

# その場観察機能付き熱間 2 工程摩擦試験機の開発及び 摩擦挙動に及ぼす潤滑剤と酸化スケールの相互作用の影響

岐阜大学 スマート金型技術研究センター  
特任教授 土屋 能成  
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019019-B2)

キーワード：熱間鍛造，酸化スケール，直接観察

## 1. はじめに

熱間鍛造で生産される素形材は重量比で 80%を占める主力塑性加工製品である。しかしその金型寿命は熱負荷の影響もあって冷間鍛造型に比べて2桁から3桁低い生産個数にとどまっている<sup>1)</sup>。この状況を改善するために黒鉛系をはじめとした潤滑剤が活用されている。現在は環境面を配慮して黒鉛系からカルボン酸塩主体の非黒鉛系潤滑剤が多用されるようになってきた。しかし潤滑性能に関して十分とは言えず一層の高性能化が望まれている。一方、鉄鋼材料の熱間鍛造においては被加工材料の加熱時に生じるいわゆる酸化スケールが材料歩留まりや製品面性状、潤滑性能に影響するといわれている。通常熱間鍛造では予成形によっていわゆる一次スケールといわれる表面の厚い酸化膜は除去されて成形が行われるが十分取り除けないで本成形に移行せざるを得ない場合もある。残存したスケールは製品表面に傷をつけたり金型の摩耗を促進したり一方では高温成形において潤滑作用をもたらすなどいろいろな影響を与える<sup>2)</sup>。しかし潤滑剤とどのように関係して摺動特性に影響するのかはほとんど知られていない。

そこで今回実加工における脱スケールを模して、摩擦試験に供する前段階で加熱した被加工材からスケールを取り除き、そのまま連続して摩擦試験を行う装置を考案した。これを用いてスケールを取り除いた場合(脱スケールと称す)と炉加熱のまま摩擦試験を行う場合(加熱まま)との違いを比較した。また独自に考案した摩擦摺動界面の直接観察装置により両者の違いを動的に把握した。さらに試験後の表面観察を行って摩擦試験結果に及ぼす酸化皮膜と潤滑剤の関係の一端を明らかにした。

## 2. 実験方法

### 2・1 摩擦試験機の概要

図1に、実験に用いた摩擦試験機の外観を示す。しごき加工時の加工摺動界面を観察できるようにマイクロスコープを介して高速度カメラが設置されている。図2に示すようにダイスの中央に耐熱ガラス製の工具をはめ込むことでダイス表面に塗布した潤滑剤越しに被加工材の摺動面を観察できるようになっている。通常の摩擦試験時にはすべて工具鋼製のダイスを用いる。被加工材の加熱は試験機近くに設置した赤外線イメージ炉で行う。



図1 その場観察機能付き摩擦試験機

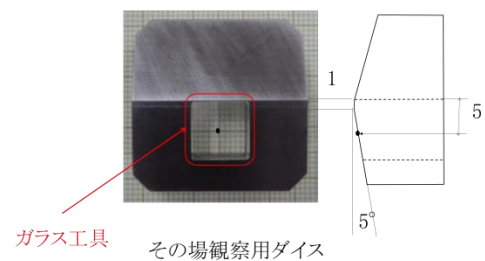
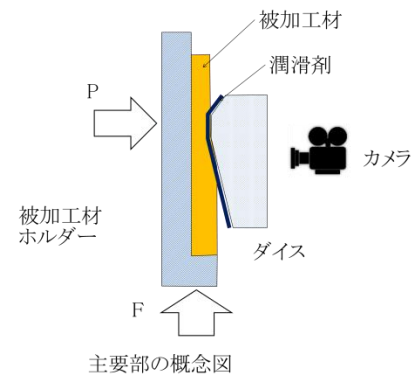


図2 摩擦試験時の主要部と観察工具

表 1 摩擦試験条件

潤滑剤	ルブキスターF-20 (カルボン酸ナトリウム系白色潤滑剤)	
	付着量 [g/m <sup>2</sup> ]	40 - 45
ダイス	材質	熱間工具鋼 SKD61 焼入れ焼戻し材
	温度	室温
被加工材	材質	炭素鋼 S50C
	加熱温度 (°C)	1150
摩擦試験	圧下荷重 [kN]	1.5
	しごき率 (%)	2.3
	加工速度 [mm/s]	5.7
その場観察	高速度カメラ 撮影速度 [fps]	2000

表 1 に摩擦試験条件を示す。潤滑剤は一般的に熱間鍛造に採用されているカルボン酸ナトリウム系の白色潤滑剤を用いた。潤滑剤はスプレーノズルで 200°C に加熱したダイス上に 40~45 g/m<sup>2</sup> 塗布した。噴霧条件は液圧 0.06MPa, エア圧 0.1MPa, 噴霧時間 0.01s, 噴霧間隔 3s で、所定回数噴霧した。被加工材は炭素鋼 S50C 製の直方体 (5×10×50mm) で、接触面の幅は 5mm である。概略寸法 5×10×50mm のステンレス製ホルダーに挿入してホルダーごと 1150°C に加熱して摩擦試験に供した。今回脱スケールを行うためにホルダー形状を含んだ一体型の被加工材を製作して摩擦試験に供した。摩擦試験条件は表 1 に示したとおりである。摩擦摺動界面を直接観察する際のフレームレートは 2000fps とした。

### 2・2 脱スケール装置の概要

図 3 に被加工材の酸化スケールを除去する装置の概略を示す。図 3(a) は被加工材の投入口から見た装置の外観写真である。これを既設機の上部に設けることで被加工材を投入する途中で脱スケールが行えるようにした。図 3(b) の正面図に示すように上部入り口から投入された一体型被加工材はガイドローラーに沿って下降し加工面側に用意された 2 枚のギヤによって加工面側表面が削り取られる。削り取られたスケール粉は出口のブラシによって除去されて加工面を清浄にする構造になっている。2 個のスケール剥離用のギヤはばね定数 18g/mm のコイルばねによって被加工材に押し付けられている。今回は各ギヤが 1kgf で被加工材を押すようにばねの伸びを調整した。

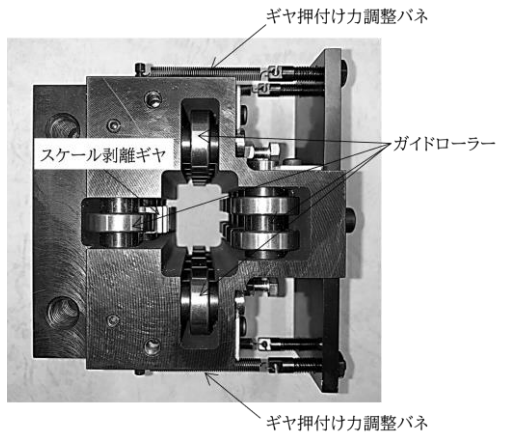
### 3. 実験結果

#### 3・1 摩擦試験

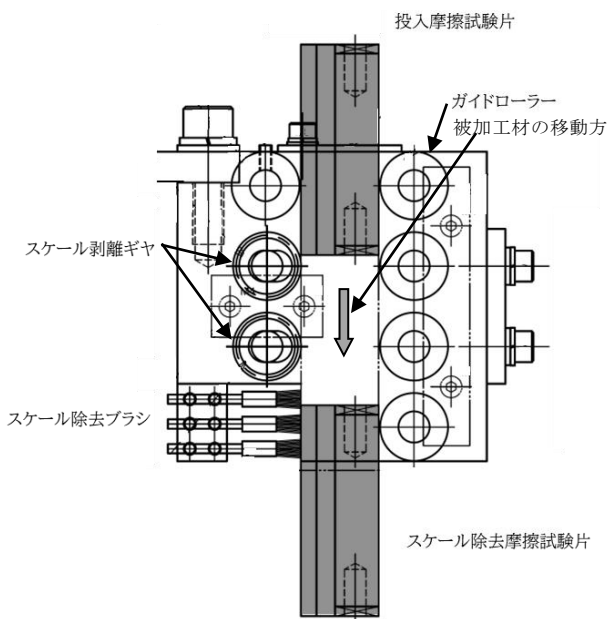
図 4 と図 5 にしごき距離に伴う摩擦係数の変化を示す。図 4 に被加工材形状の影響を示す。従来の 5×10×50mm サイズの短冊形の試験片を用いた場合と脱スケール試験を行うために今回採用したホルダー一体型試験片の結果を比較した。いずれの被加工材を用いても多少のずれはあるが無潤滑の場合も潤滑の場合もその変化の特徴はよく似ており、試験片形状の影響は小さいと判断した。これまでの摩擦試験結果と比較が可能であるといえる。

図 5 に脱スケールの影響を示す。炉加熱のまま一体型被加工材を摩擦試験に供した場合と図 3 の装置を通してスケールを機械的に除去した場合とを比較した。それぞれについて無潤滑の試験と潤滑剤を用いた試験の結果を示す。

無潤滑試験では脱スケールすることでしごき距離に対する摩擦係数の変化が小さくなった。加熱ままの被加工材ではしごき加工開始直後に摩擦係数が大きく減少したが脱スケール材では減少幅が小さくなった。潤滑試験では脱スケールすることで加熱ままより摩擦係数が小さく、しごき距離に対する変動が少なく安定した値をとった。脱スケールすることで無潤滑、潤滑にかかわらず摩擦係数が安定するといえる。潤滑剤の効果が大きくなることも分かった。



(a) 平面写真



(b) 正面図

図 3 脱スケール装置の概略

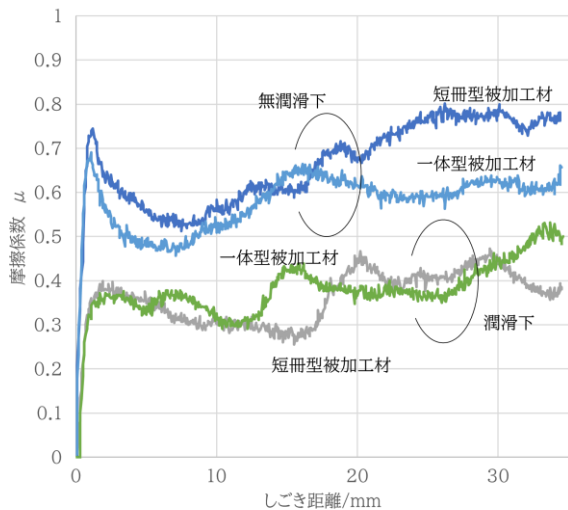


図4 摩擦試験結果に及ぼす被加工材形状の影響

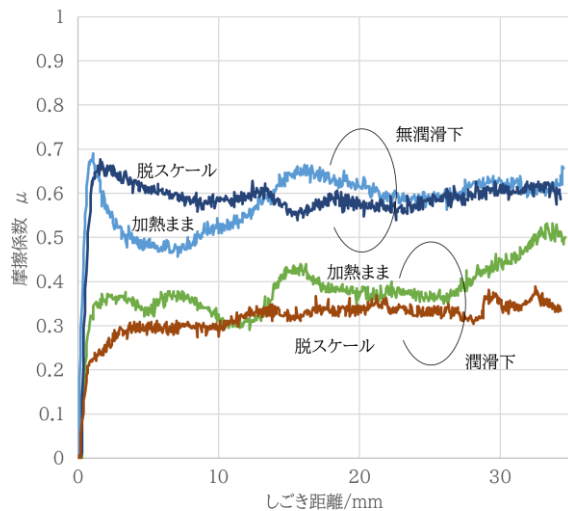


図5 摩擦試験結果に及ぼす脱スケールの影響

### 3・2 摩擦面の観察

図6に摩擦試験後の被加工材表面の外観写真を示す。無潤滑でしごき加工した場合(図6(a)), 加熱ままの被加工材では, しごき距離15mmあたりから擦り傷が発生するが, それほど大きな表面損傷は認められなかった。ただ, ここには大きさ2mmほどの三角形の酸化膜の破片が存在したり, しごき加工の終端には同様の破片が数個堆積しており, 比較的大きな破片がしごき加工によって生じたことがわかる。これに対して脱スケールした被加工材の摩擦試験では酸化皮膜が細かく残存する特徴が認められた。しごき加工の終端に細かく粉砕された酸化皮膜が堆積した。

潤滑剤を用いた試験(図6(b))ではいずれの被加工材でも擦り傷は発生せず, 滑らかな表面性状である。ただ, 加熱ままの被加工材ではしごき加工前半で酸化皮膜が大きな単位で破壊されている様子が観察された。一方, 脱スケールした被加工材ではしごき加工開始直後に酸化皮膜が潤滑剤と共存して存在する以外しごき加工の後半では認められなかった。脱スケールによって摩擦試験中に大きく

破壊されるような酸化皮膜が除かれたことがわかる。

潤滑剤を用いてしごき加工した被加工材の表面をレーザ顕微鏡で詳しく観察した結果を図7に示す。図6の赤い□の箇所, しごき開始距離3mmの箇所である。ここは図5の摩擦曲線で脱スケールの違いが大きく出ている距離に相当する。図6においても観察された酸化皮膜の破壊形態の違いがよく表れている。すなわち加熱ままの被加工材表面には大きく破壊しはく離した酸化皮膜が重なって認められる。そのプロファイル測定からは基底部から175μmと270μmの段差があり, 酸化膜が数層に分かれてはく離したことがわかる。一部の反対側が基底部まで達していることからこの膜厚が175μmであることも分かる。脱スケールを行わない場合にはこのような酸化膜の破壊脱落片が摺動とともに生成, 移動することで摩擦抵抗が増加して摩擦係数の増加や変動の多さに反映されたものと考えられる。

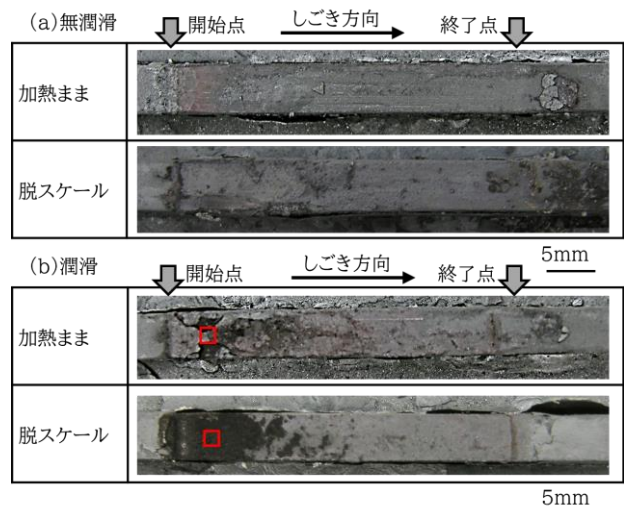


図6 摩擦試験後の被加工材表面  
(b)の□は図7の観察場所

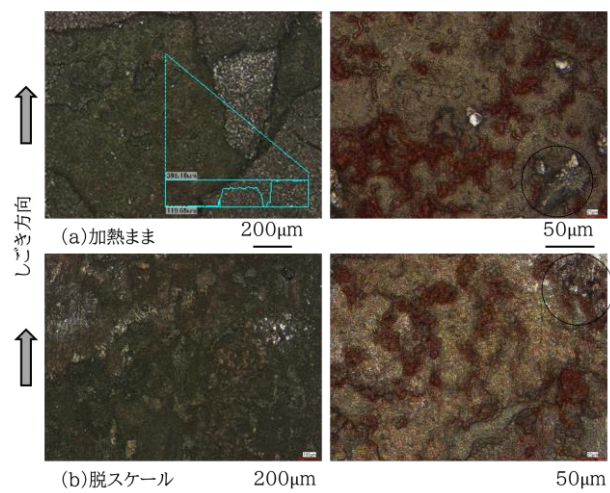


図7 しごき距離3mmにおける摩擦面性状の違い

図右列の高倍率写真には円で囲った潤滑剤の残渣がいずれの表面にも認められるが、わずかであった。また例えばクラックに沿って存在したり、表面の凹部に存在するといった特徴は認められなかった。

### 3・3 摺動界面の直接観察

図 8 に摩擦試験時のダイスと被加工材の摺動界面を直接観察した結果を示す。しごき加工の開始から 5 mm ごとの静止画で被加工材を加熱まま試験を行った場合と加熱後脱スケールして供試した場合とを比較して示す。無潤滑条件下 (図 8(a)) と潤滑条件下 (図 8(b)) とでまとめた。図中の矢印はしごき加工方向を示している。

無潤滑条件下では、摺動距離に伴う酸化被膜の損傷状況がまったく異なった。加熱ままの被加工材ではしごき距離約 10 mm まで酸化皮膜はほとんど動かなかった。ガラス工具と酸化皮膜はすべらず、被加工材の移動は酸化皮膜内もしくは酸化皮膜と被加工材の境界で行われたものと思われる。しごき距離 15 mm ほどで視野の下辺に酸化膜にクラックが発生し、破壊して分離した一部が少しずつしごき方向に移動した。その向こう側 (紙面奥) では被加工材の金属表面が所定速度で移動する様子が観察された。一方、脱スケール処理した被加工材の場合、しごき加工開始直後から酸化膜が細かく分断されて明るい被加工材表面が観察できた。その後しごき距離とともに分断の間隔が広がり金属表面の割合が増加した。その後しごき加工の前方に酸化膜が堆積する形で隙間が狭くなって前面に酸化膜が存在するようになり、さらにしごき加工が進むと大きな単位で割れが生じて金属面が観察された。両者を比較すると、加熱ままの被加工材ではしごき加工に伴う摺動面が酸化皮膜と被加工材材料の境界で、脱スケールした被加工材ではダイスと酸化皮膜の界面で酸化膜が少しずつ破壊されながら摺動することが分かった。

潤滑下の試験では、加熱ままの被加工材の場合無潤滑下同様おもな摺動面は酸化皮膜と被加工材境界で、観察画面での動きはほとんど認められなかった。しごき加工が進むと酸化皮膜にクラックが入って破壊された。破壊された酸化皮膜のサイズは視野内で 2 分割される程度の大きなものであった。潤滑剤存在下でも接触時から熱のために潤滑剤が熔融して摺動面から排除されるためか、無潤滑の場合と観察結果はあまり違わなかった。しかし摩擦係数は無潤滑時より小さい。これは図 7 に示したように、詳細に観察すると酸化皮膜は破壊されており、その隙間から潤滑剤が被加工材側に浸み込んでそこで摺動するために摩擦が小さくなったことが考えられる。一方、脱スケール処理材の場合、被加工材がダイスに接触すると潤滑剤が熔融し、沸騰して気泡が発生するが、しごき加工距離が 5mm あたりでは写真視野の左辺で気泡がしごき方向に移動する様子が観察された。10mm から 15mm にかけては破壊された細かい酸化皮膜が一部はダイスに固着し、一部は被加工材と同じ速度で移動した。さらにしごき加工が進むと 25mm 付近から細かかった酸化皮膜がせき止められるように堆積するとともに被加工材表面にすじ条痕が発生した。無潤滑下、潤滑下にかかわらず脱スケール材の酸化皮膜のほうがしごき加工に伴う破壊単位が小さくしごき方向への移動が容易に起こることが分かった。

このように加熱ままと脱スケールとで酸化膜の機械的な破壊挙動が摩擦試験結果に及ぼす影響が大きいので図 9 に摩擦試験前の両者の表面を比較して示す。外観上は加熱まま被加工材が鋭角表面で脱スケールのそれは鈍角に見える。表面粗さの値を Ra で評価すると脱スケール材のほうが大きい値をとった。一方、表面凹凸の状態 (山と谷の対称性) を反映するといわれる Rsk でみると脱スケール材は負の値をとっている。このことは摩耗面のように山が

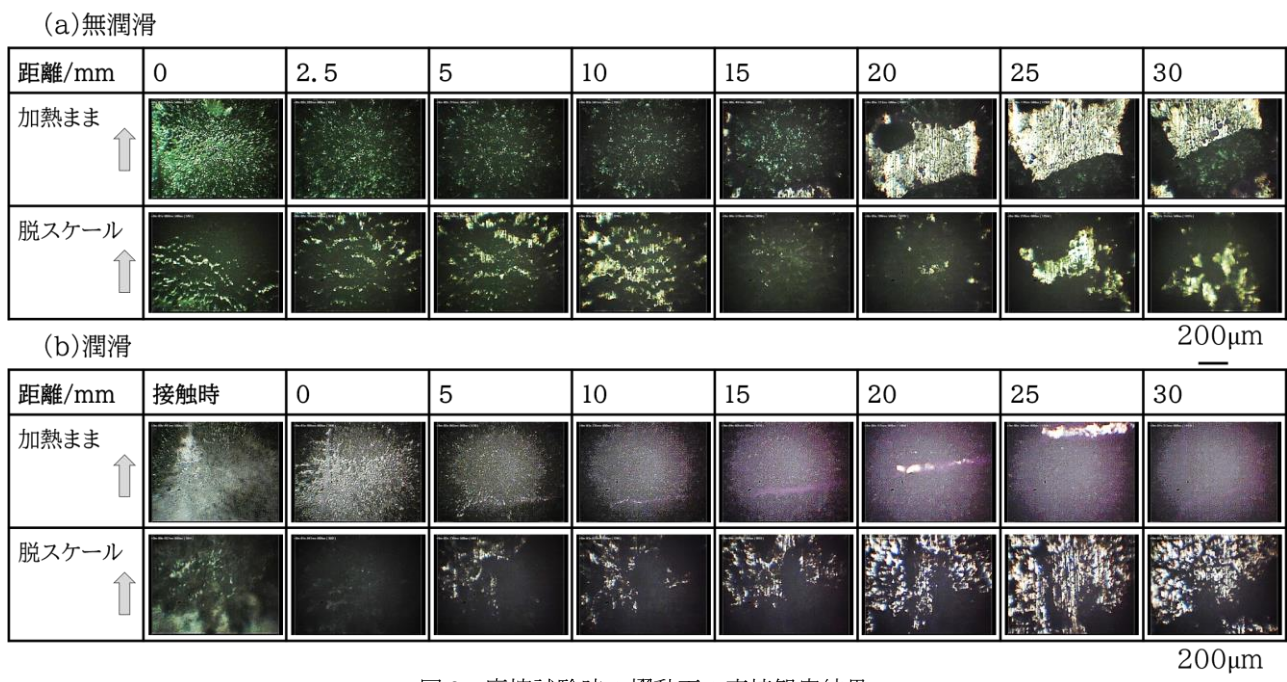


図 8 摩擦試験時の摺動面の直接観察結果

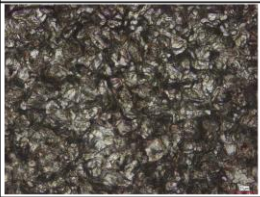

	加熱まま被加工材	脱スケール被加工材
外観 50μm		
粗さ指標 Ra/Rsk	2.68μm/1.014	6.84μm/-0.014

図9 被加工材表面の初期性状の比較

丸く、谷が鋭い形状であることを反映している。したがって脱スケール面は粗面ではあるが突起はなだらかであるといえる。また脱スケール時に生じたと思われるクラックも認められた。このような表面性状であるために無潤滑試験時に加熱ままの被加工材より摩擦係数が高くなる半面潤滑試験では潤滑剤が流動しやすい突起形状や酸化膜の脱落粉が細かいことが影響して摩擦係数の変化が小さくなったと考えられる。

#### 4. まとめ

しごき型の摩擦試験機に一次スケールを取り除いたあと連続的に摩擦試験を行う装置を考案し、摺動面の直接観察と摩擦試験後の被加工材の表面観察を行うことで、熱間摩擦試験における酸化スケールと潤滑剤の関係を調べて以下の結論を得た。

1) 無潤滑試験、潤滑試験とも脱スケールによってしごき距離に伴う摩擦係数の変動が小さくなり、安定した変化を示した。

2) 無潤滑下の試験では脱スケールのほうが試験初期に高い摩擦係数を呈した。潤滑下の試験では脱スケールのほうが摩擦係数が小さく距離による変化が小さかった。

3) 上記特徴はスケールの性状に基づいていることが分かった。すなわち加熱ままのスケールは摺動によって断続的に大きく厚く破壊して摩擦抵抗や変動が大きくなる。しかし試験初期では表面粗さが小さいので無潤滑下の試験では摩擦係数が小さくなる。一方、脱スケール材は表面粗さが大きいために無潤滑下では摩擦が高くなるが、潤滑下では表面突起の形状が滑らかなために潤滑剤の性能が発揮され摩擦係数が小さくなった。またこの酸化膜は細かく破壊するので安定した摩擦を維持した。

#### 謝辞

本研究は天田財団の研究助成金を得て実施することができました。深く感謝申し上げます。また供試潤滑剤を提供いただいた(株)MORESCOに御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省大臣官房調査統計グループ：政府統計平成24年 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報
- 2) 小豆島 明，宇都宮 裕；鉄 と 鋼 100-12 (2014), 1456-1466.