

## 技術資料

## Technical Data

# 連続铸造時のオシレーション条件最適化による 自動車用鋼の铸片表面品質改善

白鳥雅之\*, 菰田頼忠\*, 山口智則\*

## Improvement of Bloom Surface Quality of Automotive Steels by Optimizing Mold Oscillation Parameters in Continuous Casting

Masayuki Shiratori, Yoritada Komoda, and Tomonori Yamaguchi

### Synopsis

*The steelmaking shop of Chita plant, Daido Steel, produces various grades of specialty steel, low alloy steel mainly for automotive application.*

*Its monthly production is approximately 150000ton and it accounts for 90 % of crude steel produced in Daido. The molten steel is mainly cast by 2types of continuous casters. One type continuous caster (No.1 CC) is a curved-type bloom caster and the other (No.2 CC) is a high performance caster and capable of producing ultra-clean steel with better surface quality due to its unique design of "vertical type caster and round bloom".*

*In the last one and a half years, we have faced problems in decreased production after Lehman shock. Accordingly we have been promoting campaigns to improve product yield (yield of bloom and final product) in order to achieve a better profit.*

*This paper details the result of surface quality improvement achieved by applying "high-cycle and short stroke oscillation" to No.2 CC.*

## 1. 緒 言

当社知多工場（以下、当工場という）は、自動車用鋼を主体とした肌焼鋼、強靱鋼をはじめ、軸受鋼、ステンレス鋼などの特殊鋼を多品種・小ロット体制で月産約 150 千 t の製造能力がある。しかし、直近の大幅な減産下環境を受け、収益確保の観点から当工場では铸造から検査までの一貫歩留り向上を鋭意推進中である。さらに特殊鋼の主要な用途である自動車用鋼においては、部品製造コスト低減や製造時の CO<sub>2</sub> 排出削減を目的とした冷間鍛造工法の適用拡大が進んでおり、鋼材の表面品質向上のニーズはますます高まっている。今回、さらな

る検査歩留り向上と共に、自動車用鋼の加工時のワレなどを防止するための表面品質の高度化ニーズに対応すべく、丸断面垂直型連続铸造機である No.2CC のオシレーション条件のショートストロークハイサイクル化により铸片表面品質改善を図ったので、その詳細を報告する。

## 2. 現状の当社連铸铸片表面品質

### 2. 1 当工場のプロセスフロー

当工場は多品種小ロットの特殊鋼量産工場であり、鋼種数も月間平均 800 鋼種を数える。製鋼設備としても、電気炉 5 炉、構造用鋼の精錬炉である LF、RH を各 3

2010 年 10 月 29 日受付

\*大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

基, SUS専用精錬炉 AOD を1基, 鑄造設備として連鑄機2基の他, 半連鑄機 (PHC) を1基・IC鑄込場を2箇所有する。

主に自動車用鋼については完全湾曲型の No.1CC で, ステンレス・軸受鋼などについては, 高品質造り込みを目的に丸断面モールド完全垂直型である No.2CC により鑄造している。

## 2. 2 連続鑄造機(以下CC)マシンタイプ別表面ワレ影響因子と現状の表面ワレ種比率

CCマシンタイプ別に鑄片表面ワレへの影響因子を考察すると以下のことがいえる。

- (1)一次冷却帯 : 角型モールド(以下 MD) では面部とコーナー部で冷却速度の差が生じ不均一冷却が生じやすいのに対して, 丸型 MD では全周に渡って均一冷却となる。
- (2)鑄片矯正 : 湾曲型 CCではピンチロール(以下 P/R) 矯正帯にて引張応力が発生するのに対して, 完全垂直型 CCでは鑄片に対する引張応力は発生しない。

上記観点より, 当工場 No.2CC は丸断面 MD および完全垂直マシンのため, 表面品質について高品質な鋼材を製造できる連続鑄造機として位置付けている。従って, 表面品質の要求レベルの高いアイテムについては No.2CC 化を積極的に活用しているが, 製品検査過程で発見される表面ワレは鑄造過程で発生したと推定される微小ワレ(ヨコワレ)が発生比率では最も高位であった (Fig.1)。

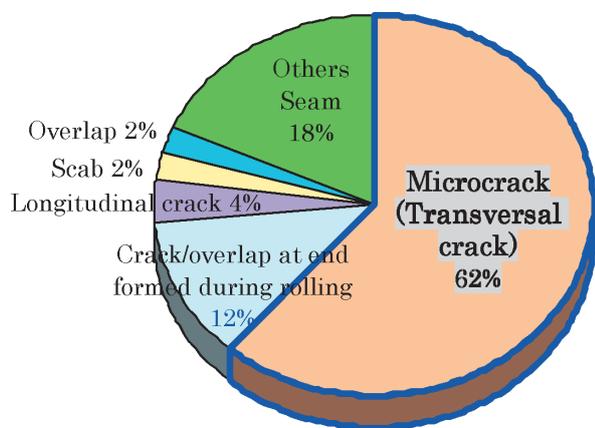


Fig.1. Surface crack incidence of No.2CC product.

## 2. 3 CC鑄片表面微小ワレ改善手法

CC材鑄片表面微小ワレ(ヨコワレ)発生の原因として, 大きく分類してオシレーションマーク(以下 OSM)深さによるノッチ効果や不均一冷却などが原因の「①一次冷却帯が及ぼす影響」と鑄片冷却過程での組織脆弱化が原因となる「②二次, 三次冷却帯が及ぼす影響」の2つに分けることができる。今回の表面品質改善においては OSM 深さに着目し, OSM 深さ低減による鑄片表面微小ワレ改善に着手した。

OSM 深さ低減策としては, ショートストローク・ハイサイクルオシレーションが一般的に有効であることが知られている。No.2CC においてもこれまで難加工鋼種である SUS303 などにショートストローク・ハイサイクル化を適用し品質改善を実施してきた。しかし, 一般構造用鋼においては, ハイサイクル化に伴う MD パウダー流入不良や, 特に肌焼鋼などの包晶系炭素濃度鋼 (0.15 ~ 0.20 %) における初期凝固時の収縮量が大いことに起因する不均一冷却やブレイクアウトが原因でハイサイクル化を適用できずにいた。そこで今回, 一般構造用鋼のハイサイクル操業に対応した新規 MD パウダー設計・製造, および操業安定化を目的とした二次冷却帯レイアウト改造(スプレーノズル位置変更)を実施することにより, 一般構造用鋼におけるハイサイクル操業拡大を図った。

## 3. 一般構造用鋼ショートストローク・ハイサイクル化改善

### 3. 1 一般構造用鋼ショートストローク・ハイサイクル用 MD パウダー設計

#### 3. 1. 1 ショートストローク・ハイサイクル用 MD パウダーの考え方

MD の振動条件は, 「オシレーションマーク形成時間 ( $T_n$ : ネガティブストリップ時間)」と「MD パウダー流入時間 ( $T_p$ : ポジティブストリップ時間)」「NSR (ネガティブストリップ時間率)」によって設定される。一般的に, ショートストローク・ハイサイクル操業を適用した場合, NSR が一定であるならば  $T_n$  と同時に  $T_p$  も減少するため, MD パウダー流入量が減少し, MD 内拘束や不均一冷却を誘発する可能性がある。よって, ショートストローク・ハイサイクル操業専用の MD パ

ウダーを開発する必要がある。ショートストローク・ハイサイクル化に伴う铸片-MD間の潤滑性確保のためのパウダー流入量を確保するため、「粘性 down」「熔融温度 down」、また、パウダーのMD内滞留時間が増加することによるベア発生防止策として「凝固温度 down」という考え方で設計を検討した。

### 3. 1. 2 鋼種別ショートストローク・ハイサイクル用 MDパウダー設計

#### (1)肌焼鋼(0.15% ≤ [C] ≤ 0.20%) 用パウダー検討

肌焼鋼用 MD パウダーについては「鋼種収縮率」と「パウダー熔融層厚」から検討を実施した。「鋼種収縮率」は MD サイズと実铸片サイズの差から算出したものを、「パウダー熔融層厚」は铸造中の MD 内パウダー熔融層厚実績値を採用している。従来よりショートストローク・ハイサイクル操業を適用しているステンレス鋼や耐熱鋼に適用しているパウダー粘性で鋼種収縮率とを比較した結果を Fig.2 に示す。この結果を参考にして、肌焼鋼用 MD パウダーの最適粘性を 0.16Pa・s とした。

#### (2)軸受鋼([C] ≒ 1.00%) 用パウダー検討

軸受鋼に関しては、下記式(1)で表される「連続铸造 MD パウダー消費量モデル<sup>1)</sup>」を用いて、従来操業のパウダー消費量とハイサイクル操業適用後のパウダー消費量が同量になるようにパウダー設計を実施した。

$$Q = \frac{K_1 \times A^{0.4}}{T_{cs}^{1.6} \times \mu^{0.5} \times Vc} \times \cos^{-1} \left( \frac{-1000 \times Vc}{2\pi \times f \times A} \right) \quad (1)$$

..... (1)  
 ( Q : パウダー消費量 (kg/t), K<sub>1</sub> : 定数,  
 A : ストローク (mm), T<sub>cs</sub> : パウダー凝固温度 (K)  
 μ : パウダー粘性 (Pa・s at 1573 K)  
 f : MD 振動数 (cpm), Vc : 铸造速度 (m/min)

#### (3)ショートストローク・ハイサイクル用 MDパウダー物性値

上記(1)によって算出された値を基に作製した MD パウダー物性値を Table 1 に示す。今回、この MD パウダーを使用してショートストローク・ハイサイクル操業テストを実施した。

### 3. 2 ショートストローク・ハイサイクル操業安定化を目的とした二次冷却帯レイアウト改造

ショートストローク・ハイサイクル操業では Tn・Tp の減少に伴う凝固シェル発達不足によるブレイクアウトが発生しやすい。そこで今回、ハイサイクル操業適用時の操業安定化を目的として MD 直下近傍の冷却効果向上と均一冷却を促すために二次冷却帯レイアウトの改造を実施した。

二次冷却帯スプレー設置位置検討結果を Table 2 に示す。铸片とスプレーチップとの距離を 70,160,250 mm と変化させて水量分布のシミュレーションを実施した。各スプレー距離にて面別水量および均一冷却性を比較し

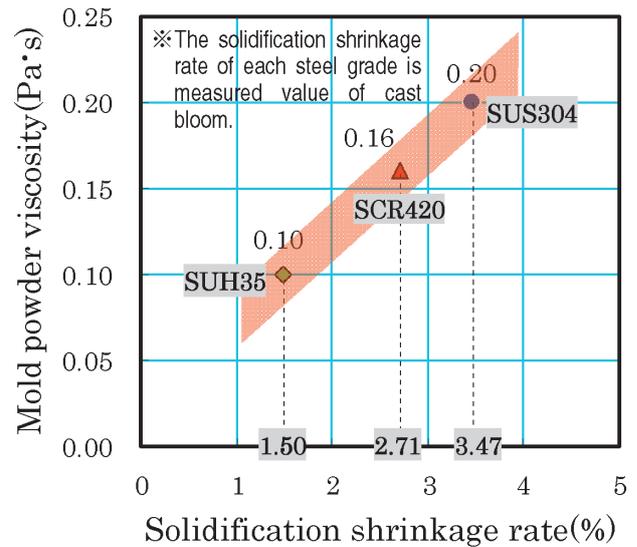


Fig.2. Relationship of solidification shrinkage rate and mold powder viscosity in short stroke high cycle applying steel.

Table 1. Mold powder properties of steel classification for a high cycle oscillation.

Steel grade	Condition	Stroke (mm)	Mold powder characteristic		
			Melting point(K)	Breaking point(K)	Viscosity (Pa・s)
Case hardening steel	Conventional	5.9	1393	1393	0.23
	Test	3.1	1353	1383	0.16
Bearing steel	Conventional	5.9	1293	1313	0.10
	Test	3.1	1293	1293	0.06

た。鑄片ースプレー距離が70 mmや250 mmではノズル部の強冷却傾向やスプレー水ラップ位置での低水量域が確認されたため、160 mmが最も冷却効果・均一冷却性に優れていると判断し、今回MD直下近傍のスプレー配管の改造を実施した。

## 4. ショートストローク・ハイサイクル 操業テスト結果

### 4. 1 操業性評価

鋼種別ショートストローク・ハイサイクル操業テスト

条件を Table 3 に示す。OSM を形成する時間である Tn は従来対比はほぼ半減する条件でテストを実施した。

鑄造中のパウダー消費量および溶融層厚はハイサイクル化に伴い、両者共にやや低下傾向であったが大幅な減少は見られず (Fig.3), 流入性問題なしと判断した。また、OSM 深さについては、鋼種特性の違いにより減少勾配に違いが見られるが、狙いどおり Tn 減少に伴い減少傾向であった (Fig.4)。

また、鑄片外観表面観察結果を Table 4 に示す。ショートストローク・ハイサイクル材はデプレッションやスティッキングの発生がなく良好であった。

Table 2. The examination result of the second cooling zone spray setting position.

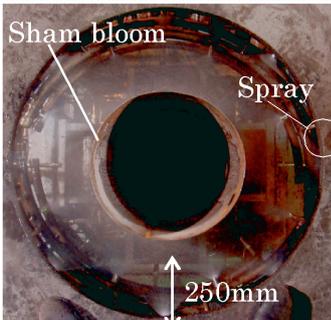
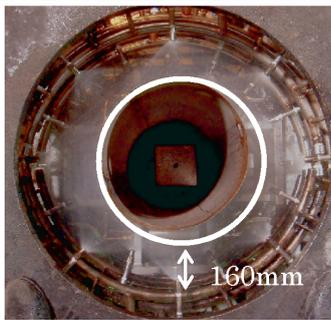
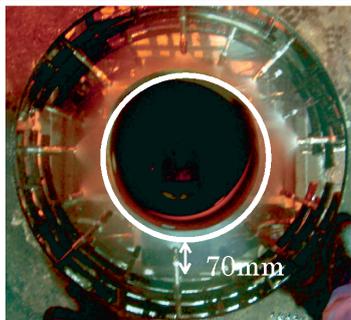
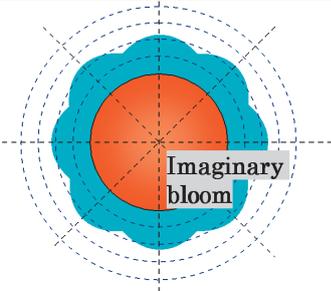
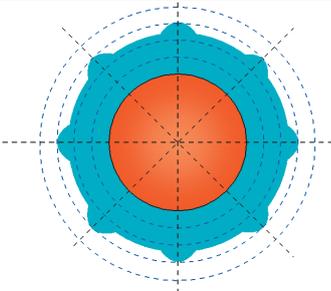
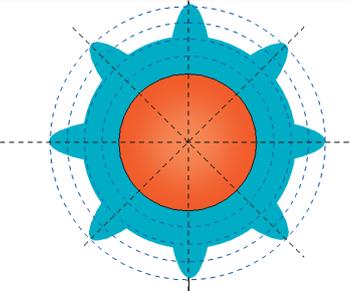
	Spray condition and distance between spray nozzle and bloom surface		
	250mm	160mm	70mm
Configuration of bloom and spray nozzle			
Cooling image			
Evaluation	Fair	Good	Bad

Table 3. Casting condition of high cycle oscillation.

Oscillation parameters	Case hardening steel		Bearing steel	
	Conventional	Test	Conventional	Test
Stroke	5.9 mm	3.1 mm	5.9 mm	3.1 mm
NSR	80 %		80 %	
Casting speed	MAX 0.70 m/min		MAX 0.52 m/min	
Tn	0.196 sec	0.103 sec	0.264 sec	0.139 sec
Tp	0.295 sec	0.155 sec	0.397 sec	0.208 sec
Cycle	122 cpm	233 cpm	91 cpm	173 cpm

NSR: Negative Strip Ratio, Tn: Negative Strip Time, Tp: Positive Strip Time

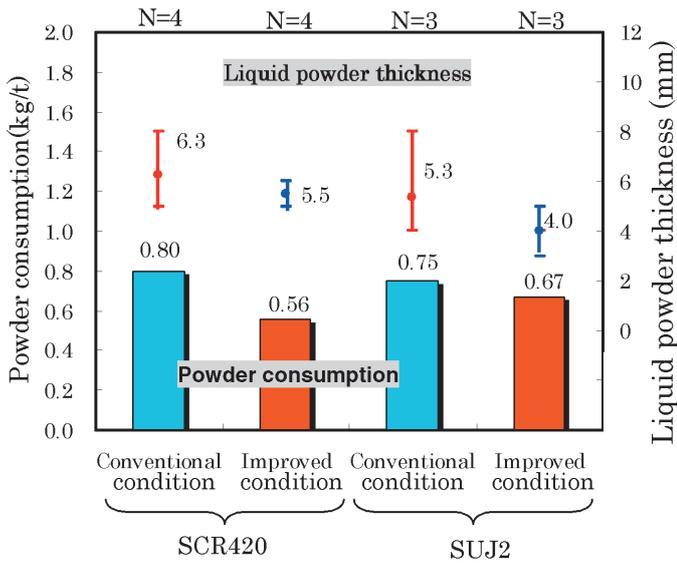


Fig.3. Change of mold powder consumption and molten layer thickness.

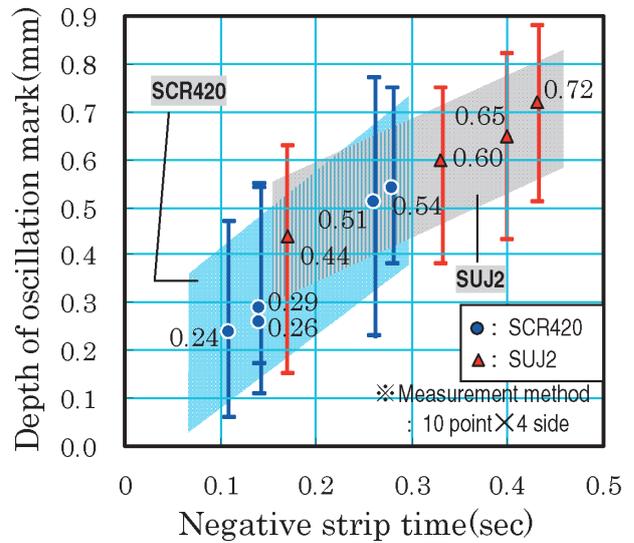


Fig.4. Change of negative stripping time and oscillation mark depth.

Table 4. Result of appearance observation of steel classification high cycle oscillation test bloom.

Steel	Item	Appearance/surface condition of bloom	
		Conventional(Stroke : 5.9mm)	Test(Stroke : 3.1mm)
Case hardening steel	Shot blasted bloom (SCR420)		
	OSM depth	Average. 0.54mm	Average. 0.24mm
	Evaluation	Good surface condition without depression and sticking	Good surface condition without depression and sticking
Bearing steel	Shot blasted bloom (SUJ2)		
	OSM depth	Average. 0.65mm	Average. 0.44mm
	Evaluation	Good surface condition without depression and sticking	Good surface condition without depression and sticking

## 4. 2 品質評価

### (1) 肌焼鋼

肌焼鋼品質評価結果を Table 5 に示す。肌焼鋼鋳片表面層の旧 $\gamma$ 結晶粒子サイズを評価したところ、ハイサイクル材では結晶粒子が微細化していた。また、二次デンドライトアーム間隔についてもハイサイクル材では従来対

比減少傾向であった。これは、 $T_n, T_p$ の減少により MD パウダー流入量減少により MD での冷却効果が大きくなった影響と考察する。

### (2) 軸受鋼

軸受鋼品質調査結果を Table 6 に示す。従来材（ストローク：5.9 mm 材）は OSM 谷部の鋳片表面層にネイル起因の偏析帯が確認でき、偏析帯を起点としたミクロク

Table 5. Result of the quality evaluation of the low alloy steel.

		Case hardening steel																
		Stroke: 5.9mm	Stroke: 3.1mm															
Micrographs of surface layer	Austenitic grain																	
	Dendrite																	
Investigation summary	Austenitic grain size	<table border="1"> <caption>Old <math>\gamma</math> grain size (mm<sup>2</sup>)</caption> <thead> <tr> <th>Stroke</th> <th>Part</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.9mm</td> <td>Top part of OSM</td> <td>2.22</td> </tr> <tr> <td>3.1mm</td> <td>Top part of OSM</td> <td>1.55</td> </tr> <tr> <td>5.9mm</td> <td>Bottom part of OSM</td> <td>2.64</td> </tr> <tr> <td>3.1mm</td> <td>Bottom part of OSM</td> <td>1.75</td> </tr> </tbody> </table>		Stroke	Part	Value	5.9mm	Top part of OSM	2.22	3.1mm	Top part of OSM	1.55	5.9mm	Bottom part of OSM	2.64	3.1mm	Bottom part of OSM	1.75
	Stroke	Part	Value															
5.9mm	Top part of OSM	2.22																
3.1mm	Top part of OSM	1.55																
5.9mm	Bottom part of OSM	2.64																
3.1mm	Bottom part of OSM	1.75																
	Secondary dendrite arm spacing	<table border="1"> <caption>Second dendrite arm spacing (<math>\mu\text{m}</math>)</caption> <thead> <tr> <th>Stroke</th> <th>Part</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.9mm</td> <td>Top part of OSM</td> <td>97.6</td> </tr> <tr> <td>3.1mm</td> <td>Top part of OSM</td> <td>62.7</td> </tr> <tr> <td>5.9mm</td> <td>Bottom part of OSM</td> <td>44.5</td> </tr> <tr> <td>3.1mm</td> <td>Bottom part of OSM</td> <td>35.0</td> </tr> </tbody> </table>		Stroke	Part	Value	5.9mm	Top part of OSM	97.6	3.1mm	Top part of OSM	62.7	5.9mm	Bottom part of OSM	44.5	3.1mm	Bottom part of OSM	35.0
Stroke	Part	Value																
5.9mm	Top part of OSM	97.6																
3.1mm	Top part of OSM	62.7																
5.9mm	Bottom part of OSM	44.5																
3.1mm	Bottom part of OSM	35.0																

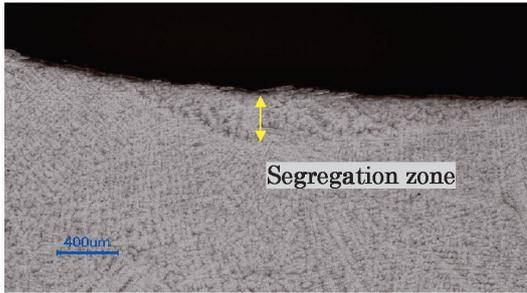
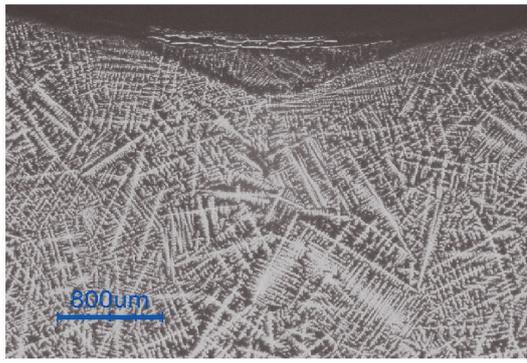
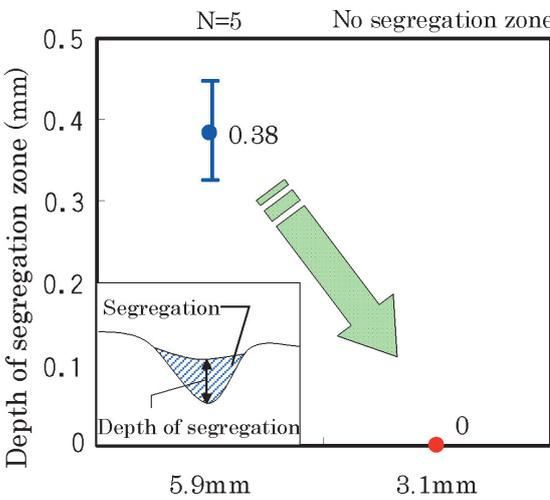
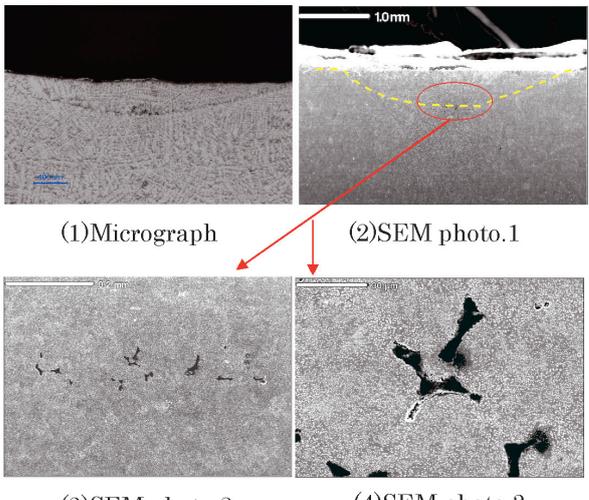
ラックも発生していた。しかし、ハイサイクル材（ストローク：3.1 mm 材）はOSM低減によりネイル近傍の濃化溶鋼オーバーフローを低減できており偏析帯は確認されず、ミクロクラックの発生もなかった。

用材の微小ワレ発生率調査結果を Fig.5 に示す。鋼種特性差により効果差はあるが、ショートストローク・ハイサイクル操作を適用することによって外観表面品質は向上することが分かった。この結果より、構造用鋼全鋼種のショートストローク・ハイサイクル操作の適用を推進することとした。

### 4. 3 微小ワレ(ヨコワレ)発生率比較

ショートストローク・ハイサイクルオシレーション適

Table 6. Result of the quality evaluation of the bearing steel.

		Bearing steel	
		Stroke:5.9mm	Stroke:3.1mm
Micrographs of surface layer	Segregation		
	Dendrite		
Investigation summary	Depth of the segregation zone		
	Observation result with the SEM		

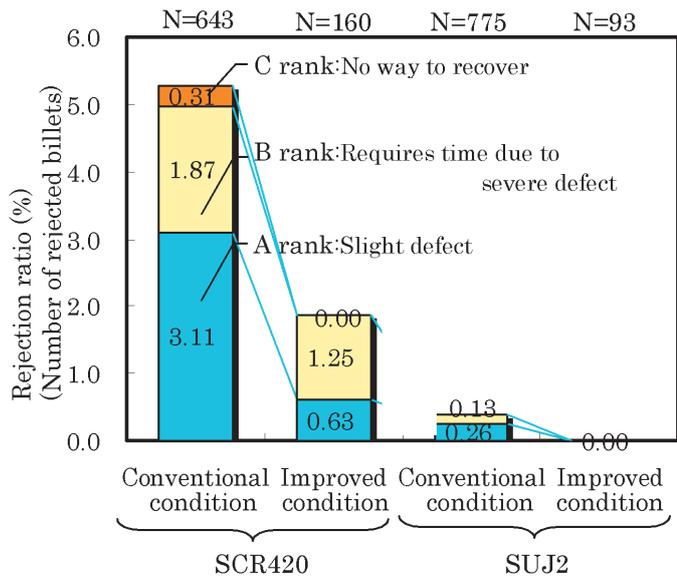


Fig.5. Result of the quality of the high cycle operation products.

## 5. 総 括

自動車用鋼加工時のワレ抑制のため、表面品質高度化を狙いとした铸造条件の最適化を実施した、オシレーションのショートストローク・ハイサイクル化によるNo.2CC 铸片表面品質向上改善の結果、OSM 深さや旧 $\gamma$  結晶粒子サイズ、2次デンドライトアーム間隔は低減し、No.2CC における鋼片での微小ワレ発生率は大幅に低減した。

(文 献)

- 1) 堤康一, 村上洋, 西岡信一, 多田光宏, 中田正之, 小松政美: 鉄と鋼, 84(1998), 617.