アルミニウム合金同種摩擦圧接における
継手性能の圧接入力による評価

2003年度

澤井 猛
目次

第1章 緒論
  1.1 序説 ........................................ 1
  1.2 摩擦圧接法の歴史的経緯 ........................... 2
  1.3 摩擦圧接に関する従来の研究 .......................... 2
  1.4 摩擦圧接法の特徴 ................................ 3
  1.5 本論文の構成と研究の概要 ......................... 4

第2章 供試材料と実験方法 .................................. 9
  2.1 緒言 ............................................ 9
  2.2 供試材料 ...................................... 9
  2.3 摩擦圧接機 ..................................... 11
  2.4 摩擦圧接実験方法 ................................. 13
  2.5 強度試験方法 ................................... 14
  2.6 結言 ............................................ 16

第3章 摩擦圧接における圧接入力の定義とその測定方法 .............. 17
  3.1 緒言 ............................................ 17
  3.2 摩擦圧接法の概要 ................................ 17
  3.3 圧接入力の測定方法 ............................... 19
  3.4 熱量の測定 ...................................... 25
    3.4.1 熱量の測定方法 .............................. 25
    3.4.2 実験方法 .................................. 27
    3.4.3 予備実験の結果 ................................ 28
    3.4.4 全熱量の検討 ................................ 29
    3.4.5 摩擦入力と変形入力の検討 ..................... 33
    3.4.6 アブセット過程における圧接入力の検討 ........... 35
  3.5 摩擦面の様相 .................................... 35
  3.6 結言 ............................................ 38
第4章 摩擦圧接における圧入力と引張強さの関係
4.1 緒言 ........................................... 39
4.2 実験方法 .................................. 39
4.3 摩擦入力と引張強さの関係 .................. 40
4.4 変形入力と引張強さの関係 ............... 42
4.5 全入力と引張強さの関係 .................. 45
4.6 アブセット過程の変形入力と伸びおよび縫りの関係 ...... 48
4.7 摩擦入力と寄りしろの関係 ............... 51
4.8 変形入力と寄りしろの関係 ............... 53
4.9 寄りしろと引張強さの関係 ............... 55
4.10 アブセット寄りしろと引張試験における伸びと縫りの関係 .. 57
4.11 摩擦圧接における圧入力と母材形状の関係 ...... 58
  4.11.1 実験方法 ................................ 58
  4.11.2 アブセット過程の変形入力と引張強さの関係 .... 59
  4.11.3 アブセット寄りしろとアブセット過程の変形入力の関係に及ぼす母材直径の影響 .. 64
  4.11.4 アブセット寄りしろと引張強さの関係に及ぼす母材直径の影響 .. 67
4.12 結言 ......................................... 69

第5章 摩擦圧接における圧入力とアブセットタイミングの関係
5.1 緒言 ........................................ 71
5.2 実験方法 .................................. 71
5.3 アブセット変形入力と引張強さの関係に及ぼすアブセットタイミングの影響 ............... 73
5.4 アブセット寄りしろおよびアブセット寄り速度に及ぼすアブセットタイミングの影響 .. 80
5.5 アブセット寄りしろに及ぼすアブセットタイミングの影響 ....... 81
5.6 結言 ......................................... 84

第6章 摩擦圧接における圧入力と各種継手強度との関係
6.1 緒言 ........................................ 85
6.2 圧接継手の曲げ強さ ....................... 85
  6.2.1 アブセット変形入力と曲げ強さの関係 .......... 85
  6.2.2 アブセット寄りしろと曲げ強さの関係 ........... 87
6.3 圧接継手のねじり強さ ................................. 87
   6.3.1 アブセット変形入力とねじり強さの関係 ............... 87
   6.3.2 アブセット寄りしろとねじり強さの関係 ............... 88
6.4 圧接継手の疲労強さ ................................. 89
   6.4.1 アブセット変形入力と疲労強さの関係 ............... 89
   6.4.2 疲労破断の様相 ............................... 90
   6.4.3 疲労強さの評価 ............................... 92
6.5 圧接継手の衝撃吸収エネルギー .......................... 94
   6.5.1 アブセット変形入力とシャルビ衝撃エネルギーの関係 . 94
   6.5.2 アブセット寄りしろとシャルビ衝撃エネルギーの関係 . 95
6.6 継手強度の比較 ................................... 95
6.7 結言 .............................................. 96

第7章 6061アルミニウム合金と各種材料の最小限界圧接入力および最小限
       界寄りしろの比較 ................................ 99
   7.1 結言 ........................................... 99
   7.2 実験方法 ....................................... 99
   7.3 各種材料のアブセット変形入力と引張強さ .................. 101
   7.4 各種材料のアブセット寄りしろと引張強さ .................. 103
   7.5 各種材料の最小限界アブセット変形入力の比較 ............ 105
   7.6 結言 ........................................... 107

第8章 総括 ........................................ 109
   8.1 総括 ........................................... 109
   8.2 今後の研究と課題 ................................ 111
第1章 緒論

1.1 序説

近年、コストダウン、エネルギーの省力化、資源の有効利用などが国際的に強く求められている。機械・電気部品の製作過程の一部である溶接加工においても例外ではなく、この要求は日毎に高まっている。こうした状況下で、溶接法の1つである摩擦圧接法は他の同類の接合法に比較して、接合精度が高い、接合に要するエネルギーが小さい、作業時間が短い、生産工程への組込みが容易である、接合に熟練を要しないなどの特徴から、コストダウンの一方法として注目されている。

摩擦圧接法とは、2つの部材の接合する面を突き合わせ、加圧下で相対する面に回転による滑り運動を与え、発生した摩擦熱によって摩擦面に接合可能な凝着部を創出したのち、相対運動を停止させて圧接を行なう一種の固相接合法である。摩擦圧接法では、縦手の形状は中実材、管材を問わず2部材の一方が回転できればよく、また、多くの異種材料からなる部材の接合が比較的容易であるなど様々な特徴がある。

一般に、材料を接合する場合には、機械的、化学的、電気的な入力のいずれかを必要とする。例えば、広範に用いられているアーク溶接の場合には、入力は直接投入される溶接電流と溶接速度の積で算定される。ところが、摩擦圧接における入力(圧接入力)は、摩擦圧接条件によって引き起こされる自己発熱であり、圧接条件の微妙な変化によって変動し、さらに圧接過程によっても著しく変動する。したがって、圧接入力の制御は困難とされてきた。その一方で摩擦圧接機械の解明には、以下の基本的な課題が残されている。圧接条件と圧接入力の関係が明かでない。供試材料によっては適切な圧接条件の設定が容易でない。摩擦圧接機が異なると最適摩擦圧接条件が異なる。さらに、適切な非破壊検査法が無く、縦手の性能評価が十分でないなどである。

そこで本研究では、上述の問題点を解決する一助として、縦手作製時に投入される圧接入力を算定して、圧接入力によって縦手の性能評価を行う評価法の確立を目的とした。
1.2 摩擦圧接法の歴史的経緯


我が国では、1960年、阪神溶接機械（株）の浅沼によってV. I. Vill著「金属の摩擦溶接」が初めて紹介された。その後、我が国の摩擦圧接技術は発展を続けて、初期には機械部品製造工場において油圧ホース用金具、ギヤブランクなどの小物部品の量産に実用された。その後、自動車工場においてステアリングシャフト、後車軸などの製造に同法を採用して、その用途はめざましく拡大し、自動車以外の産業用機械部品、農業用機械部品、工具などの量産に広く採用されるようになった。現在、我が国で摩擦圧接法を取り入れている工場は約300、摩擦圧接の設置台数は1650台を超え、世界でも有数の摩擦圧接法の実用国となっている。

1.3 摩擦圧接に関する従来の研究

摩擦圧接法に関する研究報告としては、旧ソビエト連邦のV. I. Villが1957年に論文“Welding with Friction Heating”6)を発表したのが最初であり、次いで1962年に著書“Friction Welding of Metals”7)を発表した。同様にアメリカ合衆国のHazlettがSAF1020とAISI4130の接合を発表し8)、数種の異種金属の接合に成功している9)。同年、Ginzburgもアルミニウムと鋼の異種金属の接合を報告している9)。1963年には、HollanderがAISI4140低合金鋼とSUS304ステンレス鋼の接合に成功した10)。次いで、Chengによる同種金属の接合面の温度分布の解析11)、HazlettとGuptaによる高硬度アルミニウム合金のアブセット効果12)が報告された。
我が国では、1962年に安藤らによる最初の報告があり、本格的な研究は1963年頃から実験用摩擦圧接機が通商産業省工業技術院機械技術研究所(現 経済産業省産業技術研究所)、科学技術庁金属材料技術研究所(現 文部科学省物質・材料研究所)、通商産業省工業技術院名古屋工業技術研究所(現 経済産業省産業技術研究所)、およびいくつかの企業に導入されて研究が開始された。また、同法の加工技術の特性を明らかにし、その用途を探求することを目的として1964年に摩擦圧接研究懇話会が設立され、以後、摩擦圧接研究会、摩擦圧接協会と発展し活動を続けている。その間、各企業においては、機械部品の接合に同法を積極的に取り入れる研究が行なわれる一方、中立機関である兵庫県工業試験場、慶應義塾大学、大阪府立大学、名古屋大学、日本大学、中部大学、名城大学、東京工業大学、大阪産業大学などでは積極的に同法に関する基礎的研究が進められ13)～40)、各種金属材料やセラミックスなどの接合性、接合機構の解明に取り組んでいる。その後、岩手県工業試験場では鋳鉄の摩擦圧接、姬路工業大学では接合部の金属組織と圧接機構の解明13)、岡山理科大学では継手の引張衝撃特性などの研究を開始し、今日に至っている。

1.4 摩擦圧接法の特徴

摩擦圧接法は、他の同種の溶接法に比べて、以下の長所を有している。

- 圧接因子の制御が簡単であるので、自動化が容易で、継手の信頼度が高い。
- 継手加工のエネルギー効率が高い。
- 継手の寸法精度が高い。
- 広い範囲の部材の組合せの接合が可能であり、とくに異種材料の接合が容易である。
- 圧接作業能率が高い。
- 作業環境が良好である。
- 最終製品の組み立てに利用できる。
- 金属材料以外の諸材料にも応用できる。

すなわち、摩擦圧接法を利用することにより、材料の節約、異種材料の合理的な組合せ、接合エネルギーの低減などによるコストダウン、加工工程の簡便さ、圧接部の品質の高い再現性による生産性の向上などが実現できる。

欠点としては、次の項目が挙げられる。

- 少なくとも一方は、円形断面でなければならない。
高速回転、高トルクに耐えられない素材は圧接できない。
延性、とくに耐衝撃性に劣る。
継手の相対角度の正確さを必要とするものは接合が困難である。

1.5 本論文の構成と研究の概要
現在、摩擦圧接継手を作製するうえで、その継手の性質に重要な影響を与える圧接条件を吟味するには、最適圧接条件を求めるための適切な理論式が無いため、多数の予備実験による経験則が不可欠である。その理由としては、次のような原因が考えられる。すなわち、摩擦圧接の熱源は摩擦による自己発熟であり、しかも発熱面が直接圧接面である。さらに摩擦圧接面は時間とともに変化し、次々と新しい金属面が現れる。そのため、圧接時間に伴って摩擦係数が微妙に変化し、摩擦圧接面は複雑な様相を呈する。したがって、供試材料によっては適切な圧接条件の設定が容易でない、摩擦圧接機が異なると最適圧接条件が異なるなど、いまだ解決すべき基本的な課題が残されている。そのため、従来の摩擦圧接に関する研究では、圧接条件をパラメータとして実験結果を整理し、最適圧接条件を求める試みがなされてきた。しかし、このようなアプローチでは一般性のある整理が困難であった。この原因としては、制動式（ブレーキ式）摩擦圧接法では、摩擦圧接過程とアブセット過程が存在すること、さらに回転停止時に減速域が存在すること、慣性式（イナーシャ式）摩擦圧接法では長時間の減速域が存在し、摩擦トルクの変化、すなわち摩擦係数が過渡的に変化することなどが挙げられる。
そこで本研究では、摩擦圧接機の個性に左右されない基本的現象から得られる圧接入力に着目した。そして、摩擦過程およびアブセット過程を区別し、さらにそれぞれの過程において圧接入力を摩擦入力および変形入力に分類し、圧接入力と引張強さの関係について調べた。そこから、両者の間に最も高い相関性が認められた圧接入力を継手強度の評価値として導入した。次いで、圧接入力に及ぼす諸因子の影響を検討した後、実用的な観点から寄りしきが評価値となり得るかについて検討した。最後に、良好な継手を作製するための最小限界圧接入力を各材料で比較検討した。
本論文の構成および主たる内容は以下の通りである。
第1章は緒説であり、摩擦圧接法の歴史と現状、特徴、そして問題点を挙げ、本研究の目的について述べた。
第2章では、本研究に用いた供試材料、実験用摩擦圧接機、および強度試験法について述べた。
第3章では、摩擦圧接法の概要と摩擦圧接における圧接入力について述べた。
第4章では、6061アルミニウム合金同種摩擦圧接における、圧接入力と継手の引張強さの関係を基にして、圧接入力の種類と圧接過程のいずれの段階における圧接入力が最も継手強度の評価に適するか、また圧接入力と寄りしろの関係および寄りしろと引張強さの関係について検討した。次いで、圧接入力および寄りしろにおよぶ母材直径の影響について検討を行なった。
第5章では、アプセットタイミングを変化させたときの圧接入力の変化と真の圧接入力、みかけの圧接入力について検討を行ない、真の圧接入力およびみかけの圧接入力と寄りしろとの関係を調べた。
第6章では、摩擦圧接継手の引張試験、曲げ試験、ねじり試験、疲労試験、およびシャルピ衝撃試験における、圧接入力および寄りしろと継手強度の関係について検討し、良好な継手を作製するために最低限度必要とされるそれぞれの最小限界圧接入力と最小限界寄りしろを明らかにした。
第7章では、S15CK炭素鋼、SUS304オーステナイト系ステンレス鋼、5056アルミニウム合金、7075アルミニウム合金およびAZ31マグネシウム合金の同種摩擦圧接を行い、それらの最小限界変形圧接入力および最小限界寄りしろを求め、6061アルミニウム合金の場合との比較検討を行なった。
第8章において本研究の総括を行なった。
記号と単位

本論文中に用いられる代表的な記号と単位は下記の通りである。

<table>
<thead>
<tr>
<th>記号</th>
<th>記号</th>
<th>定義</th>
<th>単位</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$N$</td>
<td>: 摩擦速度</td>
<td></td>
<td>$[s^{-1}]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$P_0$</td>
<td>: 予熱圧力</td>
<td></td>
<td>$[MPa]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$P_1$</td>
<td>: 摩擦圧力</td>
<td></td>
<td>$[MPa]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$P_2$</td>
<td>: アブセット圧力</td>
<td></td>
<td>$[MPa]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_i$</td>
<td>: 摩擦過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{if}$</td>
<td>: 摩擦過程の摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{id}$</td>
<td>: 摩擦過程の変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_f$</td>
<td>: アブセット過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{ff}$</td>
<td>: アブセット過程の摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{fd}$</td>
<td>: アブセット過程の変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_t$</td>
<td>: 全過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{tf}$</td>
<td>: 全過程の摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_{td}$</td>
<td>: 全過程の変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_I$</td>
<td>: 摩擦過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_F$</td>
<td>: アブセット過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_T$</td>
<td>: 全過程の圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_i$</td>
<td>: 摩擦過程の単位圧接入力 $q_i = \frac{dQ_i}{dt}$</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{if}$</td>
<td>: 摩擦過程の単位摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{id}$</td>
<td>: 摺摩擦過程の変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_f$</td>
<td>: アブセット過程の単位圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{ff}$</td>
<td>: アブセット過程の単位摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{fd}$</td>
<td>: アブセット過程の単位変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_t$</td>
<td>: 全過程の単位圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{tf}$</td>
<td>: 全過程の単位摩擦入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{td}$</td>
<td>: 全過程の単位変形入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_I$</td>
<td>: 摺摩擦過程の単位圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_F$</td>
<td>: アブセット過程の単位圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_T$</td>
<td>: 全過程の単位圧接入力</td>
<td></td>
<td>$[J/s]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_e$</td>
<td>: 全熱量</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_w$</td>
<td>: 水当量</td>
<td></td>
<td>$[J]$</td>
</tr>
</tbody>
</table>
\( Q_{los} \) : 熱伝導その他で失われる熱量 \[ J \]

\( T \) : 摩擦トルク \[ N\cdot m \]

\( V_s \) : 熱量計内の圧接母材の体積 \[ m^3 \]

\( V_w \) : 熱量計内の水の体積 \[ m^3 \]

\( \delta \) : 全寄りしろ \[ mm \]

\( \delta_1 \) : 摩擦寄りしろ \[ mm \]

\( \delta_2 \) : アブセット寄りしろ \[ mm \]

\( \rho_s \) : 圧接母材の密度 \[ kg\cdot m^{-3} \]

\( \rho_w \) : 水の密度 \[ kg\cdot m^{-3} \]

\( \sigma_B \) : 引張強さ \[ MPa \]

\( \varepsilon \) : 延び \[ \% \]

\( \varphi \) : 絞り \[ \% \]

\( t_0 \) : 予熱時間 \[ s \]

\( t_1 \) : 摩擦時間 \[ s \]

\( t_2 \) : アブセット時間 \[ s \]

\( t_B \) : ブレーキ時間 \[ s \]

\( t_u \) : アブセットタイミング \[ s \]

\( v_8 \) : 寄り速度 \[ mm/s \]
第2章 供試材料と実験方法

2.1 緒言

本章では、本研究に用いる供試材料の機械的性質、化学成分、実験用摩擦圧接機、および強度試験方法について述べる。

2.2 供試材料

供試材料としては、本研究において主に対象とする6061アルミニウム合金の他、比較のため、以下に述べる種々の特性を持つ5種類の材料を用いた。

すなわち、構造材として用いられることが多いAl-Mg-Si系の6061-T6 アルミニウム合金、機械部品として用いられるAl-Mg系の5056-F チタンウム合金、航空機用材料として用いられるAl-Zn-Mg系の7075 アルミニウム合金、S15CK機械構造用炭素鋼、不銹鋼として用途の広いオーステナイト系SUS304 ステンレス鋼、昨今注目されているAZ31マグネシウム合金である。これらの化学成分分析結果をそれぞれTable 2.1～2.4に、引張試験により得られた機械的性質をそれぞれTable 2.5～2.8に示す。

<table>
<thead>
<tr>
<th>Table 2.1 Chemical compositions of aluminum alloys (wt %).</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Materials</td>
</tr>
<tr>
<td>-----------</td>
</tr>
<tr>
<td>A5056-F</td>
</tr>
<tr>
<td>A6061-T6</td>
</tr>
<tr>
<td>A7075-T6</td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>Table 2.2 Chemical compositions of carbon steel (wt %).</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Material</td>
</tr>
<tr>
<td>----------</td>
</tr>
<tr>
<td>S15CK</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Table 2.3 Chemical compositions of stainless steel (wt %).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>C</th>
<th>Si</th>
<th>Mn</th>
<th>P</th>
<th>S</th>
<th>Ni</th>
<th>Cr</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>SUS304</td>
<td>0.05</td>
<td>0.36</td>
<td>1.70</td>
<td>0.032</td>
<td>0.025</td>
<td>8.46</td>
<td>18.88</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Table 2.4 Chemical compositions of magnesium alloy (wt %).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>Si</th>
<th>Mn</th>
<th>Cu</th>
<th>Fe</th>
<th>Mg</th>
<th>Zn</th>
<th>Al</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>AZ31</td>
<td>0.002</td>
<td>0.43</td>
<td>0.005</td>
<td>0.003</td>
<td>Re</td>
<td>0.91</td>
<td>3.25</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Table 2.5 Mechanical properties of aluminum alloys.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Materials</th>
<th>Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)</th>
<th>Elongation $\delta$ (%)</th>
<th>Reduction of area $\phi$ (%)</th>
<th>Hardness HV0.2</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>A5056–F</td>
<td>279.6</td>
<td>24.6</td>
<td>62.5</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>A6061–T6</td>
<td>287</td>
<td>13.6</td>
<td>66.8</td>
<td>118</td>
</tr>
<tr>
<td>A7075–T6</td>
<td>646</td>
<td>19.6</td>
<td>—</td>
<td>190</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Table 2.6 Mechanical properties of carbon steel.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>Yield strength $\sigma_Y$ (MPa)</th>
<th>Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)</th>
<th>Elongation $\delta$ (%)</th>
<th>Reduction $\varphi$ (%)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>S15CK</td>
<td>307.5</td>
<td>449.1</td>
<td>26.9</td>
<td>66.3</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Table 2.7 Mechanical properties of stainless steel.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)</th>
<th>Elongation $\delta$ (%)</th>
<th>Reduction of area $\phi$ (%)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>SUS304</td>
<td>706</td>
<td>46.0</td>
<td>68.0</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Table 2.8 Mechanical properties of magnesium alloy.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)</th>
<th>Elongation $\delta$ (%)</th>
<th>Reduction of area $\phi$ (%)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>AZ31</td>
<td>271.07</td>
<td>10.47</td>
<td>29.32</td>
</tr>
</tbody>
</table>

これらの供試材の金属組織を Fig.2.1 に示す。

A5056–F  A6061–T6  A7075–T6  S15CK  SUS304  AZ31

Fig. 2.1 Micro-structure of base materials.

2.3 摩擦圧接機

本研究に用いた実験用摩擦圧接機の概略を Fig.2.2 に示す。摩擦圧接機は、摩擦圧接機本体、回転駆動・停止部、制御部、油圧部、測定部などから構成されている。圧接機本体の圧接材の回転側に駆動モータ、電磁クラッチ、油圧ブレーキ、慣性プレート、ヘッドストック、チャックなどの回転駆動・停止機器と回転速度計用の測定器が装着されており、圧接材の固定側には、チャック、摩擦トルク検出器、油圧シリンダ、圧力検出器 (ロードセル) などの加圧関連機器と測定機器が設置されている。また、圧接機本体のプラテンには寄りしろを測定するための変位計が装着されている。摩擦圧接機の仕様を Table 2.9 に示す。
Fig. 2.2 Schematic diagram of brake-type friction welding machine.

変位計測装置の模式図をFig. 2.3に示す。油圧シリングにより移動する変位量を、変位計で測定し、オシログラムで記録した。
Table 2.9 Specification of the brake-type friction welding machine.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Item</th>
<th>Specification</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Welding type</td>
<td>Two ways of brake and inertia type</td>
</tr>
<tr>
<td>Weldable diameter of metal</td>
<td>φ3~φ20mm</td>
</tr>
<tr>
<td>Thrust</td>
<td>max. 38.0kN</td>
</tr>
<tr>
<td>Rotational speed</td>
<td>0~126.7 s⁻¹ (variable change speed)</td>
</tr>
<tr>
<td>Main spindle motor</td>
<td>Three phase 220V 15kW</td>
</tr>
<tr>
<td>Clutch type</td>
<td>Electromagnetic clutch</td>
</tr>
<tr>
<td>Dumping device</td>
<td>Hydraulic brake</td>
</tr>
<tr>
<td>Gripping device</td>
<td>Manual scroll chuck with three jaws</td>
</tr>
<tr>
<td>Control of friction time</td>
<td>0~30s</td>
</tr>
<tr>
<td>Control of upset time</td>
<td>0~30s</td>
</tr>
<tr>
<td>Weight of inertia</td>
<td>0~441N (variable change weight)</td>
</tr>
</tbody>
</table>

2.4 摩擦圧接実験方法

本研究で用いた供試材料は、直径16mmで供給された6061-T6アルミニウム合金、5056-Fアルミニウム合金、S15CK機械構造用炭素鋼、SUS304ステンレス鋼、
AZ31 マグネシウム合金、および直径 20mm で供給された 7075-T6 アルミニウム合金である。これらを旋削により Fig. 2.4 に示すような寸法および形状に加工し、圧接母材とした。摩擦圧接実験は、2.3 節で説明した摩擦圧接機を用いて行い、圧接中に、圧力はロードセルで、摩擦速度は回転速度計で、寄りころは差動変圧器式変位計で、摩擦トルクは歪計式トルク変換器を用いて検出し、それぞれを電磁オシログラムで記録した。

<table>
<thead>
<tr>
<th>Materials</th>
<th>d</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>6061-T6</td>
<td>16</td>
</tr>
<tr>
<td>5056-O</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>S15CK</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>SUS304</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>AZ31</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>A7075-T6</td>
<td>20</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Fig. 2.4 Shape and dimensions of base material.

2.5 強度試験方法

本研究では、継手の強度特性を調べるために、引張試験、曲げ試験、ねじり試験、シャルピ衝撃試験、および疲労試験を行った。まず、引張試験では、6061-T6 アルミニウム合金、5056-F アルミニウム合金、SUS304 ステンレス鋼、AZ31 マグネシウム合金および 7075-T6 アルミニウム合金の継手とそれぞれの母材については JIS Z 2201 に従い Fig. 2.5 に示すように、平行部長さ 74.3mm、平行部直径 13.5mm の JIS 14 A 号試験片に旋削加工を行なって試験片を作製した。一方、S15CK 機械構造用炭素鋼の継手と母材については、Fig. 2.6 に示すように、平行部長さ 77mm、平行部直径 14mm の JIS 14 A 号試験片に旋削加工を行なった後、さらに接合面に半径 1.6mm の円周切欠きを施し、引張試験片を作製した。これは、圧接が不完全で圧接部で破断となるべき継手が、摩擦熱によって圧接部が硬化して伸びの容易な母材部で破断となり、圧接部の評価が困難となることを防ぐためである。引張試験では、30ton の万能試験機を用いて引張強さ、伸び、および絞りを測定した。曲げ試験では、母材および圧接継手とも、直径は 13.5mm の棒状に旋削加工した試験片を用いた。これを万能試験機に固定した 3 点曲げ試験用治具に装着し、支点間距離を 72.5mm、ボンチ先端半径を 16mm、ボンチの荷重点を圧接界面位置として曲げ試験を行なった。本研究では湾曲部の裂けきるの発生時をもって試験を終了した。裂けきるの発生しない試験片は、JIS Z 2248 に示される通り 170 度まで
曲げ試験を行った。ねじり試験は、母材および圧接継手とも、ばりのみを旋削除去したねじり試験片を用いて行なった。シャルピ衝撃試験は、JIS Z 2202 に示される通常の衝撃試験片とは異なり、母材および圧接継手を Fig.2.7 に示す寸法および形状に旋削加工を行ない、室温でシャルピ衝撃試験機を用いて、曲げのシャルピ衝撃吸収エネルギーを測定した。疲労試験は、継手の界面の強さを測定するために、母材および継手を Fig.2.8 に示す寸法および形状に旋削加工を行ない、片持ち回転曲げ疲労試験機を用いて、縦返し速度約 28.3s^{-1}、打切り縦返し数 10^7 回として行なった。そして、式 (2.1) から疲労試験の S-N 曲線を作製した。

\[
\log(\sigma - \sigma_w) = a + m \log N_f
\]  
(2.1)

ここで、\(a\) および \(m\) は定数、\(N_f\) は破断までの縦返し数、\(\sigma\) は縦返し応力 (MPa)、\(\sigma_w\) は疲労限度 (MPa) である。なお、疲労試験片の切り欠き位置は圧接界面であり、切り欠きの曲げに対する応力集中は 1.62 である。

Fig. 2.5 Shape and dimensions of tensile test specimen.

Fig. 2.6 Shape and dimensions of tensile test specimen (S15CK).

Fig. 2.7 Shape and dimensions of Charpy impact test specimen.

Fig. 2.8 Shape and dimensions of fatigue test specimen.
2.6 結言

本章では、本研究に用いた供試材料の機械的性質、化学成分、実験用摩擦圧接機、および JIS に準じた強度試験法について述べた。実験用摩擦圧接機は、圧力、摩擦速度、寄りしろ、摩擦トルクの測定が可能である。強度試験法は、JIS に準じて行った。
第3章 摩擦圧接における圧接入力の定義とその測定方法

3.1 緒言

摩擦圧接では、まず、互いに押し付けられた2つの物体に相対運動を与えて摩擦し、そこに摩擦熱を発生させる。これにより摩擦面近傍の温度が上昇して、材料の軟化が生ずる。さらに、軟化した摩擦面近傍は、軸荷重によって変形し、ばりを生成する。摩擦圧接では、これら2種類の現象が相まって圧接部を形成する。これらの現象を機械的仕事からみると、摩擦熱は摩擦入力に、ばりの生成は変形入力に対応すると考えられる。

摩擦圧接中にはこれらの2種類の機械的仕事に対応する圧接入力が圧接部に投入されつつ圧接が進行する。その結果、摩擦面は高温となり圧接時間の経過に伴い軟化した圧接部の一部がばりとなって順次外部へ排出され、摩擦面の様相は時間とともに変化して行く261。

したがって、圧接プロセスにおける最終過程の圧接入力が継手強度に深く係わりがあると考えられる。しかし、前過程の圧接入力がまったく接合に寄与しないということはなく、最終過程の摩擦現象の具現化のために無くてはならないものである。

本章では、摩擦圧接法の概要を述べた後、摩擦圧接の圧接入力が摩擦入力と変形入力に分類できることを示す。次いで、熱量計を用いて、これらの圧接入力をの値を測定し、圧接部の温度は摩擦入力に依存すること、さらに、摩擦面の様相を調べ、変形入力が凝着面の生成に深く関わっていることなどを明らかにする。

3.2 摩擦圧接法の概要

摩擦圧接法は、圧接条件として摩擦速度、圧力、時間などの圧接条件因子を制御し、摩擦速度と圧力の相互作用による摩擦面の発熱と変形を利用する接合方法である。本法は、ブレーキ式(制動方式)とイナーシャ式(慣性方式)の二つの方法に大別される。

ブレーキ式は、摩擦圧力を負荷させながら回転運動を与え、一定時間経過後急停止を行なうと同時に摩擦圧力と同一か、あるいは高いアブセット圧力を負荷する方式である。アブセット圧力の負荷と同期させるブレーキ機構が複雑であるが、
圧接条件因子（摩擦速度、摩擦圧力、摩擦時間、アブセット圧力、プレーキ時間）の微調整が容易である。しかし、回転運動を急停止させるため、回転停止直前の低速域において接合界面に制動による大きなせん断力が作用し脆弱な接合部となり、そのせん断力の影響を打ち消す高いアブセット圧力で密着させる必要がある。

一方、イナーシャ式は、接合界面の摩擦力で回転運動を制動する方式である。回転軸にフライホイールを取り付け、この質量を調整することで圧接過程を制御するため、圧接装置の機構は単純である。さらに、回転停止直前で摩擦トルクが極大となるため、接合界面に無理な力がかからず、プレーキ式のように高いアブセット圧力を負荷する必要がない。しかし、イナーシャ式ではフライホイールの交換によって圧接条件を調整する必要があり、このためその微調整が困難で、最適圧接条件を求めることが難しい。

プレーキ式摩擦圧接過程をFig.3.1に示す。まず、両母材が接触していない状態で回転側母材を一定回転Nで回転させる。次に、両母材を接触させ予熱圧力P₀を負荷し摩擦を開始する。一定の予熱時間t₀経過後に摩擦圧力をP₁に増加し、摩擦時間t₁の間、P₁の加圧下で摩擦を続ける。摩擦時間t₁終了後、モータの駆動力をクラッチにて断ち、プレーキをかけて回転を急停止させると同時に摩擦圧力P₁を同一、もしくはP₁より高いアブセット圧力P₂を負荷する。圧接部が冷却して完全な継手形成に必要なアブセット時間t₂経過後、アブセット圧力を解除し、1サイクルが完了する。なお、小径材の場合には、予熱圧力P₀と予熱時間t₀を用いない場合が多い。

イナーシャ式摩擦圧接過程をFig.3.2に示す。最初、両母材を接触させる前に回転側母材を一定回転Nで回転させる。モータの駆動力をクラッチで切り離した後、両母材を接触させ摩擦圧力Pを負荷すると、摩擦抵抗によって回転が徐々に減速しながら停止する。圧接部が冷却して完全な継手を形成するのに必要な時間t₂経過後、摩擦圧力を解除し、1サイクルが完了する。

我が国では、プレーキ式が広く利用され、我が国の圧接機メーカーもほとんどがこの方式の圧接機を製作している。イナーシャ式は、アメリカで特許となっており、欧米を中心に広く利用されている。

本研究では、圧接条件の因子数を多く採り上げ、かつ、その水準も幅広く変化させる必要があるため、両方式を実装した実験用摩擦圧接機を用いた。
Fig. 3.1 One cycle of brake-type friction welding process.

Fig. 3.2 One cycle of inertia-type friction welding process.

3.3 压入力の測定方法

摩擦圧接中になされる機械的仕事、すなわち圧入力 (入熱) は、摩擦速度と摩擦トルクの積による摩擦入力、寄り速度 (変形速度) と推力の積による変形入力、
ばかり生成時の相対する母材の半径方向への相対運動による摩擦入力、および回転方向への母材のねじれによる変形入力があるが、後者2つは微小量と考えられるので無視できる。

摩擦入力の模式図をFig.3.3に示す。摩擦入力は、回転方向の摩擦トルク$T$と角速度$\omega$の積で、材料の変形が回転方向であるため、仕事を発生する力の方向も回転方向となる。その結果、摩擦入力は摩擦熱を発生して圧接面近傍を加熱するとともに、突起部と酸化膜の破壊による凝着の促進の役割を担うと考えられる。

変形入力の模式図をFig.3.4に示す。変形入力は軸方向の推力$F$と、ばかりの排出による母材の圧縮変形、すなわち、寄り速度$\nu$との積で、仕事を発生する力の方向は軸方向となる。変形入力は、摩擦入力によって軟化された圧接面の密着と凝着部を拡大し、圧着性を促進する役割を担うと考えられる。

Fig. 3.3 Idealized friction heat input.  Fig. 3.4 Idealized deformation heat input.

一般に、ある摩擦圧接条件の範囲内では、摩擦トルクが大きくなると寄りしろは増大する。この現象は、福島ら25]は摩擦トルクが増加するとねじり応力が増大する結果であるとし、摩擦トルクの増加で寄りしろが増大し、アブセット効果の増大により圧着性が促進すると述べている。また Hazlett ら41]は、この現象をねじりと圧縮の組合せ応力による降伏域の増大に起因すると述べている。しかしこれらは、摩擦過程で摩擦面が均一に加熱されていることが前提である。これらとは異なり、摩擦過程で摩擦面が均一に加熱されていない状態のときに、アブセット過程で大きなアブセット推力を付加すると、寄りしろは小さい結果となる。したがって、摩擦トルクの大きいことが必ずしも圧着性の促進に寄与しない場合がある。
ある。そのため、摩擦トルクは密着性と圧接性に直接、寄与しないと考えられる。他方、推力は摩擦トルクの発生にかかわりながら、摩擦入力によって軟化した圧接部の変形（寄りしろ）にかかわっていると考えられる。とくに、摩擦トルクが大きくなる寄り速度が低い場合に推力を大きくして寄り速度を増大させ、変形入力を大きくすることによって圧接性を促進し得ると考えられる。さらに、変形入力が大きいことは、軟化域を圧接部から押し出す効果を有する。

本論文では、圧接構成の観点から単純に摩擦トルクと摩擦速度が発熱仕事（摩擦入力）の役割を担い、推力と寄り速度が母材の変形仕事（変形入力）を担うと考える。すなわち、母材を熱しながら押し付け、金属結合に至らせる熱間圧接の基本に基づいて圧接入力（機械的仕事）を定義し、摩擦入力と変形入力が圧接性とどのような関係にあるかについて検討した。

摩擦圧接中の機械的仕事は以下のように導かれる2)。Fig.3.5 に示すように、摩擦面（回転中心 O）で、半径 $r(m)$ と微小増分を加えた半径 $(r + dr)$ 間の微小摩擦面積における熱発生過程を考える。接触圧力を $P(MPa)$ とすると、この微小面積 $ds = 2\pi r dr$ で発生する摩擦力 $dF(N)$ は

$$dF = (\mu P)(2\pi r dr)$$

$$= 2\mu P\pi r dr$$

となる。回転軸に対するこの力のモーメント $d\Gamma(Nm)$ は

$$d\Gamma = r dF$$

$$= r (2\mu P\pi r dr)$$

$$= 2\mu P\pi r^2 dr$$

(3.1)

いま、$r$ が一定、$P$ は均等に摩擦面に付加されると仮定し、摩擦面の外半径を $R(m)$ とすると、式 (3.1) を $0 \leq r \leq R$ の範囲で $r$ について積分すると、実際の中実丸棒の摩擦トルクは
\[ T = \int_0^R 2\pi P \mu r^2 dr \]
\[ = 2\pi P \mu \int_0^R r^2 dr \]
\[ = \frac{2}{3} P \mu R^3 \]
となる。ここで、摩擦係数 \( \mu \) は
\[ \mu = \frac{3T}{2\pi PR^3} \]
となる。
摩擦面における単位時間当たりの摩擦入力（仕事）は、単位時間（1s）内に一定方向に作用する力と移動した距離の積で表される。摩擦速度を \( N(s^{-1}) \) とし、移動距離を \( S = 2\pi r N(m) \) とすると、微小面積当たりの単位時間当たりの摩擦入力 \( dq_f(J/s) \) は
\[ dq_f = SdF = (2\pi r N) dF \]  
式 (3.2) より摩擦面全体の単位時間当たりの摩擦入力 \( q_f(J/s) \) は式 (3.3) で表される。
\[ q_f = \int_0^R SdF \]
\[ = \int_0^R (4\pi^2 \mu PN) r^2 dr \]
\[ = 4\pi^2 \mu PN R^3 \]
\[ = \frac{3}{3} \]
\[ = 2\pi N \frac{2}{3} P \mu R^3 \]
\[ = 2\pi NT \]
\[ = 6.283 NT \]  
(3.3)
この式は摩擦圧接過程のある時点の1秒間当たりの摩擦入力を表す式であり、摩擦入力はこの式を時間が積分することで求まる。
\[ Q_f = 2\pi \int NT dt \]
\[ = 6.283 \int NT dt \]  
(3.4)
一方、単位変形入力 \( q_d (J/s) \) は、推力を \( F (N) \), 寄り速度を \( v_b (m/s) \) とするとき式 (3.5) で表される。

\[
q_d = Fv_b \quad \text{(3.5)}
\]

ここで、寄り速度 \( v_b (m/s) \) は寄りしろを \( \delta (m) \), 圧接時間を \( t (s) \) とするとき式 (3.6) で表される。

\[
v_b = \frac{\delta}{t} \quad \text{(3.6)}
\]

そして、変形入力 \( Q_d (J) \) は、式 (3.7) で表される。

\[
Q_d = \int Fv_b dt \quad \text{(3.7)}
\]

したがって、摩擦圧接過程のある時点における単位時間当りの全圧入力 (全単位圧入力) \( q (J/s) \) は式 (3.8) で表される。

\[
q = 6.283NT + Fv_b \quad \text{(3.8)}
\]

そして、摩擦圧接過程の全圧入力 \( Q (J) \) は式 (3.9) で表される。

\[
Q = 6.283 \int NT dt + \int Fv_b dt \quad \text{(3.9)}
\]

次に、摩擦過程の圧入力を \( Q_I (J) \) とアブセット過程の圧入力を \( Q_F (J) \) とするとき、両過程を加算した全過程の圧入力 \( Q_T (J) \) は式 (3.10) で表される。

\[
Q_T = Q_I + Q_F \quad \text{(3.10)}
\]

一方、全過程の単位圧入力を \( q_T (J) \) は摩擦過程の単位圧入力を \( q_I (J) \) とアブセット過程の単位圧入力 \( q_F (J) \) とするとき、式 (3.11) で表される。

\[
q_T = \frac{dQ_T}{dt} = \frac{d(Q_I + Q_F)}{dt} = \frac{d(\int q_I dt + \int q_F dt)}{dt} \quad \text{(3.11)}
\]
Fig. 3.6 Schematic diagram of brake-type friction welding behaviors.

一般に、摩擦圧接における重要な因子とされる摩擦速度、寄りしろ、推力および摩擦トルクは、圧接中に刻々と変化し、それらは Fig. 3.6 に示す模式図の様に変化する。すなわち、母材の接触直後、摩擦トルクは急激に上昇するが、この部分では寄りしろはほとんど生じない。その後、母材の軟化に伴い摩擦トルクは一定値（定常域）を示す。その時点から寄りしろが徐々に生じ始め、次いで一定の寄り速度で進行する。アプセット過程で摩擦トルクが急激に上昇し、それに伴って寄り速度が増加する。単位摩擦入力は摩擦トルクと摩擦速度との積であるため、摩
擦過程では極初期に一時的に増大するが、ほぼ一定の値を示す。その後、アブセット過程の極初期で摩擦トルクが増大するため単位摩擦入力は増加するが、その後摩擦トルクが減少しブレーキによって摩擦速度が減速されるため、単位摩擦入力は減少する。単位変形入力は寄り速度と推力の積であり、摩擦過程では極初期を除いて、一定の寄り速度であるために単位変形入力も一定の値を示す。アブセット過程では、寄り速度と力の増加に伴い単位変形入力も増大するが、その後、寄り速度の減速によって単位変形入力は減少する。

本研究では、摩擦過程の圧接入力にかかる諸現象として、定常域の摩擦トルクと寄り速度を採用した。定常域が明らかでない場合には、アブセット過程のトルク上昇直前における摩擦トルクと寄り速度を採用した。一方、アブセット過程では、摩擦寄りしつりの生成は回転停止時にほぼ終了するので、摩擦過程終了時（アブセット過程開始後）から回転が停止するまでの短時間内の諸現象の平均値を採用した。そして、全過程の単位摩擦入力、単位変形入力および全単位圧接入力は、それぞれ全過程の摩擦入力、変形入力および全圧接入力をそれぞれ摩擦時間、ブレーキ時間、全摩擦時間で除した。

本章の圧接入力の種類とその記号を Table 3.1 に示す。なお、次章以降は、単位変形入力を単に入力として表記する。

Table 3.1 Kind of heat inputs.

<table>
<thead>
<tr>
<th>$q_{i}$</th>
<th>摩擦過程の単位摩擦入力</th>
<th>$Q_{i}$</th>
<th>摩擦過程の摩擦入力</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$q_{ff}$</td>
<td>アブセット過程の単位摩擦入力</td>
<td>$Q_{ff}$</td>
<td>アブセット過程の摩擦入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{if}$</td>
<td>全過程の単位摩擦入力</td>
<td>$Q_{if}$</td>
<td>全過程の摩擦入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{d}$</td>
<td>摩擦過程の単位変形入力</td>
<td>$Q_{d}$</td>
<td>摩擦過程の変形入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{f}$</td>
<td>アブセット過程の単位変形入力</td>
<td>$Q_{f}$</td>
<td>アブセット過程の変形入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{a}$</td>
<td>全過程の単位変形入力</td>
<td>$Q_{a}$</td>
<td>全過程の変形入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{i}$</td>
<td>摩擦過程の全単位圧接入力</td>
<td>$Q_{i}$</td>
<td>摩擦過程の全圧接入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{f}$</td>
<td>アブセット過程の全単位圧接入力</td>
<td>$Q_{f}$</td>
<td>アブセット過程の全圧接入力</td>
</tr>
<tr>
<td>$q_{u}$</td>
<td>全過程の全単位圧接入力</td>
<td>$Q_{u}$</td>
<td>全過程の全圧接入力</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.4 熱量の測定

3.4.1 熱量の測定方法

摩擦圧接中に発生する熱量（圧接入力）および用いる測定機器と記録計などの妥当性を調べるために、熱量計中で SUS304 ステンレス鋼を摩擦圧接して発生する
熱量を調べた。用いた熱量計の模式図を Fig.3.7 に示す。水を充填した熱量計中で摩擦圧接し、圧接後、すみやかに水を攪拌し、水温の上昇を記録した。熱量は、次式を用いて算出した。

Fig. 3.7 Appearance of calorimeter for measuring friction temperature.

全熱量 \( Q_e (J) \) は、

\[
Q_e = Q_w - Q_{los} \\
= (t_u - t_0)(V_w\rho_w c_w + V_s\rho_s c_s) - Q_{los} \tag{3.12}
\]

ここで、
- \( Q_w \): 水当量 (J)
- \( Q_{los} \): 熱伝導その他で失われる熱量 (J)
- \( t_u \): 圧接後の水の上昇温度 (K)
- \( t_0 \): 圧接前の水の温度 (K)
- \( V_w \): 熱量計内の水の体積 (m³)
- \( \rho_w \): 水の密度 (kg·m⁻³)
- \( c_w \): 水の比熱 (J·g⁻¹·K⁻¹)
- \( V_s \): 熱量計内の圧接母材の体積 (m³)
- \( \rho_s \): 圧接母材の密度 (kg·m⁻³)
- \( c_s \): 圧接母材の比熱 (J·g⁻¹·K⁻¹)
3.4.2 実験方法

本実験で用いた圧接母材は比較的熱伝導率の低い SUS304 ステンレス鋼で、直径 10mm の供試材を長さ 100mm に切断し、圧接部を旋削加工したものである。実験は、(I) 摩擦過程のみによる熱量測定、(II) ブレーキ式摩擦圧接による熱量測定、(III) イナーシャ式摩擦圧接による熱量測定の3種を行なった。なお、圧接母材と式 (3.12) の計算に必要な諸数値を Table 3.2 に示す。参考に 6061 アルミニウム合金の諸数値も併記する。

Table 3.2 Physical properties of material used.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>Density $\rho$(g-cm$^{-3}$)</th>
<th>Specific heat $c$(J·g$^{-1}$·K$^{-1}$)</th>
<th>Heat conductivity $\eta$(J·cm$^{-1}$·s$^{-1}$·K$^{-1}$)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>A6061-T6</td>
<td>2.7(at R.T.)</td>
<td>0.896(at 373K)</td>
<td>1.67(at 373K)</td>
</tr>
<tr>
<td>SUS304</td>
<td>8.0(at R.T.)</td>
<td>0.519(at 373K)</td>
<td>0.160(at 373K)</td>
</tr>
<tr>
<td>Water</td>
<td>0.9982(at R.T.)</td>
<td>4.182(at R.T.)</td>
<td>0.216(at R.T.)</td>
</tr>
</tbody>
</table>

実験例として、(I) 摩擦過程のみによる温度測定の概要を示す。Table 3.3 に示すように、圧接条件因子は、摩擦圧力 $P_1$、摩擦時間 $t_1$ および回転数 $N$ である。まず、固定側および回転側の両母材を①のオイルシールを破損しないように、チャンバ内に挿入し、両母材の圧接面間隙を数 mm に设置する。次いで、②のウォーターチャンバ内に所定の水を注入し、チャンバ内の上下 2カ所に設けられた①のクロメル-アルメル熱電対と⑤の母材接触界面より 40mm と 50mm の 2 点に設けた熱電対の温度が一定になることを確かめる。次に、所定の回転数 $N$ と所定の摩擦圧力 $P_1$ の元で摩擦時間 $t_1$ だけ摩擦させたあと、静止側母材を急速に後退させ両母材を瞬間的に引き離し、その後回転側母材の回転を停止させると同時に⑥の攪拌器を上下に動かして、②のウォーターチャンバ内の水を攪拌する。そして、チャンバ内の上下 2カ所に設けられた①の熱電対の示す温度が定常状態になったのを確かめて圧接サイクルが終了する。なお同時に、摩擦トルク $T$、回転数 $N$、寄りしろ $\delta$ などはオシログラムに記録する。以下、実験 (II) および (III) も、両母材を引き離すこと以外はこれに準じて行った。

- 27 -
Table 3.3 Range of welding condition factors.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>(I) Separating type</th>
<th>(II) Braking type</th>
<th>(III) Inertia type</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Friction pressure $P_1$ (MPa)</td>
<td>7～100</td>
<td>20～100</td>
<td>7～130</td>
</tr>
<tr>
<td>Upset pressure $P_2$ (MPa)</td>
<td>—</td>
<td>40～200</td>
<td>—</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction time $t_1$ (s)</td>
<td>1～3</td>
<td>1～3</td>
<td>—</td>
</tr>
<tr>
<td>Stopping time $t_B$ (s)</td>
<td>—</td>
<td>0.1</td>
<td>—</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction speed $N$ (s$^{-1}$)</td>
<td>16.7～66.7</td>
<td>50.0</td>
<td>41.7～66.7</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.4.3 予備実験の結果

(a) まず始めに圧接母材から熱伝導によって放出される熱量を調べるために、熱量計を用いないでFig.3.7の⑤の熱電対のみを設置して、大気中で圧接実験を行った。Fig.3.8に熱電対の温度変化を示す。図から、温度上昇が明確に分かるのは圧接開始より8s後であることが分かった。これより、圧接開始から8s後までに、Fig.3.7の④の2カ所に設けられた熱電対の示す温度が定常状態になれば、母材からの熱伝導による熱損失は無視してもよいことがわかった。 (b) 次に、熱量計から熱伝導で失われると思われる熱量を調べるために、熱量計の壁面に熱電対を埋め込んで温度変化を測定した。すなわち、熱量計の内壁面から0.5mmと5.0mmの距離に2対の熱電対（アルメル・クロメル）を埋め込み、313.16Kの温水を熱量計に挿入して、その温度変化を測定した。その結果をFig.3.9に示す。図から、測定開始から約4sを経過すると徐々に上昇し、約8s後には内壁面から0.5mmの点で最大約1.5Kの温度上昇が測定された。この温度上昇による損失熱量は熱量計の容量から換算して最大約30Jと計算された。したがって、熱量計にはこの損失熱量を考慮する必要がある。
Fig. 3.8 An example of temperature data.

Fig. 3.9 An example of temperature data (Hot water).

3.4.4 全熱量の検討

Fig. 3.10〜3.12に実験 (I) 〜 (III) の温度測定結果の1例を示し、Fig. 3.13〜3.14に摩擦トルクなどの摩擦挙動を示す。各温度測定結果の図から、Fig. 3.7の①の2カ
所に設けられた熱電対の示す温度が定常状態になっているのは、いずれも圧接開始から8s以内であり、従って、圧接時における母材からの熱伝導による熱損失は無視してもよいことが確認された（Fig.3.7の⑧の熱電対の温度も参照）。そこで式（3.12）から、各実験における全熱量$Q_e$を計算し、さらに、摩擦トルク、摩擦圧力、摩擦速度、摩擦時間、アブセット圧力、ブレーキ時間、寄りしろなどの記録から式（3.9）を用いて全熱量$Q$を求めた。まず、熱量計から求めた全熱量$Q_e$と、式（3.9）の全熱量$Q$と比較検討した。Fig.3.15にその結果を示す。図から、総じて、熱量計から求めた全熱量$Q_e$の値は、計算された熱量$Q$の値より、やや低い値を示した。これは全熱量$Q_e$の値において、前述の装置の熱伝導による熱損失（最大で約30J）やその他の熱損失があると考えられ、両者の関係は妥当なものであると思われる。

次に両者の関係をより詳細に検討するために、回帰分析を行い、

相関係数  $r = 0.981$

回帰式  $Q = 0.97Q_e + 684$

を得た。Fig.3.16 にその結果を示す。図から、両者は極めて高い相関関係があり、計算から求められる熱量すなわち式（3.9）の妥当性が確かめられた。

Fig. 3.10  An example of temperature data of experiment (I).
Fig. 3.11 An example of temperature data of experiment (II).

Fig. 3.12 An example of temperature data of experiment (III).
Fig. 3.13  An example of friction behavior.

Fig. 3.14  An example of friction behavior.
3.4.5 摩擦入力と変形入力の検討

前節において、摩擦現象から熱量 (圧接入力) の算定が可能であることを明らかにした。そこで、実験 (I) ∼ (III) それぞれの形式別に、式 (3.9) の全圧接入力 (全熱量) から摩擦入力と変形入力を求めた。その結果を摩擦圧力 \( P_t \) を横軸に、熱量 \( Q \) を縦軸にとって表したのが Fig.3.17 ∼ 3.19 である。いずれの図からも、摩擦入力に比較して変形入力は極めて小さく、その絶対値は (0 〜 30J) 程度である。しかしながら、Fig.3.18 の実験 (II) のブレーキ式圧接法において、アブセット過程での圧接入力がその絶対値で (270 〜 390J) と計算でき、アブセット過程の変形入力は無視できない値と考えられる。実験 (III) のイナーシャ式摩擦圧接の結果である Fig.3.19 では、全圧接入力がブレーキ式に比べ約 1.5 倍と大きく、変形入力もブレーキ式の全変形入力に比べ約 1.5 倍と大きくなっている。
Fig. 3.17 Relation between heat inputs and friction pressure under separating type.

Fig. 3.18 Relation between heat inputs and friction pressure under braking type.

Fig. 3.19 Relation between heat inputs and friction pressure under inertia type.
3.4.6 アブセット過程における圧接入力の検討

Fig.3.18の計算結果からアブセット過程での変形入力の存在が確認できたので、本節ではアブセット過程における圧接入力の検討を行った。すなわち、アブセット過程における圧接入力は実験(I)と実験(II)との温度差を求めその温度差を熱量に変換すればその値がアブセット過程における圧接入力と考えられる。Table 3.4にその測定結果を示す。表から全熱量に比較して少ない（絶対値として40〜150J）が、アブセット圧力$P_2$の大小にかかわらず、その存在を確かめることができた。

Table 3.4 Comparison between friction heat input and deformation heat input.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Welding conditions</th>
<th>Heat input (J)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$P_1$ $P_2$ $t_1$ $t_B$</td>
<td>Friction</td>
</tr>
<tr>
<td>40 0 2 0.1 50.0</td>
<td>4550</td>
</tr>
<tr>
<td>40 80 2 0.1 50.0</td>
<td>4700</td>
</tr>
<tr>
<td>60 0 2 0.1 50.0</td>
<td>4700</td>
</tr>
<tr>
<td>60 120 2 0.1 50.0</td>
<td>4830</td>
</tr>
<tr>
<td>80 0 2 0.1 50.0</td>
<td>4970</td>
</tr>
<tr>
<td>80 160 2 0.1 50.0</td>
<td>5110</td>
</tr>
<tr>
<td>100 0 2 0.1 50.0</td>
<td>5090</td>
</tr>
<tr>
<td>100 200 2 0.1 50.0</td>
<td>5240</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.5 摩擦面の様相

摩擦過程における摩擦面の様相の変化に関する研究結果については、すでに蓮井らによって報告されている26）。同研究ではアクリル樹脂を用いて摩擦圧接を行い、圧接中、固定側母材端面よりアクリル樹脂を透過して摩擦面を観察している。そして、摩擦圧力が高く、摩擦速度が低いほど摩擦トルクが増大し、円形密着部領域は広くなることを示している。一方、摩擦圧力が低く、摩擦速度が高くなるほど摩擦トルクは減少し、円形密着部領域が狭くなることを明らかにしている。本研究ではこのような摩擦面の様相を想定し、円形密着部領域を凝着摩擦面、その外側で単に滑っている部分を滑り摩擦面と呼ぶことにする。

変形入力と摩擦面の様相を調べるために、6061アルミニウム合金を使用し、摩擦圧接中、加圧シリンダを所定の時点で急速に後退させて回転側母材と固定側母材
を引き離した。摩擦過程において両母材を引き離した代表的な接合面の外観、SEM写真、摩擦入力および変形入力の値をFig.3.20に示す。

Fig. 3.20 Appearance of welded interface.

変形入力が0Jでは、外観写真で凝着摩擦面と滑り摩擦面が混在し、ばりの発生は認められない。右側のSEM写真で見ると凝着摩擦面Aでは停留した付着模様が
Fig. 3.21 Schematic illustration of friction surface.

一方、B 部の SEM 写真では、滑り模様を呈している。これは、変形入力が 0J であるため軸方向の仕事が行われず、回転方向の仕事である摩擦入力だけが作用したため、凝着部が散乱して発生したと考えられる。

変形入力が 3.57J, 26.63J, 57.63J と増加するに従い、SEM 写真の C, E, G にみられるように付着・滑り模様が次第に細かくなる。外周部の D, F, H では、付着・滑りが回転のために縦状に回転させられた様相を示す (flow pattern)。外観的には、変形入力の増加に伴い中心部に存在する凝着部が次第に全面に拡大し、さらに、中心部は輝面となり外周部に筋目が入った形になる。

摩擦力が 5408J の外観写真では凝着部が全面に広がっていないが、摩擦力が 4737J では凝着部が全面に広がっていることから、摩擦力と凝着部との間の密着関係は無いものと判断される。

本実験の結果から、摩擦圧接中的摩擦面の様相を概念図で示すと Fig.3.21 (a), (b) のようになる。それぞれ濃灰色が凝着摩擦面、その周りの白抜きが滑り摩擦面を表す。

低い摩擦推力 (A) の摩擦過程において、摩擦面の所々が部分的に凝着し、その状態でアブセット過程に移行すると凝着摩擦面は幾分拡大するが、全面に広がる
ことはない。Fig. 3.20 より、変形入力は凝着摩擦面の大小に対応しており、変形
入力が小さいと凝着摩擦面も小さくなって不完全継手となる。
(B) の高い摩擦圧力では、摩擦面中央部に凝着摩擦面が形成される。この状態で
高いアブセット圧力のアブセット過程に移行すると、摩擦面全域に凝着摩擦面が
拡大する。(B) は (A) に比べ変形入力が大きく、凝着摩擦面が摩擦面全域に拡大す
るため、完全継手となることが予想される。

3.6 結言

摩擦圧接中に発生する熱量 (圧接入力) を測定するために、透明アクリル樹脂製
の熱量計中で摩擦圧接し、内部に充填した水温の上昇量を水当量に換算して発生熱量求めた。そして、摩擦入力と変形入力を比較した。次いで、摩擦圧接中、加
圧シリンダを急速に後退させて回転側母材と固定側母材を引き離し、圧接入力と
摩擦面の様相の関係を調べ、以下の結果を得た。

1) 摩擦トルクと回転数および寄りしろと圧接圧力より求められる摩擦入力の計
算値と熱量計から換算した実測値とは高い相関を示した。
2) 摩擦入力と変形入力を比較した結果、摩擦過程における変形入力は極めて小
さいが、アブセット過程における変形入力は大きくなる。
3) ブレーキ式摩擦圧接における全過程の変形入力に比べ、イナーシャ式摩擦圧
接の変形入力は、約 1.5 倍と大きくなる。
4) 変形入力が小さいと凝着摩擦面は小さいが、変形入力の増大に伴い凝着摩擦
面は増加し、凝着摩擦面が摩擦面全域に拡大する。その結果、完全な接手が
形成される。

- 38 -
第4章 摩擦圧接における圧接入力と引張強さの関係

4.1 緒言

前章で、摩擦圧接法における圧接入力を摩擦入力と変形入力に分類し、それぞれの圧接入力に対応する熱量を熱量計を用いて測定し、その存在を明らかにするとともに、測定機器の妥当性を確認した。次いで、摩擦圧接中、加圧シリンダを急速に後退させて回転側母材と固定側母材を引き離し、変形入力と摩擦面の様相の関係を調べ、変形入力の増大に伴い凝着部が拡大することを明らかにした。

摩擦圧接中、摩擦面およびその近傍の素材は圧接時間の経過に伴いばりとなって順次外部へ排出されるため、摩擦面の様相は時間とともに変化する26)。したがって、一連の摩擦圧接過程において、とくに継手が形成される最終過程の摩擦現象と摩擦面の様相は継手強度と密接な関係があると考えられる。ある時点の摩擦現象は、それまでに投入された圧接入力によって熱せられた摩擦面と母材の様相によって具現されるので、摩擦過程後の圧接入力は非常に重要である。

これまで、簡単な仮定のもとで計算した圧接入力速度と引張強さの関係の報告38)があるが、圧接入力と継手強度の関係について報告したものはみられない。

本章では、圧接入力と引張強さの関係について調べ、良好な継手を作製するために必要な圧接入力の種類と、圧接入力が最も継手性能に影響を与える圧接過程について検討した。

また、比較的接合が容易とされる炭素鋼等の摩擦圧接では、全寄りしろによる圧接継手の評価が可能かつ簡便であるため、現場では多用されている。6061アルミニウム合金においても炭素鋼と同様、寄りしろと圧接継手の関係を明らかにし、寄りしろによる圧接継手の評価の可能性を模索した。

4.2 実験方法

本研究で用いた供試材は6061-T6アルミニウム合金である。用いた圧接条件因子をTable 4.1に示す。これらを組み合わせた42通りの圧接条件を採用した。アブセット圧力を基本的に摩擦圧力の3倍としたが、実際の現場作業中の圧接機の誤動作を考慮して、一部、摩擦圧力とアブセット圧力同一、あるいは、摩擦圧力よりもアブセット圧力を低くした条件も採用した。
Table 4.1 Friction welding factors.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>Friction pressure $P_1$ (MPa)</th>
<th>Upset pressure $P_2$ (MPa)</th>
<th>Friction time $t_1$ (s)</th>
<th>Stopping time $t_B$ (s)</th>
<th>Friction speed $N$ (s$^{-1}$)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45</td>
<td>5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135</td>
<td>2</td>
<td>0.1</td>
<td>16.7, 33.3, 50.0, 66.7</td>
</tr>
</tbody>
</table>

4.3 摩擦入力と引張強さの関係

まず、摩擦入力が継手性能、すなわち継手の引張強さとどのような関係にあるかについて調べた。摩擦過程、アブセット過程および全過程における摩擦入力と引張強さの関係を Fig. 4.1 〜 Fig. 4.3 に示す。図中の記号については、〇印が破断面に未凝着部の全く無い完全継手を、●印が未凝着部が存在した不完全継手を示している。摩擦過程の摩擦入力およびアブセット過程の摩擦入力には大きなデータのばらつきがみられ、引張強さと摩擦入力の間に明確な関係がみられない。全過程の摩擦入力は、摩擦過程の摩擦入力とほぼ同様の分布を示している。これは、アブセット過程では摩擦速度が減速域にあるため、摩擦速度の減少が摩擦入力の絶対値を小さくしたためである。

摩擦過程およびアブセット過程における摩擦入力は、その全エネルギーが熱に変換される。十分な摩擦入力は、母材を軟化し、変形しやすくしてアブセット過程での推力の効果を促進させる。しかし、摩擦入力が小さすぎると、母材が十分軟化せずに、不均一な摩擦面を生成する。これは、摩擦面全域が物理的あるいは熱的に均一でない接触となる。すなわち、この状態ではスティック・スリップ現象が生じており、部分的に凝着部が存在する激しい摩擦面となる。その後、アブセット過程の推力を大きくしても、十分接合できず、摩擦入力と明確な関係を示さないと考えられる。

- 40 -
Fig. 4.1  Relationship between tensile strength and unit friction heat input during friction stage.

Fig. 4.2  Relationship between tensile strength and unit friction heat input during upset stage.

Fig. 4.3  Relationship between tensile strength and unit friction heat input during total stage.
4.4 変形入力と引張強さの関係

次に、変形入力と継手性能の関係について調べた。摩擦過程、アブセット過程および全過程における変形入力と引張強さの関係を Fig.4.4 ～ Fig.4.6 に示す。なお、Fig.4.5 のみに、圧接条件因子を摩擦圧力およびアブセット圧力を7MPa、摩擦時間を50s、ブレーキ時間を0.1s と同様に、摩擦速度のみ33.3s⁻¹および50.0s⁻¹と変更した継手を加えており、Δ印で示した。これらは、摩擦時間が長く、全寄りしきが大きくなる圧接条件で、全て破断面に未凝着部が存在した不完全継手であり、本章9節で述べる。

Fig.4.4 より明らかな様に、摩擦過程では、変形入力が40J/s 以上で安定した継手性能を得ることができるが、それ以下の小さい領域ではデータはばらつきが認められる。たとえば、図中の矢印で示した変形入力が約1.29J/s における継手は、約298MPa という高い引張強さを示している。用いた圧接条件は、摩擦圧力35MPa、アブセット圧力105MPa、摩擦速度16.7s⁻¹、摩擦時間 2s である。このときの摩擦寄りしきは、実験で用いた全ての継手の平均摩擦寄りしきが4.20mm であるのに対して、0.48mm と著しく少なく、その変摩擦過程の変形入力も低い。また、アブセット過程における全継手の平均アブセット寄りしきが5.76mm であるのに 対して、この継手のアブセット寄りしきは0.72mm と少なく、アブセット過程の変形入力も116.38J/s と比較的小さい。したがって、この継手の接合面には、低い摩擦速度と高い摩擦圧力のため凝着摩擦面が所々に形成され、その部分が冷間圧接に似た接合となって荷重を受け持ち、総じてに継手強度が上昇したと考えられる。

アブセット過程は、Fig.4.5 に示すように、変形入力の小さい領域において若干のばらつきが認められるが、約200J/s 以上の変形入力で安定した継手性能を得ることができる。

全過程における変形入力と引張強さの関係を Fig.4.6 に示す。本研究の圧接条件では、ブレーキ時間が摩擦時間の1/20 であるため、アブセット過程が全過程に与える影響は小さく、アブセット過程と同様のデータ分布とならない。しかし、全過程の変形入力では変形入力の低い領域でばらつきが認められるものの、アブセット過程の変形入力とほぼ同じ分布となる。これは、摩擦過程の変形入力よりもアブセット過程の絶対値の方が極めて大きいためである。圧接継手の作製過程で、最終接合面を形成するは圧接過程の最終部であるアブセット過程とみなされており19)、したがって、アブセット過程の変形入力が継手性能に大きな影響を及ぼすものと推考される。すなわち、摩擦過程の変形入力はその全てが継手性能に影響するわけではなく、全変形入力と継手性能とは、必ずしも対応しないといえる。
アプセット過程の変形入力と引張強さの関係を示した Fig.4.5 中に指示したの
A～D に対応する継手の接合部のミクロ写真を Fig.4.7 に示す。変形入力が小さい
場合の継手では圧接界面に未凝着部が認められ繊維状組織が外周部へ向けて変形
していない。しかし、変形入力が大きい継手では繊維状組織が外周部に向けて変
形しており、これによって圧接界面が十分に密着するため凝着摩擦面が拡大し、結
果として引張強さが高くなったと考えられる。
Fig. 4.4 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during friction stage.

Fig. 4.5 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage.

Fig. 4.6 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during total stage.
Fig. 4.7 Appearance of the interface of friction welded joints.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>Joint A</th>
<th>Joint B</th>
<th>Joint C</th>
<th>Joint D</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$q_{fd}$ (J/s)</td>
<td>51.7</td>
<td>1136.1</td>
<td>2770.9</td>
<td>3566.1</td>
</tr>
<tr>
<td>$\sigma_B$ (MPa)</td>
<td>82.3</td>
<td>216.3</td>
<td>242.8</td>
<td>250.0</td>
</tr>
</tbody>
</table>

4.5 全入力と引張強さの関係

摩擦入力と変形入力の和である全圧接入力が継手性能とどのような関係があるかについて調べた。摩擦過程、アブセット過程および全過程における全圧接入力と引張強さの関係を Fig.4.8 ～ Fig.4.10 に示す。

摩擦過程の全圧接入力と引張強さの関係は、摩擦過程の摩擦入力を表す Fig. 4.1
とほぼ同じ分布となる。一般に摩擦過程では主に接合部を加熱する摩擦入力の値が変形入力の絶対値を上回り、摩擦入力が支配的となる。

アブセット過程の全圧接入口引張強さの関係は、若干、全圧接入口の低い領域でばらつきがみられるが、アブセット過程の変形入力を表すFig. 4.5とほぼ同じ分布となる。アブセット過程では、接合部を加熱する摩擦入力よりも接合のための密着や凝着摩擦面の拡大を促進する変形入力が支配的となる。そして、アブセット過程の全圧接入口1000J/s以上で作製された継手を良好な圧接継手と評価でき、良好な完全継手を作製できる目安となる。

摩擦過程では変形入力よりも摩擦入力の方が、また、アブセット過程では摩擦入力よりも変形入力の方が相対的に大きな値となる。しかし、相対的にブレーキ時間が摩擦時間よりも極端に短いため、全過程の全圧接入口は、摩擦過程の摩擦入力とほぼ同じデータ分布となる。

以上、各過程の圧接入口と継手性能の関係について調べた。その結果、アブセット過程の変形入力、全圧接入口および全過程の変形入力がそれぞれ継手性能と良好に対応することが明らかとなったが、データのばらつきと測定の容易さという観点から判断すると、アブセット過程の変形入力が継手性能の評価に最も適すると考えられる。
Fig. 4.8 Relationship between tensile strength and unit heat input during friction stage.

Fig. 4.9 Relationship between tensile strength and unit heat input during upset stage.

Fig. 4.10 Relationship between tensile strength and unit heat input during total stage.
4.6 アブセット過程の変形入力と伸びおよび絞りの関係

前節までに示した通り、アブセット過程における変形入力（アブセット変形入力）は継手性能と密接な関係にある。そこで、アブセット変形入力と伸びの関係をFig.4.11に示す。アブセット変形入力の小さい領域では不完全継手が存在し、伸びは4.5%以下であるが、アブセット変形入力が約200J/sを超えた完全継手の領域で、伸びは4.5〜9.5%の範囲にあり、ばらつきがみられる。さらに、アブセット変形入力の増大に従って、伸びは減少しそのばらつきも小さくなる。アブセット変形入力の増大に伴い伸びが若干減少するのは、前述と同様、軟化域の減少によるものと考えられる。

![Fig. 4.11 Relationship between elongation and unit deformation heat input in the upset stage.](image)

アブセット変形入力と絞りの関係をFig.4.12に示す。アブセット変形入力の小さい不完全継手の領域では絞りは小さいが、完全継手の領域に入ると35〜70%以上の絞りとなる。この領域での絞りは、伸びと同様かなりのばらつきがみられる。しかし、アブセット変形入力の拡大に伴い絞りはやや増加しながら安定する傾向にあり、この増加傾向は前述の引張強さと伸びと同様の理由によるものと考えられる。この現象を明らかにするために破断部の様相と圧接部の硬さ分布を測定した。
Fig. 4.12  Relationship between reduction of area and unit deformation heat input in the upset stage.

Figs.4.11,4.12 の中で、伸びが大きく絞りが最も小さい綫手 A、その逆の綫手 B の引張破断部外観を Fig.4.13 に示し、それらの硬さ分布を Fig.4.14 に示す。綫手 A の圧接条件は、摩擦圧力が 25MPa、アブセット圧力が 75MPa、摩擦時間が 2s、摩擦速度が 33.3s⁻¹ であり、綫手 B の圧接条件は、摩擦圧力が 45MPa、アブセット圧力が 135MPa、摩擦時間が 2s、摩擦速度が 66.7s⁻¹ である。綫手 A はアブセット変形入力が小さく、綫手 B はアブセット変形入力の大きいものである。
Base Material

(A)

\[ P_1 = 25\text{MPa}, \ P_2 = 75\text{MPa}, \ t_1 = 2s, \ t_B = 0.1s, \]
\[ N = 33.3s^{-1}, \ \delta = 9.5\%, \ \phi = 60\% \]

(B)

\[ P_1 = 45\text{MPa}, \ P_2 = 135\text{MPa}, \ t_1 = 2s, \ t_B = 0.1s, \]
\[ N = 66.7s^{-1}, \ \delta = 4.6\%, \ \phi = 46\% \]

Fig. 4.13 Appearance of tensile tested specimens.
Fig. 4.14  Hardness distributions of friction welded joints.

継手AおよびBの破断部の外観をみると、継手Aはくびれ部分の幅が広く、破断部の直径は細くなっている。一方、継手Bは、くびれ部分の幅が狭く、局部的に細くなっており、そこから破断している。

次に、Fig.4.14に示す硬さ分布をみると、継手A,Bとも最軟化部の値はほぼ同一であるものの、軟化部の幅が継手Aは広く、継手Bは狭い。

以上のことより、軟化域の広い継手は母材部で大きな伸びを伴いながら破断し、軟化域の狭い継手では、圧接界面近傍で三次元応力の影響を受けながら伸びの少ない状態で破断する。このことから、引張強さと伸び、および絞りのばらつきとそれらの大小関係が説明できる。

4.7 摩擦入力と寄りしろの関係

第4章と同様の実験方法を用いて実験を行なった。摩擦過程の摩擦入力と摩擦寄りしろ、アブセット過程の摩擦入力とアブセット寄りしろ、および全過程の摩擦入力と全寄りしろの関係をFig.4.15～Fig.4.17に示す。図中の記号は、いずれも引張試験で破断面に未凝着部が認められない完全継手を○印、破断面に未凝着部が認められた不完全継手を●印で表している。図から、いずれの結果においても相関関係を認めることができない。
Fig. 4.15 Relationship between friction burn-off length and unit friction heat input during friction stage.

Fig. 4.16 Relationship between upset loss and unit friction heat input during upset stage.

Fig. 4.17 Relationship between total loss and unit friction heat input during total stage.
4.8 変形入力と寄りしろの関係

摩擦過程の変形入力と摩擦寄りしろの関係、アブセット過程の変形入力とアブセット寄りしろの関係、および全過程の変形入力と全寄りしろの関係を Fig.4.18〜Fig.4.20に示す。若干ばらつきが見られるものの、いずれの結果においてもほぼ比例関係が認められる。アブセット過程ではアブセット過程の変形入力とアブセット寄りしろの小さい領域に不完全継手が集中しており、約200J/s以上のアブセット過程の変形入力で約3mm以上のアブセット寄りしろとなり、完全継手になると考えられる。これに対し、摩擦過程では広範囲に渡って完全継手と不完全継手が混在するので、摩擦寄りしろでは継手の評価は困難と考えられる。全過程においては、圧接入力と寄りしろの小さいところに不完全継手が分布するが、アブセット過程ほどその分布域は狭くなく、継手評価の可能性はあるものの、アブセット過程ほど厳密ではない。
Fig. 4.18 Relationship between friction burn-off length and unit deformation heat input during friction stage.

Fig. 4.19 Relationship between upset loss and unit deformation heat input during upset stage.

Fig. 4.20 Relationship between total loss and unit deformation heat input during total stage.
4.9 寄りしろと引張強さの関係

摩擦寄りしろと引張強さの関係、アプセット寄りしろと引張強さの関係、および全寄りしろと引張強さの関係を Fig.4.21~ Fig.4.23 に示す。なお、本章 4 節の Fig.4.5 で追加した圧接条件の継手も Fig.4.22 および Fig.4.23 に△印で追加した。これらの継手は、全て破断面を未凝着部が存在した不完全継手である。

摩擦寄りしろと引張強さの関係は、ばらつきが大きく、評価に値しない。全寄りしろによっても圧接継手の評価が可能であり、全寄りしろが約 15mm 以上で完全継手と評価できるが、不完全継手と完全継手の混在領域が大きい。アプセット寄りしろと引張強さの関係は、Fig.4.5 同様、アプセット寄りしろの低い領域で若干のばらつきがみられるが、約 3mm 以上のアプセット寄りしろで圧接継手を完全継手と評価でき、完全継手作製の目安となる。

炭素鋼では、全寄りしろによって完全継手作製の目安となるが、6061 アルミニウム合金では△印で示した継手が示すように、全寄りしろが大きくても不完全継手となることから、全寄りしろでは評価が難しい。しかし、アプセット寄りしろでは、このような極端な圧接条件であっても評価が可能である。その一例として、△印で示した圧接継手に対応する圧接条件、すなわち、摩擦圧力およびアプセット圧力 7MPa、摩擦時間 50s、ブレーキ時間 0.1s、摩擦速度 33.3s⁻¹ を用いて圧接を行い、継手のばりの形状、引張試験片の破断外観、および接合界面の様子を観察したその結果を Fig.4.24 に示す。この継手は、全寄りしろが 12.7mm であるが引張強さが 113MPa であるため、不完全継手である。これは、摩擦圧力およびアプセット圧力ともに 7MPa と極端に小さかったため、アプセット寄りしろが 1.2mm、アプセット変形入力が 1.29J/s いずれも小さく、破断面の様子などから、凝着摩擦面が十分に拡大していなかったものと考えられる。このことから、摩擦時間を長くすると摩擦寄りしろが増加するため、全寄りしろも増加し、全寄りしろでの評価を難しくしている。

- 55 -
Fig. 4.21 Relationship between tensile strength and friction burn-off length.

Fig. 4.22 Relationship between tensile strength and upset loss.

Fig. 4.23 Relationship between tensile strength and total loss.
Fig. 4.24 Appearance of burr shape, tensile tested specimens and welded interface.

4.10 アブセット寄りしろと引張試験における伸びと絞りの関係

アブセット寄りしろと伸びの関係を Fig.4.25 に示す。アブセット寄りしろが約3mm 以上で伸びが 4.5% 以上となる完全継手の領域となる。

Fig. 4.25 Relationship between elongation and upset loss.

アブセット寄りしろと絞りの関係を Fig.4.26 に示す。アブセット寄りしろの小さい不完全継手の領域では絞りは小さく、アブセット寄りしろが約3mm 以上の完全継手の領域に入ると 35% 以上の絞りとなる。
4.11 摩擦圧接における圧接入力と母材形状の関係

これまでに、直径14mmの6061アルミニウム合金同種材については、アップセット過程の変形入力と継手強度との間に密接な関係があり、それらによって継手強度を評価し得ることを示した。

本節では、母材直径を10mm、12mm、および16mmに変化させて圧接した継手の継手強度とアップセット変形入力の関係について調べた。次いで、それぞれの母材直径において、破断面に未凝着部が認められない完全継手の製作とその評価の指針となり得るアップセット過程の変形入力の最小限界値（最小限界アップセット変形入力）を求めた。そして、それぞれの母材直径におけるアップセット寄りしろと圧接入力の関係、および継手強度とアップセット寄りしろの関係について検討し、アップセット寄りしろの最小限界値（最小限界アップセット寄りしろ）を求めた。

4.11.1 実験方法

本実験で用いた供試材は6061−T6アルミニウム合金である。圧接母材は、直径16mmの供試材を全長80mmに切断し、直径16mmの圧接母材はそのまま、それより小径材にあっては圧接面側から軸方向に20mmの長さだけ10mm、および12mmの直径にそれぞれ旋削加工したものである。なお、圧接直前に圧接母材の圧接面をアセトンで洗浄した。

継手の作製に用いた圧接条件因子とその適用範囲をTable 4.2に示す。これらの圧接条件因子を種々に組み合わせて圧接条件とした。

母材および圧接継手とも、Fig.4.27に示すように、圧接前の母材直径より直径で
0.5mm小径に旋削加工を行ったJIS14号A試験片を用いて引張試験を行った。なお、図中のLは平行部長さであり、圧接界面は平行部の中央である。

<table>
<thead>
<tr>
<th>Friction pressure $P_1$ (MPa)</th>
<th>5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Upset pressure $P_2$ (MPa)</td>
<td>5, 10, 15, 20, 30, 40, 45, 50, 60, 75, 80, 90, 100, 105, 120, 135</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction time $t_1$ (s)</td>
<td>1, 2, 3, 4, 6</td>
</tr>
<tr>
<td>Stopping time $t_B$ (s)</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction speed $N$ (1/s)</td>
<td>16.7, 33.3, 50.0, 66.7</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Table 4.2 Factors of friction welding condition.

Fig. 4.27 Shape and dimensions of tensile test specimen.

4.11.2 アブセット過程の変形入力と引張強さの関係

母材直径10mm、12mm、および16mmの母材を圧接した接合のアブセット過程の変形入力と引張強さの関係をFig.4.28に示す。図中の記号は、いずれも引張試験で破断面に未凝着部が認められない完全接合を○印、破断面に未凝着部が認められた不完全接合を●印で表している。●印の未凝着部が存在した接合は、引張強さが低く、また引張強さのばらつきが顕著である。しかし、未凝着部が存在するにもかかわらず、母材強度よりも高い引張強さを示す接合が存在する。これは、低い摩擦速度と高い圧力のため摩擦面温度が低くなり、冷間圧接に近い形で強力な接合部が部分的に形成され、その部分が大きな荷重を受け持ち、総体的に引張

- 59 -
強さが増大したことによるものと考えられる。変形入力が 0J/s 付近の継手は、アブセット寄りしきの 0mm、もしくは 0mm に近い値を示しており、この事実はアブセット過程でほとんどばりの排出が行なわれず、変形しなかったことを示している。一般には、摩擦圧力と同等のアブセット圧力を付加した場合でも、摩擦速度や摩擦時間を調整すれば、アブセット過程でばりの排出が行なわれ、完全継手となり得る。しかし、ほとんど変形しなかった継手では圧接条件が不良なため、不完全継手となり引張強さも低下したと考えられる。
Fig. 4.28 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input in upset stage
これらの引張破断部の外観をFig.4.29に示す。図中の矢印は、圧接界面の位置を表す。図 (a) に示す変形入力が \( q_{fd} = 0 \)J/s の場合には、圧接界面全域が界面に沿ってせい性的に破断する。図 (b) の変形入力が幾分増加した \( q_{fd} = 285.41 \)J/s の場合には、界面破断と母材部破断の両者が混在した状態となる。さらに図 (c) の変形入力が \( q_{fd} = 2362.2 \)J/s に増加すると、母材部で延性的に破断するようになる。破断面の様相を Fig.4.30 に示す。図中の A は滑り摩擦面のある未凝着部、C は滑りのない停留摩擦面からなる未凝着部、B は凝着部を示している。（ここでは、滑りの無い摩擦面を停留摩擦面と定義した。）アプセット過程の変形入力が \( q_{fd} = 0 \)J/s の継手は界面より破断し滑り摩擦面が存在する不完全継手、\( q_{fd} = 285.41 \)J/s の継手は圧接界面で破断し停留摩擦面からなる未凝着部が外周部にわずかに存在する不完全継手、そして、アプセット過程の変形入力が \( q_{fd} = 2362.2 \)J/s の継手は母材部で破断した完全継手の例である。

---

**Fig. 4.29** Appearance of tensile tested specimen (16mm diameter).
ここで、完全継手となるアブセット過程の変形入力の最低値を最小限界アブセット変形入力とすると、Fig.4.28より、母材直径が10mm、12mm、および16mmでの最小限界アブセット変形入力を読み取ると、およそ70J/s、150J/s、および290J/sである。そして、最小限界アブセット変形入力の領域では引張強さはばらつきが認められるが、限界値以上では安定した完全継手が得られる。これらの最小限界アブセット変形入力で、3章で示した強力な凝着部が摩擦面全域に拡大し、完全継手になると考えられる。

次いで、アブセット過程の変形入力を圧接面の断面積で除した単位面積当たりの変形入力を算出した。母材直径10mm、12mm、14mm、および16mmで圧接した継手の単位面積当たりの変形入力と引張強さの関係をFig.4.31に示す。ここで、Uq\_fdは単位面積当たりの変形入力である。この図より、完全継手の作製に必要とされる単位面積当たりの変形入力の最低値を単位面積当たりの最小限界アブセット変形入力とすると、母材直径10mm、12mm、14mm、および16mmで圧接した継手の単位面積当たりの最小限界アブセット変形入力は、それぞれ0.92 MJ/m²s、1.27 MJ/m²s、1.58 MJ/m²s、および1.42 MJ/m²sとなることがわかる。すなわち、10mm〜16mmの小径材についての単位面積あたりの最小限界アブセット変形入力は、0.92 MJ/m²s〜1.58 MJ/m²sの範囲内にある。

Fig. 4.30 Appearance of tensile fractured surface (16mm diameter).
Fig. 4.31 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input per area in upset stage.

4.11.3 アブセット寄りしろとアブセット過程の変形入力の関係に及ぼす母材直径の影響

母材直径を変化させて圧接した継手のアブセット寄りしろとアブセット過程の変形入力の関係をFig.4.32に示す。図より、母材直径にかかわらず、変形入力の増大にともないアブセット寄りしろは増加することがわかる。しかし、アブセット
寄りしろの増加の割合は、変形入力の増大にともない徐々に小さくなる傾向がある。

さらに、母材直径が増大するほど変形入力とアブセット寄りしろを示す直線の傾きが、若干ではあるが緩やかとなる。これは、母材直径が増大すると圧接界面での熱分布が均等になりにくいため、同一のアブセット寄りしろを得るためには、アブセット圧力を高くしてアブセット過程の変形入力を大きくする必要のあることを示している。

図では、アブセット寄りしろの小さい領域でデータのばらつきがみられる。これは、アブセット寄りしろが小さいと凝着部が十分に形成されず、同一のアブセット過程の変形入力であっても凝着部にばらつきを生じ、これがアブセット寄りしろのばらつきの要因になったと考えられる。しかしながら、母材部で破断した完全継手では、アブセット過程の変形入力とアブセット寄りしろの関係を示すデータのばらつきが小さくなることから、アブセット寄りしろの大小で継手の良否の判断は可能である。
Fig. 4.32 Relationship between upset loss and unit deformation heat input in upset stage.
4.11.4 アブセット寄りしろと引張強さの関係に及ぼす母材直径の影響

母材直径を変化させて圧接した継手のアブセット寄りしろと引張強さの関係をFig.4.33に示す。

母材部で破断した継手の最小のアブセット寄りしろを最小限界アブセット寄りしろすると、母材直径10mm、12mm、および16mmの圧接に要する最小限界アブセット寄りしろは、全ての直径で約5mmであり、これ以上のアブセット寄りしろで完全継手が作製できる。
Fig. 4.33 Relationship between tensile strength and upset loss.
4.12 結言

6061-T6 アルミニウム合金の摩擦圧接を行い、圧接入力と引張強さの関係、圧接入力と寄りしろの関係、および寄りしろと引張強さの関係について調べた。次いで、母材直径 10mm、12mm、および 16mm の 6061 アルミニウム合金同種材を摩擦圧接し、アブセット過程の変形入力、およびアブセット寄りしろなどと継手強度（引張強さ）の関係について調べた。さらに、良好な継手を作製するために最低必要とされる最小限界アブセット変形入力と最小限界アブセット寄りしろを求めた。得られた主な結果を以下に列挙する。

1) 摩擦過程の圧接入力よりもアブセット過程の圧接入力の方が、より継手性能と密接な関係があり、アブセット過程の変形入力と継手性能に明確な関係が認められ、アブセット過程の変形入力の増加に伴い継手性能は増大した。また、約 200J/s 以上の変形入力を作製した継手を良好な継手と評価でき、さらに、その圧接入力以上が良好な継手作製の目安となり得る。

2) アブセット過程の変形入力と引張試験における伸びと絞りの関係では、アブセット変形入力の増加に伴い、引張強さと絞りは若干増大し、伸びは若干減少する傾向にある。

3) 摩擦過程の変形入力と摩擦寄りしろ、アブセット過程の変形入力とアブセット寄りしろ、全過程の変形入力と全寄りしろは、いずれも比例関係である。とくに、アブセット過程ではアブセット過程の変形入力とアブセット寄りしろの小さい領域に不完全継手が集中しており、約 200J/s 以上のアブセット過程の変形入力で約 3mm 以上のアブセット寄りしろで完全継手となる。

4) アブセット寄りしろと引張強さの関係は、3mm 以上のアブセット寄りしろで圧接継手を完全継手と評価でき、完全継手作製の目安となる。このときの、伸びは 4.5%以上であり、絞りは 35％以上となる。

5) 母材直径が大きくなると最小限界アブセット変形入力は大きくなる傾向にある。

6) 母材直径 10mm、12mm、14mm、および 16mm の単位面積あたりの最小限界アブセット変形入力は、0.92 MJ/m²s～1.58 MJ/m²s の範囲内にある。このときの最小限界アブセット寄りしろは、全ての直径で約 5mm であり、これ以上のアブセット寄りしろで完全継手となる。
第5章 摩擦压接における圧接入力とアブセットタイミングの関係

5.1 緒言

前章までに、アブセット過程、とりわけ摩擦過程終了時より摩擦速度停止時までの変形入力は継手の引張強さと密接な関係があることを明らかにした。

一般に摩擦压接施工においては、摩擦圧接機の差異が適正な圧接条件の範囲と継手性能に影響することが知られている。この主な原因として、プレーキング開始時とアブセット負荷開始時との同期性（アブセットタイミング）、プレーキング時間、あるいは油圧装置の容量によるアブセット圧力の立上り勾配の差異などが考えられる。これらの摩擦圧接機の個性が摩擦压接現象に微妙に影響するものとみられる25）。

本研究では、3種類の異なるアブセットタイミングのもとで摩擦压接を行ない、そのときのアブセット変形入力と継手強度の関係を検討し、寄りしる、寄り速度およびアブセット変形入力と継手強度の関係などに及ぼすアブセットタイミングの影響について調べた。

5.2 実験方法

本研究で用いた供試材は6061-T6アルミニウム合金である。

アブセットタイミングはFig.5.1に示すように、プレーキング開始よりも0.4s遅れて（回転停止後0.3s遅れ）アブセット圧力を負荷させる場合の$t_u = 0.4s$、同期する場合の$t_u = 0s$、そしてプレーキング開始よりも前にアブセット圧力を負荷する場合の$t_u = -0.3s$を設定した。なお、プレーキ時間は0.1s一定とし、その他、用いた圧接条件因子をTable 4.1に示す。

Fig. 5.1 Upset timing.

- 71 -
Table 5.1 Factors for the friction welding condition.

| Factor                  | Value
|-------------------------|-------
| Friction pressure $P_1$ (MPa) | 15    |
| Upset pressure $P_2$ (MPa) | 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 |
| Friction time $t_1$ (s)    | 2     |
| Stopping time $t_B$ (s)    | 0.1   |
| Upset timing $t_u$ (s)     | $-0.3$, 0.0, 0.4 |
| Friction speed $N$ (1/s)   | 50.0  |

アブセットタイミングを変えると当然、負荷開始とプレーリング開始の時期が異なり、摩擦過程とアブセット過程の境界が不明瞭になる。そこで、本章では便宜上、摩擦過程終了時（プレーリング開始時）以降をアブセット過程とする。

なお、アブセットタイミングを+側に設定すると、摩擦速度がゼロとなった後にアブセット圧力が負荷されることになり、たとえ大きなアブセット圧力を負荷しても変形がほとんど生じないので、変形入力は0とみなし得る。したがって、この場合には減速域の摩擦圧力をアブセット圧力とみなしてアブセット変形入力を求めた。

また、アブセット圧力は負荷後にある一定の増加率で上昇する傾向があるため、アブセットタイミングが0sのとき、Fig.5.2に示すように、アブセット圧力を高く設定した場合、プレーキ時間が短いため、設定されたアブセット圧力に到達しないうちに摩擦速度がゼロとなる圧接条件も存在する。そのため、摩擦速度ゼロ時のアブセット圧力の実測値と設定したアブセット圧力の両者についてアブセット変形入力を算出し、前者を真のアブセット変形入力、後者をみかけのアブセット変形入力とした。また、それらの値と継手強度等との関係についても比較検討した。
5.3 アブセット変形入力と引張強さの関係に及ぼすアブセットタイミングの影響

アブセットタイミングが−0.3s、0s および 0.4s のときのみかけおよび真のアブセット変形入力と引張強さの関係をそれぞれ Fig.5.3 ～ 5.5 に示す。図中の記号はいずれも引張試験で破断面に未凝着部が認められない完全継手を○印、破断面に未凝着部が認められた不完全継手を●印で表している。アブセットタイミングが−0.3s の Fig.5.3 では、みかけ、真のいずれの場合もアブセット変形入力と引張強さに明確な関係が認められる。すなわち、アブセット変形入力の増加に伴って引張強さは増大し、両者とも約 200J/s で一定値に収まる。以上の結果は、みかけのアブセット変形入力を用いて完全継手の評価が可能であることを示している。

アブセットタイミングが0s の場合には、アブセット変形入力が大きくならず、みかけのアブセット変形入力の絶対値が真のアブセット変形入力のそれよりも大きくなる傾向にある。しかし、強度的に問題になる領域ではないので、良好な継手作製に最小必要とされる最小限界変形入力は、みかけ、真とも約 200J/s で差異は無い。

これに対しアブセットタイミングが 0.4s の場合には、摩擦速度が停止してから
アブセット圧力を負荷するため、設定したアブセット圧力の効果がほとんど現れず、みかけのアブセット変形入力に比べて真のアブセット変形入力は小さい。したがって、良好な継手が得られず、評価法としては問題外である。これらを明確にするために Fig.5.6 にみかけと真のアブセット変形入力を比較した。図中の直線は、正比例を示している。図より、アブセットタイミングが−0.3s の場合には両者は同一であるが、0s の場合にはアブセット変形入力の方が大きい。すなわち、アブセット圧力の高い領域で、若干、真のアブセット変形入力よりも、みかけのアブセット変形入力の方が大きい。また、0.4s ではみかけの変形入力の方が著しく大きい。

![グラフ](A) Nominal heat input  
![グラフ](B) True heat input

Fig. 5.3  Relationship between tensile strength and unit deformation heat input in the upset stage with −0.3s upset timing.
Fig. 5.4 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input in the upset stage with 0s upset timing.

Fig. 5.5 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input in the upset stage with 0.4s upset timing.
Fig. 5.6 Relationship between true unit deformation heat input and nominal unit deformation heat input in the upset stage.
る。この図から、アプセット圧力が付加されてから生じる寄りしろは、アプセットタイミングが 0s よりも−0.3s の方が大きい。しかし、アプセット過程での寄りしろ、すなわちブレーキ時間中の寄りしろは 0s のときが最も大きく、続いて−0.3s となり、0.4s では寄りしろが極端に小さい。このため、寄りしろの勾配は−0.3s よりも 0s の方が急峻で、アプセット寄り速度が高いことを示している。これは、アプセットタイミングが 0s のとき、摩擦速度の減速時のターミナルピークトルクとアプセット圧力との相乗効果が強く支配したと考えられる。従来より、摩擦速度が比較的低い場合に（零近傍を除く）摩擦トルクが大きくなって母材の変形を助長し、寄り速度を増速させると考えられている。
Fig. 5.7 Aspect of upset loss.

Fig. 5.8 Relationship between friction speed and burn-off speed.

Fig. 5.9 Relationship between softened area and true unit deformation heat input in the upset stage.

ここで、6061 アルミニウム合金を用いて摩擦速度と寄り速度の関係を調べてきた。この実験で用いた試験片は、前述のものと同一の試験片である。摩擦圧力を20、30、40MPaの3通りと、摩擦速度を16.7、33.3、50.0、66.7s⁻¹の4通りを組み合わせて3s間摩擦した。寄り速度は、摩擦過程で寄りしろの変化が安定した期間について、時間と寄りしろを測定して求めた。その結果をFig.5.8に示す。図より、ある摩擦速度のときに寄り速度は最大になり、摩擦速度がそれより高くなると寄り速度は低下する。実際の寄り速度の最大値は、摩擦速度の高低のどちらかに
シフトすると思われる。この結果は減速域において寄り速度の増大を裏付けるものである (これを減速効果と呼ぶ)。アブセット圧力による変形 (アブセット効果)は減速効果が相乗するタイミングでは増大し、変形入力が大きくなって、完全絶手が得やすくなる。一方、ターミナルビックトルク発生前にアブセット圧力を負荷すると、相乘効果によるアブセット変形入力の増大は得にくいが、摩擦過程において既にアブセット圧力が負荷されているため変形入力が大きくなり、減速が短時間であれば引きちぎりが生じず完全絶手が容易に得られる。さらに、次の要因も考えられる。いま、摩擦速度 $N = 50s^{-1}$ 、摩擦時間 $t_1 = 2s$ 、プレーキ時間 $t_B = 0.1s$ を同一に、摩擦圧力をだけを $P_1 = 10MPa$ および $P_1 = 40MPa$ と変化させ、摩擦圧接し、摩擦過程終了直前に引き離した一方の試験片の硬さ分布を測定した。その結果を Fig.5.9 に示す。図より、摩擦圧力が低いと軟化域が広く、高いと狭くなる傾向のあることがわかる。このあと、減速域に移行して同一のアブセット圧力を負荷したときの寄りしろの推移の模式図を Fig.5.10 に示す。図より、摩擦過程で生じた軟化域の幅が広い方が、アブセット寄りしろは大きくなることがわかる。すなわち、摩擦過程中にアブセット圧力を負荷する場合が $P_1 = 40MPa$ に相当し、減速域開始時に負荷する場合が $P_1 = 10MPa$ に相当すると考えられる。

これに対し、アブセットタイミングが 0.4s の場合には、アブセット圧力を負荷するタイミングが摩擦速度停止後であるため低い摩擦圧力下での減速効果のみが実効し、アブセット圧力によるアブセット効果は期待できない。したがって、アブ

Fig. 5.10 An aspect of upset loss.
セット寄りしだが小さく、アプセット変形入力が低くなるため不完全継手となる。

5.4 アプセット寄りしだおよびアプセット寄り速度に及ぼすアプセットタイミングの影響

アプセット圧力をパラメータとしたアプセットタイミングとアプセット寄りしだの関係を Fig.5.11 に示す。アプセットタイミングが−0.3s のとき、アプセット過程の 0.3s 前の摩耗過中にはアプセット圧力が負荷される。これは一定摩耗速度域においてアプセット圧力が負荷され、摩耗圧力が増加したと同じことになり、全寄りしだは 0s や 0.4s に比べて必然的に増加するが、そのほとんどは摩耗寄りしだになる。アプセットタイミングが 0s のときに、常に摩耗アプセット圧力の場には、アプセット寄りしだは−0.3s よりも大きくなる。これは、摩耗速度の減速時のターミナルピークトルクとアプセット圧力による相乗効果により、寄りしだが増大したためである。摩耗速度の減速時のターミナルピークトルクとアプセット圧力による相乗効果については、後述する。アプセットタイミングが 0.4s のとき、摩耗速度停止後にアプセット圧力を負荷することになるので母材は変形せず、アプセット圧力の効果を全く期待できない。

アプセット寄りしだをブレーキ時間の 0.1s で除し、アプセット寄り速度を求めた。なお、Fig.5.11 の右側の縦軸は、その値を表示している。図より、アプセット寄り速度についてみると、アプセット圧力が低いとき、アプセット寄り速度は−0.3s が 0s より高いが、アプセット圧力が高くなると−0.3s よりも 0s の方がアプセット寄り速度が高くなる圧接現象が存在する。アプセットタイミングが 0.4s のとき、アプセット寄りしだと同様、アプセット寄り速度はほぼ 0m/s に近い。
5.5 Relationship between upset loss and upset timing and upset speed and upset timing.

Fig. 5.11 Relationship between upset loss and upset timing and upset speed and upset timing.

5.5 アブセット寄りしろに及ぼすアブセットタイミングの影響

アブセットタイミングが−0.3s、0s および 0.4s のときのアブセット寄りしろと引張強さの関係を Fig.5.12 に示す。アブセットタイミングが−0.3s の (A) の場合、アブセット寄りしろが約 3mm 以上で完全継手となり、不完全継手と完全継手を明確に判別できる。

アブセットタイミングが 0s の (B) の場合も、アブセット寄りしろが約 3mm 以上で完全継手となる。アブセット圧力が高くなると、アブセットタイミングが 0s の方が−0.3s よりもアブセット寄りしろの絶対値が大きくなっているが、これは摩擦速度の減速時のターミナルピークトルクとアブセット圧力との相乗効果によるものと考えられる。

アブセットタイミングが 0.4s の (C) の場合、アブセット寄りしろと引張強さに相
関関係は認められない。このときのアブセット寄りしろは、約0.08mm〜約0.45mmに分布しており、摩擦圧力とアブセット圧力を同一（15MPa）としたときのアブセット寄りしろとほぼ等しくなるので、アブセット圧力を増加させたときにみられるアブセット効果を認め難い。このため、摩擦速度停止後にアブセット圧力を負荷した条件では、アブセット寄りしろで引張強さを評価することはできないといえる。
Fig. 5.12 Relationship between tensile strength and upset loss.
5.6 結言

3 種類の異なるアブセットタイミングで 6061-T6 アルミニウム合金の摩擦圧接を行ない、寄りしろ、寄り速度およびアブセット変形入力と引張強さの関係などに及ぼすアブセットタイミングの影響について検討した。

本実験で得られた結果を以下に列挙する。

1) アブセット圧力が低いときは、アブセットタイミングが−0.3s の方が 0s のときよりも寄りしろおよび寄り速度は大きいが、高いアブセット圧力の場合には、摩擦速度の減速時のターミナルピークトルクとアブセット圧力による相乗効果により、−0.3s よりも 0s のときに寄りしろおよび寄り速度が増大する。アブセットタイミングが 0.4s のとき、アブセット効果が小さいため、寄りしろおよび寄り速度はいずれも 0 近傍となる。

2) アブセットタイミングが−0.3s および 0s のとき、アブセット変形入力の増加に伴い、引張強さも増大し、アブセット変形入力が約 200J/s 以上で完全継手が得られる。一方、アブセットタイミングが 0.4s では、アブセット変形入力が小さく完全継手は得られない。

3) アブセットタイミングが 0s で、高いアブセット圧力を負荷したとき、減速域でアブセット圧力が設定値に到達しないため、真のアブセット変形入力は、みかけのアブセット変形入力よりも小さくなる。しかし、最小限界入力には影響が無い。

4) アブセットタイミングが 0s のときには減速域に相乗効果が得られるので、アブセット寄りしろの増大によりアブセット変形入力は大きくなる。一方、ターミナルピークトルク発生前にアブセット圧力を負荷すると、相乗効果は得られないが、摩擦圧力が増加したことになり、摩擦過程においてアブセット変形入力が増大して、完全継手が得られる。摩擦速度停止後にアブセット圧力が設定値に到達する場合、摩擦速度停止以後のアブセット圧力の増加分はアブセット変形入力に変換されず、アブセット変形入力が低くなり、完全継手は得られない。

5) アブセットタイミングが−0.3s および 0s のとき、アブセット寄りしろが約 3mm 以上で完全継手が得られる。アブセットタイミングが 0.4s のとき、摩擦速度停止後の寄りしろはほとんど発生しないので、アブセット寄りしろで継手の評価はできない。
第6章 摩擦圧接における圧接入力と各種接合強度との関係

6.1 緒言

前章までに、6061アルミニウム合金摩擦圧接接合の引張強さと圧接入力および引張強さと寄りしろの関係を明らかにした。従来、摩擦圧接接合の評価は大部分が引張強さで行なわれており、引張強さ以外による圧接接合の評価の報告は少ない。圧接接合が種々の強度環境下で用いられることを考えると、これらの強度についても検討しておく必要がある。

本章では、6061アルミニウム合金摩擦圧接接合のアブセット変形入力と曲げおよびねじりなどの静的強度の関係、アブセット変形入力と疲労強度およびシャルビ衝撃エネルギーなどの動的強度の関係について検討した。

6.2 圧接接合の曲げ強さ

6.2.1 アブセット変形入力と曲げ強さの関係

第4章と同様の圧接接合を用いて曲げ実験を行なった。アブセット変形入力と曲げ強さの関係をFig.6.1に示す。アブセット変形入力の小さい領域で、曲げ強さは若干ばらついているが、アブセット変形入力が約500J/s以上で、母材の曲げ強さをやや下回る約450MPaの値で安定している。これは、引張強さの約2倍である。母材の値を下回るのは、熱影響による圧接部の軟化に起因するものである。今回の実験ではボンチ半径が小さいので、Fig.6.2に示すように、接合が完全であっても軟化域と母材部との境界においてき裂が生じている。$q_{fd} = 674(J/s)$の継手は Fig.4.14に示した継手Aであり、軟化域が広いため、き裂が生じていない。$q_{fd} = 3566(J/s)$の継手は Fig.4.14に示した継手Bであり、軟化域が狭く、そのために母材部が伸びず狭い軟化域に伸びが集中してそこき裂が生じたと考えられる。
Fig. 6.1 Relationship between bending strength and unit deformation heat input in the upset stage.

\[ \sigma_b (\text{MPa}) \]

Unit deformation heat input in the upset stage \( q_{fd} (\text{J/s}) \)

\[
\begin{align*}
\text{Base Material} & \\
\text{Welded Interface} & = 197 \ (\text{J/s}) \\
\text{Crack} & \\
\text{Welded Interface} & = 674 \ (\text{J/s}) \\
\text{Welded Interface} & = 1920 \ (\text{J/s}) \\
\text{Crack} & \\
\text{Welded Interface} & = 3566 \ (\text{J/s})
\end{align*}
\]

Fig. 6.2 Appearance of bending tested specimen.
6.2.2 アプセット寄りしろと曲げ強さの関係

アプセット寄りしろと曲げ強さの関係をFig.6.3に示す。本図は、アプセット変形入力で整理したFig.6.1と類似した分布を示しており、アプセット寄りしろが約6mm以上で、曲げ強さが母材の曲げ強さをやや下回る約450MPaで安定した継手となっている。

Fig. 6.3 Relationship between bending strength and upset loss.

6.3 压接継手のねじり強さ

6.3.1 アプセット変形入力とねじり強さの関係

アプセット変形入力とねじり強さの関係をFig.6.4に示す。引張強さ、および曲げ強さと同様、ねじり強さにおいても、アプセット変形入力の増加に伴って増大し、アプセット変形入力が約500J/s以上になると安定する。しかし、母材のねじり強さ298MPaに対し、圧接継手のねじり強さはかなり低く、約170MPaとなっている。これは、継手の変形部に熱影響による軟化域が生じ、ねじれ強さが低下したためと判断される。継手の破断面の様相の一例をFig.6.5(A,B)に示す。継手Aはアプセット変形入力が小さく、接合面に未凝着部である滑り摩擦面が存在しており、このためねじり強さが低くなったものと考えられる。これに対して、継手Bはアプセット変形入力が大きく、凝着部が接合面全面に拡大しており50,51、十分に接合され、結果としてねじり強さが高くなったものである。
6.3.2 Relationship between torsion strength and unit deformation heat input in the upset stage.

Fig. 6.4 Relationship between torsion strength and unit deformation heat input in the upset stage.

Fig. 6.5 Appearance of torsion test specimens.

6.3.2 アブセット寄りしろとねじり強さの関係

アブセット寄りしろとねじり強さの関係をFig.6.6に示す。アブセット寄りしろの小さい領域で、若干ねじり強さはばらつきがみられるが、アブセット寄りしろが約5mm以上で、ねじり強さが約170MPa以上の安定した継手となる。
Fig. 6.6 Relationship between torsion strength and upset loss.

6.4 圧接継手の疲労強さ

6.4.1 アブセット変形入力と疲労強さの関係

摩擦圧接継手を実用に供する場合には、静的強度特性よりも疲労強度のような動的強度特性が問題となる場合がある。そこで、Fig.6.7 に示すアブセット変形入力と引張強さの関係から選定した代表的な継手 A～F および母材についての回転曲げ疲労試験を行った。疲労試験結果から求めた S-N 曲線を Fig.6.8 に示す。なお、これらの継手の中で最も引張強さが小さい継手 B については、疲労試験片加工時に破断した。継手 A については、データのばらつきが大きくなり S-N 曲線を引くことは不可能であり、また強度も母材を大きく下回っていることから、引張強さ同様に疲労強さも劣ることは明らかである。その他の継手 C～F については、繰返し数 10^7 での疲労限度は母材とほぼ同程度であるが、どの継手も繰返し応力が大きい場合には母材に比べ時間強度が小さく、応力の低下に伴い母材との強度差が小さくなる。また、相対的に継手 C および継手 E の方が継手 D および継手 F よりも時間強度は大きく、疲労限度は、前者では母材よりも若干大きいが、後者では母材よりも若干小さい。
Fig. 6.7 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage.

Fig. 6.8 S-N curves of base material and joints.

6.4.2 疲労破断の様相

疲労強さの違いの原因を調べるために、各試験片の破断の様相を調べた。母材および継手の代表的な疲労破面の様相および破断経路を Fig.6.9 および Fig.6.10 に示す。母材の疲労破面は起伏に富み、破断はジグザグに進行している。一方、疲労
強さが劣る継手Aでは、接合界面で直線的に破断していることから、界面での接合が不良であったものと推測される。疲労強さの大きい継手Cおよび継手Eでは、界面の微細化層と母材の変形域の間をジグザグに破断が進行している。これらの継手は軟化領域が広く界面での接合が良好であったため、応力が軟化領域に分散しやすく、界面に欠欠を入れたにもかかわらず、軟化領域で破断が発生したと考えられる。摩擦圧接継手の疲労試験では、接合界面に欠欠を入れた場合でも、このように必ずしも欠欠の底から破断せず、接合部近傍の熱影響部の特殊な組織（変形組織、流動組織）で破断する場合がある。このような現象は圧延材の疲労試験にもみられ、圧延材を圧延直角方向または板圧方向に切り出した試験片を疲労試験に供した場合、層状組織の影響で亀裂伝播経路が波打つことが知られている。これらの継手に対し、継手Fでは圧接界面で直線的に破断している部分が認められる。この継手は軟化領域が狭いため、圧接界面に応力が集中して直線的に破断が進行し、疲労強さが若干小さくなったと考えられる。一方、継手Dは軟化領域が広いにも関わらず継手Cおよび継手Eに比べ疲労強さは若干小さい。これは、継手Dでは接合界面で直線的に破断していることから、界面での接合状態がやや不良であったためと考えられる。

![Image of fatigue-fractured surfaces](image)

Fig. 6.9 Appearance of fatigue-fractured surfaces.
このように、綫手C〜Fでは引張強さに大きな差異は認められないが、疲労強さは綫手Cおよび綫手Eの方が綫手Dおよび綫手Fに比べ若干優れている。これは、疲労試験では引張試験に比べて付加する応力が小いため、界面の接合状態や熱影響による軟化状態の差が疲労強さに微妙に影響したためと考えられる。すなわち、界面の接合が良好で軟化領域が広い綫手Cおよび綫手Eでは、軟化領域で応力が分散されて疲労強さは大きくなる。一方、界面の接合が良好でも軟化領域が狭い綫手Fでは、応力が接合界面に集中するため疲労強さが若干小さくなる。さらに、軟化領域が広くても界面の接合状態がやや劣る綫手Dでも疲労強さが若干小さくなったと推測される。

6.4.3 疲労強さの評価

疲労強さをアブセット変形入力およびアブセット寄りしろで評価するために、これらの関係を調べた。アブセット変形入力およびアブセット寄りしろと疲労限度の関係を、それぞれFig.6.11およびFig.6.12に示す。なお、母材の疲労限度は約80MPaである。データに多少のばらつきはあるが、おおむね約1000J/s以上の変
形入力で、また約9mm以上のアブセット寄りしろで母材とほぼ同等な疲労限度を持つ継手を作製できることがわかる。引張試験の場合には、アブセット形入力200J/s以上、アブセット寄りしろ3mm以上の場合に良好な継手が作製できたが、これは、疲労試験では形入力200〜1000J/s、アブセット寄りしろ4〜9mmの継手のデータがないためである。これらのことから、疲労限度で判断する限り、疲労試験においても引張試験同様に、アブセット形入力およびアブセット寄りしろによる継手性能の評価が可能であるといえる。

Fig. 6.11 Relationship between fatigue limit and unit deformation heat input during upset stage.

Fig. 6.12 Relationship between fatigue limit and upset loss.
6.5 圧接継手の衝撃吸収エネルギー

6.5.1 アブセット変形入力とシャルピ衝撃エネルギーの関係

シャルピ衝撃吸収エネルギーとアブセット単位変形入力の結果を Fig.6.13に示し、後述の図と対応をとるために、A ～ H の継手を抽出して締印で示す。いずれの継手も円周切欠き部で破断したが、未凝着が認められた継手を不完全継手とし、全く認められない継手を良好な継手とした。引張試験と同様、変形入力の低い領域ではらつきが認められるが、約300J/s 以上の変形入力で良好な継手が得られた。次に、抽出した継手の引張強さとの比較を Table 6.1 に示す。アブセット過程の変形入力が 300J/s 以上で、シャルピー衝撃吸収エネルギーと引張強さのいずれにおいても良好な継手であると判断できるが、300J/s 未満は両者に関係を認めることはできない。

![Fig. 6.13 Relationship between charpy impact absorbed energy and unit deformation heat input in the upset stage.](image)

Table 6.1 Comparison with tensile strength and charpy impact absorbed energy of selected joints.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>A</th>
<th>B</th>
<th>C</th>
<th>D</th>
<th>E</th>
<th>F</th>
<th>G</th>
<th>H</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Tensile strength $\sigma_B$ [MPa]</td>
<td>82.3</td>
<td>299.0</td>
<td>195.6</td>
<td>211.6</td>
<td>216.3</td>
<td>240.7</td>
<td>242.8</td>
<td>250.0</td>
</tr>
<tr>
<td>Charpy impact absorbed energy $E_{ab}$ [Nm]</td>
<td>2.7</td>
<td>10.0</td>
<td>19.2</td>
<td>31.3</td>
<td>45.4</td>
<td>39.9</td>
<td>38.6</td>
<td>40.2</td>
</tr>
<tr>
<td>Unit deformation heat input in the upset stage $q_{fd}$ [J/s]</td>
<td>51.7</td>
<td>66.5</td>
<td>12.9</td>
<td>243.8</td>
<td>1136.1</td>
<td>2140.1</td>
<td>2770.9</td>
<td>3566.1</td>
</tr>
</tbody>
</table>
6.5.2 アブセット寄りしろとシャルピ衝撃エネルギーの関係

引張試験ではアブセット寄りしろで継手性能の評価が可能であったが、ここでもシャルピ衝撃吸収エネルギーと寄りしろの関係を検討した。シャルピ衝撃吸収エネルギーとアブセット寄りしろの関係を Fig.6.14 に示す。アブセット寄りしろが約 3.5mm 以上で良好な継手と判断できる。前述のアブセット変形入力に比べて、アブセット寄りしろの小さい領域ではばらつきが大きくなっているが、ほぼ同様の分布が得られた。

Fig. 6.14 Relationship between charpy impact absorbed energy and upset loss.

6.6 継手強度の比較

本強度試験方法の範囲内では、引張強さ、曲げ強さ、ねじり強さ、およびシャルピ衝撃エネルギーの最小限界アブセット変形入力および最小限界アブセット寄りしろの関係を Fig. 6.15 に示す。図中の枠は、それぞれの継手強度の良好な継手を作製できる領域を示している。疲労強さの最小限界アブセット変形入力および最小限界アブセット寄りしろは、それぞれ 1000J/s および 9mm であったが、変形入力 200〜1000J/s、アブセット寄りしろ 4〜9mm の継手のデータがないため図示しなかったため、図示しなかった。

良好な継手を作製できる領域は、引張強さが最も広くなっており、アブセット変形入力およびアブセット寄りしろが小さくても良好な継手を得ることができる。続いて、シャルピ衝撃エネルギー、ねじり強さ、曲げ強さの順に領域が、アブセット変形入力およびアブセット寄りしろの大きい方向へ移動している。良好な継手を作製するためには、アブセット変形入力およびアブセット寄りしろを大きく、すなわち、摩擦圧接条件ではアブセット圧力などを高くする必要がある。
6.7 結言

アルミニウム合金摩擦圧接継手のアブセット変形入力、およびアブセット寄りしろと引張強さ、曲げ強さ、ねじり強さなどとの関係について検討し、以下に列挙する結果を得た。

1) 曲げ試験の結果、みかけの曲げ強さはアブセット変形入力が約 500J/s 以上、アブセット寄りしろが約 6mm 以上で母材の曲げ強さをやや下回る約 450MPa の値で安定する。

2) 曲げ試験の結果、十分な引張強さの良好な継手の得られるアブセット変形入力の領域において、アブセット変形入力が小さく軟化域が広い継手では、圧接部にき裂は生じ難いが、アブセット変形入力を大きく、すなわち軟化域が狭い鈎手では、軟化域と母材との境界にき裂が生じる傾向にある。

3) ねじり試験の結果、アブセット変形入力が約 500J/s 以上、アブセット寄りしろが約 5mm 以上でねじり強さは母材値 (298MPa) よりかなり低い約 170MPa の値で安定する。

4) 疲労強さは、引張強さに比べ、界面の接合状態や軟化状態に影響されやすい。すなわち、界面の接合が良好で軟化領域が広い継手では、軟化領域で応力が分散され、その結果高い疲労強さを示す。一方、界面の接合が良好でも軟化領域が狭い鈎手や、軟化領域が広くても界面の接合状態がやや劣る鈎手は、応
力が接合界面に集中するため疲労強さが若干小さくなる。

5) 疲労試験から求めた疲労限度で継手性能を判断すると、引張試験同様に、あるアブセット変形入力およびアブセット寄りしろ以上の場合には良好な継手が作製できる。

6) シャルピ衝撃試験の結果、アブセット変形入力が約300J/s以上、アブセット寄りしろが約3.5mm以上で母材とほぼ同等の破断面を示し、母材強度と同等、もしくはそれを上回る継手が作製できる。

7) 継手強度で比較した結果、良好な継手を作製できるアブセット変形入力およびアブセット寄りしろの領域は、引張強さが最も広い。また、その領域は、シャルピ衝撃エネルギー、ねじり強さ、曲げ強さの順に狭くなり、良好な継手を作成できるそれの最小値は、この順序で増加する傾向がみられる。
第7章 6061アルミニウム合金と各種材料の最小限界圧接入力および最小限界寄りしろの比較

7.1 緒言

前章までで、6061アルミニウム合金摩擦圧接接続の線手性能と圧接入力および寄りしろの関係を明らかにした。

本章では、S15CK炭素鋼、SUS304オーステナイト系ステンレス鋼、5056アルミニウム合金、7075アルミニウム合金およびAZ31マグネシウム合金同種材の最小限界アップセット变形入力および最小限界寄りしろを求め、6061アルミニウム合金のそれらとの比較検討を行なった。

7.2 実験方法

供試材は、S15CK炭素鋼、SUS304オーステナイト系ステンレス鋼、5056アルミニウム合金、7075アルミニウム合金およびAZ31マグネシウム合金を用いた。これらで用いた圧接条件因子をそれぞれTable 7.1～Table 7.5に示す。S15CK炭素鋼で38通り、SUS304オーステナイト系ステンレス鋼で49通り、5056アルミニウム合金で42通り、7075アルミニウム合金で50通り、AZ31マグネシウム合金で68通りにそれぞれを組み合わせた圧接条件を採用し、圧接後、引張試験を行なった。

<table>
<thead>
<tr>
<th>Table 7.1 Friction welding factors (S15CK).</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Friction pressure $P_1$ (MPa)</td>
</tr>
<tr>
<td>Upset pressure $P_2$ (MPa)</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction time $t_1$ (s)</td>
</tr>
<tr>
<td>Stopping time $t_B$ (s)</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction speed $N$ (s$^{-1}$)</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Table 7.2 Friction welding factors (SUS304).

| Friction pressure $P_1$ (MPa) | 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 |
| Upset pressure $P_2$ (MPa) | 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 |
| Friction time $t_1$ (s) | 5 |
| Stopping time $t_B$ (s) | 0.1 |
| Friction speed $N$ ($s^{-1}$) | 16.7, 25.0, 33.3, 41.7, 50.0, 66.7 |

Table 7.3 Friction welding factors (A5056).

| Friction pressure $P_1$ (MPa) | 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 |
| Upset pressure $P_2$ (MPa) | 7, 10, 15, 20, 30, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 110, 120, 140 |
| Friction burn-off length $\delta_1$ (mm) | 0.5, 1, 2, 8 |
| Stopping time $t_B$ (s) | 0.1 |
| Friction speed $N$ ($s^{-1}$) | 33.3, 50.0, 66.7 |

Table 7.4 Friction welding factors (A7075).

| Friction pressure $P_1$ (MPa) | 10, 20, 30, 40, 50, 60 |
| Upset pressure $P_2$ (MPa) | 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 120, 140 |
| Friction time $t_1$ (s) | 2, 3, 4, 6, 8 |
| Stopping time $t_B$ (s) | 0.1 |
| Friction speed $N$ ($s^{-1}$) | 33.3, 41.7, 50.0, 58.3, 66.7 |
Table 7.5  Friction welding factors (AZ31).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Friction pressure $P_1$ (MPa)</th>
<th>10, 20, 30, 40, 50, 60</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Upset pressure $P_2$ (MPa)</td>
<td>10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 120, 140</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction time $t_1$ (s)</td>
<td>2, 3, 4, 6, 8</td>
</tr>
<tr>
<td>Stopping time $t_B$ (s)</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>Friction speed $N$ (s⁻¹)</td>
<td>33.3, 41.7, 50.0, 58.3, 66.7</td>
</tr>
</tbody>
</table>

7.3 各種材料のアブセット変形入力と引張強さ

各種材料のアブセット変形入力と引張強さの関係をそれぞれ Fig.7.1 〜 Fig.7.5 に示す。
それぞれの材料のアブセット変形入力の小さい領域では、データにばらつきが見られるが、良好な継手であると評価できる最小限界アブセット変形入力は、Table 7.6 に示す通りになる。比較のために、6061 アルミニウム合金の結果についても併記した。
S15CK 炭素鋼と SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼の最小限界アブセット変形入力は他の材料より小さい。

Fig. 7.1 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage (S15CK).
Fig. 7.2 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage (SUS304).

Fig. 7.3 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage (A5056).

Fig. 7.4 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage (A7075).
Fig. 7.5 Relationship between tensile strength and unit deformation heat input during upset stage (AZ31).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Materials</th>
<th>A6061</th>
<th>S15CK</th>
<th>SUS304</th>
<th>A5056</th>
<th>A7075</th>
<th>AZ31</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Limit deformation heat input in the upset stage (J/s)</td>
<td>200</td>
<td>100</td>
<td>110</td>
<td>150</td>
<td>200</td>
<td>500</td>
</tr>
</tbody>
</table>

7.4 各種材料のアブセット寄りしろと引張強さ

各種材料のアブセット寄りしろと引張強さの関係をそれぞれ Fig. 7.6 ～ Fig. 7.10 に示す。

これらのデータ分布と各種材料のアブセット変形入力と引張強さの関係をそれぞれ示した Fig. 7.1 ～ Fig. 7.5 のデータ分布を比べると、ばらつきが若干大きくなっているものの不完全接着と完全接着の領域の識別が可能であり、この結果から、アブセット寄りしろによっても接着の評価が可能であるものと考えられる。

アブセット変形入力と同様、それぞれの材料のアブセット寄りしろの小さい領域ではばらついているが、良好な接着と評価できる最小限界アブセット寄りしろは、Table 7.7 に示す通りになる。
Fig. 7.6 Relationship between tensile strength and upset loss (S15CK).

Fig. 7.7 Relationship between tensile strength and upset loss (SUS304).

Fig. 7.8 Relationship between tensile strength and upset loss (A5056).
### Table 7.7 Limit upset loss of materials.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Materials</th>
<th>A6061</th>
<th>S15CK</th>
<th>SUS304</th>
<th>A5056</th>
<th>A7075</th>
<th>AZ31</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Limit upset burn-off length (mm)</td>
<td>3.0</td>
<td>1.2</td>
<td>1.0</td>
<td>1.7</td>
<td>1.9</td>
<td>5.9</td>
</tr>
</tbody>
</table>

### 7.5 各種材料の最小限界アブセット変形入力と最小限界全寄りしろの比較

各種材料の最小限界アブセット変形入力と最小限界全寄りしろの関係および最小限界アブセット変形入力と最小限界全寄りしろの関係をそれぞれ Fig.7.11 および Fig.7.12 に示す。
これらの図では、若干ばらつきは認められるが、最小限界アブセット変形入力と最小限界アブセット寄りしろの間にほぼ比例関係が認められる。また、最小限界アブセット寄りしろは圧接が比較的容易な材料ほど低い値を示しており、比較的圧接が困難な材料ほど高い値を示す。

これは、熱伝導率の小さい（軟化やすい）材料ほど、接合面に熱が蓄積され、変形しやすく、低いアブセット圧力を圧接が可能であることを示している。アルミニウム合金材の場合は熱伝導率が大きいので、アブセット圧力を高くして変形入力を増大させる必要があることがわかる。中でも AZ31 マグネシウム合金は比較的困難と思われ、高いアブセット圧力を必要とする。

Fig. 7.11 Relationship between limit unit deformation heat input and limit upset loss.

Fig. 7.12 Relationship between limit unit deformation heat input and limit total loss.
7.6 結言

S15CK、炭素鋼、SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼、5056 アルミニウム合金、7075 アルミニウム合金および AZ31 マグネシウム合金の最小限界アプセット変形入力および最小限界アプセット寄りしろを求め、6061 アルミニウム合金との比較検討を行なった。その結果、最小限界アプセット変形入力は、圧接が容易な材料ほど小さくなる傾向を示すことが明らかとなった。
第8章 総括

8.1 総括

本研究は、摩擦圧接接続時圧接力へ投入される圧接入力を算定して、圧接入力によって接合性能評価を行う評価法の確立と、接合性能評価法の最適マイナシプロセス設計の支援について検討した結果をまとめたものである。まず、摩擦圧接過程を評価するパラメータとして摩擦圧接機の個性に左右されない基本的現象から得られる圧接入力に着目した。そして、摩擦圧接過程を摩擦過程とアプセット過程に区別し、さらにそれぞれの過程において摩擦入力および変形入力を求め、それぞれの圧接入力と接合の引張強さとの関係を明らかにした。その結果から、接合の引張強さとの相関が最も強い圧接入力を接合強度の評価値として導入した。また、圧接入力に及ぼす諸因子の影響を検討した後、実用的な観点から寄りしろが評価値となり得るかについて検討した。最後に、良好な接合を作製するための最小限界アプセット変形入力と最小限界アプセット寄りしろを各種材料で比較検討した。

本研究の成果を以下に要約する。

第4章では、アプセット過程の変形入力（アプセット変形入力）およびアプセット寄りしろと引張強さに明確な関係が認められ、アプセット過程の変形入力およびアプセット寄りしろの増加に伴い引張強さは増大した。そして、約 200J/s 以上のアプセット変形入力および約 3mm 以上のアプセット寄りしろで得られた接合を良好な接合と評価でき、良好的接合作製の目安となり得ることを明らかにした。また、そのときの伸びは 4.5%以上、絞りは 35%以上であることを示した。次いで、母材直径を 10mm、12mm、14mm、および 16mm に変化させたときの圧接入力および寄りしろに及ぼす母材直径の影響について検討を行なった。その結果、母材直径が大きくなると最小限界アプセット変形入力は大きくなる傾向にあるが、母材直径の単位面積あたりの最小限界アプセット変形入力で整理すると、0.92 MJ/m²s〜1.58 MJ/m²s の範囲内にあることを明らかにした。次いで、母材直径 10mm、12mm、14mm、および 16mm の圧接に要する最小限界アプセット寄りしろは、全ての直径で約 5mm であり、これ以上のアプセット寄りしろで完全接合となることを示した。
第5章では、アブセットタイミングを−0.3s、0sおよび0.4sに変化させたときの圧接入力の変化と真の圧接入力、みかけの圧接入力などについて検討を行ない、そのときのそれぞれの寄りしろとの関係を調べた。その結果、アブセットタイミングが−0.3sおよび0sのとき、アブセット変形入力の増加に伴い、引張強さも増大し、アブセット変形入力が約200J/s以上で完全継手が得られることが示された。しかし、アブセットタイミングが0.4sでは、アブセット変形入力が小さく完全継手は得られない。アブセットタイミングが0sのときには減速域に相乗効果が得られるので、アブセット寄りしろの増大によりアブセット変形入力は大きくなる。アブセットタイミングが−0.3sのとき、ターミナルピークトルク発生前にアブセット圧力を負荷すると相乗効果が得られないが、摩擦圧力が増加したことになり、摩擦過程においてアブセット変形入力が増加して、完全継手が得られる。摩擦停止後にアブセット圧力が設定値に到達する場合、摩擦停止以後のアブセット圧力の増加分はアブセット変形入力に変換されず、アブセット変形入力が低くなり、完全継手は得られないことを明らかにした。次いで、アブセットタイミングが−0.3sおよび0sのとき、アブセット寄りしろが約3mm以上で完全継手が得られ、アブセットタイミングが0.4sのとき、摩擦停止後の寄りしろはほとんど発生しないので、アブセット寄りしろで継手の評価はできないことを示した。

第6章では、引張試験、曲げ試験、ねじり試験、疲労試験、およびシャルピ衝撃試験を行ない、圧接入力および寄りしろと継手強度の関係について検討し、良好な継手を作製するために最低必要とされるそれぞれの最小限界アブセット変形入力と最小限界アブセット寄りしろを明らかにした。曲げ試験の結果、みかけの曲げ強さはアブセット変形入力が約500J/s以上、アブセット寄りしろが約6mm以上で母材の曲げ強さをやや下回る約450MPaの値で安定する。良好な継手の得られるアブセット変形入力の領域において、アブセット変形入力が小さく軟化域が広い継手では、曲げ試験中、圧接部にき裂は生じ難いが、アブセット変形入力が大きく軟化域が狭い継手では、軟化域と母材境界でき裂が生じる傾向にあることを明らかにした。ねじり試験の結果、アブセット変形入力が約500J/s以上、アブセット寄りしろが約5mm以上でねじり強さは母材値（298MPa）より小さい約170MPaの値で安定することを明らかにした。疲労試験の結果、継手の疲労強さは引張強さに比べ、界面の接合状態や軟化状態に影響されやすいことが示された。すなわち、界面の接合が良好で軟化領域が広い継手では、軟化領域で応力が分散されて疲労強さは大きくなくなるが、界面の接合が良好でも軟化領域が狭い継手や、軟化領域が広くても界面の接合状態がやや劣る継手は、応力が接合界面に集中するため
疲労強さが若干小さくなる。そして、疲労試験から求めた疲労限度で継手性能を判断すると、引張試験同様、アブセット変形入力およびアブセット寄りしろがある値以上の場合に良好な継手が作製できることを明らかにした。シャルピ衝撃試験の結果、アブセット変形入力が約 300J/s 以上、アブセット寄りしろが約 3.5mm 以上で母材とほぼ同等の破断面を示し、母材強度と同等、もしくはそれを上回る継手が作製できることを明らかにした。

第7章では、S15CK 炭素鋼、SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼、5056 アルミウム合金、7075 アルミウム合金および AZ31 マグネシウム合金の最小限界アブセット変形入力、最小限界アブセット寄りしろおよび最小限界全寄りしろを求め、6061 アルミウム合金との比較検討を行なった。その結果、最小限界アブセット変形入力は、圧接が容易な材料ほど小さくなる傾向を示すことが明らかとなった。

第8章は総論であり、本研究の総括を行なっている。

従来、摩擦圧接法で作成された継手に対する適切な非破壊検査は困難であり、継手の品質保証あるいは継手強度を評価する一般的な手法が無かった。これに対して本研究では、6061 アルミウム合金摩擦圧接継手において、一般性のあるアブセット変形入力およびアブセット寄りしろで継手性能を評価し得ることを明らかにした。次いで、S15CK 炭素鋼、SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼、5056 アルミウム合金、7075 アルミウム合金および AZ31 マグネシウム合金の最小限界変形入力および最小限界寄りしろを求め、6061 アルミウム合金と同様、アブセット変形入力で継手性能を評価し得ることを示した。

8.2 今後の研究と課題

今後、種々の材料の接合に摩擦圧接が適用されることが予想され、摩擦圧接継手の非破壊検査に代わる評価法が求められると共に、異なる摩擦圧接機で容易に摩擦圧接条件を設定する要望が高くなると考えられる。また、本研究では同種摩擦圧接継手に限定した。摩擦圧接の特徴である異種金属間の圧接では、同種摩擦圧接継手と継手接合部の生成過程が異なると考えられ、本研究の圧接入力だけでは解明できない部分も多く、今後の課題であると考えている。

こうした種々の問題に対し、本研究で確立したアブセット変形入力による摩擦圧接継手の評価法および圧接条件の選定法は、摩擦圧接における基礎的技術の一つとして、この種の業界に貴重な知見を提供すると共に、多大の貢献をし得るものと自負している。
謝辞

本論文の作成にあたり、懇切なご指導とご教唆を賜りました慶應義塾大学理工学部 菅 泰雄教授に深い敬意と深甚なる謝意を表します。また、本論文をご査読の上、貴重なご教示を賜りました慶應義塾大学理工学部 久納 孝彦教授、三井 公之教授、宗宮 訳教授に心から感謝を申し上げます。

本研究の遂行に当たり、終始多大のご教示、ご指導を賜りました元 大阪府立大学総合科学部 小川 恒一教授に謹んで深甚なる謝意を申し上げます。また、実験上のご協力と示唆に富むご討議を賜りました摂南大学工学部 山本 義秋教授、黒澤 敏朗教授、大阪工業大学短期大学部 辻野 良二教授、大阪産業大学短期大学部 大植 義夫助教授、大阪産業大学工学部 川井 五作助教授に厚くお礼を申し上げます。

また、本研究を始める機会、本研究遂行中多大のご支援と研究促進へのご配慮を賜りました大阪産業大学工学部 櫻井 惠三教授、足立 勝重教授、吉川 晃講師に心からお礼を申し上げます。

実験および実験データの整理に当たっては、大阪工業大学 共同研究センター 越智 秀特別研究員、大阪府立大学総合科学部 山口 博講師にご協力をいただきました。心より厚くお礼を申し上げます。
発表論文

1. 本研究に関連した発表論文


4) 越智 秀、澤井 猛、山本 義秋、栗田 昌幸、小川 恒一、菅 泰雄、“6061 アルミニウム合金摩擦圧接継手の引張強さおよび疲労強度の評価”, 材料 Vol. 50, No.9, pp.961-967, (2001) .


7) 澤井 猛、山本 義秋、越智 秀、小川 恒一、辻野良二、菅 泰雄、“SUS304 ステンレス鋼摩擦圧接継手の引張強さおよび疲労強さの評価”, 高温学会誌 Vol. 27 , No.6, pp.320-325, (2001) .


10) 澤井 猛、小川 恒一、山口 博、越智 秀、山本 義秋、菅 泰雄、“6061 アルミニウム合金の摩擦圧接の入熱、継手強度に及ぼすアプセットタイミングの影響
2. 本研究に関連した国際会議発表論文


参考文献


17) 蓮井淳, 福島貞夫. 摩擦圧接におけるブレット時期について. 金属材料研究所研究報告, Vol. 8, No. 4, p. 65, Apr 1965.


22) 中村, 中原, 青柳, 矢野. 摩擦圧接法に関する研究（第1報）. 機械試験所所報, Vol. 23, No. 5, pp. 8–20, Feb 1969.


49) 小川恒一, 山口博, 川井五作, 澤井猛. 摩擦圧接挙動による継手性能の評価と最
適圧接条件の選定—摩擦圧接における圧接条件の最適化と継手性能に関する

50) 澤井猛, 小川恒一, 山口博, 越智秀, 山本義秋, 菅泰雄. 6061 アルミニウム合金

51) 澤井猛, 小川恒一, 越智秀, 辻野良二, 菅康雄. S15CK 炭素鋼摩擦圧接継手性能

52) 澤井猛, 小川恒一, 越智秀, 山本義秋, 古川宏之, 菅泰雄. 5056 アルミニウム合
金摩擦圧接継手性能の熱入力による評価. (第 1 報) 圧接継手の引張強さの検討.

53) 古川宏之, 山本義秋, 澤井猛, 小川恒一, 菅泰雄. 5052 アルミニウム合金摩擦圧
接継手性能の入熱による評価. 日本機械学会第 8 回機械材料・材料加工技術講

54) 澤井猛, 小川恒一, 山口博, 越智秀, 山本義秋, 菅泰雄. S15CK 炭素鋼同種摩擦

55) 小川恒一, 山口博, 山本義秋, 北浦堅一. 7075 アルミニウム合金摩擦圧接の曲

56) 越智秀, 小川恒一, 山本義秋, 菅泰雄. 日本材料強度学会誌, Vol. 28, No. 4, p.