総 説
 Review

反射法地震探査データの減衰特性を利用した断層シール能力評価の試み*

鶴 哲郎**・佐々木 亮***・占部 滋之***

(Received August 20, 2013 ; accepted November 6, 2013)

Fault seal evaluation by using attenuation effects of seismic reflection data

Tetsuro Tsuru, Akira Sasaki and Shigeyuki Urabe

Abstract : A new seismic attribute method using seismic attenuation is present. Contrary to conventional seismic attributes providing reflection strength and phase properties, the attenuation attribute method maps relative Q spatially. Although the method has disadvantage in resolution, it potentially bears big advantage in applicability to analyses of physical properties of rocks in less reflective areas such as volcanic and highly-faulted areas where continuous reflections are rarely observed. The present paper reports on its applicability to evaluate fault seal ability, through a case study using 3D seismic data over two oil fields. As the result of the case study, a fault that traps oil is characterized by lower attenuation, whereas a fault that doesn't trap oil is marked by higher attenuation. According to recent laboratory measurements, seismic waves highly attenuate when they pass through a fault with lower coupling, reversely they don't attenuate very much within a fault with higher coupling. Assuming that the strength of fault coupling is proportional to the ability of fault seal based on existing microscopic observations on fault contact surface, we can form a hypothesis that the higher the fault seal is the lower the attenuation becomes. The hypothesis is supported by the present case study.

Keywords : Seismic reflection, attenuation, fault seal, fault surface, seismic attributes, frequency, spectrum, spectral ratio.

1. はじめに

反射法地震探査は、地下の構造形態を高精度に映像化する手法として石油探査分野で広く使用されて来た。最も一般的な映像化手段は、音響インピーダンスの異なる地層境界面から反射して来る波をマッピングした反射断面図であり、地層境界面を連続した反射波として視覚的に認識できる。また、反射波の振幅情報から岩石の物性を推定する手法もよく用いられており、例えば、油層の孔隙率の空間分布や孔隙内流体の特定などの貯留岩性状の解析に多くの実績を有している。

しかし、地下構造の映像化にせよ物性評価にせよ、反射波が観測されなければ解析が不可能である。したがって、断層発達域や火山岩地域のように連続性の良い反射波が観測されにくい場所では、反射法地震探査によって有益な地

下情報が得られることは稀である。そのため、地震探査アトリビュート解析（例えば、徳山ほか、1988）、散乱波を利用した手法（Mikada *et al.*, 1997）および電磁探査との併用（例えば、志賀ほか、1993）などによって地下の地質情報あるいは物性情報の取得が試みられてきた。これらの既存研究と同様の視点から、本稿では、地震波の減衰を利用する新しいアトリビュート解析法を紹介するとともに、それを用いた断層シール能力評価への適用性を検討する。

2. 減衰と岩石の物性

地震波は、岩石の粘弾性的性質および不均質に伴う散乱現象とによって減衰することが知られている。したがって、減衰を観測することにより、逆に岩石の物性を推定することが原理的に可能である。そのため、減衰と岩石物性との関係に関するスタディーがいくつか実施されてきた。

孔隙率が減衰率あるいは Q 値と相関を持つことは室内実験から明らかにされている。図 1 は、Tompkins and Christensen (2001) および Tsuji and Iturrino (2008) による室内実験の結果を示しており、孔隙率が大きくなるにつれて減衰率 (Q 値) が増大する (減少する) 傾向が明らかに見られる。Tsuru and No (2009) は、これらの関係を開口性クラックの発達と減衰との関係に置き換えることによ

* 平成 25 年 6 月 27 日平成 25 年度年春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「課題は果たされたのか？—物理探査技術の現況と将来—」にて講演 This paper was presented at the 2013 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Geophysical Exploration Technology, Present Status and Next Generation" held in Tokyo, Japan, on June 27, 2013.

** コスモ石油 COSMO OIL Co., Ltd. 現在 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

*** コスモ石油 COSMO OIL Co., Ltd.,

(a) P波減衰率およびS波減衰率と孔隙率のクロスプロット (Tompkins and Christensen, 2001)。黒丸がP波、白丸がS波の減衰を表す。

(b) 玄武岩と孔隙率のクロスプロット (Tsuiji and Iturrino, 2008)。黒色シンボルは水飽和状態、白色シンボルは乾燥状態を表す。

図1 減衰率と孔隙率との関係

図2 震源分布域と減衰特性

2000年の三宅島噴火に関連して発生した群発地震の震源分布域は、従来の重合断面図では特定できないが、減衰断面図では高減衰域として特定可能である (Tsuru and No, 2009)。震源分布は酒井ほか (2001) を引用した。

図3 メタンハイドレートと音波検層データ上の減衰特性
メタンハイドレート濃集層 A～D は大きな減衰率を示す (Matsushima, 2005)。

(a) 推定された Q 値

(b) 反射断面図

図4 ガス層と減衰特性

反射法地震探査データから Q 値が直接計算され、ガス層部分で小さい Q 値 (大きな減衰率) が示されている Dasgupta and Clark (1998)。 (a) 図の上側のグラフは (b) 図の 2 枚の反射面で挟まれるウィンドウで計算された Q 値、 (a) 図の下側のグラフは油層部のみのウィンドウで計算された Q 値を示す。

(a) 通常の重合断面図

(b) 10Hz の周波数のみ表示した断面図

図5 増幅された低周波

ガス層直下に著しく大きな振幅を持つ低周波が存在することが示された (Castagna *et al.*, 2003)。周波数帯域は 6 ～ 10Hz であり、low frequency shadow と呼ばれた。

図6 微動の振幅異常と油ガス貯留層

世界の15油ガス田で微動計測を実施した結果、90%以上の確率で、油ガス田の直上で大きな振幅を有する1~6 Hzの低周波が観察された (modified Dangel *et al.*, 2003)。

り地震の震源分布域の特定を試みた。図2は、2000年の三宅島噴火に関連して発生した群発地震の震源分布域と、反射波の相対的な高減衰域とが良く一致することを示したものである。この減衰特性をマッピングした断面図は減衰断面図と呼ばれた。

メタンハイドレートと減衰率との関係が、音波検層データで明瞭に示された (Guerin and Goldberg, 2002; Matsushima, 2005)。図3に見られるように、メタンハイドレート濃集層は大きな減衰率を有するという興味深い研究成果が示され、その後、地震波の減衰に着目した研究が加速した。

ガス層では地震波が減衰することは一般的に知られていることから、減衰特性はガス層の特定手段の1つとしても利用されている。図4に示すように、Dasgupta and Clark (1998) によって反射法地震探査データから Q 値が直接計算され、ガス層部分で小さい Q 値 (大きな減衰率) が示されている。

低周波の増幅と油ガス貯留層との関連を議論した研究も見られる。まず、Castagna *et al.* (2003) は、ガス貯留層の直下に著しく大きな振幅を持つ低周波が存在することを示した (図5)。それらの周波数帯域は6~10 Hzであり、low frequency shadow と呼ばれ、比較的薄い数十 m 以下の層厚のガス層の直下で見られたと報告されている。ここで、通常の減衰理論では高周波成分が単純に減衰するだけであることから、この論文の著者らは、これらの低周波の増幅には別のメカニズムが存在するはずだと推測している。次に、微動探査の方面からも、同様な観測結果が得られている。図6は、Dangel *et al.* (2003) によって示された微動の振幅異常と油ガス層 (の厚さ) とが良い相関を示すことを報告した事例である。彼らによれば、15の油ガス田で比較した結果、90%以上の相関を示したと言われる。また、最近ではインドネシア (Suryanto *et al.*, 2009) やイラン

(Katebi *et al.*, 2011) の油田でも同様の現象が観測されており、low frequency signal あるいは low frequency tremor などと呼ばれている。これら増幅した低周波の発生メカニズムについては未だ議論中ではあるが、今後の解明に期待するとともに油ガス貯留層探査へのさらなる応用を期待したい。

3. 減衰アトリビュート解析

ここでは、筆者らが開発してきた減衰アトリビュート解析の手法について紹介する。本手法は、反射法地震探査データから相対的な減衰特性を計算する手法であり、 Q 値の空間分布をマッピングする手法である。二次元の場合は減衰断面図、三次元の場合は減衰キューブが得られる。なお、本手法は時間領域における反射波の振幅特性を利用しないため、断層発達域や火成岩地域といった連続性の良い反射波が観測されにくい場所でも岩石物性を推定可能な点が長所である。一方、短所は分解能が低いことである。

Q 値の推定法については、地震学や石油開発分野で手法の開発および改良がなされてきた (例えば、Gladwin and Stacey, 1974; Quann and Harris, 1997; Suzuki and Matsushima, in press)。Tonn (1991) は10個の既存手法を比較し、相対振幅が良く保存されているデータの場合は analytical signal 法、保存されていない場合は spectral modeling 法、ノイズが少ない場合は spectral ratio 法が適していると結論づけた。また、spectral ratio 法を使う場合には卓越周波数にかかわらずノッチなどによるスペクトラムの乱れが少ない周波数帯域を選んで解析を行うことが望ましいと指摘している。

本稿で報告する解析例では、重合後の反射法地震探査データを使用することから、入力データのノイズレベルも低く抑えられているため、 Q 値の推定には spectral ratio 法を用いた。同推定法は解析が容易であり、一般的な Q 推定法として良く使われている。なお、今回の計算では対象とした周波数帯域が10~70 Hzと比較的狭い帯域であったため、 Q の周波数依存性は考慮していない。具体的には、Dasgupta and Clark (1998) と同様、以下の式を用いて Q 値を計算した。

$$A_1(\omega) = A_0(\omega) R G \exp[-(-1/2\lambda) \ln(1 - 2\pi/Q)x] \quad (1)$$

ここで、 $A_1(\omega)$ は、振幅スペクトル $A_0(\omega)$ を持つ波長 λ の地震波が位相速度 v で距離 x だけ伝播した時の地震波の振幅スペクトルである。 R および G は反射係数および球面発散を示す。両辺の対数を取ると、

$$\ln[A_1(\omega)/A_0(\omega)] = \ln(RG) + [(x/4\pi v) \ln(1 - 2\pi/Q)]\omega \quad (2)$$

のように、2つの波のスペクトル比の対数と ω の一次式で表現される。ここで、右辺第一項が切片、第二項の ω の係数が傾きである。そこで、傾きを p と置くと、 Q 値は以下の式から求められる。

$$Q = 2\pi / (1 - e^{4\pi p v / x}) \quad (3)$$

図7 構造モデルと合成地震探査記録

水平三層構造モデルから反射法地震探査記録を合成した。三層目の中央部に高減衰域を設けている。ここで、震源周波数は0~50 Hz、サンプリングレートは4 msとした。

次に、減衰断面図の作成手順について記述する。図7に示した地下構造モデルから合成した反射法地震探査記録に対し、 Q 値を計算する時間ウィンドウを設定する。図8は、図7(b)中の反射波 Ref.1, Ref.2, Ref.3a, Ref.3b に対して計算されたスペクトルであり、減衰率が最も大きな Ref.3b で高周波成分が減衰しているのが分かる。図9は、Ref.1のスペクトルに対する他のウィンドウのスペクトルの比の対数を、周波数に対してプロットしたものである。この近似直線の傾きを p と置き、(3)式から Q 値を計算する。なお、ここで計算される Q 値は、最上位ウィンドウから対象ウィンドウまでの平均的な Q 値 (average Q) であり、速度という平均速度に対応する。そこで、下式により区間 Q (layer Q) を求める。

$$Q_i = \frac{t_n - t_{n-1}}{\frac{t_n}{Q_n} - \frac{t_{n-1}}{Q_{n-1}}} \quad (4)$$

ここで、 Q_n および t_n は上位から n 番目の反射波に対応する平均的な Q および反射波走時である。図10は、このように計算された区間 Q をマッピングした結果であり、減衰

A_1, A_2, A_{3a}, A_{3b} は図7(b)中の反射波 Ref.1, Ref.2, Ref.3a, Ref.3b に対して計算されたスペクトルである。中心周波数の位置が変化しているのが分かる。スペクトルの演算にはウィンドウ長 128 ms (32 point) の FFT を用いた。

Ref.1のスペクトルに対する他のウィンドウのスペクトルとの比の対数を、周波数に対してプロットした。この近似直線の傾きを p と置き、(3)式から Q 値を計算できる。

断面図と呼ばれるものである。この合成地震記録を用いた例では Q 値の絶対値が求められているが、実際のフィールドデータを用いる場合は解析精度を考慮して相対的な Q 値として表示する。なお、この事例で採用した震源の周波数帯域は0~50 Hz、サンプリングレートは4 msであり、

図 10 減衰断面図

図中の数値は (3) 式から計算した Q 値である。この合成記録を用いた例では Q 値の絶対値が求められているが、実際のフィールドデータを用いる場合は解析精度を考慮して相対的な Q 値として表示する。なお、この事例で採用した震源の周波数帯域は 0～50 Hz、サンプリングレートは 4 ms である。図中の格子は縦線がトレース、横線がサンプルの位置を表し、例えば三層目中央部 ($Q=20.0$ のレイヤー) はトレース 8 本かつサンプル 16 個から構成されることを示す。

今回開発したプログラムを一般的な仕様の地震探査データに対して適用可能であることが分かる。

4. ケーススタディー

本稿では、減衰アトリビュート解析を断層のシール能力評価に適用した事例を報告する。断層のシール能力は、良く知られているように、断層を挟んだ両側の地層の併置 (juxtaposition) 関係および断層自体のシール能力との 2 点から評価される (例えば、Smith, 1966; Watts, 1987)。前者では、貯留岩が断層を介して泥岩などの非浸透性の岩石と接するかどうかを見てシール能力が評価される (例えば、Bailey and Stoneley, 1981)。後者では、断層内部の地質特性である shale smear factor (SSF), clay content ratio (CCR), shale gauge ratio (SGR), clay smear potential (CSP) および断層面両側での差圧などの断層破碎帯構成物質の地質特性に基づいてシール能力が定量的に評価される。本稿で減衰アトリビュートを適用する目的は、試掘時のように断層構成物質の地質特性が不明な場合、併置解析に加えて本手法を適用することにより、断層シール能力評価の確度向上につながるかを検証することである。

ケーススタディーの対象地域は、ほぼ同規模の 2 つの近接した油田から成り、石油システムも同様である。図 11 に示すとおり、A 油田は断層を伴わない背斜トラップ、B 油田は断層トラップである。ここで、両油田に対し、堆積環境、構造形成および炭化水素移動集積タイミング、炭化

(a) 構造図

(b) 背斜トラップ型 A 油田の断面図

(c) 断層トラップ型 B 油田の断面図

図 11 ケーススタディーを実施した 2 つの近接油田とそれらの地震探査断面図

A 油田は断層を伴わない背斜トラップ、B 油田は断層トラップである。

図 12 マイグレーションタイムスライスと Q タイムスライス

(a) はマイグレーションボリュームから油層部分を切り出したタイムスライス、(b) はそれに時間構造図のコンターライン（白実線）および断層（黒破線）を重ねた図である。(c) は減衰ボリュームから油層部分を切り出した減衰タイムスライス、(d) はそれに時間構造図のコンターライン（白実線）および断層（黒破線）を重ねた図である。(a) および (b) では白色系が負の振幅、黒色系が正の振幅を表す。(c) および (d) 図では白色系が低い Q 値（大きな減衰）を、黒色系が高い Q 値（小さな減衰）を示す（modified Tsuru and No, 2011）。

水素チャージ量、トップシール能力、断層運動および併置関係は同等と仮定して解析を行った。すなわち、異なるのは断層構成物質特性のみであるとの仮定を設けた。

図 12 に、今回の減衰アトリビュート解析の結果を示す。(a) 図はマイグレーションボリュームのタイムスライスであり、油層部に相当する往復走時で切り出したものである。(b) 図は、それに貯留層頂部の時間構造図と断層を重ねて表示されている。(c) 図は、三次元 Q キューブから (a) 図と同じ走時で切り出した Q タイムスライスである。(d) 図はその Q タイムスライスに (b) 図と同じ時間構造と断層を重ねてある。(c) および (d) 図中の減衰特性は、低い Q 値（大きい減衰率）ほど白色色で表示されている。マイグレーションのタイムスライスと Q のタイムスライスを比較すると、

一般的な傾向として、後者の方が分解能は低い、断層の位置を解釈し易いのが分かる。また、 Q タイムスライスでは、全般的には断層が発達する場所で低い Q 値が見られるものの、相対的には A 油田を構成する 2 つの断層の方が B 油田のトラップを形成する断層よりも低い Q 値を示す。

5. 考 察

実油田に対して減衰アトリビュートを適用した結果、全般的な傾向として、断層が発達する場所で相対的に低い Q 値が認められた。このことは、Harris *et al.* (1997) および Worthington and Hudson (2000) によって示された断層部における低い Q 値の存在を支持している。さらに、今回のケーススタディーでは、断層で側方シールされていない

A油田に発達している断層は相対的に低い Q 値を持ち、断層で側方シールされているB油田を規制する断層は相対的に高い Q 値を持つという傾向が見られた。この傾向を断層面の固着度という観点から考察する。

Nagata *et al.* (2008) によって、断層面における摩擦強度と地震波の透過率との関係が示された。図13(a)はそれらの線形な関係を示したグラフであり、2枚の岩盤が強く押し付けられて断層面の摩擦強度が高いほど、その断面を通過する地震波の透過率が大きいことを示している。すなわち、強く押し付けられた断層面ほど地震波は減衰しないと言える。図13(b)はその原理を描いた図であり、Dieterich and Kilgore (1996) によって示されたものである。これは、アクリル板などの透明な2枚の板を用いて、その接触面の接触状態を顕微鏡によって観察された画像に基づいている。強く押し付けられた接触面ほど接触面積が大きくなるため、地震波の減衰が小さいことが描かれている。ここで、強く押し付けられた状態を断層面のカップリングが強いと表現する。

(a) 断層面の摩擦強度と地震波の透過率

(b) 断層面の接触状態と地震波の散乱

図13 断層面を通過する地震波の減衰

(a) 図は断層面における摩擦強度と地震波の透過率との関係を示す (Nagata *et al.*, 2008)。(b) 図は顕微鏡観察に基づく断層面の接触状態と地震波の散乱モデルである (Dieterich and Kilgore, 1996)。

図13に示した2つの室内実験の結果から、地震波が断層面を通過する時、断層面のカップリングが強いほど減衰が小さいという特性が示された。ここで、断層内における流体の流れ易さは孔隙の大きさと連結性に大きく依存することから、カップリングが強いほど流体は流れにくいと考えれば、断層面のカップリングが強いほど流体シール能力が高いという仮説が成り立つ。すなわち、この仮説によれば、シール能力が高い断層ほど地震波の減衰が小さいことになる。今回のケーススタディーでは、油をシールしている断層で小さな減衰が、油をシールしていない断層で大きな減衰が観察されており、この仮説を支持している。

6. まとめ

今回、断層シール能力評価に対する減衰アトリビュート法の適用性を検討した。その結果、流体シール能力が高いと考えられる断層で相対的に小さな減衰効果が観察され、室内実験から推定される両者の関係と調和的な結果が得られた。減衰と断層シール能力との関係については未だ十分な研究がなされていないものの、今後検討に値する課題の1つであると考えられる。

謝 辞

本稿の外部発表を許可して戴きましたコスモ石油株式会社に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- Bailey, R.J., and Stoneley, R., 1981 : Petroleum: entrapment and conclusions. in Tarling, H.D., ed. : *Economic Geology and Geotectonics*. Blackwell, Oxford, 73-97.
- Castagna, J. P., Sun, S. J. and Siegfried, R. W., 2003 : Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, **22**, 120-127.
- Dangel, S., Schaepman, M.E, Stoll, E.P, Carniel, R., Barzandji, O., Rode, E.-D., Singeret, J.M., 2003 : Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs. *J. Volc. Geoth. Res.*, **128**, 135-158.
- Dasgupta, R, and Clark, R.A., 1998 : Estimation of Q from surface seismic reflection data. *Geophysics*, **63**, 2120-2128.
- Dieterich, J. H., and Kilgore, B. D., 1996 : Imaging surface contacts: Power law contact distributions and contact stresses in quartz, calcite, glass and acrylic plastic. *Tectonophysics*, **256**, 219-239.
- Gladwin, M.T. and Stacey, F. D., 1974 : Anelastic degradation of acoustic pulses in rocks. *Phys. Earth Planet Inter.*, **8**, 332-336.
- Guerin, G., and Goldberg, D., 2002 : Sonic waveform attenuation in gas hydrate-bearing sediments from the Mallik 2L-38 research well, MacKenzie Delta, Canada. *J. Geophys. Res.*, **107** (B5), doi:10.1029/2001JB000556.
- Harris, P.E., Kerner, C., White, R.E., 1997 : Multichannel esti-

- mation of frequency-department Q from VSP data., *Geophysical Prospecting*, **45**, 87–109.
- Katebi, H., Hosseini, S.K., Sadeghi, H., Seyyedini, S.H., 2011 : An investigation on low-frequency passive seismic waves as a hydrocarbon indicator in SW-Iran, *Proceedings. The 10th SEGJ International Symposium*, 155–158.
- Matsushima, J., 2005 : Attenuation measurements from sonic waveform logs in methane hydrate-bearing sediments at the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan. *Geophysical Research Letters*, **32**, L03306, doi : 10.1029/2004GL021786 (Correction, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02305, doi : 10.1029/2005GL024466, 2006).
- Mikada, H., Watanabe, H. and Sakashita, S., 1997, Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima Volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of the 1986 eruptive activity. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **104**, 257–269.
- Nagata, K., Nakatani, M., Yoshida, S., 2008 : Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06310, 5 PP, doi : 10.1029/2007GL033146.
- Quann, Y. and Harris, M.J., 1997 : Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, **62**, 895–905.
- 酒井慎一, 山田知朗, 井出 哲, 望月将志, 塩原 肇, ト部 卓, 平田 直, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 西澤あずさ, 藤江 剛, 三ヶ田均, 2001 : 地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマ活動. *地学雑誌*, **110**, 145–155.
- 志賀信彦, 渡部克哉, 武田祐啓, 小池謙一郎, 1993 : 鳥海山北麓における地震探査, 電磁探査法の総合解析例. *石技誌*, **58**(1), 19–27.
- Smith, D.A., 1966 : Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults. *AAPG Bulletin*, **50**, 363–374.
- Suryanto, W., Wahyudi, Adriansyah and Sardjito, 2009 : A microseismic survey over Tambora-oilfield, West Java, Indonesia: Mapping of low-frequency anomalies. *Proceedings, The 9th SEGJ International Symposium*.
- Suzuki, H. and Matsushima, J., in press : Quantifying uncertainties in attenuation estimation at methane-hydrate-bearing zones using sonic waveform logs. *Geophys.*
- 徳山英一・末広 潔・渡辺秀文・大西正純・高橋明久・井川 猛・浅田正陽・藤岡換太郎・芦寿一郎・倉本真一・徐 垣・小川勇二郎, 1988 : 伊豆大島南部海域のマルチ・チャンネル音波探査記録. *火山*, **33**, 67–77.
- Tompkins, M. J. and Christensen, N. I., 2001 : Ultrasonic P- and S-wave attenuation in oceanic basalt. *Geophys. J. Int.*, **145**, 172–186.
- Tonn, R., 1991 : The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods. *Geophys. Prospect.*, **39**, 1–27.
- Tsuji, T. and Iturrino, G., 2008 : Velocity-porosity relationships of oceanic basalt from eastern flank of the Juan de Fuca ridge: The effect of crack closure on seismic velocity, *Exploration Geophysics*, **39**, 41–51.
- Tsuru, T. and No, T., 2009 : Application of seismic attenuation profile. *Extended abstract, The 13th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG)*.
- Tsuru, T. and No, T., 2011 : Seismic attenuation attribute and its implication to physical property analyses in less-reflective areas. *Proceedings of The 10th SEGJ International Symposium*, 151–154.
- Watts, N.L. 1987 : Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two-phase hydrocarbon columns. *Marine and Petroleum Geology*, **4**, 274–307.
- Worthington, M.H. and Hudson, J.A., 2000 : Fault properties from seismic Q. *Geophys. J. Int.*, **143**, 937–944.