

非金属介在物と母材の密着による軸受寿命の向上^{*1}

Improvement of Bearing Life through Bonding of Non-metallic Inclusions with Matrix

佐田 隆 T. SADA 野中由喜 Y. NONAKA 三上 剛 T. MIKAMI 木澤克彦 K. KIZAWA

Non-metallic inclusions in the material of rolling bearings are well-known to induce subsurface initiated spalling. Among these inclusions, oxides in particular are believed to harm bearing life due to the weak adhesion between the oxide and the matrix. In this study, life tests were carried out for the inner rings of deep groove ball bearings made from low cleanliness bearing steel to which hot isostatic pressing (HIP) had been applied. From the experimental results, we confirmed that life improvement of radial bearings can be achieved by bonding the oxides with the matrix. Furthermore, void closing analyses were carried out using a model for ideal void shape. From the correlation between the void closing rates obtained by these analyses and the interface bonding rates measured for the inner rings, we found that void closing analysis is effective in predicting the state of the interface between the oxide and the matrix.

Key Words: rolling bearing, rolling contact fatigue, non-metallic inclusion, hot isostatic pressing, finite element analysis

1. はじめに

転がり軸受の材料中に存在する非金属介在物は、内部起点剥離の起点となることが知られており、その中でも、母材との密着性の悪い酸化物が軸受寿命に特に有害と考えられている^{1), 2)}。そのため、日本の鉄鋼メーカーは、酸化物を生成する鋼中の酸素の量を極限まで低減する技術を構築することで、清浄度の高い（介在物が小さくて少ない）軸受鋼を安定的に製造している^{3)~5)}。一方、世界的に見ると、このような高清浄度の軸受鋼を容易には入手できない場合もある。そこで、清浄度の低い軸受鋼を用いた場合でも、清浄度の高い軸受鋼で製造された軸受と同等の寿命が得られる技術を確認できれば、高品質の軸受を世界中で生産することが可能になる。

常陰らは、軸受鋼の転動疲労寿命に及ぼす清浄度以外の要因として、酸化物と母材との密着状態に着目した研究結果を報告している^{6), 7)}。その研究では、熱間等方加圧（Hot Isostatic Pressing : HIP）によって酸化物を母材と密着させた軸受鋼で、転動疲労寿命の向上が確認されている。なお、この結果は、スラスト型転動疲労試験によって得られたものである。スラスト型転動疲労

試験では、棒鋼の圧延方向に対する接触荷重の方向が、転がり軸受の中で最も多く使われている深溝玉軸受などのラジアル軸受とは異なる。また、実際の軸受が通常は塑性変形を生じない接触荷重の範囲内で使用されるのに対し、上述の試験では塑性変形を伴う大きな接触荷重を作用させている。

本研究では、実際の軸受においても、酸化物を母材と密着させることによって寿命向上効果が得られることを確認するため、HIP 処理を行った低清浄度の軸受鋼から深溝玉軸受の内輪を作製し、ラジアル荷重作用下で寿命試験を実施した。なお、三つの水準の HIP 処理を行った内輪の寿命を比較することで、量産軸受と同レベルの寿命を得るために必要な加圧条件を明らかにした。さらに、簡易的な空孔モデルを用いた FEM 解析を実施し、酸化物と母材との密着状態の予測を試みた。

2. 加圧の効果に関する寿命試験

2.1 試験軸受

意図的に酸素含有量を増やして、容量 100kg の真空誘導溶解炉（Vacuum Induction Melting : VIM）で溶製した低清浄度の高炭素クロム軸受鋼（JIS-SUJ2）

*1 本論文は、トライボロジスト 第 61 巻 第 4 号 (2016) 264-274 を基に作成した。

を用い、呼び番号 6206 の深溝玉軸受（内径 30mm，外径 62mm，幅 16mm）の内輪を作製した。用いた材料の酸素含有量は 27ppm であり、日本で量産されている SUJ2 の酸素含有量が数 ppm であるのに比べて⁸⁾、多くの酸素を含んでいる。この材料に、棒鋼の状態では表 1 に示す三つの水準の HIP 処理を行った素材（HIP 材）、および HIP 処理を行っていない素材（無処理材）を焼準、焼鈍した後、旋削によって内輪の形状に加工した。続いて、量産工程と同様に、焼入れ焼戻しを行った後に研削し、軌道を超仕上げして内輪を作製した。この内輪の表面硬さは 62～63HRC である。最後に、これらの内輪を量産品の外輪、玉、保持器と組み合わせて試験軸受とした。

なお、表 1 に示す HIP-2 は、常陰らが転動疲労寿命の向上を確認した事例^{6), 7)}（1 150℃，147MPa，5h）とほぼ同等の条件である（保持時間は短くしている）。HIP-3 は、HIP-2 よりも高い温度と一般的な HIP 処理装置の上限である 200MPa⁹⁾ に近い圧力の組合せ、HIP-1 は、HIP-2 と同じ圧力で温度が低い条件として設定した。HIP 処理時の温度と圧力の履歴の一例を図 1 に示す。

表 1 HIP 処理条件
HIP conditions

Condition	Temperature	Pressure	Duration
HIP-1	1 050℃	150MPa	4h
HIP-2	1 150℃	150MPa	4h
HIP-3	1 200℃	193MPa	4h

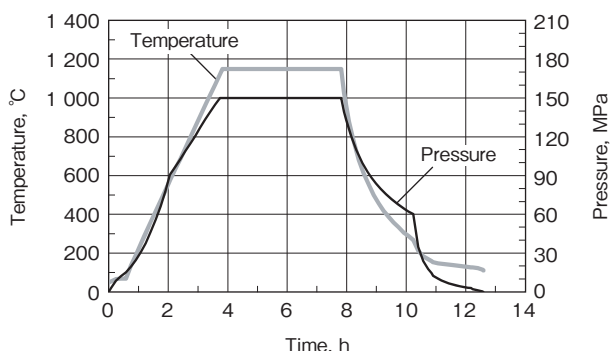


図 1 HIP 処理履歴の例 (HIP-2)
Example of HIP processing log (HIP-2)

2.2 介在物と母材の密着状態

内輪の断面で観察された酸化物の例を図 2 に示す。観察された酸化物はすべて Al₂O₃ であり、極値統計法により推定した 8 600mm² 中の予測最大径（円相当径）¹⁰⁾ は 14μm であった。無処理材製の内輪に含まれる酸化物のほとんどは、軸方向（棒鋼の長さ方向）位置の母材との間に空隙が存在している。一方、HIP 材製の内輪中の酸化物は、母材と密着しているものが多く見られる。このような HIP 処理の有無、ならびに処理条件による界面密着状態の差異を明らかにするため、以下の手順で密着状態を定量化した。

まず、無処理材および三つの水準の HIP 材から作製した内輪それぞれ 1 個を試料とし、非金属介在物測定装置〔東芝ソリューション株式会社製 METALSPECTOR II-C〕によって軸方向断面に存在する酸化物を検出した。1 個の試料につき 4 断面（1 断面あたり 34.32mm² の領域）で検出された円相当径が 4μm 以上の酸化物のうち、大きい順に 50 個を評価対象とした。なお、硫化物と複合しているものについては、酸化物の面積が複合介在物全体の 1/3 以上を占めるものに限り評価対象とした。光学顕微鏡視野で、評価対象の個々の酸化物に対して空隙の有無を判断し、次式で定義した界面密着割合（%）を算出した。

$$\text{界面密着割合} = \frac{\text{密着介在物個数}}{\text{評価介在物総数}} \times 100 \quad (1)$$

得られた界面密着割合を図 3 に示す。未処理品の密着割合は 6% であり、ほとんどの酸化物が母材との間に空隙を有していることが分かる。HIP 処理によって密着介在物は増加し、温度と圧力が高いほど密着割合が高くなっている。ただし、HIP-2 と HIP-3 では密着割合に明確な差は認められない。

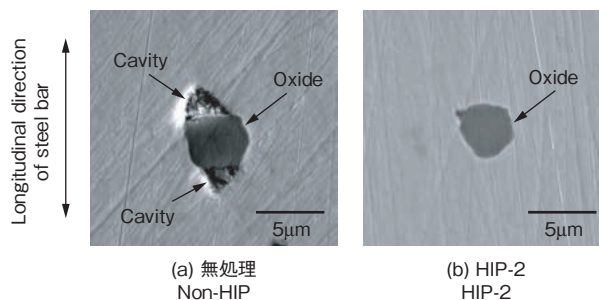


図 2 観察された酸化物の例
Examples of observed oxides

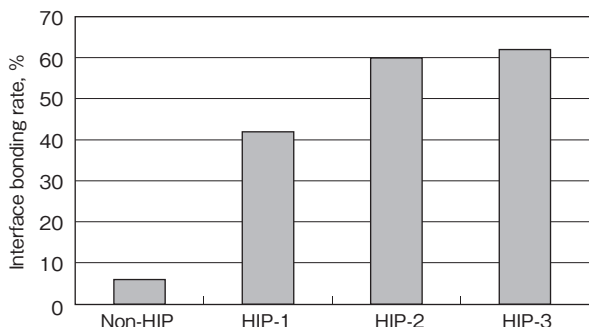


図3 HIP処理による界面密着割合の変化

Change in interface bonding rate of oxide according to the HIP process

2.3 寿命試験方法

寿命試験に用いた試験機の概略を図4に示す。本試験機は4個の軸受に均等にラジアル荷重を作用させる構造であり、今回の試験では内側の2個を試験軸受、外側の2個を支持軸受とした。なお、試験軸受を優先的に破損させるため、支持軸受には長寿命仕様の軸受を用いた。表2に示す条件で運転し、試験機上部に取り付けた加速度センサによって剥離の発生を検出した。本試験条件は、内部起点剥離を発生させるために、十分な潤滑油膜が形成されるよう設定した。軸受温度を65℃として、文献11)の付録に示された手順で算出した内輪と玉の接触部における油膜パラメータは4.5であった。なお、無処理品と三つの水準のHIP処理品に対し、それぞれ5回の寿命試験を実施した(試験軸受数は各10個)。

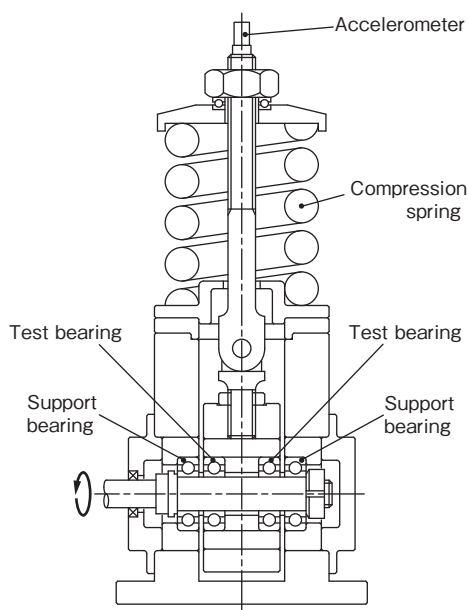


図4 寿命試験機

Schematic diagram of life test rig

表2 寿命試験条件
Life test conditions

Radial load	9 000N
Rotational speed	2 500min ⁻¹ (inner ring)
Lubricant	Mineral oil (ISO-VG68)
Lubrication	Oil circulation with on-line filter (Nominal filtration rating : 2μm)
Operating temperature	65 ± 5℃

2.4 目標寿命

本研究の目的は、低清浄度鋼を用いた軸受の寿命を清浄度の高い鋼で製造された量産軸受と同レベルに引き上げることである。そのため、量産軸受の実力が寿命の目標値となる。表2の条件における量産軸受の寿命は、基本定格寿命のほぼ10倍であるが、今回の試験は内輪のみを対象としているため、内輪の基本定格寿命を算出し、その10倍を目標寿命とする。

ISO 281¹²⁾ および ISO/TR 1281-1¹³⁾ により、6206内輪の基本動定格荷重を算出すると20 070Nになる。これをもとに、表2の条件における内輪の基本定格寿命73.9時間が得られる。したがって、これを10倍した739時間を低清浄度鋼製内輪の目標寿命とする。

2.5 寿命試験結果

得られた寿命試験結果のワイブル・プロットを図5に示す。今回の試験は内輪のみを対象としているため、内輪以外に剥離が生じた場合は、その時点で試験を中止し、それまでの時間を打ち切りデータとした。内輪に生じた剥離はすべて、外観から内部起点剥離と判断した。無処理品については3回の試験で剥離が生じており、2回の打ち切りを考慮して各剥離データのメジアンランクを決定し¹⁴⁾、母集団を推定した。一方、HIP処理品の試験では、三つの水準とも3 000時間までに剥離が1回しか発生しておらず、それ以上の剥離データを得ることが困難と判断し、軸受の基本定格寿命の50倍(3 390時間)を超えた時点で残りの試験を打ち切った。そのため、剥離データの線形回帰によって母集団を推定することができず、これらに対しては、打ち切りデータも含めた5点を線形回帰して、便宜的に母集団を推定した。

推定した各母集団の信頼度 90% における寿命 L_{10E} を表 3 にまとめている。無処理品および HIP-1 を適用した内輪は、目標を下回る寿命であった。一方、常陰らが適用した条件と同等の HIP-2、および、より強い加圧条件である HIP-3 を適用した内輪の寿命は、目標寿命の 4 倍程度であり、明らかな寿命向上が確認できる。

以上の結果から、スラスト型転動疲労試験で確認された HIP 処理による寿命向上効果が、ラジアル軸受においても同様に得られることが分かった。また、材料中の介在物を母材と密着させることで、低清浄度の軸受鋼を用いた場合でも、清浄度の高い軸受鋼で製造された軸受と同等の寿命にできる可能性がある。

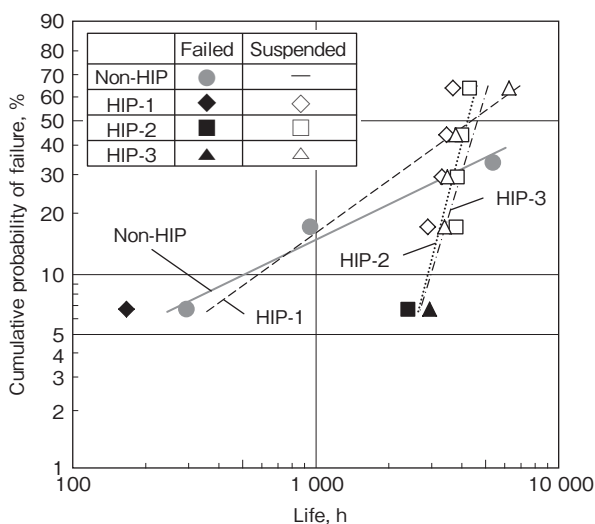


図 5 内輪の寿命試験結果
Life test results of inner rings

表 3 内輪の推定寿命
Estimated lives of inner rings

Specimen	L_{10E} , h
Non-HIP	504.4
HIP-1	577.0
HIP-2	2 894.4
HIP-3	2 977.6

3. FEM による空孔閉塞解析

前章で示した HIP 処理条件と酸化物界面の密着状態との関係 (図 3) をさらに詳細に把握する目的で、有限要素法 (FEM) による解析を実施した。ただし、現象をできるだけ単純化するために、材料中に空孔のみが存在するモデルを採用した。なお、実際の材料中に存在する空隙の内部の状態 (何らかのガスが存在するのか真空状態か) は不明なため、本報の解析においては、加圧をしても空孔内に圧力が発生しないと仮定した。

図 1 に例示したように、HIP 処理は昇温と昇圧を同時に行うため、材料の強度低下と変形が同時に進行する。さらに、昇温に伴って相変態も生じる。これらの複雑な現象を反映するため、解析には熱処理シミュレーションソフト (DEFORM-HT) を用いた。

3.1 解析条件

空孔閉塞の解析モデルを図 6 に示す。領域の中心に配置する空孔の形状は、素材の圧延方向に引き伸ばされた空隙を模擬するため、式(2)の余弦波で定義した。

$$y = \pm \frac{1}{4} \cos \left[\frac{\pi}{2} x \right] \tag{2}$$

表 4 に示す温度と圧力の組合せに対し、HIP 処理に伴う空孔の変形を解析した。表中に HIP-1、HIP-2 および HIP-3 と記載した条件は、前章の寿命試験において、内輪に適用した HIP 処理に相当する条件である。なお、HIP-3 の圧力は、実際の処理履歴では 193MPa であったが、解析条件を区切りのよい数値で等間隔に配置するため、200MPa で近似している。

解析で入力する温度と圧力の変化は、処理実績のない条件に対して仮定する必要があるため、図 7 に例を示すように、まず、実際の処理履歴をモデル化した。昇温、昇圧過程および保持期間に対しては、処理履歴における温度と圧力それぞれの屈曲点の間を直線で近似した。降温、降圧過程に対しては、各屈曲点間を懸垂線で近似した。ただし、降圧の最終段階についてのみ、放物線で近似した。

本解析では、高温での保持に伴うクリープは考慮していないため、保持時間を短縮している。また、図6のモデルでは、領域に対する空孔のサイズが実際の材料中に存在する介在物周囲の空隙に比べて大きいため、予備解析で決定した係数を乗じて圧力を補正している。2章の寿命試験に適用した三つの水準の処理履歴をもとに、処理実績のない条件の屈曲点を補間あるいは外挿によって決定し、各屈曲点の間を上述のモデルでつないで入力データを作成した。

温度に依存する材料の弾塑性特性は、日本熱処理技術協会焼入冷却剤の冷却能データベース研究部会^{15), 16)}にて構築されたデータベースを用いた。塑性挙動を表す流動応力 $\bar{\sigma}$ には、式(3)の線形硬化則を適用した。ただし、上述のデータベースでは、900℃を超える温度域における降伏応力 σ_y と加工硬化係数 H' の値が定められていなかったため、これらの値については今回の解析の最高温度である1200℃までデータを外挿して用いた。

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + H' \bar{\epsilon} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}$ は相当塑性ひずみである。800℃以上の温度域における相当塑性ひずみと流動応力の関係を図8に示す。

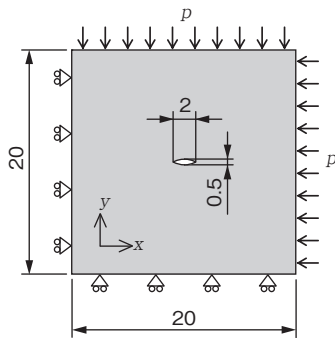


図6 空孔閉塞解析に用いた平面ひずみモデル
Plane strain model for void closing analysis

表4 空孔閉塞解析のパラメータ
Parameters for void closing analysis

Temperature \ Pressure	1 050℃	1 100℃	1 150℃	1 200℃
100MPa	*	*	*	*
150MPa	* HIP-1	*	* HIP-2	*
200MPa	*	*	*	* HIP-3

* : Analyzed conditions.

HIP-1 to 3 : Equivalent to the conditions applied to the test bearings

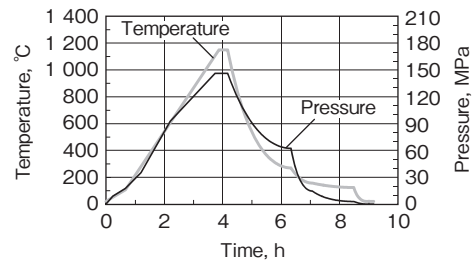


図7 モデル化したHIP処理履歴の例
(1 150℃, 150MPa)

Example of modeled HIP processing log
(1 150℃, 150MPa)

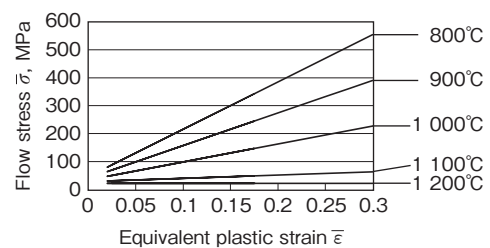


図8 相当塑性ひずみと流動応力

Relationship between equivalent plastic strain and flow stress for each temperature

3.2 解析結果

解析で得られたHIP処理による空孔の変形の一例を図9に示す。処理前に比べて、HIP処理後には空孔が小さくなっていることが分かる。各処理条件における空孔の変形の度合いを比較するため、空孔のy方向の開口幅 b (図10参照)を代表寸法として、式(4)によって空孔閉塞率(%)を定義した。

$$\text{空孔閉塞率} = \left[1 - \frac{b_{\text{処理後}}}{b_{\text{処理前}}} \right] \times 100 \quad (4)$$

表4に示す温度と圧力の組合せに対して、解析で得られた空孔閉塞率を図11に示す。当然ながら、圧力および温度が高いほど閉塞率が高くなっている。

2章の寿命試験に適用した三つの水準のHIP処理条件に対し、解析で求めた空孔閉塞率と、実測した界面密着割合(図3)の関係を図12に示す。なお、無処理の場合の空孔閉塞率をゼロとして、図中に同時にプロットしている。図より、空孔閉塞率と界面密着割合に相関が認められる。50個の実際の介在物の中で、母材との界面が密着している個数の割合を表す界面密着割合と、模式的な単一の空孔に対する変形の度合いを表す空孔閉塞率とは、対象としている現象が異なる。それにもかかわ

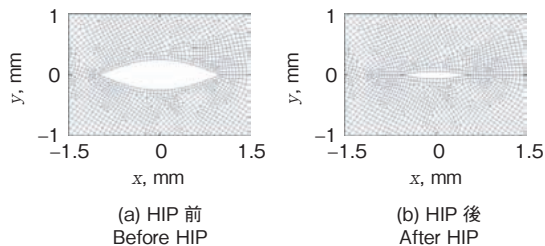


図9 HIP 処理による空孔の変化
(1 050°C, 200MPa)

Change in void shape due to HIP processing
(1 050°C, 200MPa)

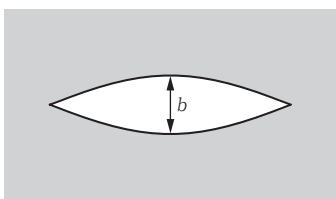


図10 余弦波形状空孔の代表寸法
Characteristic dimension of cosine-shaped void

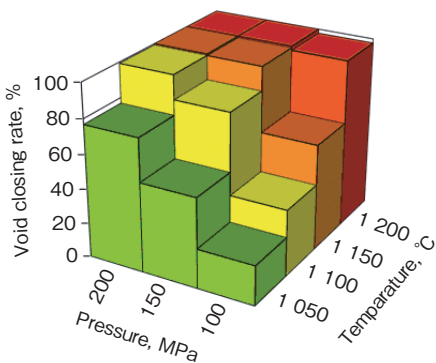


図11 HIP 処理条件と空孔閉塞率の関係
Void closing rate for each HIP condition

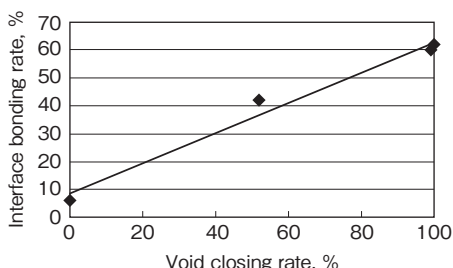


図12 空孔閉塞率と界面密着割合の関係
Relationship between void closing rate and interface bonding rate

らず、両者に相関が認められることは、いずれも加圧の程度に対する空隙、あるいは空孔の“つぶされやすさ”を表す指標であり、加圧条件に対する挙動が定性的に一致していると考えられる。したがって、本章で述べた空孔閉塞解析によって、実際の材料中に存在する介在物と母材との密着状態の、相対的な予測が可能であるとえられる。

4. おわりに

三つの水準の条件で HIP 処理を行った酸素含有量の多い軸受鋼から深溝玉軸受の内輪を作製し、寿命試験を実施した。その結果、荷重の方向や負荷レベルが異なるスラスト型転動疲労試験によって確認された寿命向上効果が、ラジアル軸受においても同様に得られることが分かった。また、HIP 処理の条件（温度と圧力）によって介在物と母材との密着度合いが異なり、それに対応して寿命が変化することを確認した。低清浄度の軸受鋼を用いた軸受の寿命を量産軸受相当に引き上げるために必要な加圧条件は、1 150°C、150MPa と判断できる。

余弦波形状の空孔モデルを用いて、熱、相変態および弾塑性変形の連成解析を実施した。寿命試験に用いた内輪で測定した界面密着割合（母材と密着している介在物の個数割合）と、解析で得られた空孔閉塞率（空孔の閉塞度合い）との間に相関が認められ、本解析が介在物と母材との密着状態の予測に有効であることが分かった。

参考文献

- 1) 上杉年一：わが国の軸受鋼の進歩発展について、鉄と鋼，74，10(1988)1889.
- 2) 宇田川毅志，菅 勝徳，小塚 巧，西川友章：軸受鋼の転動疲労損傷挙動に与える非金属介在物種の影響，愛知製鋼技報，30(2013)29.
- 3) 中島潤二，藤 健彦：連続鑄造鑄片品質向上のための非金属介在物低減技術の開発，新日鉄技報，394(2012)42.
- 4) 江見俊彦：製鋼技術の100年—高品質鋼の高効率量産システムへの軌跡—，鉄と鋼，100，1(2014)31.
- 5) 瀬村康一郎，松浦宏行：二次精錬技術の開発，発展の歴史と将来展望，鉄と鋼，100，4(2014)456.
- 6) 常陰典正，橋本和弥，藤松威史，平岡和彦：非金属介在物起点型転がり疲れにおけるき裂生成機構，山陽特殊製鋼技報，18(2011)23.

- 7) K. Hashimoto, T. Fujimatsu, N. Tsunekage, K. Hiraoka, K. Kida & E. C. Santos : Effect of inclusion/matrix interface cavities on internal-fracture-type rolling contact fatigue life, *Materials and Design*, 32, 10(2011)4980.
- 8) 川上 潔 : 高纯净度鋼における介在物の生成起源, *山陽特殊製鋼技報*, 14(2007)22.
- 9) 中井友充 : HIP 装置の実際, *溶接学会誌*, 65, 8(1996)622.
- 10) 木澤克彦, 後藤将夫 : 材料纯净度評価による転がり疲れ寿命の推定, *Koyo Engineering Journal*, No. 163(2003)36.
- 11) 転がり軸受寿命研究会 : 転がり軸受寿命試験マニュアル(3), *トライボロジスト*, Vol. 53, No. 5(2008)326.
- 12) ISO 281:2007, Rolling bearings—Dynamic load ratings and rating life.
- 13) ISO/TR 1281-1:2008, Rolling bearings—Explanatory notes on ISO 281—Part 1 : Basic dynamic load rating and basic rating life.
- 14) L. G. Johnson : *The Statistical Treatment of Fatigue Experiments*, Elsevier(1964).
- 15) 奈良崎道治 : 熱処理シミュレーションの現状と展望, *熱処理*, 50, 4(2010)343.
- 16) 渡邊陽一 : 熱処理シミュレーション利用の現状と将来動向, *素形材*, 55, 2(2014)42.

筆 者



佐田 隆*
T. SADA



野中由喜**
Y. NONAKA



三上 剛*
T. MIKAMI



木澤克彦*
K. KIZAWA

* 研究開発本部 材料研究部

** 生産技術本部 熱処理生技部