

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 27 日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540227
 研究課題名（和文） 双曲型・放物型制御系における解の幾何学的・代数的構造とスペクトラム構造の研究
 研究課題名（英文） Research on geometric and algebraic structures of solutions and spectrums in hyperbolic - parabolic control systems
 研究代表者
 南部 隆夫（Takao Nambu）
 神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授
 研究者番号：40156013

研究成果の概要（和文）：

本研究では、線形放物系について、境界観測-境界制御機構での独立した2つの安定化論の代数的相似性の証明；一般化固有空間を許す系の場合、安定化に必要な観測器と制御器の最小数を規定する条件の導出；第1種境界をもつ移流拡散系の安定化；系の状態安定化の下で、状態のある汎関数が任意の初期擾乱に対して状態より速い減衰率をもつ制御機構の構築を行った。線形双曲系について、並流型熱交換プロセスの出力トラッキング問題をバックステッピング法により達成した。

研究成果の概要（英文）：

As for linear parabolic systems, (1) algebraic similarity of two independent boundary stabilization schemes was proven; (2) the smallest possible number of sensors and actuators necessary for stabilization was algebraically obtained; (3) stabilization of a coupled transport diffusion system with boundary of the first kind was achieved; and (4) a specific feedback control scheme was designed, such that some linear functional of the "state" decays exactly faster than the state. As for linear hyperbolic systems, (5) an output tracking problem for a parallel-flow heat exchange process was achieved by the so-called backstepping approach.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・大域解析学

キーワード：関数方程式の大域理論

1. 研究開始当初の背景
放物型制御系に対するフィードバックによ

るスペクトラム再配置問題は、(i) static feedback 機構に始まり、現在、(ii) dynamic

feedback 機構に研究の流れが移っている。(ii)のスキームは 1980 年代半ばに始まり、動的補償器 (dynamic compensator) の導入により、成果を挙げつつある。(i)での設計パラメータは観測器と制御器のみであり、それらを任意には設計できない困難を回避・補償するため(ii)が導入された。(i)での研究は、1970 年代の初等的成果からは本質的には進んでいなかった。それは、設計可能なパラメータが、(ii)と比べて(i)では極端に少なくなる数学上の困難があるからであり、(i)でのスペクトラム再配置は、最も困難な問題として残っている。南部は最近、この機構(境界観測-境界制御)のもとで、安定化の十分条件を、可制御性・可観測性のもとで提案した(J. Diff. Eqns. vol. 238 (2007))。(ii)では、1980 年代半ばの坂和, Curtain, 南部による独立した研究に始まった。第 1, 3 種が混在する複雑な境界条件を含む境界安定化については、新しい代数的手法による南部の知見(1999 年, 2000 年, Quart. Appl. Math., vol. 62 (2004), 及び J. Diff. Eqns. vol. 218 (2005)) が得られており、かなり完成度の高い水準に達している。一方、双曲系に対する安定化は微分方程式の解の性質が放物系のそれとは大きく異なり、解析・設計問題は未だ不十分な成果しか得られていなかった。

2. 研究の目的

- (1) 第 1 に、双曲系(時間 2 階発展方程式系)に対して(i)の機構での安定化の研究、
- (2) (i)の機構における最も困難な楕円型作用素のスペクトラム再配置問題の研究、
- (3) (ii)の機構における安定化のみならず、解の幾何学的・代数的特質の抽出、設計、及び(以下で述べる適応制御則を含む)非線形境界制御系の定式化と L^p -空間における安定化制御則の構築。

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：

- (1) 双曲系(時間 2 階発展方程式系)の安定化は、港湾での移動クレーンの安定化制御や柔軟な多リンクロボットアームへの典型的な応用がある。放物系に対する関数解析学的手法と異なり、星状領域(star-shaped region)における解の L^p -空間等におけるエネルギー評価を直接求める幾何学的手法が要求される。多リンクアームではとくに、 $(L^p)^N$ -空間に属する解の干渉を考慮する特別なリヤプノフ関数の構成やエネルギー評価を、非線形効果が存在する場合を含めて行う。
- (2) (i)の機構では、可制御、可観測性のもとでのスペクトラム再配置の研究。最近、観測器、制御器がともに "spillover" をもち、

不安定固有値間に特別な代数的拘束があるときには、南部による肯定的成果が得られた。この拘束は、基本解に起こる特異性を避ける条件に対応している。この代数的拘束(特異性)の除去、緩和に関する研究の推進。とくに、特異性除去については、上記論文(2007)で得られた部分的成果の一般化を中心とする。

(3) (ii)の機構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。

(4) (i)の機構のもとでの安定化則が構築・設計できたとして、解のより精緻な幾何学的・代数的性質の抽出を行う。例えば上界 $Me^{-\alpha t}$, $t \geq 0$ をもつ制御則を設計すれば、境界上での観測値のような非有界性を含む解の汎関数は、少なくとも同じ $e^{-\alpha t}$ の形の上界をもつことは明らかである。本研究では、 $e^{-\alpha t}$ より速く減衰する非自明な汎関数のクラスを幾何学的に抽出する。この方向での研究の初期成果は、南部により Proc. Roy. Soc. Edinburgh, Sec. A において報告されている(2009)。また南部は新しい成果として、拘束条件付きの極再配置問題(古典的な極再配置問題(W. M. Wonham, 1967)の本質的拡張)の必要十分条件を求めた(Funkcial. Ekvac.)。この成果を発展させて、Riesz 基底をもたない系に対する一般化を推進したい。

(5) 非線形境界制御系における安定化：航空機は、高度によりシステムの変化する系である。このように特性パラメータが時変である制御系を定式化する際、通常非線形系とは大きく異なり、時間変化するパラメータは事前には与えられず、未知という拘束を伴う。変化する未知パラメータを常に推定(同定)しながら、それを制御に反映する機構、すなわち、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。偏微分方程式系への適用を試みる論文(山下, 大室)が最近発表されたが、無限次元性特有の根本的な難点は未解決であり、大域論として興味ある問題である。複雑な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 22 年度)

(1) 極めて弱い減衰項の微分方程式への定式化が困難な系, すなわち減衰のない純粋な双曲系の中でもあるクラスの 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, 数学的意義のみならず物理的に判別可能な新しい代数的判定条件の研究を, 作用 L のスペクトルの growth bound $\omega_0(L)$, spectral bound $\sigma_0(L)$ に関連付けて行いたい. 実際, $\omega_0(L) = \sigma_0(L)$ となる 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のであるから, その点を突破口にし, 関数論, 1940 年代に発展した古典 Fourier 解析を動員して行いたい. 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.

(2) 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により減衰度を保証したい.

(3) 動的補償器を内包する放物型 dynamic feedback 安定化機構において, 解とその汎関数の特別な漸近挙動, すなわち, 解の汎関数が解自身より速く減衰するような性質をもつ制御機構のクラス (同時にそのような性質をもつ特別な汎関数のクラス) の抽出と構築には微分方程式論における幾何学的・代数的方法の研究が必要である. そこには幾何学的拘束条件付きの任意の極配置可能性という新しく魅力ある問題が現れており (拘束なしの問題は 40 年前に W. M. Wonham, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-12, 1967, により完全に解かれている), 南部は最近, 固有値が単純な場合に, 拘束条件付きの極再配置可能性の必要十分条件を求めた. また, 完全可観測性が保証される境界出力をもつ非自己共役楕円型作用素を係数にもつ放物系に対して, 非自己共役性の困難を解消する一般化動的補償器を導入して, 関数空間における幾何学的手法により同様な結果を得た. その一般化の研究を, 代数的・幾何的側面から行いたい. より具体的には, 固有値が縮退する一般の場合に, 幾何学的拘束条件付きの極再配置問題が解けるための必要十分条件を可制御性, 可観測性に関連させて解きたい. またその応用として, 指定された部分領域における解の特別な挙動, すなわち, 系全体の安定化のみならず, 部分領域における解のより速い減衰問題という新しいレギュレータ問題を研究する.

(4) 放物型制御系における static feedback 機構において, 観測器, 制御器がともに spillover をもち, spillover がまったく制御できない場合 (とくに境界上の観測器, 制御器) が数学上最も困難であり, 30 年近くの間未解決の問題として残されたままである. 典型的な境界観測 — 境界制御での static feedback 機構においては, その代数的随伴構造を攻めても, 境界上の観測器, 制御器の役割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 (安定化) の代数的研究を行いたい.

(5) Static feedback 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 $n \leq 4$ 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ータ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, 一般に相異なる固有値の数が $n \geq 5$ であり, 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の論点は, 従来そのスペクトラム構造にのみ向けられており, したがって, 有限次元部分構造を基盤にした基本解 (半群) に対する評価は, 時間 $t \rightarrow \infty$ の際の安定度に関するもののみであった. より具体的には, 半群のノルムの上界 $M e^{-\alpha t}$ において, $\alpha > 0$ のみの設計に目を向けられ, 重要な $M \geq 1$ の値が α にどう従属するか, またその評価は無視されてきた. これでは, 無限次元部分構造との整合性の点で, 不十分である. そのため可能な限り少ない数の観測, 制御の仮定のもとで, 従来よりはるかに精密な大域的な基本解評価の研究を行いたい.

(7) Dynamic feedback 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 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, 有限要素法を利用して行いたい.

(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(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

① 時間変化をする未知のパラメータ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ータは、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。パラメータ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の研究を行いたい。

② 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 制御則等の研究を南部が担当したい。これは、K. Kozlowski 教授 (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 23 年度以降)

(1) 前年度の研究計画 5 での代数的拘束条件の除去については、不安定性を引き起こす相異なる固有値の数が $n \leq 4$ の場合に成功しているが、 $n=4$ のときには極めて複雑な代数的考察が必要であった。 $n \geq 5$ の一般の場合の除去に関する統一的な代数学的理論の構築を現在行っているが、代数構造の複雑さが明らかになるにつれ構築には複数年かかる見込みであるため、この研究を前年度に引き続いて行いたい。前年度の研究計画 5 において推進する定性的研究を実証するため、数値モデル化に反映される様々なパラメータの数値解析的研究とパラメータ最適化の研究を行いたい。

(2) 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を行いたい。

(3) 上記 (1) の研究においては、ゲインパラメータ γ を含んでいる。この γ を増大させる際の安定性向上には上界がある。この安定度の上限を推定する研究を行いたい。

(4) 前年度研究計画(6)において、安定化された線形制御系 (干渉系) の最大初期振動が大き過ぎると、つまり $M \geq 1$ が過大であれば、(数学モデル上は意味があっても) 物理的に無意味になってしまう可能性がある。そこで、有限次元安定化補償器の次元推定と決定、および最大初期振動 M の最適ゲイン計算、ア

ルゴリズムの研究を行いたい。

(5) 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、具体的に行いたい。

(6) L^p -空間における準線形放物形境界制御系の最適制御における Riccati 方程式の代数的・解析的構造の研究、慣性多様体と補償器の内部構造との類似性の研究を行いたい。

4. 研究成果

本研究は、線形放物系に対する安定化論と線形双曲系に対する安定化論の2つに分けられる。まず線形放物系に対しては、

(1) 係数である楕円型作用素が Riesz 基底をもつ線形放物系について、南部は境界観測-境界制御機構のもとでの完全に独立した2つの安定化論をそれぞれ、2001年、2004年 ni 提唱している。先行するこれら2つの安定化論は、実は互いに代数的に相似であることを証明した。すなわち、構築された2つの安定化機構を結び付ける可逆な有界作用素が存在することを示した。

(2) 楕円型作用素が一般化固有空間を許し、かつ Riesz 基底の存在を期待できない一般的な放物系の場合、安定化に必要な観測器と制御器の最小数を規定する代数的条件を導いた。実際、系の構造上最良の場合、対応する不安定固有値の代数的多重度 (退化度) が 1 より大きい場合でも、たった1つの観測器と制御器で安定化可能になることを示した。

また、安定化を達成する動的補償器について、低次元の補償器を実現するために、新たな安定化論の構築を行った。すなわち、被制御系の状態を $u(t, \cdot)$ 、補償器の状態を $v(t)$ とするとき、従来は $Xu(t) - v(t) \rightarrow 0$ となるような制御系と有界作用素 X の構成であったが、本研究では、 $u(t) - Yv(t) \rightarrow 0$ となるような有界作用素 Y の構成を行った。作用素 X は完全可観測性のもとでの逆作用素が存在しても、そのコンパクト性により逆作用素は必ず非有界になるため、 $Xu(t) - v(t) \rightarrow 0$ の評価からは $u(t) - Yv(t) \rightarrow 0$ の評価は決して得られない困難がある。新しいこの枠組みはある意味で、従来の研究の代数的なカウンターパートとして位置づけられる。とくに安定化のためのセンサー、アクチュエータの必要数を含めて制御系設計には作用素 Y の値域 (range) の特徴づけが必要である。不安定固有値の退化度に関連して、ある有限次元部分空間を内包する Y の値域を保証するためのセンサー、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。この成果として、十

分な解答が得られていない動的補償器の最小次元実現に部分的な解答を与えることができた。すなわち、従来の結果と比較して確実に次元の低い安定化動的補償器の存在を証明した（印刷中）。

(3) 最も単純な static feedback 機構における不安定固有値の再配置問題において、再配置が被制御系の安定固有値と共通部分をもつように設計するとき起こるスペクトラムの代数構造を解明した。すなわち、フィードバック系の楕円型作用素には一般化固有空間が現れることとその次元を明らかにし、したがって制御系には安定性を減じる代数的増大オーダーが現れることを示した（印刷中）。

(4) 第1種境界 (Dirichlet 境界) をもつ1次元移流拡散系の安定化は、楕円型作用素の構造は比較的単純である。しかしながら、その分数べきによる状態変数変換（一種の積分変換）の手法では微分方程式系の適切性 (well-posedness) に破綻を生じる。南部が近年考案した代数的方法 (2004) を応用して、境界観測-境界制御機構のもとでの安定化を達成した。

(5) 系の状態安定化の下で、状態のある汎関数が任意の初期擾乱に対して状態より速い減衰率をもつ制御機構の構築を行った。制御系は被制御系の状態 $u(t, \cdot)$ と補償器の状態 $v(t)$ から成る。すなわち、直積空間における状態 $(u(t, \cdot), v(t))$ をもつ。Riesz 基底を有する被制御系の場合、そのアクチュエータは状態より速い減衰率をもつ汎関数と各スペクトラル部分空間において直交するという比較的強い仮定のもとで、制御機構の構築を行った。

一方、対応する楕円型作用素のスペクトラム空間の中に $(f, 0)$ の形の要素がもし存在すれば、 $(f, 0)$ を汎関数に選べば、問題は自明である。しかしながら、 $(f, 0)$ の要素は相異なる有限個の一般化固有空間における線形結合では存在し得ないことを示し、本問題提起が決して自明ではないことを示した。被制御系が必ずしも Riesz 基底をもたず、とくに完全可観測性を有する場合（空間1次元の場合は確かにそうであるが）、上記の方法とは異なる新しいアプローチを提案し、状態より速い減衰率をもつ制御機構の構築を行った。その際、アクチュエータと当該の汎関数との各スペクトラル部分空間における直交性という強い条件は取り除かれた。

線形双曲系については、

(6) 分布・境界入力をもつ1階双曲系により記述される並流型熱交換プロセスについて、閉ループ系において生成される C_0 半群の無限小生成素が双曲系の安定性判別に重要な役割りを果たす SDG 条件 (spectrum determined growth condition) を満たすこ

とを示し、つぎに代数的性質をもつバックステッピング法を適用して、出力トラッキングを達成する境界制御入力を決定した。

(7) 上記SDG条件を満たす並流型熱交換プロセスに対して、エネルギー減衰のための切替制御（分布入力）を提案した。

研究計画当初にあった非ホロノミック制御系、適応制御系の研究には手がつけられず、25年度以降に引き続いて行う予定である。また static feedback 機構での安定化については最近、他の研究者による部分的成果が得られている。しかしながら（数学的に）設計される観測器、制御器については関数の台 (support) が空間全体に広がっており、物理的実現は不可能に思える。研究計画で述べた手法では関数の台についての制約がないため、理想的には δ -関数状の観測器、制御器が可能である。この方向での研究を引き続き行いたい。

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13件)

- ① T. Nambu, Equivalence of two stabilization schemes for a class of linear parabolic boundary control systems, *Bull. Polish Acad. Sci., Math.*, 査読有, Vol. 60, 2012, pp. 187--199
- ② T. Nambu, A note on the minimum number of the actuators for stabilization in linear parabolic boundary control systems, *SICE JCMSI*, 査読有, V o. 4, 2011, pp. 349-352
- ③ H. Sano, Stability-enhancing control of a coupled transport-diffusion system with Dirichlet actuation and Dirichlet measurement, *J. Math. Anal. Appl.*, 査読有, Vol. 388, 2012 pp. 1194--1204
- ④ H. Sano, Output tracking control of a parallel-flow heat exchange process, *Systems & Control Letters*, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 917-921
- ⑤ H. Sano, Output tracking control of a diffusion process with boundary inputs, *JP J. Appl. Math.*, 査読有, Vol., 2011, pp. 19-34
- ⑥ H. Sano, Neumann boundary stabilization of a coupled transport-diffusion system with boundary outputs: A backstepping approach, *Adv. Differ. Eqns. Contr. Processes*, 査読有, Vol. 7, 2011, pp. 1--14
- ⑦ H. Sano, Neumann boundary control of a coupled transport-diffusion system with boundary observation, *J. Math. Anal.*

Appl., 査読有, Vol.377, 2011, pp.807-816
⑧ T. Nambu, Stabilization and a class of functionals for linear parabolic control systems, *Proc. Roy. Soc. Edinburgh, Sec. A* 査読有, Vol.140A, 2010, pp.153-174
⑨ T. Nambu, On the minimum number of the sensors for stabilization in parabolic boundary control systems, *SICE Trans.*, 査読有, Vol.46, 2010, pp.164-169
⑩ H. Sano, Switching control of parallel-flow heat exchange processes, Proc. the 9th Wseas Int'l Conf. on System Science and Simulation in Engineering, 査読有, 2010, pp.253-258
⑪ T. Nambu, On state and output stabilization of linear parabolic systems, *Funkcial. Ekvac.*, 査読有, Vol.52, 2009, pp.321-341

その他：印刷中2編（査読有）

〔学会発表〕（計8件）

- ① T. Nambu, A remark on stabilization for linear parabolic systems: Static feedback scheme, The 38th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 23, 2012, Japan Women's University, Tokyo
- ② H. Sano, フォーマーションに関連した放物型システムの制御について, The 38th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 23, 2012, Japan Women's University, Tokyo
- ③ K. Matsumoto, and H. Sano, 拡散項を有する並流型熱交換方程式の出力トラッキング制御, 第61回理論応用力学講演会, March 7, 2012, 東京大学生産技術研究所, Tokyo
- ④ H. Sano, Feedback stabilization of an unstable ODE plant with a diffusion process in the actuation path: an RMF approach, EUROSIAM'11, Dec. 29, 2011, Montreux, Switzerland
- ⑤ T. Nambu, Alternative algebraic approach to stabilization for linear parabolic boundary control systems, The 37th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 24, 2011, Gifu University, Gifu
- ⑥ H. Sano, 拡散プロセスを通して駆動される集中定数プラントの安定化, The 37th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 24, 2011, Gifu University, Gifu
- ⑦ T. Nambu, A new algebraic approach to stabilization for linear parabolic boundary control systems, SiMCRT2011 (招待講演), Nov. 2, 2011, Kobe University, Kobe
- ⑧ T. Nambu, Equivalence of two stabilization schemes for a class of

linear parabolic boundary control systems, The 36th Evol. Eqns. and Appl. Dec. 23, 2010, Chuo University, Tokyo

〔図書〕（計0件）

〔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所・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所・准教授

研究者番号：70278737

(3) 連携研究者

なし