

一般社団法人電気学会 電力・エネルギー部門 ニュースレター

目次

B部門大会の開催案内	1
高校生みらい創造コンテスト	2
研究グループ紹介	20
学界情報	21
海外駐在記事	30
調査研究委員会レポート	31
用語解説／論文誌目次	32
論文委員会からのお知らせ	33
編修委員会からのお礼	34
「研究・技術功労賞」受賞 候補者推薦のお願い	35
学会カレンダー	36
フォーラム開催案内	37
図書広告	38

令和7年電気学会 電力・エネルギー部門大会の開催案内と論文募集(第1報)

電力・エネルギー部門（B部門）は、会員および大会参加者の交流を深め活発な活動を図るため、下記の通り、令和7年B部門大会を開催し、講演論文を募集します。会員はもとより非会員の方の発表も歓迎します。

会期 令和7年9月17日（水）～19日（金）
会場 琉球大学 千原キャンパス
〒903-0213 沖縄県西原町字千原1
<https://www.u-ryukyu.ac.jp/access/>
COVID-19の感染状況によりオンライン開催とさせて頂く可能性があります
以下の2種類があります。

論文Ⅰ：内容のまとまった密度の濃い発表ができる和文または英文の論文で、ページ数は4ページ以上14ページ以下とします。ただし、ページ数が6ページを超える場合、著者には超過分の費用（5,000円/ページ）を負担頂きます。発表形式は「口頭発表」のみです。なお、29歳以下の方で、論文Ⅰをポスター発表することも希望する場合は、申込時にその旨を申告して下さい。ただし、ポスター発表件数によっては、希望に沿えない場合があります。

論文Ⅱ：研究速報、新製品、トピックスなど速報性を重視し、成果を迅速に発表や紹介することを目的とした和文または英文の論文で、ページ数は2ページとします。発表形式は「口頭発表」と「ポスター発表」です。申込時にどちらか一方を選択して下さい。ただし、希望に沿えない場合があります。

論文Ⅰ、Ⅱで対象とする主な技術分野は以下です。

- (A) 電力系統の計画・運用・解析・制御
(系統計画・運用、需要予測、需給制御、EMS、DR、系統安定性、レジリエンス・BCP、系統最適化、直流送電・HVDC、パワーエレクトロニクス、IBR・GFL・GFM、再生可能エネルギー、電力貯蔵、アセットマネジメント・EAM、サイバーセキュリティ)
- (B) 電力自由化
(電力自由化、エネルギー経済、電力市場・経済、セクターカップリング、VPP、EMS、DR、DER、TSO・DSO)
- (C) 分散型電源・新電力供給システム
(スマートグリッド、スマートコミュニティ、マイクログリッド、風力発電、太陽光発電、GFL・GFM、電気自動車、電力貯蔵、ヒートポンプ)
- (D) 電力用機器
(電力ケーブル、変圧器、遮断器、GIS・代替ガス、配電用機器、がいし・高分子がいし、架空送電、変換器・変換所、変電所)
- (E) 高電圧・絶縁
(雷観測・雷害対策、サージ解析、アーク現象、直流遮断、絶縁材料、接地、故障電流対策)
- (F) エネルギー変換・環境
(監視・診断・センサ、設備保全、IOT・ICT、電磁環境・EMC・IEMI・EMP・HEMP、新たな電気・エネルギー利用技術、超電導、水力発電、火力発電、原子力発電、核融合発電、風車・風力発電、太陽光発電、水素製造・運搬、電力貯蔵)

発表方法

論文Ⅰ：30分程度（質疑応答を含む）の口頭発表です。なお、発表時間内に十分な討議ができる時間を確保します。

論文Ⅱ：口頭発表は、20分程度（質疑応答を含む）とします。ポスター発表はA0用紙1枚（縦）相当のポスターを指定した場所に掲示し、発表頂きます。

English Paper Session for Studentsの開催

学生の方々に英語による論文の作成・発表・質疑応答を経験していただける場として「English Paper Session for Students」を開催します。英語での発表経験のある方はもちろん、英語での発表に初めてチャレンジする学生の方々の応募もお待ちしております。一般講演の論文Ⅱと同形式の2ページ以内の英文原稿を提出するとともに、英語にて口頭発表と質疑応答を行っていただきます。

【発表形式】 英語にて口頭発表
【応募資格】 博士後期課程以下の教育課程に在籍中の学生
【申込方法】 後日案内します

表彰について

35歳以下の方が発表した論文Ⅰおよび論文Ⅱ（ポスター発表を含む）を対象に優秀論文発表賞を選定します。また、YPC（Young engineer Poster Competition）として、29歳以下の方による優れたポスター発表に対し、YPC優秀発表賞とYPC奨励賞を、29歳以下の方による優れた口頭発表に対して、YOC（Young engineer Oral presentation Competition）優秀発表賞とYOC奨励賞を授与します。なお、対象年齢は大会初日時点とします。また、English Paper Session for Studentsでの優秀な発表をOutstanding Student Presentation Awardとして表彰します。

申込方法

論文Ⅰ、Ⅱともに講演の申込をインターネットで行います。申込完了後に、論文原稿を提出して頂きます。

注意事項

- 申し込み頂いた論文は全て発表可能ですが、発表は1人1論文に限ります。ただし、上述の通り、論文Ⅰ申込者の内、29歳以下の方でYPCでの発表を希望する方のみ、論文Ⅰ（口頭発表）とポスター発表の2回の発表を認めます。また、English Paper Session for Studentsに応募の方も口頭発表とポスター発表の2回の発表を認めます。
- 論文Ⅰを論文誌B「B部門大会特集号（令和8年2月号予定）」に掲載することを希望される場合は、B部門大会への投稿と同時に、別途、各自で電子投稿・査読システムより「B部門大会特集号」へ投稿して頂く必要があります。なお、特集号への掲載の可否は、査読を経て決定されます。

講演申込/原稿提出期間（厳守）

	論文Ⅰ、論文Ⅱ
受付開始日時	令和7年3月3日（月） 9時
講演申込締切日時	令和7年5月23日（金） 17時
原稿提出締切日時	令和7年5月23日（金） 17時

主催 共催 その他

電気学会 電力・エネルギー部門（B部門）
電気学会 九州支部
大会参加の申込方法、プログラムなどの詳細につきましては、今後、B部門ニュースレターおよびB部門大会のホームページに掲載します。

問合せ先 〒102-0076 東京都千代田区五番町6-2 HOMAT HORIZON ビル8F
電気学会 事業サービス課 電力・エネルギー部門大会担当 E-mail: pes@iee.or.jp

令和6年度電気学会高校生みらい創造コンテストの実施報告

電力・エネルギー部門編修委員会委員長
高尾 智明

高校生みらい創造コンテストは、高校生が電気エネルギー技術を身近なものと感じ、我が国の基盤を支える重要な技術であること、未来を拓く有望な技術であることを理解し、電気工学を学ぶ契機となることを期待して始めました。

電気・エネルギーおよび環境を対象とした実験、測定、計算、設計などを自らの発想で行った報告や高校生らしいユニークな発想の掘り起こしを求めて行っています。

今回は、全国の高等学校、工業高等専門学校19校から23編の応募作品があり、厳正な審査の結果、論旨の展開、独創性、発展性、客観性、分析力、発想力など幅広い観点から評価し、最優秀賞1編、優秀賞2編、佳作賞3編を選考しました。

今回も興味深い、楽しい、ユニークな内容の作品が多く見受けられました。具体的には太陽光発電以外にも再生可能エネルギーに関する様々なアプローチの仕方や高度な実験・シミュレーション・考察を行なった作品がある一方で、身の回りの課題に焦点を当てた検証を行ったユニークな作品もありました。

評価の高い作品は、高校生らしい視点や考え方で課題を

捉え、試行を経て積極的に自分の意見をまとめ良く述べておりました。一方で、アイデアは良いのですが、目的が不明瞭や考察不足、主張が少ない作品の評価は高くありませんでした。

今回の審査を通して、現代の高校生が電気エネルギーに関する技術や課題に対しどのように考えているのかを読み取るとともに、現代社会の誰もが関わる電気エネルギーについて、我々電気学会の会員が分かりやすく伝えていくことの重要性を再認識しました。また、コンテストに参加した高校生の中から、近い将来に、電力・エネルギー分野で活躍する研究者、技術者が現れることへの期待を強くしました。

今年6月には、次回コンテストへの参加募集を開始いたしますので、引き続き多くの高校生に参加願えるよう指導員の先生方および関係者のご協力をお願いいたします。

最後になりましたが、本コンテストの企画・推進にあたり、共催のパワーアカデミーより多大なご支援、ご協力をいただきましたことに対し厚く御礼申し上げます。

令和6年電気学会高校生みらい創造コンテスト 審査結果

最優秀賞	長岡工業高等専門学校	阿部 葵 様
	「簡単!!製作時間最短15分!! シン型墨汁太陽電池～光起電力の原因を解明せよ!～」	指導 島宗 洋介 先生
優秀賞	大分県立日田高等学校	森 海晴 様, 他2名
	「宇宙太陽光発電に適する軌道とは～静止軌道と準天頂軌道を比較する～」	指導 工藤 督右 先生
優秀賞	玉川学園高等部	稲葉 爽 様
	「海洋エネルギーを活用した海洋機関の実現に向けた波力発電の検証」	指導 矢崎 貴紀 先生
佳作賞	東京都立科学技術高等学校	児成 卓真 様, 他2名
	「デスクトップPCの油没冷却」	指導 伊藤 翔 先生
佳作賞	広島県立西条農業高等学校	瀧奥 康汰 様, 他7名
	「発酵食品を用いた微生物発電に関する基礎研究」	指導 古舘 蔵夫 先生
佳作賞	福島県立福島高等学校	大谷 温樹 様
	「MgとI ₂ を用いた二次電池の開発」	指導 菅野 俊樹 先生

Final Results of IEEJ Essay Writing Contest for High School Students,
2024.
By Tomoaki Takao.

簡単!! 製作時間最短15分!!

シン型墨汁太陽電池

～ 光起電力の原因を解明せよ! ～

独立行政法人国立高等専門学校機構
長岡工業高等専門学校
電気電子システム工学科3年

阿部 葵
指導教員 島宗 洋介

目次

1. 背景（現状分析、新たな発想）
2. 目的
3. 実験内容・実験方法
4. 結果と考察
5. まとめ
6. 引用文献

1.背景

R06年3月長岡高専電気電子システム工学科において**墨汁(図1)**と**シリコン(Si)**の接合により**光起電力**を生成することが発見された

本来、**書道用のインク**として用いられる墨汁に太陽電池の材料としての可能性が見出された

→ **墨汁の性質や良好な太陽電池特性を得る条件など、いまだ明らかになっていない**

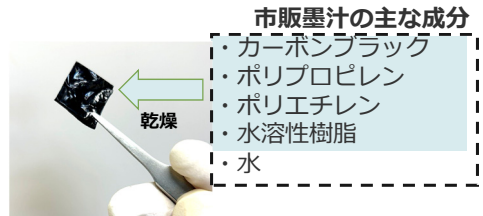


図1. 墨汁を乾燥させたシートの外観写真

私は、次に述べる観点①②から新しい太陽電池が世の中で
「大変役立つ技術になるのではないか!？」
 という可能性を感じたため、本研究に取り組むことにした

1.背景 (現状分析)

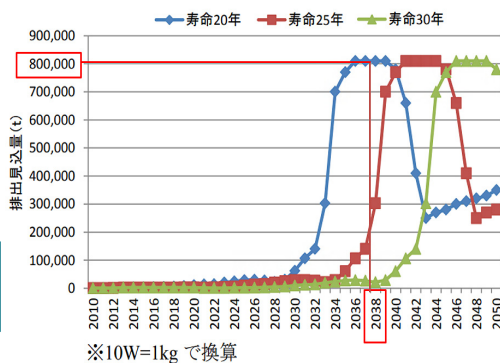


図2.太陽電池モジュール排出見込量^[1]

[1] 環境省HP「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン（第一版）」, p12]

観点①

2012年FITをきっかけに一般家庭に太陽電池が普及し、今後2038年付近に大量に**太陽電池の廃棄**が予定されている(図2)。従来の太陽電池は**有害物質**が含まれていることが多く、廃棄において**環境負荷に課題があり、費用が掛かってしまい**。

墨汁太陽電池の特徴①

墨汁太陽電池は**ありふれた材料**で作成しやすくSiウエハと墨汁の分離が容易で**再利用が簡単**である

1.背景 (現状分析)

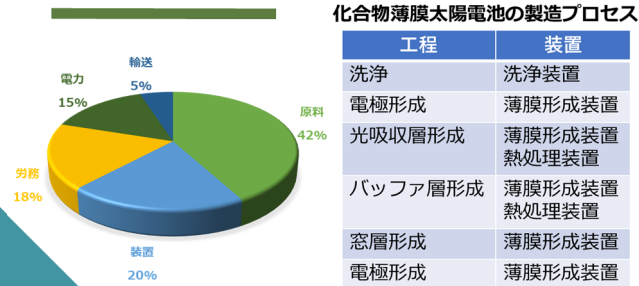


図3 太陽電池モジュールのコスト構造(左)^[2]と化合物薄膜太陽電池の工程別必要装置

[2]中田時夫 “CIGS太陽電池の基礎技術” 日刊工業新聞社, p120.

観点②

製造工程が複雑で特別な設備が必要
費用が高くなりやすい(図3)

墨汁太陽電池の特徴②

Siウエハへの墨汁の塗布乾燥だけで基本構造形成。
特別な装置を必要とせず**簡単・短時間**で製造可能

再生可能エネルギーとして太陽電池を持続可能な形で
普及させるために墨汁太陽電池は高いポテンシャルを有していると考えられる

2.目的

- 私が考える理想的なエネルギーのあり方:
消費者が**自ら電気を作り、使う社会**
- そのために必要なこと:
誰もが手に入れることができる (費用面)
環境にやさしい太陽電池の実現 (材料面)
- そのための第一歩: 墨汁太陽電池の実用化のための研究

☆本研究の目的

- 墨汁の性質を明らかにする
- 墨汁/Si太陽電池の電気的特性を明らかにする

3. 実験内容 (調査項目)

1. 墨汁の電気的性質の解明

- 1-1)抵抗率 1-2)温度依存性 金属？半導体？絶縁物？
- 1-3)p/n判定 (もし、半導体ならp,nどっち?)

2. 墨汁/Si太陽電池特性～Siウエハの抵抗率の影響?～

表1. 実験に用いたn型Siウエハ基板の抵抗率

シリーズ	抵抗率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	10cm Φ 525 μm 厚のn型(100)面Siウエハから2cm x 2cmを切り出し、太陽電池を作成、特性評価
L	7.83E-3	
M	6.88E-3	
H	2.31E-3	
X	3.49	

3. 墨汁の主成分：カーボンブラック/Si太陽電池の特性評価

墨汁/Si太陽電池の光起電力の起源は何か、主成分（カーボンブラック）のみで調査

4.さらなる性能改善施策：直列抵抗低減

SiとAl箔間の接触抵抗低減による性能改善効果について考察

3. 実験方法 (墨汁の電気的性質の解明)

抵抗率

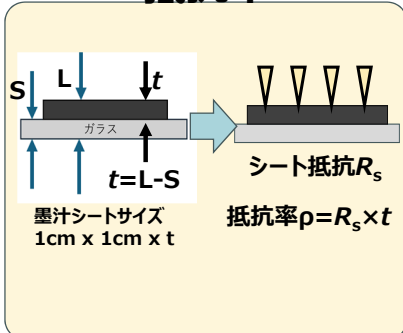


図4. ノギスによる墨汁の厚さ計測と四端子抵抗測定

温度依存性

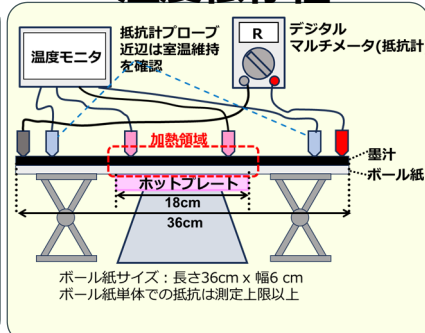


図5. 墨汁の温度依存性調査

p/n判定

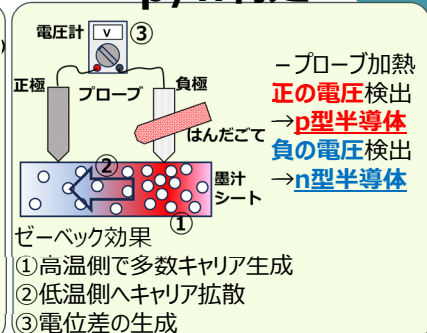


図6. ホットプローブ法による半導体p/n判定

3.実験方法 (太陽電池の作成)

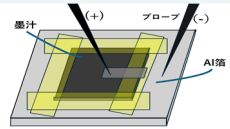


図7. 墨汁を用いた太陽電池

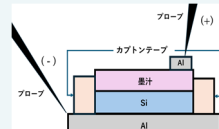


図8. 墨汁を用いた太陽電池の断面構造

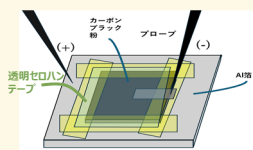


図9. カーボンブラックを用いた太陽電池

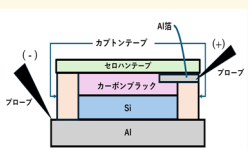


図10. カーボンブラックを用いた太陽電池の断面構造図

<作成方法>

- ① Al箔（ $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ）上にn型Siウエハ（ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ）の4辺をカプトンテープで固定。
 - ② Siウエハ露出部（約 1 cm^2 ）に墨汁（呉竹社“墨滴”）を約 0.1 cc 滴下。
 - ③ ホットプレート上で乾燥（ 30°C 5～7min）
 - ④ 墨汁が盛り上がった部分はキムワイプでふき取り。
- ※ Siウエハ上にカーボンブラック（粉）を散布、透明セロハンテープで固定したものも作成。粒子径は19, 38, 120nmの3種類。

(①～④は最短15分で完成)

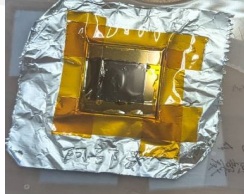
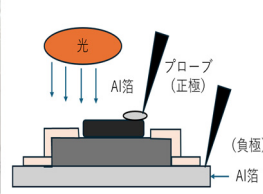


図11. 試作した墨汁太陽電池の外観写真



太陽電池では**墨汁側が正極**、**下部Al箔が負極**となる

図12. 電流-電圧特性測定時の状態

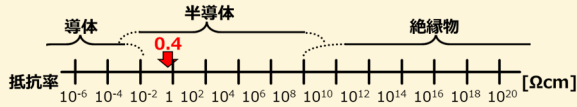
3.実験方法 (評価方法)

各種分析・評価に使用した装置

- 墨汁シート膜厚 : ノギス VC-10 新潟精機株式会社
- 抵抗温度特性 : テスターkit-8D SANWA,
ホットプレート Digital Hot Plate HP-2SA アズワン
- P/N判定 : はんだごて、デジタルマルチメータ KU-2608
- 抵抗値 : 比抵抗測定システム RESITEST8300 東陽テクニカ
- 酸化状態 : X線光電子分光装置 JPS-9010 JEOL
- 太陽電池特性 : ソーラーシミュレーター YQ-250BX JASCO

4. 結果と考察 (墨汁の電気的性質)

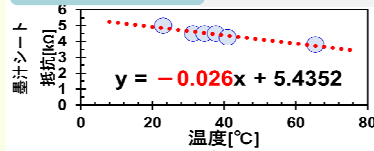
抵抗率 膜厚:0.2[mm],抵抗率:0.40 [Ωcm]^[3]



[3] 日野太郎 他「電気・電子材料」森北出版, p76

図13. 墨汁シートの抵抗率

温度依存性 負の温度係数^[4]



[4] 菅博 他「図説 電子デバイス」産業図書, p2

図14. 墨汁シートの抵抗の温度依存性

半導体的性質

ホットプローブ法 - 極プローブ加熱: 正の電圧:p型



図15. ホットプローブ法によるpn判定^[5]

*[5] A. Axelvitich et al, FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics Vol. 26, No 3, 2013, pp. 187 - 195

市販墨汁 (カーボンブラックや水溶性樹脂) を乾燥したシートは, p型半導体的性質があることを明らかにした。

4. 結果と考察 (墨汁太陽電池の試作評価)

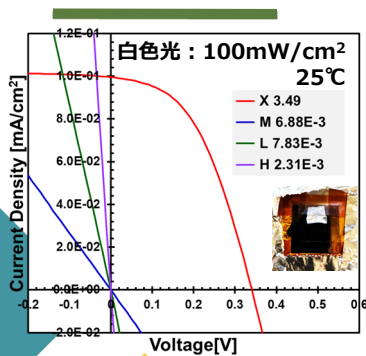


図16. 墨汁太陽電池の白色光下でのJVカーブ

- Xシリーズ n型Siウエハ(抵抗率3.49[Ωcm])と墨汁の積層構造において変換効率0.016[%],開放電圧0.341[V],短絡電流0.1 [mA/cm^2]の太陽電池動作を実現。

墨汁太陽電池の基本動作原理は、p型半導体墨汁シートとn型半導体Siによるpn接合によるものと考えられる。

- 一方、Xシリーズ以外の低抵抗率n型Siウエハではダイオードカーブを得られず、太陽電池動作が確認できなかった。
→抵抗率以外の要因で太陽電池動作を阻害している可能性はないか？
• Siウエハ表面には絶縁性の自然酸化膜 SiO_2 が形成されることが知られている。
【仮説】Siウエハの抵抗率によって自然酸化膜の状況が異なるのではないか

4. 結果と考察 (Siウェハの影響)

酸化されたSi 酸化されていないSi 酸化されたSi 酸化されていないSi

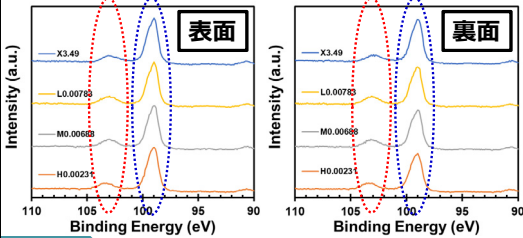


図17. Siウェハの表面、裏面のSi2p軌道電子のXPSスペクトル

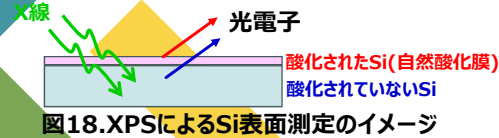


図18. XPSによるSi表面測定イメージ

仮説①

Siウェハ表面にできる絶縁性自然酸化膜が、Xシリーズ以外の低抵抗率ウェハで表面裏面ともに厚く形成されたために電池動作が阻害された？

検証

Siウェハの表面と裏面の酸化状態をXPS分析した。
→X(3.49Ωcm)と他シリーズ(10⁻³Ωcm)の酸化状態は同程度であることから、電池特性の極端な違いの原因とは考えにくく、仮説が成り立たない。

∴L,M,Hシリーズの10⁻³Ωcm低抵抗Siの太陽電池性能劣化の要因は自然酸化膜以外に主要因があることを示唆。

墨汁と抵抗率10⁻³Ωcmと3.49Ωcmのn型Siウェハとの接合においては、良好な太陽電池特性を実現するためには高抵抗Siの方が好ましく、抵抗率の最適化が重要であることを見出した。

4. 結果と考察

(墨汁主成分カーボンブラック/n型Si接合による太陽電池)

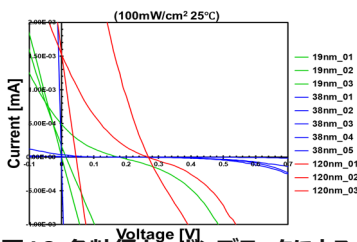


図19. 各粒径カーボンブラックによる太陽電池のJVカーブ

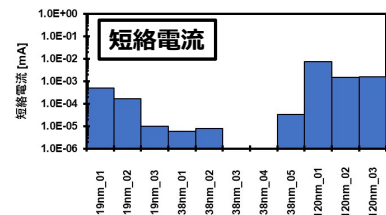
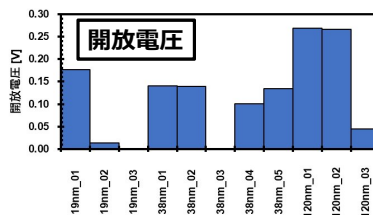


図20. 各粒径カーボンブラックによる太陽電池の開放電圧(左)および短絡電流(右)

平均粒径19nmを3セル、38nmを5セル、120nmを3セル作成し、JVカーブを評価 (図19.20) →特性ばらつきはあるものの最大0.27Vに達する光起電力を確認した(墨汁太陽電池同等)。

カーボンブラックが光起電力の要因の一つと考えられる

一方電流は小さく、直列抵抗高め、シャント抵抗低めの傾向。墨汁とカーボンブラックの違い？

4. 結果と考察 (墨汁主成分による太陽電池)

カーボンブラック太陽電池では、**直列抵抗が高く、シャント抵抗が低くなりやすいこと**の要因推定

墨汁：カーボンブラック+水溶性樹脂

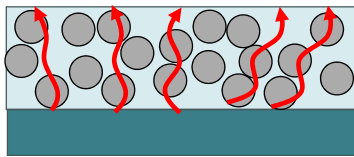


図21.カーボンブラックと水溶性樹脂の太陽電池の構造図

水溶性樹脂中にカーボンブラックが均一に分散し、**電流がパスしやすい**。

カーボンブラックのみ

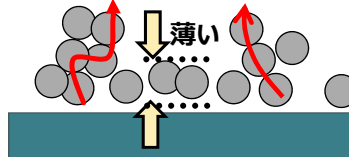


図22.カーボンブラックのみの太陽電池の構造図

電流パスが制限：**直列抵抗が増大**
薄い部分が生じやすい：電極-Si間距離が近接→**シャント抵抗が増大**

カーボンブラックのみであるため、分布が不均一。

カーボンブラックの均一化、カーボンブラック以外の水溶性樹脂の電気特性の解明が重要

4. 結果と考察～さらなる改善施策の検討～ 物理的圧力による改善案

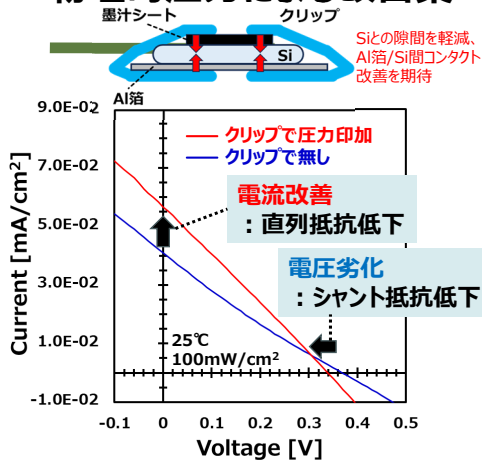


図23.物理的圧力(上図)によるJVカーブの変化(下図)

Siに対して墨汁は塗布乾燥、Al箔は接触させているのみ
→Al箔、Si基板、墨汁シート間の**接触抵抗**が高いことが疑われる。
クリップで物理的に鉛直方向圧力を加えて強く接触させた(図23上)。
→**直列抵抗減少(改善)**(図23下)。
∴基板表面Al箔との間の接触抵抗が減少したと推察。
→**シャント抵抗減少(劣化)**∴墨汁シートが柔らかいため、クリップで圧力を加えた部分が薄くなり、**漏電流増加**と推察(図24)
シャント抵抗低減させずに直列抵抗改善が性能改善に効果あり



図24.クリップ直下の墨汁の状況の推察イメージ

5.まとめ

- カーボンブラックを主成分とする墨汁を乾燥させた
墨汁シートはp型半導体の性質を有する
- 墨汁とn型Siウエハ(抵抗率 $3.49\Omega\text{cm}$)の積層構造において
**変換効率0.016 [%], 開放電圧0.341 [v],
短絡電流0.1 [mA/cm²]**の太陽電池を実現した。

インクとして使われてきた墨汁を用いて
低コストで環境にやさしい墨汁太陽電池の実用化の可能性を見出した

6.参考文献

- [1]環境省HP「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン (第一版)」, p12.
- [2] 中田時夫 “CIGS太陽電池の基礎技術” 日刊工業新聞社, p120.
- [3] 日野太郎 他「電気・電子材料」 森北出版, p76.
- [4] 菅博 他「図説 電子デバイス」 産業図書, p2.
- [5] A.Axelevitch et al, FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics Vol. 26, No 3, 2013, pp. 187 - 195

宇宙太陽光発電に適する軌道とは

— 静止軌道と準天頂軌道を比較する —

大分県立日田高等学校

森 海晴, 森山己太郎, 藤本 健心

1. 研究動機・先行研究・研究目的

近年、クリーンエネルギーの需要が高まっていることから、私たちは究極の太陽光発電「宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power System : 以後 SSPS)」に着目した。SSPS は静止軌道上を運行する衛星に設置した太陽光パネルで発電し、その電力を地上に設置した受電レクテナに向けてマイクロ波等で無線送電するという計画で、マイクロ波が雲を通り抜けられるため、天候に左右されずに安定した電力供給ができることや、受電レクテナを置けばどこでも電気を受け取れるなどの利点がある。一方で実現に向けて①送電や受電の効率化、②静止軌道上の衛星数の飽和、という課題がある。課題①については、坂井ら⁽¹⁾が、世界最高の電力変換効率を達成するなど、現在も研究が進められている。課題②については、長友⁽²⁾によって SSPS の軌道に関する考察がなされているが、その他で議論は深められていない。よって私たちは「静止軌道と同程度かそれ以上に効率よく送電できる宇宙太陽光発電衛星の軌道を見つけ出す」ことをテーマに研究を行うこととした。

2. 前提条件

- 条件①：地球に電力を送る際にはマイクロ波を用いる
- 条件②：夏至の1日で地球での受信電力量を比べる
- 条件③：送信機のアンテナは常に受信点を向くが、アンテナの制御に電力は消費しない
- 条件④：マイクロ波は以下に示すフリスの公式に則って空間を伝わるとする

$$Pr = \frac{ArAt}{d^2\lambda^2} Pt$$

Pr : 受信電力, Pt : 送信電力, Ar : 受電レクテナの実効開口面積, At : 送電レクテナの実効開口面積, λ : 波長, d : 送受信機間の距離

3. 仮説

『静止軌道より準天頂軌道の方が地球での受信電力量が大きくなる』とした。私たちが注目した準天頂軌道は、日本上空を高くゆっくり周回し、日本から見ると8の字に見えるという特徴がある (図1)。つまり日本上空で静止軌道に比べて仰角が大きくなるため、受信時の電力損失が小さく

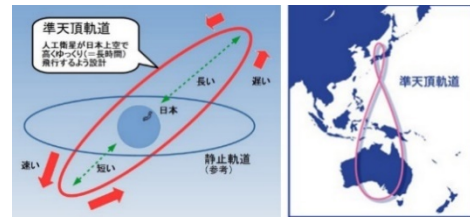


図1 準天頂軌道の概略図⁽⁶⁾⁽⁷⁾

なると考えた。

4. 研究 I (定義式の導出)

〈4・1〉 予備実験① (距離によるマイクロ波の減衰)

距離によってマイクロ波はどれほど損失するのかを調べるため、NaRiKa マイクロ波送信機・受信機、SHIMADZU ワイヤレス電圧計を用いて実験を行った。送信機と受信機を一直線上に設置し、受信機で計測された電流と電圧から電力を算出した。送受信機間の距離を 40cm~110cm まで 10cm おきに計測した (図2)。

実験結果 (図3) より、曲線的なグラフが得られたため、マイクロ波においてもフリスの公式を用いてよいと判断した。

〈4・2〉 予備実験② (角度によるマイクロ波の減衰)

マイクロ波送信機と受信機の角度 θ により、マイクロ波がどれほど損失するかを調べるため、送受信機間の距離を 40cm に保ちながら、 θ を $0^\circ \sim 50^\circ$ まで 10° おきに電力を計測した (図4)。なお、 $\theta = 0^\circ$ の電力を 1 とし、 θ の変化による受信電力の減衰率を測定した。その結果から、

$$y = -8 \times 10^{-7} \theta^4 + 1 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.0037 \theta^2 + 0.0145 \theta + 1$$

という関数が得られた。これを θ による減衰関数 $R(\theta)$ とした。

2つの予備実験より、今回の研究に用いる準天頂軌道は、軌道上を周回する衛星と大分県との角度が絶えず変化する軌道であることから、フリスの公式と減衰関数 $R(\theta)$ の積である 3K の公式を新たに作成した。

$$3K \text{ の公式 } Pr = \frac{ArAt}{d^2\lambda^2} Pt \times R(\theta)$$

この 3K の公式を利用して、静止軌道と準天頂軌道におけ

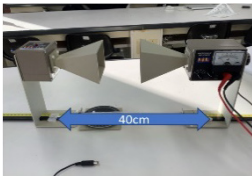


図2 距離40cmの実験の様子

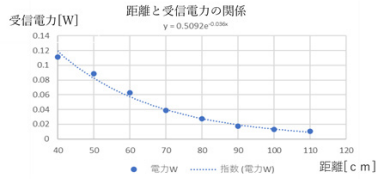


図3 距離と受信電力の関係

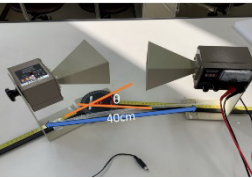


図4 角度θ=40°の実験の様子

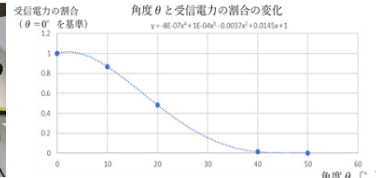


図5 角度と受信電力の割合

る送電効率を比較する。ただし、式の赤枠部分は静止軌道と準天頂軌道で変化しないため定数 (= 1.3×10^{24}) とした。この定数を 1.3×10^{24} という値にした理由は、静止軌道からの受信電力 P_r をおよそ 1.0×10^6 kW (100 万 kW) にするためである。

5. 研究Ⅱ (受信電力量の算出)

〈5-1〉 本実験① (静止軌道の場合の受信電力量)

静止軌道上で衛星を周回させた場合の1日の受信電力量を算出するために、シミュレーションソフト Matlab を用いた。以下は計算条件である。

- 地球を球体とみなし、その半径は 6371 km
- 受信点は大分県 (緯度 N33°14'22", E131°36'34")
- 衛星は地球を中心とした円軌道上を等速円運動する
- 軌道傾斜角は 0° で赤道上空を運動する
- 衛星の公転周期と地球の自転周期はともに 24 時間
- 24 時間の 100 分の 1 (864s) ごとに d と θ を算出し、以下の積分式で1日の受信電力量を計算する

$$W = \int_0^{24h} \frac{ArAt}{d^2 \lambda^2} P_t \times R(\theta) dt$$

図6のようなシミュレーションを行い、 d と θ に関して図7, 図8の結果を得た。図7で縦軸の d が一定の値を示していないが、 d の変化量が極端に小さい値で、わずかな差であるため、受信点から衛星までの距離 d は常に 3.67×10^7 m であるといえる。また、図8より θ は常に 37° を指しており、シミュレーションによって得られた d と θ の値は、実測値と概ね一致している。常に $\theta = 37^\circ$ と得られたが、地球に置いた受電レクテナも 37° 傾けて設置すれば、衛星から発射されるマイクロ波を垂直に受信できると考えられるため、 θ の値を 0° とみなせ、 $R(\theta) = 1$ とできる。求めた d と $R(\theta)$ から、1日の受信電力量 W を計算した結果、 $W = 2.4 \times 10^7$ kWh となった (図9)。

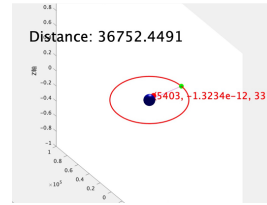


図6 Matlabでの静止軌道の再現

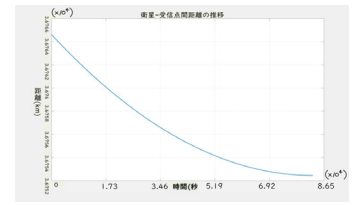


図7 衛星-受信点間の距離dの推移

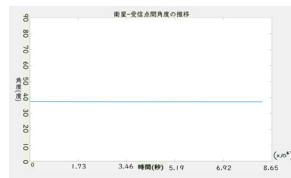


図8 衛星-受信点間の角度θの推移

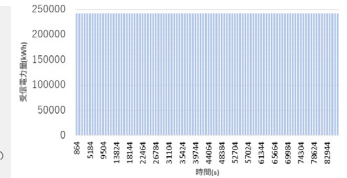


図9 静止軌道における受信電力量Wの推移

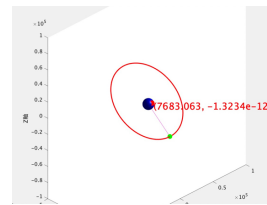


図10 Matlabでの準天頂軌道の再現

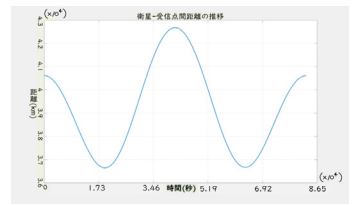


図11 衛星-受信点間の距離dの推移

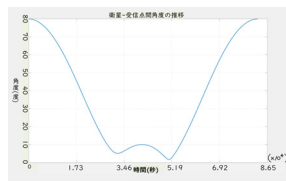


図12 衛星-受信点間の角度θの推移

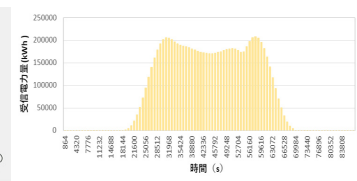


図13 準天頂軌道における受信電力量Wの推移

〈5-2〉 本実験② (準天頂軌道の場合の受信電力量)

準天頂軌道における1日の受信電力量を、Matlabを使用して算出した。本実験①から変更した計算条件を以下に示す。

- 衛星は離心率 0.075 の楕円上を運動し、楕円焦点の1つに地球を配置する
- 衛星の楕円軌道は赤道面に対し 40° の軌道傾斜角をもつ

図10のようなシミュレーションを行い、図11, 図12から、 d が大きくなった時に、 θ が小さくなることを確認できるため、準天頂軌道の特徴を表した結果となっている。求めた d と θ から、1日の受信電力量 W を計算した結果、 $W = 8.4 \times 10^6$ kWh となった (図13)。また、図13の特徴として、①受信電力量が0の時間が1日の40%程度あること、②受信電力量の最大値は 2.0×10^5 kWh であり、静止軌道よりも値が小さいことが確認できる。①の原因として、 $\theta > 40^\circ$ の時間が長く生じるためだと考える。

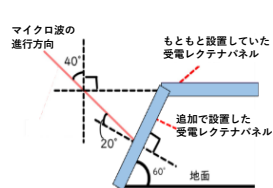


図 14 地上から 60° 傾けた受電レクテナを 1 枚追加設置する場合の模式図

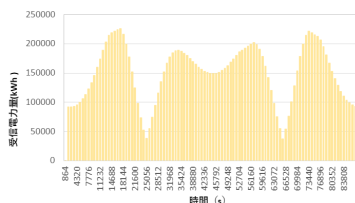


図 15 準天頂軌道において 60° 傾けた受電レクテナを追加設置した場合の受信電力量 W の推移

6. 考 察

準天頂軌道で受信電力量が 0 である時間を減らすことはできないかと考えた。そこで、図 14 のように地表面から 60° 傾けた受電レクテナをもう 1 枚設置するとして 1 日の受信電力量 W を計算すると、 $W = 1.5 \times 10^7$ kWh となり、静止軌道と遜色ない結果となることが判明した。ゆえに、SSPS の軌道として、衛星が飽和状態になりつつある静止軌道に代わって、受電レクテナ 2 枚の準天頂軌道も候補に挙げられることを発見した。

7. 今後の展望

受信電力量の大きさは、 d に強く依存しているため、地球からの距離が近い ISS 軌道などについても調査することを検討している。また、予備実験②をより細かい角度変化で実験したい。

8. 謝 辞

この研究を行うにあたって、日々指導・助言をいただきました日田高校の工藤督右先生、訪問時に助言をいただきました九州大学の花田俊也教授、QPS 研究所の大西俊輔様、市来敏光様、九州大学の八坂哲雄名誉教授、メールで助言をいただきました京都大学の篠原真毅教授に心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) 坂井尚貴・野口啓介・伊東健治：「短絡スタブ装荷ダイポールアンテナを用いる 5.8GHz 帯高効率 1W レクテナ」, 信学技報, Vol.122, No.411, pp.60-65 (2023)
- (2) 篠原真毅：「宇宙太陽光発電システムの開発動向」, 電学誌, Vol.137, No.12, pp.841-844 (2017)
- (3) 長友信人：「実現性から見た太陽発電衛星 (SPS) の軌道の選択に関するクリティカル・レビュー」, 第 2 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨, pp.88-92 (1999)
- (4) 西山淳一・小泉 悠・依田達郎：「宇宙に関する基本情報」, 科学技術に関する調査プロジェクト 2016 報告書 宇宙政策の動向, pp.7-25 (2016)
- (5) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 研究開発部門：「宇宙太陽光発電システム (SSPS) について」, JAXA, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-ssps.html> (アクセス日 2024-9-30)
- (6) Science Portal：「日本版 GPS 「みちびき初号機後継機」 打ち上げ成功 高精度測位に貢献」, 科学技術振興機構 (JST) (2021-10-27), https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20211027_n01/index.html, (アクセス日 2024-9-30)
- (7) みちびきウェブサイト：https://qzss.go.jp/overview/services/tech01_orbit.html

海洋エネルギーを活用した海洋機関の実現に向けた波力発電の検証

玉川学園高等部

稲葉 爽

1. はじめに

本研究は、「海洋機関」と称するシステムの一部を検証することを目的とする。海洋機関とは、波力、風力、太陽光などの海洋で得られるエネルギーを利用して持続可能なエネルギー供給を目指す多機能装置のことである。

また、さまざまな環境条件に適応し、柔軟に最適化が可能な点も特長であり、将来的には新たなエネルギー源の追加も可能な設計を目指している。本研究では、この海洋機関の一部として、波力発電システムを取り上げ、そのエネルギー変換効率や機械的構成について実験的検証を行う。特に、滑車や歯車を用いた機構のエネルギー効率に着目し、実用化に向けた基礎的データを収集することを主な目標とする。

(1) 波力発電について 波力発電とは、波の運動エネルギーを利用した発電方法であり、さまざまな種類が存在する。地球規模でのエネルギー問題が深刻化する中、海洋エネルギーの活用は持続可能なエネルギー供給の一つとして注目されている。特に、波力発電は広大な海洋面積を持つ地域において、大量のエネルギーを安定的に供給できる可能性があり、再生可能エネルギーの分野で重要な位置を占めている。本研究では、これらの背景を踏まえ、振動水柱型波力発電を利用する。振動水柱型波力発電とは、発電装置内にある空気室に海水が流れ込み、海面の上下運動によって空気が押し出され、その空気が風となってタービンを回すことで発電を行う仕組みである。

(2) 風力発電について 風力発電とは、風の運動エネルギーを回転運動に変換し、その回転によって発電を行う技術である。風力タービンを利用して風を受け、ブレードが回転することで発電機が稼働する仕組みである。特に海洋環境では、広大な水面がもたらす安定した風を利用できるため、陸上に比べて効率的に風力発電を行うことが可能である。海洋風力発電は、再生可能エネルギーの一環として注目されており、他のエネルギー源と組み合わせることで安定した電力供給を目指すことが求められている。

(3) 太陽光発電について 太陽光発電は、太陽光を直接電気に変換する技術であり、半導体材料を利用した太陽電池によって発電が行われる。海洋環境では、太陽光が豊富に得られる地域が多いため、効率よくエネルギーを利用することが可能である。また、太陽光発電は静音で環境に優しい特性を持ち、波力発電や風力発電と組み合わせるこ

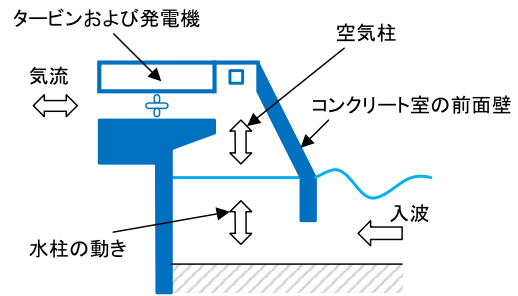


図1 波力発電装置構造(1)

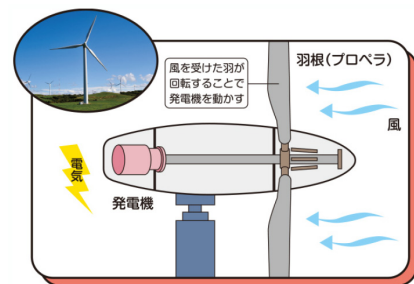


図2 風力発電装置構造(4)

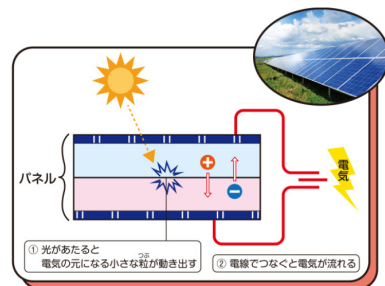


図3 太陽光発電構造(4)

とで、さまざまな気象条件下でも安定した電力供給が可能である。

(4) 先輩たちの先行研究で得た結果について 本校の先輩方の先行研究では、振動水中型波力発電装置の実験を通じて、発電効率の向上を目指した実験が行われ、実験室レベルでの装置の再現可能性を検証することが目的であった。この研究において、装置の改良を重ねた結果、最大約7mAの発電に成功し、発電装置の効果的な設計の可能性が示された。発電が成功した要因として、空気室部分の先端形状が重要であると考察されている。この発見は、波力発

電装置の設計において空気室の形状を最適化することが、発電効率の向上につながることを示している。さらに、波力発電の高効率化を目指す実験の結果、発電効率を上げるための最適な形状として、ひょうたん型のペットボトルが最も有効であることが明らかになった。この形状は、波が小さい時でも他の形状と比較して高い発電効率を持つことが示されている。

2. 動機及び目的：波力発電を基盤とした持続可能な技術開発の探究

（動機） 授業やメディアで滑車の仕組みに触れる中で、その機械的な特性と応用可能性に魅了されたことから本研究は始まった。特に、滑車を持つ運動の効率性と力の伝達の原理に関心を持った。そして地球温暖化やエネルギー問題に対する関心が高まる中、再生可能エネルギーの開発は非常に重要であると考えている。特に、電気エネルギーへの変換効率において、太陽光発電が10～20%であるのに対し、波力発電は30%と高い効率を誇っているのにも関わらず実用化例が少ない点に着目し波力発電を重点に実験を行った。最初は円運動の法則を用いた非電力降下装置の再現実験に取り組んだが、回転半径が大きい円運動が必要であることや、回転運動のエネルギーの減衰を実験装置で適切に制御することが課題となった。この経験を通じて、エレベーターの設計に新たな視点を取り入れる必要性を感じ、研究を重ねる中で、海洋機関という新たな研究分野に辿り着いた。

（目的） 本研究の目的は、実験室規模での装置が海洋機関の一例としていくつかの機能を検証することである。その中で、海面や海中、さらには海底に存在する浮遊物や海洋資源（例えば、深海鉱物やプラスチックごみなど）の効率的などの採集を想定し、波力を用いて一定の重さの物体を持ち上げられるかを確認することを主な目標とした。また、これと同時に発電量も測定し、仕事と電気エネルギーの生成を同時に行うことを目指した。具体的には、装置が動く際の電流や圧力を測定し、これらのデータを基に装置の現状を把握する。これにより、装置の性能を理解し、海洋機関としてどのように活用できるかについて多角的な検証を行う。また、以前行った円運動を利用した非電力降下装置の再現実験で得られた知見も活かしながら、新たな応用可能性を模索していく。

3. 実験構成

クロスフロー型の風車、歯車：歯数24個、3Dプリンターで作成した歯車（1つ目（小さい歯車）：歯数27個）、（2つ目（大きい歯車）：歯数31個）、ベイトリール、リールシート（リールを固定するもの）、おもり5kg（バケツに乗せるもの）、おもり1g～22g（持ち上げる用）、ひょうたん型のペットボトル、30Lのゴミ箱、電流計。

作成した歯車はCAD (fusion) を使って3Dデータを作り、3Dプリンターで出力して作成した。

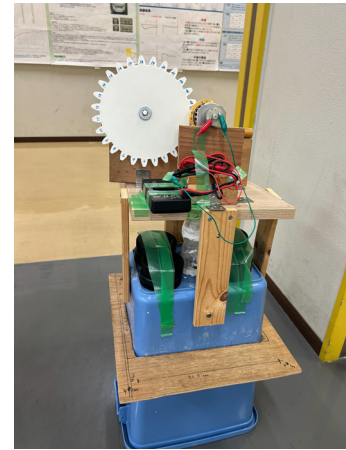


図4 実験装置構造

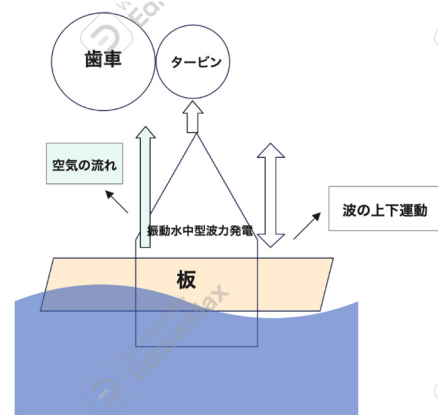


図5 実験装置構造の仕組み

4. 実験内容

3種類全て同様の手順で行う

(I)歯車, (II)大きい歯車, (III)小さい歯車

実験 1-1：手動測定, 実験 1-2：おもり5kg+手動測定
1gのおもりから順番に巻き上げ力を測定していく。

全ての実験において1つの重さに対して複数回実験を行いその平均値をとる。

5. 結果と考察：実験データに基づくエネルギー効率の分析

実験結果は、以下のようになった。

(I)・(II)

実験 1-1 では、滑車のサイズが小さく、歯数が24個の歯車を使用したところ、装置のリールが回転することは確認できなかった。

実験 1-2 では、滑車のサイズを大きくし、歯数が27個の歯車を使用して同様の実験を行ったが、こちらでもリールは回転しなかった。この結果から、滑車のサイズ変更により装置の動作に対する影響が確認された。

以上の結果を踏まえ、実験 1-2 は実施しなかった。

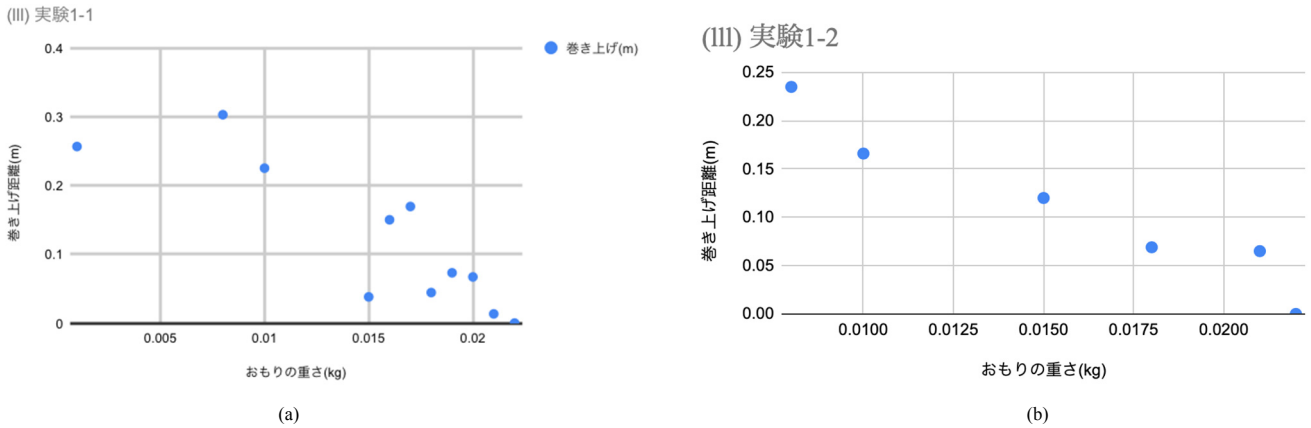


図6 おもりの重さと巻き上げた距離の関係

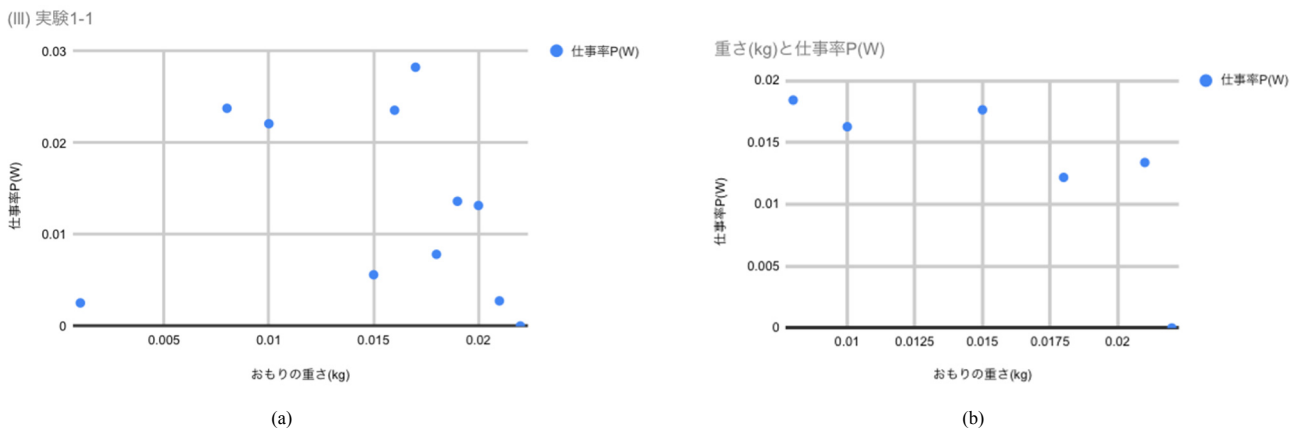


図7 おもりの重さと仕事率の関係

(III)

〔実験 1-1〕 手で押し込んだ際、滑車が回転したが、測定において誤差が見られた。最大で 21g のおもりを持ち上げることができた。

〔実験 1-2〕 5kg のおもりを追加し手で測定した際には、滑車はスムーズに回転し、実験 1-1 に比べて結果が安定していた。最大で 21g のおもりを持ち上げることができた。

以下のグラフは(III)の実験 1-1 と 1-2 について示している。

図 6 では、重さが増加するにつれて巻き上げられる距離が変化することが確認された。一般的に、より重いおもりでは巻き上げ距離が短くなる傾向が見られた。これは、重いおもりを引き上げるためにはより大きな力が必要となり、装置の効率が低下するためであると考えられる。図 7 では、重さが増加するにつれて仕事率も上昇する傾向が確認された。これは、重いおもりを持ち上げるために必要な力が大きくなることから、システム全体のエネルギー消費が増加するためである。図 8 では、実験中の時間に伴って電流効率が一定であることが示された。これは、システムが時間の経過にかかわらず安定して動作していることを示唆しており、長時間の運用における装置の信頼性や耐久性に寄与していると考えられる。

図 9 では、圧力が一定である場合でも巻き上げた距離に

差が見られることが確認された。この結果から、圧力以外の要因（例えば、波の高さや装置のメカニズム）が巻き上げ性能に大きく影響を与えることが示唆される。図 10 では、全体的な分布が均一ではなく、特定の条件下でのみ高い効率が達成されていることが示された。この分布は、システムのパラメータ調整によって最適化される可能性があることを示している。

(考察)

(I)・(II)：滑車のサイズがシステムの動作に大きく影響を与えたと考えられる。実験(I)では滑車のサイズが小さく、十分なトルクを伝達することができなかったため、リールが回転しなかったのだと思う。実験(II)では、滑車のサイズを大きくしたことでシステム全体の慣性モーメントが増加し、装置の回転に対して抵抗が増加したと考えられる。大きな滑車は回転を開始するためにより大きな力が必要となるため、入力エネルギーが不足しリールが回らなかったと推測される。

(II)：歯車のサイズが適切であったためトルクの伝達が効率的に行われ、滑車の回転がスムーズになったと考えられる。手動操作時の力のバラつきによる誤差が 1 回目の測定では見られたが、2 回目の測定で 5kg のおもりを追加したことで、装置全体にかかる荷重が増加し、手動操作時の力が

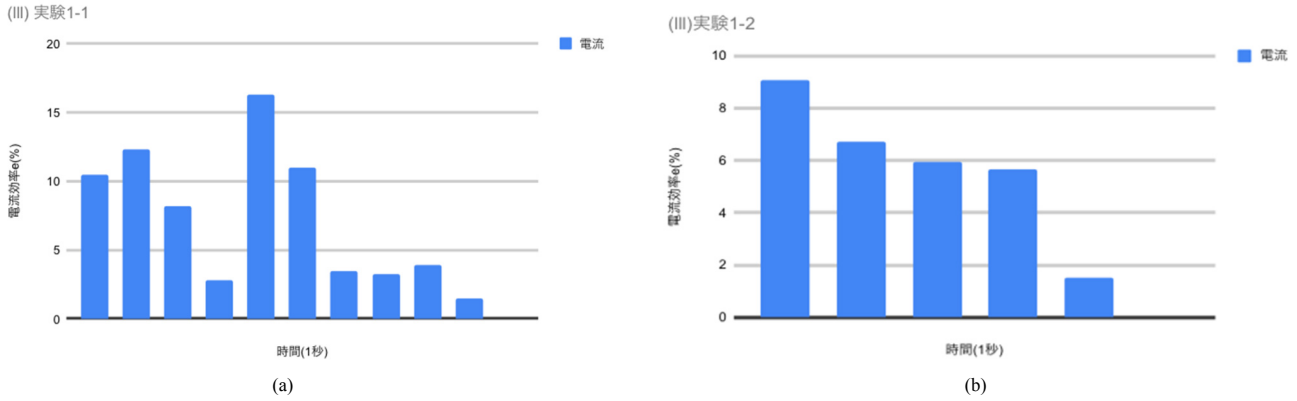


図8 時間と電流効率の関係

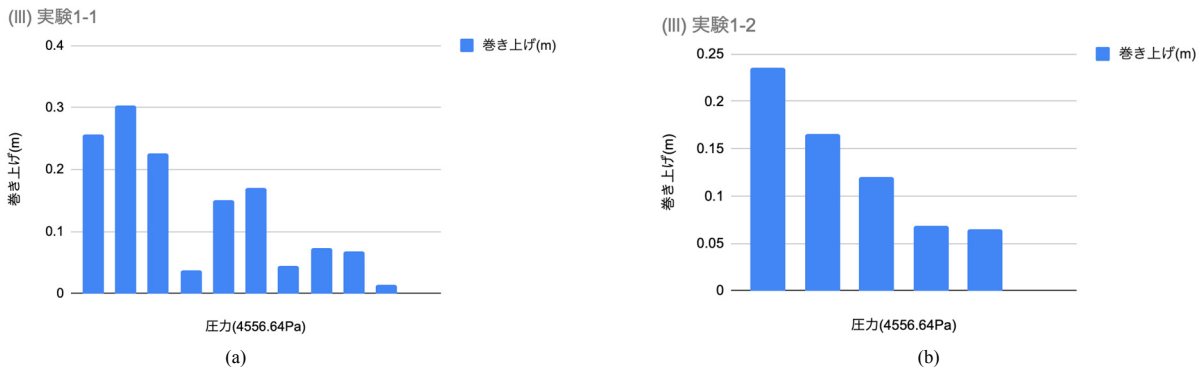


図9 圧力と巻き上げた距離の関係

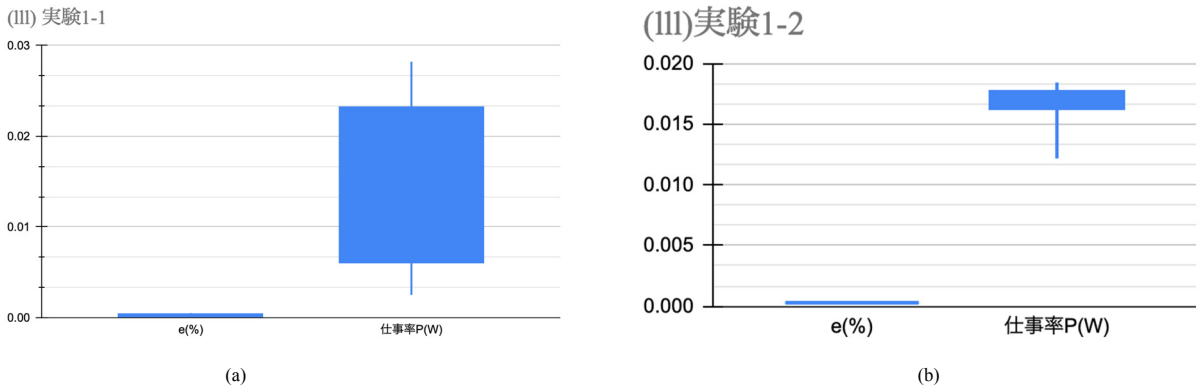


図10 発電効率および仕事率の分布

より安定して伝わったため、結果の安定性が向上した。今回の実験結果・考察から、滑車のサイズと装置の慣性モーメントのバランスが重要であることが明らかになった。したがって、装置の設計においては、滑車のサイズやシステム全体のトルク、慣性のバランスを最適化することが重要であり、効率的なエネルギー伝達を実現するための検討が必要であると考えられる。

6. 課題と展望：装置改良と円運動の応用によるシステム改良

(課題) 今回の実験全体における課題として、まず挙げられるのは滑車や歯車のサイズ選定の難しさである。実験の

結果からも明らかなように、滑車や歯車の大きさはトルクや慣性モーメントに直接影響を与え、装置全体の性能に大きく関わる。歯車が小さすぎるとトルク不足により十分な回転が得られず、大きすぎると慣性モーメントが増大して回転が困難になるという問題が生じる。このため、最適なサイズの選定が実験の成功にとって重要ですが、それを決定するための具体的な基準や指標が不足している点が課題として明らかである。また、手動操作による力の加え方にバラつきが生じるため、実験結果の再現性と安定性に欠けるという点も問題である。特に手動測定では、操作の微妙な違いが結果に大きな影響を与えるため、より定量的で安定した測定方法を確立することが必要とされる。また、波

