解 説
Glossary

重合前深度マイグレーション処理

浅川 栄一*・大西 正純*

(Received March 3, 2008 ; accepted May 16, 2008)

Pre-stack depth migration (PSDM)

Eiichi Asakawa and Masazumi Onishi

Abstract : Seismic imaging is generally a technique to figure out the subsurface structure or physical properties of subsurface media. It is often considered the same as seismic migration in reflection seismic. Migration has been the means of collapsing diffraction events to points, moving (“migrating”) reflection events to the proper locations to obtain a true image of subsurface structures.

Over the years, the technique of migration has evolved. It started from NMO (normal move out) for the horizontally layered structure, and then DMO (dip move out) for dipping layer has been developed. For more general velocity structure, a variety of migration techniques has been applied in time and depth domain. In case of small variation of the subsurface velocity, time migration is enough to gain true image, whereas depth migration is required for abrupt lateral change of the velocity. As the computer technology is developed, CPU intensive pre-stack migration methods become into practice use. Pre-stack depth migration (PSDM) is one the final steps of the seismic imaging with proper velocity estimation.

In this paper, we introduce the general ideas of migration as well as some of the issues related to it, such as computation efficiency and velocity estimation, without describing the details of the migration algorithms themselves. This short paper is intended to provide the overview of migration methods for non-geophysicists.

Keywords : reflection seismic, imaging, migration, velocity model

1. はじめに

反射法地震探査において、地層の形状あるいは岩石の物性を反映した地下構造を把握する技術を一般的にイメージングと呼ぶ。狭義には、人工震源から発生した地震波が地下の地層境界面で反射して戻った波を観測した地震記録に含まれる反射イベントをその反射が起こった地下の場所（反射点）に戻す（移動させる）処理を指す。地下の地層境界では反射係数が変化し反射波が発生すると考えられるため、このような処理で得られる反射イベントの断面図を地下構造の断面図とみなすことができる。本稿では、狭義のイメージングに関して説明するが、観測された反射イベントを地下の反射点に「移動する」という意味で「マイグレーション (migration)」という用語も使われる。その手法としては NMO (normal move out) 補正, DMO (dip move out) 補正, 重合後 / 重合前時間マイグレーション (post-stack / pre-stack time migration), 重合後 / 重合前深度マイグレーション (post-stack / pre-stack depth migration) があげられる。

石油探査におけるイメージング技術は、探査対象の複雑化、計算機技術の進歩と密接に関係してきた。通常の堆積層は緩やかな構造が多く、水平多層構造に基づく NMO 補

正などでも十分であったが、岩塩ドームやオーバースラスト構造などの複雑な構造が探査対象となってくると、精度の高い重合前深度マイグレーションの必要性が高まってきた。また、一方で、近年のコンピュータ技術の飛躍的な進歩により、重合前深度マイグレーションが要求する膨大な計算量を、現実的な時間で処理することが可能になってきた。この他、三次元反射法地震探査や石油貯留層解析などで、より精度の高い解析が要求されてきていることも、重合前深度マイグレーション普及の一因となっている。本稿では、反射法地震探査データを用いて地下構造をイメージングする技術全般に関し概観した後、重合前深度マイグレーションの概要、速度モデルの構築技術、今後の展望について説明する。

2. イメージング技術

イメージングは、いろいろな制約（計算機の性能等）や仮定（探査対象の構造等）のもとでなるべく正確に地下の反射点に地震記録の反射イベントを戻す技術であり、簡単なものから複雑なものまでいくつかの手法が開発されてきた。通常、反射法地震探査では、発震点と受振点を離して地震記録を取得する。NMO 補正は、地下構造が水平多層構造と仮定した上で、発震点と受振点が同じ場所にあ

* 株式会社地球科学総合研究所 探査部 JGI, Inc.

るような記録（ゼロオフセット記録）を作りだす処理である。ゼロオフセット記録にした上で各記録を重合（加算）し、S/N比を向上させる処理がCMP（common mid-point）重合法であり、通常は、NMO補正と組み合わせて用いられる。水平多層構造では、ゼロオフセット記録の反射波は観測点の直下から上方に伝播してくるので、観測点の直下の反射情報を含んでいると見なすことができ、これを横に並べることによって、反射イベントの断面図、すなわち地下構造のイメージを得ることができる。しかし、地下構造が傾斜している場合は、観測点の直下からの反射波と見なすことができないため、補正（DMO補正など）が必要になる。さらに、背斜や向斜・断層・岩塩構造など対象となる地下構造が複雑になると、水平多層構造の仮定に基づいたNMO補正・CMP重合法では正しいイメージが得られなくなり、より進んだマイグレーション処理が考案・適用されるようになってきた。初期には傾斜面に関する対応が重点的になされ、重合後時間マイグレーション（post-stack time migration）の開発、さらにDMO補正処理へと進展した。前者は、NMO補正・CMP重合後の記録に対して傾斜を考慮しながら反射イベントを再配置する方法で、後者は重合前の記録に対し、傾斜を持った層構造を考慮してゼロオフセット記録を作る手法であり、その後にCMP重合を行う。しかし、これらの手法は速度の側方変化を考慮しておらず、極端な水平方向の速度構造変化を生じる岩塩の貫入や逆断

層構造のイメージングには適切ではなかった。このため、重合前マイグレーション（pre-stack migration）による高精度化、深度マイグレーション（depth migration）による側方への速度変化への対応が進められた。

重合後マイグレーションは、NMO補正やDMO補正処理を含むCMP重合後に行われる。重合効果によりS/N比の向上したデータを扱うことができることと、データ量が減少するため計算時間が節約できることが利点である。反面、重合処理を施した時点で、水平成層構造や単傾斜構造を仮定しているために、各地震記録に含まれている有意な情報の一部が失われてしまう可能性があるという欠点がある。これに対し重合前マイグレーションでは、重合による変形を受ける前の地震記録に対して反射イベントを地下の反射点に「移動する」ため、高精度なイメージが得られる。

一方、深度マイグレーション（Schultz & Sherwood, 1980, Judson *et al.*, 1980 など）は、あらかじめ速度モデルを仮定し、波動伝播を計算するため、速度構造の変化に柔軟に対応することができる。速度モデルが正しいものであれば、逆断層や岩塩構造のような場合でも、鮮明なイメージを得ることが可能である。また、時間マイグレーションでは時間断面が出力されるのに対し、深度マイグレーションでは、深度断面が出力されるため、実際の深度での地下構造の把握が可能となる。さらに、深度マイグレーションでは、深度領域でイメージを速度モデルと対比しながら結

図1 重合後深度マイグレーション（上図）と重合前深度マイグレーション（下図）との比較：重合前深度マイグレーションの方が、ソルト下部の反射（図中の矢印）がより鮮明に現れている。

果を評価することができるため、信頼性の高い深度断面および速度モデルを得ることができる。

以上、概観したように、マイグレーションは、重合後/重合前時間マイグレーション、重合後/重合前深度マイグレーションに大きく分けることができ、重合前深度マイグレーション (pre-stack depth migration, PSDM) は、現在のところ、反射法地震探査のイメージング技術として最も進んだものといえる (図1)。

1980年代前半のイメージング技術においては、重合後時間マイグレーションが主流であった。その後、計算機の進歩とともに重合前の大量データを扱うDMO補正、重合前時間マイグレーションが主流となってきた。特に重合前時間マイグレーションは、地下速度の不均質性が大きな場合でも比較的安定したイメージが得られるという利点もあり、現在でもよく用いられるイメージング法である。深度マイグレーションは時間マイグレーションより処理時間がかかり、速度モデルの構築が前もって必要であるといったように、コスト高の印象があったが、計算機の処理速度の向上や計算アルゴリズムの整備により、1980年代後半以降急速に普及してきている。特に重合前深度マイグレーションは、より複雑な構造を持つ地域での石油探鉱の必要性に応えるようになってきた。

3. 重合前深度マイグレーション

現在、重合前深度マイグレーションのアルゴリズムとしてはキルヒホッフ型マイグレーション (Schneider, 1978) が一般的である。重合後深度マイグレーションではよく用いられるFK法や差分法では入力データが規則正しく等間隔に並んでいる必要がある。しかし、重合前のデータは発震点・受振点配置が不規則な場合が多く、特に三次元データの場合は不規則になるのが通例である。キルヒホッフ型マイグレーションは入力データの発震点・受振点配置に関して制限がないためこの問題点を回避することができる。本稿ではキルヒホッフ型マイグレーションについてその原理を簡単に説明する。詳細に関しては、物理探査学会 (1998) を参照されたい。

キルヒホッフ型深度マイグレーションでは、まず、速度モデルを構築する。その後、その速度モデルを使って、観測の発震点、受振点からの走時計算を行う。次に、走時結果に基づいて、各地震記録の反射イベントを深度断面に振り分ける。最後に、深度断面の各点で重合を行うといった処理ステップを踏むことになる。

まず、マイグレーションの原理を簡潔に説明する。一般に、地表の1点で反射イベントを観測した場合、その反射波がどの方向から到来してきたかは不明である。そこで、地下の全方位から到来したと仮定して、いったん、反射点の可能性のある点、すなわちその反射イベントが観測された時刻に相当する等走時面に、反射波の振幅を振り分ける。重合後マイグレーションでは発震点と受振点が同じ点で取られた記録 (ゼロオフセット記録) に補正がされているため、地下速度が一定の場合、等走時面は観測点を中心

図2 マイグレーションの原理：時刻Tでの反射イベントの振幅を発震点から受振点までの走時がTとなる点に振り分ける。地下の地震波速度が一定の場合、重合後マイグレーションでは発震点 (受振点と同じ点) を中心とした半円に相当し (a)、重合前マイグレーションでは、発震点と受振点を焦点とする楕円に相当する (b)。

にした半円を描くことになる (図2 (a))。これに対して、重合前マイグレーションでは、発震点と受振点が離れているため、発震点と受振点を焦点とする楕円形になる。(図2 (b))。全地震記録に関して、この様な円または楕円に反射イベントの振り分けを行うと、真の反射点では、反射イベントが重なり振幅が強調される一方、その他の点では、ランダムな反射イベントが重なることになるため、統計的に弱められる。このようにして、真の反射点を深度断面に見いだしていくプロセスがマイグレーションの基本原理である。図3に背斜構造の二次元モデルを示す。このモデルのもとで合成されたゼロオフセット記録を図4に示す。このデータにキルヒホッフ型マイグレーション処理を施した結果が図5である。足し合わせの結果、構造が反射面として形成されていくのがわかる。

図3 二次元背斜構造モデル

図4 合成地震記録：発震点と受振点が一致するゼロオフセット記録。

図5 ゼロオフセット記録を用いたキルヒホッフ型深度マイグレーションの結果。

上記では、地下速度が一定で、地震波が直線経路上を進むと仮定して説明したが、実際の深度マイグレーションの場合には、速度モデルを構築した上で、発震点から地下空間内の任意の点までの走時と受振点からその点までの走時をより精度良く求め、その合計走時にあたる地震記録上のシグナルをその振幅や位相に補正を加えた上でこの点に振り分ける（図6）。この操作を地下空間内のすべての点で行うと楕円に似た形状の等走時面上に反射波イベントがマッピングされていく。さらにこの一連の操作を全地震記録に対して行い、足し合わせていくことで反射面がイメージングされていく。

キルヒホッフ型マイグレーションでは、発震点または受振点からの走時計算が大切な役割を果たす。速度モデルに対する走時計算の手法は、差分法（たとえば、Schneider Jr. *et al.*, 1992 など）による手法と波線を追跡していく手法（ray-tracing）の2種類に大別できる。差分法で走時を計算

図6 深度マイグレーションの原理：地下のある点（P）において、発震点からの走時（ T_s ）と受振点からの走時（ T_r ）を計算後、合計走時（ $T = T_s + T_r$ ）を求める。それらを発震点・受振点とする地震記録の時刻 T での信号の振幅を点 P に移動する。

する手法は比較的短時間で計算でき、また全ての格子点で走時を求めることができる、などの利点がある。しかし速度の境界面では速度の速い層を伝播する屈折波が発生し、マイグレーションに必要な反射走時が求まらなくなるという問題がある。これに対し波線追跡法は計算に時間がかかるが精度は高い。初動走時の求まらない領域、いわゆる shadow zone が発生するという問題点があるが、通常何らかの内挿操作により走時を近似計算する。最近では、波線密度をある範囲に保つように生成消滅させながら波線を計算し、隣り合う3本の波線より波面を構成することで、shadow zone を作らない手法（wave-front construction 法、例えば Vinje, 1996）も開発されている。近年の三次元地震探査データに対する深度マイグレーション技術においては、高精度のイメージング結果を求める要求が高いことから、差分法より計算時間を要しても精度の高い波線追跡法による走時計算が利用されることが多い。

4. 速度モデル

重合前深度マイグレーションは地下速度構造の形状をモデルとして与えることで、複雑な地震波伝播の影響を補正し、正しい地下のイメージを得る手法である。深度マイグレーションは時間マイグレーションに比べてはるかに速度モデルに対して敏感であり、最終的に得られるイメージング結果の品質は速度モデルによって決定されるといっても過言ではない。つまり、速度モデルが真の速度構造からかけ離れるに従い、得られるイメージが急速に劣化してしまう。一方、この「敏感さ」を利用すれば、速度モデルをPSDMの結果との整合性を比較することで良否を判断し、より精度の高い速度モデルを構築することができる。

重合前深度マイグレーションで用いる速度モデルの構築には、残差ムーブアウト法やコヒーレンシーインバージョン法がよく用いられる。前者は、まず初期モデルによる深度マイグレーションを行い、各反射点に対応する地震記録のギャザー（データの集合）を出力する。このギャザー上で反射イベントが同じ深度にそろっていれば、速度モデルが適切と判断し、そろわない場合は、その誤差の度合いから、与えた速度モデルに修正を施す方法である。後者は、地下の構造をある程度仮定した上で、推定される範囲で速

度を変化させて走時を計算し、観測点毎に反射の振幅が大きくなるような速度を選択する手法である。これらの方法はモデル構築の初期段階で用いられ、地層毎に浅部から深部へと徐々にモデルを決定していく「はぎとり」法のアプローチをとっている。ある程度モデルが構築された段階では、反射波トモグラフィーなどの数値解析的な手法によって全体的な修正を加えるのが一般的である。

重合前深度マイグレーションの速度解析による速度推定は、速度モデルと深度マイグレーション結果の整合性を保ちながら行うため、時間のかかる困難な作業であるが、最終的には深度断面での正確な速度モデルを得ることができる。求められた速度モデルは、石油探鉱において坑井データや地質情報など異種データを統合して、精度の高い貯留層モデルを構築する際に、基礎モデルとして用いられている。

5. 今後の展望

現状の重合前深度マイグレーション技術では、まだ解決できないイメージング上の課題も存在し、更なる精度向上

の必要性も指摘されている。各種の重合前深度マイグレーションアルゴリズムの中で、現在最も一般的に使われている手法はコストパフォーマンスの良いキルヒホッフ型マイグレーションであるが、極端に複雑な速度構造の場合には単一経路の走時計算に基づく情報の欠落や振幅や位相の点に関して信頼性の問題がある。一方、差分法マイグレーションのアルゴリズムはいかなる速度構造にも対応できる上、振幅・位相をも正しく考慮することのできるため、規則的な発震点・受振点配置のデータにしか適用できないこと、及び膨大な計算時間を必要とするなどの制限があるものの、実用化に向けて開発が進められている。キルヒホッフ型マイグレーションとの比較を図7 (Dai *et al.*, 2002) に示す。

異なる視点からの研究として、媒体の速度異方性を考慮したイメージング技術の研究・開発がコロラド鉱山大学のCWPコンソーシアム等において進められつつある (CWP, 2000)。そして、現に異方性を仮定せず推定した速度でのマイグレーションでは正確な地質構造のイメージングができない事が実証された例もある (Schultz, 1999)。

Kirchhoff PSDM image

Wave equation PSDM image

図7 波線理論に基づくキルヒホッフ型重合前深度マイグレーション（上図）と波動論に基づく重合前深度マイグレーション（下図）の比較 (Dai *et al.*, 2002 より引用)

表1 マイグレーションの分類

Type	Image area	Lateral velocity variation	Computation cost	Velocity model
Post-stack time migration	time	mild	very low	not so accurate
Pre-stack time migration	time	mild	high	not so accurate
Post-stack depth migration	depth	strong	low	accurate
Pre-stack depth migration	depth	strong	very high	accurate

また、近年のデータ取得技術の発達に伴って、陸上および海底での多成分反射法地震探査データが取得されるようになってきている。特に、震源で発生したP波が地層境界面でS波に変換し、受振点においては水平動成分として観測される波、すなわちPS変換波が注目されている。PS変換波を使ったイメージングは、地下の弾性波（特にS波）特性を把握する上で有用な情報を与えるものである。

6. おわりに

反射法地震探査データによる地下構造イメージング技術として、低コストの反面、適用可能な速度構造が水平成層に近いものに限定されるNMO補正およびCMP重合法から、高コストの反面、複雑な速度構造にも対応可能な重合前深度マイグレーションに至るまでさまざまな種類の手法が開発されてきた。マイグレーション処理は、CMP重合処理を前段階として必要とする場合としない場合、また、得られる地下構造イメージが時間あるいは深度領域のいずれかによって表1に示す4つの方法に分類することができる。すでに述べたように、CMP重合処理は構造が単純な場合に適しており、重合前深度マイグレーション処理は構造が複雑な場合まで取り扱える処理である。重合前深度マイグレーション処理は計算コストが大きく、かつ、速度モデル構築も容易ではないため、地下構造の複雑さの度合いによって最適な手法を選択して利用すべきである。

今後の反射法地震探査による石油探鉱や地下構造探査においては、従来以上に複雑な構造を対象とした三次元調査が増えてくることは確実であり、それとともに、高精度なイメージング結果、速度モデルが要求されるであろう。重合前深度マイグレーションに代表される高精度なイメージング技術の必要性がますます増大するものと考えられる。

Gray *et al.* (2001) および Biondi (2007) では、マイグレーションの手法や課題、最新の成果がまとめられており、一読することをすすめる。

謝 辞

本稿の執筆にあたっては、石油資源開発(株)青木直史氏、(株)地球科学総合研究所 中島義成氏に協力をいただいた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- Biondi, B. L., 2007 : Concept and Applications in 3D Seismic Imaging, 2007 : Distinguished Instructor Short Course, pp.243, Soc. Expl. Geophys.
- 物理探査学会, 1998 : 物理探査ハンドブック 手法編 第1章 反射法地震探査, pp.114.
- CWP, 2000 : Colorado School of Mines CWP Annual Report, 357pp, Colorado School of Mines.
- Dai, N., Willacy, C. N., Pascual R. V., Gochioco, J. M., Sun Y. and Mecham, B.B., 2002 : 3D wave equation PSDM optimizes and improves imaging of subsalt prospects, *The Leading Edge*, 21, 1224–1226.
- Gray, S. H., Etgen, J., Dellinger, J. and Whitmore, D., 2001 : Seismic migration problems and solutions, *Geophysics*, 66, 1622–1640.
- Judson, D. R., Lin, J., Schultz, P. S. and Sherwood, J. W. C., 1980 : Depth migration after stack, *Geophysics*, 45, 376–393.
- Schneider, W. A., 1978, Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 43, 49–76.
- Schneider Jr., W. A., Ranzinger, K. A., Balch, A. H., and Kruse, C., 1992 : A dynamic programming approach to first arrival traveltimes computation in media with arbitrarily distributed velocities, *Geophysics*, 57, 39–50.
- Schultz, P. S. and Sherwood, J. W. C., 1980 : Depth migration before stack, *Geophysics*, 45, 361–375.
- Schultz, P., 1999 : The Seismic Velocity Model as an Interpretation Asset, Second Annual 1999 Distinguished Instructor Short Course, Soc. Expl. Geophys.
- Vinje, V., Iversen, E., Astebo, K. and Gjoystdal, H., 1996 : Estimation of multivalued arrivals in 3D models using wavefront construction—Part 1, *Geophysical Prospecting*, 44, 819–842.