編込み金属線による熱電変換パネルの発電特性

正員 山本直克 (通信総合研究所)

非会員 高井裕司 (東京電機大学)

Electrical power generation from a knitted wire panel using a thermoelectric effect

Naokatsu Yamamoto (Communications Research Laboratory)

Hiroshi Takai (Tokyo Denki University)

Thermoelectric devices have been investigated widely in order to transform a low temperature heat source to the electrical power. In this report, we proposed a knitted wire panel as a thermoelectric power generator. A thermocouple on the knitted wire panel was formed by knitting an alumel wire and a chromel wire ($\phi 0.3\text{mm}$). The knitted wire panel was set at a measurement system using a peltier cooling device, and electrical characteristics were measured. Additionally, we discuss here the characteristics of electrical power generation from the panel using a equivalent circuit model. As a result, electrical power from the panel increases linearly with increasing a number of thermocouple formed by wire knitting process on the panel. It is considered that thermocouples can be formed easily by wires knitting process.

KEYWORD: 環境低負荷、熱電変換、ゼーベック効果、熱電対、編込み

1. はじめに

近年、地球環境の保全を念頭に置いた産業・工業開発が積極的に行われており、電力エネルギー分野も例外ではなく“地球環境にやさしい”を接頭語として研究がなされている。環境低負荷型の電力エネルギー源としては太陽光発電、風力発電や潮力発電などがあり、現在、実用化の段階でさらなる研究開発がなされている。特に太陽光発電では、半導体産業の発展にともない太陽電池の発電効率は上昇しており、また、 β 鉄シリサイドなどのより高効率な太陽電池用材料の研究が盛んに行われている^(1,2)。

エネルギー形態として、光、電気、高温、極低温または高運動エネルギーは低エントロピーな状態として考えることができる。つまり発電は、低エントロピーなエネルギーである光や高温などから、利用度の高い電気エネルギーへの変換として解釈でき、電気エネルギーを取り出す方法としての太陽光発電や風力発電または現在の多くの発電設備などが重要であることを示している。一方、地球上における数十度程度のわずかな温度差は高エントロピー状態として考えられ、その温度差を直接的にエネルギー源として利用することは

困難であると考えられる。しかし、数十度程度のわずかな温度差はエネルギー資源として地球上に豊富に存在していると思われる。将来、このような高エントロピーでかつ低エネルギーな状態をかき集めて、利用度の高い電気エネルギーを作り出す技術は地球上でのエネルギー資源の有効利用のみでなく、宇宙開発でも重要となると考えられる。

低温度差での発電としてはゼーベック効果を利用した熱電発電などが提案されている。ゼーベック係数の高い材料対の研究開発⁽³⁻⁵⁾や、広い面積に効率良く熱電対群を作成する方法などが広く研究されている。熱電変換素子は支持基板上に変換効率の高い半導体結晶などで作られた熱電対を集積化して配置し金属線で接続することで作成される^(6,7)。しかし半導体素子による発電パネル開発には大面積化に伴う技術的・コスト的な課題がある。一方で金属材料による熱電変換素子を用いる方法として、鋼板を湾曲させることにより大面積な発電パネルを作成する方法なども報告⁽⁸⁾されている。熱電変換素子による大規模な発電を実現するためには、①熱電対の変換効率を高めること、②広い面積に大量の熱電対群を簡便に作成することが重要な課題と考えられる。本論文では先に述べた課題の内後者に重点を置いた基礎研究とし

て、熱電対群を線材の編み込みにより簡便に作成する方法を新たに提案する。

本実験では2種類の線材を編み込むことで熱電変換素子を面状に作成した編み込み型熱電変換パネルを試作し、その発電特性と電気特性について検討した。

2. 実験方法

2-1. 編み込み型熱電変換パネルの試作

図1に試作した編み込み型熱電変換パネルの表面と断面構造の模式図を示す。本研究での金属線は熱電対作成用として一般的な0.3mmのアルメル線(Alumel wire)とクロメル線(Chromel wire)を使用した。ただし、本論文で提案する線材の編み込み方法は金属線のみに限った方法ではないと考えられる。ガラスエポキシ材(厚さ1.2mm)に2.5mm間隔に直径1mmの孔が正方格子状に空いた基板を断熱用かつ金属線支持用として使用した。アルメル線とクロメル線を、布を編む様に、上下左右交互にガラスエポキシ基板に縫い込み、結果としてアルメル線とクロメル線のクロスした箇所が結び目として接触しアルメル-クロメル熱電対として動作する。長い金属線を編み込むことでアルメル-クロメル熱電対は基板上面と基板下面に一対づつ構成され、本研究では基板をはさんだ熱電対ペアを熱電対セルと呼ぶこととする。例えば、図中でガラスエポキシ上部と下部に温度差を形成することにより熱電対セルでは高温の接合点と低温の接合点で熱起電力が発生する。金属線の編み込みにより図1中でLineと記してある黒塗りの帯として熱電対セルを縦に列を成して作ることができる。測定のためにLineの端点に電極を取り付け、その番号を $A_n(n=0, 1, 2, \dots)$ とする。ある A_m と A_{m-1} の間で

は1つの熱電対セルが並列に並んでいることが分かる。Lineを多数並べることで熱電対セルを直列的に作成することができる。このような熱電対セルの並列、直列的な配列は編み込みとしての単純な繰り返し作業で形成できる。本研究で試作した編み込み型熱電変換パネルでは8個×8Lineの熱電対セルにより、その発電特性と電気特性を測定した。

2-2. 特性測定方法

図2に本実験で用いた測定装置の概要を示す。編み込み型熱電変換パネルを中央に配置し、パネル上部と下部に温度差を

図1 編み込み型熱電変換パネル
(Fig.1 Knitted wire panel.)

図2 編み込み型熱電変換パネルの特性試験
(Fig.2 Measurement system for Knitted wire panel.)

形成するためにヒートポンプとしてペルチェ素子を用いた。下部のペルチェ素子とパネルの接触面は高温に、また上部ペルチェ素子との接触面は低温に保った。ペルチェ素子や放熱板は銅板に接触させることで、熱流は下部のペルチェ素子から発生し上部のペルチェ素子を通り、放熱板により放出される構造となる。パネル上部と下部の温度差を一定にするためにアルメルクロメル熱電対を直列に配線した温度差計を設置した。編込み型熱電変換パネルは、その発電特性を評価するために可変負荷抵抗器に取り付けられ、抵抗両端間の電圧をデジタルボルトメータにより測定した。ただし、可変抵抗の大きさに比較してデジタルボルトメータの内部抵抗は無視できるほど十分に大きい。電圧値測定後、パネルと抵抗間にあるスイッチを切ることによって可変負荷抵抗器の抵抗値を測定した。本研究では可変負荷抵抗の両端の電圧を出力電圧とし、また出力電圧値を負荷抵抗値で除算した値を出力電流と定義する。さらに、出力電圧と出力電流の積を本実験の編込み型熱電変換パネルの出力電力と換算する。温度差センサによる指示値はパネル上部と下部の温度差に対応したアルメルクロメル熱電対による電圧値として出力され、実験では指示電圧値と温度換算値（実験結果では dT と表記）を併用する。

3. 実験結果および考察

3-1. 開放端における基礎特性評価

図2の実験装置で負荷抵抗を切り離し、開放状態での出力電圧を測定し図3に示す。横軸は図1と同様の各 Line 番号であり、縦軸は A_0 を基準とした各 Line 端での電位である。Line 番号の増加にともない、Line 端での電位は直線的に増加することが分かる。また、温度差 dT の増加にともない直線の傾きが増加することが分かる。この結果は、各 Line での熱起電力が直線的に積算されたことを意味しており、任意の電圧値を Line 数の増加により達成できることを示唆している。図3の各温度差 dT での直線の傾きは平均的な 1Line 当たりの電位差、つまりパネル中の熱電対セル一個の起電力として見る事が出来る。図4に温度差測定用の熱電対センサ出力電圧に対する図3の直線の傾きを示す。また図4中では一個の熱電対セルを用いた編込み型熱電変換パネルの出力電圧も合わせて示す。編込み型熱電変換パネル内のセル数によらず温度差センサの出力電圧に対して Line 当たりの出力値は直線的に増加することが分かる。理想的には図4の一点破線で示した直線のように、温度差センサ出力電圧と編込み型熱電変換パネルの 1 熱電対セル当たりの出力電圧は一致すると考えられる。しかし、本実験の結果では温度差センサ出力電圧の約 77% の値が編込み型熱電変換パネルの 1 熱電対セルの出力として観測された。この結果は熱電対セルに使用した金属線を通しての熱流による各熱電対間の温度差の減少によると考えられる。

図3 温度差変化に対する各 Line での出力電圧
(Fig.3 Output voltage on a Line at various temperature.)

図4 温度差センサ電圧に対する Line 当たりの出力電圧
(Fig.4 Dependence of output voltage per 1Line with voltage from thermocouple sensor.)

3-2. 実負荷による発電特性評価

本実験では 8 個 $\times$ 8 Line の編込み型熱電変換パネルによる出力電圧として A_0 と A_8 間の電圧を出力電圧としている。図5に出力電圧に対する出力電流値を編込み型熱電変換パネルの温度差をパラメータとして示す。温度差によらず電圧に対して電流は直線的に減少すること、また、その傾きは温度差にほとんど依存しないことが明らかとなった。出力電流が 0mA のときは 3-1 節で述べた開放状態での編込み型熱電変換パネル端子間の電圧である。一方、実験的には測定することは困難であるが、理想状態の短絡電流値をグラフから読むことができ、例えば発電パネル間の温度差 $dT=26.3K$ での短絡電流は約 7.65mA と予測される。開放端電圧は先の 3

ー1節で示したように温度差 dT の増加にともない増加するが、一方で短絡電流も同様に編込み型熱電変換パネル間の温度差の増加に対して増加することがわかる。出力電圧と出力電流の積を本実験の編込み型熱電変換パネルの出力電力として、出力電圧に対する依存性を図6に示す。電圧の増加にともない編込み型熱電変換パネルの出力電圧は上に凸の放物曲線状に増加することがわかり、最大電力点が存在することが明らかとなった。電圧に対する出力電力の上に凸の特性曲線は編込み型熱電変換パネル間の温度差によらず観測されることが本実験よりわかる。最大電力点を観測できる出力電圧は開放電圧の半分であることをわかり、温度差には依存しないことが明らかとなった。例えば編込み型熱電変換パネル間の温度差 $dT=26.3\text{K}$ の時、開放電圧は 6.5mV 程度であるが最大電力 $11.2\mu\text{W}$ の得られる端子間電圧は 3.1mV 程度であることが実験的に観測できる。この結果は、編込み型熱電変換パネルを用いて、最も効率良く熱エネルギーから電力を回収する方法として端子間の電圧を開放電圧値の半分に調整するような最大電力点追従が有効であることを示している。

編込み型熱電変換パネルの最大出力電力と最大出力電力点での出力電圧の温度依存性を図7に示す。横軸の温度差は熱電対温度差センサにより測定した結果である。温度差の増加にともない最大出力電力点を示す出力電圧は直線的に増加することが明らかとなった。一方、最大出力電力は温度差の増加にともない緩やかに放物曲線状に増加することがわかる。これらの実験結果については後に、編込み型熱電変換パネルの等価回路モデルを用いて考察する。

表1に 8×8 編込み型熱電変換パネルと 1×1 編込み型熱電変換パネルの最大出力電力と開放端電圧の特性比較を示す。ただし、パネルの温度差 dT は 26K とした。開放端電圧は 1×1 パネルに対して 8×8 パネルは 7.6 倍の比として出力されることがわかる。この結果は、図3で示した様に1Line ごとの出力電圧の総和が、最終 Line の出力電圧として観測される結果と一致する。よって、本実験で作成した編込み型熱電変換パネルの出力電圧は Line 数に対して比例的に増加すると考えられる。一方、最大出力電力は 1×1 パネルに対して 8×8 パネルは 67 倍の比として出力されることがわかる。本実験の 8×8 パネルは 64 個の熱電対セルを有している。故に、出力電力は面内に配置された熱電対セルの数に比例すると考えられる。編込み型熱電変換パネルは線材を編込めば編込むほどその出力電力が増加することがわかり、この結果は熱電変換に対して面積を有効に利用できることを示唆している。一方で、編込み型熱電変換パネルの線材の編込む方向によって出力電圧の増減が制御できることが明らかとなった。

3-3. 編込み型熱電変換パネルの等価回路モデル

本実験で試作した編込み型熱電変換パネルの電気特性、発電特性について図8に示す等価回路モデルを用いて考察す

図5 温度差変化に対する出力電圧—電流特性
(Fig.5 Output voltage-current characteristic at various temperature.)

図6 温度差変化に対する出力電力—電圧特性
(Fig.6 Output power-voltage characteristic at various temperature.)

図7 最大出力電力と電圧値の温度依存性
(Fig.7 Temperature difference dependence of maximum output power and voltage.)

る。等価回路モデルは一般的な電源の等価回路モデルと同一である。開放端電圧を E_0 、内部抵抗を r として理想的な短絡電流 I_0 は E_0/r として考えられる。等価回路の出力端に負荷抵抗を接続したときの、負荷抵抗の端子間電圧を e とし、また負荷抵抗に流れる電流を i 、負荷での消費電力を w とする。端子間電圧に対する電流、電力量は以下の式となる。

$$i = \frac{E_0 - e}{r} = I_0 - \frac{e}{r}, \quad w = \frac{e \cdot (E_0 - e)}{r} \quad \dots(1)$$

式1より出力電流は出力電圧に対して直線的に減少し、 $e=0$ で $i=I_0$ かつ $e=E_0$ で $i=0$ となる。また、式1に示した出力電力の出力電圧依存性は、上に凸の放物曲線として計算される。実際、 $e=0$, E_0 でそれぞれ $w=0$ であること、さらに出力電圧が開放端電圧の半分 $e=E_0/2$ であるとき出力電力量は最大となることが式1よりわかる。

等価回路モデルからの計算結果として得られた出力電圧に対する出力電流の線形性と、出力電力の放物曲線特性はそれぞれ図5および図6に示した実験結果を考察するために有効である。式1を図5に適用すると本実験の範囲でパラメータとした温度差によらず、内部抵抗値は $r=0.85[\Omega]$ と算出することができる。式1より計算される内部抵抗 r は熱電変換パネルの金属線の抵抗値より遙かに大きいため金属線間の接触抵抗を示していると考えられる。また、図6に示した最大出力電力点が開放端電圧の約半分の出力電圧で得られるとする実験結果も、式1により理論的に考察できる。

表1 編込み型熱電変換パネル内のセル数に対する発電特性
(Table 1 Dependence of output power characteristics with the number of cells.)

	8x8 Knitted wire panel (8lines, 64 cells)	1x1 Knitted wire panel (1line, 1cell)
Voltage for open circuit	6.52mV	0.856mV
Voltage at maximum electrical power	3.11mV	0.408mV
Output maximum electrical power	11.22 μ W	0.166 μ W

$dT=26K$

図8 編込み型熱電変換パネルの等価回路モデル
(Fig.8 Equivalent circuit model for the Knitted wire panel.)

温度差に対してもっとも影響を受けるパラメータは熱電対の起電力であるが、編込み型熱電変換パネルの開放端電圧は温度差の増加に対して直線的に増加することが図4と図7よりわかる。また、図7の最大出力電力の温度差依存性は放物曲線状に増加することが実験的に明らかとなっている。この実験事実、等価回路モデルでの開放端電圧 E_0 が温度差に比例することを基として、式1の最大出力電力が温度差の2乗に比例する計算結果により説明できる。

等価回路モデルとしては非常に単純であるが、本実験で作成した編込み型熱電変換パネルの電気特性、発電特性を定量的に考察するためのモデルとしては十分に有効であると考えられる。

4. まとめ

本論文では金属線を編込むことで熱電対セルを効率よく面内に作成できることを示した。編込み型熱電変換パネルの電気特性や発電特性について実験的に検証した。編込み型熱電変換パネルの出力電圧に対する出力電力は上に凸の放物曲線状の特性として観測され、最大電力点が存在することを確認した。また、最大電力を得られる出力電圧値は、編込み型熱電変換パネルの開放端電圧の半分であることが実験的かつ等価回路により明らかとなった。さらに、編込み型熱電変換パネルの最大電力はパネル両面の温度差の2乗に比例して増加すること、またパネル内の熱電対セルの数に比例して増加することが明らかとなった。

編込み型熱電変換パネルは線材の編込み動作のみで作成でき、非常に簡便に面内へ熱電対を配置できることが特徴としてあげられる。線材を編込む動作は単純な繰り返し動作であるため、編込み型熱電変換パネルの面積化は比較的容易と考えられる。一方、本実験は編込み型熱電変換パネルの基礎特性について議論したが、将来的にさらに実用的な発電パネルを開発する為には、線材の編込みにより作成した熱電対群の面密度を高める必要がある。また、本実験では一般的なアルメル線とクロメル線の金属線を線材として使用したが、さらに高い熱電変換効率を有する金属もしくは半導体材料によるワイヤーの開発が重要であると考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり (有)光栄電設 様にご協力いただきましたことを感謝いたします。

(平成12年7月11日受付、平成13年2月9日再受付)

参考文献

- (1) 社団法人レーザー学会：レーザー研究，“光技術と環境半導体解説小特集号”，Vol.28, 2000, pp.76-111
- (2) H. Kakemoto, H. Katsumata, T. Takada, Y. Tsai, M. Hasegawa, S. Sakuragi, N. Kobayashi, Y. Makita, T. Tsukamoto, S. Uekusa: “Formation of polycrystalline β -FeSi₂ layers by ion implantation and their optical

properties", Materials Science & Engineering, A253, 2000, pp.284-291

(3) T. Caillat, M. Carle, P. Pierrat, H. Scherrer and S. Scherrer : "Thermoelectric properties of $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_{1-y}\text{Te}_3$ single crystal solid solutions grown by the T.H.M. method", J. Phys. Chem., Vol.53, 1992, pp.1121-1129

(4) I. Terasaki, Y. Sasago and K. Uchinokura : "Large thermoelectric power in NaCo_2O_4 single crystals", Phys. Rev. B Condensed Matter, Vol.54, 1997, pp.685-687

(5) 小野勝敏、鈴木亮輔、中橋良一、正田雅裕 : "低温用鉄系熱電変換素子", 鉄と鋼, Vol.83, 1997, pp.73-77

(6) 堀 康彦、伊藤哲夫、山本 淳、太田敏隆 : "200℃級熱電発電システムのエネルギー収支の検討", 電気学会研究会資料, 新エネルギー・環境研究会, FTE-99-2, 1999, pp.5-12

(7) 柴田 格、生駒圭子、古谷健司、小林正和、篠原和彦 : "熱電変換モジュールの自動車への適用", 電気学会研究会資料, 新エネルギー・環境研究会, FTE-99-3, 1999, pp.13-17

著者紹介

山本 直克 (正会員) 1973年3月6日生まれ。2000年3月

東京電機大学大学院博士課程修了。同年4月東京電機大学工学部電気工学科嘱託助手。2001年4月独立行政法人通信総合研究所基礎先端部門専攻研究員。現在に至る。半導体材料の光・電子物性の研究に従事。応用物理学会、レーザー学会、電気学会、電子情報通信学会会員。工学博士。

高井 裕司 (非会員) 1955年1月24日生まれ。1977年3

月早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。84年同大学大学院博士課程修了。同年1月IBM T.J.Watson Research Center Visiting Scientist。85年4月東京電機大学工学部電気工学科助手、96年10月同教授。現在に至る。電気電子材料および薄膜半導体材料の研究に従事。工学博士。