

熱加工プロセスにおける誤差の 材料のおよび環境的因子の推定に 関する基礎的検討

大阪府立大学 生島研究室 B4 石本桃雅

背景:環境・材料的影響によるバラツキ

2

鋼構造物製造時の熱加工 ➡ 溶接・線状加熱の現場に**バラツキ**がある

バラツキ:材料定数や境界条件などが毎回の施工状態によって異なること

環境的影響



材料的影響



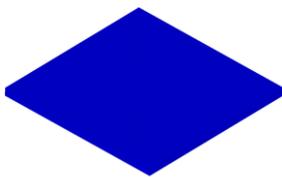
可視化の必要性

- ・バラツキによるき裂や破損の**防止・対策**
- ・**高品質化**につながる

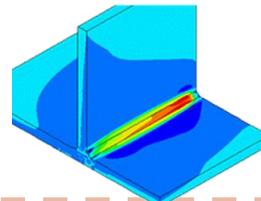
バラツキのある熱加工プロセスでの力学的状態の**可視化**が**重要**

力学的状態

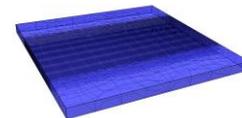
温度



残留応力

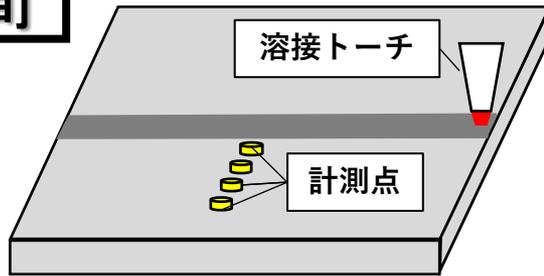


変形



温度場・変形場の把握が必要不可欠

実空間



計測データ

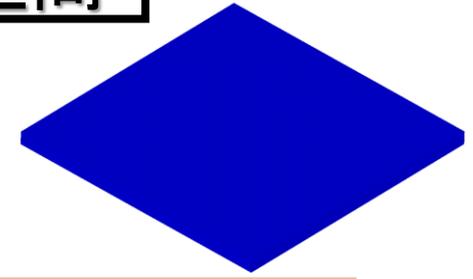
温度履歴

変位分布

基本的に表面で計測

→計測点以外の現象の把握は困難

デジタル空間



解析結果

温度

残留応力

変形

実測結果を解析上で再現

- ・内部を含めた現象の可視化
- ・事前に最適な施工条件を導出

内部の現象を可視化することによって
破損やき裂などの欠陥部分を早期に特定し、高品質化ができる

研究目的

溶接・線状加熱の現場において材料的・環境的影響が温度場・変形場に影響する

未知パラメータを推定することで
誤差因子を可視化し、高品質化につなげる

研究目的

未知パラメータを推定することで
誤差因子を可視化し、**高品質化につなげる**

発表内容

1. デジタルツインシステムの概要

温度場デジタルツイン

2. 双子実験への適用による検証

- **環境的**・**材料的**影響を考慮した場合の推定

3. 温度場デジタルツインのTig溶接への適用

- **環境的**影響を考慮した場合の推定

変形場デジタルツイン

双子実験による妥当性評価
変形場デジタルツインの実問題への適用

デジタルツインシステムの概要

温度場のデジタルツインシステム

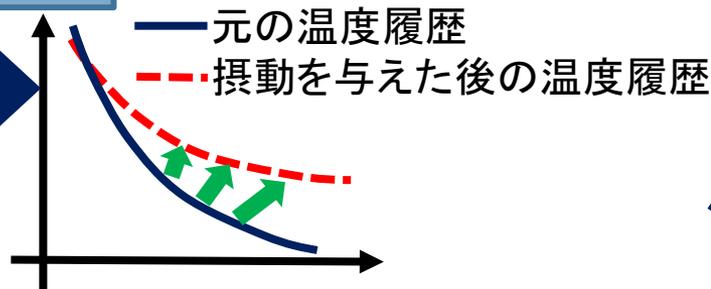
6

DTシステム: パラメータの摂動に対する感度から正解値と解析値の誤差を最小化するようなパラメータの値を求める逆解析的手法

変数

未知パラメータ

摂動



感度行列M

摂動を与えたことによる温度履歴の変化を格納

$$M = \frac{\delta T(x^{(s)})}{\delta x^{(s)}} = \frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} \frac{\delta T_1(x_1^{(s)})}{\delta x_1^{(s)}} & \dots & \frac{\delta T_1(x_m^{(s)})}{\delta x_m^{(s)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta T_n(x_1^{(s)})}{\delta x_1^{(s)}} & \dots & \frac{\delta T_n(x_m^{(s)})}{\delta x_m^{(s)}} \end{bmatrix}$$

残差行列R

正解値と解析で得られた温度履歴の差

未知のパラメータの更新式

$$X^{i+1} = X^i + \left[[MW_X]^T MW_X \right]^{-1} [MW_X]^T W_y R(X^i)$$

X_i : i回目の施行における未知パラメータ

W_X : Xについての重み行列

$R(X^i)$: i回目の施工における誤差ベクトル

W_Y : 計測温度についての重み行列

No

残差行列Rが十分に小さくなった?

Yes

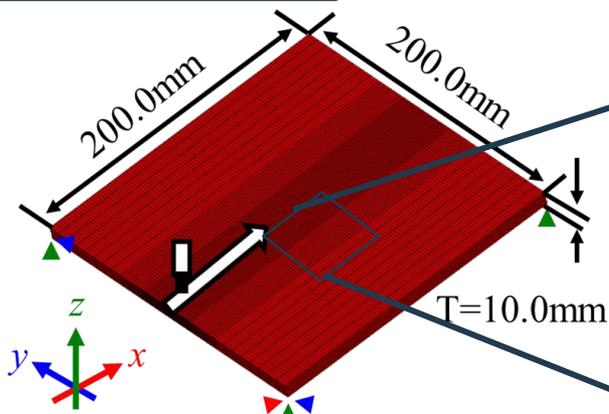
未知パラメータの推定

繰返し

双子実験への適用によるデジタルツイン システムの検証

目的: 双子実験への適用による温度場デジタルツインシステムの検証

解析モデル



材料: 鋼材 (SM490A)
トーチ送り速度: 5mm/sec
入熱量: 3200W

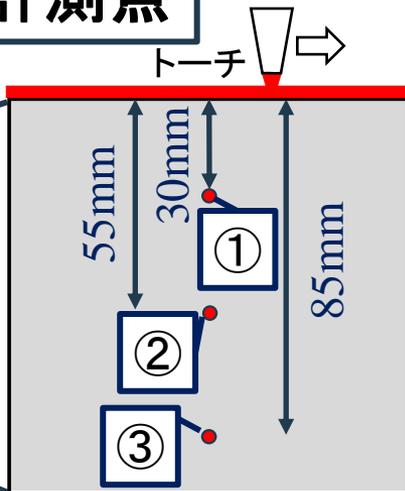
未知パラメータ

熱伝達率
熱伝導率
比熱

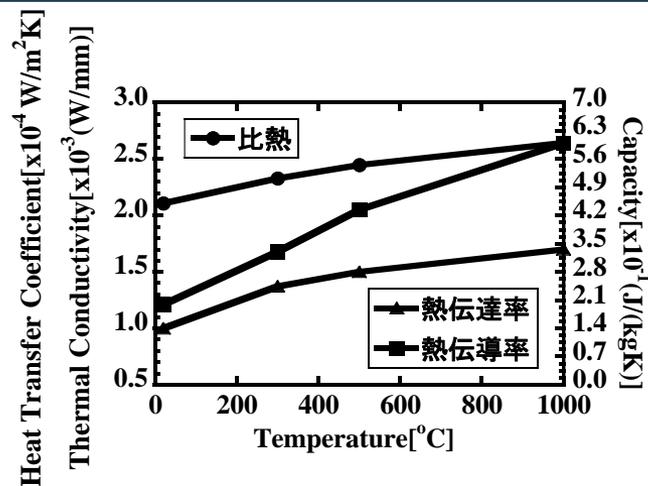
環境的影響

材料的影響

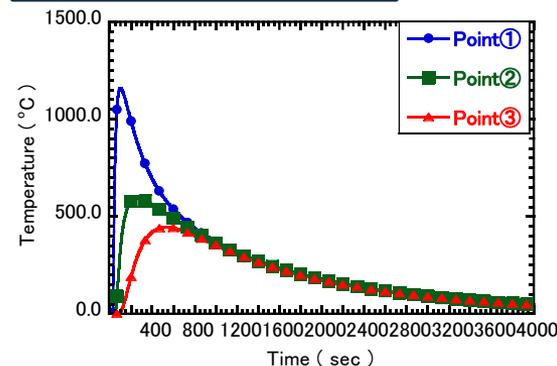
計測点



パラメータの温度依存性

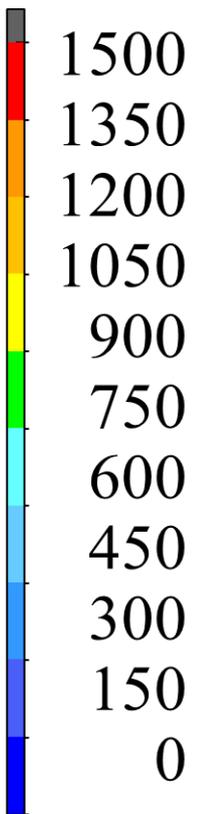


計測された温度履歴

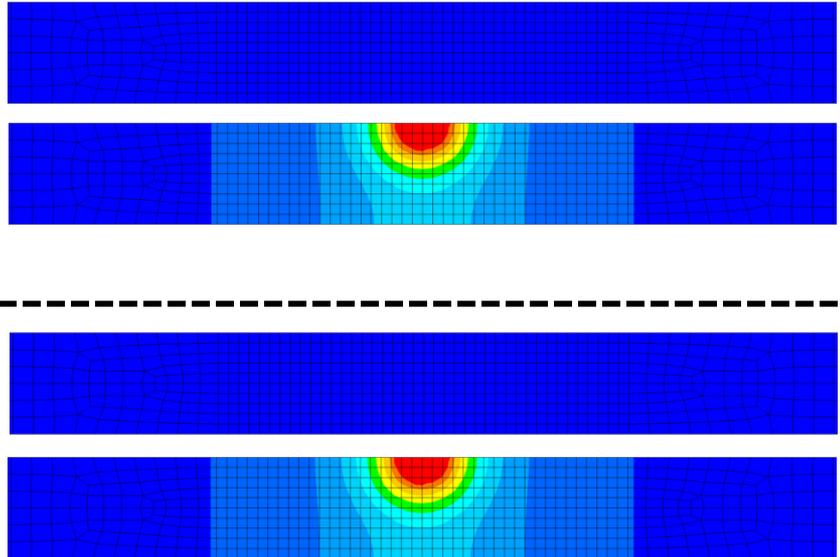
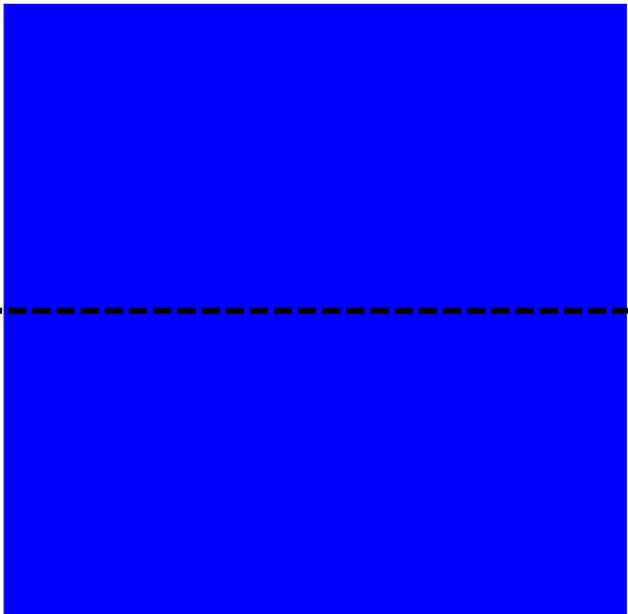


計測された温度履歴を推定することでパラメータの検証を行う

[°C]



正解値とする温度分布

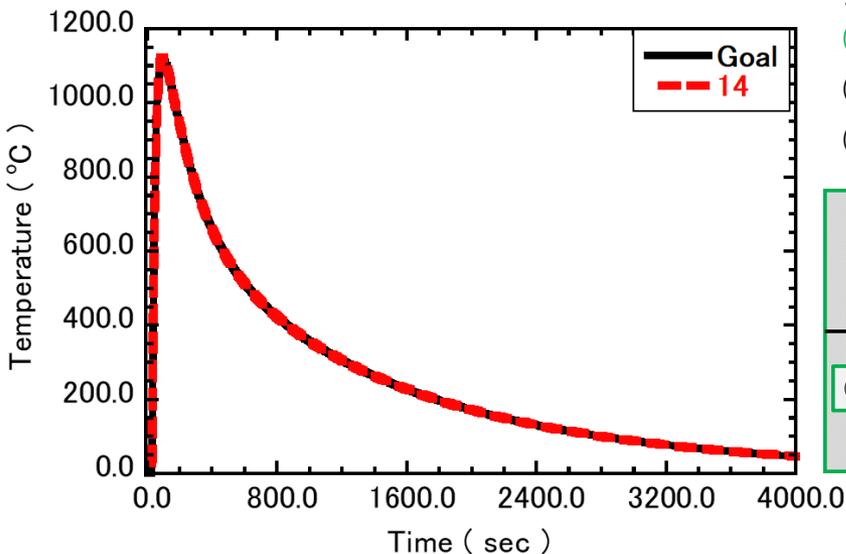


推定された温度分布

温度分布の一致が確認された

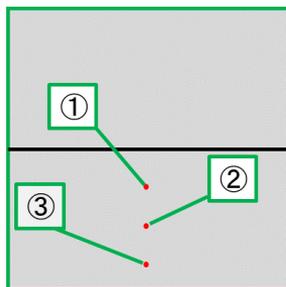
推定結果:温度依存性がある場合の誤差因子

計測点①の温度履歴の推移

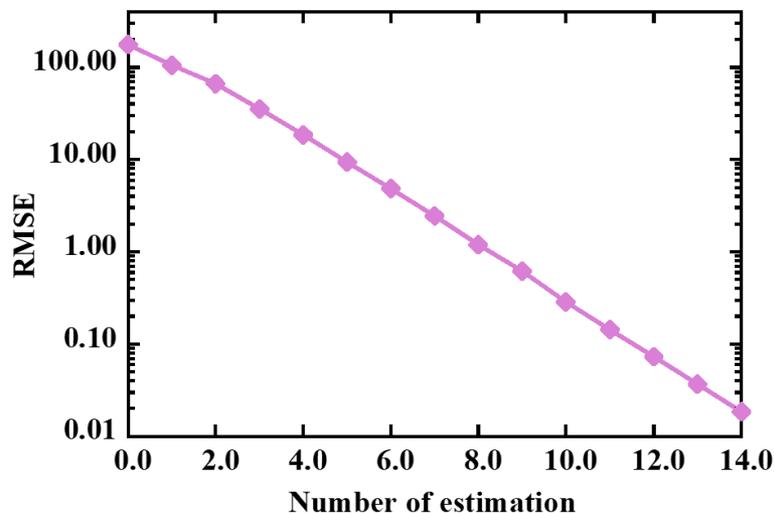


溶接部分から

- ①30mm
- ②55mm
- ③85mm

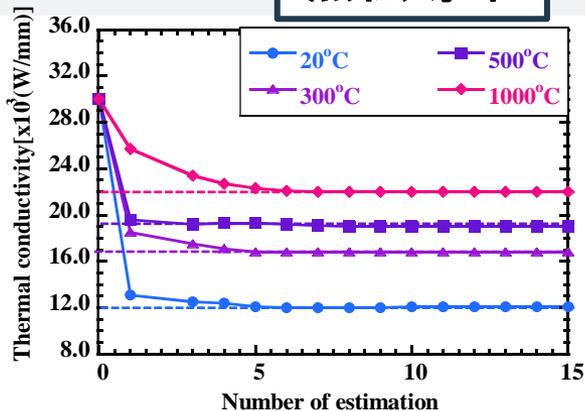


RMSEの推移

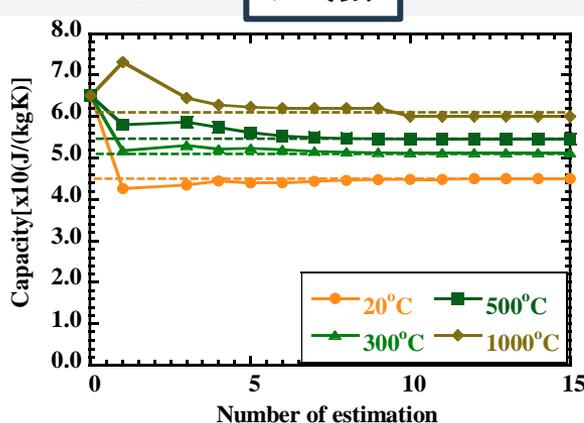


材料的影響

熱伝導率

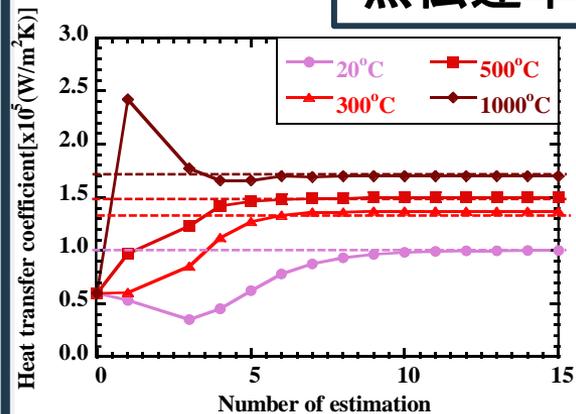


比熱



環境的影響

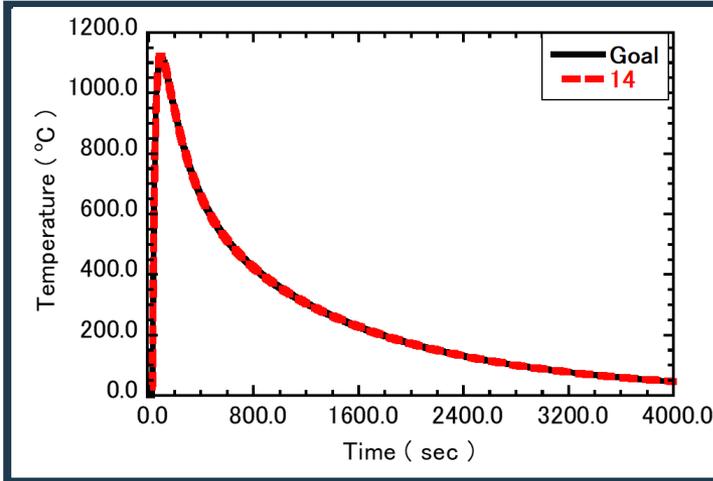
熱伝達率



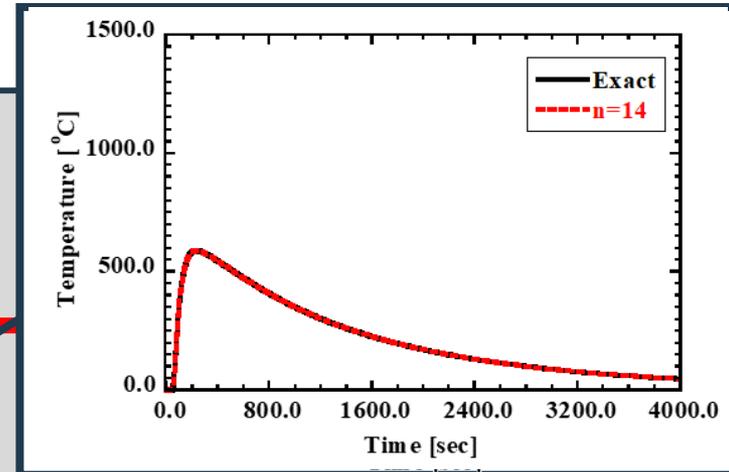
温度場の時間方向での一致が確認された

推定結果：各計測点での温度履歴

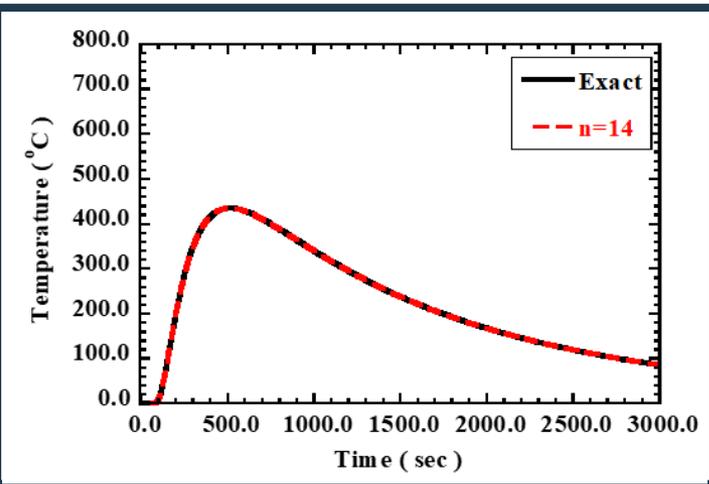
計測点①



計測点②

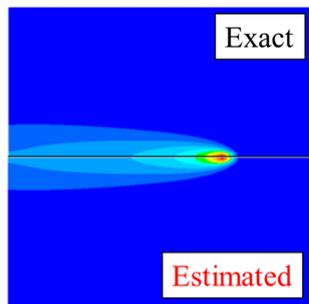
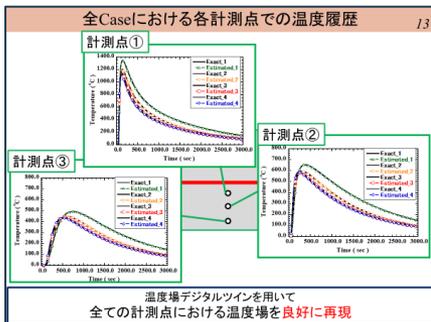


計測点③

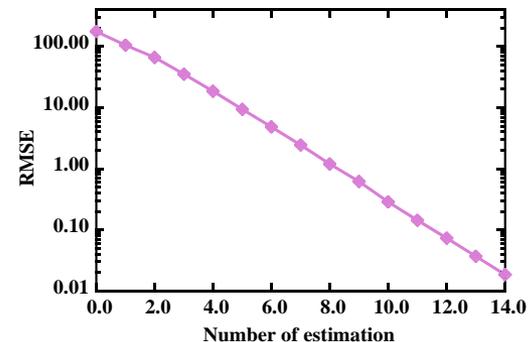


温度場デジタルツインを用いて
全ての計測点における温度場を**良好に再現**

温度場の一致

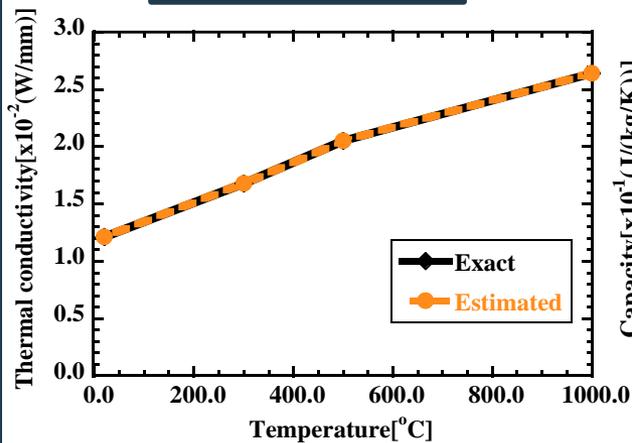


RMSEの推移

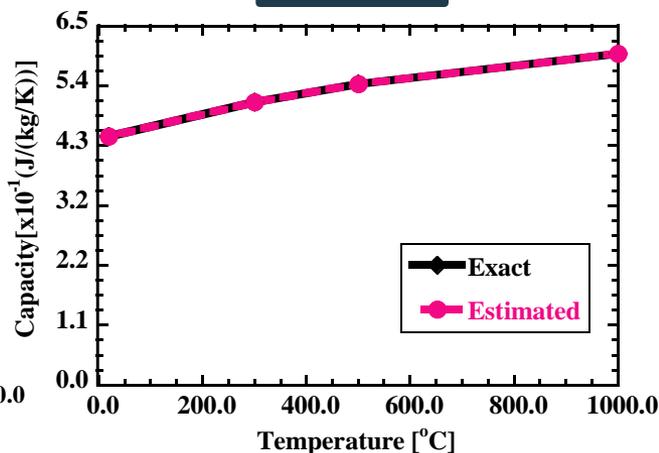


材料的影響

熱伝導率

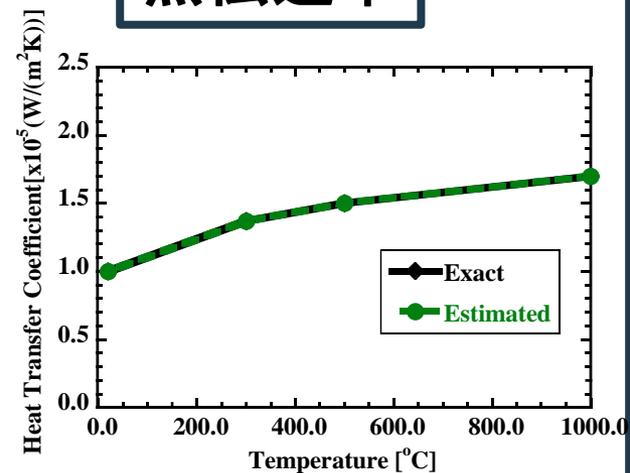


比熱



環境的影響

熱伝達率

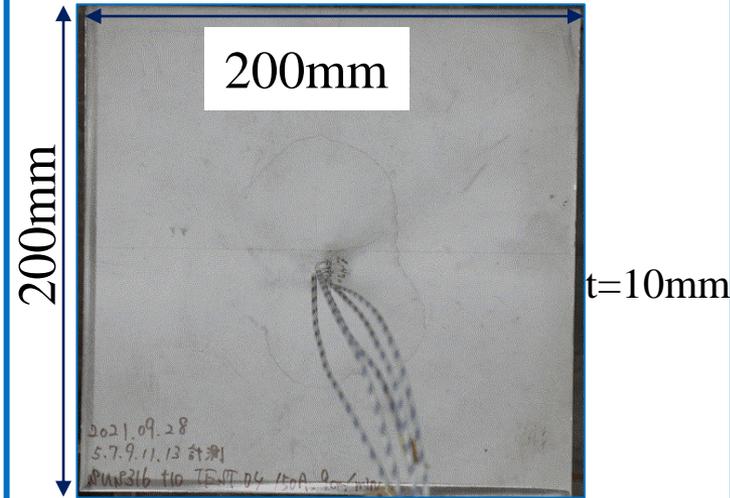


数値解析上では環境的・材料的影響を推定できることを確認

温度場デジタルツインの実問題への適用

目的: 実験で得られた温度履歴との一致・パラメータの推定

実験の様子



材料: SUS316L

トーチ送り速度: 1.5mm/sec

電流: 150A 電圧: 20V

未知パラメータ

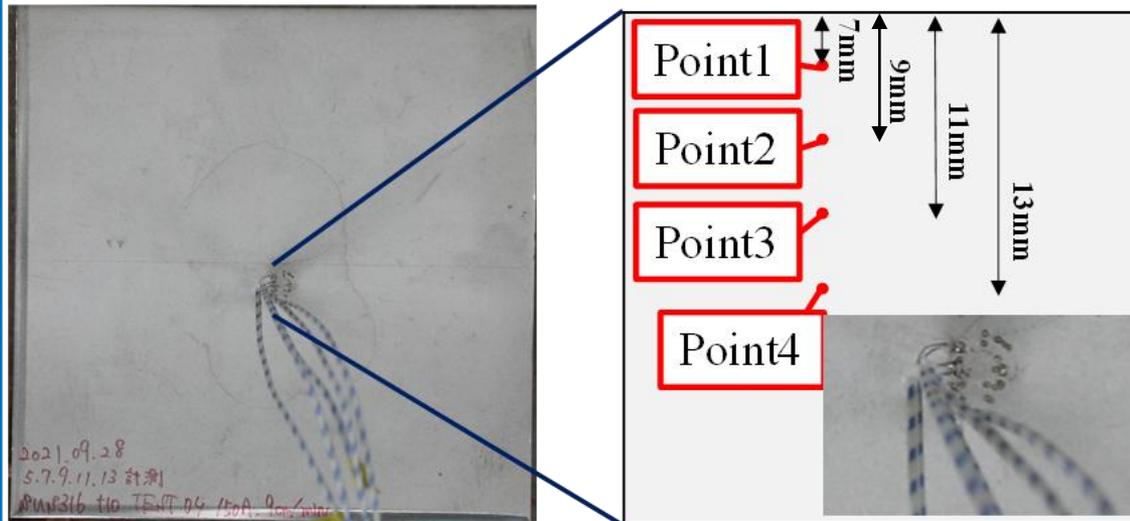
熱伝達率

熱効率

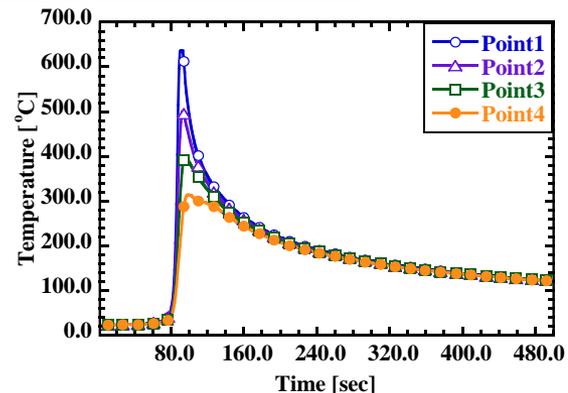
溶接開始位置

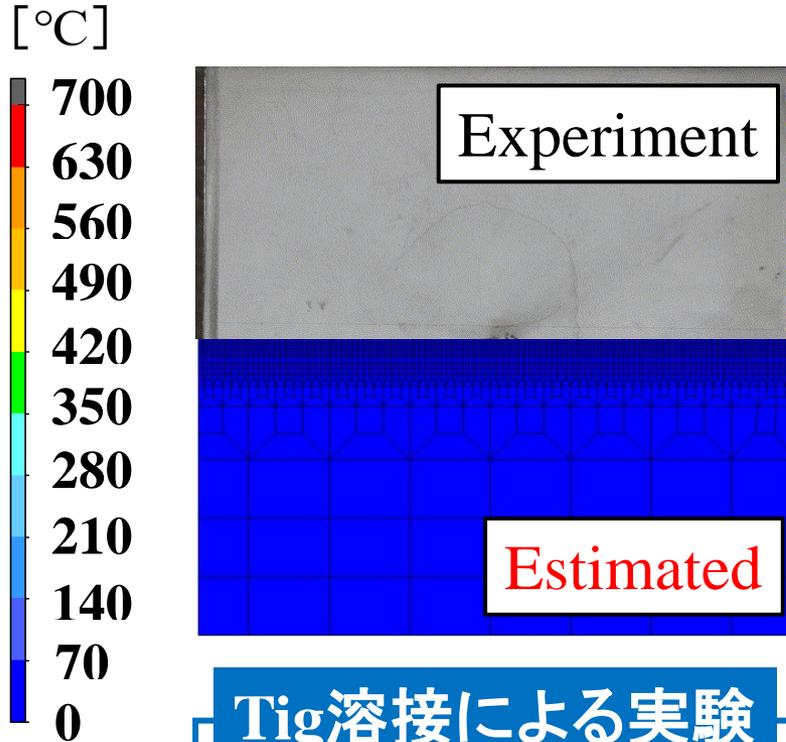
環境的影響

計測点

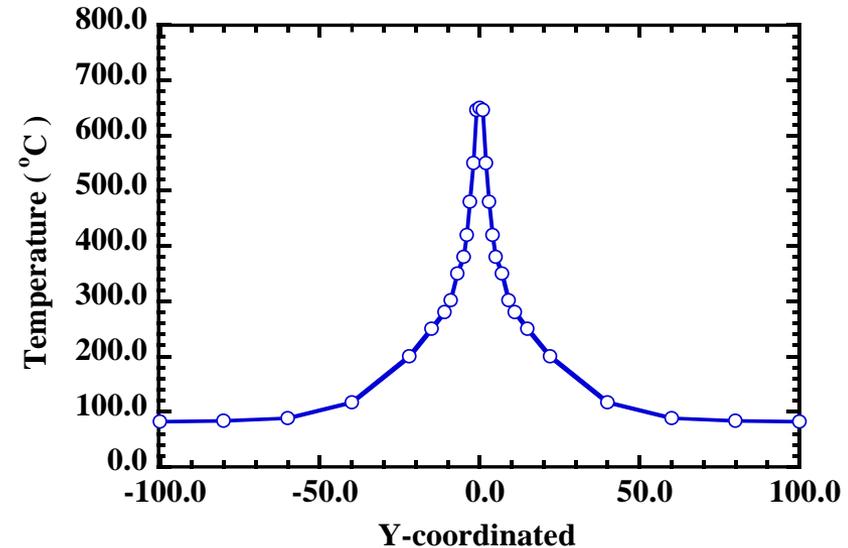


計測された温度履歴



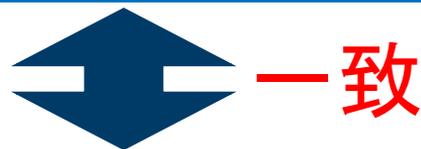


最高到達温度分布



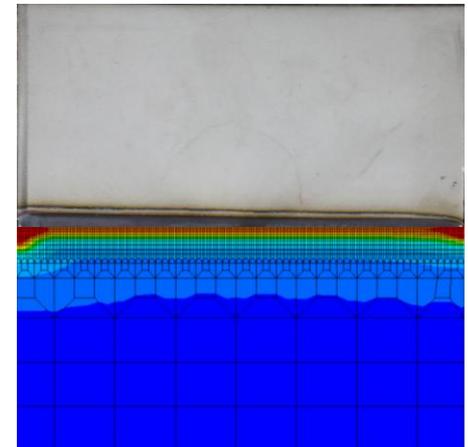
Tig溶接による実験

溶接部分の高温アークによる酸化領域



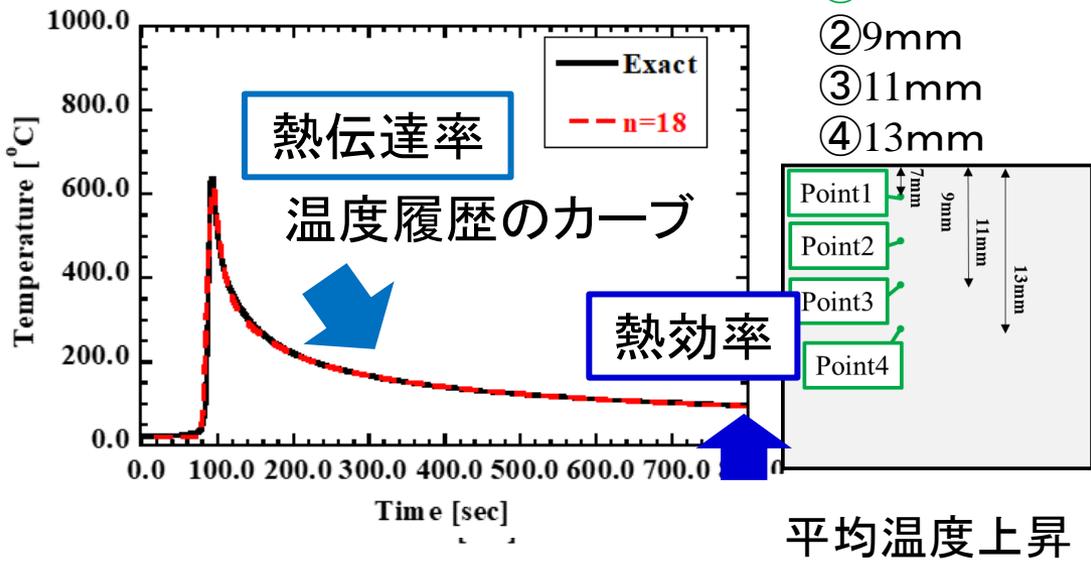
解析

最高到達温度分布の高温領域

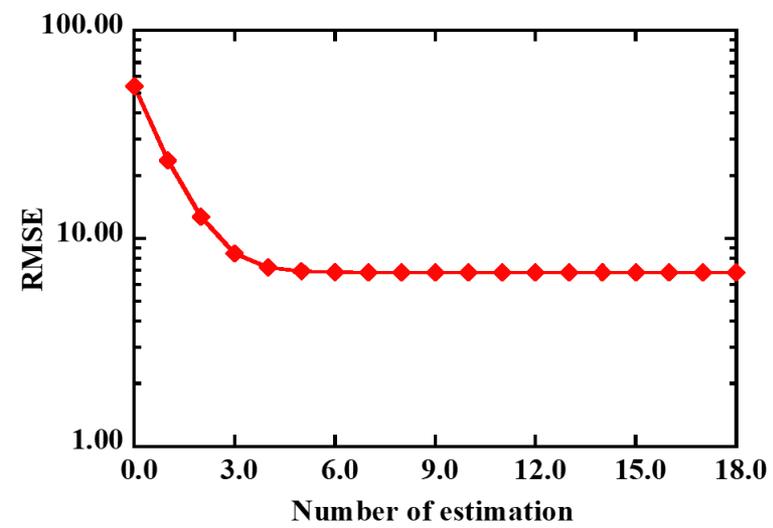


温度分布の一致が確認された

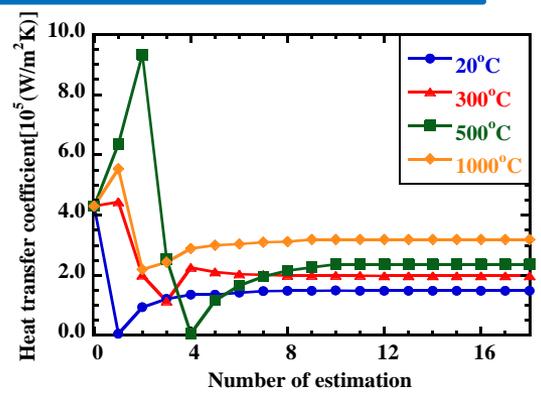
計測点①の温度履歴の推移



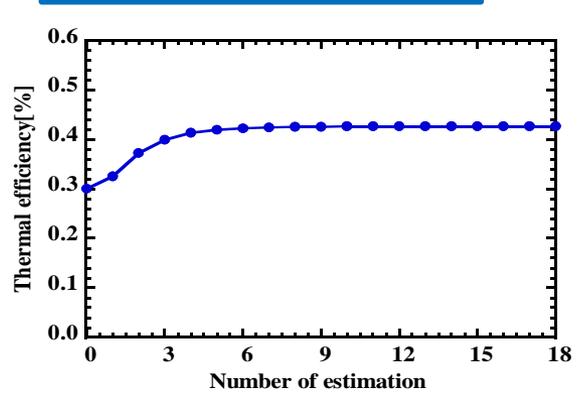
RMSEの推移



熱伝達率の推移



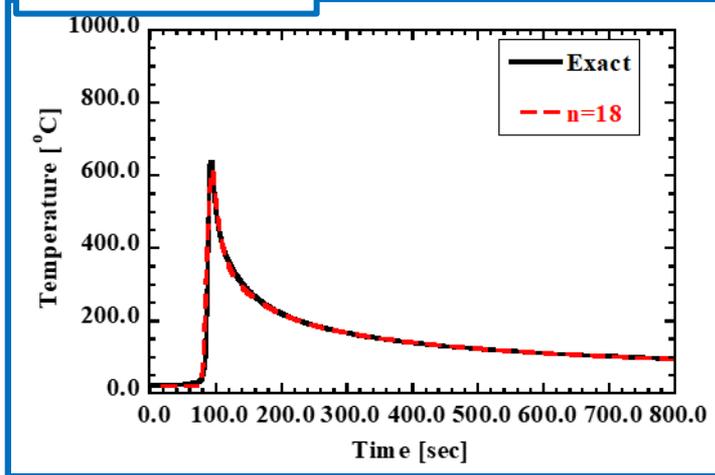
熱効率の推移



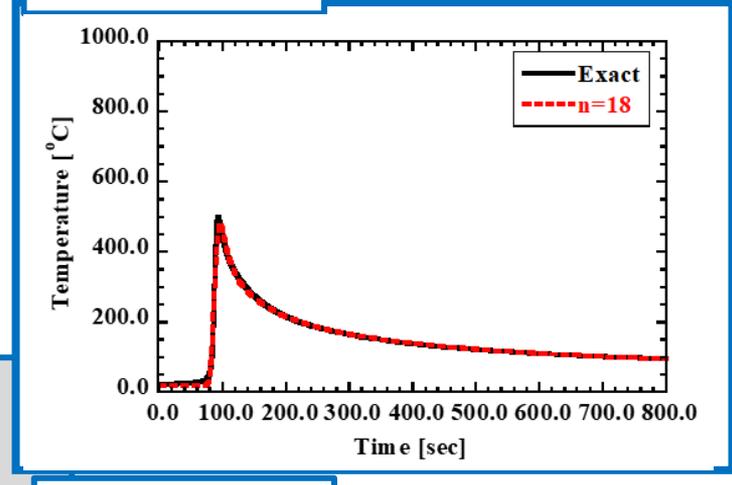
温度場の時間方向での一致が確認された

推定結果：各計測点での温度履歴

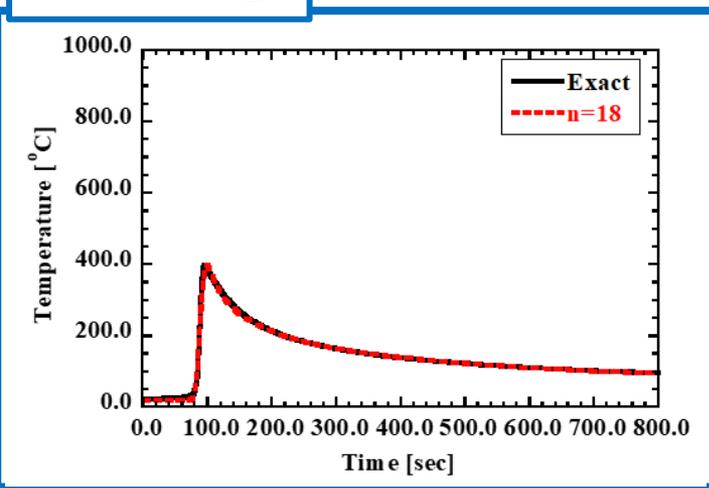
計測点①



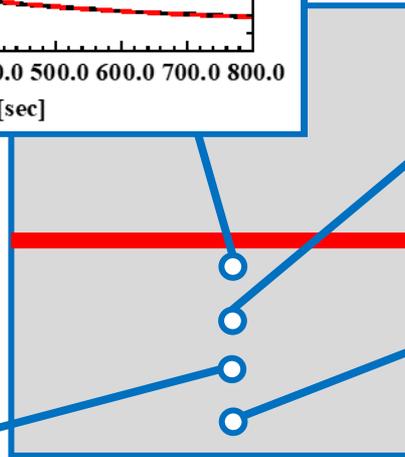
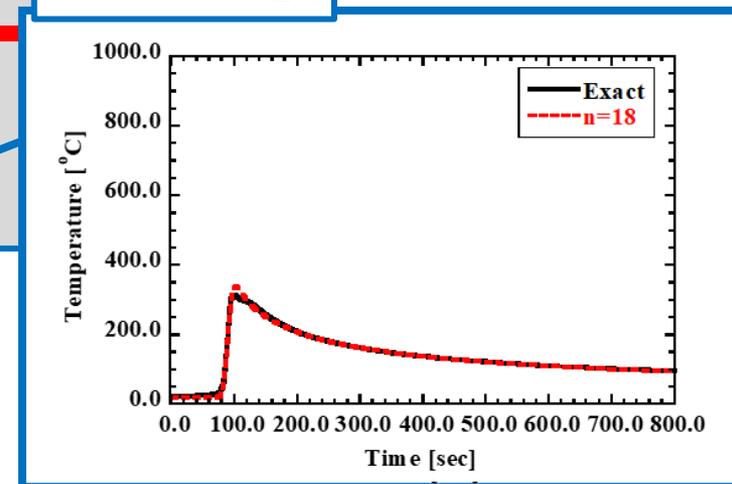
計測点②



計測点③

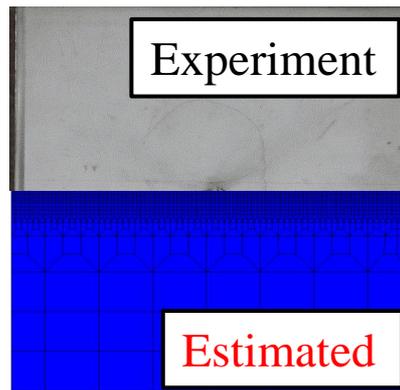
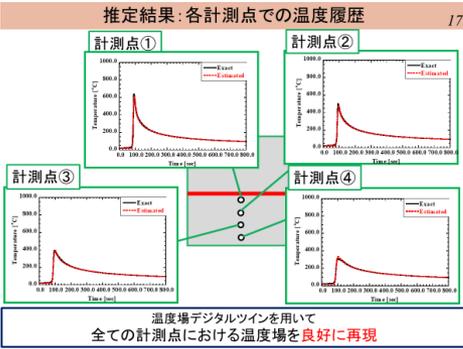


計測点④

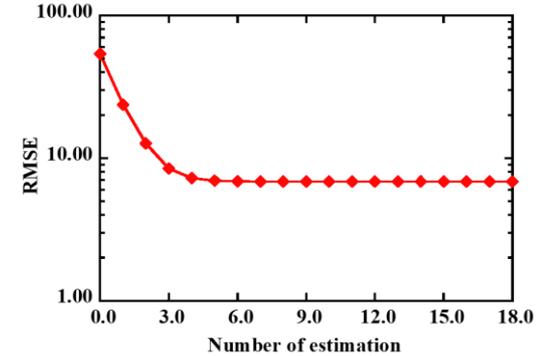


温度場デジタルツインを用いて
全ての計測点における温度場を**良好に再現**

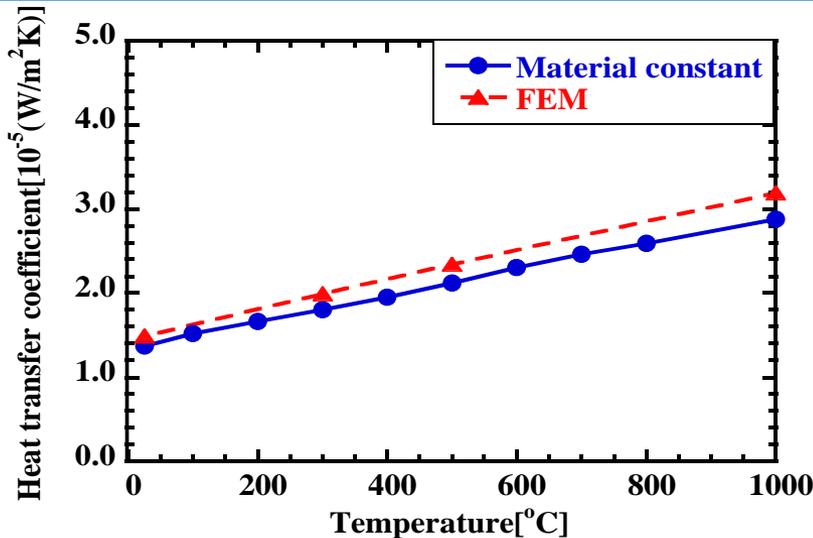
温度場の一致



RMSEの推移



推定結果と既知である熱伝達率



参考値との乖離率

20°C : 8.75%

300°C : 8.88%

500°C : 10.36%

1000°C : 10.76%

温度場の一致・RMSE・乖離率よりTig溶接による
実験の妥当性と実用性を示した

本研究では、FEM解析に感度行列による逆解析的手法を適用したデジタルツイン技術について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 温度場デジタルツインを用いて環境的影響を持つ熱伝達率 α 、材料的影響を持つ熱伝導率 λ や比熱 c を未知とし、双子実験に適用した。得られた温度履歴から未知パラメータを推定し、温度場を再現できることを双子実験上で確認した。
2. 熱伝達率 α 、熱伝導率 λ や比熱 c の温度依存性が定数、1次関数、2次関数に近い形と仮定した場合で熱伝導逆解析を行い、それぞれのCaseを比較することで妥当性を評価することができた。
3. 温度場デジタルツインを用いて溶接開始位置、環境的影響を持つ熱伝達率 α や熱効率を未知とした際にTig溶接による実験に適用した。得られた温度履歴から未知である熱伝達率 α を推定し、温度場を再現できることを確認した。
4. Tig溶接による実験の推定結果を誤差率やRMSEを比較することで妥当性と実用性を示した。