

切削加工品の代替としての WAAM方式金属積層造形品の 可能性評価

機械加工ロボット科

専門研究員 安齋弘樹
副主任研究員 小林翼
研究員 ○穴澤大樹

質問はメールにて事務局までお気軽にお問い合わせください。

問い合わせ先：福島県ハイテクプラザ 企画連携部産学連携科

e-mail : hightech-renkei@pref.fukushima.lg.jp

研究背景

金属積層造形(金属3Dプリンター)の活用が様々な分野で進んでいる



<https://news.sharelab.jp/cases/aerospace/geaviation-210915/>



<https://j3d.co.jp/business/index37.htm>

航空宇宙、医療、
電力、金型...

市場規模は、2017年に約1300億円→2030年に3兆円を超えると予測

(NEDO公開情報 <https://www.nedo.go.jp/content/100888741.pdf>)

急速に技術開発、実用化が進む

金属積層造形のメリット

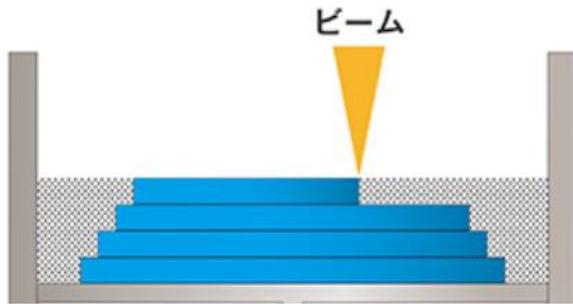
◎ 設計の自由度が高い

→ 複雑形状、軽量化、部品点数削減、短納期化など

研究背景

金属積層造形の種類

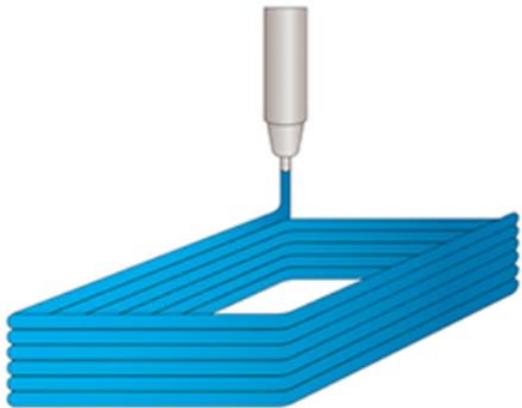
◆パウダーベッド方式



敷き詰めた粉末を電子ビームやレーザーにより選択的に溶融・凝固させる手法

研究報告、実用化事例の多くがパウダーベッド方式によるもの

◆デポジション方式



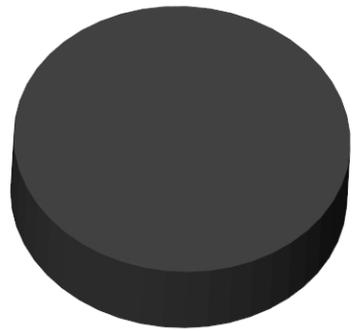
溶かした材料を所定の場所に積層させていく手法

- ◎形状付与
- ◎異種金属積層
- ◎造形速度
- ◎大型品対応
- ◎コスト

ハイテクプラザでは、デポジション方式のうちWAAM(Wire Arc Additive Manufacturing)方式の研究を行ってきた

研究背景・目的

これまでの取り組みで、形状によっては切削加工よりもコスト、時間的メリットがあることが分かった



加工前

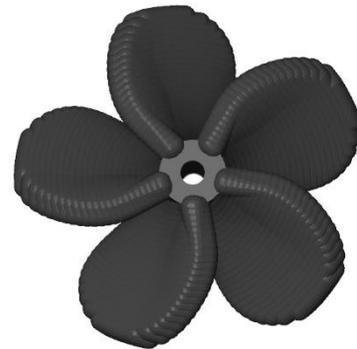
加工時間 16h57m
除去重量 3,294g



Φ179mm×高さ50mm



積層造形前



積層造形後



加工時間 15h23m
除去重量 688g

“複雑形状加工時の切削加工と金属積層造形のコスト比較”. 令和2年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. pp.21-24.

研究目的

目的

WAAM方式の特徴である**形状付加**および**異材積層造形**を活かし、**切削加工の代替**として利用可能な積層造形技術を構築する

ニッケル合金(インコネル718相当) を対象

耐熱合金→航空宇宙分野で多く使用

難削材→WAAM方式によるコスト、時間的メリット大

実施内容

- ・造形条件の最適化
- ・熱処理条件の検討
- ・造形物の機械的特性把握
- ・母材と異なる金属を積層造形した際の接合強度把握

実験①（造形条件の最適化）

①内部欠陥・溶け込み評価

実験① (造形条件の最適化)

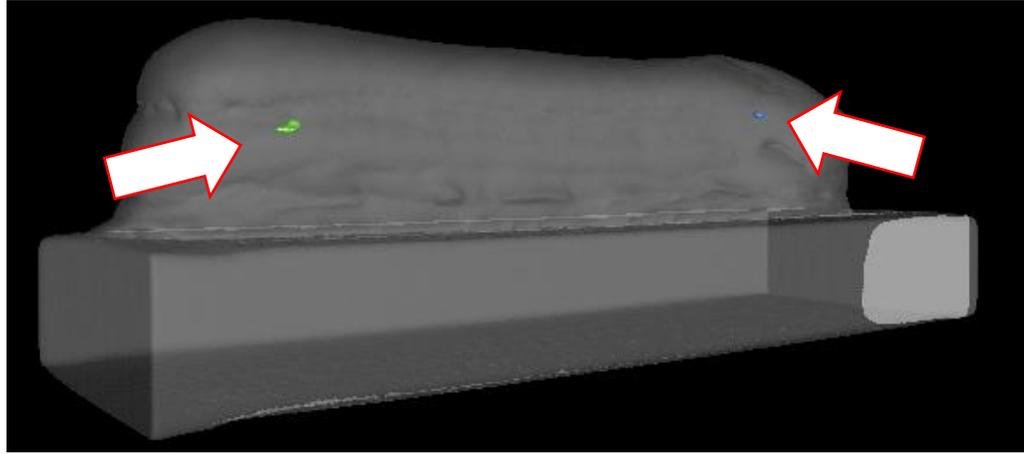
積層条件

入熱の大小と積層パス間温度による欠陥発生量と溶け込み量を確認

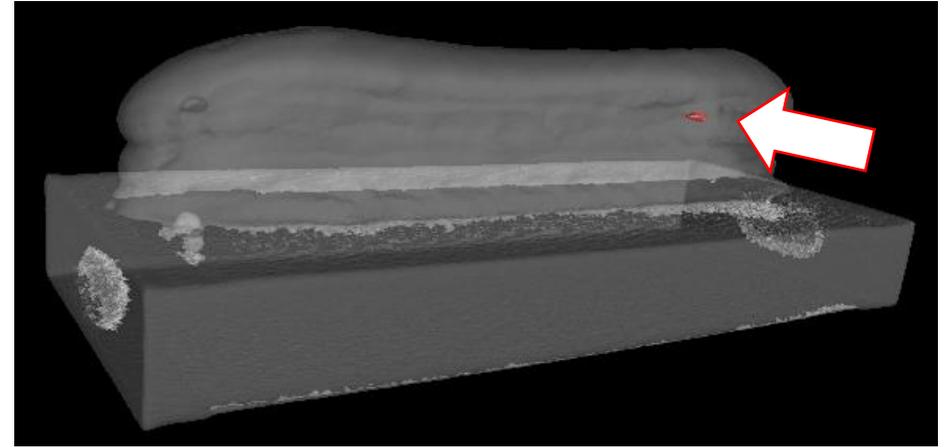
試料 No	積層材種	母材材種	溶接方法	電流 A	電圧 V	ワイヤーフィード m/min	トーチ送り mm/min	シールドガス	パス間温度 °C
1	インコネル 718	SUS 304	P	150	17	6	400	Ar	200
			CMT	140	14.1				
2	インコネル 718	SUS 304	P	150	17	6	400		100
			CMT	140	14.1				
3	インコネル 718	SUS 304	P	228	22.3	9	600		200
			CMT	195	17				
4	インコネル 718	SUS 304	P	228	22.3	9	600		100
			CMT	195	17				

実験① (造形条件の最適化)

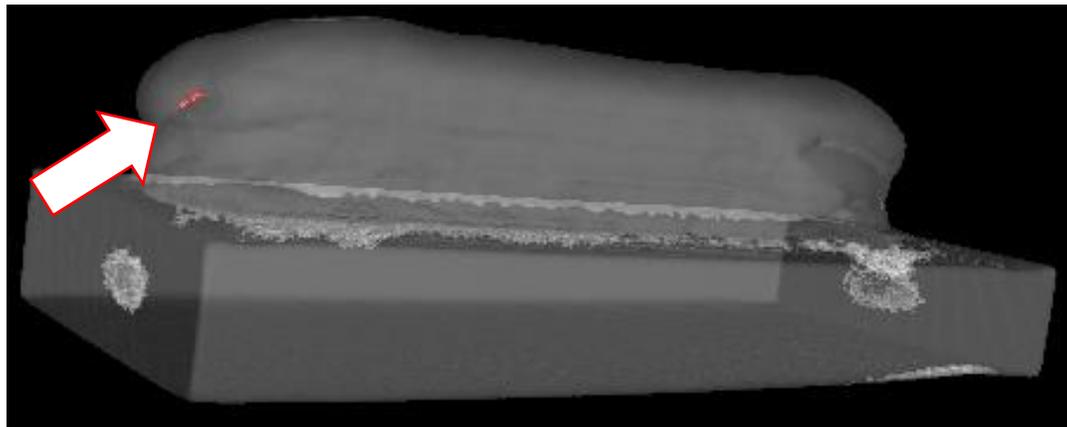
X線CT観察写真



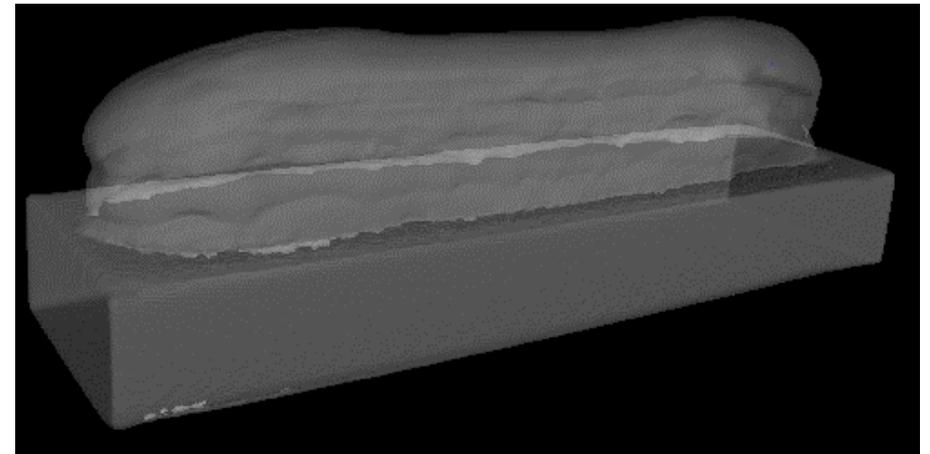
試料No.1(入熱小、パス間温度200℃)



試料No.2(入熱小、パス間温度100℃)



試料No.3(入熱大、パス間温度200℃)

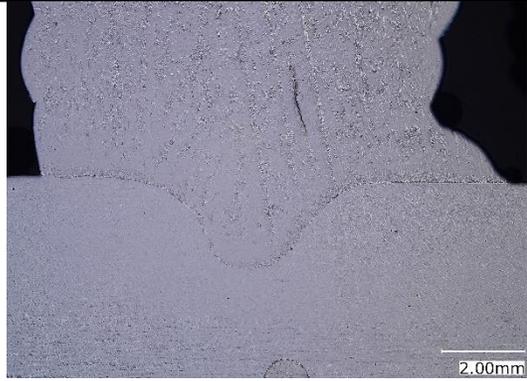


試料No.4(入熱大、パス間温度100℃)

欠陥は少なくSUS316積層品と同程度、入熱が大きい方が欠陥が少ない

実験① (造形条件の最適化)

溶け込み部断面観察結果

	試料No.1	試料No.2	試料No.3	試料No.4
				
溶け込み深さ mm	1.8	1.8	2.5	2.2
ビード幅 mm	7.6	9.3	10.7	11.3
ビード幅 1/2P位置 mm	2.4	2.5	2.4	2.6

いずれも良好な溶け込みが得られていた

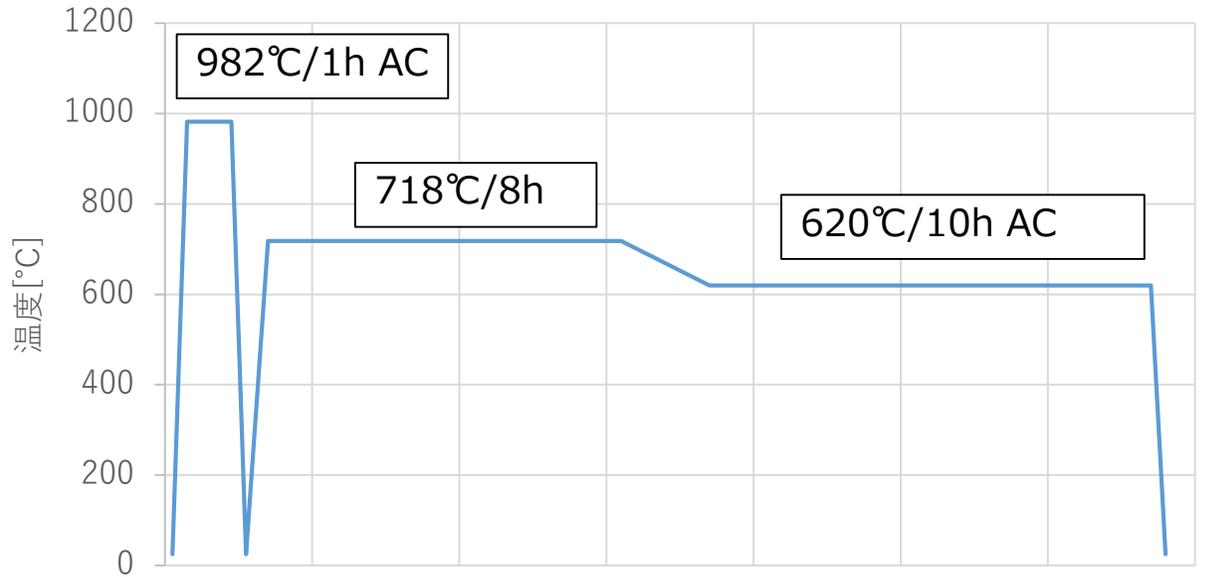
実験②（熱処理条件検討）

②熱処理条件検討

実験②（熱処理条件検討）

インコネル718は熱処理合金
実使用時には熱処理実施の必要がある

AMS 5662 では右図の熱処理を指定



積層造形品では、特有の熱履歴が残ることから
展伸材と同じ熱処理条件が適しているか不明

熱処理条件を変えた試料の組織観察、硬さ試験を行い、最適条件の確認を行う

実験②（熱処理条件検討）

溶体化処理条件を変えた3パターンで試験

条件No.	溶体化処理条件	時効処理条件
1	982°C/1h AC	718°C/8h→620°C/10h AC
2	1080°C/1h AC	
3	-	

- 狙い
- No. 1 AMS規格準拠の標準熱処理条件
 - No. 2 主な析出物の固溶温度以上とする条件
積層造形時の入熱で時効が進んでいる可能性を考慮
 - No. 3 積層造形時の入熱で溶体化温度を一度超えているため、
溶体化処理無しで熱処理が成立するか確認

実験② (熱処理条件検討) 造形まま

溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤー フィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	シールドガス	パス間温度 [°C]
CMT	195	17	9	600	Ar	200

硬さ : 19.2HRC



YZ面 400倍観察

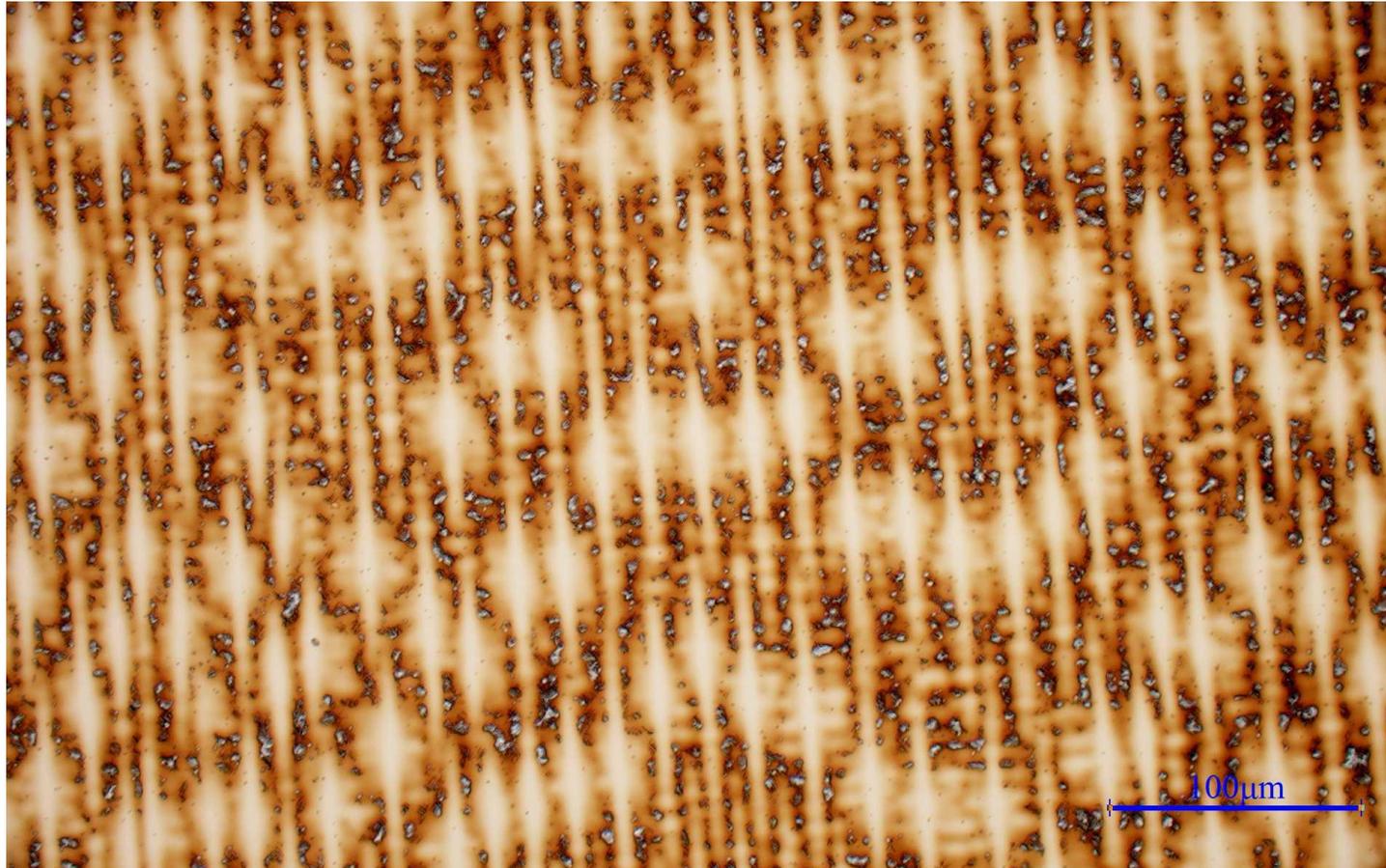
Z方向への結晶成長が見られる

析出物はやや粗大

実験② (熱処理条件検討)

条件No.	溶体化処理条件	時効処理条件
1	982°C/1h AC	718°C/8h→620°C/10h AC

硬さ : 45.3HRC



YZ面 400倍観察

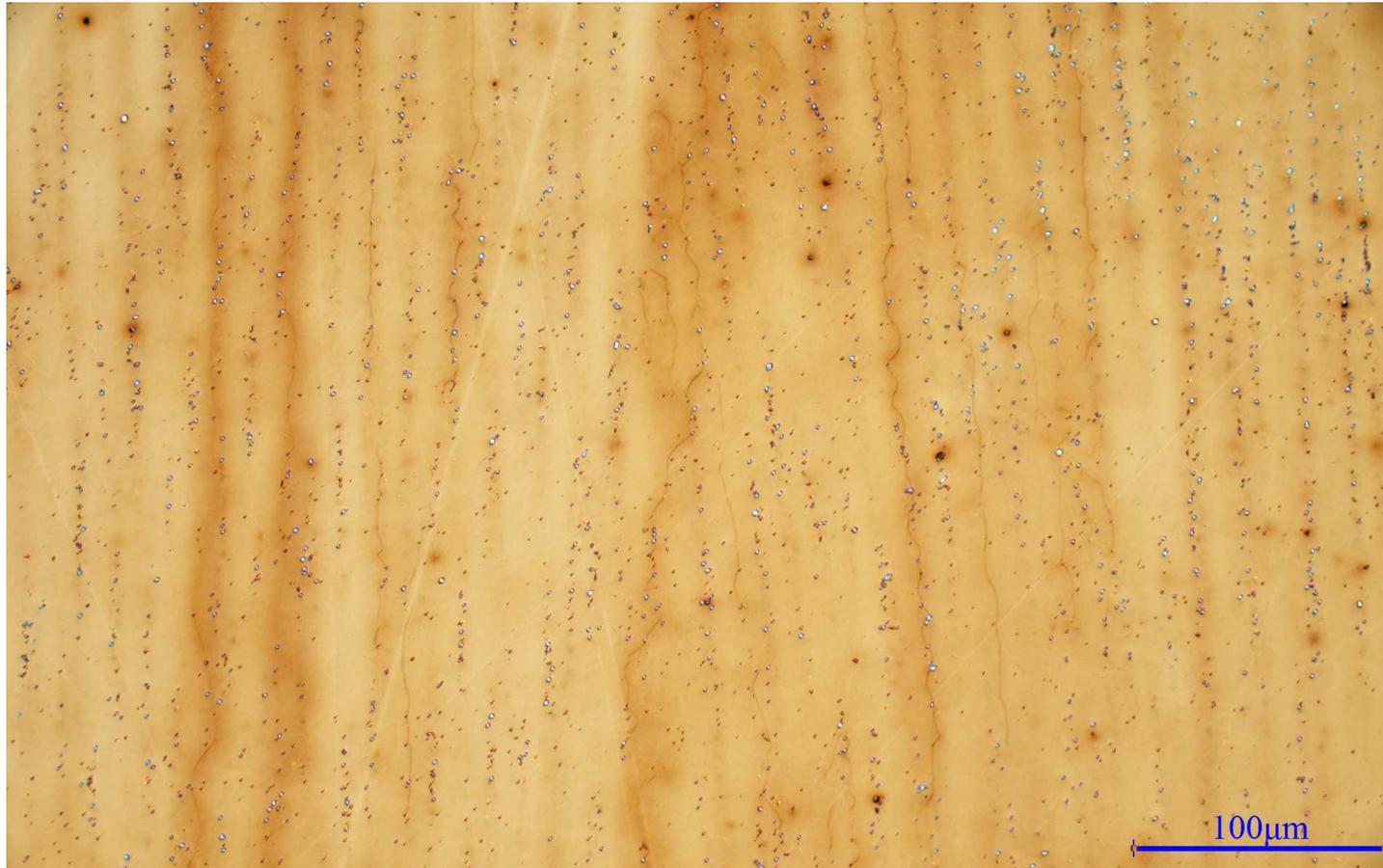
Z方向への結晶成長が見られる

析出物はやや粗大だが
造形ままよりは微細

実験② (熱処理条件検討)

条件No.	溶体化処理条件	時効処理条件
2	1080°C/1h AC	718°C/8h→620°C/10h AC

硬さ : 46.2HRC



Z方向に伸長な粗大な結晶粒が見られる

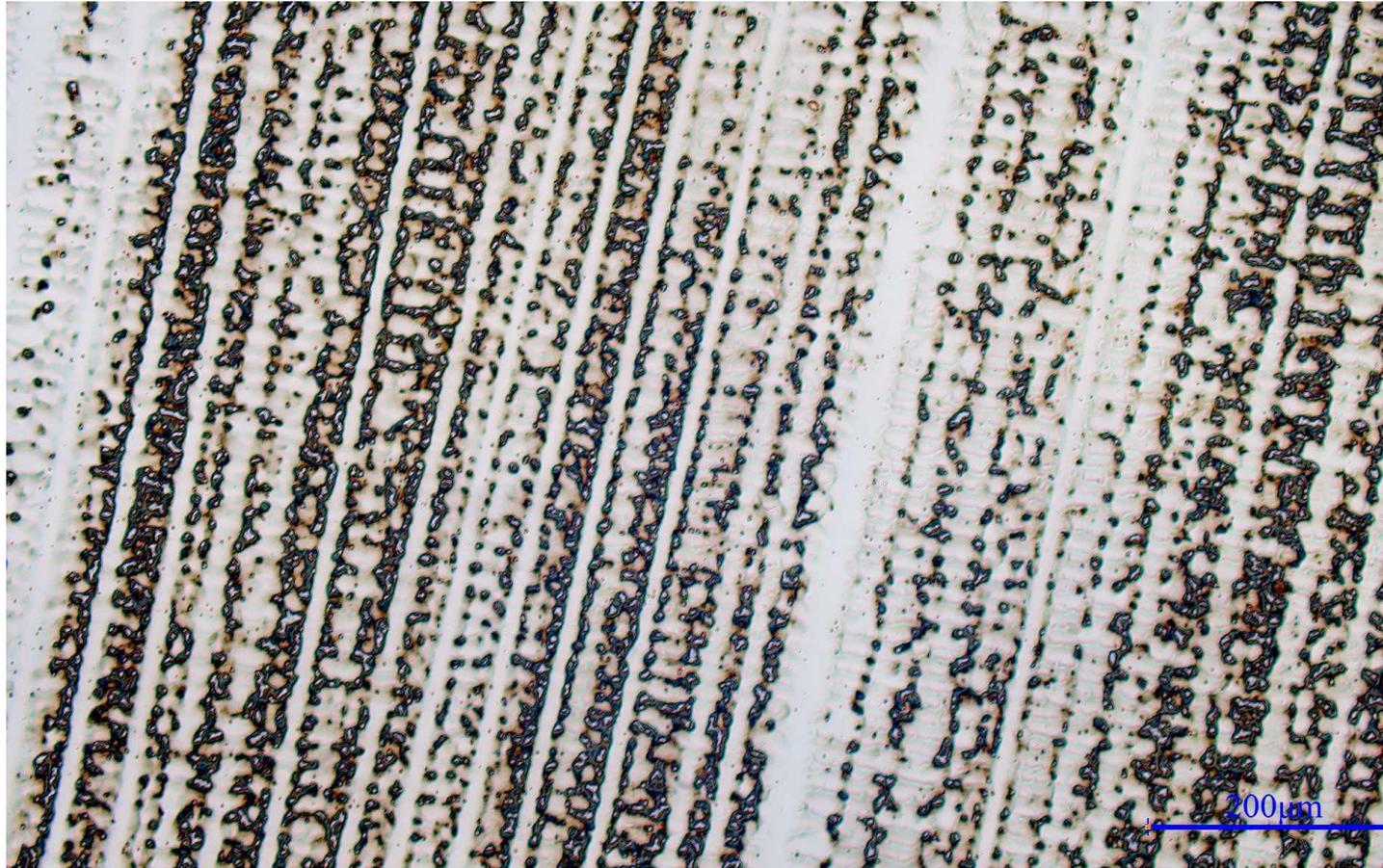
析出物は微細化されている

YZ面 400倍観察

実験② (熱処理条件検討)

条件No.	溶体化処理条件	時効処理条件
3	-	718°C/8h→620°C/10h AC

硬さ : 43.0HRC



Z方向への結晶成長が見られる
粗大な析出物が増加

YZ面 400倍観察

実験② (熱処理条件検討)

条件No.	硬さ [HRC]	析出物の種類
造型まま	19.2	γ “相、Nb,Ti炭化物、Al酸化物
1 (溶体化温度982°C)	45.3	γ “相、 δ 相、Nb,Ti炭化物、Al酸化物
2 (溶体化温度1080°C)	46.2	γ “相、Nb,Ti炭化物、Al酸化物
3 (時効のみ)	43.0	γ “相、Nb,Ti炭化物、Al酸化物

いずれの熱処理でも硬度が向上

造型まま、No.2、No.3では、同一の析出物が存在。析出物の大きさが異なるだけ。

No.1の条件では、針状の δ 相(Ni_3Nb)が生成している。

→主な強化相である γ “相が変態し δ 相生成。

一般的なインコネル718合金では、 γ “相による粒内強化を重視するが、結晶成長方向に異方性がある積層造形物では、粒界を強化する δ 相も重要

実験③（機械的特性評価）

③機械的特性評価

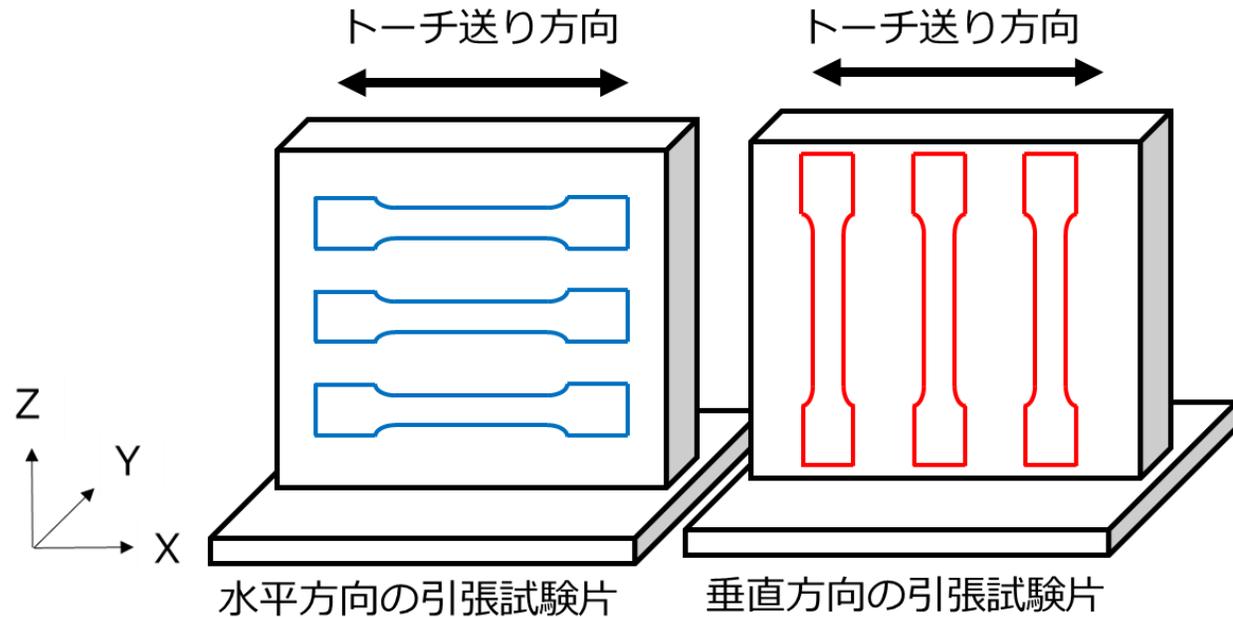
実験③ (機械的特性評価)

積層条件

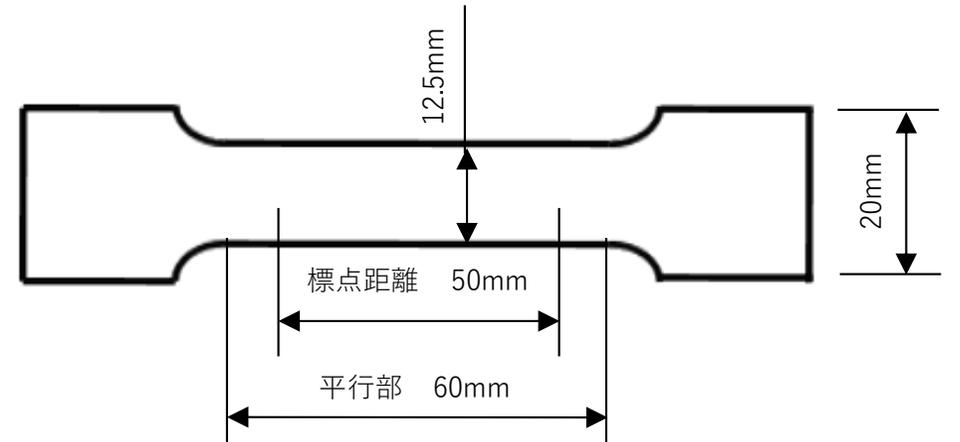
欠陥の少なかった入熱大の条件で作成

積層材種	溶接方法	電流 A	電圧 V	ワイヤーフィード m/min	トーチ送り mm/min	シールドガス	パス間温度 °C
インコネル718	CMT	195	17	9	600	Ar	200

試験片採取方向



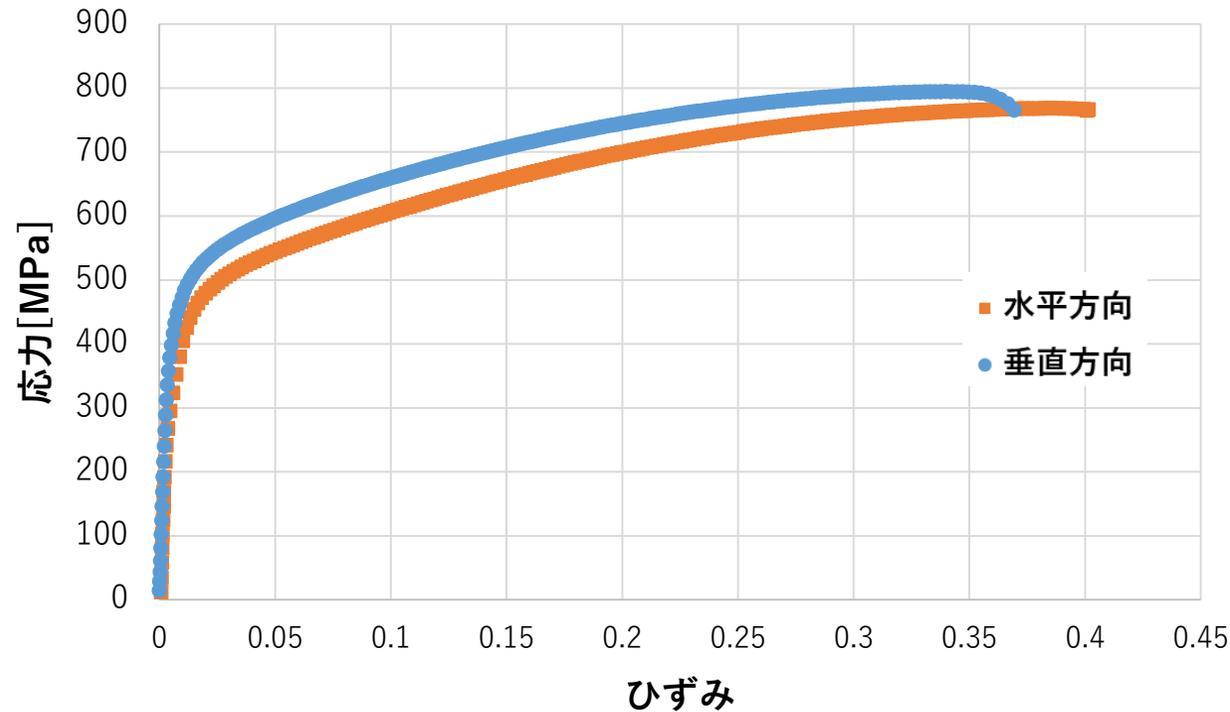
試験片寸法



実験③ (機械的特性評価)

インコネル718積層品 引張試験結果 熱処理前

	引張強さ [N/mm2]	0.2%耐力 [N/mm2]	伸び [%]
垂直方向	786	541	35
水平方向	770	508	36



インコネル718積層品 引張試験結果 熱処理後

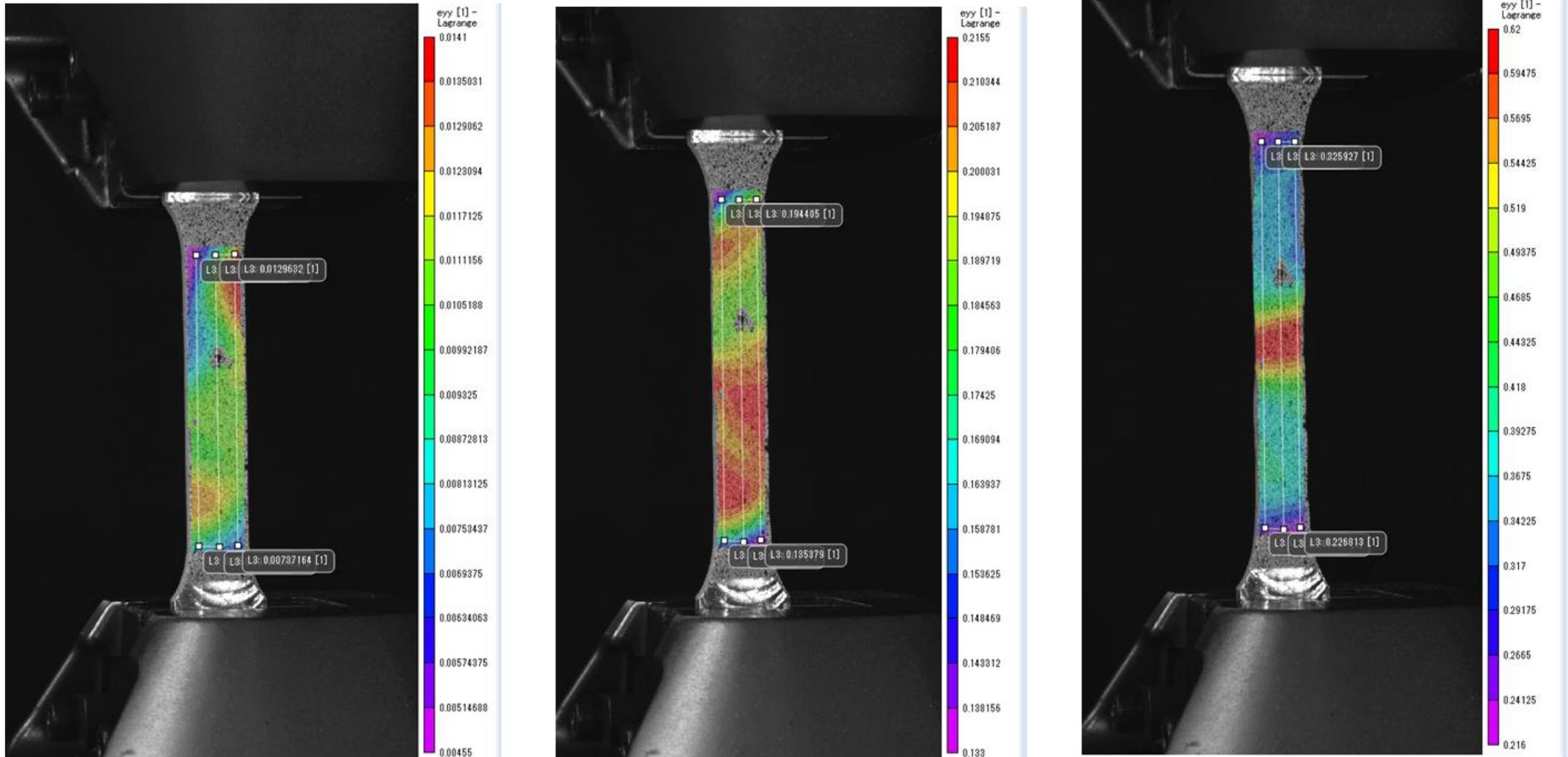
	引張強さ [N/mm2]	0.2%耐力 [N/mm2]	伸び [%]
垂直方向	1212	1105	23
水平方向	1128	1047	22
ASTM参考値	1275	1034	12

熱処理により強度が大きく向上

アルミ合金やSUS積層品に比べて
インコネル718積層品では、
機械的特性の異方性が小さい

実験③ (機械的特性評価)

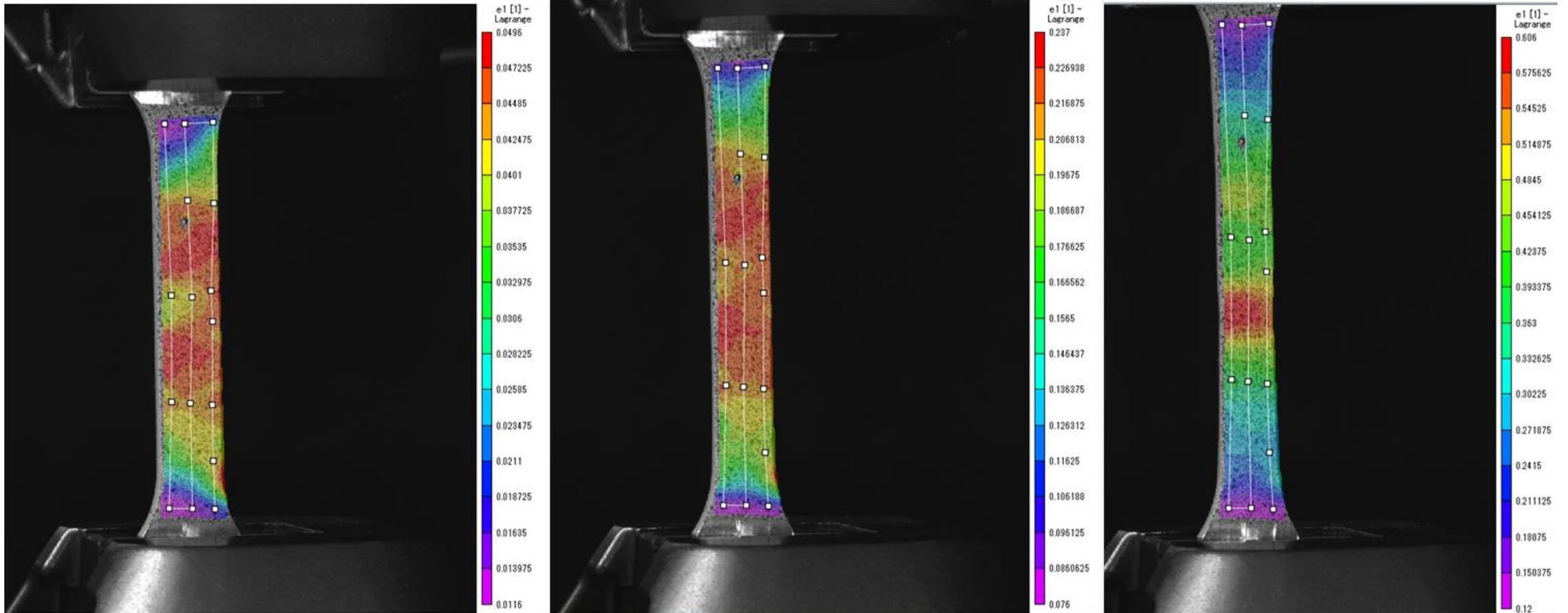
DICによるひずみ分布の可視化



水平方向DIC解析結果(左：引張初期、中央：引張中期、右：破断直前)

実験③ (機械的特性評価)

DICによるひずみ分布の可視化



垂直方向DIC解析結果(左：引張初期、中央：引張中期、右：破断直前)

各方向とも展伸材と同様のひずみ分布であり、積層造形物特有の分布などは見られなかった

実験④（異種材料積層造形）

④異種材料積層造形

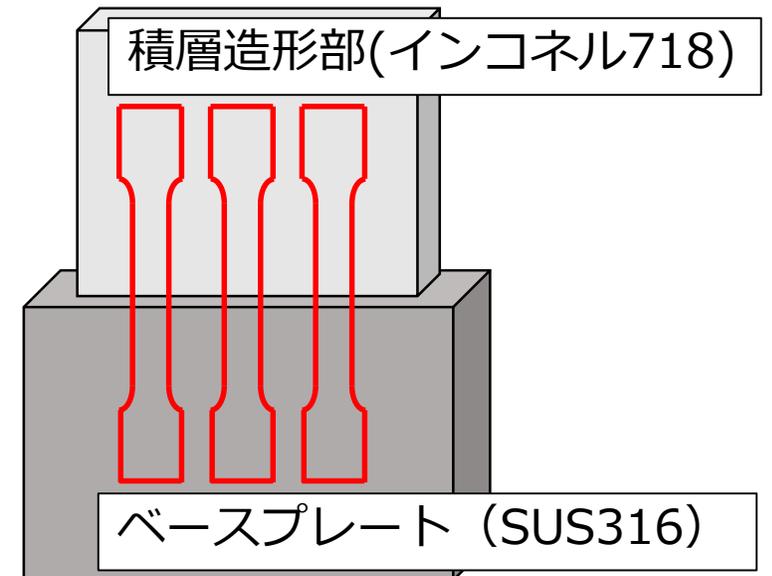
実験④ (異種材料積層造形)

積層造形条件 欠陥の少なかった入熱大の条件で作成

積層材	母材	溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	シールドガス	パス間温度 [°C]
インコネル718	SUS316, S50C	P	228	22.3	9	600	Ar	200
		CMT	195	17				

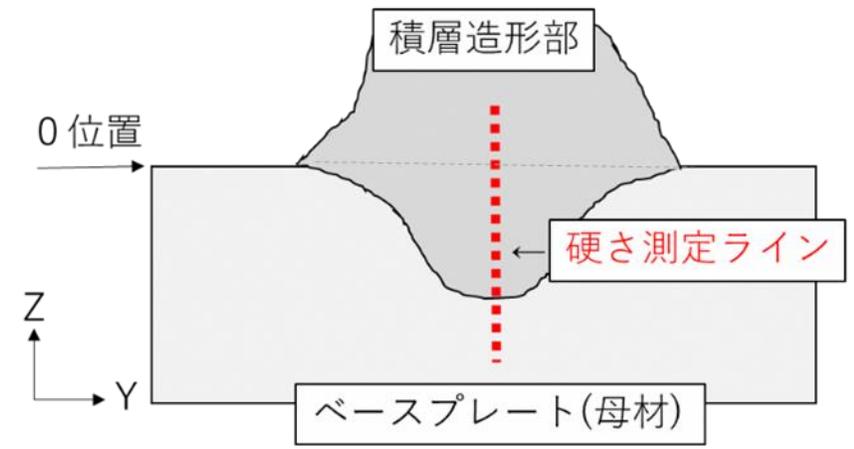
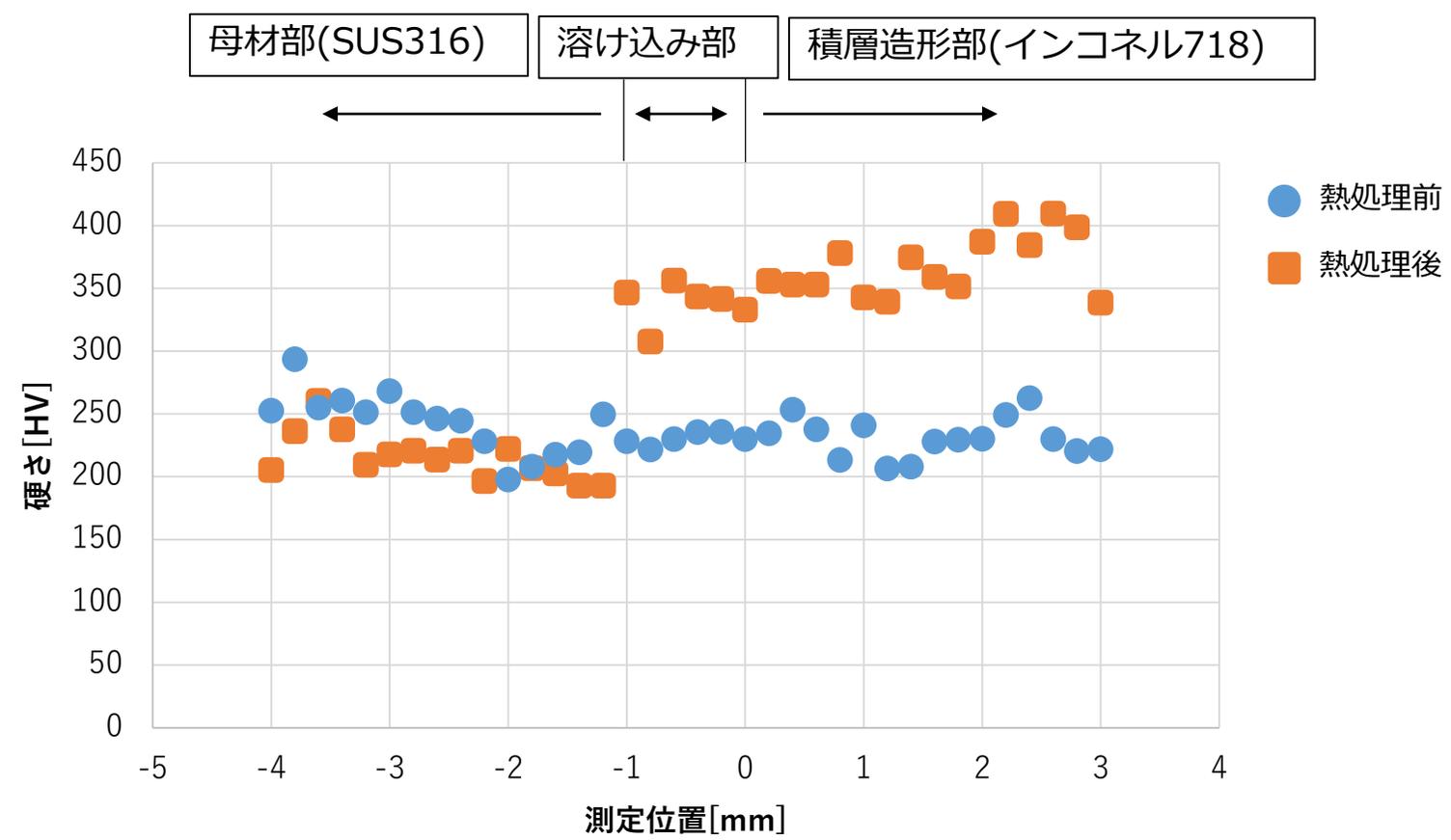
引張試験片：接合部が中心となるように切り出し

硬さ試験片：接合部から採取



実験④ (異種材料積層造形)

硬さ分布(SUS316+インコネル718)



熱処理条件

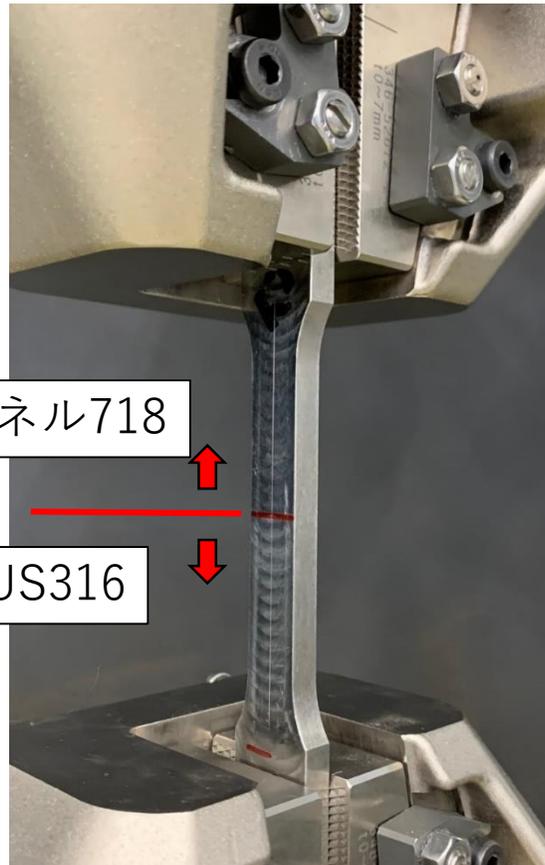
溶体化処理条件	時効処理条件
982°C/1h AC	718°C/8h→620°C/10h AC

熱処理により積層造形部、溶け込み部の硬さが向上

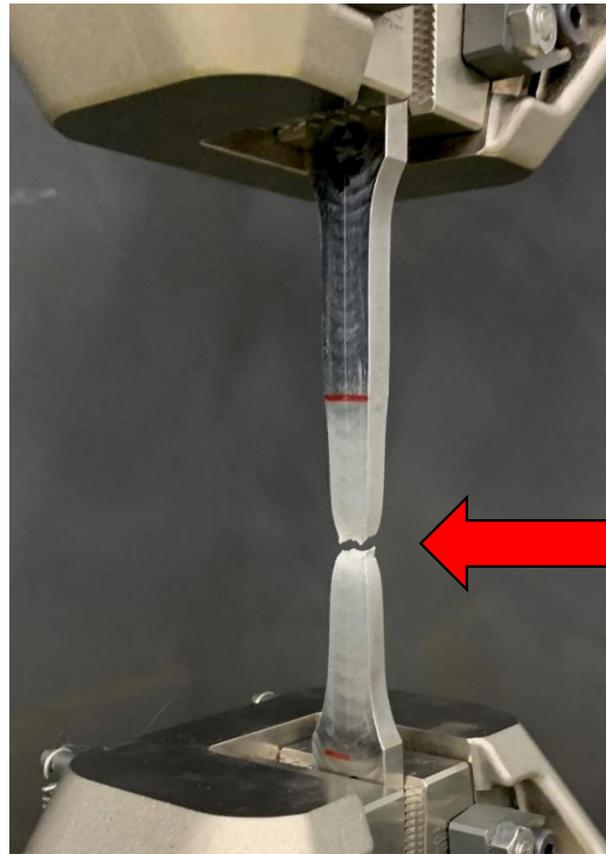
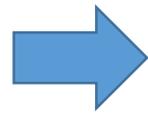
実験④ (異種材料積層造形)

引張試験(SUS316+インコネル718)

引張強さ Mpa	積層部伸び %	母材部伸び %	破断位置
586	7.6	69.4	母材部(SUS316)



引張試験



母材部(SUS316)が優先的に大きく変形し破断

まとめ

- ニッケル合金(インコネル718相当)の積層造形条件、熱処理条件に関する知見を得た。
- ニッケル合金(インコネル718相当)の機械的特性について、異方性が少ないことが分かった。
- SUS316上へ積層造形した際の界面の機械的特性を調べ、接合界面が十分な強度を持つことが分かった。

次年度は

- 対象とする材料として難削材のチタン合金を検討中