

# 裏ヤケ防止を目的とした特定の溶接条件下におけるダブリングプレートの最適設置条件に関する研究

日本船舶海洋工学会

「PSPC 適用船の施工のための裏ヤケ防止検討」研究委員会

九州大学

篠田 岳思

名村造船所

上中 邦央, 内野 一成

住友重機械ME

山口 雄嗣, 川下 聡一郎

JMU・舞鶴

角井 秀行

函館どつく(株)

松本 純季

# 研究背景・目的

造船所ではIMOが定めるバラスタタンク等の塗装性能基準(PSPC)適用船の施工に伴い、艤装品の塗装後の取付による裏焼けトラブルの対応に苦慮している。

裏焼けとは、艤装品の鋼板への溶接による取付の際に、施工面の裏側が溶接入熱により塗装皮膜に焼損を与える現象を指す。デッキ裏に発生すると足場をかけ直す等多くの手間が発生する。

**ダブリング材による裏焼け防止検討**



船首楼甲板裏, 甲板機取付け時に発生

ダブリング厚さ

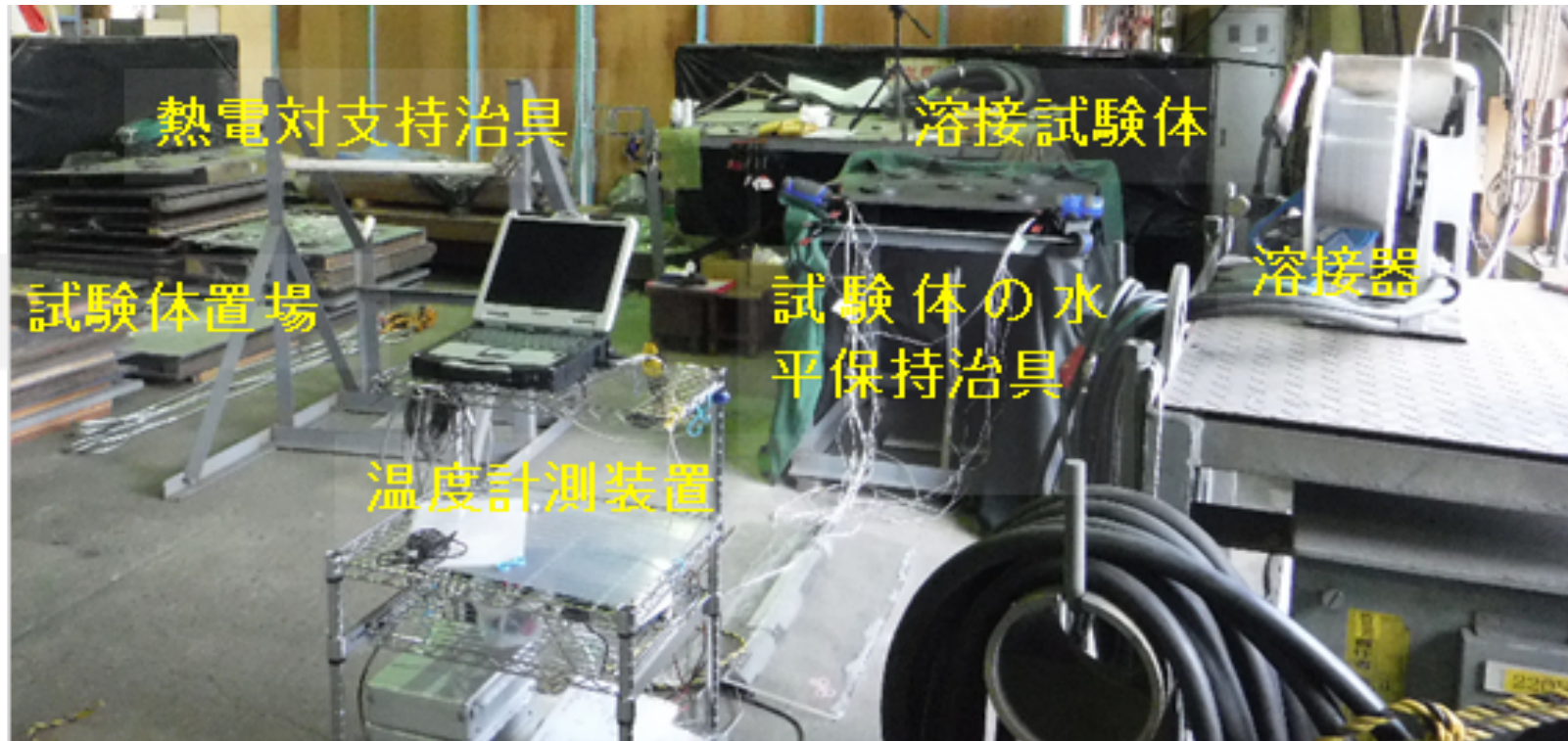
溶接条件

温度上昇のチャート

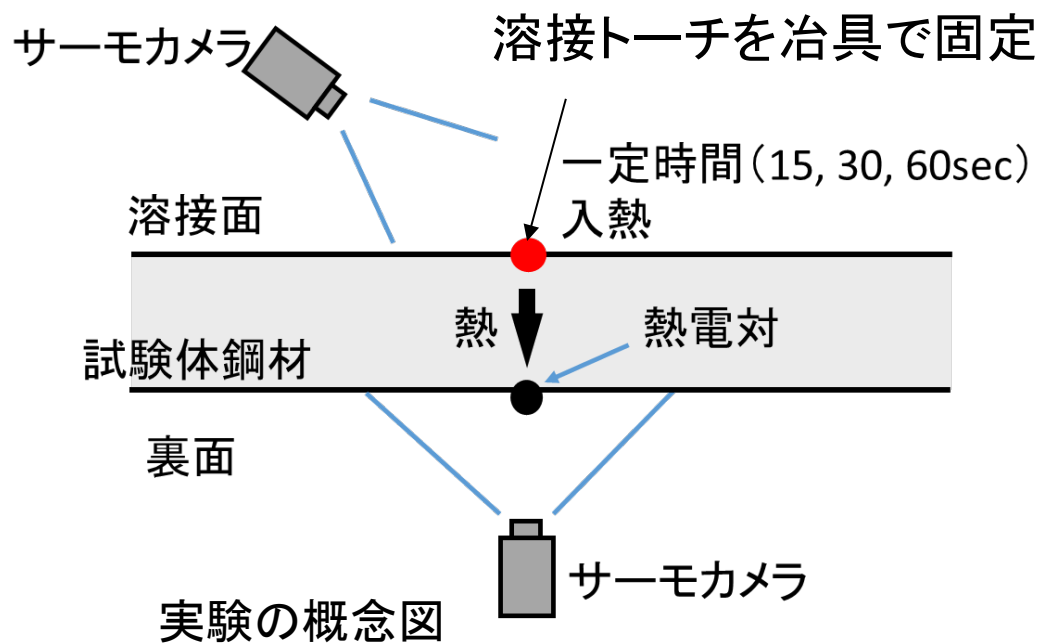
裏焼け予測ツール

裏焼けの発生評価<sub>2</sub>

# 溶接裏焼け実験の方法



# 実験の概要と温度計測方法



入熱による鋼板の裏側の温度変化を熱電対とサーモカメラで計測する

裏面の計測装置

熱電対





# 溶接裏焼け実験の概要

試験体1: 母材のみ

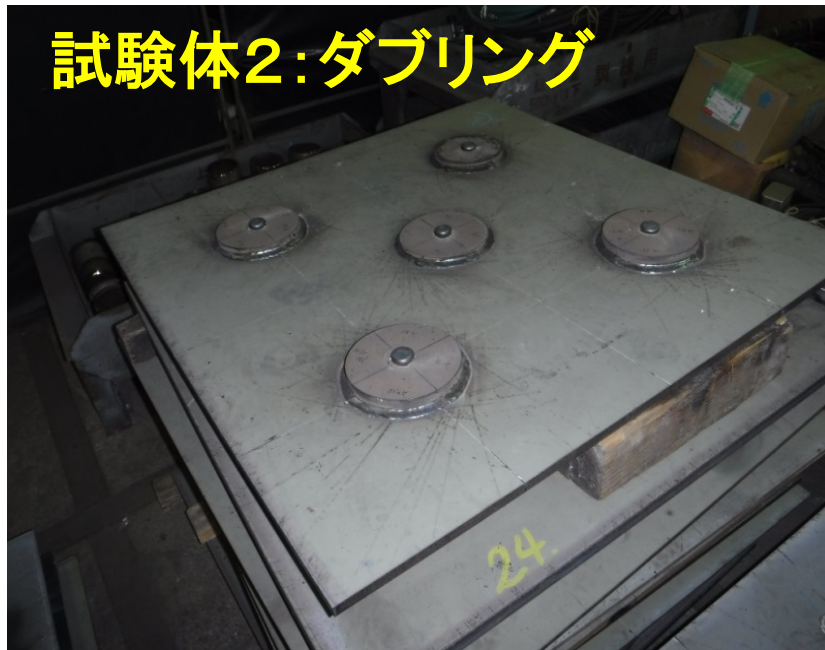


試験体: 母材1m x 1m  
ダブリング材: 直径150mm  
板厚を変えて実験

溶接設定:  
電流: 230A, 電圧: 25.4V  
アークタイム: 60sec.

温度計測:  
熱電対, サーモグラフィ  
計測サンプリング: 1Hz

試験体2: ダブリング

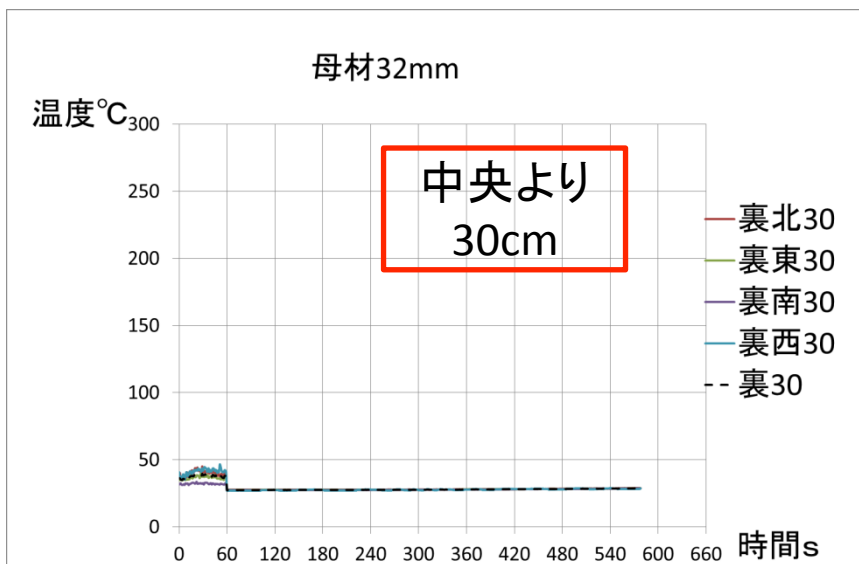
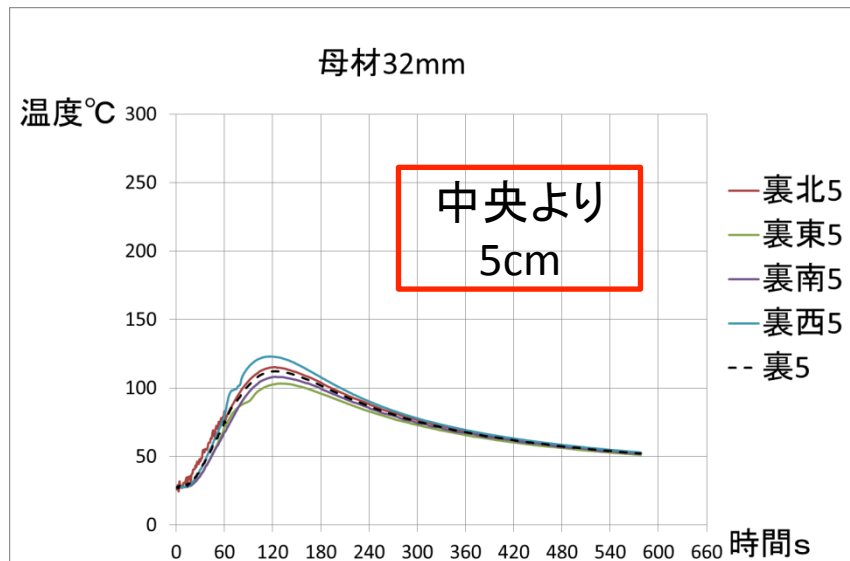
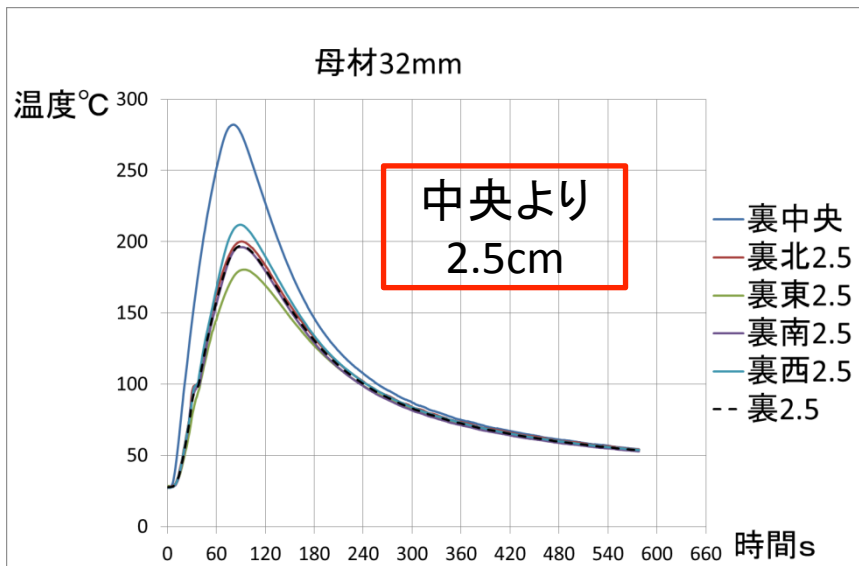


試験体3: 削り出し材  
空隙0を仮定したもの

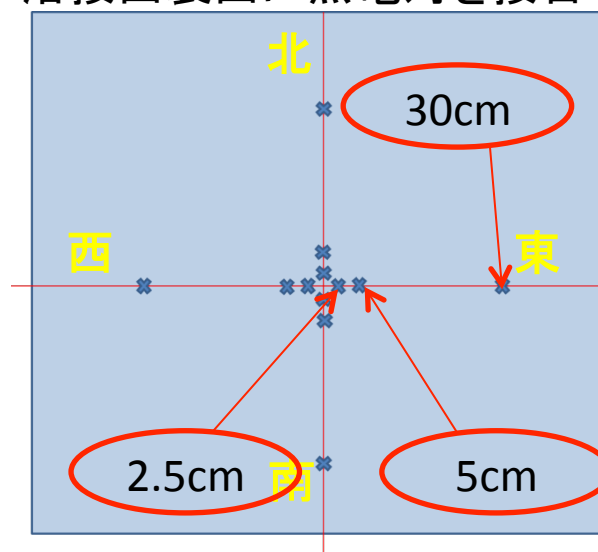


# 熱電対による温度計測結果

試験体: 母材のみ32mm



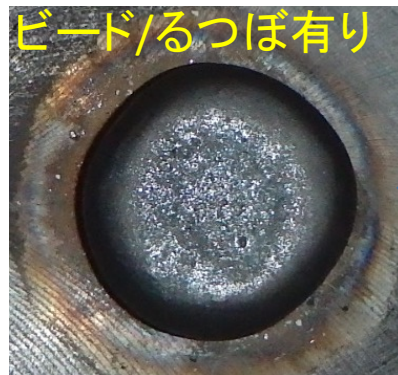
溶接面裏面に熱電対を接合



# るつぼとサーモグラフィの導入



課題: 溶接時, 時間の経過と共に, 熔融金属が流れ, 裏面の温度分布が安定しない。



改善案: るつぼを用い, 熔融金属の形状を保ち, 溶接の中心のずれを管理する。

面の温度分布を計測するため  
非接触式温度計測装置  
サーモグラフィを導入

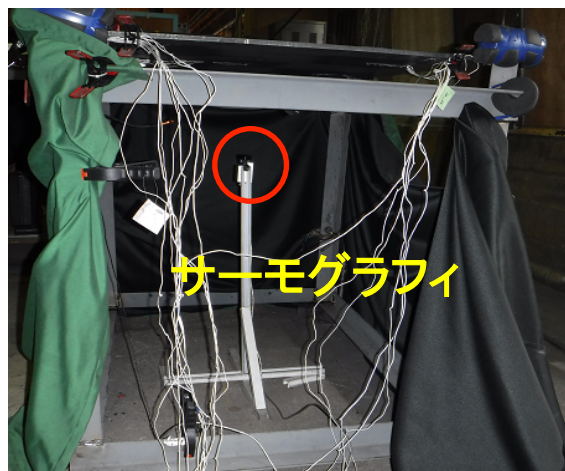
鋼板の放射率が小さく計測困難なため,  
グライツスプレーを実験開始の前に  
計測領域に噴射する。  
放射率を0.765にする



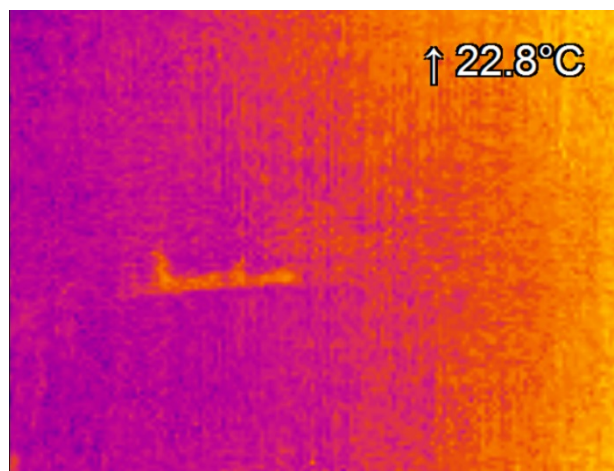
# サーモグラフィによる裏面の温度分布観測

試験体：母材16mm，ダブリング16mm

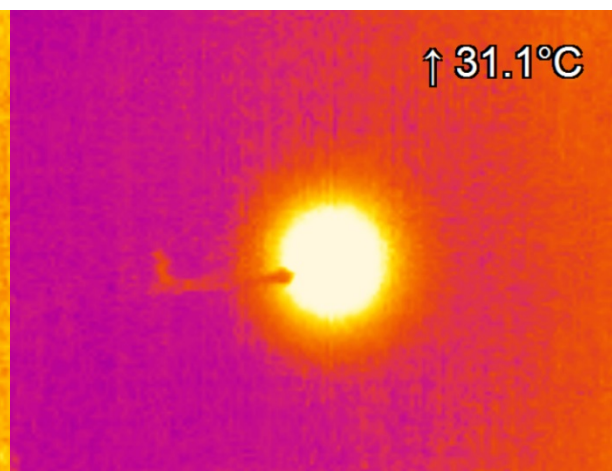
熱拡散の様子を観測



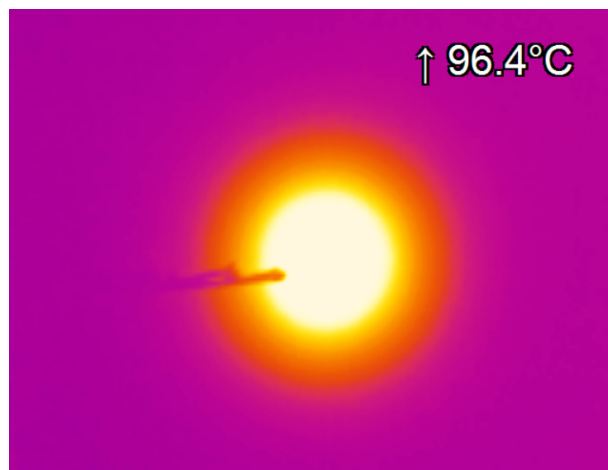
サーモグラフィの設置



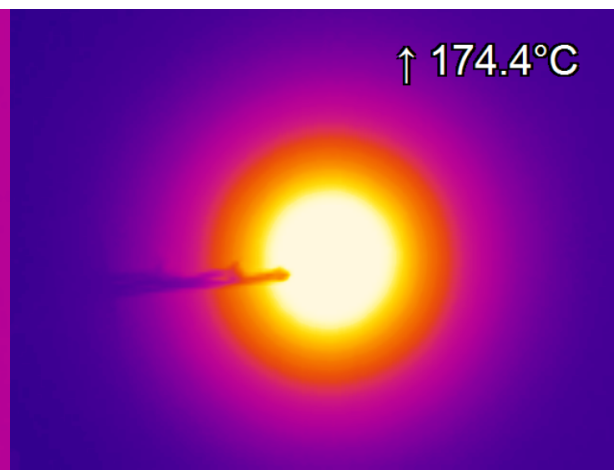
0s



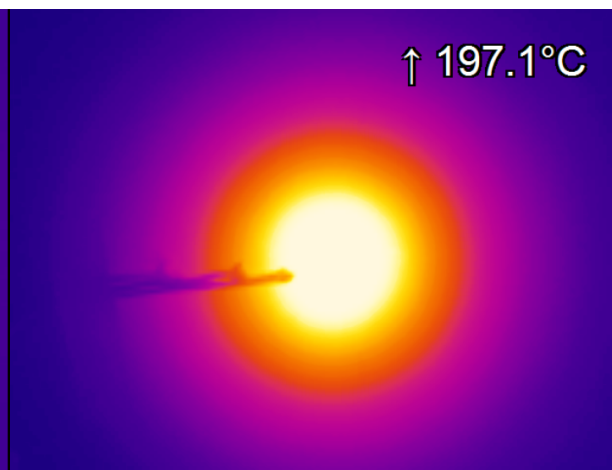
10s



30s



60s



最高温度(80.4s) <sup>8</sup>

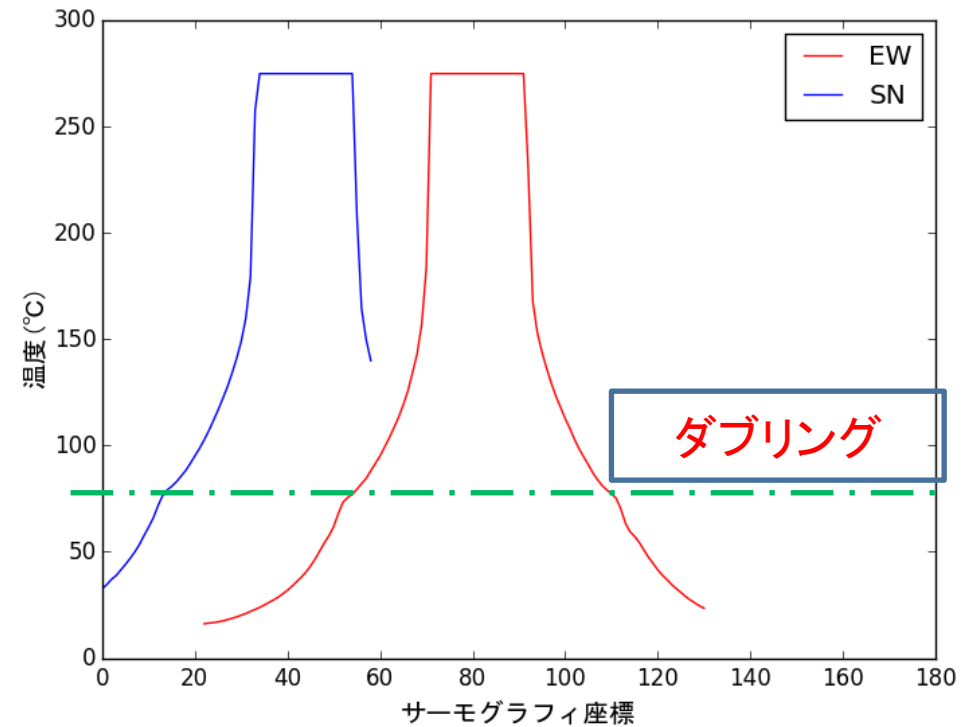
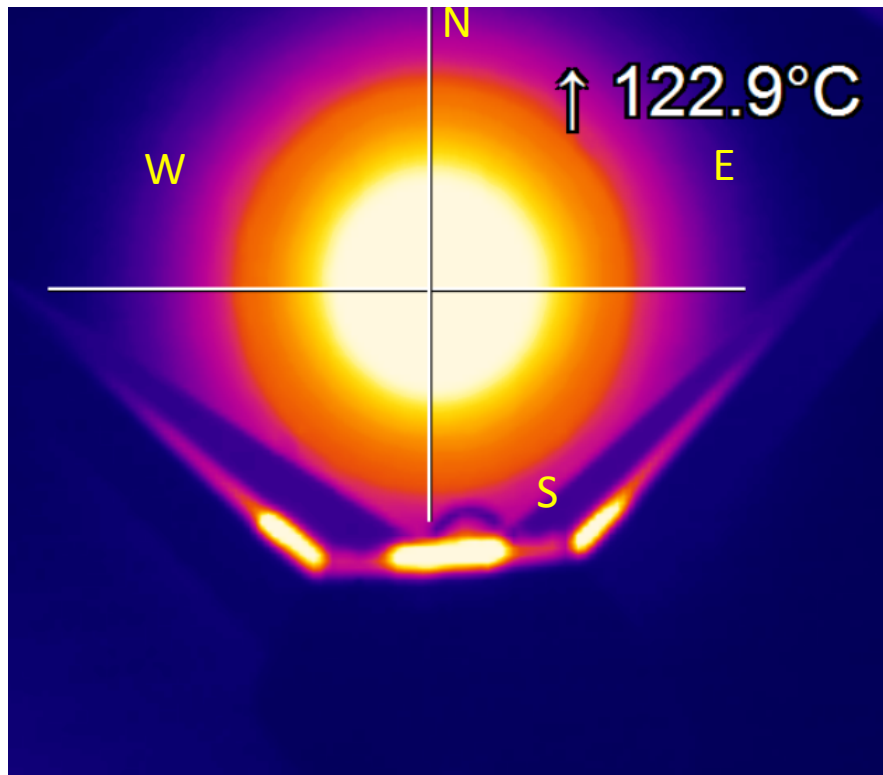


# サーモグラフィによる表面の温度分布観測

試験体：母材16mm,  
ダブリング13mm  
溶接後

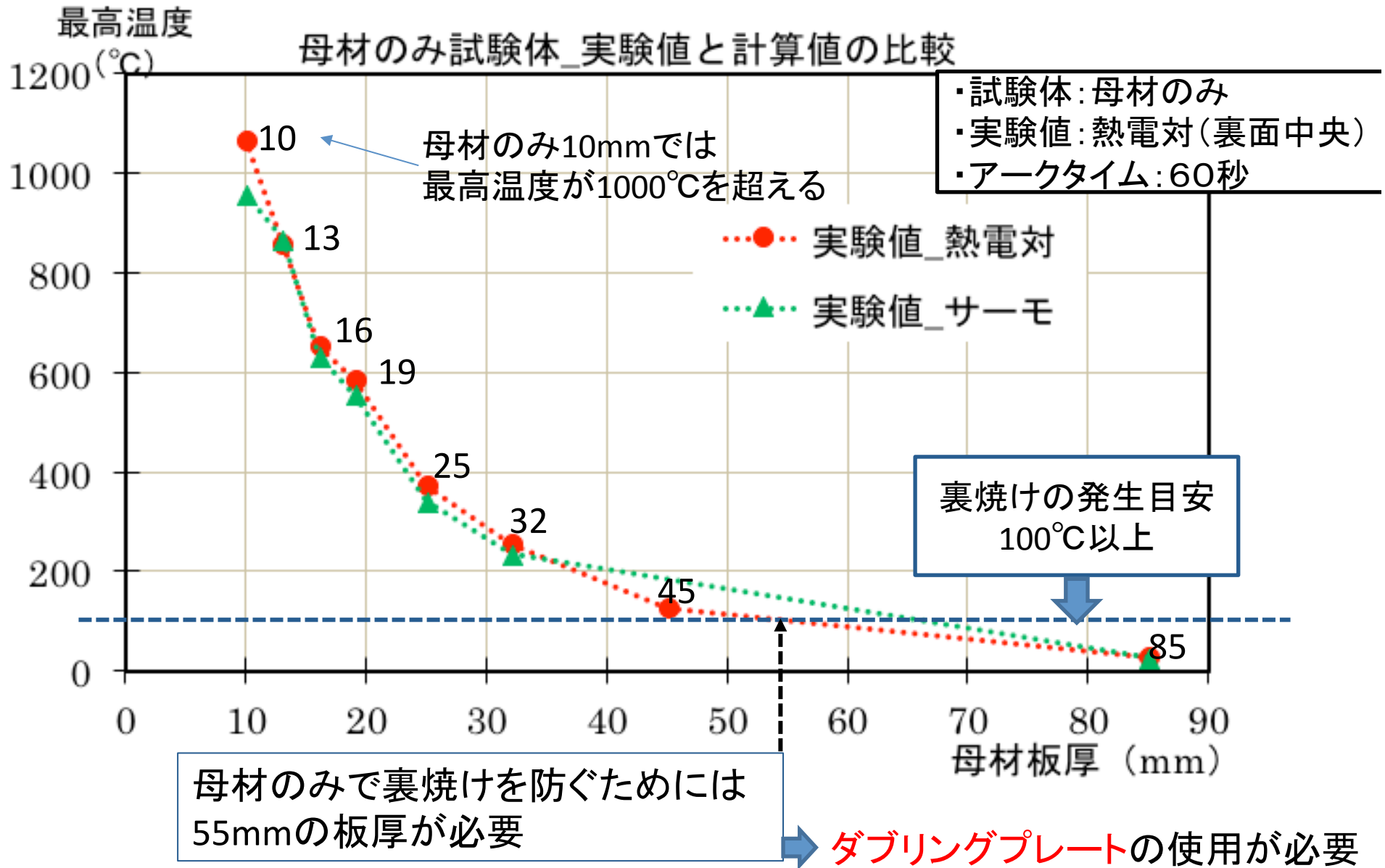
## 表面温度分布

SN方向 EW方向



ダブリング部分が高温状態

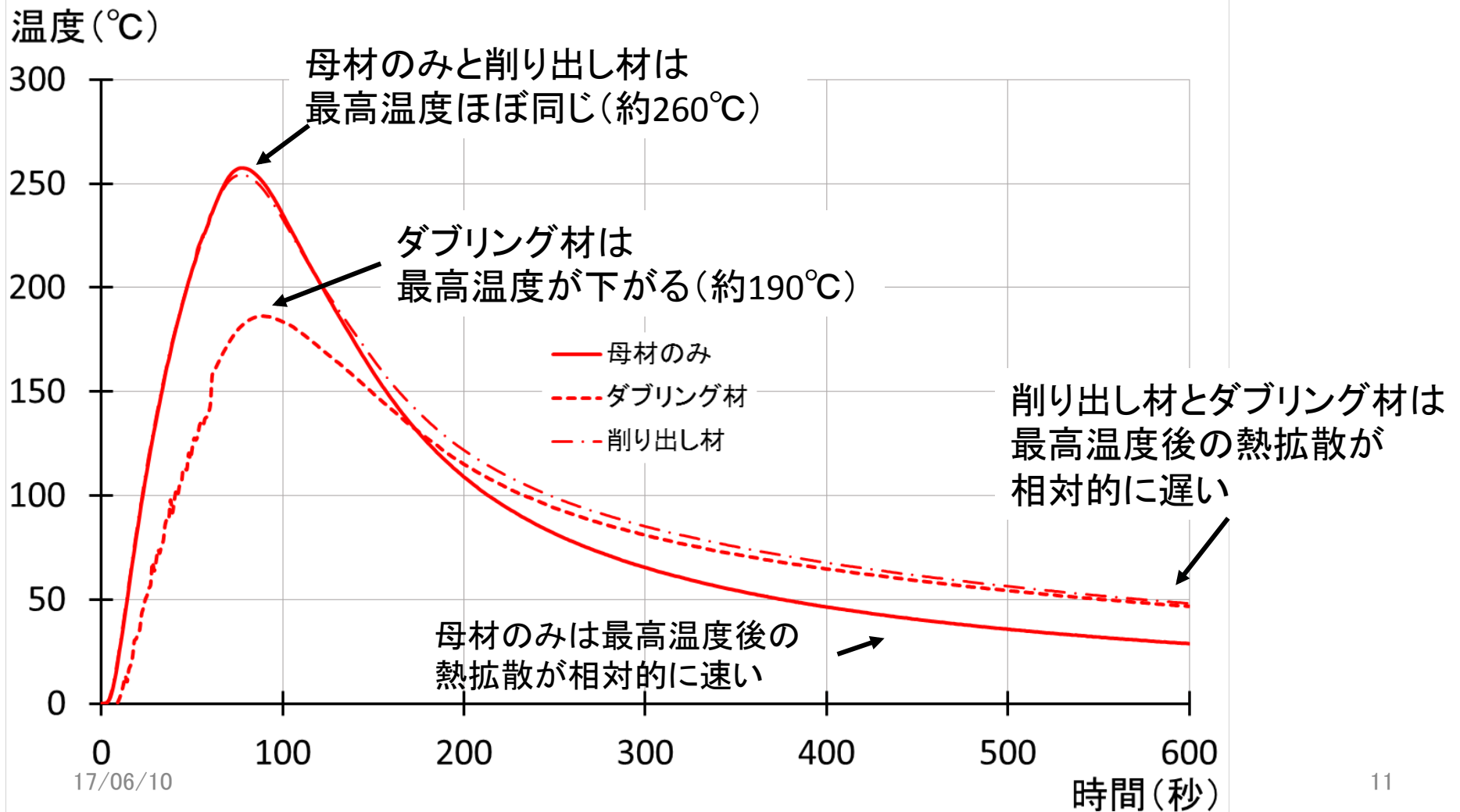
# 母材板厚による裏面中央最高温度



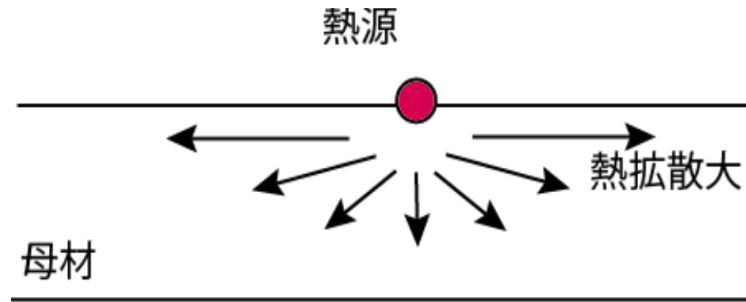
# 合計板厚32mmの実験結果の比較

- ①母材のみ : 母材32mm
- ②ダブリング材 : 母材16mm + ダブリング部分16mm
- ③削り出し材 : 母材部分16mm + 削り出し部分16mm

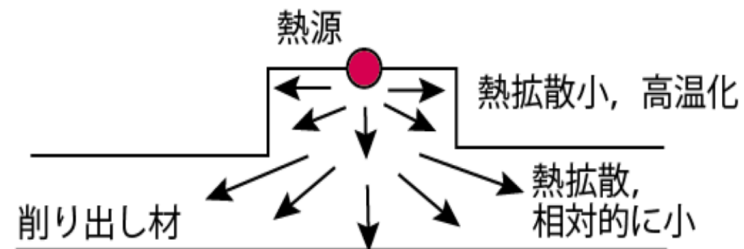
・実験値: 熱電対(裏面中央)  
・アークタイム: 60秒  
・ダブリング直径: 150mm  
・計測値 - 初期温度で  
温度上昇の経時変化



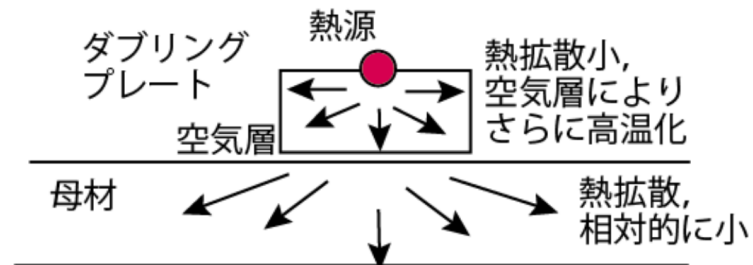
# 試験体の違いによる熱拡散のメカニズム



1) 板厚効果



2) 形状効果



3) 空気層効果

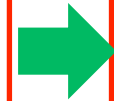


# 溶接裏焼け実験の中央最高温度

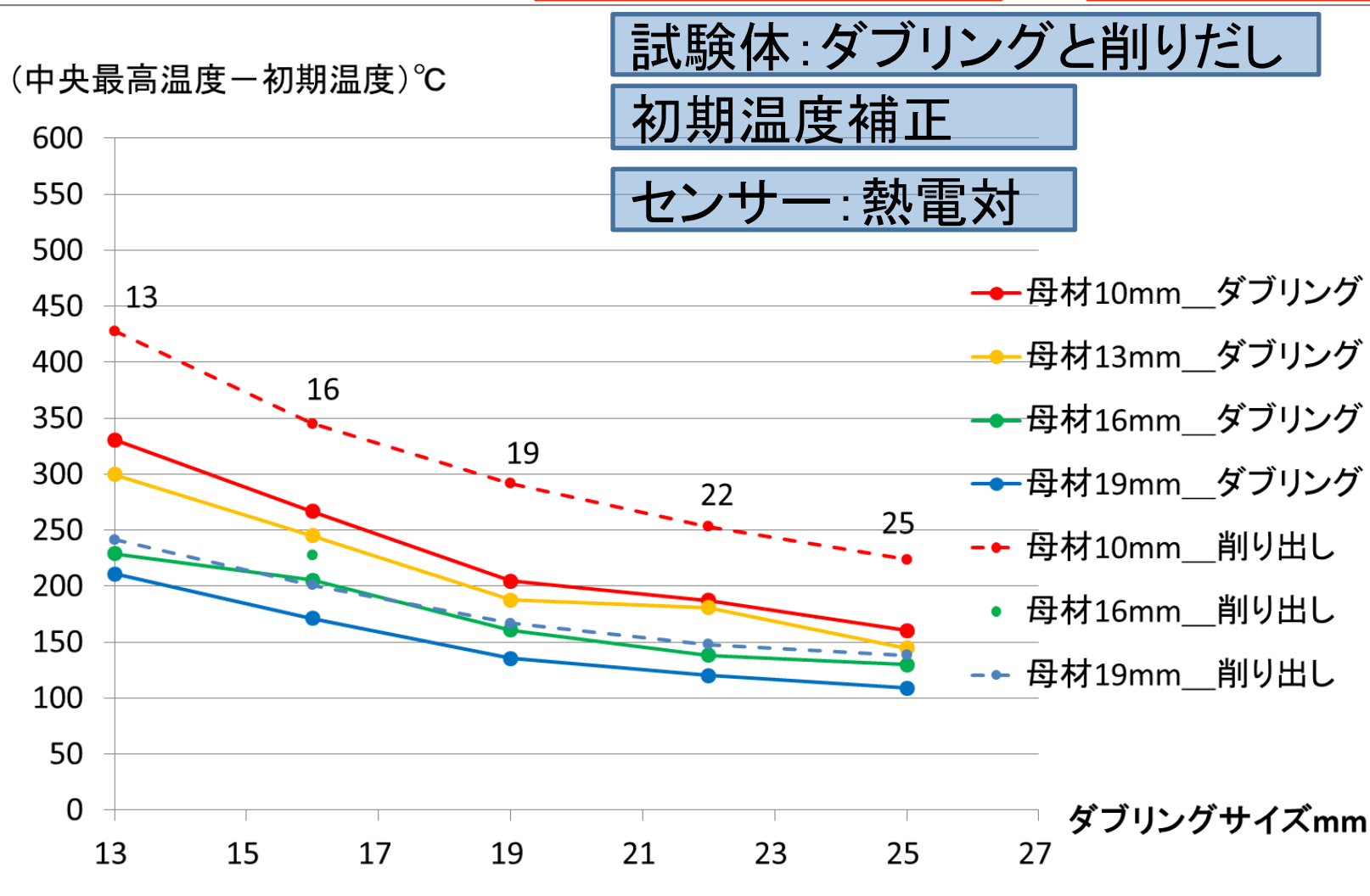
ダブリング材と母材には、  
僅かに空隙が生じる。  
空隙影響は大きい。  
バラツキが大きい



空隙を最小(均一)にする  
ため治具を使いダブリン  
グ材を接合, 塗装膜  
60 $\mu$ m程度の空隙



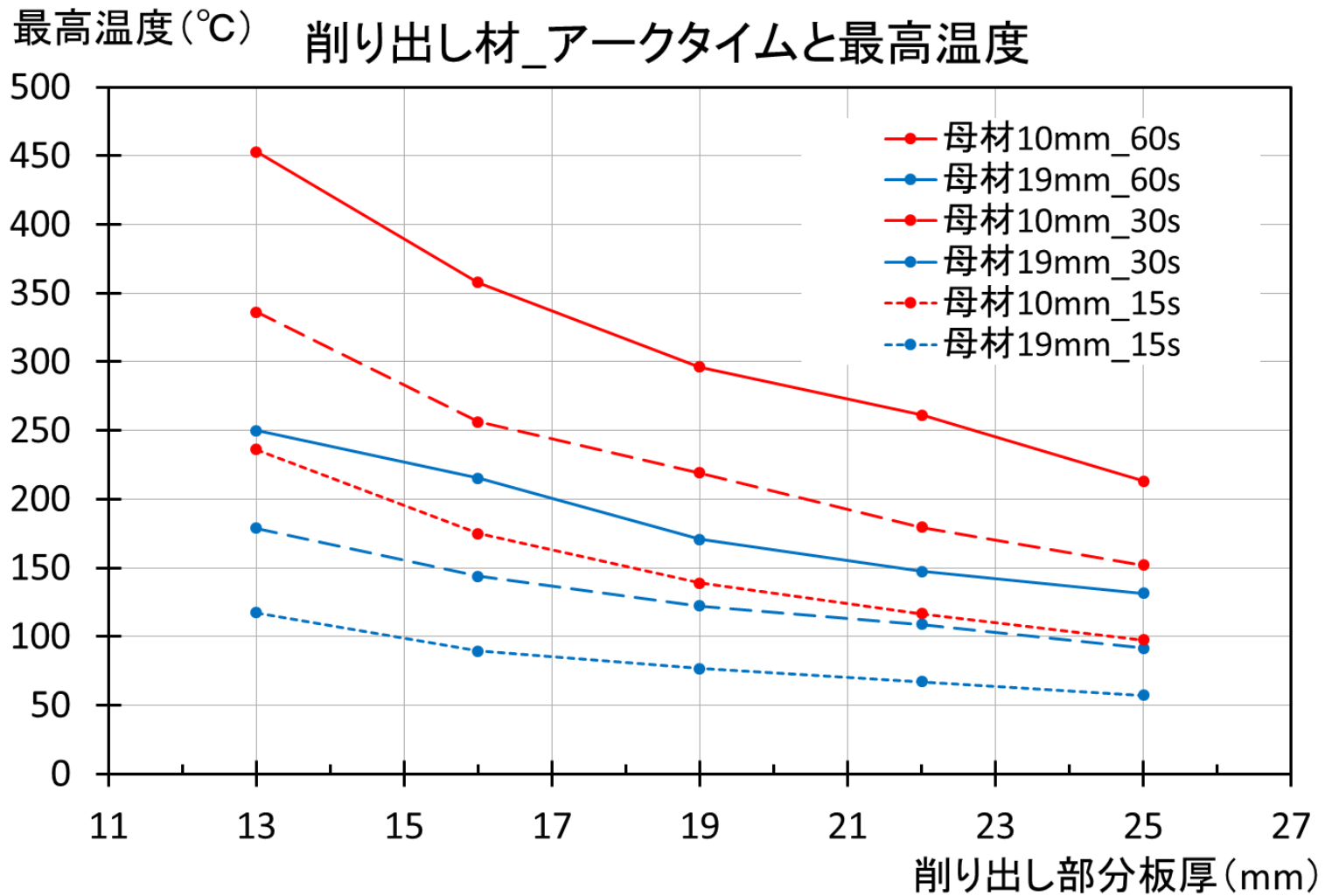
鋼材をダブリング材が  
取付られた形状を模擬  
して削り出しを行う。  
空隙0を仮定したもの



# 溶接裏焼け実験の中央最高温度

溶接時間: 60, 30, 15秒

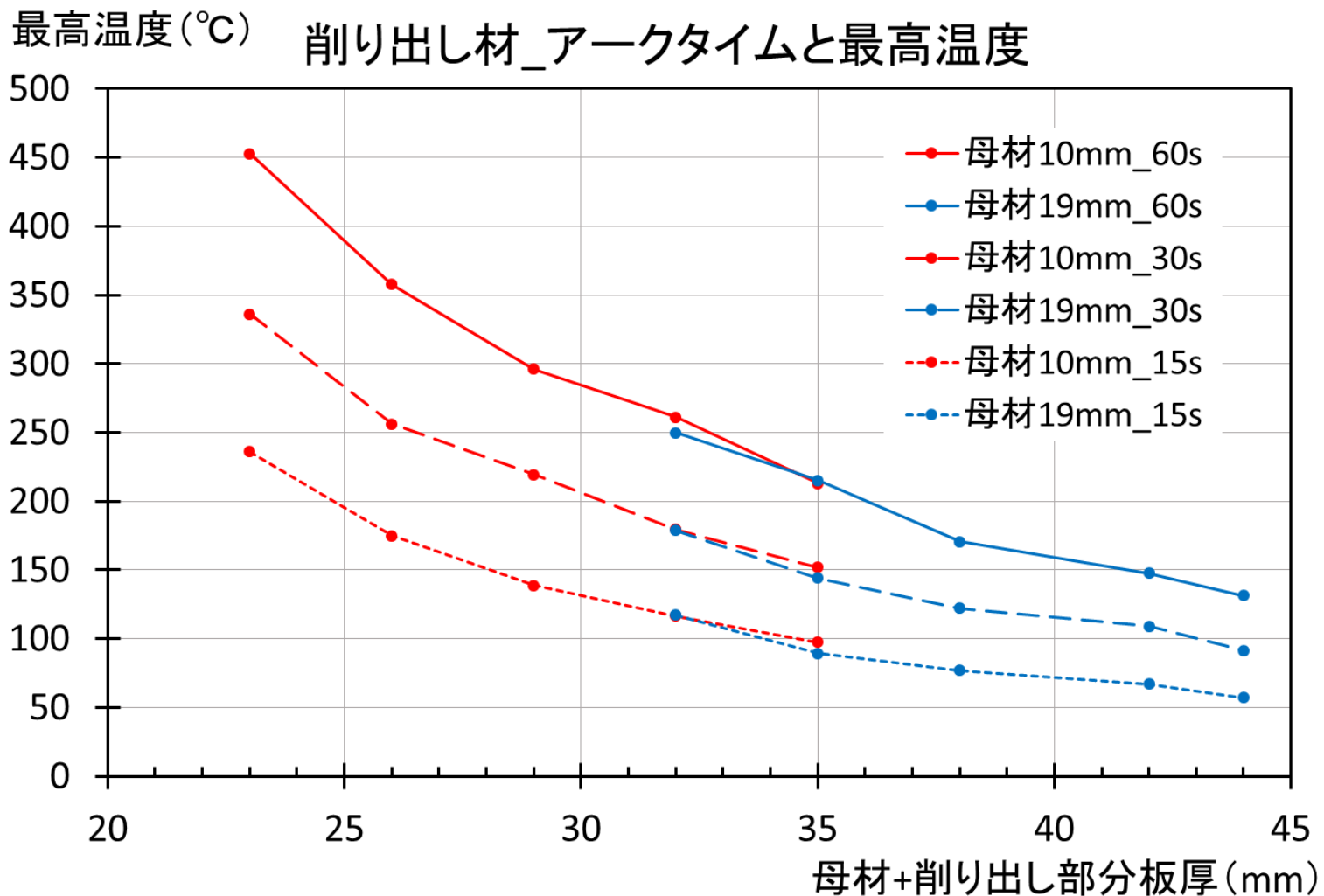
試験体: 削り出し材



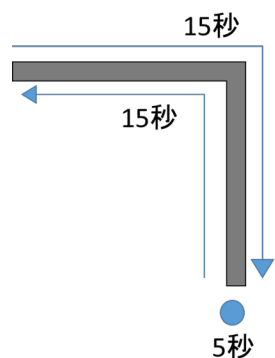
# 溶接裏焼け実験の中央最高温度

溶接時間: 60, 30, 15秒

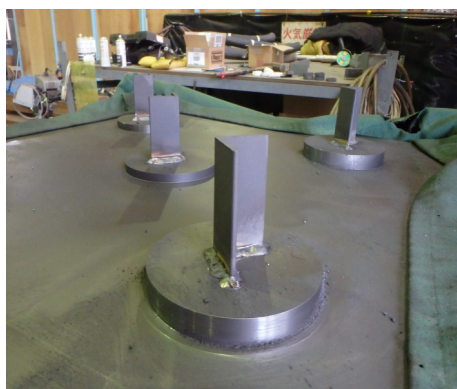
試験体: 削り出し材, 母材と削り出し部の合計板厚として表記



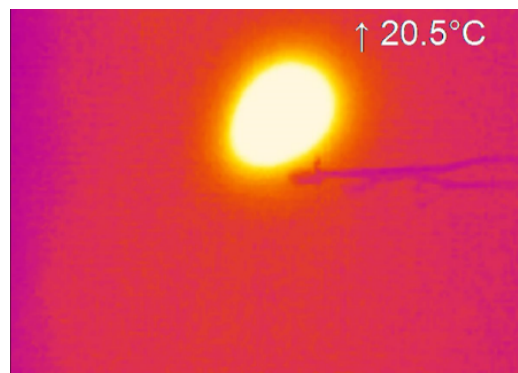
# アングル材取付実験



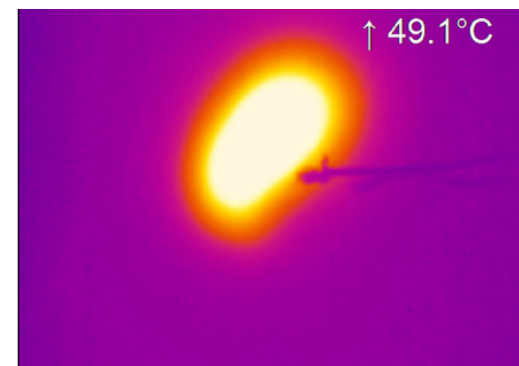
(a) アングル材取付  
溶接時間の配分



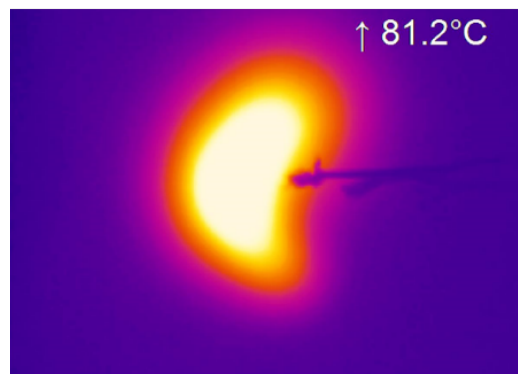
(b) アングル材の取付後の様子



5s



10s



15s



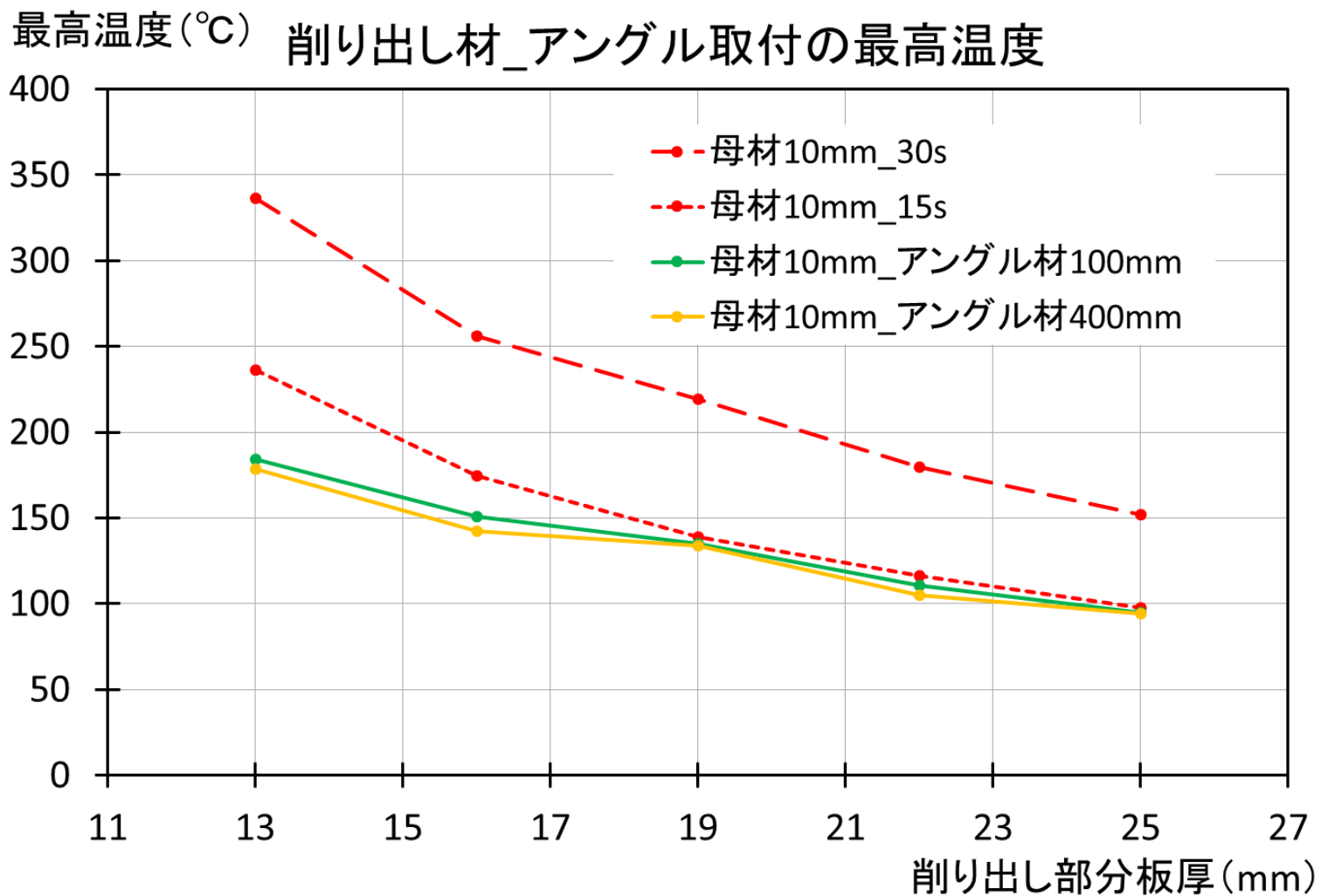
35s

(c) アングル材取付時のサーモグラフィ, 計測結果



# 溶接裏焼け実験の中央最高温度

溶接時間: 外側15秒, インターバル5秒, 内側15秒,  
試験体: 削り出し材, アングル材取付



# シミュレーションと支配方程式

シミュレーションの支配方程式を定め、有限体積法を用いて3次元非定常熱輸送モデルについて、反復法により保存式を解く汎用熱流体解析ソフトPHOENICSを用いた。

連続の式  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

運動方程式  $\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -1/\rho \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{B}$

熱輸送方程式  $\rho c \partial T / \partial t + \rho c \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T + q$   
非定常項    熱対流項    熱拡散項    生成項

$\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\nu$ : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]

$p$ : 圧力 [Pa]

$\mathbf{B}$ : 単位体積当たりの体積力,

x方向とy方向は0, z方向は浮力を考慮する。

$\mathbf{u}$ : 速度ベクトル [m/s]

$c$ : 比熱 [J/(kg·K)]

$\lambda$ : 熱伝導率 [W/(m·K)]

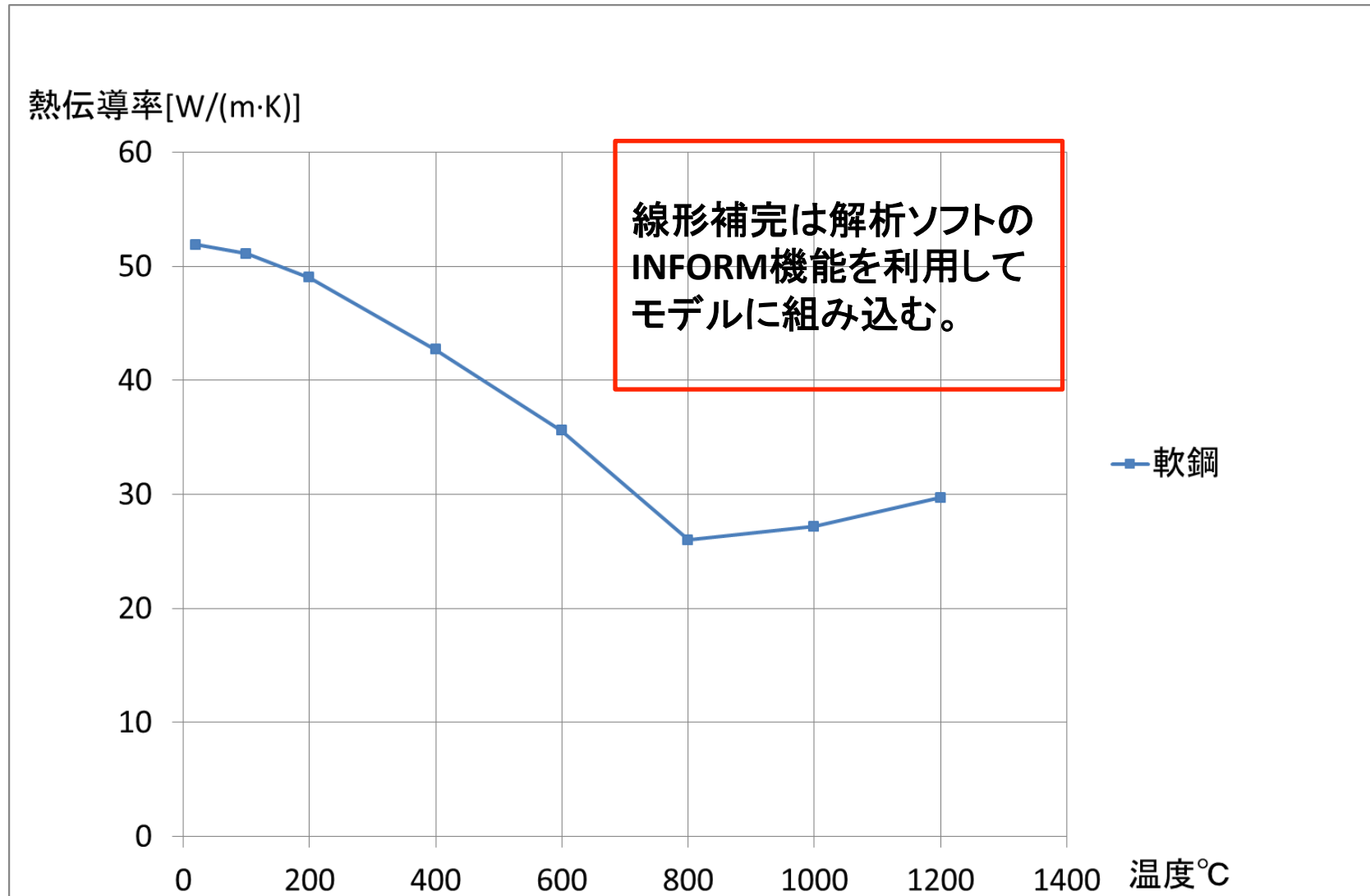
$T$ : 温度 [K]

$q$ : 単位時間当たりの入熱量 [W/m<sup>3</sup>]

# シミュレーションでの設定

- 1) 解析領域: 1.0m×1.0m×1.0m
- 2) 境界条件: 境界から熱が流出する設定(流出境界)
- 3) 物性値:
  - 金属: 鋼 (物性値は定数)
  - 空気: 物性値に温度依存性を考慮
- 4) 熱源: 円筒形のビード上面2mmを60秒間,  
計測した金属の溶融温度の1500°Cに設定
- 5) ビード: 高さ10mm, 直径40mm, 金属(固体)
- 6) 初期温度: 計測値を利用
- 7) タイムステップ: 0.5s

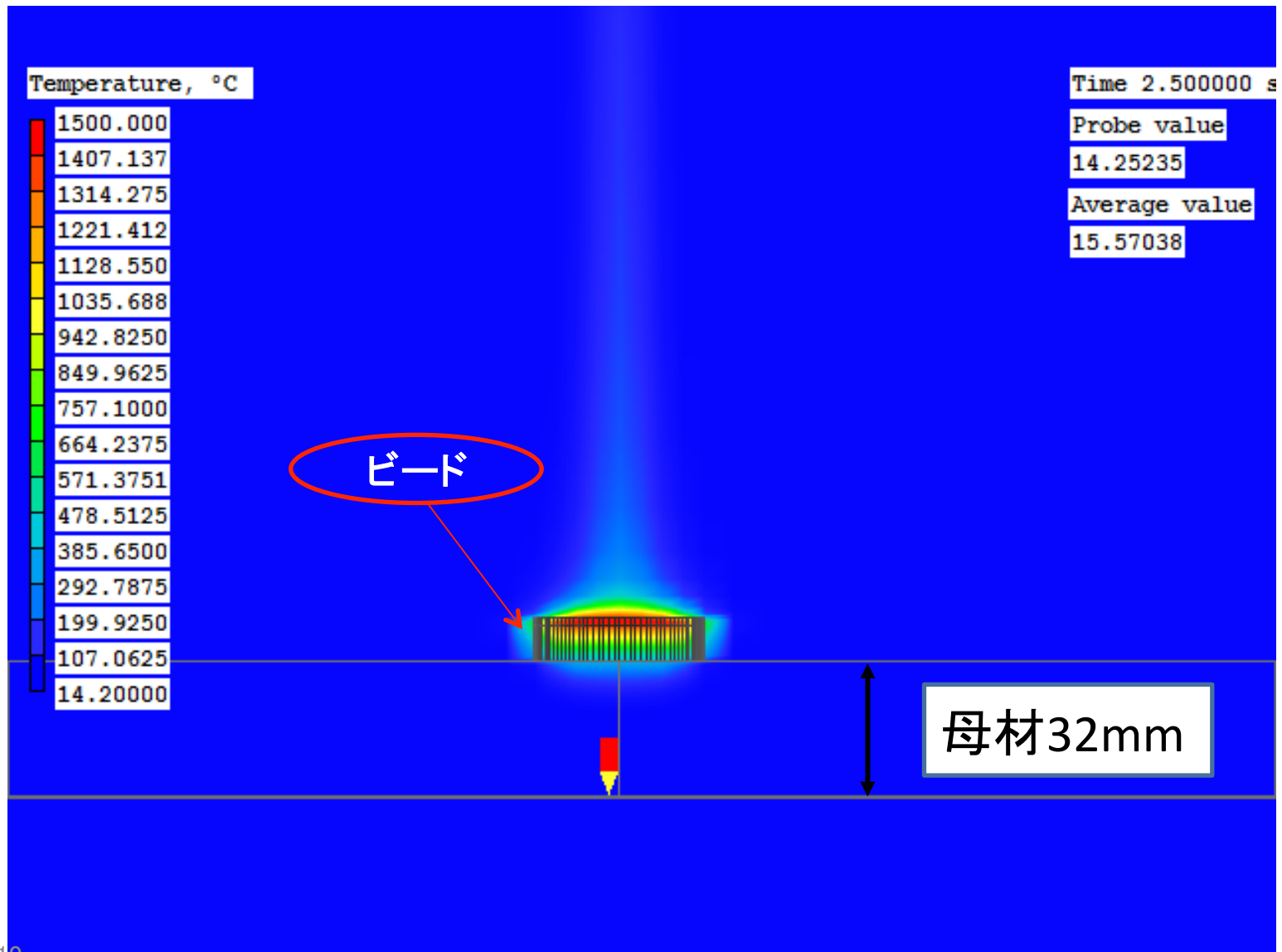
# 軟鋼の熱伝導率の温度依存性





# 母材のみのシミュレーションモデル 温度場の経時変化(横断面)

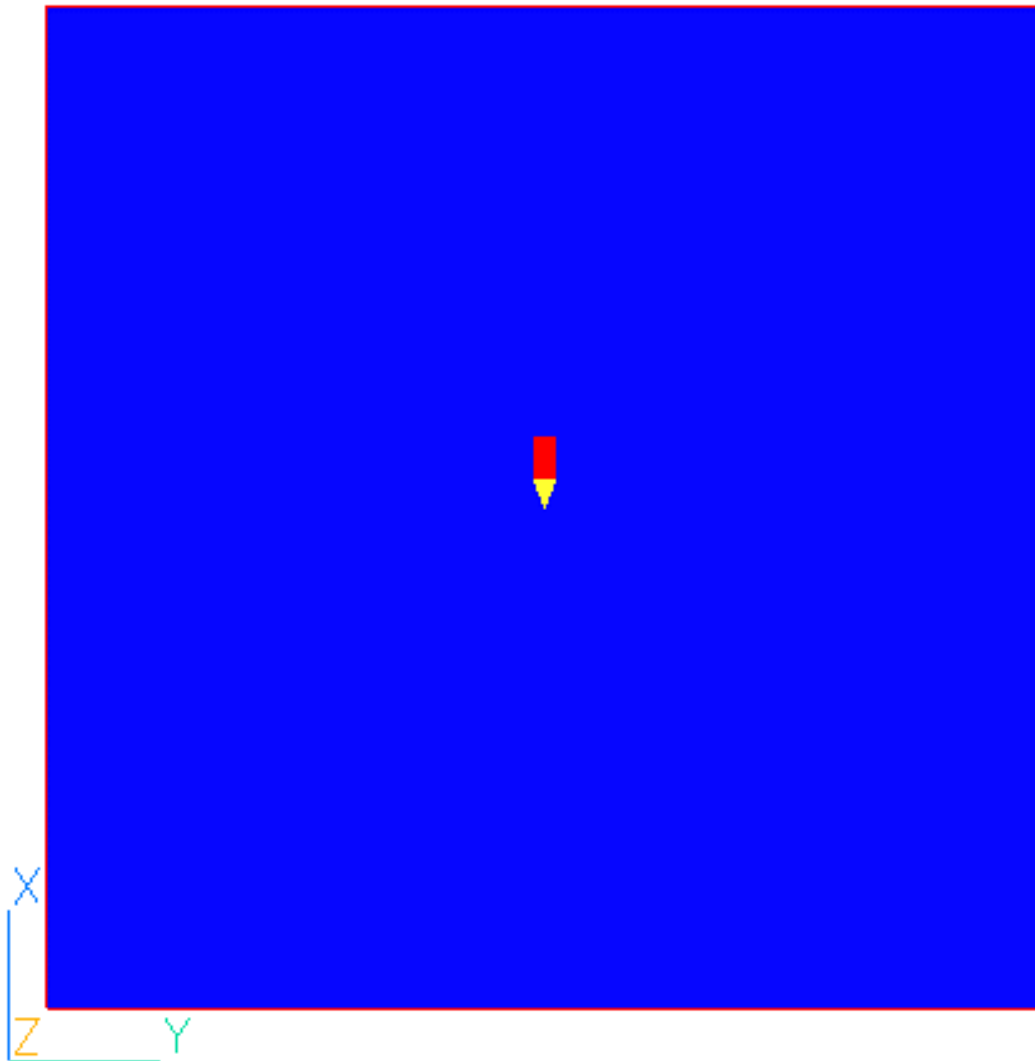
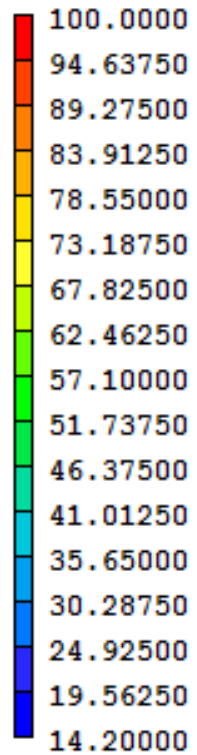
○母材板厚:32mm



# 母材のみのシミュレーションモデル 温度場の経時変化(裏面)

○母材板厚:32mm

Temperature, °C



Time 2.500000 s

Probe value

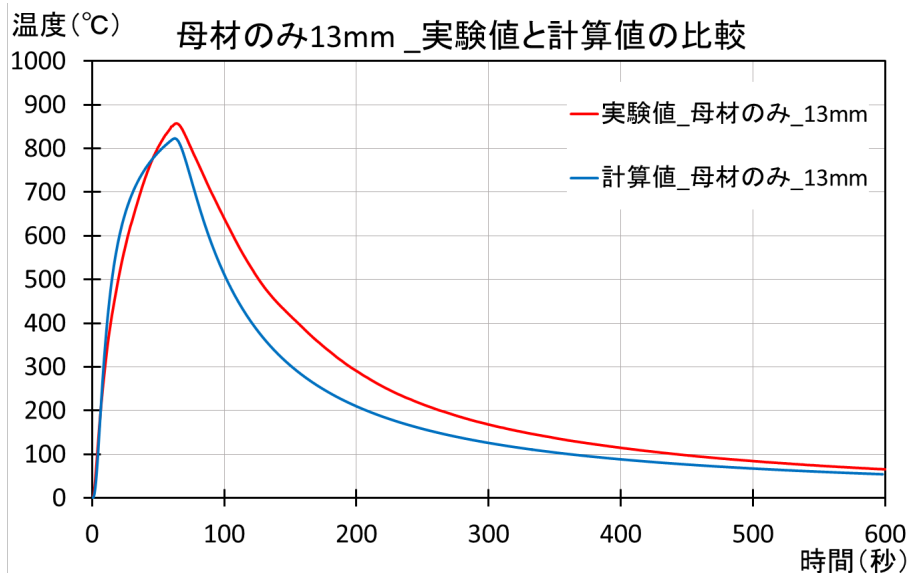
14.25235

Average value

14.20007

赤色が裏焼けが予測される  
100°Cを超える範囲

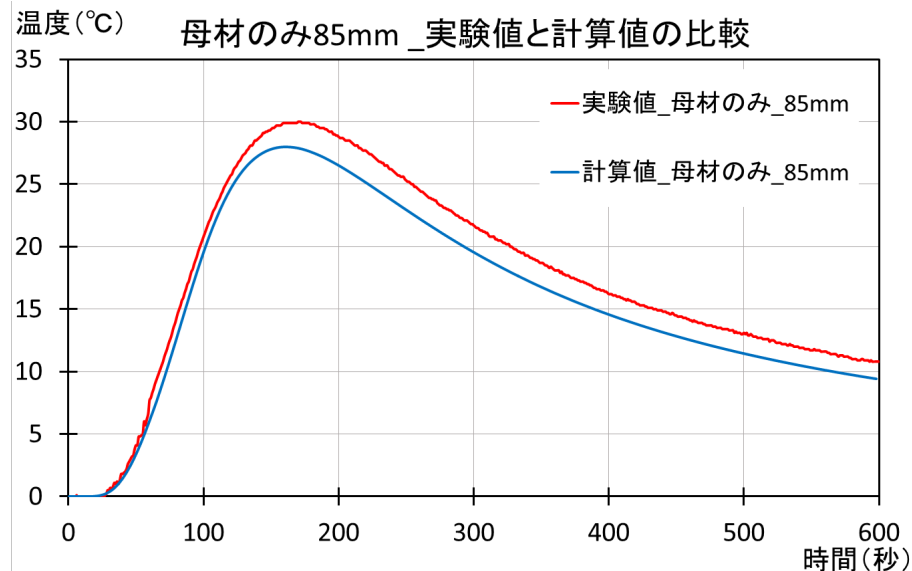
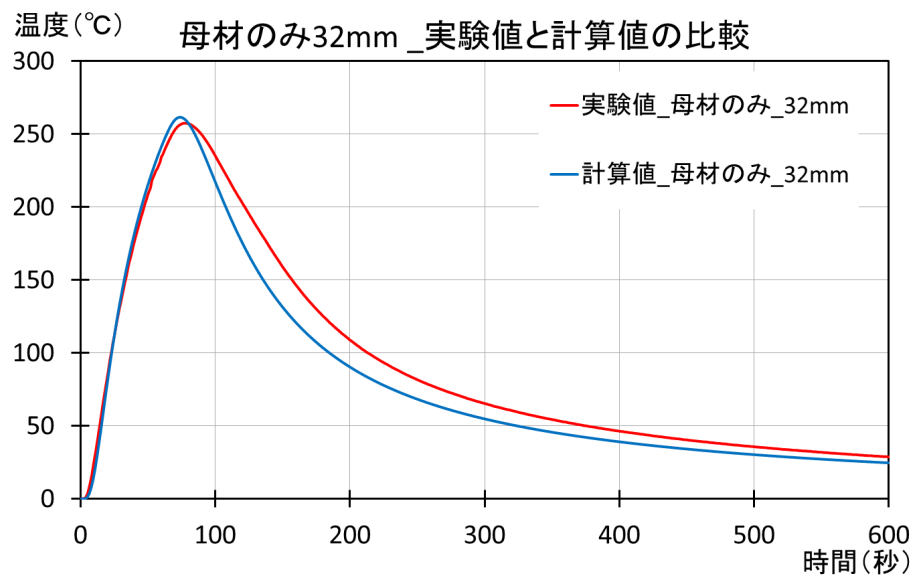
# シミュレーションと実験値の比較



熱伝導率定常

初期条件は  
計測値  $\Rightarrow$  0に補正

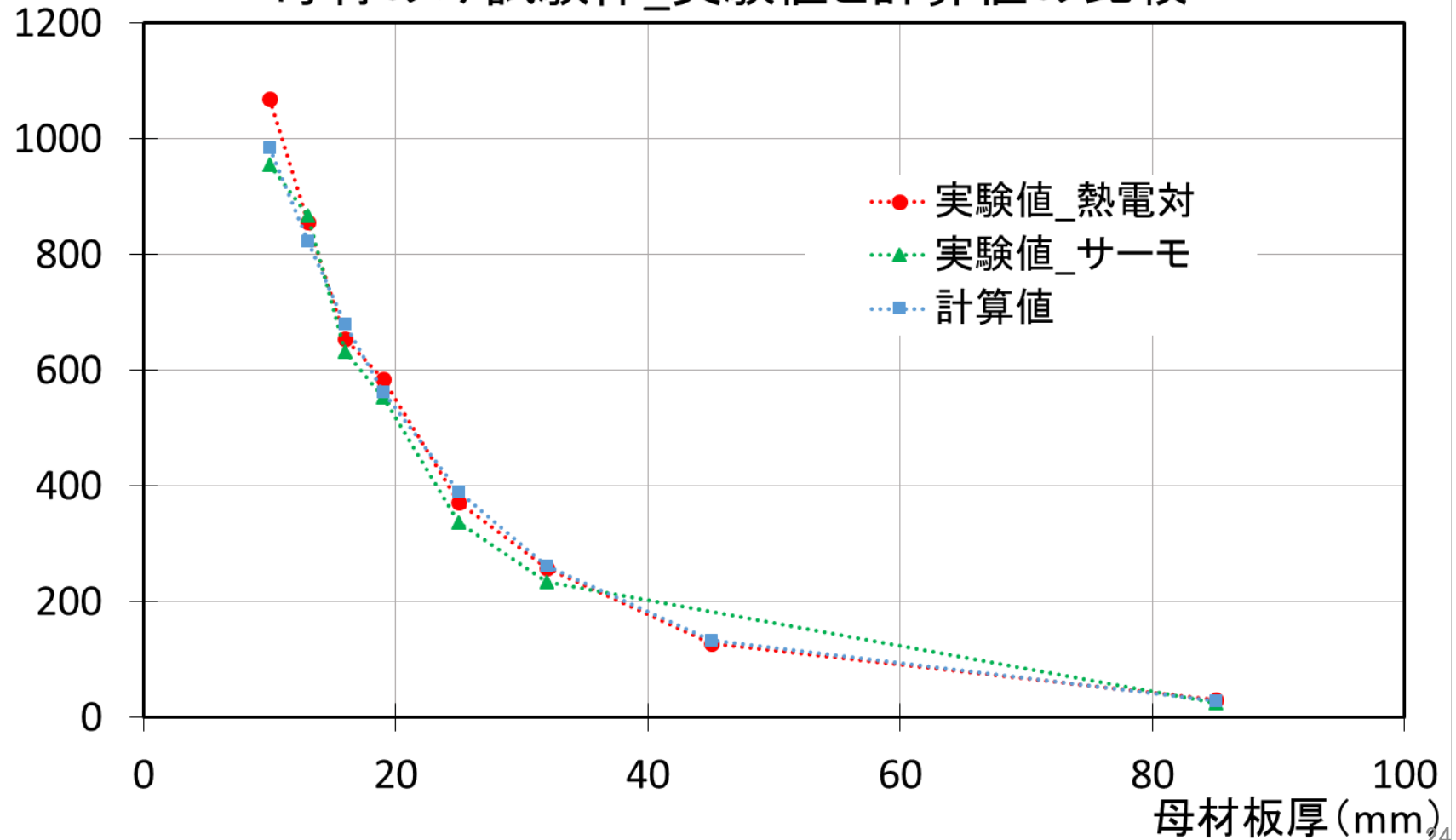
実験値: 熱電対



# 計算値と実験値の比較：裏面の中央最高温度

試験体：母材のみ

最高温度(°C) 母材のみ試験体\_実験値と計算値の比較



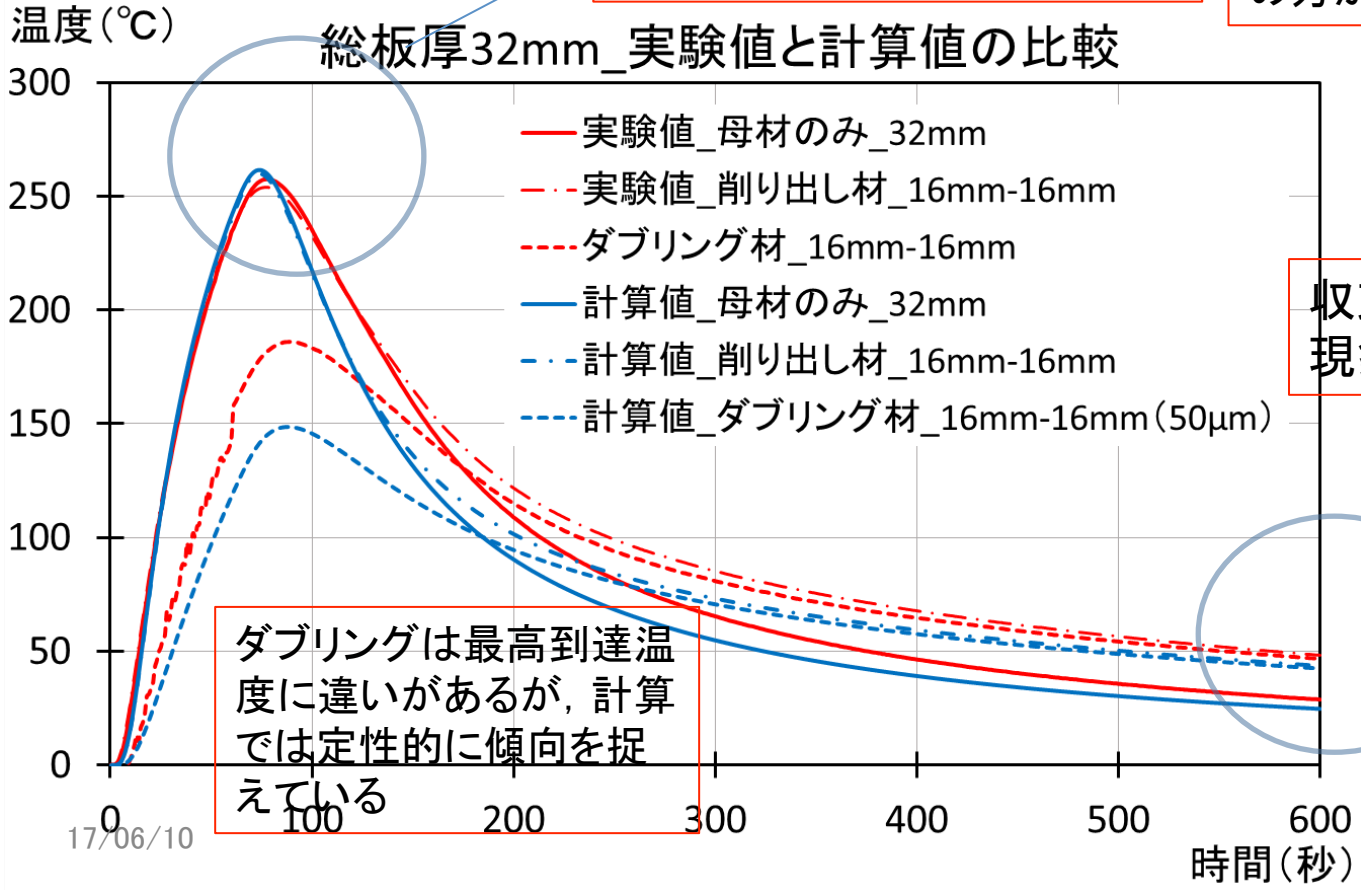
# 計算値と実験値の比較：3試験体

- 母材のみ : 母材32mm
- 削り出し材 : 母材部分16mm + 削り出し部分16mm
- ダブリング : 母材部分16mm + ダブリング16mm  
(ギャップ50 $\mu$ m)

- ・実験値: 熱電対(裏面中央)
- ・ダブリング直径: 150mm
- ・アークタイム: 60秒
- ・計測値 - 初期温度で温度上昇の経時変化

シミュレーションにより  
最高温度を捉えられている

最高温度後は傾向を  
捉えられているが計算  
の方が熱拡散が速い



ダブリングは最高到達温度に違いがあるが、計算では定性的に傾向を捉えている

収束は異なるが現象を捉えられている

# 結言1

- 1) 溶接施工点をダブリングプレートの中央に取ったとしても、裏面の中央部は必ずしも、最大温度にはならない場合もある。熱電対による計測方法により裏面の最大温度を取得するには限界があり、動画によるサーモビューワーによる計測法について検討した。
- 2) サーモビューワーを利用した計測方法では、鋼板からの熱計測には適さないことが多い。ここでは、グラファイトスプレーを塗布して問題の解決を図った。また、鋼板の放射率は、放射率を変化させ、熱電対とサーモビューワーによる温度計測値が一致した際の放射率を読みとり補正を行った。
- 3) ダブリングプレートの実験のための試験体制作には、治具を製作して一定の圧力を加えダブリングプレートを母材に圧着して溶接施工したが、母材とダブリングプレートとのわずかな空隙により、最高到達温度が異なるため、空隙を模擬した削り出し材による試験体を製作して実験検討した。

## 結言2

4) 母材板厚およびダブリングプレート板厚を変えた最高温度到達の目安を見出すチャートを作成した(スライド 10, 13, 14, 15, 17の図)。

・スライド10: 図は母材のみにおける最高温度を示すもので、母材のみで裏ヤケを防ぐためには55mmの板厚が必要となり、それより薄い母材の場合にはダブリングプレートの使用が必要となる。

・スライド13: 図はダブリングプレートと削り出し材における最高温度を示すもので、ダブリングプレートの板厚に応じて温度軽減効果が高いが、空気層の無い削り出し材では、ダブリング材に比べ温度上昇が有りうるため、ダブリングプレート使用時には注意を要する。

・スライド14: 図は母材10mmと19mmにおける各ダブリングプレート厚さにおける最高温度を示すもので、溶接時間60秒, 30秒, 15秒における最高温度の違いを示している。例えば、19mmの母材に19mmの削り出し材(ダブリングプレートとの関係についてはスライド13参照)を使用する場合には、溶接時間60秒では約170°C, 30秒では約120°C, 15秒では約75°Cとなる。

・スライド15: 図はスライド14を母材と削り出し材の合計板厚で表記したもので、溶接時間60秒, 30秒, 15秒における最高温度を示す。

・スライド16: 図は削り出し材にアングル材を取り付けた際の最高温度を示すもので、母材10mmの場合には、溶接時間にインターバルと熱の移動があるために、連続的に1点に溶接した場合に比べ温度軽減が図られる。



## 結言3

5) 上記4)の図中の数値は一定条件により実験実施から得られた結果であり、目安であり、溶接運用時には以下を留意する必要がある。

- ・溶接裏焼け実験の到達温度の評価としては、溶接裏面の最高到達温度を採用しているが、これには、外気温の影響があるため、初期温度を考慮して裏焼け発生について評価を行う必要がある。
- ・入熱条件として、溶接設定電流・電圧値に、電圧25.4(V)と電流230(A)として設定を元にして実験を検討したため、入熱が多い場合には注意を要する。
- ・一般塗料の裏焼け温度は100°Cとして考察しているが、裏焼けが発生する温度については、塗料メーカーに確認する必要がある。
- ・本チャートは裏焼けしないことを保証するものではなく、PSPCの検査は省略できない。

6) シミュレーション上の課題として、以下が上げられる。

- ・溶接による裏焼けのための数値計算モデルを熱拡散方程式により解いてもある程度の推定は可能であるが、更に精度向上には、流体固体熱連成解析モデルとして実施する必要がある。また、熱伝導率の非線型性や、空気への熱伝達等考慮する必要がある。
- ・溶接金属の溶融池状態を固体状態としてモデル化しているが、この仮定の十分性を把握する必要がある。
- ・母材とダブリングプレートとの間の微少な空隙について検討を加える場合に、計算モデルのためのメッシュについて検討する必要がある。