

## 技術解説

多合金白鑄鉄の諸特性に及ぼす  
コバルトの影響Effect of Cobalt Addition on Characteristics of  
Multi-Component White Cast Irons久留米高専 材料工学科  
教授博士(工学) 笹栗 信也  
Nobuya Sasaguri

## 1. はじめに

多合金白鑄鉄は、Cr, Mo, W, Vなどの強い炭化物形成元素を複数含有するため、凝固時に高硬度のMC、M<sub>2</sub>C及びM<sub>7</sub>C<sub>3</sub>炭化物を晶出するとともに、その後の熱処理により基地が2次硬化するため、良好な耐摩耗性を示す。そのため、従来の高クロム鑄鉄に代って鉄鋼熱間圧延ロールに実用化され、優れた耐摩耗性を有することが示されている<sup>1)</sup>。多合金白鑄鉄は多種類の合金元素を含有するため、これら合金の含有量が異なれば、諸特性が変化すると考えられ、これまで凝固組織<sup>2)</sup>、晶出炭化物の種類や形態<sup>3)</sup>、状態図<sup>4)</sup>、連続冷却変態特性<sup>5)~8)</sup>さらに機械的性質<sup>9)~12)</sup>などに及ぼす合金元素量の影響について調査されている。一方、本鑄鉄には、上記の炭化物形成元素以外にも基地の高温特性改善のために、Coが添加される場合がある。本鑄鉄にCoが添加された場合、Coは炭化物には固溶されず基地に固溶されるために、変態特性や酸化特性などが大きく変化すると考えられる。そこで、ここではこれまでに実施してきた本鑄鉄の諸特性に及ぼすCoの影響に関する研究成果についてまとめて紹介する。

## 2. 炭化物の種類および形態に及ぼすCoの影響

Fe-2mass%C-5mass%Cr-5mass%Mo-5mass%W-5mass%V(以下基本合金組成と称する。)の鑄鉄に、Coを0~10%添加したときの鑄造組織をFig.1に示す。いずれの試料にも粒状あるいは花卉状のMC炭化物と、粒界に板状あるいはラメラ状のM<sub>2</sub>C炭化物が晶出しており、Co量を変化させても炭化物の種類や形状は変化しない。基地組織に着目する

と、Co量の増加に伴い、炭化物周辺に黒色に見えるパーライトが増加している。このことは、Co添加により変態挙動が変化することを示唆している。

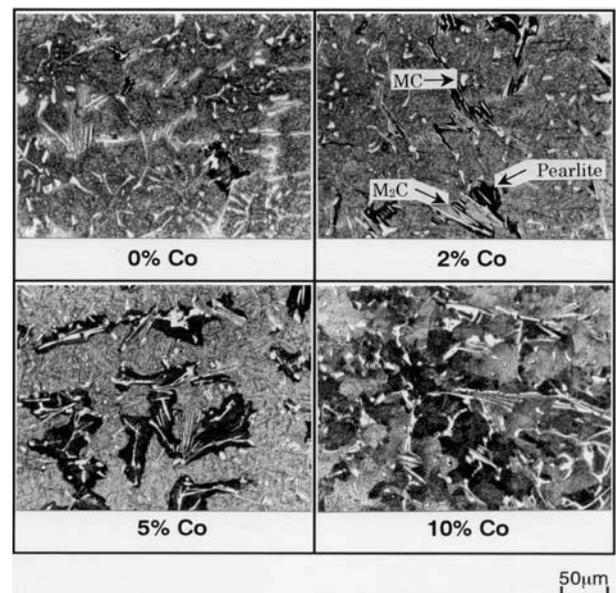


Fig.1 As-cast microstructures of multi-component white cast irons with different cobalt content.

## 3. 連続冷却変態挙動に及ぼすCoの影響

Fig.2に基本合金組成の多合金白鑄鉄にCoを0~10%添加したときの連続冷却変態(CCT)曲線を示す。Coを含有しない多合金白鑄鉄のCCT曲線は、パーライトとベイナイトが大きく分かれており、パーライトノーズはベイナイトノーズよりも長時間側にある。また、Ms点は現れるが、Mf点は現れない。さらに、オーステナイト( $\gamma$ )化温度が高いほど、両変態は遅れ、Ms点は低下する。Co量が増加すると、両変態は、短時間側へ移動する。両変態ノーズ

時間及び Ms 点に及ぼす  $\gamma$  化温度の影響は、Co 量が変わっても同じである。Fig.3 は CCT 曲線から得られたパーライト及びベイナイト変態の臨界冷却速度と Co 量との関係を示している。両変態の臨界冷却速度は、 $\gamma$  化温度に関わらず Co 量が約 2% までは増加する。Co 量が 3% になるとベイナイト変態の臨界冷却速度はわずかに増加するが、パーライト変態の臨界冷却速度はいったん低下する。さらに Co 量が増加すると、両変態の臨界冷却速度は再び増加する。すなわち、両変態ノーズは Co 量の増加とともにいったん短時間側へ移動し、その後長時間側へ移動するか、あるいは停滞して、再び短時間側へ移動する。Fig.1 で示したように铸造状態で Co 量の増加により炭化物周辺でパーライトが増加するのは、Co の増加によりパーライト変態が短時間側へ移動するためである。

Ms 点に及ぼす Co の影響を Fig.4 に示す。Ms 点は  $\gamma$  化温度に関わらず Co が約 2% までは Co 量の増加とともに低下するが、その後は上昇する。ただし、 $\gamma$  化温度が 1373K と高い場合には、Co が 10% まで増加しても Ms 点は 0%Co 試料のそれとほぼ同程度である。なお、 $\gamma$  化温度が高い方が、Ms 点が低く

なるのは、 $\gamma$  中への C 量及び合金元素の固溶量が増加し、 $\gamma$  が安定化するためである。

Co が鋼に添加された場合、パーライト及びベイナイト変態を促進させることもあれば、遅滞させることもある<sup>12)</sup>。Ms 点についても通常の鋼であれば、Co は Ms 点を上昇させると言われているが、高速度鋼に対しては、Ms 点を低下させると言った報告<sup>12)</sup> もあり、鋼に対する Co の影響は複雑である。それと同様に、本铸铁の変態特性に及ぼす Co の影響も複雑である。

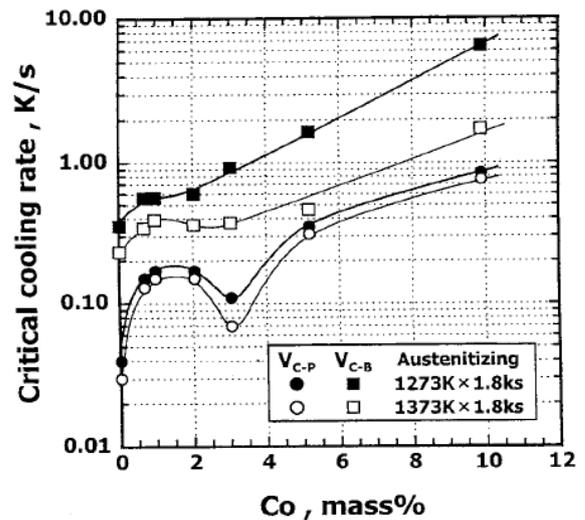


Fig.3 Influence of Co content and austenitizing temperature on critical cooling rate of multi-component white cast iron. ( $V_{C-P}$ : Pearlite transformation,  $V_{C-B}$ : Bainite transformation)

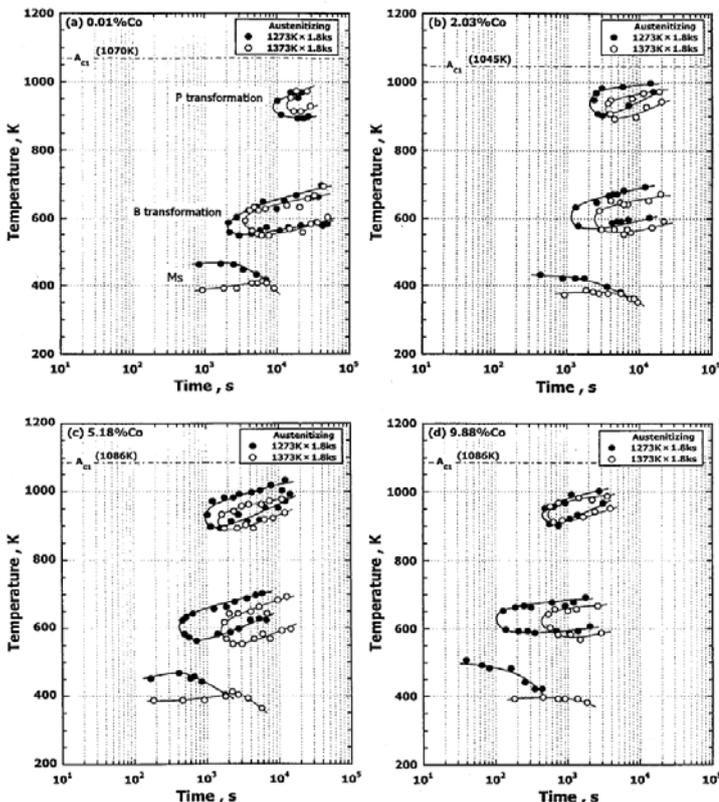


Fig.2 CCT diagrams of multi-component white cast irons with different cobalt content.

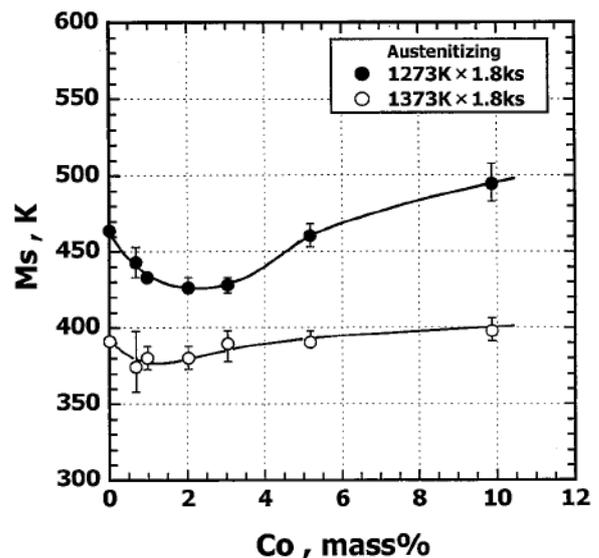


Fig.4 Influence of Co content and austenitizing temperature on Ms temperature of multi-component white cast iron.

#### 4. 熱処理特性に及ぼす Co の影響

多合金白鑄鉄は、焼入れ後の焼戻しにより大きな2次硬化を示す。Fig.5は基本合金組成の多合金白鑄鉄の焼戻し曲線に及ぼすCoの影響を示している。いずれの試料も焼戻し温度の上昇とともに硬さは上昇し、最大値を示した後低下する。同一焼戻し条件ではCo量が多いほど硬さは高く、2次硬化で得られる最高硬さも高い。さらに最高硬さを示す温度は、Co量の増加とともに高温側へ移動する傾向を示す。

Fig.6は773Kで焼戻しを行ったときの基地組織を示している。Co量の多い試料ほど微細な炭化物の析出が起こっている。Coは $\gamma$ 中のCの活量を増加させ、2次炭化物を多く析出させるために、より大きな2次硬化を示し、最高硬さを増加させるものと考えられる。なお、焼戻しによって析出する炭化物として、MC、 $M_6C$ 及び $M_7C_3$ が認められている<sup>13)</sup>。

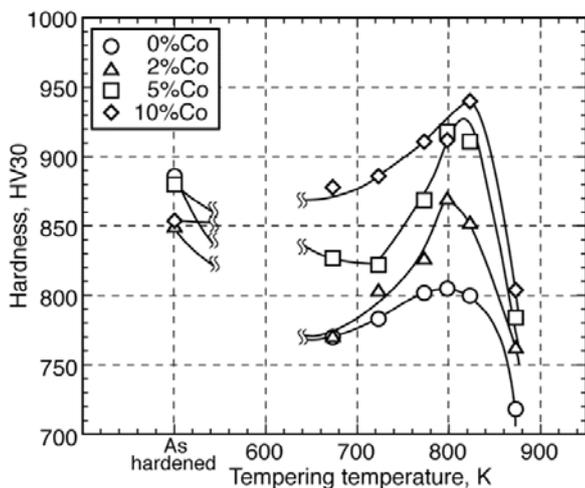


Fig.5 Relationship between tempered hardness and tempering temperature of multi-component white cast irons with different cobalt content. (Holding time :10.8 ks)

#### 5. 高温酸化特性に及ぼす Co の影響

多合金白鑄鉄の特性を十分発揮させるには、焼入れ・焼戻し処理が不可欠である。焼入れ処理を行う場合、高温に保持されるため、部材表面は著しく酸化される。また鉄鋼熱間圧延ロールに使用される場合、使用時の温度は823~973K<sup>14)</sup>となる。そのため、多合金白鑄鉄の高温酸化特性を把握しておくことは重要である。そこで、基本合金組成を有する多合金白鑄鉄の大気雰囲気での高温酸化特性に及ぼすCoの影響について調査した。Fig.7に973K~1273Kで36ksの酸化試験での酸化量とCo量の関係を示す。973Kでの試験では、Co量に関係なくほとんど酸化していないが、試験温度が1073K及び1173Kでは、Co量の増加とともに酸化量は低下し、Coの添加は本鑄鉄の耐酸化性を改善することが明らかである。しかし、試験温度が1273Kの高温になると、Coを10%まで増加させても、耐酸化性の改善にはつながらない。

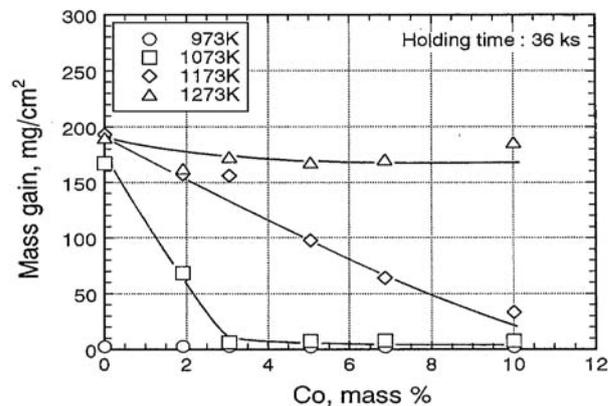


Fig.7 Influence of test temperature and Co content of multi-component white cast iron on mass gain of air-oxidation.

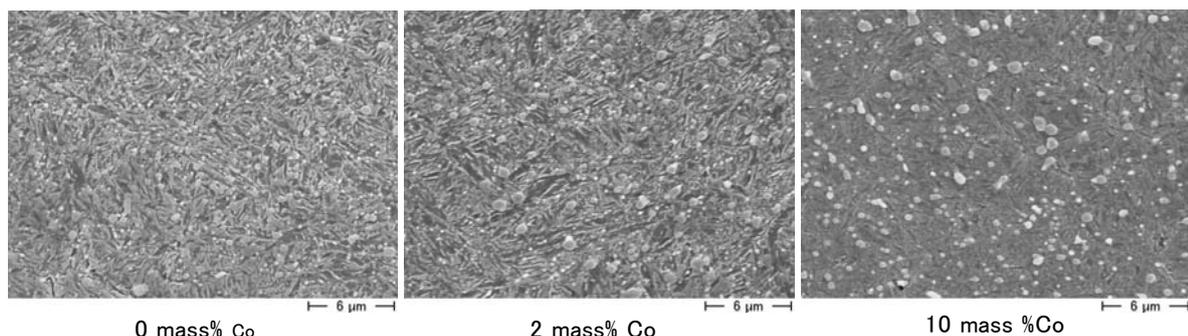


Fig.6 SEM microphotographs of tempered multi-component white cast irons with different cobalt content. (Tempered temperature: 773K)

Fig.8 に 11173 K での酸化試験後の酸化皮膜の状況を示す。Co を添加した試料では、比較的緻密な皮膜が形成されており、この緻密な皮膜の形成が、耐酸化性の向上に寄与していると考えられる。なお、皮膜の構造を調査した結果、皮膜は Co 無添加試料では主に  $Fe_2O_3$ 、Co 添加試料では  $Fe_2O_3$  および  $Fe_3O_4$  からなり、Co 量が増加するほど  $Fe_3O_4$  が増加する。また、Co は皮膜と母材の境界近傍に濃化して存在することが分かっている。

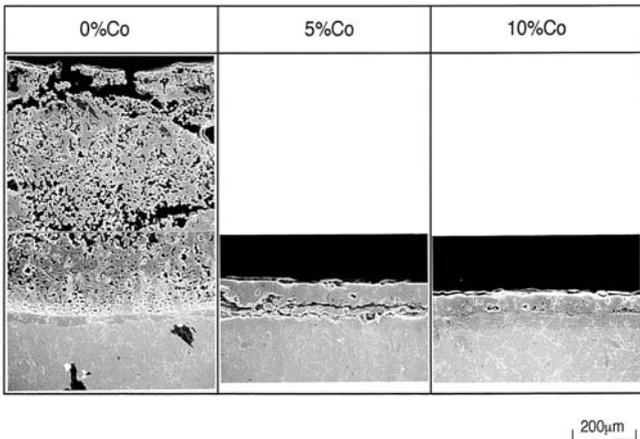


Fig.8 SEM microphotographs of oxide layers of multi-component white cast irons with different cobalt content tested in air 1173 K for 10.8 ks.

### 6. 高温硬さに及ぼす Co の影響

多合金白鑄鉄に Co を添加する目的の一つは、基地の高温硬さを高めることにある。特に本鑄鉄を熱間圧延ロールとして使用する場合、圧延温度が 823 ~ 973K となるため、973K までの高温硬さが重要となる。

Fig.9 は基本合金組成を有する鑄鉄に Co を添加し、1373 K で焼入れ後、773 K で焼戻し処理を行った試料について、高温硬さを調査した結果を示している。Co 量に関係なく硬さは温度の上昇とともに漸次低下し、973 K を超えると硬さは急激に低下する。Co 量の影響を見ると、Co 量が多いほど室温及び高温での硬さは高い。すなわち、室温での硬さが高いものほど、高温での硬さも高いことがわかる。

なお、橋本らの結果では、7%Co を含有した多合金白鑄鉄は 973K でも 350HV と高い硬さを示し、Co の有効性が示されている<sup>14)</sup>。

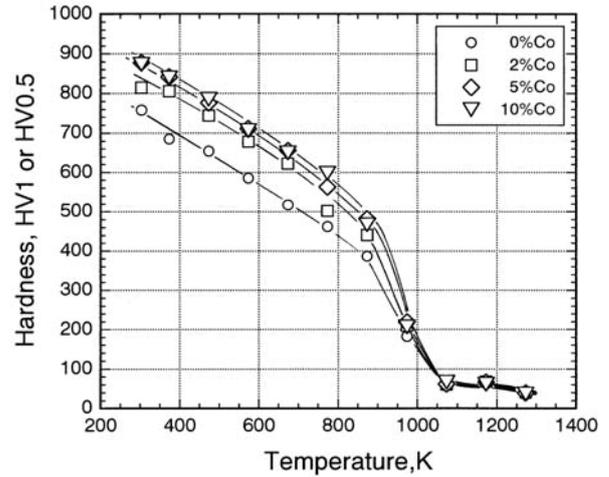


Fig.9 Influence of temperature on micro-hardness of multi-component white cast iron with different cobalt contents.

### 7. 耐摩耗性に及ぼす Co の影響

ここでは、アブレシブ摩耗試験（スガ式摩耗試験及びラバーホイール摩耗試験）及び金属同士のすべり摩耗特性に及ぼす Co の影響について述べる。アブレシブ材として SiC(#120 : 粒径約 170 µm) の磨耗紙を用い、荷重 29.4N(3kgf) で実施したスガ式摩耗試験結果を Fig.10 に示す。2次元摩耗であるスガ式摩耗試験では、耐摩耗性を表す摩耗速度（単位時間当たりの摩耗体積）は試料の硬さに比例して減少することがわかる。この結果から耐摩耗性に及ぼす Co 量の影響は認められないが、Fig.5 に示したように、同一焼入れ焼戻し材では、Co を多く含有した試料ほど硬さが高くなるため、この場合には Co 量の多い試料の方が、耐摩耗性に優れることは明らかである。

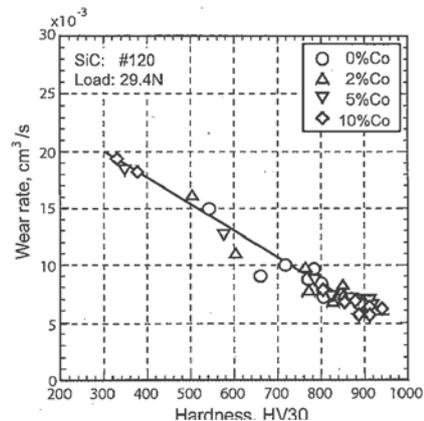


Fig.10 Relationship between wear rate by Suga type wear test and macro-hardness of multi-component white cast iron with different cobalt content.

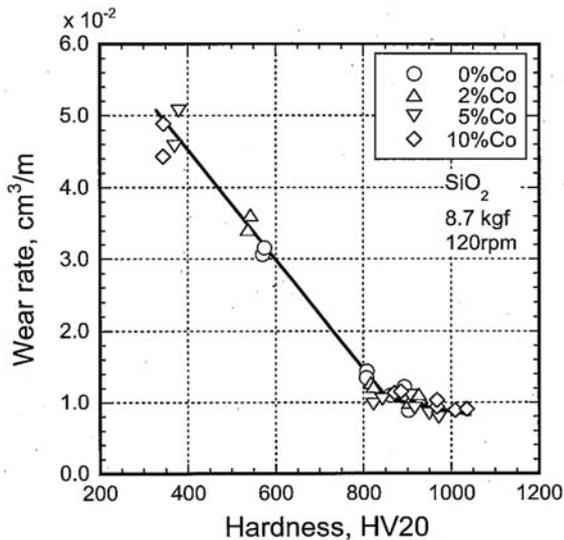
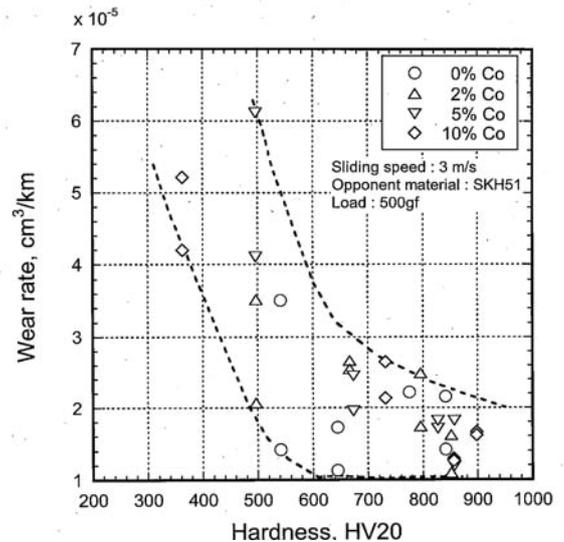


Fig.11 Relationship between wear rate by rubber wheel wear test and macro-hardness of multi-component white cast iron with different cobalt content.

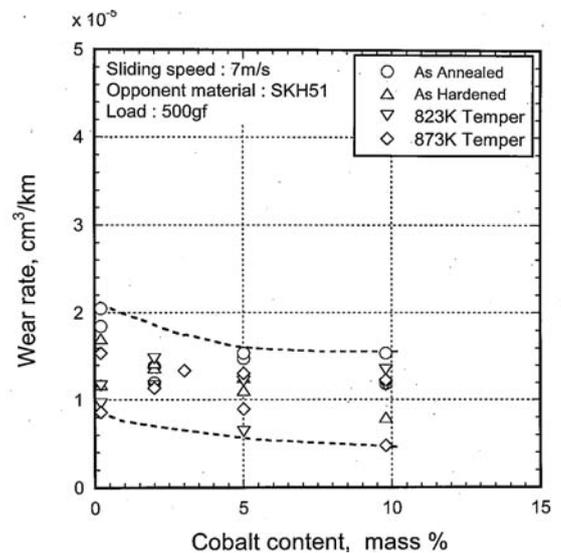
次に 3 次元摩耗であるラバーホイール摩耗試験結果を Fig.11 に示す。ラバーホイール摩耗試験とは、円盤端面にラバーを貼り、それと試験片の間に荷重を付加した状態で 6 号ケイ砂(粒径約 200 $\mu$ m)を流しながら摩耗させる試験法である。この場合も、2 次元摩耗と同様に耐磨耗性は試験片の硬さが高いものほど優れている。

次に金属同士のピンオンディスクタイプのすべり摩耗試験結果を Fig.12 に示す。試験はディスク材として SKH51(硬さ約 800HV)を用い、すべり速度を 3m/s 及び 7m/s の 2 条件で実施されている。すべり速度が 3 m/s (Fig.12(a))では、ばらつきはあるが、単位距離当たりの摩耗量は、硬さが高いほど低下しており、Co 量との関係は認められない。

一方、すべり速度が 7m/s(Fig.12(b))では、硬さの影響は認められず、ばらつきは大きいですが、Co の増加とともに摩耗量が減少する傾向が認められる。すべり速度が 3m/s の場合、摩耗面には金属の摩耗粉が多く認められ、7m/s では摩耗面には酸化皮膜が形成されていた。このことから、すべり速度が 3 m/s での摩耗は硬さに依存し、7 m/s での摩耗では、Co の多い試料ほど摩耗面の温度上昇により密着性の高い緻密な酸化皮膜が形成されるために、Co の影響が現れたと考えられる。



(a) Sliding speed: 3 m/s



(b) Sliding speed: 7 m/s

Fig.12 Relationship between wear rate by sliding wear test and macro-hardness of multi-component white cast iron with different cobalt content.

## 7. おわりに

多合金白鉄は、1990 年代に入って鉄鋼熱間圧延ロールに実用化され始めた。特に日本では CPC ロールが開発され、本鉄の性能を十分発揮させることができるようになってきている。これまで我々は、本鉄について凝固組織、変態特性及び熱処理特性などの基礎的な研究を行ってきており、ここでは本鉄の諸特性に及ぼす Co の影響についてまとめた。

Co はレアメタルで価格も高いことから、合金元素として多量に使用することは難しいが、本鑄鉄の諸特性に及ぼす Co の影響を把握しておくことは重要であると考え、この機会を利用してこれまでの研究データをまとめて紹介した。

#### 参考文献

- 1) 橋本光生,川上保, 小田高士,倉橋隆郎, 保木本勝利：新日鉄技報 355(1995) 76
- 2) 松原安宏, 笹栗信也, 本田義興, 武 宏強,橋本光生：鑄物 66(1994) 815
- 3) 武 宏強, 笹栗信也, 橋本光生, 松原安宏：鑄造工学：鑄物 67(1995) 49
- 4) 武 宏強, 笹栗信也, 橋本光生, 松原安宏：鑄物 69(1997) 917
- 5) 横溝雄三, 笹栗信也, 南條潔,松原安宏：鑄造工学 74(2002) 9
- 6) 横溝雄三, 笹栗信也, 南條潔,松原安宏：鑄造工学 74(2002) 69
- 7) 横溝雄三, 笹栗信也, 南條潔,松原安宏：鑄造工学 77(2002) 301
- 8) 横溝雄三, 笹栗信也, 山本郁,松原安宏：鑄造工学 82(2010) 8
- 9) 橋本光生, 西山泰行, 笹栗信也,松原安宏：鑄造工学 78 (2006) 238
- 10) 橋本光生, 西山泰行, 笹栗信也,松原安宏：鑄造工学 79 (2007) 23
- 11) 橋本光生, 西山泰行, 山本郁, 笹栗信也,松原安宏：鑄造工学 79(2007)650
- 12) 橋本光生, 西山泰行, 山本郁, 笹栗信也,松原安宏：鑄造工学 79(2007)732
- 13) 日本學術振興製鋼第 19 委員会：鉄鋼と合金元素(上) (誠文堂新光社) (1996)255
- 14) 橋本光生,久保 修,笹栗信也, 松原安宏：鑄造工学 76(2004) 205
- 15) 矢中棣二ほか：製鉄研究 308(1982) 104