

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00772

研究課題名(和文)高出力化した環境低負荷型熱電池を車載化するためのブレークスルー要素技術開発

研究課題名(英文) Development of automotive thermoelectric waste heat recovery system integration using evolved environmentally benign material of magnesium silicide

研究代表者

飯田 努 (IIDA, TSUTOMU)

東京理科大学・先進工学部マテリアル創成工学科・教授

研究者番号：20297625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：発電用エンジンを搭載する電動自動車の低炭素化に向けて、中温度域(<600℃)未利用排気熱を熱電発電システムで回生電力化し燃費改善(CO<sub>2</sub>削減)につなげられる以下の要素技術について、研究開発を実施し成果を創出した。

(1)熱電変換材料による発電素子の性能を最大限に引出すために、熱伝導可変機能を有するセラミック多層基板を導入した熱発電モジュール構造の基礎開発、(2)エンジン排気系から熱発電モジュールの耐久温度を越えない調温機能を内装した熱交換・導熱機構の開発、(3)熱発電モジュールが発電した電力を余さず取り出し高変換効率で電力用途に供給できる熱電池専用DC-DC電力変換技術開発

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、熱電材料の基本的な発電特性の向上、熱伝導を可変できる基板構造、可変コンダクタンスヒートパイプ導熱、新型動作方式によるDC-DC電力変換回路開発の取り組みにより、産業化視点での社会実装に必要な基盤技術となりうる次期型高出力Mg<sub>2</sub>Siグリーン熱電池特性向上、熱発電用熱交換器構造小型高熱伝達型熱電専用熱交換機、極低損失型熱電発電モジュール特化型DC-DC電力変換器の実現に目処をつけた。

研究成果の概要(英文)：By converting unused automotive exhaust heat in the medium temperature range (<600 °C) into regenerative power using a thermoelectric power generation system, improving fuel efficiency (CO<sub>2</sub> reduction) of electric vehicles equipped with a power generation engine is effective in reducing carbon.

We conducted research and development to operate the thermoelectric (TE) power generation system effectively in automobile applications and produced results.

(1) Develop a thermoelectric power generation module structure that introduces a ceramic multilayer board with a variable heat conduction function; (2) Develop a heat exchange/heat conduction mechanism with a built-in temperature control function that does not exceed the durable temperature of the TE power generation (TEG) module from the engine exhaust system; (3) Develop circuit technology that converts the power generated by the TEG module into DC-DC power conversion (specification for TE batteries) with high conversion efficiency.

研究分野：電気電子材料、エネルギー変換材料

キーワード：熱電変換 環境低負荷半導体 排熱発電

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

エンジンを搭載する電動車(ストロング/マイルド・ハイブリッド(HEV)・プラグインハイブリッド(PHEV)・発電機搭載EV(EREV)系)において、エンジン排気系への熱発電システム導入は熱効率向上や燃費向上(CO<sub>2</sub>削減)に資する有望技術と認識されながら実用化できていない。このため、エンジン排気配管系に設置可能な排熱熱発電システム実用化を早期に実現させるための、熱発電実装用排気系熱交換器開発や、熱交換器 熱発電システム間の熱伝達制御・熱接合の高度化、さらには電力変換器を含めたシステム全体のエネルギー変換効率向上などの技術課題解決について取り組む必要がある。

## 2. 研究の目的

今後主流となるエンジンを搭載する電動車の低炭素化に向けて、EREV、PHEV での発電用エンジンからの未利用排気熱を熱発電システムで回生電力化し、需要が逼迫している車載電力システムに供給することで、燃費改善(CO<sub>2</sub>削減)に資する以下に示す要素技術をターゲットとした研究開発を実施した。

- (1) 熱電変換材料による発電素子の性能を最大限に引出すためにセラミック多層 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics)基板を導入し、熱伝導可変機能を有するユニレグ型(電気伝導型が n 型もしくは p 型のみ)の発電素子から構成される熱発電モジュールの構造熱発電モジュール構造の基礎開発
- (2) エンジン排気系の圧力損失増大によるエンジン熱効率低下を抑制し、熱発電モジュール(複数の発電素子を平面的に連結して構成される 30 × 30mm<sup>2</sup>程度の発電デバイス)への伝熱量を確保し、かつ熱発電モジュールの耐久温度を越えない調温機能を内装した熱交換機構の開発
- (3) 熱発電モジュールが発電した電力を余さず取出し高変換効率で電力用途に供給できる熱電池専用 DC-DC 電力変換技術開発

## 3. 研究の方法

- (1)熱伝導を可変できる基板構造導入による熱発電モジュール構造の基礎開発及び Mg<sub>2</sub>Si 熱電池発電能力向上  
熱発電モジュール専用セラミック多層基板 LTCC 基板開発  
中温度域(300~600 )排気系システム用熱発電モジュール用 Mg<sub>2</sub>Si の材料性能向上
- (2)排気管から導熱する機構を内蔵する熱交換器と導熱機構開発  
可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)導熱及び排気管形状に依存しない熱発電用熱交換器構造  
熱源から取り出し可能な熱量(熱賦存量)を推定するモデル・アルゴリズム構築(開始後に必要となった開発要素項目)
- (3)熱発電専用高昇圧 DC-DC コンバータ開発  
フライングキャパシタ方式低電圧入力・高昇圧 DC-DC コンバータの開発

## 4. 研究成果

- (1)熱伝導を可変できる基板構造導入による熱発電モジュール構造の基礎開発及び Mg<sub>2</sub>Si 熱電池発電能力向上  
熱発電モジュール専用セラミック多層基板 LTCC 基板開発

一般的な熱電池基板は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックス板(熱伝導率 20 W/mK)であるが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 板は熱抵抗が大きく、立ち上がりの極めて早い燃焼ガスでの温度上昇に追従できず燃焼ガスエネルギーから高応答に発電量を十分に得られない。走行時のエンジン回転変動すなわち燃焼ガス温度変動は極めて頻繁で排気ガス温度への追従性確保は最重である。LTCC 基板はセラミックス基材を用いているが熱源/冷却源と発電素子をつなぐ伝熱方向に沿ってサーマルビア(Thermal Via)と呼ばれる金属材料で充填された縦穴を配することができ熱源の熱特性や低温度域(100~300 )BiTe 系発電素子や中温度域(300~600 )Mg<sub>2</sub>Si 発電素子の特性に合わせて熱伝達を制御できる熱電モジュール設計が可能となる。

LTCC 基板については Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基本シート金属シートを積層接着して全体を 1 mm 厚とし、サーマルビア径は 0.2 及び 0.4 mm を設定し、発電素子形状(WxHxL=3 × 3 × 5 ~ 5 × 5 × 7 mm<sup>3</sup>)の伝熱特性に整合できる基本構造とした。設計した基板に発電素子を配した構造に対して、有限体積法を基礎とする流体解析ソフトであるアドバンスドナレッジ研究所製 FlowDesigner を用いた温度分布と熱流束分布解析を実施してゼーベック起電圧を算出後に、ジュール熱、ペルチェ吸発熱を含めた熱-電気連成解析を Excel 上に作製したプログラムコードにより行い、モジュール構造基礎設計を実施した。

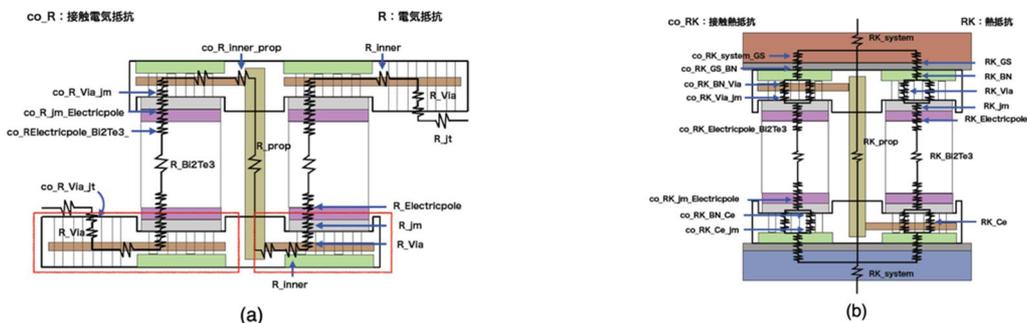


図 1: ユニレグ型 LTCC 基板設計および発電量予測計算に用いた熱抵抗等価回路要素 (a)基板全体(赤枠箇所が低温側 LTCC 基板一部分を示す)、(b)素子及びブリッジ配線部の拡大図

図1にユニレグ型LTCC基板設計および発電量予測計算に用いた熱抵抗要素の等価回路形式での表記一例を示す。本研究で実施した伝熱解析の温度収束性について、温度分布・熱流束解析に基づく熱-電気連成解析後には温度成分が変化するため、厳密には再度温度分布・熱流束解析及び熱-電気連成解析を繰り返し行い経時温度変化の収束性を十分考慮する必要があるが、現状では、プログラム規模や時間的、計算機リソースの制約から印加温度一定下における定常解析のみ実施した。製作したLTCC基板では、発電素子が熱源/冷却源と連結する部分に $Al_2O_3$ 基板より熱抵抗の低い金属系サーマルビアを配する構造とすることで図1に示されるRK\_Viaや近接の接触抵抗を低減させ、25における基板熱伝導値として $Al_2O_3$ 基板における $20\text{ W/mK}$ に比して $13.4\sim 68.7\text{ W/mK}$ の範囲で可変することが可能となった。

ユニレグ型熱発電モジュール構造では高温側と低温側をつなぐ形で配置される金属配線部が熱発電に寄与しない熱流経路となり、発電量確保の面で損失要素となるが、LTCC基板では図2(a)に示すような金属配線部の電極接続部を電気的に絶縁し、かつ熱源または冷却源と接する箇所を熱的に断熱傾向(熱抵抗を大きく設計できる)に振る機構要素を有するため、熱流経路面での損失要素を低減できる設計が可能であることが判明した。中温度域熱発電モジュール用 $Mg_2Si$ では、発電チップ( $W \times H \times L = 5 \times 5 \times 7\text{ mm}^3$ )6本のユニレグ基本構造で高温側500及び低温側100の条件下において $1.03\text{ W/cm}^2$ (従前 $Al_2O_3$ 基板使用時は $0.87\text{ W/cm}^2$ )の改善向上が見られた。図2(b)は、得られた基本条件を基にLTCC基板を用いて作製した発電素子16本を実装できる試作熱発電モジュール基本構造であり、このモジュールでは、モジュール基板内の温度、熱流を計測できるセンサを内装して基板面内の伝熱特性をより詳しく解析できる仕様として設計し、同時に作製した温度、熱流を読み取るインターフェースを実装した評価用基板とともに示した写真である。今後継続して、開発したモジュール基本構造の解析と構造最適化への改良余地を探索し性能向上に向けた取り組みを実施していく。

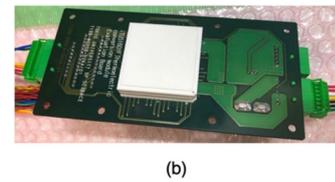
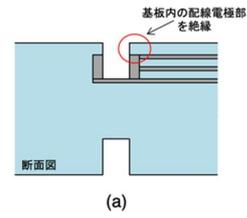


図2: ユニレグ型熱発電モジュール  
(a) ユニレグ型金属配線部損失低減処理の基板構造の一例、(b) 発電素子16本実装の評価試作機と評価用基板

中温度域(300~600)排気系システム用熱発電モジュール用 $Mg_2Si$ の材料性能向上

上記LTCC基板開発で使用した $Mg_2Si$ 発電素子は、原料の熔融合成プロセス中にSbとZnのn型不純物をそれぞれ0.5at%添加し、合成後に粉碎、焼結素子形成プロセスで作製した物を用いている。一方、社会実装上、発電素子の焼結素子形成プロセスは容易に酸化する $Mg_2Si$ の場合コスト的に大きな障害となる。本研究では、この点に注目し、熔融合成した単結晶ライクな育成インゴットから直接切り出し可能な複数の発電素子( $W \times H \times L = 3 \times 3 \times 5 \sim 5 \times 5 \times 7$ )を同時に再現性よく製作可能にするプロセス開発に取り組み、研究期間中に実現可能なプロセス条件を見出すことができた。図3は熔融合成インゴットから直接切り出した試料の熱伝導率および発電量(パワーファクター)の変化及び無次元性能指数(ZT)値をSbとZnの添加量ごとに示した結果を示している。熔融合成インゴットから直接切り出した試料では、焼結プロセス試料に比べ、熱伝導率が高い値となっていることからZT値は低く示されるが、発電量の指標であるパワーファクター値はむしろ高く得られており、発電能力自体は遜色ないことが知られた。また、SbとZnの添加量を低減させると、パワーファクター値の温度依存性が大きく低温側に移行できる特性を得ることができ、 $Mg_2Si$ の低温側での動作拡大に資する結果を得られた。最終的に、熔融合成インゴットから直接切り出した試料を用いて6本のユニレグ基本構造で高温側500/低温側100において $0.95\text{ W/cm}^2$ を得ることができ、焼結プロセス試料に比べて発電量としては低下しているものの、従前のプロセス、すなわち熔融合成した多結晶インゴットを粉碎、分級、焼結プロセスにより整形した発電素子の作製に比べ、実用上大きな製作工程数削減に資する素子作製プロセスを確立できたと考えられる。

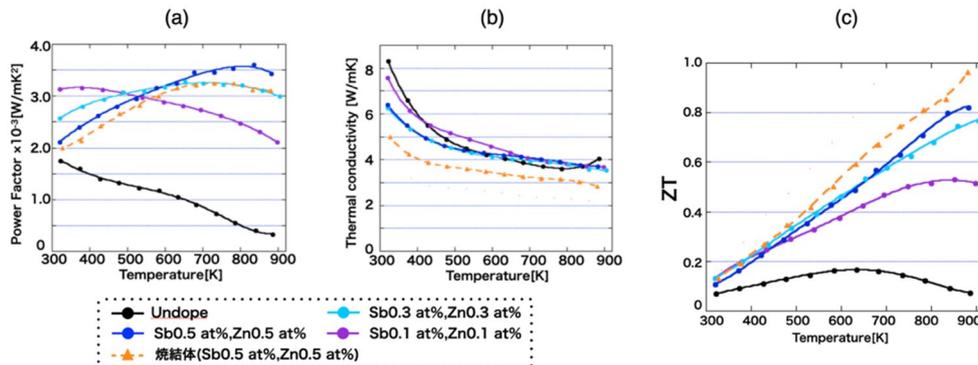


図3: 熔融合成インゴットから直接切り出した試料の熱電特性  
(a)パワーファクター、(b)熱伝導率、(c)無次元性能指数(ZT)値

## (2) 排気管から導熱する機構を内蔵する熱交換器と導熱機構開発

可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)導熱及び排気管形状に依存しない熱発電用熱交換器構造

本VCHPは密閉型金属管状容器の内部に作動流体を封入して、高温部と低温放熱部の温度差(温度勾配)で水が蒸発と凝縮を繰り返して熱輸送を行う基本構造である。エンジン排気ガス温度500の入力に対して、車載システム向けに必要な小型集積化と排気管から熱交換器への数kWクラスの熱輸送を実現するための基礎開発を実施した。事前

取り組みでは、VCHP1 本で～100W が実現できたものの、～1 kW 容量の試作機では 1,500 × 600 mm<sup>2</sup> 程度の非常に大きなものであったため、本研究では同容量の熱輸送をできる小型熱交換器 VCHP 機構の開発に取り組んだ。

VCHP 機能では作動流体に不凝縮性ガスを添加し低温放熱部での放熱量を大きく取る制限があるため、低温部に冷却用伝熱板とガスリザーバの設置が必要となるため、必要とされるシステム全体の熱計算を詳細に行い、車載還流水冷方式での境界条件となる冷却水温度 80 の場合を基にして冷却用伝熱板と不凝縮性ガスリザーバのサイズ最適化を実施した。全体として図 4 に示すような 300 × 220 mm<sup>2</sup> 程度の大きさまで小型化が可能であることがわかり、エンジン排気ガスをシミュレートする温風発生装置を用いて実証実験を実施した。(図 5)

表1に VCHP 熱交換器熱発電実装器の熱特性(1 本あたり)を示す。エンジン排気ガス温度として想定する 500 、ガス流量 10g/s の入力に対して 307 W の熱流が確保され、～1 kW 容量の VCHP 機構を導入することで熱交換器と一体構造で熱発電実装器を比較的小型に作製できる可能性を示す結果が得られたと考える。

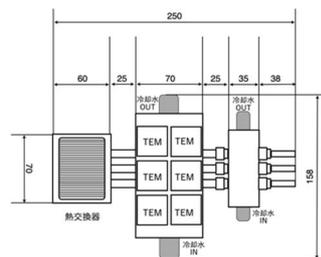


図 4: VCHP 熱交換器熱発電実装器の概形概要図



図 5: VCHP 熱交換器エンジン排気ガスをシミュレートする温風発生装置での試験の様子 (赤枠部が製作機器、左部が熱風発生機)

表 1: VCHP 熱交換器熱発電実装器の熱特性

排気入口温度 (°C)	400	500	600
熱交換器出力部	334.38	415.69	495.96
VCHP加熱入力部	291.28	350.15	415.06
VCHP加熱部	165.67	184.49	210.61
熱発電モジュール高温面	150.36	173.87	197.33
熱発電モジュール低温面	96.99	103.60	109.50
冷却水	80	80	80
温度差			
熱輸送寄与分 (K)	65.62	84.31	104.04
熱流			
熱輸送寄与分 (W)	232.73	307.47	379.43

### 熱源から取り出し可能な熱量(熱賦存量)を推定するモデル・アルゴリズム構築

(研究開始後に開発した成果機器の実装検討において追加すべきと判断された技術開発項目)

EREV、PHEV での発電用エンジンでは、熱効率が極限まで高められる開発がなされており、現状では 50% 超の仕様で市販が計画される段階に至っている。エンジンの高熱効率化においては、通常、吸気系からエンジン本体及び排気系でターボチャージャーから触媒及びマフラーまでを含めた高熱効率化設計がとなっている。本研究での排熱発電システムを排気系に導入する際の考え方として自動車メーカーとの協議の結果、高熱効率化設計済みの排気系を含めたエンジンシステム全体の特性を低減させないような範囲で、排気系に放出されている不要熱を収集し電力変換するアドオンのシステム設計方針が有効であると明らかになった。自動車排気系では、排気系から熱発電システムへ取得熱を増加させると排気系の圧損上昇により、熱発電システムでの発電量は増やせても、エンジン熱効率は低下するなどの相反要素が生じることから、対象熱源からエンジンシステム熱効率を低下させることなく、どの程度の熱を引出すことが可能か、すなわち、熱源から熱を引出す場合に、熱源が有する熱提供機能や熱環境維持機能を阻害しない範囲で不要に排出されている「取得可能熱量を把握する方法」の検討が必要となった。

こうした点に対応するため、対象とする熱源から取り出し可能な熱量、いわゆる「熱源における熱賦存量」の考え方を導入する必要があると考えるに至り、本開発要素項目を追加設定した。図 6 に示すような排気系の熱取り出し可能位置に熱交換器を設置し、熱発電システム用に熱取得を可能にする伝熱流路を導入する。ここで、設置可能な熱発電システム熱取得用熱交換器特性としては、ターボチャージャー、触媒および排気マフラーで構成される既存排気系に追加する熱交換器とで生じる総圧損値が増加することによる、エンジンシステム全体の熱効率を低減させない境界条件を満たす必要がある。当該系における熱発電システム導入設計では、エンジンシステム全体の熱効率を低減させない用に導入された熱交換器から得られる最大熱量の把握が熱発電規模設定で重要となる。本研究では、追加設定した熱交換器からの伝熱流路に「取得可能熱量計測」を行うための熱流過渡応答性を計測、分析する方法および、熱回路モデルを作製した。さらに、同計測器から得られる熱流過渡応答性を図 7 に示す伝熱解析モデルをベースとして考慮すべき熱回路解析要素を付加し発展させながら、取得可能熱量推定モデルおよび推定解析のための基礎アルゴリズム構築を得るに至った。本取得可能熱量推定モデルおよび推定解析アルゴリズムは継続して精査、開発を実施しており、現時点で比類方式技術がないため、開発成果として知財化の準備を進めている。

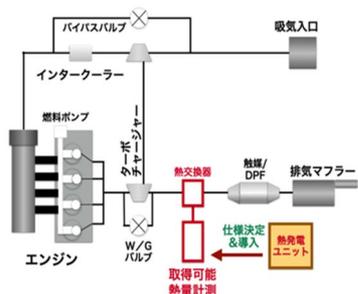
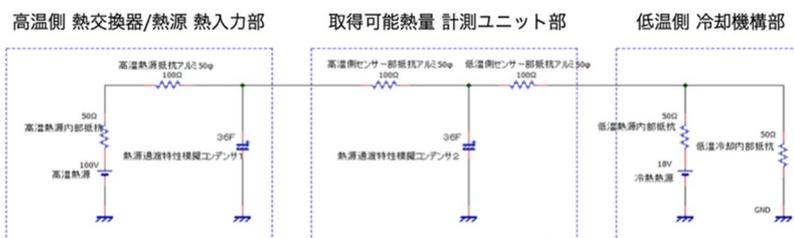


図 6: エンジン排気系に設置想定される熱発電システムの導入位置の例および取得可能熱量計測



伝熱解析: 熱回路に等価な電気回路解析モデル構築 (初期案)

モデル&解析アルゴリズム構築

図 7: 取得可能熱量を推定するための熱回路モデル初期構成検討案の例

本開発では、エンジン排気系における取得許容不要熱を対象として取得可能熱量を推定するモデルおよび推定解析のためのアルゴリズム製作を実施したが、「取得可能熱量計測」を実施して熱システムからの排気不要熱を電気エネルギーに再資源化する熱発電システムの社会実装を想定した場合に、エンジン排気系のみならず、本技術成果が応用展開可能な工業炉などの熱源についても、熱源からどれだけの熱量を取り出せるかについての「熱源における熱賦存量」の推定は排熱再資源化システム構築の観点から非常に有用であると考えられる。

本研究の成果としての取得可能熱量計測手法について、今後は工業炉系を含めた産業界における熱源での内規熱再資源化推定の基礎ツールとしての可能性の観点から、今後発展的に取り組んでいきたい。

### (3) 熱発電専用高昇圧 DC-DC コンバータ開発

フライングキャパシタ方式低電圧入力・高昇圧 DC-DC コンバータの開発

図 8 に高昇圧比 DC-DC コンバータの概念図および回路図を示す。主回路はコイル、コンデンサ、ダイオード、Si-MOSFET によって構成される。特に C3 は、フィルムコンデンサを用いており、フライングキャパシタ方式の高昇圧比 DC-DC コンバータである。スイッチが ON のとき、電源からコイルを通してグラウンドへ向かう電流経路と、コンデンサ C1 からダイオード D2、コンデンサ C3 を通ってグラウンドへ向かう電流経路がある。スイッチが OFF のとき、電源からコイルを通してコンデンサ C3、ダイオード D3、コンデンサ C2 および C1 を通ってグラウンドへ流れる電流経路と、電源からコイルを通してダイオード D1、コンデンサ C1 を通ってグラウンドへ流れる電流経路がある。

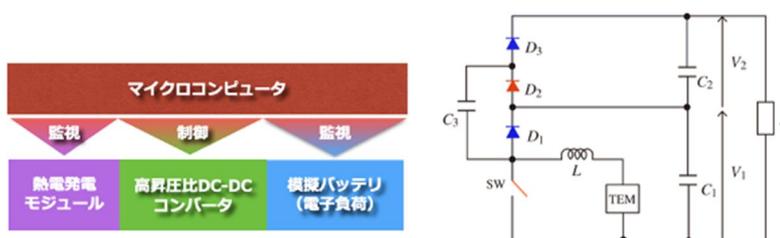


図 8: 高昇圧 DC-DC コンバータ

図 9 に実験結果を示す。横軸には熱発電モジュールの開放電圧を、縦軸には電力利用率、電力変換効率、システム変換効率をそれぞれ設定した。まず、(a) に示す実験結果について報告する。電力利用率とは、コンバータへの入力電力を模擬電源の最大電力点における電力で除したものである。例えば、開放電圧が 38V の時の最大電力点における電力は 58W 程度となる。この時、コンバータへの入力電力が 58W であれば、電力利用率が 100% となる。コンバータ回路に内蔵される電流センサとして 400mV/A の高感度デバイスを選定・設計し、電力利用率の向上を実現した。

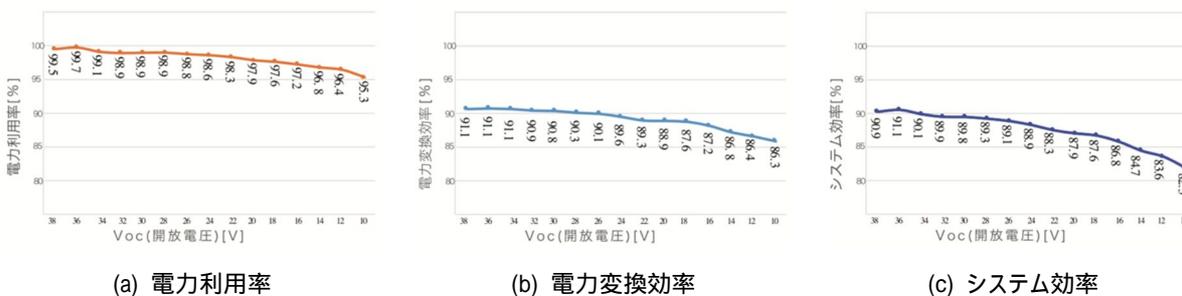


図 9: 高昇圧 DC-DC コンバータの実験結果

実験結果より、コンバータへの入力電力が 60W 程度～5W 程度の範囲において、電力利用率が 95%以上を達成していることが確認できた。次に、(b) に示す実験結果に注目し、高昇圧比 DC-DC コンバータの電力変換効率を評価する。ここで、電力変換効率とはコンバータ出力電力を入力電力で除したものである。実験結果より、入力電力の減少に伴い、電力変換効率が低下傾向にあることが確認できた。これは、ダイオード群による電圧降下の影響を受けてのものであると考えられる。最後に、(c) に示すシステム変換効率に着目する。システム変換効率とは、電力利用率と電力変換効率の積をとったものである。これまでに、電力利用率および電力変換効率の実験結果を評価したが、これらの特性が反映された結果となっていることを確認した。

なお、GaN スwitchングデバイスを用いたインターリーブ方式の DC-DC コンバータの開発も同時並行して進め、200W の入力電力帯で、電力利用率 98%以上、電力変換効率 92%以上の達成も確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, M. Yamaguchi, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 634
2. 論文標題 First-principles study of the effects of native defects on the thermoelectric properties of narrow-gap semiconducting $\delta$ -SrSi <sub>2</sub> using the hybrid functional method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 413795-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2022.413795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Yamaguchi, D. Shiojiri, T. Iida, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 61
2. 論文標題 First-principles study of the structural and thermoelectric properties of Y-doped $\delta$ -SrSi <sub>2</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 031002-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac48d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Hagiwara, M. Tato, D. Shiojiri, T. Iida, and S. Fujihara	4. 巻 905
2. 論文標題 Ni-doping effect on thermoelectric properties of c-axis-oriented CuFeO <sub>2</sub> ceramics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 164192-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2022.164192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, H. Hamba, T. Kodama, M. Yamaguchi, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 51
2. 論文標題 Enhanced Thermoelectric Performance of Vertical Bridgman Grown Mg <sub>2</sub> Si by Codoping with Sb and Zn	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1311-1321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11664-021-09404-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, M. Yamaguchi, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 30
2. 論文標題 Performance comparison of hybrid functionals for describing narrow-gap semiconductors: A study on low-temperature thermoelectric material $\alpha$ -SrSi <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 e00620-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cocom.2021.e00620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, M. Yamaguchi, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 130
2. 論文標題 Electronic structure tuning of $\alpha$ -SrSi <sub>2</sub> by isotropic strain and isoelectronic impurity incorporation: A first-principles study for enhancement of low-temperature thermoelectric performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 215103-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0063506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, H. Kakio, M. Yamaguchi, N. Hirayama, Y. Imai	4. 巻 891
2. 論文標題 Enhancement of thermoelectric performance of Mg <sub>2</sub> Si via co-doping Sb and C by simultaneous tuning of electronic and thermal transport properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 161968-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2021.161968	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Shiojiri, T. Iida, T. Kadono, M. Yamaguchi, T. Kodama, S. Yamaguchi, S. Takahashi, Y. Kayama, K. Hiratsuka, M. Imai, N. Hirayama, and Y. Imai	4. 巻 129
2. 論文標題 Re-evaluation of the electronic structure and thermoelectric properties of narrow-gap semiconducting $\alpha$ -SrSi <sub>2</sub> : A complementary experimental and first-principles hybrid-functional approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115101-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041670	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Asahara, T. Kousaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Stability analysis based on monodromy matrix for switched dynamical systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 237-256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.12.237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 麻原寛之, 内野翔太, 高坂拓司	4. 巻 65
2. 論文標題 排熱発電用電力変換回路	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 213-218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.65.6_213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Kadono, N. Hirayama, T. Nishio, S. Yamazawa, N. Oki, Y. Takahashi, N. Takikawa, A. Yasui, K. Nitta, O. Sekizawa, M. Tokumura, S. Takemoto, T. Iida, and M. Kotsugi	4. 巻 117
2. 論文標題 Investigation of local structures and electronic states of Sb-doped Mg <sub>2</sub> Si by fluorescence XAFS and HAXPES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 143901-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0018323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Uchino, H. Asahara	4. 巻 24
2. 論文標題 Analytical and experimental approaches for controlling unstable oscillation by changing switching timing in an interrupted electric circuit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 137-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.24.137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Uchino, Y. Maeda, T. Iida, H. Ohtagaki, T. Kousaka, H. Asahara	4. 巻 33
2. 論文標題 Bifurcation analysis in an interrupted dynamical system with state dependent input	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of ISCIE	6. 最初と最後の頁 24-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Uchino, Y. Maeda, T. Iida, H. Ohtagaki, T. Kousaka, H. Asahara	4. 巻 33
2. 論文標題 Bifurcation Analysis in an Interrupted Dynamical System with State Dependent Input	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of ISCIE	6. 最初と最後の頁 24-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Uchino, H. Asahara	4. 巻 24
2. 論文標題 Analytical and Experimental Approaches for Controlling Unstable Oscillation by Changing Switching Timing in an Interrupted Electric Circuit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 137-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.24.137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 S. Uchino, T. Kousaka, H. Asahara
2. 発表標題 Relationship of Bifurcation and Power Conversion Efficiency in DC-DC Converter with TEM
3. 学会等名 The 5th IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Aoki, T. Kousaka, S. Uchino, D. Hozumi, H. Asahara
2 . 発表標題 An Estimation Method for Controlling Unstable Periodic Orbit Without Using Poincare Map
3 . 学会等名 The 18th International SoC Conference (ISOCC 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Uchino, T. Kousaka, H. Asahara
2 . 発表標題 Analysis of a Simple DC-DC Converter Model with TEM
3 . 学会等名 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Aoki, S. Hanafusa, S. Uchino, H. Ohtagaki, T. Kousaka, H. Asahara
2 . 発表標題 Bifurcation Phenomena in a Simple Model of DC-DC Converter with Photovoltaic Module
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Uchino, H. Asahara
2 . 発表標題 Controlling an Unstable Periodic Waveform Using Evolution of Perturbation in Hybrid Dynamical Systems
3 . 学会等名 2020 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K.Shinohara, T.Kousaka, N.Kasa, H.Ohtagaki, H.Asahara
2 . 発表標題 Study for MPPT Algorithm with Amplitude Optimization of Periodic Border to DC-DC Converter with Photovoltaic Module
3 . 学会等名 2020 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Iida, T. Kawamura, F. Ikeda, J. Nakano, Y. Minamida, T. Kodama, K. Tani, R. Hatanaka, D. Shiojiri R. Inoue, and Y. Kogo
2 . 発表標題 Enhancing the thermoelectric characteristics of n-type Mg <sub>2</sub> Si
3 . 学会等名 European Materials Research Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Keisuke Yokota, Tsutomu Iida, Takahide Motegi, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Ryo Inoue, Yasuo Kogo, Hirofumi Tsuchida, Yasuhiko Izumi, Kei Yoshimura
2 . 発表標題 Waste Heat Recovery of Diesel Engine System using Thermoelectric Module
3 . 学会等名 SAE Thermal Management Systems Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tomoya Kawamura, Tsutomu Iida, Fuyuko Ikeda, Daishi Shiojiri
2 . 発表標題 Examination of the formation of electrodes for mid-temperature thermoelectric MnSix materials
3 . 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Iida, Koki Kaita, Hiroto Hamba, Fuyuko Ikeda, Tomoya Kawamura, Tomoyuki Kadono, Jyunki Nakano, Yuya Minamida, Takuya Kodama, Kenki Tani, Reina Hatanaka, Daishi Shiojiri, Ryo Inoue, Masato Kotsugi, and Yasuo Kogo
2. 発表標題 Improvement of both thermoelectric and mechanical properties for n-type Mg <sub>2</sub> Si applicable to practical power generation device fabrication
3. 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyuki Kadono, Tadashi Nishio, Shingo Yamazawa, Naoto Oki, Yoshinobu Takahashi, Ntsumi Takikawa, Akira Yasui, Kiyohumi Niita, Oki Sekizawa, Mako Tokumura, Shoji Takemoto, Naomi Hirayama, Tsutomu Iida, Masato Kotsugi
2. 発表標題 Analysis of the electronic states and the local structure of Mg <sub>2</sub> Si using synchrotron radiation
3. 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuntaro Shiiba, Shunsuke Kondo, Mitsunobu Nakatani, Hiroki Kakio, Daishi Shiojiri, Tsutomu Iida
2. 発表標題 Evaluating the thermoelectric performance of sintered Mg <sub>2</sub> Si co-doped with donor and isoelectric impurities
3. 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fuyuko Ikeda, Koki Kaita, Tomoya Kawamura, Daishi Shiojiri, Tsutomu Iida
2. 発表標題 Investigation of electrode-matrix interface stability for mid-temperature thermoelectric material of Mg <sub>2</sub> Si
3. 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Kawamura, Tsutomu Iida, Fuyuko Ikeda, Daishi Shiojiri
2. 発表標題 Examination of the formation of electrodes for mid-temperature thermoelectric MnSix materials
3. 学会等名 2019 International Union of Materials Research Society- International Conference in Asia (IUMRS-ICA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Seiya Yamaguchi, Takuya Kodama, Hiroto Hamba, Daishi Shiojiri, and Tsutomu Iida
2. 発表標題 Thermoelectric Performance of n-type Mg <sub>2</sub> Si Grown by the Vertical Bridgman Method
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Shiojima, Takeaki Harada, Kenki Tani, Tatsuya Yamashita, Daishi Shiojiri, and Tsutomu Iida
2. 発表標題 Refinement of the calculated power generation characteristics of a unileg-type Mg <sub>2</sub> Si thermoelectric module using thermal-electric analysis
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daishi Shiojiri, Mitsunobu Nakatani, Shuntaro Shiiba, Hiroki Kakio, and Tsutomu Iida
2. 発表標題 Thermoelectric performance of Mg <sub>2</sub> Si doped with an isoelectric impurity
3. 学会等名 Materials Challenges in Alternative and Renewable Energy 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K.Shinohara, T.Kousaka, N.Kasa, H.Ohtagaki, H.Asahara
2 . 発表標題 Study for MPPT Algorithm with Amplitude Optimization of Periodic Border to DC-DC Converter with Photovoltaic Module
3 . 学会等名 2020 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Uchino, H. Asahara
2 . 発表標題 Controlling an Unstable Periodic Waveform Using Evolution of Perturbation in Hybrid Dynamical Systems
3 . 学会等名 2020 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Uchino, T. Kousaka, H. Ohtagaki, K. Shinohara, H. Asahara
2 . 発表標題 Behavior of Current-Controlled DC-DC Converter with TEM
3 . 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Uchino, T. Yamamoto, F. Mohamad, K. Shinohara, T. Iida, T. Kousaka, H. Ohtagaki, H. Asahara
2 . 発表標題 Basic circuit design of high step-up ratio DC-DC converter
3 . 学会等名 16th International SoC Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 内野翔太, 飯田努, 高坂拓司, 太田垣博一, 麻原寛之
2. 発表標題 周期的に変動する閾値が熱電池を有するDC-DCコンバータに及ぼす安定化効果の検証
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Tsutomu Iida, Ryo Inoue, Daishi Shiojiri, Naomi Hirayama, Noriaki Hamada, and Yasuo Kogo	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 680
3. 書名 Thermoelectric energy conversion	

1. 著者名 鈴木 雄二、秋永 広幸、八馬 弘邦、神野 伊策、舟橋 良次、篠原 真毅、宮崎 康次、竹内 敬治、飯田 努	4. 発行年 2021年
2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 345
3. 書名 環境発電ハンドブック	

1. 著者名 飯田努、塩尻 大士、阿武 宏明（12章分担著者名）	4. 発行年 2019年
2. 出版社 NTS	5. 総ページ数 346-356
3. 書名 サーマルデバイス～新素材・新技術による熱の高度制御と高効率利用～	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京理科大学 先進工学部 マテリアル創成工学科 飯田研究室  
https://tus-iidalab.net  
岡山理科大学 工学部 電気電子システム学科 麻原研究室  
https://nonlineargroup.jp

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	麻原 寛之  (ASAHARA HIROYUKI)  (50709615)	岡山理科大学・工学部・准教授    (35302)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------