

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656574

研究課題名(和文)水レンズによる太陽光の集熱型熱電変換

研究課題名(英文)Thermoelectric generation by solar light concentration using water lens

研究代表者

鈴木 亮輔 (Suzuki, Ryosuke)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80179275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：透明シートに水を溜めただけで作成できる水レンズを太陽光の集光集熱に用いる新しい提案を行った。半円筒形のレンズについて計算と実験で集光を確認した。理論的に水レンズの形状を計算する方程式を提示し、これを解いてレンズ形状を示した後、垂直入射光と斜め入射光についてその屈折を正確にトレースする数値解を示した。シートに入れた水量に応じて最適な張力が存在し、そのときに集光が最大なることを予言した。たとえば水面幅を1mと固定したときに得られる最大集光率は75を越す。斜め入射光に対する集光が効果的になる条件を計算で示した。これらにより太陽光の日周運動に対応する可変レンズの動作条件の設定が可能となった。

研究成果の概要(英文)：This work proposes that water lens consists of only a transparent sheet and water, and that it concentrates the solar light and heat. Both calculation and experiments confirmed that a half-cylindrical lens could accumulate the light. Analytical equation describing the lens shape was given and solved numerically. The refraction and ray tracing were evaluated for the perpendicular and slant irradiations. It is predicted that there exists the optimal tension for an amount of filled water in the sheet, and that the maximum concentration ratio exceeds, for example, 75 if the width of sheet is fixed at 1m. The concentration effects for the slant ray were also estimated to simulate the sunrise and sunset. These results contribute to the system design of flexible lens corresponding to the solar dairy movement.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：エネルギー学

キーワード：熱電変換 水レンズ エネルギー変換 屈折 集光 計算機実験 微分方程式 光学

1. 研究開始当初の背景

世界中どこでも簡便に建設できる水レンズを用いて太陽光を集熱し、太陽光の赤外線成分を用いて太陽熱発電を行うため熱電変換素子を利用して発電する場合に、水レンズが具備すべき要件を計算と実験の両面から明示する。少なくとも 50 倍に集光する条件探索を目標とし、一点もしくは直線焦点上に集光する条件、水レンズに対して斜めに入射する光を集光する条件、焦点距離を可変とし異なる太陽位置に適合する対応策、焦点に置く受熱板と熱電変換素子の最適条件、を設計し実証する。

太陽熱の積極的な利用には集光が必須である。レンズもしくは反射板による集光は太陽追尾装置が必要で、太陽光利用は高価である。たるませた透明シートに水をためて水レンズとし、集光による高熱を焼却や調理に用いる試みがある。安価で原理が単純なため、水レンズは多くの人々に受け入れられる。太陽光のエネルギー密度が低いため、大口径の水レンズで集光が必要である。水レンズによる集光を工学的、科学的に解析し、レンズ形状を最適に制御する方策は未知であった。水レンズによる高効率の集光で電気を創る試みもなかった。

2. 研究の目的

太陽高度に対応して水レンズの水深と張力を制御し、レンズの形状を最適な形に保って、常に線状パイプの表面上に焦点を結ぶための方策を、(A) 数学的な方程式の形および数値解で明示する。(B) その解を参照し実験を行う。透明シートの張力ベクトルを変化させてレンズの曲率を制御し、集光度を確認する。(C) 斜め入射に対しての焦点ズレを計算し、レンズ口径に対する適切な集熱パイプの直径等の関係を定める。(D) 集熱板の形状と最適な熱電素子材料の配置、寸法を定める。

水レンズのは半面が平面である凸レンズとして屈折の法則で説明できるが、レンズに対して単に平行光線が入射するのではなく、斜め入射となるので、最適なレンズ形状は透明ビニールシートが作る放物線ではなく、ひずんだ凸レンズとなる。この形状を保ちつつ、水深とビニールシートにかかる張力ベクトルを制御して線状焦点に太陽光線を集める方策を理論的に導く。例示の線状集光の熱電発電では従来にない高効率定置式発電が期待できる他、集光し加熱した高熱流体は融雪、暖房やタービン応用が期待できる。

本研究では、水深とレンズの曲率を、水量と透明シートにかかる引張強度により調整する。ビニール製透明シートは水量によって

簡単に自重で変形し、焦点距離が可変となる。水量とシートへの張力と方向でレンズの曲率が制御でき、その結果、焦点距離と焦点形状を変化させる。レンズと集光パイプの位置関係が固定されているとき、焦点距離可変のレンズは朝昼晩や春夏秋冬の太陽の高度変化に対応し集光、集熱でき優れている。

また、太陽光のように水平面に対して斜めに入射する場合、焦点はぼけるが、シートを左右非対称に歪ませた場合、斜めに入射する場合でも一点に集光させることができる。このように非球面レンズを実現する。

水と透明シートが安価な素材であるから、多数のレンズを設置して太陽光を集熱する。例えば、半円筒状のシートを用いて焦点上のパイプ上に集光させる。円形でなく長方形の形状の水レンズは、隙間なく平面を埋め尽くすことが可能で、均等に集熱パイプを暖める。特に朝晩や春夏秋冬のように太陽高度が変化する場合、線状焦点と、焦点距離の可変性を用いると、集熱パイプは水レンズの下方の水平面内の平行移動に抑えることが可能である。この太陽追尾は機械的移動が容易であるから、可変焦点非球面レンズにより集熱配管システムが可能になる。

レンズ形状に関する微分方程式を数値解として解き、光路を計算して集光位置を定める。一方で XYZ 方向にそれぞれ数十 cm 可変な受光台を開発して集光位置の空間分布を実験により検証する。このような不均一なエネルギー分布下での熱電変換の最適化例は報告例がないので、光の強度に対応した最適化設計を行う。一点集光形と線状集光形につき、それぞれ斜め入射に対応した実験を行う。

非球面レンズの焦点距離を水量と張力の制御によって可変とすると、熱電変換による温度差発電装置を太陽光に追尾させるシステムが非常に簡便になって、発電システム全体の設置経費、運営経費を大幅に削減できる。廃熱は寒冷地では温水による融雪や暖房用途に提供できる。電力の一部を用いて安定した強制送風冷却により安定発電出力が想定できる。太陽熱と太陽光の発電セルのひとつの起電力は数 V と小さく、通例は直列接続、AC 変換、電圧制御で市販電力に変換する。

3. 研究の方法

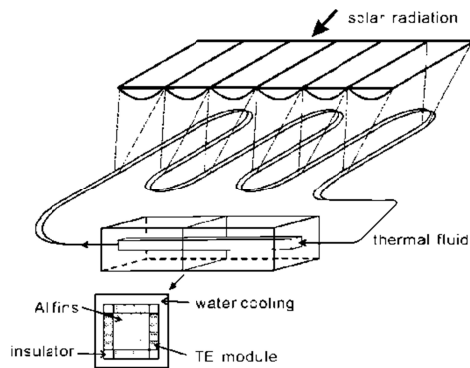
(1) 実験装置設計: 初年度

垂直入射、左右対称の水レンズの基礎設計を微分方程式の数値解で示す。

斜め入射光に対応する非球面レンズの光路について数値解を求める。

一点集光形は 3 次元の数値解となる。

計算機実験で定めた諸元を参考に可搬式架台を自作する。透明塩化ビニールシートを張った図示の小型水レンズを製作する。



垂直入射時の光路を想定しレーザー光を用いて計算の正当性を調べる。熱電モジュール寸法の最適化計算を行って、ふさわしい熱電素子寸法を得る。野外での太陽熱発電実証試験を、札幌市、いわき市、赤道に近いタイ国で実施する。

(2)平成 24 年度の計画: 計算機を援用した水レンズの基礎設計と実験装置試作を行う。

数学的モデルにより数値解を得る。透明シートは張力ベクトルと水の自重の釣り合いから保持される。水溜りの口径と水深の関数として焦点距離を数値解で示す。

数学計算ソフト Mathematica を用いて、数値微分する。水レンズの利用者が使いやすいように、焦点距離を、透明シートの大きさと引っ張り角度、水量の関数で示す。

斜め入射光のモデルでは、透明シートの厚さや温度による水の局所的な屈折率変化も考慮し、異なる方向を向く張力を与えたときの光路を調べる。ANSYS 社のソフトウェアを使用する。本研究目的達成のために新しいソースコードを付け加える。この改良ソフトの動作を確認した後、相当の精度で繰返演算を行う。

(3) 平成 25 年度の計画

数値計算を用いて水レンズの光路の諸特性を把握し基礎設計を完成させる。

透明シートと太陽を用いた小型集光実験を行い、設計の妥当性を確認する。福島高専では水レンズを支持する架台を作成し、必要な張力を任意の方向から透明シートにかける。歪と引っ張り応力の関係は既設の引張試験機で調査し、歪量を張力に瞬時に換算する。

レーザー光を用いて垂直入射時、斜め入射時の光路を濁水と煙で調査する。光路を解析し計算結果と比較する。

太陽光への応用は、北大と福島高専でまず行った後、タイ国 Mahasarakham 大学の Lertsatitthanakorn 教授が赤道直下での太陽熱発電試験を行う。Mahasarakham 大学には自前の熱電発電モジュールが準備されており、送風送水施設も整っている。

4. 研究成果

(1)水レンズの試作と特性評価

製作した水レンズ装置を図 1 に示す。両端をアクリル板と接着したビニールシートを使用し、レンズとした。焦点と光の照度についてフォトダイオードで電流に換算して照度を測定した。可動測定ステージで最大出力点を探した。照度比として集光を評価した。

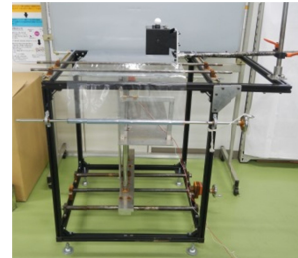


図 1 制作した水レンズと特性実験装置

集光された光は、光の幅が減少するとともに照度が高く、焦点を過ぎたあとは光の幅がほぼ一定で、分光が現れる。集光比は計算では 100 であったが、実際の測定では、9.6 から 13.9 であった。水の表面による光の反射、ビニールシートのたるみなどの原因による焦点のぼけ、光の透過度の影響であった。

(2)太陽熱発電の適用のための水レンズ

水レンズはビニールシートのように透明な膜の上に水を注ぐことで作成し、水の量と膜の両端に加える張力を調整することで自由に变形できる。太陽光の入射角度の変化に応じて、水レンズを变形させ、光路を調整することで固定した集光板上へ常に太陽光を集光させた。集光板の位置次第では、レンズ形状の最適化を行っても全く集光されない。そのため集光板と水面の距離が重要となる。水面への入射強度を基準として集光板上での集光率を計算し、太陽高度の高低に関わらず、常に集光が行える集光板の設置位置を設計した。図 2 に示すように、水面の面積を $0.1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ に設定し、張力を加える方向を β としたさいのレンズ形状を水レンズの外形を数値解を解くことで求めた。さらにレンズの長手方向と平行に、水面へ角度 α で入射した光の進路と透過エネルギーを計算することで、水面から距離 $d = 0.10 \sim 0.18 \text{ m}$ に水面と平行に設置した幅 1 mm の集光板上での集光率を算出した。加えて、張力方向 β を変化させ、レンズ形状を最適化した。

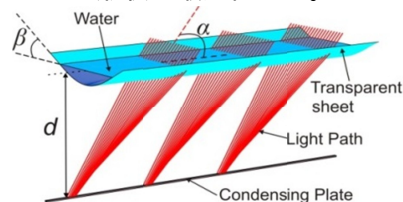


図 2 水レンズの集光モデル

最適化した場合に、入射角度と集光率の関係を調べた。水面と集光板の距離が離れるほど、垂直入射に近い角度での集光率が增大し、最大 82 倍の集光率を得た。また、全ての入射角度に対して、集光率を均一に保つことは困難だったものの、 $d = 0.12 \text{ m}$ においては本研究における入射条件 $10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ の範囲内で集光率を常に 17 倍以上に保つ事ができた。

(3) 水レンズを用いる熱電発電設計

光路の計算を行ったところ、屈折された光は必ずしも一点に集中するのではなく、分散した。集光板を設置する位置と集光板の大きさが問題となる。水の質量、張力と集光板の位置の最適な組み合わせを厳密に計算した。

水面が長方形で奥行きが 1m の半円筒水レンズを想定し、水面に垂直入射した光が屈折してレンズ下方に集光する場合を計算した。5.0kg の水をビニールの中に注入した例を計算した。集光板を水面下方 0.15m に設置して水面と垂直な光を入射させた時、ある水平力の時に集光率が最大となった。水面から 0.30m の位置に集光板を設置し、水平力を 32.5N/m とすると、最大集光率 25.6 を得た。この位置に幅 7.15mm × 長さ 1m の熱電モジュールを置くと大きな熱起電力が得られる。斜めの入射光を利用して光路を計算した。例えば、2.0kg の水に 30° で入射する光は 2.0N/m の水平力で、最もよく一点に集光した。このように、水レンズは斜めの入射光も集光できるので、太陽光の集光に利用できる。

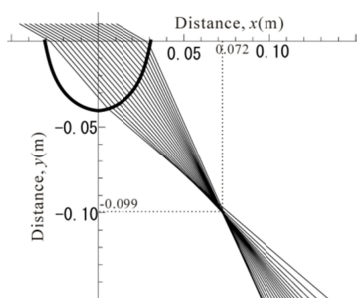


図3 斜め入射光の集光結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Keita O. Ito, Hongtao Sui, Hidetoshi Hakozaki, Hiroshi Kinoshita, Ryosuke O. Suzuki, "Using a Water Lens for Light Concentration in Thermoelectric Generation", *Journal of Electronic Materials*, 43, (2014) 2086-2093, 査読有 <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-013-2965-5>

Keita O. Ito, Hongtao Sui, Hidetoshi Hakozaki, Hiroshi Kinoshita, R. O. Suzuki, "Light-Concentration Characteristic of Water Lens and its Application to Thermoelectric Generation", *Key Eng. Mater.*, 617, (2014)247-250., 査読有

Xiangning Meng, Takeyuki Fujisaka, Keita O. Ito, Ryosuke O. Suzuki, "Simulation of a thermoelectric module having parallelogram elements", *Materials Transaction*, (2014) 印刷前公開中, 査読有, dx.doi.org/10.2320/matertrans.E-M2014822

Xiangning Meng, Takeyuki Fujisaka, Keita O. Ito, R. O. Suzuki, "Thermoelectric Analysis for Pai-type Thermoelectric Module with Tilted Elements", *Materials Research Innovations*, 18 Suppl, 4, (2014) in press., 査読無

Xiangning Meng, Takeyuki Fujisaka, R. O. Suzuki, "Thermoelectric Analysis for Helical Power Generation Systems", *J. Electron. Mater.*, 43, (2014)1509-1520., 査読有 <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-013-2768-8>

R. O. Suzuki, Atsushi Nakagawa, Hongtao Sui, Takeyuki Fujisaka, "Thermoelectric Generation Using Water Lenses", *J. Electron. Mater.*, 42 (7), (2013) 1960-1965., 査読有 <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-013-2483-5>

Takeyuki Fujisaka, Hongtao Sui, R. O. Suzuki, "Design and Numerical Evaluation of Cascade-Type Thermoelectric Modules", *J. Electron. Mater.*, 42 (7), (2013) 1688-1696., 査読有 <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2400-3>

R. Funahashi, Y. Matsumura, H. Tanaka, T. Takeuchi, W. Norimatsu, E. Combe, R. O. Suzuki, Y. Wang, C. Wan, S. Katsuyama, M. Kusunoki, K. Koumoto, "Thermoelectric properties of n-type $\text{Mn}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Si}_4\text{Al}_2$ in air", *J. of Applied Physics*, 112, (2013) 073713., 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4755793>

Takeyuki Fujisaka, R. O. Suzuki, "Dimensional Optimization of Thermoelectric Modules for Solar Power Generation", *IECON 2012 - 38th Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society*. 25-28 Oct., 2012, Ecole de Technologie Superieure de Montreal, Universite du Quebec, Canada, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ 08854 USA, (2012) 5868-72., 査読有, <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2012.6389>

〔学会発表〕(計 14 件)

2nd International Symposium on Inorganic and Environmental Materials, 27-31 October 2013, Universite de Rennes 1, Rennes, France, “A light-concentration characteristic of the water lens and its application to the thermoelectric generation”, Keita Ito, Hongtao Sui, Xiangning Meng, Ryosuke O. Suzuki

第十回日本熱電学会学術講演会, 2013年9月8-9日, 名古屋大学, “太陽熱電発電への適用に向けた水レンズの検討”, 伊藤 圭太, 箱崎 英俊, 木下 博嗣, 鈴木 亮輔

平成 25 年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション, 2013年7月26日, 室蘭工業大学, “水レンズの集光を利用した熱電発電”, 伊藤 圭太, 箱崎 英俊, 木下 博嗣, 鈴木亮輔

JST-EPSRC&CREST 4th Int. Workshop on Thermoelectrics, 4-6 July 2013, The Westin Resort & Conf. Center Awaji Island, “Design of TE Generation under a Constant Heat Flux”, Ryosuke O. Suzuki, Hong Tao Sui, Takeyuki Fujisaka, Keita O. Ito, Xiangning Meng

JST-EPSRC&CREST 4th Int. Workshop on Thermoelectrics, 4-6 July 2013, The Westin Resort & Conf. Center Awaji Island, “Simulation of Water Lens to Use for Thermoelectric Generation”, Keita O. Ito, Hidetoshi Hakozaki, Hiroshi Kinoshita, Ryosuke O. Suzuki

The 32nd Int. Conf. on Thermoelectrics, 30 June – 4 July 2013, Kobe Int. Conf. Center, Kobe Japan, “Optimal Design of Thermoelectric Modules under Solar Radiation”, Ryosuke O. Suzuki, Takeyuki Fujisaka, Keita O. Ito, Xiangning Meng, Hongtao Sui

The 32nd Int. Conf. on Thermoelectrics, 30 June – 4 July 2013, Kobe Int. Conf. Center, Kobe Japan, “Light Concentration by Water Lens for Thermoelectric Generation”, Keita O. Ito, Hongtao Sui, Ryosuke O. Suzuki

機械学会東北支部学生会、一関高専、平成 25 年 3 月 11 日, “太陽熱利用熱電発電用水レンズの試作と特性評価”, 箱崎 英俊, 木下博嗣, 鈴木 亮輔

日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同冬季講演大会, 2013年1月24-25日, 室蘭工業大学, “太陽熱利用型熱電発電の特性評価”, 伊藤 圭太, 藤坂 岳之, 鈴木 亮輔

The 38th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Soc., IEEE-IECON2012, 25-28 October 2012, ÉTS, Montréal, Canada. “Dimensional Optimization of Thermoelectric Modules for Solar Power Generation”, Takeyuki Fujisaka, Ryosuke O. Suzuki

JST-EPSRC, JST-MOST & CREST Joint Workshop on Thermoelectrics, 2-3 October, 2012, Nagoya Univ., “Thermoelectric Generation Using Water Lens Concentrating Solar Heat”, R. O. Suzuki,

第九回日本熱電学会学術講演会, 平成 24 年 8 月 27-28 日 東京工業大学, “水レンズを用いる熱電発電シミュレーション”, 隋 洪涛, 藤坂 岳之, 鈴木 亮輔

Int. Conf. on Thermoelectrics, 9-12 July 2012, Aalborg Denmark, “Thermoelectric Generation Using Water Lens”, Ryosuke O. Suzuki, Atsushi Nakagawa, Hongtao Sui, Takeyuki Fujisaka

Int. Conf. on Thermoelectrics, 9-12 July 2012, Aalborg Denmark, “Using water lens for thermoelectric generation”, Hongtao Sui, Takeyuki Fujisaka, Ryosuke O. Suzuki

6 . 研究組織

(1)研究代表者 鈴木 亮輔

(SUZUKI, Ryosuke)

(北海道大学・工学研究院材料科学部門・教授)

研究者番号 : 80179275

(2)研究分担者 木下 博嗣

(KINOSHITA, Hiroshi)

(福島工業高等専門学校・機械工学科・教授)

研究者番号 : 40177895

(3)連携研究者

夏井 俊悟先生(NATSUI, Shungo)

(北海道大学・工学研究院材料科学部門・助教)

研究者番号 : 70706879

河本 邦仁先生(KOUMOTO, Kunihito)

(名古屋大学・工学部応用化学科・教授)

研究者番号 : 30133094

舟橋 良次博士(FUNAHASHI, Ryoji)

(独立行政法人産業総合研究所関西センター・主任研究員)

研究者番号 : 60344107

阿武 宏明先生(ANNO, Hiroaki)

(山口東京理科大学・工学部電気工学科・教授)

研究者番号 : 60279106

(4)研究協力者

藤坂 岳之氏(FUJISAKA, Takeyuki)

(北大・工学院・大学院生、
現在 新日鐵住金、千葉県在住)

Sui Hongtao 氏(SUI,Hongtao)

(北大・工学院・大学院生、
現在 中国上海市在住)

中川 淳史氏(NAKAGAWA,Atsushi)

(北大・工学部・学生、
現在卒業して札幌市在住)

伊藤 圭太氏(ITO,Keita)

(北大・工学部・学生、
現在 北大・工学院・大学院在学中)

箱崎 英俊氏(HAKOZAKI,Hidetoshi)

(福島高専・専修科・学生、
現在 福島県南相馬郡在住)

石井 俊夫先生(ISHI,Toshio)

(北大・工学研究院材料科学部門・
客員教授および JFE スチール株式会社ス
チール研究所)

Meng Xiangning 先生(MENG,Xiangning)

(北大・工学研究院材料科学部門・JSPS
外国人特別研究員)

Lertsatitthanakorn Charanporan 先生

(LERTSATITTHANAKORN,
Charanporan)

(タイ国 King Mongkut University of
Technology ・教授)