

太陽光-熱電ハイブリッド素子の最適設計と検証実験

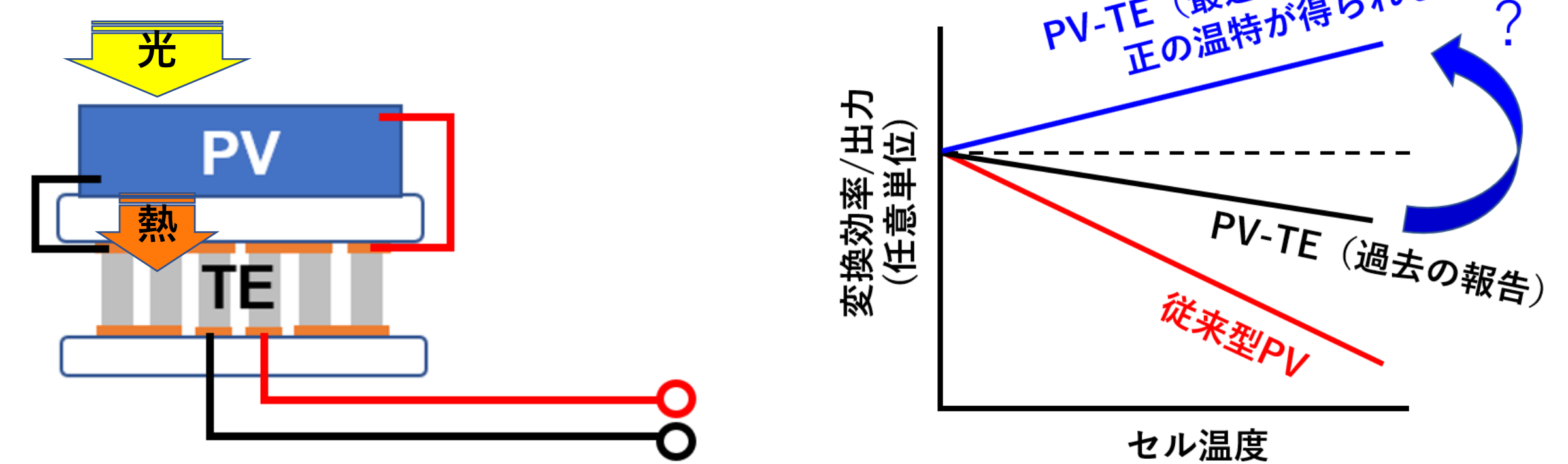
上出 健仁¹、佐久間 惇²、望月 敏光¹、高遠 秀尚¹、秋山 英文²
 1 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター
 2 東京大学

研究の概要

- 高温時に変換効率が向上する正の温度特性(通常とは逆の特性)を持つ「熱回収型太陽電池」を理論提案している(タイプI=ワイドギャップ半導体利用[1]、タイプII=熱電変換素子利用[2])。
- タイプIIの本構造(2端子直列型太陽電池-熱電素子(PV-TE)ハイブリッド素子)の特性を最適化する設計理論を導き[3-5]、得られた設計指針の妥当性を実験で検証した[6-7]。

太陽光-熱電(PV-TE)ハイブリッド素子の開発

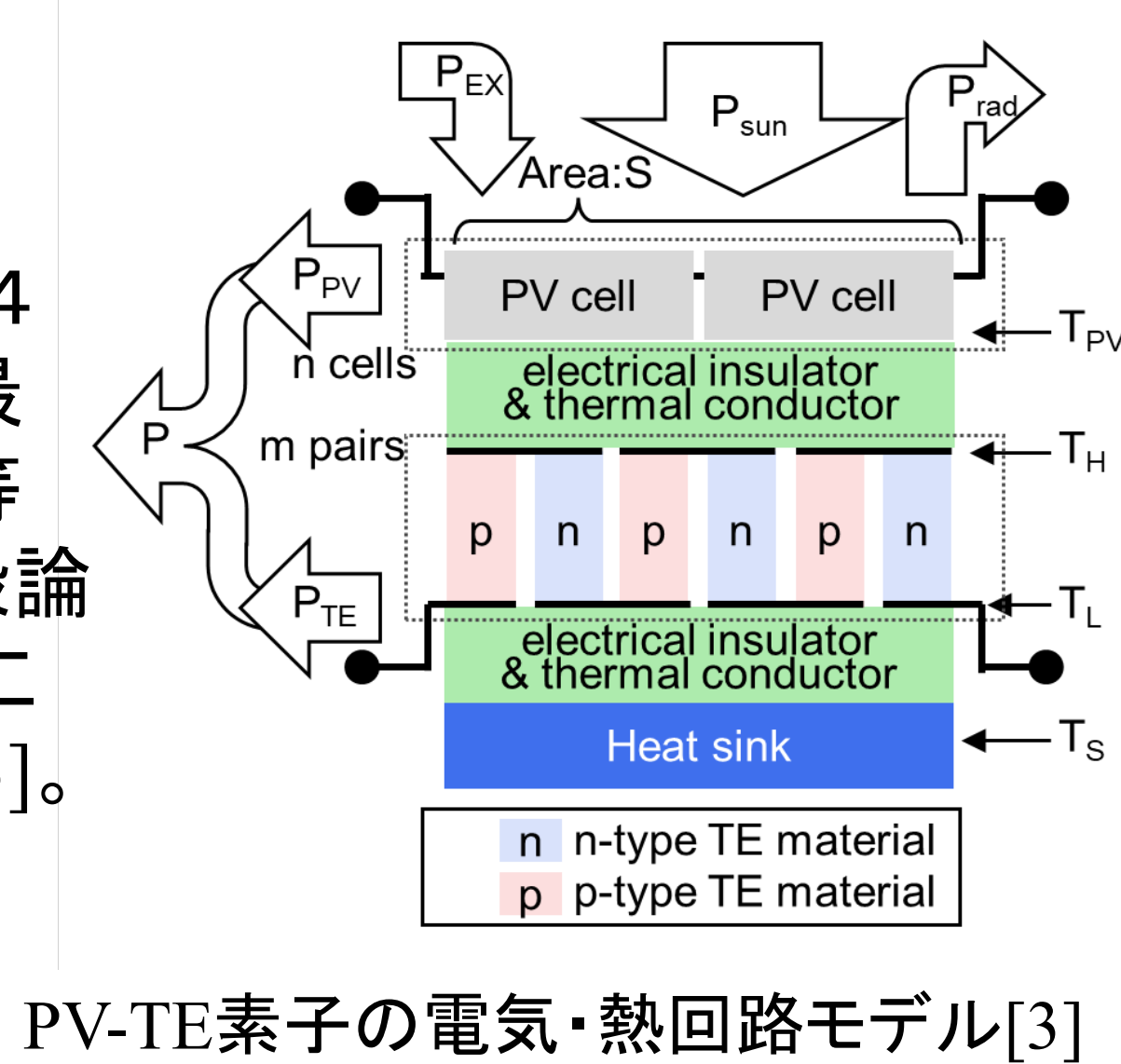
太陽電池は高温化すると出力が下がるが、太陽電池からの排熱を熱電回収すれば、温度特性を大きく改善することができるはず。4端子型と同等の出力が得られれば経済性に優れた2端子型がさらに有利。



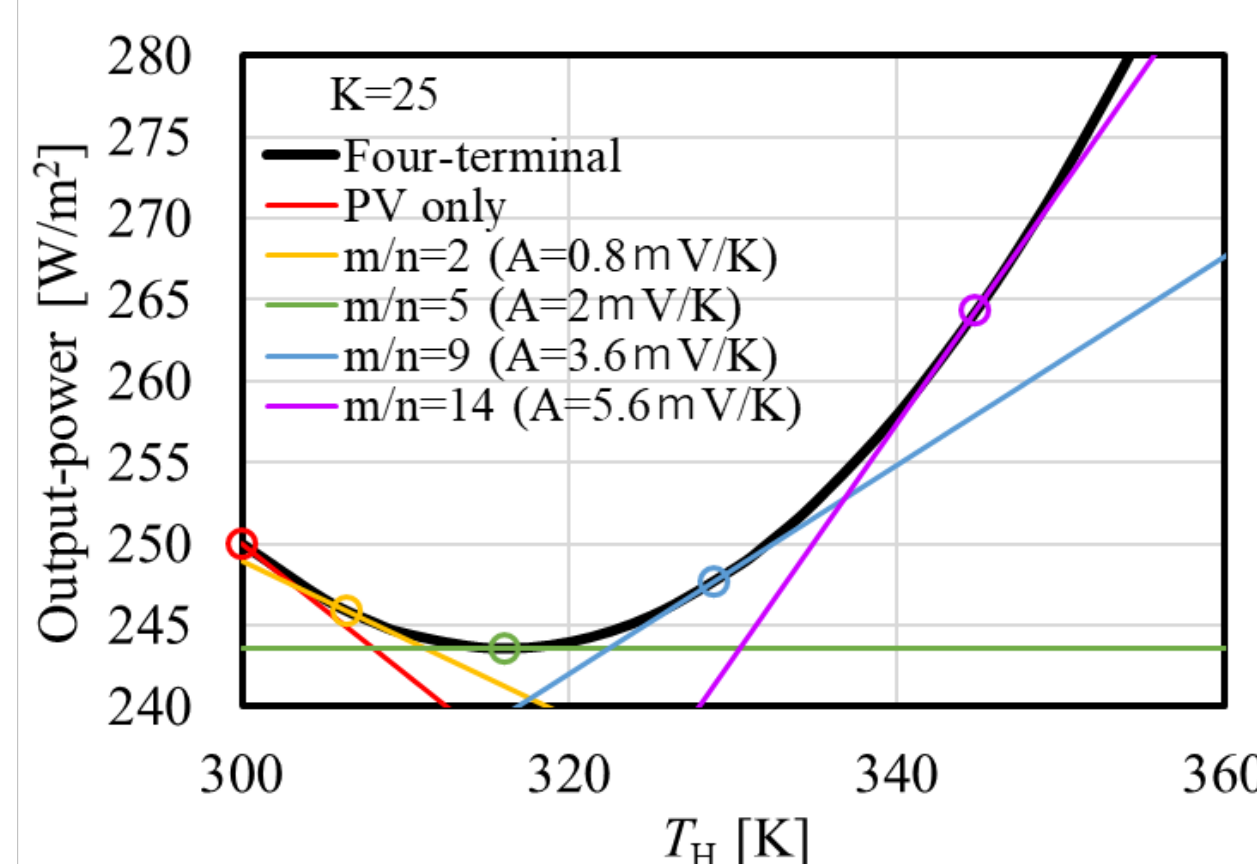
設計理論 [3,4,5]

2端子型ハイブリッド素子はPVとTEからの出力を独立に最大化して取り出す4端子型に対し、電気的な不整合による損失が追加で発生する。不整合損失を回避する設計が可能か理論的に検証した[3, 4, 5]。

2端子型と4端子型の最大出力の等価性を一般論として示すことに成功 [3]。



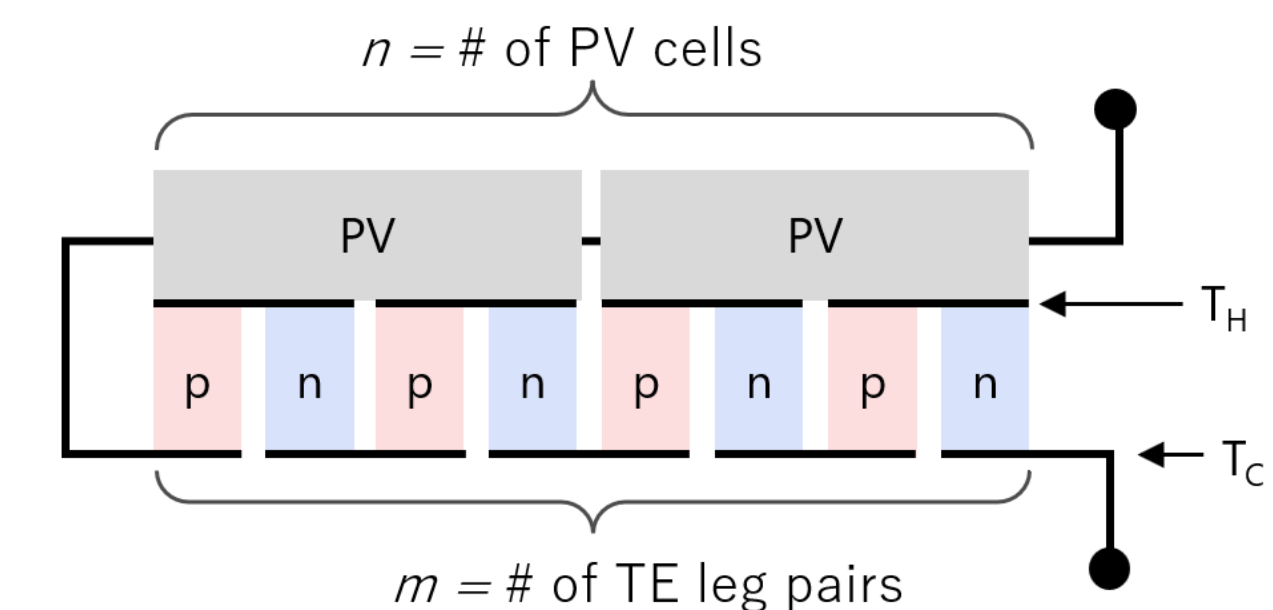
PV-TE素子の電気・熱回路モデル[3]



市販のPVとTE素子(結晶SiとBiTe)のハイブリッド素子の出力温度特性の計算結果[4, 5]。どの温度設定でも、m/nを最適化することにより2端子型が4端子型と等しい最大出力が得られることが分かる。

設計理論: 普遍的ロスレス・ハイブリッド公式
 ~2端子型での不整合損失を消失させる条件式[6, 7]

直列する素子数の比(m/n)が整合条件を決める重要な設計パラメータ



最適値の理論公式

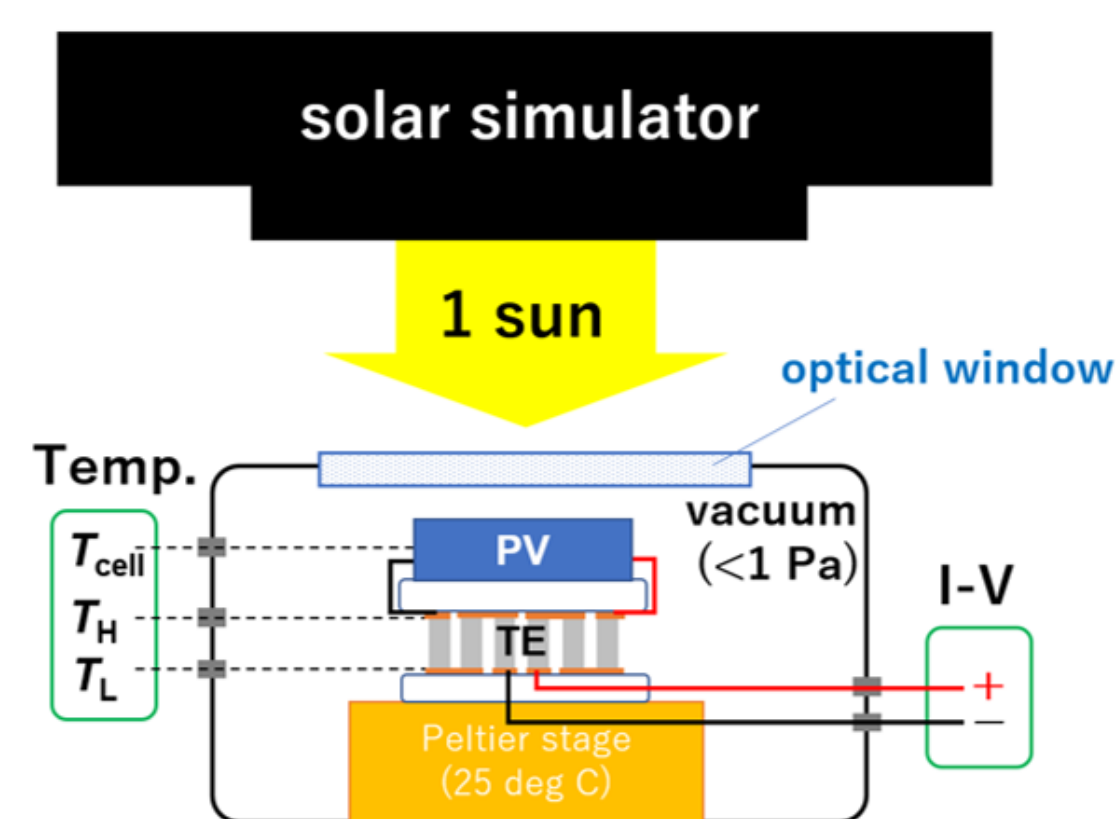
$$\left(\frac{m}{n}\right)^{\text{opt}} = \frac{Q_H / J_{PV}^{\text{MPP}}}{\left(\frac{|\alpha_p| + |\alpha_n|}{2}\right) \times 4T_C} \times \frac{ZT_C}{1 + ZT_C/2}$$

Q_H ($\sim P_{\text{sun}} \times (1 - \eta_{PV})$): TE素子への熱流入
 J_{PV}^{MPP} : PV素子の電流(最大電力点での)

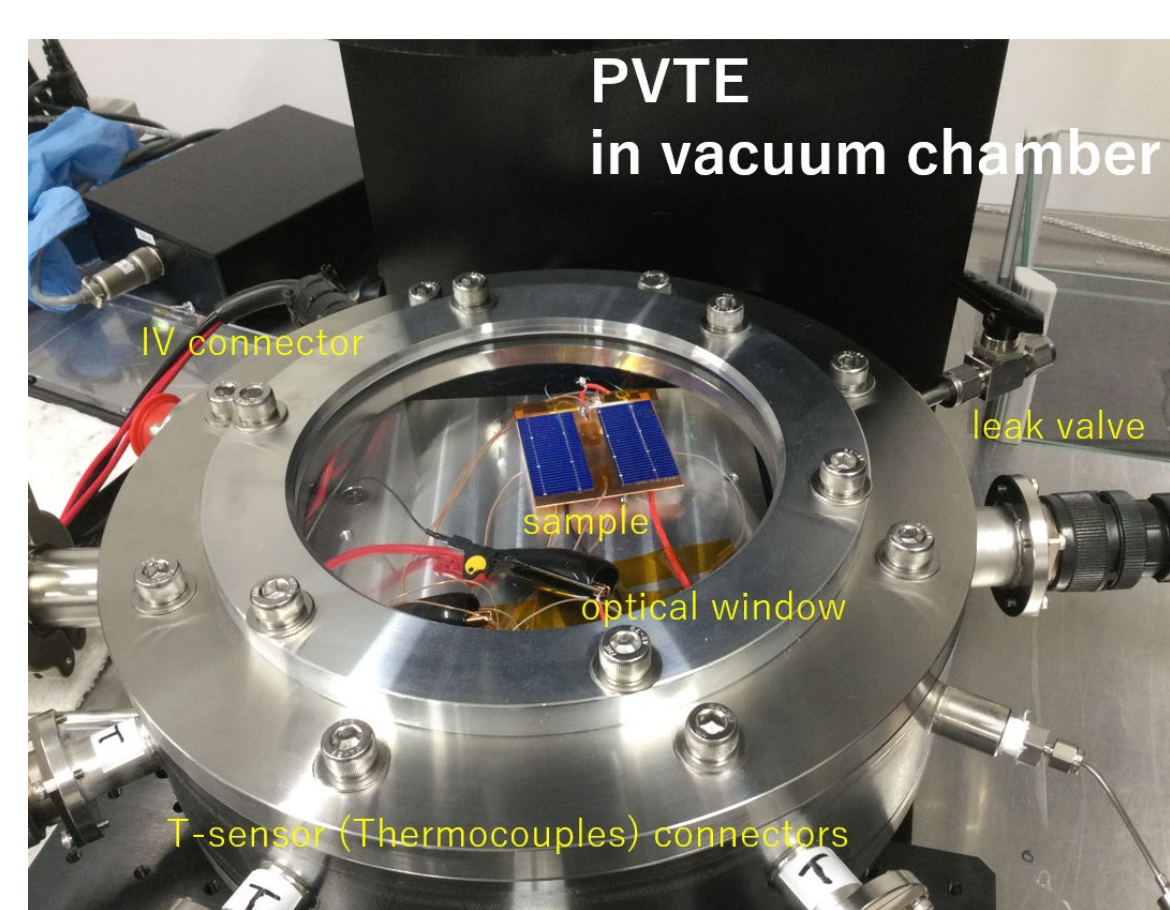
Z: 熱電材料の性能指数、 α_n, α_p : 熱電材料のゼーベック係数

検証実験と結果 [6,7]

これまで外部から熱を印可した条件下でハイブリッド素子の正の温度特性を確認している[2]。太陽光受光以外による入熱を絶った真空下で、温度係数の向上を設計パラメータ(m/n)を変えて評価し、理論の妥当性を検証した[6, 7]。

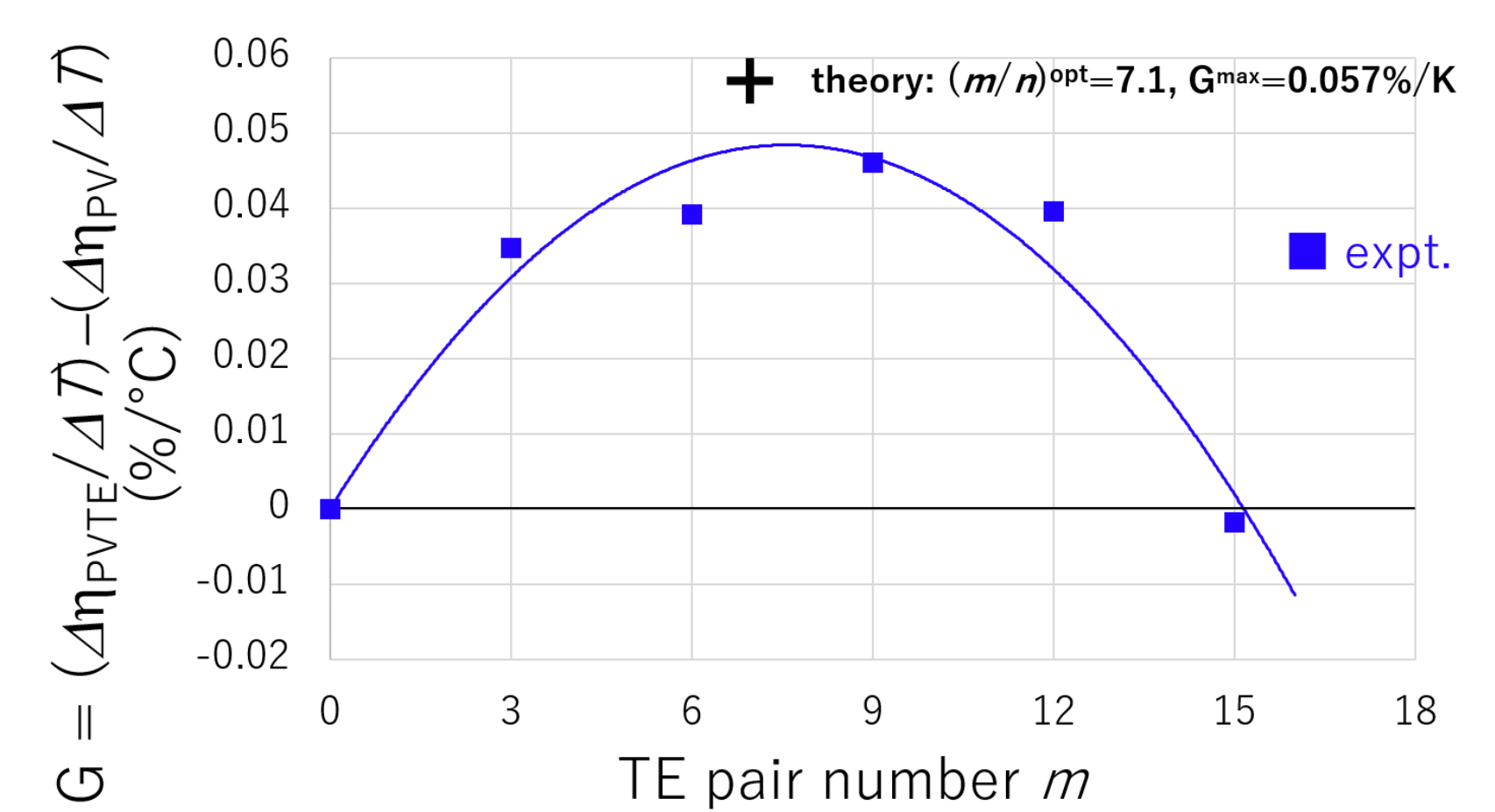


実験概略図(真空チャンバー内で試作素子の各所温度と光照射I-V特性の同時測定を行った)



検証実験系の写真

結果) PV-TEハイブリッド化による出力温度係数の利得



m/nの最適値を実験的に評価した(n=1)。試作素子の熱流評価も行い、結果が理論(ロスレスハイブリッド公式)と整合することを確認した。これにより設計理論の妥当性が示された[6, 7]。

結論

- 直列2端子PVTEハイブリッドの設計の一般論を整備し、検証実験で不整合損失を回避する設計の理論公式の妥当性を確認した。
- 実際の熱環境や、より実用的な冷却方法(フィン+空冷/水冷)、集光下での測定が次の課題。

参考文献

- [1] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
- [2] K. Kamide et al., 38th EU PVSEC, 1BO.16.4, pp. 37-40 (2021).
- [3] J. Sakuma et al., Appl. Phys. Express 16, 014003 (2023).
- [4] 佐久間他、第83回応用物理学会秋季学術講演会 21p-B202-11 (2022).
- [5] J. Sakuma et al., PVSEC-33, WeP-42-18 (2022).
- [6] 上出他、第83回応用物理学会秋季学術講演会 21p-B202-12 (2022).
- [7] K. Kamide et al., PVSEC-33, TuO-42d-04 (2022).

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP19K04523の助成を受けたものです。