

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：17104  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560449  
 研究課題名（和文） 近視眼及び巨視的消散特性の調和に基づく大規模非線形ダイナミクス設計基礎論  
 研究課題名（英文） Fundamental theory for designing large-scale nonlinear dynamics based on microscopic and macroscopic dissipativity  
 研究代表者  
 伊藤 博（HIROSHI ITO）  
 九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授  
 研究者番号：70274561

研究成果の概要（和文）：現代社会が直面する動的システムデザインにおける諸課題は、人工画一的アプローチが適用・転用可能なスケールを超えており、複雑な相互作用に相対することが必要である。そこで、システム全体を集中一括して捉えるのではなく、近視眼的な振る舞いと巨視的な振る舞いを非線形に調和させることで、各技術の効果的な融合により、大規模ダイナミクスの効率的な解析設計を可能にする新しい理論枠組みを構築した。

研究成果の概要（英文）：Design of dynamical systems in our society goes beyond the scale in which artificial approaches based on uniformity remain effective. To make use of diversity taking effect in a non-traditional scale, centralized approaches are no more successful. This research has developed a fundamental framework for designing large-scale nonlinear dynamics by seeking a harmony between microscopic and macroscopic dissipativity.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：システム制御

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論、非線形システム、ダイナミクス、安定論

## 1. 研究開始当初の背景

現代の科学技術の発展のための鍵の一つは、大規模さから生まれる複雑さに相対する基盤理論の整備である。物としてサイズが大きいことを必ずしも意味するのではなく、微小でも多数の要素が絡み合ってネットワークとして動く（機能する）事・技術こそ、現代社会がめざす自然に見習うディペンダブルな物づくりである。集中均一的扱いが都合の悪いスケールにまで手を伸ばしてシステ

ムの頑強性や自律性、協調性を追求することが、現代の社会が必要としているシステム設計である。

ダイナミクスの解析と設計を支えてきた制御システム理論の近年の発展を見ると、人工画一的アプローチの壁を超える方法論の提供ができていない状況にある。大規模システムの理論研究は、1970～80年代頃に大発展を遂げたが、1990年以降から急速に減少し、人工的に無理やり押さえ込む画一的な最適化を求める傾向が強くなり、スケールを限

定した計算論的研究が加速した。非線形システム制御理論も同じ方向へと引き込まれ、多くの研究は限定的スケールにおける量や数値の改善へと向けられた。社会では情報通信ネットワークやバイオロジー、ナノテクノロジーなどへ急速にシフトし、そのような身の回りの問題に近年の制御システム理論が十分に対処できない状況にあった。

## 2. 研究の目的

ダイナミクスは、取扱いに都合のよいスケールを超えると振舞空間上に非線形特性が表れる。規模が大きくなると、多数の相互作用と通信により挙動が複雑になる。この2種類の煩雑さに対処するようなダイナミクス解析とダイナミクスデザインのための基盤理論を提供することを本研究の目的とした。従来の集中一括处理的なアプローチを捨て、配位空間および結合規模空間の意味で近視眼的な解析や設計と、巨視的な解析や設計を調和する形で大規模非線形ダイナミカルシステムを組み上げ、各科学技術の効果的な融合を可能にする新しい数理枠組みを目指した。それらは以下の2つである。

(1) 近視眼及び巨視的消散性を合成する安定基礎論

(2) 近視眼及び巨視的消散性を融和する設計基礎論

ここで言う安定性とは、教科書・原始的なものではなく、ロバスト性や各種性能を包含する概念である。近視眼及び巨視的な消散性の調和は、結合されるサブシステムの数を表す空間、結合規模空間と、システムが動く座標空間、配位空間の両方で展開を目指した。研究課題名にある「調和」とは、その目的によって合成・融和の二つ役割を演ずることを狙ったものとした。

## 3. 研究の方法

本研究の独創性は、「近視眼及び巨視的消散性の調和」という着想にある。大きなシステムの設計と運用（制御）では集中一括処理は不可能、あるいは、頑強性や自律性、協調性、回復力に欠ける。自然物は一括集中最適解ではないこともよく知られ、モジュール統合理論が1970～80年代に活発に研究された。本研究は、このモジュール統合理論に新たに近視眼及び巨視的消散性を導入するアプローチを取った。非線形システム分野では、1989年にInput-to-State-Stability (ISS)という概念が提唱され、安定論に非線形頑強性という観点から入力を持ち込んだその枠組は、20年間で世界を大きく変えた。1972年に提唱された消散理論は綺麗な抽象表現を提供するものの、それ自体では具体的活用手

段にはならなかったが、ISSはそこに一つの解決可能な枠組みを提供した。そして1994年にはISSを用いた結合システム安定理論がJiangらによって完成された。本研究では、1998年に提案されたISSより豊かな非線形挙動を規定する概念であるintegral ISS (iISS)に注目した。本課題研究代表者は2004年に、iISSから結合システムの安定性が導けることを世界で初めて示し、iISS小ゲイン定理を完成させてiISS論の世界的先導者の一人となっていた。本研究はiISS論を最大限活用、さらに進化させて、大規模さから生まれる非線形性や相互干渉の遅れ等への取り扱いを可能にするダイナミカルシステムの解析設計のための基盤理論の整備に取り組んだ。

図1のように、近視眼及び巨視的消散特性の調和の基礎論研究を要素(1)と(2)に分解し(2. 研究の目的を参照)、それらを(A)と(B)、(C)で立体的に取り巻き、計五要素を有機的に連係させる形で研究を計画した。要素(A)の具体的対象で獲得した知見を基盤理論研究(1)(2)に取り込み、さらに基礎研究を具体的対象へフィードバックさせ、抽象的な(1)(2)の効果的研究を促進させた。要素(A)は本課題研究開始時に研究者代表者が持ち合わせた概日リズムなどの遺伝子ネットワークの知識に加え、無線通信におけるCDMAにおける携帯端末の送信電力制御における近視眼及び巨視的消散性の抽出と調和的活用に取り組んだ。グリッドコンピューティングおよび大規模(電力)グリッドにおける巨大数の電気自動車の充電問題にも取り組み、その知見を基礎論研究へフィードバックさせた。要素(B)は本研究の概要を社会に見せる形で発信することが主な役割であったが、交付金の大幅減額に合わせ、初年度から(B)は本課題の経費を使わない研究へと移行再計画した(後述)。要素(C)は本研究に欠かせない工夫であり、国内に類がない研究の推進に大いに役立てた。世界的に活躍中の研究者を計2名(フランスおよびドイツ)短期招聘した。その他多数の国外研究者とメール等の機器を使って情報交換を日常的に行い、成果発表の国外出張の機会を活用して集中的な打ち合わせ・討論、別資金による訪問機会も活用して、効果的な協力を得た(5. 主な発表論文等、および、6. 研究組織を参照)。



図1. 主プロダクト1,2と工夫A,B,C

#### 4. 研究成果

本課題研究の主プロダクトである以下の(1)と(2)を「大規模さから生まれる複雑さに相対する数理枠組み」としてまとめ上げ、本課題申請時の予定を上回る成果を得た。

##### (1) 近視眼及び巨視的消散性を合成する安定基礎論

まず、システムをマイクロな規模のサブシステムに分解し、各要素を  $iISS$  という消散性に基づいて特徴化する方法を確立した。研究の工夫(A)からの知見に基づき、相互干渉には和型と最大型の二つのモデル化を用意し、両方に対して平行に理論を整備することに成功した。要素の非線形性や要素間の相互干渉、時間遅れ等を  $iISS$  という消散性によって見事に特徴化することが出来た。次に、マイクロな消散性をマクロな消散性へと組み上げる数理的道具として、独自のリアプノフ関数構成法という大きな新理論の提案に成功した。それは、非線形変換を通した和型リアプノフ構成法と、非線形変換を通した最大型リアプノフ構成法である(これらの和・最大は相互干渉の和・最大とは全く別のもの)。各構成法によって近視眼的消散性から巨視的消散性の合成を具体的に可能にし、それぞれの長所短所を数理的に明らかにするという2点に見事に達成した。後者の一例として、最大型リアプノフ構成法は近視眼的  $iISS$  の巨視的合成に便利であるが、 $iISS$  の場合は不可能であり、和型リアプノフ構成法は  $iISS$  と  $iISS$  の両方を統一的に合成可能であることの証明に成功している。これらのリアプノフ関数構成法はダイナミカルネットワークの位相構造を限定せず、位相構造(空間相互の質)および非線形構造(各空間上の質)とそれらの強度(量)を融合するのに見事に役にち、誰も予想していなかった成果として世界に注目された。これらにより  $iISS$  論を本格的に、近視眼及び巨視的消散特性の調和に基づく大規模非線形ダイナミクス基礎論へと進化させることに成功し、当初の目的を達成した。さらに先に研究を加速させ、「近視眼的消散性と巨視的消散性の融和可能条件のベクトル表現とスカラ表現の解析」に取り組み、各表現への帰着可能性は表面的には近視眼的消散性の集約形式に依存するが、ベクトル表現に異なる代数演算を持ちこむことで、近視眼的消散性の集約形式に依らずベクトル表現とスカラ表現の両方に成功した。これにより実用性の高い数値計算法への新しい道筋を与えた。開発した数理枠組みは非線形ダイナミクスを対象とした汎用理論であるが、上記の観察は歴史の長い線形大規模システ

ムにおける未解決課題にも解答を与えた。

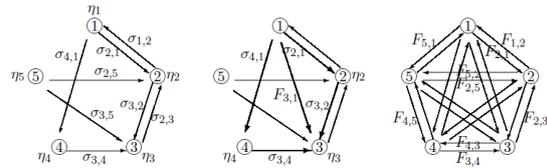


図2. 大規模システムの消散性合成の概念図

##### (2) 近視眼及び巨視的消散性を融和する設計基礎論

大規模システムの消散性の設計においてネットワーク構造制約を取り去ることに成功し、スケラビリティを確保した設計を本格的に可能にした。さらに、無駄時間と不連続性を許容するロバスト設計法の開発にも成功した。マイクロな規模での無駄時間、マクロな規模での無駄時間を集約する方法としてリアプノフ汎関数の設計法の提案に成功したことは、分野研究者に大きなインパクトを与えた。無駄時間要素として、離散無駄時間、分布無駄時間を始め大規模ダイナミクスをしばしば左右する中立型無駄時間を統一的に消散性融和論へ組み込むことを可能にしたことが大きな特徴となった。これらの基盤の上に、アクチュエータの特性変化や制限に対して、システム全体の消散を頑強に確保するようなロバスト化コントローラ的设计法を整備した。具体例としては、グリッドコンピューティングの負荷分散アルゴリズム、および、大規模(電力)グリッドにおける巨大数の電気自動車の充電アルゴリズムを考案し、その有効性の特性解析に成功した。



図3. グリッドコンピューティングの概念図

なお、3. 研究の方法で説明した通り、交付金減額により必要機器の購入が不可能となったため、初年度に図1(申請時のもの)中の工夫(B)は本課題の経費を使わない研究へと移行させて再計画した。本科研費の補助を受けない成果として、計測自動制御学会九州支部学術講演会で1件(2011)、自動制御連合講演会で1件(2012)、計測自動制御学会制御部門大会で3件(2013)の関連発表を行った。

以上の研究成果として構築された数理的枠組みは、各分野の先端科学技術の素質を活かし効果的に融合する大規模なシステムの設計を可能にする新しい道を開いた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Hiroshi Ito, "Disturbance and delay robustness guarantees of gradient systems based on static non-cooperative games with an application to feedback control for PEV charging load allocation", IEEE Trans. Control Systems Technology, 査読有, Vol.21, 2013 (掲載決定), 10.1109/TCST.2012.2208752
- ② Hiroshi Ito, Zhong-Ping Jiang, Sergey Dashkovskiy and Björn S. Rüffer, "Robust stability of networks of iISS systems: Construction of sum-type Lyapunov functions," IEEE Trans. Automatic Control, 査読有, Vol.58, No.5, pp.1192-1207, 2013, 10.1109/TAC.2012.2231552
- ③ Frédéric Mazenc and Hiroshi Ito, "Lyapunov technique and backstepping for nonlinear neutral Systems," IEEE Trans. Automatic Control, 査読有, Vol.58, No.2, pp.512-517, 2013, 10.1109/TAC.2012.2206709
- ④ Hiroshi Ito, Randy A. Freeman and Antoine Chaillet, "Revisiting the iISS small-gain theorem through transient plus ISS small-gain regulation," Asian Journal of Control, 査読有, Vol.15, No.1, pp.11-19, 2013, 10.1002/asjc.538
- ⑤ Hiroshi Ito, Sergey Dashkovskiy and Fabian Wirth, "Capability and limitation of max- and sum-type construction of Lyapunov functions for networks of iISS systems," Automatica, 査読有, Vol.48, No.6, pp.1197-1204, 2012, 10.1016/j.automatica.2012.03.018
- ⑥ Pierdomenico Pepe and Hiroshi Ito, "On saturation, discontinuities and delays in iISS and ISS feedback control redesign," IEEE Trans. Automatic Control, 査読有, Vol.57, No.5, pp.1125-1140, 2012, 10.1109/TAC.2011.2170454
- ⑦ Hiroshi Ito, "Necessary conditions for global asymptotic stability of networks of iISS systems," Mathematics of

Control, Signals, and Systems, 査読有, Vol.24, No.1, pp.55-74, 2012.

- ⑧ Sergey Dashkovskiy, Hiroshi Ito and Fabian Wirth, "On a small gain theorem for ISS networks in dissipative Lyapunov form," European Journal of Control, 査読有, Vol.17, No. 4, pp.357-369, 2011, 10.3166/EJC.17.357-365
- ⑨ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "A small-gain condition for iISS of interconnected retarded systems based on Lyapunov-Krasovskii functionals," Automatica, 査読有, Vol.46, No.10, pp.1646-1656, 2010, 10.1016/j.automatica.2010.06.037

[学会発表] (計 24 件)

- ① 伊藤 博, "むだ時間微分差分方程式ネットワークのロバスト性解析", 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, p.158(4 pages), 福岡, 3月6日, 2013.
- ② Antoine Chaillet, David Angeli and Hiroshi Ito, "Strong iISS: Combination of iISS and ISS with respect to small inputs", The 51th IEEE Conf. Decision Control, pp.2256-2261, Maui, USA, December 11, 2012.
- ③ 伊藤 博, "PEV 充電の系統負荷を軽減する一つのフィードバック調整法のロバスト性解析", 第 41 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.207-210, 葉山, 9月19日, 2012.
- ④ 伊藤 博, "iISS ネットワークの大域漸近安定性の二段階メカニズム - 多変数小ゲインの二役 -", 第 41 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.63-66, 葉山, 9月18日, 2012.
- ⑤ Hiroshi Ito and Frédéric Mazenc, "An iISS formulation for establishing robust stability of dynamical networks with neutral, retarded and communication delay", 2012 American Control Conference, pp.6394-6399, Montréal, Canada, June 29, 2012.
- ⑥ Frédéric Mazenc and Hiroshi Ito, "New stability analysis technique and backstepping for neutral nonlinear systems", 2012 American Control Conference, pp.4673-4678, Montréal, Canada, June 29, 2012.
- ⑦ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "Decentralized iISS robustification of interconnected time-delay systems: a small-gain approach", The 10th IFAC Workshop on

- Time Delay Systems, pp.219-224, Boston, USA, June 24, 2012.
- ⑧ 伊藤 博, ピエールドメニコ・ペペ, "分散型LgV補償による非線形無駄時間系の外乱ロバスト化", 第12回計測自動制御学会制御部門大会, p.0117(4 pages), 奈良, 3月15日, 2012.
- ⑨ 伊藤 博, "iISS ネットワークの新しい定式化による閉路小ゲイン型安定条件とリアプノフ関数の構成", 第12回計測自動制御学会制御部門大会, p.0043(4 pages), 奈良, 3月14日, 2012.
- ⑩ Antoine Chaillet and Hiroshi Ito, "Disturbance rejection in iISS feedback nonlinear systems: a sensitivity trade-off", The 50th IEEE Conf. Decision Control and European Control Conference, pp.6066-6071, Orlando, USA, December 14, 2011.
- ⑪ Hiroshi Ito, "Disturbance and delay robustness of gradient feedback systems based on static noncooperative games with application to PEV charging", The 50th IEEE Conf. Decision Control and European Control Conference, pp.325-330, Orlando, USA, December 12, 2011.
- ⑫ Hiroshi Ito, "Approaching global asymptotic stability of networks of iISS systems via transient plus ISS small-gain convergence", 第40回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.211-216, 大阪, 9月27日, 2011.
- ⑬ Hiroshi Ito, "A robust stability test and a Lyapunov-Krasovskii functional for networks of neutral systems", 第40回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.61-66, 大阪, 9月26日, 2011.
- ⑭ Hiroshi Ito, Zhong-Ping Jiang and Pierdomenico Pepe, "A small-gain methodology for networks of iISS retarded systems based on Lyapunov-Krasovskii functionals", The 18th IFAC World Congress, pp.5100-5105, Milan, Italy, August 30, 2011.
- ⑮ Hiroshi Ito, "An asymmetric small-gain technique to construct Lyapunov-Krasovskii functionals for nonlinear time-delay systems with static components", 2011 American Control Conference, pp.4872-4877, San Francisco, USA, July 1, 2011.
- ⑯ Hiroshi Ito, Zhong-Ping Jiang, Sergey Dashkovskiy and Björn S. Rüffer, "A small-gain theorem and construction of sum-type Lyapunov functions for networks of iISS systems", 2011 American Control Conference, pp.1971-1977, San Francisco, USA, June 30, 2011.
- ⑰ Hiroshi Ito, "Global robustness of gradient control for noncooperative games: PEV Charging, network flow, CDMA power control", 第11回計測自動制御学会制御部門大会, p.186-2-3(7 pages), 沖縄, 3月18日, 2011.
- ⑱ Hiroshi Ito, "An iISS small-gain methodology for dynamical networks and its application to a network computing strategy", 第11回計測自動制御学会制御部門大会, p.175-1-1(7 pages), 沖縄, 3月17日, 2011.
- ⑲ Hiroshi Ito, "Necessary conditions for stability of networks of iISS systems", The 49th IEEE Conf. Decision Control, pp.7401-7406, Atlanta, USA, December 17, 2010.
- ⑳ Hiroshi Ito, Randy A. Freeman and Antoine Chaillet, "Interpreting the iISS small-gain theorem as transient plus ISS small-gain regulation", The 49th IEEE Conf. Decision Control, pp.2432-2437, Atlanta, USA, December 15, 2010.
- ㉑ Hiroshi Ito, "Lyapunov functions for general networks of iISS systems via small-gain criteria: a dissipative formulation", 第39回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.373-380, 大阪, 9月29日, 2010.
- ㉒ Hiroshi Ito, "An asymmetric small-gain theorem for construction of Lyapunov-Krasovskii functionals of nonlinear time-delay systems with static components", 第39回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.169-174, 大阪, 9月27日, 2010.
- ㉓ Hiroshi Ito, "Networks of retarded iISS Systems: Lyapunov-Krasovskii functionals and small-gain conditions", 第39回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.199-204, 大阪, 9月27日, 2010.
- ㉔ Hiroshi Ito, Hiroto Suzuki and Shunji Taketomi, "Delay robustness of CDMA Power Control in the presence of disturbances using iISS small-gain technique", The IEEE Conference on Control Applications, pp.1109-1114, Yokohama, Japan, September 9, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 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  
・准教授  
研究者番号：70274561

### (4) 研究協力者

ブヨン リュッフエル (BJOERN RUEFFER)  
パーダーボルン大学

フレデリック マゼンク  
(FREDERIC MAZENC)  
フランス国立情報学自動制御研究所

セルゲイ ダシュコフスキー  
(SERGEY DASHKOVSKIY)  
エアフルト専門大学

ファビアン ビルト (FABIAN WIRTH)  
ビュルツブルグ大学

オントワン シャレ (ANTOINE CHAILLET)  
パリ第 11 大学

ランディ フリーマン (RANDY FREEMAN)  
ノースウェスタン大学

ピエールドメニコ ペペ  
(PIERDOMENICO PEPE)  
ラクイラ大学

ゾンピン ジャン (ZHONG-PING JIANG)  
ニューヨーク大学

ダビッド アンジェリ (DAVID ANGELI)  
インペリアル大学