

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「微小エネルギーを利用した革新的な
環境発電技術の創出」
研究課題「フォノンエンジニアリングに立脚した
熱電給電センシングシステム」

研究終了報告書

研究期間 2019年4月～2023年3月

研究代表者:野村 政宏
(東京大学生産技術研究所 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

産学連携により、環境熱発電デバイス搭載型のモニタリングシステム開発を行った。熱電変換デバイスで環境に漂う熱で発電し、センシングデータをクラウドに記録するシステムである。また、熱電材料の高効率化を念頭に、フォノンエンジニアリング分野の開拓も行った。

I. 熱電変換デバイス・モニタリングシステム開発

野村グループは、多結晶シリコン薄膜に構造パラメータを最適化したナノフォニック構造を形成することで熱電変換性能を増強した。また、平面型熱電変換デバイスにおいて重要な熱設計とそのためのデバイス作製技術を構築し、環境温度の3割以上を熱電材料に印可できるマイクロ構造を安定して作製する技術を獲得した。その結果、現時点でシリコンを材料とした平面型熱電デバイスのカテゴリーで世界最高性能をもつデバイスを実現している。原島グループと吉田グループは、微小な電流・電圧で駆動できるエネルギー管理回路及び充放電回路の開発を行った。センサー・無線機器・エネルギー管理回路及び充放電回路を実装したエネルギーハーベスター搭載型センサーノードを開発し、熱電環境発電によって生成されたエネルギーを用いて取得したセンシングデータをクラウドに記録するシステムを構築した。森下グループは、ユーザー目線で活動し、複数個所のインフラの温度差データを1年間取得し、モニタリングに適した条件と得られる温度差に関する知見を得た。人工気象室でシステム実証実験を実施し成功している。また、環境モニタリングのニーズ調査を世界規模で実施し、領域内でも広く情報共有して役立てた。

II. フォノンエンジニアリング分野の開拓

熱電変換材料開発に資するナノスケール熱輸送現象の物理的理解を深め、新しい概念も創出した。シミュレーションを得意とする大西グループは、シリコン表面のアモルファス構造や酸化層におけるフォノン散乱をモード依存で解析する手法を確立し、薄膜構造におけるフォノン散乱メカニズムを明らかにすることで、シリコン熱電薄膜における熱輸送現象の理解を深めるツールを獲得した。ナノフォニックシリコン構造内での熱輸送の理解に役立っている。また、野村グループでは、Ray Phononics 分野の創成、熱フォノンクス分野の開拓、熱電変換材料の高性能化につながる表面ナノ構造形成技術、新しい熱フォノン平均自由測定法の確立、Ray Phononicsを用いた微細熱電構造の提案などを行い、二次元フォノンパラリトンによる熱伝導や、二次元材料(グラファイト)におけるフォノン流体力学による熱伝導などの新しい熱伝導現象を世界に先駆けて観測することに成功した。伝熱工学において新分野を開拓し、世界的にもトップレベルのインパクトを持った成果を複数生み出した。

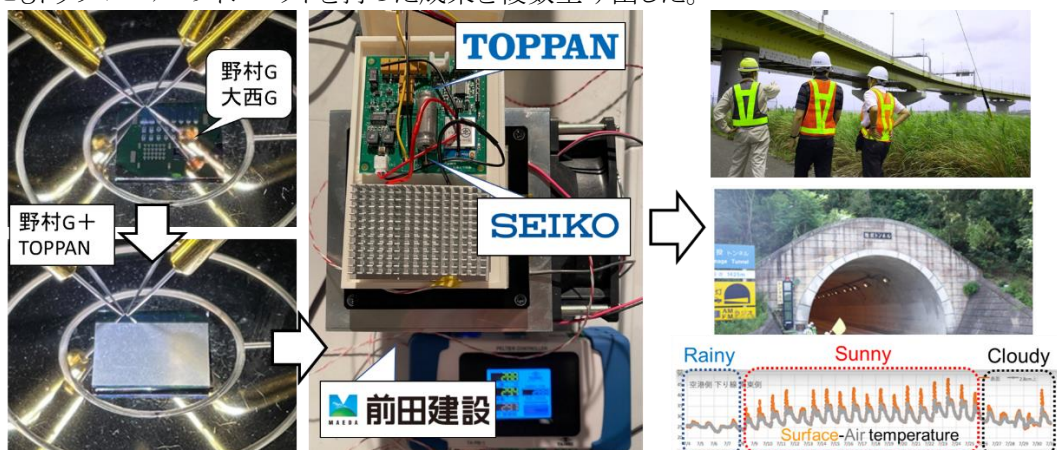


図1. 実施内容と体制概要。野村Gと凸版印刷(原島G)、セイコー(吉田G)、前田建設工業(森下G)が熱電変換デバイスとモニタリングシステム開発を行った。野村Gと大西Gは、熱伝導制御に関するフォノンエンジニアリングの学理構築に寄与する基礎研究を行った。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. Ray Phononics 分野の創出

概要:

フォノンが平均自由行程内では弾道的に輸送されることは知られていたが、ナノ構造の利用は低熱伝導率化に留まっていた。光線光学とのアナロジーから着想し、半導体薄膜に空孔を整列させることで指向性熱流発生や固体集熱など、拡散的熱輸送では決して実現できない新機能が実現できることを初めて提唱し、実証も行うことで伝熱工学分野に Ray phononics という新しい概念と分野を構築した。

2. 表面フォノンポラリトンを用いた薄膜面内熱輸送

概要:

薄膜においてフォノンと光子が融合した新しい固有状態である表面フォノンポラリトンが、固体熱伝導が抑制されるナノ薄膜において熱輸送の主役となることが理論的に予測されていたが、試料の作製と測定が困難であった。SiN ナノ薄膜において精密な面内熱伝導計測を行うことにより、表面フォノンポラリトンの熱伝導が固体熱伝導を大きく上回り、温度上昇に伴って熱伝導率が増大することを初めて示した。

3. 現実的な表面構造を考慮したフォノン輸送解析手法の確立と現象の理解

概要:

ポーラス薄膜における熱輸送では表面とネック領域におけるフォノン散乱による熱伝導抑制が重要な要素である。表面のアモルファス構造や酸化層におけるフォノン散乱をモード依存で解析する手法を確立し、薄膜構造におけるフォノン散乱メカニズムを明らかにした。また、ナノメートルスケールのネックにおけるフォノン輸送を波動性と粒子性に分解して解析することで、ポーラス構造におけるフォノン波動性制御の可能性を明らかにした。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 平面型ナノフォニックシリコン熱電変換デバイスの開発

概要:

シリコンウエハ上に作製される平面型熱電変換デバイスの開発を行い、フォニックナノ構造を用いたデバイス性能の向上を初めて実証し、高い発電密度を実現した。手のひら程度のデバイス面積によって環境で一般的な温度差から 100 μ W クラスの発電が可能であり、自己給電センサーネットワークシステムの構築に貢献するものである。

2. 環境熱発電デバイス搭載センサーノード開発およびモニタリングシステム開発

概要:

微小な電流・電圧で駆動できるエネルギーマネジメント回路及び充放電回路の開発を行った。センサー・無線機器・エネルギーマネジメント回路及び充放電回路を実装したエネルギーハーベスター搭載型センサーノードを開発し、熱電環境発電によって生成されたエネルギーを用いて取得したセンシングデータをクラウドに記録するシステムを構築した。保守点検が必要なインフラ管理の省力化や安全・安心な社会の実現に資する成果である。

<代表的な論文>

1. M. Nomura, R. Anufriev, Z. Zhang, J. Maire, Y. Guo, R. Yanagisawa, and S. Volz, "Review of thermal transport in phononic crystals," Mater. Today Phys. 22, 100613 (2022). (Invited review)

概要:

フォニック結晶は、フォノンに対する人工周期構造であり、ナノメートル周期とすることで

熱伝導制御も可能になる。本論文は、これまでに半導体ナノ構造を用いた熱伝導制御について行われた実験および理論におけるマイルストーン的成果をまとめ、フォノンエンジニアリングを用いた熱電変換材料開発とデバイス応用についても解説した招待レビュー論文であり、本分野の研究発展に大きく貢献するものである。

2. Y. Wu, J. Ordonez-Miranda, S. Gluchko, R. Anufriev, D. De Sousa Meneses, L. Del Campo, S. Volz, and M. Nomura, “Enhanced thermal conduction by surface phonon-polaritons,” *Science Advances* 6, eabb4461 (2020).

概要:

ナノ構造中の熱伝導に関する物理的な理解の深化は、熱電変換や半導体産業の発展において重要である。フォノンによる固体熱伝導に加え、フォトンとフォノンが融合したポラリトン状態を用いることで、新たな熱輸送チャンネルが開く。本論文は、窒化シリコン薄膜において表面フォノンポラリトンがフォノンによる寄与を超え、主な熱キャリアとなることを初めて示した。温度上昇にともなって表面フォノンポラリトンが活性化し、熱伝導率が上昇する現象を初めて観測した。

3. R. Anufriev and M. Nomura, “Ray phononics: Thermal guiding, emission, and shielding using ballistic phonon transport,” *Mater. Today Phys.* 15, 100272 (2020).

概要:

従来、フォノンの弾道的輸送特性は、ナノ構造形成による低熱伝導率化に利用されていた。本論文は、半導体薄膜に空孔を適切に配置することにより、熱流を高度に制御することが可能なことを用い、指向性の発現に加え、遮蔽、スペクトルフィルタリングなどが可能なことを示した。Ray Phononics 分野を開拓した論文で、伝熱工学分野において重要な知見を提供した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 東京大学グループ

研究代表者:野村 政宏(東京大学生産技術研究所 教授)

研究項目

- ・ナノ構造化による熱伝導制御
- ・平面型 Si 熱電変換デバイスの設計と作製、性能評価

② 東京大学グループ

主たる共同研究者:大西 正人(東京大学大学院工学系研究科 特任助教)

研究項目

- ・ナノスケールにおける界面熱コンダクタンスの理解
- ・モード分解原子グリーン関数法の開発とシリコン薄膜における表面フォノン散乱の解析
- ・ポーラス構造におけるフォノン輸送に及ぼす粒子性・波動性の影響解明

③ 前田建設工業(株)グループ

主たる共同研究者:森下 真行(前田建設工業(株)ICI 総合センター グループ長)

研究項目

- ・供用中のインフラ構造物(橋梁及びトンネル)における温度差分布計測
- ・社会実装計画の検討と案出

④ 凸版印刷(株)グループ

主たる共同研究者:原島 純一(凸版印刷(株)エレクトロニクス事業本部 主任)

研究項目

- ・カメラ+LPWA 通信の消費電力検討と計測
- ・既存ペルチェ素子+エネルギーハーベスト電源+カメラ+LPWA 通信モジュール開発
- ・通信プロトコル変換器(LoRa-ZETA)開発

⑤ セイコーフューチャークリエーション(株)グループ

主たる共同研究者:吉田 宜史(セイコーフューチャークリエーション(株)開発一部 部長)

研究項目

- ・センサーノード筐体の設計と作製
- ・パワーマネジメント回路の検討と作製

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

○ 国内研究者と産業界との連携

- ・応用物理学会において「フォノンエンジニアリング研究グループ」を2017年1月に設立した。2020年には研究会に昇格した。84グループ(14企業含)、約330名で活動を行っており、委員長を務めている。5年半の活動を通じて、多数の共同研究と共著論文が産まれており、国内研究者のネットワーク形成に貢献している。
- ・応用物理学会において鈴木先生、秋永先生と共に「エネルギーハーベスティング研究グループ」を2018年10月に設立し、幹事を務めている。シンポジウムも数回開催している。
- ・応用物理学会に合同セッション M「フォノンエンジニアリング」の創設に貢献し、分類代表を務めている。創設6年後の今も安定して30~40件の投稿を集め、シンポジウムも数回開催している。
- ・領域の連携促進のお陰様で、本分野の多くの研究者と知り合うことができた。特に、森先生

(NIMS)、黒澤先生(名大)とは、共著論文を出版するなど緊密に連携している。

- 塩見 G と実験－理論連携体制を構築した。JJAP に共著で招待論文を出版し、第 42 回(2020 年度)応用物理学会解説論文賞を受賞した。
- 2017 年度からサプライチェーンを意識して協働していた前田建設工業、凸版印刷、セイコーホールディングスとの共同研究開発体制がより一層強固なものとなった。
- 2019 年度から 2 年間、企業一社と共同研究契約を結び、異方性熱伝導に関する研究を行い、特許出願を行った。
- 2022 年度から企業一社と共同研究契約を結び、半導体中のナノスケール熱伝導に関する研究を行っている。

○ 国外研究者との連携

- Eurotherm (Nanoscale and Microscale Heat Transfer)の Committee member を務めており、多くの欧州研究者と分野の展開や運営について意見交換を行っている。
- 野村グループとドイツ・フライブルク大学の O. Paul 教授との共同研究が 10 年近く続いており、熱電材料である多結晶シリコンを供給して頂いている。CREST により一層強固な共同研究となった。
- 野村は、アメリカ、フランス、ドイツ、ロシア、中国、スペイン、台湾の大学と共同研究を行っており、共著論文を出版した。
- 野村は、スペイン、ポーランドの研究者と共同で国際共同研究に応募し、獲得した。
- 2017 年度以降、野村グループではフランス・CNRS との共同研究が活発化し、教授クラス 2 名とエンジニア 1 名が常駐して研究を行っており、この 5 年間で 36 本の共著論文を出版している。
- 2022 年度から、野村はフランス CNRS と東大生産技術研究所の共同運営研究センター(LIMMS/CNRS-IIS 国際連携研究センター)のセンター長となり、特にフランスの研究者との連携を強めることとなった。9 月に渡仏し、リールにある IEMN というエレクトロニクス、マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジーに関する組織の副所長と面会し、エネルギーハーベスティングなどに関する共同研究ネットワーク形成を推進する枠組みを新設した。
- 2022 年度に、アメリカ・ユタ大学の Park 准教授を 3 か月間招へいし、ナノギャップ熱輸送に関して集中的な研究を行い、共同研究を立ち上げた。
- 2022 年度に、ロシア科学アカデミー主席研究員の Kosevich 教授を 1 年間の予定で招へいし、原子シミュレーションを用いた熱輸送に関する研究を開始した。
- 2023 年 4 月に、海外から約 20 名の研究者を招へいし、野村を主催者の一人として東大生研でワークショップを開催した。
- 大西グループは、シンガポール Institute of High Performance Computing (IHPC)の Zhun-Yong Ong 博士と共同研究を行った。Ong 博士はモード分解原子グリーン関数法の理論の開発者であり、本研究では Ong 博士が開発した 2 次元におけるフォノン輸送解析コードを 3 次元システムに拡張することで、シリコン薄膜における表面フォノン散乱を解析した。