

- (b)また、内部組織観察や板製品の曲げ特性の調査を通して、以下の結果を得た。
- ①半溶融加工工程は、強化粒子を含む粒子相互の良好な接合を達成するうえで有効であり、半溶融加工を経た板材は、それを経ないものより曲げ性が向上する。
 - ②複合板材製造における圧延過程においては、強化粒子がマトリックス粉末の展伸変形の障害となり、強化粒子が大きくまた含有率が高いほどマトリックス粉末は湾曲し、不均一な展伸状態となる。強化粒子が細かく含有率が低いほど均一な繊維状組織が発達しやすい。
 - ③圧延によりマトリックス粉末の繊維状組織が発達するほど、得られる複合材の曲げ性は向上する。
 - ④圧延条件が適切でないと、強化粒子とマトリックス粉末の界面に空隙・剥離・亀裂等が発生し、曲げ性が劣化する場合がある。
 - ⑤表8-5に、製品として得られる複合板材の硬さおよび曲げ性を向上あるいは劣化させる要因をまとめて示した。
- (c)本製造法の結果は、他のアルミニウム合金粉末あるいはそれらの混合粉末を金属マトリックス材とし、アルミナ粒子以外の他の各種セラミックス粒子やセラミックス繊維を強化材として用いる複合板材の製造についても同様に適用できると考えられる。

8.4 めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の製造と加工

6) 8) 10) 14) 17)

8.4.1 はじめに

近年、めっき鋼板の分野においては、多品種・連続(大量)かつ高品質製造技術が発達し、めっき層と鋼板との密着性に優れた種々の製品が安価に供給されるようになってきた。本節では、これらめっき鋼板を利用し、半溶融圧接法と冷間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、種々の複合鋼板の製造を行った。すなわち、(a)めっき鋼板の表層部を改質する表層改質型複合鋼板、(b)めっき鋼板上に金属粉末を積層させる粉末積層型複合鋼板、(c)めっき鋼板どうしを合わせる合わせ板型複合鋼板、(d)めっき鋼板とめっき鋼板の間に金属粉末、または、金属粉末とセラミックス粒子や黒鉛粒子などの混合粉を積層させるサンドイッチ型複合鋼板、の製造を行い、製造条件と製品の内部組織・曲げ加工性・制振性などの諸特性について検討した結果を示す。

8.4.2 製造・加工法の概要

めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工法の概要を図8-33に示す。複合形態により、タイプ1からタイプ4まで4通りに分ける。それぞれの製造法の概要を以下に示す。

タイプ1は、めっき鋼板を単独で用い、加熱工程において、めっき金属の一部あるいは全部を半溶融状態あるいは溶融状態にし、めっき金属と素板金属を積極的に反応相に変換し、その後冷間圧延する方法である。すなわち、大気中で加熱を行うと反応相は酸素と結合しセラミックス化し、セラミックス化した反応相は硬くて脆い性質と一般にはなるが、この反応相を圧延ロールにて粉碎し同時にめっき鋼板の素板に埋め込む方法である。これにより、めっき鋼板の素板の表面に破碎されたセラミックス粒子が埋没し、表面硬化型・耐摩耗性型・耐熱強度型の表面処理複合鋼板の製造が可能となる。

タイプ2は、めっき相の上に、めっき金属と同一組成の金属粉末あるいはめっき金属となじみやすい金属粉末を敷き詰め、当該粉末ならびにめっき金属が半溶融状態になる温度まで加熱し、半溶融圧接後冷間圧延する方法である。従来のめっき工程ではめっき相(第2層)の厚みを厚くすることは困難であるが、本製造法により、めっき相の厚みを任意の厚さにすることができ、かつ素板(第1層)との接合性の良い積層型複合鋼板の製造が可能となる。

タイプ3は、2枚以上のめっき鋼板を重ね合わせ、めっき金属が半溶融状態となる温度で圧接し、その後冷間圧延する方法である。めっき金属が接着材(ロウ

材)の役目を果し、鋼板どうしが数層に重なり合った合せ板型複合鋼板の製造が可能となる。

タイプ4は、めっき鋼板とめっき鋼板の間に、金属粉末・強化粒子・強化繊維あるいは金属粉末と強化粒子との混合粉末を挟み、当該粉末あるいはめっき金属を半溶融状態に加熱し圧接後冷間圧延する方法である。これにより、中間に挟む材料の機能・特性により、遮蔽性や制振性などに優れたサンドイッチ型複合鋼板の製造が可能となる。本製造法は、積層・加熱・圧接・圧延の一連の工程から構成される。このタイプ4について各製造工程の概要を以下に示す。

素板としては各種めっき鋼板を用い、芯(中間)材としては、製品の用途に合わせ、めっき金属と同一組成あるいはなじみやすい金属粉末を主体に、単一あるいは複数種類の金属の混合粉末(各種セラミック粉末や黒鉛粒子などの強化粒子を含む場合もある)を用いる。図8-34(a)は、芯材に金属粉末を用いた例を、図(b)は、金属粉末と黒鉛粒子の混合粉を用いた例を模式的に示してある。

積層工程において、使用粉末の大きさ(直径)の数倍程度の厚みに薄く積層させるには、素板上に粉末を単に振り落とす方法でよい。芯材を厚く、しかも一定厚さに積層させるには、素板端部からの芯材粉末の脱落を防止するために、適当な型や溝型ロールを用いたり、素板表面に溝を付けるなどの工夫が必要となる。実験では、図8-35に示す圧接用密閉金型内において、芯材の粉末の積層を行った。

加熱工程では、めっき金属と芯材の材質の違いから、めっき金属と芯材が熱間状態にあるか半溶融状態にあるかにより表8-6に示す3通り組み合わせがある。また、めっき金属と芯材の接触部においては、加熱に伴う拡散反応により合金化が進み、両金属の凝固開始点より低い温度で合金化した部分が先に溶融し始めることに注意を要する。

次に、圧接工程では、(a)めっき金属と芯材との接合を達成すること、(b)芯材の金属粉末どうしの接合を達成すること、(c)液相成分により芯材の空隙を埋めること、が要求される。

更に、圧延工程では、素板と芯材の塑性変形によって芯材の内部組織の緻密化をはかりると同時に所定の寸法に仕上げることを目的としている。

タイプ2からタイプ4までの実験は、圧接工程と圧延工程は分けて行ったが、圧延工程での製造条件(圧延温度・圧下率・圧延速度・ロール径比・ロール温度・潤滑など)が整えば、圧接工程と圧延工程とは分ける必要はない。

8.4.3 実験方法および実験条件

めっき鋼板の種類ならびに寸法を表8-7に示す。亜鉛めっき鋼板・アルミニ

ウムめっき鋼板・(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板はいずれも連続溶融めっき法により製造された市販品であり、銅めっき鋼板は電気めっき法により製造された提供品である。各めっき鋼板は、表面を#100の研磨紙で磨いた後エチルアルコールで脱脂してある。タイプ2とタイプ4では、各めっき鋼板に対し亜鉛粉末(#200)を相手材として用いた。各粉末は市販のものをそのまま用い、特別な表面処理は施していない。実験は、加熱・圧接・圧延の各工程とも大気中で行った。タイプ2・タイプ3・タイプ4の加熱は、幅40mm・長さ80mm・厚さ20mmの寸法を持つ2枚の鋼製ブロック間に試料を挟み、これを高周波誘導加熱炉内に置き行う。圧接は、鋼製ブロックを直ちに加熱炉から取り出し、プレス装置にセットして行う。ただし加圧力を2分間保持する。圧延はいずれの場合も冷間で行った。加熱・圧接・圧延の温度と時間の一連の関係を図8-36に示す。その他、冷間圧延後の製品に対し2~3の熱処理を行い、熱処理条件が製品の特性(内部組織・制振性・曲げ性)に与える影響についても検討した。

8.4.4 実験結果および考察

タイプ1からタイプ4まで分類別に、製品の製造条件と内部組織ならびに機械的特性について検討した結果を以下に示す。

(1) 表面処理型製品の内部組織

通常、溶融めっき鋼板のめっき相には、数相のFe合金相が形成され、その合金相は硬くてもろい性質がある。図8-37に、亜鉛めっき鋼板を用いた場合の加熱条件および圧下率が製品の内部組織におよぼす影響を示す。上側には熱処理後の製品の内部組織を示し、下側には総圧下率約50%で冷間圧延した後の内部組織を対比して示す。図中、Fe-Znの各合金相名を文献を参考に明記する。加熱温度400℃・保持時間30分の条件では、めっき相全体の厚み(約50μm)に対し相ならびに拡散相の占める割合が高い。加熱温度600℃・保持時間30分の条件では、一部に相が残るものの、δ相の占める割合が高くなっていく。加熱温度800℃・保持時間30分の条件では、δ相またはΓ合金相が酸化したと思われる層が板表面層部を被う。この熱処理した製品に対し冷間圧延(総圧下率約50%)を行うと、いずれの場合も合金相の層が崩壊し、鋼板との界面が凹凸していることがわかる。

同様に、アルミニウムめっき鋼板・銅めっき鋼板について圧下率が製品の内部組織におよぼす影響を図8-38に示す。アルミニウムめっき鋼板の場合、加熱温度810℃・保持時間10分の加熱条件ですでにめっき相全体が合金相となっており、圧延によって合金相が細かく砕け、それが圧下率の増加に伴って鋼板に突き刺さる形になってきている。銅めっき鋼板の場合、加熱温度810℃・保持時間10分の条件ではめっき相はまだ純銅が大部分を占めている。圧延によって鋼板との界

面において材料が互いに入り組み、鋸の刃のようにぎざぎざした状態になって良好な接合面を形成していることがわかる。

(2) 積層型製品の内部組織

図8-39は、(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板に亜鉛を積層した製品の内部組織を示す。圧延後の製品において、全体の板厚に占める亜鉛層(積層)厚さの割合は約37%である。この値は最大値を示すものでなく、亜鉛の初期積層を厚くすることにより、さらに亜鉛層厚さの厚い製品も可能と思われる。また、圧接後の製品を冷間圧延(総圧下率 $r=62\%$)することによって、亜鉛の内部組織が2~3倍微細化し、かつ、めっき相と亜鉛層との界面も入り組んできて接合が良好となってきたことがわかる。

(3) 合わせ板型製品の内部組織

(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板どうしを半溶融圧接ならびにそれを冷間圧延した後の接合強度(ただし、接合面のせん断強度)におよぼす圧接温度の影響を図8-40に示す。圧接圧力は500MPaであり、圧接後、総圧下率約60%となるまで冷間圧延した。図から、圧接温度が500℃前後でもっとも高い接合強度を示し、圧接後の接合界面のせん断強さは約25MPa、圧延後では約60MPaとなっている。圧延後の製品を熱処理することで、さらにせん断強度が向上することがわかる。

図8-41は、銅めっき鋼板を3枚重ね、図中に示す条件のもとに圧接・圧延したタイプ3(合せ板型)の製品の内部組織を示す。図から、元あっためっき相どうしの界面の識別が不可能であることなどにより、めっき金属である銅を介し、鋼板が互いに良く接合していることがわかる。また、この製品に対し密着曲げを行った結果、剥離などの欠陥は生じなかった。

(4) サンドイッチ型製品の内部組織と機械的特性

図8-42は、タイプ4の製品例ならびに製品の曲げ加工例を示す。(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板では、総圧下率約80%にまで圧延しても、またそれをコイル状に曲げてめっき鋼板が剥がれることなく、良く接合した製品が得られた。

図8-43は、(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板と亜鉛の組み合わせの製品の、密着強さにおよぼす圧延圧下率の影響を示す。試験片形状を図中に記す。図から、総圧下率 r が50%程度までは密着強さは約30MPaであるが、 r が50%を越えると急激に密着強さが高くなり、 r が60~70%では密着強さは75~95MPaとなることがわかる。なお、その時の剥離面はざらざらしており、亜鉛層の中間でせん断破壊していた。

図8-44は、各めっき鋼板と亜鉛を組み合わせた場合の圧接後と圧延後の製品の内部組織を示す。左側は圧接後の製品の内部組織を示し、右側には冷間圧延後の製品の内部組織を示す。図(a)の亜鉛めっき鋼板と亜鉛を組み合わせたものと、図(b)の(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板と亜鉛を組み合わせたものは、同様な内部組織を持つ。すなわち、図から、めっき金属と亜鉛が互いに拡散し、特に圧延により、めっき金属と亜鉛の拡散が一段と進行し、互いの金属どうしが糸状に連結していることなどがわかる。図(c)は銅めっき鋼板と亜鉛の組み合わせを示す。銅と亜鉛は異種金属どうしではあるが、その合金のあるものは真鉛ともよばれ、加工性に富む材料として知られている。図中、黒い部分が純亜鉛であり、この純亜鉛を挟み、上下に対称に、合金相1・合金相2(真鉛)・純銅と層状になっていることがわかる。圧延により、鋼板と鋼板の間の中間層がじゅず状となり、純亜鉛層ならびに合金層は途切れ、純銅層どうしが互いに接合するといった特異な内部組織となっていることがわかる。なお、加熱条件の選択によって、亜鉛全部を合金相に変えたり、各合金相の厚さを変えたりすることは可能である。

図8-45は、アルミニウムめっき鋼板を素板とし、芯材にA7075を用いた場合の、圧接温度が圧接後の製品の内部組織におよぼす影響を示す。なお、一般にA7075は、他のアルミ合金に比べ半溶融温度範囲(467~638℃)が広く、しかも固相線温度が低いという特徴がある。図から概略以下のことがわかる。

(a) 400℃で圧接した製品の芯材には、粉末状態が残り、未接合の箇所もある。また、めっき金属と芯材の境界も明瞭にわかる。

(b) 550℃(この温度のA7075の固相率 ϕ は約89%)で圧接した製品は、めっき金属と芯材の境界がかなり不明瞭となってきたものの、両者の判別は可能である。

(c) 600℃($\phi=59\%$)で圧接した製品では、めっき金属と鋼板の間の反応相が著しく成長し(400℃で圧接した製品の反応相に比べ約5倍)、また、めっき金属と芯材の判別もつきにくくなってきた。

図8-46は、アルミニウムめっき鋼板を素板とし、芯材に(A7075+C)混合粉末を用いた場合の、圧延圧下率が製品の内部組織におよぼす影響を示す。なお、黒鉛粒子の粒度は#200(74 μm)であり、体積含有率 V_f は30%である。図から、圧延圧下率が約50%以上になると黒鉛粒子が展伸され、互いに連結してくること、また、めっき金属と鋼板との間の反応相が破砕され、断続的に分布してくることなどが観察できる。

図8-47は、アルミニウムめっき鋼板を素板とし、芯材に(A7075+C)混合粉末を用いた場合の、黒鉛粒子の体積含有率 V_f が圧接後の製品の内部組織におよぼす影響を示す。図から、黒鉛粒子の含有率 V_f が50%以上になると黒鉛粒子が互いに連結してくることがわかる。

図8-48は、アルミニウムめっき鋼板を素板とし、芯材に(A7075+C)混合粉末を用いた場合の、黒鉛粒子の粒径が圧接後の製品の内部組織におよぼす影響を示す。粒径の小さい黒鉛粒子を含有する製品の内部には所々微細な空隙がある。また、粒径の大きい黒鉛粒子を含有する場合の方が、黒鉛どうしが互いに連結しにくくなっているように見える。

図8-49は、アルミニウムめっき鋼板を素板とし、芯材に(A7075+C)混合粉末を用いた場合の、熱処理が圧延後の製品の内部組織におよぼす影響を示す。一般に行われているA7075の焼鈍(420℃, 120min., 炉冷)条件で熱処理を行った製品の内部組織は、冷間圧延後の製品の内部組織に比べ、A7075粉末の粒の展伸が多少緩和され丸みをおびてきてはいるものの、それ以外では大きな組織の変化は見られない。550℃, 30min., 水冷の条件で熱処理した製品の内部組織では、めっき金属の大部分が鋼板と反応し、反応相が厚く形成されていること、また、芯材と反応相の界面にクラックが発生していることなどがわかる。

タイプ4で製造したサンドイッチ型複合鋼板について、その製造条件と制振性能の関係を調査するために、それぞれのサンドイッチ型複合鋼板に対して共振法による損失係数 η を求め、制振性能の判断基準とした。図8-50にその結果を示す。黒で示した値は、冷間圧延した製品($r=70\sim 80\%$)の損失係数 η を示し、斜線で示した値は圧接したままの製品の η を示す。比較のために市販のSS41材の結果を併記する。図の(a)~(c)は芯材に亜鉛系を用い、図(d)は芯材にアルミニウム系を用いた複合鋼板に関する結果である。図(a)から、製品板厚に対し、芯材の厚さを大きくしても、損失係数 η の変化はわずかであることがわかる。図(b)から、黒鉛の含有率が高くなるほど、損失係数 η は急激に高くなることわかる。これは、黒鉛を多く含有することによって、芯材内部に微小な空隙などができやすく、こうした箇所、振動エネルギーが吸収されるためであると考えられる。図(c)から、温度が高くなるにしたがい、損失係数 η が急激に高くなっていることがわかる。これは、温度の上昇によって、亜鉛の弾性率の低下が大きくなることに起因していると思われる。図(d)から、黒鉛粒子の含有率が50%の圧接後の製品の損失係数 η は0.05~0.08であり、普通鋼板SS41の場合と比べ、約一桁高い損失係数となっていることがわかる。冷間圧延後A7075の通常焼鈍条件で熱処理した製品の損失係数 η は、冷間圧延したままの製品の η と比べて際だった変化はない。550℃, 30min., 水冷の条件で熱処理した製品においても、冷間圧延後の製品と比べ、損失係数 η に大きな変化がないことがわかる。

図8-51は、素板に(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板を用い、芯材に亜鉛粉末を用いた複合鋼板の最終製品に対して、冷間曲げ加工を行った際の曲げ半径と剥離の概容を示す。曲げ加工は、図中に示す折り曲げ機の工具と複合鋼板の間

にゴム板を挟み、このゴム板の厚みを種々変えて行った。図から、ゴム板を置かず曲げた場合には、素板と芯材が曲げ部で剥離してしまうが、厚さ2mmのゴム板を挟んで曲げた場合には、90度(直角)に曲げても剥離は発生しなかった。このときの曲げ半径は約0.5mmであった。

図8-52は、素板にアルミニウムめっき鋼板を用い、芯材に(A6061+B₂C)混合粉末を用いた際の圧接後と圧延後の製品の内部組織を示す。圧延によって炭化ボロン粒子が固定され、内部組織が緻密化してくることがわかる。

図8-53は、素板にアルミニウムめっき鋼板を用い、芯材に(A6061+Mg)混合粉末を用いた際の圧接後と圧延後の内部組織を示す。マグネシウム粉末は500 μ m程度の粒径であり、体積含有率は70%である。圧延によって、マグネシウム粉末が大きく展伸されている様子がわかる。

8.4.5 まとめ

めっき鋼板を利用し、半溶融圧接法と冷間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、種々の複合鋼板の製造を行い、概略以下の結果ならびに知見を得た。

(a)表面処理型複合鋼板の製造(タイプ1)では、各めっき鋼板とも、圧延後の製品は、反応相の破砕などの影響により、鋼板との界面の凹凸が一層大きくなってきた。また、アルミニウムめっき鋼板の例では、反応相の一部が鋼板に突き刺さり、表面硬化型の複合鋼板の製造が一部達成できた。今後、めっき金属と鋼板との材料の組み合わせを考え、さらに、加熱を大気中でなく特殊雰囲気で行うなどの工夫により、より優れた表面改質型複合鋼板の製造が可能と思われる。

(b)(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板と亜鉛粉末を組み合わせた積層型複合鋼板の製造(タイプ2)では、全板厚に対する亜鉛層(積層)厚さの割合が約37%ある製品が製造できた。この数字が積層厚さの上限を示す値ではなく、繰り返しこの方法を用いることなどにより、さらに積層厚さを大きくすることも可能である。

(c)重ね合わせ型複合鋼板の製造(タイプ3)において、銅めっき鋼板を3枚重ねた複合鋼板の製造が可能となった。得られた製品に対して密着曲げ試験を行っても、重ね合わせ面に亀裂や剥離が入るなどの欠陥はみられず、良好な接合状態となっていた。この方法では、重ね合わせるめっき鋼板の枚数には制限がない。

(d)(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板に亜鉛粉末を組み合わせたサンドイッチ型複合鋼板に対して、圧延圧下率が60~70%で圧延した製品のせん断強さ(密着

強さ)は75~95MPaあり、これは亜鉛のせん断強さにほぼ匹敵する値である。

(e)アルミニウム・亜鉛合金めっき鋼板に亜鉛粉末と黒鉛粒子との混合粉末を組み合わせたサンドイッチ型複合鋼板に対して制振性能を調査した結果、黒鉛の含有率が15%の製品の損失係数は0.08程度であった。この値は普通鋼板SS41の損失係数と比較して約一桁低い損失係数であり、良好な制振特性を示すことがわかった。

(f)アルミニウムめっき鋼板にA7075粉末と黒鉛粒子との混合粉末を組み合わせたサンドイッチ型複合鋼板、アルミニウムめっき鋼板にA6061粉末とB₄C粒子との混合粉末を組み合わせたサンドイッチ型複合鋼板、アルミニウムめっき鋼板にA6061粉末とマグネシウム粉末との混合粉末を組み合わせたサンドイッチ型複合鋼板の製造を行い、適当な圧接条件・圧延条件のもとでは、亀裂剥離などの欠陥の無い良好な内部組織を持つ複合鋼板の製造が可能となることを示した。

8.5 部分接合型複合鋼板の製造と加工⁵⁾¹¹⁾

8.5.1 はじめに

近年、電気洗濯機や自動車エンジン部からの騒音や振動を防ぐため制振鋼板が多量に使用されている。現在、制振鋼板としては大きく4つの種類がある。いずれの種類も、制振性能を発揮させるために、何らかの形で振動エネルギーを熱エネルギーに変換するしくみは同じであるが、それぞれの構造は、(a)鋼板と鋼板の間に樹脂やゴムなど金属と極端に振動特性の違う物質をはさむ方法、(b)金属材料内部に、黒鉛・セラミック粉末などの第2相を介在させる方法、(c)磁性・双晶・転位などの金属材料自身の特性を利用する方法、(d)金属板どうしを部分接合させる方法、と異なる。これらの各種類のうち、(a)(c)については、使用温度が低温でしかも狭い温度域にかぎられ、また(b)については、制振性能と接合強度とが反比例の関係にあり、複雑形状の制振部品を製造することは困難であるなどの構造的な欠点がある。その点、接合強度が高くしかも低温から高温まで高い制振性能を発揮する部分接合型タイプの制振鋼板の用途は広いといえる。

本節では、めっき鋼板を利用し、半溶融圧接法と冷間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、鋼板の内部に空隙(または未接合部)を積極的に内在させた部分接合型複合鋼板の製造を次の2つの方法により行った。すなわち、(a)突起付きめっき鋼板を重ね合わせる方法、(b)めっき鋼板の間に金網を積層させる方法、である。以下に部分接合型複合鋼板の製造条件と、製品の内部組織・曲げ加工性・制振性との関係について検討した結果を示す。

8.5.2 製造・加工法の概要

鋼板内部に空隙(または未接合部)を内在させる部分接合型複合鋼板の製造加工法の概要を図8-54に、また製品の内部構造の模式図を図8-55に示す。本製造法は、積層工程・加熱工程・圧接工程・圧延工程の各工程から成り立っており、それぞれの工程の基本的な特徴については前節を参照されたい。

突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式では、縦縞の突起を付けためっき鋼板と、横縞の突起を付けためっき鋼板を互いに突起面(めっき金属が残存している部分)を向き合わせ、半溶融圧接後冷間圧延する。それによって、めっき相が残存している突起部どうしが接合し、めっき相をあらかじめ削り取ってある溝部どうしは未接合となる。したがって、接合部は板全面に点状に分布する。突起の幅あるいは突起の間隔を変えることによって、接触率あるいは逆に空隙率を自由に定めることができる。製造加工法の全体の流れとしては、加熱工程で突起部のめっき相を半溶融状態にし、圧接工程ではそのめっき相どうしを互いに接合させ、圧延工程において強固な接合をはかるとともに空隙部を押しつぶし所定の寸法に仕上げ、となる。

金網積層方式では、金網をめっき鋼板とめっき鋼板の間に挟み積層させる。これには、(a)金網直接積層法と、(b)金網間接積層法とがある。(a)の金網直接積層法では、めっき鋼板と同種(あるいはめっき鋼板と接合しやすい金属)のめっきを施してあるめっき金網を、めっき鋼板とめっき鋼板の間に挟み、半溶融圧接・冷間圧延によりこれらを接合させる。(b)の金網間接積層法では、金網の表面を前もって酸化しておくなどの処理をあらかじめ施しておき、めっき鋼板のめっき金属と金網とは(a)の場合とは逆に未接合状態にしておき、めっき鋼板のめっき金属と同じ組成の金属粉末を処理金網とともにめっき鋼板の間に挟み、半溶融圧接・冷間圧延により接合させる。(b)の金網積層方式では、金網の線径ならびにメッシュを変えることによって、空隙率を任意に変化させることができる。さらに、金網を数枚重ね合わせて用い、空隙を鋼板内部に立体(3次元)的に分布させることも可能である。

8.5.3 実験方法および実験条件

本実験で用いた素板の材質・寸法を表8-8に示す。各めっき鋼板は表面を#100の研摩紙で磨いた後、エチルアルコールで脱脂してある。突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式では、市販の(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板を用い、図8-56に示すように、めっき相を除去するために切削によって溝を付けた。溝幅 b は一定とし、突起幅 a の寸法を0.5、1、2mmの3段階に変化させた。溝を付けた鋼板を上下に用い、溝が互いに交差するように組み合わせる。したがって、用いた溝幅の組み合わせにより接触部の板全体に対する面積率は、1/4、1/9、1/25となる。ただし、上下の板の縦縞・横縞の突起幅ならびに溝幅は同じ寸法のものを用いた。金網積層方式においても、素板には、(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板を用いた。芯材として、金網直接積層法では、市販の亜鉛引き平織り金網をそのまま用いたが、一部、この亜鉛引き平織り金網を亜鉛浴に再度浸し、めっき相を厚く形成させて用いた。金網間接積層法では、あらかじめ、大気中において800~900℃で約60分間金網を熱し、金網の表面に酸化皮膜を形成させて用いた。図8-57に金網直接積層法ならびに金網間接積層法に用いた金網の形状を示す。

圧接・圧延は、表8-8に示す条件範囲で、大気中で行った。圧接は、めっき相金属の半溶融温度で、めっき相どうしの接合が十分なされと思われる約500MPaの加圧力で、加圧保持時間を2分間にして行ない、また、圧延はすべて冷間で行った。

8. 5. 4 実験結果および考察

(1) 突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式

a) 内部組織など

図8-58は、部分接合用圧接工具(パンチ)とTピール試験後の部分接合の様子を現す。剥離後の試験片で白く見える箇所が製品時に接合されていたことがわかる。図8-59は、部分接合した製品例と、それを曲げ半径2.5mmに直角曲げた例を示す。剥離のない良好な曲げ加工製品が得られた。圧接後ならびに圧延後の製品の内部組織を図8-60に示す。図(a)に、素板に用いた市販の(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板のめっき相部分の内部組織をもあわせて示す。(アルミニウム・亜鉛)合金めっき鋼板のめっき相は、図から分かるように、亜鉛含有率の高い部分と、アルミニウム含有率の高い部分が混在し、めっき相は不均一な成分分布をしている。図(b)から、めっき相どうしの接触部は、圧接温度が約500℃の場合でもまた約600℃の場合でも互いに良く密着している。ただし、圧接温度が約500℃では、(アルミニウム・亜鉛合金)めっき相が大部分残存しているのに対し、圧接温度が約600℃では、アルミニウム/亜鉛合金めっき相はすべて鉄(Fe)との反応相に変化していることが分かる。図(c)から、元溝部であった鋼板の表面部分は、加熱中酸化皮膜が形成され、それが圧接・圧延工程において鋼板どうしの互いの接合を妨げ、空隙となって複合鋼板内部に内在している様子が観察できる。

b) 制振特性

図8-61に、冷間圧延後の製品に対し、共振法により、損失係数 η を求めた結果を示す。比較のために普通鋼板の損失係数を併記する。図から、(a)突起と突起の接合面積の割合 S が低くなるほど損失係数は大きい値となり、 S が1/25の製品では普通鋼板に比べ5~6倍大きい損失係数となっていること、(b)圧接温度が400℃と500℃での損失係数の差は明らかでないこと、(c)冷間圧延後の製品を熱処理することにより、冷間圧延したままの製品の損失係数に比べ数倍大きくなっていくことなどが分かる。

(2) 金網積層方式

a) 内部組織など

図8-62(1)は、金網直接積層法により製造した製品の内部組織を示す。図から、めっき相どうしが互いに接合している様子、ならびに、平織り金網の有する空間が、空隙として複合鋼板内部に残存していることなどが分かる。圧延によって、空隙は押し潰されてくるものの、依然、複合鋼板内部に内在していることが確認できる。図8-62(2)は、金網間接積層法により製造した製品の内部組織を

示す。空隙は、あらかじめ金網に形成させた酸化皮膜の内部に発生し、それが複合鋼板内部に分布している。上下のめっき鋼板の接合は、添加した亜鉛粉末によってなされていることが観察される。図8-63に金網直接積層法により製造した製品のTピール後の様子を示す。金網間接積層法により製造した複合鋼板を冷間曲げ加工した例を図8-64に示す。複合鋼板を曲げ半径約5mmで曲げ角度180度に曲げても剥離せず、良好な接合が達成されていることが分かる。

b) 制振特性

図8-65に制振性能の結果を示す。図8-61と同様に、圧延後の製品に対し、共振法により、損失係数 η を求めた結果である。図から、同じメッシュの金網を使用した場合には、金網直接積層法と金網間接積層法では、損失係数の差は特には認められない。細かいメッシュの金網を使用した製品に比べ、粗いメッシュの金網を使用した製品の方が、より大きい損失係数となっていること、また、金網を数枚重ね合わせて使用することによって、損失係数が大きくなっていくことなどが分かる。

8.5.5 まとめ

本節では、めっき鋼板を利用し、半溶融圧接法と冷間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、鋼板の内部に空隙または未接合部を積極的に内在させた複合鋼板の製造を行った。すなわち、(a)突起付きめっき鋼板を重ね合わせる方法、(b)めっき鋼板の間に金網を積層させる方法、により部分接合型複合鋼板の製造・加工を行い、製品の内部組織の観察、製品の曲げ加工性ならびに制振性について検討し、概略以下の結果を得た。

- (a)突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式により、接触率あるいは逆に空隙率を自由に交えた部分積層型複合鋼板の製造が可能となった。
- (b)突起付きめっき鋼板を重ね合わせる方法において、突起と突起の接合面積の割合(S)が低くなるほど損失係数は大きな値となる。Sが1/25の製品は普通鋼板より5~6倍大きな制振性(防振性)を示した。
- (c)金網積層方式において、金網の線径ならびにメッシュを変えることによって、空隙率を任意に変化させた部分接合型複合鋼板の製造が可能となった。また、金網を数枚重ね合わせ、空隙を鋼板内部に立体(3次元)的に分布させた部分接合型複合鋼板の製造についても示した。
- (d)金網積層方式において、細かいメッシュの金網を使用した場合に比べ、粗いメッシュの金網を使用した場合の方が、より大きい損失係数となっていること、また、金網を数枚重ね合わせて使用することによって、損失係数が大きくなることわかった。
- (e)前節のサンドイッチ型複合鋼板、ならびに、本節の部分接合型複合鋼板の代表的な材料の組合せに対して、2~3の特性の比較を行った結果をまとめて表8-9に示す。各特性は製造加工条件によりことなり、その材料の使用に当たってはそれらの特性を十分考慮する必要がある。

8.6 結言

本章では、冷間・熱間加工法また第5章からはこれまで述べてきた単独の半溶融加工法では達成できない、(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、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た半溶融複合加工法を新たに提案し、概略以下の結論を得た。

(a)複合材料の製造ならびに加工

①金属粉末とセラミックス粉末の混合粉末を用いそれを板製品に製造また加工すること、②金属粉末と黒鉛粉末との混合粉末を2枚の金属板にサンドイッチ状に積層させ、制振板を製造すること、③材料内部に空隙あるいは未接合部を立体的(三次元的)に配列させた制振板を製造すること、など複雑構造の複合材料の製造・加工の問題に対し既存の製造法あるいは単独の半溶融加工法では対応できない。半溶融複合加工法によりはじめてこれらの製造と加工が可能となる。

(b)連続製造化

金属粉末あるいは金属粉末と強化粒子の混合粉末を使用し粉末冶金的方法で板材製品を製造するには、一般的には焼結工程が必要であり、それによって一旦粉末どうしを結合させその後圧延を行わなければならない。そのため、粉末冶金法では製造工程がバッチ式あるいは半連続式にならざるをえず生産性や生産コストに問題が生じる。半溶融鍛造法と冷間・熱間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、金属粉末を焼結工程を必要とせず直接板材に加工することが可能となる。

(c)設備・行程の小規模化や簡略化ならびに既存設備の運用化

半溶融複合加工法は、これまで述べてきたように加工力の大幅な低減が達成でき、また、粉末冶金法に適用した場合、焼結行程が省略できるなど行程の簡略化が期待できる。めっき鋼板を利用した半溶融複合加工法では既存のめっき鋼板製造行程に半溶融加工設備を組み込むことが可能性であるなど、比較的小規模の設備ならびに既存設備との運用が可能となる。

(d)半溶融複合加工法の多様化

本研究では主に半溶融鍛造法と熱間圧延法、半溶融圧接法と冷間圧延法といった半溶融加工法と既存の冷間・熱間塑性加工法との複合加工法を提案した。この他にも、半溶融加工法どうしの複合加工法、粉末製造法(アトマイズ法)と半溶融加工法との複合加工法、半溶融加工法と熱処理技術との複合加工法、などが考えられる。

参考文献

- 1) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編:鉄鋼材料便覧,(1976),238,丸善。
- 2) (財)総合鋳物センター 先端金属材料調査委員会(調査部会):昭和56年度 先端金属材料開発調査報告(Ⅱ) 粉末冶金,(1982-9),P1-149。
- 3) 木内 学・杉山澄雄・富岡美好・山本隆嗣:アルミ合金粉末の半溶融複合加工 第1報 昭61年塑性加工春季講演会,昭61年塑性加工春季講演会講演論文集,(1986-5),P 571-574。
- 4) 木内 学・杉山澄雄・山本隆嗣:アルミ合金粉末の半溶融複合加工 第2報,第37回塑性加工連合講演会講演論文集,(1986-11),P235-238。
- 5) 江嶋瑞男・橋本治二:樹脂複合鋼板の成形性と成形技術,第110回塑性加工シンポジウムテキスト(新素材の応用と加工技術),(1987),P51-60。
- 6) 木内 学・杉山澄雄:半溶融圧延に関する研究 第8報(めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工),第38回塑性加工連合講演会講演論文集,(1987-10),P129-132。
- 7) 木内 学・杉山澄雄・高木茂義:アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工 第3報,第38回塑性加工連合講演会講演論文集,(1987-10),P133-136。
- 8) 木内 学・杉山澄雄:半溶融圧延圧接法による複合鋼板の製造,第115回鉄鋼協会講演大会講演論文集(1988-3),P
- 9) 木内 学・杉山澄雄・高木茂義:アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工 第4報,昭63年塑性加工春季講演会講演論文集,(1988-5),P163-166。
- 10) 木内 学・杉山澄雄:半溶融圧延に関する研究 第9報(めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工2),昭63年塑性加工春季講演会講演論文集,(1988-5),P167-170。
- 11) 木内 学・杉山澄雄:半溶融圧延に関する研究 第10報(めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工),第39回塑性加工連合講演会講演論文集,(1988-10),P581-584。
- 12) 木内 学・杉山澄雄・高木茂義:アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工,材料とプロセス,1-5(1988-11),P1477-1480。
- 13) 木内 学・杉山澄雄・高木茂義:半溶融複合加工によるアルミニウム基粒子分散強化複合板材の製造とその加工性,塑性と加工,30-345(1989-10),P1427-1433。
- 14) 木内 学・高木茂義・杉山澄雄:半溶融複合加工によるアルミニウム基粒子分散強化複合板材の製造とその加工性,住友軽金属技報,31-1(1990-1),P38-45。
- 15) 木内 学・杉山澄雄:鉄/チタンクラッド板の高温圧延加工特性,第123回鉄鋼協会講演大会講演論文集,(1992-04),P
- 16) 木内 学・杉山澄雄:半溶融圧延法による制振鋼板の製造,第5回複合材料連合研

究会(1990-3), P1-4.
17)大同鋼板(株):カ^ルハ^リウム鋼板技術資料.

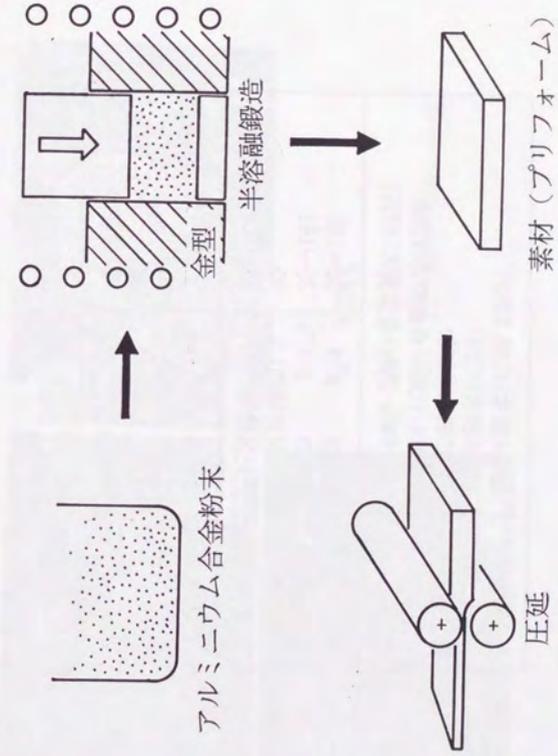


図8-1 半溶融複合加工法による板材成形の概要

表 8-1 半溶融複合加工法による板材製造の実験条件一覧表

素材材質寸法	A2014粉末(#250, #350) A5056粉末(#100) A7075粉末(#250) 〈A2014-12%Si〉合金粉末(#250) 〈Al-8%Fe-2%Mo〉合金粉末(#250)	
半溶融鍛造	固相率 ϕ / % 加圧力 p/MPa 加圧保持時間 t/s プレス機械	50~100 30~196 60 油圧式max. 100ton
圧延	ローレル速度潤滑電動機 /mm $v/m \cdot s^{-1}$	ϕ 250-110 同径2段 0.6 無 VSF-72kw

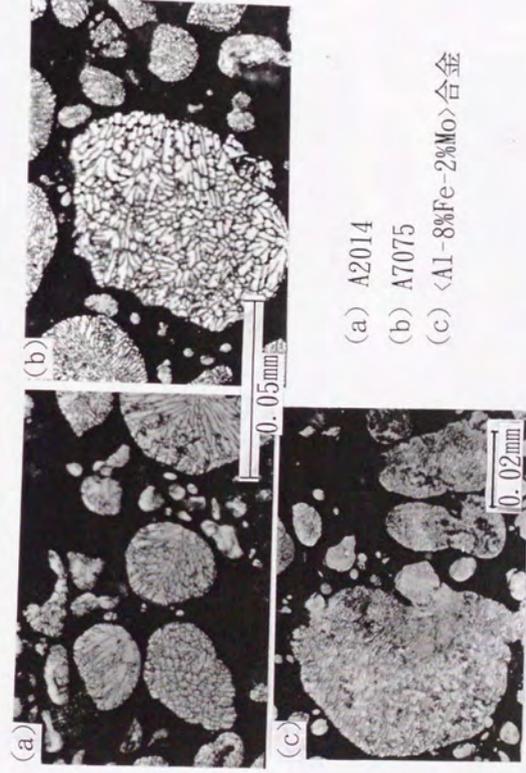


図 8-2 アルミニウム合金粉末の内部組織

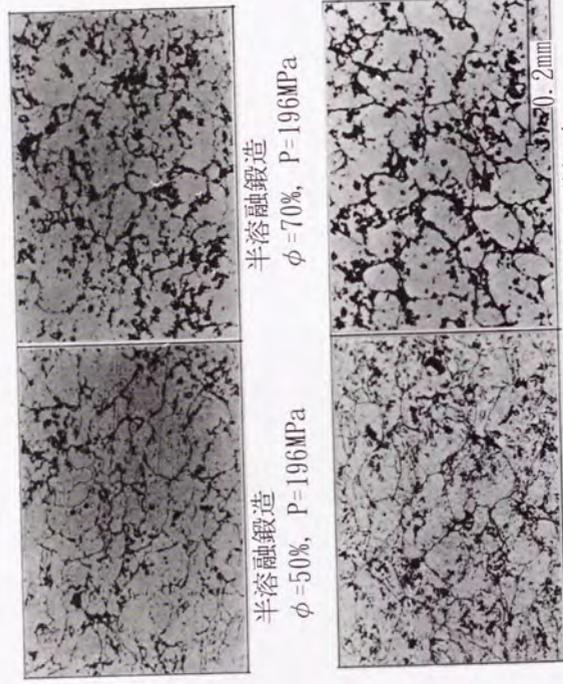


図8-3 半溶融鍛造製品ならびに熱間鍛造製品の内部組織(A5056)

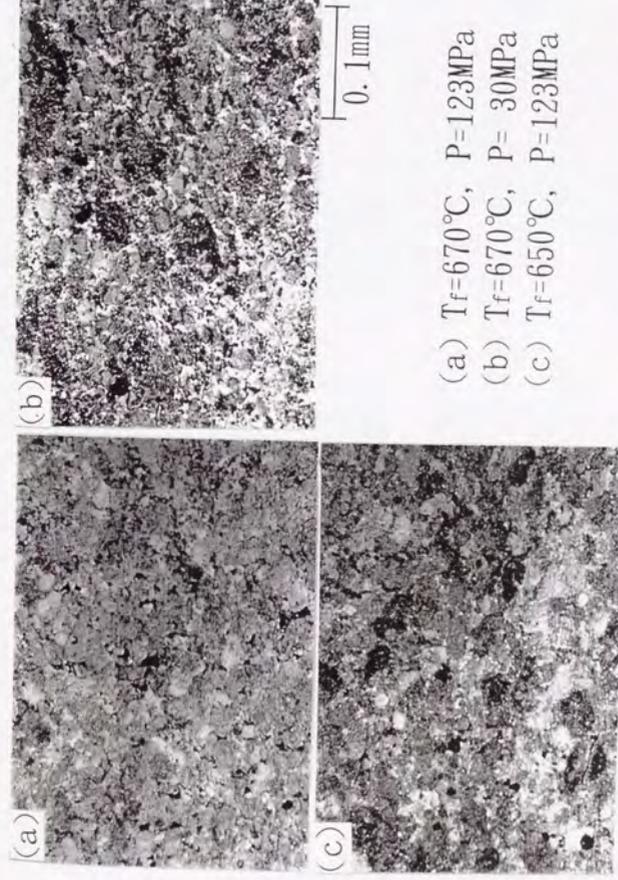
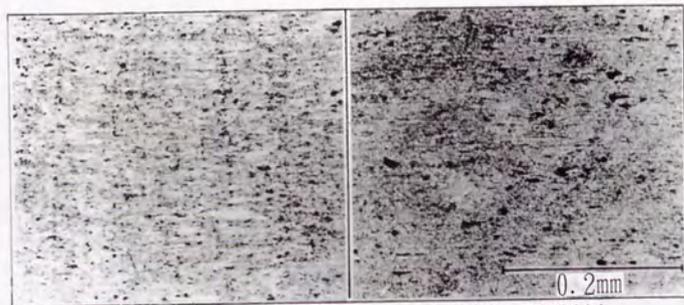
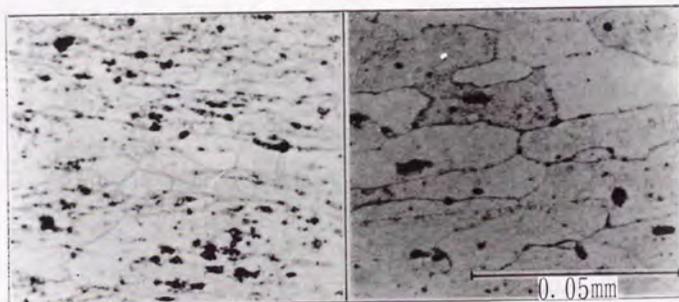


図8-4 半溶融鍛造後の製品の内部組織におよぼす影響(Al-8%Fe-2%Mo合金)

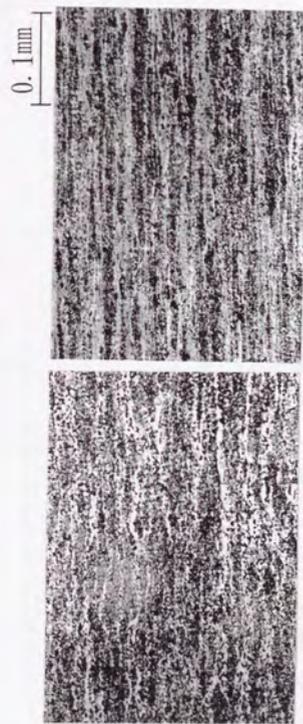


半溶融複合加工による製品 市販の溶製材
冷間圧延後の加工組織



半溶融複合加工による製品 市販の溶製材
再結晶組織 (熱処理条件: 400°C, 30分)

図8-5 半溶融複合加工による板材製品と市販の溶製材の
板材製品の内部組織の比較(A2014)



(a) 半溶融鍛造圧力 $p=30\text{MPa}$ 半溶融鍛造圧力 $p=123\text{MPa}$
 圧延温度 $T=550^\circ\text{C}$ 圧延温度 $T=550^\circ\text{C}$
 総圧延圧下率 $r=80\%$ 総圧延圧下率 $r=80\%$

図8-6 半溶融鍛造条件が圧延後の最終製品の内部組織に
およぼす影響 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

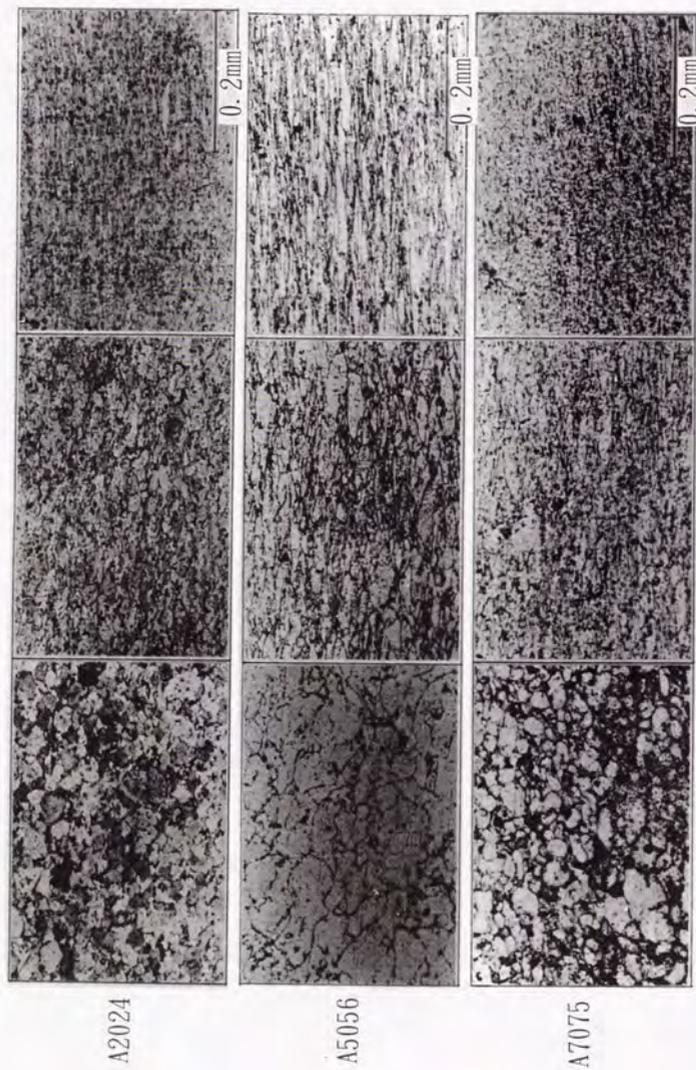


図 8-7 圧延圧下率が製品の内部組織におよぼす影響

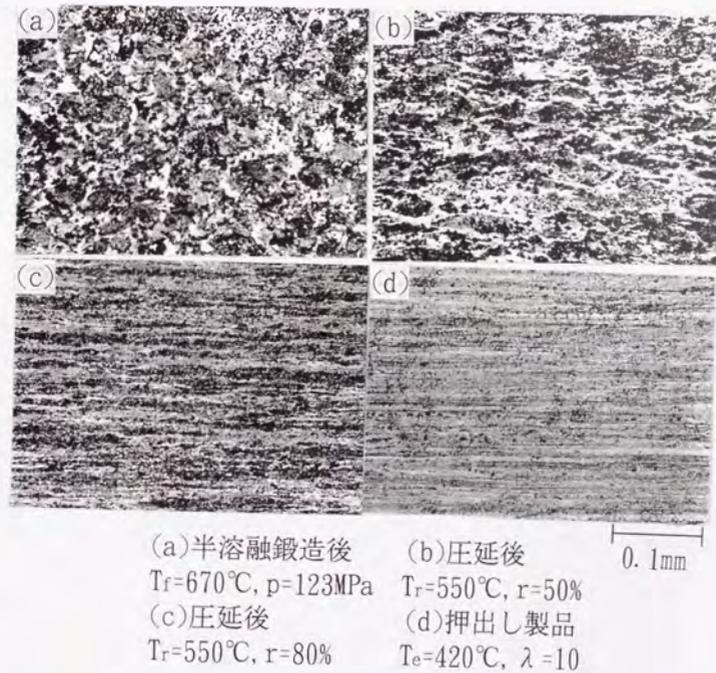


図 8-8 圧延圧下率が製品の内部組織におよぼす影響
 (<Al-8Fe-2Mo>合金)

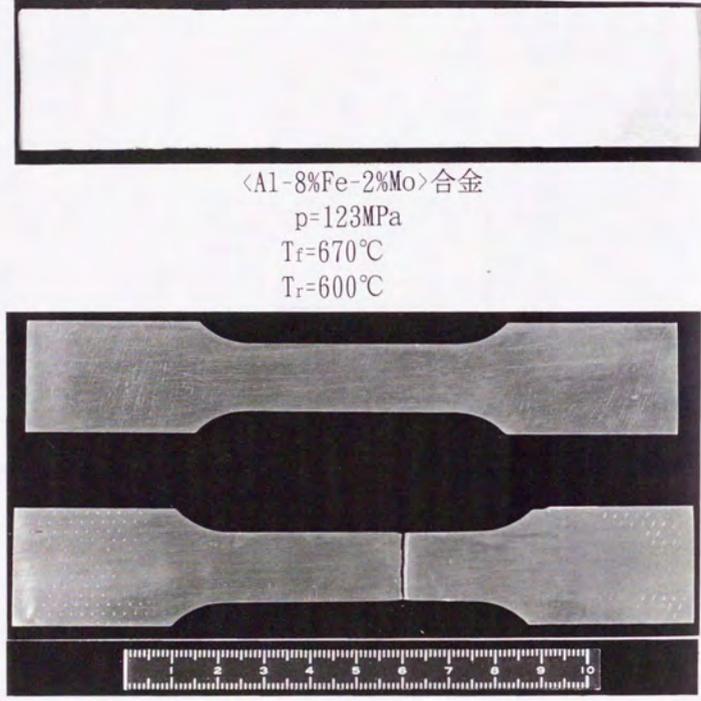


図8-9 半溶解複合加工製品例ならびに引張り試験前後の試験片の様子

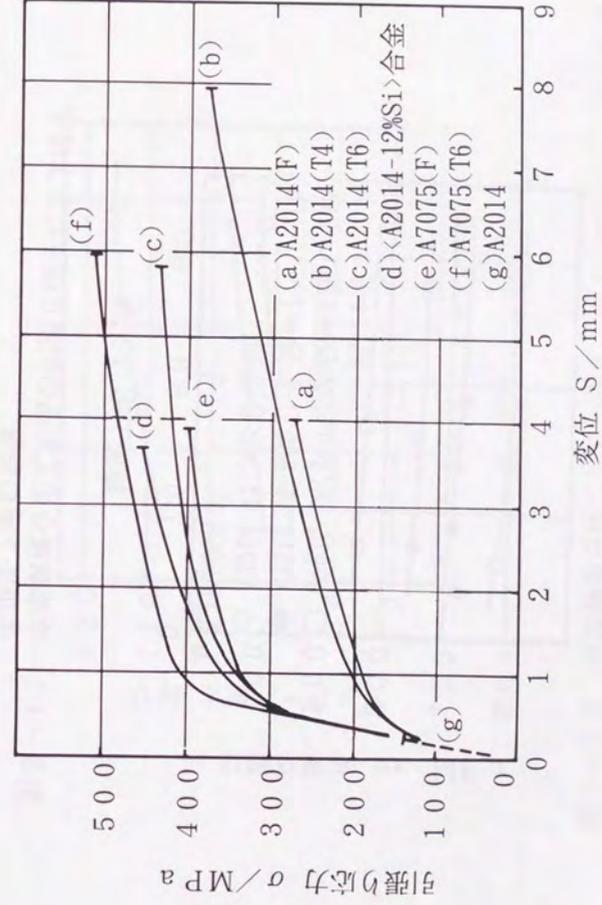


図8-10 引張り応力-変位曲線

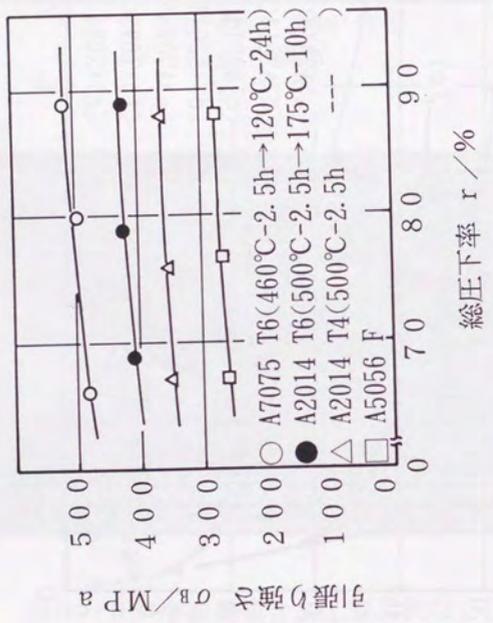


図8-1-1 半溶融複合加工製品の引張り強さにおよぼす
 圧延下率の影響

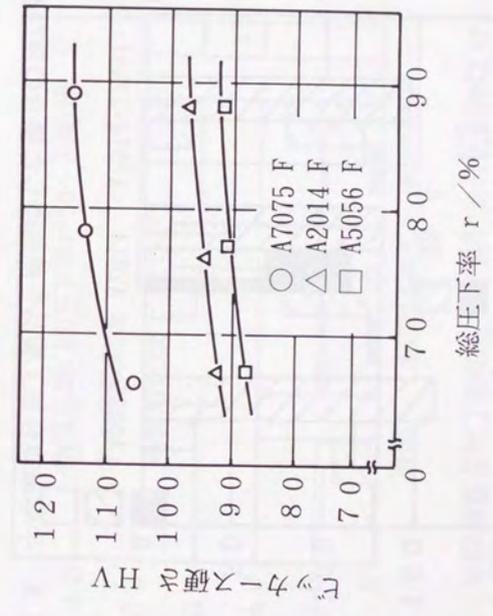


図8-1-2 半溶融複合加工製品の硬さにおよぼす圧延下率の影響

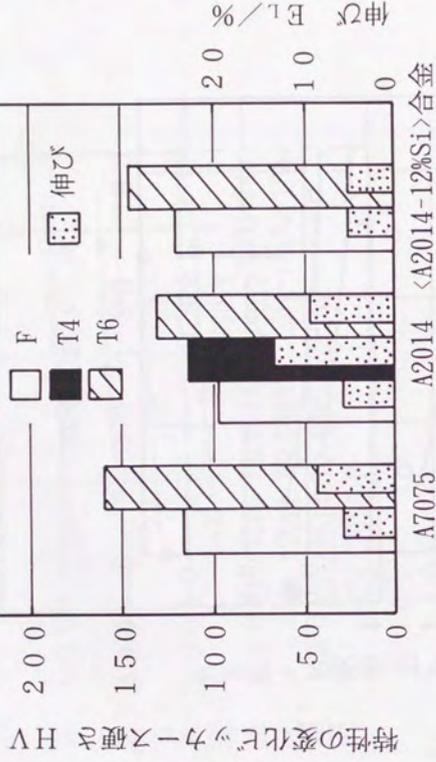


図8-1-3 半溶融複合加工製品を熱処理した場合の伸び特性と硬さ

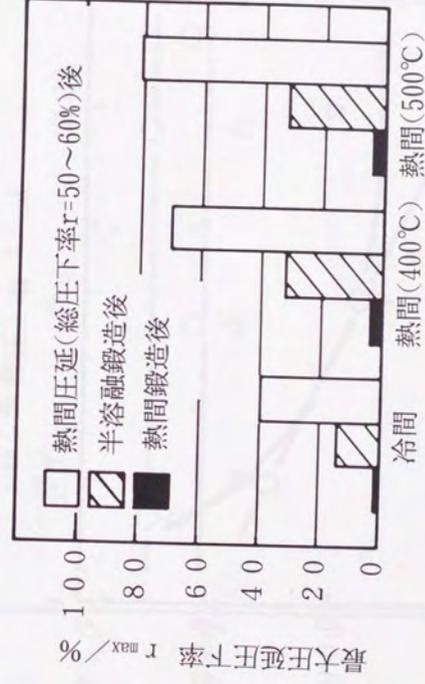


図8-1-4 半溶融複合加工法の圧延工程における被加工材への1パス当たりの最大延圧下率 (亀裂発生限界圧下率)

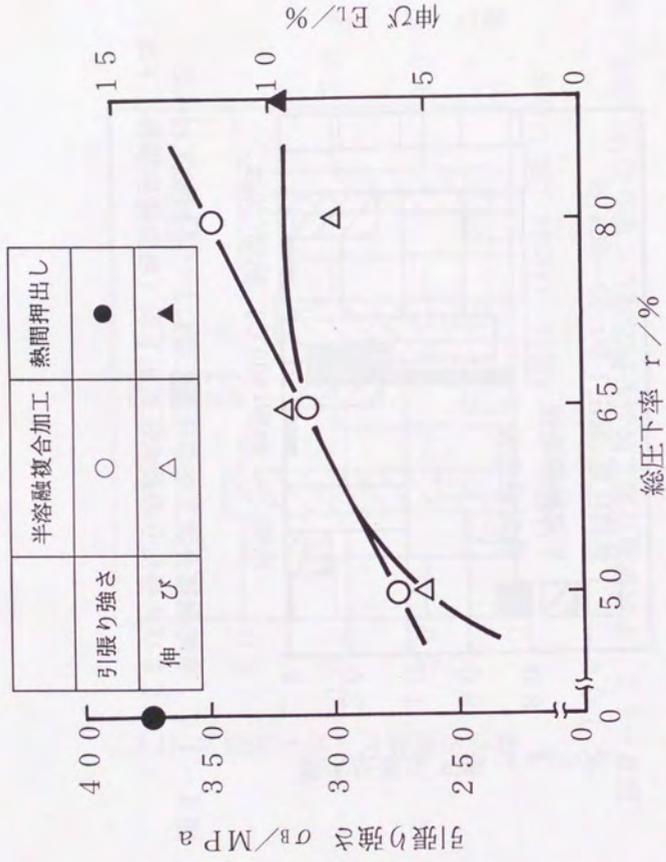


図8-15 半溶融複合加工製品の引張り特性におよぼす圧延下率の影響 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

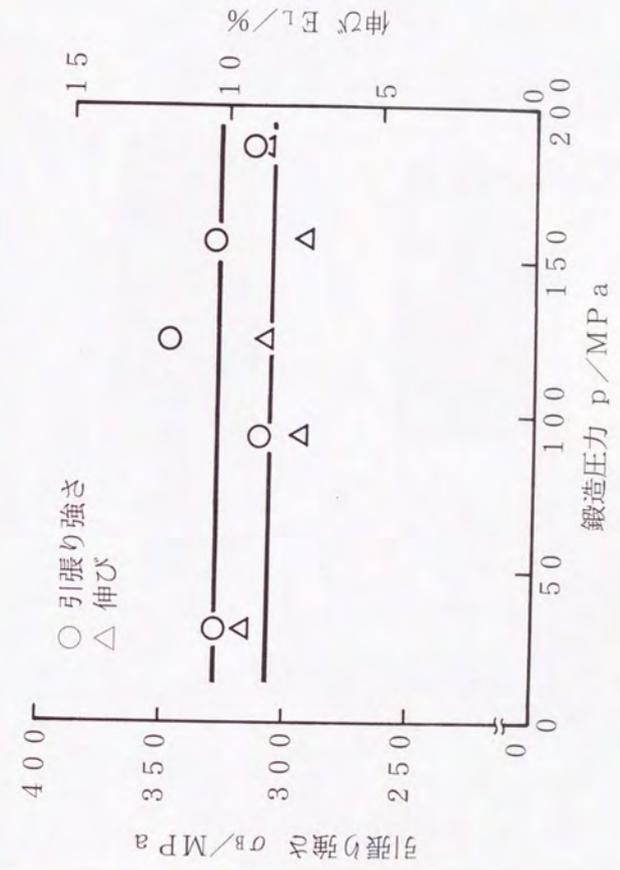


図8-16 半溶融複合加工製品の引張り特性におよぼす鍛造圧力の影響 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

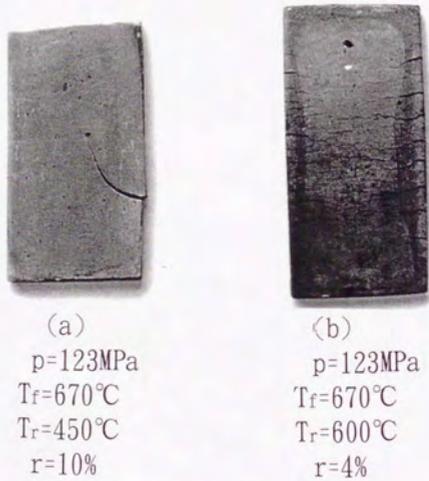


図8-17 圧延加工時の不良例

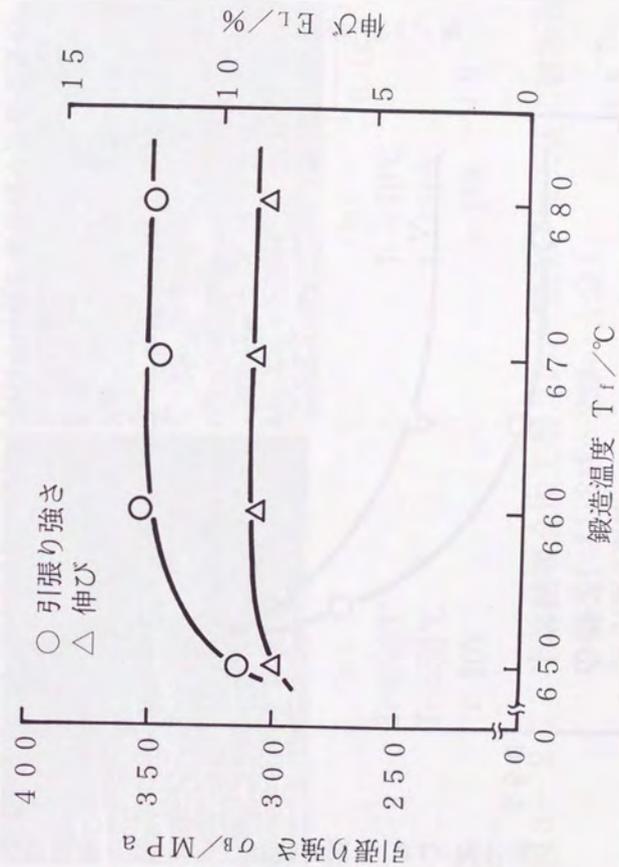


図8-18 半溶融複合加工製品の引張り特性におよぼす鍛造温度の影響 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

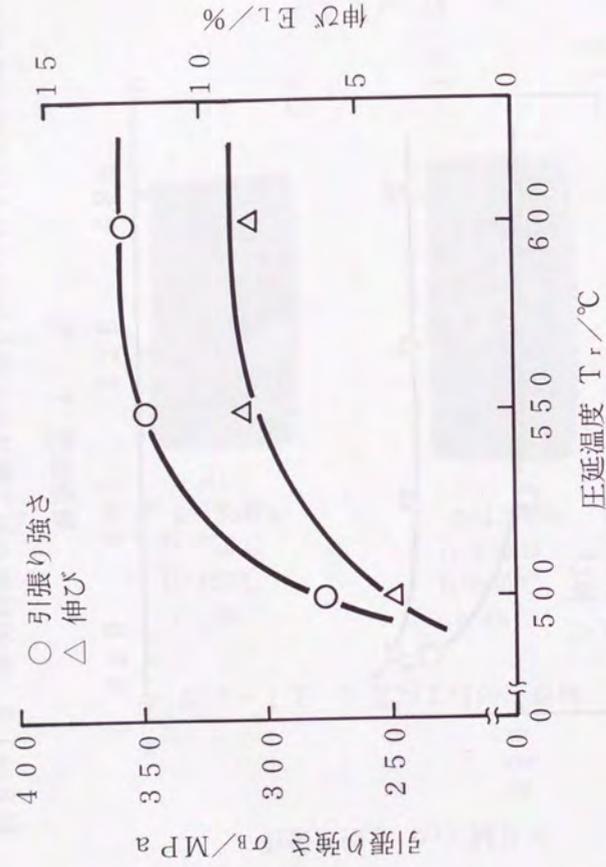


図8-19 半溶融複合加工製品の引張り特性におよぼす圧延温度の影響 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

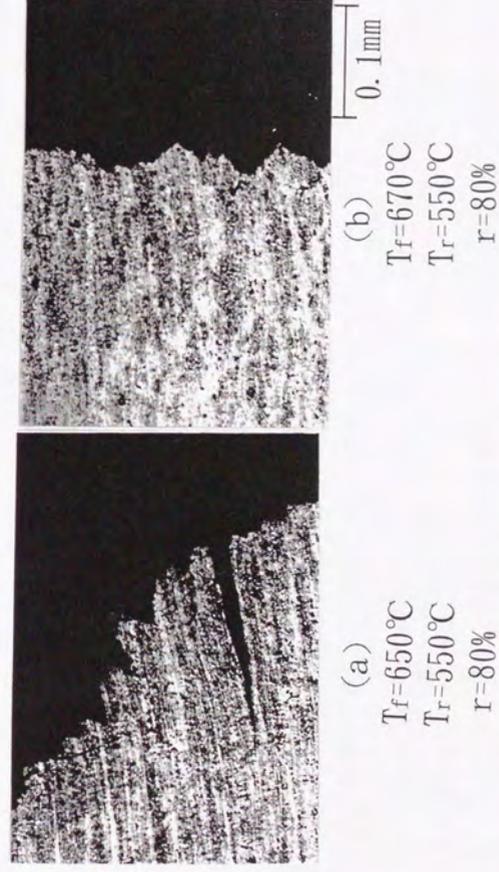


図8-20 半溶融複合加工製品の冷間曲げ加工後の破断面の様子 (<Al-8%Fe-2%Mo>合金)

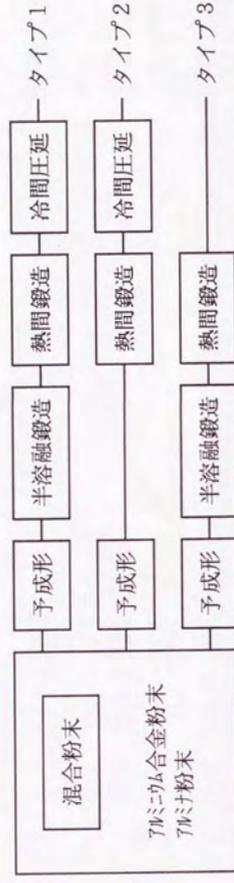


図 8-2-1 半溶融複合加工法による粒子強化複合板材製造・加工の概要

表 8-2 半溶融複合加工法による粒子強化複合板材製造・加工実験条件一覧表

素材材質寸法	A2014粉末(#250, #350)-----マトリックス A6061粉末(#250, #325)-----マトリックス Al203粉末-----強化粒子 (#100, #400, #1200, #3000)	
予 成 形	温度 /°C 加圧力 /MPa	室温 304
半溶融鍛造	鍛造温度 T_f /°C 加圧力 p /MPa 加圧保持時間 t /s プレス機械	620~650 196 60 油圧式max. 100ton
圧 延	圧延温度 T_r /°C ロール速度 v /mm $v/m \cdot s^{-1}$ 潤滑 電動機	450--A2014系 550--A6061系 室温 ϕ 250-110 同径2段 0.79 無 YS ϵ -722kw

表8-3 半溶融複合加工法による粒子強化複合板材製造・加工実験条件一覧表

グループ	タイプ	素材		含有率 VP/%	半溶融鍛造温度 Tf/°C	圧延圧下率/%		
		マトリックス	Al ₂ O ₃			熱間	冷間	総圧下率
A	1	A6061	#400	10	620~630	44~50	35~75	65~87
B	1	A6061	-	-	620~624	47~50	29~74	62~87
C	2	A6061	#400	10	-	41~50	25~65	58~83
D	3	A6061	#100	30	631~651	80~83	-	80~83
		A6061	#1200	30	630~650	80~84	-	80~84
E	3	A6061	#1200	20	639~642	61~85	-	61~85
F	3	A6061	#100	0~30	640~645	80~84	-	80~84
		A6061	#400	0~40	640~644	79~83	-	79~83
		A6061	#1200	10~35	640~642	79~84	-	79~84
		A6061	#3000	10~30	640~643	80~87	-	80~87
G	3	A6061	#1200	0, 20	640~642	79~84	-	79~84
		A2014	#1200	0, 20	630	79~83	-	79~83



総圧延圧下率55~57%

図8-22 複合板材のマトリックス粉末の展伸状況

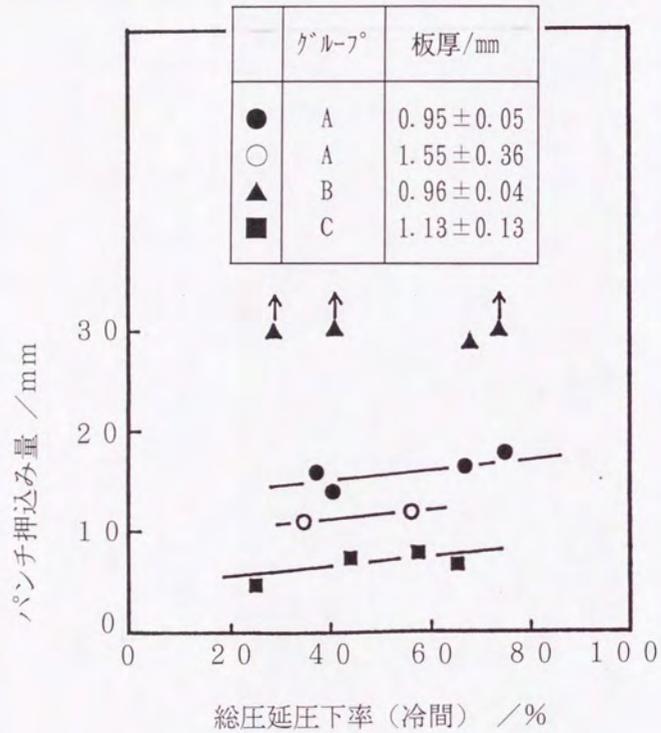


図8-23 複合板材の曲げ性におよぼす総圧延圧下率の影響

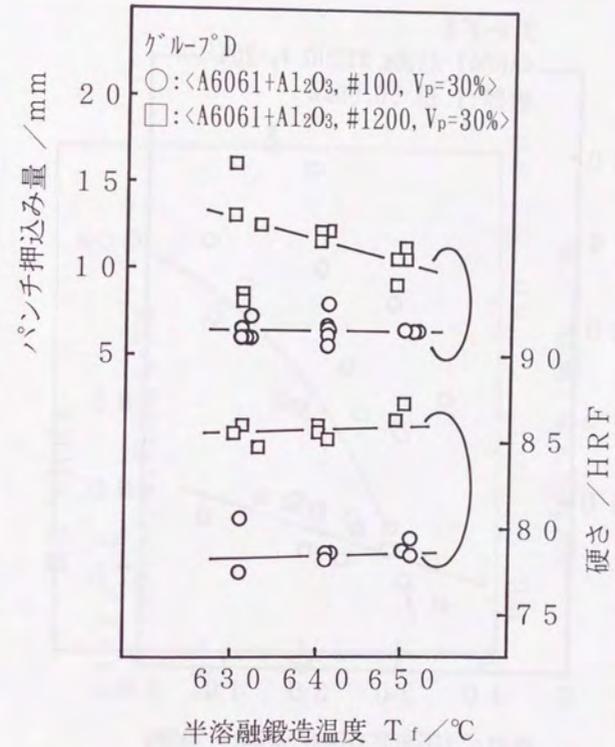


図8-24 複合板材の硬さならびに曲げ性におよぼす半溶融鍛造温度の影響

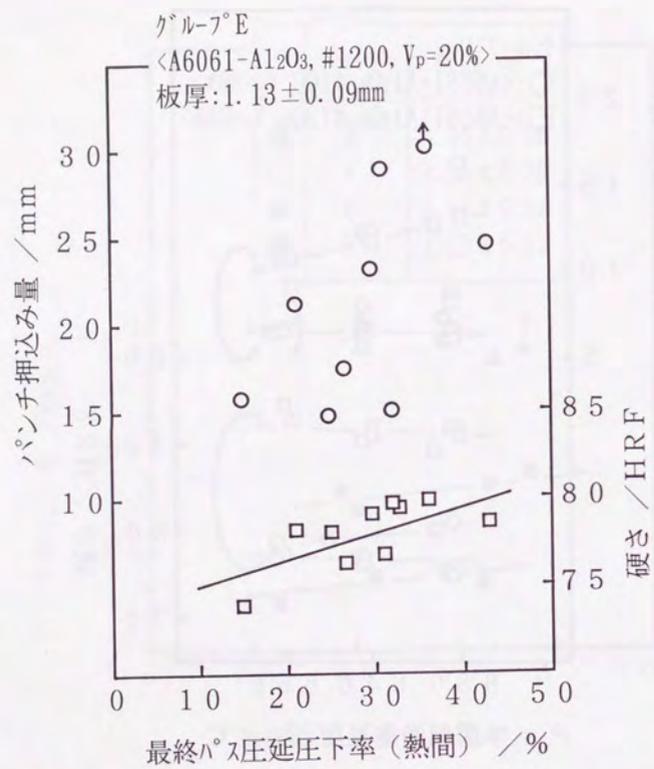


図8-25 複合板材の硬さならびに曲げ性におよぼす最終プレス延圧下率の影響

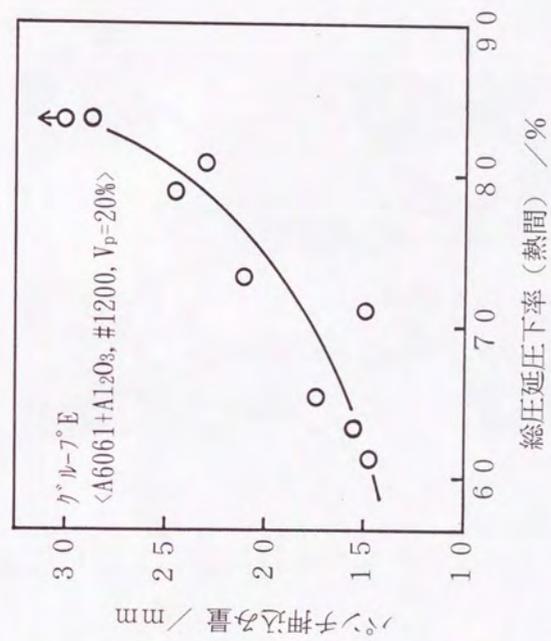
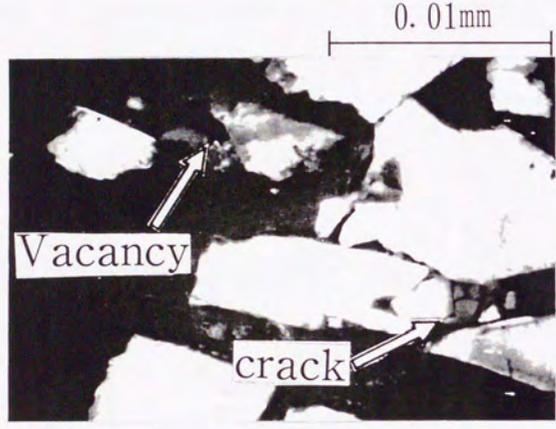


図8-26 複合板材の曲げ性におよぼす総延圧下率の影響



<A6061+Al₂O₃, #1200, V_p=20%>

図8-27 複合板材内部のSEM観察

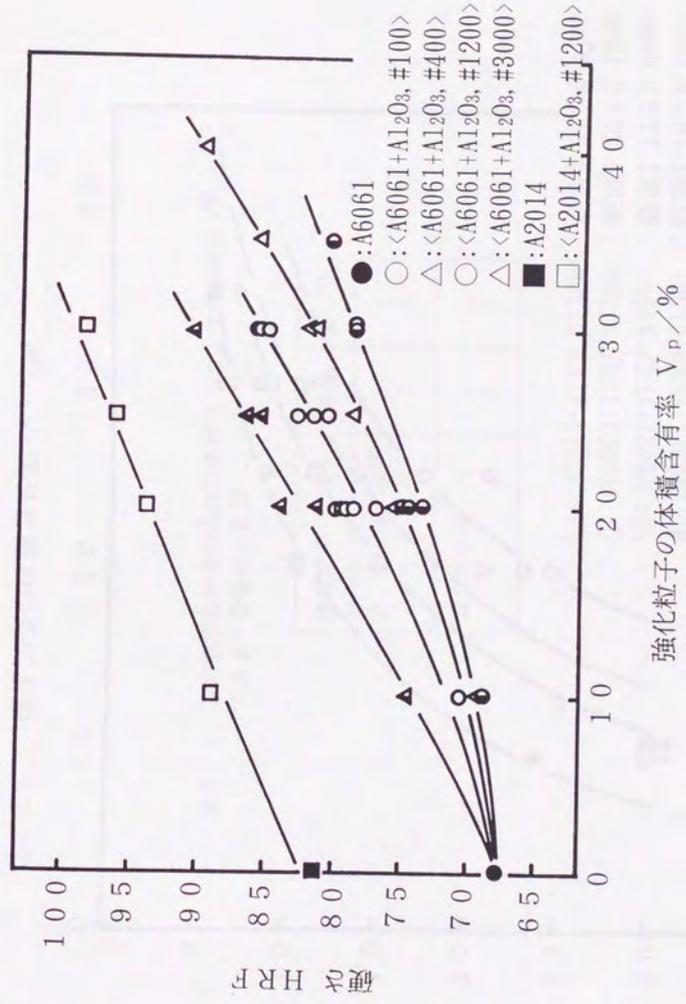


図8-28 複合板材の硬さにおよぼす強化粒子含有率の影響

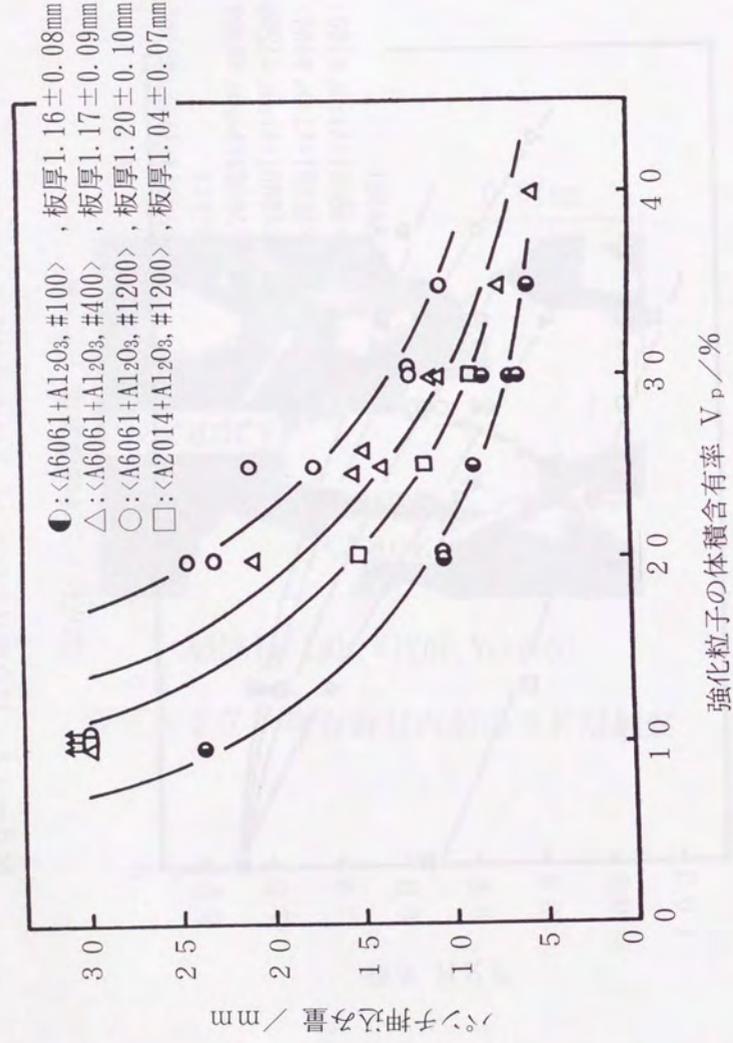


図8-29 複合板材の曲げ性におよぼす強化粒子含有率の影響

表8-4 複合板材の硬さならびに曲げ性におよぼす強化粒子の大きさ・含有率の影響

強化粒子 Al ₂ O ₃	硬さ	曲げ性
含有率 高 低	↑ ↓	↓ ↑
強化粒子径 大 小	↓ ↑	↓ ↑

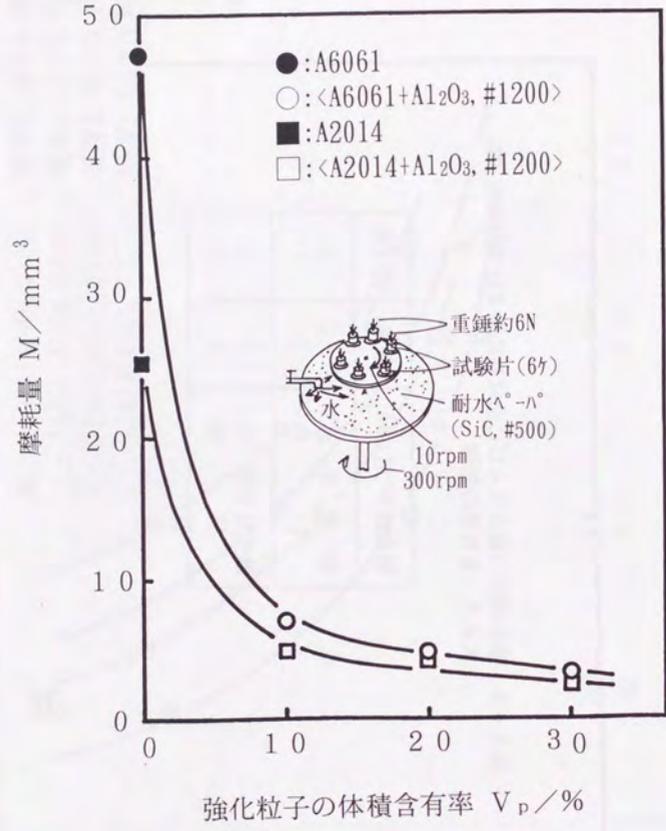


図8-30 複合板材の耐摩耗性におよぼす強化粒子含有率の影響

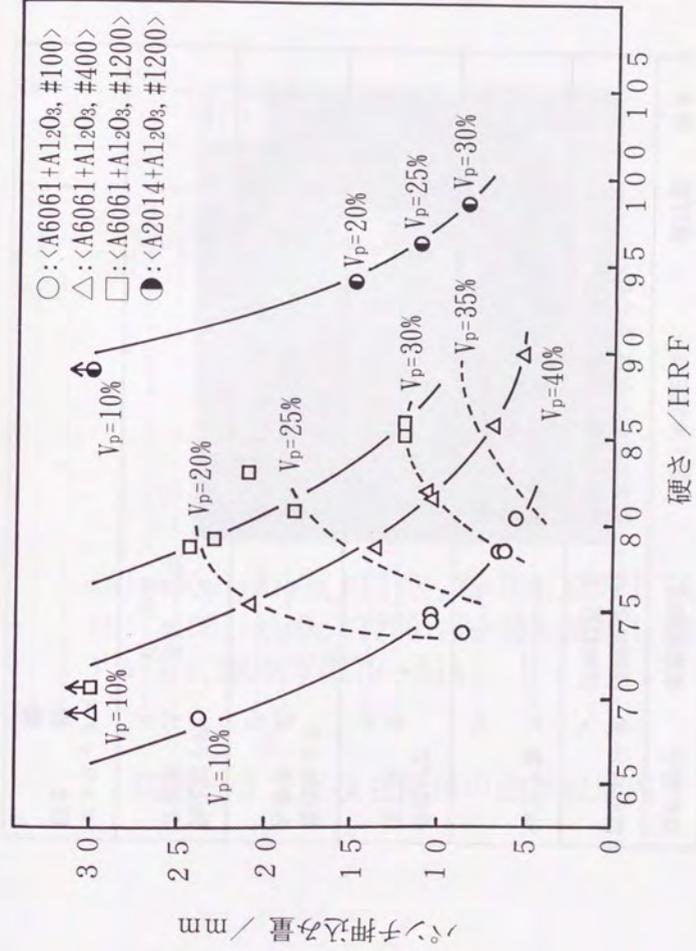
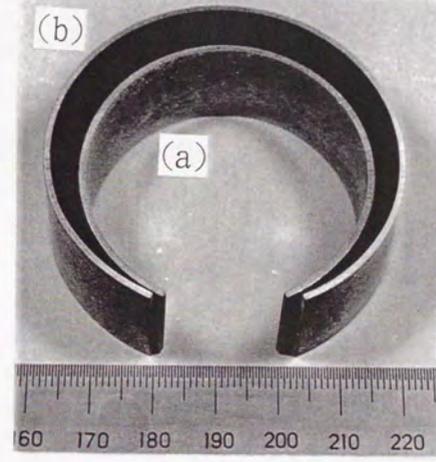


図8-31 複合板材の硬さならびに曲げ性におよぼす強化粒子含有率・大きさの影響

表 8-5 複合板材の硬さならびに曲げ性におよぼす各製造条件の影響のまとめ

条件因子	半溶融鍛造	熱間・冷間圧延	曲げ性	硬さ
液相成分	多-固相粒径 小 少-固相粒径 大	繊維状組織の発達 不十分 繊維状組織の発達 十分	↓ ↑	---
総圧下率	大 小	繊維状組織の発達 十分 強化粒子の破損 繊維状組織の発達 不十分	↑ ↓ ↓	---
最終パス 圧下率	大 小	---	↑ ↓	↑ ↓
強化粒子の 大きさ	大 小	繊維状組織の発達 不十分 繊維状組織の発達 十分	↓ ↑	---
強化粒子の 含有率	大 小	不均一分布 均一分布	↓ ↑	↑ ↓
マトリックス 硬さ	硬 軟	---	↓ ↑	↑ ↓



(a) <A6061+Al₂O₃, #1200>, V_p=20%, 板厚1.14mm
 (b) <A6061+Al₂O₃, #1200>, V_p=30%, 板厚1.14mm
 ゲル-7°F, 総圧下率79~81%

図 8-32 複合板材の曲げ成形例

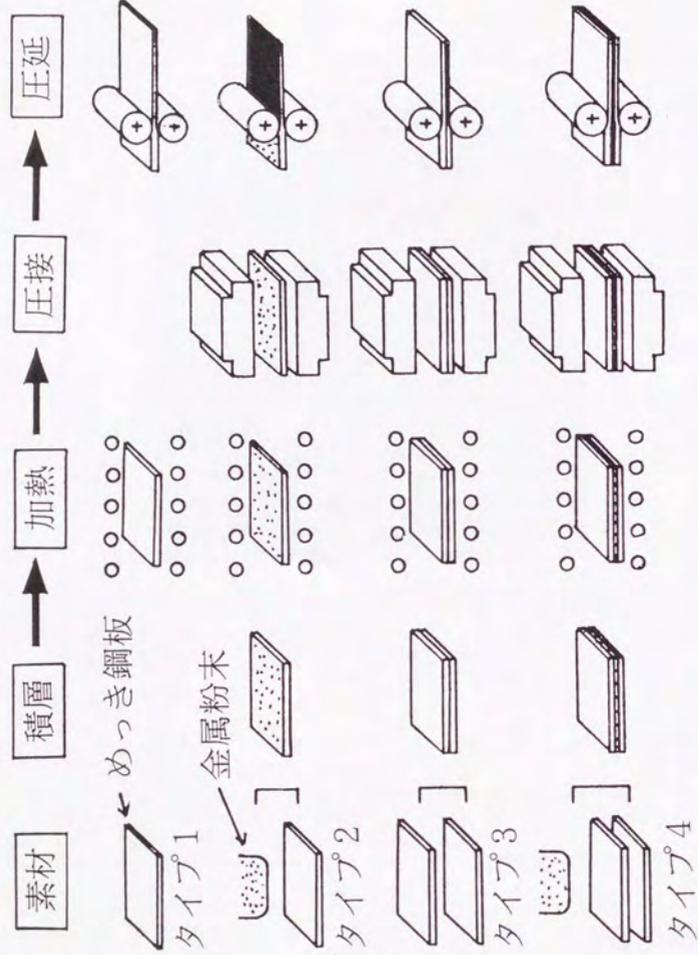


図 8-3-3 めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の製造法の概要

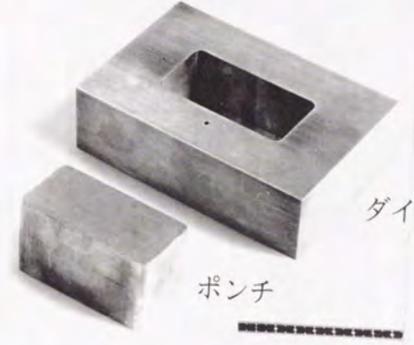


図 8-3-5 圧接用金型

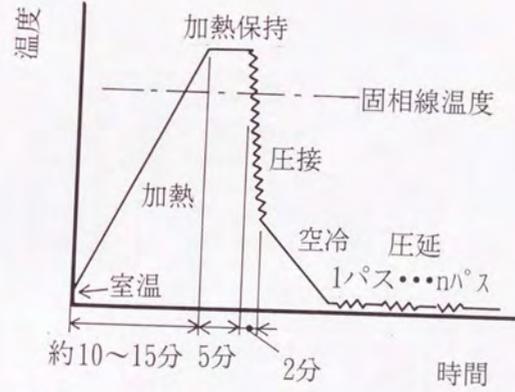


図 8-3-6 製造工程の温度と時間の関係

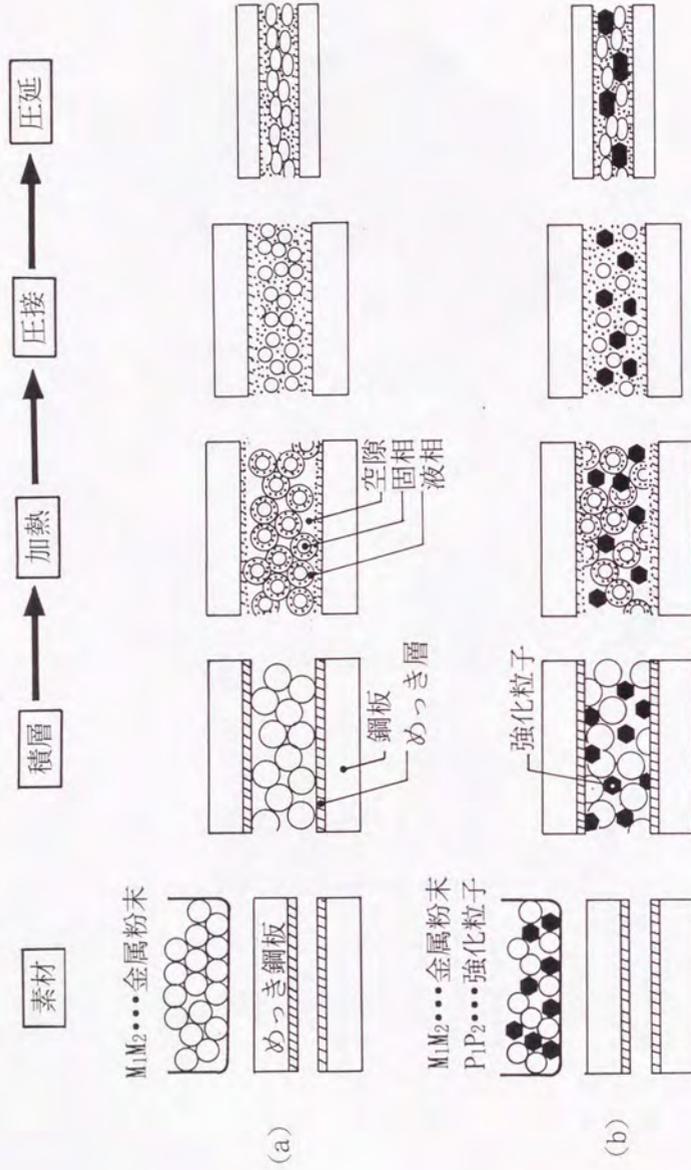


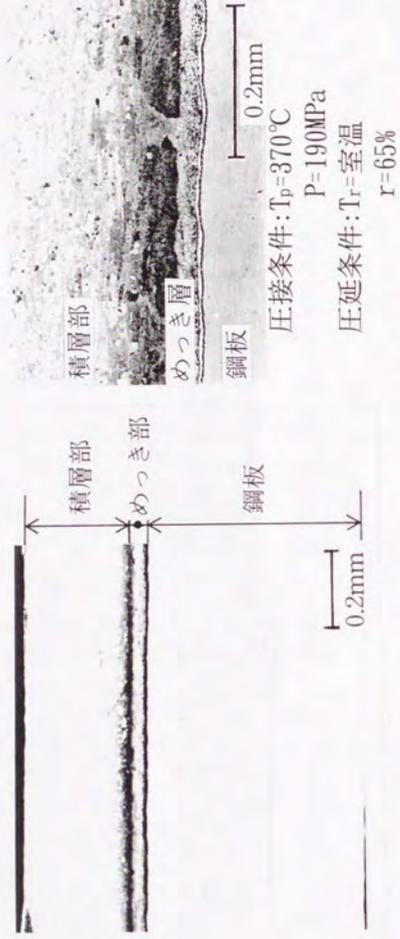
図8-3-4 めっき鋼板を利用したサンドイッチ型複合鋼板の製造法の概要

表8-6 めっき層金属と芯材が固相状態か半溶融状態かの区別

	めっき層金属	芯材
1	固相	半溶融
2	半溶融 (溶融)	固相
3	半溶融 (溶融)	半溶融

表8-7 めっき鋼板を利用した複合鋼板製造実験条件一覧表

素材	めっき鋼板	
	Znめっき鋼板(SPG-Z27) 40-80-1.6mm (Al・Zn)合金めっき鋼板 40-80-1.6mm (GL-AZ150) Alめっき鋼板(SA1-100) 40-80-0.87mm Cuめっき鋼板 40-80-1.1mm	
芯材	Zn粉末 #200 A7075粉末 #250 <Zn粉末+C粉末> <A7075粉末+C粉末> <A6061粉末+Mg粉末> <A6061粉末+B4C粉末>	
圧接	温度 $T_p / ^\circ\text{C}$ 加圧力 p / MPa 加圧保持時間 t / s プレス機械	300~810 190~250 120 油圧式max. 100ton
圧延	温度 $T_r / ^\circ\text{C}$ 圧下率 $r / \%$ ロール $/ \text{mm}$ 速度 $v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 潤滑 電動機	約20(室温) 約20以下(1 \wedge ス) ϕ 250-110 同径2段 0.9 無 VS t - γ 22kw



〈Zn/(Al·Zn)合金めっき鋼板〉

図8-39 タイプ2における圧延後の製品の内部組織

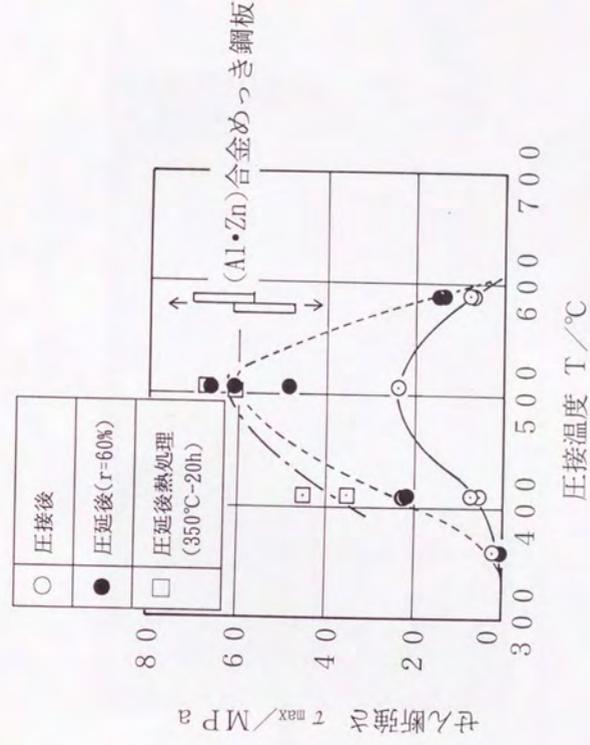
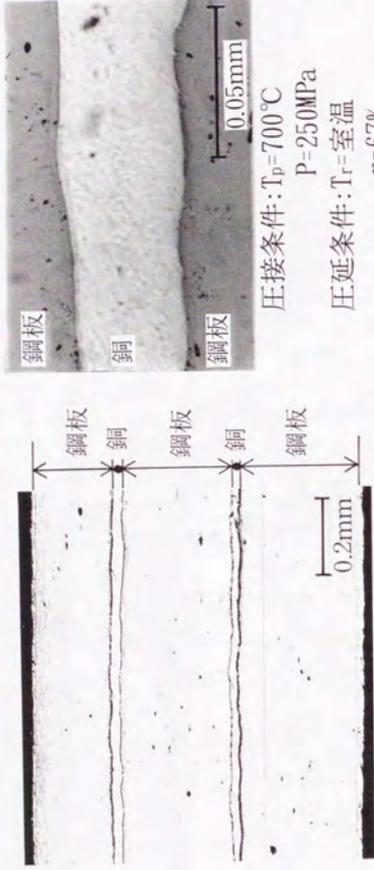


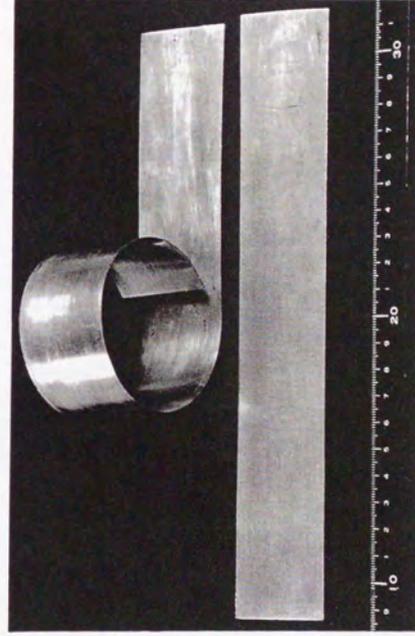
図8-40 タイプ3における製品の接合強さにおよぼす
圧接温度の影響



圧接条件: $T_p = 700^\circ\text{C}$
 $P = 250\text{MPa}$
 圧延条件: $T_r = \text{室温}$
 $r = 67\%$
 フラックス使用

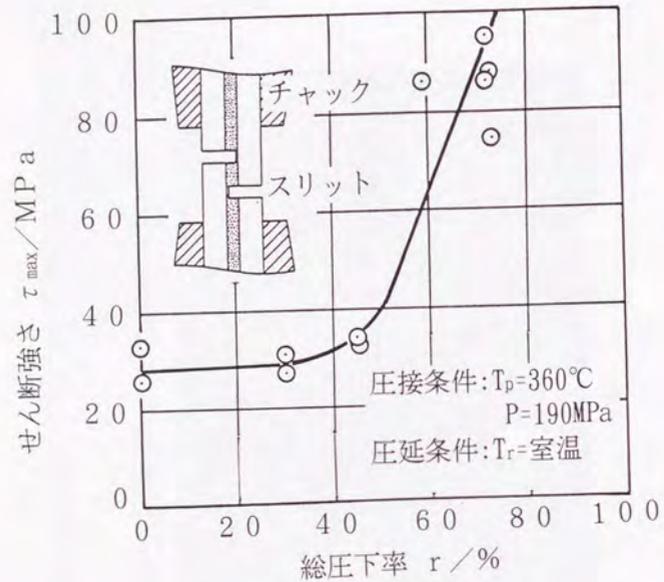
〈Cuめっき鋼板/Cuめっき鋼板〉

図8-4-1 タイプ3における圧延後の製品の内部組織



〈(Al・Zn)合金めっき鋼板/Zn/(Al・Zn)合金めっき鋼板〉

図8-4-2 タイプ4の製品例ならびに製品の曲げ加工例



〈(Al・Zn)合金めっき鋼板/Zn/(Al・Zn)合金めっき鋼板〉

図8-43 タイプ4の圧延後のせん断強さにおよぼす圧延圧下率の影響

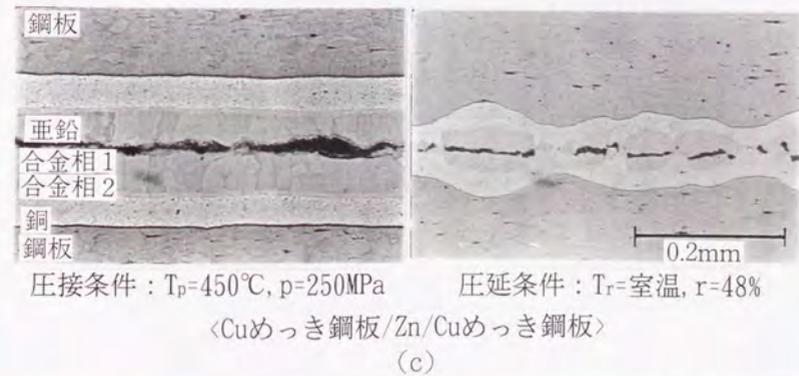
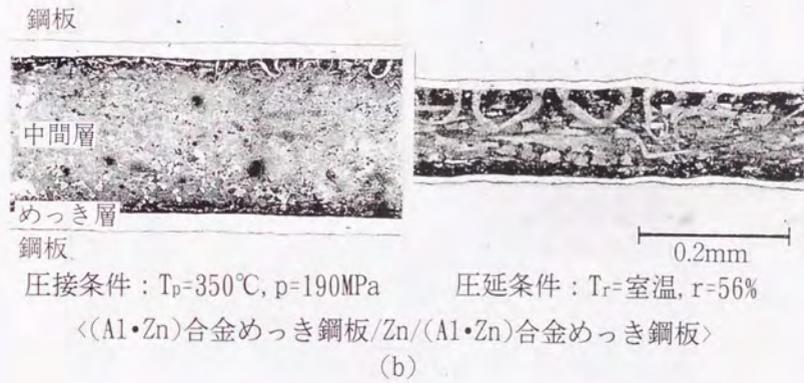
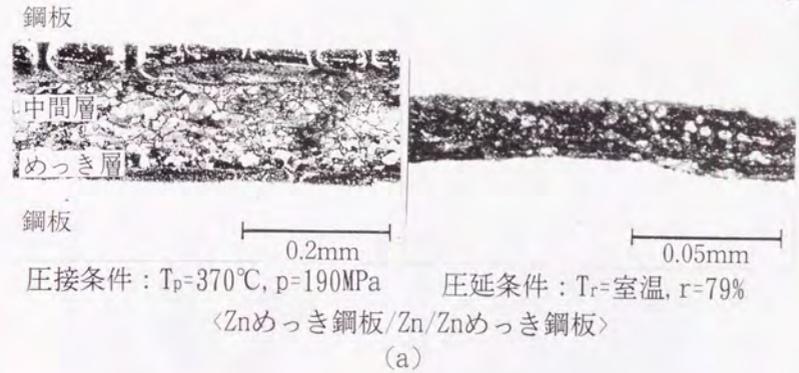
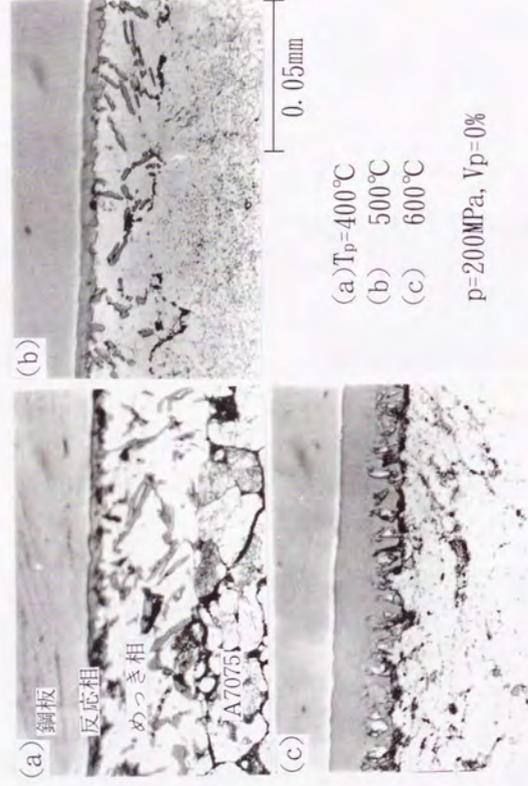


図8-44 タイプ4の圧接後ならびに圧延後の製品の内部組織



〈Alめっき鋼板/A7075/Alめっき鋼板〉

図 8-4-5 タイプ4の圧接温度が製品の内部組織におよぼす影響

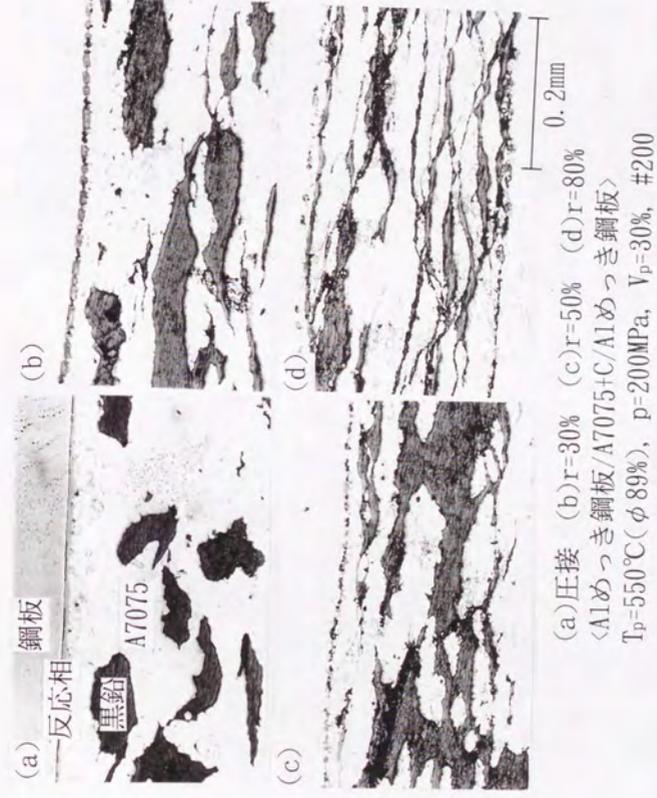
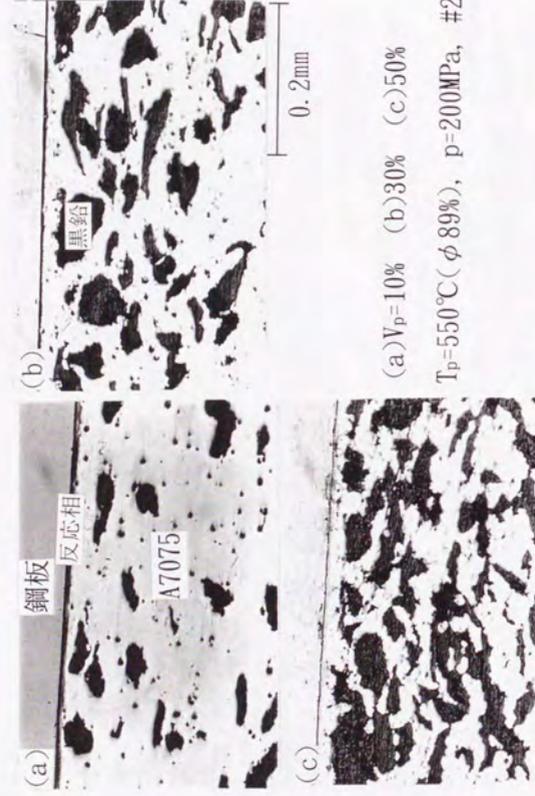


図 8-4-6 タイプ4の圧延下率が製品の内部組織におよぼす影響

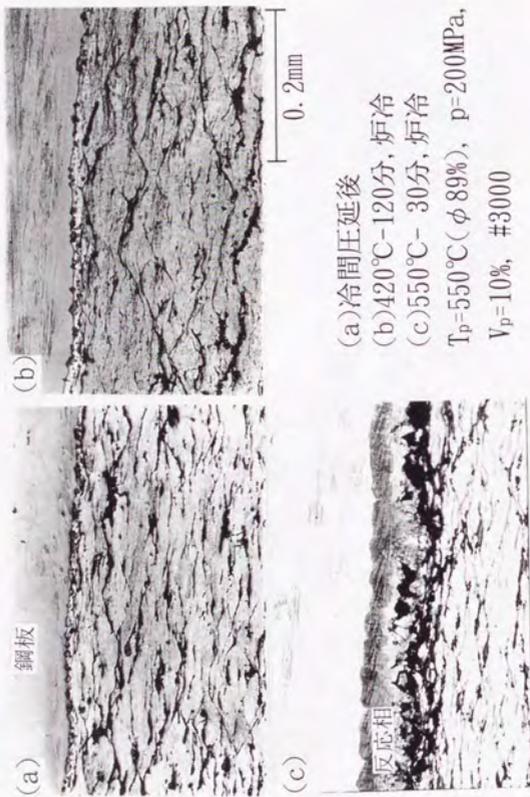


<Alめっき鋼板/A7075+C/Alめっき鋼板>

図8-47 タイプ4の黒鉛の含有率が製品の内部組織におよぼす影響



図8-48 タイプ4の黒鉛粒子の大きさが製品の内部組織におよぼす影響



<Alめっき鋼板/A7075+C/Alめっき鋼板>

図8-49 タイプ4の製品の熱処理が内部組織におよぼす影響

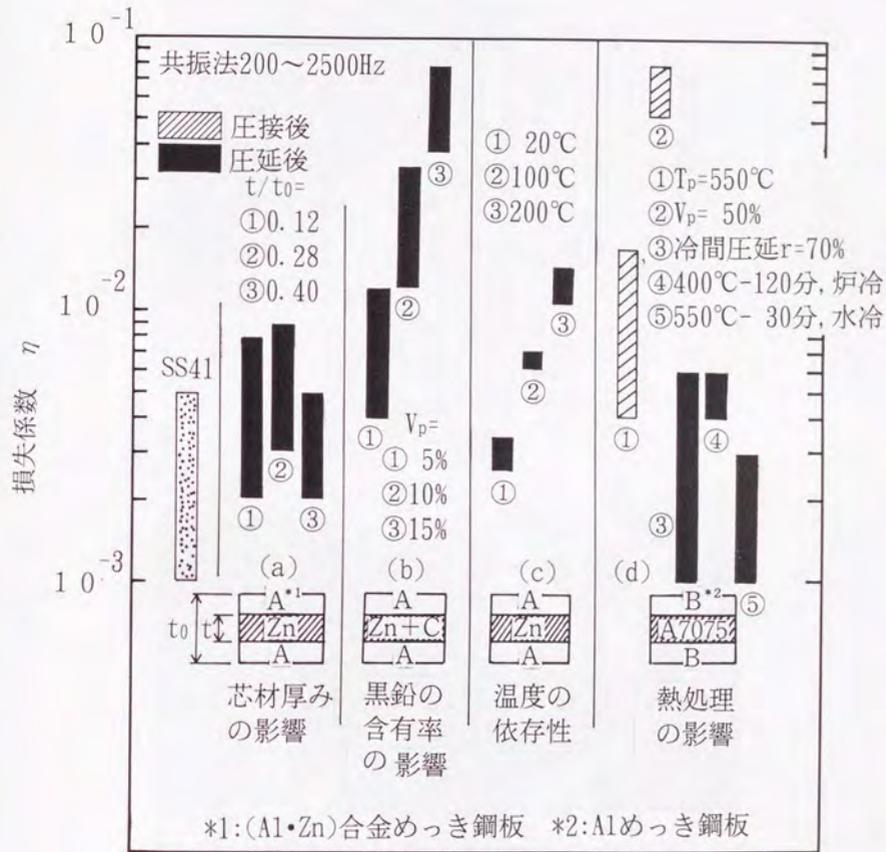
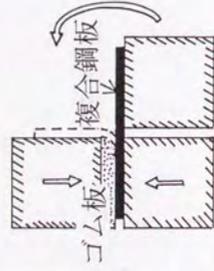
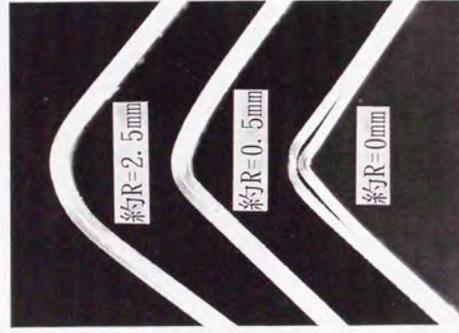


図8-50 タイプ4の製品の制振性結果



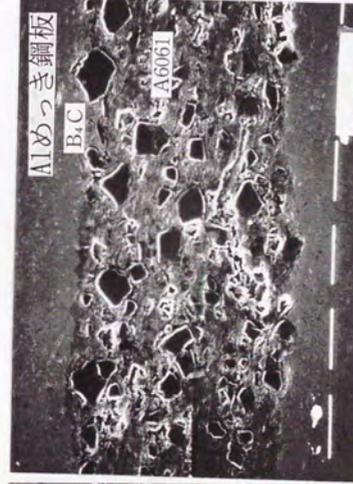
$T_p=360^\circ\text{C}$, $p=200\text{MPa}$, $r=77\%$

<(Al・Zn)合金めっき鋼板/Zn/(Al・Zn)合金めっき鋼板>

図8-51 タイプ4の製品の冷間曲げ加工における
曲げ半径と剥離の結果



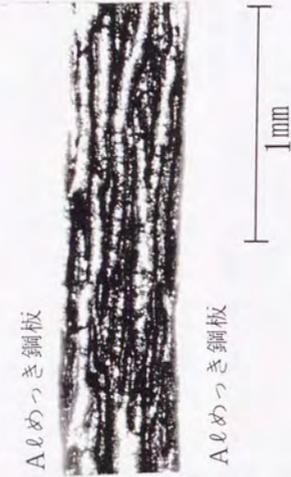
圧接後 $T_p=600^\circ\text{C}$, $p=200\text{MPa}$



圧延後 $r=64\%$ 0.2mm

<Alめっき鋼板/A6061+B₂C/Alめっき鋼板>, $V_p=50\%$, #325

図8-52 芯材に(A6061+B₂C)を用いたタイプ4の製品の内部組織



圧接後 $T_p=400^\circ\text{C}$, $p=200\text{MPa}$

圧延後 $r=61\%$

〈Alめっき鋼板/A6061+Mg/Alめっき鋼板〉, Mgの体積含有率70%

図8-5-3 芯材に(A6061+Mg)を用いたタイプ4の製品の内部組織

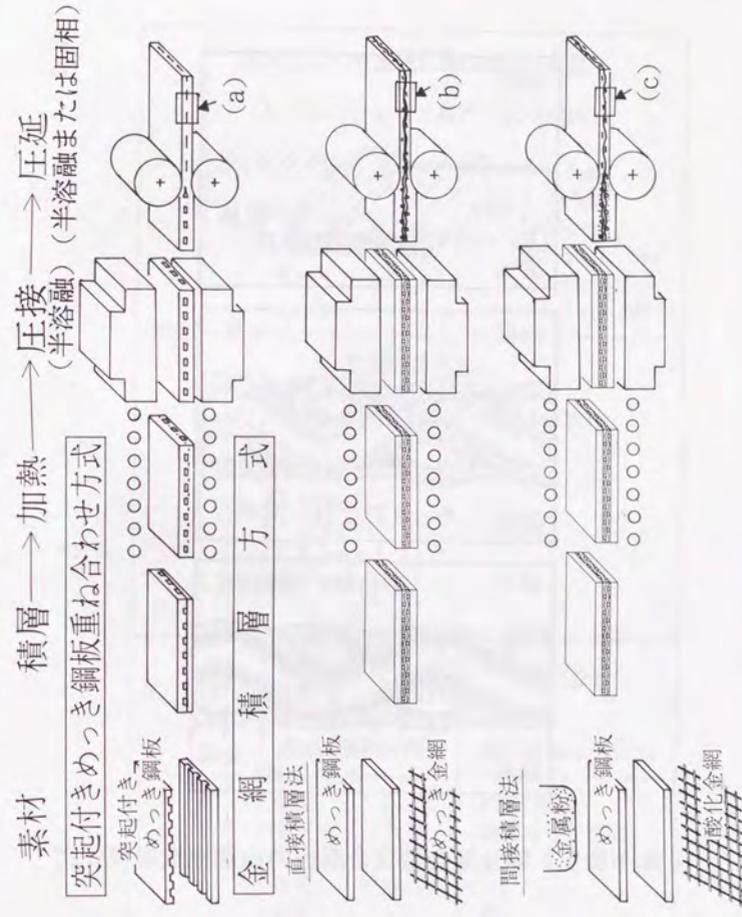


図8-5-4 部分接合型複合鋼板の製造・加工法の概要

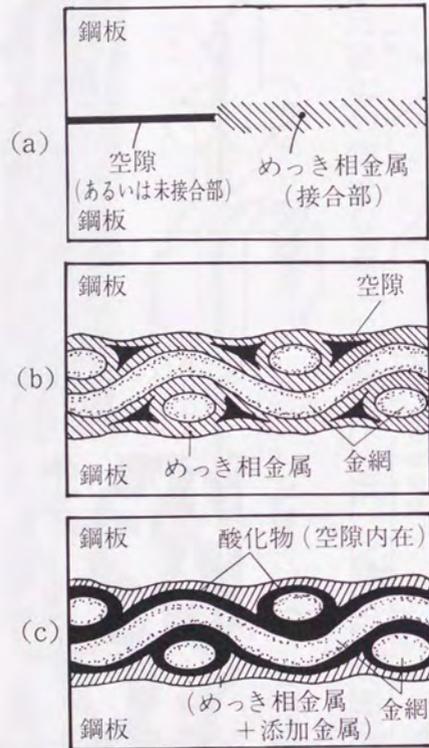


図 8-55 部分接合型複合鋼板の内部構造の模式図

表 8-8 部分接合型複合鋼板の製造実験条件一覧表

素材	突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式 (Al・Zn)合金めっき鋼板 (GL-AZ150)	
		t=1.6mm w=40mm L=160mm a=0.5, 1, 2mm b=2mm c=0.4~0.6mm
圧接	金網積層方式 (Al・Zn)合金めっき鋼板 (GL-AZ150)	
	平織り金網 φ0.25mm-#22 φ0.5mm-#10 φ0.8mm-#6 Zn粉末 #200	-----芯材
圧延	温度 $T_p / ^\circ\text{C}$	300~600
	加圧力 p / MPa	500
圧延	加圧保持時間 t / s	120
	プレス機械	油圧式max.100ton
圧延	温度 $T_r / ^\circ\text{C}$	約20(室温)
	圧下率 $r / \%$	約20以下(1A°s)
圧延	ロール /mm	φ250-110 同径2段
	速度 $v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.9
圧延	潤滑	無
	電動機	VS ϵ -722kw

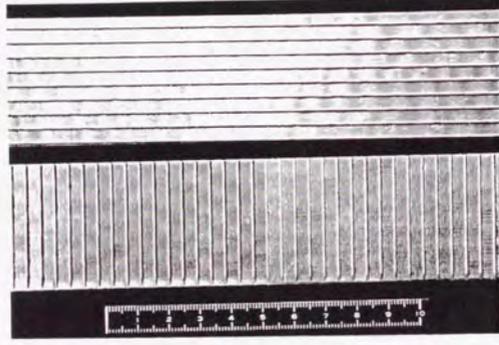
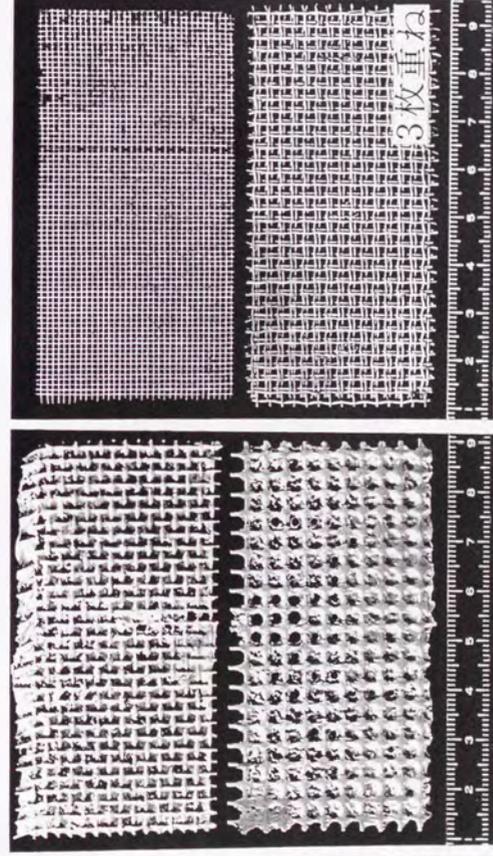


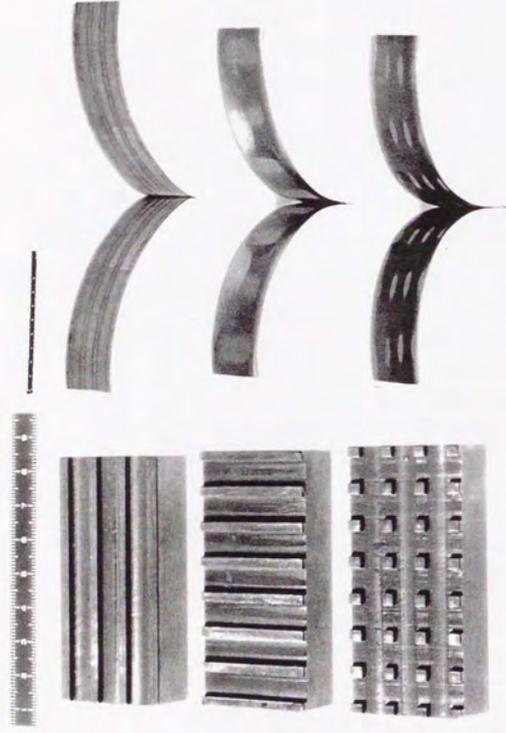
図8-56 突起付きめっき鋼板



再めっき金網

酸化金網

図8-57 金網直接積層法ならびに金網間接積層法に用いた金網



$T_p=360^{\circ}\text{C}$, $P=200\text{MPa}$, 約 $r=77\%$

<(Al・Zn)合金めっき鋼板/Zn/(Al・Zn)合金めっき鋼板>

図8-58 部分接合用圧接工具（ポンチ）と部分接合製品の
T_p試験後の様子

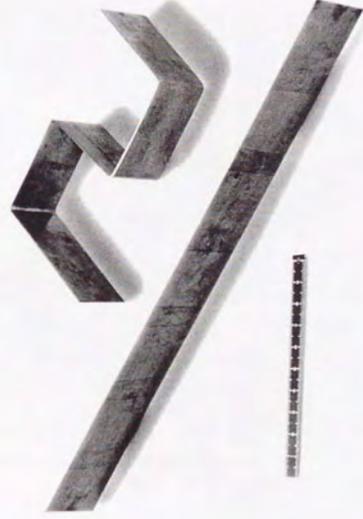


図8-59 部分接合型複合鋼板の製品例ならびに曲げ加工例

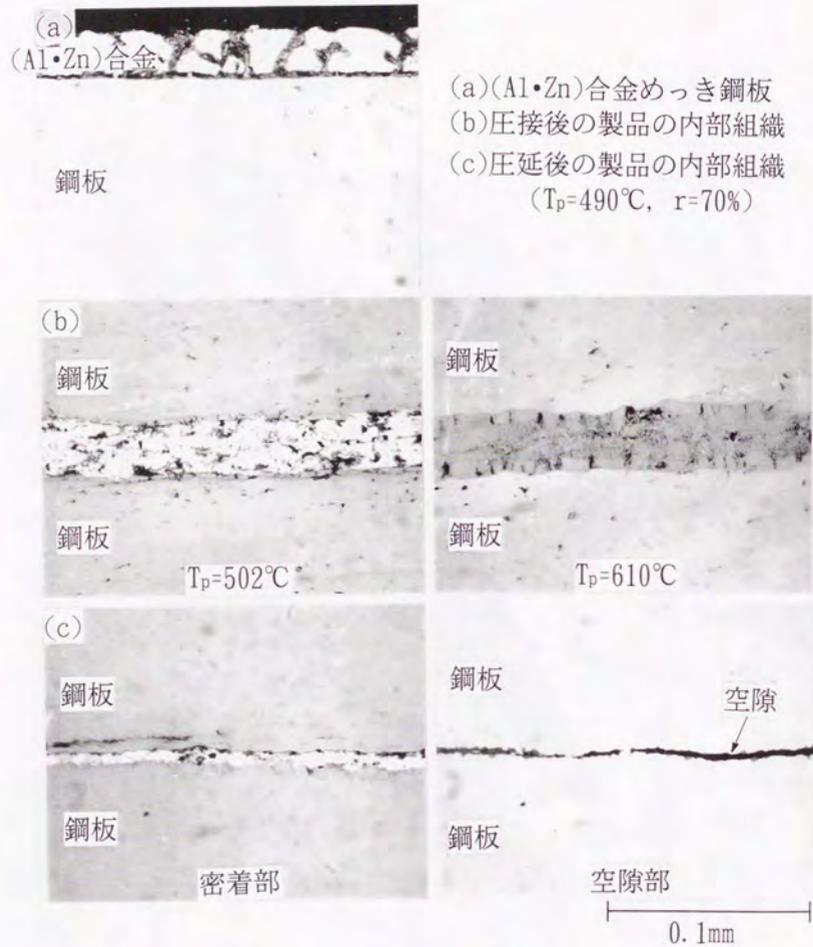


図8-60 突起付きめっき鋼板重ね合わせ方式による部分接合型複合鋼板の内部組織

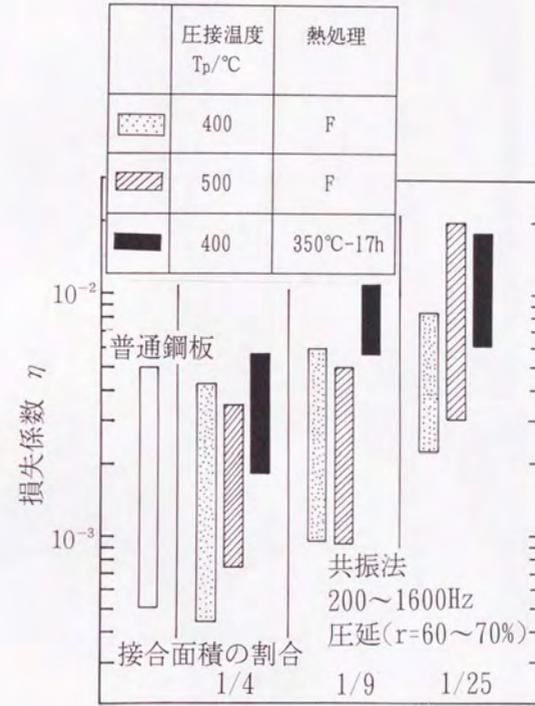
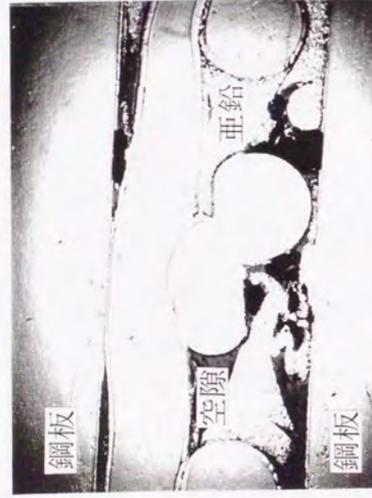
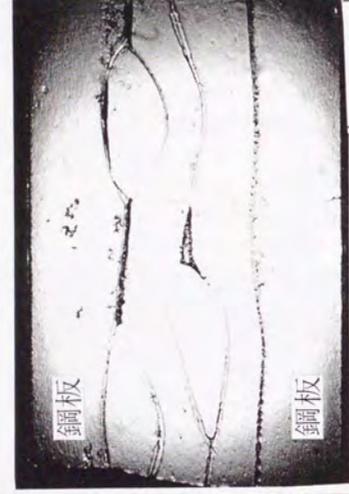


図8-61 部分接合型複合鋼板製品の制振性の結果



圧接後 $T_p=402^\circ\text{C}$, $P=30\text{ton}$



圧延後 $r=30\%$

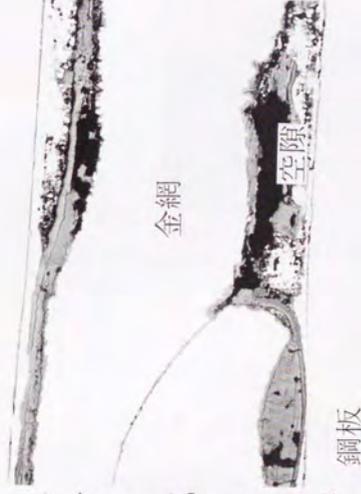
(Al·Zn)合金めっき鋼板 + 平織り金網3枚重ね
($\phi 0.8\text{mm}-\#6$, 亜鉛浴に浸せき)

(a)金網直接積層法

図 8-6-2 金網積層方式による部分接合型複合鋼板の内部組織 (1)



圧接後 $T_p=397^\circ\text{C}$, $P=20\text{ton}$



圧延後
(Al·Zn)合金めっき鋼板 + 平織り金網 + 亜鉛粉末
($\phi 0.5\text{mm}-\#10$, $900^\circ\text{C}-60\text{分}$)

(b)金網間接積層法

図 8-6-2 金網積層方式による部分接合型複合鋼板の内部組織 (2)

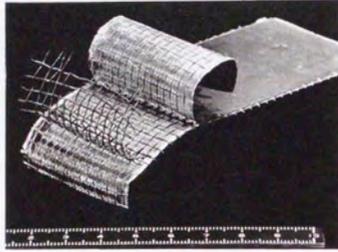


図8-63 金網直接積層法により製造した製品の
Tピール後の様子

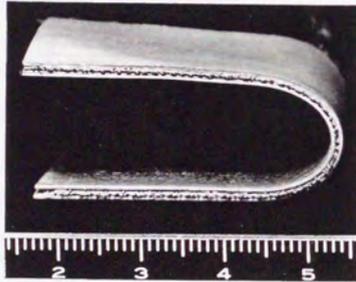


図8-64 金網直接積層法により製造した製品の
冷間曲げ加工例

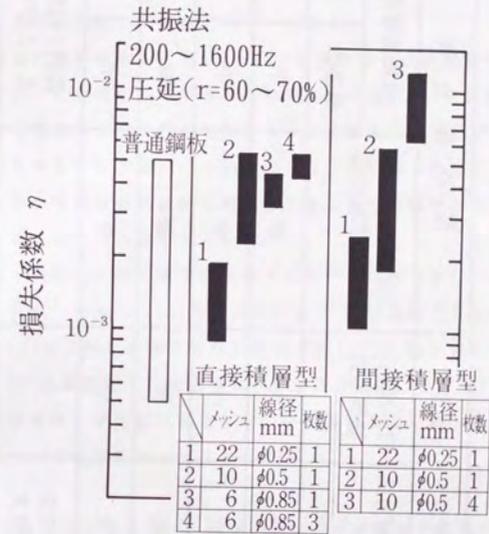


図8-65 金網積層法により製造した製品の制振性の結果

表 8-9 めっき鋼板を利用した各種複合鋼板の特性の比較

	サンドイッチ型		部分接合型	
	Zn積層方式	(Zn+黒鉛)積層方式	突起付きめっき鋼板方式	金網積層方式
			直接法	間接法
制振性	小	大	中	中
曲げ加工性	大	小	中	大
異方性	無	有	無	無
密着性	大	小	中	大
その他	高温での制振性大			金網を数枚重ねることが可

*(Al・Zn)合金めっき鋼板を使用する

第 9 章 結論

9. 1 緒言

本論文は、半溶融加工に関する基礎的研究と題し、金属（合金）材料の半溶融状態の基本特性ならびに半溶融加工法の基本特性について検討した結果をまとめたものである。すなわち、

- (a) 半溶融金属の基本的な特性の解明を目的に、内部組織の直接観察ならびに各種実用合金の変形抵抗について検討を行ったこと、
- (b) 固相率の測定技術の確立を目指し、(a)半溶融状態での金属材料の（圧縮）変形抵抗を求め、その値を基に固相率を推定する方法、(b)半溶融また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、その値を基に固相率を推定する方法、について新たな提案を行ったこと、
- (c) 均一・微細かつ等軸な結晶組織を有する半凝固処理金属材料を製造する新しい処理法（SCR法）の提案を行ったこと、
- (d) 通常の冷間・熱間塑性加工法では困難であるかまたはできない、(a)小荷重・高加工率を目指した加工、(b)難加工材の加工、(c)金属どうしの複合材料の製造と加工、(d)粒子強化型複合材料の製造と加工、(e)繊維強化型複合材料の製造と加工、(f)積層型粒子強化複合材料の製造と加工、の問題に半溶融押し出し法、半溶融鍛造法、半溶融圧延法などの半溶融製造加工法の適用を試み、その基本特性について検討を行ったこと、

である。

本章では、本論文の結論として、研究の成果と今後の検討課題について述べる。

9. 2 研究の成果

(1) 半溶融金属の基本的特性の解明

半溶融加工に関する研究の出発点として、特に高固相率域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について検討を行った。これまで、高固相率域においては2, 3の先駆的な研究があるだけで、金属の溶融域・低固相率域・固体領域の特性研究に比較し質・量ともに十分であるとはいえない。本研究により概略以下の成果を得た。

(a)高固相率域での半溶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、また半溶融金属に荷重を付加した場合、結晶粒はどのように変形するかなどに対し必ずしも明らかではなかった。こうした疑問に対し、金属学的にも価値ある観察結果が得られ、明確にすることができた。また半溶融金属の高温顕微鏡による直接観察手法についても提案できた。

(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溶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を明らかにした。この結果は、今後、半溶融加工法での加工条件の決定、被加工材の変形特性の把握、構成式の確立、解析モデルの構築とその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種類の半溶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。得られた結果は、データベースとして、半溶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。

(2) 固相率推定法の提案

固相率の測定技術の確立を目指し、(a)半溶融状態での金属材料の(圧縮)変形抵抗を求め、その値を基に固相率を推定する方法、(b)半溶融また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、その値を基に固相率を推定する方法、について新たな提案を行った。本研究により概略以下の成果を得た。

(a)固相率測定技術の確立は、半溶融加工条件の選定や製品特性の決定に深く関係し、半溶融・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り、体系的な研究は行われていない。本推定法の結果は組織凍結法から得られた結果とも概ねよい一致が得られ、固相率測定技術確立の手がかりを示すことができた。

(b)半溶融金属の変形抵抗は半溶融加工法における重要な加工条件因子である。これによって固相率の推定が可能なのがわかり、より半溶融加工に密着した情報が得られるようになった。

(c)本研究によって提案した固相率推定の基本的な考え方は、他の機械的特性(せん断抵抗や粘性抵抗など)、電気的特性(電気伝導度や誘電率など)、物理化学的特性(透磁率・密度・超音波速度など)などに対しても適用が可能であると考えられる。

(d)半溶融・半凝固加工時において加圧力付加のタイミングが製品特性に大きく影響をおよぼすことが一般によく知られている。しかし、そのタイミングを決定するために必要な固相率を瞬時に知る方法はいまだ確立されておらず、これまでのところ温度を指標として加工のタイミングを計っているのが現状である。電気的特性を利用し固相率を推定する本手法により、瞬時に固相率が推定でき、いわゆる固相率のインライン測定技術の可能性を示すことができた。

(3) 半凝固処理金属材料の製造法の提案

均一・微細かつ等軸な結晶組織を有する半凝固処理金属材料を製造する新しい処理法(SCR法)の提案を行った。SCR法には、現在研究が進められている機械攪拌法(レオキャスト法)や電磁攪拌法などの半凝固処理法にない様々な特徴のあることが判明し、特に、レオキャスト法と比較して、以下に示す特長を見出すことができた。

(a)レオキャスト法では、機械装置の構造上、冷却速度を早くすることには限界がある。したがって、冷却(抜熱)速度に起因する結晶粒の大きさも、 $30\mu\text{m}$ 以下にすることは現在のところ難しい。その点、SCR法では、冷却(抜熱)速度を格段に早くすることができ、 $10\mu\text{m}$ 程度の微細な結晶組織の処理材の製造が可能とな

る。結晶粒が $10\mu\text{m}$ 以下でない半凝固処理材としての特長が生かしきれないなどの報告もあり、こうした見地から、SCR法は微細な結晶構造材料の製造法として有用である。

(b) SCR法の装置は比較的簡単な機構であるため、装置の大型化・単純化・ラインへの組み込み化が容易である。また、工具は常に被処理材温度よりも低い温度で使用するために工具寿命が長く、また工具材の選択肢も広がる。

(c) レオキャスト法では、処理材の排出方向に重力以外の力が作用せず、排出は重力落下に頼る機構である。それに対しSCR法は処理材の排出方向にせん断力が作用するために排出が促進され、したがって生産性が向上し、半凝固処理材の量産化に有利である。

(d) 過共晶合金に対しSCR法を適用し、微細な晶出物や析出物が均一に分散する一体形（バルク形）の半凝固処理材の製造が可能となったことがわかった。

(4) 半溶融押出しの基本特性の検討

通常の冷間・熱間押出し法では困難であるかまたはできない、(a)小荷重・高加工率を目指した棒管材の加工、(b)難加工材の加工、(c)同心円状に積層した複合棒線材の製造と加工、(d)粒子強化型複合棒材の製造と加工、(e)チタン短繊維強化型複合棒材の製造と加工、(f)炭化珪素短繊維強化型複合棒材の製造と加工、の問題に半溶融押出し法を中心に据えた半溶融製造加工法の適用を試み、概略以下の成果を得た。

(a) 既存の押出し条件の拡張化

従来の冷間・熱間押出しでは、押出し荷重の増大によるダイスやコンテナの変形または破損を防止するために、被加工材の材質や押出し比に厳しい制限がある。アルミニウム合金に関していえば、合金化率の小さい1000番系、6000番系合金は冷間・熱間押出しに適した材料であるが、2000番系、5000番系、7000番系合金は、同様な条件では押し出されず、押出し比を小さくしたり、管製造においてはホローダイ方式からマンドレル方式にするなどの変更が必要となる。本研究結果から、A7075を用い半溶融押出しを行った例では、押出し比400 ($\phi 40\text{mm} \rightarrow \phi 2\text{mm}$)の細線、押出し比84 ($\phi 40 \rightarrow \phi 10, t 0.5\text{mm}$)の薄肉管の製造が可能であった。半溶融押出し

法は被加工材の材質や押出し比などの加工条件の拡張化に寄与する。

(b) 既存の押出し設備の縮小化

半溶融押出しと通常の熱間押出しとで押出しに必要な力を比較した場合、半溶融押出しは熱間押出しの数分の一でよいことが判明した。このことは、押出し機械や駆動設備あるいは押出しに必要なダイス・パンチ・コンテナなどの工具類の小規模化、小型化をもたらす。

(c) 金属溶湯からの直接加工の可能性

押出し時におけるピレットの固相率が零パーセントであってもテアリング（割れ）などの欠陥のない良好な製品が得られた。この事実は、ダイスの温度管理（制御）を適切に行うことにより、溶湯からの連続押出しの可能性を示す。

(d) 複合材料の製造ならびにその加工の可能性

通常の冷間・熱間押出しでは不可能であった複合材料の製造ならびにその加工が半溶融押出しによって始めて可能となった。例えば、①A1050を被覆材に用い、芯材にA7075を用いた積層型複合棒材の加工、また同組み合わせの、製品被覆率Cが0.03~0.04の極薄皮積層型複合棒材の加工、②セラミックス粒子を金属マトリックス中に40体積パーセント含有させた粒子強化複合棒線材の製造とその加工、③チタン短繊維などの金属繊維を金属マトリックス中に50パーセント含有させたチタン繊維強化複合棒材の製造とその加工、④セラミックス短繊維を破断させることなく、製品断面に均一かつ一方に整列させた短繊維強化複合棒材の製造とその加工、などである。

(5) 半溶融鍛造の基本特性の検討

通常の鍛造加工では製造や加工が困難であるかまたはできない、(a)鋳鉄の加工、(b)金属基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、の問題に半溶融鍛造法を中心に据えた半溶融製造加工法の適用を試み、概略以下の成果を得た。

(a) 既存の鍛造条件（材質）範囲の拡張化

冷間・熱間鍛造の場合、加工対象となる材質については厳しい制限があり、脆性材料のような延性の乏しい材料を加工することは極めて難しい。半溶融鍛造法

はこのような材料の加工に対しても適用が可能である。すなわち、半溶融鍛造には、ビレット内部に液相成分と固相成分を含有するため、通常液相成分が固相結晶粒を取り囲むように存在するが、結晶粒のすべりや回転が起こりやすく、したがって材料全体の変形が起こりやすいこと、また、変形中に結晶粒界が開き亀裂が発生しても、その亀裂に液相成分が浸入し亀裂を埋めてしまうこと、などの特性がある。

(b)液相成分と固相成分の変形流動差による複雑形状部品製造の可能性

半溶融鍛造は通常の冷間・熱間鍛造と加工行程を単純に比較する場合には大差がないが、加工にともなうビレット内部の材料の変形流動を比較する場合には大きな相違がある。すなわち、半溶融鍛造では、ビレット内部に固相成分と液相成分の2相が存在するため、加工の進行にともない液相成分と固相成分の変形流動差が顕著に現れる。この二相の流動差現象を利用することで、液相成分と固相成分のマクロ分布を意図的に行うことができる。例えば、歯車のような複雑形状部品に対して、歯先には流動しやすい液相成分を導き、中心部には元の固相成分を残留させるといったことが可能となる。

(c)傾斜機能材料の製造の可能性

(b)の変形流動差に起因する内部組織の不均一性を利用し、かつ熱処理を適切に行い、元液相成分から元固相成分に対し結晶粒の大きさ・形状あるいは析出物や晶出物の大きさ・形状・分布が変化する機能材料の製造が可能となる。例えば、片状黒鉛鋳鉄を用いた場合、液相成分が金型に接し急冷凝固した部分には塊状や球状の黒鉛が析出し、固相成分が凝固した部分には片状黒鉛が残留するといった、析出物の形状からみた傾斜機能材料が製造できる。

(d)金属とセラミックスとの複合材料の製造の可能性

金属とセラミックス粒子との複合材料の製造法にはこれまで溶湯含浸法やコンポキャスト法がある。これらの方法は、セラミックス粒子とマトリックス金属との偏在や未充填に対する十分な注意が必要であり、厳密な温度制御あるいは機械的攪拌や加圧を行うための新たな設備などが要求される。本製造法では、製造工程を粉末冶金的な方法に移行することができるために、既存の設備が利用でき強化粒子の均一分散ならびに、高濃度(約60体積パーセント程度にまで)に強化粒子含有した金属基粒子強化複合材料の製造が可能となる。

(e)金属とセラミックスとの複合材料の加工の可能性

強化粒子が数十パーセント含有された複合材料においては、切削加工以外、冷間・熱間塑性加工法により加工を行うことは極めて困難である。半溶融鍛造法により、このような複合材料に対しても加工が可能となる。

(f)粒子強化複合材料と金属素板との積層化の可能性

セラミックス粒子が混入された金属基粒子強化複合材料は、一般に耐摩耗性や耐熱強度の特性には優れているが、延性や靱性には劣っているために冷間での曲げ加工などができず、単独での使用には制限があった。この欠点を補うために、粒子強化複合材料を金属素板(裏金)に積層させる積層型粒子強化複合材料が種々提案されている。どの製造方法にも一長一短があるものの、特に素板と積層部(PRM)との接合強度に関してははまだ検討課題を多く残している。半溶融鍛造を中心とする製造加工法により、素板と積層部との接合強度に優れた積層型粒子強化複合材料(PRCM)の製造が可能となる。

(6)半溶融圧延の基本的特性の検討

通常の冷間・熱間圧延では製造や加工が困難であるかまたはできない、(a)難加工アルミニウム合金ならびに鋳鉄の板材加工、(b)積層型複合板材の製造、(c)アルミニウム基積層型粒子強化複合板材の製造と加工、(d)鉄基積層型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、の問題に半溶融圧延法を中心に据えた半溶融製造加工法の適用を試み、概略以下の成果を得た。

(a)既存の圧延条件(材質)範囲の拡張

金属板圧延技術は急速な発展を遂げている。特に、高速圧延技術や板厚・板幅などの形状制御圧延技術の進歩にはすばらしいものがある。しかし、被加工材の材質的な拡張に関してはまだまだ多くの制限があるように思われる。半溶融圧延法は、被圧延材質の拡張化の問題に対し大きく貢献する。すなわち半溶融圧延は、被圧延材中に液相成分と固相成分を内在しているために、ロールバイト内での材料の変形流動挙動は冷間・熱間圧延と比べ大きく異なり、延性の乏しい材料を圧延する場合においても、液相成分の存在のために変形が滑らかに起こり、また、粒子間に亀裂が生じても液相成分があるためにその亀裂を埋め接合させてしまう

特性がある。しかしこの特性が利用でき、熱間圧延に匹敵する製品を得るためには、固相率を90%程度以上にして圧延を行う必要がある。固相率がそれ以下になると後述するようにこれとは違った特性が現れるが、固相率が90%程度以上の半溶融圧延では、被圧延材中の固相成分と液相成分は一体となってほぼ均一に展伸され、また製品の機械的特性（引張強度・伸び）に関しても、熱間圧延のそれと同等となる。

(b) 圧延機ならびにその設備の小規模化

熱間圧延と固相率90%程度の圧延とでは、その他の圧延条件が同じ場合、半溶融圧延での圧延荷重は熱間圧延に比べ約1/2程度よいことがわかった。このことは、圧延機自体の大きさや駆動設備あるいはロールなどの工具の小規模化につながる。

(c) 金属溶湯からの直接製品化ならびに省工程化

圧延技術のもう一つの課題は、金属溶湯からの連続化ならびに省工程化があげられる。アルミニウム合金に関しては、ストリップ連続鋳造技術が実際に使われ溶湯から直接製品が製造されているが、銅合金や鉄合金に関してはいまだ未開発である。その原因としては、精錬工程からの形状不良あるいは組織不良（柱状晶組織・偏析・晶出物・析出物）が挙げられるが、この問題に関しては、近年、第4章において述べたように、半凝固処理金属材料の適用によって解決される見通しが高い。半溶融圧延はその後工程に位置し、従来の熱間冷間圧延工程を省略し、半凝固処理金属から直接薄板製品を製造することを可能にする。

(d) 機能材料の製造の可能性

半溶融圧延では、被圧延材の固相率が約70%以下になると、ロールギャップにおける材料内の液相成分と固相成分の流動変形はそれぞれ単独に起こる。すなわち、圧下力によって被圧延材中に静水圧の分布が発生し、その影響により、ロールギャップ内の液相成分は固相成分の間隙をぬって流動を始め、圧力が解放されている方向であるロールギャップ入口側の被圧延材の上下面に向かって流出する（絞りだされる）。流出してきた液相成分は、通常、ロールによって冷却され凝固しつつ再びロールギャップに引き込まれ圧延される。この間、固相成分は互いに拘束しあいながら圧延され、長手方向に展伸される。したがって半溶融圧延後の製品（板材）の内部組織は、高固相率下での圧延の場合を除き、板厚方向に不均一性を有するのが普通であり、中心部は圧延前の固相成分が残留し、表層部は圧延

前の液相成分が主に流動し構成される。また、固相成分がロールにより展伸される程度は、板厚中央部から表層部へ向かって次第に大きくなり、液相成分が凝固して構成される不均一な内部組織のみならず、固相成分についても板厚方向の不均一性が起こる。このような液相成分と固相成分の変形流動差に起因する製品の不均一性は好ましい場合と好ましくない場合とがある。好ましい場合では例えば、板厚中心付近は韌性に富む球状黒鉛鋳鉄となり表層部は耐摩耗性の良い片状黒鉛鋳鉄で構成される板材を製造し得ること、黒鉛の形状・寸法・分散を板厚方向に制御し傾斜機能を持つ板材の製造が可能であること、などである。

(e) 積層型複合板材の製造の可能性

金属の積層型複合材料（クラッド材）の製造法については、圧延圧接法・圧接法・押し出し法・引抜き法・爆着法・拡散法・焼結法・鍍金法・鋳ぐるみ法・溶射法など、これまで多くの方法が提案されまた実用化されている。これらは、塑性変形を利用した固相-固相の積層法、拡散による固相-固相の積層法、拡散による液相-固相の積層法に分類できる。半溶融圧延法による積層型複合板材の製造法は、塑性変形をも利用した固相-液相の積層法と定義することができ、これまでこのような積層法はなく、本製造法が初めてである。

(7) 半溶融複合加工の基本的特性の検討

冷間・熱間塑性加工またはこれまで述べてきた単独の半溶融加工では製造や加工が困難あるかまたはできない、(a)アルミニウム合金粉末の板材加工、(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、の問題に半溶融加工と既存の冷間・熱間塑性加工法とを組み合わせた半溶融複合加工法を新たに提案し、概略以下の成果を得た。

(a) 複合材料の製造ならびに加工

①金属粉末とセラミックス粉末の混合粉末を用いそれを板製品に製造また加工すること、②金属粉末と黒鉛粉末との混合粉末を2枚の金属板にサンドイッチ状に積層させ、制振板を製造すること、③材料内部に空隙あるいは未接合部を立体的（三次元的）に配列させた制振板を製造すること、など複雑構造の複合材料の製造・加工の問題に対し既存の製造法あるいは単独の半溶融加工法では対応できない。半溶融複合加工法によりはじめてこれらの製造と加工が可能となる。

(b)連続製造化

金属粉末あるいは金属粉末と強化粒子の混合粉末を使用し粉末冶金的な方法で板材製品を製造するには、一般的には焼結工程が必要であり、それによって一旦粉末どうしを結合させその後圧延を行わなければならない。そのため、粉末冶金法では製造工程がバッチ式あるいは半連続式にならざるをえず生産性や生産コストに問題が生じる。半溶融鍛造法と冷間・熱間圧延法を組み合わせた半溶融複合加工法により、金属粉末を焼結工程を必要とせず直接板材に加工することが可能となる。

(c)設備・行程の小規模化や簡略化ならびに既存設備の運用化

半溶融複合加工法は、これまで述べてきたように加工力の大幅な低減が達成でき、また、粉末冶金法に適用した場合、焼結行程が省略できるなど行程の簡略化が期待できる。めっき鋼板を利用した半溶融複合加工法では既存のめっき鋼板製造行程に半溶融加工設備を組み込むことが可能性であるなど、比較的小規模の設備ならびに既存設備との運用が可能となる。

(d)半溶融複合加工法の多様化

本研究では主に半溶融鍛造法と熱間圧延法、半溶融圧接法と冷間圧延法といった半溶融加工法と既存の冷間・熱間塑性加工法との複合加工法を提案した。この他にも、半溶融加工法どうしの複合加工法、粉末製造法（アトマイズ法）と半溶融加工法との複合加工法、半溶融加工法と熱処理技術との複合加工法、などが考えられる。

9.3 今後の検討課題^{1)~4)}

本論文で述べてきたことは全体を通じて実験室的規模での研究の成果であり、半溶融加工に関する基礎的な問題について広く浅く研究を進めてきた感じが否めない。今後さらにこの分野の研究を進め半溶融加工法を実用化段階にまで発展させていくためには、(a)これまでの研究を基にさらに深く掘り下げた基礎的研究と、(b)実規模にまで拡大した研究が必要であり、まだまだ解明すべき多くの課題が残されている。具体的には以下に示すような課題が挙げられる。

(a)固液両相の量的なバランス面での制御技術の確立

半溶融加工をより厳密に行うためには、液相成分と固相成分の量的バランスを正確にとらえなければならない。この量的バランスは液相成分と固相成分との偏在化に関係し、液相成分と固相成分が一体となって均一に変形させる場合には液相成分はそれに必要最低の量でよく、一方、偏在化を積極的に利用するためにはそれ相当の液相成分の量が要求されることになる。このような現象を制御するには、インラインでの固相率測定技術の開発が必要であり、また同様に、ピレット内における固液両相の分布状態がわかる透視技術の開発が必要となる。

(b)固液両相の変形流動に対する制御技術の確立

液相成分と固相成分の変形流動は異なり、液相成分は固相成分より自由面に向かって流動しやすい特性がある。この特性は、被加工材の材質、被加工材の寸法形状、固液両相の量比のバランス、加工速度、型形状によって影響を受ける。今後これらの関係を詳細に検討する必要がある。

(c)工具の温度管理技術の確立

半溶融加工では、半溶融状態にある被加工材が加工具通過中の一瞬の間に凝固しかつ固相成分が塑性変形し製品となる。こうした条件を満足するためには工具の温度管理（制御）技術が必要不可欠となる。

(d)半溶融加工に適した工具・機械・装置・行程（プロセス）の設計基準作り

半溶融加工法では、冷間・熱間加工法と違い、工具の使用温度が一般に高くまた一部溶融した金属が工具と直接接触する。したがって、冷間・熱間加工法と同じ工具材料では工具寿命の点からも好ましくなく、耐食性・耐熱性のある工具材

料を選択しなければならない。また、半溶融・半凝固処理金属の保持において注意すべき点は、時間とともに結晶粒径が拡大化することである。100 μm 程度の結晶粒径では、時間とともに結晶が成長する速度はあまり大きくない(1000秒保持してもそれほど成長しない)が、10 μm 程度の結晶粒径では、数10秒で結晶の成長が起こることが報告されており、いかに速く半溶融・半凝固処理金属を加工機の中に挿入し短時間で加工するかが問題となる。半溶融加工を本格的に実施する場合にはこうした点に注意する必要がある、工具・機械・装置・工程(プロセス)の新しい設計基準作りが必要となる。

9. 4 結言

近年、世界各地において半溶融・半凝固加工技術に関する関心が高まりつつある⁷⁾⁻⁹⁾。90年代に入り半溶融・半凝固加工技術に関する国際会議が始まり、1990年・フランス・C.E.M.E.F.、1992年・アメリカ合衆国・M.I.T.、1994年6月・日本・東京そして1996年6月には第4回国際会議が英国・SHEFFIELDにおいて開催される予定であるなど、国際的規模での情報の交換が積極的に進められてきている。

国内的にも、1988年3月から半凝固加工プロセスの研究開発を目的とし、鉄鋼14社と非鉄・重工の4社の計18社からなるR&D会社(株)レオテックが設立され⁸⁾、半凝固加工プロセスの実現に必要な基盤技術の確立をはかるため実質1994年9月までの間基礎研究が行われ、多くの成果が学協会にて報告されている⁹⁾。また、1988年4月から(社)日本塑性加工学会の中に半溶融・半凝固加工分科会が発足し、活発な活動が行われている。半溶融加工に関する研究・開発の体制が徐々にではあるが大学・民間企業・公的研究機関に広まりつつあるといえる。

半溶融加工法は、従来の塑性加工法にはない新規性・可能性・拡張性を有し、(a)製造加工行程の大幅な簡略化、(b)難加工材料の加工、(c)機能材料や複合材料の製造とその加工、などの問題に答え得る21世紀を目指した新しい加工技術であるといえる。

本論文で示した研究成果が今後この分野のさらなる発展の礎となることを期待する。

参考文献

- 1) 千々岩健児:半熔融金属の加工技術, 塑性と加工, 22-247(1981-8), P745-746.
- 2) 吉川昌範:半熔融金属の加圧成形およびその材質, 22-247(1981-8), P760-766.
- 3) 木内 学:半熔融加工法の開発と応用, 塑性と加工, 22-247(1981-8), P767-773.
- 4) 金属の半凝固加工プロセスに関する調査研究報告書:(社)日本機械工業連合会 (財)金属系材料研究開発センター,(1988).
- 5) (社)日本鉄鋼連盟:金属の画期的な製造+加工法 半凝固加工7th R&D会社「レオテック」が発足, 鉄鋼界報, 1443(1988-4), 2A^o-2^o.
- 6) 木内 学:半熔融・半凝固加工技術の現状と将来, 生産研究, 42-6(1990), P319-326.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) D. H. Kirkwood:European Trends in Semi-Solid Processing, Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1994-6), P19-23.

研究業績一覧表

1976-11	半熔融加工に関する実験的研究 第1報 (アルミ合金の半熔融変形抵抗・押し加圧力に関する検討)	第27回塑性加工連合講演会 講演論文集 P311-313	木内 学・新井博男 杉山澄雄
11	半熔融加工に関する実験的研究 第2報 (アルミ合金の半熔融押し材の特性に関する検討)	第27回塑性加工連合講演会 講演論文集 P314-317	木内 学・新井博男 杉山澄雄
1978-11	半熔融加工に関する実験的研究 第3報 (アルミ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)	第29回塑性加工連合講演会 講演論文集 P181-183	木内 学・杉山澄雄
11	半熔融加工に関する実験的研究 第4報 (低固相分率域を含むPb合金・アルミ合金の半熔融押し加工に関する検討)	第29回塑性加工連合講演会 講演論文集 P184-186	木内 学・杉山澄雄 新井博男
1979- 5	テンションリールへのコイル巻付けの力学特性	塑性と加工(20-220) P412-420	鈴木 弘・荒木甚一郎 阿高松男・杉山澄雄
8	Study of Metal Forming in the Mashy State 1st Report:Flow Stress and Deformation Behavior of Alloys in Mashy State	10th M. T. D. R. P71-78	M. Kiuchi・S. Sugiyama and K. Arai
8	Study of Metal Forming in the Mashy State 2nd Report:Extrusion of Tube, Bar and Wire of Alloys in Mashy State	10th M. T. D. R. P79-86	M. Kiuchi・S. Sugiyama and K. Arai
8	アルミ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) P762-769	木内 学・杉山澄雄 新井博男
9	鉛合金・アルミ合金の半熔融押し加工に関する検討 (半熔融加工に関する実験的研究 II)	塑性と加工(20-224) P826-833	木内 学・杉山澄雄 新井博男
11	半熔融加工に関する実験的研究 第5報 (クラッド材の押し加工に関する検討・1)	第30回塑性加工連合講演会 講演論文集 P260-263	木内 学・杉山澄雄

1980- 5	半溶融加工に関する実験的研究 第6報 (クラッド材の押し出し加工に関する検討・2)	昭55年塑性加工春季講演会 講演論文集 P481-484	木内 学・杉山澄雄
11	半溶融加工に関する実験的研究 第7報 (粒子強化複合材料の製造および加工に関する検討・1)	第31回塑性加工連合講演会 講演論文集 P223-226	木内 学・杉山澄雄

1981- 5	半溶融加工に関する実験的研究 第8報 (粒子強化複合材料の製造および加工に関する検討・2)	昭56年塑性加工春季講演会 講演論文集 P575-579	木内 学・杉山澄雄
11	半溶融加工に関する実験的研究 第9報 (粒子強化複合材料の半溶融鍛造に関する検討・1)	第32回塑性加工連合講演会 講演論文集 P329-332	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇
11	半溶融加工に関する実験的研究 第10報 (粒子強化積層複合材料の製造および加工に関する検討・1)	第32回塑性加工連合講演会 講演論文集 P333-336	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇

1982- 5	半溶融加工に関する実験的研究 第11報 (粒子分散強化型複合材料の半溶融鍛造に関する検討・2)	昭57年塑性加工春季講演会 講演論文集 P423-426	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇・鍛崎尚哉
5	半溶融加工に関する実験的研究 第12報 (積層型複合材料の半溶融圧延圧接に関する検討・2)	昭57年塑性加工春季講演会 講演論文集 P427-430	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇・鍛崎尚哉
5	半溶融加工に関する実験的研究 第13報 (半溶融還元法による粉末の製造)	昭57年塑性加工春季講演会 講演論文集 P431-434	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇・鍛崎尚哉
7	半溶融押し出し法によるクラッド材の製造に関する検討 (半溶融加工に関する実験的研究 III)	塑性と加工(23-258) P700-707	木内 学・杉山澄雄
9	半溶融加工法による粒子分散強化型複合材料の製造および加工 (半溶融加工に関する実験的研究 IV)	塑性と加工(23-260) P915-923	木内 学・杉山澄雄
11	半溶融加工に関する実験的研究 第14報 (粒子強化積層複合材料の製造および加工に関する検討・3)	第33回塑性加工連合講演会 講演論文集 P493-496	木内 学・杉山澄雄 鍛崎尚哉

1983- 5	半溶融加工に関する実験的研究 第15報 (繊維強化複合材料の製造・加工に関する検討・1)	昭58年塑性加工春季講演会 講演論文集 P21-24	木内 学・杉山澄雄 鍛崎尚哉・星野祐作
9	半溶融鍛造法による粒子強化複合材料の製造および加工	塑性と加工(24-272) P974-980	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇・鍛崎尚哉
11	半溶融鍛造法による粒子強化積層複合材料の製造およびその特性	塑性と加工(24-274) P1113-1119	木内 学・杉山澄雄 遠藤 昇

1984- 5	半溶融圧延に関する研究 第1報 (アルミ合金の半溶融圧延特性)	昭59年塑性加工春季講演会 講演論文集 P187-190	木内 学・杉山澄雄 星野祐作・川村 純
8	Production and Mechanical Property of Clad-Metals Laminated with Particle Reinforced Composite Metal and Ceramic Powder	4th I. C. M. P1013-1021	M. Kiuchi・S. Sugiyama
11	半溶融圧延に関する研究 第2報 (積層型粒子強化複合材料の製造・加工)	第35回塑性加工連合講演会 講演論文集 P311-314	木内 学・杉山澄雄 川平哲也・富岡美好

1985- 4	半溶融圧延による粒子強化積層複合材料の製造	鉄鋼協会109回春季講演会 講演論文集	木内 学・杉山澄雄
5	半溶融圧延に関する研究 第3報 (アルミ系積層型粒子強化複合材料の製造・加工)	昭60年塑性加工春季講演会 講演論文集 P57-60	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・川平哲也
5	半溶融圧延に関する研究 第4報 (鉄系積層型粒子強化複合材料の製造・工)	昭60年塑性加工春季講演会 講演論文集 P61-64	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・川平哲也
5	溶湯からの直接押し出しに関する研究-2	昭60年塑性加工春季講演会 講演論文集 P465-468	木内 学・杉山澄雄 川平哲也
10	溶湯からの直接押し出しに関する研究-3	第36回塑性加工連合講演会 講演論文集 P417-420	木内 学・杉山澄雄 川平哲也
10	半溶融圧延に関する研究 第5報 (鉄系積層型粒子強化複合材料の製造・加工(2))	第36回塑性加工連合講演会 講演論文集 P543-546	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・川平哲也
10	半溶融加工による繊維強化複合材料の製造および加工に関する研究・1	第36回塑性加工連合講演会 講演論文集 P547-550	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・川平哲也

1986-4	半溶融押しによるチタン短繊維強化FRMの製造・加工	鉄鋼協会111回春季講演会 講演論文集	木内 学・杉山澄雄
5	アルミ合金粉末の半溶融複合加工 第1報	昭61年塑性加工春季講演会 講演論文集 P571-574	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・山本隆嗣
5	半溶融加工による繊維強化複合材料の製造および加工に関する研究・II	昭61年塑性加工春季講演会 講演論文集 P575-578	木内 学・杉山澄雄 富岡美好・川平哲也
5	Production of Metal-Ceramic Composite Sheet by Mashy-State Rolling	14th N. A. M. R. C. P359-364	M. Kiuchi・S. Sugiyama
11	アルミ合金粉末の半溶融複合加工 第2報	第37回塑性加工連合講演会 講演論文集 P235-238	木内 学・杉山澄雄 山本隆嗣
11	半溶融圧延に関する研究 第6報 (金属粉末を用いた積層型複合材料の製造)	第37回塑性加工連合講演会 講演論文集 P239-243	木内 学・杉山澄雄

1987-4	半溶融圧延による複合板材の製造	第4回複合材料連合研究会 論文集 P104-107	木内 学・杉山澄雄
5	半溶融圧延に関する研究 第7報 (積層型複合鋼板の製造・加工)	昭62年塑性加工春季講演会 講演論文集 P327-330	木内 学・杉山澄雄
8	Mashy-State Rolling of Composite Sheets	Advanced Technology of Plasticity 1987 Volume II P753-758	M. Kiuchi・S. Sugiyama
9	半溶融圧延圧接法による鋳鉄積層鋼板の製造	第114回鉄鋼協会講演大会講演論文集 S1501 P361	木内 学・杉山澄雄
10	半溶融圧延に関する研究 第8報 (めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工)	第38回塑性加工連合講演会 講演論文集 P129-132	木内 学・杉山澄雄
10	アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工 第3報	第38回塑性加工連合講演会 講演論文集 P133-136	木内 学・杉山澄雄 高木茂義
11	半溶融圧延によるアルミ系積層型粒子強化複合板材の製造	塑性と加工(28-322) P1166-1172	木内 学・杉山澄雄 富岡美好

1988-3	半溶融押しによる片状チタン短繊維強化複合材料の製造	塑性と加工(29-326) P279-285	木内 学・杉山澄雄
3	半溶融圧延圧接法による複合鋼板の製造	第115回鉄鋼協会講演大会講演論文集	木内 学・杉山澄雄
5	アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工 第4報	昭63年塑性加工春季講演会 講演論文集 P163-166	木内 学・杉山澄雄 高木茂義
5	半溶融圧延に関する研究 第9報 (めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工 2)	昭63年塑性加工春季講演会 講演論文集 P167-170	木内 学・杉山澄雄
5	半溶融押し加工材のSEM観察	昭63年塑性加工春季講演会 講演論文集 P171-174	関口秀夫・杉山澄雄 木内 学
5	半溶融圧接・圧延法による粒子強化積層複合板材の製造	第114回塑性加工シンポジウム テキスト P13-22	木内 学・杉山澄雄
10	半溶融圧延に関する研究 第10報 (めっき鋼板を利用した複合鋼板の製造・加工 3)	第39回塑性加工連合講演会 講演論文集 P581-584	木内 学・杉山澄雄
11	アルミニウム合金粉末の半溶融複合加工	材料とプロセス(1-5) P1477-1480	木内 学・杉山澄雄 高木茂義
11	半溶融加工法による新素材の開発 (半溶融圧延法による粒子強化積層複合)	第689回日本機械学会講習会 テキスト P1-5	木内 学・杉山澄雄

1989-5	半溶融圧延に関する研究 第11報 (鋳鉄板の半溶融圧延 1)	平1年塑性加工春季講演会 講演論文集 P57-60	木内 学・杉山澄雄
5	半溶融圧延による鉄系積層型粒子強化複合板材の製造	塑性と加工(30-340) P650-664	木内 学・杉山澄雄
10	鋳鉄の半溶融鍛造 1	第40回塑性加工連合講演会 講演論文集 P631-634	木内 学・杉山澄雄
10	半溶融複合加工によるアルミニウム基粒子分散強化複合板材の製造とその加工性	塑性と加工(30-345) P1427-1433	木内 学・杉山澄雄 高木茂義
11	半溶融加工法による短繊維強化複合材料の製造	塑性と加工(30-346) P1524-1531	木内 学・杉山澄雄 鎌崎尚哉・星野祐作
11	Manufacturing of Metal-Ceramics Composites	Metallurgical Processes for the 2000 and Beyond (1989)	M. Kiuchi・S. Sugiyama
	鋳鉄板の半溶融圧延・1	第118回鉄鋼協会講演大会講演論文集	木内 学・杉山澄雄

1990- 1	半溶融複合加工によるアルミニウム基粒子分散強化複合板材の製造とその加工性	住友軽金属技報 (31-1) P38-45	木内 学・高木茂義 杉山澄雄
3	半溶融圧延法による制振鋼板の製造	第5回複合材料連合研究会論文集	
	Application of Mashy State Extrusion	J. Materials Shaping Technology (8-1) P39-51	M. Kiuchi・S. Sugiyama
4	Manufacturing of Metal-Ceramics Composites by Mashy-State Processings	Proc. 1st Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites	M. Kiuchi・S. Sugiyama
4	Mashy-State Rolling of Al-Alloy and Cast Irons	Proc. 1st Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites	M. Kiuchi・S. Sugiyama
5	鋳鉄の半溶融鍛造・第2報	平2年塑性加工春季講演会講演論文集 P371-374	木内 学・新井勝男 杉山澄雄

1991- 4	製造法の特性ならびに製品の外觀性状 (せん断冷却ロール法による半凝固金属材料の製造・1)	第121回鉄鋼協会講演大会講演論文集	木内 学・杉山澄雄
4	製品の内部組織・硬さ特性・熱処理特性 (せん断冷却ロール法による半凝固金属材料の製造・2)	第121回鉄鋼協会講演大会講演論文集	木内 学・杉山澄雄
5	製造法の特性ならびに製品の外觀性状 (せん断冷却ロール法による半凝固金属材料の製造・1)	平3年塑性加工春季講演会講演論文集 P1-4	木内 学・杉山澄雄
5	製品の内部組織・硬さ特性・熱処理特性 (せん断冷却ロール法による半凝固金属材料の製造・II)	平3年塑性加工春季講演会講演論文集 P5-8	木内 学・杉山澄雄
8	Mashy-State Rolling of Aluminum Alloys and Cast Irons	Annals of the CIRP. 40 1 P259-264	M. Kiuchi・S. Sugiyama
9	半溶融・半凝固金属の固相率の測定法・I	第42回塑性加工連合講演会講演論文集 P647-650	木内 学・杉山澄雄

1992- 4	鉄/チタンクラッド板の高温圧延加工特性	第123回鉄鋼協会講演大会講演論文集	木内 学・杉山澄雄
5	半溶融・半凝固金属の固相率の測定法・II	平4年塑性加工連合講演会講演論文集 P295-298	木内 学・杉山澄雄
6	A New Process to Manufacture Semi-Solid Metals	Proc. 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites P47-56	M. Kiuchi・S. Sugiyama
6	Application of Mashy Metal Processing and Forming Technologies to Manufacturing Fiber Reinforced Metals	Proc. 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites P382-389	M. Kiuchi・S. Sugiyama
10	S C R法により製造された半凝固金属素材の二次加工特性・1	第43回塑性加工連合講演会講演論文集 P469-472	杉山澄雄・木内 学 柳本 潤

1993- 5	鉄系合金の半凝固処理材の製造 (せん断冷却ロール法による半凝固処理金属の製造・3)	平5年塑性加工春季講演会講演論文集 P269-272	杉山澄雄・木内 学 柳本 潤
8	半溶融・半凝固加工技術の動向	日本金属学会シボゾム予稿 P13-16	杉山澄雄
10	S C R法により製造された半凝固金属素材の二次加工特性・2	第44回塑性加工連合講演会講演論文集 P667-670	杉山澄雄・木内 学 柳本 潤・田辺明三

1994- 5	高速型S C R機による半凝固処理材の製造 (せん断冷却ロール法による半凝固処理金属材料の製造・4)	平6年塑性加工春季講演会講演論文集 P443-446	杉山澄雄・木内 学 柳本 潤・田辺明三
6	Mashy-State Extrusion, Rolling and Forging	Proc. 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites P245-257	M. Kiuchi・S. Sugiyama
10	過共晶Al-Si合金の半凝固処理材の製造 (せん断冷却ロール法による半凝固処理金属材料の製造・5)	第45回塑性加工連合講演会講演論文集 P109-112	杉山澄雄・木内 学 柳本 潤・田辺明三
	A New Method to Detect Solid Fractions of Mushy/Semi-Solid Metals and Alloys	44th CIRP-1994. Manuscript P271-274	M. KIUCHI・S. SUGIYAMA

1995- 5	高温顕微鏡による合金材料の半溶融状態の観察	平7年度塑性加工春季講演会 講演論文集 P115-116	木内 学・杉山澄雄 田辺明三
10	高温顕微鏡による合金素材の半溶融状態の観察・2	第46回塑性加工連合講演会 講演論文集 P363-364	木内 学・柳本 潤 杉山澄雄・田辺明三
10	せん断冷却ロール法による半凝固処理金属の製造	第165回塑性加工ショウ・デラム テキスト P67-79	杉山澄雄
1996- 4	鑄鉄の半溶融鍛造	「塑性と加工」論文投稿中	木内 学・杉山澄雄 新井勝男
4	半溶融（半凝固）金属の固相率推定法の検討	「塑性と加工」論文投稿中	木内 学・杉山澄雄
5	高温顕微鏡による合金材料の半溶融状態の観察・3	平8年度塑性加工春季講演会 講演論文集 P268-269	木内 学・柳本 潤 杉山澄雄・田辺明三

謝辞

本論文は、東京大学生産技術研究所・木内研究室、柳本研究室において、昭和50年(1975年)4月から平成8年(1996年)2月まで、20年余に亘り行ってきた半溶融加工に関する研究をまとめたものです。

その間、木内 学先生には終始一貫した半溶融加工研究の直接のご指導に加え、研究に対する心構え、研究論文の書き方、研究発表の仕方などここに到達するまでの一切に関し暖かいご助言とご援助を賜りました。また、柳本 潤先生には平成4年(1992年)4月から同研究所・柳本研究室の助手とし配置替えとなった後これまで、暖かいご配慮とご指導を賜りました。ここに深く感謝致します。

また、この論文には、㈱横尾製作所 新井博男氏、元松本精機㈱ 遠藤 昇氏、星野祐作氏、富岡美好氏、元三井アルミニウム工業㈱ 鍛崎尚哉氏、川桐 純氏、川平哲也氏、東洋アルミニウム㈱ 山本隆嗣氏、住友軽金属工業㈱ 高木茂義氏、奈良工業高等専門学校 関口秀夫先生、㈱曙ブレーキ中央研究所 新井勝男氏との共同研究の成果が含まれております。皆様方のご協力によって論文の形にまとめることができました。ここにお名前を記し、皆様方に深く感謝致します。

さらに、東京大学生産技術研究所・試作工場の皆様方には、実験設備・工具・試験片の作製に常に懇切丁寧なご指導を頂きました。そして、映像技術室の皆様方には、実験設備・工具・試験片・実験過程の写真やビデオ撮影などにおいて心温まるご協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

最後に、研究のみならず研究室での日常生活において、数多くの励ましや示唆にとんだご助言そして公私を越えたご協力を頂いた新谷 賢助手、田邊明三技術官、木内研究室、柳本研究室に在籍の研究員・研究生・留学生・大学院生そして秘書の皆様方に深く感謝致します。

平成8年(1996年)5月13日

杉山澄雄

