

技術論文

Technical Paper

熱間鍛造金型の摩耗に及ぼす高 Si 鋼のスケールの影響

岡島琢磨^{*1}, 泉 幸貴^{*2}, 藤原正尚^{*2}, 清水崇行^{*2}

Influence of Scale of High Si Steel on Hot Forging Die Wear

Takuma Okajima, Yukitaka Izumi, Masanao Fujiwara, and Takayuki Shimizu

Synopsis

Wear of die in hot forging, which is caused by sliding of work and pressure concerning work at flash land areas of a die, is one of major die damage. A new wear test with a hot punching machine was developed to investigate the wear phenomenon under hot forging conditions. It was confirmed that the wear behavior of dies in the tests could represent the real hot wear damage of the die on flash land areas. In this study, the influence of Si content in works and forging temperature on die wear was investigated.

We confirmed the following.

- 1) Die wear increases with forging temperature regardless of Si content in works. But at 1200 °C die wear increases with Si content in works.
- 2) Scale generation accelerates die wear with lost of lubricant layer occurred at high surface expansion ration areas.

1. 緒 言

近年、熱間鍛造品のコストダウンのニーズはますます高まってきており、製造現場ではさまざまな取り組みがなされている。その例として、鍛造速度の高速化、歩留りや金型寿命の向上が挙げられる。このうち、金型コストが鍛造品の製造コストに及ぼす影響は大きく、また金型寿命ごとに行われる金型交換作業が生産効率に大きな影響を及ぼすため、金型寿命を向上させる技術開発のニーズは非常に高い。金型寿命を決定する主要因は、初期割れ、摩耗、ヒートチェック、剥離、疲労割れである。このうち、摩耗は全体の約7割¹⁾を占めることからその対策が特に重要である。熱間鍛造金型の摩耗への影響因子は、鍛造材（以下、被鍛材とよぶ）の材質、鍛造形状、鍛造温度、金型材質、金型表面処理、潤滑条件が挙げられる²⁾。これらの影響因子の定量評価や摩耗現

象のメカニズムを解明するため、実際の鍛造条件の特徴を再現し、様々な鍛造条件で評価可能な試験法の開発が望まれている。特に、鍛造部品の低廉かつ高強度化を目的とした被鍛材である Si 含有量が多い高 Si 鋼は、熱間鍛造金型のフラッシュランド部の摩耗が、一般的な被鍛材に比べて顕著に進行し、型寿命が非常に短くなる現象を発生している。そのため、高 Si 鋼の材質が金型摩耗に及ぼす影響因子の明確化とその対策を検討することが求められている。

そこで、本研究では、高 Si 鋼による熱間鍛造金型の摩耗に顕著な影響を及ぼす因子を明確化するため、クラックシャフトなどの製造でよく見られるバリが張り出す熱間鍛造を模擬した試験を考案し、熱間鍛造金型の摩耗に及ぼす代表的な影響因子として、被鍛材の材質（Si 含有量）と鍛造温度について調査を行った。

2014年4月22日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博(Dr., Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 熱間鍛造模擬試験の考え方

実際にクランクシャフトを鍛造し、摩耗した熱間鍛造金型の外観写真を Fig. 1 に示す。この金型の摩耗が最も顕著な部位は、成形時にバリがしゅう動するフラッシュランド部である。高温の被鍛材は、上下のフラッシュランド部に挟まれながら変形するため、この部位は、面圧が高い上に、金型の表面温度が非常に高くなる環境と考えられる。この熱間鍛造金型形状を単純化した Fig. 2 に示す模擬試験法を考案した。Fig. 3 に模擬試験金型の外観写真を示す。構造上、この金型の上面部は、クランクシャフトの熱間鍛造金型にみられるフラッシュランド部に相当するため、この金型の上面部の摩耗を定量評価することとした。

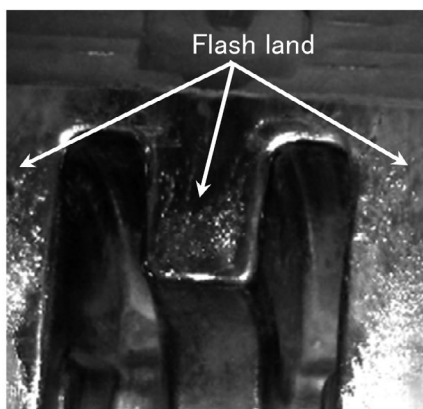


Fig. 1. Picture of hot die wear at flash land area.

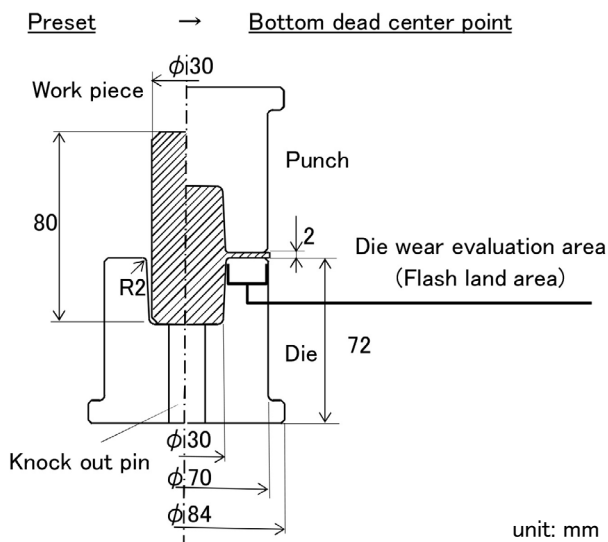


Fig. 2. Die damage test for hot forging.

Die wear evaluation area

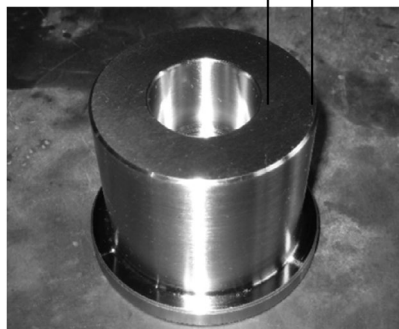


Fig. 3. Picture of die for die damage test.

3. 試験方法

本試験では、被鍛材の Si 含有量と鍛造温度が金型の摩耗に及ぼす影響を調査した。被鍛材は炭素鋼をベースに、Si 含有量の異なる 0.2 mass%-Si 鋼, 0.6 mass%-Si 鋼, 1.0 mass%-Si 鋼の 3 鋼種とした。金型には、一般的に熱間鍛造金型として用いられている熱間ダイス鋼 JIS-SKD61 を準備し、熱処理によりビッカース硬さ約 500 HV に調質して用いた。試験条件を Table 1 に示す。5.5 sec の鍛造 1 サイクルの中で、被鍛材を加熱後、手動搬送、鍛造、ロックアウト、払い出し、スプレーによる潤滑剤の噴霧を実施し、これを 1000 回繰り返した後、金型の摩耗量を測定した。測定は、レーザー顕微鏡 AMS-5 (三鷹光器製) を用いて、フラッシュランド部の円周方向に 90°ごとに 4 カ所で外周側から中心側に向けて半径方向に表面凹部を計測し、その平均値を金型摩耗深さとした。

Table 1. Test condition of die wear evaluation test.

Item	Condition
Work piece	0.2 mass%Si steel, 0.6 mass%Si steel, 1.0 mass%Si steel
Die material	JIS-SKD61
Forging temperature	1200 °C, 1100 °C, 1000 °C
Forging cycle time	5.5 sec/shot
Initial die temperature	170~200 °C
Lubricant	F-500 (NICCA CHEMICAL)
Forging shots	1000 shots

4. 試験結果と考察

4. 1 金型摩耗量の測定結果

Fig. 4 に 1000 ショット試験後の金型上面（フラッシュランド部）の拡大写真を示す。これらの金型の摩耗量測定結果を Fig. 5 に示す。いずれの組成の被鍛材にお

いても、鍛造温度が高いほど摩耗深さや摩耗範囲が増加した。摩耗は金型外周から内周に向かって徐々に増加する傾向がみられた。鍛造温度 1200 °C で比較すると、0.2 mass%-Si 鋼よりも高 Si 鋼の方が明らかに摩耗が大きかったことがわかった。一方、鍛造温度が 1100 °C や 1000 °C では、Si 量の増加に伴う摩耗量の増加は明確に確認できなかった。

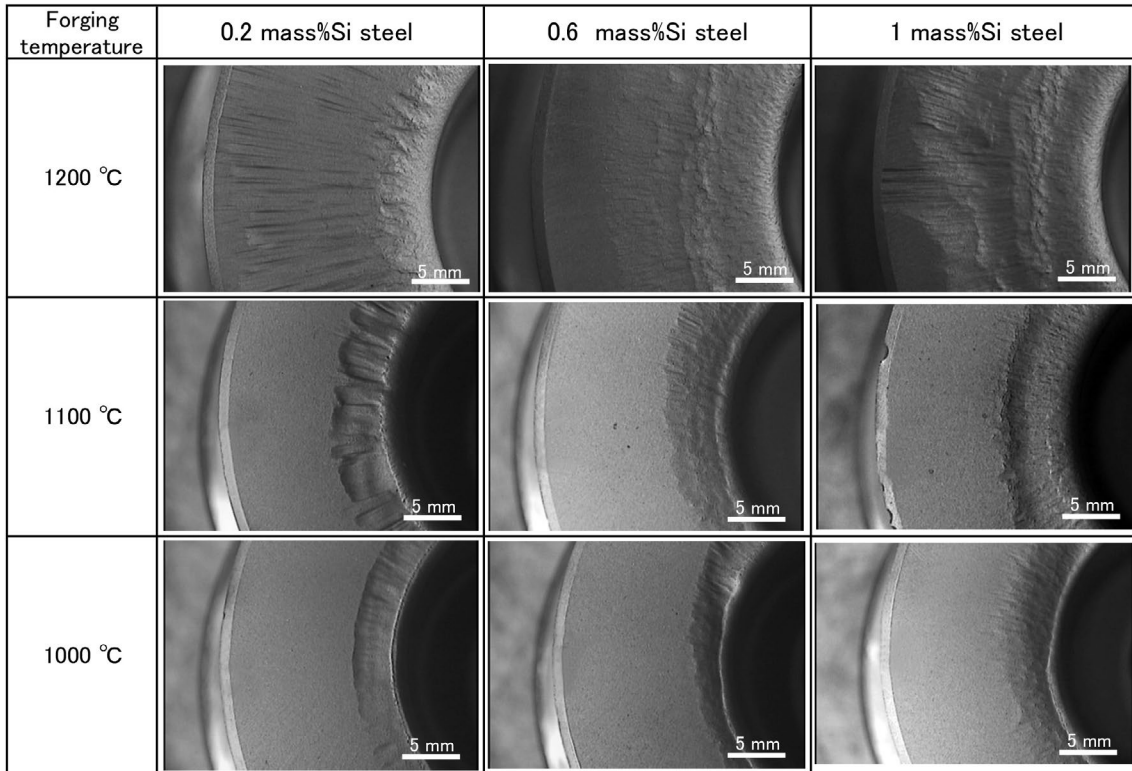


Fig. 4. Pictures of die after 1000 shots at flash land area.

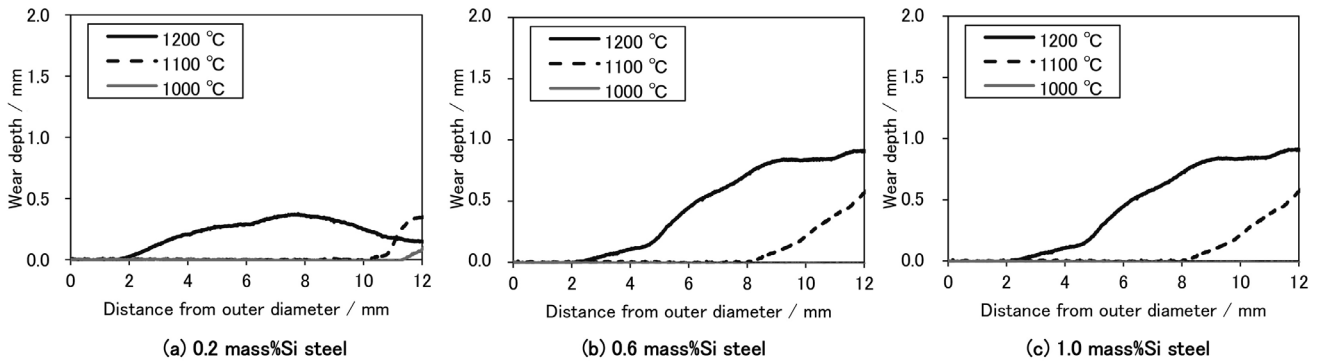


Fig. 5. Wear depth profiles of dies after 1000 shots.

4. 2 金型の摩耗予測式による影響因子の考察

金型の摩耗予測式として、(1)式で表わされる Archard の式³⁾がある。

$$W_a = \alpha PL \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 W_a ；摩耗深さ、 α ；定数、 P ；面圧、 L ；しゅう動距離である。この式は、(2)式で表わされる累積摩擦仕事量で置きなおすことができる。

$$W_a = Cm \int PV dt \dots \dots (2)$$

ここで、 C ；係数、 m ；せん断摩擦係数、 P ；面圧、 V ；相対すべり速度、 dt ；微小時間である。

せん断摩擦係数は、被鍛材の鍛造時の表面積拡大比がある値を超えると潤滑剤の膜切れが発生し⁴⁾、摩擦係数が急激に上昇する現象が報告されている⁵⁾。なお表面積拡大比とは、被鍛材の元の表面積に対する鍛造後の表面積の比である。そこで、せん断摩擦係数は式(3)のように表面積拡大比 S の関数として評価することにした。

$$m = f(S) \dots \dots \dots (3)$$

この式から、本試験で金型の摩耗量を変化させる因子として、被鍛材の変形抵抗による面圧 P の変化、スケール量の変化に伴う摩擦係数 m や係数 C の変化が考えられる。

4. 3 被鍛材の熱間変形抵抗の測定結果

被鍛材の熱間変形抵抗が金型の摩耗に及ぼす影響を考慮するため、被鍛材3鋼種について、端面拘束型圧縮試験法を用いて、試験温度 800, 900, 1000, 1100, 1200 °C、ひずみ速度 25 sec⁻¹ の条件で応力-ひずみ曲線を採用した⁶⁾。試験片は $\phi 15 \times 22.5$ mm を用いた。得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 6 に示す。

いずれの鋼種も鍛造温度が高くなるほど変形抵抗は低下するのに対して、Si 含有量による変形抵抗の変化はわずかであった。(2)式中の面圧は、鍛造温度が高くなるほど低下するため、摩耗深さは浅くなると予測される。さらに、Si 含有量による摩耗深さの変化はわずかであると予測される。この予測は試験結果とは異なる傾向であることが確認された。そのため、金型摩耗に及ぼす面圧の影響は小さいと考えられる。

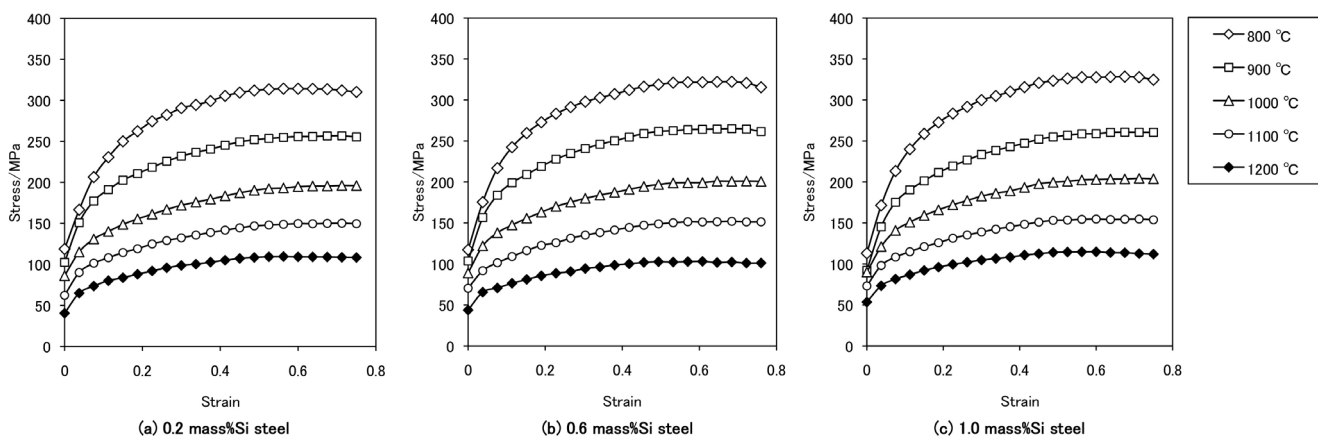


Fig. 6. Flow-stress of work piece at strain rate 25 sec⁻¹.

4. 4 被鍛材の酸化層(スケール)発生量の測定結果

熱間鍛造において、加熱された被鍛材から発生するスケールは金型摩耗への影響因子のひとつと考えられる⁷⁾。そこで、前述の金型摩耗試験と同じ鍛造温度に加熱した場合に生成するスケールの量を摩耗試験とは別に調査した。被鍛材3鋼種から、それぞれ試験片 30 × 20 × 2 mm を採取した。これらの試験片を大気中に加熱温度 1000 ~ 1200 °C、加熱時間 0.5 ~ 4.5 hr の熱処理を実

施した。その後、試験前後の重量変化から、被鍛材のスケール生成量を求め、試験片の表面積から単位面積あたりのスケール発生量を算出した。

Fig. 7 に各被鍛材の加熱時間 t と単位面積あたりのスケール発生量 W_s の関係を示す。(4)式で表わされるように、いずれの加熱温度においても W_s は t の 1/2 乗に比例しているとみなした。

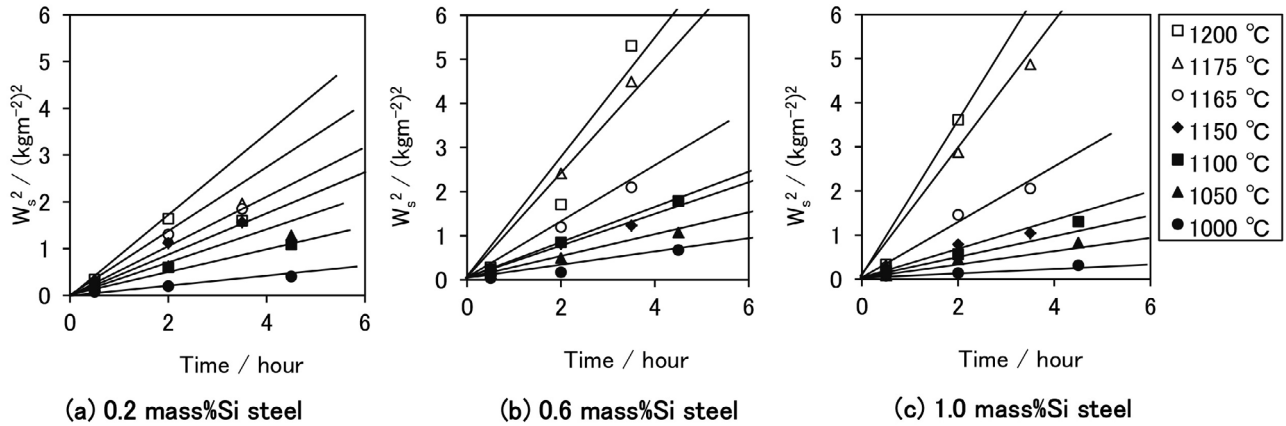


Fig. 7. Relationship between squared amount of scale per area W_s^2 and heating time for each Si steel.

$$W_s^2 = kt \cdot \dots \cdot (4)$$

ここで係数 k は任意の加熱温度に対する単位面積あたりのスケール生成速度を表し、被鍛材の酸化のしやすさの指標と考えられる。そこで、Si 含有量ごとに加熱温度と係数 k の関係を Fig. 8 に示す。いずれの被鍛材においても、加熱温度の低下に伴い、スケール生成速度は小さくなる傾向が認められる。また、1165 °C 付近を境にその傾きが変化している。1165 °C より低温側では、Si 含有量の増加とスケール生成速度にはあまり相関はなかった。一方、1165 °C より高温では、0.2 mass%-Si 鋼に比べて、高 Si 鋼の方がスケール生成速度が速くなった。

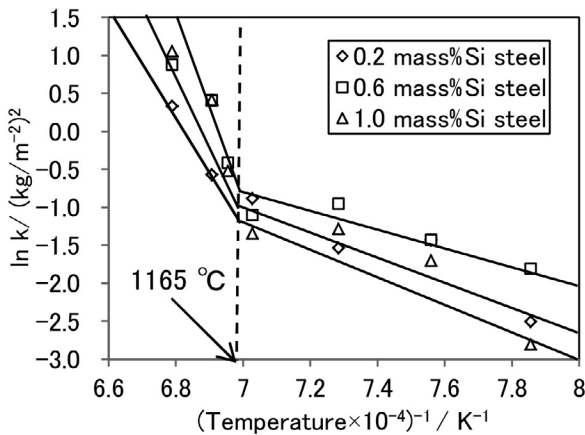


Fig. 8. Relationship between rate of scale generation and temperature for each Si steel.

4. 5 被鍛材のSi含有量と金型摩耗の関係の考察

(2) 式の摩耗予測式を用いて金型摩耗量を有限要素法で解析を行った。解析は、有限要素解析コード DEFORM-2D を用いて実施した。Fig. 9 に示すように、被鍛材は剛塑性体、金型は弾性体とした応力熱連成 - 軸対称モデルとした。

本解析に用いた境界条件を Table 2 に示す。被鍛材の変形抵抗には、Fig. 6 で示した応力 - ひずみ曲線を使用した。さらに、式 (4) を用いて Fig. 5 で示した摩耗量のプロファイルに一致するように Cm を解析した。Fig. 10 に摩耗量測定結果に一致させた計算結果と、Fig. 11 に解析した表面積拡大比に対するせん断摩擦係数 m と係数 C の積 (Cm) の関係を示した。Si 含有量や鍛造温度によらず、表面積拡大比がある値以上の領域では Cm の値が上昇する傾向が認められる。これは、潤滑剤の膜切れによる摩擦係数の上昇が生じていると推定される。さらに、この領域での Cm の値と Fig. 8 で示した単位面積あたりのスケール生成速度 k の関係を Fig. 12 に示す。 Cm の値は、 k にほぼ比例する傾向が認められる。

以上の結果より、潤滑剤の膜切れが発生する高い表面積拡大比の領域では、スケールの生成速度あるいは量が熱間鍛造金型の摩耗影響因子のひとつであることを確認することができた。特に、1200 °C の熱間鍛造温度域では、被鍛材の Si 含有量の増加に伴い、スケール生成速度が増加するため、熱間鍛造金型は顕著に摩耗することを確認した。

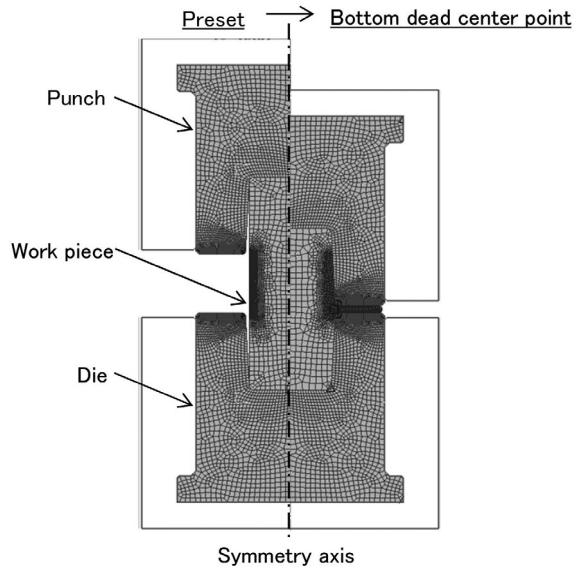


Fig. 9. FE analysis model.

Table 2. Input data of FE analysis.

Item	Data
Initial die temperature	200 °C
Initial work piece temperature	1000 °C, 1100 °C, 1200 °C
Heat transfer coefficient	
Die - Work piece	15 kW/m ² K
Die - Lubricant	15 kW/m ² K
Die - Air	0.1 kW/m ² K
Work piece - Air	0.1 kW/m ² K

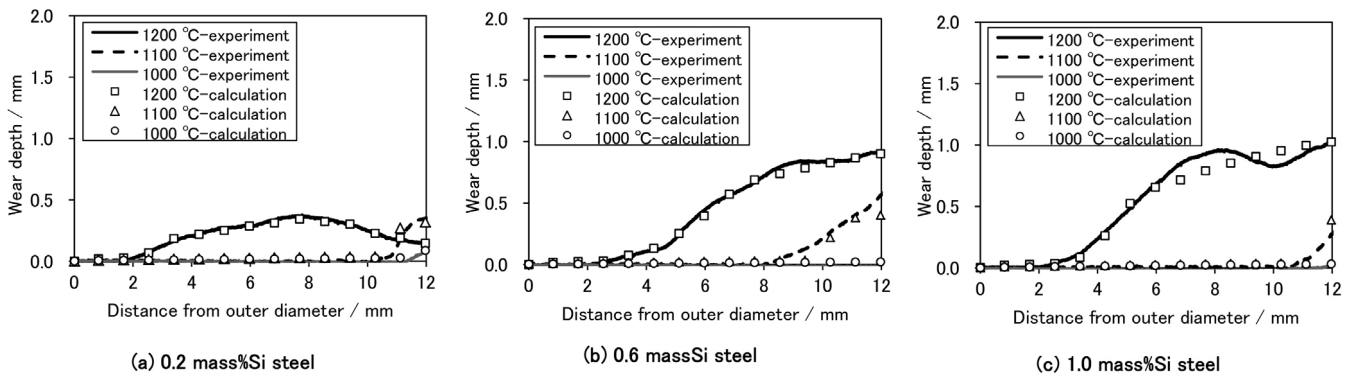


Fig. 10. Results of fitting calculation for experimental wear depth.

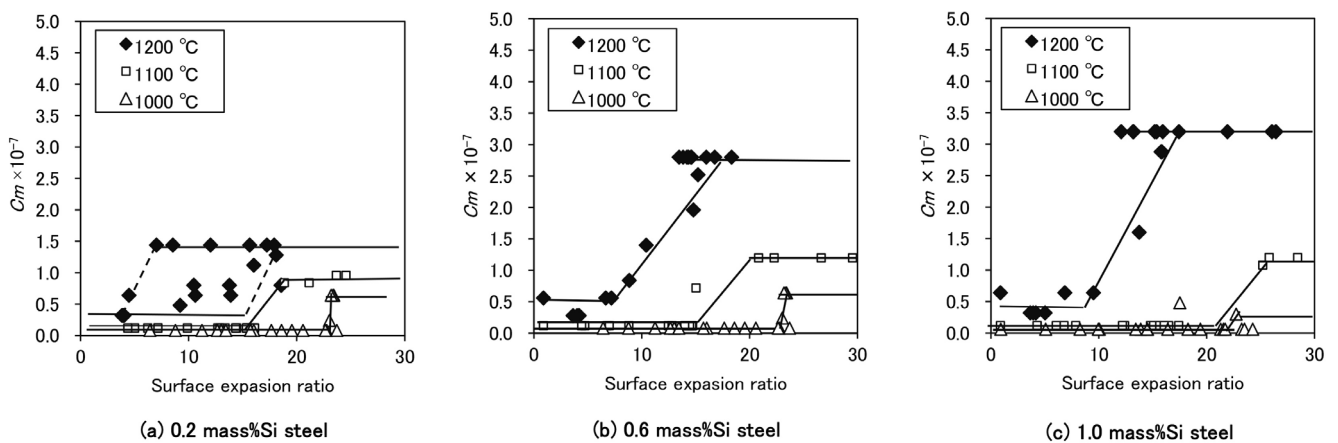


Fig. 11. Relationship between surface expansion ratio and C_m value.

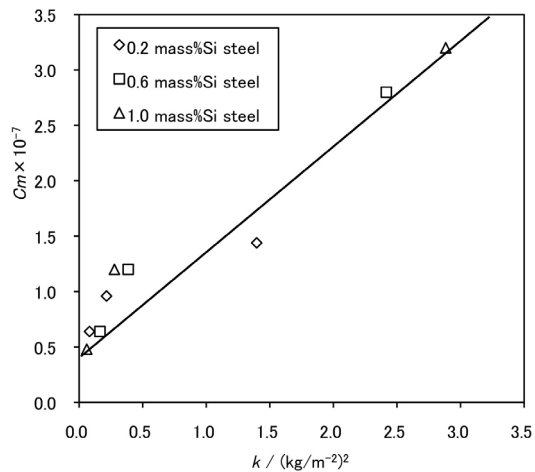


Fig. 12. Relationship between C_m and rate of scale generation k .

5. 結 論

熱間鍛造を模擬した試験法を考案し，熱間鍛造金型の摩耗に及ぼす代表的な影響因子として，被鍛材の材質（Si含有量）と鍛造温度について調査を行った。

- 1) 被鍛材の Si含有量に関わらず，鍛造温度が高いほど金型摩耗量が増加することを確認した。特に，鍛造温度 1200 °C では，Si含有量の増加に伴い金型摩耗量が増加することを確認した。
- 2) 高 Si鋼により熱間鍛造金型の摩耗量が増加する現象は，潤滑剤の膜切れが発生する高い表面積拡大比の領域において，スケールの生成速度の影響が大きいことを確認した。

(文 献)

- 1) 田村庸，井上謙一，長澤政幸：熱処理，**45**(2005)，295.
- 2) 森下弘一，鈴木寿之：塑性と加工，**45**(2004)，310.
- 3) Archard, J. F.: J. Appl. Phys., **24**(1953)，981.
- 4) 伊藤樹一，吉田広明，五十川幸宏，土井善久，堂田邦明：塑性と加工，**48**(2007)，303.
- 5) 伊藤樹一：「鍛造におけるトライボ特性評価法の開発」，博士学位論文，名古屋工業大学，(2008)，55.
- 6) Osakada K., et al.: CIRP Annals – Manufacturing Technology, **30**(1981)，135.
- 7) 宇都宮裕，原健一郎：山陽テクニカルレポート，**18**(2011)，9.