

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：10101  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21540425  
 研究課題名（和文） 地殻の微細不均質性の新しいイメージング法および物性量の推定法の開発とその応用  
 研究課題名（英文） Development and application of new imaging methods for small-scale heterogeneities in the crust and estimation of their physical properties  
 研究代表者  
 蓬田 清（YOMOGIDA KIYOSHI）  
 北海道大学・大学院理学研究院・教授  
 研究者番号：70230844

研究成果の概要（和文）：高周波地震波形記録から地殻内の微細不均質構造による散乱波をアレイ解析などの手法を組み合わせ、その強度の空間分布に留まらず、散乱理論・シミュレーションとの比較により物性量の推定の可能性を示した。また、地震学では不均質性が低速度と高速度に対応して位相が遅延・先行のどちらも生じるという光学・電磁気学・音響学といった他分野には見られない特徴から、散乱による時間遅延だけでなく、時間反転も含めた新しい概念を考察した。

研究成果の概要（英文）：With array analysis of high-frequency seismic wave records scattered by small-scale heterogeneities in the crust, researchers have imaged their spatial distributions in the past. We show it possible to estimate some of their physical properties based on wave phenomena. In addition, we pay attention to the fact that there are both phase delay and advance, corresponding to scatterings of low- and high-velocity heterogeneities, respectively, which is in contrast with phase delay only in other research fields such as optics, electromagnetism and acoustic waves. In such a case, scattered waves are not always caustic but it can be explained by the concept of time-reversed phases depending on velocity anomalies of heterogeneities.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2730,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数理系

科研費の分科・細目：地球惑星科学、固体地球科学

キーワード：微細不均質性、微細不均質性、散乱理論、数値実験、イメージング

1. 研究開始当初の背景

走時などの地震波伝搬時刻の測定から地球内部での3次元空間的な地震波速度の分布は、地震波トモグラフィーとして30年近くも改良が加えられ、より高い分解能の分布が求められつつある。一方で、1Hz以上の高周波数地震波記録は非常に複雑で、確率論的

モデリングのみであったが、過去10年近くの理論・観測・データ解析法の発展により、散乱理論に基づく微細構造の空間分布として、徐々にその分布も明らかにされてきた。しかし、それは「散乱係数・強度」の相対的な空間分布を示すだけであり、その実体についての情報はこれまで全く手

づかずの状態であった。

特に近年は地殻などで検出された不均質性と地震発生場（火山噴火に結びつくマグマの輸送も含む）が密接に関係することが多くの傍証から示唆され、不均質性の物理的性質の解明は重要な問題として認識されるようになってきた。

## 2. 研究の目的

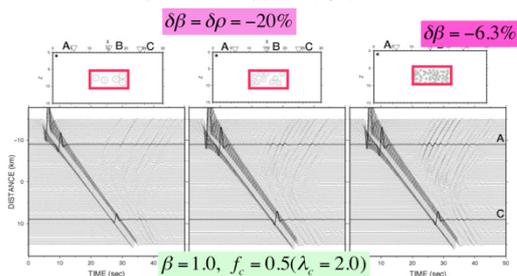
観測される高周波地震波波形記録のうち、アレイ解析等により、地殻内の微細不均質性による散乱波は同定される。ここでは、時間・周波数領域のスペクトログラムの強度のピークを検出し、これを3次元的な散乱体（微細不均質性）の位置へマッピングする。この作業を繰り返し、3次元空間分布が求まる。スペクトログラムのピークは時間・周波数領域で2次元的に分布し、散乱波によって広がりや形状が異なる。これを散乱理論と数値シミュレーションによって比較することで、不均質性の何らかの物理量との関係が推定できるはずだ。

一方、光学・電磁気学・音響学などの散乱理論が高度に発展してきた分野では、散乱により常に散乱されない状態よりも伝搬が遅れる、すなわち位相の遅延が起こる。例えば、光は真空が最速で、不均質性の存在は常に遅くなることに対応する。しかし、地震学では基準の媒質に対して、不均質性は低速度だけでなく、おそらく同じ頻度で高速度である。散乱現象は基準となる背景速度分布からのずれと見なされ、それは伝搬時間を正負の両方に変動させる。一般的に散乱理論は位相遅延を伴った時間軸での因果律を第一原理として構築されてきた。だが、上のような特徴を持つ地震波の散乱現象は根本的な原理の違いがあるはずで、この点を理論・数値シミュレーションで定量的に考察する。

## 3. 研究の方法

不均質性の物性や、地震波散乱の因果律の考察には研究代表者が開発してきた境界積分法を用いる。この手法は背景媒質が複雑な場合は適応できないが、周波数毎の計算によるため、広帯域の周波数依存性を精度よく求めることができるため、本研究の目的に最適である。

図1にその一例を示す。これは2次元SH波において、一様な背景媒質にで円形の不均



質性が、数・大きさを規定してある領域内にランダムに分布させた場合の合成波形である。震源は左上の★で示した等方震源とする。この図の合成波形は中心周波数  $f_c$  のリカー波であるが、周波数領域での計算なので、自由に周波数範囲を選べるし、周波数毎の分散現象も精度よく求められる。

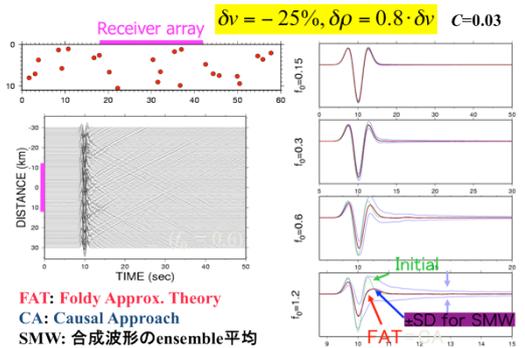
地震波散乱の因果律においては、このような数値シミュレーションの結果と、他分野で広く用いられている Foldy モデル (FAT と呼ぶ) と、因果律に基づく Kramers-Kronig 関係式による位相速度と振幅 (散乱減衰) の関係に基づく理論 (CA と呼ぶ) とも比較する。空隙が不均質の場合にはこれらは十分な精度で一致することが示されている (Kawahara et al., 2009)。

## 4. 研究成果

地震波に特有な因果律による散乱現象と、微細不均質性の物性量の推定、および補足的に得られた成果を示す。

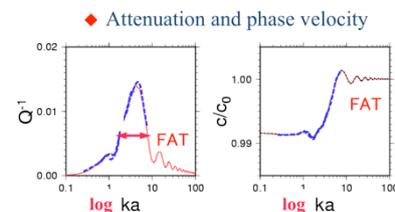
### (1) 低速度と高速度の散乱現象

下図の左上のように、一様な背景媒質に低速度の円形の不均質性がランダムに分布したモデルに鉛直したから平面波が入射した場合、上側の観測点での合成波形を左下に示す。散乱現象により直達波の到達



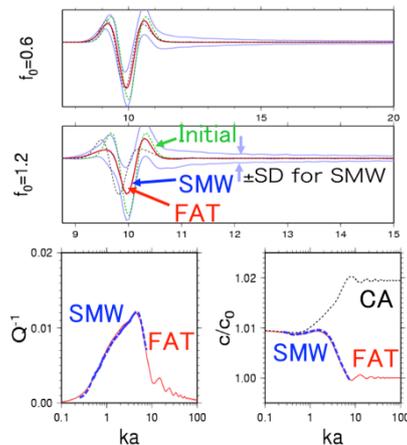
時刻が乱され、振幅は減少され、後続波にそのエネルギーが分配されている。異なった中心周波数の波形を重ね合わせて平均した波動場を右側に青線で示す。後続波は十分にランダムな振る舞いをするため、重ね合わせで消え、それはこの計算結果の妥当性を示している。

こうして重ね合わせた波形の直達波の振幅と位相を測定し、2つの理論 (赤が Foldy、黒破線が Causality による) と比較したのが下図である。振幅は減衰率の  $Q$



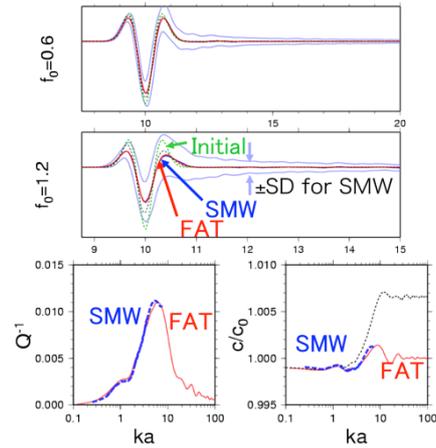
値を用いている。2つの理論と数値シミュレーションの結果は一致しており、これは位相遅延に基づいた従来の散乱現象の結果と全く同じである。

これに対して、下図は高速度の円形不均質性をランダムに分布させた場合の同様な合成波形と、振幅・速度（位相）の分散関係の比較である。Foldy（赤）と合成波形（青）は低速度の場合と同様に一致しているが、CAは速度の分散関係が全く逆である。言い換えれば、因果律を満たすには必然的に低速度の場合と同じく、高周波側が速度が大きくなってはいけませんが、実際には逆に遅くなっている。合成波形を見ても位相が先行していることがわかる。低速度の場合の波形と比較すると左右が逆、すなわち高速度では時間が反転した形となっている。



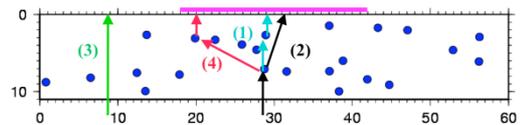
高周波数極限では波動場は背景媒質を伝搬するのに対して、低周波極限ではバルク体積比の各部分の速度の平均値で伝搬する。高速度不均質性がある媒質では、この図のFATや合成波形のようになり、波形の形も低速度の場合と逆になることは妥当である。そして、ボルン近似のような一次の摂動論的概念が適用できる条件ならば、低速度不均質性とちょうど位相遅延の符号を逆にした位相先行が高速度の場合には生じる。このように、時間反転の因果律ともいうべき振幅と位相（速度）の分散関係が成立するという極めて重要な結論が得られた。

次の図は、低速度と高速度の円形不均質性が混在した場合の合成波形と、振幅・位相の分散関係を示す。この場合は速度変化を同じにしているので、高周波極限ではやや低速度の不均質性の場合と同じ傾向を示すが、全体としては、分散が弱く、合成波形の形も時間軸にほぼ対称的で、振幅だけが減衰した様子となっている。位相の遅延と先行が同程度に起こったことを示唆する。スローネル（速度の逆数）の正負を同じレベルで変化させた不均質性をランダムに分布させたモデルにおいては、位相の分散がほとんどなく、波形が時間軸でほぼ対称的となり、上の説明をさら



に支持する。

しかし、速度変化の他にインピーダンス比に関する密度変化も含めると、振幅と位相の関係はそれほど簡単ではないことがわかった。いくつかの考察を重ねた結果、前方散乱が強い場合には時間反転を導入することでほぼ説明できるが、横方向の散乱強度が強くなる不均質性を含む媒質の場合は、単純な時間反転による予測値からのずれが大きくなる。ボルン近似的な一次散乱のみであれば不均質性の速度の大きさが位相の遅延・先行の大小にほぼ比例するが、多重散乱の度合いが大きくなるにつれて、単純な比例関係が崩れることに対応する。下の概念的な図で、低速度の不均質性の場合には直達波(3)に比べて散乱された他のすべての波は位相が遅延し、因果律が厳密に成り立つ。これに対して、高速度の場合には一次散乱波(2)は直達波(3)より位相が先行する。しかし、多重散乱成分では前方散乱波の重ね合わせの(1)はより位相が進むが、側方や後方散乱成分が入った(4)は例え高速度の不均質があっても伝搬経路が長くなって直達波(3)よりもむしろ位相が遅延する。



このように、高速度不均質性が入ると分散関係が単純な因果律では説明できないが、前方散乱が支配的な場合にはある程度の精度で成立することが説明された。このような知見は、研究代表者が知る限り他の分野でも十分に検討されておらず、地震学から一般的な波動伝搬の原理を提唱した意義は大きいと考える。

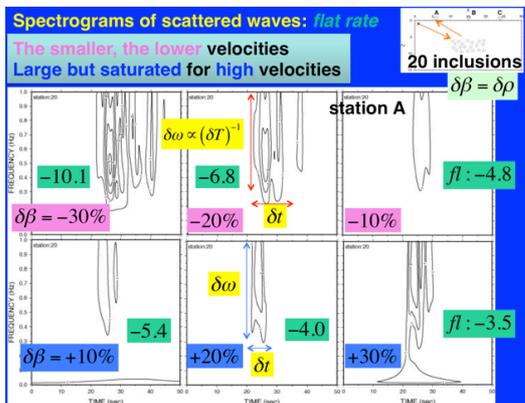
## (2) 不均質性の物性量の推定

散乱波を同定するために、高周波地震波記録のアレイ観測により、時間・周波数領域でのスペクトログラムのピークが一般

に用いられ、これが散乱体（微細不均質性）の強度として、その空間分布が求められる（Taira et al., 2007）。スペクトログラムの形状はさまざまなので、それを定量化するために、その時間領域での広がり（ピークの半値幅とここでは定義）、以下の2つのパラメータを導入する：(a)この2つの値の比である flat rate と、(b)積である area。スペクトログラムが時間軸に相対的に大きく広がり継続時間の長い散乱波は、flat rate が負（または小さい）に対応する。また、一つの散乱体からの散乱波の場合には、いかなる特性であっても時間領域と空間領域の広がり積は一定という波動の基本的性質（Heisenberg の不確定原理）から、area はほぼ同じ値となる。よって、area が大きい場合には複数の散乱過程が関与した波に対応する。

この2つのパラメータが散乱体の特性との関係を定量化するために、「研究の方法」で示した数値シミュレーションの結果を用いた。まず、散乱体として用いた円形不均質性の速度を背景媒質に比べて、低速度から高速度に変化させ、合成波形の散乱波の時間・周波数領域でのスペクトログラムの広がりを測定し、flat rate を求めた（下図）。低速度不均質性での散乱波の合成波形は、高速度の場合に比べて、継続時間が長い。周波数帯域での広がり（ピークの半値幅）は散乱体の大きさにほぼ規定されるので、flat rate は低速度では小さくなる。これは散乱波のエネルギーが低速度の不均質性の内部に部分的にトラップされるために継続時間が長くなるのに対して、高速度の場合には散乱波のエネルギーは外側へより大きくなり、継続時間が短いインパルス的な波形となる。ただし、下図の結果のように低速度では速度異常の大きさにより flat rate は系統的に変化するが、高速度では速度異常の強さを大きくしてもある程度の値で頭打ちして、観測波形の flat rate は大きくは変化しない。これは、時間領域の広がりがある幅よりは小さくなり得ない（周波数が有限なため）と考えられる。

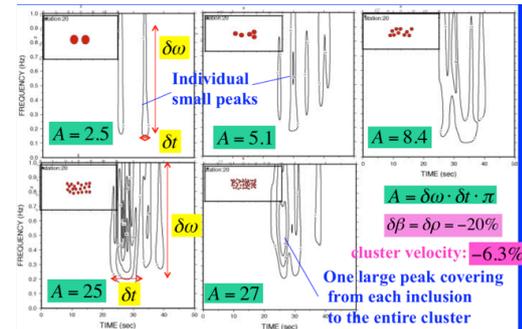
まとめると、flat rate を観測することで



不均質性の速度の大きさを推定することが可能であることが示された。

次に、領域全体としての不均質性の大きさを一定とし（下図の例では速度異常が-30%の低速度不均質性を用いて、全体を-6.3%と固定する）、これを構成する個々の円形不均質性の大きさと個数を変化させた媒質について、合成波形から area の値を求めた。左上の大きな2個の場合から下中央の小さな48個の場合まで、合成波形の area の値が増加していく。「研究の目的」の合成波形例でわかるように、全体の個数が少ないと、内部の個々の不均質性からの散乱波が個別に現れ、下図のスペクトログラムでは独立したピークとなり、結果として area の値は小さい。これに対して多数の不均質性で構成された場合には、個々の不均質性からの散乱波の他に相互作用した、いわゆる多重散乱の効果が支配的となり、クラスター全体が一つの不均質性の如く散乱波を生成する。こうして、時間・周波数領域のどちらにも広がりを持つスペクトログラムが形成され、area の値が大きくなっていく。

すなわち、area の値は不均質性内部の構造の複雑さに関係している。内部の階層性が高くなると、その値が大きくなっていく。



以上のように、flat rate と area という新しいパラメータを観測データから求めることで、その散乱体（微細不均質性）の物性量のいくつかを推定することが可能であることが示された。例えば、flat rate が小さく、area が大きい場合には、低速度で階層構造が大きな不均質性だと推定され、実際に仙台市近郊の長町利府断層ではそのような観測例があり、流体を含む細かな割れ目の集合体であることが強く示唆される。

### (3) 東北地震の発生過程の特徴

平成23年度においては、東日本大震災の多大な影響のため、この地震に関する研究に多くの時間を要するをえない状況となった。高周波数地震波の励起については、K/KiK-net の強震動波形記録を用いて、静的変位量との比較から断層面上で様々な周波数依存性を持つ励起源があること

を示した。また、同じ M9 クラスの超巨大地震でも、知られている世界の過去の数例と比較すると、今回の地震は極めて特異的な性質を有することが明確となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 小山順二、都筑基博、蓬田清、斜め衝突帯の巨大地震(1)相模トラフ、*北海道大学地球物理学研究報告*、査読無、**75**, 161-174, 2012.
- ② Ogiso, M., and K. Yomogida, Migration of tremor locations before the 2008 eruption of Meakandake Volcano, Hokkaido, Japan, *J. Volcanology Geotherm. Res.*, 査読有, doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.12.005, **217-218**, 8-20, 2012.
- ③ Yomogida, K., K. Yoshizawa, J. Koyama, and M. Tsuzuki, Along-dip segmentation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and comparison with other megathrust earthquakes, *Earth Planets and Space*, 査読有, **63**, 697-701. 2011.
- ④ Agata, Y., K. Yomogida, and K. Katsumata, A new method of hypocenter determination without clear seismic phases: Application to low-frequency seismic events beneath Tokachi-dake volcano, Hokkaido, Japan, *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 査読無, **74**, 67-88, 2011.
- ⑤ Yoshizawa, K., K. Miyake, and K. Yomogida, 3-D upper mantle structure beneath Japan and its surrounding region from inter-station dispersion measurements of surface waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, **183**, 4-19, doi:10.1016/j.pepi.2010.02.012, 2010.
- ⑥ Bourova, E., K. Yoshizawa, and K. Yomogida, Upper mantle structure of marginal seas and subduction zones in northeastern Eurasia from Rayleigh wave tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, **183**, 20-32, doi:10.1016/j.pepi.2010.06.007, 2010.
- ⑦ Osada, K., K. Yoshizawa, and K. Yomogida, Upper boundary of the Pacific plate subducting beneath Hokkaido, Japan, estimated from ScSp Phase, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, **183**, 63-72, doi:10.1016/j.pepi.2010.06.006 2010.

- ⑧ Yamada, R., I. Yamada, H. Shiraishi, S. Tanaka, Y. Takagi, N. Kobayashi, N. Takeuchi, Y. Ishihara, H. Murakami, K. Yomogida, J. Koyama, A. Fujimura, H. Mizutani, Capability of the penetrator seismometer system for lunar seismic event observation, *Planet. Space Sci.*, 査読有, **57**, 751-763, 2009.

- ⑨ Kawahara, J., T. Ohno, and K. Yomogida, Attenuation and dispersion of antiplane shear waves due to scattering by many two-dimensional cavities, *J. Acoust. Soc. Am.*, 査読有, **125**, 3589-3596, 2009.

[学会発表] (計 17 件)

- ① K. Yomogida, J. Koyama, K. Yoshizawa and M. Tsuzuki, Double Segmentation of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Uniqueness and Similarity to Other Megathrust Earthquakes, American Geophysical Union, 2011 Fall Meeting, 平成23年12月9日, Moscone Center, San Francisco, 米国.
- ② J. Koyama, K. Yoshizawa, K. Yomogida and M. Tsuzuki, Variability of Megathrust Earthquakes in the World, American Geophysical Union, 2011 Fall Meeting, 平成23年12月5日, Moscone Center, San Francisco, 米国.
- ③ 蓬田清・小山順二・吉澤和範・都筑基博、2011年東北地方太平洋沖地震における二重セグメント: その特異性と他の超巨大地震との比較、日本地震学会2011年秋季大会、平成23年10月13日、静岡県コンベンションセンター・グランシップ.
- ④ 小山順二・吉澤和範・蓬田清・都筑基博、2011年東北地方太平洋沖地震が明らかにした巨大地震の多様性、日本地震学会2011年秋季大会、平成23年10月13日、静岡県コンベンションセンター・グランシップ.
- ⑤ 蓬田清・平貴昭、散乱波の時間・周波数領域でのスペクトrogram形状と散乱体の物性量との関係、日本地震学会2011年秋季大会、平成23年10月13日、静岡県コンベンションセンター・グランシップ.
- ⑥ Koyama, J., K. Yoshizawa, K. Yomogida and M. Tsuzuki, 2011 Megathrust earthquake in Japan revealed existence of two types of great earthquakes, IUGG 2011 General Assembly, 平成23年7月7日, Melbourne Convention & Exhibition

Centre, オーストラリア.

- ⑦ 蓬田 清・吉澤 和範・小山 順二・都筑 基博、2011年東北地方太平洋沖地震と1964年アラスカ地震との類似性：他の超巨大地震との違い、日本地球惑星科学連合2012年連合大会、平成23年5月27日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑧ 蓬田 清・河原 純、高速度不均質性媒質での地震波伝搬における因果律からのずれと多重散乱の関係、日本地震学会2010年秋季大会、平成22年10月29日、広島国際会議場。
- ⑨ 升井 健吾・蓬田 清・山中 佳子、微視的断層パラメーターのスケーリング則：地震断層面のすべりの不均質性の特性化、日本地球惑星科学連合2010年大会、平成22年5月27日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑩ 吉澤 和範・三宅 一彰・蓬田 清、日本列島及び周辺域の3次元S波速度構造：表面波二点法によるアプローチ、日本地球惑星科学連合2010年大会、平成22年5月26日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑪ 阿形 葉・蓬田 清・勝俣 啓、明瞭なフェーズがない地震の新しい震源決定法：十勝岳火山体の地殻深部低周波地震への応用、日本地球惑星科学連合2010年大会、平成22年5月25日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑫ 小林 直樹ほか25名、SELENE-2月広帯域地震計の進捗、日本地球惑星科学連合2010年大会、平成22年5月24日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑬ 河原 純・斎藤 竜彦・蓬田 清、介在物分布を含む2次元媒質中のSHコーダ波エンベロープ：マルコフ近似理論と数値実験の比較、日本地震学会2009年秋季大会、平成21年10月23日、京都大学吉田キャンパス。
- ⑭ 蓬田 清・河原 純、不均質媒質での地震波伝搬における因果律：速度異常の正負と時間の流れ方向との関係、日本地震学会2009年秋季大会、平成21年10月22日、京都大学吉田キャンパス。
- ⑮ 阿形 葉・蓬田 清・勝俣 啓、波形の相互相関を用いたマスターイベント法による北海道の地殻深部低周波地震の震源決定、日本地球惑星科学連合2009年大会、平成21年5月20日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑯ 三宅 一彰・吉澤 和範・蓬田 清、表面波二点法を用いた日本列島および日本海下の3次元S波速度構造、日本地球惑星科学連合2009年大会、平成21年5月18日、幕張メッセ国際会議場。
- ⑰ 河原 純・蓬田 清、介在物分布を含む2次元媒質中のSHコーダ波エンベロープ、日本地球惑星科学連合2009年大会、平成21

年5月17日、幕張メッセ国際会議場。

〔図書〕(計3件)

- ① 蓬田 清, K. Aki&P.G. Richards: Quantitative Seismology, 「科学者の本棚」、岩波書店、pp. 263, 85-89, 2011.
- ② 藤野清志、蓬田清, 地球内部構造と構成物質, 「地球惑星科学入門」, 北海道大学出版会, pp. 427, 15-24, 2010.
- ③ 蓬田清, 地震はどこでなぜ起こる?, 「地球惑星科学入門」, 北海道大学出版会, pp. 427, 47-58, 2010.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://noreply.sci.hokudai.ac.jp/~yom>  
o

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

蓬田 清 (KIYOSHI YOMOYIDA)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：70230844

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

河原 純 (JUN KAWAHARA)  
茨城大学・理学部・准教授  
平 貴昭 (TAKA' AKI TAIRA)  
米国・カリフォルニア大学バークレー校・研究員