

技 術 資 料

高 温 軸 受 材 料*

耐熱軸受研究委員会

Bearing Materials for High Temperature Use.

High Temperature Bearing Material Committee

1. 緒 言

最近の機械の発達はいちじるしいものがあり、それにつれてこれらに使われる機械部品も苛酷な条件のもとで使われることが多くなってきた。

機械部品として重要な位置をしめているコロガリ軸受も高荷重・高速で使われるようになり、さらにジェット・エンジンなどでは、これに加えて高温にさらされるようになった。

このような高温コロガリ軸受の材料には、従来、一般に使用されている軸受鋼では満足されない場合があり、これに代って高速度鋼のような耐熱性のある、しかも耐荷重性の大きい材料を使わなければならない。

機械工業臨時措置法にもとづく、玉およびコロ軸受製造業振興基本計画でも、昭和 40 年度までの目標として常用 300°C 以上の耐熱軸受を開発することがあげられている。

しかし、高温軸受材料の研究は、アメリカでは多く行なわれているが、わが国では系統的な研究はほとんど行なわれておらず、技術的にも遅れているのでこれを急速にとりもどすことも必要である。しかもこのような高温コロガリ軸受材料の研究には、高温における諸特性を研究しなければならないため、多くの試験設備と費用・労力を必要とする。そこで日本ベアリング工業会としては研究項目の一つとして取りあげ、技術部会のなかに耐熱軸受研究委員会を設け、600°C までの高温に耐える軸受を目標として、高温性能を左右する要素のうち、もっとも重要な軸受材料について共同研究を行なった。

高温コロガリ軸受に要求される性質のうち、とくに重要なのは寸法安定性と寿命の 2 つである。コロガリ軸受が高温にさらされた場合に、材料が寸法変化をおこすと軸受が変形して軸受の発熱、焼付、破損などの原因にもなる。このため、国際標準化機構 (ISO) においても、材料の高温における寸法変化の規格を与えている。

また、コロガリ軸受に負荷を与えて運転すると、転走面にコロガリ疲労を生じて破損する。したがって材料としては高い負荷能力を持つことが当然必要であるが、一般に高温になるとカタサが低下し、そのために負荷能力が低下して寿命が短くなることが知られている。したがって、高温においてこのようなことのない、安定した材料を見出す必要がある。

このような目標で、次の 4 種類の鋼を試験の対象として選んだ。

1. AISI M50 (真空中溶解)
2. AISI M50 (大気中溶解)
3. AISI M2 (大気中溶解)
4. AISI MHT (真空中溶解)

このうち、1~3 はモリブデン高速度鋼で、高温コロガリ軸受としてすぐれていることが報告されている。また、4 はアルミニウム添加軸受鋼であつて、耐熱性は上の 3 種よりも劣つていることが知られているが、実用性が高いため、耐熱限界を知るために選んだ。さらに、1 と 2 とは同じ材料であるが、大気中溶解鋼と真空中溶解鋼との差を知るために、溶解方法を変えたものである。

試作した材料については、できるだけ多くの資料を得る必要があるため、試験はつぎの項目について行なった。

- (1) 材料確性試験
 - a. 焼入・焼モドシカタサ
 - b. 高温カタサ
 - c. 高温引張試験

* 昭和 40 年 2 月 15 日受付

本原稿は日本ベアリング工業会耐熱軸受研究委員会より投稿されたものである。委員会は下記の委員によつて構成され、原稿は共同執筆されたものであります。

高木理逸・岡本純三(工業技術院機械試験所)、八幡 宏・松浦菊男(株式会社天辻鋼球製作所)、重信 潔・森原源治(光洋精工株式会社)、近藤正男・永田 寛(株式会社不二越)、◎綿林英一・喜熨斗政夫(日本精工株式会社)、黒田昌夫・室 博・渡辺俊弥(東洋ベアリング製造株式会社) ◎印: 主査

d. 高温衝撃試験

e. 高温疲労試験

(2) 高温寸法安定性試験

(3) 高温コロガリ疲労試験

なお、当委員会に参加・研究を行なった会社・研究所はつぎの通りである。

工業技術院機械試験所

株式会社 天辻鋼球製作所

光洋精工株式会社

株式会社 不二越

日本精工株式会社

東洋ベアリング製造株式会社

また、材料の製造・試験などにつき、つぎの会社にご助力を願った。

山陽特殊製鋼株式会社

日本特殊鋼株式会社

特殊製鋼株式会社

なお、この研究は昭和 37 年度通商産業省応用研究補助金の交付を受けて行なわれたものである。

表1 試験材料の記号

記号	材料 (AISI 記号)	メーカー記号
VM50	M50 真空溶解	L
AM50	M50 大気中溶解	D
M2	M2 大気中溶解	K
MHT	MHT 真空溶解	M

(注) 真空溶解は誘導加熱による。

2. 試験材料

試験に用いた材料、およびこの資料中で用いる記号などは表1の通りである。

表2 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Al	W
VM50	0.82	0.21	0.24	0.004	0.009	4.02	4.20	1.02	0.03	—	—	
AM50	0.85	0.15	0.30	0.014	0.015	3.80	4.10	0.97	—	—	—	
M2	0.84	0.22	0.33	0.004	0.020	4.18	4.93	1.80	0.03	0.03	—	5.78
MHT	1.02	0.37	0.33	0.010	0.013	1.53	—	—	tr	0.03	1.01	

表3 カタサと非金属介在物

	カタサ (焼ナマン)	非金属介在物 (%)		
		A	B+C	合計
VM50	H _B =176	0.021	0.008	0.029
AM50	H _B =182	0.004	0.029	0.033
M2	H _B =223	0.017	0.040	0.057
MHT	H _B =183	0.03	0.03	0.06

鋼材の寸法は各鋼種ともそれぞれ直径50mm, 15mm および 8.9mm の3種類の丸棒に仕上げた。

このうち 50mmφ のものは材料確性試験, 寸法安定性試験およびコロガリ疲労試験の軌道輪に, 15mmφ のものは寸法安定性試験(棒状試験片)に, また8.9mmφ のものはコロガリ疲労試験の鋼球に使用した。

これら4種類の材料の化学成分を表2に, カタサ(焼ナマン), 非金属非在物の検査結果を表3に示す。

素材の顕微鏡組織は写真1に示す通りでいずれの材料も炭化物がほぼ微細で, 均一に分布していることがわかる。

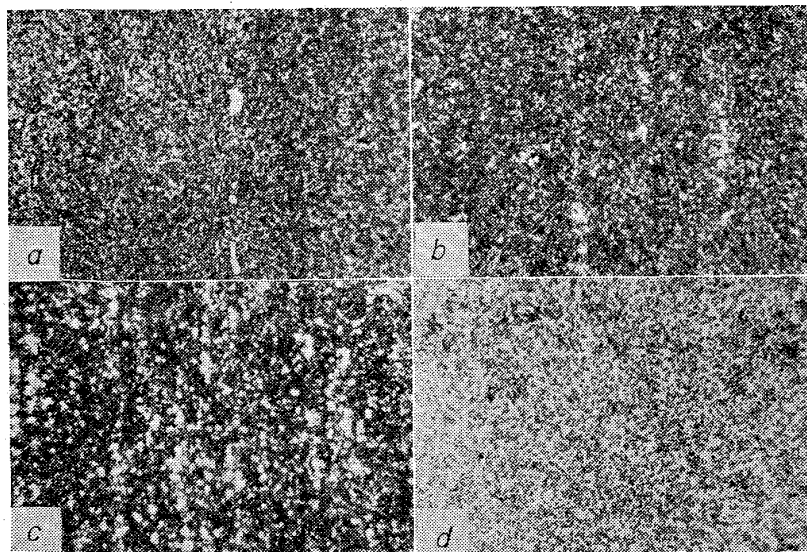
3. 材料確性試験

試作した材料の常温~高温における諸性質を明らかにするため確性試験を行なった。

3.1 カタサ・結晶粒度・炭化物量

3.1.1 VM50 および AM50

VM50 について焼入温度を 1100, 1120, 1140°C (ソルトバス 5min保持, 油冷)とし, 焼モドシ温度を 500~600°C (1 hr 保持, 空冷)として1回および2回焼モドシを行なったときのカタサの変化は図1の通



a: VM50 b: AM50, c: M2 d: MHT
写真1 素材の組織 ×400 (3/5)

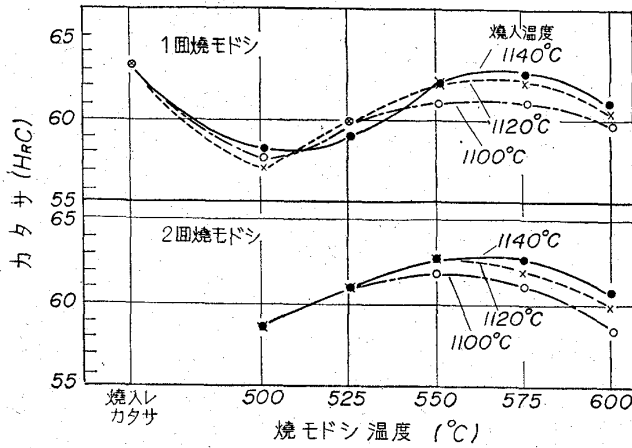


図1 VM50の焼モドシカタサ

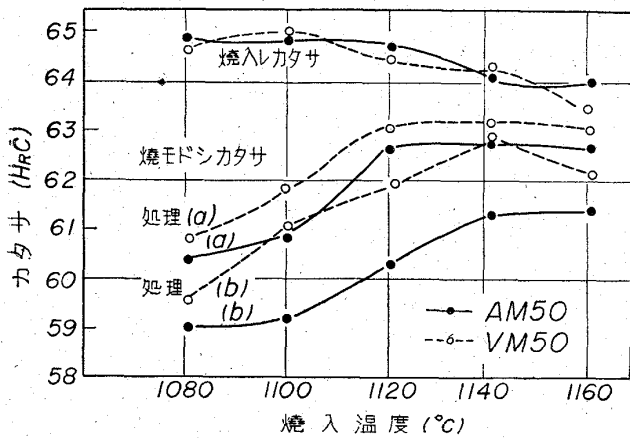


図2 VM50, AM50の焼入レおよび焼モドシカタサ

りであった。これより、VM50は焼モドシ温度500°C以上で二次硬化がおり、また、焼入温度によつて異なるがカタサは、焼モドシ温度550~570°Cで最高になることがわかる。

そこで、AM50およびVM50を900°C(ソルトバス、1.5min保持)で予熱した後、1080~1160°C(ソルトバス、1.5min保持、油冷)の範囲で焼入し、これを焼モドシして、カタサ、結晶粒度、残留炭化物を測定した結果が図2、3および4の通りであった。なお、このときの焼モドシ条件は図1による最適条件と、さらにサブゼロの効果を見るため、次の2通りとした。

- (a) 550°C × 2hr 2回くりかえし
- (b) 550°C × 2hr → -80°C × 2hr → 550°C × 2hr → -80°C × 2hr → 550°C × 2hr

これらの結果から、VM50は焼入温度1120°C以上で焼モドシカタサが最高になるが、逆にこの温度以上では残留炭化物が急激に減り、また結晶粒度が大きくなるので、適当な焼入温度の範囲は非常にせまいことがわかる。また、AM50の挙動はVM50に似ているが、残留炭化物には若干の差が認められる。またカタサが(a)

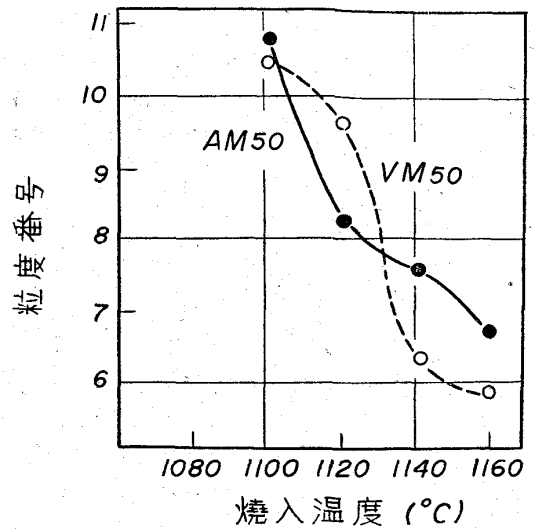


図3 VM50, AM50の結晶粒度

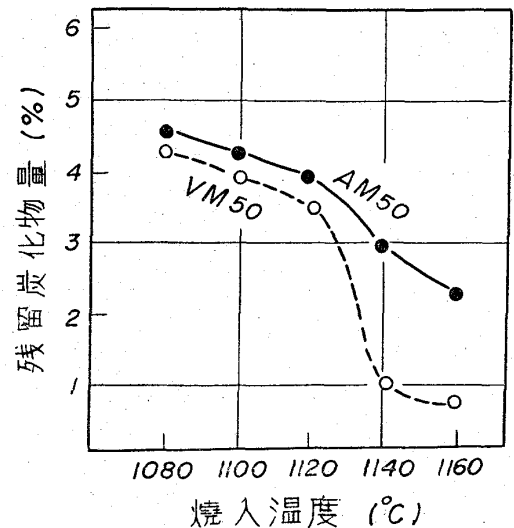


図4 VM50, AM50の残留炭化物量(焼入レ)

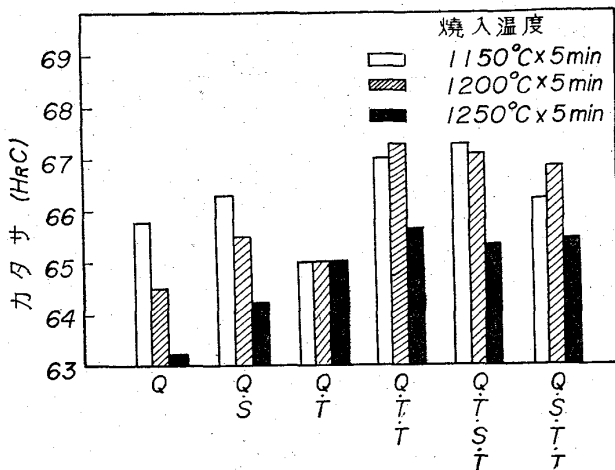
処理でも(b)処理でもAM50の方が低く、とくに(b)処理の場合に低くあらわれている。これは残留炭化物量と関係があると思われるが、理由は明らかでない。

3.1.2 M2

熱処理条件をいろいろに変えた場合のカタサを図5に示す。このM2はSKH-9相当のモリブデン高速度鋼で、1150~1200°Cより焼入して550°Cで2回焼モドシすればM50よりも高いカタサがえられる。この程度の焼入温度では結晶粒度番号10.5であるが、1250°C焼入では粒生長をおこして6.0になった。

3.1.3 MHT

焼入温度を変えたときのMHTの焼入カタサを図6に、また焼モドシ温度を変えたときのカタサを図7に示す。なお、この図中に、比較として一般の軸受鋼であるSUJ-2の試験結果も示したが、MHTでは軸受鋼に1



熱処理 [Q: 焼入れ, T: 焼モドシ (550°C × 1.5 hr), S: サブゼロ (-80°C × 1.5 hr)]

図5 M2の熱処理カタサ

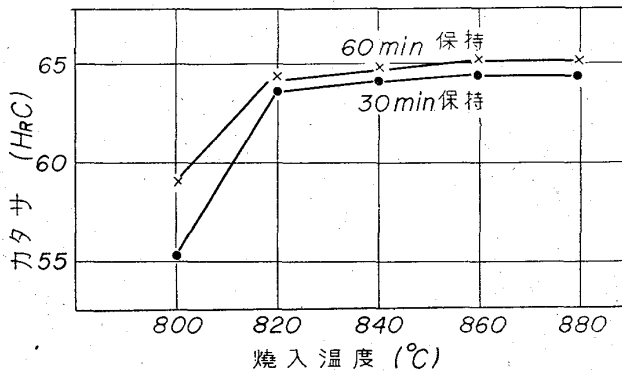


図6 MHTの焼入カタサ

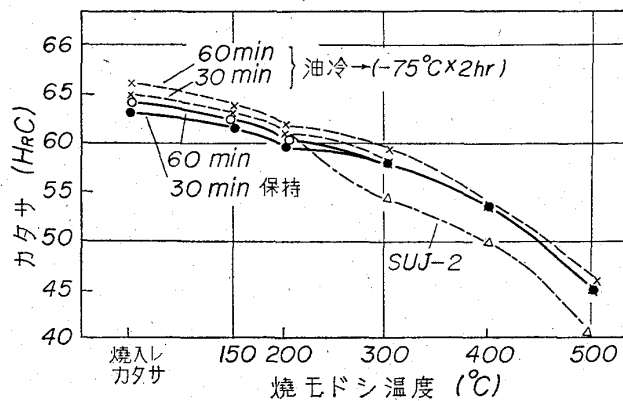


図7 MHTの焼モドシカタサ (840°C 焼入れ)

% Alを添加したことにより、焼モドシ第3段階が高温側に移り、焼モドシ温度 250°C程度まで HRC 60以上に保たれている。

3.2 高温カタサ

室温におけるコロガリ疲労寿命は、室温で測ったカタサと密接な関係にあることが知られているので、高温用軸受でも高温におけるカタサと、その寿命とが近い関係

表4 高温カタサ試験機の種類

記号	試験機形式
C	ビッカーズ
D	ロックウェル
E	ビッカーズ
L	マイクロビッカーズ

にあると考えておかなければならない。そこで高温カタサについて測定をおこなった。

3.2.1 試験機

測定につかした試験機の種類は表4に示す通りである。

この試験機の記号は以下の試験結果の記号と対応する。なお、カタサ試験機形式間の換算は室温においてさえも問題があり、高温では室温と同じ換算をしてよいかどうかは全く不明であるが、一応、室温のままの換算をして測定値の比較をした。

3.2.2 VM50

高温カタサの測定結果は図8の通りである。このVM50の測定結果は、いずれも比較的よく一致しており、600°C以上でカタサの急激な減少が見られる。

3.2.3 AM50

測定結果は図9に示す通りであつて、400°C以上においてC, D, Eの勾配がそれぞれ異なっていることが認められる。これは試験温度条件による器差のためであると考えられる。なおWADC (アメリカ, 図13)の測定結果はEaとよく一致している。

このAM50とVM50をくらべてみると、VM50とAM50のEaは比較的よく一致しているが、焼モドシ・サブゼロをくり返したAM50のEbは全般的にカタサ

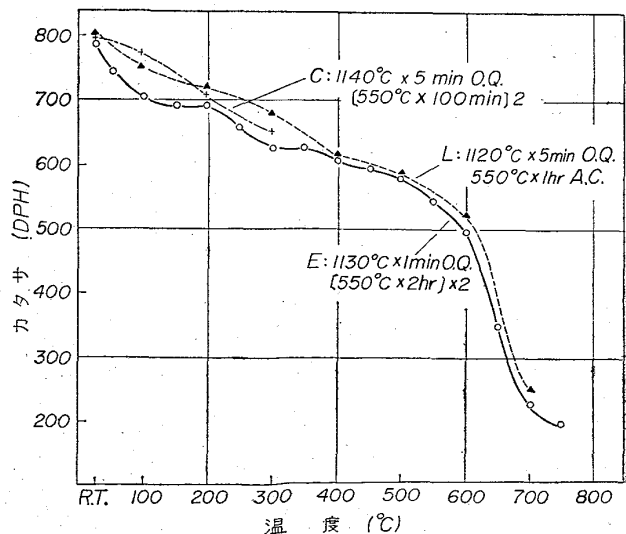


図8 高温カタサ (VM50)

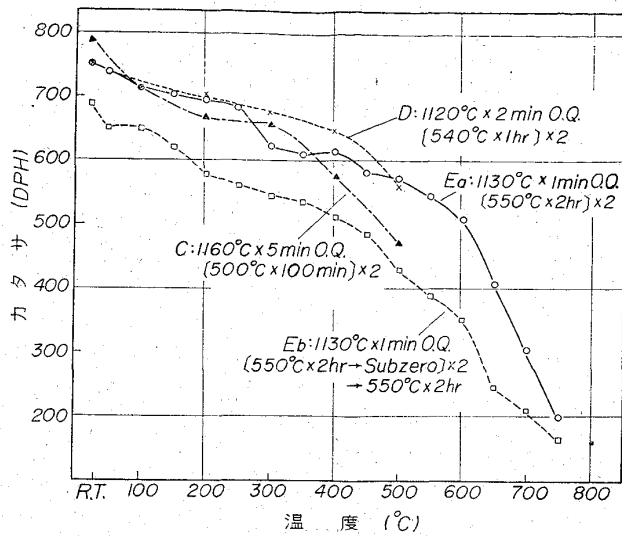


図9 高温カタサ (AM50)

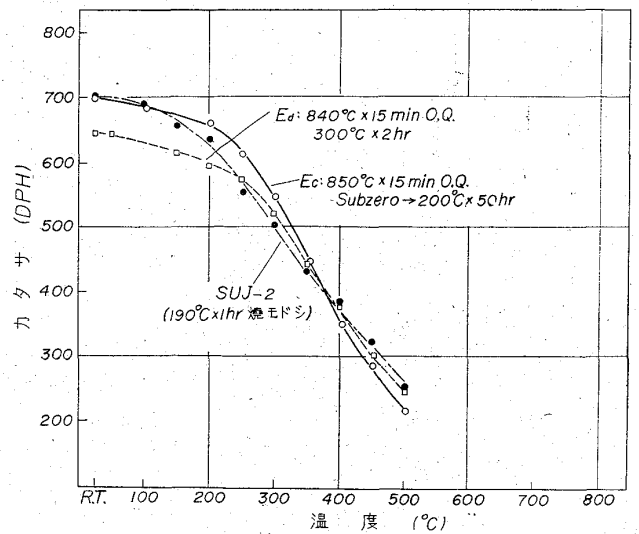


図12 高温カタサ (MHT, SUJ-2)

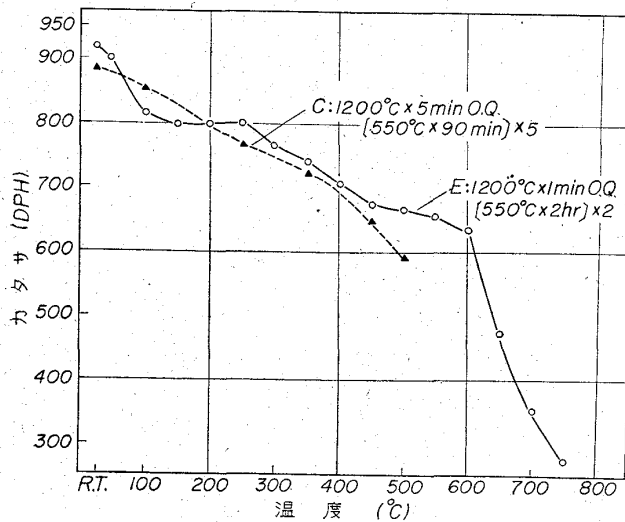


図10 高温カタサ (M2)

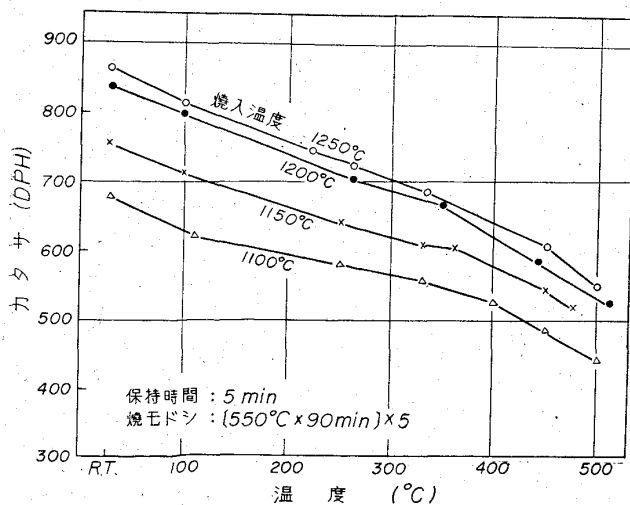


図11 M2 の焼入温度による高温カタサの変化

が低い。これは M2 の結果 (図11) などから考えて、実際の焼入温度が低くて炭化物のオーステナイトへの固溶が少なかったのではないかと考えられる。

3.2.4 M2

高温カタサの測定結果を図10に、また焼入温度を変えて高温カタサを測定 (測定場所C) した結果を図11に示す。図10の結果では、500~600°Cまで Hv=600以上を示しており、M2 は前の VM50, AM50 よりもさらに耐熱性があるということが出来る。また図11で焼入温度が低いと常温~高温で全般的にカタサが低いことがわかる。

3.2.5 MHT

この材料は軸受鋼と似ているので、MHTの結果と同時に SUJ-2 (一般の場合の焼モシ温度は150~170°C程度であるが、高温用として 190°C で焼モシを行なったもの) の結果を図12に示した。

MHTは 200°C をこえるとカタサの低下を示しているが、SUJ-2 は 150°C 以上で低下が見られ、MHTは 350°C 程度まで SUJ より高温カタサが高いということが出来る。なお、これ以上の温度ではカタサの絶対値が低いので、両者の比較は実用的に問題とならない。

焼モシ温度 300°C の MHT の Ed は、200°C で焼モシした Ec よりも常温~250°C までカタサが低く、しかもそれ以上の温度でも Ec よりすぐれているとは言えない。

3.2.6 外国における研究結果との比較

高温カタサについて、Wright Air Development Center (アメリカ) で研究した結果²⁾と、今回の測定結果をまとめて図13に示す。鋼種が同一であるというだけで化学成分などの材料確性、測定器などが異なるにもかか

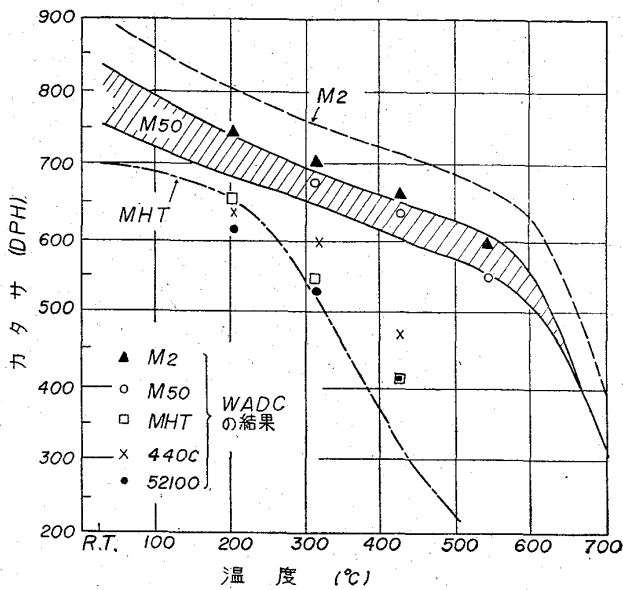


図13 高温カタサの結果と WADC の結果 (プロット)との比較

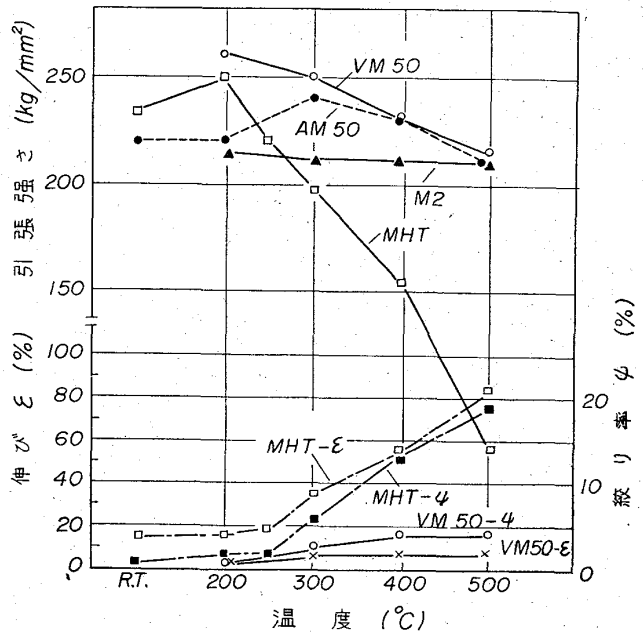


図14 高温引張試験結果

わらずわれわれの結果とかなりよく一致している。

3.3 高温における機械的性質

各材料の 500°C までの引張強さ、衝撃値などの試験をおこなった。

3.3.1 試験片の熱処理

それぞれの材料の試験片は表5のような熱処理をおこなった。

3.3.2 高温引張試験

試験片を加熱しながら引張試験をおこなった。その引張強さ、伸び、絞り率の結果は図14の通りである。

3.3.3 シャルピー衝撃値

試験片を加熱してシャルピー試験機により衝撃値を測った結果が図15である。

3.3.4 衝撃引張試験

AM50 について、シャルピー試験機を使つて図16のように、ハンマーに加熱試験片をとり付けて衝撃引張試験を行なった。その結果を図17に示す。

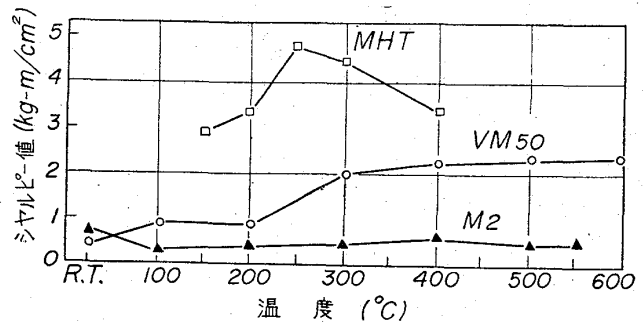


図15 高温シャルピー衝撃値

表5 試験片の熱処理条件

鋼種	熱処理
VM50	1120°C × 5min Oil Quench → [550°C × 1hr] × 2
AM50	1125°C × 2min O.Q. → [550°C × 2hr] × 2
AHT	840°C × 30min O.Q. → 200°C × 2hr
M2	1150°C × 5min O.Q. → [550°C × 2hr → -80°C × 2hr] × 2 → 550°C × 2hr

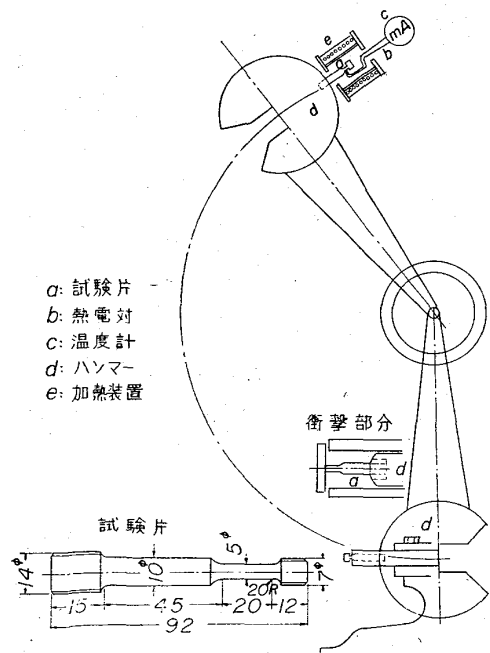


図16 高温衝撃引張試験装置

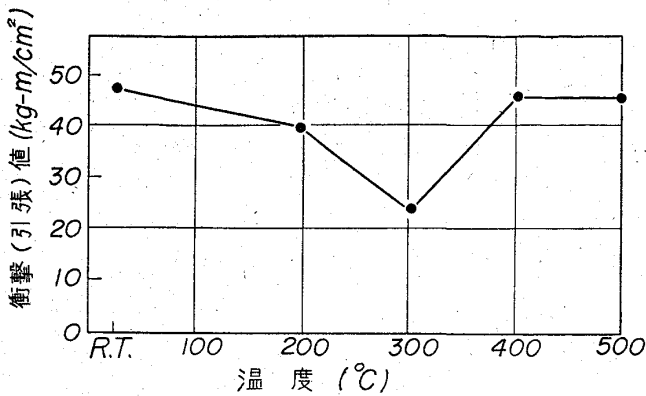


図17. 高温衝撃引張値 (AM50)

3.3.5 機械的性質試験の結果

以上の結果より、次のことが明らかになった。

(1) VM50

この材料は 300°C 以上でシャルピー値が増加し、伸び、絞りの増加も認められ、破壊の様相がぜい性破壊から延性破壊に変っている。また、引張強さも低下の傾向を示しているが、500°C まで強さ 200 kg/mm² 以上を示しているため、あまり問題とはならないと考えられる。

(2) AM50

試験温度 300°C において引張強さをもつとも高く、また一方ではこの温度で衝撃引張強さに谷が見られ、VM50 とは異つた挙動が見られるが、これが鋼の溶製方法あるいは熱処理によるものであるかどうかは明らかでない。

(3) M2

シャルピー値は他の鋼種よりも小さく、500°C まで変化しない。しかし実用的には、軸受鋼 (SUJ-2) の室温のシャルピー値が 1 kg-m/cm² 程度であるので、M2 を軸受として使用しても特に不都合はない。

(4) MHT

温度が 250°C をこえるとシャルピー値、伸び、絞りとともにいちじるしく大きく、延性破壊となる。また、これ以下の温度でも伸び、シャルピー値は他の鋼種よりも大きいので、これらよりもじん性が高いといえる。

3.3.6 外国における研究結果との比較

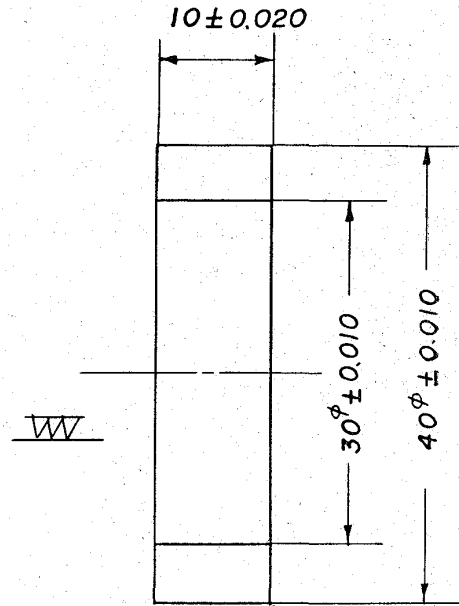
高温における機械的性質について、この資料でとりあげた 4 種類の鋼種全部に関する研究は外国でもないが、M50 については、いくつかの報告がおこなわれている。

その一例⁹⁾を表 6 に示す。

引張強さについて、図14の結果と表6を比較すると、アメリカにおける真空誘導溶解 M50 にくらべて、今回の

表 6 真空溶解 M50 (H_RC 62) の高温における機械的性質 (Sachs, Sell, Weiss による)

鋼種	温度	引張強さ (kg/mm ²)	弾性限		10 ⁷ に耐える回転曲げ疲労応力 (kg/mm ²)
			引張 (kg/mm ²)	圧縮 (kg/mm ²)	
MV-1	Room	260	207	237	88
(M50)	260°C	235	210		70



偏肉 0.01mm 以下

図18 リング試験片

実験の VM50 ではかなり高い値を示しているが、AM50 では常温で低い値を示し、260°C では大体同程度と推定できる。

3.4 高温疲労試験

高温における機械的性質試験の一つとして、リング状試験片による繰返し曲げ疲労試験を行なった。

3.4.1 試験条件

(1) 試験片

リング状で、その寸法を図18に示す。

(2) 熱処理

試験片の熱処理は表5と同じである。

(3) 試験機

カムと環状バネにより、試験片の直径方向に片振り圧縮応力 (最低荷重 15 kg) を加える形式の試験機で、繰返し速度は 800cpm である。

(4) 温度

試験温度は室温と 200°C で、室温では大気中、200°C

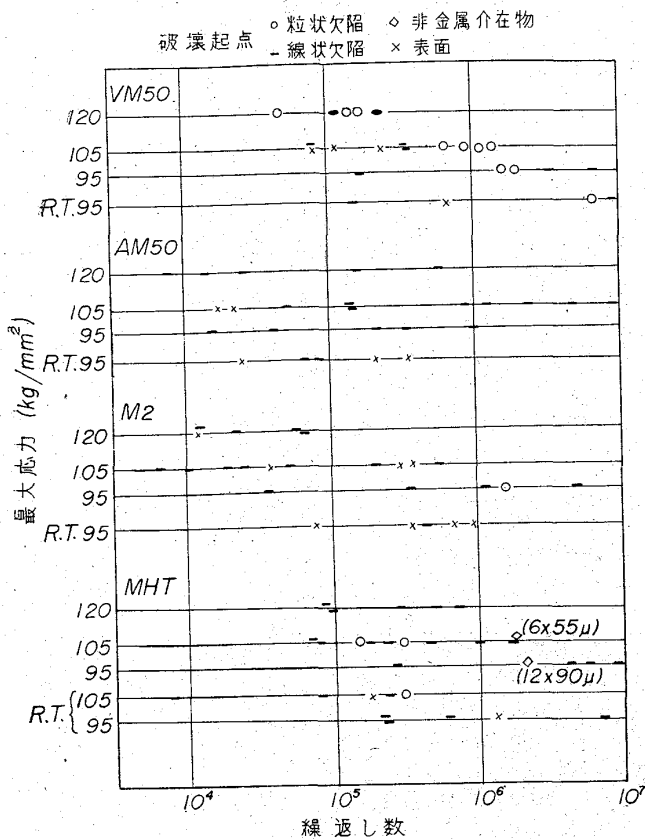


図19 高温疲労試験結果

ではシリコン油中で試験を行なった。

なおこの試験では繰返し数 10⁶ まで昼夜連続で約 21 hr であり、組織変化をおこすことはないと考えられる。また、試験前と後とは、カタサの変化はなかった。

3.4.2 疲労強度

この試験では、破壊は荷重点直下の内径から生じ、破断場所が限られている。

リング試験片による試験の結果は図19の通りであり、図の縦軸は最大荷重においてリングに生じる最大応力で示した。

この結果より、真空溶解した VM50 およびMHTは他よりも若干強くあらわれているが、あまり大きな差ではない。また、試験を行なった材料の疲労強さの水準は、室温における軸受鋼 (SUJ-2) とほぼ同じであり、したがって高温軸受材料として満足すべき強さをもっているといえる。

3.4.3 破面の状態

図19には破壊起点も示してあるが、表面から発生したもの以外は、破面に肉眼で見える白点 (fish

eye または white spot) がある。この白点は通常1個で、その周が試験片内径に達している。また白点の中心附近には非金属介在物その他の欠陥が認められる。これらの白点と、その中心の欠陥を写真 2~7 に示す。写真 2, 3 は MHT の非金属介在物起点で、シリケート系の介在物と見られる。また写真 4, 5 は VM50 の粒状欠陥で電子顕微鏡では等高線模様が見られる。さらに写真 6, 7 は M2 の線状欠陥で、炭化物の密集が起点として作用したものと考えられる。欠陥の形状としてはVM50では粒状が多く、AM50, M2, MHT では線状のものが多くあらわれているが、大型非金属介在物はMHTに2例あるだけであつた。

大形非金属介在物が疲労起点になつたときでも、図19の結果からみれば疲労寿命が特に短いとはいえない。したがって、大型介在物以外の欠陥も、これと同程度の影



写真2 MHTの非金属介在物を核とした fish eye. ×200(7/10)

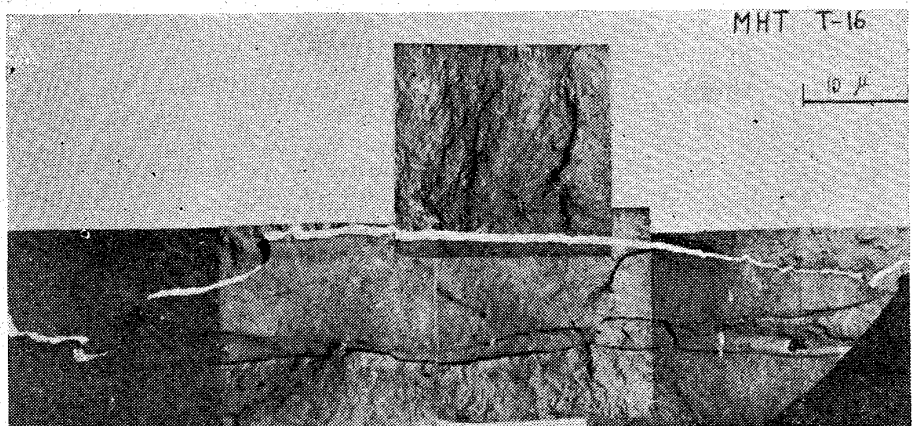


写真3 写真2の電子顕微鏡写真 ×1700 (2/3)

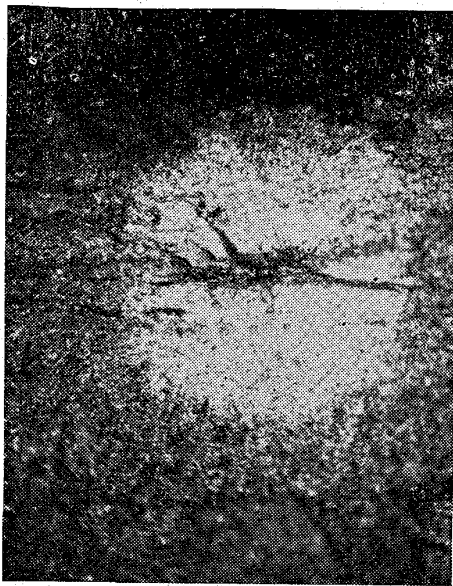


写真4 VM50における粒状欠陥 ×200(7/10)

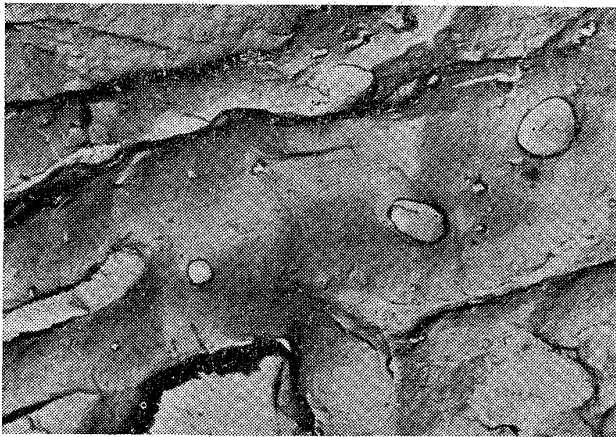


写真5 写真4の電子顕微鏡写真 ×10000(2/5)

性が明らかでない現在では、同一温度への換算もできない。しかし真空溶解鋼の方が疲労強さが高いという点では今回の M50 に関する試験結果と一致している。

4. 寸法安定性試験

一般の軸受鋼を焼入れした場合、鋼中に若干のオーステナイトが残留し、これが長期間にわたって徐々に分解するので、時効変形を生じ、コロガリ軸受としても不都合が生じる。

この時効変形は単に常温のみ問題であるばかりでなく、軸受の使用温度が高い時には残留オーステナイトの分解が促進されて変形が増大することも考えられ、高温で使用する軸受にとって大きな問題の一つである。

国際標準化機構 (ISO) でも、材料の熱安定性について規定してあり、 350°C 以下では 2500 hr、また 425

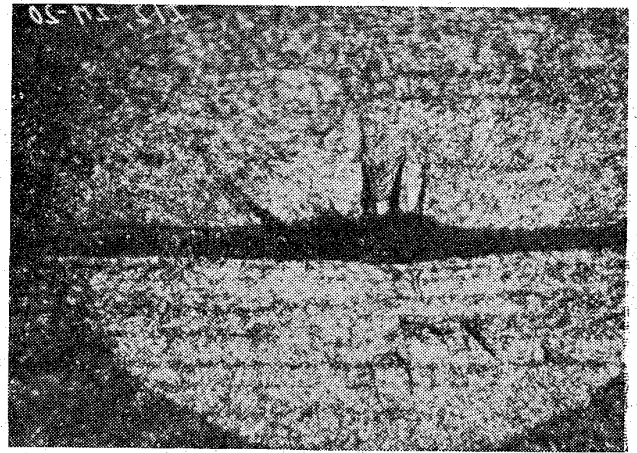


写真6 M2における線状欠陥 ×200(7/10)

響を持つていると言えよう。

なお AM50 および M2 では、試験材料に炭化物が鍛造方向に列をなしているものがあり、試験では線状欠陥が多く、また VM50 では離散した大型炭化物があらわれたものがあつて、試験では粒状欠陥が多くあらわれたところから、高速度鋼などでは炭化物が疲労破壊起点となりうることが想像され、この点が軸受鋼や構造用鋼と異なるものと考えられる。

3.4.4 外国における研究結果との比較

前に引用した表6の疲労強さは、回転曲げ疲労試験の結果であつて、両振繰返応力に対する疲労強さである。リング疲労の場合には片振繰返応力による疲労であるから両者を直接比較することはできない。また試験温度も一致していないので、温度依存

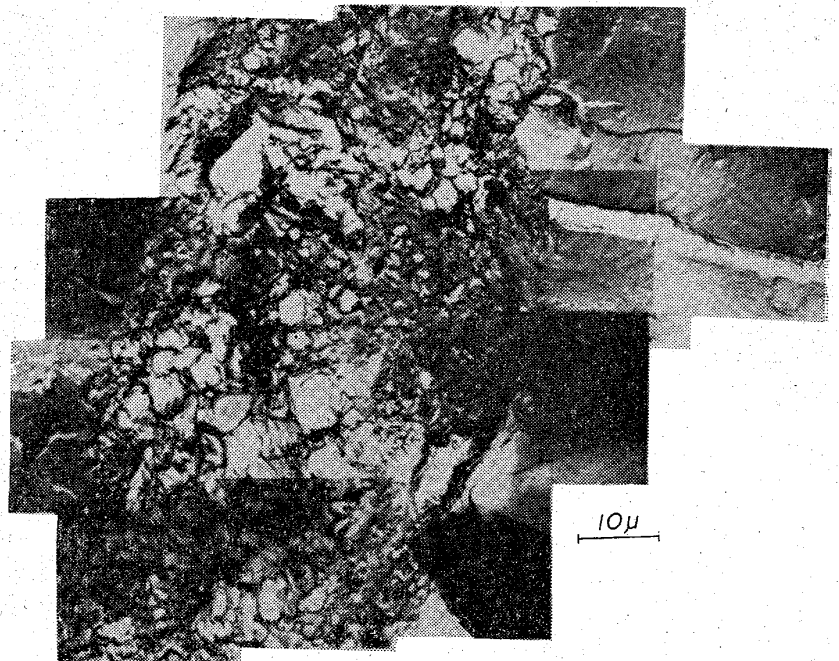


写真7 写真6の電子顕微鏡写真 ×1350(2/3)

°C では 1500 hr 保持した後で、変形量が 0.015% 以上の材料は軸受材料として好ましくないとしている。

しかし、この規定は材料、熱処理などについてはまったくふれていないので、この研究に用いた材料が、どのような挙動をするか、また ISO の規定内に入るかどうかを明らかにするため、寸法安定性試験を行なった。

4.1 試験片

4.1.1 試験片の形状

試験片には、棒状試験片とリング状試験片の2種類を製作した。試験片は熱処理後、研削により図20に示す形に仕上げた。

従来、外国などでは棒状試験片が多く用いられているが、コロガリ軸受の軌道輪を対象として考え、また測定の容易さなどもあつて、棒状のほかにリング状試験片も

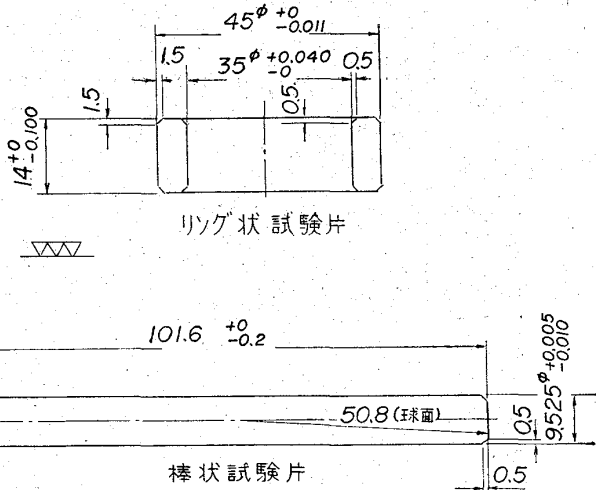


図20 寸法安定性試験片

表7 寸法安定性試験片の熱処理

鋼種	熱処理
VM50	850°C × 15min 予熱 (salt bath) → 1130°C × 1min (salt) oil quench → (I) [550°C × 2hr] × 2 → (II) { [550°C × 2hr] × 2 → -80°C × 1.5hr → 550°C × 2hr
AM50	925°C × 2.5min 予熱 (salt bath) → 1125°C × 2min (salt) oil quench → (I) [550°C × 2hr] × 2 → (II) { 550°C × 2hr → -80°C × 1.5hr → 550°C × 2hr
M2	850°C × 20min 予熱 → 1230°C × 5min (electric) oil quench → (I) [550°C × 2hr] × 2 → (II) { 550°C × 2hr → -80°C × 1.5hr → 550°C × 2hr
MHT	840~850°C × 30min (electric) oil quench → 300°C × 2hr → -70°C × 2hr → 200°C × 50hr

表8 寸法安定性試験片(リング)の熱処理カタサ

鋼種	カタサ (HRC)
VM50	64.8~65.3
AM50	61.3~61.7
M2	63.5~64.0
MHT	60.5~61.5

比較の意味で採用した。

4.1.2 熱処理

寸法安定性試験片は、棒状、リング状とも表7のような熱処理を行なった。

なお、この表に見られるように、焼モディは全鋼種について普通の焼モディとサブゼロ処理の2通りを行なつてある。

この熱処理を行なった後での、リング試験片端面のカタサは表8の通りであつた。

4.2 試験方法

4.2.1 試験温度

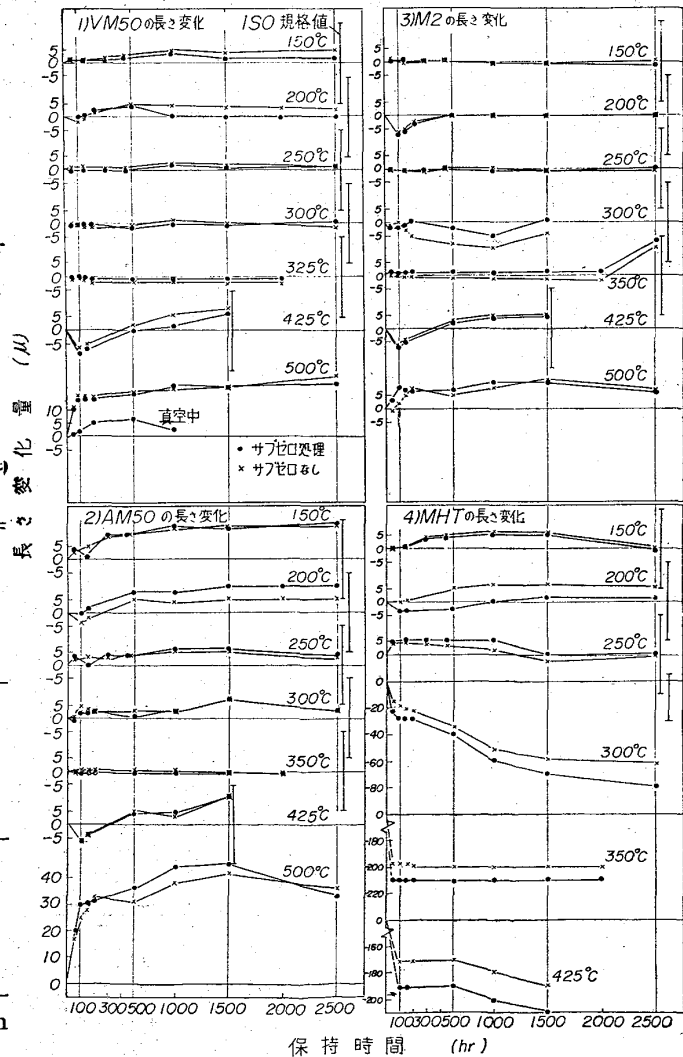


図21 棒状試験片の寸法変化

温度は 150, 200, 250, 300, 350, 425, 500°C の7段階とした。

このうち、300°C以下は大気中で試験を行なったが、350°C以上では試験片を滲炭剤あるいは活性炭などの入った容器に入れて密閉し、スケールが付着しないようにした。

保持時間は 150~350°Cでは 2500 hr, 425°C以上は 1500 hr とし、その間、適当な時間に試験片をとり出して変化量を測定した。

4.2.2 寸法測定

寸法の変化量はきわめてわずかなので、恒温室中で、試験片が室温と同一になってから測定を行なった。

測定は、棒状試験片では長さを SIP 万能測長機で測定し、リング状試験片では内径、外径を内径測定機、Mikrokator などで、いずれも 1/10,000mm の単位まで測定した。なお、リング状試験片では、直径の測定位置をあらかじめ定め、その位置だけを測定した。

4.3 試験結果

4.3.1 棒状試験片

棒状試験片の試験結果を図21に示す。なお VM50 については、500°Cで真空中(10⁻²~10⁻⁴mmHg)の試験も行なった。また、図中に ISO の規格値を同時に示した。

4.3.2 リング状試験片

リング状試験片の試験結果を図22に示す。

4.3.3 結果の考察

以上の結果を 1500hr (150~350°C) および 2500hr (425, 500°C) の最終時間の結果で整理すると図23のようになる。

これらの結果より次のことがわかる

(1) 一般に、棒状試験片は 250~350°Cで若干収縮の傾向をもつが、その他の温度ではMHTを除き膨張する。

(2) リング状試験片では、内径が収縮し、外径が膨

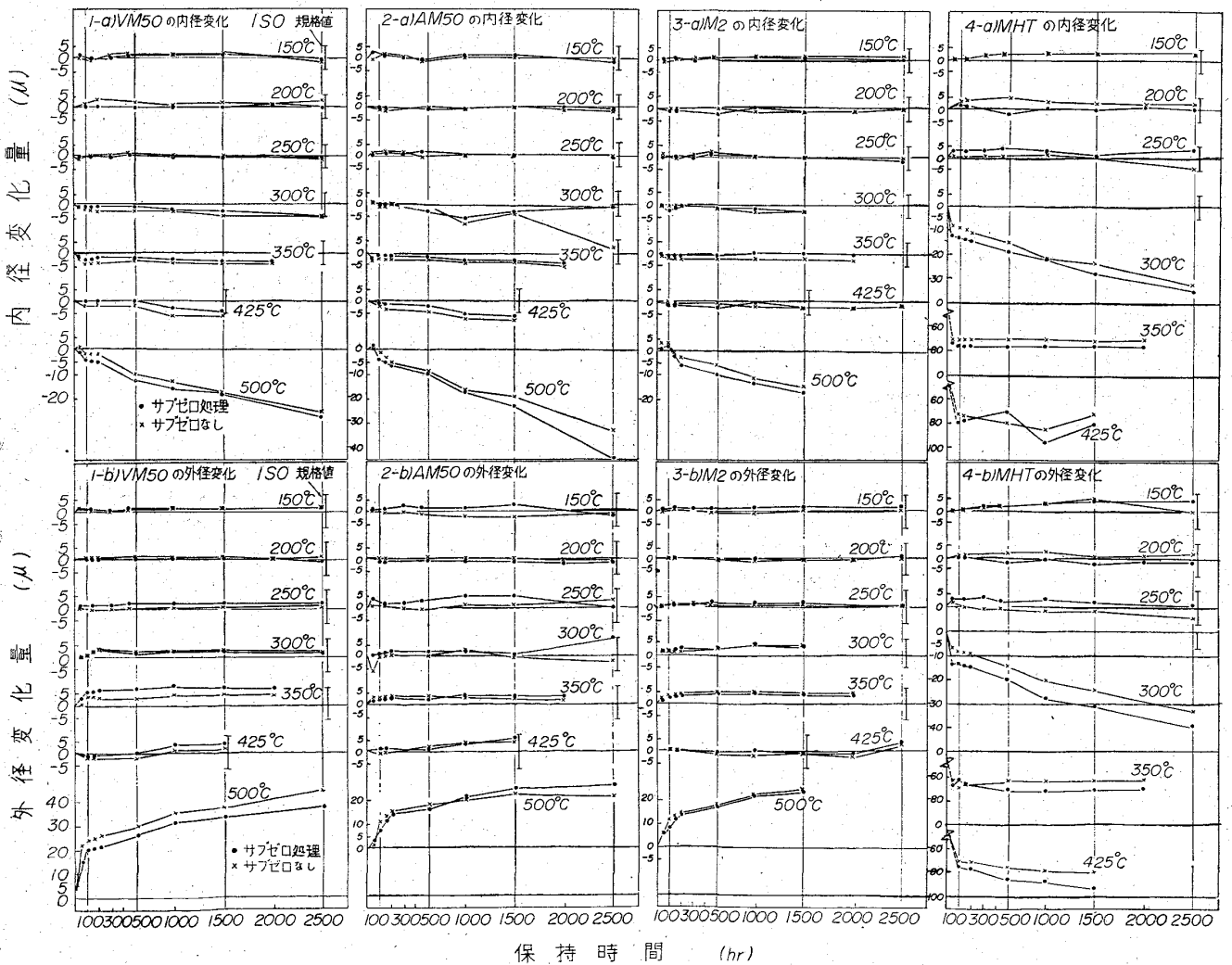


図22 リング状試験片の寸法変化

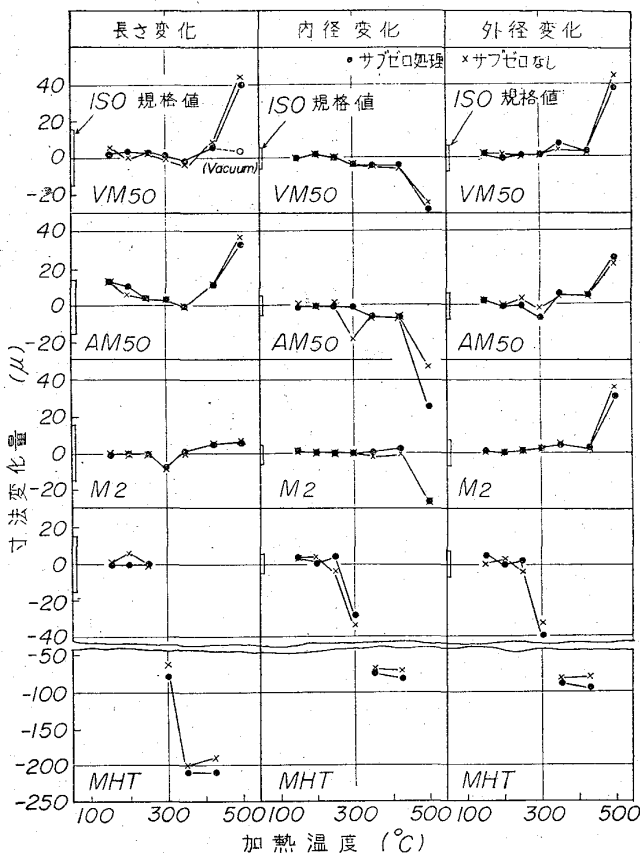


図23 最終時間における寸法変化量

張する傾向を持つものがある。特に 500°C ではその傾向がいちじるしいが、これには高温のためのスケール付着も認められるので材料自体の変形としては、今後さらに検討する必要があると考えられる。

(3) 寸法変化のもつとも小さい、安定した材料はM2で、VM50、AM50 がこれに次ぎ、MHTは寸法変化がもつとも大きかった。

しかしながら MHT は焼モドシ温度が 200~300°C であり、それ以上の加熱温度では組織変化のために寸法変化を生じるのは当然である。

そこで、MHTは焼モドシ温度以下の結果を見ると、AM50 よりも寸法変化がやや大きい程度で、ISO 規格値内に入っている。

(4) ISO 規格値からみると、MHT は 250°C まで

VM50、AM50、M2 は 425°C までの使用が可能である。

(5) 加熱温度 500°C では寸法変化がいちじるしく大きくなるが、これは試験片にスケールが付着したために生じたもので、VM50 の棒状試験片を真空中で試験した結果とくらべると、このことは明らかである。したがって試験の際の雰囲気には厳重な注意を払わない場合には寸法変化がいちじるしく、この結果をそのまま評価すれば M2 がもつともすぐれている。

なお、材料だけの純粋な問題として考える時には、高度の真空中あるいは外気と完全に遮断するような試験方法が必要である。

(6) サブゼロ処理の効果は次の通りであった。

i) VM50、AM50 サブゼロの効果はあまり明らかにあらわれていない。

ii) M2 サブゼロを行なったものの方が、やや寸法変化が少ない。

iii) MHT 加熱温度が 250°C まではサブゼロ処理をした方がやや寸法変化が少なく、300°C をこえるとサブゼロをしたものの方が変化が大きい。

(7) この試験に用いた高温用材料でも、ISO 規格に近い値まで寸法変化がおきることがあり、軸受として使用中の変化も考えれば、さらに安全側をとることが必要で、そのためには組織を安定化するために焼モドシ時間を長くするなどの処理について今後検討する必要があると思われる。

4.3.4 外国における研究結果との比較

寸法安定性に関しては、アメリカの Crucible steel Co. で29種類の高温用鋼につき、研究を行なっている。その研究結果から、この資料でとりあげた4種類の鋼種に相当するものを取り出して表9に示す。

表9は今回使用した棒状試験片と寸法・形状が同一の試験片(試験時間は1000hr)によるものであるから、図21と比較することができる。

M50 については、500°C 以上の場合をのぞいて、VM50 は同程度の結果であるが、AM50 は 200°C における寸法変化が大きい。500°C 以上では、表9では収縮

表9 寸法安定性試験 (Bhat, Nehrenberg による)

鋼種	熱処理		1000 hr 後の長さ変化量 (μin/in)			
	焼入レ	焼モドシ	204°C	316°C	427°C	538°C
M50	1149°C × 20min	[566°C × 2hr] × 2	+22	+12	+27	-50
M2	1232°C × 10min	[566°C × 2hr] × 2	-25	-17	-10	+32
MHT	843°C × 1hr	204°C × 2hr	+20	+20	-1502	-

試験片寸法: 直径 3/8", 長さ 4"

の傾向にあるのに、図21で膨張の傾向にあるのは、前述のようにスケールの影響と考えられる。

MHT では、300°C で図21がすでに収縮しているのに対して、それよりも高い温度の 316°C でも表9はまだ収縮していないという差が認められる。熱処理条件は繰返し焼モドシをおこなっている点をのぞいて、ほとんど同一であるから、残留オーステナイトの安定化が影響をおよぼしていると思われる。約 425°C における収縮量は同程度であつて一致している。この収縮はマルテンサイトの分解によるものであるから、組織変化が同程度であることを示している。

M2 では、低い温度で収縮の傾向がみられ、温度が高くなるにしたがつて膨張の傾向がうかがわれるという点では一致している。500°C 以上における膨張はスケールの影響で図21の方が大きい、M50 の場合よりもその程度が少ない。

寸法変化についての各鋼種の優劣は、ここで行なつた結果による結論と一致している。

5. コロガリ疲労試験

5.1 コロガリ疲労現象

コロガリ軸受に荷重を加えて回転させると、ある時間経過した後で軌道面あるいは転動体（玉、コロ）の表面の一部が突然剝離する。これはコロガリ軸受に限らず、コロガリ接触を受ける物体に一般に生じる表面疲労現象で、フレーキング (Flaking) とよばれ写真8のような状態としてあらわれる。フレーキングを生じた軸受は振動や発熱が大きく、実用に耐えないので、コロガリ軸受においてはフレーキングが最初に発生したときをもって軸受の寿命と判定している。

一般の軸受鋼で作られている軸受では、寿命の概略の値を計算によつて求めることもできるが、今度の場合の

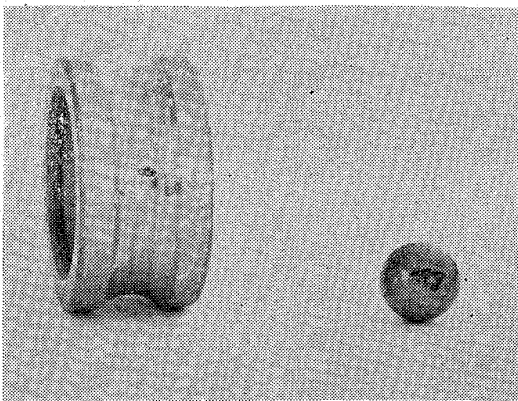


写真8 フレーキング (左: 玉軸受の内輪に発生したもの、右: 玉に発生したもの)

ような高速度鋼などについては実験例もほとんどない。また、高温では材料のカタサが低下するために一般に寿命が短くなるといわれているが、その点も明らかでないので、高温で疲労試験を行なうこととした。

しかしながらコロガリ軸受の形で寿命試験を行なうことは技術的に困難であり、また不必要な因子（たとえば軸受スキマ、精度など）が入るおそれがあるので、単純な形の試験片によつて試験を行なうこととした。

5.2 五球式コロガリ疲労試験機

5.2.1 試験法

材料のコロガリ疲労試験を行なう方法はいろいろあるが、試験機の構造、試験片の加熱方法、試験片の製作、軸受への近似などの点から検討して図24のような形式とすることとした。

図24は Scott の行なつた試験方法⁵⁾で、下に3個の支持鋼球を用い、上部の鋼球に荷重を加えて回転する四球式試験法である。また NASA では下に4個の支持鋼球を使用する五球式試験⁷⁾により、研究を行なっている。

図25は黒田氏の行なつた試験方法⁹⁾で、上部の試験鋼

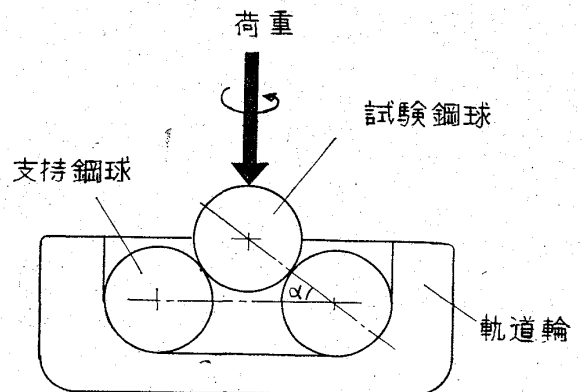


図24 四(五)球式コロガリ疲労試験

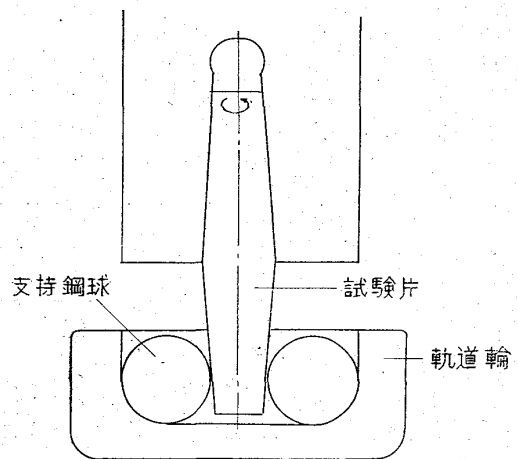


図25 ピボット形コロガリ疲労試験

球のかわりにピボット形の試験片を使ったものである。

ここで行なう高温コロガリ疲労試験では、試験片と別に、これに接触する支持鋼球も耐熱材料で製作する必要があるため、この手間をはぶくために試験片と支持鋼球とは同一材料・寸法の鋼球を使うこととした。また、試験鋼球が1回転するさいの、支持鋼球との接触回数が多いという点で、NASAと同じ五球式試験法を採用した。

五球式の場合、支持鋼球を受ける軌道輪の精度を十分に高くしないと、支持鋼球が試験鋼球に対して均等な荷重で接触しなくなるので、軌道輪の精度は真円度 2μ 以下とし、また支持鋼球の直径に寸法差があつても同様なおきるので、鋼球の精度は相互差・真球度ともに 0.3μ 以下とした。

しかし、NASAの方法では支持鋼球4個は軌道輪の中におさめられたとき、保持器によつて等間隔に保持されているが、この試験では相当の高温を目標としたため、保持器の材質、性能に問題がおきないように保持器を付けないこととした。そのため、支持鋼球同志の間隔が 0.05mm づつになるように軌道の直径を定めた。

5.2.2 試験機の構造

この高温コロガリ疲労試験のために試作した五球式コロガリ疲労試験機を写真9に示す。写真において試験機は、右から主軸潤滑ポンプ、本体、回転数測定用ストロボ、制御盤の順に並べてある。

本体の構造は図26に、試験部分は図27に示す通りである。すなわち、試験鋼球は円錐チャックによつて主軸に取付けられ、回転する。支持鋼球は軌道輪におさめられ、この軌道輪は下部の負荷軸に取付けられていて、分銅とレバーによつて上方に押しあげられるので、支持鋼球は試験鋼球に荷重を与えるようになっている。

試験片の加熱のために、軌道輪の周囲には加熱装置が取付けられ、軌道輪の外周の温度を熱電対で測定しながら温度の自動制御を行なうことができる。

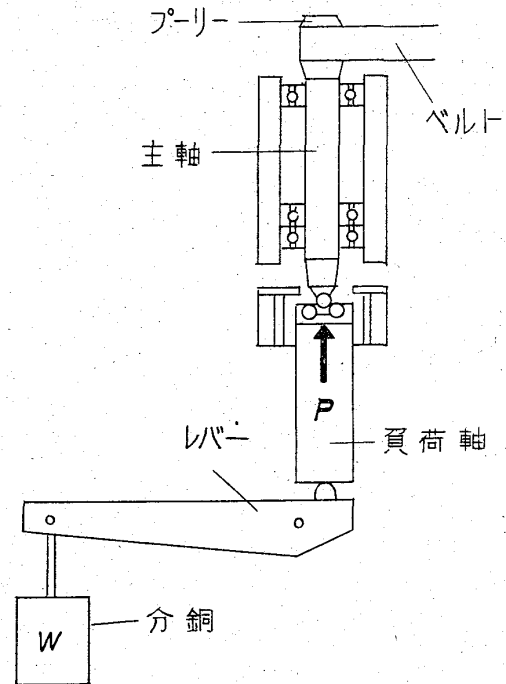


図26 五球式疲労試験機の構造

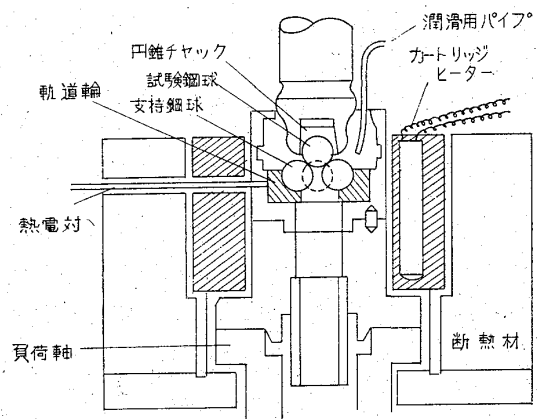


図27 五球式疲労試験機の試験部分と加熱装置

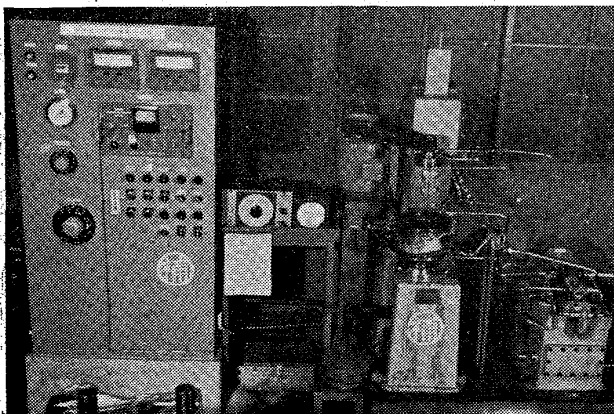


写真9 五球式高温コロガリ疲労試験機

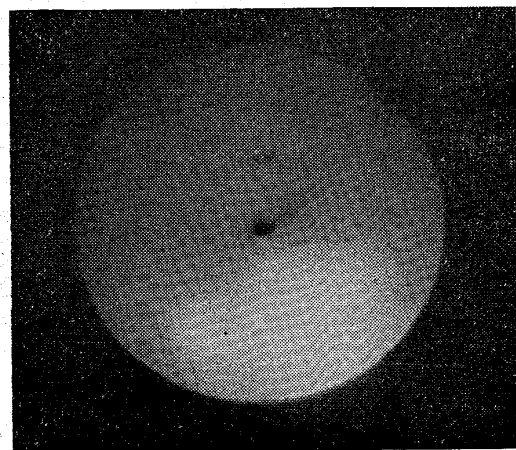


写真10 試験鋼球の転走面とフレーキング（鋼球中心の黒点はカメラのレンズが写つたもので無関係）

表10 試験鋼球の熱処理と機械的性質

鋼 種	ヘッディング プレス	焼 入				焼 モ ド シ		
		予 熱 (°C)	加 熱 (°C)	焼 入 (°C)	カタサ (HRC)	処 理	カタサ (HRC)	圧碎値 (kg)
VM50	熱間 750°C	835	1120	油冷 55	58・0	[550°C × 2hr → サブゼロ] × 2 → 550°C × 2hr	62・0	25000
AM50	熱間 750°C	835	1120	油冷 55	57・8	[550°C × 2hr → サブゼロ] × 2 → 550°C × 2hr	60・2	23500
M 2	熱間 750°C	835	1200	油冷 55	61・2	[550°C × 2hr → サブゼロ] × 2 → 550°C × 2hr	64・0	15100
MHT	冷間	—	840	水冷 30	62・8	サブゼロ → 200°C × 50hr	61・5	21000

なお、試験片にフレーキングが生じると(写真10)振動が急激に増加するので、レバー下端に振動ピックアップを取付けて常に振動を監視し、設定値以上の振動が発生したときには試験機の電源を切る自動停止装置と、停止までの総回転時間を示す時計も付いている。

試験片の潤滑は、試験機後部のタンクから潤滑油を試験片に滴下させるが、高温試験のためにタンクから試験片までの間に潤滑油加熱装置を持っている。

5.2.3 試験機の仕様

五球式コロガリ疲労試験機の概略の仕様はつぎの通りである。

- i) 試験鋼球 呼ビ1/2(直径12・7mm)JIS 精密級
- ii) 支持鋼球 試験鋼球と同じ

iii) 主軸回転数 10000±200 rpm

iv) 主軸の振レ 5μ 以下

v) 鋼球接触角(図24のα) 44°46'

vi) 鋼球の接触荷重 最大 300 kg (最大接触圧力 650 kg/mm²)

vii) 試験片の加熱温度 最高 600°C

・3 試験鋼球

試作した4種類の鋼材は、呼ビ1/2(直径12・7mm)の鋼球にした。この場合の熱処理は表10の通りである。

なお、熱処理後の顕微鏡組織を写真11に示す。

5.4 試験条件

コロガリ疲労試験をおこなう場合に、試験条件として重要な項目は、コロガリ部分の接触条件と潤滑条件である。

高温でコロガリ疲労試験をおこなう場合は温度が高くなるにしたがつて高温カタサが下がるので、接触部が大きく塑性変形しないように、試験温度に応じた接触圧力をえらぶ必要がある。したがって、試験温度を常温、150、250、300、350°Cの5段階にえらんで、最大接触圧力はそれぞれ520、520、470、460、440 kg/mm²とした。(表11)

温度が高くなると、潤滑油・グリースは酸化・分解・重合をおこ

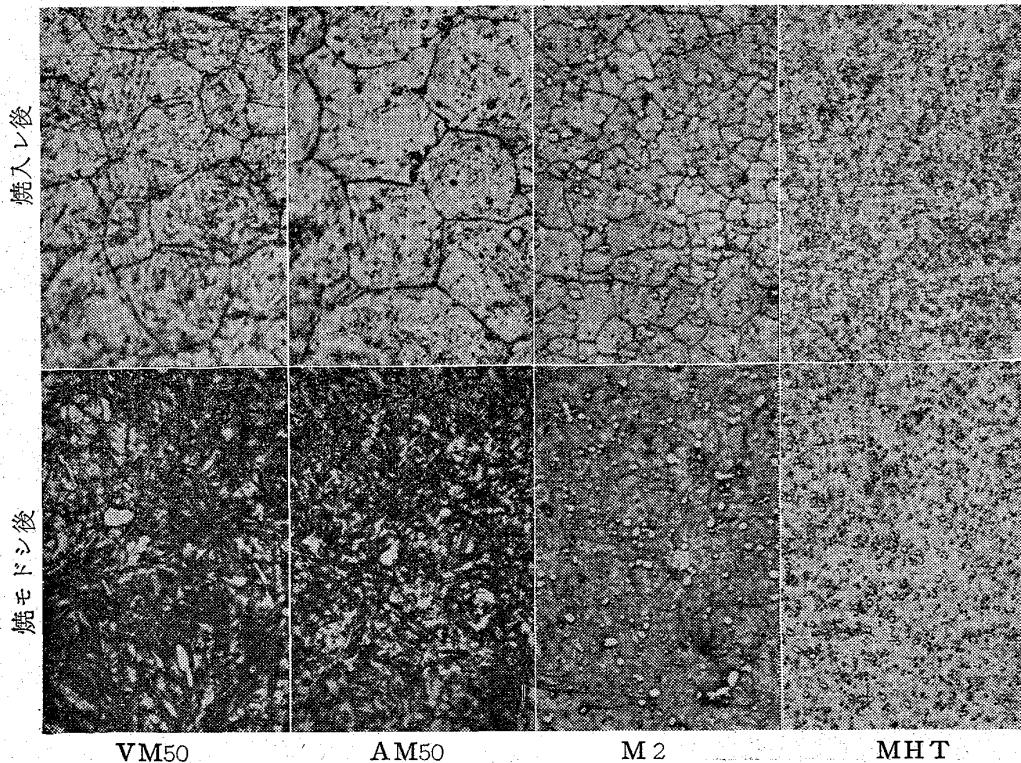


写真11 試験鋼球の組織 ×400 (1/1)

表11 コロガリ疲労の試験条件

温度 (°C)	荷重 (kg)	最大接触圧力 (kg/mm ²)	潤滑剤	潤滑油量 (cc/min)	潤滑剤温度 (°C)	軌道輪温度 (°C)
常温	153	520	MIL-L-7808D	2~4	常温	45~90
150	153	520	MIL-L-7808D	2~4	150	150
250	113	470	MIL-L-7808D	2~4	200	250
300	107	460	MIL-L-7808D	2~4	250	300
350	94	440	MIL-L-7808D	2~4	300	350
			黒鉛 MoS ₂	—	350	

して潤滑能力が低下するため、高温でコロガリ疲労試験をおこなう場合は、潤滑剤・潤滑方法の選定が重要である。潤滑に失敗すると、焼付・摩耗をおこしてしまうので、コロガリ疲労が発生しないうちに試験不能におちいる。高温用潤滑油としては、精製度の高い鉱油、あるいはジエステル油が多く使用されているので、五球試験機による寿命試験には、ジエステル油として MIL-L-7808 D (ジェット・エンジン用, ESSO Aviation Turbo-Oil TJ-15) をえらんだ。また、試験温度の変動を小さくするため、潤滑油はできるだけ試験温度と同じ温度に加熱したのも供給したが、250°C 以上では劣化がはげしく、かえって試験結果に悪影響をあたえたと考えられたので、供給時の潤滑油温度は試験温度よりも 50°C 低くした。

また、このジエステル油でも潤滑能力が不足するような高温に対しては、化学的に安定な固体潤滑剤として、二硫化モリブデン (MoS₂) 黒鉛を使用した。

寿命試験は、接触圧力および潤滑剤・潤滑方法以外の試験条件を一定とした。また、すべての場合、試験鋼球と支持鋼球とは同一材質のものを使った。

5.5 試験結果

5.5.1 250°C 以下の試験結果

寿命試験はバラツキが大きく、同一試験条件でも数多くの試料数を必要として、試験時間を非常に多く要する。したがって、この共同研究では、A, B, C, D, E, F の 6 の箇所 (これら記号は前述の試験の場合の記号と対応する。) にそれぞれ五球式試験機を設備して、同一試験条件を 2~3 箇所分担して試験をおこない、得られた結果を総合した。各試験機による試験結果の間には、とくにきわだつた差はなかつた。

4 種類の材料によつて、各条件での試料数は同一ではないが、各 10~22 個の試験鋼球について試験をおこない、その結果を Weibull paper に図示した。この

Weibull paper の縦軸は損傷率 F を $\log \log [1/(1-F)]$ の形で目盛つてあり、横軸は寿命時間 L を $\log L$ で目盛つてある。ここで、 F は試験した数に対して寿命 L 以下で破損したものの数の比率である。(たとえば、 $L=1$ において $F=0.1$ ならば、寿命 1 までに 10% のものが破損したことを示す。)

また図において、測定結果が直線に近いほど、Weibull の仮定した材料破損の理論式 $F=1-\exp(-ax^\beta)$ に一致することを示し、直線の傾斜がゆるくなるほど、そのグループの寿命のバラツキが大きくなることを示している。さらに、線が右にあるほど、そのグループの寿命が長いことを示すものである。

(1) 寿命値

試験温度ごとにまとめた結果を図 28~30 に、各材料ごとにまとめた結果を図 31~34 に示す。図 31~34 にお

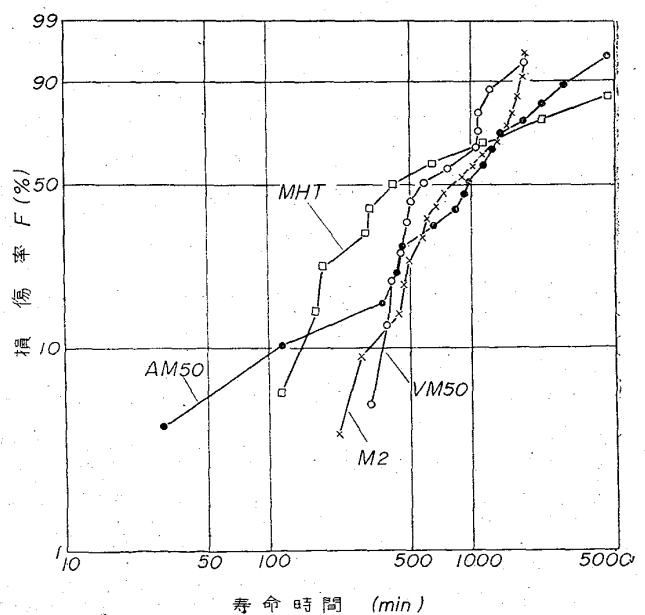


図28 常温の寿命試験結果 (最大接触圧力 520 kg/mm²)

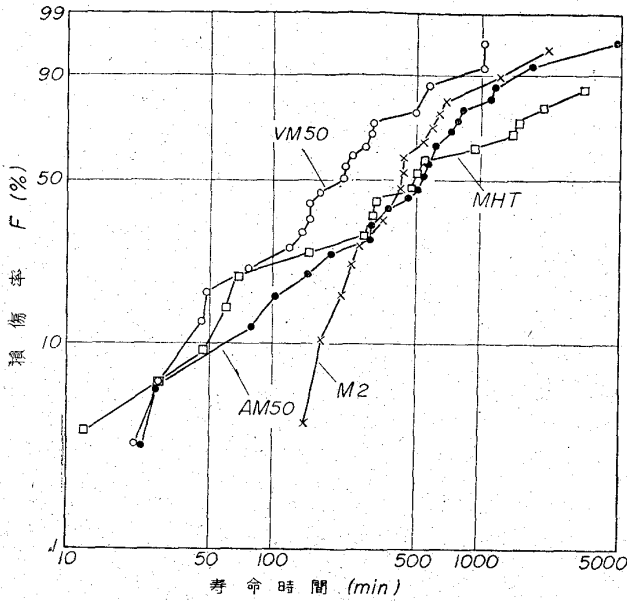


図29 150°Cの寿命試験結果
(最大接触圧力 520 kg/mm²)

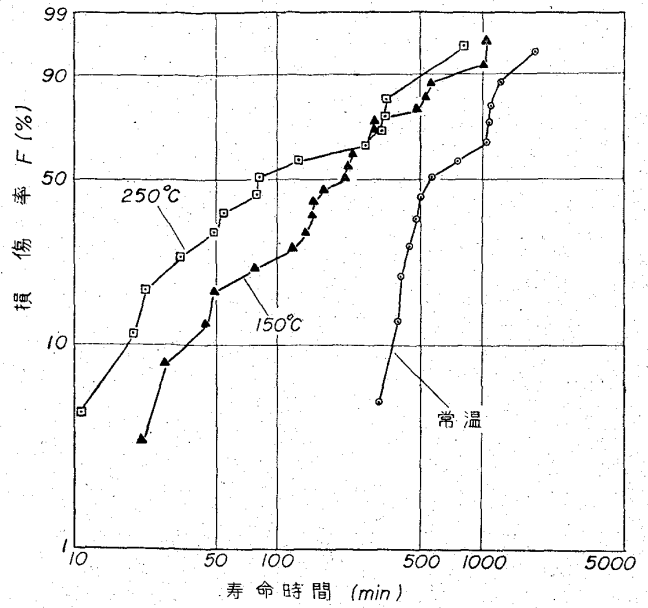


図31 VM50の寿命変化
(最大接触圧力 520 kg/mm²)

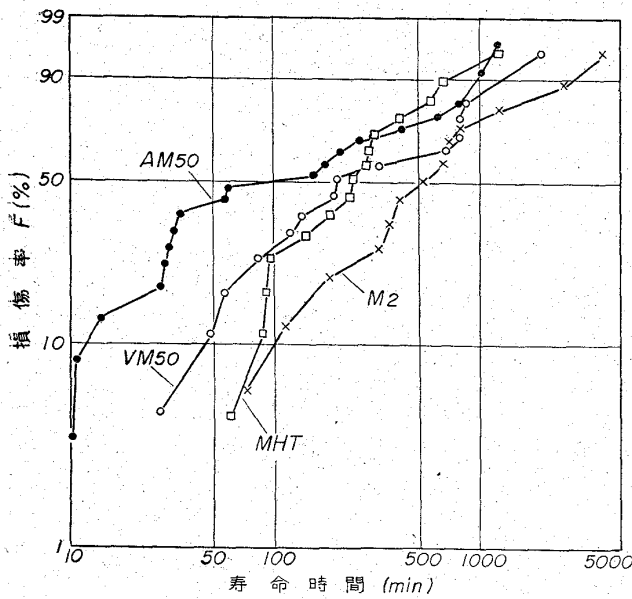


図30 250°Cの寿命試験結果
(最大接触圧力 470 kg/mm²)

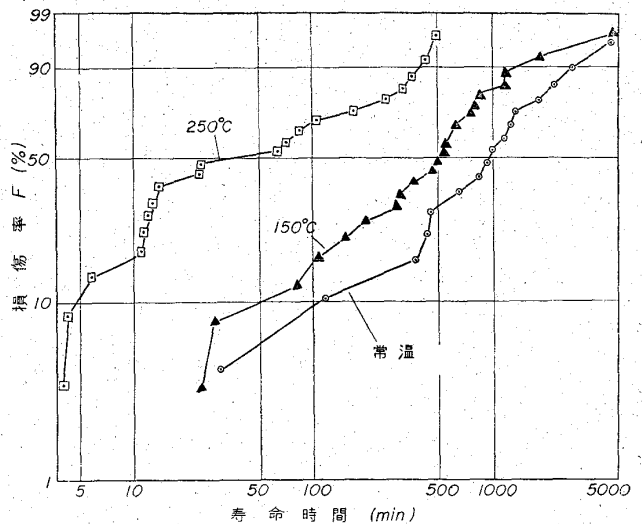


図32 AM50の寿命変化
(最大接触圧力 520 kg/mm²)

ける 250°C の結果は、寿命が接触圧力の 9 乗に反比例するとして、最大接触圧力 470 kg/mm² における寿命値を、520 kg/mm² における寿命値に換算してあらわしてある。

試験温度が 250°C の場合には、潤滑油が蒸発するとともに、鋼球表面に劣化した潤滑油が付着したが、潤滑能力は失われず、摩耗・焼付などはおこらなかつた。

これらの図から、平均寿命(算術平均)、メジアン寿命(損傷率 50% における寿命)、定格寿命(損傷率 10% における寿命)を求めて、表 12~14 に示した。表 14 の

250°C 試験結果には、図 31~34 における 250°C の結果と同様に、最大接触圧力 520 kg/mm² に換算した寿命値が併記してある。

(2) 考察

試験材料の優劣の判定は、メジアン寿命、定格寿命などの見方により評価が異なるが、概略的には次のようにいうことができる。

a) 試験に使つた鋼種は全部、試験温度が上昇すると寿命が短くなる。コロガリ疲労寿命と、温度による低下の状態は材料によつて異なるが、鋼種別に見ると次の通りとなる。

i) VM50 常温では寿命はやや短かめだが、パラ

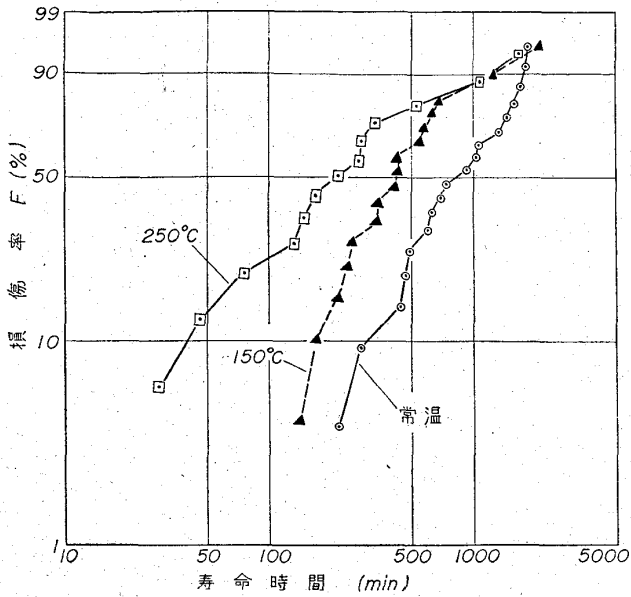


図33 M2の寿命変化
(最大接触圧力 520 kg/mm²)

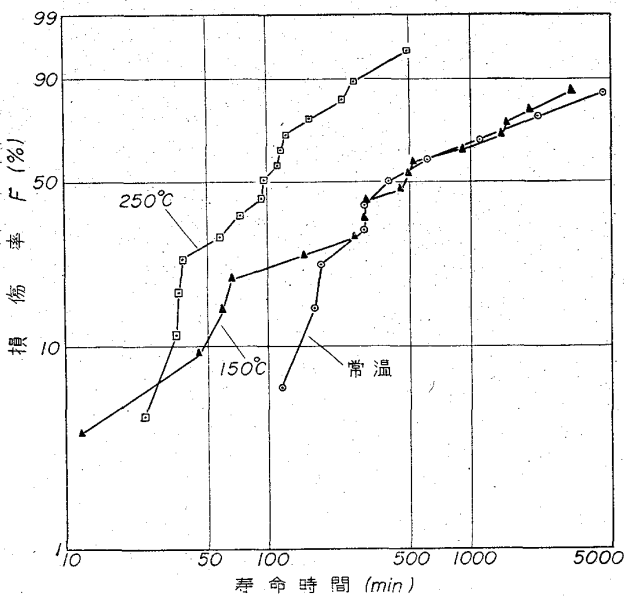


図34 MHTの寿命変化
(最大接触圧力 520 kg/mm²)

ツキが非常に小さい。しかし、150°Cになると急激に寿命が低下して全鋼種中最低となり、バラツキも大きくなるが、250°Cにおける寿命は、その割には低下しない。

ii) AM50 常温の寿命は短かくはないが、寿命のバラツキがいちじるしく大きい。150°Cにおける寿命低下は少ないが、250°Cになると寿命が全鋼種中でもつとも短くなる。

iii) M2 常温、150°C、250°Cのいずれにおいても、他に比べて寿命がもつとも長く、寿命のバラツキも小さい。

表12 常温の疲労試験結果

	MHT	AM50	VM50	M2
試験料数	11	16	13	18
平均寿命(min)	1388	1282	787	986
メジアン寿命(min)	580	940	720	880
定格寿命(min)	120	155	270	300

表13 150°Cの疲労試験結果

	MHT	AM50	VM50	M2
試験料数	17	20	21	16
平均寿命(min)	1662	476	305	579
メジアン寿命(min)	530	450	213	450
定格寿命(min)	42	69	34	157

表14 250°Cの疲労試験結果

	MHT	AM50	VM50	M2
試験料数	15	20	15	13
平均寿命(min)	329 (132)	312 (125)	529 (213)	946 (381)
メジアン寿命(min)	250 (101)	123 (50)	300 (121)	560 (226)
定格寿命(min)	59 (24)	4・7 (1・9)	26 (10)	86 (35)

(注) カッコ内の数値は接触圧力 470 kg/mm² の結果を 520 mm² の場合に換算したものの。

iv) MHT 常温では寿命がもつとも短かいが、150°Cにおける寿命低下はわずかである。しかし、早期破壊のものは寿命がかなり低い点に注意する必要がある。

また、250°Cまでの寿命低下はわずかである。

b) VM50, AM50, M2 は、250°Cにおいては常温における場合より寿命のバラツキが大きくなる。

c) 総合的にみれば、この試験では M2 がもつともすぐれていて、その他の材料の寿命は優劣をつけたいが、250°Cにおいては AM50 の寿命が劣っている。

(3) 外国における疲労試験結果との比較

高温コロガリ疲労試験は、アメリカにおいてかなり多くおこなわれていて、研究結果も発表されているものが多い。

しかし、この資料でとりあげた鋼種について、五球式試験機と同一試験機構により研究をおこなったものはない。五球式試験機では、WB-49, M-1 が試験されていて⁷⁸⁾、四球式試験機では軸受鋼、W-Cr 工具鋼が試験されている⁵⁾⁶⁾。

一方、他の試験機構による試験結果を五球式試験機による場合に換算することも考えられるが、これは不可能

に近い。五球式試験機では、その機構上、負荷部分にスピンドル運動が生じて、スベリをとともなうコロガリ運動をしている。これに対して他の試験方法では、ほとんどスベリをとともなわないコロガリ運動をしている。スベリの影響は、現在のところ定量的に解析されていないので、試験方法がことなる場合に、寿命値を換算して比較することはできない。

また試験方法がことなっても、鋼種間の優劣は比較できるが、残念なことに、同一試験方法で M50, MHT, M2 を試験した報告は見られない。M50 と MHT を試験した報告はあるが¹⁰⁾、寿命の優劣を求めたものではなく、フレーキング位置の研究を目的としているため、寿命値が発表されていないので、比較資料にならない。

したがって、この技術資料における寿命試験結果を、外国で発表されている研究結果と比較することはできなかった。アメリカでは、AISI M-1 による実験結果が多い。

5.5.2. 300°C 以上の試験結果

五球式試験機では、高温になるとどのような現象があらわれるかという点について、E, F の 2 箇所試験をおこなった。

(1) ジエステル油

300°C になると、ジエステル油でも化学的に不安定となり、酸化がいちじるしく、蒸発による消耗も大きくなる。600min 程度の試験をおこなうと、スラッジが多量に発生して、油の循環系統にある金網の目をつまらせてしまうため、長時間の試験をおこなうことが困難であった。

350°C では、さらに潤滑油の蒸発がはげしく、試験鋼球の円錐チャック部分、軌道輪にまでスラッジが付着して、潤滑作用がおこなわれていない状態となった。また、いちじるしく試験鋼球が摩耗して、振動が安定時の 5 倍以上となり、110~170min で試験不能となった。

(2) 固体潤滑剤

350°C で固体潤滑剤を使用した結果をつぎに示す。

i) グラファイト (ワックス)

28~167min でいちじるしく摩耗して、振動が 5 倍以上に増加したため試験不能となった。試験後の観察では試験部分にグラファイトはなかつた。

ii) 二硫化モリブデン (ペースト状、溶剤ベース)

100min 程度は正常状態で回転しているが、その後摩耗が進行するとともに振動が増加して、204min で試験不能となった。試験部分には二硫化モリブデン (MoS₂) 粉末が残っていた。

iii) 二硫化モリブデン (粉末)

20min 程度は安定して回転しているが、その後振動が増加して不安定となるため、27min で試験を中止せざるを得なかつた。

iv) 二硫化モリブデン (粉末) + ジエステル油
振動値は高いが、50min 程度は安定して回転している。その後、振動が不安定となり、数倍にまで増加したので 73min で試験を中止した。試験後では、試験部分に MoS₂ は残っていないかつた。

v) 二硫化モリブデンコーティング

試験鋼球と支持鋼球に、下地としてリン酸マンガン処理をおこなった場合とおこなわない場合とについて、MoS₂ コーティングをして試験をした。MoS₂ コーティングをおこなうと、鋼球の真球度が悪くなるため、試験開始直後から振動が大きく、5~23min でさらに振動が増加したので試験不能となった。試験後の鋼球は、接触していない部分にはコーティング層が残っているが、コロガリ部分は金属面が露出して、はげしい摩耗をおこなっていた。

このように、300°C 以上の高温では、潤滑上の問題から、安定した寿命試験をおこなえないので、コロガリ疲労試験は 250°C までしかできなかつた。300°C 以上の高温でコロガリ疲労試験をおこなうためには、スベリ量の少ない試験方法をとるか、安定で潤滑性能がすぐれている潤滑剤を開発しなければならない。

6. ま と め

以上に行なつた試験の結果を総合すると、次のようなことがいえる。

6.1 材料について

低合金鋼である MHT と、高合金鋼である VM50-AM50-M2 とは、使用温度範囲が本来異なるものである。区別して考えることにする。

6.1.1 MHT

(1) この材料は一般に用いられている高炭素クロム軸受鋼に 1% Al を添加して焼モドシ耐性 (高温雰囲気中で焼モドシを受けにくい性質) を高めたものである。

安定化熱処理をしてカタサ HRC 60 程度にしたものは、ISO の寸法安定性の基準に 250°C まで合格する。

(2) カタサの低下は 250°C までではゆるやかで、この温度までは軸受鋼にくらべて低下の割合が小さい。

したがって、250°C 以下の雰囲気を使う場合には、この材料は有利である。

(3) ここで使用した MHT は真空溶解によつたので、非金属介在物が少なく、材料としても良好であつた。

が、大気溶解ではおそらく性能が低下するものと思われる。

6.1.2 VM50・AM50・M2

(1) これらの材料は高速度鋼に属するので、焼モドシ耐性は MHT に比べてはるかに高い。

(2) いずれの鋼種も 425°C まで ISO の寸法安定性の基準に合格する。しかし 500°C においては、寸法変化のほかに大気による酸化も進行するので、もしこの温度で使用するを考えるならば、非酸化性雰囲気が必要とする。

(3) これらの鋼種を比較すると、寸法安定性および高温カタサの点から M2 がもつともすぐれている。ただし M2 は 600°C までぜい性破壊するが、VM50 は 250°C 以上で若干の塑性変形を伴うので、高温カタサの必要なときと、じん性が必要なときは区別して材料を選ぶのが有利である。

(4) M50 について真空溶解と大気溶解の優劣をみると、高温カタサや寸法安定性には差が認められない。ただ AM50 の衝撃引張の結果では 300°C に衝撃値のいちじるしい低下が見られるが、VM50 の衝撃値ではこのような現象が見られない。これが溶解法の差であるかどうかは明らかでないが、今後検討を要する問題である。

6.2 寿命について

(1) いずれの鋼種も温度が上昇するにつれて寿命は低下する。常温・150°C・250°C の試験においては、いずれの温度でも M2 の寿命がもつとも長く、また温度による寿命の低下も少ない。

(2) VM50・AM50・MHT の 3 鋼種の優劣は、試験温度によつて異なるので判定をつけ難いが、耐熱材料としては AM50 は 250°C で寿命が短くなるので好ましくない。

(3) M50 についての真空溶解と大気溶解の差についてみると、常温と 150°C で AM50 がすぐれていたが、250°C で劣っていた。これは、前記の材料の項でのべた AM50 の 300°C のぜい性と関連して、大気溶解の特質であるかどうか、今後検討してみる必要があると思われる。

(4) 250°C における材料のカタサの減少は少ないにもかかわらず、この温度における寿命の減少は相当大きいものがあり、従来、軸受鋼に適用されていた寿命に対するカタサ係数、温度係数による寿命減少率よりも大きいようである。したがって、これら係数については、さらに明確にすることが必要である。

(5) 今回の試験では、一般的に用いられている高温潤滑剤でも、性能不足のため 300°C 以上の試験が不可

能であつたが、今後は高温における潤滑剤およびその使用法について研究を進め、さらに高温における寿命を明らかにする必要があると考えられる。

7. あと き が

高温コロガリ軸受用材料を開発するため、多数の委員の協力によつて材料の試作と試験・研究を行ない、現在有望であろうと考えられる耐熱材料の性能を明らかにした。

コロガリ軸受材料の開発は Try and Error によるほかに、また多くの費用、労力、時間を必要とするものである。ここで試作した材料が最高のものであるとはもちろん考えていないが、一応の目安としての結果は得られたものと考えられる。そして、この結果をもとにして、今後さらに使用範囲の広い材料を開発する必要がある。

ここに行なつた試験は共同研究であるので、材料試験(たとえば衝撃値など)において試験機、試験方法が統一されなかつた場合もあり、そのため結果が完全にまとめに整理できなかつた点がある。これは今後、機差などを含めて、換算法の確立が望ましい。

最後にこの試験を行なうにあたり、いろいろと適切な御指導を下さつた東京工業大学、田中実教授に厚く御礼申し上げるとともに、材料の試作と一部の試験の担当を願つた日本特殊鋼株式会社、特殊製鋼株式会社、山陽特殊製鋼株式会社、および試験機の試作に御協力願つた神鋼造機株式会社に深く感謝する。

文 献

- 1) 喜熨斗, 山本: 高温用ころがり軸受, 日本機械学会誌, 66 (1963), p. 1575~1581
- 2) G. K. BHAT and A. E. NEHRENBURG: A Study of the Metallurgical Properties that are Necessary for Satisfactory Bearing Performance and the Development of Improved Bearing Alloys for Service Up to 1000°F, WADC Tech. Rep. 57-343 (1957)
- 3) G. SACHS, R. SELL and V. WEISS: Tension, Compression and Fatigue Properties of Several SAE 52100 and Tool Steels Used for Ball Bearings, NASA TN D-239 (1960)
- 4) ISO, TC4, Resolution No. 202 (1959), No. 257 (1961)
- 5) F. T. BARWELL and D. SCOTT: Effect of Lubricant on Pitting Failure of Ball Bearings, Engineering, 182 (1956), p. 9~12
- 6) D. SCOTT: Lubricants at Higher Temperatures assessing the Effect on Ball Bearing Failures, Engineering, 184 (1958), p. 660~663
- 7) E. V. ZARETSKY and W. J. ANDERSON:

- Rolling-Contact Fatigue Studies with Four Tool Steels and Crystallized Glass Ceramic, Trans. ASME, J. of Basic Engg., 83 (1961) 4, p. 603~612
- 8) E. V. ZARETSKY, W. J. ANDERSON and R. J. PARKER: The Effect of Contact Angle on Rolling-Contact Fatigue and Bearing Load Capacity, Trans. ASLE, 5 (1962), p. 210~219
- 9) 黒田: 軸受鋼の転動疲れ寿命に対する潤滑剤の影響, 潤滑, 5 (1960), p. 283
- 10) W. J. ANDERSON and T. L. CARTER: Effect of Fiber Orientation, Temperature and Dry Powder Lubricants on Rolling Contact Fatigue, Trans. ASLE, 2 (1959) 1, p. 108~120
-