

石炭火力発電用パネル式ボイラ水冷壁管の補修のための タンデム研削の開発

○土屋俊一^{*1}, ニノ宮進一^{*1}, 白石陽一^{*2}

Development of tandem grinding method for water-cooled-wall pipes of coal fired power generation

Shunichi TSUCHIYA, Shinichi NINOMIYA, Youichi SHIRAIISHI

Keywords: tandem grinding, form grinding, coal fired boiler, pipe of water wall, maintenance by hard facing

1. 緒言

石炭火力発電の主流である超々臨界圧ボイラには、複数の熱交換機用鋼管を並列溶接したパネル式水冷壁管が使用されている^{1,2)}。この水冷壁管は、常に高温高压の過酷な条件(593℃, 24MPa 以上)になるので、稼働に伴って水冷壁管の表層面に高温硫化腐食や溝状腐食が発生する場合がある。水冷壁管が破損した場合のメンテナンス費用が極めて大きいので、管が破孔する致命傷になる前に定期的な補修や交換が必要となる。この対応策として、早期腐食時に現地で肉盛溶接補修をする技術が着目されている(図1)。しかしながら、肉盛溶接前に腐食箇所全体を機械的に除去しなければならず、水冷壁管の形状が特殊で、かつ、対象面積が非常に広いので、プラントの内部において水冷壁管の燃焼面側の表層だけを均一に除去することは容易ではない。

そこで著者らは、回転方向の異なる2つのグラインダに取り付けた砥石を管に沿って掃引する「タンデム研削法(複列砥石研削法)」を考案した。本研究では、開発したタンデム研削法の基本加工特性を調査するとともに、本加工法の実用化に向け、パネル式水冷壁管の表層部除去を模擬した炭素鋼管の研削除去実験を行った。

2. パネル式水冷壁管のタンデム研削の提案

2.1 タンデム研削法の概要

パネル式水冷壁管の断面形状を図2(a)に示す。ボイラ給水が流れる管は、燃焼側(火炉側)に面した片面表層面に灰の付着や腐食が生じる時がある。この管表層部を効率良く研削除去するために考案したタンデム研削法(図2(b))は、回転方向の異なる砥石をタンデム配置して、管の稜線上の2カ所を同時に圧力研削する方法である。各砥石の水平研削抵抗を垂直研削力に付加できること、管を2点拘束して加工するので、現地で設置する装置の剛性不足を解消することが特徴である。砥石間の幅を変更して複数回掃引することで、所望形

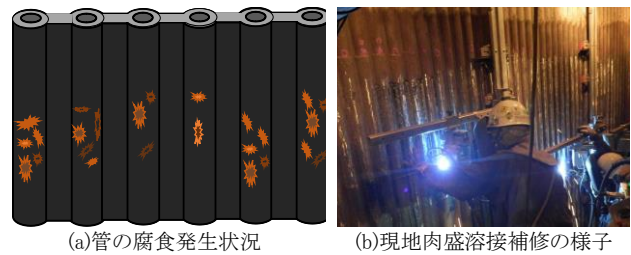


図1 現地補修の様子と腐食状態の模式図

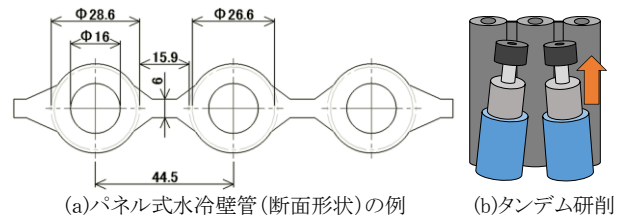


図2 水冷壁パネル形状とタンデム研削法の模式図

表1 仮想タンデム研削条件

砥石	インターナル砥石 A36 (φ38mm×L20mm)
被削材	STBA24:ボイラ・熱交換器用合金鋼鋼管 STKM13A:機械構造用炭素鋼鋼管 S30C:機械構造用炭素鋼丸棒 (いずれも径と長さ:φ28mm×L1000mm)
仮想タンデム研削条件	汎用2次元CAD:図脳 rapid17, 加工箇所:溶接部を除いた管片側部(1/3 円のみ), 設定加工量:管外周より1mm厚みを除去, 砥石軌跡(研削稜線):3, 5, 7 箇所, 砥石配置の基準(角度等分 or 間隔等分)

状・厚さで腐食層除去ができる。

2.2 水冷壁管のタンデム研削シミュレーション

水冷壁管片側の半円筒表面をタンデム研削した場合の加工後の断面形状を把握するため、CADソフト上で仮想除去した状態からカスプ高さを調べた(表1)。カスプ高さは、砥石径と加工ピッチ(今回は等分数)によって決定される。φ38mmの砥石を2個配置したタンデム研削を想定し、溶接箇所を除く管の半円に対して、最上部を含めて3, 5, 7 箇所の研削稜線

*1 日本工業大学: 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1 NIPPON INSTITUTE OF TECHNOLOGY

*2 株式会社 ウェルディングアロイズ・ジャパン
〒346-0101 埼玉県久喜市菖蒲町昭和沼24-1
Welding Alloys Japan Ltd.

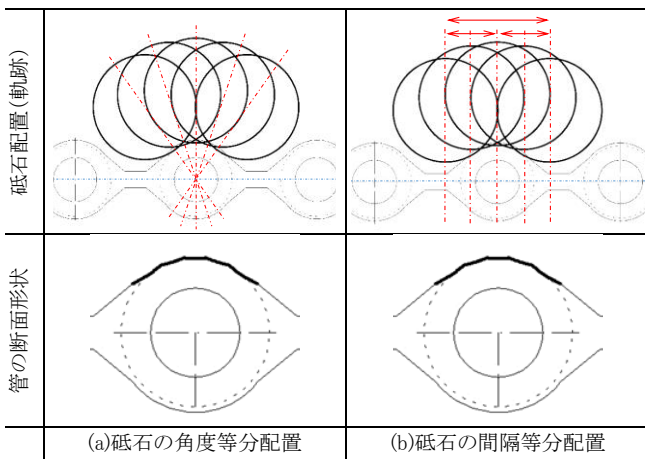


図3 研削稜線 5 箇所にてタンデム研削した後の管形状

を除去した。加工深さは、半径方向に $a=1\text{mm}$ および $a=2\text{mm}$ とした。タンデム研削では、管の長手方向に砥石を複数回掃引して形状創成されるが、この場合、2つの砥石間隔を調整することで加工位置が決定されるため、管中心に対して角度基準で等分する方法に加え、間隔基準で等分する方法でも調査した。図3は研削稜線 5 箇所にて仮想タンデム研削した管の断面形状の例である。それぞれの砥石配置で研削稜線を 3~7 箇所としてタンデム研削した後のカスプ高さを図4に示す。研削稜線(加工回数)が増加するにつれて、加工ピッチが小さくなるので、加工後の形状精度は向上し、カスプ高さは砥石配置を間隔等分しても、 $a=2\text{mm}$ の稜線 5 箇所以上で 0.2mm 以下になることがわかった。

3. 単砥石による水冷管の研削実験

3.1 単砥石による研削作用力の測定

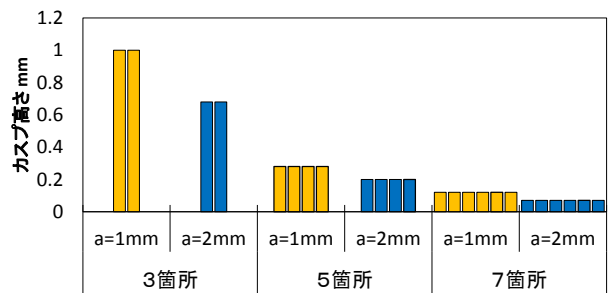
発電ボイラ用合金鋼鋼管は、火 STBA 21 等が利用されているが、入手が非常に困難なので、ボイラ・熱交換器用合金鋼鋼管 STBA24 と、機械構造用炭素鋼鋼管 STKM13A および S30C 丸棒を研削して、予めそれぞれの研削特性(研削抵抗、研削能率等)を比較し、大きな加工特性の差が無いことを確認した。そこで、以降の実験では、STKM13A または S30C でタンデム研削の基本特性を調査した。

単砥石による実験では、正回転グラインダで被削材円筒外周の一部を研削し、被削材に加わる作用力を3分力動力計で測定した(図5)。実験の簡便化のため、小型汎用フライス盤のテーブル上に被削材を設置して、外部から自重をコントロールできる治具を介してグラインダを取り付けた。表2に実験条件を示す。加工に作用する力は、円筒被削材外周での砥石位置によって異なるので、水平方向と垂直方向の作用力を実験的に求めた。

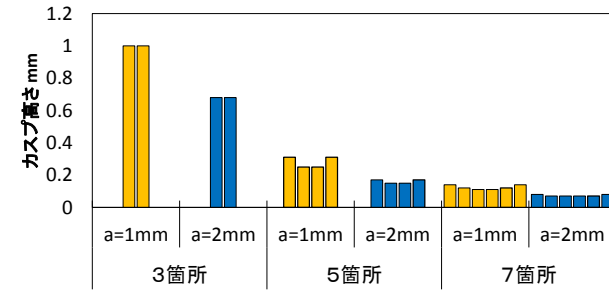
砥石無回転時の場合の水平方向の作用力 F_q は、自重による垂直押付力 mg 、砥石設置角度を θ とした場合、以下の式で求められる。

$$F_q = mg \cdot \tan\theta \dots \dots \dots (1)$$

砥石無回転時 F_q の計算値および設定垂直荷重(重力) mg



(a)砥石の角度等分配置



(b)砥石の間隔等分配置

図4 各砥石配置準による加工箇所とカスプ高さの関係

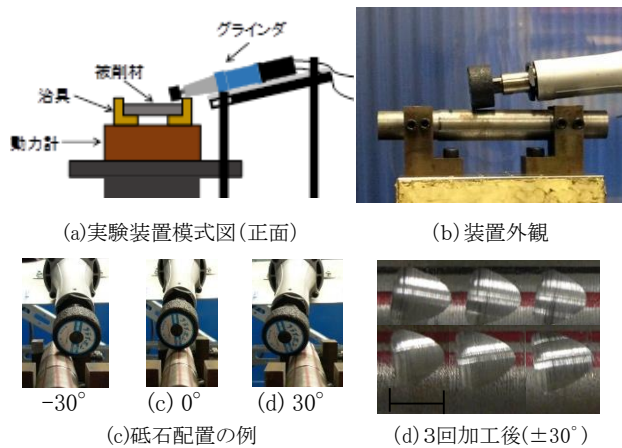


図5 単砥石による研削実験の模式図と状況

表2 単砥石による研削実験条件

実験装置	ストレート式グラインダ GP4SA(日立工機)
使用砥石	軸付砥石 WA60P(φ25×25mm, 軸径 6mm)
被削材	S30C(φ30×L200~1000mm)
加工条件	N=24000rpm, 押付力:11.8N, 研削時間:30 秒間 研削方法:グラインダ 1 台で自重により研削

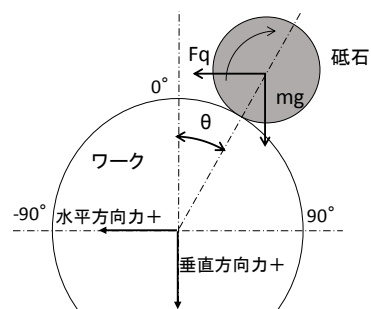
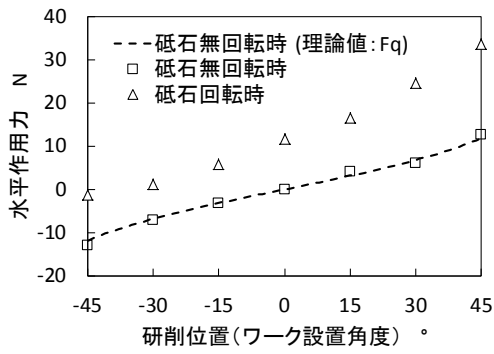
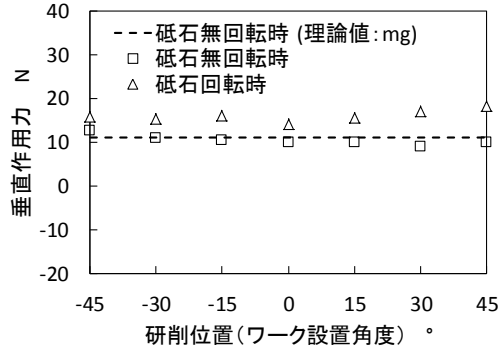


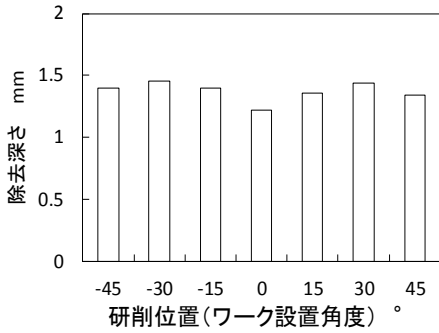
図6 単砥石による研削時の作用力



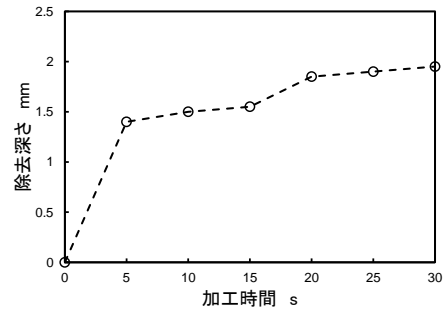
(a) 水平方向への作用力(mg=11.8N)



(b) 垂直方向への作用力(mg=11.8N)



(c) 除去深さ(mg=11.8N)



(d) 除去深さの推移(研削位置 0°, mg=13.7N)

図7 単砥石による研削作用力および除去深さの測定結果(加工時間 30s)

を理論値として、実際に $mg=11.8N$ に設定して被削材円周上の各位置で作用力を求めた結果を図7に示す。砥石無回転時での静的な作用力に対して、研削時(砥石回転時)には、水平・垂直ともに動的な作用力が増大した(図7(a), (b))。砥石回転時の値から無回転時の値を引いたものが、研削で増加した作用力となる。また、水平方向では、被削材の中心位置(0°)を境に、作用力の正負が逆転するため、タンデム研削では、正回転と逆回転の両方の砥石回転を持つグラインダを複列配置することで水平作用力が釣り合い、左右対称に安定した加工ができると期待される。

3.2 単砥石による除去深さ

それぞれの研削位置における 30 秒加工後の最大除去深さ(図7(c))をみると、いずれの箇所でも 1.2~1.4mm の範囲に収れんしていることがわかった。また、研削位置 0°にて、 $mg=13.7N$ として 5 秒毎に除去深さを測定した結果を図7(d)に示す。除去深さは 5 秒以内の加工初期で 1.5mm 程度まで達しており、その後、緩やかに加工が進行するものの 20 秒経過後にはこれ以上加工は進まないことがわかった。対象となる被削材が管であるため、過剰に加工する人為的なミスで破孔をさせることは避けたいが、このようにタンデム研削では加工時間に伴って自動的に深さが制限されるので好都合である。さらに、砥石の設置高さや位置を計測してモニタリングすることで、ある程度の加工の進行状況が確認できる。タンデム研削法の実用化に向けて、砥石径や被削材径に応じた送り速度と除去量の関係を明確にするとともに、データ収集することが必要である。



図8 タンデム研削実験装置の外観

表3 正・逆回転砥石によるタンデム研削実験条件

実験装置	ストレート式グラインダ GP4SA(日立工機) ・正回転タイプ ・逆回転タイプ(特殊試作)
使用砥石	軸付砥石 WA60P(φ25×25mm, 軸径 6mm)
被削材	S30C(φ30×L200~1000mm), STKM13A(φ28×L200~1000mm)
加工条件	N=24000rpm, 押付力:22.5N, 研削時間:30 秒間 研削方法:グラインダ 2 台で自重により研削

4. 正・逆回転グラインダによるタンデム研削実験

4.1 基本タンデム研削特性の調査

正回転と逆回転のグラインダを 1 本ずつ左右に対峙させて取り付け、タンデム研削を行った。タンデム研削実験装置の外観を図8に、実験条件を表3に示す。逆回転グラインダでは、配線を入れ替え、砥石の脱落を防止するために砥石軸と主軸を止めねじで固定した。グラインダが2台なので、垂直方向

の初期押付力を $mg=22.5N$ とした。

砥石位置(研削位置)を $\pm 30^\circ$ として、S30C をタンデム研削している様子を図9に示す。回転方向の異なる砥石で研削しているため、加工火花が両砥石の間から均等に発生している。タンデム研削による研削作用力と除去深さの結果を図10に示す。砥石無回転時には、両者の水平方向作用力がバランスして、垂直方向($mg=22.5N$)のみに作用力が生じている。砥石回転時(タンデム研削時)では、水平方向の作用力が現れたが非常に小さく抑制されている。つまり、図7(a)に示した単砥石での研削時の水平方向の作用力は25Nであったが、タンデム研削では5N以下になった。一方、タンデム研削時の垂直方向の作用力は2倍に増大した。単砥石で研削した場合の垂直方向作用力(図7(b))の増加率に比べて大きい。したがって、タンデム研削では、水平方向の作用力を垂直方向に付加した加工が行えていることがわかった。

タンデム研削後の除去深さは、どちらの研削位置でも1.2~1.4mmとほぼ等しく、この結果は、単砥石による除去深さの結果(図7(c))と比較しても大きな差はなかった。

4.2 砥石送りを付与した STKM13A のタンデム研削

STKM13A の炭素鋼鋼管を用いて、研削距離100mmを砥石送り速度 $V_w=100\text{mm/min}$ と、 $V_w=200\text{mm/min}$ でタンデム研削した。各送り速度で研削した後の鋼管の性状を図11に示す。加工前のSTKM13Aの表面には黒皮が付いている状態であったが、問題なく加工できることを確認した。また、送りが遅い方が若干除去深さが深いことがわかった。今後、さらに詳細な実験を継続していく予定である。

5. おわりに

火力発電用ボイラに用いられる大面積パネル式水冷壁管の現地メンテナンスを対象として、管の片側だけを現地で効率良く加工するタンデム研削法を考案し、基本的な研削特性を調査した。その結果、タンデム研削によって砥石回転軸に対して生じる水平方向作用力がバランスして、かつ垂直作用力に付加されることを明らかにした。現地で研削装置を組み付ける必要があるが、タンデム研削では、砥石が管の2点で拘束されるため、装置の剛性不足を補えるとともに、安定した加工が実現できることがわかった。

なお、両方の砥石による加工状況をモニタリングするために、砥石主軸の消費電力を同時に測定して、リアルタイムに加工状況を評価するシステムを構築している。現在は、自動送り機構等を搭載したタンデム研削装置(図12)を試作して、現地メンテナンスでの実用化に向けた取り組みを実施している。

6. 参考文献

- 1)例えば、経済産業省 HP: <http://www.meti.go.jp/policy/>
- 2)例えば、電源開発 HP: <http://www.jpowers.co.jp>



図9 S30Cのタンデム研削の外観($\pm 30^\circ$)

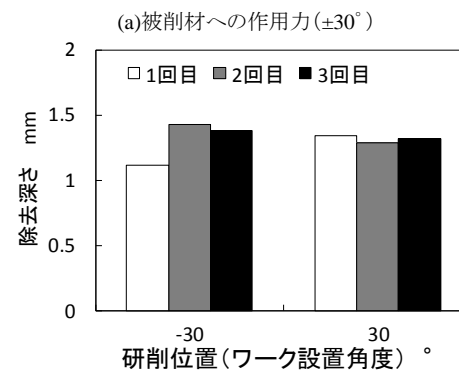
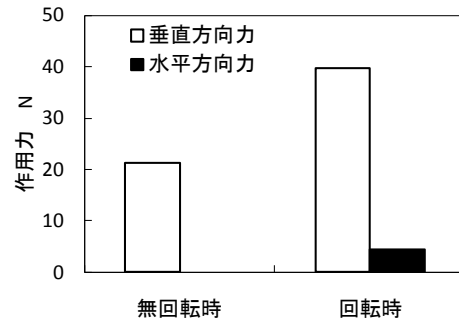


図10 タンデム研削による研削作用力と除去深さ (S30C, 加工時間30s)

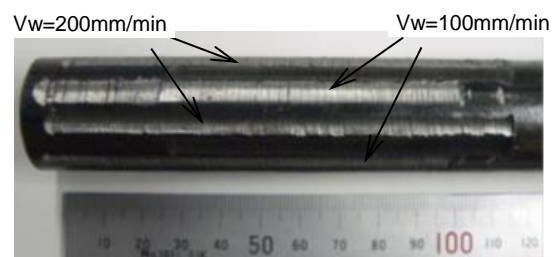


図11 砥石送りを付与したタンデム研削結果 (STKM13A, 砥石位置: $\pm 30^\circ$, $V_w=100$ or 200mm/min)

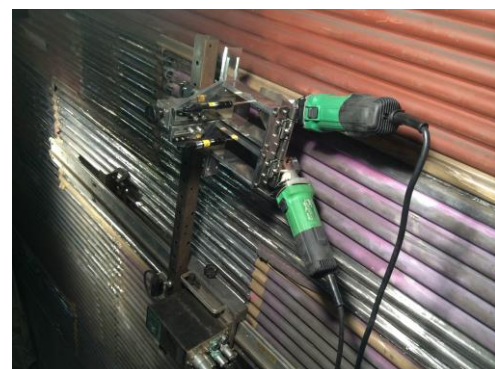


図12 現地メンテナンス用タンデム研削装置の外観