

CO₂ガスシールド半自動アーク溶接の 溶接施工管理条件の合理化に関する研究

浅田 勇人（芝浦工業大学）

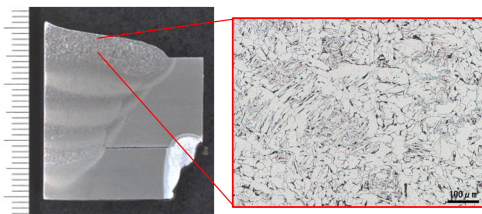


報告内容

1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

研究背景

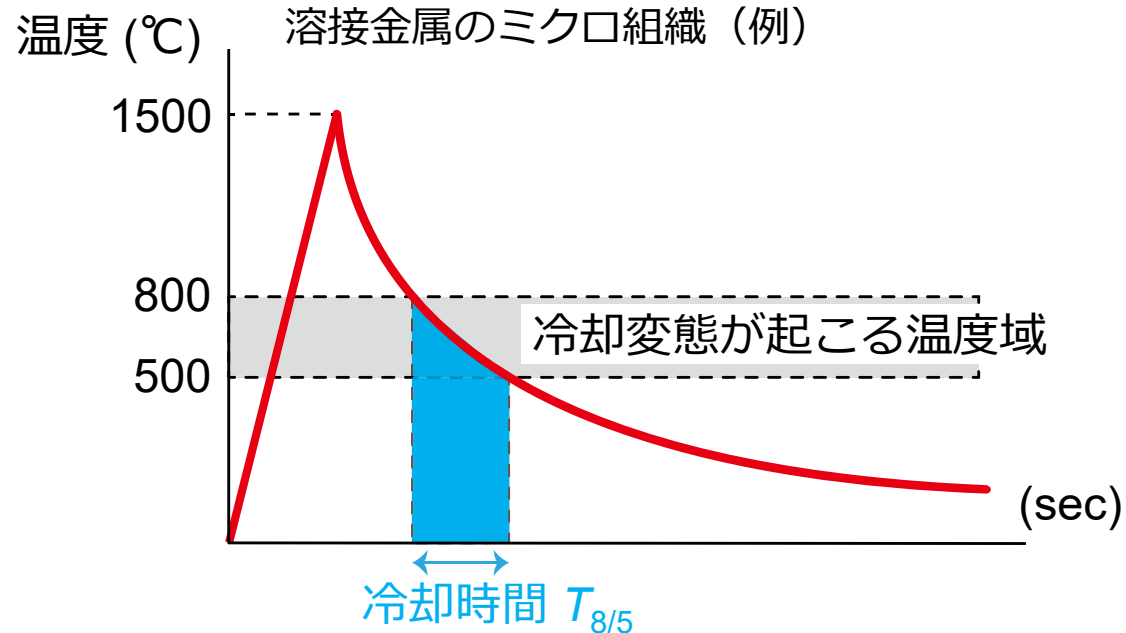
鋼構造溶接部の要求性能：**母材以上の強度**を有すること（オーバーマッチング）



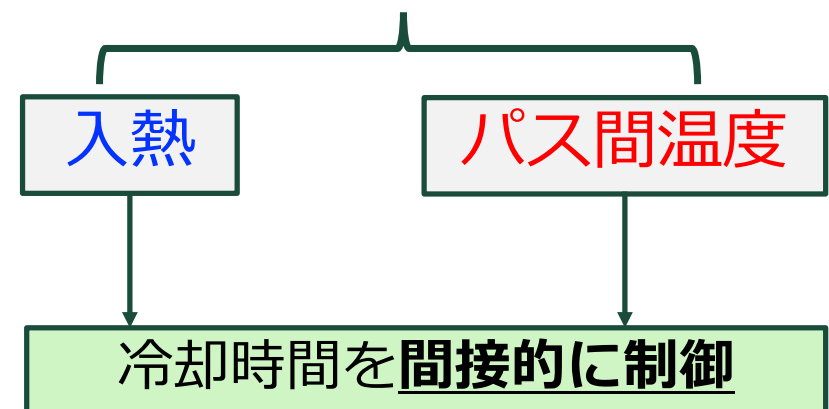
溶接金属のミクロ組織（例）

化学成分：主に使用材料（溶接ワイヤ）による

冷却時間：主に溶接施工条件（**入熱**・**パス間温度**）による



管理条件



現行の溶接施工条件

国土交通大臣認定鉄骨製作工場の性能評価基準における溶接施工条件

適用鋼材の引張強さ	ワイヤの種類	溶接条件	
		入熱 (kJ/cm)	パス間温度 (℃)
400MPa級	YGW11, 15, 18, 19	40以下	350以下
		30以下	450以下
490MPa級	YGW11, 15	30以下	250以下
	YGW18, 19	40以下	350以下

400N級鋼材では、入熱30kJ/cm・パス間温度450℃以下および
入熱40kJ/cm・パス間温度350℃以下の管理値が設定されている。

現行の溶接施工条件

国土交通大臣認定鉄骨製作工場の性能評価基準における溶接施工条件

適用鋼材の引張強さ	ワイヤの種類	溶接条件	
		入熱 (kJ/cm)	パス間温度 (℃)
400MPa級	YGW11, 15, 18, 19	40以下	350以下
		30以下	450以下
490MPa級	YGW11, 15	30以下	250以下
	YGW18, 19	40以下	350以下

490N級鋼材では、YGW18, 19を適用した場合、現状は
40kJ/cm・350℃以下のみ

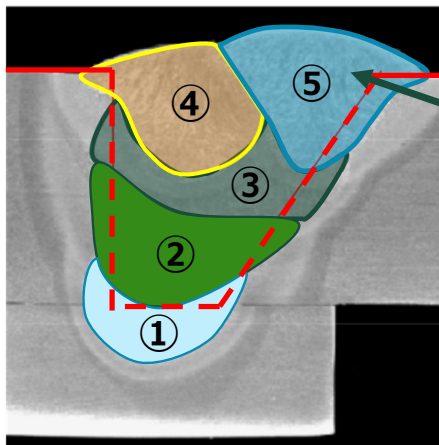
入熱の管理方法

溶接入熱 HI の算出式

$$HI = \frac{0.06E \cdot I}{v} \quad (\text{kJ/cm})$$

E : アーク電圧 (V)
 I : 溶接電流 (A)
 v : 溶接速度 (cm/min)
 HI : 入熱量 (kJ/cm)

溶接積層



各パスの溶着断面積は、入熱の大きさに比例
 $HI \propto A_w$

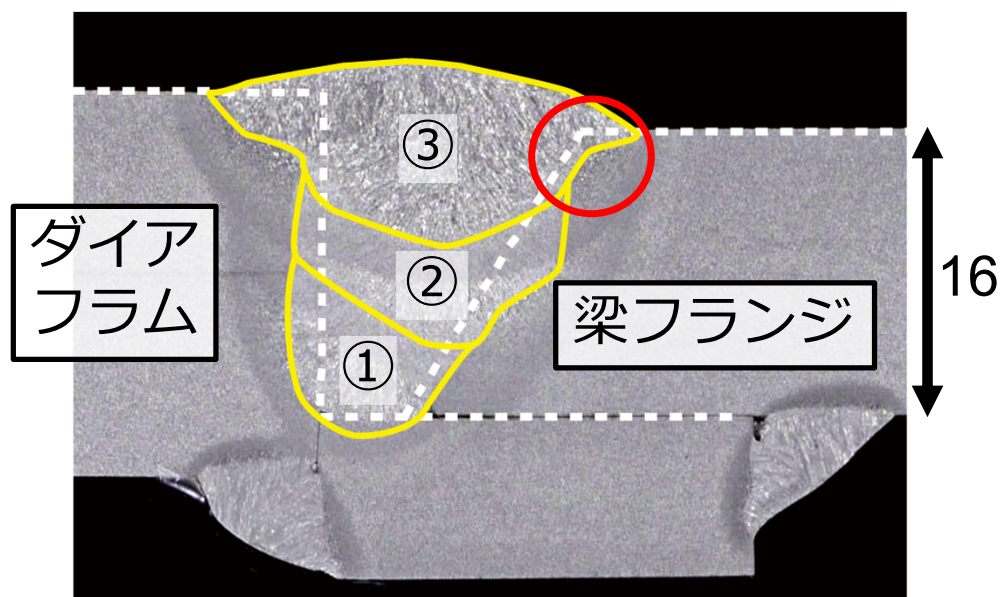
HI : 入熱量 (kJ/cm)
 A_w : 溶着断面積 (cm²)



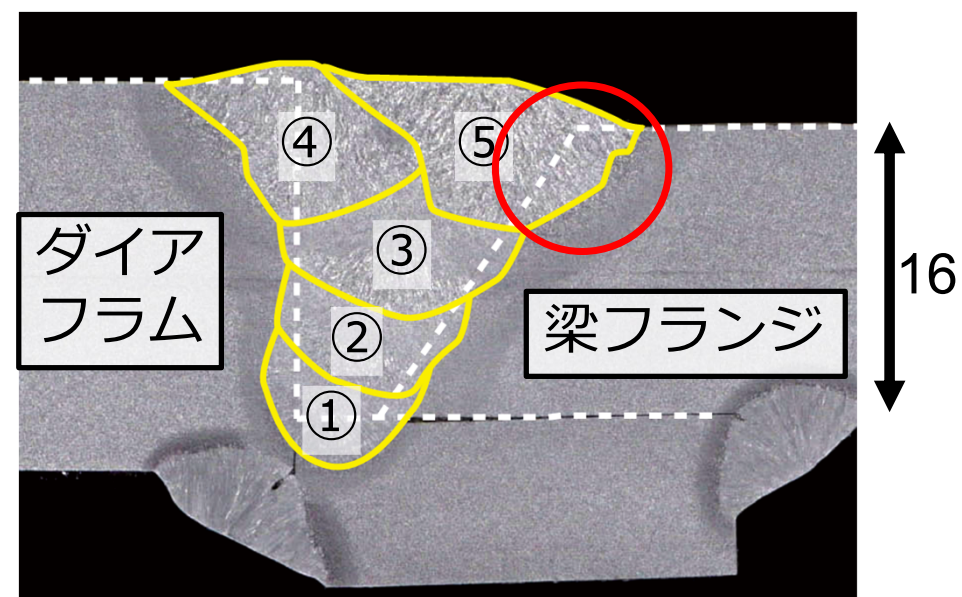
溶接積層を指定することで、入熱を管理することが一般的

開先肩の溶込み

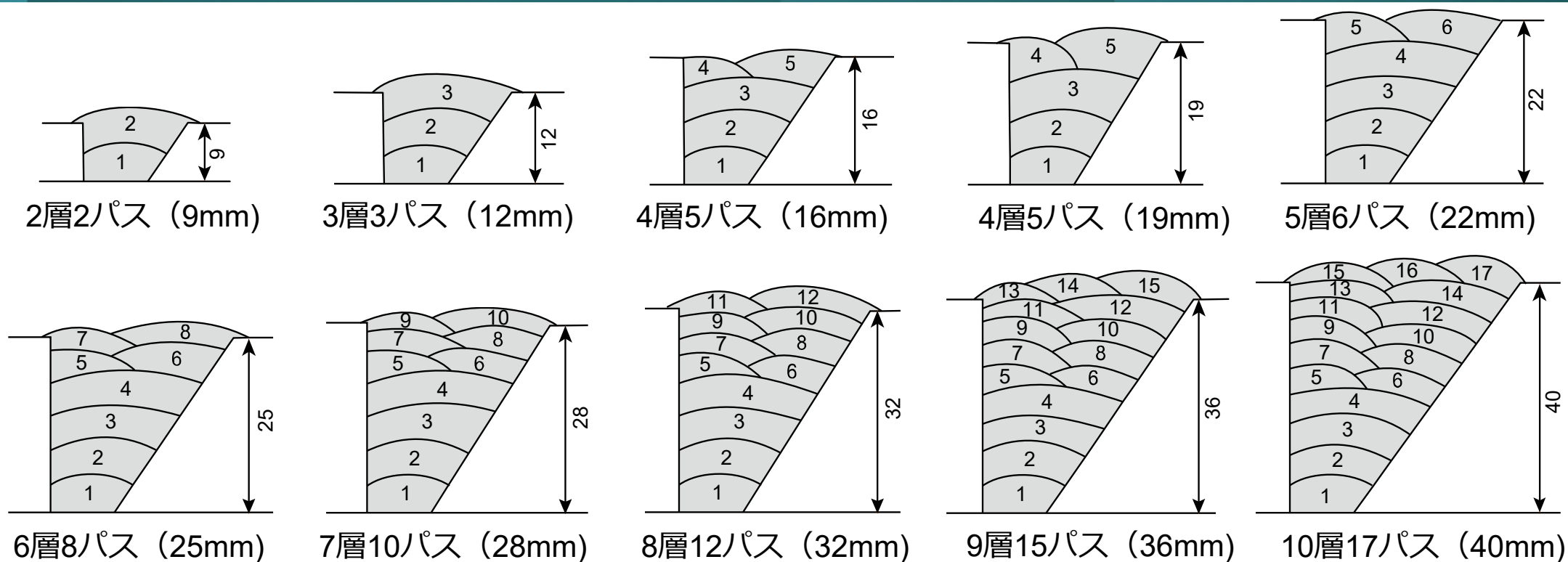
入熱量：40kJ/cm以下
(ウィービング幅大)



入熱量：30kJ/cm以下
(ウィービング幅小)



入熱 $\leq 30\text{kJ/cm}$ の標準積層



この溶接積層を用いて， 30kJ/cm 以下の溶接条件を一貫して実現する

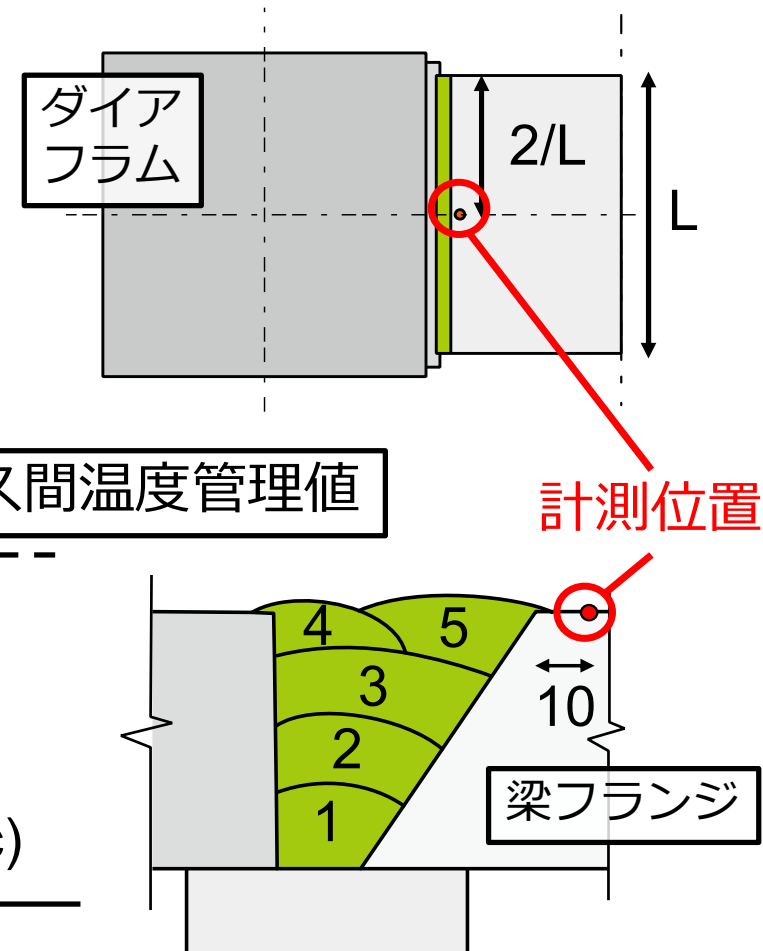
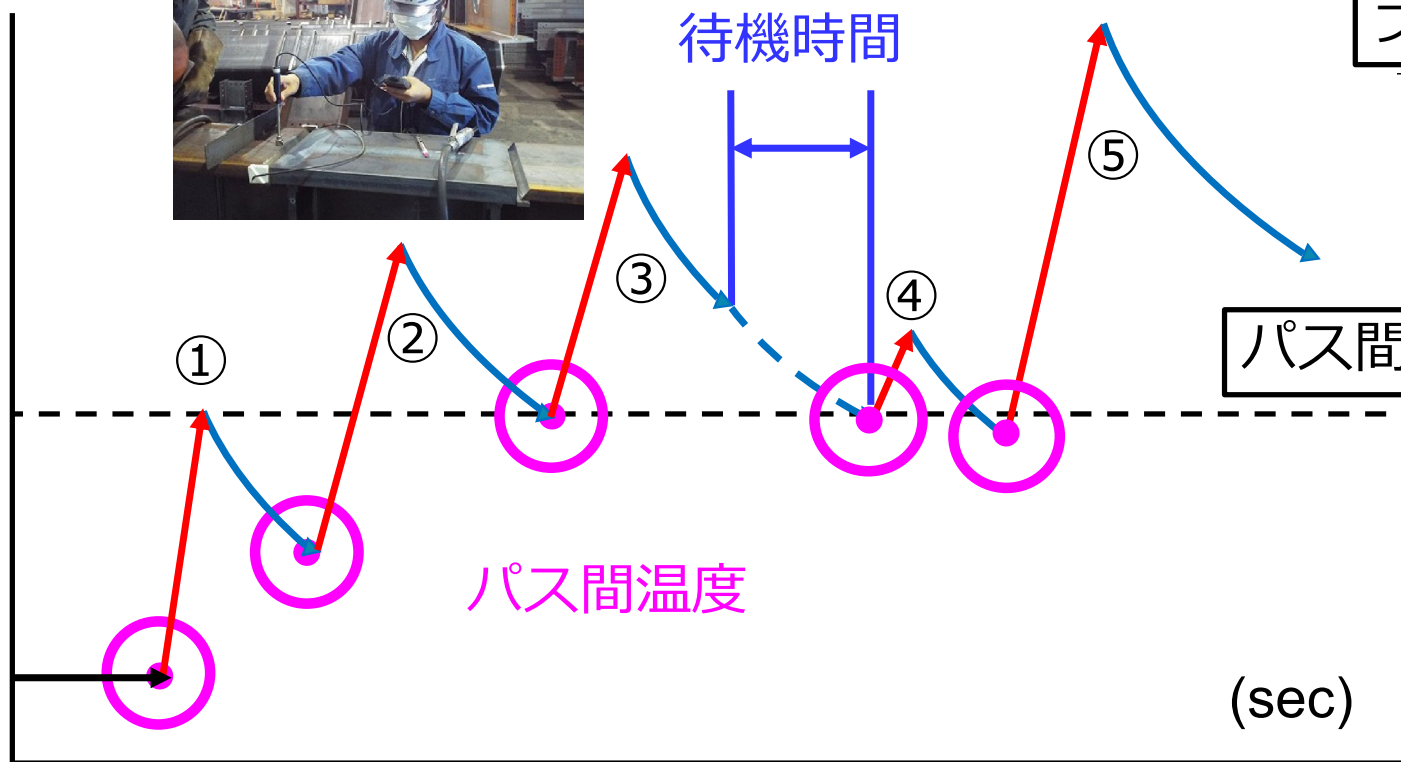
パス間温度の管理方法

温度計

温度 (°C)

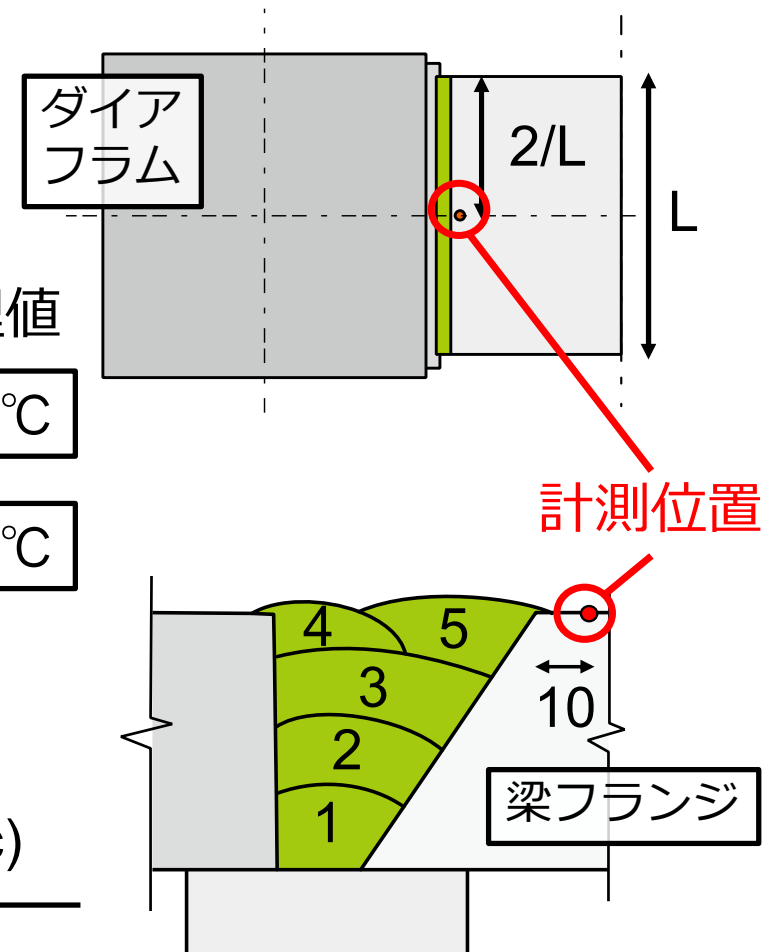
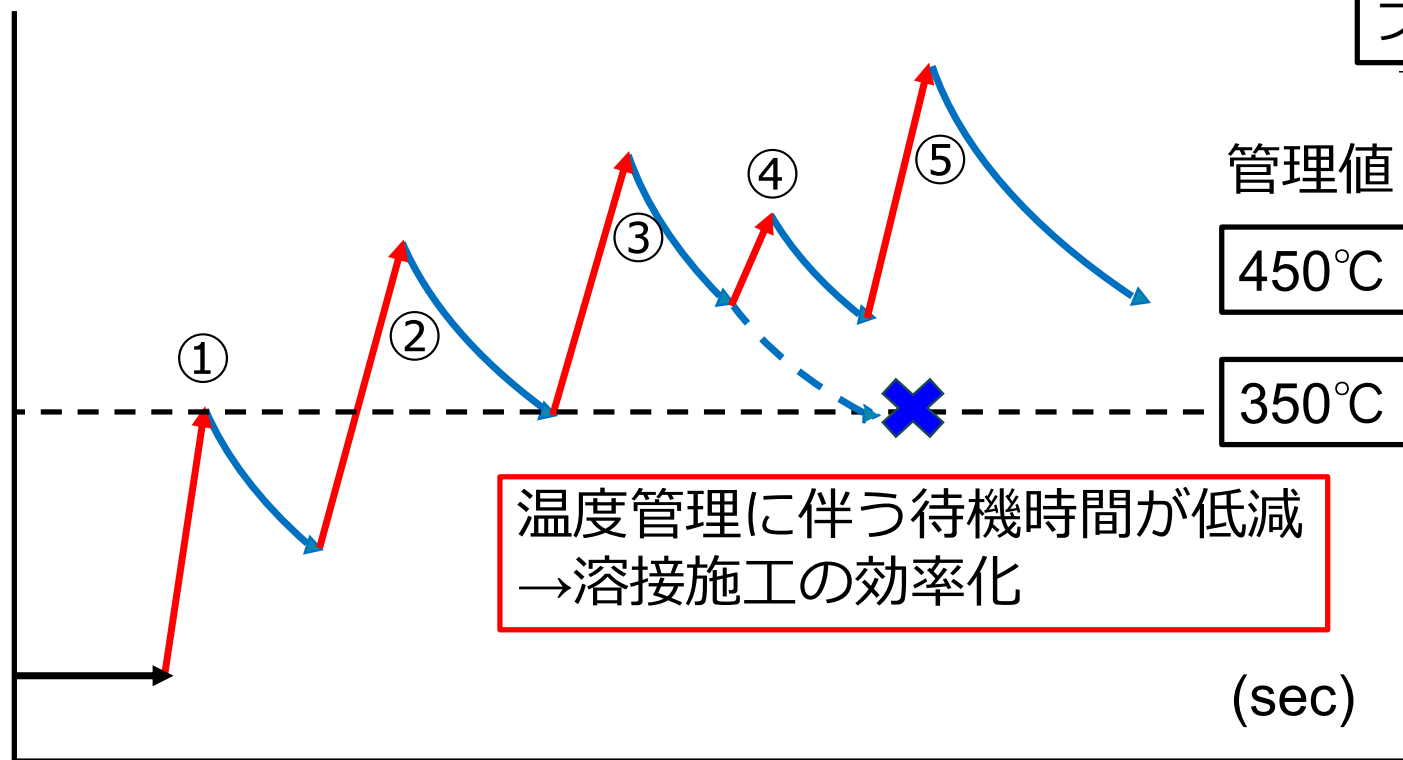


待機時間



パス間温度管理値の緩和

温度 (°C)



本研究の目的

- 490N/mm² 級鋼材を対象として、溶接ワイヤにYGW18を用い、 $HI \leq 30\text{kJ/cm}$, $IT \leq 450^\circ\text{C}$ (提案条件) とする溶接施工条件の妥当性を検証する
- 提案条件における管理合理化を図るため、提案条件における合理的なパス間温度管理方法を提示する

適用鋼材の引張強さ：490N/mm²

溶接ワイヤ：YGW18

溶接条件

提案条件

入熱：30kJ/cm以下
パス間温度：450℃以下

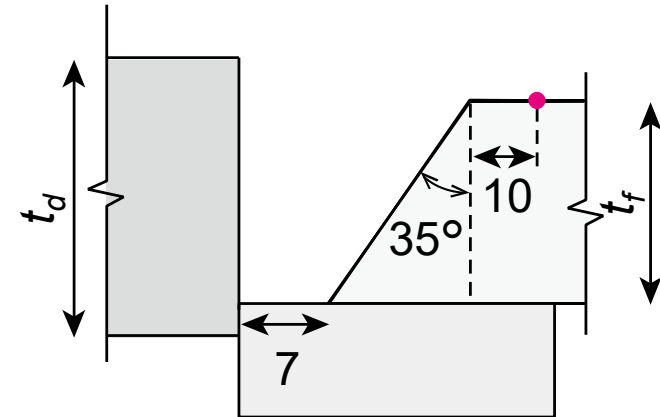
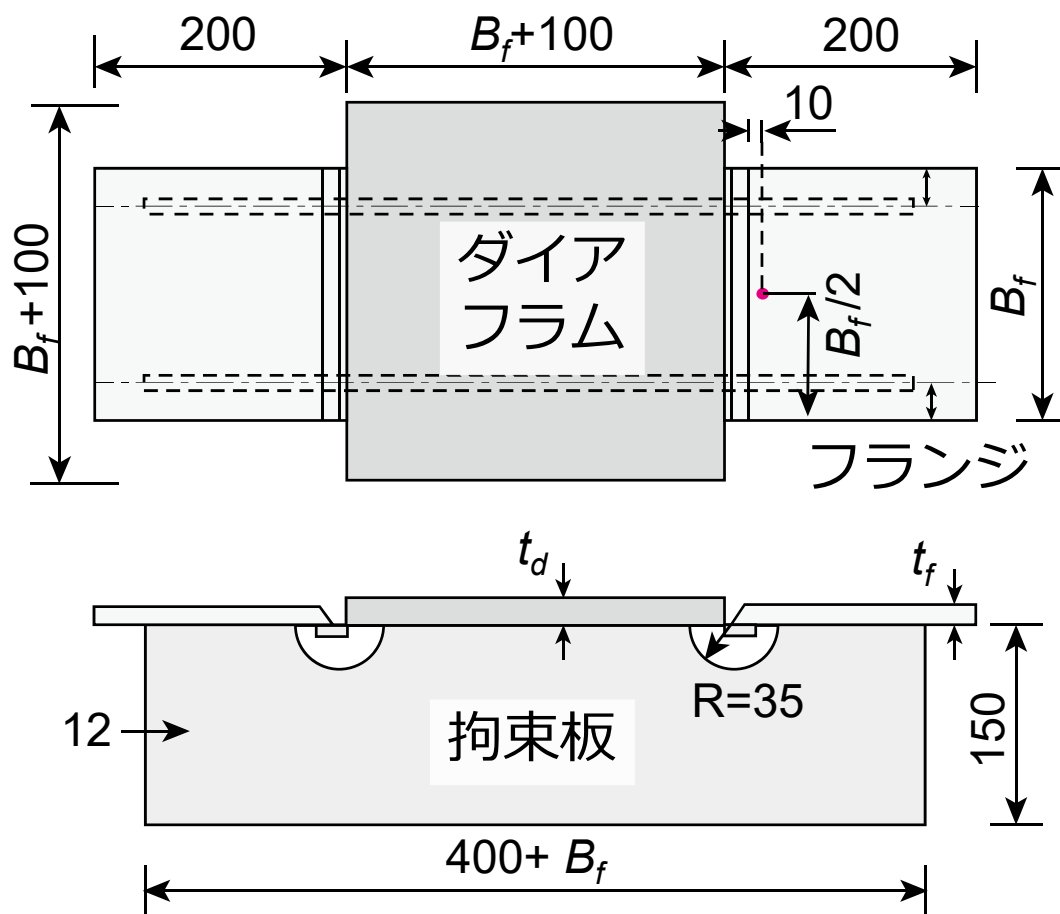
従来条件

入熱：40kJ/cm以下
パス間温度：350℃以下

報告内容

1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

提案条件と従来条件の溶接施工効率の比較・検討



試験体形状一覧

鋼種	フランジ厚 t_f	B_f	t_d
SN490B	16	200	22
	25	200	32
	32	250	40

※ B_f は、JIS圧延H形鋼または外法一定鋼の最小幅とした

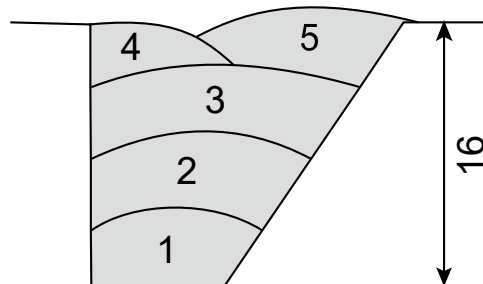
提案条件と従来条件の溶接施工効率の比較・検討

提案条件

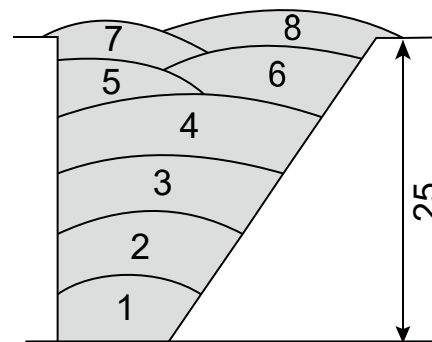
HI : 30kJ/cm以下

IT : 450℃以下

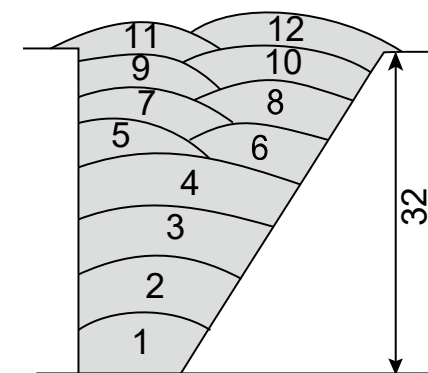
溶接ワイヤ : YGW18



4層5パス (16mm)



6層8パス (25mm)



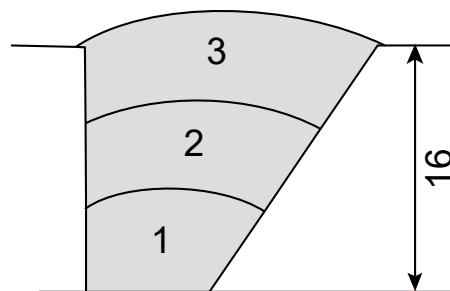
8層12パス (32mm)

従来条件

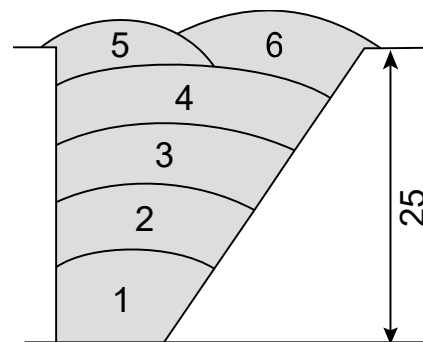
HI : 40kJ/cm以下

IT : 350℃以下

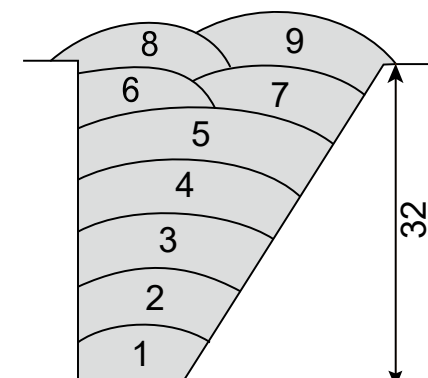
溶接ワイヤ : YGW18



3層3パス (16mm)



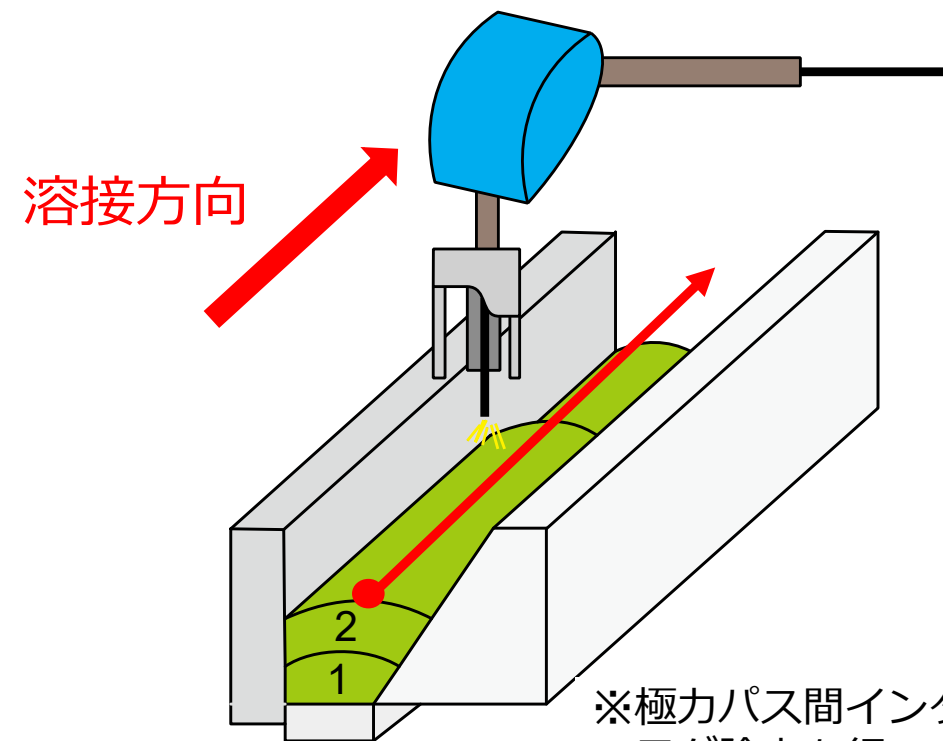
5層6パス (25mm)



7層9パス (32mm)

提案条件と従来条件の溶接施工効率の比較・検討

溶接の様子



※極カパス間インターバルを短くするために、スラグ除去も行っていない。

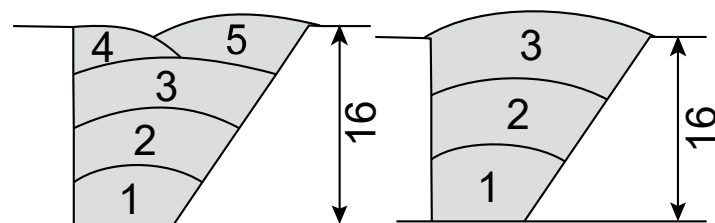
溶接状況



提案条件と従来条件の溶接施工効率の比較・検討

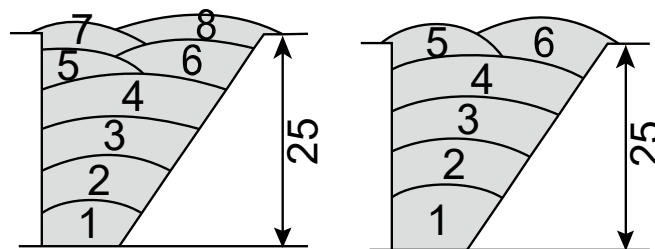
提案条件

従来条件



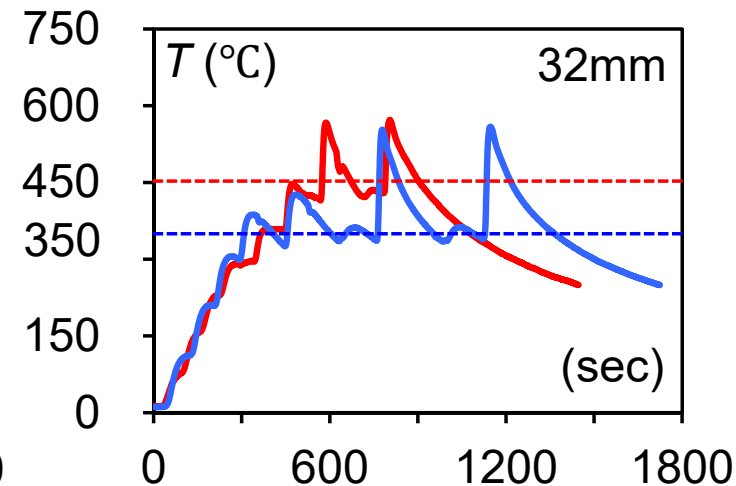
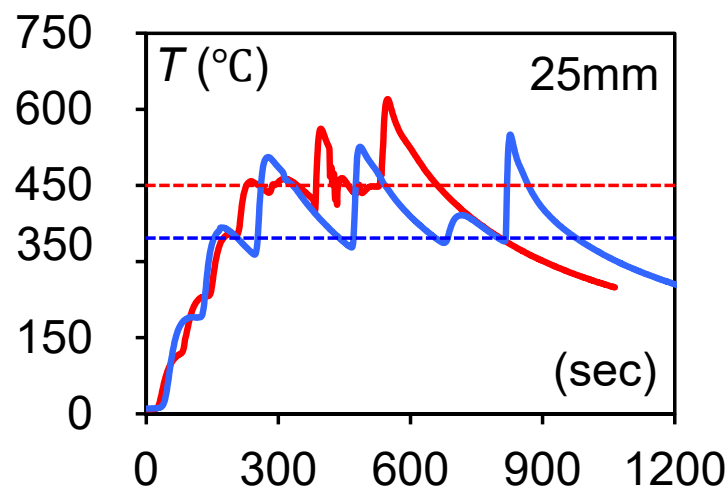
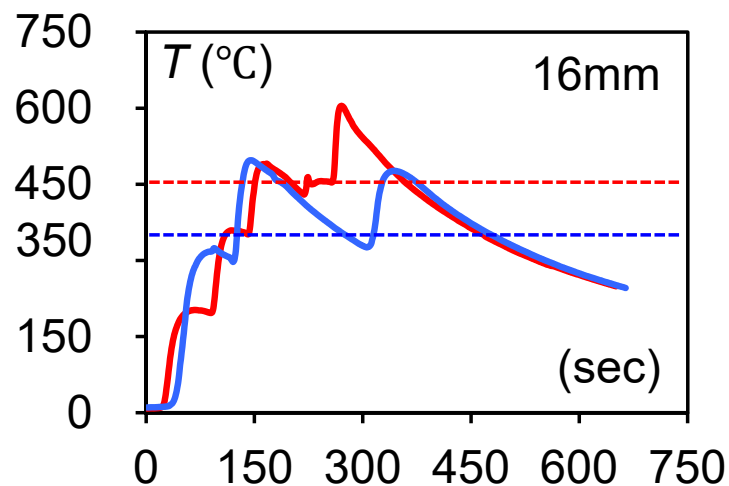
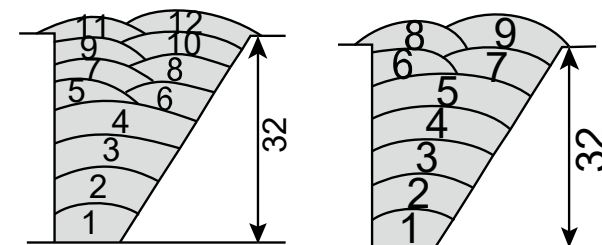
提案条件

従来条件



提案条件

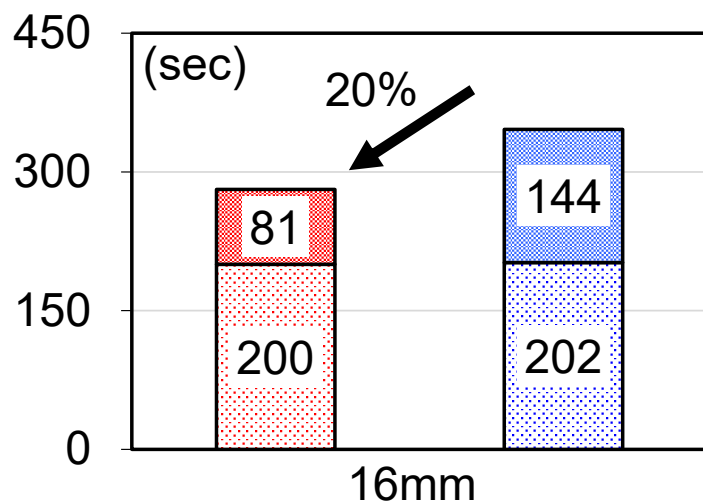
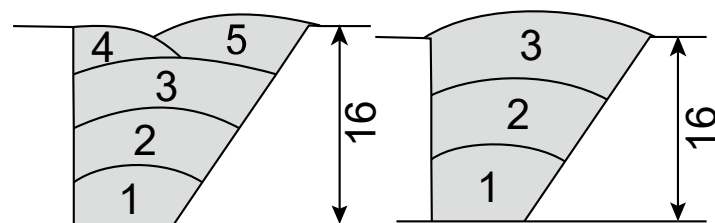
従来条件



提案条件と従来条件の溶接施工効率の比較・検討

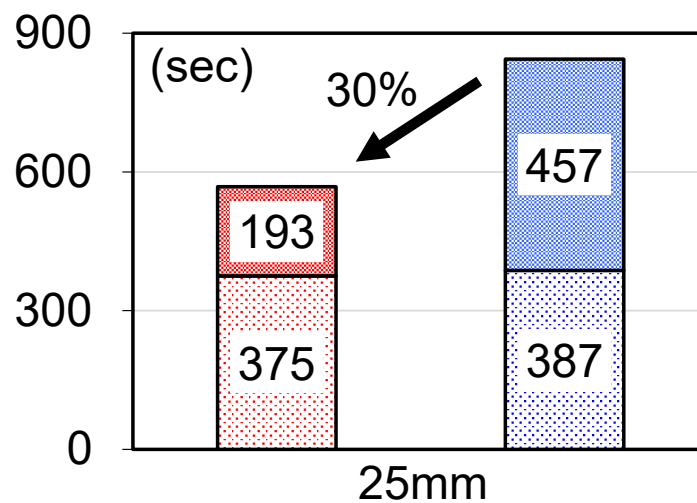
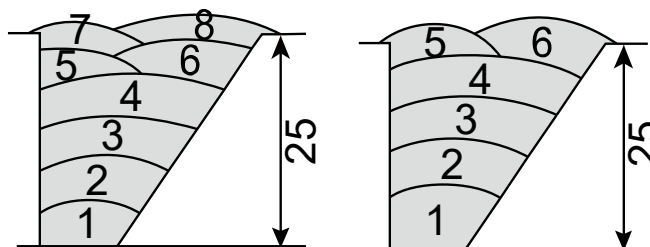
提案条件

従来条件



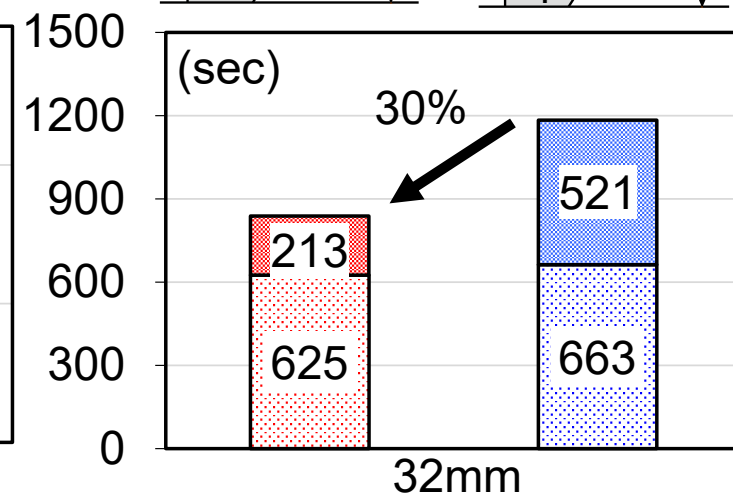
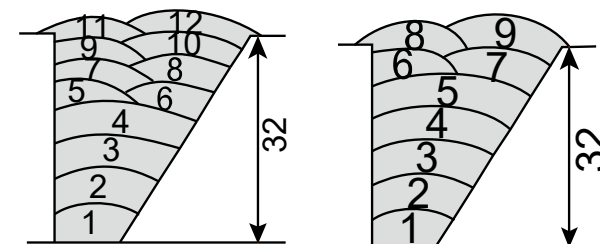
提案条件

従来条件



提案条件

従来条件



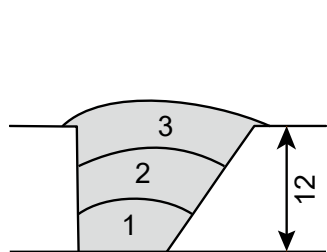
溶接時間 (アークタイム) 待機時間

報告内容

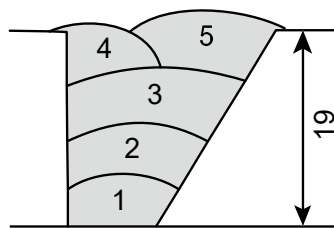
1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

本検討の概要

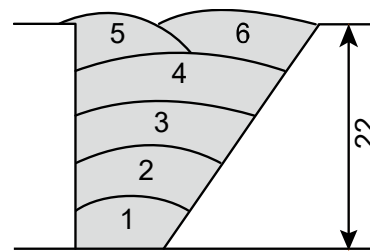
板厚12~40mmの溶接施工試験



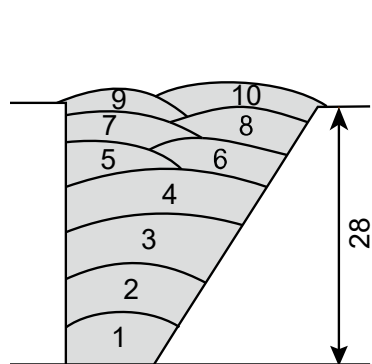
3層3パス (12mm)



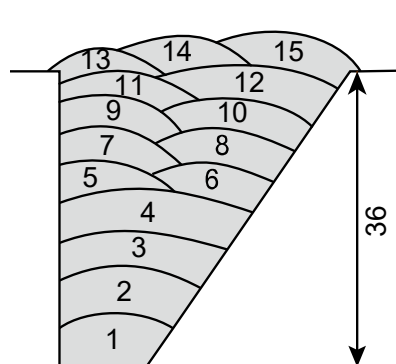
4層5パス (19mm)



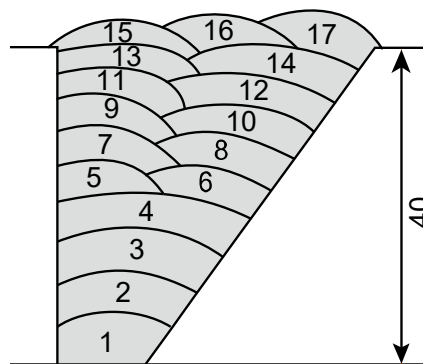
5層6パス (22mm)



7層10パス (28mm)



9層15パス (36mm)



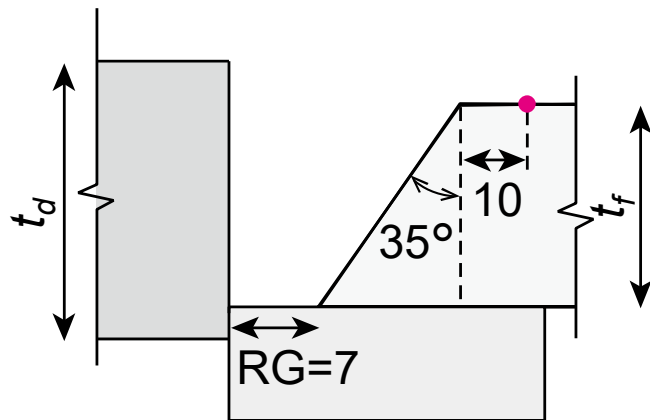
10層17パス (40mm)

3社のFABでの溶接施工試験 (16mm, 25mm, 32mm)

・ 東京 (T)

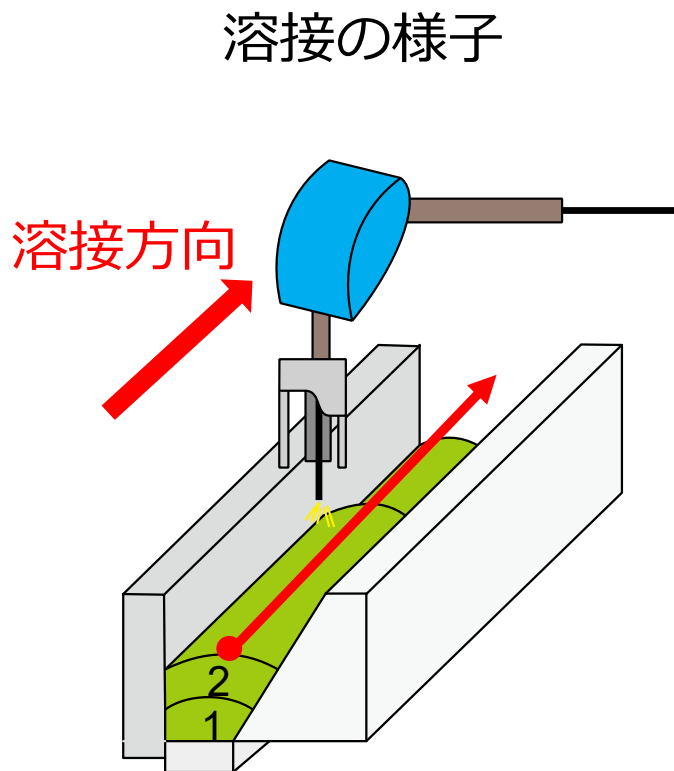
・ 福岡 (F)

・ 北海道 (H)



東京：12~40mm
福岡：16, 25, 32mm
北海道：16, 25, 32mm

溶接施工試験計画（溶接方法・溶接ワイヤ）



溶接ワイヤ(YGW18)の化学成分

溶接ワイヤ	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Mo (%)	Ti+Zr (%)	C _{eq} (%)
A	0.05	0.94	1.69	0.005	0.013	0.24	<0.01	0.14	0.371
B	0.03	0.79	1.90	0.011	0.007	0.25	0.15	0.21	0.417
C	0.02	0.84	1.83	0.011	0.008	0.24	0.14	0.21	0.395

A : 東京 B : 福岡 C : 北海道

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14$$

化学成分について

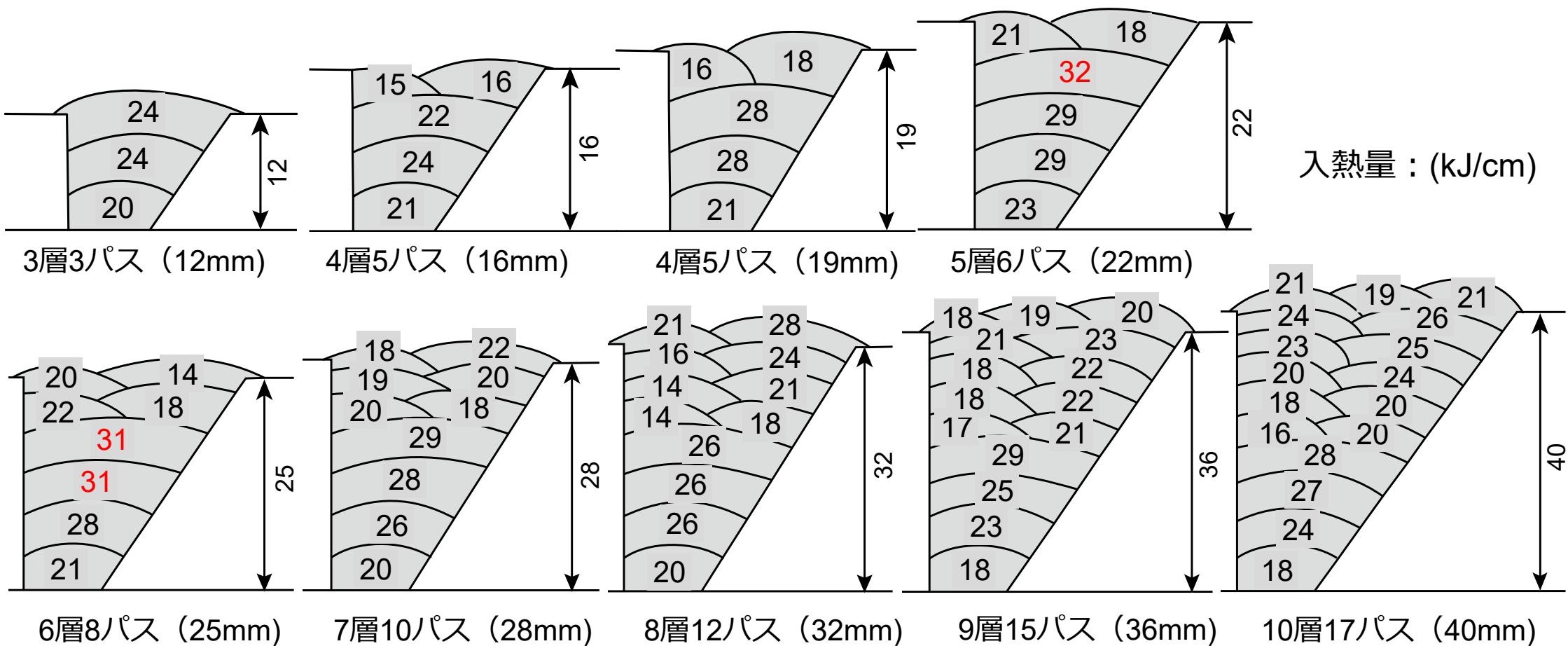
溶接金属の化学成分は主に使用するワイヤに依存する。
ただし、溶接施工条件によって母材希釈や酸化消耗によっても変化する。

JIS Z 3312: 2009 ソリッドワイヤの化学成分

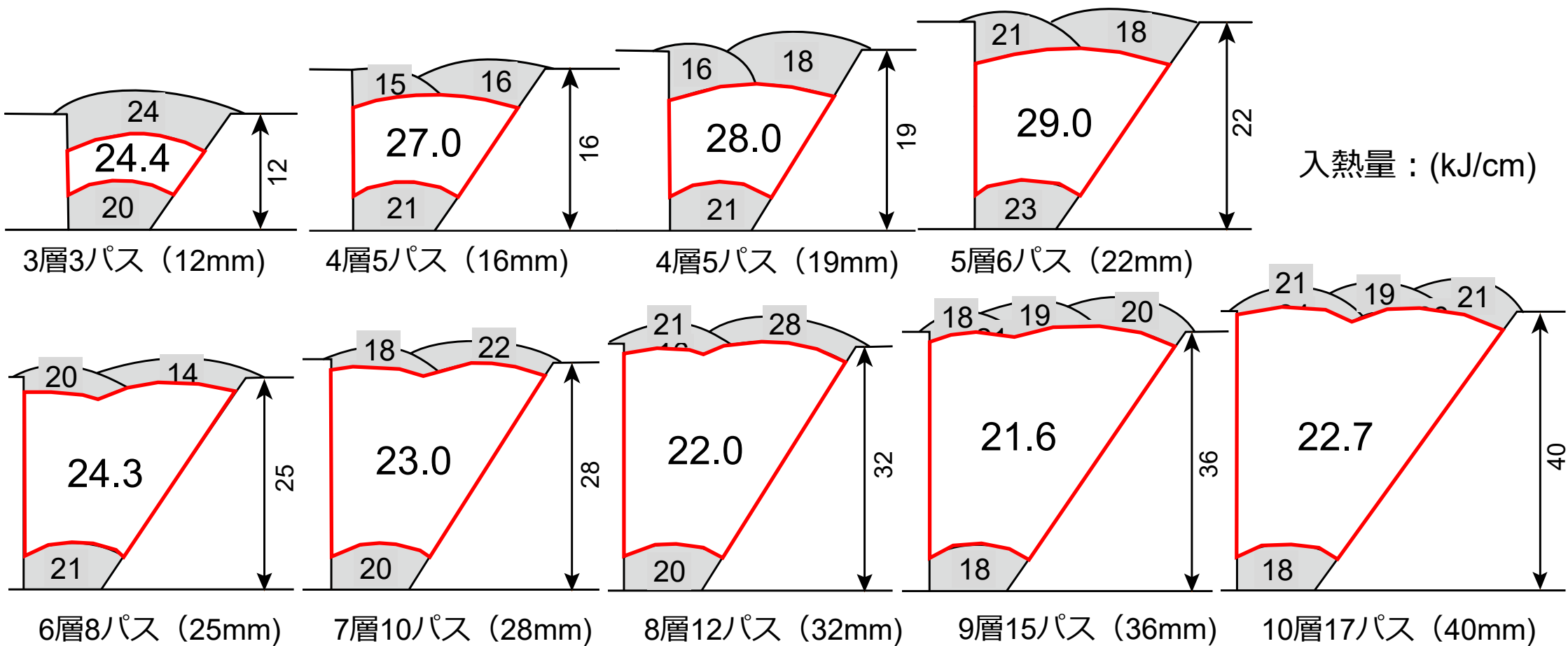
	化学成分 の記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ti+Zr
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
YGW11	11	0.02~ 0.15	0.50~ 1.10	1.40~ 1.90	0.030 以下	0.030 以下	0.50 以下	-	0.02~ 0.30
YGW18	J18	0.15 以下	0.55~ 1.10	1.40~ 2.60	0.030 以下	0.030 以下	0.50 以下	0.40 以下	0.30 以下

- ・ 高入熱・高パス間温度用 ⇒ **Mo添加有**
- ・ 横向き溶接用（低入熱・低パス間温度用） ⇒ Mo添加無

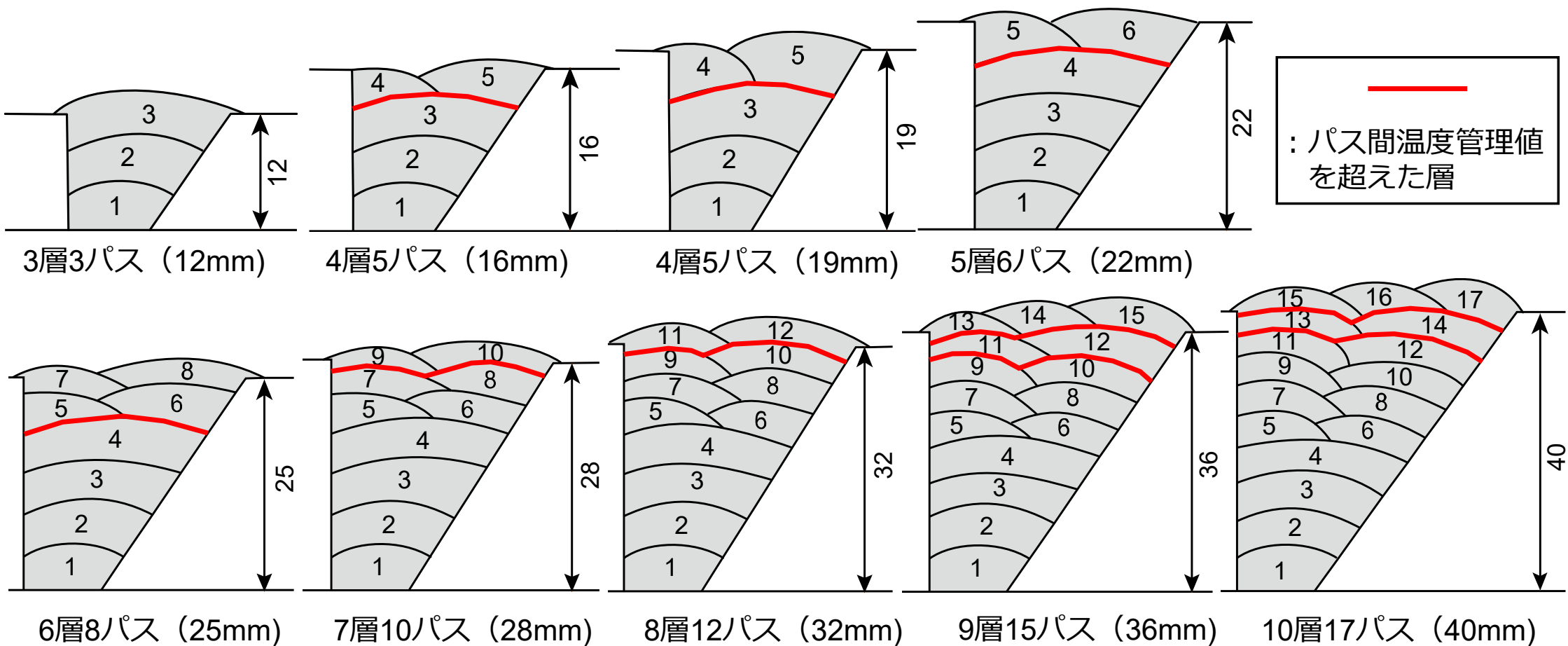
溶接施工試験結果（フランジ厚12~40mm）



溶接施工試験結果（フランジ厚12~40mm）

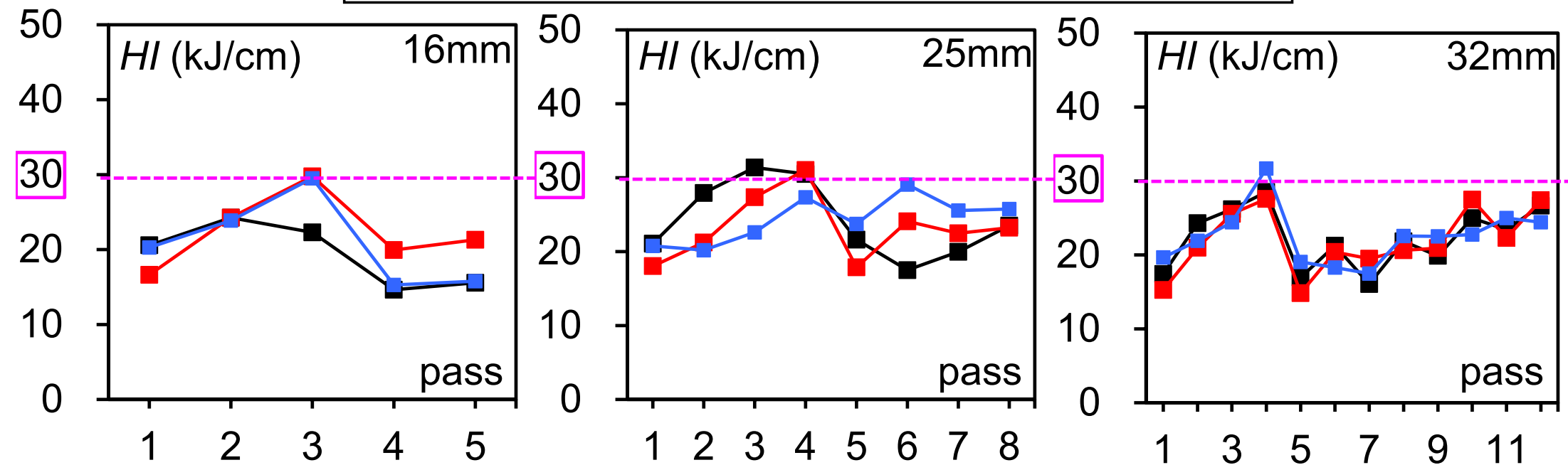


溶接施工試験結果（フランジ厚12~40mm）



溶接施工試験結果（入熱の比較）

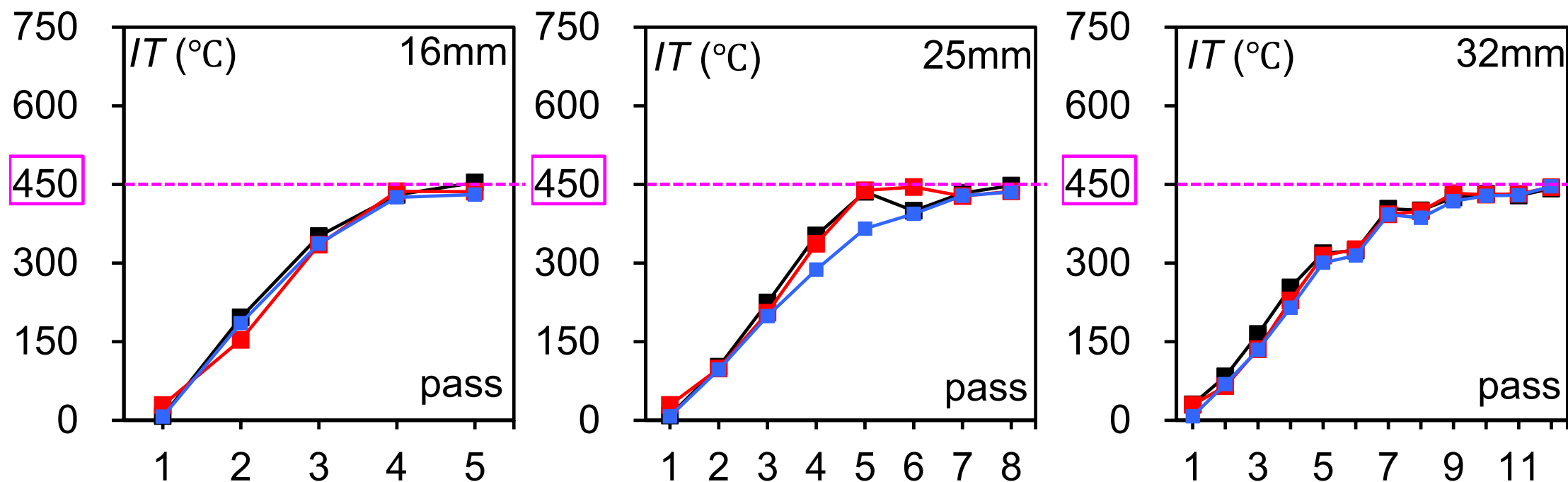
■：東京 (T) ■：福岡 (F) ■：北海道 (H)



中間層 平均HI (kJ/cm)	23.3	25.8	20.4
	27.0	24.3	22.0
	26.7	24.6	22.3

溶接施工試験結果（パス間温度の比較）

■：東京 (T) ■：福岡 (F) ■：北海道 (H)



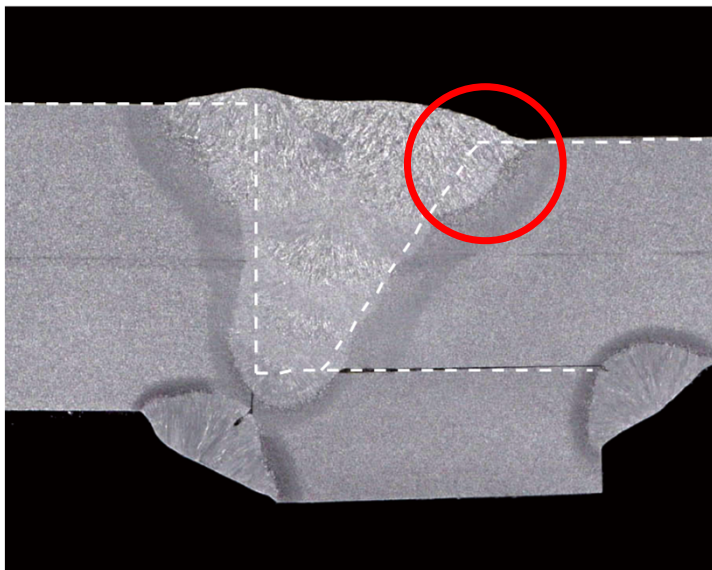
室温で20℃以上の差がある中で3社のパス間温度はほぼ同様に推移

講演内容

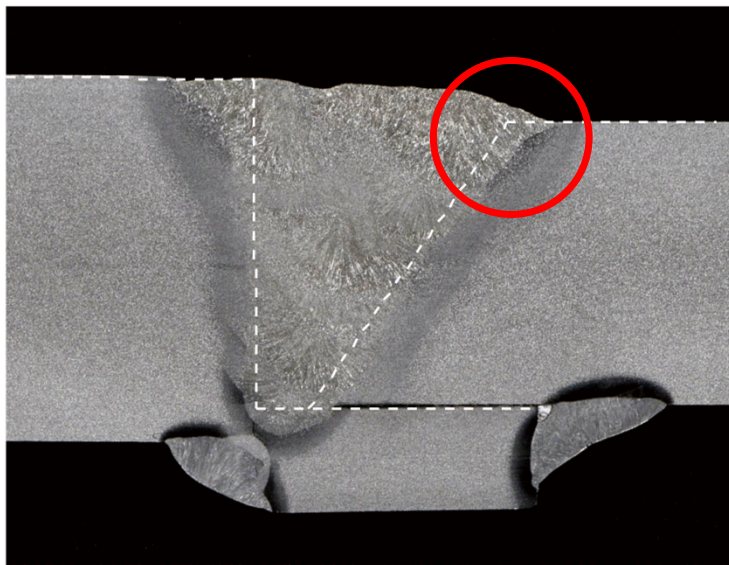
1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

断面マクロ

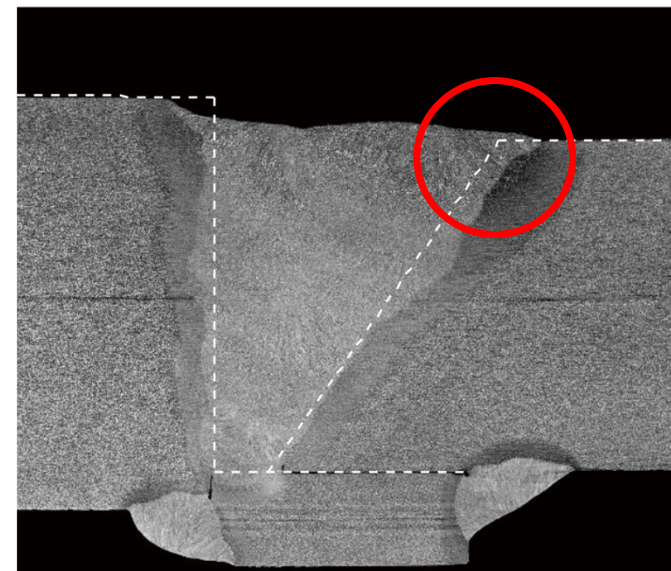
板厚16mm



板厚25mm



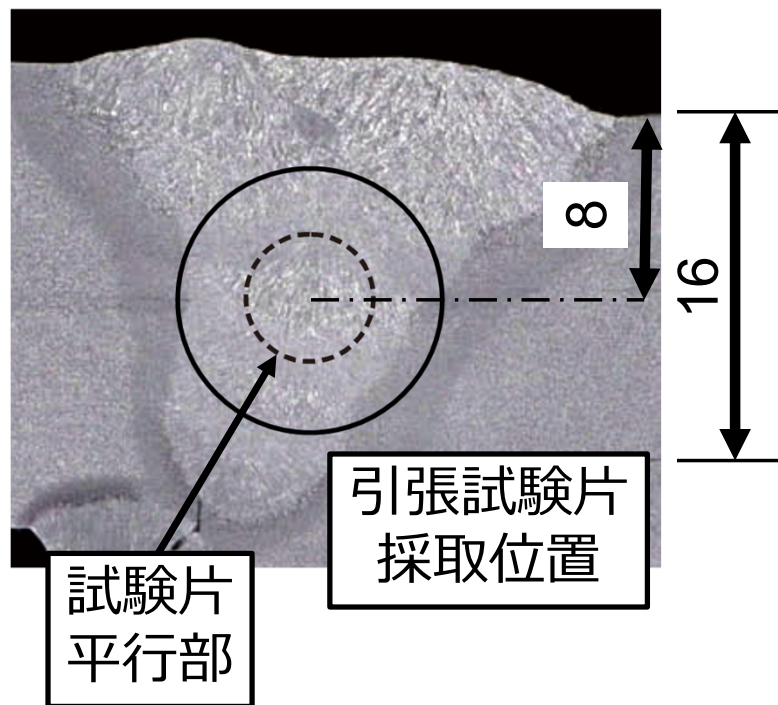
板厚32mm



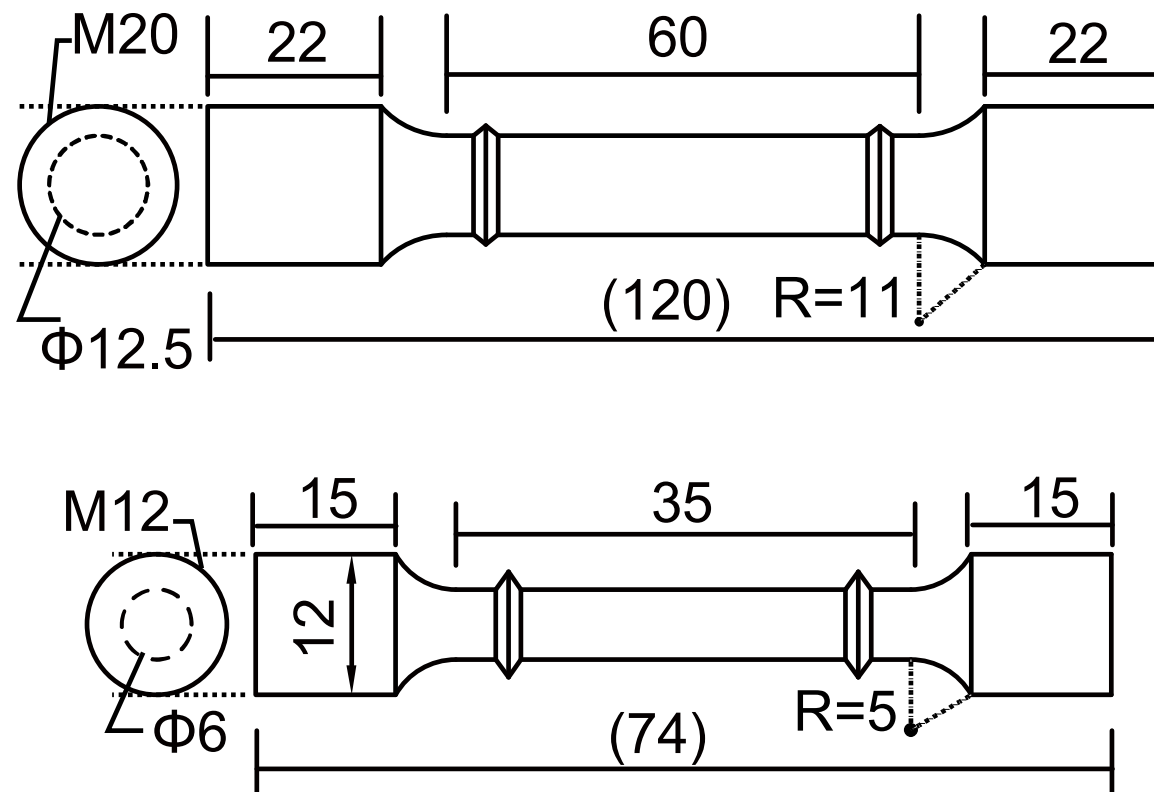
開先肩付近において、母材に対して十分な溶込みが確保されている

溶接金属の引張試験位置

引張試験片採取位置

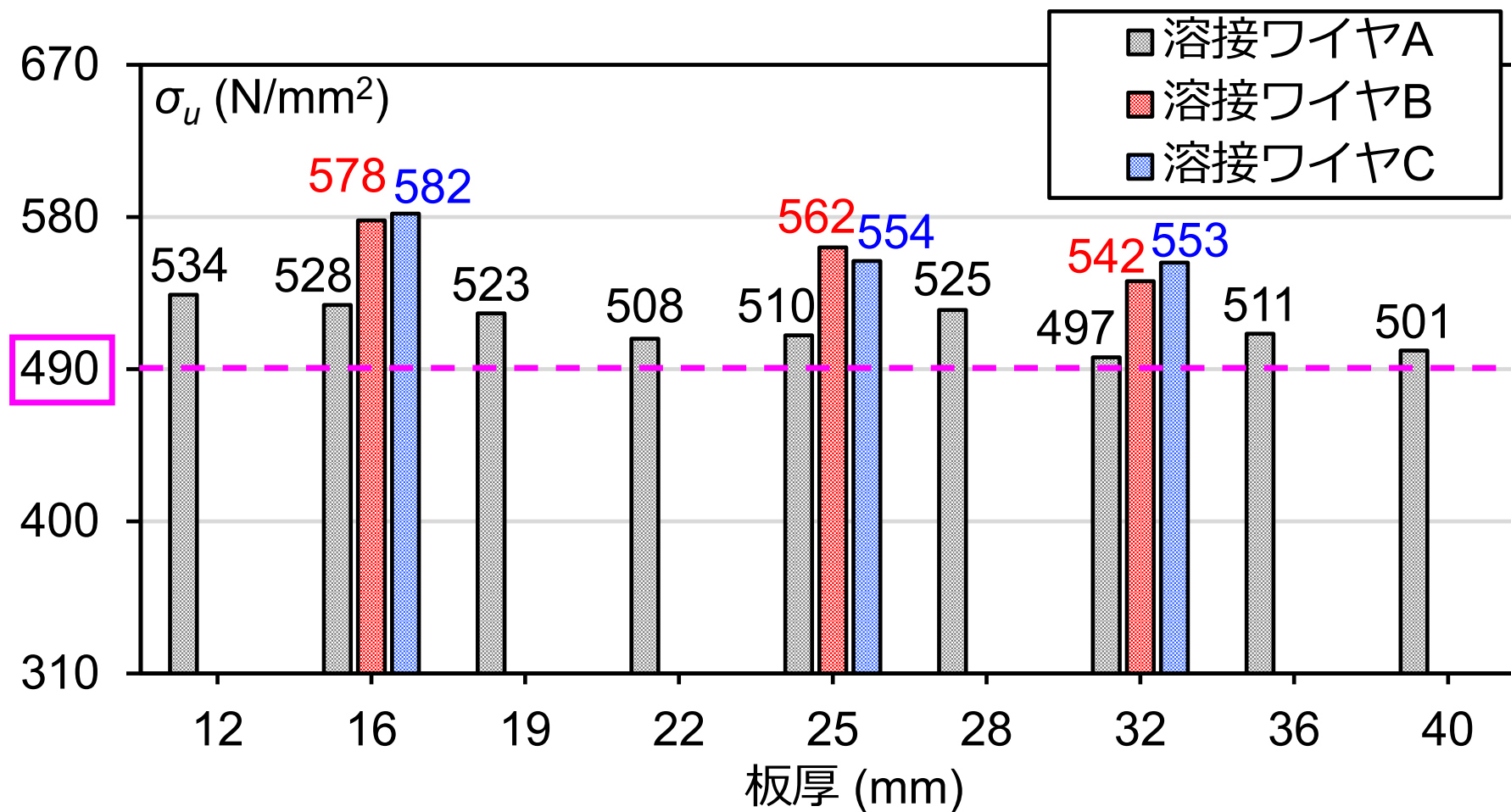


引張試験片形状 (JIS Z 3111)



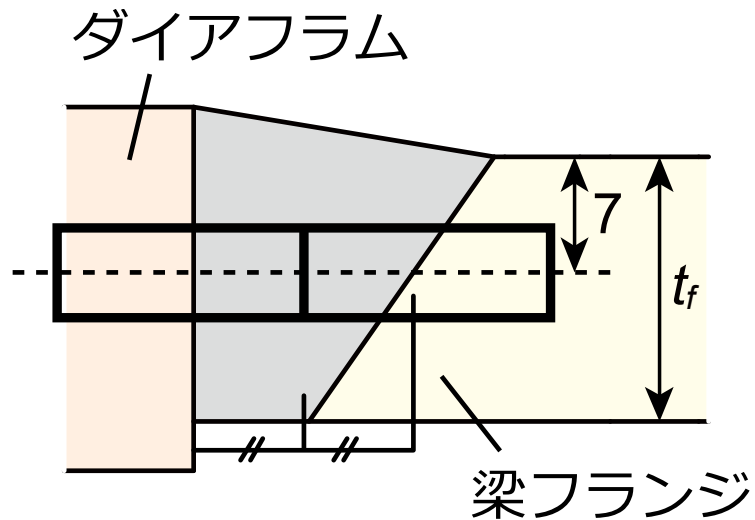
※ 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験 (JSS IV13-2016) による

溶接金属の引張試験結果

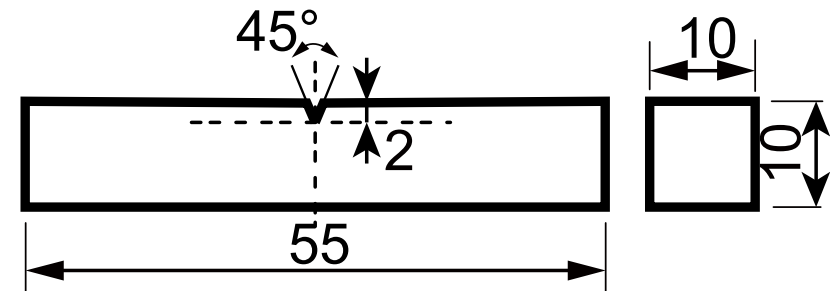


シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験片採取位置



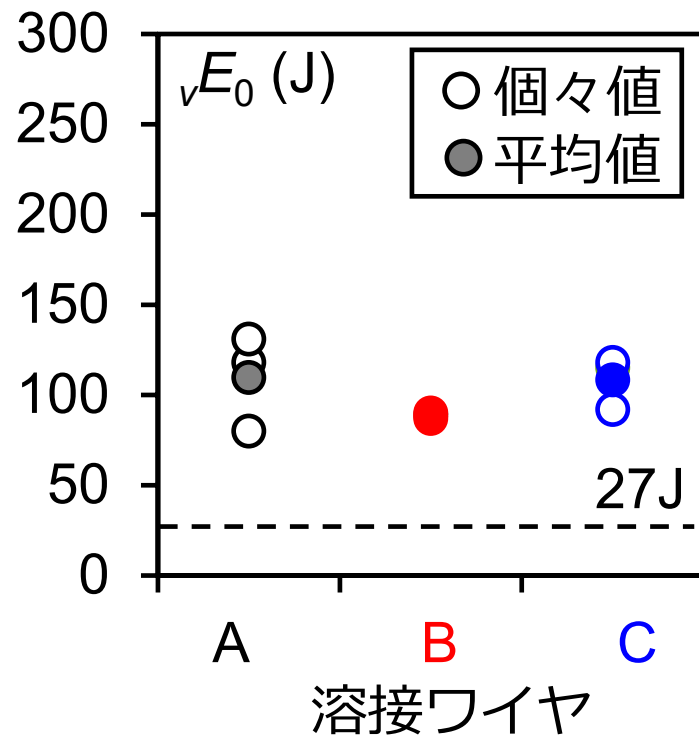
Vノッチ試験片 (JIS Z 2242)



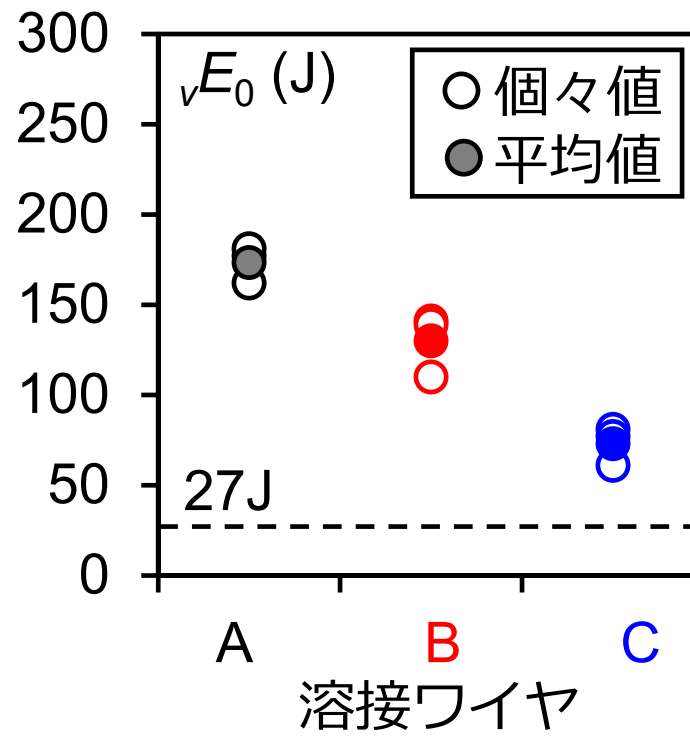
※ 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験（日本鋼構造協会JSS IV13-2016）による

シャルピー衝撃試験

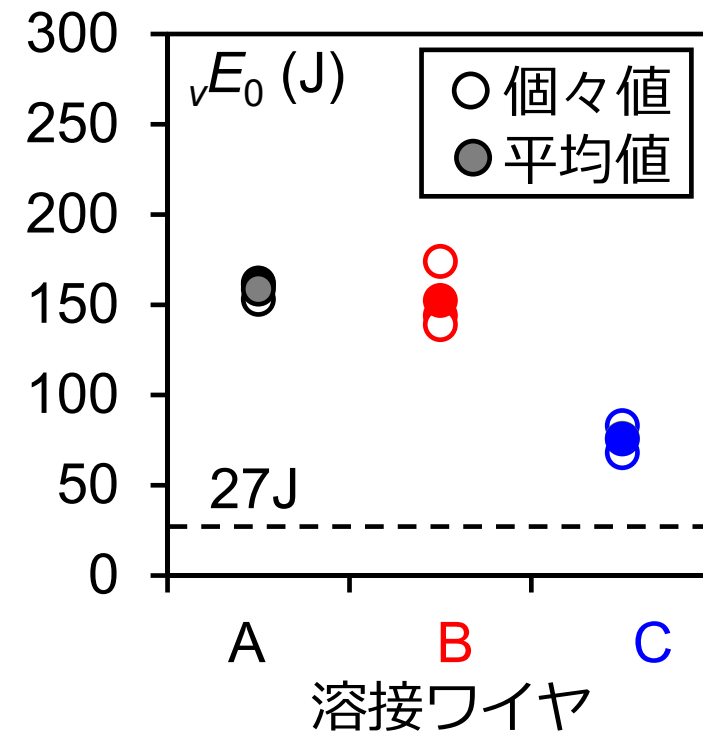
板厚16mm



板厚25mm



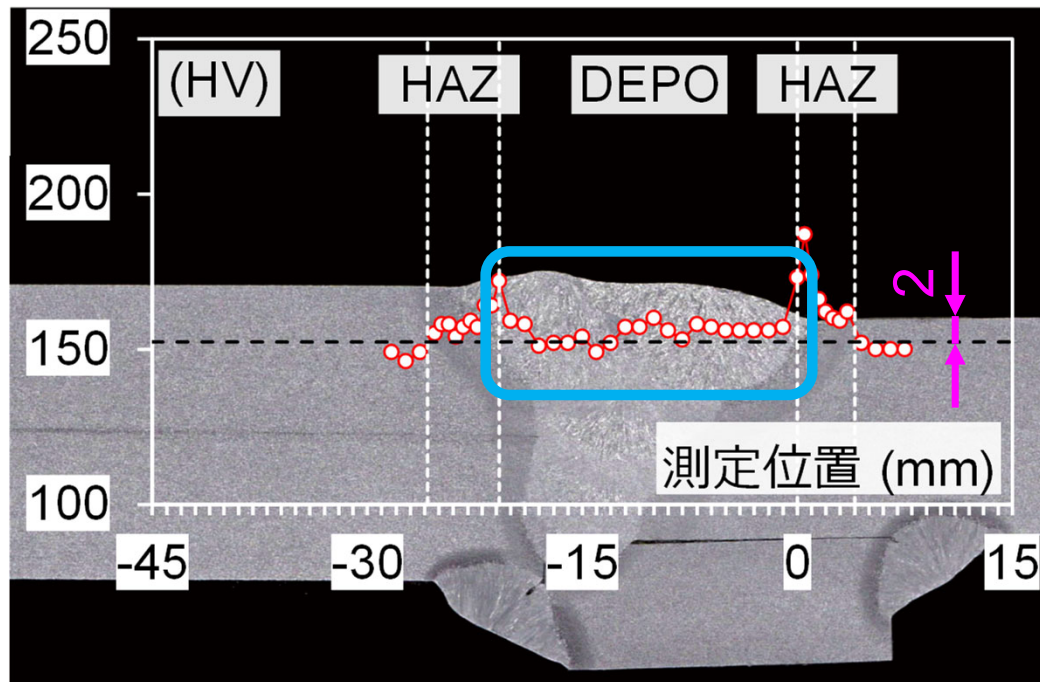
板厚32mm



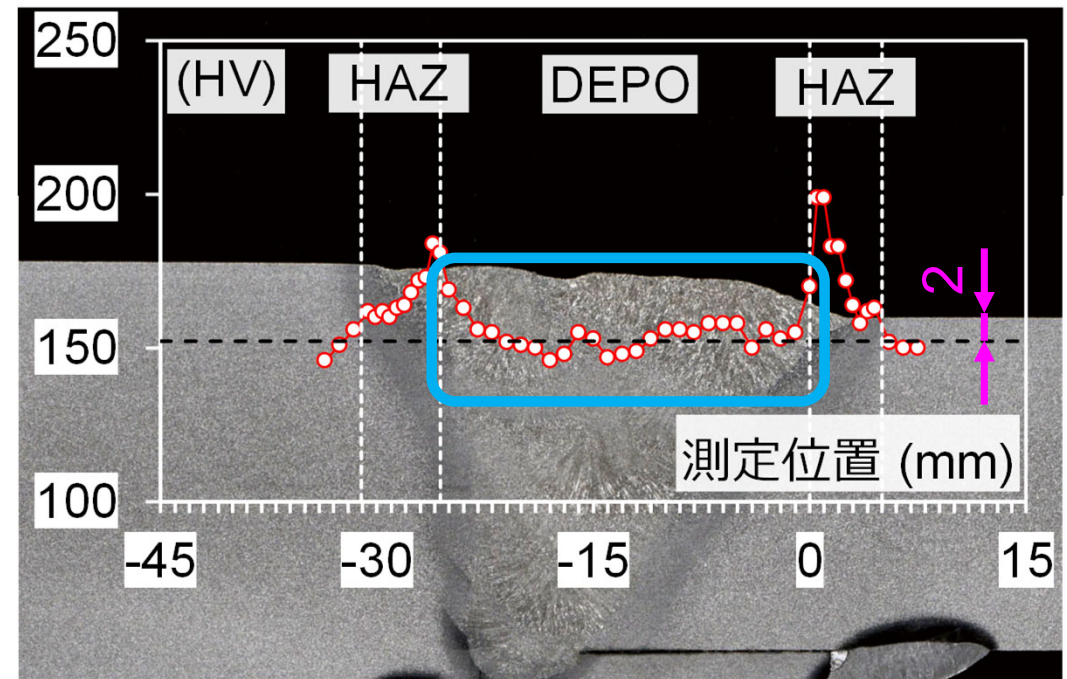
いずれも母材の規格下限値である27Jを大きく上回っている

ビッカース硬さ試験

板厚16mm

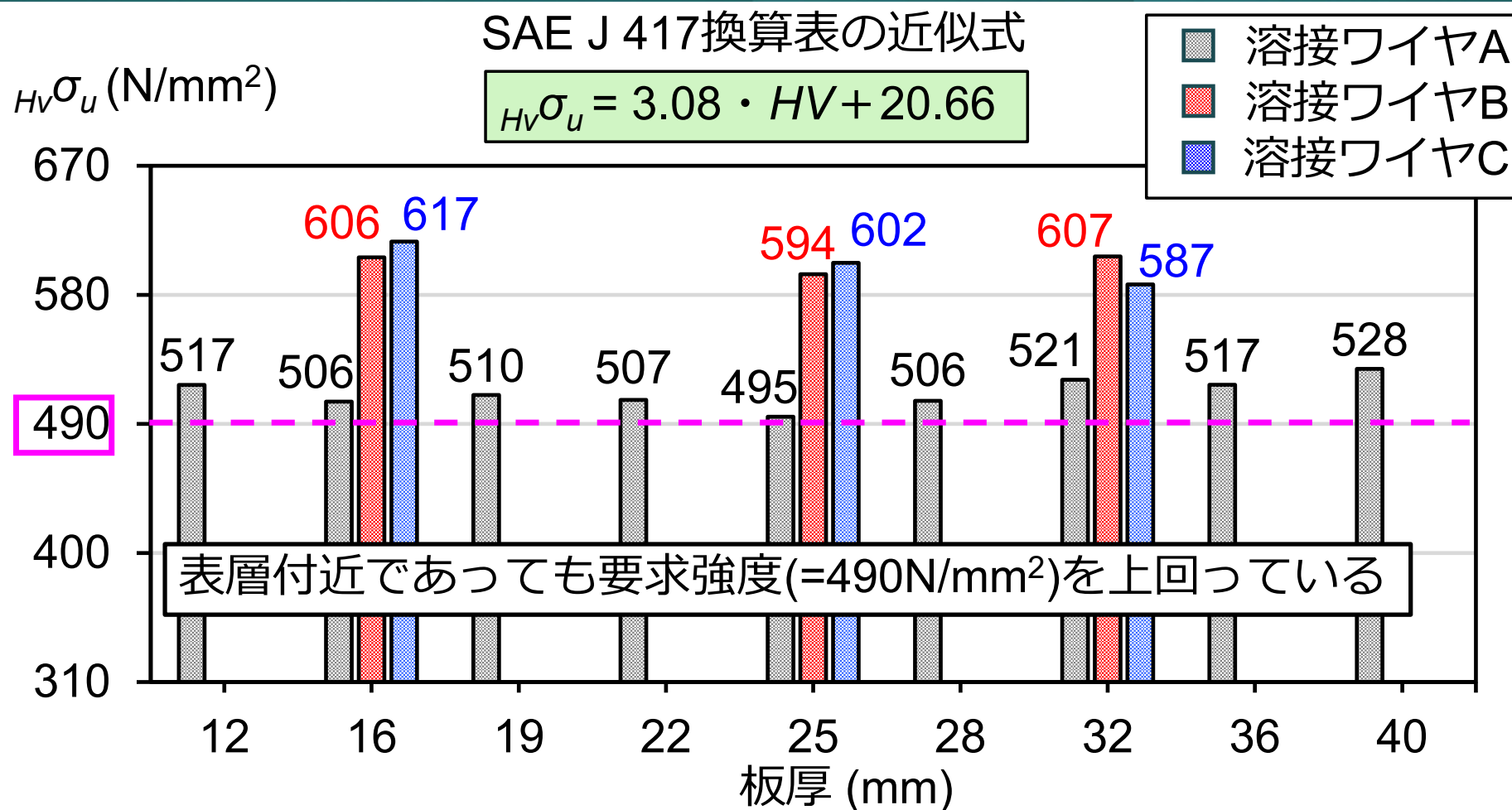


板厚25mm



溶接金属(DEPO)の硬さは概ね均等に分布している

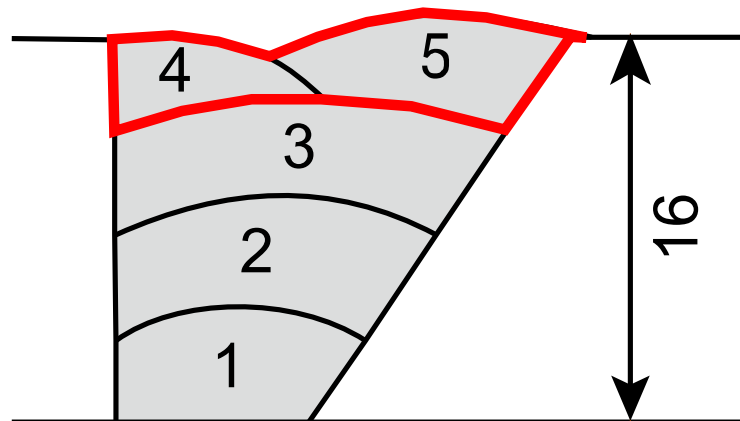
ビッカース硬さをを用いた強度推定



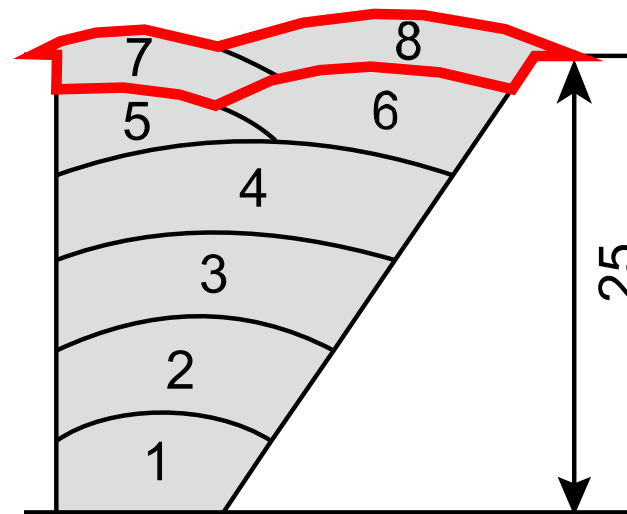
【参考文献】岡本他：25度挟開先口ボット溶接部の性能評価に関する論理的構成と接合部周辺の材料特性（鉄骨造建築物の安全性向上に資する新自動溶接技術の開発 その5），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1材料施工，pp.1063-1064，2011.8

ビッカース硬さ分布の比較

最終層の冷却時間が最も長くなる



4層5パス (16mm)



6層8パス (25mm)

Mo添加による焼き入れ性向上の効果が大きく発現される

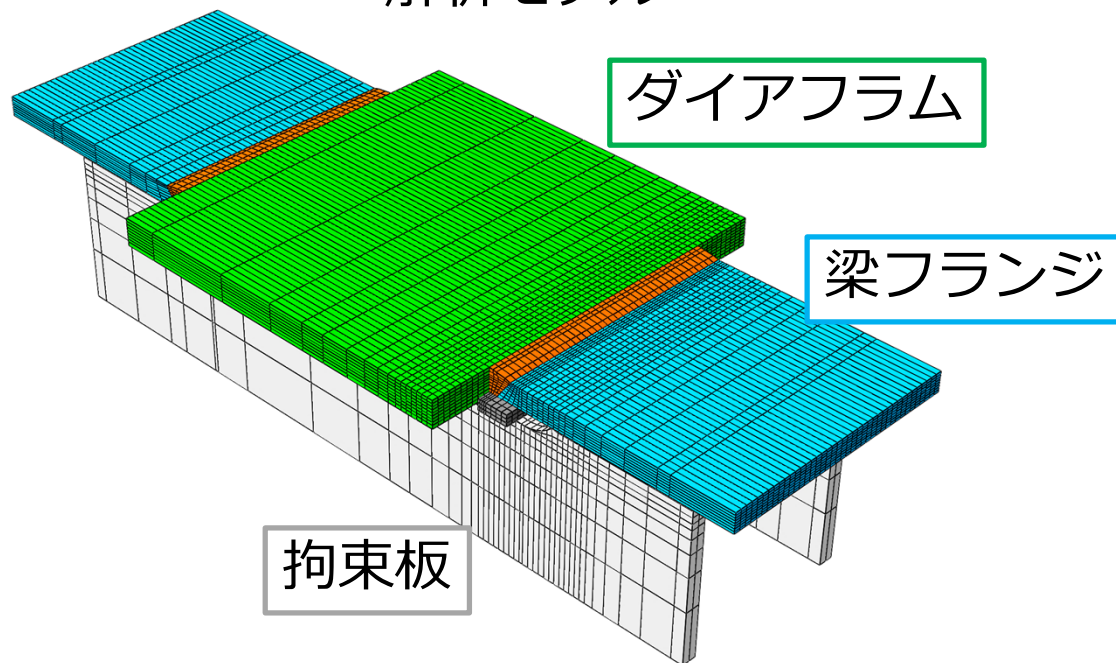
報告内容

1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

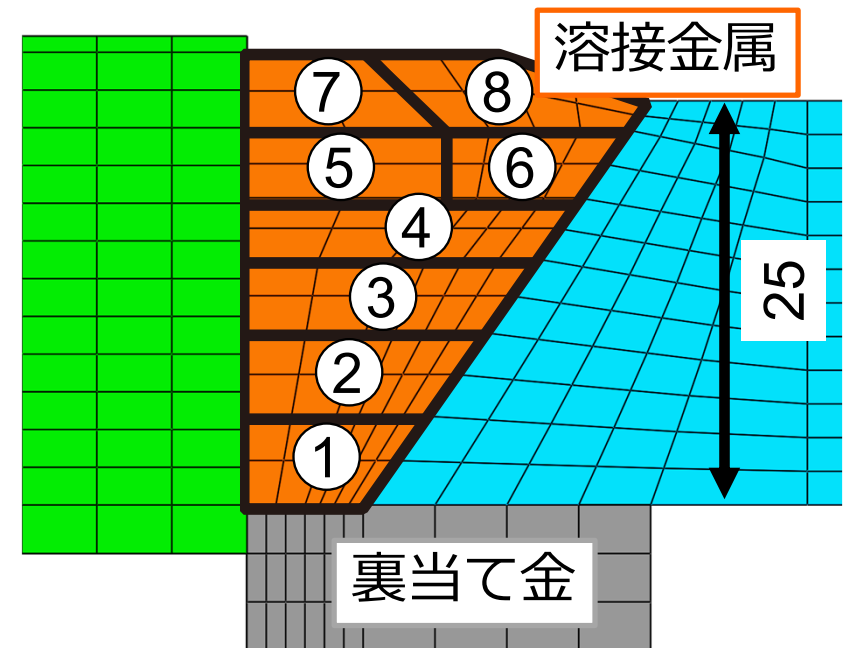
熱伝導解析

溶接金属の冷却時間を定量化 → 非定常熱伝導解析 (Abaqus ver.2022)

解析モデル



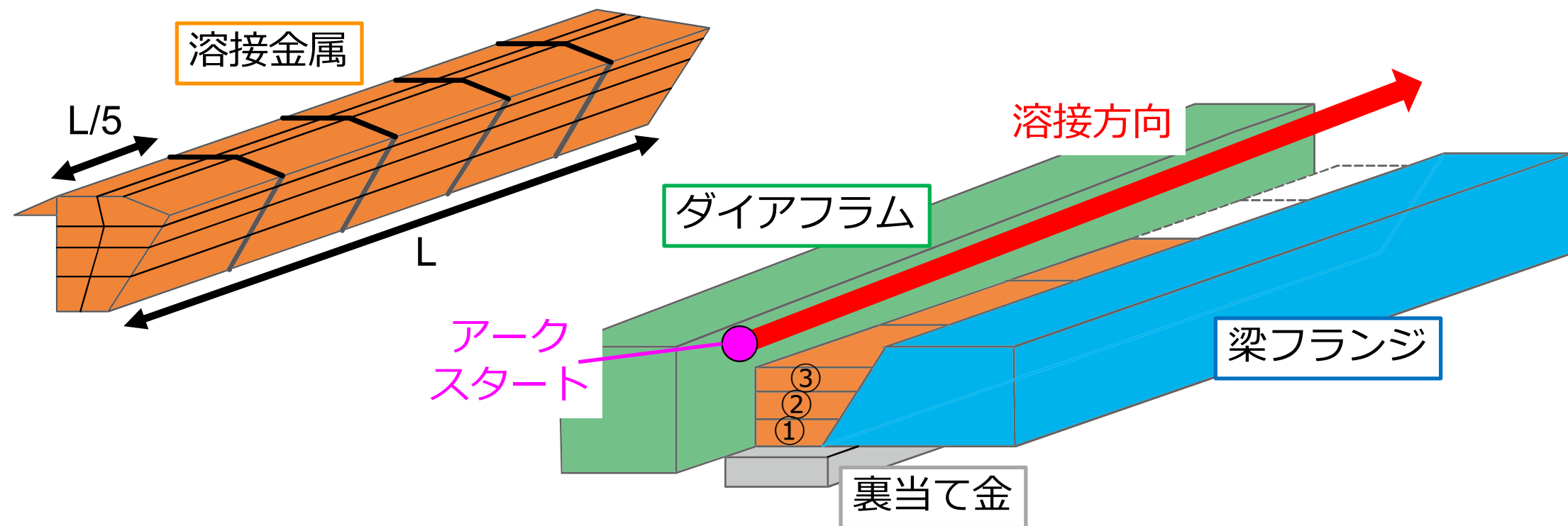
溶接部形状 ($t_f=25\text{mm}$)



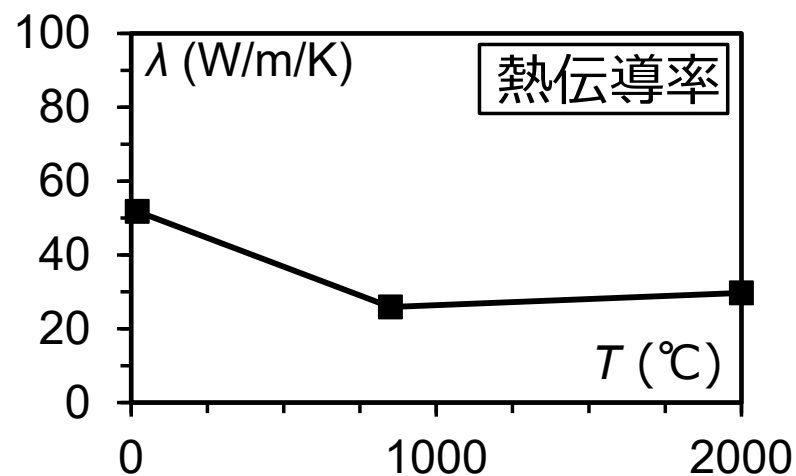
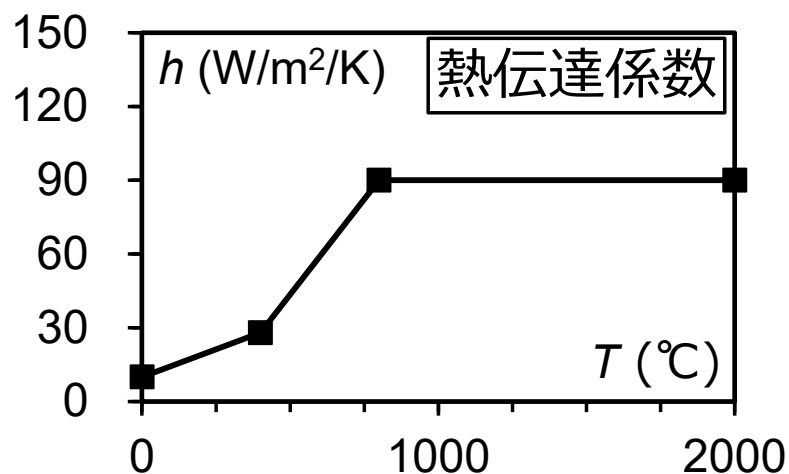
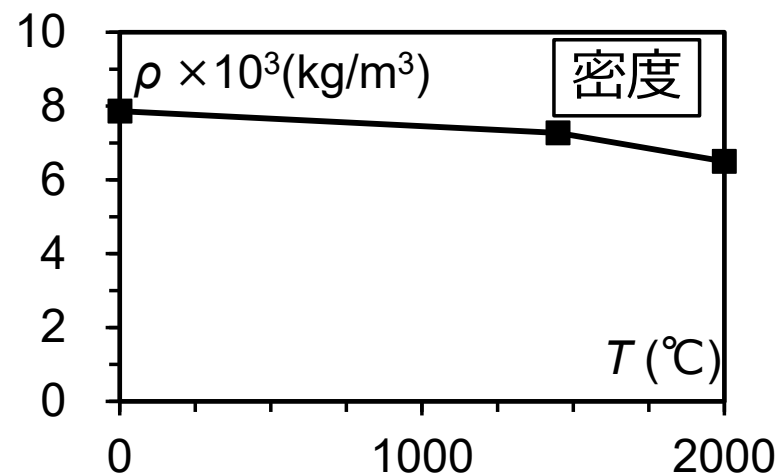
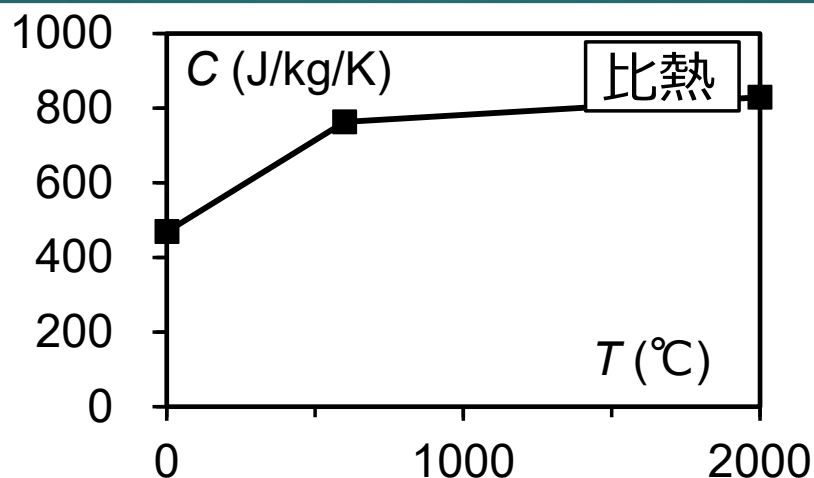
熱伝導解析

溶接金属に相当する要素を5分割

熱効率 η : 0.85

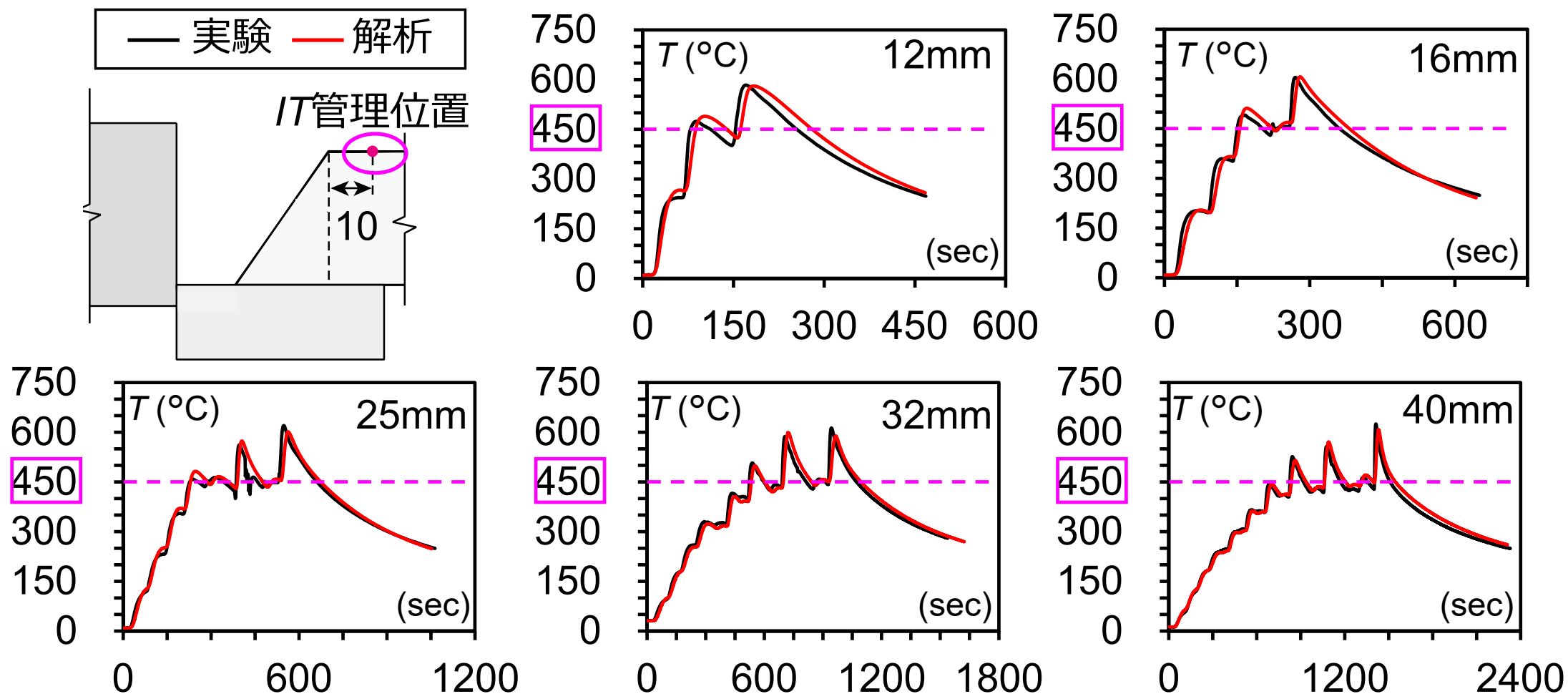


熱物性値

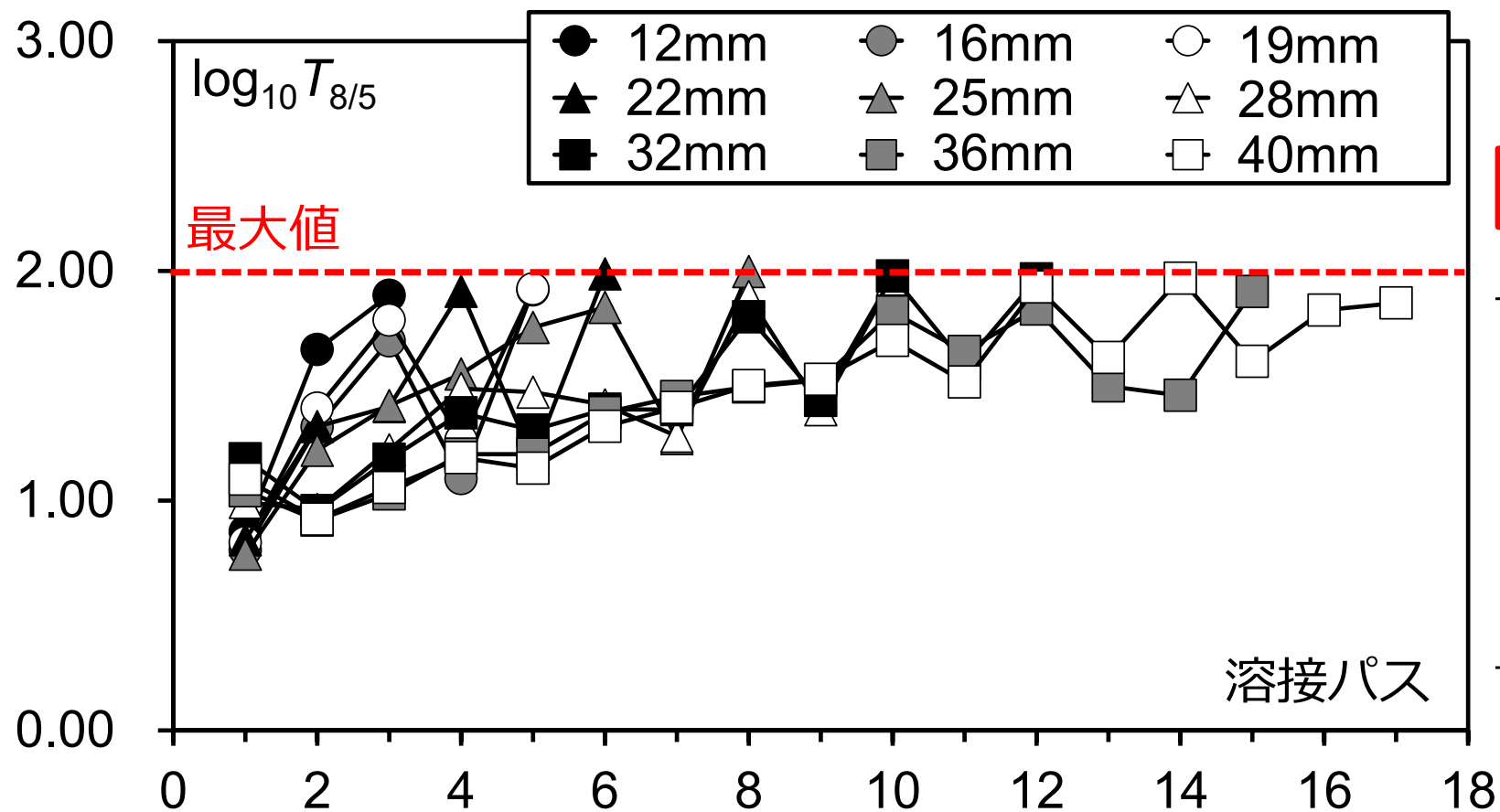


【参考文献】岡本昌大，浅田勇人，田中剛，田淵基嗣：ロボット溶接による冷間成形角形鋼管
柱梁溶接部の熱伝導解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.655-656，2020.9

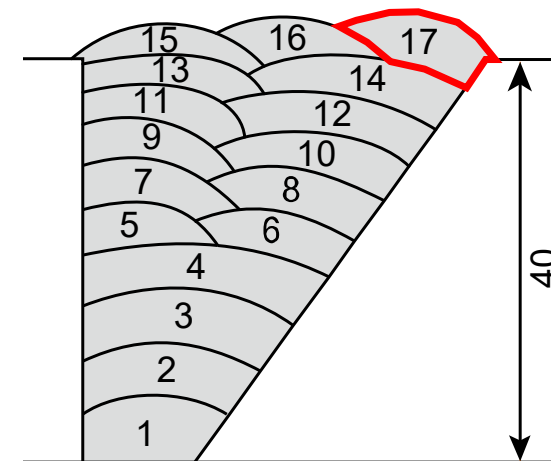
熱伝導解析結果 (温度履歴の比較)



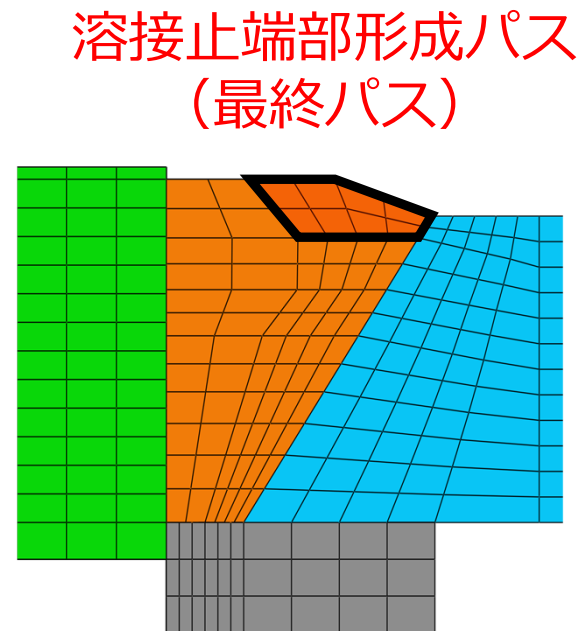
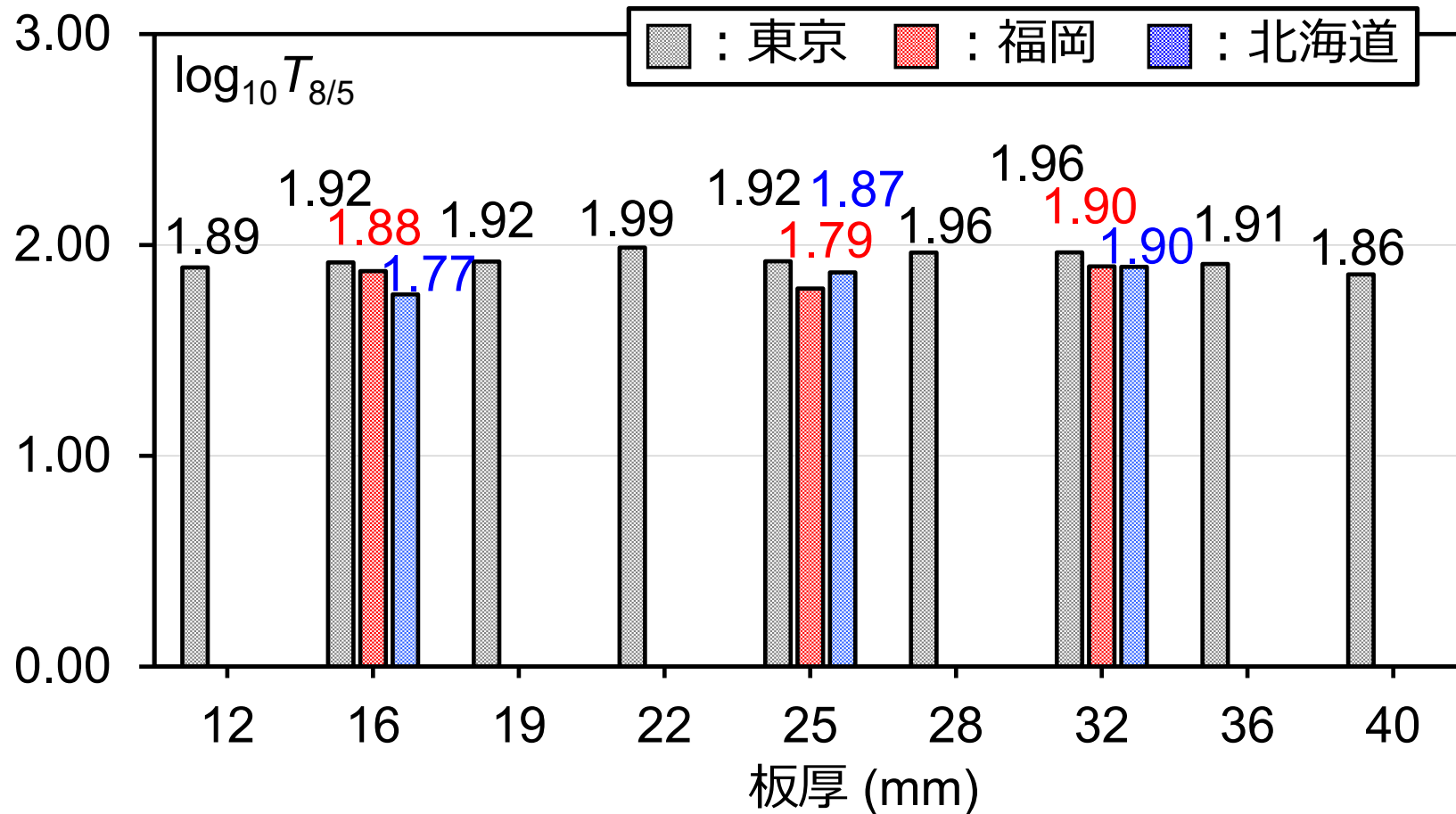
各パスの冷却時間



溶接止端部形成パス

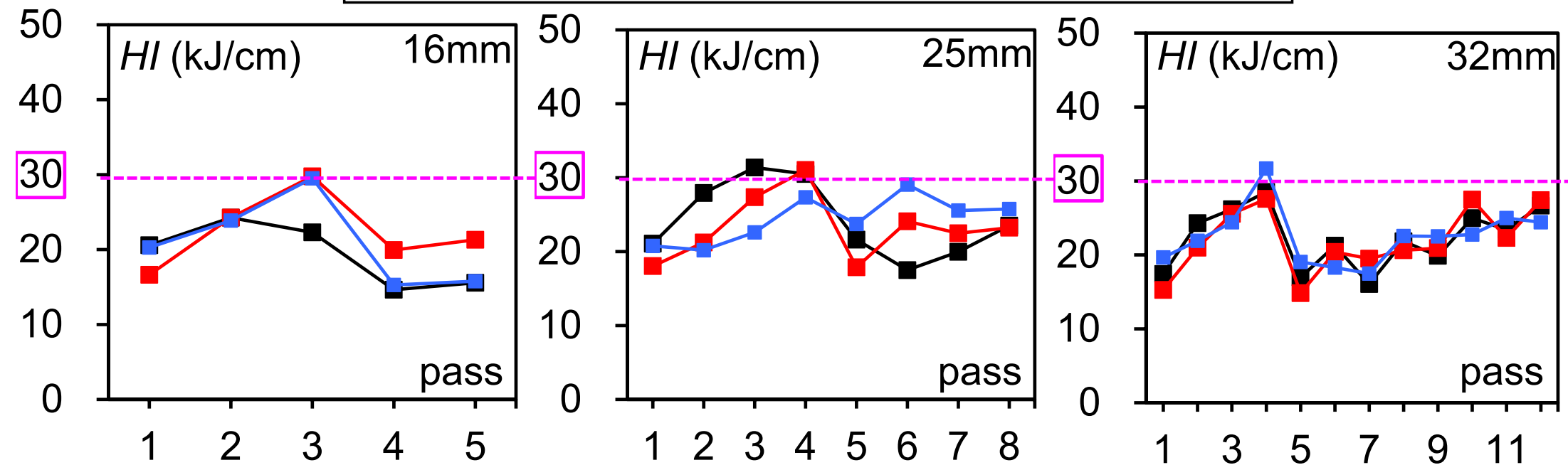


溶接止端部形成パスの冷却時間



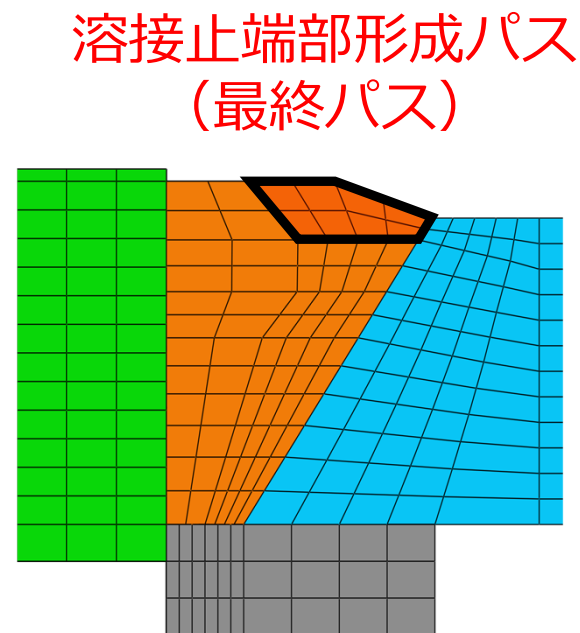
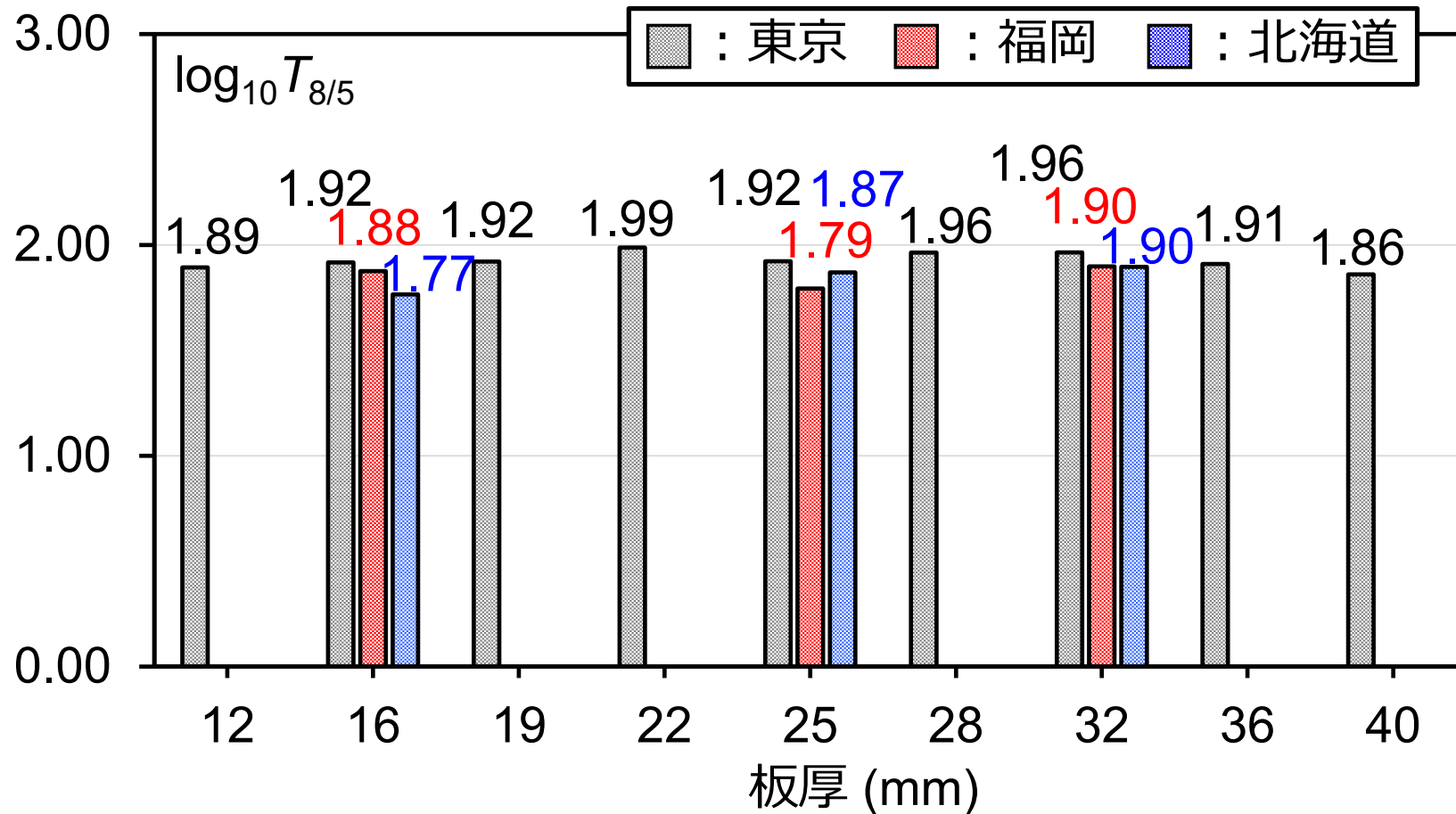
溶接施工試験結果（入熱の比較）

■：東京 (T) ■：福岡 (F) ■：北海道 (H)



中間層 平均HI (kJ/cm)	23.3	25.8	20.4
	27.0	24.3	22.0
	26.7	24.6	22.3

溶接止端部形成パスの冷却時間



溶接金属の強度推定式

YGW18の溶接金属強度推定式

$$\text{引張強さ} : \sigma_u = -\bar{C}_{eq} (242 \log_{10} T_{8/5} - 1260) \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

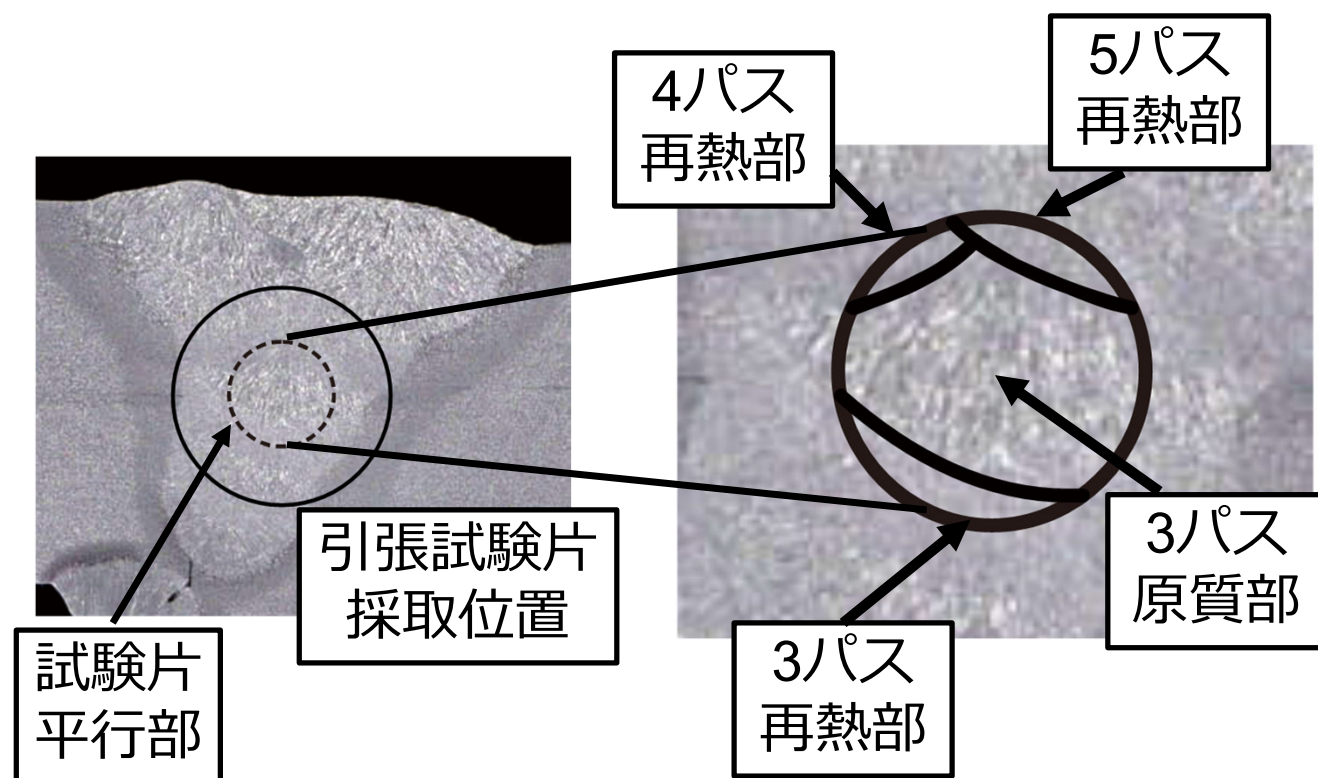
\bar{C}_{eq} : 炭素当量

$$\bar{C}_{eq} = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Mo}}{4}$$

炭素当量 \bar{C}_{eq} : 0.284~0.393%

強度推定方法

平行部の断面マクロ詳細 (板厚16mm)



平行部の冷却時間 ${}_aT_{8/5}$

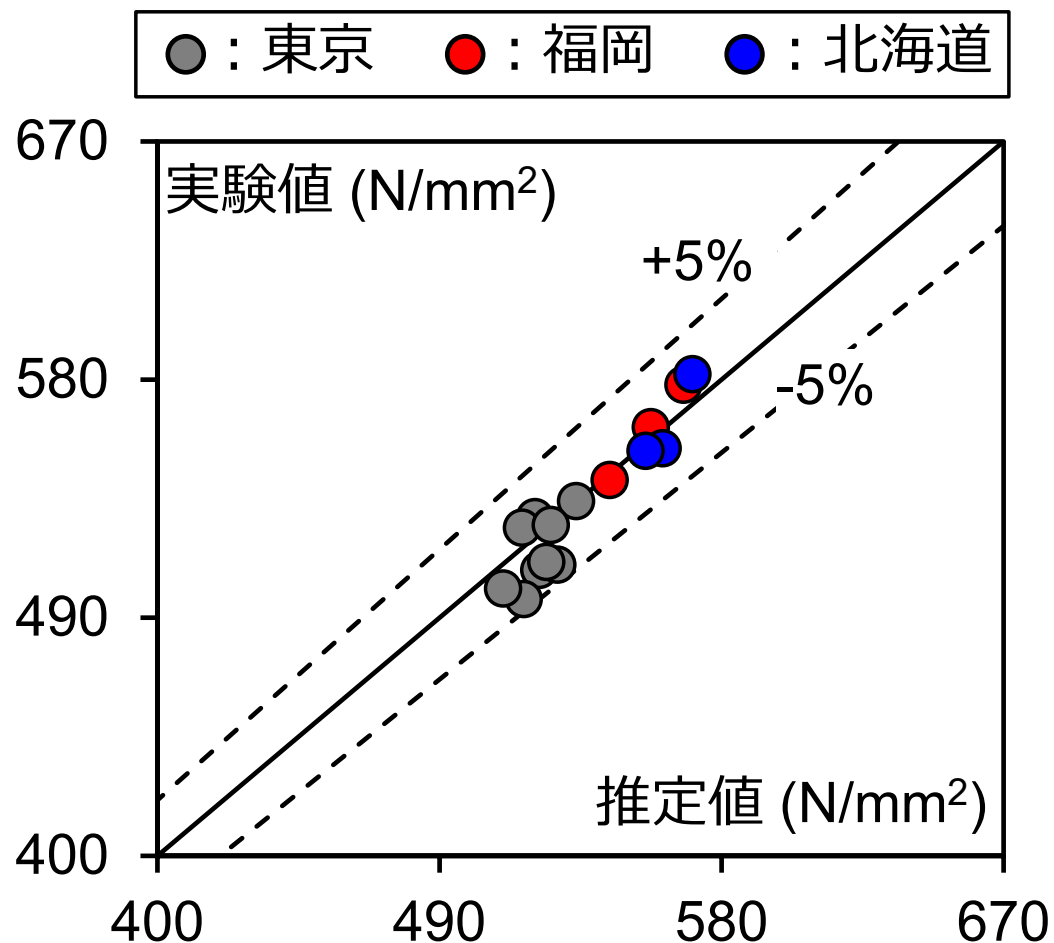
$${}_aT_{8/5} = \frac{{}_aT_3 A_3 + {}_aT_4 A_4 + {}_aT_5 A_5}{A_{\text{total}}}$$

平行部の断面積 : A_{total}

i パス目の $T_{8/5}$: ${}_aT_i$

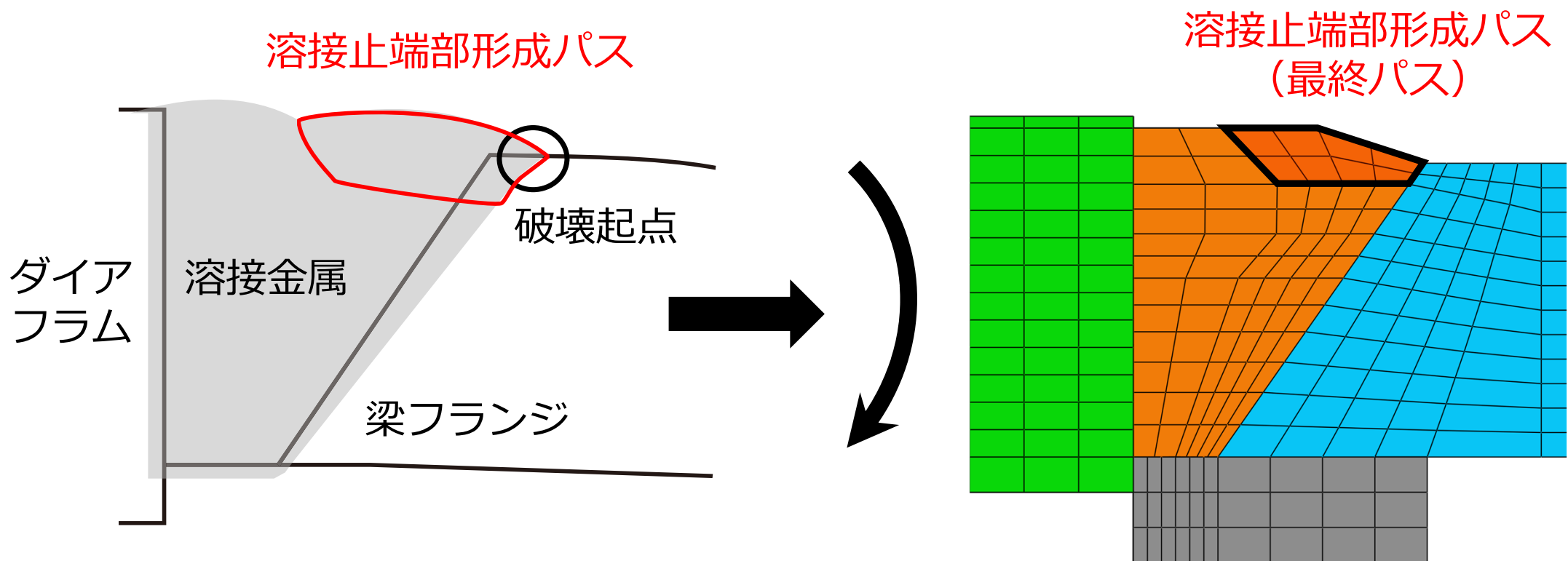
i パス目の面積 : ${}_aT_i$

引張試験結果の推定精度

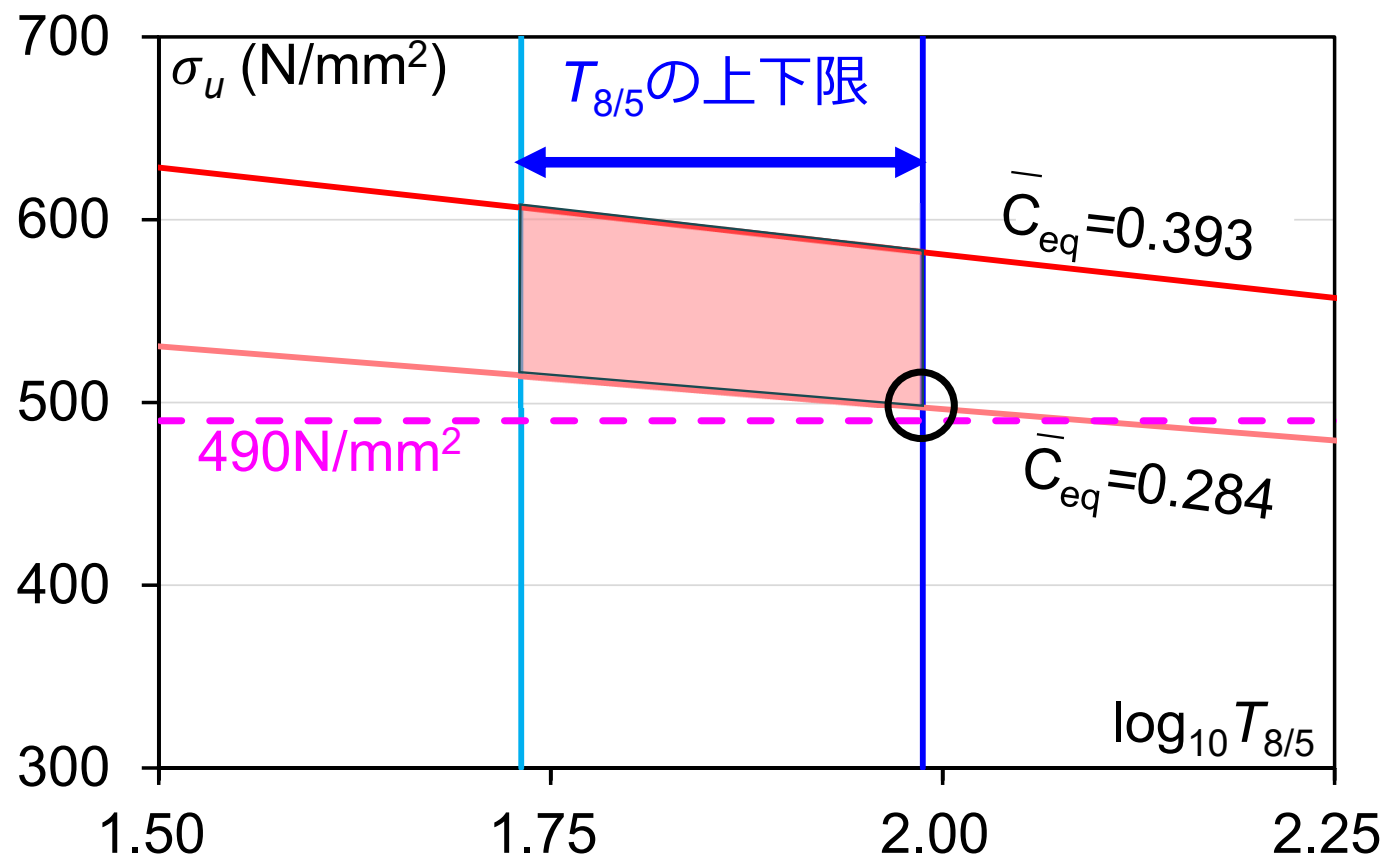


- ・ 実験値と解析値の比は0.96~1.02
- ・ 本推定方法によって実験値を精度良く評価できている。

実現可能強度の検討位置

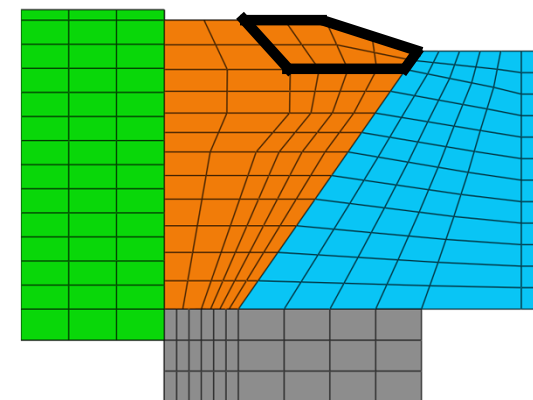


実現可能な強度範囲



YGW18を用いた
場合の溶接金属の
炭素当量 \bar{C}_{eq}
0.284~0.393%

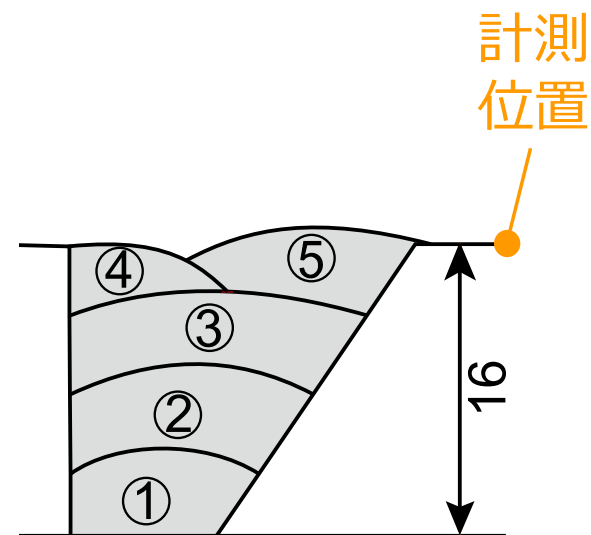
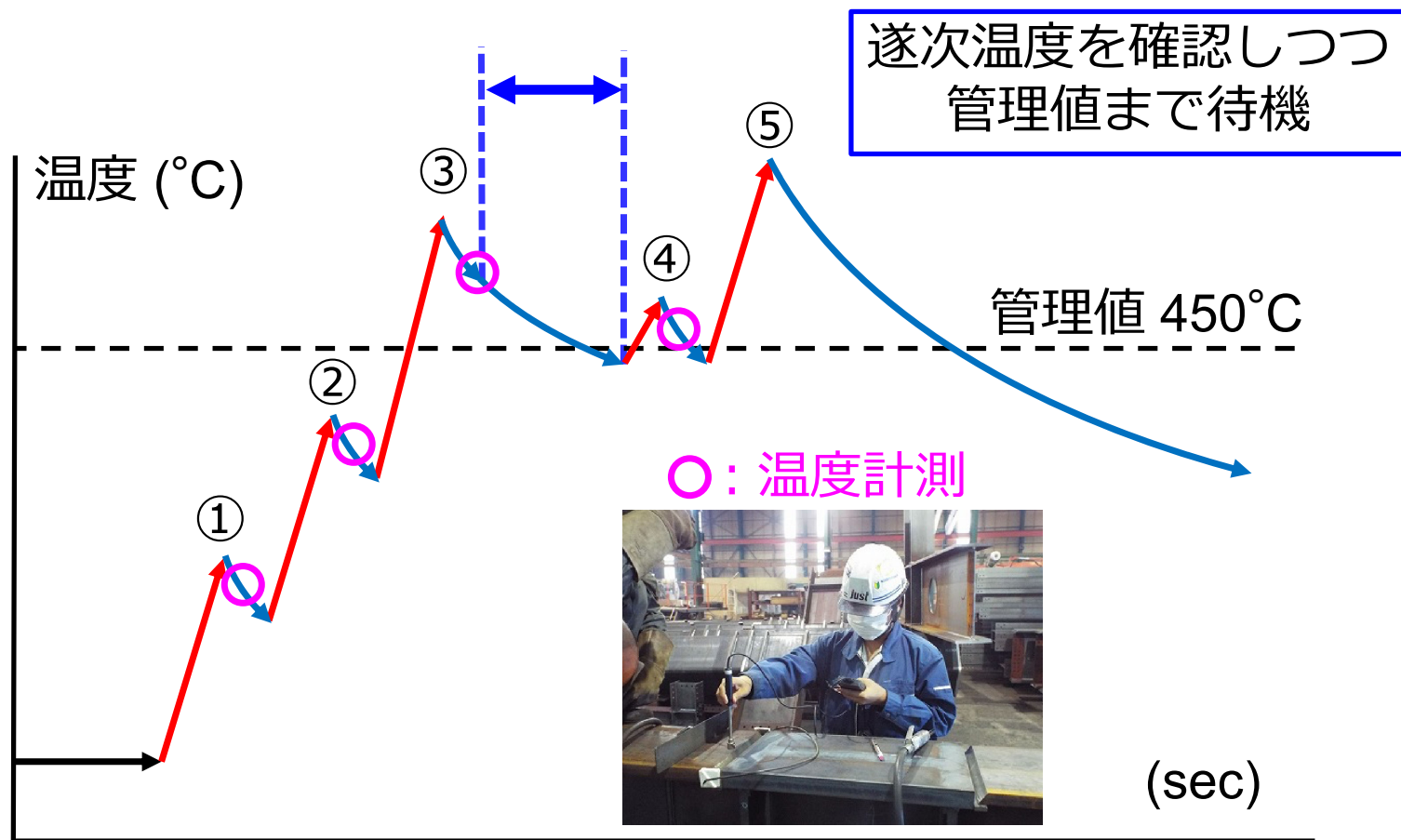
溶接止端部形成パス
(最終パス)



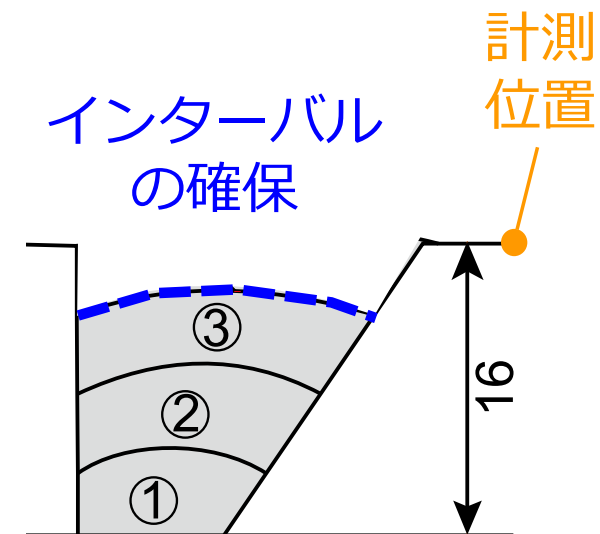
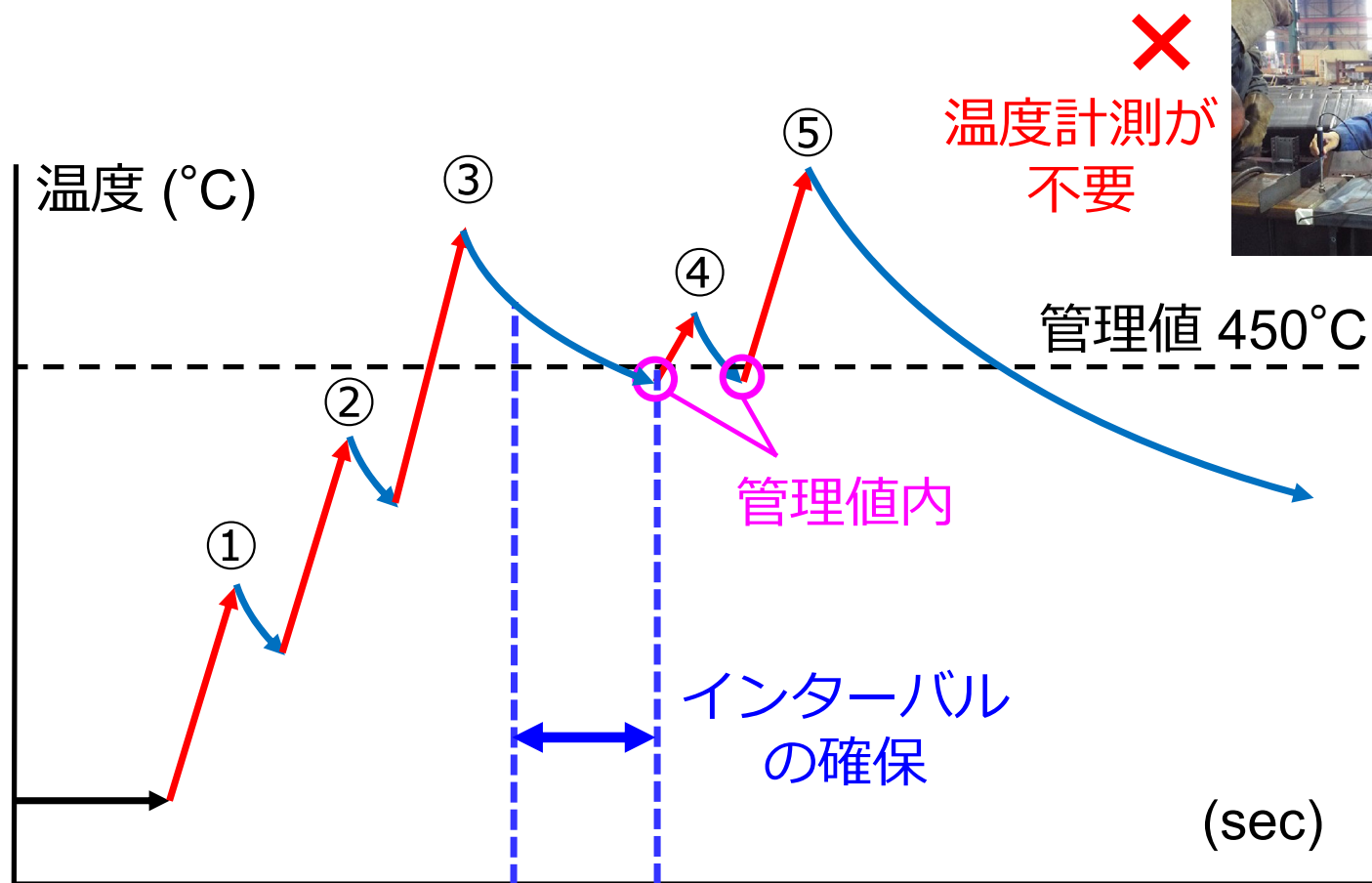
発表内容

1. 研究の背景と目的
 2. 提案条件と従来条件の溶接効率の比較・検討
 3. 提案条件のフィージビリティスタディ
 4. 提案条件による溶接金属の機械的性質の検証
 5. 提案条件による実現可能強度
 6. インターバルによる合理的なパス間温度管理方法
 7. まとめ
-

合理的なパス間温度管理方法の提案



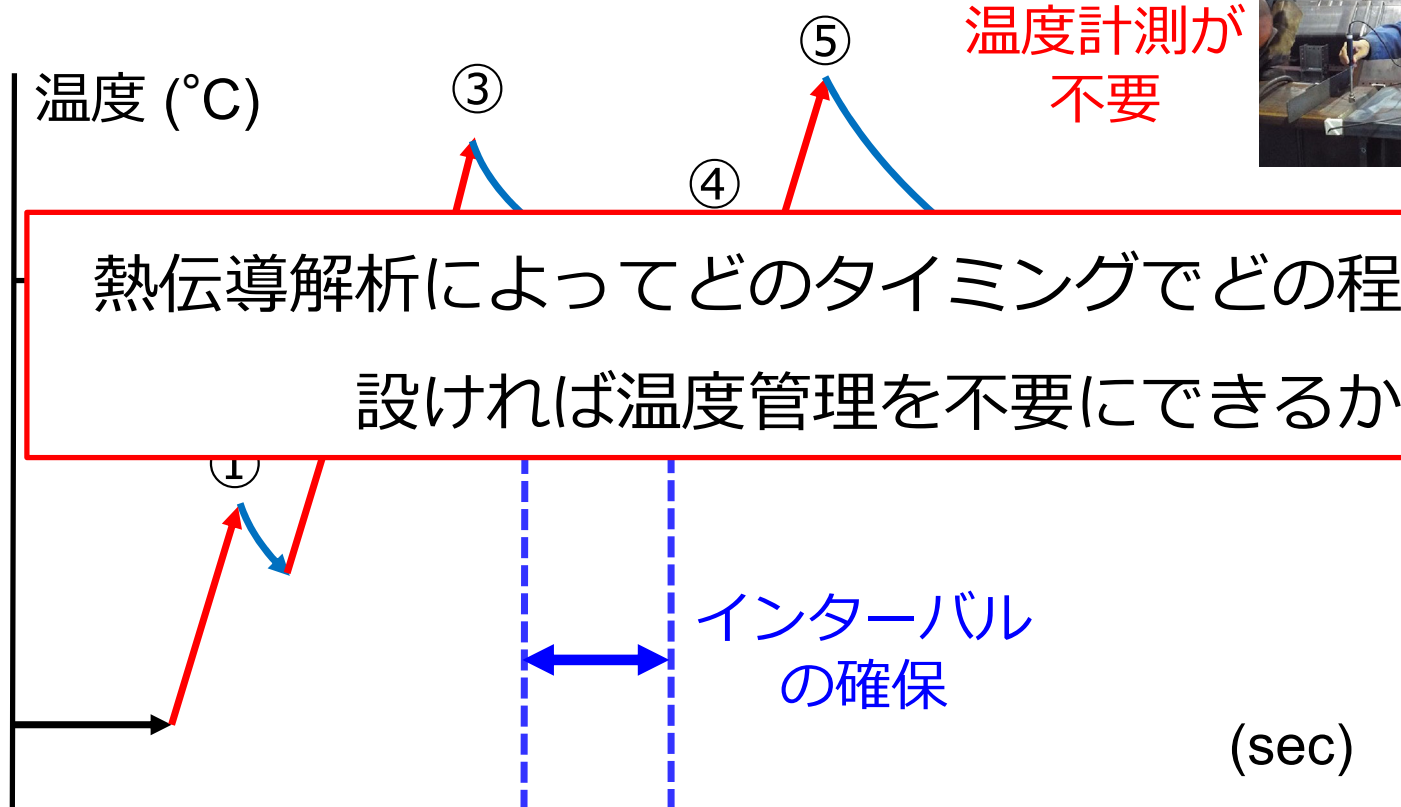
合理的なパス間温度管理方法の提案



合理的なパス間温度管理方法の提案

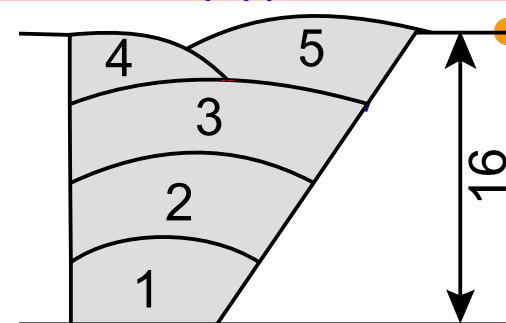


温度計測が
不要

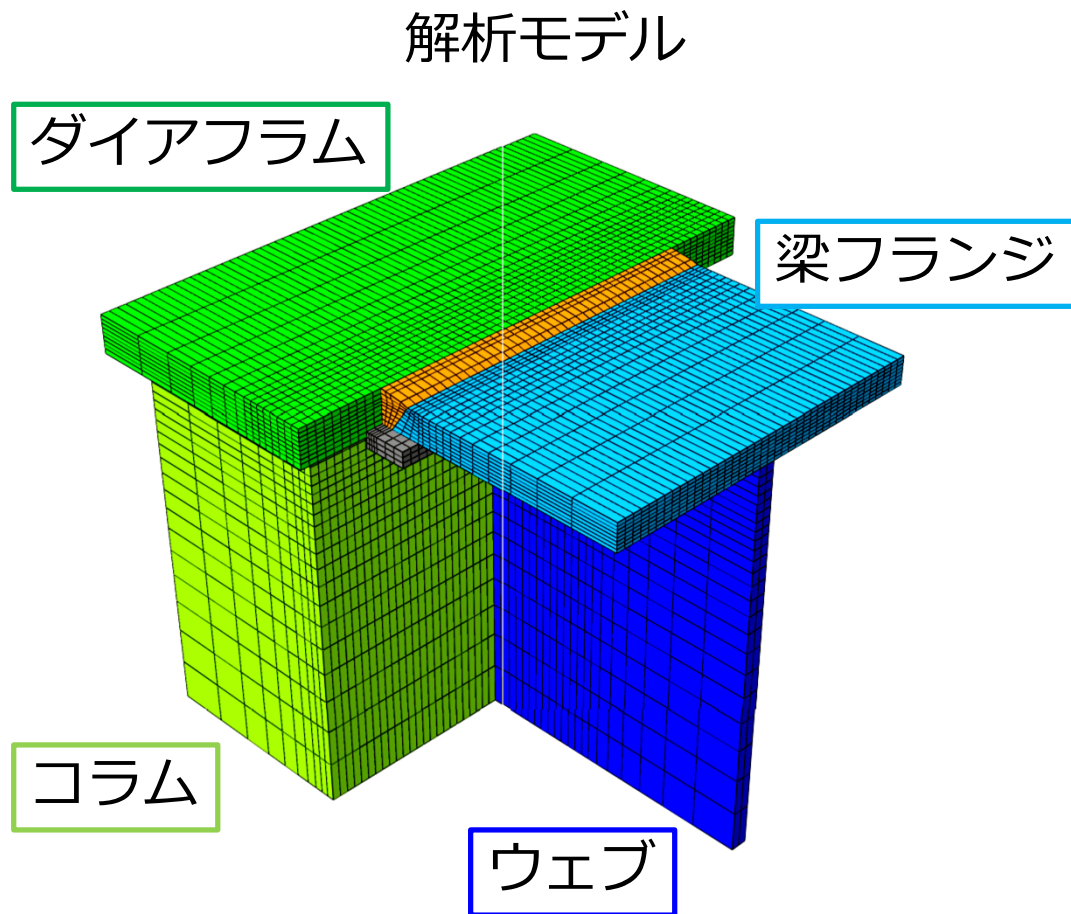
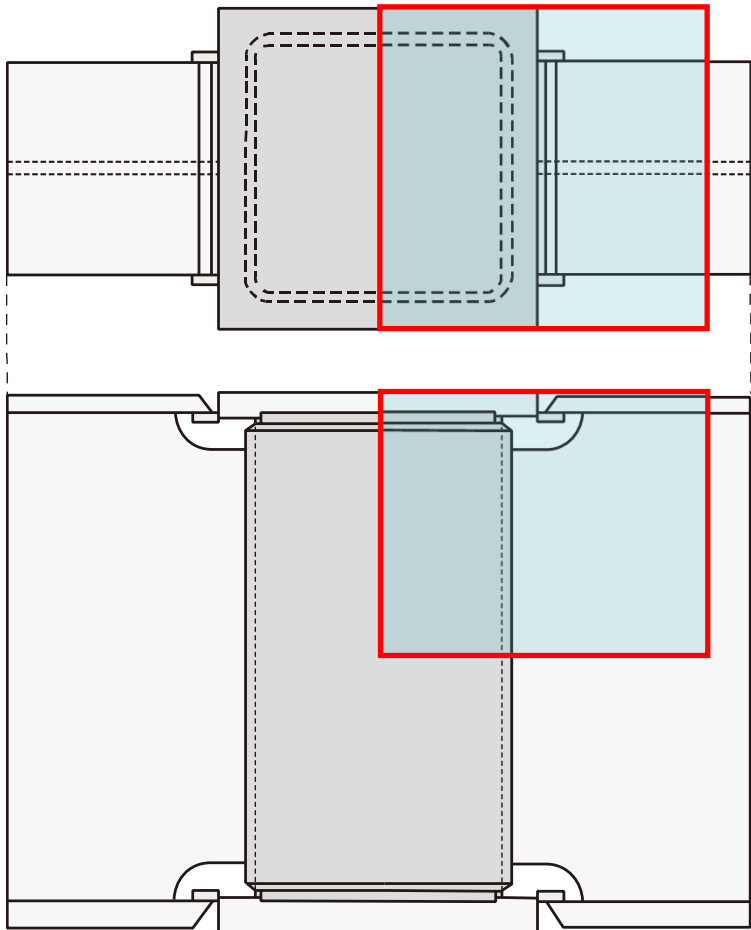


熱伝導解析によってどのタイミングでどの程度のインターバルを
設ければ温度管理を不要にできるかを見出す。

則置

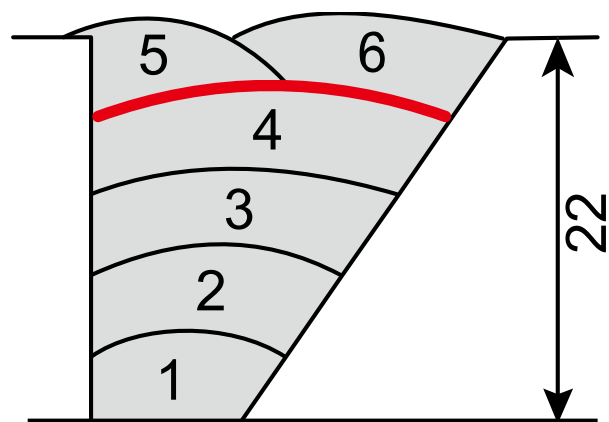


解析モデル

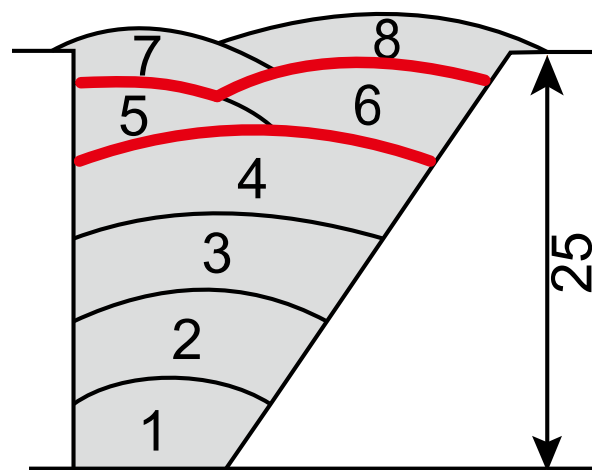


インターバルを設ける層間

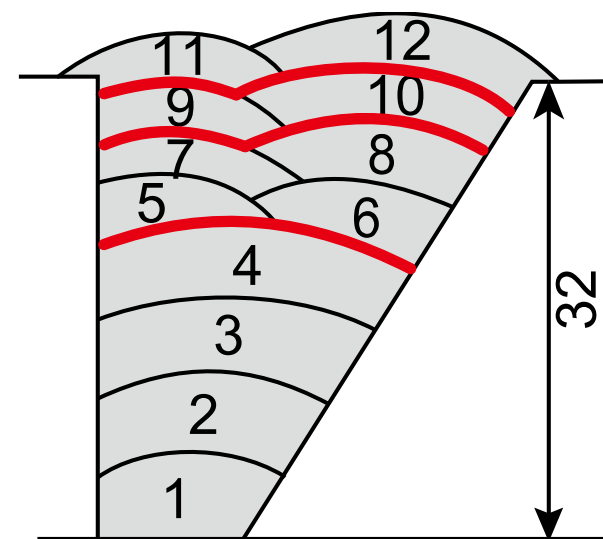
—— : インターバルを設ける層間



フランジ厚22mm以下

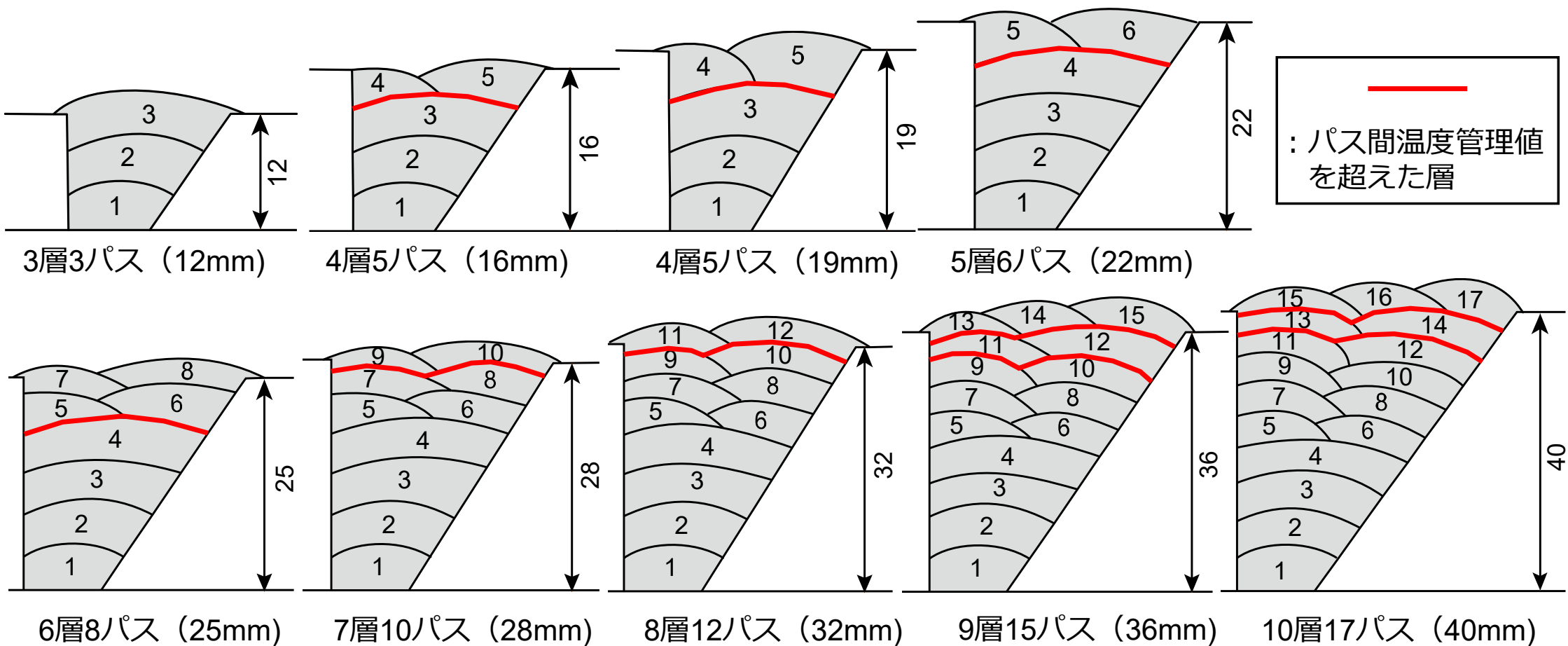


フランジ厚25mm以上



フランジ厚32mm以上

溶接施工試験結果（フランジ厚12~40mm）



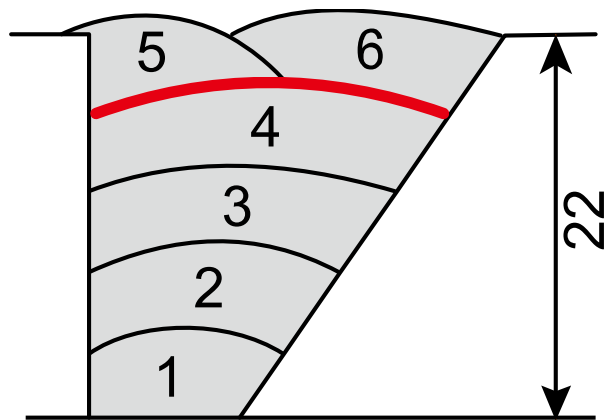
インターバルを設ける層間と時間

インターバル時間：60秒, 90秒, 120秒

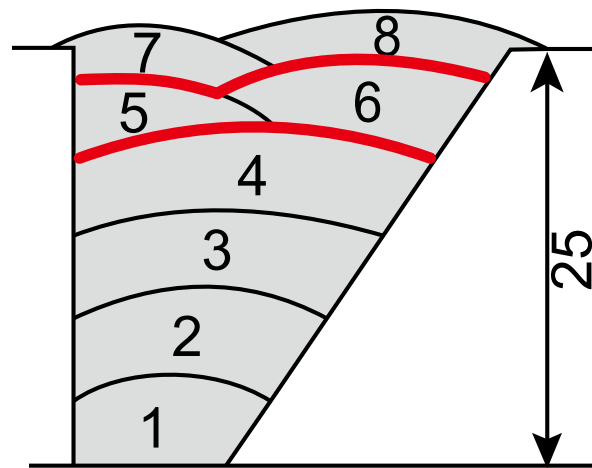
その他のパス間
0秒



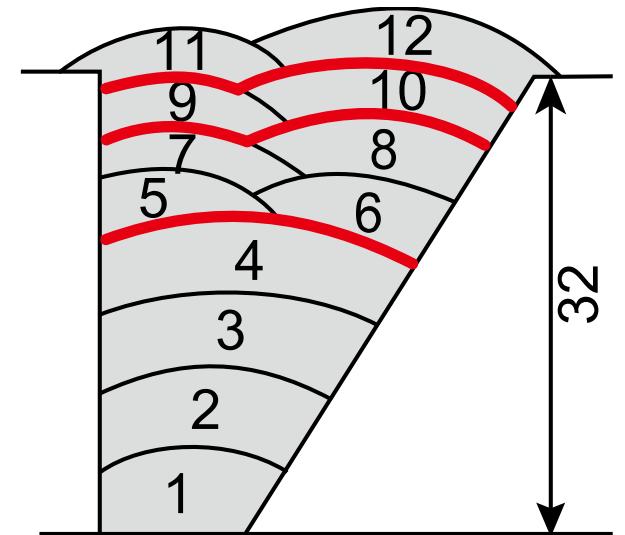
——— : インターバルを設ける層間



フランジ厚22mm以下

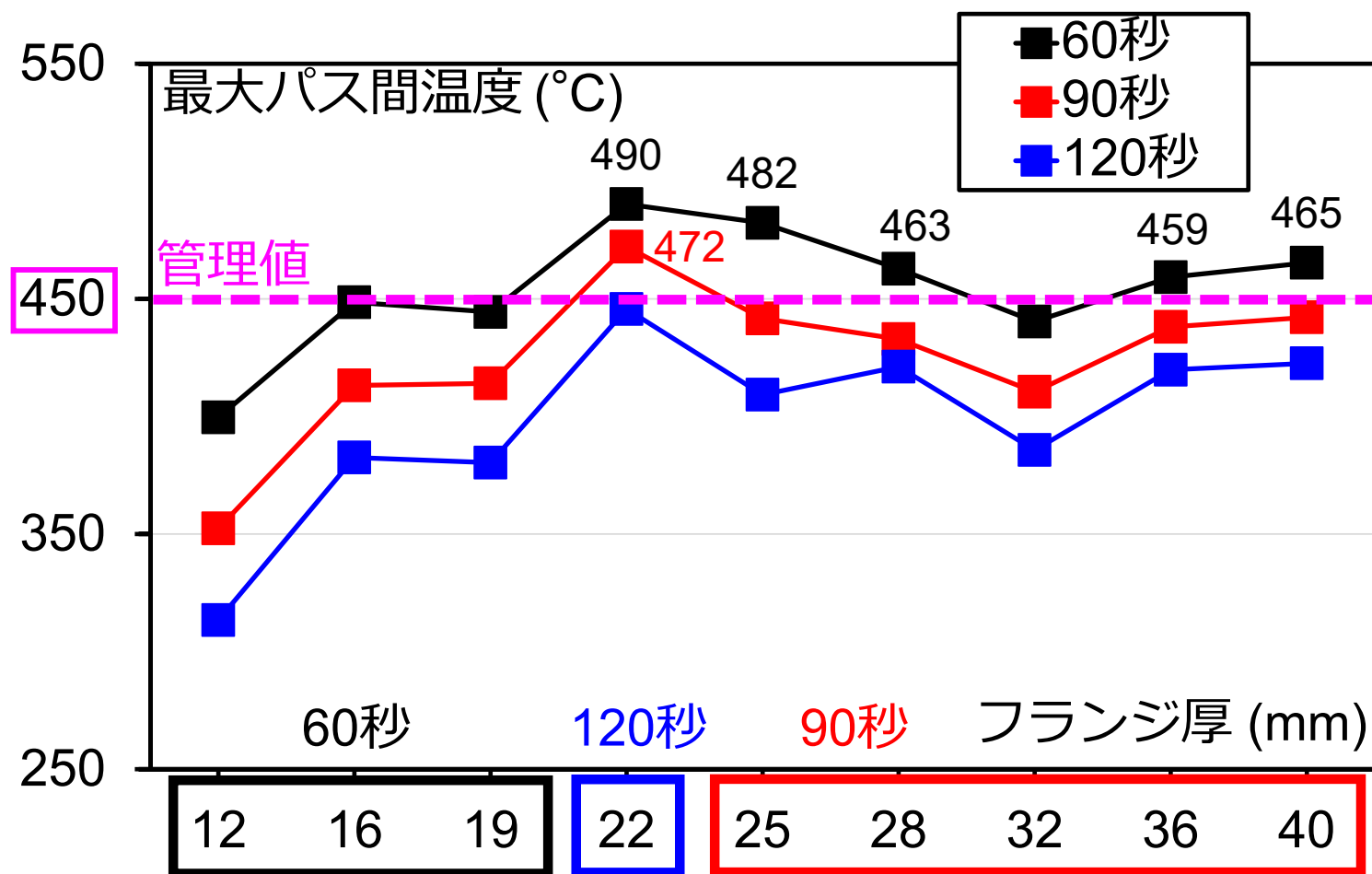


フランジ厚25mm以上



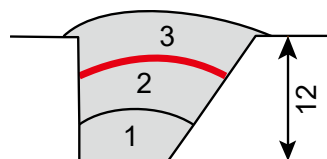
フランジ厚32mm以上

適正なインターバル時間の検討

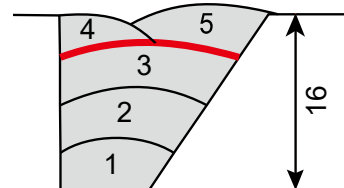


提案条件におけるパス間温度管理方法の提示

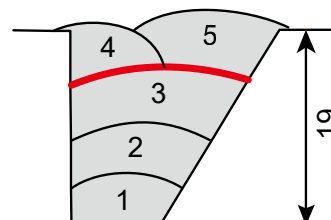
— : 60秒



12mm

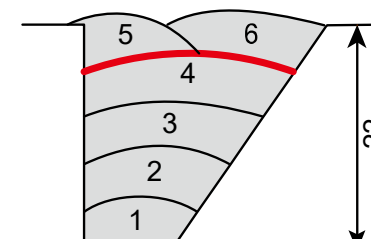


16mm



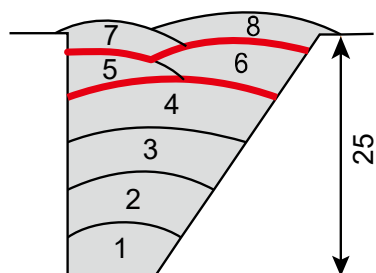
19mm

— : 120秒

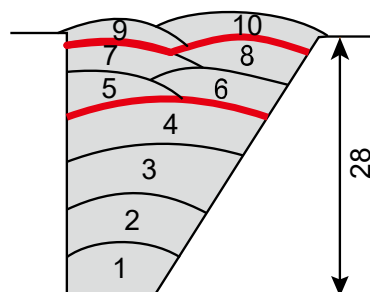


22mm

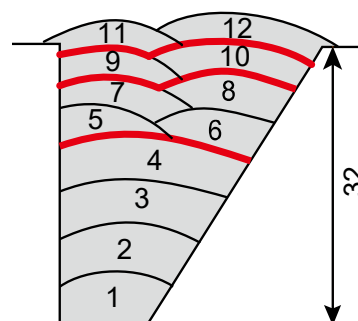
— : 90秒



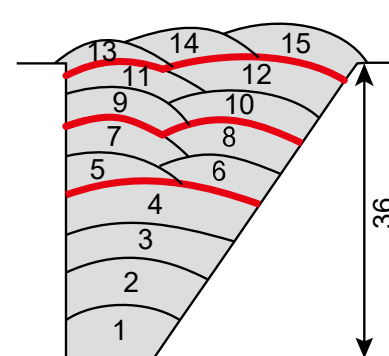
25mm



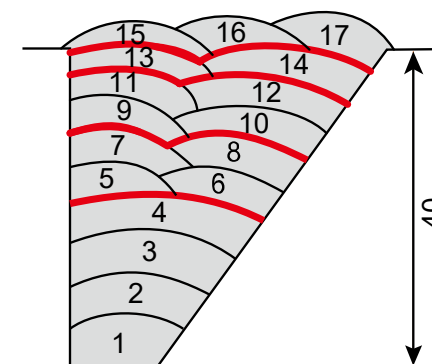
28mm



32mm



36mm

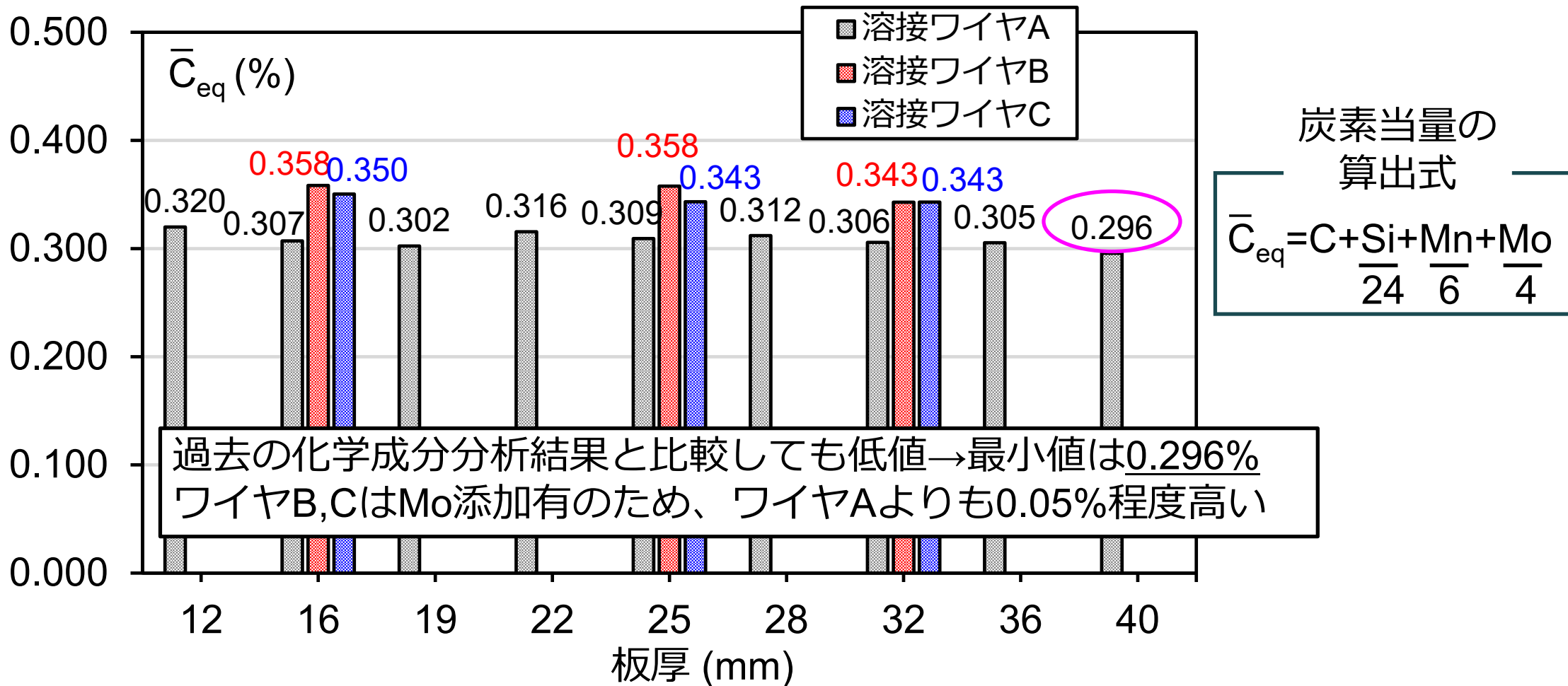


40mm

まとめ

- 現行の規定にはない490N/mm²級鋼材に対して、溶接ワイヤにYGW18を用い、入熱を30kJ/cm以下、パス間温度を450℃以下とする条件を適用することで、従来条件である40kJ/cm・350℃以下の管理に比べて、パス間温度管理による待機時間が短くなり、溶接作業時間は従来条件に比べて20~30%程度短縮される。
- 引張試験結果より、提案条件による溶接金属強度は、要求強度の490N/mm²を上回ることを確認した。
- 提案条件による冷却時間の上限値と現有するYGW18の溶接金属の炭素当量の最小値を適用して推定した引張強さであっても要求強度を上回る。
- 提案条件に基づく標準積層を運用する前提で、インターバルを考慮したパス間温度管理方法を提案した。

溶接金属の化学成分分析結果



【参考文献】西田他：入熱量による溶接ワイヤの化学成分の変動を考慮した溶接金属強度の推定，鋼構造論文集，第14巻，第54号，pp.83-94，2007.6

標準積層の溶接条件詳細

(平成14年度中小企業活路開拓調査・実証化事業)

パス間温度・入熱量の管理マニュアル

兵庫県鉄工建設業協同組合
(監修：神戸大学鋼構造研究室)

1. 下向き溶接の標準溶接条件 (ワイヤー径 $\phi=1.2$ mm)

電圧 E	30~36 (V)
電流 I	270~330 (A)
ガス流量	25 (L/分) 以上
ワイヤ突出し長さ	25 (mm)

2. 入熱量の管理手順

- 電圧E (V)・電流I (A) の管理
:作業開始前に捨て板にアークを発生させ、電流・電圧を確認
- 溶接速度v (cm/分) の管理
:積層方法により管理する(右図参照)
(1パスのビード幅が20mmを超えそうになったら振り分ける)

- 入熱量の確認
:右図の積層方法を満足すれば、入熱量は30kJ/cm以下となる
異なる積層を用いた場合は、下式により確認する

$$H = \frac{60E \cdot I}{v}$$

H : 入熱量 (J/cm)











E : 電圧 (V)

I : 電流 (A)











v : 溶接速度 (cm/分)

3. 標準積層図および温度管理が必要となるパスの範囲 (入熱量 30kJ/cm 以下)

■ パス間温度 : 350℃

					
2層 2パス 9mm	3層 3パス 12mm	4層 5パス 16mm	4層 5パス 19mm	5層 6パス 22mm	6層 8パス 25mm
					
7層 10パス 28mm	8層 12パス 32mm	9層 15パス 36mm	10層 17パス 40mm		

■ パス間温度 : 250℃

					
2層 2パス 9mm	3層 3パス 12mm	4層 5パス 16mm	4層 5パス 19mm	5層 6パス 22mm	6層 8パス 25mm
					
7層 10パス 28mm	8層 12パス 32mm	9層 15パス 36mm	10層 17パス 40mm		