

連続鋳造で製造した低炭素S-Pb快削鋼の被削性に及ぼす 溶鋼酸素濃度の影響

磯部 浩一*・草野 祥昌*・林 浩明*²・小川 敏文*³・関谷 武幸*²

Effects of Oxygen Content of Molten Steel on the Machinability of Low-carbon S-Pb Free-machining Steel Cast by Continuous Casting

Kohichi ISOBE, Yoshiaki KUSANO, Hiroaki HAYASHI, Toshihumi OGAWA and Takeyuki SEKIYA

Synopsis : A study was made to clarify the effects of oxygen content of molten steel on the machinability of low-carbon S-Pb free-machining steel cast by continuous casting.

The machinability of this steel was deteriorated by increase of the oxygen content of molten steel and oxygen potential of slag: $(\%T.Fe) + (\%MnO)$ after LF treatment. It was estimated that the cause of the deterioration of machinability was the increase of amount of MnO rich, MnO · SiO₂ system large oxides, which promoted the abrasive wear of tool because of their hardness and the size of oxides also promoted the wear. And it was supposed that the large oxides were formed by the contamination of Si and SiO₂ from added alloy and firebrick, and reoxidation by the involved high oxygen potential slag on Pb-injection, and the oxides trapped by solidified shell on the continuous casting, give the effects on the machinability. From the results of previous and this study, it seemed that the proper control of the oxygen content of molten steel considering the effect of oxygen content on the machinability through the size, shape and formability of MnS and the amount of MnO · SiO₂ system large oxides, was very important to improve the machinability on the production of this steel by continuous casting process.

Key words : low carbon ; S ; Pb ; free-machining steel ; oxygen content ; molten steel ; machinability ; oxide ; billet ; continuous casting ; reoxidation.

1. 緒言

自動車部品等機械加工部品の製造においては、鋼材の被削性が部品の品質や部品製造コストに大きく影響する。そのため、多くの分野で被削性の優れた鋼材が利用されているが、これらの鋼材に対して一層の被削性改善が要求されている。本研究では低炭素S-Pb快削鋼の被削性改善を目的に、実機製造プロセスにおいて試験を行い連铸快削鋼の被削性に及ぼす溶鋼酸素濃度の影響について調査した。

従来より高速度鋼の工具を用いて低炭素S快削鋼や、低炭素S-Pb快削鋼を旋削したりドリルで穴開け加工する場合の仕上げ面粗さや工具摩耗、工具寿命等で評価される被削性に対し、鋼材中のMnSの分布形態や変形能およびAl₂O₃やSiO₂等の硬質酸化物の量が大きな影響を及ぼすことが知られている^{1,2)}。溶鋼酸素濃度はMnSの分布形態や変形能^{3,4)}、あるいは、硬質酸化物量⁵⁾を通してそれらの被削性に影響を及ぼしていると考えられるが、必ずしもそれらの影響が分離された形では把握されていない。また、それらの影響は

溶製から鋳造工程までの製鋼プロセスやそれらの工程での操業条件によって大幅に異なることが考えられる。これまでに小型試験鋼塊を用いたラボ実験や実機規模の造塊法では本快削鋼や低炭素S快削鋼を高速度鋼の工具により旋削する場合の仕上げ面の粗さや、ドリルで穴開け加工する場合の工具寿命に及ぼす溶鋼酸素濃度の影響について検討した結果¹⁾や実機連铸材においてそれらの指数で評価される被削性について調査した結果^{1,5)}については報告されているが、実機連铸材の被削性に及ぼす溶鋼酸素濃度の影響について調査、検討した報告は少ない。

筆者らは、前報¹⁾において、溶鋼酸素濃度がMnSの生成挙動に影響し、結果としてMnSの分布形態や変形能を通して、仕上げ面粗さや工具寿命といった鋼材の被削性に影響することを明らかにしてきた。本研究では前報の小型試験鋼塊を用いたラボ実験で得られた知見を実機に適用するために、実機連铸プロセスにおいて低炭素S-Pb快削鋼連铸材の被削性に及ぼす溶鋼酸素濃度の影響についてプランジカット試験¹⁾で調査するとともに、溶鋼酸素濃度がどのように被削性

平成9年5月26日受付 平成9年8月26日受理 (Received on May 26, 1997; Accepted on Aug. 26, 1997)

* 新日本製鐵(株)室蘭技術研究部 (Muroran R & D Lab., Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

* 2 新日本製鐵(株)室蘭製鐵所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鐵(株)室蘭製鐵所 (現: 日本スチール(株)) (Muroran Works, Nippon Steel Corp., now Nihon Steel Company)

Table 1. Conditions of plunge cutting test.

Tool	High-Speed Steel(JIS SKH 57)
Feed	0.1 mm/rev
Lubricant	Spindle oil
Cutting width	5 mm
Cutting speed	80 m/min, Repeat 2.9sec cutting
Sample	60~80mm dia., Round bar as rolled

に影響を及ぼしているかについて検討した。

2. 実験方法

最初に本研究で実施した実機試験の試験方法について説明する。本試験では、転炉で低炭素溶鋼を溶製し、出鋼時やLFで合金鉄等を溶鋼へ添加して成分調整し、さらに、鍋上スラグへのフラックス添加等によりスラグ組成をコントロールして溶鋼酸素濃度を調整した。また、PbはLF処理後にインジェクション法で添加し、その後、溶鋼をビレット連铸機で断面サイズが162mm×162mmの铸片に铸造した。このビレット铸片を直径60mm~80mmの丸棒に熱間圧延し、この丸棒を用いて前報¹⁾と同様の切削条件でプランジカット試験を行い、試験サンプルの仕上げ面粗さを測定して被削性を評価した。プランジカット試験ではTable 1に示したように、高速度鋼の工具(JIS SKH57)を用い、機械油で潤滑しながら送り0.1mm/rev, 速度80m/min, 2.9s間の旋削を断続的に繰り返した。

3. 実験結果

実機試験材の化学組成をTable 2に示す。トータル酸素濃度を60~225massppmの範囲で変化させ、他の成分はできるだけ一定に制御した。

プランジカット試験で実機試験材の被削性を調査した結果をFig. 1~3に示す。Fig. 1にトータル酸素濃度と被削性の関係を示す。本図の縦軸の仕上げ面粗さ指数は、前報¹⁾と同様にJISで規定されたRzで仕上げ面粗さを評価し、各Rzの値をある値で割って規格化した指数であり、Rzに比例する指数であると共にこの値が小さいほど被削性が良好なことを意味する。本図より、トータル酸素濃度が高いほど実機試験材の仕上げ面粗さは増大し、被削性が低下することが分かる。前報¹⁾においては、プランジカットの仕上げ面粗さはトータル酸素濃度が高いほど改善され、その被削性の改善がMnSのサイズの増大や変形能の低下をもたらすことに起因することを明らかにした。同一の切削方法、切削条件にもかかわらず、Fig. 1の結果と前報のラボ実験の結果とは仕上げ面粗さのトータル酸素濃度依存性は逆の傾向を示

Table 2. Chemical compositions of test steels. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	T.Al	Pb	T.O
0.08~ 0.10	<0.01	0.98~ 1.01	0.062~ 0.078	0.31~ 0.34	<0.001	0.22~ 0.30	0.006 ~ 0.0225

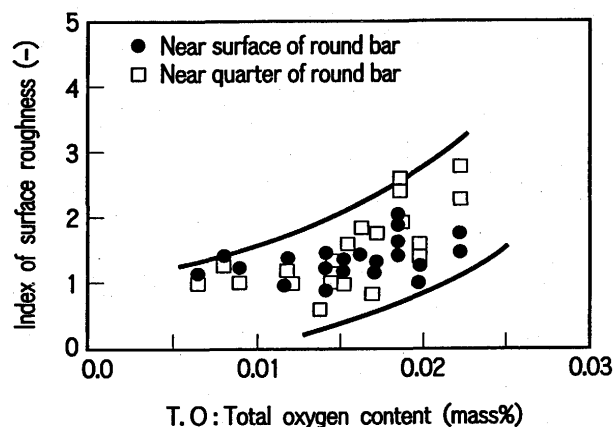


Fig. 1. Relation between total oxygen content and index of surface roughness. (Plant tests)

している。連铸材と小型鋼塊材の差や圧延材と鍛造材の差異はあるものの、MnSの分布形態や変形能の酸素濃度に対する依存性は基本的には同じと考えられ、従って、それらの因子を通じてのプランジカットの仕上げ面粗さの溶鋼酸素濃度依存性も同様な傾向を示すと推定される。それにもかかわらず、実機試験材とラボの小型鋼塊材の仕上げ面粗さが異なった酸素濃度依存性を示したことは、実機試験材の被削性がMnSの分布形態や変形能以外の因子を通して溶鋼酸素濃度の影響を受けていることを示唆していると考えられる。また、造塊材での調査結果を含め、仕上げ面粗さや工具寿命等の被削性が溶鋼酸素濃度の増大にともなって悪化すると報告はほとんど見受けられない。

次に、LF処理後のスラグ酸化度 $\{(\%T.Fe) + (\%MnO)\}$ と仕上げ面粗さ指数の関係をFig. 2に示す。本図より、実機試験材においては上記スラグ酸化度が高いほど仕上げ面粗さは悪化している。このスラグ酸化度が高いと溶鋼のトータル酸素濃度も高くなることが確認されており、LF処理後のスラグ酸化度が溶鋼のトータル酸素濃度を通して仕上げ面粗さに影響を及ぼしていると考えられる。

このように、実機試験材において溶鋼酸素濃度の増加とともに被削性が低下する理由を明らかにするため、铸片表面よりスライム法で大型酸化物を抽出し、その量と被削性の関係について調査した。直径53 μ m以上の大型酸化物のビレット1kg当たりの量と仕上げ面粗さ指数の関係をFig. 3に示す。本図より、実機試験材の被削性はスライム法で抽出された大型酸化物の増加に起因して低下していることが分かった。

トータル酸素濃度が152ppmで大型抽出酸化物の個数がビ

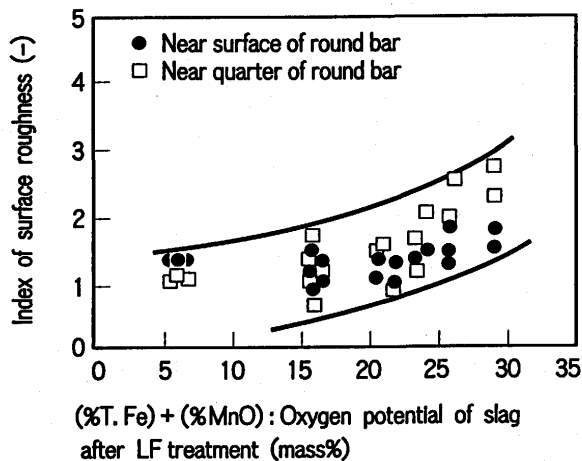


Fig. 2. Relation between oxygen potential of slag after LF treatment $\{(\%T.Fe) + (\%MnO)\}$ and index of surface roughness.(Plant tests)

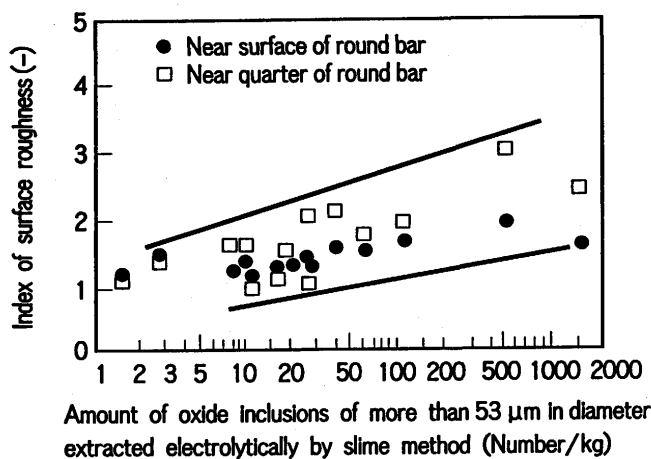


Fig. 3. Relation between amount of oxide inclusions of more than $53\mu m$ in diameter extracted electrolytically by slime method and index of surface roughness.(Plant tests)

レット 1 kg 当たり 120 個あった鋼材において、大型酸化物の組成を E. P. M. A で調査した結果を Fig. 4 に示す。多くの鑄片で調査した結果、抽出介在物としては球形の MnO・SiO₂ 系酸化物、非球形の SiO₂ 系や Al₂O₃ 系の酸化物が認められたが、Fig. 4 のように溶鋼酸素濃度が高い場合は MnO に富む MnO・SiO₂ 系酸化物が多く認められ、溶鋼酸素濃度の低下にともなってその個数は減少した。さらに、上記 MnO・SiO₂ 系酸化物の形態や組成について詳細に調査した結果、MnO・SiO₂ 単相の場合 (Fig. 5 (a)) や MnO・SiO₂ 系の中に Al₂O₃ や SiO₂、MnS に富む相が析出している場合 (Fig. 5 (b)) が観察された。以上の調査結果より、トータル酸素濃度の増大にともなう実機試験材の被削性の低下に、MnO に富む MnO・SiO₂ 系大型酸化物の増加が関与していることが分かった。なお、このような MnO・SiO₂ 系酸化物が旋削時の仕上げ面粗さに代表されるような被削性に対して悪影響を及ぼすことは従来報告されていない。

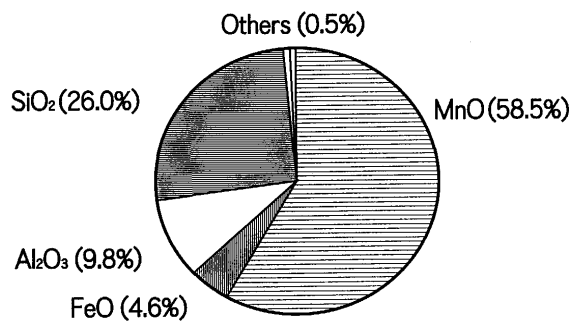
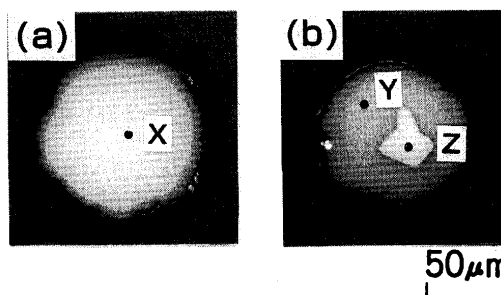


Fig. 4. Average composition of oxide inclusions of more than $53\mu m$ in diameter extracted by slime method.(Average of 20 oxides, Plant tests)



X: 52.5mass%MnO-25.6%SiO₂-11.8%Al₂O₃
 Y: 46.5mass%MnO-34.2%SiO₂-14.0%Al₂O₃-2.2%FeO
 Z: 55.8mass%Al₂O₃-40.1%MnO-3.3%FeO

Fig. 5. Micrographs and composition of oxide inclusions extracted by slime method.(Plant tests)

4. 考察

4・1 MnOに富むMnO・SiO₂系大型酸化物の生成機構

さらに本研究では、被削性に有害なMnOに富むMnO・SiO₂系大型酸化物の生成機構について検討した。製鋼の各段階で溶鋼サンプルを採取、急冷し、直径20 μm 以上のMnO・SiO₂系酸化物の単位視野面積当たりの個数を光学顕微鏡とE. P. M. A.を用いて測定した結果をFig. 6に示す。上記酸化物はLF処理後では少ないが、Pbを溶鋼へインジェクションした直後には大幅に増加し、その後は工程が進む間に減少している。本結果およびLF処理後のスラグ酸化度が高いほどこのMnO・SiO₂系酸化物が増加することを考え合わせると、MnOに富むMnO・SiO₂系の酸化物は、Pbインジェクション時に酸化度の高いスラグが溶鋼に巻き込まれ、それによる溶鋼の再酸化で生成したものと推定される。PbインジェクションがArガス雰囲気中で行われること、および、Fig. 4にも示したように上記酸化物のCaO含有量が少ないことから、雰囲気による溶鋼の再酸化の影響や巻き込みスラグ自身がそのまま残留した可能性は小さいと考えられる。

次に熱力学計算により上記酸化物の生成機構について検討した結果について述べる。本計算では、溶鋼組成を0.1mass% C-

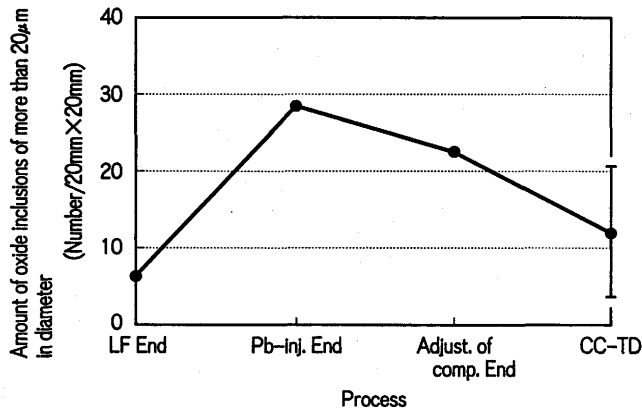
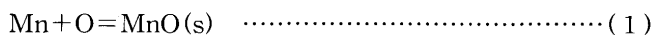


Fig. 6. Change of the amount of oxide inclusions of more than 20μm in diameter during steel-making process.

0.01%Si-1.0%Mn-0.08%P-0.35%S-0.0005%Alとし、Pbをインジェクションする1600°Cにおいて下記(1)式の反応でMnO生成するのに必要な溶鋼フリー酸素濃度を求めた。なお、(1)式の反応の自由エネルギーと各元素の相互作用助係数は学振の推奨値⁶⁾を用いた。



$$\log K(\text{s}) = 15,050/T - 6.75 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K(\text{s}) = a_{\text{MnO}(\text{s})} / a_{\text{Mn}} \cdot a_{\text{O}} = a_{\text{MnO}(\text{s})} / (f_{\text{Mn}} \cdot [\% \text{Mn}] \cdot f_{\text{O}} \cdot [\% \text{O}]) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$G^{\circ}(\text{J}) = -288,200 + 129.3 \cdot T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\log f_{\text{Mn}} = \sum_j e_{\text{Mn}}^j \cdot [\%j] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\log f_{\text{O}} = \sum_j e_{\text{O}}^j \cdot [\%j] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここでs: 固体, T: 溶鋼温度(K), j: 各種元素 (j=Mn, O, Al, C, P, S, Si)

本計算で得られたMnOの生成に必要な溶鋼フリー酸素濃度は670massppmであった。一方、LF処理後の溶鋼フリー酸素濃度の実測値は200massppm未満であるため、上記計算結果はバルク溶鋼の組成や溶鋼のフリー酸素濃度では溶鋼中にMnOが生成しないことを示しており、上記計算結果もスラグによる溶鋼の再酸化に起因するとした上記酸化物の生成機構を裏付けるものと言える。

さらに、溶鋼の再酸化による大型酸化物の生成をラボ実験で模擬した結果について述べる。本実験では150kg真空溶解炉を用い、以下の方法でPbを含有しない3種類の低炭素S快削鋼の鋼塊を溶製した。一つは溶鋼成分と温度を調整後何もせず鑄型へ鑄込んだもの(以下L1と記す)、他の二つは成分調整後にろう石レンガ(SiO₂含有率85%)を溶鋼へ浸漬してSiO₂を溶解、添加した後、一つはそのまま鑄型へ注入して凝固させたもの(L2)、もう一つは鑄造の際に鉄鉱石を注入流へ添加して溶鋼を再酸化させながら鑄造したもの(L3)である。これらの鋼塊の表層部で酸化物の種類や量を光学顕微鏡とE. P. M. A. で調査した。

各鋼塊表層部で視野面積20mm×20mm当たりに観察され

Table 3. Amount of oxides of more than 10μm in diameter of 150kg ingots.

Ingot	L1	L2	L3
Number / 20mm×20mm	0	0	4

Table 4. Melting point and microhardness of several kinds of inclusion⁹⁾.

Inclusion	Melting Point °C	Microhardness kN/mm ²
MnO	1850	55
2MnO · SiO ₂	1345	131
MnO · SiO ₂	1291	104
SiO ₂	1723	221
Al ₂ O ₃	2020	415~622
MnS	1600	24

る直径10μm以上のMnO·SiO₂系酸化物の個数を測定した結果をTable 3に示す。何も添加しない鋼塊(L1)やろう石レンガを浸漬しただけの鋼塊(L2)ではサブミクロンオーダーの酸化物しか観察されなかったが、ろう石レンガを溶解後、鉄鉱石で溶鋼を再酸化させた鋼塊(L3)では直径が10μm以上の酸化物が観察された。本実験結果より、MnO·SiO₂系の大型酸化物は、SiO₂が溶鋼へ混入するとともに溶鋼の再酸化が加わって初めて生成することが確認された。

スラグによる再酸化で酸化物系大型介在物がタンテンシユ等で増加することが報告されており⁷⁾、これらの報告も上記大型酸化物の生成機構を支持するものと考えられる。また、再酸化で大型酸化物が増加するのは、酸化し易い成分を含む溶鋼が再酸化を受けると、溶鋼中に既に存在するSiO₂等の酸化物を核としたheterogeneous reactionで酸化物が新たに生成、成長したり、生成した酸化物が凝集、合体して大型化するため⁸⁾と推定される。

4.2 MnO·SiO₂系大型酸化物の生成による被削性低下機構

R. Kiesslingらによって各種介在物の微小硬度の測定結果がTable 4のようにまとめられており⁹⁾、その測定結果では、実機試験材で抽出された酸化物組成に近い2MnO·SiO₂の硬度はAl₂O₃やSiO₂の硬度に比べ小さいものの、MnSやMnOに比べると2倍あるいは5倍以上大きいことが分かる。

さらに、本研究ではMnO·SiO₂系大型酸化物の被削性への影響を確認する目的で、溶鋼再酸化の模擬実験で溶製したL2とL3の鋼塊を、前報と同様に熱間鍛造で直径50mmの丸棒に加工した後に、プランジカット試験を行い、仕上げ面粗さを測定して被削性を評価した。その結果を前報の結果と比較してFig. 7に示す。前報のラボ溶製材はサブミクロンオーダーのMnO系酸化物のみが観察されていたものである⁴⁾。Fig. 7より、SiO₂を添加しただけでMnO·SiO₂系酸化物が微細に分散している材料(L2)では仕上げ面粗さの悪化は認められないが、再酸化で酸化物が大型化した材料(L3)では、同一トータル酸素濃度で他の材料に比べ仕上げ面の粗さが増大していることが分かる。本材料の切削では、使

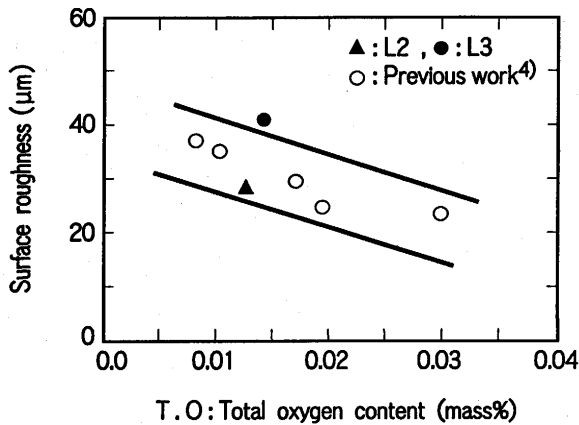


Fig. 7. Relation between total oxygen content and surface roughness.(Labo. experiments)

用した高速度鋼工具のすくい面や逃げ面で溝状摩耗がより進行しており、その結果として仕上げ面粗さが増大したと考えられる。超硬工具での旋削で Al_2O_3 のサイズが工具摩耗に影響することが報告されているが¹⁰⁾、本実験結果より、高速度鋼の工具での旋削において $MnO \cdot SiO_2$ 系酸化物のサイズが工具摩耗や仕上げ面粗さに影響を及ぼし、 $10\mu m$ 以上の大きさの酸化物がある程度の量存在する場合はこれらの指数で評価される被削性が低下することが初めて明らかになった。

以上の検討結果より、 $MnO \cdot SiO_2$ 系大型酸化物の生成機構とこの酸化物の増加により実機試験材の仕上げ面粗さ等の被削性が低下する機構はFig. 8のように推定される。成分調整用の合金等から微量のSiが溶鋼へ混入し、溶鋼中の酸素と反応して SiO_2 が生成する。また、成分系や被削性に有害な硬質酸化物の生成を防止するためにAlやSiで脱酸しないことに起因して溶鋼中の酸素濃度が高く、成分調整のためにMnを添加すると MnO が容易に生成する。この MnO により耐火物中の SiO_2 が溶出したり、取鍋スラグの酸化度が高くなり易い。このような状態でPbをインジェクションすると、溶鋼に巻き込まれた取鍋スラグによる溶鋼の再酸化で MnO に富む $MnO \cdot SiO_2$ 系の大型酸化物が生成する。その一部は溶鋼から浮上しきれず、連続鋳造の際に凝固シェルに捕捉され、介在物として鋼材内に残留する。その量が多いと切削時に工具のアブレッシブ摩耗を促進するため、工具寿命の低下や仕上げ面粗さの増大をもたらす。

また、凝固時の介在物の浮上挙動や凝固シェルへの捕捉挙動は鋳造プロセスや鋼塊サイズおよび鑄片サイズ、その他の鋳造条件によって大幅に変化すると考えられ、それらの相違によって $MnO \cdot SiO_2$ 系の大型酸化物の鋼材への残留量やその酸化物量を通じての溶鋼酸素濃度の被削性への影響も鋳造プロセスや鋳造条件によって大幅に異なると推定される。今回の実機試験の結果も実機試験のプロセスや鋳造条件等の試験の条件に依存した結果と考えられる。

なお、以上の検討結果から、スラグによる再酸化で生成

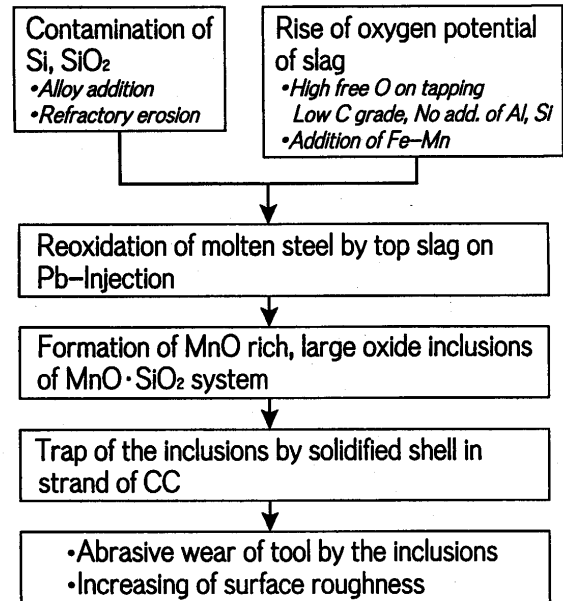


Fig. 8. Schematic diagram on the formation of $MnO \cdot SiO_2$ inclusions and the effects on the machinability.(Plan tests)

するような大型の $MnO \cdot SiO_2$ 系酸化物の有無が、前報⁴⁾と本研究において仕上げ面粗さの溶鋼酸素濃度依存性に大きな相違を生じさせた主因と判断される。

5. 結論

低炭素S-Pb快削鋼の被削性改善を目的に、前報の基礎検討に引き続いてピレット連続鋳造を採用した実機プロセスにおいて実機試験を行い、プランジカット試験により実機連続鋳材の被削性に及ぼす溶鋼酸素濃度の影響について調査すると共に、実機試験材の被削性低下原因となった大型酸化物の生成機構や生成原因等について、実機溶製工程での介在物生成挙動調査やラボでの溶鋼再酸化の模擬実験などにより検討し、以下のことを明らかにした。

(1) 本快削鋼実機試験材のプランジカットの仕上げ面粗さは溶鋼のトータル酸素濃度やLF処理後のスラグ酸化度の増加にともない増大し、被削性の低下が認められた。

(2) 上記被削性の低下は、 MnO に富む $MnO \cdot SiO_2$ 系大型酸化物の増加に起因すると推定された。

(3) また、上記酸化物は MnS や MnO に比べある程度高い硬度を有し、しかもそのサイズが大きいために工具摩耗を促して仕上げ面粗さの増大原因になったと推定された。

(4) 上記酸化物は、添加合金や耐火物からSiや SiO_2 が混入し、さらにPbのインジェクション時に酸化度の高いスラグによる溶鋼の再酸化に起因して生成したと推定された。

(5) 以上の結果および前報の結果より、本快削鋼連続鋳材の旋削時の仕上げ面粗さや工具摩耗などで代表される被削性の改善には、 MnS の分布形態や変形能を通してのそれら

被削性への影響に加え、上記MnO・SiO₂系酸化物量を通じての被削性への影響を考慮した溶鋼酸素濃度の適正な制御が重要であると推察された。

文 献

- 1) S. Ohtani, S. Katayama, T. Akasawa, D. Bhattacharya and H. Yaguchi: *J. Appl. Metalwork.*, 4(1986), 245.
- 2) 藤田 達, 山口嘉弘, 萩原康禎, 金田次雄, 柳 義親: 鉄と鋼, 57(1971), 260.
- 3) C. E. Sims: *Trans. AIME*, 215(1959), 367.
- 4) 磯部浩一, 草野祥昌, 前出弘文: 鉄と鋼, 80(1994), 890.
- 5) J. Thomas, W. Pepler, S. Geiman and P. Freeman: *Mech. Work. Steel Process.*, 29 (1992), 321.
- 6) 製鋼反応の推奨平衡値 改訂増補, 日本学出版興会製鋼第19委員会編, (1984), 114; 257.
- 7) 駒村宏一, 久々湊英雄, 小嶋英明, 越川隆雄, 上杉浩之, 児玉正範, 吉井 裕, 垣生泰弘, 江見俊彦: 鉄と鋼, 67 (1981), A133.
- 8) V. Brabie, M. Kawakami and S. Eketorp: *Scand. J. Metall.*, 4 (1975), 273.
- 9) *Non-metallic Inclusions in steel of part III*, ed. by R. Kiessling, The Metals Society, London, (1978), 74.
- 10) 古沢貞良, 竹下秀男, 佐々木敏彦: 昭和56年度精密機械学会春期大会学術講演会論文集, (1981), 16.