

## 温度履歴制御を目的としたトポロジー最適化の基礎的検討

名古屋大学 学生会員 ○高荒 圭佑  
 名古屋大学 正会員 干場 大也  
 名古屋大学 正会員 西口 浩司  
 名古屋大学 正会員 加藤 準治

### 1. はじめに

近年、電子機器の小型化や高性能化に伴い、熱対策の重要性が増している。適切な熱対策を行わなければ、様々な不具合が発生する可能性がある。したがって、製品設計の段階で必要な熱対策を盛り込む熱設計が必要である。トポロジー最適化は、数学的根拠に基づき最適な形態を求める方法であり、熱設計分野でのトポロジー最適化の研究は盛んに行われている。しかし、それらの研究の多くは定常状態を仮定している。非定常状態を考慮した研究は、例えば Wu らによる研究[1]があるが、その数は多くない。電子回路の動作の時間変化や、放熱による部品の温度分布の時間変化など、現実には生じる熱問題を捉えるためには非定常状態を考慮することは不可欠である。本研究では、非定常状態を考慮したトポロジー最適化手法の基礎的検討として、ある物質点の着目時刻における温度を最小化するためのトポロジー最適化法を提案し、その有効性を確かめる。

### 2. 設計変数および最適化問題の設定

本研究では、ある物質点の着目時刻における温度を最小化するために、次のような最適化問題を設定する。

$$\text{minimize} \quad f_0 = \int_0^{t^r} \mathbf{w}(t)^T \boldsymbol{\theta} dt \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^N s_i V_i \leq V_{max} & (2) \\ 0 \leq s_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, N) & (3) \\ \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{F} & (4) \end{cases}$$

ここで、 $\mathbf{w}(t)$ は評価したい位置と時間での温度のみに正の重みを、それ以外の温度にはゼロの重みをつけ、評価したい温度のみの影響を目的関数に反映させるためのベクトルである。

### 4. 最適化計算例

計算に用いた材料の物性値は表-1に、設計領域および境界条件は図-1に示した。また、設計領域の温度の初期値は領域内で一様に0 Kとし、Dirichlet境界上の温度は0 Kとした。なお、加熱のある境界とDirichlet境界のどちらにも含まれない境界は断熱とする。以降、加熱のある境界を加熱境界と呼ぶ。

表-1 設定する物性値

	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
材料 1	10	1000	10
材料 2	1	100	10

キーワード トポロジー最適化, 熱伝導解析

連絡先 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: takaara.keisuke@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

本計算例では、一定の熱を $t_T$ 秒だけ加えた場合に、構造内の最大温度が抑制される構造を求める。したがって、加熱のある境界上に温度評価点を設ける。 $t_T$ が 100 s, 1000 s, 400 s, 10000 s の場合に得られた結果を表-2 に示す。十分に長い加熱時間の場合、つまり $t_T=10000$  s の場合は、熱伝導率が相対的に大きい材料 1 が加熱境界と Dirichlet 境界を直接つなぐような構造が最適となった。このような構造は、入力された熱を下端の Dirichlet 境界まで早く伝え、より多くの熱を外部に放出することで温度上昇を抑制するものと解釈できる。一方、加熱時間が短い場合、つまり $t_T=100$  s の場合には、上端部中央の加熱境界に材料 1 が集まっているような構造が得られている。加熱時間が短い場合に最大温度を下げるには、比熱の大きい材料 1 が瞬間的に熱を蓄える方が効率的であることから、物理的に妥当であると考えられる。

この計算例では、それぞれ設定した時刻 $t_T$ における最大温度が最も低くなるような構造が得られるべきである。このことが達成されているかを確かめるために、得られた全ての構造に対して同様に 10000 s かけて加熱する解析を行い、最大温度の時間経過を調べた。その結果が表-3 である。同じ時刻で比べた時に、最小となっている値には赤い下線を引いた。表を見ると、 $t_T=100$  s と $t_T=10000$  s の構造は目的を達成しているが、 $t_T=1000$  s と $t_T=4000$  s の構造は達成できていないことが分かる。これは、温度上昇を防ぐメカニズムである熱吸収と放熱のうち、どちらのメカニズムが支配的になる方が良いのかが切り替わるところで生じる、問題の非凸性により、工学的に有効ではない局所解に陥った結果である。

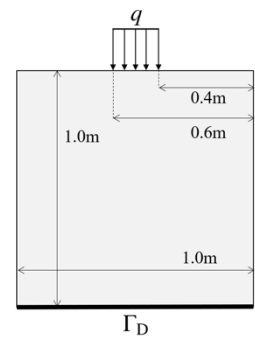


図-1 設計領域と境界条件

表-2 それぞれの加熱時間で得られた構造

$t_T$ (s)	100	1000	4000	10000
Topology results				

表-3 各時刻における最大温度 (K)

	$t_T=100$	$t_T=1000$	$t_T=4000$	$t_T=10000$
100 s	<u>174.50</u>	175.96	208.64	240.72
1000 s	610.51	603.38	608.05	<u>549.64</u>
4000 s	1227.93	1169.34	949.11	<u>586.25</u>
10000 s	1410.35	1313.87	983.65	<u>586.27</u>

## 5. 結論

非定常熱問題のトポロジー最適化における目的関数を新たに提案した。特定の時刻の温度を最小化することを意図したものである。本研究の計算例から、本研究における問題設定および解法では、条件によって工学的に有用な構造が得られないことが明らかになった。この原因は、トポロジー最適化問題の、勾配（感度）に基づく最適化アルゴリズムでは扱いにくい非凸性が生じたためであると推測できる。

## 参考

- [1] Wu,S., Zhang,Y. Liu,S.: Topology optimization for minimizing the maximum temperature of transient heat conduction structure, Structural and Multidisciplinary Optimization, vol.60, pp.69-82, 2019