別紙４

報告番号	※甲　　第3424号

主　論　文　の　要　旨

論文題目　**システムの受動性に関する研究**

氏　　名　**坂本 登**

論　文　内　容　の　要　旨

受動性は回路網理論に始まり，古典制御理論，現代制御理論において非常に重要な役割をし，さらに現在もなお新しいアイディアを生み出すよりどころとなっている．例えば，非線形システムの大域的安定化問題，適応制御理論で注目を集めている Integrator Backstepping 法，ロボットマニピュレータのようなオイラー・ラグランジュ方程式で表される非線形機械系の制御などにおいて，受動性または受動性を拡張することによる制御理論が現在盛んに研究されている．これは受動性の概念がシステムの物理的性質を反映するからに他ならない．本研究では新たな視点から受動性の解析と拡張を行った．そして，それまで無秩序に点在していたいくつかの理論・概念に対して有機的系統付けを与える．

受動システムは最小位相性というシステム理論上重要な特徴を持つ．そして，最小位相性はハイゲインフィードバックと密接な関係を持つ．例えば，非線形システムにおける最小位相性はハイゲイン出力フィードバックの考察を通して発見されたことはよく知られている．ハイゲインフィードバックには感度低減化，外乱除去，目標追従特性の向上等，様々な利点がある．しかしフィードバックゲインを上げていくとシステムは不安定になることがあり，ハイゲインフィードバックが可能であるシステムのクラスを明らかにすることが必要になる．第２章では非線形系におけるハイゲインフィードバックの設計問題としてハイゲインレギュレータ問題，ロバスト安定化問題を考察した．線形系においてハイゲインレギュレータ問題は完全制御問題として必要十分条件が求められており，設計アルゴリズムも求められている．２章前半では特異摂動法と８０年代から盛んに研究された非線形システムに対する微分幾何学的手法を用いて，非線形系におけるハイゲインレギュレータ問題の可解条件とその構成アルゴリズムを求めた．得られた条件は最小位相性と右可逆性であり，線形理論の自然な拡

38字×23行

張となっている．２章後半では，完全線形化可能な１入出力非線形系が有界な時変不確定要素を含む場合に，不確定要素によらず安定化するというロバスト安定化問題を考察した．この問題に対してもハイゲインフィードバックは有効であることがわかり，Lyapunov 関数を構成することでロバスト安定化が可能であることを証明した．また，この問題の考察を通して，現在非線形制御理論や適応制御理論において注目を集めている Integrater Backstepping 法とマルチパラメータハイゲインフィードバックが同一構造を持つことを明らかにした．

受動システムはエネルギー減衰系であるという物理的特徴を持つ．特定の入出力間（例えば，外乱入力と制御出力）に対してそのような受動的性質を持たせようとする制御系設計問題を受動化問題と呼び，これを第３章で考察した．受動定理とスモールゲイン定理は Cayley-変換と呼ばれるシステムの双一次変換によって双対的となることが古くから知られているが，これがこの章における鍵を与える．非線形系を取り扱うために消散システム理論を用い，非線形系における受動性と有限ゲイン性の双対的性質を，非線形作用素の Cayley-変換を状態空間上で表現して証明した．そして，Caley-変換を一般化制御対象へ拡張することによって，受動化問題は H^∞ 問題と等価であることを証明した．すなわち，受動化制御則はそれに付随した H^∞ 問題を解くことによって求められ，逆に H^∞ 制御則は付随した受動化問題を解くことによって求められる．消散システム論において，受動性と有界実性はエネルギーの概念の取り方が異なるが Cayley-変換によって双対的関係がある．３章は，これが設計問題（受動化問題と H^∞ 問題）に対しても成立することを示している．つまり，H^∞ 問題も，受動化問題と同様，エネルギー減衰系を構成することであり，両者のエネルギーの取り方は Cayley-変換によって結びつけられる．

受動性は，受動的であるかないかの二者択一であり，「L^2-ゲインが有限であること」と「その値」のように二つの言葉を用いて表現される有限ゲインシステムと大きく異なっている．この違いは消散システム理論の中で考察すれば，有限ゲインシステムにおいてはエネルギー消散度を調節することが（ゲインの値によって）可能であるが，受動システムにおいてはそのようなことができないことによるものであることがわかる．第４章では受動システムに対して，消散の度合いを調節することを可能とする新しい定式化を行うことと，それに伴って得られる様々な新しい結果を述べる．受動システムに対する消散度の導入のアイディアは以下のようなものである．受動性は消散システム理論において supply rate を入力と出力の内積にとる．内積は，二つの２乗ノルムの差として表すことができ，すなわち，正の要素と負の要素からなる．正の要素に０と１の間の定数パラメータ γ を乗じれば，$\gamma = 1$ のとき supply rate は内積と等しくなり，$\gamma < 1$ のときは内積より小さくなる．４章ではこのようなパラメータをもつ supply rate を用いて定義されたものを γ-受動システムとして提案する．すな

わち，γ-受動システムの γ は受動システムの消散の度合いを調節する働きをし，受動的システムであっても弱い受動システムや強い受動システムが考えられるようになる．言い換えれば，γ-受動システムは $\gamma = 1$ のときは通常の受動システムと一致し，$0 < \gamma < 1$ のときは γ が小さくなるにつれて消散度が大きくなるという性質を持つ．また，γ-受動性の定義に際して導入された新しい形の supply rate に関して消散的なシステムは，$\gamma > 1$ のときは一般に不安定となる．しかし，このクラスの非線形システムに対しては漸近安定化が可能であることが証明され，この結果は $\gamma = 1$ のとき以前まで知られていた結果と一致するという意味で自然な拡張となっている．さらに，Cayley-変換はここにおいても重要な働きをする．すなわち，γ-受動システムと L^2-ゲイン γ をもつシステムは Cayley-変換を通して双対的であることがわかり，これを用いて γ-受動システムの設計法を提案した．線形系においては，γ は伝達関数の位相を計る役割をし，γ-正実システムはその位相的性質に大きな特徴を持つ．この位相的性質と，γ-受動システムの設計法とから「位相曲線整形法」を提案した．H^∞ 制御はゲイン曲線の整形法であるが，位相的性質は全く無視されてしまう．ところが，γ-正実システムによる制御は位相曲線と同時にゲイン曲線も整形されるという特徴を持つ．受動定理は古くからよく使われているが，適応制御理論等において「正実関数と強正実関数のフィードバック結合は漸近安定である」という形で用いられる．この受動定理を拡張した γ-受動定理とも言うべきフィードバックシステムの安定性に関する結果を得，その構造的不確かさに対するロバスト安定解析における有効性を例によって示した．この例はスモールゲイン定理，受動定理，γ-受動定理の保守性を比較する意味から興味深い結果を示している．すなわち，構造的不確かさは位相情報を含む不確かさとも見ることができるが，H^∞ 制御はこの不確かさに対しもっとも保守的な結果を与える．そして，正実関数による受動定理からは非保守的な結果が得られるが，位相情報をより反映する γ-受動定理からはもっとも非保守的な必要十分条件が得られる．

第５章では，柔軟構造物の制御に対する応用を考察する．柔軟構造物のシステムは一般に高次元（時には無限次元）となり，制御系の設計にはそれを低次元化したものを用いる．しかし，無視されたモードと制御器とのカップリングによって不安定現象（スピルオーバ）が引き起こされることがあり，これが柔軟構造物の制御における主要な課題の一つになっている．柔軟構造物のダイナミクスは，速度センサとアクチュエータを同位置に配置したコロケーション系では，正実関数となる．この性質を利用した制御に速度の直接フィードバック (DVFB) や速度と位置の直接フィードバック (DVDFB) や，強正実関数のフィードバックなどがある．これらは，位相安定化とも呼ばれ，モードの数やパラメータ誤差などによらないロバストな制御であることはよく知られている．第５章では，γ-正実性を用いてこの位相安定化の拡張を行った．特に，スピルオーバ不安定化に対する新しい補償条件として，スモールゲイン条件とも正実条件とも異なる，γ-正実条件を提案した．