

平成 22 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560446

研究課題名（和文） 非線形ダイナミクスの構造と量情報を統融合する制御理論基盤の構築

研究課題名（英文） Formulation of control theory for nonlinear dynamics making full use of structural and quantitative information

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

研究成果の概要（和文）： 科学技術は超微小化やグローバル化し、人工から自然へ遷移している。20 紀世後半は多様性を無視できるスケールで直線画一的(線形)に発展したのと対照的に、21 世紀の技術革新の鍵は曲線多様性(非線形)が支配するスケールに取り組み豊饒なダイナミクスと相対することである。本研究では、制御工学において数値量のみをターゲットとする近年の画一的傾向を打破し、現代のダイナミクスデザイン問題を解決するために非線形システム安定論を進化させて、多様な個性の質的特徴と定量情報を統融合する基盤理論を構築した。

研究成果の概要（英文）： Technologies are advancing toward global and micro objects. In the second half of the 20th century, we looked at sizes in which we could ignore diversity and develop technologies in a straight and uniform (linear) manner. The key to the technological revolution is to tackle an unlimited variety of dynamics which is neither straight nor uniform (nonlinear). To bring about a great change in control engineering whose recent trend has been to focus only on quantitative values in standardized process, this research has developed a fundamental framework for stability theory of nonlinear dynamics, which enables us to integrate quantitative and qualitative information. This interdisciplinary tool helps us solve important dynamics design problems which have remained unsolved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1690,000
2008年度	1,100,000	330,000	1430,000
2009年度	1,100,000	330,000	1430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1050,000	4550,000

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：制御工学, 非線形システム, ダイナミクス, 制御理論, 安定論

1. 研究開始当初の背景
非線形制御の理論研究は 1980 年代後半から

1990 年代半ばにかけて勢いを増し、微分幾何学的手法、バックステッピングやH無限大

制御などが進展した。その枠組の上に数式研究が繰り返されるうちに、本来の非線形ダイナミクスから離れて画一化される傾向となり、21世紀に現れた計算機・情報通信技術、生命科学、環境科学技術等の新しい問題に制御理論は十分有用な回答を与えることができずにいた。同じ形の数式でも本質的に違うダイナミクスを適用すれば数式が導く意味は異なるが、それを区別せず画一的に取り扱うのには無理があった。そこで本研究は、古来の原点に立ち戻って、豊潤な非線形ダイナミクスの個性を分類しながら活用することが重要であると考えた。非線形ダイナミクスの多様な個性に正面から立ち向かう研究には非線形振動、非平衡現象、カオス、分岐などがある。これらの従来研究の大半は一つの現象の解明に終始して解析結果を重視する傾向にあり、手法の提供とデザインに主眼を置く制御工学と大きく異なっていた。解析と設計を区別する思想に基づき、エンドユーザが様々な対象に利用できる普遍的道具を提供することが制御理論の使命である。しかし、普遍的を画一的へとつなげてしまうと、ダイナミクスの多様性を受け入れることができず、制御理論にはすぐ限界が訪れる。そこで本研究は、非線形ダイナミクスの多様な個性に立ち向かい、具体と抽象間の往復運動を通して、個性を規定し駆使してダイナミクスを解析・設計する普遍的数理道具の土台構築を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、科学技術で学際的に現れるダイナミクスのデザイン問題において、様々なエンジニアリング対象に普遍的に適用可能で、エンドユーザに有益な解答を与えるような数理的道具の基礎の構築することとした。具体的には、普遍的を画一的へとつなげてしまわないように、多様なダイナミクスに固有の質・構造を見出す方法を新たに考案し、その計算方法と活用方法について基礎から整備することを目指した。規則的に挙動する電気電子・機械システムだけでなく、カオスという無秩序な挙動も微細な入力でも周期軌道に落ち着く。ダイナミクスが複雑で多様な生命システムにおいても、機能の秩序(ホメオスタシス)が保たれている。そのような多様な秩序性をすべて安定論に帰着するような新安定論を追究した。抽象的数理に留まらず、具体的なエンジニアリング対象を取り上げながら理論開発に還元し、非線形ダイナミクスの構造と量情報を統融合する制御理論基盤の構築を完成させることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 概要

ダイナミクスの挙動解析や設計に便利なりアプノフ安定論では、動きの秩序性や漸近性をリアプノフ関数から直ちに解析できるが、如何にリアプノフ関数を発見するか長年の課題である。要素や結合が線形なシステムにリアプノフ関数発見法は整備されているが、非線形の場合はほとんど未解決である。受動的、セクタ、ゲイン有界など極めて限られたシステムのリアプノフ構成法は古くから知られているが、そのようなマイルドな古典的非線形性ではカバーできないダイナミクスが実際には多い。そこで非線形性の強いシステムでも通常は消散特性が備わっていることに注目し、消散特性から革新的なゲイン特性を規定し、これを活用する独自のリアプノフ関数構成の理論の枠組みを構築することを狙った。これには、理論的研究方法の他に、数多くの計算機シミュレーションや数値・数式計算、計算機上で複数のモデル構築を繰り返す方法を採用した。

(2) 工夫1

本課題は、(A) 質と量を統融合する基礎理論、(B) 生命システムダイナミクス、(C) 情報通信ネットワークダイナミクス、の三要素を有機的に連係させる方法を採用した。理論要素(A)は(B)と(C)の基盤を提供するものであるだけでなく、本研究では、課題の主プロダクトである抽象理論(A)の効果的な研究展開に要素(B)と(C)で獲得した知見を活用した。

(3) 工夫2

本課題研究は代表者1名体制としたが、世界を先導する本研究が期間内に効率よく進むように、視野・知見の拡大によりブレークスルーを見出す工夫をした。最先端外国研究者との意見交換・討議を複数回行った。国際会議の前後を積極的に活用し、さらに、代表者の所属機関に招聘して短期間の研究協力を得た。また、学会研究会・ワークショップやセミナーを共同企画したり活用し、本研究の重要性を提唱した。

4. 研究成果

(1) 質と量を統融合する基礎理論

遂行方法として計画した通り研究を進め、質的特徴と定量情報を統融合する基盤的枠組、つまり、質の規定、量の計算、それらを統合したダイナミクス解析・設計への活用法、を整備することに成功した。また、不均一な質の特徴化と活用法の整備も行った。フィードバック、カスケード、時間遅れをキーワードとして、それらを統一して包含する体系を確立するとともに、それらの一つ一つに特化させたときに現れる相違事項について整理し

た。これらが「体系の構築」となった理由は、提案手法に対して「できる（十分性）」だけでなく「必要かどうか、限界はどこか（必要性）」を明らかにしたことであり、その数理的アプローチ自体も斬新であることから、世界的に注目を浴びた。このような主プロダクトの成果は、どれも世界最高峰の論文誌に掲載された。2008年の計測自動制御学会制御部門パイオニア賞の一つの受賞事由ともなった。

(2) 情報通信ネットワークダイナミクス

このダイナミクスは生命システム(C)と異なり、非線形・非対称特性が人工的でそれを工学的に活用できることが特徴であると分かった。そして、CDMA（符号分割多重接続）無線通信における伝達遅れと外乱に対する電力制御の安定性の解析に成功した。この世界に類のない成果は、斬新な基盤理論(A)の開発が可能にしたものであるとともに、(A)の有効性の実証にもなった。エッジスーパーバイザ型のTCPネットワークフロー制御にも取り組んだ。CDMA電力制御と質的に同じダイナミクスであることを突き止め、セクション・セル間の干渉の変化や伝達遅れがダイナミクスの質的变化を発生させることに注目し、その解析に成功した。

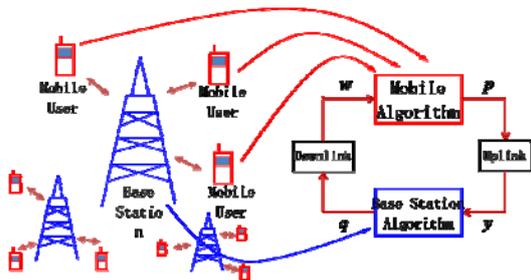


図1. CDMA 無線通信電力制御

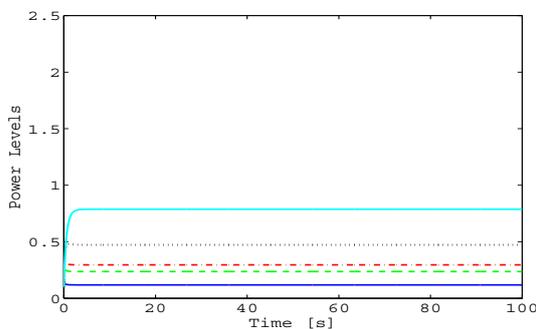


図2. モバイル電力の時間変化

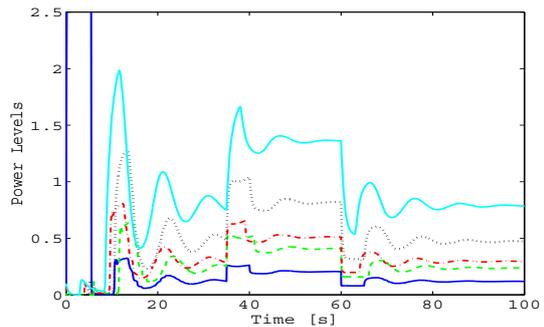


図3. 遅れと外乱がある場合の電力変化

(3) 生命システムダイナミクス

ショウジョウバエの概日リズムを取り上げ、独自に整備した基礎論(A)を活用して質的不均一な安定度を特徴化することで、タンパク質のリズム発生条件を解析的に導くことに世界で初めて成功した。これにより、国際会議でSICE 2008 International Awardを受賞した。また、活性汚泥下水処理の制御も取り扱い、酸素量や返送・循環量や一時貯水などの操作する制御法の開発に、非線形特性を活かすモデルベース制御設計の道を拓いた。

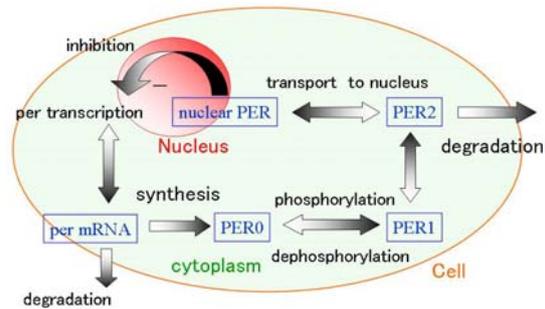


図4. 概日リズムの蛋白質ネットワーク

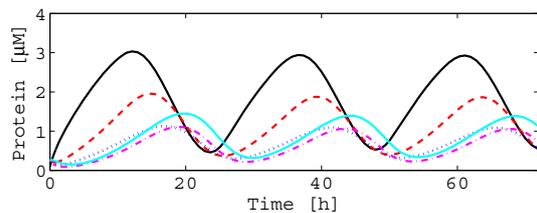


図5. 蛋白質の時間変化(転写率 0.76)

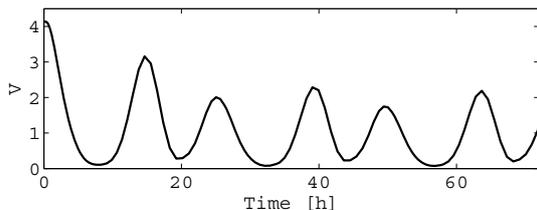


図6. 概日振動を検出したリアプノフ関数

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 3 件)

- ① Hiroshi Ito, "A Lyapunov approach to cascade interconnection of integral input-to-state stable systems", IEEE Trans. Automatic Control, 査読あり, Vol. 55, No. 3, pp. 702-708, 2010.
- ② Hiroshi Ito and Zhong-Ping Jiang, "Necessary and sufficient small gain conditions for integral input-to-state stable systems: A Lyapunov perspective", IEEE Trans. Automatic Control, 査読あり, Vol. 54, No. 10, pp. 2389-2404, 2009.
- ③ Hiroshi Ito, "A degree of flexibility in Lyapunov inequalities for establishing input-to-state stability of interconnected systems", Automatica, 査読あり, Vol. 44, No. 9, pp. 2340-2346, 2008.

[学会発表] (計 25 件)

- ① Hiroshi Ito, "Several necessary conditions for stability of networks of iISS systems", 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, p.174-2-5(6 pages), 熊本, 3 月 17 日, 2010.
- ② Hiroshi Ito, Hiroto Suzuki and Shunji Taketomi, "iISS and ISS of CDMA power control with respect to disturbances in the presence of delays: A Lyapunov-Krasovskii approach", 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, p.174-2-2(6 pages), 熊本, 3 月 17 日, 2010.
- ③ Hiroshi Ito, Randy A. Freeman and Antoine Chaillet, "A two-phase interpretation of the iISS small-gain theorem", 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, 熊本, p.166-1-1(6 pages), 3 月 16 日, 2010.
- ④ Hiroshi Ito, Sergey Dashkovskiy and Fabian Wirth, "On a small gain theorem for networks of iISS systems", The 48th IEEE Conf. Decision Control, pp.4210-4215, Shanghai, China, December 17, 2009.
- ⑤ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "Construction of Lyapunov-Krasovskii functionals for interconnection of retarded dynamic and static systems via a small-gain condition", The 48th IEEE Conf. Decision Control, pp.1310-1316, Shanghai, China, December 16, 2009.
- ⑥ 鈴木啓人, 武富俊至, 伊藤博, "CDMA 送信電力制御の外乱及び通信遅れに対するロバスト性の解析", 第 28 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, pp.3-6, 11 月 28 日, 福岡, 2009.
- ⑦ Hiroshi Ito, "A solution to the state-dependent scaling problem for a cyclic network of iISS systems and its Lyapunov function", 第 38 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.217-222, 9 月 15 日, 大阪, 2009.
- ⑧ Hiroshi Ito, Sergey Dashkovskiy and Fabian Wirth, "Some results on construction of Lyapunov functions for networks of iISS systems", 第 38 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.113-118, 9 月 14 日, 大阪, 2009.
- ⑨ Sergey Dashkovskiy, Hiroshi Ito, Fabian Wirth, "On a small gain theorem for ISS networks in dissipative Lyapunov form", The 10th European Control Conference 2009, pp.1077-1082, Budapest, Hungary, August 24, 2009.
- ⑩ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "Further results on Lyapunov-Krasovskii functionals via nonlinear small-gain conditions for interconnected retarded iISS systems", 2009 American Control Conference, pp.5452-5458, St. Louis, USA, June 12, 2009.
- ⑪ Hiroshi Ito, "Construction of Lyapunov-Krasovskii functionals for time-delay systems via iISS small-gain condition with static components", 第 9 回計測自動制御学会制御部門大会, p.WB-3(6 pages), 東広島, 3 月 4 日 2009.
- ⑫ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "A Lyapunov-Krasovskii functional for interconnected iISS systems with time-varying distributed and discrete time-delays", 第 9 回計測自動制御学会制御部門大会, p.WB-2(6 pages), 東広島, 3 月 4 日 2009.
- ⑬ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "A small-gain condition for integral input-to-state stability of interconnected retarded nonlinear systems", The 47th IEEE Conf. Decision Control, pp.19-24, Cancun, Mexico, December 9, 2008.
- ⑭ Hiroshi Ito, "A Lyapunov approach to integral input-to-state stability of

- cascaded systems with external signals", The 47th IEEE Conf. Decision Control, pp.628-633, Cancun, Mexico, December 9, 2008.
- ⑮ 谷宏幸, 伊藤博, "エッジ型帯域修正ネットワークにおける収束性のリアプノフ関数による一解析", 第 27 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, p.75-78, 那覇, 11月30日 2008.
- ⑯ Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe and Zhong-Ping Jiang, "Construction of Lyapunov-Krasovskii functionals for time-delay interconnected systems via iISS small-gain condition", 第 37 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.243-248, 霧島, 9月18日 2008.
- ⑰ Hiroshi Ito, "Lyapunov functions for networks of asymmetrically iISS systems and circadian oscillations", SICE Annual Conference 2008, pp.3283-3288, Chofu, Japan, August 22, 2008.
- ⑱ Hiroshi Ito, "Bilaterally flexible Lyapunov inequalities for nonlinear small-gain method covering iISS systems", The 17th IFAC World Congress, pp.2460-2465, Seoul, Korea, July 7, 2008.
- ⑲ Hiroshi Ito and Zhong-Ping Jiang, "Small-gain conditions and Lyapunov functions applicable equally to iISS and ISS systems without uniformity assumption", 2008 American Control Conference, pp.2297-2303, Seattle, USA, June 12, 2008.
- ⑳ Hiroshi Ito, "Integral input-to-state stability of nonlinear systems in cascade: A Lyapunov approach", 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, p.072-3-3(6 pages), 京都, 3月7日, 2008.
- ㉑ Hiroshi Ito, "A Lyapunov approach to a necessary condition for circadian oscillations", 信学技報, Vol.107, No.399, pp.37-42, 福井, 12月19日, 2007.
- ㉒ Hiroshi Ito and Zhong-Ping Jiang, "A Lyapunov function for interconnected ISS systems derived from dissipation inequalities", The 46th IEEE Conf. Decision Control, pp.4465-4470, New Orleans, USA, December 13, 2007.
- ㉓ Hiroshi Ito, "Stability analysis of interconnected systems with exogenous signals via bilaterally flexible Lyapunov inequalities", 第 36 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.45-50, 札幌, 9月5日, 2007.
- ㉔ Hiroshi Ito and Zhong-Ping Jiang, "A

unified Lyapunov function to establish stability of interconnected iISS and ISS systems with a non-uniform small-gain condition", 第 36 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, pp.39-44, 札幌, 9月5日, 2007.

- ㉕ Hiroshi Ito, "Asymmetric iISS and ISS properties yielding stability of interconnected systems and an application to a circadian model", 2007 American Control Conference, pp.3041-3046, New York City, USA, July 12, 2007.

[その他]

- ① 藤原崇弘, 伊藤博, "下水処理システムにおけるPI型曝気量制御のシミュレーション比較", 第 28 回計測自動制御学会九州支部学生発表交流会, p.2248, 福岡, 11月2009.
- ② 伊藤博, "安定性と安定化-初歩からの概観", 計測自動制御学会制御部門・非線形ダイナミクス制御ワークショップ 2008 資料, pp.E1-E14, 11月5日, 2008.
<http://sclab.naist.jp/diversity/>

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

オントワン シャレ (ANTOINE CHAILLET)
セルゲイ ダシュコフスキー
(SERGEY DASHKOVSKIY)
ランディ フリーマン (RANDY. A. FREEMAN)
ゾンピン ジャン (ZHONG-PING JIANG)
ピエールドメニコ ペペ
(PIERDOMENICO PEPE)