

ポスト CDP 重合法！？重合速度解析をともなう散乱重合法による 地下構造イメージング

東京大学工学部総合試験所 松島 潤

東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 六川修一

1. はじめに

通常の反射法地震探査における探査対象は使用する波長に比べて十分大きな長波長不均質構造である。短波長不均質構造がイメージングに及ぼす影響を評価した例として、Gibson and Levander(1988)や Emmerich et al.(1993)などがあるが研究例としては少ない。

短波長不均質構造における散乱現象は観測記録上では見掛け上ランダムノイズとなって現れ、記録上の信号である反射波イベントをマスクしてしまい、記録の S/N 比を低下させる。従来より今日まで反射法地震探査の分野では S/N 比を向上させるデータ処理技術として CDP 重合法が適用されてきているが、成層構造を仮定している等の欠点もある。ここでは CDP 重合法の欠点を克服し、なおかつ CDP 重合法より S/N 比を向上させるためのデータ処理について述べる。

2. 短波長不均質構造における波動現象

地殻の弾性的性質は小規模なランダム性を有していることは、例えば速度検層の測定より認識することができる。一般的に、速度検層により得られる速度変化はマクロ速度構造と、ランダムな短波長成分を含む速度構造とに大きく分類することができる。反射波を解析対象とする地殻構造イメージングに限って言えば、短波長不均質構造がイメージングに及ぼす影響として以下の項目が考えられる。

- (1) 散乱減衰により、反射波のエネルギーが弱まる。
- (2) 反射波走時がばらつく。
- (3) 直接波起因の散乱波が反射波をマスクする。

松島・他(1998)は図1に示すような自己相関関数によって特徴付けられるランダム媒質(ガウス型、標準偏差5%、相関距離を変数)において、卓越波長の2倍以下の相関距離を有する短波長不均質速度構造においては(3)の効果が支配的であることを示唆した(図2)。

ここで問題となるのは、不均質性により生じた散乱波は地殻構造イメージングを行う際に信号として利用できるのか、あるいはイメージングを阻害する雑音として捉えるべきか、という点である。この点を判断するための重要な指標として、波動場の多重散乱性があげられる。波動場の多重散乱性は不均質性サイズと波長との関係に依存する。現在広く地殻構造イメージングに用いられるデータ処理技術の多くは一次反射あるいは一次散乱に基づいている。Matsushima et al.(1997)は図3に示したモデルを用いた数値実験により一次散乱に基づいたデータ処理における、不均質性サイズと

波長との相反性を示唆した。図3のモデルにおいて3種類の中心周波数(50, 100, 200 Hz)を使用して一次散乱仮定に基づいて散乱重合を行った(結果を図4に示す)。図4における結果を比較すると、波長が短ければ分解能の良いイメージングできるが、S/N比の低い重合記録となる。逆に波長が長いとS/N比の高い重合記録が得られるが、イメージングの分解能が悪くなる。これはこの場合における不均質領域において短い波長ほど多重散乱を起こしやすいためである。ここで適用した散乱重合法は一次散乱仮定に基づいたデータ処理であるため、波動現象として多重散乱が卓越してくると、一次散乱仮定が成立しなくなるために、イメージング精度が低下する。

多重散乱が卓越した波動場を用いてイメージングする場合は、イメージング過程において多重散乱を考慮する必要があるが、現実的には容易ではない。本来散乱波は観測記録上においてコヒーレントなイベントになるはずであるが、多重散乱が支配的になると観測記録上において見掛け上ランダム性を呈する。このような状況では、雑音として捉えた方が良いのではないかというのが現在の筆者らの認識である。すなわちコヒーレントな反射波イベントが短波長不均質構造により励起される見掛け上インコヒーレント(ランダム)な散乱波によりマスクされ、観測記録のS/N比が低下する状況が生ずる。

3. 重合速度解析をとともなう散乱重合法による地下構造イメージング

石油探査とともに発展してきた反射法地震探査は石油開発分野に限らず、地殻構造探査、活断層調査等にも盛んに適用されており、探査対象の深部化とともに、深部探査能力、構造分解能力の向上を目指して、研究開発が進められてきた。このような発展の背景には観測技術ならびにデータ処理技術の向上があったが、とりわけデータ処理技術としてはCDP重合法の導入が最も重要であった。CDP重合法は、共通の反射点における複数の反射記録を取得し、伝播距離の異なるこれらの記録をNMO(Normal Move Out)補正し、最終的に加算し、信号である反射波を強調する方法であり、1950年代にMayneにより提案された。しかしながら、CDP重合法の問題点は、データ処理を行う際に、成層構造を仮定しているため、複雑な構造に対応できないことである。近年、このようなCDP重合法の欠点が指摘され、CDP重合法に代わる技術として、重合前マイグレーション法の研究開発が盛んに行われるようになった。重合前マイグレーション法は既存の速度場を用いることにより、CDP重合法を介さず、直接的に地下構造をイメージングする技術である。しかしながら、重合前マイグレーション法は、以下の問題点を有しているため現在のところ実用化には至っていない。

- ・速度場推定の問題
- ・これまでのCDP重合法をベースにしたデータ処理体系とのギャップが大きい。

このような状況により、1960年代にCDP重合法が紹介されて以来、今日に到るまでCDP重合法をベースにしたデータ処理法が主に適用されているのが現状である。本研究では従来のCDP重合法と重合前マイグレーション法の欠点を克服し、なおかつそれぞれのデータ処理の有する利点を生かしたデータ処理法を開発することを目的

とする。開発するデータ処理法を”重合速度をともなう散乱重合法”と呼び、以下の性質を有する。

- (1) 既存の速度場を必要としない。
- (2) 非成層構造でも解析できる。
- (3) 従来の CDP 重合法ベースのデータ処理体系に基づいて処理が行える。
- (4) CDP 重合法に比べて S/N 比の高い重合断面が得られる。

以上の性質の中で特に(4)の性質が重要である。松島・他(1999)は水平でフラットな反射面をイメージング対象として、CDP 重合法と散乱重合法とでどちらが S/N 比の高い重合断面が得られるか、また両者の間で、最良の S/N 比を与える最適な重合範囲について考察した。図 5 を用いて重合範囲を説明し、CDP 重合法と散乱重合法の違いを説明する。図 5 において一枚のフラットな反射面に対して波動が入射し、鏡面反射する様子(太線矢印)と散乱(実線矢印)する様子を示している。CDP 重合法は鏡面反射波のみを解析対象とし、散乱重合法は各点において散乱波を仮定して解析を行う。

散乱重合法を適用する際の応用として、重合するトレースを選択することができる。この考え方はマイグレーション処理におけるマイグレーションアパチャーと等価な考え方である。図 5 に示すように網掛け部分のトレースは、鏡面反射波を中心として任意の角度範囲内に含まれるトレースで、これらのトレースを利用して重合記録を作成できる。このような選択による散乱重合を行うことにより CDP 重合法と散乱重合法との両者の間のギャップを柔軟に埋める処理が行える。このように考えると、図 5 における(以下、重合範囲と呼ぶ)の値が小さいときは CDP 重合寄りの処理になり、重合範囲の値を大きくしていくと散乱重合寄りの処理になると理解することができる。言い換えると、CDP 重合法は散乱重合法の範疇の特別な場合(重合範囲が無限小)に相当すると理解できる。

図 6 は一枚の水平でフラットな反射面をイメージング対象として、重合範囲を変化させたときの S/N 比の挙動を示す(ノイズとしてランダムノイズを付加した)。図 6 より CDP 重合法に比べて散乱重合法の方が S/N 比の高い記録が得られることがわかる。この点に関しては、ホイヘンスの原理に基づけば、反射面は散乱点の集合であると考えることができるので、反射面をイメージングする作業の本質は一つの散乱点をイメージングする作業に帰着される。すなわちイメージングの基本はホイヘンスの原理における時間軸を逆にした波動の逆伝播と捉えることができる。このような観点に立てば重合範囲を大きく設定することはホイヘンスの原理に対する近似度を向上させることに相当する。散乱重合法は CDP 重合法に比べてホイヘンスの原理に対する近似度が良いため、CDP 重合法に比べて S/N 比の高い重合記録を得ることができる。

また図 6 より CDP 重合法と散乱重合法の間で S/N 比のピークを与える最適な重合範囲が存在し、そのピークを与える重合範囲の値はリッカー波形の中心周波数に依存することがわかる。この点に関しては、フレネルゾーンが原因であり、いわば波形の冗長性により、みかけ上の信号強調効果が生じるためである。フレネルゾーンに含まれるトレースのみを重合するように重合範囲を設定すれば、S/N 比のピークを得ること

ができる。

図7に桑名断層において地質調査所によって取得された反射法地震探査データに対して CDP 重合ならびに散乱重合法を適用した結果を示す。

参考文献

Emmerich, H., Zwieliich, J. and Muller, G., 1993, Migration of synthetic seismograms for crustal structures with random heterogeneities, Geophys. J. Int., 113, 225-238.

Gibson, B. S. and Levander, A. R., 1998, Modeling and processing of scattered waves in seismic reflection surveys, Geophysics, 53, 466-478.

松島 潤, 六川 修一, 横田 俊之, 宮崎 光旗, 加藤 淑史, 1998, ランダムな速度不均質性が重合処理に及ぼす影響について, 物理探査学会第99回学術講演会講演論文集, 6-10.

Matsushima, J., Rokugawa, S., Yokota, T., Miyazaki, T., 1997, Cross-well imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with velocity analysis, Butsuri-Tansa, 50, 107-122.

松島 潤, 六川 修一, 横田 俊之, 宮崎 光旗, 加藤 淑史, 1999, 坑井間散乱重合法による坑井間反射面イメージング能力についての検証, 物理探査, 印刷中.

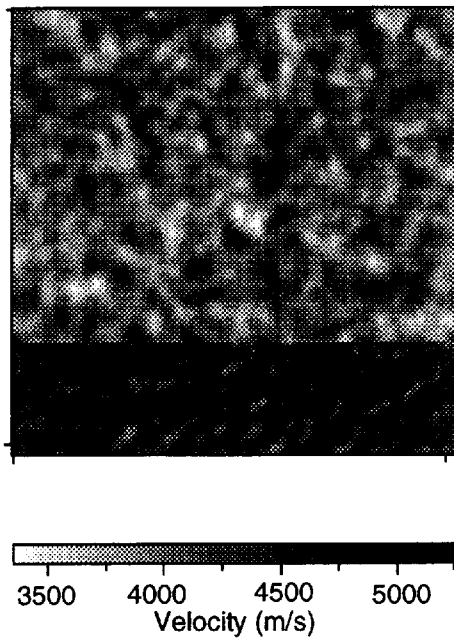





図1 ランダム媒質モデル
(ガウス型、標準偏差5%、相関距離は変数)

-  反射波の散乱
減衰効果
-  反射波走時の
ゆらぎ効果
-  直接波起因の散乱波が
反射波をマスクする効果

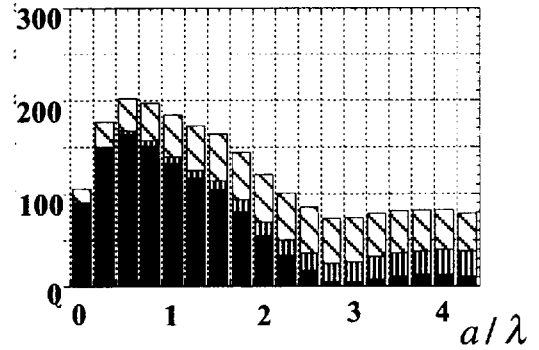


図2 ランダム媒質が反射波重合処理に及ぼす
影響因子の配分 (a: 相関距離、 λ : 卓越波長)

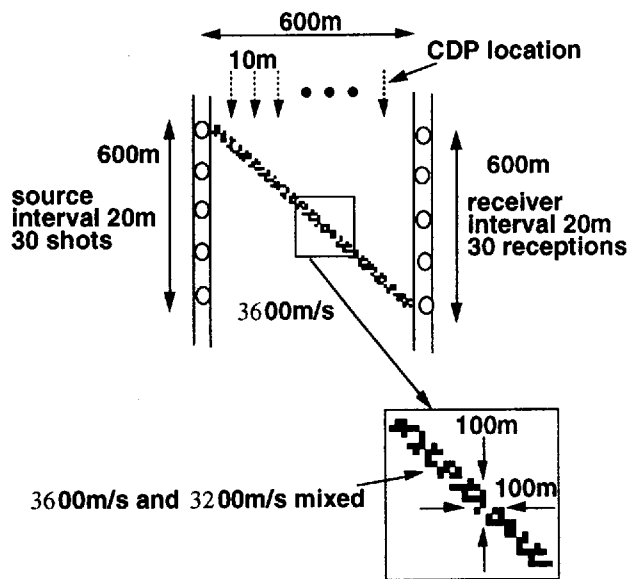


図3 数値モデル

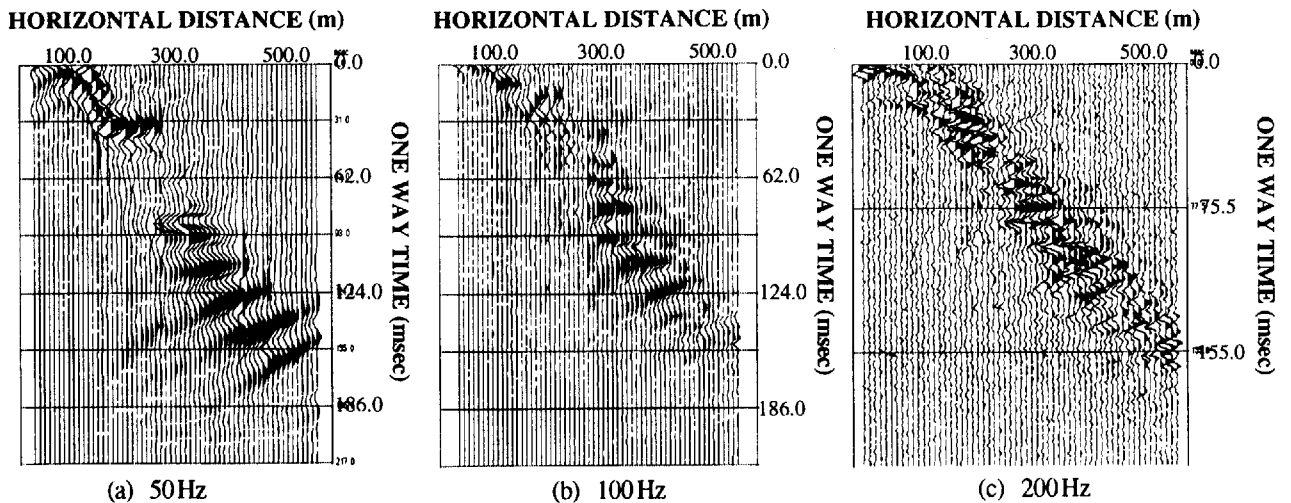


図4 図3のモデルに対して一次散乱仮定に基づいて散乱重合処理を行った散乱重合断面

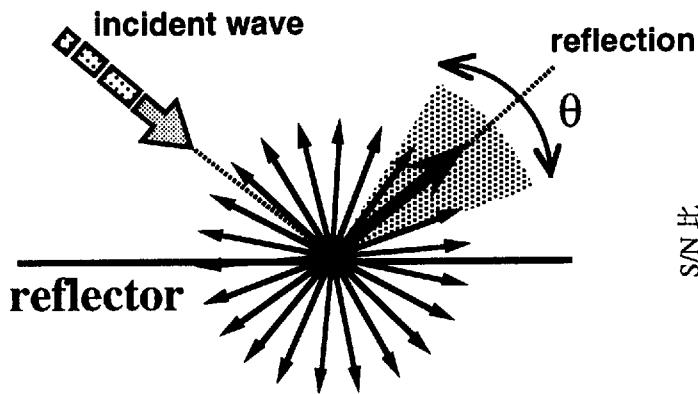


図5 重合範囲による選択的重合

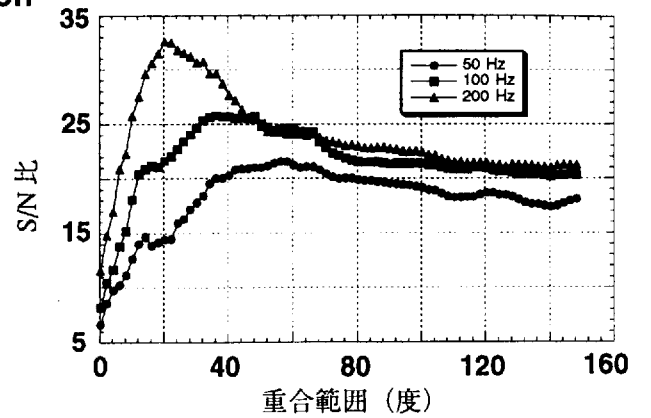


図6 重合範囲を変化させたときのS/N比の変化

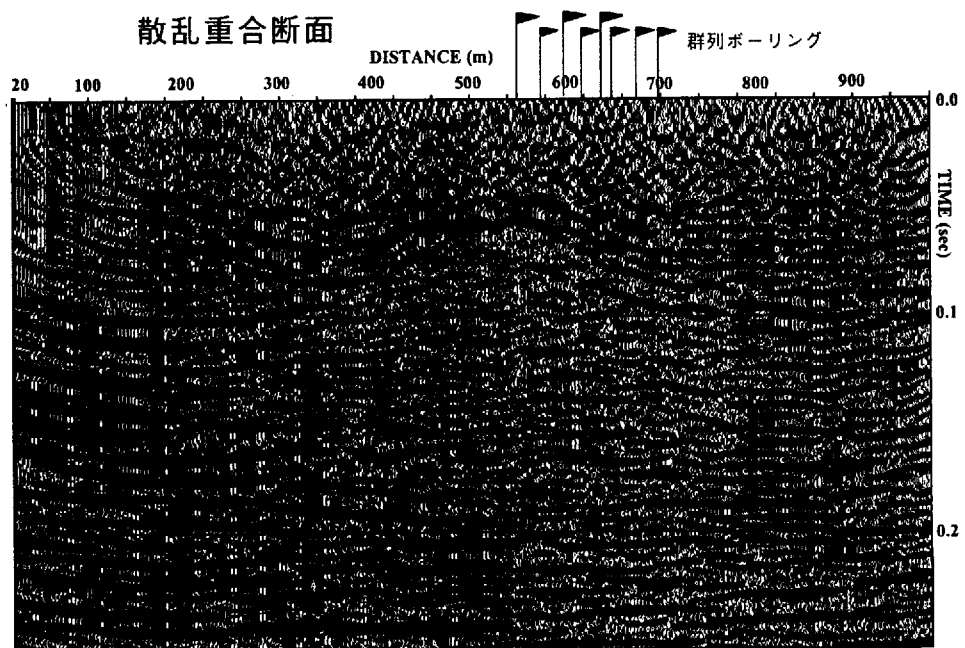
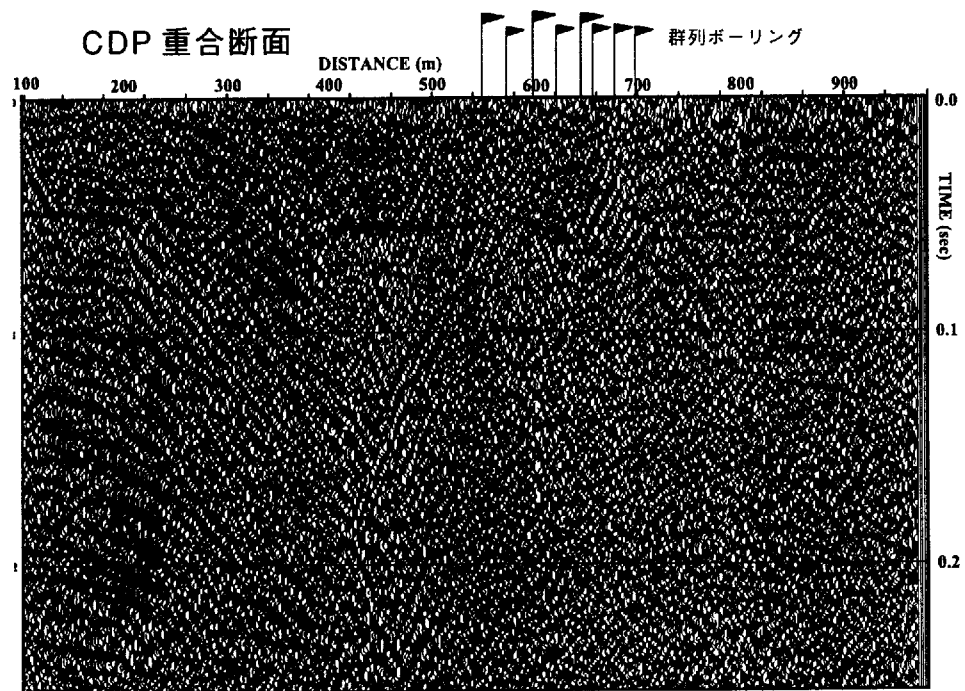


図7 桑名断層で取得された反射法地震探査記録に対する CDP 重合断面 (上図) と散乱重合断面 (下図)