

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、その現実的な研究の歴史は20年程度にすぎない。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、およびそれから発展したデータ同化研究開発センターは、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、本プロジェクトに直接関連したページが多く上位にランクされている。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 年度に終了するが、中間評価では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た。これらの成果を元に、第 2 期の新領域融合研究センターの新領域融合プロジェクトとして本課題が採択され、研究を進めている。

(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。さらに、これまでに本プロジェクトではデータ同化をより多くの分野、具体的には極地科学、生物学、ゲノム科学、マーケティング、などにも応用しており、注目を集めている。

[2] 研究計画

(1) 全体計画

テーマ	22年度	23年度	24年度	25年度	26年度	27年度
	(予備研究)					
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の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

数理・計算チームでは、階層的シミュレーションへのデータ同化適用事例として、地球物理シミュレーションと携帯電話のようなセンサー情報に代表されるサイバーフィジカルシステムとを統合する地震津波災害情報統合システムや、市町村内におけるマイクロシミュレーションと、地域間や海外を考慮したマクロシミュレーションを統合した感染症予報システムの開発に取り組む。これらの研究では、まずは、データのアクセシビリティを調査することから始める。被災者の位置情報、定点観測医療機関ごとの感染者数等についてのその調査を行い、小規模シミュレーションによるプロトタイプを作成する。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。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・計算チームでは、前年度に開発したプロトタイプをもとに、エージェント・ベースのシミュレーションシステムを開発する。地震津波避難システムでは、地震の物理シミュレーションと避難シミュレーションを統合して、津波からの避難支援システムのプロトタイプを開発する。感染症予測システムでは、感染者数の時空間分布から感染伝播における地域間の結び付きを推定し、ひとつの都市を対象とするシミュレータを全国レベルのシミュレータに統合する。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・計算チームでは、前年度に開発した統合シミュレータに実際にデータ同化を行い、リアルタイムな予報が可能かどうかを検証する。地震津波避難システムでは、住民の位置情報が、感染症予測システムでは、市町村レベルの日毎の感染者数が同化の対象となる。これまでに開発した超高並列計算機環境下での逐次アンサンブルベースフィルタを同化に用い、必要に応じてアルゴリズムを発展させる研究を行う。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・計算チームは、啓発書物の出版や開発した試システムの公開により成果の広報を行うとともに、開発したシステムのさらなる実用化に向けての課題に取り組む。とくに、災害・公衆衛生への可能な貢献を、一般向けへのセミナーや会議等を通じて幅広く公開することに努める。また、津波や感染症のシミュレーションと対策立案にはもちろん全地球的取扱いが必要であるため、海外の専門家との技術ミーティングやシンポジウムを通じての意見交換により、システムの完成度の向上や課題発見に努めていきたい。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、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、
斎藤正也、鈴木香寿恵（平成 24 年 11 月から）

〔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、木村健二（平成 24 年 9 月から）

〔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、佐藤夏雄

〔新領域融合研究センター〕 才田聡子、鈴木香寿恵（平成 24 年 10 月まで）西村耕司、小塚奈津実、
二宮洋一郎、庭山律哉、木村健二（平成 24 年 8 月まで）

〔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) 大地震に伴う大気変動のデータ同化研究

2011年3月11日に発生した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。近い将来、確実に起こるとされる東海・東南海・南海地震（南海トラフ地震）に向けて、自然科学をはじめ、工学や社会科学といった様々な科学分野の研究者が、それぞれの視点から知恵を絞り努力を積み重ねている。地震や津波を解析する上で、従来の地震波解析とは異なる切り口の一つとして、それらによって大気中に励起される「地震音波」がある。東日本大震災の際には、津波起源の音波によって励起されたと考えられる地震音波によって、地球の大気ならびに高度数十ないし数百 km に存在する電離層が大規模に揺り動かされている様が、日本およびその周辺国の微気圧計および GNSS 受信機によって観測された。大気中における音波の伝搬速度は秒速約 335m であるのに対し、津波の伝搬速度は海洋プレート境界型地震発生域の典型的な深度 4,000m において秒速約 200m 程度であり、深度 1,000m 程度の大陸棚に達すると秒速約 100m に減速し、さらに深度が浅くなる沿岸部に近づくにつれて急速に遅くなる。音波が津波よりずっと速く伝搬するというこの性質を利用し、地震音波を詳しく解析することにより、津波が到来する前にその規模と到達時刻をいち早く知らせることができる津波早期警戒システムの実現に期待が寄せられている。津波早期警戒システムの実現のためには、地震音波伝搬に関するシミュレーションと観測データの解析を同時に実施することが必要であることは自明であり、そのための基盤技術であるデータ同化の役割が非常に大きくなるであろうことは想像に難くない。

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、それに伴う気圧変動が高感度の微気圧計によって観測されている。我々は、地震音波の伝搬特性を明らかにすることを目的に、2011 年 12 月には電気通信大学菅平宇宙電波観測所に、2013 年 3 月には京都大学潮岬風力実験所に、それぞれ微気圧観測点を設置した。この地震音波を詳しく解析すれば、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（長尾ら、2012）。与えられた固体地球と大気から成る地球構造モデルおよび断層モデルの下で、観測点における気圧変動を再現するための数値シミュレーション法として、ノーマルモード重合と呼ばれる手法がある（Kobayashi, 2007）。計算手順を簡単に述べると、まずは固体地球の標準モデルである PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) および大気の標準モデルである NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) を組み合わせることにより、地球の構造モデルを構築する。この構造モデルについての固有モード（ノーマルモード）およびそれに対応する固有関数を求めることにより、震源－観測点間の Green 関数を構成することができる。次に、地震の震源となる断層モデルを構築する。地震は、地球表層である地殻内において岩盤がある地点（震源）から割れ進むことに端を発し、それによる弾性波が周囲に伝搬していくという現象であり、岩盤の割れ目が断層として残される。したがって、断層の破壊伝搬現象は、断層に沿って複数個の震源（サブイベント）を並べ、それらを次々に発震させるというモデルで近似することができる。個別の地震の震源における力源モデルとしては、気象庁や各大学・研究機関が公表している地震のモーメントテンソル（centroid moment tensor; CMT）解が利用可能である。ここでは、所与の観測データに対するシミュレーションモデルパラメータの推定というオフライン解析の問題を取り扱うが、実際の地震や微気圧の観測データはオンライン的にどんどんと入ってくるため、近い将来の解析システム構築に向けた準備として、現段階で逐次データ同化による解析の土台を作っておく。

図 S-1 に、地震音波データ同化システム内で実施されているプロシーダの概要を示す。本システムによって推定するモデルパラメータは、震源位置、サブイベントのモーメントマグニチュード、断層の破壊伝搬速度、上空を吹く風による影響を表す時間遅延、観測点における観測ノイズの分散である。本システムでは、まず予め用意された過去の地震リストから選択された地震イベントについて、気象庁が発表した震源に関するパラメータ値を取得する。断層に沿って同一の CMT 解で表されるサブイベントを等間隔に N 個並べ、それぞれのモーメントマグニチュードは等しくしておく。パラメータの事前分布 $p(\theta)$ を適当に定め、理論波形と観測波形の適合度を表す事後分布を、次式のように定義する。

$$p(\theta | \delta p_{1:K,1:T}^{\text{obs}}) \propto p(\theta) \prod_{t=1}^T \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} \exp \left[- \left(\delta p_{k,t}^{\text{obs}} - \sum_{n=1}^N m_n \delta p_{n,k,t-t_0-nL/(N-1)V}^{\text{sim}} \right)^2 / 2\sigma_k^2 \right]$$

これは、 n 番目のサブイベントによる k 番目の観測点における理論波形 $\delta p_{n,k,t}^{\text{sim}}$ をサブイベントのモーメントマグニチュード m_n で重みづけし、断層の破壊伝搬速度 V を考慮した上で重合した波形と観測波形 $\delta p_{k,t}^{\text{obs}}$ とを比較することを示している。

本システムのアルゴリズムを検証するために、仮想的な震源モデルから数値シミュレーションによって生成した気圧変動を擬似観測データとし、本システムによって震源パラメータを再現する「双子実験」を試みる。図 S-2 に示す通り、この双子実験においては近い将来起こるとされる東南海地震を想定し、遠州灘沖においてマグニチュード 8 クラスの大地震が起こったと仮定する。ここでは真の震源の深さを 10km、断層の長さを 40 km、断層の破壊伝搬速度を 2 km/秒、地震全体のモーメントマグニチュードを $M_0 = 10^{21}\text{Nm}$ とし、断層に沿った 5 個のサブイベントのモーメントマグニチュードを、それぞれ $0.15M_0$ 、 $0.25M_0$ 、 $0.35M_0$ 、 $0.20M_0$ 、 $0.05M_0$ であるとする。震源域から励起された地震音波による気圧変動は、断層の中心から 400km 離れた菅平観測点、ならびに 100km 離れた潮岬観測点において気圧変動として観測されるものとする。なお、この仮想地震のようないわゆる海洋プレート境界型地震の場合、震源の水平位置に関しては、地震波解析の段階で大きな推定誤差が生じることは考えにくいいため、本実験においては推定パラメータから除外する。また、大気中の背景風による地震音波伝搬への影響をノーマルモード重合計算によって再現することは難しいため、時間遅延パラメータについても推定パラメータから除外する。したがって、本実験において推定すべきパラメータは、震源の深さ、破壊伝搬速度、サブイベントのモーメントマグニチュード、および観測ノイズの分散となる。図 S-3 に、数値シミュレーションによって算出した各サブイベントに対する気圧応答波形を示す。実際の微気圧観測においても捉えられる地震発生後まもなく現れる表面波、およびしばらく経過した後に現れる地震音波が再現されている。これらを、上述の各サブイベントのモーメントマグニチュードによって重み付けした上で、破壊伝搬速度を考慮して重ね合わせ、正規分布に従う観測ノイズを加えたものを本実験で用いる擬似観測データであるとする (図 S-3 最下段)。ここでは、海岸付近にある潮岬観測点における観測ノイズは、山間部にある菅平観測点のそれよりも大きいことを考慮し、観測ノイズが従う正規分布の分散をそれぞれ 50^2Pa^2 および 20^2Pa^2 であるとする。

図 S-4 に、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) による各モデルパラメータを推定する過程、ならびに得られたサンプリングから推定した各パラメータについての周辺化事後分布を示す。時系列の長さとしては、地震音波に伴う気圧変動が両観測点で顕著となる A: 2,400 秒間の他、津波が海岸に襲来するまでに緊急予測することを想定した B: 300 秒間の 2 つの場合についてデータ同化を実施した。なお実際には、気象庁およびそれ以外の研究機関が発表した震源パラメータの統計を取り、その結果を基に事前分布を構築することが必要であるが、本実験においてはもちろんそのようなことは不可能であるため、ここでは事前分布は一様であることを仮定している。MCMC のアルゴリズムとして Metropolis 法

を採用したところ、約 25,000 ステップ目あたりから定常状態に達したため (図 S-4(a))、30,005 ステップ目から 80,000 ステップ目まで 5 ステップごとにサンプリングを収集することによって得られた 10,000 個のサンプリングを用いて事後分布を推定した (図 S-4(b))。本実験においては、MCMC のためのパラメータの初期値として、あえて最悪の値を与えた上で実施したものの、A、B のどちらの場合についても、各パラメータの周辺化事後分布は真の値の周辺に分布していることが分かる。最後に、MCMC によって得られた事後分布のモードを与えるパラメータ (maximum-a-posteriori; MAP) 解から再現された理論波形 $\delta p_{k,i}^{\text{MAP}}$ と、擬似観測波形 $\delta p_{k,i}^{\text{obs}}$ を比較したものを、図 S-5 に示す。理論波形は観測波形の細部に至るまで説明できていることは明らかであり、このことから地震音波データ同化システムのアルゴリズムが適切に動作していることが分かる。特に注目すべきは、B の場合は地震音波に伴う気圧変動が起こっている途中であるにも関わらず、波形がきちんと再現されている点であり、本システムが早期警戒システムへと発展する可能性を十分に秘めていることを示唆している。提案手法は CMT 解の存在を前提としているため、地震波がほとんど励起しないような津波地震の場合に直接適用することは、現時点では困難が生じる。ただし、東北地方太平洋沖地震の際には、津波波源付近の海面上昇によって励起されたと考えられる Lamb 波に伴う微気圧変動が観測されたことが報告されており、また Kobayashi (2007) のコードは Lamb 波についての計算が可能であることから、津波地震の場合であっても微気圧観測や提案手法の有効性を損なうものではない。双子実験においては、PC クラスタを用いた 120 並列の計算によって約 30 分の計算時間を要したが、今後は観測データの回収やその初期処理に要する時間を考慮すれば、計算時間は少なくとも数分の 1 以下に抑える必要がある。そのためには、ノーマルモード重合計算の並列化や、レプリカ交換 MCMC 法等の採用による分布関数の推定の効率化を図る必要があるものの、計算資源の単純な大規模化によって十分に達成可能な目標である。

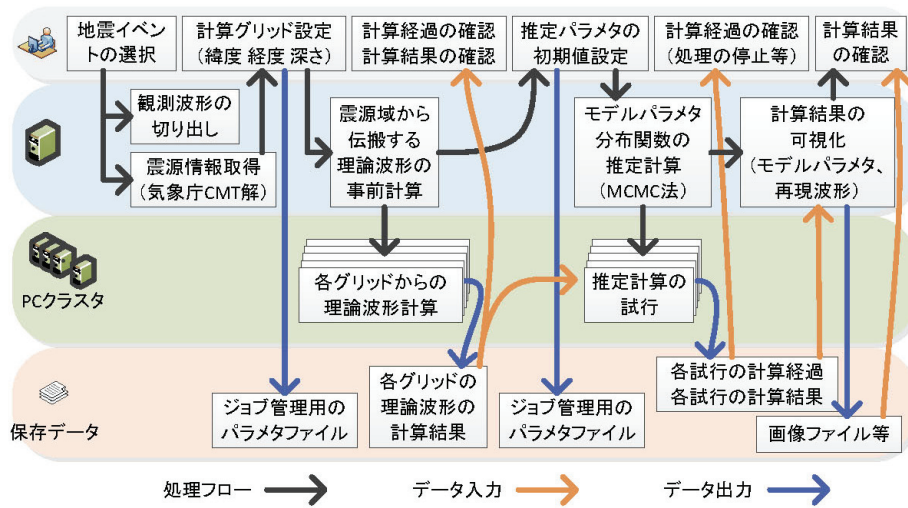


図 S-1: 地震音波データ同化システムにおける解析フローの概要

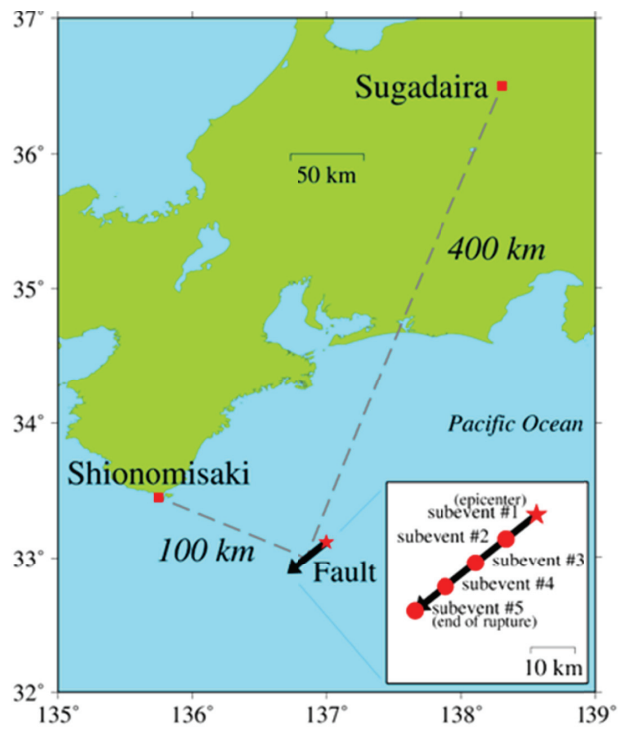


図 S-2: 双子実験で想定した東南海沖地震の設定

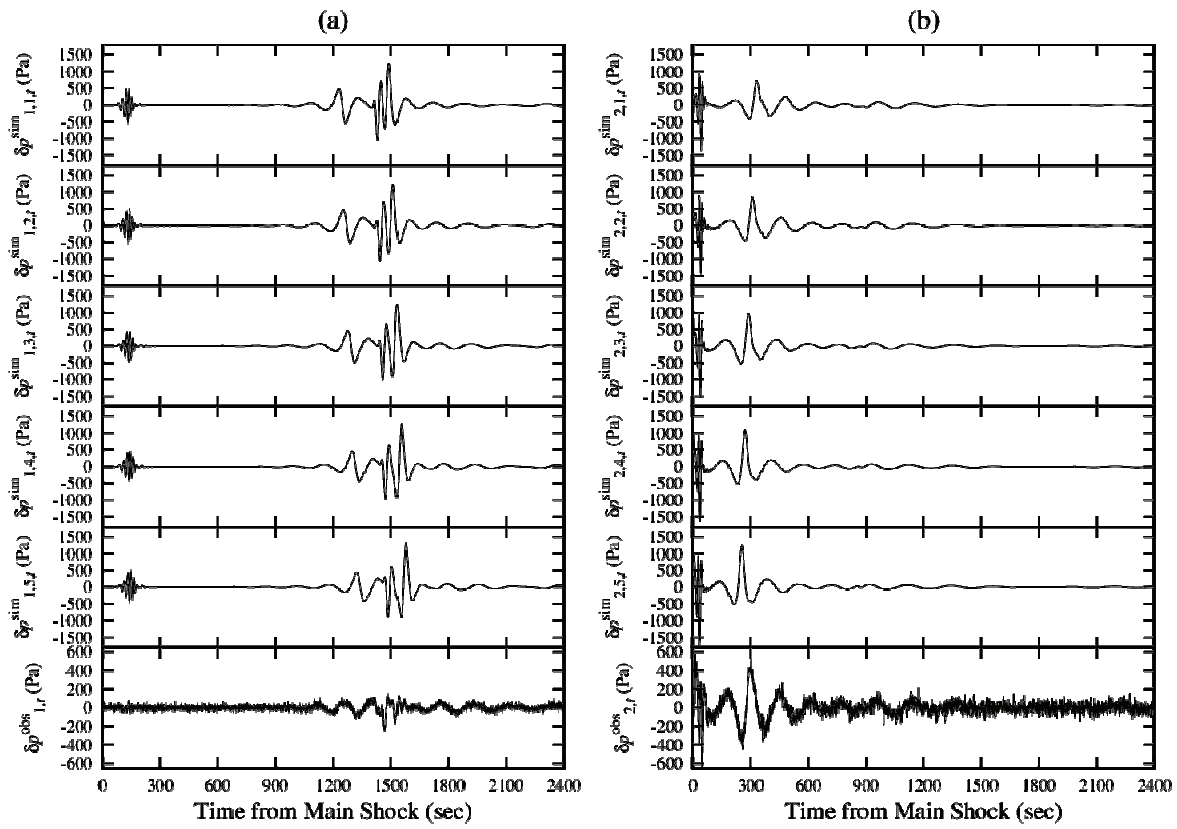


図 S-3: 仮想地震に伴う (a) 菅平観測点および (b) 潮岬観測点における気圧変動の理論波形

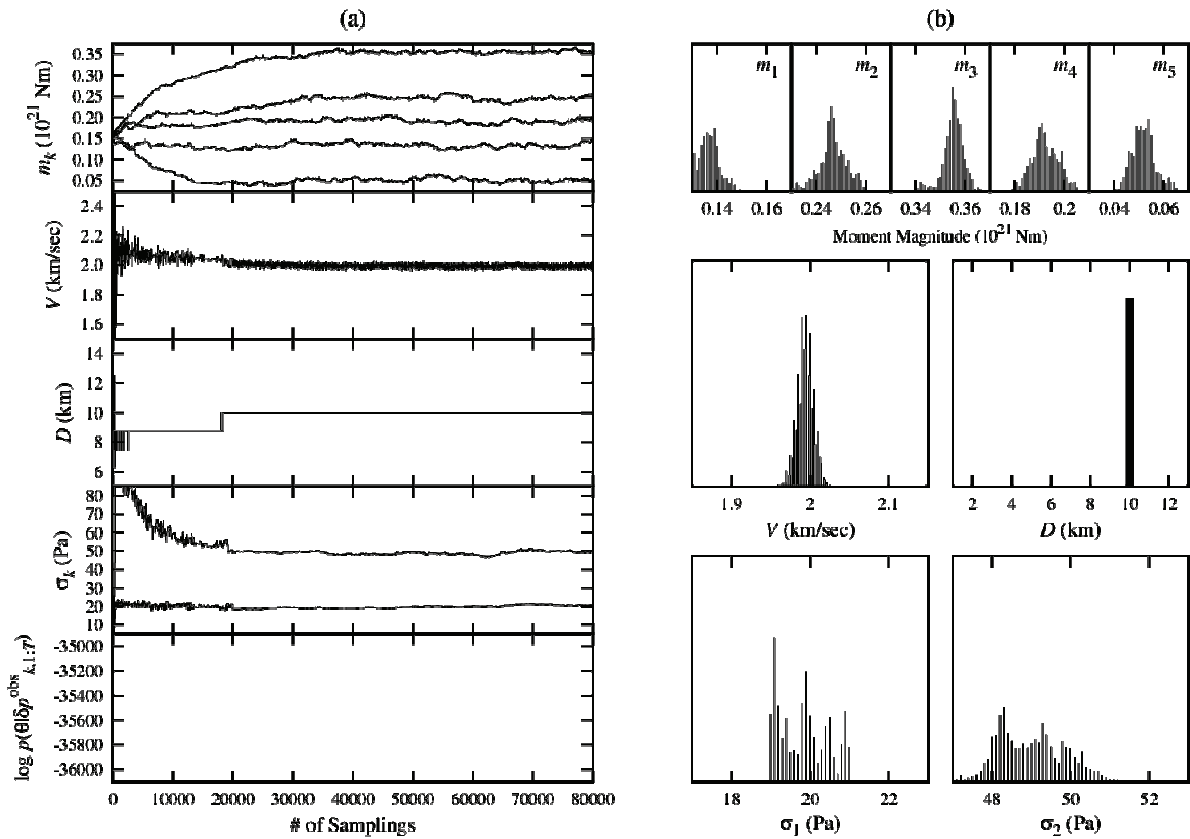


図 S-4: MCMC によって得られた各モデルパラメータの (a) サンプルング、および (b) 事後分布

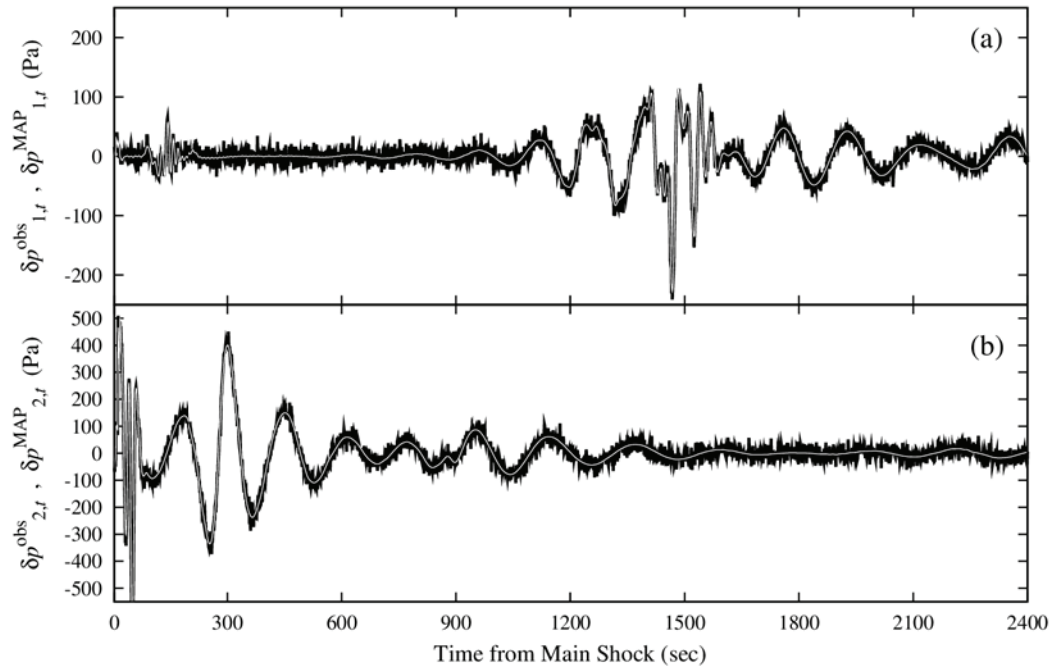
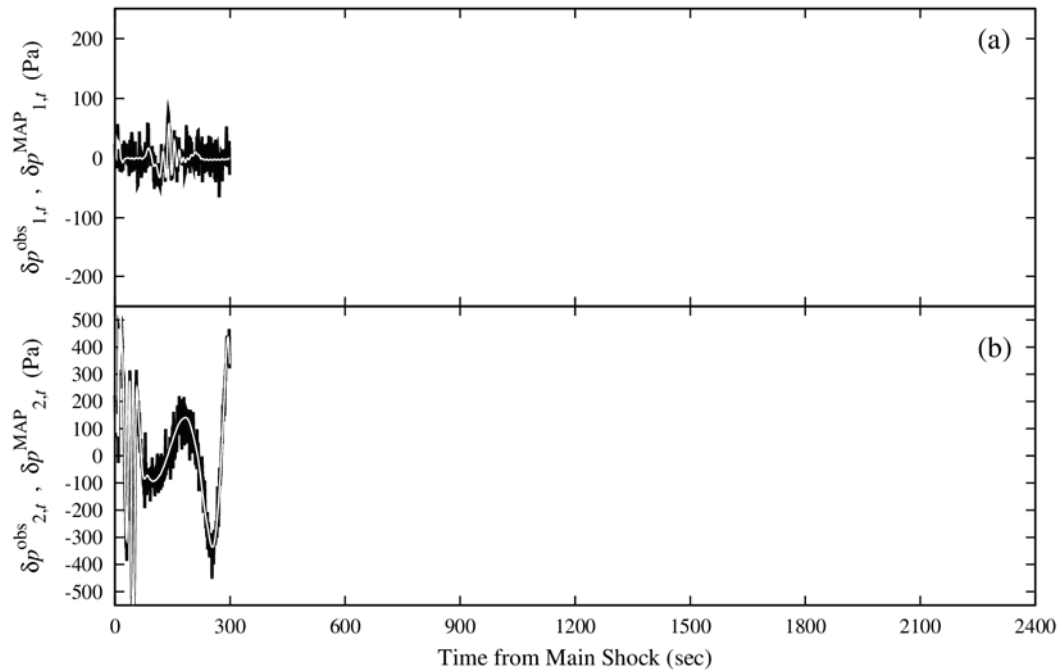
A**B**

図 S-5: 仮想地震発生から A: 2,400 秒間および B: 300 秒間のデータを用いて MAP 解から再現された (a) 菅平観測点および (b) 潮岬観測点における理論波形(白線)と擬似観測データ(黒線)の比較

(2) プラズマ圏構造の推定

地球磁気圏のプラズマは、地上高度 2 万 km 程度までの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んでいる。プラズマ圏のプラズマ分布については、米国の人工衛星 IMAGE によって、プラズマ中のヘリウムイオンが散乱する極端紫外光を撮像した画像データから、大域的な描像が得られている。図 S-6 は IMAGE による撮像観測の概念図であり、図 S-7 には実際の IMAGE による極端紫外光画像の一例を示す。図 S-7 の中央に赤い円で示しているのが地球で、それより外側で発光している領域がプラズマ圏に相当する。我々は、逐次データ同化手法の一つであるアンサンブル変換カルマンフィルタを用いて、IMAGE 衛星の極端紫外光画像からプラズマ圏のプラズマ密度分布の時間発展を推定する手法の開発を進めている。

プラズマ圏のプラズマ密度分布構造は、周辺の電場の影響を強く受けて変化する。但し、ここで注意すべきことは、プラズマ圏において、プラズマの電場に対する応答が電場の変動時間スケールと比較し

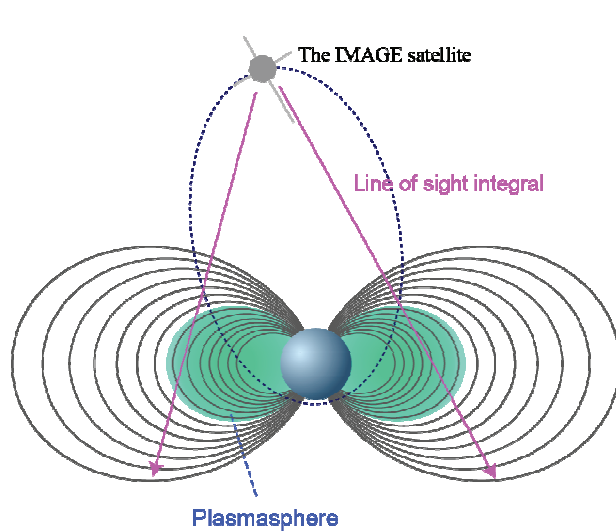


図 S-6: 人工衛星 IMAGE によるプラズマ圏プラズマ撮像観測の模式図

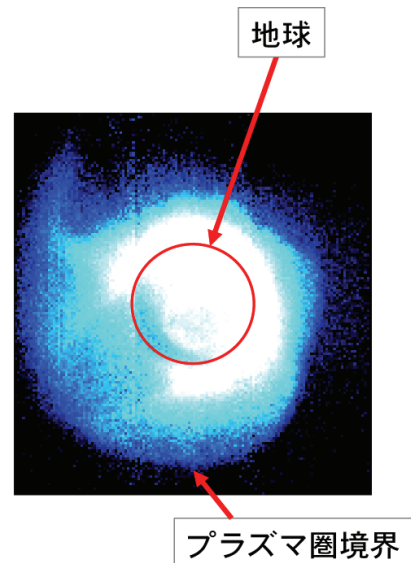


図 S-7: 人工衛星 IMAGE によって撮像されたプラズマ圏のプラズマの極端紫外光画像

て遅いため、プラズマ密度分布は電場の変動の履歴を反映して多様な形状を取り得るということである。プラズマ圏の時間発展を物理モデルで再現しようとした場合、初期値の設定においてこの点を十分考慮する必要がある。過去の履歴を反映するという事は、ある時点での太陽風や磁気圏の条件が同じであっても、その時のプラズマ圏の構造が同じであるとは限らないということを意味する。そして、初期値が不適切な場合、その後の時間発展もうまく再現できないことになる。それ故、電場変動の履歴を反映した適切な初期値を設定する必要がある。

本研究では、初期値を適切に設定するため、まず、1 つの極端紫外光画像から逆問題を解くことで初期のプラズマ密度分布を推定し、次に 30 分間隔の極端紫外光画像データを物理モデルに同化することで、プラズマ圏の時間発展や、時間発展を支配する電場分布を推定するという 2 段階のアプローチを取っている。しかし、初期値の推定の部分はパラメータ等の調整が十分ではなく、昨年度までは失敗する事例が多かった。そこで、本年度はこの点の改善を行った。具体的には、観測ノイズの分散の調整、事前分布の調整の 2 点である。観測ノイズに関しては、極端紫外光画像に重畳しているノイズに、ポアソンノイズや衛星の姿勢のずれによるノイズなど、様々な成分が含まれていることを考慮し、各画素近傍の輝度のばらつきから観測ノイズの分散を決定することにした。すなわち、各画素について、その画素から一定の距離内にある画素すべての輝度値の分散を計算し、これを各画素の観測ノイズの分散として

設定した。事前分布については、元々プラズマ密度分布の滑らかになるという条件を設定していたが、地球に近づくにつれて密度が増大し、密度勾配が大きくなることを考慮していなかったため、これを考慮できるように勾配を取る際の座標系を見直した。また、全体の滑らかさを決めるパラメータについては経験ベイズ法で決定することにした。経験ベイズ法において必要となる周辺尤度はガウス性を仮定することで得られる解析解から計算し、周辺尤度の最大値は様々なパラメータの値を試行するグリッドサーチによって決定した。以上の計算は、周辺尤度の計算には **SMP** 並列化された **LAPACK** を使い、グリッドサーチの部分も **MPI** 並列化することにより、数分程度で効率的に実行できるようになっている。

このような改善の結果、様々な事例について安定してプラズマ密度分布が推定できるようになった。図 S-8 に推定結果の一例を示す。今後は、初期分布の推定方法の改善を踏まえ、極端紫外光画像データの時系列を同化する部分にも改良を加え、様々な事例にデータ同化の適用を試みる予定である。

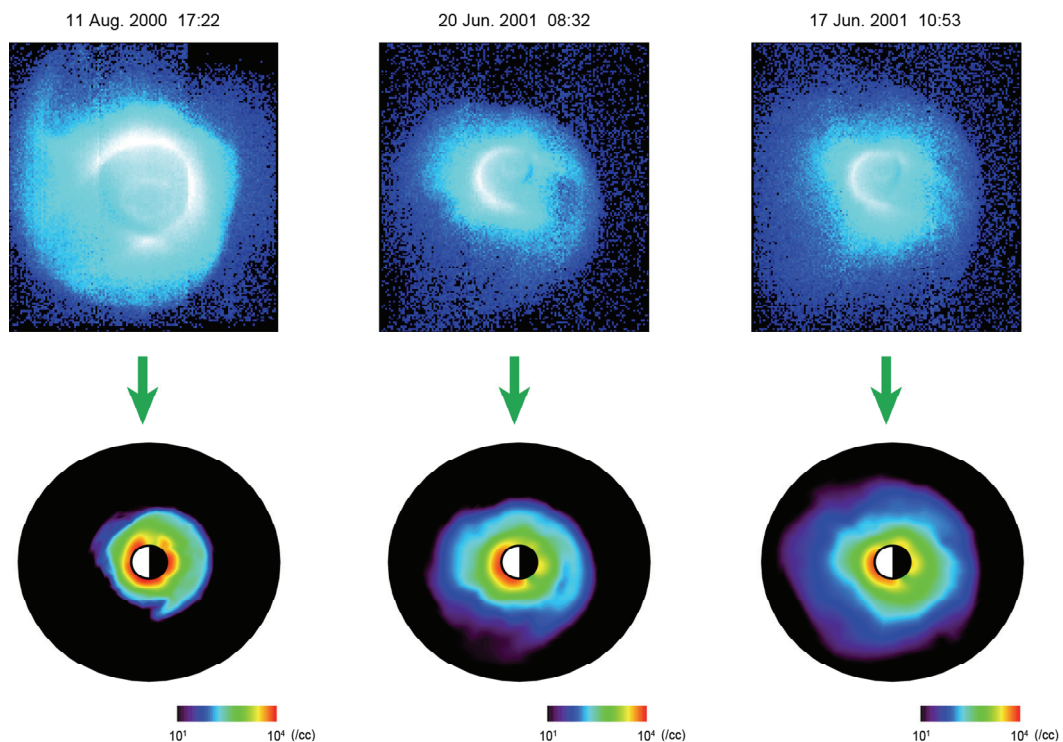


図 S-8: 3つの事例におけるプラズマ密度分布の推定結果。

(3) 少数粒子に基づくデータ同化手法の開発

データ同化を行う手法としては、状態の確率分布を多数の粒子で表現するアンサンブル型の逐次アルゴリズムがよく用いられる。多くのアンサンブル型アルゴリズムは、粒子を分布から無作為抽出したサンプルとして扱い、大数の法則に基づいて分布を表現するモンテカルロ近似の考えに基づいて設計されている。モンテカルロ近似の考え方は、低次元問題に対して十分な数の粒子を使う限りは有効であり、実際、そのような場合には妥当な結果が得られる。しかし、実際にデータ同化で扱われる大規模な問題では、モンテカルロ近似の考え方をそのまま適用するのが適切ではない場合も多い。

データ同化で扱われるシミュレーションモデルは、変数の数が数百万、数億といった規模になるのが普通である。このような大規模な問題では、計算資源の制約から分布を表現する粒子の数が制限されるため、現実には数十個ないし数百個程度の粒子しか扱えない場合が多い。分布からランダムに抽出した数十個程度の粒子では、ランダム性に起因する誤差が十分には抑えられず、よい結果が得られないこと

が少なくない。そこで、ランダム性を極力排除し、少数の粒子でも機能する手法を検討した。

ここで着目したのは、広く使われているデータ同化手法の中でも、アンサンブル平方根フィルタと呼ばれるクラスに属する手法である。アンサンブル平方根フィルタは、フィルタリングの手続きにおいてランダムな操作を一切用いないため、フィルタリングの計算においては少数の粒子でも妥当な結果が得られる。一方、一期先予測の手続きに関しては、必ずしも確立された方法はなく、ランダム性による誤差を抑えるのには不十分な少数の粒子を用いている場合においてもモンテカルロ法に基づいて一期先予測分布の計算が行われるなど、場当たりのと思われるような方法が用いられてきた。そこで本研究では、一期先予測についてもモンテカルロ法の考え方を排除し、粒子の集団としての予測性能を解析的に評価した上で、予測分布を近似的によく表現するような粒子の更新方法を開発した。この非モンテカルロ的な方法は、分散共分散行列の低ランク近似に基づいているため、低ランク近似が成り立たない場合に機能する保証はない。しかし、40次元程度の簡単なモデルによる数値実験を行ったところ、少なくともこのモデルでは非常によく機能することが示された。図 S-9 は、モンテカルロ的な方法によるフィルタ推定値(左)と非モンテカルロ的な方法によるフィルタ推定値(右)とを比較したもので、青がパラメータの真の値、赤が青で示すパラメータをそれぞれの方法で推定した結果を示している。この実験で、状態変数の数は 41 であり、推定に用いた粒子の数は 20 である。モンテカルロ的な方法では推定が不安定だが、非モンテカルロ的な方法ではある程度妥当な推定結果が得られている。細かい振動が見られるが、これはここで示しているのがフィルタ推定値だからだと思われ、平滑化を行えば、このような振動も除去できるのではないかと考えている。しかし、少数の粒子で平滑化を行う方法についてはまだ検討段階であり、次年度以降の課題としたい。

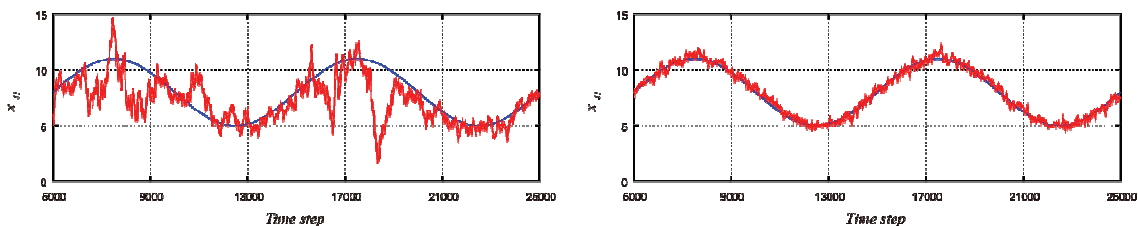


図 S-9: モンテカルロ的な推定方法による結果(左)と非モンテカルロ的な推定方法による結果(右)との比較。

(4) 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。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。密度が 800kg/m^3 に達するとフィルン中の細孔はしだいに閉じ、周囲の空気と隔離され、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。

Dreyfus et al. (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従来の手法としてあげられる。しかしながら Parrenin et al. (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。また、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、第一期・第二期深層コアを通した氷年代を補正するカルマンフィルタを用いた年代決定モデルの開発を行った。

今年度は、従来の手法を考案した、フランスの Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement の F. Parrenin 博士を中野と鈴木が訪問し、モデルの内容や年代推定手法の現状について詳しい説明を受けた。また、Parrenin 博士による最小二乗法を用いた年代推定モデルを補正手法の比較対象とし、同プログラムの実行などを行うこととした。元となる年代補正モデルは、氷床コアから得られる酸素同位体比を accumulation モデルに入力して得られる accumulation rate と 1-D 流動モデルによって算出される thinning function を深度方向にそれぞれ求め、地表面から積分することで、ある深度 z に対する氷年代を得られると考えている。絶対年代として、氷床コア分析から得られる観測値や他の資料から得られる観測値(たとえば鍾乳石や有孔虫のデータ)を与えるが、この観測値に対するモデル誤差の計算は拘束付き最小二乗法によるものが主流である(Lemieux-Dudon, et al., 2010)。本研究では、氷年代モデルを状態空間モデルに置き換え、カルマンフィルタおよび固定区間平滑化を用いてデータ同化することによって氷年代を推定する手法を開発し、「データ同化手法を用いた年代モデル」を構築した。従来の手法と比べると、計算負荷が著しく削減され、様々な実験設定やパラメタリゼーションの試行が容易に行えるようになった。

さらに、カルマンフィルタを用いて尤度を計算することにより、システムモデルに含まれる5つの未知変数のベイズ推定を行った。事後分布の計算にはマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた。事後確率が最大となるパラメータ(図 S-10)の値から accumulation rate を計算したところ、現在値において推定値が観測による値 2.8(cm/year)に近い値を取り、推定結果には妥当性があると考えられる(図 S-11)。図 S-10で示されるように、 μ と s の尤度分布には現在のモデル設定では偏りが生じている。Parrenin et al. (2007)でもモンテカルロ法によって得られたパラメータ推定分布に同様な偏りが示されており、年代モデル自体の問題であると考えられる。また推定された未知パラメータは、Parrenin et al. (2007)と概ね近い値となっており、手法によって大きく異なることがないことを確認している。

本手法の問題点は、accumulation rate と thinning function から算出される氷年代を観測値によって補正するため、accumulation rate と thinning function を独立情報として扱うことが出来ない点である。特に、古気候変動の議論の中心ともなっている、日射の妨げ(すなわち地球外からの熱量の受取に影響する)となる硫酸フラックス濃度の変動について言及する際に、元となるフラックス濃度の算出に accumulation rate を使用するため、推定された古環境における accumulation rate の値の妥当性については、専門家である国立極地研究所の川村准教授等の助言などを元に検討する必要がある。手法面からの解決策としては、カルマンフィルタではなく粒子フィルタを適用したシステムモデルを考案し、個々のパラメータとして扱うことで、個別に補正・推定が可能となる。この粒子フィルタの適用は、平成 25 年度および 26 年度に引き続き開発を進めていく予定である。

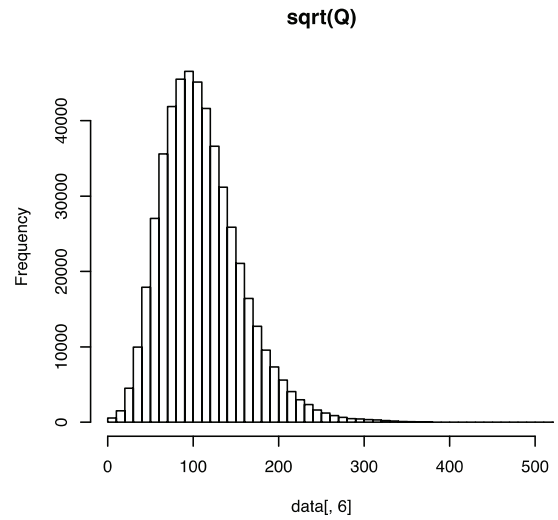
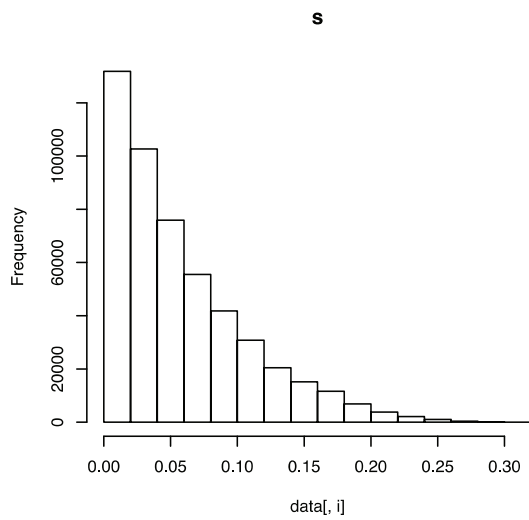
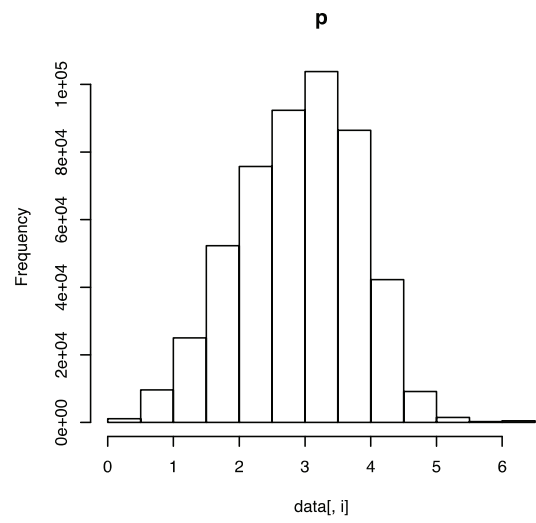
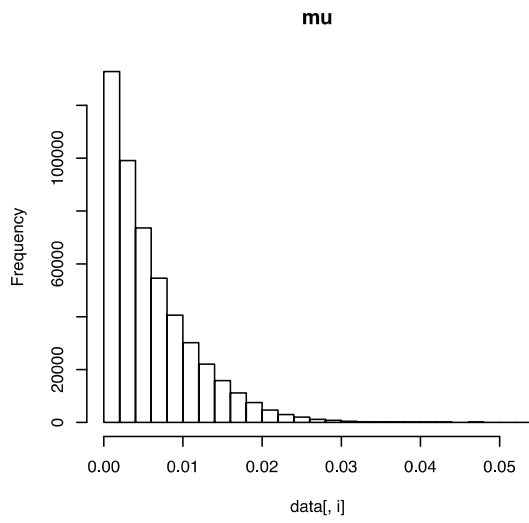
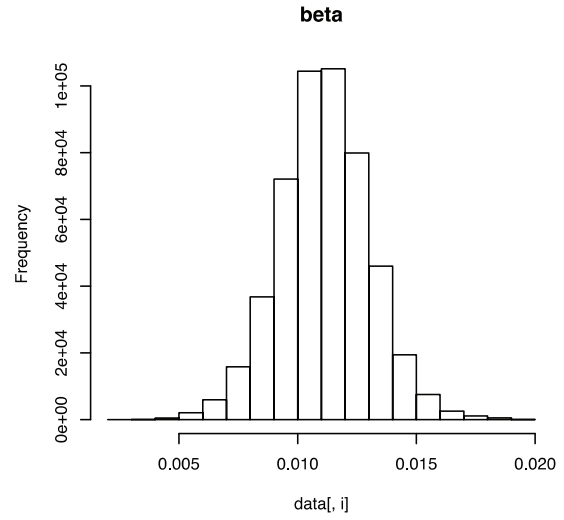
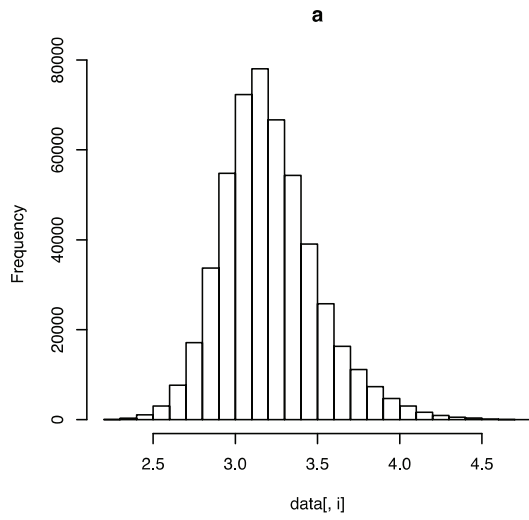


図 S-10: 事後分布のパラメータの各成分(a_0 , β , μ , p , s , $\text{sqrt}(Q)$)についての周辺化分布

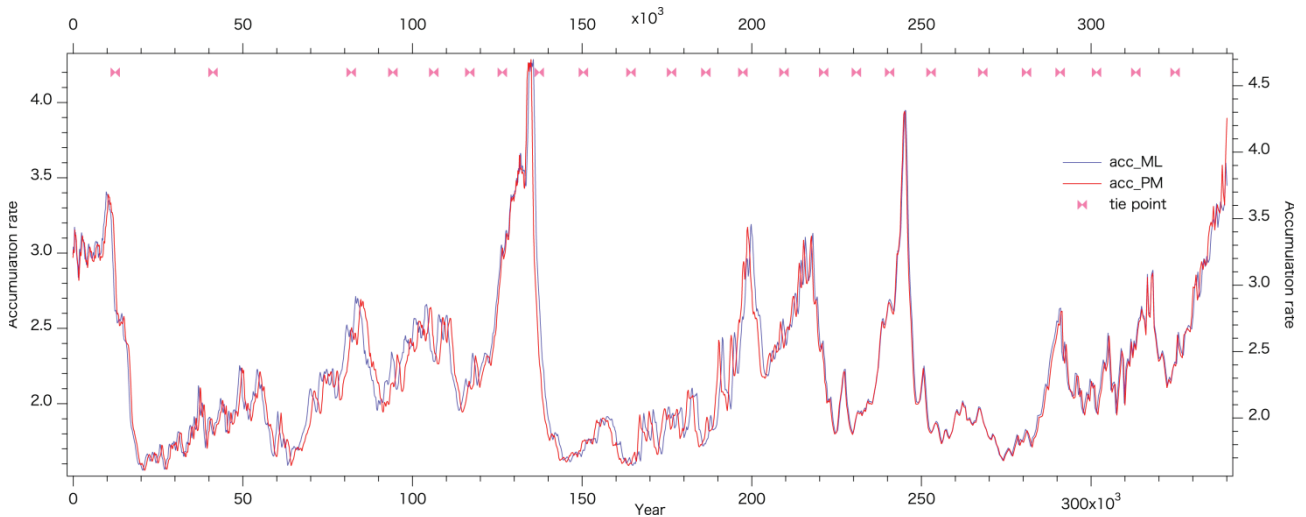


図 S-11: 第一期ドームふじ深層アイスコアの最適化された accumulation rate の年々変動と束縛点

(5) 感染症対策のためのシミュレータとデータ同化手法の開発

感染症伝播シミュレーション

突然変異や遺伝子再集合によって新しい種類のインフルエンザ・ウイルスが出現する。このような新型ウィルスに対する免疫を持つ人は少なく、感染の世界的な流行(パンデミック)が発生する。2009年に流行した、いわゆるブタインフルエンザはそのようなもののひとつである。このウイルスは弱毒性であったために、概ね季節性インフルエンザと同程度の症状にとどまり、幸い社会的インパクトは当初の予想より小さかった。しかし、90年代末期に致死率のきわめて高い新型鳥インフルエンザへの人の感染例が報告されており、人から人への安定した感染力を獲得すると、1918年スペインかぜに匹敵する脅威をもたらすものとして恐れられている。

このような新型インフルエンザに対しては、早期に感染路を死滅させるか、それが難しければ流行の規模を小さく抑えることが求められる。効果的な介入政策を打ち出すためには、シミュレーションによる流行予測が重要である。2000年以降、PC クラスタやマルチコア CPU などの並列計算環境が普及してゆくに及んで、計算機上にモデル都市を住人と学校や会社などの集まりとして構成し、人の移動は社会的役割毎に与えられる行動パターンに従うとするエージェント・シミュレーションの方法が用いられるようになってきた。この方法では、行動の結果として実現される局所的な集団内で感染が確率的に伝達される。従来のマクロシミュレーションでは難しかった、特定の学校群での学級閉鎖のような個別的な介入の効果を自然にシミュレーションに取り入れることが可能となった。

シミュレーションによる介入政策の評価

このような背景のもとで、我々は百万人規模の都市圏での感染症伝播を扱えるシミュレータを開発した。対象となる仮想都市の模式図を図 S-12 に示す。そして、介入政策を評価する一例として、どのような順序でワクチンを接種することで集団免疫を最大化できるかを計算した。新型ウィルスでも季節性インフルエンザでも、流行前に接種者全員分のワクチンを備蓄することは不可能であり、優先接種対象者を決める必要がある。現在の政策では、医療従事者、高齢者などの高リスク者、その他一般の希望者という順序になっている。これは、高リスク者の死亡率を低下させようという発想であるが、一方で集団免疫の強化、すなわち感染伝達を起りにくくするという観点からは、接触頻度が大きい学生・会社員を優先するという考え方もある。実際、我々の計算では最初の1か月間の接種対象を学生・会社員とした場合、非接種者内での罹患率を半分以下に低下させられるのに対し、非勤労者(入院患者や高齢者を

まとめた群)とした場合、ほとんど変化がない、つまり、ワクチンの恩恵は接種者のみに限定されるという結果が得られている。さらに前者の場合、高齢者死亡率も小さくなり、高リスク者を犠牲にせずに集団免疫を高めることができると考えられる。図 S-13 は、人口の 16% に 1 ヶ月掛けてワクチンを接種した場合の、非接種群における感染者割合を示したもので、ランダムにワクチンを接種するのに比べて、会社員に集中配分することで感染者割合を低下させることができることを示している。感染者数の時系列(図 S-14)を見ると、会社員に集中配分した場合、ワクチンを接種しなかった場合に見られる感染の爆発的な流行が抑えられていることが見て取れる。

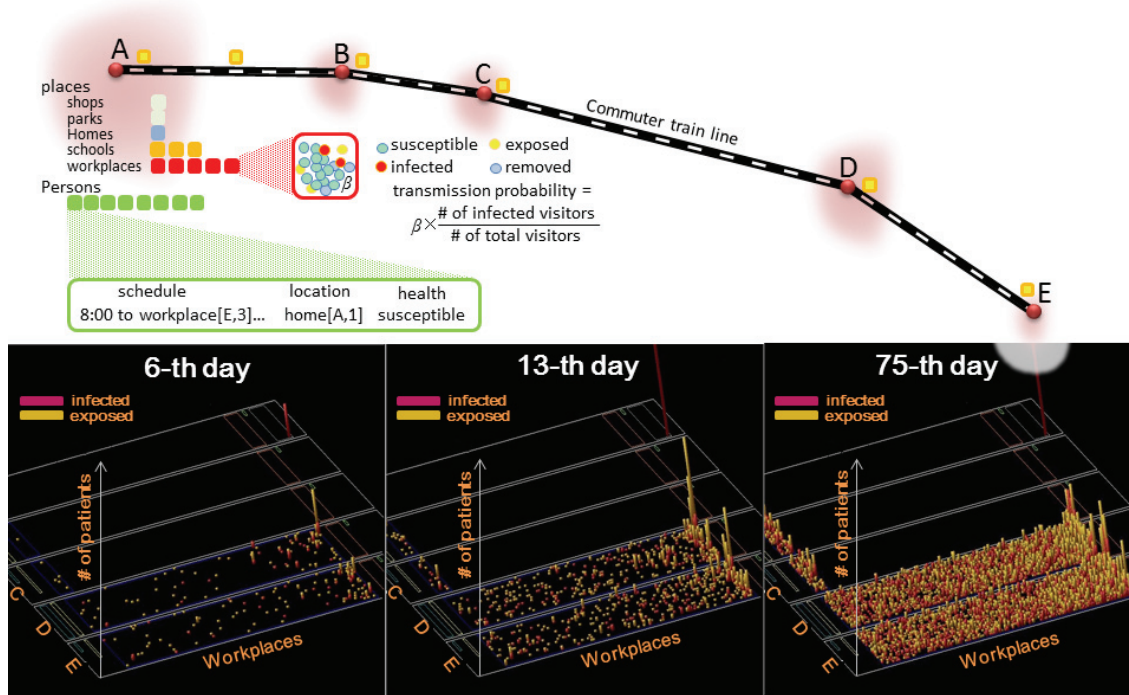


図 S-12:(上) シミュレータの模式図 (下) 感染が都市内に拡大していく様子

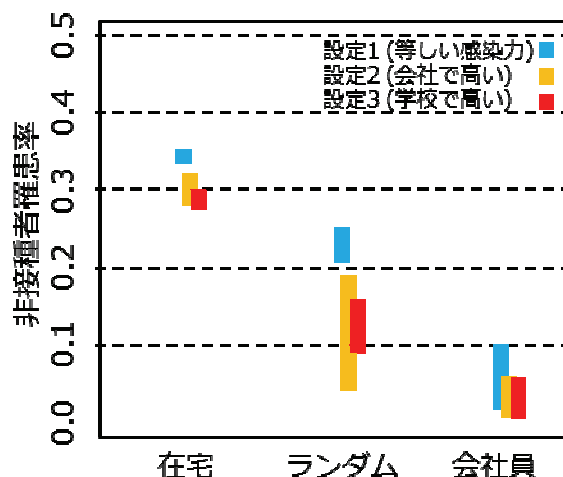


図 S-13: シミュレーション開始から 1 ヶ月間に人口の 16% にワクチンを接種した場合での、シミュレーション終了時(経過日数 180 日目)における非接種者にしめる感染者の割合。選択的投与の効果を見るために、接種者を在宅者から、全住民からランダムに、会社員から、それぞれ選択した場合の結果を示している。また、会社や学校および家庭の間での感染力の重み付けを変えたシミュレーションの結果も、色を変えて表示している。

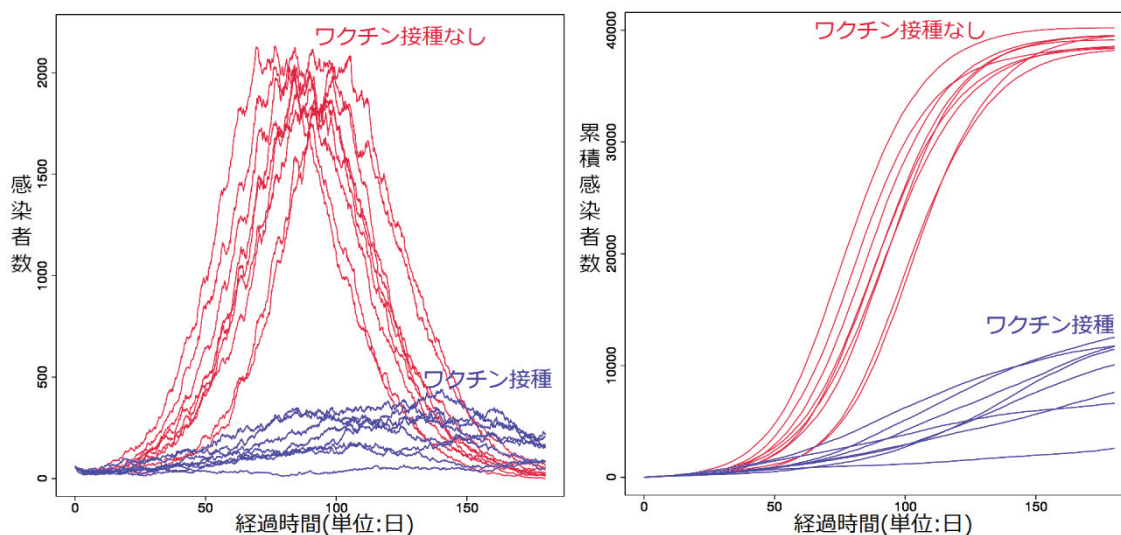


図 S-14: 会社員にワクチンを接種した場合(青)とワクチン接種を実施しない場合(赤)との間の感染者数の比較。左の図は、各時刻における感染者数(瞬時値)、右の図は累積感染者数を示している。感染伝達の偶発性による推移の違いを見るために、8つの異なる乱数列でのシミュレーション結果を、それぞれの場合で示している。

エージェント・シミュレーションへのデータ同化手法の適用実験

前パラグラフで見たようにエージェント・シミュレーションが感染症介入政策立案に有効であることを見た。しかるに、感染伝播の素過程を決める場所カテゴリ毎の感染力パラメータは任意に与えたという弱点も残されている。これは、現在利用できる感染症調査にもとづくデータが場所毎の感染力を推定するのに十分な情報を持たないためである。ここでは、将来そのようなデータが利用できるようになることを見越して、あるいはどの程度の情報があれば推定可能となるかを調べるために、いわゆる双子実験の方法で感染力の推定可能性を開発したシミュレーションモデルを使って調べた。

双子実験は、パラメータを推定する手続きの内的な正しさを検証する手法である。あるパラメータの設定値の下で、シミュレーションを実行し、観測モデルにしたがってシミュレーション結果の部分的な情報を持つ擬似観測データを生成する。この擬似データを入力として、例えば最尤推定を行ったときにパラメータが設定値に近い値に推定されれば、推定手順は適切であると判断される。そうではなく、尤度関数が当該パラメータについて多峰性や稜線構造を持つ場合、すなわち推定値を一意に決められない場合には、この擬似データでは、パラメータを推定するのに十分な情報でなく、実際に調査を行う場合には更に詳しい調査が必要であるという結論になる。

ここでは、項目(2)のシミュレータを使って、100日間にわたる感染者数の擬似データを生成し、学校・会社および家庭での感染力パラメータを推定する問題を扱った。ただし、計算量をPCクラスタで扱える程度に抑えるために、仮想都市の規模を小規模(人口1万人)にした。会社・学校での感染力を3.6、家庭での感染力を2.4とおいて、擬似観測データを生成する。ここで、1人の感染者が新たに生み出す感染者数の数を感染力の単位に用いる。

この擬似観測データに対する尤度分布を図 S-15 に示す。擬似観測データの生成に用いたパラメータ値の周辺をピークとする単峰型の分布になっており、パラメータ値は推定可能であると考えられる。他方、参照する観測データの区間を縮小して同様の評価をすると、単峰型の分布を得るには少なくとも70日目までのデータを参照する必要があることがわかった。これは、この擬似観測データでは感染のピークが55日目に来ることを考慮すると、感染のピーク以降まで観測しないと感染力が推定できないことを意味していると解釈できる。

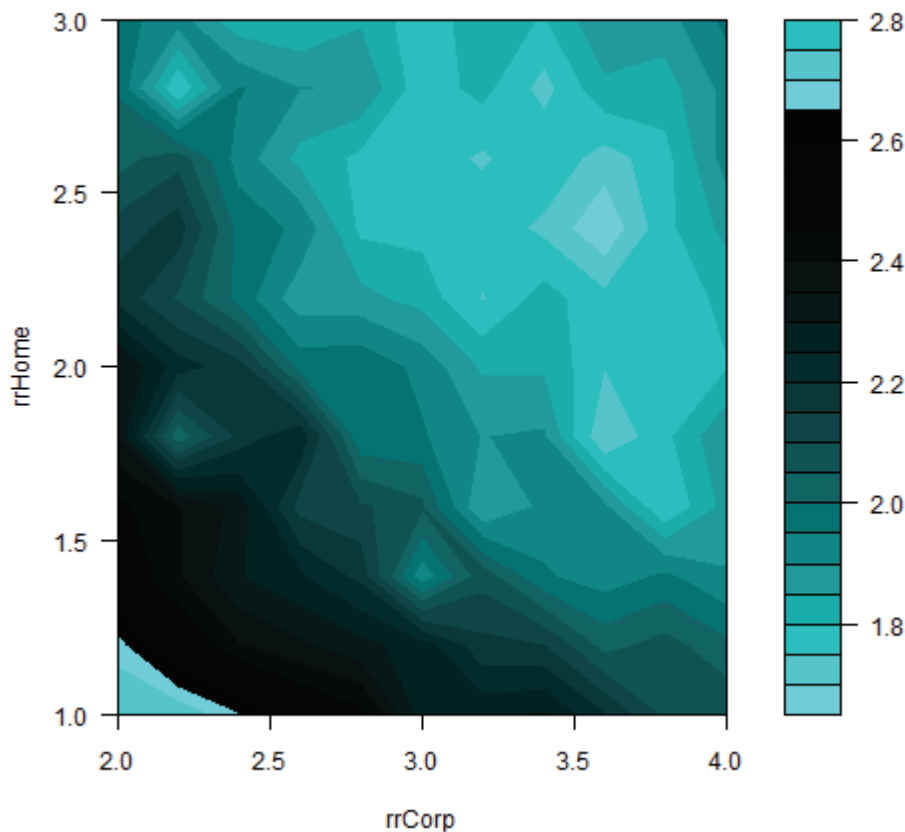


図 S-15: 対数尤度の逆符号の(会社・学校での感染力、家庭での感染力)-平面上の分布

<モデリングチーム>

(1) グローバル MHD シミュレーション

グローバル MHD シミュレーションモデルへのデータ同化の有用性を実証する研究を進めた。このシミュレーションモデルは、MHD 方程式を基礎とする磁気圏モデルと Hall・Pedersen 電流系を基礎方程式とする電離圏モデルとで構成されている。磁気圏モデルと電離圏モデルの境界領域では下記の式(1) - (4)を解き、沿磁力線電流やポテンシャルを介して結合している。

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \Phi_I = G_m (\text{rot} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_b) = J_{\parallel} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{EUV}} + k_2 \sigma_{\text{Diff}}(P, \rho) + k_3 \sigma_J(J_{\parallel}) \quad (2)$$

$$\Phi_m = \Phi_I - k_4 f_2(J_{\parallel}) |J_{\parallel}| \quad (3)$$

$$\mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b) \mathbf{n}_b = -\rho \nabla \Phi_m \times \mathbf{B}_0 / B_0^2 \quad (4)$$

磁気圏の内部境界では、磁気圏の磁場構造と電流分布が計算され、沿磁力線電流 J_{\parallel} から電離層電気伝導度 σ と電離層の電位分布 Φ_I を求めている。背景磁場 \mathbf{B}_1 と垂直方向の運動量 \mathbf{m} を求め、電離層の電位分布から磁気圏の電位分布 Φ_M を求める。磁場と平行方向の運動量は自由境界であり、Pedersen 電流と Hall 電流の発散が沿磁力線電流と一致するようにオームの法則を電離圏で解いている。電離層電気伝導度 σ は、太陽からの極端紫外線と磁気圏のプレッシャー P と温度で決まるディフューズオーロラ、上向き沿磁力線電流によって決定されるディスクリートオーロラによる各電離層電気伝導度成分 (σ_{EUV} 、 σ_{Diff} 、 σ_J) で構成される。 k_2 、 k_3 、 k_4 はスケール定数である。 f_2 は上向き沿磁力線電流に対して 1、下向き沿磁力線電流のとき 0 の値を返す。従来のグローバル MHD シミュレーション研究では k_2 、 k_3 、 k_4 は任意に定められている。

本研究では、ナッジング法を用いて最適な境界パラメータ k_2 、 k_3 、 k_4 の最適値を求める方針で、観測値と計算値の差に対し評価関数を設定して適当な初期値から出発し、パラメータ空間での反復計算により評価関数が最小となる各パラメータの最適な組み合わせを推定する。

平成 24 年度はグローバル MHD シミュレーションモデルへのデータ同化ターゲットとして用いる物理量について専門家を交えて意見交換を行った。また、磁気圏-電離圏境界パラメータ空間内での反復計算を開始し、境界パラメータに対するモデルの敏感性を検証した。その結果、図 M-1 および M-3 で示されるように、定常的な磁気圏では境界パラメータの変化による影響よりも太陽風パラメータによる影響の方が大きい。しかし、図 M-2 および M-4 で示されるように、サブストームと呼ばれるオーロラが爆発的に輝く現象が起きる状態では、境界パラメータの変化によって電離層電位分布が大きく異なる様子が見てとれる。これらの図から、境界パラメータの変動によって磁気圏や電離圏に現れる効果は非線形である可能性が考えられる。すなわち、境界パラメータの値を少しずつ変えながら最適値を探すナッジング法と呼ばれるデータ同化手法を用いる場合には、その評価関数の極小値が複数存在する場合があります。

今後は、サブストームを発生させる直前の電離圏の物理量について SuperDARN データや磁場データなどの観測値と比較し、観測結果に最も近い計算結果をもたらす係数の組み合わせを発見する。つまり幾通りもの境界パラメータの組み合わせについてシミュレーションを実行して電離圏における物理量を再現し、最も観測結果に近いシミュレーション結果を抽出する。そのためには、シミュレーション結果から得た電離圏の物理量分布をある程度パターン化して観測データとの類似性を指標化することが必要と考え、画像解析ツールを開発した (図 M-5)。

さらに、境界パラメータの組み合わせ数を最小限に抑えるなどして計算量の圧縮を試みる。例えば、マルコフ連鎖モンテカルロ法などの手法を用いることを検討する。これと平行してパラメータ空間内での反復計算を高速に行うためのコード並列化を進めていく。また、画像解析ツールについても、より適切な画像解析アルゴリズムを用いた解析ツールの開発を行う。具体的には コーナーやエッジを用いた特徴点抽出 を行うパターンマッチングを行うように、ツールを改良する。

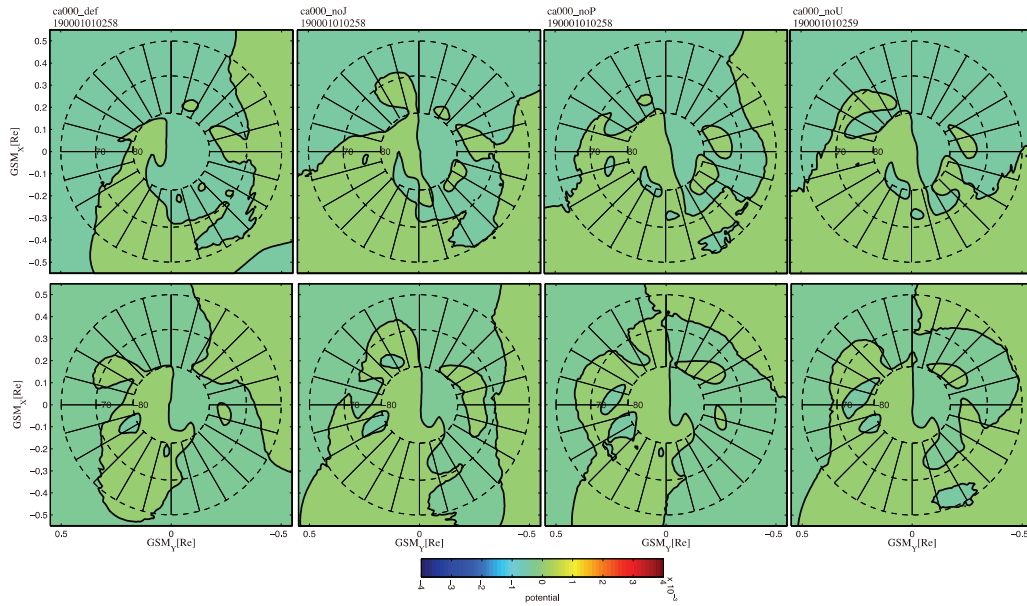


図 M-1: グローバル MHD シミュレーションモデルの磁気圏-電離圏境界パラメータに対する敏感性を検証するため、各パラメータを変えて定常的な磁気圏を作った。上が北半球、下が南半球、左から境界パラメータ k_2 、 k_3 、 k_4 を従来の値にした計算結果、 k_3 を 0 にした結果、 k_2 を 0 にした結果、 k_4 を 0 にした結果。ここでは太陽風磁場は完全に北向きで、磁気圏中の対流も活発ではなく、電離圏電位分布も小さく変動している様子が見とれる。

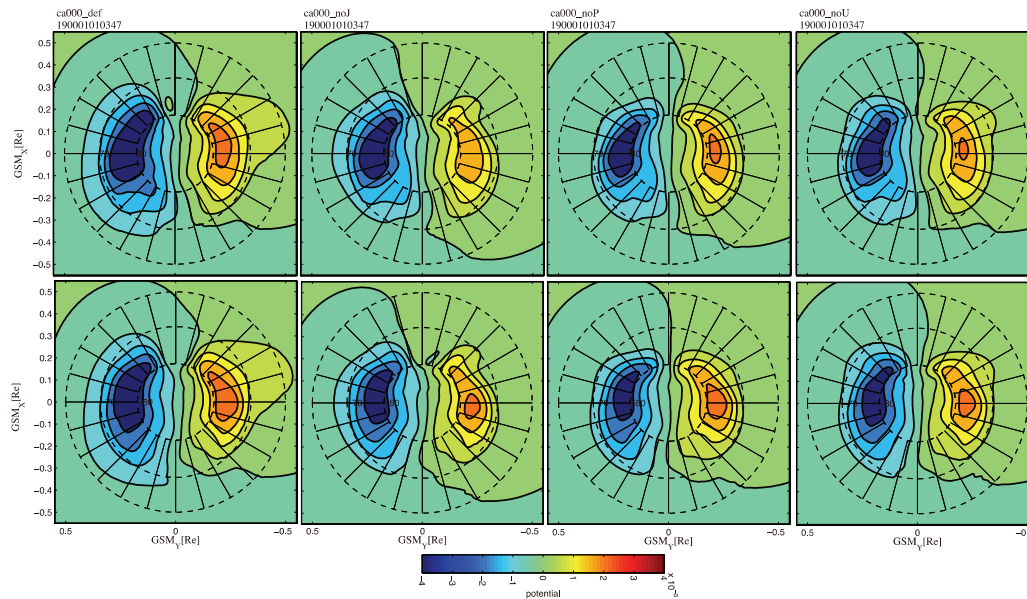


図 M-2: 図 M-1 の状態から太陽風パラメータを変化させ、サブストームと呼ばれるオーロラが爆発的に輝く現象を擬似的に発生させた。サブストームが発生する直前の電離層電位分布を示す。磁気圏からの沿磁力線電流やプラズマ圧の電離層電気伝導度への寄与によって電離層電位分布が異なる様子が見とれる。

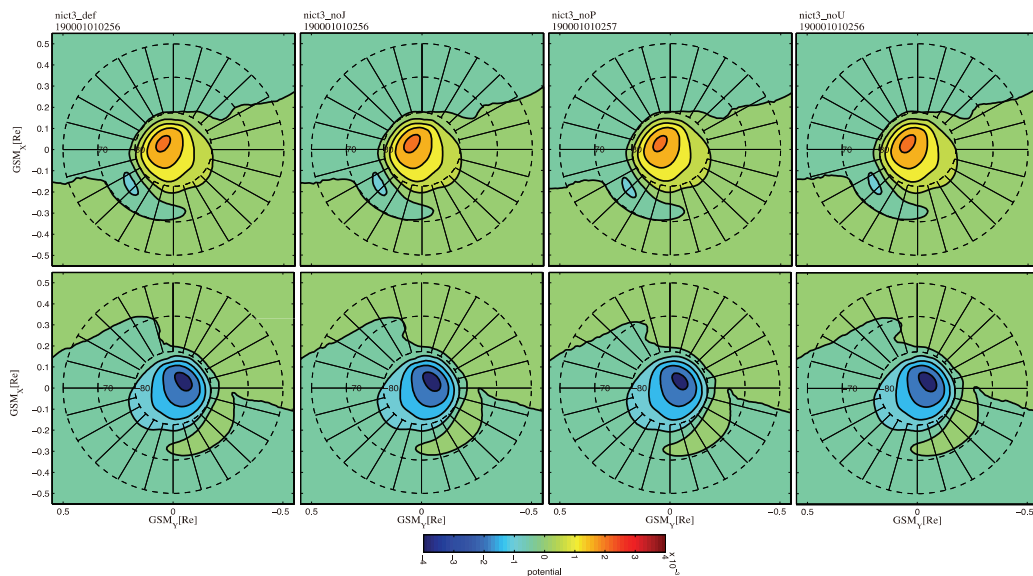


図 M-3: 図 M-1 と同様。ただし、太陽風磁場は斜めに北向きである。磁気圏中の対流は活発で電離圏電位分布にも大きな2セル構造が確認できるが、大きな違いは見られない。

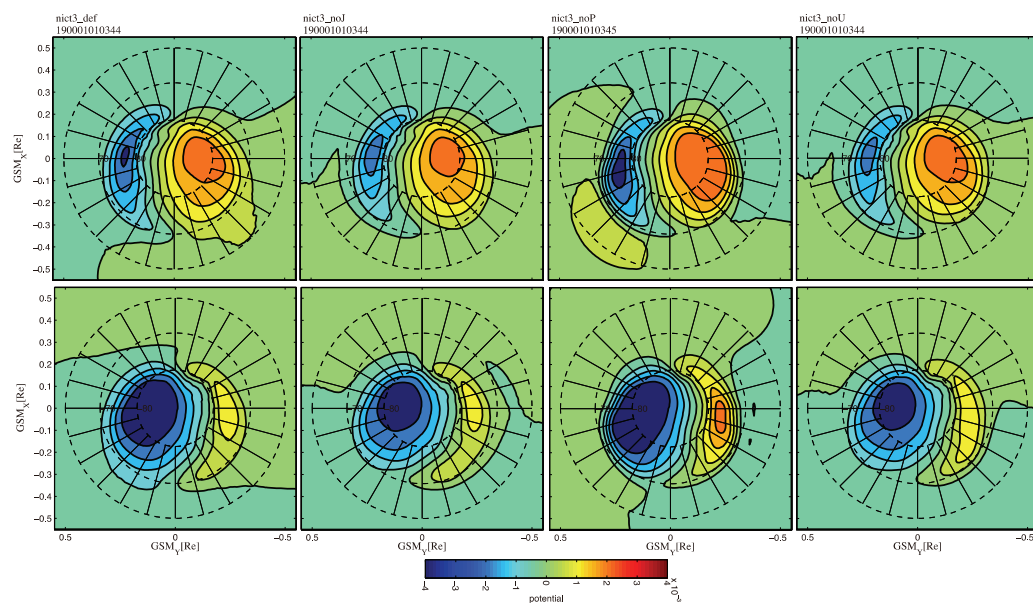
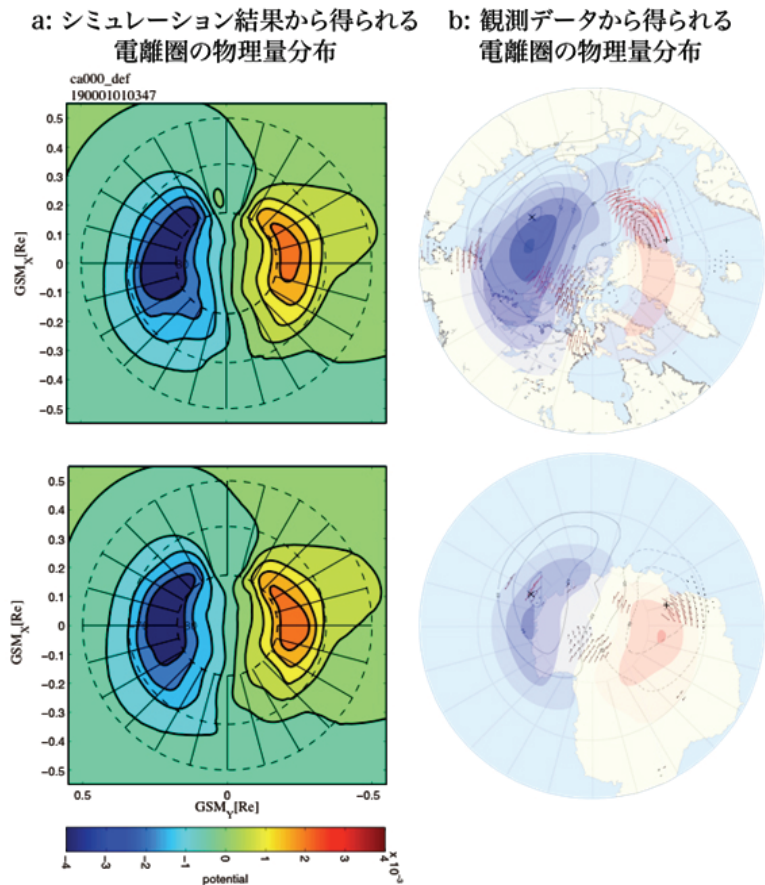


図 M-4: 図 M-1 の状態から太陽風パラメータを変化させ、「サブストーム」を擬似的に発生させた。サブストーム発生直前の電離層電位分布を示す。磁気圏からの沿磁力線電流やプラズマ圧の電離層電気伝導度への寄与により電離層電位分布が異なる様子が見てとれる。



c: a, bの画像を比較し類似性を評価する画像解析ツール

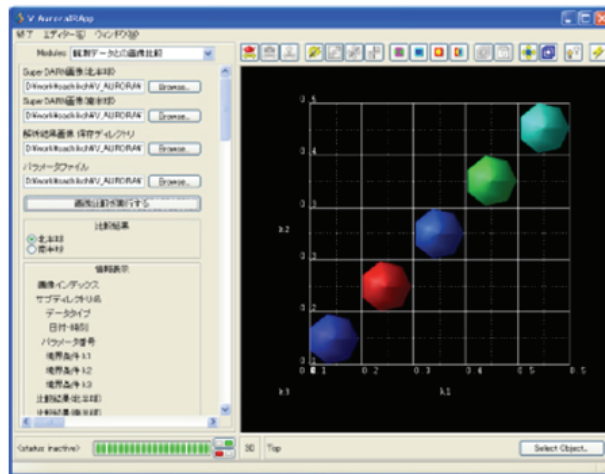


図 M-5: シミュレーションで得た電離圏の物理量分布と観測データから得た電離圏の物理量分布を比較し、類似性を評価する画像解析ツールを開発した。

(2) 大気レーダー

大気レーダーを中心とする観測データから、データ同化による精密な物理量推定につながる新たな解析手法について研究を進めている。これまでに、最新の高機能大型大気レーダーの多チャンネル・多周波観測機能を用いた高分解能適応レーダーイメージングの手法を開発し、対流圏において背景風と共にレーダービーム内を通過する散乱強度場の3次元空間での推定を得ることに成功した。また、風速、特に鉛直風速の高精度推定のための信号処理法を開発した。大気鉛直速度は、水平成分に比べて3桁程

度小さな値をとるが、グローバルな大気循環の定量的理解のためには重要で、正確な測定が不可欠である。本来その役割を期待された大気レーダーにおいても分反射と呼ばれる強い散乱メカニズムによりアスペクトセンシビリティと呼ばれる散乱強度の角度依存性が発生し、鉛直ビームによる観測が鉛直でない方向にエコーの中心がオフセットしてしまう。このため、鉛直成分観測において水平風の鉛直ビームへの漏れ込みが発生し、結果として高精度な測定が実現できないことが知られていた。本研究においては、適応ビームフォーミングを用いることにより、散乱波の強度分布とビーム感度の積パターンが所望の鉛直を指向し、精度の高い鉛直成分の推定が可能となることを明らかにし、理論的には従来に比べて1桁程度推定精度が高まることを示した (Nishimura et al., 2012)。

この理論的結果に対して実観測データによる検証が不可欠となるが、従来の測器を用いた従来より高精度な推定方法を「正解」を知らずに検証するのは本質的に困難である。H24年度においては、この実観測による推定精度の推定を課題とし、その手法の検討、実験および初期解析を行った。

手法は概ね以下の通りである。水平方向の一様性を仮定し、送受信ビームを天頂を中心に水平風成分の大きい方向に（ここでは東西）に走査する。この時、風速ベクトルのビーム方向へのドップラー（射影）成分が観測されることとなる。この観測値を天頂角の関数と見た場合、 U 、 W 、 θ をそれぞれ水平風速（東西成分）、鉛直風速、（東西面における）ビーム天頂角として、

$$V_d = U \sin \theta + W \cos \theta$$

と表すことができる。天頂角が小さい範囲においてこれは

$$V_d = U\theta + W$$

と近似することができる。つまり理想的な状況において天頂付近で観測されるドップラー速度は、天頂角の関数として直線となるべきであることから、この直線からのずれを測定することにより、分反射による風速推定誤差が推定可能であると考えられる。

MUレーダーにより観測されたデータ（2012年9月24日観測）の初期解析結果を図M-6に示す。横軸を天頂角（ラジアン）として、上パネルはドップラー速度、下パネルはエコー強度、青線が位相走査による通常のビームフォーミングによるもの、赤線が提案したアダプティブビームフォーミング法によるものである。散乱強度曲線が天頂角約0.02ラジアンにおいてピーク値を取っていることから、散乱層の傾き等により分反射が最大になる方向が1.2度程度天頂からオフセットしていることが分かる。従来法によるドップラー速度曲線と比較して、提案法によるものは直線性が高くなっており、精度が改善していることが明らかである。

次に、それぞれの曲線に対して直線フィッティングを行い、残差をプロットした結果を図M-7に示す。誤差の極大値は、従来法において+0.75および-1.2程度、提案法においては+0.25および-0.7程度と、Peak to Peakでは約1/2程度改善される。提案手法であるアダプティブビームフォーミングアルゴリズムを利用して鉛直ビーム観測を行う方法については、各パネルの天頂角0の位置について比較を行えば良く、図M-7の結果では1/10程度となっており、高い精度で推定されていると考えられる。今後、観測例を増やすことで統計的検証を行い、推定精度について結論づけたい。

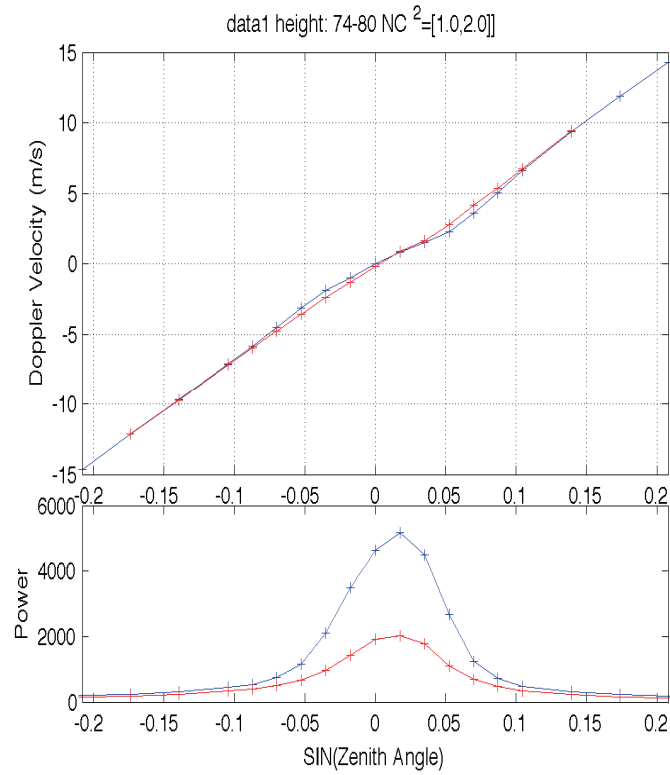


図 M-6: 従来法(青線)および提案法(赤線)による、上パネル: 推定ドップラー速度、下パネル: エコー強度。横軸は天頂角(ラジアン)

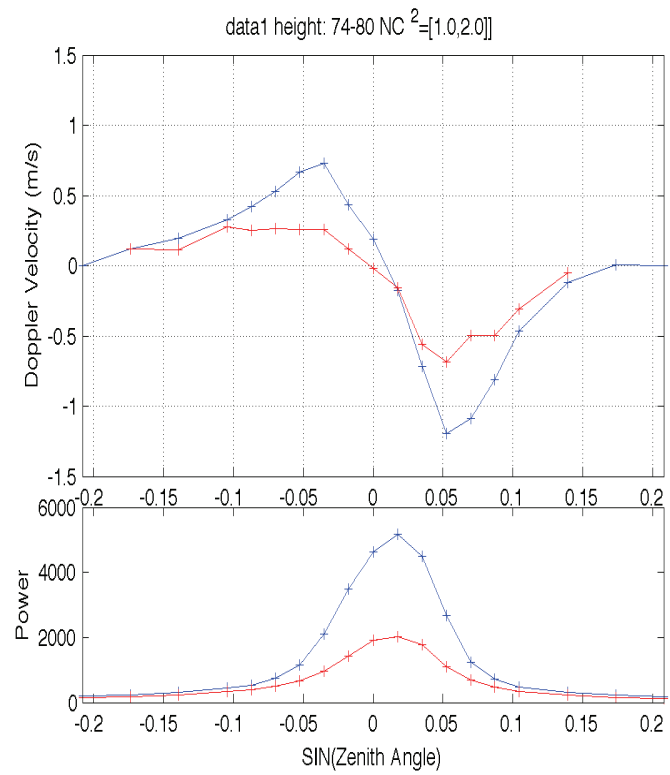


図 M-7: 従来法(青線)および提案法(赤線)による、上パネル: 直線フィット残差

また、南極大型大気レーダーでは、2012年冬期のアンテナ面における積雪量が多いところで3mを超え、多数のアンテナが埋もれる結果となった。幸いに被害は僅少であったが、アンテナ保護の観点から恒久的対策として、アレイの形状を当初の概円形から大きく変更し、風の減速効果が小さくなるよう4つのサブグループに分割した不規則配列とした。この形状変更に伴い、アレイの放射パターンは悪化し、サイドローブが増大するなどのデメリットを生じることとなった。このため、各アンテナに受給電する信号の位相を数値的に補正することによりサイドローブを抑圧し、実質的分解能を向上させるための最適化を行った。受信側は複素最適化が可能となるため重み付き最小二乗アルゴリズムによる最適化が可能であるが、送信側については振幅の変更が不可能なため位相制御のみによる最適化が必要となる。非線形性が高いため、ここではシミュレーテッドアニーリング法によるトライアルエラー最適化を行い、図M-8に示すように約5dBのサイドローブ抑圧を実現した (Sato et al., 2013.)。

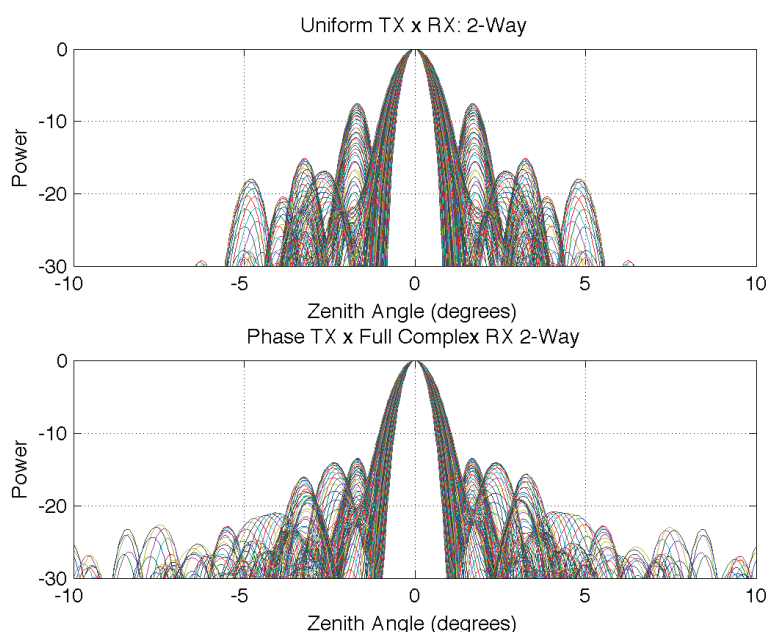


図 M-8: PANSY のアレイ形状変更後の、(上)従来法による 2-WAY ビームパターン。(下)本研究で最適化を行った場合の 2-WAY ビームパターン。

<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、「マウスの体節形成(1、2)」、「マウスの生殖細胞形成(3)」、「線虫の細胞質分裂(4)」、「線虫の細胞質流動(5)」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-1 (体節時計同調化機構の解析)

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きた。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た。

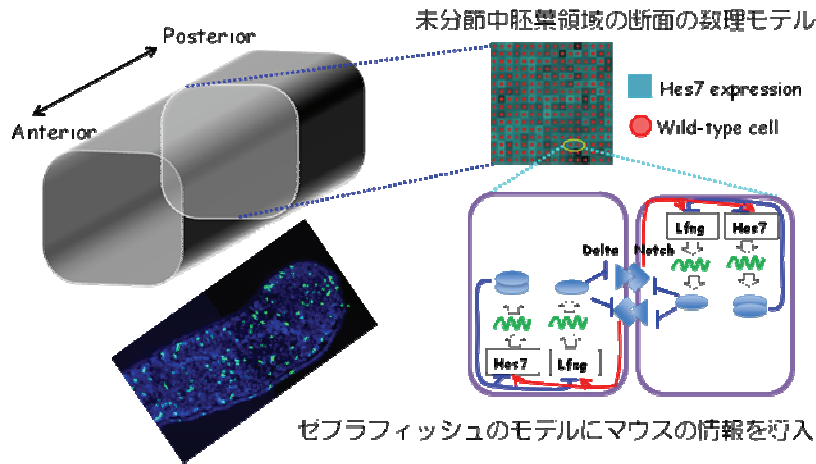
我々は Notch リガンドである Delta like 1(Dll1)及び Notch シグナル制御因子 L-fng に着目して、こ

これらのノックアウト細胞を用いたキメラ胚解析をおこない、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、また *L-fng* は隣の細胞の Notch シグナル状態を変化させる細胞非自立的な効果を持つことを発見した。そこでコンピューターシミュレーションを用いて未分節中胚葉組織のモデル化を試みた。数理モデルにおいて *L-fng* のトランス抑制機構がマウスの時計の同調化に必要であると考え、ゼブラフィッシュ時計振動モデルを利用してマウスの情報を導入し、パラメータを推定してマウスにおける同調を再現した。

数理モデル（データ同化的手法）を導入して実験結果を検証

仮説

● *Lfng* のトランス抑制機構がマウスの時計の同調化に必要



数理モデルに使用した式は以下のものである。

$$\frac{d[\text{Hes7-m}]^{(i,j)}(t)}{dt} = r_1 + \left(F + C \times \frac{\text{NICD}^{(i,j)}(t-T_m)}{K_1 + \text{NICD}^{(i,j)}(t-T_m)} \right) \times \frac{K_2^2}{K_2^2 + [\text{Hes7-p}]^{(i,j)}(t-T_m)^2} - \alpha_1 [\text{Hes7-m}]^{(i,j)}(t)$$

$$\frac{d[\text{Lfng-m}]^{(i,j)}(t)}{dt} = r_2 + C \times \frac{\text{NICD}^{(i,j)}(t-T_m)}{K_1 + \text{NICD}^{(i,j)}(t-T_m)} \times \frac{K_2^2}{K_2^2 + [\text{Hes7-p}]^{(i,j)}(t-T_m)^2} - \alpha_3 [\text{Lfng-m}]^{(i,j)}(t)$$

$$\frac{d[\text{Hes7-p}]^{(i,j)}}{dt} = \beta_1 [\text{Hes7-m}]^{(i,j)}(t-T_p) - \alpha_2 [\text{Hes7-p}]^{(i,j)}(t)$$

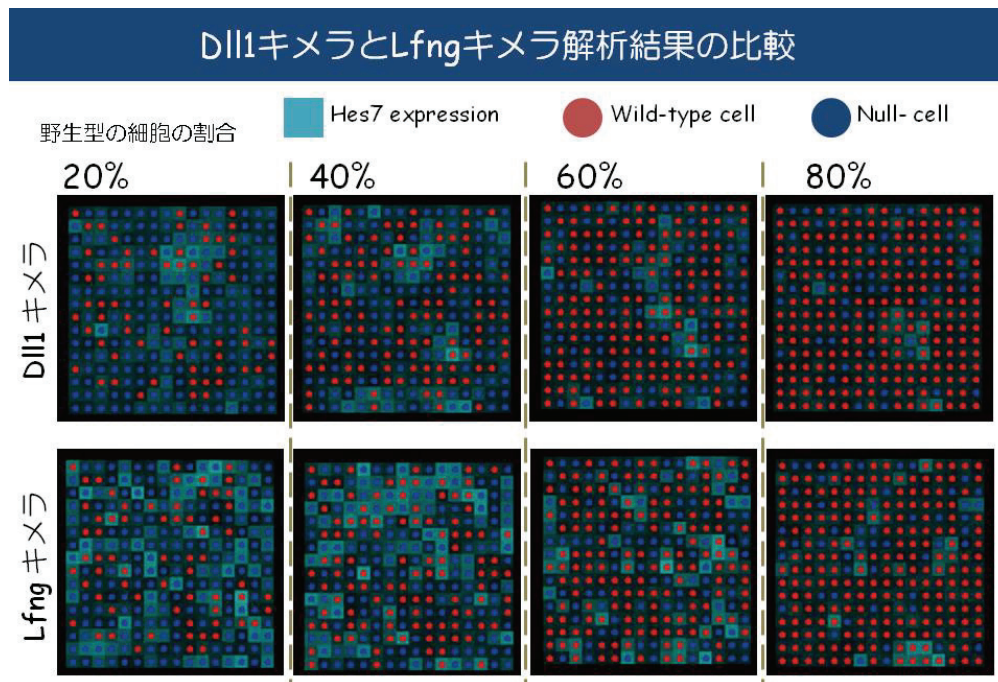
$$\frac{d[\text{Lfng-p}]^{(i,j)}}{dt} = \beta_2 [\text{Lfng-m}]^{(i,j)}(t-T_p) - \alpha_4 [\text{Lfng-p}]^{(i,j)}(t)$$

$$\frac{d[\text{pDll1-p}]^{(i,j)}(t)}{dt} = \beta_3 (B_D - [\text{pDll1-p}]^{(i,j)}(t)) - \beta_4 [\text{Lfng-p}]^{(i,j)}(t) [\text{pDll1-p}]^{(i,j)}(t)$$

$$\frac{d[\text{pNotch-p}]^{(i,j)}(t)}{dt} = \beta_5 (B_N - [\text{pNotch-p}]^{(i,j)}(t)) - \beta_6 [\text{Lfng-p}]^{(i,j)}(t) [\text{pNotch-p}]^{(i,j)}(t)$$

$$[\text{NICD}]^{(i,j)} = \lambda \times \{ [\text{pDll1-p}]^{(i-1,j)} + [\text{pDll1-p}]^{(i+1,j)} + [\text{pDll1-p}]^{(i,j-1)} + [\text{pDll1-p}]^{(i,j+1)} \} \times [\text{pNotch-p}]^{(i,j)}$$

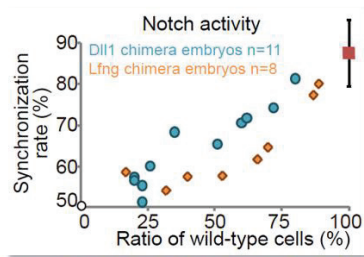
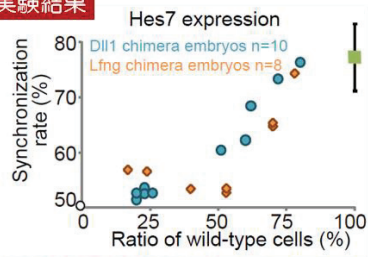
その結果、L-fng によるトランスの効果は Notch シグナルの活性を介して伝わるのが強く示唆された。さらに我々は、キメラ実験がこのモデルを用いて再現可能かどうか検証した。野生型細胞と Dll1-KO あるいは L-fng-KO 細胞をある割合でランダムに分布させ、シミュレーションを行った。



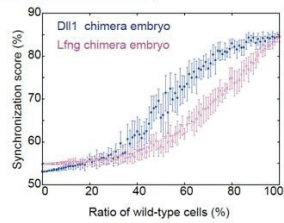
上の図がその結果を示したものである。Dll1-KO、L-fng-KO どちらの場合も野生型の細胞の割合を増加させるとその同調率は上昇するが、L-fng-KO 細胞を用いたキメラは同調率が常に低い。これは、クラスター効果によるもので、野生型細胞同士の同調的振動に対し、Dll1-KO 細胞は中立的に働くが L-fng-KO 細胞は阻害的に機能すると考えると説明可能である。Dll-KO 細胞はシグナルを送る Dll1 がいないため、野生型に作用しないが L-fng-KO 細胞では自分から送りだす Notch シグナルの抑制ができないため、常に Notch シグナルを送り続ける結果、野生型の同調的振動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。

Dll1キメラとLfngキメラ解析結果の比較

実験結果



シミュレーション結果



実験結果を非常によく反映するシミュレーションができた。

Okubo Y, Sugawara T, Kozuka N, Kanno J, Kimura A, and Saga Y. Lfng regulates the synchronized oscillation of the mouse segmentation clock via trans-repression of Notch signalling. *Nature communications*. Oct 16;3:1141. 2012

これらの結果は、LfngがDll1の活性を変化させる機能を有している可能性を示唆した。そこで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。

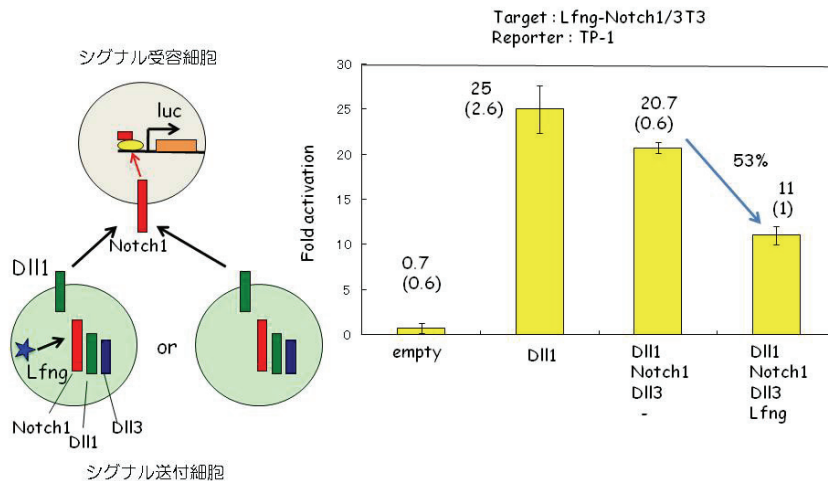
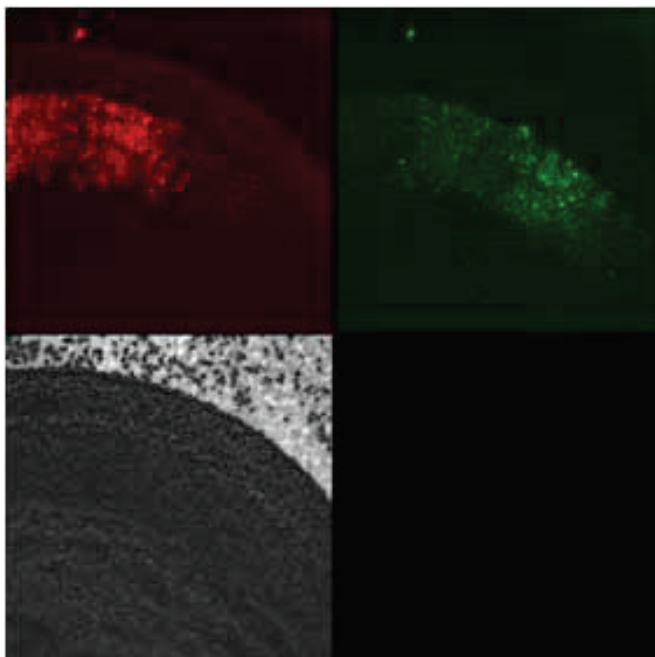
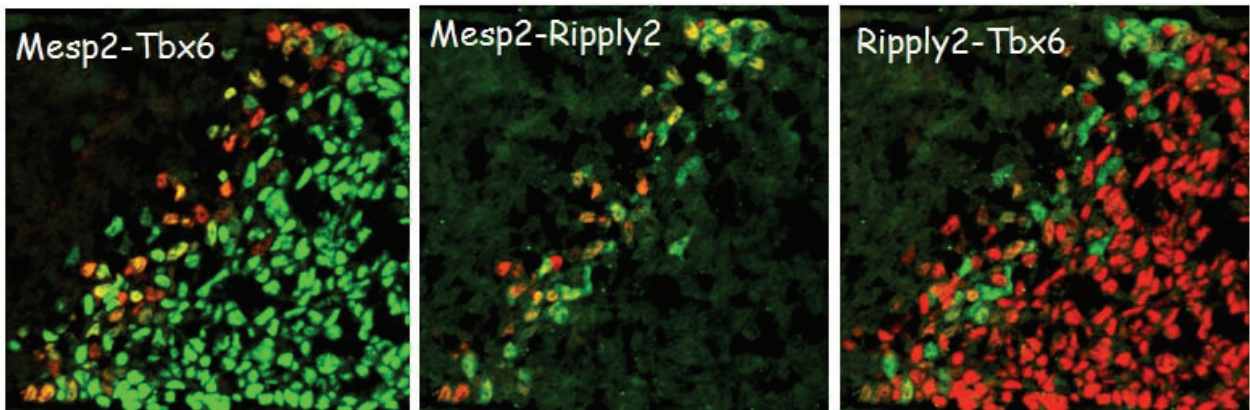


図) 培養細胞を用いたNotchレポーターアッセイ: Lfngはシグナル送付細胞でNotch1, Dll3の発現する状況でDll1の活性を抑制する。

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。この一連の結果は融合研究の成果として *Nature communication* に発表した。今後の展開としてこのL-fngの機能そのものを明らかにする必要がある、L-fngは糖修飾酵素であり、Notch受容体の細胞外ドメインを糖鎖修飾することが明らかになっているが、今回のDll1の活性抑制にその機能が必要なのか？その場合は同じ細胞内に発現するNotch受容体の糖鎖修飾を介したシス抑制の可能性もある。今後、酵素活性のないL-fngを作成し培養系で検証するとともに、生体における機能についても検証する計画をたてている。

(2) マウス 体節形成をモデルとしたデータ同化解析-2 (体節の分節境界形成機構)

体節時計に関する問題が一段落ついたので、かねてから手がけていたもう一つの大きな問題、体節が分節境界を形成する分子機構に関して、データ同化的手法が導入できるかどうか検討している。我々は分子発生遺伝学的解析により、体節の分節境界の形成には Notch シグナル及び、転写因子 Tbx6 の共同作用による転写因子 Mesp2 の発現誘導が必須であることを明らかにしている。また Mesp2 は下流因子として Ripply2 遺伝子を誘導し、その後 Tbx6 がタンパク質レベルで抑制されることが必須であることも明らかにしている。しかしこの時の Ripply2 の作用機構に関しては不明な点が多い。体節形成は2時間というサイクルで分節境界を形成する必要があるが、この時に Mesp2-Ripply-Tbx6 が時間空間的どのようなタイミングで転写・翻訳・蛋白分解の制御を介して、互いの発現を調整しているのか非常に興味深い。我々はタンパク質を可視化し、これら3者の時間空間的關係を明らかにすることにより、どのようなメカニズムが関与するかデータ同化的手法を用いて推定したいと考えている。Mesp2 及び Tbx6 の抗体はすでに作成済みだが、Ripply2 の抗体がない。そこでまず、Ripply2 の抗体を作成し、これら3種類のタンパク質の可視化を可能にした。以下の写真は隣接切片をそれぞれ2種類の抗体で染色したものである。Mesp2 と Ripply2 の発現は両者とも Tbx6 の前方境界にあり、それらの発現は2時間という間に自ら転写・翻訳・分解のサイクルをまわしている一報、他のタンパク質の転写・分解を促進している。現在、この関係性を構築のために、定量的なデータを取得中である。



また我々はライブイメージングによる解析も試みている。現在までに、Mesp2-venus (2005年に作成済み)、Tbx6-mcherry (平成24年度)、Ripply2-turquoise (平成24年度) マウスの作成を完了した。

図は胎生9.5日目の Tbx6-mcherry、Mesp2-venus のダブルトランスジェニックマウスのマウス胚の尾芽部分のライブイメージ画像である。赤が Tbx6、緑が Mesp2 の発現を示している。

現在、今後時間軸に沿った、画像データの取得、定量化、数理モデルの構築を試している。具体的には体節形成過程におけるこれら3種類のタンパク質のダイナミクスを隠れマルコフモデルを用いて確率モデル化し、実際の観察データ

を当てはめてパラメータを推定する解析方法の確立を目指している。

(3) マウス生殖細胞の形成における RNA 結合タンパク質 Nanos2 の標的 RNA の探索

生殖細胞の発生分化には RNA レベルでの制御が非常に重要な働きをもつ。特に我々が着目している RNA 結合タンパク質 Nanos2 は、胎生期の雄の生殖細胞に特異的に発現し、生殖細胞の雄性分化に必須な因子である。我々のこれまでの研究により Nanos2 は CNOT タンパク質と複合体を形成し、RNA のポリ A 鎖の分解に関与すること、その結果として標的 RNA の分解を介して遺伝子発現を制御していることがわかっている。免疫沈降実験により Nanos2 と相互作用する多くの標的候補 RNA が得られているが、Nanos2 は複合体をつくり、RNA 分解に関与する多くのタンパク質と相互作用するため、Nanos2 の標的遺伝子の同定を試みている。この解析はこれまで我々の研究室で取得してきたマイクロアレイデータ及び RNA-seq、IP-seq データを利用したものであるが、実際の統計解析は 24 年度の後半から開始したものである。まだ引き続きデータも取得中であるが、これまでの解析結果に関して報告する。

まず、マイクロアレイデータに複数の統計手法を適用して実験群・対照群間で発現が変動している遺伝子 (differentially expressed genes、DEGs) のリストを取得した。これは、統計手法の違いによって DEGs にランクされる遺伝子の順位が異なるため、どの統計手法でも上位にランクされる遺伝子をより有意の DEGs として得るためである。また、Nanos2 による制御を受けることが既知の遺伝子がこの DEGs に含まれるかどうかを検討することで、どの統計手法が頑健かを見極めることも可能であった。

次に、RNA-seq のデータから de novo アセンブリーを行って転写産物のコンティグを得 (図 1A、de novo assembly)、これに対して改めて同じ RNA-seq のリードをマッピングした (図 D-1A、read mapping)。この方法は、RNA-seq のリードを直接リファレンスゲノムへマップする従来の方法と比較すると計算時間はかかるものの、最初に転写産物のリファレンスを作成していることから、後の DEGs

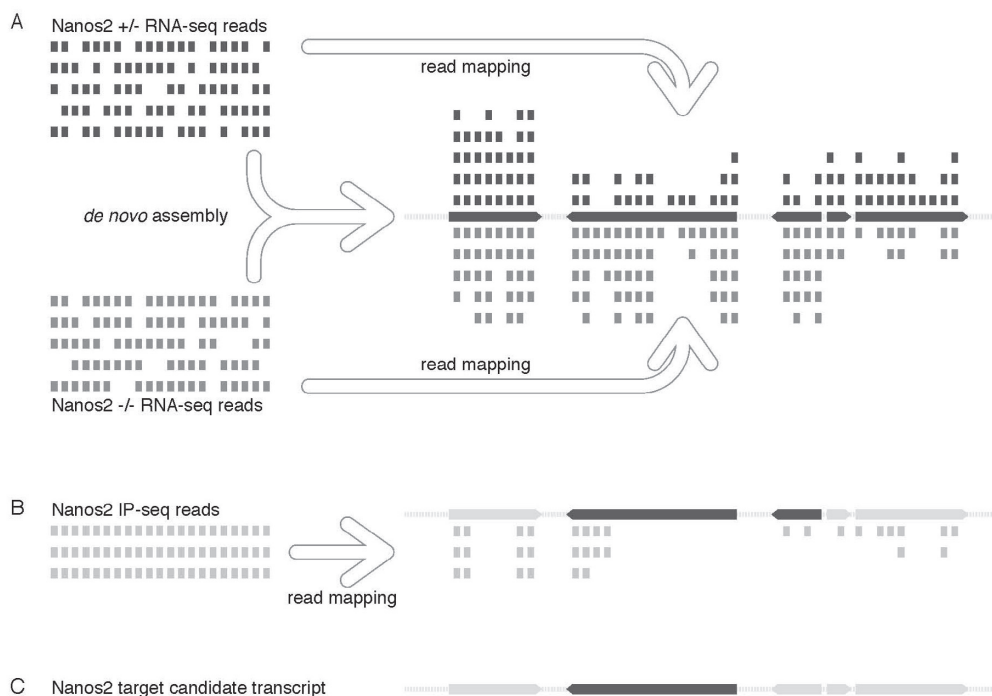


図: D-1

の検出精度を上げることができる。また、ncRNA を含む未知の転写産物を網羅的に検討することが可能となった。さらに、このコンティグへ IP-seq (図 D-1B)のリードをマッピングし、Nanos2 が結合している可能性の高い転写産物を検討した。RNA-seq と IP-seq のデータを結合することで、Nanos2 の標的である可能性の高い RNA を検出することができた (図 D-1C)。マイクロアレイデータから得られた DEGs と IP-seq、Nanos2 欠損マウスの RNA-seq の三者の解析結果から、Nanos2 の標的候補 RNA を抽出することに成功した。この候補には Nanog、Sox2、Dazl および Rb などが含まれていた (図 D-2、 isoform_exp.diff_up.bed は Nanos2^{-/-}で頻度の上がる転写産物を RNA-seq によって検出したもので、Nanos2_merge.peaks.bed は IP-seq によってピークコールの上昇が観察された転写産物の断片を示している)。RNA-seq と IP-seq から同定された標的候補は、Nanos2 が転写産物の末端に結合する場合が多いことを示している (図 D-2、 MACS_peak_9797、7245、5119 and 3910~3912)。Dazl は、我々のこれまでの生化学的研究によって Nanos2 の直接の標的 mRNA であることが分かっており、上記の統計解析に妥当性があることを示していた。現在、これらの候補 RNA が実際に細胞内で Nanos2 による直接制御を受けているかどうかを細胞生物学的に検討している。

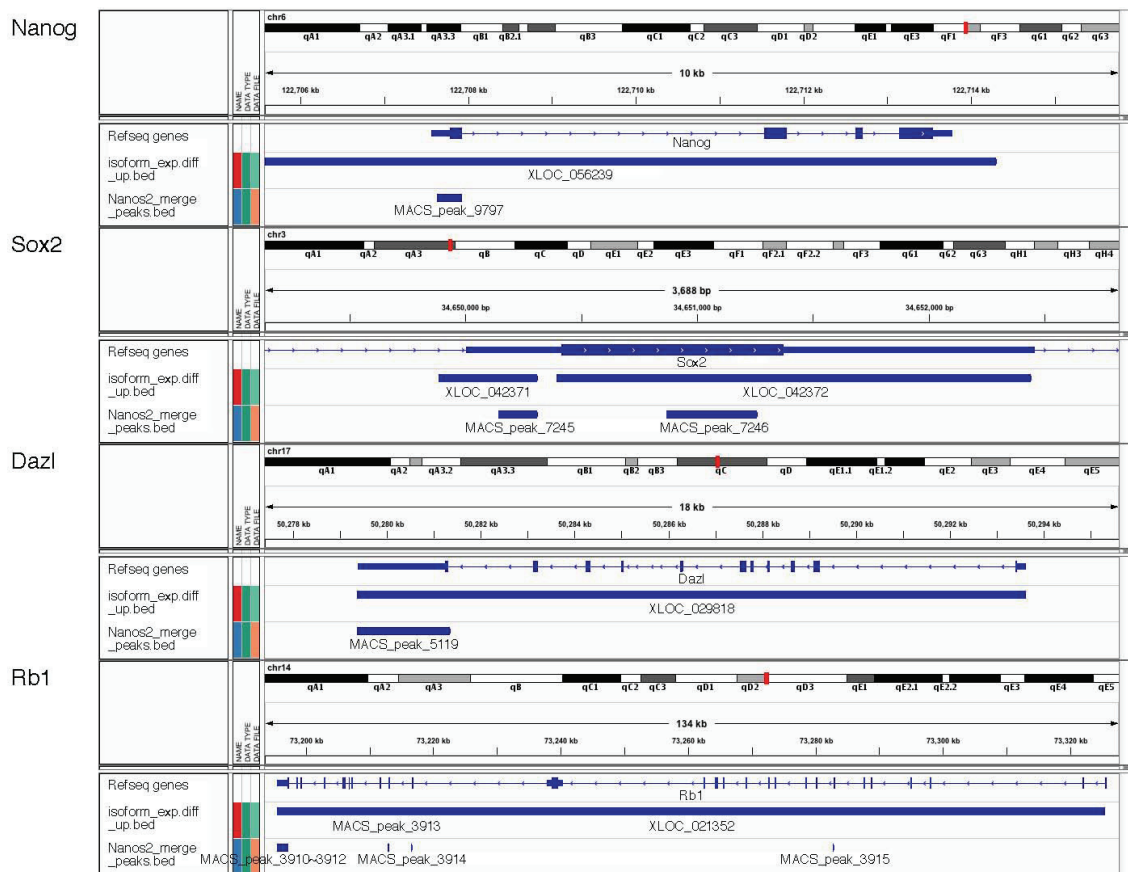


図 : D-2

(4) 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。この過程を細胞質分裂という。平成 23 年度までに、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い、国際誌に論文発表を行った (Koyama et al., PLoS ONE 7, e31607, 2012)。本研究に用いて

いる線虫の胚の細胞は通常卵殻に覆われているが、これまでの研究では、実験的に卵殻を除去した細胞を用いていた。これは、力学モデルを単純化するためであった。このモデルは卵殻をもたない多くの細胞に適用できるが、実験モデル細胞として有用な線虫の胚での研究を発展させるためには、卵殻の影響を加味したモデルを構築する必要がある。平成 24 年度は卵殻を含めた形でモデルを構築すべく検討を開始した。

(5) 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 (図 D-3)。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には至っていない。そこで、測定データ (図 D-4) 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。なお、以下で報告する研究成果は、すべて、本プロジェクト研究員の庭山律哉が中心となって、本プロジェクトの木村、樋口、長尾との共同研究として得たものである。

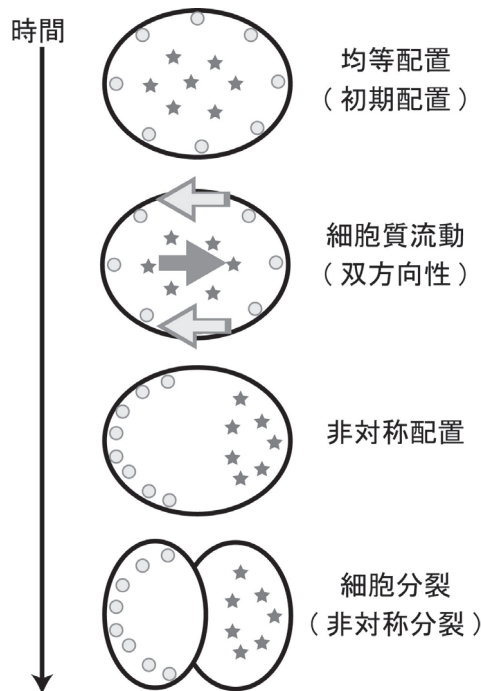


図 D-3: 動物細胞の細胞質流動と非対称分裂の模式図。線虫 *C. elegans* では、当初細胞全体に均等に配置していた物質 (図中、丸や星で表現) が、細胞質流動の結果、細胞内で偏って存在するようになり、その後の細胞分裂で異なった組成の2つの細胞が産生される。庭山他、可視化情報学会誌 32 (125)、20-25、2012 より転載。

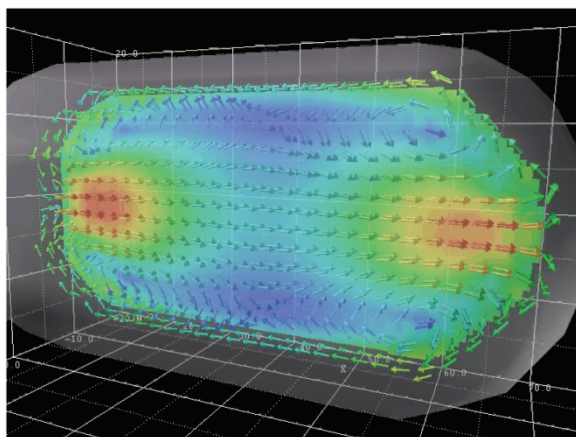


図 D-4: 細胞質流動の定量データ。線虫初期胚において実測した流速を本プロジェクトで開発したソフトウェア「4-Dimension Cell」で開発したソフトウェアで可視化。

まず、データ同化解析に用いるシミュレーションモデルの検討を行った。従来用いていた粒子法シミュレーションよりも、表層で発生する力と流動の関係を明確に定義できる流れ関数-渦度法を用いることにした。流れ関数-渦度法については東北大学の石川拓司先生にご指導をいただいた。また、多くのパラメータセットでデータを取得するために、計算時間の短縮を目指した。計算方法を工夫したの結果、従来の粒子法シミュレーションでは約1時間かかっていた計算を、約1分で完了することができるようになった。

このようにして、シミュレーションモデルに改良を加えた上で、データ同化法をもちいて線虫胚における細胞質流動の力の発生分布の推定を行った。推定された力の分布を用いたシミュレーションでは、確かに実細胞のものに近い流速分布を再現できることを確認した。すなわち、細胞質流動の流速分布から、発生している力の分布を客観的、かつ高速に推定する方法が確立できた。

また、線虫の胚に加えて、ほ乳類のモデル生物であるマウスの卵細胞(図 D-5)でおこる細胞質流動についても同じ解析を行い、マウスの細胞質流動を引き起こす力の分布の推定にも成功した。このことは、確立した方法が様々な細胞質の流動に適用可能であることを示している。なお、マウスの細胞質流動の撮影については、理化学研究所発生・再生科学総合研究センターの北島智也先生にご協力をいただいた。推定されたマウスでの力の分布と、線虫での力の分布には違いがみられたため、現在、この違いが、それぞれでの流動の役割の違いと関係するかについて検討を加えている。

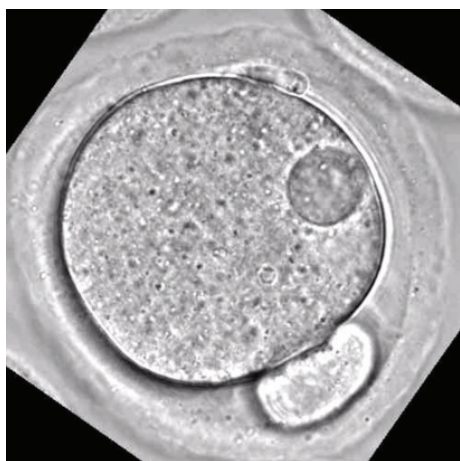


図 D-5: 細胞質流動がみられるマウスの卵細胞。

さらに、3次元での流動計測からのデータ同化も試みている。従来の解析では、シミュレーションは3次元空間について行っていたが、実験データは細胞の2次元の断面で得たものを使用していた。これは従来の顕微鏡システムの撮影スピードでは、3次元（複数の2次元断面での撮影）で細胞質流動を捉えることが不可能だったためである。3次元で細胞質流動を捉えるために、ドイツ EMBL 研究所の Hufnagel 先生、Hiiragi 先生が開発・改良した SPIM 顕微鏡をもちいた。線虫胚の固定方法などを検討し、SPIM 顕微鏡での細胞質流動の高速3次元撮影に成功した。現在、このデータを用いて3次元の流速分布を定量化し、データ同化解析をおこなっている。

この他に、データデザインチームでは、線虫の別の発生時期に生じる細胞質流動についても解析を進めている。この細胞質流動については、発生の原動力や機能についても不明な点が多い。データ同化解析を用いた力の推定から、それらの謎を解明する手がかりが得られると期待している。この研究については、本プロジェクト研究員（現・国立遺伝学研究所助教）の木村健二博士が中心となって進めている。

[5] 研究成果物

① 知見・成果物・知的財産権等

1. 体節形成可視化マウス Tbx6-mcherry、 Ripply2-turquoise マウス
2. 抗 Ripply2 抗体

② 成果発表等

<論文発表>

[学術論文]

(査読付き学術論文誌)

1. Kunitomo, N. and Sato, S., Separating Information Maximum Likelihood Estimation of the Integrated Volatility and Covariance with Micro-Market Noise, *North American Journal of Economics and Finance*, doi:10.1016/j.najef.2013.02.006, 2012
2. 長尾 大道, 樋口 知之, 三浦 哲, 稲津 大祐, 地球地殻の活動監視を目的とした粒子フィルタ法による長期潮位変動解析, *日本統計学会誌*, 42(1), 119-133, 2012
3. Hirose, K. and Higuchi, T., Creating facial animation of characters via MoCap data, *Journal of Applied Statistics*, 39(12), 2583-2597, doi:10.1080/02664763.2012.724391, 2012
4. Nagao, H., Higuchi, T., Miura, S. and Inazu, D., Time-Series Modeling of Tide Gauge Records for Monitoring of the Crustal Activities Related to Oceanic Trench Earthquakes around Japan, *The Computer Journal*, 55(10), doi:10.1093/comjnl/bxs139, 2012
5. 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*, J95-D(3), 570-577, 2012
6. Yamauchi, M., Yamaguchi, R., Nakata, A., Kohno, T., Nagasaki, M., Shimamura, T., Imoto, S., Saito, A., Ueno, K., Hatanaka, Y., Yoshida, R., Higuchi, T., Nomura, M., Beer, D., Yokota, J., Miyano, S. and Gotoh, N., Epidermal growth factor receptor tyrosine kinase defines critical prognostic genes of stage I lung adenocarcinoma, *PLoS One*, 7(9), e43923, doi:10.1371/journal.pone.0043923, 2012
7. Kawano, S., Shimamura, T., Niida, A., Imoto, S., Yamaguchi, R., Nagasaki, M., Yoshida, R., Print, C. and Miyano, S., Identifying gene pathways associated with cancer characteristics via sparse statistical methods, *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 9(4), 966-972, doi:10.1109/TCBB.2012.48, 2012
8. Saito, M., Orlov, V. and Tanikawa, K., Disintegration Process of Hierarchical Triple Systems II:

Non-small mass third body orbiting equal-mass binary, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, in press, 2012

9. 長尾 大道, 樋口 知之, 三浦 哲, 稲津 大祐, 地球地殻の活動監視を目的とした粒子フィルタ法による長期潮位変動解析, *日本統計学会誌*, 42, 119-133, 2012
10. Nagao, H., Higuchi, T., Miura, S. and Inazu, D., Time-series modeling of tide gauge records for monitoring of the crustal activities related to oceanic trench earthquakes around Japan, *The Computer Journal*, doi:10.1093/comjnl/bxs139, 2012
11. 本橋 永至, 磯崎 直樹, 長尾 大道, 樋口 知之, 状態空間モデルによるインターネット広告のクリック率予測, *オペレーションズ・リサーチ*, 57, 574-583, 2012
12. 上野玄太, データ同化, システム/制御/情報, vol. 57, No. 4, pp. 141-146, 2013
13. 上野玄太, データ同化における大規模グラフィカルモデルの推定について, *統計数理*, 印刷中
14. Ueno, G., and N. Nakamura, Iterative algorithm for maximum likelihood estimation of observation error covariance matrix for ensemble-based filters, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, in press
15. 長尾大道, 佐藤光三, 樋口知之, マルコフ連鎖モンテカルロ法を利用したトレーサー試験からフラクチャーの物理パラメータを推定する方法, *石油技術協会誌*, 78(2), 197-209, 2013
16. Y.-M. Tanaka, Y. Ebihara, S. Saita, A. Yoshikawa, Y. Obana, and A.-T. Weatherwax, Poleward moving auroral arcs observed at the South Pole Station and the interpretation by field line resonances, *Journal of Geophysical Research* (doi:10.1029/2012JA017899)
17. J. Kero, C. Szasz, T. Nakamura, T. Terasawa, H. Miyamoto, and K. Nishimura, A meteor head echo analysis algorithm for the lower VHF band, *Ann. Geophys.*, Vol. 30, pp. 639 -- 659, 2012.
18. J. Kero, C. Szasz, T. Nakamura, D. D. Meisel, M. Ueda, Y. Fujiwara, T. Terasawa, K. Nishimura, and J. Watanabe, The 2009-2010 MU radar head echo observation Programme for sporadic and shower meteors: radiant densities and diurnal rates, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* Vol. 425, pp.135-146, 2012.
19. K. Nishimura, T. Nakamura, T. Sato and K. Sato, "Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multi-channel MST Radar," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, pp. 1769-1775, December 2012.
20. Kaoru Sato, Masaki Tsutsumi, Toru Sato, Takuji Nakamura, Akinori Saito, Yoshihiro Tomikawa, Koji Nishimura, Masashi Kohma, Hisao Yamagishi, Takashi Yamanouchi, "Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY) Original Research Article" *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, in press, published online DOI: 10.1016/j.jastp.2013.08.022.
21. Hara Y, Iwabuchi M, Ohsumi K, Kimura A. Intranuclear DNA density affects chromosome condensation in metazoans. *Mol Biol. Cell* 24, 2442–2453 (2013).
22. Hara Y, Kimura A. An allometric relationship between mitotic spindle width, spindle length, and ploidy in *Caenorhabditis elegans* embryos. *Mol Biol. Cell* 24, 1411-1419 (2013).
23. Kimura K., and Kimura A. Rab6 is required for the exocytosis of cortical granules and the recruitment of separase to the granules during the oocyte-to-embryo transition in *Caenorhabditis elegans*. *J. Cell Sci.* 125, 5897-5905 (2012).
24. Okubo Y., Sugawara T., Abe-Koduka N., Kanno J., Kimura A., Saga Y. Lfng regulates the synchronized oscillation of the mouse segmentation clock via trans-repression of Notch signaling. *Nat. Comm.* 3, 1141 (2012)
25. 木村健二, 木村暁 (2013). 細胞分裂の力学的理解. *細胞工学* 32, 280-284.

26. Marshall M.F., Young K.D., Swaffer M., Wood E., Nurse P., Kimura A., Frankel J., Wallingford J., Walbot V., Qu X., and Roeder A.H.K. What determines cell size? *BMC Biology* 10, 101 (2012).
27. Hasegawa K, Saga Y. Retinoic acid signaling in Sertoli cells regulates organization of the blood-testis barrier through cyclical changes in gene expression. *Development*. 2012 Dec 1;139(23):4347-55
28. Morimoto M, Nishinakamura R, Saga Y, Kopan R. Different assemblies of Notch receptors coordinate the distribution of the major bronchial Clara, ciliated and neuroendocrine cells. *Development*. 2012 Dec 1;139(23):4365-73.

(査読付き国際プロシーディングス等)

1. 本橋 永至, 磯崎 直樹, 長尾 大道, 樋口 知之, 事例研究「状態空間モデルによるインターネット広告のクリック率予測」, *オペレーションズ・リサーチ*, 57(10), 574-583, 2012
2. Yamauchi, M., Yamaguchi, R., Nakata, A., Kohno, T., Nagasaki, M., Shimamura, T., Imoto, S., Ogami, K., Saito, A., Ueno, K., Hatanaka, Y., Yoshida, R., Higuchi, T., Nomura, M., Beer, D. G., Yokota, J., Miyano, S. and Gotoh, N. , Epidermal growth factor receptor tyrosine kinase defines critical prognostic genes of stage I lung adenocarcinoma, *PLoS ONE*, 7(9), e43923, doi:10.1371, 2012
3. Saito, M., Imoto, S., Yamaguchi, R., Miyano, S. and Higuchi, T. , Identifiability of local transmissibility parameters in agent-based pandemic simulation, *Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion*, 2466-2471, 2012
4. Nagao, H. and Higuchi, T. , Data assimilation of the earth's atmospheric and ionospheric oscillations excited by large earthquakes, *Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion*, 2472-2779, 2012
5. Nakano, S. and Higuchi, T., Weight adjustment of the particle filter on distributed computing systems, *Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion*, 2480-2485, 2012
6. Saito, M.M, Imoto, S., Yamaguchi, R., Miyano, S., Higuchi, T., Identifiability of Local Transmissibility parameters in Agent-based Pandemic Simulation, *Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion*, 2012
7. Nagao, H. and Higuchi, T. , Data assimilation of the Earth's atmospheric and ionospheric oscillations excited by large earthquakes, *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion*, 2472-2779, 2012

[データベース]

[著書等]

1. ビッグデータ時代のマーケティング, 著者: 樋口 知之(統計数理研究所), 佐藤 忠彦 (筑波大学), 講談社・2013

[解説・総説]

1. 樋口 知之, データ解析の神髄とは, *DIAMOND ハーバード・ビジネス・レビュー*, 2013.2, 98-108, 2012
2. 石垣 司, 樋口 知之, カーネル法による高精度スペクトル形状分類, 会誌「化学工学」, 76(12), 741-743, 2012
3. 長尾 大道, 小林 直樹, 深尾 良夫, 樋口 知之, 石原 靖, 坪井 誠司, 微気圧変動データ同化による2008年岩手・宮城内陸地震の断層パラメータの推定, *月刊地球*, 34(10), 566-573, 2012
4. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 徳永 旭将, 樋口 知之, 菅平微気圧観測とその初期解

析, 月刊地球, 34(10), 580-584, 2012

5. 樋口 知之, ビッグデータと個人化技術, 月刊誌「統計」, 9月号, 2-9, 2012
6. 樋口 知之, 中村 和幸, データ同化によるオンラインセンシングの高度化, 計測自動制御学会誌, 51(9), 1-8, 2012
7. 長尾 大道, 樋口 知之, データ同化—モデルパラメータの分布推定—, 日本機械学会誌, 116(1131), 23-26, 2012
8. 長尾大道, クラウドコンピューティングを利用した統計計算サービス, システム制御情報学会誌, 57(4), 160-165, 2013

[その他]

<会議発表等>

[招待講演]

[国際招待講演]

1. Nakano, Junji, Some topics in computational statistics and statistical training, Forum Math-for-Industry 2012: Information Recovery and Discovery, Fukuoka, 2012.10.24
2. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Miura, Satoshi, Inazu, Daisuke, Particle filter algorithm to analyze long-term tide gauge records for monitoring the Earth's crustal activities, ISCS & ISIS 2012, Satellite Event, Kobe, 2012.11.20
3. Nagao, Hiromichi, Niwayama, Ritsuya, Kimura, Akatsuki, Higuchi, Tomoyuki, Foundation of data assimilation and its application to intracellular fluid dynamics, International Workshop on Quantitative Biology 2012, Tokyo, 2012.11.22
4. Nagao, Hiromichi, Our attempts to broaden the application of data assimilation into many fields empowered by massively parallel computing, Schlumberger セミナー, 相模原, 2012.11.29
5. Higuchi, Tomoyuki, Prediction, Design, and Data assimilation, 2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, Tokyo, 2012.11.09
6. Yoshida, Ryo, Bayesian robust networking, Bayesian Inference and Stochastic Computation 2012 workshop, 立川, 2012.06.22
7. K. Sato, M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, H. Yamagishi, and T. Yamanouchi, The Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY), 13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kuehlungsborn, Germany, March 19-23, 2012.
8. Akatsuki Kimura. Allometric Scaling in the Mitotic Spindle. 2012 ASCB Annual Meeting. Special Interest Subgroup E. Building the Cell (Organizer: Dr. Wallace Marshall) The Moscone Center, San Francisco, USA. 2012.12.15
9. Yumiko Saga. NANOS2-mediated RNA regulation in germ cell differentiation. ISSCR, Yokohama, June 15, 2012
10. Yumiko Saga. NANOS2-mediated RNA regulation in germ cell differentiation. Saga Y. CSH-meeting, germ cells, NY. Oct.2-6, 2012

[国内招待講演]

1. 上野 玄太, データ同化とスーパーコンピュータ, シンポジウム「統計数理とスーパーコンピュータ」, 東京, 2012.09.27

2. 上野 玄太, A Bayesian approach for estimating stable observation noise covariance, 気象研究所予報研究部コロキウム, 東京, 2012.04.13
3. 上野 玄太, 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ベイズ推定法, CPS セミナー, 神戸, 2012.12.18
4. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 徳永 旭将, 樋口 知之, Coseismic atmospheric and ionospheric variations detected at the Sugadaira Space Radio Observatory, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌, 2012.10.20
5. 樋口 知之, ビッグデータが迫る研究開発の変革, 経済産業研究所 BBL セミナー, 東京都, 2012.05.14
6. 樋口 知之, 出口指向のビッグデータ研究開発, ビッグデータと統計学研究集会第 1 回研究集会, 札幌, 2012.10.05
7. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 徳永 旭将, 樋口 知之, Coseismic atmospheric and ionospheric variations detected at the Sugadaira Space Radio Observatory, 第 132 回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌, 2012.10.20
8. 樋口 知之, データ同化によるモデルの高度化～物質材料研究への応用～, 「データを活用した機能に基づく新物質・材料の設計 (マテリアルインフォマティクス)」分科会, 東京, 2013.02.11
9. 樋口 知之, 予測と計測デザインを高度化するデータ同化, 第 21 回 Future of Radiology, 東京, 2012.11.01
10. 樋口 知之, ビッグデータが拓く新しい情報通信の世界 (～サイバーとリアルの間を取り持つデータ同化技術を中心として～), 電子情報通信学会 東京支部講演会「ビッグデータが拓く新しい情報通信の世界」, 東京, 2012.12.13
11. 吉田 亮, ベイズ統計学に基づく医薬品化合物/生化学反応システムの設計, 設計情報学研究会, 京都, 2013.03.10
12. 吉田 亮, データ同化法にもとづくデータ統合・生体シミュレーション技術, 第 50 回日本生物物理学会年会, 愛知県名古屋市, 2012.09.23
13. 吉田 亮, ビッグデータ時代のバイオサイエンスと機械学習, 情報処理学会連続セミナー・第 5 回「ビッグデータに立ち向かう機械学習」, 東京都, 2012.11.19
14. Yoshida, Ryo, Bayesian statistical modeling and computational technologies in systems biology and chemoinformatics, 理研ゲノム医科学研究センター RCAI Seminar Series 2012, 横浜, 2012.06.12
15. Yuki Hara, Akatsuki Kimura. Quantification of Size Scaling Relationship of the Mitotic Spindle in the *Caenorhabditis elegans* Embryo. The 10th NIBB-EMBL Symposium 2013 –Quantitative Bioimaging [Invited] Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan. 2013.3.17.
16. Yuki Hara, Akatsuki Kimura. Size regulation of mitotic spindle in the *C. elegans* embryo. International Workshop on Quantitative Biology (IWQB) 2012 [Oral] The University of Tokyo, Tokyo, Japan. 2012.11.22.
17. Akatsuki Kimura. A cellular funicular: one active force generation drives two directional organelle movements. The 50th Annual Meeting of the BSJ. Symposium 1SI: Exploring force-generating mechanism of molecular motor ensembles: building bridges between single molecules and cells. [Invited, 1SI-05] Nagoya University, Nagoya, Japan. 2012.9.22.
18. 木村 暁「細胞内のスケールリング: 中心体の細胞中央への配置と紡錘体の大きさ制御」分子モーター討論会[招待講演]、東京大学、東京 2012.6.7
19. Yumiko Saga. The molecular mechanism of NANOS2-mediated RNA regulation in germ cell differentiation. Meeting of Japanese Society of Molecular Biology, Dec 12-14, 2012

20. Yumiko Saga. NANOS2 and NANOS3 contribute to germ cell differentiation via interacting with different components of the CNOT complex. Meeting of Japanese Society of Biochemistry, Dec 15, 2012
21. 相賀裕美子。マウス生殖細胞分化における Nanos2 を介した RNA 制御機構, 日本 RNA 学会、7月 17-19, 2012
22. Yumiko Saga. Genetic pathways leading to sexual fate decision in mouse germ cells. The 58th/60th NIBB conference, Okazaki, July 20, 2012

[一般講演]

[国際一般講演]

1. Genta Ueno, Bayesian estimation of observation error covariance matrix in ensemble-based filters, Workshop on Sequential Monte Carlo and Data Assimilation, Tokyo, Japan, 2012.08.09
2. Genta Ueno, Stable Estimation of Observation Error Covariance Matrix by Bayesian Method, 93rd American Meteorological Society Annual Meeting, Austin, USA, 2013.01.08
3. Genta Ueno, Bayesian estimation of observation error covariance matrix in ensemble-based filters, 第5回統数研データ同化研究ワークショップ, 東京, 日本, 2012.09.18
4. Saito, Masaya, Imoto, Seiya, Yamaguchi, Rui, Miyano, Satoru, Higuchi, Tomoyuki, Identifiability of Local Transmissibility Parameters in Agent-based Pandemic Simulation, 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
5. Suzuki, Kazue, Motoyama, Hideaki, Yamanouchi, Takashi, Kawamura, Kenji, Higuchi, Tomoyuki, Spatial and temporal variability of snow accumulation rate and air transports at East Antarctic ice sheet in 1993-2010, XXXII SCAR and Open Science Conference & COMNAP XXIV AGM, Portland, U.S.A., , 2012.07.17
6. Nakano, Shin'ya, Higuchi, Tomoyuki, Weight adjustment of the particle filter on distributed computing systems, 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
7. Nakano, Shin'ya, Ueno, Genta, Hybrid approach of ensemble transform and importance sampling for nonlinear data assimilation, International Conference on Ensemble Methods in Geophysical Sciences, Toulouse, France, 2012.11.13
8. Nakano, Shin'ya, Two ways of representation of the probability density function for ensemble-based data assimilation, International Workshop on Particle Filters for Data Assimilation, Tachikawa, Japan, 2013.02.07
9. Nakano, Junji, Regression analysis for aggregated symbolic data, The 2nd Institute of Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting, Tsukuba, Japan, 2012.07.02
10. Nakano, Junji, Regression Analysis for aggregated symbolic data, 3rd workshop in Symbolic Data Analysis, Madrid, Spain, 2012.11.08
11. Shimizu, Nobuo, Nakano, Junji, Clustering based on normal mixture model for aggregated symbolic data, ISI-ISM-ISSAS Joint conference 2013, Taipei, Taiwan, 2013.01.31
12. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Data assimilation of the Earth's atmospheric and ionospheric oscillations excited by large earthquakes, The 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
13. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Fault parameter estimation from coseismic infrasound

- variation excited by a large earthquake, European Geosciences Union General Assembly 2012, Vienna, Austria, 2012.04.26
14. Nagao, Hiromichi, Niwayama, Ritsuya, Kimura, Akatsuki, Higuchi, Tomoyuki, Data assimilation on intracellular fluid dynamics in *C. elegans* embryo, Workshop on Applied Physics and Statistics on Quantitative Biology, Tachikawa, Japan, 2012.11.26
 15. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Miura, Satoshi, Inazu, Daisuke, Time-series modeling of tide gauge records using the particle filter for monitoring crustal activities related to oceanic trench earthquakes near Japan, International Workshop on Particle Filters for Data Assimilation, Tachikawa, Japan, 2013.02.07
 16. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Fault parameter estimation from coseismic infrasound variation excited by a large earthquake, European Geosciences Union General Assembly 2012 (EGU) , Vienne, Austria, 2012.04.26
 17. Saito, Masaya, Imoto, Seiya, Yamaguchi, Rui, Miyano, Satoru, Higuchi, Tomoyuki, Identifiability of local transmissibility parameters in agent-based pandemic simulation, 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
 18. Nagao, Hiromichi, Higuchi, Tomoyuki, Data assimilation of the earth's atmospheric and ionospheric oscillations excited by large earthquakes, 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
 19. Nakano, Shinya, Higuchi, Tomoyuki, Weight adjustment of the particle filter on distributed computing systems, 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, 2012.07.12
 20. Kazue, Suzuki, Motoyama, Hideaki, Yamanouchi, Takashi, Kawamura, Kenji, Spatial and temporal variability of snow accumulation rate and air transports at East Antarctic ice sheet in 1993-2010, XXXII SCAR, Portland, U.S.A., 2012.07.16
 21. Yoshida, Ryo, Bayesian sparse reconstruction: Latent factor analysis of gene regulatory programs, ISBA2012 World Meeting, Kyoto, Japan, 2012.06.28
 22. Yoshida, Ryo, Bayesian methods for making systems, molecules and others, Workshop on Applied Physics and Statistics for Quantitative Biology, Tachikawa, Japan, 2012.11.26
 23. Nagao, Hiromichi, Our attempts to broaden the application of data assimilation into many fields empowered by massively parallel computing, Data Assimilation, Oxford, United Kingdom, 2012.09.25
 24. T. Hashimoto, K. Nishimura, K. Sato and T. Sato, Adaptive suppression of aircraft clutter with the PANSY radar training system, 13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kuehlungsborn, Germany, March 19-23, 2012.
 25. J. Kero, C. Szasz, T. Nakamura, D. Meisel, T. Terasawa, Y. Fujiwara, M. Ueda, K. Nishimura, and J. Watanabe, The MU radar meteor head echo analysis technique and the 2009-2010 observation programme, 13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kuehlungsborn, Germany, March 19-23, 2012.
 26. K. Nishimura, T. Nakamura, T. Sato, and K. Sato, Adaptive beamforming technique for accurate vertical wind measurements with multi-channel MST radar, 13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kuehlungsborn, Germany, March 19-23, 2012.
 27. Ritsuya Niwayama, Hiromichi Nagao, Tomoyuki Higuchi, *Akatsuki Kimura. Estimation of forces

driving a cytoplasmic flow in the *C. elegans* embryo using data assimilation. 2012 ASCB Annual Meeting [Poster 1739] The Moscone Center, San Francisco, USA. 2012.12.17.

[国内一般講演]

1. 吉田 亮, 山下 博史, 伊庭 幸人, 分子設計のカーネル逆像問題について: 医薬品開発への応用, 日本統計学会, 札幌, 2012.09.10
2. 外山 晴途, 三好 由純, 上野 玄太, 越石 英樹, 松本 晴久, 塩川 和夫, データ同化に基づく放射線帯モデルパラメータの推定, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京, 2012.11.06
3. 外山 晴途, 三好 由純, 塩川 和夫, 上野 玄太, 越石 英樹, 松本 晴久, 粒子フィルタを用いた放射線帯モデルのパラメータ推定, 共同研究集会, 東京, 2013.02.05
4. 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ベイズ推定法, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.11
5. 田野倉 葉子, 津田 博史, 佐藤 整尚, 北川 源四郎, 欧州危機の長期化が世界経済へ及ぼす影響について, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.10
6. 国友 直人, 佐藤 整尚, 三崎 広海, A Robust Estimation of Integrated Volatility, Covariance and Hedging Coefficients under Non-linear Adjustments, Micro-market Noises and Random Sampling, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.11
7. 佐藤 整尚, 状態空間モデルによる金融・経済データ解析, 大内賞受賞記念シンポジウム, 東京, 2013.02.12
8. 鈴木 香寿恵, 川村 賢二, Parrenin, Frederic, 中野 慎也, 長尾 大道, 阿部 彩子, 齋藤 冬樹, 樋口 知之, 南極ドームふじ氷床アイスコア年代補正の試み, 第 5 回統数研データ同化研究ワークショップ, 東京, 2012.09.18
9. 鈴木 香寿恵, 川村 賢二, Parrenin, Frederic, 中野 慎也, 長尾 大道, 阿部 彩子, 齋藤 冬樹, 樋口 知之, データ同化手法を用いたアイスコアの年代モデル開発, 平成 24 年度 ICC 研究集会, 東京, 2013.03.28
10. 鈴木 香寿恵, 内陸旅行ルート上の年間涵養量と大気輸送の関係, 大気・雪氷間の物質循環と南極への物質輸送に関する研究小集会, 東京都, 2012.10.15
11. Nakano, Shin'ya, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus, Higuchi, Tomoyuki, Estimation of the spatial structure of the plasmasphere using a data assimilation technique, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012.05.24
12. Nakano, Shin'ya, Hybrid filtering method of ensemble transform and importance sampling, Workshop on Sequential Monte Carlo and Data Assimilation, Tachikawa, 2012.08.09
13. 中野 慎也, Particle filter と ensemble Kalman filter, 第 16 回 海洋データ同化夏の学校, むつ市, 2012.08.23
14. 河野 英昭, 才田 聡子, 上野 玄太, 樋口 知之, 中野 慎也, 湯元 清文, 地上磁場観測と GPS TEC 観測からのプラズマ圏密度推定に向けて, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉市, 2012.05.23
15. 中野 慎也, 高次元システムにおけるデータ同化のための予測分布表現法, 統計関連学会連合大会, 札幌市, 2012.09.11
16. 中野 慎也, A particle filter with Gaussian proposal distribution on a small subspace, 第 5 回統数研データ同化研究ワークショップ, 立川, 2012.09.18
17. 中野 慎也, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus, 樋口 知之, 極端紫外光画像データの同化によるプラズマ圏構造の推定, 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究集会, 調布, 2012.12.21
18. 中野 慎也, 内部磁気圏データ同化システムの現状と今後, GEMSIS workshop, 犬山, 2012.12.28

19. 中野 慎也, 惑星探査機高速中性粒子データからの情報抽出, 物理計測とベイズ統計的方法研究会, 立川, 2013.01.16
20. 中野 慎也, Construction of the proposal distribution for the particle filter using the ensemble transform Kalman filter, 第3回データ同化ワークショップ, 立川, 2013.01.18
21. 中野 慎也, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus, 樋口 知之, IMAGE/EUV データの同化とプラズマ圏構造の推定, 共同研究集会「電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化」, 立川, 2013.02.04
22. 清水 信夫, 中野 純司, 集約的シンボリックデータの混合分布モデルに基づくクラスタリング, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.11
23. 山本 由和, 清水 信夫, 中野 純司, 藤原 丈史, Mahout と MySQL と R を利用した閲覧行動の予測, 平成24年度データ解析コンペティション(日本計算機統計学会データ解析スタディグループ最終報告会), 東京, 2013.02.23
24. 山本 由和, 中野 純司, 藤原 丈史, 尾崎 皇彦, 可視化とネットワーク分析による閲覧・購買行動の解析, 日本計算機統計学会第26回大会, 高松, 2012.05.12
25. 山本 由和, 中野 純司, 主成分分析のための平行座標プロットとその集約的シンボリックデータへの拡張, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.11
26. 中野 純司, 統計数理研究所の最近の取り組み, 日本計算機統計学会第26回シンポジウム, 東京, 2012.11.02
27. 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る大気変動および電離層変動のモデリング, 日本地球惑星科学連合 2012年度連合大会, 幕張, 2012.05.23
28. 長尾 大道, 富澤 一郎, 金尾 政紀, 家森 俊彦, 樋口 知之, 菅平宇宙電波観測所における微気圧観測, 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究集会, 調布, 2012.12.21
29. 長尾 大道, 微気圧データからの音源位置に関する分布関数の推定, 共同研究集会, 立川, 2013.01.16
30. 長尾 大道, 佐藤 光三, 樋口 知之, マルコフ連鎖モンテカルロ法を利用したトレーサー試験からフラクチャーの物理パラメータを推定する方法, 理論応用力学講演会, 東京, 2013.03.08
31. 長尾 大道, 佐藤 光三, 樋口 知之, 複素変数境界要素法とマルコフ連鎖モンテカルロ法の融合による貯留層内フラクチャーの同定, 流体科学研究所・統計数理研究所 合同ワークショップ, 立川, 2013.03.26
32. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 樋口 知之, 微気圧データからの音源位置に関する分布関数の推定, 極域における固体地球の振動特性・不均質構造・ダイナミクス解明に関する検討会, 立川, 2013.03.28
33. 長尾 大道, データ同化による地震音波モデリングの試み, 津波警報に資する気圧観測の具体化に向けて, 東京, 2012.09.06
34. 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る大気変動および電離層変動のモデリング, 日本地球惑星科学連合 2012年大会, 千葉, 2012.05.23
35. 樋口 知之, アンサンブルベース逐次データ同化と HPC, CPS セミナー, 神戸, 2012.06.07
36. 樋口 知之, ビッグデータが照らす新しい研究道, 統計数理研究所オープンハウス, 立川, 2012.06.15
37. 長尾 大道, 樋口 知之, 三浦 哲, 稲津 大祐, 潮位解析による過去のプレート境界型地震に伴う地殻変動の検出, 統計関連学会連合大会, 札幌市, 2012.09.11
38. 長尾 大道, 本橋 永至, 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(II), 統計関連学会連合大会, 札幌市, 2012.09.11
39. 齋藤 正也, 井元 清哉, 山口 類, 坪倉 正治, 上 昌広, 中田 はる佳, 佐藤 弘樹, 宮野 悟, 樋口 知之, インフルエンザ介入制作における集団免疫を高めるワクチン接種対象群の選択, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.11

40. 本橋 永至, 磯崎 直樹, 長尾 大道, 樋口 知之, 時系列モデルを用いたインターネット広告の効果予測, 統計関連学会連合大会, 札幌, 2012.09.10
41. 長尾 大道, 佐藤 光三, 樋口 知之, マルコフ連鎖モンテカルロ法を利用したトレーサー試験からフラクチャーの物理パラメータを推定する方法, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京, 2013.03.08
42. 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を引き起こす細胞内力分布の推定, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京, 2013.03.08
43. 池端 久貴, 吉田 亮, ベイジアン・コンピューティングと DNA 配列からのプロモータ部位の予測, 2012 年度統計関連学会連合大会, 北海道, 2012.09.10
44. 吉田 亮, 山下 博史, 伊庭 幸人, 分子設計のカーネル逆像問題について: 医薬品開発への応用, 2012 年度統計関連学会連合大会, 北海道, 2012.09.10
45. 吉田 亮, 大規模化合物データに基づく創薬情報学の新しいかたち, 情報・システム研究機構シンポジウム 2012 生命科学のビッグデータ革命 - 仮想から現実へ -, 東京, 2012.11.09
46. Higuchi, Tomoyuki, Data assimilation and sequential Bayes filters: Information fusion with numerical simulation, ISBA2012, 京都, 2012.06.26
47. Higuchi, Tomoyuki, Data Assimilation: Challenge for Big Data through Numerical Simulation, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 仙台, 2012.09.19
48. Higuchi, Tomoyuki, Towards efficient improvement of transcriptional circuit models by Life Science Data Assimilation System, ISLiM 国際シンポジウム: 4th Biosupercomputing Symposium, 東京, 2012.12.05
49. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 大谷晋一, 樋口知之, 地球磁気圏 MHD シミュレーションモデルのパラメータ感度について, 流体科学研究所・統計数理研究所 合同ワークショップ, 統計数理研究所, 2013 年 3 月 26 日
50. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 大谷晋一, 樋口知之, 地球磁気圏 MHD シミュレーションモデルのモデルパラメータ最適値推定, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京工業大学, 2013 年 3 月 8 日
51. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 行松彰, 村田健史, 樋口知之グローバル MHD シミュレーションで再現される電離圏電位分布のモデルパラメータ依存性について, 電磁圏物理学シンポジウム, 九州大学西新プラザ, 2013 年 3 月 5 日
52. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 行松彰, 北村健太郎, 田中良昌, グローバル MHD シミュレーションと SuperDARN から得られる電離圏電位分布の比較, 第 211 回生存圏シンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2013 年 3 月 1 日
53. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 大谷晋一, 樋口知之, グローバル MHD シミュレーションの電離層電気ポテンシャルのモデルパラメータ依存性について, 国立極地研究所研究集会「SuperDARN による極域超高層大気研究集会」, 国立極地研究所, 2013 年 2 月 15 日
54. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 大谷晋一, 樋口知之, グローバル MHD シミュレーションの電離層電気ポテンシャルのモデルパラメータ依存性について, 宇宙・電磁環境研究集会, 電気通信大学, 2012 年 12 月 20 日
55. 才田聡子, 門倉昭, 藤田茂, 田中高史, 大谷晋一, 樋口知之, データ同化を利用したグローバル MHD シミュレーションモデルの境界条件およびパラメータの最適化, 第 3 回極域科学シンポジウム/第 36 回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2012 年 11 月 26 日
56. 田中良昌, 行松彰, 佐藤夏雄, 堀智昭, 吉川顕正, 才田聡子, 極域昼夜境界近傍の電流系について, 第 3 回極域科学シンポジウム/第 36 回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2012 年 11 月 26 日
57. 河野英昭, 行松 彰, 田中良昌, 才田聡子, 西谷 望, 堀 智昭, SuperDARN radar で観測される地磁気脈

動からの磁気圏領域推定可能性, 第3回極域科学シンポジウム/第36回極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2012年11月26日

58. 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, 村田健史, 樋口知之, グローバル MHD シミュレーションを用いた オーロラの形状と動きの南北両半球非対称性の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第134回総会および講演会 2012年10月23日, 北海道 札幌コンベンションセンター, 2012年10月23日
59. 才田聡子, 磁気圏 MHD シミュレーションにおける電離層電気伝導度パラメータのデータ同化による最適値推定, 第5回統数研データ同化研究ワークショップ, 統計数理研究所, 2012年9月18日
60. 庭山律哉, 長尾大道, 樋口知之, 木村暁「データ同化法を用いた線虫 *C. elegans* 胚における細胞質流動の駆動力の推定」定量生物学の会第5回年会 [Poster 70] 東京大学, 東京, 2012.11.24-25.
61. Akatsuki Kimura, Yuki Hara. A systematic quantification of the width-length relationship of mitotic spindle during embryogenesis of *Caenorhabditis elegans*. Joint meeting of the 45th annual meeting of the Japanese Society of Developmental Biologists & The 64th annual meeting of the Japan Society for Cell Biology. Workshop 4a. Systems biology [WS4a-2/P2-129], Kobe International Conference Center, Kobe, Japan 2012.5.30

[国内ポスター講演]

1. 山下 博史, 吉田 亮, 伊庭 幸人, 創薬を支援するデータ駆動型化合物設計, 第15回情報論的学習理論ワークショップ, 東京, 2012.11.08
2. 外山 晴途, 三好 由純, 上野 玄太, 越石 英樹, 松本 晴久, 塩川 和夫, 2チャンネル電子データを用いた放射線帯モデルパラメータ推定に関するデータ同化研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌, 2012.10.21
3. 鈴木 香寿恵, 川村 賢二, Parrenin, Frederic, 中野 慎也, 長尾 大道, 阿部 彩子, 齋藤 冬樹, 樋口 知之, データ同化手法を用いた南極ドームふじアイスコアの年代モデル開発, 第35回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2012.11.29
4. 鈴木 香寿恵, 川村 賢二, Parrenin, Frederic, 中野 慎也, 長尾 大道, 阿部 彩子, 齋藤 冬樹, 樋口 知之, ドームふじアイスコアの年代補正モデルによる年代軸決定の試み, 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 千葉, 2012.05.23
5. 鈴木 香寿恵, 本山 秀明, 山内 恭, 川村 賢二, 内陸旅行ルート上の年間涵養量と大気輸送の関係, 2012 年度気象学会春季大会, 東京, 2012.05.26
6. 中野 慎也, 長尾 大道, 樋口 知之, 夜側中緯度静穏時地磁気 H 成分の長期変動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉市, 2012.05.23
7. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 徳永 旭将, 樋口 知之, 地殻活動起源の大気変動をモニタリングするための微気圧連続観測, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張, 2012.05.23
8. 長尾 大道, 富澤 一郎, 家森 俊彦, 金尾 政紀, 徳永 旭将, 樋口 知之, 地殻活動起源の大気変動をモニタリングするための微気圧連続観測, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012.05.23
9. 中野 慎也, 長尾 大道, 樋口 知之, 夜側中緯度静穏時地磁気 H 成分の長期変動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012.05.23
10. Nakano, Shinya, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus C., Higuchi, Tomoyuki, Estimation of the spatial structure of the plasmasphere using a data assimilation technique, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012.05.24
11. 鈴木 香寿恵, 川村 賢二, Frederic, Parrenin, 阿部 彩子, 齋藤 冬樹, 藤田 秀二, 樋口 知之, ドームふじアイスコアの年代補正モデルによる年代軸決定の試み, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉,

2012.05.23

12. 齋藤 正也, 吉田 亮, 長尾 大道, 中野 慎也, 樋口 知之, 高速な生命体データ同化システムの開発とパスウェイ・モデル探索への応用, 京コンピュータ・シンポジウム 2012, 神戸市, 2012.06.14
13. Nakano, Shinya, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus, Higuchi, Tomoyuki, Two-dimensional structure of the plasmasphere estimated by the ensemble transform Kalman filter, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌, 2012.10.22
14. 山下 博史, 吉田 亮, 伊庭 幸人, 樋口 知之, 創薬を支援するデータ駆動型化合物設計, 第 15 回情報論的学習理論ワークショップ, 東京, 2012.11.08
15. 池端 久貴, 吉田 亮, タスク分割型ベイジアンモデリングに基づく DNA モチーフ配列の探索, 第 15 回情報論的学習理論ワークショップ, 東京, 2012.11.08
16. Nakano, Shin'ya, Fok, Mei-Ching, Brandt, Pontus, Higuchi, Tomoyuki, Two-dimensional structure of the plasmasphere estimated by the ensemble transform Kalman filter, 第 132 回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌, 2012.10.22

<受 賞>

③ その他の成果発表