

すべり軸受の焼き付き限界に及ぼす各種因子の影響 (第5編)
 (軸・軸受メタル材料, 表面あらさ, 軸受寸法比, 変動荷重の影響)

朝 鍋 定 生*・浦 晟*
 川 添 強*・森 高 秀四郎*
 福 富 正 稔**・渡 辺 真太郎***

Effect of Some Factors on Sliding Bearing Seizure (5 th Report)
 (Effect of Bearing Materials, Surface Roughness, Bearing
 Dimensions and Fluctuating Load.)

by

Sadao ASANABE, Akira URA*, Tsuyoshi KAWAZOE*, Hideshirou MORITAKA*
 Masatoshi FUKUTOMI**, and Shintarou WATANABE***

1. 緒 言

高速高荷重用すべり軸受を対象に, 焼き付き限界におよぼす軸および軸受メタル材質, 摩擦面表面あらさ, 荷重変動の影響, さらに限界温度を制限した場合の軸受諸元寸法比(すきま/直径比, 幅/直径比)の最適値などについて研究し, きわめて有益な軸受設計指針を与えることができた。なお, 本研究を含めた一連の研究成果はわが国産業界への新製品開発, 実用化, 技術進歩に貢献するところ多大であるとして, 平成5年4月の日本機械学会賞(技術開発)に続き, 平成12年4月にも日本機械学会賞(技術功績)が授与されたことを付記しておく。

2. 実験装置

図1に軸受試験装置の概略を示す。1のモータにより駆動し, 2の無段変速機にて回転速度を調整し, 4の段付きベルトで増速して6の歯車装置に連結する。歯車装置の入力軸側延長軸は20の変動荷重発生装置につながり, 出力軸は試験軸につながる。21の電気式回転計で負荷軸回転数を計測し, 試験軸回転数は歯車装置の増・減速比を乗じて求める。試験軸の試験軸受摩擦トルクを計測するため19のストレングージ式トルク

棒を設置し, 歯車装置出力軸端にとりつけた5の水銀スリップリングを介して取り出す。試験軸受への潤滑油は7のタンクから11の給油ポンプで供給され, 14の加熱ヒータで入口温度を調節し, 13の流量計, 15の圧力計でそれぞれ軸受給油量, 給油圧力を計測した。給油温度は試験軸受の直前で計測した。

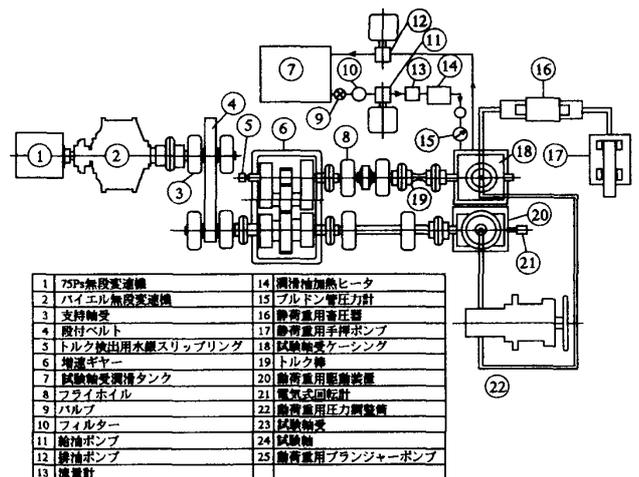


図1 高速軸受試験装置概略図

図2に変動荷重発生装置と試験軸受部分の詳細を示す。負荷装置20では負荷軸に取り付けたカムで燃料が

2001年9月17日受理

*機械システム工学科

**長菱エンジニアリング(株)

***三菱重工業(株)

ンプを利用した25のプランジャーポンプを駆動し、22の筒で圧力を調整した。23の試験軸は両端をころがり軸受で支持され、その中間に23の試験軸受が配置される。試験軸受の上部に負荷装置からの油圧変動荷重が課せられる。

本実験では歯車増速比は2.0と設定し、あたかも4サイクルエンジンのごとくクランク軸2回転に1回の爆発荷重が作用する様をシミュレートしている。2サイクルエンジンの場合をシミュレートするには増速比を1とすればよい。なお、静荷重試験の場合には17の手押しポンプで高油圧を16の蓄圧器に蓄え、試験軸受上部に負荷する。

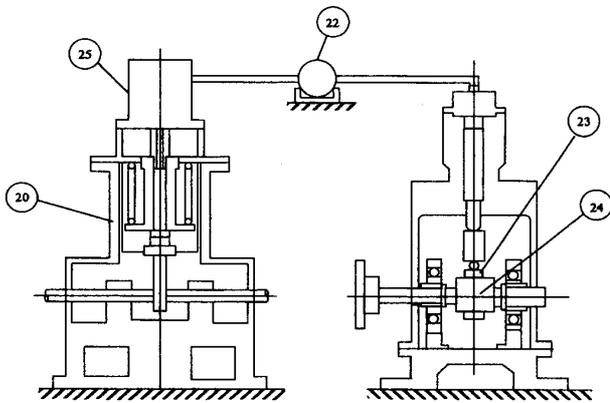


図2 変動荷重負荷装置と試験軸受詳細図

3. 変動荷重条件下での実験

3.1 荷重変動が軸受油量、軸受温度におよぼす影響

さきに、静荷重条件下での短幅軸受の実験で、軸受油量、温度上昇などの軸受諸特性を7つの外部因子すなわち、軸受直径・幅・すきま、給油圧力・温度（給油粘度）、荷重・回転数の指数表示式で表現することに成功した。^{1), 2)} ここでは、変動荷重条件下では如何になるかを実験する。実験条件を表1に示す。軸受直径 D 以外を変数とした。

表1 実験条件

直径すきま	$c=0.053(C/D=0.76/10^3)$, $0.083(C/D=1.18/10^3)$, $0.159(C/D=2.2/10^3)$ mm
軸受面圧	$p_b=200\sim500$ kg/cm ² (随時可変)
軸回転数	$N=2500, 3500, 4500$ rpm
給油圧力	$p_f=1.5, 2, 3, 3.5$ kg/cm ²
軸受有効半幅	$L_0=10, 15, 20$ mm
入口粘度	$Z_f=9, 15, 20, 21, 31$ c.p $T_f=110, 91, 81, 80, 68$ °C
軸受直径	$D=70$ mm (一定)

3.2 軸受油量に関する実験結果

各因子の影響を前の研究¹⁾と同様に Log-Log Scale でプロットし、指数を求めた結果を静荷重での結果と対比して示すと表2のようになり、大まかにみると両者のあいだには歴然とした差異は見当たらない。

表2 油量に関する指数比較

外部因子 油量	C	L_0	p_b	p_f	Z_f	N
$(Q)_{STA}$	1.25	-0.334	0.054	0.718	-0.490	0.306
$(Q)_{DYN}$	1.14	-0.584	0.00	0.700	-0.334	0.290

そこで、静荷重に対する指数表示式で実験結果をまとめてみると図3に示すように静荷重、変動荷重の差異は見られず、両者は一つの線上にのっている。軸受油量に関しては荷重変動性の影響は無いと言える。

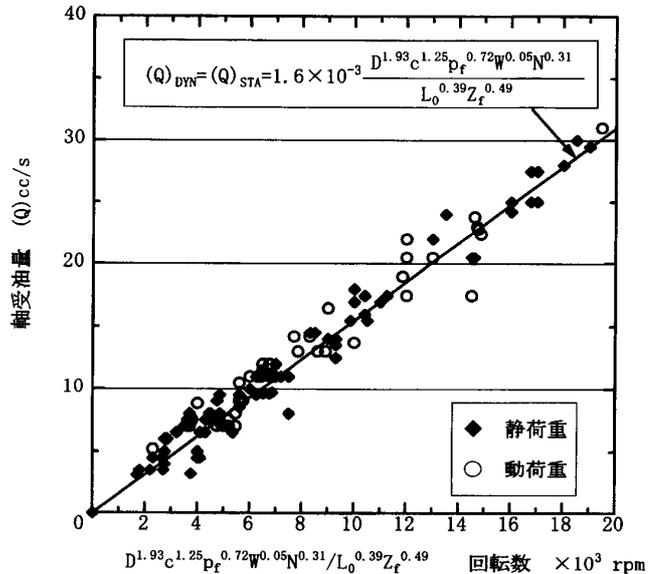


図3 静荷重、変動荷重下の油量比較

3.3 軸受温度上昇に関する実験結果

各因子の影響を油量実験結果と同様に Log-Log

Scale でプロットし、指数を求めた結果を静荷重での結果と対比して示すと表3のようになる。細かく見れば L_0 の影響指数が倍ほど違うがそれ以外についてはほぼ同じである。

表3 温度上昇に関する指数比較

因子	C	L_0	p_b	p_f	Z_f	N
$(\Delta T)_{STA}$	-0.417	0.324	0.447	-0.145	0.462	1.035
$(\Delta T)_{DYN}$	-0.316	0.610	0.560	-0.150	0.425	1.220

図4に(a)油量と(b)温度上昇の各因子の影響指数を対比して示すが、変動荷重下での指数は静荷重下でのたくさんのデータのばらつきの範囲内にあるように見て取れる。そこで、静荷重下での指数表示式で実験結果を整理すると図5のようにそれぞれ一本の直線上にまとまることわかる。変動荷重下のほうが温度上昇は低く、静荷重下での温度上昇の0.876倍にあたる。荷重 x 時間面積 (Duty Number) から言えば変動荷重下では楽のはずであり、荷重変動による油膜の呼吸作用によるものではないかと思われる。

以上軸受特性上荷重変動の影響はかならずしも本質的なものでなく、大半は静荷重下の特性で論じても良

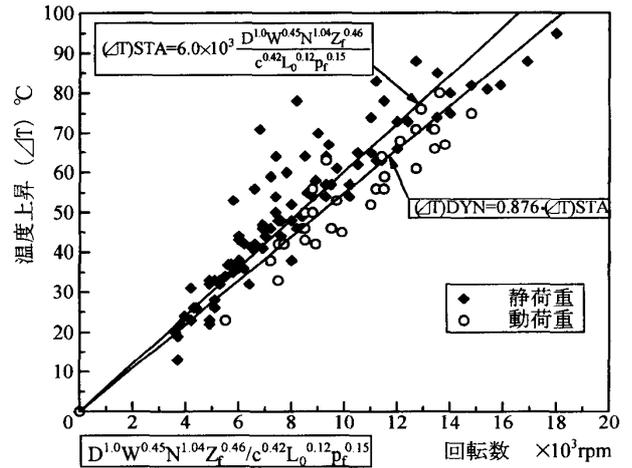


図5 静荷重, 変動荷重下の温度上昇比較

いことがわかったので、以下の実験は静荷重条件で実施することにした。

4. 焼き付き限界におよぼす軸/軸受材質, 表面加工法, 表面あらさの影響

4.1 試験軸および軸受

メタル軸は (1) 焼きなまし (N) 鋳鉄軸, (2) 高周波焼き入れ (IH) 鋳鉄軸, (3) 調質 (H) 炭素鋼軸, (4) 高周波焼き入れ (IH) 炭素鋼軸 の4種を用いた。それぞれの製造, 加工行程は以下の通りである。

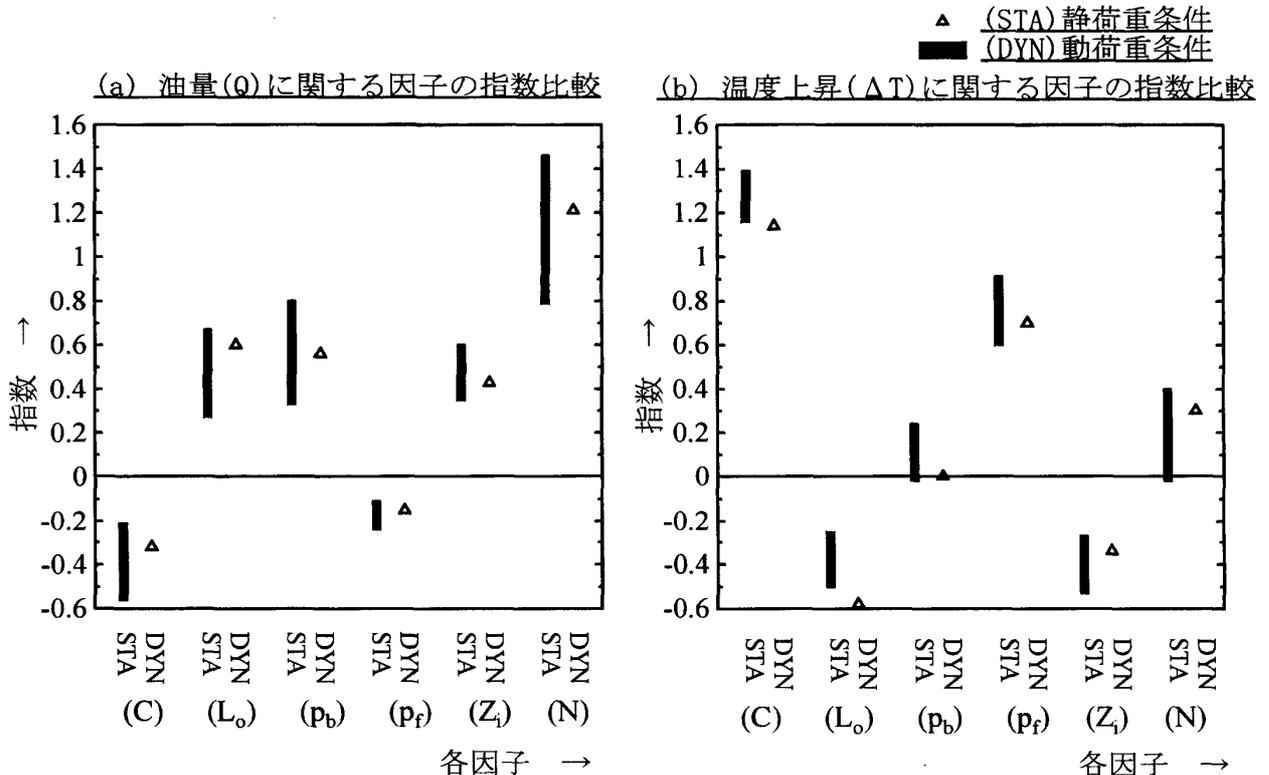


図4 静荷重, 変動荷重下での特性指数比較

- (J-1)DCI-N : 鋳込み→ ノルマライズ処理→ 機械加工→ グラインダー研削→ ペーパー超仕上げ
- (J-2)DCI-IH : 鋳込み→ ノルマライズ処理→ 機械加工→ 高周波焼き入れ→ グラインダー研削→ 砥石超仕上げ
- (J-3)S45C-H : 鋳造→ 調質→ 機械加工→ グラインダー研削→ ペーパー超仕上げ
- (J-4)S45C-IH : 鋳造→ 調質→ 機械加工→ グラインダー研削→ 高周波焼き入れ→ グラインダー研削→ 砥石超仕上げ

軸表面あらさはいずれも $R_{max} = 1.0 \pm 0.2 \mu m$ に仕上げた。

軸表面のショア硬度測定結果を表4に示すが、焼きなまし軸、調質軸にくらべて高周波焼き入れ軸は2倍程度の硬さを有している。

表4 軸表面ショア硬度測定結果

DCI (N)	(Hs)	38~40	
DCI (IH)		74~78	(N) 焼ならし
S45C (H)		35~36	(H) 調質
S45C (IH)		73~77	(IH) 高周波焼き入れ

軸受メタルは組成の異なる3種類の銅・鉛焼結合金(M-1) K-24, (M-2) K-30, (M-3) K-50と1種類の錫・アルミ合金(M-4) A-20の計4種類を用いた。それぞれの合金成分組成ほかを表5に示す。記号のうしろの数字は概略であるが、M-1~M-3においては鉛成分比、M-4では錫成分比を示す。

4.2 実験条件および手順

表6に焼き付き限界試験に供する軸および軸受メタル材質の組み合わせを示す。軸材質の評価はK-30メタルで実施し、メタル材質の評価はDCI-N軸で実施する。

試験軸受寸法は直径 $D = 70mm$, 全幅 $L_t = 25mm$, 油みぞ幅 $L_g = 5mm$, 直径すきま $c = 0.045 \sim 0.047mm$ で、

表6 軸および軸受メタル材質組み合わせ

軸材 \ 軸受材	S45C		DCI	
	(H)	(IH)	(N)	(IH)
M-1			○	
M-2		○	○	
M-3	○	○	○	○
M-4			○	

給油条件は SAE#30潤滑油を圧力 $p_f = 2 \text{ kg/cm}^2$, 温度は焼き付きを生じやすくさせるため $T_f = 145 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。

運転手順は給油温度 T_f を高めながら無負荷で回転数 N を徐々に上げ、 $T_f = 145 \text{ }^\circ\text{C}$ かつ $N = 4500 \text{ rpm}$ が達成されたあと面圧 p_b を10分間で 27.5 kg/cm^2 ずつステップアップし、軸受温度 T_b が $230 \text{ }^\circ\text{C}$ に到達した時点で試験終了とした。この間の軸受温度測定結果を図6に示す。負荷開始がB点、 T_b はまだ $180 \text{ }^\circ\text{C}$ で焼き付きには達してないが試験終了がX点である。焼き付き限界の判定基準は軸受温度 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ と決め、このときの軸受面圧を焼き付き面圧とし、各種材料の優劣を相对比较した。

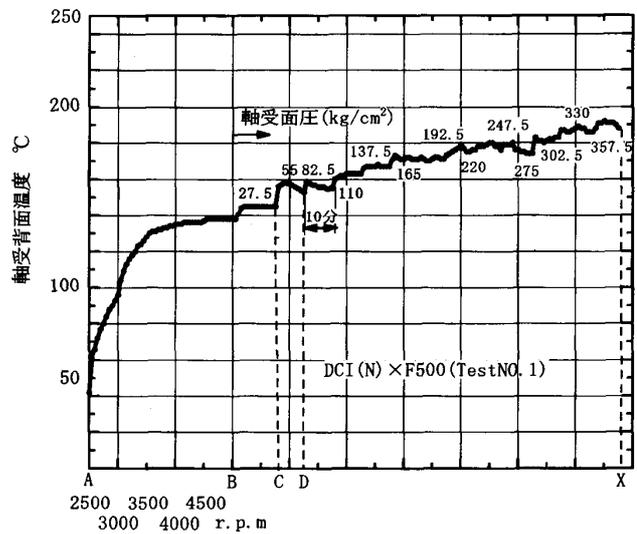


図6 運転手順での温度上昇の様子

表5 供試軸受メタル成分組成

	Cu	Sn	Pb	Al	オーバレイ材質	表面粗さ	Hs	Hv.M100g
(M-1)K-24	残	0.3	24.0	*	$P_b 90 + Sn10 + Cu2.5$	0.9μ	44	39.7~45.3
(M-2)K-30	残	*	28.8	*	$P_b 90 + Sn10$	1.1μ	44	35.8~40.7
(M-3)K-50	48	1.0	51.0	*	なし	12μ	25	49.8~53.3
(M-4)A-20	1.0~	21.8	*	残	なし	*	34	37.8~38.5

4.3 軸表面あらしの影響

材質組み合わせの試験に先立ち、条件設定の前段階として軸表面あらしの影響を調べた結果を図7に示す。表面あらし R_{max} が $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 以上では焼き付き面圧が急激に減少すると同時にそのばらつきも増大している。また、 R_{max} が同じなら超仕上げ方法がペーパーでも砥石でも差は無いこともわかった。以後の試験に於いては $R_{max} = 1 \mu\text{m}$ を基準に実施することに決めた。なお、図8は焼き付き直前の短幅軸受特性数キャパシティーナンバー C_n^3 を計算して R_{max} との関係をもとめたものであり、定性的には Cameron⁴⁾ や Burwell ら⁵⁾ も指摘している現象ではあるが、本研究結果は定量的にもきわめて良好な特性把握ができています。筆者らが別途実施した軸表面あらしを広範囲に

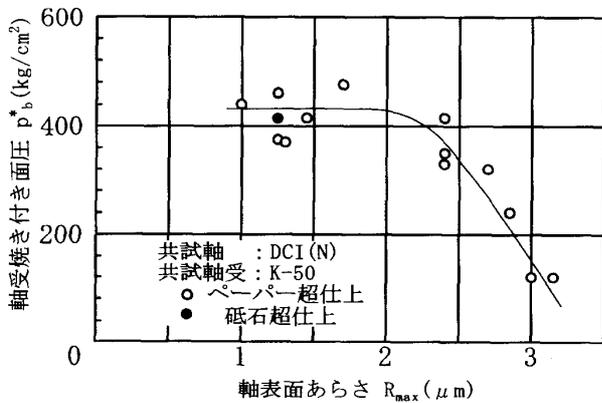


図7 軸表面あらしと焼き付き面圧

変えた研究では最小油膜厚さ h_{min} が軸表面あらし R_{max} と一致する程度に薄くなった時点で焼き付きが始まることが示されている。^{6), 7)} (付図 7-1参照)

4.4 軸および軸受材質の影響

図9に軸受特性数のゾンマーフェルト数と計測した摩擦トルクから求めた摩擦係数の関係を示した。流体潤滑領域では軸受材質の影響は見られず、ばらつきの範囲内におさまっている。しかし、点線で併記した実測温度から計算した最小油膜厚さ h_{min} が軸表面あらし

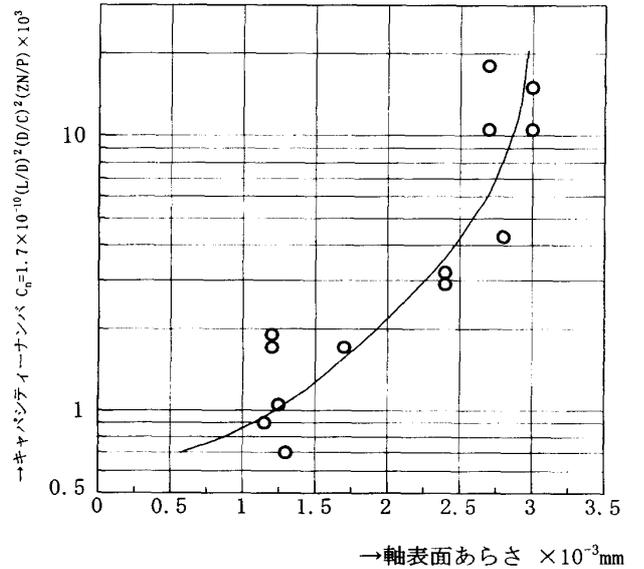
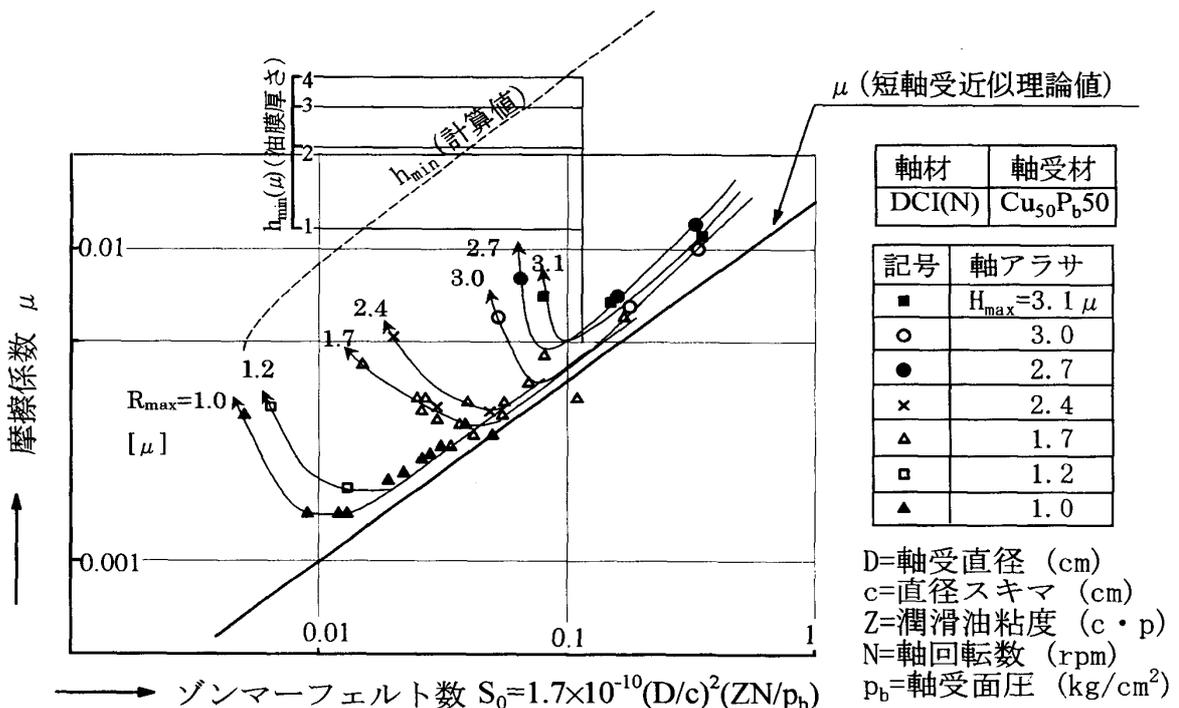


図8 焼き付き限界のキャパシティー数



付図7-1 軸表面あらしと摩擦特性

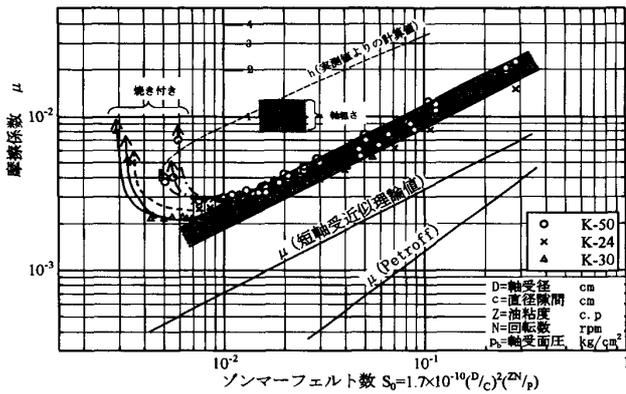


図9 軸受材質と摩擦特性

さ $R_{max} = 0.8 \sim 1.2 \mu m$ に匹敵するほど薄いゾーンに近付くと境界摩擦力が加わりはじめ、材質の影響が姿をあらわしている。同じ表面あらさのもとで、○印の K-50、×印の K-24、最後に△印の K-30の順で摩擦係数が増大し始め、焼き付きの兆候が始まる。

表7に材質組み合わせによる焼き付き面圧試験結果をまとめて示す。まず、軸受メタル材質の比較では銅・鉛合金では錫成分比が30%の K-30が $650 kg/cm^2$ ともっとも高く、ついで K-24 ($530 kg/cm^2$)、K-50 ($400 kg/cm^2$) の順であった。これは図9に示した摩擦特性で焼き付きの兆候をあらわしはじめた順番通りの結果であ

表7 焼き付き限界試験結果

	軸材	軸受材	焼き付き限界面圧 (kg/cm^2)								軸表面最終仕上げ
			100	200	300	400	500	600	700	800	
軸受材比較試験	DCI (N) 一定	k-50	[Bar chart showing limits for k-50]								ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ 砥石超仕上げ
			k-50 平均値								
		k-24	[Bar chart showing limits for k-24]								ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ
			k-24 平均値								
		k-30	[Bar chart showing limits for k-30]								ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ
k-30 平均値											
		A-20	[Bar chart showing limits for A-20]								ペーパー超仕上げ
軸材比較試験	DCI (N)	一定	[Bar chart showing limits for DCI (N) average]								ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ
			DCI (N) 平均値								
	DCI (IH)	k-30	[Bar chart showing limits for DCI (IH) average]								砥石超仕上げ 砥石超仕上げ
			DCI (IH) 平均値								
	S45C (H)	一定	[Bar chart showing limits for S45C (H) average]								ペーパー超仕上げ ペーパー超仕上げ
S45C (H) 平均値											
S45C (IH)			[Bar chart showing limits for S45C (IH) average]								砥石超仕上げ 砥石超仕上げ
S45C (IH)		k-24	[Bar chart showing limits for S45C (IH) average]								砥石超仕上げ 砥石超仕上げ
			[Bar chart showing limits for S45C (IH) average]								
			S45C (IH) 平均値								
			[Bar chart showing limits for S45C (IH) average]								砥石超仕上げ 砥石超仕上げ
			S45C (IH) 平均値								

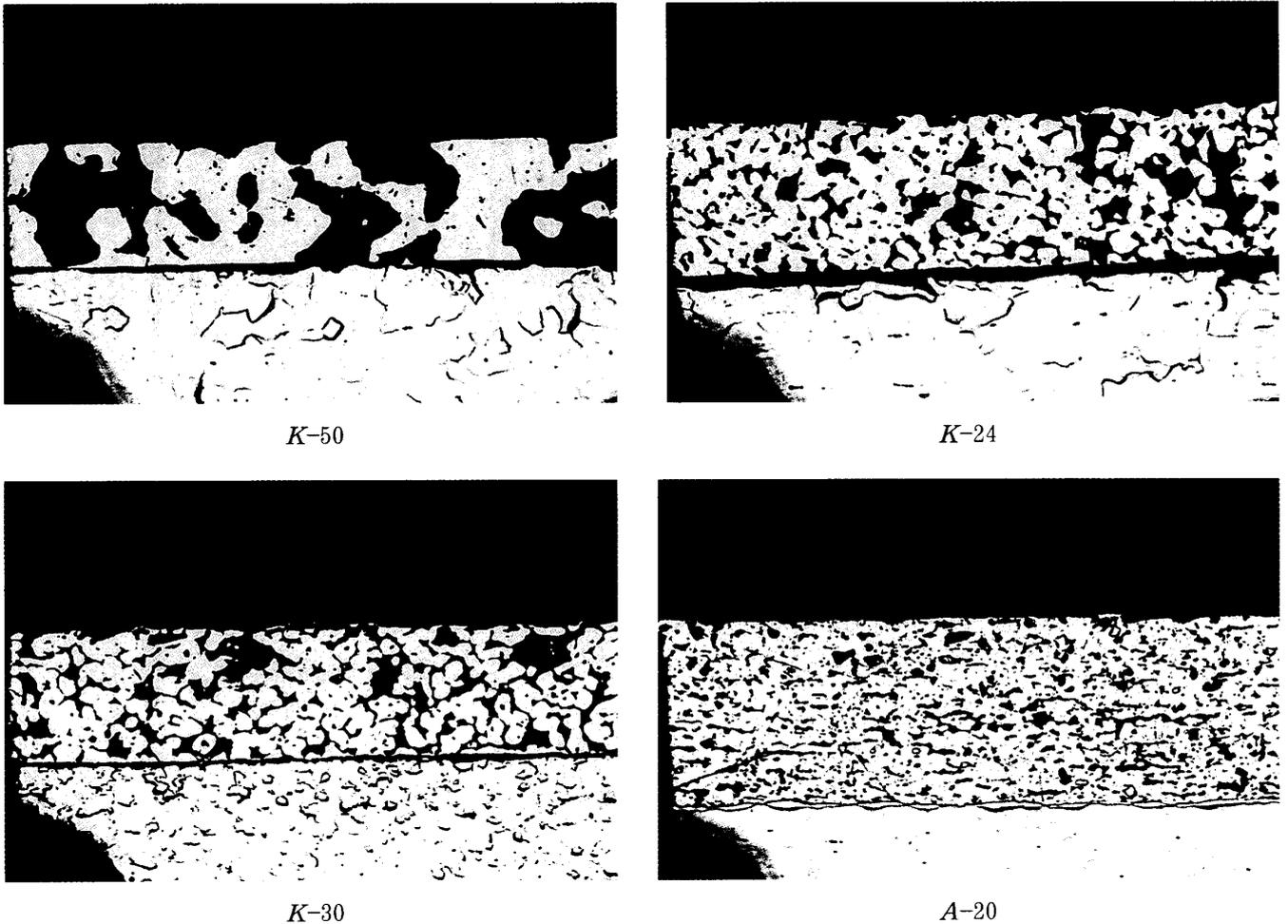


図10 供試軸受断面組織写真

る。供試軸受断面組織写真を図10に示すが、銅・鉛焼結合金の *K-50* では錫の割合が多く、銅粒子が粗くバラバラ状態で分散しており、荷重を支える耐圧能力が不足したものと判断される。

錫・アルミ合金の *A-20* では $440\text{kg}/\text{cm}^2$ と *K-50* より若干高めではあったが、*K-30* や *K-24* には及ばなかった。しかも、焼き付き時の温度上昇は極めて急激であり、軸表面のかじりまで生じた。この原因のひとつは表面に鉛・錫オーバーレイを施さなかったことである。鉛・錫オーバーレイによるなじみ性の改善や耐摩擦割れ寿命増大の効果は明らかであり、^{8),9)} 材質そのものの評価を同一条件下で行うべきであった。なお、筆者らが別途実施した船用2サイクルディーゼル機関のクロスヘッドピン軸受を対象にした実験では、*A-20* メタルはなじみ性、耐疲れ割れ寿命とも良好な結果を得ており^{10),11)} 1 ケースのみの実験で良否を判断するのは早計であろう。

つぎに、軸材質の比較ではっきり言えることは熱処理、超仕上げ方法の如何に関わらず、*DCI* 軸は焼き付き面圧が低く $620\sim 640\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度)、*S45C* 軸は面圧

$800\text{kg}/\text{cm}^2$ でも焼き付かなかったものがあったということである。*DCI* 軸での焼き付き限界が低かった理由は図11の供試軸断面組織写真を見るとよく理解できる。*DCI(N)*、*DCI(IH)*とも研削時グラファイト脱落によるピットが見られ、とくに *DCI(IH)* においては、高周波焼き入れ時に $900\sim 1000^\circ\text{C}$ の高温となるため、グラファイトの燃焼脱落という現象と重なり、ピットの数および毛羽立ちが顕著になるものと思われる。40年ほど以前に自動車メーカー各社がとくにタクシー車仕様でクランク軸材質選定でご苦労なされたことが今なつかしく思い出される。

5. 軸受設計寸法と負荷能力

5.1 実験条件と自動車エンジン軸受寸法

軸受寸法に関する実験では軸受寸法をパラメータとする以外に、これまでの焼き付き限界試験と異なる点は給油条件のみであり、 $p_f = 1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $T_f = 92.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ とし、焼き付き限界判定基準は多少の安全をみて軸受温度 $T_b = 180^\circ\text{C}$ 到達時とした。軸は前節の *S45C(IH)*、軸受は *K-30* を使用した。

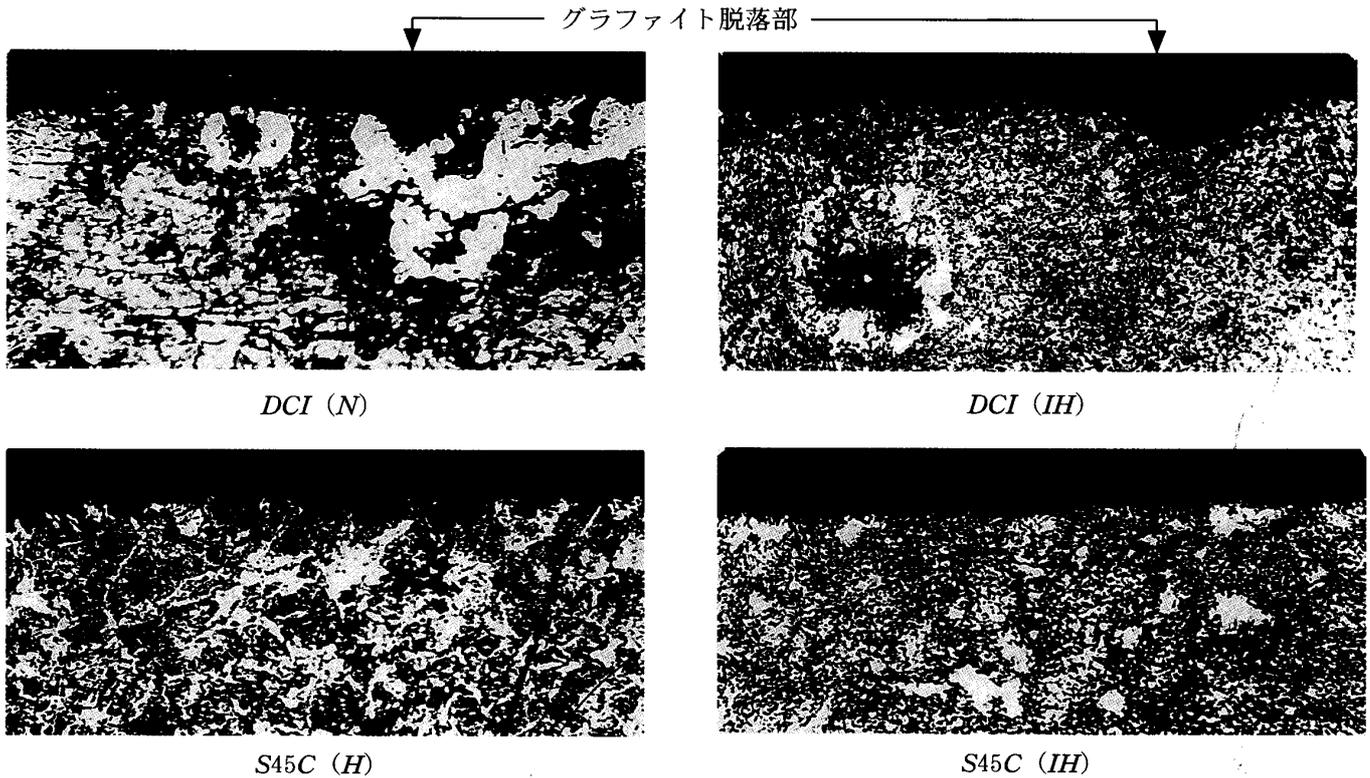


図11 供試軸断面組織写真

軸受直径 $D=70\text{mm}$ に対して全幅 $L_t = L_g + 2L_0 = 15, 25, 35, 45\text{mm}$ すなわち $L_t/D = 0.21, 0.36, 0.50, 0.64$ または $L_0/D = 0.5$ ($L_t - L_g$) $= 0.14, 0.29, 0.43, 0.57$ を、直径すきま $c = 0.038, 0.073, 0.108, 0.140$ すなわち、すきま/直径比 $c/D = 0.5, 1, 1.5, 2/1000$ を供試軸受とした。 C/D については $L_t/D = 45/70$ で $4/1000$, $L_t/D = 35/70$ で $3/1000$ を特別に追加した。高速高荷重軸受の典型的な自動車エンジン軸受では平均的に、クランク軸主軸受で $L_t/D = 0.55$, $L_0/D = 0.29$, $c/D = 1.1/1000$, コンロッド大端部軸受で $L_t/D = 0.59$, $L_0/D = 0.50$, $c/D = 1/1000$ 程度が実用されている。本実験条件はこれらを十分包含するものである。

5.2 焼き付き限界荷重実験結果

表8に L_t/D と c/D の組み合わせに応じた限界荷重をまとめた。

これらの結果をグラフに表現すると図12のようになり、焼き付き限界荷重すなわち荷重能力 W_* は、 L_t/D については実験範囲内では L_t/D が大きいほど増加するが、 c/D については点線で示すように L_t/D に応じた最適点が存在する。

表8 軸受寸法と限界荷重 $W_* \times 10^3$ (kg)

		$10^3 \cdot c / D$					
		0.5	1	1.5	2	3	4
L_t / D	45 / 70	6,154	9,250		11,530		8,250
	35 / 70	5,400	8,100			8,400	
	25 / 70	5,400	7,700	8,080	8,450		
	15 / 70	3,462	5,200		4,230		

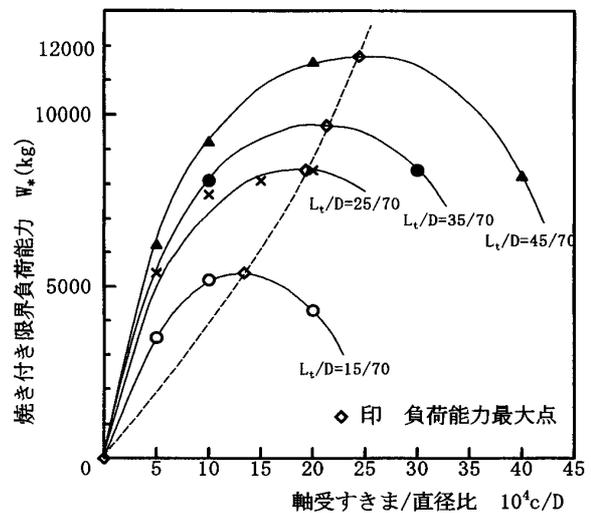


図12 荷重能力と軸受寸法比

5.3 最適軸受寸法比

負荷能力を最大にする最適すきま/直径比は全幅/直径比の関数として次の実験式が得られる。

$$(c/D)_{opt} = 6 \times 10^{-4} \times \{5 - \exp(1.6 - 2.4 L_t/D)\} \quad (1)$$

すなわち、最適すきま/直径比は全幅/直径比とともに対数関数的に増加するが、 L_t/D が無限に大きくなっても3/1000程度に飽和するようである。

5.4 負荷能力近似式

軸受寸法比と負荷能力については次の実験式が導かれ、図13に見られるように、実験結果をかなり良く近似している。これらの結果は本実験条件範囲内で得られたものではあるが、その定性的な性質は共通であり、条件に応じて数値を変換してゆけばよい。

$$W_* = 14,000 \times \left\{ 1 - 0.16 \exp(2.1 - 3.2 L_t/D) \right\} \\ \times [1 - \{\exp 2.5(1-k) + \exp 2.5(k-1) - 2\} \\ / \{\exp 2.5 + \exp(-2.5) - 2\}] \quad (2)$$

ただし、 $k = (c/D)/(c/D)_{opt}$

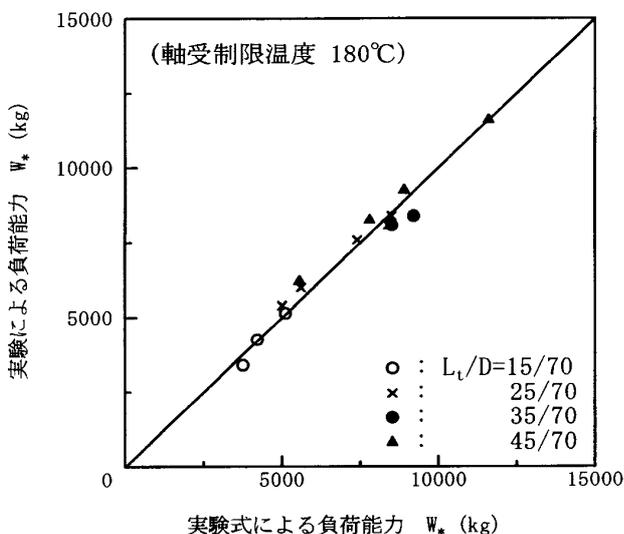


図13 負荷能力近似式による整理

6. 結言

自動車エンジンなど各種産業機械用の高速高荷重すべり軸受を対象に、油みぞつき短幅について実験し、

1) 静荷重下での特性予測指数式は変動荷重下でも摘要できること。

焼き付き限界については、

- 2) 軸材質は熱処理、研削時にグラファイトの脱落や毛羽立ちの危険性を伴う铸铁系よりその心配のない鋼系が有利なこと。
- 3) 軸は材質や熱処理の影響よりも表面仕上げあらかさの影響が顕著であること。
- 4) 軸受メタル材質の影響は流体潤滑領域での摩擦特性には現れず、油膜厚さが軸表面あらかさ程度に減じた境界潤滑領域への移行時点で現れること。
- 5) 銅・鉛焼結合金ではCu70%前後の成分組成で焼き付き限界が最大になること。
- 6) 錫・アルミ合金では表面層に鉛オーバーレイをつけるのが不可欠であること。
- 7) 軸受すきま/直径比には焼き付き限界負荷能力を最大にする軸受全幅/直径比に応じた最適値が存在すること。

などが判明し、最適軸受すきま/直径比ならびに焼き付き限界負荷能力を求める精度の良い実験式を導いた。

最後に、合計5編の論文を長崎大学工学部研究報告に投稿できたことは大なる栄誉であり、ご指導、ご協力いただいた各位に深謝いたします。

(参考文献)

- 1) 朝鍋, 森高ほか: 長崎大学工学部研究報告 第30巻第55号 p. 145
- 2) 朝鍋, 森高ほか: 長崎大学工学部研究報告 第31巻第56号 p. 23
- 3) DuBois & Ocvirk: NACA Report p. 1157 (1953)
- 4) A. Cameron: Proc. of I. Mech. E. 161 p.73 (1949)
- 5) J. T. Burwell et al: Appl. Mech. 8 p. A49 (1941)
- 6) 福富, 朝鍋ほか: 機械学会講演論文集 No. 69-5 p. 27 (1969)
- 7) 朝鍋, 小路: 機械設計 第15巻第10号 p. 45 (1971)
- 8) 朝鍋, 赤星: 三菱重工技報 3巻5号 p. 456 (1966)
- 9) 朝鍋(分担執筆): 内燃機関の潤滑(幸書房) p. 289 (1987)
- 10) 朝鍋, 綾部ほか: 機械学会講演論文集 No. 768-3 p. 133 (1976)
- 11) 朝鍋ほか: 機械の研究 29巻5号 p. 25 (1977)