論 文

地震波シミュレーションが地下構造探査に果たす役割*

佐藤 岳彦**・玉川 哲也**・松岡 俊文**・佐伯 龍男***

(Received September 20, 1997 ; accepted November 26, 1997)

Roles of seismic simulation in the geophysical exploration

Takehiko Sato, Tetsuya Tamagawa, Toshifumi Matsuoka and Tatsuo Saeki

Abstract: Seismic simulation technology has been developed for many years. Recent trend that targets of exploration have become deeper and more complicated recalls demand of the seismic simulation technology. However, it has been only used for limited study due to various technical reasons. In recent years, the seismic simulation technology is rapidly advanced with new simulation methods and parallel computers. We have developed the wave propagation methods and applied to various exploration problems. We will show some results of seismic simulation in this paper.

The first example is related to the Marmousi model. This simulation result shows that the wave propagation is very complicated and is beyond our image. The second example is a virtual seismic survey related to the sub-salt play. The virtual exploration shows the problems and solutions for sub-salt seismic imaging. The third example is the difference between acoustic and elastic modeling. This result shows the problem in onshore seismic data and the future direction.

Using a seismic simulation, we can recognize various pitfalls and limitation in seismic processing and seismic interpretation. Seismic simulation can be used as potential tools for virtual explorations. We can gain the knowledge and the virtual experience through the virtual explorations.

Key words: seismic modeling, seismic simulation, wave propagation, geophysical exploration

1. はじめに

地震波シミュレーション技術とは、地下の速度構造モデルを入力とし、地震波の応答を計算機上で合成する技

術のことである。石油探鉱では、この技術は地震探鉱調査のシミュレーションを行うために実施される。

地震波シミュレーションは古くからある技術であり、地震探査技術のすべての基礎となる技術と位置づけられている。しかし、従来は技術的にさまざまな問題がありこの技術は十分活用されてきたとは言い難い。近年探鉱対象が複雑な構造に移っていく中で、地震波シミュレーション技術はますます重要になってくると考えられる。

筆者らは、地震波シミュレーション技術は重要であると考え、これを実際の探鉱作業に応用すべく、技術開発を行ってきた(佐藤ほか 1993, 1994, 1995, 1997 a, 1997 b)。本報告では、まず地震波シミュレーション技術の現状のレビューを行い、次に具体的に探鉱作業への応用例や、実例について紹介する。

* 平成 9 年 6 月 5 日, 平成 9 年度石油技術協会春季講演会, 地質・探鉱部門シンポジウム「石油探鉱に果たすシミュレーションの役割」で講演 This paper was presented at the 1977 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Applications of simulation modeling to hydrocarbon exploration" held in Makuhari, Chiba, Japan, June 5, 1997.

** 石油資源開発株式会社物理探鉱部 Geophysics department, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

*** 石油公団石油開発技術センター物理探査研究室 Technology Research Center, Japan National Oil Corporation.

2. 従来の地震波シミュレーション技術

従来、地震波シミュレーション技術は波線追跡法などを用いて行われてきたが、入力できるモデルは単純なものに制限され、得られる結果についても不十分であった。波線追跡法は、波動方程式の高周波近似を行って得られる Eikonal 方程式を解くことによって計算が行われる (Cerveny *et al.*, 1977)。計算コストは比較的小さく、ワークステーションクラスの計算機を用いて十分計算を行うことができる。また波線を計算することができるので、結果が非常に理解しやすいという利点を有している。

しかし、この手法では自然界に存在する波動のうち、実体波のみを計算することができ、回折波や head wave を計算するのは困難である。また多重反射波のような場合、計算する波動をすべて指定する必要があった。走時に関しては正確に計算ができるが、振幅に関しては精度よく求めるのは困難である。さらにモデルが複雑になると得られる結果が不安定になり、現実的な結果を得るために本質的でないパラメータを調節する必要があった。

一方、差分法などの数値解法では、モデルが比較的柔軟に入力でき、すべての波動を計算することができるので、結果もまた現実的である。しかし、この計算にはばく大な計算コストを必要とし、実際の探鉱作業に使うのは事実上困難であった。

従来は、計算コストの観点から波線追跡法が主に用いられていたが、得られる結果が不十分なため、結果を用いてデータ処理を行うのは困難であった。したがって、地震波シミュレーションの結果は、波線の解釈を中心とした定性的な考察にとどまり、定量的な考察はあまりなされることはなかった。

一方、80年代末期から90年代にかけ、地震波シミュレーション技術は急速に進歩した。ひとつは数値的な解法の手法そのものの改良が進み、高次の差分法や、Pseudospectral 法 (Gazdag 1981; Reshelf *et al.* 1988a, Reshelf *et al.* 1988b; Fornberg 1987; 古村ほか, 1996) が登場してきた。これらの解法は従来の差分法に比べ大幅に計算時間、計算機容量を節約できる。

また、従来の高価なスーパーコンピュータの代わりに、比較的安価でコストパフォーマンスのよい、並列計算機が登場し、その利用技術が進歩してきた。それに従ってばく大な計算コストを要する地震波シミュレーションが比較的安価に実行できるようになってきた (Sato *et al.* 1996)。今回の報告では、石油探鉱を想定した大規模な地下構造モデルに対して、実際に並列計算機

を用いてシミュレーションを行った結果について紹介する。

3. Marmousi モデルのシミュレーション

ここでは、比較的複雑な地下構造モデルに対して、地震波シミュレーションを行うことにより、得られる記録がどのようなものになるかをスタディした結果について報告する

ここで用いた Marmousi モデルは、Institut Français du Pétrole が作成した、二次元のモデルである。このモデルはアンゴラ国沖の Quanza 盆地を想定したモデルであり、岩塩が流動した際にできた構造を模している (Fig. 1)。

最下部に背斜構造があり、その頂部には貯留層が存在する。その上は岩塩が不整合で覆い、その上には岩塩が流動した際にできたタートルバック構造が存在している。またその上位の堆積層は、3本の成長断層によって分断されている。

地震波シミュレーションは、実際のデータ取得のように、モデルの表面で位置を少しずつ変えて発振し、240ショットの合成記録を作成した。このシミュレーションは Pseudospectral 法による音響波動場モデリングによって実施された。このモデルのシミュレーション結果の一部を Fig. 2 に示す。

この結果よりわかることは、成長断層よりも左側の単傾斜の部分では、良好な反射波が見える。一方、断層群の中での反射波は、回折波が卓越していることがわかる。興味深いことは、不整合部分の反射波は、単傾斜の部分でははっきり見ることができるが、断層群の下では視認できず、記録が良好でないように見えることである。実際は断層群の下でも不整合からの反射波は返ってきているはずであるが、上部の断層ブロック群の速度変化が大きいため屈折、回折し視認することができないものと考えられる。

このシミュレーションから、地下構造モデルが石油探鉱におけるモデルとしてはそれほど複雑でなくても、得られる結果は予想ができなくなるほど、複雑になる場合があることがわかる。このように地震波シミュレーションを行うことにより、なにが起きているのか、なにが起きるかを事前に把握することが可能であり、地震探鉱のデータ取得、処理、解釈に役立てることができる。

4. サブソルト探鉱の地震波シミュレーション

次に仮想的な探鉱エリアを想定し、地震波シミュレーションを用いてスタディを行い、予想される問題点と解決方法について考察した例を示す。

Fig. 1 Velocity model of the Marmousi model. White area represents velocity as 1,500 m and black area represents 5,500 m/s.

Fig. 2 Synthetic seismogram of shot record of the Marmousi model.

メキシコ湾では岩塩体は周りの堆積層より P 波速度が大きく、しかも岩塩体自体が塑性流動しているため三次元的に非常に複雑な形状をしている。そのため岩塩体を通過する波動は複雑に反射、屈折し、地震探鉱によって岩塩に深の良好なイメージを得ること（“イメージング”）は極めて困難である。そのため、メキシコ湾において岩塩体より下は永らく探鉱ターゲットとはされていなかったが、90年代になり、幾つかの商業油田が岩塩体下位で発見され、鉱床成立の可能性が示されている。

今回筆者らが使用した地下構造モデルは、米国物理探査学会 (society of Exploration Geophysicists) と欧州物理探査学会 (European Association of Geophysicists and Engineers) が作成した “Salt” モデルと呼ばれるモデルである (Fig. 3)。彼らは、このモデルに対して米国の国立研究所を中心とした並列計算機を使用し、極めて大規模な地震波シミュレーションを実施している (Amizadeh *et. al.* 1994, 1995, 1996)。この目的は、複

雑な構造下における合成地震波記録を得て、データ処理の問題点の抽出および重合前深度マイグレーションアルゴリズム、速度推定の手法開発の基礎データとして利用することである。

この Salt モデルの概略であるが、岩塩体は北西から南東に向かって舌状に上昇しており、岩塩体は3本の成長断層によって切られている。岩塩体上面は、成長断層に向かって貫入し、リッジを作っている。また上面は凹凸が激しく、特に先端ではトウスラスト断層に向かって再貫入している。また岩塩体下にはホルストブロックや、幾つかのレンズ状砂岩体が存在し、これらがイメージングの対象である。

このような地質状況下では、地震探査においてどのような問題点があり、どのように解決すべきなのをスタディした結果について報告する。今回紹介するシミュレーションは計算時間の関係から重合後のシミュレーションである。スタディは、以下の手順で行った。

Fig.3 SEG/EAGE salt model. (from image date file in CD-ROM produced by SEG/EAEG salt modeling project).

4.1 擬似重合記録の作成

擬似重合記録を作成するために、爆発反射面モデル (exploding reflector model) (Claerbout, 1985) に基づき地震波シミュレーションを行い、擬似重合データを作成した。支配方程式は、無反射往復波動方程式 (Baysal *et al.*, 1984) を用いた。モデルの大きさおよびシミュレーションパラメータは以下のとおりである。

Model size :

12.8 km (EW) × 12.8 km (NS) × 6.4 km (Depth)

$\Delta x = \Delta y = \Delta z :$ 50 m

$v_{\min}/v_{\max} :$ 1,500/4,500 m/s

Time step width : 7.6 ms

Max time for computation : 5.7 s

Maximum Frequency : 7.5 Hz

Crossline—inline interval : 50 m

計算時間は、並列計算機 nCUBE-2S を使用し、実時間で1時間50分かかった。最大周波数が7.5 Hz と低いのはモデルの格子間隔が大きいためである。ちなみに格子間隔を半分にして、計算周波数を倍の15 Hz にした場合、計算時間は2⁴=16 倍になる。

4.2 時間マイグレーション処理

次に4.1節のシミュレーションで得られたデータに対して三次元時間マイグレーションを実施した。マイグレーションは堆積層の速度を使用し、空間方向に一定な速度を使用した。マイグレーションアルゴリズムは、空間周波数型差分法1パスマイグレーションアルゴリズム (たとえば Yilmaz, 1987) を使用した。この場合の最大マイグレーション角度は65度である。

4.3 深度マイグレーション処理

平行して三次元深度マイグレーション処理を行った。深度マイグレーションのための速度はモデルの速度を入力している。マイグレーションアルゴリズムは reverse time migration アルゴリズム (Baysal *et al.*, 1983) を使用した。

4.4 シミュレーション結果と考察

Fig.4 は岩塩体上面の深度構造図と、これから説明する3本の断面の測線位置を表示している。

Fig.5 は、インライン30測線直下の速度構造モデルの断面である。この測線は岩塩体の近傍を通過する測線であり、この直下に岩塩体はない。Fig.6 はインライン30のシミュレーション結果で得られた擬似合成重合記録である。測線側方からの岩塩体上面の反射波 (サイドスワ

Fig. 4 Map view of top salt surface, gray scale means depth of top salt, black area represents no salt, and white represents 150 m.

Fig. 5 Velocity profile of inline 30. White and black area represents 1,500 m/s and 4,500 m/s.

Fig. 6 Synthetic "Stack" seismograms derived by the exploding reflector model.

イプ) が取得されていることがわかる。

Fig. 7 はこの測線の二次元マイグレーションと三次元マイグレーションの比較である。二次元マイグレーション断面では、サイドスワイプは解決されおらず、あたかもこの測線の直下に岩塩体が存在するように見える。また右側の小さな断層についてもイメージングされていない。これはこの断層面と測線とは斜交しており、二次元

Fig. 7 Comparison between 2D (upper) and 3D migration.

マイグレーションではイメージングできないということを示している。

Fig. 8 は、速度構造モデルのインライン90における断面である。この直下の岩塩体は断層に向かって再貫入しリッジを作っており、岩塩体の厚さが著しく変化している。この測線の三次元時間マイグレーション結果を、Fig. 9 に示す。岩塩体の上面より上位の構造に対しては極めて良好なイメージが得られる。しかし岩塩体より下位の構造はプルアップを受けており、ひずんだ形態を示す。

Fig. 8 Velocity profile of inline no. 90.

Fig. 10 Velocity profile of inline no. 140.

Fig. 9 Time migrated synthetic section of inline no. 90.

Fig. 11 Time migrated synthetic section of inline no. 140.

Fig. 10 は速度構造モデルのインライン140における断面である。この直下では岩塩体の厚さはそれほど変化していないが、岩塩体上面の凹凸が激しい。Fig. 11 はインライン140における三次元時間マイグレーション断面である。インライン90の場合と同じく、岩塩体の上面より上に関しては非常によくイメージングされていることがわかる。しかし、岩塩体よりも下の部分に関して、特に凹凸が激しい部分では回折波の残りのような波動が卓越し、岩塩体の下の良好なイメージは得ることができない。

一方、Fig. 12 にインライン90、Fig. 13 にインライン140の三次元深度マイグレーション結果の断面を示す。正しい速度モデルを使用したので、岩塩体の下位に関しても正しいイメージが得られていることがわかる。正確な速度モデルを用いれば正しいイメージが得られる。すなわち正確なイメージを得るためには正確に地下モデルを推定する必要があることがわかる。このことは実際の深度マイグレーション処理においては、速度モデルの推定、深度マイグレーションの繰り返し処理が必要であることを意味している。

一方、三次元時間マイグレーションデータの時間1.804 sにおける時間スライスをFig. 14に、三次元深度マイグレーションデータの深度1,350 mにおける深度スライスをFig. 15に示す。これらの類似性から、岩塩体の上面より上のイメージは三次元時間マイグレーションを用いれば、十分精度よく得られることがわか

Fig. 12 Depth migrated synthetic section of inline no. 90.

Fig. 13 Depth migrated synthetic section of inline no. 140.

る。

一方、岩塩体下位のイメージに関して、三次元時間マイグレーションデータの時間2.986 sにおける時間スライスをFig. 16に、三次元深度マイグレーションデータの深度3,150 mにおける深度スライスをFig. 17に示す。このように岩塩体下位のイメージは三次元深度マイグレーションを必要とすることがわかる。

ここで述べたように地震波シミュレーション技術を用

Fig. 14 Time migrated time slice at 1.804 S.

Fig. 16 Time migrated time slice at 2.986 s.

Fig. 15 Depth migrated depth slice at 1,350 m.

Fig. 17 Depth migrated depth slice at 3,150 m.

いて仮想の地震探鉱を行うことによって、対象エリアでの地震探鉱上の問題点を抽出し、地質状況に応じた解決法を考えることができる。

5. データ処理における虚像のスタディ

我々は現実にはデータ取得しデータ処理を行っている。しかし、前項でも述べたとおり、地震データ処理は比較的単純な仮定を用いて処理を行っており、そのため品質の悪化、虚像の発生などが起こることがある。それを防止するため、次のような手段が有効である。まず想定されるモデルを用いて地震波シミュレーションを実施する。次に地震波シミュレーション結果をデータ処理することで、あらかじめ考えられる問題点または地質状況が、どのように地震探鉱の結果に反映されるかを事前に

把握することができる。したがって、この情報を処理担当者にフィードバックすることによって、虚像を抑制し、高品質な断面を得ることができる。この例を以下に示す。

Fig. 18 は、ある地域での時間マイグレーション断面である。スマイル状の強振幅のイベントが見られるが周辺の堆積層の反射波とは不調和で、かつ向斜部の端の限られたところにしか発生していない。このイベントは地震探鉱データ解釈において解釈不能のイベントとして認識されていた。またショット記録の考察からこのイベントはオフセット（発振点、受振点間距離）の大きなトレースの初動直下に双曲線状に現れることが知られていた。この原因を探るべくシミュレーションスタディを行った。Fig. 19 は対象エリアを想定したモデルである。

Fig. 18 Time migrated stack of real data. Note strong reflection shown as “smile”.

モデルは、浅部に背斜、向斜を含み、深度方向に速度が増加するモデルである。このモデルについて地震波シミュレーションを実施し、合成ショット地震記録を作成した。次にその合成地震記録に対し、データ処理を実施した。Fig. 20 は、Fig. 18 と同様の処理パラメータでシミュレーションデータを処理して重合し、時間マイグレーション処理を行った断面である。実データと同様に向斜部の端に強振幅で、かつ解釈不能なイベントが存在している。

この原因を探るべく合成ショット記録に立ち返り、波線追跡法を併用して検討したところ、このイベントは向斜部で臨界多重反射を起こした波動が原因であることがわかった（玉川ほか、1996）。この波動はオフセットが大きいトレース、しかも初動付近に存在することがシミュレーション結果より判明したので、シミュレーションデータに対し、処理パラメータを変更し、これらの波動を取り除くような処理を行った。その結果を Fig. 21 に示す。

Fig. 21 を見ると、もはや解釈不能のイベントは存在せず、良好なイメージを得ることができることがわかった。その結果、実データに立ち戻り、同様に処理パラメータを変更した結果を Fig. 22 に示す。Fig. 18 と比べ解釈不能のイベントは取り除かれていることがわかる。

このように地震波シミュレーションを行い合成データを作成し、それを処理することによって、既存のデータ処理の問題点を抽出し、解決法を見いだすことが可能となる。

6. 音響波動と弾性波動

最後に、なぜ陸上、特にオーバースラスト帯においては地震探鉱記録が悪いのか地震波シミュレーションから

の考察を報告する。

使用したモデルは、第 4 章で紹介された EAGE/SEG によるオーバースラストモデルである（Fig. 23）。この三次元モデルは、3 本の逆断層を含み、層ごとの速度コントラストが強いことが特徴である。また、地表面近くは風化層を反映し、速度変化が大きい。

シミュレーションの手法としては音響体シミュレーションと、弾性体シミュレーションを行った。オリジナルの EAGE/SEG オーバースラストモデルでは、P 波速度のみが与えられているため、S 波速度を P 波速度の $1/1.7777$ で与えた。また密度については Gardner の式によって与えた（Gardner *et al.*, 1974）。

モデルのほぼ中心で発振した場合の音響体モデリングの結果を Fig. 24、弾性体モデリングの結果を Fig. 25 に示す。弾性体モデリングにおける震源は爆発型震源で、Fig. 25 は変位の垂直成分のみを表示した。Fig. 24 と Fig. 25 を比べてみると、音響体モデリングの結果は、各層の 1 枚 1 枚の同定が容易であり、反射波とモデルとの対比が容易であることがわかる。しかし弾性体モデリングの場合は、記録は表面波に汚染され、しかも P-P 波以外の見かけ速度の遅い波動が記録上に現れ、反射波とモデルとの対比は困難であることがわかる。

一般に海上地震探鉱記録が良好なのは、海水層が S 波を発生させず、また通過させないため、S 波による効果を低減することができ、音響体モデルに近いものと考えられるためである。しかし陸上では、Fig. 25 の結果からわかるように、S 波の効果は無視できないほど大きく、これが地震探鉱記録の品質を悪化させている。

一般に地震探査データ処理は P 波の反射波のみに対して行われるために、その他の波動はノイズとして扱われる。もしこのような地域で処理結果の品質を上げよう

Fig. 19 Velocity model for simulation study.

Fig. 20 Time migrated stack of the simulation data using same parameters in real data processing.

Fig. 21 Time migrated stack of the simulation data using revised parameter to attenuate the multiple critical reflection wave.

Fig. 22 Revised time migrated stack of real data. Processing parameters are same as figure 21. Compare figure 18.

Fig. 23 EAGE Overthrust model. (from image data file in CD-ROM produced by SEG-EAEG overthrust modeling project).

と考えるならば、ノイズとされているS波やその他の波動を同時に処理するような手法が必要となる。しかし現在のところ、そのような方法はいまだ確立されていない。今後は音響波動ばかりではなく弾性波動を含む処理技術の開発が重要な課題となることがわかる。

これらの地震波シミュレーションを通じて、我々は地

震探査の現場作業では弾性波を取得し扱っているにもかかわらず、データ処理は音響波という仮定で行っていることの問題点を再認識することとなった。

7. ま と め

現在、ようやく地震波シミュレーション技術は石油

Fig. 24 Acoustic synthetic seismogram of EAGE Overthrust model.

Fig. 25 Elastic synthetic seismogram of EAGE Overthrust model. Vertical component of displacement is displayed. Compare figure 24.

開発における地震探鉱への応用が可能なレベルに達しつつある。地震波シミュレーション技術の進歩によって波動伝播は我々が想像しているよりもはるかに複雑であることが示されてきた。その結果、波動伝播に対する我々の知識は飛躍的に増えつつある。

また、地震波シミュレーションデータをデータ処理することによって、既存の処理の問題点と、解決方法を検討し、実際の地震探鉱処理品質の改善を図ることができるようになった。

さらに、地震探鉱の可能性と限界を探ることも可能になりつつある。すなわち、地震波シミュレーション技術が地震探査データの解釈において、地質技術者と物探技術者の共通のツールとなりうることが期待される。

また、地震波シミュレーション技術による仮想的な地震探鉱を行うことによって、ばく大な費用がかかる実際の探鉱作業を伴わずに、従来探鉱が行われてこなかった、いわゆるフロンティアにおける地震探鉱の問題点を抽出し、解決法を探れる可能性がある。その結果、新しい探鉱へのアイデアが生まれることが期待される。

一方、問題点として、三次元地震波シミュレーションを行う際に三次元モデル構築技術が必要となる。三次元モデル構築のためには二次元のそれに比べ、はるかに大量の情報を必要とし、それらの整合性を保ったまま、三次元モデルを作成することは、困難な作業である。しかしながら3次元可視化技術の発達によりこの三次元モデル構築技術は急速に発達しつつあり、この問題の解決

が期待されている。

謝 辞

この研究は石油公団石油開発技術センターと石油資源開発株式会社との共同研究「高精度イメージング技術の開発」の成果の一部である。発表を許可された石油公団と石油資源開発株式会社に対して感謝いたします。

また、石油資源開発株式会社物理探鉱部のかたがたには日ごろから有益な議論、助言を頂いた。特に高橋明久主査にはこの発表をするにあたって多大なご助力を頂いた。また、河合展夫主査、島尾琢氏には地震探鉱データ処理において多大なご協力を頂いた。以上のかたがたに深く感謝する。

引 用 文 献

- Aminzadeh, F., Burkhard, N., Nicoletis, L., Rocca, F. and Wyatt, K., 1994 : SEG/EAEG 3-D modeling project : 2nd update. *The Leading Edge*, **13**, 949-952.
- Aminzadeh, F., Burkhard, N., Kunz, T., Nicoletis, L. and Rocca, F., 1995 : 3-D modeling project : 3rd update. *The Leading Edge*, **14**, 125-128.
- Aminzadeh, F., Burkhard, N., Long, J., Kunz, T. and Duclos, P., 1996 : Three dimensional SEG/EAEG models an update. *The Leading Edge*, **15**, 131-134.
- Baysal, E., Kosloff D. D. and Sherwood, C., 1983 : A reverse time migration. *Geophysics*, **48**, 132-141.
- Baysal, E., Kosloff, D. D., Kosloff, R. and Reshelf M., 1984 : A two-way non-reflecting wave equation. *Geophysics*, **49**, 132-141.
- Claerbout, J. F., 1985 : *Imaging the Earth's Interior*. Blackwell Scientific Publications.
- Cerveny, V., Molotkov, I. A. and Psencik I., 1997 : *Ray method in seismology*. Univerjita Karlova, Praha.
- Fornberg, B., 1987 : The pseudospectral method : Comparison with finite differences for elastic wave equation. *Geophysics*, **53**, 483-501.
- 古村孝史・竹中博士・額綱一起, 1996 : Pseudospectral 法による地震波動の三次元計算. 物理探査, **49**, 536-548.
- Gazdag, J., 1981 : Modeling of the acoustic wave equation with transform method, *Geophysics*, **46**, 854-859.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. and Gregory, A. R., 1974 : Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, **39**, 770-780.
- Reshelf, M., Kosloff, D., Edwards, M. and Hsiung, C., 1988 a : Three dimensional acoustic modeling by Fourier method. *Geophysics*, **53**, 1175-1183.
- Reshelf, M., Kosloff, D., Edwards, M. and Hsiung, C., 1988 b : Three dimensional elastic modeling by Fourier method. *Geophysics*, **53**, 1184-1193.
- 佐藤岳彦・松岡俊文・鶴 哲郎, 1993:並列型計算機を用いた Pseudospectral 法波動場モデリングおよび Reverse time migration について. 物理探査学会第89回講演論文集, 96-91.
- 佐藤岳彦・松岡俊文・鶴 哲郎, 1994:並列型計算機を用いた Pseudospectral 法波動場モデリング. 物理探査学会第90回講演論文集, 96-91.
- 佐藤岳彦・松岡俊文・浅川栄一, 1995:並列型計算機を用いた Pseudospectral 法波動場モデリング (その2). 物理探査学会第92回講演論文集, 392-396.
- Sato, T., Matsuoka, T. and Tsuru, T., 1996 : Parallel computation in reflection seimology. *Journal of Applied Geophysics*, **35**, 99-104.
- 佐藤岳彦・松岡俊文・佐伯龍男, 1997 : Pseudospectral 法による三次元波動場モデリング. 物理探査学会第96回講演論文集, 126-130.
- 佐藤岳彦・松岡俊文・佐伯龍男: 1997 : 三次元波動場モデリングを用いた石油探鉱のシミュレーションスタディ. 物理探査学会第96回講演論文集, 131-135.
- 玉川哲也・松岡俊文・佐藤岳彦・峰岸政人・鶴 哲郎, 1996:波動場モデリングによる地震探査断面の解釈—強振幅イベントに対する考察—. 物理探査学会第96回講演論文集, 129-131.
- Yilmaz, O., 1987 : Seismic data processing. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK.