

技術資料

UDC 669.14.018.256.018.8 : 669.14.018.2560.18.45

耐熱軸受鋼および耐食軸受鋼*

小 柳 明**

High Temperature Bearing Steel and Anti-Corrosion Bearing Steel

Akira KOYANAGI

1. ま え が き

近年、航空機や高速機械などのめざましい発達にともなつて、機械部品として重要な役割りを果たしているころがり軸受も、高荷重、高速、昇温の状態に使われる度合がより多くなつてきた。特にジェットエンジンやガスタービンの開発普及は、これに拍車をかけている。

通常、ころがり軸受として最も多く使用されている高炭素クロム軸受鋼 (JIS-SUJ2) は、その焼もどし温度 160°~180°C をこすと、硬さが低下するので昇温部での長時間使用には耐えられない。したがつて、長時間高温にさらされても軟化や寸法変化が少なく、高温硬さの高い鋼種が開発使用されている。

また、ころがり軸受の用途が多様化するにしたがい、特殊な腐食性雰囲気のもとで使用される場合や、大気中でも計測器用小型ころがり軸受のように、ほんのわずかな錆でも、その性能に大きく影響をおよぼす場合には、耐食性のある鋼種を選ばなければならない。

耐熱軸受鋼の研究は、特に第2次大戦後、米国でさかんに行なわれているがたとえば^{1)~6)}、わが国では系統的な研究はあまり見られず、約10年前に日本ベアリング工業会が耐熱軸受研究委員会を設け、600°Cまでの高温に耐えるころがり軸受を目標として、数種の耐熱軸受鋼の高温特性について、共同基礎研究を行ない一応の成果を得たが⁷⁾、まだ多くの問題点が残されている。また、耐食軸受鋼については、わが国での研究らしい研究はほとんど見当らない。

本稿では、現在用いられている耐熱軸受鋼ならびに耐食軸受鋼を紹介し、それらの諸特性について解説を試みることにする。

2. 耐熱および耐食軸受鋼の必要特性

ころがり軸受はその使用温度の常温、高温を問わず、その要求される回転性能は同じで、このために必要な特

性としては、使用温度における寸法安定性、転動疲労寿命、塑性変形に対する抵抗、耐酸化性、耐食性などである。

2.1 寸法安定性

軸が高速でしかも円滑な回転を維持するためには、ころがり軸受と軸との間に適度の微小間隙が保たれることが必要で、精密加工により得られた寸法、形状が長期間にわたり、変化することなく維持されねばならない。一般に寸法変化は、相変態など材料のミクロまたはマクロ組織の変化が主因と考えられ、この意味で高温になるほど、寸法変化の問題は重要となつてくる。

ミクロ組織の変化による寸法変化を防止するだけでなく、使用温度より高めの温度で焼もどしを行なつておけばよいわけであるが、一方、硬さの低下は避けられない。高温での焼もどし抵抗の大きい軸受鋼が望まれると同時に、その熱処理条件も重要な問題となつてくる。

使用中の過大な応力などにより、ミクロ組織的な変化がなくても、変形を生ずる場合があるが、これは昇温変形抵抗に関連する問題である。

参考までに、表1⁸⁾にISOで規定されているころがり軸受の寸法変化許容量を示す。

2.2 昇温変形抵抗

ころがり軸受の場合は、昇温といつてもその使用温度はそれほど高温ではなく、製紙機械の乾燥ロールなどで~150°C、熱間圧延機用特殊テーブルローラーで~250

表1 ころがり軸受の寸法安定性に関するISO規定値

温度 (°C)	時間 (hr)	許容寸法変化率 (%)	コード
150	2 500	0.015	26
150	2 500	0.010	27
200	2 500	0.015	28
250	2 500	//	29
300	2 500	//	30
350	2 500	//	31
425	1 500	//	32

* 昭和50年10月27日受付 (Received Oct. 27, 1975) (依頼技術資料)

** 山陽特殊製鋼(株)工博 (Sanyo Special Steel Co., Ltd., 3007 Nakajima Shikama-ku Himeji 672)

°C, ガスタービンやジェットエンジンで 260°~420°C といわれている。潤滑剤の制約から、使用温度上限は~420°C といわれているが、耐久時間、回転速度、荷重などを制限すれば、500°~800°C でも使用可能である。

普通、耐熱鋼では、クリープ強度などがその必要特性とされているが、耐熱軸受の場合には、直接これは必要でなく、むしろ負荷応力として内輪あるいは外輪と転動体との間に働く接触応力が問題となる。過大な接触応力によつて生ずるころがり面のわずかな凹みも許容されず高温での硬さ、変形抵抗ともに大きいことが要求される。

弾性接触部に生ずる塑性変形については、押込み硬さとの間に比例関係が成立し、点接触の場合はその材料のピッカースかたさ Hv の 3 分の 1 の平均接触圧力 (kg/mm²) をこえると、性能上影響があらわれるような凹みが生ずる⁹⁾。このことが高温硬さでも成立すると考えられるので、その使用温度で十分な高温硬さを持つている高速度鋼系のような鋼種を選ばなければならない。高温においても常温と同じ静定格荷重を要求されるとすれば、その高温硬さは HRC 60 以上が必要となる。

2.3 ころがり疲労寿命

ころがり軸受の寿命は、軌道輪の溝や転動体の表面にフレーキングが生ずるまでの期間であらわされる。フレーキングが生ずると、ころがり面に凹凸ができて、回転精度の悪化、振動の増加がおり、さらに使用を続けると、ついには破損に至る。

フレーキングは接触部の弾性接触応力が、ころがり運動により繰返し応力となるため、表面層直下に応力集中点を生じ、微小クラックを発生し、これが表面へ伝播することによつておこる。

耐熱軸受の場合も、フレーキング発生機構は同じと考えられるが、高温硬さが高い方が、フレーキングを生じにくく、寿命が長い。この関係は同一材料についていえることで、異種の材料では、同一硬さでも寿命に差のあることが多い。耐摩耗性についても、高温硬さの高い材料は有利である。

非金属介在物は巨大炭化物と同様、高温で使用する場合も、転動寿命に影響をおよぼすと考えられ、航空機用

の軸受などでは、清浄度、特に酸化物系介在物をできるだけ少なく規定している。真空溶解法や ESR 溶解法が、採用されているゆえんである。

2.4 耐食性

水蒸気や水、海水などが浸入するような用途、たとえばウォーターポンプや各種船舶あるいは特殊な化学薬品用などに使用されるころがり軸受には、もちろん、耐食性が要求される。また、計測器などに用いられるミニチュアころがり軸受はその性能上、少しの錆でも有害である。単なる耐食性鋼球としては、クロム鍍金を施したのも使用されるが、内外輪材としては、各種ステンレス系軸受鋼が用いられる。

一般にこれら耐食性用途に用いられるステンレス系軸受鋼は耐酸化性もあり、特に高炭素ステンレス鋼は、焼もどし抵抗も大で、高温硬さが高いため、準高温用として使用される場合が多い。

3. 耐熱軸受鋼

高温で使用される代表的な軸受鋼を表 2 に示す。なお Steel 30, 31, 32 は 1973 年、ISO-TC17 で耐熱軸受鋼の標準鋼種として、国際的に規定されたものである。

JIS の高炭素クロム軸受鋼 (SUJ1~SUJ5) は、標準焼もどし温度が 150°~200°C であるから、標準処理のものでは 120°C 程度までしか使用できない。焼もどし温度以上で用いる場合は、焼もどし温度を上げねばならないが、上げると標準硬さ HRC 60~62 より低くなるので、寸法を大きくしないと定格荷重に耐えられない。したがって、ある限度以上の使用温度に対しては、大型の軸受を設計するよりは、高級な耐熱軸受鋼を使用した方が、経済的にも有利な場合が多い。

3.1 耐熱低合金軸受鋼

MHT (Medium High Temperature Use) は SUJ2 に Al を 1.5% 添加して焼もどし抵抗、高温硬さを少し高めたもので、準高温用に米国で開発された。温度が上つても、Al が固溶することにより、マルテンサイトの分解と炭化物の析出が阻止されるので、図 1¹⁰⁾ のように高温硬さの低下が SUJ2 より小さい。図 2 は MHT の焼入硬さ、図 3 は焼もどし硬さを示す。Al 添加によ

表 2 各種耐熱軸受鋼の化学成分 (%)

鋼種	相当鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Co	Al
MHT		1.0	0.4	0.4		1.5					1.3
52C B		0.85	0.8	0.3		1.0	0.6				
M50	Steel 30	0.80	0.30	0.30		4.0	4.25		1.0		
M10		0.80	0.30	0.30		4.0	8.0		2.0		
M2	Steel 31, SKH9	0.80	0.30	0.30		4.0	5.5	6.0	2.0		
M1		0.80	0.30	0.30		4.0	8.0	1.5	1.0		
T1	Steel 32, SKH2	0.70	0.30	0.30		4.0		18.0	1.0		
WB49	SKH55	1.10	0.30	0.30		4.4	4.0	7.0	2.0	5.0	
M315		0.15	0.30	0.50	2.8	1.5	5.0				

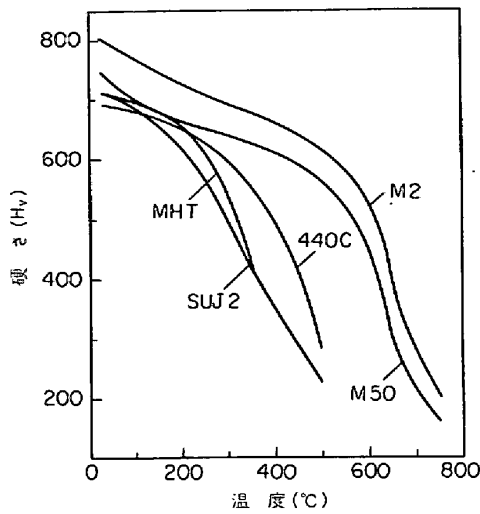


図1 耐熱軸受用鋼の高温硬さ

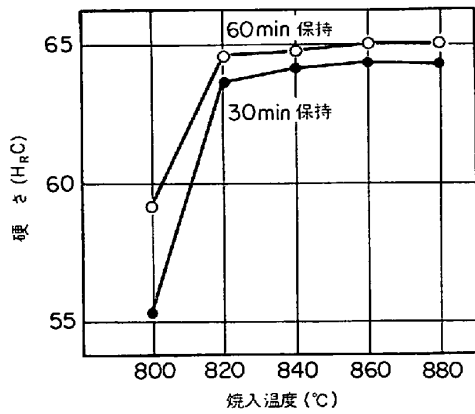


図2 MHTの焼入硬さ

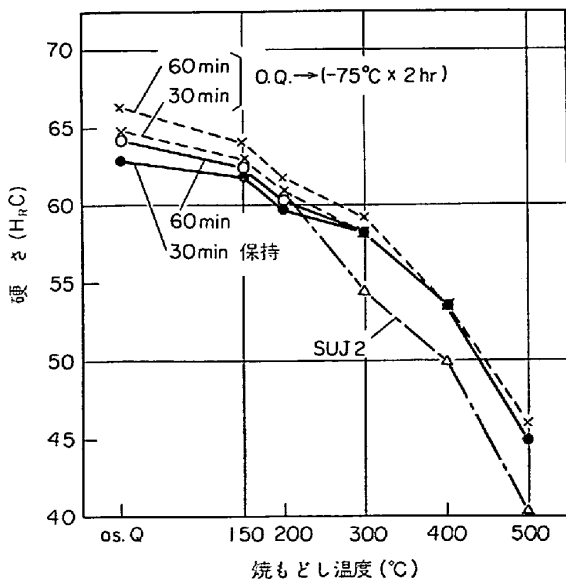


図3 MHTの焼もどし硬さ (840°C 焼入れ)

り 250°C まで HRC 60 以上が保たれ、この温度が MHT の使用限界と考えられる。

SUJ2₂ の Si₂ を増加させると、焼もどし抵抗、高温硬

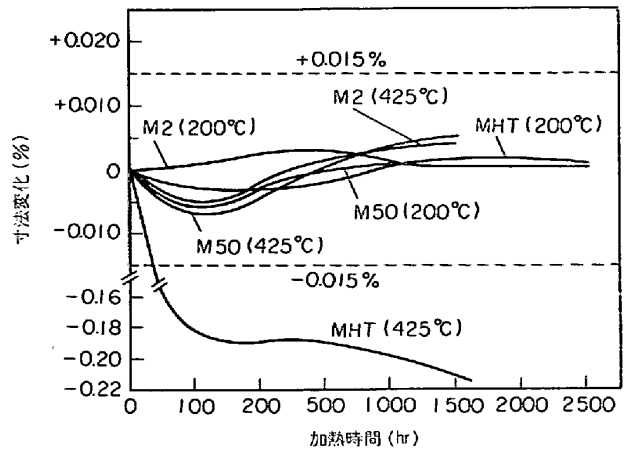


図4 耐熱軸受用鋼の寸法安定性

さを増すが¹¹⁾、Al と Si を両方添加しても、焼もどし抵抗は高くなる¹²⁾。スウェーデン SKF 社で開発された 52CB¹³⁾ は高 Si 軸受鋼であるが、MHT と同様、あまり実用化は進んでいない。図 4¹⁴⁾ は MHT の寸法安定性を他の高合金耐熱軸受鋼と比較したもので、200°C では ISO 規格を満足している。

3.2 耐熱高合金軸受鋼

ダグラス DC8 のエンジン JT-3D のタービン側のころ軸受では、使用温度は 200°C であるが、SST 用のエンジンになると、ラム効果により空気温度の上昇が大きく、マッハ 3 の場合には 400°C 近くになるといわれている¹⁵⁾。このように温度が上つてくると、前述の低合金軸受鋼は使用できず、かといつて普通のいわゆる耐熱鋼では、硬さが不足するので、析出二次硬化のある準高速度鋼や高速度鋼を使用しなければならない。

高速度鋼は添加合金の入手や国内価格の事情から、英国ではタングステン系の AISI-T1 などが多く実用化され、米国ではモリブデン系、たとえば AISI-M1, M2, M50 などが用いられている。日本では、ジェットエンジンの技術導入事情から、M50 がおもに使用されている。

図 5 に M50 の焼もどし硬さを示す。前述の図 1 に M2, M50 の高温硬さを他の鋼種と比較して示したが、焼入温度による高温硬さの変化を M2 について求めたのが図 6¹⁶⁾ である。

前述の図 4 に M2, M50 の寸法安定性を低合金軸受鋼と比較して示したが、Mo と W の合計量が、マルテンサイトの分解、軟化防止、析出二次硬化の主要因と考えれば、M50 より M1, M2 の方がより高温の使用に適している。

図 7¹⁷⁾ に M2, M50 の高温ころがり寿命の一例を示す。250°C におけるころがり寿命では、M2 の方が優れているが、必ずしもそうでない場合もある。図 8¹⁸⁾ は日本ベアリング工業会耐熱軸受研究委員会が行なつた実験結果の一例で、五球式ころがり疲労試験機を用いて、M

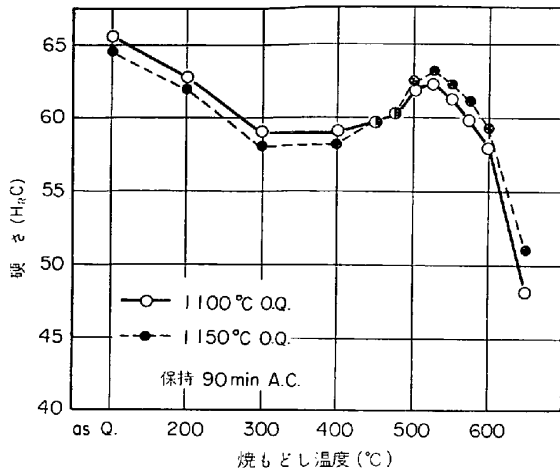


図5 M50の焼もどし硬さ

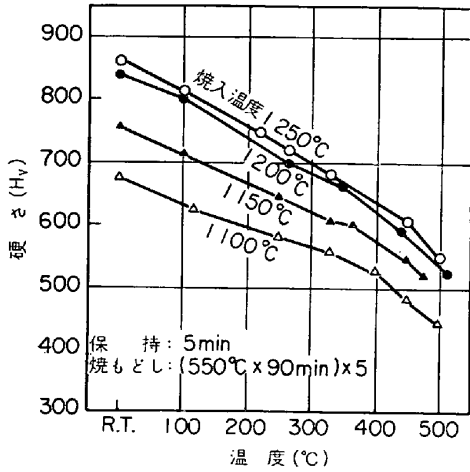


図6 M2の焼入温度による高温硬さの変化

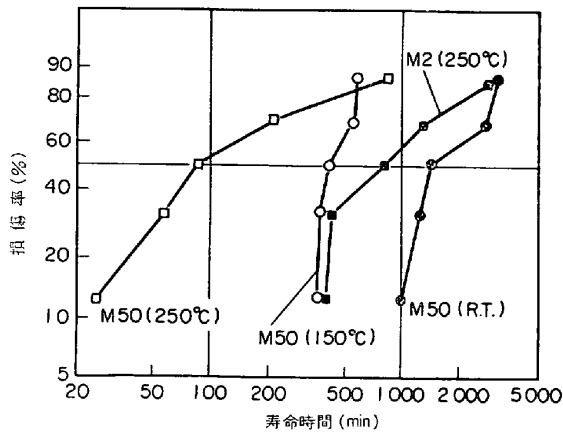


図7 M2とM50の高温ころがり疲れ寿命

2, M50, MHT の 150°C におけるころがり寿命を比較したものである。図中, MHT, VM50 は真空溶解材, AM50, M2 は大気溶解材である。

必ずしも高級なものが, ころがり寿命がよいという結果にならないのは, 寿命試験自体のバラツキもあるが,

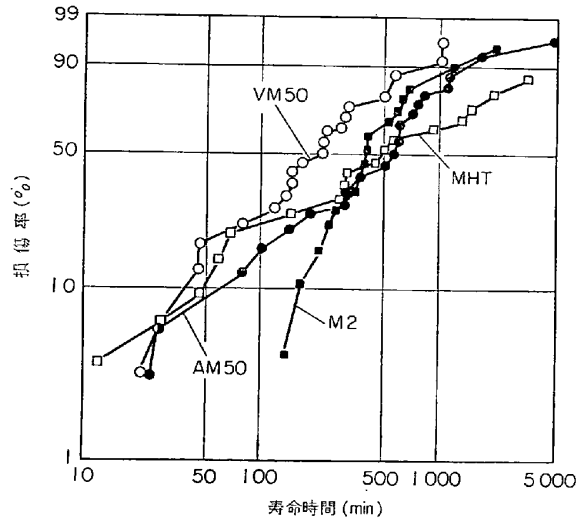


図8 耐熱軸受鋼の高温ころがり疲れ寿命 (150°C)

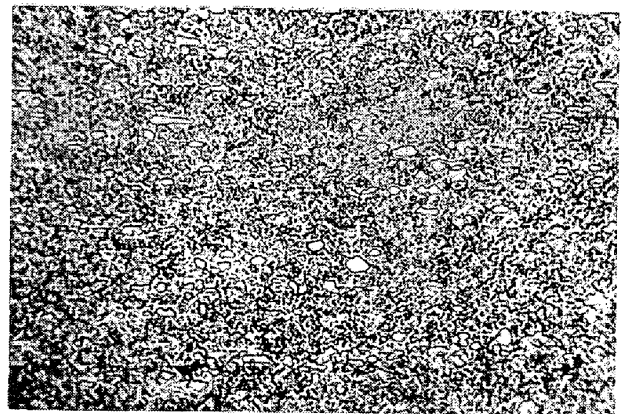


写真1 M2のマイクロ組織 ×400 (6/7)

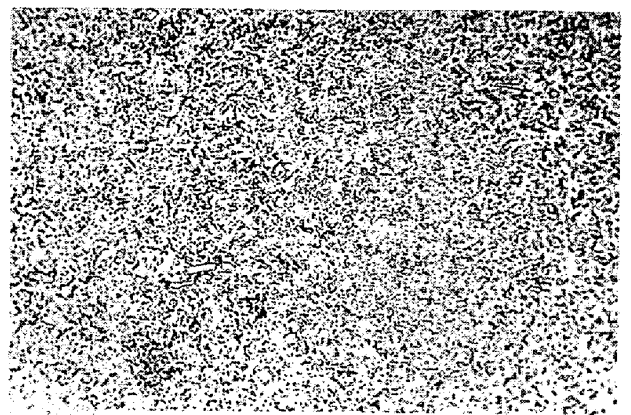


写真2 M50のマイクロ組織 ×400 (6/7)

炭化物の分布状況もその要因と考えられる。

高速度鋼の炭化物は, M_6C あるいは MC 型で, その粒の大きさは, 比較的小さいというものの, MHTのそれよりは粗く, B系やC系の介在物と同様な悪影響をころがり寿命におよぼすと考えられる。準高速度鋼のM

表 3 エンジンメーカーのころがり寿命係数*例

メーカー	真空溶解 52 100	真空溶解 M50	その他の材料
A	3.0	4.0	脱ガス52100材 3.0 真空溶解M315
B	4.7	10.7	2.0
C	3.0(ローラー) 5.0(ボール)	10.0(ボール)	—
D	使用せず	5.0	真空溶解M50 20.0 製造法の変更
E	3.0	5.0	—

* ころがり寿命係数

その材料のころがり寿命値を大気溶解した SAE 52 100 鋼のそれで除した値をいう。

例えば 3.0 のころがり寿命係数とは、その材料は大気溶解 52 100 鋼の 3 倍のころがり寿命値をもつことをいう。

50 では炭化物は M2 などより少ないし、粒の大きさも比較的小さく、熱処理によつて改善できる幅が広く、ころがり寿命には有利である。写真 1 に M2 の、写真 2 に M50 の焼なまし状態でのマイクロ組織を示す。

エンジンメーカーによつて多少異なるが、SAE 52 100 鋼 (SUJ 2 相当) に比較して M50 のころがり寿命係数はすべて大きくとられており、表 3¹⁹⁾ に示すとおりである。M50 と M1 あるいは M2 との厳密な使用区分はないが、M50 は 316°C まで、M2, M1 は 427°C までと考えられている²⁰⁾。

Mo 系あるいは W 系高速度鋼のほか、これらにコバルトを添加し、さらに高温性能を改善したものに、WB 49, SKH 4A などがある。

これらの鋼は、もちろん、真空溶解法による非金属介在物の極めて少ないものが要求されるが、そのほかに鍛造、熱処理、研削などの諸条件の影響を受けることが大きく、これらが不適切な場合には、高温ではともかく、常温では、SUJ 2 より悪いころがり寿命を示すことがある。

耐衝撃性が必要な場合は、浸炭用高速度鋼が用いられる。M315 がその代表的なものであるが、高温硬さを上げるために添加してある Mo や Cr が炭化物生成元素であるため、浸炭時に初析炭化物を生じやすく、一般の浸炭用鋼よりも浸炭処理に技術を要する。また、浸炭特性上から Cr を高速度鋼ほど多く添加してないので、高

温硬さは M50 などより低く、あまり実用化されていない。

高速度鋼は、その合金元素含有量が多く、比較的大きな炭化物も多いため、被削性、被研削性はよくない。特にころがり軸受の場合、形状が複雑でしかも内面研削工程があるため、被研削性の優劣が加工時間に大きく影響し、製品の品質、コストに占める割合は大きい。適量の硫黄、セレンニウムの添加により、被削性、被研削性の改善がはかられている²¹⁾。

高速度鋼の S 曲線で、準安定オーステナイト域が長時間側に拡大しているのを利用して、オーステナイト化したのち、この準安定領域で 80% の強塑性加工を行なつて焼入れするいわゆる加工熱処理法がある。この処理によつて、歪誘起析出強化を生ずるが、M50 の玉軸受に適用した場合、軸受寿命が普通焼入れの軸受の 9 倍になる²²⁾といわれている。オースフオーミングは焼入したあとの加工が困難なため、コストが一般軸受の 20~30 倍にもなり、実用化はされていないが、材料の強靱化という点では非常に有効と考えられる²³⁾。

高速度鋼よりさらに高温硬さを要求する場合は、ハステロイ、ステライトなどが使用されるが、表 4 にそれらの化学成分を示す。

これらの合金は、600°C 以上では、図 9²⁴⁾ のように M2, M50 より高温硬さが高い。実際に内径 20 mm のアンギュラ玉軸受をステライトで製作し、5 000 rpm で試験した例では、816°C まで使用することができた²⁵⁾。しかし、ハステロイは高温での硬さの低下は少ないが、常温ではもともと硬さが低いので、むしろ、その優れた耐食性を利用する機会が多い。ステライトは高温硬さが高いので、有望であるが、鑄造品が多く、塑性加工製品は加工性が悪いため、軸受内外輪のような精密リング形状のものでは、歩留りが悪くコストも高い。チタンカーバイド系の超硬合金も使用されるが、同様の欠点があり、特に被研削性耐衝撃性が悪く実用化が遅れている。

その他の材料では、サーメット、セラミックなども試用されることがあるが、耐熱性は良好でも機械的強度が劣り、硬さが高い割には耐久性が低いのが欠点である。

4. 耐食軸受鋼

普通の環境あるいは特殊な環境で使用されるころがり

表 4 耐熱軸受用非鉄合金の化学成分 (%)

名 称	C	Ni	Cr	Mo	W	Co	Fe	その他
ハステロイ C	—	57	16.5	17	4.5	—	5	Ti 3
René 41	0.09	56	19	10	—	11	—	Al 1
ステライト 6	1.0	—	28	—	4	64	<3	
ステライト 1	2.5	—	30	—	12	62	<3	
Haynes 25	0.1	10	20	—	15	51	1.5	Si 0.5 Mn 1.5

表5 各種耐食軸受鋼の化学成分 (%)

鋼種	相当鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	Co
SUS 420J2	Steel 20	0.33	<1.0	<1.0	<0.6	13	—	—	—
SUS 440C	Steel 21	1.08	<1.0	<1.0	<0.6	17	<0.75	—	—
14Cr-4Mo		1.08	<1.0	<1.0	—	14.5	4	<0.15	—
B G42		1.15	0.3	0.5	—	14	4	1.1	—
B G43		1.2	0.3	0.5	—	14	4	2	—
AL 129		0.7	1.0	0.3	—	12	5.3	—	—
WD65		1.1	<0.15	<0.15	—	15	4	2.7	5.3

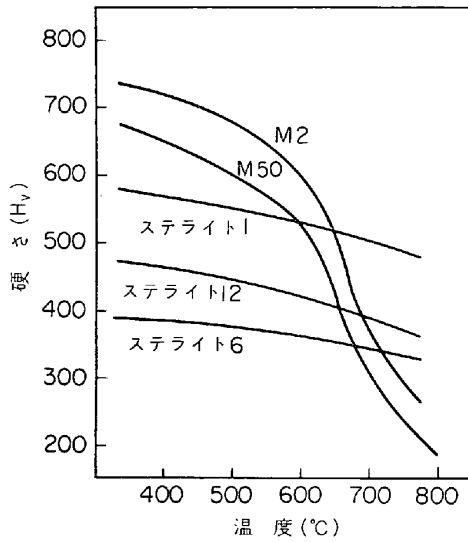


図9 ステライトの高温硬さ

軸受の中で、特に耐食性が要求される場合には、ステンレス系軸受鋼が使用される。表5にその代表的なものの化学成分を示す。Steel 20, 21は1973年、耐熱軸受鋼と一緒に、ISO-TC17で、耐食軸受鋼の標準鋼種として、国際的に規定されたものである。Steel 20はSUS 420J2とほぼ同じであるが、Cを0.42~0.50%、Crを12.5~14.5%といずれも少し高めている。Steel 21はSUS 440Cとほとんど同じである。

耐食軸受鋼の開発は最初、13Cr系から出発し、続いて18Cr系に進み、さらに14Cr-4Mo系に至っている。

図10にSUS 420J2の焼入硬さを示すが、軸受用としては、硬さが不十分である。さらに高C高Crの440Cは(Cr, Fe)₂₃C₆の複炭化物をつくるので、炭化物の分解が遅く、焼入温度をSUJ2や前述のMHTなどより高くしなければならない。図11に440Cの焼入温度と硬さの関係を示す。

440Cはもともと耐食性の目的で、ころがり軸受に使用されるものであるが、SUJ2などより焼もどし抵抗が大きく、高温硬さ、寸法安定性もかなりよいので、耐熱軸受鋼としても用いられる。しかし、前述のごとく、高C高Crのため、写真3のような(Cr, Fe)₂₃C₆の高硬度の巨大炭化物を生じ、これが融点まで安定しているの

で、仕上面粗さに悪影響をおよぼし、ころがり寿命にも悪い結果を与える。また、マトリックスに溶解するCr量も多いため、残留オーステナイトが多く、硬さの不足する場合がしばしばある。このオーステナイトは、550°Cまでの焼もどしに対し安定であるから、寸法安定性には影響しないが、高速度鋼のような二次硬化性はなく、高温硬さも高速度鋼ほど高くはない。

440CのMoの添加量を多くしてゆくと、海水などに対する耐食性が改善されるが、それを利用してCrの一部をMoで置き換えた14Cr-4Mo鋼は、本来の耐食性のみならず、高温性能もより優れている。したがつ

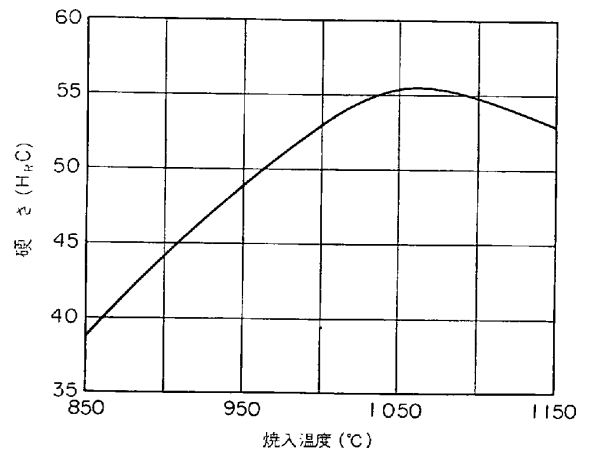


図10 SUS420J2の焼入硬さ

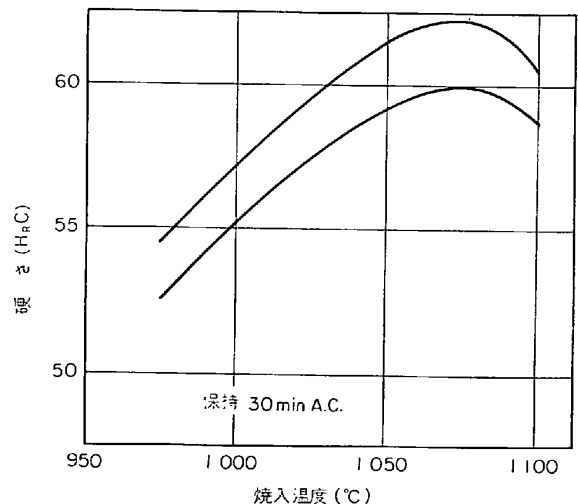


図11 440Cの焼入硬さ

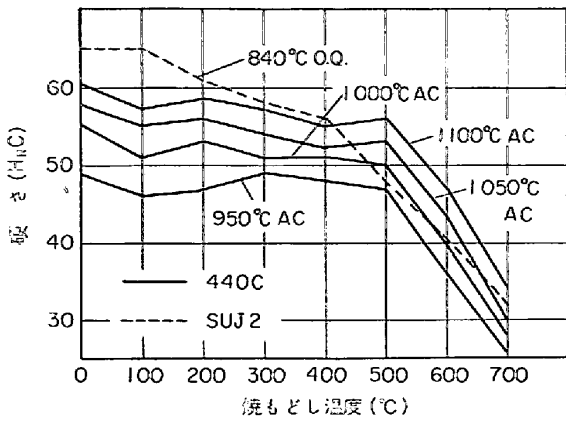


図12 440C の焼もどし硬さ

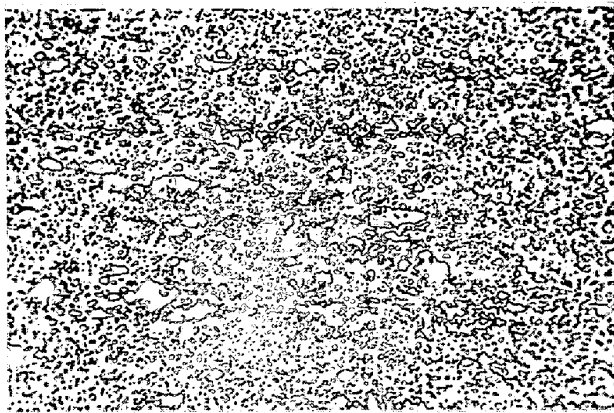


写真3 440C のマイクロ組織 ×400 (6/7)

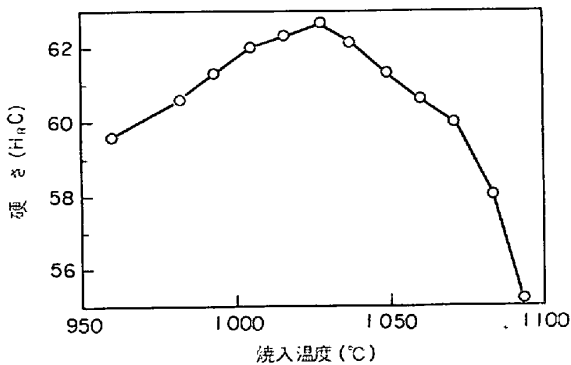


図13 14Cr-4Mo の焼入硬さ

で、その使用温度も 300°~350°C まで可能とされている。

14Cr-4Mo 鋼の基本成分以外に、V, W, Co などを若干添加した改良型鋼種として、BG42, 43, AL/29, WD65 などがある。BG42, 43 はVを多くして耐摩耗性、高温硬さ、二次硬化の改善をはかったものである。AL129 はCを下げ、Mo を上げて靱性と加工性を向上させたものであり、WD65は高温硬さと耐食性を改善したものであるが、加工性は若干悪くなる。これら鋼種はMoの含有量から考えて、二次硬化性をもっており、前述の $M_{23}C_6$ 型の巨大炭化物も、440C に比較すれば少

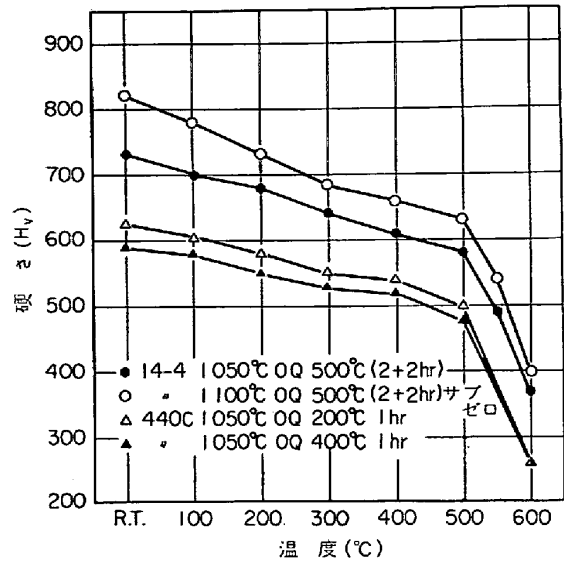


図14 14Cr-4Mo および 440C の高温硬さ

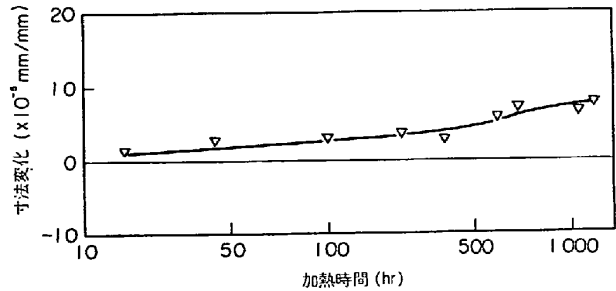


図15 14Cr-4Mo の寸法安定性 (427°C)

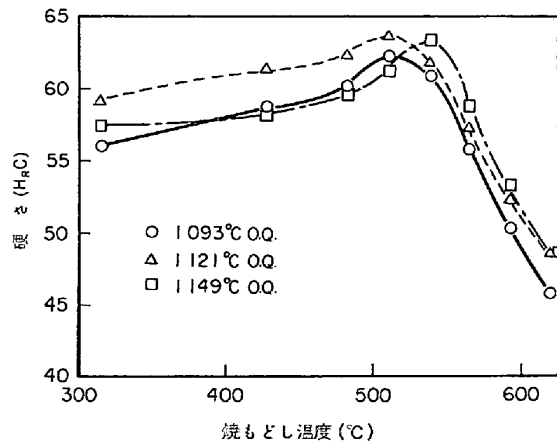


図16 14Cr-4Mo の焼もどし硬さ

なく、ジェットエンジン、ガスタービン用高速軸受にも使用される。

図13²⁶⁾に14Cr-4Mo 鋼の焼入温度と硬さの関係を図14²⁷⁾には高温硬さを440Cと比較して示す。Moによる高温硬さの改善は顕著である。図15²⁸⁾は14Cr-4Mo 鋼の427°Cにおける寸法安定性を、図16²⁹⁾はその焼入焼もどし曲線を示す。また、図17³⁰⁾図18³¹⁾には、それぞれBG42, 43の焼入れ焼もどし曲線を示す。Vの増量

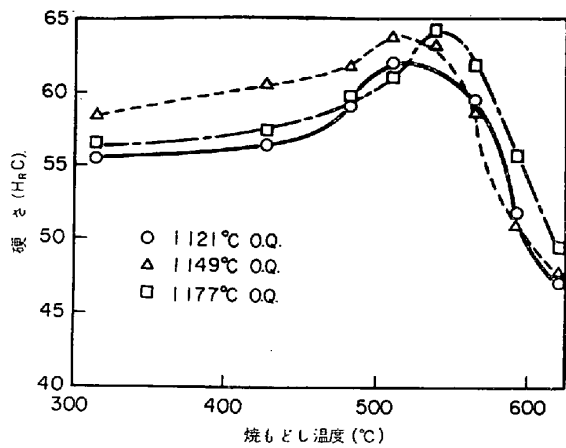


図17 BG42 の焼もどし硬さ

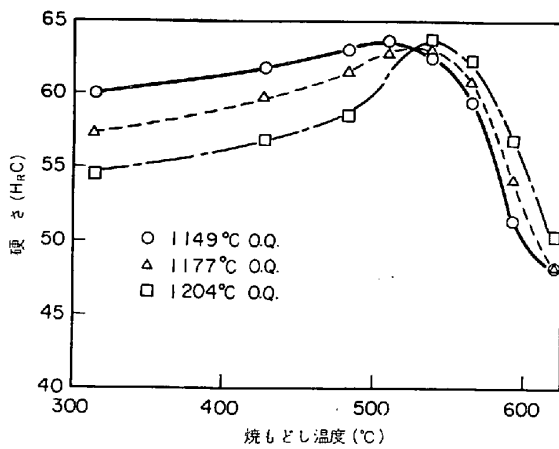


図18 BG43 の焼もどし硬さ

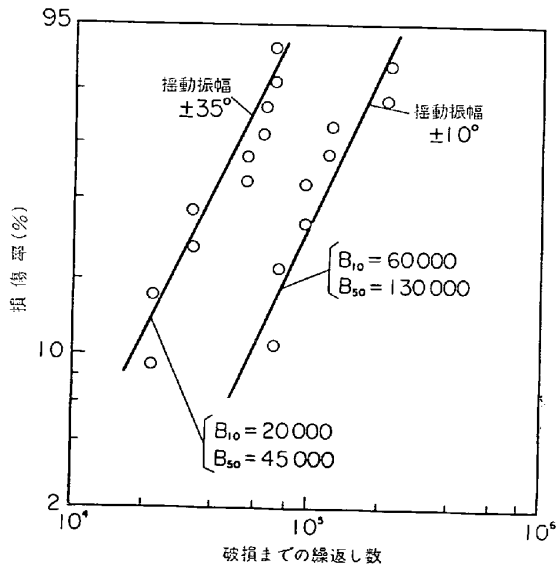


図19 14Cr-4Mo 鋼製コロ軸受の高温ころがり
疲れ寿命 (316°C)

により焼入温度は若干高くなるが、14Cr-4Mo 鋼に比し焼もどし抵抗の改善がみられる。

表 6³²⁾は WD65 の高温硬さをベースの 14Cr-4Mo 鋼や、440C、M50 のそれらと比較したものである。

表 6 WD65 の高温硬さと他の高合金軸受鋼のそれとの比較

鋼 種	常温 硬さ HRC	316°C での硬さ HRC		427°C での硬さ HRC	
		1hr	1000hr	1hr	1000hr
440C	61	55	55	53	50
14Cr-4Mo	63	57	57	54	54
WD65	65	59	59	56	56
M50	64	58	58	55	55

図 19³³⁾には 316°C、1360 kg の荷重下で、14Cr-4Mo 鋼製のころ軸受の寿命試験を行なった結果を示す。潤滑油は、シリコン樹脂系のグリースを用いている。

表 7³⁴⁾は 14Cr-4Mo 鋼と 440C の各種酸に対する耐食性を比較したもので、40%沸騰硝酸試験での耐食性は 14Cr-4Mo 鋼の方が悪いが、これは Mo の影響と考えられる。

表 8³²⁾は各種耐食軸受鋼の耐食試験結果の比較である。14Cr-4Mo 鋼およびその改良型鋼種の耐食性は、他のマルテンサイト系ステンレス鋼と同様、熱処理によって大きく左右される。通常、焼入れのまま、あるいは焼入れ後、低温焼もどしの状態が、耐食性は最も優れている。表 8 においても、焼もどし温度の低い 440C の方が焼もどし温度の高い 14Cr-4Mo 鋼より耐食性が平均的に優れている。また、別の試験³⁵⁾によれば、93°C、10% の食塩水の滴下中では、14Cr-4Mo 鋼は 440°C とほぼ同程度の耐食性を示すが、482°C で焼もどした場合は、204°C で焼もどした 440C よりも耐食性は劣る。酸素富化した熱湯中では、焼なまし、引抜状態で比較した場合、明らかに 14Cr-4Mo 鋼の方が、440C より耐食性が優れている。

一般的効果からいって、還元性媒体中では、低温焼もどしの 14Cr-4Mo 鋼の方が 440°C より有利であると考えられる。427°C までの大気中 5hr の酸化試験では、440C も 14Cr-4Mo 鋼も、淡紫色のよく似た皮膜が認められるが、それ以上の温度になると後者の耐酸化性の方がわずかに優れている。

マルテンサイトステンレス鋼では、化学成分を調整しても、マルテンサイト組織である限り、耐食性は極端には向上しないので、海水や化学薬品などに対して、より耐食性を必要とする場合には、SUS 304、316 などのオーステナイト系ステンレス鋼を使用する。ただし、硬さが低いために許容荷重、耐久性などが低下することを見込まなければならない。オーステナイト系ステンレス鋼でも耐食性が不足するときは、前述の表 4 の Ni 合金や Co 合金を使用するが、高温の場合が多い。

原子力発電の開発普及にとともに、高速増殖炉の開発も進められているが、これに使用されるころがり軸受は溶融ナトリウムの中で運転される。この高温腐食性雰囲気中で、無潤滑運転される軸受材料については、焼つき

表7 14Cr-4Mo および 440C の耐食性 (g/m²/hr)

鋼種	熱処理	硬さ(HRC)	2%沸騰硫酸	5%沸騰硫酸	40%沸騰硝酸
14Cr-4Mo	1150°C 油冷	42	543.9	973.6	12.53
	1150°C 油冷, 550°C 2hr もどし, サブゼロ 550°C 2hr	53	593.5	1001.8	21.07
440C	1050°C 油冷	61	575.6	1003.9	1.15
	1050°C 油冷 150°C 1hr もどし	60	502.0	968.3	1.04

表8 各種耐食油受鋼の耐食試験結果

鋼種	熱処理	かたさ(HRC)	3サイクル水蒸気(A)	CuCl ₂ (B)	CuSO ₄ (C)	塩水噴霧(D)
440C	1038°C 30 min 油冷 204°C 2hr 2回もどし	59	腐食せず	60+	表面清浄	表面腐食
14Cr-4Mo	1066°C 45 min 油冷 482°C 2hr 2回もどし	61	孔食大	30+	激しい Cu の析出	孔食
WD65	1204°C 10 min 油冷 538°C 1hr, 1hr, 2hr 3回もどし	65	わずか孔食	ごくわずか	かるい Cu の析出	表面腐食
WB49	1218°C 10 min 油冷 552°C 2hr 2回もどし	69	孔食大	100+	極度の Cu の析出	激しい孔食

- (A) 各サイクルは水蒸気 8hr 露出後 16hr 乾燥
 (B) CuCl₂ 0.5g+H₂O 99.5ml, 試験前空気飽和, 1滴当たりの pit 数を示す
 (C) H₂O 90ml に濃 H₂SO₄ 10ml, CuSO₄·5H₂O 4g 添加, 30min 浸漬
 (D) 2hr 暴露

摩耗の見地から多くの試験が行われた³⁶⁾。その結果、耐食性については、オーステナイト系ステンレス鋼が適しているが、軸受材料としては、ステライトが最適と考えられている。

また、宇宙開発などのロケットに使用される液体燃料用ターボポンプ軸受は液体酸素や液体水素の中で運転される。LPG に対しても、温度の差はあるが同じことで、実際には冷却により水分が凝縮し、錆が発生するので、440C などの耐食軸受鋼が用いられる。

軌道輪や軌動体にステンレス鋼を使用する場合には、保持器にも当然耐食性が必要となる。保持器では、硬さが高い必要はないので、SUS 304 を用いることが多い。高温強度もあるため、耐熱ころがり軸受の保持器にも使用される。

5. む す び

以上、耐熱あるいは耐食ころがり軸受に使用される軸受鋼を紹介し、その諸特性について述べたが、ころがり軸受材料、特に耐熱、耐食軸受材料については、設計の際、定性的な比較はできても、理論的な構成ができず、その開発は Try and Error によるほかないようである。これには多くの労力、時間、費用が必要となる。

第2次大戦を境として、航空機の発展はめざましいものがあり、欧米ではその研究開発が多く行なわれているが、スタートで出遅れたわが国では、系統的な研究はあまり行なわれていないのが現状である。

一方、ジェット機のみならず、宇宙ロケットや原子力

発電、さらに今後現れるであろう新産業などに使用される軸受材料については、ますますその品質、コストに対する要求はきびしくなつてゆくものと考えられる。設計段階における特殊軸受材料の理論構成の確立のためにも軸受メーカー、製鋼メーカーの一体となつた系統的共同開発研究が望まれるゆえんである。

文 献

- 1) G. K. BHAT and A. E. NEHRENBURG: WADC Tech. Rep., (1957), p. 57~343
- 2) F. T. BARWELL and D. SCOTT: Engg., 182 (1956), p. 9~12
- 3) E. G. JACKSON: Trans. ASLE, 1 (1959) 2, p. 121
- 4) W. J. ANDERSON and T. L. CARTER: Trans. ASLE, 2 (1959) 1, p. 108
- 5) G. SACHS, R. SELL and V. WEISS: NASA TN. D-239(1960)
- 6) E. V. ZARETSKY and W. J. ANDERSON: Trans. ASME, Ser. D, 83(1961) 4, p. 603
- 7) 日本ベアリング工業会耐熱軸受研究委員会: 鉄と鋼, 51(1965) 9, p. 1646
- 8) ISO TC4 Resolution, (1959) 202, (1961) 257
- 9) 青木, 古川: 潤滑, 3(1958) 4, p. 191
- 10) 服部: 日本金属学会会報, 4(1965) 9, p. 580
- 11) 喜熨斗, 結城, 杉山, 梶川, 坪田: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, p. 278
- 12) 日下, 鶴見, 大沢: 日本金属学会誌, 26(1962) 10, p. 647
- 13) P. S. GIVEN: SAE Preprint, 670060(1967)

- 14) 服部: 日本金属学会会報, 4(1965)9, p. 582
- 15) 五百田: ペアリングエンジニヤ, 21(1972)1, p. 59
- 16) 日本ベアリング工業会耐熱軸受研究委員会: 鉄と鋼, 51(1965)9, p. 1650
- 17) 服部: 日本金属学会会報, 4(1965)9, p. 582
- 18) 日本ベアリング工業会耐熱軸受研究委員会: 鉄と鋼, 51(1965)9, p. 1662
- 19) 五百田: ペアリングエンジニヤ, 21(1972)1, p. 60
- 20) T. W. MORRISON, H. D. WALP, and P. R. REMORENKO: Trans. ASLE, 21(1959), p. 129
- 21) 近藤: 金属材料, 4(1964)12, p. 72
- 22) E. N. BAMBERGER: Final Engg. Rep. Bureau of Naval Weapons No. W-65-0070-f (1966)
- 23) 喜熨斗: 機械の研究, 23(1971)5, p. 775
- 24) 喜熨斗: 機械の研究, 23(1971)5, p. 774
- 25) H. E. SLINNEY and R. L. JOHNSON: NASA Tech. Brief, 69-10025(1969)
- 26) Climax Molybdenum Co.: 14Cr-4Mo the stainless bearing and tool Steel (1962), p. 21
- 27) 日下, 村井: ステンレス, (1965)3, p. 23
- 28) Climax Molybdenum Co.: 14Cr-4Mo the stainless bearing and tool steel (1962), p. 18
- 29) 30) 31) Climax Molybdenum Co.: 14Cr-4Mo the stainless bearing and tool steel (1962), p. 25
- 32) A. E. NEHRENBURG, G. STEVEN and T. V. PHILIP: ASME, Spring Lubrication Meeting, May (1961)
- 33) P. C. HANLON: SAE Preprint 176B(1960)
- 34) 日下, 村井: ステンレス (1965)3, p. 25
- 35) Climax Molybdenum Co.: 14Cr-4Mo the stainless bearing and tool steel (1962), p. 16~17
- 36) R. B. JERMAN, R. C. WILLIAMS and D. O. LEESER: Trans. ASME Ser. D, 81(1959)2, p. 213