様　式　C－19、F－19、Z－19　（共通）

# 科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 28 年　 6 月 14 日現在

機関番号：１４５０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2013～2015
課題番号：２５４００１６４

研究課題名（和文）境界制御系に対するスペクトル構造の幾何学的・代数学的研究：複雑干渉系を中心として

研究課題名（英文）Geometric and algebraic studies on spectrums arising from boundary control systems -- a viewpoint of complex and coupling sustems

研究代表者
南部　隆夫（Nambu, Takao）

神戸大学・システム情報額研究科・名誉教授

研究者番号：４０１５６０１３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，線形放物系，および放物系と双曲系の中間に位置するC_0-半群を生成する線形系に対して，フィードバック安定化機構の構築を，境界観測 - 境界制御機構のもとで，代数学的・幾何学的アプローチにより行った．その結果，被制御系に対する何らの有限次元近似系の存在をも仮定しない（たとえば，係数閉作用素に関わる Riesz基底の存在も仮定しない）．無限次元作用素方程式を基盤に，統一された原理に基づく安定化論を構築できた．また，系の状態を安定化しつつ，より速い減衰率をもつ自明でない出力安定化を達成する制御系についての新しい知見を得た．

研究成果の概要（英文）：Stabilization problems for infinite-dimensional linear control systems are studied through algebraic/geometric approaches. The systems consist of parabolic ones generating analytic semigroups, and of those generating C_0-semigroups lying between parabolic and hyperbolic systems. Control laws are based on the scheme of boundary observation/boundary feedback. As for the closed coefficient operators of the systems, no assumption is made on the existence of any finite-dimensional approximation such as a Riesz basis. The stabilization law is based on a unified principle via an infinite-dimensional operator equation, the so called Sylvester equation, and turns out to be applied to a fairly broad class of linear systems. Another specific feedback control law is also constructed, such that, while the system being stabilized, a class of non-trivial outputs decay faster than the state.

研究分野： 偏微分方程式に対する制御理論

キーワード： 安定化論　擬似内部構造　無限次元作用素方程式　境界制御系　C_0-半群論

## １．研究開始当初の背景

放物型や双曲型制御系の安定化の研究においては，それぞれの型に応じた個別の手法で安定化機構が構築されてきた．放物型制御系については，1970 年代より (i) static feedback 制御機構に始まり，(ii) dynamic feedback 制御機構のもとでの関数解析学的手法に基づく研究が今日まである程度系統的に進められてきた．しかしながら，大半の研究においては，無限次元系に対する何らかの（定量的評価が可能な）有限次元近似系の存在を本質的に仮定している．一方，エネルギー減衰の全くない双曲型制御系（純粋な波動）については有限の伝播速度の存在や全固有値の多重度の上限の有界性の要求等，制御を行う際の構造上の限界があり，たとえば領域の幾何学的形状に対応した手法を取り入れた static feedback 機構のもとでの特殊な研究に留まっている．工学に現れる無限次元系は大変複雑，多様であり，放物型と双曲型の中間に位置する系（たとえば時間遅れを伴う系），何らの有限次元近似系の存在を期待できない系や，無限次元系と集中定数系 (ODE) との複雑な干渉系として記述される場合も多い．それらの系は従来の手法の枠組みからはみ出ることがある．純粋な波動以外のより広範な系に対する統一された安定化論の構築には，代数的・幾何学的側面からのスペクトル構造に着目した効率的（ある種の最適制御論的）で統一された原理に基づくフィードバック制御機構の構築が必要とされている．しかも，数学上のみならず工学上も実現可能な制御機構であることが求められている．

## ２．研究の目的

本研究では計画当初，つぎの研究を推進することを目的とした：

(1) 放物型境界制御系と集中系 (ODE) との干渉系，付随する干渉を受けた楕円型作用素の代数的・幾何学的スペクトル構造の研究,

(2) 上記のスペクトル構造に応じて，干渉の結びつきを反映した dynamic feedback 機構のもとでの新たな安定化論の構築,

(3) エネルギー減衰を伴う双曲系（時間 2 階発展方程式系）に対して(i) static-, (ii) dynamic-フィードバック制御機構での安定化の研究,

(4) そのスペクトラムが扇状領域 (sector) からはみ出るようなより広範な線形系に対するスペクトラム再配置問題の研究.

より具体的には，本研究ではつぎの項目について明らかにしようと計画した：

上記(1), (2)では，分数次 Sobolev 空間を記述の言語とし，直積空間における楕円型作用素の特徴づけ，干渉系を構成する 2 つの系のスペクトラムから系全体のスペクトラムの確定（2 つのスペクトラムが互いに共通部分を持たなければ問題は比較的単純であり，1997 年には作用素方程式（Sylvester 方程式）の問題としての成果がすでにある）．スペクトラム間に共通部分がある場合の研究に興味がある．　このような楕円型作用素には集中系 (ODE) からの影響で，有限次元部分構造に Jordan 構造が標準的に登場するため，その構造解明に大きな代数的な興味がある．

双曲系（時間 2 階発展方程式系）については，移動クレーンや柔軟な多リンクロボットアームの安定化制御等，典型的な応用があり，上記(1), (2)の問題とも関連している．関数解析学的手法と異なり，境界の幾何的形状に応じた解の $L^p$-空間におけるエネルギー評価を求める幾何学的手法の開発．H. J. Zwart らにより提案された port-Hamiltonian 法の本質的拡張.

Static feedback 制御機構のもとでの安定化は最近再び，V. Barbu や M. Krstic らにより線形化された流体方程式，熱拡散方程式に対して研究が進められているが，工学上極めて重要なセンサー（観測器），アクチュエータ（制御器）の台 (support) に関する考慮が一切ない．理想的な台は，δ-関数に代表されるような１点，あるいはそれに近いものであるが，もしそれらの台が空間全体に分布していれば，物理的設計がほぼ不可能になってしまう（Krstic による１次元拡散方程式の static 制御機構による安定化では，台は確かに区間全体に位置している）．南部の最近の知見では，安定化の結果そのものは弱いながらも compact support を考慮した肯定的成果が得られている：これは不安定固有値間に代数的拘束がある場合であり，代数的拘束（特異性）の除去，緩和に関する研究の推進.

Dynamic feedback 制御機構のもとでの動的補償器の次元の推定問題の研究の推進．推定問題には，制御器，観測器のある種の対称性，非干渉性等が関わってくると予想され，これら性質をフーリエ解析的側面と結びつけて行う．また，補償器の数値近似スキームの研究の推進．これは，有限要素法による無限次元系の近似における制御系の精密な誤差解析を含む.

非線形境界制御系における安定化：
航空機は，高度により動的特性が変化する系である．このように特性パラメターが時変である制御系では，通常の非線形系とは大きく異なり，『時間変化のパラメターは事前には与えられず，未知』という拘束を n 伴う．変化する未知パラメターを常に推定（同定）しながら，それを制御に反映する機構（適応制御機構）が必要である．被制御プラントが線形系でも，制御則は必然的に非線形になる．ODE モデルではある程度の工学的成果は得られている．無限次元性特有の根本的な難点は未解決であり，微分方程式論における時間大域論として興味ある問題である．

その他，平成 24 年度以前の研究課題として取り上げながら十分な成果が得られなか

った課題として，複雑系の安定性を測る適切なリヤプノフ関数の構築，境界制御におけるように無限次元性が本質的に現れる非線形系の安定化の幾何学的研究の推進．また，非ホロノミック拘束のある非線形境界制御系の定式化，安定化の研究を，Lie 代数との関連のもとで推進する．

３．研究の方法
(平成 25 年度)

１．干渉系のスペクトル構造，および対応する安定化制御機構の研究については先ず，弾性特性をもつ長いアームの境界（先端）に剛体が力学的な拘束を受けながら接続されているような比較的単純な PDE-ODE 干渉系モデルから研究を始める．

２．極めて弱い減衰項を内包する線形系，すなわち減衰のない純粋な波動に近いあるクラスの 2 階発展方程式系に対する安定化，及び安定性判別に関して，数学的のみならず物理的に意義のある新しい代数的判定条件の研究を,作用素 L のスペクトラムの growth bound ω_0($L$), spectral bound σ_0($L$) に関連付けて行いたい．実際，ω_0($L$)=σ_0($L$) となる spectrum determined growth cond.（SDG 条件)が満たされるか否かが双曲系の安定性判別に重要な役割りを果たすため，それを切り口にして，有力な手段と予想される古典 Fourier 解析を基盤に研究を行いたい．また，対応する有限次元モデル系を利用したフィードバックゲインの最適化の研究も行いたい．

３．双曲型制御系の一つの典型として，2 層あるいは 3 層から成るバイオプロセスへの安定化制御系の構築を考える．閉ループ系では連続スペクトラムが現れるため，放物系に対する研究とは数学的様相が異なることが予想される．LaSalle の不変原理の無限次元版（Hale）を経由する手法では，漸近安定性程度の弱い結果は予想されるが，微分不等式による巧妙なエネルギー評価や port-Hamiltonian 法により減衰度を保証したい．

４．放物型制御系における static feedback 機構においては，境界観測/境界制御機構が数学上最も困難であり, 30 年以上未解決の問題として残されたままである．その代数的随伴構造を求めても，観測器，制御器の役わりが交換されるだけであり，難点を回避できない．そこで直接，楕円型作用素に対応する 2 つの無限次元部分構造の整合性の研究を通じて，スペクトラム再配置問題の代数的研究を，関数論的視点から研究したい．

５．Static feedback 制御機構でのスペクトラム再配置問題において，不安定スペクトラムに対して現れる代数的拘束は，系の内部特異性に起因する．特異性の位数は，相異なる固有値の数が増えれば，また固有値の縮退位数とともに増加する．この代数的拘束の除去については，対象となる相異なる固有値の数が $n≦4$ の場合には，その多重度に依らず特異性を打ち消し合う制御則の設計が可能であること，その制御則のパラメター変動に関して系の安定性が堅固（robust）であることが南部により確かめられている．この拡張として，任意の不安定固有値で任意の縮退位数の場合における特異性除去可能性についての統一された代数的方法の研究を行いたい．

６．Static feedback 機構における部分構造として現れる有限次元系の設計においては従来，安定指数（減衰度）の設定のみに重点があった．有限次元部分構造のスペクトラム設定の選択にはかなりの自由度が与えられ，選択によっては半群の時間発展に代数的増大性が現れる恐れがある．これは無限次元系全体の時間発展に本質的に関わるため，部分構造のスペクトル設定と半群（基本解）の時間発展について従来よりはるかに精密な大域的な評価の研究を行いたい．

７．Dynamic feedback 制御機構における安定化補償器（feedback loop に位置する新たな微分方程式）の数値解析的設計法では，いわゆる不適切（ill-posed）な問題を避けて通れない．これを回避する安定な設計アルゴリズムの数値解析的研究を，スペクトラム構造が比較的簡単な１次元空間の例から始めて行いたい．

８．最近，可観測性・可制御性の欠如のもとでも少なくとも出力安定化が可能であることが南部により示された．有限次元系とは異なり，可観測性・可制御性の欠如が無限次元制御系のスペクトラム代数構造に与える影響は微妙である．さらに，与えられた有限個の異なった周期関数に出力が追従（tracking）できるような無限次元制御系の構築を，無限次元代数方程式と関連付けて行いたい．

９．非ホロノミック拘束を伴う境界制御系，適応制御系等，非線形境界制御系の研究

(a) 時間変化をする未知のパラメターを含む放物系に対する適応制御系において，本質的に無限次元性を反映する適応制御則の構成に関する研究を行いたい．時間変化を伴う未知のパラメターは，とくに事前には未知である点が，単なる時変系と本質的に異なる．パラメターの関数値を連続的に推定しながら，その推定値に基づく適応制御則の構成を行いたい．

(b) 非ホロノミック制御系における Lie 代数を通じた代数的アプローチ；Pfaffian 形式で記述される非ホロノミック拘束のある境界制御系の定式化と $L^p$- 空間における適切性；Brockett 障壁の困難を打ち破る動的補償器を内包する dynamic 制御則等の研究を行いたい．これは，K. Kozlowski (Poland) との共同研究（本会招聘外国人研究者，2005 年）における基本的な知見が基盤になっている．

(平成 26 年度以降})

１．Static feedback 機構において，部分構

造として現れる有限次元系と本来の無限次元系との干渉系としての整合性・調和とその精密な評価の研究，および前年度 5 における固有値間の代数的拘束条件（内部特異性）の除去に関する研究とその一般化の研究を継続して進めたい．

２．上記 1 の研究に現れる微分方程式は，ゲインパラメター $\gamma$ を含んでいる．この $\gamma$ を増大させる際の安定性向上には上界がある．この安定度の上限は制御系の限界を知る上で重要であり，上限を推定する研究を進めたい．

３．前年度研究計画９のロボット運動学への応用として，非ホロノミック境界拘束をもつロボットアーム等の非線形弾性振動系に対する安定化と補償器の設計アルゴリズムの構築を，弾性振動系スペクトラムと共通部分がない安定なスペクトラムを有する物理的に存在する無限次元微分方程式系を利用して，具体的に行う．

## ４．研究成果

本研究は，線形放物系に対する安定化論と放物系と双曲系の間に位置するより広範な線形系に対する安定化論の 2 つに分けられる．先ず線形放物系に対しては，以下の [1] – [4] で述べる．とくに，[2], [3]における研究を通じて，作用素方程式（Sylvester 方程式）を基盤とし，有限次元系，無限次元系いずれにおいても統一された原理で記述される安定化論の体系を構築した．

[1] 線形放物系の安定化は通常，被制御系の状態変数 $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t},.)$（温度，振動の変位等）そのものの安定化を意味する．有限次元可観測性，可制御性が満たされている場合には安定化を実現できるが，可観測性，可制御性が失われた場合でも少なくとも出力 (output) の安定化が実現可能であることは，南部により近年示された．それゆえ，可観測性，可制御性の仮定のもとでは，状態安定化のみならずより強い主張が得られるのではないかと予想した．すなわち，$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t},.)$ 自身に対して要求される減衰率を達成しつつ，$\boldsymbol{u}$ よりも速い減衰率をもつ自明でない汎関数 $\langle \boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}, .), \boldsymbol{f}\rangle$ の構築を行った．より正確には，制御機構は $\boldsymbol{u}$ に加え，新たな状態変数 $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{t})$ をもつ動的補償器を含み，系は状態 $(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}, .), \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t}))$ に関する無限次元干渉微分方程式系により記述される．状態 $(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}, .), \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t}))$ の直積空間における安定化においては干渉項を内包し次元の増大した楕円型作用素が表れ，そのスペクトラムの代数的・幾何学的構造は被制御系単独のそれよりもはるかに複雑化されている．そのスペクトラム空間の中に $(\boldsymbol{f}, 0)$ の形の要素がもし存在すれば，$(\boldsymbol{f}, 0)$ を $(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v})$ に対する汎関数 $\langle(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}), (\boldsymbol{f}, 0)\rangle = \langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{f}\rangle$ に選べば，問題は自明である．しかしながら，$(\boldsymbol{f}, 0)$ の形のベクトルは，相異なる固有値に対応する有限個の一般化固有空間における線形結合では存在せず，したがって，上記の特別な制御系の構築が決して自明ではないことを示した．

[2] 境界観測-境界制御機構の最も困難なもとでの線形放物系の安定化は，対応する楕円型作用素に関する何らかの，そして当該放物系に関する何らかの有限次元近似が可能な場合には，Y. Sakawa, R. Curtain, I. Lasiecka をはじめとする有力な研究者たちにより研究成果が得られている．それらに共通する思想は，Riesz 基底や有限要素法等により，『有限次元系による無限次元系の定量的な近似が可能である』という仮定であり，簡単な数例のモデルではその仮定は満たされる．しかしながら，一般的な楕円型作用素の代数的・幾何学的構造は，標準的な 2 階偏微分作用素においてさえ十分解明されているとは言い難く，ましてや有限次元近似の可能性を仮定することは安定化論を極めて狭い理論に留めてしまっている．本研究においては，標準的な 2 階偏微分作用素，および第 1, 3 種境界が連続的に接続される複雑で一般的な境界により特徴づけられる広範な制御系を対象とした．もちろん，Riesz 基底の存在等，系に対する何らの有限次元近似も仮定しない．そのような制御系に対して安定化を実現し，有限次元空間における安定化論からの拡張という視点から，最も自然で標準的な安定化論の理論体系を構築した．すなわち，不安定固有値の退化度に関連して，被制御系のセンサー，アクチュエータの代数的条件を緩和し，それらの最小実現を達成した．また，互いに代数的に双対 (dual) な 2 つの安定化制御機構を構築，比較することにより，より低次元の動的補償器の実現のために部分的な解答を与えることができた．それは，2 つの双対な制御機構の次元が，それぞれ，センサー，アクチュエータの数学的性質にのみより決定されるからである．

[3] 上記安定化論では，有限次元空間における極再配置論が基本的な役割を果たしている．この理論は 1967 年に完成され，その後様々なアプローチにより磨かれてきた．基礎的な理論でありながら，高度な代数的思考を必要とする．完成から 50 年近くも経過しているにも拘わらず，具体的な制御系設計には自由度が多く，数学上不完全なアプローチすら存在する．本研究では，作用素方程式（Sylvester 方程式）を基盤とする新しい知見を見出し，有限次元制御論コミュニティにおいてすら知られていないより簡単，有効で具体的な有限次元安定化論を構築した．しかも，初期時刻近傍における半群の振る舞い（半群のノルムのマージン $M$）は従来の理論と比較して複数の数値例では改良されている．

[4] Dynamic feedback 制御機構による安定化においても，有限個の観測値を直接制御系に入力させる static feedback 機構での楕円型作用素のスペクトラム構造が基本的な

役割を果たしている．Static feedback 制御機構において，不安定な固有値の安定域への再配置を行う際，自由度が大変大きい．それは同じ減衰率を保証しながら，制御系が生成する半群の評価のマージン $M$ にとくに影響を与え，$t\to\infty$での安定化が保証されても，比較的初期時刻に近いときに系の状態（解）を大きく増大してしまう効果をもつ．本研究では，再配置する固有値を被制御系の安定固有値と重複するように選ぶような場合には，結果として無限次元制御系に代数的増大度が生じることを示し，したがって，系の安定度，マージン $M$ に悪い影響を及ぼすことを証明した．

より広範な C_0-半群を生成する線形系についての成果は，以下の通りである：

[5] 線形放物系においては，系のスペクトラムはある扇状領域（sector）に存在し，解析半群を生成する．そのような系に対して構築した上記の安定化論を，より広いクラスの系にも適用可能であることを示した：被制御系は C_0-半群を生成するが，そのスペクトラムは扇状領域には存在しない．したがって，半群は時間 $t$ に関して解析的ではなく，解のレギュラリティは時間の増大とともに増えてくる性質をもつ．古典的な典型例としては，時間遅れを伴う標準的な関数微分方程式系があり，また，佐野（研究分担者）が最近示したように，第１種境界をもつ１次元移流拡散系の安定化において現れる系もそうである．そのような系に対して，補償器の係数作用素 $B$ を解析半群ではなく，そのスペクトラム $\sigma(B)$ が被制御系のスペクトラムとは干渉し合わないように虚軸に平行に位置するよう，巧妙に設計する．それは，被制御系のスペクトラムの分布が大まかに理解されていれば，可能である．対応する無限次元 Sylvester 方程式の作用素解が望ましい幾何学的性質をもつように $\sigma(B)$ の無限遠点への代数的増大度 $\alpha$を放物系の場合より「遅く」なるよう，すなわち $\alpha < 1/2$ となるよう設定することにより，安定化を達成した（放物系安定化の場合には，$\alpha < 2$ で十分であった）．このような補償器は放物系に対する場合と比べ，動的補償器の無限次元モデルとしては幾分制約的になるが，最終的には制御系の安定性を保持しながら有限次元微分方程式系に落とすことができる．

[6] 上記 [2], [5]の研究では，制御系設計において不適切な（ill-posed）問題が現れる．南部が提案した近似計算アルゴリズム (Math. Contr. Sig. Syst., Vol. 7, 1994) において，近似列の収束率の改良結果を得た．

## 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 12 件）

① H. Sano, Feedback stabilization of one-dimensional parabolic systems related to formations, *Bull. Polish Acad. Sci.-Tech. Sci.,* Vol. 63, 2015, pp.295-303 (DOI: 10.1515/bpasts-201500034)

② T. Nambu, Algebraic multiplicities arising from static feedback control systems of parabolic type, *Numer. Func. Anal. Optim*. 査読有, Vol. 35, No. 10, 2014, pp.1359-1381 (DOI: 10.1080/01630563.2014.884581)

③ T. Nambu, Remarks on the stabilization problem for linear finite-dimensional systems, *Bull. Polish Acad. Sci. - Math.,* 査読有, Vol. 62, No. 1, 2014, pp. 87-99 (DOI: 10.4064/ba62_1_9)

④ T. Nambu, Alternative algebraic approach to stabilization for linear parabolic boundary control systems, *Math. Control, Signals, and Systems,* 査読有, Vol. 26, No. 1, 2014, pp.119-144 (DOI: 10.1007/s00498-013-0108-4)

⑤ 南部隆夫, 放物形境界制御系に対する安定化論, ***システム制御情報学会誌***, 査読無, Vol.58, 2014, pp.368–364

⑥ H. Sano, Modal control of linear parabolic systems with internal feedback loop, *Adv. in Diff. Eqns. and Contr. Processes*, 査読有, Vol. 14, 2014, pp.55 -70

⑦ H. Sano, Dirichlet boundary stabilization of unstable mixed systems, *Proc. 2014 Int'l Conf. on Math. Computers in Sci. Ind.,* 査読有, Vol. 1, 2014, pp.261-266 (DOI: 10.1109/MCSI.2014.14)

⑧ T. Nambu, On decay of solutions and spectral property for a class of linear parabolic feedback control systems, Advances in Pure Mathematics 査読有, Vol. 3, No. 9A, 2013, pp.26-37 (DOI: 10.4236/apm.2013.39A1005).

⑨ T. Nambu, A remark on stabilization for linear parabolic systems: Static feedback scheme, *SICE Trans.* 査読有, Vol. 49, No. 4, 2013, pp.449-454 (DOI: 10.9746/sicetr.49.449)

⑩ 児島晃, 佐野英樹, 分布パラメータ・むだ時間と制御, ***計測と制御***, 査読無, Vol. 52, 2013, pp.354-360

他２編

〔学会発表〕（計 12 件）

① 南部隆夫, 擬似内部構造としての有限次元制御系とその安定化に対する新しい知見, 熊本大学における微分方程式セミナー（微分方程式セミナー通算 37 回）, Sep. 9-10, 2014, 熊本大学, 黒髪キャンパス,

熊本県
② H. Sano, Dirichlet boundary stabilization of unstable mixed systems, 2014 Int'l Conf. on Math. Computers in Sci. Ind., Sep. 14, 2014, Varna, Bulgaria
③ 南部隆夫，線形無限次元系の安定化：解析半群から C_0-半群へ，愛媛大学数学談話会（招待講演），Jan. 16, 2014, 愛媛大学 理学部，愛媛県
④ 佐野英樹，内部にフィードバックループを有する線形放物型システムのモード制御，日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会 第17回シンポジウム，Jan. 12, 2014, 愛媛大学，愛媛県
⑤ 佐野英樹，並流型熱交換プロセスに関連した移流拡散系の境界制御，SICE 制御部門マルチシンポジウム，March. 5, 2014, 電気通信大学，東京都
⑥ 南部隆夫，C_0-半群を生成するあるクラスの線形系に対する安定化論，The 39th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 21-23, 2013, Japan Women's University, Tokyo, 東京都
⑦ 南部隆夫，あるクラスの C_0-半群に対する安定化論，岡山理科大学における微分方程式セミナー（微分方程式セミナー通算 36 回），Sep. 10, 2013, 岡山理科大学，岡山県
⑧ 佐野英樹，Stabilization of linear parabolic systems with internal feedback loop, 岡山理科大学における微分方程式セミナー(微分方程式セミナー通算 36 回)，Sep. 09, 2013，岡山理科大学，岡山県
他４編

〔図書〕（計１件）
① T. Nambu, ``Theory of Stabilization for Linear Boundary Control Systems,” CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-10: 1498758479 ISBN-13: 978-1498758475
（今夏，出版予定）

〔産業財産権〕
○ 出願状況（計　0 件）
なし

○取得状況（計 0 件）
なし

〔その他〕
ホームページ等
http://www.research.kobe-u.ac.jp/csi-applmath/html/pub.html

６．研究組織
(1)研究代表者
南部 隆夫（NAMBU TAKAO）
神戸大学・大学院システム情報学研究科・名誉教授
研究者番号：40156013

(2)研究分担者
佐野 英樹（SANO HIDEKI）
神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授
研究者番号：70278737

(3)連携研究者
なし