

地震波干渉法概説

白石和也* 松岡俊文** 川中卓*

Review of Seismic Interferometry

Kazuya SHIRAISHI*, Toshifumi MATSUOKA** and Taku KAWANAKA*

Abstract

We review seismic interferometry with an example of a numerical simulation. A cross-correlation of two seismic records at different receivers yields a virtual source record that corresponds to the seismic response observed at one receiver due to the source at another receiver location. By changing the combination of cross-correlations, as many virtual source records as the number of receivers used in an observation can be generated. Synthesized virtual source records have useful information for subsurface imaging or characterization of the Earth. Using this technique, we can use background seismic noise as a signal, and we can investigate the subsurface with controlled sources and an ingenious deployment of receivers adapted to the environment of a target field. By optimizing of data acquisition and processing method for the virtual source record, seismic interferometry can be widely applied to interesting problems in the Earth science.

Key words : seismic interferometry, cross-correlation, Green's function, virtual source record, seismic exploration

キーワード : 地震波干渉法, 相互相関, グリーン関数, 仮想震源記録, 地震波探査

I. はじめに

地震波干渉法 (Seismic Interferometry) は、物理探査において近年注目を集める信号処理技術である。地中の波動場を異なる二地点で同時に観測した場合、それらの地震波形の相互相関処理を行うことにより、一方を仮想的な震源に他方を受振点とした場合の波形を合成することができる。そして、合成された波形記録を用いることで地下構造のイメージングや物性解析など種々の解析を行うことが可能である。本技術は、これまでノイズと考えられてきた地震波を信号として利用し地

下情報の取得を可能にする画期的な物理探査技術とされる (Curtis *et al.*, 2006)。2006年には米国物理探査学会 SEG の発行する雑誌 *Geophysics* において地震波干渉法の特集号が生まれ、理論から種々の応用に関して取りまとめられた (Wapenaar *et al.*, 2006)。その前後から現在にかけて、受動的な地震観測記録および人工的な制御震源の観測記録に対するフィールドデータへの適用事例が数多く報告されている。受動的観測記録に対する適用例として地中の雑震動観測記録 (Hohl and Mateeve, 2006; Draganov *et al.*, 2007) や自然地震 (Daneshvar *et al.*, 1995; Campillo and Paul,

* (株) 地球科学総合研究所

** 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

* JGI, Inc.

** Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

2003; Roux, 2005; Shapiro *et al.*, 2005, Abe *et al.*, 2007; 松岡ほか, 2007) への適用のほか, 広帯域地震計で観測された海洋からの雑音(脈動)(Sabra *et al.*, 2005), 海中の音響ノイズ(Roux *et al.*, 2004), さらに日震(helioquake)(Rickett and Claerbout, 1999)への適用例などがある。また, 微動アレイ探査への応用の検討(横井・Margaryan, 2008)もなされている。一方, 人工的な震動を利用した例として, 発破震動(Tsutsumi, 1992), ドリルビット信号(Schuster *et al.*, 2004)やTBM(Tunnel Boring Machine)の震動(Poletto and Petronio, 2006), トンネル内を移動する震源の利用(白石ほか, 2008a), VSP記録(Yu and Schuster, 2006; Willis *et al.*, 2006; Hornby and Yu, 2007; 白石ほか, 2008b)や地表の震源と坑井内の受振点による観測記録(Bakulin and Calvert, 2006; Minato *et al.*, 2007)に対する適用事例などが挙げられる。

Claerbout (1968) は一次元成層構造において地中にある震源からの波を地表で観測した透過波記録の自己相関により, 地表に震源および受振器を設置したとする反射波記録を合成できることを示した。この手法は, 地下に存在する震源位置が空間的にランダムな波動場の受動的観測から反射波記録を合成して地下を可視化する方法であり, 人の目が太陽光により対象物を認識するのに例えて“Acoustic Daylight Imaging”と称されるようになった(Rickett and Claerbout, 1999; Wapenaar *et al.*, 2002; Schuster *et al.*, 2004)。その後, Wapenaar (2003) や Wapenaar *et al.* (2004) は, この理論を三次元音響媒質に拡張し, 地表の受振点群で地中の震動を透過波として観測した場合, 異なる受振点における透過波記録の相互相関をとることにより, 基準とするある受振点位置を仮想的な震源として他の受振点群で観測を行ったかのような反射波記録を合成できることを示した(図1)。さらに, Wapenaar (2004) および Wapenaar and Fokkema (2006) は, 相反定理と時間反転不変の原理に基づき, 損失のない音響媒質および弾性媒質において地震波干渉法の一般的な理論を導出し, 二点の異なる受振点で波動場を観測

した記録の相互相関により, 一方の受振点位置に与えられたインパルス入力に対する他方の受振点位置における地震波応答であるグリーン関数を合成できることを示した。この理論は Draganov *et al.* (2004, 2006) の数値シミュレーションにより確認された。一方, Bakulin and Calvert (2004, 2006) による仮想震源法(Virtual Source Method)は人工的な震源を積極的に利用し, 坑井内の受振器列による観測記録の相互相関から仮想的な坑内震源記録を合成し貯留層イメージングの実例を示した。また, 上述の決定論的な媒質(deterministic media)に対して, 散乱性媒質(diffusive media)においても同様に, 異なる点で観測された波形記録の相互相関から受振点間のグリーン関数が求められることも示された(Weaver and Lobkis, 2002; van Tiggelen, 2003; Derode *et al.*, 2003a, b; Malcolm *et al.*, 2004; Snieder, 2004)。

II. 地震波干渉法

1) 一般化された地震波干渉法

Wapenaar and Fokkema (2006) は, 震源と受振点を入れ替えても観測される地震波形が同じであることを示す相反定理と時間を反転しても物理法則が変化しないという性質を示す時間反転不変の原理を基に, 音響波動場および弾性波動場における地震波干渉法の基礎式を導出した。ある波動場において無数の震源で囲まれた領域を考え, その内部に異なる二つの受振点があるとすると, 各震源 \mathbf{x} による波動場を異なる二点 \mathbf{x}_A と \mathbf{x}_B で観測したとき, 地震波干渉法では, これら二点の地震記録 $G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, t)$ と $G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, t)$ の相互相関をとり, すべての震源 \mathbf{x} についてその相関結果を積分すると, 点 \mathbf{x}_B を震源として点 \mathbf{x}_A で受振したときの地震波形 $G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, t)$ を合成することができる。

均質媒質中に散乱点のあるモデル(図2a)を用いた数値シミュレーションにより地震波干渉法の原理を確認することができる。均質媒質中($V_p = 2,500$ m/s)に受振点AとBと散乱点Cがあり, 震源はそれらを取り囲む円上を $\phi = 0^\circ$ から $\phi = 360^\circ$ まで 1° 刻みで移動しながら発震を行うとす

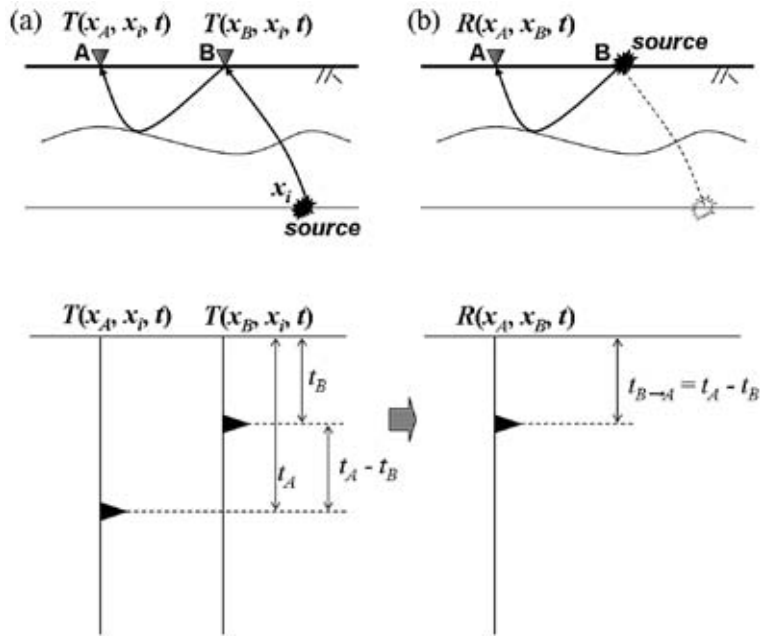


図 1 地震波干渉法概念図. 異なる二つの受振点で観測された地震記録 $T(x_A, x_i, t)$ と $T(x_B, x_i, t)$ の相互相関により, 仮想震源記録 $R(x_A, x_B, t)$ を合成することができる. 震源から点 B に到達した波 (走時 t_B) とその波が地表面で反射し地中を伝播して点 A に到達した反射波 (走時 t_A) の相互相関により, 走時 $t_A - t_B$ に点 B を震源として点 A で観測される反射波が合成される.

Fig. 1 Conceptual diagram of seismic interferometry. A virtual source record $R(x_A, x_B, t)$ is calculated from a cross-correlation of seismic records at different receiver points, $T(x_A, x_i, t)$ and $T(x_B, x_i, t)$. The reflected wave is generated at time $t = t_A - t_B$ by cross-correlating the transmitted wave ($t = t_B$) at receiver B and the wave at receiver A ($t = t_A$) is propagated in the ground after downward reflection at B.

る。震源関数にはピーク周波数 45 Hz のリッカーウェーブレット (ガウシアン関数の二階微分である零位相波) を用いる。各震源に対する点 A および点 B における地震波記録をそれぞれ図 2b と c に示す。A1 と B1 は各震源から点 A と点 B に直接到達した波, A2 と B2 は点 C において散乱して点 A と点 B に到達した波である。次に, 震源を共通とする地震トレースの相互相関を行った結果を図 2d に示す。これらの図で縦軸が走時 t , 横軸は震源の位置を示す角度 ϕ を表す。図 2d で, $A_i \times B_j$ は図 2b, c における A_i ($i = 1, 2$) と B_j ($j = 1, 2$) の相互相関により生ずる波を表す。この相互相関結果を横軸 ϕ に沿って積分した結果を図 2e に示す。この合成された波形は点 A と点 B

の間の仮想震源記録であり, 時刻 $t = 0.4$ s ($t = -0.4$ s) 付近に直接波, 時刻 $t = 0.6$ s ($t = -0.6$ s) 付近に散乱点からの波が確認できる。相互相関と波動の性質から図 2e において $t > 0$ は点 B を震源として点 A で受振した場合, $t < 0$ は点 A を震源として点 B で受振した場合の地震波形となっている。図 2f は $t > 0$ の波形について真の波形と合成波形の比較を示しており, ほぼ完全な波形合成ができたことを確認できる。

図 2d において, 角度 ϕ ごとに相互相関から得られた波形は, 角度 ϕ の変化に対してその出現時刻が連続的に変化している。その中で点①~④の付近では位相 (走時) の変化が緩やかとなり, その周辺で振幅は足し合わされ, それ以外の部分で

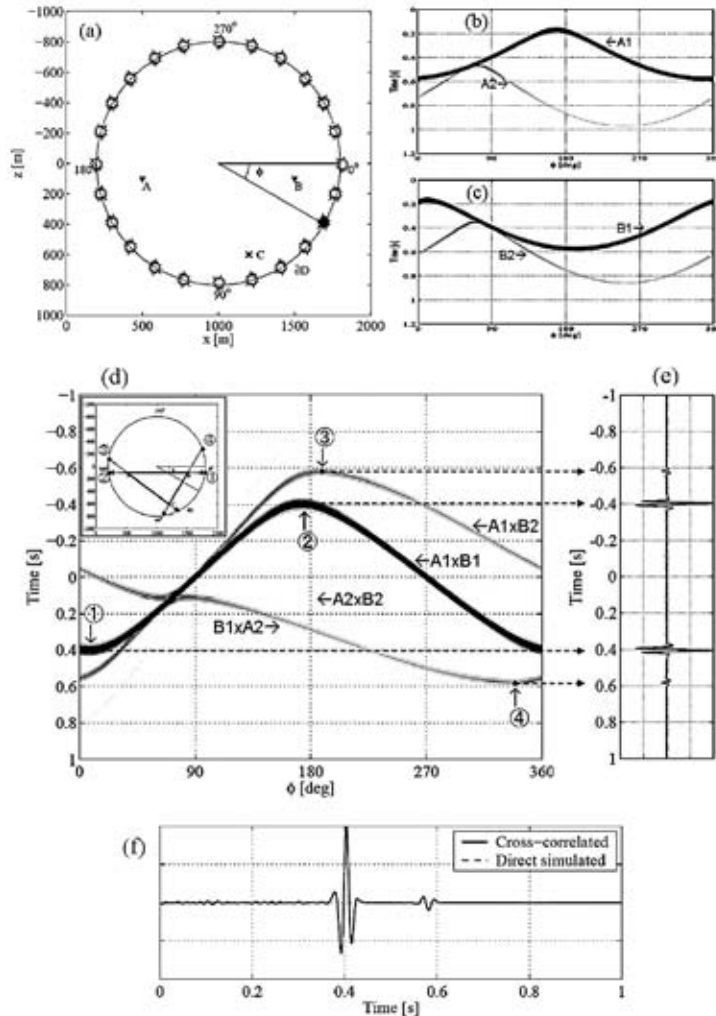


図2 均質媒質中に散乱点のあるモデルにおける地震波干渉法の数値シミュレーション。(a) 二つの受振点AとBおよび散乱点Cが無均質媒質中 ($V_p = 2,500$ m/s) にあり、それらを含む半径800 mの円上を震源が移動する。(b) および(c) は震源の移動に対する点Aおよび点Bにおける観測記録。A1とB1は震源からの直接波、A2とB2は点Cからの散乱波である。(d) は各震源に対する点Aおよび点Bの地震記録の相互相関結果を示す。(e) は(d)の相互相関結果を ϕ について積分した結果。相互相関処理により、(d)には{A1, A2}と{B1, B2}の組み合わせにより生じる4つの波形が存在し、停留位相(点①, ②, ③および④)周辺の波が積分結果(e)に寄与する。(f)は合成された地震波応答(実線)と真の地震波応答(点線)の比較。ほぼ完全な応答が計算された。

Fig. 2 Numerical simulation of seismic interferometry in a homogeneous medium with a diffractor. (a) Two receivers, A (500 m, 100 m) and B (1,500 m, 100 m), and a diffractor C (1,200 m, 600 m) are in an infinite homogeneous medium, $V_p = 2,500$ m/s. Source moves along a circle with an 800 m radius. (b) and (c) show synthetic seismic records at receivers A and B respectively. A1 and B1 are direct waves from each source, and A2 and B2 are scattered waves at C. (d) A cross-correlogram calculated from a cross-correlation of each trace in (b) and (c). There are four combinations of the cross-correlations of seismic responses {A1, A2} and {B1, B2}. Points ①, ②, ③, and ④ are stationary points that are effective for simulating a pseudo-seismic response. (e) The seismic response simulated by integrating cross-correlogram (d) in the horizontal direction. (f) Comparison between simulated seismic response (solid line) and true seismic response (dashed line) at A due to a source at B.

は互いに波が打ち消しあう。このため積分に対して大きく寄与するこの位相の停留する点を、停留点(stationary point)または停留位相(stationary phase)と呼ぶ(Snieder *et al.*, 2006)。波動伝播を幾何学的に捉えた場合、この停留点は仮想的な震源となる点を通りもう一方の受振点へ至る波線に対する震源の位置に対応する。停留点に関する考察は、仮想震源記録合成に寄与する震源と受振点の位置関係を知ることができ、地下探査の現場においては、震源と受振点の配置が決まれば仮想震源記録のカバーするエリアの推定、逆に、情報を得たい地下の対象領域に応じた適切な震源受振点の配置決定に有効である。

2) 地震波干渉法の利用

一般化された地震波干渉法理論は、受振点の位置や数、次元には依存しない。多数の受振点を用いて波動場の観測を行った場合、基準とする地震トレースを順次変えて相互相関処理を行うことによって、すべての受振点が仮想的な震源になることができ、設置した受振点の数だけの仮想震源記録が得られる。また、調査地域に広く受振点を配置することで三次元的な利用も可能である。

地震波干渉法を用いた地下探査を実施するためには、観測波形記録の相互相関による仮想震源記録合成と、合成された記録に対するデータ処理の二つのステージに分けられる。例えば、地表の受振器群による透過波記録に対して地震波干渉法を適用した場合には、合成された波形記録は固定展開により各受振点位置で発震を行った反射波記録に相当している。したがって、合成記録に対して従来の反射法地震探査で実施されるデータ処理を施すことにより地下構造イメージングを行うことができる。また、地中(孔内)に設置された複数の受振器群による仮想震源記録の解析や、合成記録に含まれる表面波成分を対象とする解析ができる。

ところで、相互相関処理により合成される仮想震源記録は、震動源の特性(種類, 周波数), 震源受振点の位置関係による波の到来方向, などの影響を大きく受ける。したがって、まず、仮想震源記録を合成する際には、利用できるデータとそ

うでないデータを整理して、合成記録のS/Nを向上させることが重要である。特に、受動的観測記録の利用においては、観測される波動場の適用可能な問題について事前に検討しておくことが大切である。例えば、相澤ほか(2008)は震動源と適用範囲について例をまとめた。また、理想的な仮想震源記録合成のためには、自然震源と人工震源とにかかわらず全方位的に広範囲にわたりランダムかつ高密度に震源が存在していることが望ましい。しかし、現実の観測では少なからず震源分布に偏りがあることを考慮する必要がある。次に、仮想震源記録の利用においては、合成された記録に対する評価作業も重要である。単純なS/Nの評価に加え、理想的な観測環境では相殺されるはずの位相が実際には震源受振点の関係や境界条件のために生ずる偽像を同定することが、誤った解析結果や解釈を避けるために大切である。したがって、今後、調査対象に応じた最適な利用法の提唱、本手法に適した観測技術や処理解析技術の開発が望まれる。

III. おわりに

地震波干渉法の理論は、一見すると無意味に見える記録に隠れた意味のある情報を引き出せるということを示したものである。本稿では、地震波干渉法についてシミュレーション例とともに概説した。地震波干渉法は、相反定理と時間反転普遍の原理に基づき、異なる受振点で観測され地震記録について相互相関処理を行うことで、ある受振点位置を仮想的な震源とする波形記録を合成することができる。地震波干渉法のもつ最大の特徴のひとつは、相互相関を行う地震トレースの組み合わせを変えることにより、観測に利用した受振器の数だけの仮想震源記録を合成できることである。そして、合成された波形記録は、従来のデータ処理法または新しい処理技術によって種々の解析が可能となる。今後、適用事例を積み重ね地震波干渉法の利用や処理における最適化が進み、多分野での工夫を凝らした地震波干渉法の有意義な利用が期待される。

文 献

- Abe, S., Kurashimo, E., Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T. and Kawanaka, T. (2007): Interferometric seismic imaging of crustal structure using scattered teleseismic waves. *Geophysical Research Letters*, **34**, L19305, doi:10.1029/2007GL030633.
- 相澤隆生・山中義彰・伊東俊一郎・木村俊則・尾西恭亮・松岡俊文 (2008): フィールドでの観測実データを用いた地震波干渉法の適用条件に関する検討. 物理探査, **61**, 121-132.
- Bakulin, A. and Calvert, R. (2004): Virtual source, New method for imaging and 4D below complex overburden. *SEG Expanded Abstracts*, **23**, 2477-2480.
- Bakulin, A. and Calvert, R. (2006): The virtual source method: Theory and case study. *Geophysics*, **71**, SI139-SI150.
- Campillo, M. and Paul, A. (2003): Long-range correlation in the diffuse seismic coda. *Science*, **299**, 547-549.
- Claerbout, J.F. (1968): Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, **33**, 264-269.
- Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R. and Wapenaar, K. (2006): Seismic interferometry: Turning noise into signal. *The Leading Edge*, **25**, 1082-1092.
- Daneshvar, M.R., Clay, C.S. and Savage, M.K. (1995): Passive seismic imaging using microearthquakes. *Geophysics*, **60**, 1178-1186.
- Derode, A., Larose, E., Tanter, M., de Rosny, J., Tourin, A., Campillo, M. and Fink, M. (2003a): Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, **113**, 2973-2976.
- Derode, A., Larose, E., Campillo, M. and Fink, M. (2003b): How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves. *Applied Physics Letters*, **83**, 3054-3056.
- Draganov, D., Wapenaar, K. and Thorbecke, J. (2004): Passive seismic imaging in the presence of white noise sources. *The Leading Edge*, **23**, 889-892.
- Draganov, D., Wapenaar, K. and Thorbecke, J. (2006): Seismic interferometry: Reconstructing the earth's reflection responses. *Geophysics*, **71**, SI61-SI70.
- Draganov, D., Wapenaar, K., Mulder, W., Singer, J. and Verdel, A. (2007): Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements. *Geophysical Research Letters*, **34**, L04305.
- Hohl, D. and Mateeve, A. (2006): Passive seismic reflectivity imaging with ocean-bottom cable data. *SEG Expanded Abstracts*, **25**, 1560-1563.
- Hornby, B.E. and Yu J.Y. (2007): Interferometric imaging of a salt flank using walkaway VSP data. *The Leading Edge*, **26**, 760-763.
- Malcolm, A.E., Scales, J.A. and van Tiggelen, B.A. (2004): Extracting the Green's function from diffused, equipartitioned waves. *Physical Review E*, **70**, 015601 (1-4).
- 松岡俊文・田中見枝子・白石和也・橋原省吾・阿部信太郎 (2007): 地震波干渉法による地下の可視化. 月刊地球, **29**, 421-426.
- Minato, S., Onishi, K., Matsuoka, T., Okajima, Y., Tsuchiyama, J., Nobuoka, D., Azuma, H. and Iwamoto, T. (2007): Cross-well seismic survey without borehole source. *SEG Expanded Abstracts*, **26**, 1357.
- Poletto, F. and Petronio, L. (2006): Seismic interferometry with a TBM source of transmitted and reflected waves. *Geophysics*, **71**, SI85-SI93.
- Rickett, J. and Claerbout, J.F. (1999): Acoustic daylight imaging via spectral factorization: Helioseismology and reservoir monitoring. *The Leading Edge*, **18**, 957-960.
- Roux, P., Kuperman, W.A. and the NPAL Group (2004): Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean. *Journal of the Acoustical Society of America*, **116**, 1995-2003.
- Roux, P., Sabra, K.G., Gerstoft, P. and Kuperman, W.A. (2005): P-wave from cross-correlation of seismic noise. *Geophysical Research Letters*, **32**, L19303 (1-4).
- Sabra, K.G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W.A. and Fehler, M.C. (2005): Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, **32**, L03310, doi:10.1029/2004GL021862.
- Schuster, G.T., Yu, J., Sheng, J. and Rickett, J. (2004): Interferometric/daylight seismic imaging. *Geophysical Journal International*, **157**, 837-852.
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L. and Ritzwoller, M.H. (2005): High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, **307**, 1615-1618.
- 白石和也・尾西恭亮・伊東俊一郎・山中義彰・相澤隆生・松岡俊文 (2008a): 地震波干渉法による地下構造イメージング技術の実用化にむけた実験的研究. 物理探査, **61**, 101-110.
- 白石和也・松岡俊文・松岡稔幸・田上正義・山口伸治 (2008b): 逆 VSP データに対する地震波干渉法の適用. 物理探査, **61**, 111-120.
- Snieder, R. (2004): Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, **69**, 046610 (1-8).
- Snieder, R., Wapenaar, K. and Larner, K. (2006): Spurious multiples in seismic interferometry of primaries. *Geophysics*, **71**, SI111-SI124.
- Tsutsui, T. (1992): Pseudoreflection profiling method: An efficient complement to CDP method. *Geophysical Prospecting*, **40**, 15-30.

- van Tiggelen, B.A. (2003): Green function retrieval and time reversal in a disordered world. *Physical Review Letters*, **91**, 243904 (1–4) .
- Wapenaar, K. (2003): Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, **68**, 1756–1759.
- Wapenaar, K. (2004): Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation. *Physical Review Letters*, **93**, 254301 (1–4).
- Wapenaar, K. and Fokkema, J. (2006): Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, **71**, SI33–SI46.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Thorbecke, J. and Fokkema, J. (2002): Theory of acoustic daylight imaging revisited. *SEG Expanded Abstracts*, **21**, 2269–2272.
- Wapenaar, K., Thorbecke, J. and Draganov, D. (2004): Relationship between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media. *Geophysical Journal International*, **156**, 179–194.
- Wapenaar, K., Draganov, D. and Robertson J. (2006) : Introduction to the supplement on seismic interferometry. *Geophysics*, **71**, SI1–SI4.
- Weaver, R. and Lobkis, O. (2002): On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: Pulse-echo using thermal phonons. *Ultrasonics*, **40**, 435–439.
- Willis, M.E., Lu, R., Campman, X., Toksöz, M.N., Zhang, Y. and de Hoop, M.V. (2006) : A novel application of time-reversed acoustics: Salt-dome flank imaging using walkaway VSP survey. *Geophysics*, **71**, A7–A11.
- 横井俊明・Margaryan, S. (2008) : 地震波干渉法理論に基づく SPAC 法の再検討. *物理探査*, **61**, 87–99.
- Yu, J. and Schuster, G.T. (2006): Crosscorrelogram migration of inverse vertical seismic profile data. *Geophysics*, **71**, S1–S11.

(2008年7月28日受付, 2008年9月4日受理)