

平成25年度 戦略的基盤技術高度化支援事業（継続事業）

「伸び変形率の大きな布状発電シートの開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第 1 章	研究開発の概要	1
1.1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.1.1	研究背景と目的	1
1.1.2	研究概要及び目標	2
1.1.2 (1)	研究概要	2
	① 伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発	2
	② 伸び変形に強い電極形成技術の開発	2
	③ 分極条件の最適化	2
	④ 発電シートの動作検証	2
1.1.2 (2)	研究目標	3
	① 伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発	3
	② 伸び変形に強い電極形成技術の開発	3
	③ 分極条件の最適化	3
	④ 発電シートの動作検証	3
1.2	研究体制	4
1.2.1	研究組織	4
1.2.2	管理体制	5
1.2.3	研究員及び管理員氏名	6
1.2.4	他からの指導・協力者及び指導・協力事項	7
1.3	成果概要	8
1.3.1	伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発	8
1.3.1 (1)	含浸化実験	8
1.3.2	伸び変形に強い電極形成技術の開発	8
1.3.2 (1)	圧電膜上への塗布による電極形成	8
1.3.2 (2)	電極の密着性の向上	8
1.3.3	分極条件の最適化	8
1.3.3 (1)	大面積での分極処理装置の仕様検討	8
1.3.3 (2)	分極処理装置設計・製作	8
1.3.4	発電シートの動作検証	9
1.3.4 (1)	使用環境に適応した動作検証用回路の設計検討	9
1.3.4 (2)	発電シートの仕様検討	9
1.4	当該研究開発の連絡窓口	9
第 2 章	本 論	10
2.1	伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発	10

2.1.1	含浸化実験	10
2.2	伸び変形に強い電極形成技術の開発	10
2.2.1	圧電膜上への塗布による電極形成	10
2.2.2	電極の密着性の向上	11
2.3	分極条件の最適化	14
2.3.1	大面積での分極処理装置の仕様検討	14
2.3.2	分極処理装置設計・製作	14
2.4	発電シートの動作検証	17
2.4.1	使用環境に適応した動作検証用回路の設計検討	17
2.4.2	発電シートの仕様検討	21
第3章	全体総括	23
3.1	研究開発成果まとめ	23
3.2	事業化について	25
	参考文献	26

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1.1.1 研究背景と目的

現在の自動車業界では振動エネルギー回収技術が強く求められている。自動車の振動エネルギーは、主にタイヤ、サスペンションで損失されており、タイヤからの振動エネルギーの回収技術が極めて重要になってきている。

エネルギー回収用蓄電技術、配線技術は自動車メーカーで実用化が始まり、タイヤ発電用の配線技術、電力伝送技術も、自動車メーカー、自動車関連メーカーで開発が進んでいるが、肝心の振動回収用圧電シートについては提供できていないのが現状である。

振動エネルギー回収用発電材料として、セラミック圧電材料が利用されているが、セラミックはフレキシブル性がないため、タイヤのような大きな変形をする箇所に装着すると破壊してしまう。従って、振動エネルギー回収用材料としてよりフレキシブルな圧電材料が求められている。フレキシブルな圧電材料としては、高分子圧電材料が知られているが、高分子圧電材料は日本で発見された材料であり、日本の科学者が30年以上にわたって最も重要な基礎的理論研究を行ってきた分野である。

現在、世界最高性能の高分子圧電材料を製造する技術は、本研究者の大東と表により開発され、その圧電材料の基本特許は実施企業の株式会社イデアルスターが保有している(第3742574号、US6843941)。

フレキシブルな高分子圧電材料のシートが製品化されているにもかかわらず、世界中の期待が集まる自動車のタイヤ内部での振動発電が実現出来ていない理由は以下の通りである。

タイヤ内部は、加減速、旋回等走行条件の変化や路面条件の変化により様々な方向に変形するため、最も大きな変形領域では数%の伸び変形が発生している。従来の圧電シートは、最大でも1%程度の変形にしか耐えられず、数%の変形を与えると、膜内に多数存在する結晶粒界で破壊が生じてしまい、タイヤ内面への装着が不可能であった。

そこで、自動車産業界で次世代エネルギー回収技術として注目されている自動車のタイヤ内部の振動エネルギーの回収を可能とする発電材料を開発することを本研究での目的とする。

1.1.2 研究概要及び目標

1.1.2 (1) 研究概要

高分子圧電材料を伸縮性母材に含浸させて、引張荷重に対して大きな変形に耐え、伸び圧電性が飛躍的に増加する圧電シートを開発する。

この圧電シートが既存製品にない非常にフレキシブルな特性を持ち、自動車のタイヤ内部に貼付けることが可能であることを実証する。

また、開発した圧電シート用の蓄電用電力安定回路の開発を行い、蓄電池を接続して発電システムを構築し、自動車のタイヤ内部での発電を想定した原理実証を行う。

上記実施における課題テーマは以下の通りである。

①伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発

高分子圧電材料を高伸縮性材料に含浸させ、大変形に追従する特徴を有する圧電布を製作する。圧電材料を高伸縮性母材に含浸させる際には、高伸縮性材料の持つ柔軟性を生かしたいが、一方で、発電能力は圧電材料の体積に比例するため、目標伸び変形率をクリアできる範囲で、可能な限り多くの圧電材料を含浸できる条件を見出す必要がある。

②伸び変形に強い電極形成技術の開発

伸び変形に追従できる電極材料を含浸布の両面に、密着性よく形成する技術を構築する。

従来の高分子圧電素子用電極材の金属蒸着膜では伸び変形の大きなデバイスには採用出来ない。電極材候補として、銀インク及び導電性高分子 PEDOT:PSS について検討し開発品に用いる電極材を選定する。

ここでは、大きな伸び変形に耐えうる電極材料の形成技術を開発する必要がある。

③分極条件の最適化

圧電膜に圧電性を持たせるために圧電膜に外部から高い電圧をかけて膜内に存在する分子の分極方向を一方向に揃える高電界印加プロセス（分極処理）が必要である。本研究ではコロナ放電法による開発圧電材料への分極処理の最適条件を見出す必要がある。

④発電シートの動作検証

開発する発電シートに蓄電用電力安定回路（振動発電はプラスとマイナスの符号を持った電気が交互に出力されるため、ブリッジ回路により一方向の電気に変換して一定電圧で蓄電出来るようにする回路）及び蓄電池を接続し、エネルギー回収ができることを実証する。

セラミック圧電材料のための蓄電用電力安定回路は市販されている（入力電圧が最大 50 V 程度まで対応）が、高分子圧電材料の場合、高インピーダンスで且つひずみ量によっては 100 V 以上の高い電圧を出力するため、蓄電用電力安定回路を専用に設計、製作する必要がある。

1.1.2 (2) 研究目標

本研究は平成 23 年度から平成 25 年度の 3 年間での実施を計画しており、最終目標としてタイヤ内部の使用環境下を想定し 25 年度当初の実施計画では以下に定めた。

- ・伸び変形率 10%を最大値とした最適化を行う
- ・伸び圧電性(d_{31}) 40 pC/N 以上
- ・温度耐性 -40 ~ +100 °C

伸び圧電性の目標については単位荷重当りの圧電性を示しているが、実際のタイヤ実装状態での使用を想定した場合、発電量は変形量に拘束されるので目標とする指標としては適当でないとのアドバイザーからの指摘もあり研究推進会議での同意を得た上で上記目標値の見直しを実施した。見直し後の目標値を以下に示す。

- ・伸び変形率 10%を最大値とした最適化を行う
- ・発電シートの発電能力 実装状態にてタイヤ 1 回転当たり 2.5 μ C 以上
- ・温度耐性 -40 ~ +100 °C

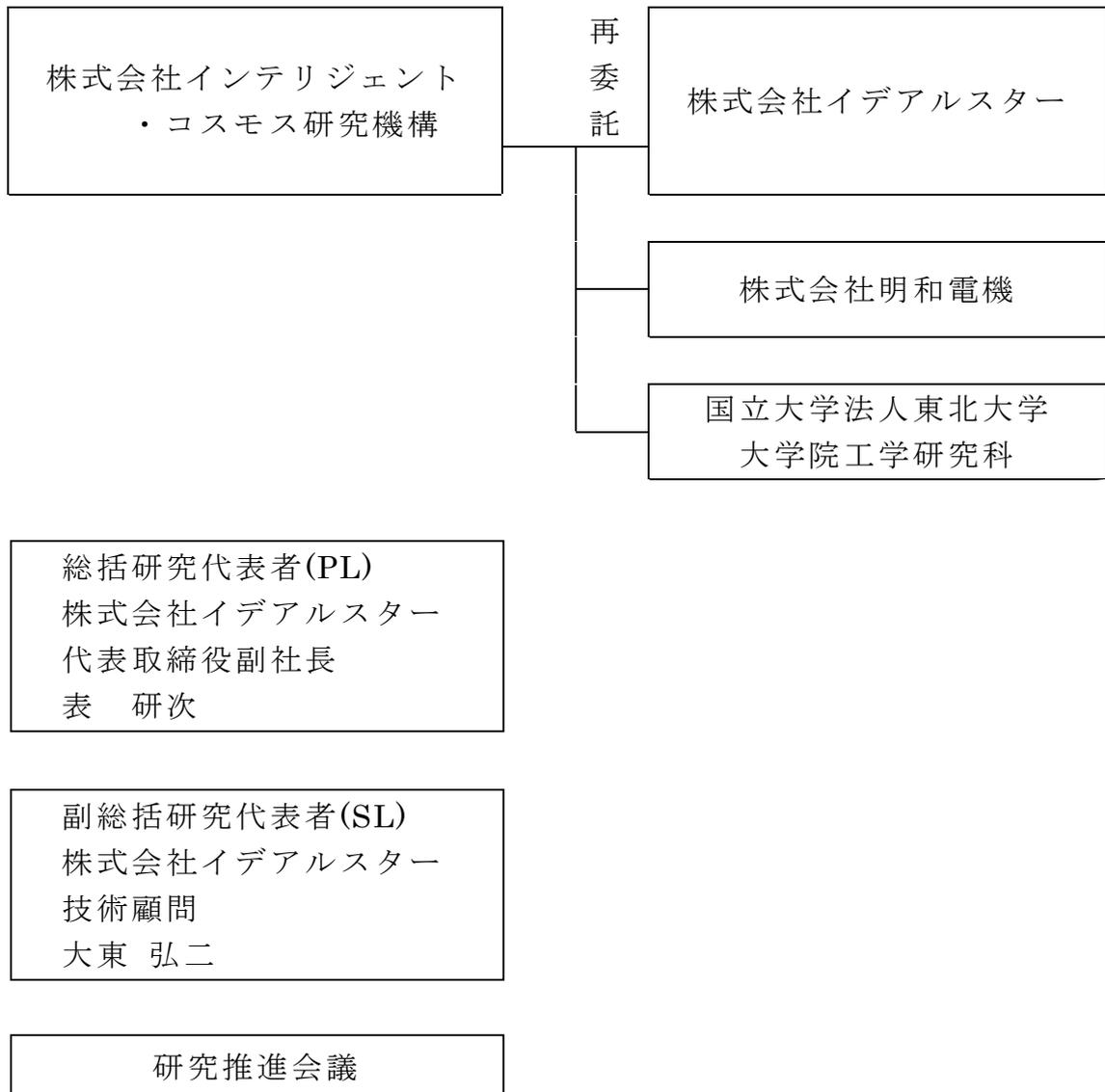
各テーマ毎の目標は以下に定めた。

- ①伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発
 - ・引張り強さ時ひずみ 10%を最大値とした最適化を図る。
 - ・量産想定メーカーで製造出来るプロセスを構築する。
- ②伸び変形に強い電極形成技術の開発
 - ・母材の可逆変形領域において母材上に塗布された電極材が追従変形し、剥離・絶縁を生じないこと。
 - ・高温環境下での振動試験後に電極と圧電材料との剥離なく表面抵抗値 1000 Ω/\square 以下。
- ③分極条件の最適化
 - ・実装状態で要求発電量タイヤ 1 回転当たり 2.5 μ C 以上を確保する。
(当初の目標は開発圧電材料の伸び圧電性(d_{31}) 40 pC/N 以上としたが、推進会議での合意の上目標値の見直しをした)
- ④発電シートの動作検証
 - ・タイヤ内に発電シート及び回路を実装し回収・蓄電の実証をする。
 - ・製品化に向けた発電シートの基本形態を確立する。

1.2 研究体制

1.2.1 研究組織

事業管理者は株式会社インテリジェント・コスモス研究機構、再委託先として株式会社イデアルスター、株式会社明和電機、国立大学法人東北大学大学院工学研究科で組織構成される。

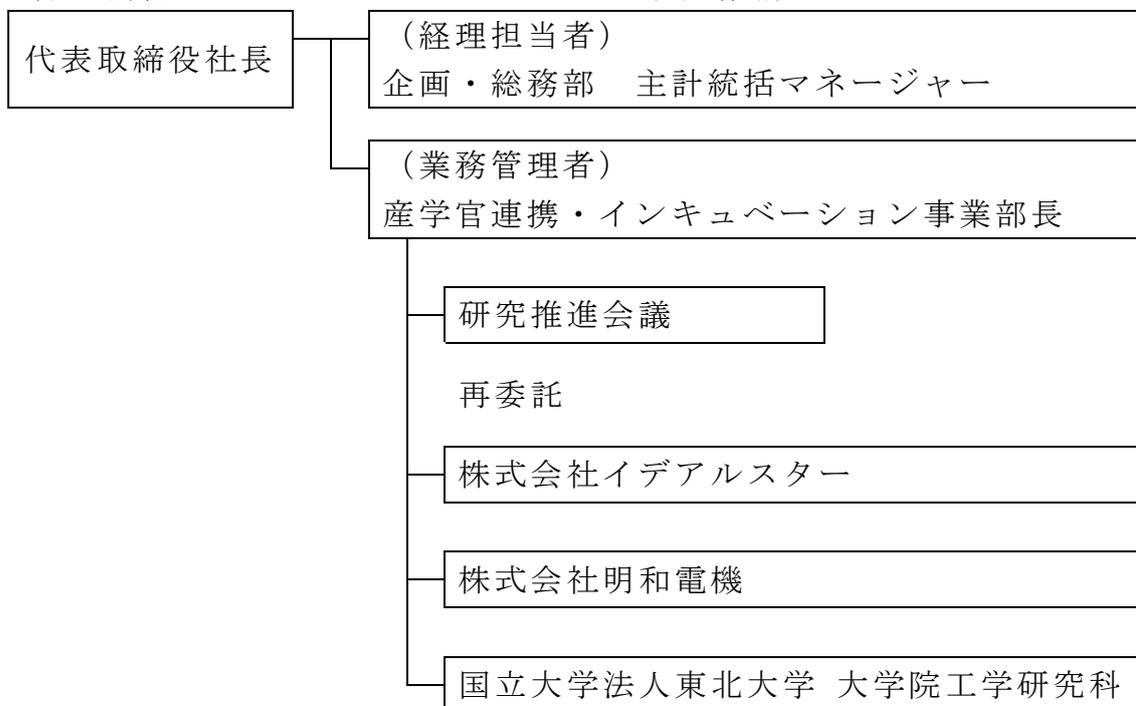


1.2.2 管理体制

管理体制は以下の通りである。

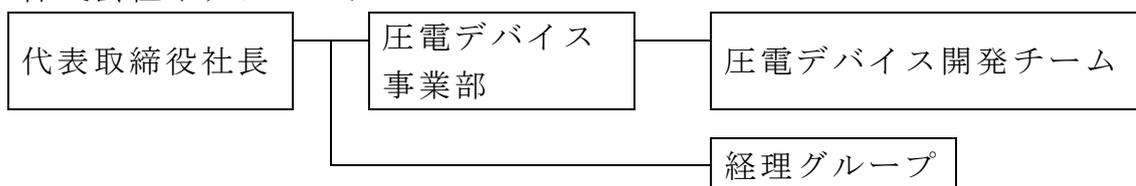
(1) 事業管理者

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

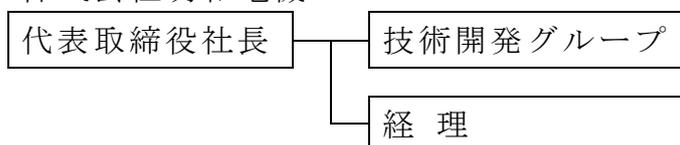


(2) 再委託先

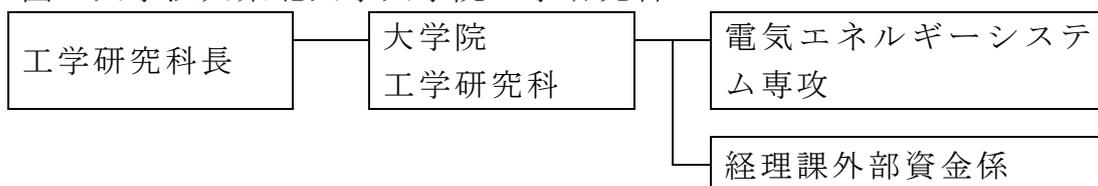
株式会社イデアルスター



株式会社明和電機



国立大学法人東北大学大学院工学研究科



1.2.3 研究員及び管理員氏名

(1)研究員(再委託先)

株式会社イデアルスター

氏名	所属・役職	備考
表 研次	代表取締役副社長	PL
大東 弘二	技術顧問	SL
横尾 邦義	技術顧問	
相模 寛之	圧電デバイス事業部 研究員	
鮫澤 剣	圧電デバイス事業部 顧問研究員	
宇川 由香利	研究員	

株式会社明和電機

氏名	所属・役職	備考
根本 真	専務取締役	

国立大学法人東北大学大学院工学研究科

氏名	所属・役職	備考
山口 正洋	電気エネルギーシステム専攻 教授	

(2)管理員(事業管理者)

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

氏名	所属・役職	備考
鈴木 秀夫	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	
松田 さとみ	産学官連携・インキュベーション事業部 管理員	

1.2.4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

共同体内での研究課題共有、研究計画の見直し決定を行うため、アドバイザーを含めた研究推進会議を設立し運営を行った。以下に委員会の構成委員及びアドバイザーの協力事項を示す。

尚、平成 25 年度は全体での研究推進会議を計 3 回実施した。

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職
表 研次(PL)	株式会社イデアルスター 代表取締役副社長
大東 弘二(SL)	株式会社イデアルスター 技術顧問
横尾 邦義	株式会社イデアルスター 技術顧問
相模 寛之	株式会社イデアルスター 研究員
鮫澤 剣	株式会社イデアルスター 顧問研究員
宇川 由香利	株式会社イデアルスター 研究員
根本 真	株式会社明和電機 専務取締役
山口 正洋	国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 教授
甲斐 健(※)	株式会社本田技術研究所四輪 R&D センター 研究員
鹿野 満(※)	国立大学法人東北大学 大学院工学研究科情報知能システム研究センター 特任教授
古川 猛夫(※)	財団法人小林理学研究所 主任研究員
坂本 敏昭	(株)ICR 代表取締役副社長兼 産学官連携・インキュベーション事業部 事業部長
猪股 則夫	(株)ICR 産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネージャー
鈴木 秀夫	(株)ICR 産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー
松田 さとみ	(株)ICR 産学官連携・インキュベーション事業部

※印 3 名は本研究で協力頂いたアドバイザー

アドバイザー指導・協力事項

氏名	主な指導・協力事項
甲斐 健	自動車業界のニーズからの開発製品への要求仕様に関するアドバイス
鹿野 満	圧電システムの製品化までに必要な学術的検証に関するアドバイス
古川 猛夫	圧電材料含浸シートの分極状態の解析評価および圧電性能評価に関するアドバイス

1.3 成果概要

1.3.1 伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発

1.3.1 (1) 含浸化実験

昨年度、母材をポリエステル製不織布からフッ素系伸縮材へ変更し、含浸化プロセスを再構築した。母材と圧電材料の重量比率の異なる含浸品を製作し、圧電特性と引張り特性の両立する複合比率を求めた。今年度は圧電材料自身についても仕様の見直し選定作業を行うことで、より伸縮性がある圧電性の高い圧電材料仕様を見出すことが出来た。また同時に従来より高温耐熱性に優れる圧電材料仕様を見出した。

また、昨年度構築した含浸化プロセスフローを基本とし量産委託先想定メーカーでの試作を通じて、フローの見直し作業を行いロールトゥール工程における含浸化プロセスフローを構築した。

1.3.2 伸び変形に強い電極形成技術の開発

1.3.2 (1) 圧電膜上への塗布による電極形成

タイヤ内での実装評価を得て最終的に開発圧電シート上に塗布する電極材としてポリエステル含有銀ペーストを選定し、その形成条件を確立した。

1.3.2 (2) 電極の密着性の向上

1.3.2(1)の条件にて形成した電極面と圧電シートとの密着性を高温(100 °C)下での試験を行えるように改良した振動試験機を用いた振動試験より評価し、規定回数(100万回)後も密着性良く剥離なきことを確認出来た。試験後にて表面抵抗目標値 1000 Ω/□以下を達成した。

以上より表面改質処理の必要ないことを確かめた。

1.3.3 分極条件の最適化

1.3.3 (1) 大面積での分極処理装置の仕様検討

1.3.3 (2) 分極処理装置設計・製作

昨年度基本設計を実施したロールトゥール分極試作機の製作を行った。試作機を用いた検討実験を進めていく中で均一な分極処理を実施する為にコロナ生成電極方案の改良を実施し、分極処理品の評価を行った。

以上により目標発電量を有する圧電シートを製造出来る分極処理の基本条件を確立した。

1.3.4 発電シートの動作検証

1.3.4 (1) 使用環境に適応した動作検証用回路の設計検討

発電シートの動作検証に用いる回収回路の検討を進め、昨年度の方式から改良し外部駆動電源を必要としない自律型回路への設計見直しを行った。見直しした設計方針に基づき、回路定数の最適解を系統的な実験により求め、発電シートに適合した回収回路を試作した。製作した回路をタイヤに設置した発電シートと接続し、蓄電池への電力回収実験を行い、高効率にて回収・蓄電が行えることを実証した。

1.3.4 (2) 発電シートの仕様検討

デバイスの仕様検討方針をタイヤメーカーの評価結果及び自動車メーカーアドバイザーの意見を元に決定し、発電シートの各種設計パラメータを変更した実装評価用のサンプルを製作した。設定した実装試験方法による発電シートの耐久性およびテーマ 1.3.4 (1) で製作した回収回路を用いての蓄電量の結果をもとに、本事業における開発品発電シートの標準仕様を確立した。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

産学官連携・インキュベーション事業部 鈴木秀夫

TEL 022-279-8811 (代)、FAX 022-279-8880

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目 6 番地の 3

第2章 本論

2.1 伸縮性母材への圧電材料含浸化技術の開発

2.1.1 含浸化実験（実施担当：株式会社イデアルスター）

25年度は、24年度に見出した基本条件をベースに第2.4節の発電シートの動作検証で実施したタイヤ内実装走行試験からのフィードバックを受けて圧電材料及び高伸縮性母材の仕様選定を行った。検討の結果、最終的な材料仕様として、圧電材料：高伸縮性母材=80:20であれば、繰り返しの実装走行試験に耐え得るという結論を得た。詳細な諸物性および製造プロセスは、重要な知見・ノウハウとして本書での記載は控える。

また、量産想定メーカーで製造できるプロセス構築に関しても、重要なノウハウであるため、外部協力メーカーの意向で基本的には詳細な記述を控えるが、試作を通じてロールトゥロールプロセスにおける製造が行えたことを報告する。

2.2 伸び変形に強い電極形成技術の開発

2.2.1 圧電膜上への塗布による電極形成

（実施担当：株式会社イデアルスター）

本項では、第2.4.2項で実施した発電シートをタイヤ内面に貼り付けた走行試験結果のフィードバックを受けて、走行試験で耐えた仕様の発電シートに対して確立した電極形成条件の一部を紹介する。

電極は、ポリエステル含有銀ペーストを圧電膜上にスクリーン印刷して形成した。第2.2.1-1表に銀ペースト塗布後の乾燥条件と、表面抵抗値、100マステープ剥離試験結果を示した。本条件で乾燥した後に形成した銀電極の表面抵抗値を測定したところ約0.05-0.10 Ω/□を示し、100マステープ剥離試験では全く剥離は観察されなかった。

第 2.2.1-1 表 実装走行試験で耐えた電極材料の仕様と印刷後の乾燥条件、表面抵抗値と 100 マステープ剥離試験の結果

電極	バインダー	乾燥条件	表面抵抗 [Ω/\square]	100 マステープ 剥離試験
銀	ポリエステル	100℃ 60 分	0.05 - 0.10	100 / 100

※乾燥はヤマト科学製の熱循環式オーブン(DN4101)で実施した。

※表面抵抗値の測定には三菱化学のロレスタ-AXを使用した。4 端子プローブは、柔軟材料向けのプローブ(MCO-TPLSP)を使用した。

2.2.2 電極の密着性の向上

(実施担当：株式会社イデアルスター)

繰り返し実装走行試験に耐えた材料仕様にて製作した圧電シート上に確立した条件で形成した電極に対して、高温(100 °C)下での耐振動試験を実施した。第 2.2.2-1 図に熱風を導入可能な恒温槽を有する振動試験機(a)と、試験機のチャックに取り付けた発電シート写真(b)を示す。発電シートの有効電極サイズは 50 mm×50 mm で、膜厚は約 35 μm である。振動試験は 100 °C に達した後、ひずみ約 1.05%、周波数約 5 Hz の条件で実施し、ある振動回数で振動を止めてひずみゼロに戻し、室温に到達して十分に時間が経過した後、再び振動させて発生した電荷量をチャージアンプで電圧変換してオシロスコープで評価した。振動試験前後の発生電荷量の比較と、100 °C 下で 100 万回の振動に到達するまでの発生電荷量の推移を第 2.2.2-2 図に示した。また、高温下での 100 万回振動試験前後での表面抵抗値、および試験後の 100 マステープ剥離試験結果を第 2.2.2-1 表にまとめた。本試験結果から、圧電膜上に形成した電極材料は高温下で繰り返し振動を加えても、その表面抵抗値は増加するどころか低下し、目標値 1000 Ω/\square 以下の値を示すことを確認した。さらに、試験後の発生電荷量は試験前と比較して約 8.5%の減少にとどまった。

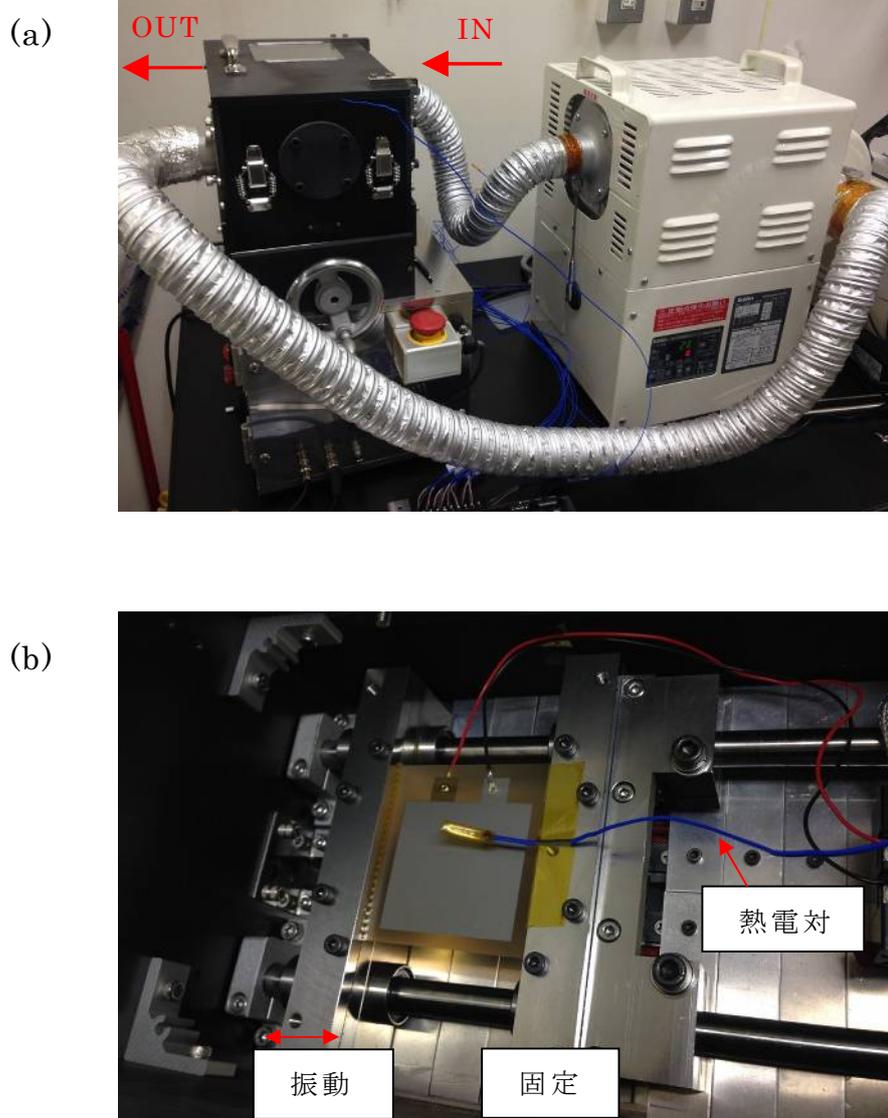
以上より、選定した電極材料と圧電材料は高温耐熱性と密着性に優れており、圧電材料と電極材料の密着性を向上させるための表面改質処理は必要ないと判断する。

第 2.2.2-1 表 高温下(100℃)での振動試験(5Hz、1%ひずみ 100 万回印加)結果

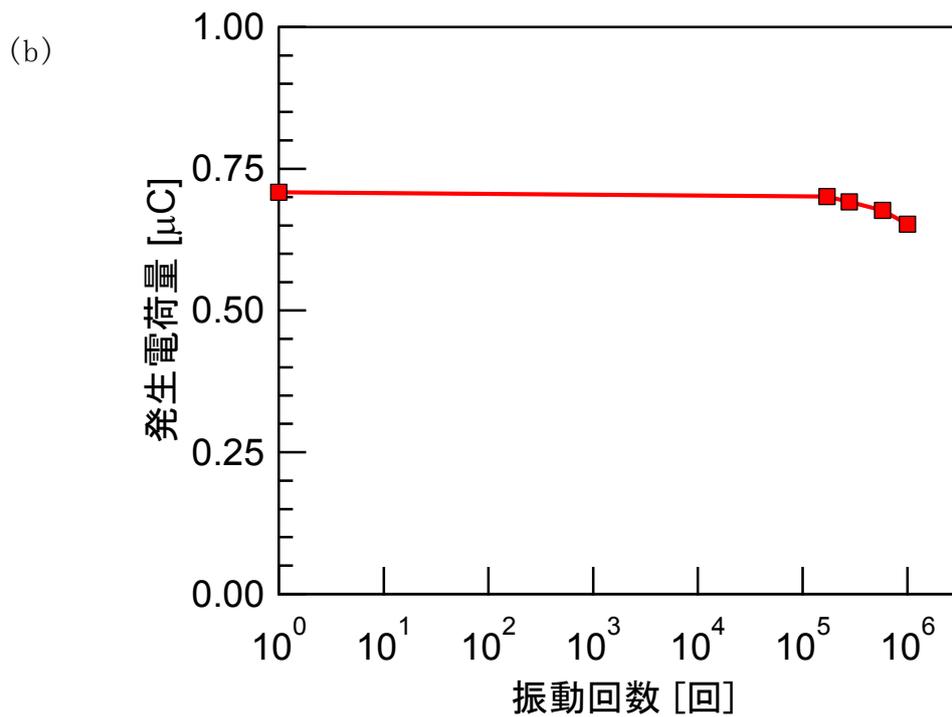
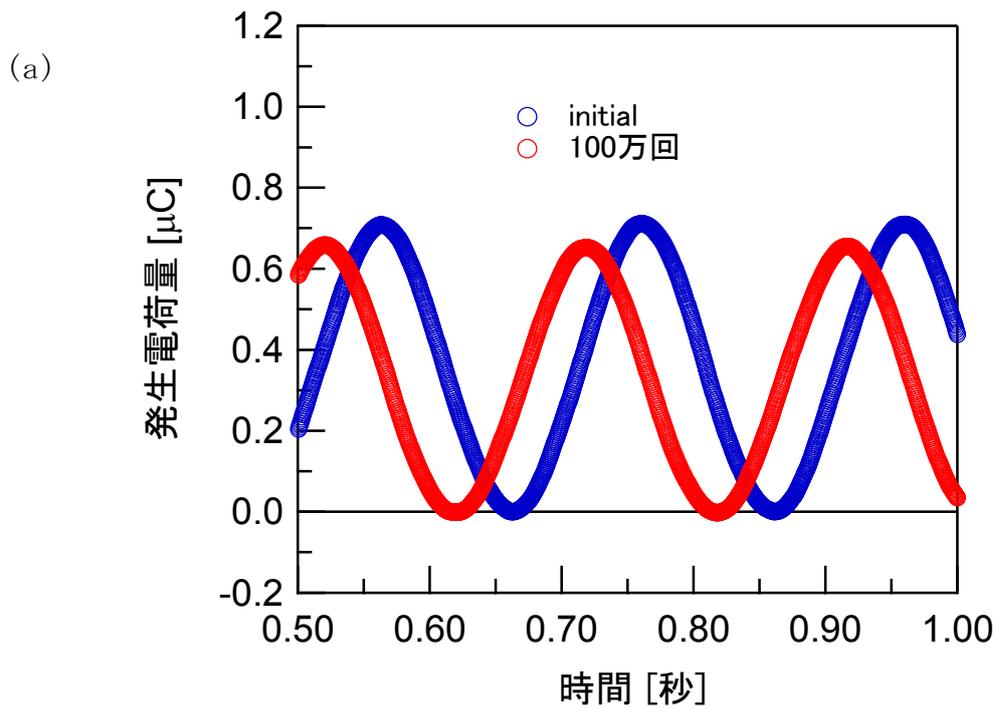
膜面	試験前 表面抵抗値 [Ω/□]	試験後 表面抵抗値 [Ω/□]	試験前後 表面抵抗値 変化率 [%]	試験後 100 マスター プ剥離試験
オモテ ^{※1)}	6.05×10^{-1}	2.48×10^{-1}	-59.0	100/100
ウラ ^{※2)}	5.06×10^{-1}	2.01×10^{-1}	-60.3	100/100

※1) 圧電材料塗布成膜時に溶剤蒸発面。光沢有。

※2) 圧電材料塗布時の基材面。



第 2.2.2-1 図 熱風を導入可能な恒温槽を有する振動試験機(a)と、試験機のチャックに取り付けた発電シート写真(b)。



第 2.2.2-2 図 高温(約 100°C) 下における繰り返し振動印加過程での発電シートの発生電荷量の変化。印加ひずみは 1.05%、周波数は 5Hz、発電シート有効電極サイズは $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。各振動回数における出力電荷量の評価は、室温で実施した。

(a) 発生電荷量、(b) 各振動回数における発生電荷量の推移。

2.3 分極条件の最適化

2.3.1 大面積での分極処理装置の仕様検討

2.3.2 分極処理装置設計・製作

(実施担当：株式会社イデアルスター、株式会社明和電機)

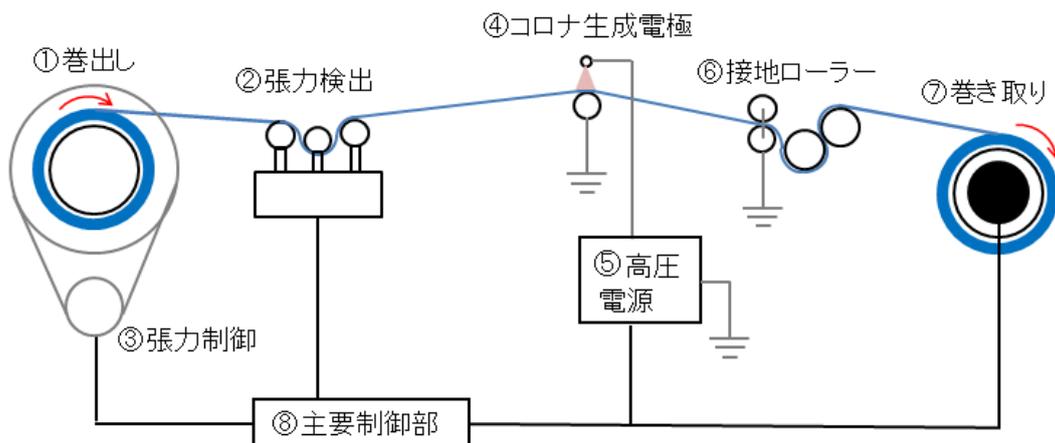
24年度に基本設計を完了したロールトゥロール分極処理試作機を、25年度は実際に製作を行った。製作した分極試作機の写真を第2.3.2-1図に、機構概略図を第2.3.2-2図に示す。本試作機は、上流側から下流に向かって①ロール巻出し部、②張力検出部、③張力制御部、④コロナ生成電極、⑤高圧電源、⑥接地ローラー、⑦ロール巻き取り部から構成され、①～⑦を⑧の主要制御部で全体を制御できる機構となっている。最終的な試作機仕様を見出すために、本試作機はコロナ生成電極による圧電シートへの印加電界均一化（それによる分極状態均一化）と、圧電シートをシワなく安定して製作可能な長さ（安定長）増大のための改良を重ねた。

最終的な仕様・最適分極条件下で分極処理を行った圧電シートに対して、圧電特性に関する幅方向の分布状態を評価した結果を第2.3.2-3図に示した。圧電シートは極めて均一な圧電特性分布を示すことが分かった。さらに、圧電シートの圧電特性は、両面に電極を付けて十分にコロナ分極した場合に得られる k_{31} 値0.060よりもかなり大きな k_{31} 値0.070（平均値）を示した。これは直接交流電界をかけて圧電シートの永久双極子を繰り返し分極反転させた場合に得られる値である。この結果は、引張り張力を印加した状態で電界を印加することで、引張り張力を印加しない場合よりも分極しやすくなる何らかの作用があることを示す重要な結果である。

したがって、本試作機の繰り返しの改良と実証試験の実施により、本試作機は圧電性能も申し分なくかつ均一に付与できる試作機仕様として仕上がったことを確認できた。

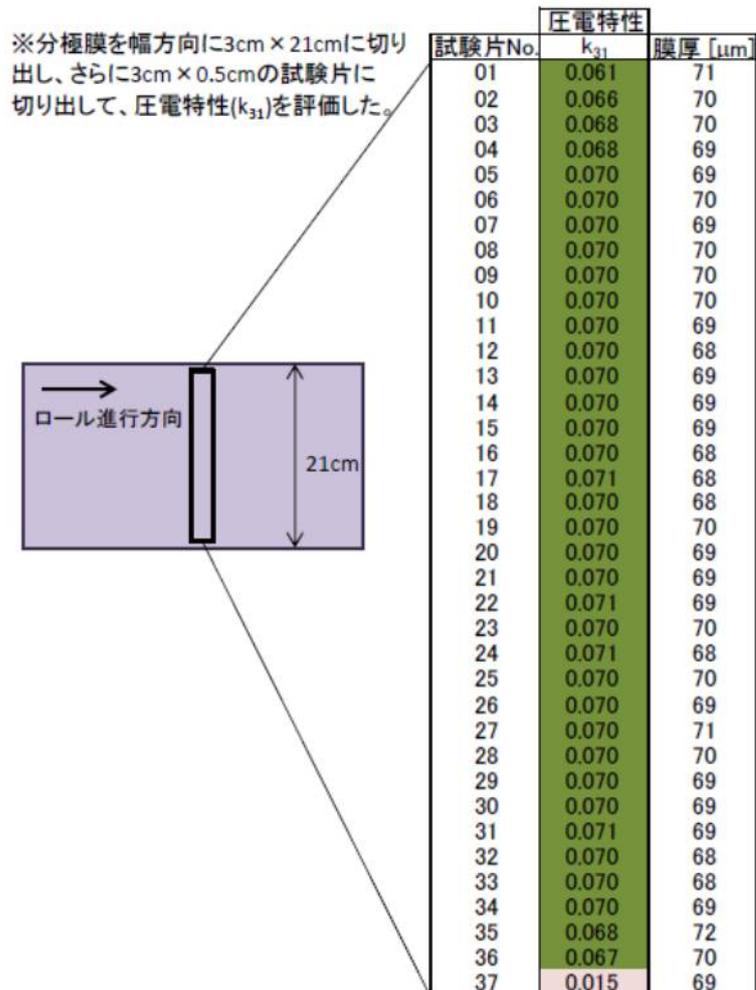


第 2.3.2-1 図 製作したロールトゥロール分極処理試作機装置写真。



第 2.3.2-2 図 ロールトゥロール分極処理試作機の機構概略図。

(a)



(b) 電気機械結合係数 k_{31} のバラつき

判別色	k_{31} 分布	サンプル数
	0 ~ 0.019	1
	0.020 ~ 0.029	0
	0.030 ~ 0.039	0
	0.040 ~ 0.049	0
	0.050 ~ 0.059	0
	0.060 以上	36

第2.3.2-3図 量産想定メーカーで製作した圧電シートをロールトゥロール分極試作機を用いて最適条件下で分極した場合の圧電特性（電気機械結合係数 k_{31} ）に関する幅方向の分布状態評価結果(a)。(b)電気機械結合係数 k_{31} のバラつき。

2.4 発電シートの動作検証

2.4.1 使用環境に適応した動作検証用回路の設計検討

(実施担当：国立大学法人東北大学大学院工学研究科、
株式会社イデアルスター)

タイヤ内環境での使用により適した外部電源を必要としない回路として昨年度成果を発展させ第 2.4.1-1 図に示した自律型 SSHI 回路[文献 1]を製作した。(a)に回路図を、(b)に実際に製作した回路写真を示す。回路図(a)内の R_1 と R_2 は回路を動作させるために重要なタイミング調整抵抗である。まず、昨年度より検討している従来仕様の発電シートで動作確認を行った。発電シートの有効電極面積は $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ で、膜厚は約 $40\text{ }\mu\text{m}$ である。静電容量 10 mF の蓄電池に充電された電荷量 Q_{rect} は、 C_{rect} と V_{rect} の積である。実際に、振動試験機を用いて発電シートにひずみ 1%、周波数 5 Hz を印加した時の充電電荷量 Q_{rect} を計測した結果を第 2.4.1-2 図に示した。全波整流回路を介した場合の時間当たりの充電量($14.6\text{ }\mu\text{C/s}$)と比較して、SSHI 回路を介した場合の方が充電電荷量は大きく、SSHI-1 回路($R_1=R_2=510\text{ }\Omega$)は全波整流回路の約 5.4 倍($79.3\text{ }\mu\text{C/s}$)、SSHI-2 回路($R_1=R_2=10\text{ M}\Omega$)は全波整流回路の約 2.6 倍($38.4\text{ }\mu\text{C/s}$)の蓄電量が得られることを確認した。

上記記載から分かるように、タイミング調整抵抗値は蓄電電荷量に影響を与える。したがって、このタイミング調整抵抗値に対する取り出し得る蓄電電荷量の関係について調べた。本実験で得られた結果を第 2.4.1-3 図に示す。結果として、タイミング調整抵抗値が $60\text{ }\Omega\sim 1\text{ k}\Omega$ の広範囲において、充電電荷量は全波整流回路よりも大きく、かつ一定値を示すことが分かった。この結果は、回路設計の自由度が確保でき、また抵抗素子の温度変化による充電電荷量の変化が小さいことが期待できるため、実用上有用な結果である。

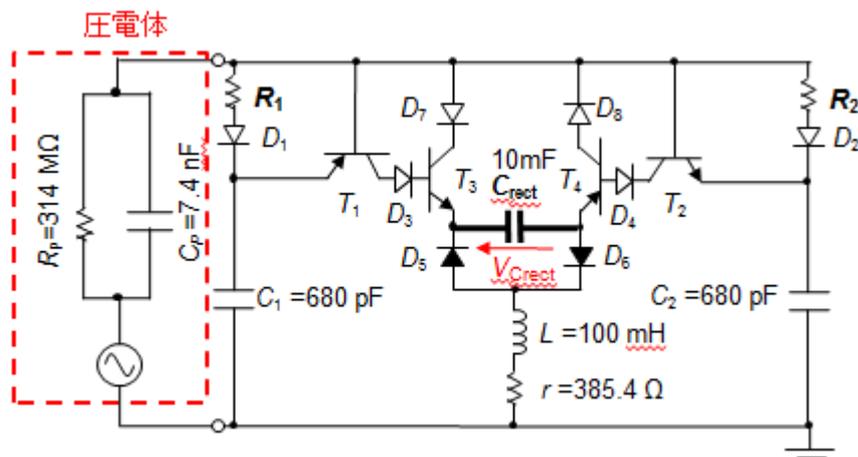
以降は 25 年度タイヤ内の実装走行試験で耐えた新仕様の発電シートを用いた電力回収実験に移る。発電シート仕様の変更による素子の内部容量と内部抵抗の違いを第 2.4.1-1 表に示す。実際に新仕様用の発電シートに振動試験機で周波数 5 Hz 、1%のひずみを印加し、SSHI 回路($R_1=R_2=510\text{ }\Omega$)動作を確認した。新仕様発電シートでも自律スイッチング動作が可能であることを確認できた。そこで、SSHI 回路を用いた場合の蓄電電荷量の評価を行った。その結果を第 2.4.1-4 図に示す。SSHI 回路を用いた場合の充電電荷量は、全波整流回路の場合($5.6\text{ }\mu\text{C/s}$)の約 2.6 倍($14.4\text{ }\mu\text{C/s}$)を示し、新仕様発電シートに対しても有効な結果を示すことを確認した。

最後に、試作した SSHI 回路を開発した発電シート標準仕様(発電部サイズ $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 、厚さ $40\text{ }\mu\text{m}$)品と接続し、自動車タイヤ内に実装、電力回収走行実験を行った結果を第 2.4.1-5 図に示す。全波整流回路の蓄電量 $3.43\text{ }\mu\text{C/回転}$ に対して SSHI-1 回路で 12.7、SSHI-3 回路で $13.0\text{ }\mu\text{C/回転}$ と

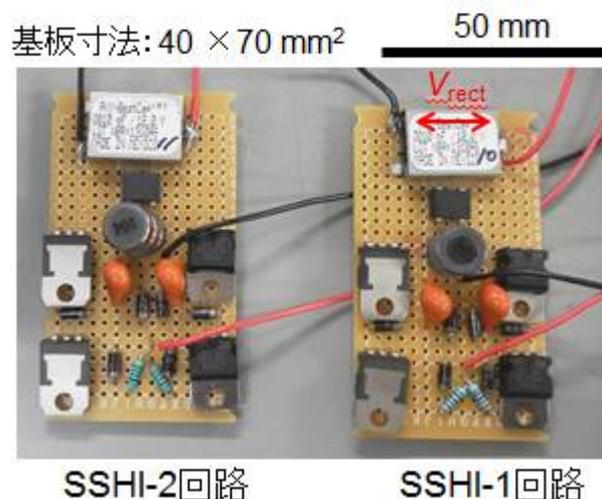
約 3.7 倍の回収率向上効果を得た。尚、SSHI-1 回路と SSHI-3 回路は同設計(タイミング調整抵抗値 $R_1, R_2=510 \Omega$)である。

疑似振動発生装置により確かめた回収回路最適設計仕様はタイヤ実装状態の発電シートからの出力に対しても有効であることを実証出来た。よって、発電シートの仕様に合わせた回収回路の最適設計・動作確認は、まず本事業内で構築した疑似振動発生装置を用いて実施すれば良いことがわかる。今後のさらなる開発における発電シート及び回収回路の簡易的特性評価方法を構築できたことも、本事業の大きな成果である。

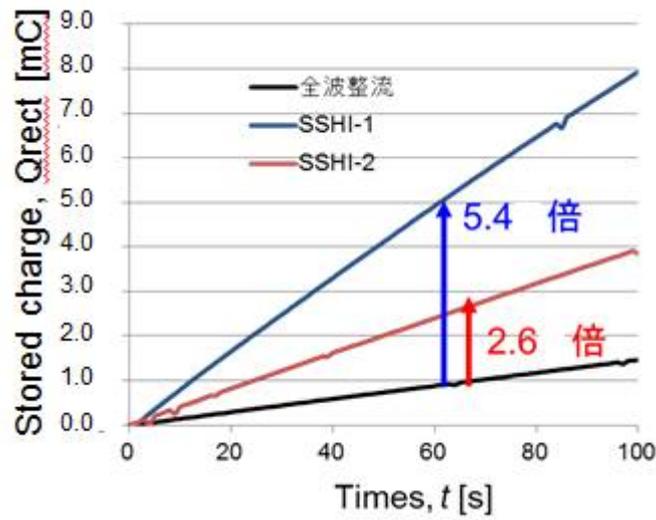
(a)



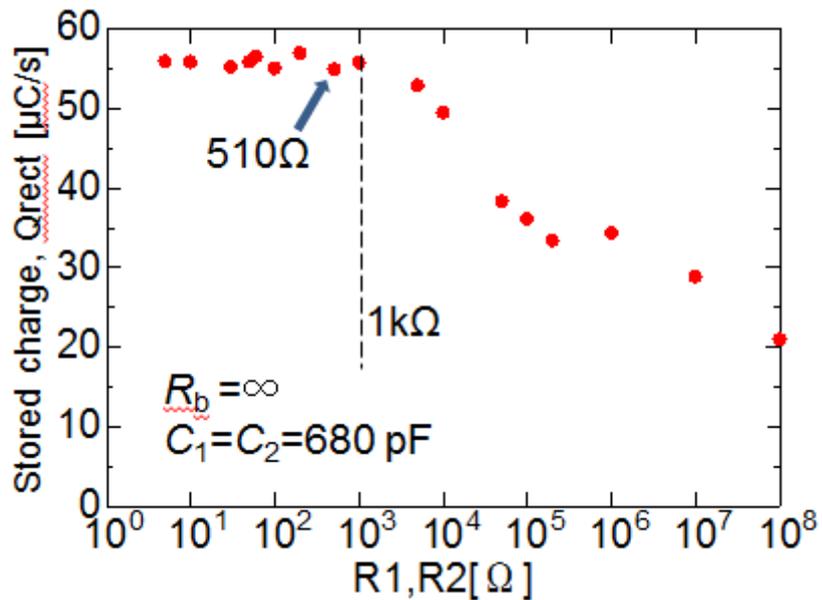
(b)



第 2.4.1-1 図 製作した自律型 SSHI 回路の回路図 (a) と、実際に製作した回路 (b)。SSHI-1 回路は $R_1=R_2=510 \Omega$ 。SSHI-2 回路は $R_1=R_2=10 \text{ M}\Omega$ 。



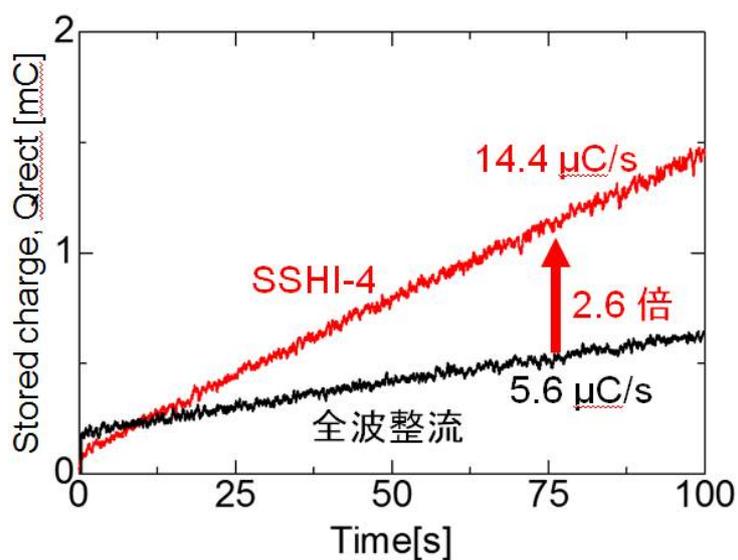
第 2.4.1-2 図 昨年度仕様の発電シートに振動試験機で繰り返し振動（ひずみ 1%、周波数 5 Hz）を加えた場合に全波整流回路と SSHI 回路を介して充電された蓄電電荷量 Q_{rect} の時間変化。



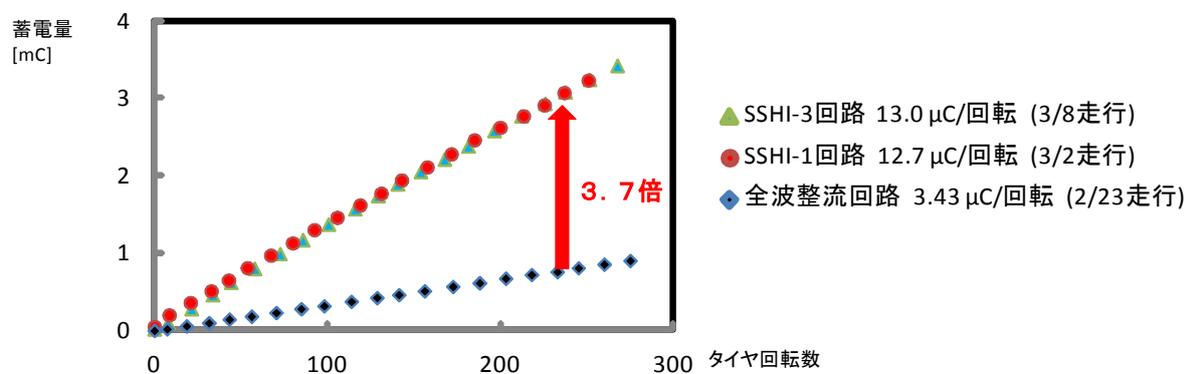
第 2.4.1-3 図 自律型 SSHI 回路におけるタイミング調整抵抗 (R_1, R_2) と充電電荷量の関係。

第 2.4.1-1 表 発電シートの仕様

	内部抵抗 R_p [M Ω]	内部容量 C_p [nF]	発電部寸法 [mm]
24 年度従来仕様シート	314	7.4	50×50
25 年度開発新仕様シート	500	5.2	50×50



第 2.4.1-4 図 新仕様発電シートから回収可能な蓄電電荷量の全波整流回路と SSHI 回路の比較。



第 2.4.1-5 図 SSHI 回路と全波整流回路の実装試験における蓄電結果比較

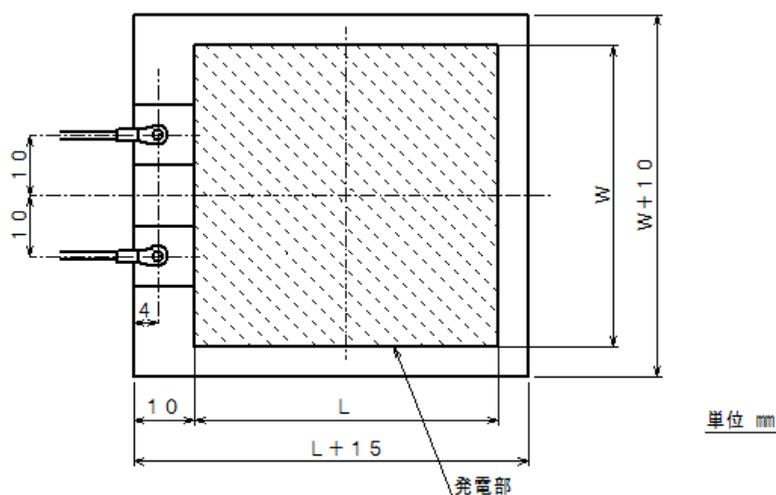
2.4.2 発電シートの仕様検討

(実施担当：株式会社イデアルスター)

本テーマでは発電シートがタイヤに実装された状態での信頼性の把握と発電量の把握のため自己で実際に発電シートをタイヤに貼付け細かな性能調査実験を行う計画を立案し実行した。

まず、発電シートの仕様を検討するにあたり、目標とする発電量をタイヤ内で得た圧力等の情報を外部へ無線送信するために必要な電力量に置き、例えばタイヤ空気圧監視システム(TPMS)用センサ等における現状調査結果【文献2】からタイヤ1回転あたり $2.5 \mu\text{C}$ に設定した。

今年度、本事業にて製作した実装試験用の発電シートの形状を第 2.4.2-1 図に示す。



第 2.4.2-1 図 発電シート形状

実装試験にて比較確認した発電シート仕様パラメータは主に圧電材料仕様、発電部面積、シート厚さとなる。仕様毎に第 2.4.2-1 図に示した発電シートを製作した。尚、本事業にて設定した実装試験条件を第 2.4.2-1 表に示す。シートの発電特性は全波整流回路を通した後の蓄電池への蓄電量で評価することとし、静電容量 10 mF の蓄電池を使用した。蓄電量の計測は内部抵抗 $1.1 \text{ M}\Omega$ の電圧ロガーを用いて行っている。

第 2.4.2-1 表 発電シートタイヤ内実装試験条件

項目	条件
使用タイヤサイズ	175/60R15
タイヤ充填空気圧	230 kPa
使用車両	日産ノート (排気量 1500 cc、FF 方式、右ハンドル車)
実装タイヤ位置	右前輪
タイヤにかかる荷重	約 4 kN
走行コース	舗装路 周長 200 m 左旋回
車両走行速度	30 km/h 以下 (20 km/h 狙い)

実装試験その他の結果から本事業で得た発電シート標準仕様を第 2.4.2-2 表に示す。目標とした蓄電量 2.5 μC /回転に対し 12.7 μC /回転と大きく上回る蓄電量を得た。

以上、本事業の実実施計画に沿って、計画内容を全て遂行し、目標課題を達成出来たことを報告する。

第 2.4.2-2 表 発電シートの標準仕様

項目	仕様
用途	自動車タイヤ内振動発電用
発電体材料	企業秘
シート寸法	長さ 65 mm × 幅 60 mm × 厚さ 40 μm
発電部寸法	長さ 50 mm × 幅 50 mm : 面積 25 cm^2
外部出力	圧着端子付属
重量	約 0.9 g (シート本体 約 0.6 g / 端子部 約 0.3 g)
高温耐熱性	100 $^{\circ}\text{C}$
蓄電テスト実績	タイヤ 1 回転当り 12.7 μC * * 専用設計高効率回収回路を使用、15 インチタイヤでの実装調査結果

第 3 章 全体総括

3.1 研究開発成果まとめ

平成 25 年度研究目標達成状況を下記にまとめる。各テーマの実施計画内容を滞りなく実施完了し、目標達成が行えた。

研究開発実施計画内容	成果
①不織布への圧電材料含浸化技術の開発	
①-1 含浸化実験	
圧電シートの目標特性（伸び特性と圧電特性の両立）を達成する材料仕様の最適仕様とそのプロセス条件をタイヤ内実装試験結果を元に確立する。	タイヤ内実装試験に耐える材料仕様及びそのプロセス条件を確立した。
量産製造出来るプロセスを構築する。	量産委託先想定メーカーでの試作を通じて、フローの見直し作業を行いロールトゥロール工程における含浸化プロセスフローを構築した。
②伸び変形に強い電極形成技術の開発	
②-1 圧電膜上への塗布による電極形成	
含浸品上への電極形成プロセスを確立する	タイヤ内での実装評価を得て最終的に開発圧電シート上に塗布する電極材としてポリエステル含有銀ペーストを選定し、その形成条件を確立した。
②-2 電極の密着性の向上	
②-1 で選定した電極材料に関して振動試験(100 °C、ひずみ 1%、周波数 5 Hz、100 万回)後の抵抗値劣化を調べる	振動試験後も電極の密着性良く剥離なきことを確認出来た。試験後にて表面抵抗目標値 1000 Ω/□以下を達成した。
表面改質方法・条件の検討	上記結果より、表面改質処理の必要ないことを確認した

研究開発実施計画内容	成果
③分極条件の最適化	
③-1 大面積での分極処理装置の仕様検討	
③-2 分極処理装置設計・製作	
昨年度基本設計を完了したロールトゥロール分極処理試作機を実際に製作、整備する。	本事業開発シートの分極処理に適した試作機の製作を完成させた。
分極実験を進めていく中で試作機の改良を行う。	均一な分極処理を実施する為にコロナ生成電極方案の改良を実施し、均一分極を可能とする分極処理条件を得た。
事業化に向けた連続生産対応型分極装置の設計仕様を完成させる。	目標発電量を有する圧電シートを製造出来る分極処理の基本設計仕様を確立した。
④発電シートの動作検証	
④-1 使用環境に適応した動作検証用回路の設計検討	
昨年度設計した回路をベースに、開発発電シートに疑似振動を与えた場合の回路性能評価実験を行う。	昨年度の設計回路をベースに自律型 LC 並列 SSHI 回路を開発し、開発発電シート疑似振動負荷にて全波整流回路の 2.6 倍の電荷蓄電量を得た。
上記実験結果をもとに最大電力を取り出せる試作回路の設計・製作を行う。	供試シートで最大電力を得る為の自律型 LC 並列 SSHI 回路のタイミング調整抵抗の値を 60~1 kΩ と明らかにした。
製作した回路と発電シートをタイヤに装着し蓄電地への電力回収実験を行い、回収・蓄電が行えることを実証する。	回路基板に実装した回路を発電シートと共にタイヤに装着し、走行試験条件にて順調に駆動した。全波整流回路の 3.7 倍の蓄電が行えることを実証した。
④-2 発電シートの仕様検討	
デバイスの仕様改良の方針を決定する。	メーカー及びアドバイザーとの打合せを実施し、電極材料の密着性、配線固定部の軽量化、シート最適面積の明確化と課題を明らかにした。
実装評価結果をフィードバックし事業化に向けた発電シートの基本形態仕様を確立させる。	実装評価を繰り返し行う中で、目標とする発電量を確保する発電シートの標準仕様を確立した。

3.2 事業化について

量産製造は一部外部委託を計画しており、圧電シート製造を株式会社FILWEL、将来的には電極形成・分極処理工程も株式会社倉元製作所への発注を想定しており、両社には現段階から量産化課題検討や試作製作等の協力を得ている。

参考文献

- 文献1) Junrui Liang, Wei-Hsin, Proc. 2009 IEEE Int'l Conf. Information and Automation, June 2009, Zhuhai/Macau, China.
- 文献2) Shad Roundy, "Energy Harvesting For Tire Pressure Monitoring Systems : Design Considerations", Proceedings of PowerMEMS 2008+ microEMS 2008, Sendai, Japan, November 9-12, (2008)

