

半溶融加工法の開発と高温加工の複合化

Metal Forming in MASHY State and Combined Processing of Metal
in High Temperature Range

木内 学*

Manabu KIUCHI

近年、連続鋳造法、アキュラッド法、溶湯鍛造法などの発展に伴って、溶湯から素形材または最終製品を得る直接加工法、あるいは溶湯から固体に至る半溶融状態の特性を利用した半溶融加工法の開発が、省エネルギーおよび省資源の観点から注目されている。ここでは、これらの技術の動向と、筆者らが開発を進めている半溶融加工法の概要を述べる。

1. はじめに

高温域における金属材料の加工法を従前的な考え方に基づいて大別すれば、(1)鋳造加工、(2)溶接加工、(3)熱間塑性加工、(4)粉末冶金、等の分野に分けることができる。これらの加工法は、溶湯の秀れた流動性と造形性、溶融金属の接合性・分離性、熱間域における変形抵抗の低下と変形能の向上、あるいは粉末金属の秀れた造形性・混合組成の任意性あるいは高温域での拡散・結合性の向上、など高温下での金属材料の多様な特性を利用したものである。

個々の加工法は、各々独自の特徴・利点を有する加工技術として、社会的・工業的要求に基づいて開発され発展し、様々な形で実際生産の場に適用されているが、同時に、加工技術上あるいは手法上の制約または限界をも有している。したがって従前的な枠内で、しだいに高度化する工業的な諸要求や加工技術上の諸問題に対処しようとする限り、おのずからそこに加工法としての機能的限界あるいは適用上の限界が存在する。他方、これらの加工法が有する特徴・利点は、必ずしも従前的な各加工法固有の手法によってのみ実現可能であるとは限らず、適切な付加的な手法または機械設備の開発、あるいは各加工法の有機的結合などを考慮し、種々の複合的な形態での適用を図ることによって、従前的な枠を越えてその特徴・利点をより以上に拡張して活かすことが可能である。かつまたそのような試みを通じて、従前的な加工法の制約を打破し、加工機能あるいは加工限界の高度化、ひいては新しい加工法・加工技術の開発の可能性も生まれてくると考えられる。

本報では、このような見地から、最初に、高温下での金属材料の加工法のうち特に注目されるものを幾つか採りあげ、その技術的發展の経過ならびに現状の概要を述べるとともに、筆者らが開発を進めている半溶融加工法

の概要とその複合加工技術への発展の可能性などについて述べる。

2. 連続鋳造法から直接圧延へ

溶湯から直接圧延された板材または棒材を製造しようとする試みは、H. Bessemer により提案された双ロール型直接圧延法が最初であり、その基本的な考え方は、鋳造加工と熱間塑性加工の複合化の典型的な例として理解することができる。しかしながら現在行われている連続鋳造法は、本来の直接圧延の概念から離れ、主として鋳造・造塊という工程にとどまっておき、加工技術としては独自の立場を確立してはいるものの、まだ大きな課題あるいは可能性を残していると言える。これには種々の方式があるが、代表的なものとその特質は以下のとおりである。まず、連続鋳造法の出発点となった双ロール方式は2個の回転ロールの間に直接溶湯を注ぎ込み、その間で冷却・凝固させるもので、現在実用化されているものとしては Hunter 法がある(図1参照)。この方法では、素材はその内部に液相成分、外層部に固相成分が存在する状態において、ロールによりわずかに圧下されるが、加工の内容は本質的に鋳造加工と考えられ、主としてアルミニウムの板材や箔の製造に適用されている。回転体による連続作業の特徴を生かしつつ、より安定なプロセスを実現したのが Wheel and Belt 方式である。これは

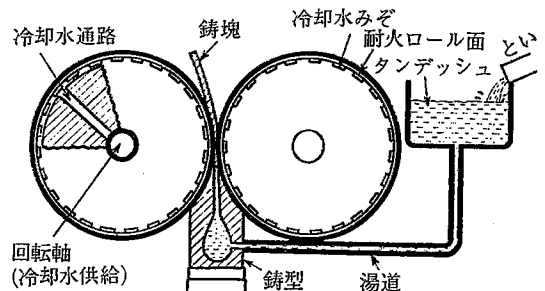


Fig. 1 Schematic Diagram of Hunter Process

* 東京大学生産技術研究所 第2部

表面に円周方向の溝を切った回転鑄造論と溝の表面をおおうように取り付けられた鋼製のベルトからなり、この溝中に注湯して連続的に凝固させる方式である。この方式としては Properzi 法(図2参照)、Spidem 方式、SCR 方式があり、アルミニウム・銅の線材用素材の製造に用いられている。また、小幅・中幅の板材を製造する方式としては、Mann, Impact, Gautch の方式がある。これらの方式はいずれも、鑄造工程の直後に圧延工程を有しており、それぞれ工程は分かれているものの、それらを有機的に結合して一貫した連続作業によりきわめて高い生産性を以て溶湯から最終製品を得ることが可能である。したがって直接圧延とは異なるものの、鑄造加工と熱間塑性加工との複合化が達成された代表的な加工プロセスと考えることができる。強制冷却した鑄型から凝固した製品を連続的に引き出す方式も幾つか実用化されており、垂直型、水平型、わん曲型方式などがある。このうちわん曲型方式は鑄塊の大型化と高速処理の要求に対応するために採用され、鑄型内面を円弧形とし、鑄塊をわん曲させて取り出し、圧延ロールによりわずかの圧下を加えながら水平方向に延伸させつつ製造する方式である(図3参照)。この方式では、素材の内部に液相成分が残留する段階で曲げ加工を加えることになるが、近年この段階でロールにより大きな圧下を加える直接圧延方式が関心を集めており、様々な角度から検討が加えられている。これにより、大型鑄塊の連続鑄造から所要の小型鑄片を直接製造できる、あるいは中心部の組織の劣化を加压・急速凝固により防止できる、などの利点があるとされ、鑄造加工と熱間圧延加工の本格的な複合化の試みとして注目されているがまだ開発の段階である。

以上の例からも判るように、連続鑄造法は、本質的に鑄造加工と熱間の塑性加工との複合化を指向しており、その結果として高い生産性あるいは材料歩どまりの向上やエネルギーコストの低減など多くのメリットが期待できる。この複合化を達成しそれによる利点を實際生産の場において十分活かすためには、まだ解決すべき問題が多く残されている。特に凝固の途中段階、あるいはより一般的に考えて半熔融状態における加工時の素材の基本的特性、あるいはその結果得られる製品の品質、さらにまた複合化を実現するための具体的手段、とりわけ被加工材の温度制御のあり方とその手法、あるいは高温下での使用に耐える工具材料、などに関する検討がなされる必要がある。

3. 高速鑄造法とその動向

鑄造加工の機械化・自動化あるいは製品品質の高度化の試みは、様々な角度からなされているが、加工プロセスの複合化という見地から、ダイカスト法およびアキュラッド法が多く示唆を与えている。

ダイカスト法は、プランジャにより溶湯に機械的な

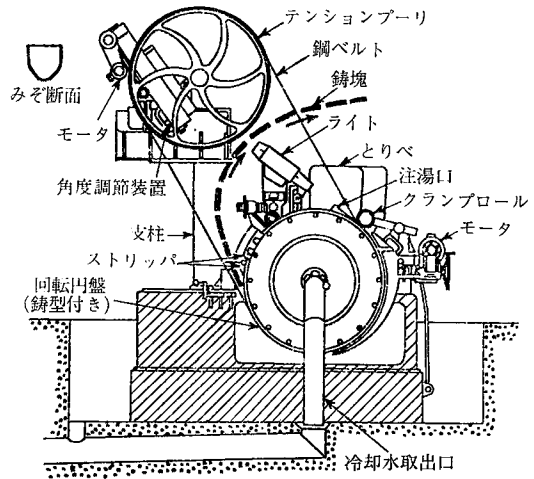


Fig. 2 Schematic Diagram of Properzi Process

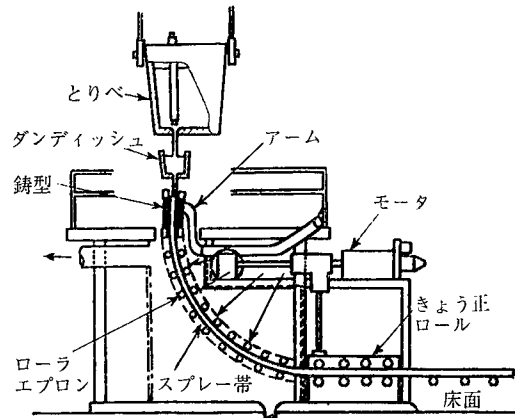


Fig. 3 Schematic Diagram of Continuous Casting Process with Curved-Mold

力を加え強制流動を生じさせて高速で金型中に鑄込み、鑄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・細物製品の鑄造を実現し、併せて製品の精度を著しく向上させたものであり、アルミニウム・亜鉛等の加工に広く適用されている。この方法は従来溶湯の自然流動に頼っていた鑄造加工に機械的な強制流動の手法を導入したという意味で原初的な複合加工プロセスと考えることもできるが、金型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、加工力を加えないという点から、現状では本質的には鑄造加工の一方式である。しかしながら、この加工法にはまだ多くの可能性が残されている。たとえばダイカスト法と半熔融鍛造あるいは熱間鍛造加工の結合は容易に予測されるものであり、溶湯素材の供給と予成形加工としてのダイカスト法および仕上げ加工としての半熔融または熱間鍛造加工の組合せは、従来考えられなかった高速かつ高加工度を達成する

複合加工プロセスを実現させる可能性がある。

アキュラッド法は、ダイカスト法の欠点であるガスの巻込みと引け巣の発生を防止するように考案されているが、機械装置はほとんど同じであり、異なるのは次の4点、(1)大きな湯口を設ける、(2)遅い注入速度で鑄込む、(3)2段式のプランジャを有する、(4)金型冷却を制御し、指向性凝固を行わせる、である(図4参照)。(1)、(2)により最終凝固部がプランジャ近くにくるように制御し、引け巣が発生する寸前にインナープランジャーで溶湯を押し込み、その発生を防止することができる。この方法は凝固末期においてインナープランジャーにより加圧力を付加し引け巣の発生を防止するが、この加圧力は単に溶湯を補給して引け巣の発生を防ぐばかりでなく、凝固末期または凝固終了直後の素材の流動・変形に寄与する可能性がある。現状では基本的に鑄造加工の一方式であると考えられるものの、先にダイカスト法について述べたのと同様な意味で、潜在的な可能性としては鑄造加工と熱間塑性加工の複合加工プロセスとしての特性を備えている。この特性を活かし、複合加工プロセスとして拡大・発展させていくためには、目的に応じた指向性凝固のあり方およびそれを実現する冷却方法に関する検討、溶湯を金型内に注入する際の湯流れの正確な把握、さらにインナープランジャーの押し込みのタイミングの厳密な制御、など、アキュラッド法そのものにかかわる問題のほかに、その後加工に関連して金型の構造・材質・強度、金型内における外力の付加方法、などについて今後一層の研究が必要である。特に、凝固終了直前のいわゆる半溶融状態における金属材料の物理的・機械的特性あるい

は変形・流動時の挙動について、十分なデータを集積することも重要と考えられる。

4 溶湯鍛造法とその拡張

溶湯鍛造法は、半鍛造法・高圧鑄造法とも呼ばれ、鑄型内の溶湯に機械的な高圧を加えて成形凝固させる鑄造法である。この加工法は、ダイカスト法の欠点を除き、長所をのばす目的で開発され、現在鑄鉄から鋼に至るまで適用されている。主要方式には次の3種類、すなわち、(1)プランジャー加圧凝固法、(2)直接押し込み法、(3)間接押し込み法、がある(図5参照)。(1)は、溶湯の流動がなく、高静水圧下で成形凝固させるもので、比較的単純な形状の厚肉製品に適用されている。凝固時間は重力鑄造法に比して1/3程度に短縮される。(2)は、雄型パンチの押し込みによって溶湯が移動し、その後加圧しながら凝固させる方式である。この場合、パンチの最終位置は溶湯量により左右されるので定量給湯が重要となる。(3)は、アキュラッド法に似ているが大きな湯口を必要としないなどの構造上の違いがある。また立型ダイカストと似ているが、溶湯が噴流あるいは極端な渦を発生しない等の相違がある。

加圧下の凝固による製品の機械的性質の改善は、上記3種の方式のうち、プランジャー加圧凝固法において最も顕著であるとされているが、他の2方式においても、加工条件の選択如何で、十分な加圧効果は期待できる。アキュラッド法の場合同様、溶湯鍛造法も本質的に鑄造加工と熱間塑性加工との複合加工プロセスへの拡大発展の可能性を有しており、目的に応じて型内における凝固の程度と塑性的な変形・流動の組合せ、およびそのシ

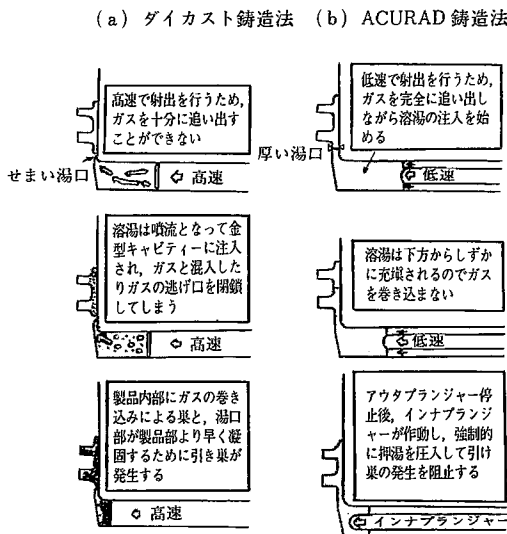


Fig. 4 Comparison between ACURAD Process and Die-Casting Process

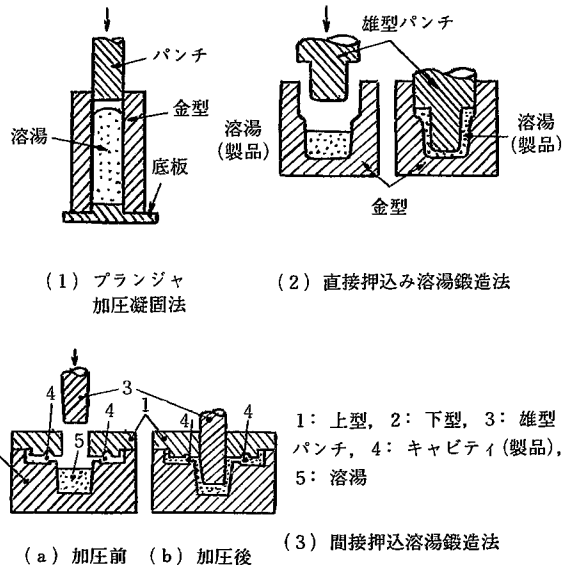


Fig. 5 Schematic Diagrams of Typical Processes of Forged Casting

一ケンスを最適化していくことにより、新しい加工プロセスへと展開していくことが期待できる。さらに応用面での拡張も試みられ、特に複合材料(クラッド材・繊維強化複合材)の製造に適用され、顕著な成果をあげていることなどもこの加工技術の将来性をうかがわせるものとして注目される。

5. 半溶融加工法の開発

上述の各種の鋳造加工法およびその拡張を試みる場合、材料の溶湯から固体への過渡的な段階、すなわち、半溶融状態における挙動が種々の意味で問題となるが、近年、この半溶融状態における材料の特性を積極的に利用した加工法の開発が進められている。これは主として各種合金材料を対象とし、その固相線以上の温度域で材料内に固相成分と液相成分が共存または並存している状態を定期的に作り出し、そこで急激に大きな変形を加えて所要の製品を製造しようとするものである。

一般にこのような半溶融状態では、液相成分が粒界に偏在し、そのために各結晶粒間の相対向き、各結晶粒の変形や回転に対する結晶粒相互間の束縛が大幅に緩和され、巨視的にみた材料の変形・流動が極めて容易になる。また、液相成分による材料・工具間の潤滑効果も期待できる。したがってこのような特性を利用する半溶融加工法には、概略次の利点あるいは可能性がある。すなわち、(1)加工力が著しく低下する。したがって加工機械・設備の簡易化・小型化が可能となる。(2)単一工程で高加工度を達成できるため、加工プロセスの短縮が可能になると同時に細物の棒、線材、薄肉の管材・サッシ、などが大きな素材から比較的容易に製造できる。(3)適当な冷却手段を併用することにより、溶湯から半溶融状態を経て最終製品に至る、いわゆる一貫した直接加工を実現でき、熱エネルギー消費率の少ない新しい加工法に結びつく可能性がある。(4)製品の強度・伸び率等の性質については、鋳造材よりも熱間加工材に近く、半溶融加工後の二次加工も十分可能である。また、半溶融加工を粗加工工程として適用し、その後に軽度な熱間または冷間の仕上げ加工を結合することにより、高品質の製品を得ることも可能である。

半溶融加工の形態としては種々のものが考えられるが、最も可能性の高いのは押し出し加工、密閉型鍛造などである。筆者らは数年来半溶融押し出し加工法の開発を進めてきたが、既に、難加工材と考えられている高力アルミ7075その他の合金について線・棒材・薄肉パイプの製造に成功しており、その結果、従前的な熱間押し出し加工に比較して、数分の一の加工力で押し出しが可能であること、製品の品質は熱間押し出し加工によるものに十分匹敵し得ること、あるいはまた、この種の材料の押し出し加工において最も問題となり易い表面ワレの発生防止についてはむしろ好ましい加工条件が得られること、などを明らかに

した。さらに、今後の技術的発展の可能性としては、近年種々の形で検討が行われている連続押し出し加工法との複合化を図り、溶湯から半溶融状態を経ての連続直接押し出し加工法の開発が考えられ、筆者らによるものを含めて既に幾つかの方式が検討されている。

以下、本稿においては、筆者らが半溶融加工法の開発に関して行ってきた研究結果について説明する。すなわち主として Al 合金について種々の半溶融状態下での押し出し加工を行い、押し出し加圧力の特性、正常な製品を得るための加工条件、加工後の製品の機械的特性などについて得られた結果についてその概要を示す。

6. 半溶融状態における材料の機械的特性

以下、半溶融状態を示すパラメータとして固相分率 ϕ 、すなわち材料内に含まれる固相成分の重量パーセントを用いる。

図6～10には Al-5.7% Cu 合金、Al-0.93% Si 合金、Al-13.7% Mg 合金、高力アルミ 7075、快削黄銅 C 3602 BD について、平均圧縮応力-圧縮対数ひずみ線図の測定結果を示す。

図から明らかなように、試験温度が固相線温度を超えて半溶融状態に入ると変形抵抗は急激に低下する。低下

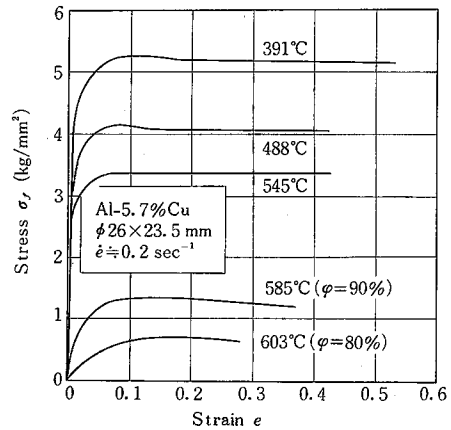


Fig. 6 Stress (σ_f)-Strain (e) Curve of Al-5.7% Cu

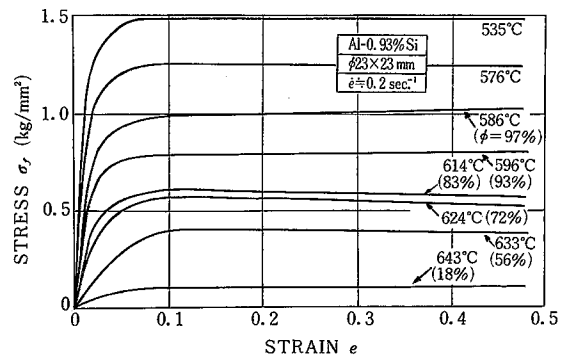


Fig. 7 Stress (σ_f)-Strain (e) Curve of Al-0.93% Si

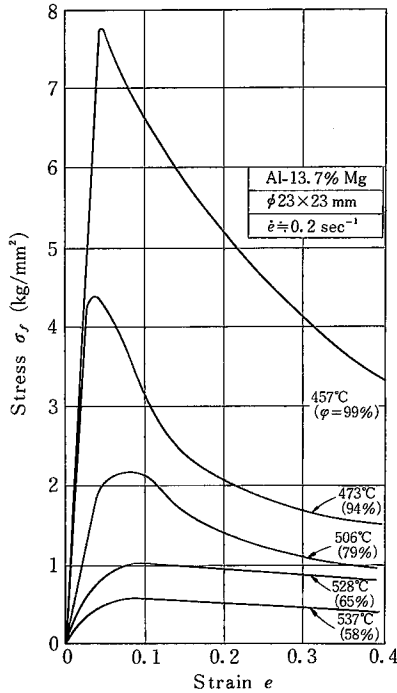


Fig 8 Stress (σ_f)-Strain(e) Curve of Al-13.7% Mg

の度合については後に細かく検討するが、同時に変形の初期での応力 σ_f の立上がり緩やかになる点も注意を要する。また、特に固相分率 ϕ が低い範囲で、 σ_f がひずみ e の増加とともに次第に増加する傾向もみられるが、これはいわゆる加工硬化とは異なるもので、主として液相成分の流動に対する拘束状態の変化によるものと考えられる。

図 11 には圧縮ひずみ 0.04 (4%) における変形抵抗 (σ_f)_{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 (σ_f)_{0.04} は急激に減少することが判る。ただし、Al-0.93%Si 合金だけはこの (σ_f)_{0.04} の減少の度合がゆるやかであり、他の材料と異なる特性を示している。これは、この合金のみが他に比較して、結晶粒が非常に大きいことによるものと考えられる。固相線温度での (σ_f)_{0.04} (換言すれば熱間域での限界変形抗) が材質によって大きく異なること、および Cu 系合金のそれが、Al 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。ところで Al 系の合金については、いずれの場合も半溶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 (σ_f)_{0.04} の挙動を把握し易いが、Cu 系の合金ではこの温度範囲が狭く、温度即ち固相分率が (σ_f)_{0.04} に与えられる影響を適確に把握することは容易ではない。

図において熱間域における (σ_f)_{0.04} の曲線を半溶融域へ外挿した破線を示してあるが、これは半溶融域での固

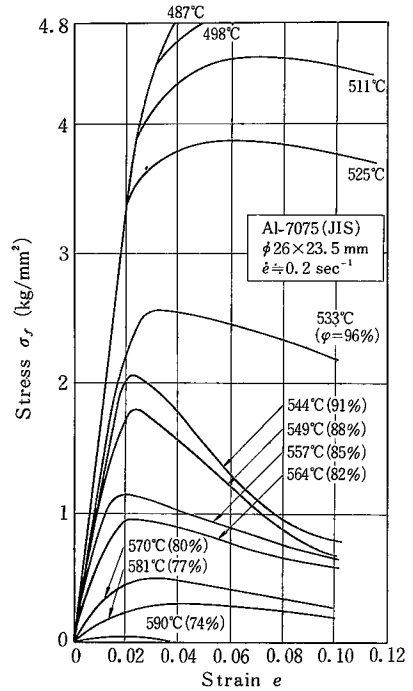


Fig 9 Stress (σ_f)-Strain(e) Curve of Al-7075 (JIS)

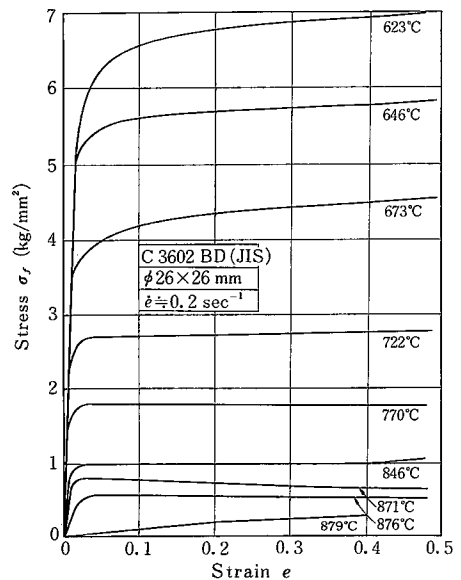


Fig 10 Stress (σ_f)-Strain(e) Curve of C3602BD (JIS)

相成分自体の変形抵抗を示すものとして理解されることに注意されたい。

既に述べたように、半溶融状態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、(1) 結晶粒界における入り、(2) 個々の結晶粒自体の変形、(3) 結晶粒の回転、などに対する拘束が緩和されるためと考えられる。ところで、固相成分の

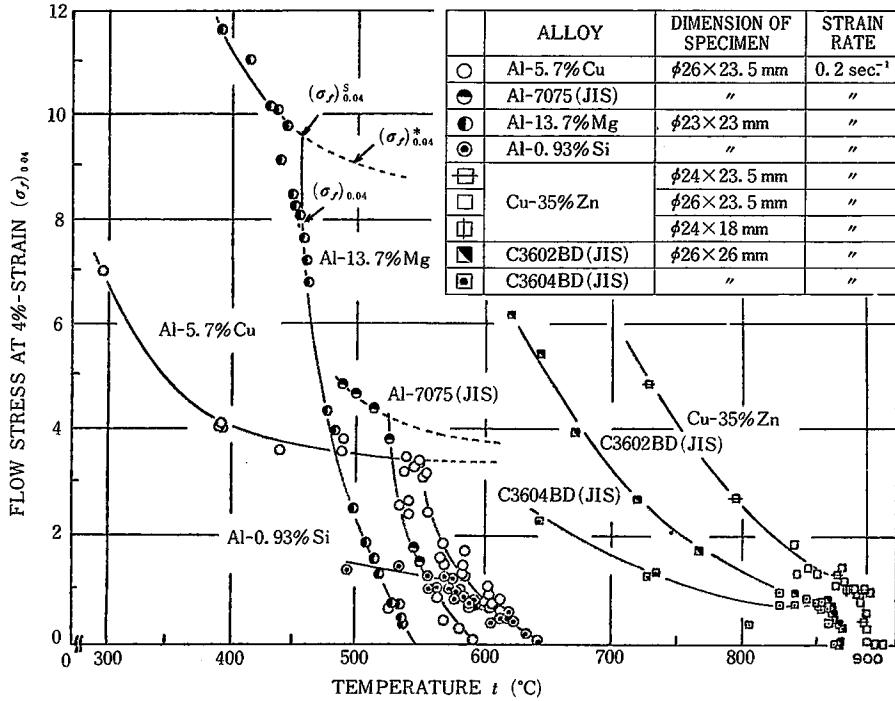


Fig. 11 Relationship between Flow Stress at 4%-Strain $(\sigma_f)_{0.04}$ and Temperature (t)

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、その差は材質の相違による液相成分の流動抵抗の相違に比較すれば、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片の寸法に比較して個々の結晶粒の寸法が十分小さく、試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は材質が異なっても同程度に起こりうることが予想される。このような推定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を示すパラメータとして無次元化変形抵抗 σ_n 、すなわち圧縮ひずみ4%の段階で、変形抵抗 $(\sigma_f)_{0.04}$ と同じひずみ時の固相線温度 ($\varphi = 100\%$) での変形抵抗 $(\sigma_f)^s_{0.04}$ または外挿法で得た固相成分自体の変形抵抗 $(\sigma_f)^*_{0.04}$ との比、 $\sigma_n = (\sigma_f)_{0.04} / (\sigma_f)^s_{0.04}$ または $\sigma_n = (\sigma_f)_{0.04} / (\sigma_f)^*_{0.04}$ の概念を導入し、固相分率 φ と σ_n の関係をプロットした結果を図12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、多少のパラッキはあるものの、 φ と σ_n の関係はほぼ同一の直線で示されることが判る。Al-0.93%Si合金のみがこの関係から外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。

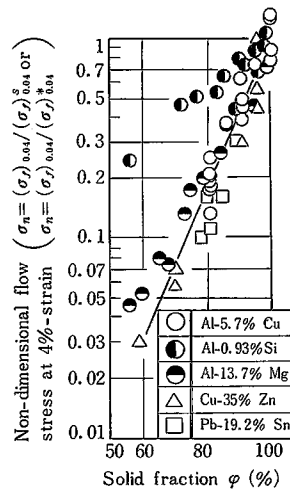


Fig. 12 Relationship between Non-Dimensional Flow Stress (σ_n) and Solid Fraction (φ)

7. 押し出し加工実験とその結果

押し出し加工実験には、100 ton 横型押し試験機 (図13参照)を用い、加熱には上記試験機に取り付けられた高周波誘導加熱炉を用いた。詳細は文献7)を参照されたい。

実験の手順は各材質ごとに多少異なり、まず高力アルミ7075の場合には、ポンチ・コンテナ・ビレット・ダ

イスを所定の位置にセットした後、上記加熱炉を以て、これらを同時に加熱し所定の温度に一定時間保持したうえで、室温への押出しを行った(以下この方法を同時加熱方式、S-Hプロセスと呼ぶ)。次にPb-19.2%Sn合金の場合は、上記の同時加熱方式をとりつつさらに、ダイスに空冷用の孔をあげ(図13参照)、これを通して圧縮空気によるダイス出側の強制冷却を行い、ビレット温度に対するダイス出側温度を変化させ、製品性状の変化および安定な押出し加工の可・不可について検討した(以下同時加熱+強制空冷方式、S-H-Cプロセスと呼ぶ)。Al-5.7%Cu合金の場合には、前述の同時加熱方式のほか、コンテナとビレットのみを上記加熱炉で加熱し、

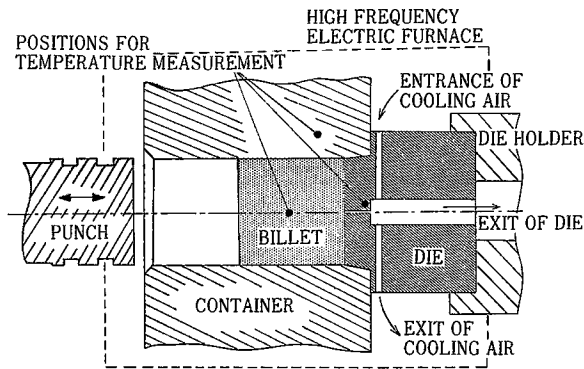


Fig. 13 Schematic Diagram of Structure of Punch, Container, Billet and Die, and Positions for Temperature Measurement

ポンチとダイスは室温に保持し、押し出し開始直前にポンチとダイスを所定の位置にセットして押し出すダイス予加熱なし方式(N-Hプロセスと呼ぶ)との2通りの方法で、同じく室温中への押し出しを行った。ただし、前者の場合は固相分率(ビレットの固相成分の重重パーセント)で $\phi = 70 \sim 100\%$ 、後者の場合は $\phi = 0 \sim 100\%$ の範囲での押し出しを試みた。その他製品の形状・寸法など実験条件をまとめて表1に示す。

7.1 ダイス出側温度と残留液相成分

図14はPb-19.2%Sn合金の半溶融押し出しの際に、同時加熱方式に加えてダイス冷却用圧縮空気圧を変化させることにより生じたビレット温度とダイス出側温度・コンテナ温度の相違を検出し、(ダイス出側温度)-(固相分率)座標面上で、安定な押し出し加工の可・不可の判別を行った結果を示す。ここで押し出し不可とは、液相成分の過多などに起因するトラブルにより、押し出しそのものが安定的に行われなかったことを意味し、健全な製品が得られなかったという意味ではない。そのため押し出し可と示した範囲においても製品表面にクラックが発生した場合が含まれている。したがって、健全な製品を得るための加工条件としては別の見地からの検討が必要であり、たとえば、筆者らはその一つとしてダイスのベアリング寸法比、すなわち(ベアリング部長さ)/(ダイス径)、を少なくとも5.0以上にすることが望ましいことを既に報告してある。

この結果から半溶融押し出しを安定的に行うためには、

Table 1 Conditions of Extrusion Test

ALLOY	Al-5.7%Cu					Al-7075 (JIS)					Pb-19.2%Sn			Al-5.7%Cu								
DIMENSION OF BILLET	$\phi 40 \times 40, \phi 40 \times 25$					$\phi 40 \times 25$					$\phi 40 \times 30$			$\phi 40 \times 40$								
SOLID FRACTION (%)	$\phi = 100 \sim 70$					(88.5)					100 ~ 63			100 ~ 0								
HEATING PROCESS	S-H PROCESS DIE TEMPERATURE $\approx 520^\circ\text{C}$					S-H PROCESS DIE TEMPERATURE $\approx 500^\circ\text{C}$					S-H-C PROCESS DIE TEMPERATURE $= 140 \sim 210^\circ\text{C}$			N-H PROCESS								
DIMENSION OF DIE DIAMETER ϕ (mm)	BAR					TUBE					SHEET			BAR								
	2	3	4	6	10	8	10	2	4	6	10	8	10	$1' \times 10^w$			10					
B L (mm)	4	6	8	12	10	20	30	50	8	10	4	8	12	20	8	10	10			100		
DIE ANGLE (°)	180					180					180			180								
EXTRUSION RATIO	16 ~ 400					24 ~ 80					16 ~ 400			24 ~ 80			126			16		
RAM SPEED (mm/min)	45					37					45 ~ 47			40 ~ 47								

S-H Process : Simultaneous Heating of Billet, Container, Die and Punch

S-H-C Process : Simultaneous Heating Combined with Air Cooling

N-H Process : No Preheating of Die and Punch

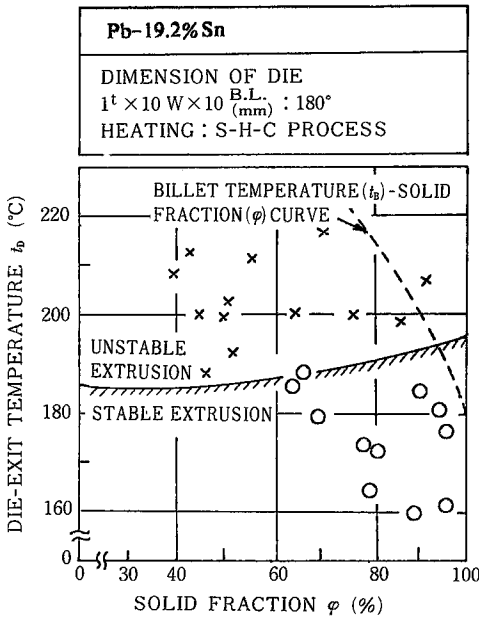


Fig. 14 Critical Temperature of Die Exit for Stable Extrusion, (S-H-C Process)

ダイス温度には許容される上限が存在すると言えるが、このことは別の見地から言えば、押し出されてくる製品に含まれる液相成分の量には許容される限度があり、それ以上の量の液相成分が含まれる場合には安定的な押し出し加工が期待できないことを意味している。許容されるダイス温度は、ビレット・製品・ダイスあるいはダイスホルダー等の形状・寸法ならびに熱的特性によって定まるものと考えられ、その具体的数値は個々のケースによって異なり得るので、この場合の温度をうんぬんすることはあまり意味がない。しかしながら、押し出された製品に残留し得る液相成分の量に関しては多少検討の余地がある。たとえば図14において、ビレットの固相分率が高い範囲では、ダイス温度がビレット温度より高くても押し出しが可となる場合があり得ることが示されている。そこで、このダイス温度限界線と被加工材の温度-固相分率線の交点に注目してみると、少なくともこの交点の温度、換言すれば固相分率で製品が押し出されてきても問題はないと考えることができる。実際には、ダイス面温度あるいは押し出されてくる製品の温度はここでいうダイス温度よりも若干高いと考えられるので、許容される製品の固相分率はさらに低くてもよいことになるが、その値はまだ確定できていない。ここで示した Pb-19.2% Sn 合金の結果から推定して、押し出し時に製品内に残留する液相成分の限度量は少なくとも5~10%程度と考えることが可能である。

7.2 荷重ストローク線図

図15には同時加熱方式による、高力アルミ7075とAl

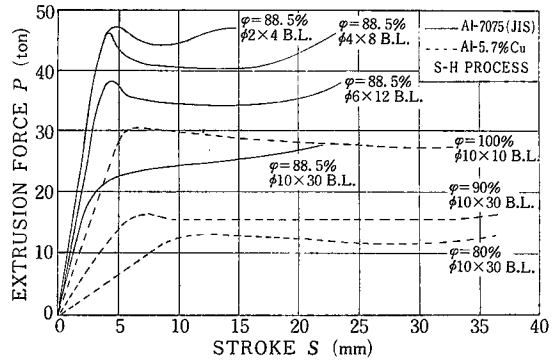


Fig. 15 Extrusion Force (P)-Stroke (S) Curve of Al-7075 (JIS) and Al-5.7% Cu, (S-H Process)

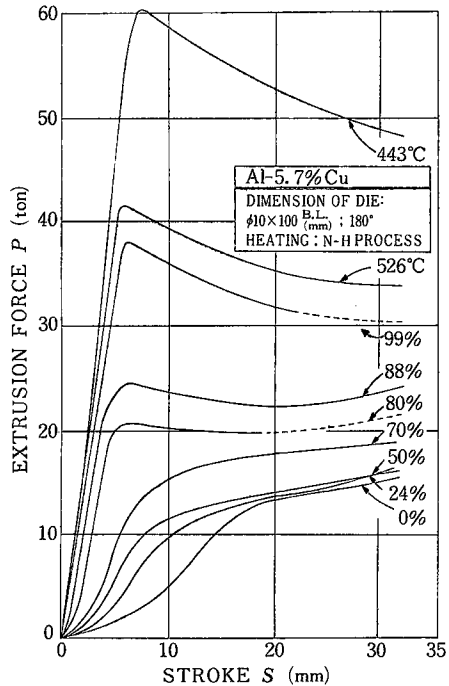


Fig. 16 Extrusion Force (P)-Stroke (S) Curve of Al-5.7% Cu, (N-H Process)

-5.7% Cu合金押し出しの際の荷重P-ストロークS線図を示す。固相分率φの低下とともに押し出し開始時の荷重Pのレベルが大幅に低下することが判る。

図16はAl-5.7% Cu合金のダイス予加熱なしで押し出しを行った場合の荷重P-ストロークS線図を示す。図より、固相分率の低下とともに押し出し初期の荷重の立ち上がりやゆるやかになること、固相分率が概略80%以下になるとピーク荷重があらわれなくなること、また固相分率が80ないし70%以下になるとストロークに対して荷重が単調に増大していくことなどが判る。荷重の立ち上がりやゆるやかになること、およびピーク荷重があらわれなくなことは、ビレット中の液相成分の挙動と関係が

ある。通常、押し開始時には液相成分がピレット先端に向かって流動を始め、液相成分自体あるいは液相成分が過多に偏在する状態の素材が少量押し出される傾向があり、また固相率の低下とともにこの傾向が助長されるが、このことが上述の結果をひき起こすものと考えられる。さらに荷重が増加しつづける傾向を示すのは、この場合ダイス・ポンチは室温に保たれた状態から押しが始まるので、押し過程でピレット温度が低下し固相率が実質的に上昇してくるためと考えられる。なお固相率が50%以下の場合に荷重の立上りが中途から急になるのは、固相率がこの程度に低くなると、コンテナの中でピレットが自重により変形し、押し開始時にはダイス前面に素材が充満していないことも原因していると考えられる。

7.3 押し加圧力-固相率の関係

図17はAl-5.7%Cu合金の同時加熱の場合の定常押し加圧力 p に与える固相率 ϕ の影響を示す。一般に、各押し比の場合とも、固相率の低下とともに p が急速に減少し、減少の割合もほぼ等しい。

図18は同時加熱の場合の押し加圧力 p を前報で示した変形抵抗 $(\sigma_f)^*_{0.04}$ で割って得られる無次元化押し加圧力 p_n と押し比 λ との関係を、Al-5.7%Cu合金と高力アルミ7075の場合について、棒材と管材それぞれについて調べたものである。両者の p_n の値が各押し比 λ に対してほぼ等しいことから、同一の押し条件下では、各材質について液相成分が押し出し時のピレットの変形・流動を容易化する効果がほぼ同程度に作用す

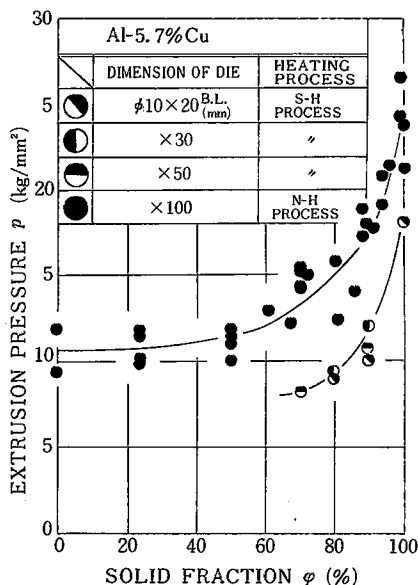


Fig. 17 Effects of Solid Fraction (ϕ) on Extrusion Pressure (p) for Al-5.7%Cu

ると考えられる。またこの結果は、前報で示した一軸の圧縮変形抵抗の液相成分の存在による低下の割合が、材質によらずほぼ同じ割合で起こるという結果とも対応している。

なお、ここには結果を示していないが、固相率 ϕ が概略70%以下の範囲では、無次元化押し加圧力 p_n の値が、いわゆる理論解でいうダイスおよびコンテナ壁面の摩擦係数 $\mu=0$ の場合の値にほぼ一致してくることも、筆者らによって既に指摘されている。

7.4 押し製品の表面性状

表2は同時加熱の場合のAl-5.7%Cu合金および高力アルミ7075の押し製品の表面性状を目視により判別した結果をまとめて示す。Al-5.7%Cu合金の結果をみると、概して、薄物や細物の押し出しに良い結果を得ている。また、既述のようにB.O.比(ベアリング部長さ/ダイス径)が概略5.0以上では健全な製品が得られ易いことも判る。また難加工材としての高力アルミ7075の押し出しにおいても比較的容易に健全な製品が得られることが示されている。

7.5 製品の機械的特性

7.5.1 引張り荷重-変位線図

図19はダイスの温度条件が同時加熱方式の場合と予加熱なしの場合にそれぞれ押し出した製品(外径 $\phi 10$ mmの丸棒)の一軸引張り試験より得た荷重P-ストロークS線図である。各曲線は押し出し方向にとった数本の試験片に関する平均値を示してある。また製品の横断面内の半径方向にみた特性の変化をみるために、外径の異なる3種($\phi 8, \phi 6, \phi 4$ mm)の試験片を削り出し、引張り試験を行った結果も同時に示してある。同時加熱の場合に比し、ダイス予加熱なしの場合は、荷重の立上りがや

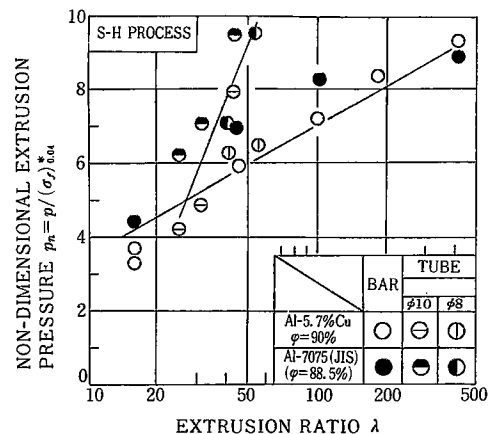


Fig. 18 Relationship between Non-Dimensional Extrusion Pressure (p_n) and Extrusion Ratio (λ) for Bars and Tubes, (S-H Process)

Table 2 Appearance of Surface of Extruded Bars and Tubes of Al-5.7% Cu

Al-5.7% Cu					Al-7075 (JIS)	
HEATING PROCESS : S-H PROCESS		SOLID FRACTION ϕ (%)				ϕ (%)
DIMENSION OF DIE : DIAMETER \times (THICKNESS) \times B. LENGTH (mm)		100	90	80	70	(88.5)
B A R	22 \times 4		○	○	○	○
	3 \times 6		○	○	○	
	4 \times 8		○	○	○	○
	6 \times 12		○	○	○	○
	10 \times 10	○	×			
	10 \times 20		×			○
	10 \times 30		○	×		
	10 \times 50		○	○	○	
T U B E	10 \times (2) \times 10		⊖			○
	10 \times (1.5) \times 10		⊖			○
	10 \times (1) \times 10		○			○
	8 \times (1.5) \times 8		○			○
	8 \times (1) \times 8		○			○

○ : SOUND	⊖ : PARTLY DEFECTED	× : DEFECTED
-----------	---------------------	--------------

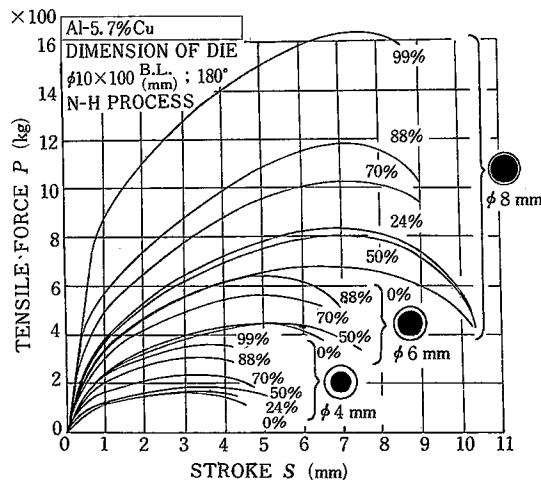


Fig. 19 Effects of Diameter of Specimen on (P)-(S) Curves of Extruded Bar of Al-5.7% Cu, (N-H Process)

や急であり、全般的に伸びが少ない。図 20 は同時加熱の場合の、ひずみ 0 ~ 1% の範囲での応力-ひずみ曲線を示す。この場合も、押し出し方向にとった数本の試験片に関する平均値を示す。この結果からも押し出し時の固相分率 ϕ の相違による押し出し材の応力-ひずみ特性の相違

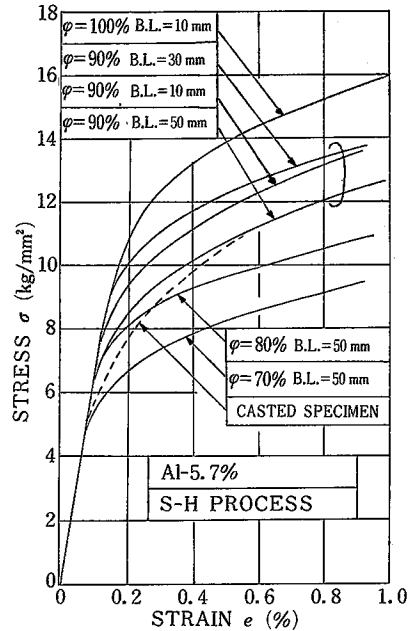


Fig. 20 Effects of Solid Fraction (ϕ) on (σ)-(e) Curve of Extruded Bar of Al-5.7% Cu (S-H Process)

は明瞭であり、 ϕ が低下するとともに押し出し材の降伏応力および変形抵抗が低下することが判る。半径方向にみた特性に関しては、このような微小ひずみの範囲ではほとんど差異はない。

7.5.2 引張り強さ σ_B 、伸び E_l

図 21 は押し出し材の引張り強さ σ_B および伸び率 E_l とビレットの固相分率 ϕ の関係を示す。図中同時加熱方式の場合と、予加熱なしの場合の結果それぞれについてプロットしてある。図より、 σ_B に関しては同時加熱方式の場合と、ダイス予加熱なしの場合の相違がほとんどないこと、固相分率 ϕ が低下すると引張り強さ σ_B は急速に低下していくことなどが判る。 ϕ に対する σ_B の変化は、半溶融状態での一軸圧縮試験における固相分率 ϕ に対する変形抵抗の変化に類似している。図 22 には、押し出された ϕ 10mm の丸棒から削り出した ϕ 8, ϕ 6, ϕ 4 mm の各試験片に関する結果を示すが、これにより製品の半径方向にみた σ_B の相違はほとんどないことが判る。伸び率 E_l については、同時加熱方式の場合と、ダイス予加熱なしの場合で大きく異なり、後者の場合 E_l は全般的に低く、かつ ϕ の低下とともにやや上昇する傾向を示す。これらの結果はダイス予加熱なしの場合、素材がダイスを通過する際に急冷されることに起因しているものと考えられるが、製品部の組織や粒度分布等についての厳密な対比が、いまだ行われていないので、この問題に関する検討は今後の課題としたい。

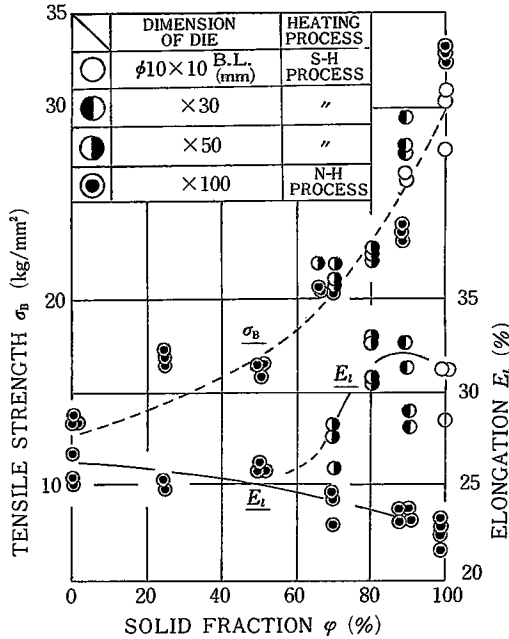


Fig. 21 Effects of Solid Fraction (ϕ) on Tensile Strength (σ_B) and Elongation (E_1) of Extruded Bar of Al-5.7% Cu

7.6 半溶融押し出し加工実験のまとめ

以上、Al-5.7% Cu 合金および高力アルミ 7075 等の半溶融押し出し加工に関して実験的面から検討を行い、以下の結果を得た。すなわち(1)種々の見地から半溶融押し出し加工について検討した結果、実際加工への適用が可能であり、特に薄肉製品・細物製品への適用、あるいは難加工材である高力アルミの押し出し加工への適用、などの面でその特性を活かし易いことが判明した。(2)押し出し加圧力は通常の熱間押し出し加工に比して数分の一に低下する。(3)押し出し加工を安定的に行うためには、押し出されてくる製品の内部に残留する液相成分の量には限界がある。その値は重量比で概略5~10%程度と考えられる。(4)ピレットの固相成分 ϕ が低下するとともに、製品の引張り強さは低下する。その度合は $\phi = 100\%$ の場合に比して $\phi = 0\%$ 近傍では約1/3程度となる。ただし製品の引張り強さはダイスの温度条件によってはあまり影響を受けない。(5)製品の伸び率は、ピレットの固相分率およびダイスの温度条件によって影響を受けるが、Al-5.7% Cu 合金の場合で言えば、全体的には伸び率22~23%以上あり鋳造材に比較して秀れていると言える。(6)押し出された棒材の横断面の半径方向の特性の相違をみると、引張り強さあるいは硬度は半径方向にほぼ均質であるが、伸び率については中心部ほど低下する。(7)ダイスの温度管理が十分行われるならば、固相分率 $\phi \approx 0$ の近傍でも押し出しが可能であり、このこ

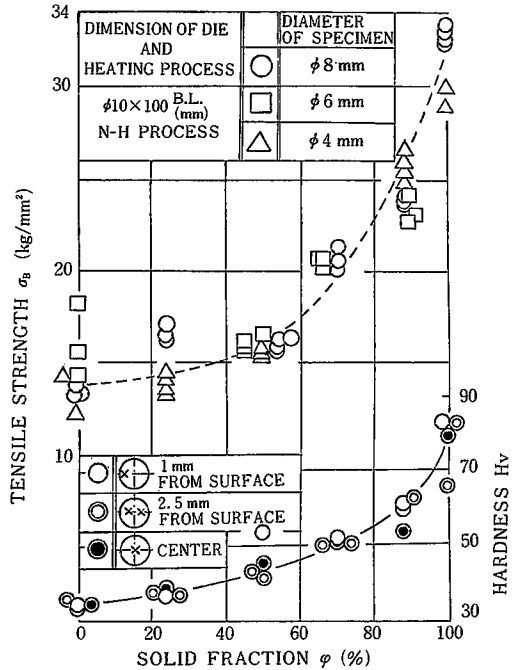


Fig. 22 Effects of Solid Fraction (ϕ) on Tensile Strength (σ_B) and Hardness (H_V) on Cross-Section of Extruded Bar of Al-5.7% Cu

とは、将来溶湯からの直接一貫押し出し加工の開発の可能性もあるものと考えられる。

8. むすび

本稿においては、金属材料の高温域における加工について、幾つかの例をとりあげ紙面の許される範囲でその技術的内容の概況と、併せて今後の発展の可能性について、筆者の私見をおりませながら述べた。現在、省資源・省エネルギーの達成があらゆる分野で強く要請されているが、そのような見地からみると、金属加工の分野においても従前的な加工法の体系の内において、加熱・冷却を繰り返すプロセスはできるだけこれを排除し、溶湯から最終製品へ至る一貫した加工プロセス、あるいは高加工度・高効率を達成するための高度に集約化された複合プロセスの開発がこれまで以上に強く要求されていると言える。しかしながら、この種の問題は一般論としての議論は容易であっても、各論として具体化していくことは非常に困難であるのが常であり、それを克服していくためにはまだ検討すべき問題点、解明せねばならない課題は多い。したがって、全ては今後の研究開発の努力にかかっており、その進展には多大の時間と費用を要するものと考えられるが、この問題へのアプローチは、将来に向けての加工技術の大きな流れの一つであることは否定できず、今後の動向が注目されるところである。

(1980年1月8日受理)

参考文献

- 1) 木内 「塑性と加工」 Vol. 18, no 193 (1977-2) 137
- 2) 日本機械学会第447回講習会テキスト (1978-8)
- 3) 「機械工学最近10年の歩み」日本機械学会 (1977-9)
- 4) 「塑性と加工・10周年記念特集号」 Vol. 16, no. 176 (1975-9)
- 5) 福岡 「生産研究」 Vol. 24, no. 8 (1972-8) 34
- 6) 「溶接便覧」溶接学会編, 丸善 (1966)
- 7) 木内, 福岡, 新井 「塑性と加工」 Vol. 18, no. 199 (1977-8) 633
- 8) 木内, 福岡, 新井 「塑性と加工」 Vol. 17, no. 186 (1976-7) 595
- 9) 木内, 杉山, 新井 「塑性と加工」 Vol. 20, no. 223 (1979-8)
- 10) 木内, 杉山, 新井 「塑性と加工」 Vol. 20, no. 224 (1979-9)

