

半熔融加工に関する基礎的研究

杉山 澄雄



半溶融加工に関する基礎的研究

杉 山 澄 雄

半熔融加工に関する基礎的研究

目次

第1章 序論	1
1. 1 緒言	1
1. 2 言葉の定義	2
1. 3 研究の概要	3
(1) 研究の流れ	
(2) 研究の目的	
(3) 研究の範囲	
(4) 研究の意義	
1. 4 関連分野の研究・技術開発・応用動向	7
1. 4. 1 半熔融・半凝固金属の基本的特性に関する動向	7
(1) 粘度・せん断抵抗	
(2) 固相率の測定	
1. 4. 2 半熔融・半凝固処理金属材料の製造技術に関する動向	9
(1) 半熔融処理法	
(2) 半凝固処理法	
1. 4. 3 溶融凝固現象を伴う製造法に関する動向	11
(1) 溶湯鍛造法	
(2) ダイキャスト法	
(3) レオキャスト法	
(4) チクソモールディング法	
(5) スプレーフォーミング法	
(6) 溶融焼結法	
1. 4. 4 理論解析・数値シミュレーションに関する動向	14
(1) ミクロ的モデルによる理論解析	
(2) マクロ的モデルによる理論解析	
1. 5 本論文の構成	16
参考文献	17
第2章 半熔融金属の特性調査	45
2. 1 緒言	45
2. 2 半熔融状態の直接観察	46
2. 2. 1 観察方法	46
2. 2. 2 観察結果および考察	46
2. 3 半熔融金属の変形特性	48
2. 3. 1 変形抵抗の測定方法および測定条件	48
(1) 測定方法	
(2) 測定条件	
(3) 応力・ひずみの算出方法	
2. 3. 2 測定結果および考察	49
(1) 応力とひずみの関係	
(2) 温度(固相率)と変形抵抗の関係	

(3) ひずみ速度と変形抵抗の関係	
(4) 試験片寸法(アスペクト比)と変形抵抗の関係	
(5) 試験片材質と変形抵抗の関係	
(6) 圧縮試験後の試験片の外面性状ならびに内部組織の検討	
2. 4 まとめ	55
2. 5 結言	56
参考文献	57
第3章 半溶融(半凝固)金属の固相率推定法の提案	99
3. 1 緒言	99
3. 2 変形抵抗から固相率を推定する方法	100
3. 2. 1 はじめに	100
3. 2. 2 固相率推定の根拠	100
3. 2. 3 推定方法	100
3. 2. 4 固相率推定結果	101
3. 2. 5 本推定法の制限・制約	101
3. 2. 6 まとめ	102
3. 3 電気的特性(比抵抗・電位差)から固相率を推定する方法	103
3. 3. 1 はじめに	103
3. 3. 2 固相率推定の根拠	103
3. 3. 3 電位差(比抵抗)の測定方法および測定条件	103
3. 3. 4 二元合金の無次元化電位差と固相率の関係	105
3. 3. 5 多元(実用)合金の固相率の推定	106
3. 3. 6 固相率推定結果ならびにその検証	107
3. 3. 7 まとめ	108
3. 4 結言	109
参考文献	110
第4章 半凝固処理金属材料の製造法の提案	149
4. 1 緒言	149
4. 2 実験方法および実験条件	150
4. 2. 1 実験装置	150
4. 2. 2 ロールおよび固定冷却シュウの材質・寸法・形状	150
4. 2. 3 ロールと固定冷却シュウとの間隙設定	150
4. 2. 4 ロールならびに固定冷却シュウの予熱方法	150
4. 2. 5 注湯方法	151
4. 2. 6 被処理材の材質・凝固開始点	151
4. 2. 7 実験手順	152
4. 2. 8 実験条件	153
4. 3 実験結果および考察	154
4. 3. 1 SCR材の外面性状の調査	154
(1) Pb-19.2%Sn合金	
(2) A2017	
(3) A5056	

(4) ADC12	
(5) 鉄系合金	
(6) 過共晶Al-Si合金	
(7) 製造過程中的外面性状の推移	
4. 3. 2 SCR材の内部組織の調査	156
(1) Pb-19.2%Sn合金	
(2) A2017	
(3) A5056	
(4) ADC12	
(5) 鉄系合金	
(6) 過共晶Al-Si合金	
(7) 製造過程中的内部組織の推移	
4. 3. 3 SCR材の外面性状と内部組織の関係	161
4. 4 SCR材の特性調査	162
4. 4. 1 内部組織の熱変化特性	162
(1) アルミニウム合金	
(2) 鉄系合金	
4. 4. 2 硬さ特性	163
4. 4. 3 圧縮強度特性	163
(1) 試験片および試験条件	
a) 試験片	
b) 試験条件	
c) 圧縮前の試験片の内部組織	
(2) 圧縮試験結果および考察	
a) 応力とひずみの関係	
b) 圧縮後の試験片側面のあらさ	
4. 4. 4 押出し加工特性	166
(1) 押出し加工前のSCR材の内部組織	
(2) 試験結果および考察	
4. 5 まとめ	169
(1) SCR材の外面性状に関して	
(2) SCR材の内部組織に関して	
(3) SCR材の二次加工特性に関して	
4. 6 結言	171
参考文献	172
第5章 半溶融押出しの基本特性の検討	255
5. 1 緒言	255
5. 2 棒線管材の加工	256
5. 2. 1 はじめに	256
5. 2. 2 実験方法および実験条件	256
5. 2. 3 実験結果および考察	257
(1) ダイス出側温度と残留液相成分の関係	
(2) 押出し荷重とストロークの関係	

(3) 押し加圧力と固相率の関係	
(4) 製品の表面性状	
(5) 製品の機械的特性	
a) 引張り荷重と変位の関係	
b) 引張り強さ・硬さ・伸び	
(6) 製品の内部組織および成分分析結果	
5. 2. 4 まとめ	-262
5. 3 積層型複合棒材の加工	-264
5. 3. 1 はじめに	-264
5. 3. 2 実験方法および実験条件	-264
5. 3. 3 実験結果および考察	-265
(1) 押し加圧力の検討	
(2) 押し出しの安定性	
(3) 製品の機械的特性	
a) 硬さ分布	
b) 引張り強さ・伸び特性	
(4) 製品の内部組織	
(5) 引抜き加工による強度特性の変化	
5. 3. 4 まとめ	-268
5. 4 粒子強化型複合棒材の製造と加工	-270
5. 4. 1 はじめに	-270
5. 4. 2 製造・加工法の概要	-270
5. 4. 3 実験方法および実験条件	-271
5. 4. 4 実験結果および考察	-272
(1) 押し加圧力の検討	
(2) 製品の機械的特性	
(3) 製品の内部組織	
5. 4. 5 まとめ	-276
5. 5 チタン短繊維強化型複合棒材の製造と加工	-277
5. 5. 1 はじめに	-277
5. 5. 2 実験方法および実験条件	-277
5. 5. 3 実験結果および考察	-278
(1) 押し加圧力の検討	
(2) 製品の内部組織	
(3) 製品の機械的特性	
(4) 繰り返し半溶融押し出しと特性変化	
(5) 熱処理による特性変化	
5. 5. 4 まとめ	-281
5. 6 炭化珪素短繊維強化型複合棒材の製造と加工	-283
5. 6. 1 はじめに	-283
5. 6. 2 製造・加工法の概要	-283
5. 6. 3 実験方法および実験条件	-283
5. 6. 4 実験結果および考察	-284
(1) FRMグリーンの製造	
(2) FRM素材中の繊維の損傷・分散・配向	

(3) FRM製品中の繊維の損傷・分散・配向	
(4) FRM製品の機械的特性	
5. 6. 5 まとめ	-288
5. 7 結言	-290
参考文献	-292
第6章 半溶融鍛造の基本特性の検討	-389
6. 1 緒言	-389
6. 2 鋳鉄の加工	-390
6. 2. 1 はじめに	-390
6. 2. 2 実験方法および実験条件	-390
6. 2. 3 実験結果および考察	-391
(1) 製品の外面性状	
(2) 製品の内部組織	
(3) 製品の硬さ特性	
(4) 成分分析結果	
(5) 応用例	
6. 2. 4 まとめ	-394
6. 3 粒子強化複合材料の製造と加工	-396
6. 3. 1 はじめに	-396
6. 3. 2 製造・加工法の概要	-396
6. 3. 3 実験方法および実験条件	-396
6. 3. 4 実験結果および考察	-397
(1) 鍛造圧力と内部組織の関係	
(2) 強化粒子の含有率・鍛造温度と製品の外面性状・内部組織との関係	
(3) 金型の予熱温度と外面性状・内部組織の関係	
(4) 製品の機械的特性	
(5) 実部品への応用例	
6. 3. 5 まとめ	-400
6. 4 積層型粒子強化複合材料の製造と加工	-402
6. 4. 1 はじめに	-402
6. 4. 2 製造・加工法の概要	-402
6. 4. 3 実験方法および実験条件	-403
6. 4. 4 実験結果および考察	-404
(1) 粒子強化複合材料を素板へ積層する場合	
a) 鍛造温度の影響	
b) 鍛造圧力の影響	
c) 素板材質の影響	
d) 製品の機械的特性	
(2) 強化粒子を素板へ直接圧入する場合	
6. 4. 5 まとめ	-407
6. 5 結言	-408
参考文献	-410

第7章 半熔融圧延の基本特性の検討	481
7.1 緒言	481
7.2 アルミニウム合金ならびに鋳鉄の板材加工	482
7.2.1 はじめに	482
7.2.2 実験方法および実験条件	482
7.2.3 実験結果および考察	483
(1) 単位幅当り圧下力-圧下率線図	
(2) 製品の外面性状	
(3) 圧延条件と製品の内部組織との関係	
(4) 製品の機械的特性	
7.2.4 まとめ	487
7.3 積層型複合板材の製造	488
7.3.1 はじめに	488
7.3.2 実験方法および実験条件	488
7.3.3 実験結果および考察	489
(1) 亜鉛粉末/アルミニウム板	
(2) 亜鉛粉末/アルミニウム合金板	
(3) 亜鉛粉末/銅板	
(4) アルミニウム粉末/チタン板	
(5) 亜鉛粉末/チタン板	
(6) (亜鉛粉末+アルミニウム粉末)/チタン板	
(7) 鋳鉄粉末/ステンレス鋼板	
(8) 鋳鉄粉末/純鉄板、鋳鉄粉末/SPCC板	
(9) (鋳鉄粉末+還元鉄粉)/SPCC板	
7.3.4 まとめ	493
7.4 アルミニウム基積層型粒子強化複合板材の製造と加工	495
7.4.1 はじめに	495
7.4.2 実験方法および実験条件	495
7.4.3 実験結果および考察	496
(1) 強化粒子を素板へ直接圧入する場合	
a) 圧延圧下率の影響	
b) 圧延温度の影響	
c) 強化粒子の粒度の影響	
d) 製品の機械的特性	
(2) 混合粉末(アルミニウム合金粉末と強化粒子)を素板へ積層する場合	
a) 圧延圧下率の影響	
b) 素板と積層部の接合特性	
c) 繰り返し半熔融圧延による積層化の検討	
(3) 半熔融圧延による積層化の様子	
7.4.4 まとめ	499
7.5 鉄基積層型粒子強化複合板材の製造と加工	501
7.5.1 はじめに	501

7.5.2 実験方法および実験条件	501
7.5.3 実験結果および考察	502
(1) 製品の内部組織	
(2) 製品の機械的特性	
a) 素板と積層部の接合特性	
b) 摩耗特性	
c) 曲げ加工特性	
(3) 応用技術	
a) 繰り返し半熔融圧延による製品の高品質化	
b) 強化粒子高濃度積層型複合板材の製造	
c) 多層構造積層型粒子強化複合板材の製造	
7.5.4 まとめ	506
7.6 サンドイッチ型粒子強化複合板材の製造と加工	508
7.6.1 はじめに	508
7.6.2 実験方法および実験条件	508
7.6.3 実験結果および考察	508
(1) 製品の内部組織および製品性状の検討	
(2) 変形機構の検討	
7.6.4 まとめ	511
7.7 結言	512
参考文献	514

第8章 半熔融複合加工の基本特性の検討	619
8.1 緒言	619
8.2 アルミニウム合金粉末の板加工	620
8.2.1 はじめに	620
8.2.2 実験方法および実験条件	620
8.2.3 実験結果および考察	620
(1) 内部組織の検討	
a) 鍛造工程の影響	
b) 圧延工程の影響	
(2) 製品の機械的特性	
8.2.4 まとめ	624
8.3 粒子強化複合板材の製造と加工	625
8.3.1 はじめに	625
8.3.2 実験方法および実験条件	625
8.3.3 実験結果および考察	625
(1) 半熔融鍛造工程の有無の検討	
(2) 半熔融鍛造温度の検討	
(3) 熱間圧延の圧下率の検討	
(4) 強化粒子の粒度・含有率の検討	
(5) マトリックス材質の検討	
(6) 複合板材の硬さと曲げ性の関係	
(7) 複合板材の硬さおよび曲げ性に影響をおよぼす	

第1章 序論

1. 1 緒言

近年、機械・金属・電気・土木建築など各産業分野の発展にともない、金属材料の多用化とその製造法の多様化には目を見張るものがある。とりわけ、金属材料の凝固現象を伴う高温下での製造法は、連続鋳造法・溶湯鍛造法・ダイカスト法・アキュラッド法・レオキャスト法・チクソキャスト法・コンボキャスト法・溶融焼結法・スプレーフォーミング法など多岐に渡っている。これらの製造法は、従前的な枠組みによる鋳造法と熱間塑性加工法の境界領域に位置するものが多く、(a)液相成分の良好な流動性・造形性、(b)液相成分のもつ接合性・分離性・混合性、(c)急冷凝固にともなう結晶粒の微細化現象を巧みに利用している点にその特徴がある(図1-1、図1-2、図1-3参照)。

半溶融加工法においても、液相成分の凝固現象を制御しつつ加工を行わんとする点において鋳造法と熱間塑性加工法の境界領域に位置する製造法であるといえる。しかし、上述の製造法が溶融金属を出発点とし、(a)(b)(c)に示すように、主に液相成分の特性を利用した製造技術として見る事ができるのに対し、半溶融加工法は固体金属を出発点とし、液相成分の持つ上記特性のほか、固相成分の特性(例えば剛性・塑性変形性・均質性)の利用をも含めた製造かつ加工技術として捉えることができる。すなわち、半溶融加工法は固体金属を加熱し、主に結晶粒界に液相成分を現出させ、液相成分と固相成分が混在するがゆえに有する流動性・造形性・接合性・分離性・混合性・加工性を利用し、製造ならびに加工に対し固相成分と液相成分の二相を積極的に制御対象とした製造・加工法であるといえる(図1-4参照)。

半溶融加工法は固液二相を制御対象にする複雑さ故に可能性と問題点が混在し、未だ実用的な技術となり得ていない。半溶融加工法の基本的特性を明確にするとともにその可能性を引き出すことは、溶融凝固現象をともなう製造・加工技術体系の確立において、かつまた今後の金属材料加工技術の新しい方向を提示する上においてきわめて重要な意義を有するものと考えられる。本論文はこのような観点に基づき、「半溶融加工に関する基礎的研究」と題しまとめたものである。

加工条件のまとめ	
(8) 複合板材の曲げ成形例	
8. 3. 4 まとめ	629
8. 4 めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の製造と加工	631
8. 4. 1 はじめに	631
8. 4. 2 製造・加工法の概要	631
8. 4. 3 実験方法および実験条件	632
8. 4. 4 実験結果および考察	633
(1) 表面処理型製品の内部組織	
(2) 積層型製品の内部組織	
(3) 合わせ板型製品の内部組織	
(4) サンドイッチ型製品の内部組織と機械的特性	
8. 4. 5 まとめ	637
8. 5 部分接合型複合鋼板の製造と加工	639
8. 5. 1 はじめに	639
8. 5. 2 製造・加工法の概要	640
8. 5. 3 実験方法および実験条件	641
8. 5. 4 実験結果および考察	642
(1) 突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式	
a) 内部組織など	
b) 制振特性	
(2) 金網積層方式	
a) 内部組織など	
b) 制振特性	
8. 5. 5 まとめ	644
8. 6 結言	645
参考文献	647
第9章 結論	721
9. 1 緒言	721
9. 2 研究の成果	722
(1) 半溶融金属の基本的特性の解明	
(2) 固相率推定法の提案	
(3) 半凝固処理金属材料の製造法の提案	
(4) 半溶融押出しの基本特性の検討	
(5) 半溶融鍛造の基本特性の検討	
(6) 半溶融圧延の基本特性の検討	
(7) 半溶融複合加工の基本特性の検討	
9. 3 今後の検討課題	731
9. 4 結言	733
参考文献	734

研究業績
謝辞

1. 2 言葉の定義

本論文で使用する言葉の定義を以下に示す。

半熔融状態：固体状態にある金属（合金）材料を均一に加熱し、その内部特に結晶粒界が部分的に熔融しているものの、未熔融の結晶粒が固相成分として残存している状態。加熱の程度により、液相成分が結晶粒界の限られた一部に存在する場合（高固相率状態）もあれば、液相成分中に固相粒が浮遊しているとき場合（低固相率状態）もある（図1-5、図1-6、表1-1参照）。

半熔融加工法：金属（合金）材料の半熔融状態を加工の出発点とし、主に高い静水圧（圧縮力）の作用により、液相成分の流動特性の利用のみならず、固相成分の変形特性をも積極的に利用し、目的とする製品を製造する方法。これには、半熔融押出し法、半熔融鍛造法、半熔融圧延法などがある（図1-7、図1-8参照）。

半熔融処理材：固体状態にある金属（合金）材料を均一に加熱し、その内部に固相成分と液相成分との構成を意図的に分散させた材料、またそれを凝固させた材料。半熔融処理材の製造法としては均一加熱法、SIMA(Strain Induced Melt Activated)法などがある。

半凝固状態：熔融状態にある金属（合金）材料を冷却し、時には発生した初晶デンドライトを攪拌しつつ破碎して溶湯中に分散させ、溶湯と固相粒子とが混合した状態。冷却および攪拌の程度により、固相率および固相粒子の大きさ・形状が異なる。半熔融状態にある金属と半凝固状態にある金属とは、内部構造の基本的な相違は無いものと考えられる。

半凝固加工法：金属（合金）材料の半凝固状態を加工の出発点とし、主に液相成分の流動特性を利用し、目的とする製品を製造する方法。これには、レオキャスト法、コンボキャスト法、粘鋳法などがある（図1-9参照）。

半凝固処理材：熔融状態にある金属（合金）材料を冷却しつつ機械的方法あるいは電磁的方法などで攪拌し、溶湯と固相粒子とを意図的に分散させた材料、またそれを凝固させた材料。半凝固処理材の製造法としては、電磁攪拌法、機械攪拌法超音波法、Flow-Cast法などがある。

1. 3 研究の概要

(1) 研究の流れ

固液共存領域を対象とした研究は大きく2つの分けて考えることができる。その一つは、鋳造技術の開発を目的とした研究であり、加工対象金属を金属溶湯の延長上として捉えた半凝固域での研究である。もう一つは塑性加工技術の開発を目的とした研究であり、加工対象金属を固体金属の延長上として捉えた半熔融域での研究である。

半凝固域での研究は、鋳造技術との関係から、古くから多くの研究者により行われてきている。国内では、1965年、萩原ら¹⁾による、半凝固状態にあるAl-Cu合金を機械的に攪拌することにより、偏析の防止と結晶の微細化の事実を見い出した「鋳塊の結晶粒微細化と偏析防止のための新凝固法」の研究論文がある。また、1970年代、1980年代では、安江ら²⁾、加山ら³⁾、市川ら^{4), 5), 6), 7)}、木口ら⁸⁾、渋谷ら⁹⁾、森ら¹⁰⁾の半凝固域での粘度測定ならびに粘性挙動の研究があり、現在においても研究が続けられている^{11), 12)}。海外では、1970年初期から始まるFlemingsらによる半凝固域での一連の研究¹³⁾が有名である。Flemingsら¹³⁾は、まず同心二重円筒法により粘性挙動の研究を行い、粘度と固相率との関係を明らかにした。また、半凝固域で機械的攪拌を行うことにより、デンドライト組織が破壊された等軸晶の素材が製造されることを見い出し、レオキャストと名付け、同素材の製造ならびにその加工法の研究を行った。Flemingsらの研究は多くの研究者に引き継がれ、日本においても市川^{7, 2)}らに引き継がれ、レオキャスト法による結晶粒微細化技術を応用し、真空中で1000回転以上の高速回転凝固を行う粘鋳法の研究に発展させた。

一方、木内らは、金属の塑性加工の立場から、熱間状態よりさらに温度を上げ、結晶組織に一部液相が含まれる温度での加工を目指した研究、すなわち半熔融加工の研究を1970年代初期から開始した。当初、Pb-19.2%Sn合金やAl-5.7%Cu合金などの二元合金を用い、半熔融域での圧縮変形抵抗に関する研究を行い^{14), 15), 16)}、続いて、同合金の半熔融押出し加工に関する研究^{17), 18), 19)}を行った。半熔融域での研究は、木内らの研究以外には、1970年後半から始まる浅枝ら^{20), 21), 22)}の「アルミニウム合金の半熔融加圧成形の研究」があるにすぎず、半凝固域での多くの研究に比べ極めて少ない。

(2) 研究の目的

熱間塑性加工の延長上に位置づけられる半熔融加工法の研究は、加工法自体の系統的な研究はもちろんのこと、半熔融状態の基本的な特性についても十分解明

されているとはいえず、技術的にもまた学問的にも確立しているとはいえない。本研究は、木内らが始めた半熔融加工の研究を継続し、半熔融加工によって何ができないかをより系統的にまとめ、技術的・学問的確立の基礎を築くことを目的とする。具体的には、後述する範囲での、半熔融金属の基本特性の解明と半熔融加工法の基本特性の解明を目指す。

(3) 研究の範囲

本研究が対象とした範囲を以下に示す。この中で、半熔融金属の基本特性の解明を目指した研究は以下の(a)(b)(c)(d)であり、半熔融加工法の基本特性を目指した研究は(e)(f)(g)(h)である。

(a) 半熔融金属の直接観察

熔融金属の凝固過程を対象とした高温顕微鏡による直接観察例については、凝固組織の粗大化の研究やデンドライトの成長の研究などこれまで2、3の研究があるが、固相金属の熔融過程を直接観察した例については見当たらない。本研究では、高温顕微鏡を使用し、固体金属を加熱し半熔融状態にまで昇温させた際の内部組織変化などについて観察する。

(b) 半熔融金属の圧縮変形特性の検討

高固相率状態下における半熔融金属の変形抵抗・変形挙動に関しては、これまで一部の金属材料について、限られた試験条件のもとで調査されたものであり、十分解明されたとはいえない。本研究では、研究室で溶製し作製した5種類の二元合金と38種類の市販の実用合金（アルミニウム合金36種類と銅合金2種類）を用い、半熔融状態下でのカムプラスチック（定ひずみ速度圧縮試験機）を用いた一軸圧縮試験を行い、半熔融金属の変形抵抗におよぼす温度（固相率）・ひずみ速度・試験片寸法比・試験片材質などの影響について検討する。

(c) 半熔融・半凝固状態にある金属の固相率推定法の検討

固相率の測定技術の確立は、半熔融加工における最適加工条件や製品特性などに大きな影響をおよぼし、半熔融・半凝固加工技術の開発にとって欠くことのできない課題である。しかし、この方面の研究はようやく始まったばかりである。本研究は固相率測定の可能性を探る目的で、(a)半熔融・半凝固状態での金属材料の（圧縮）変形抵抗を求め、その値をもとに推定する方法、ならびに、(b)半熔融状態あるいは半凝固状態にある金属材料の二点間の電位差（または電気抵抗）を計測し、その値をもとに推定する方法について検討する。

(d) 半熔融加工に供する半凝固処理金属素材の製造法の検討

金属溶湯から、一旦鑄造材を造ることなく、連続的に製品を製造するプロセスが近年盛んに研究されている。こうした連続製造プロセスにおいては、製造・加

工程に到達する前工程での当該金属材料の性状（微細化・均質化・等軸晶化・強化粒子などの均一分散化）が最終の製品性状に重要な影響をおよぼすことが一般によく知られている。これまで、溶湯を冷却しつつ攪拌し、生成する樹枝状晶組織を破碎し、固相結晶粒と液相成分とが均一・微細かつ等方的に分散したいわゆる半凝固処理金属材料（以後処理材とする）を製造する方法としては、(a)Flemingsらによって提案されたレオキャスト法（機械攪拌法）、(b)Winterらによって提案された電磁攪拌法があり、それぞれ実験室的あるいは半量産的規模での実用化を目指した研究が広く行われている。しかし、レオキャスト法の場合においては、高固相率の処理材の製造が困難であり、高融点金属については工具材料として適切なものが見あたらないこと、電磁攪拌法の場合においては、同様に高固相率の処理材の製造が困難であり、また製造装置が大型化することなどが指摘され、いまだ検討の余地が残されている。

本研究では、上述の半凝固処理材製造の問題点を解決すべく、新たにせん断冷却ロール法（SCR法）を提案し、実用合金を対象とした半凝固処理金属材料（SCR材）の製造を試み、その外面性状・内部組織・機械的特性などの調査を行うとともにSCR法の特徴について検討する。

(e) 半熔融押し出しの基本特性の検討

通常の押し出しでは製造や加工が困難であるかまたはできない、①小荷重・高加工率を目指した棒管材の加工、②難加工材の加工、③同心円状に積層した複合棒線材の製造と加工、④粒子強化型複合棒材の製造と加工、⑤チタン短繊維強化型複合棒材の製造と加工、⑥炭化珪素短繊維強化型複合棒材の製造と加工、の問題に半熔融押し出し法を中心に据えた半熔融製造加工法の適用を試み、その基本特性について検討する。

(f) 半熔融鍛造の基本特性の検討

通常の鍛造では製造や加工が困難であるかまたはできない、①鑄鉄の加工、②金属基複合材料の製造と加工、③積層型粒子強化複合材料の製造と加工、の問題に半熔融鍛造法を中心に据えた半熔融製造加工法の適用を試み、その基本特性について検討する。

(g) 半熔融圧延の基本特性の検討

通常の圧延では製造や加工が困難であるかまたはできない、①アルミニウム合金ならびに鑄鉄の板材加工、②積層型複合板材の製造、③アルミニウム基積層型粒子強化複合板材の製造と加工、④鉄基積層型粒子強化複合板材の製造と加工、⑤サンドイッチ型粒子強化複合板材の製造と加工、の問題に半熔融圧延を中心に据えた半熔融製造加工法の適用を試み、その基本特性について検討する。

(h) 半熔融複合加工の基本特性の検討

冷間・熱間加工またはこれまで述べてきた単独の半溶融加工では達成できない、①アルミニウム合金粉末の板材への製造と加工、②粒子強化複合板材の製造と加工、③めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の製造と加工、④部分接合型複合鋼板の製造と加工、の問題に半溶融加工法と既存の冷間・熱間加工法とを組み合わせ半溶融複合加工を新たに提案し、その基本特性について検討する。

(4) 研究の意義^{34) 35)}

半溶融加工法により製造可能な製品としては、形状・構造面から分類して、一般金属の棒線管板材、難加工金属の棒線管板材、金属積層型複合材料、粒子強化複合材料、繊維強化複合材料、機能面から分類して、制振材料、遮蔽材料、耐熱材料、耐摩耗材料、表面硬化材料、傾斜機能材料、金属間化合物型機能材料、超電導材料、超塑性材料、形状記憶合金、水素貯蔵材料、部品面から分類して、ブレーキ材、電気接点材料、摩擦部材、ベアリング材、自動車エンジン材、航空機外板、航空機翼材、ガスタービン翼材などが考えられる(図1-10参照)。半溶融加工法による上記製品は、温度計測技術、加熱制御技術、型・装置設計技術、被加工材移送挿入技術、製品取り出し技術、製造・加工技術、金属材料学的基础、冶金学的基础、が集合しはじめて実現される。半溶融加工法により製造される上記製品ならびに半溶融加工法に深くかわる上記技術の向上は、単に金属工業分野にとどまらず、産業機械工業分野、電気電子工業分野、輸送機械工業分野、宇宙航空工業分野、土木建築工業分野の発展に対して大きな意義を持つ。

また、半溶融加工法は、適当な温度場・圧力場・速度場のもとでの、金属の固相成分と液相成分の溶融・凝固・析出・拡散・反応現象を伴った、接合・変形・流動による製品の加工方法であるといえる。したがって、このような観点から半溶融加工法を捉えるならば、上述の物理現象は金属加工学、金属組織学、金属材料学、粉末冶金学、複合材料学、無機化学、流体力学、金属拡散・反応学、分子量子力学、計測制御工学などと学問的に深く関係している。

1.4 関連分野の研究・技術開発・応用動向

半溶融加工法に関連する分野の最近の研究・技術開発・応用動向について、以下の4項目に分け概説する。

- (a)半溶融・半凝固金属の基本的特性に関する動向、
- (b)半溶融・半凝固処理金属材料の製造技術に関する動向、
- (c)溶融凝固現象を伴う製造法に関する動向、
- (d)理論解析・数値シミュレーションに関する動向

1.4.1 半溶融・半凝固金属の基本的特性に関する動向

近年、鑄造技術の面からあるいはダイキャスト法や溶湯鍛造法など半凝固製造技術の面から、溶融または半溶融・半凝固金属の基本的特性の研究が盛んに進められている。その基本的特性の一つに粘度またはせん断抵抗値がある。粘度は溶融状態から半溶融・半凝固金属が粘性挙動を示す低固相率(固相率が約50%以下)状態の範囲に限られるが、これまで多くの研究者によりその測定法が提案され研究されてきた。また、半溶融・半凝固金属の状態の程度を表現するために固相率(材料全体の固相成分の占める割合)または液相率でもって数値的に表わす場合がある。本項では、最近の半溶融・半凝固金属の基本特性として、粘度(せん断抵抗)に関する研究と固相率の測定・推定に関する研究をとりあげ概説する。

(1) 粘度・せん断抵抗

半凝固金属の粘度あるいは粘性挙動に関する本格的な研究は、D.B.Spencer, R. Mehrabian, M.C.Flemingsらによって1970年代初期から始まった^{27) 12)}。Sn-15%Pb合金を測定材料とし、容器・円錐台形状の回転子(ボブ)・トルク検出器からなる測定装置により、固相率・せん断速度・固相粒の大きさなどが見かけ粘度におよぼす影響について明らかにした。その後同様な測定手法により、Sn-Zn合金⁷⁾・Al-Cu合金^{7) 13) 14)}・Fe-C合金¹⁵⁾・Fe-Cr-Ni-C合金¹⁶⁾・Al-Mn合金²⁰⁾・Al-Si合金²¹⁾・鋳鉄¹⁷⁾など、高融点材料ならびに実用合金材料にまで粘度測定の実験範囲が広がられた。また、ねじり振動法による粘度測定²²⁾、あるいは、回転子の形状や容器と回転子の間隙がみかけ粘度におよぼす影響¹⁷⁾などの研究も進められた。最近の半凝固金属の粘度に関する研究を以下に記す。

(a)平居らは^{23) 24) 25) 26)}、固相率が0~0.4の範囲(みかけ粘度が指数関数増大する前)の見かけ粘度は、液相の見かけ粘度・合金の液相線温度における密度・凝固速度・せん断速度・合金中の主溶質濃度の関数として表わされるとし、定式

化を行った(図1-11参照)。

(c)W. C. Flemingsらは⁴⁶⁾、Al-Si合金などの共晶合金が凝固時に晶出する場合の粘性挙動について、また粒子強化複合材料など強化粒子が半凝固スラリーの中に含有されている場合の粘性挙動について研究を行い、その結果、強化粒子の含有率の増加とともにみかけ粘度が減少するといった興味ある事実を明らかにした(図1-12参照)。

(c)W. R. Loue⁴⁷⁾らは、後方押し出し法および圧縮試験法による粘度測定法を提案し、Al-6%Si-0.3%Mg合金・Al-7%Si-0.3%Mg合金を用い、みかけ粘度 η は、せん断ひずみ速度が $10^{-3}\text{s}^{-1} < \dot{\gamma} < 10^3\text{s}^{-1}$ の広い範囲にわたって、 $\eta = k\dot{\gamma}^{-1}$ により統一的に表されることを示した(図1-13参照)。

(d)S. B. Brown^{48) 49) 54) 55)}らは、これまで得られている半凝固金属の定常状態(Constant Structure Response)でのせん断力-せん断ひずみ速度の関係に対して、内部構造(組織)が定常変化(Steady State Response)する場合のせん断力-せん断ひずみ速度の関係を明らかにした(図1-14参照)。

(d)T. G. Nguyen⁴⁹⁾らは被測定材の体積ひずみの影響などを考慮した側圧付加圧縮(Drainned Compression with Lateral Pressure)法を提案し、軸圧縮応力-圧縮ひずみの実験結果から、半溶融・半凝固状態における加工の熱力学モデルを提案し、その定式化を試みた(図1-15参照)。

以上、最近の半凝固金属の粘度あるいは粘性挙動等に関しては、多くの研究者によって、(a)圧縮法・押し出し法など様々な測定方法により、(b)せん断ひずみ速度の広い範囲にわたり、(c)体積ひずみや密度差などより細かな要因の影響をも考慮した、また、(d)粒子強化複合材料や過共晶合金のような特殊な材料に対して研究が進められている。

(2) 固相率の測定

固相率に関しては、従来から、(a)状態図を用い槓杆関係から推定する方法、(b)急冷凝固組織から推定する方法などがあるが、いずれも制限・制約があり最も良方法であるとはいえない。以下に最近の研究動向について記す。

(a)半凝固金属の粘度は固相率に依存することが図1-11からも明らかである。

したがって、粘度と固相率との検定曲線をあらかじめ作成しておくことにより、粘度の測定値から固相率を推定することができる。ただし、半溶融金属が粘性挙動を示すのは固相率が約50%以下の範囲であるので、固相率の推定もその範囲となること、また粘度は時間の推移とともに変化し、同一の固相率においても結晶粒径の分布や結晶粒形状に影響されることなど、依然多くの検討課題がある。

(b)吉田⁵⁶⁾らは凝固時の潜熱の放出割合から固相率を推定する方法について検討した。Al-Si合金およびAl-Cu合金を用い、示差熱分析および断熱型熱容量測定装置による比熱測定を行い、それぞれの凝固潜熱の放出割合をピーク面積比から求め、半凝固金属の温度と固相率の関係を換算した。晶出時の晶出物の潜熱の影響ならびに高固相率(70%以上)での潜熱ピークなどの読み取り誤差の影響により固相率の推定精度が悪くなるが、これらの点を除けば温度と固相率(潜熱放出割合)の関係は良い一致を示し、熱分析法による固相率推定の可能性について示した。

(c)固相と液相の密度差のために発生する超音波速度の相違を利用し、凝固シェル厚みをオンライン測定する試みがすでに鋼の連続鋳造において実施されている^{28) 29)}(図1-16参照)。この測定システムを応用し、固相率の推定を行うことが提案されている。ただし、固相と液相がそれぞれ分散状態にある系に対しても凝固シェルの場合と同様な関係が成り立つか検討の余地が残されている。

固相率測定法は、半溶融・半凝固加工工程におけるインライン測定法として整備されることが目的とされるが、そのためには、固相成分と液相成分の持つ特性値の違い(例えば、密度差・超音波速度差・電気伝導度差・比熱差など)を瞬時に捉える測定システムの構築が必要不可欠となる。今後、こうした方向に固相率測定法の研究が展開していくと思われる。

1. 4. 2 半溶融・半凝固処理金属材料の製造技術に関する動向

種々の半溶融・半凝固処理金属材料の製造法が現在研究ならびに開発されているが³³⁾、いずれの処理法も目指すところは、均一・微細・等軸結晶組織となる金属材料の製造にある。以下、それぞれの処理法の最近の動向について概説する。

(1) 半溶融処理法

半溶融処理法としては、均一加熱法²⁶⁾(図1-17参照)・SIMA(Strain Induced Melt Activated)法⁶⁹⁾などがある。均一加熱法は、母材を均一に加熱し

て、その内部に平衡な半溶融状態を作り出そうとするものであるが、金属学的特性からの制約もあるため、この方法を適用できる材質は限られている。また、均一な加熱あるいは温度分布を実現するためには、加熱炉の形状・寸法、温度制御、母材の挿入ならびに保持などについて検討する必要がある、適切な条件を選択しなくてはならない。SIMA法も基本的には均一加熱法を指向しているが、加熱前の母材の処理法に特徴がある。

(2) 半凝固処理法

半凝固処理法としては、電磁攪拌法・機械攪拌法・超音波法²⁴³・Flow-Cast法⁴³³などがある。いずれの処理法も一長一短があり、最近では、それぞれの処理法の処理範囲（処理対象材料、条件）の拡張を目指した研究が進められている。また、これらの中には、パイロットプラントの段階にまで進んでいるものもある。半凝固処理法として現在最も進んでいる電磁攪拌法と機械攪拌法についてその研究動向を概説する。

(a) 電磁攪拌法^{393, 413, 423, 633, 793}

電磁攪拌法は、攪拌工具が直接溶湯に接していないなどの理由により、特に鉄系合金など高熔点材料の半凝固処理材製造において有力な方法と考えられている。また、電磁攪拌装置は鋼の連続铸造機に既に設置されているなどの実績がある。反面、十分な攪拌効果を得るためには、(a)大がかりな装置となり、(b)電力消費量も大きく、(c)付帯設備も大規模になり、したがって、(d)全体的に高価な設備となることなどが指摘されている。またさらに、(e)固相率0.2以上の半凝固処理材料の製造の問題、(f)溶融金属の中心部と周辺部では攪拌速度が異なる問題、などがあり、現在これらの問題点に対し研究が展開されている（図1-18参照）。

(b) 機械攪拌法^{23, 113, 353, 383, 623, 633, 723, 793}

M.C.Flemingsらによって開発された機械攪拌法の一種であるレオキャスト法は、凝固中の金属材料を機械的に強攪拌することにより樹枝状晶組織を分断し、微細な球状晶組織とし、これを铸造し微細な内部組織を有する製品を製造しようとする方法である。レオキャスト法は、(a)溶湯と直接接する回転羽根などの工具の材質の問題（溶損の問題）、(b)生産性の問題、(c)溶湯→半凝固処理→成形といった溶湯から直接製品化する場合の工程設計の問題、(d)半凝固処理材移送中の酸化の問題、(e)固相率が0.3以上の半凝固処理材の製造の問題、などに対し現在研究が進められている（図1-19参照）。

また、機械攪拌法（レオキャスト法）において、冷却速度は結晶粒の大きさを

を支配し、初晶粒径は冷却速度の1/3乗に反比例すること、攪拌速度は結晶粒の形状を支配し、攪拌速度が大きくなるほど初晶粒の形状は丸みを帯びてくることなどが多くの研究者により明らかにされている。こうした結果を利用し、市川らはレオキャスト法をさらに発展させた攪拌合成法を提案している。

電磁攪拌法と機械攪拌法とはそれぞれ上述に示すような長所・短所があり、半凝固処理法を実際に適用する場合には、それぞれ使い分けて使用する必要があることを岡野⁷³³らは指摘している。

1. 4. 3 溶融凝固現象を伴う製造法に関する動向

溶湯鍛造法・ダイキャスト法・レオキャスト法（コンポキャスト法）・チクソモールドイング法・スプレイフォーミング法・溶融焼結法などは従前の铸造法の枠組みを越えた製造法である。これらの最近の研究動向について概説する。また、これらの研究と本研究との対応をまとめて表1-2に示す。

(1) 溶湯鍛造法^{27, 263, 273, 673}

溶湯鍛造法あるいはスクイズキャスティング（Squeeze Casting）法とも呼ばれ、鋳型内の溶湯に機械的な圧力を加えて溶融状態から完全凝固にいたるまで高圧力で成形凝固させると同時に、部分的に半凝固状態での塑性流動を伴う铸造法である（図1-20参照）。溶湯鍛造法は、加圧下で凝固が完了すると同時に若干の塑性変形が行われることから、铸造欠陥の除去、品質特性の向上ならびに適合合金の拡大などが期待されている。

溶湯鍛造法はいまだ確立された技術ではなく、現在も試行錯誤を重ねながら、基礎・応用の両面から研究が進められている。とくに、凝固過程に対する外部からの制御と加圧効果の解明および半凝固状態下での金属材料の特性の解明が、溶湯鍛造法の今後の発展、さらには、新しいプロセスへの拡張にとって重要な課題である。また、(a)積層複合材料の製造、(b)粒子強化積層複合材料の製造などの研究も行われており、溶湯鍛造法の応用面での拡張も試みられていることは、この技術の将来性を伺わせるものであり、さらにまた、他の铸造法で製造し難い製品への適用もその動向が注目されるところである。

(2) ダイキャスト法^{233, 273, 343}

ダイキャスト法はプランジャーにより溶湯に機械的な圧力を加え、強制流動を生じさせて高速で金型中に鋳込み、铸造のサイクルを早くするとともに、従来、困難とされた薄物・細物製品の铸造を実現し、あわせて製品の精度を著しく向上させる製造法であり、アルミニウム（合金）・亜鉛などの铸造に広く適用され、自動車・電気機器用部品などの製造に使用されている（図1-21参照）。ダイ

キャスト法が他の鑄造法に比較して優れている特徴としては、寸法精度・薄肉化・鑄肌の平滑性・仕上げ加工の省略などの利点を有することにあるが、最近のユーザの要求は一層の品質向上と経済性を求めており、かつまたダイカスト法本来の特徴を生かしつつ、他の鑄造法の利点をも備えた鑄物の製造技術の開発についての要請も一段と高まりつつある。将来のダイキャスト法の技術開発の課題としては、

- (a) 鑄巣の発生しない素材密度の均一なダイキャストの開発
- (b) 寸法精度の高いダイキャストの開発
- (c) 強度と靱性の高いダイキャストの開発
- (d) 表面状態のよいダイキャストの開発
- (e) 安価な金型製作法の研究
- (f) 極薄肉ダイキャストの開発
- (g) 切削性のよいダイキャストの開発
- (h) 中子形状の複雑なダイキャストの開発
- (i) 加工行程省略のための研究

などが示されており、鑄巣の発生を防止した、密度の均一なかつ複雑形状な製品の製造が望まれている。

ダイキャスト法は、従来、溶湯の自然流動に頼っていた鑄造に機械的な強制流動を与える手法を導入したという点で、初歩的な複合加工プロセスと考えることもできるが、金型キャビティ内で素材の凝固が進行していく過程、あるいは、凝固を完了した後に圧力を加え変形を起こさせることを意図していないという点から、現状では鑄造加工の一方式であると考えられる。

(3) レオキャスト法^{23) 27) 29) 36) 39) 42)}

半凝固金属の粘度や組成は、攪拌速度（せん断速度）、冷却速度および固相率に影響され、通常、せん断速度を増加させると粘性が減少する。すなわち、半凝固金属は、流動速度の増大に伴って粘性が低下するいわゆるチクソトロピー（Thixotropy）を有し、攪拌が容易に行われる。半凝固合金を攪拌することにより、球状の固相が液相中に分散した流動性の高い半凝固処理金属が製造され、これがアルミニウム合金・鑄鉄・ステンレス鋼など各種合金に適用されている（図1-22参照）。このレオキャスト法による製造行程としては

- (a) 連続式レオカスターにより半凝固処理金属を製造し、
- (b) この半凝固処理金属をショットチャンバーへ供給し、
- (c) ダイキャスト法により成形し、
- (d) 凝固を完了させ製品を得る、

方法が提案されている。このように半凝固処理金属を素材とするダイキャスト機の開発についても広範囲な研究が行われている。このレオキャスト法の実際的な利点としては、(a) 溶湯に比較して半凝固金属の温度を低く抑えることができるため、ダイスおよびショットチャンバーの寿命の延長を図ることができ、これにより従来、経済的に困難であった高融点金属の金型鑄造が可能となること、(b) 攪拌により均一かつ微細な内部組織を得ることができるため、健全かつ信頼性の高い鑄物の製造が可能となること、(c) ダイキャスト機への材料の供給を正確かつ自動的にできること、などが挙げられる。レオキャスト法を発展させた研究として、チクソキャスト法（Thixocasting Process）・レオリファイニング法（Rheorefining Process）・チクソフォーミング法（Thixoforging Process）・コンポキャスト法（Compocasting Process）などがある。

(4) チクソモールディング法^{28) 43) 74)}

チクソモールディング法は、プラスチックの射出成形と原理的には同じプロセスである。すなわち、チップ状の原料をシリンダー後方のホッパーから供給し、回転するスクリーによって前方に搬送すると同時に加熱して、所定の固相率を持つ流動性のあるスラリー状とし、この金属スラリーをスクリーの高速前進運動によってシリンダー先端のノズルを通じて金型のキャビティ内に射出し、所望の形状の成形体を得る方法である（図1-23参照）。

チクソモールディング法の特徴としては、(a) 溶解・鑄込み・凝固の全過程がシリンダーおよび金型内で終了するために、熔融金属を直接扱うことなく安全である。また、(b) 溶解炉を必要としないので、一台の成形機で複数の合金の成形が可能である。ただし、(c) 材料の加熱制御、(d) 装置材料とくにスクリー材の選択、(e) 成形できる材料としては、低融点合金（アルミニウム合金程度）が対象となる、(f) 射出時の固相率は約30%以下が適当であり、50%以上になると完全充満が困難となる、などの点に注意する必要がある。現在マグネシウム合金を使い、自動車部品・電動工具部品などが実際に製造されている。

(5) スプレーフォーミング法^{22) 27) 50) 56) 58) 68)}

金属溶湯を噴霧し、いまだ半凝固状態のまま型に入れて鑄塊を作る技術である（図1-24参照）。英国のオスプレイ社で最初に開発されたことで、オスプレイ法といわれている。この技術の特徴は、(a) 急冷の効果により微細な結晶構造となること、(b) 大型成形プレスを必要とせずに、粉末から鑄塊が製造できること、(c) 半凝固状で型に集積するので、個々の粉末は溶着した形で結合されているため、99%の高密度材が得られこと、などである。ただしオスプレイ法におい

では急冷凝固とポロシティとは二律背反の関係になっており、ポロシティを生じない程度の急冷凝固を得ることがオスプレイ法において肝要な条件となる。真密度材が必要な場合にはさらに熱間加工を行う必要がある。オスプレイ材は溶製材とほぼ同等の機械特性を有することが報告されている。

(6) 溶融焼結法⁶¹⁾

粉末を用いた成形法に溶融焼結法がある。この成形法は、ガス噴霧法などにより製造した急冷凝固粉末を一旦圧粉成形し、粉末が一部溶融する温度にまで焼結温度を高め焼結固化する方法である。結晶粒の成長粗大化や偏析など、解決すべき問題も多いが、溶融焼結法に適した材料を選択することで真密度に近い成形品を製造することができる。

1. 4. 4 理論解析・数値シミュレーションに関する動向

近年、半溶融状態にある金属材料を数学的にあるいは物理的モデルに置き換え、理論解析また数値シミュレーションを行い、半溶融状態の変形挙動を予測する研究が行われている^{90) 93) 93)}。これには、大きく2つの流れに分けることができる。一つは、半溶融状態をミクロ的(個別的)に捉え、液相部分が結晶粒(固相)の外周を取り巻くように存在するとした不連続体力学モデルであり、もう一つは半溶融状態の材料をマクロ的(全体的)にとらえ、固相部分を多孔質体とし、液相部分がその孔に充満しているとする連続体力学モデルである。それぞれのモデルについて、モデルの特徴、適用限界、問題点などについて概説する。

(1) ミクロ的モデルによる理論解析^{90) 93)}

半溶融状態にある金属材料をミクロ的に捉えモデル化し、微視的な変形のメカニズムから巨視的な変形を予測しようとする解析法である。すなわち、変形は固相粒子間の相対すべりによって引き起こされると考え以下に示すようにモデル化する(図1-25参照)。(a)固相粒界においては、固相粒は薄い膜状の液相成分を介して接触しており、互いにすべることができる。(b)固相粒間のすべりの発生などの変形にともなう隣接領域との干渉は無視する。(c)領域中央部の液相成分が、固相粒界に流入したり、さらに領域外に流出することはない。(d)固相・液相間の相移転は発生しない。数値解析手法としてはラグランジュ乗数法によるFEM法を採用し、固相成分と液相成分の構成式としては次式を用い、材料定数を変化させることによって固液両相を区別した。

$$\sigma = \sigma_0(a + b\varepsilon^n)\varepsilon^m$$

図1-26は、一軸圧縮試験において圧下率が4%時における解析領域の形状および接点速度分布の計算例を示す。ここで節点速度は工具との相対速度を用いて表されている。変形にともなって固相粒間に相対すべりが発生し、またすべりの発生により固相成分の応力が緩和されるために、かなり広い範囲にわたり剛体域が存在する結果となっていることがわかる。この解析結果では固相率が80~90%の範囲においては解析値は実測値に近いが、固相率が80%以下では解析値は実測値よりも大きくなってしまふ。これは、固相率が低くなると、実際では液相成分が固相粒界を通して自由に流動することができるのに対し、解析では液相成分が移動することはないと仮定したためであると考えられる。

(2) マクロ的モデルによる理論解析^{33) 93) 93) 93) 71)}

半溶融状態にある金属材料をマクロ的に捉えモデル化(図1-27参照)し、加工時における製品内部の液相成分の流動、加工後の固相率の分布、あるいは加工荷重を予測しようとする解析法である。すなわち、固相部分の骨格に対しては多孔質体の構成則を用い、液相部分に関してはD'Arcy則を用いて流体の流動を表し、つり合い式と質量保存式を同時に満たす解をFEM法により求める方法である。図1-28は半溶融金属の一軸圧縮試験における固相率と無次元化変形抵抗の関係を実測値と比較して示す。解析による結果はAl-0.93%Si合金の実測値の結果と一致しているが、この合金は結晶粒が他の合金に比べ著しく大きいことが判明している。また図1-29は半溶融押し出しにおける固相率の軸方向分布の予測結果を示す。ラム速度が速くなるに従い、液相成分の流出が抑制されて内部に保持されたまま加工が進む結果となっているが、このことは実験的にも確認されている。

以上、これまでの理論解析・数値シミュレーションでは、変形流動特性が全く異なる固相と液相の2相を解析対象とする複雑さから、いずれの解析方法においても実測値を十分にシミュレートするまでには至っていない。すなわち、解析結果は実測値に対し定性的一致は示すものの定量的一致にはまだ問題が残る。定性的・定量的に満足した結果を得るためには、固相粒子の回転やすべり、半溶融状態の正確な特性値の把握、熱連成などを考慮したモデル化が今後の課題となる。

1. 5 本論文の構成

本論文は、半溶融加工の基礎的研究と題し、序論と結論を含む9章からなる。第2章から第8章までの構成は、第2章と第3章が半溶融・半凝固金属の基本的特性に関する研究であり、第4章が半凝固処理金属の製造法に関する研究であり、第5章・第6章・第7章・第8章が半溶融加工法に関する基本的特性の研究である。各章間の関係を図1-30に示す。また、各章の概要を以下に示す。

第1章は序論であり、研究の目的、言葉の定義、本研究の概要、関連分野の研究・技術開発・応用動向ならびに本論文の構成について示す。

第2章は、半溶融（半凝固）金属の基本的特性の調査を目的とし、(a)高温顕微鏡による半溶融状態の直接観察結果、ならびに、(b)半溶融金属の一軸圧縮変形抵抗におよぼす材質・温度・ひずみ速度・試験片形状の影響について示す。

第3章は半溶融（半凝固）金属の固相率の測定法の開発を目的とし、(a)変形抵抗から固相率を推定する方法、ならびに、(b)電気的特性（比抵抗または電位差）から固相率を推定する方法を提案し、それら固相率推定法の特徴ならびに推定結果の検証について示す。

第4章は、半凝固処理金属材料の製造法の開発を目的とし、新たにせん断冷却ロール法を提案し、同法の特徴について示すとともに、同法によって製造された半凝固処理金属材料の特性について示す。

第5章は、半溶融押出し法の基本的特性の検討を目的とし、半溶融押出し法による(a)棒線管材の加工、(b)積層型複合棒材の加工、(c)粒子強化型複合棒材の製造と加工、(d)チタン短繊維強化型複合棒材の製造と加工、(e)炭化珪素短繊維強化型複合棒材の製造と加工、について示す。

第6章は半溶融鍛造法の基本的特性の検討を目的とし、半溶融鍛造法による(a)鋳鉄の加工、(b)粒子強化複合材料の製造と加工、(c)積層型粒子強化複合材料の製造と加工、について示す。

第7章は、半溶融圧延法の基本的特性の検討を目的とし、半溶融圧延法による(a)板材の加工、(b)積層型複合板材の製造と加工、(c)積層型アルミニウム基粒子強化複合板材の製造と加工、(d)積層型鉄基粒子強化複合板材の製造と加工、(e)サンドイッチ型粒子強化複合板材の製造と加工、について示す。

第8章は、半溶融複合加工法の基本的特性の検討を目的とし、半溶融複合加工法による(a)アルミニウム合金粉末の板加工、(b)粒子強化複合板材の製造と加工、(c)めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の製造と加工、(d)部分接合型複合鋼板の製造と加工、について示す。

第9章は、結論として研究の成果と今後の検討課題について示す。

参考文献

- 1) 萩原 巖・高橋忠義: 鋳塊の結晶粒微細化と偏析防止のための新凝固法, 日本金属学会誌, 29-6(1965), P637-642.
- 2) D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings: Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Range, Metallurgical Transactions, 3(1972-6), P1925-1932.
- 3) 福岡新五郎・鈴木 弘・木内 学: 固液共存状態における金属の変形抵抗, 第23回塑性加工連合講演会講演論文集, (1972-11), P435-438.
- 4) 福岡新五郎・木内 学: 固液共存状態の金属の押出し加工に関する研究・第1報, 昭和48年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1973-5), P249-252.
- 5) 福岡新五郎: 固液共存状態の金属の押出し加工に関する研究・第2報, 第24回塑性加工連合講演会講演論文集, (1973-11), P433-436.
- 6) 福岡新五郎・新井博男: 固液共存状態の金属の圧縮変形抵抗・第2報, 第25回塑性加工連合講演会講演論文集, (1974-11), P419-422.
- 7) 安江和夫・小坂岑雄・磯谷三男: 半溶融Sn-ZnおよびAl-Cu合金のみかけ粘度測定について, 鋳物, 46-1(1974), P36-43.
- 8) 木内 学・福岡新五郎: 半溶融金属（合金）の変形挙動, 日本金属学会会報, 14-6(1975), P441-448.
- 9) 加山延太郎・村井香一・佐藤万企夫・木口昭二: ねじり振動法による凝固進行中の溶融金属の粘度測定, 鋳物, 47-7(1975), P485-491.
- 10) 木内 学・福岡新五郎・新井博男: 固液共存状態における金属（合金）の変形抵抗, 塑性と加工, 17-186(1976-7), P595-602.
- 11) P. A. Joly, R. Mehrabian: The Rheology of a Partially Solid Alloy, Journal of Materials Science, 11(1976), P1393-1418.
- 12) 浅枝敏夫・吉川昌範・津田英明: γ/δ ニウム合金の半溶融加圧成形の研究（第1報 加圧成形体の機械的性質）, 日本機学会論文第3部, 42-360(1976-8), P2632-2642.
- 13) 浅枝敏夫・吉川昌範・大藤俊洋: γ/δ ニウム合金の半溶融加圧成形の研究（第2報 押出し成形体の機械的性質）, 日本機学会論文第3部, 42-363(1976-11), P3662-3668.
- 14) 木内 学・福岡新五郎・新井博男: 固液共存状態における金属（合金）の押出し加工, 塑性と加工, 18-199(1977-8), P633-640.
- 15) 吉川昌範・大藤俊洋・浅枝敏夫: γ/δ ニウム合金の半溶融加圧成形の研究（第3報 高けい素 γ/δ ニウム合金の機械的性質）, 日本機学会論文第3部, 44-381(1978-5),

- P1763-1769.
- 16)市川理衛・三輪謙治:半溶融状態におけるAl-Cu合金のみかけ粘性挙動と組織, 日本金属学会誌, 42-11(1978), P1023-1029.
 - 17)木口昭二・加山延太郎:凝固初期のみかけ粘度測定による各種鋳鉄の初晶成長過程の検討, 日本金属学会誌, 43-2(1979), P140-145.
 - 18)渋谷明彦・有原和彦・中村 泰:固相・液相共存下における鉄および非鉄合金のみかけの粘性の測定結果(Fe-C, Sn-Pb, Al-Cu, Fe-Cr-Ni-C合金), 鉄と鋼, 66-10(1980), P1550-1556.
 - 19)浅沼 裕・吉川昌範・西本 廉:鉄合金の高温における変形抵抗, 昭和56年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1981-5), P583-586.
 - 20)市川理衛・三輪謙治:攪拌による半溶融過共晶Al-Mn合金のみかけの粘性挙動と組織, 日本金属学会誌, 45-2(1981), P189-193.
 - 21)三輪謙治・市川理衛:攪拌による半溶融過共晶Al-Si合金のみかけの粘性挙動と組織, 日本金属学会誌, 45-2(1981), P853-859.
 - 22)(財)総合鋳物センター・先端金属材料調査委員会(調査部会):先端金属材料開発調査報告書(Ⅱ)粉末冶金, (1982), P1-149.
 - 23)(財)総合鋳物センター・先端金属材料調査委員会(調査部会):先端金属材料開発調査報告書(Ⅳ)半溶融加工, (1982), P1-122.
 - 24)森信幸・大城桂作・松田公扶:半溶融状態で攪拌したAl-Cu合金の組織とみかけ粘度, 日本金属学会誌, 48-9(1984), P936-944.
 - 25)Sherif D. El Wakil: A Model Study of Metal Forming in the Mushy State, Advanced Technology of Plasticity, (1984), P45-49.
 - 26)木内 学:溶湯鍛造の現状と将来, 鉄と鋼, 71-1(1985), P12-18.
 - 27)(財)素形材センター・素形材技術調査委員会・凝固制御凝固加工技術調査部会:素形材技術調査報告書(Ⅳ)凝固制御・凝固加工技術部会報告, (1985-9), P1-276.
 - 28)鈴木賢次郎:高温高圧下における超音波計測技術の開発と材料の機械的性質, 昭和59-61年度文部省科学研究費補助金特定研究成果報告書, (1987-9), P120-127.
 - 29)(社)日本機械工業連合会・(財)金属系材料研究開発センター:金属の半凝固加工プロセスに関する調査研究報告書(1988).
 - 30)木内 学・前崎雄彦:GMDHの塑性加工への応用, 昭和63年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1988-5), P699-702.
 - 31)伊丹 哲・井川良雄・安藤 剛・熊谷 憲:スラッシュ法の開発, 住友重機械技報, 36-107 (1988-8), P10-16.
 - 32)難波明彦・市川 洸:半凝固加工技術の現状と課題, 熱処理, 28-4(1988-8), P254-

- 261.
- 33)豊島史郎・高橋洋一:半溶融状態における加工の数値シミュレーション, 第40回塑性加工連合講演会講演論文集, (1989-10), P635-638.
- 34)木内 学:半溶融・半凝固加工技術の現状と将来, 生産研究, 42-6(1990-6), P319-326.
- 35)Antoine Tissier, Diran Apelian, Gilles Regazzoni: Magnesium Rheocasting - a Study of Processing-Microstructure Interactions, Journal of Materials Science, 25(1990), P1184-1196.
- 36)Werton C. Flemings: Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State, Metallurgical Transactions A, 22A(1991-5), P957-981.
- 37)吉川雄司・平居正純・竹林克浩・難波明彦:半凝固金属の粘性挙動, 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, (1991-9), P651-654.
- 38)吉川雅三・平居正純・佐伯幸弘・西村論:熱的手法による半凝固金属粘度測定法の開発, CAMP-ISIJ, 4(1991), P690.
- 39)吉川雄司・竹林克浩・森谷尚玄・藤川安生・岩田至弘・難波明彦:電磁攪拌方式による高融点半凝固金属の製造(半凝固金属製造に関する研究-2), CAMP-ISIJ, 4 (1991), P687.
- 40)木内 学・柳本 潤・森本庸介:半溶融金属の変形解析モデルの検討(1), 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, (1991-9), P643-646.
- 41)難波明彦・平居正純:半凝固金属スラッシュ製造技術の研究動向, 第105回塑性加工懇談会資料(1991-12).
- 42)Charles Vives: Elaboration of Semisolid Alloy by Means of New Electromagnetic Rheocasting Processes, Metallurgical Transactions B, 23B(1992-4), P189-206.
- 43)木内 学・柳本 潤・森本庸介:半溶融金属の変形解析モデルの検討(2), 平成4年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1992-5), P299-302.
- 44)J. S. Gunasekera: Development of a Constitutive Model for Mushy (Semi-Solid) Materials, Proc. 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P211-222.
- 45)W. C. Flemings, S. F. Chen, I. Diewwanit, J. A. Cornie: Rheology and Structure of Some Aluminum Base Composites, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P202-210.
- 46)W. R. Loue, M. Suero, J. L. Querbes: Microstructure and Rheology of Partially Remelted AlSi-Alloys, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P266-275.

- 47) Stuart B. Brown, Pratyush Kumar, Christophe L. Martin: Exploiting and Characterizing the Fundamental Rheology of Semi-Solid Materials, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P183-192.
- 48) Pratyush Kumar, Christophe L. Martin, Stuart Brown: Flow Behavior of Semi-Solid Alloy Slurries, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P248-262.
- 49) T. G. Nguyen, M. Suery, D. Favier: Mechanical Behavior of Semi-Solid Alloys Under Drained Compression With Lateral Pressure, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P296-305.
- 50) E. R. Cau, M. H. Robert: Obtention of Rheocast Structures of M-2 and 308-L Stainless Steel by S.L.M.A., 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P1-10.
- 51) Renzo Moschini: Manufacture of Automotive Components by Semi-Liquid Forming Process, 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992-6), P149-158.
- 52) 難波明彦・村田泰之: 電磁攪拌方式による半凝固金属の製造実験結果, 第11回半溶融・半凝固加工分科会資料, (1992-10).
- 53) 豊島史郎: 半溶融状態における加工の数値シミュレーション(圧縮変形における加工速度と液相の偏析について), 第43回塑性加工連合講演会講演論文集, (1992-10), P337-340.
- 54) Q. Z. DIAO and H. L. TSAI: Modeling of Solute Redistribution in the Mushy Zone during Solidification of Aluminum-Copper Alloys, METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 24A(1993-4), P963-973.
- 55) Alan G. Leatham and Alan Lawley: The Osprey Process (Principles and Applications), The International Journal of Powder Metallurgy, 29-4(1993), P321-326.
- 56) Rochelle D. Payne, M. Allen Matteson, Angela L. Moran: Application of Neural Networks in Spray Forming Technology, The International Journal of Powder Metallurgy, 29-4(1993), P345-351.
- 57) CHARLES VIVES: Elaboration of Metal Matrix Composites Thixotropic Alloy Slurries Using a New Magnetohydrodynamic Caster, METALLURGICAL TRANSACTIONS B, 24B(1993-6), P493-510.
- 58) Alan G. Leatham, Alan Lawley: The Osprey Process-Principles and

- Applications, The International Journal of Powder Metallurgy, 29-4(1993), P322-326.
- 59) 吉田直嗣・白井善久・森谷尚玄・吉田千里: 熱分析法による固相率の推定, 日本金属学会春期大会講演概要, (1993), P156.
- 60) 木内 学・柳本 潤・福島保浩: 半溶融金属の変形挙動の数値シミュレーション, 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994-5), P447-450.
- 61) 高城重彰: 液相焼結一半溶融・半凝固系に関連させて, 第14回半溶融・半凝固加工分科会資料(1994).
- 62) Merton C. Flemings・C. Vives: Semi-Solid Processing, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P3-6.
- 63) Shinobu Okano: Research Activities in Rheo-Technology Ltd., Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P7-18.
- 64) Christophe L. Martin, Stuart B. Brown, Denis Favier, Michel Suery: Mechanical behavior of coarse dendritic semi-solid Sn-Pb alloys under various stress states, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P27-36.
- 65) Pratyush Kumar, Christophe L. Martin, Stuart Brown: Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P37-46.
- 66) S. Toyoshima: A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P47-62.
- 67) Tatsuo Sakamoto: Recent Development of Squeeze Casting, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P137-144.
- 68) 富田省吾: スプレー・フォーミングプロセスの基礎特性, 第11回半溶融・半凝固加工分科会資料, (1994-10).
- 69) 木内 学: 半溶融加工技術の現状と課題, 第165回塑性加工シンポジウム, (1995-9), P1-14.
- 70) 江見俊彦・柳 正熙: 半溶融・半凝固合金製造加工技術の問題点と可能性, 第165回塑性加工シンポジウム, (1995-9), P15-22.
- 71) 豊島史郎: 半溶融加工問題に関する数値解析手法, 第165回塑性加工シンポジウム, (1995-9), P35-44.

- 72)市川 測:レキ+スト法と攪拌合成技術,第165回塑性加工シンポジウム,(1995-9),P45-55.
- 73)岡野 忍:半凝固金属の連続製造法と製品品質について,第165回塑性加工シンポジウム,(1995-9),P57-65.
- 74)齊藤 研・武谷健吾・附田之欣・沖本晋一:チタニウム合金成形プロセス開発の現状,第165回塑性加工シンポジウム,(1995-9),P103-112.

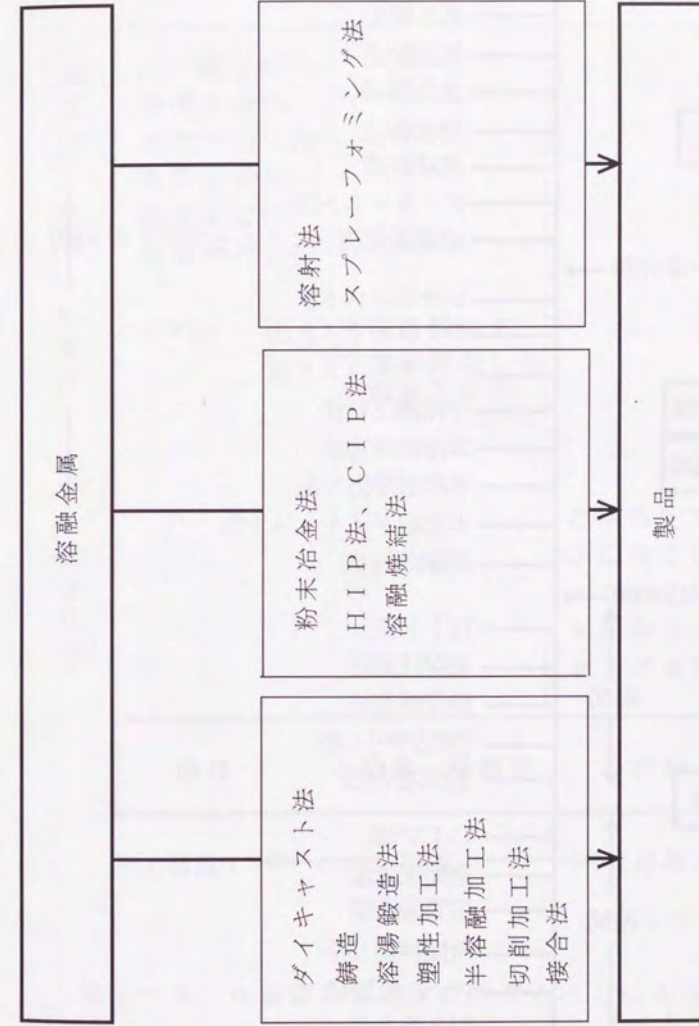


図1-1-1 金属製品製造法の素材形状による分類

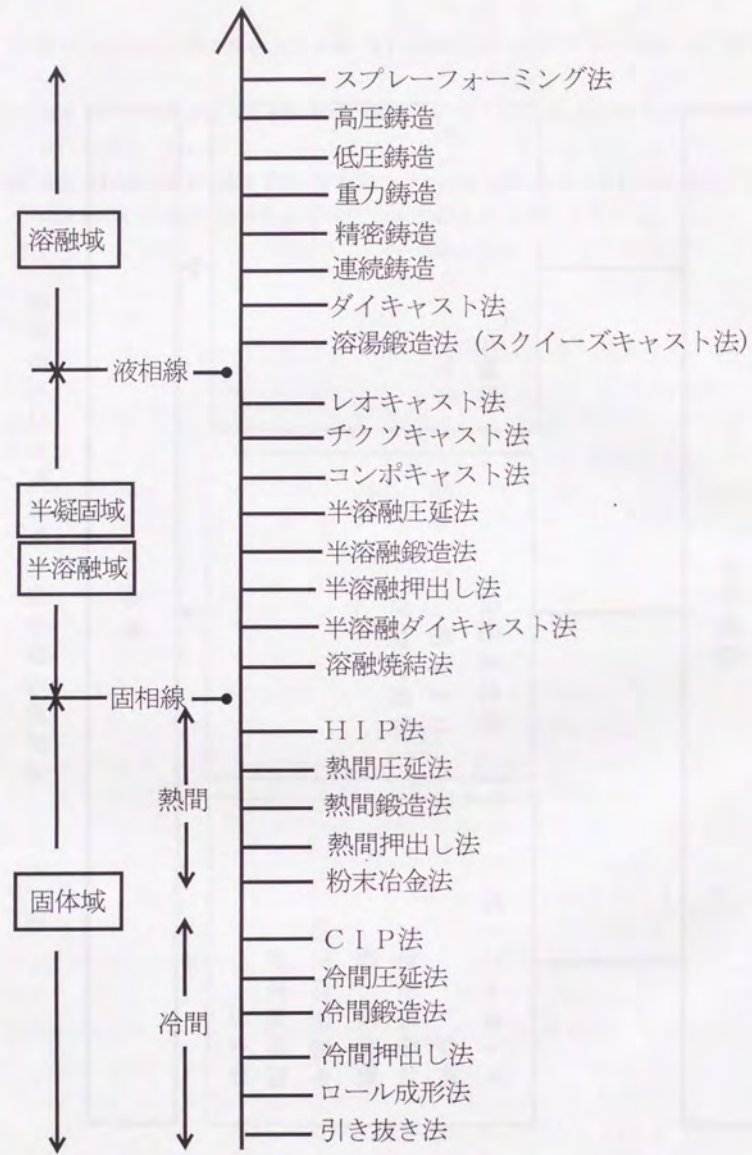


図 1-2 金属製品製造法の温度による分類

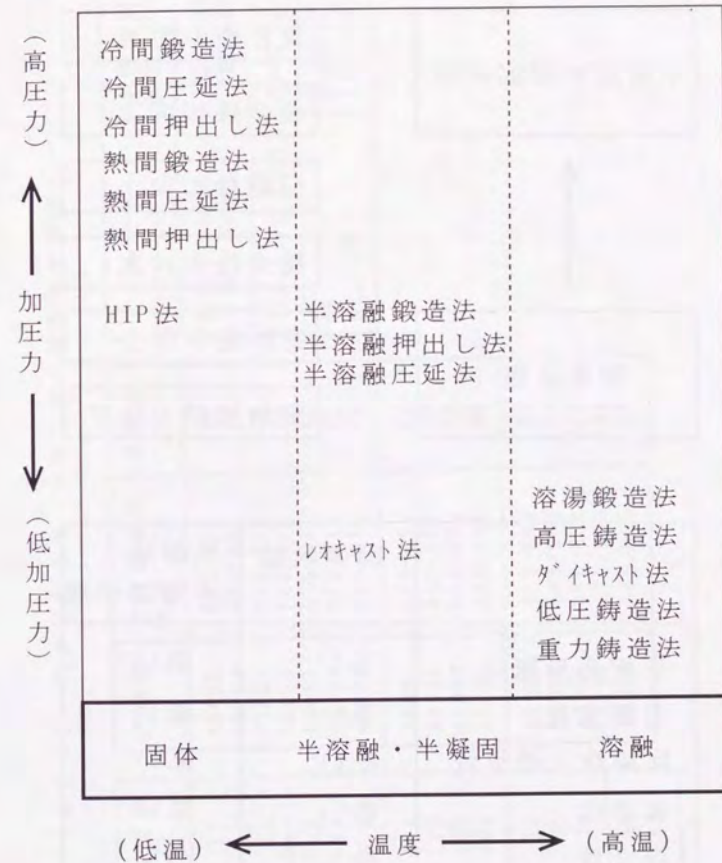


図 1-3 金属製品製造法の温度と圧力による分類

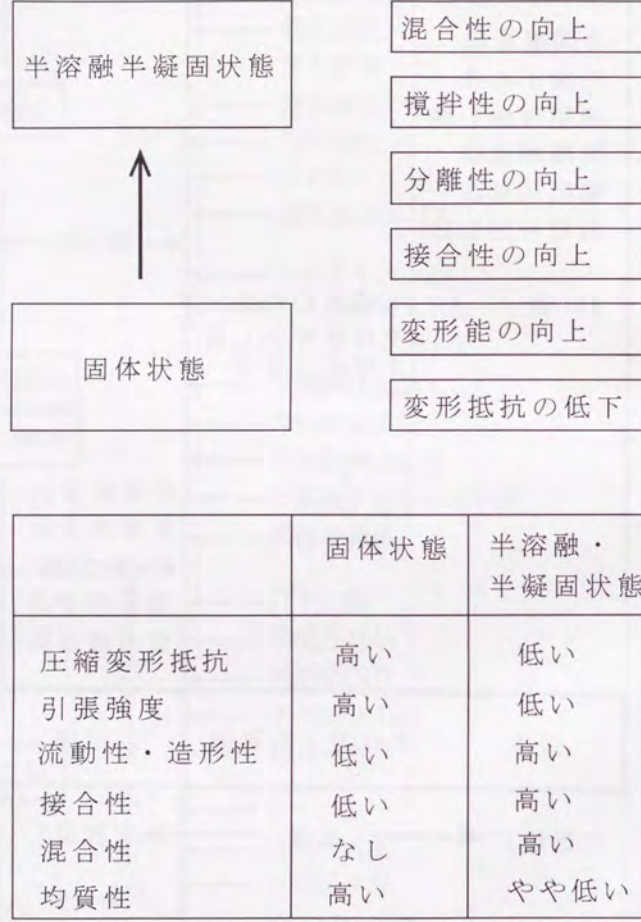


図 1-4 金属の半熔融半凝固状態の特性

表 1-1 代表的な金属（合金）の半熔融温度範囲

合金名	半熔融温度範囲 / °C	温度差 / °C
A1060	646-657	11
A1100	646-657	11
A1200	646-657	11
A2011	535-643	108
A2014	507-683	176
A2017	513-641	128
A2018	507-638	131
A2024	502-638	136
A2117	510-649	139
A2218	504-635	131
A2219	543-643	100
A3003	643-654	11
A3004	629-654	25
A3105	635-654	19
A4032	532-571	39
A4043	574-632	58

合金名	半熔融温度範囲 / °C	温度差 / °C
A5005	632-654	22
A5050	624-652	28
A5052	593-649	56
A5056	568-638	70
A5083	579-641	62
A5182	579-641	62
A5086	585-640	55
A6061	582-652	70
A6N01	615-652	37
A6063	616-654	38
A6151	552-649	97
A7003	615-650	35
A7072	646-657	11
A7075	476-638	162
A7178	477-629	152
A7N01	615-650	35

合金名	半熔融温度範囲 / °C	温度差 / °C
黄銅 (35%Zn)	904-935	31
青銅 (5%Sn)	954-1049	95
モリブデン (Ni70-Cu30)	1299-1349	50
鋼	1466-1510	44
ステンレス鋼	1427-1471	44

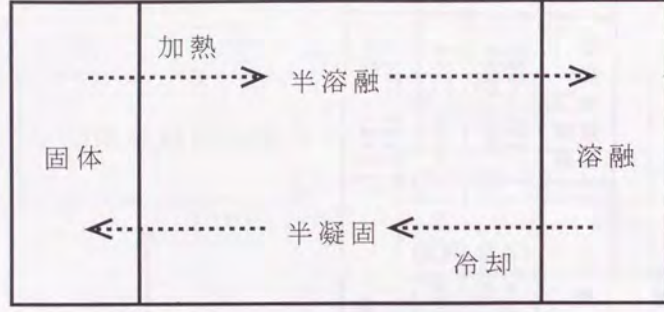


図 1-5 半熔融と半凝固の定義

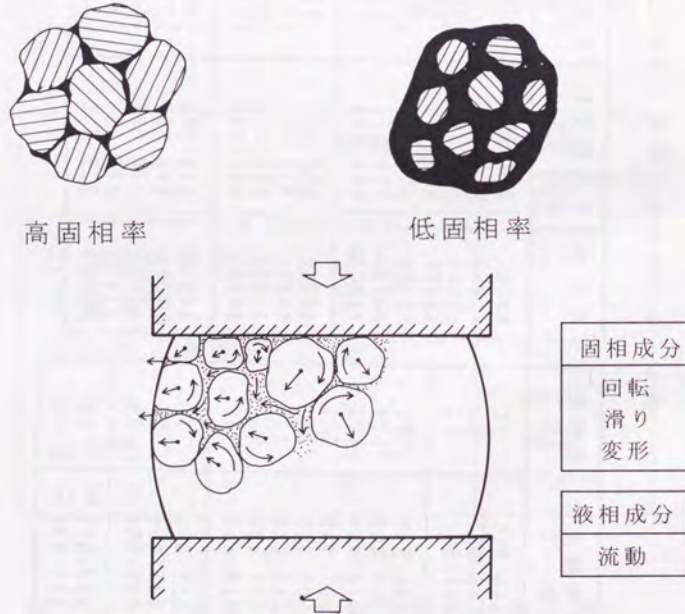


図 1-6 半熔融状態の様子³⁴⁾

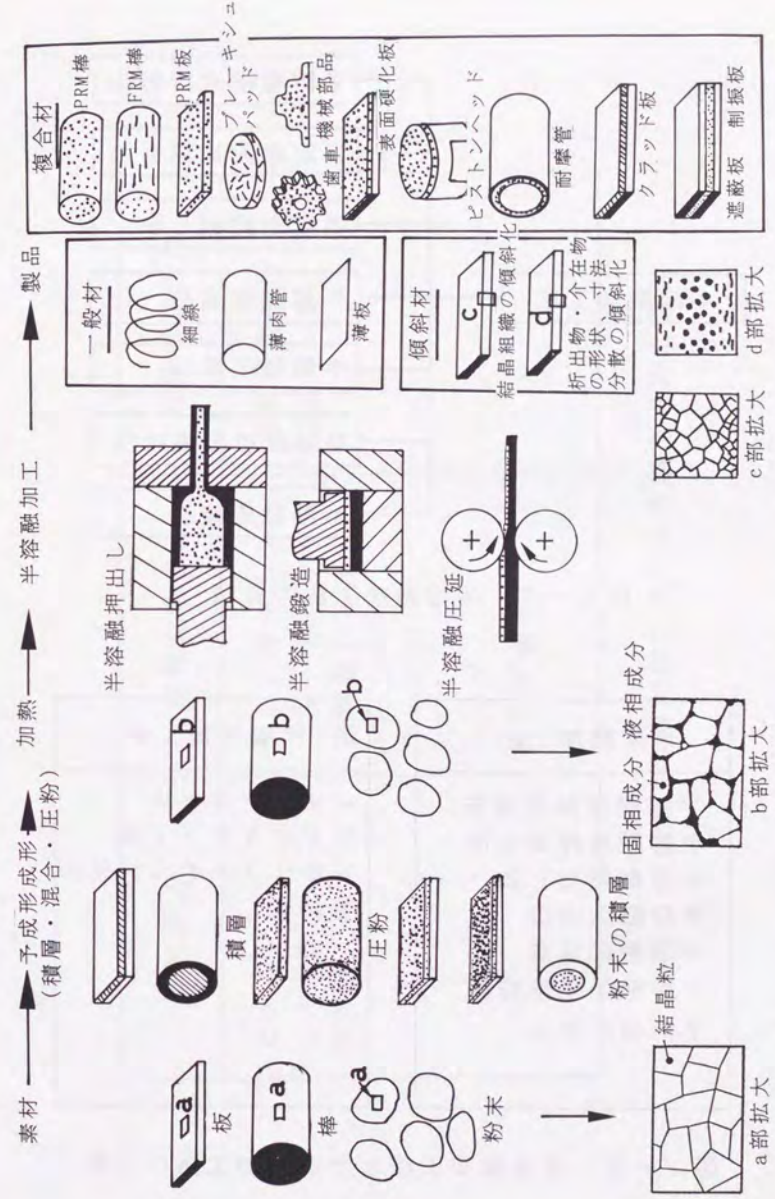


図 1-8 半熔融加工行程とその製品例

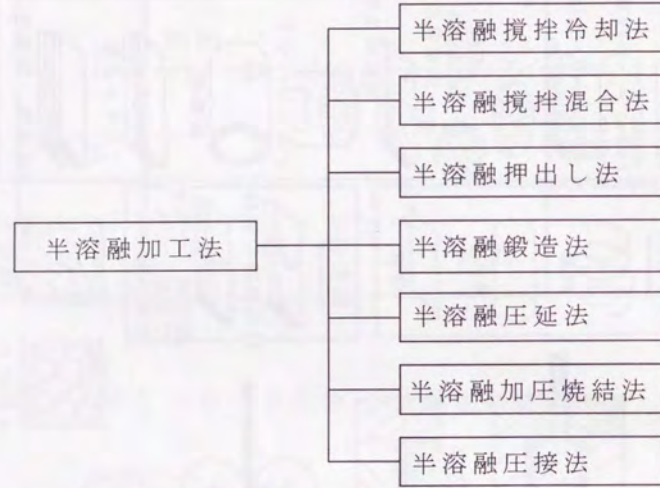


図 1-7 半熔融加工法の分類

半熔融加工法	半凝固加工法
半熔融攪拌冷却法 半熔融攪拌混合法 半熔融押出し法 半熔融鍛造法 半熔融圧延法 半熔融加圧焼結法 半熔融圧接法	レオキャスト法 コンボキャスト法 レオリファイニング法 粘鋳法

図 1-9 半熔融加工法と半凝固加工法の分類

耐熱部品	耐摩耗部品	特殊機能部品
ピストン ステンレス管 排気管	ブレーキディスク レーキパドル 耐摩耗ローラー ベアラリグ ベアラメタル バルブ 粉体圧送管	放射線遮蔽板 制振板・管

図 1-10 半熔融加工法による製造可能な製品

$$\eta_s = \eta_{\infty} \left\{ 1 + \frac{\alpha \rho_s C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3}}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{0.72 - \beta C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3}} \right)} \right\}$$

$$\alpha = 2.03 \times 10^2 (X/100)^{1/3}$$

$$\beta = 19.0 (X/100)^{1/3}$$

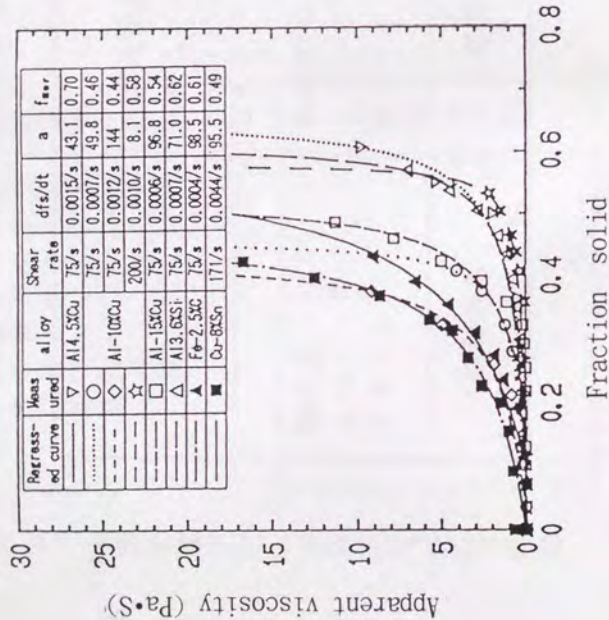


図1-1-1 半凝固金属の粘度と固相率の関係⁷⁰⁾

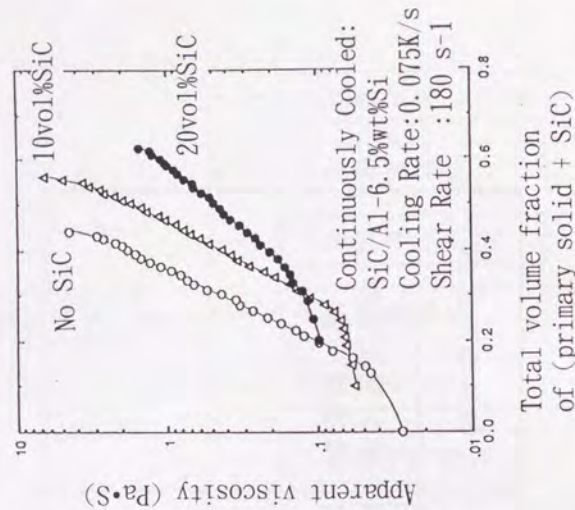


図1-1-2 半凝固金属に強化粒子を混入した際の粘度と固相率の関係⁴⁵⁾

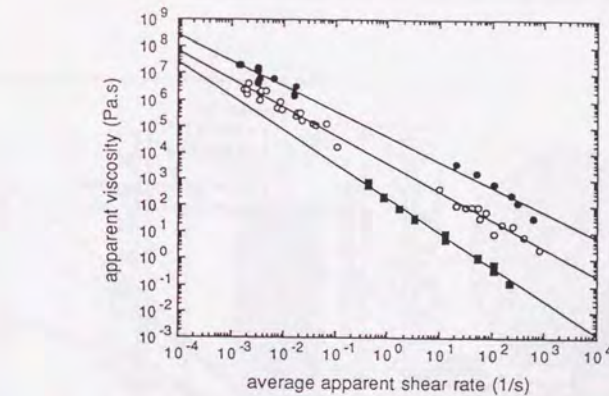
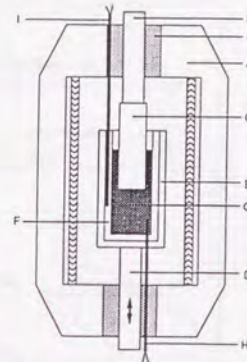
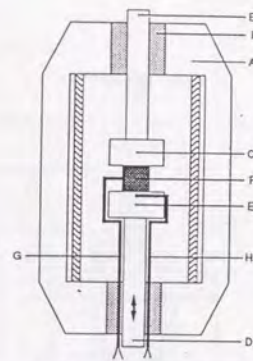


Figure 1-1-3 Apparent viscosity as a function of the average apparent shear rate for partially remelted AlSi6Mg0.3 (● fraction solid 0.55) and AlSi7Mg0.3 (○ fraction solid 0.45) obtained by backward extrusion (high shear rates) and parallel plate compression (low shear rates) at 580 °C. Results on partially solidified AlSi7Mg0.3 at 590 °C (■ fraction solid 0.3) obtained by Searle viscometry are also included.

図1-1-3 後方押し出し法および圧縮法による粘度測定法の概要⁴⁶⁾



Schematic diagram of the experimental apparatus for semi-solid state backward extrusion: A, IR furnace; B, stainless steel upper (stationary) shaft, connected to force transducer; C, graphite plunger; D, stainless steel lower shaft (ram); E, stainless steel envelope of F, graphite container; G, semi-solid metal; H and I, thermocouples; J, insulation.



Schematic diagram of the experimental apparatus for semi-solid state parallel plate compression: A, IR furnace; B, stainless steel upper (stationary) shaft, connected to force transducer; C, stainless steel upper plate; D, stainless steel lower shaft (ram); E, stainless steel lower plate; F, semi-solid metal; G and H, thermocouples; I, insulation.

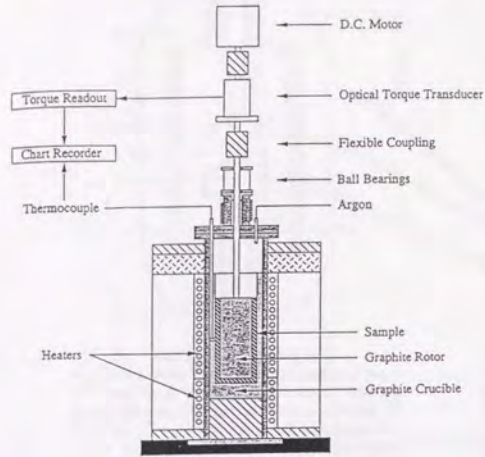


図1-14 半凝固金属の定常変化(Steady State Response)におけるせん断力とせん断ひずみ速度の関係⁴⁷⁾⁴⁸⁾

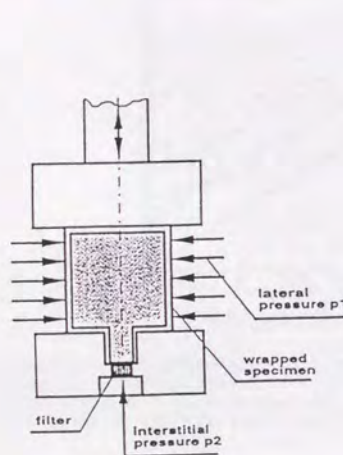
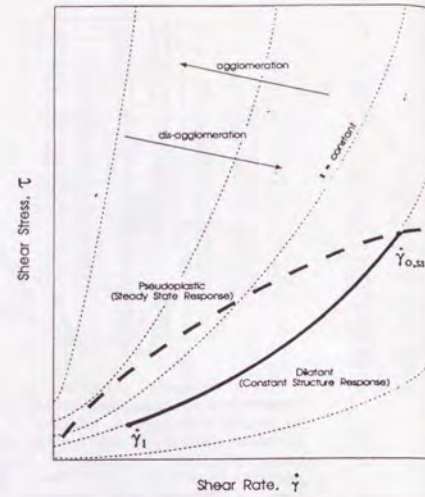


図1-15 側圧付加圧縮(Drained Compression with Lateral Pressure)法の概要⁴⁹⁾

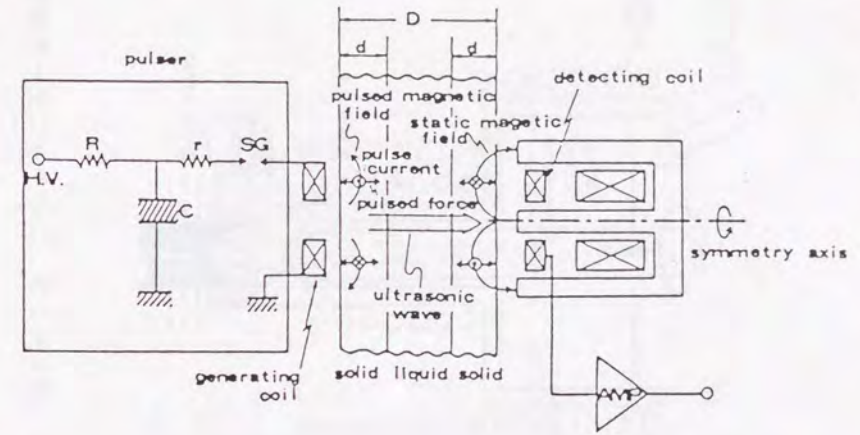
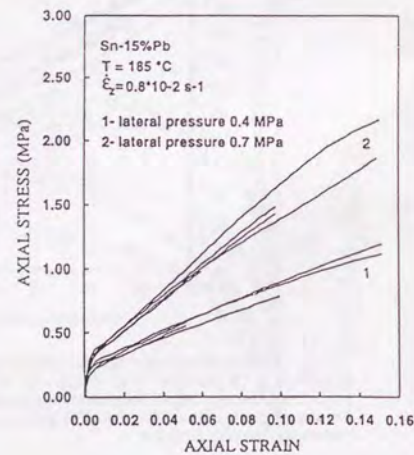


図1-16 超音波法による凝固シェル厚み測定法の概要²⁹⁾

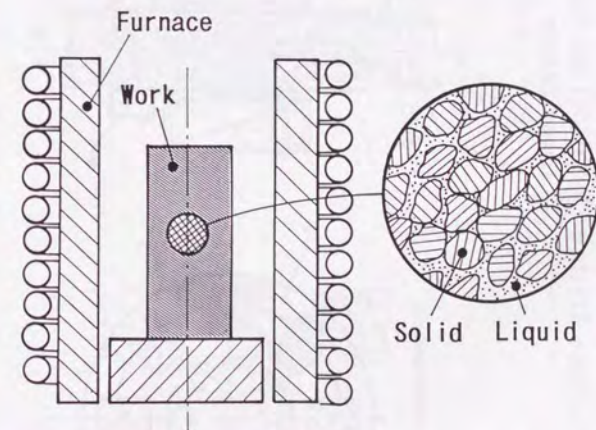
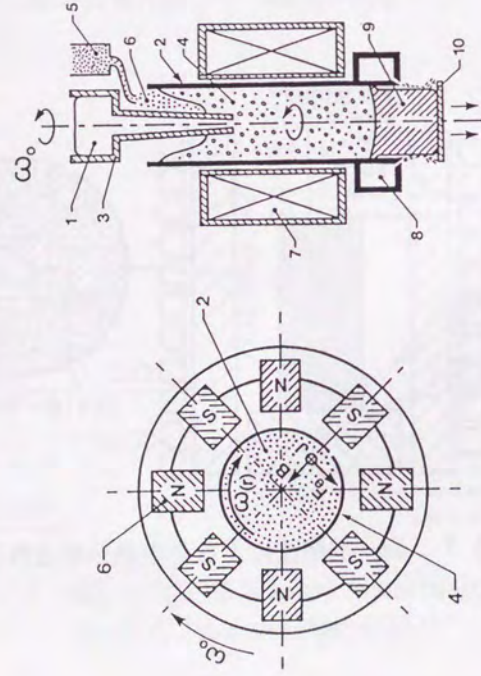


図1-17 均一加熱法による半溶融処理金属製造法の概要³⁴⁾

1. Molten Alloy
2. Ingot Mold
3. Spout
4. Multiphase Mixture
5. Tank
6. SiC particles
7. Rotor
8. Cooling Water
9. Solidified alloy
10. Dummy Bottom



(a) view from above

(b) front view

図 1-18 電磁攪拌法の概要 42)

図 1-19 レオキスターの概要 35)

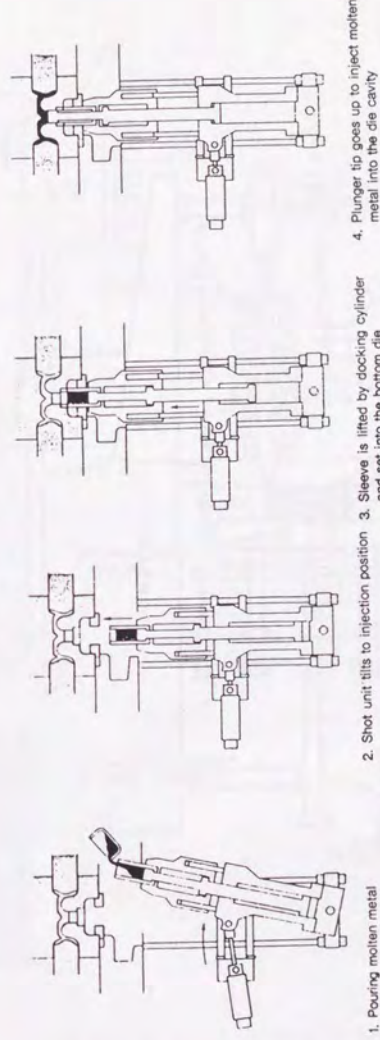
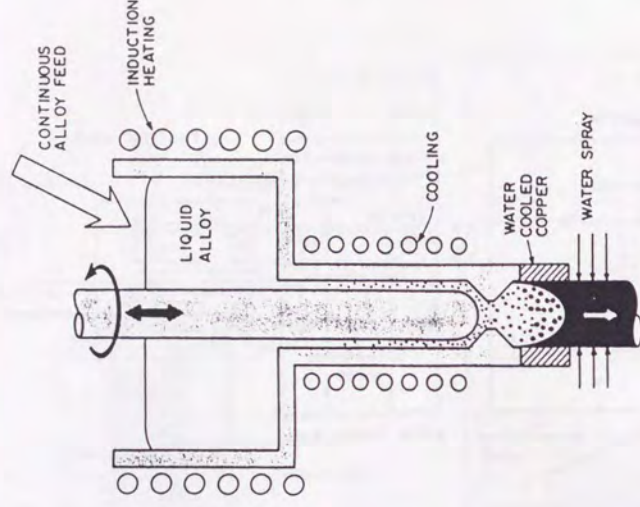
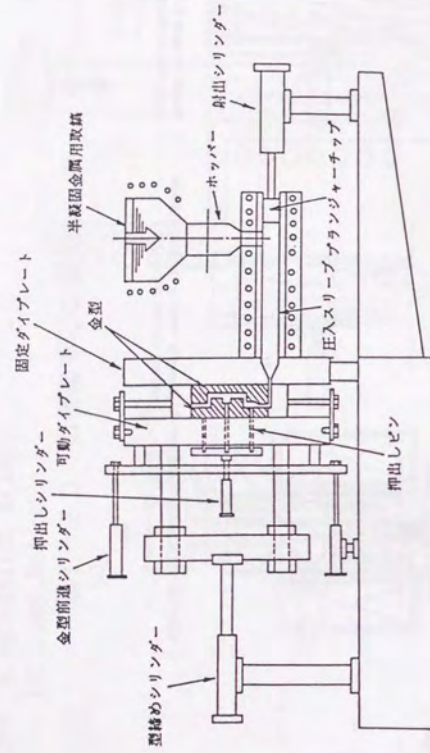
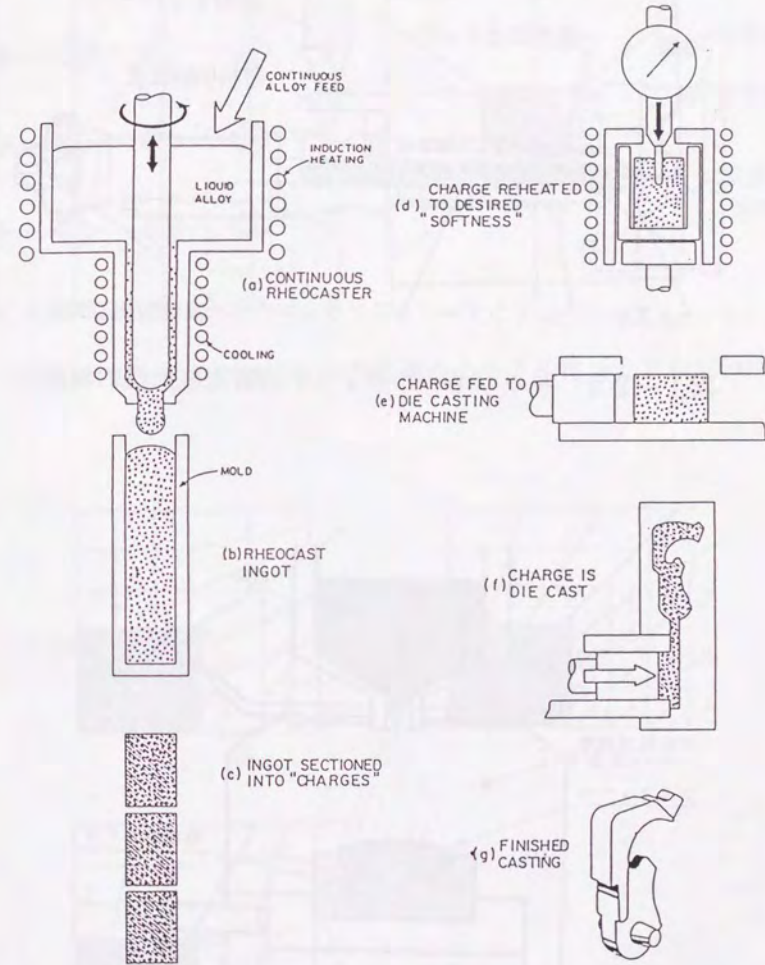


図 1-20 溶湯鍛造法の概要 67)

図 1-21 ダイキャスト法の概要³⁴⁾図 1-22 レオキャスト法の概要⁶²⁾

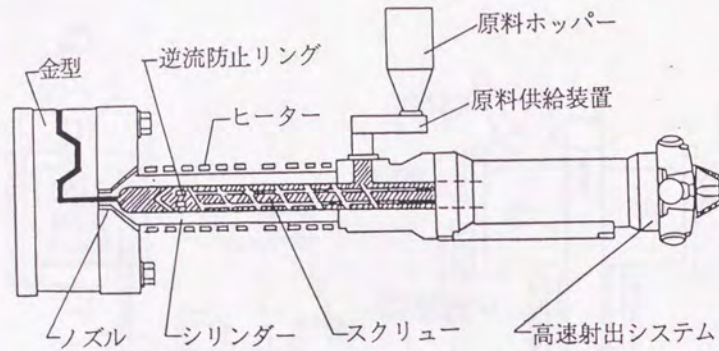


図1-23 チクソモーディング用射出成形機の構造⁷⁴⁾

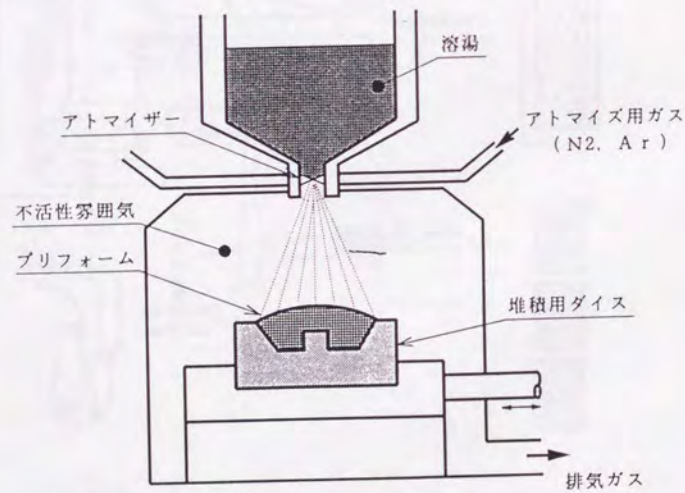


図1-24 オスプレー法の概要⁶⁸⁾

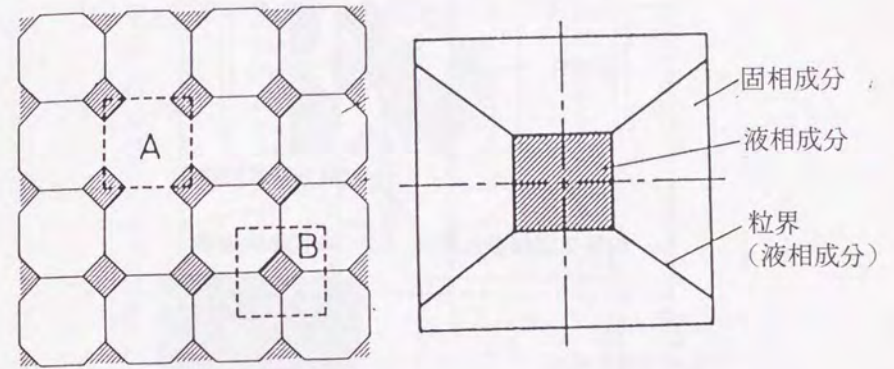


図1-25 半溶融状態の内部構造のモデル化 (ミクロ的)⁴⁰⁾⁴³⁾

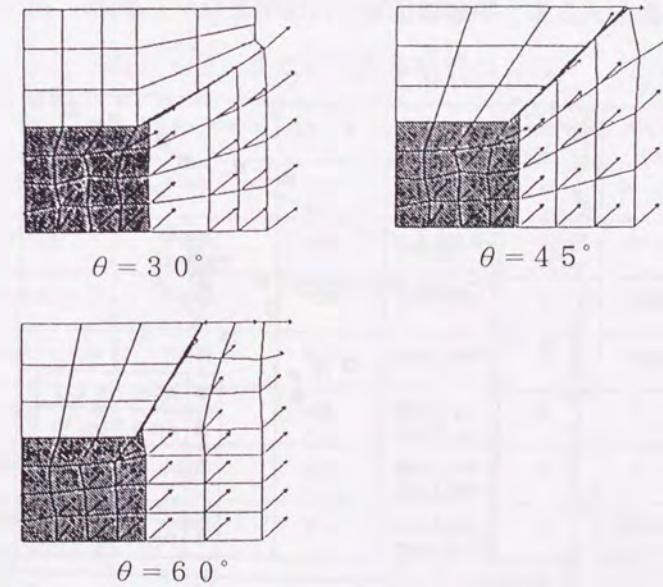


図1-26 半溶融圧縮時における形状ならびに接点速度分布⁴³⁾
(固相率75%)

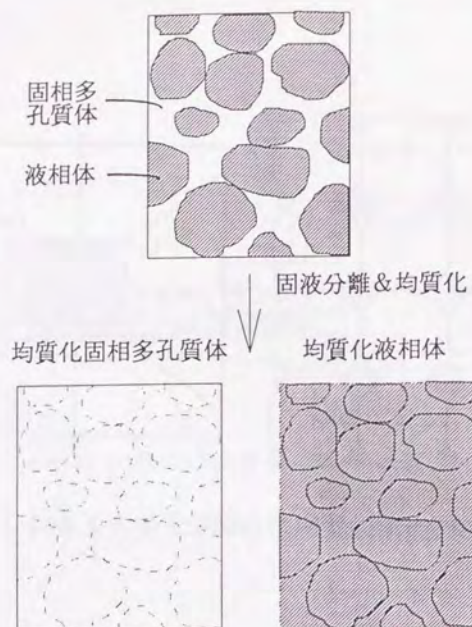


図1-27 半溶融状態の内部構造のモデル化 (マクロ的)⁶⁰⁾

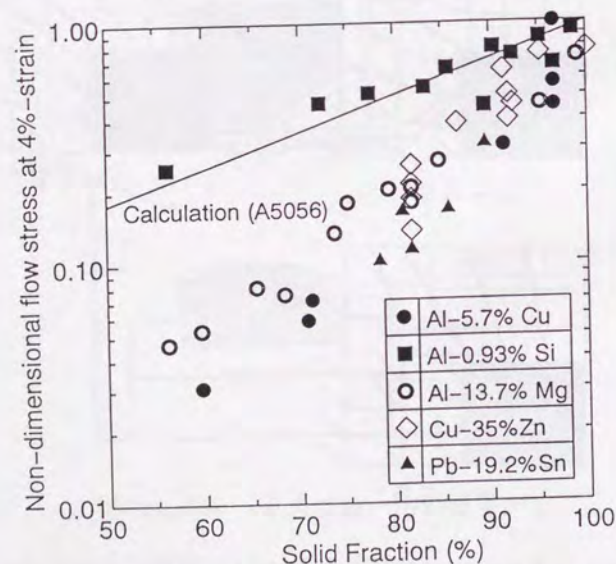


図1-28 固相率と無次元化変形抵抗の関係⁶⁰⁾

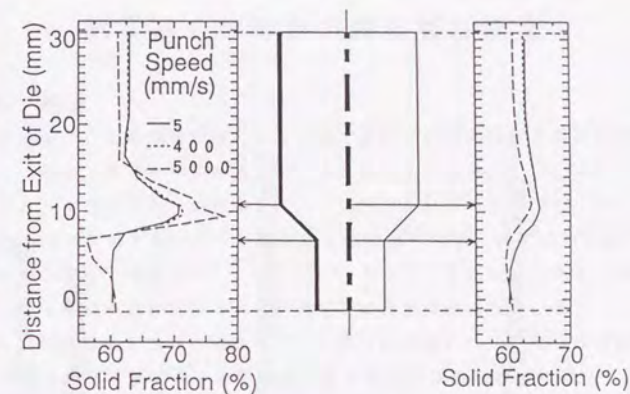


図1-29 固相率の軸方向分布⁶⁰⁾

表1-2 従来研究と本研究の対応

	半溶融/半凝固	成形/加工	対象材料	複合材製造 の可否	適用圧力 MPa
溶湯鍛造法	半凝固	成形 一部加工	低融点材料	可	50~200
ダイキャスト法	半溶融 半凝固	成形	低融点材料	否	50~100
レキャスト法	半凝固	成形	低融点材料	可	100程度
チタニウム法	半溶融	成形	低融点材料	否	100程度
スプレイング法	半凝固	成形	低融点材料 高融点材料	否	0
溶融焼結法	半溶融	成形	低融点材料 高融点材料	可	0
半溶融加工法	半溶融	加工	低融点材料 高融点材料	可	100~400

* ここでいう成形とは、固相成分の塑性変形を伴わない場合の形状付与を意味し、加工とは、固相成分の塑性変形を伴う場合の形状付与を意味する。

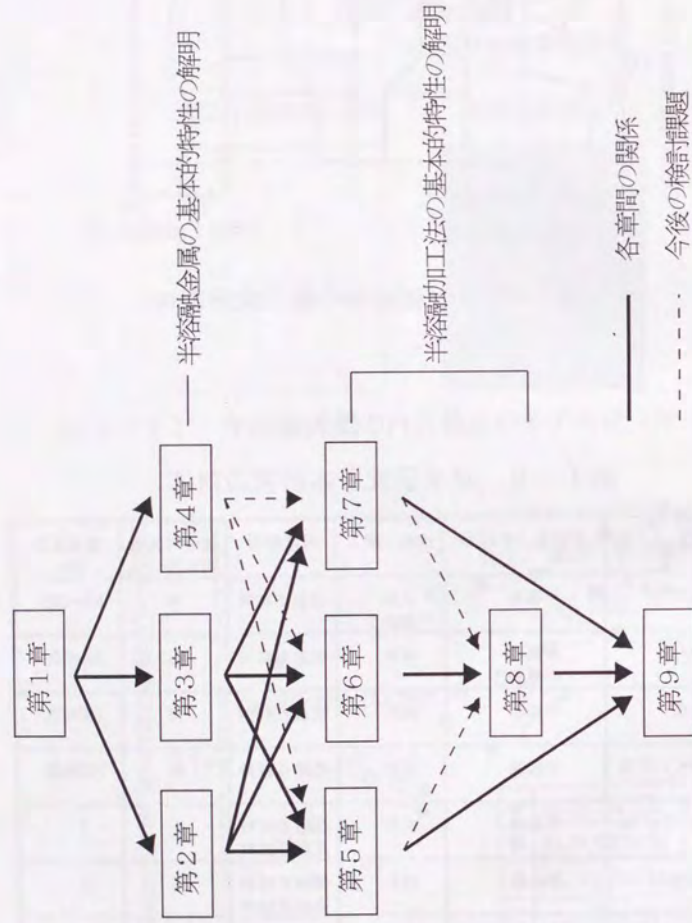


図1-30 本論文における各章間の関係

第2章 半溶融金属の特性調査

2.1 緒言

金属素材全体が完全固体状態にある冷間・熱間での組織観察や機械的特性に関しては、これまで多くの研究がなされ、体系的にまとめられ、いくつかの構成式が提案され、実際の冷間・熱間加工に大いに利用されている^{1) 2) 4)}。また、金属素材が完全溶融状態あるいはその延長上の低固相率状態（固相率約50%以下）での特性についても、前章の2.1項で述べたように、粘度あるいはせん断抵抗などに関し様々な構成式が提案され、鑄造技術の向上に役だっている。

しかし、固体金属を加熱し固相内に一部液相が含まれた、いわゆる固体の延長上にある高固相率状態での半溶融金属の機械的特性や組織観察に関しては、2, 3の先駆的な研究があるだけで十分解明されているとはいえない。高固相率状態における金属材料の特性ならびに変形挙動を明らかにしておくことは、(a)半溶融加工法における加工条件の選定、(b)被加工材の変形挙動の把握、(c)製品品質の向上、(d)解析モデルの構築、(e)構成式の決定、(f)解析結果の検討などにおいて重要な役割を果たす。^{1) 6) 1) 9) 2) 2) - 2) 7)}

本章では、半溶融加工に関する研究の出発点として、特に高固相率状態での半溶融金属を対象とし、内部組織の直接観察ならびに各種実用合金の変形特性（変形抵抗・変形能）について検討する。

2. 2 半熔融状態の直接観察

完全熔融金属の凝固過程を対象とした高温顕微鏡による直接観察例は、例えば凝固組織の粗大化の研究やデンドライトの成長の研究などに見られるように^{3) 12)}、これまでいくつかある。しかし、固体金属の溶融過程を直接観察した例については見当たらない。

本節では、高温顕微鏡を使用し、固体金属を加熱し半熔融状態にまで昇温させた際の、(a)溶融開始位置や溶融域の拡大化、(b)半熔融状態にある試験片に荷重を付加した際の結晶粒の変形・移動・分離など、内部組織の変化について検討した結果を示す^{14) 28) 29)}。

2. 2. 1 観察方法

半熔融状態の観察には、ユニオン光学(株)製のHM-4型高温顕微鏡装置を用いた。本装置は、反射型の光学顕微鏡と小型の加熱炉体(炉体寸法は直径50mm、高さ50mm)とが一体となった構造であり、加熱過程・冷却過程における試験片の内部組織の変化を直接観察し撮影することが可能である(図2-1参照)。試験片には純アルミニウムに5.7重量パーセントの銅が含有されたアルミニウム合金(JISの2000番系のアルミニウム合金に相当する)を用いた。このAl-5.7%Cu合金は、アルミニウムに対して銅が最も多く固溶する合金であり、したがって半熔融温度範囲が広く、また2元合金であるため状態図から温度と固相率の関係が算出できる利点がある。

観察は、(a)通常観察と、(b)試験片に圧縮荷重を付加した場合の観察との2通りある。(b)では、装置の構造上、バルジ変形する試料側面を観察することになる。いずれの観察においても、観察面に酸化皮膜が形成されることを防ぐため、炉内を 10^{-4} torr程度の真空にした状態で行った。

2. 2. 2 観察結果および考察

Al-5.7%Cu合金試験片を熱間状態から半熔融状態に至るまで加熱した際の同一箇所での観察結果を図2-2に示す。図から、主に粒界部から溶融が始まっていることがわかる。これは、粒界部ほど溶質原子が濃厚となる試験片作製時の成分偏析(ミクロ偏析)現象に関係があるものと思われる^{7) 8) 30)}。

図2-3は、Al-5.7%Cu合金試験片に数MPa程度の圧縮荷重(一定荷重)を付加したまま加熱した際の試験片側面の観察結果を示す。圧縮力加えているにもかかわらず、観察面である試験片側面には引張り力が作用しているためにバルジ変形している点に注意されたい。温度の上昇とともに試験片側面ではバルジ変形が起

こり、次第に結晶粒界が開口し、結晶粒が分離している様子が観察できる。

図2-4は、同様にAl-5.7%Cu合金試験片に数MPa程度の圧縮荷重(一定荷重)を付加したまま加熱した際の、同一観察位置における固相線温度直下(固相率10%)での内部組織と、固相率が約91%での内部組織の相違を示す。固相率が91%になると、表面に滲み出てきた液相成分が膜状となり、変形の進行とともに皺となり、かつ、粒界部分が亀裂となって連なってくる様子が観察できる。

図2-5は、図2-3・図2-4よりもさらに固相率が低い(固相率が84%)場合で、試験片表面に液相成分が流出し、さらに結晶粒界の崩壊が一段と進行している様子となっている。

以上、高固相状態の半熔融金属の観察結果から、概略以下のことがわかる。

- (a)主に粒界から溶融し始め、粒界から結晶内部に向かって溶融が進行する。
- (b)固体状態から半熔融状態に達すると、結晶粒界の結合が非常に弱くなり、たかだか数MPa程度の圧縮力でも、各結晶粒間にすべり・回転・変形が発生する。
- (c)半熔融状態下にある金属材料に引張り力が作用した場合、その金属材料は結晶粒子間を起点とし容易に分離する。

2. 3 半溶融金属の変形特性

高固相率状態における半溶融金属の変形抵抗・変形挙動に関しては、福岡ら^{13) 4) 9) 10) 11)}、浅沼ら^{12) 他2, 3の研究^{1) 2) 2) 3)}}があるにすぎず、一部の金属材料について、限られた試験条件のもとで調査されたものであり、未だ十分解明されているとはいえない。

本節では、広範囲の実用合金を用い、半溶融状態下でのカムプラストメータ（定ひずみ速度圧縮試験機）を用いた一軸圧縮試験を行い、(a)応力とひずみの関係、ならびに、(b)圧縮温度（固相率）・ひずみ速度・試験片寸法比・試験片材質が変形抵抗・変形挙動におよぼす影響について検討した結果を示す^{14) 17) 18)}。

2. 3. 1 変形抵抗の測定方法および測定条件

(1) 測定方法

変形抵抗はカムプラストメータを用い測定した。カムプラストメータは、対数曲線形状のカムの回転を上下運動に変換し、試験片のある初期高さに対し、一定のひずみ速度で圧縮を行うことができる試験機である。図2-6にカムプラストメータの概略図を示す。実際の圧縮は、炉から取り出し圧縮開始までの間の試験片の温度降下を未然に防ぐため、図2-7に示す厚肉のサブプレスを用い行った。試験手順は、(a)試験片をサブプレスにセットし、(b)サブプレスごと高周波誘導加熱炉で加熱し、(c)所定の温度に一定時間保持した後に、(d)サブプレスをカムプラストメータに設置し、(e)圧縮する、である。試験片温度は、サブプレスの外側からK熱電対を用い測定した。試験片の上下面に接触する工具は、試験ごとに1000番の研磨紙でみがき、常に表面状態を一定の表面状態にして試験を行った。なお、いずれの場合も、試験片の上下面と工具面の間に潤滑剤は用いず無潤滑で行った。荷重と変位をロードセルと接触式変位計を用い測定した。それら計測に用いた機器名を表2-1に示す。

(2) 測定条件

試験片材質・試験片寸法・圧縮ひずみ速度・圧縮温度をまとめて表2-2に示す。研究室で溶製し作製した5種類の二元合金と38種類の市販の実用合金（アルミニウム合金36種類と銅合金2種類）について圧縮試験を行った。試験片の寸法は直径12mm、高さ18mm（アスペクト比1.5）を標準としたが、A5056・A6061・A7075の3材質については、試験片寸法の相違が圧縮変形抵抗におよぼす影響を調査するために、高さの異なるφ12-12mm・φ12-6mm・φ12-3mmの試験片を作製した。また、ひずみ速度は約0.2~0.5s⁻¹を標準としたが、A2014・A5056・A70

75の3材質については、ひずみ速度を0.2~8s⁻¹の範囲で変化させ、ひずみ速度が変形抵抗におよぼす影響について調査した。圧縮温度に関しては、熱間から試験片が自重で崩れ荷重の測定が不可能となる温度までを対象とした。

(3) 応力・ひずみの算出方法

圧縮開始から終了までの時間を均等に分割し、各分割の荷重に相当する出力値（電位差）と、変位に相当する出力値（電位差）をもとに（図2-8参照）、以下の方法により、真応力-対数ひずみ線図を求めた（図2-9参照）。

(a)圧縮後の試験片高さ H_e (mm)を測定する。

(b)変位計の最下点位置の出力 Se (V)を読み取り、この値と(a)で計測した圧縮後の試験片高さ H_e とが対応するとし、圧縮中の試験片高さ H を次式で求める。

$$H = H_e + (S + Se) / Scal$$

ただし

S : 変位の出力(V)

$Scal$: 変位のこう正值(V/mm)

(c)ひずみ e を次式から求める。

$$e = \ln(H/H_0)$$

ただし

H_0 : 試験片初期高さ(mm)

(d)真応力 σ_t (kgf/mm²)を次式から求める。

$$\sigma_t = F/A$$

ただし

$$F = P \cdot Pcal$$

$$A = A_0 H_0 / H$$

$$= (\pi D_0^2 / 4) \cdot H_0 / H$$

P : 圧縮中の荷重出力(V)

$Pcal$: 荷重のこう正值(kgf/V)

D_0 : 試験片初期直径(mm)

A_0 : 試験片初期横断面の面積(mm²)

F : 圧縮中の荷重(kgf)

A : 圧縮中の試験片横断面の面積(mm²)（ただしバルク変形は考慮しない）

2. 3. 2 測定結果および考察

(1) 応力とひずみの関係

図2-10から図2-14にはアルミニウム合金（Al-5.7%Cu合金・Al-0.93%Si

i合金・Al-13.7%Mg合金・A7075)と銅合金(Cu-35%Zn合金・C3602)について、真応力 σ -対数ひずみ ϵ 線図の測定結果を示す。これらの測定結果から、半熔融状態下での応力-ひずみ線図の形(パターン)を模式的に示すと図2-15のようになり、その変化過程を3段階に分けて考察する。

第Iの過程は、圧縮の初期段階(ひずみ ϵ が0.05以下)で、変形量も少なくかつ変形が試料全体に渡ってほぼ均一であり、粒界に集中的に存在する液相成分の流動もあまり大きくない範囲である。一般に液相成分の存在により、固相成分である結晶粒は相互の束縛が緩和され、粒界におけるすべり・粒自体の変形・粒の回転、などが容易になることが2.2節の半熔融状態の直接観察から推論されるが、巨視的にみた圧縮変形が開始されると、微視的にみた個々の結晶粒の粒界すべり・回転・変形が誘起される。巨視的な変形量に含まれるそれらの微視的な移動量・回転量・変形量の割合は、液相成分の量によって異なるものと考えられ、液相成分が多いほど、すなわち固相率が低いほど、結晶粒自体の微視的な変形量の占める割合が低くなり、そのことが圧縮初期の応力の立ち上がりが緩やかになってくる原因であると考えられる。これにより、後述する変形抵抗の低下の度合いの問題と同様に、試験片の巨視的な寸法に比して結晶粒の寸法が十分小さいかまたは結晶粒度がほぼ同程度の場合には、固相率の変化に対する応力 σ の立ち上がりの勾配の変化が同様な割合で起こることが推定される。そこで固相率の変化に対する応力の立ち上がりの勾配 $d\sigma/de$ の変化をみた結果が図2-16である。図から明らかなように、 $d\sigma/de \propto \phi^m$ の関係が見られ、かつ、指数 m は材質によらずほぼ一定となることがわかる。ただしAl-0.93%Si合金は他の試験片に比して結晶粒が非常に大きく、液相成分の効果が減殺されたものと考えられることができる。

第IIの過程は、圧縮の変形量が次第に増加し、試験片内部の液相成分が側壁部(自由表面)に向かって流動し、さらには流出し、あるいはまた結晶粒界に閉じこめられた状態となり、液相成分の存在による結晶粒の微視的な変形を緩和する効果が初期の液相成分の量によって定まる下限に近づく段階であり、そのために応力の値は次第に飽和している範囲である。この飽和の過程が急速に進行する場合と、ゆるやかに進行する場合があり、特に固相率が低く初期の液相成分の量が多い場合に大きなひずみ範囲に渡って応力が緩やかに増加していく傾向が顕著となる。換言するとこの過程における応力 σ の挙動は、変形過程における試料の液相成分を内部に保持する能力と結びついており、液相成分の側壁部への流動が起こりにくいかあるいは側壁部分からの流出が起こりにくい場合には応力の飽和が緩やかになる。したがってこの問題は試験片の材質・試験片の寸法形状あるいは圧縮ひずみ速度などの影響を受ける可能性があり、例えば、試験片の径に対して

高さを減少させるとこのような現象が現れる。

第IIIの過程は、液相成分の試験片側壁部からの流出が顕著になり、あわせて側壁部から内部に向かって崩壊が進行する範囲である。液相成分の集中とその流出により、側壁部近傍の結晶粒間の結合力は弱まり、相互に容易に分離して移動し、ある種の崩壊現象を起こす。圧縮変形量の増大とともにこの現象が内部に進行していくが、このような状態になるとこの部分の負荷能力が急速に低下してくるので、結果的に応力の低下を招くことになる。これらのことは、後述する変形後の顕微鏡組織観察結果と対比させてみると興味深い。

以上は、固相率が100%から70%前後までの範囲の応力-ひずみ線図に関して検討した結果であるが、それ以下の固相率になると試験片の自重による流動が始まり、通常の意味での圧縮試験はできなくなる。

(2) 温度(固相率)と変形抵抗の関係

図2-17には、圧縮ひずみ0.04(4%)における変形抵抗 $(\sigma_r)_{0.04}$ と温度との関係をまとめて示す。図から明らかなように、いずれの材質についても固相線温度を越えると $(\sigma_r)_{0.04}$ は急激に減少することがわかる。ただし、Al-0.93%Si合金だけはこの $(\sigma_r)_{0.04}$ の減少の度合いがゆるやかであり、他の材料のものと異なる特性を示している。この理由については、この合金が他に比較して結晶粒が非常に大きいことによるものと考えられる(図2-59参照)。固相線温度での $(\sigma_r)_{0.04}$ (換言すれば熱間域での限界変形抵抗)が材質によって大きく異なること、および銅系合金のそれがアルミニウム系合金のそれに比して著しく小さいことは興味深い結果である。また、アルミニウム系の合金については、いずれの場合も半熔融域の温度範囲が広く、変形抵抗の一般的挙動、特にこの場合で言えば $(\sigma_r)_{0.04}$ の挙動を把握し易いが、銅系合金ではこの温度範囲が狭く、温度すなわち固相率が $(\sigma_r)_{0.04}$ におよぼす影響を適確に把握することは難しい。

図において熱間域における $(\sigma_r)_{0.04}$ の曲線を半熔融域へ外挿した破線を示してあるが、これは半熔融域での固相成分自体の変形抵抗を表すものとして理解される。既に述べたように、半熔融状態下で変形抵抗が急激に減少する理由としては、液相成分が主として粒界に存在するために、(a)結晶粒界におけるすべり、(b)結晶粒の回転、(c)個々の結晶粒自体の変形、などに対する拘束が緩和されるためと考えられる。一方、固相成分の変形抵抗と液相成分の流動抵抗の間には大きな差があり、また、その差は材質の相連による液相成分の流動抵抗の差に比較すれば相対的に非常に大きいものと考えられる。そこで、各材質について結晶粒の形状や粒度がほぼ等しいかあるいはまた巨視的にみた試験片の寸法に比較

して個々の結晶粒の寸法が十分小さい場合には、更に、試験片の巨視的な変形に含まれる個々の結晶粒の変形量や回転量および結晶粒間のすべり量の割合が同程度であるとすれば、液相成分の存在による変形抵抗の低下の度合いは材質が異なっても同程度に起こり得ることが予想される。このような推論の妥当性を確認するために、液相成分の存在による変形抵抗の低下の度合いを示すパラメータとして無次元化変形抵抗 σ_* （圧縮ひずみ4%の段階における変形抵抗 $(\sigma_t)_{0.04}$ と同じひずみ時の固相線温度 $(\phi=100\%)$ での変形抵抗 $(\sigma_t)_{0.04}$ または外挿法で得た固相成分自体の変形抵抗 $(\sigma_t)_{0.04}$ との比、すなわち、 $\sigma_* = (\sigma_t)_{0.04} / (\sigma_t)_{0.04}^{\phi=100\%}$ （または $\sigma_* = (\sigma_t)_{0.04} / (\sigma_t)_{0.04}^{\phi=100\%}$ ）の概念を導入し、固相率 ϕ と σ_* の関係をプロットした結果を図2-18に示す。図から明らかなように、Al-0.93%Si合金を除く他の合金類については多少のバラツキはあるものの、 ϕ と σ_* の関係はほぼ同一の直線で示されることがわかる。Al-0.93%Si合金のみがこの関係からはずれている理由は、その結晶粒の大きさにあり、上述の液相成分の効果が十分現れ得ないためである。

なお、この図2-18に示す結果を利用し、固相率 ϕ を簡単に求めることのできない実用（多元）合金に対しても便宜的に固相率を推定することができるが、これについては第3章で述べる。

また、図2-60には、図1-11から読み取った各合金の見かけ粘度を常用対数で表し固相率に対しプロットし、無次元化変形抵抗との比較を示す。図から、各直線の傾きを表すB値は概略4~6の範囲にあることがわかる。この数値の意味することはいまだ説明されておらず今後の検討課題である。

（3）ひずみ速度と変形抵抗の関係

図2-19から図2-21は、実用アルミニウム合金A2014・A5056・A7075について、ひずみ速度を $0.2s^{-1}$ から $8s^{-1}$ まで変化させた際の各温度に対する変形抵抗の推移を示す。いずれの合金においても変形抵抗はひずみ速度に依存し、ひずみ速度が $0.2s^{-1}$ から $8s^{-1}$ まで変化した場合、変形抵抗は各温度に対して約2倍程度高くなっていることがわかる。冷間・熱間での圧縮試験においても変形抵抗はひずみ速度に依存することが一般に知られているが、その原因とし、(a)単位時間あたりの転位移動にともなうエネルギーの差によること、(b)回復・再結晶の量の差によること、が指摘されている。半熔融状態における圧縮試験において変形抵抗がひずみ速度に依存する理由としては、(a)ミクロ的にみた固相成分の上記原因の他に、2.3.2項の(1)で考察したように、(b)試験片内部に液相成分を保持する能力に関係していることが考えられる。

（4）試験片寸法（アスペクト比）と変形抵抗の関係

図2-22から図2-24は、実用アルミニウム合金A5056・A6061・A7075について、試験片寸法比（アスペクト比）を0.25から1.5まで変化させた場合の各温度に対する変形抵抗の推移を示す。A5056・A6061において、アスペクト比 (H/D_0) が1.5から1の範囲では、各温度に対して、アスペクト比が圧縮変形抵抗におよぼす影響はほとんどないといえる。アスペクト比が0.5まで小さくなると、いずれの合金においても、アスペクト比が1.5の圧縮変形抵抗と比較し、約1.2倍高い値を示し、アスペクト比がさらに0.25となると、約2倍高い値を示す。このように、アスペクト比の減少にともない変形抵抗が増加する理由としては、2.3.2項の(1)で考察したように、側壁の自由表面の面積と工具の接触面の面積との比の減少にともない試験片内部に液相成分を保持する能力がアスペクト比の小さい方が相対的に高くなり、側壁からの液相成分の流出量が出にくくなるためであると考えられる。

（5）試験片材質と変形抵抗の関係

各種実用アルミニウム合金の半熔融状態下での変形抵抗の特性について、概略以下のことがいえる。（上述に示した以外の実用アルミニウム合金の圧縮変形抵抗 $(\sigma_t)_{0.04}$ と温度との関係を図2-25から図2-56に示す。）

(a)アルミニウム合金展伸材の温度-圧縮変形抵抗 $(\sigma_t)_{0.04}$ の関係

図2-57に示すように、一般的に、半熔融温度範囲内のあるX点において圧縮変形抵抗が急激に低下する。このX点は、試験片材質・ひずみ速度・試験片のアスペクト比の相違により、半熔融温度範囲内で種々変化する。試験片材質についてみると、2000系・4000系・5000系・7000系のアルミニウム合金においては、X点は比較的固相線近いところにあり、1000系・3000系・6000系アルミニウム合金においては、固相線より離れたところにある。このように1000系・3000系・6000系アルミニウム合金において、半熔融状態での圧縮変形抵抗が急激に減少しない理由としては、合金元素の含有率にその原因があると考えられる。すなわち、合金元素の含有率が少ないいわゆる合金化度が小さい合金では、半熔融域に突入しても粒界全周が溶融せず粒界の一部分が溶融するにとどまり、結晶粒どうしが未だ部分的に連結した状態にあるためと推論されるが、これに対しては確認するに至っていない。

また、同一材質でも、ひずみ速度が大きくなるほうが、また試験片のアスペクト比が小さくなるほうが、X点は固相線より離れた位置となる。これは、既述のように試験片内部の液相成分の保持能力と関係し、ひずみ速度が速くなるにした

がい液相成分の流動が束縛されやすく、またアスペクト比が小さいほど、液相成分の試験片の側面（自由面）からの流出が拘束されるためである。

(b) アルミニウム合金鋳物材（AC8A, ADC12）の温度－圧縮変形抵抗の関係

半熔融温度の増加に対して圧縮変形抵抗は単調に減少している。この理由としては、これらの合金はアルミニウムに対し10重量パーセント前後のシリコンを含有したいわゆる共晶点組成に相当し、半熔融温度範囲が狭く純金属のような溶融挙動を呈するためである。

(6) 圧縮試験後の試験片の外観性状ならびに内部組織の検討

図2-58は圧縮変形後の試験片の外観および試験片中央部の内部組織の写真を対応させて示す。既述のように圧縮変形の進行と共に、液相成分が試験片の側壁（自由表面）から流出して凝固し、あわせて側壁部近傍の組織が崩壊する傾向にあるが、各材質とも固相率が低下するとともにこの傾向が助長されることが確認できる。またその崩壊の形態は材質によって異なり、たとえばAl-13.7%Mg合金の場合には、側壁（自由表面）から流出して新たに凝固した部分は直径が1mm前後の球状体が連結した構造となっているのに対して、Cu-35%Zn合金ではそのような崩壊でなく、もとの試験片の周囲に側壁から流出した液相成分が円筒状に密に凝固した構造を呈している。また、Al-5.7%Cu合金などは両者の中間的構造を呈している。この崩壊の形態は、素材内部における液相成分の保持能力と関係があり、前述した応力－ひずみ線図の特性とも対応しているものと考えられる。

次に試験片内部の微視的観察の結果について述べる。結晶粒の大きさが固相率に対する変形抵抗の依存性すなわち無次元化変形抵抗の挙動に影響を及ぼすことは先に述べたとおりであるが、7種類の試験片の観察結果の中で、Al-0.93%Si合金の粒子が非常に大きいことを除いて、他の材質については、多少のバラツキはあるが大体同程度の粒度を有していることがわかる（図2-59参照）。また変形後の組織についてみても、固相率の変化が、結晶粒度にあまり影響を与えないこともわかる。ただし、固相率が50%程度まで低下してくると試験片中心部に鑄造組織が残存している場合がある。

2.4 まとめ

高温顕微鏡による半熔融状態の観察、ならびに半熔融金属の一軸圧縮試験により概略以下の結果を得た

- (a) Al-5.7%Cu合金の固体を半熔融状態にまで加熱した場合、まず始めに内部組織の粒界部から溶融が始まり、昇温とともに溶融部は次第に粒界全体に広がり、さらに結晶内部へと溶融域が進行していく。
- (b) 半熔融状態にある金属材料の内部組織は、微小力によって大きく変化する。特に引張り力に対する結晶粒界部の結合は弱く、数MPa程度の微小力によって簡単に開口分離する。
- (c) 変形抵抗の低下の度合いは、金属の材質・ひずみ速度・試験片寸法（アスペクト比）の相違によって異なる。
- (d) 試験片の内部組織の結晶粒度が同程度の場合には、材質によらず、同量の液相成分の存在による変形抵抗の低下の度合いはほぼ同じである。
- (f) 固相率が高い圧縮試験の場合、圧縮変形後粒に若干の異方性が観察されるが、固相率が低くなるにしたがい異方性は見られない。固相率が50%程度まで低下してくると試験片中心部に鑄造組織が残存してくる。
- (g) 材質の相違により半熔融圧縮試験後の崩壊の様子が異なる。

2. 5 結言

本章では、半熔融加工に関する研究の出発点として、特に高固相率状態での半熔融金属を対象とし、内部組織の直接観察ならびに各種実用合金の変形特性について検討を行った。本研究により概略以下に示す知見ならびに成果が得られた。

(a)高固相率領域での半熔融金属の直接観察例はこれまでなく、溶融がどこから始まり、どのように拡大していくか、また半熔融金属に荷重を付加した場合、結晶粒はどのように変形・分離するかなどに対し必ずしも明らかではなかった。本観察によって半熔融状態が視覚的にとらえられ、第5章以降に示す半熔融加工法の加工特性の解明、特に被加工材の固液両相の変形流動挙動の予測、あるいは今後の研究課題となる有限要素法など各種解析法による半熔融加工シミュレーションのモデルの構築などに対し、有用な情報が得られた。また、さらに半熔融金属の高温顕微鏡による直接観察手法についても示すことができた。

(b)数種類の実用アルミニウム合金ならびに実用銅合金を用い、高固相率状態にある半熔融金属の一軸圧縮変形抵抗におよぼす、温度（固相率）の影響、ひずみ速度の影響、応力とひずみの関係（構成方程式）を明らかにした。研究結果は、今後、有限要素法などの解析法に取り入れられ、半熔融加工法における加工荷重の予測、被加工材の変形挙動の予測、解析結果の検討などにおいて有用な情報源となる。

(c)JIS1000系から7000系まで実用アルミニウム合金36種類の半熔融状態の一軸圧縮変形抵抗におよぼす温度の影響について明らかにした。本研究の結果は、第5章以降に示す半熔融加工法の加工特性の解明、特に加工荷重の予測、積層型複合材料の製造・加工などの問題における素板と積層材との変形抵抗差が製品性状におよぼす影響の把握に役立つ。また、データベースとして、半熔融加工法のみならず溶湯鍛造法や溶融焼結法などに溶融凝固現象を伴う製造法全体に活用できる。

参考文献

- 1)橋爪 伸:変形抵抗について、塑性と加工, 1-5(1960), P403-412.
- 2)橋爪 伸:金属材料の塑性変形抵抗に関する研究, 学位論文, (1961).
- 3)V. de L. Davies: Direct Microscopic Observation of Solidification of Metals, J. Inst. Metals, 93(1963-4), P127.
- 4)鈴木 弘・橋爪 伸・矢吹 豊・市原幸則・中島 聰・検持 治:東京大学生産技術研究所報告, 18-3(1968).
- 5)福岡新五郎・鈴木 弘・木内 学:固液共存状態における金属の変形抵抗, 第23回塑性加工連合講演会講演論文集, (1972-11), P435-438.
- 6)福岡新五郎・新井樽男:固液共存状態の金属の圧縮変形抵抗・第2報, 第25回塑性加工連合講演会講演論文集, (1974-11), P419-422.
- 7)椋山正孝・梅田高照・加藤 寛:Al-Cu合金の固液界面形態および界面前方の溶質分布, 日本金属学会誌, 38-1(1974), P1-7.
- 8)椋山正孝・梅田高照・加藤 寛:Al-Cu合金における急冷効果と固液界面での溶質分布, 日本金属学会誌, 38-2(1974), P154-155.
- 9)S. Fukuoka and M. Kiuchi: A Study on Plastic Working of Alloys in Their Mushy State, Proceeding of the 15th International Machine Tool Design and Research Conference, (1975), P423-429.
- 10)木内 学・福岡新五郎:半熔融金属(合金)の変形挙動, 日本金属学会会報, 14-6(1975), P441-448.
- 11)西田:融点近傍での金属(99.99%A1, ADC-12)の強度に関する研究, 学位論文, (1975).
- 12)坪田 治・江見俊彦:固液共存域の直接観察によるFe-30%Cu合金のデンドライト組織粗大化の研究, 日本金属学会誌, 42-6(1978), P612-617.
- 13)木内 学・福岡新五郎・新井樽男:固液共存状態における金属(合金)の変形抵抗, 塑性と加工, 17-186(1976-7), P596-602.
- 14)木内 学・杉山澄雄・新井樽男:7%合金および銅合金の半熔融変形抵抗・変形挙動に関する検討(半熔融加工に関する実験的研究I), 塑性と加工, 20-223(1979-8), P762-769.
- 15)浅沼 裕・吉川昌範・西本 廉:鉄合金の高温における変形抵抗, 昭和56年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1981-5), P583-586.
- 16)Sherif D. El Wakil: A Model Study of Metal Forming in the Mushy State, Advanced Technology of Plasticity, (1984), P45-49.
- 17)(財)素形材センター:凝固過程における半熔融金属の変形抵抗に関する調査報告書,

(1986-6), P1-176.

18) (財) 素形材センター: 凝固過程における半熔融金属の基本的変形特性に関する調査報告書, (1987-7), P1-232.

19) 豊島史郎・高橋洋一: 半熔融状態における加工の数値シミュレーション, 第40回塑性加工連合講演会講演論文集, (1989-10), P635-638.

20) 鈴木俊夫・梅田高照・申 健: 炭素鋼の固液共存域における強度, 第8回半熔融・半凝固加工分科会資料, (1990-12).

21) 森高 満・新谷定彦・八幡誠朗・吉田千里・難波明彦: 固液共存域におけるレキスト材の変形挙動, 平成3年塑性加工春季講演会講演論文集, (1991-5), P9-12.

22) 木内 学・柳本 潤・森本庸介: 半熔融金属の変形解析技術の検討(1), 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, (1991-9), P643-646.

23) 木内 学・柳本 潤・森本庸介: 半熔融金属の変形解析技術の検討(2), 平成4年塑性加工春季講演会講演論文集, (1992-5), P299-302.

24) 豊島史郎: 半熔融状態における加工の数値シミュレーション(圧縮変形における加工速度と液相の偏析について), 第43回塑性加工連合講演会講演論文集, (1992-10), P337-340.

25) Paul Wisniewski: Microstructural Characterization of Interdendritic Liquid Channels, Materials Science and Engineering, A165(1993), P45-49.

26) Q. Z. Diao and H. L. Tsai: Modeling of Solute Redistribution in the Mushy Zone during Solidification of Aluminum-Copper Alloys, Metallurgical Transactions A, 24A(1993-4), P963-973.

27) 木内 学・柳本 潤・福島傑浩: 半熔融金属の変形挙動の数値シミュレーション, 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994-5), P447-450.

28) 木内 学・杉山澄雄・田辺明三: 高温顕微鏡による合金材料の半熔融状態の観察, 平成7年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1995-5), P115-116.

29) 木内 学・柳本潤・杉山澄雄・田辺明三: 高温顕微鏡による合金素材の半熔融状態の観察2, 第46回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995-9), P363-364.

30) 佐藤 彰: 半熔融・半凝固金属材料に関する金属学的考察, 第165回塑性加工シンポジウム, (1995-9), P23-33.

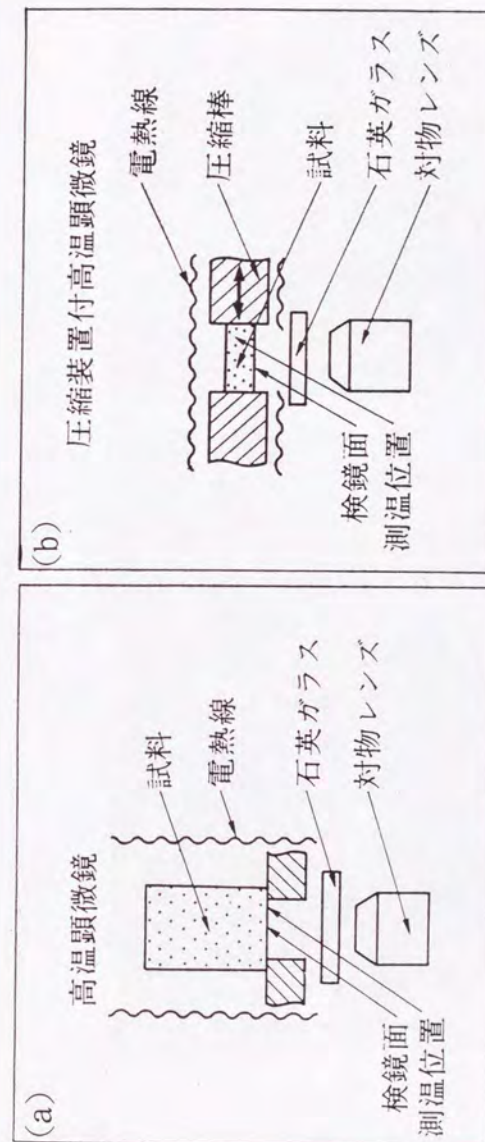


図2-1 高温顕微鏡による半熔融状態の観察

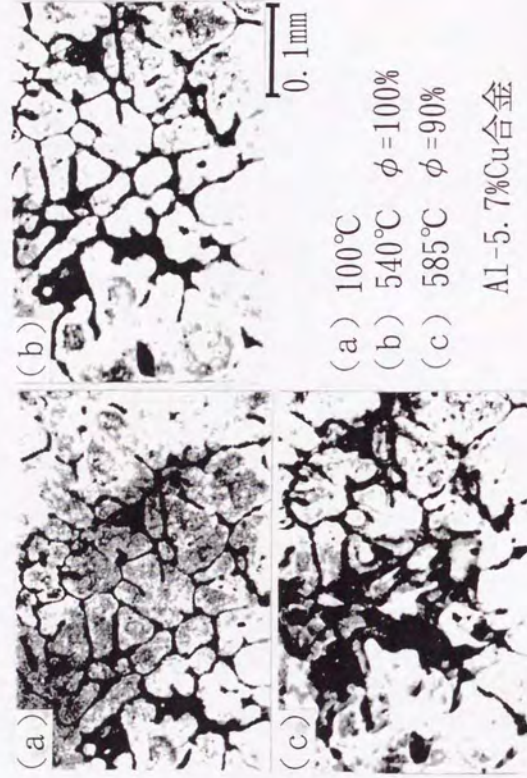
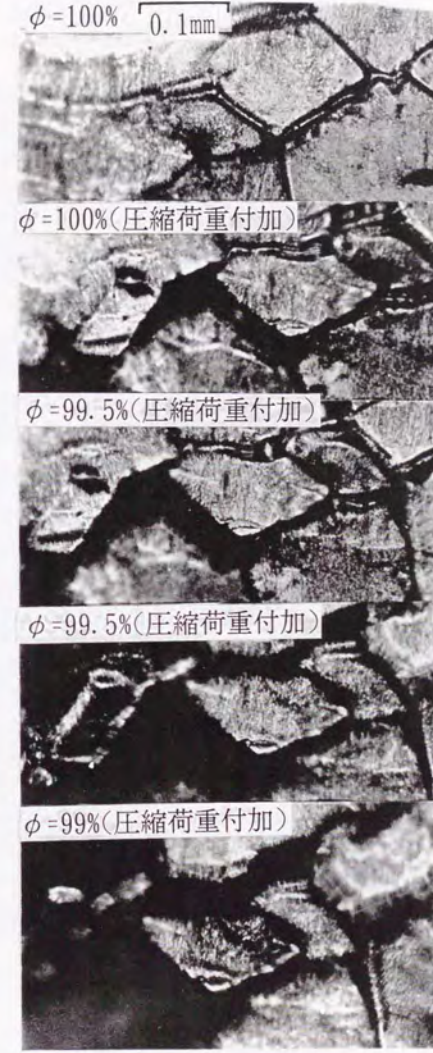


図2-2 熱間状態から半溶融状態に至る間の内部組織の変化



Al-5.7%Cu合金

図2-3 半溶融状態にある金属試料に圧縮荷重を付加した際の内部組織の変化(1)

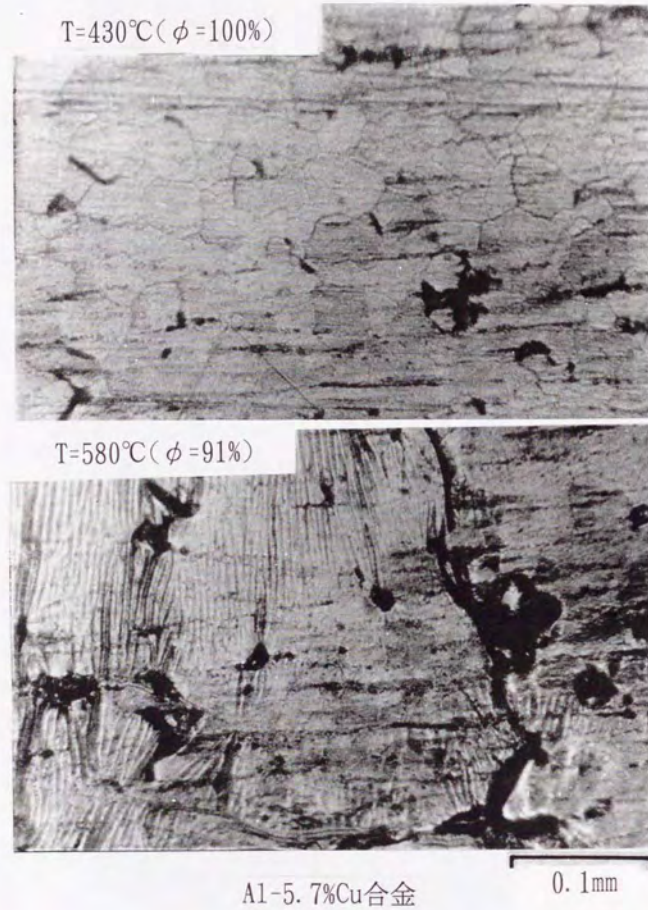


図2-4 半溶融状態にある金属試料に
圧縮荷重を付加した際の内部
組織の変化(2)

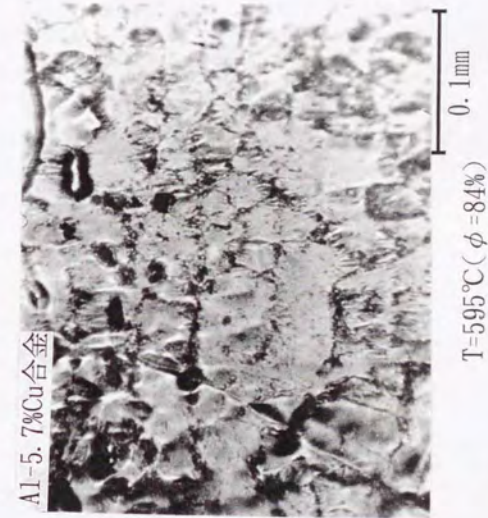


図2-5 半溶融状態にある金属試料に
圧縮荷重を付加した際の内部
組織の変化(3)

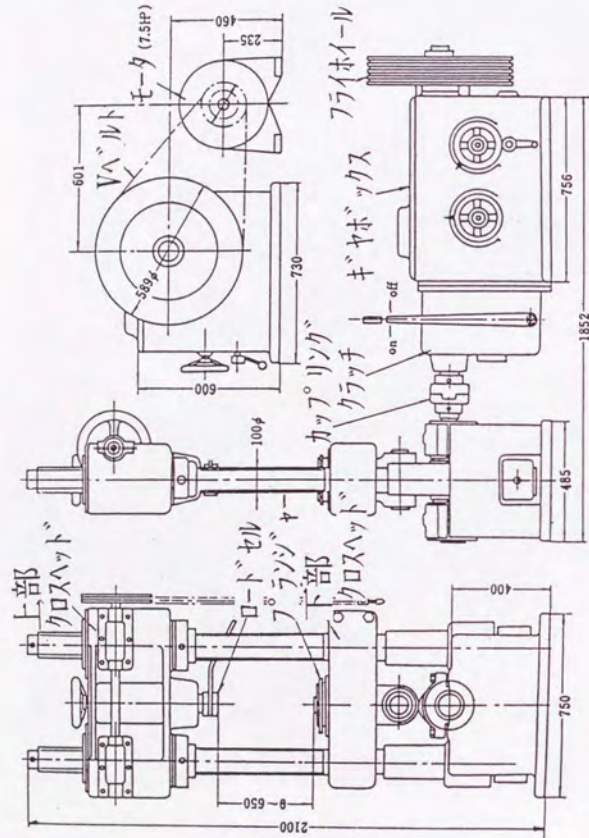


図 2-6 カムプラストメータの概略図

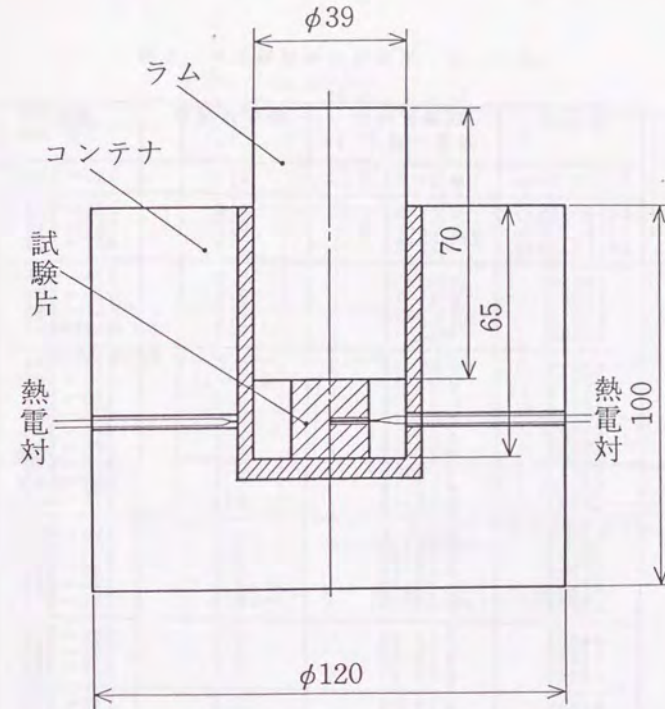


図 2-7 サブプレスの概略図

表 2-1 半溶融圧縮試験に用いた機器

		名 称	型 式	メーカ
セ ン サ ー	変位検出部	セ ン サ ー	NP-250	新日本測器 (EMIC)
		トランスデューサユニット	503-F ₂ -4	
		直 流 安 定 化 電 源	PS-503	
	荷重検出部	ロ ー ド セ ル	2ton, 10ton	自 家 製
		ス ト レ イ ン ア ンプ	3126	横河北辰電機 (YEW)
データの演算処理・格納		①アナライジングレコーダ	3655	横河北辰電機
		②パーソナルコンピュータ	PC-9801vm	日 本 電 気 (NEC)
		③インターフェイス	GP-1B	日 本 電 気
記録		①アナライジングレコーダ	3655	横河北辰電機
		②プ リ ン タ ー	PC-PR201	日 本 電 気
その他		①マイクロメーター	NO. 102-230	三 豊
		②デジタルマルチメータ	TR6824	Takeda Riken (TR)

表 2-2 半溶融圧縮試験条件一覧表

合金名	試験片寸法 直径-高さ mm	ひずみ速度 s ⁻¹	温度 ℃
Pb-19.2%Sn	φ 26-23.5	0.2	185~230
Al-0.92%Si	φ 23-23	0.2	535~643
Al-5.7%Cu	φ 26-23.5	0.2	545~619
Al-13.7%Mg	φ 23-23	0.2	457~537
A1050	φ 12-18	0.5	514~655
A1051	φ 12-18	0.5	540~650
A1070	φ 12-18	0.5	551~663
A1080	φ 12-18	0.5	419~662
A2011	φ 12-18	0.5	483~585
A2014	φ 12-18	0.2~10	475~523
A2017	5-5-H10	0.3	440~587
A2018	φ 12-18	0.5	474~620
A2024	φ 12-18	0.5	546~593
A2025	φ 12-18	0.5	475~600
A2117	φ 12-18	0.5	475~632
A2218	φ 12-18	0.5	463~599
A2N01	φ 12-18	0.5	473~605
A3003	φ 12-18	0.5	550~662
A3004	φ 12-18	0.5	607~643
A3204	φ 12-18	0.5	584~645
A3205	φ 12-18	0.5	565~660
A3304	φ 12-18	0.5	581~665
A4004	φ 12-18	0.5	505~570
A4043	φ 12-18	0.5	490~592
A4343	φ 12-18	0.5	530~586
A5005	φ 12-18	0.5	540~658
A5052	5-5-H10	0.3	494~620
A5056	φ 12-18	0.2~10	513~595
	φ 12-12	0.5	523~596
	φ 12-6	0.5	521~617
	φ 12-3	0.5	531~617
A5083	φ 12-18	0.5	550~605
A5086	φ 12-18	0.5	562~609
A5182	φ 12-18	0.5	552~599
A5282	φ 12-18	0.5	546~595
A5952	φ 12-18	0.5	537~628
A5N02	φ 12-18	0.5	532~620
A6061	φ 12-18	0.5	516~621
	φ 12-12	0.5	475~627
	φ 12-6	0.5	535~647
A6063	φ 12-18	0.5	560~652
A7003	φ 12-18	0.5	553~637
A7075	φ 26-23.5	0.2	487~590
	φ 12-18	0.2~10	436~563
	φ 12-12	0.5	464~545
	φ 12-6	0.9	465~564
ADC12	φ 12-18	0.5	469~578
AC8A	φ 12-18	0.5	500~560
Cu-35%Zn	φ 24-23.5	0.2	800~903
	φ 26-23.5	0.2	846~906
C3602BD	φ 24-18	0.2	886~905
C3604BD	φ 26-26	0.2	623~879
	φ 26-26	0.2	646~874

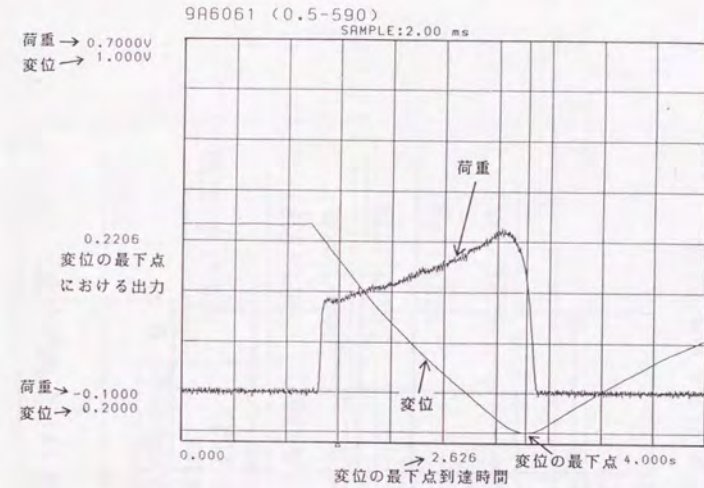


図 2-8 荷重と変位の関係

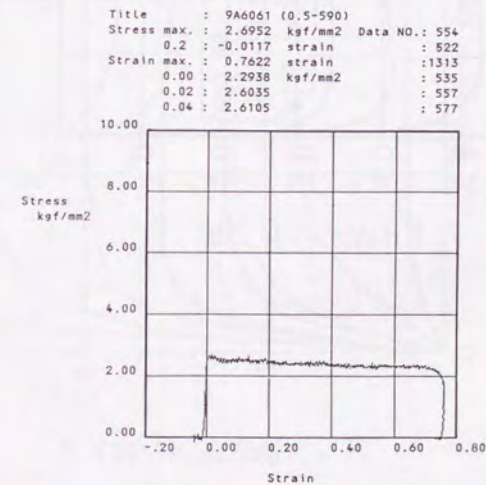


図 2-9 真応力-対数ひずみ線図

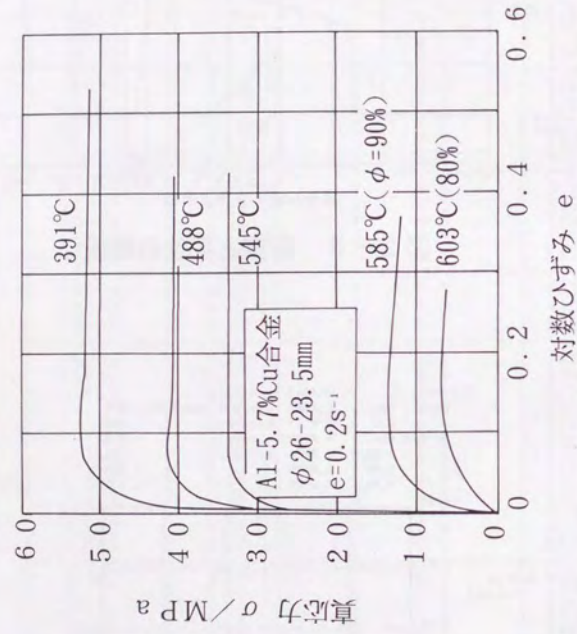


図 2-10 真応力-対数ひずみ線図 (Al-5.7%Cu合金)

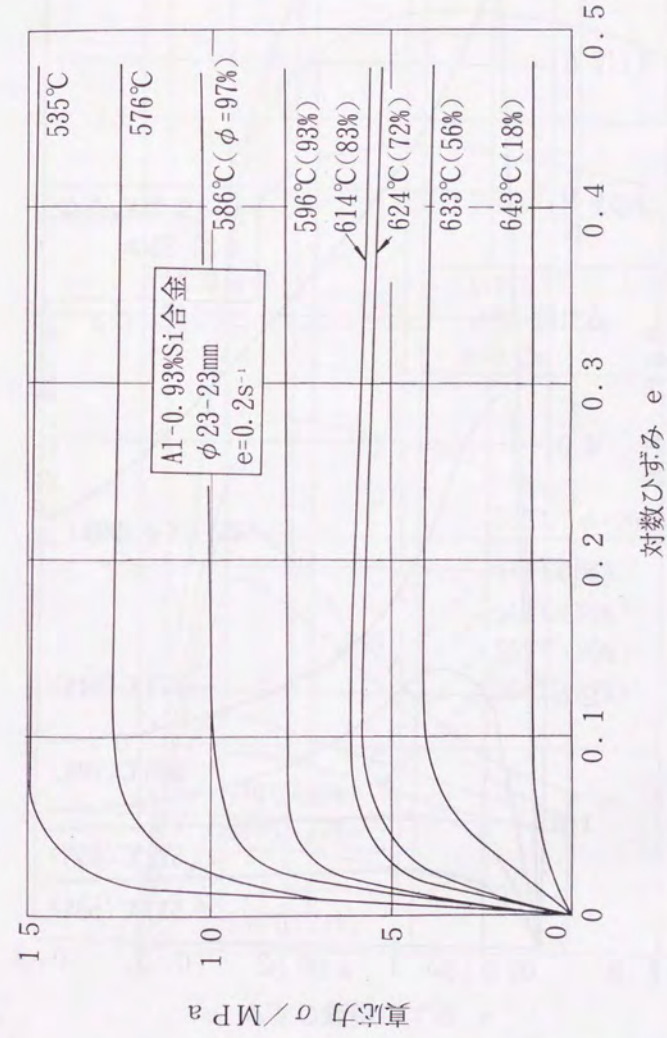


図 2-11 真応力-対数ひずみ線図 (Al-0.93%Si合金)

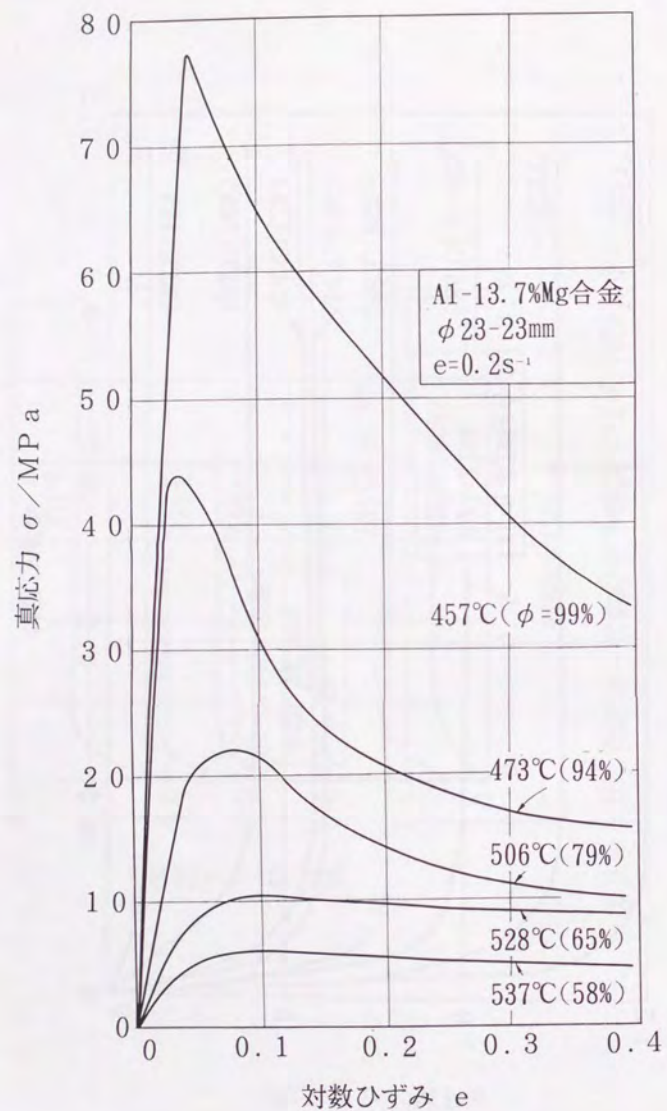


図 2-12 真応力-対数ひずみ線図 (Al-13.7%Mg合金)

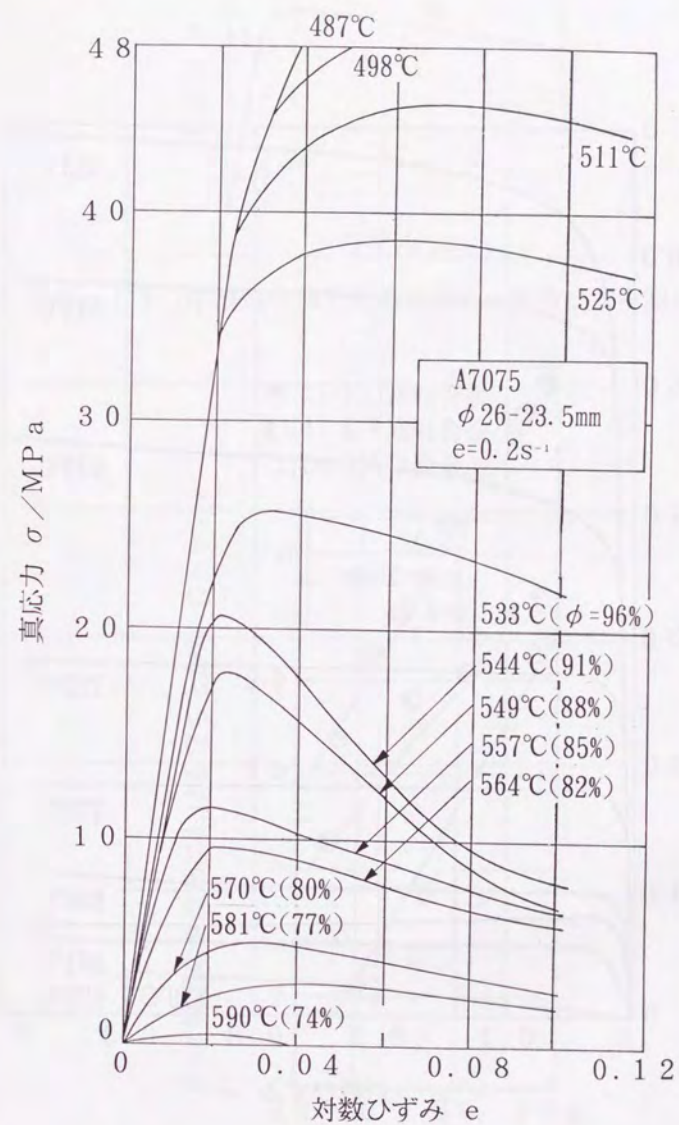


図 2-13 真応力-対数ひずみ線図 (A7075)

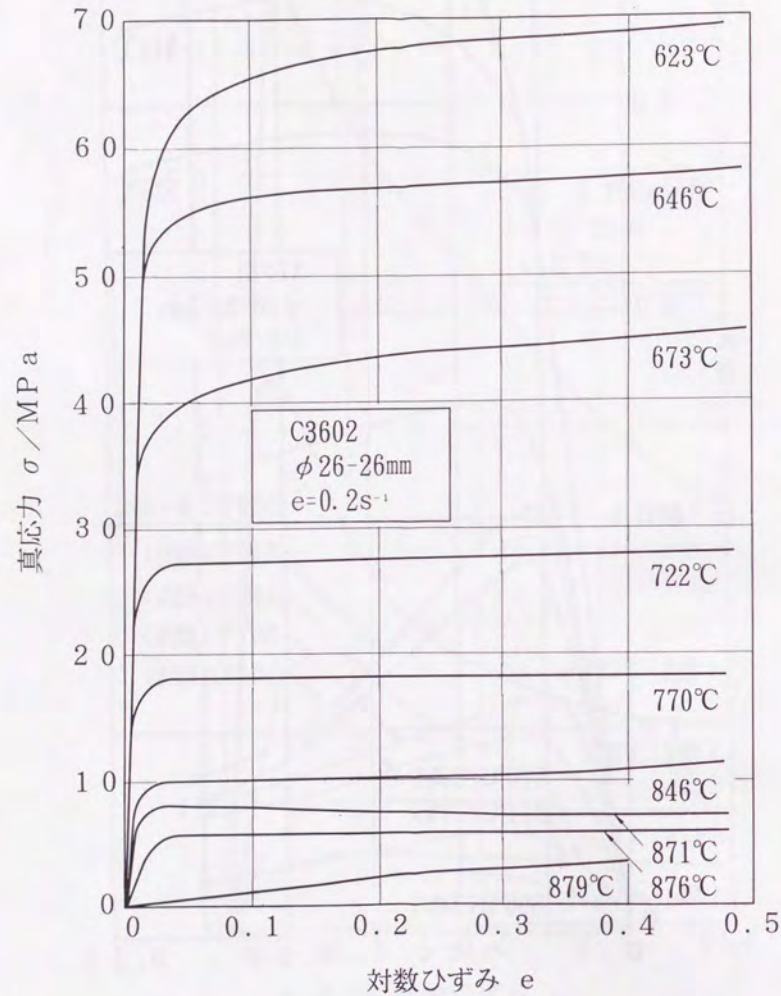


図 2-14 真応力-対数ひずみ線図 (C3602)

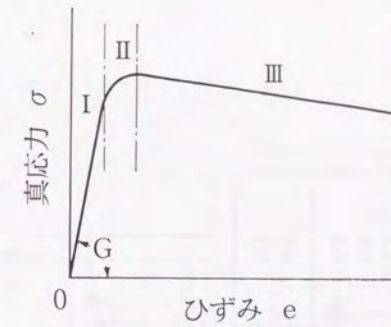


図 2-15 半熔融状態下での真応力-対数ひずみ線図の形

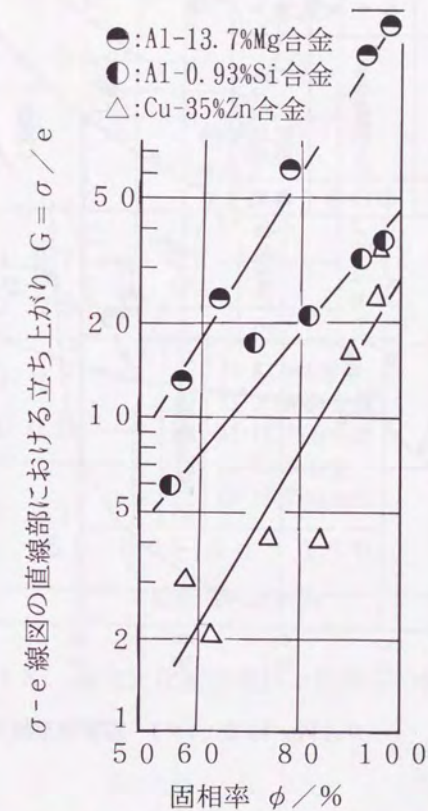


図 2-16 変形初期段階での真応力-対数ひずみ線図の立ち上がり勾配と固相率との関係

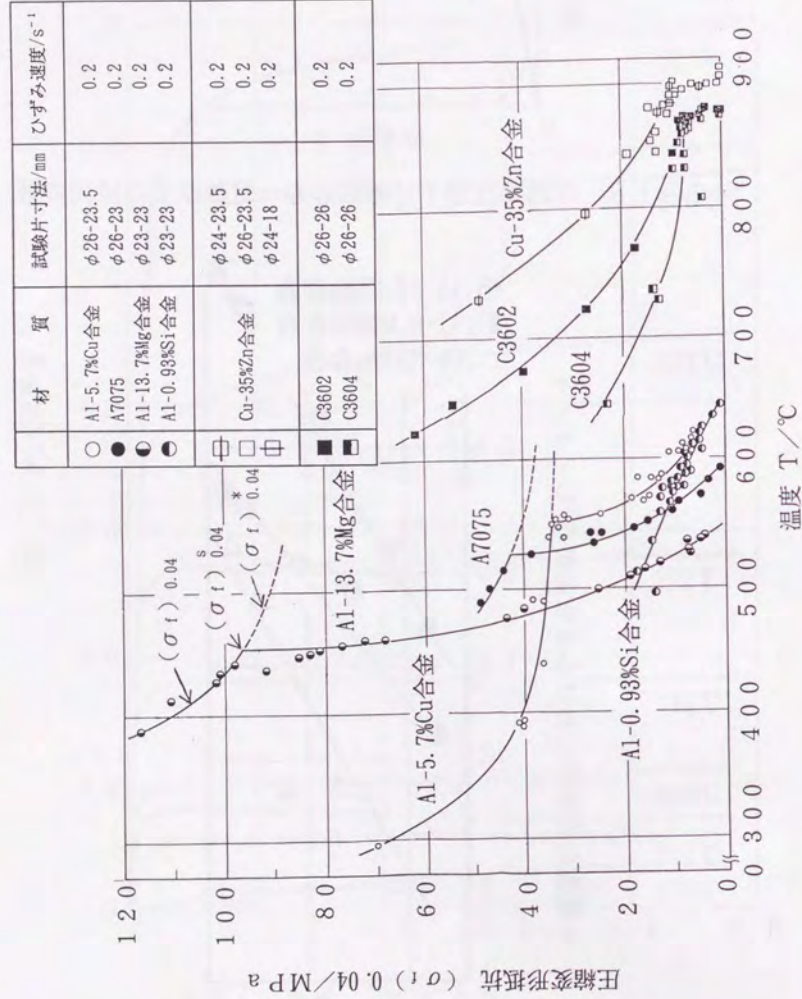


図2-17 圧縮変形抵抗と温度の関係

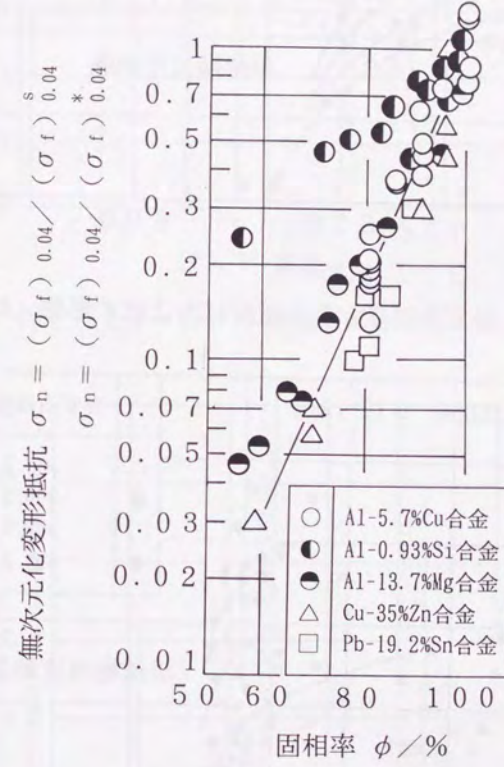


図2-18 無次元化変形抵抗と固相率の関係

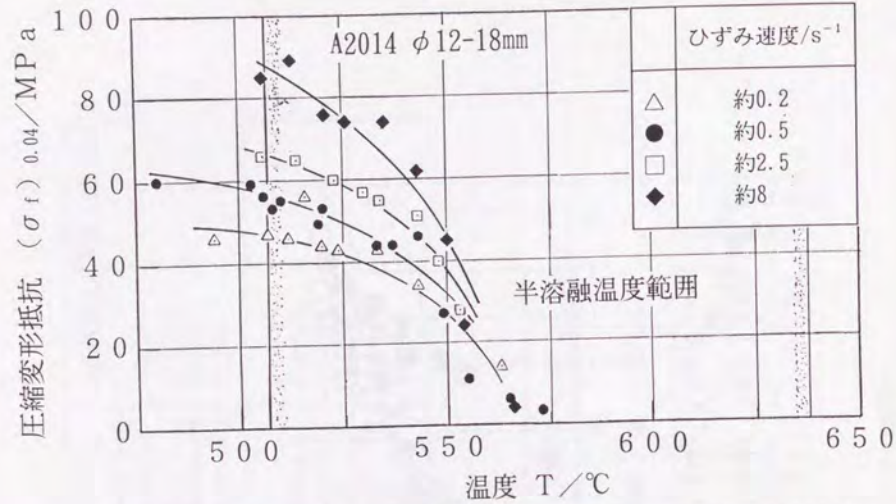


図 2-19 ひずみ速度が変形抵抗におよぼす影響 (A2014)

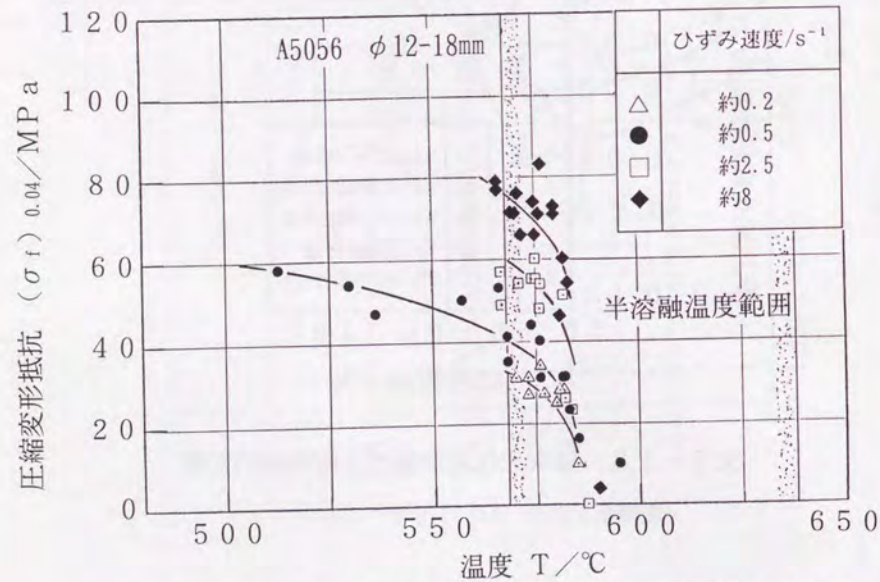


図 2-20 ひずみ速度が変形抵抗におよぼす影響 (A5056)

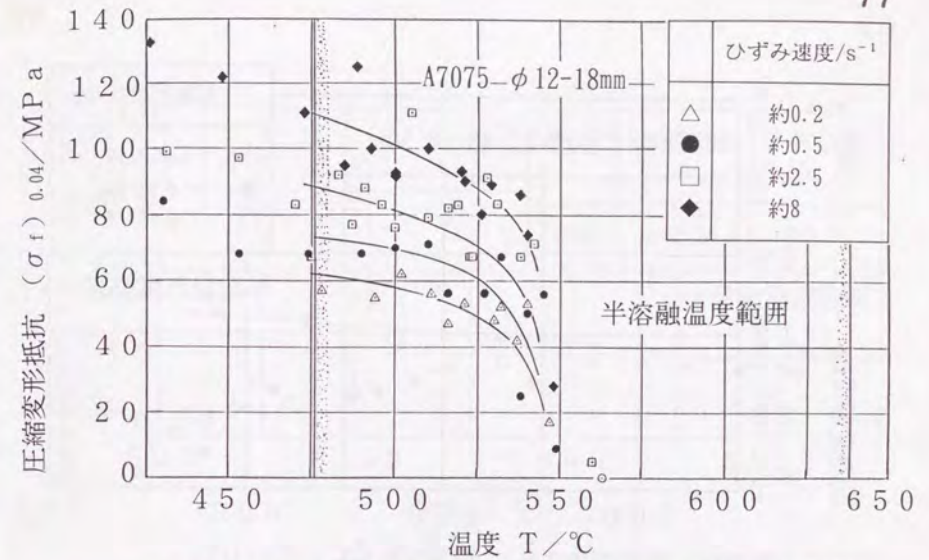


図 2-21 ひずみ速度が変形抵抗におよぼす影響 (A7075)

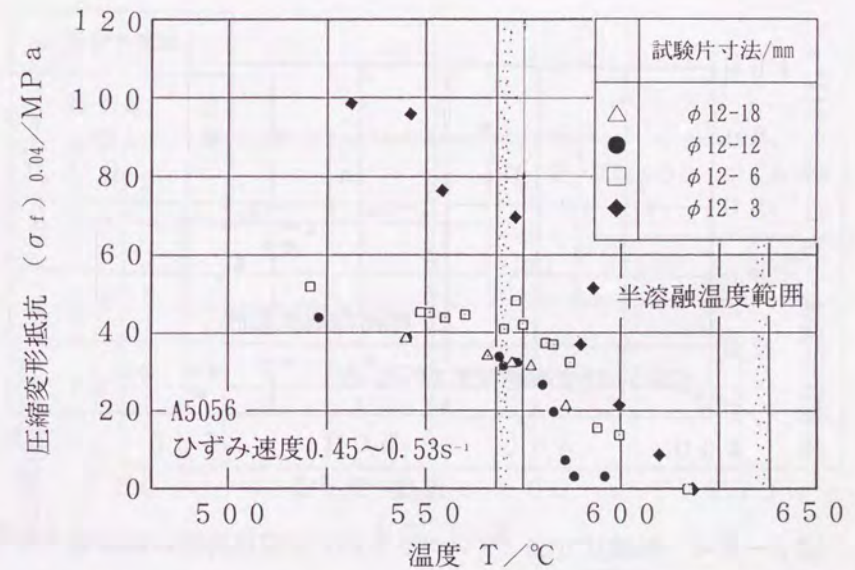


図 2-22 試験片寸法 (アスペクト比) が変形抵抗におよぼす影響 (A5056)

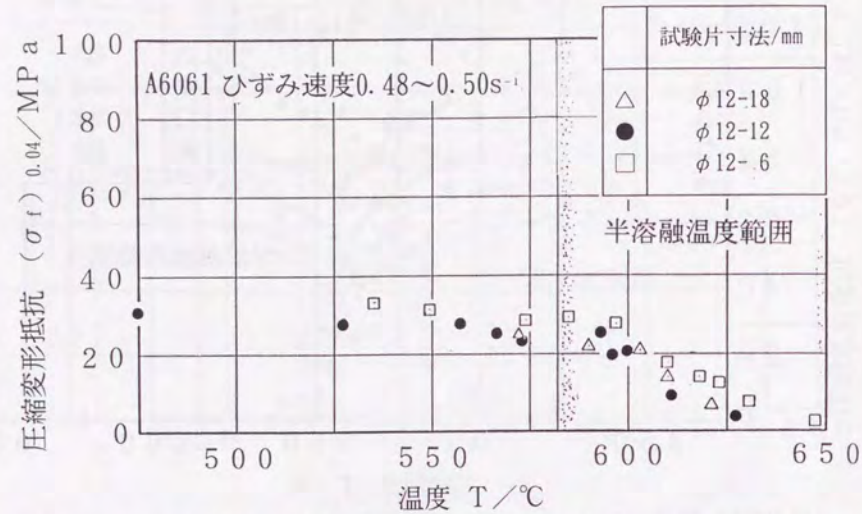


図2-23 試験片寸法（アスペクト比）が変形抵抗におよぼす影響（A6061）

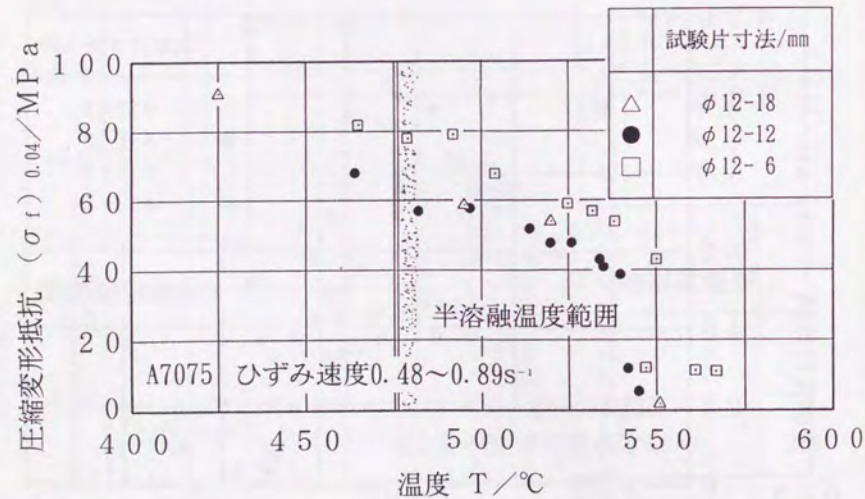


図2-24 試験片寸法（アスペクト比）が変形抵抗におよぼす影響（A7075）

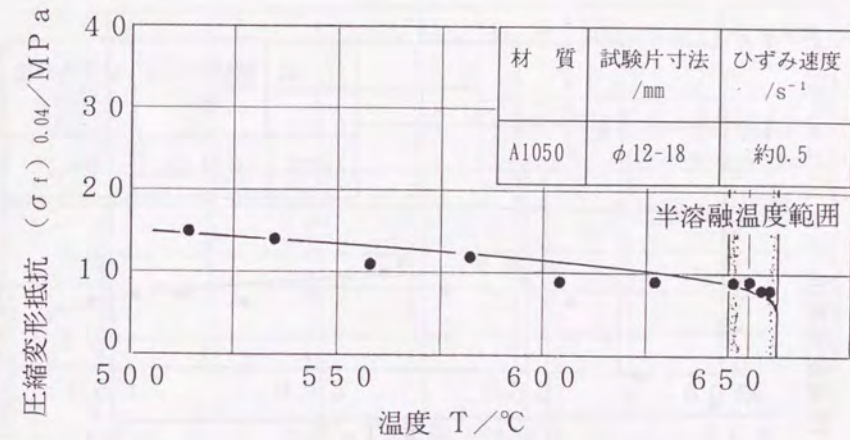


図2-25 圧縮変形抵抗と温度の関係（A1050）

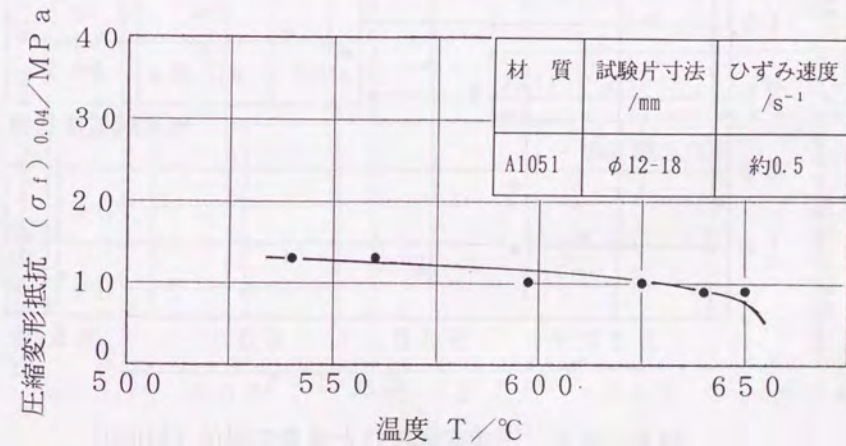


図2-26 圧縮変形抵抗と温度の関係（A1051）

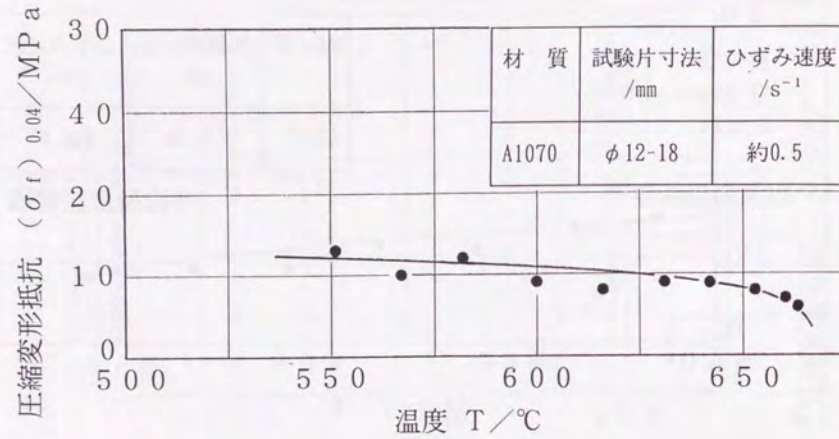


図 2-27 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A1070)

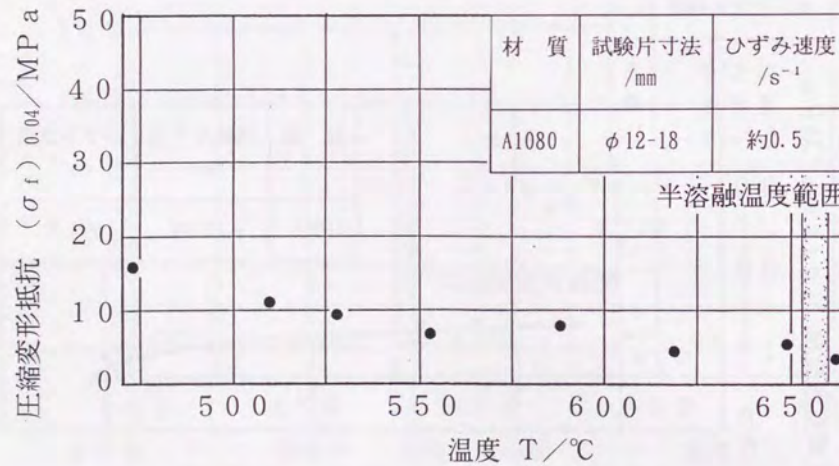


図 2-28 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A1080)

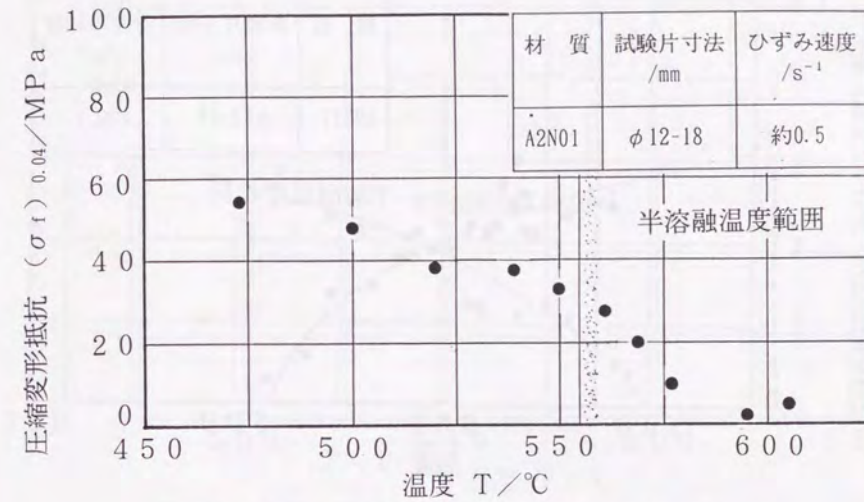


図 2-29 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2N01)

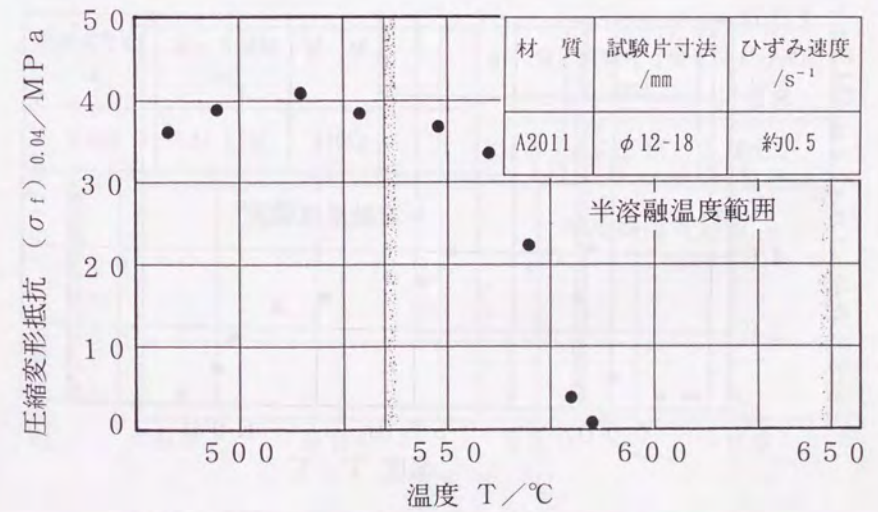


図 2-30 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2011)

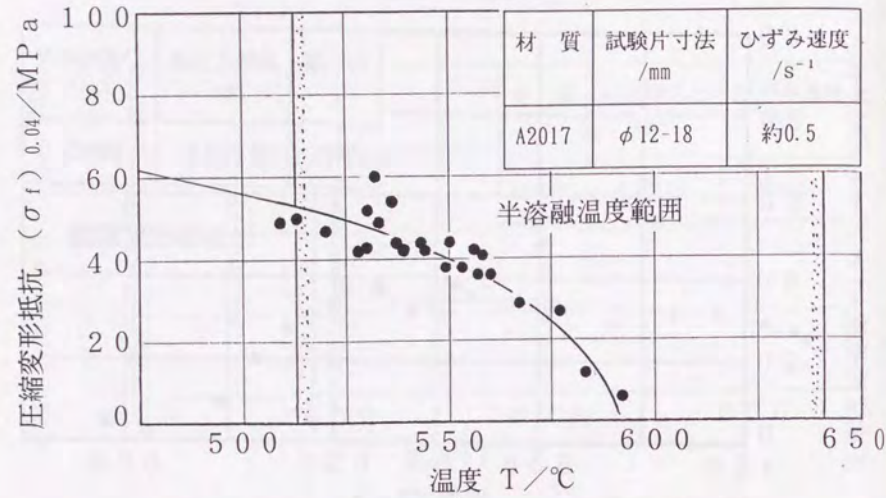


図 2-3 1 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2017)

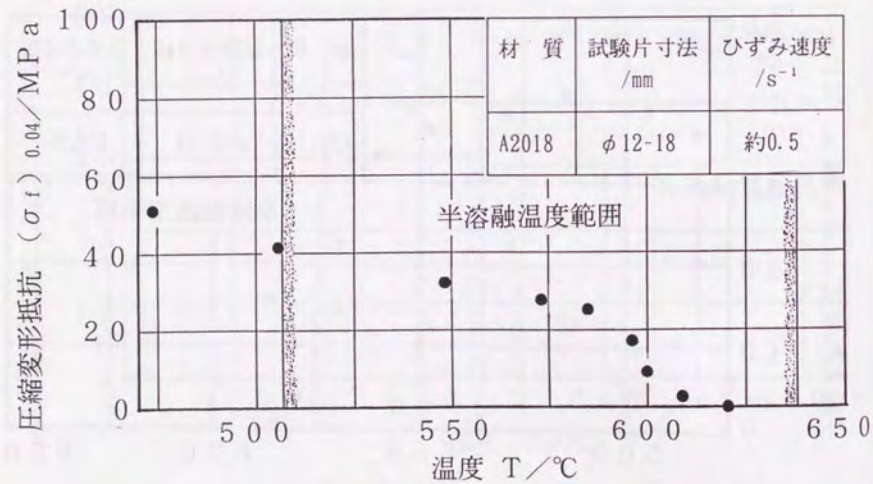


図 2-3 2 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2018)

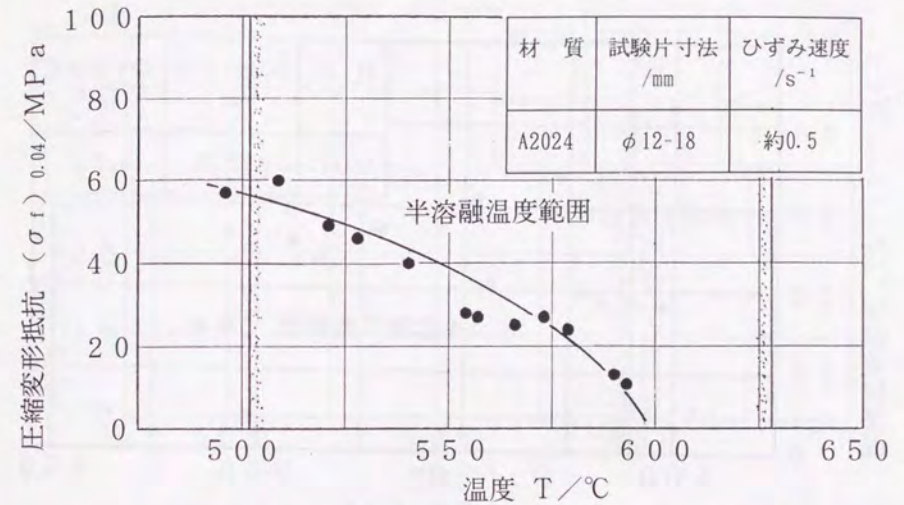


図 2-3 3 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2024)

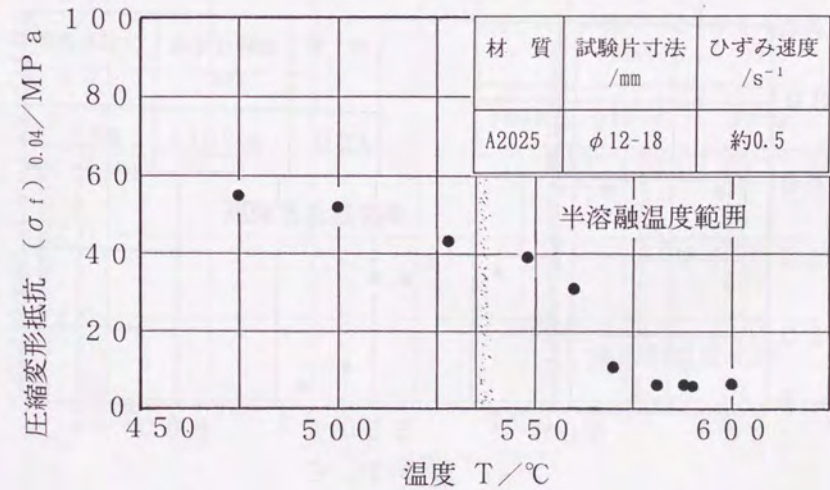


図 2-3 4 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2025)

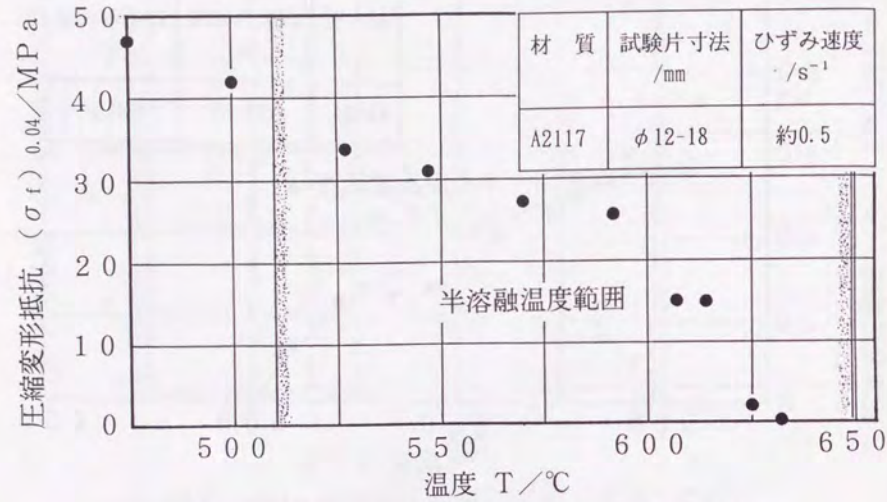


図 2-35 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2117)

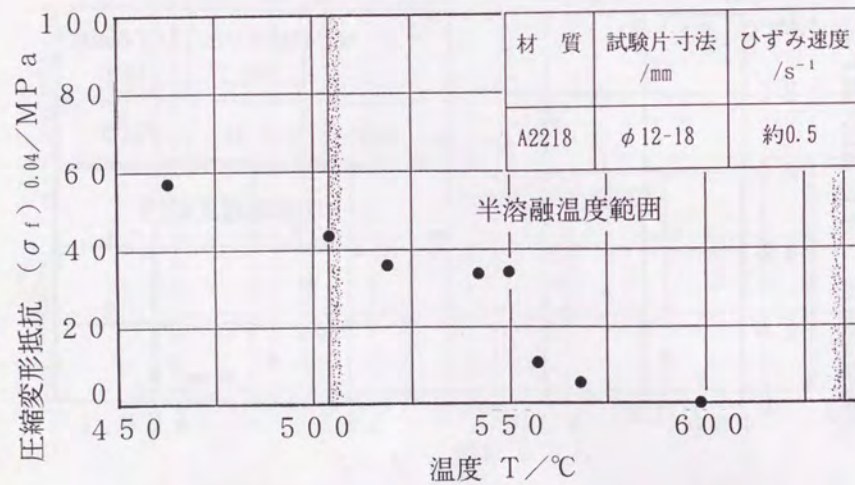


図 2-36 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A2218)

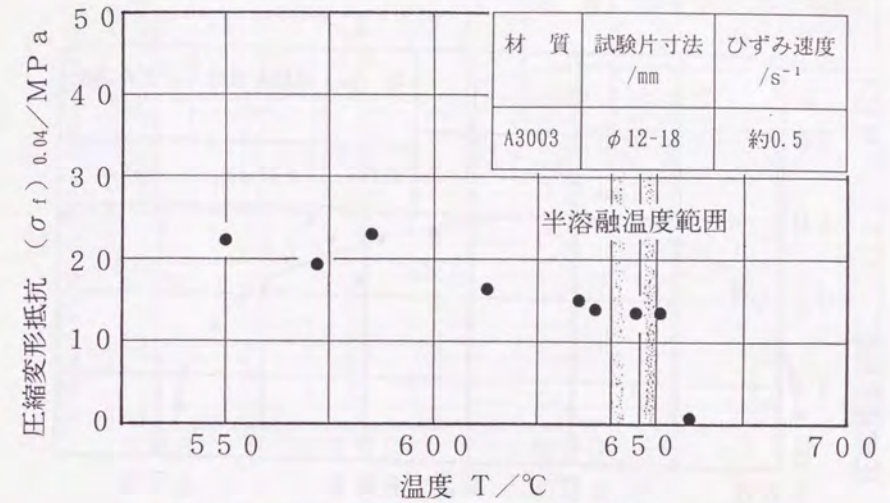


図 2-37 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A3003)

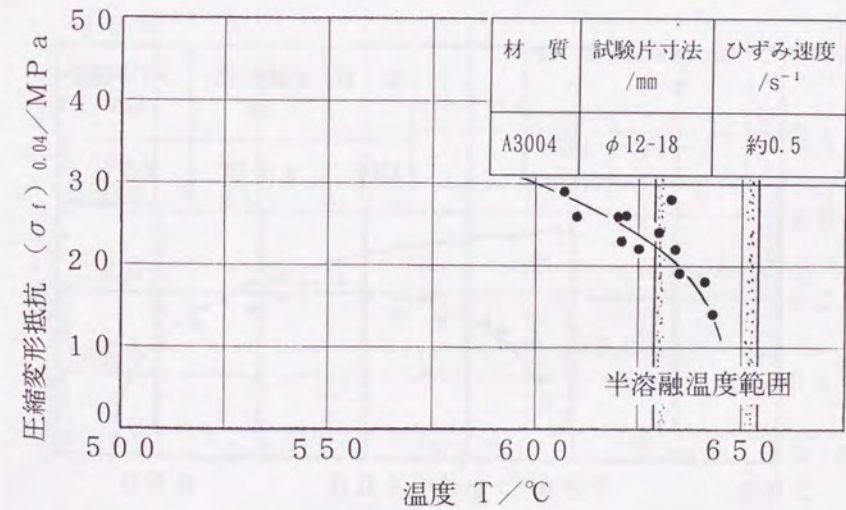


図 2-38 圧縮変形抵抗と温度の関係 (A3004)