

日本機械学会研究協力部会 RC294継続研究分科会

日本の電子実装産業の復活を目指す、
電子実装の信頼性と熱制御に関する研究分科会

第2小委員会における信頼性解析の取り組み例
(電子デバイス内の接合界面強度の信頼性評価)

2023年11月15日(水)

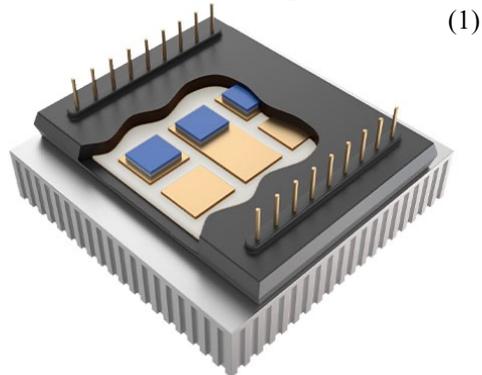
第2小委員会幹事 池田 徹

鹿児島大学
学術研究院理工学域工学系 (機械工学プログラム)

電子デバイス内の接合界面強度の信頼性評価

パワーモジュール内部の金属基板・樹脂間
における疲労き裂進展挙動の解明

研究背景 (樹脂封止)

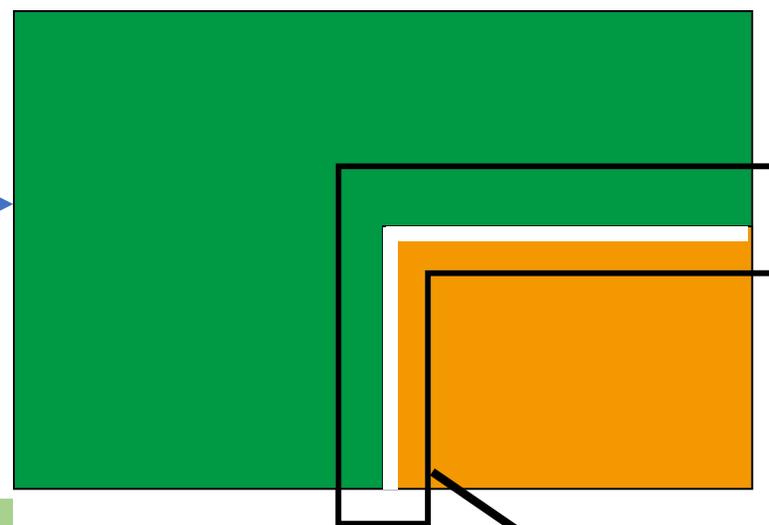


温度変化
機械的応力

ヤング率や線膨張係数の差に起因する熱応力を繰り返し受ける



金属基板の界面角部に応力集中が発生



研究背景

封止樹脂を用いたパワーモジュールに対して高耐熱性が求められておりその開発が進んでいる

繰り返し熱負荷時におけるはく離の発生を定量的に評価する手法の確立が急務

パワーモジュール(樹脂)の長期信頼性評価を行う手法の確立



熱サイクル試験が一般的に用いられる
試験に多くの時間とコストを要する



熱サイクル試験を簡易的に予測し、より短時間で信頼性評価が可能な試験方法が求められている

本研究は熱サイクル試験を機械的低サイクル疲労試験に置き換え、
評価時間を短縮することを目的とした

機械的低サイクル疲労試験

熱サイクル試験に比べて

- ・短時間での評価が可能
- ・はく離の観察が容易

両試験のはく離発生の特異性の調査が必要で

本研究グループの先行研究⁽²⁾で
界面が最も損傷を受ける温度域(はく離発生温度域)を予測

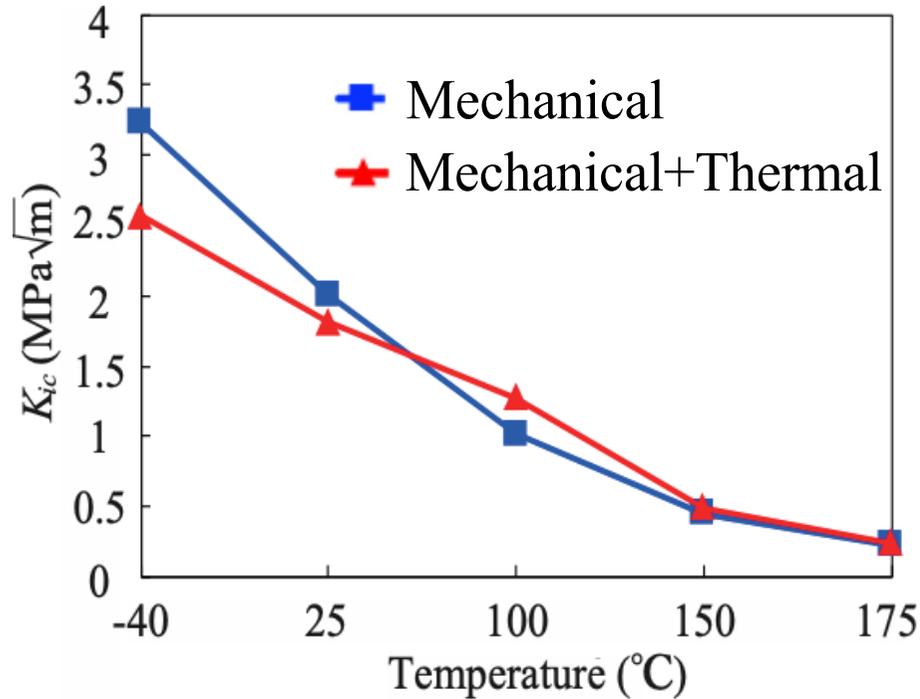
予測した温度域において

熱サイクル試験および機械的低サイクル疲労試験を実施し
破壊形態の比較を行う

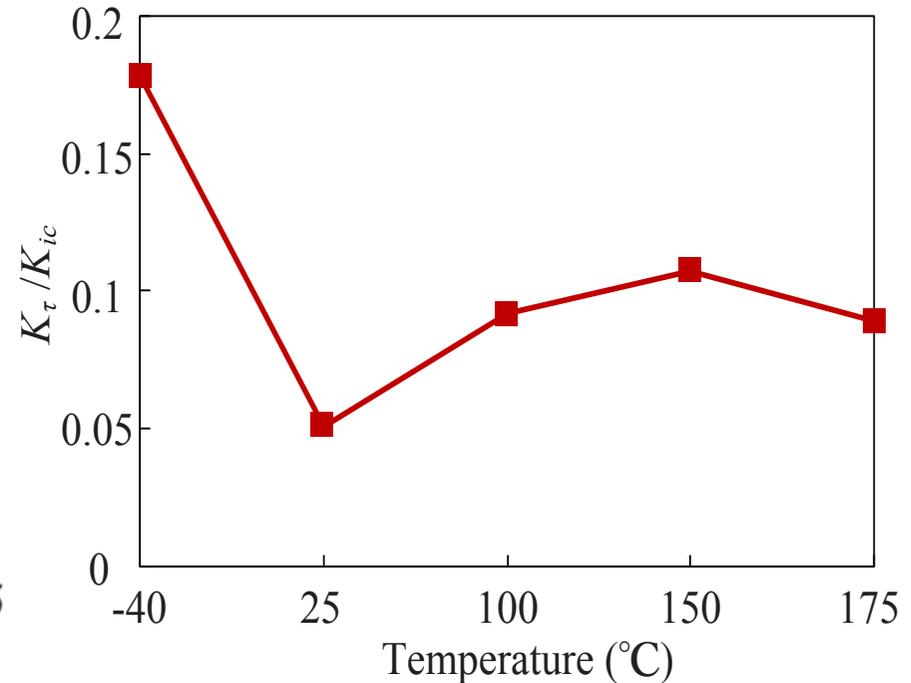
(2)長尾元気, 池田徹, 小金丸正明, 加々良剛志, 中井戸宙, 畑尾卓也: “パワーモジュール中における熱サイクル疲労と機械的疲労下での封止樹脂-金属基板界面き裂の進展挙動”
計算力学講演会論文集, 32, 214, 2019.

静的な破壊靱性値の温度変化

ENF試験時の破壊靱性値 K_{ic} と熱サイクル試験時の応力拡大係数 K_{τ} を算出(1)



ENF試験時の破壊靱性値 K_{ic}



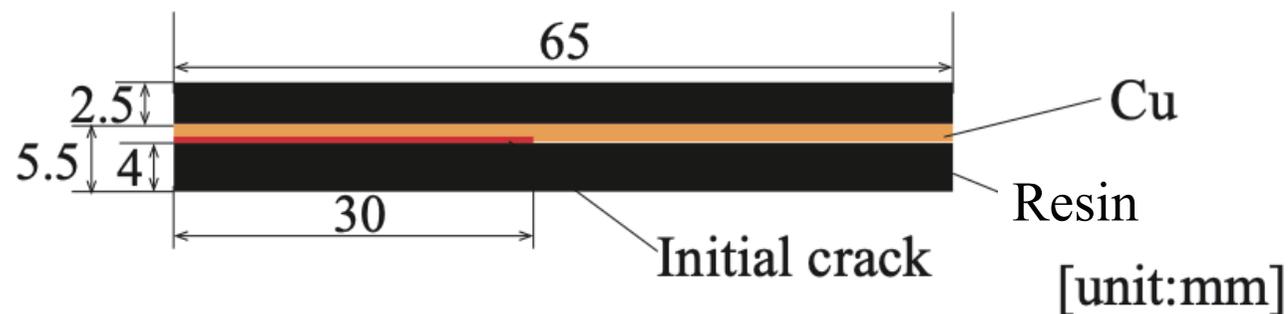
応力拡大係数 K_{τ} / 破壊靱性値 K_{ic}

- ・ 昇温するにしたがって破壊靱性値が大きく低下した
- ・ K_{τ}/K_{ic} から、 -40°C 付近の温度域で熱応力の影響が大きくなった

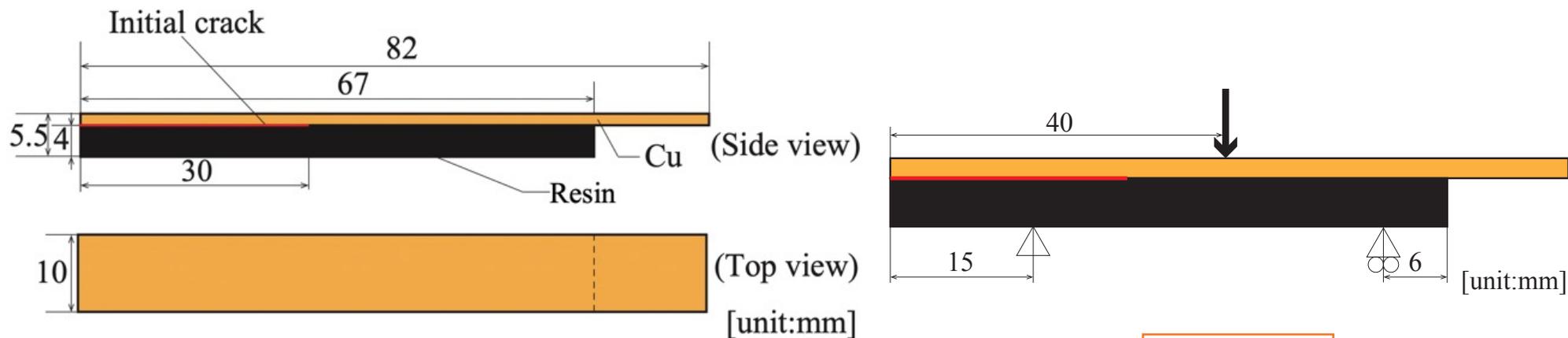
→ -40°C ～ 175°C の範囲における、静的な破壊靱性値と疲労破壊の関係を調査

試験片寸法

熱サイクル試験



機械的低サイクル疲労試験



試験片寸法

境界条件

試験荷重は片振りであり、荷重負荷周期は1サイクルあたり10秒とし、最小荷重は0.1kgfで統一

試験条件, 物性値

試験条件

	Thermal cycle test	Mechanical fatigue test
Temperature (°C)	-40~175	-40, -20, 25, 100, 150, 175
Ratio to fracture load (%)	-	50, 60, 70, 75
Observation cycle	10~50	Change in displacement
Resin	Epoxy	Epoxy

銅物性値

Young's modulus (GPa)	CTE(ppm/°C)	Poisson's ratio
118	17.7	0.343

樹脂物性値

T (°C)	E (GPa)	CTE(ppm/°C)	T_g (°C)
-40	32.8	13.6	
25	30.7	15.6	
100	27.6	20.7	
150	6.4	24.3	130
175	2.7	25.7	
200	2	26.9	
240	1.7	28.9	

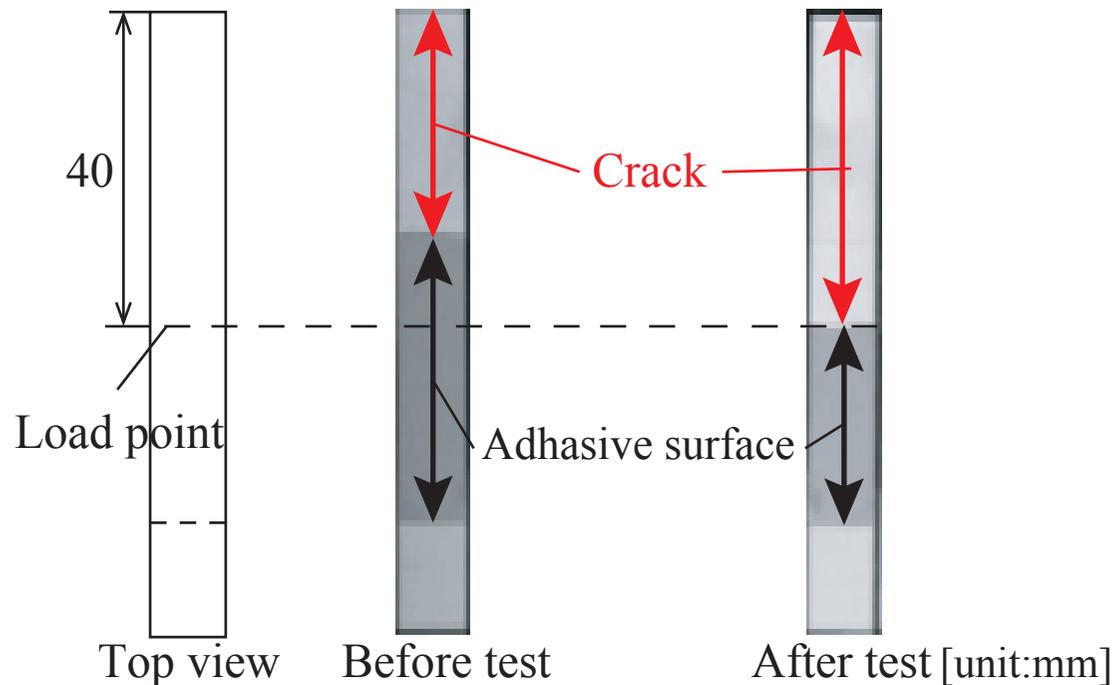
き裂進展評価手法

熱サイクル試験

10サイクル～50サイクル毎に超音波探傷映像装置(SAT)で観察, き裂進展距離を確認
荷重点まで進展したところで, き裂進展サイクル数を評価

機械的低サイクル疲労試験

試験の際, クロスヘッド変位の挙動が変化したところでき裂が進展したと予測し, SATでき裂進展距離を確認. 荷重点まで進展したところで, き裂進展サイクル数を評価



き裂が荷重点まで進展した際のサイクル数をはく離サイクル数とした

熱サイクル試験・機械的低サイクル疲労試験結果

熱サイクル試験結果

Temperature range [°C]	Fracture style
-40 ~ 175	Brittle fracture

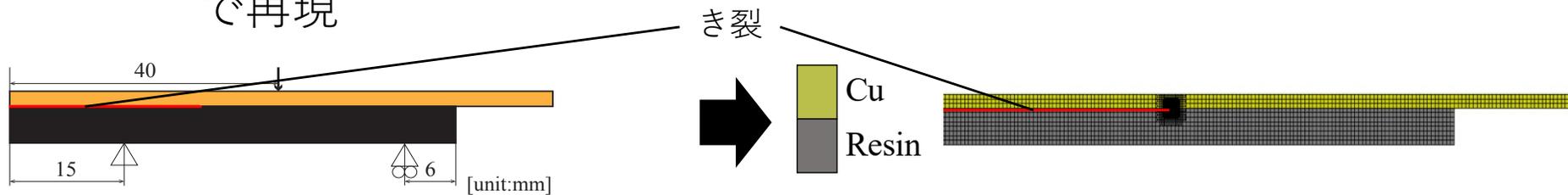
機械的低サイクル疲労試験結果

Temperature(°C)	Fracture load ratio(%)	Fracture style
175	75	Brittle fracture
175	70	Steady-state crack extension
150	70	Steady-state crack extension
150	60	Steady-state crack extension
$T_g(130^{\circ}\text{C})$		
100	70	Brittle fracture
100	60	Steady-state crack extension
100	50	Steady-state crack extension
25	70	Brittle fracture
-20	50	Steady-state crack extension
-40	70	Brittle fracture
-40	50	Steady-state crack extension

あるサイクル数で急に荷重点までき裂が進展する ぜい性破壊(Brittle fracture)
荷重点まで徐々にき裂が進展する 定常き裂進展(Steady-state crack extension) の二種類が観察された

Paris線図を用いた結果整理

銅と樹脂からなる二層材試験片を有限要素モデルで再現



き裂進展距離を変化させたモデルを作成し，機械的疲労試験中のき裂進展を再現

下記の式で総括応力拡大係数範囲 ΔK_i を算出

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$$

$$\Delta K_{II} = K_{II\max} - K_{II\min}$$

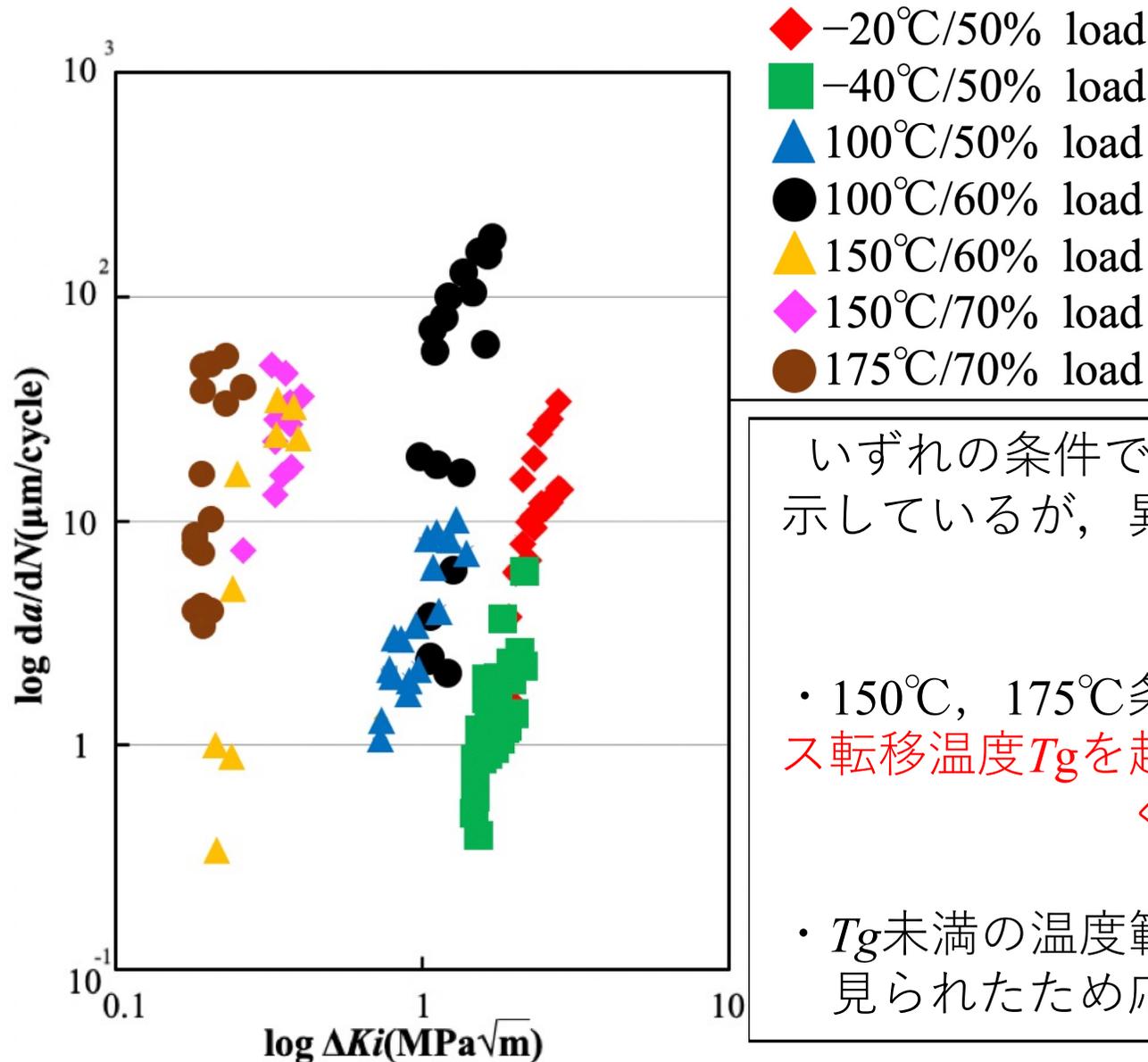
$$\Delta K_i = \sqrt{\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2}$$

※ $K_{I\max}$, $K_{II\max}$...最大荷重負荷時の応力拡大係数
 $K_{I\min}$, $K_{II\min}$...最小荷重負荷時の応力拡大係数

機械的疲労試験，有限要素法解析結果からParis線図を作成

Paris線図を用いた結果整理

各き裂長さでの総括応力拡大係数範囲(ΔK_i)とき裂進展速度について整理



いずれの条件でもParis則に従う直線性を示しているが、異なる直線上に並んでいる



・ 150°C , 175°C 条件について、樹脂のガラス転移温度 T_g を超えたことで弾性率が大きく低下した

・ T_g 未満の温度範囲ではプロットの変離が見られたため応力拡大係数を比較した

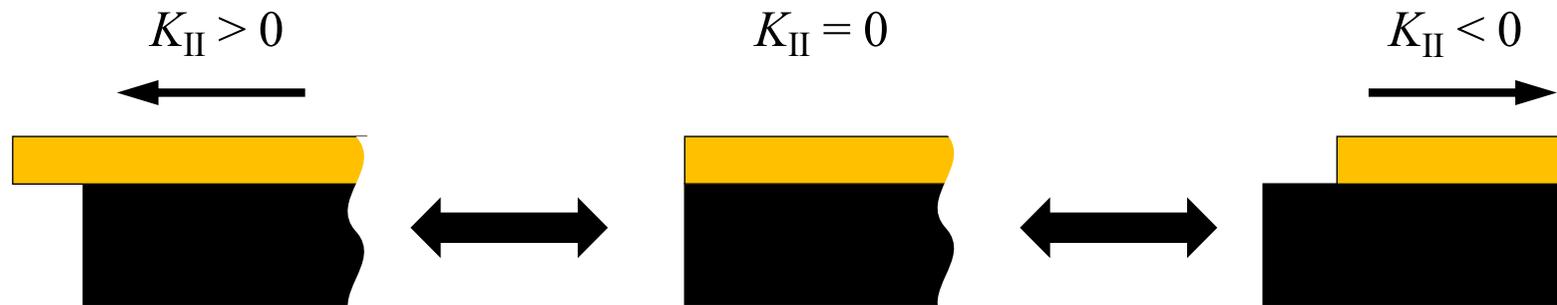
Paris線図

T_g 以下でのプロットの分離について

K_{IImin} の符号の反転について

	-40°C 50% load	-20°C 50% load	100°C 50% load	100°C 60% load
K_{IImin} (MPa√m)	1.065	0.695	-0.175	-0.175
K_{IImax} (MPa√m)	-0.419	-1.170	-0.854	-0.916

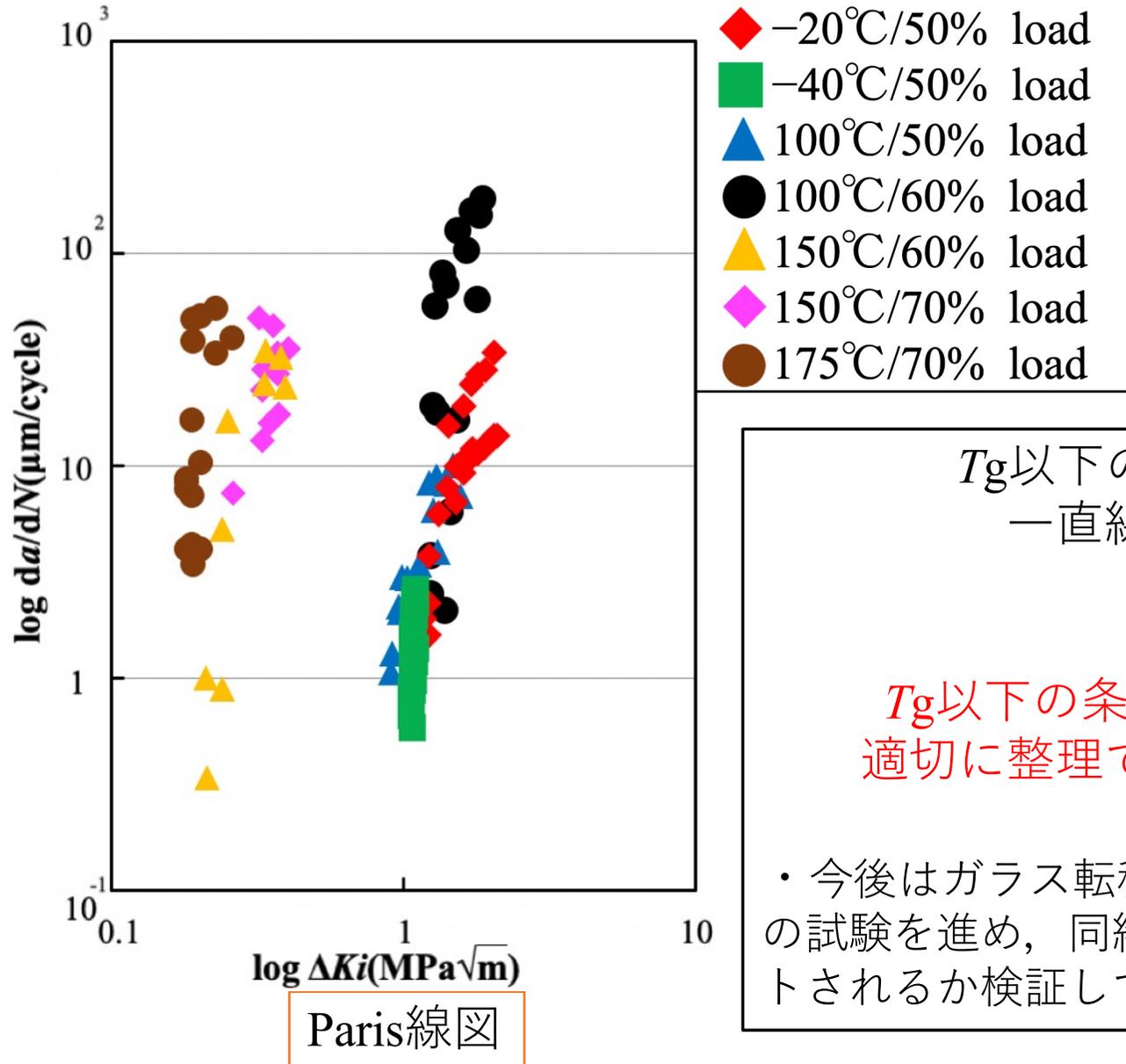
K_{II} の符号による試験片変形模式図



最小荷重負荷時 K_{II} の符号が反転している場合は
 K_{IImin} と K_{IImax} とで、絶対値が大きい方を ΔK として扱った

Paris線図を用いた結果整理

各き裂長さでの総括応力拡大係数範囲(ΔK_i)とき裂進展速度について整理

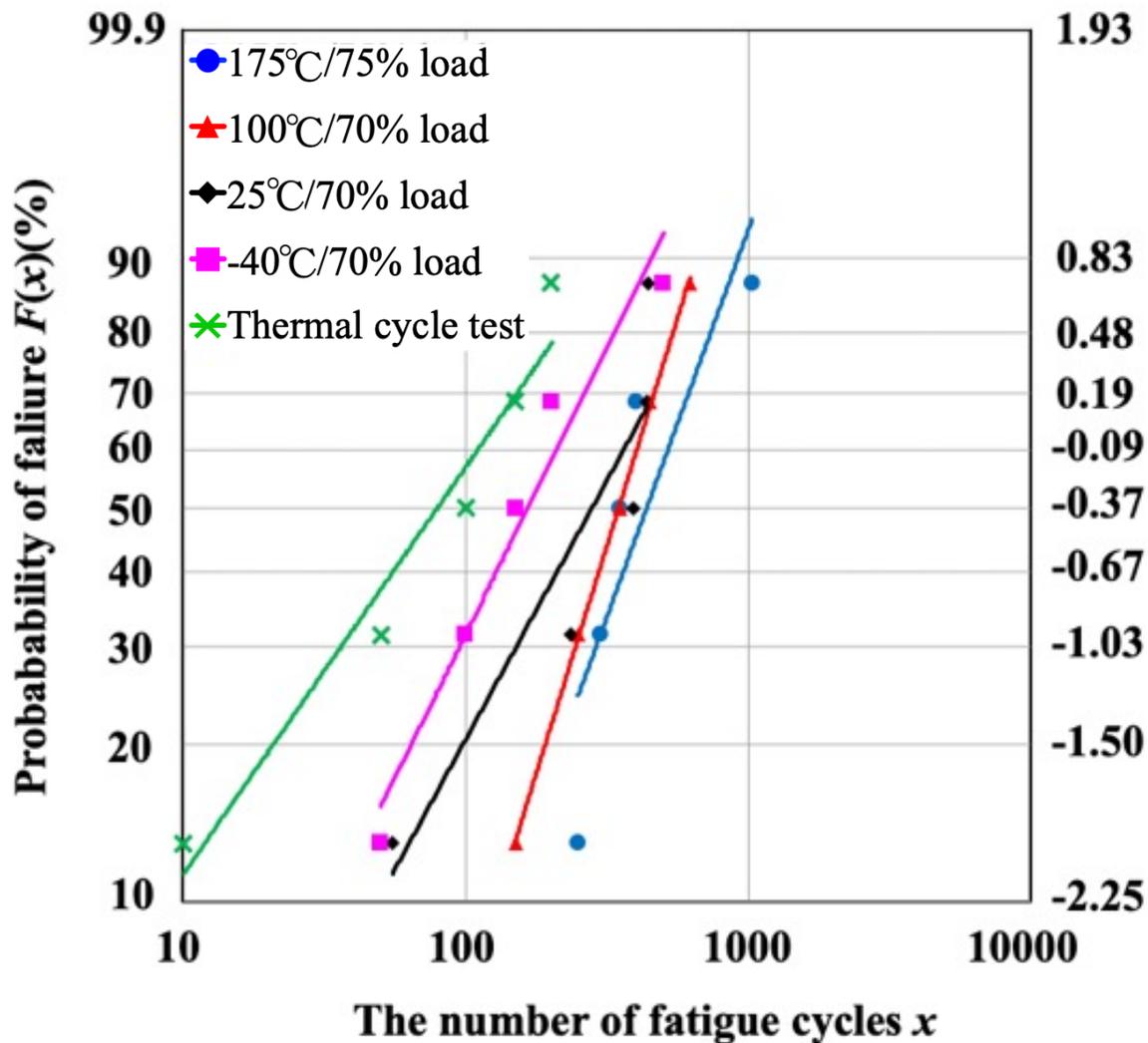


T_g 以下の条件のプロットが
一直線上に並んでいる



T_g 以下の条件をParis線図において
適切に整理できていると考えられる

・ 今後はガラス転移温度を超えるより高温条件での試験を進め、同線図においてどのようにプロットされるか検証していく



形状パラメータ比較

Test condition	Weibull coefficient m
175°C/75% load	1.61
100°C/70% load	1.89
25°C/70% load	1.07
-40°C/70% load	1.19
Thermal cycle test	0.84

異なる試験条件でも同程度の傾き
同じ故障パターンを示していると考えられる

まとめ

- ・ T_g 以下の温度域では、定常き裂進展から、ぜい性破壊に移行する遷移点があく離荷重の6~7割程度に、 T_g 以上では7~7割5分程度に存在すると推測された
- ・ 定常き裂進展域で最小荷重負荷時 K_{II} の符号が反転している場合 K_{IImin} と K_{IImax} とで、絶対値が大きい方を ΔK として扱うことで定常き裂進展挙動をParis線図において整理することができた
- ・ ぜい性破壊時には異なる試験条件であっても同じ故障パターンを示していると推測された

今後の課題

T_g 以上の高温条件において、定常き裂進展からぜい性破壊に移行する遷移点についての調査

電子デバイス内の接合界面強度の信頼性評価

鉛フリーなZnAl共析合金を用いた
拡散接合プロセスによる高温接合材料の開発

現在使われているPb-Sn(鉛スズ)系のはんだには融点が300°Cのものもある. しかし, ヨーロッパなどでは, RoHS指令によりPb等の有害物質は規制され始めている⁽¹⁾.



鉛フリーはんだの開発が進められている

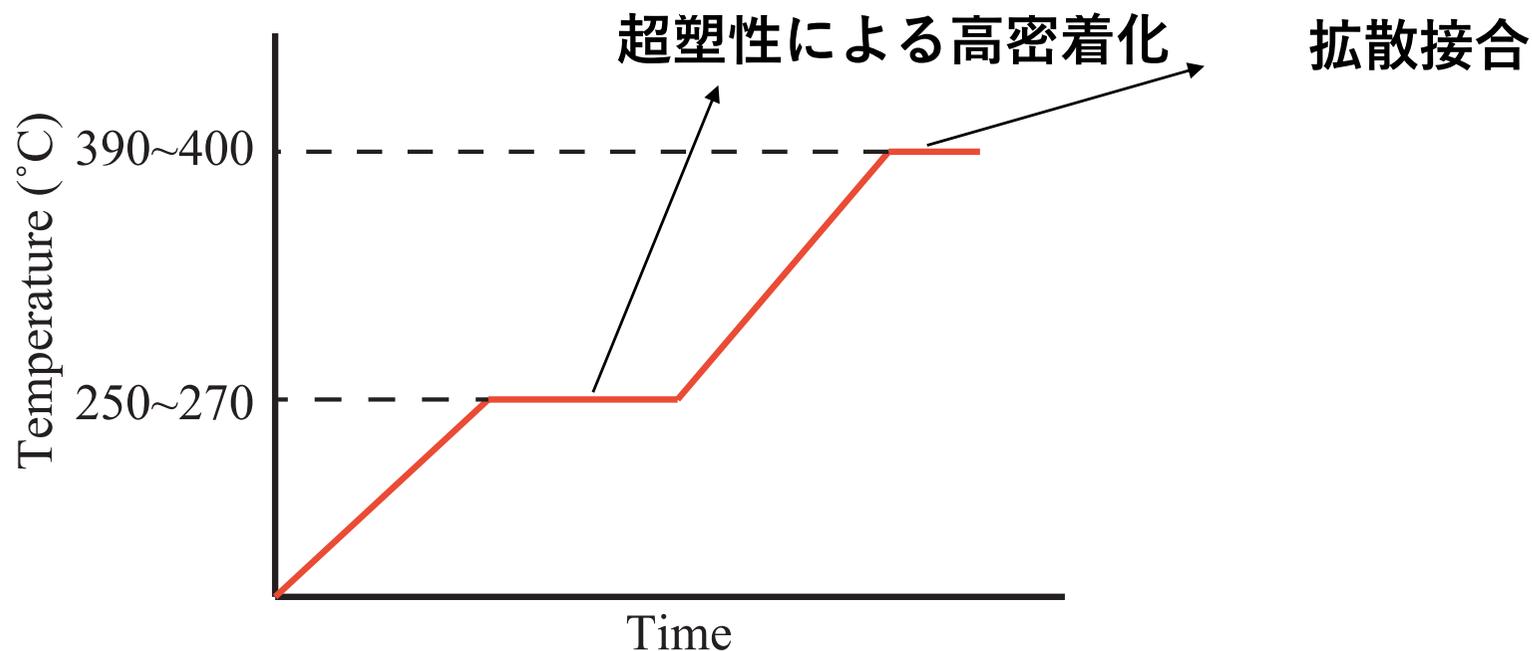
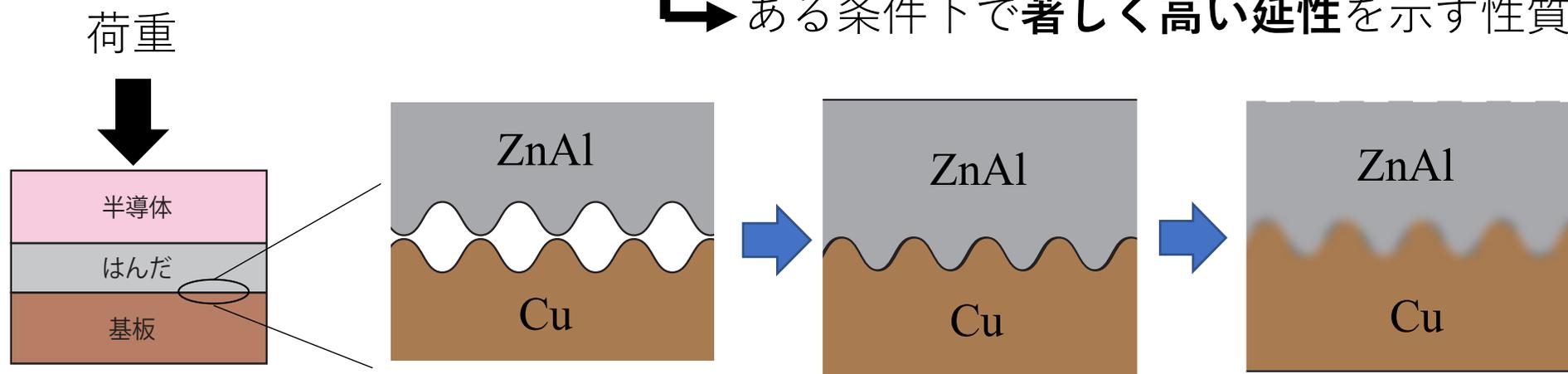
	Au系はんだ ⁽²⁾	Zn系はんだ ⁽³⁾	ナノ銀ペースト ⁽⁴⁾
課題	<ul style="list-style-type: none">・高コスト・融点が高い	<ul style="list-style-type: none">・引っ張り強度や硬度など機械的特性に難がある・酸化しやすい	<ul style="list-style-type: none">・高コスト・クラックの発生

各々の課題があるために鉛はんだの代替材料として確立しているものはない.

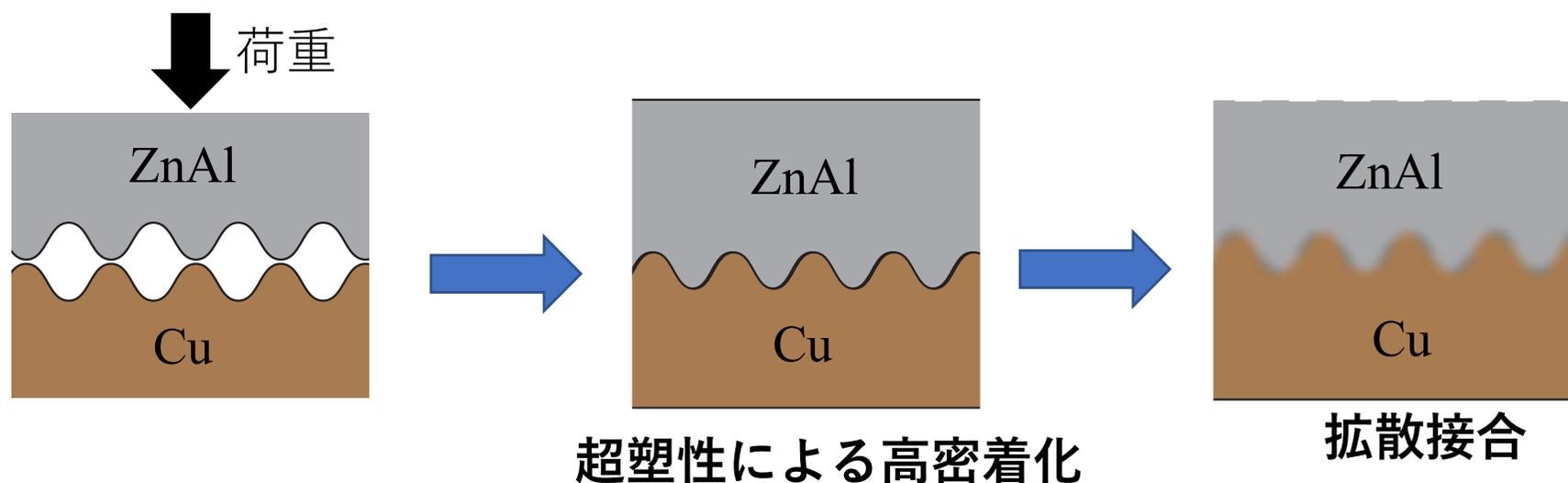
(1) 竹本正, 溶接学会誌, 第75巻 第7号(2006), pp.583-588. (2) 平森智幸, 伊藤元剛, 吉川正雄, 廣瀬明夫, 小林紘二郎, エレクトロニクス実装学会誌, Vol 6, No 6(2003), pp.503-508. (3) 北嶋雅之, 庄野忠昭, 荻野武久, 小林鉄也, 山崎一寿, 野口道子, エレクトロニクス実装学会誌, Vol 6, No. 5(2003), pp.433-438. (4) 栗田哲, 遠藤圭一, 三好宏昌, MES2014, pp.187-190.

ZnAl合金の超塑性を利用した拡散接合⁽¹⁾

ある条件下で著しく高い延性を示す性質



(1) Jin Onuki, Akane Saitou, Akio Chiba, Kunihiro Tamahashi, Yoshinobu Motohashi, Yuji Kawamata, A New Lead-Free Solder Joint Utilizing Superplastic Al-Zn Eutectoid Alloy for Next Generation Sic Power Semiconductor Devices, materials Science Forum, (2016), Vols838-839, pp.482-487.



< ZnAl共析合金で拡散接合するにあたっての課題 >

- ・ 大きな加圧によりチップ割れが発生し、歩留まりの低下につながる
- ・ 酸化による接合強度不足

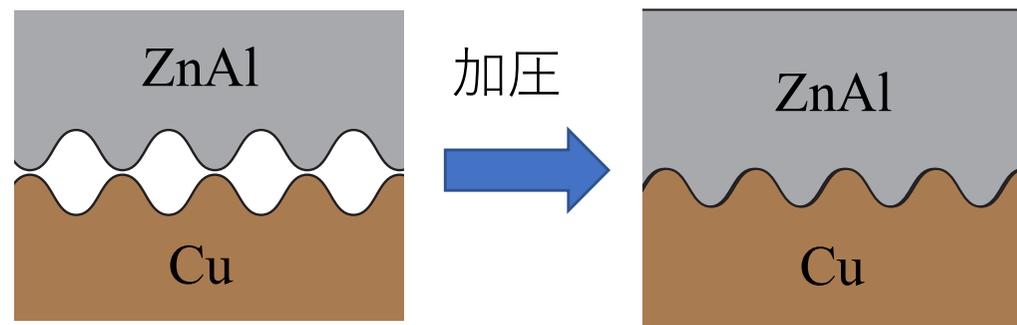
本研究の目的

- ・ 低加圧で十分な接合強度を得られる接合プロセス条件の調査
- ・ 機械的疲労試験による接合部の疲労強度の評価

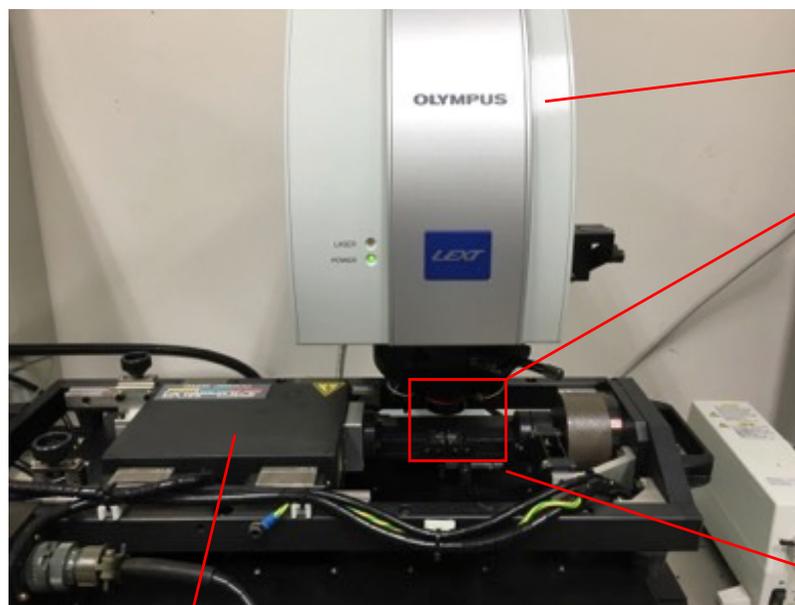
ZnAl微小試験片の静的引張試験



低い圧力で高密着化を可能にするには、ZnAlの降伏応力を下げることが重要になる

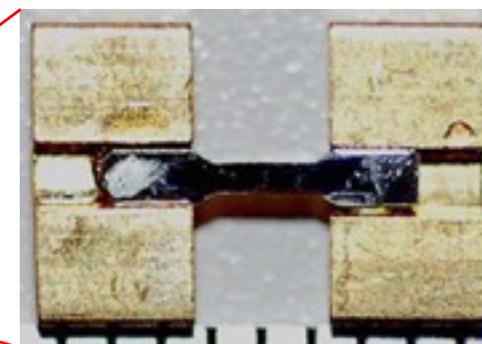
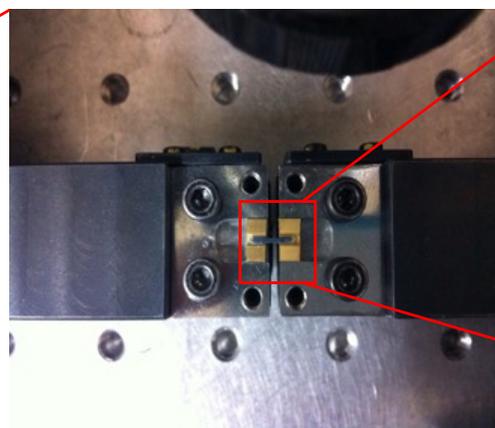


結晶粒径や負荷速度の違いによる降伏応力への影響を調査するため ZnAl試験片に対して引張試験を行なった



微小疲労荷重試験機

レーザー顕微鏡



試験片

熱処理条件の調査



微小試験片を375°Cで3時間保持した後の冷却方法と結晶粒径の調査

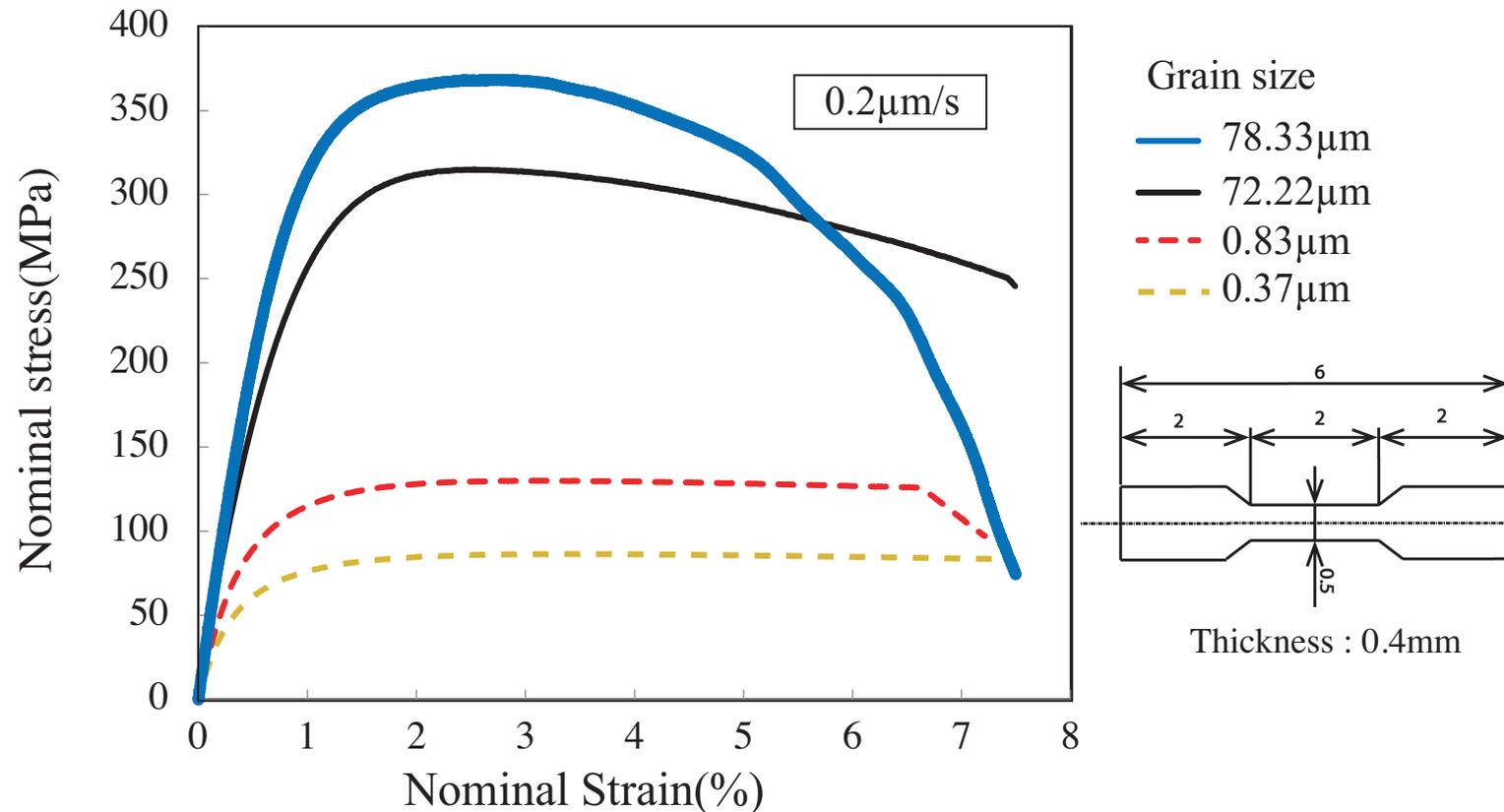
Cooling method	Grain size (μm)
Cooling in water	0.37
Cooling in air	0.83
Cooling in liquid nitrogen	0.39
Cooling in a furnace	72.2

- 冷却速度が速い方が結晶粒が微細
- 液体窒素と水冷では、結晶粒径に大きな違いが見られない

結晶粒径の違いによる比較



結晶粒径の違いによる降伏応力の比較



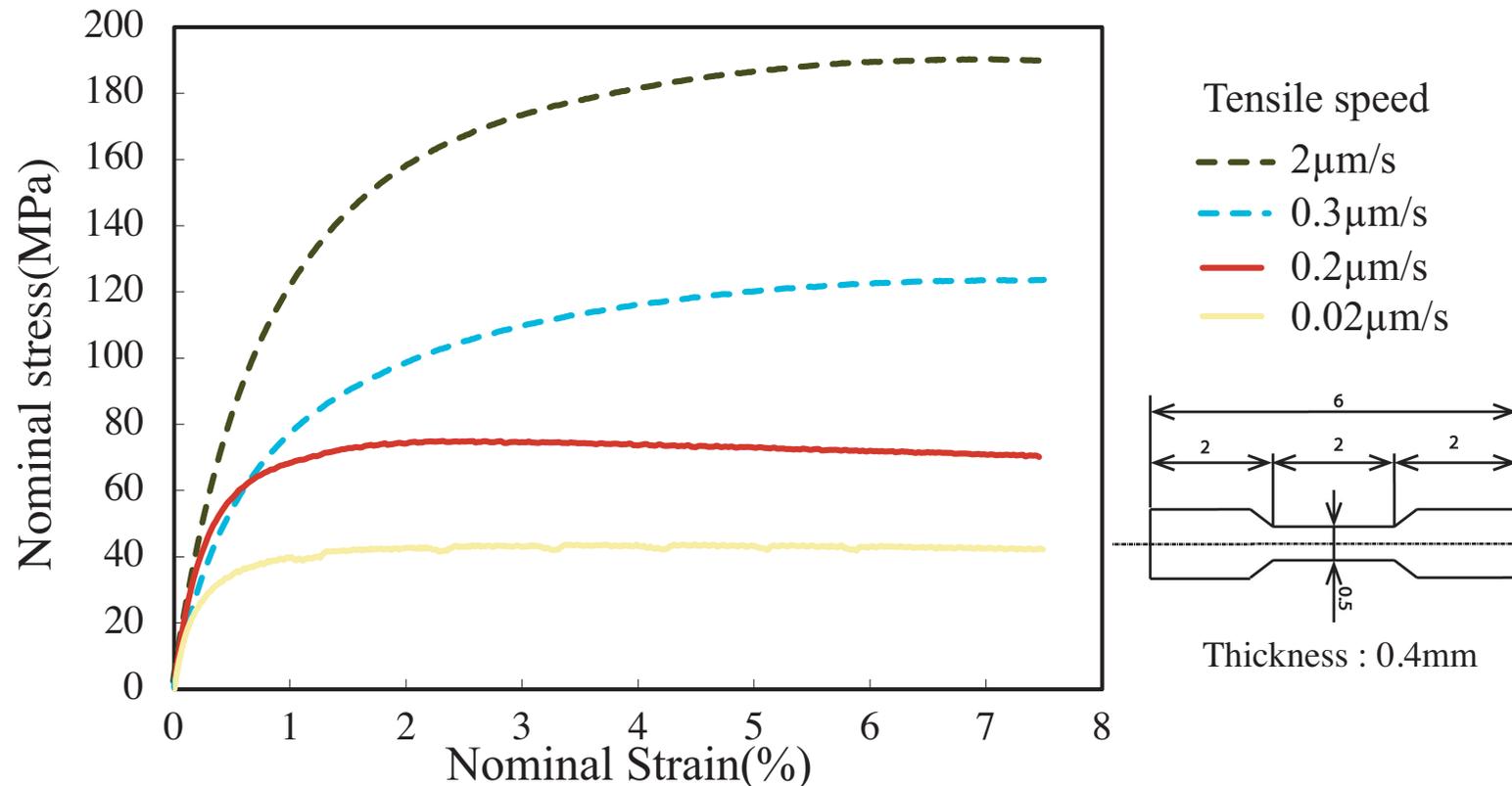
応力-ひずみ曲線 (結晶粒径)

結晶粒径が，小さい方が降伏応力が下がる。

負荷速度の違いによる比較



負荷速度による比較



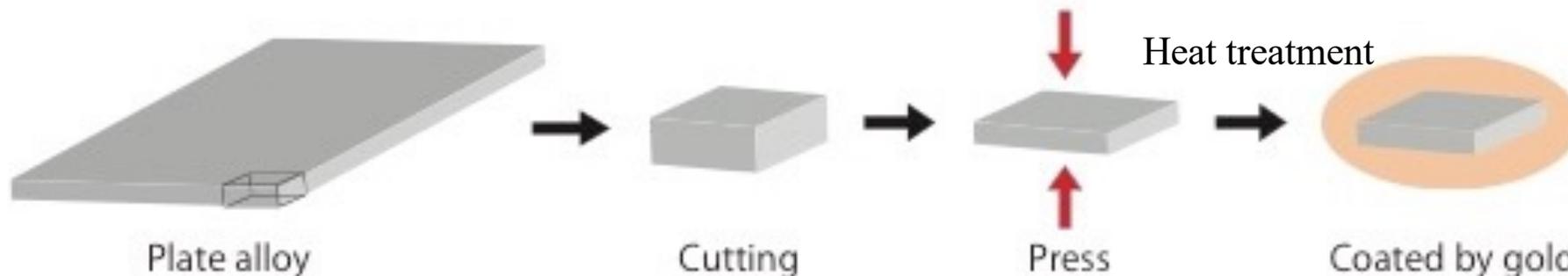
応力-ひずみ曲線（負荷速度）

ZnAlは高いひずみ速度依存性を示すため、負荷速度が遅い方が降伏応力が小さい

以上より、

結晶粒径が小さく、負荷速度が遅いほど降伏応力が小さくなる

ZnAl板はんだ製造方法



厚さ3mmの Zn22 wt.%Al板 → 低速切断機で切り出す → 圧縮・成形 → 熱処理 → 研磨・Au蒸着

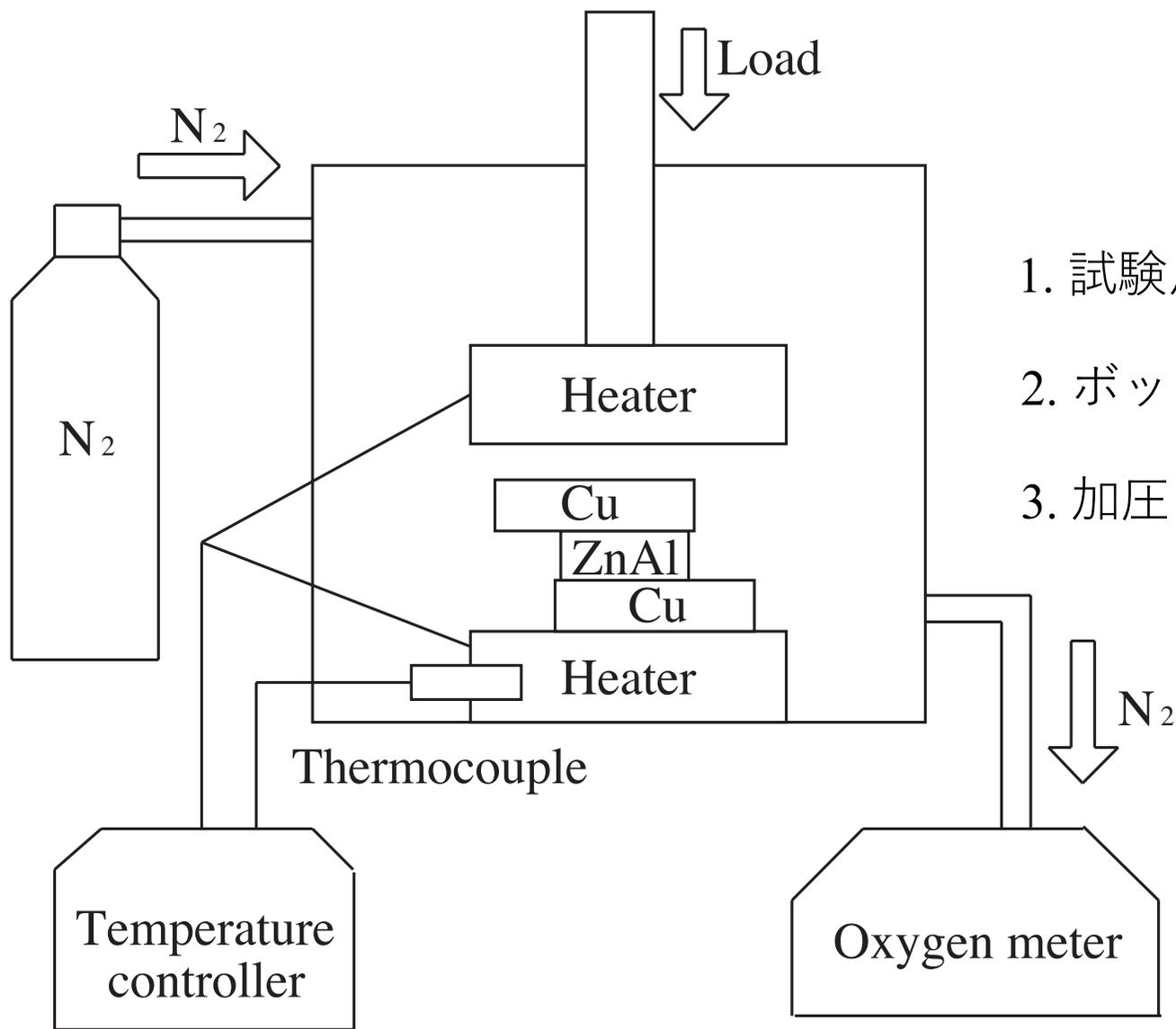
Cooling method	Grain size (μm)
Cooling in water	0.37
Cooling in air	0.83
Cooling in liquid nitrogen	0.39
Cooling in a furnace	72.2



熱処理温度	保持時間	冷却方法
375°C	3時間	水冷

- ・冷却速度を速くするために薄い板はんだの形状にしてから熱処理を行う

拡散接合試験装置の概略図



1. 試験片をヒーターに設置
2. ボックス内を窒素で置換
3. 加圧・加熱を開始

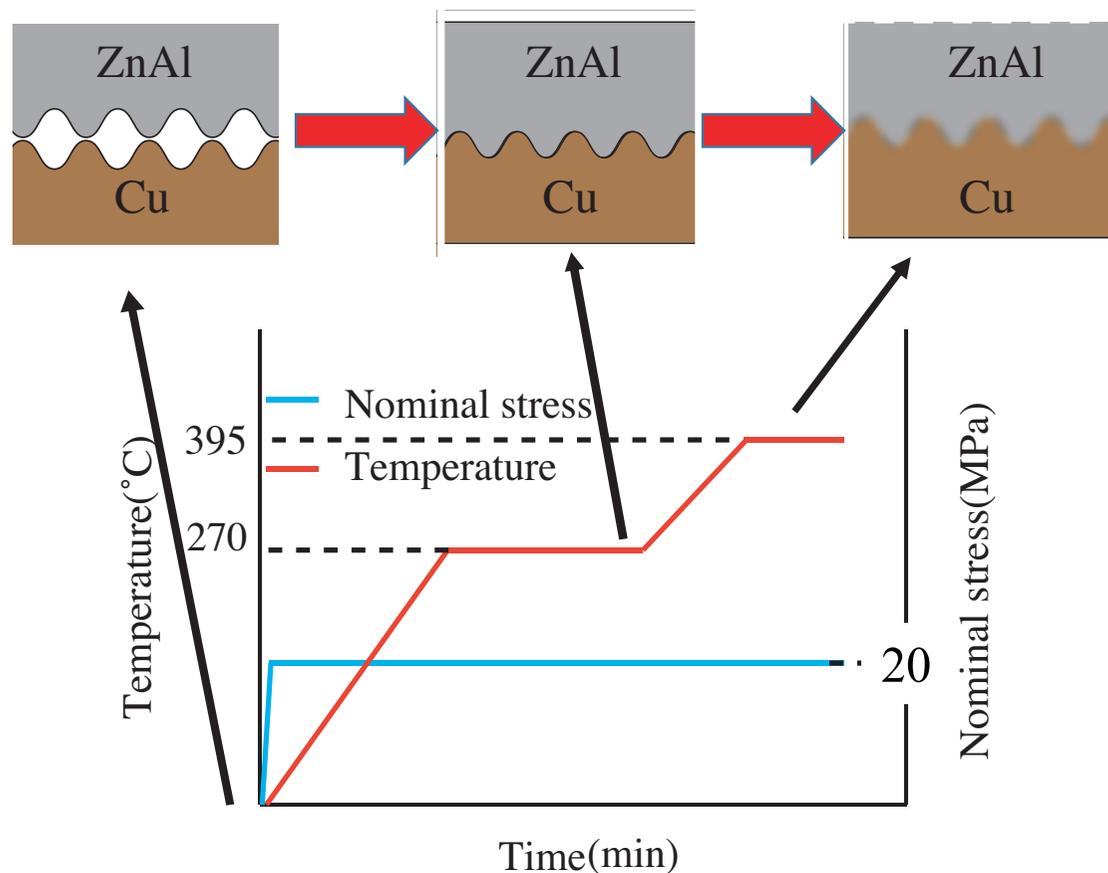
窒素置換雰囲気気で酸素濃度を1ppm以下まで低下させる

拡散接合プロセス(1)



従来の方法

超塑性特性を利用し、接合面を高密着化させる



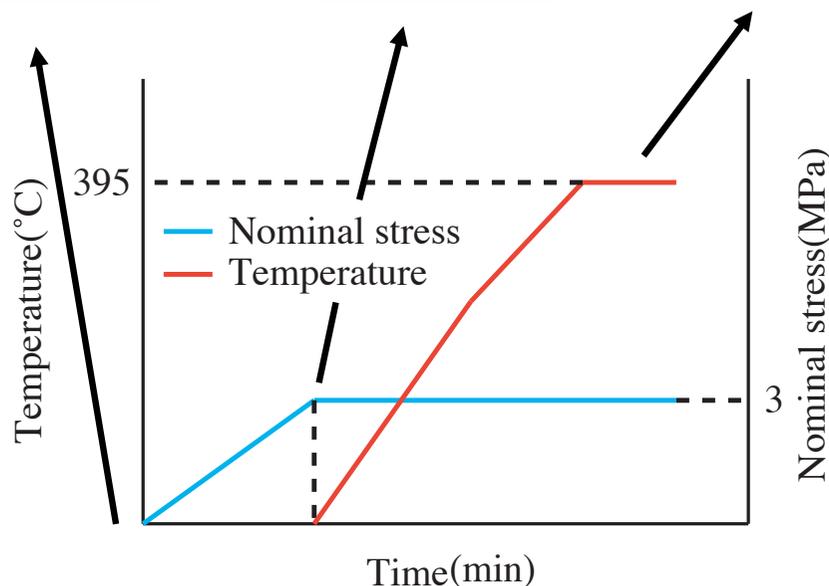
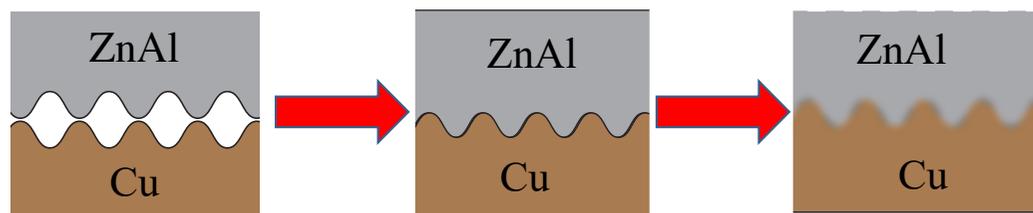
1. 試験片を目標の荷重で圧縮
2. 温度を超塑性流動が顕著に発現する温度域まで昇温し、一定時間保持する
3. さらに昇温し、高温で5分間保持することにより、原子を拡散させて接合面を得る

拡散接合プロセス(2)



新しい手法

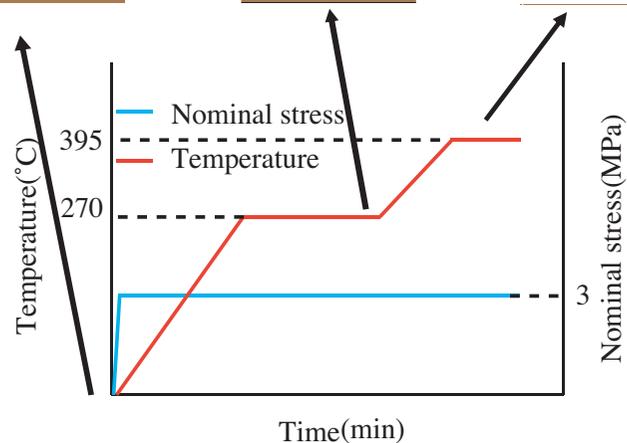
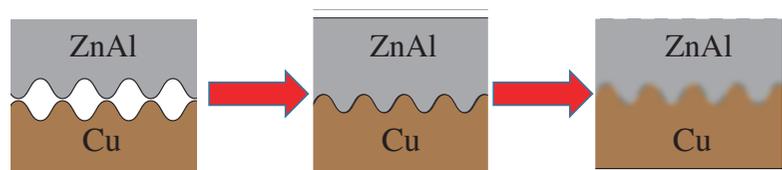
ZnAlの降伏応力を下げて接合面を高密着化させる



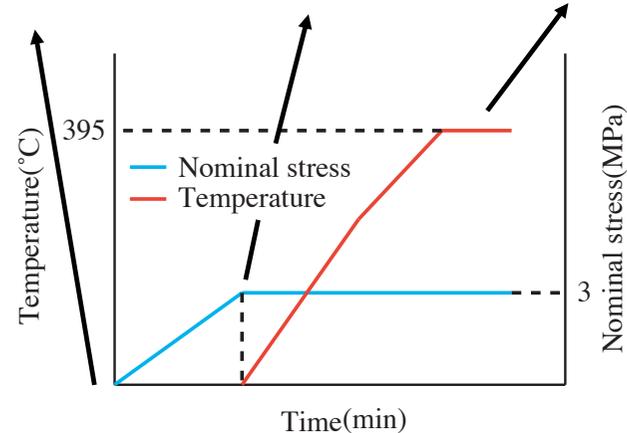
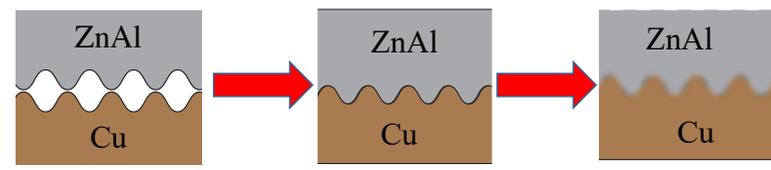
1. 目標の荷重まで**低速度**で圧縮
→常温で高密着化させる
2. 超塑性発現温度域における
保持時間を省略して
原子拡散する温度まで昇温

非常に酸化しやすいZnAlを常温で高密着化させることで、
高温状態の接合面をガスに触れさせないまま接合を完了できる

拡散接合プロセスの調査



従来の方法



新しい手法

新しい手法の有効性を確認するために、以下の3つの条件を変更しながら接合し、引張試験によって接合強度を評価する

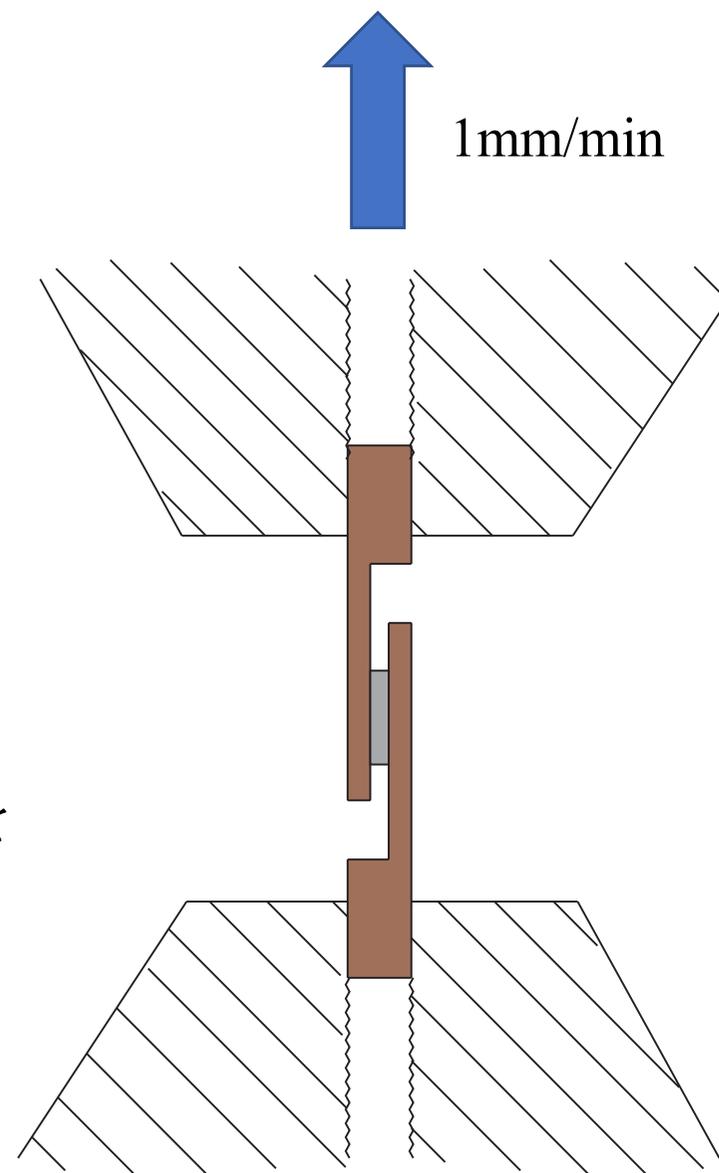
- ・ 超塑性発現温度における保持時間
- ・ 加圧速度
- ・ 結晶粒径

接合力の評価

使用した機器：
精密万能試験機
(島津製作所AG-X 100kN)

室温で引張速度1mm/minの
条件で接合強度を評価

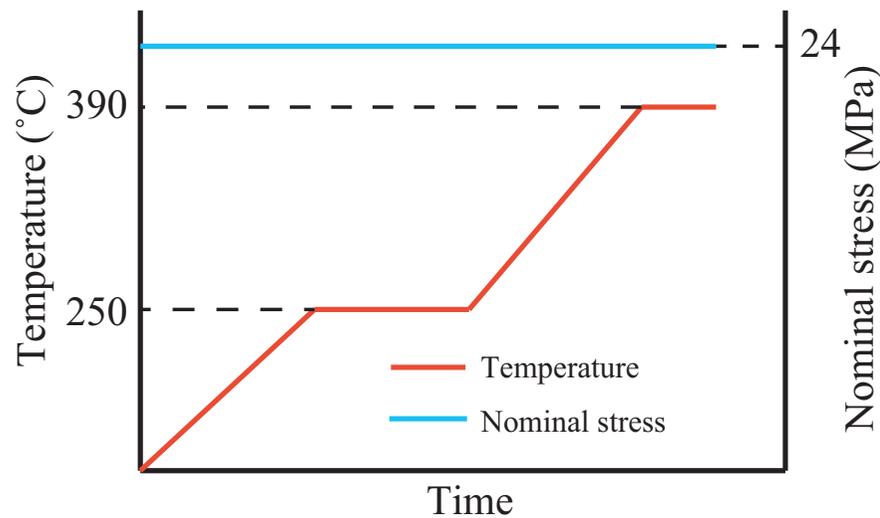
公称応力は ZnAl 板はんだの面積を
用いて、算出する。



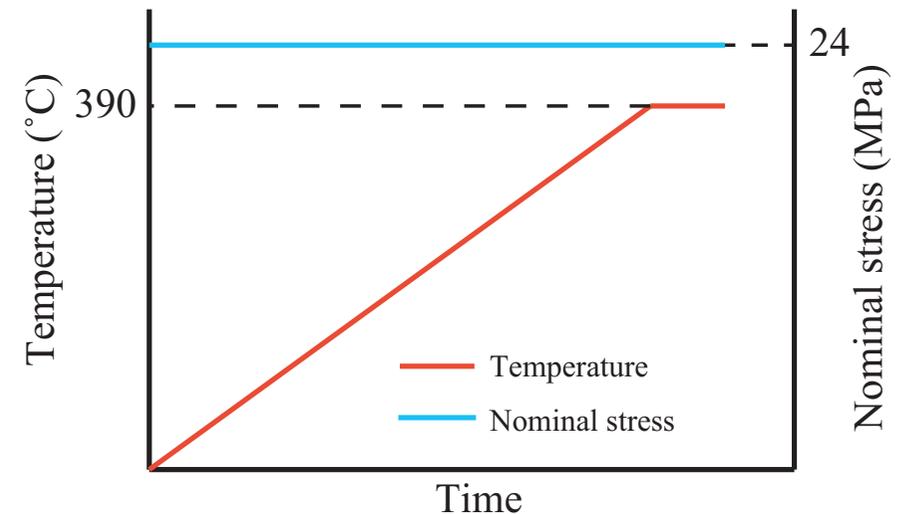
超塑性温度域での保持時間の比較(先行研究)



先行研究⁽¹⁾によって加圧力24MPaの条件において、250~270°Cでの保持時間(10分)を省略した場合、接合強度が著しく低くなることが報告されている。



保持時間あり(加圧力24MPa)
常温での負荷でせん断強度は
70MPa程度



保持時間なし(加圧力24MPa)
常温での負荷でせん断強度は
13MPa程度

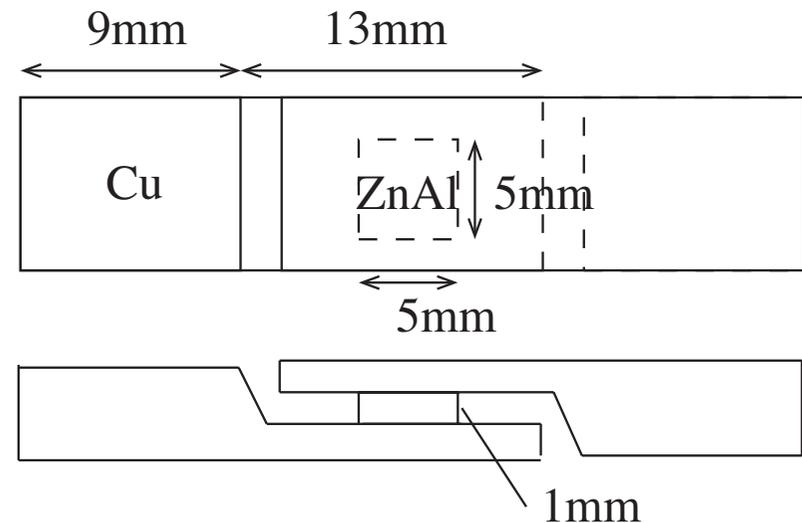
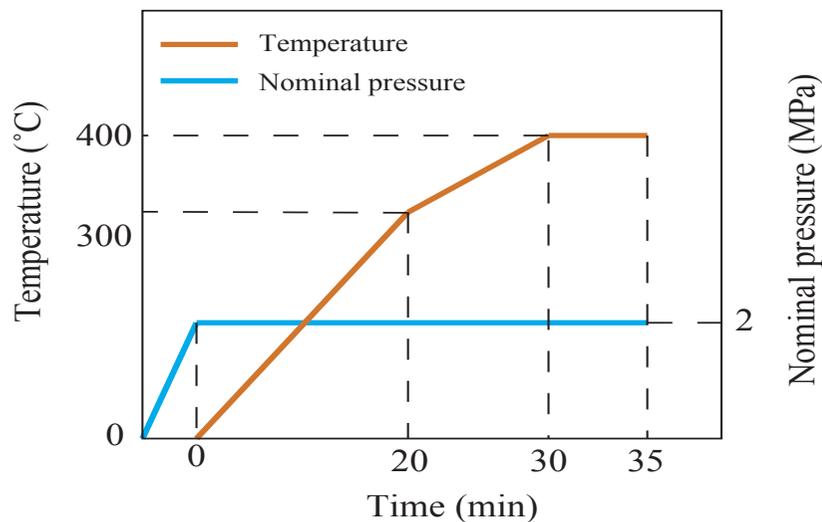
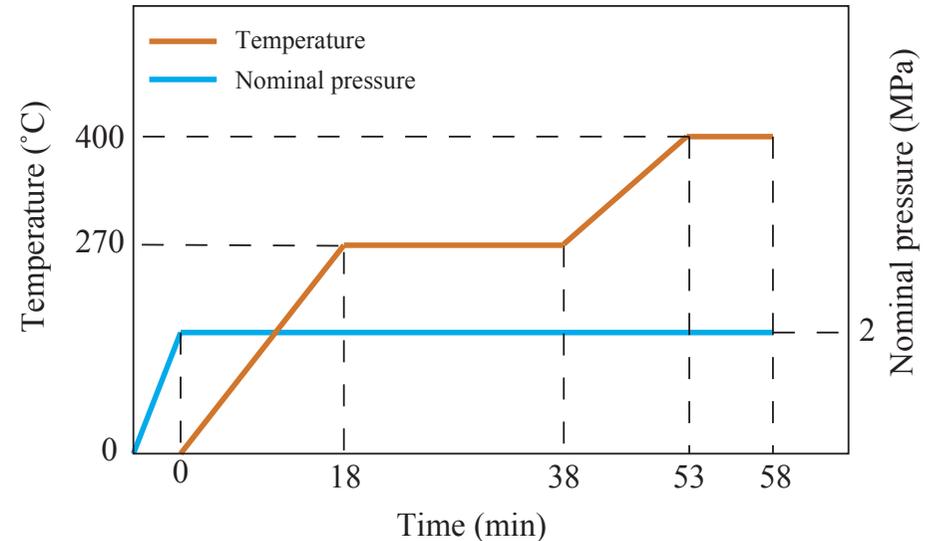
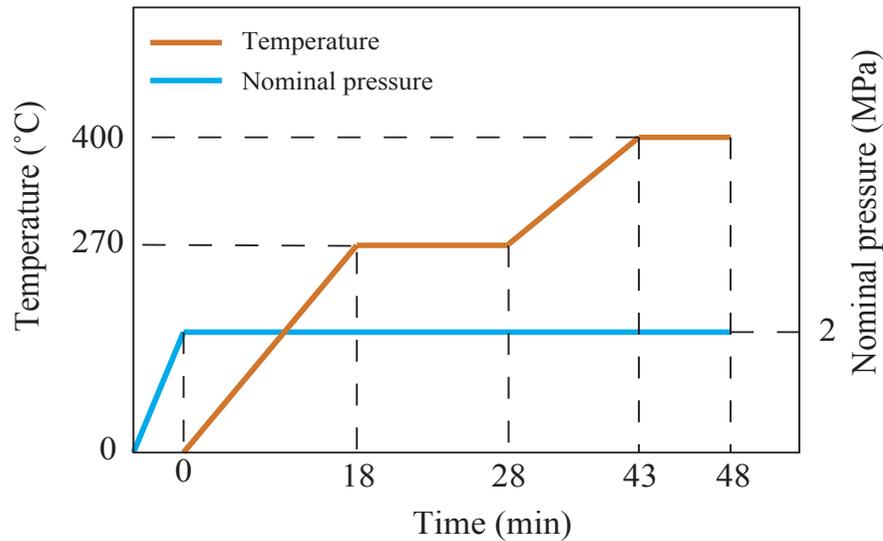
※せん断力評価時の負荷速度：4.5mm/min

(1)Jin Onuki, Akane Saitou, Akio Chiba, Kunihiro Tamahashi, Yoshinobu Motohashi, Yuji Kawamata, A New Lead-Free Solder Joint utilizing Superplastic Al-Zn Eutectoid Alloy for Next Generation Sic Power Semiconductor Devices,materials Science Forum,(2016),Vols838-839,pp.482-487.

超塑性温度域での保持時間の比較(試験条件)



本研究の手法における保持時間の必要性を検討するため
加圧力2MPa, 加圧速度0.01mm/minの条件で以下の温度履歴を用いて試験を行った。



超塑性温度域での保持時間の比較(試験結果)



Duration time at 270°C	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
0min	711	28.4
10min	452	18.1
20min	387	15.5



保持時間0分



保持時間10分



保持時間20分

先行研究と異なり、保持時間が短いほど接合強度が強くなる傾向を示した

ZnAlの降伏応力を下げることにより加熱前の時点で、
ある程度の高密着化が可能になるため、保持時間を省略できる

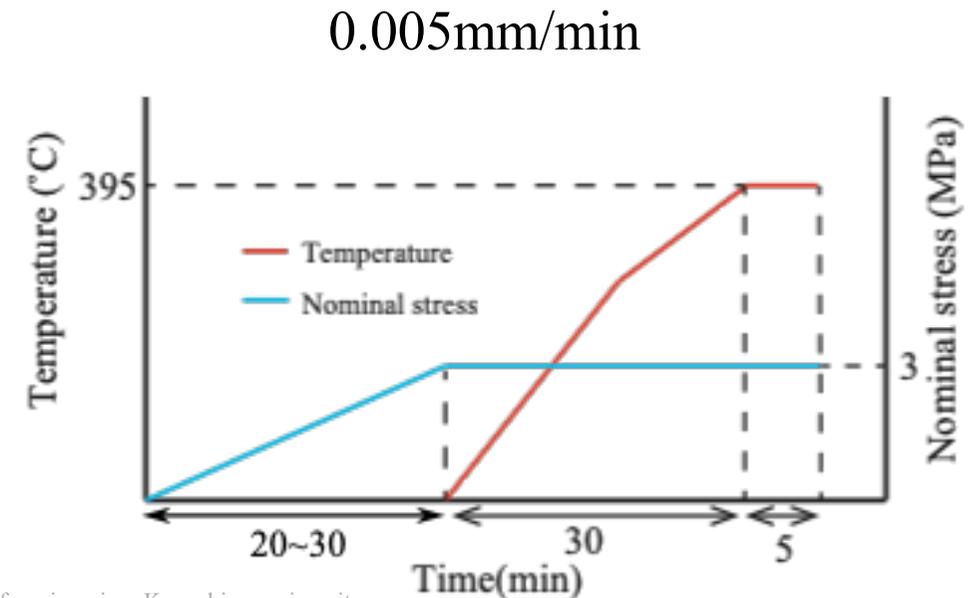
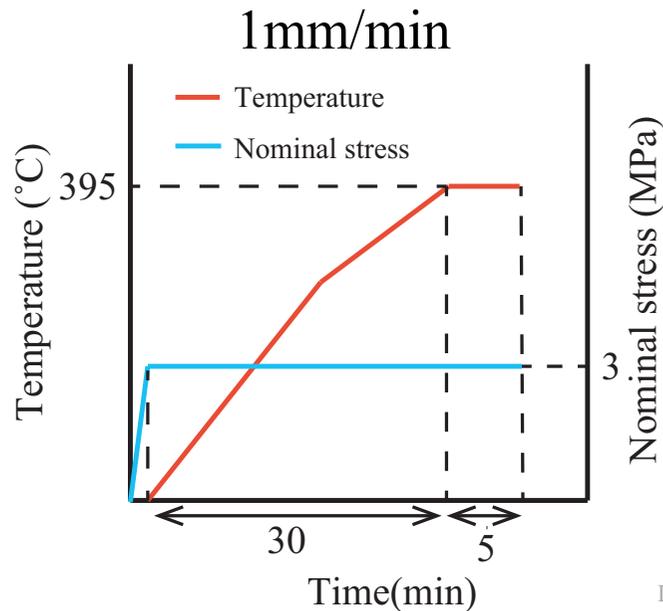
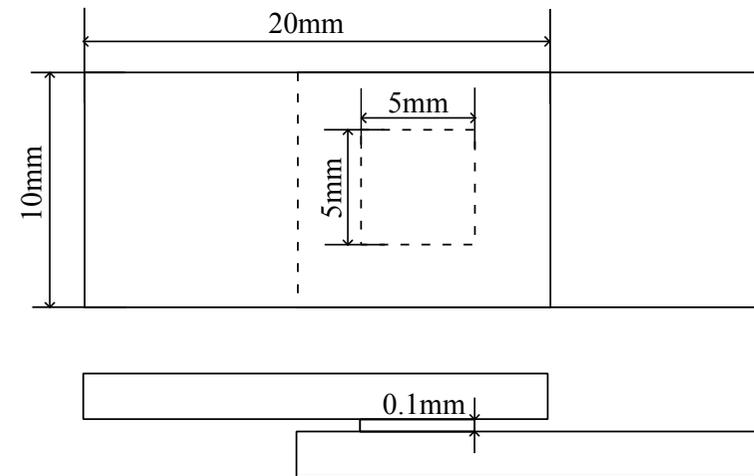
超塑性発現温度での保持は接合層の酸化を引き起こす可能性がある

常温での加圧速度の比較



常温での密着による、**降伏応力を下げる**ことの有効性を確認するため、常温での加圧速度の違いによる接合強度の比較を行った。

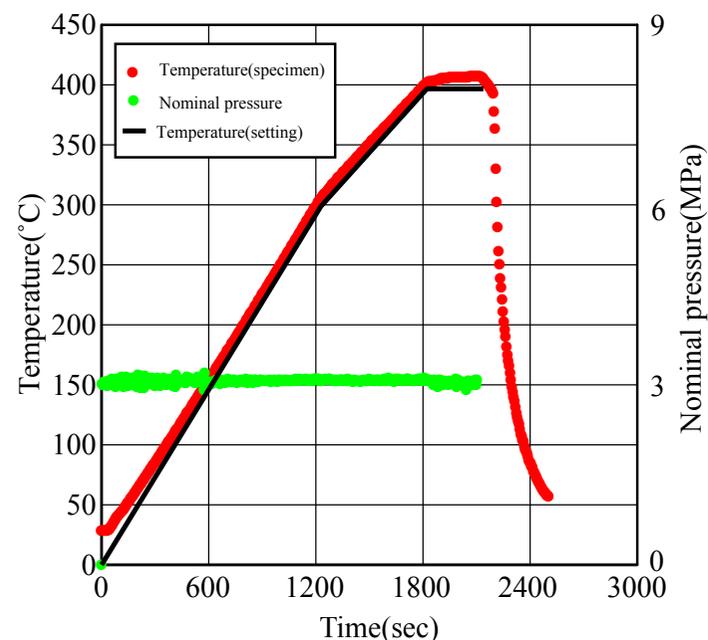
試験片形状



常温での加圧速度の比較(1mm/min)



加圧力3MPa
加圧速度1mm/min



Pressure speed	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
1mm/min	794	31.8
	495	19.8
	☆ 482	19.3

平均23.6MPa

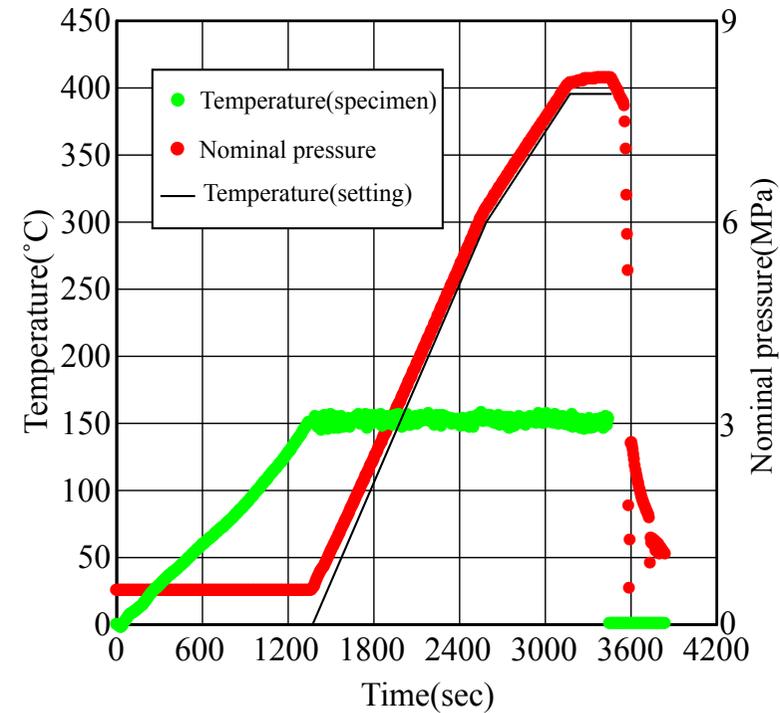
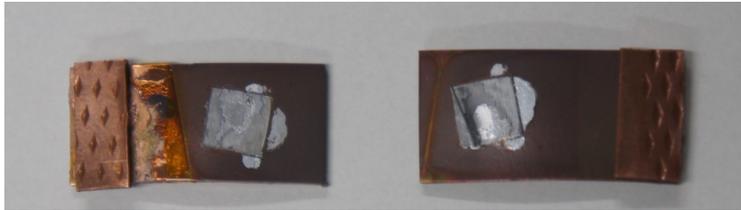
加圧速度が低い方が接合強度が高くなることが確認できた

 降伏応力が低下した

常温での加圧速度の比較(0.005mm/min)



加圧力3MPa
加圧速度0.005mm/min



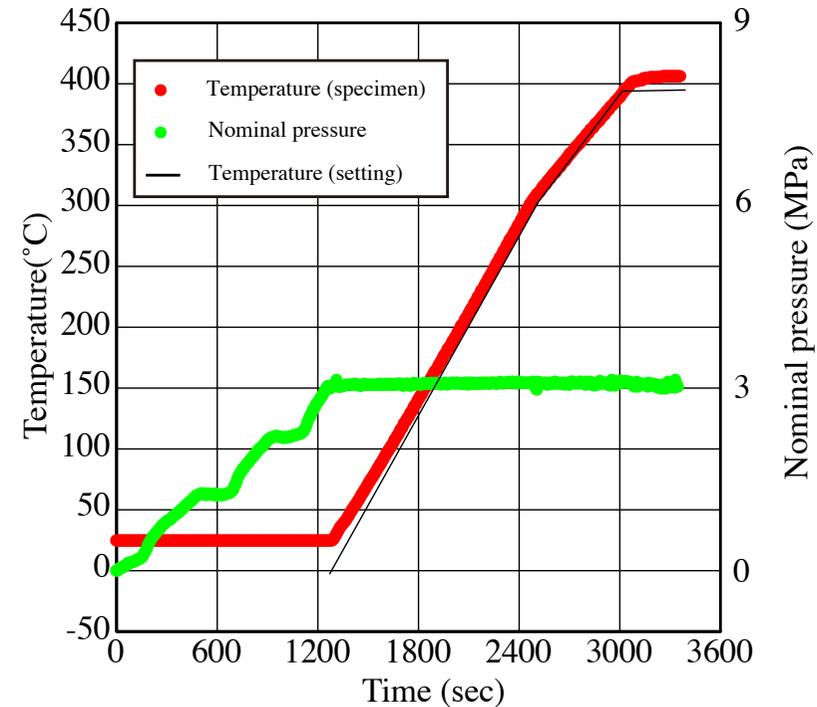
Pressure speed	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
0.005mm/min	1044	41.8
	☆ 1089	43.6
	1043	41.7

平均42.4MPa

結晶粒径の比較(炉内での冷却)



加圧力3MPa
加圧速度5N/min
(0.0083~0.01mm/min程度)
炉内で冷却したZnAl (結
晶粒径72.2 μ m)



Condition	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
Cooling in a furnace	678	27.1

接合強度：水冷：36.9MPa > 炉冷：27.1MPa

結晶粒径が小さい方が接合強度が高くなる結果となった。

結晶粒径の比較(水冷)



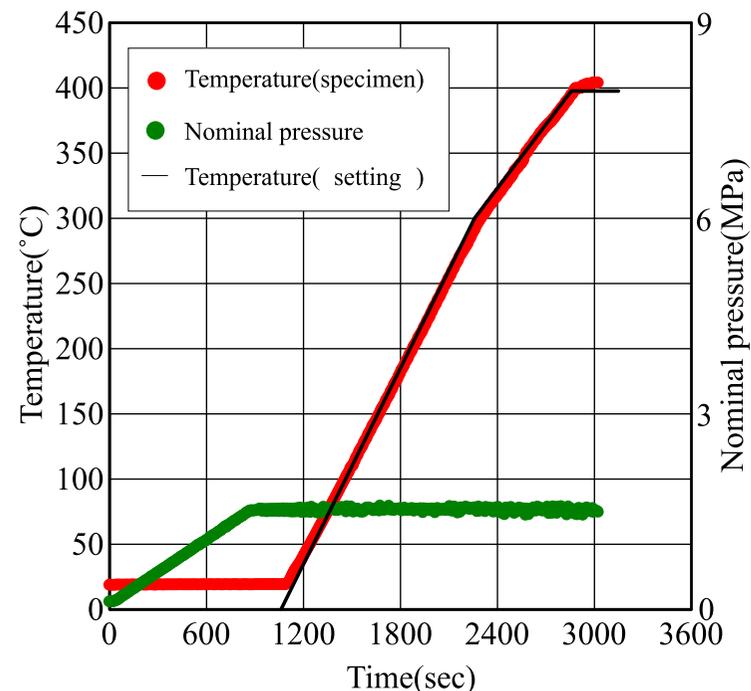
375°Cで3時間保持したのちに**水冷**した板はんだと**炉内での冷却**をした板はんだの接合強度を比較した

加圧力3MPa

加圧速度5N/min

(0.0083~0.01mm/min程度)

水冷したZnAl (結晶粒径0.37 μ m)



Condition	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
Cooling in water	☆ 992	39.7
	800	32.0

平均36.9MPa

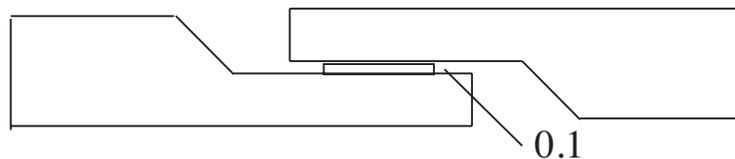
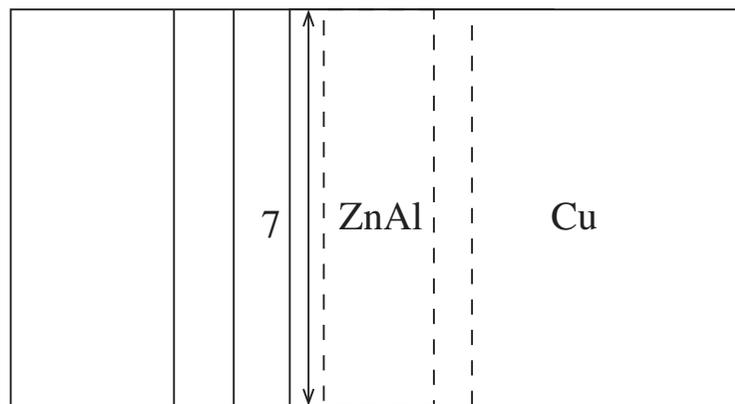
微小疲労試験片作製方法



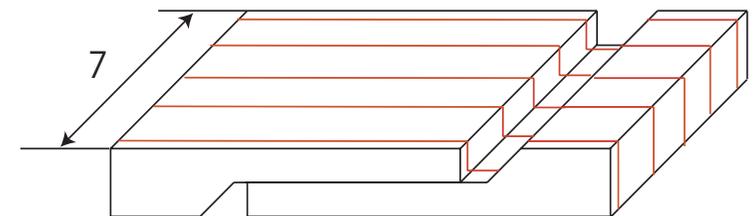
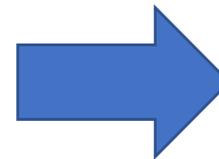
冷却方法 水冷

加圧力 3MPa

加圧速度 0.005mm/min



接合試験片構造



低速切断機で切断



両端を研磨する

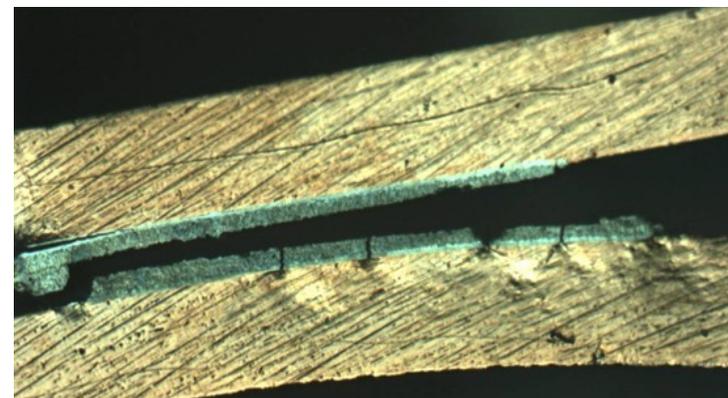
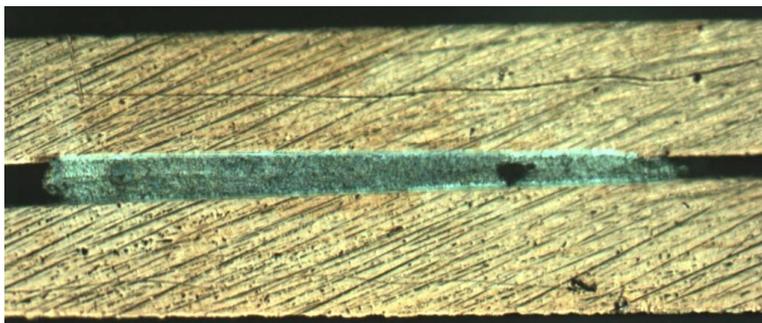


微小疲労試験片作製過程

静的引張試験



機械的疲労試験で与える負荷の大きさを決定するため、
微小疲労試験片に対して $10\mu\text{m}/\text{sec}$ の負荷速度で静的引張試験を行った



破断前

破断後

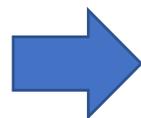
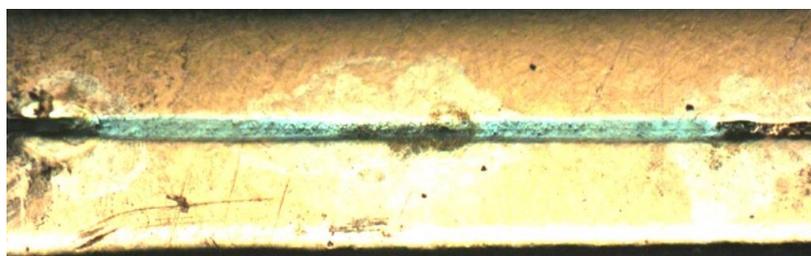
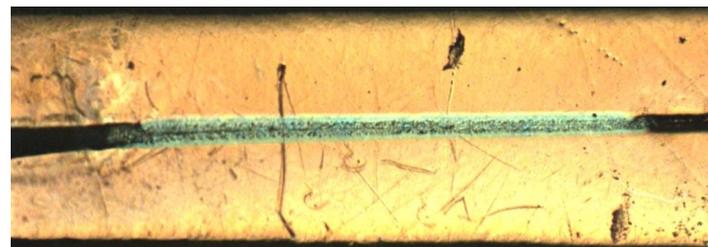
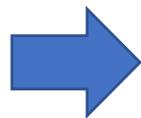
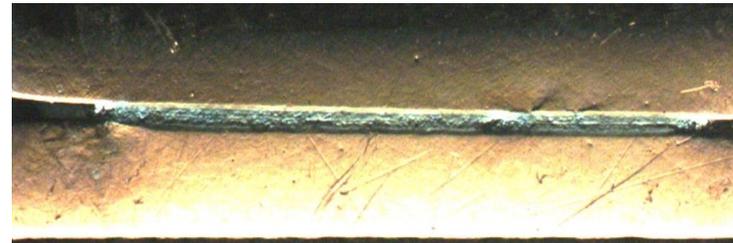
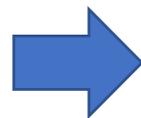
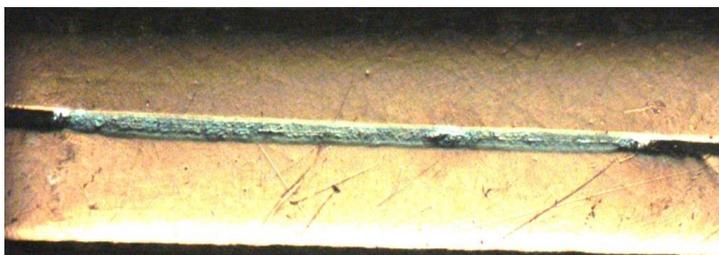
	Tensile strength (N)	Maximum nominal stress (MPa)
# 1	22.2	20.6
# 2	25.4	26.3
# 3	23.6	21.8
# 4	34.9	27.4
# 5	27.0	20.6

平均公称応力は23.3MPa

機械的疲労試験



微小疲労試験片に対して
引張強度の7割から3割→16.3MPaから7.0MPa
の応力範囲で繰り返し荷重を与えた

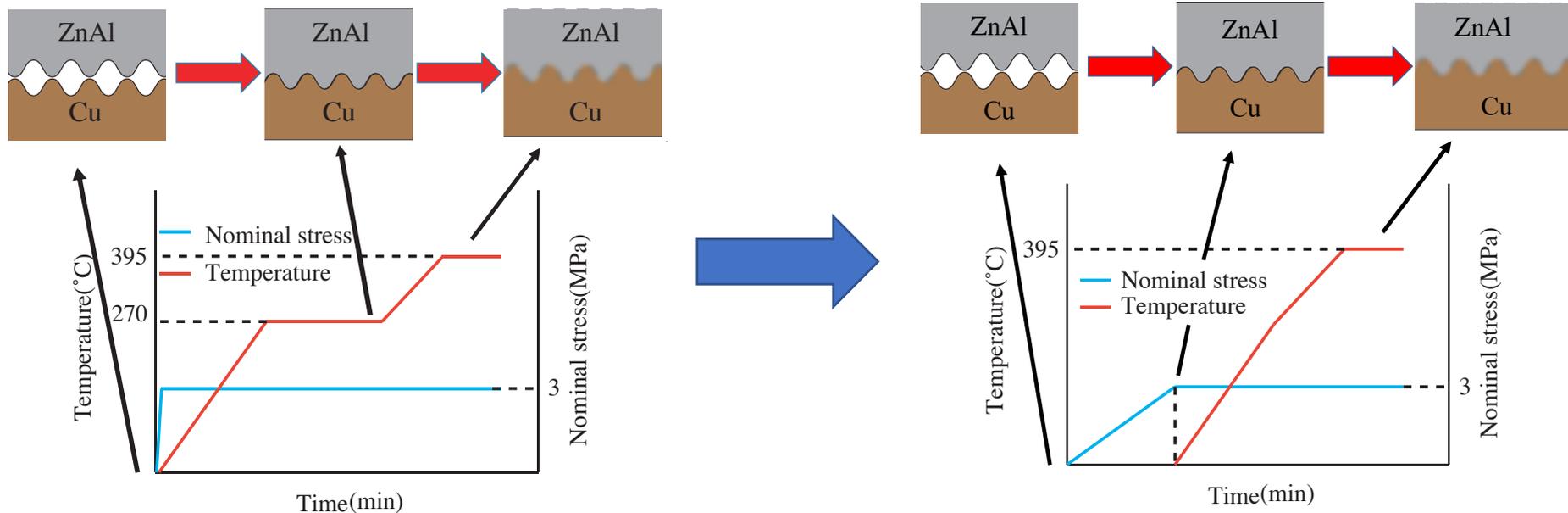


0サイクル

負荷速度:10 μ m/sec

10000サイクル

10000サイクルまでに、き裂の発生は確認できなかった



- ・ ZnAlとCuの拡散接合において，接合プロセスを改善することで低加圧（2,3MPa）における接合強度の改善を行った。
 - ・ 超塑性温度域の保持時間を省略することで接合強度が向上した
 - ・ 常温での圧縮速度を遅くすることで接合強度が向上した
 - ・ 結晶粒径を小さくすることで接合強度が向上した
- ・ 本研究における手法で接合したZnAlとCuの微小試験片は引張強度の3割から7割の片振り疲労試験において10000サイクルまでき裂の発生が見られなかった。