鋼中窒素濃度を正確に管理した浸炭窒化SUJ2鋼の人工痕付与による圧痕起点型はく離寿命評価

大木 力*・中村 裕一*²

Estimation of Scratched Contact Fatigue Life with Artificial Dent of SUJ2 Steel Carbonitrided to Controlled Surface Nitrogen Content

Chikara OHKI and Yuichi NAKAMURA

Synopsis : It was obvious that NH_3 partial pressure, H_2 partial pressure, carbon activity, and atmospheric imbalance of NH_3 partial pressure in a furnace is essential for carbonitriding process, thus, quantum shift of nitrogen concentration in the steel will be achieved in the factory. The scratched contact life is very important performance for rolling bearings, however, there is no research about relationship between nitrogen concentration and the scratched contact life. Keeping this situation in mind, the scratched contact life of SUJ2 (SAE52100 equivalent) of which nitrogen concentration accurately controlled is investigated in this research. To avoid uncertain accidents occurred by additive contamination to lubrication oil, ball bearing's inner rings added the artificial dent by Rockwell indenter (196 N) were used for the scratched contact life test. Weibull slope of the test results by this operation condition became shaper than that of test result by general test method (*i.e.*, bearing's rolling contact fatigue life test under contaminated lubrication condition). Therefore, it is thought that the test method in this research is suitable to get quantitative data. Significance test of the results appeared that when the surface nitrogen concentration is over 0.05 mass%, the scratched contact life is superior to that of normal SUJ2 with a reliability of 99%. Besides, experimental results revealed that, when the surface nitrogen concentration is 0.4 mass%, the life can be longer than that of 0.1 mass% nitrogen concentration. The sample whose surface nitrogen concentration is 0.4 mass% demonstrated L50 life that was 4 times as long as normal SUJ2.

Key words : JIS-SUJ2; carbonitriding; fatigue life; rolling bearing; WEIBULL.

1. 緒言

鋼の強化および耐摩耗性向上のため浸炭窒化処理が有効であり、最近では鋼中窒素濃度分布予測法も Mittemeijer ら、Narita ら、Hu らにより提案され¹⁻³⁾、Ohki は高炭素クロム軸受鋼2種(SUJ2)の窒素濃度分布を浸炭窒化処理雰囲気中の未分解 NH_3 分圧、 H_2 分圧、炭素の活量と処理時間から高精度に予測した⁴⁾。Ohki はさらに熱処理炉内の未分解 NH_3 分圧の分布にも着目し、この均一化方法も提案した⁵⁾。これにより、生産現場の品質管理基準として窒素濃度を組み入れることが可能な段階にあると考えられる。

一方、転がり軸受の内部起点型はく離寿命⁶⁾におよぼす浸炭窒化処理の影響については古くは倉部らによって、最近では例えば Dommarco らによって有効性が確認されている^{7,8)}。近年では、転がり軸受の異物混入潤滑下での寿命(以下、圧痕起点型はく離寿命と呼称する)は潤滑油中に硬質異物が混入する自動車のトランスミッション内や自動車用ハブ、減速機等の転がり軸受にとって重要であるが、前述の窒素濃度を正確に管理した SUJ2 材の寿命データは

まだない。寿命予測式などがいくつか提案され、それらをまとめた解説記事も見られるが⁹⁾、実機の使用条件を網羅していないためか、現状では一般的に使用されていない。圧痕起点型はく離寿命の試験方法は、実機を模擬して潤滑油中に故意に硬質異物を混入した寿命試験が行われる場合が多い^{10,11)}が、その試験結果でさえも、異物の材質や硬さ、大きさ、量、油膜厚さなどの多くの要因が絡む⁹⁾ため、ばらつきが大きい場合があり再現性も十分とはいえない。最近、Mota らは硬さ試験圧子による人工圧痕を付与した試験片を用いて圧痕起点型はく離試験を行った¹²⁾。この方法を用いれば、潤滑油中に硬質異物を混入する寿命試験のように実機と同じ状態とはいえないが、不確定要因が少なく、ばらつき、再現性のよい寿命データが得られると期待できる。

そこで本研究では、窒素濃度を正確に管理した SUJ2 材の圧痕起点型はく離寿命について、人工圧痕を付与した試験片を用いることにより、不確定要因が少なく、ばらつき、再現性のよい寿命データを得ることを目的とする。4種類の窒素濃度の玉軸受内輪軌道面に、ロックウェル硬さ測定

平成21年4月1日受付 平成21年6月12日受理 (Received on Apr. 1, 2009; Accepted on June 12, 2009)

* NTN (株) 要素技術研究所 (Elemental Technological R&D Center, NTN Corporation, 3066 Higashikata Kuwana)

* 2 三重大学大学院工学研究科物理工学専攻 (Physics Engineering Department, Faculty of Engineering, Mie University)

Table 1. Chemical compositions of JIS-SUJ2 used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O (ppm)
0.99	0.26	0.44	0.012	0.006	0.08	1.46	0.03	0.15	9

Table 2. Heat treatment conditions and grinding allowances.

(N0C for the test under contaminated lubrication)

Notation of each specimen	Inner ring				Outer ring
	N0, N0C	N005	N01	N04	
Partial pressure of NH ₃ (Pa)	—	30	213	←	—
Partial pressure of H ₂ (kPa)	33.4	36.5	42.5	←	33.4
Flow rate of RX gases measured at 25 °C and 1 atm (L/min)	11.5	←	←	←	11.5
Treating temperature (°C)	850	852	852	←	850
Duration (s)	3000	8000	5300	←	3000
Carbon activity ac	0.70	0.95	←	←	0.70
Grinding allowance (μm)	100	110	130	50	100
Surface nitrogen concentration after grinding (mass%)	0	0.05	0.1	0.4	0

用圧子により圧痕を付与して寿命試験を行った。以下、これを圧痕起点型はく離寿命試験と呼称する。比較のため、従来よく用いられる異物混入潤滑下での寿命試験も行った。寿命データよりワイブル分布図の構築を中心に有意差検定などの考察を行う。

2. 試験方法

2.1 試験片材質

試験軸受は深溝玉軸受（JIS規格軸受型番：6206、内径30mm、外径62mm、幅16mm、転動体9個）とした。転動体には波紋状はく離による寿命への影響¹³⁾を避けるためセラミック球(φ9.525mm (3/8 inch))を用いた。圧痕起点型はく離寿命試験に用いた内、外輪の素材は全てTable 1に示した化学成分の同一ロットのSUJ2とした。内、外輪の熱処理にはパッチ型熱処理炉（容積120l）を用い、浸炭窒化処理時の雰囲気は非分散型赤外吸収法によりCO、CO₂分圧、熱伝導度法によりH₂分圧、ガスクロマトグラフィーによりNH₃分圧を測定した。Ohkiの方法に基づいて、未分解NH₃分圧、H₂分圧、炭素の活量と処理時間から、鋼中窒素濃度分布を制御した⁴⁾。圧痕を付与しない外輪は内輪よりも必ず長寿命になるため、浸炭窒化処理は施さず、通常の焼入れ、焼戻しを施した。熱処理条件と研削加工取代をTable 2に示す。以降、各試験の実験番号は表中のように研削後の完成した表面窒素濃度を表す英数字で記述する。

各試験片はそれぞれTable 2に示した各加熱温度から油冷による焼入れを経た後、180°C×2hの焼戻しを施した。N0、N0Cは浸炭窒化処理を施さない場合で、Cは異物混入潤滑下での寿命試験用を表すものとする。N005は窒素濃度が低い場合、N01、N04は研削後にある程度の窒素濃度が確保された場合を想定した。熱処理後、各実験番号の試

験片から無作為に2個ずつ抽出し、内輪軌道面溝底部中央における鋼中の炭素、窒素濃度分布をElectron Probe Micro Analyzer (EPMA)の線分析によって調査した。その結果をFig. 1に示す。同一実験番号内での炭素、窒素濃度分布にばらつきはなく、窒素濃度分布はFig. 1に併記する予測値とほぼ合致している。なお、EPMAによって得られる炭素、窒素濃度の値はFe中に固溶したものと析出物内に含まれるものの合計値である。

EPMAの線分析によって研削加工後の内輪軌道面溝底部中央の窒素濃度分布を実験番号毎に2箇所ずつ調査した。その結果をFig. 2に示す。窒素濃度分布はFig. 1の窒素濃度分布からTable 2に記載した研削加工取代を削除したものにはほぼ合致している。熱処理によって得た鋼中窒素濃度分布は3種類だが、研削加工取代を変更することにより4種類の鋼中窒素濃度分布を持つ試験片を得ることが出来た。X線回折法を用いて、試験実施前の内輪軌道面溝底部中央の最表面から50μm深さ位置における残留応力と残留オーステナイト量を調査した。その結果をTable 3に示す。残留応力は熱処理条件によらず圧縮であり、定量値にも大きな差は生じていない。残留オーステナイト量は窒素濃度の高い順に多くなっており、N04が最も多く、浸炭窒化処理を施していないN0が最も少ない。また、Fig. 3に熱処理完了後の断面硬さ分布を示す。研削後の最表面に相当する位置においてN005、N01の断面硬さはN0、N04に比較して若干高いが、その差は50HV以下と小さい。以上より、各実験番号における材質の主な違いは鋼中窒素濃度と残留オーステナイト量の2点であるといえる。

2.2 寿命試験方法

試験対象は深溝玉軸受の内輪であるが、圧痕は内輪軌道面溝底部中央に円すい形ダイヤモンドのロックウェル硬さ測定用圧子を196Nの荷重で押し付けて形成した。形成した圧痕形状は三次元表面形状装置で測定され、圧痕周縁部

Fig. 1. Carbon and nitrogen concentration distribution profiles before grinding.

Fig. 2. Nitrogen concentration distribution profiles after grinding.

の盛り上がり形状は圧痕中心を対称軸として軸方向，円周方向に対しほぼ対称形状であることが確認されている。各試験片の代表的な圧痕形状をFig. 4に示す。付与した圧痕は内輪1個当たり30個（12°ごとの等配）とした。

用いた寿命試験機はFig. 5に示すように2個の試験軸受に均等にラジアル荷重を負荷する構造である。軸受の潤滑はハウジング内を油浴にすることによって保った。試験条件をTable 4に示す。はく離の検知には振動監視計を用いており，試験中の振動加速度は約1.5 m/s²（周波数範囲：3~5 kHz，実効値）であるが，振動加速度が6 m/s²になった時に振動監視計が感知して試験が停止する設定とした。振動加速度が約6 m/s²になった時，内輪に形成された圧痕のうち1個の圧痕から大きなはく離が発生することを確認している。また，寿命に与える機差の影響を除外するため

Table 3. Characteristics measured by X-ray diffraction.

Notation	Residual stress (MPa)	Retained austenite (%)
N0, N0C	-53	8.5
N005	-92	15.3
N01	-75	15.8
N04	-119	23.3

に全ての寿命試験を1台の試験機で実施した。

比較のため，浸炭窒化処理を行わない軸受(N0C)に対して従来多く用いられる異物混入潤滑下での寿命試験（以下，異物混入潤滑試験と呼称する）も行った。試験軸受の材質，試験機，軸受に与えるラジアル荷重，内輪回転数，潤滑方法は圧痕起点型はく離寿命試験方法と同じで，他の条件もほぼ同じである。異なる点は内輪に人工圧痕を付けず，潤

Fig. 3. Hardness distribution profiles before grinding.

Fig. 4. Examples of dent's shapes.

Fig. 5. Schematic drawing of ball bearing RCF tester.

Table 4. Test conditions of scratched contact life testing.

Radial load (kN)	4.9
Radial internal clearance (μm)	20
Maximum contact stress of flat surface (GPa)	3.04
Rotating speed of inner ring (rpm)	3150
Lubricant	Turbine oil (Dynamic Viscosity at 40°C : 58.6 mm ² /s)

滑油内に所定量の硬質異物（形状：球形，量：0.4 g/L，硬さ：800HV，粒径：108~180 μm ）を混入させる点である。

3. 試験結果および考察

3.1 はく離および圧痕の状況

圧痕起点型はく離寿命試験では，全ての試験軸受において内輪にはく離が発生し，転動体，外輪には損傷がなかった。内輪に形成された30個の圧痕のうち1個の圧痕のみから大きなはく離が発生していた。はく離の起点部周辺の例をFig. 6に示す。他の試験軸受も同様の形態を示しており，はく離の起点は圧痕の内側ではなく，圧痕周縁の盛り上がり部分を起点として荷重移動方向にはく離が広がる形であった。この形態は従来の試験方法^{10,11)}で得られるはく離形態と同様である¹⁴⁾。

異物混入潤滑試験でのはく離部周辺の代表例をFig. 7に示す。圧痕周縁の盛り上がり部分を起点として荷重移動方向にはく離が広がる形であり，圧痕起点型はく離寿命試験方法でのはく離形態と同様であることが確認される。他の試験軸受においてもはく離形態は同様であった。試験後の内輪軌道面の圧痕分布状態（はく離していない部分）を外観写真でFig. 8に示す。14.7hという比較的短寿命ではく離した内輪の軌道面に形成された圧痕量は，65.0hはく離品の内輪軌道面に形成されている圧痕量の2倍以上であり，同じ試験条件であっても両者に大きなばらつきがある。

Fig. 6. Examples of flaking area with artificial dent.

Fig. 7. Examples of flaking area under contaminated lubrication condition.

3.2 ワイブル分布

本試験での寿命はLundberg-Palmgrenの古典理論¹⁵⁾より2パラメータのワイブル分布関数に従うものとして求めた。ワイブル分布の累積分布関数を式(1)に示す。

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^e \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで， F ， x ， η および e はそれぞれ破損確率，尺度パラメータ，確率変数およびワイブル勾配である。Table 5に試験結果の一覧表，Table 6にワイブル分布から得られた軸受寿命を示す。異物混入潤滑試験から求めた浸炭窒化処理無しの場合のワイブル分布(N0C)を，圧痕起点型はく離寿

Fig. 8. Inner ring's raceway after life test under contaminated lubrication condition.

Table 5. Results of scratched contact life test.

N0C		N0		N005		N01		N04	
Cumulative life (%)	Failure time (h)	Cumulative life (%)	Failure time (h)	Cumulative life (%)	Failure time (h)	Cumulative life (%)	Failure time (h)	Cumulative life (%)	Failure time (h)
15.9	14.1	5.6	36.7	10.9	66.6	5.6	78.4	8.3	109.9
38.6	14.7	13.7	42.5	26.5	95.3	13.7	87.1	20.2	150.4
61.4	19.8	21.8	44.4	42.2	119.6	21.8	100.9	32.1	200.7
84.1	65.0	29.8	47.0	57.8	123.6	29.8	101.9	44.0	235.6
—	—	37.9	50.1	73.5	130.7	37.9	105.8	56.0	241.7
—	—	46.0	55.3	89.1	168.2	46.0	111.6	67.9	244.2
—	—	54.0	58.5	—	—	54.0	121.2	79.8	244.2
—	—	62.1	62.9	—	—	62.1	122.3	91.7	319.2
—	—	70.2	63.0	—	—	70.2	130.5	—	—
—	—	78.2	70.1	—	—	78.2	146.3	—	—
—	—	86.3	71.6	—	—	86.3	146.4	—	—
—	—	94.4	85.7	—	—	94.4	195.0	—	—

Table 6. Test results from Weibull distributions.

	N0C	N0	N005	N01	N04
L_{10} life* (h)	8.0	38.6	67.6	81.7	124.9
L_{50} life* (h)	24.3	57.7	117.3	121.3	218.0
Weibull slope*	1.70	4.68	3.42	4.77	3.38

※ Calculation values from 2 parameter Weibull distribution.

Fig. 9. The difference of Weibull distributions by the variation of the test method.

命試験で得られたもの(N0)と比較した図をFig. 9に示すが、前者は寿命が大きくばらついたために、ワイブル勾配が明らかに小さい。前者の試験法では、油浴中の硬質異物の分布状態や軸受の運転開始タイミング等によって軌道面に噛み込む異物量が大きく変化してしまうことがこの原因であると考えられる。後者の試験法ではワイブル勾配が大きくなり再現性のよい寿命データが得られており、これは

Fig. 10. The difference of Weibull distributions by the variation of nitrogen concentration.

人工圧痕を付与するために軌道面に噛み込む異物量という不確定要因がなく、圧痕量、すなわち疲労が主に進行する危険体積のばらつきが小さいためである。

圧痕起点型はく離の寿命試験方法で得られた表面窒素濃度による寿命変化について、ワイブル分布図をFig.10に示す。いずれの実験もばらつきが少なく、勾配が大きいことが分かり、本試験法が実機の寿命予測の有用な試験法となりうると考えられる。Table 6の L_{50} 寿命で見ると、N0（浸炭窒化処理なし）では57.7h、N005（表面窒素濃度が0.05 mass%程度）では117.3h、N01（表面窒素濃度が0.1 mass%程度）では121.3h、N04（表面窒素濃度が0.4 mass%程度）では218.0hと最大では4倍程度の値になるなど表面窒素濃度が高い程長寿命を示し、窒素濃度を正

確に管理したSUJ2材の定量的なデータが得られた。N005とN01では表面窒素濃度が異なるのにほぼ同じワイブル分布となっているが、これについては3章4項で考察する。

3・3 有意差の検定

複数種類の軸受の寿命差を論じる場合に、試験より得られたワイブル分布から直接比較されることがある^{10,11,16}。しかし試験に供した軸受個数が少ない場合にはワイブル分布の信頼性が低いため、必ずしも適切な比較であるとは限らない。その場合、統計処理を背景にした有意差で比較する必要があると考えられるが、ワイブル分布の有意差検定に関する研究例は少ない。Johnsonは統計学を用いて、Fujitaは計算機上に発生させる乱数を用いて検定方法の研究を行っている^{17,18}が、現状では確立されているとはいえない。そこで本研究では得られた寿命試験結果を正規分布の有意差検定により評価することにした。比較する2者の母集団の分散が未知の場合、両者共通の母標準偏差を推定し、t分布よりその母平均の有意差を検定することが可能である¹⁹。ワイブル分布はその勾配が3.26の時に正規分布に一致する¹⁵。異物混入潤滑試験のワイブル勾配は1.7であり、正規分布に近似すると誤差が大きくなる（歪度1.9、尖度3.8）が、圧痕起点型はく離寿命試験で得られたワイブル勾配は3.38~4.77の範囲で3.26に近く（歪度は最大で1.1、尖度は最大で1.8）、正規分布におおよそ近似することが可能であると考えられる。正規分布に近似した場合の各実験番号の平均寿命、標準偏差、および平方和をTable 7に示す。正規分布に近似した場合の平均寿命は全ての実験番号においてワイブル分布から求めた L_{50} 寿命とほぼ同じ値を示している。従って正規分布に近似したことによる誤差は少ないものと考えられる。

有意差検定の結果をTable 8に示す。浸炭窒化処理を施していないN0と、N005またはN01の母平均には危険率1%で有意差が認められ、本試験での浸炭窒化処理による圧痕起点型はく離寿命の長寿命化が確認される。N005とN01の母平均には危険率10%で有意差がない。また、表面窒素濃度が0.4 mass%程度と高いN04の母平均は、危険率1%でN01の母平均と有意差があることが確認される。し

Table 7. Approximations to normal distribution.

	N0	N005	N01	N04
Average life (h)	57.3	117.3	120.6	218.2
Standard deviation	14.2	34.3	31.5	64.4
Sum of squares	2211.9	5869.8	10903.7	29040.0

Table 8. Results of *t*-test.

Objects	Standard deviation of population	t_0	$t(\phi^*, 0.1)$	$t(\phi^*, 0.01)$
N0 and N005	22.475	5.339	↑	↑
N0 and N01	24.416	6.350	1.717	2.819
N005 and N01	32.378	0.204	1.746	2.921
N01 and N04	47.107	4.539	1.725	2.845

※Degree of freedom

たがって本研究での圧痕起点型はく離寿命試験において、SUJ2の浸炭窒化処理はこれを長寿命にする効果があり、窒素濃度が高い場合にはその効果が大きくなると結論出来る。

3・4 浸炭窒化処理による長寿命化に関する考察

本研究での圧痕起点型はく離寿命試験において、SUJ2の浸炭窒化処理がこれを長くする効果があり、鋼中空素濃度が高い場合にはその効果が大きくなることが分かった。ここでは浸炭窒化処理による長寿命化の理由について考察する。

圧痕起点型はく離寿命について、圧痕内部の傾き（＝圧痕深さ÷圧痕径）が小さいほどその寿命が長くなるという報告があるが²⁰、Fig. 4にあるように圧痕の内部形状の差異は少ないため、本研究での長寿命化の理由には挙げられない。また、盛り上がり部の曲率半径を圧痕半径で除した値が小さいほど¹⁶、または盛り上がり部頂点の角度が小さい（鋭角）ほど²¹盛り上がり部分の疲労が進行する際に生じる応力集中が大きくなり、圧痕起点型はく離寿命は短くなると報告されている。そこで圧痕起点型はく離寿命試験実施前後の圧痕周縁の盛り上がり部分の形状（荷重移動方向に対して後方）をFig.11, Fig.12に示し、考察する。なお、Y軸方向原点は圧痕がない場合の内輪軌道面の溝底とし、X軸方向原点は盛り上がりの斜面とY軸の交点としている。

Fig.11の試験実施前では浸炭窒化処理品(N005, N01, N04)の盛り上がり部頂点の形状は、浸炭窒化していない

Fig. 11. Shapes around dents before rolling contact fatigue.

Fig. 12. Shapes around dents after rolling contact fatigue.

Table 9. Calculation results of nitrogen concentration in γ -Fe at 850°C (1 mass% C–N–1.5 mass% Cr–Fe).

Total nitrogen concentration (mass%)	Mass of CrN per steel 1g (g)	Nitrogen concentration in γ -Fe* (mass%)	Phase at 850°C
0.05	0	0.050	γ -Fe*+cementite
0.1	0.001	0.077	γ -Fe*+cementite+CrN
0.2	0.005	0.092	
0.3	0.009	0.115	
0.4	0.012	0.154	γ -Fe*+CrN
0.5	0.014	0.211	
0.6	0.015	0.286	

※Austenite-Fe

N0の形状に比較してより鈍角であり曲率半径も大きい。残留オーステナイトの存在は加工誘起マルテンサイトの生成によって加工硬化係数を大きくすると考えられるが、浸炭窒化処理品は残留オーステナイト量が多い。鋼の物性と圧痕形状の関係を調査した研究²²⁾によれば、加工硬化係数が大きい材料ほど圧痕周縁の盛り上がり形状は鈍化するという結果が得られているため、本調査結果は妥当であると考えられる。しかし試験実施後のFig.12では、試験実施前に比較して盛り上がり高さは半分程度に減少しており、盛り上がり部頂点付近の形状は試験片の材質や経過時間によらずにほぼ同じになっていた。過去の研究により転がり接触時の圧痕周縁の盛り上がり形状は疲労の初期（はく離寿命の約1/8まで）に大きく変化し、それ以降はあまり変化しないことが指摘されている²³⁾。そのため、疲労が進行する際の応力集中は材質によらず同程度であったことが推察される。したがって、浸炭窒化処理による長寿命化原因は残留オーステナイト富化による圧痕周縁の盛り上がり形状の鈍化によるものではないと考えられる。

本研究での浸炭窒化処理方法⁴⁾では脱炭が生じないため、炭素と窒素の合計濃度は侵入した窒素濃度分だけ増加すると考えられる。したがって浸炭窒化処理による固溶強化²⁴⁾によって疲労寿命が向上していることも考えられる。しかしながら、表面窒素濃度0.05 mass%程度のN005と表面窒素濃度0.1 mass%程度のN01のワイブル分布はほぼ同じなため、長寿命化原因を一概に表面窒素濃度で説明することはできない。そこで、鋼中全体の窒素濃度とオーステナイト（以下、 γ -Feと呼称する）中に固溶している窒素濃度（以下、固溶窒素濃度と呼称する）の関係を市販の熱力学相平衡状態図計算ソフトにより計算した。供試材のSUJ2は化学成分としてC, Si, Mn, Crを含むが、計算の複雑化を避けるためにSi, Mnを計算対象から省き、1 mass% C–1.5 mass% Cr–Fe系に窒素を加えた場合の平衡状態を計算するものとした。温度は浸炭窒化処理温度と同じ850°Cとした。なお、実際は加熱後に焼入れを施すため、マルテンサイト中の固溶窒素濃度を明らかにすべきであるが、その計算は困難である。本研究での焼入れは油冷による急冷であるため、850°Cの γ -Fe中の固溶窒素濃度と大きな差は生じないものとする。また、窒素はCrNの他にもセメンタイト((Cr,Fe)₃(C,N))中の炭素の置換元素としても

存在するが、その量は非常に少ないために無視している。計算結果をTable 9に示す。0.05 mass% Nの場合、850°Cでは γ -Fe+セメンタイトの2相域であるが、0.1~0.3 mass%の範囲では γ -Fe+セメンタイト+CrNの3相域になり、0.4~0.6 mass%の範囲では γ -Fe+CrNの2相域になることが分かる。0.05 mass% Nの場合にはCrNを形成しないため固溶窒素濃度は全体の窒素濃度に等しいが、0.1 mass% Nの場合はCrNを形成して固溶窒素濃度は0.077 mass%程度になる。0.4 mass% Nの場合にもCrNを形成するが、全体の窒素濃度が高いために固溶窒素濃度が0.154 mass%程度になり、0.1 mass% Nの場合の2倍になることが分かった。したがってN005とN001の平均寿命に差が生じないのは固溶窒素濃度が同程度であるためと考えられる。以上より、浸炭窒化処理材の圧痕起点型はく離寿命は、表面窒素濃度よりも固溶窒素濃度との相関があると考えられる。

4. 結言

本研究では表面窒素濃度を正確に管理したSUJ2材深溝玉軸受に対し、ばらつき、再現性のよい寿命データを得ることを目指し、内輪軌道面に人工圧痕を付与して圧痕起点はく離寿命試験を行った。結果を以下にまとめる。

(1) 本試験方法で得られたワイブル分布はいずれの試験片も、従来の硬質異物混入潤滑下での寿命試験に比較してばらつきが少なくワイブル勾配は大きい結果となり、これは異物の軌道面への噛み込み方の不確定要因がなくなったためであり、本試験方法は再現性のよい寿命データを得るのに適していると言え、実機の寿命予測の有用な試験法になりうると考えられる。

(2) ワイブル分布から得られた L_{50} 寿命は、浸炭窒化処理を施さないもので57.7 h、表面窒素濃度が0.05 mass%、0.1 mass%、0.4 mass%のものでそれぞれ117.3 h、121.3 h、218.0 hとなり、最大では4倍程度の値になるなど表面窒素濃度が高い程長寿命を示し、窒素濃度を正確に管理したSUJ2材の定量的なデータが得られた。

(3) ワイブル分布を正規分布に近似し、t分布による有意差検定を実施した。その結果、異物混入潤滑下での寿命試験ではワイブル勾配が小さく正規分布に近似出来なかったのに対し、本試験方法では浸炭窒化処理品の平均寿

命が浸炭窒化処理を施さない場合より危険率1%で長くなり、表面窒素濃度が0.4 mass%程度と高い場合の平均寿命は表面窒素濃度が0.05 mass%、0.1 mass%の場合よりも危険率1%で長くなることを明らかに出来た。

(4) 熱力学相平衡状態図計算により浸炭窒化処理材の寿命は、表面窒素濃度よりも固溶窒素濃度と相関があることを見いだした。

文 献

- 1) E.J.Mitte-meijer and M.A.J.Sommers: *Surf. Eng.*, **13** (1997), 483.
- 2) 成田匠吾, 横瀬敬二: 日本熱処理技術協会第61回講演大会予稿集, 日本熱処理技術協会, 愛知, (2005), 5.
- 3) M.-J.Hu, J.-S.Pan and D.Ruan: *Mater. Sci. Technol.*, **16** (2000), 547.
- 4) C.Ohki: *Tetsu-to-Hagané*, **93** (2007), 220.
- 5) C.Ohki: *Tetsu-to-Hagané*, **94** (2008), 42.
- 6) N.Mitamura: *J. Jpn. Soc. Tribol.*, **53** (2008), 641.
- 7) H.Kurabe and T.Araki: *Tetsu-to-Hagané*, **53** (1967), 1305.
- 8) R.C.Dommarco, K.J.Kozaczek, P.C.Bstias, G.T.Hahn and C.A.Rubin: *Wear*, **257** (2004), 1081.
- 9) T.Sada: *J. Jpn. Soc. Tribol.*, **53** (2008), 659.
- 10) K.Maeda: *Kougyou Kanetsu*, **38** (2001), 2.
- 11) C.Ohki: *SAE Technical Paper Series*, (2004), 2004-01-0634.
- 12) V.M.M.B da Mota, P.M.G.P.Moreita and L.A.A.Ferreira: *Int. J. Fatigue*, **30** (2008), 1997.
- 13) Y.Fijii and K.Maeda: *Wear*, **252** (2002), 787.
- 14) T.Sada and T.Mikami: *J. Jpn. Soc. Tribol.*, **49** (2004), 948.
- 15) 清水茂夫: 機械系のための信頼性設計入門, 数理工学社, 東京, (2006), 34.
- 16) Y.Murakami: *Mach. Des.*, **39** (1995), 13.
- 17) L.G.Johnson: *The Statistical Treatment of Fatigue Experiments*, Elsevier Publishing Company, St. Louis, (1964), 3.
- 18) 藤田 工: トライボロジー会議予稿集, 日本トライボロジー学会, 愛知, (2008), 439.
- 19) 森口繁一: 統計的方法新編改訂版, 日本規格協会, 東京, (1989), 121.
- 20) A.A.Lubrecht, C.H.Venner, S.Lane, B.Jacobson and E.Ioannides: *Proc. of the Japan Int. Tribology Conf.*, Aichi, (1990), 185.
- 21) 大木 力: トライボロジー会議予稿集, 日本トライボロジー学会, 東京, (2000), 169.
- 22) S.Maki: *J. Mater. Test. Res. Assoc. Jpn.*, **39** (1994), 127.
- 23) 柿嶋秀史, 木本榮治, 是永 敦, 吉岡武雄: トライボロジー会議予稿集, 日本トライボロジー学会, 東京, (1997), 443.
- 24) 加藤雅治: 入門転位論, 裳華房, 東京, (1999), 179.