

# COMSOL Multiphysicsを用いた 熱電発電装置の最適化

---

竹澤晃弘, 北村充  
広島大学大学院工学研究院  
機械システム・応用力学部門

# 発表の内容

---

1. 研究背景
  2. 研究目的
  3. 定式化
  4. 数値計算法の実装
  5. 数値例
  6. まとめ
-

# 研究背景

---

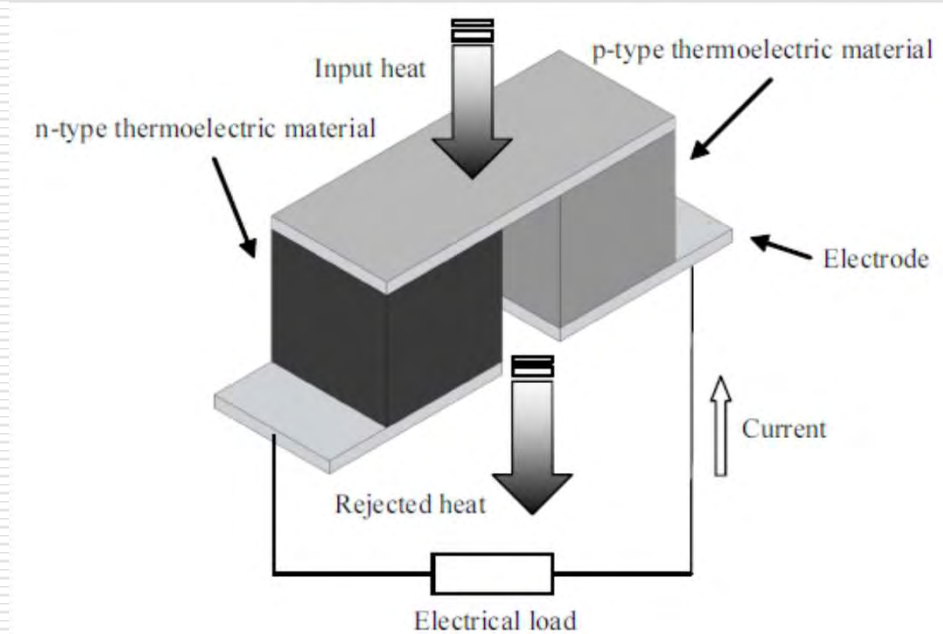
- Energy harvestingとは環境発電のこと
  - 本来は無駄になるはずのエネルギーを利用して発電する技術
  - 有名なのは太陽光発電, 風力発電
  - 本研究では, 廃熱→電力の発電技術を扱う
  - メンテナンスフリーで永続的に発電可能
  - 国家プロジェクト(NEDO等)でも積極的に進められた.
  - 近年, 材料性能の急激な向上により再注目されている.
-

# 研究背景

---

## □ 熱→電力への変換

- 温度差を電力に変換する熱電素子を使用

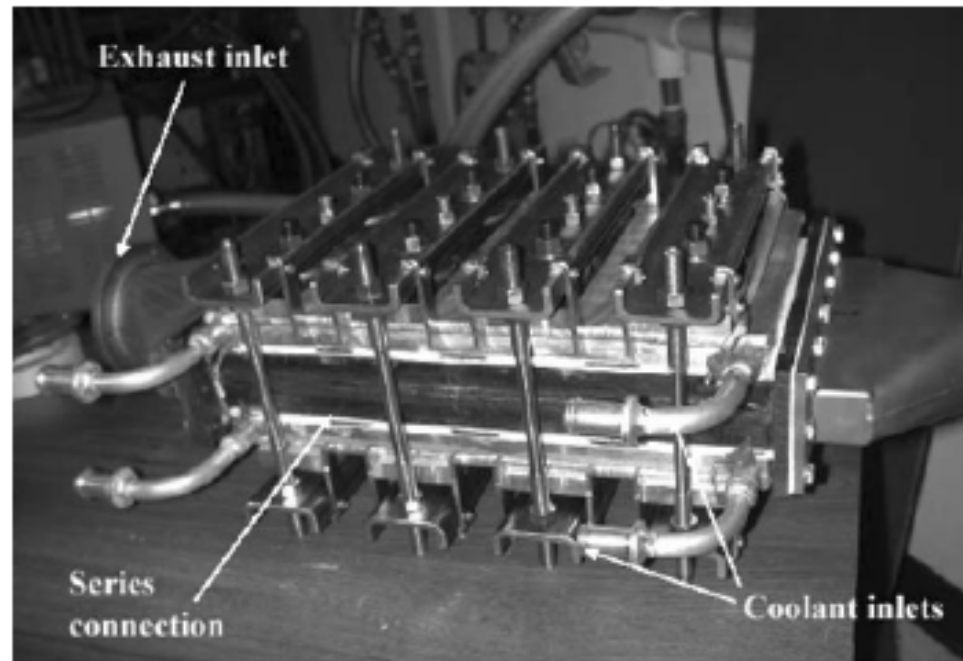


# 研究背景

---

## □ トラックエンジンの廃熱を利用した発電

- Thacher, E. F., Helenbrook, B. T., Karri, M. A. and Richter, C. J. (2007). Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck. Proc. I MECH E, Part D: J. Automobile Engineering 221, 1, 95-107.



# 研究背景

---

- 温泉を利用した発電
  - 群馬県草津温泉，NEDO

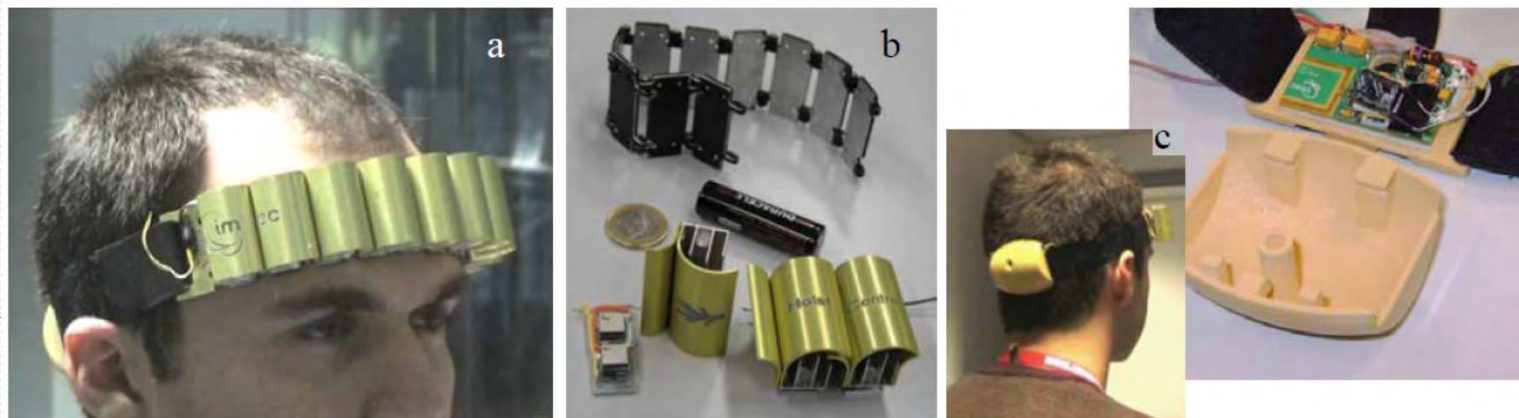


# 研究背景

---

## □ 体温からも・・・

- Mieke VAN BAVEL, Vladimir LEONOV, Refet Firat YAZICIOGLU, Tom TORFS, Chris VAN HOOFF, Niels E. POSTHUMA and Ruud J. M. VULLERS, Wearable Battery-free Wireless 2-Channel EEG Systems Powered by Energy Scavengers, *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 94, 2008, pp. 103-115



# 研究目的

---

- 熱電材料部の形状が性能に大きく影響するのでは？
  - しかし、既存研究では寸法最適化のみ行われており、抜本的な最適化は行われていない。
  - そもそも装置の形は長方形や直方体のみ。
  - トポロジー最適化を試みたい。
-

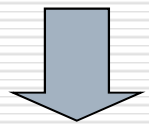


# 定式化

## □ 状態方程式

$$\nabla \cdot j = 0 \quad j = \sigma(E - \alpha \nabla T) \quad \text{Seebeck係数}$$

$$\nabla \cdot q = f \quad q = \beta j - \lambda \nabla T \quad \text{Peltier係数}$$



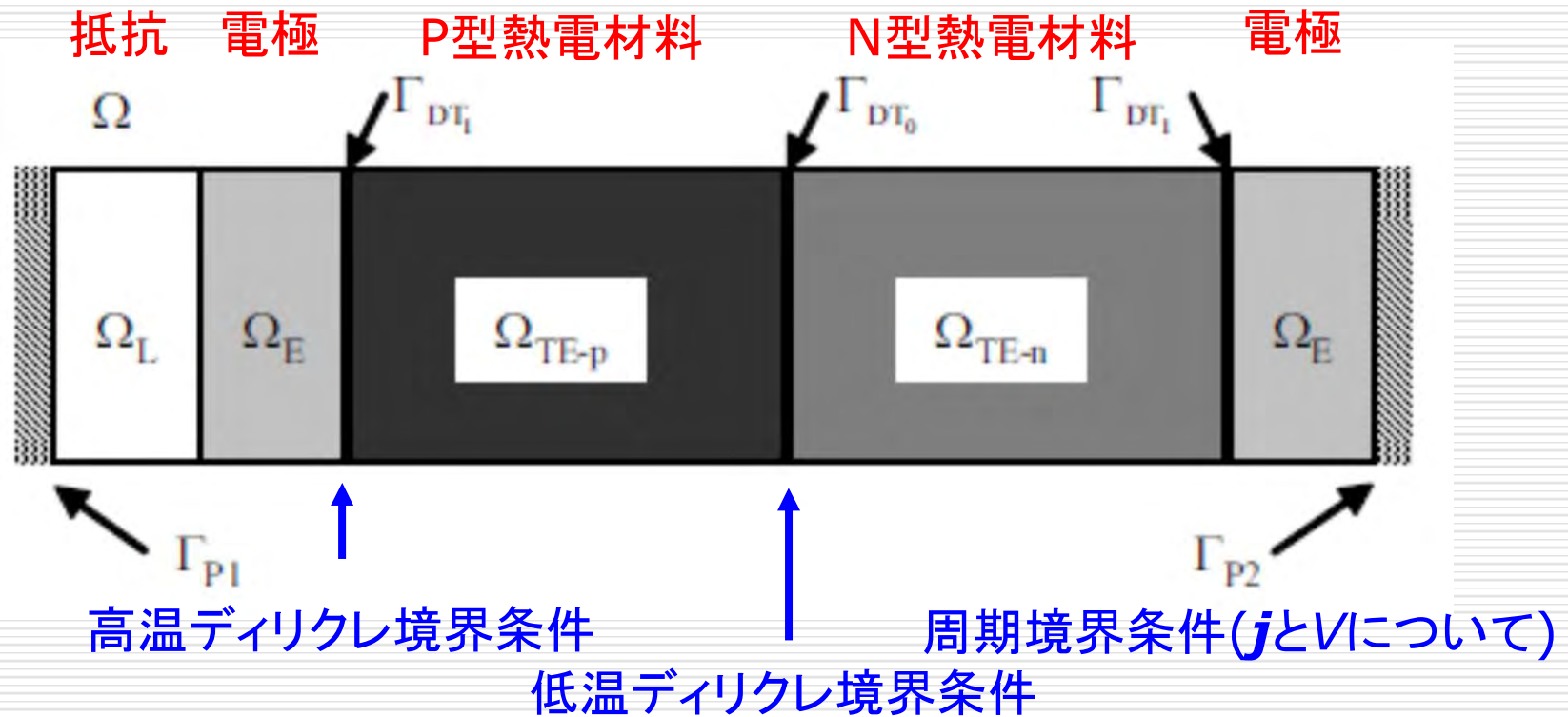
電圧Vと温度Tを状態変数として展開する

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V - \alpha \sigma \nabla T) = 0$$

$$\nabla \cdot \{-(\alpha^2 \sigma T + \lambda) \nabla T - \alpha \sigma \nabla V T\} = \sigma \{(\nabla V)^2 + \alpha \nabla T \nabla V\}$$

# 定式化

## □ 解析領域の設定



# 定式化

---

## □ 目標関数

- 抵抗領域に作用する電気エネルギーに-1をかけて最小化

$$J(\Omega_{\text{TE}}) = - \int_{\Omega} H j \cdot E dx$$

## □ トポロジー最適化

- SIMP法を使用

$$\alpha^* = \rho^{p_\alpha} \alpha_o \quad \sigma^* = \rho^{p_\sigma} \sigma_o \quad \lambda^* = \rho^{p_\lambda} \lambda_o$$

---

# 定式化

---

## □ 感度

$$J'(\rho) = - \{ \sigma'(\rho) \nabla V + (\alpha'(\rho) \sigma + \alpha \sigma'(\rho)) \nabla T \} \cdot (\nabla p - \nabla V q) \\ - \{ (\alpha'(\rho) \sigma + \alpha \sigma'(\rho)) \nabla V T + (2\alpha \alpha'(\rho) \sigma + \alpha^2 \sigma'(\rho)) T \nabla T + \lambda'(\rho) \nabla T \} \cdot \nabla q$$

## □ 随伴方程式

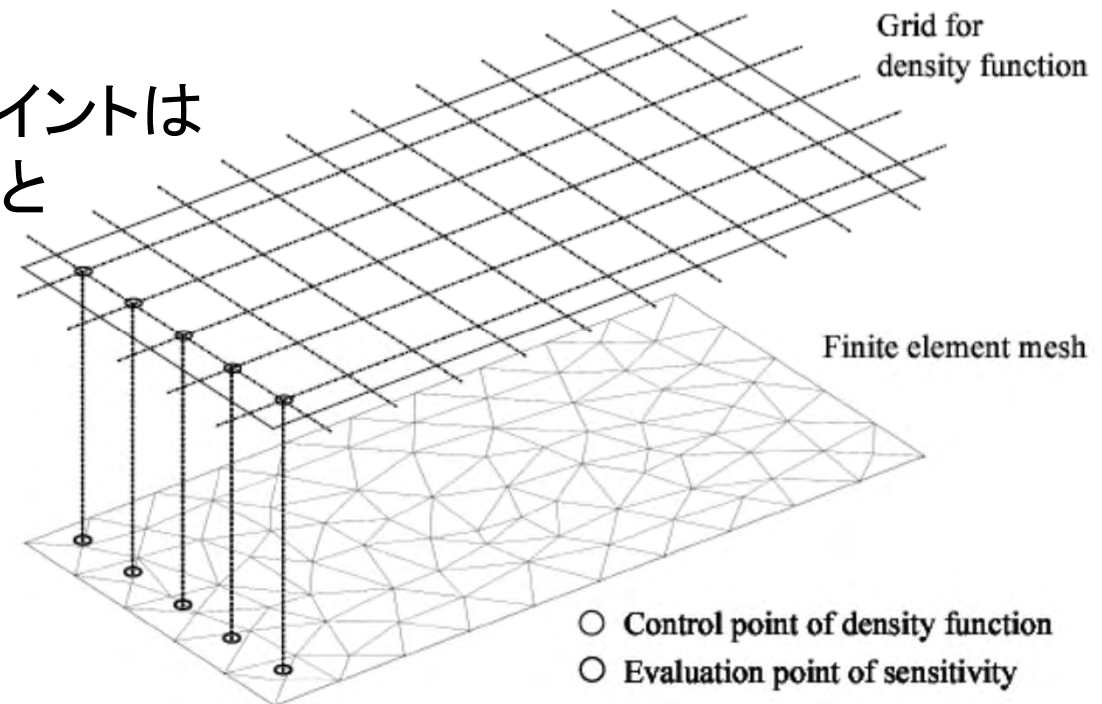
$$\nabla \cdot \{ -\sigma \nabla p - \alpha \sigma T \nabla q + \sigma (2\nabla V + \alpha \nabla T) q - 2H\sigma \nabla V - H\alpha \sigma \nabla T \} = 0$$

$$\nabla \cdot \{ -(\alpha^2 \sigma T + \lambda) \nabla q + \alpha \sigma \nabla V q - \alpha \sigma \nabla p - H\alpha \sigma \nabla V \} \\ + \{ \alpha \sigma \nabla V + (\alpha^2 \sigma + \lambda'(T)) \nabla T + (\alpha'(T) \sigma + \alpha \sigma'(T)) \nabla V T + (2\alpha \alpha'(T) \sigma + \alpha^2 \sigma'(T)) T \nabla T \} \cdot \nabla q \\ - \{ \alpha'(T) \nabla V + (\alpha'(T) \sigma + \alpha \sigma'(T)) \nabla T \} \cdot \nabla V q \\ = - \{ \sigma'(T) \nabla V + (\alpha'(T) \sigma + \alpha \sigma'(T)) \nabla T \} \cdot (\nabla p + H \nabla V)$$

# 数値計算の実装

## □ 密度関数の設定

- 密度関数は設計領域内に  
双一次で分布
- コントロールポイントは  
FEMのメッシュと  
独立に設定
- 四角形の構造  
メッシュでは  
収束性に難



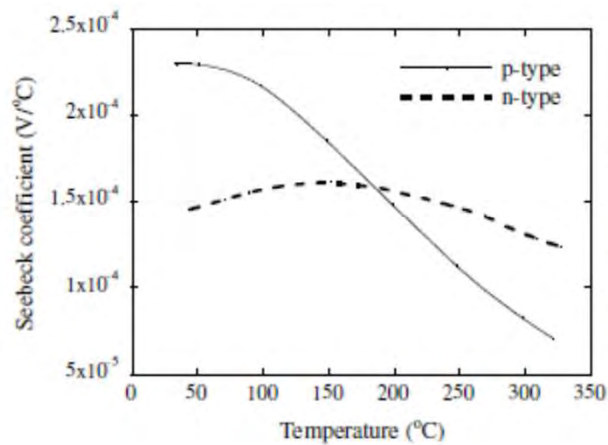
# 数値計算の実装

---

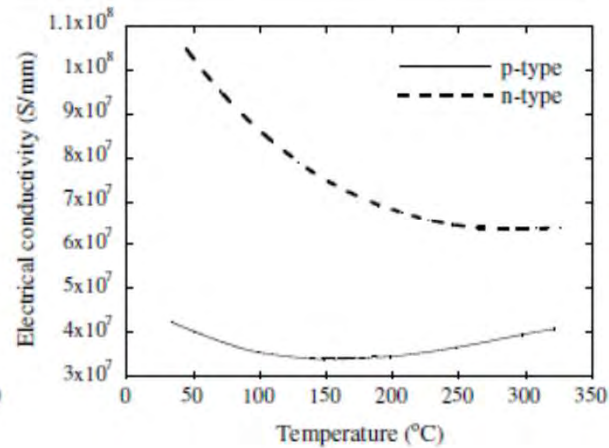
- 有限要素法の計算にはCOMSOLを使用.
  - 設計変数の更新にはMMAを使用.
  - フィルタリングにはProjection Methodを使用.
-

# 数值例

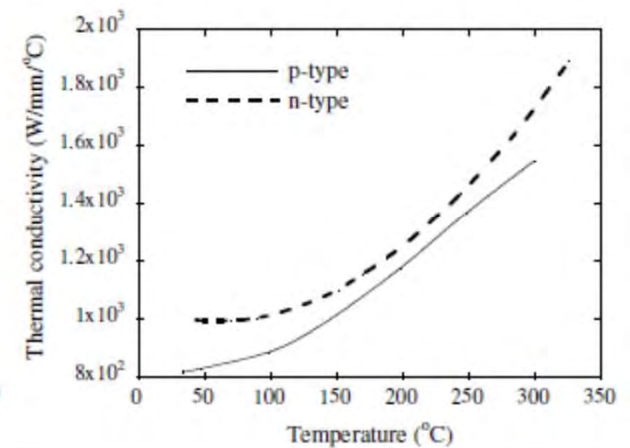
## □ 物性定数



Seebeck係数



電気伝導率



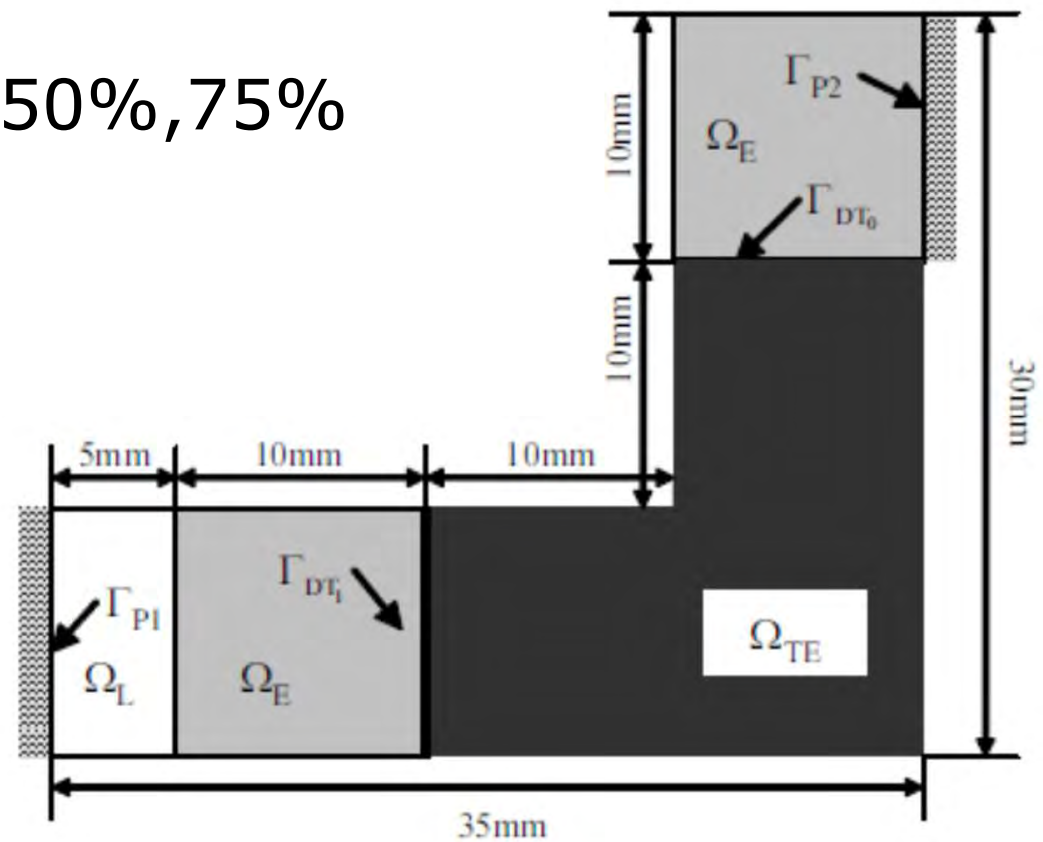
熱伝導率

Ebling D, Jaegle M, Bartel M, Jacquot A, Böttner H. Multiphysics simulation of thermoelectric systems for comparison with experimental device performance. *Journal of Electronic Materials* 2009; **38**(7):1456–1461.

# 数値例

## □ 単一材料の場合

- 体積制約25%, 50%, 75%
- 高温部300°C
- 低温部50°C



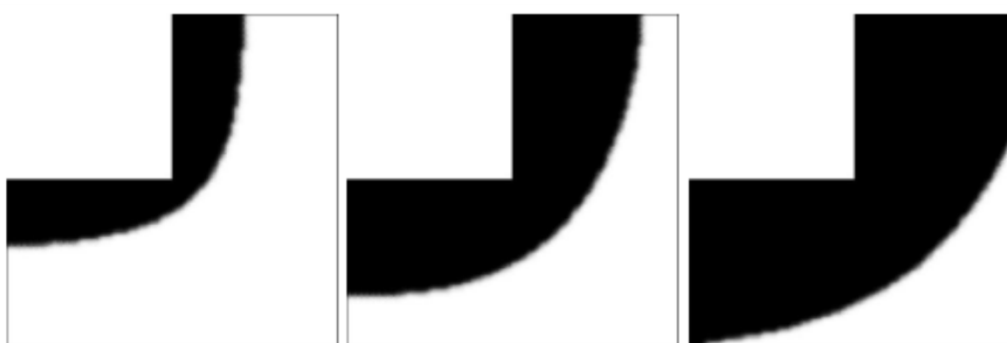


# 数值例

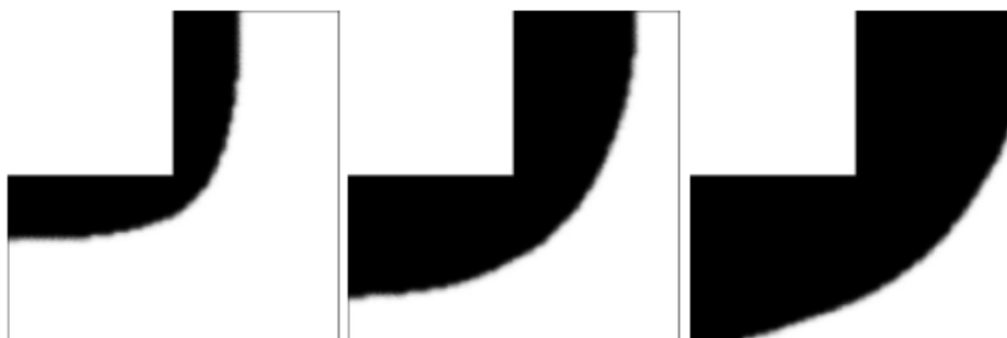
---

## □ 最適形状

P型材料

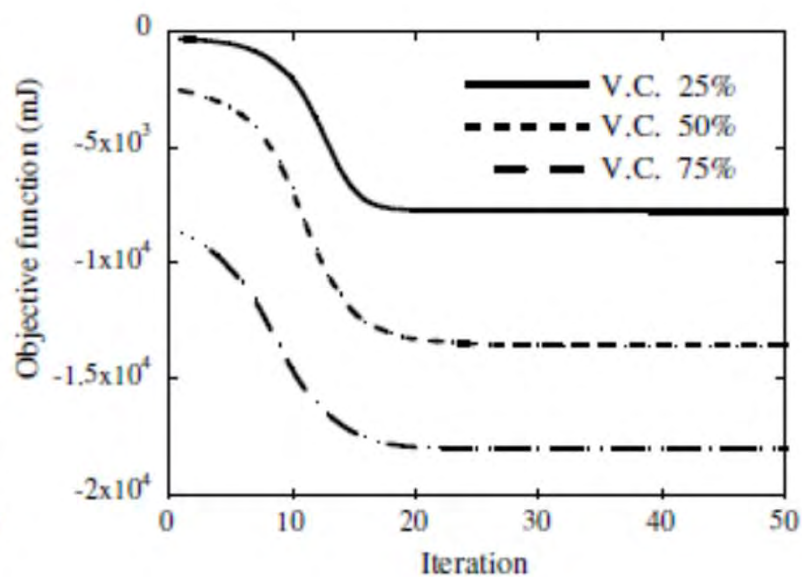
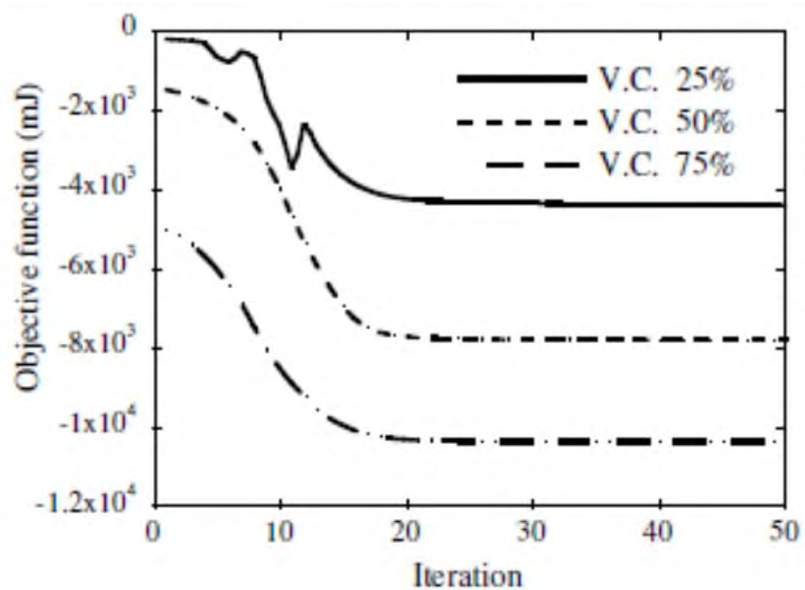


N型材料



# 数値例

## □ 目標関数の収束



# まとめ

---

- 熱を電気に変換する環境発電装置のトポロジー最適化を行った。
    1. 熱電変換の状態方程式の導入.
    2. 閉回路を模した二次元解析領域の導入.
    3. 目標関数を抵抗領域に生じる電気エネルギーとした.
    4. SIMP法に基づくトポロジー最適化.
    5. 感度解析とMMAに基づく最適化アルゴリズム
  - 今後の展望
    1. P型とN型を組み合わせた最適化
    2. 三次元への拡張
-