

転炉-連続铸造による高炭素クロム軸受鋼 の製造

技術報告

大西 稔泰*・塩飽 潔*・川崎 正蔵*
奥島 敢*・鈴木 康夫*・土井 健司*

Production of High Carbon Chromium Bearing Steel in BOF-CC Process

Toshiyasu OHNISHI, Kiyoshi SHIWAKU, Shozo KAWASAKI,
Susumu OKUSHIMA, Yasuo SUZUKI and Kenji DOI

Synopsis:

High carbon chromium bearing steel has been mainly produced by electric arc furnace-small ingot casting process. However application of continuously cast steel has been gradually expanded. In order to improve the rolling contact fatigue life of bearing steel, it is essential to decrease oxygen, titanium and sulfur contents in the steel and improve center line segregation.

Taking these points into consideration, high carbon chromium bearing steel is produced through BOF-CC process. The contents of oxygen, titanium, phosphorus and sulfur are easily decreased by combining the hot metal pretreatment furnace-BOF-ladle refining process.

The center line segregation is improved by the combined electromagnetic stirring technique. As a result, cleanliness of the steel and rolling contact fatigue life are improved. Based on good result of ball fatigue test, it can be expected to apply continuously cast steel to bearing ball use.

1. 緒 言

高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) は、これまで一般的に電気炉-小型鋼塊のプロセスで製造されてきたが、近年連続铸造プロセスの生産性ならびに品質面での優位性を活用することにより、連铸材の使用比率が急速に高まりつつある^{1)~3)}。

軸受の最も重要な特性である疲労寿命に対しては、鋼中の酸化物系介在物の低減、すなわち鋼中のトータル酸素量の低減が必須条件であるが、取鍋精錬技術の進歩により主原料の溶解工程と鋼の精錬工程を分離することにより、かなりのレベルにまで低減できるようになってきた。さらに寿命を向上させるために、硫化物やチタン系介在物の低減も要求されており^{4)~6)}、鋼中の硫黄やチタンの除去が必要である。

軸受用鋼球に適用する場合には、鋼球表面に鋼材の中心部が露出するために中心偏析の大小が疲労寿命に影響をおよぼすことが考えられ、連铸材の中心偏析の改善が必要である。さらに、りんについても偏析を起こしやすい元素であることから低減が必要である。

本報告では、上記の点を考慮し、当社の転炉-連続铸

造プロセスの特徴を有効に生かして、鋼中不純物が少なく、かつ中心偏析レベルの良好な高炭素クロム軸受鋼の製造技術を確立したので、その製造プロセスの特徴ならびに品質特性について述べる。

2. 製造プロセス

当社における SUJ2 の製造プロセスを Fig. 1 に示す。不純物である酸素・チタン・りん・硫黄は、溶銑予備処理-転炉-取鍋精錬に機能分担したプロセスで除去し、铸型内と凝固末期の組合せ電磁攪拌装置を備えた大断面ブルーム連铸機で適切に铸造することにより、清浄度が高く、中心偏析レベルの良好な SUJ2 を製造できるのが特徴である。

製造設備の仕様を Table 1 に示し、以下に各プロセスの主な特徴を示す。

2.1 溶銑予備処理

溶銑予備処理は高炉铸床における脱けいプロセスと溶銑予備処理専用炉 (H 炉) における脱りん・脱硫プロセスから成っている。すなわち、脱けいされた溶銑は H 炉に装入され、石灰系フラックスインジェクション-酸素上吹法で脱りんされた後、連続してソーダ系フラックス

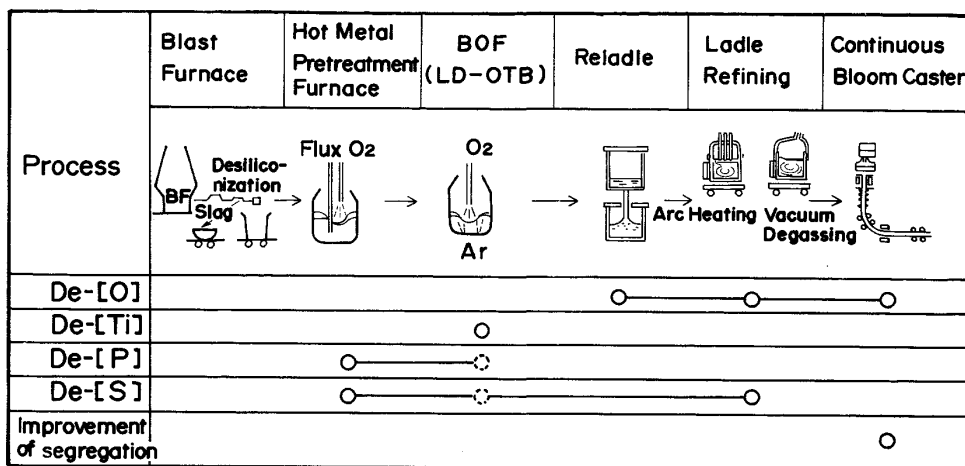


Fig. 1. Steelmaking process of high quality bearing steel.

Table 1. Main specifications of steelmaking process.

Hot metal pretreatment furnace	Capacity Oxygen flow rate Flux for dephosphorization Flux for desulfurization Flux flow rate	80 t/heat Max. 4 000 Nm ³ /h CaO-scale-CaF ₂ Soda ash Max. 400 kg/min
BOF	Type Capacity Oxygen flow rate Bottom blowing gas	LD-OTB 80 t/heat Max. 16 000 Nm ³ /h Argon
Ladle refining equipment	Type Ladle capacity Transformer capacity Secondary current Vacuum degassing Stirrer	ASEA-SKF 90 t/heat 12 MVA 35 kA 5 ejectors and 3 condensers Induction stirrer (one side type)
Continuous caster	Type Bloom size Number of strand Casting speed Electromagnetic stirrer	Vertical-curved 300 mm×430 mm 2 Max. 1.2 m/min Combined stirrer (stirring in-mold and at a later stage of solidification)

Table 2. Cr yield and Cr partition in BOF.

Blowing	Hot metal pretreatment	Cr yield (%)	(Cr)/[Cr]
Top	Nontreated Pretreated	45 70	10~20 10~20
Combined	Pretreated	90	3~7

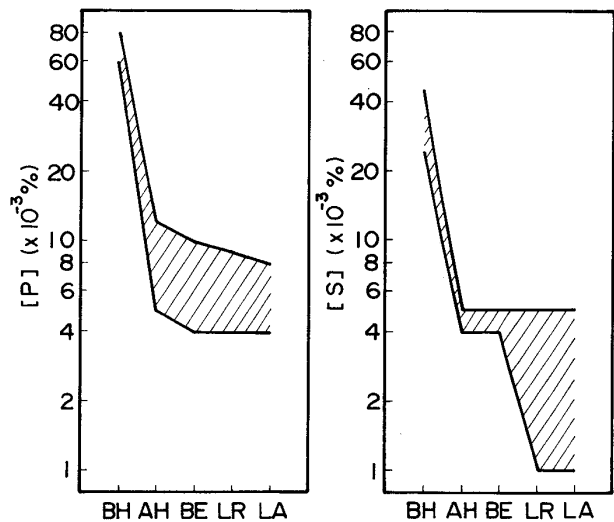
インジェクションにより脱硫処理される⁷⁾。

Fig.2 にりん・硫黄の挙動を示すが、溶銑予備処理後で $[P] \leq 0.012\%$, $[S] \leq 0.005\%$ が得られている。

2.2 転炉

溶銑予備処理により、りん・硫黄はすでに低減されているので、転炉に要求される機能は脱炭と昇温のみとなり、低スラグ比吹錬が可能である。さらに複合吹錬を併用実施することにより、マンガン鉱石やクロム鉱石の熔融還元や合金鉄の大量溶解も可能となった。

Table 2 に、クロム源を転炉に添加溶解した時のク



BH : Before pretreatment AH : After pretreatment BE :
Blowing end in B. O. F. LR : After ladle refining LA :
Ladle analysis

Fig. 2. Transition of [P] and [S] contents in steelmaking process.

ロム歩留りと分配比を示す。予備処理銑を使用し低スラグ比で複合吹錬を行った場合には、非常に高いクロム歩留りが得られている。

ところで、疲労寿命に悪影響をおよぼすチタンは、主に合金鉄、特に添加量の多いクロム源から鋼中に持ち込まれる。したがって、従来まではチタン含有量の低い、高価なクロム源を取鋼添加していた。しかしながら、クロム源を転炉溶解することによりチタンを容易に酸化除去することが可能となり、鋼中チタン量の大幅な低減が達成できた。

2.3 取鋼精錬

鋼中酸素量低減のためには、取鋼精錬時の溶鋼の再酸化防止とアルミナ系介在物の浮上分離が重要である。

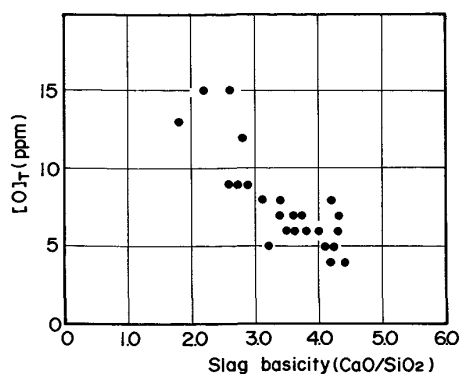
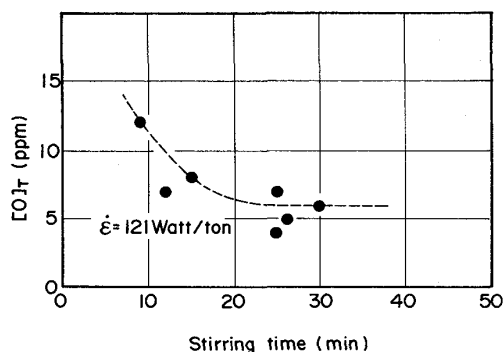


Fig. 3. Relation between oxygen content and slag basicity after ladle refining.



$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.0012 d^2 \gamma_L h^{2/3} / M_L \\ h &= 316 \sqrt{\frac{\mu}{\rho f} \cdot \frac{P}{S} \cdot \frac{1}{\gamma_L}} \\ \gamma_L &= \text{Molten steel density (g/cm}^3\text{)} \\ M_L &= \text{Molten steel mass (t)} \\ d &= \text{Ladle diameter (cm)} \\ h &= \text{Swelling height of molten steel (cm)} \\ \mu &= \text{Permeability} \\ \rho &= \text{Resistivity (}\Omega\text{-cm)} \\ f &= \text{Frequency (Hz)} \\ S &= \text{Area of molten steel surface (cm}^2\text{)} \\ P &= \text{Supplied electric power (kW)} \end{aligned}$$

Fig. 4. Relation between oxygen content and stirring time.

溶鋼の再酸化源としては取鍋れんが・大気・スラグが考えられるが、れんが材質はスラグインにカーボンマグネシア質を、壁・敷にはハリアルミナ質れんがを使用して、また大気酸化については、アーク通電時の適正スラグ厚みの確保と真空中での強撹拌を実施している。スラグについては、転炉出鋼後リレードルを実施し、低級酸化物を含んだ転炉スラグの混入を防止している。さらに Fig. 3 に示すように、取鍋スラグは塩基度 3 以上を確保し、強力な電磁誘導撹拌下で溶鋼中に懸濁している介在物の浮上分離をはかることにより、鋼中酸素量を 8ppm 以下にコントロールしている。また Fig. 4 に示すように、15 min 以上の強撹拌で低酸素鋼が得られている。

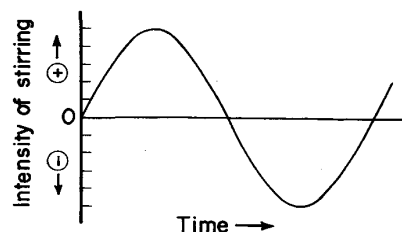


Fig. 5. Schema of different phase current stirring.

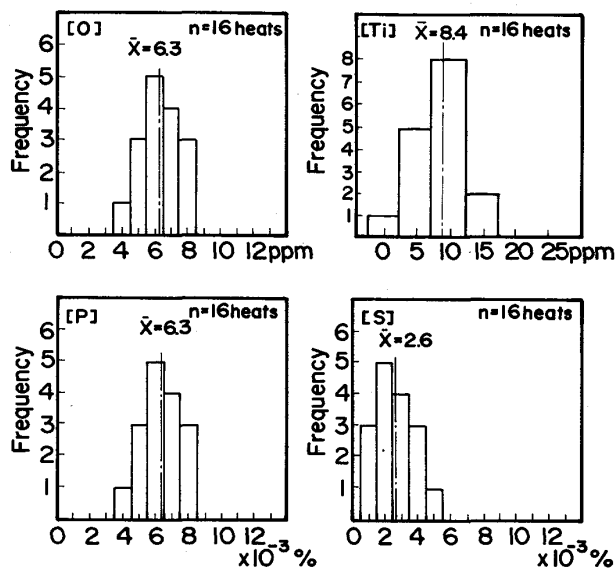


Fig. 6. Oxygen, titanium, phosphorus and sulfur contents of high quality bearing steel.

2.4 連続鋳造

垂直-曲げ型ブルーム連鋳機には、鋳型内と凝固末期に電磁撹拌装置が設置されている。鋳型内で溶鋼を撹拌することは、非金属介在物の浮上分離を促進し、清浄鋼にとって非常に有利である。また、鋳型内と凝固末期の組合せ電磁撹拌を行うことにより、ホワイトバンドの発生なしに中心偏析を改善することができる⁸⁾。さらに凝固末期撹拌には、断続撹拌よりも偏析低減効果の大きい異周波撹拌⁹⁾¹⁰⁾を採用している。異周波撹拌は、隣り合う 2 組の電磁撹拌用コイルに通じる交流電流の周波数に差をもたせることにより、Fig. 5 に示すように溶鋼の撹拌方向と強度を時間とともにめらかに変化させながら反転させるものである。

3. 製造結果

3.1 清浄度

前述のプロセスで製造された SUJ2 の成分例を Table 3 に示す。主原料として高炉銑を使用するため、銅・ニッケル・モリブデンなどの元素は安定して低位に維持でき

Table 3. Example of chemical composition.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	O	Ti
JIS SUJ2	0.95 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	≤0.50	≤0.025	≤0.025			1.30 ~ 1.60				
Steel A	1.00	0.25	0.32	0.006	0.003	0.01	0.01	1.43	tr.	0.016	0.0006	0.0010
Steel B	1.01	0.24	0.32	0.007	0.002	0.01	0.02	1.44	tr.	0.024	0.0006	0.0009

Table 4. SAM rating of high quality bearing steel.

Inclusion type	Rating
B	0
D	0

N=16 heats

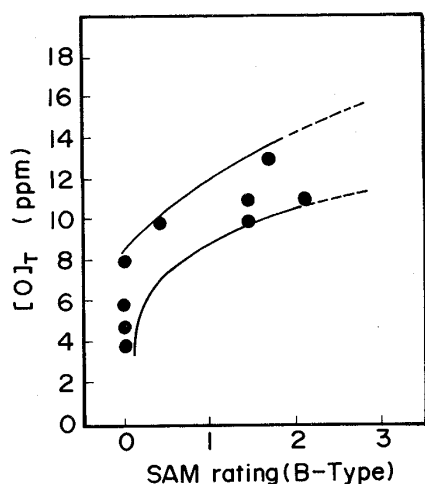


Fig. 7. Relation between oxygen content and SAM (B-type) rating.

る。また Fig.6 に示すように、疲労寿命に最も影響をおよぼす酸素は 8ppm 以下にコントロールされている。チタンについては、クロム源を転炉溶解した場合には 15 ppm 以下となる。りん・硫黄については、それぞれ 0.010 % 以下、0.005 % 以下が容易に達成できている。

軸受鋼の清浄度を表す指標として '84 年に改訂された ASTM A295-84 の SAM 法により評価した結果を Table 4 に示す。B系 Thin 1.5 以上、Heavy 1.0 以上ならびに D系 Heavy 0.5 以上の介在物は認められないことがわかる。また Fig.7 に鋼中酸素量と SAM 値 (Bタイプ) の関係を示すが、酸素量が 8ppm 以下になると SAM 値が 0 となることが把握できた。

3.2 組合せ電磁攪拌の効果

Photo. 1 に凝固末期攪拌条件を変化させて製造した場合の鑄片の横・縦断面マクロ写真を示す。条件①は鑄型内攪拌のみの場合で、中心部に大きな偏析もしくはキャ

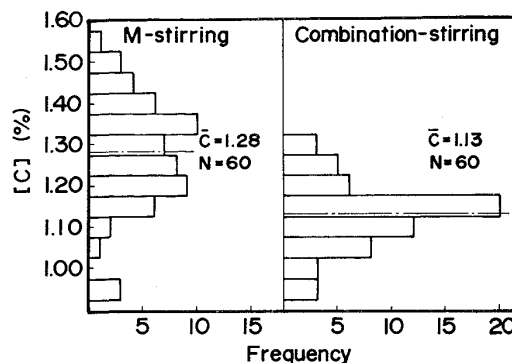


Fig. 8. Comparison of center segregation of carbon between M-stirred and combination-stirred blooms.

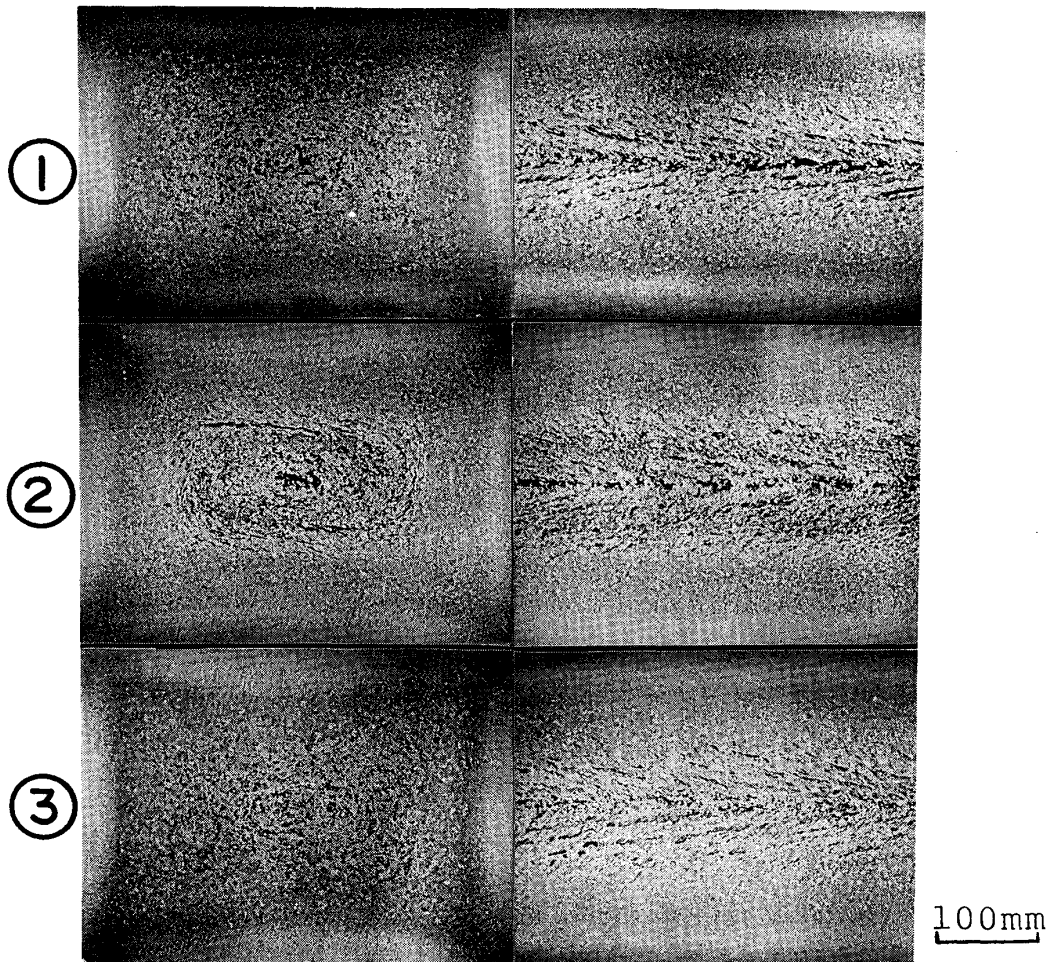
ビティが認められる。条件②は鑄型内攪拌とかなり早い時期での凝固末期攪拌を実施した組合せ攪拌の場合であるが、攪拌時に形成されたホワイトバンドが認められるものの、攪拌後の中心部の凝固組織は条件①の場合と同様であり、中心部に大きな偏析もしくはキャビティが発生している。条件③は適切な条件で組合せ攪拌を実施した場合で、中心部の偏析やキャビティは条件①②にくらべ著しく改善されているのがわかる。

Fig.8 は、条件①と③で製造した鑄片の中心部から 6 mmφ ドリルで鑄造方向に連続して採取したサンプルの [C] 分析値を中心偏析として比較したものである。鑄型内攪拌のみの場合にくらべ、適切な条件の組合せ攪拌を適用することにより、中心偏析の平均値が低減し、かつばらつきも小さくなることがわかる。

すなわち、SUJ2 のように固液共存領域が広い鋼種では、凝固末期での濃化溶鋼の移動可能領域も広いと顕著な V 偏析を生じやすく、鑄型内や鑄型下攪拌により微細な等軸晶域を増加させるだけでは中心偏析改善の効果は少ない。溶鋼プール内の平均固相率 0.1~0.2 での適切な凝固末期攪拌¹¹⁾により、濃化溶鋼の等軸晶域内での移動をさまたげることが中心偏析の改善に非常に効果的である。

また Fig.9 に示すように、鑄片の中心部を通るテストピースを切り出し、中心部のキャビティ (ポロシティ)

Cross section Longitudinal section



Casting speed : 0.9 m/min Super heat : 25~35°C

Photo. 1. Effect of electromagnetic stirring condition on macro structure.

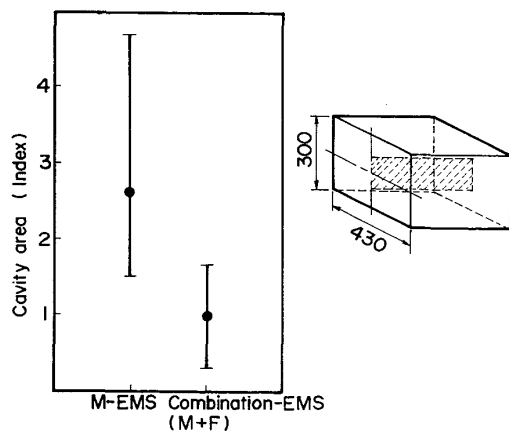


Fig. 9. Effect of combination stirring on center cavity.

面積をイメージアナライザーにより条件①と③で比較すると、鋳型内攪拌のみの場合は中心キャビティの発生量が非常に多いことがわかる。大きな中心キャビティが発生すると鋳片切断後の加熱工程で端面酸化がおり、 $\text{SiO}_2\text{-MnO-FeO}$ 系介在物生成の原因となる¹²⁾ ため、組合せ攪拌の適用によりキャビティの発生を抑制することが、清浄鋼にとっては非常に重要である。

4. 疲 勞 寿 命

寿命試験には森式スラスト型転動疲労試験機と、鋼球用として曾田式変動荷重軸受試験機を用いた。

前者の場合は、鋼材の横断面における寿命試験に加えて縦断面についても寿命試験を行つた。これは寿命試験ではなく離は板状炭化物をとまなつており¹³⁾、その生成には基地中の炭素量が大きな影響をおよぼす¹⁴⁾ ため、

転動軌跡が中心偏析上を横切る鋼材についても寿命を確認する必要があつたためである。サンプルは、Fig. 10 に示すように鋼材の横・縦断面より 60 mm 径×5 mm 厚の円板を切り出し、840 °C で油焼入れし、硬度が HRC 62 ~ 63 となるように焼もどしをした後、ラッピング加工を施した。試験条件は、面圧 (P_{max}) 500 kgf/mm²、速度 3 000 c.p.m.、潤滑油 #60 スピンドル油である。Fig. 11 に試験結果を示すが、従来の鋼塊材 ($[O]_T=7\sim12$ ppm, $[S]=0.006\sim0.020\%$, $[Ti]=11\sim35$ ppm) に比べ清浄度が良いことから良好な寿命が得られているとともに、横断面と縦断面での差も認められない。Fig. 12 は、縦断面での疲労試験におけるフレーキング発生位置の鋼材中心からのずれを角度 (θ) で示したものであるが、フレーキング発生位置は鋼材中心部、すなわち中心偏析部へのかたよりがなく、中心偏析が疲労寿命低下の原因となっていないことがわかる。

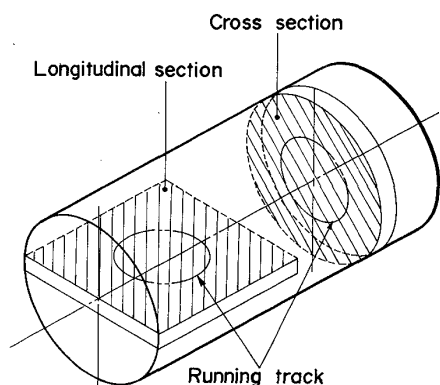
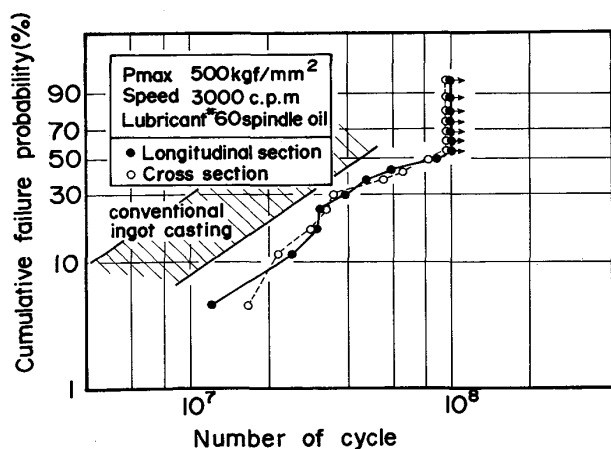


Fig. 10. Specimens of rolling contact fatigue life test.



Conventional ingot casting : EF-Ladle refining-2 t ingot
 $[O]=7\sim12$ ppm $[S]=0.006\sim0.020\%$ $[Ti]=11\sim35$ ppm
 Fig. 11. Weibull probability of rolling contact fatigue life test. (steel B)

鋼球の疲労試験は、840 °C で油焼入れし、硬度が HRC 60~63 となるように焼もどしをした後ラッピング加工した直径 9.52 mm の鋼球を単列深みぞ型 #6206 の玉軸受に 9 個組み込み、曾田式変動荷重軸受試験機¹⁵⁾により実施した。試験条件は、内輪を 2 000 r.p.m. で回転させながら毎分 2 000 回の正弦波形の変動荷重 1 200±800 kgf を軸受に与えるものである。Fig. 13 に試験結果を示す。ところで、基本的寿命計算式は次式で表される¹⁶⁾。

$$L_{10} = (C/P)^3 \quad (\times 10^6 \text{ 回})$$

ここで、 C は基本動定格荷重であり、# 6206 玉軸受の場合 1 530 kgf となる。また P は試験荷重であり、

$$P = (2P_{max} + P_{min}) / 3 \approx 1\,470 \text{ kgf}$$

とすれば、本試験における計算寿命は 1.1×10^6 となる。これを試験時間になおせば 9.4 h となるが、本試験で得られた定格寿命は 199 h ($=2.4 \times 10^7$) と非常に良好で

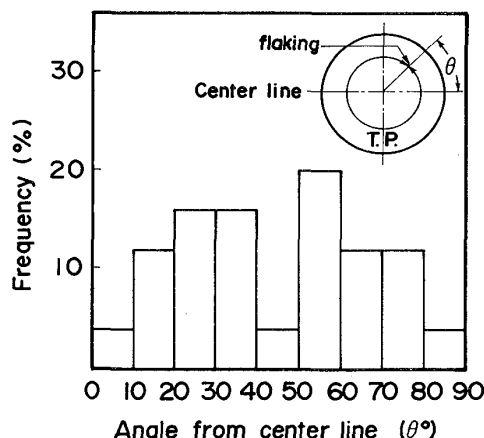


Fig. 12. Distribution of flaking points on longitudinal section.

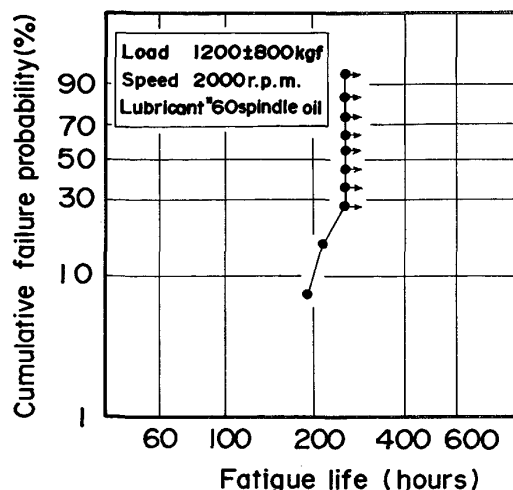


Fig. 13. Weibull probability of ball fatigue life test. (steel A)

ある。

すなわち、適切な条件で製造された連鑄材の SUJ2 は鋼球用素材としても十分使用できることがわかる。

5. 結 言

転炉-連続鑄造プロセスにおいて、清浄度にすぐれ、長寿命の SUJ2 の製造技術を確立した。以下に、得られた結果を要約する。

(1) 溶銑予備処理-転炉複合吹錬-取鍋精錬-連続鑄造プロセスにより、SUJ2 の転動疲労寿命に有害な酸素・チタン・硫黄ならびにりんを機能分担して容易に低減することができる。

(2) SUJ2 連鑄材の中心偏析とキャビティ改善のためには、鑄造時の組合せ電磁攪拌、特に適切な条件の凝固末期攪拌が非常に有効である。

(3) 清浄度にすぐれ、組合せ電磁攪拌を適用した SUJ2 連鑄材は、鋼球における疲労寿命も長いため、従来まで鋼塊材から製造されていた鋼球への連鑄材の適用が期待できる。

文 献

- 1) 上杉年一: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1631
- 2) 森 甲一, 熊谷憲一, 高田八束, 浅田徳弘, 山田忠政: 鉄と鋼, **71** (1985), S1327
- 3) 大西稔泰, 塩飽 潔, 川崎正蔵, 上野伸熹, 鈴木康夫, 土井健司: 鉄と鋼, **71** (1985), S262
- 4) 成田貴一, 尾上俊雄, 山本浩太郎: 鉄と鋼, **66** (1980), S1135
- 5) J. AKESSON and T. LUND: Ball Bearing Journal, **217** (1984), p. 32
- 6) 堀 捷樹, 日紫喜基久, 川辺秀昭, 上村正雄: 精密機械, **49** (1983), p. 1345
- 7) 大西稔泰, 高木 彌, 小倉哲造, 羽鹿公則, 矢場田武, 吉田康夫: R&D 神戸製鋼技報, **36** (1986), p. 9
- 8) 吉井賢太, 高木 彌, 鈴木康夫, 森 隆資, 許斐英郎, 太田安彦: R&D 神戸製鋼技報, **31** (1981), p. 14
- 9) S. KOJIMA, T. OHNISHI, T. MORI, K. SHIWAKU, I. WAKASUGI and M. OHGAMI: AIME Conference in Atlanta, Application of Advanced Mild Stirring to A New Bloom Caster (1983)
- 10) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 83 回製鋼部会 (1982 年 10 月) (株) 神戸製鋼所 (私信)
- 11) K. AYATA, T. MORI, T. FUJIMOTO, T. OHNISHI and I. WAKASUGI: Trans. ISIJ, **24** (1984), p. 931
- 12) 田阪 興, 伊藤幸良, 前出弘文, 大佐々哲夫, 高尾滋良: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 1260
- 13) 坪田一一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1046
- 14) 坪田一一: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1487
- 15) 日紫喜基久, 堀 捷樹, 高野博史, 川辺秀昭, 上村正雄: 精密機械, **44** (1978), p. 1321
- 16) 日本規格協会: JIS B1518 転がり軸受の動定格荷重と定格寿命の計算方法