

前進的モデルを用いた
不均質性堆積岩評価手法の研究 II

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2005 年 1 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、下記に御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)

2005

前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究 II

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

星 一良*, 侯 建勇*, 川田耕司*, 辻 隆司**, 諏訪部瑞恵**

要 旨

堆積岩の不均質場の特性を実測データに基づき定量的に把握する手法を開発することは、サイト特性調査およ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となる。本研究では堆積岩の不均質性評価手法を開発する目的で、幌延地域の珪質泥岩を検討し、堆積過程とその後の埋没過程とを考慮した堆積モデリングソフトウェアを開発した。本年度は、平成 15 年度の研究で開発した堆積モデリングソフトウェアの堆積シミュレーション部分の機能を拡張し、これに予測データと実際のボーリング孔データとを比較する機能を追加した。また入力パラメータの最適化を行う機能も追加した。ボーリング孔データに基づく幌延地域の地質モデルを用いて堆積モデリングソフトウェアのテストランを行った。

また、本研究では、開発と並行して、堆積モデリングソフトウェアのパラメータの設定に資することを目的として、以下の観点から地質解析を行った。

- 1) 声問層・稚内層のボーリング孔検層解析により間隙率、泥質分含有量、削剥量の分布と埋没曲線を求め、マーカーを対比し年代を推定して地質モデルを構築した。
- 2) EMI 検層解析を実施した結果、コアの肉眼観察では識別することのできない層状の不均質性が認められ、化学分析によりその要因が珪藻と碎屑物の含有量であることがわかった。
- 3) 地震探査記録を、GDI法を用いて解析し、広域的な堆積岩物性の変化の把握を試みた。

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 a Method to Evaluate Heterogeneity of Sedimentary Rocks Using a
Forward Model, II

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

Kazuyoshi Hoshi*, Jian-Yong Hou*, Koji Kawada*, Takashi Tsuji**, Mizue Suwabe**

Abstract

Developing a method to evaluate heterogeneity of sedimentary rocks is very important for a site survey and a property test of the site. We studied siliceous shale from wells in the Horonobe area, and developed a sedimentary process modeling software in order to establish a method to evaluate heterogeneity of sedimentary rocks. In this year, we expanded the sedimentary simulation module, and attached another module to compare the calculated results with actual data. We also attached the module to find the best input parameters. We performed a test run using the geology model we made for Horonobe area.

In parallel with software development, following geological data analysis carried out for parameter setting of the sedimentary process modeling.

- 1) Well log analysis of Koetoi and Wakkanai Formations revealed variations of porosity, shale content, and amount of erosion. We correlate marker beds, and establish a compaction curve for siliceous shale in the Horonobe area.
- 2) EMI analysis revealed alternation of thin beds which can not be recognized by naked eyes. Chemical analysis shows that this heterogeneity originates from a variation in diatom and clastic material contents in the rock.
- 3) We also examined seismic data using GDI method. For sedimentary modeling software, we expanded the sedimentary simulation module, and attached another module to compare the calculated results with actual data. We also attached the module to find the best input parameters. We performed a test run using the geology model we made for Horonobe area.

This work was 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. はじめに	1
2. 検層解析	2
2. 1 目的及び使用データ	2
2. 2 自然 Γ 線検層を用いたボーリング孔間対比	3
2. 3 稚内層・声間層の年代.....	6
2. 4 検層による間隙率の決定	10
2. 4. 1 検層解析パラメータの決定	10
2. 4. 2 間隙率の推定.....	13
2. 5 泥質分含有率 (VSH) の決定	13
2. 6 地質モデルの作成.....	27
2. 7 削剥量の推定	30
2. 8 珪質泥岩の埋没曲線 (深度・間隙率曲線) の推定	33
2. 8. 1 埋没曲線推定のための使用データ	33
2. 8. 2 埋没曲線推定式作成.....	34
2. 8. 3 埋没曲線の決定	35
3. EMI を用いたファシス解析とボーリング孔間対比	39
3. 1 はじめに	39
3. 2 検討手法	40
3. 2. 1 GR カーブでのボーリング孔間対比 (昨年度委託作業の見直し)	40
3. 2. 2 EMI ファシス区分, 層状構造のボーリング孔間対比と化学組成分析	40
3. 3 結果	41
3. 3. 1 GR カーブでのボーリング孔間対比.....	41
3. 3. 2 EMI ファシス.....	42
3. 3. 3 EMI で認められる層状構造のボーリング孔間対比	45
3. 3. 4 マーカー間の厚さ変化	52
3. 3. 5 EMI 画像と岩芯との対応.....	52
3. 4 考察	55
3. 4. 1 EMI 画像に認められる厚さ 10cm~1m オーダーの層状構造 (0.1~1mEMI 層状構造) の性状とその成因	55
3. 4. 2 各ボーリング孔における堆積速度と GR 値や EMI 画像で認められる不均質性の周期性	57
3. 4. 3 EMI 画像に認められる厚さ 10cm~1m オーダーの層状構造 (0.1~1mEMI 層状構造) の発達層準.....	59
3. 5 まとめ.....	59
4. 地震探査データの GDI システムを用いた岩相解析.....	61

4. 1	目的	61
4. 2	GDI 解析手法	61
4. 2. 1	GDI について	61
4. 2. 2	地質層序統合モデルの	62
4. 2. 3	モンテカルロシミュレーションの実行	63
4. 2. 4	アーティフィシャルニューラルネットワークの応用	63
4. 3	解析対象地域における GDI の適用	66
4. 3. 1	震探測線, ボーリング孔データおよび対象層	66
4. 3. 2	GDI 地質層序統合モデルの設定	67
4. 3. 3	擬似ボーリング孔の作成	69
4. 3. 4	擬似ボーリング孔と合成地震記録との相関性の考察	69
4. 3. 5	ニューラルネットワークによる地震波属性と岩石物性の相関関係式の導出	75
4. 3. 6	稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布予測	78
4. 3. 7	予測結果の検討	79
4. 4	問題点および今後の課題	79
5.	堆積モデリングソフトウェアの機能拡張	85
5. 1	ソフトウェアの概念設計・機能設計	85
5. 1. 1	堆積シミュレーション機能 (拡張)	85
5. 1. 2	データ比較機能	90
5. 1. 3	パラメータ最適化機能	92
5. 2	ソフトウェアのコーディング	95
6.	テストラン	97
6. 1	入力データ	97
6. 1. 1	対象範囲・対象層準と深度構造	97
6. 1. 2	堆積過程パラメータ	106
6. 1. 3	埋没過程パラメータ	110
6. 1. 4	データ比較用パラメータ	112
6. 1. 5	最適化用パラメータ	116
6. 2	結果	118
6. 2. 1	初期パラメータでの堆積シミュレーション結果	118
6. 2. 2	パラメータ最適化機能および最終パラメータでのシミュレーション結果	124
6. 3	考察	132
7.	今後の提案	133
8.	おわりに	135

9. 参考文献	137
---------------	-----

図目次

図 2.1-1	ボーリング孔および地震探査測線位置図.....	2
図 2.2-1	GR ログを用いた幌延地域のボーリング孔のマーカ対比.....	5
図 2.3-1	鮮新統～更新統の珪藻化石帯区分と幌延ボーリング孔の対比	7
図 2.3-2	幌延地域の声問層・稚内層の年代 GR ログとユースタシー曲線の対比	9
図 2.4-1	音波検層で得られた区間速度 dT とコア間隙率の関係	10
図 2.4-2	音波検層より求めた音波速度 V_p とコア間隙率の関係.....	11
図 2.4-3	密度検層で測定された地層密度 ρ_b とコア間隙率の関係	12
図 2.4-4	中性子検層で測定された間隙率 PHIN とコア間隙率の関係	13
図 2.4-5	HDB-1 孔検層解析結果, マーカー深度.....	15
図 2.4-6	HDB-2 孔検層解析結果.....	16
図 2.4-7	HDB-3 孔検層解析結果.....	17
図 2.4-8	HDB-4 孔検層解析結果.....	18
図 2.4-9	HDB-5 孔検層解析結果.....	19
図 2.4-10	HDB-6 孔検層解析結果.....	20
図 2.4-11	HDB-7 孔検層解析結果.....	21
図 2.4-12	HDB-8 孔検層解析結果.....	22
図 2.4-13	MITI 天北 検層解析結果	23
図 2.4-14	北川口 SK-1 検層解析結果	25
図 2.6-1	幌延地域の地質モデル：検層解析結果	29
図 2.7-1	dT 深度カーブと見積られた削剥量 HDB-1,2,3,4 MITI 天北.....	31
図 2.7-2	dT 深度カーブと見積られた削剥量 HDB-5,6,7,8,北川口 SK-1.....	31
図 2.7-2	dT 深度カーブとシリカ鉱物の相転移深度.....	32
図 2.8-1	最大埋没深度・間隙率プロット	33
図 2.8-2	最大埋没深度・間隙率プロットおよび埋没曲線.....	37
図 2.8-3	間隙率残差プロット	38
図 3.1-1	厚さ数 10cm～1m の層状構造が認められる EMI 画像 (HDB-1 孔)	39
図 3.3-1	GR カーブによるボーリング孔間対比と EMI ファシス	42
図 3.3-2	EMI ファシス区分.....	43
図 3.3-3	EMI ファシス (EMI-A, HDB-1 孔)	44
図 3.3-4	EMI ファシス (EMI-B, HDB-1 孔)	44
図 3.3-5	EMI ファシス (EMI-C, HDB-1 孔)	44
図 3.3-6	EMI ファシス (EMI-D, HDB-1 孔)	44
図 3.3-7	EMI ファシス (EMI-E, HDB-1 孔)	45

図 3.3-8	2004GR マーカー1~3 層準の EMI 画像	46
図 3.3-9	2004GR マーカー4~5 層準の EMI 画像	47
図 3.3-10	2004GR マーカー6~7 層準の EMI 画像	48
図 3.3-11	HDB-2 孔の 2004GR マーカー6~8 層準の EMI 画像に認められる不定形の高比抵抗部	49
図 3.3-12	HDB-2 孔の EMI 画像とそこに認められる不定形高比抵抗部あたりの岩芯写真(岩芯深度 77.45~77.63m)	50
図 3.3-13	2004GR マーカー16~18 の EMI 画像	51
図 3.3-14	EMI マーカー2.1 と 2.2 を含む層準の EMI 画像, 岩芯写真および化学組成	53
図 3.3-15	393~394m 層準を含む EMI 画像, 岩芯写真および化学組成	54
図 3.3-16	Al ₂ O ₃ 含有量と比抵抗値との関係。	55
図 3.4-1	HDB ボーリング孔で認められる珪藻質泥岩に認められる不均一性をもたらした要因の周期性の概念図	59
図 4.2-1	岩石物性の GDI 解析の流れ	62
図 4.2-2	後向き演算アーティフィシャルニューラルネットワークの基本構造	64
図 4.3-1	地震探査測線とボーリング孔位置	67
図 4.3-2	既存ボーリング孔データと地質資料から構築した統合構造 (Integration Framework) (HDB-1 孔井の例)	68
図 4.3-3	作成した擬似ボーリング孔(上)とそれに対応する合成地震記録 (下) の例	69
図 4.3-4	地震トレースから抽出した地震波属性の概念図	70
図 4.3-5	声問層下部層準の「平均間隙率」と地震波属性のクロスプロットの例	72
図 4.3-6	声問層下部層準の「泥質含有率」と地震波属性のクロスプロットの例	73
図 4.3-7	稚内層上部層準の「平均間隙率」と地震波属性のクロスプロットの例	74
図 4.3-8	稚内層上部層準の「泥質含有率」と地震波属性のクロスプロットの例	75
図 4.3-9	稚内層上部層準の「平均間隙率」を予測するために訓練した ANN とそのパフォーマンス	77
図 4.3-10	稚内層上部層準の「泥質含有率」を予測するために訓練した ANN とそのパフォーマンス	78
図 4.3-11	GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」の分布	80
図 4.3-12	GDI で予測された稚内層上部層準の「泥質含有率」の分布	81
図 4.3-13	GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (ST96-2 測線)	82
図 4.3-14	GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (ST96-3 測線)	82
図 4.3-15	GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (TP90-1D 測線)	83
図 4.3-16	GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」の分布(ST96-a 測線)	83
図 4.3-17	GDI で予測された稚内層上部層準の「泥質含有率」の分布(ST96-a 測線)	84

図 5.1-1	稚内層の堆積モデル概念図	87
図 5.1-2	時間による海岸線位置移動の概念図	88
図 5.1-3	埋没過程の概念図	88
図 5.1-4	埋没過程の概念図（複数の堆積物の場合）	89
図 5.1-5	座標変換概念図	90
図 5.1-6	ボーリング孔位置での予測値内挿概念図	91
図 5.1-7	各レイヤー予測値作成概念図	91
図 5.1-8	パラメータ摂動方法概念図	94
図 6.1-1	シミュレーション対象範囲位置	97
図 6.1-2	声問層下限深度構造図	99
図 6.1-3	A-1～声問層下限アイソパックマップ	100
図 6.1-4	Marker A-1 深度構造図	101
図 6.1-5	Marker A-1 最大埋没深度構造（仮）図	102
図 6.1-6	Marker A-1 最大埋没深度構造図	103
図 6.1-7	Marker A-1 最大埋没深度構造および現在深度構造の三次元表示	104
図 6.1-8	Marker A-1 深度構造図および最大埋没深度構造図(シミュレーション座標)	105
図 6.1-9	堆積盆平面図	106
図 6.1-10	水深，基準堆積速度プロファイル	106
図 6.1-11	各イベント・堆積物のイベント堆積量	108
図 6.1-12	氷河性海水準変動およびイベント頻度カーブ	109
図 6.1-13	氷河性海水準変動および海岸線移動位置カーブ	110
図 6.1-14	深度間隙率曲線および間隙率透水係数曲線	112
図 6.2-1	堆積シミュレーション結果三次元表示（初期パラメータ，間隙率）	119
図 6.2-2	ブロックダイアグラム（初期パラメータ，間隙率）	119
図 6.2-3	堆積シミュレーション結果三次元図（初期パラメータ，珪藻比率）	120
図 6.2-4	ブロックダイアグラム（初期パラメータ，珪藻比率）	120
図 6.2-5	実・予測データプロット（初期パラメータ，ボーリング孔毎）	121
図 6.2-6	実・予測データプロット（初期パラメータ，レイヤー毎）その 1	122
図 6.2-7	実・予測データプロット（初期パラメータ，レイヤー毎）その 2	123
図 6.2-8	SA 試行に対する評価値および温度グラフ	124
図 6.2-9	堆積シミュレーション結果三次元図（最終パラメータ，間隙率）	127
図 6.2-10	ブロックダイアグラム（最終パラメータ，間隙率）	127
図 6.2-11	堆積シミュレーション結果三次元図（最終パラメータ，珪藻比率）	128
図 6.2-12	ブロックダイアグラム（最終パラメータ，珪藻比率）	128
図 6.2-13	実・予測データプロット（最終パラメータ，ボーリング孔毎）	129
図 6.2-14	実・予測データプロット（最終パラメータ，レイヤー毎）その 1	130
図 6.2-15	実・予測データプロット（最終パラメータ，レイヤー毎）その 2	131

表目次

表 2.2-1	幌延地域ボーリング孔のマーカ深度	4
表 2.2-2	幌延地域のボーリング孔の GR 検層の測定条件と GR 値.....	6
表 2.3-1	幌延地域のボーリング孔マーカの年代と堆積速度.....	8
表 2.6-1	声問層・稚内層の主要マーカ深度と各レイヤーの層厚.....	27
表 2.6-2	幌延地域のボーリング孔での各レイヤーの平均間隙率と泥質分含有率.....	28
表 2.7-1	幌延地域のボーリング孔において推定される削剥量.....	30
表 2.8-1	埋没曲線パラメーター一覧.....	36
表 3.3-1	化学組成分析結果.....	52
表 3.4-1	ボーリング孔毎の堆積速度（圧密補正後）	57
表 3.4-2	各サイクルの堆積期間（万年）	58
表 5.1-1	声問層・稚内層堆積システムの構成要素.....	86
表 5.1-2	堆積シミュレーション追加パラメーター一覧.....	89
表 5.1-3	摂動パラメータおよび摂動方法一覧.....	94
表 5.2-1	ソースファイル一覧.....	95
表 5.2-2	主要関数一覧.....	96
表 6.1-1	間隙率・透水係数パラメーター一覧	111
表 6.1-2	対象レイヤー一覧.....	113
表 6.1-3	ボーリング孔データ一覧(1/2)	114
表 6.1-4	ボーリング孔データ一覧(2/2)	115
表 6.1-5	座標変換・評価値パラメーター一覧	116
表 6.1-6	各ボーリング孔の実座標位置およびシミュレーション座標位置.....	116
表 6.1-7	SA パラメーター一覧.....	117
表 6.1-8	摂動パラメーター一覧.....	117
表 6.2-1	初期評価値，最終評価値，比較対象値一覧.....	124
表 6.2-2	摂動パラメータ最終値一覧	125

1. はじめに

堆積岩中の地下水や物質の移動挙動は地層の透水性などの不均質性により大きく支配される。このため堆積岩の不均質場の特性を実測データに基づき定量的に把握する手法を開発することは、サイト特性調査およ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となる。

従来、堆積岩の不均質性を再現するために、試錐孔調査などにより取得されたデータを内・外挿し統計的に処理することによって堆積相や地層特性の分布を把握する「バックワードモデル」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試錐孔の間隔が広い場合には堆積岩の不均質場の特性を十分に把握できない可能性がある。

この問題を解決する手段として、本研究では堆積過程とその後の埋没過程とを考慮した「前進的モデル」手法による堆積シミュレーションを開発し、幌延地域を対象として堆積岩の堆積場を再現することにより、不均質場の特性を定量的に把握することを試みる。

幌延地域の声問層・稚内層は大部分が泥質岩からなる。このため、これらの地質は一般に「泥岩」として一括されがちで、不均質性を考慮した岩相解析事例は少ない。本研究で得られた成果は実施主体が推進する概要調査地区や精密調査地区の不均質場のモデル化に資するものとなる。

本研究は平成 15 年度「前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究」に引き続くものである。平成 15 年度には幌延地域の声問層、稚内層の堆積システムを明らかにするために、①既往研究を用いた堆積システムの考察、②HDB-1 孔のコアの堆積学的観点からの再調査、③ボーリング孔データを用いた声問層、稚内層の岩相と圧密特性の解析、④地震探査データを用いた地下構造図、等層厚線図、復元断面の作成、を行った。また幌延地域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）を開発した。

今年度は昨年を引き続き

- ①幌延地域の声問層、稚内層の不均質性の定量的な評価と堆積システムの推定と、
- ②堆積モデリングソフトウェアの機能拡張を実施した。

幌延地域の不均質性の定量評価については

- ①検層解析による岩相・物性の評価と対比、
- ②EMI 検層解析とコア観察・分析を用いた細かな層状構造の空間分布の解析、
- ③地震探査データを GDI (Geology Driven Integration)法を用いて広域的な物性変化の解析、を実施した。

堆積モデリングソフトウェアについては

- ④「基本ソフトウェア」の機能拡張
- ⑤予測データをボーリング孔データと比較する機能の追加
- ⑥入力パラメータの最適化を行う機能の追加
- ⑦幌延地域の地質データを用いたテストラン、を行った。

2. 検層解析

2. 1 目的及び使用データ

堆積モデルソフトウェアの入力データとなる幌延地域の地質モデルを作成するためにボーリング孔の検層解析を行った。検層解析の主眼は幌延地域の泥岩の垂直および水平方向の岩相変化を定量的に記述することである。本解析においては、全てのボーリング孔をなるべく同じパラメータで解析するよう努めた。

解析に用いたボーリング孔はサイクル機構が掘削した HDB-1～8 孔と平成 5 年度 MITI 基礎試錐「天北」、北川口 SK-1 および昭和 47 年度 MITI 基礎試錐「浜勇知」である(図 2.1-1)。声問層/稚内層の境界の深度は各ボーリング孔の報告書に従った。対象ボーリング孔の声問層と稚内層, および増幌層の上部は珪質な泥岩のみからなり, 砂岩や凝灰岩を挟在しない。

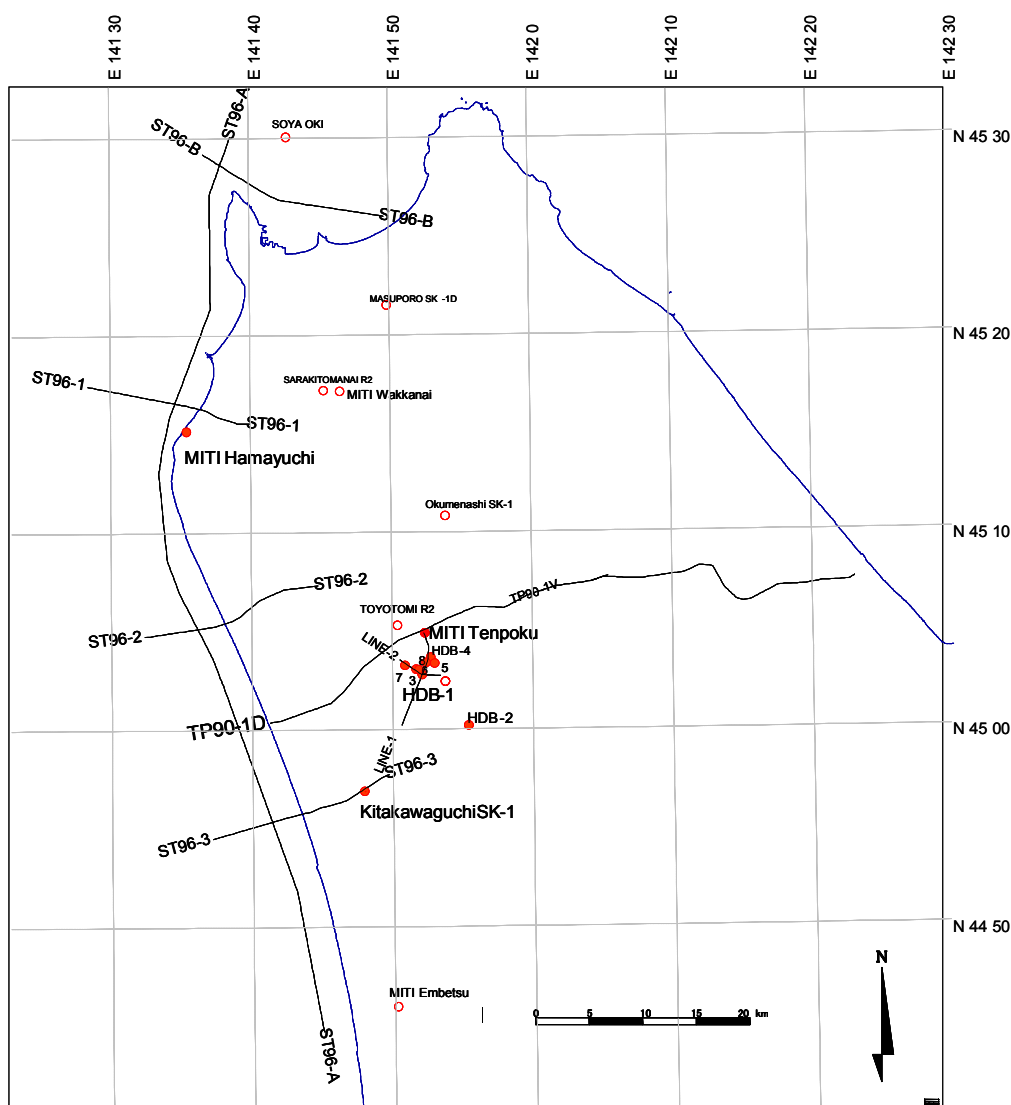


図 2.1-1 ボーリング孔および地震探査測線位置図

TP90-1D: 石油公団基礎物理探査「天北地域」 ST96-1, 2, 3, A, B: 「天北浅海」

Line-1, 2: サイクル機構「幌延地下構造調査」

2. 2 自然 γ 線検層を用いたボーリング孔間対比

自然 γ 線検層（以下 GR 検層という）は珪質岩の岩相，特に泥質分の量比を直接反映するので，砂や凝灰岩を挟まず泥岩のみからなる，幌延地域の声問層・稚内層のボーリング孔対比に有用である。3章「EMIを用いたファシス解析とボーリング孔間対比」で後述するように，昨年度の委託研究(増井ほか, 2004)で実施した GR 検層を用いた対比は今年度の EMI 検層を用いた対比とも調和し有用であることが再度確認されたので，今年度は GR 対比マーカーの数を増やし，また対比ボーリング孔を HDB-1～8 のボーリング孔と MITI 天北，北川口 SK-1 を含めた幌延地域全域に拡張して対比を行った。マーカー深度の一覧を表 2.2-1 に，また GR 検層対比結果を図 2.2-1 に示す。

今年度の対比では HDB-5 孔の対比について昨年から一部変更した。マーカー名が A,B,C,D で始まるマーカーは昨年度（2003 年）に設定したマーカー(2003GR マーカー)であり，T および S で始まるものが今年度（2004 年）に新たに追加されたマーカーである。マーカー T-2, T-1, T0, T1～24 はそれぞれ後述の EMI 検層を用いた堆積相解析（以下ファシス解析という）で用いた 2004GR マーカーの-2, -1, 0, 1～24 に相当する。

3章で述べるようにこれらの自然 γ 線マーカー（以下 GR マーカーと言う）はおそらく海水準変動に起因する堆積サイクルを反映するもので同時代面と考える。各ボーリング孔の報告書で設定されている声問層／稚内層の境界は GR マーカーの B2 から C2 付近であり，GR マーカーと若干斜交する。声問層／稚内層の境界は地層が固くなる岩相境界で設定されており，珪藻シリカの Opal-A 帯から Opal-CT 帯への鉱物相変移の境界にはほぼ一致するが，必ずしも同時代面ではない。

HDB-7 孔の孔底付近のマーカー A1 と，他ボーリング孔の最浅部の A1 との対比についてはオーバーラップする区間がなく，珪藻化石分帯が異なるので対比に若干疑問がある。その他のマーカーについては概ね GR 検層のパターンが良く似ており対比は信頼できると判断している。

表 2.2-1 幌延地域ボーリング孔のマーカ深度

Marker Name	他の呼称	Age	HDB-1	HDB-2	HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-7	HDB-8	MITI Tenpoku	KitaKawaguchi SK-1
		(Ma)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Koitoi Top		2.6							365			23
D-1			50		41							
A-1		3.5	94		80				485		74	336
D-009			120		114						116	365
S1			151		147						155	
A-009		3.8	150		146						140	385
D-008		3.9	180		178			10		6	222	415
S2			205		203	47		42		26	253	448
C-1		4.0	208		207	54		45		29	256	452
S2.5			226		226	71		63		48	274	481
S3		4.2	243		248	87		86		65	293	506
S3.1			255		258	95		95		71		514
D-2			260		263	102	10	101		75	305	521
S3.2			272		278	112		117		87	352	532
S3.3			295		305	132		145		106	385	547
B-2			316		328	150	39	168		121	400	562
S4			317		334	152	43	169		122	402	564
S4.1			335		347	165	50	189		125	412	585
A-2	PK	5.0	352		364	179	65	206		145	426	593
T-2	-2		379		398	199	89	229		165	438	611
B-3	GR1		383		402	202	94	233		168	446	619
T-1	-1		391		408	208	96	247		177	453	624
C-2	LB	5.2	398	26	423	216	108	261		182	459	631
T0	0		404		429	223	111	270		187	466	
T1	1		417		441	233	122	282		197	472	650
S5			420		448	237	126	285		200	477	
T2	2		423		452	241	130	289		203	482	
T3	3		435		464	249	140	304		213	490	663
T4	4		448		479	264	152	316		222	501	676
T5	5		458	68	492	273	162	328		232	510	686
T6	6	5.5	472	81	505	281	173	340		240	515	689
T7	7		481	86		296	184	353		249	532	699
T8	8			91		305	197	360		256	541	
T9	9		495	96		313	202	368		266	547	
T10	10		508	102		322	208	381		275	561	715
T11	11		515	105		332	218	391		284		723
D-3	YL	5.8	523	114		342	224	396		292	577	740
T12	12		526	114		345	227	400		295	582	744
T12.5			541	128		355	237	416		307		753
T13	13		545	134		363	245	422		312		
T14	14	6.3	555	144		369	251	430		321	603	759
T14.5			563	151		384	268	440		333		766
T15	15		574	156		391	272	445		344	622	773
T16	16		590	170		415	297	465		355	642	784
T17	17		599	182		429	310	479		367	656	793
T18	18		614	193		440	324	494		379	673	811
B-4	GR2	7.5	623	202		448	335	504		388	681	820
T19	19		630	206		460	345				688	
S7			638	212		464	352	520		403	696	826
T21	21		650	233		479	366	535		419	708	834
T22	22		659	242		487	380	545		429	721	840
T23	23		667	249			389	553		450	738	845
T24	24		686	267		509	405	564		461	754	850
D-4		8.2	697	274		527	409	584		469	772	858
C-3				314			447				810	875
S8		9.0		317			455				822	884
T25				397							897	922
D-5				450							957	975
T26				472							977	1016
C-4		10.5		493							1000	1031
A-4				520							1027	1047
D-6				540							1045	1064
A-5		11.5		569							1089	1075
T27		12.0		630							1210	1121
Masuporo Top		12.5		683							1271	1194
Wakkanai Top			321	57	382	128	69	266		116	248	581
Onishibetsu											2247	1904
Haboro Top											2968	2800
Hakobuchi											3625	3030
U.Ezo											4553	3782

Ageは地質モデル用に設定した年代

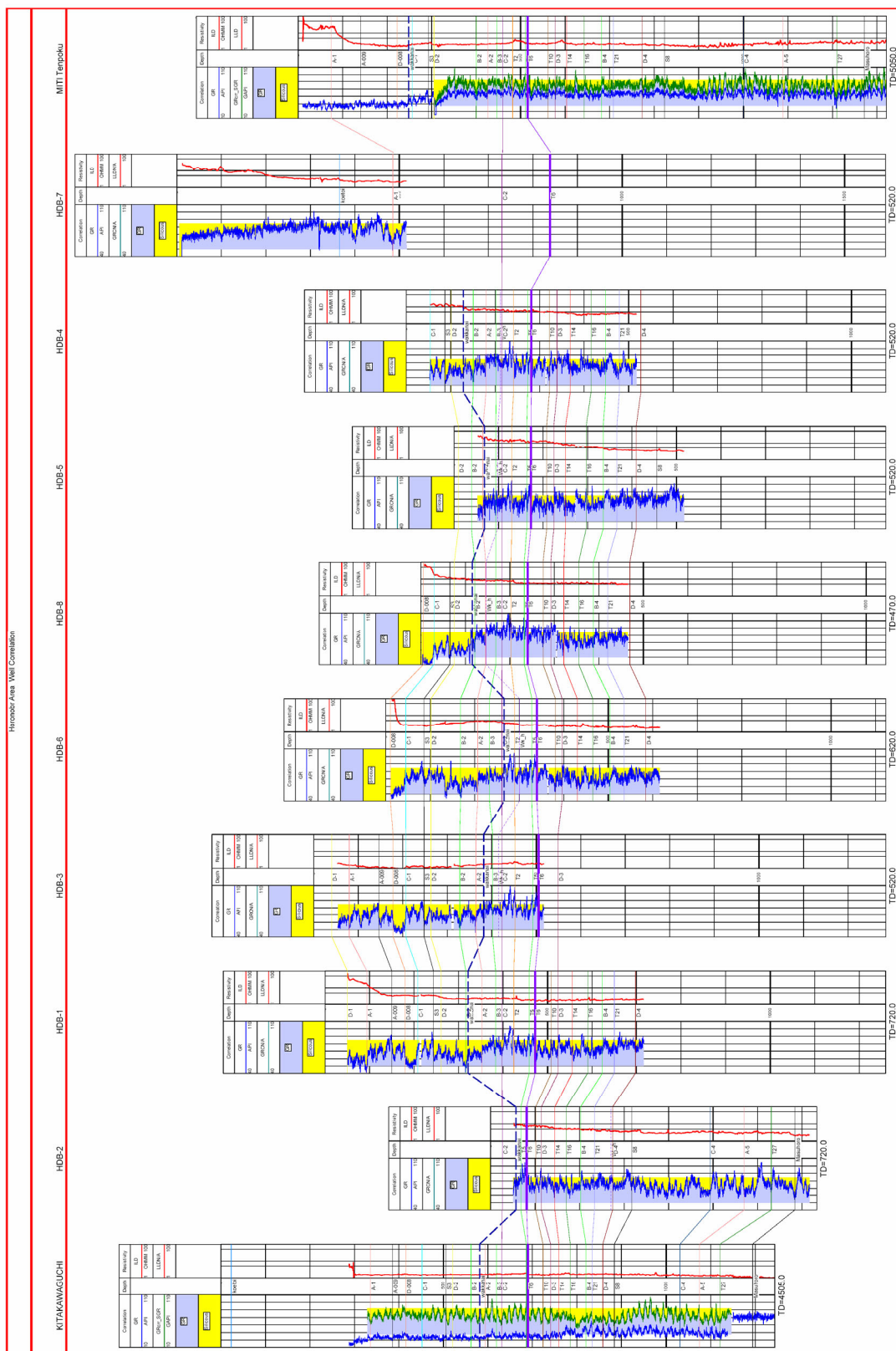


図 2.2-1 GR ログを用いた幌延地域のボーリング孔のマーカ対比
 マーカーC2で水平にした。破線は各ボーリングの報告書における声間層／稚内層の境界

GR 検層で測定される地層の自然 γ 線強度（以下 GR 値という）の絶対値はボーリング孔の孔径や泥水比重，測定器の孔壁への密着の度合いに影響され，孔径が大きいほど，泥水比重が大きい程，孔壁への密着度が低い程 GR 測定値が小さくなる。表 2.2-2 に各ボーリング孔での測定条件と GR 値の特徴をまとめた。MITI 天北と北川口 SK-1 の GR 値は HDB-1～8 孔に比べて低くなっているが，これは測定条件の差，特に孔径の差である。

表 2.2-2 幌延地域のボーリング孔の GR 検層の測定条件と GR 値

孔井名		測定深度(m)	ビット径	泥水	GR値の特徴
HDB-1	1次	50-213	6.25 inch	清水	やや低い 坑径拡大
HDB-1	2次	215-718	6.25 inch	清水・ベントナイト	標準
HDB-2 から HDB-8			6.25 inch	ベントナイト	標準
MITI天北	1次	0-314	17.5 inch	ベントナイト	低い
	2次	311-1327	17.5 inch	K-Cl	標準
北川口SK-1	1次	299-1148	17.5 inch	ベントナイト	低
	2次	1143-2166	17.5 inch	K-リグネート	標準

そこで自然 γ 線(以下 GR という)を用いた対比では GR の絶対値だけでなく GR カーブの形態を重視した。孔径が拡大している箇所についてはキャリパー径と泥水比重を用いて GR 値の環境補正を行った。(図 2.4-6～図 2.4-14 で示す GRC は環境補正後の GR 値である) HDB-1～8 孔ではほぼ同じ条件で検層されているので原則 GR の絶対値を用いたが，6.5inch のビット径に対し孔径が拡大している箇所では GRC も併せ対比した。

MITI 天北の一次検層 (0～313m) は 17.5 inch 孔で測定されており GR 値が低いですがキャリパー測定がないので環境補正を行っていない。MITI 天北の二次検層(311～1327m)も同じく 17.5 inch 孔であるが，KCl ポリマー泥水を用いており，KCl ポリマー泥水の主成分であるカリウムは GR を放出するので GR 値が一次検層に比べ高い。北川口 SK-1 の二次検層 (299m～1148m) は K-リグネート泥水を用いているためカリウムの影響により GR 値が高い。

2. 3 稚内層・声問層の年代

堆積モデルの入力パラメータに用いるために，微化石分析結果を用いて声問層・稚内層中に設定したマーカーの年代を決定した。幌延のボーリング孔での珪藻化石分析の要約を図 2.3-1 に示す。

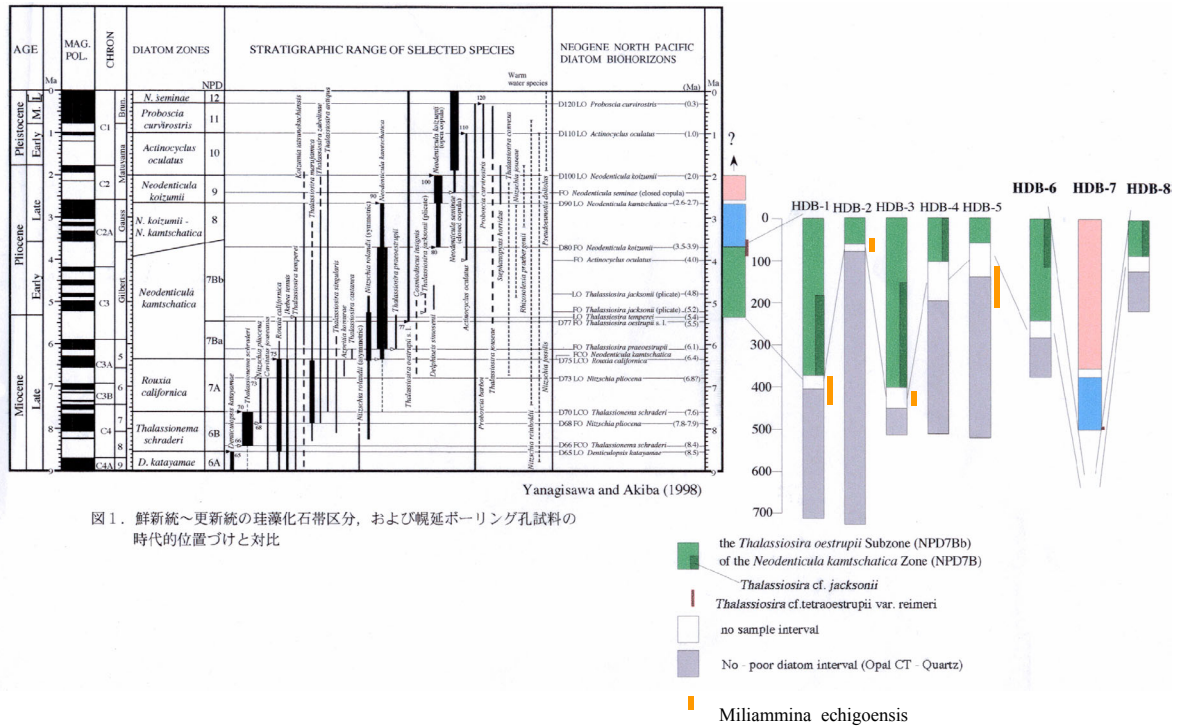


図1. 鮮新統～更新統の珪藻化石帯区分、および幌延ボーリング孔試料の時代的位置づけと対比

図 2. 3-1 鮮新統～更新統の珪藻化石帯区分と幌延ボーリング孔の対比

マーカーの年代の決定には以下の手順を用いた。

- ① HDB-7 孔の勇知層: 珪藻化石分帯の NPD-9(*Neodenticula koizumii* Zone, 2.0Ma ~ 2.6/2.7Ma)であるので地表を 2.0Ma, 勇知層 Base を 2.6Ma とした。
- ② HDB-7 孔の声問層: NPD-8 (*N. koizumii*-*N. kamtschatica* Zone, 2.6/2.7Ma ~ 3.5/3.9Ma)であるので声問層 Top を 2.6Ma, 下限=マーカーA1 を 3.5Ma とした。
- ③ HDB-1~6 孔と HDB-8 孔の声問層: NPD-7Bb (3.5/3.9Ma~5.5Ma) であり, 下部では *Thalassiosira cf. jacksonii*(4.8-5.4Ma)を産するが NPD-7Ba (5.5Ma~6.4Ma) まで達していないので, 声問層下限=稚内層上限=マーカーC2 を 5.2Ma とした。
- ④ 底生有孔虫の *Miliammina echigoensis* の出現 (産出下限) を 5.5Ma とした。稚内層上部のマーカーA2 付近がこれにあたる。花方ほか(2001)では新潟・秋田での *Miliammina echigoensis* の出現を中新世と鮮新世の境界に対比しその年代を 5.2Ma とした。より高緯度の幌延地域に適用できるか否かについては検討されていないが, ここでは示準化石となると考え, 珪藻年代を優先させて 5.5Ma の年代を割り当てた。
- ⑤ 稚内層ベース: 昨年度のスタディ(地科研 2004)を踏襲し, 珪藻化石から 8.5Ma ~ 12.5Ma とされる羽幌堆積盆の金駒内層を幌延地域の稚内層に対比し, 稚内層の

Base を 12.5Ma とした。

- ⑥ その他の各マーカーには上記の年代を基準とし、Haq et. al (1987)の sea level curve を用い、海水準が高い時期は砕屑物の供給が減り珪藻遺骸の堆積が卓越するので GR が低く、海水準が低い時期に砕屑物・泥質堆積物が増すので GR ログが高いとの仮定を設けて、堆積速度がほぼ一定となるように年代を割り振った。

幌延地域の孔井マーカーの年代と堆積速度を表 2.3-1 と図 2.3-2 に示す。

表 2.3-1 幌延地域のボーリング孔マーカーの年代と堆積速度

Marker	Age (Ma)	Thickness (m)	Sedimentation Ratio (m/Million year)	GR	Marker Depth (m)		
					HDB-7	HDB-1	HDB-2
Yuuchi surface	2	0			0		
Koetoi Top	2.6	360	600	sand	360		
A1	3.5	500	156	low	500	80	
A009	3.8	566	220	high		146	
D008	3.9	600	340	middle		180	
C1	4	627	270	low		207	
S3	4.2	668	205	high		248	
A2 (PK)	5	784	145	low		364	
C2 (LB)	5.2	843	295	high		423	
≈Wakkanai Top							
T6	5.5	925	273	high		505	
D3 (YL)	5.8	943	60	low		523	
T14	6.3	975	64	high		555	
B4 (GR2)	7.5	1043	57	low		623	
D4	8.2	1117	106	high		697	274
S8	9	1160	54	high			317
C-4	10.5	1315	103	low			472
A5	11.5	1413	98	low			570
T27	12	1473	120	high			630
Masuporo Top	12.5	1526	106	low			683

太字は珪藻化石に基づく年代

Thickness は HDB-7, HDB-1, HDB-2 の各ボーリング孔をつなぎ合わせて算出した。

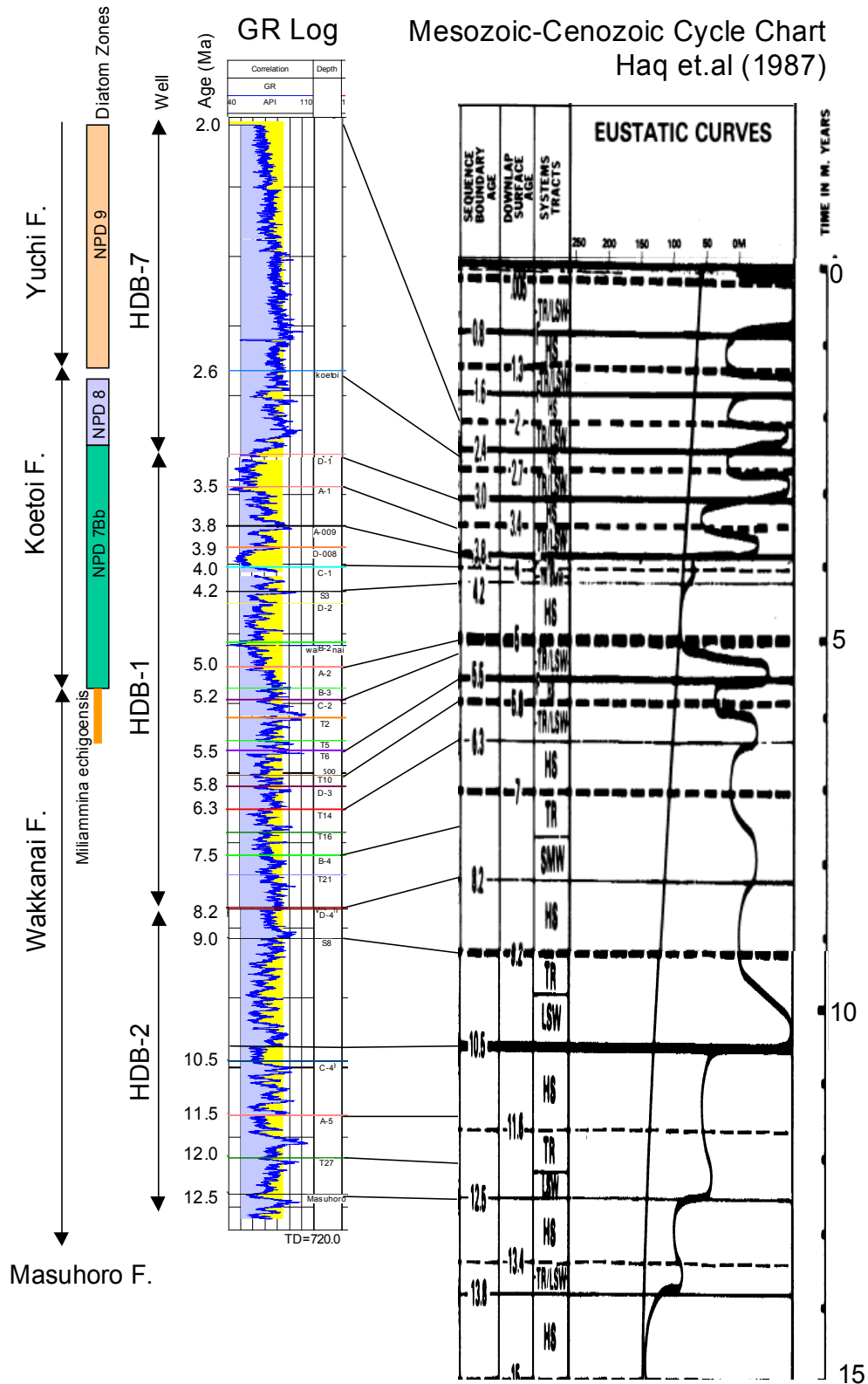


図 2.3-2 幌延地域の声問層・稚内層の年代 GR ログとユースタシー曲線の対比
GR ログは HDB-7, 1, 2 孔のログをつなぎあわせた。

昨年度のスタディ（増井ほか 2004）では羽幌堆積盆の金駒内層と遠別層をそれぞれ幌延地域の稚内層と声問層に対比し、稚内層の年代を 12.5～8.5Ma に、声問層の年代を 8.5Ma 以降としていた。今年度のスタディーの結果では、幌延地域のボーリング孔の声問層の最下部より産出した珪藻化石が NPD7Bb で地層の年代が 5.5Ma より若いことが明らかになった。また稚内層上部の地層からは *Miliammina echigoensis* を産し地層の年代は 5.2Ma 前後と推定された。よって幌延地域の稚内層の上部は 5.5Ma より新しく、羽幌地域に分布する遠別層の下部と同時異相と解釈される。

2. 4 検層による間隙率の決定

2. 4. 1 検層解析パラメータの決定

音波（Sonic）、密度（Density）、中性子（Neutron）の各間隙率検層をコア試験による間隙率と比較し、それぞれの検層解析パラメータを決定した。実際には物理検層深度とコアの深度との間に最大で 1m 前後の差があるが、両者の正確な深度合わせは困難なので、比較に際して、検層深度はコア深度と等しいとし、多くのサンプルを比較することにより深度誤差の影響を少なくするように努めた。

(1) 音波（Sonic）検層

図 2.4-1 に音波（Sonic）検層の区間速度 $dT(\mu \text{ sec/f})$ とコア間隙率とのクロスプロットを示す。HDB-7 孔の勇知層砂岩を除いた残りの声問層、稚内層の泥岩で区間速度 dT 、および音波速度 V_p とコア間隙率の間に明瞭な相関が認められた。

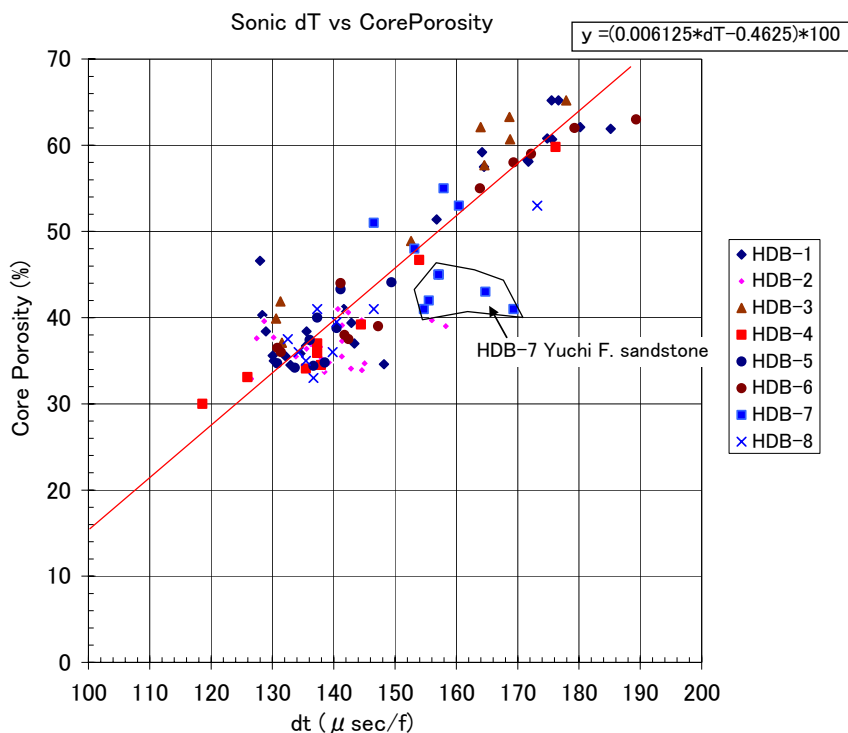


図 2.4-1 音波検層で得られた区間速度 dT とコア間隙率の関係

区間速度(dT)とコア間隙率を一次式で近似し、区間速度から音波検層による間隙率(ϕ sonic)を求める式を導出した。

$$\phi \text{ sonic} = 0.0062125 \times \text{dTlog} - 0.4625 \quad (2.1)$$

ϕ sonic = sonic derived porosity

dTlog = interval transit time of formation (μ sec/foot)

また dT の逆数である音波速度 (弾性波速度) V_p とコア間隙率との関係を図 2.4-2 に示す。上記の式を V_p に適用すると以下のようなになる。

$$\phi \text{ sonic} = 1.8669 / V_p - 0.4625 \quad (2.2)$$

V_p : Velocity (km/sec)

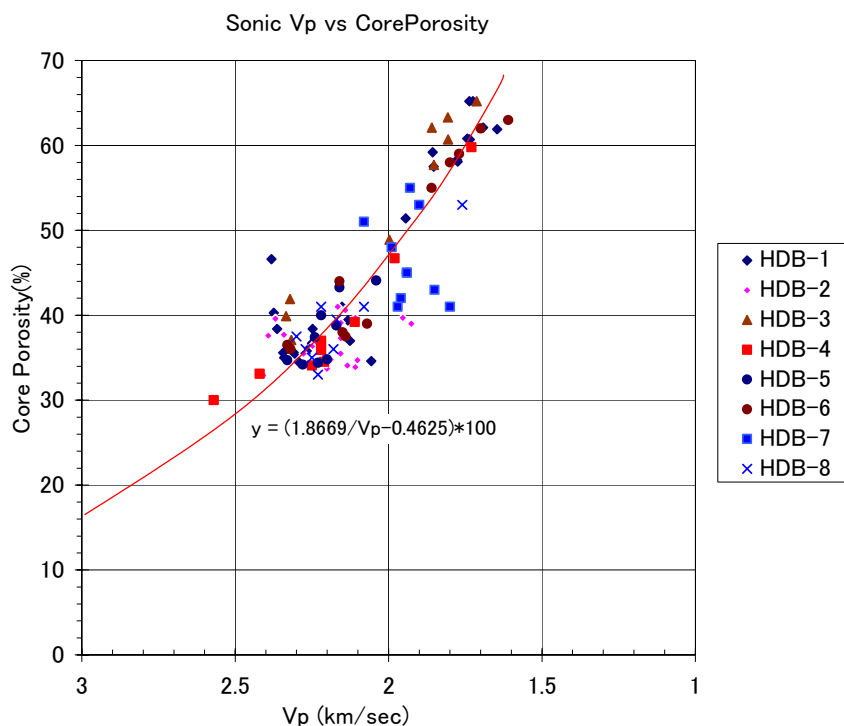


図 2.4-2 音波検層より求めた音波速度 V_p とコア間隙率の関係

(2) 密度 (Density) 検層

図 2.4-3 に幌延での Density 検層による地層密度 ρ_b とコア試験による間隙率の関係を示す。HDB-1 孔の 350m 以浅ではコアの間隙率が 58-66% の範囲に、また地層密度が 1.7~1.9 の範囲にあり、他のデータとは外れた所にプロットされるが、ここはボーリング孔の孔径が 8inch 以上に拡大して孔壁が凸凹している為に密度検層の精度が落ちたためと判断され、解析から除外した。

一般に密度検層からは以下の式で間隙率が求められる。

$$\phi \text{ density} = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_f) \quad (2.3)$$

ϕ density = density derived porosity

ρ_{ma} = matrix density

ρ_b = formation bulk density

ρf = fluid density

図 2.4-3 から幌延地域泥岩の密度検層解析パラメータとして

$\rho_{ma}=2.55, \rho f=1.0,$

$\phi \text{ density} = (2.55 - \rho b) / (2.55 - 1.0)$ と決定した。

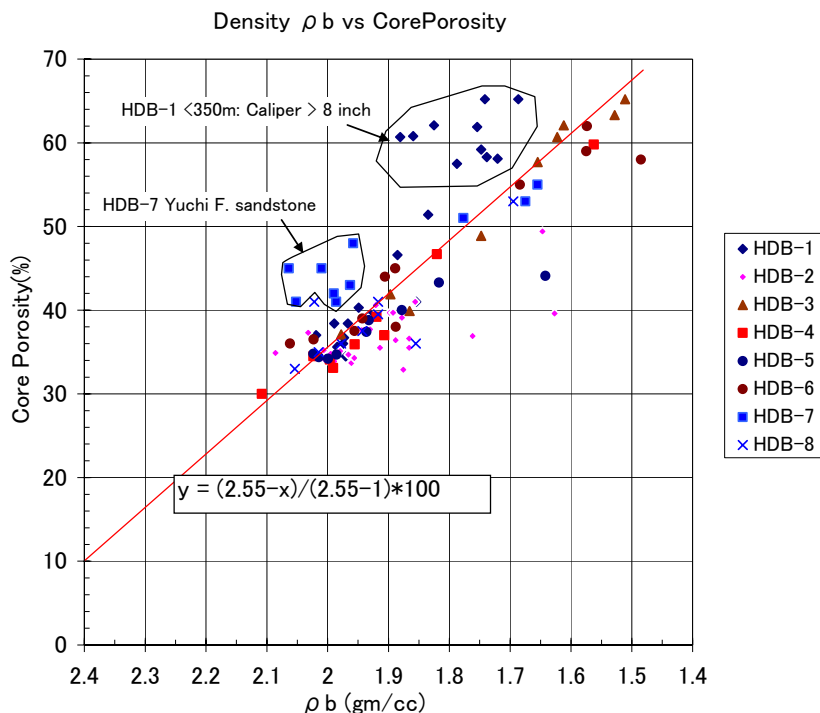


図 2.4-3 密度検層で測定された地層密度 ρb とコア間隙率の関係

(3) 中性子 (Neutron) 検層

図 2.4-4 に中性子検層で測定された間隙率 (Neutron Porosity ; PHIN) とコア試験による間隙率の関係を示す。コア試験結果と比べると HDB-3, 4, 5 孔では HDB-1, 2, 6, 8 孔に比べ PHIN 値が小さい。中性子検層の測定値はボーリング孔によりばらつきがあって測定環境に違いがある可能性があるが、各検層それぞれの測定環境の検討し補正することは困難であった。そこで全ての中性子検層について単一の式で PhiN からコア間隙率を近似することとし、図 2.4-4 から以下の式を用いることとした。

$$\phi \text{ neutron} = \text{PHIN} - 6 \tag{2.4}$$

PHIN: 測定された中性子間隙率(%)

$\phi \text{ neutron}$: コア間隙率を用いて補正後の中性子間隙率(%)

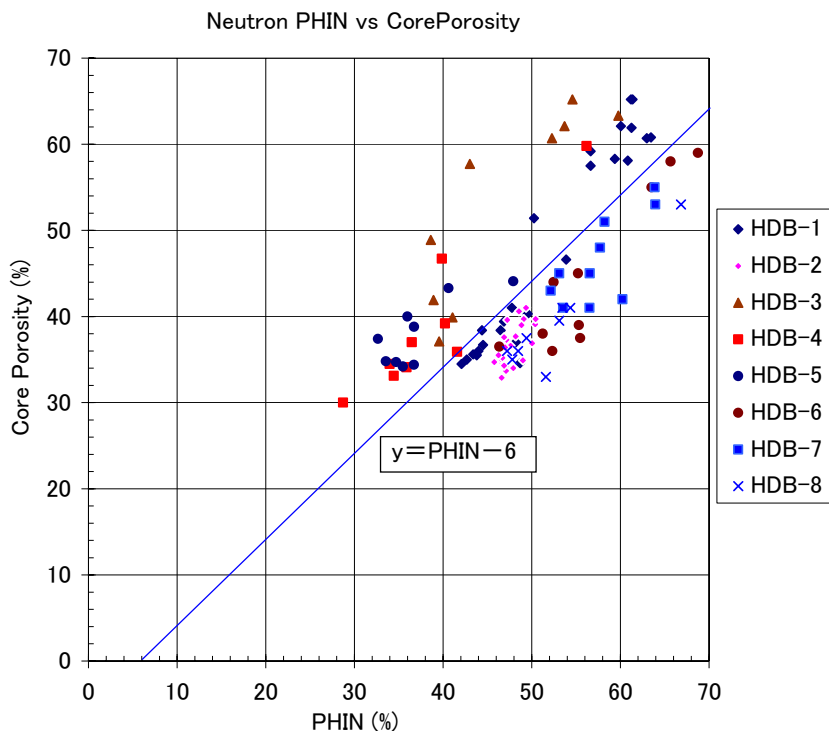


図 2.4-4 中性子検層で測定された間隙率 PHIN とコア間隙率の関係

2. 4. 2 間隙率の推定

上述の検層解析パラメータを用いて HDB-1～HDB-8 の各ボーリング孔の ϕ sonic, ϕ density, ϕ neutron ログを作成しコア試験結果と対比した。HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔の ϕ neutron はコア間隙率や ϕ sonic, ϕ density に比べ小さい。中性子検層はボーリング孔によるばらつきがあると判断し、間隙率の推定には ϕ neutron を採用せず、 ϕ sonic と ϕ density を用いた。

密度検層は孔壁が凸凹していると正しく測定されない。HDB-1 孔の 110m 以浅では本来 6.5 inch であった孔径が 11～15 inch に拡大しており密度検層値がスキップしている。一方音波検層は中性子検層や密度検層に比べて孔径の大きさや荒れ（凸凹）の影響を受けにくい。そこで孔径が安定している箇所では間隙率として ϕ sonic と ϕ density の平均を用い、キャリパー検層で孔径が 8 inch 以上に拡大している箇所では ϕ sonic のみを用いて検層解析間隙率 PhiA を計算した。

$$\text{PhiA} = (\phi \text{ sonic} + \phi \text{ density}) / 2 \quad (2.5)$$

$$\text{If Caliper} > 8 \text{ inch then PhiA} = \phi \text{ sonic}$$

図 2.4-5～図 2.4-14 に各ボーリング孔の検層解析結果を示す。検層解析による間隙率 (PhiA) はコア試験による間隙率 (Core_Por) と良く一致している。

2. 5 泥質分含有率 (Vsh) の決定

地層中に含まれる泥質分含有率 Vsh の決定は昨年度の研究（増井ほか 2004）の手

法に従った。すなわち

- ① 泥質岩が泥質分(Vsh)・珪藻 (Opal-A, fracD)・Opal-CT+石英・間隙(PhiA)の 4 成分から構成されるモデルを採用した。
- ② 泥質分の主体をなす粘土鉱物の主要化学成分である Al₂O₃の量と、物理検層の GR 値とは相関しているため、泥質分含有率(Vsh)の決定には物理検層の GR の値を使用した。Al₂O₃が 0%に対応する GR 値を 30API、泥質分 100%の泥岩の Al₂O₃値 16～18%に対応する GR 値を 105API とした (増井ほか 2004)。

$$Vsh = (GR - GR_{cln}) / (GR_{sh} - GR_{cln}) \quad (2.6)$$

Vsh: Volume of shale, 泥質分含有率

GR_{cln} = 30 API (シリカ 100%)

GR_{sh} = 105 API (泥質分 100%)

孔径が拡大している箇所ではキャリパー径と泥水比重を用いて環境補正した GR 値 (GRC) を用いた。MITI 天北と北川口 SK-1 では前述のようにキャリパー径が 17.5 inch と大きくかつ KCl を主体とする高 GR 泥水を用いて掘削している為に GR 値を HDB ボーリング孔と定量的に比較するのが難しい。そのため MITI 天北と北川口 SK-1 の Vsh 値の精度は HDB ボーリング孔のそれらより低い。各ボーリング孔の GR 値, GRC 値と Vsh の解析結果を図 2.4-5～図 2.4-14 に示した。

珪藻シリカ (Opal-A) とその他のシリカ (Opal-CT+石英) の量比 fracD を昨年度の研究 (増井ほか 2004) の手法に従い密度検層, 中性子検層, GR 値を用い以下の式で求めた。

$$fracD = (CF - CF_{(Min)}) / (CF_{(Max)} - CF_{(Min)}) \quad (2.7)$$

Al₂O₃ 量比 = (0.2187 × GR) - 6.56

CF = ρ b / (1 - (PHIN/100))

CF(Max) = (Al₂O₃ 量比 + 48.107) / 10.933

CF(Min) = (Al₂O₃ 量比 + 27.661) / 10.933

Opal-A 量比 fracD の解析結果を図 2.4-5～図 2.4-14 に示した。fracD はボーリング孔で設定された稚内層上限 (ほぼ Opal-A 帯の下限に相当する) より浅い深度で大きいボーリング孔により量がかなり変わる。横方向での fracD の変化が大きい原因を前述した中性子検層値のボーリング孔によるばらつきと考え、fracD の定量値は誤差が大きいと判断し、参考にとどめ、2.6 の地質モデルには用いていない。

Well HDB-1
 Well ID H-1
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

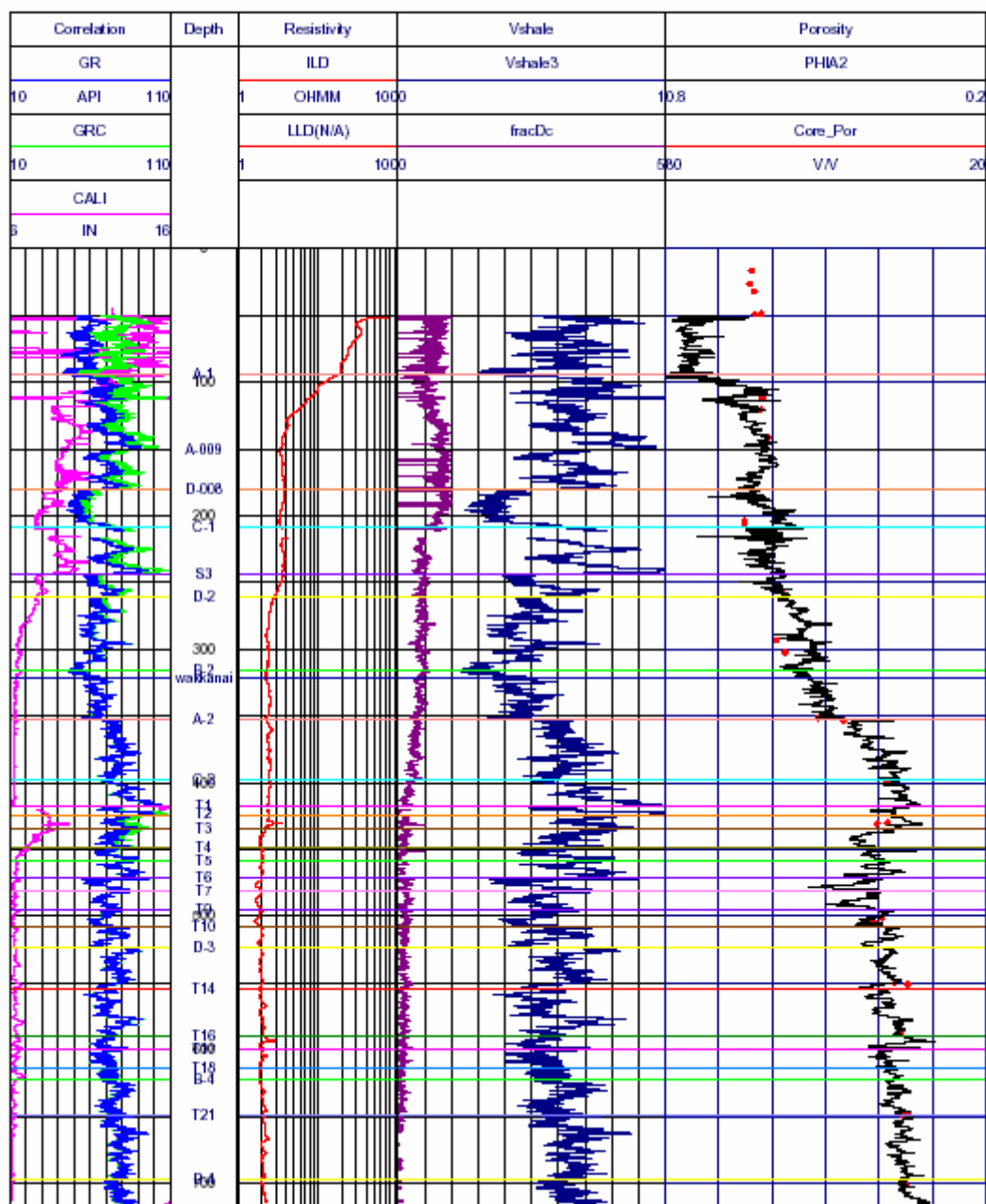


図 2.4-5 HDB-1 孔検層解析結果, マーカー深度

PHIA2 (黒線) : 検層解析による間隙率 Core_Por (赤丸) : コア試験による間隙率
 Vshale3 (青線) : 泥質分含有率 fracDc: Opal-A 量比 GR(青線) : GR 検層 (API unit) GRC(緑線) : 環境補正した GR (API) CALI: キャリパー径 (inch) ILD: 比抵抗 (ohmm)

Well HDB-2
 Well ID H-2
 Field Horonobe
 Country
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

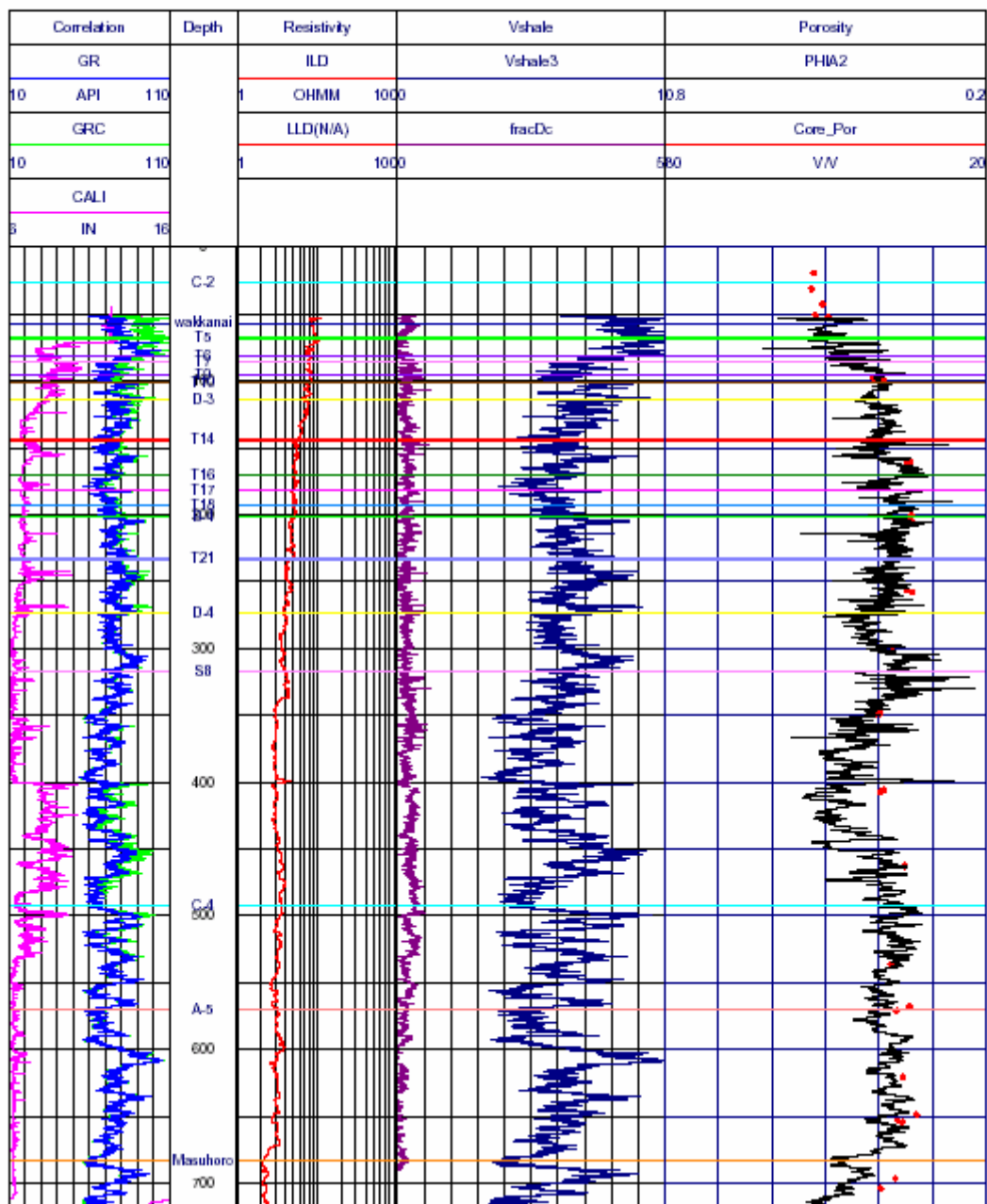


図 2. 4-6 HDB-2 孔検層解析結果

Well HDB-3
 Well ID H-3
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

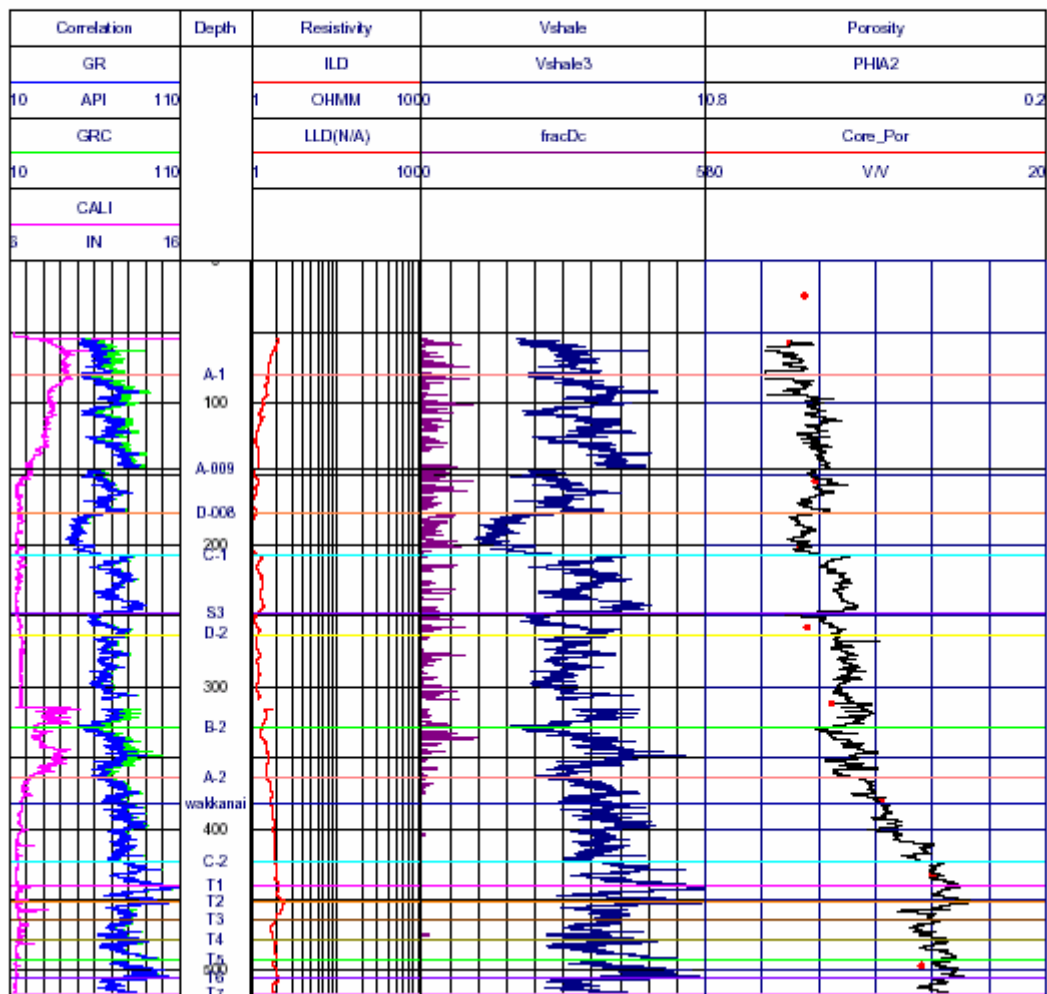


图 2.4-7 HDB-3 孔檢層解析結果

Well HDB-4
 Well ID H-4
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

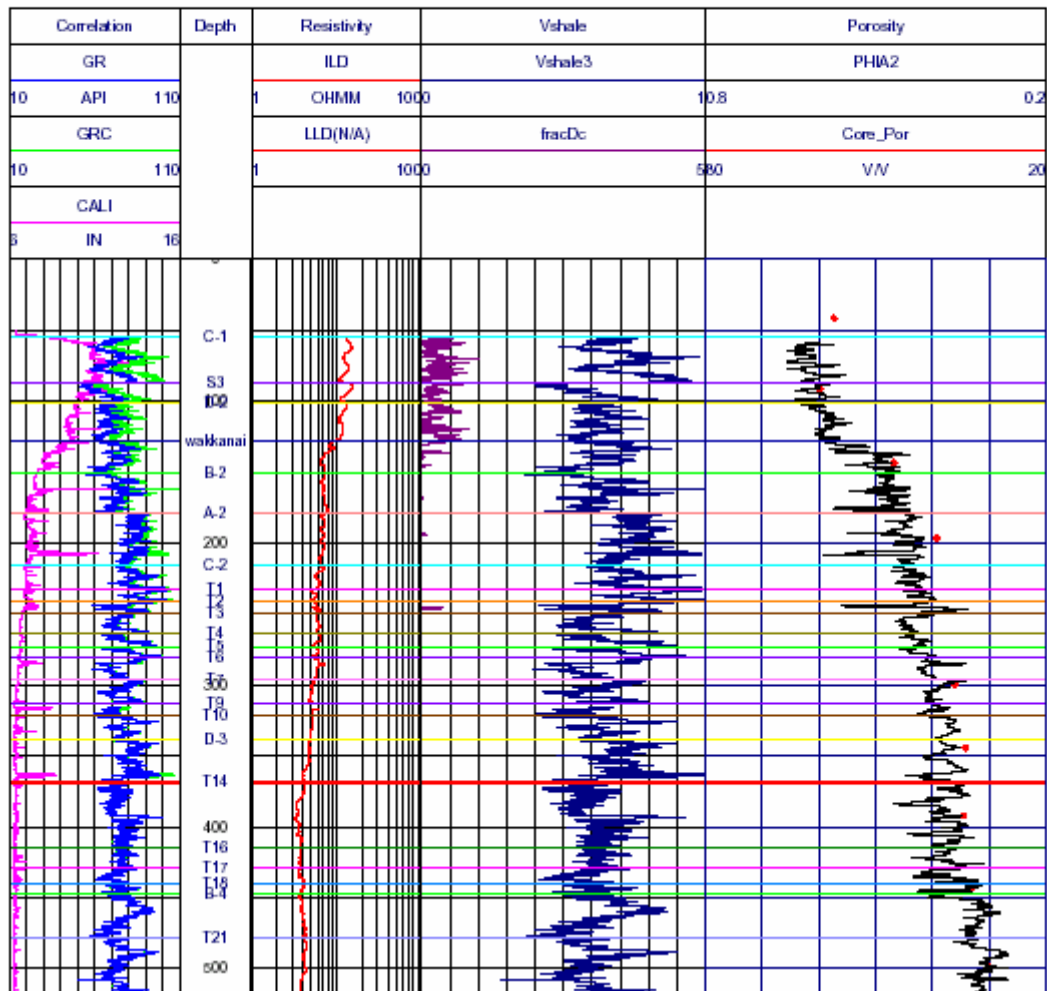


図 2. 4-8 HDB-4 孔検層解析結果

Well HDB-5
 Well ID H-5
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

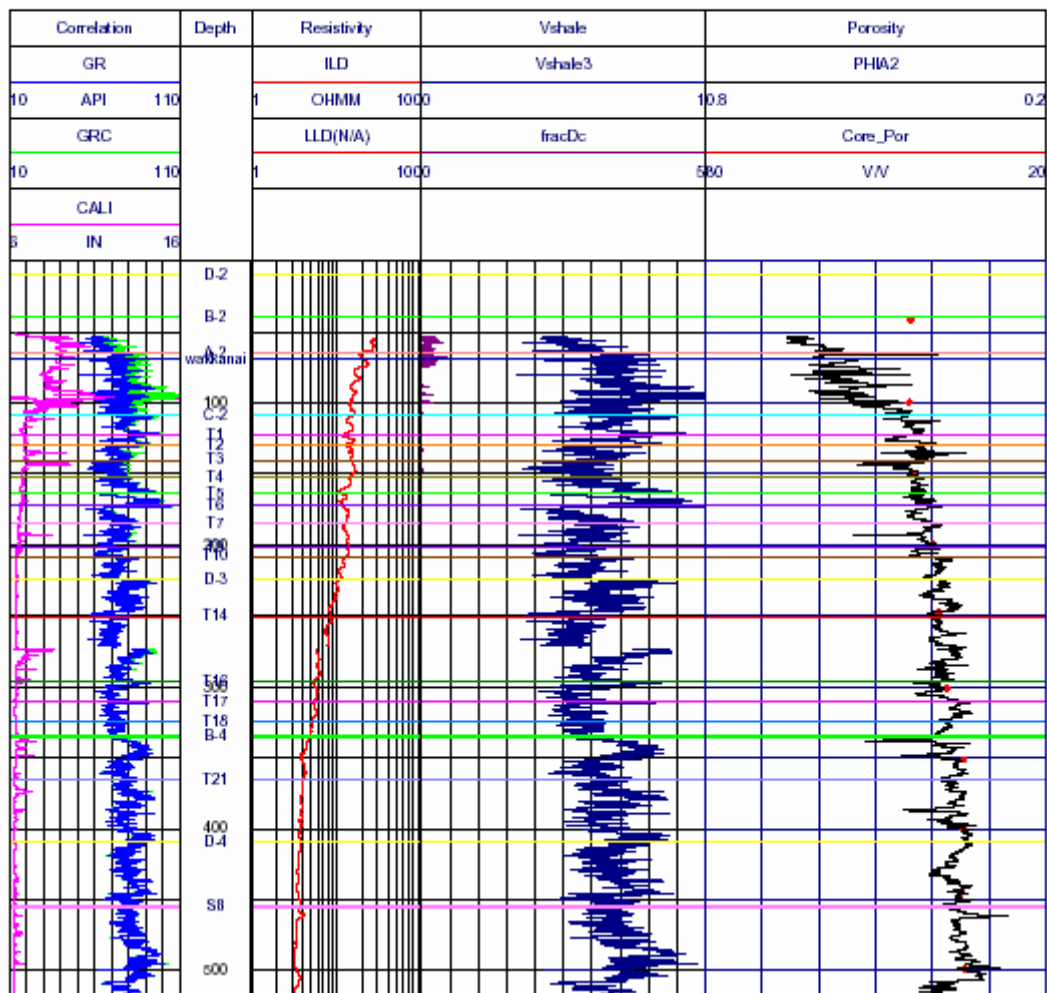


図 2.4-9 HDB-5 孔検層解析結果

Well HDB-6
 Well ID H-6
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

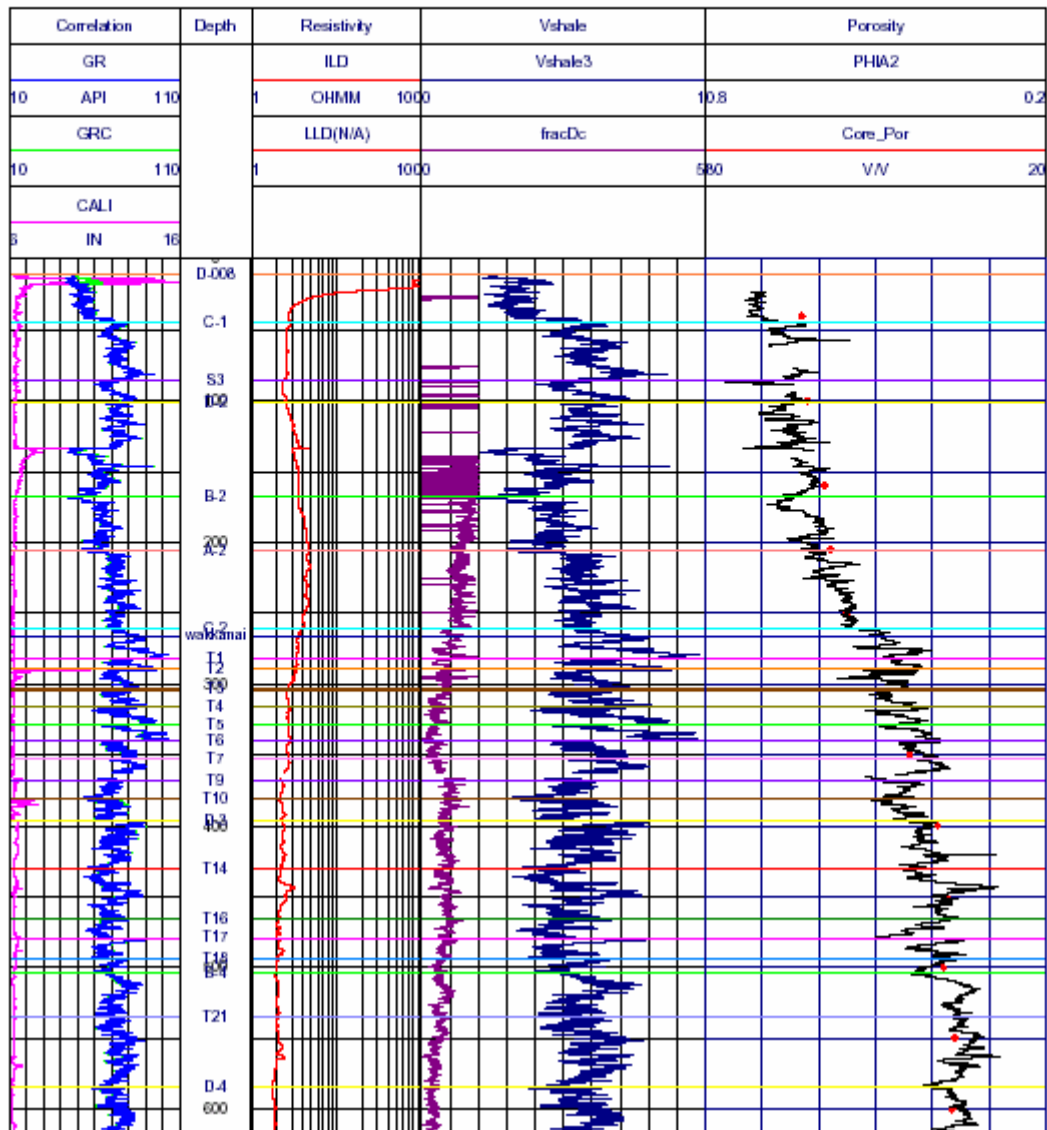


图 2.4-10 HDB-6 孔檢層解析結果

Well HDB-7
 Well ID H-7
 Field Horonobe
 County
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

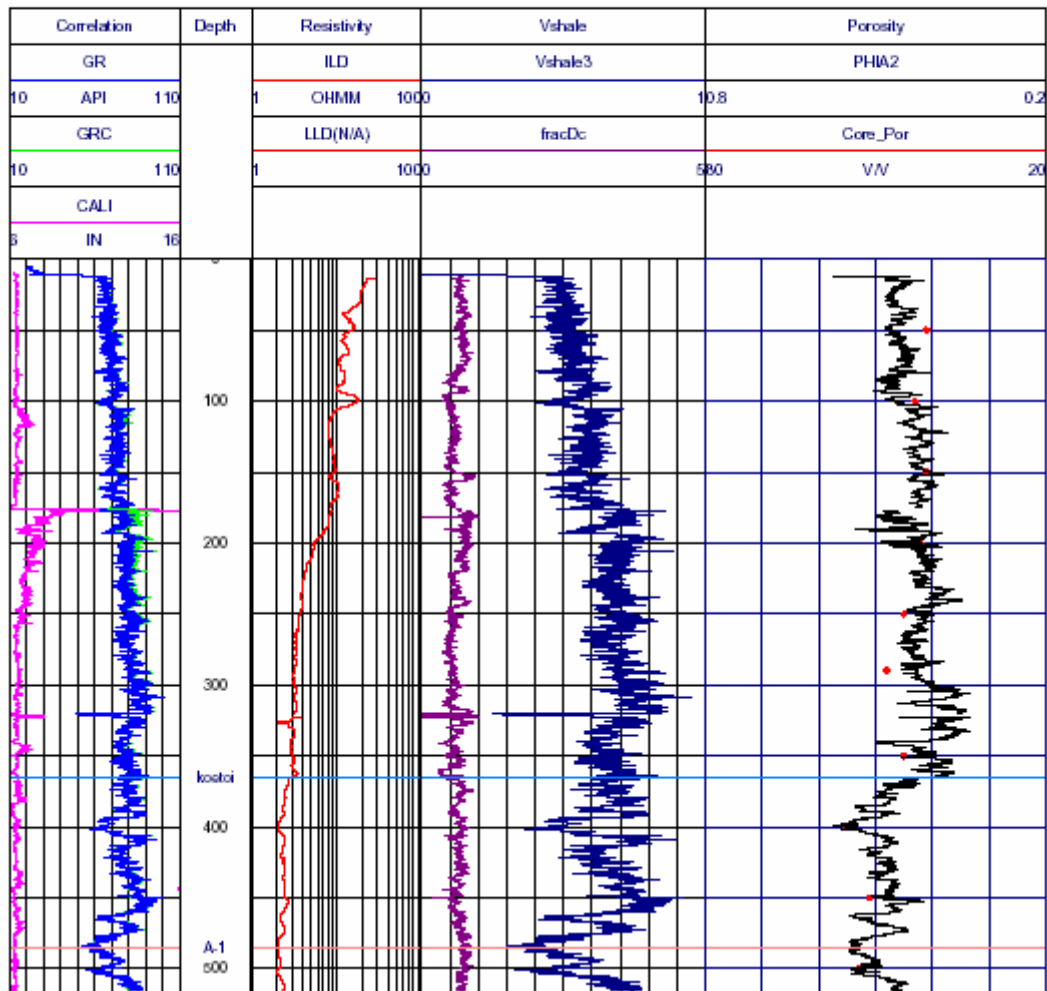


図 2.4-11 HDB-7 孔検層解析結果

Well HDB-8
 Well ID H-8
 Field Horonobe
 Country
 State/Province Hokkaido
 Country Japan

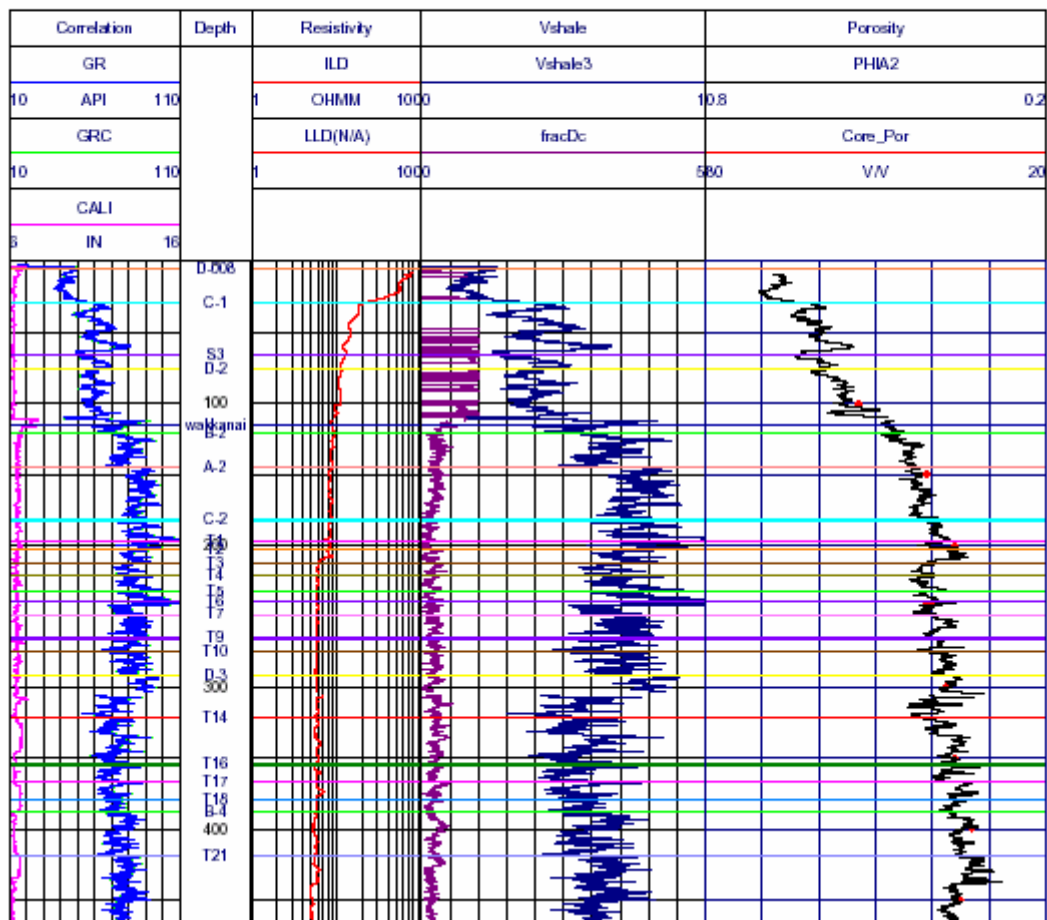


图 2.4-12 HDB-8 孔検層解析結果

Well MITI Tenpoku TENPO
 Well ID 2141452041
 Field TENPOKU
 County 1625-DE
 State/Province JAPAN
 Country

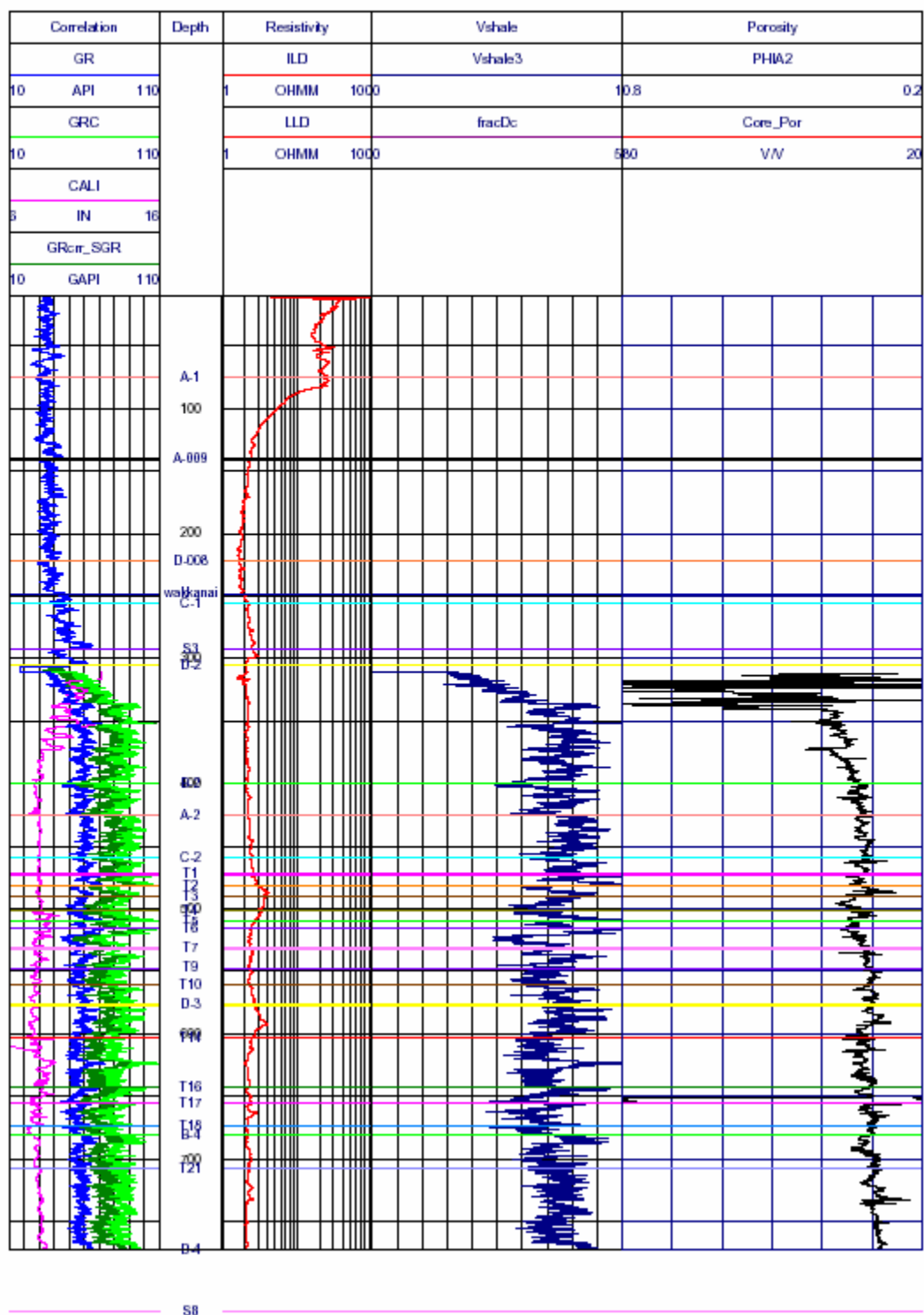


図 2.4-13 MITI 天北 検層解析結果

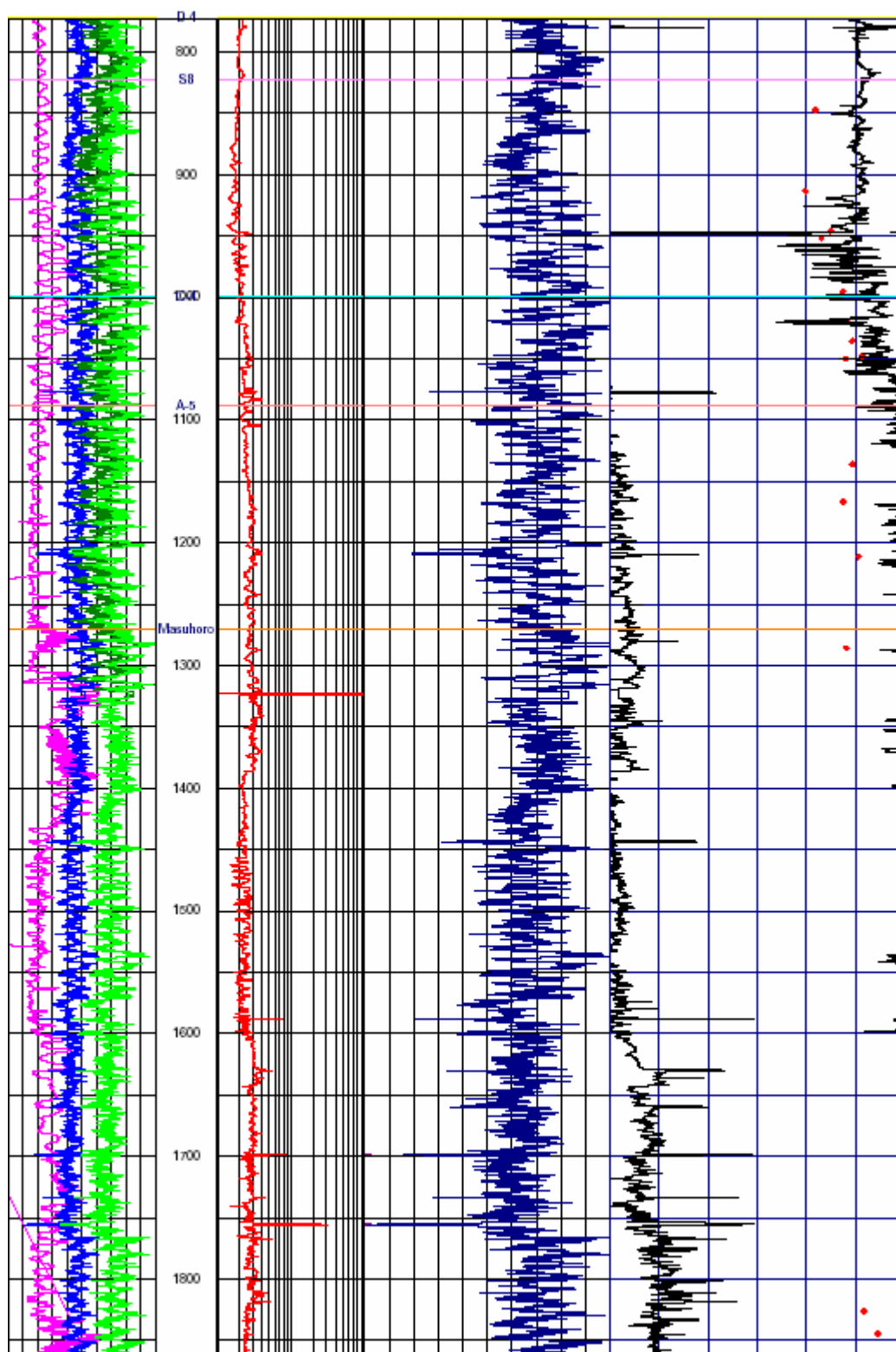


図 2.4-13 MITI 天北 検層解析結果 つづき

Well KITAKAWAGUCHI SK-1
 Well ID 2141448561
 Field <Field>
 County
 State/Province <Province>
 Country

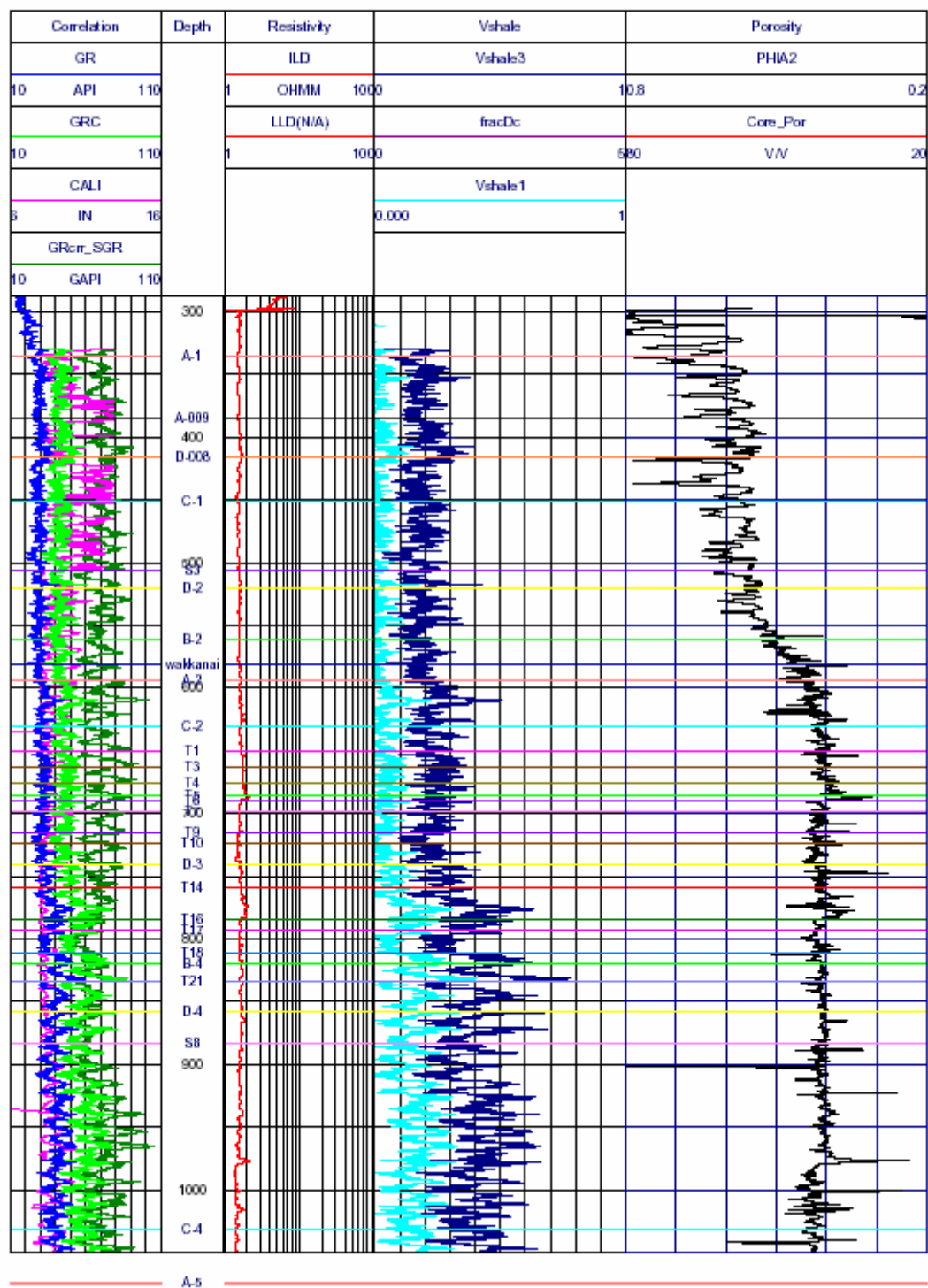


図 2.4-14 北川口 SK-1 検層解析結果

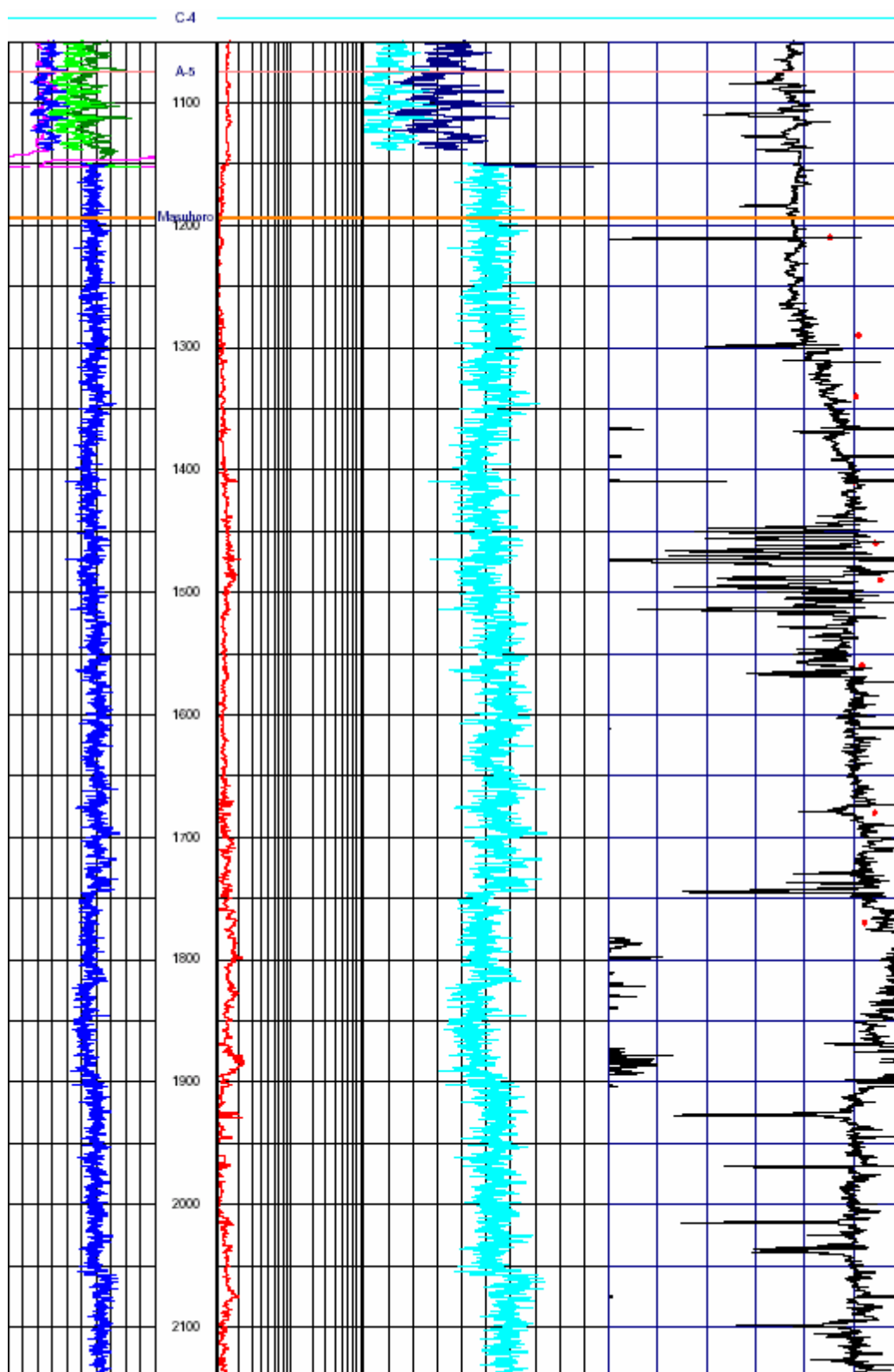


図 2.4-14 北川口 SK-1 検層解析結果 つづき

2. 6 地質モデルの作成

以上の検層解析結果を用いて幌延地域の地質モデルを作成した。珪藻(Opal-A)とオパール CT+石英とを区別せずにあわせてシリカ(Silica)とし、珪質泥岩がシリカ(Silica)と泥質分 (Clay, Vsh), 間隙率(PhiA)の3成分からなるモデルを採用した。図 2.6-1 に結果を示す。

2. 3節で年代を決定したマーカーで声問層・稚内層と 15 の堆積レイヤーに区分し、PhiA と Vsh を相加平均して6章で述べるテストランの入力値とした。表 2.6-1 に各ボーリング孔の各レイヤーの層厚を、表 2.6-2 に各レイヤーの検層解析間隙率PhiA と泥質分含有率 Vsh の平均値を示す。

表 2.6-1 声問層・稚内層の主要マーカー深度と各レイヤーの層厚

	HDB-1	HDB-2	HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-7	HDB-8	Kitakawag uchi_SK1	MITI Tenpoku
GL(m)	69.1	42.5	58.2	63.6	78.8	60.2	43.8	70.1	21.7	41.7
マーカー名	主要マーカー深度(from GL, m)									
koetoi								365.4		23.0
A-1	93.7		79.6					485.0		335.7
A-009	150.0		146.0							385.1
D-008	180.0		178.0			10.4			5.7	415.3
C-1	208.1		206.5	54.0		44.7			29.4	451.6
S3	243.4		247.9	87.1		86.0			65.3	505.6
A-2	352.0		364.0	179.4	65.0	206.3			145.4	593.4
C-2	397.7	26.2	423.0	215.9	108.0	261.1			182.4	630.9
T6	471.6	80.9	504.8	280.9	172.5	339.5			239.8	689.3
D-3	523.2	114.0	548.6	338.7	224.0	396.0			291.9	740.4
T14	555.0	144.2		368.7	250.5	430.0			321.1	759.0
B-4	622.8	202.0		447.7	335.0	503.6			387.6	819.7
D-4	697.0	274.0		527.0	409.1	584.0			469.3	857.5
S8		317.1			455.1					883.5
C4		493.0								1031.1
A5		569.5								1074.6
Masuporo		683.2								1194.0
TD	720	720.0	520	520	520	620	520	470	4505	5050
	各レイヤーの層厚(m)									
Top	Base									
A-1	A-009	56.3		66.4		0.0	0.0	35+	0.0	49.4
A-009	D-008	30.0		32.0		0.0	10.4		5.7	30.2
D-008	C-1	28.1		28.5	54.0	0.0	34.3		23.7	36.3
C-1	S3	35.3		41.4	33.1	0.0	41.3		35.9	54.0
S3	A-2	108.6		116.1	92.3	65.0	120.3		80.1	87.8
A-2	C-2	45.7	26.2	59.0	36.5	43.0	54.9		37.0	37.5
C-2	T6	73.9	54.7	81.8	65.0	64.5	78.4		57.5	58.4
T6	D-3	51.6	33.1	43.8	57.8	51.5	56.5		52.1	51.1
D-3	T14	31.8	30.2	29+	30.1	26.5	34.0		29.2	18.6
T14	B-4	67.8	57.9		79.0	84.5	73.6		66.5	60.7
B-4	D-4	74.2	72.0		79.3	74.1	80.4		81.7	37.8
D-4	S8	23+	43.1		7+	46.0	36+			26.0
S8	C-4		175.9			65+				147.6
C-4	A-5		76.5							43.5
A-5	Masuhoro		113.7							119.4

表 2.6-2 幌延地域のボーリング孔での各レイヤーの平均空隙率PhiAと泥質分含有率Vsh

レイヤー		H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7	H-8	MITI Tenpoku	Kitakawag uchi SK1
		Average Porosity									
Top	Bottom										
A-1	A-009			0.61							0.61
A-009	D-008	0.62		0.60							0.57
D-008	C-1	0.61		0.63			0.71		0.67		0.61
C-1	S3	0.61		0.56	0.62		0.65		0.60		0.58
S3	A-2	0.54		0.55	0.54		0.64		0.52	0.42	0.52
A-2	C-2	0.40		0.47	0.45	0.53	0.57		0.42	0.32	0.43
C-2	T6	0.39	0.48	0.39	0.43	0.43	0.46		0.40	0.33	0.40
T6	D-3	0.42	0.42	0.39	0.39	0.41	0.44		0.39	0.31	0.42
D-3	T14	0.39	0.40		0.38	0.39	0.41		0.39	0.31	0.41
T14	B-4	0.38	0.38		0.37	0.38	0.40		0.37	0.34	0.41
B-4	D-4	0.36	0.38		0.32	0.37	0.35		0.35	0.30	0.41
D-4	S8		0.40			0.36				0.28	0.40
S8	C-4		0.43							0.30	0.41
C-4	A-5		0.38							0.26	0.43
A-5	Masuhoro		0.39							0.19	0.43
		Average Vsh									
A-1	A-009	0.70		0.60							0.55
A-009	D-008	0.64		0.49							0.59
D-008	C-1	0.39		0.30			0.35		0.19		0.56
C-1	S3	0.71		0.59	0.72		0.60		0.43		0.57
S3	A-2	0.47		0.54	0.62		0.49		0.50	0.68	0.54
A-2	C-2	0.61		0.63	0.75	0.70	0.57		0.76	0.80	0.56
C-2	T6	0.70	0.89	0.70	0.70	0.66	0.67		0.76	0.77	0.59
T6	D-3	0.55	0.71	0.60	0.62	0.57	0.56		0.71	0.72	0.55
D-3	T14	0.63	0.66		0.69	0.64	0.58		0.65	0.75	0.56
T14	B-4	0.56	0.59		0.61	0.59	0.52		0.56	0.69	0.47
B-4	D-4	0.63	0.66		0.62	0.67	0.59		0.62	0.74	0.47
D-4	S8		0.64			0.67				0.39	0.45
S8	C-4		0.58							0.70	0.58
C-4	A-5		0.62							0.74	0.56
A-5	Masuhoro		0.61							0.70	0.55

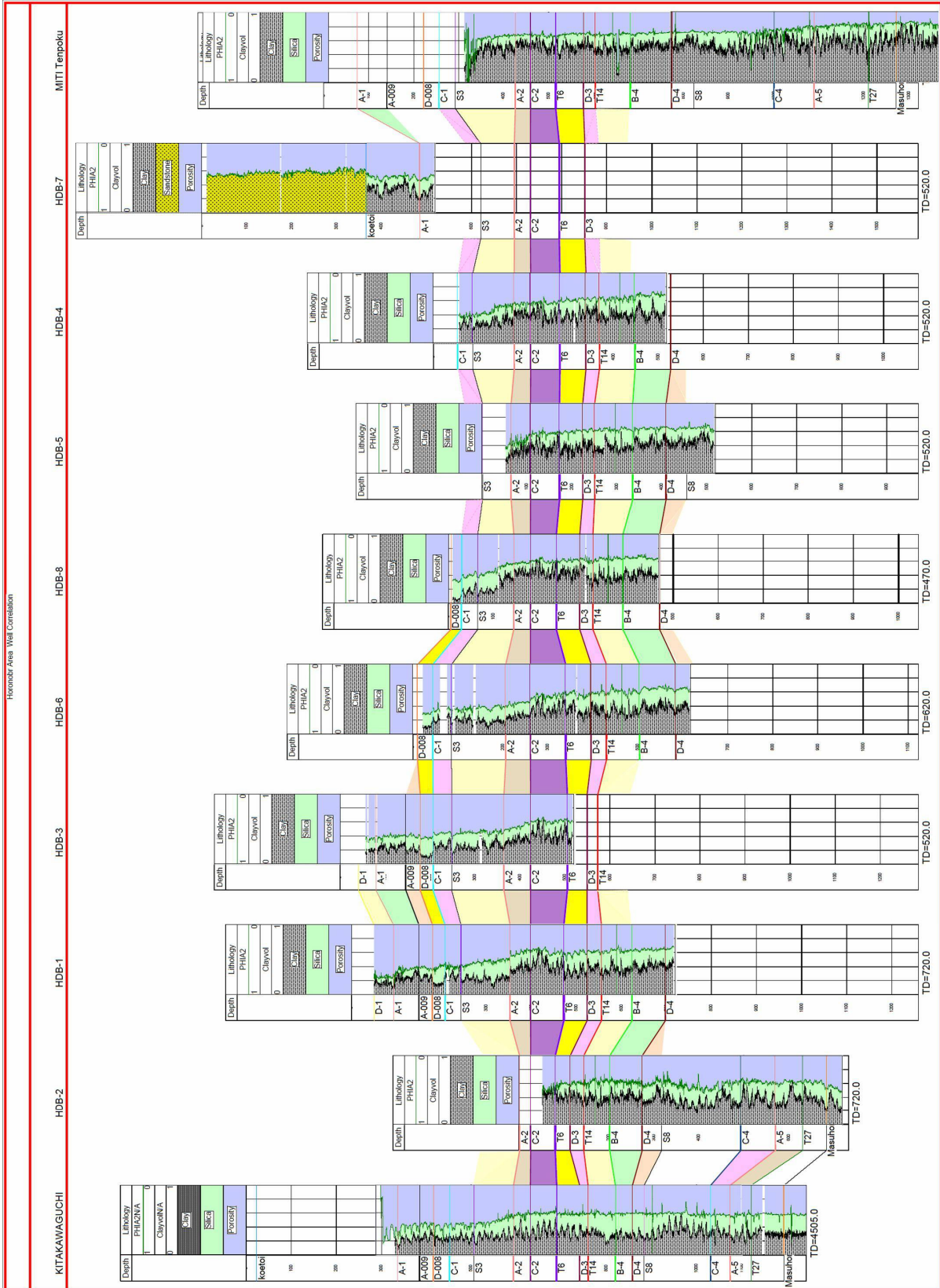


図 2.6-1 幌延地域の地質モデル：検層解析結果

PHIA2=Porosity: 検層解析による間隙率 Φ_i Clay: 泥質分量 $=V_{sh} \times (1-\Phi_i)$

Silica: シリカ量 $= (1-V_{sh}) \times (1-\Phi_i)$ 対比線は主要マーカー（レイヤー境界）

2. 7 削剥量の推定

削剥されておらず現在深度が最大埋没深度であるボーリング孔の泥質岩の dT—深度カーブを基準とし、対象とするボーリング孔の dT—深度カーブが深度方向にどれだけシフトしているかを評価することにより削剥量と最大埋没深度の見積もりを行った。この手法は Magara(1976)や Heasler and Kharitonova (1996)など石油鉱業で一般に用いられている手法に従ったものである。

削剥量の推定手順は以下の通りである。

① dT(Sonic)—深度カーブを各ボーリング孔について作成した。(図 2.7-1, 図 2.7-2, 図 2.7-3)

② 深度が増すにつれてなめらかに dT が減少し、サイクルスキップが少ない HDB-3 孔と MITI 浜勇知を基準ボーリング孔として選定した。

③ HDB-3 を基準とし、対象ボーリング孔の dT—深度カーブがどれだけ深度方向にシフトしているかを検討した。

④ 基礎試錐「天北」調査報告書(石油公団, 1995)では続成鉱物の Opal-A/Opal-CT, Opal-CT/Qtz, 方沸石, 濁沸石の変質分帯から削剥量を 730m と見積もっている。MITI 天北と HDB-3 の dT—深度カーブを比較して HDB-3 孔の削剥量を 650m と見積もった。残りのボーリング孔については③で得られた相対的なシフト量をこの 650m に加えて削剥量を見積もった。

⑤ MITI 浜勇知を基準として③と④の手順を繰り返して各ボーリング孔の削剥量を別個に見積もり、④の結果と整合的であることをチェックし、異なる時は③で得たシフト量を見直した。

各ボーリング孔で見積もられた削剥量を表 2.7-1 に示す。また、削剥量を考慮した dT—深度カーブの対比を図 2.7-1～図 2.7-3 に示す。

表 2.7-1 幌延地域のボーリング孔において推定される削剥量

HDB-1	HDB-2	HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-7	HDB-8
690m	950m	650m	850m	910m	650m	600m	910m

MITI 天北	北川口 SK-1	MITI 浜勇知
730m	450m	440m

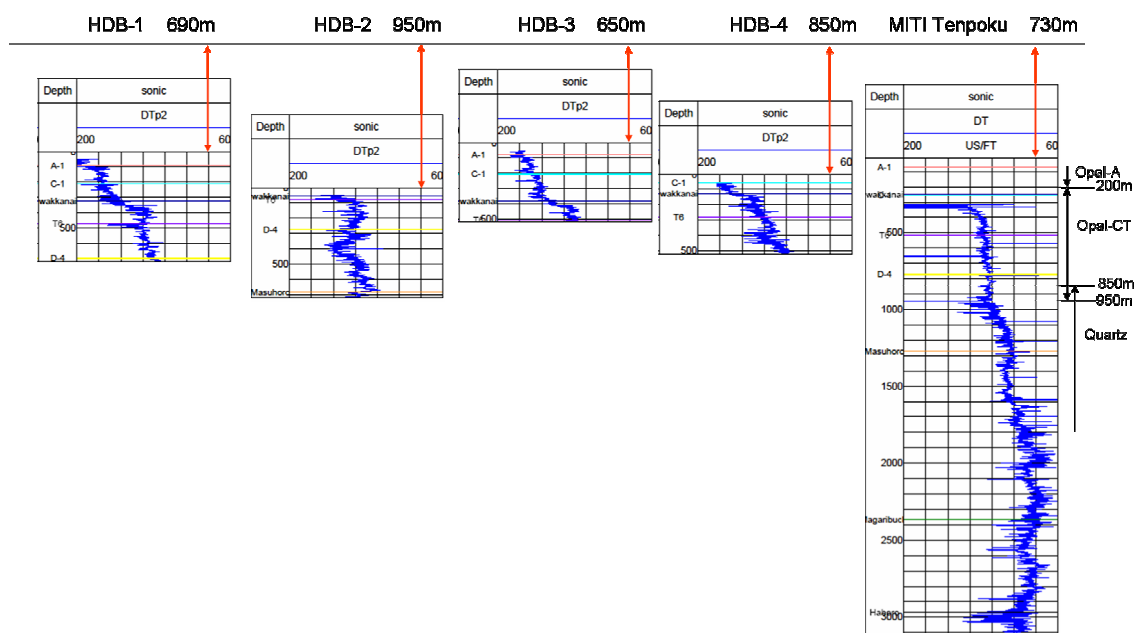


図 2.7-1 dT-深度カーブと見積られた削剥量 HDB-1, 2, 3, 4 MITI 天北
 DTP2, DT:: sonic dT(μ sec/f) 深度:m ボーリング孔名の左の数字は削剥量を示す。

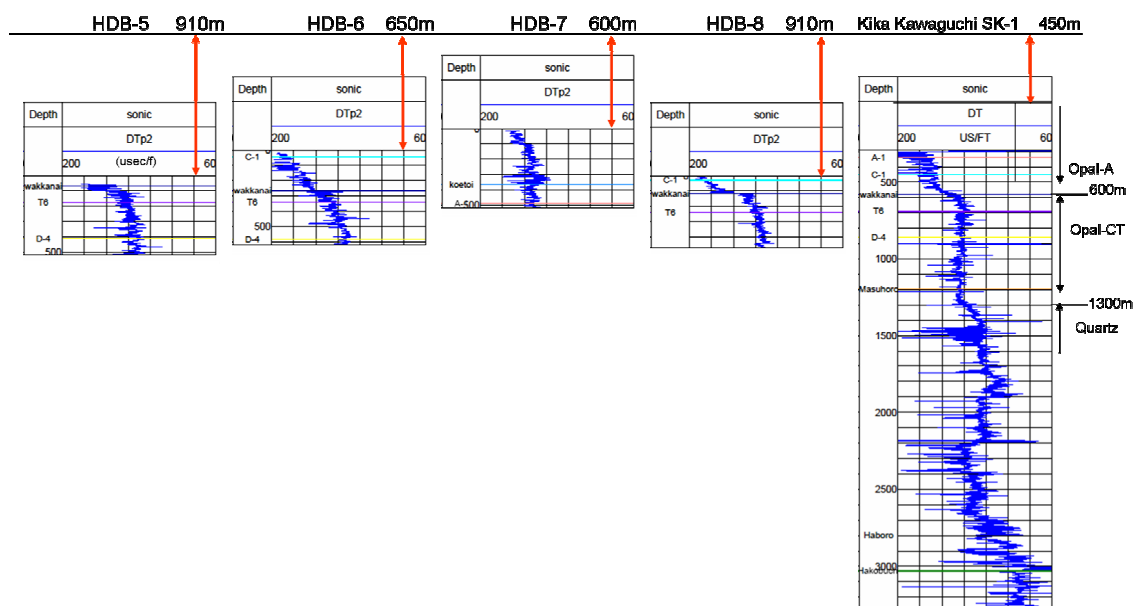


図 2.7-2 dT-深度カーブと見積られた削剥量 HDB-5, 6, 7, 8, 北川口 SK-1

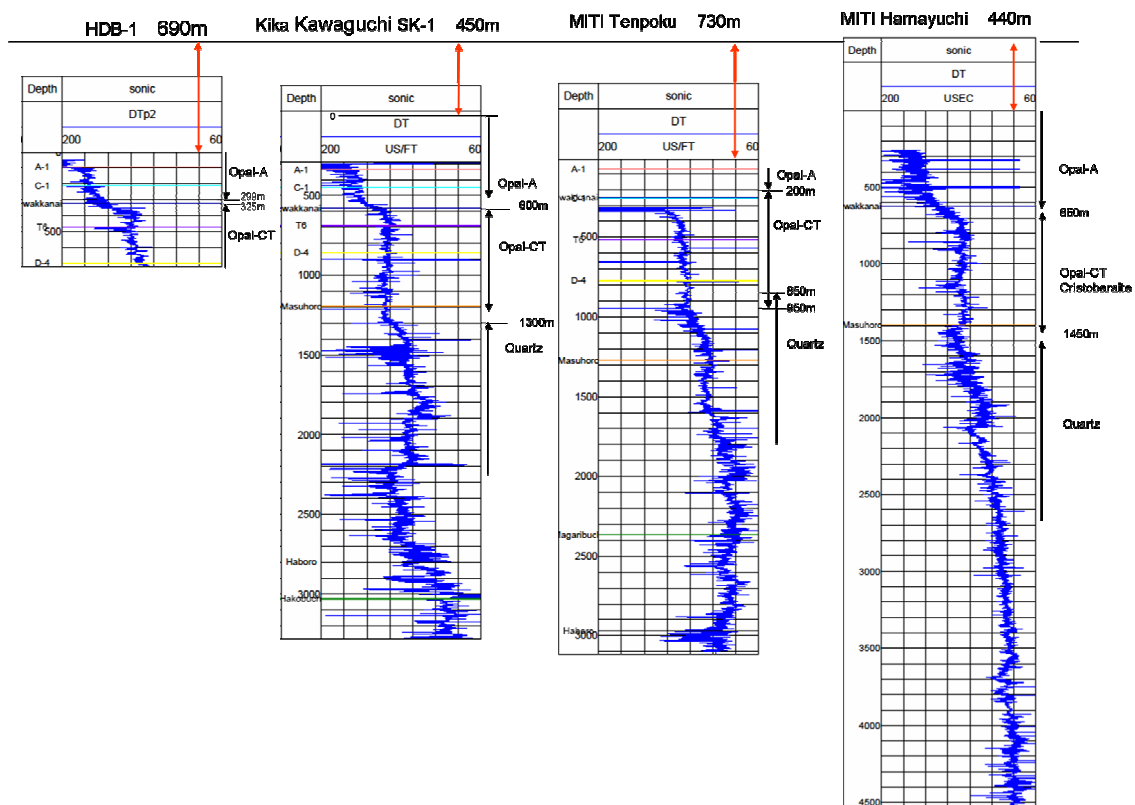


図 2.7-3 dT-深度カーブとシリカ鉱物の相転移深度：MITI 浜勇知，MITI 天北，北川口 SK-1，HDB-1

HDB-7 孔については、365m 以浅が勇知層の砂岩であり、他のボーリング孔の珪質泥岩の圧密カーブとは比較できないので、400m 以深の声問層の部分のみを用いて dT-深度カーブの比較を行い、震探断面を参考にして削剥量を見積もっている。その他のボーリング孔の声問層、稚内層と増幌層の上部は珪質泥岩からなり、皆良く似た圧密カーブを示した。

珪質岩では埋没による続成作用でシリカ鉱物が珪藻シリカ (Opal-A, Amorphous) からクリストバライト (Opal-CT, Cristobalite)へ、クリストバライトから石英 (Qtz) へと相転移する。それぞれの鉱物続成分帯の中では dT は緩やかに減少し、鉱物分帯の境界で dT は階段状に急激に減少する。図 2.7-3 は、幌延周辺の代表的なボーリング孔におけるシリカ鉱物分帯と dT-深度カーブの対比図である。石英帯の上限=クリストバライトの消滅は MITI 天北では稚内層中の 950m にあるが、稚内層がこれより薄い北川口 SK-1 と MITI 浜勇知では増幌層中のそれぞれ 1300m, 1450m となっている。HDB-1～8 孔では各ボーリング孔の報告書で設定された声問層が Opal-A 帯に、稚内層が Opal-CT 帯にほぼ相当し、石英帯までは達していない。

2. 8 珪質泥岩の埋没曲線（深度・間隙率曲線）の推定

2. 8. 1 埋没曲線推定のための使用データ

HDB-1～8 孔について、物理検層解析で得られた間隙率、泥質分含有率（Vsh）を 1m 毎にサンプリングし、埋没曲線の推定を行った。深度については、2. 7「削剥量の推定」で得られた削剥量を現在深度に加え、「最大埋没深度」として使用した。図 2.8-1 に、最大埋没深度に対する各ボーリング孔の間隙率のプロットを示す。

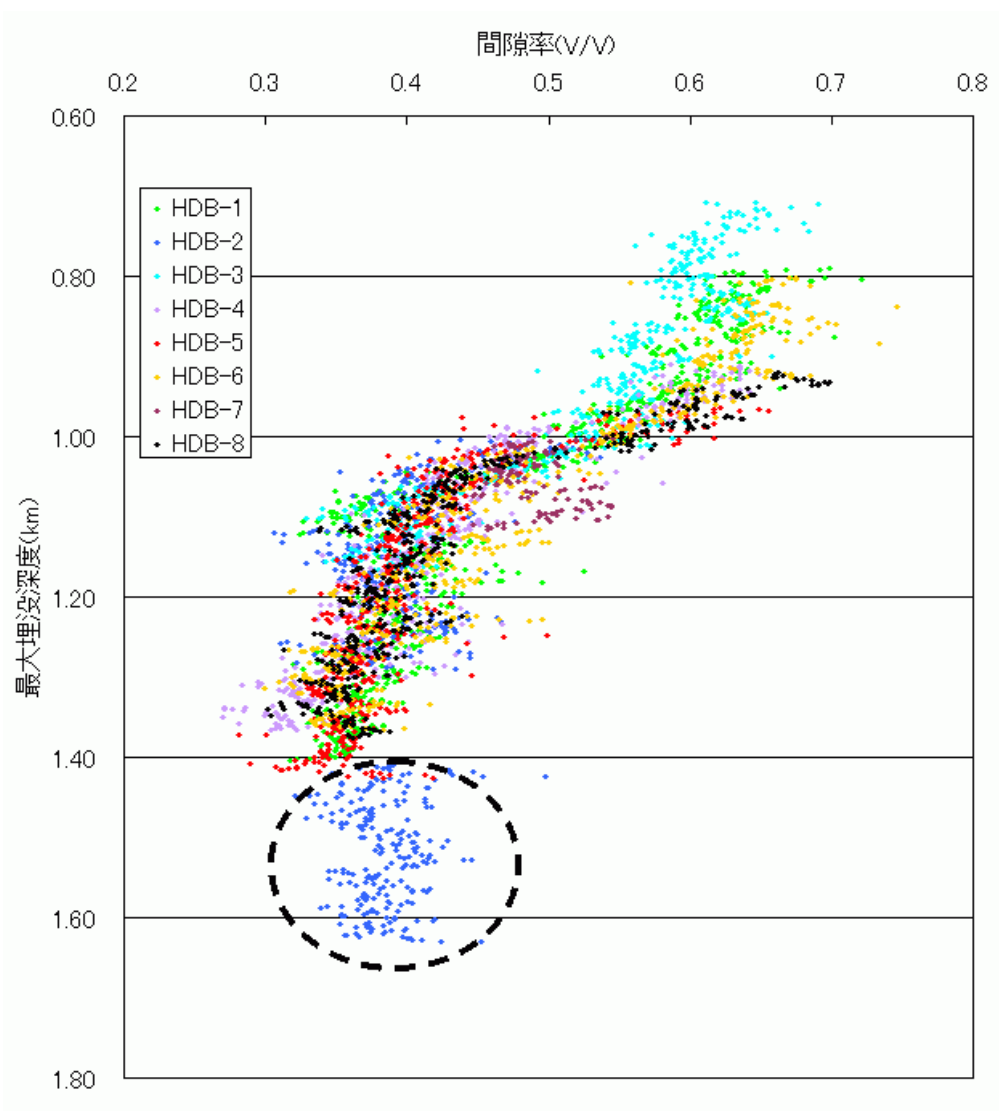


図 2.8-1 最大埋没深度・間隙率プロット

(1) HDB-2 孔の異常値について

HDB-2 孔については、最大埋没深度 1400m 以深（現在深度 550m 以深）の音波検層、密度検層データが特異な傾向を示し、そこから算定された間隙率も他ボーリング孔のトレンドから著しく外れることが判明した。この原因については未だ検討中であるが、異常高圧層（静水圧より高い圧力層）の可能性が推定される。本スタディーで作

成するモデルでは異常高压層などの要因を考慮していないことから、埋没曲線推定に際しては、HDB-2 孔の深度 550m（最大埋没深度 1400m）以深のデータを除いたデータセットを用いて実施した。

2. 8. 2 埋没曲線推定式作成

堆積モデルソフトウェアの入力情報とするためには、「泥質物」「珪藻」それぞれの埋没曲線（間隙率式）が必要となる。以下各堆積物について埋没曲線推定式を定義する。

（1）泥質物

泥質物については、石油地質で一般的に用いられる手法をそのまま採用し、以下の指数関数式を使用した。

$$\phi_{\text{mud}} = \phi_{\text{mud}0} \times e^{-C_{\text{mud}} \times d} \quad (2.8)$$

ここで、 Φ_{mud} ：泥岩の間隙率、 $\Phi_{\text{mud}0}$ ：泥岩の初期間隙率、 C_{mud} ：泥岩の圧密係数、 d ：埋没深度である。

（2）珪藻

珪藻については、埋没過程において Opal-A から Opal-CT へと相転移することが知られている。図 2.8-1 の 1000m 付近における間隙率の急激な変化は、それに対応するものと考えられる。

従って、泥岩同様、単一の指数関数式で表現することが難しい。ことから Opal-A、Opal-CT についてそれぞれ指数関数式を与えることとした。

$$\phi_{\text{opalA}} = \phi_{\text{opalA}0} \times e^{-C_{\text{opalA}} \times d} \quad (2.9)$$

$$\phi_{\text{opalCT}} = \phi_{\text{opalCT}0} \times e^{-C_{\text{opalCT}} \times d} \quad (2.10)$$

ここで、 Φ_{opalA} ：珪藻（Opal-A）の間隙率、 Φ_{opalCT} ：珪藻（Opal-CT）の間隙率、 $\Phi_{\text{opalA}0}$ ：珪藻（Opal-A）の初期間隙率、 $\Phi_{\text{opalCT}0}$ ：珪藻（Opal-CT）の初期間隙率、 C_{opalA} ：珪藻（Opal-A）の圧密係数、 C_{opalCT} ：珪藻（Opal-CT）の圧密係数、 d ：埋没深度である。

Opal の相転移は温度によって支配され、Opal-A から Opal-CT への転移は約 45°C でおこる（Aoyagi and Kazama, 1980）。対象ボーリング孔が同一堆積盆内であることから、古地温勾配を一定と考え、相転移は特定の深度区間で起こると仮定した。また、相転移区間における間隙率変化については、図 2.8-1 より、深度の一次式として表現することとした。

以上の仮定を基に、珪藻の式を以下のように設定した。

$d < d_{top}$ の場合

$$\phi_{diatom} = \phi_{opalA} \quad (2.11)$$

$d_{top} \leq d \leq d_{base}$ の場合

$$\phi_{diatom} = \frac{(d_{base} - d) \times \phi_{opalA@d_{top}} + (d - d_{top}) \times \phi_{opalCT@d_{base}}}{d_{base} - d_{top}} \quad (2.12)$$

$d > d_{base}$ の場合

$$\phi_{diatom} = \phi_{opalCT} \quad (2.13)$$

ここで、 Φ_{diatom} : 珪藻の間隙率、 d_{top} : 相変化上限深度、 d_{base} : 相変化下限深度、 $\Phi_{opalA@d_{top}}$: 相変化上限深度の Opal A 間隙率、 $\Phi_{opalCT@d_{base}}$: 相変化下限深度の Opal CT 間隙率である。

(3) 珪藻質泥岩

珪藻質泥岩の間隙率式は、「泥質物」「珪藻」の間隙率式および「泥質分含有率」を用いて、以下の式で表した。下式は平成 15 年度本スタディーの埋没過程モデル式から導かれる。

$$\phi = \frac{\frac{Vsh}{1 - \phi_{mud}} \times \phi_{mud} + \frac{1 - Vsh}{1 - \phi_{diatom}} \times \phi_{diatom}}{\frac{Vsh}{1 - \phi_{mud}} + \frac{1 - Vsh}{1 - \phi_{diatom}}} \quad (2.14)$$

ここで、 Φ : 珪藻質泥岩の間隙率、 Vsh : 泥質分含有率である。

2. 8. 3 埋没曲線の決定

2. 8. 2 で示した式の未知数は、 Φ_{mud0} , C_{mud} , Φ_{opalA0} , C_{opalA} , $\Phi_{opalCT0}$, C_{opalCT} , d_{top} , d_{base} の 8 つである。HDB ボーリング孔の物理検層解析で得られた Φ , Vsh のデータセットを用いて上記未知数を決定した。結果を表 2.8-1 に示す。

また、図 2.8-1 の最大埋没深度・間隙率プロットに、埋没曲線パラメータを用いた各 Vsh での埋没曲線（線データ）を加えたプロットを図 2.8-2 に示す。さらには、検層解析で得られた間隙率と埋没曲線で推定される間隙率との差（間隙率残差）プロットを図 2.8-3 に示す。

本パラメータ決定では、統計推定を用いたパラメータ推定ではなく、図 2.8-2 プロ

ットが視覚的に適当と考えられる様、パラメータを調整し、そのパラメータを採用した。

これは、間隙率残差を用いた最小二乗法などがうまく適応できなかった経緯があり、各ボーリング孔の削剥量や検層解析間隙率についても、ある程度の誤差が見込まれ、それらを踏まえた統計推定が困難であったためである。

今後の課題として統計的に意味のある推定を行うことが挙げられるが、図 2.8-3 の誤差分布を見る限り、その誤差は概ね間隙率 5%以下であることから、実用上問題ないと考え、本年度のスタディーでは、表 2.8-1 のパラメータを用いることとした。

表 2.8-1 埋没曲線パラメータ一覧

項目	記号	値
泥質物初期間隙率(v/v)	Φ_{mud0}	0.80
泥質物圧密係数	C_{mud}	0.00065
OpalA 初期間隙率 (v/v)	Φ_{opalA0}	0.90
OpalA 圧密係数	C_{opalA}	0.00025
OpalCT 初期間隙率 (v/v)	$\Phi_{opalCT0}$	0.90
OpalCT 圧密係数	C_{opalCT}	0.00060
相転移上限深度(m)	d_top	960
相転移下限深度(m)	d_top	1090

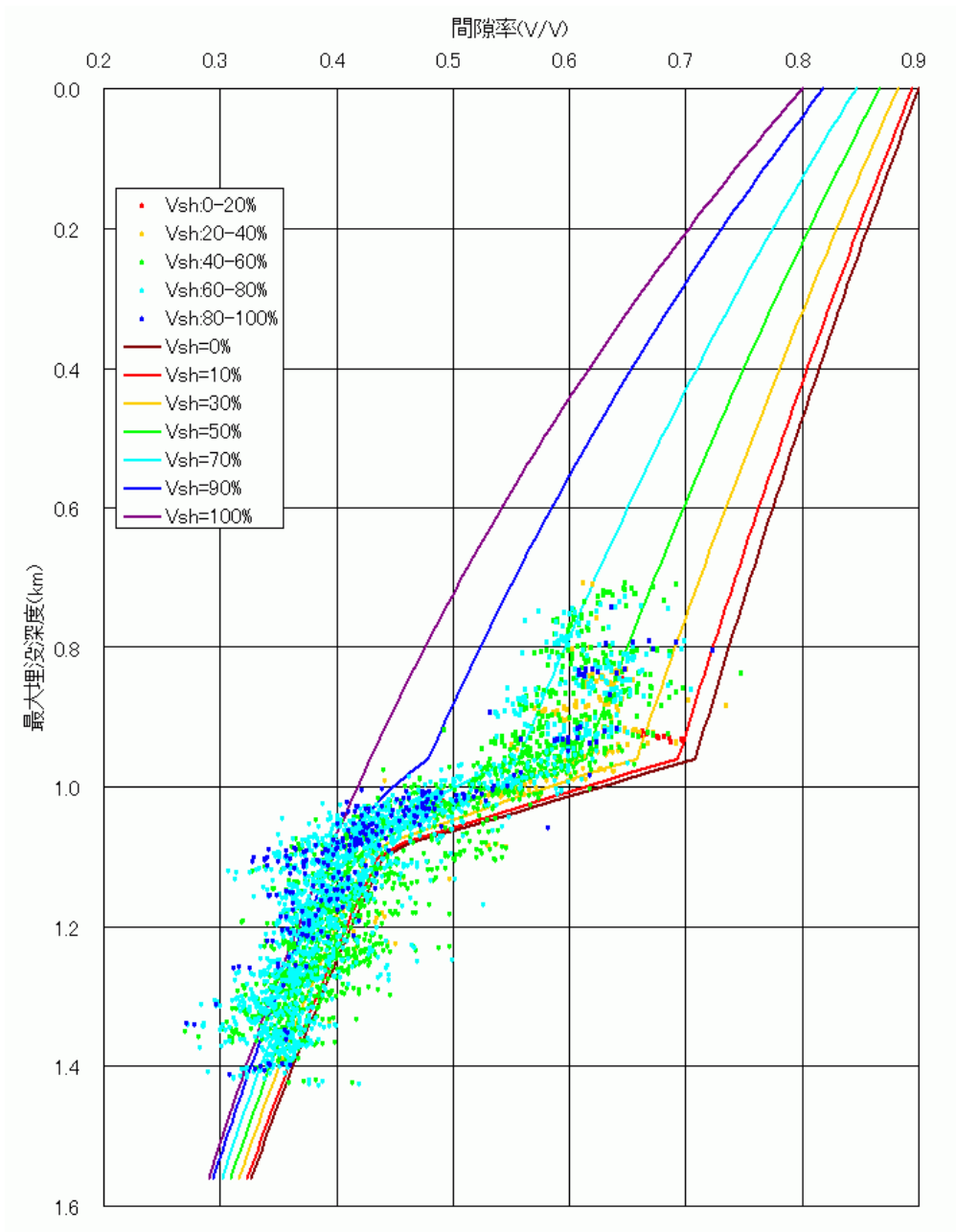


図 2.8-2 最大埋没深度・間隙率プロットおよび埋没曲線

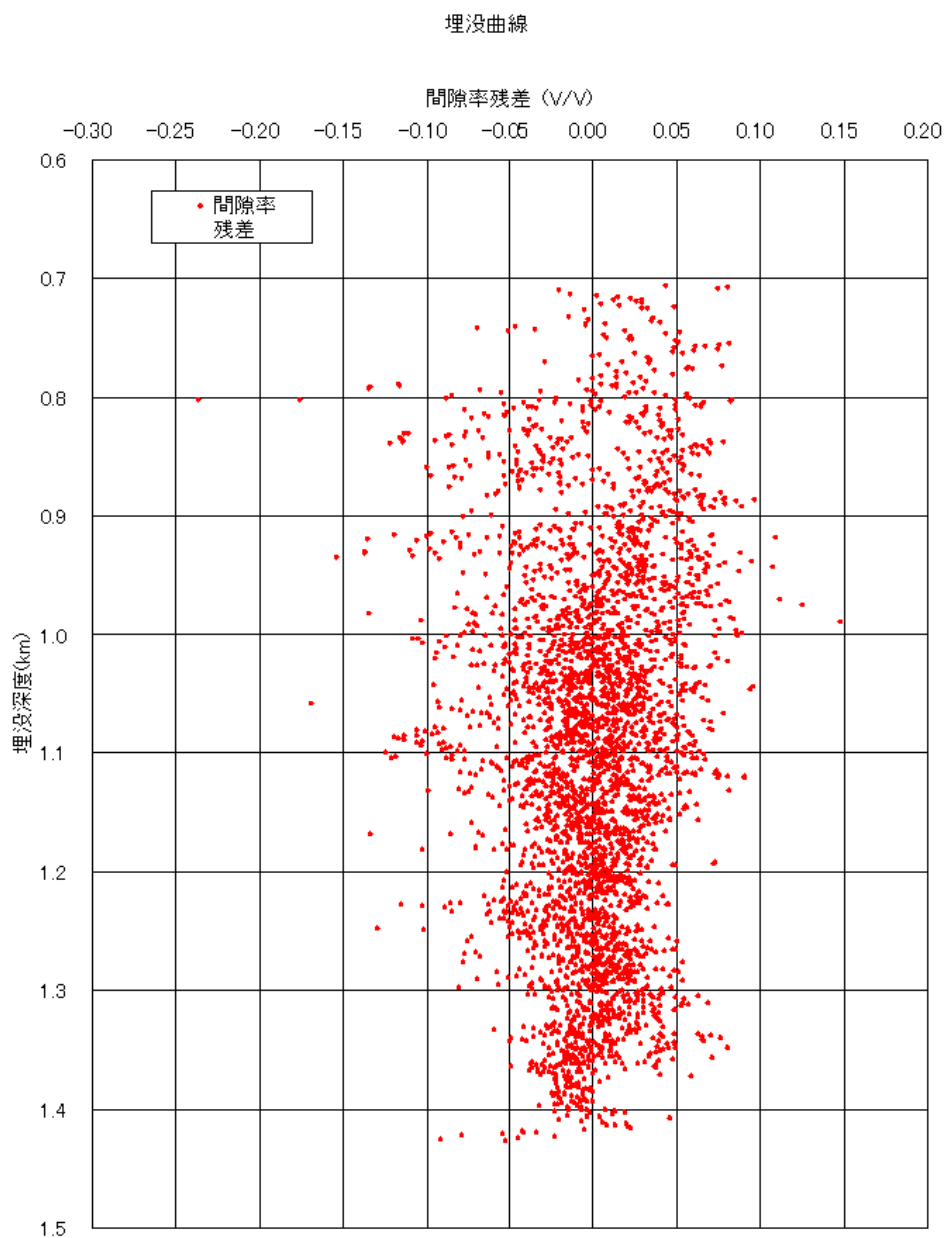


図 2.8-3 間隙率残差プロット

3. EMI を用いたファシス解析とボーリング孔間対比

3. 1 はじめに

EMI 検層では 6 枚のパッドを孔壁に押し当て孔壁表面付近の導電率（比抵抗値の逆数）を測定する。導電率は各パッドに埋め込まれた 25 個のボタン電極で密に測定し、これを画像処理することで解像度約 5mm の擬似坑壁画像（EMI 画像）が得られる。

今年度、EMI 画像を検討したところ、HDB-1 孔の多くの層準で厚さ 10cm～1m の層状構造（以下 0.1～1mEMI 層状構造と称す）が認められた（図 3.1-1）。昨年度の委託作業（増井ほか 2004）で実施した HDB-1 孔岩芯の肉眼観察では大半の層準で初生的な堆積構造は保存されておらず、均質であると判断されている。したがって、肉眼観察では認められなかった岩相の不均質性が EMI 画像で認められている可能性がある。そこで今回、HDB-1、-2、-3 および-5 孔で認められた 0.1～1mEMI 層状構造の性質を明らかにし、その成因について検討する。

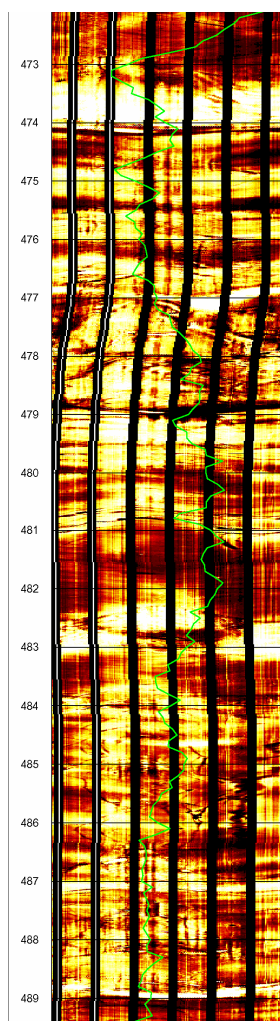


図 3.1-1 厚さ数 10cm～1m の層状構造（0.1～1mEMI 層状構造）が認められる EMI 画像（HDB-1 孔） EMI 画像に重ねた緑色の線は GR 値を示す。

3. 2 検討手法

3. 2. 1 GR カーブでのボーリング孔間対比（昨年度委託作業の見直し）

0.1~1mEMI 層状構造は通常の物理検層の解像度と同等かそれを越えた細かな構造なので、これをボーリング孔間で精度良く対比するには補助となるより粗い対比指標が必要である。2003 年度委託作業（増井ほか 2004）では、GR カーブの形状とその類似性に基づいた対比を HDB-1 孔~8 孔さらに基礎試錘「天北」、北川口 SK-1 の 10 ボーリング孔間で行い、厚さ 50~100m 毎に一枚のマーカを設定した。今回は対象を HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔に絞り、同様の作業を密な深度区間で行った。対比対象区間は 2003 年度の対比（増井ほか 2004）を参考に、HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔のうち少なくとも 3 ボーリング孔で共通して掘削されている層序区間とした。なお、2003 年度委託作業（増井ほか、2004）で設定されたマーカを 2003GR マーカ、今回設定したマーカを 2004GR マーカと呼ぶことにする。「2.2 GR を用いたボーリング孔間対比」は以上の結果をに基づいている。

3. 2. 2 EMI ファシス区分、層状構造のボーリング孔間対比と化学組成分析

各ボーリング孔の EMI 画像で認められる特徴、特に 0.1~1mEMI 層状構造の発達程度（明瞭さ）を基準にして、EMI ファシスを区分した。そして、その出現層準を孔毎とそれらの間で検討した。EMI 検層で測定された導電率はカラースケールに変換され EMI 画像として表示される。導電率と色調の対応を全層準にわたって同一にすると、導電率変化の小さい区間では色調のコントラストが小さくなり微細な変化が確認し難い。今回は単位区間 1m ないしは 10m 毎にその導電率を 256 階調に再配分して色分けした。導電率が低い部分は明色で、高い部分は暗色で表現されている。

処理の単位区間を 1m にするか 10m にするかは、予察的に全層準で導電率と色調の対応関係を同一にした EMI 画像を用いて検討し、明瞭な層状構造が認められるか、認められる可能性が高いところを中心に単位区間 1m で処理した。したがって、EMI 画像で認められる明るさは導電率の絶対値を示すものではなく、区間内での相対値を表している。なお、この処理のとき局所的に極端に高いもしくは低い導電率はノイズとして処理し、色調のコントラストを少しでも大きくするように努めた。

0.1~1mEMI 層状構造のボーリング孔間対比は EMI ファシスのうち、とくに層状構造が明瞭な層準に注目して行い、それをより詳細なマーカとして設定した。このとき前述したように 2003GR マーカ、2004GR マーカを参考にした。0.1~1mEMI 層状構造の成因については、それに対比される岩芯試料の化学組成分析結果、さらに既存の年代データから求められる層状構造の形成周期に基づいて考察を行った。なお、化学組成分析結果はサイクル機構研究報告（番号取得中）として別に報告されている。

0.1~1mEMI 層状構造は細かな構造なので、この性状を検討するための化学組成分析用試料を採取するには EMI 画像と岩芯との精度の高い対比が必要となる。岩芯は均質な珪藻質泥岩からなり（増井ほか、2004）、0.1~1mEMI 層状構造を肉眼観察で認識することは一般に不可能である。ただし、岩芯には散点的に炭酸塩岩ノジュール

が認められ、これが高比抵抗部として EMI 画像で良く認識できる。今回、炭酸塩岩ノジュールを指標として EMI 画像と岩芯を精度良く対比し、分析用試料を岩芯から採取した。このとき対比精度を高く保つため、指標とする炭酸塩岩ノジュールは試料採取点から深度差数 m 内で認定できるものに限定している。なお、フラクチャーの発達などで岩芯が部分的に破碎しているが、その状況も岩芯と EMI 画像との対比に補助的に用いることができた。

EMI 画像で認められる低比抵抗層を中心にフラクチャーが発達する場合があります、EMI 画像が岩相ではなく、フラクチャーやそれにもなう流体の影響を受けている可能性がある。このことを検討するため、岩芯の化学組成と比抵抗値の関係を求めた。これに相関関係があれば EMI 画像は岩相に初生的に関連していることになる。岩芯の試料採集深度は 1cm 単位で記述し、それに対応した比抵抗値は同じ深度のデータが得られていない場合はその上下で最も近い深度の比抵抗値を深度差で比例配分して求めた。

3. 3 結果

3. 3. 1 GR カーブでのボーリング孔間対比

対比対象区間において 2004GR マーカーを厚さ 5~10m 間隔で 21 枚設定した (図 3.3-1)。この区間内には 2003GR マーカーがすでに 3 枚設定されているので計 24 枚のマーカーが認定されたことになる。また、2004GR マーカーには上位のものから 2~18 と番号を付した。なお、この区間の 3 枚の 2003GR マーカーは 2003 年度委託作業報告書 (増井ほか, 2004) で示された対比線の色から PK, YL および GR2 と今回命名した。

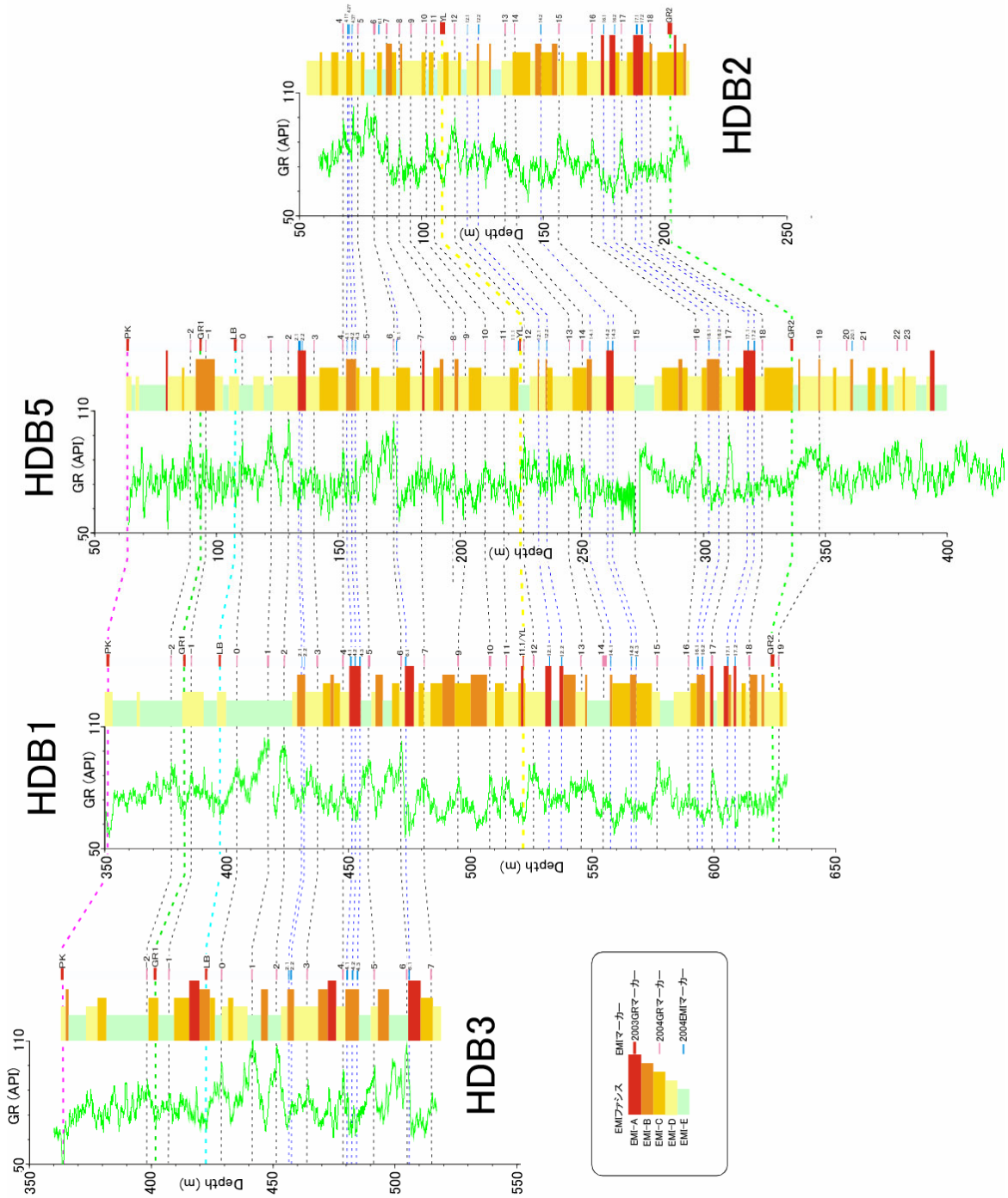


図 3.3-1 GR カーブによるボーリング孔間対比と EMI ファシス

3. 3. 2 EMI ファシス

各ボーリング孔で認められる 0.1~1mEMI 層状構造は高比抵抗層と低比抵抗層の互層で認識される。ただし、この層状構造はどのような層準にも現れるわけではなく、そのような特徴は認められず均質な層準、さらにその中間的な性質を示す層準も存在

する（図 3.3-2）。

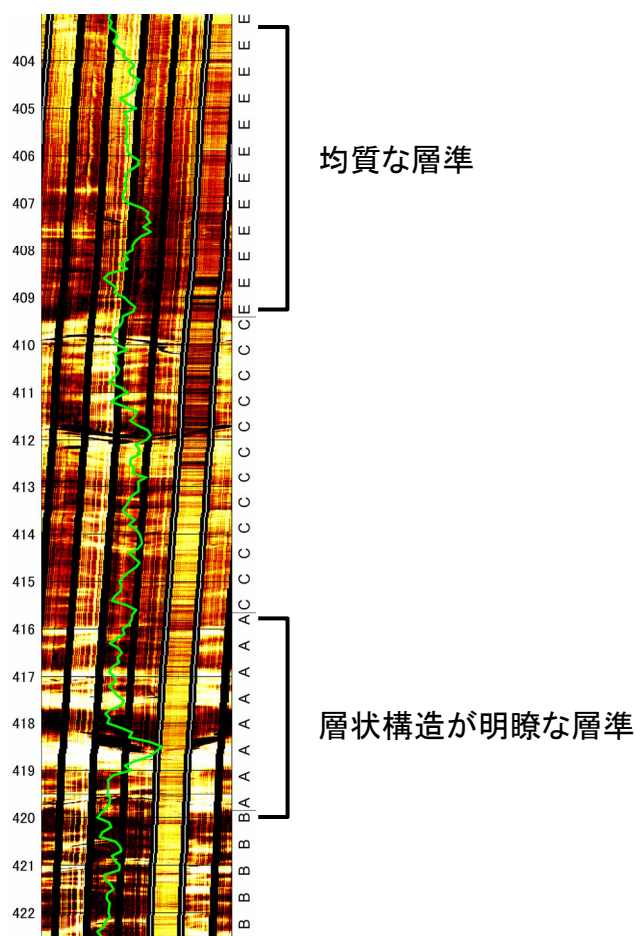


図 3.3-2 EMI ファシス区分

厚さ数 10cm～1m の層状構造（0.1～1mEMI 層状構造）の明瞭さを基準に区分した。EMI 画像に重ねてある緑色の線は GR 値を示す。

今回、このような EMI 画像で認められる層状構造をその明瞭なものから EMI-A, -B, -C, -D および -E の 5 つに区分した。それぞれの特徴は以下のとおりである。ただし、検層時の孔壁の状態や孔壁とパッドとの接触具合がボーリング孔毎や層準毎で一般に異なるので、それに応じて EMI 画像の解像度も影響を受ける。したがって、この区分はあくまでも相対的なものである。

・EMI-A（図 3.3-3）：厚さ数 10cm～1m の高比抵抗層と低比抵抗層の互層（0.1～1mEMI 層状構造）が明瞭に認められる。

・EMI-B（図 3.3-4）：EMI-A と -C の中間的な性質を示す。

・EMI-C（図 3.3-5）：0.1～1mEMI 層状構造が不明瞭ながら認められる。

・EMI-D（図 3.3-6）：EMI-C と -E の中間的な性質を示す。

・EMI-E（図 3.3-7）：層状構造はほとんど認められない。

これらの出現状況をボーリング孔毎に表示した（図 3.3-1）。

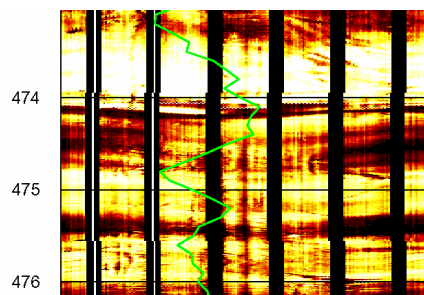


図 3.3-3 EMI ファシス (EMI-A, HDB-1 孔)
EMI 画像に重ねて示されている緑色の線は GR 値を示す。

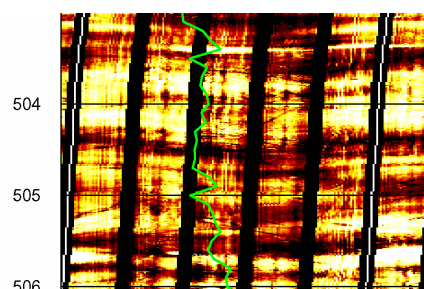


図 3.3-4 EMI ファシス (EMI-B, HDB-1 孔)
EMI 画像に重ねた緑色の線は GR 値を示す。

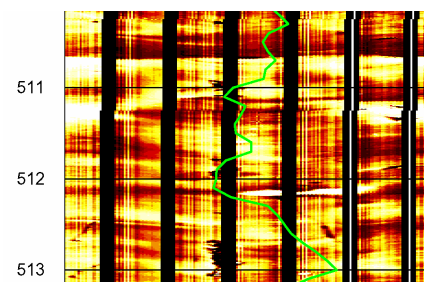


図 3.3-5 EMI ファシス (EMI-C, HDB-1 孔)
EMI 画像に重ねた緑色の線は GR 値を示す。

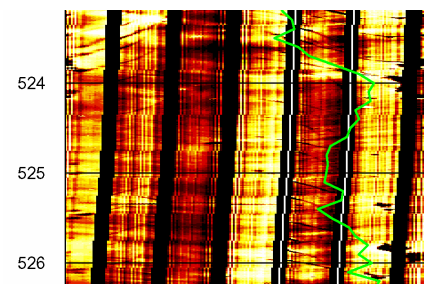


図 3.3-6 EMI ファシス (EMI-D, HDB-1 孔)
EMI 画像に重ねた緑色の線は GR 値を示す。

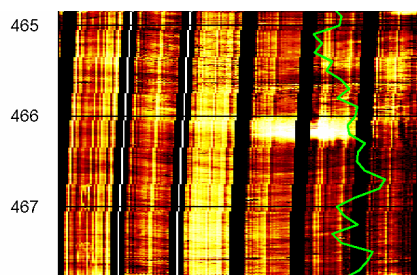


図 3.3.7 EMI ファシス (EMI-E, HDB-1 孔)

EMI 画像に重ねた緑色の線は GR 値を示す。

3. 3. 3 EMI で認められる層状構造のボーリング孔間対比

EMI ファシスのうち、とくに EMI-A や EMI-B で認められる比較的明瞭な層状構造を HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔間で対比し、「2004EMI マーカー」とした。これらのマーカーにはその直ぐ上位の GR カーブで認定されたマーカー番号に少数点以下の数字を付して示した (図 3.3-8~10)。これはそのマーカーの出現層準が分かるようにするためである。たとえば、2004GR マーカー16 の直下で認定された EMI 画像上のマーカーは EMI マーカー16.1 とした。

図 3.3-8~11 には 2004GR マーカー1~3, 4~5, 6~8 および 16~18 層準の 4 層準の EMI 画像をそれぞれ示す。2004GR マーカー1~3 層準は HDB-1, -3 および-5 孔の 3 ボーリング孔で、2004GR マーカー4~5 層準と 2004GR マーカー6~7 の層準は HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔で、2004GR マーカー16~18 層準は HDB-1, -2 および-5 孔の 3 ボーリング孔で出現するのが前述の GR カーブ対比作業で分かっている。これらの層準の EMI 画像に認められる特徴、すなわち高比抵抗層や低比抵抗層がその出現間隔や比抵抗変化の見かけ上の類似性に基づいてボーリング孔間で対比できることが分かる。

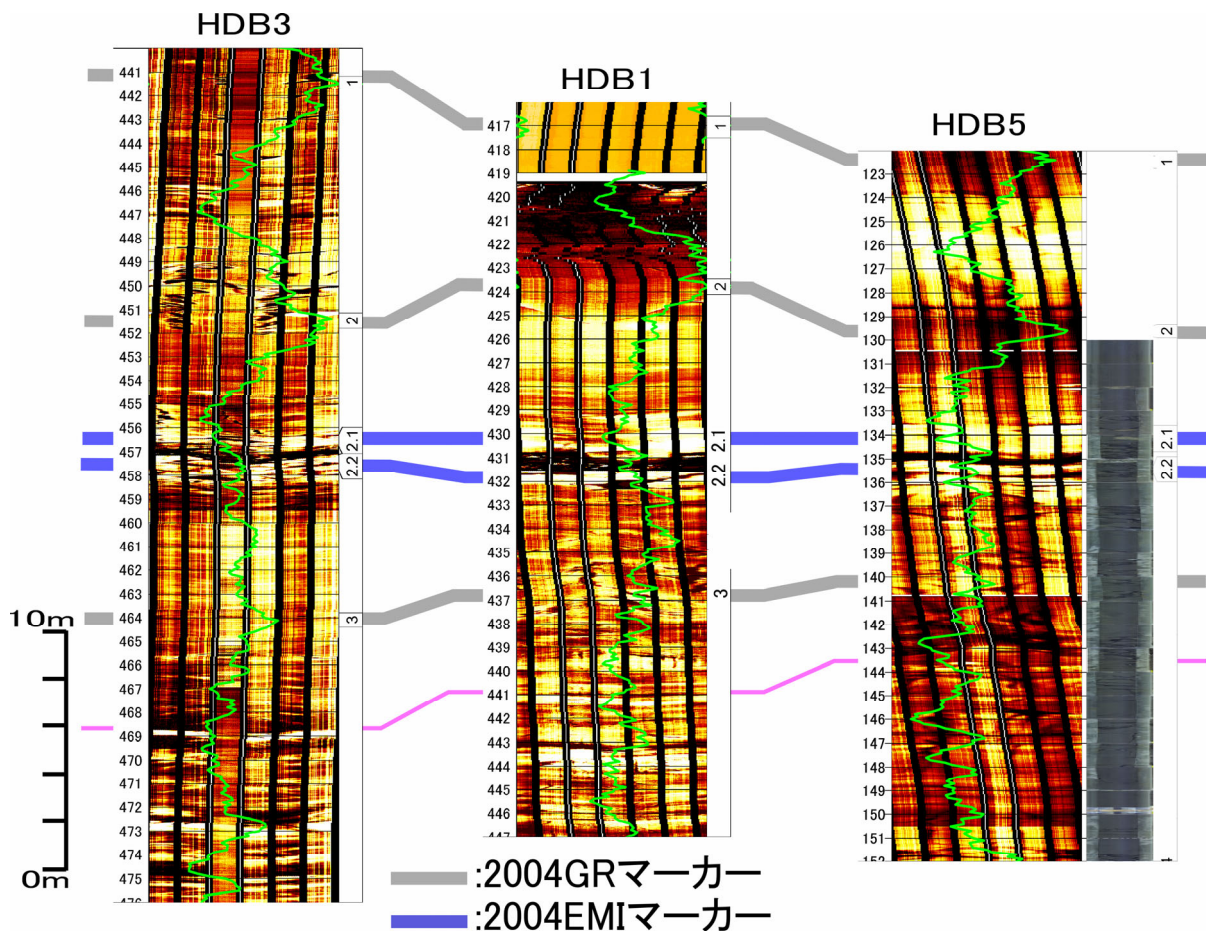


図 3.3-8 2004GR マーカー1~3 層準の EMI 画像

厚さ 1m 未満の高比抵抗層と低比抵抗層がその出現間隔や比抵抗変化の見かけ上の類似性からボーリング孔間で対比できる(マーカー-2.1 と 2.2)。EMI 画像に重ねて示されている緑色の線は GR 値である。また、HDB-5 孔の EMI 画像の横に示してあるのは岩芯写真である。

図 3.3-8 は 2004GR マーカー1~3 層準の HDB-1, -3 および-5 の 3 ボーリング孔の EMI 画像である。2004GR マーカーはこれらの 3 ボーリング孔間でよく対比できる。このことはより大きなスケールでの対比でより明確である(図 3.3-1)。2004GR マーカー2 と 3 の間には 3 ボーリング孔で共通して厚さ 0.5~1m の特徴的な高比抵抗層が 2 枚存在し、その間に厚さやはり 0.5~1m の低比抵抗層が挟在しており、これらが 3 ボーリング孔間で良く対比できる。これらの特徴的な高比抵抗層と低比抵抗層のペアを 2004EMI マーカー-2.1 と 2.2 と名付けた。

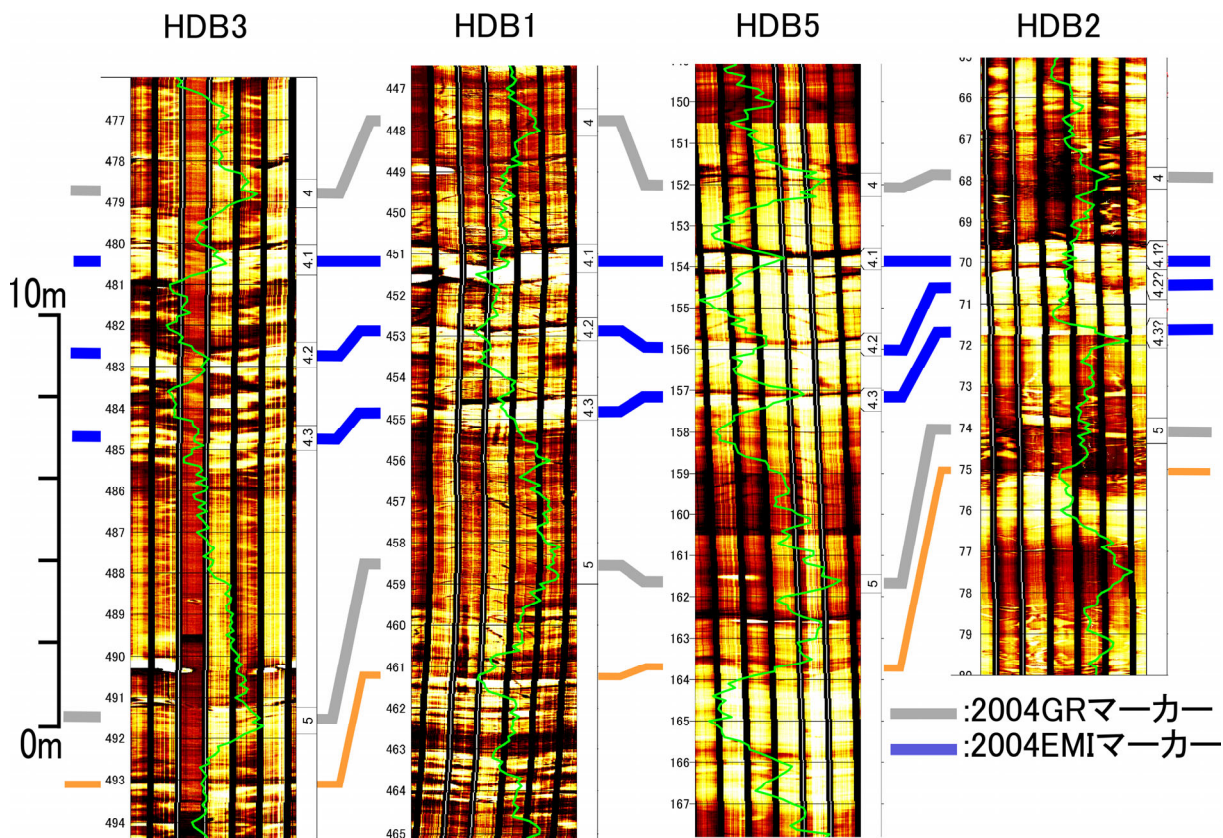


図 3.3-9 2004GR マーカー4～5 層準の EMI 画像

厚さ 1m 未満の高比抵抗層と低比抵抗層がその出現間隔や比抵抗変化の見かけ上の類似性からボーリング孔間で対比できる（2004EMI マーカー4.1, 4.2, 4.3）。EMI 画像に重ねて示されている緑色の線は GR 値である。

図 3.3-9 は 2004GR マーカー4～5 層準の HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔の EMI 画像である。2004GR マーカー4 と 5 はこれらの 4 ボーリング孔間でよく対比できる。このことはより大きなスケールでの対比でも明確である（図 3.3-1）。2004GR マーカー4 と 5 の間には 4 ボーリング孔で共通して厚さ 0.5～1m の特徴的な高比抵抗層が 2～5 枚挟在する。これらのうち HDB-1 孔に挟在する 3 枚の高比抵抗層を基準とすると、4 ボーリング孔間で対比することができ、これらを EMI マーカー4.1, 4.2, 4.3 と名付けた。また、2004GR マーカー5 の数 m 下位で高比抵抗層が出現する（図 3.3-9 のオレンジ色の線はこの上限を示す）のも 4 ボーリング孔で共通する。マーカー間の層厚は HDB-3, -1, -5, -2 の順で薄くなる。また、とくに HDB-2 孔で層状構造が不明瞭になる傾向がある。

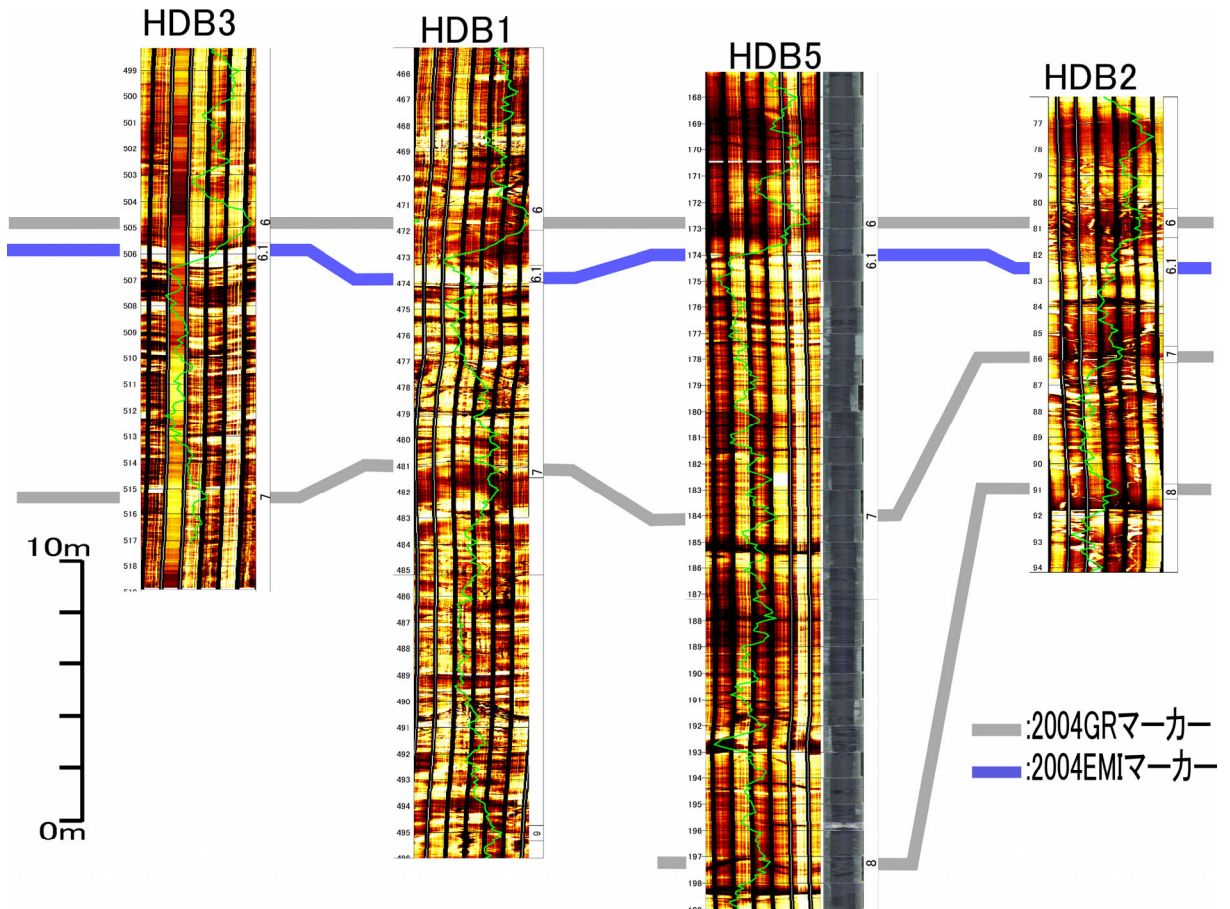


図 3.3-10 2004GR マーカー6～7 層準の EMI 画像

とくに高比抵抗層がその出現間隔や比抵抗変化の見かけ上の類似性からボーリング孔間で対比できる(2004EMI マーカー6.1)。EMI 画像に重ねて示されている緑色の線は GR 値である。また、HDB-5 孔の EMI 画像の横に示してあるのは岩芯写真である。

図 3.3-10 は 2004GR マーカー6～8 層準の HDB-1, -2, -3 および-5 孔の 4 ボーリング孔の EMI 画像である。2004GR マーカーはこれらの 4 ボーリング孔間でよく対比できる。このことはより大きなスケールでの対比でより明確である(図 3-2)。2004GR マーカー6 と 7 の間には、4 ボーリング孔で共通し厚さ 0.5～1m の特徴的な高比抵抗層が複数枚挟在する。このうちの最も上位の高比抵抗層を 4 ボーリング孔間で対比し、2004 マーカー6.1 とした。また、HDB-2 孔では層状構造が不明瞭になる傾向がある。この HDB-2 孔では、とくに GR 値の高い層準である 2004GR マーカー6, 7 および 8 周辺に層状構造とは明らかに斜交し、長さ数 10cm で不定形の高比抵抗部が認められる(図 3.3-11, 12)。ただし、GR 値の高い層準で不定形の高比抵抗部が認められるという現象は HDB-2 孔の全層準で共通しているわけではない。なお、HDB-3 孔は 2004GR マーカー7 の層準までしか掘削されていないので、2004GR マーカー8 の層準は表示されていない。また、HDB-1 孔の 2004GR マーカー8 に相当する層準は認められない。

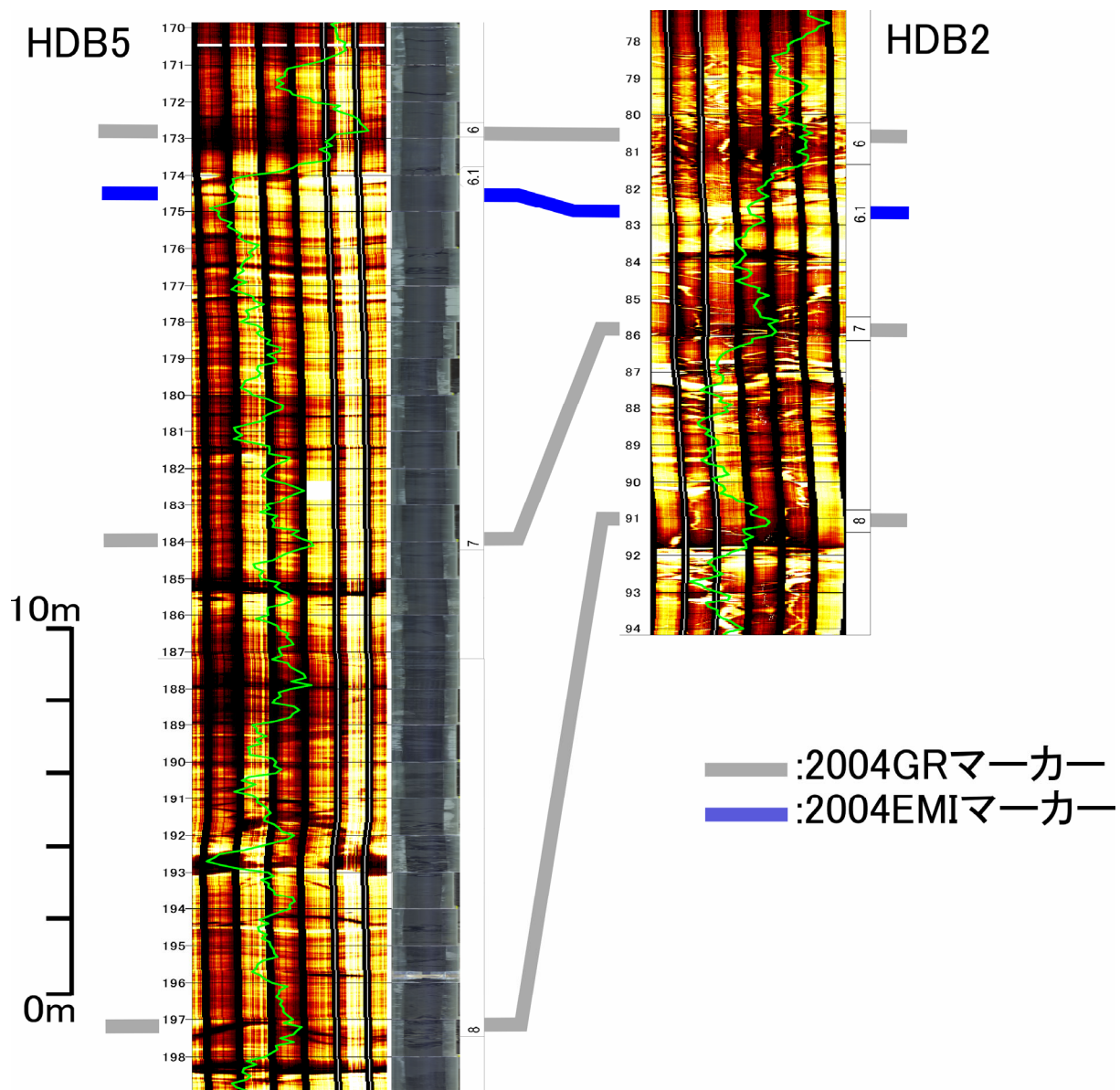


図 3.3-11 HDB-2 孔の 2004GR マーカ—6~8 層準の EMI 画像に認められる不定形の高比抵抗部

EMI 画像に重ねて示されている緑色の線 GR 値である。また、HDB-5 孔の EMI 画像の横に示してあるのは岩芯写真である。

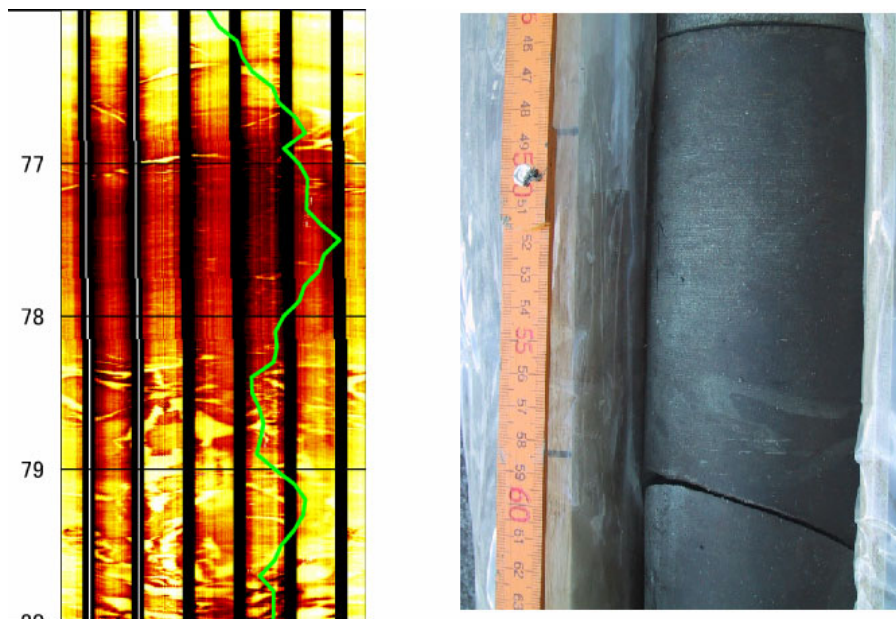


図 3.3-12 HDB-2 孔の EMI 画像とそこに認められる不定形高比抵抗部あたりの岩芯写真（岩芯深度 77.45～77.63m）

岩芯の肉眼観察では生痕化石（図右）が認められるのみで、不定形のものに対応する特徴はとくに認められない。実際の EMI 画像で不定形高比抵抗部が発達するのは EMI 深度 78～80m であるが、この層準の岩芯は保存状態が良くないので今回十分な観察ができていない（ただし、この付近に炭酸塩岩ノジュールがないので、EMI 深度と岩芯深度の対比はできているわけではない）。

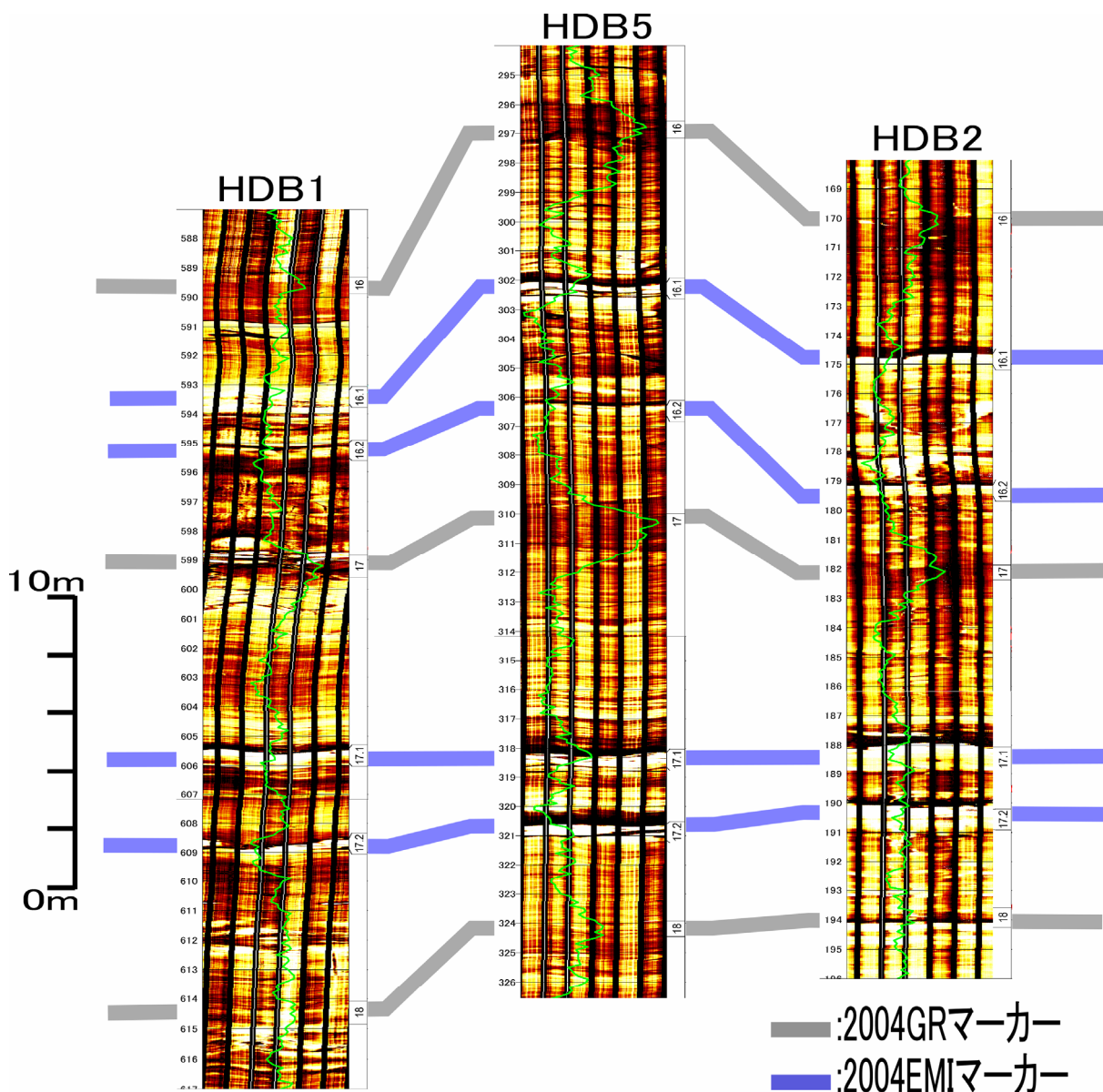


図 3.3-13 2004GR マーカー16~18 の EMI 画像

とくに高比抵抗層がその出現間隔や比抵抗変化の見かけ上の類似性からボーリング孔間で対比できる(2004EMI マーカー16.1, 16.2, 17.1, 17.2)。EMI 画像に重ねて示されている緑色の線は GR 値である。

図 3.3-13 は 2004GR マーカー16~18 層準の HDB-1, -2 および-5 の 3 ボーリング孔の EMI 画像である。2004GR マーカーはこれらの 3 ボーリング孔間でよく対比できる。このことはより大きなスケールでの対比により明確に示される(図 3.3-1)。2004GR マーカー16 と 17, 17 と 18 の間にはそれぞれ高比抵抗層が 3 ボーリング孔で共通して複数枚挟在する。これらをもその見かけの類似性と 2004GR マーカーとの関係に基づいて対比し、2004EMI マーカー16.1, 16.2, 17.1, 17.2 と名付けた。マーカー4~5 層準(図 3.3-11), マーカー6~7 層準とは異なり, HDB-2 孔での層状構造も明瞭で良く対比できる。

3. 3. 4 マーカー間の厚さ変化

マーカー6 より上位の層準が出現する HDB-1, -3 および-5 孔で各マーカー間の厚さを比べると、HDB-3 孔で最も厚く HDB-1, -5 孔の順で薄くなり、これより下位の層準が出現する HDB-1, -2 および-5 孔では、HDB-5 孔で最も厚く、HDB-1, -2 の順で薄くなる (図 3.3-1)。また、共通して出現する区間の多い HDB-1 孔と-5 を比べると、おおよそ 2004GR マーカー2 と 0 の間、4 と 6 の間、9 と 10 の間、11 と 12.2 の間および 13 と 14 の間で HDB-1 孔が、2004GR マーカー6 と 9 の間および 2004GR マーカー15 と 2003GR マーカーGR2 の間では HDB-5 孔で厚くなっている (図 3.3-1)。

3. 3. 5 EMI 画像と岩芯との対応

EMI 画像上での層状構造と化学組成はよく相関している。ただし、炭酸塩岩ノジュールは GR 値が高い層準、すなわち 0.1~1mEMI 層状構造があまり明瞭でない層準により発達する傾向があるようで、今回信頼度の高い EMI 画像と岩芯が対比出来たのは HDB-5 孔の 2 層準であった。しかもそのうちの 1 層準は今回検討対象とした区間より下位である。このため、HDB-5 孔に限ってこの層準までを EMI ファシスの検討対象としている。EMI 画像と岩芯が対比できたこれら層準の岩芯の化学分析結果を表 3.3-1 と図 3.3-14, 3.3-15 に示す。

表 3.3-1 化学組成分析結果

ボーリング孔名	採取深度			化学組成	
	平均深度	EMI深度	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	
HDB-5	130.45 ~ 130.50	130.48	10.45	71.26	
HDB-5	132.60 ~ 132.65	132.63	9.33	74.21	
HDB-5	133.90 ~ 134.00	133.95	6.72	79.31	
HDB-5	134.30 ~ 134.35	134.33	7.76	77.00	
HDB-5	135.15 ~ 135.20	135.18	11.55	68.66	
HDB-5	136.25 ~ 136.30	136.28	7.67	80.14	
HDB-5	393.95 ~ 394.00	393.98	8.67	74.32	
HDB-5	394.40 ~ 394.45	394.43	12.35	69.39	
HDB-5	394.60 ~ 394.65	394.63	13.40	67.17	
HDB-5	394.65 ~ 394.70	394.68	8.83	79.41	
HDB-5	394.80 ~ 394.85	394.83	6.52	84.23	

図 3.3-14 には HDB-5 孔の EMI マーカー2.1 と 2.2 を含む層準の EMI 画像と岩芯写真を示す。岩芯写真の深度 132.0m 付近に 2 つの炭酸塩岩ノジュールが認められ、これを EMI 画像で認められる高比抵抗層に対比した。ここでは EMI 画像と岩芯写真の間に深度のずれはない (図 3.3-14)。ただし、各種の比抵抗検層カーブはほぼ 0.3m 浅い方にずれている。岩芯は EMI 画像で層状構造が認められる層準付近において細かく破碎されているが、その層準は EMI 画像の色調変化と一致しているわけではない。EMI 画像では 135m 付近に厚さ 30cm 程度の低比抵抗層が認められるが、岩芯の破碎区間は厚さ 1.5m におよんでいる。比抵抗検層カーブのうち最も解像度の高い

MSFL は EMI 画像の低比抵抗層に調和的な値を示し、厚さ 30cm の低比抵抗層が挟在することを示している。また、図 3.3-14 には EMI 画像で認められる層状構造の特徴的な箇所の Al_2O_3 と SiO_2 含有量を同時に示す。これらの含有量も岩芯写真と同様に EMI 画像と対比してある。EMI 画像で高比抵抗を示す層準は Al_2O_3 含有量が少なくなり、 SiO_2 含有量が多くなる傾向が明瞭に認められる。

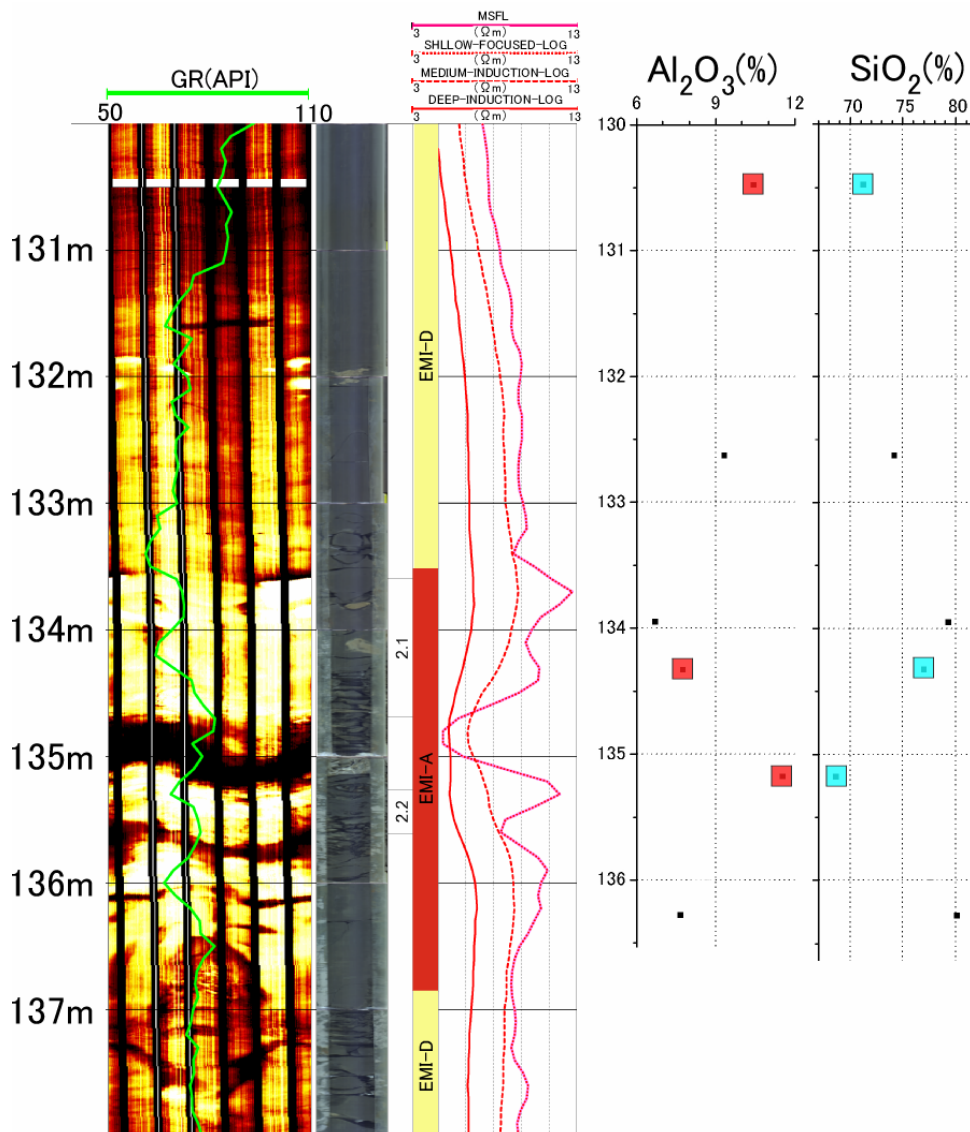


図 3.3-14 EMI マーカー2.1 と 2.2 を含む層準の EMI 画像，岩芯写真および化学組成
EMI 画像に重ねてある緑色線は GR 値を，その隣の赤色の線は各種の比抵抗値を示す。化学組成のうち，計 4 つある小さい黒四角は補助的に行った分析結果である。化学組成分析結果は表 3.3-1 に示す。

図 3.3-15 には HDB-5 孔の 393～394m 層準の EMI 画像と岩芯写真を示す。岩芯写真の深度 391.00m 付近に 2 つと 395.70m 付近に 1 つの炭酸塩岩ノジュールが認められ，これを EMI 画像で認められる高比抵抗層に対比し，岩芯深度をほぼ 0.9m 浅い方にずらしてある（図 3.3-15）。また，EMI 画像との対比から各種の比抵抗検層カーブ

は 0.22m 深い方にずれていることが分かる。EMI 画像の 393m と 394m の間に厚さ 50cm 程度の低比抵抗層が認められる。この厚さは比抵抗検層カーブのうち最も解像度の高い MSFL が示す低比抵抗層の厚さと調和的である。この深度区間で岩芯深度 394.50~394.65m (EMI 深度 393.60~393.75m) にフラクチャーが密に発達し、岩芯は数 cm 角の岩片に破碎されている。この岩片の硬さは周囲の岩芯とほとんど変わらないが、岩片間には未固結の粘土が詰まっている。とくに岩芯深度 394.60~394.61m (EMI 深度 393.70~393.71m) の厚さ 1cm はほぼ粘土のみからなり、断層粘土様である。図 3.3-15 にも EMI 画像で認められる層状構造の特徴的な箇所 Al₂O₃ と SiO₂ 含有量を同時に示してある。これらのデータも岩芯写真と同様に EMI 画像に対比するように深度を上にも 0.90m ずらして示してある。EMI 画像で高比抵抗を示す層準は Al₂O₃ 含有量が少なくなり、SiO₂ 含有量が多くなる傾向が明瞭に認められる。

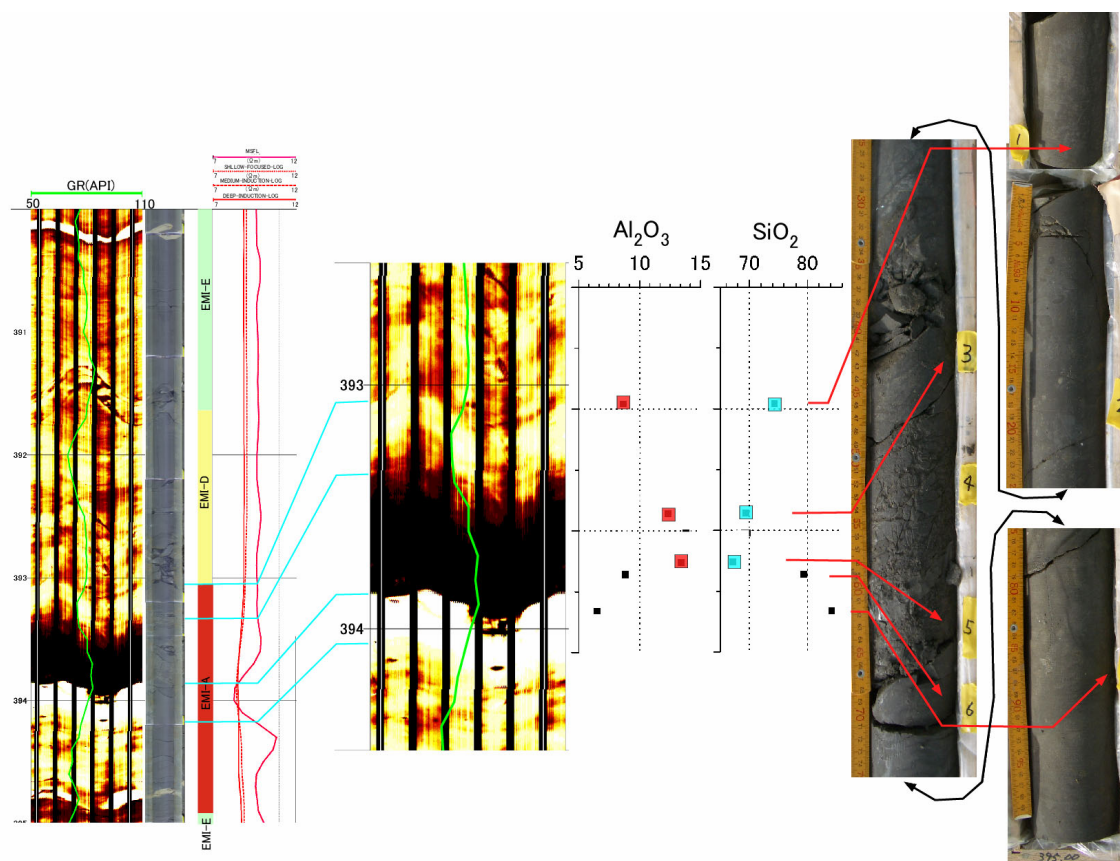


図 3.3-15 393~394m 層準を含む EMI 画像、岩芯写真および化学組成

EMI 画像に重なって示されている緑色の線は GR 値、その隣の赤色の線は各種の比抵抗値を示す。化学組成のうち、計 4 つある小さい黒四角は補助的に行った分析結果である。化学組成分析結果は表 3.3-1 に示す。

化学組成とそれに対応する比抵抗検層データとの関係を図 3.3-16 に示す。各層準毎に Al₂O₃ 含有量と比抵抗値は直線関係で良く相関しているのが分かる。EMI 検層では孔壁極近傍の導電率を測定しているの、ここで用いた比抵抗は最も浅い探査深度の

検層種目である MSFL から得ている。

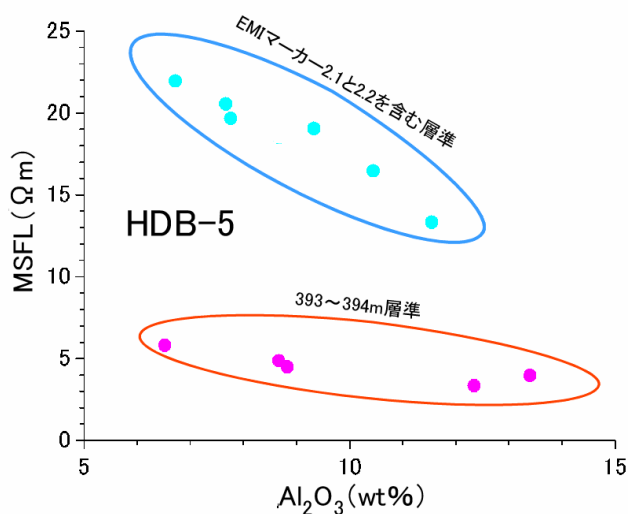


図 3.3-16 Al₂O₃ 含有量と比抵抗値との関係。

3. 4 考察

3. 4. 1 EMI 画像に認められる厚さ 10cm~1m オーダーの層状構造 (0.1~1mEMI 層状構造) の性状とその成因

EMI画像上での層状構造と化学組成はよく相関し、高比抵抗層ではAl₂O₃が少なく、SiO₂が多くなり、低比抵抗層ではこの逆の関係がある。今回、層状構造と化学組成の関係を検討した2層準では0.1~1mEMI層状構造の低比抵抗層を中心にフラクチャーが発達しているのが共通して認められた。掘削泥水に比べ地層水の比抵抗が低いので、0.1~1mEMI層状構造はフラクチャーに沿って湧出する地層水を反映している可能性がある。しかしながら、フラクチャー発達層準と低比抵抗層は正確には一致しているわけではないので、フラクチャーからの湧水は直接0.1~1mEMI層状構造に反映していないと判断した。また、0.1~1mEMI層状構造はボーリング孔間で対比されるので、断層等ではなく、初生的な岩相そのものを反映していると判断される。さらに、このことは図3.3-16に示した岩芯のAl₂O₃含有量と比抵抗値との関係からも支持される。すなわち、採取した岩芯試料のAl₂O₃含有量が比抵抗値と良く相関している。

昨年度の委託研究(増井ほか, 2004)ではGR値に厚さ10~20mオーダー周期の増減(10~20mGR変化)を認め、この増減は珪藻と碎屑物の含有量の変化を反映していると推測した。また、原(2004)は化学組成からその推測を裏付けるとともに、その要因についての検討も行っている。今回、0.1~1mEMI層状構造で認められた低比抵抗層および高比抵抗層と化学組成の関係は原(2004)が示した10mオーダーGR変化でのGR値が高い層準および低い層準と化学組成の関係と一致する。このことは10mオーダーのGR値の変化と同様の変化が数10cm~1mオーダーでも現れていることを示す。すなわち、EMI画像で認められる数10cm~1mオーダーの層状構造は

珪藻と砕屑物の含有量の違いを反映していると考えられる。

福沢（1988）は稚内層の層状珪質岩を A～E の 5 つのタイプに分類し、その分布とその堆積場の解釈に基づいて、ほぼ南北に伸びるトラフ状地形が発達していたと推測している。本研究における、昨年度の報告書（増井ほか、2004）にも記したように、福沢（1988）は稚内トラフ内の陸棚斜面に沿って湧昇流が発生し、外側陸棚から陸棚斜面にかけては珪藻の活発な生産活動場となるとした。そして、このような珪藻が定常的に堆積する場に陸源砕屑物が流入し、珪藻と陸源砕屑物の混合物が堆積してタイプ A と B が形成され、さらにそれらが再移動して陸棚斜面を流下し、陸源堆積物が定常的に堆積する場に達して堆積しタイプ C と E が形成されたとした。ただし、D タイプに関して、福沢（1988）は堆積場を特定していない。

今回のボーリング孔はこの稚内トラフの東側の外側陸棚～陸棚斜面に位置すると推定される。これにしたがうと 0.1～1mEMI 層状構造も外側陸棚～陸棚斜面の定常的に珪藻殻が堆積している場で形成されたことになる。すなわち、そのような定常的な堆積物で高比抵抗層が形成され、そこにストームなどにより発生した密度流が流入することで粘土～シルトサイズの陸源砕屑物が珪藻と混合して運搬され低比抵抗層が形成されたと推定することができる。

0.1～1mEMI 層状構造に対比されるコアにはこの推測を支持するような証拠は肉眼では観察できない。ただし、図 3.3-15 の EMI 画像の低比抵抗層は基底面がシャープで、上面は漸移的であるのが認められる。また、 SiO_2 と Al_2O_3 含有量も、高比抵抗層から低比抵抗層への境界付近では急激に変化し、低比抵抗層から高比抵抗層へは緩やかに変化している。これらの事実は上記の推定と矛盾しない。すなわち、定常的に珪藻殻が堆積している場に砕屑物と珪藻の混合物が密度流として流入し、はじめにより密度の大きい砕屑物に富む粒子を、あとに珪藻に富む粒子を堆積させたと説明できる。このことはこの低比抵抗層が単層の極細粒タービダイトと解釈できることを示す。一方、図 3.3-14 の低比抵抗層は基底面、上面ともに比較的明瞭に見える。これも図 3.3-15 の低比抵抗層と同様に解釈するなら、今回の分析では検出できないぐらいに薄い、おそらく厚さ数 mm のタービダイト単層が複数積み重なっていると解釈することは可能である。いずれにしても、陸源砕屑物は極細粒であるので、おそらくタービダイト・システムの末端部分に位置するか、全般的に粗粒砕屑物の供給量が少ない時代、あるいは場所であったと考えられる。

図 3.3-15 の EMI 画像の低比抵抗層は全体がシルトサイズ以下の粒子サイズで、定常的には珪藻質泥岩が堆積し、それに陸源砕屑物が基底から上方に減少する特徴を示す。これは陸棚に堆積した層状珪質岩である福沢（1988）のタイプ A と B のうち、タイプ B に類似する。また、図 3.3-14 の陸源砕屑物が基底から上方に粒度変化を示さない場合は福沢（1988）のタイプ D に類似する。しかしながら、福沢（1988）のタイプ B は珪藻質泥岩と砂質泥岩の互層であり、陸源砕屑物の基底面が削剥面である場合があること、その粒子サイズが細～中粒砂に達することがあること、などの点で図 3.3-14 と図 3.3-15 で認められた 0.1～1mEMI 層状構造とは異なる。また福沢（1988）の調査した稚内層とボーリング孔での稚内層が同じものかにも議論の余地がある。したがって、今回認められた 0.1～1mEMI 層状構造に福沢（1988）の層状珪

質岩の分類が適用できるかは今後の課題である。

3.3.3 章に記述したように、EMI 画像における層状構造は 10～20m オーダーの周期でもボーリング孔間でよく対比できる（図 3.3-1, 8～11, 13）。EMI 画像における低比抵抗層は GR が周囲に比べ高い層準とほぼ一致し（図 3.3-8～11, 13）、Al₂O₃ 含有量が高い区間とも一致する（図 3.3-14）。このことは、EMI 画像における低比抵抗層が相対的に珪藻に対して陸源碎屑物の流入量が増加した層準であることを示している。また高比抵抗層はその逆を示す。そして、このような層準はボーリング孔間において対比可能であることから、局地的な珪藻生産量の変化や陸源碎屑物流入量の変化によるものではなく、湧昇流の変動や気候変動による海水準の低下など、よりグローバルな変化によりこれらが変化した可能性がある。

3.4.2 各ボーリング孔における堆積速度と GR 値や EMI 画像で認められる不均質性の周期性

珪藻化石分析によって、ボーリング孔間で GR のパターンによって設定、対比された各マーカの年代が推定された（第 2 章参照）。それによると、増幌層トップが 12.5Ma、稚内層内のマーカ GR2 (B4) が 7.5Ma、11.1/YL (D3) が 5.8Ma、6 (T6) が 5.5Ma、稚内層トップのマーカ LB (C2) が 5.2M となった（表 2.3-1, 図 3.3-1, 表 3.4-1）。ただし、これらの年代には珪藻化石の産出層準が限られているなど、問題点があり、今後さらに検討を要するかもしれない。今回のスタディーでは、現段階で確定した年代値と圧密補正した層厚を使って、稚内層トップ LB (C2) からマーカ GR2(B4)までの堆積速度を求めた（表 3.4-1）。各ボーリング孔とも新しい時代ほど堆積速度が大きくなっている。また HDB-2 孔は他のボーリング孔と比べて、堆積速度が小さい。この理由についてはよくわからないが、堆積システムに何らかの違いがあるのか、あるいは年代値に問題があるのかも知れない。

表 3.4-1 ボーリング孔毎の堆積速度（圧密補正後）

マーカ	時代 (Ma)	期間 (m.y.)	HDB3 堆積速度 (m/m.y.)	HDB1 堆積速度 (m/m.y.)	HDB5 堆積速度 (m/m.y.)	HDB2 堆積速度 (m/m.y.)
LB(C2)	5.2					
		0.3	1,086.0	982.7	816.5	519.8
6(T6)	5.5					
		0.3		730.5	723.8	417.2
11.1/YL(D3)	5.8					
		1.7		257.7	283.2	221.4
GR2(B4)	7.5					

空欄は対比マーカがないため計算できない区間。

各ボーリング孔の稚内層（マーカ GR2～LB）では、GR が 50～110API の幅で高～低～高と周期的に変動している。1つの GR の高～低～高のサイクルはマーカ 1

～6, 6～11.1/YL, 11.1/YL～15, 15～GR2 の4つ認められる(図 3.3-1)。堆積速度、圧密の割合が一定と仮定して、各サイクルのおおよその堆積期間を比例配分を用いて計算した(表 3.4-2)。やはり新しい時代のサイクルほど形成期間は短い、理由は不明である。3.4.1 で記述したように、各サイクルが全域的に同時代的に起こっていることから、気候や海水準変動などのグローバルな変動によって珪藻と碎屑物の割合が周期的に変動したために形成されている可能性が高い。

表 3.4-2 各サイクルの堆積期間(万年)

	HDB3	HDB1	HDB5	HDB2
マーカー区間	堆積期間(万年)	堆積期間(万年)	堆積期間(万年)	堆積期間(万年)
1～6	23	22	23	
6～11.1/YL		30	30	30
11.1/YL～15		80	91	70
15～GR2		86	89	95

空欄はマーカーがないため、計算できない区間。

また GR の値がこれより短い周期(10m オーダー)でも高～低～高と規則的に変動している(図 3.3-1)。マーカー1～6の間には5つ、マーカー6～11.1/YLの間には5つ、マーカー11.1/YL～15の間には5つ、マーカー15～GR2の間には4つのサイクルがみられる。堆積速度が一定と仮定し、これらの短周期のサイクル1つ当たりの堆積期間を求めると、マーカー1～6の間は約4.5万年、マーカー6～11.1/YLの間は6万年、マーカー11.1/YL～15の間は16万年、マーカー15～GR2の間は22.5万年となる。この GR の高～低～高と変動するサイクルも、前述のサイクルよりさらに高周期の気候や海水準変動によって形成されたと考えられる。

ボーリング孔にみられる最も短い周期のサイクルが、3.4.1 章に記載されている 0.1～1mEMI 層状構造である。これらはボーリング孔間で対比でき、組成変化がこの地域で周期的に起こっていることがわかる。0.1～1mEMI 層状構造で認められる変化周期を前述した年代値から検討すると、数千年～数万年周期となる。

4 ボーリング孔で認められる岩相の不均質性はこれら3つのオーダーの変化の重なり合いを反映していると解釈できる。図 3.4-1 には、そのうち珪藻含有量と碎屑物含有量の関係が明らかとなっている2つのサイクルを概念的に示した。ただし、それぞれの絶対量はわかっていないので、ここで示すのはあくまでも相対量の変化である。また、最も大きな50m オーダーのサイクルは珪藻と碎屑物含有量の関係はまだ明らかとなっておらず、GR 値の変化のみによって認められたサイクルであるので、図からは省いた。さらに原(2004)は GR 値に200m オーダーのサイクルも認めているが、同様に図からは省いた。

地球の自転軸の傾きや公転軌道の変動によって引き起こされるミランコビッチサイクルには、様々な周期があるが、自転軸の傾きの変動による周期は約4.1万年、自転軸の歳差運動の周期には2.3万年と1.9万年があり、公転軌道の離心率による周期は約10万年と約41万年があるとされている。このような変動が地球の気候に周期的な

変化をもたらす、珪藻の生産量に変化が生じている可能性がある。GR にみられる周期性は、ミランコビッチサイクルによる気候変動のいずれかと対応しているのかもしれない。

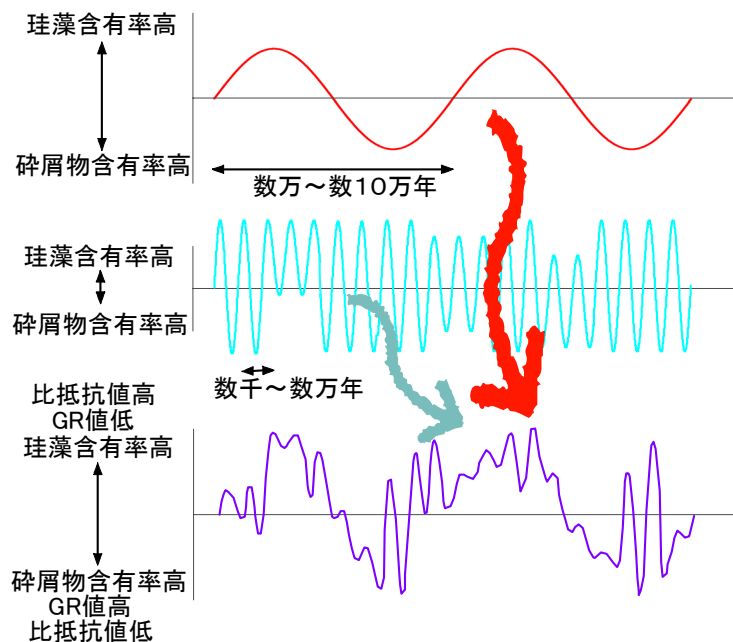


図 3.4-1 HDB ボーリング孔で認められる珪藻質泥岩に認められる不均一性をもたらした要因の周期性の概念図

3. 4. 3 EMI 画像に認められる厚さ 10cm～1m オーダーの層状構造 (0.1～1mEMI 層状構造) の発達層準

EMI ファシスのうち層状構造が比較的明瞭に認められる EMI-A や-B ファシスは 10m オーダーGR 変化で GR 値が低い層準に発達し、不明瞭な EMI-D や-E ファシスは GR 値の高い層準に発達する傾向がある (図 3.3-1)。また、それらの EMI ファシスの分布は、4 ボーリング孔間で 2003GR マーカー、2004GR マーカーおよび EMI マーカーの対比とほぼ調和的で斜交しない (図 3.3-1)。ただし、10m オーダーGR 変化で GR 値が高い層準で層状構造がない EMI-E ファシスが常に発達するわけではなく、ふつうは不明瞭ながら層状構造が認められる。すなわち、GR 値に関わらず層状構造は発達するが、10m オーダーの GR 変化で GR 値が高い層準では層状構造が不明瞭になっていると解釈できる。

3. 5 まとめ

- ① EMI で認められた層状構造は、高比抵抗層と低比抵抗層の互層からなる。それらがボーリング孔間で対比できたことから、この層状構造は堆積盆内で同時的に形成されたと考えられる。

- ② 層状構造のうち、高比抵抗層は碎屑物含有量が少なく、珪藻含有量が多い。低比抵抗層はその逆の特徴を示す。
- ③ 層状構造をもたらした組成の変化周期は、数千～数万年である。また昨年度明らかになった GR 値に認められる厚さ 10～20m の変化周期は、数万～数十万年である。
- ④ GR 値と岩芯観察では認められなかった厚さ 10～1m オーダーの不均質性が EMI で認めることができた。

4. 地震探査データの GDI システムを用いた岩相解析

4. 1 目的

本解析の目的は、Geology Driven Integration (GDI) システムを幌延地域に適用し、既存ボーリング孔データから得られた岩石物性と、地震探査データに記録された地震波属性との相関関係を導き出して、稚内層と声間層の岩相変化を空間的に予測することである。

4. 2 GDI 解析手法

4. 2. 1 GDI について

GDI システムは、次元やスケール、確実性の異なる各種のデータや情報を、統計的手法 (Monte Carlo 法) を用いて統合的に解析し、岩石性状の空間的分布予測、地震探査データのパターン解析、地震探査データの感度分析 (Sensitivity Analysis) といった定量的解釈を行うことを主な目的とするソフトウェアである。

一般に、ボーリング孔データから求めた岩石性状とそれに対応する地震波属性との相関関係を統計学的に求めるためには、多数のボーリング孔データとそれに対応する震探トレースが必要とされる。このため、調査あるいは開発の初期段階においてボーリング孔数が少ない場合は、岩石性状と地震波属性との相関関係を統計的に導くためのデータが不十分であり、いわゆる「地球統計学」的な手法を摘要することは躊躇される。しかし、GDI システムを用いた解析手法は、このような段階においても効力を発揮する。

実際に掘削されたボーリング孔が少ない場合でも、通常の地質技術者らはその他の多くの地質的な情報を持っている。GDI システムのユニークな点の一つは、このような各種地質情報を拘束条件として加味したモンテカルロシミュレーション (Monte Carlo Simulation) を実行することによって、多くの擬似ボーリング孔とそれに対応する震探トレースを合成することができることである。モンテカルロシミュレーション法で創出したボーリング孔は実際のボーリング孔ではないが、対象地域の岩石物性の変化を反映させたものであり、実際のボーリング孔データと同様に、これら擬似ボーリング孔のデータも利用することによって、データが不十分であるという問題を解決することが可能となる (de Groot, et al., 1996; Nakayama and Hou, 2001)。

GDI システムにとって最も重要なものは、

- ① 地質層序統合モデル (Integration Framework) の設定、
 - ② モンテカルロシミュレーション (Monte Carlo Simulation) の実行によるより多くの岩質物性データの獲得、
 - ③ アーティフィシャルニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) 法による岩質物性と地震波属性の導出、
- の三つである。GDI 解析における作業の流れを図 4.2-1 に示す。

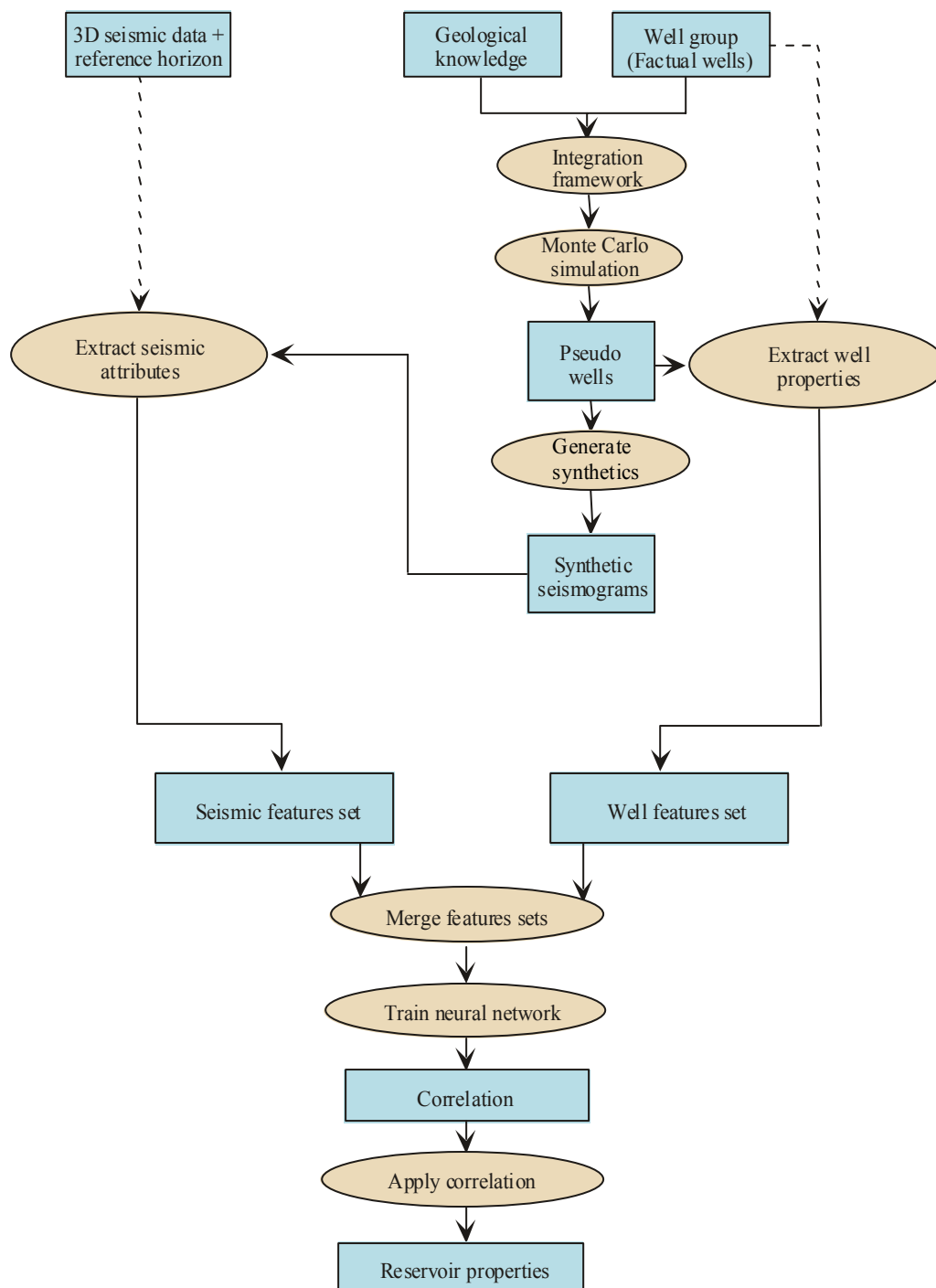


図 4.2-1 岩石物性の GDI 解析の流れ

4. 2. 2 地質層序統合モデル

「地質層序統合モデル」とは、各種の地質データ（層序、層厚や岩質等）、検層ログおよび地質技術者が持っている対象地域の地質知識（Geological Knowledge）を統合して設定されるモデルであり、GDI ではそれをもとに架空ではあるが可能性のある多

くの地質状況をモンテカルロ法によって作り出す。ニューラルネットワークはそれらの岩石物性と地震波属性の相関性を人間の脳の認識過程を模放して数学的に関連させるものである。

地質層序統合モデルの設定においては、既存ボーリング孔データと地質資料を用いて、対象地域の層序、層厚および岩質と検層ログとの関連を導き出し、対象地域の地層モデルを構築することが必要である。GDI でのすべての分析、計算はこの地質層序統合モデルで設定された各種地質データ、検層ログデータの階層（Hierarchical Layer）およびそれらの相関関係に従って行われる。

4. 2. 3 モンテカルロシミュレーションの実行（擬似ボーリング孔の作成）

モンテカルロ法を用いた擬似ボーリング孔の生成においては、まず、地質層序統合モデルにおいて定義した各地層ユニット、各岩質ユニットの層厚、地震波速度、密度、インピーダンスおよび間隙率を個別の独立したインプット・パラメータとして仮定し、その上で既存ボーリング孔データに基づいた地質状況を基本とし、地域地質に関する情報と知識を拘束条件として、各層における各々のパラメータの確率分布をそれぞれ設定する。次に、設定した各層の砂岩、泥質岩の層厚、間隙率、地震波速度および密度を乱数表に従って独立に変化させて、より複雑な地質状況を反映した擬似ボーリング孔を得る。このように作成した擬似ボーリング孔は具体的な空間位置を持たないが、対象地域内のどこかに存在する可能性を持っているので、後述するニューラルネットワーク解析手法を適用することができる。さらに、対象地域の地震データから抽出したウェーブレット（基本地震波形）を用い、各々の擬似ボーリング孔について合成地震記録を作成する。したがって、地質層序統合モデルを設定する段階では各種地質資料と地域地質に関する知識の統合が必要であり、擬似ボーリング孔と合成地震記録を生成する段階においては地質資料と地震探鉱データの統合が前提とされる。なお、地質層序統合モデルの構築とモンテカルロシミュレーションのパラメータの設定には解析者（GDI 使用者）の地質解釈結果が大きく反映され、解析結果の正しさにも影響を与える。

4. 2. 4 アーティフィシャルニューラルネットワークの応用

擬似ボーリング孔の岩石物性と地震波属性との相関関係を導出するため、ニューラルネットワーク法を利用する。ニューラルネットワーク法にはいくつかの学習アルゴリズム（Learning Algorithm）があるが、岩石物性の側方変化の予測では、後向き演算（Back-propagation）アルゴリズムがよく用いられている。後向き演算アルゴリズムは三つの層、すなわち、いくつかの入力結節点（Input Node）からなる入力層（Input layer）、一つあるいはいくつかの出力結節点（Output Node）からなる出力層（Output Layer）、いくつかの結節点からなる隠れた中間層（Hidden Layer）から構成される（図 4.2-2）。

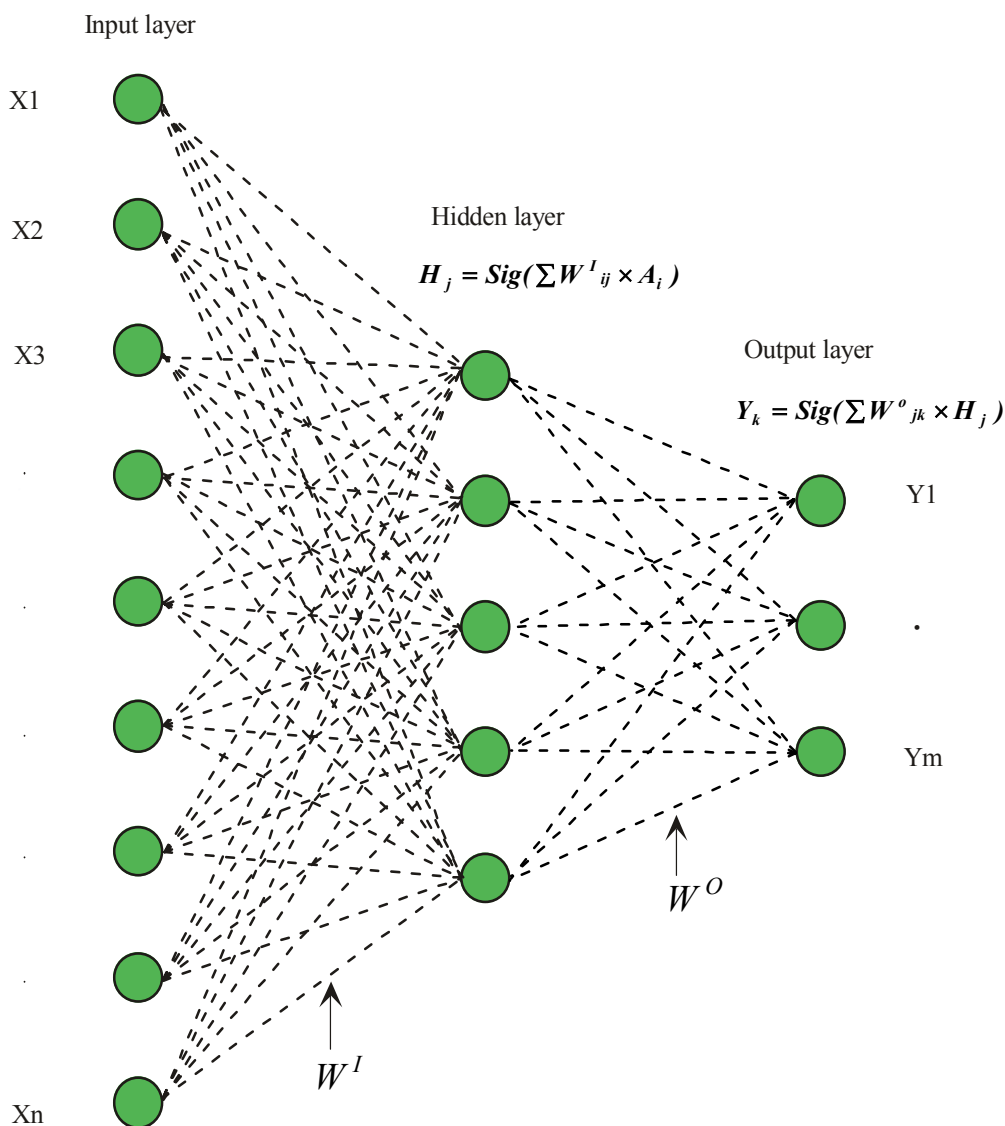


図 4.2-2 後向き演算アーティフィシャルニューラルネットワークの基本構造

W^I : 入力層と中間層を繋ぐ重みづけベクトル

W^O : 中間層と出力層を繋ぐ重みづけベクトル

Sig.: sigmoid 指数関数 $f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1$

GDIにおいては、ニューラルネットワーク(ANN)が入力結節点(地震波属性)と出力結節点(岩石物性)との間の非線型関係を導き出す手法として利用されている。GDIでは、後向き演算アルゴリズムの基本計算式がいくつかあるが、よく利用されるのはSigmoid 指数関数(Exponential Function)である。Sigmoid 指数関数の基本算出式は以下の通りである。

$$H_j = \text{Sig}(\sum W^{I_{ij}} \times A_i) \quad (4.1)$$



$$Y_k = \text{Sig}(\sum W^{O_{jk}} \times H_j) \quad (4.2)$$

Sig は Sigmoid 指数関数 :

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1, \quad x = \sum W_i \times X_i \quad (4.3)$$

ここで、A は入力値（地震波属性）、W^I は入力層と隠れた中間層を繋ぐ、重みづけベクトル（Weighting Vector）、Y は出力値（岩石物性）、W^O は隠れた中間層と出力層を繋ぐ、重みづけベクトル（Weighting Vector）、i は入力結節点の数（入力値数）、j は隠れた中間層の結節点の数、k は出力層の結節点の数（出力値数）である（図 4.2-2）。ANN とは、上式において各入力を適当に重みづけしたものをすべて足し合わせた値を出力とし、これが実際の岩石物性値に近づくように重みづけを変化させていき、計算された出力値と実際の岩石物性値との差が最小になるような最適の重みづけを決定するものである。この計算はシステム内で完全に自動化されている。

計算するには、上記の Multi-Layer-Perceptrons ネットワークを基本式として、地震波属性と岩石物性との相関式を求める。まず、

$$H_j = \text{Sig}(\sum W^{I_{ij}} \times A_i) \quad (4.4)$$

と置いて、中間層の j 個の結節点の値 H_j を求め、これらを出力層に対する入力値と見なして、ネットワーク基本式を使って最終出力値 Y_k を、

$$Y_k = \text{Sig}(\sum W^{O_{jk}} \times H_j) \quad (4.5)$$

として求める方法である。こうして 2 重にネットワーク基本式を作用させる。

ニューラルネットワークが訓練される毎にニューラルネットワークから算出された岩石物性の計算値とボーリング孔（既存ボーリング孔あるいは擬似ボーリング孔）から得られた“真実値”との間の Normalized RMS 誤差が計算される。誤差の計算式は以下の通りである：

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - e_i)^2} \quad (4.6)$$

$$norm \ .rms = rms / \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - mean)^2} \quad (4.7)$$

$$mean = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.8)$$

ここで、nは入力値の数、tはボーリング孔（真実および擬似）から抽出した岩石物性値、eはニューラルネットワークで算出した岩石物性値である。

この Normalized RMS 誤差が小さければ小さいほど、GDI を適用して得られる岩石性状の分布予測結果の信頼性は高い (de Groot, et al., 1999)。一般的に、誤差が 0.8 ~ 0.5 になれば予測結果は“良好”であり、0.5 以下になれば“極めて良好”な結果であると言える。逆に、誤差が 0.8 以上になると、予測結果には無視できない程の誤差が含まれていると言える (dGB Earth Science, 2002)。

このように、ニューラルネットワークで決定されたボーリング孔（真実および擬似）における岩石物性と地震波属性との相関式を全地震探鉱記録に応用することにより、震探測線上のすべての点における岩石物性を推定することができる。

以上記述してきたように、GDI システムは、ボーリング孔データの限られる初期調査段階において、岩石性状の空間的分布を予測する上で有効な解析手段の一つであると言える。

4. 3 解析対象地域における GDI の適用

4. 3. 1 震探測線、ボーリング孔データおよび対象層

今回、GDI 解析を実施した震探測線は、幌延地域に既存する 3 本の東西方向に延びる 2 次元の地震探査測線 (ST96-2, ST96-3 および TP90-1D) と、1 本の南北方向の測線 (ST96-a) の 4 測線である (図 4.3-1)。ST96-2, 96-3, 96-a は、石油公団の平成 8 年度基礎物理探査「天北浅海」において取得された地震探査断面である。また、TP90-1D は、石油公団の平成 2 年度基礎物理探査「天北地域」において取得された地震探査断面である。

GDI 解析に用いたボーリング孔データは、HDB-1, HDB-2, HDB-3, HDB-4, HDB-5, HDB-6, HDB-8 および北川口 SK-1 の 8 本のボーリング孔である。

地質資料および既存ボーリング孔データによると、幌延地域の稚内層と声間層は、殆ど泥岩からなる。しかし、泥岩中の泥質物の含有率および粒度や鉱物組成の変化によって地層の不均質性が生じ、これに伴って、泥岩の間隙率および透水性は変化する。

既存のボーリング孔においては稚内層および声間層が確認されたが、ボーリング孔データが少ないため、広域的な岩質の変化については把握されていない。そこで、今回 GDI 手法を適用し、幌延地域に存在する 2 次元地震探査データを用い、稚内層上限から下位約 300m の層準 (以下稚内層上部層準と称す) と稚内層上限から上位約 100m の層準 (以下声間層下部層準と称す) を解析対象層として、間隙率 (Porosity) お

よび泥質含有率 (Vsh) の変化を予測した。

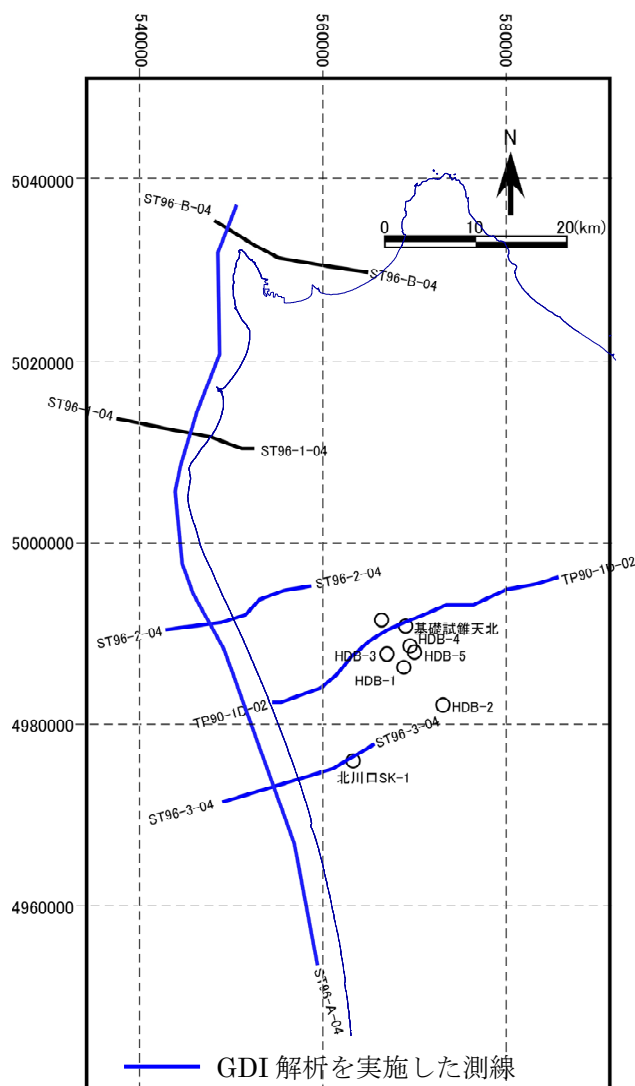


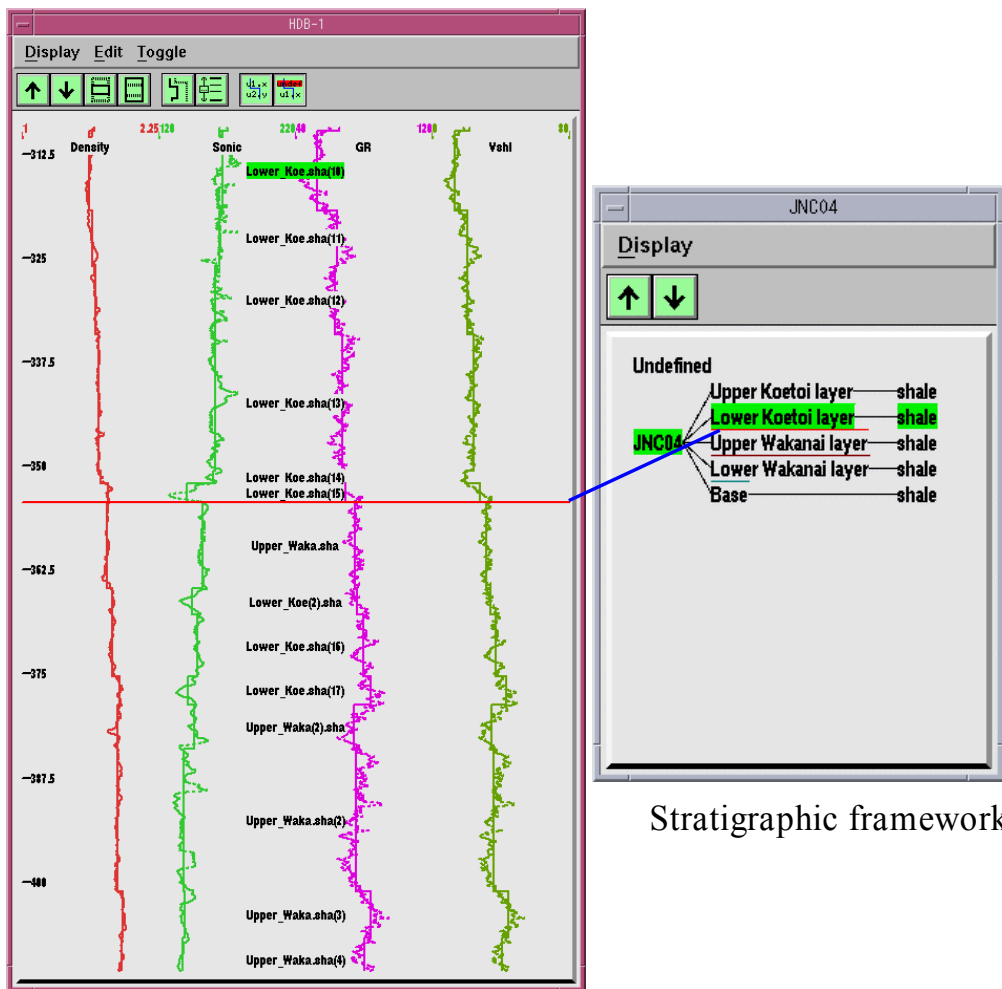
図 4.3-1 地震探査測線とボーリング孔位置

4. 3. 2 GDI 地質層序統合モデルの設定

対象地域の地層モデルを構築するために、既存ボーリング孔データ、広域地質資料および技術者の地質知識を統合して、地質層序統合モデル (Integration Framework) を設定した。

まず、対象地域の地質資料と既存ボーリング孔データに基づき、対象地域の地層層序を、五つの地層ユニット、すなわち、Upper Koetoi Layer, Lower Koetoi Layer, Upper Wakanai Layer, Lower Wakanai Layer および Base に区分した。各地層ユニットの岩質は、すべて泥質岩 (shale) で設定した (図 4.3-2)。Lower Koetoi layer ユニットと Upper Wakanai layer ユニットは、GDI 解析の対象層とした声間層下部層準と稚内層上部層準にそれぞれ相当する。

また、これと同時に、地層ユニットおよび岩質ユニットから構成される樹枝状構造層序表 (Framework) を作り (図 4.3-2), 各地層, 各岩質ユニットの物性量, たとえば地層の厚さ (Thickness), 音波速度 (Sonic), 密度 (Density), 間隙率 (Porosity) の確率分布を求めた。このような地質層序統合モデルの設定を通じて, 地層層序-岩質-物理検層データを統合させ, 対象地域の地層モデルを構築した。



Blocked well logs

図 4.3-2 既存ボーリング孔データと地質資料から構築した統合構造 (Integration Framework) (HDB-1 孔井の例)

4. 3. 3 擬似ボーリング孔の作成

前述のように、本スタディーで利用した、既存ボーリング孔データは 8 本である。しかし、ボーリング孔データから求めた岩石性状とそれに対応する地震波属性との統計的相関関係を求めるには、多数のボーリング孔データとそれに対応する震探トレースが必要である。既存ボーリング孔データのみを利用すれば、サンプルデータ不足の問題に遭遇する。この問題を解消するために、モンテカルロシミュレーション法を用い、擬似ボーリング孔の作成を試みた。

ここでは既存ボーリング孔データに基づいて構築した地質層序統合モデルを用い、各地層、岩質ユニットの層厚、音波速度(ソニックログ値)、密度および間隙率の確率分布およびそれらの相関関係を設定した上で、地質層序統合モデルで設定した各層泥質岩の層厚、間隙率、音波速度および密度を乱数表に従って独立に変化させ、対象地域に対して、500 本の擬似ボーリング孔を生成し、擬似ボーリング孔に対応する地震合成記録を作成した。作成した擬似ボーリング孔と合成記録の例を図 4.3-3 に示す。

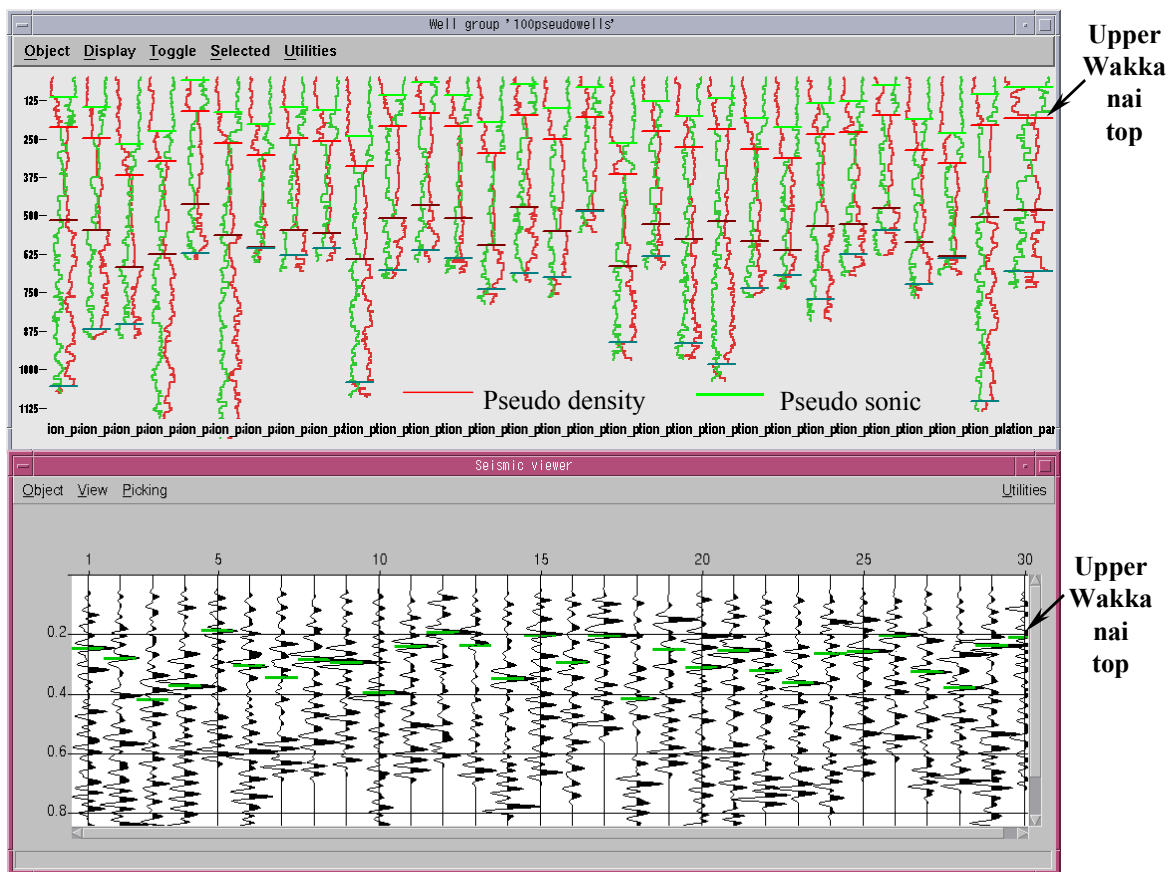


図 4.3-3 作成した擬似ボーリング孔(上)とそれに対応する合成地震記録(下)の例

4. 3. 4 擬似ボーリング孔と合成地震記録との相関性の考察

擬似ボーリング孔ログに反映される岩石物性と合成地震記録に反映される地震波属性との相関性を考察するために、前項で得られた擬似ボーリング孔と合成地震記録に基づいて以下のように抽出パラメータを設定した。すなわち、擬似ボーリング孔では

声問層下部層準と稚内層上部層準泥質岩の「平均間隙率(Porosity)」およびそれら部分の「泥質岩含有率 (Vsh)」を「岩石物性特徴セット」として抽出した。また、合成地震記録では地震波の属性，すなわち Sample(Amplitude:振幅値)，Energy(Σ Amplitude²)，Area(Sum Amplitude)，Zero Crossing(time)等を「地震波属性特徴セット」として抽出した(図 4.3-4)。Sample で表わされる「振幅値」は地震探査断面における解釈ホライズン (Interpreted Horizon) を挟む時間ゲート内でサンプルされた震探トレースの振幅値である。時間ゲートは，声問層下部層準では解釈ホライズンを基準として[-100~10msec]の範囲，また稚内層上部層準では解釈ホライズンを基準として[-10~200msec]の範囲とし、それぞれ 10msec 毎の震探トレースの振幅値とした。

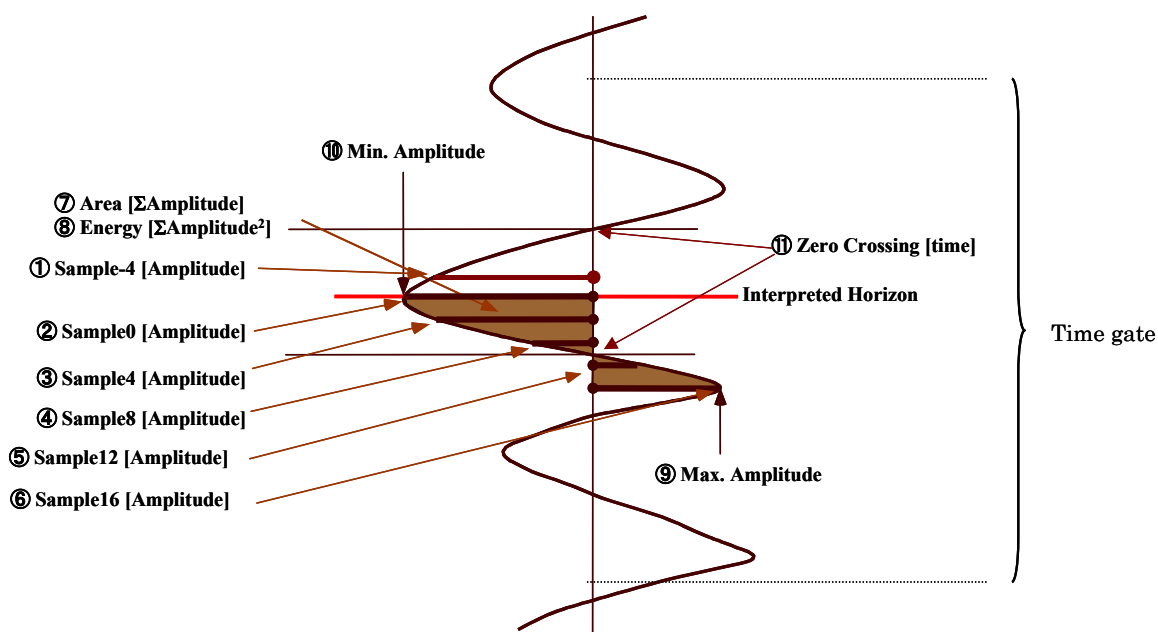


図 4.3-4 地震トレースから抽出した地震波属性の概念図

抽出した岩石物性特徴セットと地震波属性特徴セットをクロスプロットして，岩質物性と地震波属性との相関性を定性的に考察した。

図 4.3-5, 6, 7, 8 は声問層下部層準および稚内層上部層準の「平均間隙率 (Porosity)」および「泥質含有率 (Vsh)」と合成地震波属性とのクロスプロットである。これらの図のうち，稚内層上部層準と地震波属性の間には，強くではないが，明瞭な相関性が見られる(図 4.3-7, 4.3-8)。しかし，声問層下部層準と地震波属性の間では相関性がほとんど見られない(図 4.3-5, 4.3-6)。

このことは，稚内層上部層準については「間隙率」と「泥質含有率」をインプットデータとしてニューラルネットワークを訓練すれば「平均間隙率」，「泥質含有率」と地震波属性との相関性が導出される可能性があるが，声問層下部層準については，「平均間隙率」と「泥質含有率」と地震波属性との相関性を導出することは困難であることを示している。したがって，本スタディーでは，稚内層上部層準の「平均間隙率」

と「泥質含有率」の分布予測のみを実施することとした。

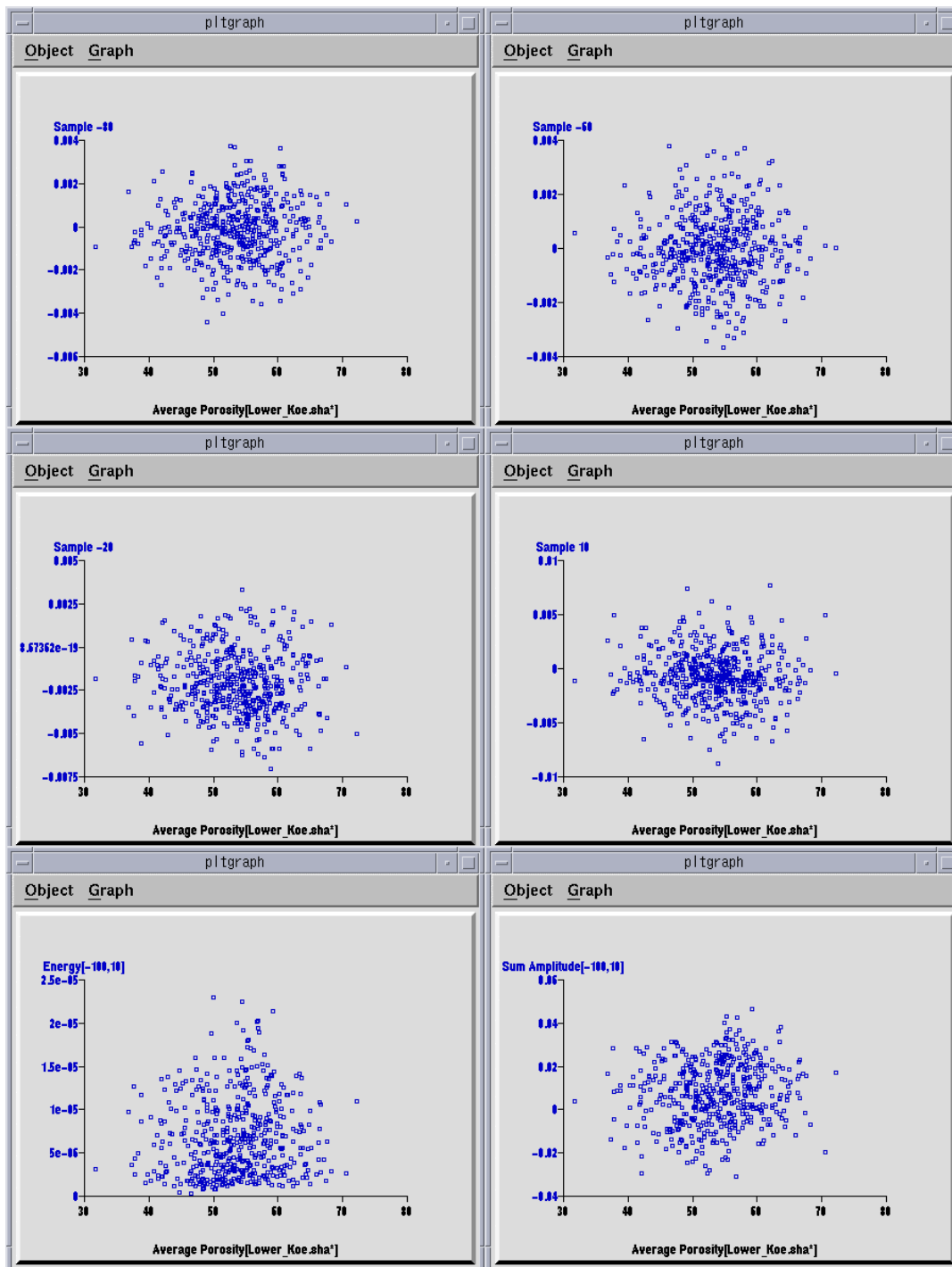


図 4.3-5 声問層下部層準の「平均間隙率」と地震波属性のクロスプロットの例

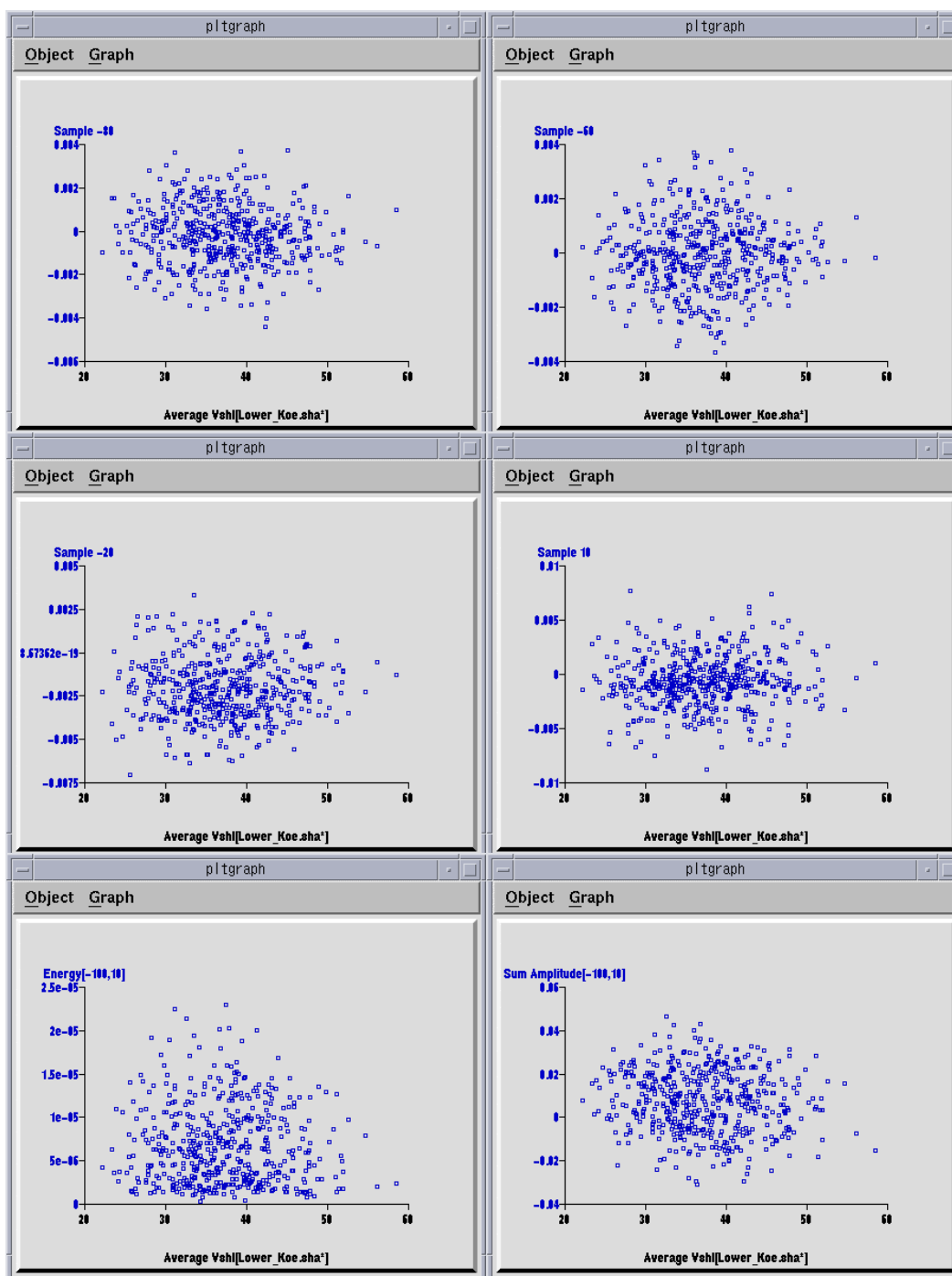


図 4.3-6 声問層下部層準の「泥質含有率」と地震波属性のクロスプロットの例

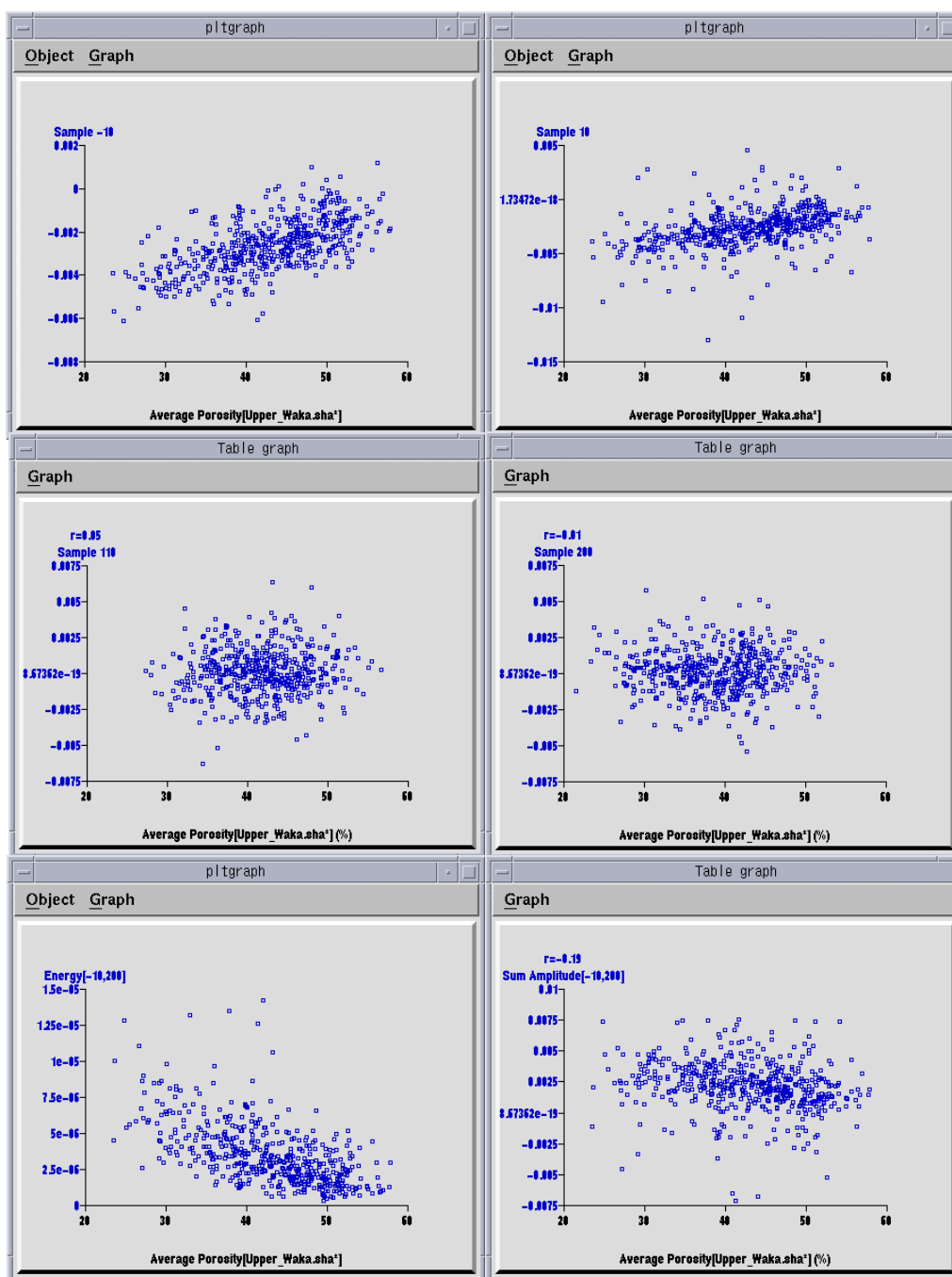


図 4.3-7 稚内層上部層準の「平均間隙率」と地震波属性のクロスプロットの例

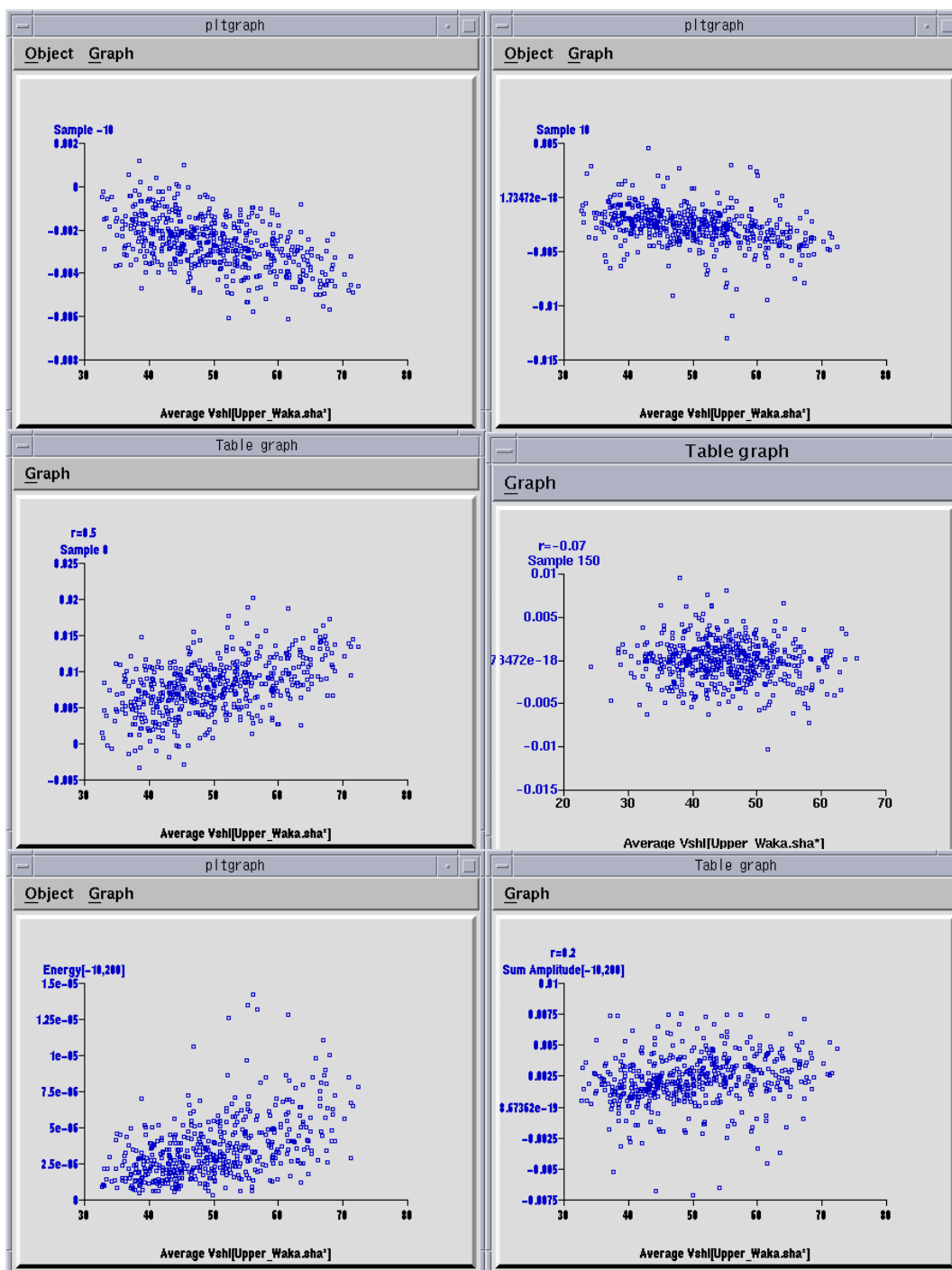


図 4.3-8 稚内層上部層準の「泥質含有率」と地震波属性のクロスプロットの例

4. 3. 5 ニューラルネットワークによる地震波属性と岩石物性の相関関係式の導出

対象地域の岩石物性と地震波属性との相関関係を導出するため、対象地域の稚内層

上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」に対して、図 4.3-9, 4.3-10 に示す 26 個の地震波属性を選び、ニューラルネットワークを訓練するためのインプットデータとした。

次に、ニューラルネットワーク法を用い、稚内層上部層準（稚内層上限から下位約 300m）を構成する泥質岩の「平均間隙率」および「泥質含有率」と地震波属性との相関関係式を導き出した。

ニューラルネットワークによる訓練を実施した結果導出された推定値と擬似ボーリング孔での値との間の相関、およびニューラルネットワークの繰り返し計算過程における Normalized RMS エラーの変化を、図.4.3-9 および図 4.3-10 に示す。本結果によれば、稚内層上部層準の「平均間隙率(Average Porosity)」と「泥質含有率(Vsh)」におけるニューラルネットワーク訓練エラー (Normalized RMS, 図.4.3-9 および図 4.3-10 の右下部に表示) は、繰り返し回数 (図中の"Nr vectors used") が 7500 回を過ぎると、ともに 0.8 程度に収束している。前節に述べたように、一般的に、RMS 誤差が 0.8~0.5 になれば予測結果は“良好”であり、0.5 以下になれば“極めて良好”な結果であると言える。したがって、ここで示した訓練結果は、誤差はある程度存在するものの、訓練結果から求めた相関関係式を、実際の震探データに適用することにより、稚内層上部層準の泥質岩の岩石性状の変化を予測できることを示している。

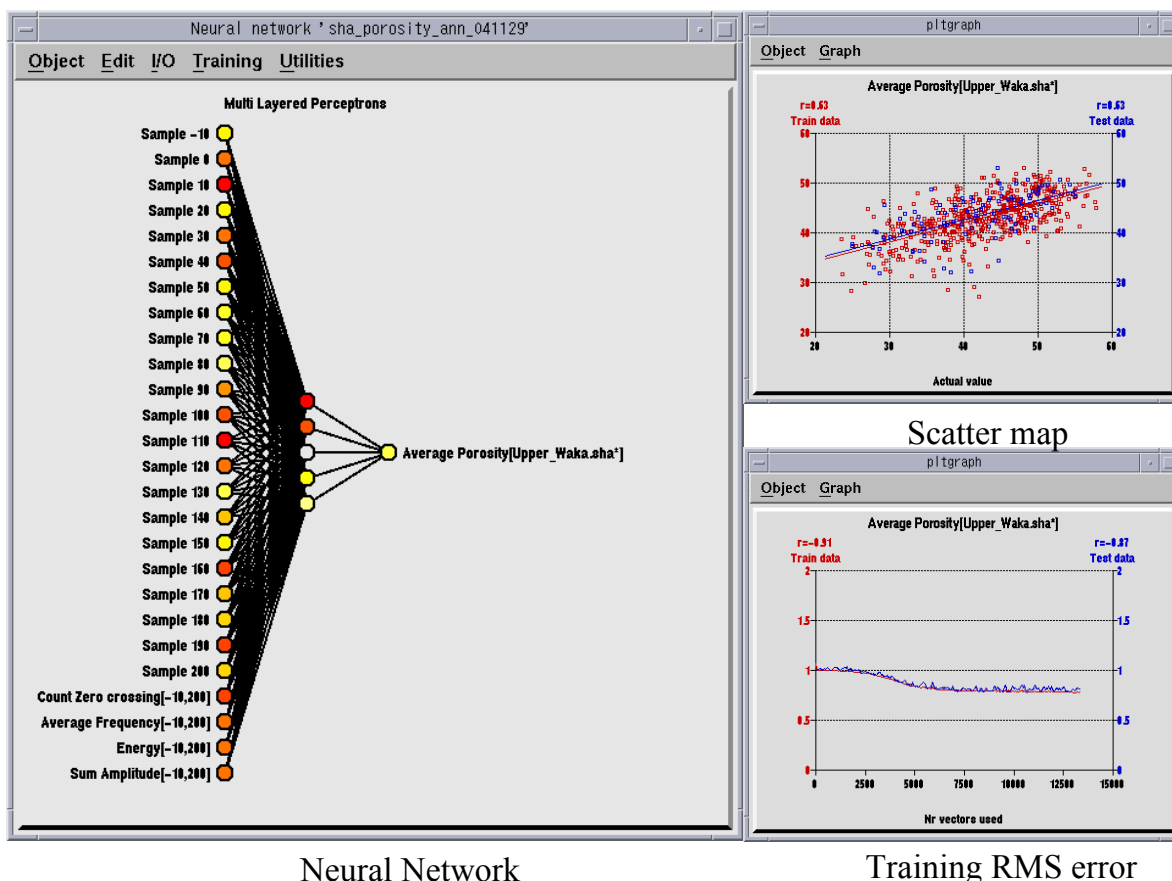


図 4.3-9 稚内層上部層準の「平均間隙率」を予測するために訓練した ANN とそのパフォーマンス

結節点の色は入力層の結節点（地震波属性）対出力層（岩石物性）の貢献度を示す。赤色は貢献度が高く、オレンジと黄色は中程度、白色は貢献度が低いことを示す。

Scatter map は ANN の計算値と擬似ボーリング孔から抽出した値の相関性を示す。

Training RMS error は ANN を訓練することによるエラーの変化を示す。

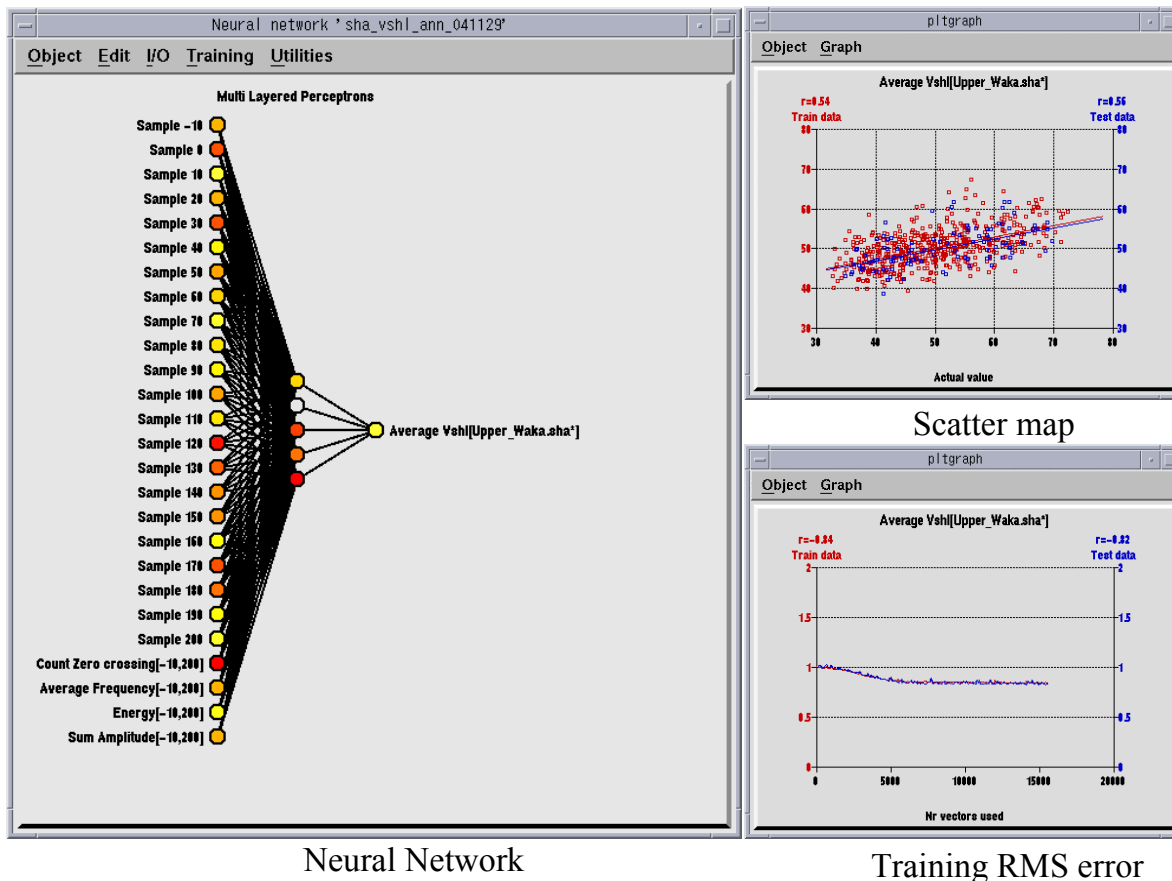


図 4.3-10 稚内層上部層準の「泥質含有率」を予測するために訓練した ANN とそのパフォーマンス

4. 3. 6 稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布予測

ニューラルネットワークによって導出された相関関係式を幌延地域の 4 本の既存二次元地震探査測線に適用し、これらの測線沿いの稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の側方への変化を予測した。予測結果を、図 4.3-11 および図 4.3-12 に示す。また、それぞれの地震探査測線における予測結果を、図 4.3-13, 14, 15, 16 および 17 に示す。

① 「平均間隙率」

稚内層上部層準の平均間隙率（図 4.3-11）は、全域にわたって 30～55%の範囲にあり、このうち大部分は 40%～50%と予測された。ST96-2 測線の中央部付近においては、間隙率が約 55%に達しており、対象地域において間隙率が最も高くなっている。また、TD90-1D 側線の西端と ST96-3 側線の中央部では間隙率が相対的に低くなる傾向が見られる。しかし、対象地域全域における明瞭な分布傾向は認められない。

② 「泥質含有率」

稚内層上部層準の泥質含有率（図 4.3-12）は全域に亘って約 40～80%位と推定さ

れた。大部分の地域では40%～60%の範囲で分布しているが、対象地域のほぼ中央部では泥質の含有率が最も高く、最大で70%以上に達すると予測された。また、対象地域における泥質含有率の分布は、北から南に向って低くなる傾向が見られる。

4. 3. 7 予測結果の検討

GDI手法を用い、幌延地域の稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布を予測した。予測結果によれば、「平均間隙率」は、対象地域全域でほぼ40%～50%の範囲にあるが、明瞭な分布傾向は認められない。これに対し、「泥質含有率」は、全地域ではほぼ40%～60%で分布しているが、北から南に向かって低くなる傾向が認められた。これは稚内層上部層準の珪藻化石の含有量が南部ほど増加することを示唆しているものと推定される。

4. 4 問題点および今後の課題

本スタディーでは、幌延地域で取得された、既存の二次元地震探査測線を利用し、稚内層上部層準における「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布を推定した。今回のスタディーでは、GDIシステムを適用することにより、対象地域において、地震探査記録から岩石物性の空間的な変化を予測することができることを示した。しかし、今回のGDIの解析結果を利用する際には、以下の点に留意する必要がある：

① 地震探査断面においては、大部分の稚内層上限の時間深度が2秒以下（約2000m以深）に位置する。これに対し、基本データとして利用した8本の既存ボーリング孔における稚内層上部の埋没深度は相対的に浅い。このことは、GDI解析において稚内層の間隙率として用いた値は、地震探査断面の位置における稚内層の間隙率より大きな値を適用している可能性があることを意味している。この結果、地震探査断面における稚内層の「平均間隙率」は、実際の値より大きめに予測されている可能性がある。

② 抽出した稚内層上部の岩石物性と地震波属性の間にある程度の相関性が認められたものの、ニューラルネットワークを訓練した結果において、RMS誤差が相対的に高かった。このため、間隙率や泥質含有率の予測結果にも、ある程度の誤差が含まれているものと考えられる。

③ 本スタディーで利用した既存ボーリング孔は、すべて測線から離れた位置に位置している。このため、GDIの解析結果を、ボーリング孔データとクロスチェックすることができなかった。したがって、GDIで予測した稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」と実データ（＝ボーリング孔データ）との誤差の程度を明確にすることはできなかった。

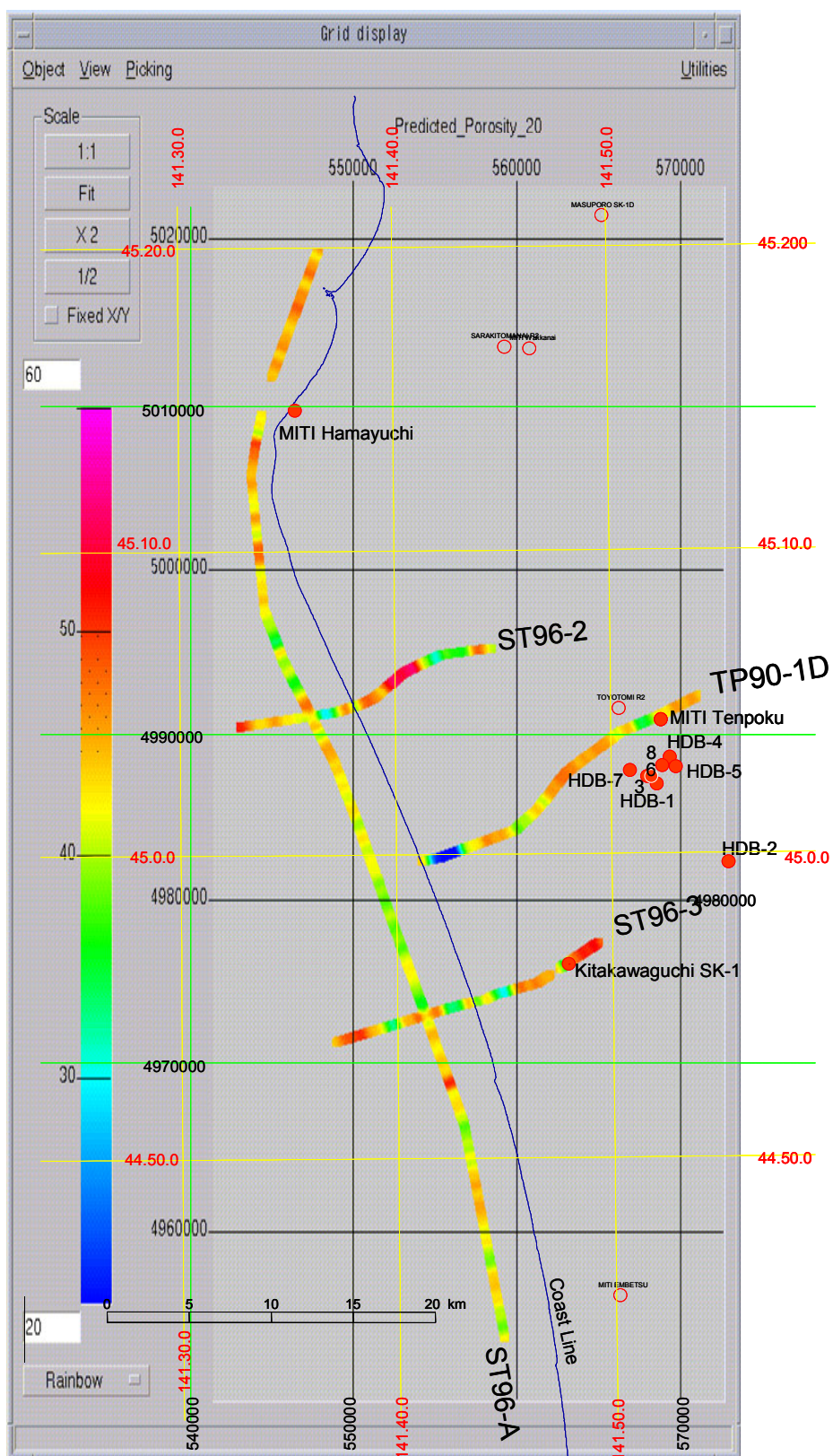


図 4.3-11 GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」の分布
各地震探査側線上の間隙率(%)を左のカラーバーの色で示した。

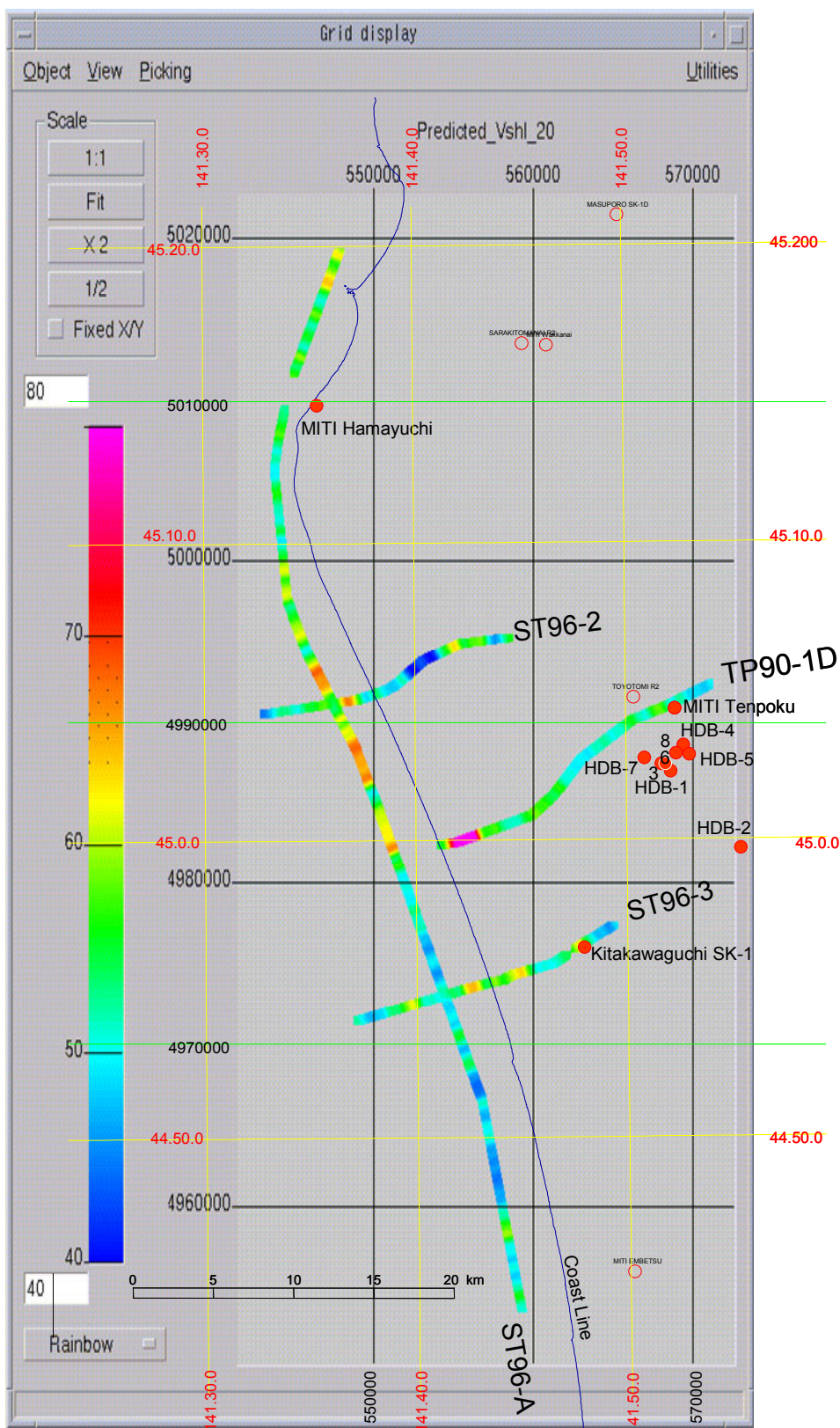


図 4.3-12 GDI で予測された稚内層上部層準の「泥質含有率」の分布
各地震探査側線上の泥質含有率(%)を左のカラーバーの色で示した。

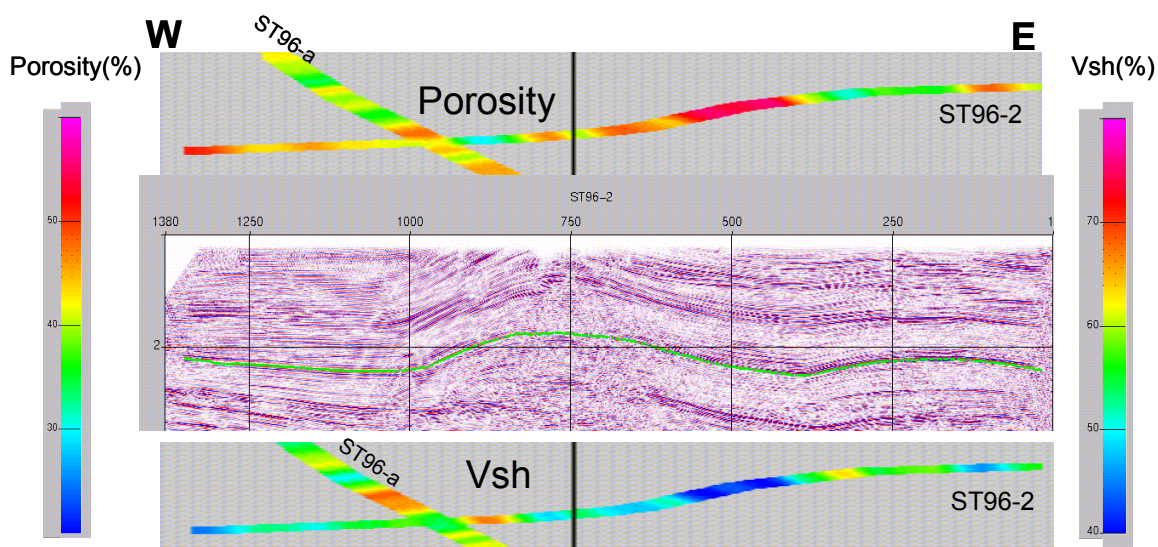


図 4.3-12 GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (TP90-1D 測線)

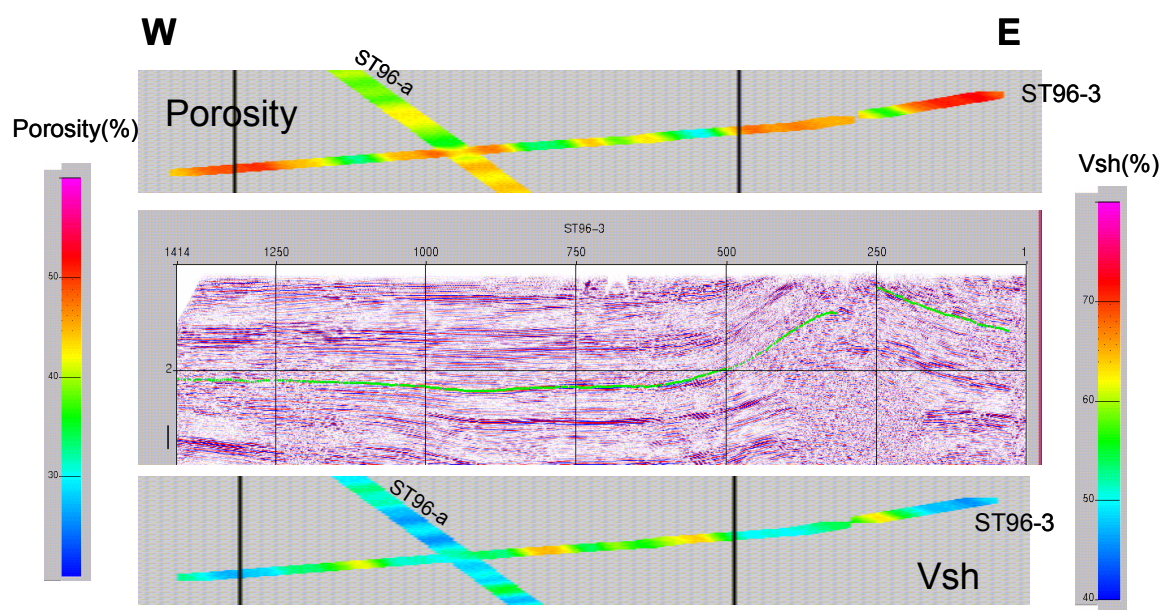


図 4.3-13 GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (ST96-測線)

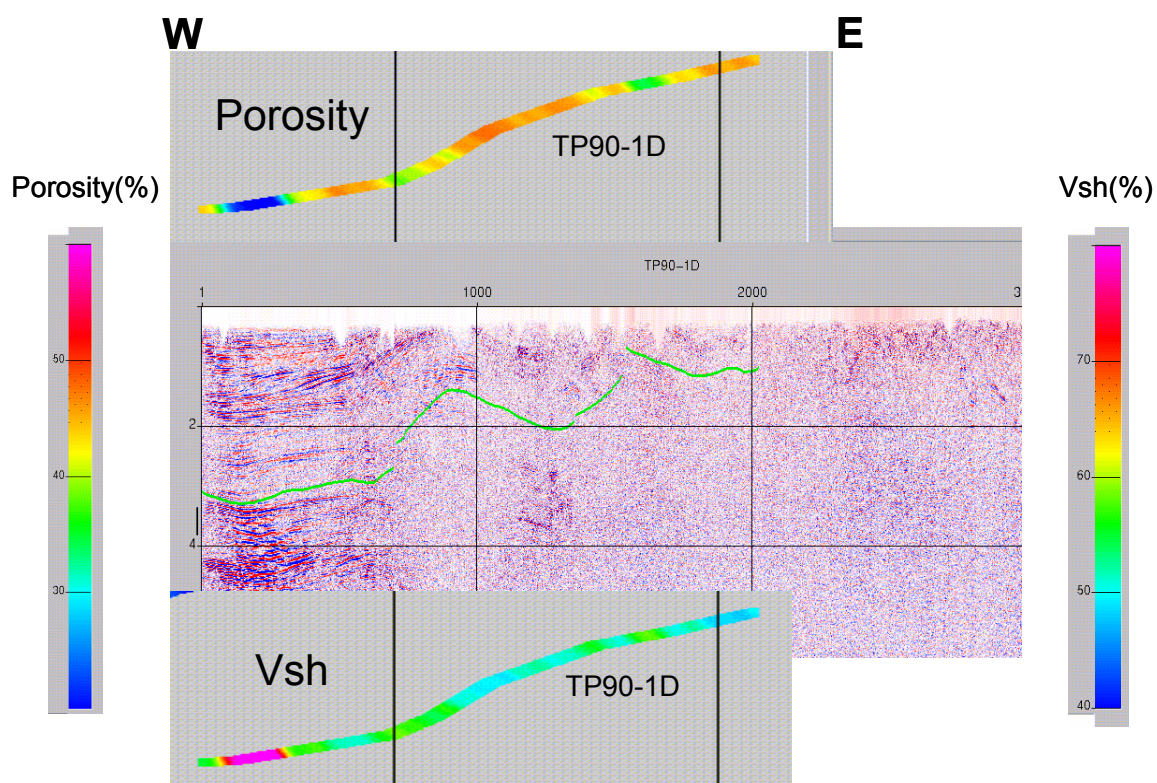


図 4.3-14 GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」と「泥質含有率」の分布 (TP90-1D 測線)

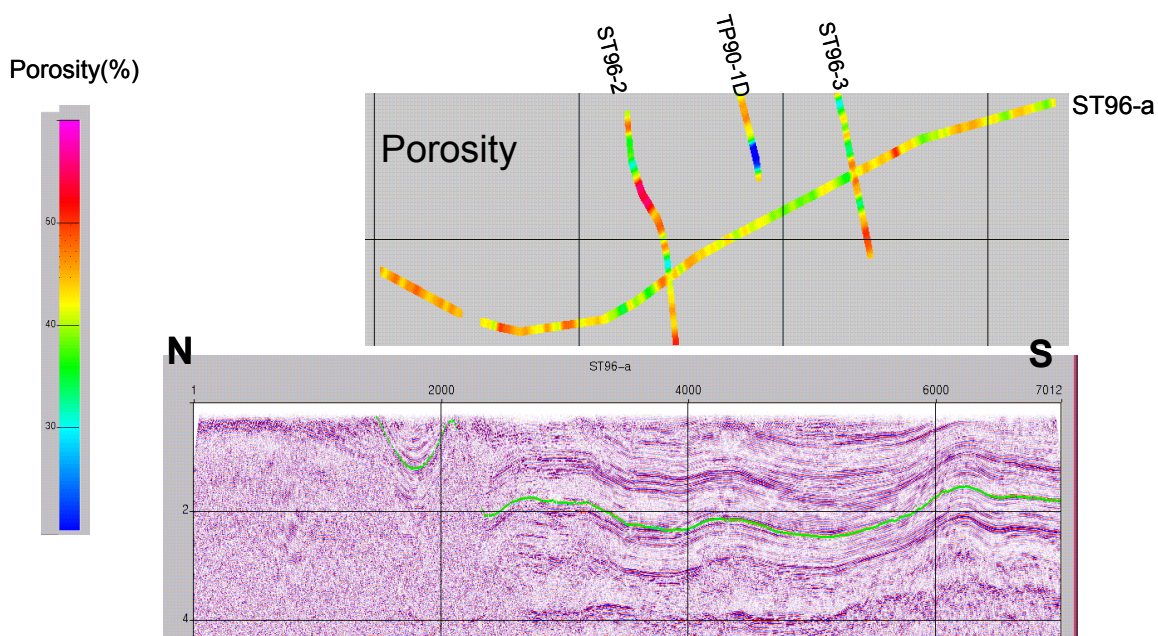


図 4.3-15 GDI で予測された稚内層上部層準の「平均間隙率」の分布 (ST96-a 測線)

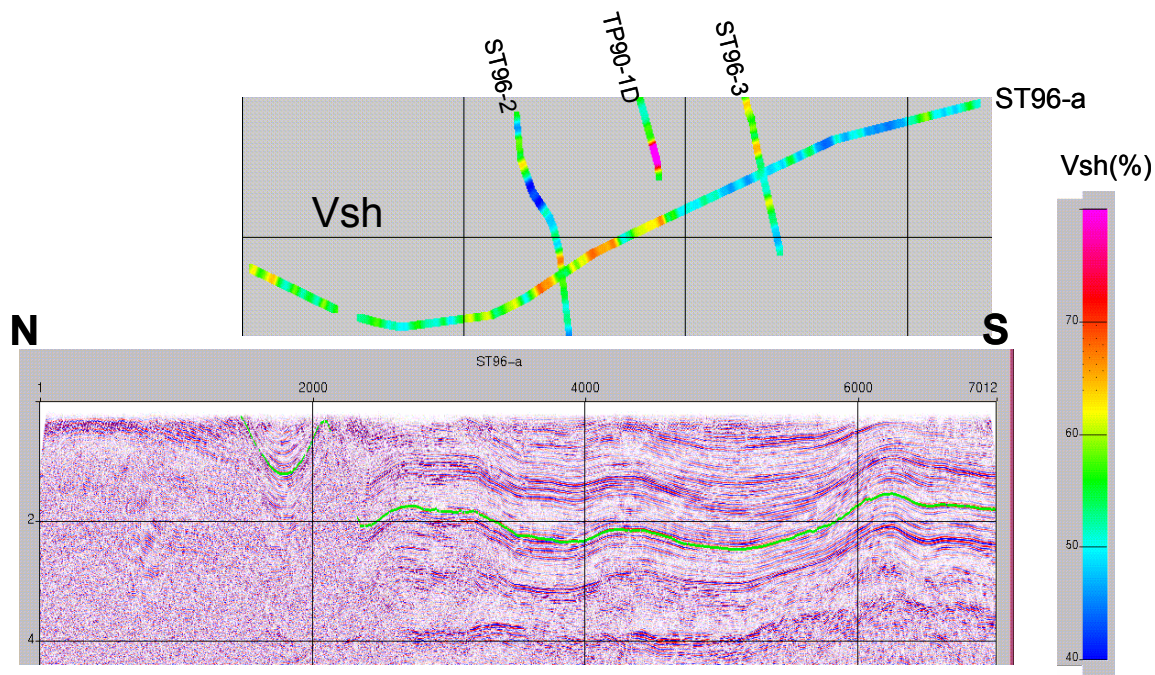


図 4.3-16 GDI で予測された稚内層上部層準の「泥質含有率」の分布 (ST96-a 測線)

5. 堆積モデリングソフトウェアの機能拡張

本年度は、昨年度開発した「基本ソフトウェア」の機能の拡張を行うとともに、予測データをボーリング孔データと比較する機能、入力パラメータの最適化を行う機能を追加した。本年度追加した予測機能、最適化機能と区別するために、「基本ソフトウェア」は今後「堆積シミュレーション機能」と呼ぶこととする。

昨年度の課題として挙げた残差データの統計処理機能については、本年度開発を行うことを見送った。その理由は以下の通りである。

堆積シミュレーション機能の性質として、その予測データをボーリング孔データと一致させることが難しい。昨年度は、その残差を統計処理し、不均質性の表現とボーリング孔データと予測データとの一致の提案を行った。しかし、いくつかの試行を行った結果、その残差が当初の想定より非常に大きいことが判明した。

よって、その残差処理の前に、予測データをボーリング孔データに近づける手法、つまり入力パラメータの最適化機能が必要であると考え、昨年度提案の「予測・実データ比較」機能を、「データ比較」機能と「パラメータ最適化」機能とに分離し、それぞれの開発を優先して実施した。

5. 1 ソフトウェアの概念設計・機能設計

5. 1. 1 堆積シミュレーション機能（拡張）

（1）初年度概念設計の概略

堆積シミュレーション機能は、層序モデリング（中山，1990）を用い、その過程を「堆積過程」と「埋没過程」に分け、それぞれについて概念設計を行った。

① 堆積過程モデル

堆積過程モデルでは、堆積物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。本モデルの概念設計は、声問層・稚内層の堆積システム（福沢，1988）を基にして作成した（表 5.1-1，図 5.1-1）。

表 5.1-1 に声問層・稚内層を対象とした堆積システムの構成要素を示す。堆積システムは、堆積物種類および堆積様式のカテゴリーで分類した。堆積様式の「一次堆積」は、その性質が定常的であることから、堆積速度を堆積関数とした。また「二次堆積」は、イベント堆積量およびイベント頻度を堆積関数とした。

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）

図 5.1-1 に稚内層の堆積モデル概念図を示す。一般的な層序モデル同様、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。また、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関数とした。

図 5.1-2 に時間による海岸線位置移動の概念図を示す。時間により直接変化する要素は、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。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した。

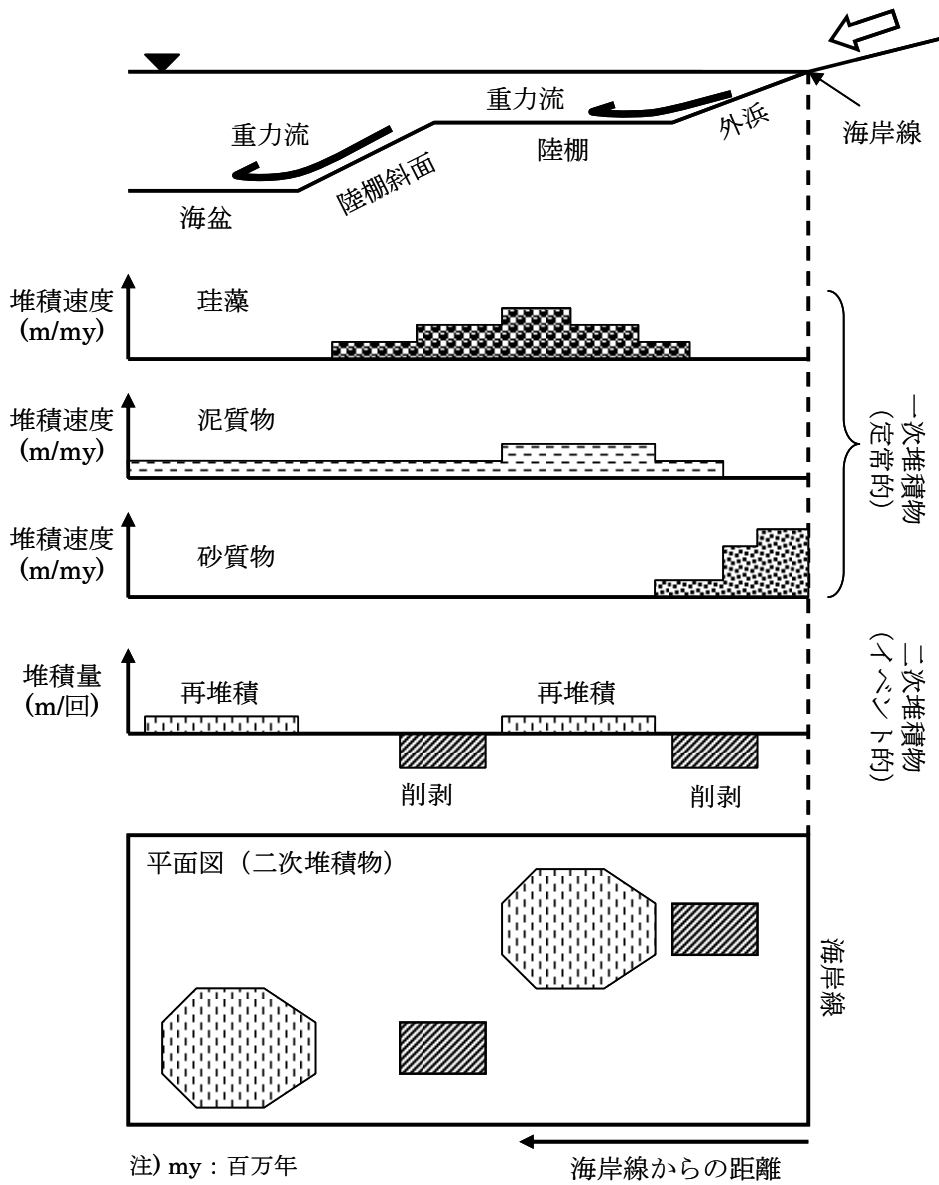


図 5.1-1 稚内層の堆積モデル概念図

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。

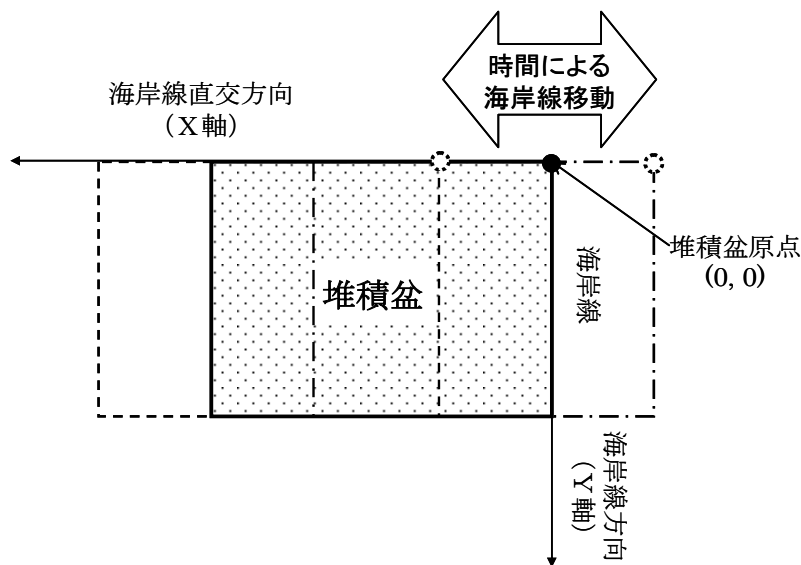


図 5.1-2 時間による海岸線位置移動の概念図

② 埋没過程モデル

埋没過程では、堆積過程で得られた各堆積物堆積量から、間隙率・透水係数を予測する。各堆積物種の間隙率・透水係数は、それぞれ深度・間隙率の関数として計算される。

埋没過程の概念図を図 5.1-3 に示す。堆積物は、その構成粒子（以後、マトリックス）と間隙に区分される。ここでは、埋没深度が増加してもマトリックス量は変化しないと考え、各セル上限の最大埋没深度から、各セルの層厚・間隙率・透水係数を推定する。

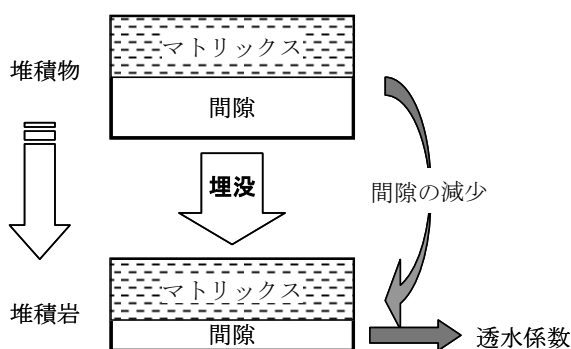


図 5.1-3 埋没過程の概念図

セルに複数種類の堆積物が存在した場合、各堆積物はセル内で分離（独立）していると考え、各堆積物の間隙量・透水係数を求める。「セル間隙率」は、各堆積物のマトリックス量と間隙率から予測される。「セル透水係数」は各堆積物透水係数の代表値(指数平均値)とする（図 5.1-4）。

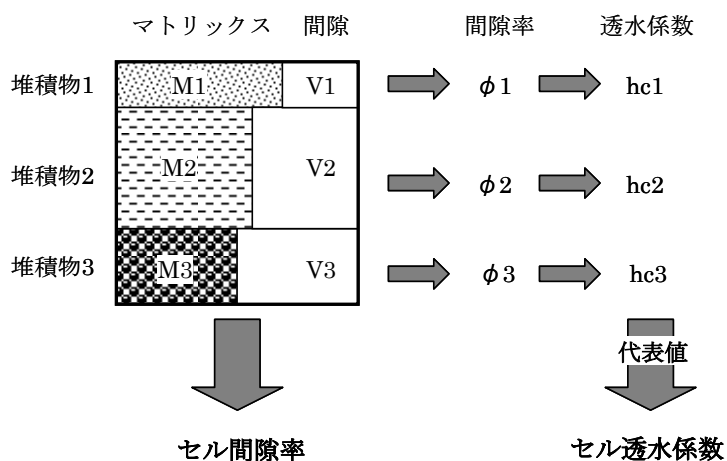


図 5.1-4 埋没過程の概念図（複数の堆積物の場合）

(2) 本年度追加項目

堆積シミュレーション機能について、本年度追加した項目を表 5.1-2 に示す。

表 5.1-2 堆積シミュレーション追加パラメーター一覧

過程	追加項目
堆積過程	一次堆積速度の時間変化
	二次堆積イベント位置の時間変化
埋没過程	間隙率算定式の追加

一次堆積速度については、「3.4.2 各ボーリング孔における堆積速度と GR 値や EMI 画像で認められる不均質性の周期性」で議論した通り、時間による変化が大きいたことが分かった。この変化は堆積位置の変化のみでは説明がつかないと考えられることから、時間を変数とする「堆積速度係数」パラメータを設定した。時間・位置による堆積速度は下式の通りである。

$$R_i(x, t) = a_i(x) \times f_i(t) \tag{5.1}$$

ここで、 R_i : 時間 t 海岸線からの距離 x での堆積速度、 a_i : 基準堆積速度（昨年度設定の「堆積速度」）、 f_i : 堆積速度係数、 i : 堆積物番号である。

二次堆積物堆積のイベント位置の時間変化については、時間を変数とする「イベント位置移動」パラメータを設定し、時間・位置によるイベント位置を下式で表現した。

$$P_{ix}(t) = p_{ix} + \Delta p_{ix}(t), \quad P_{iy}(t) = p_{iy} + \Delta p_{iy}(t) \tag{5.2}$$

ここで P_x, P_y : 二次堆積のイベント位置、 p_x, p_y : 堆積盆位置での基準イベント位置、 $\Delta p_x, \Delta p_y$: イベント位置移動、 i : イベント番号、 x, y : x 軸位置、 y 軸位置である。

イベント位置移動に関しては、あらかじめパラメータを設定することが困難であることから、主に「最適化機能」で利用することを想定している。

埋没過程パラメータとしては、間隙率算定式のオプションとして「複数指数式の組合せ」を追加した。本パラメータの詳細については「2. 8」を参照されたし。

5. 1. 2 データ比較機能

データ比較機能は、堆積シミュレーションで得られた予測データと、ボーリング孔データとを比較する機能である。ボーリング孔データとしては、①ボーリング孔間対比および化石年代から推定される各ユニット情報、②ボーリング孔検層解析から推定される各ボーリング孔、各レイヤーにおける各堆積物マトリックス量および間隙量、を用いる。

堆積シミュレーションの予測データはセル単位のデータであるため、データ比較の前処理として、各ボーリング孔の位置およびユニットごとへの「データ加工」が必要となる。

(1) データ加工

データ加工には、①シミュレーション座標でのボーリング孔位置計算、②ボーリング孔近傍セルの予測値からボーリング孔位置での予測値内挿、③ボーリング孔位置での各時間ユニットの予測値から、各レイヤー予測値作成、の3つがある。

① シミュレーション座標でのボーリング孔位置計算

実座標（測地系座標）の座標軸を平行移動、回転させ、シミュレーション座標上のボーリング孔位置を計算する。座標変換計算のためのパラメータとして、参照点（実座標およびシミュレーション座標位置を持つ点）および実座標 X 軸とシミュレーション座標 X 軸との角度を使用する（図 5.1-5）。

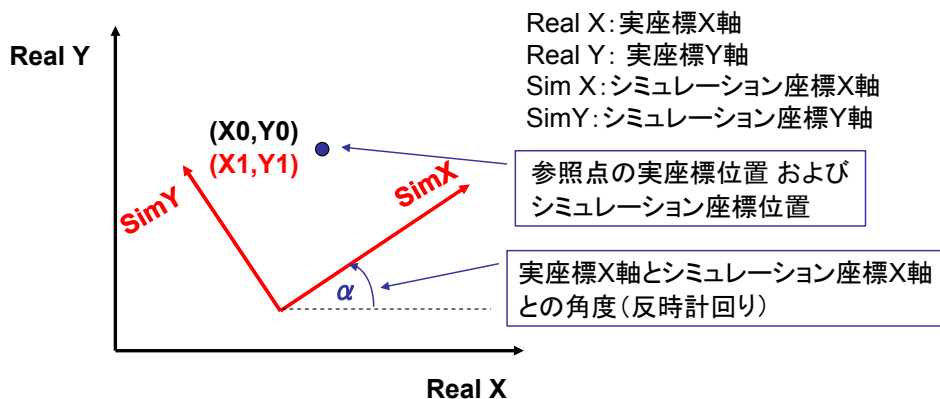


図 5.1-5 座標変換概念図

② ボーリング孔近傍セルの予測値からボーリング孔位置での予測値内挿(図 5.1-6)

各時間ステップについて、ボーリング孔位置近傍の4セルを選択し、それら予測値の一次式でボーリング孔位置での予測値を内挿する。各予測値の重みには、ボーリング孔位置までの距離の逆数 (Inverse Distance) の二乗を用いた。

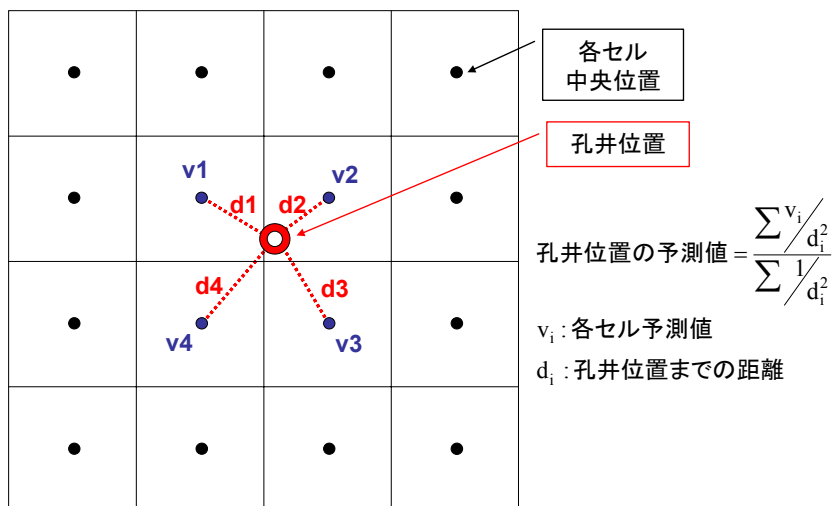


図 5.1-6 ボーリング孔位置での予測値内挿概念図

③ 各時間ユニットの予測値から各レイヤー予測値作成 (図 5.1-7)
 各レイヤーに含まれる時間ユニットの予測値 (堆積物マトリックス量, 間隙量) を合計することで、各レイヤー予測値を作成する。

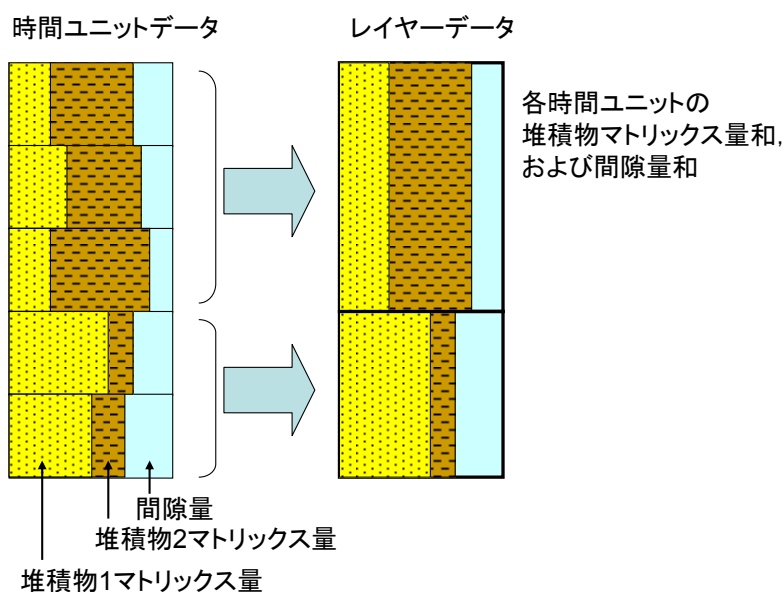


図 5.1-7 各レイヤー予測値作成概念図

上記手順①～③により、各ボーリング孔位置・各レイヤーにおける各堆積物マトリックス量および間隙量の予測データが作成される。

(2) データ比較

データ比較の対象としては、各レイヤーにおける「各堆積物マトリックス量」および「間隙量」である。比較方法としては実データ、予測データの差（残差）を用い、データ比較の結果として2つの評価値を採用した。

評価値のひとつは、各マトリックス量の誤差分散（残差平方和／データ数）の総和とする。算定式は以下の通りである。

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum_s \sum_l \sum_w (M_{s,l,w} - M_{s,l,w}^*)^2 \quad (5.3)$$

C1: 評価値1, M: マトリックス量 (実データ), M*: マトリックス量 (予測データ),
n: M のデータ数, s: 堆積物番号 (種類), l: レイヤー番号, w: ボーリング孔番号

もうひとつの評価値は、上記評価値に、間隙率の誤差分散（残差平方和／データ数）を加算したものである。算定式は以下の通りである。

$$C_2 = C_1 + \frac{1}{n} \sum_l \sum_w (N_{l,w} - N_{l,w}^*)^2 \quad (5.4)$$

C2: 評価値2, N: 間隙量 (実データ), N*: 間隙量 (予測データ)

5. 1. 3 パラメータ最適化機能

パラメータ最適化機能は、データ比較機能から得られた評価値を基に、入力パラメータの最適化を行う機能である。実データと予測データとの差が小さくなるにつれ、評価値が小さくなることから、評価値が最小となるように、パラメータを調整する。パラメータ最適化手法として、シミュレーテッド・アニーリング手法(SA: Simulated Annealing)を採用した。

(1) SA 法

アニーリング（焼きなまし）とは、固体を非常に高温に熱し、熔融した物質がゆっくりと結晶化するまで、その温度を制御しつつ、冷却していく。アニーリングにより、その固体の自由エネルギーは最小化される。SA 法はこの過程をシミュレートしたものとなる (Sait ほか, 2002)。

具体的な手順としては、あるパラメータセットがある場合、その各パラメータ値を、モンテカルロ法により、その近傍値に変化（摂動）させ、新しいパラメータセットを

生成する。その後、新しいパラメータセットの評価値と以前のパラメータセットの評価値と比較し、ある採択条件を満たせば、新しいパラメータセットを採択する。この作業を繰り返すことにより、評価値を最小とするパラメータセットを探す。

採択条件にはメトロポリス(Metropolis)基準を用いる。式は以下の通りである。

$$P(S_{\text{new}}) = \begin{cases} 1 & \Delta C < 0 \\ \exp\left(\frac{-\Delta C}{T}\right) & \Delta C \geq 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\Delta C = C_{\text{new}} - C_{\text{old}}$$

ここで、 $P(S_{\text{new}})$ ：新しいパラメータセットを採択する確率、 C_{new} ：新しいパラメータセットの評価値、 C_{old} ：現在のパラメータセットの評価値、 T ：「温度」、である。

メトロポリス基準では、新しい評価値が現在の評価値より大きい場合でも、ある確率で新しいパラメータセットを採択する。このことで、局所的な最小値に収束しないようにする。採択する確率は「温度」の影響を受け、その「温度」を徐々に下げっていくことで、最適化を行う。

温度の冷却スケジュールについては、変数 α 、 β を用いて以下のように行う。

$$\begin{aligned} T_{k+1} &= \alpha T_k & (k = 0, 1, \dots) \\ M_{k+1} &= \beta M_k & (k = 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (5.6)$$

ここで、 T ：温度、 M ：時間（回数）である。また $\alpha < 1$ （通常 0.8 以上）、 $\beta \geq 1$ となる。

SA 法に必要なパラメータは、上述の「初期温度 (T_0)」、「初期回数 (M_0)」、「 α 」、「 β 」および、終了条件である。本ソフトウェアでは、終了条件として「最大回数」を採用している。

(2) パラメータ摂動

摂動可能なパラメータは、海岸線移動位置、一次堆積物堆積速度位置および量、二次堆積物イベント位置、イベント頻度である。

各パラメータは、時間、もしくは海岸線からの距離の軸上に複数個の値を持つ。本ソフトウェアでは、これら複数個の値を同時に摂動させる方法および複数個を独立で摂動させる方法を設けた。また複数個を同時に摂動させる方法として、①平行移動、②実数倍、③傾斜の3種類を設けた。図 5-1-8 に、それぞれの摂動方法の概念図を示す。

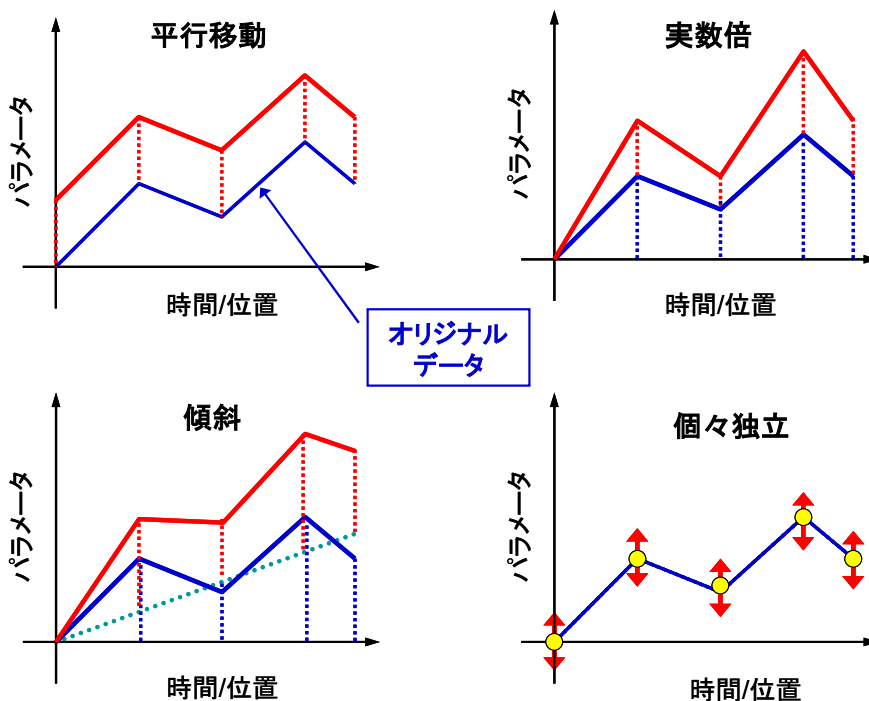


図 5.1-8 パラメータ摂動方法概念図

①平行移動とは、複数のパラメータに同一値を加算することであり、②実数倍とは、複数のパラメータに同一値を乗算することである。③傾斜とは、たとえば時間軸に複数のパラメータが存在した場合、その時間によって加算する値に傾斜をつける（時間軸上の距離にある定数を乗算したものを加える）ことである。

対象となるパラメータによって、選択できる摂動方法は異なる。表 5.1-3 に摂動パラメータおよび選択可能な摂動方法を示す。

表 5.1-3 摂動パラメータおよび摂動方法一覧

種類	パラメータ	軸	平行移動	実数倍	傾斜	独立
海岸線	海岸線移動位置(X)	時間	○	○	○	○
一次堆積	堆積速度位置(X)	距離	○			○
	堆積速度量	時間		○		○
二次堆積	イベント位置(X,Y)	時間	○			○
	イベント頻度	時間		○		○

○：可能，各摂動方法は組み合わせ可能である。

5. 2 ソフトウェアのコーディング

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。表 5.2-1 にソースファイル一覧を示す。

表 5.2-1 ソースファイル一覧

ヘッダー	コード	内容
sedm_main.h	sedm_main.c	sedm メイン関数
sedm_calcn.h	sedm_calc.c	堆積シミュレーション機能関数群
sedm_comp.h	sedm_comp.c	データ比較機能関数群
sedm_sa.h	sedm_sa.c	パラメータ最適化機能関数群
sedm_array.h	sedm_array.c	動的メモリ割当関数群
mt19937ar.h	mt19937ar.c	擬似乱数発生関数 (Mersenne Twister (MT))

擬似乱数発生には、Mersenne Twister (MT)を使用した。MT は周期の長い良質の乱数を高速に発生させるアルゴリズムである。MT の詳細については、MT 開発者ホームページ (<http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/mt.html>) を参照されたし。

表 5.2-2 に本ソフトウェアの主要関数を示す。本ソフトウェアの詳細および使用方法については、ソフトウェアに添付の「堆積ソフトウェアの解説と操作法」を参照されたし。

表 5.2-2 主要関数一覧

関数名	内容	ファイル名
main	メイン関数	sedm_main.c
└ sedm_check_arg	コマンドオプション処理	sedm_main.c
└ CALC_para_initialize	SEDM 変数初期化	sedm_calc.c
└ COMP_set_initialize	データ比較変数初期化	sedm_comp.c
└ SA_initialize	パラメータ最適化変数初期化	sedm_sa.c
└ SA_main	パラメータ最適化メイン関数	sedm_sa.c
└ CALC_main	堆積シミュレーションメイン関数	sedm_calc.c
└ COMP_well_matrix_calc	ボーリング孔での予測データ計算	sedm_comp.c
└ COMP_cost_calc	評価値計算	sedm_comp.c
└ CALC_write_results	SEDM 結果（埋没深度）書出し	sedm_calc.c
└ CALC_write_paramerters	最適化パラメータ書出し	sedm_calc.c
└ COMP_write_results	データ比較結果書出し	sedm_comp.c
└ CALC_write_top_results	SEDM 結果（現在深度）書出し	sedm_calc.c
└ SA_free_memory	パラメータ最適化変数メモリ開放	sedm_sa.c
└ COMP_set_free_memory	データ比較変数メモリ開放	sedm_comp.c
└ CALC_res_free_memory	SEDM 結果変数メモリ開放	sedm_calc.c
└ CALC_para_free_memory	SEDM 変数メモリ開放	sedm_calc.c

6. テストラン

本年度のテストランは、幌延地域を対象とし、できるかぎり実際のデータを用いて、実施した。以下、入力データとその結果について記す。

6. 1 入力データ

6. 1. 1 対象範囲・対象層準と深度構造

(1) 対象範囲・対象層準

テストラン対象範囲として、HDB-1～8 ボーリング孔および基礎試錐「天北」が含まれる地域を選択し、福沢（1988）および現在の構造トレンドから、実座標 X 軸（測地系座標 Easting）から反時計回り 211 度の方向をシミュレーション X 座標とした。図 6.1-1 にシミュレーション対象範囲位置を示す。

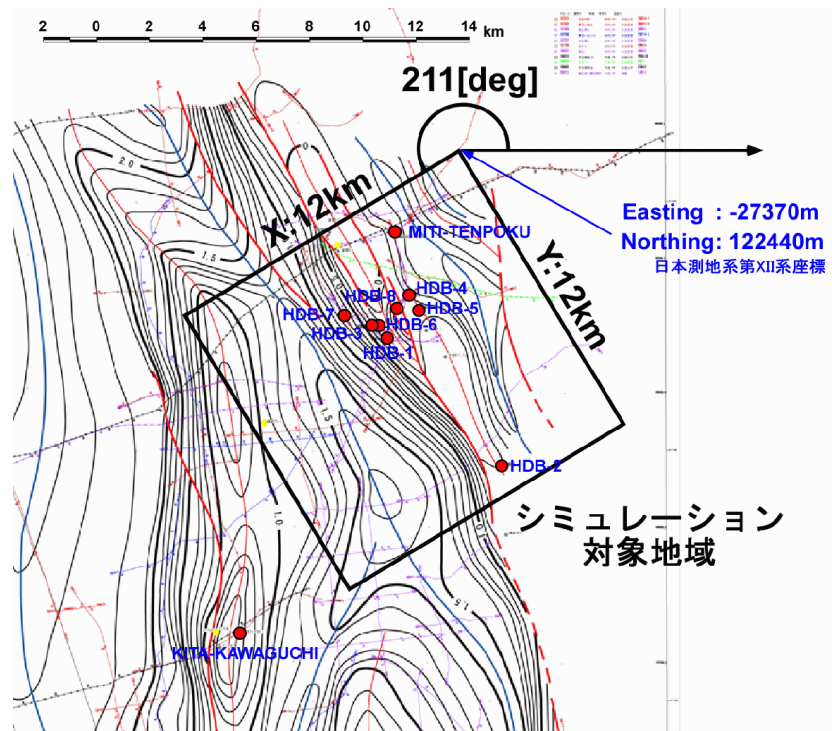


図 6.1-1 シミュレーション対象範囲位置
(声問層基底時間構造図(増井ほか, 2004)に重ねて表示)

対象層準については、本報告書 2 章で設定した Marker「A1」から「Masuhoro Top」までとした。

(2) 深度構造

昨年度作成の声問層基底深度構造図を基に、Marker「A-1」の深度構造図および Marker「A-1」の最大埋没深度構造図を推定した。作成方法は以下の通りである。

① 声問層基底深度構造図のデジタイズおよびグリidding

昨年度作成の声問層基底深度構造コンターのデジタイズを行い、デジタイズコンターから 200m 間隔のグリッドデータを作成した。

② Marker A-1～声問層基底のアイソパックマップ作成

HDB-1, HDB-3, 基礎試錐「天北」, 北川口 SK-1 のデータから, Marker A-1～声問層基底までのアイソパックグリッドデータを作成した。

③ Marker A-1 深度構造図作成

①のグリッドデータから②のグリッドデータを引き算することで, Marker A-1 の深度構造グリッドデータを作成した。

④ Marker A-1 最大埋没深度構造 (仮) の作成

HDB-1, HDB-3, HDB-7, 基礎試錐「天北」の Marker A-1 深度に削剥量を加えた「最大埋没深度データ」を作成し, そのデータから最大埋没深度 (仮) グリッドデータを作成した。

⑤ Marker A-1 最大埋没深度作成

各格子点について, ④のグリッドデータと③のグリッドとの最大値を設定することで, Marker A-1 最大埋没深度を作成した。

⑥ シミュレーション座標へのデータ変換

③, ⑤のグリッドデータについて座標変換を行い, 再グリッド化することで, シミュレーション座標でのグリッドデータを作成した。

①～⑤のグリiddingには, Landmark 社の Geographix ソフトウェアの IsoMap を使用し, グリiddingアルゴリズムには, 「Minimum Curvature」法を用いた。②, ④についてはデータ点が少なく, また集中していることから, N31W-S31E の地質トレンド (シミュレーション Y 座標方位) を補助情報として与えてある。⑥については, Rockware 社の Rockworks2002 を使用し, グリiddingアルゴリズムには, 「Inverse Distance」(2 乗) 法を用いた。本手法は「5. 1. 2 データ比較機能」の手法と同じである。図 6.1-2～図 6.1-8 に, ①～⑥で作成したグリッドコンター図を示す。

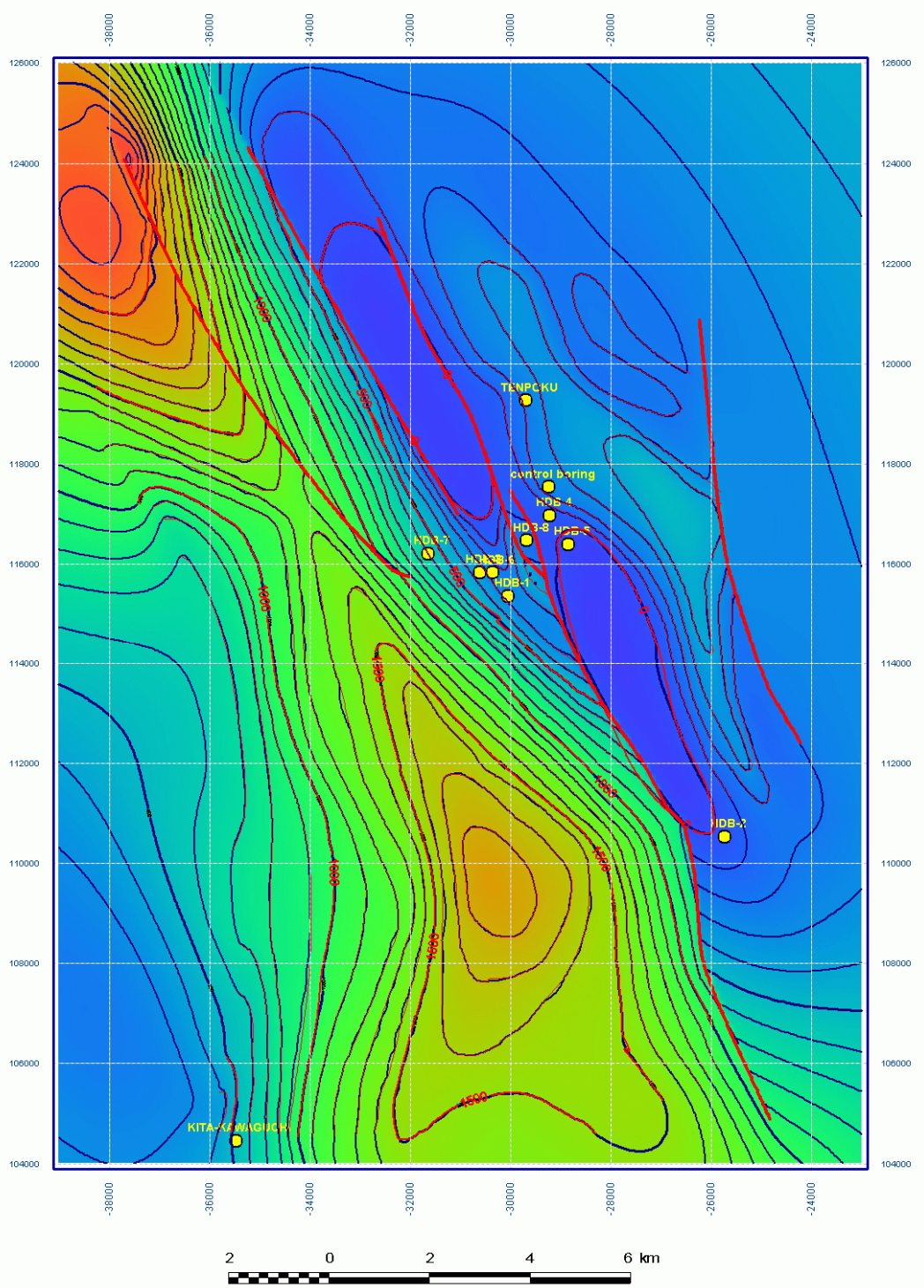


図 6.1-2 声問層下限深度構造図

赤線はデジタルカウンターデータ、青線はグリッドのカウンターデータ。黄色丸印は、HDB ボーリング孔、基礎試錐「天北」、北川口 SK-1 の位置を示す。デジタルカウンターとグリッドカウンターは、ほぼ一致している。

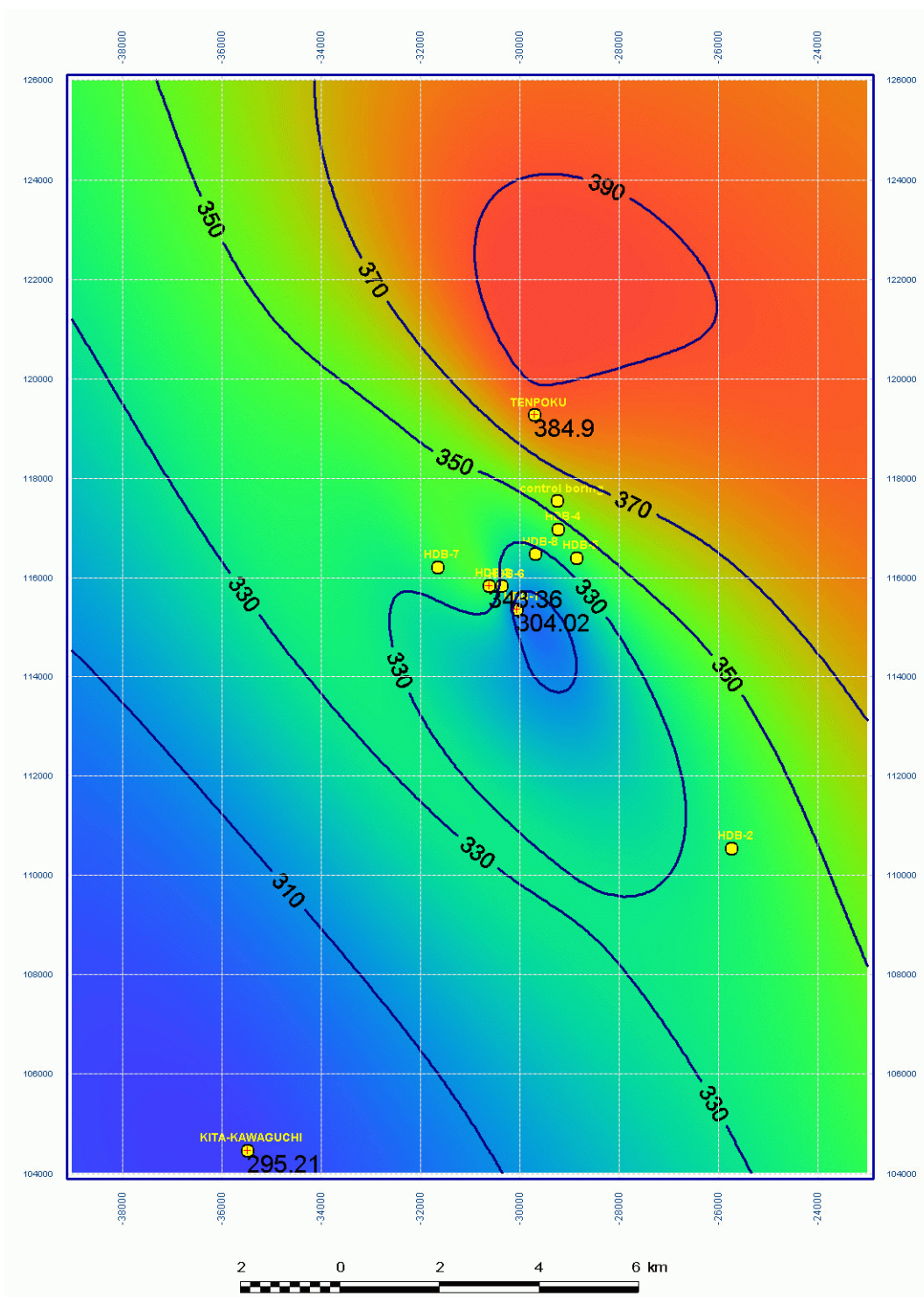


図 6.1-3 A-1~声問層下限アイソパックマップ

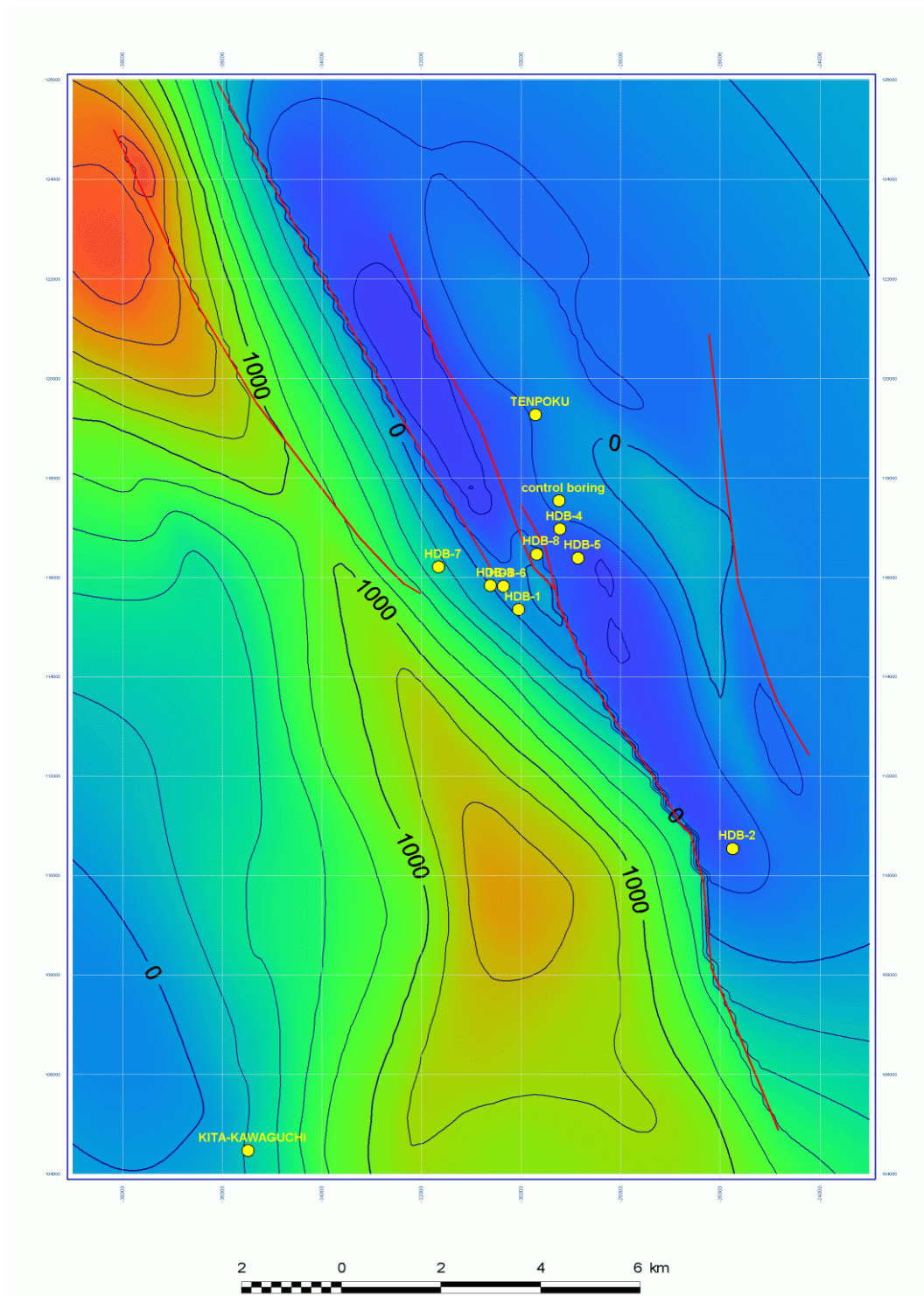


図 6.1-4 Marker A-1 深度構造図

声間層下限深度グリッドから、声間層下限アイソパックグリッドを引算することにより作成。

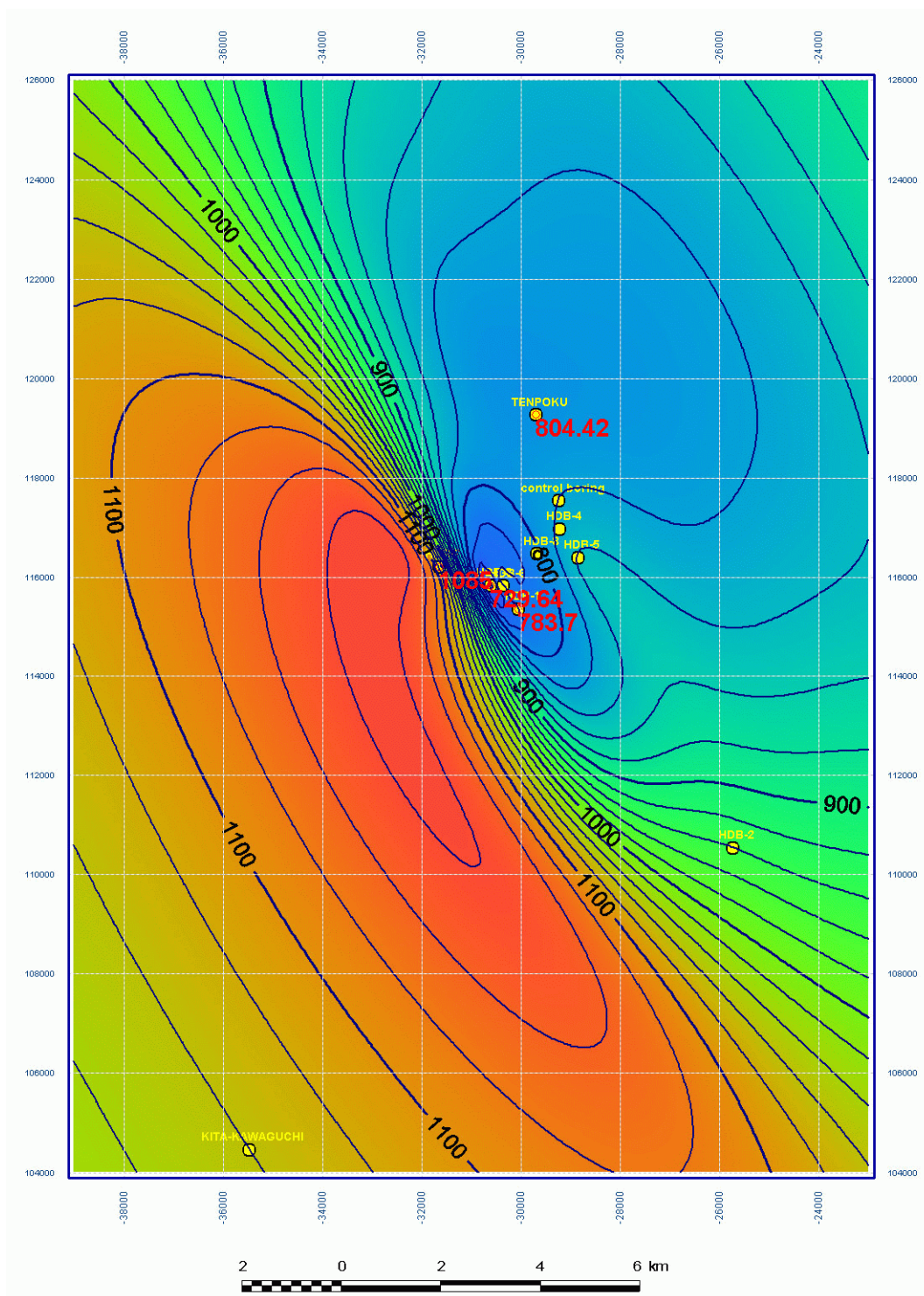


図 6.1-5 Marker A-1 最大埋没深度構造（仮）図
 ボーリング孔位置の赤色数字は、ボーリング孔での最大埋没深度を示している。

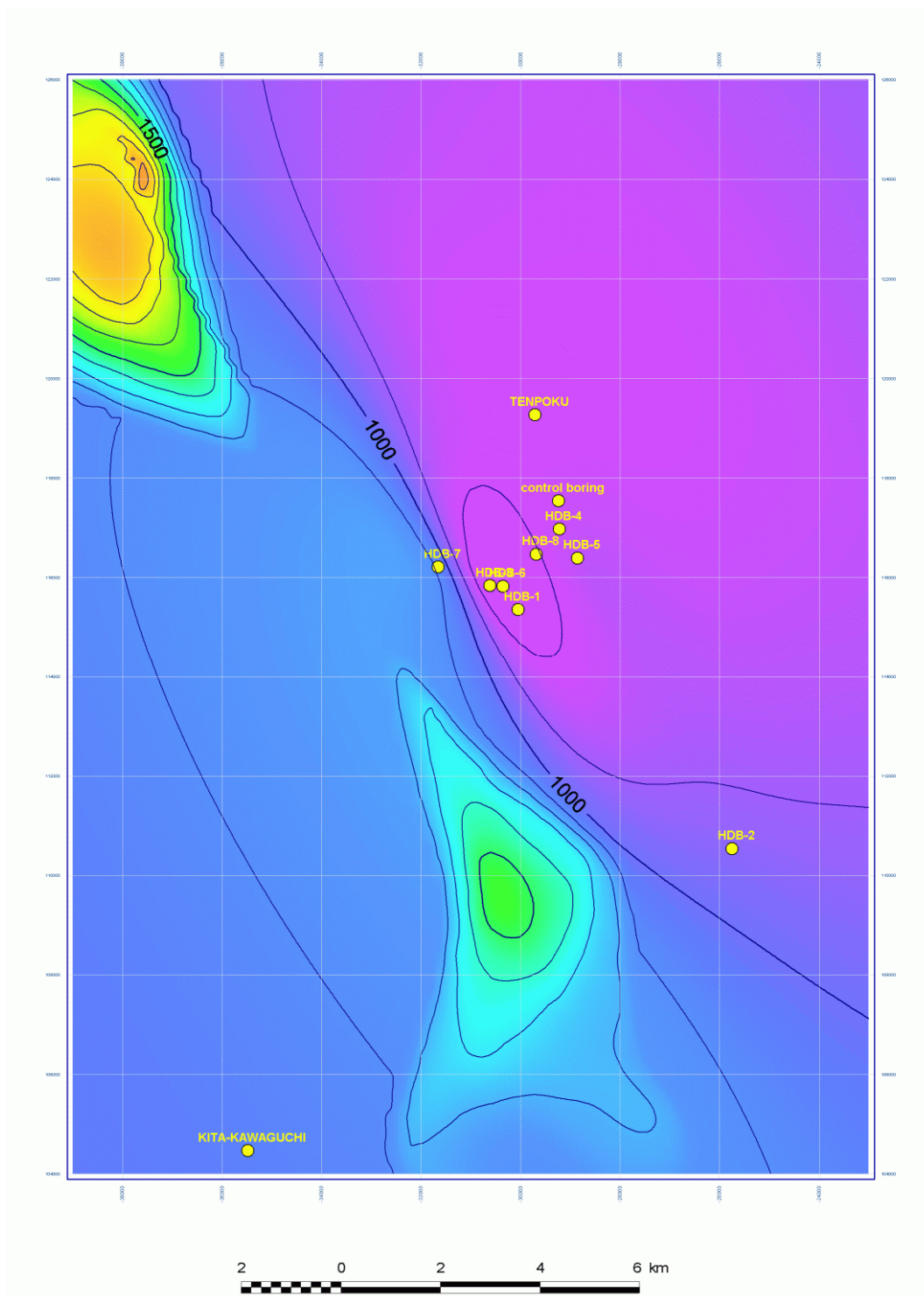


図 6.1-6 Marker A-1 最大埋没深度構造図

Marker A-1 最大埋没深度構造（仮）グリッドと Marker A-1 深度構造グリッドとの最大値を取り，作成。

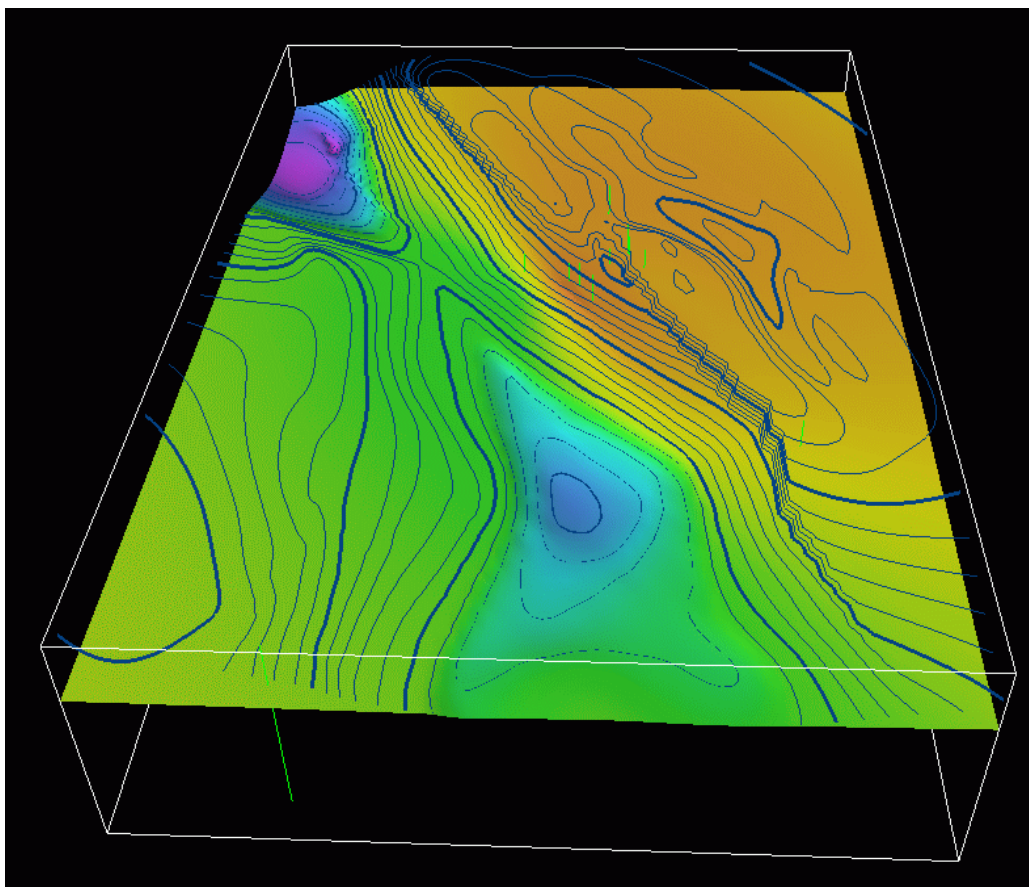


図 6.1-7 Marker A-1 最大埋没深度構造および現在深度構造の三次元表示
着色構造面は最大埋没深度，青色コンターは現在深度構造。緑線は各ボーリング孔の孔跡。

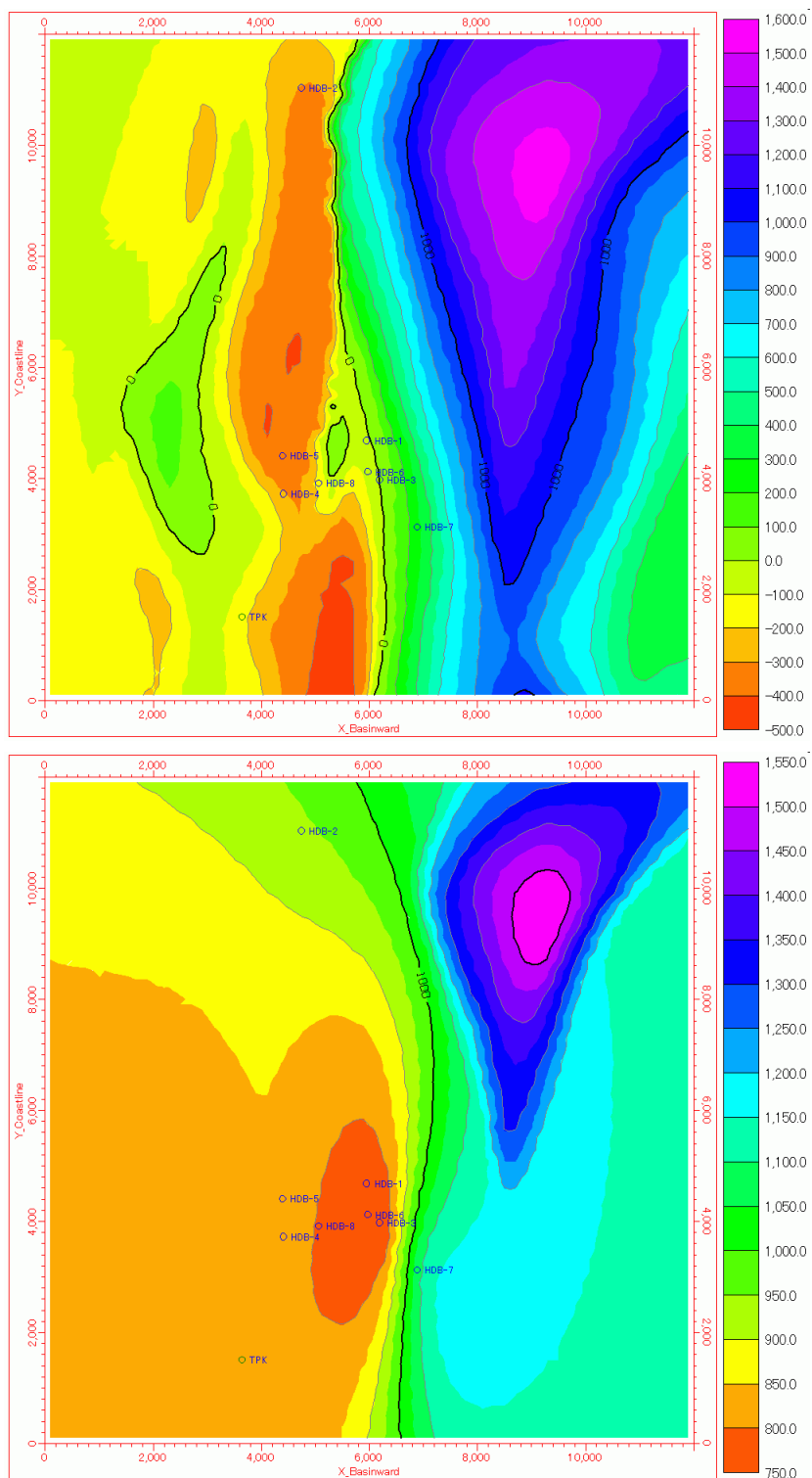


図 6.1-8 Marker A-1 深度構造図および最大埋没深度構造図(シミュレーション座標)
 上図は深度構造図, 下図は最大埋没深度構造図。青丸はボーリング孔位置。

6. 1. 2 堆積過程パラメータ

(1) 堆積盆, 対象範囲位置, イベント位置

堆積盆サイズは, 対象地域が評価できるよう, X方向 50km, Y方向 20km とした。水深断面は, 福沢(1988)の古環境図を基準とし, 現在の遠別, 留萌の水深断面を参考に作成した。対象地域の堆積盆位置は, 陸棚斜面から海盆の範囲であるとした。

図 6.1-9 に堆積盆, 対象地域を平面図を, また図 6.1-10 に水深のプロファイルを示してある。一次堆積, 二次堆積, ボーリング孔位置の各パラメータについては後述する。

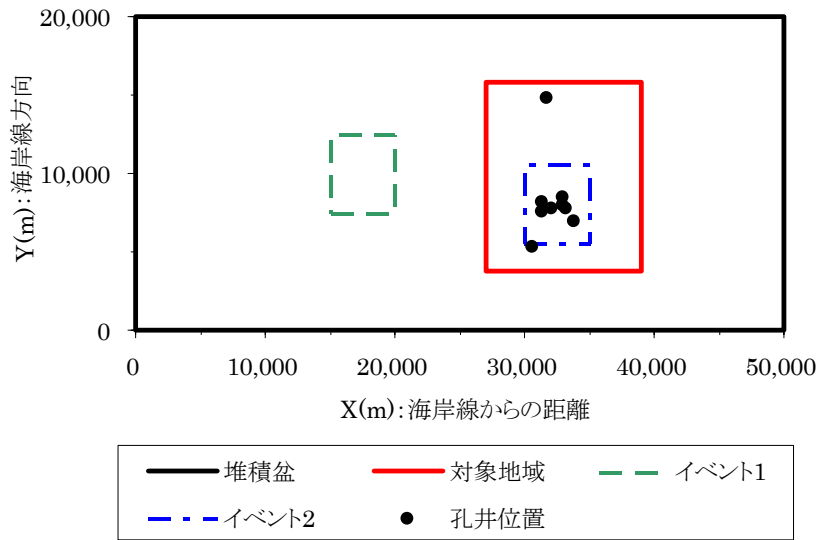


図 6.1-9 堆積盆平面図

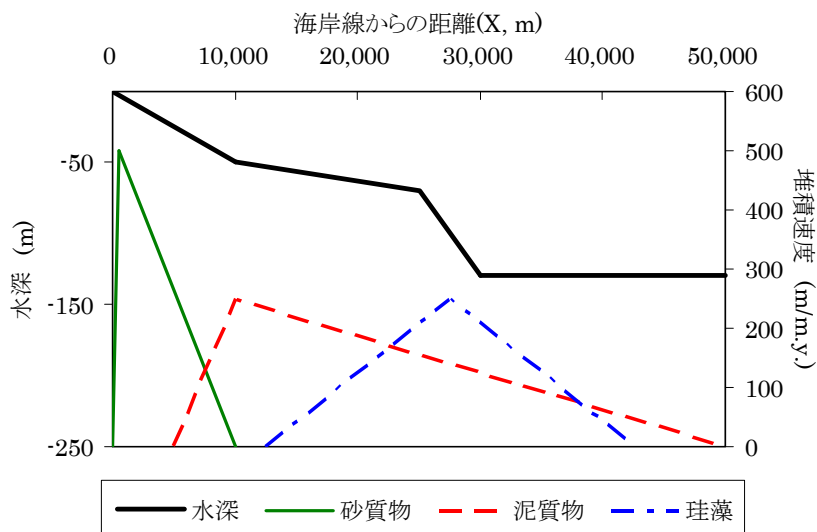


図 6.1-10 水深, 基準堆積速度プロファイル

(2) 一次堆積パラメータ

① 基準堆積速度

基準堆積速度のプロファイルは、図 6.1-10 に示した通りである。砂質物、泥質物については、海岸線から離れるに従い堆積速度が遅くなるとした。一方、珪藻については、陸棚斜面中央部にそのピークを置き、そのから離れるに従い堆積速度が減少するように設定した。これら設定は、昨年度と同様である。堆積速度の絶対値については、一般的な値を使用し、最適化機能によって、その最適値を探ることとする。

② 堆積速度係数

3章の議論の通り、堆積速度には時間による変化が見られる。表 3.4-1「ボーリング孔毎の堆積速度（圧密補正後）」によれば 5.8Ma～5.5Ma 間では時間とともに急激に増加する傾向が見られ、5.5Ma 以降の堆積速度は 5.8Ma 以前に比べ 2～4 倍となっている。堆積速度が海岸線からの距離におおじて変化することを考慮しても、数倍といった変化は大きすぎると考えられる。よって、5.8Ma 以前は、全ての堆積物に対し堆積速度係数を 1、5.5Ma 以降は堆積速度係数を 2.5 と設定した。

(3) 二次堆積パラメータ

① イベント位置

二次堆積イベントは、陸棚中心部で 1 ヶ所、海盆開始位置周辺に 1 ヶ所設定し、それぞれ「イベント 1」「イベント 2」とした。堆積盆および対象範囲との関係は図 6.1-9 に示した通りである。

② イベント堆積量

イベント堆積量分布範囲については、昨年度報告書で設定した値の分布範囲に誤りがあったため、その分布範囲を修正した（10km 四方を 5km 四方に変更）値を採用した。図 6.1-11 に各堆積物・各イベントのイベント堆積量を示す。

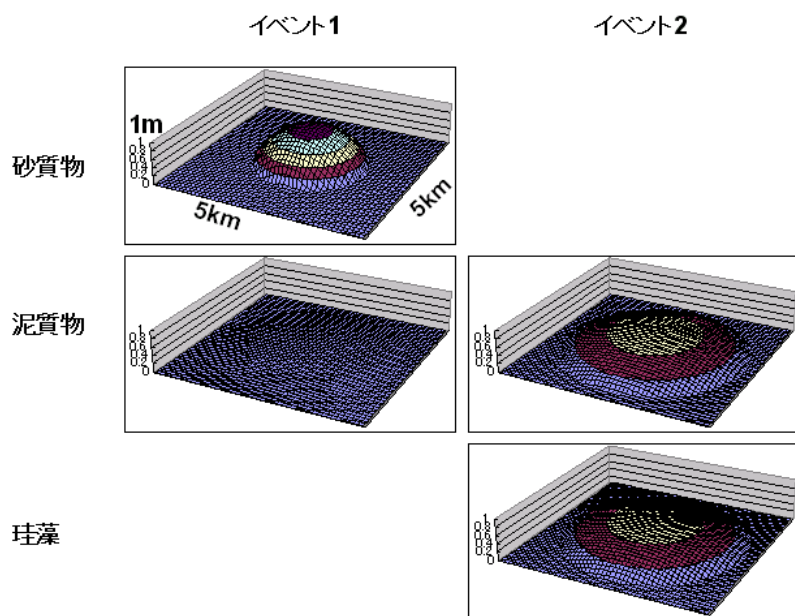


図 6.1-11 各イベント・堆積物のイベント堆積量

③ イベント堆積頻度

イベント堆積頻度に関しては、一般に低海水準期にその頻度が増すことが知られている。テストランのパラメータには、氷河性海水準変動カーブ（Haq, 1987）の値を基にし、仮パラメータを作成した。具体的には、海水準「50m」より低い海水準の場合に、二次堆積が起こるとし、海水準「50m」と、対象となる時間の海水準との差の2倍をその堆積頻度の初期パラメータとした。

図 6.1-12 に、氷河性海水準変動およびイベント頻度カーブを示す。本パラメータは、最適化機能の摂動パラメータ対象とする。

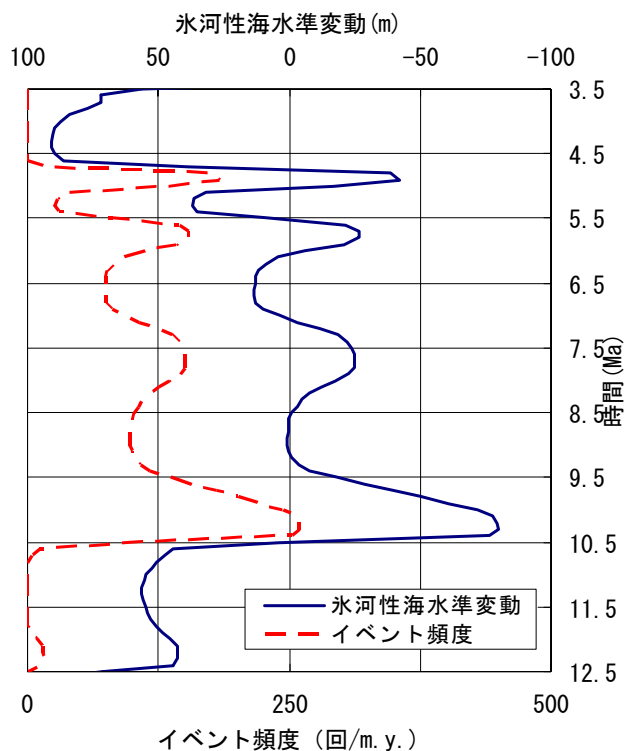


図 6.1-12 氷河性海水準変動およびイベント頻度カーブ

④ 二次堆積位置移動

本パラメータは、最適化機能のため設定されたパラメータであり、その推定は困難であることから、初期パラメータは0とした。

(4) シミュレーション時間、海岸線移動距離

時間に関するパラメータには、シミュレーション時間、海岸線移動位置、堆積速度係数、二次堆積頻度、二次堆積位置移動がある。堆積速度係数、二次堆積頻度、二次堆積位置移動については、すでに説明していることから、ここではシミュレーション時間および海岸線移動位置について記す。

① シミュレーション時間

ボーリング孔データの存在する区間、12.5Ma (Masuhoro Top) から3.5Ma(A1)までを、シミュレーションの対象時間とした。また時間ステップは0.1Maとした。

② 海岸線移動位置

海岸線移動位置に大きな影響を及ぼす要素としては、海水準変動、構造運動（堆積盆の沈降、隆起）、堆積物堆積量などがある。海水準が上がれば、海岸線位置はX軸上マイナスの方向へ動く。今回のテストランでは、氷河性海水準変動値を「-20倍」したものを海岸線移動距離の初期パラメータとした。図6.1-13に、氷河性海水準変動

カーブおよび海岸線移動距離パラメータを示す。

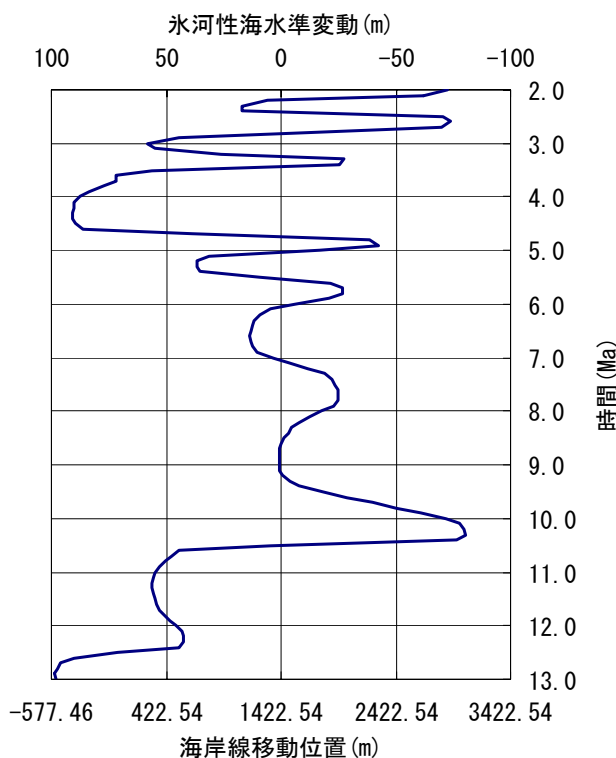


図 6.1-13 氷河性海水準変動および海岸線移動位置カーブ
 海岸線移動位置は、氷河性海水準変動 (Haq, 1988) を-20 倍し、
 シミュレーション開始時間 (12.5Ma) が0 となるようシフトしている。

構造運動その他の影響については現時点で未知である。また上記「-20 倍」も裏付けのある数値ではないことから、これらパラメータについては、最適化機能の摂動パラメータ対象とする。

6. 1. 3 埋没過程パラメータ

埋没過程パラメータには、堆積物毎の間隙率推定式、透水係数推定式、透水係数指数平均用パラメータ、最大埋没深度パラメータ (グリッドデータ) がある。最大埋没深度パラメータ (グリッドデータ) および現在深度パラメータ作成については「6. 1. 1」の通りである。ここでは、各堆積物パラメータの説明を行う。

泥質物、珪藻の間隙率推定式のパラメータについては、「2. 8」で推定したパラメータを使用した。砂質物推定式パラメータについては、幌延地域でのデータがないことから、一般的な指数式を用いた。透水係数推定式、透水係数指数平均用パラメータについては、未だ検討を行っていないことから、昨年度報告書と同じパラメータを使用した。

表 6.1-1 に各パラメータ一覧を、図 6.1-14 に、各堆積物の深度間隙率曲線および間隙率透水係数曲線をそれぞれ示す。

表 6.1-1 間隙率・透水係数パラメータ一覧

堆積物種類	砂質岩	泥質岩	珪藻
初期間隙率 (V/V)	0.5	0.8	0.9
間隙率式	指数式 (係数：0.0005)	指数式 (係数：0.00065)	指数式の組合せ 0～960m (初期間隙率：0.9) (係数：0.00025) 1090m～ (初期間隙率：0.9) (係数：0.0006)
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： $\omega = 1$ ，垂直： $\omega = -1$			

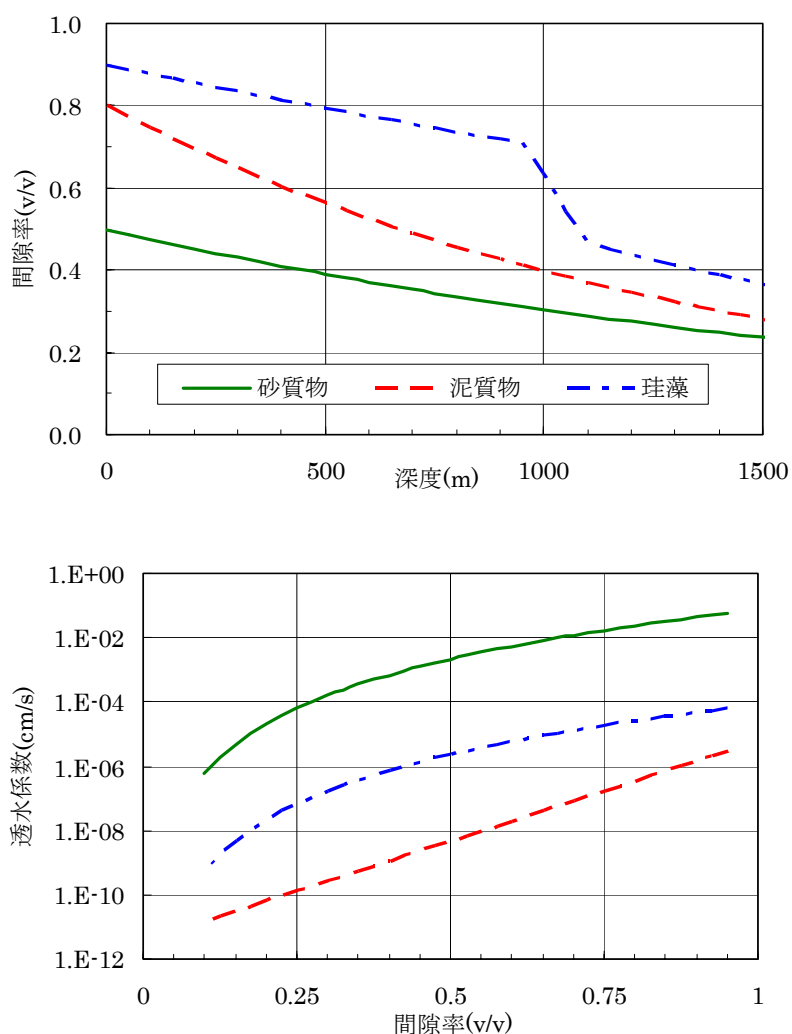


図 6.1-14 深度間隙率曲線（上）および間隙率透水係数曲線（下）

6. 1. 4 データ比較用パラメータ

データ比較用パラメータには、レイヤー情報、ボーリング孔情報、座標変換情報、評価値情報がある。

① レイヤー情報

対象とするレイヤーは、Marker A-1 から Masuporo top までの各マーカーで区切られた 15 レイヤーとした。各レイヤー名は、その上位のマーカー名と同一とした。表 6.1-2 に対象レイヤー一覧を示す。

表 6.1-2 対象レイヤー一覧

レイヤー名	番号	上限時間 (Ma)	下限時間 (Ma)
A-1	1	3.5	3.8
A-009	2	3.8	3.9
D-008	3	3.9	4.0
C-1	4	4.0	4.2
S3	5	4.2	5.0
A-2	6	5.0	5.2
C-2	7	5.2	5.5
T6	8	5.5	5.8
D-3	9	5.8	6.3
T14	10	6.3	7.5
B-4	11	7.5	8.2
D-4	12	8.2	9.0
S8	13	9.0	10.5
C4	14	10.5	11.5
A5	15	11.5	12.5

② 対象ボーリング孔

データ比較対象のボーリング孔は、HDB-1～HDB-6、HDB-8 および基礎試錐「天北」である。HDB-7、北川口 SK-1 については、それぞれ A-1 レイヤー下限を見ていないこと、対象範囲外であることから、データ比較対象から外した。

各ボーリング孔の比較パラメータは、2 章の検層解析結果を基に、間隙量、泥質物マトリックス量、珪藻マトリックス量を各レイヤーについて算出した。表 6-1-3, 6.1-4 にその結果を示す。

表 6.1-3 ボーリング孔データ一覧(1/2)

		HDB-1	HDB-2	HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-8	基礎 試錐 「天北」
A-1	Pore	36.6		40.3					
	Mud	13.7		15.5					
	Diatom	6.0		10.5					
A-009	Pore	18.7		19.3					
	Mud	7.3		6.3					
	Diatom	4.1		6.4					
D-008	Pore	17.1		18.0			24.3	16.0	
	Mud	4.3		3.1			3.5	1.5	
	Diatom	6.7		7.4			6.5	6.2	
C-1	Pore	21.6		23.3	20.4		26.9	21.7	
	Mud	9.8		10.6	9.1		8.7	6.1	
	Diatom	4.0		7.4	3.6		5.8	8.2	
S3	Pore	58.6		64.5	49.7		76.5	41.7	56.2
	Mud	23.6		28.0	26.4		21.6	19.1	52.6
	Diatom	26.5		23.7	16.2		22.2	19.3	24.3
A-2	Pore	18.5		27.9	16.5	23.0	31.0	15.7	10.7
	Mud	16.7		19.5	15.0	14.0	13.5	16.2	18.3
	Diatom	10.5		11.6	5.0	6.0	10.4	5.1	4.7
C-2	Pore	28.6	26.5	31.7	28.0	27.8	36.2	22.8	18.4
	Mud	31.6	25.2	35.0	26.0	24.3	28.3	26.3	29.2
	Diatom	13.7	3.0	15.1	11.0	12.3	14.0	8.3	8.5
T6	Pore	21.4	13.7	17.1	22.5	21.1	24.8	20.2	19.2
	Mud	16.6	13.7	16.0	21.7	17.5	17.9	22.5	30.7
	Diatom	13.6	5.7	10.6	13.6	13.0	13.8	9.4	11.8

Pore, Mud, Diatom はそれぞれ、各レイヤーの間隙量 (m)、泥質物マトリックス量 (m)、珪藻マトリックス量 (m) を表す。

表 6.1-4 ボーリング孔データ一覧(2/2)

		HDB-1	HDB-2	HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-8	基礎 試錐 「天北」
D-3	Pore	12.3	11.9		11.4	10.2	14.0	11.3	7.9
	Mud	12.2	12.0		13.0	10.4	11.6	11.7	13.5
	Diatom	7.2	6.3		5.7	5.9	8.4	6.2	4.4
T14	Pore	25.6	21.8		29.5	31.9	29.2	24.4	26.4
	Mud	23.6	21.4		30.1	31.1	22.9	23.6	35.6
	Diatom	18.7	14.7		19.4	21.5	21.4	18.5	16.2
B-4	Pore	26.8	27.5		25.2	27.1	28.3	28.6	27.0
	Mud	30.1	29.5		33.3	31.5	30.5	33.0	47.8
	Diatom	17.4	14.9		20.8	15.5	21.6	20.0	16.4
D-4	Pore		17.2			16.6			14.2
	Mud		16.6			19.8			14.1
	Diatom		9.4			9.6			21.9
S8	Pore		75.7						53.5
	Mud		57.8						86.9
	Diatom		42.5						36.9
C4	Pore		28.9						22.7
	Mud		29.3						48.9
	Diatom		18.2						17.5
A5	Pore		44.0						34.3
	Mud		42.3						102.8
	Diatom		27.4						45.0

Pore, Mud, Diatom はそれぞれ、各レイヤーの間隙量 (m)、泥質物マトリックス量 (m)、珪藻マトリックス量 (m) を表す。

③ 座標変換情報, 評価値情報

実座標からシミュレーション座標への変換には、図 6.1-1 で示した値を使用した。評価値としては、堆積物マトリックス値の残差平方和を用い、評価値分母には 1 を使用した。表 6.1-5 に座標変換、評価値パラメータを示す。また表 6.1-6 に各ボーリング孔の実座標位置およびシミュレーション位置座標を示す。

表 6.1-5 座標変換・評価値パラメータ一覧

実座標 X 値 (Easting)	-27,370m
実座標 Y 値 (Northing)	122,440m
シミュレーション座標 X 値	0m
シミュレーション座標 Y 値	0m
X 軸角度	211 度 (反時計回り)
評価値種類	堆積物マトリクス値のみ使用
評価値分母	分母=1

表 6.1-6 各ボーリング孔の実座標位置およびシミュレーション座標位置

ボーリング孔	実座標 (日本測地系 XII 系)		シミュレーション座標	
	X (Easting)	Y (Northing)	X	Y
HDB-1	-30,051.65	115,365.45	5,942.29	4,682.92
HDB-2	-25,747.95	110,541.84	4,737.64	11,034.13
HDB-3	-30,622.47	115,845.86	6,184.14	3,977.13
HDB-4	-29,224.51	116,976.66	4,403.46	3,727.86
HDB-5	-28,859.43	116,400.83	4,387.09	4,409.46
HDB-6	-30,359.97	115,831.94	5,966.31	4,124.26
HDB-7	-31,656.18	116,215.18	6,879.99	3,128.17
HDB-8	-29,685.81	116,475.50	5,056.98	3,919.85
基礎試錐「天北」	-29,712.12	119,270.98	3,639.75	1,510.10

6. 1. 5 最適化用パラメータ

最適化用パラメータの設定については、未だ試行錯誤の部分が大きく、手順の確立までには至っていない。今回のテストランでは、試行錯誤の中の一例を示す。これらパラメータの設定手順、妥当性の検討は、今後の課題である。

(1) SA パラメータ

SA (シミュレーティッド・アニーリング) のパラメータを、以下の通り設定した。初期温度は、採択率が 100% になるように試行錯誤で設定した。 α 、 β には一般的な値を用いた。最大回数、初期回数については、30,000 回、1,000 回とした。表 6.1-7 に、SA パラメータの一覧を示す。

表 6.1-7 SA パラメーター一覧

分類	パラメータ値
初期温度	1000
α	0.8
β	1
初期回数	1000
最大回数	30,000
乱数初期化値	65335

(2) 摂動パラメータ

摂動パラメータの対象として、海岸線移動位置、一次堆積速度係数、イベント Y 軸座標位置およびイベント頻度係数を選択した。各パラメータの設定値を表 6.1-8 に示す。

表 6.1-8 摂動パラメーター一覧

項目	種類	番号	最大値	最小値	単位値
海岸線 位置移動	平行移動	-	5000	-5000	100 (m)
	実数倍	-	5	0.1	0.1
堆積速度 係数	個々独立	2	2.0	-0.5	0.1
		3	2.0	-0.5	0.1
イベント Y 座標位置	平行移動	2	5000	-5000	100 (m)
イベント 頻度係数	実数倍	2	10	0.1	0.1

海岸線移動位置については、氷河性海水準変動の「-20 倍」とした仮パラメータの最適化を考慮して「実数倍」の摂動パラメータを選択した。また堆積盆における対象範囲基準位置についても「平行移動」を用いて、その位置の調整を行った。

一次堆積に関しては、堆積速度の急激な変化における堆積速度係数の変化を検討するために「個々独立」を使用した。「個々独立」を使用することにより、「堆積速度変化前」の係数、および「堆積速度変化後」の係数が別々に求められる。

二次堆積に関しては、イベント Y 軸方向位置の調整、イベント頻度の調整のためそれぞれ摂動パラメータを与えた。

6. 2 結果

以下，6. 1 の入力パラメータから得られた結果を示す。まず，初期パラメータ（最適化前パラメータ）の結果を示し，その後，最適化されたパラメータでの結果を示す。

6. 2. 1 初期パラメータでの堆積シミュレーション結果

堆積シミュレーション結果のうち，間隙率分布を図 6.2-1,2 に，珪藻比率分布を図 6.2-3,4 にそれぞれ示す。また，ボーリング孔データ（実データ）と予測データとの比較結果を，ボーリング孔毎（図 6.2-5）およびレイヤー毎（図 6.2-6,7）にそれぞれ示す。

図 6.2-5 のボーリング孔毎比較プロットから，特に HDB-2，基礎試錐「天北」の 2 ボーリング孔について，実データと予測データとの乖離が大きいことが分かる。また図 6.2-6,7 のレイヤー毎比較プロットからは，レイヤー 5～7 (S3～C-2)および，レイヤー 13～15 (S8～A5)でその乖離が大きい。後者に関しては，データ点は HDB-2，基礎試錐「天北」の 2 ボーリング孔のみである。

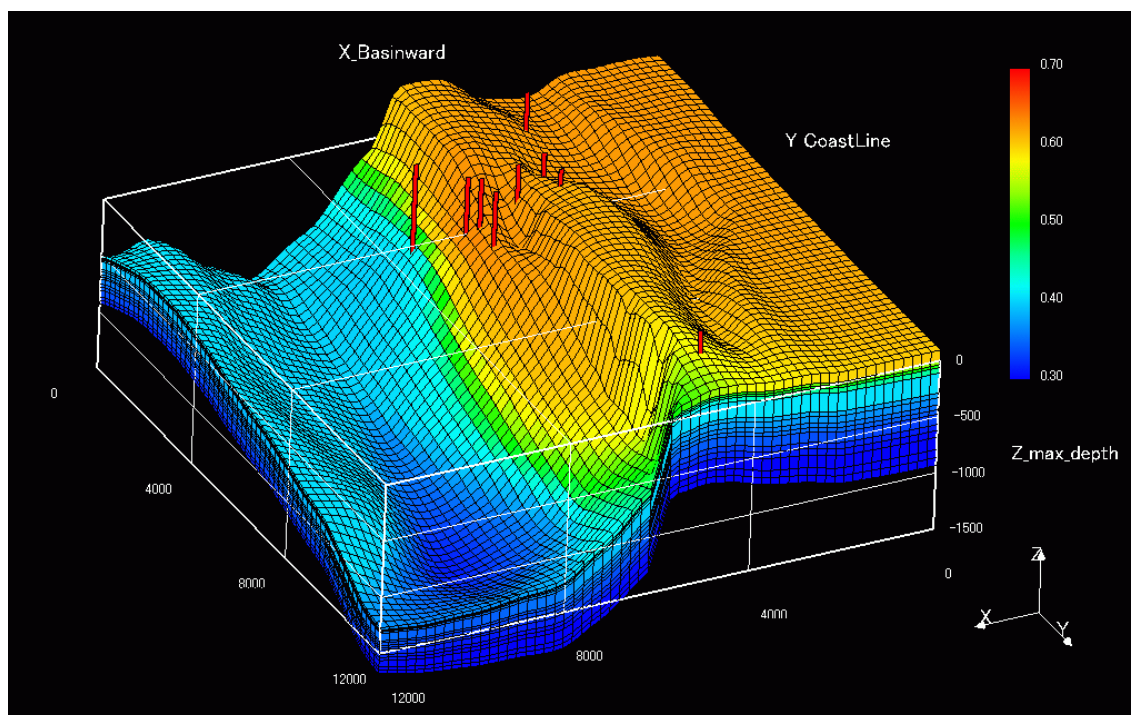


図 6.2-1 堆積シミュレーション結果三次元表示（初期パラメータ，間隙率）
 XY 軸はシミュレーション座標。Z 軸は深度 (m) であり，現在深度ベースで表示してある。赤線は，ボーリング孔位置を示す。一番手前のボーリング孔は HDB-2，一番奥のボーリング孔は基礎試錐「天北」である。

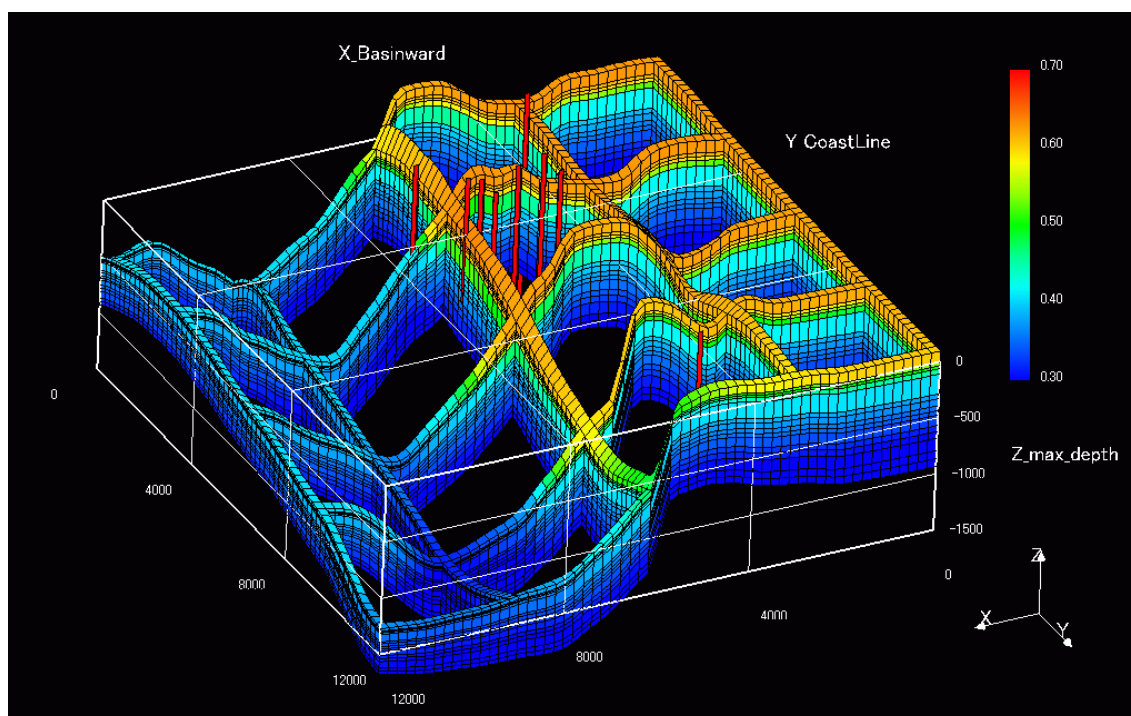


図 6.2-2 ブロックダイアグラム（初期パラメータ，間隙率）

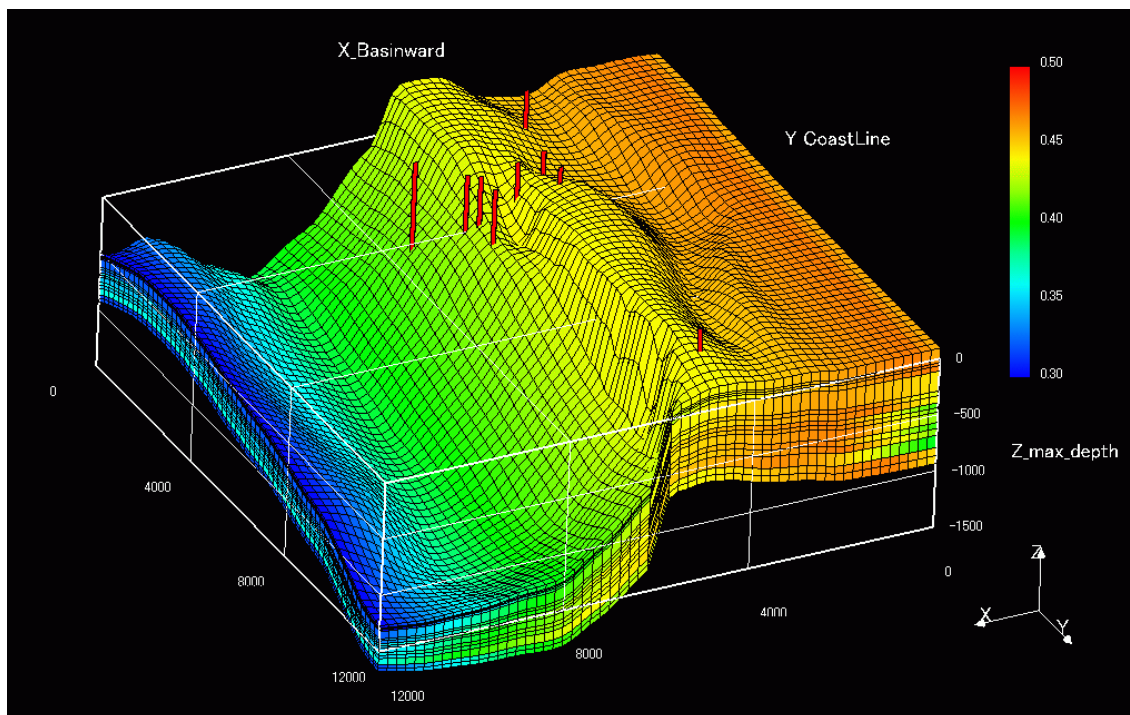


図 6.2-3 堆積シミュレーション結果三次元図（初期パラメータ，珪藻比率）

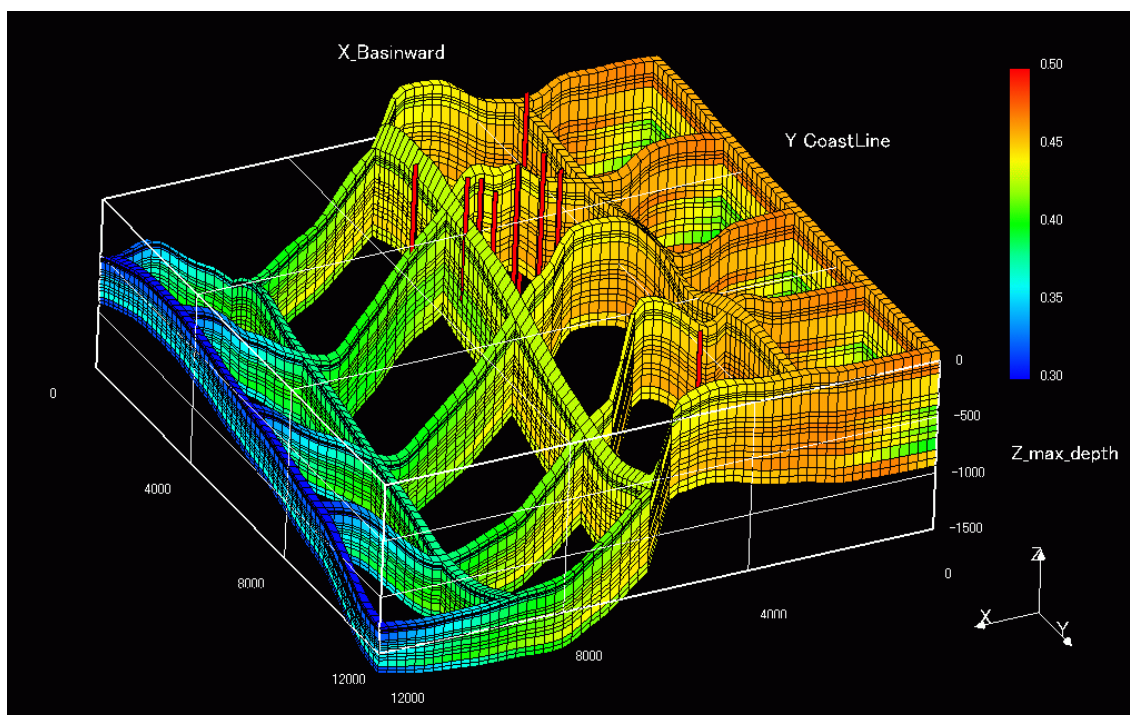


図 6.2-4 ブロックダイアグラム（初期パラメータ，珪藻比率）

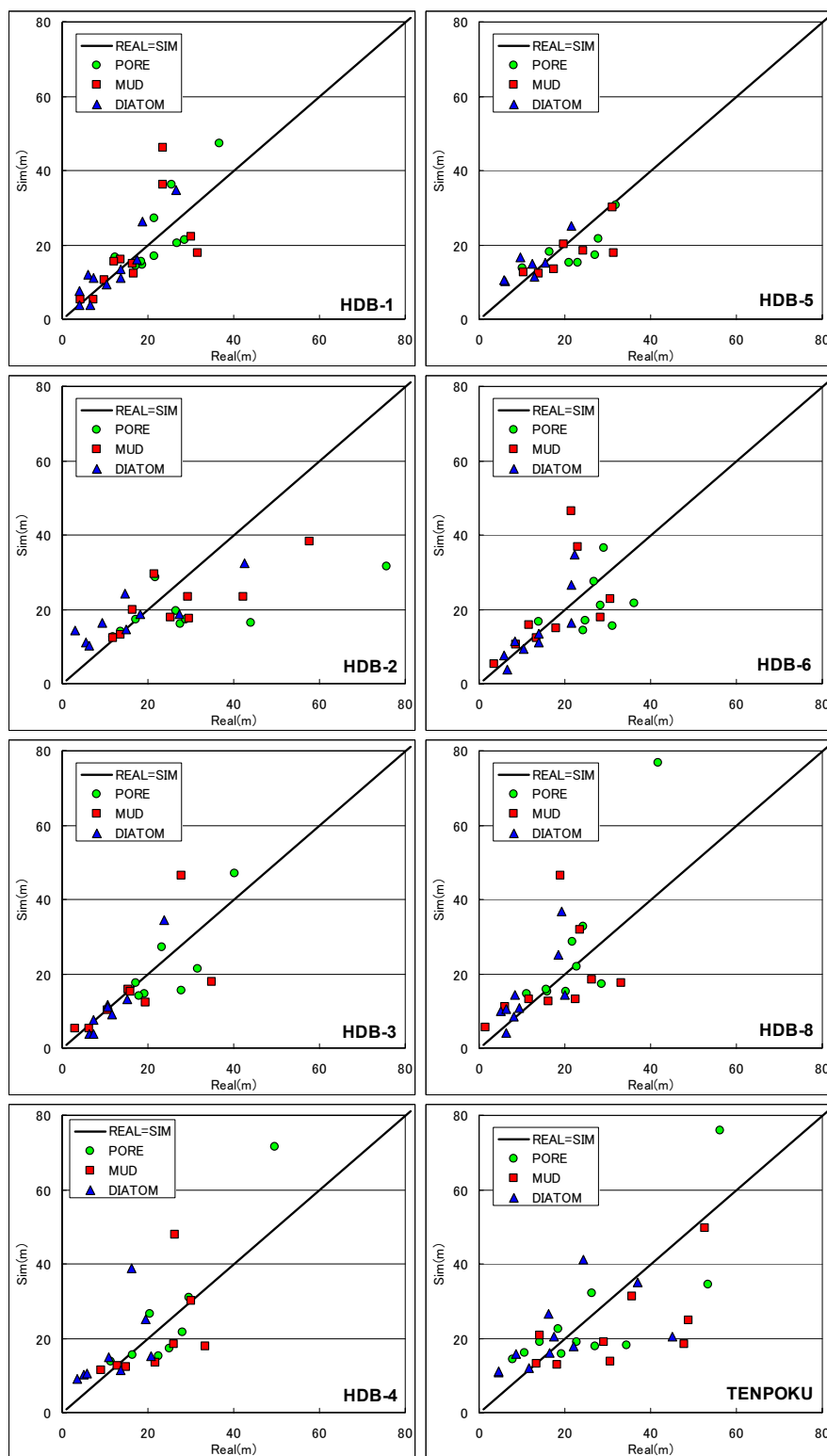


図 6.2-5 実・予測データプロット (初期パラメータ, ボーリング孔毎)
 各ボーリング孔について, 各レイヤーの間隙量, 泥質物マトリックス量, 珪藻マトリックス量をプロットした。横軸は実データ, 縦軸は予測データである。

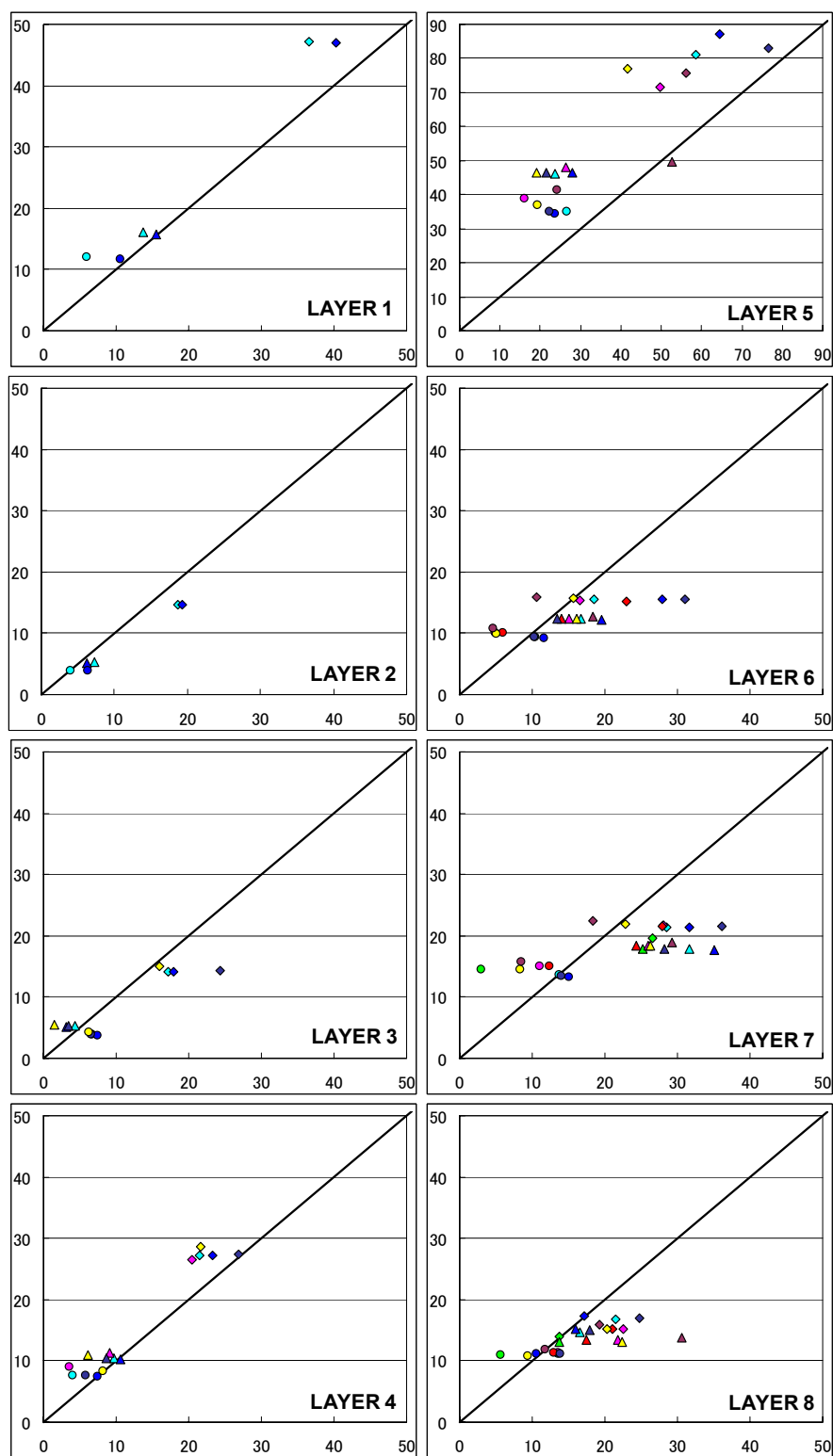


図 6.2-6 実・予測データプロット（初期パラメータ，レイヤー毎）その 1
 レイヤー毎に各ボーリング孔の実・予測データをプロットした。横軸は実データ，縦軸は予測データ。
 各プロットの形態である。凡例については，図 6.2-7 参照。

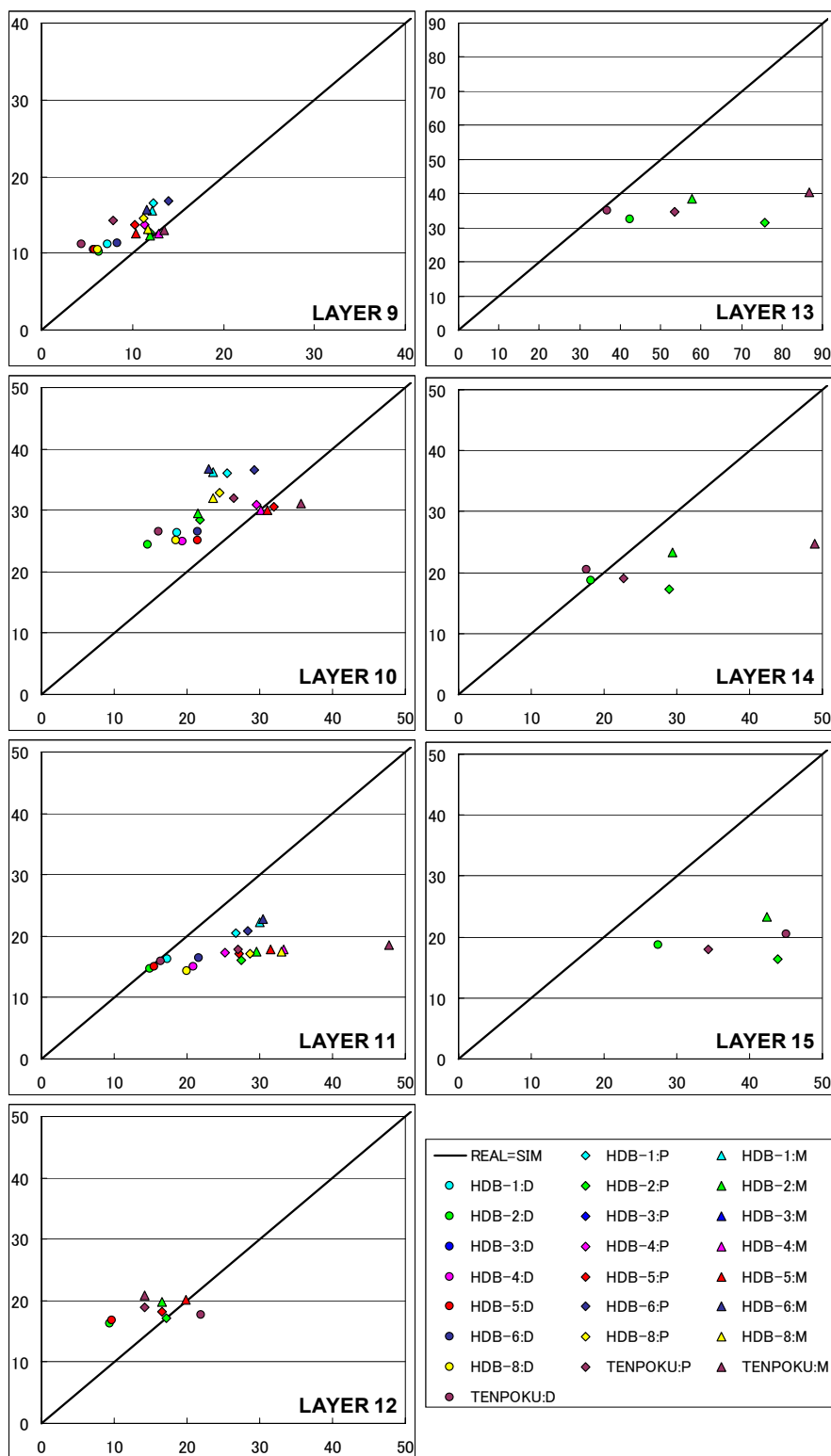


図 6.2-7 実・予測データプロット（初期パラメータ，レイヤー毎）その 2
 右下凡例の、D は珪藻マトリックス量を、M は泥質物マトリックス量を、また P は間隙量を、それぞれ意味している。

6. 2. 2 パラメータ最適化機能および最終パラメータでのシミュレーション結果

(1) パラメータ最適化機能

① SA 試行結果

図 6.2-8 に SA の各試行における評価値および温度グラフを示す。また，表 6.2-1 に初期評価値，最終評価値，および比較対象値を示す。

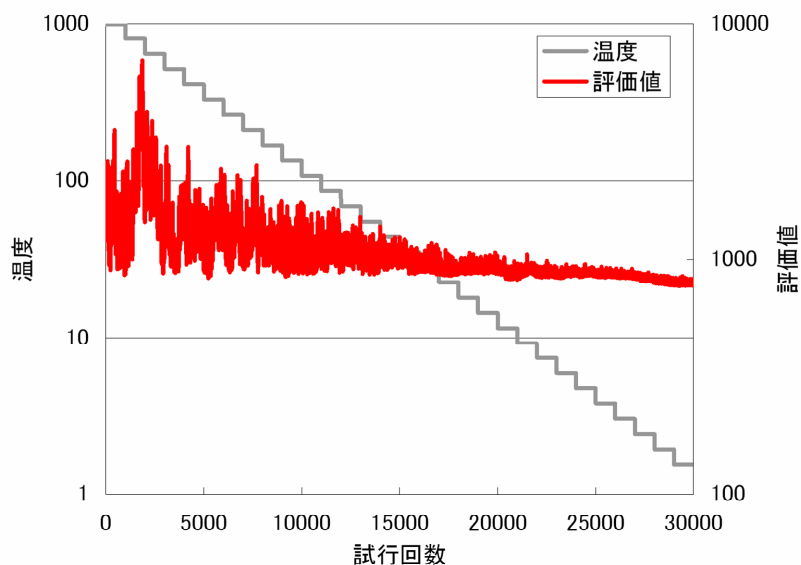


図 6.2-8 SA 試行に対する評価値および温度グラフ

表 6.2-1 初期評価値，最終評価値，比較対象値一覧

項目	値
初期評価値 (Initial Cost)	1147.04
最終評価値 (Best Cost)	768.09
各堆積物についての マトリックス量分散の総和	353.45
各レイヤー各堆積物についての マトリックス量分散の総和	64.63

評価値：各堆積物マトリックス量の誤差分散の総和

パラメータ最適化機能の結果，評価値は，1147.04 から 768.09 と改善されたが，比較対象となる「各堆積物についてのマトリックス量分散の総和」よりも大きい値で終

了した。

「各堆積物についてのマトリックス量分散の総和」は、全レイヤーについて各堆積物マトリックス量をそれぞれ単一値で代表させた時の分散値の総和である。よって、実データとの「誤差分散」を判断基準とした場合、堆積シミュレーション予測値より、全レイヤー単一値の方が推定値として望ましいとなってしまう。評価値（誤差分散）の大きい要因、その改善案については、6.3「考察」で議論する。

② 摂動パラメータ結果

表 6.2-2 に摂動パラメータの最終値を示す。以下各パラメータについて説明する。

表 6.2-2 摂動パラメータ最終値一覧

項目	種類	番号	最終値
海岸線 位置移動	平行移動	-	-3100(m)
	実数倍	-	4.9
堆積速度 係数	個々独立	2	5.5Ma -0.3 5.8Ma +0.1
		3	5.5Ma -0.6 5.8Ma -0.2
イベント Y座標位置	平行移動	2	-400(m)
イベント 頻度係数	実数倍	2	9.9

海岸線移動位置（平行移動）の結果からは、対象範囲のを堆積盆基準位置を初期パラメータより、3100m 陸側に移動させる。また海岸線移動位置（実数倍）は、初期パラメータで使用した「20倍」より「100倍程度」がより実データに合うとの結果となった。

初期パラメータの堆積速度係数は、各堆積物とも 5.8Ma 以前で 1、5.5Ma 以降で 2.5 と設定した。摂動パラメータの結果から、泥質物については 5.8Ma 以前で 1.1、5.5Ma 以降で 2.2、珪藻については、5.8Ma 以前で 0.8、5.5Ma 以降で 1.9 との結果となった。つまり、5.8Ma から 5.5Ma に掛けての堆積速度の変化は、泥質岩は 2 倍程度、珪藻は 2.3 倍程度にするほうが実データにより近づく。

イベント Y 座標位置は、初期設定位置より -400m ほど移動させるとの結果となった。またイベント頻度は現在の頻度の 10 倍程度が良いとの結果となった。

海岸線移動位置およびイベント頻度の最終値は、設定最大値の極近傍であるため、それら最大値を広げれば、評価値が改善する可能性がある。

(2) 最終パラメータでのシミュレーション結果

初期パラメータでの堆積シミュレーション結果同様、間隙率分布を図 6.2-9,10 に、珪藻比率分布を図 6.2-11,12 にそれぞれ示す。また、ボーリング孔データ（実データ）と予測データとの比較結果を、ボーリング孔毎（図 6.2-13）およびレイヤー毎（図 6.2-14,15）にそれぞれ示す。

間隙率分布に関しては、上位レイヤー（レイヤー番号 2）でその値に若干の違いが認められるが、大局的には同じような分布を示す。一方、珪藻比率に関しては、海岸線移動が初期パラメータの 10 倍程度になったことを反映して、レイヤー毎の値の変化が明瞭となっている。

ボーリング孔毎の実・予測データの比較では、初期パラメータでの結果同様、HDB-2、基礎試錐「天北」についてデータの乖離が認められ、初期パラメータからの改善点は、はっきりしない。しかしながら、レイヤー毎の比較では、レイヤー6、7 について初期パラメータから改善されていることが分かる。

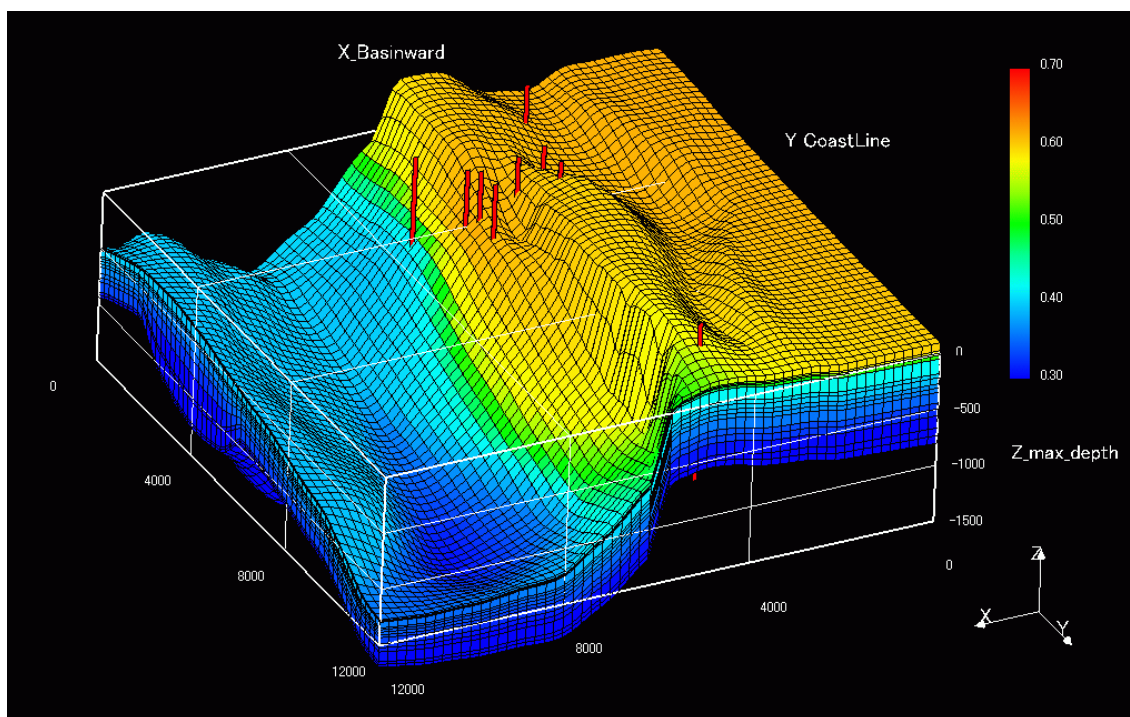


図 6.2-9 堆積シミュレーション結果三次元図（最終パラメータ，間隙率）

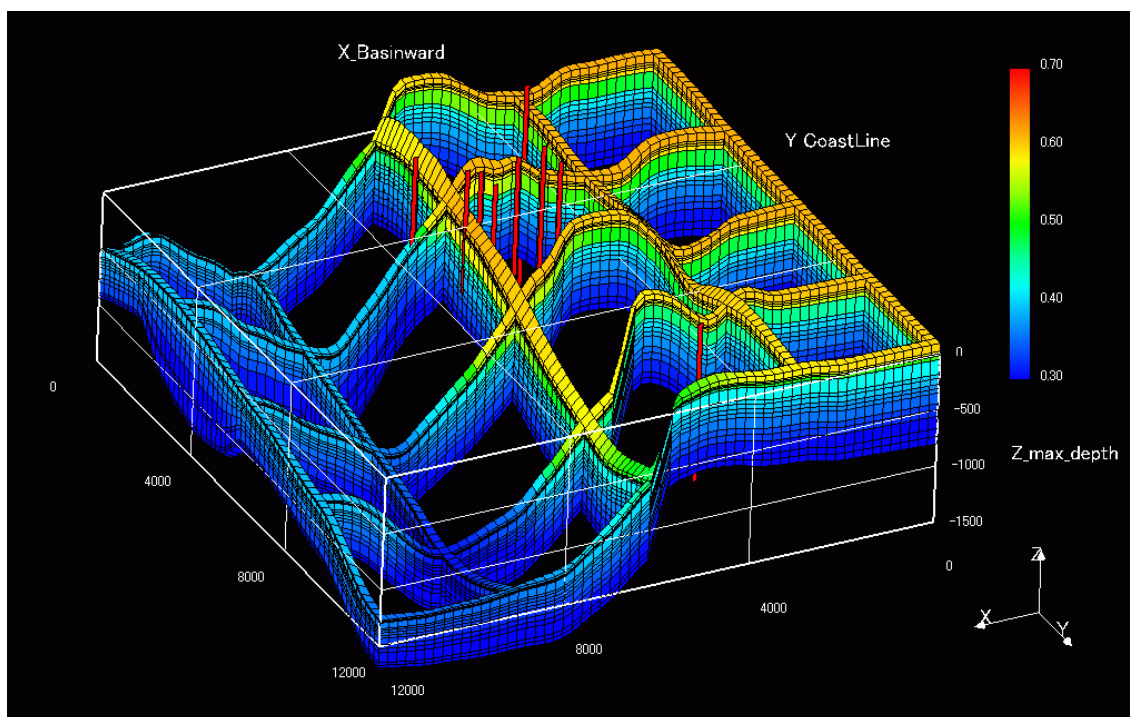


図 6.2-10 ブロックダイアグラム（最終パラメータ，間隙率）

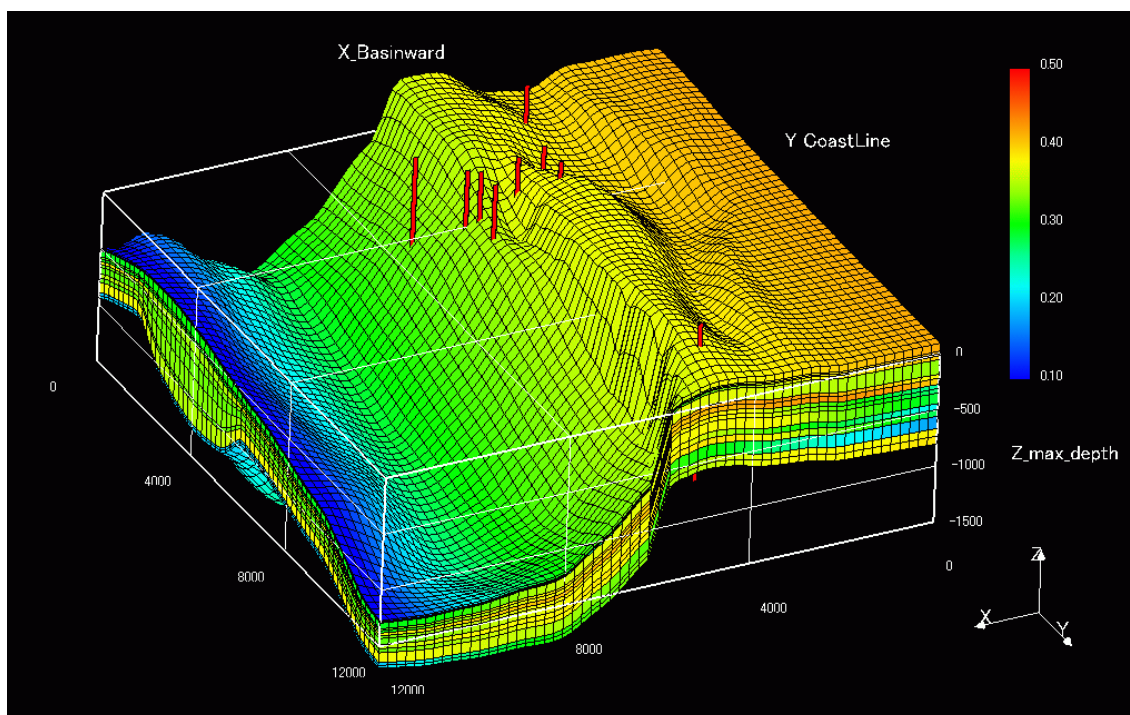


図 6.2-11 堆積シミュレーション結果三次元図（最終パラメータ，珪藻比率）

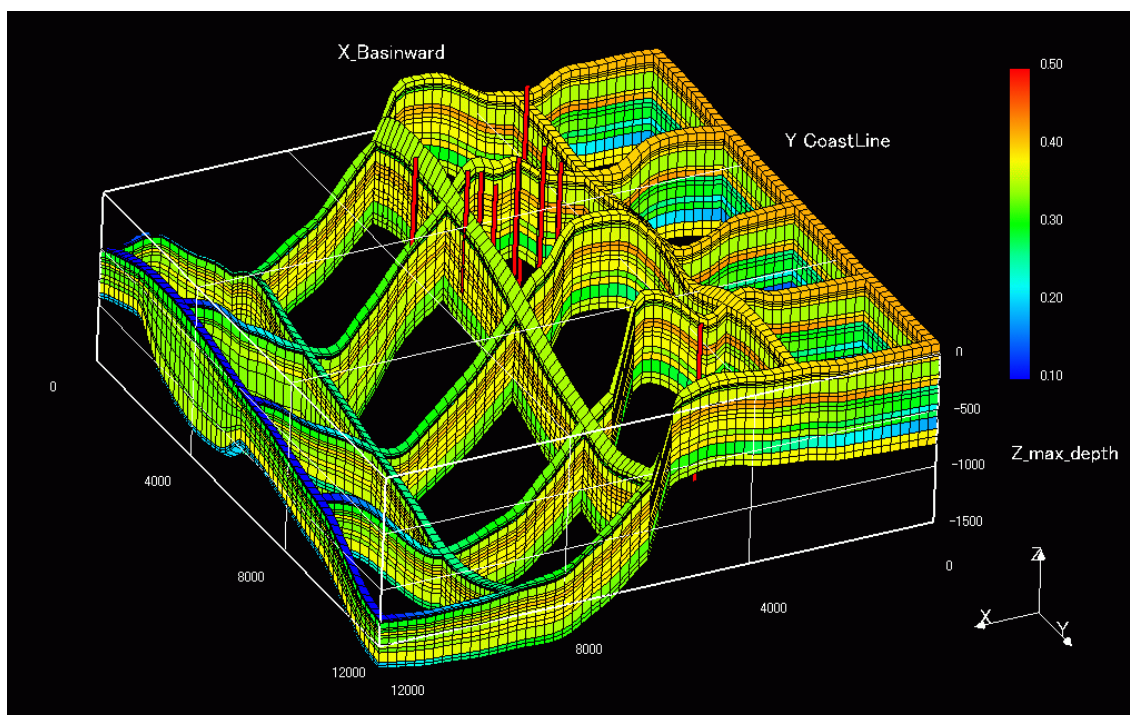


図 6.2-12 ブロックダイアグラム（最終パラメータ，珪藻比率）

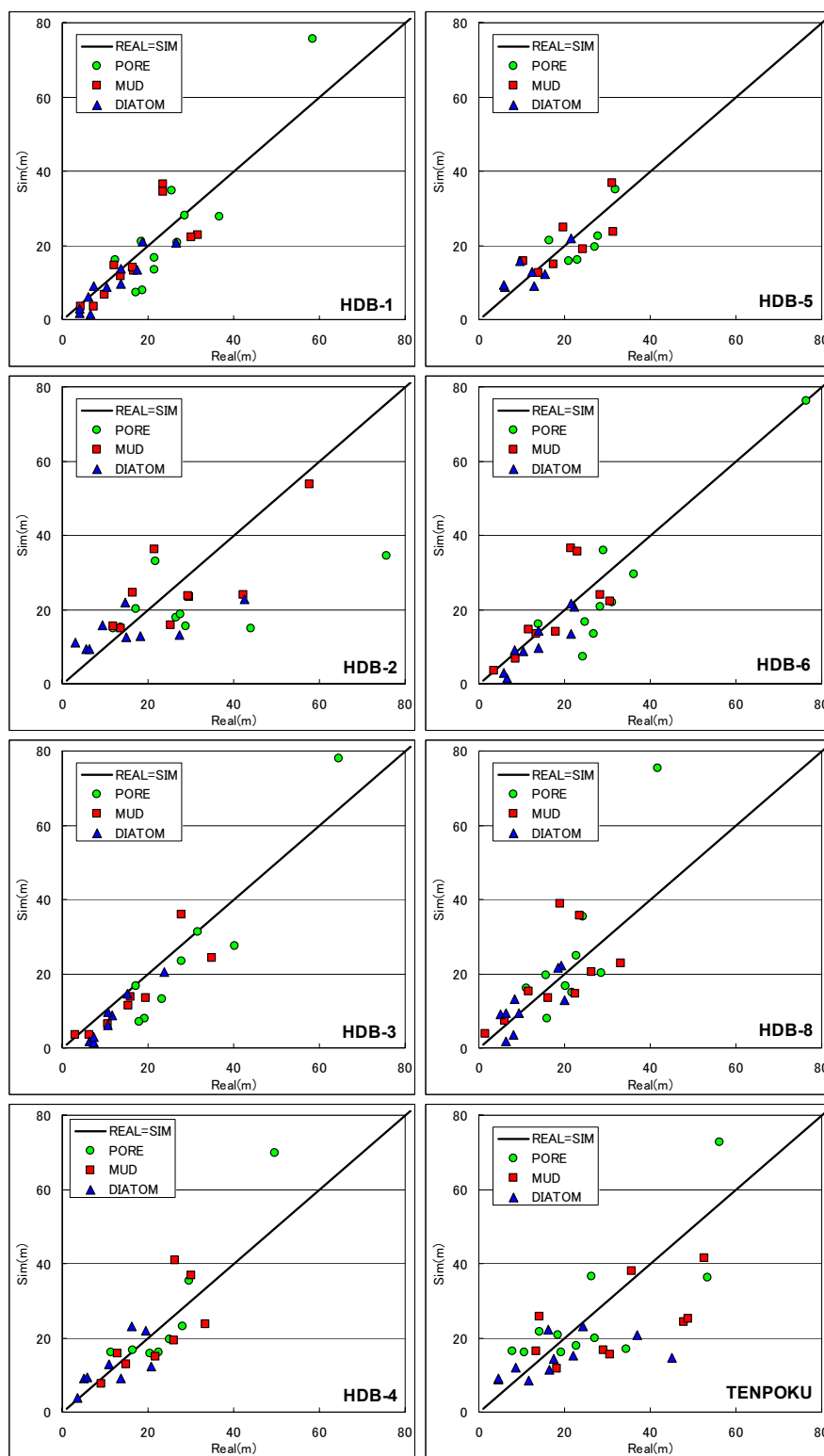


図 6.2-13 実・予測データプロット（最終パラメータ，ボーリング孔毎）
 各ボーリング孔について，各レイヤーの間隙量，泥質物マトリックス量，珪藻マトリックス量をプロットした。横軸は実データ，縦軸は予測データである。

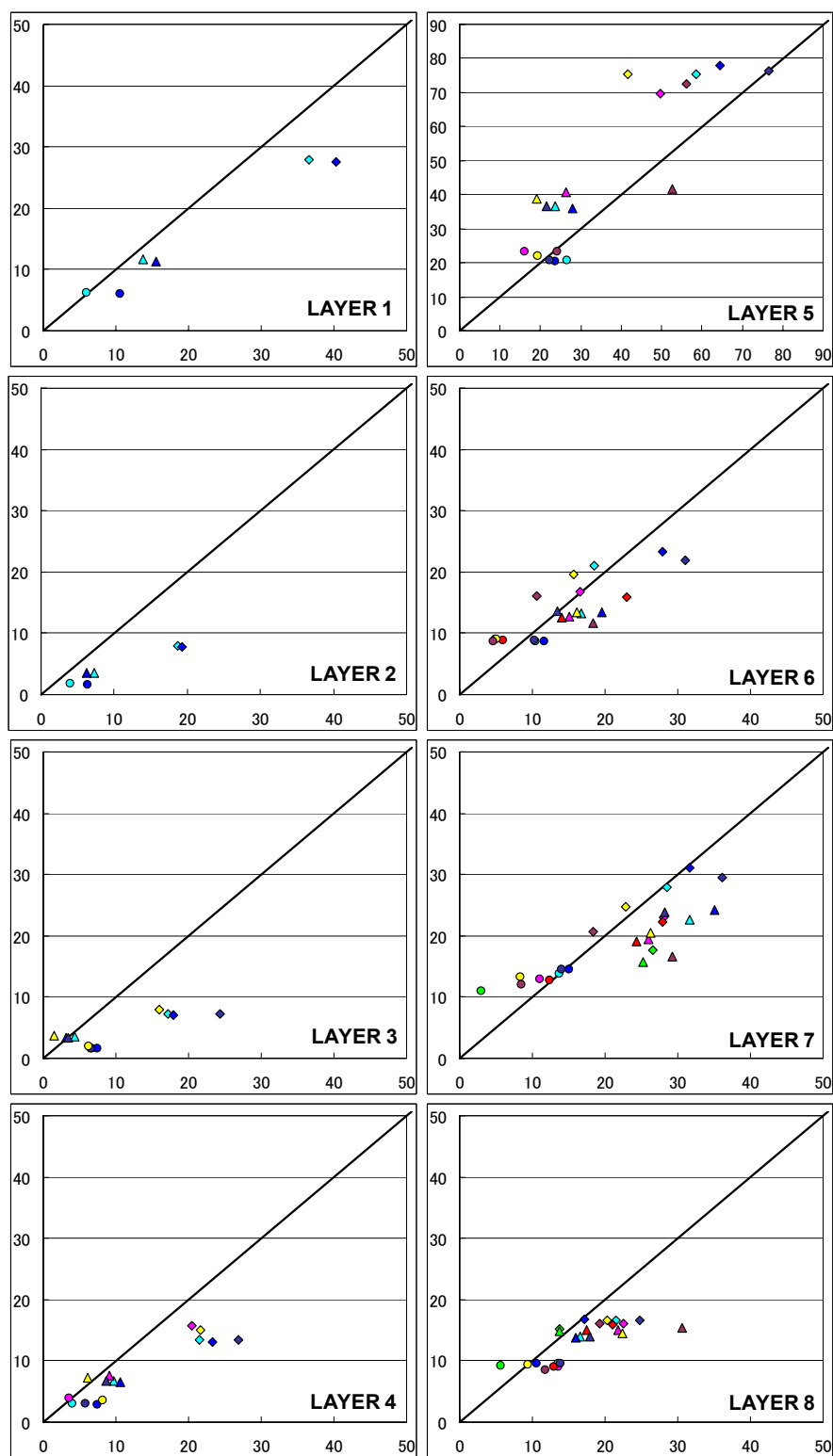


図 6.2-14 実・予測データプロット（最終パラメータ，レイヤー毎）その 1
 レイヤー毎に各ボーリング孔の実・予測データをプロットした。横軸は実データ，縦軸は予測データ。
 各プロットの形態である。凡例については，図 6.2-15 参照。

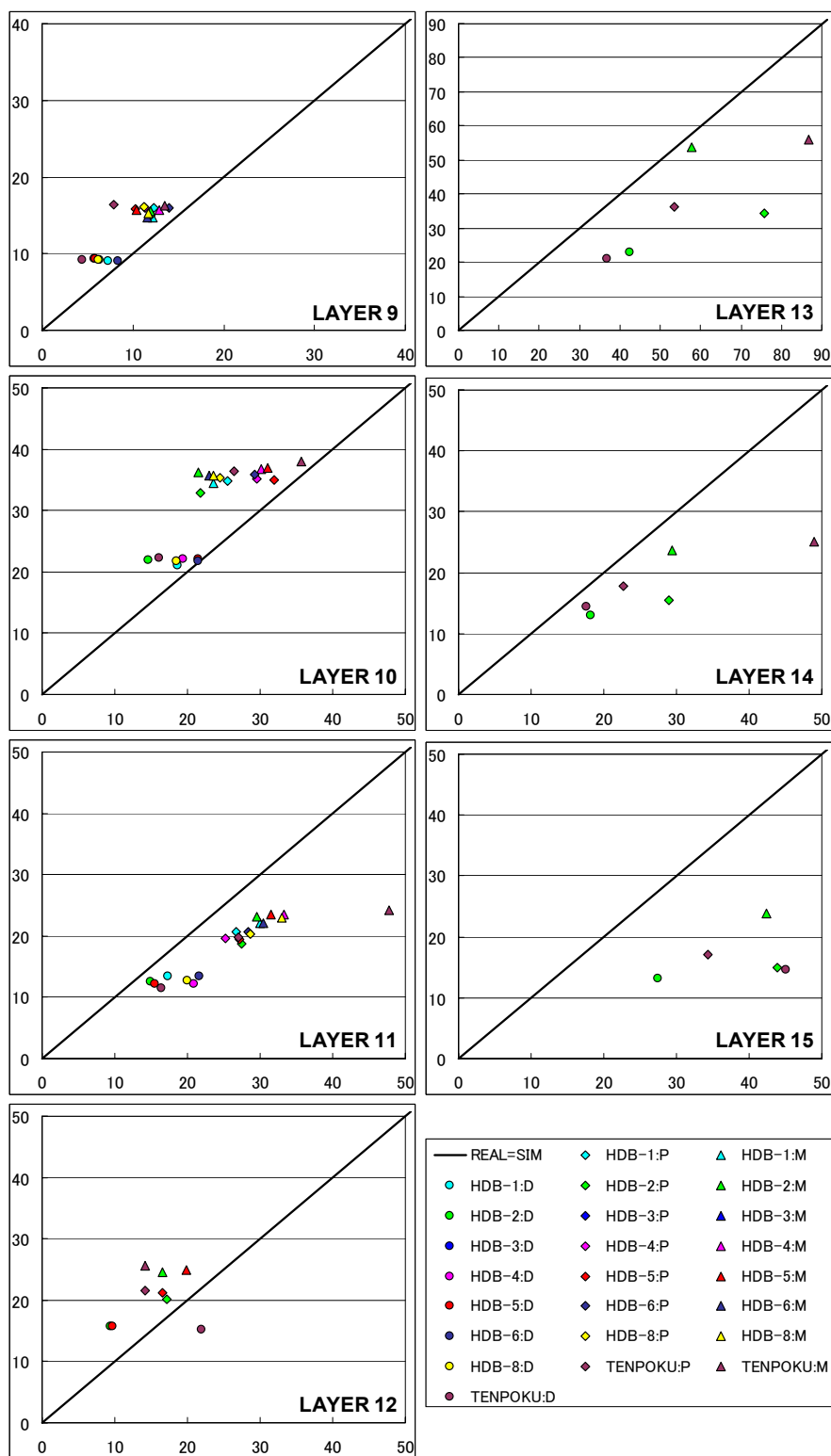


図 6.2-15 実・予測データプロット（最終パラメータ，レイヤー毎）その 2
 右下凡例の、D は珪藻マトリックス量を、M は泥質物マトリックス量を、また P は間隙量を、それぞれ意味している。

6. 3 考察

6. 2に示した通り、データ比較機能によって実データと予測データとの比較が可能になり、またパラメータ最適化機能によって実データに予測データを近づけるためのパラメータ調整が可能となった。ただし、今回のテストランでは、実データと予測データとの乖離は、パラメータ最適化後においても、未だ大きいという結果になった。

この乖離には、2つの要因が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

1つは、各マーカー時間設定の際の不確定性の問題である。堆積シミュレーションでは、各堆積物の堆積速度を基礎としてシミュレーションを行うため、基準堆積速度や各レイヤーの時間間隔に非常に敏感である。

各マーカーの時間（年代）は、古生物層序や放射性年代のデータを基に決定されるが、基準となるデータ点が少なく、幾つかの仮定を設けてマーカー時間を設定せざるを得ないのが現状である。よって、堆積シミュレーションパラメータを作成する際に、それらマーカー時間の不確定性を考慮し、必要であればマーカー時間の見直しといったフィードバックが必要であると考えられる。

もう1つは、本テストランでは、氷河性海水準変動のみを用いて海岸線位置移動パラメータを作成したため、本地域の構造運動（堆積盆沈降、隆起速度）の影響がパラメータに反映されていないことがある。摂動パラメータの「傾斜」は、単調に沈降もしくは隆起する構造運動の影響を評価するために作成した。しかし、昨年度のスタディから、稚内層は堆積盆沈降ステージ、声間層は隆起ステージと考えられ、「傾斜」を適応することができなかった。

上記2つの要因を考慮し、パラメータ見積もり精度を高められれば、予測データの信頼性も向上すると考えられる。したがって、これらパラメータの設定手法・手順を整備し、他堆積盆に対しても対応できるようにすることが今後の課題である。

7. 今後の提案

検層解析

MITI 天北と北川口 SK-1 の GR 値は坑径が大きいこと、使用している泥水が異なることから、幌延の HDB ボーリング孔の GR 値とはそのままでは比較できない。本スタディでは環境補正を行い HDB ボーリング孔と同一パラメータでの Vsh の算出を試みたが、なお MITI 天北、北川口 SK-1 と HDB ボーリング孔との定量的な Vsh の比較には疑問が残る。既存試掘井と HDB ボーリング孔との定量的な対比には、ボーリング孔間でのキャリブレーションの方法を検討すべきである。

稚内層のマーカの年代

海水準カーブを用いてマーカ年代の細かい推定を行っているが、化石でのコントロールが少ないので確度は十分ではない。炭酸塩ノジュールを酸処理して鑑定が可能な珪藻や放射虫を取り出すことにより、稚内層中の微化石層序を調べ、マーカの対比と年代の精度を上げることが有用である。

EMI 画像に認められる厚さ 10cm~1m オーダーの層状構造の明瞭に関する検討と生物擾乱の EMI 画像への影響について

GR 値が高い層準では層状構造がなぜ不明瞭になるのかについて、ここで少し検討してみる。まず考えられるのは、GR 値が高い層準では Al_2O_3 で代表される碎屑物や SiO_2 で代表される珪藻の含有量の変化が小さいということである。これ以外に計測条件による可能性もある。1つは、炭酸塩岩ノジュールの存在である。炭酸塩岩ノジュールは比抵抗が極端に高い。このため、EMI 画像を処理する単位区間に炭酸塩岩ノジュールが存在すると、炭酸塩岩ノジュールとそれ以外の層準との比抵抗の差が炭酸塩岩ノジュール以外の層準内での比抵抗の差に比べて極端に大きくなる。しかも、炭酸塩岩ノジュールは GR 値の高い層準に発達する傾向がある。したがって、全層準の不均質性をより詳細に評価するためには、今回 0.1~1m EMI 層状構造が不明瞭とされた層序区間で化学組成分析を行うとともに、より細かな深度区分で EMI 画像の処理を行う必要がある。

また、HDB-2 孔でのみ不定形の高比抵抗部が認められ、そのような層準で層状構造が他の孔に比べて不明瞭な傾向があるように思える。この不定形の高比抵抗部はその形状から生痕化石と解釈できそうな場合が多い。もし、そうなら HDB-2 孔の不定形が認められる層準では生物擾乱がより激しいのかもしれない。また、HDB-2 孔で不定形の高比抵抗部が認められるのは 2004GR マーカー16 より上位であり、この層準で他の層準や他の孔に比べて生物擾乱が激しい可能性がある。

堆積モデリングソフトウェア

① 各マーカの時間設定について、より詳細に検討を行う。また、見積もった堆積

速度の妥当性からから逆に時間設定にフィードバックする手法・手順を整備する。

- ② 地域的な構造運動を見積もり，海岸線位置移動パラメータに反映させる。
- ③ 最適化機能のパラメータ設定，つまりシミュレーテッド・アニーリングの冷却スケジュールや近傍距離の設定について，その手順・手法の検討を行う。
- ④ 現在のソフトウェアに GUI 機能を持たせ，ユーザーフレンドリーにする。
- ⑤ 昨年度からの課題であり，今年度解決できなかった課題，①時間による水深の変化，②誤差分散機能について，検討，実装を試みる。
- ⑥ 二次堆積物の広がり，各堆積物の分布について再検討。二次堆積物分布を可変とする。

8. おわりに

本研究では堆積岩の不均質性を定量的に把握する手法を開発することを目的として、幌延地域の声問層、稚内層の不均質性の定量的な評価と堆積システムの推定を行い、また堆積モデリングソフトウェアの機能を拡張した。

幌延地域の不均質性の定量評価と堆積システムの推定については以下の成果が得られた。

検層解析

- ① GR 検層を用いて声問層・稚内層のマーカを幌延ボーリング孔間で対比し、微化石データと海水準カーブを用いてマーカの年代を見積もった。
- ② 検層とコア間隙率を比較して検層パラメータを求めた。音波 (Sonic) 検層と密度 (Density) 検層の平均を検層間隙率とした採用し、各ボーリング孔の間隙率を算出した。
- ③ GR 検層を用いて泥質分含有量(Vsh)を各ボーリング孔について算出した。
- ④ Sonic 検層を用いて各ボーリング孔の削剥量を見積もった。
- ⑤ 珪質泥岩の埋没曲線を推定した。

EMI 解析

- ① EMI 画像で厚さ数 10cm~1m の層状構造が認められた。高比抵抗層と低比抵抗層の互層であり、その多くはコア肉眼観察では識別できない。
- ① EMI 層状構造の発達程度を基準にして 5 つの EMI ファシスを区分した。
- ② EMI 層状構造がボーリング孔間で対比されることがわかった。
- ③ 化学組成から EMI の高比抵抗層は碎屑物含有量が少なく珪藻含有量が多い。低比抵抗層はその逆の特徴をなす。
- ④ EMI 層状構造は数千年から数万年周期であり、GR 値の数万~数 10 万年周期の増減と重なって不均質となる。
 - 1) EMI で認められた層状構造は、高比抵抗層と低比抵抗層の互層からなる。それらがボーリング孔間で対比できたことから、この層状構造は堆積盆内で同時的に形成されたと考えられる。
 - 2) 層状構造のうち、高比抵抗層は碎屑物含有量が少なく、珪藻含有量が多い。低比抵抗層はその逆の特徴を示す。
 - 3) 層状構造をもたらした組成の変化周期は、数千~数万年である。また昨年度明らかになった GR に認められる厚さ 10~20m の変化周期は、数万~数十万年である。
 - 4) GR と岩芯観察では認められなかった厚さ 10cm~1m オーダーの不均質性が EMI で認めることができた。

GDI 解析

- ① 震探記録を GDI 法により解析し、広域での地層物性変化の把握を試みた。稚内層上部について間隙率と Vsh の水平的変化が抽出された。震探記録の質の影響、ボー

リング孔が離れていることの影響を今後検討する必要がある。

堆積モデリングソフトウェアについては以下の成果が得られた。

① 堆積シミュレーション機能の拡張

一次堆積速度の時間変化と、二次堆積イベント位置の時間変化をパラメータとして追加した。また埋没曲線を用いて珪質泥岩の間隙率算定式を追加した。現在深度での表示が可能となった。

② データ比較機能の追加

堆積シミュレーションで得られた予測データと、ボーリング孔データ（実データ）とを比較する機能を追加した。

③ パラメータ最適化機能の追加

データ比較機能から得られた評価値を基に、堆積シミュレーションへの入力パラメータの最適化を行う機能を追加した。最適化はアニーリング手法を用いた。

④ テストラン

幌延地域の声間層・稚内層を対象としてボーリング孔の検層解析結果と構造図データを入力してテストランを行った。

パラメータの最適化により予測データは実データに近づいたが、いまだ大きな乖離が残った。乖離の大きな要因は各マーカー時代の不確実性と、堆積仮定パラメータ（海岸線）の設定にあると判断され、課題として残った。

9. 参考文献

増井泰裕, 他: “前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究”, JNC TJ8400 2003-093 (2004)

原 彰男: “堆積岩の水理・物質移行特性に関するデータ取得”, JNC TN8400 2003-052

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)

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, vol. 94, pp.669-688 (1988)

花方 聡, 本山 功, 三輪美智子: “日本海地域における底生有孔虫 *Spirosigmoilinella compressa* の消滅と *Miliammina echigoensis* の出現の年代およびその古海洋学的意義 — 中新世～鮮新世の海水準変動との関連 — ”, 地質学雑誌, vol.107, pp.101-116,(2001)

石油開発公団: “昭和 47 年度 天然ガス基礎調査 基礎試錐「浜勇知」調査報告書”, (1972)

石油公団: “平成 2 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「天北地域」調査報告書”, (1991)

石油公団: “平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「天北」調査報告書”, (1995)

石油公団: “平成 8 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「天北浅海」調査報告書”, (1997)

石油資源開発: “昭和 59 年度 北川口 SK-1 号井試掘完了報告書”, 石油資源開発社内報告, (1985)

Sait, Sadiq M., Youssef, Habib, I. : “Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering”, IEEE Computer Society, p.387(1999) (白石洋一訳: “組合せ最適化アルゴリズムの最新手法”, 丸善, p.347(2002))

Aoyagi, Koichi; and Kazama, T., Transformational changes of clay minerals and silica minerals during diagenesis: *Sedimentology*, vol. 27, pp. 179-188.(1980)

de Groot, P.F.M., Bril, A.H., Floris, F.J.T. and Campbell, A.E., Monte Carlo simulation of wells. *Geophysics*, vol.61, no.3, pp.631-638, (1996)

de Groot, P.F.M., Bril, A.H. and Oldenziel, T., dGB-GDI User documentation. Part I, p.144, (1999)

Haq, B.U., Haardenbol, J, Vail, P.R.: "Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change", in *Sea-Level Changes: an integrated approach*, SEPM Special Publication No.42, pp.71-108, (1988)

Heasler, H.P., Kharitonova, N.A.: "Analysis of sonic well logs applies to erosion estimates in the Bighorn Basin, Wyoming", *AAPG. Bulletin*, vol.80, pp.630-646, (1996)

Magara, Kinji: "Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressures, and paleotemperature, Southwestern part of Western Canada Basin", *AAPG Bulletin*, vol.60, pp.554-565, (1976)

K. Nakayama and J.Y. Hou, Prediction of Reservoir Properties by Monte Carlo Simulation and Artificial Neural Network in the Exploration Stage. *Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling*. Edited by P. Wong, F. Aminzadeh and M. Nikravesh, Published by Physica-Verlag, pp.15-33. (2001)

K. Nakayama and D. Sato, Prediction of sealing capacity by the equivalent grain size method. *Hydrocarbon Seal Quantification*. Edited by A.G. Koestler and X. Hunsdale. Published by Elsevier Science B.V., Amsterdam. pp. 51-60. (2002)