

[事業報告]

## エネルギーの地産地消を目指して

森田 廣

山陽小野田市立山口東京理科大学 工学部 電気工学科

### Aiming for Local Production and Consumption of Energy

Hiroshi MORITA

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Sanyo-Onoda City University

#### 要 約

東日本大震災の直後に本学に着任した筆者は、その後の未曾有ともいえる風水害も目の当たりにしながら、自然災害に強い再生可能エネルギーの研究に取りかかった。この10年、他の研究者があまり着手していない領域の研究を同じ意志を持つ学生たちと続けてきた。その中でも特に思い入れのある3技術を紹介する。紫外線を電力に変える透明太陽電池についてはその形成技術も含めて開発し、世界最高レベルの効率を達成した。風レンズ効果を用いたディフューザー付きの風力発電は、弱風下でも発電が可能であることを示すことができた。さらに、微生物を起源とする土壌微生物燃料電池については筆者らが初めて実施した多孔質体の導入により、従来の発電電力の10倍を達成して実用化に近づけた。この地は、瀬戸内ゆえの日照時間が長く、弱風ながらいつも風のある、湖沼や田圃が多い環境にある。それらから自然エネルギーを頂き、電力に変えてエネルギーの地産地消の実現につなげていきたい。

キーワード：地産地消、エネルギー、太陽光発電、風力発電、微生物発電

#### Abstract

Immediately after the Great East Japan Earthquake, I arrived at the university and started research on renewable energy that is resistant to natural disasters. For 10 years, I continued my research with my dear students in areas where other researchers have not done much. Among them, I would like to introduce three technologies that I have a strong feeling for. We have developed a transparent solar cell that converts ultraviolet rays into electric power, including its formation technology, and achieved the world's highest level of efficiency. It was possible to show that wind power generation with a diffuser using the wind lens effect can generate power even in weak winds. Furthermore, the soil microbial fuel cell originating from microorganisms has achieved 10 times the conventional power generation by introducing the novel porous body, which is our invention, and is close to practical use. This area has long daylight hours due to the coast of the Seto Inland Sea, and although it is weak, the wind always blows, and there are many lakes and rice fields. We would like to receive natural energy from them and convert it into electric power, which will lead to the realization of local production for local consumption of energy.

**Keywords** : local production and consumption, energy, solar power generation, wind power generation, microbial power generation

## 1. 大学の研究で目指したもの

地球温暖化から自然エネルギーへの関心が高まっている。筆者は東日本大震災の直後、2011年3月に本学に赴任した。震災に端を発した原子力発電所の事故は日本のエネルギー政策を大きく変化させ、代替エネルギー開発、分散発電への期待が高まった。その後の未曾有と言われる自然災害が日本列島を相次いで襲ったこともそのことに拍車をかけた。以来、この大学において、環境に寄り沿った、この地に潜在する自然エネルギーを用いた発電の研究を行ってきた。永年在職した企業で携わってきた半導体や電子部品のハイテク研究を続けられる環境が地方の小さな大学には無かったことも理由ではあったが、同じ思いの若い学生たちの純粋な情熱が後押ししてくれた。研究室の歴代学生と共に、太陽光、風力、微生物を起源とする“地産地消エネルギー”の研究を行うことができたが、社会での実用の可能性をいくらかでも前に進められたなら幸いである。今回、大学での10年の節目に今までの研究を振り返り、まとめる機会を頂いたが、特に思い入れのある三つの技術を紹介したい。この拙稿が少しでもこれからの若い研究者や技術者の自然エネルギー研究への動機づけになればと願っている。

三つのカテゴリーの研究のうち、一つ目の太陽光発電については、これまで活用度の低かった紫外光を利用した透明太陽電池の研究を行い、世界的にもトップクラスの光電変換効率を達成する素子構成を実現することができた。瀬戸内のこの地域は年間日照時間も長く、固定された建物の窓や車の窓での発電に有効活用できる。二つ目の研究は風力発電に関するものである。山陽小野田市は海と山が近接する豊かな自然環境下で、さほどの強さはないが、風がよく吹く。流体力学の世界で知られている「風レンズ効果」を用いた風速の増幅作用の研究の結果、弱い風でも大きな電力を得られる風車構造を考案することができた。実際に試作した実物の数分の一のモデルでこの効果を検証でき、実用の可能性を実証できた。三つ目の研究は微生物燃料電池である。今世紀になり発見された微生物の活動を源泉とする発電は、地球上のどこでも安価に簡単に電力を取り出すことができる。実用化への壁であった発電効率の向上に対して、発電装置内へ微生物を集積化する新規材料の導入を試み、従来の10倍以上の出力を実現し、実用化に一步近づけた。この技術が実用化されれば僻地や災害時の電力供給にも大いに役立つ。

本学でのエネルギー地産地消を目指した10年間の研究の軌跡と今後の展望を示す。

## 2. 太陽光発電への取り組み

太陽光発電については企業在職時に国家プロジェクトの「サンシャイン計画」に携わり<sup>1)</sup>、シリコン結晶太陽電池を開発し商品化した経験もあるので、取り組みやすいテーマである。また、新たな構造の太陽電池を作製する際の薄膜形成技術も筆者が長年、様々な電子部品の研究に用いてきた手法である<sup>2)</sup>。

そのような中で対象として絞り込んだ「透明太陽電池（発電ガラスとも称する）」の元々の研究動機は、太陽光中、日常の人間の生活に使われていない紫外領域の光を利用して発電することであった。太陽光スペクトルにおける紫外部の割合が6%程度と小さいことと太陽光の稀薄性、不安定性という不利な点を、常時、太陽光が当たっている窓を用いた“発電電力蓄積効果”で解決を図り、その場での電力の活用を狙った<sup>3)</sup>。蓄積効果といっても、実用的な時間内で一定の電力を得るには光電変換効率の向上が不可欠である。世の中のこのタイプの太陽電池の効率は最高でも10のマイナス3乗のオーダーであった。これを大幅に向上させる手立てとしてp、n型透明半導体に不純物を混入した性能改善を行ってきた<sup>4-7)</sup>。透明太陽電池の構成の一例はFig.1のようになり、ITO透明電極間にp型とn型の透明半導体層を各々1000Å形成する。



Fig.1 透明太陽電池の構成例

p型としてはNiO、n型としてはZnOを基本材料として検討を始めた。大学保有の装置を用いた二元同時電子ビーム蒸着法を駆使した試作を重ね、p型ではNiO薄膜中に、Li、Cu、Feを各々添加することが太陽電池の光電変換特性の向上に有効であることを見出した。それぞれの膜中でこれらの添加元素がNi<sup>2+</sup>サイトを置き換え、半導体特性を向上させるためと考えられる。上述の元素を添加したp型のNiO系酸化物薄膜（順にNLO、NCO、NFOと称する）とn型のZnO薄膜を積層した太陽電池の特性をFig.2に示す。

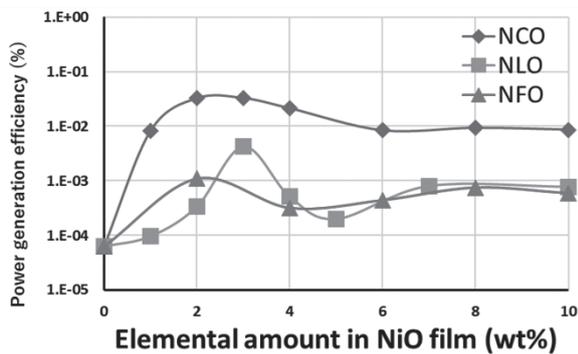


Fig.2 透明太陽電池の光電変換効率

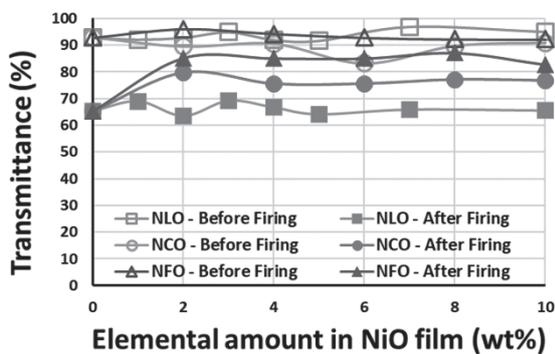


Fig.3 各薄膜の熱処理前後の透過率

各々元素添加量に最適値があり、最も良い変換効率はNCOの、元素添加量2wt%の場合であるが、このときの変換効率は従来よりも一桁良い値を達成することができた。透明太陽電池なので十分な可視光透過率も達成しなければならない。NiO膜は製膜直後の酸素欠損を補い安定化させるための大気中での熱処理を行うが、酸化が進むと透明性が低下するやっかいな物質であり、添加元素によってその低下率が異なる。Fig.3に示すように、CuよりもFeを添加したほうが、透明性からは優位であり、どちらを選択するかには総合的な判断が必要である。なお、n型についてはZnOにLiを添加する(ZLOと称する)とわずかに特性が向上することも見出している。

所望量のLiを混入したNiO薄膜(NLO)を二元同時電子ビーム蒸着法で作成してZnO薄膜との積層太陽電池を世界で初めて作り発表<sup>4)</sup>してから7年が経過した。同時蒸着による元素添加膜の形成は、材料の性状や電子ビーム加熱条件の配慮など、試行錯誤の連続であり、時には老朽化した装置の修理やクリーニングばかり行っていた時期もあった。そのかいあってFig.2に示した世界最高レベルの光電変換効率を得ることができた。技術開発は一筋縄ではいかないと身を

もって学んだ学生たちは社会に出て、仕事にその経験を生かしてくれていると思う。

### 3. 風力発電への取り組み

筆者らは地元(山口県山陽小野田市)の風にも注目した。瀬戸内の自然豊かな場所にあるこの土地では、平均風速は弱い(2~3m/s)が、高頻度で風が吹くことを学生が地道な現地調査で明らかにしてくれた。弱風でも効率の良い発電を行うには小型の垂直軸複合風車が好ましい<sup>8)</sup>。これに、水平軸方式では既に実用化されている、風車における風レンズ効果<sup>9)</sup>を併用して風速を増大できれば、実用化可能な発電出力を得ることができると考えた。

風力発電におけるエネルギーPは次式で表すことができ、風速Vの3乗に比例する。

$$P = C_p \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot A V^3 \quad (1)$$

$C_p$ は風車のパワー係数、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]は空気密度、 $A$  [m<sup>2</sup>]は受風面積、 $V$  [m/s]は風速である。例えば、風レンズ効果により風速を2倍にできれば出力を8倍にできる。

複合風車は、ダリウス+サボニウス、ダリウス+S字ローター、H型ダリウス+S字ローターの3通りの組み合わせを試作した。風レンズ効果をもたらすディフューザーを考案して各々に付帯した。これらをFig.4に示す。

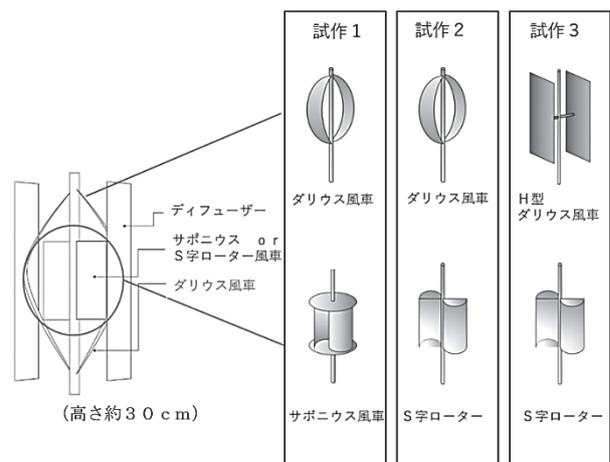


Fig.4 ディフューザー付垂直軸複合風車

Table 1 試作した風車特性と発電量

		試作1	試作2	試作3
ディフューザー付帯前	風速(m/s)	3.0	3.0	3.0
	発電量( $\mu$ W)	6.4	6.2	6.4
ディフューザー付帯後	風速(m/s)	2.8	3.3	3.6
	発電量( $\mu$ W)	5.7	8.7	11.0
増大率	風速(%)	90	110	120
	発電量(%)	90	140	170

ディフューザーの有無の風速（付帯無し時に 3m/s に固定）と、発電量（抵抗を接続して電圧を測定）を実測した。結果（10 回の平均値）を Table 1 に示す。風レンズ効果による風速、発電量の増大はサボニウス風車（試作 1）では確認できず、S 字ローター風車（試作 2、3）で顕著で、さらに断面を風の流れを滑らかにするために液滴状に工夫した H 型ダリウス風車との組み合わせが最も良いディフューザーによる増大率を示した。試作 1 のサボニウス風車は S 字ローター形に比べ、ディフューザーでの摩擦損失が大きく風レンズ効果が認められなかった。試作 1、2 の板状のダリウス風車が揚力を十分に活用できないのに対して、試作 3 の液滴状の断面形状のものは揚力に有利に働いたといえる。試作 3 の複合風車は風レンズ効果で風速は 1.2 倍に、発電量は 1.7 倍になり、試作したモデルを実用的なサイズに拡大して、材質（試作品は Al 製）の軽量化を図れば、弱風下の環境でも必要なエネルギーを取り出すことができることが分かった<sup>10,11)</sup>。

#### 4. 微生物発電への取り組み

地球上のあらゆるところに存在する微生物は有機物を分解して生存している。本技術の微生物発電装置（微生物燃料電池 MFC とも称する）とは、微生物の電極呼吸を利用して、有機物の持つ化学エネルギーを電気エネルギーに変換する装置である。微生物の代謝と電気との関係は 100 年も前から知られていたが、電力は化石燃料中心に供給されてきたので一般の関心は薄く、技術的な発展はなかった。それが、20 世紀の終わりに体外に電子を放出しマイナス極に伝達する能力のある微生物、例えば「シユワネラ菌」が発見され、21 世紀の初めに微生物燃料電池の構造が確立された。おりしも、エネルギー・環境問題が拡大し、それとともにこのエネルギー源に大きな関心が集まりだして現在に至っている。この 20 年の間に世界各地の大学研究者を中心に微生物発電の研究が行われるようになっ

た。

微生物発電装置は、アノードとカソードとからなる 1 対の電極間に微生物と有機物を存在させた構造をしている。

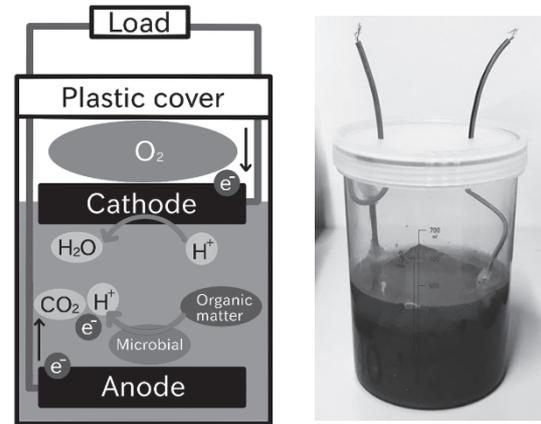


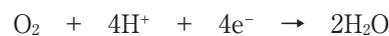
Fig.5 土壌型微生物燃料電池

次に示す関係のように、微生物が有機物を分解した際に電子、水素イオン、二酸化炭素が発生するが、アノードにて電子を回収し、カソードにて回収した電子とプロトン ( $H^+$ ) と酸素が反応し、水が生成される。アノードの有機物酸化反応（約  $-0.3V$ ）とカソードの酸素還元反応（約  $+0.8V$ ）に電位差があるため、アノードからカソードへと電子が流れ、エネルギーが得られる。

アノード：



カソード：



筆者らは 2016 年から本格的に微生物発電の研究を開始し、山口県各地で採取した土壌のいずれにおいても発電可能であることを確認した<sup>12)</sup> が、発電電力量が不十分なこと ① と、長期間の発電継続性が不明の点 ② から実用化には課題のあることを認識した。その後の微生物燃料電池の構成要素の改良により発電量や発電時間は、ある程度の改善はみられた<sup>13-15)</sup> が、抜本対策には至らなかった。やがて、様々な実験から、大幅な改善には、①に対しては、微生物の集積度を上げることにより発電電力が改善されることが分かり、②の発電維持のためには、微生物の活動継続に有機物の補給が重要であることが分かった。

実は、当研究室では 10 年前、“廃棄ガラスの再利用

研究”を行っていた<sup>16)</sup>。液晶ディスプレイの工程で出る破砕ガラスを再加工した発泡ガラスに可視光光触媒粉を修飾して、細孔に吸着した汚染物質を分解して吸着能を格段に向上させた研究である。今回、この研究経験が上記問題の解決に役立った。ガラス瓶、液晶ディスプレイや太陽電池パネルの廃棄ガラスの再処理として、粉碎したガラスと炭酸カルシウム（貝殻等）を混ぜて、空气中 1000℃の高温で焼成すると発泡し、軽石状の多孔質体ができることが知られており、(株)鳥取再資源化研究所と鳥取大学の共同研究で環境に無害なものが商品化されている。この発泡多孔質体（商品名：ポーラスα<sup>®</sup>）の細孔部に有機物質や微生物が取り込まれ、工場排水や農業排水、池の汚染物質除去、水の浄化に役立っている。10年前の研究では、これに可視光光触媒として扱える WO<sub>3</sub> 粉をスラリー状にして塗布したところ汚染物質が除去され効果が高まることを発見した。今回は、その事実から発想し、本研究の発電量増大に寄与する微生物、発電の持続に寄与する有機物を多孔質体に取り込み、集められることに行きついた<sup>17)</sup>。

この多孔質体を本研究の微生物担持層として微生物燃料電池の電極近傍に配置すると、そこに微生物と有機物が集積され、恰も“巣窟”のようになるため、①の課題に対して従来の 10 倍の発電量を得ることができるようになった。その構造と評価結果を Fig.6 と Fig.7 に示す。

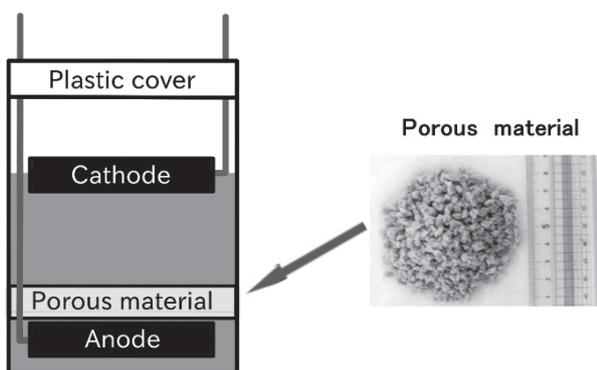


Fig.6 多孔質体を挿入した微生物電池

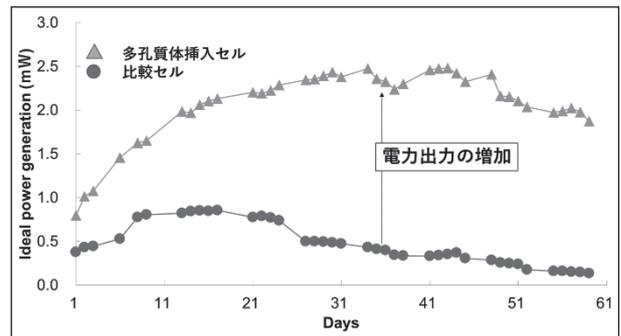


Fig.7 多孔質体挿入による発電電力増大定

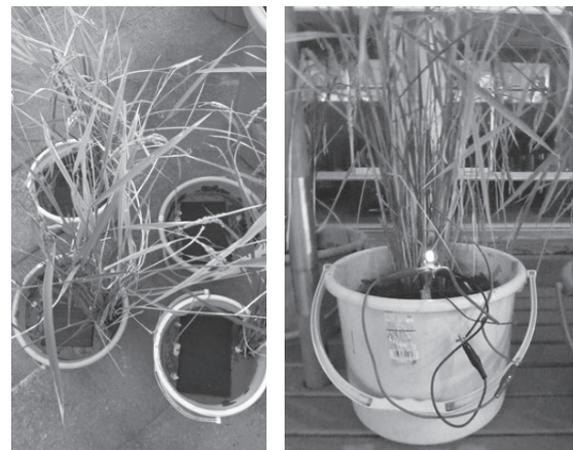


Fig.8 屋外での実証試験

また、②については、多孔質体を土中に埋設しておくことにより、細孔への微生物と有機物の集積があらかじめ実現され、電池化直後から発電が可能となる<sup>18)</sup>。屋外の実証実験（Fig.8 参照）によれば自然環境からの有機物の供給（植物の光合成による有機物生成、田・池・用水等からの有機物流入）がなされ、発電の継続性が保持されることが分かった。

微生物発電の発電量は電極の面積に比例する。現状の技術を用いた試算では、1m<sup>2</sup> あたりの理想値で 700mW、現実には諸損失を加味して 560mW 程度の出力が可能となる。例えば一つの電池あたり 0.9V、620mA の出力となり、これを直列、並列に接続する

ことにより利用が可能であり、さらに昇圧回路や蓄電池を用いることにより様々な用途への対応が可能となる。例えば街路灯や庭園灯として 28 個の超高輝度 LED (1500 ルーメン、10W) の点灯には現状、夜間のみ常時点灯使用 (12 時間) として、蓄電池を用いることにより上記の 9 個の電池 (9m<sup>2</sup>) が必要となる。現在、電池構造や多孔質材料の改善により数倍の出力増加の可能性を得ており、近いうちに電池 1 個までの低減が可能とみている。即ち、1m<sup>2</sup> の植栽地や池、用水があれば 10W の LED 街路灯を点灯できることになる<sup>19)</sup> (Fig.9)。

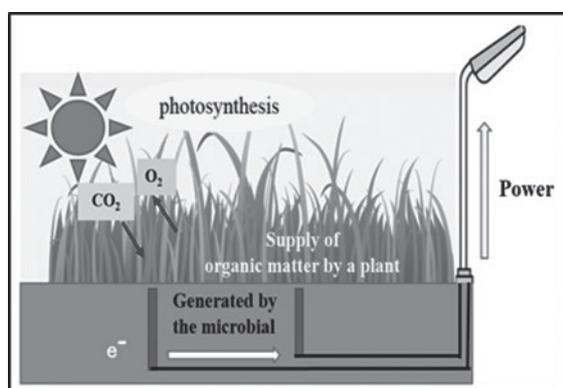


Fig.9 街路灯への適用例

さらに、「発電」としての要求が高まれば、大規模な発電所や送変電設備不要の、現状の商用電源にかわる安価な電力供給がオンサイトで可能となる。また、災害時や僻地での電力供給にも即座に対応可能である。付随する効果として、ここに用いる多孔質体が本質的に有する汚染物質除去効果により環境浄化や水質改善の作用も期待できるので代替エネルギーとしての期待以上の環境効果、経済効果も望める。

## 5. 本学におけるその他のエネルギー創生への取り組み

筆者の研究室では、上述した以外に太陽光発電の一環として、カラーフリー、曲面对応可能なスプレー法による太陽電池の研究<sup>20)</sup>、量子ドットによる太陽電池の作製研究、そして現行の結晶シリコンや薄膜太陽電池の屋外設置モジュール効率を如何に研究室レベルでの高い変換効率に近づけるかの研究<sup>21,22)</sup>などのエネルギー創出に関わる研究を行ってきた。また、学内においては、阿武宏明教授のグループの熱電発電の研究、

星肇教授のグループの色素増感太陽電池やペロブスカイト型太陽電池の研究等が精力的に行われている。さらに、将来のエネルギー源として間違いなくその時代が来るといわれる水素エネルギーについても山口県や山陽小野田市は高い意識を持っており、本学でも将来のグランドデザインの中で明確に位置付け、地元の企業の協力も得て、複数の教員が各々関連研究を始めている。今後の研究の発展に大いに期待するものである。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、本学森田研究室に所属し、共に夢を追いかけてくれた学生の皆様と長年にわたり研究のご支援を頂いた多くの皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 最新太陽光発電技術：森田廣（共著）、楨書店、1984年7月
- 2) 薄膜作成における真空技術：森田廣、真空産業展開催記念セミナー（期待される真空技術）予稿（1989.9.13日本真空工業会）
- 3) Super Smart Window --Its Energy Design and Some Early Research：Hiroshi Morita, Hiroyuki Yoshida, Proceedings of Internal Display Workshop 2014, Niigata, The Society for Information Display, MEET4-4（2014.12.4）
- 4) 透明太陽電池用 p 型酸化ニッケル膜作製とその物性：加藤三四郎、吉永諭、前田匠、吉田博行、森田廣、第 64 回電気・情報関連学会中国支部連合大会、岡山大学、3-11（2013.10.19）
- 5) NLO 膜を用いた透明太陽電池の開発と機能性窓への応用：森田廣、市岡大志、第 63 回春季応用物理学会学術講演会予稿集、東京工業大学、22a-P1-3（2016.3.22）
- 6) 二元同時電子ビーム蒸着法により形成した透明太陽電池用半導体薄膜：平野雅也、合田和矢、森田廣、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集、名古屋国際会議場、19p-PB1-1（2018.9.19）
- 7) Cu 添加量による NCO 薄膜の物性変化：平野雅也、石丸大智、伊藤賢哉、森田廣、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 11a-W641-1（2019.3.11）
- 8) 垂直軸風車製作ガイドブック：松本文雄、牛山泉、西沢良史、パワー社、2011年2月
- 9) Optimum aerodynamic design for wind-lens turbine：Nobuhito Oka, Masato Furukawa,

- Kenta Kawamitsu and Kazutoyo Yamada, *Journal of Fluid Science and Technology*, vol.11, No.2, p.1 (2016)
- 10) 山陽小野田市の弱風でも必要電力を得るための、風レンズ効果を用いたハイブリッド風力発電における風車形状の改良研究：2019 年度分地域に関わる教育・研究成果の展示：佐竹透、森田 廣、(大学ホームページで公開, 2020)
  - 11) 風レンズ効果を用いた複合垂直風車風力発電の研究：山下亜未都、佐竹透、森田 廣、第 71 回電気・情報関連中国支部連合講演会 (オンライン)、r 20-7-2-2 (2020. 10. 16)
  - 12) 土壌微生物による微生物燃料電池の基礎研究：古屋直史、山内健太郎、合田和矢、森田廣、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集、名古屋国際会議場、20a-PB1-6 (2018. 9. 20)
  - 13) 有機物添加による微生物燃料電池の効率向上：古屋直史、長嶋哲也、松尾匠剛、森田廣、第 66 回応用物理学会春季学術講演会予稿集、東京工業大学、9a-W371-2 (2019. 3. 9)
  - 14) アノード電極の改良による微生物燃料電池の発電量向上：八塚淳弘、古屋直史、久保航一、森田廣、第 70 回電気・情報関連学会中国支部連合大会、R19-07-02-02、鳥取大学 (2019. 10. 26)
  - 15) 微生物燃料電池に利用可能な原水に関する調査：古屋直史、久保航一、八塚淳弘、森田廣、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、19a-E303-6、北海道大学 (2019)
  - 16) 液晶ディスプレイ廃ガラスの再活用高機能化：森田廣、吉田博行、第 59 回応用物理学会関係連合講演会予稿集 8a-GP3-2 早稲田大学 (2012. 3. 18)
  - 17) ポーラス  $\alpha$ ®による土壌微生物燃料電池の出力向上：古屋直史、久保航一、八塚淳弘、森田廣、第 67 回応用物理学会春季学術講演会予稿集 12a-PB5-4 上智大学 (開催中止・予稿集刊行) (2020. 3. 12)
  - 18) 土壌微生物蓄積による微生物燃料電池の出力特性改善：古屋直史、久保航一、八塚淳弘、森田廣、第 81 回応用物理学会秋季学術講演会、8a-Z26-2 (オンライン開催、2020. 9. 8)
  - 19) 微生物電池、発電能力 10 倍に：日本経済新聞電子版 (2020 年 10 月 29 日付全国版) 及び日本経済新聞朝刊 (2020 年 10 月 30 日付中国地方版)
  - 20) High Performance DSC Fabricated by Spraying Method：Hiroyuki Yoshida and Hiroshi Morita, *Proceedings of Hybrid and Organic Photovoltaics 2014*, Lausanne, Switzerland, No.285, p.280 (2014. 5. 11)
  - 21) 民生用太陽光パネルの実用効率低下原因に関する研究：元田駿、新谷友浩、吉村康一郎、吉田博行、森田廣、第 64 回電気・情報関連学会中国支部連合大会講演会予稿集、岡山大学、8-6 (2013. 10. 19)
  - 22) 民生用太陽光パネルにおける入射光量改善による効率向上：日野翔、新谷友浩、吉田博行、森田廣、2014 年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会講演予稿集、島根大学、Fa-9 (2014. 7. 26)