

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 25 年 6 月 28 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340132

研究課題名（和文） 地球内核境界の構造とダイナミクス 一半球構造の成因一

研究課題名（英文） Structure and dynamics of the Earth's inner core boundary
-The origin of hemispherical structure-

研究代表者

田中 聡（TANAKA SATORU）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号：60281961

研究成果の概要（和文）：

内核半球構造は少なくとも内核境界から下 400km まで及ぶ。内核東半球最上部における地震波の減衰は、内核最上部 200km に速度構造の揺らぎがあれば、説明できる可能性がある。東半球において内核表面で反射した波は、2Hz の高周波の方が 1Hz より大きくなる場合がある。内核表面の形態の安定性は内核の成長速度に依存する。拡散の非等方性は外核底部における運動エネルギー、ある境界条件では磁気エネルギーにも影響を与える。

研究成果の概要（英文）：

Hemispherical difference of the inner core reaches at least 400km below the inner core boundary. Attenuation of seismic wave passing through the Eastern hemisphere can be explained by velocity perturbation within the uppermost 200km of the inner core. The reflected waves at the inner core boundary in the Eastern hemisphere show that 2Hz components are larger than those of 1Hz. The stability of morphology at the inner core surface depends on the growth rate of the inner core. Diffusivity affects kinetic and magnetic (in some case) energies of the outer core flow near the inner core boundary.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：内核境界・内核成長・ダイナモシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地球核の中心に存在する内核は、鉄の結晶である。その体積は月よりやや小さく、地球の体積に対する割合は1%にも満たない。しかしながら、内核の構造を解明し、その成長過程を明らかにすることは、地球の熱史や地

球ダイナモのエネルギー源を理解する上で大変重要であると考えられている。

この約30年間にわたる地震学的研究によって、内核のP波速度は地球回転軸と平行に伝わる方が、赤道面に平行に伝わる場合より約3%速いという、内核異方性の概念が定着

した。近年は、異方性の地域性、深さ方向の変化について、さらなる追求が進んでいる。

研究代表者は約15年前に、地震学的解析から内核の半球構造を提唱した。しかし、地球自転軸対称を当然のものとして考察を進めていた内核異方性成因論にとっては、このような非対称な構造は全く想定外であった。そのため、半球構造そのものも地球ダイナミクスの研究者の間で懐疑的に受け止められてきた。

しかし最近、地球自由振動からも内核の半球構造が支持されるようになった。それと同時に、外核内部の特徴的な流れや、内核内部の自発的対流によって、内核が非対称に成長し半球構造を形成するという説が唱えられるようになった。

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究では以下のような内容に焦点を当てて研究を進める。

(1) 地震学的解析による内核境界近傍におけるさらに詳細な構造。(2) 3次元内核境界成長シミュレーションによる自律的・外因的パターン形成の検証。(3) より現実的なCMB熱流量分布による外核の流れと内核境界における成長速度との関係。

これらの研究課題で得られた成果を互いに随時フィードバックすることによって、内核半球構造の成因の謎に少しでも迫ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) PKP-Cdiff と PKP-DF の走時と振幅を用いた外核最下部と内核最上部（内核境界近傍）の構造の推定（田中）。

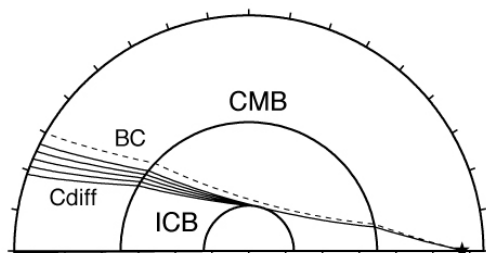


図1. PKP-Cdiff の波線。

① 内核境界直上を回折する PKP-Cdiff (図1) に着目し、走時と振幅を調べることによって、外核最下部におけるP波速度勾配と地震波減衰の地域性の有無を調べる。単独の観測点では観測点直下の構造の影響を取り除くことが困難なので、地震アレイまたは数百

キロメートル規模の観測網を構成する観測点の走時と振幅の異常値を遠地P波から推定して、PKP-Cdiff データを補正する。

② 観測点直下の異常を打ち消すことに有効な PKP-DF (図2) と PKP-Cdiff の走時差と振幅比を使って、外核最下部と内核最上部500km における速度構造と減衰構造を推定する。この波の組み合わせによって、以前より深い領域の内核構造を議論することが出来る。ただし、PKP-Cdiff の走時と振幅を正しく評価するために、Reflectivity method を用いる。

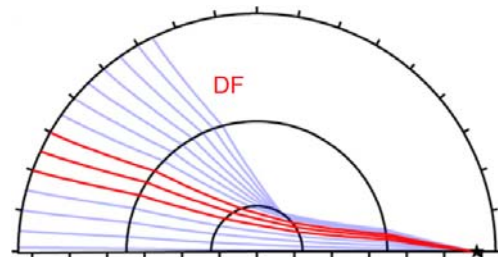


図2. PKP-DF の波線。赤い部分が PKP-Cdiff との組合せで解析できる深さ範囲。

③ 内核の減衰構造を地震波速度の不規則な揺らぎから生じた散乱によるものと解釈する。Reflectivity method による理論波形と観測波形を比較して、地震波速度の揺らぎの深さ範囲とその大きさを推定する。

(2) PKiKP と PcP のスペクトル比による内核境界の構造推定（田中）。

日本国内に展開されている高感度地震観測網 Hinet の記録から、内核境界からの反射波 PKiKP (図3) と核マントル境界からの反射波 PcP (図3) を探し出し、震源と構造の補正を施す。高周波 PKiKP の存在が指摘されているので、周波数領域で PKiKP/PcP 振幅比を調査する。

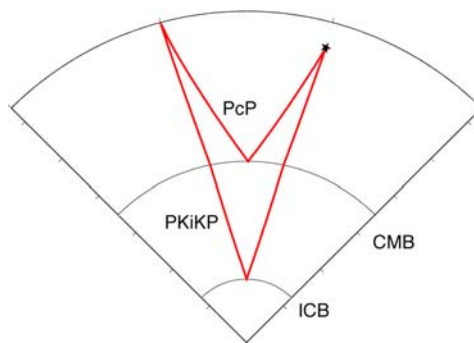


図3. PKiKP と PcP の波線。

(3) 地震観測の検討 (田中)

将来の地震観測計画を立てるために、最新の広帯域地震計を購入して、その性能を把握し、使用法の検討を行う。

(4) 内核境界の成長シミュレーション内核表面の安定性と外核最下部の流れ (清水)

①外核最下部に鉛直方向の流れ (鉛直方向のひずみ速度) が存在する場合について、内核表面の安定性を数理的に解析する (図4)。上昇流や下降流が存在する領域における, mushy layer の存在条件を求める。また、局所的な内核の成長速度による mushy layer の存在条件についても検討する。両者から、外核の鉛直方向の流れおよび内核の成長速度の差に

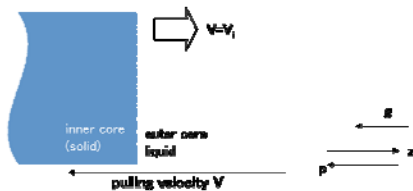


図4. 安定性解析の設定. 内核・外核境界に摂動を与えて成長率を調べる。

より、内核の東西半球にみられるような違いが作られるか調査する。

②内核表層の構造

内核表層における圧密効果ついて熱力学的に矛盾のないモデルを構築し、内核表層構造と熱流量他の物理量との関係を数値的に求め、内核の東西半球にみられるような違いが外核最下部の条件により作られるか調査する。

(5) ダイナモシミュレーション (松島)

①地球ダイナモの数値シミュレーションを実施することにより、内核の成長および運動に関連するパラメータの適否を検討する。

②地球ダイナモの数値シミュレーションを実施することにより、外核の流体運動を駆動するエネルギーについて検討する。

③内核回転を駆動する電磁トルクを取り入れた地球ダイナモシミュレーションを実施することにより、内核が半球構造となりうるかどうかを検討する。

4. 研究成果

(1) PKP-Cdiff と PKP-DF の走時と振幅を用

いた外核最下部と内核最上部 (内核境界近傍) の構造の推定 (田中)。

①複数の地震と観測網の組み合わせを解析した。南米の地震-日本の観測網、フィジーの地震-ヨーロッパ観測網、南米の地震-チベットの臨時地震アレイ、それぞれの観測網について、遠地P波から推定した観測点補正値を適用してPKP-Cdiffの走時と振幅の震央距離変化を求めた。しかし、その変化は想定していた外核最下部の地域変化から予想されるものより遥かに大きく、観測点直下よりさらに深い場所 (例えば上部マントル) の構造異常の影響を十分に除去できなかったと結論づけた (学会発表⑩)。

②これまでの研究で提案された内核境界近傍の地震波速度と減衰構造から予想される走時差と振幅比を観測値と比較した。

その結果、既存のモデルで、走時差と振幅比の全地球の平均に最も近い理論値を示すのが、ak135モデルであることがわかった。ak135モデルの内核構造に若干の修正を施した後で、東半球と西半球における速度モデルを推定した。その結果、東半球では、内核境界におけるP波速度が平均より0.5%速く、その違いは深さとともに線形に減少し、内核境界からの深さ400kmにおいて平均モデルに一致する (図5)。一方、西半球では、内核境界におけるP波速度は平均より0.9%遅く、深さとともに線形に減少する速度の違いは、内核境界からの深さ250kmにおいて平均モデルに一致する (図5)。一方、Q構造は、西半球のQ値が内核最上部450kmの範囲において約300-400なのに対し、東半球では内核最上部250kmでは約180、内核境界からの深さ範囲

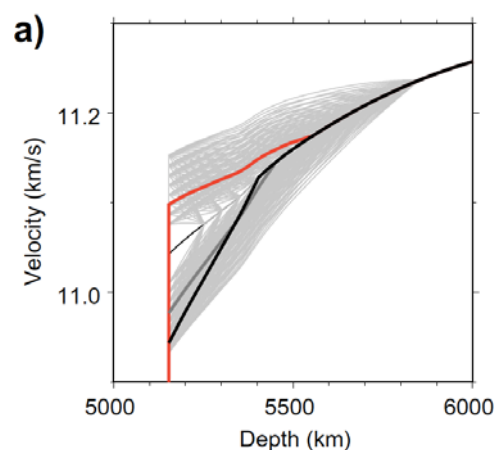


図5. 内核最上部のP波速度構造. 太い赤線が東半球、太い黒線が西半球の最適なモデル. 細い灰色の線が検討した速度モデル。

350km から 450km の範囲では約 1000 である。従来の認識では、東西半球の違いは内核最上部の極浅部ただか 100km 程度にしか及ばないと考えられてきたが、その違いは少なくとも 400km に及ぶことが示唆される。また、東半球の Q 構造は深さ変化が著しく、西半球の Q 構造は内核全体の平均値に近い。(雑誌論文③, 学会発表⑦, ⑨)

③上で求めた東半球の P 波速度構造に深さ方向にランダムな速度揺らぎを与える。内核最上部からの深さの範囲は 100km, 200km, 300km, 速度揺らぎの大きさは 1% から 7% を仮定した。

Reflectivity 法によって、波形を計算し、振幅比の震央距離変化を比較した結果、速度揺らぎの存在する範囲が 200km、速度揺らぎの大きさが 5% から 7% であれば、データを説明できることがわかった (図 6)。(雑誌論文①)

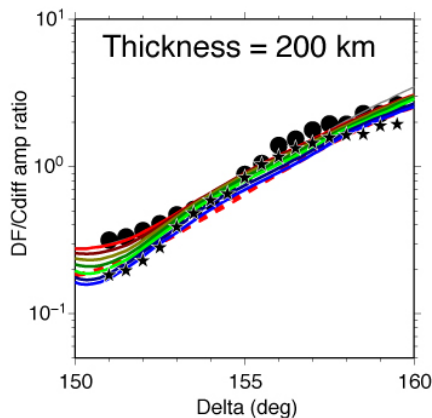


図 6. 速度揺らぎを与えた厚さが 200km のときの、速度揺らぎの大きさと振幅飛距離変化の比較。速度揺らぎが 5% から 7% (緑色, 青色, 水色の線) がデータとよく一致する。

(2) PKiKP と PcP のスペクトル比による内核境界の構造推定 (田中)。

Hinet に記録された日本周辺で起きた地震 11 個の地震から、PKiKP と PcP の SN 比の高いものを選び出し、スペクトル領域で PKiKP/PcP の振幅比をとった。周波数 2Hz 付近にピークを持つ場合が多く見られた。そこで、1Hz と 2Hz 近傍のスペクトル振幅比のピークを読み、震源メカニズムと非弾性減衰の効果を補正し、内核境界における反射率に変換して、内核境界における入射角の関数としてプロットした (図 7)。

その結果、1Hz の反射率は理論値に近いが、2Hz の反射率は入射角が 20 度以上の場合、1Hz の反射率の約 2 倍ほど大きいことがわかった。今後はこの観測事実を説明すべく、内核

境界の構造を検討していく。

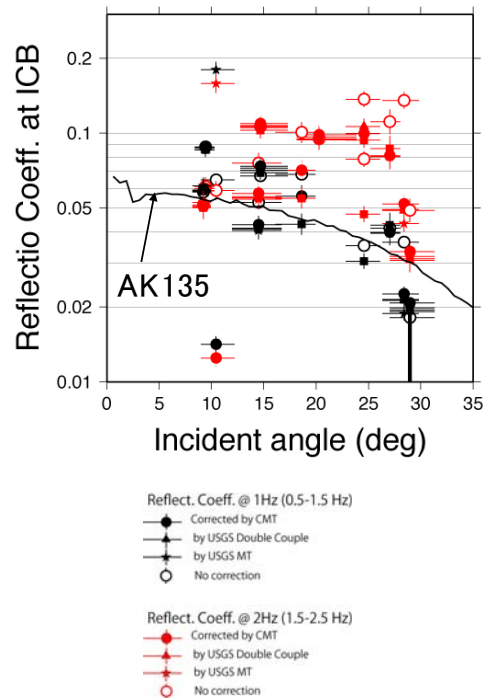


図 7. 推定された内核境界での反射率。黒いシンボルは 1Hz, 赤いシンボルは 2Hz における反射率を示す。各シンボルを入射角の平均にプロットした。縦棒は標準誤差, 横棒は用いたデータがカバーする範囲を示す。黒い実線は AK135 モデルによって予想される反射率の理論値。

凡例を下側に示す。白抜き黒丸, 赤丸は震源メカニズムと減衰の補正を施さない場合、塗りつぶしたシンボルは減衰の補正を含み、震源メカニズムの補正に用いたモデルによって形を変えている。

(3) 地震観測の検討 (田中)。

既存のデータロガーに接続し、メディア、電源などを検証した。

(4) 内核境界の成長シミュレーション (清水)。

①準定常内核成長状態を考えると、外核には鉄以外の軽元素が含まれる多相系であることから、外核最下部に過冷却領域が生成される。このため、内核表面は形態不安定を起こす可能性があり、結果として、mushy layer と呼ばれる樹枝状結晶によって満たされた固液混合層が作られる可能性がある。1次元準定常内核成長モデルを構築し、外核最下部の鉛直方

向のひずみ速度と内核成長速度をパラメータとした、内核表面の安定性の解析を行った。

内核成長速度を変えた場合の、摂動の成長速度を図8に示す。これから、内核成長速度により、摂動の成長速度が大きく影響を受けることがわかる。結果として、*mushy layer* 厚さや樹枝状結晶の大きさが、内核成長速度に強く異存することを示す。従って、内核表層に熱流量の不均質があり、成長速度に地域依存性があれば、内核表面の状態は地域により大きく異なることを示唆する。

外核最下部の上昇流によるひずみ速度は、最大で 10^{-6} 程度 ($[10^{-4} \text{ m/s}]/[100 \text{ m}]$) であると予想される。上昇流に相当するひずみ速度が正の場合は、ひずみ速度が摂動の成長率に与える影響は極めて限定的であり、内核成長率の影響の方が強い。一方、下降流が存在する場合には、不安定に関する条件はほとんどかわらないものの、振動する解があらわれる可能性があることがわかった。

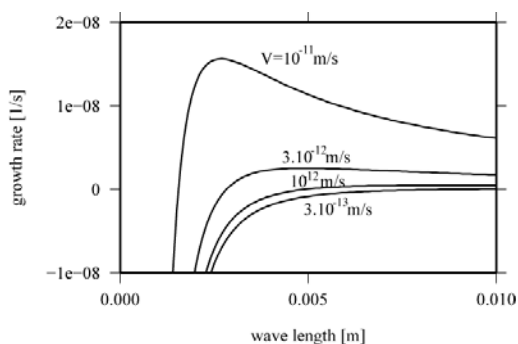


図8. 内核表面の摂動の成長速度. 図中の数字は内核の成長速度.

②内核表層構造への圧密効果の影響を調査するため、1次元準定常内核成長モデルの構築を試みた。この際、熱力学的な平衡もモデルに含めた。定式化は完了したものの、準定常状態に関する信頼できる数値解を期間内に得る事ができなかった。これは、数値手法の問題の可能性もあるが、想定した状態が、仮定した条件の下では物理的に不安定である可能性も否定できない。

(5) ダイナモシミュレーション (松島).

①外核内部において境界から離れた領域での局所MHDダイナモの数値シミュレーションの結果では、運動エネルギーにおいても磁気エネルギーにおいても、非等方性の影響はなく、緯度の依存性のみが認められる。一方、外核内部でも内核境界に近い領域での局

所MHDダイナモの数値シミュレーションの結果では、緯度および非等方性の条件によって運動エネルギーに大きな違いが現れる。磁気エネルギーにも違いが現れるが、運動エネルギーの違いほど大きくはない(雑誌論文②, 学会発表⑥, ⑧, ⑪, ⑫)。

ただし、熱流束を固定した境界条件を採用した場合、内核境界に近い領域での局所MHDダイナモの数値シミュレーションの結果では、緯度および非等方性の条件によって、運動エネルギーにも磁気エネルギーにも大きな違いが現れる(図9; 学会発表③, ⑤)。

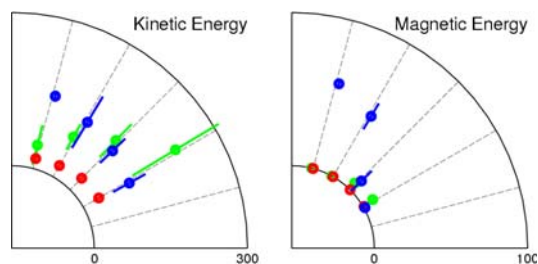


図9. 内核に近い局所領域におけるMHDダイナモ数値シミュレーション(熱流束一様境界条件)の結果として得られた運動エネルギーおよび磁気エネルギーの非等方性・緯度依存性. 緯度および非等方性の条件によって運動エネルギーおよび磁気エネルギーに大きな違いが現れる。

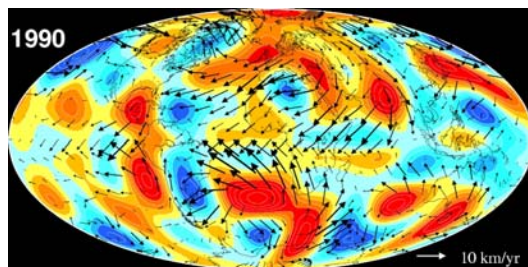


図10. 外核表面付近の流体運動. 矢印が水平方向の流れを示す. 赤色系の領域は流れの沸き出し, 青色系の領域は流れの沈み込みに対応する。

②MHDダイナモの数値シミュレーションとは異なるが、地球磁場データを用いて、外核表面付近の流体運動を推定した(図10)。そして、流体運動のパターンを調べた。コア-マントル境界における非一様熱流量分布によって流れが駆動されるとしても、低緯度の流れは内核からは離れた場所での柱状対流セルで特徴づけられる。しかし高緯度の流れについてははっきりとした結果は得られなかった。しらべた期間は50年程度であり、今後、Aubert et al. (2008) のように、より長い期間における流体運動を調べるこ

を必要とする。

③内核の超回転を取り入れた地球ダイナモシミュレーションを実施するには至らなかった。

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 3 件)

- ① Tanaka, S., One-dimensional modeling of multiple scattering in the upper inner core: Depth extent of a scattering region in the Eastern hemisphere, *J. Earth Sci.*, in press, 2013. 査読あり.
- ② Matsushima, M., The effect of anisotropic diffusivity on rotating magnetoconvection in the Earth's core, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 106, 630-642, 2012, DOI:10.1080/03091929.2011.641959. 査読あり.
- ③ Tanaka, S., Depth extent of hemispherical inner core from PKP(DF) and PKP(Cdiff) for equatorial paths, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 210-211, 50-62, 2012, DOI:10.1016/j.pepi.2012.08.001. 査読あり.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Tanaka, S. and Tkalcic, H., A new probe of the inner core boundary: Frequency dependent amplitude ratio of PKiKP/PcP observed at the Hinet array (招待), AGU2012, 2012年12月3日, サンフランシスコ, USA.
- ② Tanaka, S. and Tkalcic, H., Hinetで観測されたPKiKP/PcP振幅比の周波数依存性, 地震学会 2012年 秋季大会, 2012年10月18日, 函館.
- ③ Matsushima, M., Influence of thermal boundary condition and anisotropic diffusivity on dynamics in the Earth's core, SEDI2012, 2012年7月3日, リーズ, イギリス.
- ④ Tanaka, S. and Tkalcic, H., Frequency dependent amplitude ratio of PKiKP/PcP observed at the Hinet array: Possible detection of a thin liquid layer above the inner core boundary, SEDI2012, 2012年7月2日, リーズ, イギリス.
- ⑤ Matsushima, M., Effects of thermal boundary condition and anisotropic thermal diffusivity in the Earth's core, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012年5月25日, 千葉.
- ⑥ Matsushima, M., Latitudinal dependence of some effects of anisotropic thermal diffusivity in the Earth's core, IUGG2011, 2011年7月2日, メルボルン, オーストラリア.
- ⑦ Tanaka, S., Depth variation of inner core

hemisphericity from PKP(DF) and PKP(Cdiff): P-wave velocity and attenuation structures for equatorial paths, IUGG2011, 2011年7月2日, メルボルン, オーストラリア.

- ⑧ Matsushima, M., The effect of anisotropic diffusivity on rotating magnetoconvection in the Earth's core, SEDI 2010, 2010年7月23日, カリフォルニア大学 サンタバーバラ校, USA.
- ⑨ Tanaka, S., Spatial variations of differential travel times and amplitude ratios between PKP-Cdiff and PKP-DF, SEDI 2010, 2010年7月19日, カリフォルニア大学 サンタバーバラ校, USA.
- ⑩ Tanaka, S., Array analysis of PKP(BC) phase with station corrections for travel times and amplitudes, AGU Fall Meeting 2009, 2009年12月16日, モスコーンセンター, サンフランシスコ, USA.
- ⑪ Matsushima, M., Global and local MHD turbulence in the Earth's core, AGU Fall Meeting 2009, 2009年12月15日, モスコーンセンター, サンフランシスコ, USA.
- ⑫ Matsushima, M., Effects of anisotropic tensor diffusivity on the core dynamics, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009年9月28日, 金沢大学, 金沢.

[図書] (計 1 件)

- ①地球電磁気・地球惑星圏学会編 松島政貴, 京都大学学術出版会, 太陽地球系科学 (第12章 地球ダイナモ), 2010, pp.237-251.

[その他]

ホームページ等

田中 聡

<http://www.jamstec.go.jp/res/ress/stan/TanakaHome/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 聡 (TANAKA SATORU)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号: 60281961

(2) 研究分担者

松島 政貴 (MATSUSHIMA MASAKI)

東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 20242266

清水 久芳 (SHIMIZU HISAYOSHI)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 70302619