

繊維強化複合金属の熱間摩耗特性と熱間圧延特性

Characteristics of Wear and Rolling on Fiber Reinforced Metal at High Temperature

井上 剛*
Tsuyoshi INOUE

内田 秀
Shigeru UCHIDA

小川 茂
Shigeru OGAWA

抄 録

ハイス鋼にアルミナ繊維を添加した新ロール材（FRM ロール材）が熱間圧延用ロールとして適用可能かどうか調査した。FRM ロール材にはセラミック添加量を増やしても、韌性などの機械的性質を低下させずに耐摩耗性等のトライボロジー特性を向上させる特性が期待されている。セラミック添加量を増やすため焼結法で製造された FRM ロール材の耐摩耗性と圧延特性と機械的性質について実験室レベルの装置で調査した結果、耐摩耗性は鋳造ハイスロール材の3倍以上、圧延荷重や摩擦係数は鋳造ハイス材よりも若干低減すること、耐熱衝撃性や引張強度は鋳造ハイスロール材よりも同等以上の性能を有していることが明らかになった。これらのことから考案した FRM ロール材は熱間圧延ロールに適用できる可能性が十分にあると考えられる。

Abstract

Possibility of applying new roll materials (FRM roll materials), which are consisted of high speed tool steel reinforced with alumina fiber, to work rolls for hot rolling process is investigated by several laboratory tests. The FRM roll material expected to have superior tribological and mechanical properties, have been manufactured using sintering method (Hot Isostatic Pressing process) with which ceramic content can be increased. Wear resistance and mechanical properties and hot rolling characteristics of the materials were investigated, and the FRM roll material was found to have three times or more wear resistance, a little lower rolling force and friction coefficient, and same or more thermal crack resistance and higher tensile strength in comparison with high speed tool cast steels. Therefore, FRM roll materials are expected to be used for hot rolling as high performance roll materials instead of high speed tool steel.

1. 緒 言

鉄鋼製造プロセスにおける熱間圧延工程の更なる生産性向上や高強度製品の生産量増加にともなって、熱間圧延ロールに対する一層の耐摩耗性、耐焼付き性、耐肌荒れ性および耐事故性などの性能の向上が求められている。現在、熱間圧延用ロールとして使用されているのは、高硬度の MC 型炭化物と M_7C_3 型共晶炭化物とを主として晶出させたハイスロール材である。それまで使用されていた高 Cr 鋳鉄ロール材よりも高硬度の炭化物の晶出量が多く、耐摩耗性や耐焼付き性などの優れた性能が確認され、1990 年代初頭の実機導入が開始された。それ以降、操業上顕在化したハイスロール材の種々の課題に対して材質改善や製法見直しを加えながら、現在も熱間仕上圧延の前段および中段で使用され続けている¹⁻⁵⁾。

熱間圧延ロール材のトライボロジー特性を向上させるには、ロール材表面に晶出している炭化物などの硬質相の含有量を増加させることが有効と考えられる。しかしながら、ハイスロール材の主要製造方法である連続鋳掛肉盛法（CPC 法）や遠心鋳造法を用いて成分変更や製造条件の改善によって、MC 型炭化物や M_7C_3 型共晶炭化物の晶出量を数倍オーダーで増加させるのは困難である。近年、硬質相の含有量の増大によってハイスロール材の性能を数倍向上可能な新しい熱間圧延用ロール材の開発が報告されている⁶⁻⁹⁾。

これらは鋳造法ではなく粉末焼結法を用いてセラミックス含有量を増加させたものであり、線材圧延用ロールとして使用されている超硬材を熱間圧延ロール用に材質を改善したスーパーサーメットロール材^{6,7)}や、著者らが提案したハイス材にセラミックス繊維を複合させた繊維強化複合金

* プロセス研究所 圧延研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

属 (Fiber Reinforced Metal : FRM) 製の FRM ロール材^{8,9)}である。このうち FRM ロール材は、セラミックス晶出量を増加させることによる韌性や耐熱亀裂性などの機械的特性の低下を抑制するために、セラミックスを粒子ではなく繊維形状で添加することにより、機械的性質を低下させずにトライボロジー特性の向上を狙ったものである。これまでにハイス鋼にアルミナ繊維を分散させた FRM ロール材が、機械的性質は铸造製ハイスロール材と同等以上に保ちつつ、耐摩耗性については铸造製ハイスロール材よりも2倍以上の向上が期待できることを明らかにした。

本報告では、FRM ロール材が熱間圧延ロールとして適用可能かどうかを見極めるために更に検討を深め、アルミナ繊維の形態、特にアスペクト比の違いが熱間耐摩耗性に与える影響や FRM 材の熱間圧延特性について実験調査を行った。圧延特性の調査では、铸造製ハイスロール材の導入初期に問題となった MC 型炭化物を起因とする圧延荷重増加等¹⁰⁾の新ロール材に特有な現象が発現するかどうかに着目し、铸造製ハイスロール材と FRM ロール材とを使用したときの圧延荷重や摩擦係数の違い、基本的な機械的特性に関して実験室レベルでの評価装置によって調査した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 FRM 材の試作

本研究では、FRM 材の試作原料として、入手が容易な市販のハイス鋼粉末およびセラミックス繊維を使用した。ハイス鋼粉末は JIS G 4403 (高速度工具鋼鋼材) で規程されている SKH10 の粉末を使用し、アトマイズ法で製造された 45 μm アンダーの粒径のものを使用した。容易に入手可能なセラミックス繊維として、SiC 繊維とアルミナ繊維を選定し、この2種類についてホットプレスを用いた焼結実験を行い、ハイス鋼粉末との焼結可否を検討した。焼結実験には一軸ホットプレス装置を使用し、ハイス鋼粉末中に 10 体積%の SiC 繊維とアルミナ繊維を束上に混合した混合粉を焼結し、約 23mm × 35mm × 3mm のサイズの FRM 焼結サンプルを製作した。このときのホットプレスの焼結条件は、温度 1000 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力は約 40MPa、保定時間は約 2 時間である。

その試験片の断面を観察した結果を図 1 に示す。ハイス鋼粉末にアルミナ繊維 (A) を混合したものは繊維の形状が維持され、ハイス基地 (C) とアルミナ繊維 (A) とが密着して接合されているが、ハイス鋼粉末に SiC 繊維 (B) を混合したものは繊維の形状が変化してハイス基地 (C) と SiC 繊維 (B) とが反応して劣化したと考えられる痕跡 (図 1 (b) の矢印部に観察されるハイス基地 (C) と SiC 繊維 (B) との境界付近に発生した空隙) が認められることから、本研究ではアルミナ繊維を使用して FRM ロール材を試作することにした。

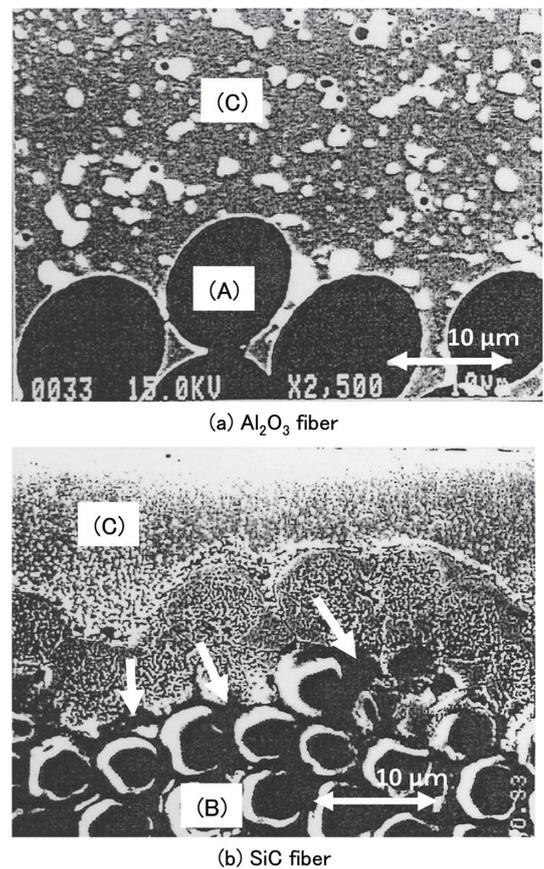


図 1 ホットプレス後の FRM 材の組織
Microstructure of FRM materials after hot press
(A): Al₂O₃ fiber, (B): SiC fiber, (C): High speed steel matrix

熱間圧延ロールに適用可能かどうかを検討するための FRM ロール材の試作に使用したアルミナ繊維は、アルミナ純度が 95% 以上、 α 化率が約 50% 以上のもので、直径が 8 ~ 10 μm 、アスペクト比が約 50 程度のもので、直径が 3 ~ 7 μm 、ボールミルによる粉砕によってアスペクト比を 20 ~ 40 程度に調整したものの 2 種類を使用した。この 2 種類のアルミナ繊維をハイス鋼粉末に対して 20 体積% 混合し、攪拌機によって充分攪拌、混合して均一な FRM 混合粉を作成した。この FRM 混合粉を HIP 装置を使って、1000 $^{\circ}\text{C}$ で 98MPa の圧力下で約 3 時間保持して FRM 材の焼結体とした後、ハイス鋼と同じ熱処理を行って FRM ロール材を試作した。熱処理後の FRM ロール材のショア硬度は 83 ~ 86 程度であり、铸造製ハイスロール材 (HSS) とほぼ同じ硬さにした。

試作した FRM ロール材の組織写真を図 2 に示す。FRM ロール材の黒い部分がアルミナ繊維であり、それ以外の部分がハイス基地である。アルミナ繊維が方向性を持たずにほぼ均一に分散した形態で混合された FRM ロール材が得られたと考えられる。表 1 に試作した FRM ロール材の組成を示す。摩耗特性に与えるアルミナ繊維の混合量の影響を調査するために、アルミナ繊維の添加量が 10 体積% と 25 体積% の FRM ロール材も試作した。また、圧延実験に使用するスリーブ形状の FRM ロールは、JIS G 4053 (機械

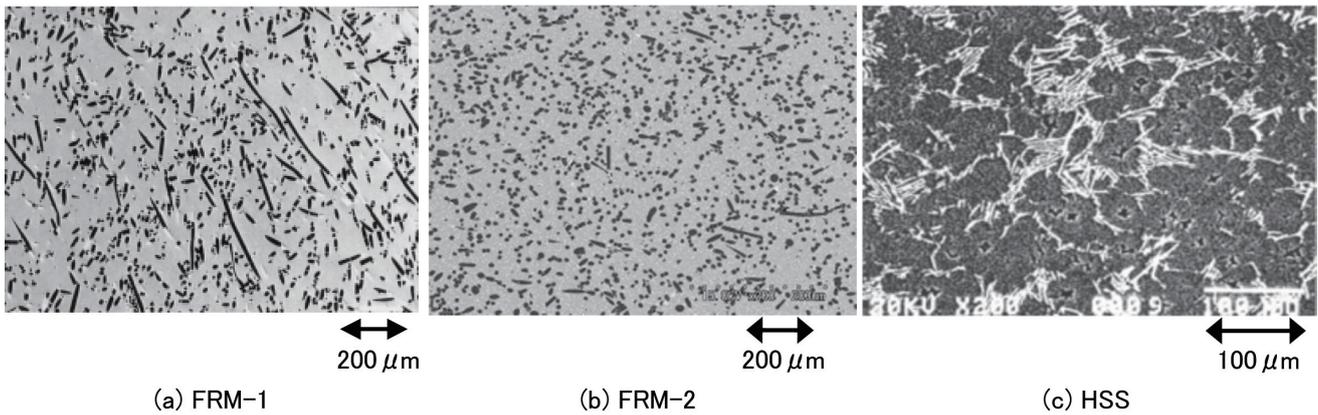


図2 試作した FRM 材の代表的な組織

Microstructure of representative FRM materials made in this study on trial

表1 FRM 試作材の組成
Compositions of FRM samples

FRM-1	High speed steel roll material : 80 vol.% Al ₂ O ₃ fiber (aspect ratio: 50) : 20 vol.%
FRM-2	High speed steel roll material : 80 vol.% Al ₂ O ₃ fiber (aspect ratio: 20-40) : 20 vol.%
FRM-3	High speed steel roll material : 90 vol.% Al ₂ O ₃ fiber (aspect ratio: 50) : 10 vol.%
FRM-4	High speed steel roll material : 75 vol.% Al ₂ O ₃ fiber (aspect ratio: 50) : 25 vol.%

表2 転動摩耗試験の条件
Experimental conditions of hot rolling wear test

Roll disk (test piece)	Material	HSS, FRM
	Temperature	500 °C
	Size	φ80 × 10 mm
Material disk (opposite piece)	Material	S45C
	Temperature	850 °C
	Size	φ165 × 15 mm
Load		196 N
Rotating velocity of roll disk		500 rpm
Slipping ratio		11 %
Lubrication		Water (no oil)
Revolutions		5000

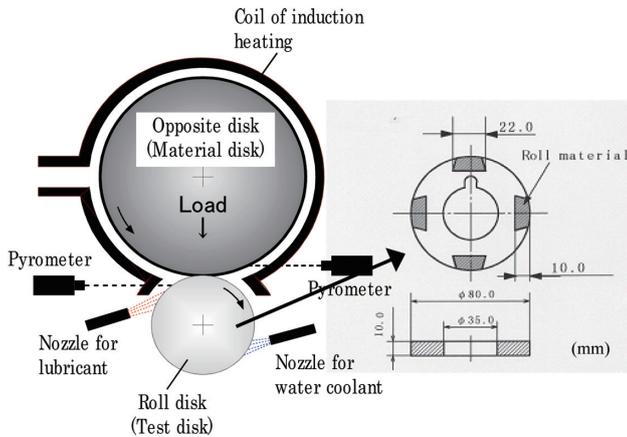


図3 熱間転動摩耗試験機の概略図
Schematic diagram of hot rolling wear tester

構造用合金鋼鋼材)で規格されているCr-Mo鋼(SCM材)で外径60mm、内径45mm、胴長100mmの円筒状のスリーブを作成し、その外周面に厚さ約10mmのFRMロール材をHIPによって接合して、直径80mmのスリーブ形状のFRMロールを作成した。

2.2 実験装置および条件

試作したFRMロール材の耐摩耗性、耐熱衝撃性および機械的性質や圧延特性を検討するために、熱間転動摩耗試験機による耐摩耗性の評価、熱間コイル圧延実験による熱間耐摩耗性と圧延特性の評価および落重式摩擦熱衝撃試

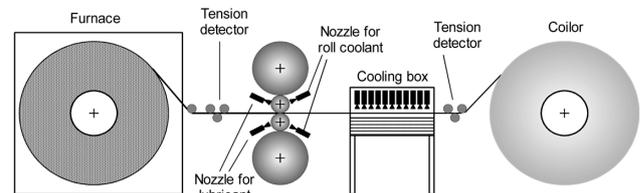


図4 熱間コイル圧延機の概略図
Schematic diagram of hot coil rolling mill

験機による耐熱衝撃性や引張強度等の調査を行い、铸造製ハイスロール材と比較した。熱間転動摩耗試験では、図3に示すように、円周方向の4箇所にもFRMロール試作材を埋め込んだ試験片を製作し、4種類の試験片に同一条件で転動摩擦を与え、各FRMロール試作材の最大摩耗深さを同時に比較できるようにして耐摩耗性を評価した。表2は熱間転動摩耗試験の条件を示す。図4は熱間コイル圧延機の概略図で、表3は圧延実験条件を示す。

熱間圧延実験では、圧延前後のロールプロフィールの比較によって求めた摩耗深さで耐摩耗性の比較を行うとともに、圧延荷重や先進率等の圧延特性についても調査した。落重式摩擦熱衝撃試験では大橋ら¹⁾が実施した方法と同じように、20mm × 20mm × 30mmの各ロール試験片に、直径5mm × 長さ40mmの軟鋼製のピンによって強制的に摩擦による急激な熱衝撃を与え、ロール試験片の摩擦部の

表3 熱間圧延実験の条件
Experimental conditions of hot rolling test

Roll Material	FRM, HSS roll
Rolled material	SPCC coil Thickness: 1 mm Width: 50 mm Length: 1000 m
Temperature of furnace	1000°C (N ₂ atmosphere)
Rolling velocity	80 m/min
Tension	Entry side: 588 N Delivery side: 1177 N
Reduction	28 - 37 %
Roll coolant	Water spray (at delivery side)
Lubrication	Nothing

中央部の断面を顕微鏡で観察し、摩擦部に発生した熱亀裂進展長さによって、ロール材の耐熱衝撃性を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 熱間耐摩耗性

図5は熱間転動摩耗試験機で調査したFRMロール材の耐摩耗性を鍛造ハイスロール材およびアルミナ繊維が混合されていないHIP製ハイスロール材(HSS(HIP))と比較した結果を示す。また、アスペクト比が約50のアルミナ繊維を使って、アルミナ繊維の体積混合比率を10%と25%として作成したFRMロール材の耐摩耗性についても比較して示す。図5は鍛造ハイスロール材の摩耗量を1として規格化した指標で各ロール材の耐摩耗性を示した。HIP製ハイスロール材の耐摩耗性は鍛造ハイスロール材の約2倍であり、HIP製ハイスロール材にアスペクト比が約50のアルミナ繊維を20体積%添加したFRMロール材(FRM-1)の耐摩耗性は鍛造ハイスロール材の約4倍優れている結果が得られた。

アスペクト比が20~40のアルミナ繊維を20体積%添加したFRMロール材(FRM-2)の耐摩耗性は、アスペクト比が約50のアルミナ繊維を20体積%添加したFRMロール材(FRM-1)とほぼ同等であり、アルミナ繊維のアスペクト比よりもアルミナ繊維の添加量の方がFRMロール材の耐摩耗性に大きく影響を与えることが明らかになった。アスペクト比が約50のアルミナ繊維を10体積%添加したFRMロール材(FRM-3)の耐摩耗性が、FRM-1とHSS(HIP)のおおむね中間の値であったことから、FRMロール材の耐摩耗性はアルミナ繊維のアスペクト比よりもアルミナ繊維の添加量の影響を受けやすいと裏付けられる。

アルミナ繊維の分散状態はほぼ均一であることからアルミナ繊維の添加量は摩擦面のアルミナ繊維の晶出面積比率に相当すると考えられるので、アルミナ繊維の晶出面積が大きくなることで耐摩耗性が向上したと推察される。なお、アルミナ繊維の添加量が25体積%のFRMロール材(FRM-4)の耐摩耗性は、アルミナ繊維の添加量が20体積%の

FRMロール材(FRM-1)に比べて、アルミナ繊維の添加量の増分に比べて摩耗量の低減量が小さいことから、アルミナ繊維の添加量を25体積%以上増やしても耐摩耗性の向上代はあまり大きくないと考えられる。

図6は1000°Cで加熱された約1000mのコイル材を4本圧延した後で測定した各ロール材のロールプロフィールを示す。また、図7は図6に示したロールプロフィールから読み取った摩耗深さを示す。アスペクト比が50のFRMロール材の摩耗深さは1.0~1.5μm、アスペクト比が20~40のFRMロール材の摩耗深さは1.5~2.0μmであるのに対して、鍛造製ハイスロール材の摩耗深さは4.5~6.5μmである。熱間コイル圧延実験では、アルミナ繊維のアスペクト比の違いによって若干FRMロール材の摩耗深さに違いが生じたものの、鍛造製ハイスロール材とFRMロール材との摩耗量を比較すると、FRMロール材の方が鍛造製ハ

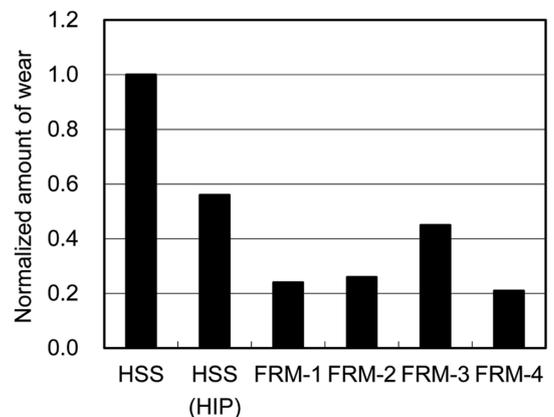


図5 転動摩耗試験による摩耗重量
Amount of wear by hot rolling wear test

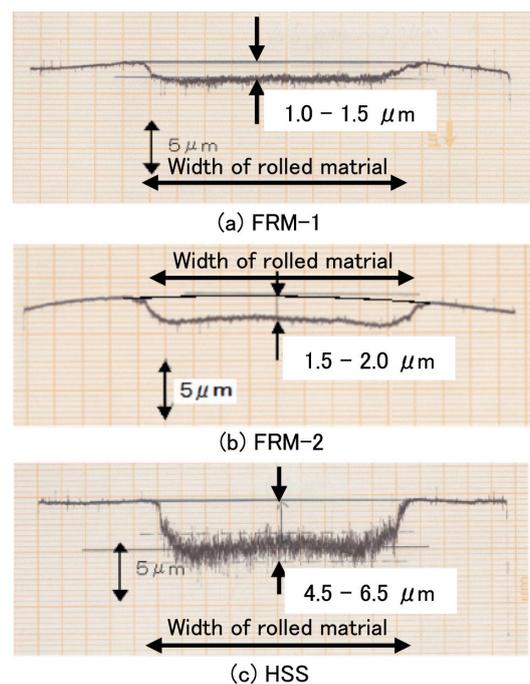


図6 熱間圧延実験後のロールプロフィール
Roll profile after hot coil rolling test

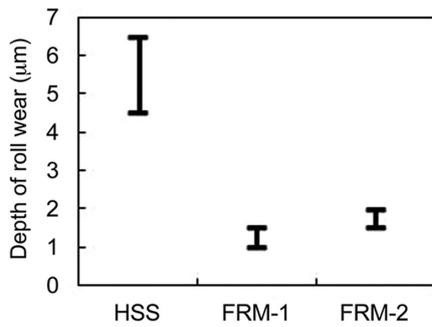


図7 熱間圧延実験後のロール摩耗深さ
Wear depth of roll after hot coil rolling test

イスロール材に対して約3倍程度耐摩耗性に優れていると考えられる。アスペクト比の異なるFRMロール材を使用して圧延したときに若干の摩耗深さの違いが発生した原因については今のところ不明であり更に圧延実験データを増やして検討を進める必要がある。

3.2 圧延特性

図8は各ロール材を用いて圧延を行ったときの圧延線荷重の結果、そのうち圧下率が約36%のときの先進率と圧延線荷重の実測値を使って計算で求めた摩擦係数の結果を図9に示す。先進率はロールマーク法で求め、摩擦係数はその先進率と圧延線荷重が実験値と合致するように摩擦係数と変形抵抗とを変えてOrowanの圧延モデルを用いて計算した。鑄造製ハイスロール材で圧延したときとFRMロール材で圧延したときとの圧延線荷重を比較すると同等か、若干FRMロール材の方が小さくなった。

アスペクト比の異なるFRMロール材を使って圧延したときの圧延線荷重はほぼ同じ値となった。先進率や摩擦係数は、鑄造製ハイスロール材よりもFRMロール材の方が小さくなり、本研究で実施した圧延条件では鑄造製ハイスロールよりもFRMロール材の方が約0.04程度摩擦係数が小さくなる結果となった。鑄造製ハイスロール材よりもFRMロール材の方が摩擦係数が小さくなったのは、一般的に金属同士の摩擦よりも金属とセラミックスとの摩擦の方が摩擦係数が小さくなりやすく、アルミナ繊維が20体積%添加されたことにより摩擦面のアルミナ繊維の露出面積が増大したことによると考えられる。

図10は1000℃に加熱されたコイル材を圧延したときのロールの表面粗さの変化を示す。本実験ではロールの初期粗さは約0.02~0.05μmRaにそろえて実験を行った。コイル材を1本圧延すると鑄造製ハイスロール材の圧延後の表面粗度は約0.48μmRaに増大するのに対して、FRMロール材はアスペクト比の違いに関わらずFRM-1およびFRM-2のどちらのFRMロール材も圧延後の表面粗さは約0.08μmRaと鑄造製ハイスロール材よりも小さい値を示した。その後、圧延量を増やしてもいずれのロール材の表面粗度は同じレベルを維持する結果が得られた。熱間圧延

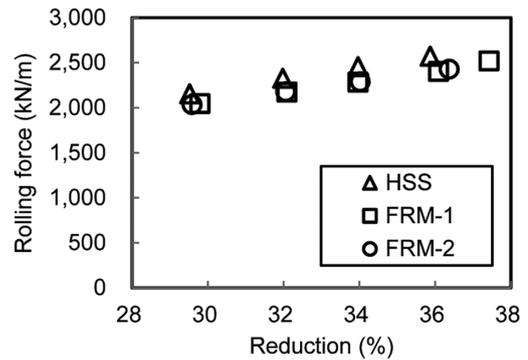


図8 熱間圧延実験で得られた圧延線荷重の比較
Comparison of rolling force per unit width obtained by hot coil rolling test

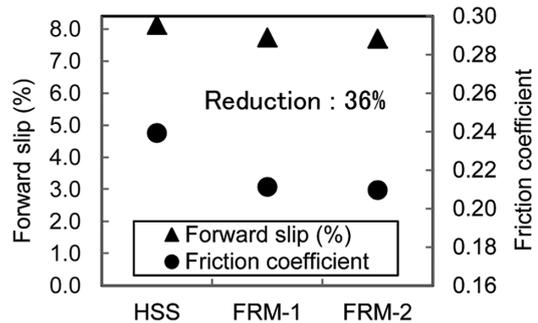


図9 熱間圧延実験で得られた先進率および摩擦係数の比較
Comparison of forward slip and friction coefficient obtained by hot coil rolling test

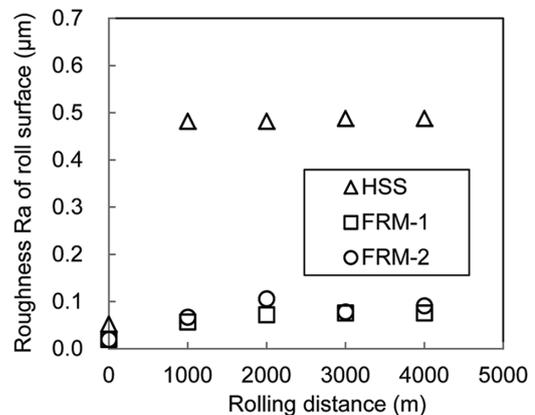


図10 熱間圧延実験後のロール表面粗度 Ra
Roughness Ra of roll surface after hot coil rolling test

ロールにハイスロールが導入された当初は、ハイスロール材の表面に晶出しているMC型炭化物が、基地(マトリックス)との摩耗進行速度の違いによって突起状の凸部となり、それが摩擦係数を増大させて圧延荷重の増加や摩擦発熱増大に伴うスケール起因の製品疵を誘発するという報告があった¹⁰⁾。

本研究で着目したアルミナ繊維をハイス鋼に分散させたFRMロール材については、鑄造ハイスロール材よりも摩擦係数が小さく、圧延荷重も若干小さくなる傾向が認められるので、ハイスロール材の導入初期に顕在化した圧延荷重

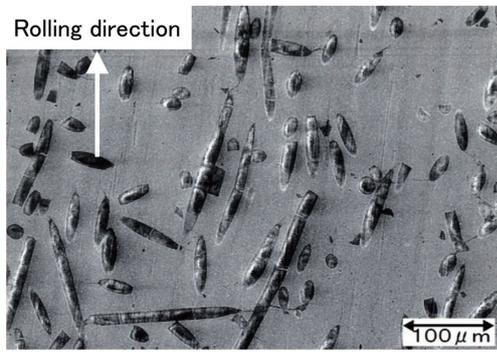


図 11 熱間圧延後の FRM-1 ロール材表面の SEM 写真
SEM image of surface of FRM-1 roll sample after hot coil rolling test

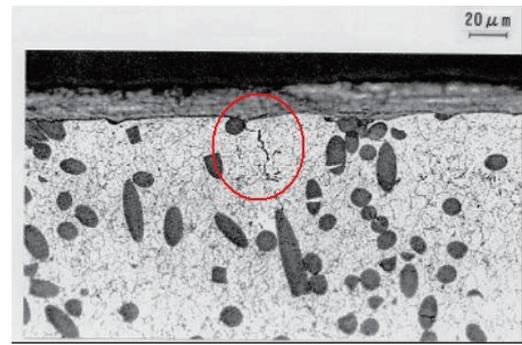
が増大するという問題が発生する可能性は小さいと考えられる。図 11 にアスペクト比が約 50 の FRM ロール材でコイル材を 1 本圧延した後の通材部のロール表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。鑄造製ハイスロール材の MC 型炭化物は粒状に分布しており、その突起状の硬質炭化物が摩擦相手に埋め込まれたり、ロールから脱落してロール基地のアブレシブ摩耗を促進すると考えられている。

それに対して鑄造ハイスロール材と同じ荷重が FRM ロール材に働いたときを考えた場合、アルミナ繊維の露出面積は鑄造ハイスロール材の MC 型炭化物の晶出面積よりも大きいので、アルミナ繊維の露出面積あたりの荷重は MC 型炭化物の単位面積あたりの荷重よりも小さくなる。そうすると MC 型炭化物よりもアルミナ繊維の方が同じ荷重で接触したとき摩擦相手材に埋め込まれる深さが浅くなるので、摩擦抵抗は小さくなると考えられる。更に、埋め込まれる深さが浅いアルミナ繊維はロールから脱落してアブレシブ摩耗を促進するような現象が発生しにくいと考えられる。

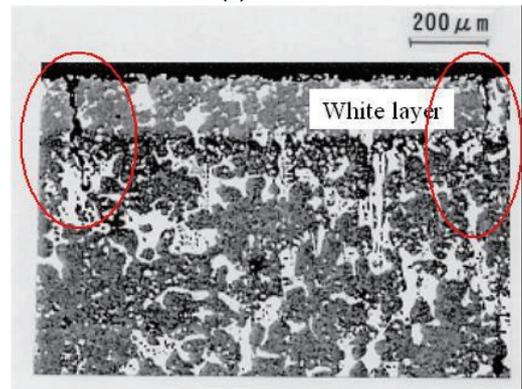
3.3 機械的特性

図 12 に落重式摩擦熱衝撃試験後の FRM-1 材と鑄造製ハイスロール材の熱衝撃部の代表的な断面組織を示す。鑄造製ハイスロール材には、表面から熱影響層 (白色層) を貫いて、約 100 ~ 150 μm の深さの亀裂が多数進展している。これに対して、FRM-1 材は表面から約 30 ~ 50 μm 程度の深さの亀裂しか観察されなかった。また、亀裂の先端がアルミナ繊維のところで止まっている箇所が観察されたことから、アルミナ繊維が添加されることによって亀裂の進展を抑制し耐熱衝撃性が鑄造製ハイスロール材よりも向上したと考えられる。

図 13 は、アルミナ繊維を 20 体積% 添加した FRM ロール材と鑄造製ハイスロール材の常温での引張試験によって得られた引張強度を、鑄造製ハイスロール材の引張強度を基準にして比較したものである。FRM ロール材の常温引張強度は鑄造製ハイスロール材の引張強度に比較して、同等レベルの値を示すことが明らかになった。また、アスペ



(a) FRM-1



(b) HSS

図 12 落重式摩擦熱衝撃試験後のロール試験片の断面写真
Microstructures of cross section of roll samples after thermal shock test

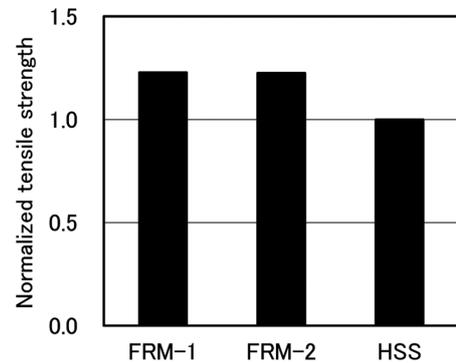


図 13 ロール材の引張強度
Tensile strength of roll materials

クト比の違う FRM ロール材を使用しても引張強度に大きな差異は認められず、アスペクト比の違いが FRM ロール材の引張強度に大きな影響は与えないと考えられる。従って、試作した FRM ロール材は実際の熱間圧延用ロール材として使用するのに十分な強度が確保されていると推察される。

図 14 は SCM 材と FRM 材との接合強度を、鑄造製ハイスロール材の外層部のハイス材と SCM 材製芯材の接合強度を基準にして比較したものである。FRM ロール材を熱間圧延ロールとして製造する際には、必ず芯材として使用される SCM 材と HIP 処理時に接合してロールを構成することが必要と考えられる。そこで、FRM ロール材と SCM 材

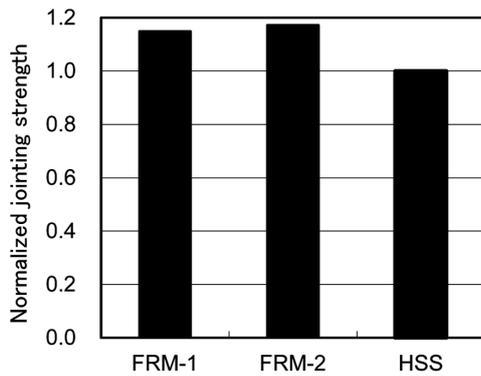


図 14 FRM 材と SCM 材の接合強度
Jointing strength between FRM and SCM

との接合界面の接合強度を引張試験によって調査した。FRM ロール材と SCM 材の接合部が試験片の中央になるように引張試験片を作成し、接合界面から破断するときの強度を調査した。その結果、図 14 に示すように、鑄造製ハイスロール材の外層ハイス材と SCM 製芯材との接合強度に対して FRM 材と SCM 材の接合強度は同等以上であり、熱間圧延ロールとして使用するのに支障の無いレベルと考えられる。また、アスペクト比が異なるアルミナ繊維を使用しても接合強度はあまり変わらなかった。

4. 結 言

現在、熱間圧延工程で使用されている鑄造製ハイスロール材に代わる新しい熱間圧延用ロール材として、ハイス鋼粉末にアルミナ繊維を添加した FRM ロール材を試作し、熱間における摩耗特性や圧延特性等を実験調査した結果、以下の知見を得た。

1) アルミナ繊維を 20 体積%添加した FRM ロール材の耐摩耗性は、鑄造製ハイスロール材に比べて、約 3 倍以上の耐摩耗性を有していることが、熱間転動摩耗試験および熱間コイル圧延実験によって確認された。また、アルミナ繊維のアスペクト比の違いよりも添加量の方が摩耗特性に影響を与える、つまりアスペクト比の多少の差異に

よって FRM ロール材の耐摩耗性が大きく変化するものではないことが明らかになった。

2) FRM ロール材は鑄造製ハイスロール材よりも摩擦係数が若干小さく、それに応じて圧延荷重も多少低くなることが明らかになった。この特性はアルミナ繊維のアスペクト比の違いに関わらず認められ、アルミナ繊維の露出量が増えたことによるものと推察される。

3) アルミナ繊維を添加して硬質相添加量が鑄造製ハイスロール材よりも多いにもかかわらず、FRM ロール材の耐熱衝撃性や引張強度等の機械的特性は鑄造製ハイスロール材と同等もしくはそれ以上の特性を有している。

従って、ハイス鋼にアルミナ繊維を分散させた FRM ロール材は、鑄造製ハイスロール材に代わって熱間圧延用ロール材になる可能性が十分にあると考えられる。FRM ロール材が実際に熱間圧延ロールとして使用されるためには、実機の圧延ロールサイズを想定した焼結ロール製造技術の確立が課題と思われる。

謝 辞

本研究は、経済産業省の補助金を受けて実施した“エネルギー使用合理化社会基盤材料関連技術等開発”事業の成果の一部であることを記し、謝意を表します。

参照文献

- 1) Sano, Y. et al.: ISIJ Int. 32 (11), 1194 (1992)
- 2) Hashimoto, M. et al.: ISIJ Int. 32 (11), 1202 (1992)
- 3) 橋本光生 ほか：新日鉄技報. (356), 76 (1995)
- 4) 野田朗 ほか：日立金属技報. 13, 89 (1997)
- 5) 佐野義一：塑性と加工. 39 (444), 2 (1998)
- 6) 神谷欣宏 ほか：CAMP-ISIJ. 18, 1235 (2005)
- 7) 神谷欣宏 ほか：CAMP-ISIJ. 19, 993 (2006)
- 8) 井上剛 ほか：CAMP-ISIJ. 21, 1231 (2008)
- 9) 井上剛 ほか：CAMP-ISIJ. 22, 429 (2009)
- 10) 後藤邦夫 ほか：鉄と鋼. 84 (12), 861 (1998)
- 11) 大橋秀三 ほか：鉄と鋼. 77 (5), 652 (1991)



井上 剛 Tsuyoshi INOUE
プロセス研究所 圧延研究部 首席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小川 茂 Shigeru OGAWA
技術開発本部 顧問 工博



内田 秀 Shigeru UCHIDA
プロセス研究所 圧延研究部 主幹研究員
工博