

サブテーマ2：統計的モデルに基づく地球科学における逆問題解析手法

研究代表者

[国立極地研究所] 門倉 昭

共同研究者

[国立極地研究所] 江尻 全機, 麻生 武彦, 佐藤 夏雄, 宮岡 宏, 田口 真, 海老原 祐輔,
金尾 政紀, 岡田 雅樹

[統計数理研究所] 樋口知之, 尾形 良彦, 上野 玄太

[国立情報学研究所] 北本 朝展, 児玉 和也, 佐藤 真一, 孟 洋

[早稲田大学] 田邊 國士

[名古屋大学] 小川 泰信, 野澤 悟徳, 藤井 良一

[産業技術総合研究所] 遠田 晋次

[トロムソ大(ノルウェー)] Bjorn Gustavsson, A. Brekke, C. La Hoz, T. Grydeland,
M. Blixt

[スウェーデン宇宙物理研究所(スウェーデン)] Urban Braendstroem, Ingrid Sandahl,
Tima Sergienko

1. 研究目標

極地研が所有する地球科学関連観測データ(オーロラ観測データ、EISCAT レーダーによる電離圏観測データ、地震波観測データ、磁気圏観測データなど)やシミュレーションデータ(磁気圏粒子シミュレーション)に、統数研や情報研が持つ先端の逆問題解析手法や画像解析手法を適用することにより、そのような地球科学現象を生み出している生成源(電離圏、磁気圏、地球内部など)の構造や特徴、そこに働く物理過程の詳細を定量的に明らかにすることを目的とする。現在、以下の5つの研究課題について研究を進めている： データ同化と数値シミュレーションによる磁気圏高エネルギー粒子分布3次元構造の研究、 昭和基地 - アイスランド共役点オーロラ画像データ解析によるオーロラの南北共役性の定量的な評価の研究、 A L I S 地上オーロラ多点観測網データと、衛星オーロラ画像データ、EISCAT レーダー電子密度データ、イメージングリオメータ宇宙雑音吸収データなど多種類のデータを用いたオーロラの3次元立体構造及びオーロラ降下粒子エネルギースペクトルの復元に関する研究(一般化オーロラトモグラフィー)、 狭視野オーロラ観測データとEISCAT レーダーデータを用いたオーロラの微細構造の研究、地震活動データを用いた、地球内部構造の研究、及び、地震発生メカニズムとその予測に関する研究

2. 年次研究計画

平成17年度：データ取得と解析手法検討・開発・初期解析

研究課題： 磁気圏粒子分布シミュレーションコードをデータ同化に適した形式に書き換え、

テストデータによる検証を行う。

研究課題 : 昭和基地とアイスランドにおいて同時観測データを取得し、共役点現象の抽出と解析アルゴリズムの検討を進める。

研究課題 : ALISと「れいめい」衛星との同時観測を行い、コンジャンクション画像データを取得し、トモグラフィー解析に供するとともに、異種の補助データも組み込んだ一般化オーロラトモグラフィーについても基本的な検討を行う。

研究課題 : EISCATレーダーと光学オーロラ同時観測データを取得し、高分解能インバージョン解析手法の検討を行う。

研究課題 : 遺伝統計学的手法による広帯域地震波形インバージョンにより、南極域の地殻及び最上部マンツルの速度構造を求める。地震活動の静穏化現象を感度良く検出する解析方法を開発し、前駆的非地震性すべりのシナリオの検討を行う。

平成18年度 : データ取得と解析手法検討・開発・実データへの適用

研究課題 : データ同化手法を実際のIMAGE衛星データに適用し、磁気嵐時の電離圏電場ポテンシャル及びプラズマシート内粒子密度の時間空間変動の導出を行う。

研究課題 : 昭和基地とアイスランドにおいて同時観測データを取得する。解析対象となる共役点現象についてサマリープロット作成やデータベース作成を行う。解析アルゴリズムの検討をさらに進める。

研究課題 : ALISと「れいめい」衛星との同時観測を行い良好なデータを得るとともに、解析プログラムの整備を行う。また、一般化トモグラフィーのアルゴリズムの検討、とくに汎関数最小化による逆問題を、データに基づく確率的なベイズモデルとして求解する手法について検討する。

研究課題 : EISCATレーダーと光学オーロラ同時観測データを取得し、高分解能インバージョン解析手法の開発、観測データに基づく評価を行う。

研究課題 : 南極プレート周辺の地震の統計学的な時空間分布を導出し、広域応力場との関連を検討する。遺伝統計学的手法による遠地地震波形インバージョンや波形の自己相関手法により、地殻及びマンツルの速度構造や異方性の解析を行う。地震データの不均質性をモデル化して、広域の地震活動を一挙に計測できる時・空間E T A Sモデルの一層の実用化を進める。

平成19年度 : データ取得と解析手法開発・実データへの適用・解析

研究課題 : 状態空間表現形式のコードを並列計算が実施できるコードへ書き換える。

研究課題 : 昭和基地とアイスランドにおいて同時観測データを取得する。解析アルゴリズムを確立し、抽出した現象を解析し、共役性の時間空間変化についての研究を行う。

研究課題 : 時間変化を考慮したトモグラフィー解析、すなわちオーロラ位置形状の時間変化を多点時系列画像をもとに推定するアルゴリズムの研究を行う。また、一般化トモグラフィーの定式化を行う。また、これに必要な順問題としての粒子降りこみに対するオーロラ励

起・発光、電離等の数値モデル化を行う。

研究課題：レーダーデータ、光学データの高分解能インバージョン解析手法の改良と評価、EISCATサイトにおけるレーダー・光学観測データ取得、及び、研究会開催、を行う。

研究課題：南極プレート内部及び周辺のプレート境界域の地震活動について、フラクタル次元解析を行う。昭和基地周辺の野外臨時観測点について、遺伝統計学的手法による地震波形のインバージョンにより、周辺域の地殻及び最上部マントル構造を求める。地震活動の静穏化、活発化、前震などの異常現象と地殻内の応力分布の変化を結びつける統計的モデルの研究をすすめる。

平成20年度：データ取得と解析手法改良発展・実データ解析・論文作成

研究課題：同化実験に用いるパラメータサーベイを行う。

研究課題：昭和基地とアイスランドにおいて同時観測データを取得する。現象の抽出・解析を進め、共役性の時間空間変化についての論文作成・発表を行う。解析結果を考察するために、磁気圏電離圏グローバルMHDシミュレーションモデルを当該イベントに適用する。

研究課題：観測を継続して行うとともに、一般化トモグラフィーの計算機コードの開発を進め、これにもとづく観測データの解析を行う。

研究課題：レーダー干渉計システム用インバージョン解析手法の開発、光学データの高分解能インバージョン解析手法の改良と評価、EISCATサイトにおけるレーダー・光学観測データ取得、及び、研究会開催、を行う。

研究課題：1998年3月のバレー諸島付近の大地震域について、発生前後の地震活動の推移を統計モデルで考察する。南極大陸上の他国の野外臨時観測点について、遺伝統計学的手法による地震波形のインバージョンにより、周辺域の地殻及び最上部マントル構造を求める。地震活動異常の時空間変化をモニターするベイズ的可視化統計モデルの研究をする。

平成21年度：解析手法発展・実データ解析・論文作成・計画とりまとめ

研究課題：同化実験による最適な境界条件の算出と物理的検討を行う。

研究課題：平成20年度の研究内容を継続して行い、5カ年計画の取りまとめを行う。

研究課題：一般化トモグラフィーのアルゴリズムや計算機コードの改良、これにもとづく観測データの解析を行い、5カ年の成果をまとめる。

研究課題：レーダー干渉計システム用インバージョン解析手法の改良と評価、磁気圏電離圏複合系の物理モデル作成、研究会開催、及び、研究成果の出版、を行う。

研究課題：北極海の周辺域についても、南極プレートと同様な地震活動度の解析を行う。また北極域の国際デジタル地震観測網の定常点について、遺伝統計学的手法による地震波形のインバージョンにより、周辺部の地殻及び最上部マントル構造を求める。震源カタログや各種地球物理データの時間的空間的均質化、異常値欠測値の補間、入力モデルによる地球物理現象の各種ノイズの除去、および異種データ間の同時使用を目的とした規格化・標準化などデータの品質管理に関わる統計的研究をすすめる。

3. 平成17年度の研究進捗

本サブテーマは、場（電場、磁場）と粒子により構成される磁気圏内無衝突プラズマシステム（課題 ）、オーロラ発光現象に関わる電離圏 - 磁気圏結合系システム（課題 ）、地震活動に関わる地球内部構造システム（課題 ）の複雑な機能を、それぞれ高エネルギー粒子の運動、オーロラ発光現象、地震活動といった観測し得る現象をもとにした逆問題を解くことにより帰納的にモデル化することを目指すもので、平成17年度は、諸現象の観測とデータ取得、逆問題解析手法の検討、所期解析などが主として行われた。

以下にそれぞれの課題についての概要を述べる。

研究課題 磁気圏高エネルギーイオンの時間変動をシミュレートするプログラムをデータ同化に適した形に書き換え、テストデータをもとにした検証を行い、良好な結果が得られた。

研究課題 共役点イベントの抽出・初期解析を進め、論文をGRLに発表した。2005年8月～9月に共役点観測を実施し新たなデータを取得した。

研究課題 2005年10～11月、2006年1～2月にALIS-れいめい衛星-EISCATキャンペーン観測を行い地上多点観測については新たなデータを取得したが、衛星オーロラ観測との同時観測は実現出来なかった。オーロラ画像データに、EISCATレーダー電子密度データやイメージングリオメータ宇宙雑音吸収データも加えた一般化オーロラトモグラフィについての検討を行った。

研究課題 2005年10-11月、2006年1-2月に地上光学-れいめい衛星-EISCAT特別観測を行い新たなデータを取得した。EISCATレーダー散乱エコースペクトルから高速に電子密度を求める解析手法を開発した。

研究課題 南極域の地殻及び最上部マントルの速度構造を、遺伝統計学的手法による広帯域地震波形インバージョンにより求めた。地震活動の静穏化現象を感度良く検出する解析手法を開発し、最近の地震活動の前駆的非地震性すべりや、クーロンストレス変化との対応についての解析研究を行った。

4. 平成17年度研究成果

(1) 知見・成果物・知的財産権等

1. アイスランド - 昭和基地共役点オーロラ観測データ

・全天TVカメラデータ：

アイスランド Husafell、2005年8月26日～9月11日、DV180分テープ20巻

アイスランド Tjornes、2005年9月1日～9月9日、DV180分テープ8巻

・広角TVカメラデータ：

アイスランド Tjornes、2005年9月1日～9月9日、DV180分テープ7巻

・天頂多色フォトメータデータ：

アイスランド Tjornes、2005年8月31日～9月9日、MO(1.3GB)1巻

・共役点イメージャデータ：

アイスランド Husafell、2005年8月26日～2006年3月31日(2005年9月12日以降は自動運転)、静止画6秒間隔、1.05MB/枚

2. ALIS オーロラ多点観測データ

2005年1月分0.3GB、2月0.3GB、3月0.4GB、9月0.008GB、10月14GB、11月45GB、計64GBの5観測点における各波長の単色光画像(fitsフォーマット、1画像は深さ1ピクセル16ビットで約150kB)。

3. れいめい衛星3波長観測画像データ(共同研究用)

4. 昭和基地広帯域・短周期地震観測データ

2005年4月1日～2006年3月31日、12GB DAT テープ4巻

5. リュツォ・ホルム湾沿岸広帯域地震観測データ

沿岸露岩計4観測点、2005年4月1日～2006年3月31日、650MB MO ディスク20枚分

6. バイカルリフト帯広帯域地震観測データ

ロシア Maximiha、2005年4月1日～2005年10月8日、650MB CDR ディスク1枚分

(2) 成果発表及び著書執筆等

〔口頭発表〕

1. Nakano S., G. Ueno, Y. Ebihara, M. -C. Fok, S. Ohtani, P. C:son Brandt, and T. Higuchi, A Data Assimilation Model of the Storm-time Ring Current, AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, 5 December 2005. Sato, N., A. Kadokura, Y. Ebihara and T. Saemundsson, Meso-scale and small-scale conjugacy of discrete and pulsating auroras observed with TV cameras, IAGA, Toulouse, France, July 18-29, 2005.
2. Ebihara, Y. and M. -C. Fok, Theoretical modeling for ENA investigations at Earth, The 2nd Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) meeting, 58-ST-A0212, Suntec Singapore, 20-24 June 2005 (solicited)
3. Ebihara, Y., M. -C. Fok, and R. A. Wolf, Storm-time development of the ring current, The 2nd Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) meeting, 58-ST-A0211, Suntec Singapore, 20-24 June 2005 (solicited)
4. Ebihara, Y. and M. -C. Fok, Significant role of the ionosphere on the ring current development, CAWSES Workshop 2005, 12-13 September 2005 (solicited)
5. Ebihara, Y. and M. -C. Fok, Non-liner Development of Ring Current, Japanese CAWSES (Climate and Weather of the Sun-Earth System) meeting on Space Weather, 5-6 April 2005 (solicited)
6. 佐藤夏雄, 門倉 昭, 海老原祐輔, 出口大樹, Thorsteinn Saemundsson, オーロラによる地磁気共役点位置の時間的トレース、地球惑星科学関連学会 2005 合同大会、5月22-26日、幕張メッセ国際会議場、2005.
7. 佐藤夏雄, 門倉 昭, 海老原祐輔, 出口大樹, Thorsteinn Saemundsson, ディスクリットオーロラと脈動オーロラの共役性、第29回極域宙空圏シンポジウム、8月4-5日、国

- 立極地研究所、2005.
8. 佐藤夏雄, 門倉 昭, 海老原祐輔, 出口大樹、Thorsteinn Saemundsson, 小規模カ・ル型オーロラの共役性、第 118 回地球電磁気・地球惑星圏学会、9 月 29 日-10 月 1 日、京都大学、2005.
 9. 遊津拓洋、田口 真、佐藤夏雄、岡野章一、Calibration of the all-sky imagers for conjugate aurora observation, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会、5 月 22-26 日、幕張メッセ国際会議場、2005.
 10. 遊津拓洋、田口 真、佐藤夏雄、岡野章一、全天イメージャーによる共役点オーロラの南北同時定量観測計画、第 29 回極域宙空圏シンポジウム、8 月 4-5 日、国立極地研究所、2005.
 11. 遊津拓洋、田口 真、佐藤夏雄、岡野章一、全天イメージャーによる共役点オーロラの南北同時定量観測、第 118 回地球電磁気・地球惑星圏学会、9 月 29 日-10 月 1 日、京都大学、2005.
 12. 麻生武彦、Gustavsson Bjorn、田邊國士、一般化オーロラトモグラフィについて、地球惑星科学関連学会 2006 年合同大会、5 月 14-19 日、幕張メッセ国際会議場、2006.
 13. 平原聖文、坂野井健、浅村和史、笠羽康正、岡田雅樹、小淵保幸、井野友裕、山崎敦、小川泰信、野澤悟徳、関華奈子、岡野章一、麻生武彦、江尻全機、門倉昭、宮岡宏、田口真、海老原祐輔、塩川和夫、細川敬祐、家田章正、坂口歌織、亘慎一、菊池崇、村田健史、篠原育、れいめい衛星によるオーロラ発光・粒子観測と地上・衛星共同研究に関する最新状況報告、地球惑星科学関連学会 2006 年合同大会、5 月 14-19 日、幕張メッセ国際会議場、2006.
 14. Kaminuma, K., M. Kanao and S. Tsuboi, 2005, Intra-Plate seismicity and recent lithospheric dynamics in the Antarctic and surrounding ocean: Estimation of the occurrence of Balleny Earthquake 1998, The 12th Seoul International Symposium on Polar Sciences, Ansan, Korea, May 17-19, 2005.
 15. 金尾政紀, 澁谷拓郎, 根岸弘明、広帯域地震計観測によるバイカルリフト帯の深部構造とテクトニクス、地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会、5 月 22-26 日、幕張メッセ国際会議場、2005.
 16. 臼井佑介, 平松良浩, 古本宗充、南極海における D” 層の異方性速度構造、地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会、5 月 22-26 日、幕張メッセ国際会議場、2005.
 17. Kanao, M., V. D. Suvorov, G. I. Tatkov and T. Toubanov, Deep structure and tectonics around the Baikal Rift Zone, Russia, from temporary broadband seismic observations, II International Workshop on ACTIVE GEOPHYSICAL MONITORING OF THE EARTH LITHOSPHERE, Novosibirsk, Russia, September 12-16, 2005.
 18. Usui, Y., Y. Hiramatsu, M. Furumoto, Anisotropic shear wave velocity structure in the D” layer beneath the Antarctic Ocean, IASPEI General Assembly, Santiago,

Chile, October 02-08, 2005.

19. 金尾政紀, 野木義史, 坪井誠司、スマトラ沖大地震 (26/12/2004) 前後の南極プレート周辺域における地震活動の時空間分布、第 25 回極域地学シンポジウム、10 月 13-14 日、国立極地研究所、2005.
20. 金尾政紀, 神沼克伊, 坪井誠司、南極及び周辺海域のプレート内地震活動と最近のダイナミクス、第 25 回極域地学シンポジウム、10 月 13-14 日、国立極地研究所、2005.
21. 臼井佑介, 平松良浩、南極海周辺の下の D" 層の異方性と速度不連続面、第 25 回極域地学シンポジウム、10 月 13-14 日、国立極地研究所、2005.
22. 金尾政紀, 野木義史, 坪井誠司、スマトラ沖大地震 (26/12/2004) 前後の南極プレート周辺域における地震活動の時空間分布、日本地震学会 2005 年度秋期大会、10 月 19-21 日、北海道大学、2005.
23. 臼井佑介, 平松良浩, 古本宗充、南極海の下の最下部マントルにおける S 波速度異方性と速度不連続面、日本地震学会 2005 年度秋期大会、10 月 19-21 日、北海道大学、2005.
24. 臼井佑介, 平松良浩, 古本宗充、南極海の下の D" 層の S 波速度異方性について、スタグナントスラブ第 2 回シンポジウム、11 月 10-11 日、九州大学、2005.
25. Kanao, M. and T. Shibutani, Lithospheric shear velocity models beneath continental margins in Antarctica inferred from genetic algorithm inversion for teleseismic receiver functions, AGU Fall 2005 Meeting, San Francisco, California, USA, December 05-09, 2005.
26. Usui, Y., Y. Hiramatsu, M. Furumoto, Seismic anisotropy and velocity discontinuity in the lowermost mantle beneath the Antarctic Ocean, AGU Fall 2005 Meeting, San Francisco, California, USA, December 05-09, 2005.
27. Kanao, M., Y. Nogi and S. Tsuboi, Spacial distribution and time variation In seismicity around Antarctic Plate before and after the M9.0 Sumatra Earthquake, 26 December 2004, The 4th International Workshop on Statistical Seismology, Hayama campus of the Graduate University for Advanced Studies, Japan, January 9-13, 2006.

〔論文発表〕

1. Ebihara, Y., M.-C. Fok, S. Sazykin, M. F. Thomsen, M. R. Hairston, D. S. Evans, F. J. Rich, and M. Ejiri, Ring current and the magnetosphere-ionosphere coupling during the super storm of 20 November 2003, *Journal of Geophysical Research*, 110, A09S22, doi:10.1029/2004JA010924, 2005.
2. Kataoka, R., D. H. Fairfield, D. G. Sibeck, L. Rasttter, M.-C. Fok, T. Nagatsuma, and Y. Ebihara, Magnetosheath variations during the storm main phase on November 20, 2003: Evidence for solar wind density control of energy transfer to the magnetosphere", *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21108, doi:10.1029/2005GL024495, 2005.
3. Fok, M. -C., Y. Ebihara, T. E. Moore, D. M. Ober and K. A. Keller, Geospace storm

processes coupling the ring current, radiation belt and plasmasphere, Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging, Geophysical Monograph Series 159, 207-220, AGU, 2005.

4. Sato, N., A. Kadokura, Y. Ebihara, H. Deguchi, and T. Saemundsson, Tracing geomagnetic conjugate points using exceptionally similar synchronous auroras, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17109, doi:10.1029/2005GL023710. 2005.
5. Usui, Y. Hiramatsu, M. Furumoto and M. Kanao, Thick and anisotropic D" layer beneath Antarctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13311, doi: 10.1029/2005GL022622. 2005.
6. Kaminuma, K., M. Kanao and S. Tsuboi, Intra-Plate seismicity and recent lithospheric dynamics in the Antarctic and surrounding ocean: Estimation of the occurrence of Balleny Earthquake 1998, The 12th Seoul International Symposium on Polar Sciences Proceedings, 55-56, 2005.
7. 金尾政紀, V.D.Suvorov, G.I.Tatkov, T.A.Toubanov、シベリアクラトン～バイカルリフト帯の深部構造と広帯域地震計観測、月刊地球 2005 年 10 月号、768-772、2005.
8. 臼井佑介, 平松良浩, 古本宗充, 金尾政紀、ユーラシア北極域の D" 層の地震学的異方性と速度不均質、月刊地球 2005 年 10 月号、794-798、2005.
9. Kanao, M. and K. Kaminuma, Seismic activity associated with surface environmental changes of the Earth system, around Syowa Station, East Antarctica, Futterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H., Tessensohn F. (eds) Antarctica: Contributions to global earth sciences, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 361-368, 2005.
10. Kanao, M., V. D. Suvorov, G. I. Tatkov and T. Toubanov, Deep structure and tectonics around the Baikal Rift Zone, Russia, from temporary broadband seismic observations, II International Workshop on ACTIVE GEOPHYSICAL MONITORING OF THE EARTH LITHOSPHERE Proceedings, 218-222, 2005.
11. Kanao, M., Y. Nogi and S. Tsuboi, Spacial distribution and time variation in seismicity around Antarctic Plate before and after the M9.0 Sumatra Earthquake, 26 December 2004, The 4th International Workshop on Statistical Seismology Proceedings, 136-137, 2006.

【参考文献】

1. Takehiko Aso, Masaki Ejiri, Akira Urashima, Hiroshi Miyaoka, Åke Steen, Urban Brändström, and Björn Gustavsson, First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995, *Earth Planets Space*, 50, 81-86, 1998
2. 田邊國士、帰納推論と経験ベイズ法 逆問題の処理をめぐって、階層ベイズモデルとその周辺、岩波書店、p.235,2004.