# SCM415 と SUS303 の摩擦圧接

大平 宏樹　安部 彰　渡邊 健次郎*　桂澤 豊*　中川 昌幸*

A Study on Friction Welding of SCM415 and SUS303

OODAIRA Hiroki,　ABE Akira,
WATANABE Kenjirou*,　KATSURAZAWA Yutaka* and NAKAGAWA Masayuki*

**抄　録**

被削性の良いオーステナイト系ステンレス鋼 SUS303 と、浸炭焼入れにより表面を硬化させたクロムモリブデン鋼 SCM415 を接合することにより、一部は加工性が良く、他の部位は耐摩耗性の高い複合材を作ることが出来る。本研究では、このような異種材料の接合方法として摩擦圧接法を試みた結果、良好な継ぎ手が得られた。同径φ8mm の供試材の場合、アプセット寄り代が 2mm 以上得られた場合には、接合界面全面がほぼ接合され 600MPa 程度の引張強さを示した。また、接合機、供試材の材質、硬さ等を変更した場合、適切なアプセット寄り代を得るための指針として、変更すべき接合パラメータとそれらがアプセット寄り代に及ぼす影響について検討した。

## 1. 緒　　言

材料の機械的性質は、材質、熱処理や加工により決定されるが、たとえば、製品とするための加工性と強度や耐摩耗性などを両立することは難しく、材料、加工コストともに高くなってしまう。比較的安価な材料を用い、製品に要求されるさまざまな機能、性能の一部を満たすような材料を複合化することにより、コストを押さえより付加価値の高い製品をつくることが出来る。本研究では、浸炭焼入れにより表面を硬化させたクロムモリブデン鋼 SCM415（以下 SCM）の丸棒と、被削性の良いオーステナイト系ステンレス鋼 SUS303（以下 SUS）の丸棒の接合を検討した。接合方法として、より加工コストを抑えることが出来、十分な接合強度が期待できる摩擦圧接法を用い、その最適な加工条件について調べた。

＊　研究開発センター

## 2. 摩擦圧接について [1)]

### 2.1 接合原理

摩擦圧接は被接合材を溶かさずに接合する固相接合である。接合原理は、接合界面における酸化膜､汚染層などの接合を阻害する表面層を破壊し、新生面同士を凝着、拡散させて接合するというものである。摩擦圧接の加工工程は、接合界面を摩擦することによって、表面層を破壊しながら摩擦熱により発熱させ、その後、軟化した接合部付近を塑性変形させ、酸化物等の汚染層をバリとして排出すると同時に新生面同士を押し付けて凝着させ、接合面積を増加させるというものである。破壊された表面層がバリとともに接合界面から排出されるため、それに起因する欠陥が残留しにくいこと、マクロ的には材料を溶融させないため、接合強度を低下させる脆い金属間化合物が生成しにくいこと、などの理由から溶融接合では困難な異材の接合に適している。また、接合界面が雰囲気に触れないため、大気中でのプロセスが可能であ

る。さらに、被接合部材自身の摩擦熱により接合部が発熱するため、他の熱源が不要である。つまり、異種材の接合において、加工コストを大幅に低減でき、信頼性の高い接合が出来る可能性のあるプロセスであると考えられる。

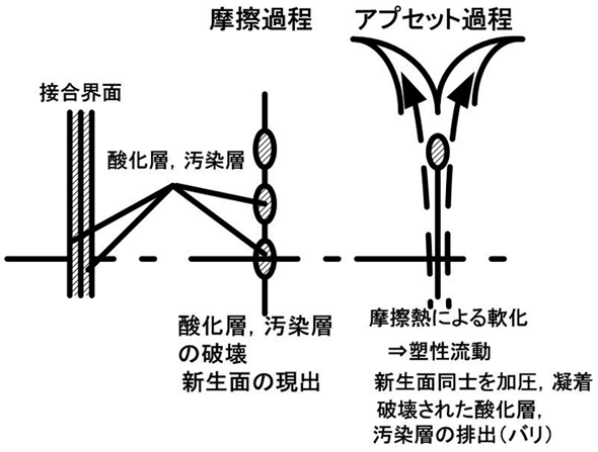



図 1　接合原理

## 2.2 加工工程

本研究ではブレーキ式と呼ばれる摩擦圧接機を用いて実験した。その加工プロセスの概略図を図 2 に示す。また、本研究で用いた各接合パラメータに対応する記号を表 1 に示す。

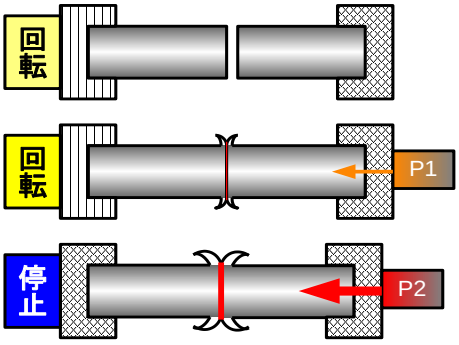



図 2　摩擦圧接工程の概略図

摩擦圧接機は、2 本の被接合部材の一方を主軸に取り付けて回転させ、もう一方を回転軸と同軸に互いの端面が正対するように固定する。固定側は油圧によって回転軸と平行にスライドし回転側に押し付けることができる構造となっている。主軸を回転開始した後両者の端面を接触させ、一旦低い荷重（摩擦圧力 P1）で軸方向に押し付けることで、摩擦熱を発生させ、さらに大きな加圧（アプセット圧力 P2）を行うと同時にブレーキによって回転停止する。その際に摩擦熱によって軟化した接合部付近に大きな塑性変形（アプセット寄り代 U2）を引き起こし、塑性流動した材料の一部が接合部付近から押し出され盛り上がったバリとなる。バリは必要に応じて除去する。

各段階における、主軸の回転数（———）、加圧力（— ・ —）、軸方向の変形量（寄り代）・（・・・・・ ）を図 3 に模式的に示す。

表 1　各接合パラメータに対応する記号

| パラメータ | 単位 | |
|---|---|---|
| N | rpm | 主軸回転数 |
| P1 | MPa | 摩擦過程における軸方向の加圧圧力 |
| P2 | MPa | アプセット過程における軸方向の加圧圧力 |
| U1 | mm | 摩擦寄り代（設定値） |
| U | mm | 全寄りしろ（=U1+U2） |
| U2 | mm | アプセット寄り代 |
| T1 | sec | 摩擦時間（摩擦寄り代がU1に達するまでの時間） |
| T2 | sec | アプセット時間 |
| V | mm/sec | 接合部断面周速 |
| P2L | sec | アプセット遅れ時間 |
| UTS | MPa | 引張強さ |

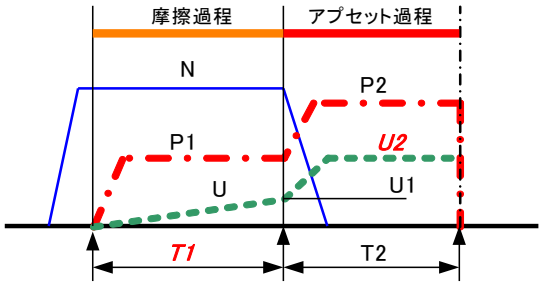
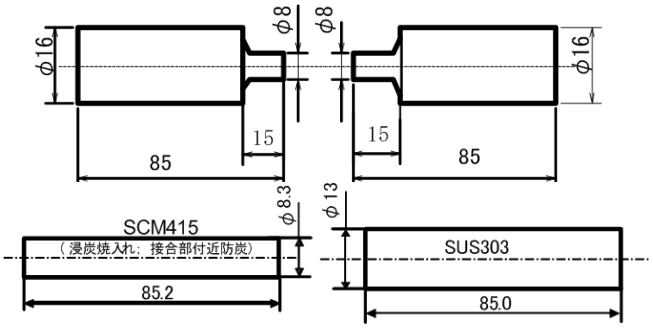



図 3　摩擦圧接工程の模式図

## 3. 供試材および実験方法




（上：同径φ8　下：異径φ8－φ13）

図 4　供試材形状概略図（単位：mm）

### 3.2 接合条件

供試体の周速は、すべての実験において、およそ 1.6m/sec となるように主軸の回転数を設定した。φ8SCM－φ13SUS 異径の場合は細径側の周速で設定した。φ8 同径の場合の接合条件（摩擦圧力 P1、アプセット圧力 P2、摩擦寄り代 U1）を表 2 に、φ8SCM とφ13SUS の異径の場合の接合条件を表 3 に示す。

表 2　φ8 同径の場合の接合条件

| P1 | P2 |
|---|---|
| MPa | MPa |
| 40 | 100 |
| 60 | 150 |
| 80 | 200 |
| 100 | 250 |
| 120 | 300 |

U1=0.5、1.0、2.0、3.0、4.0mm

表 3　φ8、φ13 異径の場合の接合条件

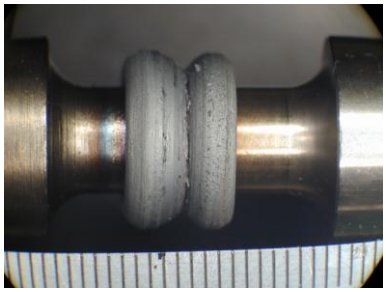
| P1 | P2 |
|---|---|
| MPa | MPa |
| 80 | 200 |
| 100 | 250 |
| 120 | 300 |

U1=0.5、1.0、2.0mm

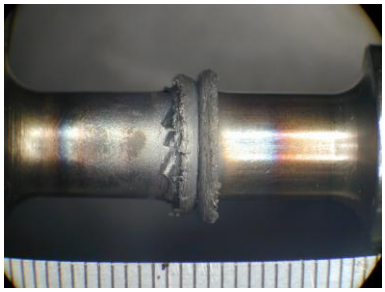
## 4. 実験結果及び考察

### 4.1　接合部の特徴

摩擦圧接では、前述のとおりアプセット時に塑性変形を引き起こすことにより、大きなバリを生成する。その一例を図 5(a)、(b)に示す。接合条件



(a) アプセット寄り代が大きい場合



(b) アプセット寄り代が小さい場合

図 5　接合部バリ生成の様子の例

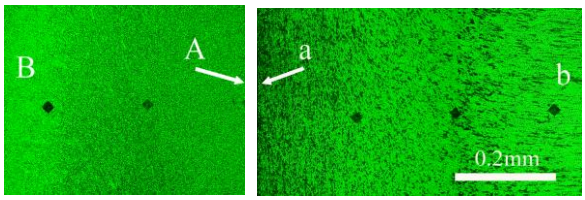
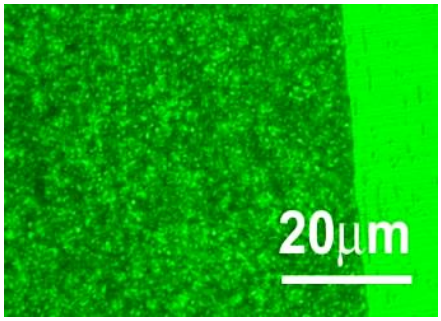



図 6　接合界面周辺（左：SCM、右：SUS）

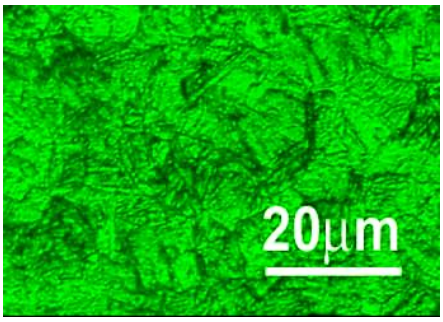
の違いにより、バリの生成状態が異なることが分かる。

図 6 に接合界面付近の断面組織を示す。A、a 部が接合界面付近であり、左側が SCM、右側が SUS である。

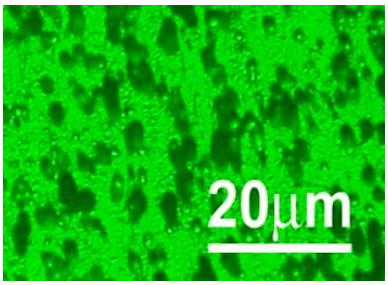
また、図 7 に接合界面付近 A、B 部（SCM 側）a、b 部(SUS 側)の組織の拡大写真を示す。接合界面付近ではアプセット時における塑性流動によって組織が微細化していることが分かる。



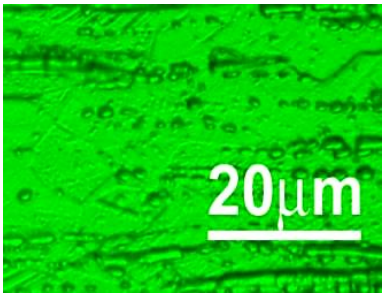

(a) SCM 側 A 部




(b) SCM 側 B 部




(c) SUS 側　a 部




(d) SUS 側　b 部

図 7　接合界面付近断面組織

### 4.2　引張試験による接合強度評価

表 2 に示した条件（摩擦圧力 P1、アプセット圧力 P2、摩擦寄り代 U1）で接合した供試材を引張試験した結果を表 4 に示す。摩擦圧力、アプセット圧力の大きい条件では、引張強さがほぼ同等の 590－600MPa という結果となったが、摩擦、アプセット圧力が小さい条件では引張強さが小さくなった。引張強さが 612MPa、333MPa となった供試材の引張破面写真を図 8(a)(b)にそれぞれ示す。

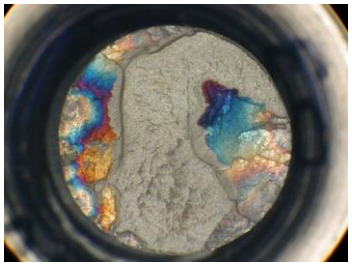
引張強度が 600MPa 程度となる接合条件ではほぼ全面接合しているのに対し、摩擦圧力、アプセット圧力が小さく接合強度が小さくなる条件では部分的な接合となっており、これが接合強度の差になっていると考えられる。

表 4　各接合条件(P1、P2、U1)における
引張強さ(MPa)(複数の結果の平均値)

| P1 | P2 | U1(mm) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MPa | MPa | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 40 | 100 | 453 | 429 | 340 | --- | 234 |
| 60 | 150 | 612 | 609 | 557 | --- | 337 |
| 80 | 200 | 603 | 609 | 591 | 583 | 571 |
| 100 | 250 | 607 | 609 | 607 | 581 | 598 |
| 120 | 300 | 612 | 606 | 608 | 612 | 600 |

■ 最大値の 98%以上 ■95%以上

(a) 引張強さ 612MPa
(P1=120MPa、P2=300MPa、U1=3.0mm、 U2=4.6mm)



(b) 引張強さ 333MPa
(P1=40MPa 、P2=100MPa、U1=2.0mm 、U2=0.5mm)

図 8　引張破断面

### 4.3　アプセット寄り代と接合強度

アプセット過程は、摩擦過程後に摩擦圧力よりもさらに大きな圧力を軸方向に付加し、大きな変形を与えバリを排出させる過程であり、そのパラメータであるアプセット寄り代は接合状態を直接表している重要なパラメータといえる。図 9 にφ 8mm 同径供試材におけるアプセット寄り代と引張強さとの関係を示す。

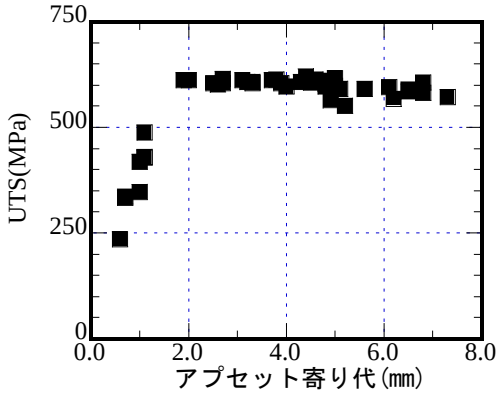



図 9　アプセット寄り代と引張強さとの関係

アプセット寄り代が 2.0mm 程度以上になると引張強さが飽和値に達している。引張破断面観察より、2.0mm 以上のアプセット寄り代が得られる条件では、ほぼ界面全面が接合されたのに対し、2.0mm 以下の場合では、破面に非接合面が観察された。アプセット寄り代 2.0mm 以下の場合では、引張強度は実際の接合面積に依存していると考えられる。また、5.0mm 程度以上のアプセット寄り代が得られる条件で引張強さが若干低下する傾向がみられた。図 10 に接合界面付近の断面軸方向の硬さ分布と図 11 に引張破断部断面 SCM 側のマクロ写真を示す。

SUS の接合界面付近で硬さが低下しており、SCM 側破断部に SUS の破面が残留していることから、破断経路は SUS の熱影響部であると考えられる。全面接合される条件では、この SUS 熱影響部が破断経路となるため、発熱量が大きくなる条件、すなわちアプセット寄り代が大きくなる条件で、接合強度が低下傾向を示すものと考えられる。

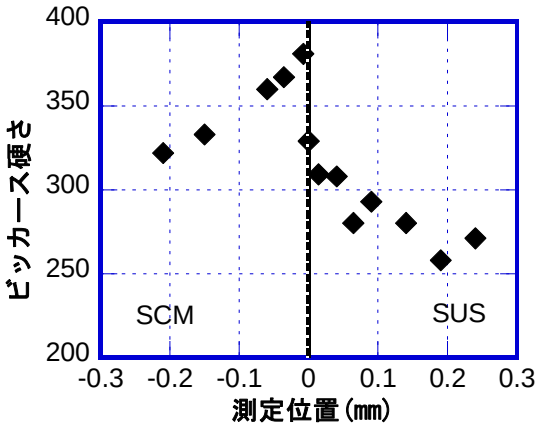



図 10　接合界面付近の硬さ分布

図 11　引張破断部断面(SCM 側)

### 4.4　アプセット寄り代に影響を与える接合パラメータ

#### 4.4.1　摩擦過程のパラメータ

摩擦過程は接合界面発熱のための過程であり影響するパラメータは周速、摩擦圧力、摩擦寄り代、摩擦時間である。本研究では、周速一定で行っているのでそれ以外の摩擦過程のパラメータが相互にどのように関連し、アプセット寄り代に影響を与えるかを検討した。 図 12 に摩擦寄り代と摩擦時間との関係を示す。これらは、加圧条件により傾きは異なるが、比例関係が見られる。このことは、摩擦圧力による変形が一定の速度で進むことを示している。その変形は、摩擦圧力が大きくなるほど速くなり、一定の寄り代を得るための時間、すなわち摩擦時間が短くなる。

また、熱により材料が軟化すると変形抵抗が低下するため、摩擦過程における発熱量はアプセット寄り代で類推できると考えられる。図 13 に摩擦

時間とアプセット寄り代との関係を示す。

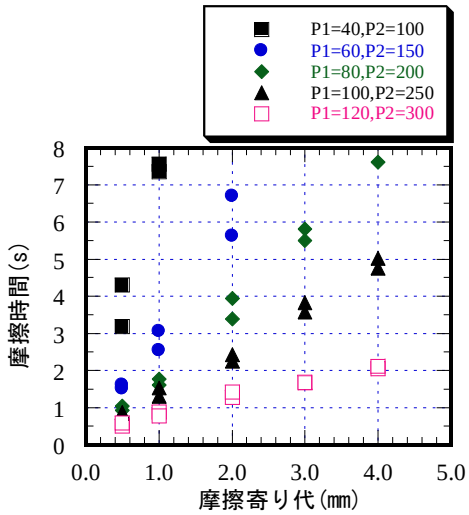



図 12　摩擦寄り代と摩擦時間との関係

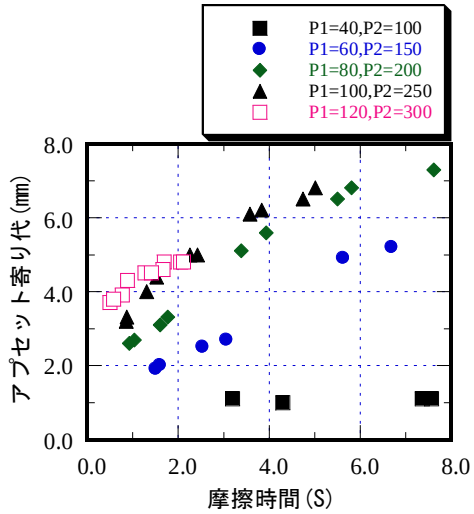



図 13　摩擦時間とアプセット寄り代との関係

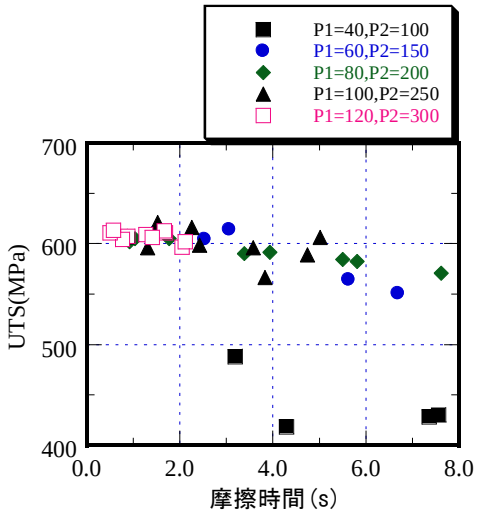



図 14　摩擦時間と引張強さとの関係

各加圧条件において、（全面接合しなかった P1=40MPa、P2=100MPa の条件を除いて）摩擦時間が長くなるほどアプセット寄り代が大きくなっており、摩擦時間が長くなるに従い、発熱量が大きくなっていることを示している。加圧力に注目すると、例えば、最も加圧力の大きい P1=120MPa、P2=300MPa の条件では、必要な摩擦寄り代を得るための時間が短く、摩擦時間が短くなる結果、発熱量があまり大きくならないため、アプセット圧力は最も大きい条件であるにもかかわらず、アプセット寄り代は、他のアプセット圧力の小さい条件より小さい値にとどまっている。これは、より大きなアプセット寄り代を得るためには、アプセット圧力を大きくするよりも、摩擦圧力を低下させ、摩擦時間を適当に長くすることで発熱量を大きくした方がアプセット寄り代の増加に対して効果的であることを示している。しかし、接合時の発熱量は、十分なアプセットを得るための変形抵抗の低下にも寄与するが、熱影響による接合強度の低下の原因となる。図 14 に、摩擦時間と引張強さとの関係を示す。

摩擦圧力の小さい P1=40、P2=100MPa の条件では、摩擦圧力が小さすぎるため、図 13 からもわかるように、アプセット寄り代も不十分でその結果として接合強度が非常に小さい。一方、図 14 において、全面接合になっていると思われるその他の条件では、摩擦時間の増加に伴い引張強度が漸減している。この結果からも、破断経路が SUS 熱影響部であること、摩擦時間が必要以上に長くなると発熱量が大きいため、軟化の度合いも大きく、接合強度が低下するということを確認できる。

### 4.4.2　接合機固有の接合パラメータ

同じ供試材の接合であっても、異なる接合機で最適な接合条件が異なる場合がある。この原因として考えられるパラメータは、アプセット時における接合機の主軸の制動特性である。装置依存パラメータとしては、主軸のイナーシャ、ブレーキの構造、容量、応答性などが挙げられる。これら

は、制動指令が出てから完全に回転停止するまでの時間の変化として表れる。これと関係する制御パラメータは、制動指令からアプセット圧力を付与されるまでの時間、すなわちアプセット遅れ時間である。これを変化させることにより、主軸が完全に停止するまでにアプセット圧力が付加される時間を変化させることが出来る。本研究では、アプセット遅れ時間というパラメータがアプセット寄り代、接合強度に及ぼす影響を検討し、接合機変更の際に起こると予想される接合条件の変化への対処方法について検討した。　図 15 にφ8SUS－φ13SCM 供試材におけるアプセット遅れ時間の影響を示す。アプセット遅れ時間は 0sec、0.2sec の 2 条件である。

アプセット遅れ時間 0sec では 0.2sec の条件に比べ、アプセット寄り代が大きくなり、結果として引張強さが大きくなっている。これは、回転しながらアプセット圧力が付加される場合、より大きな塑性変形量つまりアプセット寄り代が得られるためであると考えられる。この結果から、接合機の制動性能の変化で、回転停止時間が変化したことによりアプセット寄り代が変化した場合、アプセット遅れ時間を変化させることでアプセット寄り代を制御できると考えられる。

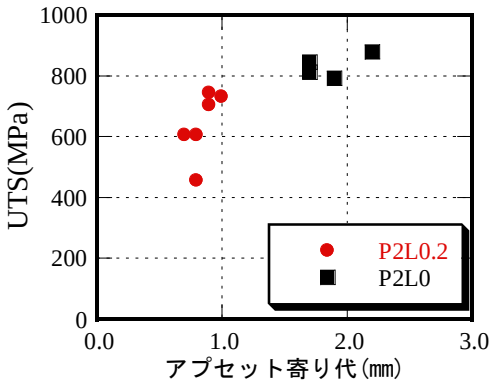
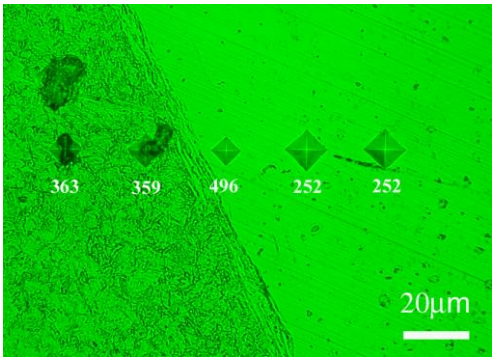



図 15　アプセット遅れ時間による
アプセット寄り代、引張強さの変化

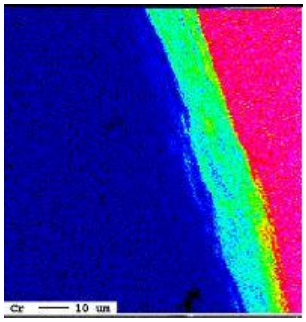
### 4.5　異径材における接合強度の向上について

#### 4.5.1　接合界面における硬化層の生成

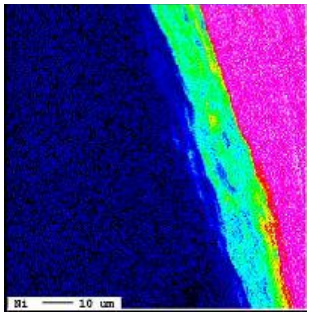
図 15 はφ8SUS－φ13SCM の異径の供試材の結果である。異径の供試材では同径の場合と異なり、引張強さが 600MPa 程度で飽和せず、条件によってはアプセット寄り代の増加に伴い引張強度が向上している。前述のとおり、同径の場合では接合界面付近の熱影響部が破断経路となり、引張強度がその熱影響部の強度に収束した。異径の場合の接合界面付近の軸方向の硬さ分布の一例を図 16(a)に示す。また，Cr、Ni のマッピングをそれぞれ図 16(b)、(c)に示す。接合界面付近が硬化しており、母材とは成分の異なる硬化層が生成している事が分かる。




(a) 軸方向硬さ分布



(b)Cr マッピング



(c)Ni マッピング

図 16　硬化層周辺硬さ分布と元素マッピング
((a)、(b)、(c)ともに　左：SCM　右：SUS)

この硬化層において簡易定量分析を行った結果、およそ Cr（4.1%）Mn(1.1%)、Fe(87.3%)、Ni(1.5%)であった。また、炭素量は母材である SCM、SUS と同程度であると仮定すると 0.1～0.2%程度である。これから Cr 当量=4.1%、Ni 当量＝1.5+30×(0.1～0.2)+0.5×1.1＝(5～8)%となり、図 17 の schaeffler（シェフラー）の組織図 [2] と照らし合わせるとマルテンサイト相の領域であり、この中間層における硬化の要因はこのマルテンサイト相によるもの

ではないかと考えられる。

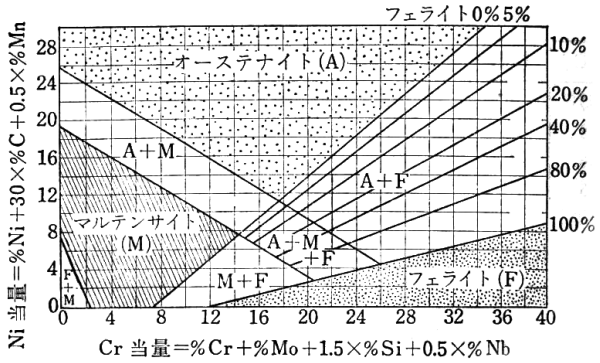
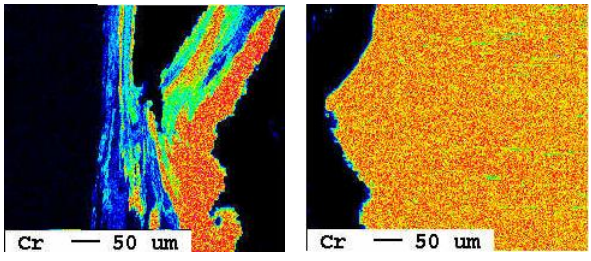



図 17　schaeffler の組織図 [2)]

### 4.5.2 破断経路の変化による接合強度の向上

図 18 に引張破断部の断面における Cr マッピングを示す。Cr 量の多い SUS 側で破断しているのが確認できる。従って、異径の場合も同径の場合同様、破断経路は SUS 側の熱軟化部であると考えられる。しかし、前述のとおり、異径の場合には同径の場合よりも引張強さが大きな値となり、アプセット寄り代に比例し増加する傾向を示している。この理由として、SUS303 の軟化が抑えられたこと、または、材料が強化されたとは考え難い。なぜなら、アプセット寄り代が大きい場合には十分な発熱が得られているため、接合部付近の熱影響は避けられず、図 19 に示されるようにφ8－φ8 同径の試験片と同程度もしくはそれ以上の硬さ低下が見られるからである。以上のことから、この引張強度の向上は、破断経路の変化による破断部実面積の増加によるものではないかと考えられる。




(a) SCM 側　　(b) SUS 側

図 18　引張破断部断面の Cr マッピング

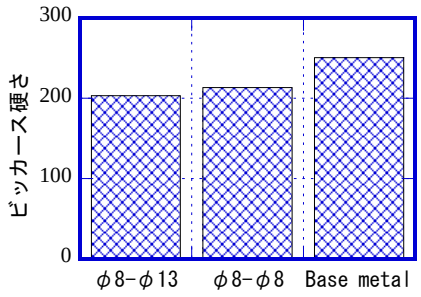



図 19　接合界面付近 SUS 軟化部の硬さ

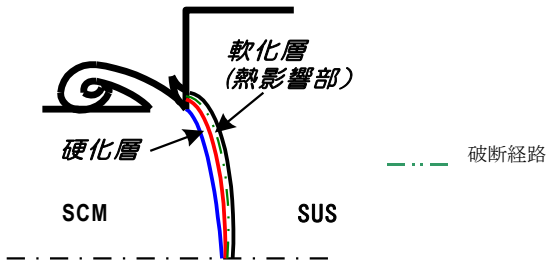



図 20　φ8－φ13　異径の場合の破断経路

接合界面にはマルテンサイト相が生成されていると考えられる硬化層と、接合時の熱影響による SUS の軟化層が生成している。また、接合界面は硬い SCM が凸、SUS が凹の形状になっており SUS 側に食い込んでいる。破断経路である SUS の軟化層も径の大きい SUS 側に食い込んだ形状であるため、破断面積はφ8 の SCM の断面積よりも大きくなっており、強度の上昇に寄与していると考えられる。

## 5. 結　　言

（1）SCM415 と SUS303 の異材の接合に摩擦圧接を適用した結果、良好な継ぎ手を得ることが出来た。φ8 同径の接合では十分なアプセット寄り代が生じる条件で、600MPa 程度の引張強さを示した。

（2）アプセット寄り代が増加するに従い接合強度は増大し、ある値に達すると接合強度は飽和し、若干減少する傾向を示す。アプセット寄り代を管理することで接合品質を管理できる。

（３）適切なアプセット寄り代を得るために、接合パラメータをどのように調整すべきかを検討し、いくつかの知見を得た。摩擦過程のパラメータ、アプセット遅れ時間を変化させることで、アプセット寄り代を有効に調整できることが分かった。

（４）φ8SCMーφ13SUS の異径の接合では、接合界面付近に硬化層が出来ること、破断経路となる SUS の熱影響部が SUS の内部の方に湾曲し、破断面積が大きくなることによって、接合強度が向上することが分かった。

**参考文献**

1) (社)溶接学会編，“溶接・接合便覧”，丸善，2003,p444-445.

2) (社)溶接学会編，“溶接・接合便覧”，丸善，2003,p658-659.