



Title	フォトニックDNAプロセッサの実装手法に関する研究
Author(s)	西村, 隆宏
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27480
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	にしむらたかひろ 西村隆宏
博士の専攻分野の名称	博 士（情報科学）
学 位 記 番 号	第 2 5 8 4 3 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 25 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 情報科学研究科情報数理学専攻
学 位 論 文 名	フォトニック DNA プロセッサの実装手法に関する研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 谷 田 純 (副査) 教 授 森 田 浩 教 授 藤 崎 泰 正 准教授 小 倉 裕 介

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、光技術とDNAナノ技術を利用し、センシング、情報処理、アクチュエータ機能を備えたフォトニックDNAプロセッサの実装手法に関する研究成果をまとめたものである。DNAの分子認識能と自律的反応は、ナノスケール領域で生体分子に関する情報を取り扱う際に有用である。また、光と物質との相互作用の利用により、非侵襲かつ遠隔的に外界とプロセッサの情報通信が可能となる。

フォトニックDNAプロセッサの実装には、センシング、演算、出力の一連の動作をナノスケールで実現することが求められる。実現のための要素技術として、分子センサ機能の光制御手法とDNA構造変化を利用した状態遷移表現を検討した。その上で、光信号のタイミングに従って、DNAフラグメントを検知し、特定のフラグメントの有無を判断し、その結果を蛍光信号として出力するナノマシンを提案した。実験により、フォトニックDNAプロセッサの基本動作を確認し、光とDNAを利用してセンサ・演算・アクチュエータの一連の動作が実装できることを示した。

演算機能の拡張手法として、蛍光共鳴エネルギー移動(Fluorescence Resonance Energy Transfer, FRET)による信号処理を導入したDNA論理回路の構成手法を提案する。この手法をDNA足場論理と呼ぶ。入力分子情報に従って、足場となるDNA上の蛍光分子の配置を制御し、FRETによるシグナル伝達を切り替えて演算結果を得る。NOT, AND, OR演算を含む論理回路の動作を実証実験により確認した。乗法標準形で表された演算を処理可能であることから、任意の論理演算が実装可能であることを示した。

DNA足場論理においてメモリ機能を実現するために、FRET回路に組み込み可能なセット／リセットフリップフロップを検討した。蛍光分子の光制御によるFRETの変調を利用し、状態に応じてFRETのオン／オフを切り替えるフリップフロップを実装した。繰り返し遷移や状態保持可能であることを示した。

DNA足場論理を基にしたフォトニックDNAプロセッサの実装は、情報システムの高速化、局所化、制御性の向上だけでなく、外部からの光照射による駆動・制御を可能にすることからも、有効な手法であると考えられる。本研究で示した、分子レベルにおける情報処理の根幹となりうる論理回路やメモリ機能の実装手法であり、フォトニックDNAプロセッサをナノテクノロジー・バイオテクノロジーへと展開するための基盤技術となると考えられる。

多様な分子の相互作用に基づく生体の分子システムは重要な解析対象であると同時に、そのメカニズムは工学応用的見地からも興味深い。ナノ領域の解析や制御を行うには、分子反応に関連する現象をとらえ、得られた情報をその場で処理し、利用することを可能にする分子スケールの情報技術は有用であり、その実現に向けた研究は重要と考えられる。本論文では、フォトニックDNAプロセッサと呼ばれる分子スケールでの情報の取得・処理・制御技術の実装手法を検討し、その有効性を明らかにしている。

光は、生体への侵襲性が小さく、生体分子環境の操作に有効な媒体である。また、光と物質の多様な相互作用を利用することで、外部から非接触に生体分子環境へ働きかけることが可能である。しかし、伝搬光を用いる場合には回折現象により操作スケールが制限されるため、分子スケールの制御は容易ではない。一方、DNAはワトソン・クリックの相補性に基づく分子認識と自律反応性から、ナノスケールの事象の取り扱いや構造体作製において、優れた機能性材料である。また、DNAは他の生体分子との相互作用や生体と親和性が高いことから、細胞内における情報取得や分子機能の制御など幅広い応用が期待できる。

本論文では、フォトニクスとDNAナノ技術を利用して、センシング、情報処理、アクチュエータ機能を備えたフォトニックDNAプロセッサの実装手法を提案している。第一章では、フォトニックDNAプロセッサの概念と特徴、実装のための要素技術が示されている。第二章では、光照射のタイミングに従って、DNAフラグメントの有無を検出し、その結果に従って蛍光信号を変調するフォトニックDNAプロセッサのプロトタイプが提案されている。第三章では、情報処理の性能向上に向け、ナノスケールでの光信号処理に基づく分子論理演算を実現する足場DNA論理が提案されている。また、NOT、AND、OR演算を含む論理回路の動作が実証されている。第四章では、ナノ光信号処理へのメモリ機能の付与をめざし、ナノスケールのフリップフロップ回路の構成とその基本動作が示されている。第五章では、足場DNA論理技術における回路規模や拡張性が検討され、生体環境への応用に向けた今後の展望が明らかにされている。

本論文の成果は、フォトニックDNAプロセッサの開発に有効となる実装技術のみならず、その高機能化に適した論理構成技術を提示するものであり、ナノスケール情報システムの実現に貢献するものと判断される。よって、博士（情報科学）の学位論文として価値あるものと認める。