論文審査の要旨および学識確認結果

報告番号	㊙／乙第　　号	氏　名	小塚　太資

論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	堀　豊
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	内山　孝憲
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	井上　正樹
	慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	山下　忠紘

（論文審査の要旨）

学士（工学）、修士（工学）、Master of Science 小塚太資君提出の学位請求論文は、Control Theoretic Modeling and Analysis of Molecular Communication Feedback Systems（分子通信フィードバックシステムの制御理論的モデリングおよび解析）と題し全 6 章から構成されている。

近年、細胞や生体ナノロボット（分子ロボット）の間で行われる分子による情報伝達機構を「分子通信」と定義し、その特性を通信工学や制御工学の観点で理論解析する研究が行われている。これまでの分子通信の解析では、ナノロボット間の通信路のみに焦点を当てた解析が主流であり、通信主体であるナノロボット内で生じる化学反応のダイナミクスやナノロボット間のフィードバックにより生じる遅れを考慮した包括的な数理モデルや解析法は存在しなかった。そこで本論文では、分子通信によって双方向にフィードバック制御されるナノロボット群全体をシステムと捉え、そのダイナミクスを記述するシステム論的なモデル表現を提案し、分子通信するナノロボット群の周波数特性、安定性、およびロバスト性を理論的に解析するための方法を提案している。

第 1 章では、分子通信システムの分子生物学的なメカニズムとその工学応用を論じ、本論文の位置づけ、目的、および構成を述べている。

第 2 章では、ナノロボット内の化学反応と分子拡散による通信路から成る分子通信システム全体の反応拡散モデルを導出し、既存研究が扱うモデルとの相違点に明らかにしている。

第 3 章では、通信路の遅れが小さい場合の解析として、密接したナノロボット群により構成される分子通信システムに着目し、ナノロボット群の外乱応答特性の解析法を提案している。具体的には、反応拡散モデルの空間周波数分解を利用して、外乱の空間的特徴によるナノロボット群の応答速度の違いを代数方程式に基づいて解析する方法を提案している。

第 4 章では、通信路の遅れを陽に考慮した解析のために、ナノロボット、通信路、およびそれらの境界をそれぞれ 2 端子対回路で表現した双方向分子通信路のシステム論的なモデルを提案している。さらに、提案モデルを用いて双方向分子通信路の周波数応答特性を解析し、所望の帯域の信号を伝達するための分子通信路の設計指針を明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章で提案した理論的枠組みを発展させ、多数のナノロボットで構成される大規模な分子通信システムの制御理論的なモデル表現を導出し、安定性解析法を提案している。特に、一般に解析が困難である大規模で高次なシステムを単入力単出力システムに等価変換する方法を示し、ナノロボット群の安定性解析を簡易に行う方法を提案している。

第 6 章では、各章の内容をまとめ、本論文の成果と今後の展望を示している。

以上要するに、本研究は分子の拡散を介して情報伝達するナノロボット群を対象として、そのダイナミクスをシステム論的な観点で解析するための数理モデルの枠組み、およびシステムの基本的な特性を解析するための数理的な方法論を提案するものであり、システム制御工学および分子ロボティクスの発展に大きく寄与するものである。

よって，本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

学識確認結果	学位請求論文を中心にして関連学術について上記審査委員会で試問を行い、当該学術に関し広く深い学識を有することを確認した。 また，語学（英語）についても十分な学力を有することを確認した。