

「両極域から見た地球内部の不均質構造とダイナミクスに関する研究集会」報告

金尾政紀*・臼井佑介¹

Report on workshop “Heterogeneous structure and dynamics of the Earth’s interior viewed from polar regions”

Masaki Kanao* and Yusuke Usui¹

(2006年4月24日受付; 2006年5月24日受理)

Abstract: A workshop on “Heterogeneous structure and dynamics of the Earth’s interior viewed from polar regions” was held on 2nd-3rd February 2006, at the National Institute of Polar Research with 32 participants. The meeting provided the opportunity to exchange valuable information involving solid Earth studies around the polar region, followed by a discussion about future plans. The first section of the workshop covered the present status of scientific results, such as insights of the inner structure and dynamics of the Earth viewed from high latitude. Significant results concerning the heterogeneous structure were demonstrated from the depths ranging from the deep interior of the Earth to the upper mantle and overlying crust. Several remarkable topics concerning the Sumatra Earthquake on December 2004, were also presented involving seismic activity of the Antarctic Plate, free oscillation of the Earth, Tsunami waves, dynamic triggering, and so on. The second section of the workshop treated future plans both for the development of new analytical methods and for observations in the polar regions. Multidisciplinary studies, moreover, were proposed for the Antarctica including high-density superconducting gravimetric network, infrasonic observations, high sampling GPS recording, ice-quake monitoring, etc. Finally, several international activities in Eastern Dronning Maud Land were discussed with regard to the International Polar Year (IPY) in 2007–2008.

要旨: 平成 18 年 2 月 2, 3 日に国立極地研究所講義室にて, 「両極域から見た地球内部の不均質構造とダイナミクスに関する研究集会」が開催された (参加者計 32 名). 極域の固体地球物理学に関連する研究者が集まり, 最新の研究成果の発表と学際的な情報交換を行い, また今後の研究の取り組み方を議論した. 第 1 部 (極域から見た地球内部の科学的成果) では, 地球中心核・最下部マントル~上部マントル・地殻における様々な地震学的不均質構造とその変動現象 (ダイナミクス) に関する発表をはじめ, 南極プレート周辺の地震活動, また 2004 年 12 月のスマトラ沖巨大地震に関連した研究が紹介された. 第 2 部 (極域における将来計画の展望) では, 地震波伝搬モデリングなどについての今後導入すべき解析手法,

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

*Corresponding author. E-mail: kanao@nipr.ac.jp

インフラサウンド観測や高サンプリング GPS 観測等、極域における様々な時空間スケールでの特徴的な振動現象を解明するための斬新なアイデアが紹介された。2日目は、国際極年 2007-2008 に関連した観測計画の紹介をはじめ、東ドロンニングモードランドを中心に今後の国際共同研究の具体的な進め方について議論した。

1. はじめに

「両極域から見た地球内部の不均質構造とダイナミクスに関する研究集会」が平成 18 年 2 月 2, 3 日に国立極地研究所講義室にて開催された。地球内部をのぞく窓としての極域では、高緯度に位置する地理的条件を生かして、近年固体地球の深部から地球表層部に至るまでの様々な深さにおいて、地球物理学的な各種研究が精力的に行われてきた。発表内容は、以下の複数の大きなテーマに分類される。A) 中心核(内核)の不均質構造と異方性, B) 液体核(外核)の構造とダイナミクス, C) 核~マントル境界(CMB), D) 層の不均質構造, D) 下部マントルの構造, トモグラフィーとプルームテクトニクス, E) 上部マントル遷移層と地震学的不連続面の性質, F) リソスフェア(岩石圏)の構造とテクトニクス, G) 南極域のプレート運動と地震活動, H) 氷床変動・地殻変動に関連したダイナミクス, レオロジー, I) 地球内部を探るための極域における具体的な観測方法、並びに将来の計画案、などである。

本集会では、こうした地球内部の不均質構造とダイナミクスに関する最新の研究成果の発表と、学際的な情報交換を行い、今後の共同研究推進の具体的な方針について意見交換を行うことを目的とした。

2. 経過

集会は 2 月 2, 3 日の両日にわたり、計 23 の講演とそれに対する質疑応答が行われた。第 1 部(極域から見た地球内部の科学的成果)では、最下部マントル以浅の地震学的不均質構造をはじめ、南極プレート周辺の地震活動、またスマトラ沖巨大地震に関連した発表が行われた。第 2 部(極域における将来計画の展望)では、地震波伝搬モデリングなどの今後導入すべき解析手法、極域での特徴的な振動現象解明のための斬新なアイデアが紹介された。2 日目は、国際極年 2007-2008 に関連した計画の検討をはじめ、将来の地球物理学的各種探査の展望が示された。最後にこれら一連の科学的成果を踏まえて、極地研究所における共同研究の方向性を含め、今後の両極域での固体地球科学研究推進のための取り組み方を議論した。表 1 に、発表者とタイトルの一覧を示す。

以下、各講演の内容について簡単に紹介する。冒頭に主催者(著者の一人、金尾)により、高緯度に位置する両極から地球の内部構造とダイナミクスを調べることの意義について述べられた。また、2 日間にわたる集会の概要が説明された。グローバルな観点から固体地球科学へ貢献することの重要性と共に、今後さらに学際的な研究の進展が望まれることが指摘された。また、極域の研究を進める上で国際共同研究は非常に重要であり、2007-2008 年の中

表 1 「両極域から見た地球内部の不均質構造とダイナミクスに関する研究集会」プログラム
 Table 1. Program of workshop "Heterogeneous structure and dynamics of the Earth's interior viewed from polar regions".

平成 18 年 2 月 2 日 (木) 12:30-18:40

1. はじめに - 集会の意義と概要 -
 第 1 部：極域から見た地球内部の科学的成果
2. 南極周辺の下の厚い D'層について
 臼井佑介 (金沢大学大学院自然科学研究科)
3. 東南極大陸の上部マントル構造と大陸プレートの化学組成
 久家慶子 (京都大学理学部)
4. 表面波による南極地域の 3 次元 S 波速度構造
 小林励司 (東京大学地震研究所)
5. 臨時地震観測網を用いたバイカルリフト帯下の上部マントル構造
 井上智史 (愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)
6. プレート沈み込み帯の地震火山活動とマントル組成
 吉田明夫 (総合研究大学院大学)
7. 南極みずほ高原で記録された特徴的な地震波形：基盤地形の応答と X フェイズ
 山田 朗 (愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター)
8. 南極プレート - インド洋区の地震活動の時空間分布
 - スマトラ巨大地震と Global High Seismic Active Periods (HSAP) -
 金尾政紀 (極地研究所)
9. 余震の減衰様式：2004 年スマトラ沖地震と最近日本で起きた地震について
 楠城一嘉・B. Enescu・R. Shcherbakov・D.L. Turcotte・
 岩田貴樹・尾形良彦 (統計数理研究所)
10. 2004 年スマトラ地震によって励起されたスリヒター・モード 1S1 (周期約 5 時間) と
 コア・モード 2S2 (周期約 1050 秒) 検出の試み
 小巻あずみ・西口知久・川崎一朗・森井 互・小久保一哉・
 大久保慎人・柳谷 俊・加藤 護 (京都大学防災研究所)
11. 昭和基地の超伝導重力計・広帯域地震計による津波とセイシュの観測
 名和一成 (産業技術総合研究所)
12. 2004 年スマトラ沖地震の歪波形解析
 池上 裕 (京都大学理学部)
13. 遠地地震波による動的トリガリング - 長野県松代における解析例 -
 岩田貴樹 (統計数理研究所)

第 2 部：極域における将来計画の展望

14. 地球深部を伝播する地震波の効率のモデリング：準球座標系アプローチ
 豊国源知・竹中博士 (九州大学大学院理学研究院)
15. 超伝導重力計の地震学への応用
 今西祐一 (東京大学海洋研究所)
16. 南極におけるインフラサウンド観測の提案
 石原吉明 (東北大学大学院理学研究科)
17. 高緯度地域における高サンプリング GPS 観測
 新井直樹 (電子航法研究所)
18. 極域における特徴的な振動現象とその解明に向けて
 金尾政紀 (極地研究所)

2 月 3 日 (金) 10:00-12:30

第 2 部：(続き)

19. 国際極年 (IPY 2007-2008) での広帯域地震計展開計画 (AArrays/POLENET)
 金尾政紀 (極地研究所)
20. 今後の南極での地震探査についての展望
 宮町宏樹 (鹿児島大学理学部)
21. 今後の南極での反射法探査についての展望
 戸田 茂 (愛知教育大学)
22. 南極における無人小型飛行機による磁場探査計画
 船木 實 (極地研究所)
23. ベルギー基地、ドーム基地等での地震観測の展望
 金尾政紀・澁谷和雄 (極地研究所)
24. 総合討論

心に予定されている国際極年 (International Polar Year; IPY) に向けての具体的な計画策定とその準備の必要性が説明された。

第1部 (極域から見た地球内部の科学的成果) では、最初に、南極域では報告例が数少ない最下部マントルにおける地震波速度の不均質構造が紹介された (2. 白井講演)。SKS 波等の解析により、南極海下の D'' 層 (外核—マントル境界から上層部数 100 km) に最大 2.0% の S 波速度異方性の存在が明らかにされ、また地震波形モデリングにより不均質構造を推定した結果、D'' 層上端の地震波速度不連続面の深さがアラスカやカリブ海地域と比べて 50-100 km 浅いことが示された。

次に地震実体波の解析から、東南極大陸の上部マントルにおいては、リソスフェア直下の約 200 km 深に顕著な低速度領域の存在が示された (3. 久家講演)。観測波形と理論波形とを比較して得られた地震波速度構造モデルを説明するために、上部マントルの化学組成と温度勾配とを変化させて検討した結果、東南極大陸下には太古代マントルに特徴的な、いわゆる「枯渇したマントル (depleted mantle)」の組成モデルが良く説明できた。また、地震表面波を用いて南極プレート周辺での 3 次元速度構造の研究が紹介された (4. 小林講演)。エレバス山直下のホットスポットによる低速度異常が顕著に確認され、東南極は西南極よりも大陸地殻が 10-20 km 程度厚く、リソスフェアに対応する高速度領域も深さ 150 km 付近まで確認できた。

シベリアクラトン～バイカルリフト帯を南北にまたぐように設置された臨時地震観測点を用いて、遠地地震トモグラフィとレシーバー関数解析により、上部マントルの不均質構造が求められた (5. 井上講演)。バイカルリフト帯の直下では、660 km 深の地震波不連続面が周囲よりも深く得られ、ホットブルームの上昇に伴う低速度領域の存在が明らかにされた。また、沈み込み帯における海洋性プレート (スラブ) 周辺での地震火山活動について報告があった (6. 吉田講演)。例として、日本列島下にスラブ上面での地震活動は、東日本全域では深さ約 100 km を境に急減する (いわゆる D-line)。この D-line より西側ではスラブからの脱水反応により火山フロントが形成され、今後マントルウェッジ内の弾性的特性や化学組成を詳しく調べる重要性が示唆された。

「東南極リソスフェアの構造と進化研究計画 (Structure and Evolution of East Antarctic Lithosphere; SEAL 計画)」で行われたみずほ高原での人工地震探査中に記録された、特徴的な自然地震について紹介があった (7. 山田講演)。また、遠地地震や局所的な氷震とは明らかに異なる、振動継続時間の長い波群 (X-phase) も観測されており、南極大陸周辺での励起源を明らかにすることは重要である。また、探査中に記録された遠地地震や X-phase は、測線下の基盤構造の不均質特性を大きく反映している可能性が指摘された。

2004 年 12 月 26 日に、インドネシアのスマトラ島沖でマグニチュード 9.0 という過去 40 年間で最大規模の地震が発生した。これに関連して、南極プレート—インド洋区における最

近の地震活動の時空間分布についてレビューがあった(8. 金尾講演). 過去 20 数年来の地震計の精度向上や観測ネットワークの整備により, 大陸域を中心に微小地震の検知能力が上がってきたが, 南極域も含めたグローバル観測網で常時モニタリングすることで, 南大洋の地震活動が今後さらに明らかにされ, 津波等の監視にも貢献することが期待される. また, スマトラ沖巨大地震の余震活動の定量的評価について報告があった(9. 楠城講演). 余震減衰に関する「大森公式」の時間定数をマグニチュードに依存すると仮定した場合, スマトラ沖地震を含む多くのケースで余震の時間減衰過程をうまく説明できることが示された.

次に, スマトラ沖巨大地震により励起された地球自由振動から, 深部構造を推定する報告があった(10. 小巻講演). 周期 1055.4 秒のコアモード ${}_2S_2$ は, 地球標準モデル (PREM) から予測される理論周期 (1045-1050 秒) よりもやや長い. このことは, 内核の S 波速度が PREM より 0.5-1.0 % 遅い可能性を示唆する. 内核研究のために実体波を利用することは非常に困難であるため, 今後のこのような巨大地震に伴う地球自由振動からのアプローチが重要であろう. また, 地球自由振動による潮位補正や弾性定数の決定を目的とした, 津波と短周期潮位変動 (セイシュ) に関する報告があった(11. 名和講演). スマトラ沖巨大地震による潮位変動は, 昭和基地の超伝導重力計や広帯域地震計にも記録されており, 長期的な海洋変動の周波数・時間変化や非正常イベントの検出, さらに地球深部シグナル検出のための基礎情報となる.

スマトラ沖巨大地震の震源過程を推定するために, 気象庁松代地震観測所の歪計記録を解析した(12. 池上講演). 1000 km 以上の断層面に沿った多重震源モデルを仮定することで, 観測波形と理論波形との一致をよく説明することができた. また, 遠地地震による波動伝播に伴う動的な応力・歪変化により, 局所的な地震が誘発される現象が最近確認されている(「動的トリガリング」, 13. 岩田講演). この動的トリガリングを規定するパラメーターとして, 地殻内部の歪み変化量の最大値, 並びにその継続時間や周波数特性などが考えられる. こうした地殻内の応力状態をモニタリングすることにより, どの程度の規模の局所地震が誘発されるかを予測できる.

第 2 部 (極域における将来計画の展望) では, 最初に地球内部を伝播する地震波の効率的なモデリング手法が開発された(14. 豊国講演). これは非対称な構造や横方向の不均質を考慮した実際の地球の構造に近い準球座標系を取り入れ, 任意の全球構造断面中を伝わる地震波をシミュレートできるため, 極域という特異点での波形モデリングの強力なツールになると期待される. 次に, 超伝導重力計データを地震学へも応用し, 詳細な地殻応力状態や, 地下水などの変化を調べる提案があった(15. 今西講演). 超伝導重力計は広帯域地震計と比較して, 長周期側の周波数特性が広く, 非地震性のテクトニックな重力変化を精度よく検出できる利点がある.

また, 将来極域での学際的研究の例として, インフラサウンド観測の提案があった(16.

石原講演). インフラサウンドは、20 Hz 以下の超低周波の不可聴音であり、南極大陸内の既設4点を含め、これまでに核実験探知用として世界中に約60点が設置されている。近年、地震・氷震・火山噴火・津波・海洋変動・積乱雲・オーロラ・火球落下など様々な自然現象に伴うインフラサウンドが報告されており、この観測を進めることで超高層—大気—海洋—固体地球の物理的相互作用の理解がさらに進むと期待される。さらに、極域における高サンプリング GPS 観測について発表があった(17. 新井講演)。近年、地殻変動検知のために GPS 測位が行われているが、電離層のシンチレーションにより測位誤差が増大、また場合によっては測位不能に陥るなどの問題が報告されている。将来的に、高サンプリングで GPS の緻密観測を行うことで、電離層や対流圏の物理的变化を捉えて補正を行い、測地学や地震学へのフィードバックが可能になると期待される。

1日目最後の講演では、固体地球と氷床・海水・大気との相互作用に注目して、極域における未解明な振動現象がまとめて紹介された(18. 金尾講演)。例えば南極大陸縁辺で観測される特徴的な現象として氷震活動があるが、その起源の可能性としては、波浪・海洋潮汐による海水変動、海水や氷山の動きに伴う振動、棚氷・氷河の流出、氷爆・氷崖、大陸氷床内部での雪震、大陸氷床の底面滑りに伴う基盤岩との摩擦振動、さらには氷床後退に伴う地殻変動などのテクトニックな起源、など多岐にわたると考えられる。今後も、発生原因を同定・分類するために、震源決定・スペクトル・活動度・震源過程などの解析を進めることが必要である。

2日目は、国際極年 2007-2008 に関連した計画や、将来の地球物理学的各種探査について展望が示された。昭和基地を含む既存の国際デジタル地震観測網 (Federation of Digital Seismographic Networks; FDSN) を補うため、IPY に関連して南極大陸全域で広帯域地震計を展開する計画 (Antarctic Arrays/POLENET) が国際的に進められている (<http://www.antarcticarray.org>)。これに積極的に貢献するため、東ドロンニングモードランドの大陸縁辺部、特にこれまで SEAL 計画等で成果が得られているリュツォ・ホルム岩体を中心に、広帯域地震計の無人観測点を展開する。得られたデータから、特に上部マントルの不均質構造を求め、超大陸の形成分裂過程を調べるという主旨が説明された(19. 金尾講演)。

次に、リュツォ・ホルム岩体における、将来の屈折・広角反射法による人工地震探査について紹介があった(20. 宮町講演)。これまでに行われたみずほ高原での成果をもとに、みずほ基地を東西にまたぐ測線をとることで、リュツォ・ホルム岩体の海岸部でみられる表層地質の変成層境界(グラニュライト層～角閃岩層)が、内陸部でどのように延長されているのかを調べるのが目的である。また、反射法地震探査によるリュツォ・ホルム湾地域の地下構造調査の展望が述べられた(21. 戸田講演)。浅部構造を目的として、オングル諸島周辺に分布するモレーン堆積物や基盤岩の内部構造の調査、また沿岸露岩や大陸氷床下の深部構造を得るためのバイプロサイズ(起震車)等を用いた本格的な探査の案も提示された。さ

らに、南極で将来使用するための無人小型飛行機の開発状況と、国内での試験飛行結果、また南極での磁場探査計画が紹介された(22. 船木講演)。現状では、高度 1000–5700 m で無線による自動飛行が可能であることが報告された。

最後に、ベルギーが国際極年で開設を予定している基地、並びにドーム基地における固体地球観測の展望について紹介があった(23. 金尾・澁谷講演)。国際極年で計画されている新ベルギー基地は、あすか基地に近いセルロンダーネ山麓(南緯 72 度, 東経 23 度付近)に位置しており、地球深部の解析をするための震央距離の大きい遠地震のデータ収集に非常に有利な場所であることが示された。また、内陸部に位置するドーム基地が、現状の国際デジタル地震観測網(FDSN)の観測点網を補う上で大変有用な場所にあることが指摘された。ベルギー基地については、基地候補地の現場写真が紹介され、今後ベルギーとの国際協力を進めることでFDSNレベルの観測点の設置が望まれる。またドーム基地については、FDSNの統括機関であるアメリカのIncorporated Research Institute of Seismology(IRIS)から、新規観測点の設置に関する打診が極地研究所にあったことが紹介された。設営的にも長年にわたり観測点を維持することは極めて難しいと思われるが、ドーム基地での新たな観測点の展開が期待されている天文・気象など他分野の計画とリンクして、地震等の観測点の設置が進められることが考えられる。

総合討論では、これら一連の科学的成果を踏まえ、今後の両極域での固体地球科学研究推進のための取り組み方について意見交換を行った。南極現地での観測計画以外にも、極地研究所による各種共同研究(一般、及びプロジェクト)への取り組み方に関して、現状についての補足説明を交え具体的に検討した。

地球内部を通過してきた様々な波長(周波数)の地震波形・走時データを利用して、極域を中心とした観測点と震源の組み合わせにより総合的に地球内部構造の解析を進めることで、地球中心核～表層部の様々な時空間スケールの不均質構造が検知できると期待される。また、地球進化史に関連した静的な内部構造のみならず、発震メカニズムの解明やプレート内部変形、氷床後退に伴う地殻変動、さらには地震波異方性の走向をプレート運動と比較するなど、現在の地球表層環境に関するダイナミクスが理解されるであろう。さらに、極域の定常観測点からインターネット等を通じてグローバル観測網へ迅速に貢献することで、固体地球の変動現象のリアルタイムモニタリングが可能になり、汎地球規模での防災予知にも役立つことが期待される。

3. ま と め

グローバル地球科学におけるフロンティアの一つとしての両極域から、地球深部の静的・動的構造を視る重要性についての再認識を行い、将来の両極域での科学研究の進展について意見交換を十分に行うことが出来たと言える。また、これまで個別に観測研究を行ってき

た研究者同士がお互いの現状を把握し、今後の共同研究の足がかりを模索することができたといえる。今後は、今回の集会参加者以外の固体地球に関する幅広い学問分野の研究者を交え、引き続き科学的成果と調査研究の推進のための情報交換の場を持つことが大切であると思われる。さらに国際極年 2007-2008 を契機にして、地球表層の環境変動をリアルタイムで検知しつつ、極域からみた地球進化史解明のためにも、国際共同研究をさらに推進することが望まれる。

謝 辞

本集会での研究発表に、以下に示した多数の参加者（敬称略）のご協力を頂き、無事成功裏に終えることができた。ここに記して感謝する。また本集会開催に当たり、ご協力を頂いた所内外の関係皆様を重ねて御礼申し上げる。

参加者一覧（順不同）：

中西一郎, 久家慶子, 福田洋一, 池上 裕, 岡本大志（京都大学大学院理学研究科）, 川崎一朗, 小巻あずみ（京都大学防災研究所地震予知研究センター）, 臼井佑介（金沢大学大学院自然科学研究科）, 宮町宏樹（鹿児島大学理学部）, 戸田 茂（愛知教育大学教育学部）, 名和一成（産業技術総合研究所）, 小林励司（東京大学地震研究所）, 竹中博士, 豊国源知, ジャファーガンドミアラシュ（九州大学大学院理学研究院）, 山田 朗, 井上智史（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）, 石原吉明（東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター）, 楠城一嘉, 岩田貴樹（統計数理研究所）, 田島文子（広島大学理学研究科）, 藤原 明（千葉大学大学院自然科学研究科）, 新井直樹（電子航法研究所）, 今西祐一（東京大学海洋研究所）, 神沼克伊（元国立極地研究所）, 四ノ宮 浩（エヌ・イー・ティ（株））, 吉田明夫, 西岡文維（総合研究大学院大学）, 澁谷和雄, 船木 實, 土井浩一郎, 金尾政紀（国立極地研究所） 計 32 名.