

第41号

平成31年4月1日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(平成30年度 後学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲 第 116 号	博士(工学)	小間 徹也	ダンピング機能を備えた ULV 用増速式リニア型発電サスペンションの開発とその実証研究・・・1
博甲 第 117 号	博士(工学)	Oguntoyinbo Bolaji	生体電位応答に連動した茸工場ならびにワサビ工場の至適生育環境制御・・・5
博乙 第 54 号	博士(工学)	鈴木 直彦	パイプフレーム構造を用いた小形工作機械の開発・・・10
博乙 第 55 号	博士(工学)	森 貴之	急峻なサブスレッショルド特性を持つ“PN-body tied SOI-FET”の研究・・・15

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	こま てつや 小間 徹也			
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	博甲 第116号			
学位授与の日付	平成31年3月20日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当			
学位論文の題目	ダンピング機能を備えたULV用増速式リニア型発電 サスペンションの開発とその実証研究			
論文審査委員	(主査) 教授	十河 憲夫	教授	中田 政之
		教授 山部 昌	教授	畝田 道雄
		金沢大学		
		准教授 上野 敏幸		

論文内容の要旨

脱炭素社会の実現に向けたEVシフトが加速する中、超小型モビリティ（ULV）が注目されている。ULVはエネルギー消費効率が高く、省エネルギーに貢献する自動車であるが、軽量で低速なため運動エネルギーが減少し、従来の回生ブレーキによる電力回収効果が少ない。このような中、走行時に連続的に発生するサスペンション振動に着目した発電サスペンションの研究が進められている。この発電サスペンションは、発電をおこなう電磁ダンパを中心とした車載振動発電装置の研究が進められているものの、未だ課題が多く、実用化には至っていない。このうちリニア型電磁ダンパは、サスペンション振動に対し発電運動方向が一致するためダイレクトに発電がおこなえ、効率が良い。また機械的信頼性が高く、ULVへの適用が期待できる。しかしこのリニア型電磁ダンパは、他の方式に比べて発電性能が低いことが課題となっている。また、発電性能が低いと電磁コイルには誘導電流が流れず、ローレンツ力が十分に得られない。そのためダンパ機能として必要となる制動力に関しては、あまり議論されていない。

そこで本論文では、リニア型電磁ダンパの発電特性を向上するために、これまでアプローチされていなかった逆位相運動を適用した増速式リニア型発電方法を提案した。また、制振性としてのダンピング特性については、車両運動特性への寄与の観点から、サスペンション制振特性の制御を目指し、電気負荷による電磁力のセミアクティブ制御の可能性を評価した。さらに発電サスペンションシステムを搭載した場合の電力回生効果を、実走行試験により明らかにした。

本論文は6章で構成されており、各章の内容は次に示すとおりである。

第1章では、はじめに普及が期待されるULVのエネルギー効率向上のための電力回生手段について考察し、サスペンションの上下動にともなうエネルギー損失を電気エネルギー

ーに変換して回収する、振動発電サスペンションに着目した。そしてこれまでの先行研究における課題を挙げ、3つの研究目的に絞り込み、以降の2章～6章の構成で研究を推進する流れを述べた。

第2章では、文献調査とレビューに基づき、電磁ダンパ方式としてリニア型電磁ダンパを選定した。そして、この電磁ダンパを用いた発電サスペンションシステムの構成を提案した。その上で、開発する発電サスペンションの発電特性、制振特性および電力回収率の3点について、具体的な開発目標値を設定した。

第3章では、まずリニア型電磁ダンパの発電現象を解明するために、基本的な磁石単動式設計モデル（EMD 1）による誘導起電力特性を解析した。ここでは振動入力により発生する誘導起電力を予測する数値解析手法を検討し、FEMによる静磁場解析と運動解析を連成した数値解析プログラムを構成した。そして設計モデルに基づいた開発性能計算により、その発電特性のフィージビリティの可能性を示した。そしてプロトタイプを製作し、磁場解析における積分点の分解能の確保により、数値解析予測値と実測データとが一致することを述べ、導出した数値解析法の妥当性を示した。

第4章では、発電体に電機子スロットを持つ磁気回路を形成し、材料構成、磁石配列方向および発電素子のスロットコンビネーションの比較をおこない、発電に効果的な構成要素を数値解析により推定した。そして独自の逆位相運動機構を備えた増速式リニア型電磁ダンパ（EMD 2）を提案し、発電目標を達成する設計モデル構成を見出した。次に、制振特性指標である減衰係数の予測のため、発電にともなう電気回路方程式に基づいた数値解析方法を構成し、本研究の設計モデルが目標値を確保できることを示した。これらの予測結果に基づきプロトタイプを製作し、発電特性と制振特性の実機特性評価によって、完成した設計モデルが目標を達成できることを実証確認した。そして数値解析との一致性を確認した。

第5章では、増速式リニア型電磁ダンパ（EMD 2）に、ばね系を組み合わせた発電サスペンションを実験車に搭載して、インパルス振動を与えた場合のサスペンション挙動を検証した。その結果、電気負荷調節により減衰比が有効に調整可能であり、目標を満足する制振性能が得られる条件を確認した。そして平地巡航実験での周波数解析からは、想定していたばね上振動周波数域および、ばね下20Hz程度の振動周波数域においても発電がおこなわれていることが確認でき、広帯域での発電が期待できることが示された。さらにこの実験で得られた電力収支データから1.3%の電力回生効果を確認し、発電サスペンションを搭載することによって、エネルギーの利得が得られることを実証した。

第6章では、各章の結果をまとめ、総括した。

論文審査の結果の要旨

脱炭素社会の実現に向けた自動車のEVシフトが加速する中、超小型モビリティ（ULV：Ultra Light-weight Vehicle）が注目されている。ULVはエネルギー消費効率が高く、省エネルギーに貢献する自動車であるが、比較的軽量かつ低速での走行のため、従来の回生ブレーキによる電力回生効果が少ないという課題がある。その点を改善するため自動車の走行時に発生するサスペンションの振動に着目し電力回生する発電サスペンションの研究が進められているが、未だ課題が多く、実用化には至っていない。

小間氏は本研究において、発電サスペンションの開発目標を明確にし、所望の発電特性が得られる増速式リニア型発電方法を提案している。さらに、乗り心地の観点より、従来の研究ではほとんど検討されてこなかったサスペンションの制振特性の制御を目指した手法も提案している。氏は、ここでの検討過程で、リニア振動に関する運動解析と振動により発生する誘導起電力を検討するFEMによる静磁場解析の連成した数値解析手法を提案し、その上で、蓄電回路の回路方程式に基づき、制振特性が設計目標値を達成できる設計モデルを考案している。この設計モデルを単動式発電モデルを用いた台上試験により検証し、連成した解析手法の精度を確認した。その結果、実験と解析の結果に同一の傾向が見られ、発電特性と制振特性の相互の関係を同時に捉えることが可能となった。

開発目標の検討では、まず、発電効率向上の観点から、発電体に電機子スロットをもつ磁気回路を構成し、材質構成、磁束配列方法およびスロットコンビネーションを比較検討するとともに、独自の逆位相運動機構を提案し増速式リニア型発電ダンパを設計・構築し検討している。その際、電磁現象では、磁気回路に応じたコギング力が問題となるが、解析検討により解決策を模索し、その影響を最小限に抑えた。その結果ULVへの適用において発電目標を達成することを確認し、設計モデルの有効性を示した（本研究内容で論文掲載済み）。次に、制振性能検討では、発電電流に基づくローレンツ力の検討手法の構築により、発電サスペンションの制振特性（減衰係数）の予測を可能とするとともに、蓄電時の電気負荷の制御により制振制御の可能性を示した。その結果、発電性能と制振性能の折衷を図った性能予測により、振動エネルギーに対する発電エネルギーおよび制振に関する消費エネルギーの見積もり検討から、その両立の可能性を示した（本研究内容で論文掲載済み）。

これらの解析手法に基づき、増速式リニア型発電ダンパのプロトタイプを製作し台上試験で発電性能および制振特性を明らかにし本方式のフィジビリティおよび解析手法の妥当性を確認している。併せて、それを組み込んだプロトタイプサスペンションを実験車に搭載実証することで、路面からの振動に対応した自動車サスペンションの挙動解析に基づいた検討で発電特性や制振性を検討し、本リニア型発電サスペンションが幅広い周波数域の振動への対応の可能性を確認し、同種の発電方式の適用の可能性および有効性を示唆する内容が示された。

本論文は、6章で構成されている。第1章では、本研究の背景、ならびに本研究が解決すべき課題とアプローチ方法など、本論文の目的および意義を明確にしている。第2章で

は、電磁ダンパの現状のレベルとそれぞれの位置づけについて述べ、選定したリニア型電磁ダンパによる発電サスペンションシステム方式を提案している。その上で、開発する発電サスペンションの発電特性、制振特性および発電電力回収に関する課題と開発目標値を明確にしている。第3章では、本研究を展開する上で必要な電磁発電特性の解析手法構築要領を述べている。その上で、基本的な磁石単動式モデルに適用することで発電特性（誘導起電力特性）を検討し、モデルに基づいたプロトタイプとの比較により解析手法の精度を確保し、導出した解析手法の妥当性を示している。その際、発電サスペンションの構築に当たっての課題解決のポイントを明らかにしている。第4章では、開発目標値達成のため、まず、発電効率向上についての検討と独自の逆位相運動機構を提案、発電目標を達成する設計モデルを構成している。次に、制振特性目標値の検討にあたり、先の数値手法に付加する構成として電磁制振解析手法を構築し、ダンピング特性が目標値を確保できる設計モデルを完成している。これらの解析手法に基づき、増速式リニア型発電ダンパのプロトタイプを製作し、発電性能および制振特性を明らかにし、本方式のフィジビリティおよび解析手法の妥当性を評価している。第5章では、増速式リニア発電ダンパをもとに発電サスペンションを構成し、実機特性を実験車による平地巡行試験等を通して検証している。開発した発電サスペンションの発電特性、制振特性および発電電力回収率について開発目標値を評価している。併せて、本発電方式の、幅広い振動周期への対応性なども確認し、同種の振動エネルギー回収の可能性を示唆する内容が示された。第6章では、本研究の総まとめとして、工業的意義、工学的な意義について述べられている。

これらの研究成果は、理論、解析、設計、製作、実験評価を関連付けることにより、要求する開発目標にあったサスペンションシステムの設計から実証までを一貫して実施するものであり、今後の設計検討に寄与するものとして評価できる。また、このことはまさに高信頼ものづくりを体現したものであり、プロトタイピングを通じた技術的実証研究の方法論を示すものといえる。

本学大学院博士課程在学中において、査読あり論文2編（他、査読中論文1編）、国外発表1件、国内発表5件を行い、併せて、実車走行実証ではワールドエコノムーブ大会で技術賞を受けるなど、学協会でも高く評価されている。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	オグントインボ ボラジ Oguntoyinbo Bolaji			
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	博甲 第117号			
学位授与の日付	平成31年3月20日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当			
学位論文の題目	生体電位応答に連動した茸工場ならびにワサビ工場の 至適生育環境制御			
論文審査委員	(主査) 教授	平間 淳司	教授	山口 敦史
		教授 會澤 康治	教授	鈴木 亮一
		石川県立大学		
		教授 村上 賢治		

論文内容の要旨

世界の人口増加と都市化による農地の減少、さらに異常気象の多発などに伴い農作物の安定供給が喫緊の課題となり、近年、植物工場での食物栽培が注目されている。しかし、露地栽培に比べて播種から出荷に至るランニングコスト増加により普及が遅れている。

本研究では茸や植物栽培の安全・安心・安定供給や工場内でのランニングコスト削減を目指し、茸・植物工場での高効率人工栽培が実現できる至適環境制御の栽培パラメータの決定および新たな工場設備などの提案である。本研究の最大特色は、栽培期間中の茸や植物から誘発する生体電位を計測し「生き物の気持ちを知り」、それを生育環境制御パラメータとすることであり、本手法は国内外では類がなく斬新な発想である。本論文は茸工場と植物（ワサビ）工場の2種類について、至適生育環境パラメータの重要性の目的と意義を論じている。（第1章）

茸（マイタケ）工場での生育促進効果を高めるために、栽培期間中に茸の子実体から誘発した生体電位を解析して生育環境制御を目指している。本研究では茸の生体電位の環境応答から栽培環境を自動制御するオリジナルのSMA（Speaking Mushroom Approach）方式の制御システムを提案し、茸工場での実証試験にて一定の成果を得ている。（第2章）また、黒と白マイタケの生体電位の外的光刺激応答の差異を突き止め、茸工場での光刺激提示順序の変更で生育促進効果を提案している。さらにSMA方式の環境制御パラメータの変更で至適環境の新たな提案も行っている。（第3章）

一方、人工栽培が困難である植物（ワサビ）工場に関して、本研究ではいち早く、IoT、ICT、センサーネットワークを導入した小規模のワサビ工場を設置して試験栽培を試みた結果を論じている。最近の植物工場では、各種生体計測に基づき生育環境を調節するSPA（Speaking Plant Approach）方式によるシステムの導入により、生産効率を高めている。本

研究では従来の SPA 方式に、上述した茸で提案した SMA 方式のようにワサビの生体(葉面)電位も栽培期間中に連続計測し「わさびの気持ち」を間接的に知ることを追加して、更なる至適環境制御を目指して高効率栽培技術を提案している。(第4章) 以下に、その概要を述べる。

茸研究では栽培期間中に生体電位を計測して、そのデータから至適生育およびランニングコスト削減を目指し光照射制御可能な SMA 方式の制御システムを試作して実証試験を行った。生体電位から、電位変動のエネルギー強度、短区間や長区間の分析区間長でのバイオリズム変動特性から、光源の照射タイミング、光質切替え、照射強度などの変更を自動的に行った。その結果、茸工場現場では栽培効率の向上が確認できた。ところが、更なる高効率栽培・ランニングコスト削減を狙う場合、設定したパラメータの各閾値の正確な決定が困難であったことから、新たに茸の培地を変更して外的光刺激の生体電位応答特性の再実験を試みた。その結果は、380nm~540nm の光刺激波長範囲で生体電位応に特定波長域でピーク電圧が確認できた。その結果を踏まえ、形態形成の再実験の結果、380nm の光刺激波長では、菌傘は黒色化し、しかも展開が発達して菌柄が短くなった。一方、520nm と 540nm の光刺激波長は菌傘の展開が少なく、白色化して菌柄が徒長した。収穫後の新鮮重は緑色の波長域では重かった。この結果を踏まえ、今後の SMA システムの効果的な制御パラメータの設定条件の新規提案を行った。(第2章~第3章)

一方、ワサビ工場に関しては、一般にワサビ栽培は厳しい環境パラメータの設定が必要である。当初、当該研究室では葉菜類全般の人工栽培を目指した Seeds-N システムであったが、本研究ではワサビ栽培に特化したシステムに大幅にシステム制御パラメータを変更した。その結果、同一栽培期間中に工場内で栽培したワサビは、露地栽培に比べて根茎の生育速度が約 4 倍であった。この結果はワサビ工場の環境制御技術が将来の人工栽培に有効となった。更なる生育促進効果とランニングコスト削減を目指した養液の pH 変化実験は、pH の高低でワサビを栽培して生体電位応答および形態形成の関係を調べた。その結果、高 pH よりも低 pH で栽培した方が、より大きな葉面電位応答が観測でき生長促進効果が認められ、根茎の発達に寄与した。一方、高 pH ではワサビは、クロロシス状態が葉に発生し生育阻害となった。そこで、養液の pH の高低がワサビの形態形成に及ぼす効果や他の環境刺激因子、および葉面電位解析に使用するための閾値のパラメータを再度調べるために 3 種類のオリジナル実験装置を試作した。すなわち、(1)WECMC は栽培環境の溶液濃度条件と光刺激条件を共通化しながら、空気環境パラメータをそれぞれ制御できる。(2)DWEC は空気組成と養液の設定値を共通にして、光刺激条件のみ変化できる。(3)DWEC や WECMC では実験期間中に毎日の葉のクロロフィル蛍光の観測装置も自作した。このような装置でワサビ栽培を実施することで、今後のシステム性能のさらなる向上を目指すことが可能となった。すなわち、ワサビの葉面電位、形態形成およびクロロフィル蛍光に関する外的刺激環境効果の解明、葉面電位応答から「ワサビの気持ち」を推定しながら生育環境制御パラメータの閾値決定が見込めることで、新たな健康診断技術への応用も提案した。

以上のように、本研究では栽培期間中に連続計測する葉面電位データから生育環境制御のパラメータの閾値を自動的に設定し、生育進行を定量的に推定するための早期健康診断

が可能となる新 SPA 方式システムを提案した。(第 4 章～第 5 章)

最後に、茸とワサビ栽培の茸・植物工場での至適環境制御の本システムの優位性と、将来の展望と課題等について論じている。(第 6 章)

論文審査の結果の要旨

世界の人口増加と都市化による農地の減少、さらに異常気象の多発などに伴い農作物の安定供給が喫緊の課題となり、近年、植物工場での食物栽培が注目されている。しかし、露地栽培に比べて播種から出荷に至るランニングコスト増加により普及が遅れている。

本研究では茸や植物栽培の安全・安心・安定供給や工場内でのランニングコスト削減を目指し、茸・植物工場での高効率人工栽培が実現できる至適環境制御の栽培パラメータの決定、および新たな工場設備などの提案である。本研究の最大特色は、栽培期間中の茸や植物から誘発する生体電位を計測し「生き物の気持ちを知り」、それを生育環境制御パラメータとすることであり、本手法は国内外では類がなく斬新な発想である。本論文は6章で構成されており、各章の概要を以下に示す。

第1章では、本研究の位置づけと茸工場と植物（ワサビ）工場の2種類について、至適生育環境パラメータの重要性と意義を述べている。

第2章では、茸（マイタケ）工場での生育促進効果を高めるために、栽培期間中に茸の子実体から誘発した生体電位を解析して、奇抜なアイデアでの生育環境制御に成功したことを論じている。すなわち、本研究では周囲環境変化から茸の生体電位応答により、栽培環境を自動制御するオリジナルのSMA (Speaking Mushroom Approach) 方式の制御システムを提案し、茸工場での実証試験にて一定の成果を得たことを言及している。すなわち、栽培期間中に茸子実体の生体電位を計測して、そのデータから至適生育およびランニングコスト削減を目指し光照射制御可能なSMA方式の制御システムを考案・試作して、茸工場内で実証試験を行った。生体電位から、電位変動のエネルギー強度、短区間や長区間の分析区間長でのバイオリズム変動特性から、光源の照射タイミング、光質切替え、照射強度などの変更を自動的に行った。その結果、茸工場現場では栽培効率の向上が確認できた。

第3章では、黒と白マイタケの生体電位の外的光刺激応答の差異を突き止め、茸工場での光刺激提示順序の変更で生育促進効果を提案している。さらにSMA方式の環境制御パラメータの変更で至適環境の新たな提案も行っている。すなわち、更なる高効率栽培・ランニングコスト削減を狙う場合、設定したパラメータの各閾値の正確な決定が困難であったことから、新たに茸の培地を変更して外的光刺激の生体電位応答の再実験を試みた。その結果、380nm~520nmの光刺激波長範囲で生体電位応答に特定波長域でピーク電圧が確認できた。その結果を踏まえて形態形成の再実験の結果、380nmの近紫外域の光刺激波長では、菌傘は黒色化し、しかも展開が発達して菌柄が短くなった。一方、520nmと540nmの緑色域の光刺激波長は菌傘の展開が少なく、白色化して菌柄が徒長した。収穫後の新鮮重は緑色域では重かった。この結果を踏まえ、今後のSMAシステムの効果的な制御パラメータの設定条件の新規提案を行った。

第4章では茸から植物栽培に話題を移し、人工栽培が大変困難である根菜類の植物（ワサビ）工場に関して、本研究ではいち早く、IoT、ICT、センサーネットワークを導入し、ワサビ栽培に特化した至適生育環境制御パラメータを用いた、小規模の水耕型のワサビ工場を研究室内に設置して試験栽培を試みた結果を論じている。なお、最近の葉菜類や果菜

類の一般の植物工場では、各種生体計測に基づき生育環境を調節する SPA (Speaking Plant Approach) 方式によるシステムの導入により生産効率を高めている。本研究では従来の SPA 方式に、上述した茸で提案した SMA 方式のように、ワサビの生体 (葉面) 電位も栽培期間中に連続計測して「ワサビの気持ち」を間接的に知ることを追加して、更なる至適環境制御を目指した高効率栽培技術を提案している。当初、当該研究室では葉菜類全般の人工栽培を目指した Seeds-N (特注システム) の生育システムであったが、本研究ではワサビ栽培に特化した生育制御パラメータに大幅に変更した。その結果、同一栽培期間中に工場内で栽培したワサビは、露地栽培に比べて根茎の生育速度が約 4 倍となった。この結果はワサビ工場の環境制御技術が将来の人工栽培に大変有効である確信を得た。そして、更なる生育促進効果とランニングコスト削減を目指した養液の pH 変化実験は、pH の高低でワサビを栽培して生体電位応答および形態形成の関係を調べた。その結果、低 pH よりも高 pH で栽培した方が、より大きな葉面電位応答が観測でき生長促進効果が認められ、根茎の発達にも寄与した。一方、高 pH ではワサビは、クロロシス状態が葉に発生して一部生育阻害となることを突き止めている。

第 5 章では、養液の pH の高低がワサビの形態形成に及ぼす効果や他の環境刺激因子、および葉面電位応答解析に使用するための閾値のパラメータを再度調べるために、3 種類のオリジナル実験装置を試作して至適生育環境制御パラメータの検討について論じている。すなわち、(1) WECMC (Wasabi Environmental Control and Chamber) は栽培環境の養液濃度条件と光刺激条件を共通化しながら、空気組成パラメータをそれぞれ制御できる。(2) DWEC (Dual Wasabi Environmental Chamber) は空気組成と養液成分の設定値を共通にして、光刺激条件のみ変化できる。(3) DWEC や WECMC の両装置で実験期間中に毎日の葉のクロロフィル蛍光の観測ができる装置も自作した。このような装置でワサビ栽培を実施することで、今後のシステム性能のさらなる向上を目指すことが可能となった。すなわち、ワサビの葉面電位、形態形成およびクロロフィル蛍光に関する外的刺激環境効果の解明、葉面電位応答から「ワサビの気持ち」を推定しながら生育環境制御パラメータの閾値決定が見込めることで、新たなワサビの健康診断技術への応用も提案した。

以上のように、本研究では栽培期間中に連続計測する葉面電位データやその他の生体計測データから、今後は至適生育環境制御のパラメータの閾値を自動的に設定し、生育進行を定量的に推定するための早期健康診断が可能となる新 SPA 方式システムを提案した。

第 6 章では、全体の統括を含め茸とワサビ栽培の茸・植物工場での至適環境制御の本システムの優位性と、将来の展望と課題等についてまとめている。

申請論文の内容は、未来型の高効率な茸・植物工場の発展に資する生育環境制御方式の提案を行っており、その成果は査読付き論文 3 件 (うち 2 件英文)、国際会議 4 件 (口頭発表)、国内口頭発表 22 件、受賞 2 件 (論文奨励賞、優秀発表賞) であり、申請論文の研究成果が学会において高い評価を得ていることが客観的に裏付けるものである。

なお、技術者倫理における高度な倫理観についても確認済みである。よって、本論文は博士 (工学) の学位に十分値すると判断する。

氏名	すずき なおひこ 鈴木 直彦		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博乙 第54号		
学位授与の日付	平成31年3月20日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	パイプフレーム構造を用いた小形工作機械の開発		
論文審査委員	(主査) 教授	森本 喜隆	教授 新谷 一博
		教授 加藤 秀治	
		金沢大学	産業技術総合研究所
		教授 浅川 直紀	岡崎 祐一

論文内容の要旨

我が国は世界でも類を見ない高齢化社会である。これに伴い日本の製造業を支える労働人口の減少と実生産年齢の高齢化が進んでいる。このため、高等な技術や技能を有する人材の確保も難しくなっている。リーマンショック以降、日本企業は生産拠点を海外中心で展開してきたが、2016年頃から、この企業の約12%が生産拠点を日本国内に移す傾向が見られる。さらに2019年までには約8%の企業が国内回帰を計画していると言われている。このため、今後の日本の製造業にとっては、限られた労働力と資源の有効活用が必要となるだけでなく、限られた工場スペースにいかにか生産設備をコンパクトに配置するかが重要な課題となってくる。一方、世界規模で考えるならば、環境保護や省エネルギー化の実現が叫ばれており、具体的にはCO₂削減を目的とした脱炭素化社会を実現するためのクリーンエネルギーの導入やトータルエネルギーの削減が必要とされている。経済産業省は、エネルギー削減指標を、2030年度は2016年度の比率で原油換算3%減、CO₂排出量21%減としている。この指標を受けて製造業界には、次世代自動車として注目されているEV車へのシフト対応や、設計の最適化によるエネルギーロスの削減、ロボットやAI技術導入による生産現場の効率化が求められている。このことは、製造業界がエネルギー削減を行いつつ生産性の向上を図ることが必要となり、小さな工場で小形生産機械を多数設置することが一つの解決策につながる。特に自動車産業、家電産業で有効であるため、結果的に日本企業の国内回帰を支援する有効な手段の一つになる。ここで、工業製品の生産を支えるものづくりの中心的役割は、マザーマシンである工作機械が受け持つ。「部品の小型化」が進む中、その大きさに見合った「小形の工作機械」の導入がこの課題解決に有効となることから、工作機械の小形化は喫緊の課題である。

本研究では、この課題を解決するために、生産能率を低下させずに省エネルギー化を可能とする小形工作機械の開発を目的として、基本構造体をパイプフレーム構造としたCNC

工作機械を製作し、その性能を検証する。まず、組立て効率の観点からパイプフレーム構造を構成するパイプ材とブロック材とを接着剤を用いて結合するため、その結合強度の比較、結合部形状の選定、及び耐久性について実験的に検証する。

次に、これから得た知見を基にパイプフレーム構造の試験用モデルを製作し、静剛性の確認及び耐久性の検証を行い、工作機械用フレームとしての実用性を示す。これらの成果を踏まえて基本構造体にパイプフレーム構造を用いた試作 CNC 旋盤を製作し、機械剛性および加工能力について評価し、その実用性について評価、検証を行う。

ここで、基本構造体をパイプフレーム構造とすると、軽量化を図ることが出来るが、質量の減少による熱容量の低下が生じる。基本構造体の熱容量が低下すると熱応答性が高まり、加工に伴う機械各部の発熱や環境温度変化によってパイプフレーム構造に温度分布が生じ、結果的に工作機械の熱変形を招くため、安定した加工精度が得られなくなることが懸念される。また、従来の基本構造体と比較して、静剛性の低下も懸念される。そこで、パイプフレーム構造の特性を生かした、熱変形制御システム、振動制御システムの適用を行い、従来の工作機械と同等の加工性能、及び、加工精度の安定化が得られることを検証する。最後に、これらの開発において得られた成果を踏まえて、小形、軽量かつ、金属加工が可能なデスクトップ型マシニングセンタを開発し、工作機械としての機械性能及び加工性能等の実用性について検証を行う。

第 1 章では生産現場を取り巻く環境と、それに伴う工作機械に求められる課題について概説する。この課題を解決するためには、工作機械の小形化が有効である理由を述べるとともに、その具体的解決策として、工作機械の基本構造体に、従来使用されなかったパイプフレーム構造の適用を提案することで、本研究の新規性を示し、併せて研究の目的について述べる。

第 2 章ではパイプフレーム構造を設計する上で必要となるのは、パイプ材とブロック材間の接合方法の選定である。このため、化学系接着剤を用いた結合方法に着目し、試験用モデルを作製し、強度試験と耐久性試験を行い、工作機械の基本構造体に用いることについての妥当性の検証を行う。

第 3 章では、第 2 章で得られた結果を基にパイプフレーム構造 CNC 旋盤の製作を行う。これと従来の鋳鉄製の CNC 旋盤と比較し、パイプフレーム構造 CNC 旋盤の静剛性及び加工性能について検証する。

第 4 章では、パイプフレーム構造の特性を利用した熱変形制御システムを考案し、この効果について検証を行う。熱変形の起点となるブロック材にペルチェ素子を取付け、ブロック材の温度分布を対称化することで、工作機械の熱変形による加工径変化を抑える効果を確認し、実用性を評価する。

第 5 章では、パイプフレーム構造の特性を利用した振動制御システムを提案し、この効果について検証を行う。主軸回転に伴う強制振動をアクチュエータを用いたアクティブ振動制御によって削減し、工作物の真円度が向上する効果を確認する。

第 6 章では、2 章、3 章で得られたパイプフレーム構造を構成するための設計手法、及び、製作方法を基に、デスクトップ型マシニングセンタを製作する。パイプフレーム構造

を用いてデスクトップ加工機とすると、機械の小形化、軽量化を図ることが可能となるが、各スライド軸の小形化、制御装置の小形化等、機械に合わせた制御方法が求められる。この小形化に必要な技術の検証と、機械性能及び加工性能の検証を行う。

第7章では本研究を通して得られた成果をまとめ、研究成果の工学的貢献に対する位置づけと今後の課題と展望について述べる。

論文審査の結果の要旨

我が国は世界でも類を見ない高齢化社会である。これに伴い日本の製造業を支える労働人口の減少と実生産年齢の高齢化が進んでいる。このため高等な技術や技能を有する人材の確保も難しくなっている。リーマンショック以降、日本企業は生産拠点を海外中心で展開してきたが、2016年頃からは、この企業の約12%が生産拠点を日本国内に移す傾向が見られる。このため、今後の日本の製造業にとっては、限られた労働力と資源の有効活用が必要となるだけでなく、限られた工場スペースにいかにか生産設備をコンパクトに配置するかが重要な課題となってくる。一方、世界規模で考えるならば、環境保護や省エネルギー化の実現が叫ばれており、具体的にはCO₂削減を目的とした脱炭素化社会を実現する必要がある。経済産業省は、エネルギー削減指標を、2030年度は2016年度年の比率で原油換算3%減、CO₂排出量21%減としている。製造業には、次世代自動車として注目されているEV車へのシフト対応や、設計の最適化によるエネルギーロスの削減、ロボットやAI技術導入による生産現場の効率化が求められている。このことは、製造業界がエネルギー削減を行いつつ生産性の向上を図ることが必要となり、小さな工場で小形生産機械を多数設置することが一つの解決策につながる。現状では、「部品の小型化」が一層進む中、その大きさに見合った「小形の工作機械」の導入がこの課題解決に有効となることから、小形工作機械の開発は喫緊の課題である。

本研究では、この課題を解決するために、基本構造体をパイプフレーム構造としたCNC工作機械を製作し、その性能と有効性を検証することを目的としている。

まず、パイプ材とブロックの結合強度の比較、結合部形状の選定、及び耐久性について実験的に検証している。これから得た知見を基にパイプフレーム構造の試験用モデルを製作し、静剛性の確認及び耐久性の検証を行い、工作機械用フレームとしての実用性を示している。

次に、これらの成果を踏まえて基本構造体にパイプフレーム構造を用いた試作CNC旋盤を製作し、その機械剛性および加工能力について評価しその実用性について評価、検証を行っている。ここで、基本構造体をパイプフレーム構造とすると、質量の減少による熱容量の低下が生じる。

基本構造体の熱容量が低下すると熱応答性が高まり、加工に伴う機械各部は、発熱や環境温度変化によって温度分布が生じ、結果的に工作機械の熱変形を招くため、安定した加工精度が得られなくなる。また、従来の基本構造体と比較して、静剛性の低下も懸念されたため、パイプフレーム構造の特性を生かした、熱変形制御システム、振動制御システムの適用を行い、従来の工作機械と同等の加工性能、及び、加工精度の安定化が得られることを検証している。

最後に、これらの開発において得られた成果を踏まえて、小形、軽量かつ、金属加工が可能なデスクトップ型マシニングセンタを開発し、工作機械としての機械性能及び加工性能等の実用性を検証している。

第1章では生産現場を取り巻く環境と、それに伴う工作機械に求められる課題について概説している。工作機械の小形化を具体的解決策に掲げ、工作機械の基本構造体に、従来使用されなかったパイプフレーム構造の適用を提案することで、本研究の新規性と研究の目的を述べている。

第2章ではパイプフレーム構造を構成するパイプ材とブロック材間の接合方法の選定を行う。化学系接着剤を用いて試験用モデルを作製し、強度試験と耐久性試験を行い、工作機械の基本構造体に用いることについての妥当性の検証を行っている。

第3章では、第2章の結果を基にパイプフレーム構造 CNC 旋盤の製作を行い、従来型鋳鉄製の CNC 旋盤の性能と比較することで、開発機の静剛性及び加工性能について検証している。

第4章では、パイプフレーム構造の特性を利用した熱変形制御システムを考案し、この効果について検証を行う。ブロック材の温度分布を対称化することで、工作機械の熱変形による加工径変化を抑える効果を確認し、実用性を評価している。

第5章では、パイプフレーム構造の特性を利用した振動制御システムを提案し、この効果について検証を行う。主軸回転に伴う強制振動を、アクチュエータを用いたアクティブ振動制御によって削減し、工作物の真円度が向上する効果を確認している。

第6章では、デスクトップ型マシニングセンタを製作する。パイプフレーム構造を用いてデスクトップ加工機を製作し、各スライド軸の小形化、制御装置の小形化等、機械に合わせた制御方法を用いた。この小形化に必要な技術の検証と、機械性能及び加工性能の検証を行っている。

第7章では本研究を通して得られた成果をまとめ、研究成果の工学的貢献に対する位置づけと今後の課題と展望について述べる。

以上、本論文の審査を行った結果、博士（工学）に十分値すると判断する。

氏名	もり たかいゆき 森 貴之		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博乙 第55号		
学位授与の日付	平成31年3月20日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	急峻なサブスレッショルド特性を持つ“PN-body tied SOI-FET”の研究		
論文審査委員	(主査) 教授	井田 次郎	教授 山口 敦史
		教授 宮田 俊弘	
		産業技術総合研究所	奈良先端科学技術大学院大学
		森 貴洋	教授 太田 淳

論文内容の要旨

本論文は、新規考案したトランジスタである“PN-body tied (PNBT) Silicon on Insulator Field-Effect Transistor (SOI-FET)”に関する研究結果をまとめたものである。本論文の目的は、急峻なサブスレッショルド特性を持つPNBT SOI-FETを設計、メカニズムの解析を行い、極低消費電力大規模集積回路 (Large-Scale Integration circuit: LSI) 及び極低電力用レクテナ整流デバイスへの応用可能性を追求することである。

これまでLSIは、構成デバイスである金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor: MOSFET) の微細化によって高性能化、高密度化、低消費電力化をしてきたが、その性能改善は限界を迎えつつある。特に低消費電力化に関しては、MOSFETのスウィッチング性能を表すサブスレッショルド係数 (Subthreshold Slope: SS) が動作原理に基づく物理的限界を持っているため、電源電圧を一定値以下にすることが難しく、現在からの劇的な改善は望めない。そこで今、理論限界を下回る低い電源電圧で急峻スウィッチングが可能なデバイス (steep slope devices) の研究が盛んにおこなわれている。steep slope devicesは従来のMOSFETとは異なる原理で動作し、例えば、トンネル現象を利用したトンネル電界効果トランジスタや、強誘電体キャパシタと通常のキャパシタを接続した際に発生するとされる負性容量効果を利用した負性容量電界効果トランジスタが主として研究されている。これらのデバイスは、理論的には非常に優れた性能を持つと期待されているが、実測結果ではまだ十分な特性が得られていない。本研究では新構造デバイスのPNBT SOI-FETを提案し、先行研究を凌ぐ極急峻なSS (< 1 mV/decade) を実証した。また、応用としてPNBT SOI-FETをRF環境発電 (Radio Frequency-Energy Harvesting: RF-EH) 用の整流デバイスに活用する検討を行った。

PNBT SOI-FET の特徴は、これまでの先行研究と比較しても非常に低いドレイン電圧で動作する点にある。PNBT SOI-FET はフローティングボディ効果と呼ばれる現象を利用して極急峻な SS を達成している。フローティングボディ効果はキャリアの蓄積を利用する現象で、従来型の SOI MOSFET でも現れることが知られている。しかし、高いドレイン電圧が必要なインパクトイオン化現象を用いなければならず、低消費電力用デバイスに使用することは難しい。本研究では、SOI MOSFET に PN 接合を持つボディ端子を繋げた PNBT 構造を考案した。この構造では、ボディ端子からキャリアを注入し、フローティングボディ効果を引き起こすことができる。考案方式ではインパクトイオン化現象を用いる必要がないため、ドレイン電圧を 0.1 V にすることが可能となった。また、キャリアの動きを解析し、デバイス中に形成された pnpn サイリスタ構造によるフィードバック効果が働き、キャリアが注入される動作メカニズムを提案した。極急峻な SS は、n-channel 及び p-channel 両方のタイプで確認することができた。すなわち、PNBT SOI-FET を用いた相補型 MOS が実現可能であることを示唆できた。更に、本デバイスは現在商用で使用されている SOI MOSFET と同じ製造ラインで作製された。steep slope devices は Si 以外の III-V 材料や、通常の Si-LSI では使用されない工程を使用するものが多い中、通常 Si プロセスで作製できたことはコストの面でも優位であることを意味している。ただし、PNBT SOI-FET はゲート長を縮小化すると on/off 比が減少すると分かった。そこで、デバイスシミュレーションによって特性の更なる改善検討を行った。結果、ボディ側 pn 接合部の幅及び不純物濃度を最適化することで、on/off 比を増大させることができた。これはゲート長縮小化による on/off 比減少が、他のデバイスパラメータの最適化によって補償できることを示している。

さらに応用として、PNBT SOI-FET を RF-EH 用レクテナ整流デバイスに活用するための基礎検討を行った。RF-EH は地上デジタルテレビ、携帯電話、Wi-Fi 等の電波を用いる環境発電方式で、広範囲にエネルギーが存在し、非接触でそれらを集めることができるため、有望な環境発電方式の一つである。しかし、得られるエネルギーが非常に小さく、極低入力電圧を整流し、エネルギーとして取り出す必要があるため、レクテナに使用できる適したデバイスの開発が課題となっている。そこで、ダイオード接続した PNBT SOI-FET を整流デバイスとして使用することで、従来型のダイオードでは困難だった極低入力電圧における整流特性を実証した。静特性では 50 mV 以下の入力でも極急峻なターンオン特性を確認した。また、動特性では 30 MHz 入力までの半波整流特性及び交流電圧 10 mV の検波を確認した。

本研究によって、PNBT SOI-FET を RF-EH 用レクテナの整流デバイスとして使用し、その集めたエネルギーによって PNBT SOI-FET を用いた極低消費電力 LSI を駆動させる、センサーネットワークシステムへの展望を得ることができたと言える。

論文審査の結果の要旨

大規模集積回路 (Large Scale Integrated Circuit : LSI) は、コンピュータに代表される様々な情報処理端末の演算処理に使用され、現代社会において、なくてはならない技術の一つである。さらに、近年、地球上に一兆個のセンサーをばらまき、環境モニターや防災等を行うトリリオン・センサーユニバースのコンセプトに代表される極低電力 IoT 分野や、インプラント医療分野では、電池を使わない自立的なシステムが求められている。そこでは、エネルギー・ハーベスティング (環境発電とも言われる)、すなわち、環境中の振動、温度差、さらには、電磁波から得られる微弱な電力で動作する極低消費電力 LSI が求められている。

これまで LSI は、その構成素子である金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor: MOSFET) の微細化によって高速化、高密度化、低消費電力化を達成してきたが、近年、その性能改善は限界を迎えつつある。特に低消費電力化に関しては、MOSFET のサブスレッショルド特性の理論限界によって制限されている。サブスレッショルド特性とは MOSFET のスイッチング性能を表すパラメータで、値が小さいほど、より低い電源電圧でスイッチングを行うことが可能になり、消費電力を下げることができる。しかし、通常の MOSFET では室温で約 60 mV/decade という値が理論下限値となっている。この限界を超えるため、異なる動作原理で、非常に小さい値のサブスレッショルド特性を達成しようとする研究が、現在、シリコン電子デバイス分野のホット・トピックスの一つになっている。量子力学の効果であるトンネル現象を使うデバイス、強誘電体を使った負性容量デバイスなど複数の候補デバイスが研究されているが、まだ解決すべき課題が多く残っているのが現状である。

申請論文では、新構造デバイスとして“PN-body tied SOI-FET”を提案し、通常の MOSFET の理論限界を超える非常に小さな値のサブスレッショルド特性を実現し、極低消費電力 LSI に応用することを目的としている。また、至近の応用として、このデバイスを RF 環境発電 (Radio Frequency-Energy Harvesting) 用の整流素子として活用する検討を行っている。

申請論文は全 6 章で構成されており、各章の内容は次に示すとおりである。

第 1 章では、研究の背景として、極低消費電力 LSI 及び極低入力電力用整流デバイスの必要性を述べ、さらに、低消費電力化に向けた MOSFET のこれまでの取り組みの歴史、RF 環境発電に向けた先行研究、MOSFET 及びダイオードの理論限界とそれを克服するための新原理デバイスの先行研究の現状と課題を、広範囲な文献調査を基にまとめている。

第 2 章では、申請論文中で使用するデバイスの作成方法とデバイスシミュレーション方法に関して説明している。

第3章では“PN-body tied SOI-FET”の構造及び基本アイデアについて説明し、シミュレーションによって動作メカニズムの詳細な解析を行っている。さらに、実際にデバイスを作製し、実測においてPチャネル型及びNチャネル型ともに低電圧で非常に小さな値のサブスレッショルド特性 ($<1\text{mV/decade}$) が発生することを示し、LSI 応用へのキーとなる相補型 MOS への展開可能性について論じている。

第4章では、“PN-body tied SOI-FET”の更なる特性改善のために、シミュレーションによる検討を行っている。第3章の実測結果を受けて、物理パラメータの見直しを行い、より実測に近い値でのシミュレーションを行っている。結果として、“PN-body tied SOI-FET”のさらなる性能向上が、デバイス寸法、不純物濃度を最適化することにより可能であるとの方向性を示している。

第5章では、“PN-body tied SOI-FET”の至近の応用としてRF環境発電用の整流デバイスへの適用について述べている。RF環境発電は、地上デジタルTV波、Wi-Fi波などの環境中にある電磁波からの発電を目指すものであり、非常に小さいエネルギー、すなわち、極低電圧での整流が必要になる。ダイオード接続した“PN-body tied SOI-FET”を実測し、極低電圧で急峻なターンオン特性を持つことを実証し、さらに、半波整流回路を作成し、現在知られているダイオードでは非常に困難な 10mV の極低電圧での整流特性を確認している。

第6章では、各章の結果をまとめ、今後の展望について述べている。

“PN-body tied SOI-FET”は、半導体デバイス、特にMOSFETへの深い洞察から生み出されたものである。シミュレーションには半導体物理と科学技術計算の知識、デバイス作製には現代のLSI作製プロセスへの十分な理解が必要である。ここで確認されている特性、特に、Pチャネル型及びNチャネル型共に理想に近い電流電圧特性を得ている点は、現在、多く研究されているトンネル、負性容量デバイスを凌駕するものである。また、技術が蓄積されたシリコン半導体での実証であり、極低消費電力LSIへの実用に近い成果であると考えられる。

以上、申請論文に記載されている研究成果は、極低電力IoT分野の今後の本格的な普及に資するものと考えられる。

申請論文の研究成果は、有審査英語論文4件と有審査国際学会6件(口頭発表4件、ポスター発表2件)として、申請者が筆頭著者にて発表している。有審査英語論文のうち2件は、IEEEの国際学会で上位10件程度が選ばれるSelected Paperとなり、電子デバイス分野の世界的な代表誌である *IEEE Journal of the Electron Devices Society*にて、査読、採択されており、研究成果の評価の高さを裏付けるものである。また、各国際学会では、採択された中でも上位評価のものが口頭発表となるため、これも研究成果が学会において

高い評価を得ていることを客観的に示している。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。