

プロジェクト名： データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン（略称：データ同化）

プロジェクトディレクター： 中野 純司教授（統計数理研究所）

〔1〕 研究計画・研究内容について

(1) 目的・目標

広範囲な分野の複雑なシステムを対象とする研究の具体的な問題解決に向けた共同研究をとおして、シミュレーションとデータ解析の作業を一体化する手法の高度化と一般化を実現する。あわせて、未適用分野の発掘を戦略的にすすめ、個別科学を横断的につなぐ新しい学問領域を創る。

(2) 必要性・重要性（緊急性）

コンピュータの計算能力の向上とともに大規模かつ複雑精緻なものとなるシミュレーションモデルと、飛躍的に増大することが予想される観測・計測データの融合技術の開発は急務である。あらゆる研究分野で、シミュレーションが生み出す大量の計算結果をどのように評価するのか、また研究対象に関する多面的網羅的な観測・計測データをシミュレーションモデルの改良にどう生かしたらいいのか、エキスパートがごくかぎられた部分を不完全に考察しているのが現状である。このように、シミュレーションと大量データを連係させる統計数理をないがしろにしてきたことが、あらゆる科学研究の推進のボトルネックとなってきたと言えよう。データ同化はまさにこの問題に真正面から取り組む研究で、その研究の端緒はまだ20年に満たない。そのこともあり、日本においてははまだ統計数理研究所以外に、手法の総合的研究を行っているところがないという、まことに危機的状況である。データ同化技術は、初期投資として高性能の計算機を用意しそれを有効利用することで、コストを下げつつ一方推定精度は向上させる観測・実験システムの提案も可能であり、大規模予算を投入する大型装置や大規模実験の設計においても今後必須の道具となることは確実である。

(3) 期待される成果等（学問的効果、社会的効果、改善効果等）

学問的効果としては、理論を基礎とする計算推論技術であるシミュレーションと、実験・観測データを基盤とする推測手段であるデータ（統計）解析法の両者を統合する新しい学問体系の構築がまず挙げられる。このようなシミュレーションと大量データ解析を両輪とする学問体系の確立は各個別科学分野において長年の夢であり、その波及効果はシミュレーションを研究手段に用いているあらゆる分野に及ぶ。本プロジェクトは、人間とコンピュータが協調してつくりあげる“データにもとづいて考えるスーパー科学脳”の実現を目指していると言える。

データ同化の分かりやすい目的に、予報を行うための最適な初期条件の探索や、スケールが全く異なる現象どうしをシームレスに連結するシミュレーションモデル内のパラメータ設定がある。これらにより、実はすぐにでも手元のシミュレーションを高性能化することが可能であるにもかかわらず、具体的に限定された計算資源の中でどう工夫したらよいか暗中模索の状態となっている。仮想観測ネットワーク実験や感度解析が可能になるのもデータ同化の恩恵の一つである。社会的ニーズに十分応えるスピードで、さらに限定された研究費内で最大限の知見を獲得する、観測や実験システムの立案が可能となる。時間・経費を節約できる効率的な実験・観測システムを構築することは、納税者である国民の理解を得る上で非常に大切な観点である。

これまでは、シミュレーションのような順問題的に課題を解決する研究者の養成が学術分野の体制であったが、本プロジェクトの推進により、データから理論に遡る、まさに逆問題解決のセンスも兼ね備

えた新しいタイプの研究者の養成が可能になる。これにより、どのようにして取り扱ったらよいか分からない問題に果敢に取り組める人材の育成プログラムを強化できる。

(4) 独創性・新規性等

データ同化の計算基盤を与えるのが状態空間モデルにもとづくフィルタリング計算技術で、その研究開発では統計数理研は誇るべき経験と実績がある。研究所内に設置された、予測発見戦略研究センターデータ同化グループは、先端的同化手法やその上位概念物であるメタシミュレーション法の研究開発とともに、インパクトのある新規適用分野の開拓を行ってきた。実際に、津波、海洋潮汐、宇宙空間と、データ同化の概念を比較的柔軟に理解してもらえる分野で新しい研究テーマを複数開発できたばかりでなく、ゲノム情報分野、“ものづくり”においてデータ同化の研究を開始し、まさに「統計数理研究所データ同化グループが種をまき双葉にまで育て上げた」と言える。データ同化の公開講座を同グループメンバーで平成 20 年度（4 日間連続）と 21 年度（2 日間連続）に開講したが、受講希望人数が多く締め切り前に早々と応募を締め切るなど、非常に好評であった。また現在“データ同化”のキーワードでもってインターネットで検索すると、トップサイトの 3 つは本プロジェクトに直接関連したページである。これらから、データ同化手法の研究を本グループが先導していることを物語るとともに、新規適用分野の開発を含めてデータ同化の総合的研究推進において国内の中心的役割を果たしていることは明らかである。

(5) これまでの取り組み内容の概要及び実績

統計数理研究所・予測発見戦略研究センターの平成 15 年 9 月の創設時は、データ同化グループは動的磁気圏モデル研究グループという名を掲げ、大量データにもとづく地球磁気圏の時空間経験モデルの構築を主たる研究目的としていた。平成 16 年 10 月に JST の CREST「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」研究領域に、「先端的データ同化手法と適応型シミュレーションの研究」題目で、樋口教授を代表とする同グループメンバーが提案する研究プロジェクトが採択されたため、そのプロジェクトが実質的に動き始めた平成 17 年 4 月にグループ名をデータ同化グループと変更し、研究推進体制を整備した。これまで所長のリーダーシップにより、同グループに研究スペースの配分が優遇されおり、また最低限の基盤的研究費の継続的な支援が行われている。なお、その CREST プロジェクトは平成 21 年度に終了したが、高い評価を得ている。

機構内におけるデータ同化の研究は、これまで主に JST/CREST 事業の他には、次世代スパコンの研究開発資金により、理化学研究所を中心に機構外の複数の国内の研究機関に所属する多くの研究者群を巻き込んで行われているアプリケーションソフト開発プロジェクト（「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」）内で、生命体データ同化技術とアプリケーションの開発が行われている。その開発も統計数理研究所が担当している。これに対して、第 1 期の新領域融合研究センターの活動としてのデータ同化の研究は統数研との共同研究が、融合プロジェクト「機能と帰納」により国立極地研究所と、また育成融合プロジェクト「デジタル細胞を利用した仮説発見」により国立遺伝学研究所と小規模に行われていた。

(6) 国内外における関連分野の学術研究の動向

データ同化にはオンライン型（逐次データ同化と呼ばれる）とオフライン型（非逐次データ同化）がある。非逐次型データ同化は比較的昔（1990 年代中頃）から欧米の気象・海洋学の現業機関を中心に研究開発が進んできており、国内においては JAMSTEC と気象庁がその中心的存在である。一方、統計数理研究所のデータ同化グループは、オンライン型である逐次データ同化手法の研究とその応用を行って

いる。同グループは、データ同化手法を統計科学の枠組みで正確に定義し、統計科学や情報科学の分野において蓄積されてきたアルゴリズムやモデリングに関する研究成果を利用しながら、これからの計算機インフラを視野に入れつつ、実装が平易かつ広い分野に適用できる逐次データ同化手法の開発を行ってきた。このような研究を行っているのは国内では同グループのみであったが、気象庁にて逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタを用いた予報の現業化が始められつつあることからしても、逐次データ同化技術の有効性は国内においてはようやく認められてきたと言えよう。また、大気海洋結合モデルへのアンサンブルカルマンフィルタの適用は同グループが世界初であったが、同様のデータ同化研究は、中国科学院とアメリカ大気研究センター(NCAR)でも進められている。

[2] 研究計画

(1) 全体計画

テーマ	22年度 (予備研究)	23年度	24年度	25年度	26年度	27年度
研究体制の編成						
情報収集・整理						
研究会・ワークショップの開催	←→					
研究体制の見直し	←→	→				
数理・計算チーム	←					→
モデリング、データデザインチーム			←→	→		

(2) 各年度の計画

平成 23 年度

データ同化に関する国際会議を隔年毎に、また国内ワークショップを毎年開催する。数理・計算チームは超高次元アンサンブルベース同化手法の数値的問題点の解決に取り組む。あわせてアクセラレータを用いた粒子フィルタの高速化に注力する。グローバル MHD シミュレーションモデルの境界パラメータとして使うため、観測データを収集する。システムモデル・状態空間モデルの構築が完了し次第、データ同化のための初期実験を行う。PANSY での電離圏観測に先立って、統計モデルを用いた多チャンネル信号からの信号分離アルゴリズムの開発をすすめ、実運用に結びつける準備研究を行う。データデザインチームはデータ獲得作業を本格的に開始する。得られたデータは随時適切なレベルのデータ同化手法をパイロット的に適用し、主にモデルの改良や定量データの取得方針の改善につなげる。データ同化研究プロジェクト事務局は、NOE 構築のための各機関との連携協力作業をすすめる。

平成 24 年度 (中間評価)

数理・計算チームはデータデザインチームと連携し、獲得したデータを用いたデータ同化実験を開始する。同時に超高次元確率ベクトルを持つ、データ同化用統計モデルの評価に関する数値的問題を研究する。アクセラレータを用いた簡便・経済効率的なデータ同化システムのプロトタイプを構築する。併せて、超並列(マルチコア)アンサンブルベース同化計算アルゴリズムの開発も進める。研究体制の見直しのために、国内ワークショップ等にデータ同化の実務経験者を招待し、データ同化実験(観測)の進め方について意見をいただく。モデリングチームは、グローバル MHD シミュレーションモデルへの

データ同化にむけて初期実験を完了する。初期実験結果と観測データを比較し、状態空間モデル内のパラメータ、誤差の評価を行う。評価にあたっては磁気圏-電離圏結合モデルの専門家から意見をいただく。解像度の向上とダイナミクス抽出を可能とする状態空間モデルを構築し、これまで精度の高い観測が難しかった大気乱流にかかわる物理量の信頼度の高い推定値を得ることにより、データ同化結果の質の向上に結びつける。データデザインチームは、引き続きデータの取得とデータ同化への適用を行う。データ同化研究プロジェクト事務局は、引き続き各機関との覚え書き（諸外国とは MOU）締結作業などの研究連携作業をすすめる。

平成 25 年度

国内外のデータ同化実務機関を巻き込み連携・協力してデータ同化に関する国際会議を開催する。この国際会議に内外のデータ同化に関する識者を招待し、中間評価を実施する。数理・計算チームは、データ同化のアイデアを取り込んだ階層的シミュレーション法の研究に取り組むとともに、簡便・経済効率的なデータ同化システムの実問題への適用による評価と、超並列計算機へのアルゴリズムの実装もあわせて行う。モデリングチームは、グローバル MHD シミュレーションモデルへのデータ同化に使われる状態空間モデルや誤差について、モデルのパラメータと誤差の重みづけを再検討する。初期実験結果と観測データとの比較により、同化システムの改善を目指す。高分解能 4 次元モデルへの同化手法の開発を本格的に開始する。データデザインチームは、前年度のデータ同化実験の進め方の検討結果にもとづき、データ獲得（観測）を大規模に行う。さらには同年度までの解析結果を小括し、対外発表などを通じて他の系への応用可能性を探る。

平成 26 年度

数理・計算チームはデータ同化型階層的シミュレーションアルゴリズムの超並列計算機上での実装実験を行う。同チームはあわせて、簡便・経済効率的なデータ同化システムを完成し一般に公開する。モデリングチームは、初期実験結果から改善された同化システムをグローバル MHD シミュレーションモデルに実装する。データ同化によって再現される磁気圏構造の変化、電離層電流について、サブストームの専門家から意見をいただく。大気レーダー観測データの輸送問題に関しては、極地研を中心とする既存の観測ネットワークを持つ機関との連携も図る。データデザインチームは、前年度からの大規模なデータ獲得を引き続き行うとともに、数理・計算チームと合同でデータ同化実験結果の多面的かつ慎重な検討を行い、データ同化実験用のデータセットとしての完成度を高めることに注力する。

平成 27 年度

数理・計算チームは、開発した理論、アルゴリズムをまとめた報告集、可能であればデータ同化理論の教科書を出版準備する。一般公開したシステムの不具合等の修正を行う。あわせて、データ同化実装に関するノウハウ等をまとめたウェブサイト構築する。そのサイト、あるいは統合データベースセンター等で、獲得（観測）したデータ同化実験用のデータセットを公開する。モデリングチームは、グローバル MHD シミュレーションモデルに同化システムを実装し運用する。同化モデルと、非同化モデルについて 3D 可視化ツールによる比較を行う。比較結果はウェブサイトに公開し、データ同化のインパクトを一般にアピールする。また、グローバル MHD シミュレーションの外部境界（太陽風-磁気圏）、内部境界（磁気圏-電離圏）を支配する力学モデルについて新しい発見があればこれを学会で発表し、他の研究者と意見を交換する。局所的な地域での垂直的な観測データと、世界各地あるいは極域において既存の観測ネットワークによる広域データとを融合させることにより、乱流スケールでの 4 次元的なデータ同化を試みる。データデザインチームは、成果公開を通じてデータ同化手法の生命科学分野、特に定量

イメージングデータを利用した発生細胞生物分野への普及・発展に努める。

平成 28 年度以降の展開

数理・計算チームでは、この時期には既に本格化していると思われる「ポストペタスケール」あるいは「エクサスケール」コンピューティングの潮流に合わせ、本プロジェクトで開発した超並列計算機用のソフトウェアや計算技術を大幅に改良することを目指す。さらには、現在の計算機リソースをもってしてもデータ同化を実施することが困難な超大規模問題について、解決することが可能かどうかを検討する。モデリングチームでは、本プロジェクトで得たノウハウや成果をもとに、グローバル MHD シミュレーションモデルだけでなく、他の太陽圏・磁気圏・電離圏モデルへの同化システムの実装を試みる。また、将来は多くの大学や研究機関において、より多くのグリッド数、パラメータ数の大規模シミュレーションや多点観測網の構築に着手するであろうことを見据えて、データ同化によるシミュレーションモデルの改良とともに、データ同化による仮想観測ネットワーク実験や感度解析を行うことにより、限られた研究費で最大の知見を獲得する最適な実験・観測システムの立案・構築に貢献する。さらに、大気レーダーを用いた物理パラメータの抽出では、光学観測データの知能的解析による高分解能データとの有機的結合を進める。また、リアルタイムモデル同化による結果を観測システムにフィードバックすることにより、適応的に最適な観測スキームを構築する技術を検討する。これらにより、さらに進化したデータ同化に基づく観測・解析手法が生まれることが期待される。データデザインチームは、それまでの成果を分析し、データ同化手法が効果的な問題設定、対象を体系化する。その結果を踏まえて、データ同化手法を駆使して発生細胞生物学の問題に取り組む。チーム外の生物研究者と積極的に連携し、データ同化手法導入の助言を行う。また、そのようにデータ同化手法を取り入れた生物研究者を集めて研究会を開催するなど、普及・発展に努める。

[3] 研究推進・実施体制

研究代表者

[統計数理研究所] 中野純司

共同研究者

[統計数理研究所] 樋口知之、佐藤整尚、上野玄太、吉田 亮、中野慎也、長尾大道、斉藤正也、才田聡子、鈴木香寿恵

[国立情報研究所] 三浦謙一

[国立遺伝研究所] 相賀裕美子、木村 暁、長谷川和輝、小塚奈津美、林 華子

[国立極地研究所] 宮岡 宏、門倉 昭、小川泰信、田中良昌、元場哲郎、中村卓司、堤 雅基、富川喜弘、山内 恭、山岸久雄、西村耕司

[東北大学] 太田雄策

[東京大学] 宮野 悟、佐藤 薫

[千葉大学] 中田裕之

[名古屋大学] 藤井良一、三好由純、中溝 葵

[京都大学] 海老原祐輔、宮崎真一、佐藤 享、村上 章

[山口大学] 松野浩嗣

[九州大学] 田中高史、河野英昭、広瀬直毅、吉川顕正、渡辺正和

[長崎大学] 万田敦昌

[JAMSTEC/ ESC] 松岡大祐

[気象大学校] 藤田 茂

〔4〕 研究の進捗状況

〈数理・計算チーム〉

(1) 高次元問題への適用に向けた粒子フィルタの改良

粒子フィルタは、確率分布から抽出した大量のサンプルで確率分布の形状を表現することで、状態推定を行う手法である。粒子フィルタは、カルマンフィルタ等のような正規分布を前提としたアルゴリズムではないため、正規分布に限らず様々な確率分布を扱うことができるという利点がある。しかし一方で、必要なサンプル数が変数の数に対して指数関数的に増加するため、状態ベクトルの次元が大きい場合には、多大な計算資源が必要になるという欠点もある。この問題に対処するために、今年度は2つのアプローチで計算効率の向上を試みた。

① 大規模並列計算機の活用

粒子フィルタでデータ同化を行う際に最も計算量が必要となるのは、一期先予測の手続きである。粒子フィルタの一期先予測の手続きでは各粒子についてそれぞれシミュレーションを走らせる必要があり、シミュレーションを粒子数と同じ回数だけ繰り返すことになるからである。しかしこの部分は、粒子ごとに独立に計算できるため、完全に並列処理が可能である。そこで我々は、大規模並列計算機を使って一期先予測の部分を計算することで、粒子フィルタの計算効率の向上を目指して研究を進めてきた。

大規模並列計算機上で粒子フィルタを実行する際には、リサンプリング時に計算ノード間の通信がランダムかつ大量に発生することが問題となる。これを解決するための手段として、粒子を幾つかのグループに分割するという方法が考えられる。グループごとにリサンプリングを行えば、ノード間の通信量を抑制し、かつ並列性を高めることができる。但し、単にグループに分割してグループごとにリサンプリングを実行しただけでは、何度かリサンプリングを繰り返すとグループ内の粒子の多様性が失われ、精度が悪化してしまう。そこで昨年度は、図 S-1 のように全計算ノードを2次元平面にマップした上で近接の4ノードを1つのグループとし、時間ステップごとにグループ分けを切り替える手法を考案した。この手法によって、ある程度の精度を保ちながら計算速度を大きく改善することに成功した。

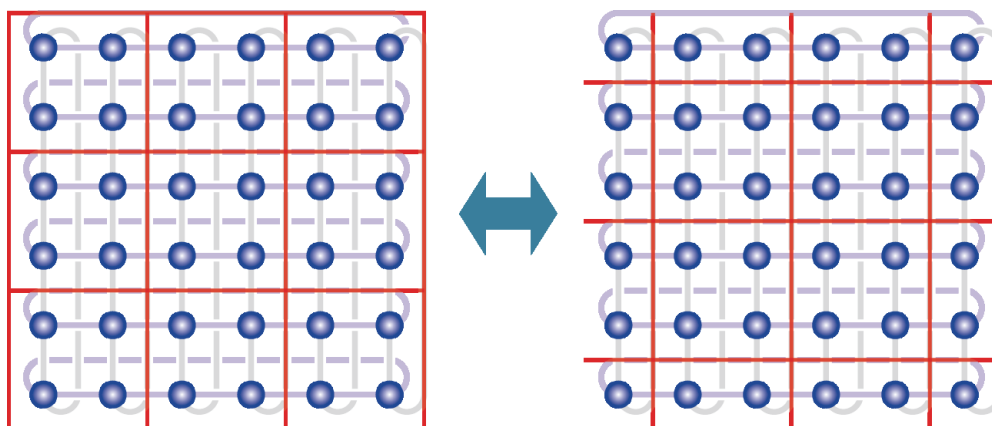


図 S-1: 2次元マップ上で定義したグループ分けパターン。

しかし、さらに並列度を上げて粒子のグループ分けを細かくしていくと、再び計算精度の低下が問

題となってくる。これは、計算ノード間の通信を細かく分割したグループ内に制限することで、計算ノード間の重みのばらつきを十分に解消しきれなくなり、確率密度分布の推定に寄与しない粒子の割合が増大することが原因となって起こる。並列化効率の向上と精度の低下とはトレードオフの関係にあり両立させるのは難しいが、計算過程上で重みのばらつき具合をモニタリングし、ばらつきが大きくなった時のみ全体の重みのばらつきを解消するような手続きを施せば、さほど計算効率を低下させることなく計算精度を維持できると考えられる。

今年度は、粒子間の重みのばらつき具合や計算ノード間の重みのばらつき具合を評価するために情報エントロピーに基づく指標を導入し、その指標を用いて精度の悪化リスクを検知する方法を開発した。エントロピーを用いてステップごとに重みのばらつきを評価し、重みのばらつきが大きくなった時のみ全計算ノードで重みのばらつきを解消する手続きを実行することで、計算効率を大きく悪化させることなく高精度の推定が実現できることを確認した。図 S-2 の左側は、重みのばらつきを解消する手続きを入れなかった場合において、各計算ノードに割り当てられた粒子による予測の性能の悪化の度合いを示したものである。この図では、1024 の計算ノードを 32×32 の 2 次元平面にマップし、各ノードに割り当てられた粒子による推定が成功しているものは暖色で、失敗しているものは寒色で示している。寒色のノードが多くなると実質的に推定に寄与する粒子が少なくなるので、性能が悪化することになる。図 S-2 の右側が重みのばらつきを解消する手続きを追加した場合の結果である。各ノードでの推定のよさのばらつきが解消されており、粒子数に見合う精度での推定が可能となることが示されている。

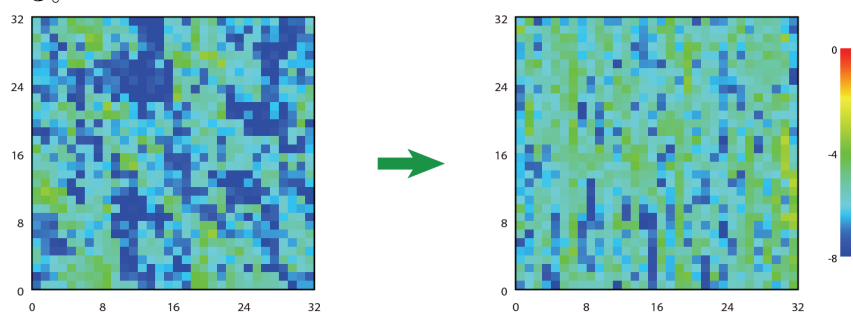


図 S-2: 各計算ノードに割り当てられた粒子による推定性能の比較。

② 一期先予測の計算効率の改善

粒子フィルタにおいて、予測分布を表現する各粒子は、一つ前の時間ステップのフィルタ分布を表現する各粒子から 1 個とシステムノイズを表現するサンプル 1 個から生成される。通常の実装では、前の時間ステップのフィルタアンサンブルの粒子 1 個に対して予測アンサンブルの粒子 1 個を対応させ、システムノイズを表現するサンプルについてはシステムノイズを表現する確率分布からランダム抽出したサンプルから生成する。この方法は、十分な数の粒子を使えばよい予測分布の近似を与える。しかし、粒子の数が充分でない場合には、システムノイズを表すサンプルのサンプリング誤差のために、予測分布の形状が歪められてしまうという問題がある。この問題を回避するために、もとの粒子数よりも多数のブートストラップサンプルを抽出することを考えた。これは、フィルタアンサンブル粒子 1 個に複数のシステムノイズのサンプルを割り当て、1 個のフィルタアンサンブル粒子から複数の予測アンサンブル粒子を生成することに相当する。この方法は、一般の問題では単に粒子数を増やしたのと同じことになって計算量が著しく増大するが、加法的システムノイズを仮定した場合には、フィルタ分布粒子 1 個につきシミュレーションを 1 回走らせるだけで複数の予測分布粒子が生成されるため、計算量がある程度抑えられる。図 S-3 は、加法的システムノイズを仮定した場合に、この方法がどのように機能するかを模式的に示したものである。フィルタアンサンブル粒子の数が充分でない

場合、フィルタアンサンブル粒子 1 個にシステムノイズのサンプルを 1 個ずつ割り当てる方式では予測分布の形状が歪められてしまう場合があるが、システムノイズのサンプルを多数割り当てることで分布の形状がうまく表現され、高精度の推定値が精度よく得られる。例えば Lorenz 96 モデルを用いたある双子実験では、通常の実装で 200 万粒子を使って達成できる精度が、わずか 3 万程度のフィルタ分布粒子（すなわち実際にシミュレーションで動かす粒子）で実現されたことを確認している。Lorenz 96 モデルのシミュレーションに要する時間は少ないので、計算速度は 3 倍速くなった程度であるが、規模の大きいシミュレーションモデルに適用すれば、より効果が大きくなるものと考えている。

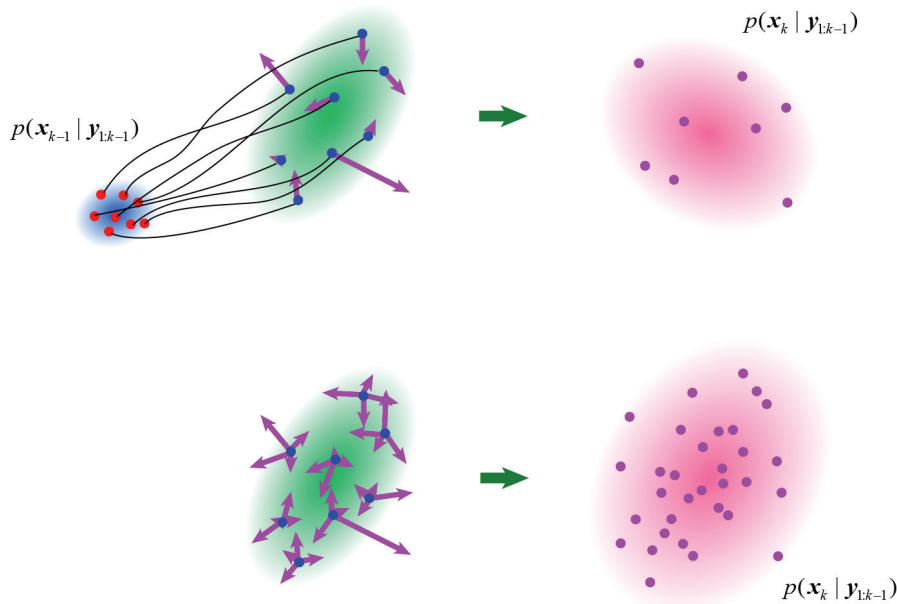


図 S-3: フィルタアンサンブル粒子 1 個にシステムノイズのサンプルを 1 個割り当てる方式では予測分布の形状が歪められてしまう場合がある(上)が、システムノイズのサンプルを多数割り当てることで分布の形状がうまく表現される(下)。

(2) アンサンブルカルマンフィルタの応用

粒子フィルタは非線型・非ガウス問題にも適用できるものの、多大な計算資源が必要となるという欠点がある。上述のように、我々は粒子フィルタの効率化の研究も進めているが、それでも、状態ベクトルの次元が極めて大きい場合には現実的な計算時間でよい解を得るのは難しいのが現状である。アンサンブルカルマンフィルタは、状態の確率分布を複数の実現値（粒子）で表現することで状態推定を行う手法の一つである。粒子フィルタも複数の粒子で確率分布を表現するという点では同じだが、アンサンブルカルマンフィルタは状態の確率分布がガウス分布に近い形状であれば、粒子フィルタよりもはるかに少ない粒子数でよい推定が得られるため、粒子フィルタと比較して著しく計算効率がよいという利点がある。特に、アンサンブルカルマンフィルタの一種であるアンサンブル変換カルマンフィルタは、計算効率も計算精度も優れた設計になっていることから、近年、盛んに使われるようになってきている。

我々はアンサンブル変換カルマンフィルタの応用研究として、地球磁気圏のプラズマ密度分布を推定する手法の開発を進めている。地球磁気圏のプラズマは、比較的高度の低い領域に集中しており、この領域をプラズマ圏と呼ぶ。プラズマ圏は、通常、地上高度 2 万 km 程度まで広がっている。図 S-4 は、プラズマ圏のプラズマが散乱する極端紫外光を人工衛星 IMAGE によってプラズマ圏の外から撮像した画像である。図 S-5 に IMAGE がどのような位置からプラズマ圏を撮像したかを模式的に示す。図 S-4 の中央に赤い円で示しているのが地球で、それより外側に青白く光っている領域がプラズマ圏に相当す

る。プラズマ圏の形状は日々変化しており、特に、強い磁気嵐が起こると小さく収縮する。我々の開発している手法は、プラズマ圏の構造の刻一刻の変動を IMAGE の極端紫外光画像データから推定するものである。

プラズマ圏の構造やその変化は、プラズマ圏周辺の電場によってほぼ決まる。したがって、プラズマ圏のダイナミクスを推定するためには、電場を推定することが本質的である。そこで、プラズマ圏のプラズマ密度分布だけでなく、系の各点の電場ポテンシャルも同時に推定している。図 S-6 に、実際にアンサンブル変換カルマンフィルタを用いて、IMAGE の極端紫外光画像データからプラズマ圏構造および電場ポテンシャルの空間分布を推定した結果の一例を示す。現在は、数時間程度の比較的短い時間スケールの変動を解析している段階であるが、今後は数日程度の変動も推定できるように手法の改良を進める予定である。

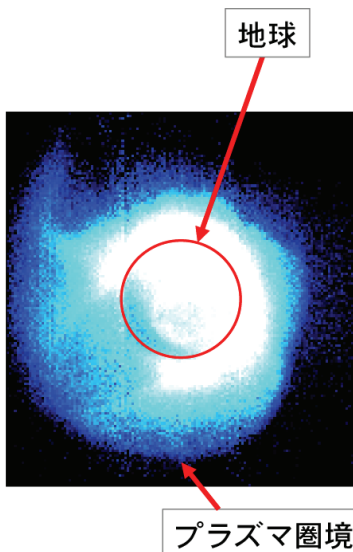


図 S-4: 人工衛星 IMAGE によって撮像されたプラズマ圏のプラズマの極端紫外光画像。

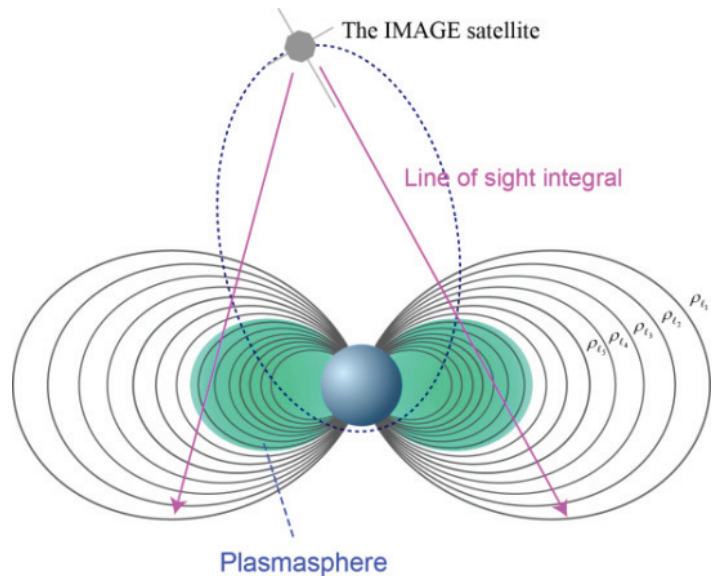


図 S-5: 人工衛星 IMAGE によるプラズマ圏プラズマの撮像観測の模式図。

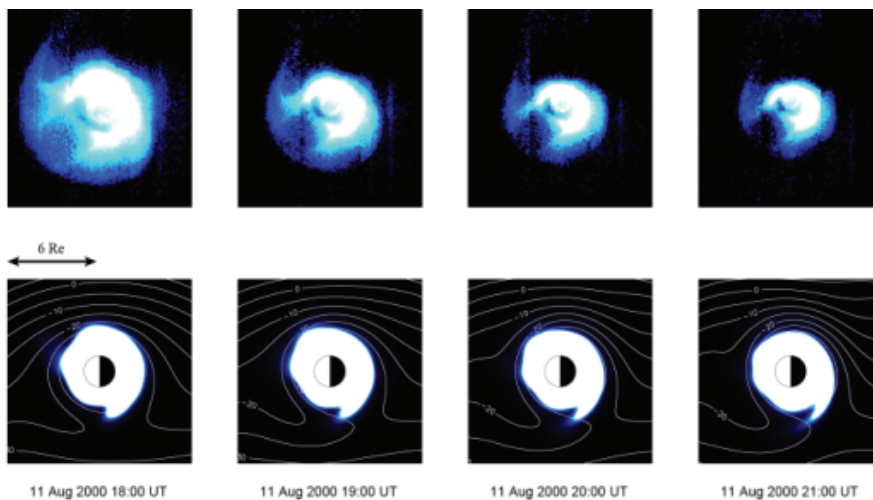


図 S-6: 人工衛星 IMAGE によって得られたプラズマ圏プラズマの極端紫外光画像(上); その画像からアンサンブル変換カルマンフィルタを用いて推定したプラズマ圏プラズマ密度分布および電場ポテンシャル分布の変動。

(3) 大地震に伴う大気変動のデータ同化研究

2011年3月11日 午後2時46分(日本時間)に発生した、観測史上4番目の大きさとなるマグニチ

ュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、東北地方太平洋沿岸部を中心に、特に巨大津波による未曾有の大被害をもたらした。以前より、大地震の発生時には大気中に音波が励起され、ついには高度数十～数百キロメートルの電離層にまで達するという現象が知られているが、東日本大震災の際には、包括的核実験禁止条約機構（CTBTO）が管理・運営する東アジアの微気圧観測点において、津波起源と思われる微気圧変動が捉えられたことが報告されている。大気中の音波速度は、津波の伝搬速度よりもずっと速いため、沿岸部における微気圧観測を強化することにより、津波の規模等の情報を到達前に予測する「津波早期警戒システム」の構築に貢献することが期待されている。

本節では、まず 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う大気変動のデータ同化研究について述べ、次いで東日本大震災に伴う大気変動および電離層変動のデータ同化研究の現況について報告する。なお、本研究の内容は、平成 24 年 1 月 27 日付の日本経済新聞夕刊第一面において紹介された。

(ア) 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う大気変動のデータ同化研究

2008 年 6 月 14 日午前 8 時 43 分（日本時間）に発生した岩手・宮城内陸地震は、マグニチュード 7 クラスの典型的な逆断層型内陸地震である。断層の長さは約 30km と推定されており、ほぼ北端に位置する震源から破壊が始まり、毎秒 2km を越える速度で南南西方向へ破壊が伝搬していったと考えられている。本地震は震源の深さが非常に浅かったこともあり、地滑りの発生によって多くの人的・物的被害をもたらされたものの、地球物理学的には本稿の主題でもある非常に興味深い現象が捉えられた。千葉県いすみ市にある包括的核実験禁止条約機構（CTBTO）が管理・運営している夷隅微気圧観測点（IS30）では、本地震に伴う数 Pa 程度の微小な気圧変動を記録した。IS30 は震央距離 417km の地点に位置しており、6 台の高感度微気圧センサーからなるアレイによって、音源のおおよその位置を割り出すことが可能となっている。観測波形には、地震発生の約 1 分後に固体地球と大気の境界を地動と共に伝搬する表面波（Rayleigh 波）が現れ、地震発生の約 25 分後には震源域から大気中を伝搬してきたと考えられる「地震音波」が現れた。すなわち非可聴帯域ではあるが、「地震の音」がかすかに聞こえたことになる。

観測された地震音波現象を数値的に再現するための数値シミュレーション法として、Kobayashi [Geophys. J. Int., 2007]によって開発されたノーマルモード計算コードを用いた。計算手順を簡単に述べると、固体地球の標準モデルである PREM (Dziewonski and Anderson [Phys. Earth Planet. Int., 1981]) および大気の標準モデルである NRLMSISE-00 (Picone et al. [J. Geophys. Res., 2002]) から構築した固体地球－大気結合系の 1 次元地球モデルについて、ノーマルモードおよびそれに対応する固有関数を求めて震源－観測点間の Green 関数を構成し、公表されている地震の CMT 解を震源関数として与えることにより、観測点における気圧変動の理論波形を計算する（詳細については、Kobayashi [2007]および Nagao et al. [FUSION 2012]を参照されたい）。

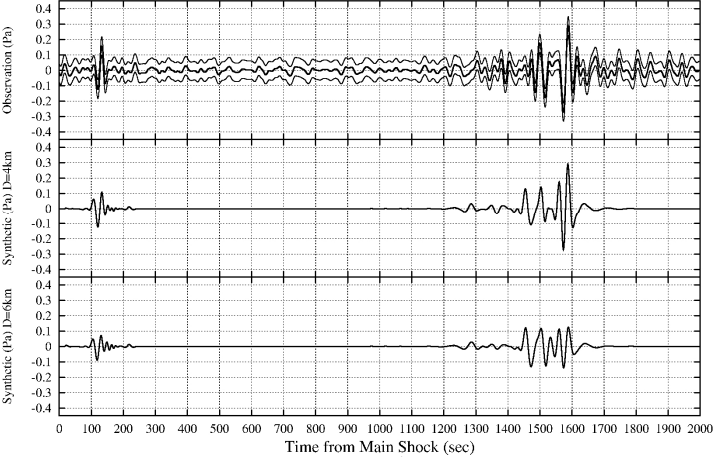
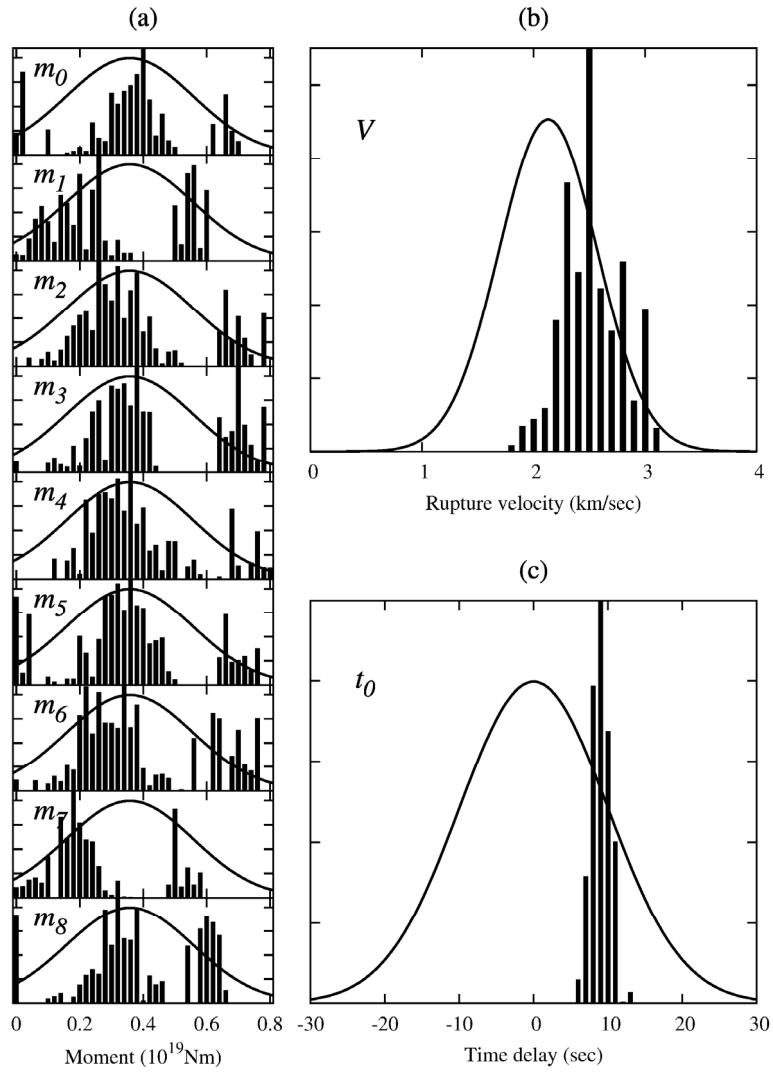


図 S-7: (a) 断層沿いに置いた各サブイベント (b) 断層の破壊伝搬速度 (c) 上層大気を吹く風の影響による地震音波の遅延時間の事前分布(実線)および事後分布(棒グラフ)。 (d) 6つの微気圧センサーのスタック波形(上段)と、事後分布を最大にするモデルパラメータ(MAP 解)によって再現された理論波形(中段: 震源の深さ 4km、下段: 同 6km)の比較。観測波形には標準誤差を付してある。

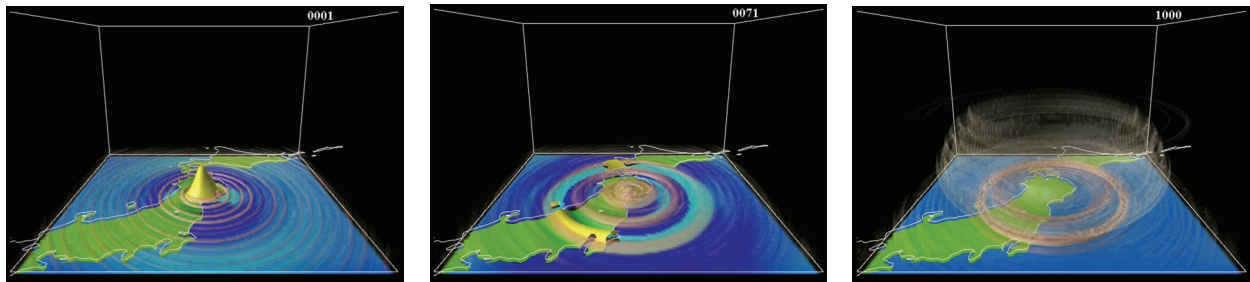


図 S-8: データ同化の結果から再現した、2008 年岩手・宮城内陸地震の(左)発生直後(中)発生から 70 秒後(右)発生から 1000 秒後の地震音波の空間分布。

データ同化のアルゴリズムに従って、理論波形と観測波形を比較したところ、最適な震源の深さは約 4km と、地震波インバージョンが得られたこれまでのモデルよりもやや浅く求まった。図 S-7(a)~(c)に、各モデルパラメータについて設計した事前分布、およびモンテカルロ探索によって得られた震源の深さが 4km のときの事後分布を示す。最も目立つ特徴として、断層沿いに配置した仮想震源のモーメントの大きさについての事後分布が複数のピークを持っていることが挙げられるが、これは断層沿いに単一の震源を仮定したモデルよりも、複数の震源を置いたモデルの方が良いことを意味している。事後分布を最大にするパラメータセットは MAP (maximum-a-posteriori) 解と呼ばれるが、断層破壊速度 については毎秒 2.5km、遅延時間 については 9 秒という値を得た。MAP 解から再現した理論波形と観測波形を比較したものを図 S-7(d)に示す。震源の深さを気象庁のモデルの 6km から、今回得られた 4km に変更すると、波形が非常によく合うことが分かる。微気圧変動の振幅は、震源の深さに対して非常に敏感であることが分かっており、この特徴を活かせば、本地震のような浅発地震については、地震データと微気圧データの同時解析によって震源の深さをより精度良く決めることが可能となる。

図 S-8 に、データ同化の結果から得られた地震音波の伝搬の時空間分布を示す。今回は微気圧観測データについては IS30 のわずか 1 点のみを用いたが、観測点が複数の場合でも、本稿で提案したデータ同化の枠組みに自然に取り込むことができる。将来、大量の観測データがオンラインで時々刻々と入力されてくるようになれば、データ同化による逐次解析が大きな威力を発揮するであろう。

(イ) 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う大気変動および電離層変動の再現

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震によって励起される地震波および地震音波の伝搬の様子を可視化するためのソフトウェアを開発し、統計数理研究所のスーパーコンピュータを利用して、大震災に伴う大気変動および電離層変動を再現することに成功した。本シミュレーションでは、地球中心から地表までの固体地球および地表から高度 1000km までの大気を考慮した 1 次元地球構造モデル、および気象庁が決定した震源解 (モーメントテンソル解) を長さ 150km の断層に沿って配置した断層破壊モデルを仮定し、各計算グリッドにおける地震波 (表面波) および音波の応答波形をノーマルモード法 (Kobayashi [2007]) によって計算した。グリッド幅は緯度・経度方向 0.1 度および高度方向 10km とした。

図 S-9 に、シミュレーション結果を示す。本地震は放出エネルギーが極めて大きく、かつ断層が非常に長大であったため、シミュレーション結果においては、地震発生直後約 10 分間は地震波と地震音波が混ざり合った非常に複雑な構造を持つ「大音響」が、周囲に伝搬していく様子が示されている。この地震音波は、高度約 300km にある電離層をも広範囲にわたって振動させたことが、GPS データの解析から分かっている。これらの波群が遠方に去った後、第二波となる地震音波が、震源域を中心に音速でゆっくりと伝搬していく様子が分かる。

本地震によって励起された地震波および地震音波は、日本各地の地震計や微気圧計によって記録されており、今後はこれらの観測データを「データ同化」の手法によって取り込むことにより、さらに高精度のシミュレーションモデルを構築することを予定している。

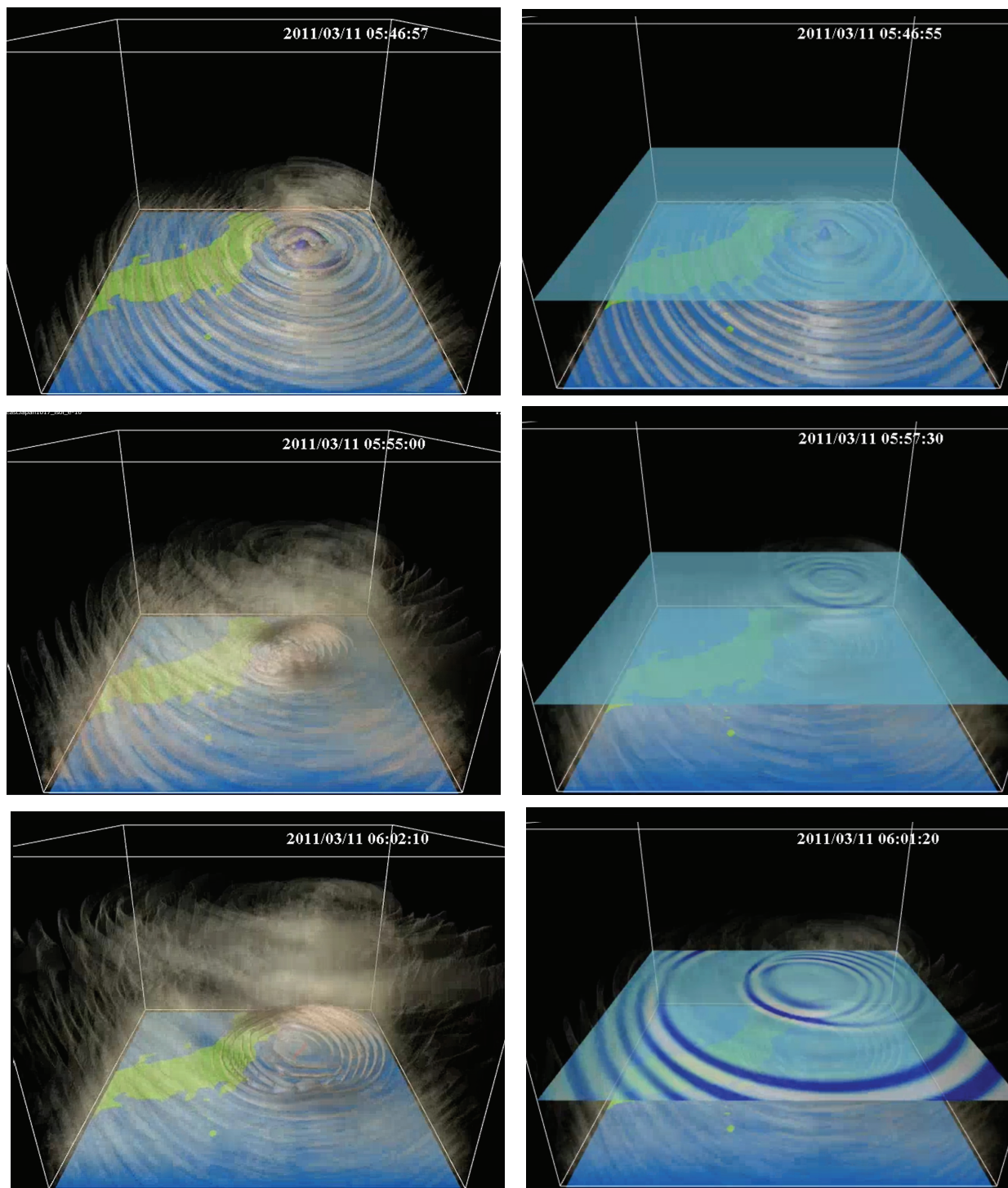


図 S-9: 2011 年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)に伴う(左)大気変動、および(右)電離層変動の再現シミュレーション。

(4) 固体地球と大気の物理的相互作用を解明するための微気圧観測

固体地球と大気との物理的相互作用メカニズムを解明することを大目標に、電気通信大学 菅平宇宙電波観測所に微気圧観測点（以下、「菅平観測点」と呼ぶ）を新たに設置し、2011年12月から微気圧の連続観測を開始した。菅平観測点では、HF ドップラーレーダーによる電離層変動の連続観測も実施しているため、微気圧と電磁気の同時観測によって、固体地球と大気の相互作用メカニズムと関連する様々な観測事実が得られることが期待できる。

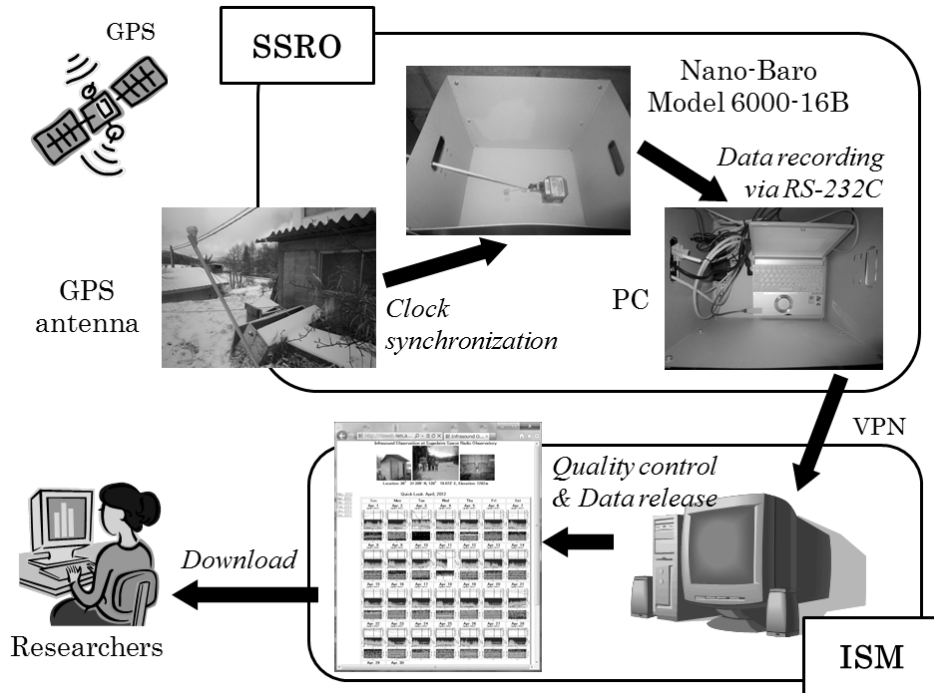


図 S-10: 菅平観測点における微気圧連続観測の概要。

長野県北部にある菅平観測点は、北緯 36 度 31 分 23 秒、東経 138 度 19 分 4 秒に位置しており、海拔が 1262 メートルであるため、普段の地上気圧は 870 hPa 程度である。図 S-10 に、菅平観測点における微気圧観測の概要を示す。設置した気圧計は Paroscientific 社製 Nano-Baro Model 6000-16B であり、800~1100 hPa の圧力レンジ内を絶対精度 8 Pa で計測することが可能である。観測条件は多段階で設定することが可能であるが、本観測では地震に伴う現象だけでなく、例えば観測点付近にある浅間山のモニタリングなど観測対象を幅広く想定しており、なるべく広帯域での観測を実施するために、サンプリング周波数を 50Hz、カットオフ周波数を 22Hz と設定している。時刻同期は GPS を用いて行われ、気圧計からデジタル出力された観測値はノートパソコンに収録される。観測データは定期的にインターネット経由で統計数理研究所に回収し、品質チェックおよび一次処理を経た後、1 秒平均値時系列およびスペクトログラムをホームページ上 (<http://daweb.ism.ac.jp/~hnagao/Infrasound/>) で公開している。研究目的を条件に、リクエストに応じて研究者に観測データを提供する方針である。

東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、本震後 1 年以上経った現在でも余震活動が非常に活発であり、それに伴う微気圧変動が菅平観測点でも捉えられている。図 S-11 上は、本震の約 1 年後となる 2012 年 3 月 14 日午後 9 時 5 分 4 秒（日本時間）に、千葉県沖で発生したマグニチュード 6 クラスの余震に伴う微気圧変動を示しており、バターワースフィルタによる 1~20 秒周期の帯域通過フィルタをかけてある。菅平観測点は、震央から見て西北西方向 250km に位置している。地震発生後、約 1 分後に現れる振幅約 1 Pa の波群は、地動とともに伝搬する表面波（Rayleigh 波）であり、約 15 分後に現れ

る振幅約 0.5 Pa の波群は、震源域から大気中を伝搬した「地震音波」である。この地震音波が観測で検出されることは比較的珍しく、この余震は震源の深さが 15km と比較的浅かったためと考えられる。この地震音波を詳しく解析すれば、この余震のような震源の浅い地震については、震源の深さを精度良く決定できることが指摘されている。

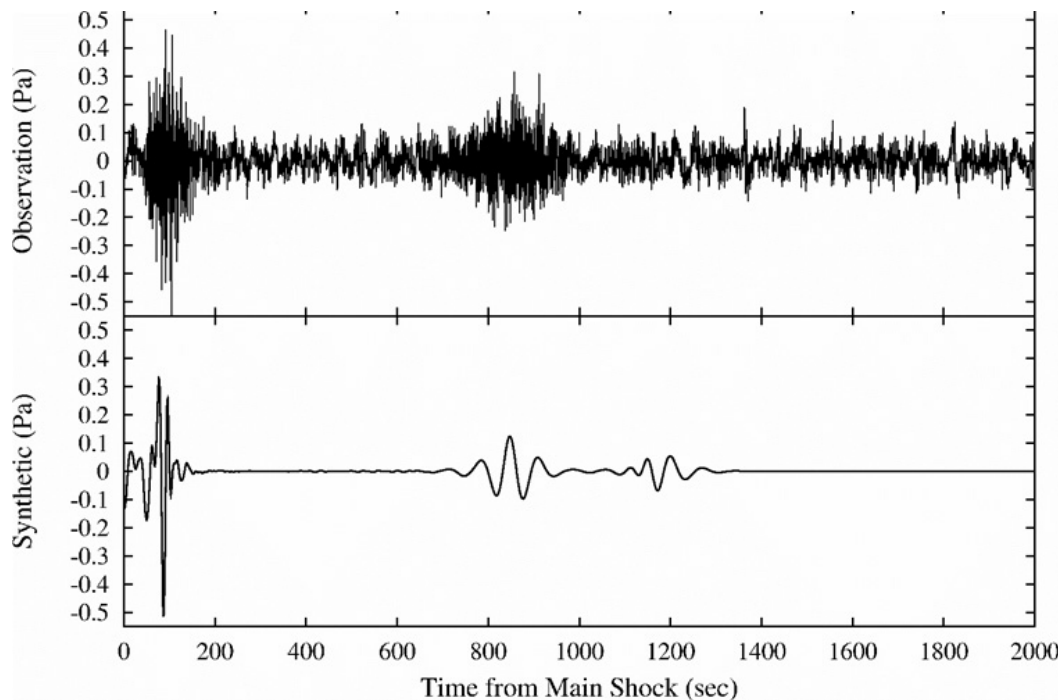


図 S-11:(上)菅平観測点で捉えられた、2012 年 3 月 14 日に千葉県沖で発生した東北太平洋沖地震の余震に伴う微気圧変動。1~20 秒周期の帯域通過フィルタをかけてある。(下)ノーマルモード計算によって再現された 10 秒より長周期の理論波形。

観測された微気圧変動現象が地震起源であることを理論的に確認するため、Kobayashi [2007]のノーマルモード計算コードを用いて、波形を再現することを試みた。微気圧データには当然ながら気象現象が多く記録されるため、固体地球と関連すると思われる現象が捉えられたとしても、このような理論計算による確認は必要である。図 S-11 下に、10 秒より長周期の帯域における理論波形を示す。観測波形(図 S-11 上)と比較すると、表面波および地震音波の走時はほぼ一致しており、観測された波群が本余震に伴う現象であることが確認できた。ただし、微気圧データに記録される地震音波は 10 秒以下の短周期成分がかなり卓越しているにも関わらず、計算コストの観点から、まだそのような短周期成分の理論計算には至っていない。ノーマルモード計算コードの高度化を含めた、今後の解析パイプラインの整備が待たれる。なお本研究は、日本地球惑星科学連合 2012 年大会において、ハイライト論文に選出された。

(5) 氷床コア年代補正モデルの開発

南極内陸部で約 3030m 採掘された氷床コアは、その氷を形成する水の安定同位体比を気温の指標とした古気候環境場の再現が期待されているが、その氷床コアデータを見る前にどのように氷床が形成されるのか、という概念を知ることが必要である。氷床上に降り積もった雪は、自らの重みで圧縮される。その際、水蒸気の拡散によって雪の結晶が変形し融合し合い、多孔質の組織を形成する。この組織を「フィルン」と呼ぶ。フィルンの上部(密度が約 550kg/m³以下の領域)では、細かい氷粒が間隔を狭めることによって密度を上昇させ、空隙が小さくなっていく。フィルン下部(密度が約 550kg/m³以上の領域)では結晶同士の融合が支配的になり、やがて雪は多結晶の氷となる。密度が 800kg/m³に達するとフィルン中の細孔ははだいに閉じ、周囲の空気と隔絶され、気泡となって氷床コアの中に保存される。フィル

ン中では、空隙同士はつながっており、表層では地上の大気ともつながっているため、フィルン内部と地上の大気の間では空気が交換できる。したがって、氷床コアの気泡の中には、回りの氷よりも年代の若い空気が入っていると考えられる。この気泡が閉じられる深度を「Close of Depth (COD)」と呼ぶ。日本の南極地域観測隊が採取したドームふじ氷床コアでは、深度約80~100mの位置にこのCODがあると考えられており、氷年代と気泡年代をそれぞれ別々に取り扱う必要がある。ここで氷年代を決める指標として酸素窒素同位体比が知られており、氷年代は正確に決定することが出来る。この氷年代と気泡年代が同じ時の深度差を推定することで、二酸化炭素濃度など、古気候変動を議論する上で重要な大気中微量物質の年代を補正・決定するという手法が従来適用されてきた。図 S-12 にこのフィルンから氷となる様子を模式的に示した。



図 S-12: 氷柱中の雪の状態変化の模式図。

Dating Method

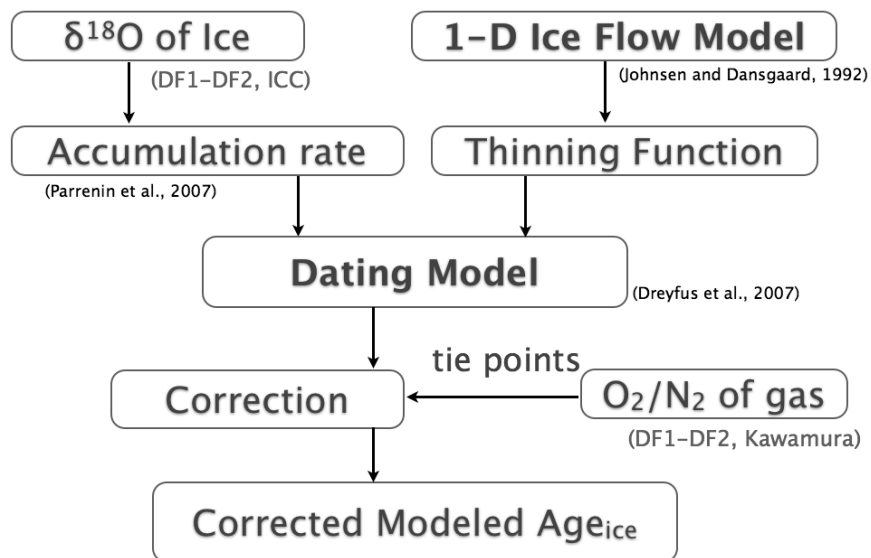


図 S-13: 今回行った南極氷床コア年代補正のフローチャート。

従来の手法として Dreyfus et al. [Climate Past, 2007]が EDC3 氷床コアに適用した、氷柱の圧密計算を行い、深度方向に沿って雪層の伸び縮みから年代を推定する、1-D 氷床流動モデルによる年代決定が挙げられる。ここでは氷年代は次式で得られる。

$$A(z) = \int_0^z \frac{1}{T(z')a(z')} dz' \dots \dots (1)$$

A: 年代, T: thinning function, a: Accumulation rate, z: 深度

しかしながら Parrenin et al. [Climate Past, 2007]で指摘されたように、ドームふじ氷床コアでは岩盤の地熱効果シナリオが十分に再現できず、氷床コア深部における同様の年代補正が難しい。そこで、

先に述べた酸素窒素同位体比による氷年代補正をまず行い、従来の手法でどの程度年代補正が可能か検証を行った。特に、ドームふじ基地では2本の深層掘削氷床コアが採取されているが、第二期深層コアの特に2400mより深部にはまだ年代補正が適用されていない。Dreyfus et al. [2007]の手法を元に、第二期深層コア中の酸素窒素同位体比による氷の絶対年代を束縛値として与え、最小二乗法によるそれぞれの深度に対する補正値を求め、第二期ドームふじ深層コアの年代補正を行った。実際の手順を図S-13のフローチャートで示す。

図S-14は、1-D氷床流動モデルによって算出された thinning function と氷中の酸素窒素同位体比から式1を用いて算出した氷年代（黒実線）と、その氷年代を酸素窒素同位体比による絶対年代を束縛値として特に2400mよりも深部に重点を置いて補正を行った（赤実線）結果を示している。束縛のない氷年代は2000m付近からずれ始め、2500mを超えた辺りから指数関数的に年代が進むことが示されている。したがって、深層部においてはモデルだけでは氷年代を推定することが難しく(Parrenin et al., 2007)、酸素窒素同位体比による束縛が必須であることが確認された。図S-14では詳しく示していないが、最深層部において年代の逆転がみられ、酸素窒素同位体比による束縛だけでは解決しない問題が依然残っている。今後の研究計画としては、今回のように1-D氷床流動モデルによる圧密計算を行って深度方向の伸び縮みから年代を推定するのではなく、ベイズ統計を用いた年代決定モデルの開発を行い、1-D氷床流動モデルによる補正値との比較や問題点などを明らかにする予定である。その上で、氷と気泡の年代差を推定しそれぞれの年代を算出する年代モデルの構築を行い、古気候変動メカニズムを明らかにするための氷床コアデータを整備することを予定している。

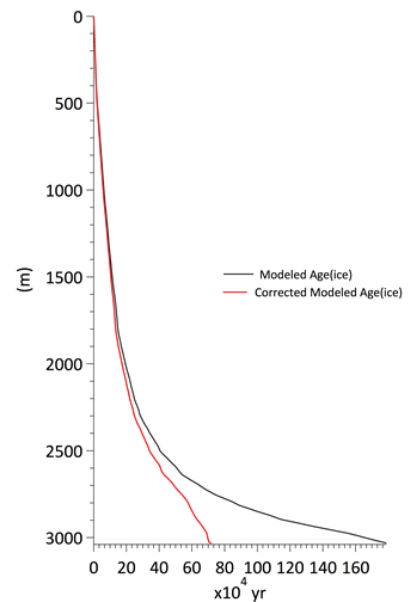


図 S-14: 束縛を行わない氷年代(黒実線)と酸素窒素同位体比による絶対年代による束縛を行った補正年代(赤実線)。

〈モデリングチーム〉

モデリングチームでは、(1)グローバル MHD シミュレーション、ならびに、(2)大気レーダーを用いた大気物理パラメータの抽出、の具体的課題にデータ同化手法を適用し、その有用性を実証する研究を進めた。

(1) グローバル MHD シミュレーション

地球磁気圏の電磁流体力学(MHD)モデルでは、内部境界パラメータとして電離圏の電気伝導度が出力される。一方、観測としては、欧州非干渉散乱(EISCAT)レーダーで観測されている電子密度から局所的な電気伝導度が、また、Super DARN レーダー観測から求まる電離圏電場と地上磁場データを用いて広域の電離層電気伝導度を推定することが可能である。本年度は、データ同化を用いて観測値と計算値の誤差を最小にする電離圏電気伝導度（沿磁力線・ペダーセン・ホール電気伝導度）を求める初期実験として境界パラメータを任意に与えてシミュレーションを実行し、その結果を解析した。

地球磁気圏近尾部から磁力線をトレースすると、オーロラ発生後に磁力線フットポイントの経度方向の間隔が南北両半球で変化する事が分かった（図 M-1、図 M-2）。

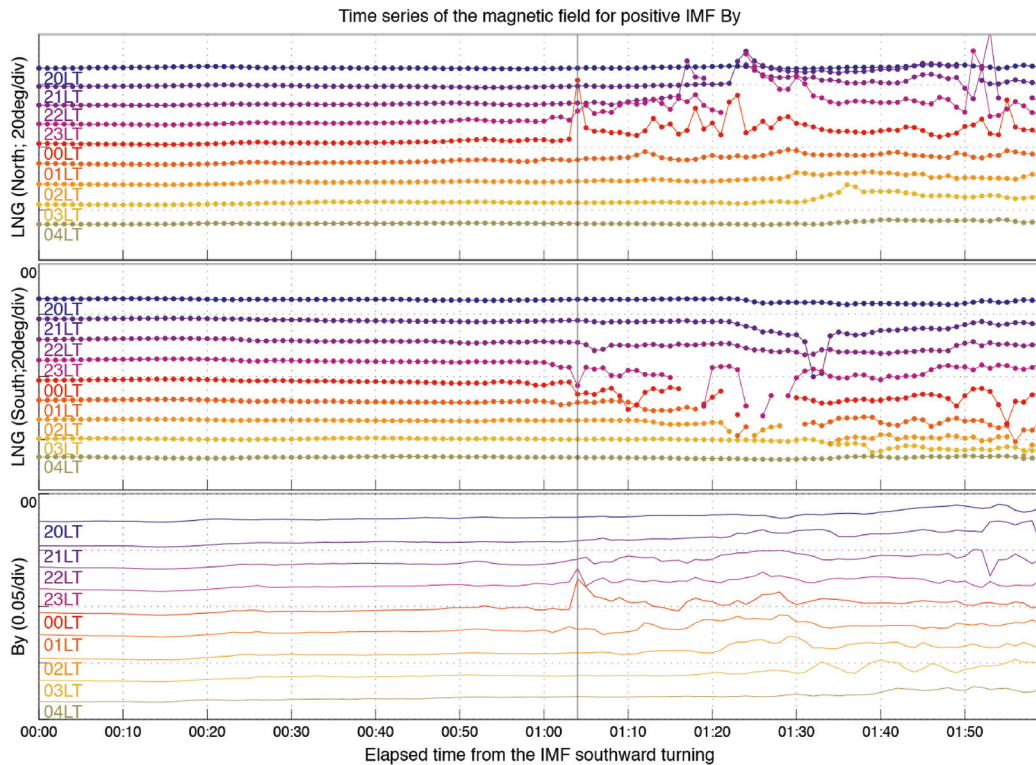


図 M-1: 太陽風中の磁場の向きを夕方側方向に固定しグローバル MHD シミュレーションを実行した結果。

例えば、境界パラメータとして太陽風磁場の向きを夕方方向に固定すると、オーロラ発生後に夕方側（朝側）では北半球（南半球）側が磁力線の経度方向の間隔が狭くなり（図 M-1）、太陽風磁場の向きを朝側に逆転させると反対に南半球側が磁力線の経度方向の間隔が狭くなった（図 M-2）。各プロットの間隔が広く（狭く）なるのは、同じオーロラを南北両半球から見たとき、オーロラの時間発展に伴い経度方向の大きさが南北で異なって見えて、それが時間変化するためと解釈できる。また、局所的に経度方向の順番が逆になることもあり、オーロラの経度方向の形状が南北で反転する可能性が想定される。

また、内部境界条件に関する初期実験として、電離圏電気伝導度（沿磁力線、ペダーセン、ホール）のうち、沿磁力線電流による電離圏電気伝導度への寄与を無視する設定にてシミュレーションを実行した。従来の実験では、オーロラ発生時に南北両半球における磁気共役点が急激に移動する様子が見られたが、今回の実験では磁気共役点の急激な移動は確認されなかった。前年度までの研究で内部境界パラメータを操作せずにシミュレーションを実行し、磁気圏におけるプラズマ圧の増加、背景磁場の減少、電流の急激な増加、などの複合的な効果が地球の磁力線を大きく歪めていることを明らかにしたが、今回の実験によって磁気圏に生じる様々なオーロラ関連現象は、内部境界の各パラメータの値に大きく影響を受けることが明らかになった（図 M-3、図 M-4）。

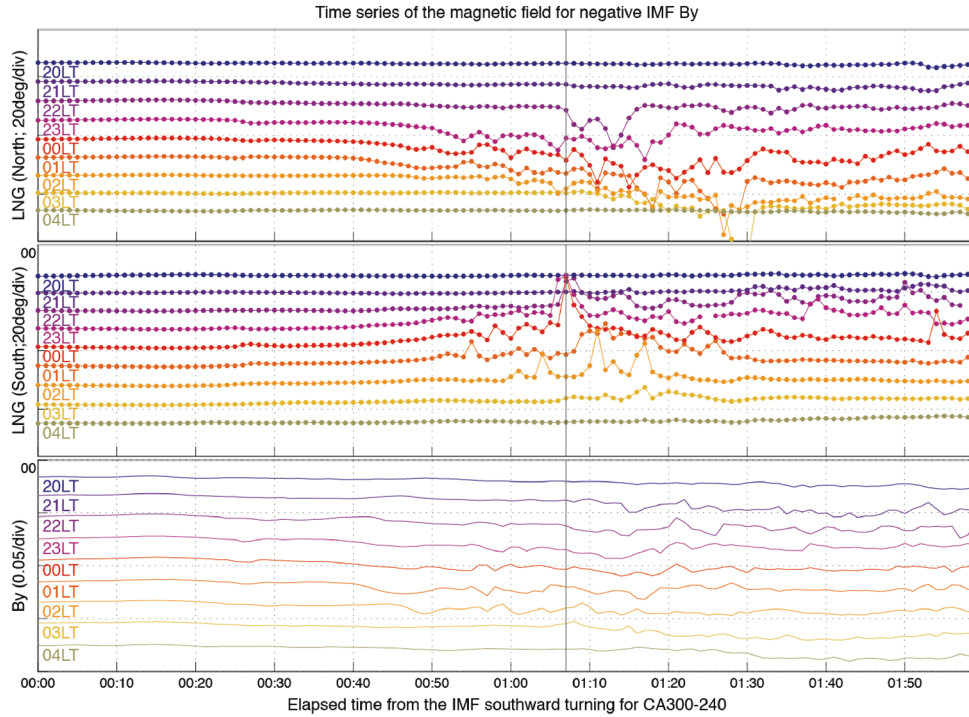


図 M-2: 太陽風中の磁場の向きを朝方側方向に固定しグローバル MHD シミュレーションを実行した結果。

従来、グローバル MHD シミュレーションにおける内部境界パラメータは、モデルを構築する際に観測値を最もよく再現するよう任意に与えられてきた。データ同化手法によりパラメータの最適値を推定し、再現性に優れた数値モデルを作ることは今後のオーロラ現象の研究において重要になるものと考えられる。

このグローバル MHD シミュレーションの解析では、新領域融合研究センターの育成研究課題として開発した三次元可視化ツール「バーチャルオーロラ」を利用し、サブストーム発達過程を可視化ツール上でモニターしながらデータ同化により磁気圏物理量が変動する様子を解析している。平成 23 年度においても「バーチャルオーロラ」ソフトの開発を継続し、内部境界パラメータの値を南北両半球に投影できるように改良を施した (図 M-5)。

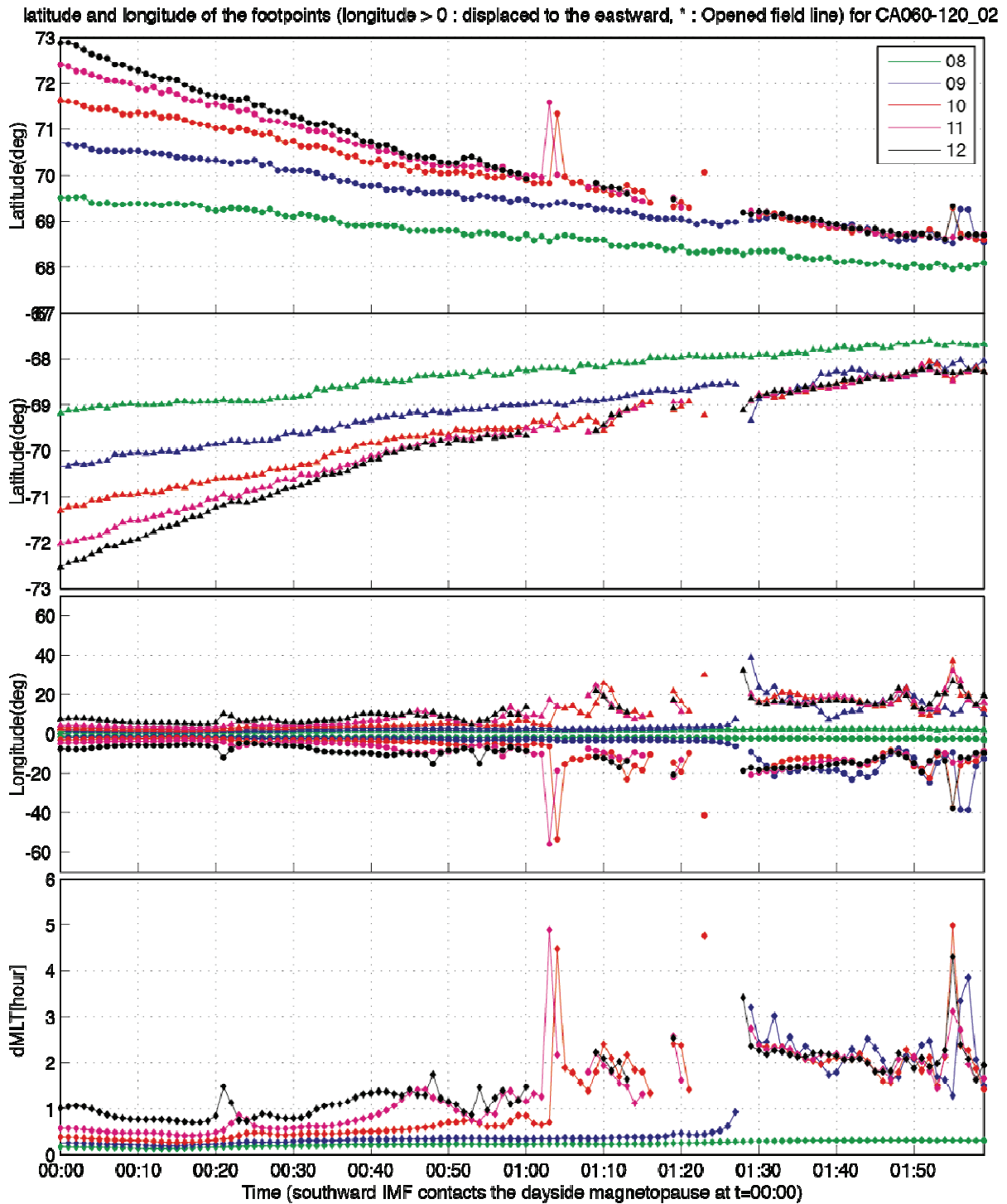


図 M-3: 電離層電気伝導度への沿磁力線電流の寄与を無視しない条件で実行したグローバル MHD シミュレーションの結果。

latitude and longitude of the footprints (longitude > 0 : displaced to the eastward, ^ : Opened field line) for CA060-120_H0

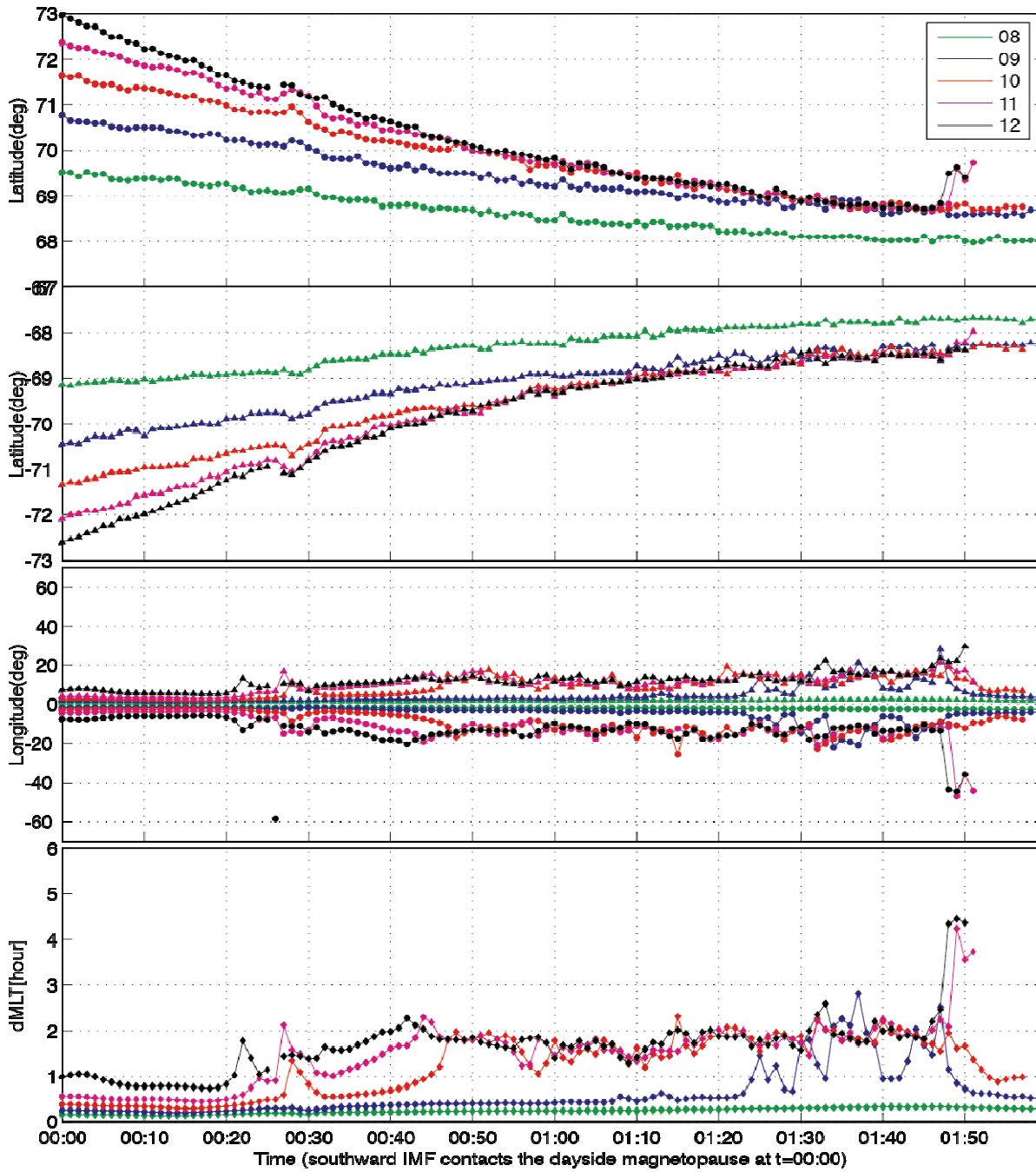


図 M-4: 電離層電気伝導度への沿磁力線電流の寄与を無視する条件で実行したグローバル MHD シミュレーションの結果。従来の研究で見られていたオーロラ発生時の急激な磁気共役点の移動がみられない。

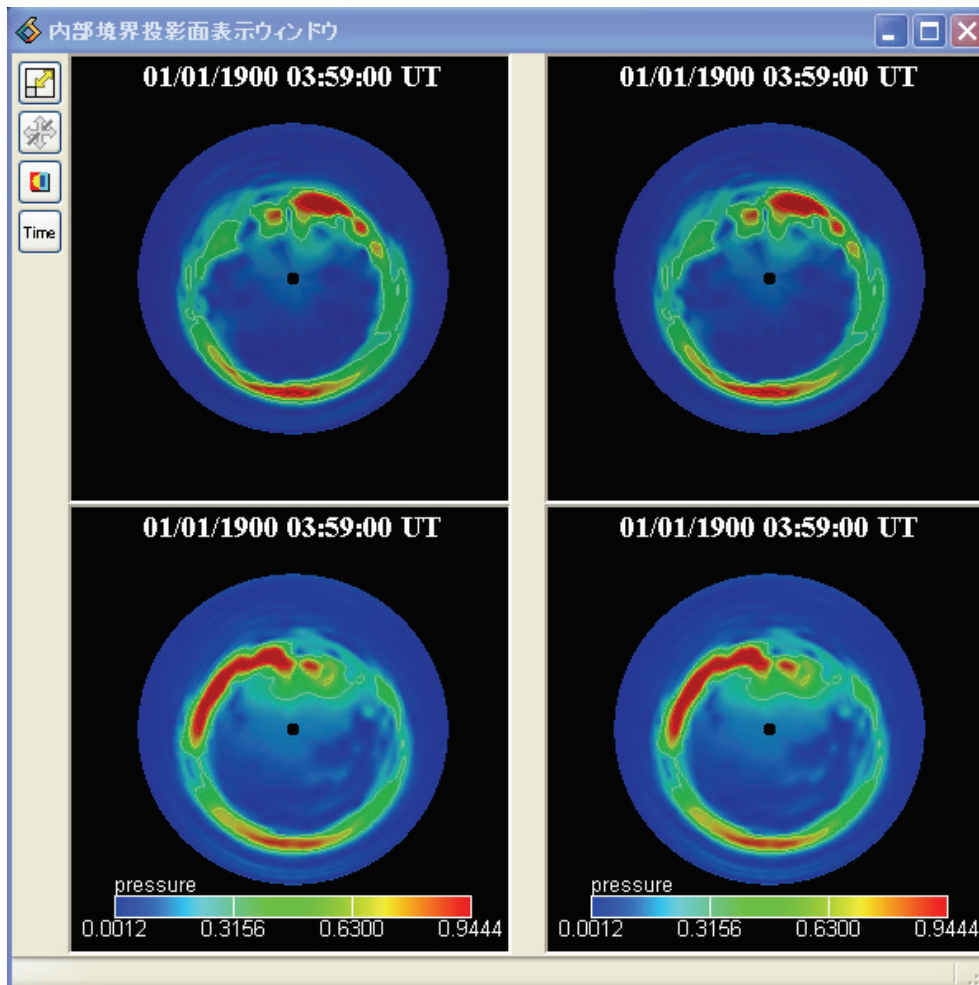


図 M-5: 三次元可視化ツール「バーチャルオーロラ」を用いてグローバル MHD シミュレーションの内部境界パラメータを南北両半球に投影できるよう改良した。

(2) 大気レーダーを用いた大気物理パラメータの抽出

大気レーダーで観測対象とする物理量のうち最も基本的な量は風速（ドップラー速度）である。レーダーの大開口アレイにより鋭い電波ビーム形成することにより、大気の流れ速度のビーム軸への射影成分が観測される。特に、他の観測手段（レーゾンゾンデなど）での測定が困難な鉛直ビームを用いた鉛直風速の観測が大気レーダーの最重要目的の一つとされている。鉛直風速はローカルならびにグローバルな大気ダイナミクスの解明において大変重要な物理量である。

しかし、レーダーの鉛直ビームの軸方向に鉛直からの偏差がある場合、ドップラー周波数偏移に水平風成分が重畳するため、鉛直風速の測定に誤差が発生する。水平風速は鉛直風速に対して 2 桁ないし 3 桁大きい値を取るため、小さな指向偏差が大きな推定誤差となりうる。この現象は、レーダーの分反射層が水平から傾く場合などにおいて散乱波の到来方向が天頂からずれることにより発生する。実際の観測においては常にこの原理が働き、鉛直風速の推定精度は 10cm 毎秒程度が限界とされており、グローバルダイナミクスに寄与する mm 毎秒オーダーの観測は不可能であった。

本研究では、このように電波の到来方向が所望の方向からシフトしている場合でも、正確に所望方向に対するドップラー速度を測定するアルゴリズムを発見し、計算機シミュレーションを用いてその効果を実証した。MU レーダー（滋賀県）のシステム構成をモデルとしたシミュレーションによる例を図 M-6 に示す。図 M-6a にエコーパターン（散乱波強度の分布）を、図 M-6b に受信ビームパターン（感度の分布）を、図 M-6c にこれらの合成積となる実質のエコーパターン（合成信号に含まれる散乱波の

重み分布)を示す。エコーが所望の天頂方向から偏っているにも関わらず(a)、逆の偏りを持つ受信ビームパターンが自動的に生成され(b)、合成信号では所望方向を指向する実質的エコーパターンが形成されている(c)。つまり、ドップラー速度推定に供される最終的な合成信号においては、天頂方向成分が中心となっている。

さらに、最終的な推定誤差の大きさについて定量的な検討を行った結果を図 M-7 に示す。横軸はエコーパターン中心方向のずれ角度、縦軸は実質的エコーパターンの中心方向のずれ角度を示している。グラフ中の数値はアルゴリズムに与えるパラメータ (ノルム拘束値) である。拘束なし(unbound)アルゴリズムはイメージングなどにおいて一般的になりつつある手法である。適当なノルム拘束を与えることにより、広範な誤差のレンジに対して従来法 (ノルム拘束=1.0) のものよりも 1 桁以上精度を向上させることができる。この結果から、ノルム拘束を導入したアルゴリズムにおいてより安定的に高い推定精度が得られることが分かった。これにより cm から数 mm 毎秒程度の推定精度が得られ、これまで観測ができなかったダイナミクス of 解明に貢献することが期待されている。また、グローバルな大気循環に寄与する mm 毎秒オーダーの鉛直成分の直接観測も現実的なものとなってきた。

Nishimura, K., T. Nakamura, T. Sato, and K. Sato, "Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multi-Channel MST Radar," *J. Atmos. Oceanic Technol.* Conditionally accepted, 2012.

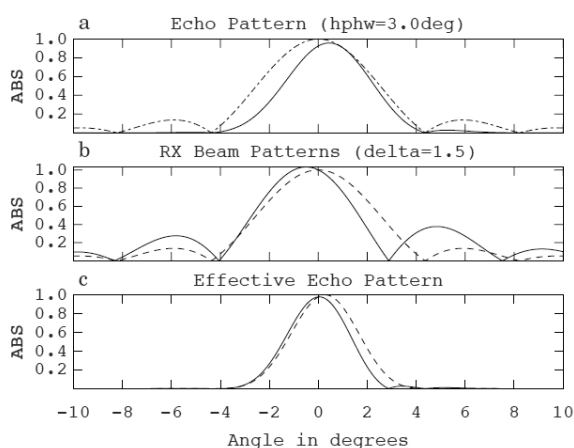


図 M-6. (a)エコーパターン、(b)受信ビームパターン、(c)実質的エコーパターン。

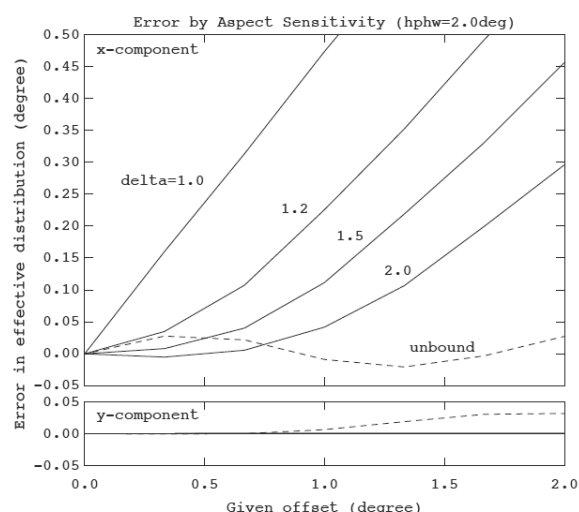


図 M-7. エコーパターンの中心方向誤差(横軸)に対する実質的エコーパターンの誤差(縦軸)

従来と比較して 1 桁以上高い精度での測定が可能となったことは、これまでとは異なる時空間スケールの物理モデルにおける同化が可能となったことを意味する。今後は、実観測における精度の検証を経て、これまで非現実的であったグローバルダイナミクス of 解析における鉛直風速のデータ同化を行った場合の評価などを行う。また、南極昭和基地において大型大気レーダーの設置を進めており、設置済みの部分システムを用いた定常観測が実現している。今後も引き続き、推定アルゴリズムの改良と他の観測装置との連携などについて検討を進める。

〈データデザインチーム〉

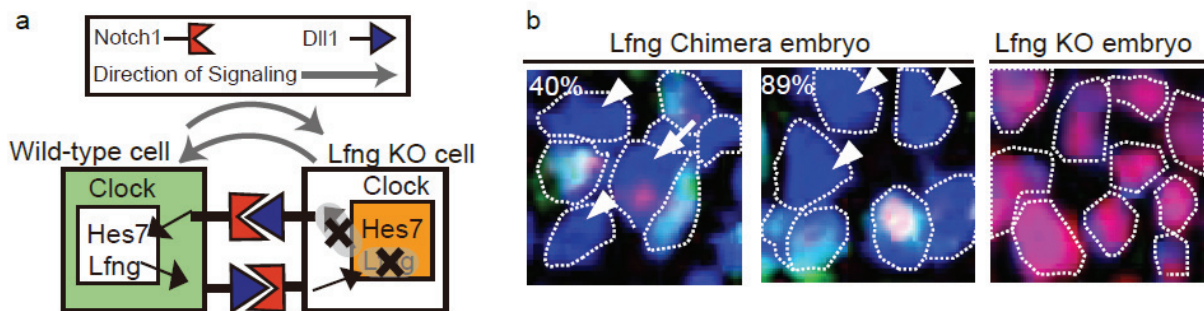
データデザインチームでは、4 つの生命現象に着目して定量データを取得し、発生細胞生物分野にデータ同化手法を適用・普及させるための礎となる研究を展開することを目標としている。4 つの生命現

象とは、(1) マウスの体節形成、(2) マウスの精子形成、(3) 線虫の細胞質分裂、(4) 線虫の細胞質流動、である。

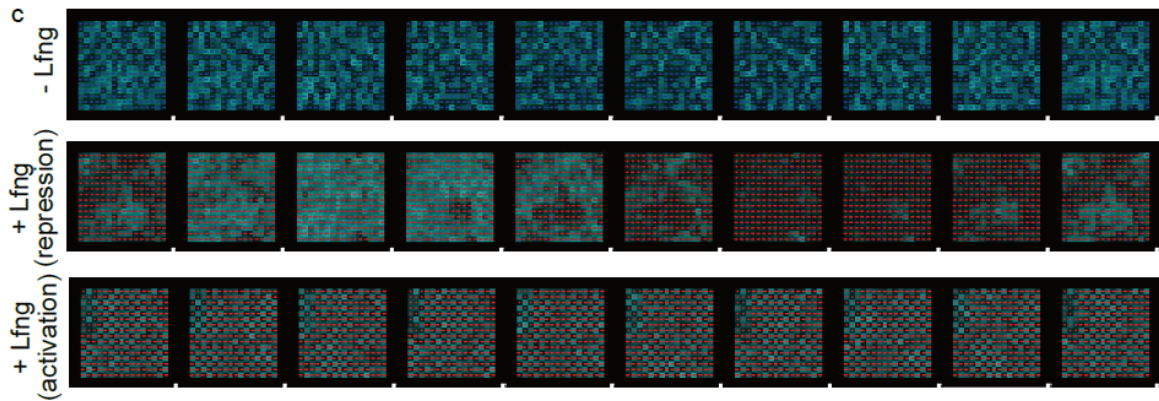
(1) マウス体節形成をモデルとしたデータ同化解析

マウスの発生過程で形成される体節は、我々脊椎動物の分節構造の基盤となる節構造である。前駆細胞は尾部に存在する幹細胞から由来する未分節中胚葉とよばれる細胞群である。これらの細胞はそれぞれの細胞が時計を持っており、マウスにおいては2時間という一定の時間間隔で細胞集団が分節構造を形成する。我々はこれらの細胞の時計を同調するメカニズムを明らかにしたいと考えて研究を進めている。方法として、野生型細胞と変異体細胞を用いたキメラにおける時計遺伝子の発現を定量的に取得し、それらをもとにコンピューターシミュレーションによるモデル化を試みる。

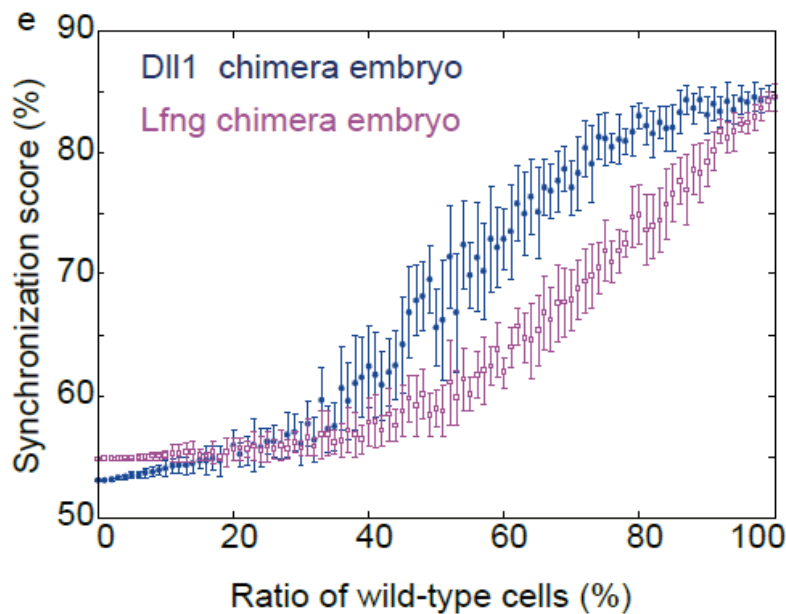
まず体節形成過程における時計の同調率は、時計遺伝子 *Hes7* の発現及び時計遺伝子によって制御される *Notch* シグナルの活性化状態を測定対象として計測した。体節の未分節中胚葉(*PSM*)部分(全体を500ピクセルとして表示する)を前方部(150ピクセル)と後方部(350ピクセル)に分けて、同調率は後方部の前方部20ピクセル分のシグナルで測定した。具体的には、この範囲でシグナルがポジティブかネガティブの細胞数をカウントし、多い方を全体の細胞数で割り、同調率とした。この計算法だと、最低(ランダムな場合)が50%で最高(完全同調)は100%になる。



まず *Notch* リガンドである *Delta like 1(Dll1)* のノックアウト細胞を用いたキメラ胚解析により、マウス体節形成においても、*Notch* シグナルが *coupled oscillator* 機構を介して体節時計の細胞間同調機構に重要な役割を果たしていることを明らかにした(平成22年度の報告)。この結果は、*Notch* シグナルがマウスの体節形成の同調化に関与することをしめしているが、シグナルを隣の細胞に送る *Dll1* の発現自体は振動していないことが明らかになった。従って、*Dll1* 以外の分子が同調化制御に関与している。そこで我々はマウス胚で特異的に発現が振動パターンをしめす *Notch* シグナル制御因子 *L-fng* に着目して、*L-fng-KO* 細胞と用いてキメラ解析を行った。これまで *L-fng* は細胞自律的にその発現細胞における *Notch* シグナル活性を抑制することが知られていたが、隣の細胞にどのような影響を示すかはわかっていなかった。我々のキメラ解析の結果は、興味深いことに、*L-fng* の機能により、隣の細胞の *Notch* シグナル状態を変化させる。すなわち、細胞非自立的な効果を持つというものであった。そこでコンピューターシミュレーションを用いて *Lfng* がどのように作用すれば、同調化が可能になるのか検討した。未分節中胚葉組織をモデル化するために以下のように2次元の細胞パネル(16x16 cells)を設定し、個々の細胞における *Notch* シグナルのアウトプットが *L-fng* により正あるいは負に制御することにより、細胞集団における同調化がどのように制御されるかを検討した。

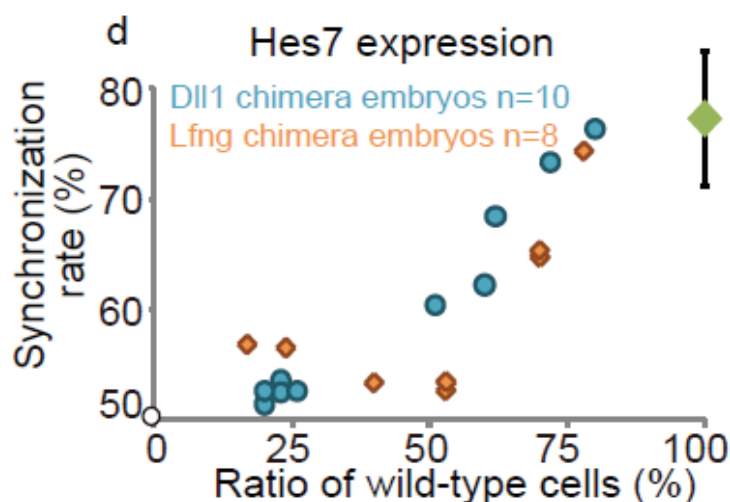


その結果、L-fng が自分の Notch シグナルを負に制御する場合に効率よく細胞集団としての同調的振動が再現できるということが明らかになった。従って L-fng によるトランスの効果は Notch シグナルの活性を介して伝わるということである。さらに我々は、キメラ実験がこのモデルを用いて再現可能かどうか検証した。同様の(16x16 cells)のパネルを用い、野生型細胞と Dll1-KO あるいは L-fng-KO 細胞をある割合でランダムに分布させ、シミュレーションを行った。



上の図がその結果を示したものである。Dll1-KO, Lfng-KO どちらの場合も野生型の細胞の割合を増加させるとその同調率は上昇する。しかしその効果に明らかに差があり、L-fng-KO 細胞を用いたキメラは同調率が常に低いという結果になった。これは、いわゆるクラスター効果というもので、基本的には野生型細胞同士の同調的振動に対し、Dll1-KO 細胞は中立的に働くが L-fng-KO 細胞は阻害的に機能すると考えると説明可能である。実際、Dll-KO 細胞はシグナルを送る Dll1 がいないため、野生型に作用しないが L-fng-KO 細胞では基本的に自分から送り出す Notch シグナルの抑制ができないため、常に Notch シグナルを送り続ける結果、野生型の同調的振動を阻害することになる。我々はさらにこのコンピューターシミュレーションによって予測されたキメラ解析結果が実際に in vivo でも再現されるか否か、さらにキメラ作成を行い解析した。その結果、以下のように、L-fng-KO 細胞を用いたキメラは Dll1-KO 細胞のキメラに比較して、同調率の阻害の効果が高いという結果が得られ、シミュレーション

の結果は支持された。



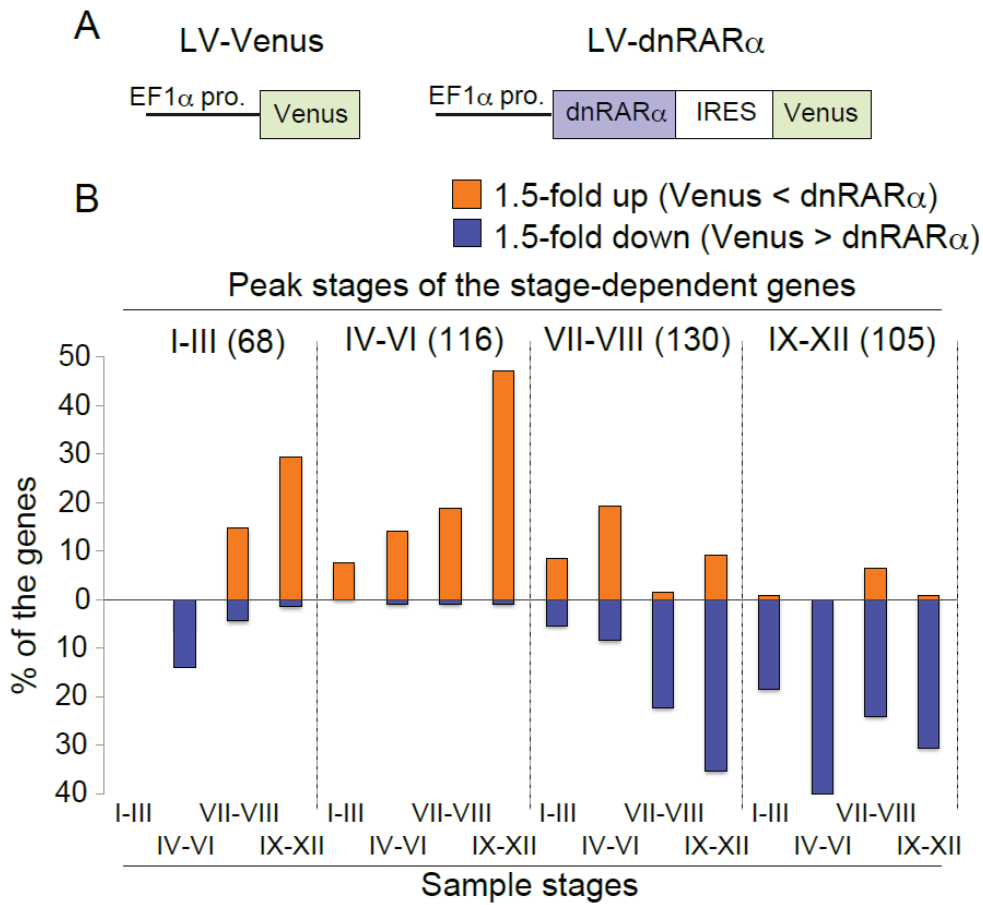
これらの結果は、L-fng が Notch シグナルを抑制することを示唆するがその分子機構はまだ不明である。我々は Lfng が Dll1 の活性を変化させる機能を有しているのではないかと考えている。

この可能性を検討するため、培養細胞を用いたレポーター解析を行った。シグナルを送る細胞として Dll1 発現細胞、そしてシグナルを受け取る細胞として Notch 発現細胞を準備し、後者に Notch レポーターをいれた。この際に、L-fng を Dll1 発現細胞に導入しても Notch 活性の抑制は観察されなかった。しかし興味深いことに、Dll1 細胞にさらに Dll3, Notch1 を導入し、より in vivo に近い状況を作り出した結果、Dll1 による Notch シグナル活性化能が有意に抑制された。この結果は、少なくとも、L-fng がトランスに隣の細胞の Notch 活性を抑制するという我々の実験結果とよく一致するものであった。詳細な分子機構は今後の問題であるが、これまでの結果をまとめて現在論文投稿中である。

(2) マウス精子形成をモデルとしたデータ同化解析

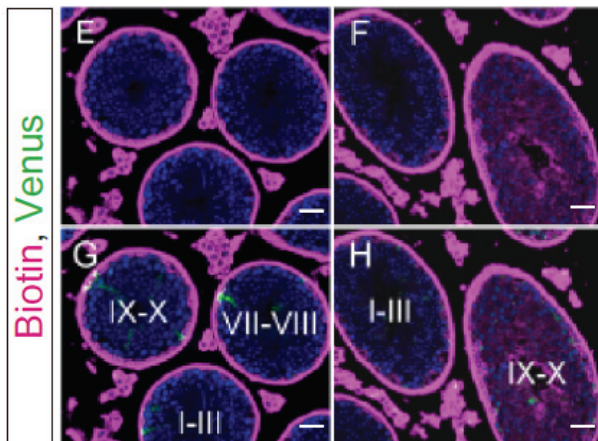
マウスの精子形成過程は雄個体が生涯を通じて精子を生産し続ける。我々は、この連続的かつ周期的な現象を作り出す分子機構をデータ同化のモデルとして解析したいと考えた。精子形成の特徴はその周期性にある。精巣は基本的に生殖細胞と、体細胞であるセルトリ細胞の 2 種類の細胞種からなっており、生殖細胞は幹細胞から 35 日周期で細胞分化を繰り返しているが、セルトリ細胞は、一度分化したら基本的に一生同じ細胞が維持される。この幹細胞システムが 35 日周期でまわりつつける機構を明らかにするため、我々は主にセルトリ細胞の遺伝子発現に焦点を絞って解析を行ってきた。精子形成過程は 12 のステージにわけることが可能で精細管のなかで空間的に配置されている。すべてのステージを分けることは困難なため、4 つの特徴的なステージに分けてサンプル調整し、それぞれのフラクションから RNA を調整し、マイクロアレイ解析を行った。精細管にはセルトリ細胞と生殖細胞が存在する。セルトリ細胞特異的な遺伝子を抽出するため、単離したセルトリ細胞や生殖細胞を欠損した精細管のアレイデータ等とのサブトラクションを行い、各ステージで変動を示す遺伝子を計 419 個同定した。これらのアレイデータからなんらかの予測プログラムをたてることは非常に困難であると考えいくつかのシグナル系に焦点を絞り、それらの生物学的意義を問う実験を行った。まず、精細管はレチノイン酸 (RA) シグナルのレベルが高い時期と低い時期があり、遺伝子発現は RA シグナルによって制御されている可能性が示唆された。そこで、RA シグナルを阻害するドミナント-ネガティブ(DN) 型のレチノイン酸レセプターをセルトリ細胞特異的に導入し、遺伝子発現変動を解析した。その結果、RA により制御されている遺伝子には、RA によって、発現が上昇する遺伝子群と発現が抑制される遺伝子の 2 種類があり、それらが精子形成過程でステージ依存的に制御されていることがわかった。すなわち、RA によって抑

制されている遺伝子群は DN 型のレチノイン酸レセプター処理により活性が上昇し、RA によって活性化される遺伝子は逆に DN 型のレチノイン酸レセプターにより発現は減少した。



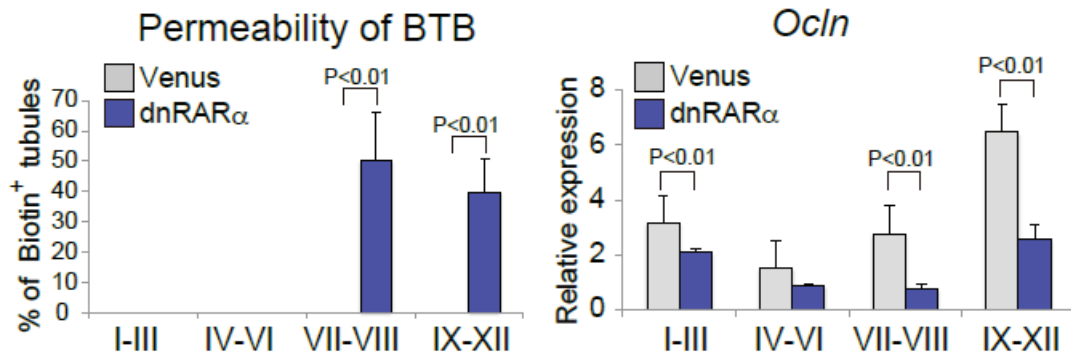
また次に我々は DN 型のレチノイン酸レセプターをセルトリ細胞特異的に導入することにより、精子形成が阻害されることをみいだした。その原因は、血液—精巣関門(BTB)を構成しているタイトジャンクションの構造タンパク質であるオクルディン遺伝子が RA によって制御されているからであることが判明した。この遺伝子の発現が RA シグナルの阻害により抑制されていた。

コントロール DN-RA 処



上の図は、DN型のレチノイン酸レセプターをセルトリ細胞に導入後5日目のBTBの機能解析のため、Biotinを血管に導入した結果である。明らかに、DN-RA処理した精細管の内部にBiotinが流入しており、BTBの異常が示唆されている。またこのBTBの以上はステージ特異、すなわちステージIX-Xにおこっており、ステージI-IIIでは正常であることが明らかになった。

以下に示すように、BTBの透過性とOcludin遺伝子の発現を解析した結果、BTBの透過性の獲得とOcludin遺伝子の発現低下に関連があることがあきらかになっている。



これらの解析結果は、現在投稿中であり、今後、他のシグナル系、具体的にはFGFシグナル系に関して精子サイクルにおける遺伝子発現制御への関与を解析していくつもりである。多くのフィードバック機構が機能しており、またセルトリ細胞からのシグナルによる生殖細胞の制御、あるいは生殖細胞からのシグナルによるセルトリ細胞の制御など非常に複雑であり、有効なモデルを用いてこれらを統合的に解析していく必要がある。

(3) 線虫の細胞質分裂をモデルとしたデータ同化解析

細胞分裂において細胞の形状はダイナミックに変化し、細胞のほぼ中央に生じた分裂溝によって物理的に二つに分割される(下図)。この過程は細胞質分裂と呼ばれ、分裂溝に生じる収縮環と呼ばれる構造物が、細胞表層の抵抗力に打ち勝って収縮することで遂行されると信じられてきた。しかし近年の知見から、分裂溝の近傍だけでなく、細胞の極側、あるいは全体にわたる細胞表層の制御が分裂溝の陥入に必須の寄与を果たしていることが明らかとなりつつある。細胞表層の力学的性質は、脂質膜ならびに細胞骨格といった生体内構造物が、表面張力あるいは曲げ弾性という力学的パラメータに翻訳されることで与えられると考えられる。しかしながら、細胞質分裂において細胞表層の力学的性質がどのような時空間的な構造を持つかは十分に理解されていない。そこで木村らは、実験的に観測された細胞形状を再現できるような、細胞表層の力学的性質の時空間的分布を予測する方法の構築を行った。本成果は、平成23年度にPLoS ONE誌に発表した(Koyama et al., PLoS ONE 7, e31607, 2012)。

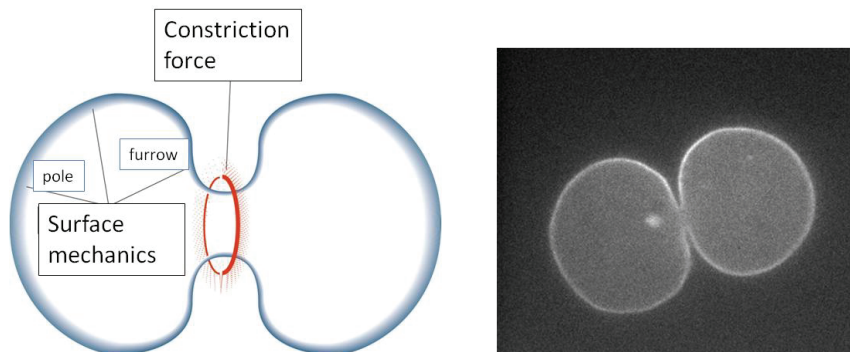
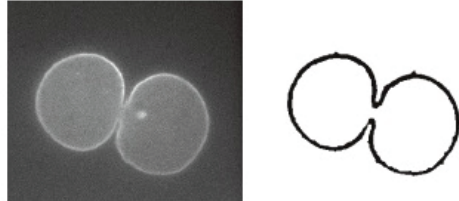


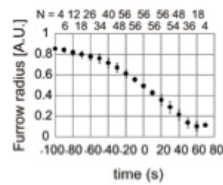
図) 細胞質分裂の模式図(左)と、実際の線虫胚における細胞質分裂の様子(右)。

まず、最初にパラメータ（硬さ）推定の材料となる定量データの取得を行った。線虫初期胚の2細胞期について、卵殻を除去しAB細胞と呼ばれる細胞を単離して細胞分裂の様子を顕微鏡下で撮影した。細胞膜を蛍光蛋白質を利用して発色させ、CCDカメラで得た蛍光輝度情報をもとに、細胞分裂中の細胞の輪郭を自動的に抽出する画像処理アルゴリズムを開発した（下図A）。定量化した輪郭情報を元に、細胞分裂の分裂溝の半径の変遷（下図B）、細胞体積の変遷（下図C）、細胞表面積の変遷（下図D）、細胞表面の曲率の変遷（下図E）といった情報の定量化を行った。

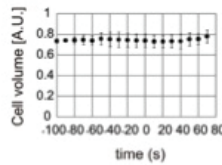
A. 分裂中の細胞の形状抽出



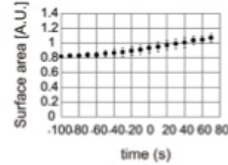
B. 分裂溝の半径の定量化



C. 細胞体積の定量化



D. 細胞表面積の定量化



E. 細胞表面の曲率の定量化

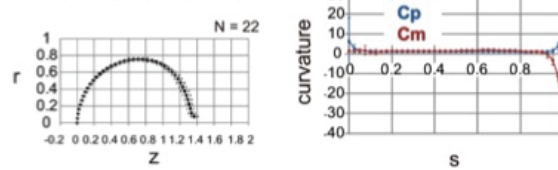


図) 細胞分裂中の形状パラメータの定量化。(図は、Koyama et al., 2012 より改変の上転載)

次に、細胞表層の曲げ弾性の変化によって細胞質分裂時の形状を説明する細胞質分裂モデルを構築し、このモデルにおいて、どのように曲げ弾性が変化すれば、実際の細胞でみられる細胞分裂時の形状変化が説明できるかを推定した（下図）。この推定においては、細胞表層を分裂軸に沿って41の領域に分割し、それぞれの領域でそれぞれの時刻においてどのような硬さ（曲げ弾性）の値をとれば、実細胞の形状と合致するかを求めた。その結果、細胞分裂の初期（Furrow radius = 0.9~0.8, 図中紫）では表層の硬さがほぼ一定であると推定されたのに対し、分裂の進行に従って細胞の極(s=0)から分裂溝(s=1)にかけて、なだらかに硬さが低下すると推定された（図中、黄-赤）。この結果は、形状という観点から分裂溝付近の細胞表層が軟化していることを示す新しい証拠である。

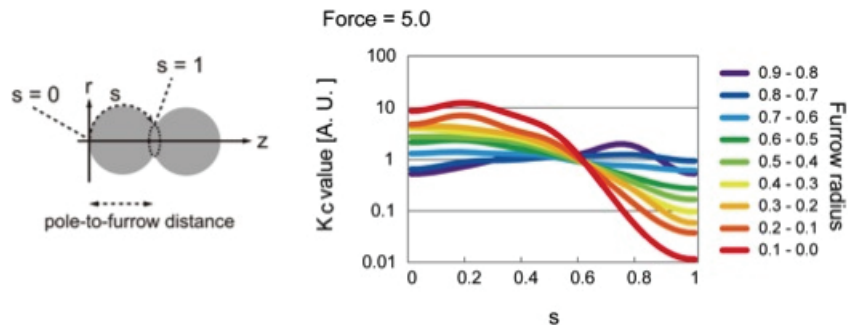


図) 細胞分裂中の硬さパラメータの推定結果。(図は、Koyama et al., 2012 より改変の上転載)

さらに、細胞分裂が途中でしか進行しない遺伝子変異体(*zen-4 ts*)において同じ推定を行うと、野生型株のような軟化がみられないという推定結果を得た (下図)。

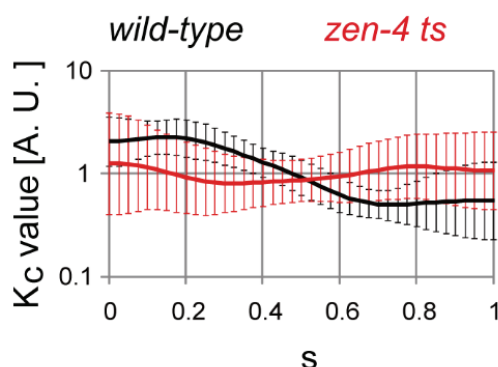


図) 野生型株(wild-type, 黒)と *zen-4* 変異体(*zen-4ts*, 赤)の細胞表層の硬さ分布の推定結果の比較。分裂溝の半径が、分裂前の0.5~0.6の時点での比較(ここまでは *zen-4* 変異体での分裂が進行する)。(図は、Koyama et al., 2012 より転載)

この遺伝子変異体を用いた解析により、細胞分裂の進行にとって細胞表層の軟化が必須である可能性、*zen-4* 遺伝子は細胞表層の軟化に関わる遺伝子で、その変異体で細胞質分裂が不全になるのは軟化の不全が原因である可能性、が示唆された (下図)。

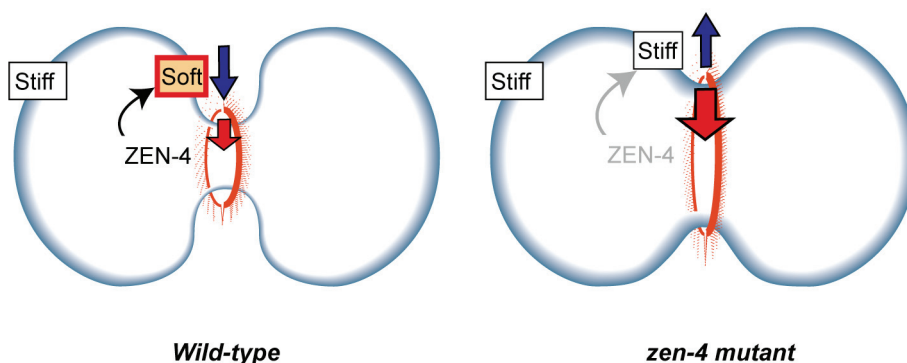


図) 開発した新手法で推定された細胞表層の硬さと、細胞質分裂のモデル。通常は分裂溝付近で細胞表層が軟化し、細胞質分裂を助けている。ZEN-4 タンパク質がないと軟化が起こらず、細胞質分裂が阻害される。(図は、Koyama et al., 2012 より転載)

さらには、構築した細胞質分裂モデルを用いて、曲げ弾性係数の適切な制御によって、収縮環が存在しない条件においても観測形状を再現が可能であることを示すことに成功した。この結果は、曲げ弾性係数が細胞質分裂の主要な力学的要素となりうることを示している。

細胞形状は、細胞質分裂時だけでなく細胞遊走、組織形成時などにおいても劇的に変化する。しかしながら、分子レベルでの機構の解明が進む一方で、どのような力学的変化が起きているかは十分に理解されていない。今回で開発した、「細胞形状から力学的パラメータを推定する」というストラテジーは、様々な細胞生物学の局面での力学的基盤の理解に波及することが期待される。

(4) 線虫の細胞質流動をモデルとしたデータ同化解析

線虫胚をはじめいくつかの細胞では、その内部で細胞質流動と呼ばれる全体的な流れが生じる。この細胞質流動は細胞内の物質の攪拌や輸送に貢献していると考えられている。線虫初期胚の細胞質流動を、データ同化を適用する新たな生物現象と位置づけ解析を開始した。木村らはこれまでに線虫胚における

細胞質流動の顕微鏡観察を行い、その画像解析から細胞内の各位置での流速の定量化に成功していた。また、流体力学シミュレーションを行い、観測した流速分布をおおむね説明できることを示している (Niwayama et al., PNAS 108, 11900-11905, 2011; 庭山他、可視化情報学会誌 32 (125), 20-25, 2012)。しかし、ここまでの研究では、シミュレーションと実測値の比較が限定的かつ定性的であり、原動力の発生位置と強さの統計的な推定、あるいはモデルと実測値の包括的な定量的比較からの説明が困難な現象の抽出には至っていない。そこで、測定データ (右図) と粒子法シミュレーションモデルからデータ同化解析を行い、実測値を再現するシミュレーションパラメータの推定を行った (庭山ら、未発表)。この推定結果については、次年度以降さらに考察を加え、データ同化の細胞生物学への適用の好例として論文発表を行いたい。

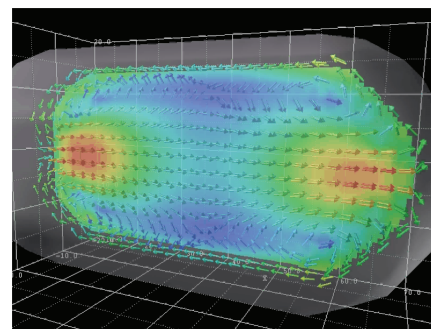


図) 細胞質流動の定量データ。実測した流速を本プロジェクトで開発したソフトウェア「4-Dimension Cell」で開発したソフトウェアで可視化。

この他に、データデザインチームでは、平成 23 年度において新たに細胞分裂に伴う細胞内のダイナミックな空間配置の再編成現象の理解にデータ同化を適用できないかと試みた。細胞内に張りめぐらされている細胞骨格である微小管の生成は、細胞内で時間的・空間的に制御されている。微小管は、細胞の有糸分裂の際に染色体を分配させる装置である紡錘体の主な構成成分なので、将来紡錘体を建築する場所で微小管を効率よく生成させることが重要である。データデザインチームでは、微小管の材料であるチューブリン蛋白質など、紡錘体の材料となる因子が、将来紡錘体ができる場所に集積してくることを線虫 *C. elegans* 初期胚において示していた。この蓄積のメカニズムの理解を深めるために、チューブリン蛋白質の移動と集積を説明する複数のモデルを構築し (下図)、データ同化の手法を応用して実細胞で起きている現象と各モデルの整合性を検討する戦略をたてて実行した。しかしながら、実細胞で得られる測定データに限りがあることもあり、明確なモデルの評価・峻別にはいあたらなかった。論文作成過程でさらなる実験が求められたこともあり、この研究課題に関してはデータ同化の適用例としての発表をあきらめ、論文発表を行った (Hayashi et al., Mol Biol Cell, 23, 1688-1699, 2012)。本研究は、結果的にデータ同化の適用例として公式に発表することはできなかったが、データ同化の適用を試みることで自体が研究の推進力となったばかりか、細胞生物学の分野でデータ同化を適用する利点と困難さを具体的に思い知るよい例となった。

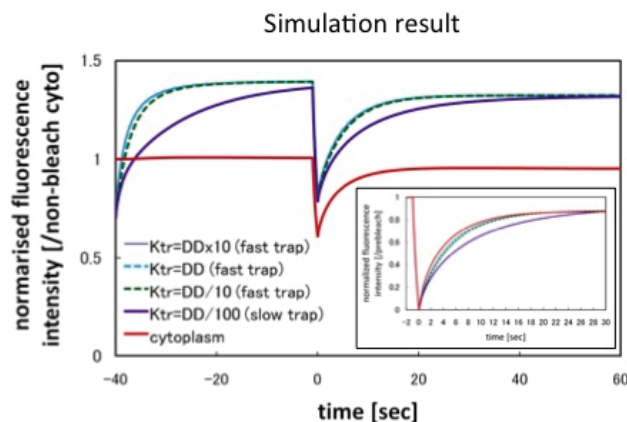


図) 細胞内の蛋白質動態を定量化する FRAP 実験のシミュレーションモデル。異なるパラメータにより結果が異なるので、細胞内でのパラメータ推定に適用できると考えた(未発表)。

[5] 研究成果物

① 知見・成果物・知的財産権等

② 成果発表等

<論文発表>

[学術論文]

1. S. Saita, A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, G. Ueno, K. Murata, D. Matsuoka, A. Kitamoto, and T. Higuchi, Displacement of conjugate points during a substorm in a global magnetohydrodynamic simulation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A06213, doi:10.1029/2010JA016155, 2011.
2. S. Wing, S. Ohtani, J. R. Johnson, M. Echim, P. T. Newell, T. Higuchi, G. Ueno, and G. R. Wilson, Solar wind driving of dayside field - aligned currents, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, doi:10.1029/2011JA016579, 2011.
3. Nakai, H. and Ueno, G., Plasma structures of Kelvin-Helmholtz billows at the duskside flank of the magnetotail, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A08208, doi:10.1029/2010JA016286, 2011.
4. Tamada, Y., R. Yamaguchi, S. Imoto, O. Hirose, R. Yoshida, M. Nagasaki, and S. Miyano, SiGN-SSM: open source parallel software for estimating gene networks with state space models, *Bioinformatics*, Vol. 27, Issue8, 1172-1173, 2011.
5. 井元智子, 中野慎也, 樋口知之, エージェントシミュレーションによる農業環境政策の影響予測と政策比較, *食農資源経済論集*, 第 62 巻, 第 1 号, 89-101, 2011.
6. 徳永旭将, 池田大輔, 中村和幸, 樋口知之, 吉川顕正, 魚住禎司, 藤本晶子, 森岡昭, 湯元清文, CPMN Group, 変化点検出を応用した時系列データからの突発現象の前兆検出アルゴリズム, *情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」*, Vol. 4, No. 3, 14-34, 2011.
7. 小川泰信, 野澤悟徳, Haggstrom, I., 大山伸一郎, 元場哲郎, 津田卓雄, 齊藤昭則, 宮下幸長, 田中良昌, 堀智昭, 上野玄太, 宮岡宏, 藤井良一, 欧州非干渉散乱, (EISCAT) レーダーの大規模データ処理と可視化, H22 年度宇宙科学情報解析シンポジウム「宇宙科学と大規模データ」(2010 年 2 月 16 日実施), JAXA 研究開発報告, 受理済み.
8. T. Higuchi, Embedding reality in a numerical simulation with data assimilation, *Proceedings of 14th International Conference Fusion*, 2011.
9. H. Nagao, N. Kobayashi, S. Nakano and T. Higuchi, Fault parameter estimation with data assimilation on infrasound variations due to big earthquakes, *Proceedings of 14th International Conference Fusion*, 2011.
10. M. Saito, S. Imoto, R. Yamaguchi, S. Miyano and T. Higuchi, Estimation of macroscopic parameter in agent-based pandemic simulation, *Proceedings of 14th International Conference Fusion*, 2011.
11. M. Saito, S. Imoto, R. Yamaguchi, H. Sato, H. Sakada, M. Kami, S. Miyano, T. Higuchi, Parallel agent-based simulator for Influenza pandemic, *Advanced Agent Technology, Lecture Notes in in Computer Science*, Springer, Vol.7068, 361-370, 2012.
12. T. Imoto, S. Nakano, T. Higuchi, Modeling human behavior selection under environmental subsidy policy by multi-agent simulation, *Advanced Agent Technology, Lecture Notes in in Computer Science*, Springer, Vol.7068, 350-358, 2012.
13. S. Nakano and T. Higuchi, Non-storm irregular variation of the Dst index, *Annales Geophysicae*, Vol. 30, 153-162, 2012.

14. 花塚泰史, 樋口知之, 松井知子, HMMに基づくタイヤ振動波形解析による路面状態判別, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J95-D, No. 3, 570-577, 2012.
15. H. Koyama, T. Umeda, K. Nakamura, T. Higuchi and A. Kimura, A high-resolution shape fitting and simulation demonstrated equatorial cell surface softening during cytokinesis and its promotive role in cytokinesis, PLoS ONE, Vol. 7, Issue 2, e31607, 2012.
16. K. Hirose and T. Higuchi, Generating artistic character facial animation based on motion capture data, Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology, in press.
17. S. Kawano, T. Shimamura, A. Niida, S. Imoto, R. Yamaguchi, M. Nagasaki, R. Yoshida, C. Print, S. Miyano, Discovering functional gene pathways associated with cancer heterogeneity via sparse supervised learning, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, in press.
18. Yamamoto, Y. and Nakano, J. Statistical graphics for aggregated symbolic data, Proceedings of the 58th World Statistics Congress, <http://isi2011.congressplanner.eu/showabstract.php?congress=ISI2011&id=1876>.
19. Saita, S., A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, G. Ueno, K. Murata, D. Matsuoka, A. Kitamoto, T. Higuchi, Displacement of conjugate points during a substorm in a global MHD simulation, Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2010JA016155, 2011.
20. Motoba, T., K. Hosokawa, Y. Ogawa, N. Sato, A. Kadokura, S. C. Buchert, and H. Rème, In-situ evidence for IMF-induced tail twisting associated with relative displacement of conjugate auroral features, J. Geophys. Res., vol. 116, A04209, doi:10.1029/2010JA016206, 2011
21. Motoba, T., K. Hosokawa, A. Kadokura, and N. Sato, Magnetic conjugacy of northern and southern auroral beads, Geophys. Res. Lett., accepted, 2012
22. Sato, N., A. Kadokura, T. Motoba, K. Hosokawa, G. Bjornsson, and T. Saemundsson, Ground-based aurora conjugacy and dynamic tracing of geomagnetic conjugate points, AGU Monograph, 2012, in press.
23. Fujita, S. (2011), The Global MHD Magnetosphere Simulation and Prospect for the Space Weather Prediction, J. Nat. Inst. Comm. Tech., 56, 179-190.
24. Tanaka, Y.-M., T. Aso, B. Gustavsson, K. Tanabe, Y. Ogawa, A. Kadokura, H. Miyaoka, T. Sergienko, U. Brändström, and I. Sandahl, Feasibility study on Generalized - Aurora Computed Tomography, Ann. Geophys., vol. 29, 551-562, 2011
25. Kosch, M., I. Yiu, C. Anderson, T. Tsuda, Y. Ogawa, S. Nozawa, A. Aruliah, V. Howells, L. Baddeley, I. McCrea, and J. Wild, Meso-scale observations of Joule heating near an auroral arc and ion-neutral collision frequency in the polar cap E-region, J. Geophys. Res., vol. 116, A05321, doi:10.1029/2010JA016015, 2011. , 2011
26. Ogawa, Y., S. C. Buchert, I. Häggström, M. T. Rietveld, R. Fujii, S. Nozawa, and H. Miyaoka, On the statistical relation between ion upflow and naturally enhanced ion-acoustic lines observed with the EISCAT Svalbard radar , J. Geophys. Res., vol. 116, A03313, doi:10.1029/2010JA015827, 2011
27. Kitamura, N., Y. Ogawa, T. Nishimura, N. Terada, T. Ono, A. Shinbori, A. Kumamoto, V. Truhlik, and J. Smilauer, Solar zenith angle dependence of plasma density and temperature in the polar cap ionosphere and low-altitude magnetosphere during geomagnetically quiet periods at solar maximum, J. Geophys. Res., vol. 115, A07310, doi:10.1029/2009JA014766, 2011
28. Partamies, N., L. Juusola, E. Tanskanen, K. Kauristie, J. M. Weygand, and Y. Ogawa, Substorms

- during different storm phases, *Ann. Geophys.*, *Ann. Geophys.*, 29, 2031-2043, 2011
29. Kero, Y., C. Szasz, T. Nakamura, D. D. Meisel, M. Ueda, Y. Fujiwara, T. Terasawa, H. Miyamoto, K. Nishimura, First results from the 2009–2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: the Orionids 2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 416, 4, pp. 2550–2559, 2011.
 30. She, C.-Y., A. Makoto, J. Yue, B. P. Williams, C. Nagasawa, and T. Nakamura,, On mesopause region temperature and wind measurements with pseudorandom modulation continuous-wave (PMCW) lidar at 589 nm, *Appl. Opt.*, in press, 2011
 31. Chang, L.C., W.E. Ward, S.E. Palo, J. Du, D.-Y. Wang, H.-L. Liu, M.E. Hagan, Y. Portnyagin, J. Oberheide, L.P. Goncharenko, T. Nakamura, P. Hoffmann, W. Singer, P. Batista, B. Clemesha, A.H. Manson, D.M. Riggan, C.-Y. She, T. Tsuda and T. Yuan, Comparison of diurnal tide in models and ground-based observations during the 2005 equinox CAWSES tidal campaign, *J. Atmos. solar-Terr. Phys.*, in press, 2011
 32. Nishimura, K., T. Nakamura, T. Sato and K. Sato, "Adaptive Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multi-channel MST Radar," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, accepted.
 33. Kero, J., C. Szasz, T. Nakamura, D. D. Meisel, M. Ueda, Y. Fujiwara, T. Terasawa and K. Nishimura, "The 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: radiant densities and diurnal rates," *Month. Not. R. Astron.*, accepted.
 34. Kero, J., C. Szasz, T. Nakamura, T. Terasawa, H. Miyamoto, and K. Nishimura, A meteor head echo analysis algorithm for the lower VHF band, *Annales Geophys.*, in print, 2012.
 35. Fujiwara, H., S. Nozawa, S. Maeda, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, K. Terada, Polar cap thermosphere and ionosphere during the solar minimum period: EISCAT Svalbard radar observations and GCM simulations, *Earth, Planet and Space*, in press, 2012
 36. 小川泰信, 野澤悟徳, I. Haggstrom, 大山伸一郎, 元場哲郎, 津田卓雄, 齋藤昭則, 宮下幸長, 田中良昌, 堀智昭, 上野玄太, 宮岡宏, 藤井良一, 欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーの大規模データ処理と可視化, *宇宙科学情報解析論文誌*, in press, 2012
 37. Niwayama R., Shinohara K., and Kimura A. The hydrodynamic property of the cytoplasm is sufficient to mediate cytoplasmic streaming in the *Caenorhabditis elegans* embryo. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108**, 11900-11905 (2011)
 38. Aoki, K., Hayashi, H., Furuya, K., Sato, M., Takagi, T., Osumi, M., Kimura, A., and Niki, H. Breakage of the nuclear envelope by an extending mitotic nucleus occurs during anaphase in *Schizosaccharomyces japonicus*. *Genes to Cells* **16**, 911-926 (2011)
 39. Koyama H., Umeda T., Nakamura K, Higuchi T. and Kimura A. A high-resolution shape fitting and simulation demonstrated equatorial cell surface softening during cytokinesis and its promotive role in cytokinesis. *PLoS ONE* **7**, e31607 (2012).
 40. Hayashi H., Kimura K., and Kimura A. Localized accumulation of tubulin during semi-open mitosis in the *Caenorhabditis elegans* embryo. *Mol. Biol. Cell* **23**, 1688-1699, (2012)
 41. Niwayama R. and Kimura A. A cellular funicular: a hydrodynamic coupling between the anterior- and posterior-directed cytoplasmic flows. *Worm* **1**, 71-75 (2012)
 42. 庭山律哉, 篠原恭介, 木村暁. 細胞の建築を理解するための可視化・定量化-PIV 解析を利用した細胞質流動の解析-, *可視化情報学会誌* 32(125), 20-25 (2012)

43. Hasegawa K, Okamura Y, Saga Y. Notch signaling in Sertoli cells regulates cyclical gene expression of Hes1 but is dispensable for mouse spermatogenesis. *Mol Cell Biol.*32(1):206-15 (2012)
44. Oyama T, Harigaya K, Sasaki N, Okamura Y, Kokubo H, Saga Y, Hozumi K, Suganami A, Tamura Y, Nagase T, Koga H, Nishimura M, Sakamoto R, Sato M, Yoshida N, Kitagawa M. Mastermind-like 1 (MamL1) and mastermind-like 3 (MamL3) are essential for Notch signaling in vivo. *Development.* 138(23):5235-46 (2012).
45. Sada A, Hasegawa K, Pin PH, Saga. NANOS2 acts downstream of glial cell line-derived neurotrophic factor signaling to suppress differentiation of spermatogonial stem cells. *Stem Cells.* 2012 30 :28

[データベース]

1. EISCAT データベース (1981 年 10 月から 2012 年 2 月までの物理量データを作成・整備・ウェブ公開)。
2. トロムソ・ロングイアビン光学データベース (2010 年 9 月から 2012 年 3 月までに取得した全天および狭視野 WATEC 光学データを整備・ウェブ公開。また、2000 年以降のロングイアビンオーロラスペクトログラフデータを整備)。

[著書等]

1. 樋口知之著, 予測にいかす統計モデリングの基本—ベイズ統計入門から応用まで, 講談社, 2011.
2. 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮, データ同化入門—次世代のシミュレーション技術, 北川源四郎・有川節夫・小西貞則・宮野悟 編, 朝倉書店, 2011.
3. 樋口知之, データを未来に活かす, 奥松英幸著, 分担執筆「序章: 統計数理研究所はデータ中心科学の中核的研究機関としての使命を果たす」, ダイヤモンド社, 2011.
4. 佐藤整尚, ファイナンス・景気循環の計量分析, 浅子和美編著, 分担執筆「日本のマクロ経済統計の課題」, ミネルヴァ書房, 2011.
5. 上野玄太, データ同化, 統計応用の百科事典, 丸善株式会社, 2011.
6. 上野玄太, 非線形最適フィルタ, 数理工学事典, 朝倉書店, 2011.
7. 上野玄太, データを未来に活かす, 奥松英幸著, 分担執筆「第 7 章気象: エルニーニョ現象も解析中。大いなる可能性を秘めたデータ同化という手法」, ダイヤモンド社, 2011.
8. 吉田亮, 電子工学ハンドブック(第 7 版), 社団法人電気学会, 分担執筆「確率と統計」, 2012.
9. 樋口知之, 予測にいかす統計モデリングの基本—ベイズ統計入門から応用まで, 講談社, 2011.
10. 中野純司, 項目「ビジュアルデータマイニングの基礎理論: 統計処理」の分担執筆, シミュレーション辞典, (日本シミュレーション学会編), コロナ社, 2011.

[解説・総説]

1. 樋口知之, 不確実性と予測/受益者・生活者の視点と目線にたつシミュレーション研究へ, 数学セミナー, 50(12), 通巻 602 号, 8-12, 2011.
2. 合原一幸, 今井浩, 樋口知之, 三村昌泰, いまモデル化が求められる理由, 科学, 第 80 巻, 第 12 号, 1176-1186, 2010.

[その他]

<会議発表等>

[招待講演]

◆ 国際会議

1. R. Yoshida, Bayesian supercomputing tackles cancers, Joint Meeting of The 2011 Taipei International Statistical Symposium and 7th Conference of The Asian Regional Section of the IASC, Taipei, Taiwan, Dec. 16-19, 2011.
2. R. Yoshida, H. Nagao, M. M. Saito, T. Higuchi, Dynamic Bayesian modelling of biological pathways and decoupling of hidden regulatory signals using nonlinear state space models Yeditepe International Research Conference on Bayesian Learning (YIRCoBL 2011), Istanbul, Turkey, June 14-17, 2011.
3. S. Nakano, G. Ueno, Y. Ebihara, M.-C. Fok, S. Ohtani, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Estimation of the ring current structure with data assimilation based on the particle filter, Inner Magnetosphere Coupling II (IMC II), Los Angeles, USA, Mar. 19-22, 2012.
4. Nakamura, T., VHF atmospheric radars, a review of new capabilities and applications, 2011 International Conference of Space Science and Communications, Penang, Malaysia, July 12-13, 2011
5. Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, H. Yamagishi, T. Yamanouchi, The program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY), The Thirteenth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kühlungsborn, Germany, March 2012.
6. Ogawa, Y., and S. C. Buchert, Recent results of ion up/outflow observed with the EISCAT radars, The 2011 IUGG General Assembly, Melbourne Australia, 05 July 2011
7. Saga, Y. Male germ cell development in mice. Gordon Research Conference (Developmental Biology), Andover, NH, June 19-24, 2011.
8. Saga, Y. Pofut1 regulates Notch activity via balancing clathrin- and caveolin-dependent endocytotic pathways. The Notch Meeting. Athens, Greece, Oct. 2-6, 2011.
9. Saga, Y. The mechanism leading to sexual differentiation of male germ cells. The Cold Spring Harbor Asia conference, Suzhou, China, Oct. 11-15, 2011.

◆ 国内会議

1. 樋口知之, 明治大学先端数理科学研究科開設記念シンポジウム, 基調講演・開設記念市民講演会, 平成 23 年 10 月 4 日.
2. 樋口知之, データ同化による半現実世界の実現～オンライン情報統合とアンサンブル予測の計算基盤～, 電子情報通信学会パターン認識とメディア理解研究会(PRMU 研究会), 幕張メッセ, 平成 23 年 10 月 6-7 日.
3. 中野慎也, データ同化による地球磁気圏撮像観測の活用, 第 14 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2011), 平成 23 年 11 月 9-11 日.
4. 佐藤薫, 新しい南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY) から見えるもの, 日本気象学会 2011 年度春季大会シンポジウム「変動する地球気候の鍵 -南極・北極-」, 代々木, 平成 23 年 11 月 5 月.
5. 木村暁. 細胞建築学: 細胞内空間の隠れた秩序の理解をめざして, 第 51 回生物物理若手の会夏の学校, 関西セミナーハウス, 京都, 平成 23 年 8 月 26 日
6. Akatsuki Kimura. Constructing Cell Model, to Study the Spatial Organization of the Cell. The 49th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan. University of Hyogo, Himeji, Japan, 平成 23

年 9 月 16 日

7. 木村暁. 細胞内部の空間構成を調べる細胞建築学と、情報科学への期待. 生命情報科学若手の会第 3 回研究会, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎, 平成 23 年 10 月 15 日
8. 相賀裕美子. 「マウス体節形成の同調化機構」基礎生物学研究所ミニシンポジウム「脊椎動物の体軸形成の制御」岡崎, 平成 23 年 11 月 22 日

[一般講演]

◆ 国際会議

1. Y. Ogawa, G. Ueno, and I. Häggström, Investigations of the upper polar atmosphere by incoherent scatter plasma line observations, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria, Apr. 3-8, 2011.
2. E. Motohashi and T. Higuchi, Dynamic brand choice modeling based on the state-space approach, SIAM International Workshop on Data Mining for Marketing (DMM2011), Mesa, Arizona USA, Apr. 28-30, 2011.
3. M. Saito, S. Imoto, R. Yamaguchi, H. Sato, H. Sakada, M. Kami, S. Miyano, T. Higuchi, Parallel agent-based simulator for Influenza pandemic, AAMAS 2011, Taipei, Taiwan, May 2, 2011.
4. T. Imoto, S. Nakano, T. Higuchi, Modeling human behavior selection under environmental subsidy policy by multi-agent simulation, AAMAS 2011, Taipei, Taiwan, May 2, 2011.
5. E. Motohashi and T. Higuchi, Modeling dynamics of consumer preference and promotion effect in brand choices, 33rd INFORMS Marketing Science Conference, Houston, USA, Jun. 9-11, 2011.
6. H. Nagao, R. Yoshida, T. Higuchi, Hybrid Bayesian filter algorithm for multivariate time-series modellings on cloud computing systems, Yeditepe International Research Conference on Bayesian Learning (YIRCoBL'11), Istanbul, Turkey, Jun. 14-17, 2011.
7. S. Nakano, M. Fok, P. C. Brandt, T. Higuchi, Data assimilation of EUV imaging data into a plasmasphere model, IUGG General Assembly 2011, Melbourne, Australia, Jun. 28-Jul. 7, 2011.
8. S. Nakano, H. Nagao, T. Higuchi, Anti-correlation between the quiet-time level of mid-latitude magnetic field and long-term solar-wind activity, IUGG General Assembly 2011, Melbourne, Australia, Jun. 28-Jul. 7, 2011.
9. T. Higuchi, Embedding reality in a numerical simulation with data assimilation, FUSION 2011, Chicago, USA, Jul. 5-8, 2011.
10. H. Nagao, N. Kobayashi, S. Nakano and T. Higuchi, Fault parameter estimation with data assimilation on infrasound variations due to big earthquakes, FUSION 2011, Chicago, USA, Jul. 5-8, 2011.
11. M. Saito, S. Imoto, R. Yamaguchi, S. Miyano and T. Higuchi, Estimation of macroscopic parameter in agent-based pandemic simulation, FUSION 2011, Chicago, USA, Jul. 5-8, 2011.
12. E. Motohashi and T. Higuchi, A state-space approach to capturing market dynamics for frequently purchased products, 2011 Joint Statistical Meetins (JSM), Miami Beach, Florida, USA, Jul. 30-Aug. 4, 2011.
13. K. Hirose and T. Higuchi, Generating artistic character facial animation based on motion capture data, The 2012 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT 2012), Ho Chi Minh City, Vietnam, Jan. 9-10, 2012.
14. H. Nagao, Data assimilation on seismoacoustic waves excited by great earthquakes, ISM SYMPOSIUM2012 Statistical Modeling and its Applications for Risk Analysis Joint International

- Symposium with Statistical Researchers from Prague, Czech, Tachikawa, Japan, Mar. 24. 2012.
15. Nakano, J., Fukui, A. and Shimizu, N. Principal Component Analysis for Aggregated Symbolic Data, Workshop in symbolic data analysis, Namur, Belgium, June 8, 2012.
 16. Yamamoto, Y. and Nakano, J. Statistical Graphics for Aggregated Symbolic Data, The 58th World Statistics Congress, Dublin, Ireland, August 24, 2011.
 17. Yamamoto, Y., Nakano, J. and Fujiwara, T. A visualization of aggregated symbolic data, Joint meeting of the 2011 Taipei international statistical symposium and 7th conference of the ARS of the IASC, Taipei, Taiwan, Dec. 17, 2011.
 18. Nakano, J. Aggregated symbolic data analysis, International workshop on symbolic computation, Seoul, Korea, Feb. 9, 2012.
 19. Saita, S., A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, K. Murata, G. Ueno, T. Higuchi, Displacement of Conjugate Points During a Substorm in a Global MHD Simulation, GEMSIS international workshop, March 14, 2011.
 20. Saita, S., A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Displacement of conjugate points during a substorm in a global MHD simulation, GEMSIS International Workshop, "Current status and future perspectives in space weather researches", 12-14 March, 2012.
 21. Fujita, S., T. Kikuchi and T. Tanaka, Generation of a new R2 FAC associated with a northward turn of the interplanetary magnetic field revealed from a global MHD simulation, IUGG Melbourne, 28 June-7 July, 2011.
 22. Fujita, S., H. Yamagishi, and T. Tanaka, Winter-summer asymmetry of auroral intensities in a global magnetosphere-ionosphere MHD simulation, IUGG Melbourne, 28 June-7 July, 2011.
 23. Nakamura, T., C. Szasz, J. Kero, D.D. Meisel, T. Terasawa, , et al. MU radar head echoes of the 2009 Orionid meteor shower, IUGG, Melbourne, Australia, 2011, 3 July 2011
 24. Nakamura, T., A. Mizuno, M. Abo, H. Suzuki, M.K. Ejiri, et al. New ground-based observations of the middle atmosphere over Syowa, Antarctica, IUGG, Melbourne, Australia, 2011, 4 July 2011
 25. K. Sato, M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, et al. Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar, IUGG, Melbourne, Australia, 2011, 6 July 2011
 26. M.K. Ejiri, T. Nakamura & M. Abo. Examination of optimum frequencies for 3-frequency measurement by potassium resonance scattering lidar, IUGG, Melbourne, Australia, 2011, 3 July 2011
 27. Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, H. Yamagishi, T. Yamanouchi, T. Aso, and M. Ejiri, Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar, IUGG 2011, Melbourne, Australia, 28 June-7 July, 2011.
 28. Nishimura, K., T. Nakamura, T. Sato, K. Sato, Adaptive beamforming technique for accurate vertical wind measurements with multichannel MST radar, The Thirteenth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kühlungsborn, Germany, March 2012.
 29. Hashimoto, T., K. Nishimura, K. Sato, T. Sato, Adaptive suppression of aircraft clutter with the PANSY radar training system, The Thirteenth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kühlungsborn, Germany, March 2012.

◆ 国内会議

1. 長尾大道, 樋口知之, 三浦哲, 稲津大祐, 粒子フィルタ法を利用した日本沿岸部における潮位の長期変

- 動解析, 第 1 回データ同化ワークショップ, 平成 23 年 4 月 22 日.
2. 中野慎也, 大規模並列粒子フィルタ, 第 1 回データ同化ワークショップ, 平成 23 年 4 月 22 日.
 3. 中野慎也, M-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, Estimation of temporal evolution of the plasmasphere using IMAGE/EUV data, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
 4. 中野慎也, M-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, 粒子フィルタのプラズマ圏データ同化への応用, 日本地球惑星科学連合 2011 年, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
 5. 長尾大道, 中野慎也, 樋口知之, 地震波・地震音波データ同化による 2008 年岩手・宮城内陸地震の断層パラメータ推定, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
 6. 河野英昭, 才田聡子, 上野玄太, 樋口知之, 中野慎也, 湯元清文, 地上磁場と GPS-TEC の同時観測データを用いるプラズマ圏密度分布推定手法, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
 7. 本橋永至, 樋口知之, 市場のダイナミクスと消費者の購買特性を考慮したプロモーション効果測定, 第 42 回消費者行動研究コンファレンス「消費者行動研究のクロスボーダー」, 平成 23 年 6 月 25-26 日.
 8. 上野玄太, 中村永友, データ同化モデルにおける観測ノイズ分散共分散行列の反復推定法, 2011 年度統計関連学会連合大会, 平成 23 年 9 月 4-7 日.
 9. 吉田亮, 組織的メタ遺伝子解析の多重検定問題, 2011 年度統計関連学会連合大会, 平成 23 年 9 月 4-7 日.
 10. 中野慎也, 樋口知之, Merging particle filter による地磁気長期変動成分の抽出, 2011 年度統計関連学会連合大会, 平成 23 年 9 月 4-7 日.
 11. 長尾大道, 樋口知之, クラウドコンピューティングを利用したデータ同化システムの開発 (序), 2011 年度統計関連学会連合大会, 平成 23 年 9 月 4-7 日.
 12. 樋口知之, 減災とデータ同化, 電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化研究集会, 平成 23 年 9 月 20-21 日.
 13. 上野玄太, アンサンブルカルマンフィルタ: その概念と計算アルゴリズム, 電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化研究集会, 平成 23 年 9 月 20-21 日.
 14. 中野慎也, M-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, 極端紫外光データを用いたプラズマ圏構造の推定—現状あるいは課題, 電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化研究集会, 平成 23 年 9 月 20-21 日.
 15. 長尾大道, 小林直樹, 深尾良夫, 樋口知之, 石原靖, 坪井誠司, 大地震によって励起される地震音波の伝搬特性, 電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化研究集会, 平成 23 年 9 月 20-21 日.
 16. 本橋永至, 樋口知之, 市場反応の構造的変化を仮定したブランド選択行動の解析, マーケティングの統計モデリング研究部会, 平成 23 年 9 月 24 日.
 17. 佐藤忠彦, 樋口知之, 階層ベイズ状態空間モデルを用いた消費者来店行動の解析, マーケティングの統計モデリング研究部会, 平成 23 年 9 月 24 日.
 18. 河野英昭, 才田聡子, 上野玄太, 樋口知之, 中野慎也, 湯元清文, FLR 地上磁場観測と TEC 観測からのプラズマ圏 3 次元密度分布推定法, 第 130 回 SGEPS 総会, 平成 23 年 11 月 3-6 日.
 19. 徳永旭将, 中村和幸, 樋口知之, 魚住禎司, 吉川顕正, 森岡昭, 湯元清文, MAGDAS/CPMN グループ湯元清文, Timing relation between positive bay onsets, Pi2 onsets, auroral initial brightenings and auroral breakups, 第 130 回 SGEPS 総会, 平成 23 年 11 月 3-6 日.
 20. 中野慎也, 磁気圏の容量, 平成 23 年度現象解析ワークショップ, 平成 23 年 11 月 28 日.
 21. 本橋永至, 樋口知之, 市場反応の構造的変化を仮定したブランド選択行動の解析, 第 90 回日本マーケティング・サイエンス学会, 平成 23 年 12 月 3-4 日.
 22. 樋口知之, データ同化とスーパーコンピュータ「京」—個別化医療サービスの実現に向けた計算技術の開発—, 科研費シンポ「生物統計における統計的推測とその応用」, 平成 23 年 12 月 11-12 日.
 23. 樋口知之, LiSDAS: データ同化計算技術に基づく生体情報シミュレーション, ISLiM 成果報告会 2011,

平成 23 年 12 月 21-22 日.

24. 樋口知之, 広がるデータ同化の応用領域: 啓発活動の報告, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年度 2 月 13 日.
25. 鈴木香寿恵, 川村賢二, F. Parrenin, 樋口知之, データ同化によるプラズマ圏構造の推定, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年 2 月 13 日.
26. 長尾大道, 小林直樹, 深尾良夫, 富澤一郎, 樋口知之, 大地震によって励起された電離層変動のモデリング, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年 2 月 13 日.
27. 中野慎也, M-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, データ同化によるプラズマ圏構造の推定, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年 2 月 13 日.
28. 庭山律哉, 木村健二, 長尾大道, 樋口知之, 木村暁, 線虫細胞質流動における流速データの取得と原動力推定, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年 2 月 13 日.
29. 小山宏史, 梅田民樹, 中村和幸, 樋口知之, 木村暁線虫細胞分裂における形状データの取得と硬さ推定, 新領域融合プロジェクト データ同化による複雑システムの定量的理解と計測デザイン 2011 年度末研究集会, 平成 24 年 2 月 13 日.
30. 長尾大道, 樋口知之, 小林直樹, 深尾良夫, 富澤一郎, 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う微気圧変動および電離層変動のモデリング, 新領域融合研究センター若手研究集会, 平成 24 年 2 月 20 日.
31. 長尾大道, 小林直樹, 深尾良夫, 富澤一郎, 樋口知之, 大地震に伴う微気圧変動および電離層変動のモデリング, IUGONET 研究集会, 平成 24 年 2 月 23 日.
32. 長尾大道, 小林直樹, 深尾良夫, 富澤一郎, 樋口知之, 地震によって励起された電離層変動のモデリング, 第 61 回理論応用力学講演会, 平成 24 年 3 月 7-9 日.
33. 山本由和, 中野純司, 藤原丈史, 尾崎皇彦, 大量 POS データの可視化と解析, 日本計算機統計学会第 25 回大会, 平成 23 年 5 月 8 日.
34. 山本由和, 中野純司, 集約的シンボリックデータの可視化, 2011 年度統計関連学会連合大会, 平成 23 年 9 月 6 日.
35. Nakano, J. Some analyses of aggregated symbolic data, ISM-ISI-ISSAS Joint Conference 2012, 平成 23 年 2 月 3 日.
36. 庭山律哉, 長尾大道, 樋口知之, 木村暁, データ同化を用いた線虫 *C.elegans* における細胞質流動の発生メカニズム, 第 61 回理論応用力学講演会, 平成 24 年 3 月 7-9 日.
37. 鈴木香寿恵, 川村賢二, Frederic Parrenin, 阿部彩子, 樋口知之, ドームふじ氷床コアの年代補正モデルの適用, アイスコアコンソーシアム研究集会兼先進プロジェクト研究集会「氷床コアからさぐる第四紀の地球気候変動史」, 平成 24 年 3 月 21 日.
38. 門倉昭, 佐藤夏雄, 電子オーロラとプロトンオーロラの南北共役性, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 130 回総会・講演会, 神戸大学, 2011 年 11 月 3-6 日
39. 元場哲郎, 小川泰信, Long-term variations and trends of ionospheric parameters observed with the EISCAT Tromso UHF radar, 179 回生存圏シンポジウム「メタ情報のデータベースを利用した分野横断型地球科学研究の進展」, 京都, 2011 年 8 月.
40. 元場哲郎, 小川泰信, Ingemar Haggstrom, 野澤悟徳, Long-term variations and trends of ionospheric temperatures observed with the EISCAT Tromso UHF radar, STE 研究会「地上科学メタ情報データ

ベースの現状とその活用」, 名古屋, 2012年2月.

41. 重信薫, 田口真, 門倉昭, 佐藤夏雄, 地磁気共役点オーロラの発光強度比較, 地球磁気圏・地球惑星圏学会第130回総会・講演会, 神戸大学, 2011年11月3-6日.
42. 西村耕司, 中村卓司, 佐藤亨, 佐藤薫, 適応アレイ処理を用いた鉛直風速の高精度推定, PANSY 研究集会, 東大, 2011年8月.
43. 西村耕司, 佐藤亨, 佐藤薫, 空間・周波数干渉計法とアレイアンテナ技術による対流圏イメージング, 気象学会春季大会専門分科会, 2011年5月.
44. 中村卓司, 堤雅基, 佐藤薫, 阿保真, 江尻省, 富川喜弘, 鈴木秀彦, 川原琢也, 山内恭, 水野亮, 南極地域観測第VIII期重点研究観測・サブテーマIメンバー, 南極地域観測第VIII期重点研究観測における中層・超高層大気観測の進捗状況第130回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 神戸, 11月3日~11月6日, 2011
45. Johan Kero, Csilla Szasz, Takuji Nakamura, David D. Meisel, Toshio Terasawa, Hideaki Miyamoto, Yasunori Fujiwara, Masayoshi Ueda, Koji Nishimura, The 2009-2010 monthly MU radar observation Programme for meteor head echoes, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 幕張, 5月22-27日, 2011
46. Johan Kero, Csilla Szasz, Takuji Nakamura, David D. Meisel, Toshio Terasawa, Hideaki Miyamoto, Yasunori Fujiwara, Masayoshi Ueda, Koji Nishimura, Monthly MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: 2009 June to 2010 December, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 幕張, 5月22-27日, 2011
47. Csilla Szasz, Johan Kero, Takuji Nakamura, David D. Meisel, Toshio Terasawa, Hideaki Miyamoto, Yasunori Fujiwara, Masayoshi Ueda, Koji Nishimura, First results from the 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: the Orionids, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 幕張, 5月22-27日, 2011
48. 佐藤薫, 堤雅基, 佐藤亨, 中村卓司, 齊藤昭則, 富川喜弘, 西村耕司, 山岸久雄, 山内恭, 南極昭和基地大型大気レーダー計画, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 幕張, 5月22-27日, 2011
49. 佐藤薫, 堤雅基, 佐藤亨, 中村卓司, 齊藤昭則, 富川喜弘, 西村耕司, 山岸久雄, 山内恭, 南極昭和基地大型大気レーダー計画の現状, 第2回極域科学シンポジウム/第35回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2011年11月.
50. 佐藤薫, 富川喜弘, Julio T. Bacmeister, 渡辺真吾, 全運動量フラックスの新しい推定法, 第2回極域科学シンポジウム/第35回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2011年11月.
51. 中村卓司, 佐藤薫, 堤雅基, 山内恭, 南極観測第VIII期重点研究観測サブテーマIメンバー, 第VIII期重点研究観測による昭和基地上空の中層超高層大気の観測, 第2回極域科学シンポジウム/第35回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2011年11月.
52. 庭山律哉, 長尾大道, 樋口知之, *木村暁. データ同化を用いた線虫 *C. elegans* における細胞質流動の発生メカニズムの解析. 第61回理論応用力学講演会(NCTAM2012), 東京大学生産技術研究所, 東京 2012.3.8
53. 大久保佑亮, 相賀裕美子. The coupling mechanism to generate synchronized oscillation of segmentation clock in mice. 第6回 Notch シグナル研究会, 2011, 11/8-11/9

[ポスター]

◆ 国際会議

1. G. Ueno, An iterative algorithm for estimating the observation error covariance matrix for

ensemble-based filters, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria, Apr. 3-8, 2011.

2. G. Ueno, On-line estimation of the observation error covariance matrix for ensemble-based filters, IUGG General Assembly 2011, Melbourne, Australia, Jun. 28-Jul. 7, 2011.
3. S. Nakano, T. Higuchi, Massively parallel particle filter and a grouping strategy, IUGG General Assembly 2011, Melbourne, Australia, Jun. 28-Jul. 7, 2011.
4. S. Saita, A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, G. Ueno, K. T. Murata, T. Higuchi, Displacement of conjugate point during a substorm in a global MHD simulation, IUGG General Assembly 2011, Melbourne, Australia, Jun. 28-Jul. 7, 2011.
5. S. Nakano, M. Fok, P. C. Brandt, T. Higuchi, An approach for exploring the dynamics of the plasmasphere using data assimilation of IMAGE/EUV data, AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA, Dec. 5-9, 2011.
6. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Data assimilation of IMAGE/EUV data for estimating the plasmaspheric structure, Inner Magnetosphere Coupling II (IMC II), Los Angeles, USA, Mar. 19-22, 2012.
7. Saita, S., S. Fujita, T. Tanaka, H. Yamagishi, Reproducing substorm-related changes of the near-Earth magnetotail field structure in a global MHD simulation, Workshop on Physical Processes in Non-Uniform Finite Magnetospheric Systems — 50 Years of Tamao's Resonant Mode Coupling Theory —, Sep. 13, 2011.
8. Saita, S., A. Kadokura, N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, G. Ueno, K. Murata, T. Higuchi, Displacement of conjugate point during a substorm in a global MHD simulation XXV IUGG General Assembly, Jul. 5, 2011.

◆ 国内会議

1. 中野慎也, 二穴喜文, Mars Express 高速中性粒子データにおけるノイズ・シグナル成分の分類と特性解析, 日本地球惑星科学連合 2011 年, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
2. 中野慎也, 長尾大道, 樋口知之, 静穏時地磁気 H 成分と太陽風活動長期変動との関係, 日本地球惑星科学連合 2011 年, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
3. 才田聡子, 門倉昭, 佐藤夏雄, 藤田茂, 田中高史, 海老原祐輔, 大谷晋一, 上野玄太, 村田健史, 松岡大祐, 樋口知之, グローバル MHD シミュレーションによるサブストーム時の磁気圏近尾部磁場構造の再現, 日本地球惑星科学連合 2011 年, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
4. 徳永旭将, 湯元清文, 魚住禎司, 吉川顕正, 中村和幸, 樋口知之, 池田大輔, MAGDAS/CPMN グループ, Singular Value Transformation を用いた地上磁場からのサブストームオンセットの同定, 日本地球惑星科学連合 2011 年, 平成 23 年 5 月 22-27 日.
5. 中野慎也, M. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, Modeling of the plasmasphere using data assimilation of IMAGE/EUV data, 第 130 回 SGEPS 総会, 平成 23 年 11 月 3-6 日.
6. 長尾大道, 大地震発生に伴う微気圧・電離層変動のモデリング—2008 年岩手・宮城内陸地震の場合—, 地震研共同利用「青い地球の地震学」研究会, 平成 24 年 2 月 21 日.
7. 長尾大道, 斎藤正也, 中野慎也, 樋口知之, データ同化ライブラリの開発, ナノ・ライフ合同シンポ, 平成 24 年 3 月 5-6 日.
8. 中野慎也, 斎藤正也, 樋口知之, Parameter estimation method using an evolutionary computation based on the alternatively lattice-pattern switching strategy, ナノ・ライフ合同シンポ, 平成 24 年 3 月 5-6 日.

9. 齋藤正也, 吉田亮, 長尾大道, 中野慎也, 樋口知之, 生命体データ同化システム LiSDAS の開発と応用, ナノ・ライフ合同シンポ, 平成 24 年 3 月 5-6 日.
10. 才田聡子, 尾花由紀, 藤田茂, 田中高史, 山岸久雄, グローバル MHD シミュレーションによる磁力線固有振動数の日変化の再現, 日本地球惑星科学連合大会 2011, 2011 年 5 月 25 日.
11. 才田聡子, 門倉昭, 佐藤夏雄, 藤田茂, 田中高史, 海老原祐輔, 大谷晋一, 上野玄太, 村田健史, 松岡大祐, 樋口知之, グローバル MHD シミュレーションによるサブストーム時の磁気圏近尾部磁場構造の再現, 日本地球惑星科学連合大会 2011, 2011 年 5 月 25 日.
12. 門倉昭, 佐藤夏雄, 昭和基地-アイスランド共役点におけるオーロラ活動の長期変動 (1), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ, 2011 年 5 月 22-27 日.

[パネラー]

1. 樋口知之, 「京とその先に向けて-我が国のコア・コンピタンスと戦略-」次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 (ライブ) 公開シンポジウム, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター (神戸市), 2012 年 3 月 5・6 日

[その他]

◆ 教育活動

1. 樋口知之, 集中講義, 島根大学医学部医療情報学, 平成 23 年 5 月 25 日.
2. 中野慎也, 「Particle filter と Kalman filter」, 第 15 回データ同化夏の学校, 平成 23 年 8 月 22-24 日.
3. 樋口知之, 明治大学各研究科横断型カリキュラムプロジェクト系科目先端, 数理科学 A-地球変動と数理-「データ同化とベイズ統計」「逐次ベイズフィルタ」「逆問題と信号分解」, 平成 23 年 8 月 26 日.
4. 長尾大道, 第 2 回計算科学アルゴリズム研究会, 「データ同化アルゴリズムとその応用」, 京都大学, 平成 23 年 8 月 26 日.
5. 樋口知之, 集中講義, 九州大学大学院システム情報科学府, 平成 23 年 11 月 29 日-12 月 2 日.
6. 吉田亮, 統計数理研究所 公開講座「統計学概論」, 平成 23 年 10 月 19 日
7. 上野玄太, 統計数理研究所 公開講座「アンサンブルカルマンフィルタの実装法」, 平成 23 年 12 月 13 日.
8. 上野玄太, 明治大学講義, 平成 23 年.
9. 中野慎也, 明治大学講義, 平成 23 年 12 月 21 日.
10. 長尾大道, 明治大学講義, 平成 23 年 11 月 2 日, 11 月 30 日, 12 月 14 日.

<受賞>

1. 佐藤整尚, 日本統計学会統計活動賞, Web-DECOMP の開発とサービスの提供.
2. 小川泰信, 地球電磁気地球惑星圏学会・大林奨励賞, 2011 年 11 月. 「非干渉散乱レーダーによる極域電離圏イオン上昇流の研究」

③ その他の成果発表

1. 日本経済新聞掲載, 平成 24 年 1 月 27 日 (夕刊第一面).