考えられる。一方、硬質薄層中の細粒砂岩は海緑石が形成される水深の溶存酸素がある環境で相対的に遅い堆積速度で堆積した。

(2) タイプB

<堆積相>

- 灰色の珪藻質泥岩からなる硬質薄層(I)と暗灰色の砂質泥岩からなる軟質薄層(II)の互層。軟質薄層に比べて硬質薄層は、bioturbationが発達し、淘汰が不良、厚い。軟質薄層は、級化構造を示し、基底面がsharp irregularを示して下位層を削りこんでいる、基底部は中粒～細粒砂サイズにまで粗粒化する場合がある、波状葉理がある、などの特徴があるが、硬質薄層にはそのような特徴はみられない(図3.2-3)
- 陸源性碎屑粒子(石英・長石)は、軟質薄層に多く、硬質薄層に少ない。
- このタイプはオパールCT帯に含まれる。

<堆積環境>

- 溶存酸素のある環境で珪藻質生物殻の定常的な堆積作用が生じている堆積場に、陸源性碎屑粒子に富む乱泥流の間欠的な流入によって形成されたタービダイトと推定される。その後、続成変質過程で珪藻質生物殻が溶解して、そのシリカが基質をセメントして差別的な硬質化が生じたものと推定される。

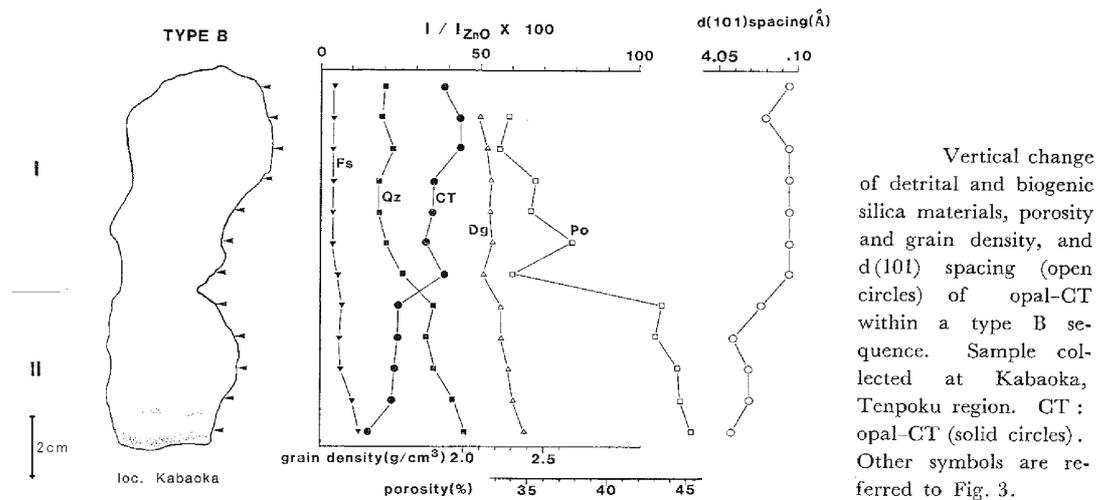


図 3.2-3 タイプBの模式図と岩石学的特徴 (福沢, 1988)

(3) タイプC

< 堆積相 >

- 灰色の珪藻質泥岩・砂質泥岩からなる硬質薄層 (I) と暗灰色の泥岩からなる軟質薄層 (II) の互層。硬質薄層 (I), 軟質薄層 (II) とともに composite burrows が認められるが, 硬質薄層 (I) の方が淘汰は良好である。硬質薄層の基底面は細粒砂サイズまで粗粒化する場合があること, 陸源性碎屑粒子に級化構造がみられること, 基底面が sharp irregular を示して下位層を削りこんでいること, などの特徴がみられるが, 軟質薄層にはみられない。軟質薄層には平行葉理がみられ, 硬質薄層にはレンズ状葉理がみられる (図 3.2-4)。
- 厚さは, 硬質薄層 (I) の方が軟質薄層より厚い。

< 堆積環境 >

- 硬質薄層にみられる特徴 (級化構造, 削り込み) から, 乱泥流により堆積したと推定される。その上位の軟質薄層は基底面が不明瞭であることから, 下位の硬質薄層から一連に堆積したことが推定される。
- 硬質薄層のうち陸源性碎屑粒子部分に級化構造がみられるが, 珪藻質粒子部分にはみられないのは, 比重の違いが原因と考えられる。珪藻質粒子は陸源性粒子と比べて, 沈降速度が遅いため, 級化構造が形成されなかったと考えられる。

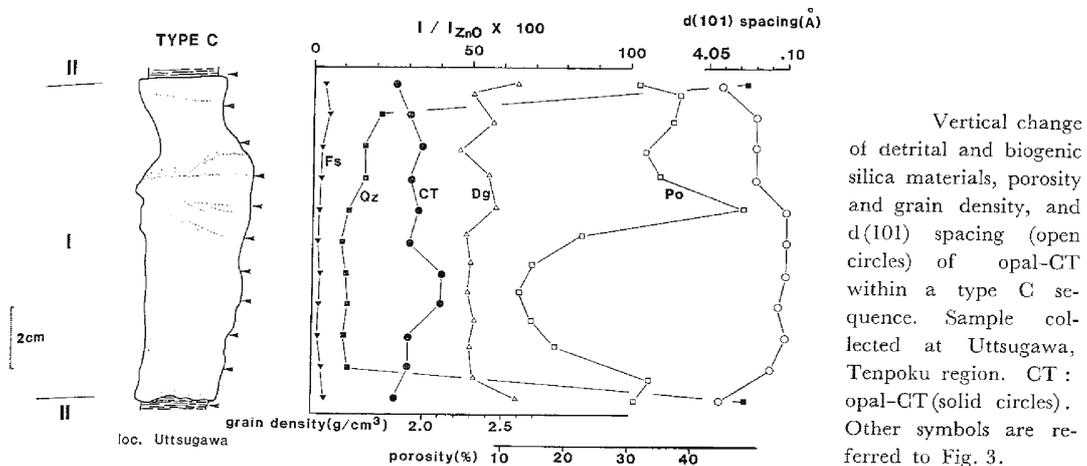


図 3.2-4 タイプCの模式図と岩石学的特徴 (福沢, 1988)

(4) タイプD

< 堆積相 >

- 暗灰色の泥岩からなる硬質薄層 (I) と灰色の珪藻質砂質シルト岩からなる軟質薄層 (II) の互層。硬質薄層 (I), 軟質薄層 (II) とともに composite burrows が認め

られることがあり，淘汰は両者とも良好である。両薄層の境界面は不明瞭なことが多く，級化構造はみられない。レンズ状葉理は両薄層に認められることが多い。軟質薄層の方が陸源性碎屑粒子の含有量が多い（図 3.2-5）。

- 硬質薄層に比べて軟質薄層はオパール CT の含有量が一般に多い。
- タイプ A,B,C,E に該当しないものをタイプ D とした。

< 堆積環境 >

- 解釈できず

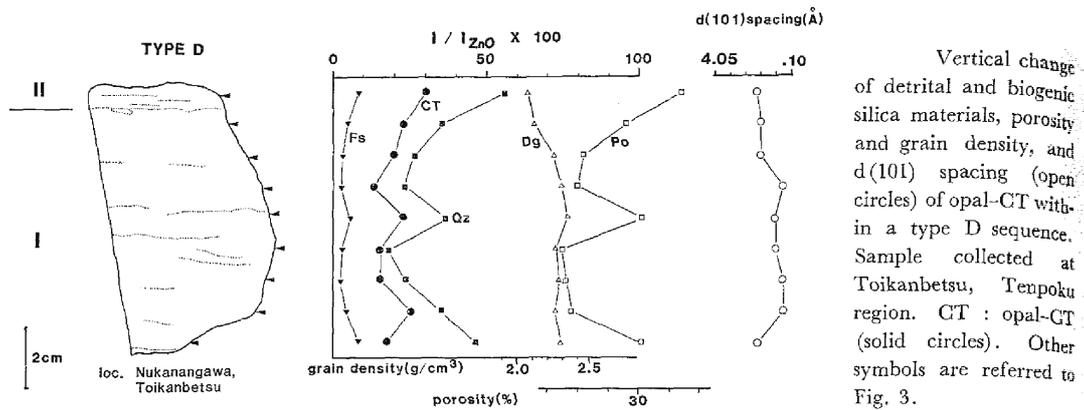


図 3.2-5 タイプ D の模式図と岩石学的特徴（福沢，1988）

(5) タイプ E

< 堆積相 >

- 灰色の珪藻質泥岩からなる硬質薄層 (I) と極薄の灰色泥岩からなる軟質薄層 (II) の互層。軟質薄層を欠くことも多い。両薄層の境界層理面はきわめて明瞭，淘汰度は良好。硬質薄層の内部には不連続な平行葉理がみられる（図 3.2-6）。
- 1 枚の硬質薄層内部には，上位へ向かって陸源性碎屑粒子の含有量が少なくなり，オパール CT の量が多くなる特徴が明瞭にみられる。

< 堆積環境 >

- 次の 2 つの可能性が推定される。1) 陸源性碎屑粒子の堆積量が一定のところから珪藻生産量が増加し，珪藻質堆積物の堆積量が増加した。2) 珪藻質生物殻に富む乱泥流によって堆積したが，粒子の比重の違いによって珪藻質生物殻が単層上位に多く，陸源性碎屑粒子が下位にやや多くなった。後者の解釈に従えば，タイプ E はタイプ C と比べて，供給源より遠いところで堆積した乱泥流堆積物と推定される。

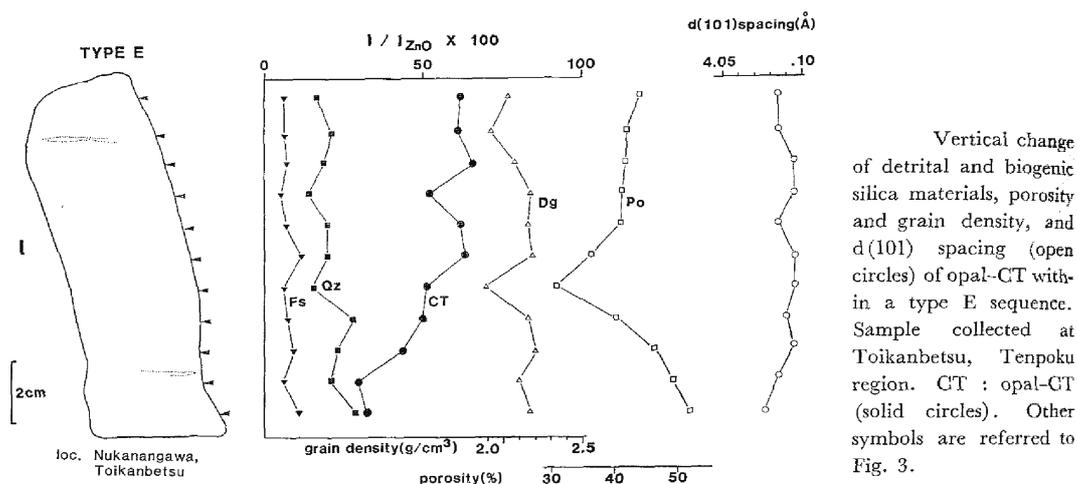
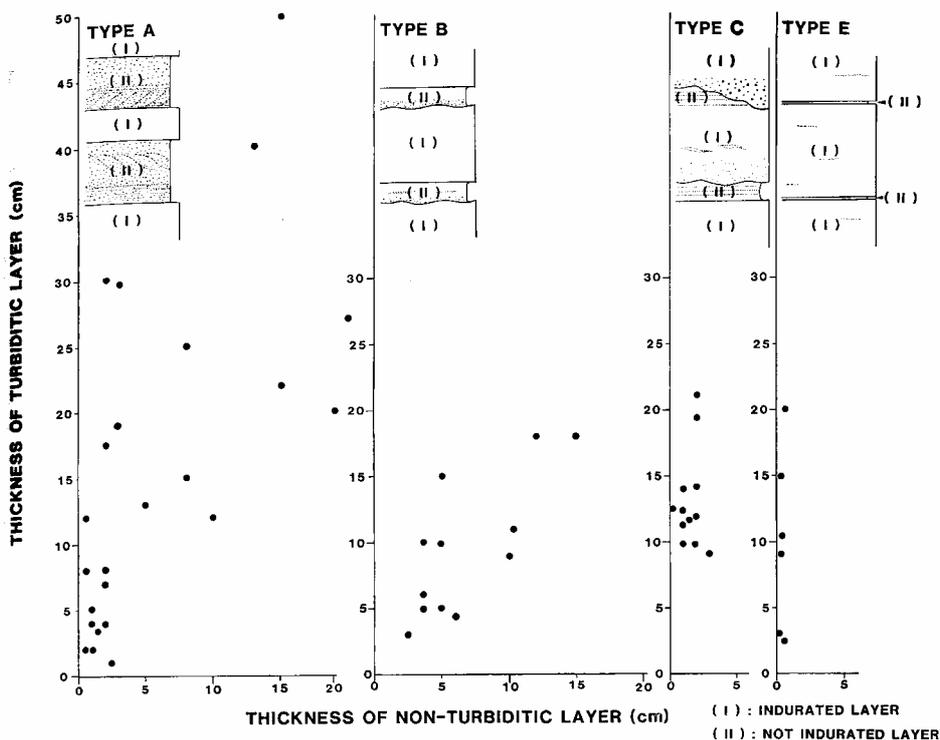


図 3.2-6 タイプEの模式図と岩石学的特徴 (福沢, 1988)

タイプ A~E (タイプ D は堆積環境が解釈できないので除く) の個々のタービダイトと非タービダイト層の特徴, 厚さの違いについて図 3.2-7 に示した。

タイプ A, B は, 軟質部が碎屑物のタービダイト層, 硬質部が珪藻質泥岩からなり, 定常的に堆積した非タービダイト層である。タイプ A は, タービダイト層が非タービダイト層より厚い。タイプ B はその逆である。タイプ A, B は, その分布から陸棚上で堆積したと推定される (福沢, 1988)。

タイプ C, E は, 硬質部が珪藻質泥岩のタービダイト層, 軟質部が碎屑物からなり, 定常的に堆積した非タービダイト層である。タイプ E は急速に堆積したタービダイトが主体で定常的に堆積した非タービダイト層は非常に薄い。タイプ C, E は陸棚上で生産された珪藻がタービダイトによって, トラフ底に再移動したものである (福沢, 1988)。



Schematic sketches and variation diagrams showing relationships between thickness of individual turbiditic and non-turbiditic beds within individual layering types.

図 3.2-7 タービダイト層と非タービダイト層の厚さの関係

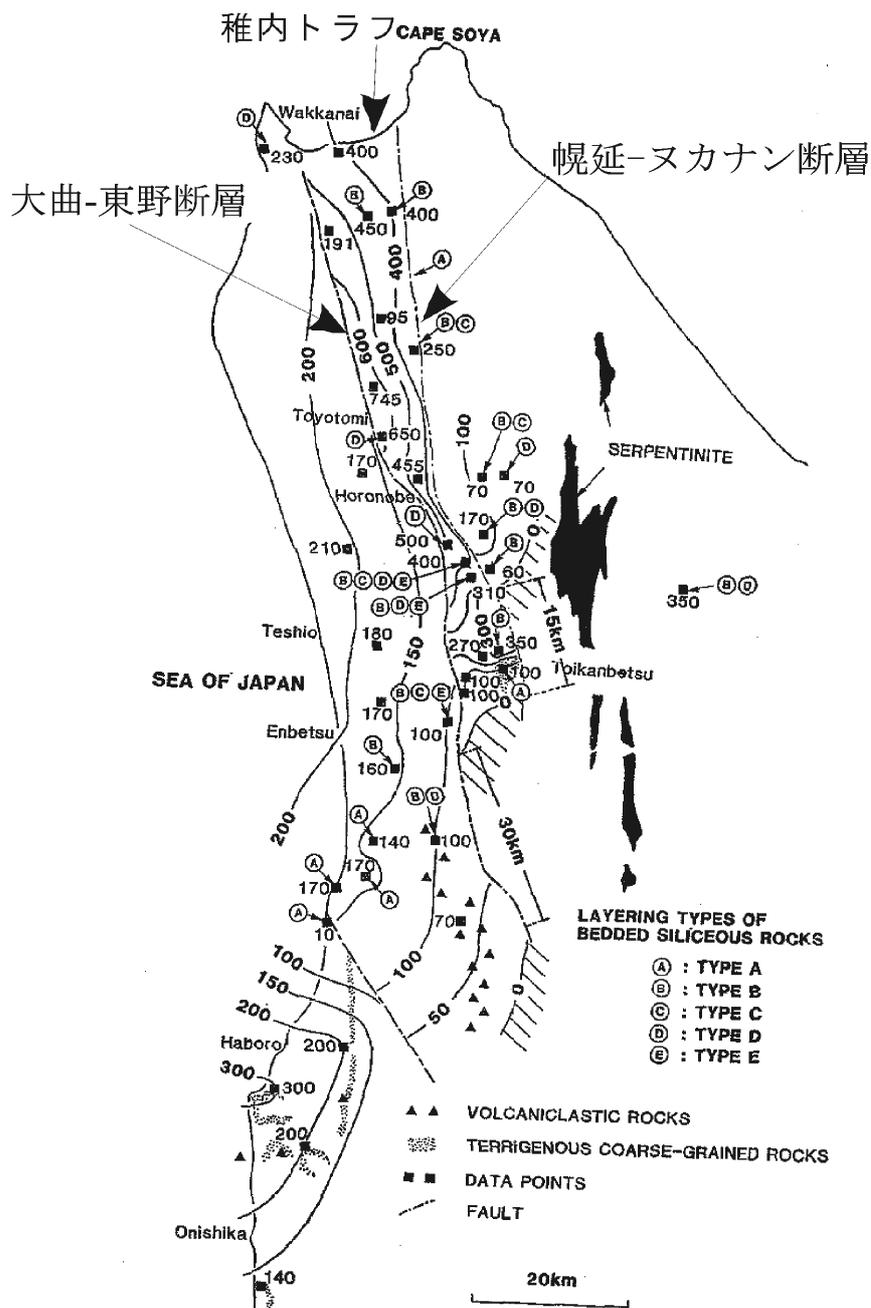
I : 硬質層, II : 軟質層

タイプ A, B は, 硬質部が珪藻質泥岩の非タービダイト層, 軟質部が碎屑岩のタービダイト層。陸棚上で形成された。タイプ C, E は, 硬質部が珪藻質泥岩のタービダイト層, 軟質部が碎屑岩の非タービダイト層。陸棚で生産された珪藻がタービダイトによりトラフ底に再移動した。

3.2.2 稚内層堆積時の古地形

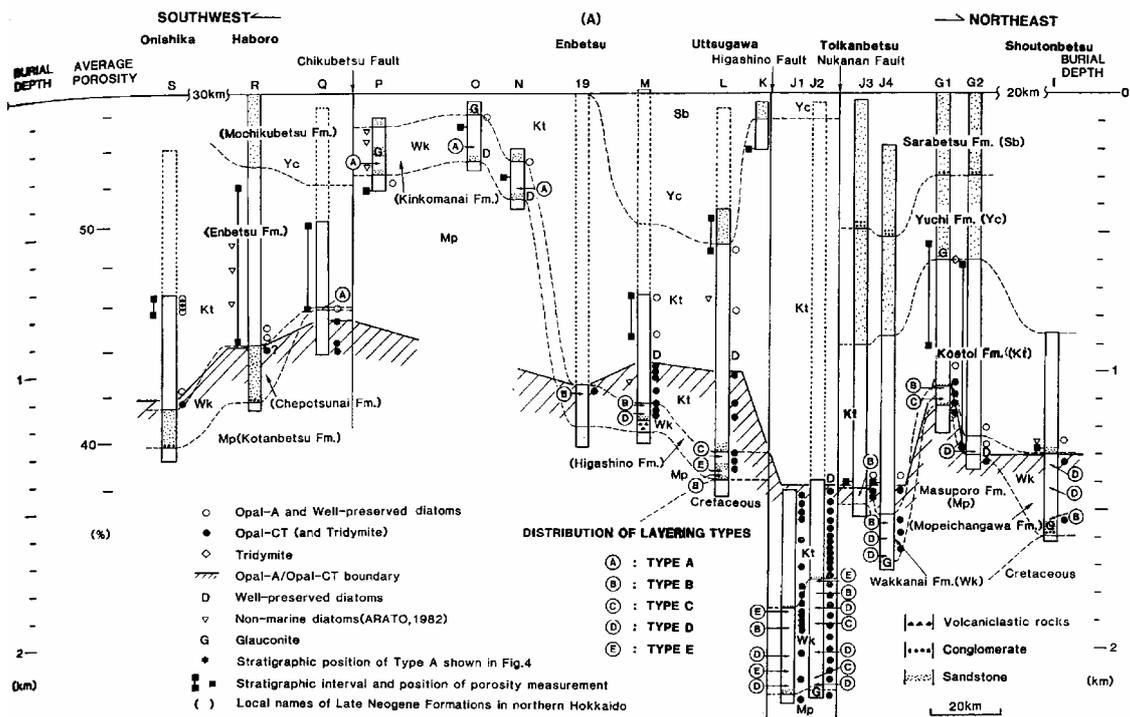
福沢 (1987) は, 稚内層堆積時の古地形を復元している。

稚内層堆積時には, 幌延 - ヌカナン断層と大曲 - 東野断層に挟まれた南北方向に伸びるトラフ(稚内トラフ)が存在し, 其中では稚内層が厚く堆積していた(図 3.2-8, 図 3.2-9)。稚内層堆積時の稚内トラフ内の古水深は, 貝化石, 海緑石, bioturbation から, 陸棚下部から斜面上部であり, 水深はおよそ 300m より浅かったと推定されている(福沢, 1988)。なお, 本報告書の調査地域は, 図 3.2-8 の間寒別と幌延の間の稚内トラフ東側の陸棚斜面から海盆底にかけて位置する。



Distribution of the five layering types of the Wakkanai Formation with the isopach map (FUKUSAWA, 1987). The hatched field shows the area covered with no deposits or, if any, very thin deposits.

図 3.2-8 稚内層の等層厚線図と5つの岩相(タイプA~E)の分布(福沢, 1988 に加筆)



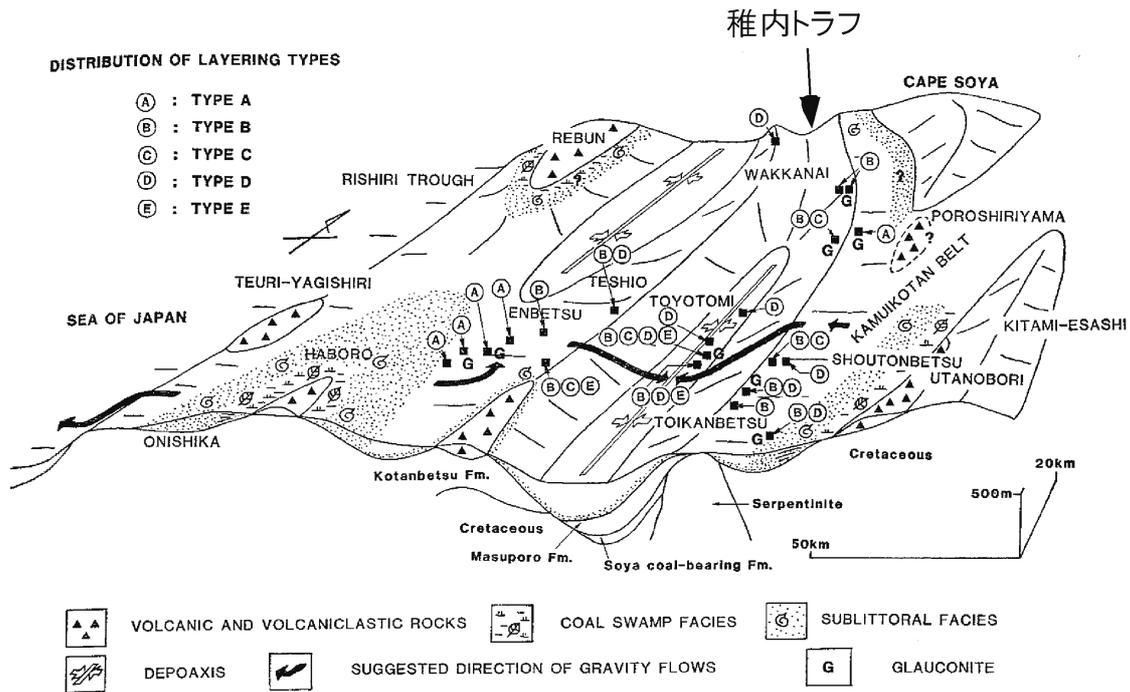
Distribution of the five layering types within schematic profiles (FUKUSAWA, 1987) of the Late Neogene Formations at the post-depositional stage of the Sarabetsu Formation in northern Hokkaido. A : Onishika-Haboro-Enbetsu-Uttsugawa-Toikanbetsu-Shoutonbetsu, B : Sarabetsu Plain-Toyotomi-Magaribuchi. Mp : Masuporo Formation, Wk : Wakkanai Formation, Kt : Koetoi Formation, Yc : Yuchi Formation, Sb : Sarabetsu Formation. Location symbols of the columnar sections correspond with those of Fig. 2.

図 3.2-9 南西-北東方向の模式断面図。

東野断層とヌカナン断層に挟まれた稚内トラフ内で稚内層が厚くなっている。

稚内層堆積時の古地形の概念図は図 3.2-10 に示した。幌延 - ヌカナン断層東側の小頓別～歌登地域は、相対的隆起域であり、陸棚 - 浅海域であった。大曲 - 東野断層の西側の遠別～手塩地域も相対的隆起域であった。両断層に挟まれた地域は、相対的沈降域であり、トラフ状海盆となっていた(稚内トラフ)。南西側の遠別・羽幌地域も陸域～浅海域であった。また稚内トラフ周辺には、火山岩・火山砕屑岩からなる島がいくつも存在していた。稚内トラフの堆積物は、トラフ東側、西側、南西側の羽幌・遠別周辺の浅海域から供給されたと考えられる(福沢, 1988)。

堆積時の古地形は稚内層の堆積速度にも関連している。福沢(1988)によれば、稚内トラフ底の層状珪藻質泥岩の堆積速度は 286m/my であるのに対し、陸棚内側の堆積速度は 60m/my である。内側陸棚上では湧昇流や陸側からの乱泥流によって堆積物が削剥・再移動させられるため、堆積物が薄くなり堆積速度も遅くなるという。



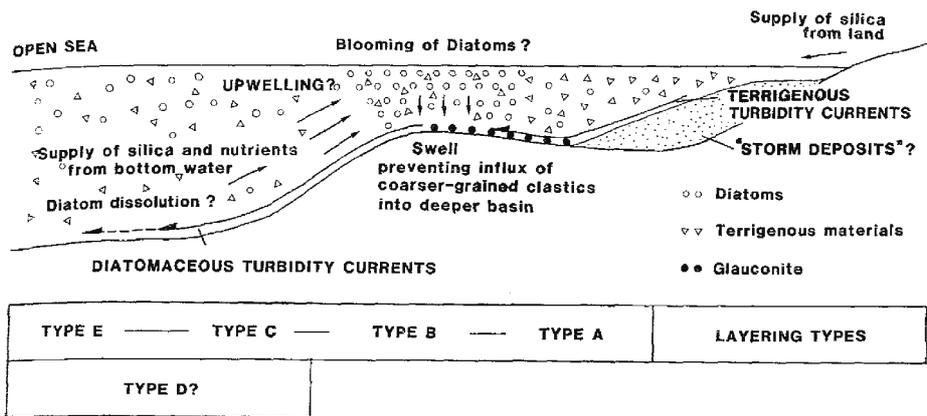
Distribution of the five layering types in the reconstruction map (FUKUSAWA, 1987) of the sedimentary basin of the Wakkanai Formation.

図 3.2-10 稚内層の堆積盆復元図と5つの岩相(タイプA~E)の分布(福沢, 1988 に加筆)

3.2.3 稚内層の堆積システム

福沢(1988)は、古地形と稚内層のタイプA, B, C, Eの4つの堆積相(タイプDは除く)の分布を重ね合わせ、堆積システムを考察している。さらに福沢(1992)では珪藻質頁岩形成と湧昇流・季節風の関係について考察している。以下にその概略を記す。

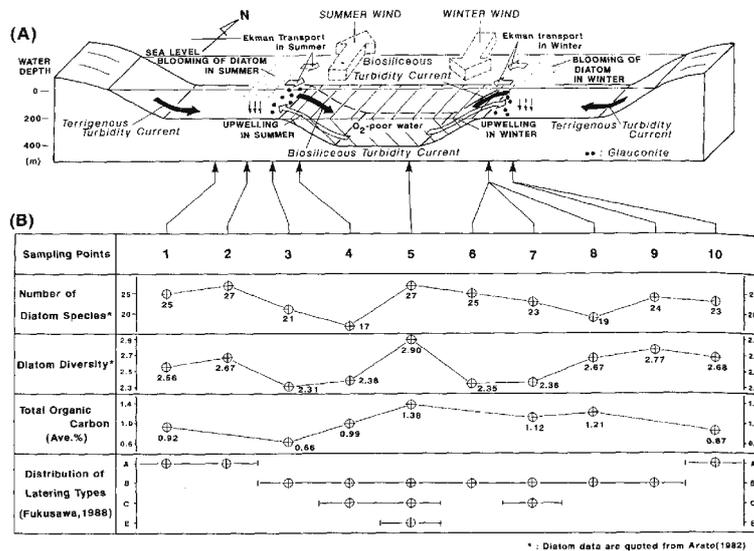
タイプA, Bは他の堆積相と比べて稚内層の層厚が薄い地域に分布し、タイプC, D, Eは稚内トラフ内の稚内層が厚い地域に多く分布している(図3.2-8, 図3.2-9)。4つの堆積相は、陸域から沖合に向かってタイプA タイプB タイプC タイプEの順に分布し、タイプA, Bは陸棚上に、タイプC, Eは斜面からトラフ底にかけて堆積した可能性が高い。とくにタイプBは塊状珪藻質泥岩と陸源性タービダイト起源の泥岩との互層からなり、他のタイプよりも珪藻に富むことからその分布が湧昇海域を示す可能性を指摘した(図3.2-11)(福沢, 1988)。



Depositional scheme of bedded siliceous rocks.

図 3.2-11 稚内層の堆積システム（福沢，1988）。本調査地域は稚内トラフ東側の陸棚斜面から海盆底にかけてに相当すると考えられる。

福沢（1992）によれば，湧昇流が起こるメカニズムは，稚内トラフのような比較的小さな海洋で季節風が吹く場合，トラフ両側の2つの斜面 - 陸棚境界に湧昇が生じて溶存ケイ酸が十分に供給され，珪藻が大繁殖する可能性が大きいという。この湧昇メカニズム仮説に基づいて稚内層堆積時期の古海洋環境を復元したのが，図 3.2-12 である（福沢，1992）。



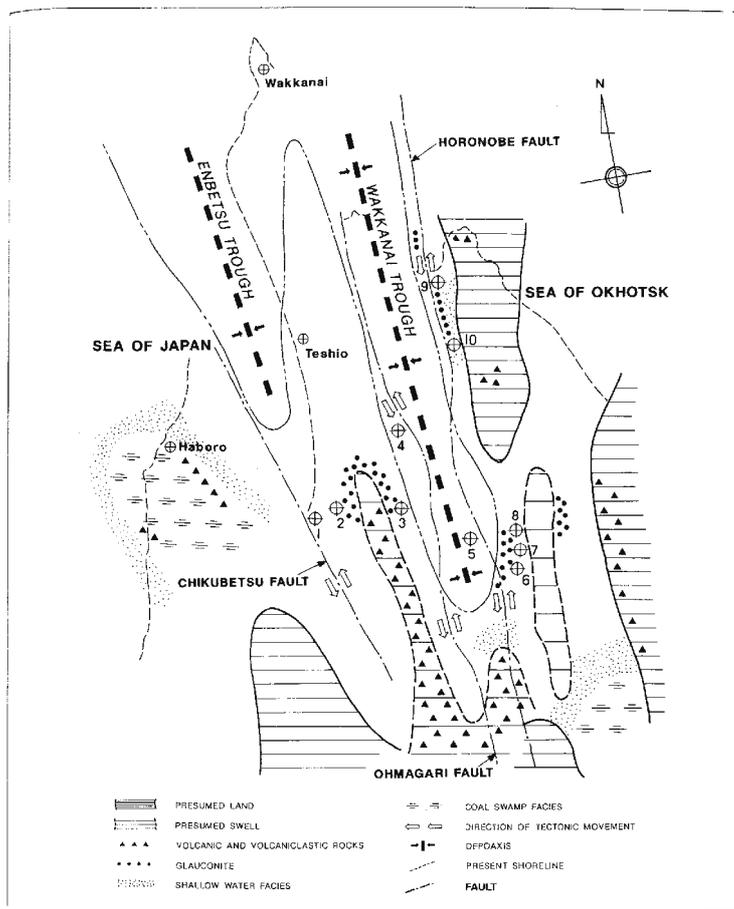
The relationship between diatom species, diatom diversity, total organic carbon content and layering types of the Wakkanai biosiliceous shale (B), and presumed paleoceanographic environments (A) in the depositional stage of the Wakkanai Formation.
Diatom data are quoted from Arato (1982).

図 3.2-12 湧昇流メカニズムに基づく稚内層の堆積システム（福沢，1992）

復元された稚内層堆積盆地図と珪藻質頁岩中の有機炭素量（平均値）および珪藻化

石群集(福沢,私信)の多様度をあわせて検討した結果,まだ不十分な検討であるが,以下の2つの特徴が認められた。1) 稚内トラフの東西両側の陸棚 - 斜面境界あるいは海面下の起伏付近で海緑石が分布する場合,珪藻化石群集多様度がほかに比べて小さい。2) トラフあるいは斜面に堆積した珪藻質頁岩中の有機炭素総量は陸棚の総量と比べて多い(福沢,1992)。

さらに海緑石の存在も湧昇流の発生の証拠となる。湧昇流が発生すると,その流れによってシルトや粘土が流され,海面表層から沈降した有機物粒子の酸化分解によって酸素の乏しい海底となり,海緑石が形成されやすいからである。海緑石の分布はトラフの東西両側に南北方向2列に存在している(図3.2-13)。海緑石分布域と珪藻化石群集多様度がほかに比べて小さい地域が一致することは,湧昇流による生物生産量の増加を支持する(福沢,1992)。



The reconstruction of the sedimentary basin of the Late Miocene Wakkanai Formation.
1 ~ 10 : sampling localities

図 3.2-13 稚内層の堆積盆復元図(福沢,1992)

3.3 声問層

上部中新統・声問層の堆積相や堆積環境に関する文献はほとんどなく，その堆積モデルも明らかではない。福沢（1985），福沢ほか（1992）に岩相記載がある程度である。以下にその概略を記す。

3.3.1 声問層の岩相記載

声問層は，下位の稚内層と整合関係，一部指交関係にある。問寒別地域の稚内層，築別川・遠別川の東野層・金駒内層（稚内層と同層準）と曲淵地域の声問層の下部はいずれも *Denticulopsis hustedtii* zone に相当することから，稚内層と声問層は同時異層と考えられる。上位の勇知層とは整合漸移関係である。（福沢，1985）

福沢（1985）によれば，岩相的に2つの部層に分けられる。

基底砂岩部層：凝灰質中～細粒砂岩からなる。初山別海岸では層厚は100mと最も厚く，北へ行くにしたがって急に薄くなり，問寒別地区では50cm程度にすぎない。

珪藻質泥岩部層：砂岩・安山岩などの巨～小礫サイズの円礫が点在する無層理塊状の珪藻質泥岩からなる。生物擾乱が極めてよく発達しているが，残された堆積構造の解析によって，陸棚から下部外浜の堆積物であると考えられている（増田ほか，1981；保柳，1992）。しかし，下位の稚内層，上位の勇知層との境界付近に海底土石流堆積物，および乱堆積帯が発達することが多い（福沢，1982）。

3.4 稚内層・声問層の年代と海水準変動の関係

嵯峨山・保柳（1993）は，福沢（1985，1987，1988）の調査地域の南側の初山別～羽幌地域の新第三系の珪藻生層序，FT年代測定を行い，世界的海水準変動との関連を考察した。嵯峨山・保柳（1993）の金駒内層は稚内層に，遠別層は声問層に対比される。そして，これらの珪藻生層序とFT年代を Haq et al.（1987）のユースタシー曲線と比較した。

3.4.1 稚内層・声問層の年代と対比

嵯峨山・保柳（1993）によれば，羽幌堆積盆の金駒内層（＝稚内層）は，珪藻化石帯から12.5～8.5Maに堆積したと推定されている。また，図3.4-1の初山別（金比羅岬）の金駒内層中の砂岩層（サンプル番号13～14）には，保柳（1992）によれば浅海におけるストーム堆積物の指標であるHCS（Hummocky Cross-stratification）が認められ，金駒内層堆積中に海水準低下期があったことが推定される。この浅海成砂岩層は，珪藻生層序の *D. katayamae* zone に相当し，10Ma前後の年代であることから，ユース

タシー曲線の 10Ma 頃の低海水準期に相当すると考えられる (図 3.4-1)。

また、遠別層珪藻質泥岩 (= 声問層) は、*D. kamtschatica* zone 上部に相当し、ユースタシー曲線の 5.5Ma 以降の高海水準期に対比できる (図 3.4-1)。その堆積時代は羽幌堆積盆南部では 5.5~4 または 3.5Ma まで、北部では 8.5Ma より新しい地層 (上限は不明) とされる (嵯峨山・保柳, 1993)。

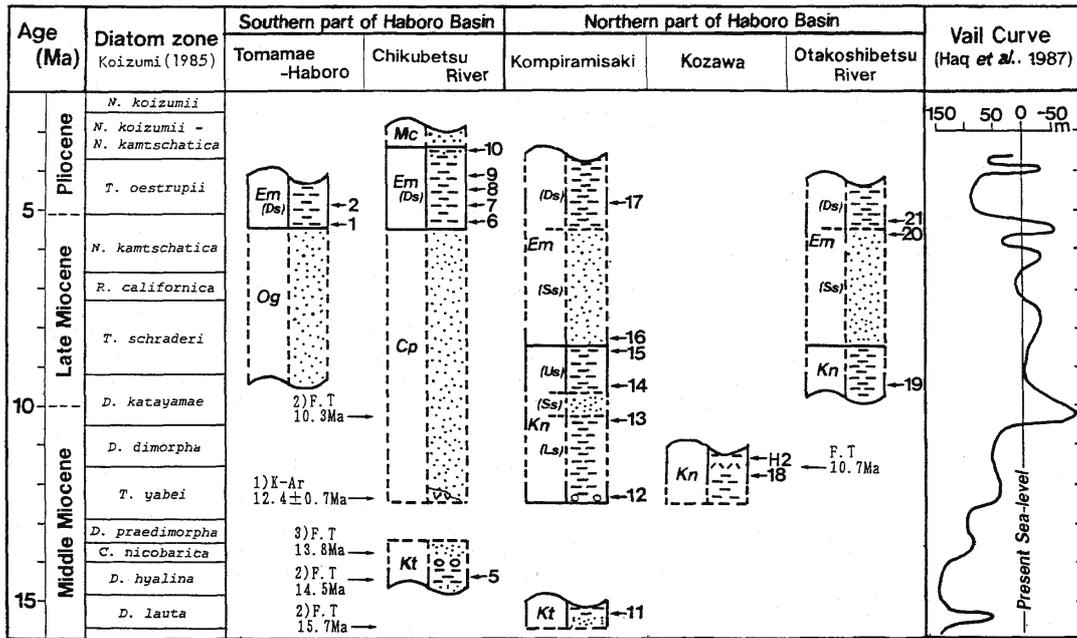


Fig. 4. Biostratigraphic correlation based on diatom zones and radiometric dating.
 1) Shibata & Tanai(1982), 2) Kimura & Tsuji(1990), 3) Kimura(unpublished data). F.T.; fission track dating, K-Ar; potassium-argon dating. 1-21: sample numbers of fossil diatom.
 Mc; Mochikubetsu Formation, Em; Embetsu Formation, Og; Ogawa lignite-bearing Formation, Kn; Kinkomanai Formation, Kt; Kotambetsu Formation. (Ds); Diatomaceous Siltstone Member, (Ss); Sandstone Member, (Ls); Lower Siltstone Member, (Us); Upper Siltstone Member.

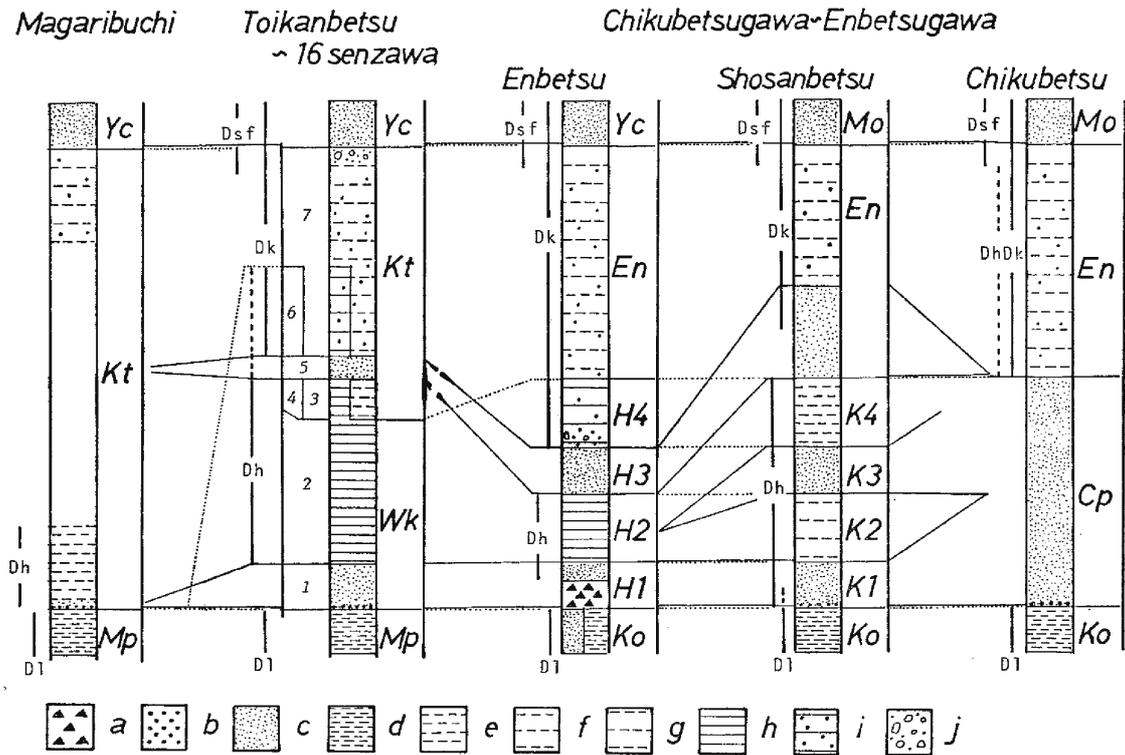
図 3.4-1 珪藻層序と FT 年代測定に基づく層序表 (嵯峨山・保柳, 1993)

羽幌堆積盆の古丹別層は天北地域の増幌層に、金駒内層は稚内層・東野層に、遠別層は天北地域の声問層に対比される。

福沢 (1985) は、福沢 (私信), 秋葉 (1979) の珪藻化石の資料をもとに地層対比を行なった。その結果、秦 (1961) の対比を変更し、問寒別~16 線沢ルートの声問層中の砂岩を遠別地域の東野層中の砂岩 (H3), 初山別地域の遠別層下部の砂岩と対比している (図 3.4-2)。

しかし、嵯峨山・保柳 (1993) は珪藻生化石分析結果から遠別地域の東野層中の砂岩 (H3) は *D. katayamae* zone (Koizumi, 1985; Akiba, 1986) に相当し、初山別地域の金駒内層の砂岩 (K3: *D. katayamae* zone に相当) と対比できることになり、

従来の秦 (1961) の対比を支持した (図 3.4-1)。そしてこれらの砂岩層は、10Ma 頃の低海水準期に形成された砂岩層と推定した。なお、本報告書の調査地域に最も近い問寒別～16 線沢地域では、これに相当する砂岩層は地表の稚内層中に確認されておらず、層状珪藻質泥岩主体である。



D1 : *Denticulopsis lauta* Dh : *Denticulopsis hustedtii* Dk : *Denticulopsis kamschatica*
 Dsf : *Denticulopsis seminae* var. *fossilis*

Correlation of lithostratigraphic units in three studied areas.

a : tuff breccia, b : conglomerate, c : sandstone, d : non-siliceous siltstone, e : turbiditic diatomite, f : diatomite, g : pebbly mudstone, h : turbiditic porcellanite, i : pebbly porcellanite, j : "slumping", Mp : Masuporo Formation, Ko : Kotanbetsu Formation, Cp : Chepotsunai Formation, H1-H4 : Higashino Formation, K1-K4 : Kinkomanai Formation, Wk : Wakkanai Formation (NEMOTO *et al.*, 1979), Kt : Koetoi Formation (NEMOTO *et al.*, 1979), En : Enbetsu Formation, Mo : Mochikubetsu Formation, Yc : Yuchi Formation, dotted line : correlation based on HATA (1961), etc., solid line : correlation based on this study.

図 3.4-2 稚内層・声問層の岩相対比図 (福沢, 1985)

点線は従来の対比線, 実線は福沢 (1985) による対比線。チェポツナイ層, 金駒内層, 東野層, 稚内層は同層準として対比されていたが, 福沢 (1985) は対比を変更した。しかし, 嵯峨山・保柳 (1993) によれば, K3 と H3 砂岩はどちらも *D. katayamae* zone に相当し, 10Ma の海水準低下によって形成されたものとなる。

3.4.2 古気候の推定

初山別地域の金駒内層では、軟体動物化石と花粉化石から古気候の推定が行われている（木村ほか，1995）。金駒内層下部の軟体動物群集は寒流影響下にある下部浅海帯，砂泥底の群衆であり，花粉化石からは現在より少なくとも 3.6 暖かく，降水量は 300mm 多かったと推定される。

陸上気候の変動は大型植物化石の全縁葉率を用いて棚井（1991）により，金駒内層と対比される美深～恩根内地域の大手層で推定されている。それによると，大手層下部堆積時の年平均気温は 9～10 であるが，大手層中・上部堆積時の年平均気温は 4～5 で，急激な温度低下が認められる。さらに，佐藤（1984）は花粉群集から，同様に 10Ma 前後が冷温な環境であったことを示している。

すなわち，金駒内層（大手層）下部では温暖な気候であったが，中・上部では寒冷化したことが明らかとなり，その変換期が 10Ma 頃である。稚内層，金駒内層，東野層と大手層の正確な年代対比は行われていないが，金駒内層，東野層中にみられる 10Ma 前後の低海水準期の砂岩層が，大手層で確認されたこの急激な温度低下による海水準低下によって浅海域からもたらされたものと推定できる。

以上のことから，古気候の方からも 10Ma に寒冷化が起こり，海水準が大きく低下したことが支持される。

3.5 まとめ

- (1) 稚内層は，幌延 - ヌカナン断層と大曲 - 東野断層に挟まれた稚内トラフに南北方向に厚く堆積し，泥質砕屑物と珪藻質岩との薄層互層である。その組み合わせ，内部構造の特徴などにより 5 つの堆積相（タイプ A～E）に区分されている。
- (2) 5 つの堆積相の分布から，稚内層堆積時の堆積システムが復元され，南北に延びるトラフの両側に発生する湧昇流と珪藻の生産の関係がモデル化された。すなわち，陸棚上で湧昇流によって大量に生産された珪藻がタービダイトとなってトラフ底に再移動し，陸源砕屑物が静穏時に堆積したのが稚内層のタイプ C, E であり，陸棚上にタービダイトとして運搬された砕屑物の上に珪藻が静穏時に堆積したのがタイプ A, B である。
- (3) 声問層は，稚内層の上位に整合，一部指交関係で重なるが，詳細な堆積相解析は行われていない。
- (4) 珪藻生層序，FT 年代測定により，羽幌堆積盆での金駒内層（稚内層に対比）は 12.5～8.5Ma に堆積し，遠別層（声問層に対比）は 8.5Ma 以降（上限は不明）に堆積したと推定された。これらの年代は幌延地域にもほぼ適用可能とさ

れる。

- (5) 稚内層・声問層の堆積時に起こった世界的海水準変動は、これらの地層の堆積システムにも影響を与えている。特に 10Ma に起こった世界的海水準低下は、稚内層とその同層準の金駒内層中に厚い浅海成砂岩層の堆積をもたらした。古気候の面でも、この時期寒冷化が起こっていたことが植物・花粉・軟体動物化石から明らかとなっていて、寒冷化によって海水準が低下したと推定できる。しかし、本報告書の調査地域周辺の地表の稚内層にはこの砂岩層は確認されおらず、層状珪藻質泥岩主体である。

4 地質データ解析

4.1 検層解析

核燃料サイクル開発機構が掘削した HDB-1～5 孔においては、各種物理検層が実施されている。幌延地域に分布する地層のホライゾンの広がりや層厚変化を確認するために、HDB-1～5 孔の各孔井間および基礎試錐「天北」で取得された物理検層データの対比を行い、これらの孔井の岩相解析を含むコンポジットログを作成した。

4.1.1 岩相解析

物理検層データによる岩相解析の結果、当地域に分布する地層の岩相を、泥岩・珪藻(オパール A)・オパール CT/石英・間隙の 4 種類に区分し、その含有率をコンポジットログに示した。以下にその手順を示す。

(1) 泥質分含有率(V_{sh})の決定

まず、地層中の泥質物の含有率を指す泥質分含有率(V_{sh})の決定を行った。

堆積岩中の化学組成で SiO_2 の量比は、珪藻殻に起因するオパール A、オパール CT、石英および碎屑性の石英などの生物起源及び陸源性物質の量比に起因している。一方、泥質物の主要構成要素である粘土鉱物の主な化学成分 Al_2O_3 の量比は、 SiO_2 の量比と負の相関関係を持つことから、泥質物の量比の指標として用いられる(辻・横井, 1996 など)。HDB-1 孔と HDB-2 孔で得た X 線全岩分析による Al_2O_3 の量比と SiO_2 の量比は、負の相関関係を持つ(図 4.1-1)ことが明らかである。このことから、当地域でも Al_2O_3 含有率は、泥質物の含有率を示すものと判断する。

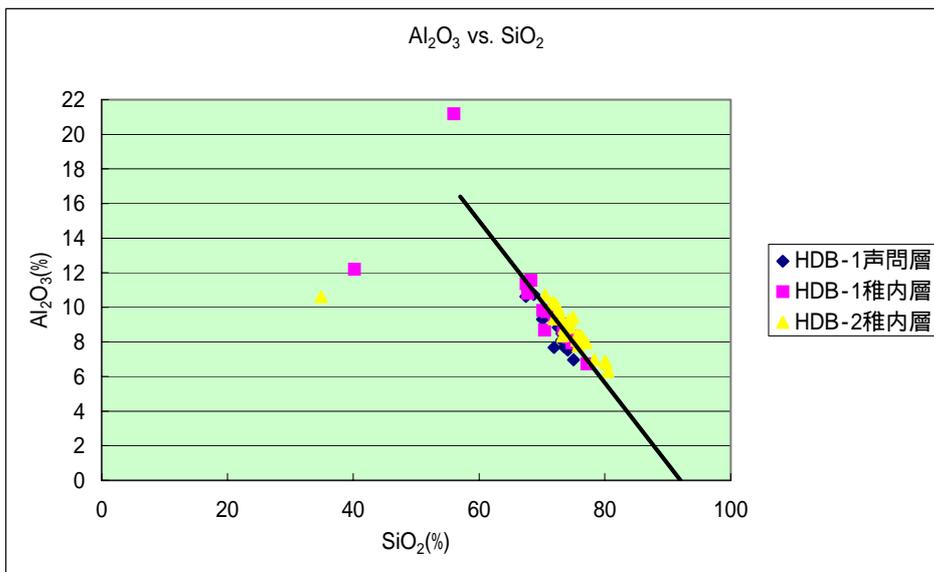


図 4.1-1 X線分析による SiO₂ と Al₂O₃ の関係

次に、X線全岩分析の Al₂O₃ の量比と検層による泥質物量比の指標となる GR とを比較する。図 4.1-2 は、HDB-1 孔および HDB-2 孔における X線全岩分析の Al₂O₃ の量比と GR の値とを比較・検討した結果である。HDB-1 孔と HDB-2 孔とでは多少の違いはあるが、GR の値と Al₂O₃ の量比には正の相関関係が認められる。このことから、物理検層の GR の値は、泥質物の主要化学成分である Al₂O₃ の量比に相関していると言える。つまり、GR の値は、泥質物の量比を示すことができる。以上の関係から、泥質分含有率の決定にあたっては、物理検層の GR の値を使用することとする。

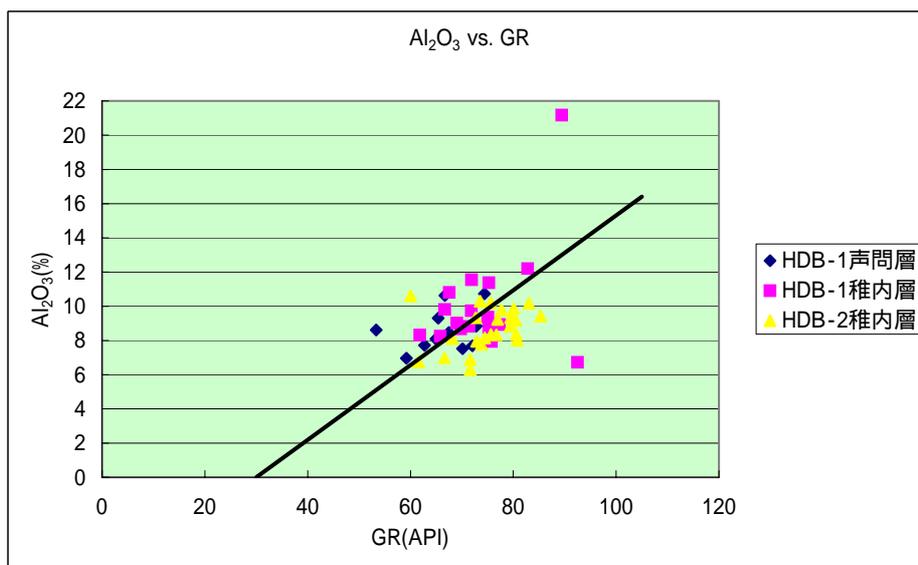


図 4.1-2 X線分析による Al₂O₃ の量比と GR との関係

上記考え方に基づき、以下に泥質物含有率の具体的計算手法について述べる。

図 4.1-2 において、泥質分含有率 0%となる Al_2O_3 含有率が 0%のポイントに対応する GR の値は 30API である。一方、一般に純粋な泥岩の Al_2O_3 の値は 16~18%とされている。また、堆積環境が同じ背弧海盆である男鹿半島における西黒沢層の泥岩の Al_2O_3 含有率は 16.4%であることから(木村ほか 2003), 16.4%を純粋な泥岩における Al_2O_3 の値とし、これに対応する GR の値: 105API を泥岩分含有率 100%に対応するものとする。

以上より次式を用いて、泥質分含有率を計算した。

$$V_{sh} = (GR - GR_{cln}) / (GR_{sh} - GR_{cln})$$

ここで、 V_{sh} : 泥質分含有率 (Volume of Shale), GR_{cln} : 30API (シリカ 100%), GR_{sh} : 105API(泥質物 100%), である。

(2) Rhob による間隙率の決定

間隙率は密度検層 Rhob を用いて、次のような式で求めた。

$$\text{PhiD} = (\text{Rhom} - \text{Rhof}) / (\text{Rhom} - \text{Rhof})$$

ここで、 PhiD : 孔隙率 (%), Rhom : マトリクスの密度 (g/cc), Rhof : 間隙水の密度 (g/cc), である。 Rhom と Rhof の値はそれぞれ、石英の密度である 2.68 (g/cc) と水の密度である 1.00 (g/cc) を用いた。

(3) 珪藻シリカ(オパール A)とその他のシリカ(オパール CT, 石英)の量比

鉱物組成が、深度に対してどのように変化しているかを把握するために、HDB-1 孔と HDB-2 孔の鉱物組成モード分析結果を検討した(図 4.1-3, 4.1-4)。その結果、両孔ともに深度に対して珪藻の量比(灰色部分)が大きく変化していることから、珪藻の量比に基づいてゾーニングを行った。珪藻の量比から、Zone A: 珪藻約 70%, Zone B: 珪藻約 30%, Zone C: 珪藻約 0%の 3 つのゾーンに区分した。各ゾーンの深度は、HDB-1 孔では Zone A は 30.90m ~ 199.90m, Zone B は 225.60m ~ 401.70m, Zone C は 423.95m ~ 700.55m, HDB-2 孔では Zone A は 12.70m ~ 41.45m, Zone B は 42.00m ~ 260.10m, Zone C は 299.78m ~ 719.00m である。

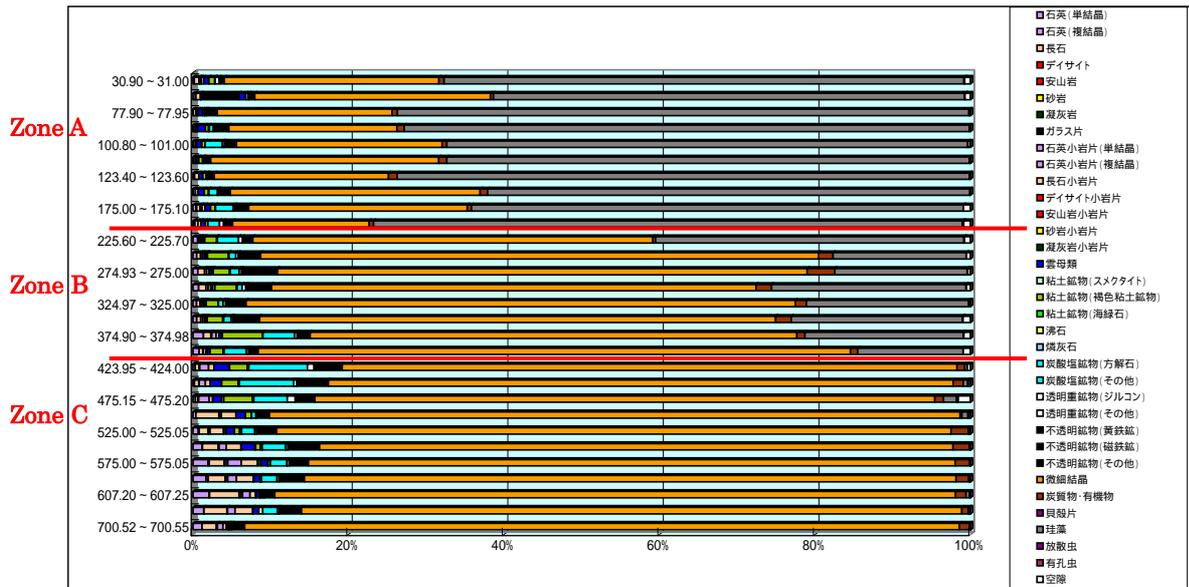


図 4.1-3 HDB-1 孔における鉱物組成モードと珪藻の量によるゾーニング：
珪藻は灰色(山本ほか，2002 - 1 の結果をグラフ化)

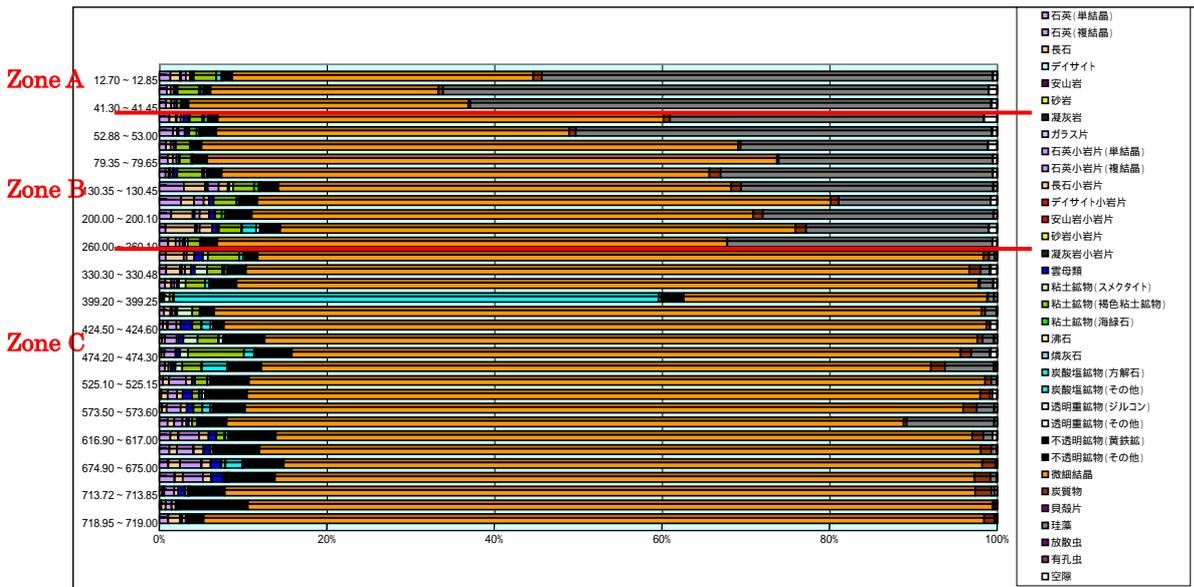


図 4.1-4 HDB-2 孔における鉱物組成モードと珪藻の量によるゾーニング：
珪藻は灰色(山本ほか，2002 - 2 の結果をグラフ化)

次に珪藻を構成するオパール A(珪藻シリカ)とその他のシリカ(オパール CT・石英)の量比を求めるため、以下に示すクロスプロットを行った。

オパール A とその他のシリカでは粒子密度が違うことから、かさ密度(密度検層：Rho_b)に注目し、その値を空隙率(中性子検層：Phi_N)による補正を行った。補正式は、“ $Rho_b / \{1 - (Phi_N / 100)\}$ ” で、これより求められる値を Rho_b の補正係数(仮称

Corrected Factor)とし、X線全岩分析によるSiO₂の量比のとクロスプロットを作成した(図4.1-5)。その結果、オパールA(珪藻シリカ)が少ないZoneはCorrected Factorの値が小さい方へ、オパールA(珪藻シリカ)が多いZoneはCorrected Factorが大きい方へプロットされる。このように、オパールA(珪藻シリカ)の量比はCorrected Factorと良好な相関関係を示す。

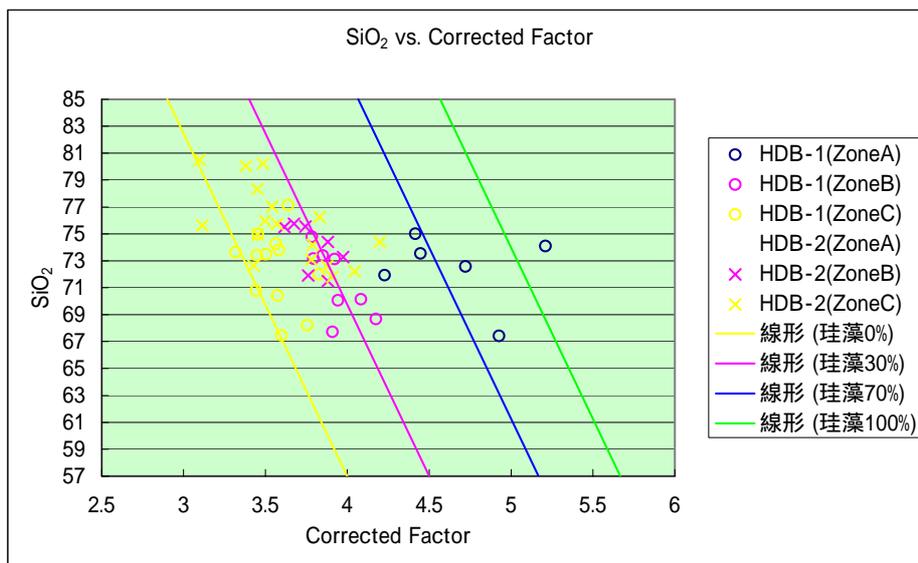


図 4.1-5 X線分析によるSiO₂とCorrected Factor との関係

以上のような考え方に基づき、Al₂O₃、GR、Corrected Factor(CF) および SiO₂ の関係(図4.1-1、4.1-2、4.1-5)から、以下の式より珪藻シリカ(Opal-A)とそれ以外のシリカの量比を求め、コンポジットログのLithologyを作成した(図4.1-6～4.1-11)。

$$\text{Opal-A 量比} = (\text{CF} - \text{CF}(\text{Min})) / (\text{CF}(\text{Max}) - \text{CF}(\text{Min}))$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 量比} = (0.2187 \times \text{GR}) - 6.56$$

$$\text{CF} = \text{Rhob} / (1 - (\text{PhiN} / 100))$$

$$\text{CF}(\text{Max}) = (\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 量比} + 48.107) / 10.933$$

$$\text{CF}(\text{Min}) = (\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 量比} + 27.661) / 10.933$$

(4) 結果と問題点

上記(1)～(3)の検討結果より、4つの岩相、泥質分・珪藻(オパールA)・オパールCT/石英、間隙の量比を求め、コンポジットログ(図4.1-6～4.1-11)を作成した。

現状ではデータ(X線全岩分析・鉱物組成モード分析)のサンプル数が少ないため、今回採用したCorrected Factorによる解析手法の適用性を十分立証するには至っていない。

ない。今後は分析データのサンプル数を増やし、解析手法を検証していく必要がある。
その結果、新たな手法が開発できれば、解析手法を変更していく必要がある。

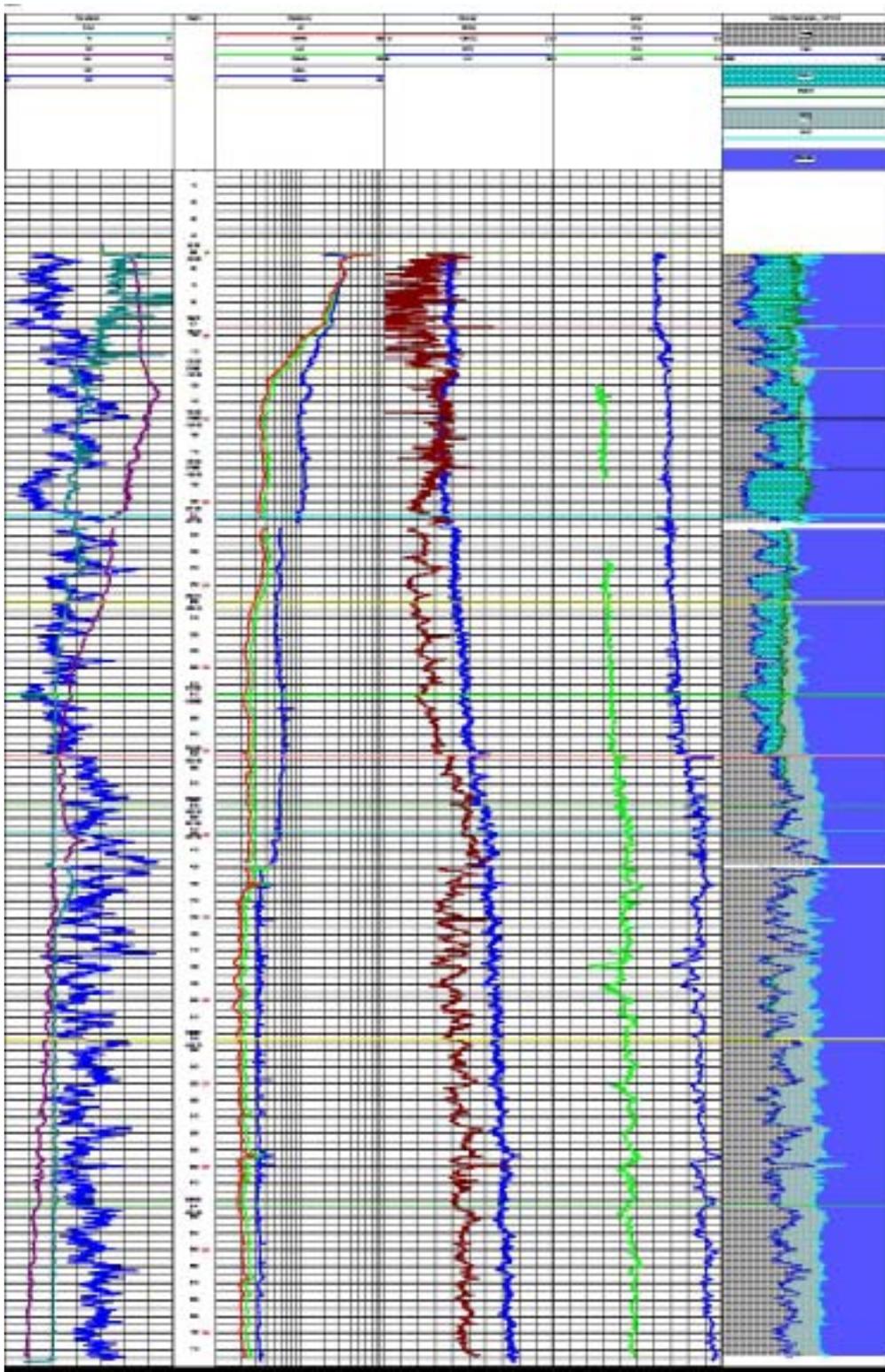


図 4.1-6 HDB-1 孔コンポジットログ

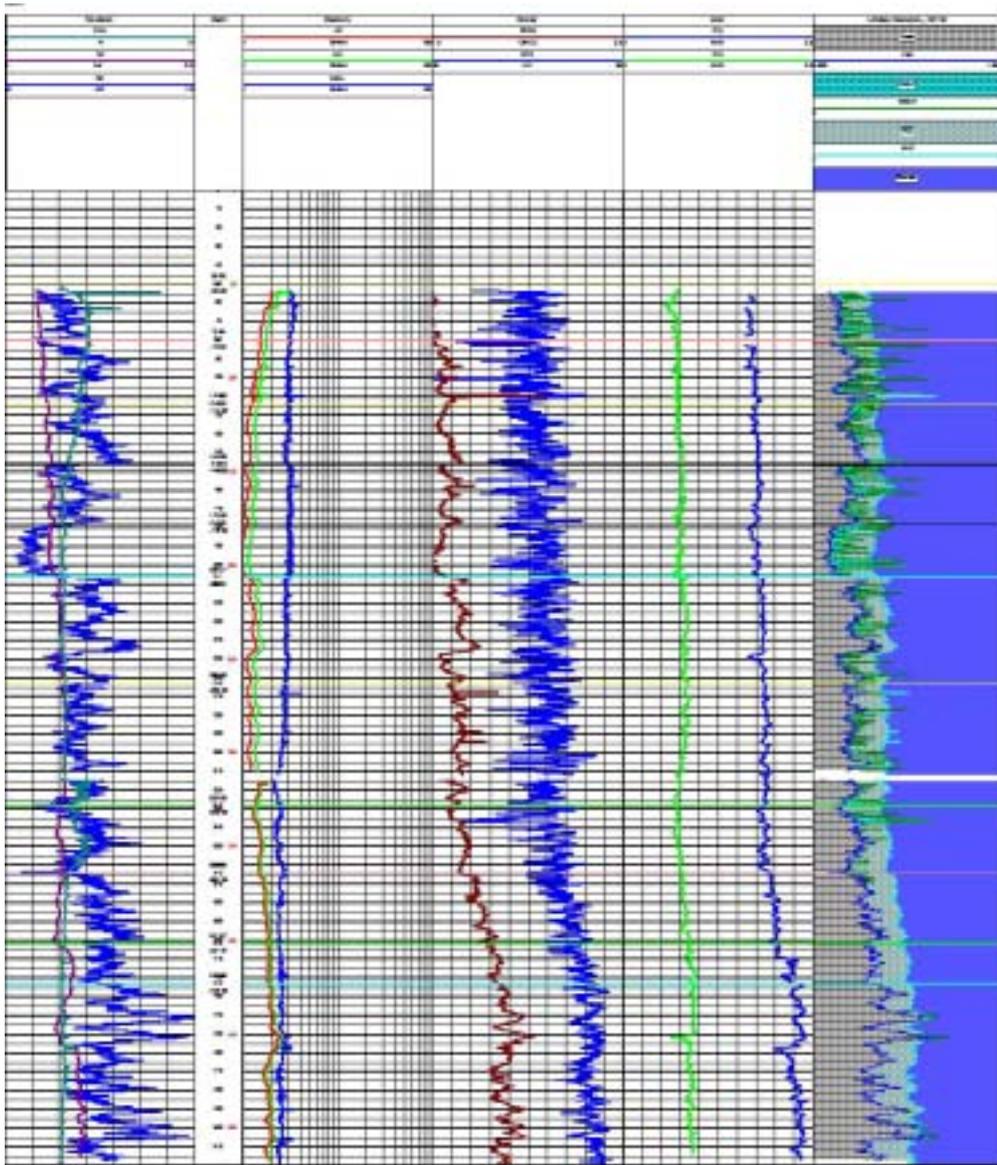


図 4.1-8 HDB-3 孔コンポジットログ

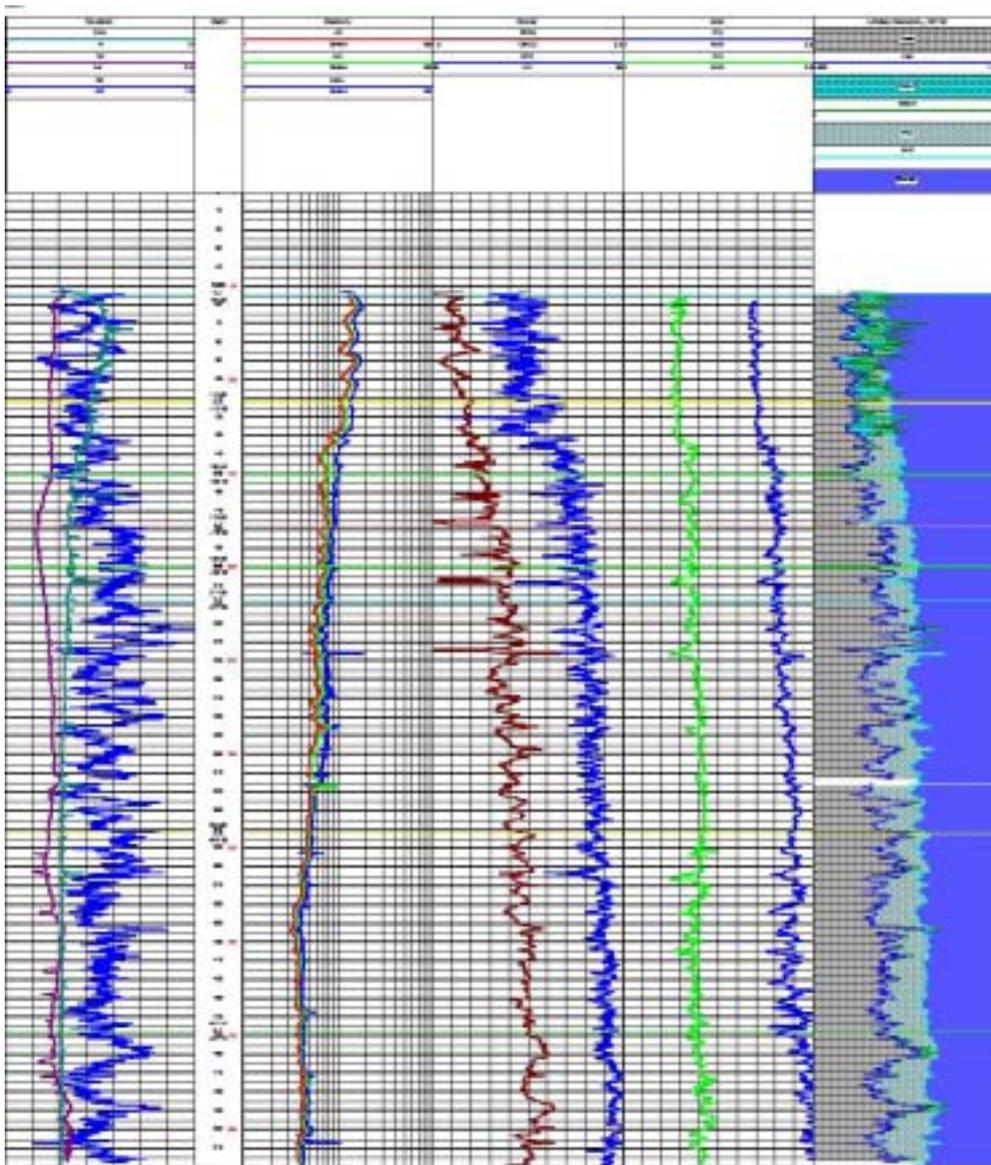


図 4.1-9 HDB-4 孔コンポジットログ

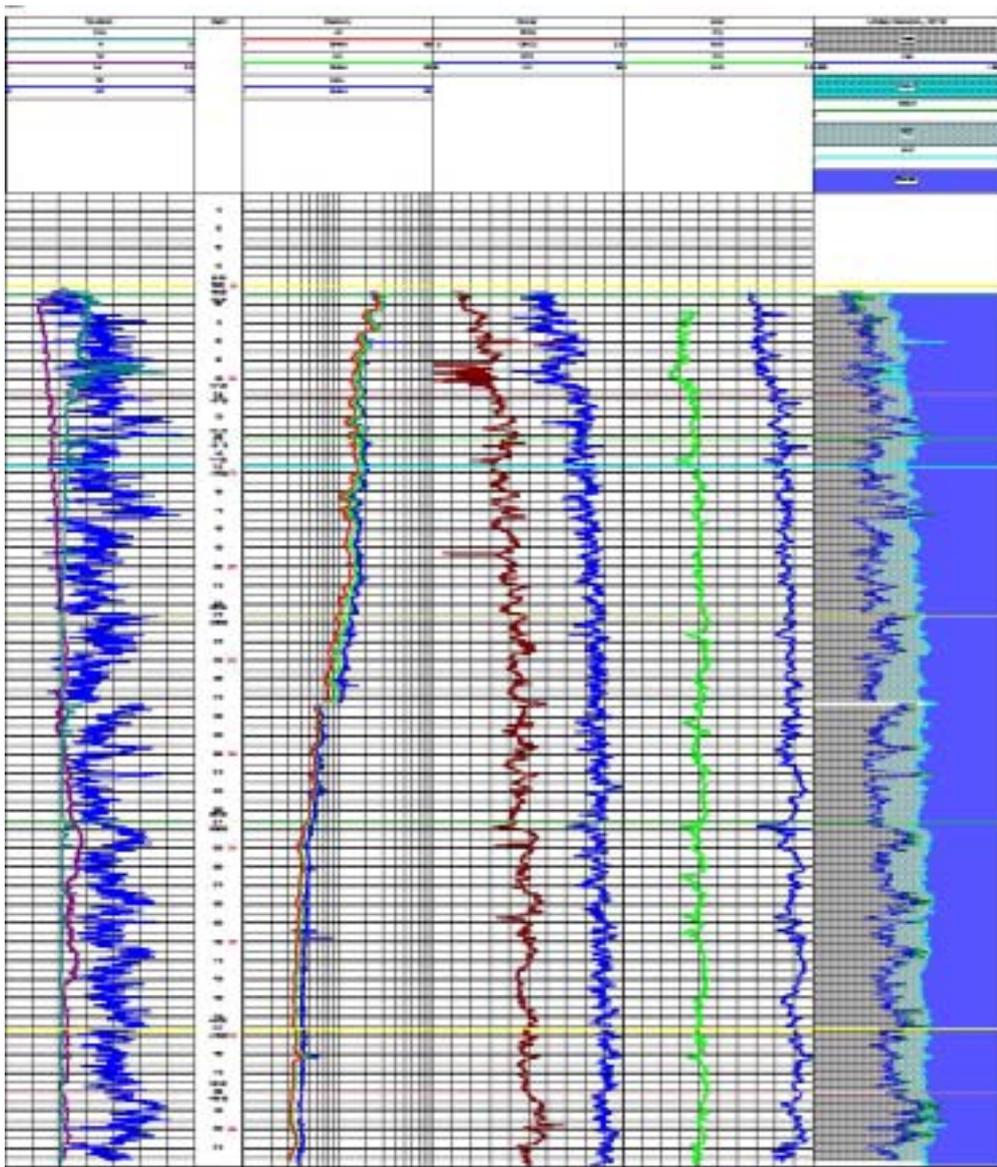


図 4.1-10 HDB-5 孔コンポジットログ

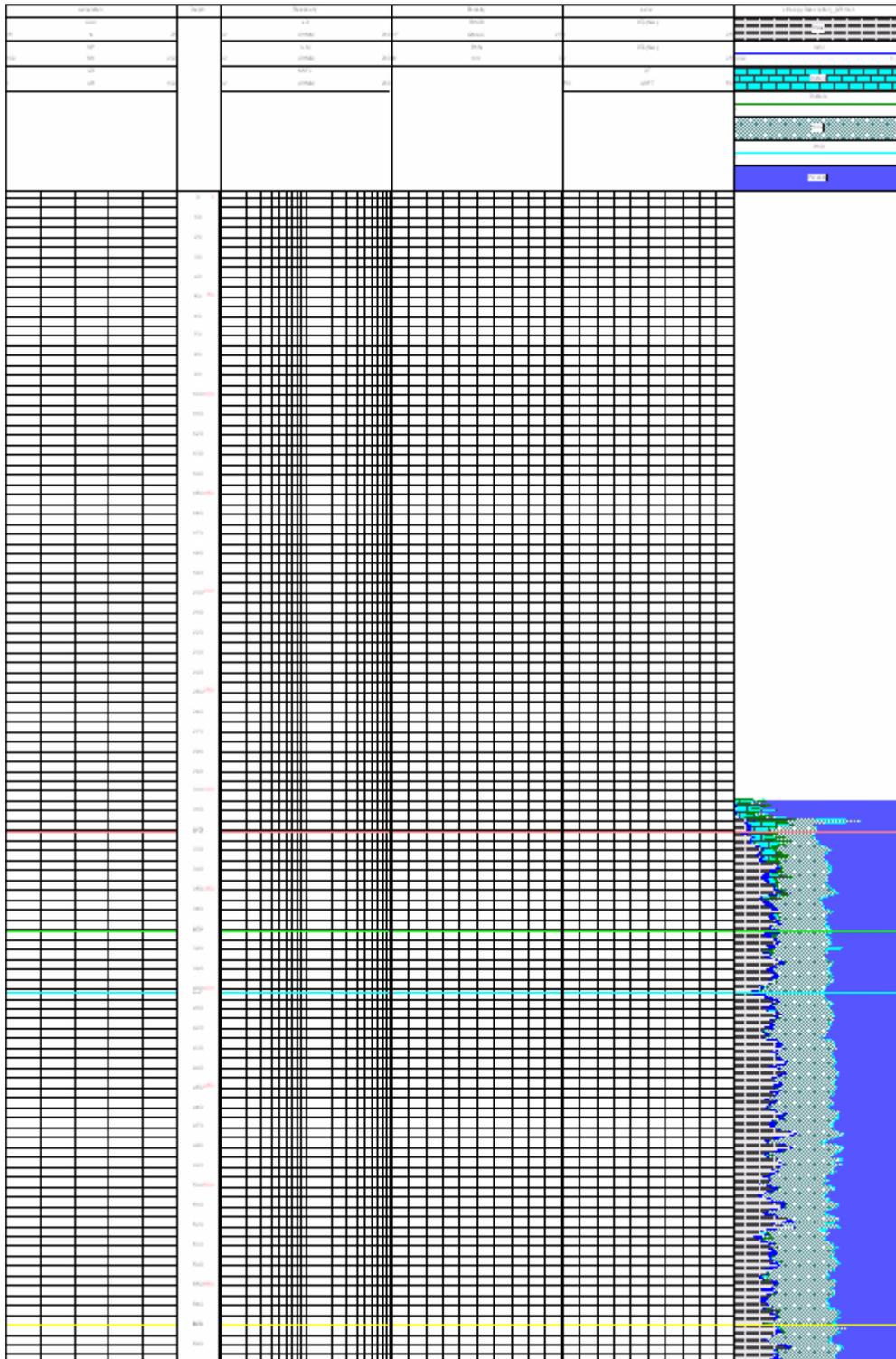


図 4.1-11(1) 基礎試錐「天北」コンポジットログ その1

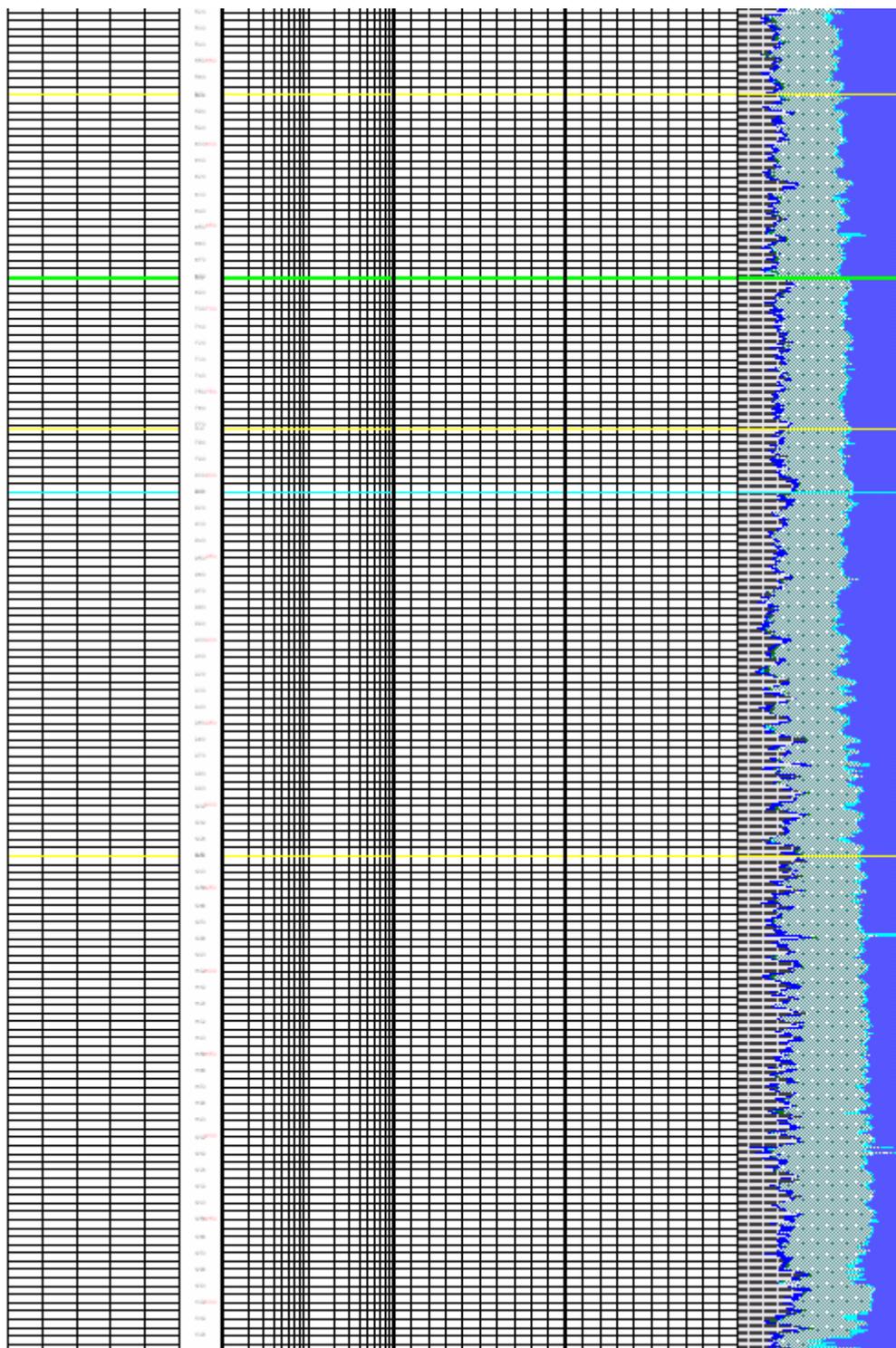


図 4.1-11(2) 基礎試錐「天北」コンポジットログ その2

4.1.2 孔井間対比

HDB-1～5 孔と基礎試錐「天北」の計 6 孔において、孔井間の対比を行った。

(1) 抗井間対比のための検層項目の選定

孔井間対比を行うにあたって GR 検層のカーブパターンを利用した。この理由として、GR 検層は岩相（泥質分の量比）を直接反映していることが第 1 に挙げられる。また、幌延地域の珪質岩においてはオパール A/CT/石英などの相変化が認められる（山本ほか 2002 - 1 および 2、基礎試錐「天北」など）が、GR 検層の値は珪質岩の相変化の影響をほとんど受けないことや、GR の値自体は孔隙率変化に大きく影響を受けないことなども GR を利用した理由である。

(2) GR 検層カーブによるタイプ分け

検層の対比を行うにあたって、特徴的な GR のパターンを下記の 4 種類抽出した。

- ・ パターン 1：GR の値がある一定の幅で深度方向に分布するもの。
- ・ パターン 2：GR の値がある一定の周期（深度方向）で緩やかに上下するものの組み合わせ。
- ・ パターン 3：GR の値がある一定の周期（深度方向）でスパイク状に上下するものの組み合わせ。（パターン 2 より周期が短いもので、パターン 1 とパターン 2 の中間的なもの）
- ・ パターン 4：数 10m にわたって低い GR の値が続くもの。

以上の 4 つのパターンを図示すると、図 4.1-12～4.1-15 のようになる。

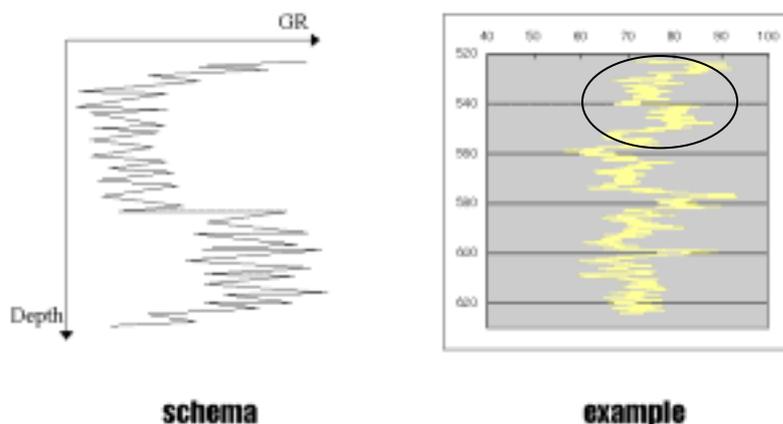


図 4.1-12 パターン 1：概念図と例（HDB-1 孔）

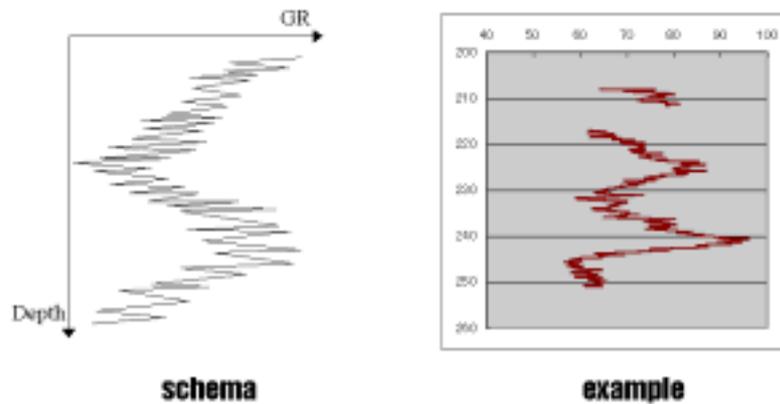


図 4.1-13 パターン 2 : 概念図と例 (HDB-1 孔)

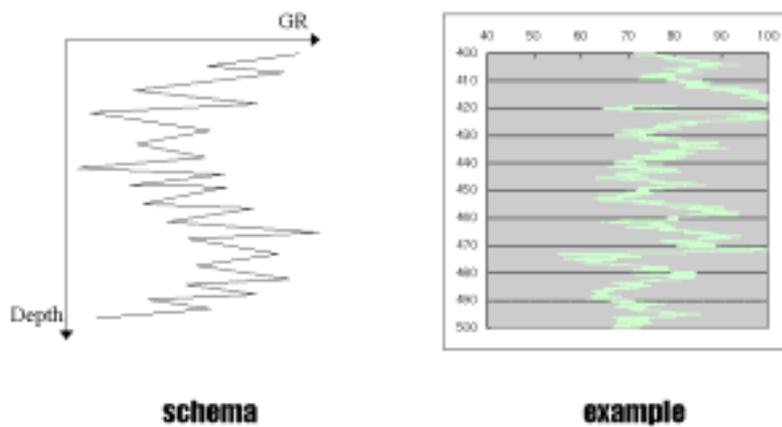


図 4.1-14 パターン 3 : 概念図と例 (HDB-1 孔)

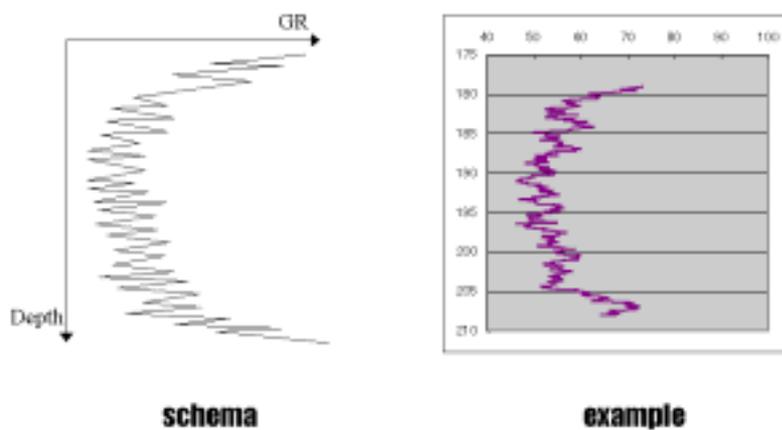


図 4.1-15 パターン 4 : 概念図と例 (HDB-1 孔)

(3) 対比結果

上記で設定した4つのパターンを基に、孔井間対比を行った。対比結果を図4.1-16に示す。また、各パターンの対比状況を以下に示す。

パターン1は各孔井で現れるが、特徴的に現れるのがHDB-1孔の260m~315mの区間で、HDB-3孔の260m~328m、基礎試錐「天北」の570m~680m、HDB-4孔の111m~149mに対比される。この層準は、HDB-5孔及びHDB-2孔では、地表に露出し削剥されていると判断する。また、HDB-1孔の530m~620m区間にも現れ、HDB-2孔、HDB-4孔、HDB-5孔では、それぞれ114m~201m、340m~448m、226m~335mの区間に対比される。HDB-3孔では、やはり地表で削剥されていると考えられる。

パターン2は各孔井で現れ、特徴的に現れるのはHDB-1孔の314m~351m区間で、HDB-3孔の328m~364m区間に対比される。この層準は、HDB-4孔ではその上下のGRパターンにより112m~150m、HDB-5孔では55m~106mに対比されるが、そのGRパターンはHDB-1孔やHDB-3孔に比べるとやや不明瞭である。

パターン3は各孔井で現れ、特徴的に現れるのはHDB-1孔の400m~520mの区間で、HDB-3孔の423m~孔底、基礎試錐「天北」の400m~570m、HDB-4孔の218m~340m、HDB-5孔の147m~225m、HDB-2孔の50m(検層データ取得開始深度)~112mの区間に対比される。このパターンは、HDB-1~5孔のすべてで最も普遍的に認められる。

パターン4は、HDB-1孔とHDB-3孔の1層準でのみ認められる特徴的なパターンである。HDB-1孔では180m~205mの区間で、HDB-3孔ではHDB-1孔とほぼ同じ深度に認められる。

(4) 考察

上記のように、GR検層の4つのカーブパターンに基づいて、HDB-1~5孔と基礎試錐「天北」の孔井対比を行った。対比結果は、一定層準ごとの対比は可能であり、調査地域での各層準の広がりおよび層厚変化を把握することができる。また、各層準内の層相(GRパターン)の変化より、水平方向の不均質性を考察することができると思われる。たとえば、HDB-1孔の深度150m~180m区間はHDB-3孔の深度146m~178mに対比できるが、詳細にGRパターンを観察すると、HDB-3孔ではその全区間がパターン3にあたるが、HDB-1孔ではパターン3が優勢で一部はパターン1に近いものとなっている。このような詳細な解析は、堆積岩の不均質性を把握する一助となると考える。

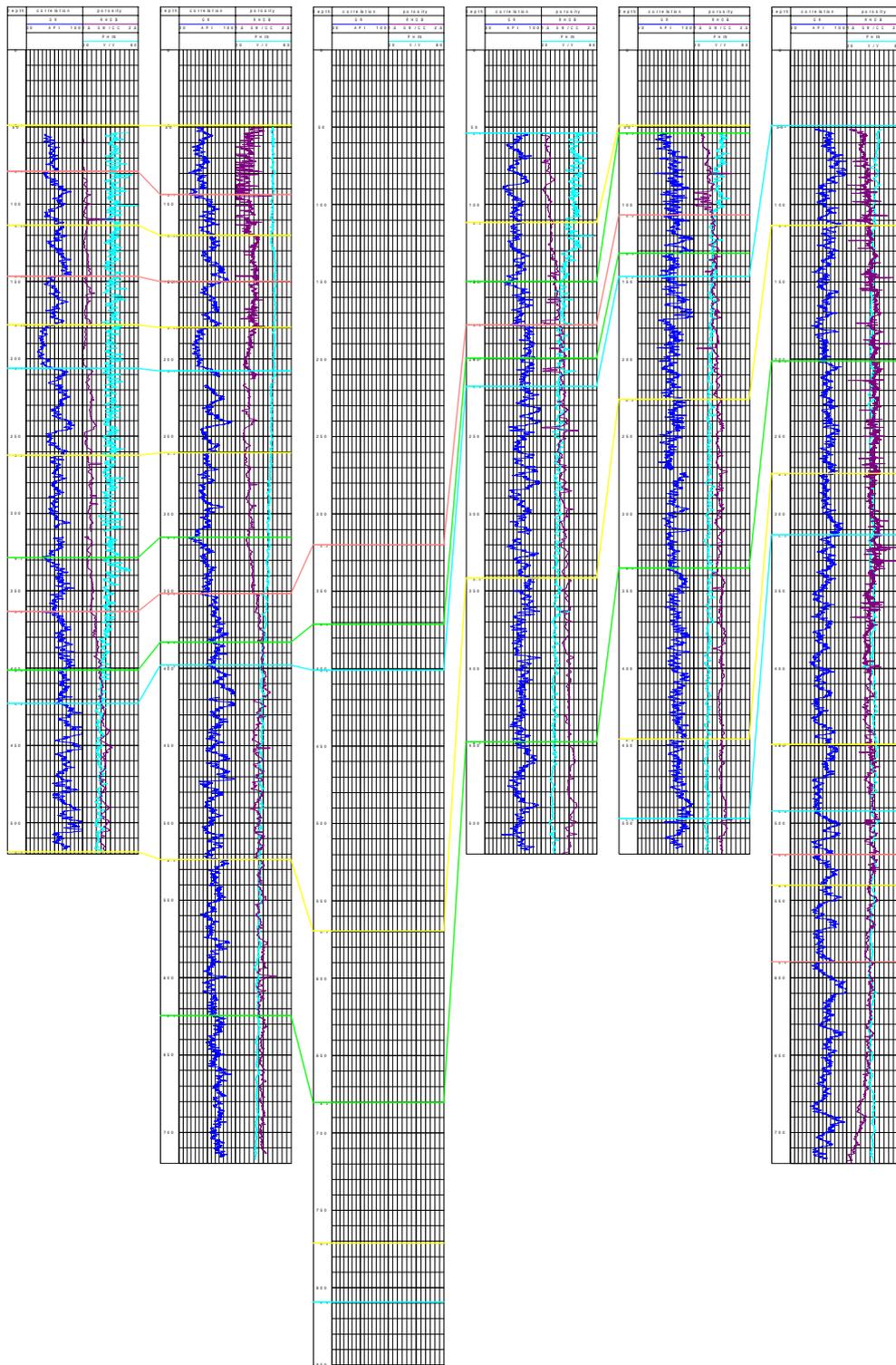


図 4.1-16 孔井対比図

(左より HDB-3 孔, HDB-1 孔, 基礎試錐「天北」, HDB-4 孔, HDB-5 孔, HDB-2 孔)

(各孔(抗)井の位置は図 4.2-2 を参照)

4.2 地震探査記録解釈

2章でリストアップした地震探査記録について地質構造解釈を施し、稚内層基底、声問層基底および勇知層基底について時間構造図、深度構造図を作成した。また稚内層と声問層について、等層厚線図を作成した。地震探査記録解釈の一例を図 4.2-1 に示す。図 4.2-1 は、基礎物理探査「天北地域」測線 TP90-1D の深度断面図であり、解釈ホライゾン（境界線）は各々、緑色：稚内層基底、水色：声問層基底、黄色：勇知層基底を示している。

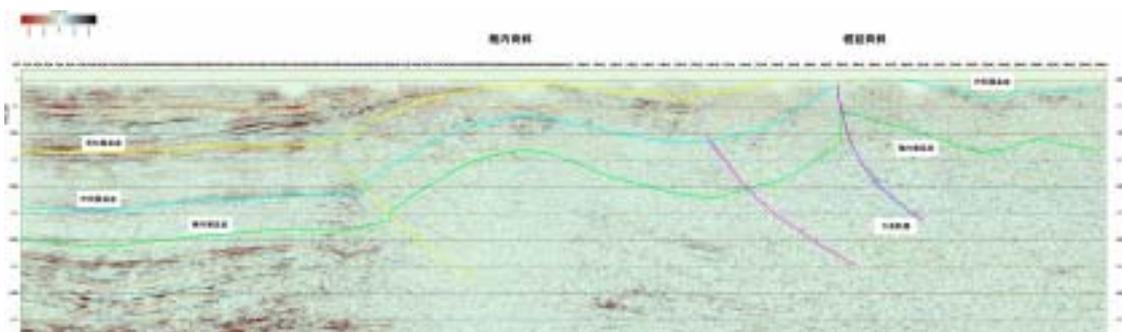


図 4.2-1 地震探査断面 TP90-1D 深度断面

なお、本解釈作業に使用した地震探査測線・孔（坑）井の位置を図 4.2-2 に示した通りである。

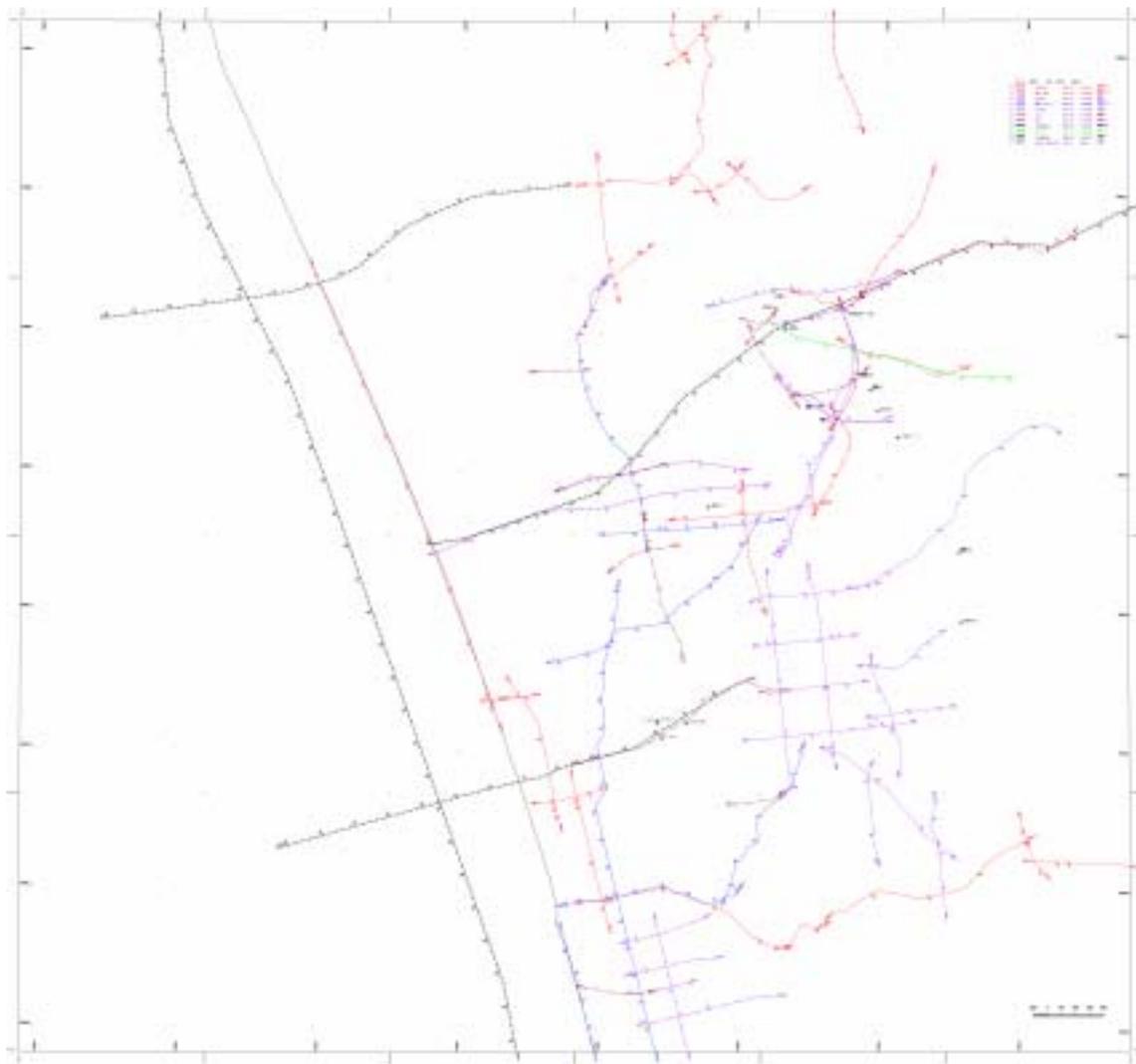


図 4.2-2 地震探査測線と孔（坑）井の位置図

4.2.1 時間構造図

稚内層基底・声問層基底・勇知層基底において時間構造図を作成した。コンターは往復走時（地震波を出してから帰ってくるまでの時間，単位：秒）で表されている。各図面上で青線は向斜を，細い赤線は背斜を，太い赤線は断層を示している。

（1）稚内層基底時間構造図

稚内層基底の時間構造図を図 4.2-3 に示す。全体的な傾向としては，調査地域の東側半部は断層や褶曲構造が多く発達する比較的複雑な地質構造を呈するのに対して，西側半部は比較的単純な構造を呈する。調査地域の東半部においては，東から西へ，北北西～南南東方向に伸張する豊富背斜（兼清，1999），豊富 - 大曲断層（兼清，1999），南北方向に伸張する六志内背斜（兼清，1999），幌延 - 川口背斜（兼清，1999）と続く。豊富背斜，幌延 - 川口背斜は，西急東緩な非対称褶曲構造であり，西翼には豊富 - 大曲断層などの逆断層が発達する。豊富 - 川口背斜は，北川口 SK 1 坑井付近および基礎物理探査「天北地域」測線 TP90-1D の CDP900 付近に局隆部を持ち，南北に向かってプランジしていく。時間深度は，豊富背斜・豊富 - 大曲断層付近では 1.0 秒から 1.5 秒前後，その西側の向斜部では 2.0 秒前後となる。また，幌延 - 川口背斜局隆部付近では 1.5 秒前後となる。調査地域の西側半部は，基礎物理探査「天北地域」測線 TP90-1D の CDP350 付近に軸をもつ南北に伸張した緩やかな向斜が形成されており，時間深度が 3.0 秒前後と本調査地域で最も深くなっている。この向斜より西側の地域では，緩やかに時間深度 2.5 秒程度まで浅くなる。

（2）声問層基底時間構造図

声問層基底の時間構造図を図 4.2-4 に示す。全体的な傾向は，稚内層とほぼ同様であり，調査地域の東側半部は断層や褶曲構造が多く発達する比較的複雑な地質構造を呈するのに対して，西側半部は比較的単純な構造を呈する。豊富背斜軸部では声問層がほぼ完全に剝離されている。時間深度は，豊富背斜・豊富 - 大曲断層付近では 0～1.0 秒となり，豊富 - 大曲断層の西側の向斜部では 1.5 秒前後となる。また，幌延 - 川口背斜および六志内背斜局隆部付近では 0.6 秒～1.0 秒前後である。また，西側半部の向斜部では，時間深度が 2.4 秒前後と調査地域で最も深くなり，向斜以西は緩やかに時間深度 2.1 秒程度まで浅くなる。

（3）勇知層基底時間構造図

勇知層基底の時間構造図を図 4.2-5 に示す。全体的な傾向は，稚内層基底，声問層基底と類似し，調査地域の東側半部が比較的複雑な地質構造，西側半部が比較的単純

な地質構造を呈する。豊富 - 大曲断層以東の地域では，地表に露出，削剥されてほとんど分布しない。これより以西は，向斜構造，六志内背斜，向斜構造，幌延 - 川口背斜構造，向斜構造がほぼ南北に伸張し発達する。時間深度は，東端部の豊富 - 大曲断層付近，幌延 - 川口背斜および六志内背斜局隆部で地表に露出し 0 秒となる。また，豊富 - 大曲断層の西側の向斜部では 0.5 ~ 1.0 秒であり，西側半部の向斜部で 1.5 秒と最大深度を有する。

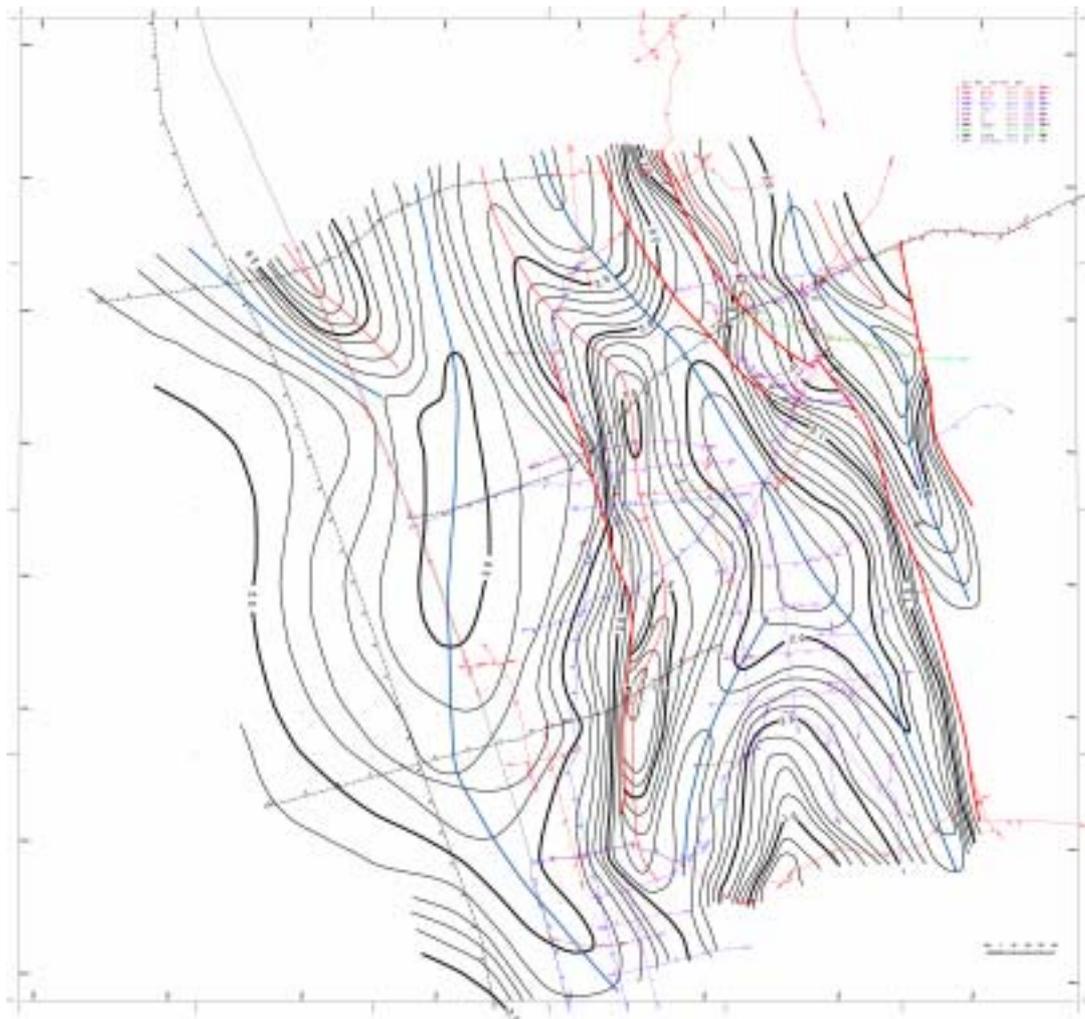


图 4.2-3 侏内層基底時間構造图

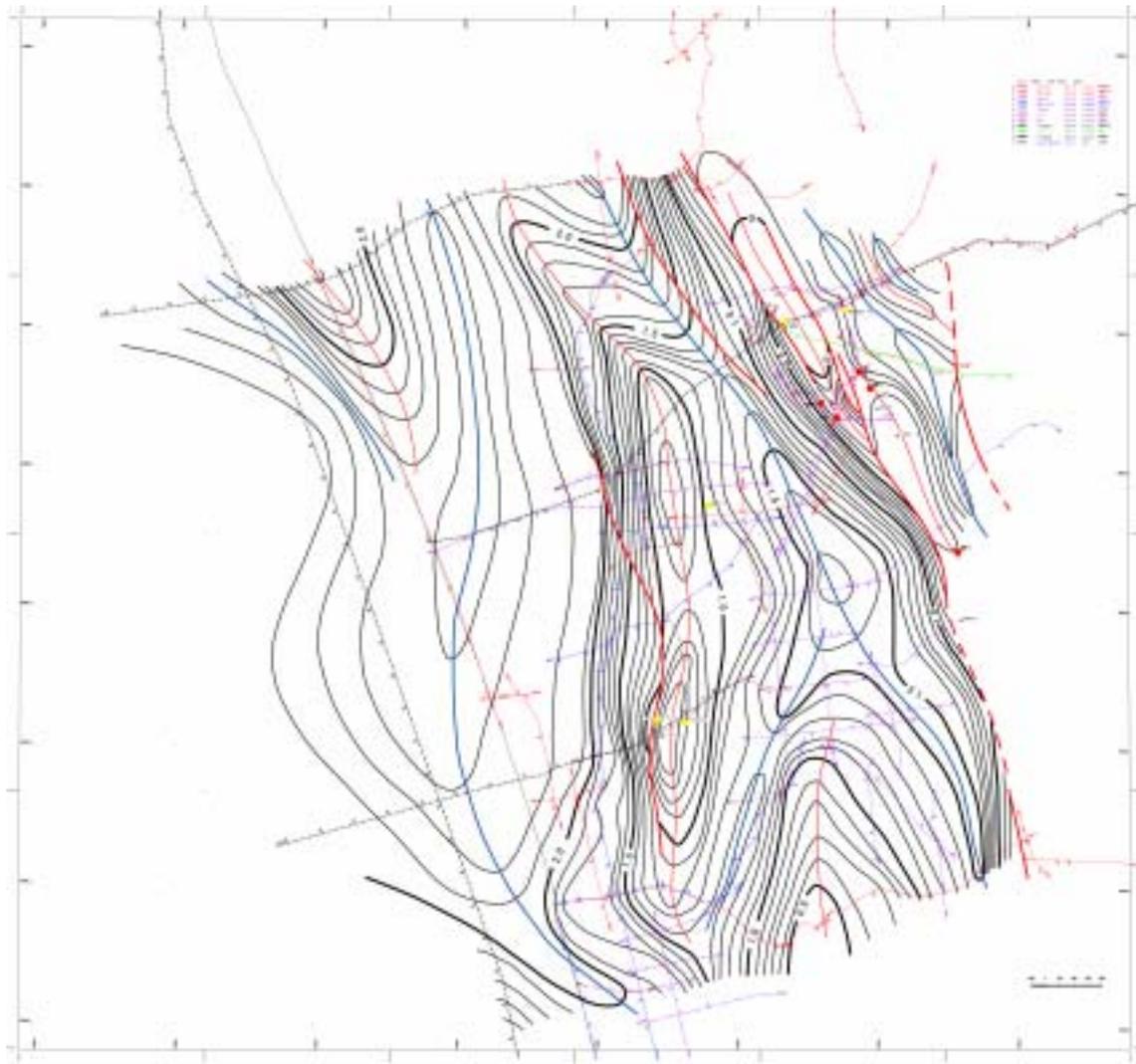


图 4.2-4 声間層基底時間構造图

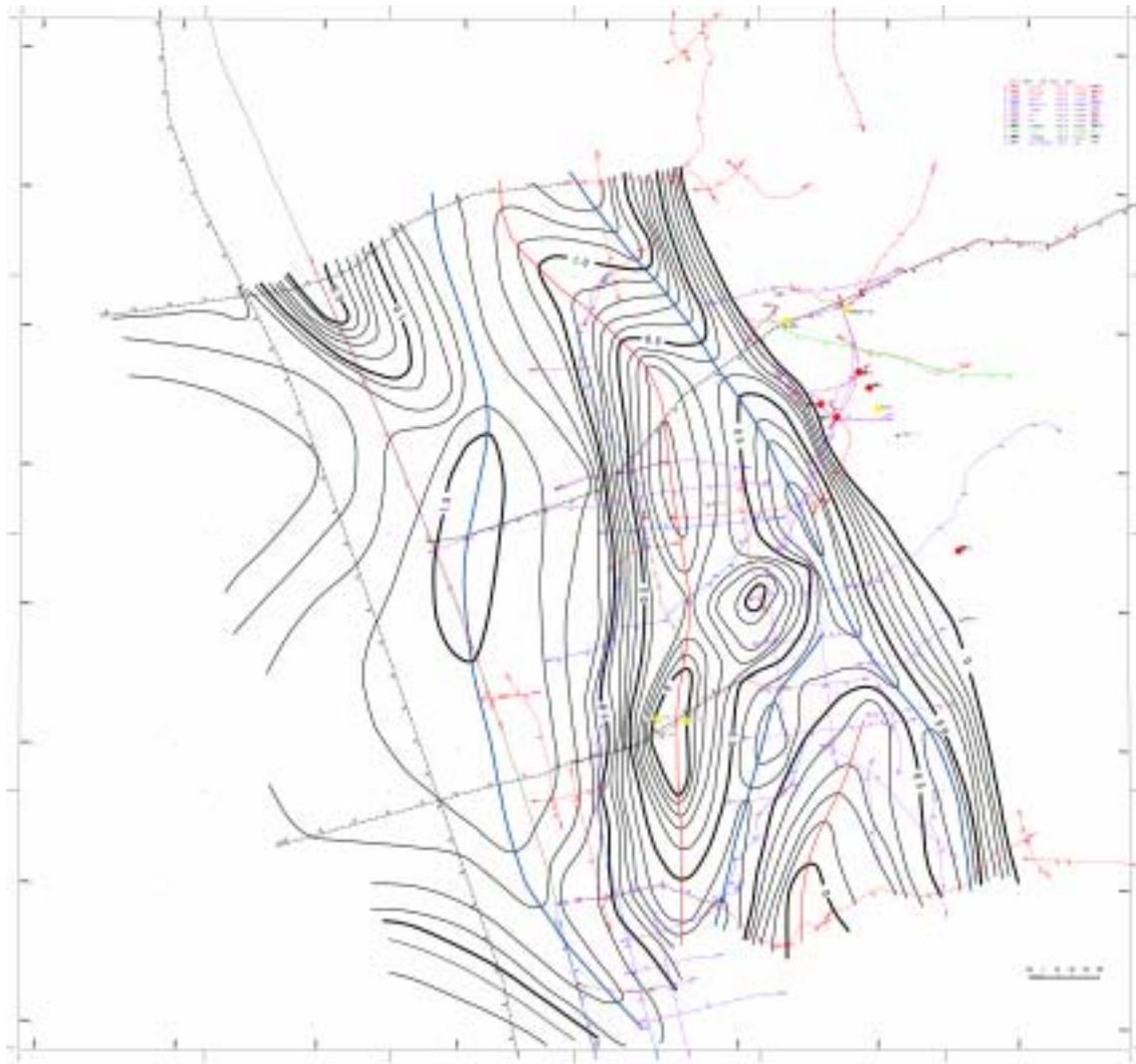


图 4.2-5 勇知層基底時間構造图

4.2.2 深度構造図

深度構造図は，時間 - 深度曲線より時間構造図を深度に変換し作成した。使用した時間 - 深度曲線は，調査地域西部域では北川口 SK-1 の VSP 結果，調査地域東部域では基礎試錐「天北」の VSP 結果である。両者には大きな速度差があり，その間の地域では，図 4.2-6 に示したように内挿カーブを適用した。

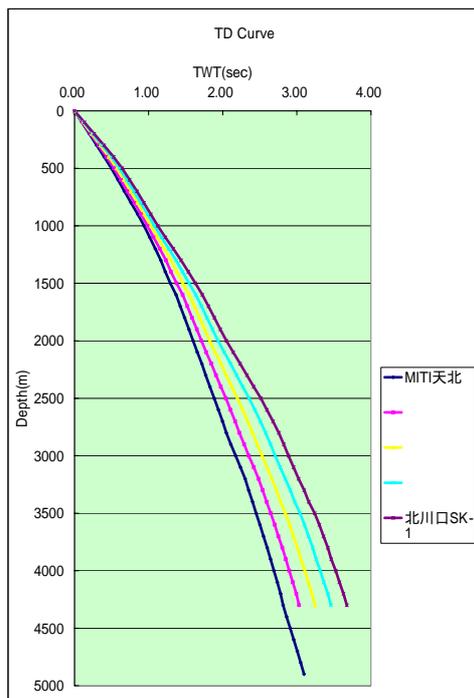


図 4.2-6 時間 - 深度変換で用いた，時間 - 深度カーブ

(1) 稚内層基底深度構造図

稚内層基底の深度構造図を図 4.2-7 に示す。全体的な傾向としては，調査地域の東側半部は断層や褶曲構造が多く発達する比較的複雑な地質構造を呈するのに対して，西側半部は比較的単純な構造を呈する。調査地域の東半部においては，東から西へ，北北西~南南東方向に伸張する豊富背斜(兼清,1999),豊富 - 大曲断層(兼清,1999),南北方向に伸張する六志内背斜(兼清,1999),幌延 - 川口背斜(兼清,1999)と続く。豊富背斜，幌延 - 川口背斜は，西急東緩な非対称褶曲構造であり，西翼には豊富 - 大曲断層などの逆断層が発達する。豊富 - 川口背斜は北川口 SK 1 坑井付近および基礎物理探査「天北地域」測線 TP90-1D の CDP900 付近に局隆部を持ち，南北に向かってプランジしていく。また，分布深度は，大局的に東側半部で 1000m ~ 2500m であるのに対して，西側半部では 2500m ~ 3000m である。豊富断層の以東地域と六志内背斜及び幌延 - 川口背斜局隆部付近の分布深度は，調査地域内で最も浅く

1000m~1500m 程度である。西側半部に大きく広がる向斜部は、地域内で最も深く最大 3100m に達する。

(2) 声問層基底深度構造図

声問層基底の深度構造図を図 4.2-8 に示す。全体的な傾向としては、稚内層基底深度構造図と同様に、調査地域の東側半部は断層や褶曲構造が多く発達する比較的複雑な地質構造を呈するのに対して、西側半部は比較的単純な構造を呈する。分布深度は、豊富 - 大曲断層より東側で最も浅く、深度 0m ~ 数 100m である。また、幌延 - 川口背斜局隆部および六志内背斜軸部では深度 400 ~ 600m 程度である。一方、幌延 - 川口背斜以西の向斜部では、等深度線間隔が広い緩やかな地質構造を呈し、深度 2000m~2400m と本調査地域で最も深い。

(3) 勇知層基底深度構造図

勇知層基底の深度構造図を図 4.2-9 に示す。全体的な傾向は、稚内層基底、声問層基底と類似し、調査地域の東側半部が短周期で背斜・向斜が連なる褶曲構造、西側半部が比較的単純な向斜構造を呈する。豊富 - 大曲断層以東の地域では、削剥されほとんど分布せず、これより以西は、向斜構造、六志内背斜、向斜構造、幌延 - 川口背斜構造および向斜構造がほぼ南北に伸張し発達する。分布深度は、東端部、幌延 - 川口背斜及び六志内背斜局隆部で最も浅く 0 ~ 200m 程度であるのに対し、西側半部の向斜部では、1000m ~ 1300m 程度と最も深い。

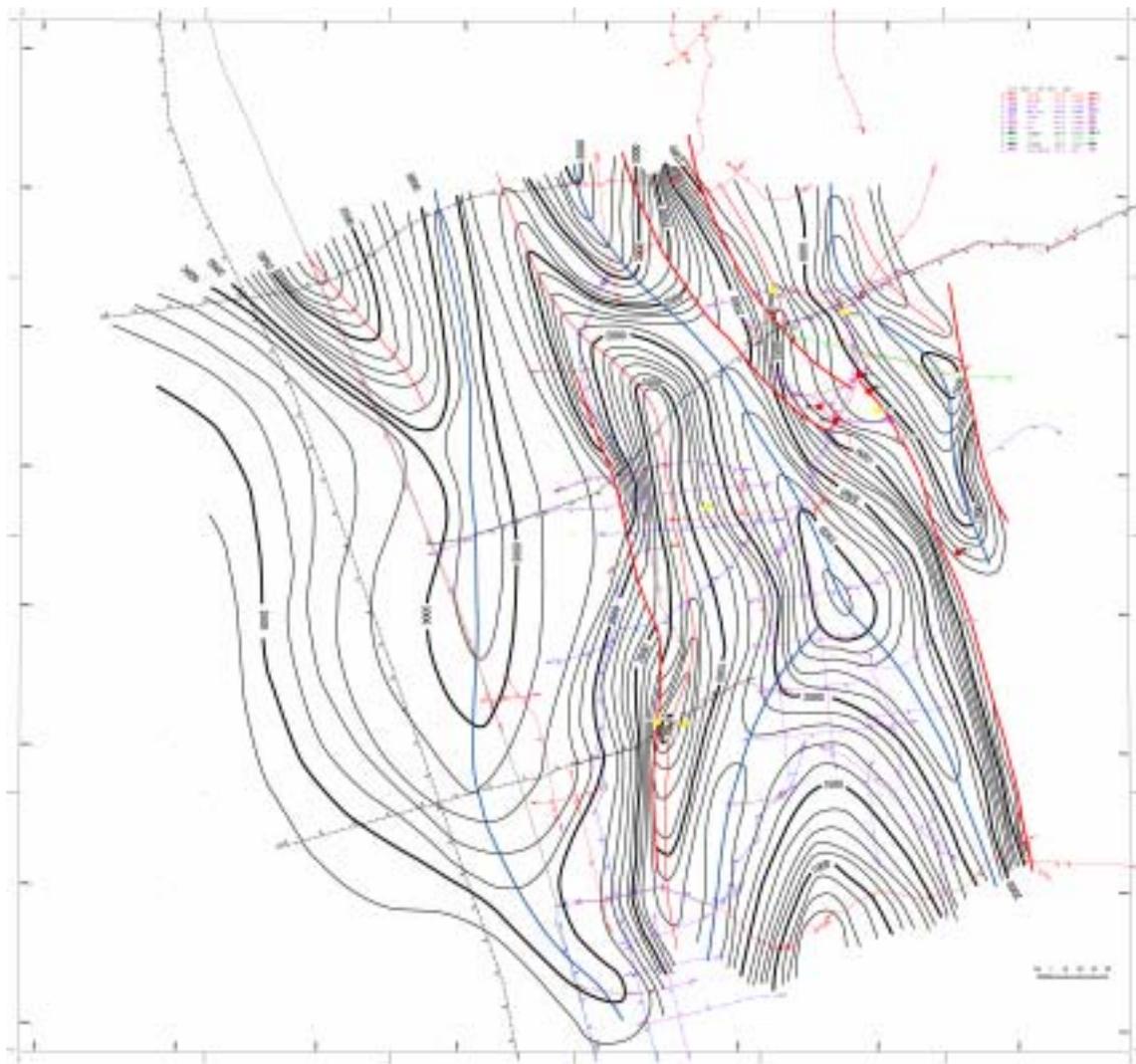


图 4.2-7 侏内层基底深度构造图

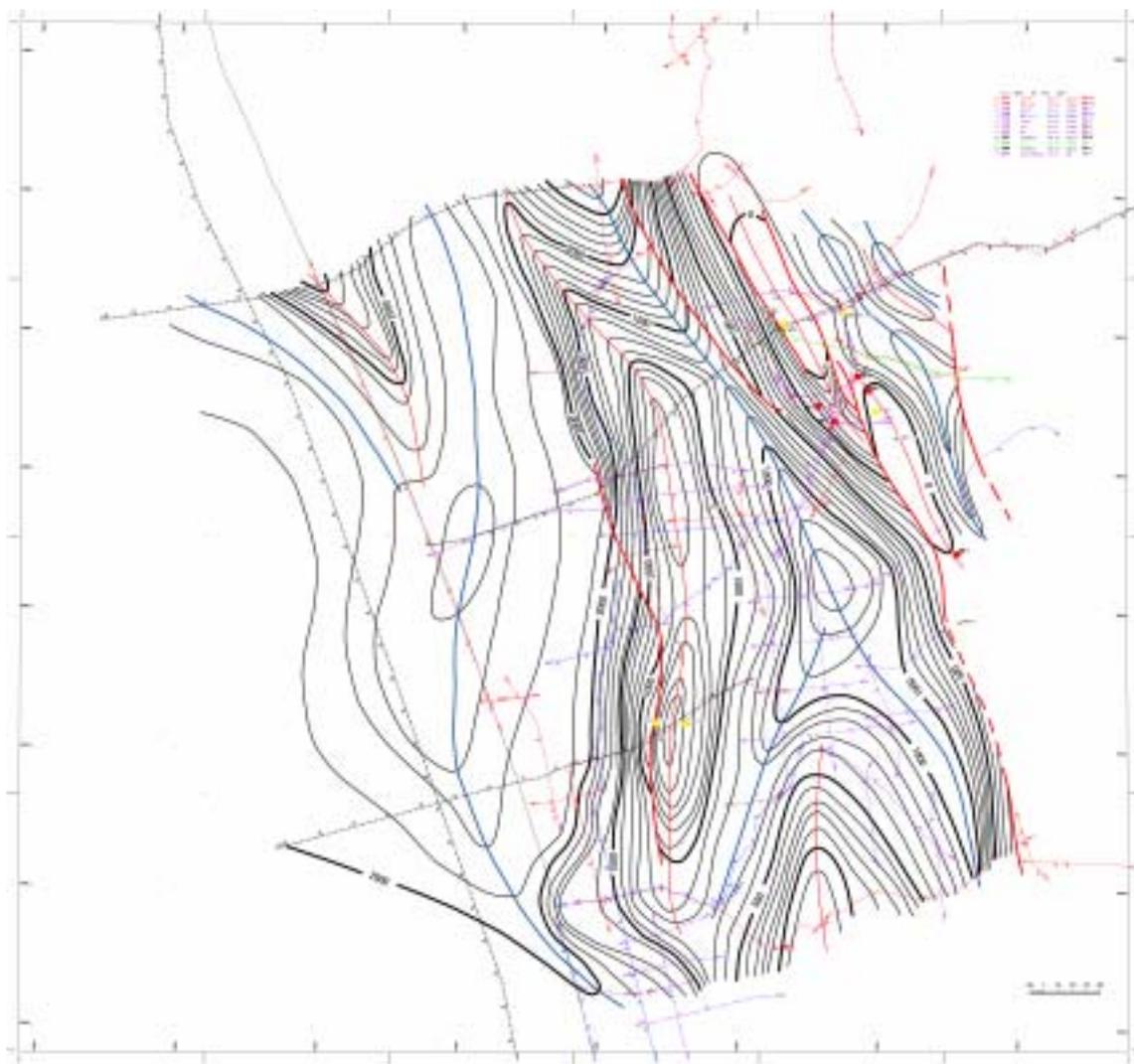


图 4.2-8 声問層基底深度構造图

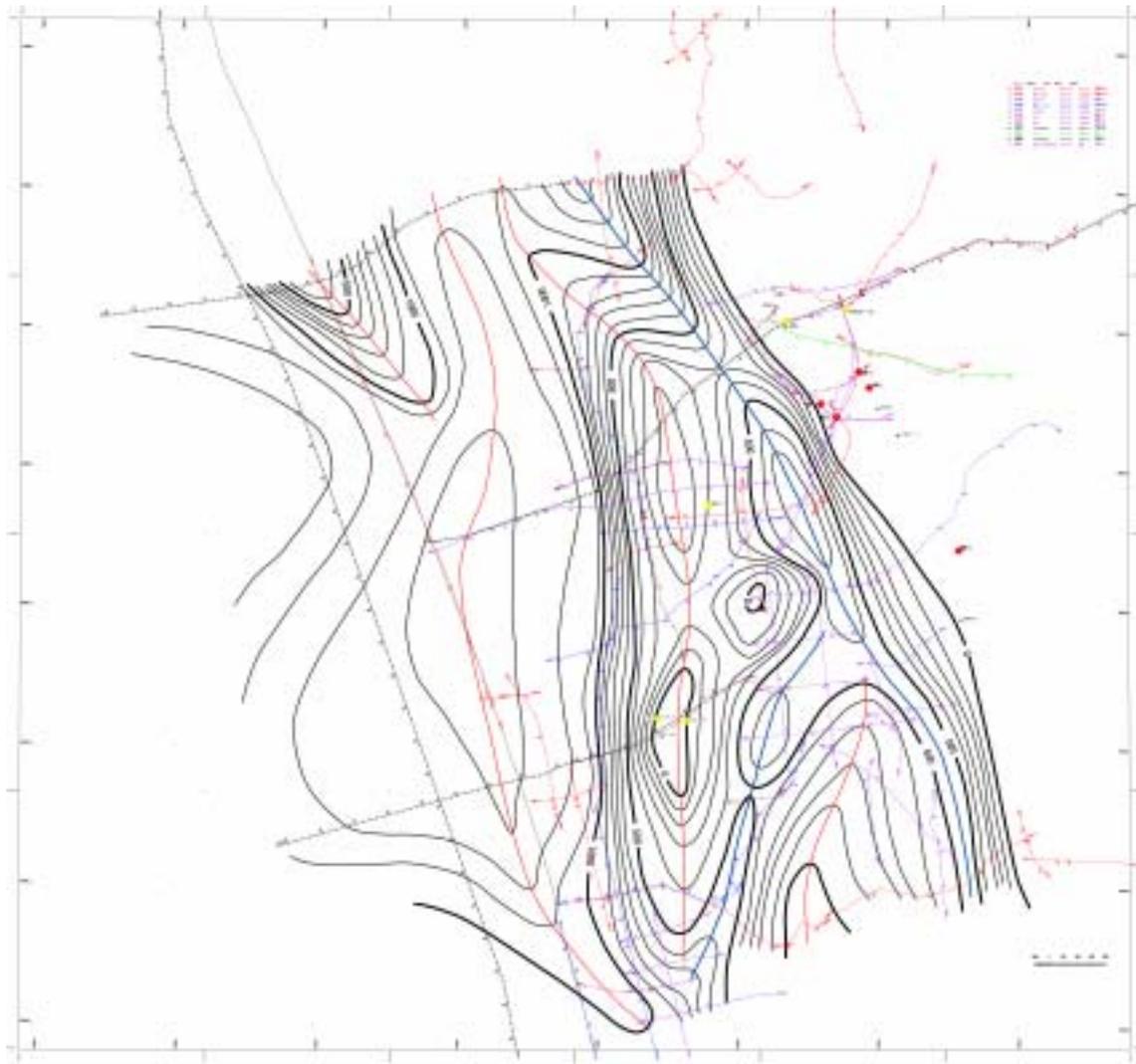


图 4.2-9 勇知層基底深度構造图

4.2.3 等層厚線図

稚内層基底深度構造図・声問層基底深度構造図・勇知層基底深度構造図を用いて、稚内層等層厚線図・声問層等層厚線図を作成した。

(1) 稚内層等層厚線図

稚内層の等厚線図を図 4.2-10 に示す。調査地域における稚内層の層厚は、400m~1000m 程度であり、調査地域東端部の豊富 - 大曲断層付近ないしは以東の地域で 1000m 前後と最も厚く、西方に向かい南北方向トレンドの薄層部(400~600m)、厚層部(600~800m)を経て、調査地域西端部で 400m 程度となる。HDB-1, 3, 4, 5 孔および基礎試錐「天北」を含む調査地域東端部が約 1000m の最大層厚を有するのは、本地域が福沢(1992) の稚内トラフ東側の陸棚斜面~海盆底に位置していたものと考えられる。

(2) 声問層等層厚線図

声問層等厚線図を図 4.2-11 に示す。大局的には稚内層と類似した傾向を持ち、調査地域内で 500~1200m 程度の層厚変化を有するが、東側から西方への薄化傾向は稚内層ほど顕著ではない。豊富 - 大曲断層付近以東の地域では一部が地表に露出して削剥を受けており、層厚は明らかでないが、豊富 - 大曲断層の西隣地域および調査地域北東部付近が 1000~1200m の層厚を有する最も厚い地域である。一方、最も薄いのは、北川口 SK 1 から南方に至る調査地域南端部で層厚 500m 以下となる。

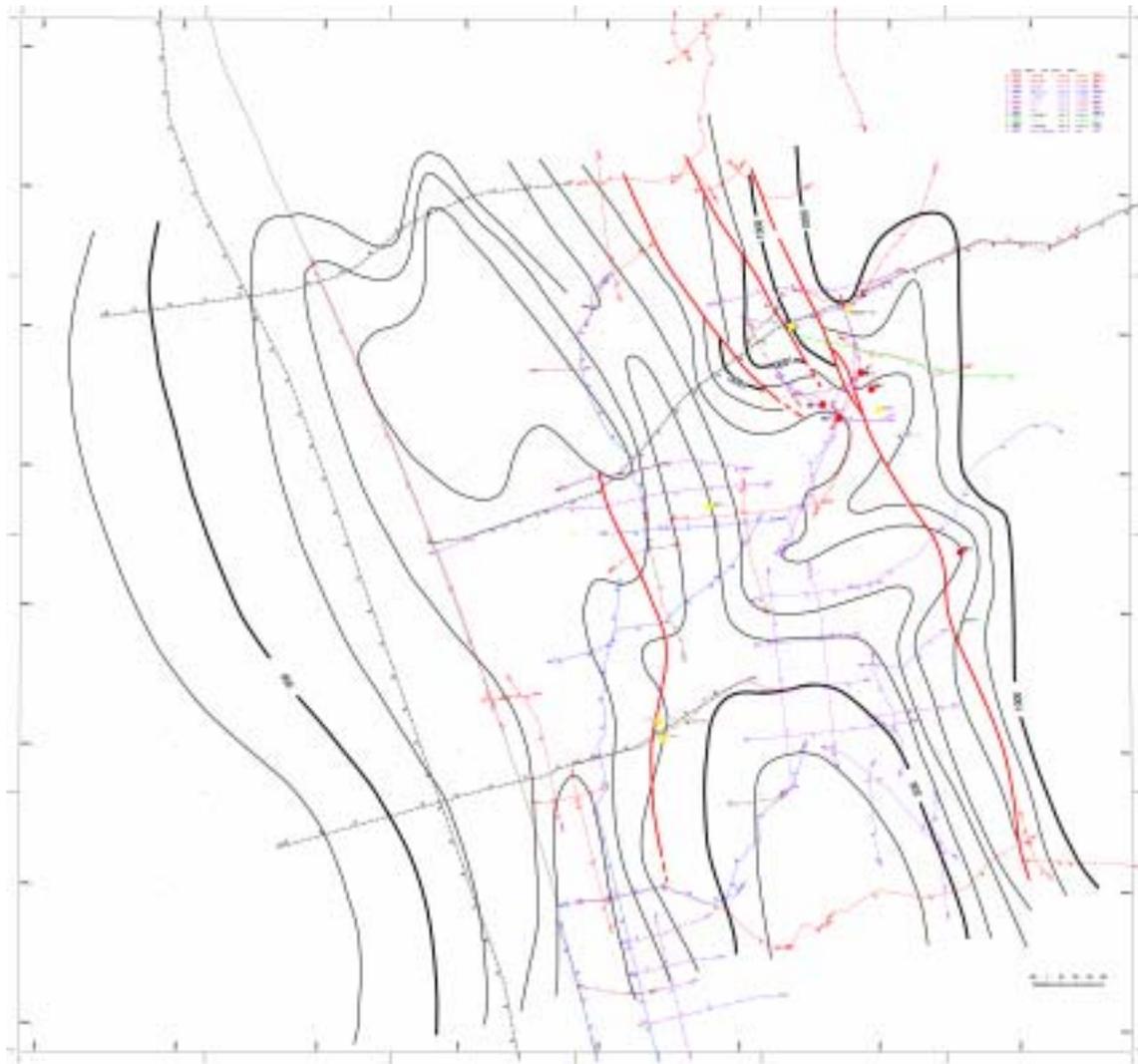


图 4.2-10 稚内層等厚线图

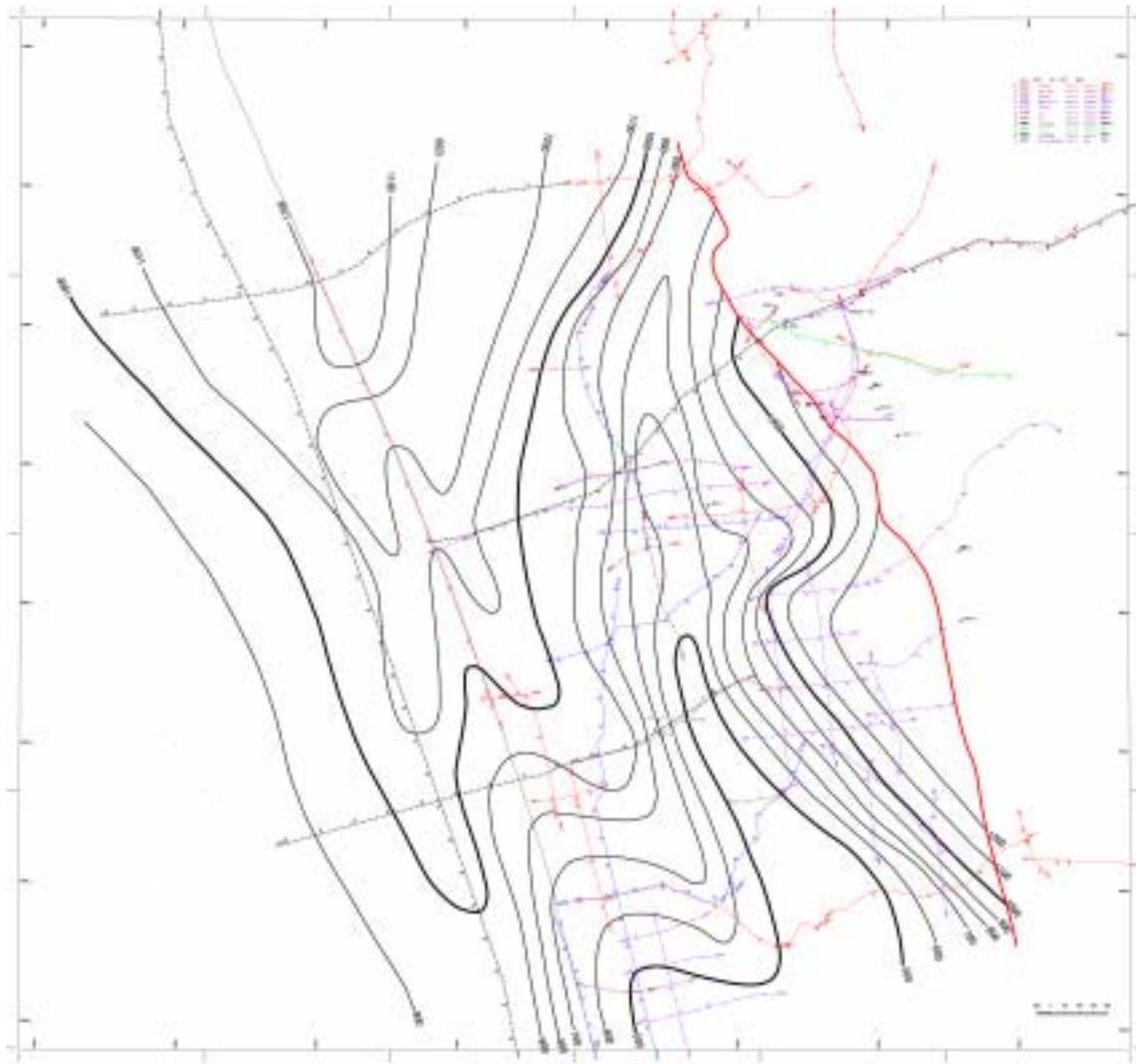


图 4.2-11 声問層等厚線図

4.3 地質構造発達史

基礎物理探査「天北地域」測線 TP90-1D を用いて地質構造発達史を検討した。TP90-1D は、HDB-1, 3 孔の北方約 2.5~3km を東北東 - 西南西に通る測線であり、幌延地域の地質構造を構成する幌延背斜や大曲断層を胴切りにする測線である。

地質構造発達史の検討は、TP90-1D における深度断面図でバックストリップ法を用いて行った。対象層準は研究対象である稚内層以浅の地層を対象とし、稚内層堆積時、声問層堆積時、勇知層・更別層（以降の地層）堆積時、現在の 4 つのステージに分けた。また、地層の堆積過程において堆積物が被ったであろう圧密の程度については、基礎試錐「天北」の孔隙率（図 4.3-1 左）を用いてキャリブレーションを行い、すべての地域においてその圧密曲線（図 4.3-1 右）をあてはめ、バックストリップする際に圧密を補正し、層厚の復元を行った。

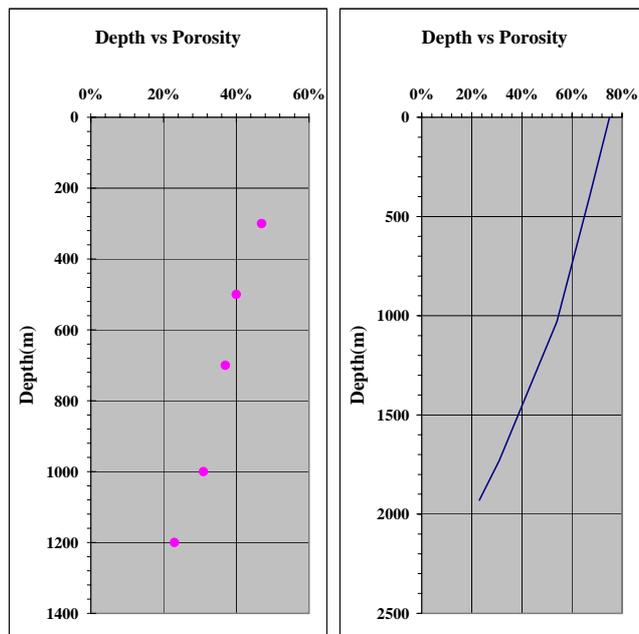


図 4.3-1 基礎試錐「天北」の間隙率（左）と復元図作成用にそれを用いてキャリブレーションをしたコンパクションカーブ（右）

なお、地盤の隆起や海水準の低下に伴って地層堆積時から現在までの期間に被った地層の削剥量に関しては福沢(1987)や石油公団「基礎試錐『天北』」に基づき、表 4.3-1 のように推測をした。

表 4.3-1 復元図作成時に見積もられた CDP ごとの削剥量と各地層の厚さ

(堆積は+で、削剥は-で表示)

CDP	11	151	391	581	711	801	931	1101	1251	1431	1731	1791
削剥された地層	-200	-200	-300	-350	-600	-900	-1000	-750	-600	-400	-730	-610
勇知層+更別層	1516	1572	1552	1502	1120	1172	1084	958	892	350	300	300
声問層	1064	1092	992	1020	960	732	592	788	892	686	634	638
稚内層	591.5	648	648	656	770	728	660	852	1000	1140	1012	1016

地質構造発達史の復元図を図 4.3-2 に示し、以下にステージごとの特徴を示す。

Stage1 : 稚内層堆積時 [8Ma 頃]

稚内層堆積時には測線の西部に比べ東部に厚く堆積する傾向が見られる。福沢 (1987) では、稚内層は稚内トラフで厚く堆積していると指摘しているが、稚内トラフの位置は TP90-1D 測線における大曲断層以東の地域にあたり、復元断面図に見られる最大層厚部と調和的な結果を示している。また、この時すでに CDP1000 付近では幌延背斜の東翼が萌芽している。

Stage2 : 声問層堆積時 [3Ma 頃]

声問層堆積時には稚内層とは異なり、西に向かって厚く堆積が行なわれる。これは、福沢 (1987) では稚内トラフは声問層堆積時には、沈降から隆起にインバージョンするとされており、調和的なものである。これに伴い、東部の薄層部 (CDP1300 ~ 1400) と西部の厚層部 (CDP600 ~ 900) の形成により、CDP800 付近では幌延背斜の西翼が、CDP1350 付近では豊富背斜の西翼が萌芽する。

Stage3 : 勇知層・更別層 (以降の地層) 堆積時 [1Ma 頃]

勇知層・更別層堆積時には CDP1300 以西が厚く、それ以东では薄い。このときに豊富背斜の西翼部が厚層部の形成により成長する。また勇知層基底では幌延背斜は形成されていないが、それ以深の地層では引き続き幌延背斜の芽が形成されている。

Stage4 : 現在

構造的には Stage1 ~ Stage3 までは沈降・堆積のステージで、Stage4 では隆起・削剥のステージにかわり、それまでに形成された地質構造がさらに強調される。さらに、大曲断層の大きな活動に伴う豊富背斜の東翼の形成や幌延背斜下部に伏在する断層の活動に伴う幌延背斜の成長が促進され、現在の地質構造を形成する。

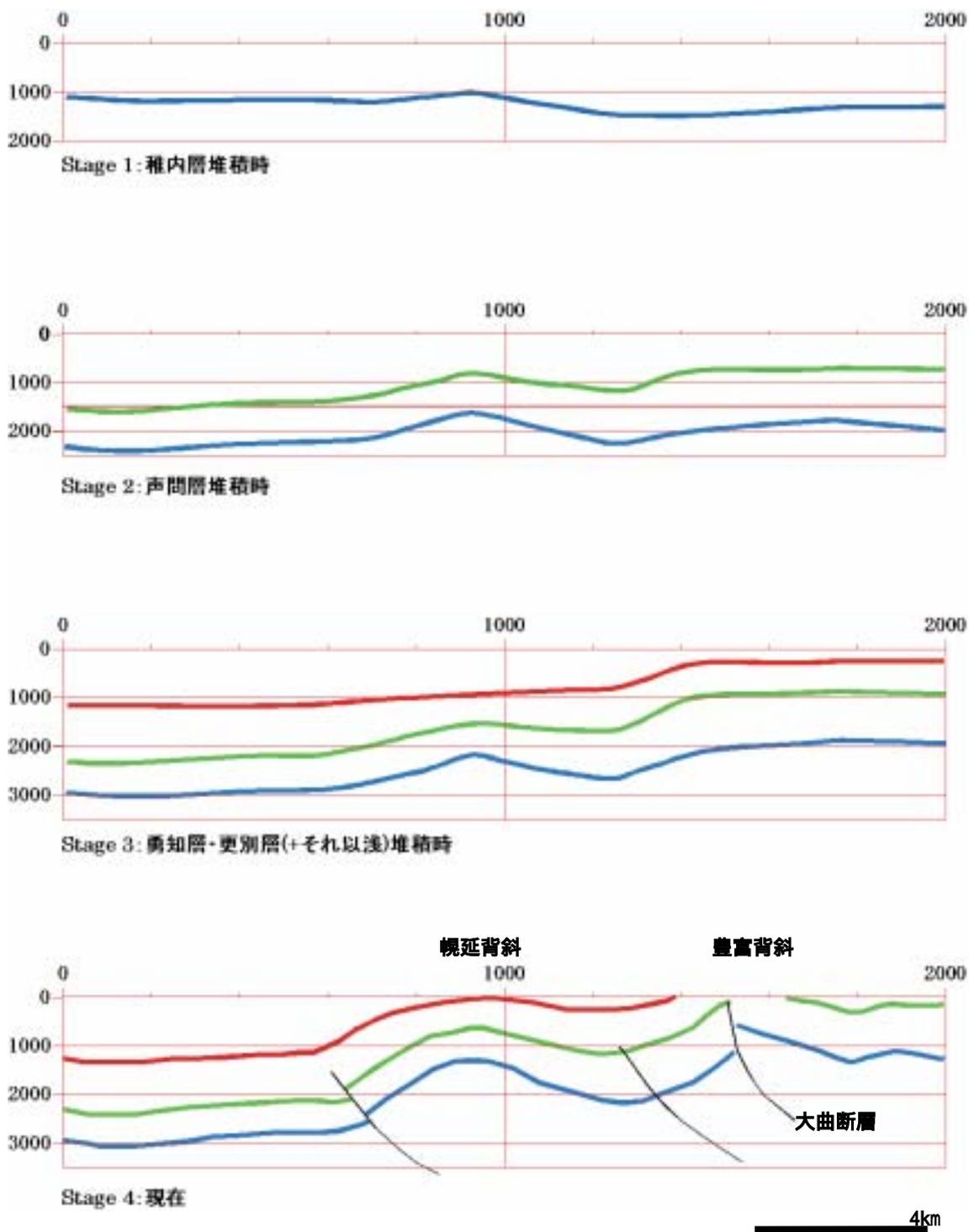


図 4.3-2 基礎物理探査「天北」の深度断面図を用いた地質構造発達史復元図

(横軸:CDP 縦軸:深度 青:稚内層基底 緑:声間層基底 赤:勇知層基底)

4.4 声問層，稚内層の岩芯観察

4.4.1 目的

堆積モデリングソフトウェア開発の基礎データ取得のためには，堆積盆を構成する堆積物の分布および堆積システムを把握する必要がある。このためサイクル機構により幌延地域で採取された岩芯について堆積学的な観点から調査を実施した。

モデリング対象層準は声問層と稚内層である。幌延を含む天北地域の地表に分布する声問層は無層理塊状の珪藻質泥岩，稚内層は層状珪藻質泥岩を主体とする（福沢，1985；1988）。福沢（1987）は地表の稚内層を詳細に検討して5つのタイプの堆積ユニットを認定している（本報告書3章参照）。また，孔井で取得されているGRカーブ（自然線検層の記録）上では岩相の不均質性を示唆すると考えられる特徴的なパターンがいくつか認められる（本章1節参照）。福沢（1987）が認めた個々の堆積ユニットの厚さは数10cm未満であり，GRカーブの特徴的なパターンは，厚さ10m程度のオーダーでGR値が漸移的に増減するパターンや，厚さ1m未満の区間でGR値が急増または急減するパターンなどがある。

岩芯調査では，これらのGRカーブのパターンが何に起因するのか，特にこれらのパターンと福沢（1987）の堆積ユニットとの間に対応関係はあるのかという点に留意した。また，出現頻度は少ないが高い浸透性を示すと考えられる砂岩にも注目して観察を実施した。

今回はHDB-1孔の岩芯を対象に特徴的なGRカーブを示す層準をいくつか抽出し，全長100m強の区間について調査を実施した。HDB-1孔を選んだ理由は，掘削深度が720mと幌延にある孔井のうちで最も深く，多くの層準が観察できるからである。なお，本孔井では，上位の声問層と下位の稚内層の境界は深度321mに認定されている。

4.4.2 調査方法

岩芯の表面を肉眼で観察して記載した。いくつかの岩芯は乾燥が進行し，表面に鉱物が晶出しており観察が困難であった。この場合，必要に応じて，岩芯を長さ10cm程度に切断し，さらに深度方向にスライスしたり，岩芯の表面を直接サンドペーパーで研磨して観察した。スライスした片方は保存し，もう一方は観察用とした。観察は試料の表面を水道水で濡らし，必要に応じてサンドペーパーで研磨して行った。

細かく破壊していたり，乾燥が進んで観察が困難な岩芯は，長さ1mにつき，10cm程度しか観察できていない。この場合は，観察できた部分のみを記載した（たとえば，

深度 195～212m)。なお、岩芯をスライスする場合は、保存する部分をなるべく多くするため、半割にするのではなく、直径の 1/3～1/4 をスライスすることにした。なお、色調の呼称と番号は Goddard 他 1975 に従った。

4.4.3 調査深度および岩相

深度 176～212m (声問層, 全長 36m)

主にオリーブグレイ (5GY4/1)～ライトオリーブグレイ (5Y5/2) を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなる。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない (写真 4.4-1)。一部の層準には厚さ数 cm 未満のオーダーで不明瞭な層状構造が認められる。この層状構造は色調がやや異なることで認められ、粒子サイズにはほとんど差はない。また、一般に明確な形状を示す生痕化石は認められないが、一部に直径 1～3mm の円ないしは楕円状の断面を示す生痕化石が存在する (写真 4.4-2)。細粒～中粒砂岩が深度 196.0～196.5m に認められるが、軟質で採取時に流動変形しており初生的な堆積構造は認定できない (写真 4.4-3)。



写真 4.4-1 深度 210.45～210.52m 泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない、写真上が上位方向。



写真 4.4-2 深度 199.00 ~ 199.10m シルト質泥岩

径 1~3mm の円ないしは楕円状の断面を示す生痕化石が認められる。生痕化石の幅は約 7cm , 写真上が上位方向。



写真 4.4-3 深度 196.00 ~ 196.50m 細粒 ~ 中粒砂岩

写真上が上位方向。

312～318m（声問層，全長 6m）

オリーブグレイ（5GY4/1）～ライトオリーブグレイ（5Y5/2）を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなり，全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない（写真 4.4-4）。一部の層準に深度 176～212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる。一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが，一部に直径 1～2mm または 5～10mm の円ないしは楕円状の断面を示す生痕化石が存在する。また，竹輪状の断面を示し，層理面と斜交して発達する生痕化石が岩芯の切断面で認められた（写真 4.4-5）。深度 317.0～318.0m では，GR 値が深度 196.0～196.5m と同様に周囲に比べて低く，砂岩の挟在が推定できる。ただし，この深度付近の岩芯は存在せず，今回は砂岩の痕跡すら認めることはできなかった。深度 312.1m および 313.9m 付近には直径 50～100mm のグレイッシュオレンジ（10Y7/4）を呈する炭酸塩岩質ノジュールが認められる。深度 313.9m 付近のノジュールには，その外壁の一部を覆うように貝殻片？が認められる。



写真 4.4-4 深度 314.92～315.00m シルト質泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない，写真上が上位方向。



写真 4.4-5 深度 315.85m 竹輪状の断面を示す生痕化石

層理面と斜交して発達する。

深度 348 ~ 358m (稚内層 , 全長 10m)

オリーブグレイ (5GY4/1 ないし 5Y3/2) ~ ライトオリーブグレイ (5Y5/2) を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなり , 全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない (写真 4.4-6 , -7) 。一部の層準に深度 176 ~ 212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる。一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが , 一部に直径 1 ~ 2mm または 5 ~ 10mm と 2 種類の大きさを示す円ないしは楕円形の断面を示す生痕化石が存在する。深度 353.5 ~ 354.0m 区間はこの一連の岩芯 (348-358m) を含むこれ以浅の岩芯のなかで最も硬質である。そして , この区間には有孔虫が良好に保存されているのがルーペで観察できる。

また , 深度 358.0m から 355.7m にかけては色調がオリーブグレイ (5GY4/1) からからライトオリーブグレイ (5Y5/2) に徐々に変化し , この層準は GR 値が徐々に低下するのに対応する。なお , 深度 352m 付近の開口したフラクチャー沿いには鉄サビ色の物質が付着している。



写真 4.4-6 深度 348.25 ~ 348.45m シルト質泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない。



写真 4.4-7 深度 353.80 ~ 353.90m シルト質泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない，写真上が上位方向。

深度 385 ~ 405m (稚内層, 全長 20m)

主にダスキープラウン (5YR2/2) ~ ダスキーイエロウイッシュブラウン (10YR2/2) を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなる。一部はオリーブブラック (5Y2/1) を呈する。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない (写真 4.4-8)。一部の層準に深度 176 ~ 212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる。一般に明確な形状を保存する生痕化石は認められないが, 一部に直径 1 ~ 2mm 円ないしは楕円状の断面を示し, 層理面と平行に発達する生痕化石, また直径 10 ~ 20mm の竹輪状の断面を示す生痕化石が認められる (写真 4.4-9)。竹輪状の断面を示す生痕化石は一般に層理面と平行に発達するが, 一部では斜交し, 深さ方向に 50mm 程度伸びるものもある。なお, 深度 387.3m 付近に直径 5mm の火山岩からなる垂円レキを含有する。



写真 4.4-8 深度 386.80 ~ 386.88m シルト質泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は保存されていない, 写真上が上位方向。



写真 4.4-9 深度 401.00～401.10m シルト質泥岩

層理面と平行に発達する竹輪形の断面を示す生痕化石，写真上が上位方向。

深度 415～425m（稚内層，全長 10m）

オリーブグレイ（5Y3/2）ないしオリーブブラック（5Y2/1）を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなる。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない（写真 4.4-10）。一部の層準に深度 176～212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる（写真 4.4-11）。一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが、直径 10～20mm の竹輪状の断面を示す生痕化石が特徴的に点在する（写真 4.4-12）。竹輪状の断面を示す生痕化石は一般に層理面と平行に発達しているようであるが、一部では斜交し、深さ方向に 100mm 程度の長さを示すものもある（写真 4.4-13）。深度 418.9～419.0m 区間は開口したフラクチャーが密に発達している。



写真 4.4-10 深度 417.15～417.25m シルト質泥岩

全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない，写真上が上位方向。

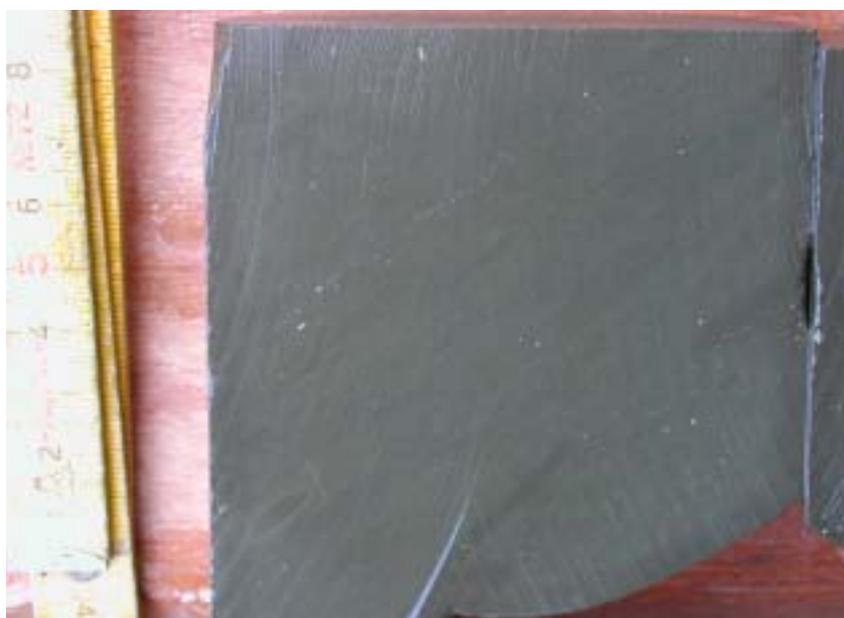


写真 4.4-11 深度 419.45～419.55m シルト質泥岩

不明瞭な層状構造が認められる，写真上が上位方向。



写真 4.4-12 深度 423.09～423.22m シルト質泥岩
層理面と平行に発達する竹輪形の断面を示す生痕化石，写真右が上位方向。



写真 4.4-13 深度 417.48～417.62m シルト質泥岩
層理面と斜交する竹輪形の断面を示す生痕化石，写真右が上位方向。

深度 535～545m（稚内層，全長 10m）
ダスキーブラウン（5YR2/2）～ダスキーイエロウイッシュブラウン（10YR2/2）を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなる。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認

められない。一部の層準に、深度 176～212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる（写真 4.4-14）。深度 535.7m 付近に直径 15mm の火山岩からなる垂円レキ（写真 4.4-15）、深度 539.2m 付近には厚さ 2mm、長さ 15mm の炭質物（写真 4.4-16）を含有する。



写真 4.4-14 深度 536.4.3～536.55m シルト質泥岩

不明瞭な層状構造が認められる，写真左が上位方向。

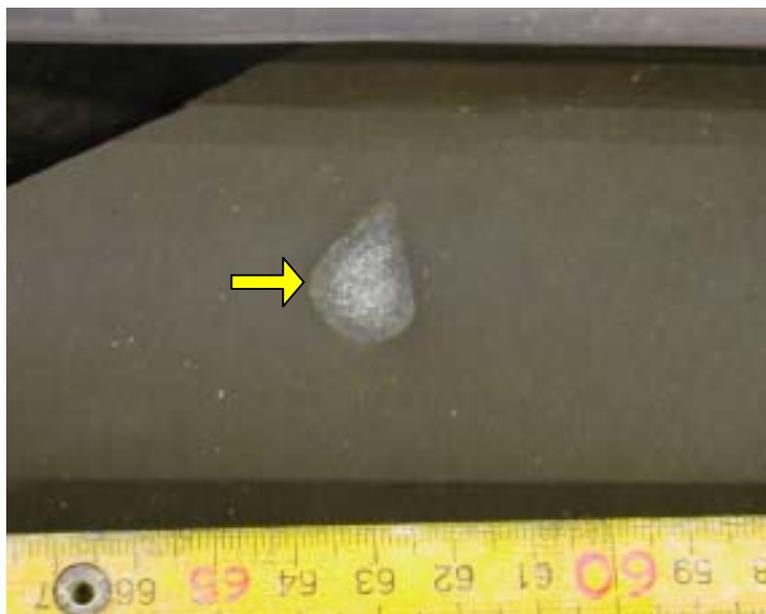


写真 4.4-15 深度 535.58～535.68m シルト質泥岩

火山岩からなる垂円レキを含む。



写真 4.4-16 深度 539.21 ~ 539.31m シルト質泥岩
炭質物を含む。

深度 666 ~ 678m (稚内層 , 全長 12m)

ダスキーブラウン (5YR2/2 ~ ダスキーイエロウイッシュブラウン (10YR2/2) ないしオリーブブラック (5Y2/1) を呈する泥岩ないしはシルト質泥岩からなる。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない (写真 4.4-17) 。一部の層準に深度 176 ~ 212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる。一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが , 一部に円ないしは楕円状の断面を示す生痕化石が認められた。この生痕化石は層理面と平行に発達し , 直径が 1 ~ 2mm と 4mm 程度の少なくとも 2 種類存在するようである。また , 深度 666m ~ 673m には幅 70 ~ 100mm で長さ数 cm 未満 , 層理面とほぼ平行で , 皿状形の断面を示す生痕化石が点在する (写真 4.4-18 ~ 23) 。この生痕化石は厚さ数 mm 程度の砂質ラミナと厚さ数 ~ 5mm の泥岩との互層状を呈している。深度 672.9m には直径 15mm の炭酸塩岩質ノジュールが認められる。

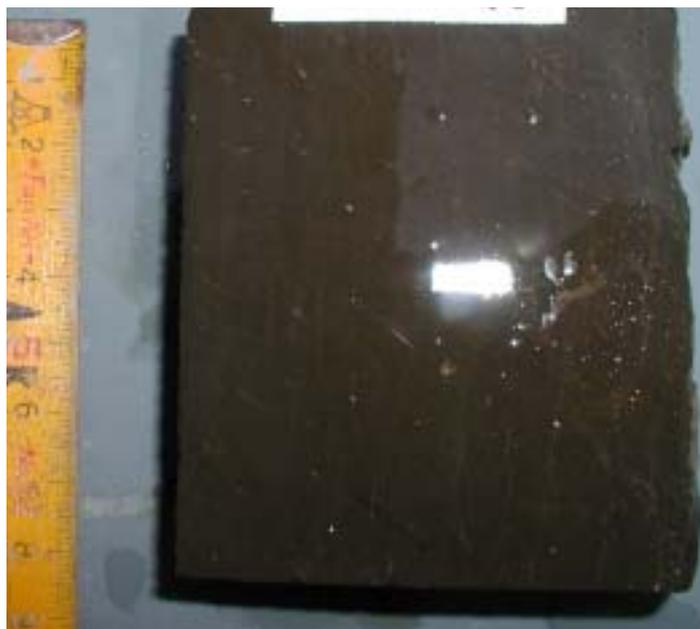


写真 4.4-17 深度 666.00 ~ 666.10m シルト質泥岩
生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない, 写真上が上位方向。



写真 4.4-18 深度 668.25 ~ 668.32m シルト質泥岩
砂岩薄層(矢印部)が挟在するように見えるが, これは写真 4.4-19 ~ 23 と同様に皿状形の生痕化石である, 写真上が上位方向。



写真 4.4-19 深度 669.50 ~ 669.62m シルト質泥岩
皿状形の生痕化石（矢印部）、写真上が上位方向。



写真 4.4-20 深度 669.50 ~ 669.62m シルト質泥岩
写真上が上位方向。皿状形の生痕化石（矢印部）、写真 4.4-19 を別の角度から撮影したもの。



写真 4.4-21 深度 669.50 ~ 669.62m シルト質泥岩

皿状形の生痕化石（矢印部）。図 4.4-19 と -20 の生痕化石を切断したもの，写真上が上位方向。



写真 4.4-22 深度 672.28 ~ 672.43m シルト質泥岩
皿状形の生痕化石（矢印部），写真上が上位方向。

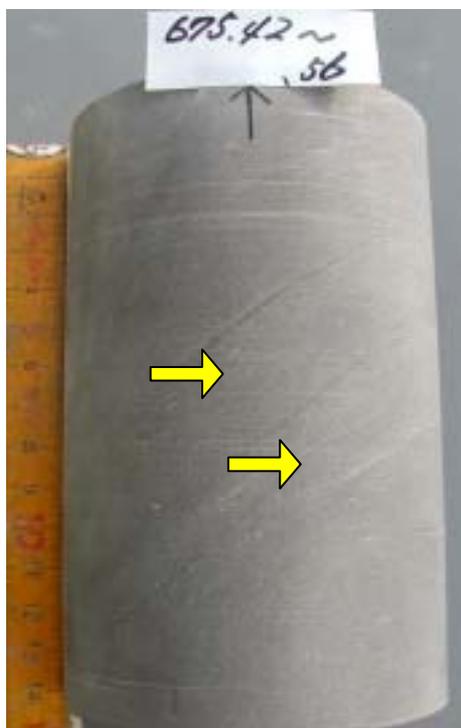


写真 4.4-23 深度 675.43 ~ 675.56m シルト質泥岩
皿状形の生痕化石（矢印部）。泥岩の薄層に見えるが，皿状形の生痕化石である。写真上が上位方向。

深度 685 ~ 715m (稚内層, 全長 30m)

オリーブグレイ(5Y3/2),グレイッシュブラウン(5YR3/2)~ダスキープラウン(5YR2/2), オリーブブラック(5Y2/1)を呈する。全体に生物擾乱が激しく初生的堆積構造は認められない(写真 4.4-24)。一部の層準に深度 176 ~ 212m で認められたのと同様の不明瞭な層状構造が認められる(写真 4.4-25)。一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが,一部に直径 1 ~ 5mm の円ないしは楕円状の明確な断面を示し,層理面と平行に発達する生痕化石が認められる。深度 705.7m には炭酸塩岩質な部分が認められる。深度 707.9m には有孔虫化石が厚さ 5cm の区間に密集するのが認められ,この最上部の有孔虫は著しく変形している(写真 4.4-26)。深度 689.7 ~ 689.9m と深度 696.6 ~ 696.8m では,厚さ 10 ~ 20mm のグレイッシュブラウン(5YR3/2)~ダスキープラウン 5YR2/2 の泥岩と厚さ 5mm のメディウムグレイの泥岩が不明瞭な互層状を呈する(写真 4.4-27)。

深度 688.0 ~ 690.1m, 深度 692.5 ~ 693.0m, 深度 696.6 ~ 696.7m の区間は開口したフラクチャーが密に発達する。この部分は周囲に比べるとやや粒径が細かいように思える。



写真 4.4-24 深度 696.80 ~ 696.90m シルト質泥岩

不明瞭な層状構造が認められる。



写真 4.4-25 深度 695.70～695.80m シルト質泥岩

不明瞭な層状構造が認められる，写真左が上位方向。



写真 4.4-26 深度 707.90～708.00m シルト質泥岩

有孔虫化石が厚さ 5cm の区間に密集するのが認められ，この最上部の有孔虫は著しく変形している，写真左が上位方向。



写真 4.4-27 深度 689.75 ~ 689.85m 泥岩

わずかに色調が異なる泥岩が不明瞭な互層状を呈する。開口したフラクチャーが周囲の層準に比べて密に発達する，写真上が上位方向。

4.4.4 岩芯観察のまとめ

厚さ数 cm を超える砂岩は深度 196.0 ~ 196.5m にのみ確認できた。ただし、深度 317.0 ~ 318.0m にもこれと同様に GR 値の低い層準が認められ、砂岩の存在が推定できたが、岩芯は流出しており、砂岩の痕跡すら認めることはできなかった。これらの砂岩層は両層とも声問層である。

調査した岩芯のうち深度 405m 以浅ではオリーブグレイ (5GY4/1) ~ ライトオリーブグレイ (5Y5/2) を呈するのに対し、それ以深は色調が暗くなり、オリーブグレイ (5Y3/2) ~ オリーブブラック (5Y2/1) ~ グレイッシュブラウン (5YR3/2) ~ ダスキブラウン (5YR2/2) を呈する。全体に生物擾乱が激しく、初生的堆積構造は全く保存されていない。ただし、一部の層準には厚さ数 cm 未満オーダーの不明瞭な層状構造が認められる。

一般に明確な形状が保存されている生痕化石は認められないが、観察した岩芯全体に直径 1 ~ 2mm または 5 ~ 10mm の円ないしは楕円形の断面を示す生痕化石が存在する。これとは別に特徴的な生痕化石を 2 種類認めることができた。一つは径 10 ~ 30mm で竹輪状の断面を示すもので一般に層理面と平行に発達するが、一部では斜交し、深さ 100mm 程度のものである。これは深度 385 ~ 405m に主に認められる。もう一つは、深

度 666m～673m に点在する生痕化石で、幅 70～100mm、深さ数 cm 未満で層理面とほぼ平行状態で産する。この生痕化石は厚さ数 mm 程度の砂質ラミナと厚さ数～5mm の泥岩との互層状を呈する。

4.5 声問層および稚内層珪藻質泥岩の圧密特性

福沢(1985, 1988)に示されるように声問層, 稚内層はともに珪藻質であり, 珪藻起源のシリカ鉱物に富む。珪藻起源のシリカ鉱物はオパール A オパール CT 石英と埋没続成にともない転移することが知られている。Tada and Iijima (1982) は, 東北日本と北海道の孔井および地表試料を用いて珪藻質泥岩の埋没続成にともなう間隙性状の変化を研究した。すなわち, オパール A オパール CT の続成転移にともない間隙率と大きな間隙が急減すること, オパール CT 石英の続成転移にともない間隙率は微減するにもかかわらず大きな間隙が急増することを示した。さらに, その変化の程度が碎屑物含有量で異なることを示した。また, 辻・横井(1994)は, 北海道天北地域の増幌層と稚内層の珪藻質泥岩を用いて, オパール CT 石英の続成転移, 碎屑物含有量, 間隙径の3つの関係を検討し, Tada and Iijima (1982) の見解を支持するデータを得た。また, この続成転移は間隙性状の変化に加えて, 岩石の脆性化をもたらし, これらが総合してこの地域の石油天然ガス鉱床形成に重要な役割を果たしていると解釈した。

HDB-1 孔で取得された岩芯に認められる珪藻起源のシリカ鉱物はオパール A もしくはオパール CT である(山本ほか, 2002 - 1)。また, 珪藻質泥岩は肉眼的にはほぼ均質にみえるものの, 物理検層で得られたガンマ線値は 50API 未満 ~ 100API 以上の間で大きく変化する。ガンマ線値は粘土鉱物含有量に相関すると考えられているので, HDB-1 孔の珪藻質泥岩で認められるガンマ線値の増減は碎屑物含有量が層準毎に大きく変化していることを示すと考えられる。したがって, HDB-1 孔での岩石の間隙性状, すなわち浸透性が, 岩相(碎屑物含有量), 深度, 続成転移で大きく変動していることが予想されることから, これらの関係について検討を行った。

なお, ここでは珪藻質泥岩のうちオパール CT を含まない岩石をオパール A 帯の岩石, オパール A を含まない岩石をオパール CT 帯の岩石, またオパール A とオパール CT の両者を含む岩石を漸移帯の岩石と呼ぶことにする。

4.5.1 使用データ

HDB-1 孔の物理検層データ(かさ密度, ガンマ線値), 佐藤(2003)に示された岩芯分析データ(かさ密度, 真密度, 間隙率および間隙径分布)

4.5.2 手法

岩石の圧密程度の指標として一般に間隙率が用いられる。佐藤(2003)では間隙率の実測データが 8 つ得られているが, HDB-1 孔全層準の圧密特性を検討するにはデー

タが足りない。そこで、ここでは HDB-1 孔で取得されている物理検層データを用いて全層準の間隙率を求め、佐藤（2003）の実測データは主にその妥当性を検証するために用いる。

密度検層ではかさ密度データが 10cm 毎に得られている。ここでいうかさ密度とは間隙を水で飽和した岩石の密度である。密度検層で得られたかさ密度から間隙率を求めるためには真密度が必要であるが、オパール A とオパール CT とで真密度が異なる。さらにこの続成転移は漸移して起こる。すなわち、オパール A が徐々に減少すると同時に、オパール CT が徐々に増加して転移が進行する。したがって、この転移にともなう岩石の真密度は漸移して変化しているはずである。しかしながら、その値を精度良く捉えるのに足る量の実測データを佐藤（2003）では得られていない。そこでオパール A 帯とオパール CT 帯の珪藻質泥岩で佐藤（2003）の真密度の実測値を平均し、それぞれの平均値を用いて間隙率を便宜的に求めた。同時にガンマ線値を砕屑物含有量の指標とし、砕屑物含有量と間隙率との関係も調査した。

また、辻・横井（1991）は、 $0.02\ \mu\text{m}$ 以上の間隙口を持つ間隙からなる間隙率 ($>0.02\ \mu\text{m}$) と石油天然ガスを貯留する層準とに関連性があることを示した。そこで浸透性と関連する指標として $>0.02\ \mu\text{m}$ を算出し、これと続成転移との関連性を検討した。

4.5.3 珪藻質岩のかさ密度 (R_{hob})、ガンマ線値 (GR)、深度の関係

図 4.5-1 にかさ密度 (R_{hob}) の深度変化を示し、同時にガンマ線値 (GR) で色分けした。R_{hob} は深度 200~250m で 1.65~1.85g/cc を、深度 700m 付近で 1.95~2.05g/cc を示し、深度 200m~700m で深度の増加とともに R_{hob} が大きくなる。同じ深度で比べると GR が大きい程、R_{hob} が大きい傾向がある。深度 320~400m はシリカ鉱物の漸移帯に相当する。この漸移帯では各深度の GR の分布幅がこの上位と下位層に比べて小さいが、R_{hob} と GR が示す傾向は変わらない。ただし、同一の GR を示す珪藻質泥岩を比べると深度に対する R_{hob} の変化がこの区間の上位で大きく、下位で小さい。なお、深度 200m 以浅ではこれらに明瞭な傾向は認められない。

また、図 4.5-1 には同時に佐藤（2003）に報告されているかさ密度を示した。このときそれぞれの試料の GR は試料採取深度に近い深度での値を採用した。これらのデータは泥岩 3 (241.28m) と 5 (371.00m) を除いて基本的に物理検層データと調和的である。

また、図 4.5-2 には同時に佐藤（2003）で報告されている珪藻質泥岩の間隙率を示した。ここでの間隙率は飽和法で測定したものである。このとき各試料の GR は採取深度に近い深度での値を採用した。これらのデータは、泥岩 3(241.28m)と 5(371.00m)の 2 つを除いて検層データと調和的な値を示す。なお、深度 200m 以浅では明瞭な傾向が認められない。

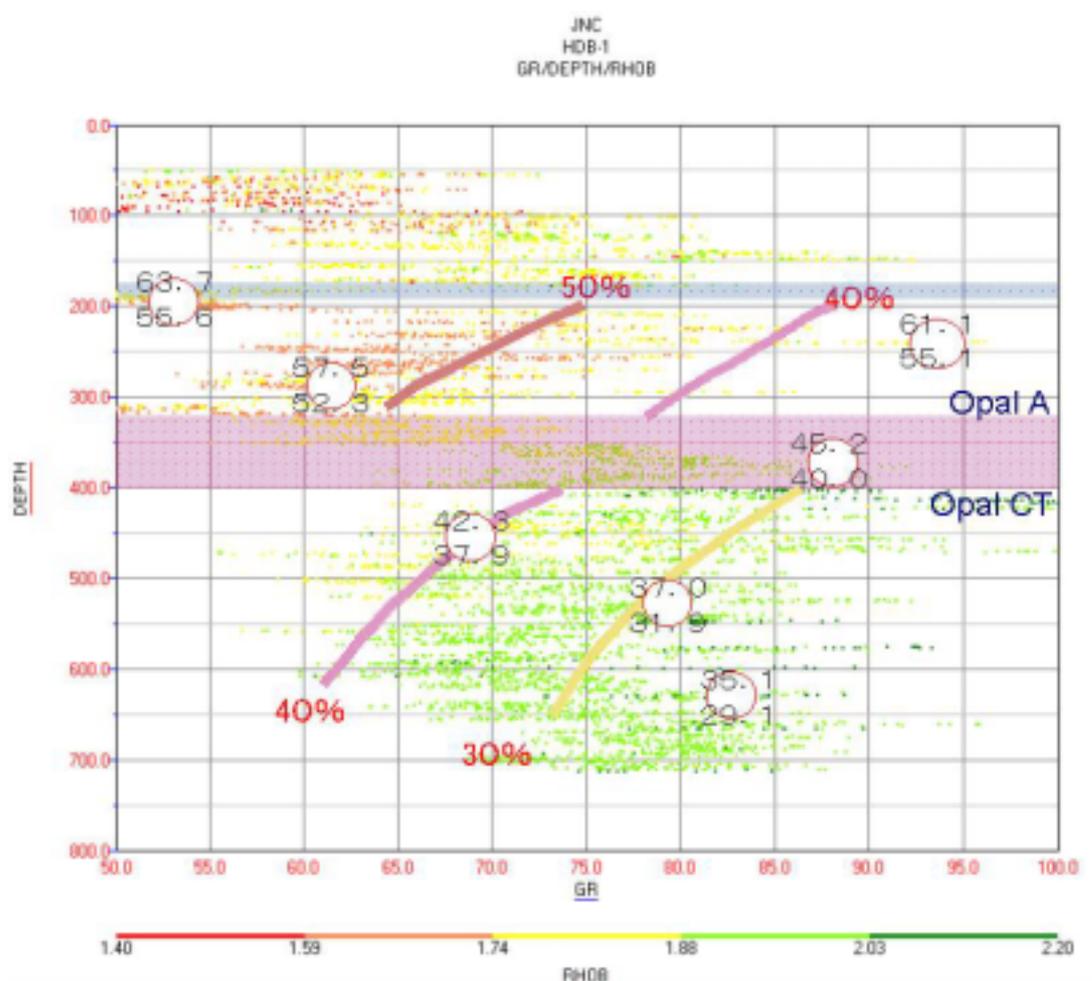


図 4.5-2 珪藻質泥岩の間隙率とガンマ線値 (GR) の深度変化

図中の丸は間隙率の実測値が得られている試料を示す。それぞれの試料の GR は検層カーブから求めた。丸の中の 2 つの数字のうち、上のは水中飽和法によって測定された間隙率 (佐藤, 2003), 下のは水銀圧入法で測定された間隙率 (佐藤, 2003) を示す。丸の色は Rhob を表す。また、深度 320 ~ 400m にピンク色で示された帯はシリカ鉱物のオパール A からオパール CT への続成転移の漸移帯を示す。

4.5.5 間隙径分布

図 4.5-3 に佐藤（2003）が示した珪藻質泥岩 8 試料の間隙径分布データを示す。こ

ここでは間隙径を間隙口の半径で示している。泥岩 1~4 はオパール A 帯に、泥岩 6~8 はオパール CT 帯に属する。泥岩 5 は漸移帯に属する。泥岩 1~4 は間隙率 50~56% を、泥岩 6~8 は間隙率 28~37% を示す。また、泥岩 5 はこれらの中間的な値である 40% を示す。 $>0.02\ \mu\text{m}$ は、泥岩 1~4 で 46~53%、泥岩 6~8 で 5~13% を示す。また、泥岩 5 はこれらの中間的な 20% を示す。

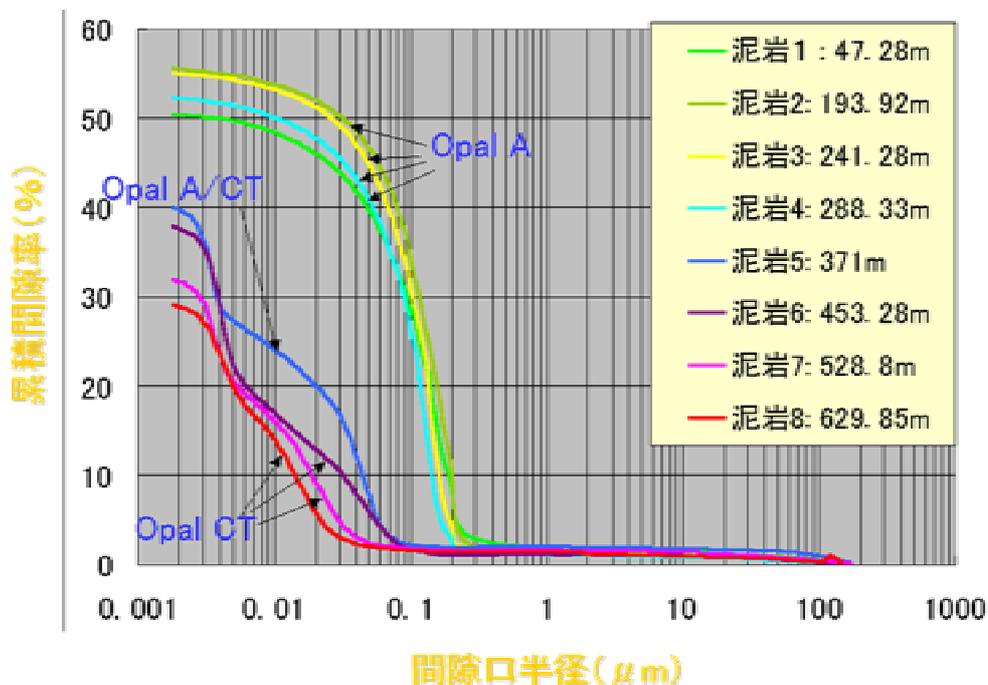


図 4.5-3 珪藻質泥岩の間隙径分布 (佐藤 2003 データをグラフ化)

4.5.6 珪藻質泥岩の浸透性へ碎屑物含有量とシリカ鉱物の続成転移が及ぼす影響

図 4.5-1 と図 4.5-2 で示されるように同じ深度では GR 値が大きい程、 R_{hob} が大きく、間隙率は小さい。すなわち、碎屑物含有量が多いほど、圧密がより進行していることがわかる。今回のような細粒岩では一般に碎屑物含有量が多いと、粘土鉱物が多く含まれる。また、粘土鉱物はそれ以外の碎屑物や珪藻起源物質に比べて、より延性の大きな物性を示す。したがって、碎屑物含有量が多いほど延性の大きな粘土鉱物の含有量が多くなるので、より圧密が進行し R_{hob} が大きくなり間隙率が小さくなると解釈できる。但し、同じ鉱物組成の岩石でも圧密が進行し間隙率が減少すると、単位体積あたりの粘土鉱物含有量が増えることになるので GR は大きくなる。このため、同じ深度では、GR 値が大きいほど R_{hob} が大きく、間隙率は小さいという傾向は、深度が大きくなると緩和される。また、浸透性に関連すると考えられる $>0.02\ \mu\text{m}$ はオパール A からオパール CT への続成転移を経て急激に小さくなる。佐藤 (2003) の SEM 観察結果によると、オパール A と続成転移漸移帯に属する泥岩 5 以浅の試料では多くの珪

藻化石が観察されるが、オパール CT 帯では珪藻化石量が減少し、泥岩 7 以深ではほとんど見られないとしている。そして、この変化を埋没深度の増加に伴う珪藻化石の機械的な圧密によるものとしている。ただし、この変化がシリカ鉱物の続成転移と関連していることを考慮すると、ここでは機械的な圧密だけでなく、化学的な変化も同時に関わっていることが示唆される。これらのことから、珪藻質泥岩は 1) 碎屑物含有量が多いほど、2) 深度が大きいほど、浸透性が小さくなる、さらに、3) オパール A からオパール CT へ続成転移でその浸透性は急減することがわかる。

4.5.7 今後の課題

今回、珪藻質泥岩の碎屑物含有量とシリカ鉱物の続成転移が浸透性へ及ぼす影響について検討した。ただし、碎屑物含有量は物理検層データからの推測であり、より細かい範囲でこの含有率が変化している場合はこの推測が適切でない可能性がある。また、浸透性に関する実測値はない。したがって、これらの検討は定性的なものにならざるを得ない。定量的な検討を行うためには、同一試料を用いて浸透性、碎屑物含有量、間隙径分布、鉱物組成などのデータを得る必要がある。また、実測データを得ることの困難なより細かい浸透性の変化を捉えるためには孔壁の詳細な比抵抗データを取得している EMI 検層データを検討する必要がある。

5 前進的モデルを用いた堆積モデリングソフトウェアの開発

「前進的モデル」を用いた，堆積相分布予測のソフトウェアの開発を行った。

一般的な地質学的アプローチは，地質データの存在する点（データ点）を出発点とし，堆積相分布を予測し，その背後にある堆積現象の考察を行う。これは，結果としての堆積相分布から，その原因となる堆積現象を理解するものであり「バックワードモデリング」手法と呼ばれる（中山，1997）。

本研究での「前進的（フォワード）モデリング」手法は，上記手法とは逆に，地質情報から堆積現象を抽出し，地質モデルを構築した後，堆積相分布の予測を行う。本手法では「データ点」は出発点ではなく，堆積相分布予測を検証する際に利用する。

「5.1」では，堆積相分布予測モデルの概念設計・帰納設計・コーディングについて述べ，作成した基本ソフトウェアのテストランについて紹介する。

一般に，前進的モデルで予測した堆積相分布は「データ点」と一致しない。これは，複雑な堆積過程を完全にモデル化することが不可能なためである。現状では，堆積モデルはどこかで，単純化・理想化する必要がある，全ての地質現象をモデル化することは不可能である。

本研究では，モデル予測データと実データとの誤差を逆に利用して，堆積相の不均質性を評価することを最終目標とする。つまり，理想化した堆積モデルと実データとの相違は，その不均質性によるものと考えるからである。「5.2」でこれら考え方より不均質性の評価手法について提案する。

5.1 基本ソフトウェアの開発

一般的な堆積岩について、堆積盆スケールでの堆積システムを再現する堆積モデリングソフトウェア（以下、基本ソフトウェアと呼ぶ）の開発を行った。

5.1.1 ソフトウェアの概念設計

基本ソフトウェアは、数値シミュレーションにより堆積岩の三次元分布を予測する。概念設計では、基本ソフトウェア構築のために堆積岩形成のモデル化を行う。堆積岩形成過程は堆積過程と堆積後、埋没し堆積岩となる過程（以後、圧密過程）の二つに分類される。

堆積過程のモデル化の候補としては、流体力学を基礎にして各々の粒子の運搬様式を数値化する物理的堆積モデリング（Sedimentary Process Modeling）と、形成される地質層序に重点を置き経験的な堆積の関数を定義して用いる層序モデリング（Stratigraphical Modeling）とがある（中山，1990）。

物理的堆積モデルは非常に演繹的手法であり、「前進的モデル」として非常に魅力的である。しかし、堆積過程すべてのメカニズムをモデル化することは難しく、また秒単位での予測であることから百万年単位の時間を扱うことは現実的でない。

層序モデルは対象地層の堆積時間のある長さのタイムステップに分割し、各ステップの堆積量を経験的な堆積関数を用いて推定する。層序モデルは百万年単位で堆積盆スケールのモデルが可能である。

従って、基本ソフトウェアの堆積過程のモデルは、層序モデルをベースとして構築し、堆積過程の一部については、物理的堆積モデルの結果を堆積関数に反映させることを考える。

圧密過程のモデルは堆積過程のモデル同様、層序モデルの考え方を採用する。つまり、各堆積物種の間隙率を深度の関数（圧密曲線）として定義し、埋没深度より堆積岩の間隙率を推定する。また各堆積物種の水透率係数を間隙率の関数とし、水透率係数の推定を試みる。

以下、堆積過程モデル、圧密過程モデルの詳細について述べる。

(1) 堆積過程モデル

堆積過程モデルでは、堆積物の種類およびその堆積関数から、各タイムステップにおける各堆積物の堆積量(厚さ)を予想する。ここでは第3章でとりまとめた声問層・稚内層の堆積システムを基に構成要素の抽出を行い、その堆積関数および時間的变化について具体的に検討する。

声問層・稚内層の堆積システムの構成要素である堆積物種類および堆積様式を表5.1-1に示す。声問層・稚内層の堆積物は、砂質物・泥質物・珪藻に三種類に分類され、また性質の異なる二つの堆積様式が認められる。

堆積様式のひとつは、定常的な堆積(以後、「一次堆積」とよぶ)であり、もうひとつは乱泥流のような重力流による堆積(以後、「二次堆積」とよぶ)である。両堆積様式とも声問層・稚内層の堆積システムを特徴づけるものであることから、堆積関数を各様式について設定することとした。

表 5.1-1 声問層・稚内層堆積システムの構成要素

堆積物種類	堆積様式
砂質物 泥質物 珪藻	一次堆積(定常的) 二次堆積(イベント的)

一次堆積は、その性質が定常的であることから、堆積速度(単位時間での堆積量)を堆積関数とした。一方、二次堆積は、その性質がイベント的であることから、イベント1回あたりの堆積量(以降、イベント堆積量とよぶ)、およびイベント頻度を堆積関数とした。シミュレーション時の利便性から、堆積量は厚さ(m)を単位とする。

図 5.1-1 は、堆積物・堆積関数の概念図である。一般的層序モデル同様、海岸線は直線であると仮定し、水深・一次堆積物堆積速度は海岸線からの距離の一次関数とした。二次堆積物のイベント堆積量は、海岸線上のある定点からの二次元関数とし、関数決定の際には、物理的堆積モデルの結果を利用する。

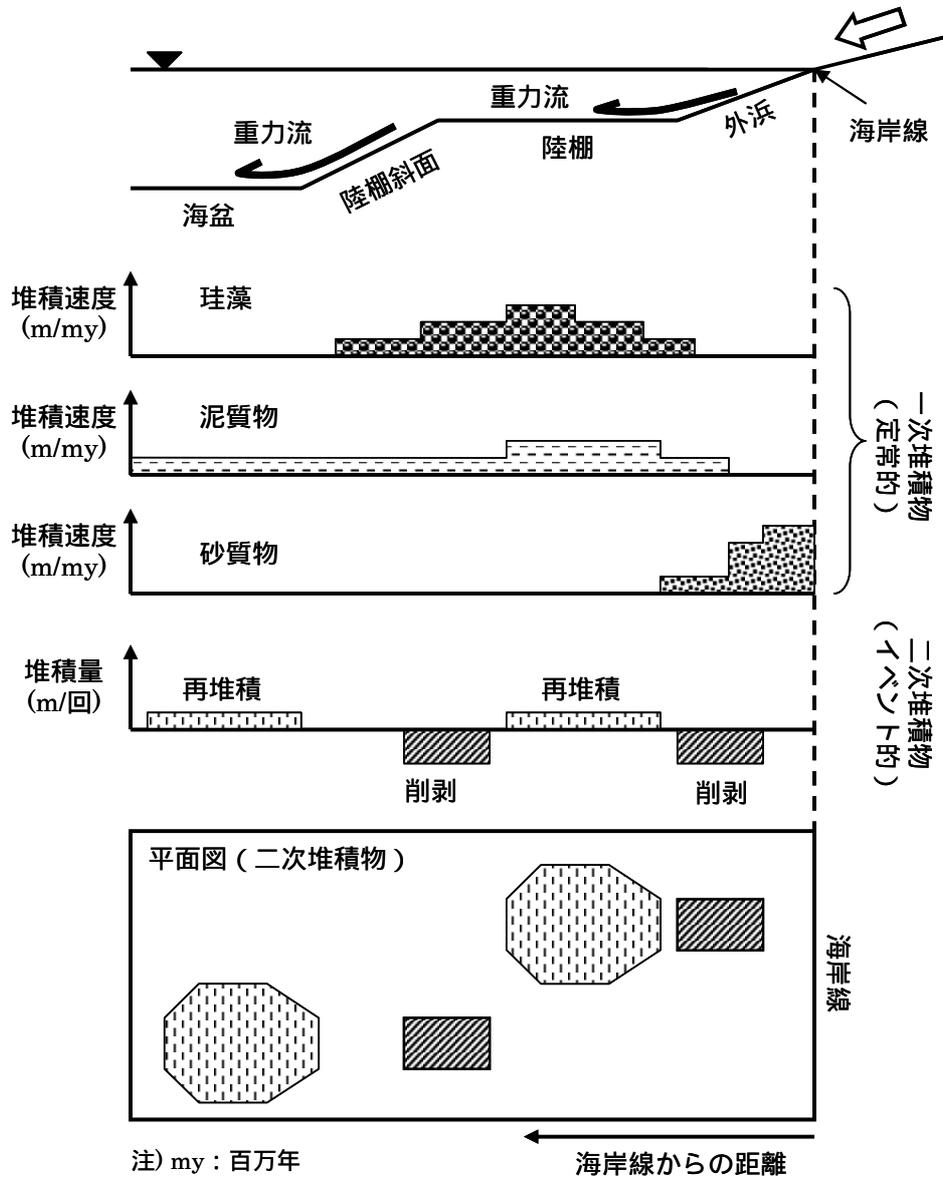


図 5.1-1 稚内層の堆積モデル概念図

最上段：古水深断面図，二～四段目：一次堆積物堆積速度，五段目：二次堆積物堆積量（一回のイベント），最下段：二次堆積物の平面概念図。

時間により直接変化する要素としては、海岸線の位置、二次堆積のイベント頻度とした。海岸線位置の時間の変化は、海進・海退を示している。一方、水深・堆積速度・イベント堆積量の関数は、海岸線とともに平行移動すると考え、海岸線からの位置関係は時間によって変化しないとする（図 5.1-2）。

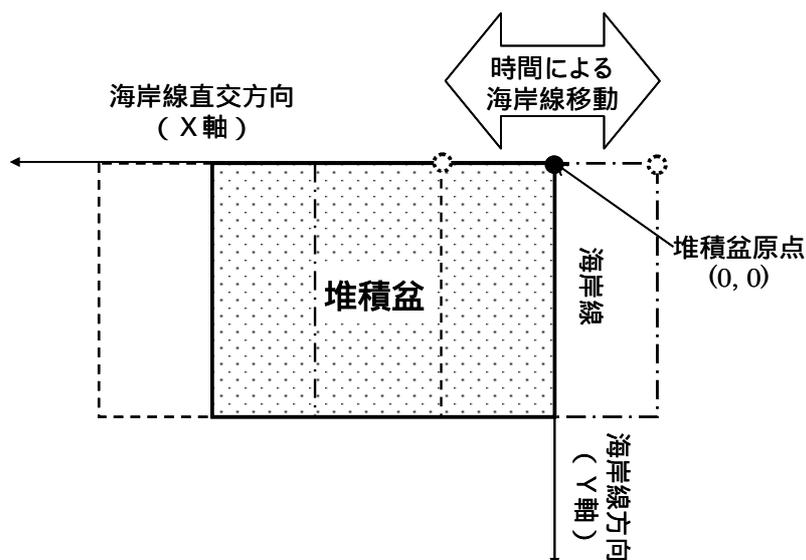


図 5.1-2 時間による海岸線位置移動の概念図

現実には、水深・堆積速度・イベント堆積量の関数は時間により変化しうる。しかし、声問層・稚内層のように地層全体を主体とし、泥質岩中心であり、大きな岩相変化を捉えにくい地層の場合、水深・堆積速度・イベント堆積量の関数の時間的な変化などを把握するためには、岩芯の詳細な観察や、広域スケールにおける岩相変化の把握などに基づいた詳細な検討が必要となる。

(2) 圧密過程モデル

圧密過程では、堆積過程で得られた各セルの堆積物堆積量から、間隙率・透水係数を予測する。埋没による堆積物の間隙率・透水係数の変化を物理化学的に再現する手法は確立されていない。したがって圧密過程のモデルは、堆積過程同様、層序モデルの考え方を採用する。つまり各堆積物種の間隙率は深度の関数とし、透水係数は間隙率の関数とする。

圧密過程モデルの概念図を図 5.1-3 に示す。堆積物は、その構成粒子（以後、マトリックス：Matrix）と間隙（Pore）に区分される。本モデルでは層序モデルで通常使用される 2 つ仮定、埋没深度の増加により間隙量は減少するが、マトリックス量は変化しない、間隙量（率）は堆積物が最も埋没した深度（最大埋没深度）によって決定され、その後の隆起によって変化しない、を用いる。これら仮定により、各セル上限の最大埋没深度から間隙率・透水係数が推定可能となる。

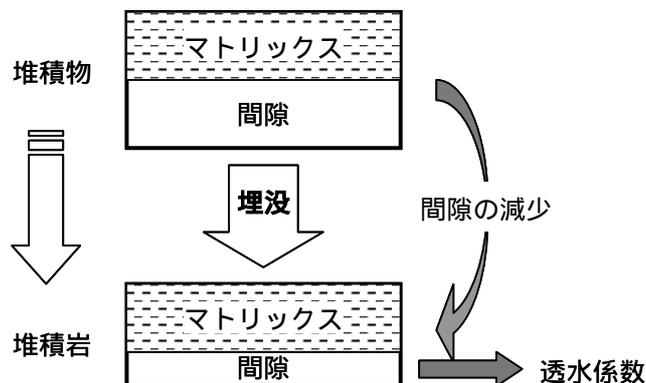


図 5.1-3 圧密過程の概念図

最大埋没深度に関しては、対象層（例えば、声問層・稚内層）上限深度を与えることで、各セルの上限深度を推定する。図 5.1-4 で示す通り、時間の最も若い（時間4）堆積物上限の最大埋没深度が分かれば、他タイムステップ堆積物埋没深度および間隙率が順々に決定されることとなる。

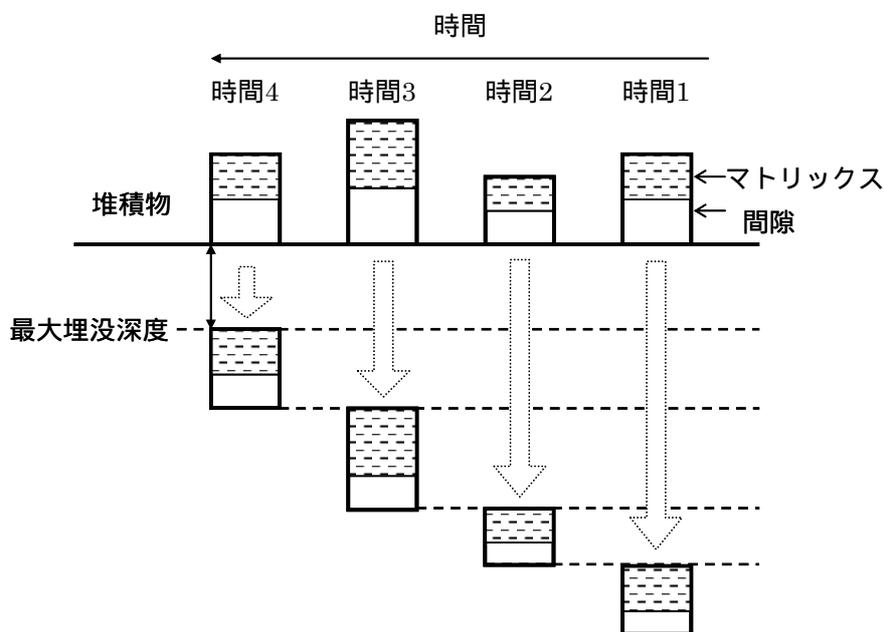


図 5.1-4 各タイムステップ堆積物の圧密過程概念図

(3) まとめ

堆積過程モデル・圧密過程モデルのまとめを以下列記する。

< 堆積過程 >

堆積盆の海岸線は直線とし、水深は海岸線からの距離の関数とする。

一次堆積物の堆積速度は、海岸線からの距離の関数とする。

二次堆積物のイベント堆積量は、その平面的位置の関数とする。

時間により、海岸線は、その直行方向に移動する。

時間により、二次堆積のイベント頻度は変化する。

で設定した関数は、時間によって変化しない。

< 圧密過程 >

各堆積物の間隙率は深度の関数とする。

各堆積物の透水係数は間隙率の関数とする。

各堆積物マトリックス量は、深度によって変化しない。

各堆積物の間隙率は最大埋没深度によって決定される。

各堆積物は（セル内で）分離（独立）したものとして扱う。

各セルの透水係数は、各堆積物透水係数の代表値とし、代表値の算定には指数平均を採用する。

5 . 1 . 2 ソフトウェアの機能設計・コーディング

(1) 機能概略

基本ソフトウェアでは、対象地域・堆積時間のあるグリッド長・タイムステップ長を持つセルに分割し、セル毎に解を求める。

X軸は海岸線の直行方向、Y軸は海岸線方向とし、堆積開始時の堆積盆原点を、X Y平面原点とする。また T 軸は時間（過去方向）とする（図 5.1-6）。

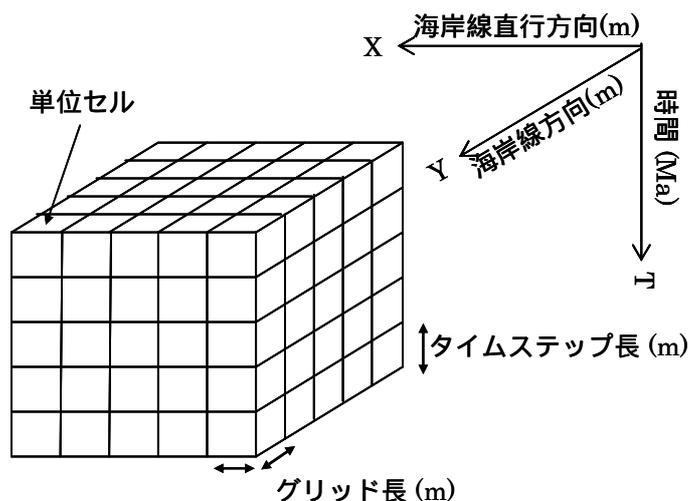


図 5.1-6 セル分割図

基本ソフトウェアでは、入力情報から堆積過程・圧密過程の処理を行い、結果情報
を出力する。図 5.1-7 に基本ソフトウェアのフロー図を示す。

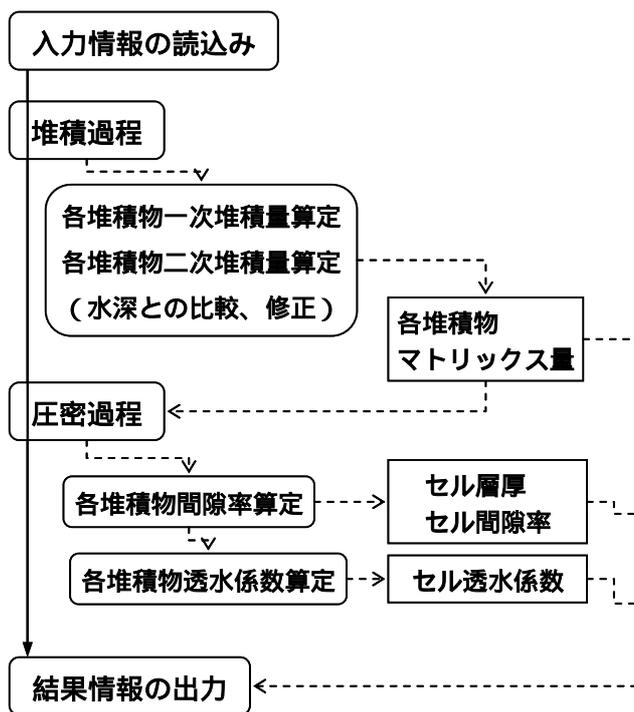


図 5.1-7 基本ソフトウェア・フロー図

(2) 入力情報・結果情報

入力情報には、対象地域・堆積時間 (X・Y・T 範囲決定) の情報、堆積過程用の情

報，圧密過程用の情報がある。表 5.1-2～4 にそれら情報の一覧を示す。また，堆積過程，圧密過程から得られる中間情報・結果情報を表 5.1-5 に示す。

表 5.1-2 入力情報（対象地域および堆積時間）

名称	記号	単位
開始地質時間	T_b	Ma
タイムステップ	Δt	my
タイムステップ数	N_t	-
対象地域原点 (X, Y)	X_0, Y_0	m
対象地域グリッドサイズ	$\Delta x, \Delta y$	m
対象地域グリッド数 (X, Y)	N_x, N_y	-

表 5.1-3 入力情報（堆積過程）

名称	記号	単位	摘要
堆積物数	n, i	-	1 i n , 圧密過程でも使用
<u>海岸線移動距離</u>	c	m	時間の関数
<u>水深</u>	w	m	海岸線定点からの距離 (X 方向) 関数
<u>堆積速度</u>	a_i	m/my	一次堆積 海岸線定点からの距離 (X 方向) 関数
イベント数	p, j	-	二次堆積, 1 j p
<u>イベント堆積量</u>	b_{ij}	m/回	二次堆積 海岸線定点からの距離 (XY 方向) 関数
<u>イベント頻度</u>	f_{ij}	回/my	二次堆積, 時間関数
初期間隙率	o_i	v/v	(圧密過程でも使用)

下線：関数情報

表 5.1-4 入力情報（圧密過程）

名称	記号	単位	摘要
埋没深度上限	d_0	m	対象堆積層上限の XY グリッド情報
<u>間隙率</u>	i	v/v	深度の関数, $i(0) = i_0$
<u>透水係数</u>	hc_i	cm/s	間隙率の関数
指数平均係数	ω	-	セル透水係数決定用 垂直 (ω_v), 水平 (ω_h)

下線：関数情報

表 5.1-5 中間・結果情報

名称	記号	単位	過程	摘要
各堆積物一次堆積量	la_i	m	堆積	厚さとして扱う
各堆積物二次堆積量	lb_{ij}	m		
各堆積物堆積量	lo_i	m		
総堆積量	lo_T	m		
各堆積物マトリックス量	m_i	m		
各堆積物層厚	l_i	m	圧密	中間情報
各堆積物間隙量	v_i	m		中間情報 厚さとして扱う
全層厚	l_T	m		セルの高さ 出力情報
セル上限深度	d	m		出力情報
セル間隙率	τ	v/v		出力情報
セル水平透水係数	hch	cm/s		出力情報
セル垂直透水係数	hcv	cm/s		出力情報
セル内各堆積物マトリックス比率	r_i	v/v		出力情報

(3) 堆積過程・圧密過程の数式化

< 堆積過程 >

堆積時間 t における堆積盆原点は、海岸線移動距離の関数を用いて $(c(t), 0)$ である。

よって時間 t , 場所 (x, y) において堆積する一次堆積物量 , 二次堆積物量はそれぞれ ,

$$la_i = a_i(x - c(t)) \times \Delta t \quad (1)$$

$$lb_{ij} = b_{ij}(x - c(t), y) \times f_j(t) \times \Delta t \quad (2)$$

となり、各堆積物堆積量、総堆積量は下式で表される。

$$l_{0i} = la_i + \sum_{j=1}^p lb_{ij} \quad (3)$$

$$l_{0T} = \sum_{i=1}^n l_{0i} \quad (4)$$

ここで、総堆積量 l_{0T} が水深 $w(x - x_t)$ を越える場合は、総堆積量を水深の厚さに調整し、余剰の堆積量を海側方向へ持ち越すこととする。総堆積量が決めれば、各堆積物マトリックス量は以式より求める。

$$m_i = l_{0i} \times (1 - \phi_{0i}) \quad (5)$$

< 圧密過程 >

各堆積物マトリックス量が圧密前・圧密後で変化しないことから、各堆積物層厚、各堆積物間隙量、総層厚について下式が成立する。

$$m_i = l_{0i} \times (1 - \phi_{0i}) = l_i - v_i \quad (6)$$

$$l_T = \sum_{i=1}^n l_i \quad (7)$$

ここで、対象堆積層の堆積終了時間レイヤーのセル（セル上限深度 d_0 ）を考える。セル内に存在する各堆積物間隙に偏りが無いと考えると、各堆積物間隙量は下式で表される。

$$v_i = \frac{l_i}{l_T} \times \int_{d_0}^{d_0+l_T} \phi_i(z) dz \quad (8)$$

従って、(6)、(7)、(8) 式をまとめると下式となる。

$$l_T = \sum_{i=1}^n (m_i + v_i) = \sum_{i=1}^n \left(m_i + \frac{m_i}{l_T - \int_{d_0}^{d_0+l_T} \phi_i(z) dz} \times \int_{d_0}^{d_0+l_T} \phi_i(z) dz \right) \quad (9)$$

(9)式により総層厚が求まり、(6)、(8)式より各堆積物層厚、各堆積物間隙量が算出される。

対象セルの下限深度、つまり下位セルの上限深度は $d_0 + l_T$ となる。よって、上位セルから順々に総層厚を求めることで、(7)式の d_0 は各セル上限深度 d に置き換え可能となり、各セルの総層厚、各堆積物層厚、各堆積物間隙量は求まる(図 5.1-4 参照)。

セル全体の間隙率 ϕ_T は下式で表現される。

$$\phi_T = \frac{1}{l_T} \times \sum_{i=1}^n v_i \quad (10)$$

各堆積物の透水係数は間隙率の関数である。セルの水平・垂直透水係数 hch 、 hcv は、各堆積物透水係数の指数平均法で求める。

$$hch = \left(\frac{1}{l_T} \sum_{i=1}^n l_i \times hc_i^{\omega_h} \right)^{\frac{1}{\omega_h}} \quad hc_i = hc_i (v_i / l_i) \quad (11)$$

$$hcv = \left(\frac{1}{l_T} \sum_{i=1}^n l_i \times hc_i^{\omega_v} \right)^{\frac{1}{\omega_v}} \quad (12)$$

ここで、 $\omega_h, \omega_v = 1$ 。指数平均の係数が 1 の場合は算術平均、0 の場合は幾何平均、 $\omega = -1$ の場合は調和平均とそれぞれ一致する。

(4) 入力関数について

入力関数には、海岸線移動距離、水深、堆積速度、イベント頻度、イベント堆積量、間隙率、透水係数がある。以下、各々の関数について説明する。

海岸線移動距離・水深・堆積速度・イベント頻度関数は、線形関数で表すことが難しいことから、それぞれ二列の二次元配列で与える。

水深を例として説明する。入力値は、海岸線からの距離とそれに対応する水深： $(x_1, w_1), (x_2, w_2), (x_3, w_3) \cdots (x_n, w_n)$ で与え、 $x_i < x_{i+1}$ ($1 \leq i \leq n-1$) とする。また任意の x について、 $x_1 \leq x \leq x_n$ ならば w は近傍二点 $(x_i, w_i), (x_{i+1}, w_{i+1})$ の直線内挿値とし、 $x < x_1$ なら $w = w_1$ 、 $x > x_n$ なら $w = w_n$ とする。

イベント堆積量は、物理的堆積モデルの利用を考慮し、グリッドデータ（基準点位置、グリッドサイズおよび $m \times n$ の二次元配列）で与える。

間隙率関数は、深度の五次式もしくは深度の指数関数（圧密関数）から選択する。五次近似式は、その係数を入力値とする。指数関数は、

$$\phi = \phi_0 \times e^{-cz}$$

：間隙率(v/v)、 ϕ_0 ：初期間隙率(v/v)、 c ：圧密係数(1/m)、 z ：深度(m)であり、圧密係数を入力値として与える。

透水係数関数は、間隙率の五次式、Berg 式、Bryant 式から選択する。Berg 式は砂質岩についての経験式で、

$$k = 5.3 \times 10^3 \times n^{5.1} \times Dn^2$$

k ：浸透率 (md)、 n ：間隙率 (%)、

Dn ：粒径分布 P90 値もしくは [算術平均値 - 標準偏差]

である (Berg, 1975)。 Dn を入力値として与える。Berg 式の解は浸透率であるため、係数 9.7×10^{-7} (cm/s/md) を用いて透水係数に変換する。

Bryant 式は、泥質岩についての経験式で、

$$k = e^{14.30 \times n - 26.30}$$

k ：透水係数(cm/s)、 n ：間隙率(v/v)

である (Bryant et al, 1975)。入力すべき係数はない。

(5) コーディング

本ソフトウェアのコーディングには C 言語 (ANSI 規格) を用いた。ソースファイルは以下の通り (詳しくは添付参照)。使用関数は表 5.1-6 の通りである。

- ・ sed_m.c : 本体ソースコード
- ・ array.c : 配列作成用ソースコード
- ・ array.h : 配列作成用 (ヘッダーファイル)

表 5.1-6 基本ソフトウェアの関数一覧

関数名	処理	ソースファイル
main()	メイン関数	sed_m.c
├── read_general_data()	一般情報読み込み	sed_m.c
├── allocate_memory()	動的メモリ割当	sed_m.c
│ ├── create_array_d3()	三次元配列メモリ確保	array.c
│ └── create_array_d2()	二次元配列メモリ確保	array.c
├── read_table_data()	配列除法読み込み	sed_m.c
├── read_rwk_data()	イベント堆積量読み込み	sed_m.c
├── read_topdepth()	最大埋没深度読み込み	sed_m.c
├── sedimentation_calc()	堆積過程処理	sed_m.c
│ └── liner_interp()	内挿計算	sed_m.c
├── compaction_calc()	圧密過程処理	sed_m.c
│ ├── phi_calc()	間隙率計算	sed_m.c
│ ├── perm_calc()	透水係数計算	sed_m.c
│ └── power_ave_calc()	指数平均計算	sed_m.c
├── free_memory()	動的メモリ開放	sed_m.c
│ ├── free_array_d2()	三次元配列メモリ開放	array.c
│ └── free_array_d3()	二次元配列メモリ開放	array.c

5 . 1 . 3 二次堆積分布の検討 (予察)

ここでは、幌延地域で区分した堆積物、砂質岩・泥質岩・珪藻の二次堆積物分布について、物理過程モデルを用いて予察を行った。

物理過程モデルは、懸濁粒子の沈積過程モデル (Suspension Model) を用いた。基本式は以下の通りである。

$$h \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} MC - \frac{\partial}{\partial y} NC + \frac{\partial}{\partial x} \left(hK \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK \frac{\partial C}{\partial y} \right) - S$$

$$U_*^2 / U_{*c}^2 < 1.0 \text{ のとき} \quad S = w \cdot C \cdot \left(1 - \frac{U_*^2}{U_{*c}^2} \right)$$

$$U_*^2 / U_{*c}^2 \geq 1.0 \text{ のとき} \quad S = 0.0$$

ここで，C：浮遊物質濃度(V/V)，M，N：海岸線直交方向，海岸線方向の流量(m³/s)，h：水深(m)，K：拡散係数(m²/s)，S：堆積関数(m²/s)，U*：摩擦速度(m/s)，U_{*c}：限界摩擦速度(m/s)，w：粒子沈降速度(m/s)である。

モデルへの入力情報は，表 5.1-7，8，および図 5.1-8 の通りである。一般情報については，堆積盆の詳細検討が終了していないことから，標準的と思われる値を使用することとした。堆積物情報は，砂質物・泥質物・珪藻についての平均的な値を与えた。珪藻の密度が低いのは，殻内部が海水で満たされるためである（殻密度 2.5g/cm³，間隙率 80%とした）。砂質物の粒径は細粒砂サイズ，泥質物は細シルトサイズ程度とした。

表 5.1-7 Suspension モデル一般情報入力値

グリッドサイズ	200m
セル数	(31, 31)
水深	10m (一定)
洪水位置	(16, 6)
タイムステップ長	100 秒
洪水継続時間	2000 秒
洪水量	200m ³ /秒
拡散係数	10
流速	図 5.1-8 参照

表 5.1-8 Suspension モデル堆積物情報入力値

堆積物情報	密度(g/cm ³)	粒径(mm)	濃度(ppm)
砂質物	2.65	0.10	200
泥質物	2.65	0.02	200
珪藻	1.30	0.04	200

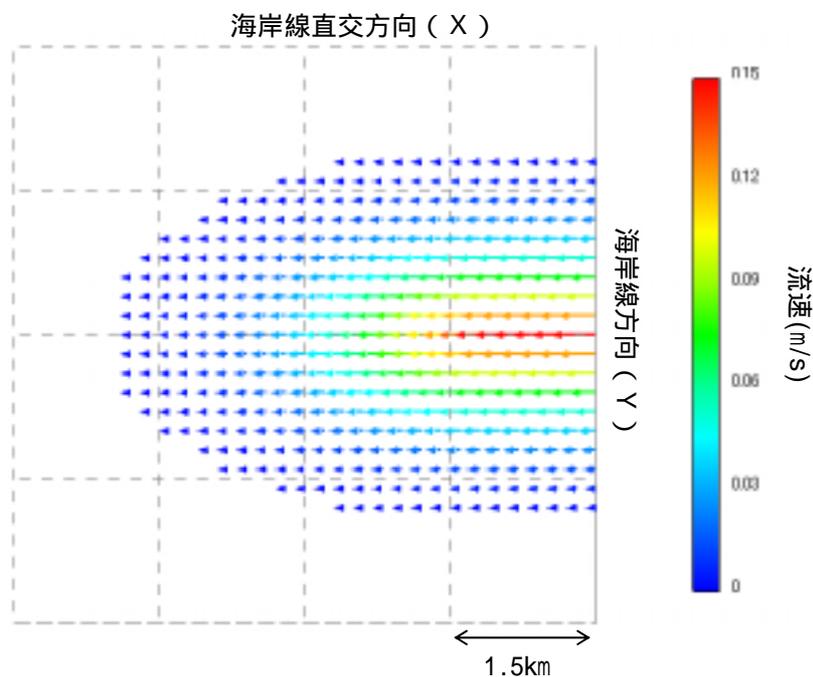


図 5.1-8 Suspension モデル流速情報入力値

図 5.1-8 に、シミュレーション結果を示す。本結果から読み取れることは、泥質岩と珪藻の広がりがほぼ同程度（直径 4km 程度）であるのに対し、砂質岩の広がりは、泥質岩・珪藻の広がりの 1/4 程度（直径 1km 程度）である。

一回のイベント堆積量により、各堆積物の分布範囲は変化することが予想されるが、泥質岩と珪藻の分布形態は、ほぼ同様であると予察できる。今後、堆積盆の詳細検討が進めば、より現実的な評価が可能となる。

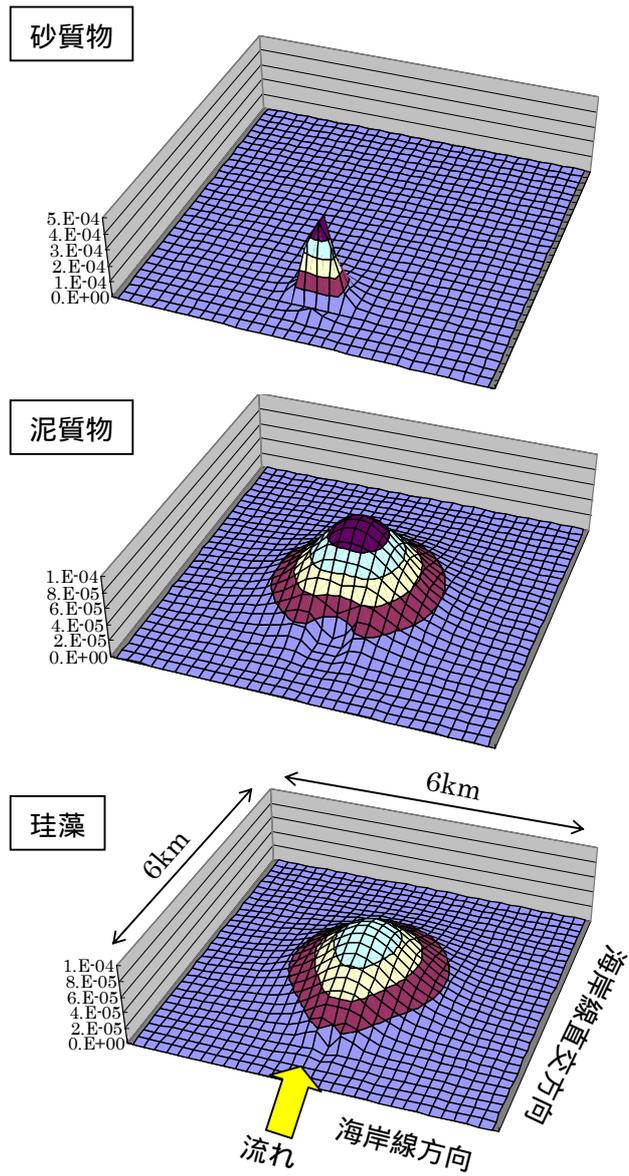


図 5.1-9 Suspension モデルシミュレーション結果

1セルは：200×200m

5.1.4 テストラン

仮想入力情報を用いて基本ソフトウェアのテストランを実施した。仮想入力情報は、幌延地域の概査を元に作成した。以下、ベースケースおよび、ソフトウェアの感度調査について説明する。

(1) ベースケース

表 5.1-9, 10 に基本パラメータ情報, 二次(イベント)堆積の位置情報を示す。対象地域のセル数は, $80 \times 100 \times 100 = 800,000$ セル, 対象物数は3種類, イベント発生場所数は2カ所とした。図 5.1-10 に堆積盆・対象地域・イベント発生場所の位置関係を示す。

表 5.1-9 基本パラメータ情報一覧

項目	細目	値	単位
時間	開始時間	12	Ma
	タイムステップ	0.1	my
	ステップ数	80	-
堆積盆	X	50,000	m
	Y	30,000	m
対象地域	グリッドサイズ	200	m
	原点(X)	15,000	m
	原点(Y)	5,000	m
	原点セル番号(X)	0	-
	原点セル番号(Y)	0	-
	セル数(X)	100	-
	セル数(Y)	100	-
堆積物数		3	-
イベント発生場所数		2	-

表 5.1-10 イベント堆積位置情報

項目	イベント1	イベント2	単位
グリッドサイズ	200	200	m
原点 (X)	15,000	5,000	m
原点 (Y)	30,000	18,000	m
原点セル番号 (X)	25	25	-
原点セル番号 (Y)	25	25	-
セル数 (X)	50	50	-
セル数 (Y)	50	50	-

50,000

10,000
20,000
30,000
Y(m): 海岸線方向



図 5.1-10 基本情報およびイベント堆積位置

水深・一次堆積物堆積速度情報を，図 5.1-11 に，海岸線位置・イベント頻度情報を図 5.1-12 に，それぞれ示す。

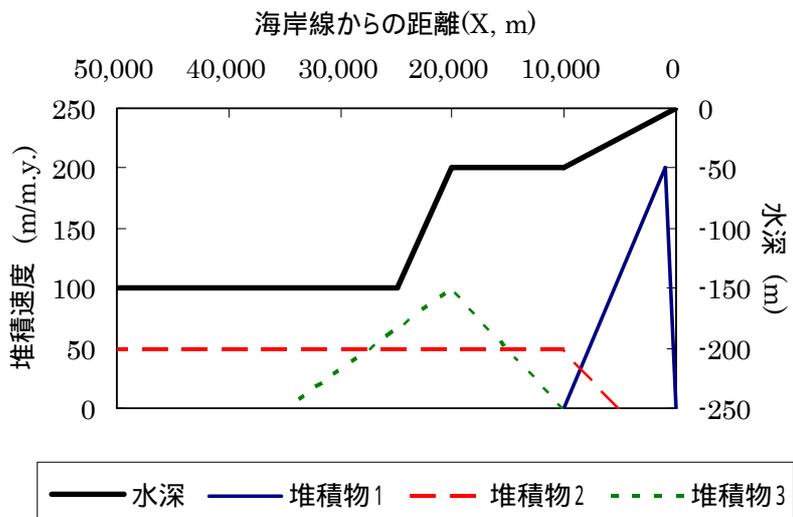


図 5.1-11 水深・堆積速度グラフ

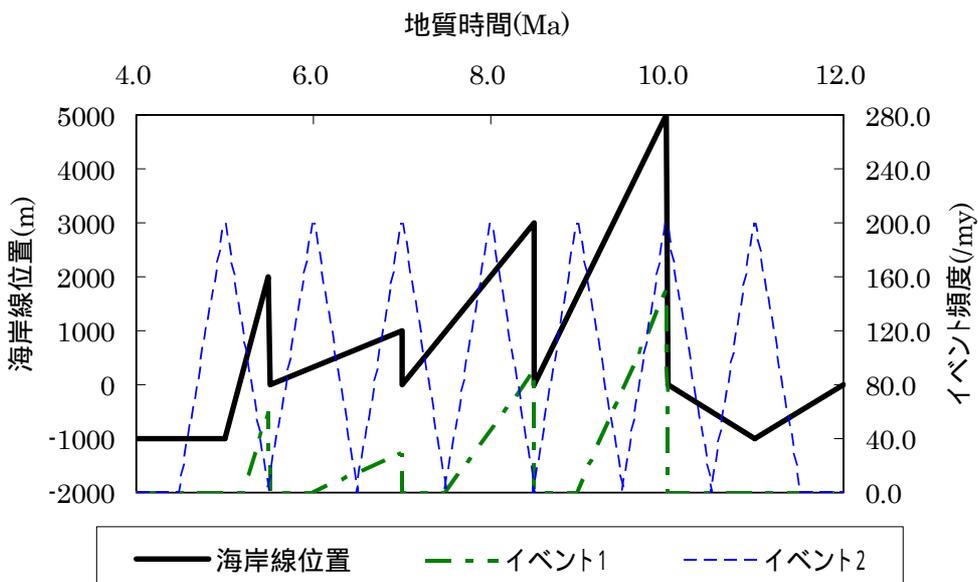


図 5.1-12 海岸線位置・イベント頻度グラフ

イベント堆積量は、図 5.1-13 の通り設定した。イベント堆積 1 は堆積物 1 (砂質岩) 優勢の重力流、イベント堆積 2 は堆積物 2・3 (泥質岩・珪藻) 等量の重力流とした。

堆積物 2 と 3 の広がりについては、「5.1.3」の結果から同じとした。ただし堆積物 1 については、その堆積量を強調させるため、堆積物 2・3 の広がり径の 1/2 と

した。

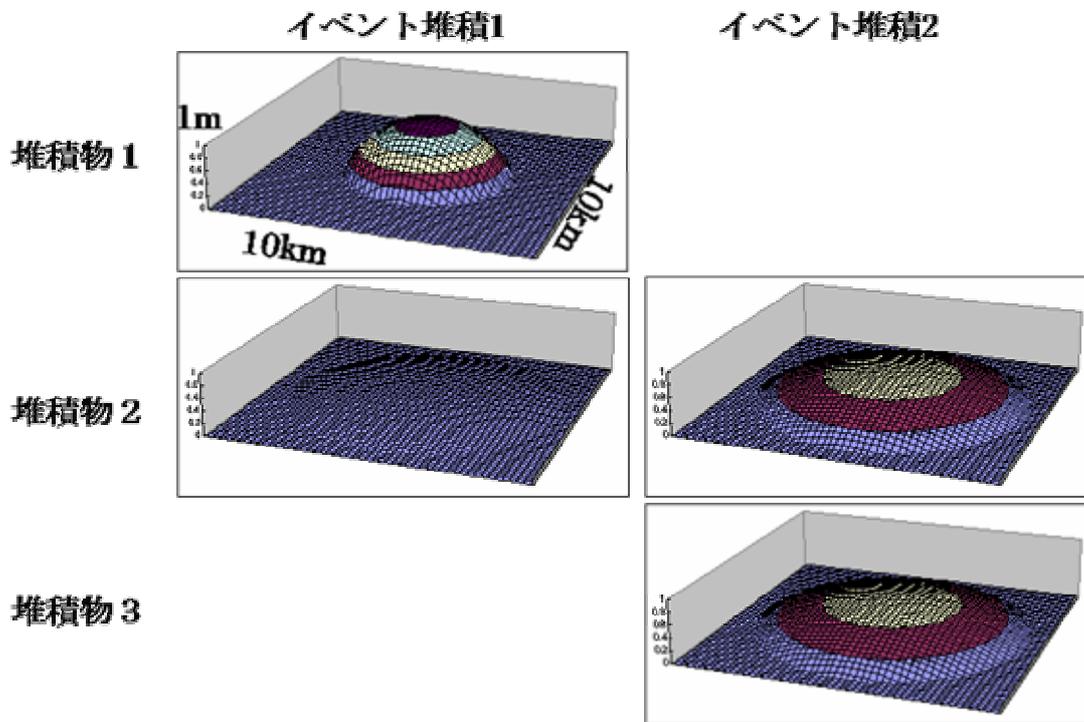


図 5.1-13 各イベント・堆積物のイベント堆積量

堆積物の入力情報は、表 5.1-11 の通りである。堆積物 1 は砂質岩、堆積物 2 は泥質岩、堆積物 3 は珪藻をそれぞれ意識して、パラメータ設定を行った。珪藻の透水係数式は、実データがないことから、砂質岩・泥質岩の中間的な式を採用した。深度 - 間隙率グラフ、間隙率 - 透水係数グラフを、図 5.1-14, 15 にそれぞれ示す。

表 5.1-11 間隙率・透水係数情報

項目	堆積物 1 (砂質岩)	堆積物 2 (泥質岩)	堆積物 3 (珪藻)
初期間隙率 (V/V)	0.5	0.7	0.8
間隙率式	指数式 (係数：0.0005)	指数式 (係数：0.0007)	指数式 (係数：0.001)
透水係数式	Berg 式 (Dn=0.03)	Bryant 式	Berg 式 (Dn=0.001)
指数平均係数 (セル透水係数算定式) : 水平 : = 1 , 垂直 : = - 1			

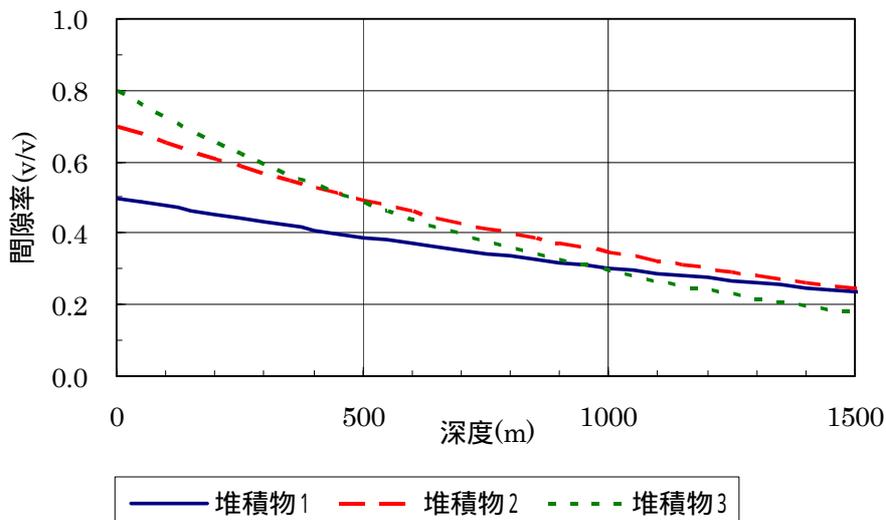


図 5.1-14 深度 - 間隙率プロット

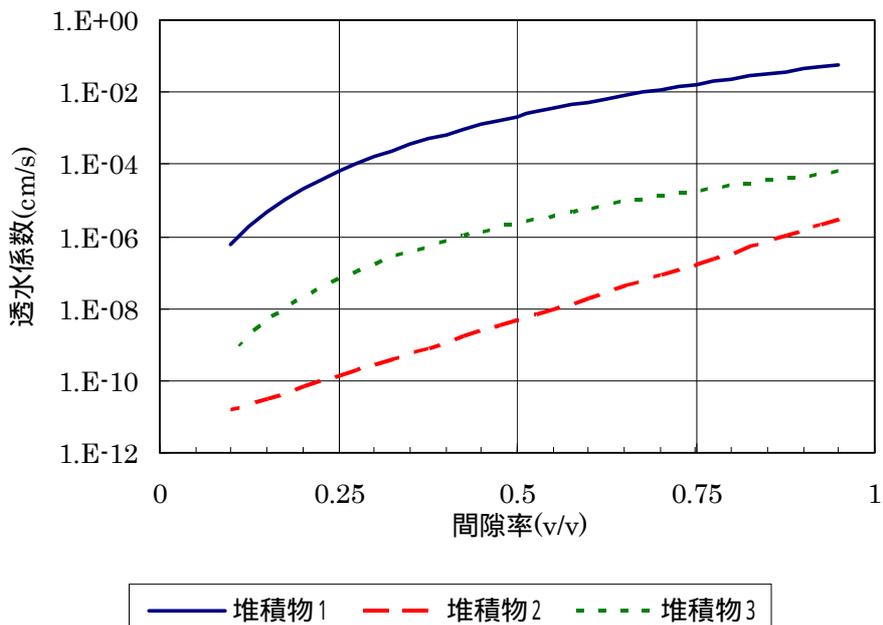


図 5.1-15 間隙率 - 透水係数プロット

対象堆積層上限の最大埋没深度は、図 5.1-16 の通りとした。

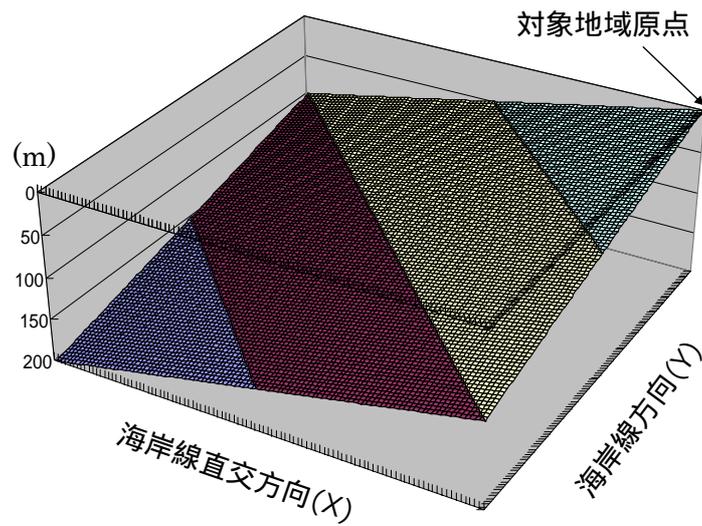


図 5.1-16 埋没深度グラフ

これら入力情報ファイルを作成し，基本ソフトウェアを実行し，出力情報（ファイル）を得た。出力情報の三次元表示を，図 5.1-17～5.1.22 に示す。三次元表示には，市販のソフトウェア（Gocad，Earth Decision Sciences 社）を用いた。

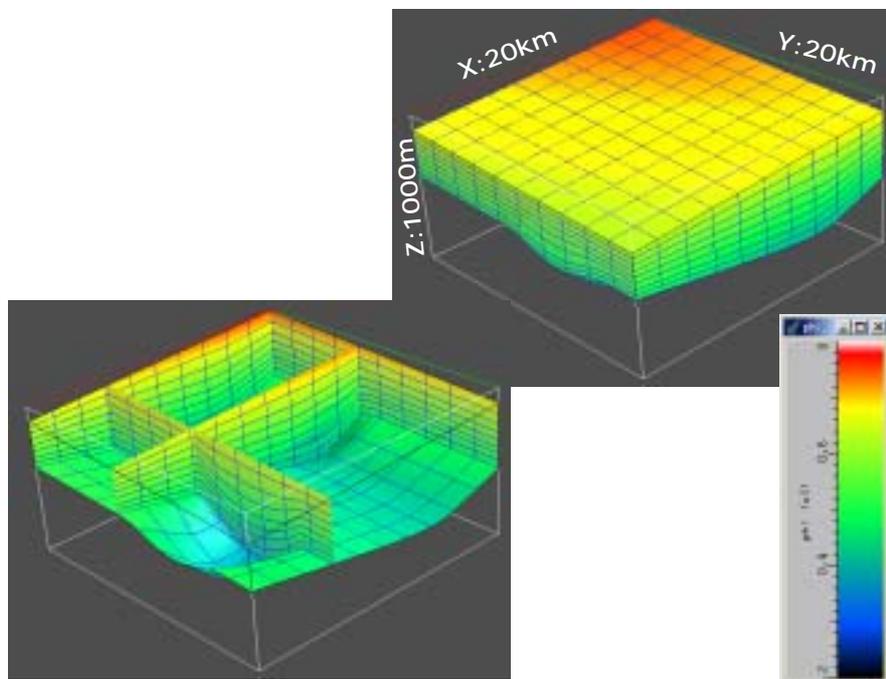


図 5.1-17 間隙率マップ

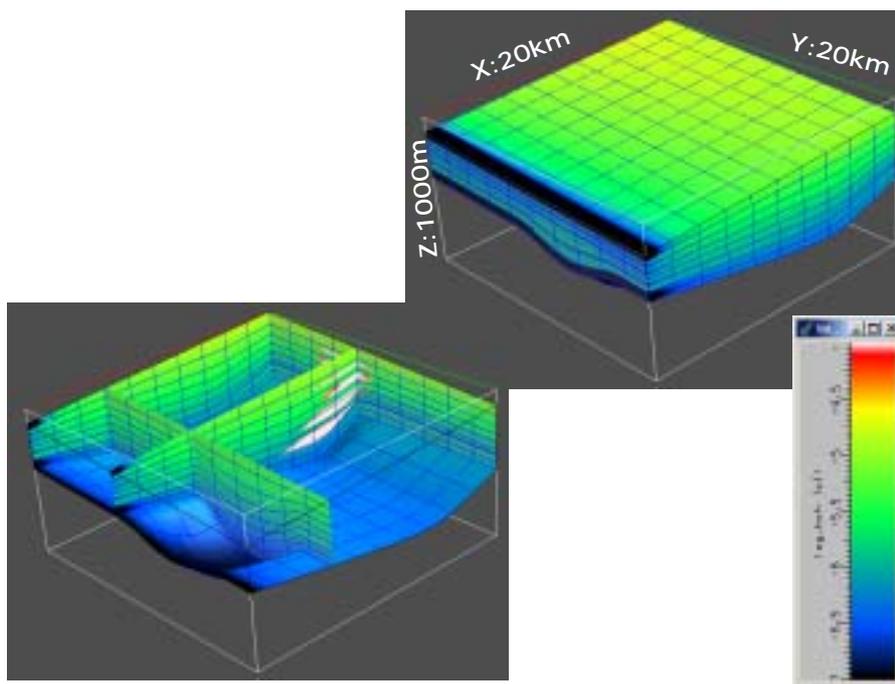


図 5.1-18 水平透水係数マップ

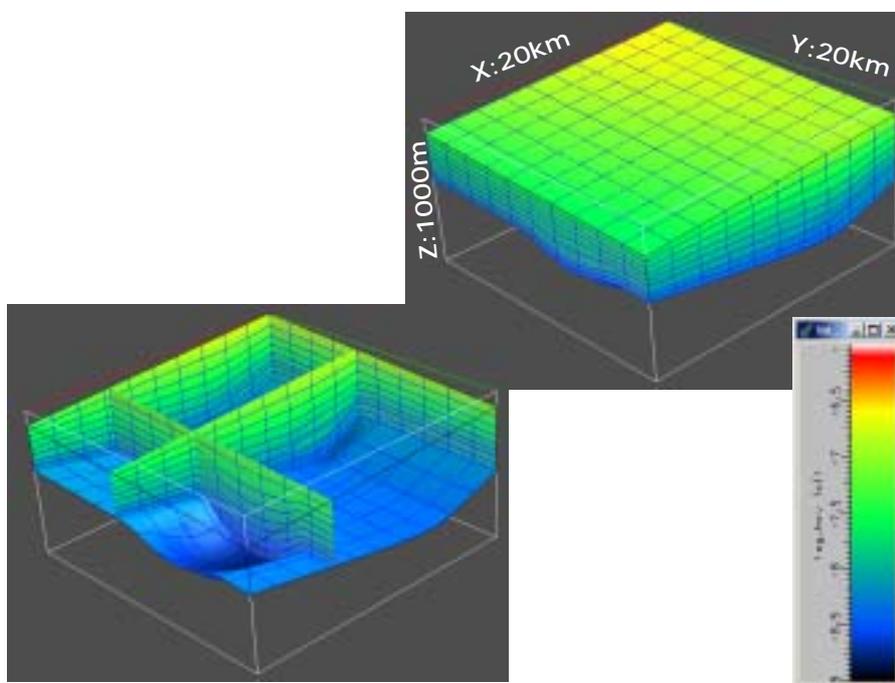


図 5.1-19 垂直透水係数マップ

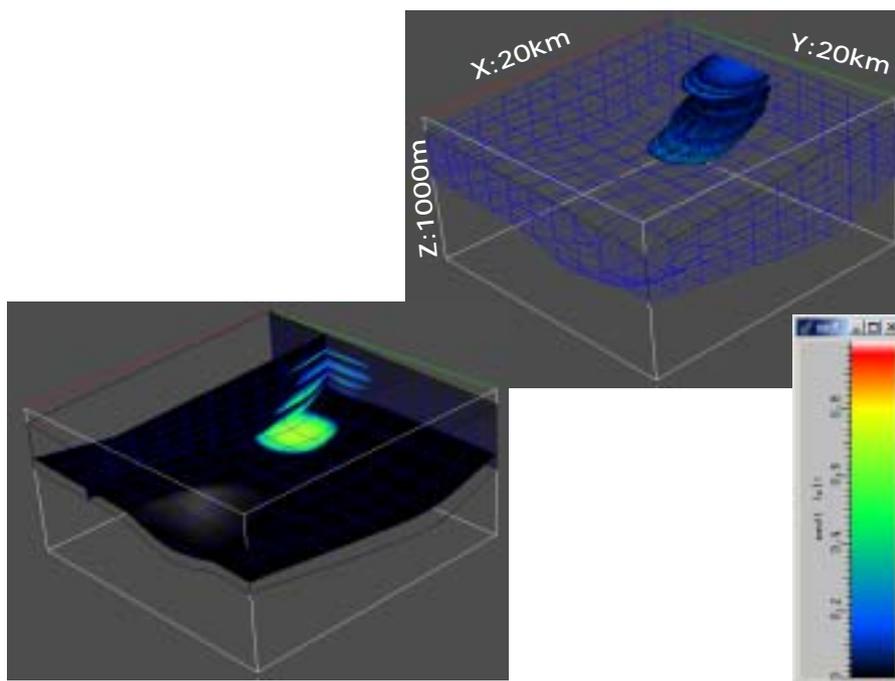


図 5.1-20 堆積物 1 (砂質岩) マップ

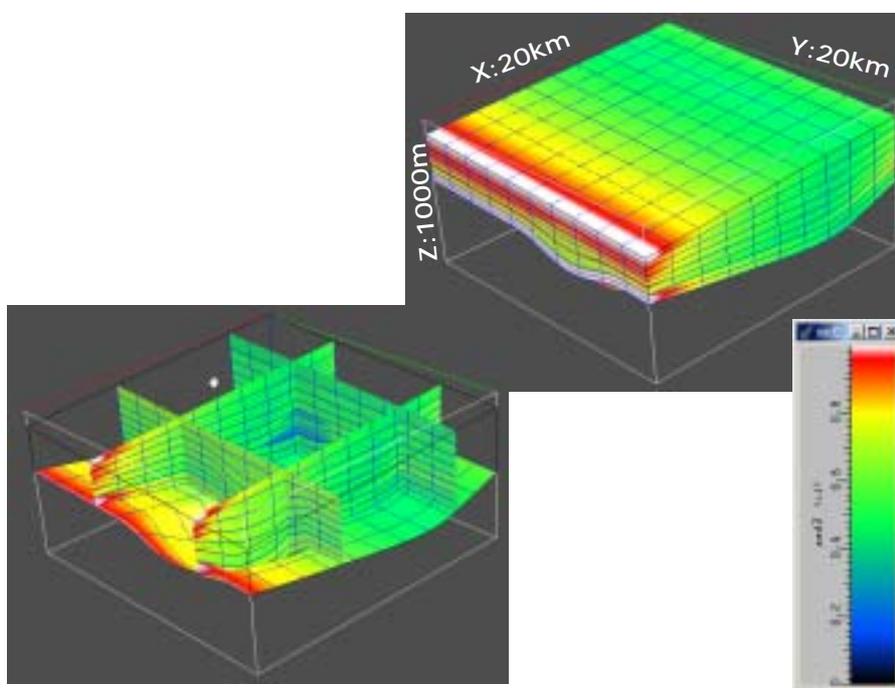


図 5.1-21 堆積物 2 (泥質岩) マップ

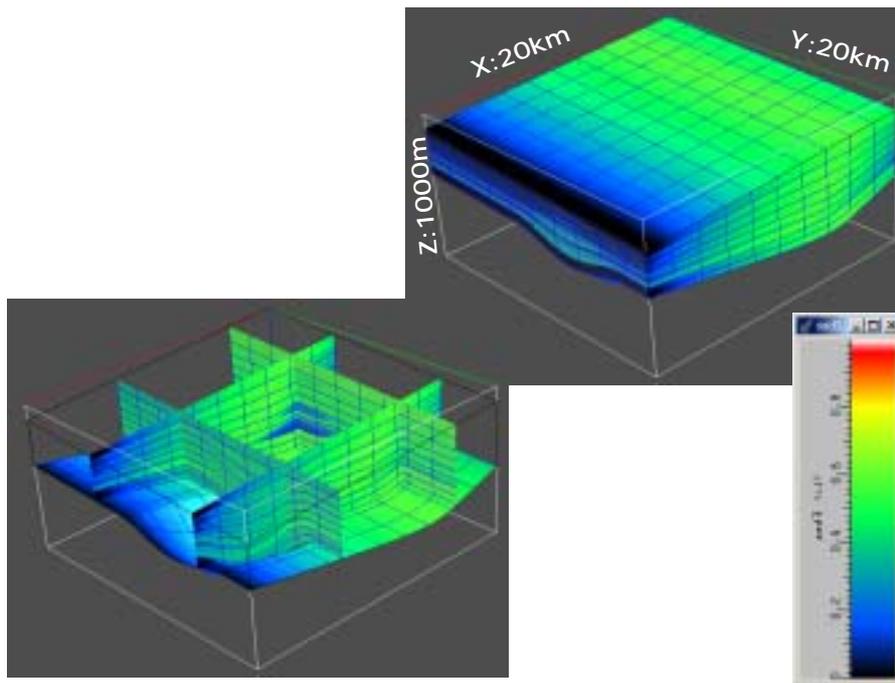


図 5.1-22 堆積物 3 (珪藻) マップ

(2) 感度調査

ベースケースの入力情報の、グリッドサイズおよびタイムステップ長を変化させることで、基本ソフトウェアの感度調査を行った。実施したケースは、表 5.1-12 の通りである。

表 5.1-12 テストランケース一覧

コード	グリッド サイズ (m)	タイム ステップ長 (my)	コード	グリッド サイズ (m)	タイム ステップ長 (my)
G2000	2000	0.1	T1	200	1
G1000	1000		T05		0.5
G500	500		T02		0.2
Base	200		Base		0.1
G100	100		T005		0.05
G50	50		T002		0.02
			T001		0.01

表 5.1-13 に、実施ケースのセル数、基本ソフトウェア実行時間、最大使用メモリ量、出力情報ファイルサイズを示した。基本ソフトウェアを実行した環境は以下の通りである。

機種：IBM ThinkPad R32

プロセッサ：モバイルインテル Pentium 4 プロセッサ (1.7GHz)

搭載メモリ：512 MB

ディスク容量：30 GB

OS：Windows XP Professional (SP1)

表 5.1-13 実施ケースのセル数，所要時間，必要メモリ

コード	セル数	実施時間 (秒)	最大使用メモリ (KB)	出力情報 ファイルサイズ (KB)
Base	800,000	22	20,252	81,498
G2000	8,000	<1	<1,000	964
G1000	32,000	1	2,052	3,404
G500	128,000	4	4,344	13,166
G100	3,200,000	92	76,952	322,426
G50	12,800,000	370	303,516	1,301,714
T1	80,000	3	3,248	8,373
T05	160,000	5	5,152	16,498
T02	400,000	11	10,820	40,873
T005	1,600,000	43	39,114	162,748
T002	4,000,000	104	95,784	406,498
T001	8,000,000	208	190,204	812,748

実施した最大セル数は、コード G50 (12.8 百万セル) で、実施時間約 6 分、最大使用メモリ約 300MB、出力ファイルサイズ約 1.3GB である。これら数値は、他の入力情報によっても変わりうるが、今回の結果から、1 千万セル程度までは、シミュレーション可能である。

上記ケースの結果情報から、X 方向の断面図 (Y=13,000) を作成した。図 5-1-23、24 に、それぞれのケースの比較を示す。グリッドサイズの比較では (図 5-1-23)、ケース「G1000」で不連続な個所が目立ち、「G500」で若干の不連続性が認められるが、

大局的には、どの結果も整合的である。

一方、タイムステップ長の比較では(図 5-1-24)、ケース「T05」が他ケースの結果と大きく食い違っている。この理由は、「T05」のタイムステップ長が 0.5my と非常に長いため、各セルの堆積量が非常に厚くなり、水深の制限を受けるためである。

水深より厚い部分は全て海側のセルへ移動する。他ケースで厚い堆積物が見られる地域(X: 5,000m 付近)は地質時間を通じて主に陸棚の環境にある。陸棚では水深が浅いため、「T05」ケースでは厚く堆積せず、さらに海よりの水深が深くなる地域(陸棚斜面から海盆, X: 7,500m 付近)で突然厚くなる。

一方、他のケースを比較すると、「T02」に若干の不連続性がやや認められる程度で、大局的に見て相違点はない。

以上の事から、今回の入力情報を用いて、適切なでシミュレーションを行うためには、グリッドサイズを 500m 以下、タイムステップ長は 0.2my 以下程度に設定する必要がある。またグリッドサイズ 200m、タイムステップ 0.1my なら十分な結果が得られる。

上記指標は、入力情報の精度によって変わりうる。よって今後のシミュレーションでは、上記指標を一つの目安としながら、その適切なグリッドサイズ・タイムステップ長を考える必要がある。

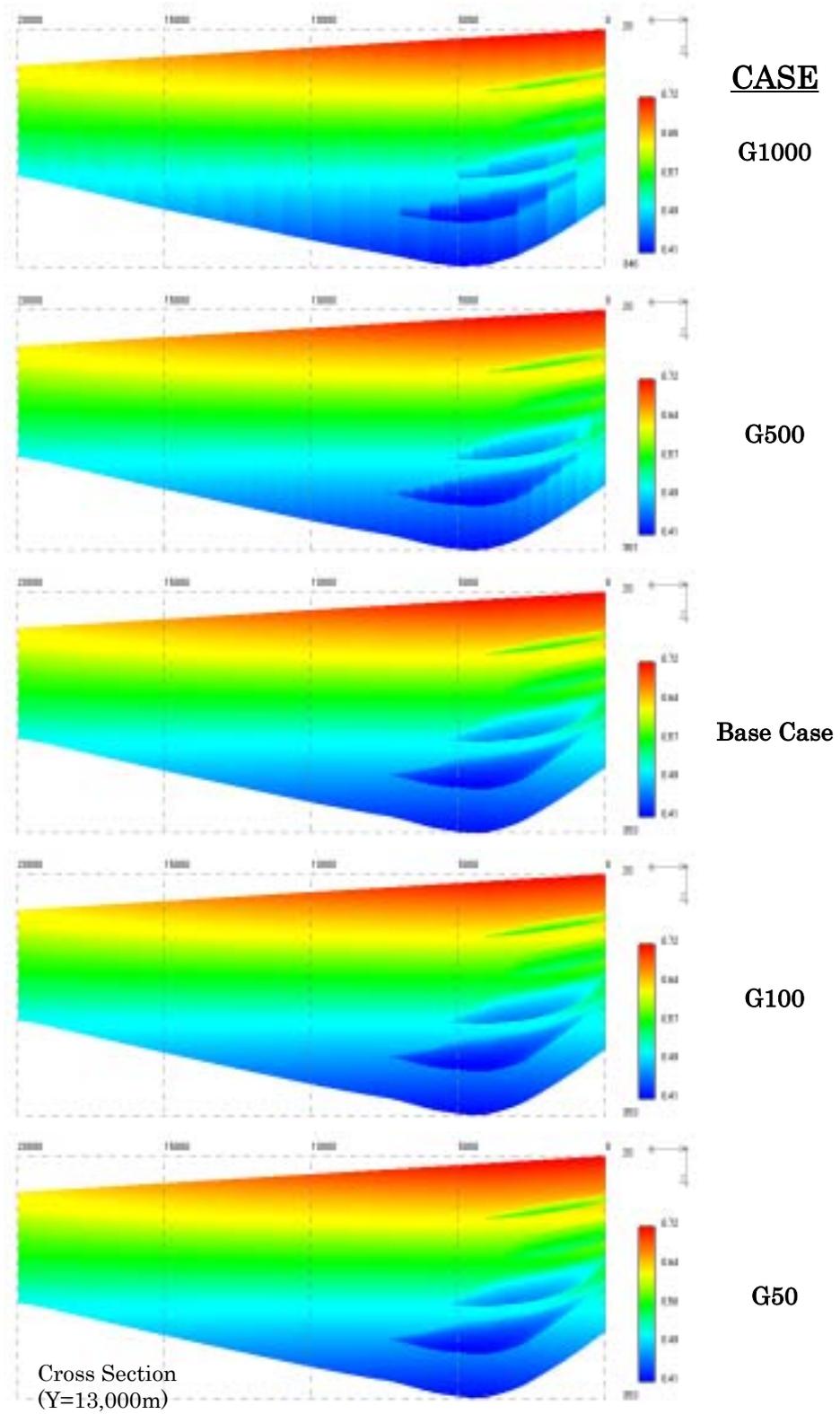


図 5.1-23 結果断面図 (間隙率): グリッドサイズ感度

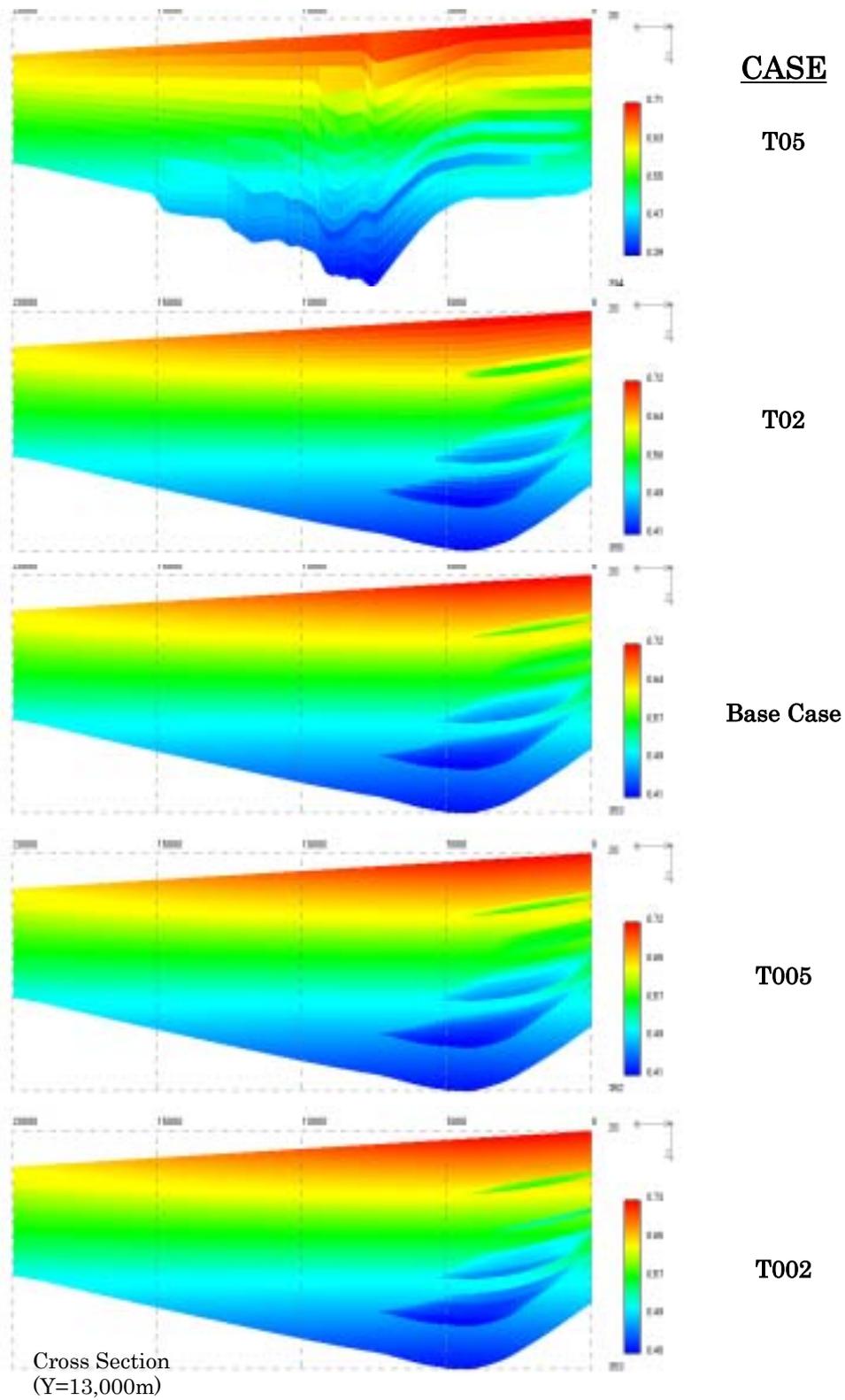


図 5.1-24 結果断面図 (間隙率): タイムステップ長感度

5.2 今後の提案

本節では、不均質性評価の要素について考察し、不均質性を再現する手法についての提案を行う。また最後に基本ソフトウェアの改良点について述べる。

5.2.1 不均質性評価手法の提案

(1) 不均質性の考察

基本ソフトウェアは、孔井や地表データを参考に入力情報を決定する。しかし、「層序モデル」で予測した堆積岩情報（以降、予測データ）は、孔井データ（以降、実データ）と一致しないのが一般的である。大きく異なる場合は入力情報の見直し・再予測作業を行うが、いずれ実データとの誤差は生ずる。

この予測データと実データとの誤差を逆に利用することで、堆積相の不均質性の評価を考える。つまり、理想化した予測データと実データとの相違は、不均質性のためであると考えられる。

モデル予測データで比較対象となるパラメータは、「各堆積物マトリックス量」、「孔隙率・層厚」、「透水係数」である。これらパラメータについて「予測データ」と「実データ」とを比較し、その誤差（以降、残差データ）を用いて不均質性を表現する。図 5.2-1 に、比較パラメータを示す。

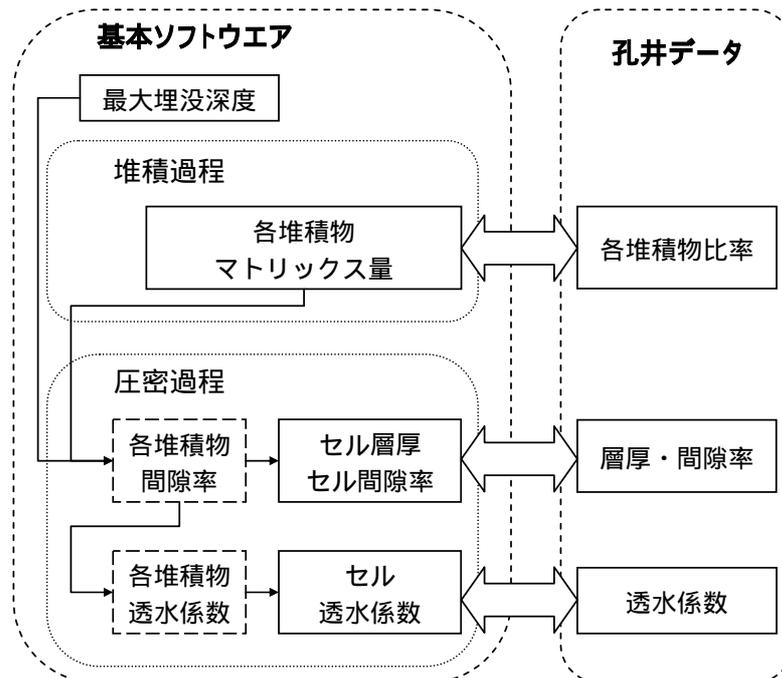


図 5.2-1 比較パラメータ関係図

次に、各パラメータの比較順序について考える。図 5.2-1 の通り各堆積物マトリックス量は「堆積過程」のみで決定され、「圧密過程」に影響を受けないパラメータである。一方、間隙率は最大埋没深度および各堆積物マトリックス量に支配される。層厚は間隙率と同時に決定される。透水係数は各堆積物間隙率に支配される。従って比較の順序は、各堆積物マトリックス量、間隙率、透水係数となる。

(2) 不均質性評価の考察

「残差」データは、点データである。平面・空間分布は地球統計学的手法、つまり残差データ集合を統計学的に扱い、その空間構造を推定する。地球統計学の用語・手法については、江藤(2003)を参考とした。

各堆積物マトリックス量の評価は、以下の手順で行う(図 5.2-2 参照)。

- 予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出
- 残差データの地球統計学的処理
- ・バリオグラムの作成
- ・逐次ガウス・シミュレーション法(もしくはクリーニング法)による「残差分布」の推定
- 各堆積物マトリックス分布の更新(「残差分布」を加える)

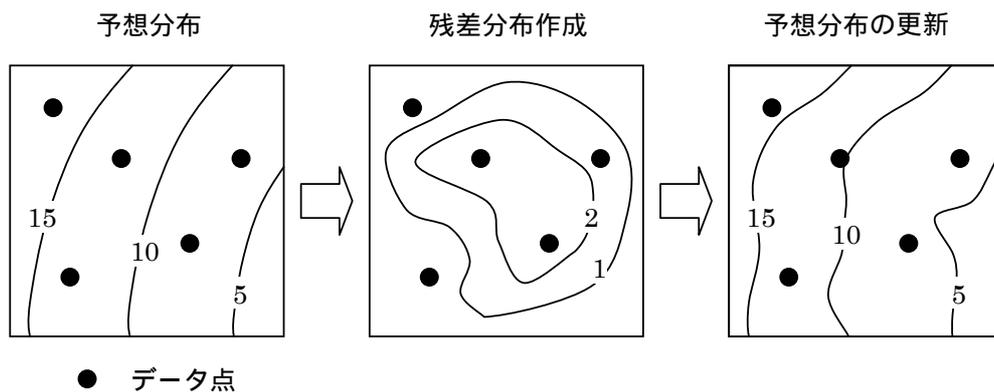


図 5.2-2 不均質性評価概念図

但し、この段階において残差分布がある明確なトレンドを示す場合は、モデル入力値の見直しを行う必要がある。つまり、この作業は、適切な予想分布が得られるまで、繰り返すこととなる。また現在の堆積モデルで適切な予想分布が得られない場合、堆積モデルの改良が必要となる可能性も出てくる。

適切な予想分布については、幌延地域といった具体例を扱いながら、その最適な手法を考えることとする。これには、堆積モデルの修正も考慮に入れる。堆積モデルの課題については「5.2.3」に列記してある。

間隙率・透水係数の評価についてもマトリックス量と同じ手法を用いる。手順は以下の通りである。また概念図を図 5.2-3 に示す。

- 間隙率：予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出
- 間隙率：残差データの地球統計学的処理（マトリックス量と同様）
- 間隙率分布の更新，各堆積物間隙率の補正
- 各堆積物透水係数の算定（基本ソフトウェア），セル透水係数
- 透水係数：予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出
- 透水係数：残差データの地球統計学的処理（マトリックス量と同様）
- 透水係数分布の更新（各堆積物透水係数との比較）

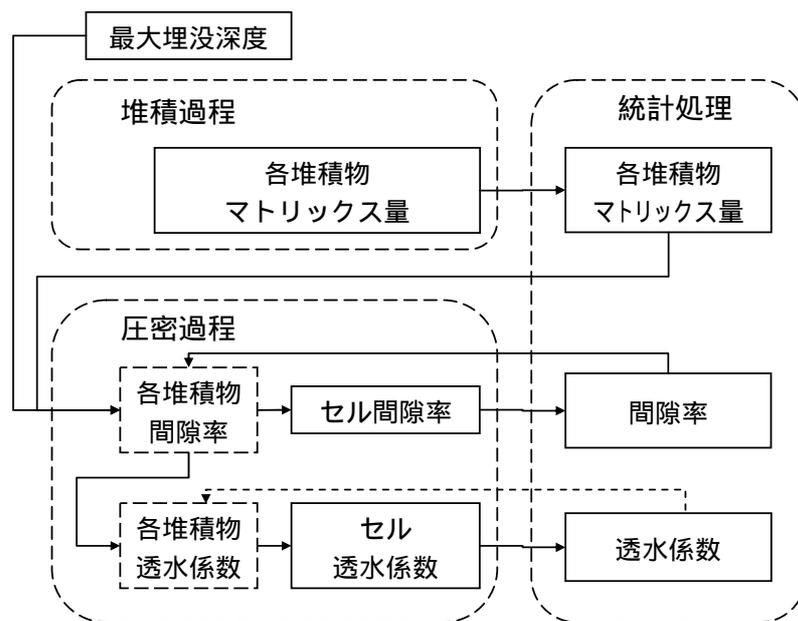


図 5.2-3 不均質性評価手法概念図

本手法の長所は、基本ソフトウェアの大部分が再利用可能であること、また事前にバリオグラムを仮定すれば、データ点が少ない場合でも評価可能であること、の二点にある。

しかし一方で、間隙率・透水係数の残差分布推定の際に「各堆積物マトリックス分布」が反映されないため、状況によっては補正した（残差分布を加えた）間隙率・透水係数分布とマトリックス分布との相関が極端に小さくなる可能性がある。

上記現象の原因として、対象堆積層に「基本ソフトウェア」のセル間隙率・セル透水係数算定法が合っていない場合、間隙率・透水係数分布とマトリックス分布との相関が元々弱い場合、2つの原因が考えられる。

原因が の場合は、まず適切な入力パラメータの選択を行う必要がある。また、状況によっては「基本ソフトウェア」の圧密過程アルゴリズムの見直し（算定式の追加など）を必要とする。

原因が の場合は、「基本ソフトウェア」の圧密過程の概念設計から見直す必要がある。例えば、「堆積過程」は従来どおりの前進的モデルを用いるが、「圧密過程」ではバックワードモデルを使用し、データ点から出発することを考える。

具体的には、「マトリックス分布」の情報から、各セルを幾つからの堆積物サブタイ

ブに分類する。例えば、砂質物の割合が 10%以上 30%以下ならば、「砂質泥岩」のサブタイプとして分類していく。各セルを堆積物サブタイプに分類した後、各サブタイプの深度間隙率プロット、間隙率・透水係数プロットを作成し、地球統計学的処理を行う手法である。

本手法は石油業界での油層モデルで頻繁に使用されており、バックワードモデルであることから、孔井データを十分反映させることが可能である。しかし、上記の例で言えば、砂質物割合が 10%であっても 30%であっても同じ「砂質泥岩」のカテゴリーに含まれるため「マトリックス分布」情報をフルに活用できないことが難点である。

間隙率・透水係数の不均質性再現モデルは、現時点では一つに絞ることは困難である。したがって、今後幌延地域といった具体例を用いて、その評価手法を吟味する必要がある。

(3) 不均質性を再現するソフトウェアの提案

これまでの議論を踏まえ、不均質性を再現するソフトウェアの提案を行う。

不均質性の評価対象パラメータは、各堆積物マトリックス量、間隙率、透水係数とする。評価法として地球統計学的手法を用い、基本手順は以下の通りとする(図 5.2-3 参照)。

各堆積物マトリックス量：予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出

各堆積物マトリックス量：残差データの地球統計学的処理

・バリオグラム作成

・逐次ガウス・シミュレーション法(もしくはクリーニング法)による「残差分布」の推定

各堆積物マトリックス分布の更新(「残差分布」を加える)

間隙率：予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出

間隙率：残差データの地球統計学的処理(マトリックス量と同様)

間隙率分布の更新、各堆積物間隙率の補正

各堆積物透水係数の算定(基本ソフトウェア)、セル透水係数

透水係数：予測データと実データとの比較、「残差データ」の抽出

透水係数：残差データの地球統計学的処理(マトリックス量と同様)

透水係数分布の更新(各堆積物透水係数との比較)

ただし、基本手順は幌延地域の具体例を取り扱いながら、より適切なものに修正し

ていく。つまり、本ソフトウェア開発は幌延地域の評価と同時並行的に行う。

幌延地域の具体例を取り扱い上で、基本ソフトウェアの修正点があれば、随時その見直しを行う。特に間隙率・透水係数を推定する「圧密過程」については、幌延地域データが十分適応しているか吟味し、大幅な修正が必要な際には概念設計からの見直しも視野に入れて作業を行う。

5.2.2 基本ソフトウェアについての課題

特に、堆積過程モデルの課題について述べる。

<一次堆積>

基本ソフトウェアでは、堆積速度パラメータは海岸線からの距離のみで決定され、時間の変化に直接対応していない。つまり総供給量は一定であると仮定している。もし時間による総供給量の変化が必要であれば、二次堆積の「イベント頻度」同様、時間によって総供給量が増えるパラメータを設定する必要がある。また堆積速度パラメータの二次元化（海岸線からの距離および海岸線方向）も課題の一つである。

<二次堆積>

イベント堆積量決定の際、物理堆積モデルを十分反映していない。物理堆積モデルの検討には具体的対象が必要である。幌延地域検討の際には物理堆積モデルの検討を十分に行い、その効率的利用法を考える必要がある。

現在のイベント堆積位置は海岸線定点からの距離のみで決定され、Y軸方向には変化しない。しかし実際の重力流堆積物は、イベントごとにその位置を微妙に変えながら堆積する。もし、Y軸方向の変化が必要である場合は、ひとつの手法として、イベント堆積位置を海岸線定点からの距離にある確率分布を加えて振らせることが考えられる。ただし確率分布を「堆積モデル」で用いれば、「地球統計学処理」を行う「予測データ」自体に不確定性が存在することから、「地球統計学処理」作業が煩雑になる恐れがある。

<水深>

基本ソフトウェアでは、水深は堆積速度同様、時間によって変化しない。水深の時間変化が重要な要素と考えられる場合には、水深を堆積盆沈降量、海水準変動および堆積量の3つのパラメータから導かれるものとし、堆積盆沈降量・海水準変動のパラメータを新規導入する必要がある。また堆積量は圧密過程を考慮する必要があるため、1タイムステップで、堆積過程と圧密過程の繰返し計算が必要となる。

以上が、今後予想される堆積過程の課題である。これら課題については、基本ソフトウェアで幌延地域の予測モデル作成時の検討項目とし、必要があれば随時見直すこととする。

6 結言

本研究では、幌延地域における既存地質データを収集し、堆積盆スケールでの声問層・稚内層についての既往研究の考察を行なった。また、物理探査データおよび孔井データに基づいて、声問層、稚内層の地下構造図および等層厚図を作成し、両層の堆積機構について考察を行なった。さらに、既存孔井の物理検層データ・各種コア分析結果に基づいて、声問層・稚内層の構成物種および圧密特性について検討を行なった。また、幌延地域の声問層、稚内層を念頭にした堆積岩について、堆積盆スケールでの堆積システムを再現することができる堆積モデルの基本ソフトウェアを開発した。

今後、本研究結果をもとに、幌延地域の声問層、稚内層の堆積相・堆積システムの全容を把握し、堆積モデルの基本ソフトウェアへの適用を図ると共に必要に応じて改善を行なう必要がある。

7 参考文献

- 秋葉文雄：“Denticula dimorpha とその類縁種の形態，および新第三系珪藻化石層序区分”，石油資源開発技術研究所所報，No.22，pp.148-188 (1979)
- Akiba, F.：“Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai trough and Japan trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones from middle-to-high latitudes of the north Pacific”，In Kagami, H., Karig, D. E., Coulbourn, W. T., et al., Init. Repts. DSDP, 87, Washington (U. S. Govt., Printing Office), pp.393-481 (1986)
- Berg, R.R.：“Capillary Pressure in Stratigraphic Traps”，AAPG Bul. Vol.59., No.6 pp.939-956 (1975)
- Bryant, W.R., et al.：“Permeability of unconsolidated and consolidated marine sediments”，Gulf of Mexico: Marine Geotechnology, Vol.1, pp.113 (1975)
- 江藤公治：“画素系地質推計学に基づいた油層キャラクタリゼーション”，石油公団・石油開発技術センター 新技術講座 2003 (セミナー資料)，p.311 (2003)
- 福沢仁之：“北海道天北 - 羽幌地域の上層新第三系層序の再検討 - とくに“稚内”・“声問層”について”，地質学雑誌，91，pp.833-849 (1985)
- 福沢仁之：“北海道北部，新第三紀の層状珪質岩の堆積場”，地質学雑誌，93，pp.37-55 (1987)
- 福沢仁之：“新第三紀層状珪質岩の堆積機構 - 北海道北部，上部中新統稚内層を例として -”，地質学雑誌，94，pp.669-688 (1988)
- 福沢仁之：“新第三紀生物起源珪質頁岩の堆積作用と古海洋環境の関係について (予報)”，地質学論集，No.37，pp.219-226 (1992)
- 福沢仁之，他：“北海道中央北部の新第三系の層序と古環境”，地質学論集，No.37，pp.1-10 (1992)
- Goddard, E.N. et al.：Rock Color Chart, Geological Society of America,(1977)
- Haq, B. U., et al.：“Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science”，

No.235, pp.1156-1167 (1987)

保柳康一：“中央北海道北部羽幌地域の新第三系の堆積環境とシーケンス層序学”，
地質学論集，No.37，pp.227-238 (1992)

木村方一，他：“北海道初山別地域の海牛化石産出層(金駒内層)の地質年代と古環境”，
地質学雑誌，101，pp.345-352 (1995)

木村進一，他：“堆積岩の化学組成及び同位体組成より推定した古日本海海洋環境”，
地質学雑誌，112(4)，pp.586-607 (2003)

Koizumi, I., 1985:“Diatom biochronology for late Cenozoic northwest Pacific”, Jour.
Geol. Soc. Japan, 91, pp.195-212 (1985)

増田富士雄，他：“北海道天塩町北西部および南東部における新第三系・第四系の浅海
堆積相”，北方科学調査報告(筑波大学)，No.2，pp.1-41 (1981)

秦 光男：5万分の1地質図福「初浦」および同説明書，地質調査所，p.60 (1961)

中山一夫：“モデルシミュレーションを用いた堆積層の形態解析”，中川久夫教授退官記念
地質論文集，pp.191-202 (1990)

中山一夫：“石油探鉱におけるシミュレーションの役割 はたして我々の思考法は変わった
のか - ”，石油技術協会誌，Vol.63，No.1，pp.2-10 (1998)

嵯峨山 積，保柳康一：“北海道北部地域の新第三系珪藻生層序と10Ma前後の低海水
準期の検討”，地球科学，47，pp.423-438 (1993)

佐藤誠司：“北日本における第三系の植物遺体による層序の検討と対比”，昭和58年度
科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書，p.17 (1984)

佐藤治夫：“堆積岩系マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究：幌延泥岩の
物理化学的特性評価”，サイクル機構技術報告書，JNC TN1400 2003-003 (2003)

Tada R. and A. Iijima:“Petrology and diagenetic changes of Neogene siliceous rocks
in northern Japan”，Journal of Sedimentary Petrology, 53, pp.911-930 (1983)

棚井敏雅：“第三紀フローラによる気候推定の2,3の問題”，千地万造，コロキウム；

新第三紀地史的イベント，京都橘女子大，pp. 17-19 (1985)

棚井敏雅：“北半球における第三紀の気候変動と植生の変化”，地質学雑誌，100，
pp.951-966 (1991)

辻 隆司,横井 悟：“北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ”，
石油技術協会誌，59，pp.283-295 (1994)

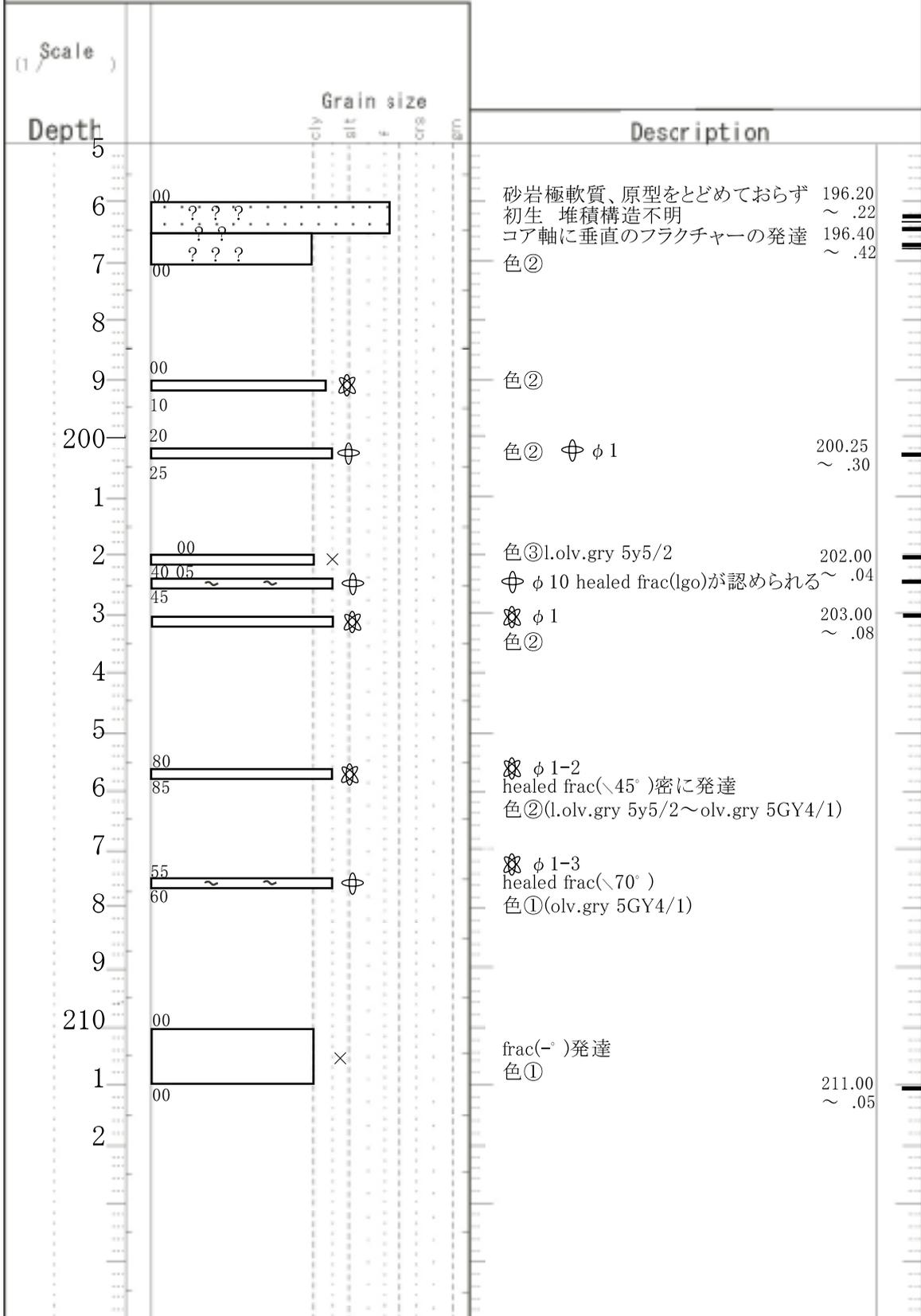
8 付録

付録資料 - 1 : HDB-1 孔岩芯岩相記載

Well : HDB-1		No. (/)					
Depth 176 m ~ 195 m		Date: 2003 . 10 . 7					
Depth	Scale	Grain size					Description
		clv	slt	s	fine	lim	
176							
7	80 90		⊕				色③:色②に近いが、より l.olv.gryが強い 176.90 ~7.00
8							
9	75 90		⊕				φ 5-10 色②
180							
1							
2							
3	00						
4	???		×?				色②
185							
6	30						
7	50		×				色①
8							
9							
190							
1							
2							
3	20						
4	25		×				色②
195							194.35 194.45
Remarks:							

Well : HDB-1
 Depth 195 m~ 212 m

No. (/)
 Date: 2003 . 10 . 7



Remarks :

Well : HDB-1

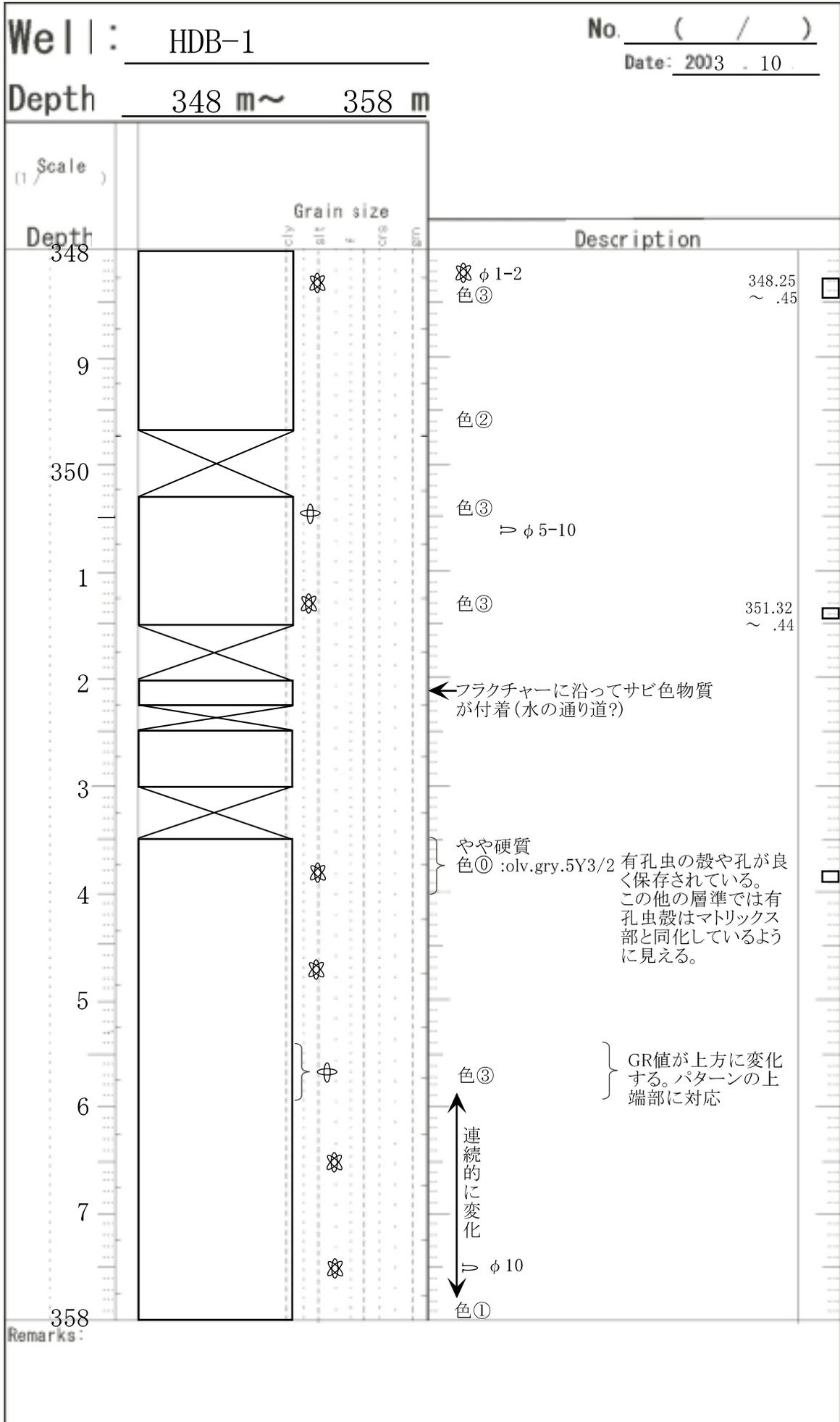
No. (/)

Date: 2003 . 10 .

Depth 312 m ~ 318 m

Depth	Grain size					Description
	clay	silt	f	org	gm	
312						☉ φ 100 gry.or10 YR7/4
312.84 ~ 312.91						色②
314						☉ φ 50 貝ガラ片がノジュールの一部を囲む部分に境界が極めて不明瞭
314.92 ~ 315.00						色③
315.85 ~ 315.95						色②
317.00 ~ 317.10						☉ φ 1-2
317.00 ~ 317.10						色③ ⊕ φ 1、⇒ φ 5-10
318						

Remarks:



Well : HDB-1

No. (/)

Date: 2003 . 10 .

Depth 385 m ~ 395 m

Depth (Scale)	Grain size					Description
	clay	silt	#	org	gm	
385						色③ ≧ φ 15 ≧ φ 20
6						
7						色③ ≧ φ 15 ← 垂円レキ(火山岩?) φ 5
8						
9						≧ φ 5 ≧ φ 15
390						色③ ≧ φ 20
1						≧ φ 5
2						≧ φ 8
3						色③ ≧ φ 15
4						≧ φ 30 ≧ φ 20 ≧ φ 10 ≧ φ 15 色③
395						色③

386.80
~ .90

392.60
~ .68

393.75
~ .85

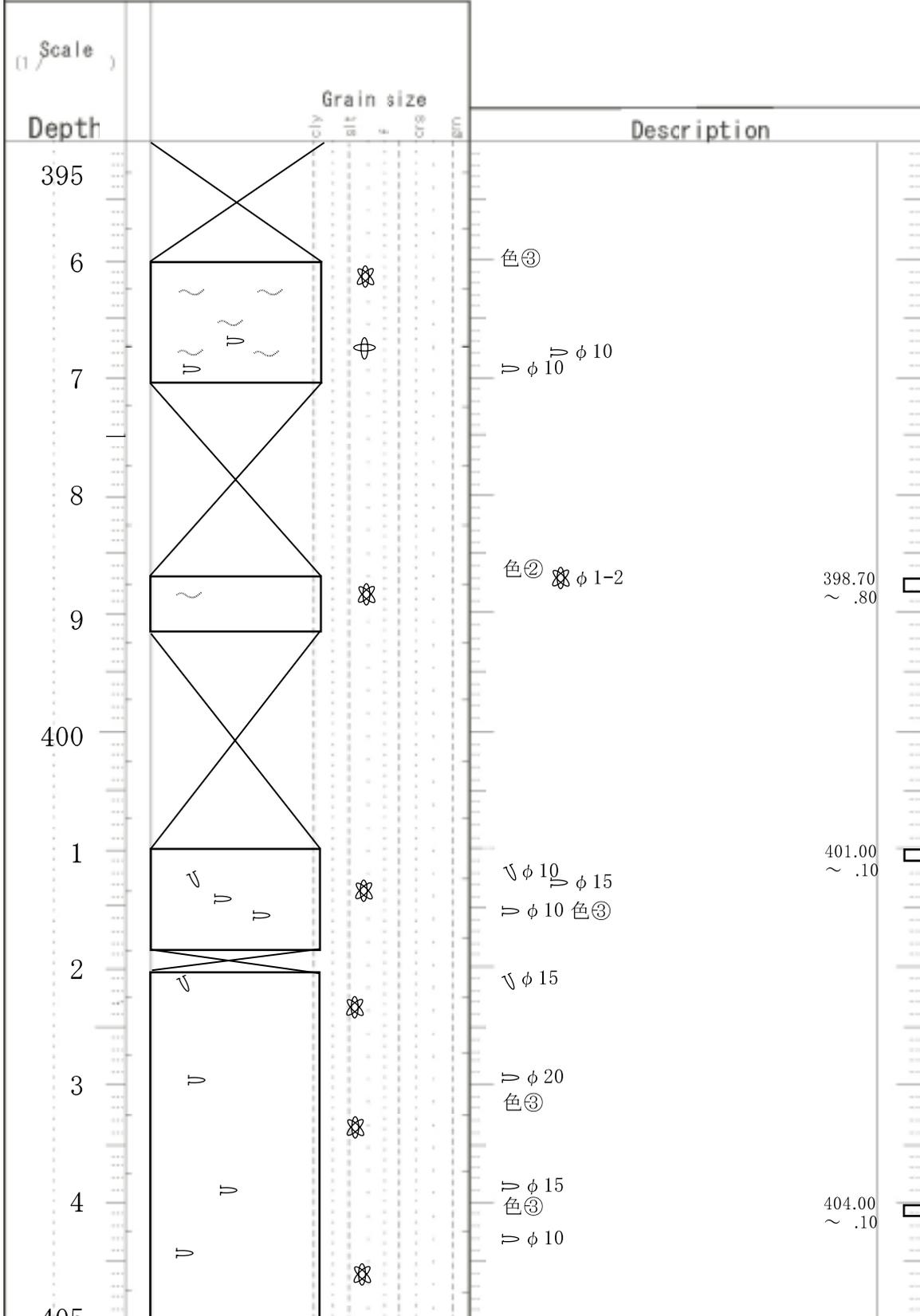
Remarks:

Well : HDB-1

No. (/)

Date: 2003 . 10 .

Depth 395 m ~ 405 m



Remarks:

Well : HDB-1		No. (/)		
Depth 415 m ~ 425 m		Date: 2013 . 10 .		
(1 / Scale)	Grain size			Description
Depth	clay	silt	f. ore	
415	∩ ∩	※		▷ φ 10 φ 15 ∩∩50 415.42 ~ .52
6	∩	※		色① ▷ φ 10
7	∩	※		色① φ 30 ∩∩100 ▷ φ 10 417.16 ~ .26
8	∩	※		▷ φ 10
9	∩	※		▷ φ 10 418.95 ~ 419.00 フラクチャー発達部 →
	∩			色① 419.45 ~ .55
420	∩			色① 420.10 ~ .20
1	∩	※		▷ φ 15 色①
2	∩	※		色①
3	∩ ∩	※		▷ φ 15 ▷ φ 10 色①
4	∩ ~ ∩ ~ ∩ ~	⊕		▷ φ 10 ▷ φ 20 色① ▷ φ 10
425	∩			
Remarks:				

Well : HDB-1		No. (/)					
Depth 535 m ~ 545 m		Date: 2013 . 10 .					
Scale (1 /)	Depth	Grain size					Description
		clay	silt	sand	fine	grm	
	535						←レキ火山岩(安山岩?) 535.62 ~ .67
	6	~	~				536.40 ~ .53
	7						
	8						
	9	~					←炭質物 2×15
	540	~	~				
	1						色③
	2	~					色③ 541.80 ~ .90
	3	~					色③ } これより上位に比べるとやや明るい色調を示す
	4	~					色③ du.br.5YR2/2 } du.y.br.10YR2/2 }
	545						542.80 ~ .90

Remarks:

Well : HDB-1		No. (/)				
Depth 666 m ~ 673 m		Date: 2003 . 10 . 9				
Depth (Scale)	Grain size					Description
	clay	silt	s	crs	gm	
666		※				色①
7		※				色③ 667.15 ~ .20
8	☾	※				色③ 668.25 ~ .32
9	☾	※				▷ φ 1~2 色③ 669.00 ~ .10
	☾	※				669.50 ~ .62
670	~ ~	⊕				色③ 670.00 ~ .10
1		※				色③ 671.10 ~ .18
		⊕				▷ φ 4
2	☾	⊕				色③ 672.00 ~ .10
	☾					672.20 ~ .42
673	⊕					▷ φ 4 ⊕ φ 15

☾: 幅70~100の皿状の生痕
厚さ数mm程度の砂質ラ
ミナと厚さ数~5mmの泥
との互層状

Remarks:

Well : HDB-1		No. (/)		
Depth 673 m ~ 678 m		Date: 2003 . 10 . 9		
(1/Scale)	Grain size			Description
Depth	clv	silt	#	
673	~ ~	⊕		色③ 673.00 ~ .13
4	~ ~	⊗		色①~色③と同様の粒度のd.gry 泥岩が雲状(不定形)で混在する。 (色の違いは風化程度の違い示している?) 674.00 ~ .10
5	~ ~	⊗		色①~色③ 675.00 ~ .10
6	~ ~	⊗		色① 675.42 ~ .56
7	~ ~			676.10 ~ .18
678	~ ~	⊕		▷φ4 676.70
				▷φ4

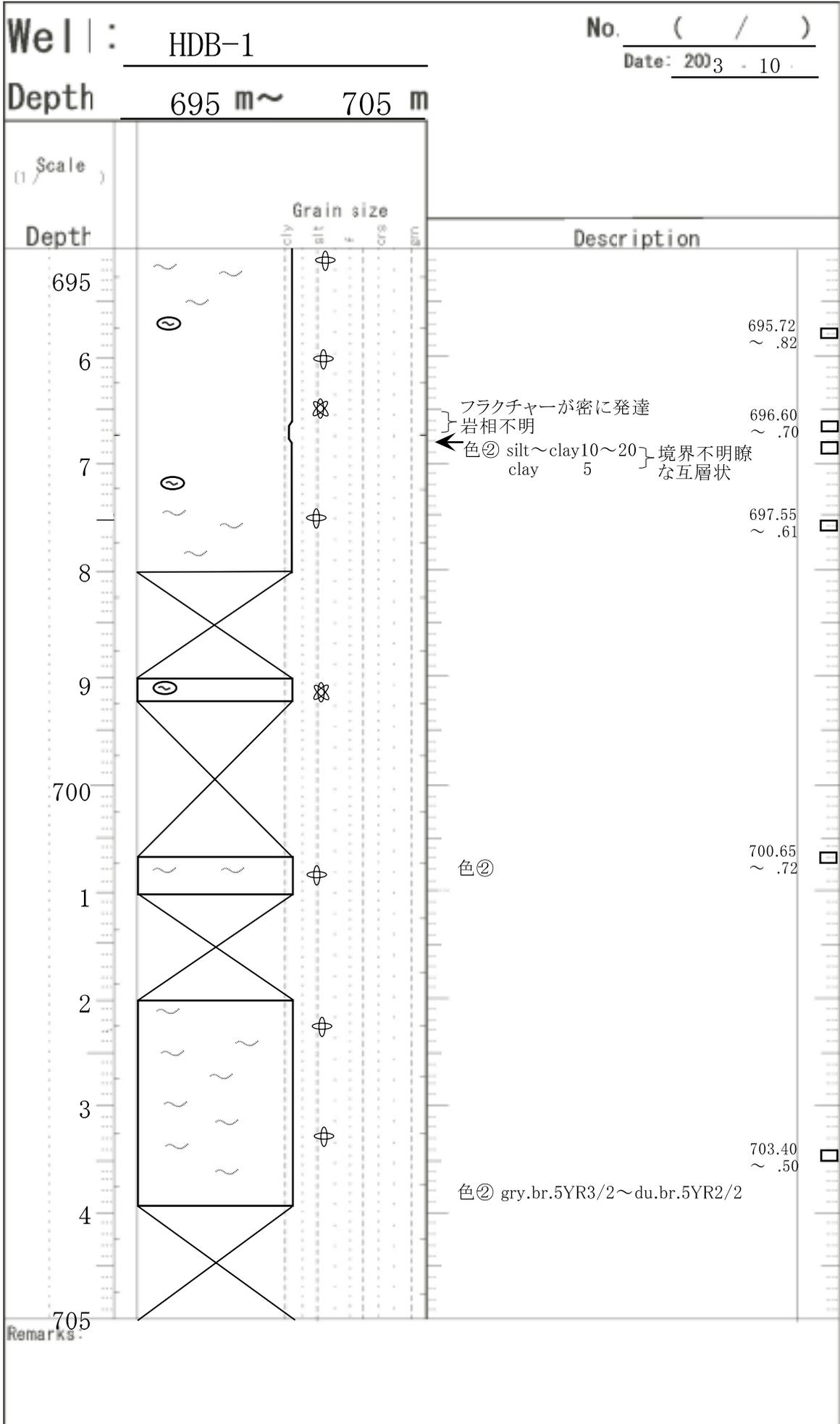
Remarks:

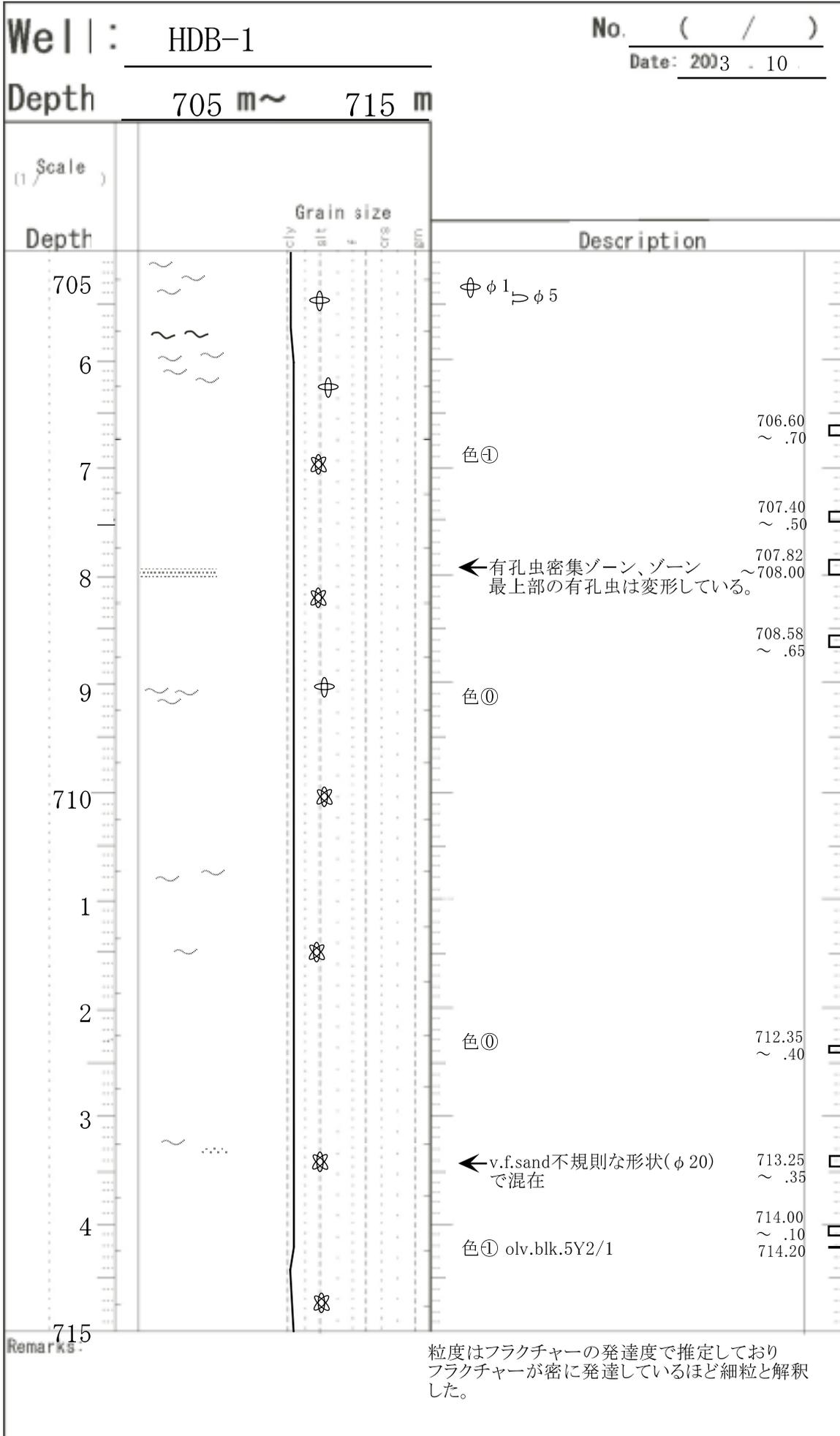
Well : HDB-1
 Depth 685 m~ 695 m

No. (/)
 Date: 2003 . 10 .

Scale (1 /)	Depth	Grain size					Description
		clay	silt	#	org	grm	
	685	~					
	6	~					φ 5
	7	~					
	8	~					色① 687.90 ~ 8.00
	9	~					
	690						clay~Silt(色②)厚さ10-20 } 不明瞭な clay(med.gry)厚さ5 } 互層状
	1	~					色①
	2	~					
	3						692.75 ~ .85
	4	~					693.20 ~ .30
	695						694.33 ~ .45

Remarks: 粒度はフラクチャーの発達度で推定しており
 フラクチャーが密に発達しているほど細粒とした。





Remarks: 粒度はフラクチャーの発達度で推定しており
フラクチャーが密に発達しているほど細粒と解釈
した。

付録資料 - 2 : 堆積モデルソフトウェア ソースコード

付録資料-2 ソースコード

1 sed_m.c

```

/*****
/*
/* Sediment Model (Basic) Program
/*
/* 2004/01/14 Kawada,JGI
/*
/*
/*****

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "array.h"

/* Macro (Define Constants) */
#define SEDMAX 5 /* Max number of Sediment */
#define RWKMAX 5 /* Max number of Event (2nd Sed) */
#define NAMEMAX 64 /* Max length of Sed Name */
#define EPSMAX 0.001 /* Tolerable error: pore thick(m) */
#define POLYMAX 5 /* Max degrre of polynomial */
#define MDTOHC 9.7e-7 /* Conv F. Perm(md) -> HC(cm/s) */

/* Dcl. Types */

typedef struct{
    double **c; /* Table(Vector) Data */
    int cnum; /* Num of Data */
} Table;

typedef struct{
    int xnum, ynum; /* Num of Cell */
    int xref, yref; /* Ref Cell */
    double x0, y0; /* Position of Ref Cell (Cell Center) */
    double size; /* Grid Size (dx = dy) */
} Grid;

typedef struct{
    Grid g; /* Grid Info */
    Table freq; /* Frequency of Evnets */
    double **s[SEDMAX]; /* Sed Info (grid data) */
} Rework;

```

```

typedef struct{
  char   name[NAMEMAX];           /* Sed Name                               */
  double phi0;                    /* Initial Porosity(V/V)                 */
  int ptype;                      /* Eq Type(Phi) 0:Poly 1:Exp             */
  int ktype;                      /* Eq Type(HC) 0:Poly 1:Berg 2:Briant   */
  union{
    double pc[POLYMAX+1];        /* Polynomial Factor(Phi)                */
    double cmpf;                /* Exponential (Compaction) Factor      */
  } up;
  union{
    double kc[POLYMAX+1];        /* Polynomial Factor(HC)                 */
    double gsize;               /* Pore Size(P90) for Berg              */
  } uk;
  double ***matrix;             /* Matrix Thickness of Sed [t,x,y]      */
} Sediment;

/* Time Data */
double timebegin;              /* Time Begin (Ma)                       */
double timestep;              /* Time Step (my)                        */
int timenum;                  /* Number of Step                        */

/* Basin Size */
double basinx, basiny;        /* Size of Basin                         */

/* Grid Data */
Grid area;                    /* Target Area                           */

/* Sediment Data */
Sediment sed[SEDMAX];         /* Sediment Info                         */
int sednum;                  /* Number of Sediment                   */

/* Coastline Waterdepth Sed.Rate */
Table coast;                  /* Position of Coastline func of [t]     */
Table water;                  /* Water Depth, func of [dis f/ coast]   */
Table rate[SEDMAX];          /* Sed Rate, func of [dis f/ coast]     */

/* Rework Data */
Rework rwk[RWKMAX];          /* Rework(2nd Sed) Info                 */
int rwknum;                  /* Num of Loc :Rework(Event)           */

/* Upscaling (Hydro. Conductivity) */
double omegah, omegav;       /* Exp. F, (Horizontal & Vertial)      */

/* Depth Data */
double **topdepth;           /* Max Burial Depth of Fm Top [x,y]     */

/* File data */

```

```

FILE *fplog;

char ipt[]      ="input.ini";
char iptrwk[]   ="rwk.ini";
char iptdepth[]="depth.ini";
char opt[]      ="sedmodel.log";

/* dcl. prototype */

int read_general_data(void);
int read_table_data(void);
int read_rwk_data(void);
int read_topdepth(void);

int sedimentation_calc(void);
int compaction_calc(void);

int allocate_memory(void);
int free_memory(void);

double phi_calc(double, double, int);
double perm_calc(double, int);
double power_ave_calc(double, double *, double *, int);
double liner_interp(double **, int, double);

/*****
/*      Main Loop      */
*****/

int main(void)
{
    int chk;

    /*** Read Input files ***/
    fplog = fopen(opt,"w");
    if(fplog == NULL){
        fprintf(stdout,"FILE NOT OPEN:%s", opt);
        return -1;
    }

    fprintf(stdout,"Read data ....%n");

    chk = read_general_data();
    if(chk) return -1;

    chk = allocate_memory();
    if(chk) return -1;

```

```

chk = read_table_data();
if(chk) return -1;

chk = read_rwk_data();
if(chk) return -1;

chk = read_topdepth();
if(chk) return -1;

/** Main **/

fprintf(stdout,"Sedimentation Process .....%n");

chk = sedimentation_calc();
if(chk) return -1;

fprintf(stdout,"Compaction Process .....%n");

chk = compaction_calc();
if(chk) return -1;

/** Closing Process **/

free_memory();

fclose(fplog);

fprintf(stdout,"SED_M Completed. %n");

return 0;
}

/*****
/* Sedimentation Calc */
*****/

int sedimentation_calc(void)
{
    int tn, xn, yn, sn, rn, xrn, yrn, rwkf[RWKMAX];
    double xb, yb, xr0, yr0, xr1, yr1, xrr, yrr;
    double bulk[SEDMAX]={0}, bulkprev[SEDMAX]={0};
    double tb, bulksum, wd, cl;

    for(tn = 0; tn < timenum; tn++){

        tb = timebegin - timestep * (tn + 0.5);

```

```

/* Coastline, Rwkfreq */
cl = liner_interp(coast.c, coast.cnum, tb);

for(rn = 0; rn < rwknum; rn++){
    rwkf[rn] = timestep *
        liner_interp(rwk[rn].freq.c, rwk[rn].freq.cnum, tb) + 0.5;
}

/* X[0]Y[0] loc on basin datum */
for (yn = 0,          yb = area.y0 - area.size * area.yref;
     yn < area.ynum;
     yn ++,          yb += area.size){

for (sn = 0; sn < sednum; sn ++) bulkprev[sn] = 0.0;

for (xn = 0,          xb = area.x0 - area.size * area.xref - cl;
     xn < area.xnum;
     xn ++,          xb += area.size){

/* Water depth */
wd = liner_interp(water.c, water.cnum, xb);
if(wd >=0) continue;

/*-----*/
/*      In situ Process      */
/*-----*/
for(sn = 0; sn < sednum; sn++){

    bulk[sn] = timestep *
        liner_interp(rate[sn].c, rate[sn].cnum, xb);

    bulk[sn] += bulkprev[sn];    /* add surplus */

    bulkprev[sn] = 0;
}

/*-----*/
/*      Rework Process      */
/*-----*/
for(rn = 0; rn < rwknum; rn++){

/* Grid corner loc. on rwk datum (unit:rwk[rn].g.size) */

```

```

xr0 = (xb - area.size * 0.5 - rwk[rn].g.x0)
      / rwk[rn].g.size
      + (rwk[rn].g.xref + 0.5);

yr0 = (yb - area.size * 0.5 - rwk[rn].g.y0)
      / rwk[rn].g.size
      + (rwk[rn].g.yref + 0.5);

xr1 = xr0 + area.size / rwk[rn].g.size;
yr1 = yr0 + area.size / rwk[rn].g.size;

/* Inside rwk area? */
if(xr1 < 0 || xr0 >= rwk[rn].g.xnum ||
   yr1 < 0 || yr0 >= rwk[rn].g.ynum
) continue;

if(xr0 < 0) xr0 = 0;
if(yr0 < 0) yr0 = 0;
if(xr1 > rwk[rn].g.xnum) xr1 = rwk[rn].g.xnum;
if(yr1 > rwk[rn].g.ynum) yr1 = rwk[rn].g.ynum;

/* Add reworked sed. to bulk */
for(yrn = yr0; yr1 > yrn ; yrn++){
for(xrn = xr0; xr1 > xrn ; xrn++){

    xrr = ((xrn + 1 > xr1) ? xr1 : xrn + 1)
          -((xrn < xr0) ? xr0 : xrn);
    yrr = ((yrn + 1 > yr1) ? yr1 : yrn + 1)
          -((yrn < yr0) ? yr0 : yrn);

    for(sn = 0; sn < sednum; sn++){

        bulk[sn] += rwk[rn].s[sn][xrn][yrn]
                  * rwkf[rn] /* SHOULD BE MODIFIED */
                  * xrr * yrr
                  * rwk[rn].g.size * rwk[rn].g.size
                  / area.size / area.size;
    }
}
}

/*-----*/
/* Total bulk thickness */
/*-----*/

for(sn=0, bulksum=0; sn<sednum; sn++) bulksum += bulk[sn];

```

```

/*-----*/
/*  Comp. with waterdepth & modify bulk  */
/*  (surplus to be added to [x+1] grid  */
/*  IMCOMPLETE: OUT OF AREA -> NOT CHECK */
/*-----*/

if(bulksum > -wd){

    for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
        bulkprev[sn] = bulk[sn] * (bulksum + wd) / bulksum;
        bulk[sn]    -= bulkprev[sn];
    }
}

/*-----*/
/*      CALC SED MATRIX THICKNESS      */
/*-----*/

for(sn = 0; sn < sednum; sn++){

    sed[sn].matrix[tn][xn][yn] =
        bulk[sn] * (1.0 - sed[sn].phi0);
}
}}
}
return 0;
}

/*****
/*  Compaction Calc  */
/*****

int compaction_calc(void)
{
    int tn, xn, yn, sn;
    double dtop, dbase, deps;
    double matrixsum, poresum;
    double bulk[SEDMAX], pore[SEDMAX], phi[SEDMAX], perm[SEDMAX];
    double permh, permv;

    /* Results Header */
    fprintf(fplog, "%nRESULTS:%n");
    fprintf(fplog, "  T    X    Y    "
        "TopDepth(m)  Thick(m) Phi(v/v) HC_h(cm/s) HC_v(cm/s) ");
    for(sn = 0; sn < sednum; sn++) fprintf(fplog, "Sed%2d(v/v) ", sn);
}

```

```

fprintf(fplog, "%n");

for(tn=timenum-1; tn >= 0; tn--){

    for(xn=0; xn < area.xnum; xn++){
    for(yn=0; yn < area.ynum; yn++){
        for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
            phi[sn] = bulk[sn] = perm[sn] = pore[sn] = 0.0;
        }

        /* Total matrix thickness */
        for(sn=0, matrixsum =0.0; sn < sednum; sn++){
            matrixsum += sed[sn].matrix[tn][xn][yn];
        }
        if(matrixsum == 0) continue;

        /* Initialize depth data */
        dtop = topdepth[xn][yn];
        dbase = dtop + matrixsum * 2.0; /* initial porosity :0.5 */

        /*-----*/
        /* Calc Porosity (iteration) */
        /*-----*/

        do{
            for(sn = 0, poresum = 0.0; sn < sednum; sn++){
                phi[sn] = phi_calc(dtop, dbase, sn);
                pore[sn] = sed[sn].matrix[tn][xn][yn] * phi[sn]/(1-phi[sn]);

                poresum += pore[sn];
            }

            deps = dtop + matrixsum + poresum - dbase;
            dbase += deps;

        }while(deps <= - EPSMAX || deps >= EPSMAX );

        /*-----*/
        /* Calc permeability (hydro-cond) */
        /*-----*/

        for(sn = 0; sn < sednum; sn ++){
            bulk[sn] = pore[sn] + sed[sn].matrix[tn][xn][yn];
            perm[sn] = perm_calc(phi[sn], sn);
        }
    }
}

```

```

permh = power_ave_calc(omegah, bulk, perm, sednum);
permv = power_ave_calc(omegav, bulk, perm, sednum);

/*-----*/
/*      Output Results      */
/*-----*/

fprintf(fplog, " %4d %4d %4d %10.4f %9.4f %7.4f %.3e %.3e "
          ,tn, xn, yn, topdepth[xn][yn], matrixsum + poresum,
          poresum / (matrixsum + poresum), permh, permv);

for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
    fprintf(fplog, " %.3e ",
           sed[sn].matrix[tn][xn][yn] / matrixsum );
}
fprintf(fplog, "%n");

/* Set top depth of next layer */
topdepth[xn][yn] += matrixsum + poresum;

}
}

return 0;
}

/*****
/*      Liner Interpolation      */
*****/

double liner_interp(double **ll ,int nn, double mm)
/* Category should be in ascending order */
{
    int i;
    if (mm >= ll[nn-1][0]) return ll[nn-1][1];
    if (mm <= ll[0][0])    return ll[0][1];

    /* simple search SHOULD BE MODIFIED => binary */
    for(i = 1; mm > ll[i][0]; i++);

    return(ll[i-1][1] + (ll[i][1] - ll[i-1][1]) *
           (mm - ll[i-1][0]) / (ll[i][0] - ll[i-1][0]) );
}

```

```

}

/*****
/*   Porosity (Average) Calc                               */
/*   t: Top depth                                         */
/*   b: Bottom depth                                       */
/*   s: Sediment Num                                       */
*****/

double phi_calc(double t, double b, int s){

    int i;
    double p, q;

    switch(sed[s].ptype){
    case 0:        /* Polynomial Eq (Integral Ave) */
        p = q = sed[s].up.pc[POLYMAX] / (POLYMAX + 1);
        for(i = POLYMAX - 1; i >= 0; i--){
            p = p * t + sed[s].up.pc[i] / (i+1);
            q = q * b + sed[s].up.pc[i] / (i+1);
        }
        p *= t;
        q *= b;
        p = (q - p) / (b - t);
        break;

    case 1:        /* Exponential Eq (Integral Ave) */
        p = sed[s].phi0 / sed[s].up.cmpf
            * (exp(-sed[s].up.cmpf * t) -
              exp(-sed[s].up.cmpf * b))/(b - t);
        break;
    }
    return p;
}

/*****
/*   Hydraulic Conductivity Calc                           */
/*   p: Type of Func                                       */
/*   s: Sediment Num                                       */
*****/

double perm_calc(double p, int s){

    double k;
    int i;

    if (p<=0) return 0.0; /* check phi */

    switch(sed[s].ktype){

```

```

case 0:      /* Polynominal Eq */
    k = sed[s].uk.kc[POLYMAX];
    for(i = POLYMAX -1; i >= 0; i--) k = k * p + sed[s].uk.kc[i];
    break;

case 1:      /* Berg Eq (for arenite) Conv md = > cm/sec */
    k = pow(p * 100, 5.1) * 0.0053 *
        sed[s].uk.gsize * sed[s].uk.gsize * MDTOHC;
    break;

case 2:      /* Bryant Eq (for shale) */
    k = exp(14.3 * p - 26.3);
    break;
}

return k;
}

/*****
/* Power Average Calc                                */
/* [in]                                              */
/* w: Omega (Coefficient of Power Ave.)            */
/* *b: Bulk data (weight of Perm. data)             */
/* *k: Perm data                                    */
/* s: number of Perm data                          */
/*                                                  */
/* [out]                                            */
/* m: power-averaged Perm                          */
*****/
double power_ave_calc(double w, double *b, double *k, int s){

    int i;
    double m, bs;

    if(s <= 0 || w > 1 || w < -1) m = -1;    /* Out of Range */

    else if(w == 0){                               /* Geometric Mean */
        for(i = 0, m = bs = 0.0; i < s; i++){
            if(k[i] > 0){
                m += b[i] * log(k[i]);
                bs += b[i];
            }
        }
        m = (bs <= 0)? 0 : exp(m/bs);
    }

    else {                                           /* Power Mean */
        for (i = 0, m = bs = 0.0; i < s; i++){
            m += b[i] * pow(k[i], w);
            bs += b[i];
        }
    }
}

```

```

        m = (bs <= 0) ? 0 : pow(m/bs, 1/w);
    }
    return m;
}

/*****
/*   Read General Data                               */
*****/
int read_general_data(void)
{
    FILE *fp;
    char buf[1024];
    char *bb;
    int sn, rn, i, j, lp;
    double n[POLYMAX+1];

    for(sn = 0; sn < SEDMAX; sn++) rate[sn].cnum = 0;
    for(rn = 0; rn < RWKMAX; rn++) rwk[rn].freq.cnum = 0;
    water.cnum = 0;
    coast.cnum = 0;
    sn = rn = 0;

    fp = fopen(ipt, "r");
    if(fp == NULL){
        fprintf(stdout, "FILE NOT OPEN:%s", ipt);
        return -1;
    }
    fprintf(fplog, "***** GENERAL DATA *****\n");

    while(fgets(buf, sizeof buf, fp)){
        if(strncmp(buf, "#", 1)==0);

        /*-----*/
        /* Time Data */
        /*-----*/
        else if(strncmp(buf, "TT", 2)==0){
            sscanf(buf+3, "%lf %lf %d", &timebegin, &timestep, &timenum);
            fprintf(fplog, "Time begin %5.2fMa Step%5.2fmy"
                " num_step%5d\n", timebegin, timestep, timenum);
        }

        /*-----*/
        /* Area Data */
        /*-----*/
        else if(strncmp(buf, "BT", 2)==0){
            sscanf(buf+3, "%lf %lf", &basinx, &basiny);
            fprintf(fplog, "basin size X:%8.1fm Y:%8.1fm\n",
                basinx, basiny);
        }
    }
}

```

```

}
else if(strncmp(buf,"AG",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf", &area.size);
    fprintf(fplog,"%n=== AREA INFO ===%n"
           " grid size %5.2fm ",area.size);
}
else if(strncmp(buf,"A0",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf", &area.x0, &area.y0);
    fprintf(fplog," datum X:%8.2fm Y:%8.2fm%n", area.x0, area.y0);
}
else if(strncmp(buf,"AR",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d %d", &area.xref, &area.yref);
    fprintf(fplog," ref_datum(%4d,%4d)%n", area.xref, area.yref);
}
else if(strncmp(buf,"AN",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d %d", &area.xnum, &area.ynum);
    fprintf(fplog," num_grid (%4d,%4d)%n", area.xnum, area.ynum);
}

/*-----*/
/* Count Table Data */
/*-----*/

/* WD Data */
else if(strncmp(buf,"WD",2)==0){
    water.cnum++;
}
/* CL Data */
else if(strncmp(buf,"CL",2)==0){
    coast.cnum++;
}
/* SR data */
else if(strncmp(buf,"SR",2)==0){
    rate[sn].cnum++;
}
/* RF data */
else if(strncmp(buf,"RF",2)==0){
    rwk[rn].freq.cnum++;
}

/*-----*/
/* Sediment Data */
/*-----*/
else if(strncmp(buf,"ST",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d", &sednum);
    fprintf(fplog,"%n=== SEDIMENT INFO ===%n"
           " TOTAL%2d%n%n", sednum);
}
/* Sed. No. */
else if(strncmp(buf,"SI",2)==0){

```

```

    sscanf(buf+3, "%d", &sn);
    fprintf(fplog, " No:%2d\n", sn);
    sn -= 1;
    if( sn < 0 || sn >= sednum){
        fprintf(stdout, "INVALID [S1]");
        return -1;
    }
}
/* Sed. Label */
else if(strncmp(buf, "SL", 2)==0){
    for(i = 0; i < NAMEMAX; i++){
        sed[sn].name[i] = buf[3+i];
        if(buf[3+i] == '\n'){
            sed[sn].name[i] = '\0';
            fprintf(fplog, " Name: %s\n", &sed[sn].name);
            break;
        }
    }
}
/* phi0 */
else if(strncmp(buf, "SP", 2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf", &sed[sn].phi0);
    if( sed[sn].phi0 <= 0 || sed[sn].phi0 >= 1){
        fprintf(stdout, "INVALID[SP]");
        return -1;
    }
    fprintf(fplog, " Phi0: %5.3f(v/v)\n", sed[sn].phi0);
}

/* phi parameters */
else if(strncmp(buf, "SC", 2)==0){
    for (bb = buf + 3, i = POLYMAX; i > 0; i--, bb += lp){
        if(sscanf(bb, "%lf\n", &n[i], &lp) == EOF) break;
    }

    /* Exponential Eq */
    if(i == POLYMAX - 1){
        sed[sn].ptype = 1;
        sed[sn].up.cmpf = n[POLYMAX];
        fprintf(fplog, " Phi_calc:Exponential Eq\n");
        fprintf(fplog, " Compaction facotr %.3e\n(1/m)", sed[sn].up.cmpf);
    }

    /* Polynomial Eq */
    else if (i == 0){
        sed[sn].ptype = 0;
        sed[sn].up.pc[0] = sed[sn].phi0;
        for(j = 1; j <= POLYMAX; j++) sed[sn].up.pc[j] = n[j];

        fprintf(fplog, " Phi calc:Polynomial Eq\n");
    }
}

```

```

        for(j = 0; j <= POLYMAX; j++){
            fprintf(fplog," Coeff[%d]% .3e\n", j, sed[sn].up.pc[j]);
        }
    }
    else {
        fprintf(stdout,"INVALID[SC]");
        return -1;
    }
}

/* perm parameters */
else if(strncmp(buf,"SK",2)==0){
    for (bb = buf + 3, i = POLYMAX; i >= 0; i--, bb += lp){
        if(sscanf(bb, "%lf\n", &n[i], &lp) == EOF) break;
    }
    if(i == POLYMAX - 1){

        /* Bryant Eq (for shale) */
        if(n[POLYMAX] == -1){
            sed[sn].ktype = 2;
            fprintf(fplog," Perm_calc:Bryant Eq\n");
        }
        /* Berg Eq (for arenite) */
        else{
            sed[sn].ktype = 1;
            sed[sn].uk.gsize = n[POLYMAX];
            fprintf(fplog," Perm_calc:Berg Eq\n");
            fprintf(fplog," Mean grainsize% .3emm\n",sed[sn].uk.gsize);
        }
    }
    /* Polynomial Eq */
    else if (i == -1){
        sed[sn].ptype = 0;
        for(j = 0; j <= POLYMAX; j++) sed[sn].uk.kc[j] = n[j];

        fprintf(fplog," Perm_calc:Polynomial Eq\n");
        for(j = 0; j <= POLYMAX; j++){
            fprintf(fplog,"Coeff[%d]% .3e\n", j, sed[sn].uk.kc[j]);
        }
    }
    else {
        fprintf(stdout,"INVALID[SK]");
        return -1;
    }
}

/*-----*/
/* Rework data (grid) */
/*-----*/

```

```

else if(strncmp(buf,"RT",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d", &rwknum);
    fprintf(fplog, "%n=== REWORK INFO ===%n"
            " Total:%3d%n%n", rwknum);
}
else if(strncmp(buf,"RI",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d", &rn);
    fprintf(fplog, " No:%2d%n", rn);
    rn -= 1;
    if( rn < 0 || rn >= rwknum){
        fprintf(stdout, "INVALID[RI]");
        return -1;
    }
}
else if(strncmp(buf,"RG",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf", &rwk[rn].g.size);
    fprintf(fplog, " grid size %5.2fm ", rwk[rn].g.size);
}
else if(strncmp(buf,"R0",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf", &rwk[rn].g.x0, &rwk[rn].g.y0);
    fprintf(fplog, " datum X:%8.2fm Y:%8.2fm%n",
            rwk[rn].g.x0, rwk[rn].g.y0);
}
else if(strncmp(buf,"RR",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d %d", &rwk[rn].g.xref, &rwk[rn].g.yref);
    fprintf(fplog, " ref_datum(%4d,%4d)%n",
            rwk[rn].g.xref, rwk[rn].g.yref);
}
else if(strncmp(buf,"RN",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d %d", &rwk[rn].g.xnum, &rwk[rn].g.ynum);
    fprintf(fplog, " num_grid (%4d,%4d)%n",
            rwk[rn].g.xnum, rwk[rn].g.ynum);
}

/*-----*/
/* Upscaling Factor (perm.) */
/*-----*/

else if(strncmp(buf,"US",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf", &omegah, &omegav);
    if( omeгах > 1 || omeгах < -1 ||
        omegav > 1 || omegav < -1 ){
        fprintf(stdout, "INVALID [US]");
        return -1;
    }
    fprintf(fplog, "%n=== PERM UPSCALING FACTOR ===%n"
            " omega:h %5.3f v %5.3f%n", omeгах, omegav);
}
}
fclose(fp);

```

```

return 0;
}

/*****
/*  Read Table(Vector) Data
*****/
int read_table_data(void)
{
FILE *fp;
char buf[1024];
int sn, rn, raten, wn, cn, fq;

fp = fopen(ipt,"r");
if(fp == NULL){
    fprintf(stdout,"FILE NOT OPEN:%s", ipt);
    return -1;
}

wn = cn = 0;
fprintf(fplog, "%n***** TABLE DATA *****%n");

/*-----*/
/*  Read and Check table data (assending order)  */
/*-----*/

while(fgets(buf, sizeof buf, fp)){
    if(strncmp(buf, "#", 1)==0);

    /* Water depth */
    else if(strncmp(buf, "WD", 2)==0){
        sscanf(buf+3, "%lf %lf", &water.c[wn][0],
            &water.c[wn][1]);

        fprintf(fplog, (wn == 0) ? "%n=== WATER DEPTH ===%n"
            "      x(m)      depth(m)%n" : "");

        fprintf(fplog, " %8.2f % 10.2f%n", water.c[wn][0],
            water.c[wn][1]);

        if(wn > 0){
            if(water.c[wn][0] <= water.c[wn-1][0]){
                fprintf(stdout, "NOT ASSENDING ORDER[WD]");
                return -1;
            }
        }
        wn++;
    }
}
}

```

```

/* Coastline */
else if(strncmp(buf,"CL",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf",          &coast.c[cn][0],
                                                &coast.c[cn][1]);

    fprintf(fplog,(cn == 0) ? "%n=== COASTLINE ===%n"
        " age(Ma)   dis.(m)%n" : "");

    fprintf(fplog," %8.2f %10.2f%n", coast.c[cn][0],
                                                coast.c[cn][1]);

    if(cn > 0){
        if(coast.c[cn][0] <= coast.c[cn-1][0]){
            fprintf(stdout,"NOT ASSENDING ORDER[CL]");
            return -1;
        }
    }
    cn ++;
}

/* Sedimentation rate */
else if(strncmp(buf,"SI",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d", &sn);
    fprintf(fplog,(sn == 1) ? "%n=== SED. RATE ===%n" : "");
    fprintf(fplog," No%2d%n %8s %10s%n",sn,"x(m)", "rate(m/my)");
    sn -= 1, raten = 0;
}
else if(strncmp(buf,"SR",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf",          &rate[sn].c[raten][0],
                                                &rate[sn].c[raten][1]);

    fprintf(fplog," %8.2f %10.2f%n", rate[sn].c[raten][0],
                                                rate[sn].c[raten][1]);

    if(raten > 0){
        if(rate[sn].c[raten][0] <= rate[sn].c[raten-1][0]){
            fprintf(stdout,"NOT ASSENDING ORDER[SR:%d]", sn);
            return -1;
        }
    }
    raten++;
}

/* Rework frequency */
else if(strncmp(buf,"RI",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%d", &rn);
    fprintf(fplog,(rn == 1) ? "%n=== REWORK  FREQ ===%n" : "");
    fprintf(fplog," No%2d%n %8s %10s%n",rn,"age(Ma)", "freq(/my)");
    rn -= 1, fq = 0;
}
else if(strncmp(buf,"RF",2)==0){
    sscanf(buf+3, "%lf %lf",          &rwk[rn].freq.c[fqn][0],
                                                &rwk[rn].freq.c[fqn][1]);
}

```

```

        fprintf(fplog,"%8.2f %10.0f\n",  rwk[rn].freq.c[fqn][0],
                rwk[rn].freq.c[fqn][1]);

        if(fqn > 0){
            if(rwk[rn].freq.c[fqn][0] <= rwk[rn].freq.c[fqn-1][0]){
                fprintf(stdout,"NOT ASSENDING ORDER[RF:%d]", rn);
                return -1;
            }
        }
        fqn++;
    }
}
fclose(fp);

return 0;
}

/*****
/*  Read Rework Grid Data
/*****

int read_rwk_data(void)
{
    FILE *fp;
    char buf[4096];
    char *bb;
    int sn, rn, xn, yn;
    int flg = 0, lp =0;

    fp = fopen(iptrwk,"r");
    if(fp == NULL){
        fprintf(stdout,"FILE NOT OPEN:%s", iptrwk);
        return -1;
    }

    fprintf(fplog,"%n*****  RWK SED THICKNESS  *****\n");

    while(fgets(buf, sizeof buf, fp)){
        if(strncmp(buf, "#",1)==0);

        /* rwk & sed number */
        else if(strncmp(buf, "RS",2)==0){
            sscanf(buf+3, "%d %d", &rn, &sn);
            fprintf(fplog," rwk:%1d  sed:%1d\n", rn, sn);
            rn--, sn--;
            if(rn >= 0 && rn < rwknum && sn >= 0 && sn < sednum){

```

```

        flg = 1, xn = 0, lp = 0;
    }
}

/* rwk sed. thickness [XY] */
else if(flgs == 1){
    for (yn=0,bb=buf; yn<rwk[rn].g.ynum; yn++, bb +=lp) {
        sscanf(bb, "%lf%n", &(rwk[rn].s[sn][xn][yn]), &lp);
        fprintf(fplog, " %.3e", rwk[rn].s[sn][xn][yn]);
    }
    fprintf(fplog, "¥n");
    if(++xn >= rwk[rn].g.xnum) flg = 0;
}
}
fclose(fp);
return 0;
}

/*****
/*   Read Topdepth Grid Data                               */
/*****

int read_topdepth(void)
{
    FILE *fp;
    char buf[4096];
    char *bb;
    int xn, yn;
    int flg = 0, lp = 0;

    fp = fopen(iptdepth, "r");
    if(fp == NULL){
        fprintf(stdout, "FILE NOT OPEN:%s", iptdepth);
        return -1;
    }

    fprintf(fplog, "¥n***** Top Depth *****¥n");

    xn = 0;
    while(fgets(buf, sizeof buf, fp)){
        if(strncmp(buf, "#", 1) == 0);
        else if(flgs == 0){
            for (yn = 0, bb = buf; yn < area.ynum; yn++, bb += lp) {
                sscanf(bb, "%lf%n", &topdepth[xn][yn], &lp);
                fprintf(fplog, " %9.2f", topdepth[xn][yn]);
            }
            fprintf(fplog, "¥n");
            if(++xn >= area.xnum) flg = 1;
        }
    }
}

```

```

fclose(fp);
return 0;
}

/*****
/* Allocate Memory for 2D & 3D Array */
*****/

int allocate_memory(void)
{
    int sn, rn;

    for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
        sed[sn].matrix = create_array_d3(timenum, area.xnum, area.ynum);
    }

    topdepth          = create_array_d2(area.xnum, area.ynum);

    for(rn = 0; rn < rwknum; rn++){
        for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
            rwk[rn].s[sn] = create_array_d2(rwk[rn].g.xnum, rwk[rn].g.ynum);
        }

        for(rn = 0; rn < rwknum; rn++){
            rwk[rn].freq.c = create_array_d2(rwk[rn].freq.cnum, 2);
        }
        for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
            rate[sn].c      = create_array_d2(rate[sn].cnum, 2);
        }

        coast.c           = create_array_d2(coast.cnum, 2);
        water.c           = create_array_d2(water.cnum, 2);

        for(rn = 0; rn < rwknum; rn++){
            for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
                if(sed[sn].matrix == NULL ||
                   topdepth == NULL ||
                   rwk[rn].s[sn] == NULL ||
                   rwk[rn].freq.c == NULL ||
                   rate[sn].c == NULL ||
                   coast.c == NULL ||
                   water.c == NULL
                ) {
                    fprintf(stdout, "FAIL TO ALLOCATE MEMORY");
                    return -1;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }}

    return 0;
}

/*****
/*   Free Memory for 2D & 3D Array   */
*****/

int free_memory(void)
{
    int sn,rn;

    free_array_d2(coast.c);
    free_array_d2(water.c);
    for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
        free_array_d2(rate[sn].c);
    }

    for(rn = 0; rn <rwknum; rn++){
        free_array_d2(rwk[rn].freq.c);
    }

    for(rn = 0; rn <rwknum; rn++){
        for(sn = 0; sn <sednum; sn++){
            free_array_d2(rwk[rn].s[sn]);
        }
    }

    free_array_d2(topdepth);

    for(sn = 0; sn < sednum; sn++){
        free_array_d3(sed[sn].matrix,timenum);
    }
    return 0;
}

```

2 array.h

```

#ifndef ARRAY_H_INCLUDED
#define ARRAY_H_INCLUDED

/* Allocate & Free Array */

double  *create_array_d1(int);
double  **create_array_d2(int, int);
double  ***create_array_d3(int, int, int);
int      *create_array_i1(int);

void free_array_d1(double *);

```

```

void free_array_d2(double **);
void free_array_d3(double ***, int);
void free_array_i1(int *);

#endif /* ARRAY_H_INCLUDED */

```

3 array.c

```

/*****
/*
/* Allocate Memory for (int) (double) Array
/*           for (int) (double) Array
/*
/* 0000.00.00 JGI Library
/* 2003.12.06 Kawada (add initialize (Set 0)
/*
*****/

#include <stdlib.h>

int *create_array_i1(int ll)
{
    return((int *)calloc(ll, sizeof(int)));
}

void free_array_i1(int *a)
{
    free(a);
}

int **create_array_i2(int ll, int mm)
{
    int i;
    int **a, *ptr;

    a = (int **)malloc(ll * sizeof(int *));
    if (!a) return(NULL);

    ptr = (int *)calloc(ll * mm, sizeof(int));
    if (!ptr) return(NULL);

    for (i=0; i<ll; i++){
        a[i] = ptr + i * mm;
    }

    return(a);
}

```

```
void free_array_i2(int **a)
{
    free(a[0]);
    free(a);
}

double *create_array_d1(int ll)
{
    int i;
    double *a;

    a = (double *)malloc(ll * sizeof(double));
    if (!a) return(NULL);

    for (i = 0; i<ll; i++){
        a[i] = 0.0;
    }

    return(a);
}

void free_array_d1(double *a)
{
    free(a);
}

double **create_array_d2(int ll, int mm)
{
    int i, j;
    double **a, *ptr;

    a = (double **)malloc(ll * sizeof(double *));
    if (!a) return(NULL);

    ptr = (double *)malloc(ll * mm * sizeof(double));
    if (!ptr) return(NULL);

    for (i = 0; i<ll; i++){
        a[i] = ptr + i * mm;
    }

    for (i = 0; i<ll; i++){
        for (j = 0; j<mm; j++){
            a[i][j] = 0.0;
        }
    }
    return(a);
}

void free_array_d2(double **a)
{
    free(a[0]);
}
```

```

    free(a);
}

double ***create_array_d3(int ll, int mm, int nn)
{
    int i, j, k;
    double ***a, *ptr;

    a = (double ***)malloc(ll * sizeof(double **));
    if (!a) return(NULL);

    for (i=0; i<ll; i++) {
        a[i] = (double **)malloc(mm * sizeof(double **));
        if(!a[i]) return(NULL);
    }

    ptr = (double *)malloc(ll * mm * nn * sizeof(double));

    for (i=0; i<ll; i++){
        for (j=0; j<mm; j++){
            a[i][j] = ptr + (i * mm + j) * nn;
        }

        for (i = 0; i < ll; i++){
            for (j = 0; j < mm; j++){
                for (k = 0; k < nn; k++){
                    a[i][j][k] = 0.0;
                }
            }
        }
        return(a);
    }
}

void free_array_d3(double ***a, int ll)
{
    int i;
    free(a[0][0]);

    for (i = 0; i < ll; i++) free(a[i]);
    free(a);
}

```