

技術論文

長尺パイプ肉盛用摩擦肉盛装置の開発及び肉盛部の耐食性評価

Development of Friction Surfacing Machine for Long Pipe and Evaluation of Corrosion Resistance for Friction Coating



技術開発センター
商品・生産技術開発班主任

木村 健治
Kenji Kimura

技術開発センター
事業化開発班班長

吉永 宏
Hiroshi Yoshinaga

技術開発センター
商品・生産技術開発班課長

寺村 敏一
Toshikazu Teramura

要 旨

本研究では、ごみ焼却による発電用ボイラー管の表面処理法として、摩擦肉盛の適用を試みた報告である。ボイラー管の変形を防止するため専用治具を開発し、ボイラー管が変形することなく全周に摩擦肉盛法を適用可能にした。また、長さ5mの実ボイラー管における全周肉盛の可能性を確認した。さらに、実際の環境で問題となる肉盛層の耐食性がMIG溶接法によるものと比較して、優れていることも明らかにした。今後、実際のボイラー管に対する摩擦肉盛法の施工技術が確立すれば、従来の溶接法と比較して、耐久性の大幅な向上が期待出来ることも示唆した。

Synopsis:

We have tried the application of friction surfacing on the boiler tube for the waste power generation plants. The new developed machine was capable of coating onto all surroundings of the boiler tube without deformation. Moreover, the possibility of the surfacing of 5m lengths was confirmed. It was cleared that friction coating has outstanding corrosion resistance compared with the coating by MIG welding. In the future, if the application technology to the boiler tube by friction surfacing process establishes, the durability of boiler tube can be substantially improved compared with conventional welding method.

1. 緒言

ごみ焼却時に発生するダイオキシンは、ごみ焼却場の周辺に土壤汚染を引き起こし、環境のみならず人体へも悪影響を及ぼす。最近、ダイオキシン類を防止するために、設備のごみ焼却温度を800℃以上にする操業が義務づけられ、今後もさらなる高温処理化が進むといわれている。一方、火力発電に頼るわが国のエネルギー事情では、発電で発生するCO₂ガスの地球温暖化が問題になっているが、ごみ焼却によるエネルギーの有効活用が今後ますます重要視されるものと考えられる。

そのため近年、廃棄物の発電施設が増加し、焼却設備における発電効率の向上が進められている。発電効率の高効率化には、ボイラー蒸気の高温・高圧化が必

要である。ボイラー蒸気の高温化は、ガスとメタルの温度を上昇させるため、ボイラー管の外周部における腐食環境がより厳しくなる。

こうした環境のボイラー管における表面処理法には、通常溶融溶接法と溶射法が用いられる^{1,2)}。溶融溶接法では、溶接材料と基材が融解するため、母材成分が溶接金属中に希釈し、溶接材料の本来の特性、特に耐食性を劣化させる。また溶射法は、母材の希釈は少ないが、皮膜中に生成する腐食スケールにより、皮膜が剥離する危険性がある。ボイラー管の使用環境におけるこの二つの課題を同時に解決する方法として、摩擦肉盛法に着目し、その施工技術を開発した。

摩擦肉盛法は、表面処理材を所定の圧力下で高速回転させ、摩擦熱により処理材と基材を、溶かさずに表

面処理材を固相状態のまま基材に圧着し、肉盛層を形成する技術である³⁾。

しかし、パイプの外周面に摩擦肉盛層を形成させるには、幾つかの課題がある。まず機械設備面での課題として、肉盛材の摩擦圧力によるパイプの変形や貫通等が少なく、パイプの軸方向の摩擦肉盛を可能にすること、及びパイプの全周に肉盛層を形成しなければならないため、パイプを円周方向に一定角度で回転させ、肉盛層の軸方向における重ねを可能にすることである。さらに、肉盛層の長さが増加するに伴い、摩擦圧力と摩擦熱の影響によるパイプ軸方向の曲がりが大きくなるため、曲がりを最小限に抑える必要がある。これらをまとめると、摩擦肉盛条件の課題として、一つはパイプの変形を最小限に抑えた状態で、一定の肉厚が確保できる条件を確立することであり、いま一つは肉盛層の軸方向における重ね部位に欠陥が発生し易いため、欠陥の少ない肉盛条件を確立することである。

本報では、上記の課題に対する取り組み内容とその成果を報告する。研究開発の概略は、次のとおりである。まず、既設の摩擦肉盛装置をパイプの肉盛仕様に改造し、つぎに摩擦圧力によるパイプの変形を防ぐための内面治具を開発した。これらを用いてパイプへの摩擦肉盛テストを行い、各肉盛条件が摩擦肉盛層の形状や欠陥有無に及ぼす影響について試験を行い、最適な摩擦肉盛条件を確立した。また、摩擦肉盛層の特性を評価するため、MIG 溶接肉盛層との耐食性の比較を行った。

2. 摩擦肉盛装置および内面治具の開発

2.1 内面治具の開発

2.1.1 内面治具の仕様

摩擦肉盛を内部に空洞がない板状や棒状の基材へ適用した場合、摩擦肉盛時に基材が肉盛材の摩擦圧力及び回転によって動かないように固定さえすれば、摩擦肉盛は可能である。しかし、パイプのように厚みが薄い中空の基材へ摩擦肉盛を適用した場合、肉盛材の摩擦圧力と摩擦熱によってパイプに曲がりや貫通等が発生するため、正常な摩擦肉盛は不可能となる。そこで、その問題を解決するためにパイプ変形防止用の内面治具が必要になる。この内面治具に必要な機能を下記に示す。

- (1) 摩擦圧力(シリンダー圧力：～10MPa)と摩擦熱(接触面温度～1000℃)によるパイプの変形が防止可能であること。
- (2) 摩擦肉盛を施工した後、パイプとの脱着が自在な構造(開閉、伸縮等)になっていること。

上記二つの機能条件を満たす内面治具として、軸部にネジが付いたクサビ方式の特殊な器具を開発して、良好な摩擦肉盛が出来る方式を確立した。

2.1.2 ネジ付きクサビ方式の内面治具の開発

パイプへの摩擦肉盛を可能にするため、パイプの変形防止用の治具として、軸部にネジが付いたクサビ方式の治具(以下内面治具と記す)を設計・製作した。Fig.1 に内面治具の概略図を示す。

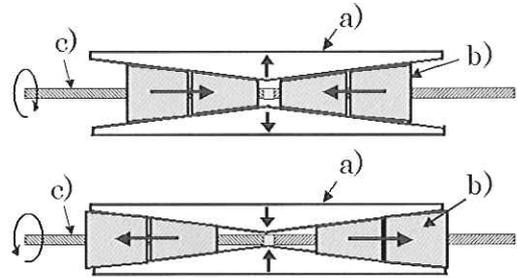


Fig. 1 Schematic illustration of screw and wedge type tool: a) Back support tool, b) Taper tool, c) Screw shaft

Fig.1 内面治具の構成は、a)：裏当金物と b)：押上用テーパ金具、c)：押上用ネジ軸である。内面治具の基本動作は、押上用ネジ軸 c)を回転することで押上用テーパ金具 b)が左右に移動する。押上用テーパ金具 b)が移動することで裏当金物 a)が上下移動し開閉する。摩擦肉盛時は、裏当金物 a)を最大限に開状態にすることで、摩擦圧力によるパイプの変形を防ぎ、肉盛後は裏当金物 a)を限界まで閉状態にすることで、パイプとの着脱を可能にする。また、押当金物 a)の変形防止機能を確実にするため、押上用ネジ軸 c)の回転をサーボモーターでトルク制御を行う。Fig.2 に内面治具を使用したパイプへの摩擦肉盛の概略図を示す。Fig.2 に示すように、内面治具を使用することでパイプへの摩擦肉盛が可能になった。

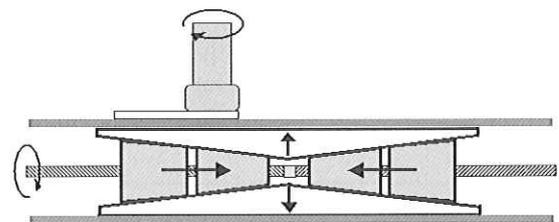


Fig.2 Schematic illustration of friction surfacing with screw and wedge type tool

2.2 長尺パイプ用摩擦肉盛装置の開発

2.2.1 パイプへの摩擦肉盛技術の確立

パイプの外周面へ摩擦肉盛を行うため、2-1-2 項で説明した内面治具をパイプ内側に設置し、パイプを摩擦肉盛装置に固定した。パイプの固定は油圧式チャックを用いて、肉盛範囲(400mm)の両端を固定した。

また、摩擦圧力によるパイプの長手方向の曲がりを抑制するため、パイプを肉盛側とは逆の底面から支える必要がある。そのため、エアシリンダーで駆動するクサビ型の荷重受けを設置した。

Fig.3 に上記の摩擦肉盛装置における各部位の写真を示す。この装置を備えることでパイプへの摩擦肉盛が可能になった。Fig.4 にパイプの摩擦肉盛層における外観状況を示す。Fig.4 で示すように、パイプに曲がりが発生させずにビード幅の約 20mm 程度の肉盛が可能であることを確認した。

また、肉盛層のパイプ断面を調査した結果、パイプ内面側は、殆ど変形していなかった。

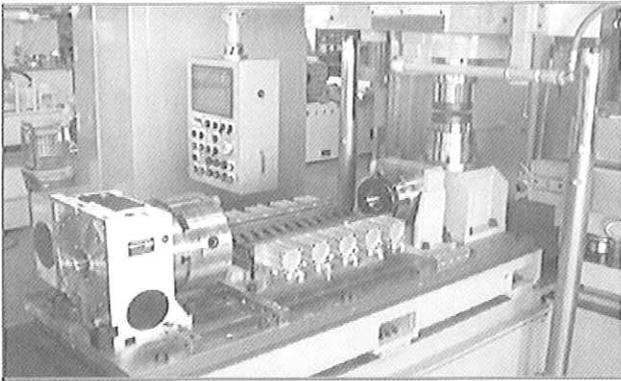


Fig. 3 Appearance of friction surfacing machine

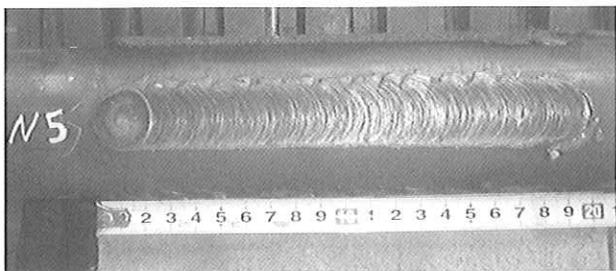


Fig.4 Appearance of friction surfacing for steel pipe substrate

2. 2. 2 パイプ全周への摩擦肉盛技術の確立

パイプ全周への摩擦肉盛を行うため、肉盛の 1 パス毎にパイプを一定角度で回転させた状態で円周方向に摩擦肉盛層を重ねる必要がある。パイプの回転は、パイプを固定するチャックの片側に付いた回転装置を用いて行った。実際に肉盛層の重ねを同じ方向に行っていくと、パイプに曲がりが発生し、肉盛層を重ねる毎に曲がりが増大し、終に摩擦肉盛が不可能となる。この原因は、1 パスの肉盛層でも僅かな曲がりが発生するためである。そこで、摩擦肉盛 1 パス後の重ね肉盛を行う前に、パイプ断面を 180° 逆側に摩擦肉盛して、パイプの曲がりやを相殺することにより、パイプに曲がりやを発生させずにパイプ全周の摩擦肉盛をすることを可能にした。Fig.5 にパイプ全周を摩擦肉盛した外観写真を示す。Fig.5 は、パイプへ長さ 400mm 範囲の全周を肉盛するために、16 パスの摩擦肉盛を行ったものである。

その結果、パイプに曲がりやを発生させずに全周の摩擦肉盛が可能であることを実証した。

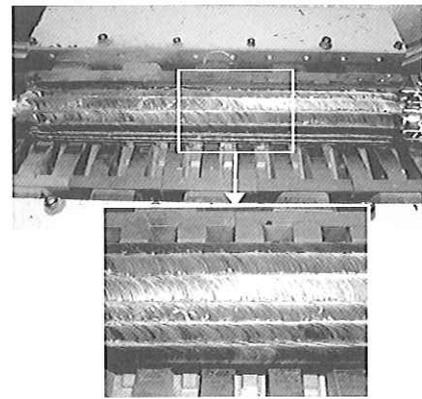


Fig. 5 Appearance of friction surfacing for steel pipe substrate

2. 2. 3 長尺範囲の摩擦肉盛技術の確立

Fig.5 に示すように、パイプ全周の摩擦肉盛を終了した後、パイプを長手方向に移動して、未肉盛部位において全周の摩擦肉盛を行った。パイプの移動は、摩擦肉盛装置のプログラム制御により、自動的に行った。長さが 400mm の定尺範囲におけるパイプ全周の摩擦肉盛とパイプの移動を交互に繰返すことで、長さが 5m のパイプ全周の摩擦肉盛が可能となる。長尺のパイプには全周肉盛を 3 回繰返し行い、その外観写真を Fig.6 に示す。

この結果、パイプの長手方向に肉盛を繰返し行っても、曲がり等が発生しないことを確認した。したがって、曲がり等がなく、数 m の長尺パイプへの全周摩擦肉盛が可能であると考えられる。

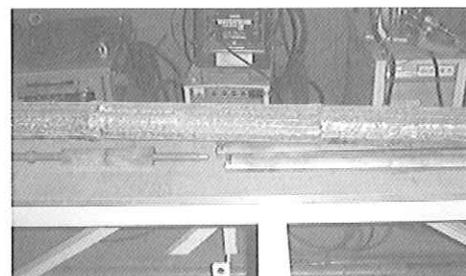


Fig.6 Appearance of friction surfacing for steel pipe substrate

2. 2. 4 使用後の肉盛材に対する再利用法の確立

試験に用いた肉盛材の長さは、肉盛条件によって多少異なるが、肉盛距離に比例して短くなる。Fig.7 に肉盛前後の肉盛材の外観写真を示す。Fig.7 で左側が使用前、右側が使用後の肉盛材である。使用後の肉盛材を再利用するため、使用後の肉盛材同士を摩擦圧接により接合して、肉盛に再使用することを考えた。このため、装置本体の基材固定側に、圧接用のクランプ機構を追加設置し、肉盛材の回転側には、肉盛用の主軸チャックを使用した。さらに圧接後の肉盛材に発生したバリを切削処理するため、専用の切削機構を追加設置した。

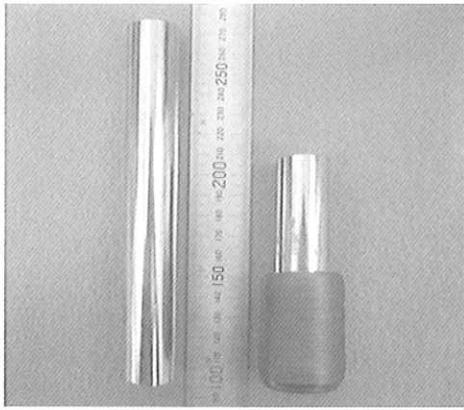


Fig. 7 Appearance of friction coating material

Fig.8 に肉盛材の摩擦圧接中における写真を示す。摩擦圧接により接合した肉盛材を摩擦肉盛に用いても、曲がり等の問題は発生しないことを確認した。この結果、摩擦肉盛材の歩留は、飛躍的に向上し、パイプの摩擦肉盛に対する実操業の目処が得られた。

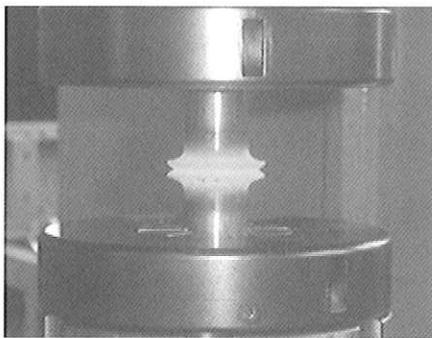


Fig. 8 Appearance of friction bonding

3. 摩擦肉盛条件の確認試験

長尺パイプへの最適施工条件を確立するため、本装置と内面治具を用いて、摩擦肉盛試験を行い、摩擦圧力、回転数、送り速度等の施工条件と肉盛形状との関係について確認試験を実施した。ここで送り速度とは、肉盛時の基材の移動速度を意味する。供試材には、肉盛材に Inconel 625 を、基材に STB340 (φ 63.5×5t×1000L)パイプを用いた。

3.1 摩擦圧力と肉盛形状との関係

摩擦圧力と肉盛形状との関係を試験するため、摩擦圧力 4.5~6 MPa の範囲で変化させた場合の摩擦肉盛形状を調査した。回転数、送り速度等のその他の条件は一定にした。

Fig.9 に摩擦圧力を変化させたときの肉盛層の外観写真を示す。摩擦圧力の増加に伴って肉盛ビード幅が増加する傾向を示した。摩擦圧力 4.5 MPa の条件では、肉盛開始位置から徐々にビード幅が狭くなり、そのため均一なビード幅を維持するために、摩擦圧力を高くする必要のあることが分かった。

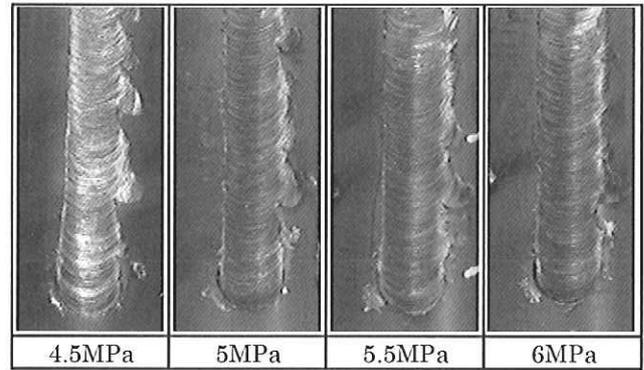


Fig.9 Photos showing relation between appearances of friction coating and friction pressure

摩擦圧力による肉盛厚さの変化を試験した結果を Fig.10 に示す。ここで、肉盛層の肉厚測定は、肉盛層の中心で行った。肉盛層の厚みは、左右で多少異なり、Fig.9 に示す肉盛層の右側が厚く、左側が薄くなる傾向がある。

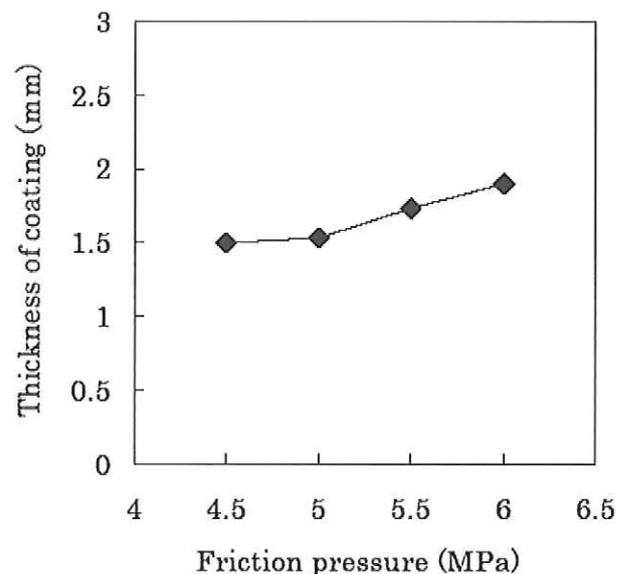


Fig.10 Relation between friction pressure and coating thickness

肉厚の測定結果より、摩擦圧力の増加とともに肉盛厚さが増加する傾向が認められた。これは肉盛時に測定した肉盛材の消費量のデータとよく一致しており、摩擦圧力を上昇させると、肉盛材の消費量が増加するので、これに伴い肉厚も増加したと考えられる。

次に摩擦圧力による肉盛層の硬さ変化を試験した結果を Fig.11 に示す。ここでは、肉盛層の断面中央部の硬さを、肉盛層側より基材に向かって測定した。各肉盛層は肉盛層と基材の境界部付近で最高硬さを示した。逆に、肉盛層の内部は、硬さが低下する傾向がある。また、摩擦圧力差による肉盛層の硬さ変化は、認められなかった。

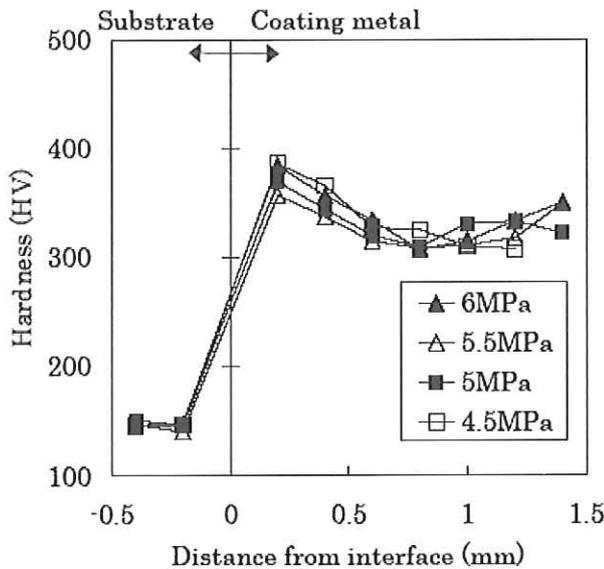


Fig.11 Relation between hardness distributions and friction pressure

3.2 回転数と肉盛形状との関係

回転数と肉盛形状との関係を調査するため、回転数を 200~350rpm の範囲で変化させた摩擦肉盛試験を行った。回転数が 200rpm 程度のレベルでは摩擦熱が足りず肉盛材が基材を削るようになり、肉盛が不可能であった。Fig.12 に回転数を変化させたときの肉盛層の外観写真を示す。回転数が最も大きい 340rpm では、肉盛層の表面形状が途中から変化して幅が狭くなり、明らかに厚みが薄くなること外観から分かった。

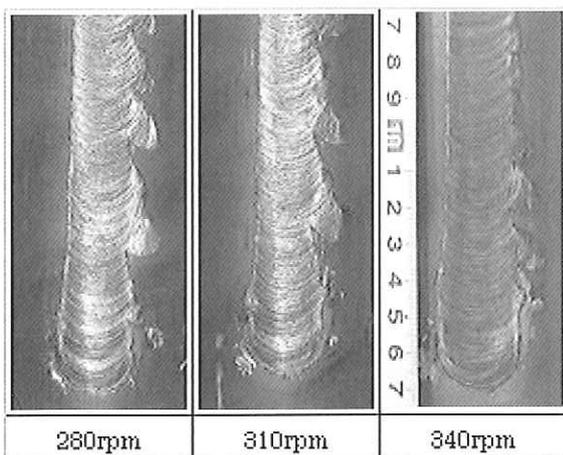


Fig.12 Photos showing relation between appearances of friction coating and rotation speed

回転数による肉盛厚さの変化を試験した結果を Fig.13 に示す。回転数の増加にともなって肉盛厚さが減少する傾向が認められた。これは、肉盛時に測定した肉盛材の消費量のデータとよく一致しており、回転数を増していくと、肉盛材の消費量が減少することを確認した。

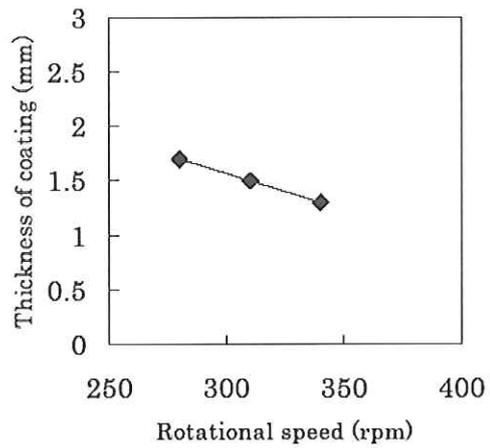


Fig.13 Relation between rotational speed and coating thickness

Fig.14 に肉盛断面部の硬さ分布を示す。各肉盛層の硬さ分布は Fig.11 と同様に、境界部付近で最高硬さを示している。回転数が増加すると、硬さが低下する傾向があり、回転数の低い 280rpm では、肉盛層の硬さが HV400 を示した。

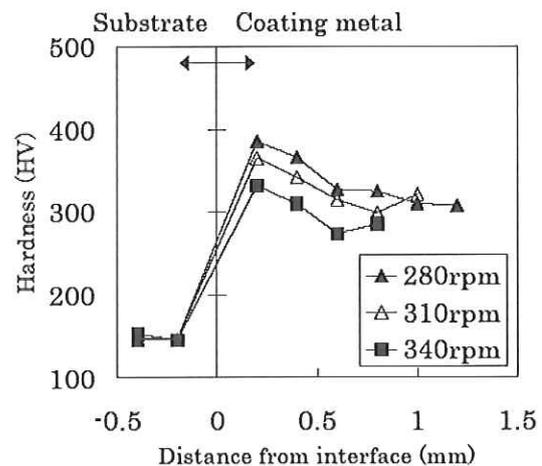


Fig.14 Relation between hardness distributions and rotational speed

3.1.3 送り速度と肉盛形状との関係

送り速度と肉盛形状との関係を調査するため、送り速度を 1.5~2.6mm/s の範囲で変化させた場合の摩擦肉盛試験を行った。

Fig.15 に送り速度を変化させたときの肉盛層の外観写真を示す。Fig.15 より肉盛層の幅は、送り速度の上昇に伴い狭くなる傾向があることが判明した。送り速度による肉盛層の厚さ変化を試験した結果を Fig.16 に示す。送り速度の低下に伴い肉盛層の厚さが増加する傾向のあることを確認した。これは、肉盛時に測定した肉盛材の消費量のデータとよく一致しており、送り速度を低下させるとともに、肉盛材の消費量が増加することを確認した。

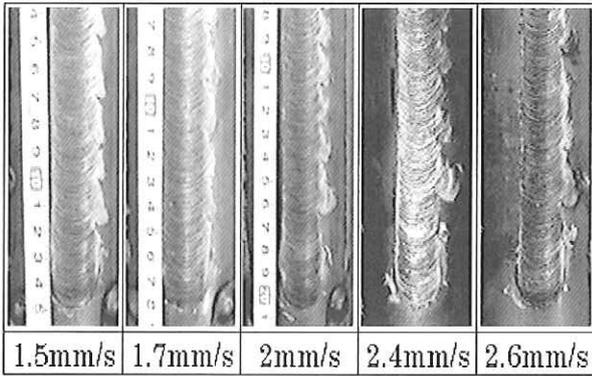


Fig.15 Photos showing relation between appearances of friction coating and traverse speed

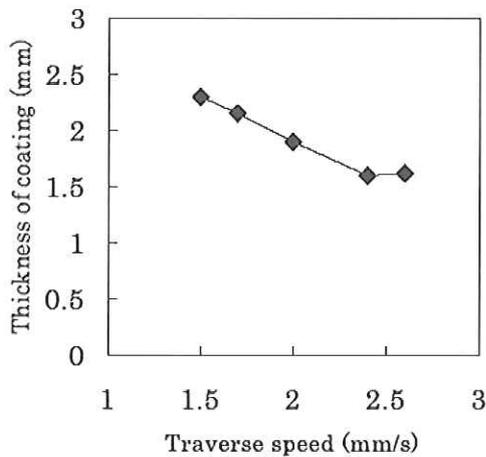


Fig.16 Relation between traverse speed and coating thickness

Fig.17 に肉盛層断面の硬さ分布を示す。各肉盛層の硬さ分布は、Fig.11 の結果と同様に、境界部付近で最高硬さを示している。送り速度の変化による肉盛層の硬さ変化は認められなかった。

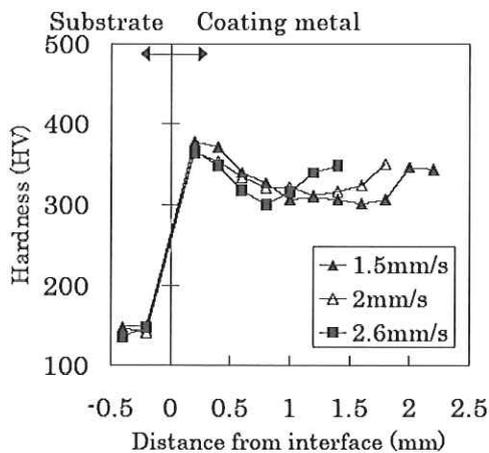


Fig.17 Relation between hardness distributions and traverse speed

4. 摩擦肉盛層の耐食性

Inconel 625 の摩擦肉盛層の耐食性を評価するため、腐食液による浸漬試験を行った。比較材として、Inconel 625 の MIG 溶接による肉盛層と摩擦肉盛で使用した Inconel 625 の肉盛材を用いた。試験片は腐食液による基材側の腐食を防ぐため、肉盛層の表面が露出するように樹脂で埋め込んだ。また、肉盛層の厚みは約 2mm とした。腐食液の王水中で 1~5 時間の浸漬試験を行い、腐食減量の測定と外観を観察した。

腐食減量の測定結果を Fig.18 に示す。摩擦肉盛層の腐食減量は、1~5 時間経過後もほとんど変化せず、その腐食量はごく僅かであった。

一方、MIG 溶接肉盛層の腐食減量は、時間の経過とともに増加し、4 時間経過した時点で肉盛層がすべて溶出した。また、摩擦肉盛層の腐食減量は、肉盛材とほぼ同じ程度であった。

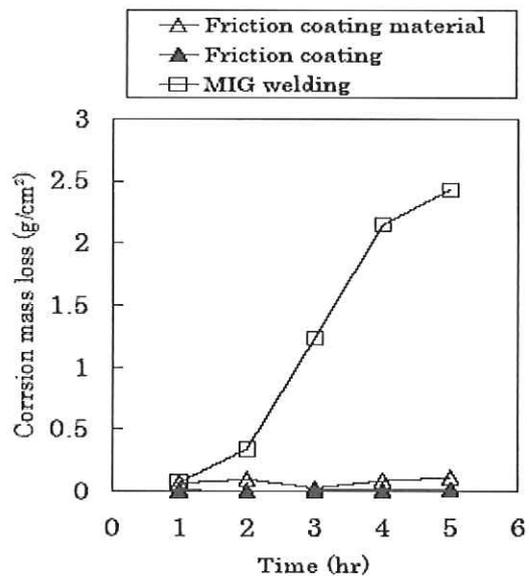


Fig. 18 Results of corrosion test

Fig.19 に 2hrs 腐食後の外観状況を示す。摩擦肉盛層は、腐食後でも平滑な表面を維持しているが、MIG 溶接肉盛層の表面には、腐食による凹凸が確認された。

また、肉盛材には多数の孔食が観察された。腐食挙動に及ぼす材料因子として、結晶粒度の差異、不純物元素、あるいは偏析等が挙げられる。溶融と凝固を伴う MIG 溶接による肉盛層は、基材成分の希釈により、溶接金属組成の変化や凝固組織中の偏析が発生するため、溶接材料の耐食性は、より劣化してしまう。

一方、摩擦肉盛部は、固相プロセスのため、基材成分からの希釈がなく、凝固を伴わないため、偏析がなく、均一な組織を有する。

また、摩擦肉盛層は肉盛材と同等の耐食性、もしくは肉盛材より微細組織を有することから、肉盛材より耐食性が有利な場合もあることが考えられる。

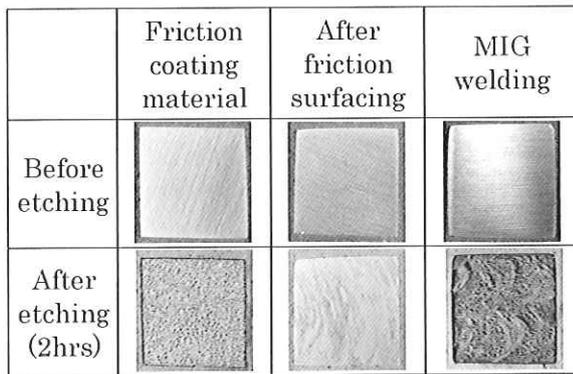


Fig.19 Photos showing effect of surfacing methods on corrosion resistance

5. 結言

本報では、摩擦肉盛法を適用してボイラー管の表面処理をするために、摩擦肉盛装置、及びパイプの変形を防止する内面治具を開発した。これらを用いてパイプの摩擦肉盛試験を行い、肉盛層の形状に及ぼす肉盛条件の影響を試験した。また、肉盛部の耐食性に関して摩擦肉盛と MIG 溶接との比較評価を行った。得られた研究成果の要約を以下に示す。

- 1) 開発した摩擦肉盛装置とネジ付きクサビ方式の内面治具を使用することで、曲がり等の変形が発生せずパイプへの摩擦肉盛が可能にした。さらに、長尺パイプへの全周肉盛も可能にした。

- 2) 摩擦圧力の増加にともない、肉盛厚さが増加する傾向があることを明らかにした。また、回転数及び送り速度の減少にともない、肉盛厚さが増加する傾向があることも明らかにした。
- 3) MIG 溶接と比較して摩擦肉盛層には希釈がないこと、及び均一かつ微細組織を有することから、摩擦肉盛層の耐食性は MIG 溶接による肉盛層より格段に優れていることを実証した。

6. 謝辞

本研究は、九州経済産業局より交付された戦略的基盤技術高度化支援事業の一環で行ったものです。ここに改めて、御支援と御協力を頂いた九州経済産業局殿と財団法人北九州産業学術推進機構殿へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 河村太一朗、木下利哉：フジコー技報 No.11 (2003) 51
- 2) 尾崎龍広、古田博昭：フジコー技報 No.12 (2004) 37
- 3) 坂田太志、山下哲司、園田晃大：フジコー技報 No.11 (2003) 47
- 4) 河村太一朗、園田晃大、山下哲司：フジコー技報 No.13 (2005) 50