

熱電変換デバイスの剪断強度試験方法の提案

山本佳嗣*

Proposal of Testing Method for Shear Strength of Thermoelectric Devices

Yoshitsugu YAMAMOTO

An experimentally testing method for mechanical strength of thermoelectric devices against shear stress was proposed. In the test, devices were sheared in the plane parallel to heating/cooling surface, in the direction of which the devices suffer shearing stress in actual use. Commercially available thermoelectric devices were tested, and deterioration of device performance (i.e., increase in ACR) could be observed commonly as a precursory phenomenon of device destruction. Nevertheless, the strength or tendency to destruction were suggested to differ greatly depending on the variety of devices. It is considered that the proposed testing method can evaluate the deterioration process of thermoelectric devices due to external load sensitively. In order to examine the correlation between the mechanical state and the deterioration process of the device precisely, the test procedure is desirable to improve. In addition, the equipment for the test is expected to be rebuilt for conditions that are closer to actual use.

Keywords: Testing Method, Thermoelectric Devices, Mechanical Strength, Shear Strength, Heat Utilization, Energy Conservation

1. はじめに

近年の世界的なエネルギー事情逼迫の観点から、省エネルギーに寄与するデバイスの開発・実用化が強く求められている。中でも、エネルギーの利用に伴い発生し、利用されことなく大量に廃棄されてしまう排熱を、うまく回収して有効利用すべき、といった社会的なニーズが増してきている。これに対する一つの解として、熱電変換技術の利用が挙げられる。熱電変換技術は、熱(温度差)を電気に変換して利用する技術であり、様々な用途展開が見込まれると同時に、排熱の有効活用にも繋がることから注目されており¹⁻³⁾、実際にこれを利用した種々の熱発電システムが提案されている⁴⁻⁷⁾。

本技術の実用化促進に向けては、デバイスおよびシステムの耐久性・信頼性の確保が重要となる。しかしながら、耐酸化性や熱的耐久性の評価⁸⁾および改善手法⁹⁾等が提案されている一方で、デバイスの機械的強度や機械的耐久性を適切に評価する手法が確立されていない。

当所ではこれまで、熱電変換デバイスの発電状態下における振動耐久性を評価する手法を提案し、デバイス劣化の有無等について評価を行ってきた¹⁰⁾。熱電変換デバイスは、熱電発電能を有するセラミックス製素子と、これを電気的に接合する接合部材、電極、リード線等、様々な異種材料を組み合わせて構築されているため、劣化や破壊が生じる起点となるのは、これら異種材料の接合部分である可能性が高いと思われる。中でも、素子と電極の接合部分は、その形状および構造上、剪断

* エネルギー技術研究課

応力に対する脆弱性を有すると予想される。そこで、本研究では、実使用環境下において熱電変換デバイスが被ると想定される、加熱冷却面に平行な方向への剪断応力をデバイスに加え、剪断に対する機械的強度を試験・評価するための手法を提案し、市販の熱電変換デバイスに対し試験を行った。その結果、デバイス破壊に至る前兆現象として、デバイス特性が緩やかに劣化していくことが観察でき、外的負荷によって生じるデバイスの劣化過程を詳細に評価できる可能性が見出されたので報告する。今後は、破壊の程度とデバイスの劣化過程との相関を調べることや、より実使用環境に近い条件で試験が可能となるよう改良を加えることも検討し、本手法の利用可能性を追求していくことが望まれる。

2. 実験方法

2.1 試験治具の設計・試作

熱電変換デバイスの剪断強度を試験・評価するにあたり、専用の治具を設計・試作した。その治具の概略を図1に示す。治具中央にある2つのL字型ブロック a, b によって対象デバイスを挟み、ばねを介し一定の圧力を加えた状態で固定したうえで、L字型ブロック a と結合した T 字型金具を鉛直下向きに押し込むことで、L字型ブロック a のツメが熱電変換デバイス的一方の基板を下方へ、L字型ブロック b のツメがもう一方の基板を上方へと押し付け、デバイスに剪断応力を加える構造となっている。熱電変換デバイスを固定する際の圧力は、治具両端を締め付けるナットのトルクを制御することで調整できる。

2.2 熱電変換デバイスの剪断強度試験

市販の Bi-Te 型熱電変換デバイス 2 種 (A 群, B 群) を試験対象とした。デバイスの特性を表 1 に示す。各デバイスを、リード線が横向きとなる

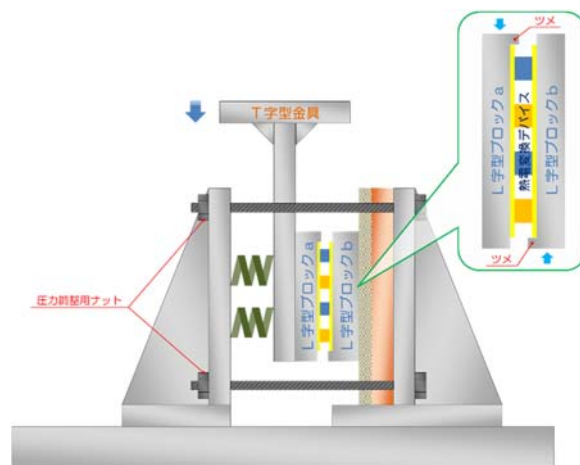


図 1 剪断強度試験治具イメージ

よう治具に固定し、固定圧力が 1 MPa となるようナットの締め付けトルクを調整した。

デバイスを固定した治具を万能試験機 (島津製作所製 AG-100kNXplus) に設置し、100 kN ロードセルを接続した圧縮試験用圧子により、対象のデバイスが破壊されるまで、0.1 mm/min の一定速度で T 字型金具を押し込んだ。同時に、交流抵抗計 (鶴賀電機製 model 3566) を用い、測定周波数を 1 kHz として、デバイスの交流抵抗値 (ACR) を 0.2 秒間隔で測定し、抵抗値の変化を捕捉した。試験数は A 群, B 群ともに N=3 とした。治具を万能試験機に設置した状態の外観を図 2 に示す。

2.3 試験後の熱電変換デバイスの内部観察

剪断強度試験終了後、破壊されたデバイスに対し、X 線 CT 装置 (島津製作所製 inspeXio SMX-225CT FPD) を用いて内部状態の観察を行い、素子の破損や剥がれ等の有無を確認した。

3. 結果と考察

図 3 に、剪断強度試験時の試験力 (負荷) と、

表 1 試験対象デバイスの特性

	A 群	B 群
外寸	39.7 mm × 39.7 mm × 厚さ 3.9 mm	40.0 mm × 40.0 mm × 厚さ 3.8 mm
チップ数	254 個 (127 対)	252 個 (126 対)
チップサイズ	1.7 mm□	1.4 mm□
初期 ACR 値	1.4 Ω (r.t., 1 kHz, リード線含む)	2.0 Ω (r.t., 1 kHz, リード線含む)
その他	防滴シールあり	防滴シールあり

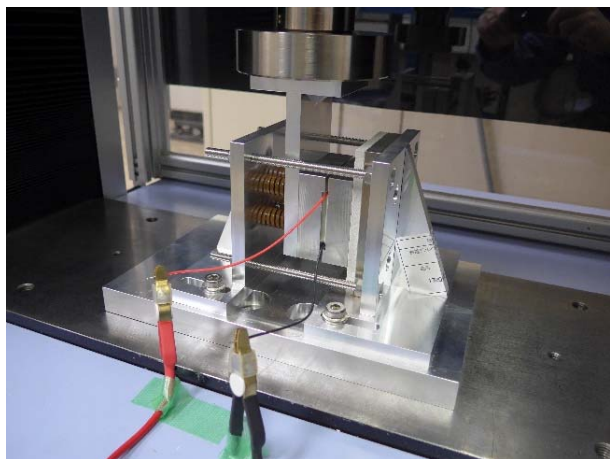


図2 治具外観（万能試験機に設置した状態）

デバイスの ACR 変化率をプロットした図を示す。なお、横軸の経過時間は、試験力と ACR の値がともに、直前の値から 20% 以上変化した時点を破壊時点と見做し、この時点を 0 時点として一致させている。デバイス A 群はいずれも、負荷が 7000 N 程度に達したところでデバイスの破壊が生じた。一方、デバイス B 群では、4000 N 程度の負荷が加わった時点でデバイスの破壊に至っており、剪断強度に大きな差異があることが確認された。これは、デバイス A 群に比べ、デバイス B 群はチップサイズ、チップ数ともに小さく、チップの総接合面積が小さい（A 群の約 67%）ことが影響していると考えられる。

また、いずれのデバイスにおいても、破壊に至る直前に ACR が徐々に上昇し始めることが観測された（図中矢印付近）。このことから、デバイス破壊に至る前兆現象として、デバイス特性の劣化が生じることが示唆された。ACR 上昇を伴うデバイスの劣化は、以前行った振動耐久性評価の際にも観察されたが、より急激な変化であり、今回のような緩やかで連続的な変化とはならなかった¹⁰⁾。このことから、今回の試験方法を用いることで、より精緻な試験が可能となり、外的負荷によって生じるデバイス劣化の過程を詳細に評価できる可能性があると考えられる。

なお、デバイス A 群では破壊のおよそ 20~30 秒前に ACR の上昇が始まっているのに対し、デバイス B 群ではおよそ 40~60 秒前と、デバイス B 群の方がより早い段階でデバイスの劣化（ACR の上昇）が始まっているといえる。一方で、ACR の

上昇率はデバイス B 群の方が緩やかであり、デバイスの種類によっても劣化過程に差異があることが分かった。

図 4 に、X 線 CT 観察により得られた、剪断破壊したデバイスの内部状態写真を示す。デバイス A 群はいずれも、内部素子チップの破損（クラック）に加え、電極からのチップ剥がれが顕著であり、大半のチップが剥がれ落ちていたことが確認された。一方、デバイス B 群ではチップの剥がれはほとんど確認されず、ACR の上昇はチップ自身の破損によるものが主要因であることが分かった（図中○印及び拡大図）。このことは、上述のデバイス劣化過程の差異に帰結するものと思われる。すなわち、デバイス A 群では、負荷が閾値（チップの接着強度）に達するまでデバイスの劣化はほとんど生じず、閾値を超えたところで複数箇所のチップが一斉に剥がれ落ち、急速にデバイスの ACR が上昇するのに対し、デバイス B 群ではより早い段階でチップそのものが少しずつ破損するも、電極との電氣的接触が一定程度保たれることで、ACR が緩やかに上昇し、やがてチップの破損が進むことで急激な ACR の上昇が生じるものと考えられる。また、いずれのデバイスにおいても、剥がれや破損を生じるチップは一部に限られることから、すべてのチップに均等に応力が加わるのではなく、より少数のチップに応力が集中し、破壊に至るものと考えられる。

いずれのデバイスにおいても、破壊の程度とデバイスの劣化過程との間には相関があると考えられ、これらをより詳細に調べるためには、破壊の直前に一旦負荷を止め、デバイスの状態観察を行うなど、試験手順を工夫する必要があると思われる。また、デバイスに温度差を加えて発電状態としながら試験を行う等、より実使用環境に近い条件での試験が望まれ、試験治具に改良を施す等して本手法の利用可能性を追求していきたい。

4. まとめ

熱電変換デバイスに面方向（加熱冷却面に平行な方向）への剪断応力を加え、機械的強度を試験するための専用試験治具を設計・試作し、市販の熱電変換デバイスに対し試験を行った。試験対象とした 2 種のデバイスにおいては、いずれもデバイス破壊に至る前兆として、デバイス性能が緩や

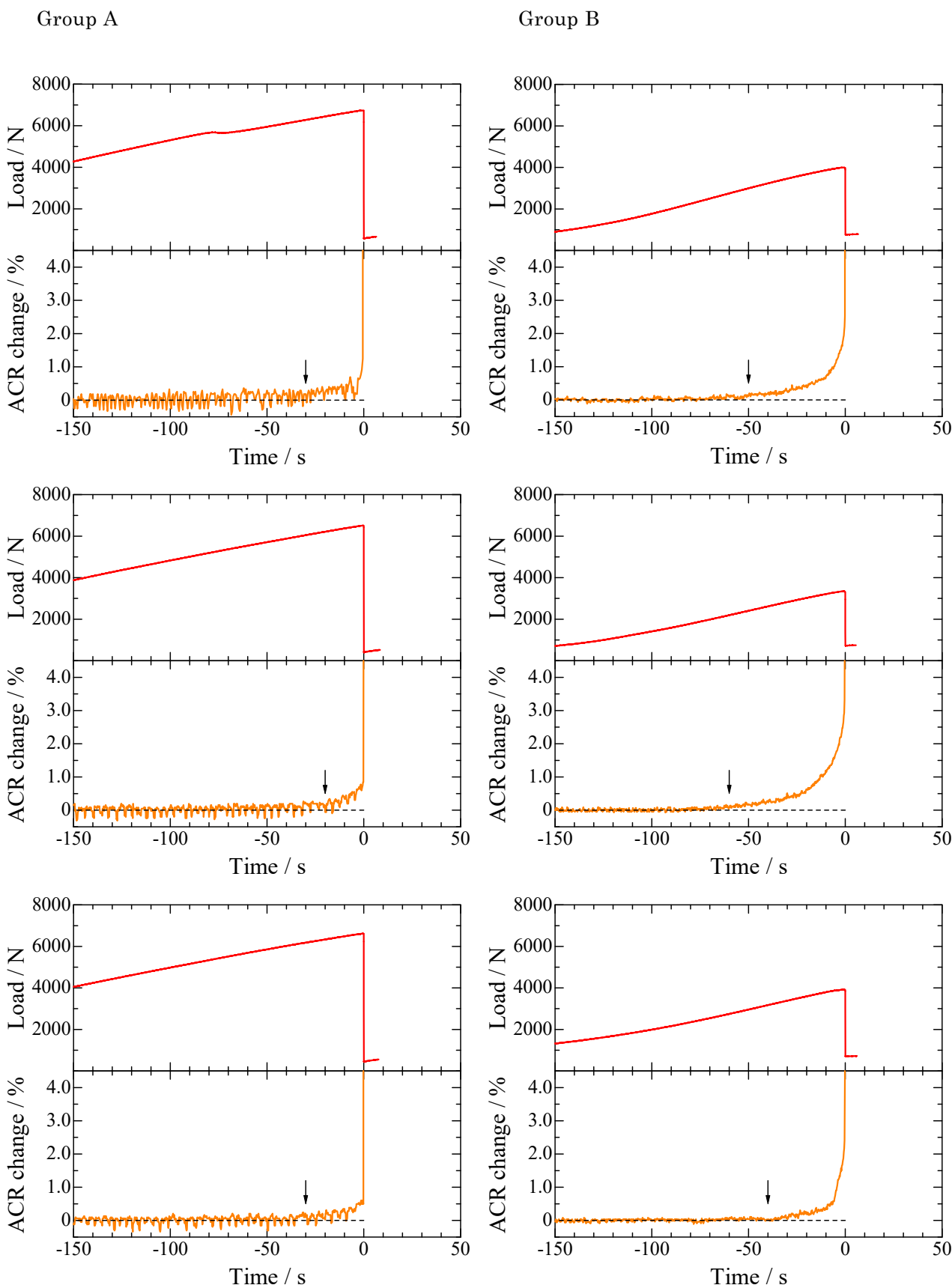
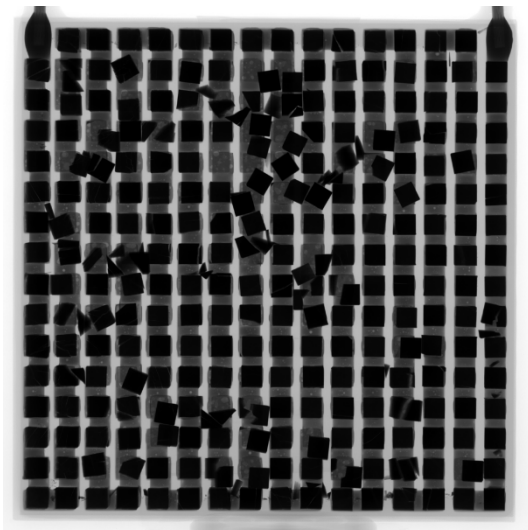
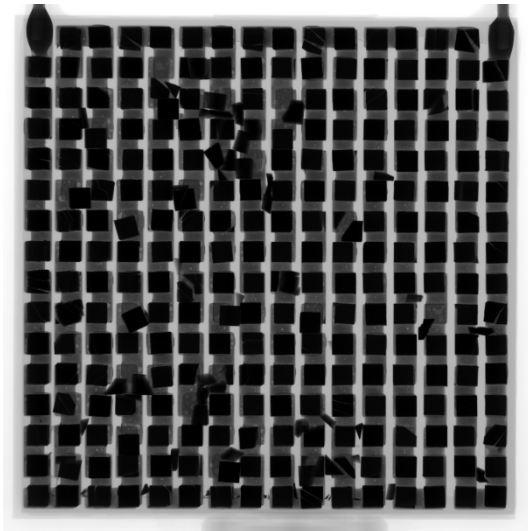
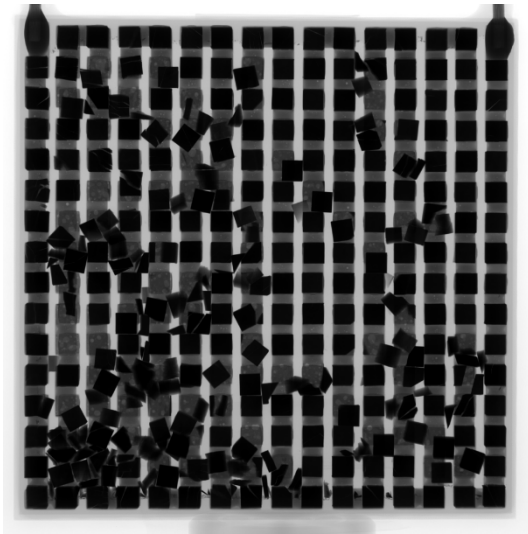


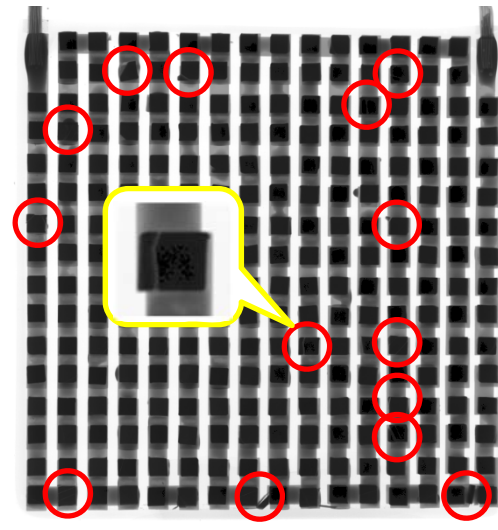
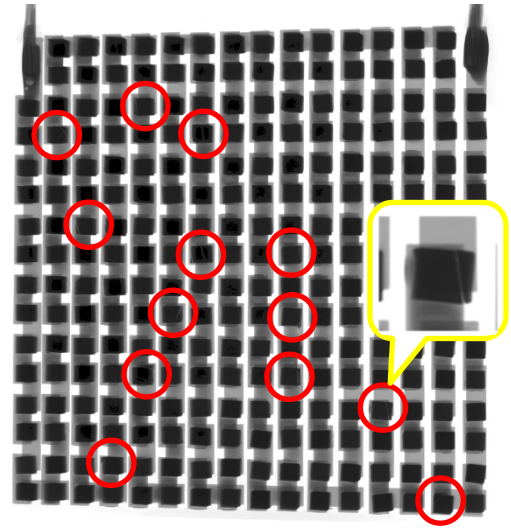
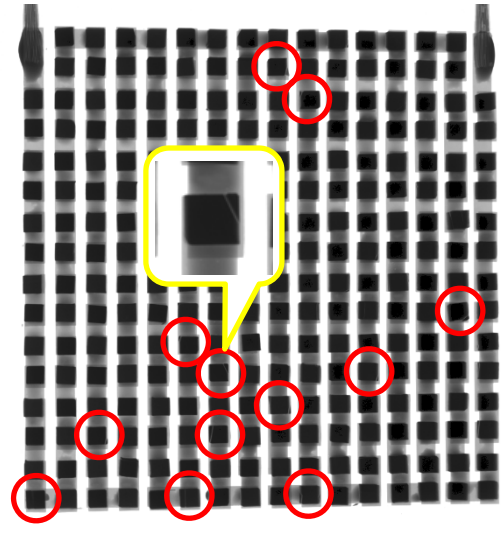
図 3 剪断強度試験時の試験力（負荷）とデバイスの ACR 変化（左列：A 群，右列：B 群）

Group A



40 mm

Group B



40 mm

図4 剪断破壊したデバイスのX線CT写真（左列：A群，右列：B群）
剪断応力は，図中の水平方向に印加．A群ではチップ剥がれが顕著であり、
B群ではチップのクラックが複数見られる（図中○印）

かに劣化することが観察できた。また、デバイスの種類によって、強度や破壊に至る過程が大きく異なることが確認できた。以上から、今回提案した試験手法を用いることで、外的負荷によって生じる熱電変換デバイスの劣化過程を詳細に評価できる可能性が見出されたといえる。

今後は、破壊の直前まで負荷を加え、デバイスの状態観察を行うことにより、破壊の程度とデバイス劣化過程との相関を調べるとともに、より実使用環境に近い条件で試験が可能となるよう、治具に改良を加えることも検討しながら、本手法の利用可能性を追求していく。

参考文献

- 1) 梶川武信ほか：熱電変換技術ハンドブック，NTS 出版 (2008)。
- 2) 河本洋：“排熱回収用高効率熱電変換材料の研究開発動向”。科技政策研・科学技術動向 No.90 (2008 年 9 月号) レポート 2
- 3) 特許庁：平成 25 年度特許出願技術動向調査報告書「熱電変換技術」，(2014 年 3 月)
- 4) 佐野精二郎ほか：“高効率熱電発電システムの開発”。コマツ技報，49(152)，p20-26 (2003)
- 5) 舟橋良次ほか：“熱電発電を利用した小型コージェネシステムの開発”。Synthesiology, 1(2), p94-100 (2008)
- 6) 飯田努：“環境低負荷型 Mg_2Si による排熱発電モジュールの開発の現状”。日本熱電学会誌, 6(2), p13-17 (2009)
- 7) 坂之上悦典ほか：“環境対応型熱電変換素子材料の廃熱利用可能性について”。京都府中小企業技術センター技報, 38, p37-41 (2010)
- 8) 舟橋良次ほか：“シリサイド熱電モジュールの耐久性向上に関する研究”。第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p09-083 (2014)
- 9) 水戸洋彦ほか：“耐久性が改善された n 型マグネシウムシリサイド熱電素子”。第 64 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p08-131 (2017)
- 10) 山本佳嗣ほか：“市販熱電変換デバイスの振動耐久性評価システムの開発”。三重県工業研究所研究報告, 41, p8-13 (2017)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源として
います.)