

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420422

研究課題名(和文) エネルギー型情報縮集約原理の開発に基づく構造的ネットワーク設計論

研究課題名(英文) A methodology for designing dynamical networks based on energy structure via contraction and aggregation principle

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ICTは、あらゆる機器の要素間作用を物理伝達から電子信号伝達に置き換えている。ICT化への期待は、ネットワークを通じた情報共有による効率化・安全化にあるが、無造作なネットワーク化は停滞や動揺による効率低下をもたらす、予期に反する不安定状態をまねく。相互作用の複雑な連鎖と、電子信号伝達によりエネルギー保存が失われることが主原因である。本研究は、効率化・安全化を保证するためのネットワーク設計基礎論を開発した。構成モジュール毎のエネルギー情報に基づく「縮約」と、モジュール相互のエネルギー収支の「集約」からなる原理を整備し、構造からネットワーク設計を可能にする解析設計の数学的枠組みを構築した。

研究成果の概要(英文)：In modern societies experiencing rapid development of information and communication technology, physical connections between components are being replaced by digital artificial connections. This technological direction is motivated by efficiency and safety. However, uncoordinated communication between components and resources often results in suspension of service and even runs into catastrophic collapse. This research perused a mathematical methodology for designing dynamical networks based on energy structure. To cover various interactions between physical and artificial modules, the developed principle of contraction and aggregation has been generalized further to cover infinite-dimensional and stochastic systems as well as finite-dimensional and deterministic systems. The results provide a flexible modular approach which allows us to address nonlinearities such as limitation and saturation in designing dynamical networks.

研究分野：制御システム理論

キーワード：非線形システム制御 ダイナミクス ネットワーク 安定論 制御理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会・科学的背景

産業革命以来、電気電子機械等の機器はそれぞれ個別の道具として開発されてきたが、現代社会では、多数の機器と人間活動を統合した高効率で安全なシステムの開発が望まれている。実際、あらゆる場面で、膨大な計測・センサの導入や情報の共有化 (ICT 化) が加速している (図 1)。これにより、物理的距離とは無関係にあらゆる物事が連鎖し、

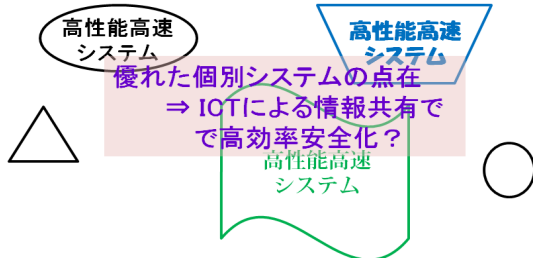


図 1 ICTによる情報共有による問題発生

一つの結果が別の原因となったネットワークが形成され、人間活動も干渉要素に入ったダイナミクスを日常的に我々は体感している。車が普及し事故や渋滞等という新問題に直面した過去の経験と類似している。情報通信システムの障害や事故、クラウドサービスの不具合・輻輳や停止、物流や航空システムの遅延や停止、自由化先進国における大停電、非効率な社会インフラ投資、ビルの過大な空調費用や電力系統への負担などがその一部である。ICTによって共有化された膨大な情報の活用は、煩雑かつ大量なフィードバックとなり、大規模・複雑なネットワークを形成する。フィードバックとは、ある物事の結果である事象が他の物事の結果を経由して原因として元に戻って来る構造である。作用し合う事象が同時進行 (コンカレント性) するため、フィードバックは振動や発散などの破壊の危険性を持つことが、制御理論では知られている。つまり、ICT化において情報が不適切に活用された時に、システムの挙動が悪化し、それを我々は実際に感じている。その原因は個別機器の性能が低いことではない。ICT化を効率化・安全化技術に結び付けるためには、要素相互の大規模・複雑な連鎖を視野の中心に置いた簡明な大域的ネットワーク設計論の整備が必要である (図 2)。

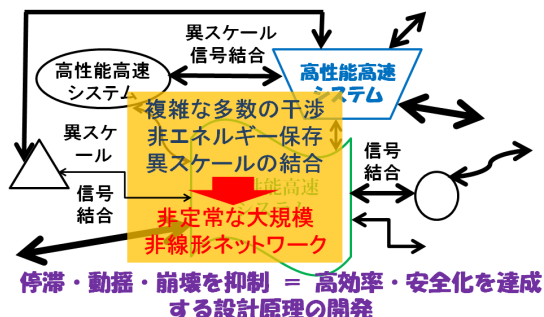


図 2 連鎖を考慮したネットワーク設計

ICT化は、あらゆる機器の要素間を物理伝達から電子信号伝達に置き換えることを基底とした技術である。ある要素の事象をデジタル信号に変換して別の要素へつなげることで、高操作性と空間的柔軟性が確保 (by-wire 技術) できるだけでなく、遠隔の多数の要素と直接的に短時間で結ぶことが可能となる。電子信号化により、物理的にありえない遠隔・多数の結合が生まれるだけでなく、物理結合で当然に成り立つエネルギー保存則が成立しなくなる。物理結合のみからなるネットワークは安定であるが、電子信号処理による結合によってエネルギーバランスを崩すようなネットワーク化をしてしまうと、停滞や動揺により効率が低下し、予期しない不安定状態に陥る。また、電子信号は異なったスケールの物事の事象も結び付けることができるため、非線形性が無視できなくなり、非線形性がダイナミクスを支配する (図 3)。

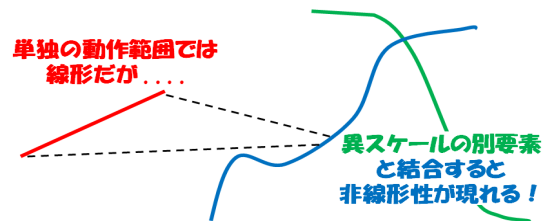


図 3 異スケール結合による非線形性出現

そこで、本研究は、大規模・複雑な相互干渉に直接的に立ち向う構造からのネットワーク設計を可能にするために、非線形も許容したエネルギーの収支バランスに基づいたコンパクトな数理的設計原理の構築を目指した。

(2) 関連研究の状況

非線形なエネルギー収支の視点からネットワーク構造を整理する設計基盤理論は、国内には研究はなく、関連研究が活発な世界でも線形システムなどの一部の場面に限って研究が活発化する傾向にあった。一方、本研究代表者が中心となった国際研究チームは、エネルギー型の特徴化を用いることで非線形要素を持つネットワークの安定性が導けることを 2013 年に見出していた。本研究はこれを予備成果とする土台の上に、集約という概念も取り入れてエネルギー型情報縮集約原理として体系化し、構造的ネットワーク設計の基礎論の構築を目指した。

2. 研究の目的

(1) 目的

従来のシステム論において標準である可制御性と可観測性という概念ではなく、エネルギー情報のみを活用してコンパクトな設計原理を導くことを目指した。これにより、可制御と可観測の概念からは出てこない有益なネットワーク構造の抽出と、大胆な縮約の 2 点を可能にすることを狙った。このような発想に基づけば、大規模なネットワークの設



において、発表論文数が当初の予想を超えた。

### (2) 縮約

ネットワークをモジュールに分解するプロセスにおいて、モジュールの振る舞いの特性を縮約するための方法の開発と、その有効性の検証を行った。これには、本研究代表者がこれまで世界を先導して開発を進めてきた積分入力状態安定という概念を活用した。成果の一つは、モジュール毎に振舞いを特徴化するような消散不等式を選択する際に、ネットワーク構造に合わせた適切なエネルギー供給関数を決定する縮約法である。これは、縮約だけに集中した個別の研究ではなく、集約の研究、そして、ネットワーク設計の研究において効果的な方法を追究したところ、新しい縮約の発想に至ったものであり、定めた計画の効果が発揮できた結果である。つまり、計画した8項目構成が研究を促進させ、ブレークスルーを可能にした。開発した新しい縮約法は、代数的計算と数値計算を効果的に活用できる道筋を与えた。さらに、ネットワーク設計において分散型計算やロバスト化補償を可能にする手段にもつながるなど、開発した縮約法は、本研究の多くの項目と結びつき、目標であるネットワーク設計のためのエネルギー型縮約原理の軸となった。これらは、5節「主な発表論文等」の雑誌論文1、学会発表3と10、及び、2017年の1月にニューカッスル大学で行った成果発表セミナーにおいて報告している。

二つ目の成果は、確率ノイズを許容する縮約法の開発の成功である。平均という工学・物理的概念に相当する時間毎の期待値に基づく視点、経験や観察という立場から過程毎の軌道の振舞いに基づく視点の2通りから縮約法を導いた。どちらの方法でも、確率ノイズのない場合の縮約法を特殊ケースとして包含するように完成させた。また、積分入力状態安定という概念だけではなく、積分ノイズ状態安定という新しい概念を提案し、それに基づく縮約法の提案にも成功した。これらは、5節「主な発表論文等」の雑誌論文2と3、学会発表2と9で主に報告した。

空間分布するシステムのエネルギー型縮約については、Mironchenko 博士と勉強会および共同研究を行い、縮約方法に大きな進展があった。特に集約を事前に考慮して縮約のための空間を選ぶことが大切であることを発見したことは重要だった。これらは無駄時間を特殊ケースに包含するような計画通りの成果となった。しかし、最終課題である境界収支ではなく、分布型のエネルギー収支に基づく縮約に限られる成果となったため、本科学研究で掲げた成果として学会等に報告するまでには至らなかった。

### (3) 集約

モジュール単位の縮約によって得られた特徴を、ネットワーク全体の特徴として組み

立てる集約方法を、積分入力状態安定システムの結合問題を拡張した問題として定式化し、それを解く方法を開発した。この際、入出力のような結合信号を用いる集約ではなく、完全にエネルギーに基づく集約に徹底したことで、従来のような結合信号の空間の不整合(図5)に阻まれることのない集約に成功した。

入力空間 $X_i$ に対して自然な位相を入れた空間 $X_o$ では写像: $X_i \rightarrow X_o$ として定義できないダイナミカル要素  
例: 飽和、限界、生化学反応速度等を有するダイナミクス

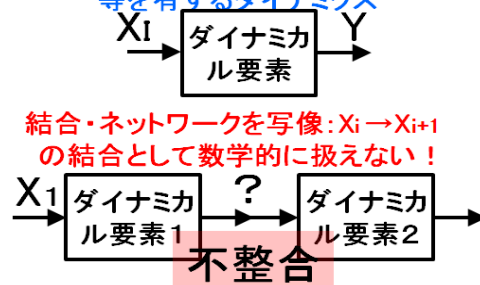


図5 結合信号の空間不一致

集約問題を単調システム論として定式化・解決した。これは、本研究の大きな成果である。これまでの単調システム論は、消散システム論などと同様に、既成理論に統一的な解釈を与える発想体系にすぎず、個別の具体的問題に新しく解法を与えるような道具ではなかった。単調システムに関わる道具開発の多くの研究は、線形システムの数値計算に限られ、単調性の活用や解釈につながるような解析的なものではなかった。本研究で取り組む要素のつながりから形成されるネットワークシステムでは、線形性という人工画一的な特徴は切望的、あるいは、極めて稀であることから、非線形性を効果的に取り込む新展開が必要であった。つまり、本研究の課題は、従来の単調システム論では解決できなかった。本研究で完成させた縮約法は、非線形システムに対し単調性を活用する道具を提供することとなり、新しい単調システム論を切り開いた。その成果は、5節「主な発表論文等」の雑誌論文4、学会発表11などで報告した。これは、単調システムの研究分野

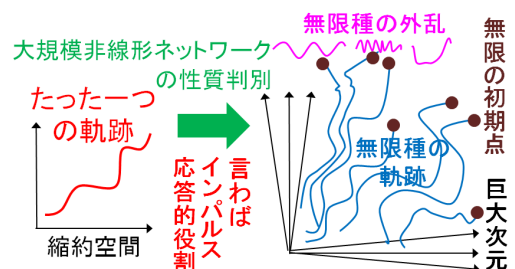


図6 単調システムの一軌道による特徴付け

に衝撃を与え、まだ、その斬新性と達成度に追従できない研究者も多く、今後の分野で

きな広まりが期待できる大きな成果である。単調性を活用した集約の利点の一つは、たった一軌道からシステムの全振る舞いの特徴付ける点である(図6)

集約の計算方法の研究では、縮約との対応の最適化を図った定式化を導き、その成果を5節「主な発表論文等」の雑誌論文1、学会発表1、3、7、10、平成27年の12月に開催した公開型国際ワークショップなどで報告した。

確率ノイズがある環境においては、積分入力状態安定と積分ノイズ状態安定という全く別の指針に基づいた縮約から、形式的に共通の集約方法を引き出すことに成功した。この統一は簡単ではなかったが、確率ノイズがない確定システムを特殊ケースとして包含する定式化を追究することから自然に達成することができたことは、興味深い発見となった。したがって、提案した確率ノイズを取り扱う縮約法は、代数的計算と数値計算を効果的に活用できる道筋を与える。その成果は主に、5節「主な発表論文等」の雑誌論文2と3、学会発表2と9で報告した。

#### (4) ネットワーク設計・補償への活用

縮約法、および、集約法として個別に開発した方法を、エネルギー型縮集約原理として統一した。その過程で、個別に取り組んで来たシステムクラス(有限次元、無限時限(無駄時間、分布定数、確定、確率))を、統一的に議論・処理する表現を導き出し、システム空間の横方向へのつながりを完成させた。これにより、抽象的に十分に拡張された形で、積分入力状態安定性という特徴で分類されたモジュールを結合する方法論に行き着いた。エネルギーの結合においては、和型の結合と最大型の結合の2つを導き出し、それらの長所と短所を数理的に解析し、整理した。これらは新しい単調システム論を構成する鍵となり、その成果は分野に強いインパクトを与え、これに追随しようとする研究が世界で始まった。しかし、本研究のように非線形性を取り扱う研究は極めて少ない。さらに、本研究が取り扱う非線形性は入出力の空間が一致する必要がないことから、後発研究と比べても、本研究の成果の達成度・有用度は数段上回っている。これらの成果は、5節「主な発表論文等」の雑誌論文1、2、4、学会発表1、3、4、5、6、7、などで報告・活用した。さらに、確率ノイズを持ったネットワークに対しては、確率ノイズをうまく使った補償が、分散型の設計にも有用な頑強なネットワークを構成につながることを学会発表8で明らかにした。

#### 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4件)

Hiroshi Ito and Christopher M. Kellett, ``iISS and ISS dissipation inequalities: preservation and interconnection by scaling'', *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, Vol.28, No.17, 1-36, 2016, 査読有.  
DOI: 10.1007/s00498-016-0169-2

Hiroshi Ito and Yuki Nishimura, ``An iISS framework for stochastic robustness of interconnected nonlinear systems'', *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.61, No.6, pp.1508-1523, 2016, 査読有.  
DOI: 10.1109/TAC.2015.2471777

Hiroshi Ito and Yuki Nishimura, ``Stability of stochastic nonlinear systems in cascade with not necessarily unbounded decay rates'', *Automatica*, Vol.62, No.12, pp.51-64, 2015, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.automatica.2015.09.011

Gunther Dirr, Hiroshi Ito, Anders Rantzer and Bjoern S. Rueffer, ``Separable Lyapunov functions: Constructions and limitations'', *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series B*, Vol.20, No.8, pp.2497-2526, 2015, 査読有.  
DOI: 10.3934/dcdsb.2015.20.2497

#### [学会発表](計18件)

Hiroshi Ito, ``Lyapunov functions to avoid squashed sublevel sets for interconnections containing non-ISS components'', *The 20th IFAC World Congress, Toulouse (France)*, July 12, 2017, 発表確定, 査読有.

Hiroshi Ito, ``Path-wise bounds and iISS of nonlinear systems exposed to global stochastic noise'' *The 20th IFAC World Congress, Toulouse (France)*, July 12, 2017, 発表確定, 査読有.

Hiroshi Ito, ``A small-gain-type improved criterion via preservation of iISS/ISS dissipation inequalities'', *2017 American Control Conference, Seattle (USA)*, May 24, 2017, 発表確定, 査読有.

Hiroshi Ito, ``Lower-power Lyapunov functions for networks of integral input-to-state stable systems'', The 55th IEEE Conf. Decision Control, pp.471-476, Las Vegas (USA). December 14, 2016, 査読有.

DOI: 10.1109/CDC.2016.7798313

Hiroshi Ito, ``Allowing nonlinear stability margins in interconnection of iISS dissipation inequalities'', The 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems'', pp.933-938, Monterey (USA), August 25, 2016, 査読有.

DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.284

Hiroshi Ito, ``Stability of systems coupled through noisy mediums'', 2016 American Control Conference, pp.2983-2988, Boston (USA), July 7, 2016, 査読有.

DOI: 10.1109/ACC.2016.7525373

Hiroshi Ito, ``Allowing vanishing stability margins in preservation of (i)ISS dissipation inequalities by scaling'', 2016 American Control Conference, pp.1130-1135, Boston (USA), July 6, 2016, 査読有.

DOI: 10.1109/ACC.2016.7525067

Hiroshi Ito and Yuki Nishimura, ``Integral input-to-state stabilization by stochastic noise generated in bounded regions'', The 54th IEEE Conf. Decision Control, pp.1835-1840, 大阪国際会議場 (大阪・大阪), Japan, December 15, 2015, 査読有.

DOI: 10.1109/CDC.2015.7402477

Hiroshi Ito and Yuki Nishimura, ``A Lyapunov approach to iISS and iNSS for stochastic systems in path-wise probability'', 2015 American Control Conference, pp.5986-5991, Chicago (USA), July 3, 2015, 査読有.

DOI: 10.1109/ACC.2015.7172279

Hiroshi Ito and Christopher M. Kellett, ``Preservation and interconnection of iISS and ISS dissipation inequalities by scaling'', The 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, pp.776-781, Saint Petersburg (Russia), June 25, 2015, 査読有.

DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.282

Hiroshi Ito, Bjorn S. Ruffer and Anders Rantzer, ``Max- and sum-separable Lyapunov functions for monotone systems and their level sets'', The 53rd IEEE Conf. Decision Control, pp.2371-2377, Los Angeles (USA), December 16, 2014, 査読有.

DOI: 10.1109/CDC.2014.7039750

〔その他〕

九州工業大学情報工学部システム創成情報工学科伊藤博研究室ホームページ  
<http://palm.ces.kyutech.ac.jp>

Fukuoka Workshop on Nonlinear Control Theory 2015 (FNT 2015)

<http://palm.ces.kyutech.ac.jp/fnt/>

## 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  
・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

クリストファー ケレット (KELLETT, Christopher) ニューカッスル大学

ブヨン リュッフエル (RUEFFER, Bjoern) ニューカッスル大学

ゲウンター ディル (DIRR Gunther) ビュルツブルグ大学

アンドリ ミロンチェンコ (MIRONCHENKO, Andrii) ビュルツブルグ大学

アンドラス ランツァー (RANTZER, Andras) ルンド大学

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

ゾンピン ジャン (JIANG, Zhong-Ping) ニューヨーク大学

タック ヌゴック ディン (DINH, Thach N.) パロンシエンヌ・エ・デュ・エノー = カンブレシ大学

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