論 文

繰り返し三次元地震探査による圧入 CO₂ および 物性量の評価手法の開発について

酒 井 明 男*

(Received March 16, 2007 ; accepted January 11, 2008)

Development of the method to evaluate the distribution of injected carbon dioxide and physical parameters by means of time-lapse 3D seismic survey

Akio Sakai

Abstract : To mitigate the global climate change due to excess carbon dioxide emission, geologic sequestration by carbon dioxide injection in the subsurface has been proposed. To monitor and verify the long-term safe storage in the subsurface, 4D or time-lapse 3D seismic technology is the most effective to spatially and efficiently detect the change of fluid saturation and pore pressure in the target aquifer and others. In RITE/METI Nagaoka carbon dioxide injection test field, 4D seismic survey was conducted to monitor injected carbon dioxide as a collaborative research of Japex and RITE/METI. It was the first 4D seismic survey for onshore aquifer injection monitoring in the world.

Target reservoir in saline aquifer is at approximately 1100m deep. Carbon dioxide saturation was observed with approximately 6m thick by logging survey. To estimate the saturation zone by 3D seismic surveys, I had to overcome the problems of data acquisition and processing, *i.e.*, 1) irregular 3D geometry in the land 3D seismic surveys, and 2) to enhance data resolution to meet the thinner target reservoir.

In order to detect and highlight 4D anomaly zones, for relatively high noise content data, it is inadequate to simply subtract baseline and monitor seismic data as there are no ways to discriminate the noises from geological changes by this volume alone. It turns out that 4D anomaly detectability is improved if supervised pattern recognition technology is implemented in the multi-attributes approach. Estimated anomaly pattern is consistent with the observation of time-lapse wireline data and total amount of injected carbon dioxide incorporated with probability of distribution. It has improved the results of visual inspection of simple math difference of 3D seismic volume.

3D data were evaluated using well synthetics data and impedance inversion data to estimate several physical parameters such as porosity and permeability combined with the wireline data and geological constraints. Estimated high permeability zone by baseline data prior to the repeat survey showed a correlation with the detected 4D anomalies.

The first onshore 4D seismic monitoring of the injected carbon dioxide in aquifer was successfully conducted, though there were difficulties caused by the irregular 3D geometry and thinner target reservoir. It provides the prototype approach to the similar onshore carbon dioxide monitoring.

Keywords : carbon dioxide injection, geologic sequestration, time-lapse 3D seismic monitoring, 4D seismic monitoring, neural network

1. はじめに

1.1 調査背景ならびに目的

化石燃料の燃焼などで生成され、大気中に自然放散される CO₂ を地下深部帯水層（一般に塩水層）そのほかに圧入・固定する技術（地中貯留技術, Geologic Sequestration）は、現状の化石燃料に大きく依存し CO₂ 生成を伴う社会経済活動を持続しつつ地球温暖化を抑制するという現実的な観点からは実効的かつ技術的に実現性の高い選択肢の 1 つと考えられる。将来、開発、実用化されると期待される、例えば非炭素エネルギーなどを主体とする革新

的な方法による根本的な解決へのつなぎとして位置づけることができる。この技術の実施評価事例は、Statoil 社の北海での Sleipner field の例に牽引されるように近年、例えばカナダ Weyburn (CO₂ EOR 事例)、米国 Frio、アルジェリア In Salah など世界各地で見られる。Sleipner field の場合、生産した天然ガスに随伴した 10% を超える CO₂ を分離回収し 1996 年以降、年間 100 万トン を地下に圧入している。これらの先駆的な試みに基づき 2005 年 9 月の第 24 回 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) 総会で採択された特別報告書は CO₂ の地中貯留技術を地球温暖化抑制への 1 つの有効な技術として明文化したものととして注目される (IPCC, 2005)。

地下に圧入された CO₂ の流動状況は、地下構造のさま

*石油資源開発(株) (現、コスモエネルギー開発(株)) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd. (Cosmo Energy Exploration & Development Ltd.)

ざまな空間スケールにおける複雑さに対応した浸透率の不均質性、異方性などの影響を受ける。CO₂の圧入により短期的には地下における状態変化（非圧縮率減少、間隙水圧増加）がもたらされるが、本研究は、三次元地震探査を繰り返し実施し、これらの状態変化に伴う人工地震応答の変化と圧入量および帯水層の厚さ・広がりとの関係を検討することを目指す。これをCO₂地中貯留技術の適用が安全であるとして社会に受け入れられる（社会的合意形成）ための安全性評価技術（モニタリング）の一環として位置づける。石油天然ガス探査でのこれまでの適用事例から認められるように、地下に圧入したCO₂の空間的・時間的挙動を広域的かつ直接的に高分解能で可視化する方法として、このような人工地震探査手法は実効性の高いものと考えられる。同様の手法での海域帯水層へのCO₂圧入モニタリングはSleipnerで実施され、有効であると確認されている（Arts *et al.*, 2002 ほか）。陸域帯水層を対象とするものでは今回の試みが世界で最初のものとなる。

財団法人地球環境産業技術研究機構（以下RITEと略す）が2003～2005年に新潟県長岡市岩野原で実施した帯水層への圧入実証試験場を含む地域をモデル調査域として選り、非爆薬震源を用いた三次元地震探査を2003年ならびに2005年に実施した。これら2回の三次元地震探査データを用いて、主としてCO₂圧入に起因する帯水層での変化を地震探査応答の変化により検知し本手法の有効性を検証する（Sakai, 2004）。

1.2 論文の構成

本論文は、以下の章で構成される。前半は、CO₂圧入実証試験の要約（2章）、調査地域および2回の三次元地震探査のデータ取得の仕様（3章）および繰り返し三次元地震探査データの比較データ解析（4章）である。後半の5章では、前半での解析結果に基づき、中心課題となるCO₂圧入に起因する繰り返し三次元地震探査データでの経時変化域の検知方法をいくつかの方法で示した。6章で1回目の三次元地震探査データと地質データおよび坑井検層データを用いて、有効孔隙率および浸透率の広域的推定を試みた。7章で本研究の成果をまとめた。

本研究での三次元地震探査は地表条件の制約のため受発震点配置が不規則で困難な地表条件のもとで実施した。解析上の多くの試みはこのデータ取得条件に起因したものであり、今回の研究の全体像を復元するという事で、調査地域の地勢を含め三次元地震探査データ取得について紹介することからはじめ、中心課題となる経時変化域の抽出にいたるまでを論じた。

2. RITE 圧入実証試験

RITEは新潟県長岡市郊外岩野原地区で、本邦初のCO₂圧入実験を2003年7月7日から2005年1月11日の期間行った。圧入対象帯水層は、深度1,093～1,105 mMDで、前期更新世、灰爪層中（Ic層 Zone 2と称す）にあると解釈されている（RITE, 2001–2006）。この圧入実験の前後にそれぞれ三次元地震探査を実施しモニタリング手法にかかわる

Fig. 1 Map of the central part of 3D seismic survey area with projected well trajectories (CO₂-1 indicates the injection well IW-1, CO₂-2, CO₂-3, and CO₂-4 indicates well OB-2, OB-3, and OB-4 respectively)

評価作業を実施した。

圧入作業にかかわり、1本の圧入坑井（IW-1坑）、3本のモニター坑井（OB-2、OB-3およびOB-4坑）が掘削された（Fig. 1参照）。日量20～40トンのCO₂を圧入し、CO₂の総圧入量は10,405.2トンであった。圧入に先行、さらに期間中ならびに終了後、坑口・坑底温度圧力（IW-1およびOB-4坑）、弾性波トモグラフィ（発震坑OB-2、受振坑OB-3）、物理検層などの測定を実施している。圧入に先行して実施した裸坑検層での測定種目は、音波、密度、CMR（Combinable Magnetic Resonance）、比抵抗、ガンマ線、SP（Spontaneous Potential）、および中性子検層である。CMRの測定データより孔隙率および浸透率を推定した。CMRで推定した孔隙率および浸透率はコア測定値、MDT（Modular Formation Dynamic Tester）測定値と調和的である（RITE, 2001, 2002）。圧入時および圧入終了後での検層種目（対象層準でFRPケーシング設置；Fiber Reinforced Plastics）は、音波、比抵抗、ガンマ線、および中性子である。

調査地域は、国内有数の石油天然ガス開発が行われている地域であり、周辺地域での地表調査などによる地質データ、掘削による坑井データの蓄積は多い。これにより実証試験域を含む地域での地質層序区分、主要地質マーカー対比、それに基づく三次元地震探査の解釈を行った。

3. 三次元地震探査データ取得

3.1 調査地域概要

調査対象地域は新潟県長岡市深沢町と親沢町にまたがり、圧入実証試験を実施した岩野原圧入基地を中心とした半径約1 kmの地域である。中央部はなだらかに南東に傾斜する段丘状の地形を呈し、その下端部の南東側は洪海川まで平坦地で水田が広がる。傾斜地の北西側は海拔50 mあたりより急な北西上がりの斜面をへて丘陵地となる。この丘陵地の標高はおおむね150 m以下で、丘陵地の両翼には急斜面をもつ小谷が発達する。調査地域の北側から北西側丘陵地のほとんどは国営越後丘陵公園の所有地となっていて、自然環境保全を強く求められた。そのため測線計画の大幅変更を余儀なくされた。主要幹線道路は舗装されているが、車両の通行可能なものの多くは未舗装である。圧

Fig. 2 Survey area map where dot line shows the boundary of the national park. Circle in the Iwanohara test site shows the injection well location.

入基地を含む南東側の 400 m 四方程度はほぼ格子状の道路網が張り巡らされているが、その外延部では車両の通行可能な道路そのものが非常に少なくなり、その分布形状も不規則になる。丘陵地については、踏み分け道があるのみである (Fig. 2 参照)。

標準的な規則配列の三次元地震探査の実施は困難ではあったが、調査地中央部では格子状の道路を用いたスワス法 (Cordsen *et al.*, 2000) が近似的に実現可能で、その周辺では不規則な道路の配置により、スワス法本来の特徴である測線間での重合数の不均一な空間分布が一部で補われ反射点が二次元的に散布されるという効果があった。

3.2 データ取得仕様

2 回の三次元地震探査の作業工程および主たる調査仕様は Table 1 に示す。すべての受振点を先行配置し、各発震

Table 1 Survey period and specifications of source, receiver and recording instrument of both baseline and monitor 3D seismic survey.

Baseline survey 1 回目探査	
Geodetic survey 測量作業	2003 年 7 月 25 日～8 月 6 日 (13 日間)
Seismic survey 地震測定作業	2003 年 7 月 28 日～8 月 11 日 (15 日間)
Monitor survey 2 回目探査	
Geodetic survey 測量作業	2005 年 7 月 9 日～7 月 21 日 (13 日間)
Seismic survey 地震測定作業	2005 年 7 月 17 日～8 月 1 日 (16 日間)
Source 震源	
Sweep frequency	10 ～ 120Hz
Sweep length	12 sec
No. of vibrators	Y-2400 : 2, MiniVib-II : 1
VP interval	20 m (midpoint between receiver locations in principle)
Receiver 受振器	
Natural frequency of geophone	10 Hz
No. of geophones per location	9
Receiver interval	20 m
Recording system 探鉱機	
Instrument	JGI/JAPEX GDAPS 4a
Record length	4 sec
Sampling rate	2 msec
Tape format	SEG Y

点で順次発震する方法 (固定展開) により、探査の作業効率の全体的向上をはかった。CMP ビンサイズは受発震点の標準的間隔を参照し、データ処理段階で 10 × 10 m と設定した。

4. 三次元地震探査データ解析

4.1 三次元地震探査基礎データ解析

今回の陸上データ解析作業における課題は、1) 雑音成分の抑制、2) 三次元的静補正解析、3) 異震源間の振幅、4) 位相補正、5) 受発震点振幅補正、6) 不規則に分布する発震点、受振点に起因する問題、7) 高分解能化、8) 精度の高い速度解析であった。

雑音成分の抑制は解析の重要な課題でさまざまな方法を試みた。雑音抑制は不規則な受発震点分布という所与の地表条件もかわり、規則配列の三次元あるいは二次元探査を対象とする汎用的な方法の形式的な適用は有効でなかった。取得したデータに最適な方法を工夫し、試行錯誤的に適用した。受発震点の不規則分布は地下構造のイメージング精度にも関係するので、イメージング精度向上のための前処理が必要となった。これらの課題をそれぞれ適正に解決し、比較データ解析へ進めた。

4.2 比較データ解析概要

繰り返し三次元地震探査で制御できない取得条件の変化の影響をできるだけ小さくし、CO₂ 圧入に起因する地下の変化を検知することをめざす。ここで各調査間の個々の制御できない差異要素を非再現性雑音、さらにこの影響をできるだけ小さくする処理を比較データ処理 (crossequalization processing) と呼ぶ。これは複数の探査データの同一フローならびにパラメタによる並行処理と並行処理後の差異の補償処理 (Matching Operation) より構成される。

制御できない要素による繰り返し三次元地震探査データへの直接的な影響は、時間、振幅、周波数帯域、位相などの差異として現れる。CO₂ 圧入による変化が想定される対象層準相当の位置、時間帯域を除いたデータ部分において、これらの差異をできるだけ小さくするようにし、対象区間内での変化をとらえることをめざす。雑音に関して、両地震探査で同じように発現しているわけではないし、また今回は各探査においてデータそのものも空間的に一様に取得されているわけではないので、雑音を抑制することも多数のデータの加算あるいは二次元手法ないしは受発震点の規則配列を前提とする三次的手法により理想的に実施できるわけではない。以上、対象層準以外での取得データの再現性を指標として、データを評価しながら、差異にかかわる解析結果を解釈することが求められる。比較データ処理を重合処理後のトレースに限定すると、処理後のトレース t_{xeq} は形式的には次の (1) 式で表現できる (Ross *et al.*, 1996)。

$$t_{xeq} = t * f(s_{corr} rms_{corr} m_{corr} p_{corr}) \tag{1}$$

ここで t は入力トレース (時系列)、 $*$ は時間軸上の畳み込み積、 s_{corr} , rms_{corr} , m_{corr} , p_{corr} はそれぞれ時間、振幅、周波数

帯域、位相に関する比較データ処理の補正要素、 f は応答関数（Matching Operator）である。

一般的な地震探査処理では最終断面として重合処理が行われるため、個々の発震記録あるいは CMP 記録内の変化は平均化されてしまう。比較データ処理を行う際には、重合断面だけでなく、発震記録や CMP 記録に現れる差異を検出するような処理手法も有効と考えられる。今回は重合と同時に Angle stack（特定の入射角範囲のトレースの重合で、3 組作成）を作成し比較データ処理の対象とした。

4.3 非再現性雑音

繰り返し三次元地震探査の非再現性の原因について要約すると以下の事項となる。

1) 地下の対象となる層準の物性の変化、2) 気象条件変化による地表付近の物性変化、3) 測線変更、震源、受振器アレイの変更などの現場測定条件の変化、4) 外部要因、例えば周辺環境雑音の記録系への混入程度の変化、5) 探査クルーの錯誤による人為的な変化、など。

これらの変動要因は一般に複合して現れるので、変化を各要素に分離して議論することは容易ではない。

4.4 再現性指標

2 回のデータ取得による地震探査断面の再現性を評価するために、2 つの指標を用いた。1 つは 2 本のトレース間の Normalized RMS difference (NRMS) であり、もう 1 つは Predictability (PRED) である (Kragh & Christie, 2001)。2 回の繰り返し三次元地震探査のそれぞれに対応する 2 つのトレース a_i, b_i が与えられた場合、時間ウィンドウ t_1-t_2 の間での NRMS は (2) 式で定義される。

$$NRMS = \frac{200 \times RMS(a_i - b_i)}{RMS(a_i) + RMS(b_i)} \quad (2)$$

ここで RMS 振幅 (root mean squared amplitude) は (3) 式で表される。

$$RMS(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{t_1}^{t_2} (x_i)^2}{N}} \quad (3)$$

N は時間ウィンドウ t_1-t_2 間のサンプル数を示す。

もう 1 つの指標 PRED は、ある時間ゲート範囲での繰り返し地震探査データの対応する 2 つのトレースの相互相関の 2 乗和をそれぞれの自己相関で割ったものとして、(4) 式で定義される。

$$PRED = \frac{100 \times \sum \Phi_{ab}(\tau) \times \Phi_{ab}(\tau)}{\sum \Phi_{aa}(\tau) \times \Phi_{bb}(\tau)} \quad (4)$$

ここで Φ_{ab} は 2 つのトレース a_i, b_i の、時間ウィンドウ t_1-t_2 で定義された相互相関、 Φ_{aa} および Φ_{bb} は自己相関を示す。

繰り返し三次元地震探査で完全な再現性が実現されたとすれば NRMS 値は 0 となる。また 2 つのトレースの位相が 180°ずれている、あるいは片方のトレースがゼロトレースである場合には、NRMS 値は 200% となり、NRMS 値の最大値を示す。

PRED 値は 0 ~ 100% の範囲で定義される。もし 2 つ

Fig. 3 NRMS vs. PRED crossplot. Two equal traces are perturbed in amplitude, static and phase by adding increasing amounts of random noise to traces. The amplitude, static and phase perturbations result in the expected straight line. Predictability is not sensitive to these changes. (modified figure of Kragh & Christie, 2001)

のトレース間で相関がなければ PRED 値は 0 である。また 2 つのトレースが正あるいは逆相関の場合、PRED 値は 100% である。この場合、仮に片方のトレースがもう 1 つのトレースの半分の振幅しかなかった場合でも、PRED 値は 100% となる。

2 本の同一なトレースに対して、時間シフトや振幅・位相のずれ、不規則雑音の足し合わせなどを行ったモデル実験によれば時間シフトや振幅・位相のずれを加えても PRED 値はほぼ 100% のままであり、これらの変化は PRED 値に鈍感であることが分かる。一方、不規則雑音の付加に対して、NRMS 値は時間シフトや振幅・位相などの変化に敏感であることが分かる (Fig. 3 参照)。このように不規則雑音がある場合には一般に、NRMS 値が小さく、PRED 値が大きいことが再現性を判断する目安とされる。

4.5 比較データ解析

2 回の三次元地震探査取得データの並行処理を実施し、重合後に時間、位相、振幅の補償処理 (2 回目の三次元地震探査データを 1 回目のものに合わせる) を実施した。並行処理での解析パラメタは原則的には両者で同一のものを選択した。まず全体のデータ評価処理を実施したものと、不規則配列に対応する処理を含めた最終処理に分けて Table 2 に示す。

4.5.1 評価処理

2 回の三次元地震探査データを用いた前処理段階の処理フローの検討と比較データ処理の根幹となる位相、時間、振幅補償処理の評価作業を行うため、前処理段階 (1-16) の処理フローを決定し、さらにここまでのデータ処理結果に対して、圧入井の音波検層データを用いた応答変化の検討および振幅・位相補償を含む後処理 (17-20) を実施した (Table 2 参照)。

4.5.2 最終処理

評価処理 (1-16) に引き続き、受振点、発震点が不規則に配列することに対応するために新たなイメージング処理 (17' - 18') を実施し、その後で位相、時間、振幅補償処理 (20'

Table 2 Data processing flow of evaluation processing 1-20 and final processing that has the same flow as in 1-16 of the evaluation processing.

Evaluation processing 評価処理	
1	Trace Edit (受発震点情報の書き込み)
2	Spherical Divergence Correction (幾何振幅補償)
3	Amplitude Compensation of Sources (震源振幅補償)
4	Field Static Correction (現場静補正量推定および適用)
5	Noise Attenuation (雑音抑制)
6	Radon Transform and Ground Roll Suppression (表面波抑制)
7	Dephasing by Estimated Wavelets (位相補償)
8	Surface Consistent Corrections (受発震点応答補正)
9	Amplitude Recovery (振幅補償)
10	CMP Sort (共通反射点編集, あるいは CMP 編集)
11	Velocity Analysis (速度解析)
12	NMO Correction (動補正)
13	Residual Static Correction (残差静補正)
14	Inverse NMO Correction (逆動補正)
15	DMO Velocity Analysis (速度解析)
16	NMO Correction (動補正)
17	Angle stacks (重合, full stack, incident angles 0-15, 15-30, 30-45deg)
18	Kirchhoff time migration (時間マイグレーション)
19	Matching operator application (位相, 振幅補償)
20	Well matching operator application (坑井補償)
Final processing 最終処理 (1 ~ 16 は評価処理に同じ)	
17'	DMO + Data reconstruction (inverse DMO)
18'	Pre-stack Kirchhoff time migration (重合前時間マイグレーション)
19'	Angle stacks (重合, full stack, incident angles 0-15, 10-25, 20-40deg)
20'	Matching operator application
21'	Well matching operator application

-21' を施し, 最終処理データを作成した (Table 2 参照)。

4.6 データ解析内容について

坑井対比に用いた時間深度変換と経時変化域の同定および物性値解析に用いた最終処理の処理フローについて説明する。

4.6.1 速度解析

解析点近傍で DMO 処理を施し, それらのトレースを用いた速度解析を実施した。NMO+DMO (幾何振幅補正を含める) は非零オフセット記録を零オフセット記録に変換する操作で Offset continuation ともいう。 (Deregowski and Rocca, 1981 ら)。圧入井 IW-1 の近傍 (Inline 82, Crossline 107) およびそれを囲む 5 点 (点 /100 × 100 m) の速度解析結果を Fig. 4 に示す。本探査では深度と往復走時の関係を知るために VSP などを行っていない。このため速度解析によって求まる往復走時と深度の関係初期モデルとして, 坑井対比を実施した。最終的な対比に用いたモデルとの時間の差異は深度 1,000 m で, 往復走時が 10 msec 程度遅くなるもので初期モデルとして十分な精度であった。

4.6.2 DMO+Data reconstruction (inverse DMO) および重合前時間マイグレーション

本三次元地震探査は受振点, 発震点の配置が不規則に配列しており, 標準的三次元データ解析の仮定とは異なっ

Fig. 4 Stacking velocities around the intersecting point of Inline 82 and Crossline 107. Thick line is the 3rd order polynomial fitting to scattered stacking velocities.

た条件で実施されている。そのため CMP ビン内トレースの反射点位置およびオフセット距離は不均一に分布している。このような条件の三次元地震探査データの三次元イメージング精度の向上をめざした。

NMO+DMO (幾何振幅補正含む。以下同じ) により, 不規則なオフセット分布のデータを零オフセットトレースに変換した。これにより, 方位角ならび傾斜角に依存しないデータが得られる。その後, 任意の発震点, 受振点の組み合わせを持つトレースを生成し (Data reconstruction), 時間マイグレーションを実施した。NMO+DMO+Data reconstruction の解析的関係を, 二次元面に配置した受振, 発震点位置を仮定し以下に示す (Baumstein, 2004)。

P_0 を零オフセットデータ, P_n を NMO 後のオフセットデータとすると, (5) 式の関係が成立する。これより, NMO+DMO 後のデータ P_0 を用いて, NMO 後のオフセットデータ P_n が任意の受振点間隔で算出できる。 $\hat{P}_n$ は P_n をフーリエ変換したもの, J はオフセット距離および走時の零オフセット領域とオフセット領域間の Jacobian matrix である。

$$\begin{aligned}
 \hat{P}(\omega_n, k_h) &= \iint e^{i(\omega_n t_n - k_h h)} P_n(t_n, h) dt_n dh \\
 &= \iint e^{i(\omega_n t_n(t_0, h_0) - k_h h(t_0, h_0))} P_0(t_0, h_0) \\
 &\quad J(t_n, h; t_0, h_0) dt_0 dh \\
 h &= h_0 \frac{d_0 - h_0 \sin(\beta)}{d_0 - h_0 \sin(\beta)} \quad l = \frac{h_0 \sin(\beta)}{v t_0} \\
 t_n^2 &= 4 \frac{d_s^2}{v^2} \frac{1}{1 - 2 \frac{h_0}{d_0} \sin(\beta)} \quad m = \frac{k_h h_0}{\omega_n t_0} \\
 J(t_n, h; t_0, h_0) &= \frac{\partial(t_n, h)}{\partial(t_0, h_0)} = \frac{2l(1-2l)^2}{m(1-6l)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

なお, h はオフセット距離, h_0 は震源と零オフセット点までの距離, t_n はオフセット距離 h 地点での往復走時, t_0 は零オフセット点での往復走時で, 反射面と波線の幾何学的関係より (6) および (7) 式が成立する (Fig. 5 参照)。

$$t_n^2 = t^2 - \frac{h^2}{v^2} = \frac{4 \sin^2(\beta)}{v^2} \left(\frac{d_0}{\sin(\beta)} - h_0 \right) \left(\frac{d_0}{\sin(\beta)} - h_0 + h \right) \quad (6)$$

$$\left(\frac{2h_0}{h} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t_0}{t_n} \right)^2 = 1 \quad (7)$$

NMO+DMO は二次元の操作であるので、この演算をすべての方位角のデータで行い、さらに Data reconstruction (inverse DMO) を実施することにより、規則配列三次元データを生成した。このデータに重合前時間マイグレーションを適用し Angle stacks (full, near, mid, far の各組) を作成した。

4.6.3 Matching Operator

振幅、時間補正（静補正）を 2003 年と 2005 年の探査において実施しているが、それぞれの探査間の変化を議論するためには両者のデータ間の偏倚の補償処理（Matching Operator の適用）を適切に行う必要がある。そのため、検層データをガイドとしてそれとの時間差ならびに位相差の補償の検討を各年度の三次元地震探査データについて行った。まず、1 回目の三次元地震探査との対比のため、圧入井の音波および密度検層データを用い reflectivity 法（Invariant embedding 法）により合成地震記録（Synthetic seismogram）を作成した（基本ウェーブレット：中心周波数 60 Hz リッカーウェーブレット）。評価処理フローに従って得られたマイグレーション処理データの合成地震記録への位相補償演算子を 2003 年地震探査データについての対象層を含む 1000–1500 msec の時間ゲートで求め、それを 2003 年と 2005 年地震探査データに適用した。2003 年地震探査データと圧入坑井での合成地震記録の一致は良好であるが、2005 年地震探査データとでは、対象層の上位近傍において、一致はよくない（Fig. 6 参照）。この傾向は、対象層を含まないように設計時間ゲートを変更しても変わらなかった。従って 2003 年と 2005 年の対象層上位での応答の違いは CO₂ の圧入に関わる速度変化に対応した波形変化と考えた。実データに対し以下に示す手順に従い地震応答の変化を検討した。最初に 2005 年地震探査の位相と振幅を、2003 年地震探査のそれに一致させる変換演算子を 500–1000 msec の時間ゲートで設計し、2005 年調査のマイグレーションデータに適用した。次に 2003 年地震探査について、圧入坑井での応答と一致させる変換演算子を 1000–1500 msec の時間ゲートを定め適用した。同じ演算子を 2005 年調査データに適用する。この処理は両調査間での

Fig. 5 Dipping reflector with dip angle β in a constant medium of velocity v where S and R is a source and receiver location and t is two-way-time of a SQR reflection.

Fig. 6 Phase matching with well synthetics. Matching operator is estimated in the time gate 1,000–1,500 ms.

Left column (left to right) : duplicated traces of time migration section of 2003 survey at well IW-1 intersection, phase matching to well synthetics overlaid with well synthetics generated by 60 Hz Ricker wavelet. Right column (left to right) : same sets of data for 2005 survey as 2003 survey.

静補正成分を補償することが主要な目的である。

なお、繰り返し三次元地震探査間のデータの位相、振幅あるいは両者の補償のための Matching Operator f は、(8) 式において、Inline 方向座標 x および Crossline 方向座標 y と時系列として 2003 年と 2005 年の地震探査データ $v(t)$ および $u(t)$ を用い、 f を (8) 式の関係が停留値を取る条件を最小二乗法により各 (x, y) 点毎に算出した（* は時間軸上の畳み込み積を示す）。

$$\sum_{x,y} \left| v_{x,y} - u_{x,y} * f \right|^2 \quad (8)$$

演算の不安定さを解消するため、各点近傍で求めた値を平均化することにより各点での変換演算子を定めた。

本処理を評価処理および最終処理の両者のそれぞれに実施し、後者を最終的なものとして選択した。

4.7 再現性指標による品質管理

比較データ処理の品質を判断する材料の 1 つとして、再現性指標（NRMS, PRED）を取り上げた。この再現性指標の算出のために算出時間ゲートを、残存する雑音がめだつ極浅部と、透過エネルギーが小さくなり対象層からはずれる深部を除く区間である 500–1200 msec に設定した。このゲートは圧入対象層を含むが薄層であるため、この平均指標（NRMS, PRED）への影響は小さい。最終処理フローである重合前時間マイグレーション後の比較データ処理（位相および振幅補償）を実施した場合と実施しない場合について、再現性指標を算出した。比較データ処理を実施することにより特に NRMS 値の改善が広範囲で認められ、比較データ処理の効果が確認できた（Fig. 7 参照）。従って、これらの評価指標に従えば、今回の解析により 2 回の探査の再現性が改善されたと評価できる。

5. 三次元地震探査データの経時変化

2 回の繰り返し三次元地震探査データの最終的な比較

Fig. 7 Normalized RMS values on the 3D survey area and the histograms after migration and matching filter of phase&litude in the time gate 500 -1,200msec where normalized RMS values are illustrated with the color code of the histograms

Upper: before application of matching filter.

Lower: after application of matching filter. An injection well is marked as a dot and the region is extracted by connecting edges (IL120 XL139, IL140 XL112, IL78 XL40, IL14 XL101 and IL40 XL128; IL: inline, XL: crossline).

データ解析の結果を基に、推定される三次元地震探査データの変化について検討した。この変化を定量的に検討するためには、両データに残る非再現性雑音の効果を評価することが必要である。ここでは、もとの地震探査データから算出する属性値も考慮し、データから推定される変化がどの程度確度が高いかを確率情報として評価した。

5.1 経時変化域の同定法

2回の三次元地震探査の変化(4D異常と呼ぶ)を推定するため、探査データおよびそれらより数学的に算出した量(Attribute, 属性値)を用いた以下の手法を検討した。

- 1) 探査データ単純差分法
- 2) 単一属性値計量空間法
- 3) 多属性値計量空間法
- 4) 最適属性値計量空間法

5.1.1 探査データ単純差分法

本手法は、繰り返し三次元地震探査データに非再現性雑音が含まれる場合は、個々のデータの差分をとることにより、異常に起因するかの判断が非常に難しくなる。従って、非再現性雑音が非常に小さい場合にのみ適用可能な手法である。差分データは4D異常の参考域検出には有効であるので、元のデータを参照し、解釈を加えて検討することにより、利用可能である。いずれにしても、このデータのみでの解釈は不確実性が伴う。

三次元地震探査データからの差分データの例をFig. 8に示す。この図は2回目の三次元地震探査の処理後のデータから1回目の三次元地震探査の対応するデータを引いたものであり、反射振幅の変化を示す。まず、CO₂は地下に圧入後、空間的に広がっていくわけであるが、その広がり方は垂直方向では非常に小さく、横方向への広がり方が大き

Fig. 8 4D anomaly of 3D seismic data on the estimated injection layer from 3D view point. 3D seismic data is simply subtracted between 2005 and 2003 survey data for 4D anomaly estimates. Wells OB-3, OB-4, IW-1 and OB-2 are stuck on the surface. Two monitor wells are located on the 4D anomaly portion (peak is highlighted white circle with grey periphery on the layer), which is consistent with the logging data observation. The injection layer tracking is more reliable close to well.

いということがモニター坑井(OB-2およびOB-4)の検層データから観測されている。このような層を三次元地震探査データの上で追跡し1つの層(injection layerと呼称)として同定する。この図には、圧入井(IW-1)と3本のモニター坑井(OB-2, OB-3, およびOB-4)の坑跡とそれに沿った音波検層データ(IW-1は圧入前、それ以外は圧入後)を示す。検層データの繰り返し測定から、OB-2とOB-4の位置へCO₂が到達したことが確認されている。従って、坑井OB-3が4D異常域からはずれた位置にあるのは、観測された検層データとは調和的である。圧入井IW-1を中心とした大きな異常域のかたまりの外側でいくつか小さな振幅の異常域が認められるが、データ解析からは調査域の縁辺部では非再現性の雑音が残っているので、残存する非再現性雑音が発現したと判断される。

5.1.2 多属性値計量空間法

本手法は、1つの三次元地震探査データから複数の属性値を算出し、三次元空間の各点の接平面上のこれらの属性値の組(多次元ベクトル)に計量(metric)を定義し、多次元計量空間(multi-dimensional metric space)を構成する。計量としては通常のEuclidean metricを用いる。距離を個別に単一属性値で判定するのが、単一属性値計量空間法であり、非再現性雑音が特定の属性値で抑制、あるいは差異量がある属性値で強調されることを期待する。

5.1.3 最適多属性値計量空間

本手法は、5.1.2では各属性値間の距離を、個々の属性値の重みが同一であるという仮定で表現していたのに対し、これらの重みをデータの解釈と組み合わせることで最適化することを目指す。データの解釈により、4D異常域とそうでない箇所という“確かな領域”の2値情報(=知識)を与え、本解析で用いる属性値データより、これらの点での重みを推定(=学習)し、これらの重みで全体領域での属性値間距離を算出する。さらに最初に与えた学習情報の

一部を用い、同じ操作を実施し、最初に与えた知識への依存度が高すぎなかったかを検証する。この依存度が過度であると、所与の知識情報に推論そのものが支配され、得られた結論の妥当性に疑問が残ることになる。属性値間距離を 0 と 1 の区間で規格化することにより、2 値による区分化（パターン認識あるいはクラスター解析）に確率の意味づけを行う。最終的にはこのように規格化した距離空間あるいはもっと簡単に各項に与えた線形の重みで、4 D 異常域が確率情報として推定できる。このような推定は既に知られる特別の法則に基づいて演算するわけではなく、与えられた属性値データと解釈による 2 値点の分布情報から、最適な重みを推定した。このように法則が未知であり、2 値観測データが所与という条件で重みを推定する方法は、一般には極めて複雑な非線形の手順が必要となる。今回は、このような問題に対して人工神経回路網モデル（ニューラルネットワークモデル）を適用した。

5.2 人工神経回路網モデルの適用

多段階層構造の人工神経回路網（Multi-layer Perceptron, 多層パーセプトロン）の模式図を Fig. 9 に示す。中間層がなく、出力層が一個の最も簡単な場合では、以下に示すように入力段の入力 y_p 、重み w_p 、活性化関数（Activation function） A を与えた場合の出力応答 x は、入力 y の関数 W を用いると $A(W)$ となる。応答の非線形性は A の関数型に依存する。このように、入力と出力を非線形関係 (9) 式で表わす。

$$W(y) = \sum_{k=1}^N w_k y_k \quad (9)$$

$$x = A(W)$$

応答の非線形性を前提としない階層モデルは単なる線形結合モデルで多段階であっても簡単な構造に帰着される。ここで出力階層に解釈により与えた既知データ、今の場合であれば、4 D 異常とそうでない点に対応する 2 値情報を与える。このような解法設定を教師付き学習（supervised learning）と呼ぶ。

多層パーセプトロン（1,2, ..., s-1,s,...）を想定した場合の s-1 層の k ニューロンに対する M 組の入力データベクトルを y_{kp} , $p = 1, \dots, M$ とし、 y_{kp} に対応する出力および既知データ（教師データ）をそれぞれ x_{ip} および d_{ip} とする。各 p 入力に対する既知データとの誤差を E_p とし、誤差を小さくするように w_{ik} を逆誤差伝搬法で求める（Rumelhart *et al.*, 1986, Haykin, 1999 他）。

$$W(y_{ip}) = \sum_{k=1}^N w_{ik} y_{kp}$$

$$x_{ip} = A(W)$$

$$E(W) = \sum_p E_p \quad E_p(W) = \frac{1}{2} \sum_i (x_{ip} - d_{ip})^2 \quad (10)$$

本手法は、勾配ベクトル方向に最急降下法（steepest descend method）で逐次的に解に収束させていく局所的な解法である。解の各段階で誤差を評価しこの誤差を解のアップデートベクトルの推定に用いることからこのような名称がついた。繰り返し演算により収束する局所解が大

域的な解であることを想定して演算を実施する。演算効率という観点からは最急降下法に基づく共役勾配法がある。大域的な解への収束を目指すものには、Newton 法あるいは Gauss-Newton 法がある。Monte Carlo 法あるいは Genetic algorithm 法と局所解法との組み合わせにより大域的な解の精度と演算効率を向上させる等の様々の工夫が提案されている。今回のデータ解析では、3 層のパーセプトロンをモデルとして与え、解法として基本になる逆誤差伝搬法を、共役勾配法を用いて適用した。既知データをすべて用いた場合と既知データを一部に絞った場合を比較し、既知データへの依存性が少ないものを解として採用した。

このような 2 値化パターン認識あるいはクラスター解析のもとになる問題に立ち返ってみる。個別に、因果的な方程式を用いてそれぞれの精度の範囲で推定することは原理的には可能であるかもしれない。しかし多くの未知量を求めることに非常に実際の困難さがある。このような場合に、神経回路網モデルをブラックボックス的に用いることにより困難さに対処する。4D 異常域の検知はこのような問題の一例となる。

5.3 人工神経回路網モデル適用結果

本手法では、最初に教師データとして 4 D 異常域とそうでない地点の位置情報を事前情報として与える。そのための情報は検層データを参照した。しかしながら検層データそのものは一次元データで、ここで求められる三次元的な情報とならない。そのため、圧入坑井 IW-1 と CO₂ が確認されているモニター坑井（OB-2, OB-4）の確認深度区間を結ぶ地点を含む近傍で CO₂ が存在すると仮定した。近傍の幅の取り方の感度については別途検証した。

入力層として取り上げた属性値は、各調査における比較データ解析後の時間マイグレーションおよび Mid-Angle stack について Energy, Frequency spectrum, および Similarity である。これらの属性値と、教師値情報を用いた学習を行う。学習過程の検証のため、教師値情報の一部を用いさらに学習を行い、両者の比較より、学習が適正であったかの判断をする。そのほかに入力データとして、2003 年と 2005 年の探査データ単純差分の属性値を用いたものなどを比較のため算出した。このような演算の妥当性の判断材料となるのは、学習過程で収束する量の比較、すべての教師データを用いた場合とテストデータのみを用いた場合の収束値の差である。後者は、学習が適正であったかの判定で、もし両者の差が大きい場合は、教師データに

Fig. 9 Schematic representation of a feed-forward layered neural network (Multi-layer perceptron).

Fig. 10 4D anomaly estimated by supervised clustering method using neural network model.

Left panel: anomaly map with index between 0 (blue background) and 1 (red in the central zone) on Ic Zone 2. Red shows high probability of 4D anomaly. Right panel: points for clustering training. Green dots in the center along wells OB-4, IW-1, and OB-2 indicate anomaly points and surrounding red dots are not in anomaly taken in advance displayed with the injection layer for supervised points. Well trajectories are vertically projected on maps as illustrated in Figure 1.

よる過学習の可能性が高い。

演算上の妥当性の検討に加え、観測データ、すなわち圧入井、あるいはモニター坑井 (OB-2, OB-4) で現に CO₂ が存在し、あるいは到達しているという事実と調和していることも重要な判断材料となる (Sakai, 2006a, b)。

この方法で 4D 異常をマッピングしたものの例を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の右側の図に示す坑井 IW-1, OB-2 と OB-4 を結ぶ線の近傍の緑の点は、4D 異常があると仮定した領域で圧入坑井 IW-1 および検層で CO₂ の到達が確認されているモニター坑井 (OB-2, OB-4) の 3 本の坑井の確認深度近傍を指定している。このような 4D 異常の描像は教師点の与え方により、少しずつではあるが変化した。しかしながら示す範囲から大きく逸脱しない限り、あるいは、坑井近傍という現に得られている CO₂ の分布の知識に、より遠方の分布というかなり不確実な仮説を置かない限り、得られる結果の変化は小さいことが数値実験で確認された。

5.4 圧入 CO₂ の総量および分布評価

CO₂ の圧入に起因する 4D 異常域を確率関数で表現した。確率関数には、圧入層の層厚、CO₂ 飽和率および孔隙率の詳細な空間分布、さらには三次元地震探査の検知能力が関係する。ここでは、層厚、飽和率および孔隙率が圧入層で均一であると仮定し、総量 10,405.2 トンの CO₂ が圧入された地層の広がりについて検討した。

総孔隙率は、調査域の 4 つの坑井の検層データから 0.25 – 0.3 の範囲にある。層厚は CO₂ が到達した OB-2 および OB-4 の坑井において約 6–7 m と測定されている。CO₂ 飽和率は重要な量であるが、中性子検層データを用いた検層解析から 0.4–0.5 と試算されている (RITE, 2006)。

地震探査データから層厚を推定することは、分解能の制約により直接的には困難である。対象となる薄層の応答の差異は基本ウェーブレットの微分波形に近いものとなり、層厚はその振幅の単調な関数で与えられる (Sakai, 2006a)。微小振幅の解析は精度の制約から難しく、ここでは検層で測定した値を用いた。

圧入した CO₂ が流体中に一様に分布するという仮定 (Homogeneous model) で Gassmann の関係式 (Gassmann, 1951) を用いて CO₂ 飽和率を試算することができる。しかし一般に P 波速度が小さくなると飽和率の感度が非常に大きくなり飽和率の精度の高い推定は困難となる。また検層での P 波速度の観測誤差の影響も大きくなる。圧入前の検層は裸坑で実施したが、圧入後はケーシング坑で実施されているため、検層の誤差評価は難しい。そのため具体的に飽和率を試算するかわりに飽和率の上限値として、最大飽和率を定義した。最大飽和率とは、CO₂ の流入による流体の体積弾性率の減少による P 波速度の減少と、密度の減少による P 波速度の増加がバランスする P 波速度の極小値に対応する飽和率である。なお、この試算のため、裸坑検層で取得したデータによる鉱物組成の解析に基づき、岩石学的モデル (Compaction model, Sakai, 1999) を導入して弾性波速度を観測値と一致させるように各坑井で岩石モデルパラメタを推定した (Sakai, 2005b)。Fig. 11 に Ic 層での弾性波速度の観測値とモデル計算した値を坑井 IW-1 および OB-2 を例に示す。両者の一致は良好で、その岩石モデルが妥当であることを表す。算出された最大飽和率は、CMR 検層で観測された Free fluid volume (FFV) よりやや小さいが、同じ変動傾向を示す (坑井 OB-2 について、Fig. 12 参照)。FFV の値 0.35–0.6 は、飽和率の最大値に相当すると考えられる。P 波速度データによる最大飽和率あるいは中性子検層の解析結果はこれらの値より若干小さい値を示した。ここで圧入 CO₂ の総量試算のために、CO₂ 飽和率として 0.4–0.5 の値を仮定した。

以上の仮定より、圧入相当量の確率関数より指定された 4D 異常域の広がり (体積) を試算した。層厚を 6 m、物性値の組 (孔隙率および飽和率) の各値を最大値 0.3 および 0.5 とした場合、確率が 0.42 より大きい領域が総圧入量に対応する。三次元地震探査データによる検知率を考慮するあるいは一部の CO₂ が溶解するという効果で現に観測するものが総圧入量の 80% であるとする、その値は 0.5 となる (Fig. 13 参照)。このように単純化したモデルであ

Fig. 11 Velocity matching by Rock physics modeling (Compaction model, Sakai, 1999) for the measured logging data of wells IW-1 and OB-2 taken as examples in Ic layer in open hole pre-injection condition where thick lines show observed logging elastic velocity data (Vp_obs, Vs_obs) and thin lines show modeled data (Vp_cal, Vs_cal).

Fig. 12 Maximum carbon dioxide saturation (S_g) estimated by Gassmann's equation and FFV (free fluid volume) estimated by CMR measurements at well OB-2. In the right figure, intersected points between acoustic velocity curve showing carbon dioxide saturated rock and the observed velocities of dash and dashed dot line indicate maximum S_g (Max S_g) and the ordinary case of less than Max S_g respectively.

れば確率分布で表現した異常域の広がりには物理的な意味づけができる。空間的な変動という要素まで考慮すると、組み合わせも複雑になり、個々の値の一義的な分布形状を定めることは確率の値のみからはできない。多くの複合する要素を同一の相対誤差をもって分離し推定することは實際上、困難な作業である。しかしこれらの構成要素（層厚、孔隙率、飽和率）が複合したものの結果の空間分布を確かめし表現する指標として有用であると考えられる。例えば、仮定した層厚、飽和率をより小さいものとした場合には大きな総 CO_2 の分布域に対応するより小さい確率値がその指標となる。一般に空間における確率の下限値が分布域の

Fig. 13 Carbon dioxide saturated zone estimated by supervised clustering method. Saturated zone is illustrated by the physical parameter assumption; carbon dioxide saturation 0.5, porosity 0.3, and layer thickness 6m. Total injected carbon dioxide 10,403.2 ton correspond to the zone of probability more than 0.42, and 80% of total injected quantity corresponds to the zone of probability more than 0.5.

Upper panel: 3D view of probability map of 4D anomaly with well trajectories of wells OB-3, OB-4, IW-1, and OB-2 from left to right, Lower panel: distribution maps for lower limit probabilities.

Fig. 14 Time contour map of the top of Ic layer showing NWW-SEE regional dip trend close to wells.

広がり の上限を決定する。確率を決めるのがこれらの構成要素の空間分布である。これによれば CO_2 の分布域は、南北トレンドがやや卓越した非等方的なものであることがわかった。分布は3本のモニター坑井測定結果（OB-2およびOB-4で CO_2 測定、OB-3で CO_2 未測定）と調和的な分布を示す。

三次元地震探査データおよび周辺坑井を用いた比抵抗対比によると構造のストライク方向での変化の類似性が高く各Unitの層厚の変化が小さい (Fig. 14 参照)。一方でディップ方向での対比の類似性は相対的に低く、層厚変化が大きいという結果である。 CO_2 の主要分布域がこの方位にやや斜行するものとなっているのは興味深く、マクロにみた岩質ならびに層厚の類似する方位と圧入層中の重力支配の方位 (ディップ方位) とが均衡する方位に CO_2 が卓越的に広がったと解釈される。この方位は、後述の孔隙率ならびに浸透率の大きいとした推定域は上記の岩質ならびに層厚の類似方位であるが、これとやや斜行する (Fig. 22, 6.2.3 章参照)。

6. 物性解析

地震探査データから直接得られる情報は、弾性波速度に関わるものである。これを用いて様々な物性量を推定するためには、調査域で得られる様々な情報を統合する必要がある。1回目の三次元地震探査データと圧入井および3本のモニター坑井で CO_2 圧入前の検層データおよび、周辺域で得られた同様の坑井データ、地質情報を参照することにより、物性量（孔隙率、浸透率）の空間分布を推定した。繰り返し地震探査により検知した変化と、これらの推定した各種の物性量との関係を検討した。

6.1 坑井データとの対比およびインピーダンスインバージョン

初回の三次元地震探査データより音響インピーダンス (Acoustic impedance, AI) および弾性インピーダンス (Elastic impedance, EI) を求めた。

入射角が零の反射振幅 $R(0)$ から音響インピーダンスを求める手法を音響インピーダンスインバージョンと呼ぶ。反射振幅 $R(0)$ として近似的に重合断面を使った。次の式 (11) は入射角零のデータと音響インピーダンスの関係を表わしたものである。

$$AI = \exp(2 \int R(\theta) dt) \quad (11)$$

上記を拡張した関係を (12) に示す, 入射角 θ の関数である Angle stack $R(\theta)$ より弾性インピーダンス $EI(\theta)$ を求める手法を弾性インピーダンスインバージョンと呼ぶ。

$$EI(\theta) = \exp(2 \int R(\theta) dt) \quad (12)$$

なお, 弾性インピーダンスは, P 波速度と S 波速度の比 V_p/V_s と入射角 θ に依存する量で, 次の式 (13) で近似される (Connolly, 1999)。

$$EI(\theta) = V_p^{(1 + \tan^2 \theta)} \rho^{(1 - 4(\frac{V_s}{V_p})^2 \sin^2 \theta)} V_s^{-8(\frac{V_s}{V_p})^2 \sin^2 \theta} \quad (13)$$

地震探査データより, 基本ウェーブレットを抽出し, これを用いて検層データから合成地震記録を作成し, 三次元地震探査の速度解析で求めた深度 - 往復走時関数を初期モデルとして, 三次元地震探査データと対比した (Fig. 15 参照)。対象帯水層 Ic 層での合成地震記録と観測した地震探査データとの一致は良好である。Angle stack と弾性インピーダンスとの対比例を Fig. 16 に示す。Ic 層内での一致は良好である。

反射波振幅の入射角依存性を用いて反射面での弾性波速度の変化を検討する方法として AVO (Amplitude versus offset) 解析が知られている。CO₂ 圧入による地震応答は対象層準での音波速度の減少 (インピーダンスの減少) により, 入射角あるいはオフセットが大きくなると反射振幅が負で絶対値が大きくなる挙動を示し AVO class III と類別される。入射角が大きくなると振幅の絶対値が大きくなるという性質を利用し Angle stack データを既に 4D 異常域の検知に用いた。

今回は通常の AVO 解析より手続きが少なくすむ方法として音響および弾性インピーダンスインバージョンの両者を実施し, 以下に示す物性量の推定のための基礎データとした。

Fig. 15 Ties of 3D seismic data with the synthetic seismogram of well IW-1.

Left panel: synthetic seismogram with equal five traces. Middle panel: extracted seismic traces of equal five traces from the seismic data of the right panel where top and bottom of the target saline aquifer is marked on the seismic section.

Fig. 16 Ties of angle stacked 3D seismic data with the synthetic seismogram of well IW-1.

Left panel: the near angle stack. Middle panel: the middle angle stack. Right panel: the far angle stack. In each panel are illustrated synthetic seismogram with equal five traces, extracted seismic traces of equal five traces from the seismic data of the right panel.

6.2 物性量の推定

6.2.1 地質モデルの作成

CO₂ 圧入井, モニター坑井 (4 坑井) および周辺坑井 (7 坑井) データの対比により, 新たに帯水層を含む Unit 1, Unit 2, Unit 3, Unit 4, および Unit 5 に区分し地質層準を推定した (代表的 4 坑井について Fig. 17 参照)。この対比は, 周辺坑井については, 主として比抵抗, SP 検層, カッティングス柱状図を用い, 一部の坑井では音波検層も用い, 圧入井およびモニター坑井では実施したすべての検層データを用いた。これらの Unit のうち, 本解析のために, 各層準を細分化しその上限を Unit 4, Unit 5, Unit 5_Zone1, Unit 5_Zone2, Unit 5_Zone3, Unit 5_below と呼称する。このうち Unit 5_Zone2 は圧入層準の上限である (Table 3 参照)。

検層データを用い坑井毎に各層準で構成する各岩質割合を推定した。これらは, 砂質 (sand), カルサイトセメント化した砂質 (cement), タフ (tuff), および泥質 (shale) で, V_{sand} , V_{cem} , V_{tuff} , および V_{shale} でその割合を表示する。物性量間の相関関係と岩質の組み合わせをより簡明に表示するため, 坑井の各深度で, 競合学習 (教師なし学習) の考えによる自己組織化マッピング (Kohonen, T., 1990) を用いこれらの岩質のいずれかで代表させた。これにより各深度で推定した岩質の連続的な構成割合 (V_{sand} , V_{cem} , V_{tuff} , V_{shale}) より, 4 つの岩質 sand, cement, tuff, あるいは shale のいずれかに区分した。

これまでに議論した, 教師付き学習と異なり, ここでいう競合学習 (Unsupervised Vector Quantizer) は, 以下で定義する。入力層 x_j , $j = 1, \dots, L$ と中間層との結合係数 w_{ij} の

$$\text{距離 } h_i = \sqrt{\sum_{j=1}^L (x_j - w_{ij})^2}, i = 1, \dots, K$$

を中間層 h_i , $i = 1, \dots, K$ として与え, 結合係数を初期に任意に与えたものから入力のステップ毎に h_i が最小になる $i = p$ (winning node) での結合係数 $w_{pj} + \eta(x_j - w_{pj})$ を (η は 1 より小さい正の一定値) で更新し, 結合係数全体の変動がなくなるように収束させていく。出力層は winning node および適合度

Fig. 17 Well correlation between the injection well IW-1 and monitor wells OB-2, OB-3 and OB-4, where measured depths are adjusted to the top of the target aquifer Ic layer. Panels from left to right are Gamma Ray, SP, lithology column, and Resistivity. In lithological columns, orange color shows gravel, yellow color shows sandstone, sky blue color shows silt and mudstone, and green color shows tuff. Lithological major boundaries and their subdivided boundaries are drawn across wells by thick and thin lines and make five major Units.

$1 - \frac{h_p}{2\sqrt{L}}$ とした (Fig. 18 参照)。区分化の妥当性は適合

度が1により近いことで測られる。入力層は各岩質 L (今回は4) の深度の関数で、深度毎に $K = 4$ classes のいずれかに区分化した。最初に任意に与えた区分の核から出発し、学習の繰り返し (データの入力) により、最小距離の class を生み出す結合係数を強化し、区分化を生成した。これにより、各坑井で、深度毎に層序ならびに岩質 (class) を定めた。このように深度毎に区分化した岩質データを用い、各岩質での物性量間の関係を求め測定した検層データと統計的に許容可能な範囲で変動を与え仮想的なモデルデータ群を Monte Carlo 法を用い作成した。これらのデータ群での検層データ間の統計的關係について、モデルデータと実データの統計的關係の類似性をクロスプロットなどで検証し、選択したモデルデータの妥当性を検討した。今回の実施事例では十分な類似性が得られたので、その後の演算にこれらのモデルデータを用いる妥当性が確保された。

6.2.2 物性量の推定法

ここでは、垂直分解能の高い検層データと空間的に均一にとられた三次元地震探査データの両者を用いて物性量 (以下有効孔隙率、浸透率を指す) の三次元空間分布を以下の手順で推定した (Groot, 1995 参照)

解析フローを Fig. 19 に示す。

- 1) 周辺の地質情報と検層データを用い、坑井位置での地質層序区分、層厚、岩質等の地質的条件を解析し、妥当な層厚変化量を定める。
- 2) 検層データより層序、岩質毎に物性量の確率分布、物性量の間の相関係数など統計的關係を解析する。
- 3) 地質的拘束条件と物性量間の統計的關係を満足するモデル坑井 (それぞれ密度、弾性波速度、孔隙率、

Fig. 18 Schematic representation of Unsupervised Vector Quantizer (Input layer, hidden layer of three segmentation classes and output layer with an index of winning hidden class and a degree of matching). Random class centers are firstly selected. Whilst training data points are fed to the network, the class centers close to the selected point is moved towards the data point. Finally the class centers are located in the center of data cloud.

Table 3 Top of the stratigraphic units in MD (m) from GL. Elevation of GL: 53.00 m for IW-1, 53.43 m for OB-2, 53.43 m for OB-3, and 53.44 m for OB-4.

Units	Well IW-1	Well OB-2	Well OB-3	Well OB-4
Unit4	906.7	908.8	890.0	902.1
Unit5	1,029.4	1,038.5	1,012.5	1,021.4
Unit5_Zone1	1,056.6	1,067.8	1,037.8	1,047.6
Unit5_Zone2	1,090	1,103.5	1,069.5	1,079.2
Unit5_Zone3	1,150	1,169.5	1,129	1,135.8
Unit5_below	1,198	1,223.2	1,177	1,182.7

浸透率データを有する) を前節に述べた方法で多数生成する。ただし、坑井の空間位置は特定しない。各層厚については統計的に妥当と判断した範囲で、今回、正規分布で与え、これをモデルデータと呼称した。

- 4) 地震探査データとの関係を推定するため、音響インピーダンスより、反射地震記録 (垂直入射あるいは Angle stack に対応する反射角のもの) を算出する。次に対象とする物性量 (往復走時の関数として与え

Fig. 19 The scheme of physical parameters estimates by the current method.

る)を出力層, ある時間深度での音響インピーダンスと反射地震記録(基本ウェーブレットゲート幅で与える)を入力層とする関係を人工神経回路網モデルにより求めた。この関係を推定(=学習)するためにモデル坑井データを, 結果の検証のために実坑井データを用いた。

モデルデータ(そのうちの密度, 弾性波速度)から算出した反射地震記録, 音響インピーダンスと実際に観測された三次元地震探査データならびにそれよりインバージョンで推定した音響インピーダンス間の値の較正を行い, モデル坑井データで学習した関係を用い, 目的とする有効孔隙率および浸透率を推定した。

なお, 4) の段階で, 入力層として前述した以外にいくつかの組み合わせを検討した。インピーダンス(音響あるいは弾性)を時間深度での値ではなくある時間ゲートで与える, あるいは音響インピーダンスおよび弾性インピーダンスの組み合わせで与える等である。これらの結果の差は小さいことが判明した。最終的には推定した弾性インピーダンスそのものの精度を考慮し, 三次元地震探査の最終処理データおよび音響インピーダンスのインバージョン結果を入力データとした初期のものを用いた。

6.2.3 物性量の推定結果

上記の手法で推定した圧入井位置での有効孔隙率および浸透率を実検層データと比較した。圧入井 IW-1 について比較したものを Fig. 20 に示す。両者の一致は良好である。Fig. 21 にモデルデータで得られた関係を 1 回目の三次元地震探査データに適用し, 孔隙率を推定したものを示す。さらに圧入対象層である Ic 層 Zone 2 を切り出しその領域で平均化した孔隙率および浸透率を Fig. 22 に示す(Sakai, 2005a, c)。

以上により, 1 回目の三次元地震探査とその時点で利用可能であった地質情報ならびに検層データを統合して, 物性量の空間分布の推定を試みた。この作業自体は 2 回目の三次元地震探査に先行して行ったので, 4D 異常域を予測

Fig. 20 Porosity and permeability estimates for the well IW-1, using well synthetics as input. The predicted porosity and permeability curves are in thick lines and the time domain porosity and permeability logs are in dot lines (Left panel: permeability, right panel: porosity; Porosity is in fraction and permeability is in natural logarithm of mD. Time zero is the top of Ic layer.)

Fig. 21 Porosity estimates on the line of wells OB-2 (annotated as Well 2), IW-1 (Well 1) and OB-4 (Well 4) where the top and bottom of the target saline aquifer Ic layer is marked.

Fig. 22 Porosity and ln(permeability) estimates in Ic Zone 2, using 3D seismic data as input. (Left panel: Porosity, right panel: ln(permeability); Porosity is in fraction and permeability is in mD). Well trajectories are projected as black lines on maps (Wells OB-3, OB-4, IW-1 and OB-2 from left to right). Map scales are 320 m in SW-NE direction and 370 m in NW-SE direction.

する試みともいえる。このような試みはこれまでになく, 極めてチャレンジングなものであったと考える。このように推定した物性量の精度は, 手法の適用のために仮定した地質モデル, 物性量間の統計的關係, 用いたインピーダンスインバージョンの精度に依存する。今回の試みでは, 坑井位置での予測と観測の一致は良好であると評価された。

7. 議論とまとめ

RITE が新潟県長岡市郊外の岩野原地区で 2003 年 7 月から 2005 年 1 月の期間実施した CO₂ 圧入実験にあわせ, 繰り返し三次元地震探査による CO₂ モニタリングを行った。対象層準は極薄層であり, 調査条件にあわせ, 解析のための手法開発(経時変化域の推定, 孔隙率および浸透率分布の推定)を行った。

本研究を以下にまとめる。

- 1) 地震応答変化域(4D 異常域)検知のため複数手法を検討, 評価し, 教師付き人工神経回路網モデルによるパターン認識手法(クラスター解析)を観測データに適用し, 4D 異常域を確率分布関数として表現した。
- 2) 層厚, 孔隙率および飽和率の分布を均一にしたモデルで総圧入 CO₂ の分布域と推定した確率分布関数の

関係を検討した。CO₂ 分布域は、北北西 - 南南西トレンドが卓越する非等方なものである。この方位は坑井対比より明らかな岩質の分布の類似性が高く層厚が一樣な方位とやや斜行する。均質媒質の分布と圧入層中の重力支配の両者が均衡した方位と解釈される。また、3 本のモニター坑井の測定と調和的な分布を示す。均一モデルで仮定した各値をより小さくすることは、より確率値の小さい領域に CO₂ がより広く分布することに対応する。ただし空間的な変動という要素まで考慮すると、個々の値の一義的な分布形状を定めることは確率の値のみからはできない。

- 3) 1 回目の三次元地震探査データと地質情報ならびに検層データをもちいて孔隙率と浸透率の分布を推定した。もし、CO₂ 分布がこれらの物性量で決定されたとすれば、基準調査データで CO₂ 分布の将来予測の試みとなる。

解析に用いた CMR 検層で観測した浸透率はその後実施した揚水試験の結果によると絶対値として過大であるという解析結果が報告されている。値を校正する観測は非常に少なく、浸透率のアップスケールと空間分布について検層データに依拠した今回の解析が妥当であったかについてはさらに検討したい。ただし非線形手法であるため出発データの単純なスケールリングにより結果を予測することは困難である。物性量を推定するという今回の非線形解析の結果がどの程度成功したかについてはさらに研究を継続したい。

8. 最 後 に

本研究で実施した三次元地震探査は国内初の繰り返し三次元地震探査でありなおかつ、陸域帯水層への CO₂ 圧入に関連したものとしては世界で初めての三次元地震探査であった。調査地域の地表条件は三次元地震探査ならびにデータ解析に多くの困難さをもたらしたが、地震波属性値の導入と人工神経回路網モデルの適用により、CO₂ 圧入に関わる地震応答の変化を広域的にとらえることができた。圧入 CO₂ の可視化は実用的な地中貯留の実現において重要な位置を占め、今回の事例はこの目的への繰り返し三次元地震探査の有効性を示すものである。これにより焦眉の地球温暖化へ対処法のひとつとしての実効的な地中貯留法の早期実現への取り組みを促したい。

引 用 文 献

- Arts, R.O., Eiken, A., Chadwick, P., Zweigel, P., van der Meer, L. and Zinsner, B., 2002 : Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time lapse seismic data, *Proceeding GHGT-6*, 347–352.
- Baumstein, A., 2004, Shot record DMO : A tool for shot-domain data regularization, *Proceeding 74th SEG*.
- Connolly, P., 1999, Elastic impedance, *The Leading Edge*, 438–452.
- Cordsen, A., Galbraith, M. and Peirce, J., 2000, Planning land 3-D seismic survey, *Geophysical Developments No.9*, SEG, Tulsa.
- Deregowski, S. and Rocca, F., 1981 : Geometrical optics and wave theory of constant offset sections in layered media, *Geophysical Prospecting* **29**, 374–406.
- Gassmann, F., 1951 : Über die Elastizität poröser Medien, *Viertel Naturforsch. Ges.*, Zürich, **96**, 1–23.
- Groot, P.F.M. de., 1995 : Total space inversion-concept and experiments in model space-, *Proceeding 57th EAGE*.
- Haykin, A., 1999 : Neural Networks—A comprehensive foundation, Prentice Hall, New Jersey.
- IPCC, 2005 : IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, (eds) 8th Session of IPCC Working Group III. ([http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage.htm](http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/IPCC%20Special%20Report%20on%20Carbon%20dioxide%20Capture%20and%20Storage.htm)).
- Kohonen, T., 1990 : The self-organization map, *Proc. Inst. Electrical and Electronics Engineers*, **78**, 1464–1480.
- Kragh, E. and Christie, P., 2001 : Seismic Repeatability, Normalized RMS and Predictability, *Proceeding 71st SEG*.
- RITE, 2001-2006 : 平成 13-18 年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書 (財団法人 地球環境産業技術研究機構)。
- Ross, C.P., Cunningham, G.B. and Weber, D.P., 1996 : Inside the cross-equalization black box : *The Leading Edge*, **15**, 1233–1240.
- Rumelhart, D. E., Hilton, G. E. and Williams, R. J., 1986 : Learning representations of back-propagation errors, *Nature*, **323**, 533–536.
- Sakai, A., 1999 : Velocity analysis of vertical seismic profile (VSP) survey at JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, and related problems for estimating gas hydrate concentration, *GSC Bull.*, **544**, 323–340.
- Sakai, A., 2004 : Monitoring of the carbon dioxide sequestration by time-lapse 3D seismic survey in Japan, *Proceeding GHGT-7*, 1253–1258.
- Sakai, A., 2005a : Monitoring of the geologic sequestration of carbon dioxide by 4D seismic survey, *Proceeding 112th SEGJ*, 94–97.
- Sakai, A., 2005b : Elastic wave velocity model in the field of the geologic sequestration of carbon dioxide by rock physics approach, *Proceeding 113th SEGJ*, 202–205.
- Sakai, A., 2005c : Can we estimate injected carbon dioxide prior to the monitor survey in time-lapse 3D seismic monitoring? *EOS*, AGU, San Francisco.
- Sakai, A., 2006a : 4D seismic monitoring of the carbon dioxide geologic sequestration onshore in Japan, *Proceeding GHGT-8*, Trondheim.
- Sakai, A., 2006b : 4D seismic monitoring of the onshore carbon dioxide injection in Japan, *Proceeding of SEGJ 8th International symposium-Imaging and Interpretation-*.