

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04536

研究課題名（和文）保存変換からの脱却による非対称ダイナミクスの符号込み合成理論の開発

研究課題名（英文）Signed formulation of dynamical systems synthesis incorporating asymmetry beyond preservation

研究代表者

伊藤 博（Ito, Hiroshi）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：70274561

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電気電子・機械から生科学、人間と生物の社会まで、あらゆるダイナミクスの安全で効果的な設計と運用では、モジュールのゲインが持つ閾値までの余裕が指標とされてきた。設計数理の最先端では、異なる質やスケールの現象が相互作用するとゲインによる画一的判断は大きく保守的、あるいは、不能となることが明らかにされ、ゲインが値から関数へ拡張されていた。しかし、それでもまだ対処できないダイナミクスが多いことに本研究は注目した。非線形ゲイン理論から対称性を除き、対称を前提とした保存変換を止め、符号込みでダイナミクスを合成する革新的方法論を構築した。その有効性を感染症のワクチン、隔離、外出規制による制御設計で例証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未解決のダイナミクスの数理基盤を開発したことから、適用対象となる科学技術範囲は予想できないほど広い。本研究の計画段階から生物システムからの着想や応用も意識していたが、助成金開始と同時に深刻化したコロナ感染症の未解決数理に、直球で立ち向かう道を提供したように、今後も産業から環境、社会まで幅広いダイナミクスの運用と設計の発展に鍵を与え続けることは間違いない。また、本研究の本課題成果という限定宣伝ではなく、システム制御理論が科学技術に貢献する力と、その大切さを、世界一の論文誌や国際会議での発表を通して提示できたことも大切であった。一部はシンポジウム論文賞などで分野に残ったことの社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Safe and effective design and operation of dynamics arising in electric and electromechanical systems have relied on margins by which gains of individual modules are allowed to increase before reaching the threshold, and their effectiveness has also been anticipated for social and environmental dynamics of humans and organisms. It was recently known among experts that qualitative and scale diversity limits the effectiveness of the gain margins, and the gains are extended to functions. This project addressed the issue that those gain functions are still insufficient for solving problems of diversely coupled dynamics. It proposed a novel methodology pursuing the utilization of asymmetry in the gain functions. The project avoided using preserving transformation that relies on symmetry and incorporated sign information into the synthesis of dynamics. The project also demonstrated its successful application to infectious disease control using vaccination, isolation, and outing regulation.

研究分野：システム制御理論

キーワード：非線形システム 結合ダイナミクス 非対称性 安定論 ロバスト性 感染症制御

1. 研究開始当初の背景

電気電子・機械から生科学、人間と生物の社会まで、あらゆるダイナミクスの安全で効果的な設計と運用では、構成毎にモジュールのゲインを調べ、それらが調和を維持できる閾値までの余裕が指標とされてきた。最近では、設計数理の最先端では、異なる質やスケールの現象が相互作用するとゲインによる画一的判断は大きく保守的、あるいは、不能となることが明らかにされ、ゲインを値から関数へ拡張する数理基盤が開発されてきた。しかし、現代の大規模複雑化した構成物や、生科学、人間と生物の社会のダイナミクスには対処できない、つまり、非線形ゲイン関数を使っても否定的な答えしか出ないようなダイナミクスが多いことは、AI や機械学習の能力に任せる場面が多くなった現代技術の背景ともいえる。そこで、問題が困難になったと感じるのは、規模が大きくなった、大きくしたからではなく、数理基盤が無意識に仮定している対称性にあるはずだ、対称性をエンコードする符号を非線形ゲイン関数に組み込めば、未解決問題に解が見つかるはず(図1) という独自の着想が本課題研究の出発点となった。

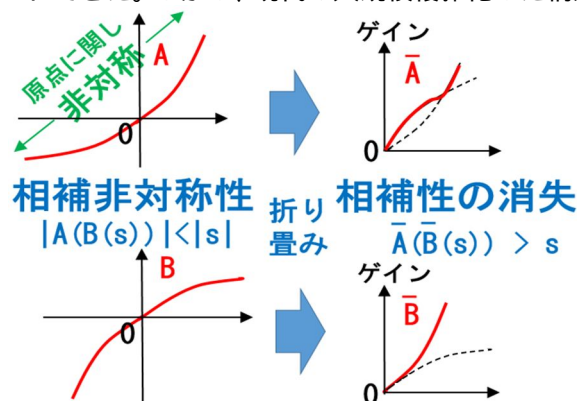


図 1

2. 研究の目的

大規模化に対処する代表的アプローチが、一度分解して処理をしてから組み立てるという、モジュール化である。ダイナミクスの分解と再結合の数学的方法論には、受動性とゲインを統合した消散性という概念が 1980 年頃に古典的結合システム論として体系化が完成している。これらはダイナミクスに出力と入力という信号を導入することに基づいているが、信号なしに、ダイナミクスの単調(モノトーン)性からモジュール化する数理も 1980 年頃までに発展をしている。中でもゲイン法はゲイン余裕を定める小ゲイン定理という強力な数理ツールが整備されていることから多く活用されている。2000 年の前にゲインが値から非線形関数へ拡張され、2000 年に入ると局所しか存在しないゲイン関数から大域的性質を導く理論を本研究者が開発し、それによりゲイン理論と単調性理論が融合されて非線形小ゲイン定理の体系化がほぼ完了した。しかし、ゲイン関数は入出力信号の大きさの関係でシステムをモジュール化する。大きさは一般に数学におけるノルムの事であり、正負の符号はない。つまり、大きさは原点に対して対称な特徴量である。本研究はその対称性を取り除くため、「非線形小ゲイン理論に符号情報を組み入れることはできないか？」への YES という解答を与える研究に取り組んだ。「ゲインモジュール化に基づく解析において対称性は避けられない本質か？」に NO という答えを出す数理基盤を開発することを研究目的とした。本研究の独自性は、図 1 のようにゲイン関数で失われてしまう非対称性に注目し、「相補的非対称性の活用」を提唱して追求するダイナミクス合成論を構築することにあった。そのための数理「保存変換からの脱却」を徹底した。

3. 研究の方法

ダイナミクスの秩序を安定性とロバスト性として数理的に表現し、秩序を維持・達成する解析・設計の対象領域を大域的に定め、線形近似が質的に無力となるダイナミクスを取り扱った。「世の中はすべて非線形だから取り組もう」では一切なく、非対称性への対処が本質になる状況に絞った。そのため、具体例として、物事の保存則から生まれる情報処理プロセス、化学プロセス、生命動態、生命分子合成、個体群動態、社会活動モデル等で共通に表れるダイナミクスの非対称性を標準数理問題として整理することから始めた。また、それらの直列合成と帰還合成を、道グラフと閉路グラフに数学的に分類して取り組んだ。本プロジェクトで抽象数理的取り組みだ研究の方法は 4 つに分類できる。

(1) 相補的非対称性を見出す非線形小ゲイン条件

ダイナミクスの閉路グラフにおいて、非対称を殺さずに結合する方法を見出すため、非線形小ゲイン定理というロバスト安定論を取り上げ、単調保存変換で消散表現を揃えてモジュールを合成する仕組みを再考し、符号情報を非線形小ゲイン条件に組み込んだ。この際、ゲインを超えてシステムの結合を特徴化できるように、入力を持った非古典的なりアプノフ関数として、積分入

力状態安定型を採用した。

(2) モノトーン性に基づく相補的非対称性の特徴化

消散性はエネルギーという概念の論理厳密化であり、対称性をもとも必要のない概念であるが、数学体系として具現化する上で、数学的取り扱いの容易さから、ゲインや受動性のように対称性が無意識に導入されていることに注目した。消散性とは別にダイナミクスを取り扱いに古からあるモノトーン理論を再調査した。信号の大きさという概念を利用せず、そもそも原点を意識しないモノトーン性から発想を得て、消散性における対称性を前提とした単調保存変換からの脱却を目指した。

(3) 相補的非対称性における伝達遅れの考慮

人工物に限らず、小さな生物から大きな社会モデルまで、伝達には無駄時間がある。これまでの非線形小ゲイン定理は単調保存変換で無駄時間を統一的に処理していた。単調保存変換を取り除く本研究では、モノトーン理論に無駄時間を処理するリアプノフ型汎関数を直接導入し、相補的非対称性の合成を目指した。

(4) 動作点移動による相補的非対称性変化への対処

ダイナミクスの非対称性の描写には、各モジュールのスカラ特徴量を抽象エネルギーとして正に制限する方法と、エネルギーの原点を動作点中心に置かず、各モジュールを正負を持つスカラ量で特徴化する2通りがある。両方の研究を平行に行いながら、拡張性、実用途との親和性を見極めた。後者の研究においては、動作点自体が結合によって変化することを解明しながら相補的非対称性の結合を行う方法論の開発を追求した。

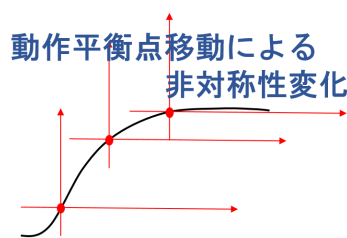


図 2

応用具体的に取り組んだ数理研究は、本研究は結果的に次の一つに絞った。

(5) 感染症制御における解析と設計

本助成研究の開始と同時に COVID-19 の感染拡大が世界的に深刻化した。本研究者は元々生命ダイナミクスの一つとして感染症の感染モデルを学習していたことから、本件研究の構想・計画時に、抽象数理基盤開発のアイデア創作と有効性の確認のための具体モデルの候補の一つに、感染症モデルがあった。COVID-19 の感染拡大という事態に、同時に行っていた細胞内概日リズムの利用は最初の1年となり、応用具体的モデルは感染モデルの一つに絞ることとした。感染予測を目的とする感染ダイナミクスのモデル化の研究は昔から多くあるが、制御設計の発展はほとんどなく、原始的レベルで留まっていた。本研究でを進めて理由を整理したところ、上記から全て当てはまる事が判明した。そこで、抽象数理的な開発と同時に、それを応用して感染症制御問題を解決するというように並行進行させる研究方法を採った。

4. 研究成果

初年度の成果の一つ目は、ダイナミクスの各モジュールにおいてエネルギー収支を不均一のまま特徴化し、接続信号の正と負に関し非対称な非線形ゲイン関数を定式化したことである。二つ目は、それを用いた小ゲイン定理を考案・証明したことにある。三つめは、そのアイデアが感染症モデルの解析設計に直接的な鍵となることを発見したことである。この三つめは、当初の計画を超えた成果を本研究プロジェクト全体に与えるスタートとなった。感染症モデルによる予測の研究は従来から数多く行われていることは対照的に、制御設計については、ウィルス感染力が強い場合の研究が世界でほとんど進んでこなかった理由は、非ゼロ平衡点によって双線形性が生む非対称がリアプノフ関数を分離不可能にすることが理由であることを初年度2020年度に証明した。そして、2021年度までに、非対称結合の対処法として、幾何学的な混合変換、リアプノフ関数の厳密化、および、非対称な制御リアプノフ関数という3つのアプローチに取り組み、開発に成功した。それらにより可能となった感染症に対するフィードバック制御法の成果は、どれも世界で類のない結果として、制御分野最高の国際会議で発表、さらには、制御理論分野で最上位の論文雑誌などに掲載され、制御および感染症数理の分野で注目をあびた。2022年度は、その成果を可能にした特殊数理手法を一般論「保存変換からの脱却による非対称ダイナミクスの符号込み合成理論」として還元することを本格化させた。一般論を展開する前に、予想を超える大成果が感染症モデルの研究段階で出たため、抽象化への研究時間の配分が難しいといううれい悩みの下で2022年度の研究を展開し、2023年度には非対称性によって平衡点移動が及ぼす影響を解析するという構想通りの成果を発表するまでに至った。また、平衡点移動に対処する積分型フィードバック、遅れに対する性能保証などは、感染症制御設計に具体的に適用した研究成果としても発表出来た。そのような感染症モデルへの取り組みで得た「半無限領域上の対数リアプノフ関数の結合」という経験蓄積が、非対称性を関数から空間へ広げるという独自の新着想

につながった。「符号付き」から「半無限領域上」への飛躍で起こるダイナミクスの本質的違いを明らかにして、「半無限領域上」で非対称ゲインを操り展開する数理土台を完成させたところで本研究期間が終了し、一般抽象論しても当初計画を超えることが出来た。最終年度は、会議発表会だけでなく、独自に国内および海外の大学で研究会や講演会等を行い成果普及活動も行った。

国際学会 SICE2022 で発表した成果は論文賞ファイナリストに、国内学会 SICE 制御部門マルチシンポジウムでは論文賞を受賞した。これらは本研究の数理基盤成果を感染症制御に適用した成果であり、本研究の本課題成果という限定宣伝ではなく、システム制御理論が科学技術に貢献する力と、その大切さを、国内分野最大のシンポジウムの論文賞と、世界一の論文誌や国際会議での発表を通して提示できたことも大切であった。

最後に、受賞の研究成果を紹介する。新型コロナ感染症の出現により、数理モデルを使った感染予想グラフが報道やインターネットなどのメディアを通して世界の全人々に広まった。感染症拡大のメカニズムの数理的研究は100年ぐらいの歴史があり、数理モデルが質的な拡大予想と解釈に利用され来ている。数理科学者による安定性や最適制御な解析なども多い。しかし、システム制御学における感染症モデルの研究は十分でなく、システム制御の他の応用分野に比べるとまだまだ未熟であった。既存成果が限定的であるだけでなく、システム制御で蓄積された理論による検証や保証が未だである

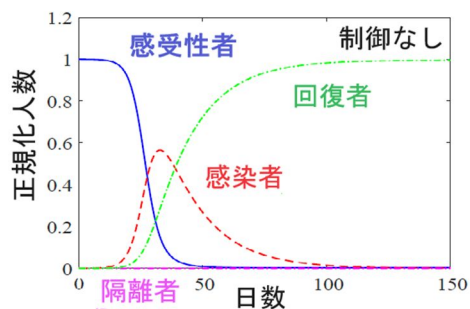


図 3

点が多かった。そこで本研究者は、ダイナミクスの非対称性に対処するリアプノフ関数を利用し、それを相補的に結合する数理基盤の独自開発に基づいて、感染症の拡大の社会負担軽減策を設計する理論研究を行った。その結果、ワクチン、隔離、外出接触規制の三つの方策を同時に導くことに成功し、感染拡大抑制の大きな効果を、シミュレーションを使って検証することが出来た(図3、図4)

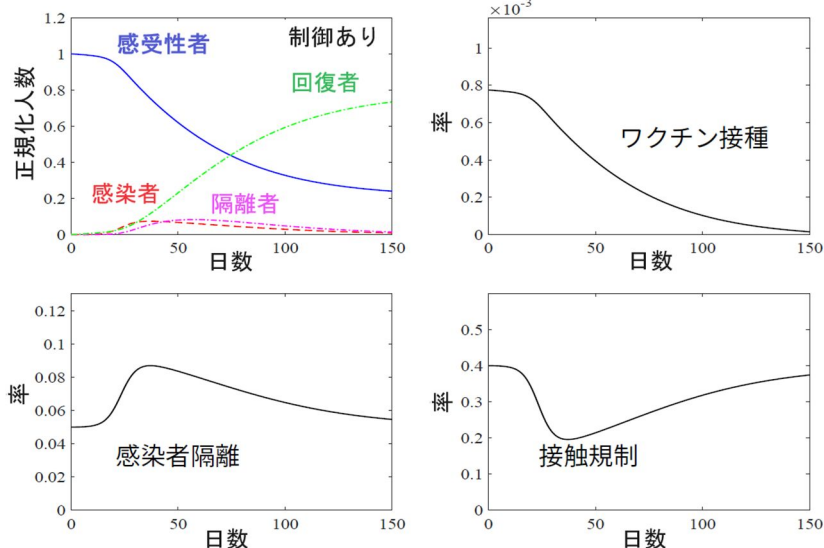


図 4

このように本研究は、非対称性が障害となって未解決となってきたダイナミクスの解析設計問題に解を提供するような、新しい数理基盤を開発した。適用対象となる科学技術範囲は予想できないほど広い。助成金期間中に深刻化したコロナ感染症の未解決数理に直球で立ち向かう道を提供したように、今後も本研究の成果は、産業から環境、社会まで幅広いダイナミクスの運用と設計の発展に鍵を与え続けることは間違いない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroshi Ito, Michael Malisoff, and Frederic Mazenc	4. 巻 13
2. 論文標題 Feedback control of isolation and contact for SIQR epidemic model via strict Lyapunov function	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Control and Related Fields	6. 最初と最後の頁 1438 ~ 1465
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3934/mcrf.2022043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroshi Ito, Michael Malisoff, Frederic Mazenc	4. 巻 27-12
2. 論文標題 Strict Lyapunov functions and feedback controls for SIR models with quarantine and vaccination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series B	6. 最初と最後の頁 6969-6988
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3934/dcdsb.2022029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroshi Ito	4. 巻 32-16
2. 論文標題 Isolation-oriented Lyapunov-based design of simultaneous feedback strategies for disease control of SIQR	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 8767-8785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rnc.6309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Ito	4. 巻 67-9
2. 論文標題 Strict smooth Lyapunov functions and vaccination control of SIR model certified by ISS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Automatic Control	6. 最初と最後の頁 4514-4528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2022.3161395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Ito	4. 巻 26
2. 論文標題 Input-to-state stability and Lyapunov functions with explicit domains for SIR model of infectious diseases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - B	6. 最初と最後の頁 5171-5196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcdsb.2020338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Hiroshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Interpreting models of infectious diseases in terms of integral input-to-state stability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics of Control, Signals, and Systems	6. 最初と最後の頁 611 ~ 631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00498-020-00272-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Asymmetric dissipativity and supply rates for compartmental systems with logarithmic storage functions
3. 学会等名 2023 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Asymmetric and fitted dissipativity with logarithmic storages for positive systems exhibiting interior equilibria
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Nonlinear PI control for semi-global asymptotic stabilization and robustness of SIQR model with inflow perturbations
3. 学会等名 The 12th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 A global and semi-global controller for SIQR epidemic model by a control Lyapunov function via logarithmic sum
3. 学会等名 The 61st IEEE Conf. Decision Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Semi-global input-to-state stabilization of SIQR model with isolation, outing regulation, and vaccination in staircase form
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Dynamic feedback control of SIQR model guaranteeing semi-global asymptotic stability and robustness for inflow perturbations
3. 学会等名 SICE Annual Conference2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 An ISS Lyapunov function estimating admissible inflow perturbations for semi-global control of SIQR model
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 博
2. 発表標題 対数型リアプノフ関数を使った非対称な状態空間上のダイナミクスのモジュール化について
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 博
2. 発表標題 非対称な状態空間上のダイナミクスのモジュール型解析設計を目指した供給率について
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Vaccination with input-to-state stability for SIR model of epidemics
3. 学会等名 The 60th IEEE Conf. Decision Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 A construction of strict Lyapunov functions for a bilinear balancing model
3. 学会等名 The 3rd IFAC Conf. Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Nakata, Hiroshi Ito
2. 発表標題 Feedback balancing between vaccination and quarantine for disease control: a simulation for COVID-19 in Japan
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 A strict smooth Lyapunov function and input-to-state stability of SIR model
3. 学会等名 2021 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 博
2. 発表標題 感染者隔離と分離型ISSリアプノフ関数によるSIQRモデルの準大域協調制御の実現
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 博
2. 発表標題 ISSリアプノフ関数により保証付けされたSIR感染モデルのワクチン接種フィードバック
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 博
2. 発表標題 SIR感染モデルに基づく流入個体数規制の不確かさに対するISS保証の一解析
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Strong integral input-to-state stability of nonlinear networks through balancing kinetics
3. 学会等名 The 59th IEEE Conf. Decision Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Signed small-gain criteria amenable to asymmetry with respect to equilibria in establishing iISS of networks
3. 学会等名 The 59th IEEE Conf. Decision Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

JSPS科研費20K04536に関わる成果報告論文
<http://palm.ces.kyutech.ac.jp/~hiroshi/fsprojects/kakenmono20.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	マリソフ マイケル (Malisoff Michael)		
研究協力者	マゼンク フレデリック (Mazenc Frederic)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Louisiana State University			
フランス	Inria EPI DISCO			