

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	定常熱伝導式による長時間加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化簡易予測
Title(English)	Simplified Prediction of changes in dynamic characteristics of viscoelastic damper under long-duration vibration by steady state heat transfer
著者(和文)	奥田翔平, 佐藤大樹, OSABEL Dave
Authors(English)	Shohei Okuda, Daiki Sato, Dave M Osabel
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 257-260
Citation(English)	, , , pp. 257-260
発行日 / Pub. date	2020, 3

定常熱伝導式による長時間加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化簡易予測

構造—振動

准会員 ○ 奥田翔平 *1

正会員 佐藤大樹 *2

// Osabel Dave *3

制振構造 熱伝達 簡易手法
粘弾性ダンパー 定常状態 温度・振動数依存性

1 はじめに

粘弾性ダンパーは地震のような大振幅で高振動数の外乱だけでなく、風のように小さな振幅で低振動数の外乱まで効果的に振動エネルギーを吸収することから、高層建築の地震や風に対する制振には有効だと考えられ、粘弾性ダンパーの研究が進められている。既往研究^{1),2)}にあるように、材料特性が温度・振動数依存性を持つ粘弾性ダンパーにおいて、その剛性や粘性といった動的特性変化を考慮した性能評価のための解析手法・評価手法が提案されている。特に文献2)ではダンパーに長時外乱加振時、特性が定常状態になることが実験と解析両方で確認された。しかしこのような手法は精度よくダンパーの特性変化を予測・評価することが可能であるが、解析をすること自体に高度な知識を必要とし、また実施できる環境・ソフトウェアを有することが必要となる。このような粘弾性ダンパーの評価手法をより簡便・簡易的なものにするには、粘弾性ダンパーを有する制振構造を普及させるのに有用なことと考えられる。そこで本研究の目的は、粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を考慮した動的特性変化の簡易的な予測手法を提案することである。本報では長時外乱加振時、ダンパー特性が定常状態になることに注目し、モデル化し簡易化した粘弾性ダンパーについての定常状態の理論式を用いることにより、その時のダンパー特性の予測法を提案する。

2 実験概要

本論文では文献2)の粘弾性ダンパーへの正弦波加振実験と比較する。これは高さ200m、幅・奥行が等しく50mの超高層建物の風応答を対象とした実験である。詳細は文献2)を参照されたい。

実験で使用したダンパーに入力する正弦波の振幅 A_r 及び振動数 f_r を Table 1 に示す。また Fig.1 に定常振動時のダンパー履歴を示す。ここで K'_d は貯蔵剛性、 C_d は粘性係数、 η_d は損失係数、 E はエネルギー吸収量、 $u_{d,max}$ は最大変位である。実験で使用した粘弾性ダンパーを Fig.2 に示す。実験では Fig.2 に示した計7点での各時間の温度、及びダンパー変位と荷重を計測した。ただし周辺温度は加振終了まで常に24℃となるよう調整を行った。

Fig.3 に実験により得られた各点における温度時刻歴の結果を示す。そして Fig.4 に貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化を示す。Fig.3 より粘弾性ダンパーが長時間加振されると定常温度になる事が確認され、また Fig.4 を見ると、それに伴い貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d もある一定値を取ることが確認できる。

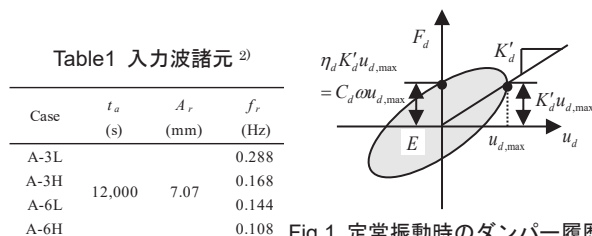


Table 1 入力波諸元²⁾

Case	t_a (s)	A_r (mm)	f_r (Hz)
A-3L			0.288
A-3H	12,000	7.07	0.168
A-6L			0.144
A-6H			0.108

Fig.1 定常振動時のダンパー履歴

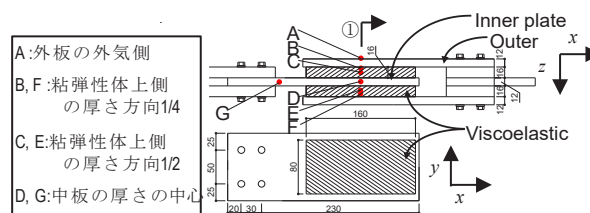


Fig.2 粘弾性ダンパー詳細²⁾

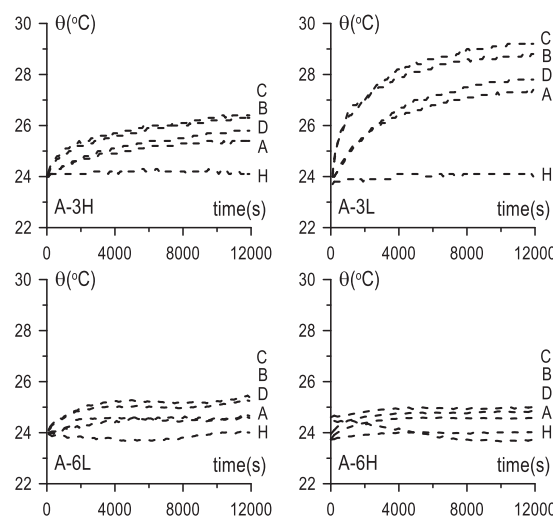


Fig.3 ダンパーの温度時刻歴

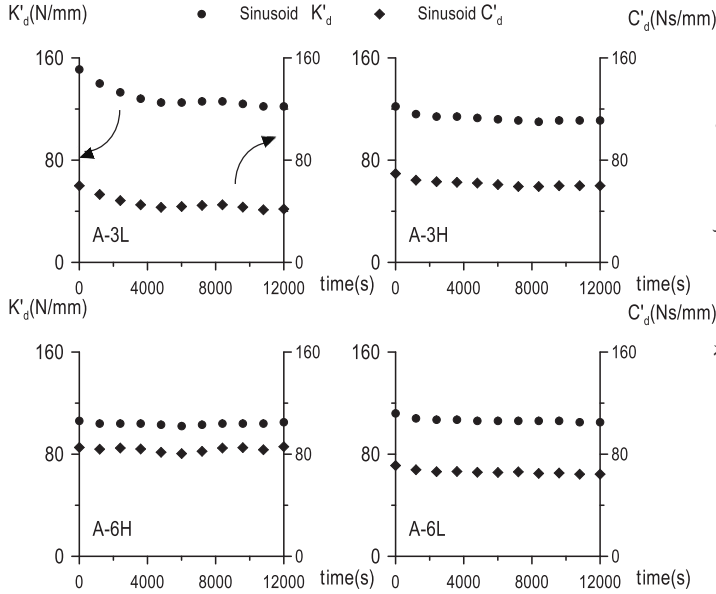


Fig.4 ダンパーの貯蔵剛性と粘性係数の時間変化

3 内部発熱・熱伝達を考慮した一次元体の定常状態

前章より長時間振動時における粘弾性ダンパーの温度や動的特性は一定値となることが示されている。つまり粘弾性ダンパーの定常状態を予測することで、ダンパーの性能評価を適切に評価できると考えられる。そこでまず粘弾性ダンパーを簡易的にモデル化した上で、定常状態の内部温度分布を導出する。そしてこの式を用い、後述する予測手法により粘弾性ダンパーの定常時の特性を予測する。本章では定常状態の理論式について述べる。

まず粘弾性ダンパーをモデル化する上で、鉄板は熱伝導率が粘弾性体と比べ、極めて大きい(約 230 倍)ため無視し、粘弾性体を厚み方向の一次元体として考える。そして一次元体は、振動エネルギー入力により発熱しながら、両端から熱伝達により熱放出を行い定常状態になるとする。Fig.5 にモデル化の図を示す。定常状態となった時のそれぞれの面の温度を θ_1 , θ_2 とする。空気温度 θ_a , 熱伝導率 κ , 熱伝達率 α_1 , α_2 , 内部発熱量 w , 比熱 c , 密度 ρ , モデルの長さを d_v とする。このとき、以下の 3 式が成り立つ。

$$0 = \frac{\kappa}{c_p \rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{w}{c_p \rho} \quad (1)$$

$$\frac{\alpha_1}{\kappa} (\theta_1 - \theta_a) - \left(\frac{\partial \theta(0)}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\alpha_2}{\kappa} (\theta_2 - \theta_a) + \left(\frac{\partial \theta(l)}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

このとき一次元体の内部温度分布は

$$\theta(z) = -\frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} z^2 + \frac{\alpha_1}{\kappa} Az + A + \theta_a \quad (4)$$

と表される。ここで

$$A = \frac{(\alpha_2 l + 2\kappa) w l}{2\kappa(\alpha_1 \alpha_2 l + \alpha_1 \kappa + \alpha_2 \kappa)} \quad (5)$$

である。さらにこの式を整理すると

$$\theta(z) = -\frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} \left(z - \frac{\alpha_1}{w} A \right)^2 + \frac{\alpha_1^2}{2w\kappa} A^2 + A + \theta_a \quad (6)$$

となるので、

$$z = \frac{\alpha_1}{w} A \quad (7)$$

で最大温度

$$\theta_{\max} = \frac{\alpha_1^2}{2w\kappa} A^2 + A + \theta_a \quad (8)$$

をとる。なお導出については付録 A に記載する。

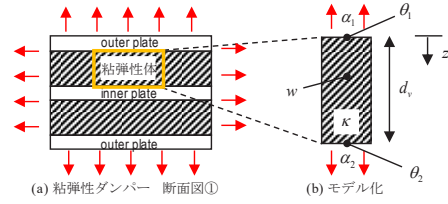


Fig.5 一次元体モデル化の概要

4 粘弾性ダンパーの定常時特性の予測

定常状態の算定において、必要になってくる単位時間当たり単位体積あたりの発熱量 w は、Fig.1 に示すような定常振動時における粘弾性ダンパーの 1 サイクルあたりのエネルギー吸収量 E を元を求める。振動の周期を T とすると w は次式より求められる。

$$w = \frac{E}{VT} \quad (9)$$

ここで粘弾性ダンパーの 1 サイクルあたりのエネルギー吸収量 E は以下の式³⁾で求められる。

$$E = \pi \eta_d K'_d u_{d,\max}^2 \quad (10)$$

ここで η_d は損失係数、 K'_d は貯蔵剛性、 $u_{d,\max}$ は最大変形である。 η_d と K'_d の特性は振動数 ω , 温度 θ に依存し、笠井ら³⁾によって以下の評価式が提案されている。

$$K'_d = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_s}{d_v} \quad (11)$$

$$\eta_d = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (12)$$

ここでは分数微分の次数 α , そして G , a , b は構成則のパラメーターであり、とくに a , b はサイクル温度に依存し次式で求まる。

$$a = a_{\text{ref}} \lambda^\alpha \quad (13)$$

$$b = b_{\text{ref}} \lambda^\alpha \quad (14)$$

a_{ref} , b_{ref} は基準温度 (20°C) における a , b の値であり、また λ は温度を考慮するシフトファクターで以下の式から求める。

$$\lambda = \exp \left[-p_1 (\theta - \theta_{\text{ref}}) / p_2 (\theta - \theta_{\text{ref}}) \right] \quad (15)$$

θ_{ref} は基準温度、 θ はダンパー温度を表す。

そして以下に予測手法を詳しく述べる。初めに周辺温度 θ_a でダンパーの各特性値を式(11), 式(12)算出し, そこから発熱量 w を求め (式(9)), (4)式より任意の位置 z におけるダンパー温度 $\theta(z)$ を算出する。そして最大温度 θ_{max} を用いて, 再度ダンパーの特性値を計算しなおし, 発熱量 w , ダンパー温度 θ_{max} を求めなおす。以上の操作を繰り返すことによって, ダンパー温度 $\theta(z)$ がある一定値に収束することが確認できる。この値をダンパーの定常温度とし, そのときの損失係数 η_d , 貯蔵剛性 K'_d を, ダンパーの定常損失係数, 定常貯蔵剛性とする。そしてこの手法を以後, 定常時予測法 (Steady State Prediction Method, SSP 手法) と呼ぶこととする。Fig.6 にフローを示す。 j は収束回数を表す。なお後述の実験値と予測値の比較を行う際, 損失係数 η_d については, 以下の式(16)の関係式より粘性係数 C_d に値を変換して比較を行っている。ここで ω は固有円振動数である。

$$C_d = \frac{\eta_d K'_d}{\omega} \quad (16)$$

5 予測値と実験値の比較

定常時予測法を用いて, Table 1 で示した波が入力されたダンパーの定常特性値を求める。ただし両側の熱伝達係数 α_c については文献 2) に記されている値を用いる。Table 2 に各振動波に対する熱伝達係数 α_c をまとめたものを示す。また各パラメーターは, 前述の実験で使用した粘弾性ダンパーの材料特性値を使用し, $\alpha = 0.558$, $G = 0.0392 \text{ N/mm}^2$, $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-3}$, $b_{ref} = 2.10$, $p_1 = 14.06$, $p_2 = 97.32$, $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$, $\kappa = 0.188 \text{ N/s}^\circ\text{C}$, である。

Fig.7 に定常時予測法で得られた温度分布を加振終了時のダンパーの各点温度の実験値を重ねて示す。なおこの比較において収束回数は式(17)の範囲に収まるまでの回数とした。ただし A-3L のケースで 6 回収束回数が必要だったため, ここではすべてのケースで 6 回まで行なった。

$$0.99 \leq \theta(x)^{(j)} / \theta(x)^{(j+1)} \leq 1.01 \quad (17)$$

Fig.8 に実験で得られた C 点 ($x = 8 \text{ mm}$) の温度時刻歴

Steady State Prediction

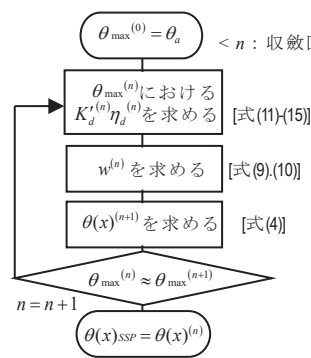


Fig.6 予測手法のフロー

Table3 熱伝達係数のまとめ

Case	$\alpha_{c,out}$ (N/s/mm ² °C)	$\alpha_{c,in}$ (N/s/mm ² °C)
A-3L	0.021	0.018
A-3H	0.027	0.024
A-6L	0.050	0.047
A-6H	0.040	0.037

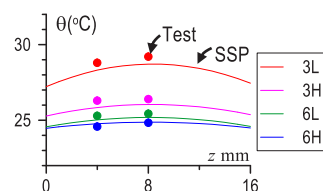


Fig.7 定常時の内部温度分布

に, 定常時予測法で得られる温度の収束回数による予測値の変化を示した図を重ねて示す。収束回数 1 回目における粘弾性体の剛性は初期温度によって決定されるため, 発熱量が高く評価されていることが分かる。収束回数 2 回目では温度が高く評価されたことによって粘弾性体を柔らかく評価しているため, 発熱量が小さくなるが, この操作を繰り返すことで, 5 回目以降において温度は一定値に収束する。実験値と予測値を比較すると 2 つの値が精度良く対応していることがわかる。

次に Fig.9, Fig.10 に実験で得られた貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化に, 予測法で得られる貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の収束回数による予測値の変化を示した図を重ねて示す。実験値と予測値を比較すると, 正弦波による実験で得られた値と予測値が精度よく一致していることが確認できる。

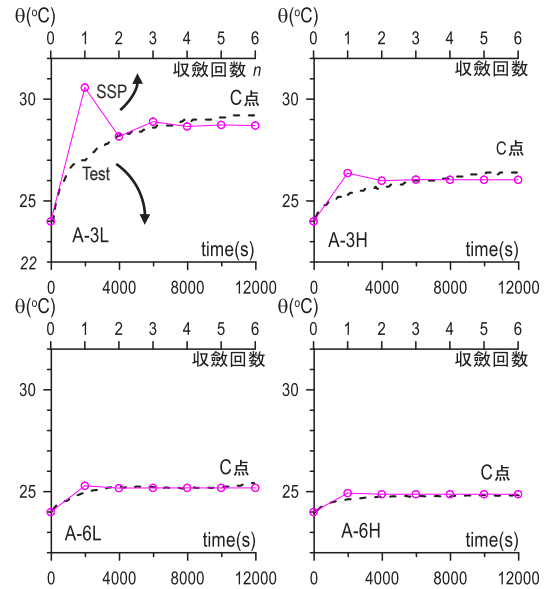


Fig.8 温度時刻歴と収束回数

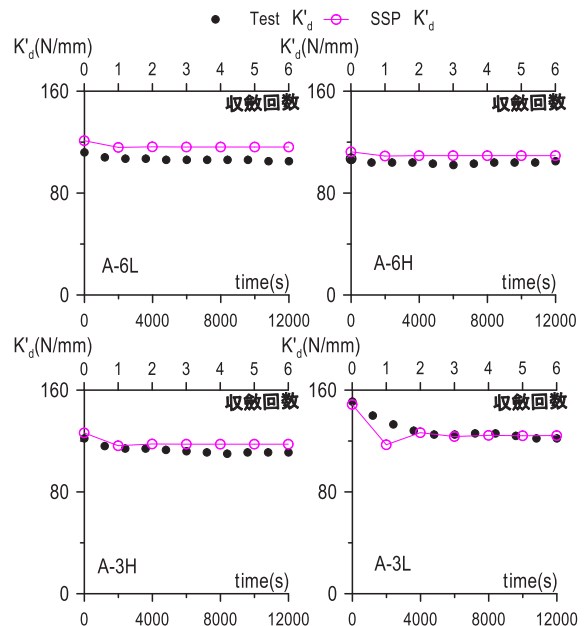


Fig.9 剛性時刻歴と収束回数

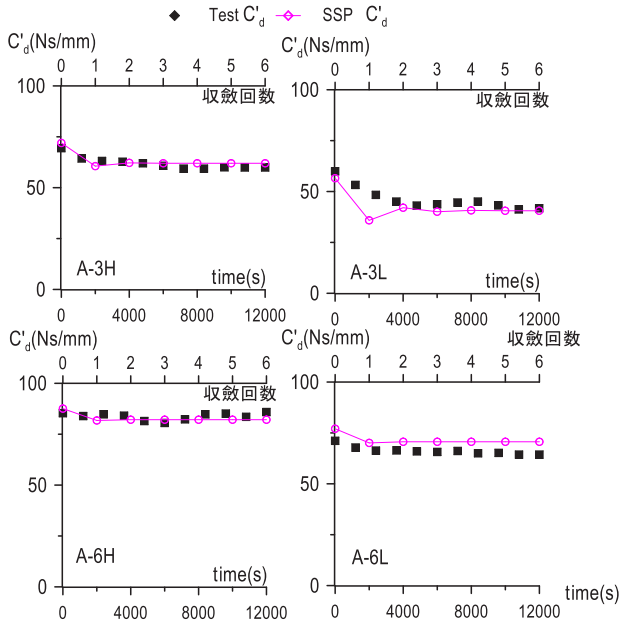


Fig.10 粘性時刻歴と収斂回数

6 終わりに

粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を考慮した動的特性変化の簡易的な予測手法として、ダンパーに長時外乱時におけるダンパーの特性の予測法を提案した。そしてその手法と実験との比較を行い、妥当性の確認を行った。以下に得られた知見を述べる。

- 1 熱伝導方程式に基づき熱伝達・内部発熱がある一次元体の定常状態における粘弾性体の内部温度分布式を導出した。
- 2 粘弾性ダンパーに長時間外乱が加わり定常状態になったときの粘弾性ダンパーの特性の予測法，定常時予測法を提案した。
- 3 正弦波加振実験の結果と比較し，予測値と実験値が精度よく一致していることが確認できた。

参考文献

- 1) 笠井和彦 他：継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法，日本建築学会構造系論文集，第599号，pp.61-69，2006.1
- 2) 佐藤大樹 他：風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性及び正弦波による簡易評価手法，日本建築学会構造論文集，第80巻，第710号，p.571-581，2015年4月
- 3) 日本免震構造協会：パンプ制振構造設計・施工マニュアル，明文社 2003.10.1

付録 A 内部温度分布式の導出と精度

以下に式(1)-(3)より式(4)，(5)を導出する過程を示す。式(1)を2回積分して θ について整理すると

$$\theta(x) = -\frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} x^2 + \frac{C_1}{\kappa} x + \frac{C_2}{\kappa} \quad (\text{A-1})$$

と表せる。ここで C_1 ， C_2 は積分定数である。一方，定常状態において， $x=0$ ， $x=l$ での温度は θ_1 ， θ_2 であるので次式が成立する。

$$\theta(0) = \theta_1 \quad (\text{A-2})$$

$$\theta(l) = \theta_2 \quad (\text{A-3})$$

よって C_1 ， C_2 は次式で求められる

$$C_1 = \frac{\kappa}{l} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} w l \quad (\text{A-4})$$

$$C_2 = \kappa \theta_1 \quad (\text{A-5})$$

よって式(A-4)，(A-5)を式(A-1)に代入することで次式が得られる。

$$\theta(x) = -\frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} x^2 + \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{l} + \frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} l \right) x + \theta_1 \quad (\text{A-6})$$

が成立する。これらの式を x について偏微分すると

$$\frac{\partial \theta(0)}{\partial x} = \frac{1}{l} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{\partial \theta(l)}{\partial x} = \frac{1}{l} (\theta_2 - \theta_1) - \frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} \quad (\text{A-8})$$

となる。これらを式(2)，式(3)に代入して整理すると

$$\frac{\alpha_1}{\kappa} (\theta_1 - \theta_a) = \frac{1}{l} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} \quad (\text{A-9})$$

$$\frac{\alpha_2}{\kappa} (\theta_2 - \theta_a) = -\frac{1}{l} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} \frac{w}{\kappa} \quad (\text{A-10})$$

が成り立つ。式(A-9)，式(A-10)を解くと以下が求まる。

$$\theta_1 = \frac{(\alpha_2 l + 2\kappa) w l}{2\kappa(\alpha_1 \alpha_2 l + \alpha_1 \kappa + \alpha_2 \kappa)} + \theta_a \quad (\text{A-11})$$

ここでAを式(5)のように置くと

$$\theta_1 = A + \theta_a \quad (\text{A-12})$$

となる。最終的に式(A-12)を式(A-6)に代入し整理することで式(4)が得られる。

式(4)より，Excelを用いて実際に数値を算出する。ここで熱伝導率 $\lambda=0.45$ [W/m/K]， $l=3$ [mm]， $\theta_0=25$ [°C]， $\theta_a=10$ [°C]，熱伝達率 $\alpha_1=200$ [W/m²/K]， $\alpha_2=1000$ [W/m²/K]，内部発熱量 $w=5000$ [kw/m³]とする。そして三次元熱伝導解析ソフトABAQUS^{ver2017}による熱伝導解析の結果と比較する。モデルの詳細をFig.11に示す。このモデルで定圧比熱 $c_p=430$ [w · s / kg / K]，密度 $\rho=7800$ [kg/m³]とする。創出した定常熱伝導式のグラフに解析値をプロットしたグラフをFig.12に示す。グラフを見ると2つが良く一致していることが確認できる。

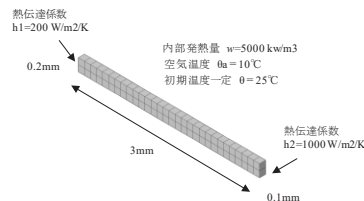


Fig.11 解析モデル詳細

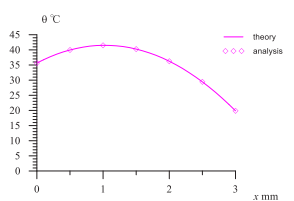


Fig.12 定常熱伝導式の精度

*1 学生会員 東京工業大学 学部生

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士

*3 学生会員 東京工業大学 大学院生