

グリース潤滑による玉軸受の摩擦トルク

Friction Torque of Grease-packed Ball Bearing

茂 庭 喜 弘* 友 部 友 綱*
Yoshihiro Moniwa Tomotsuna Tomobe

要 旨

各種組成のグリースを用い単列深みぞ形ラジアル玉軸受 #6203, 1,500 rpm, 20~30℃ における摩擦トルクを検討した。摩擦トルクはグリースの組成により著しく相違する。石けん基系グリースについて、石けん基の種類、ちょう度、基油粘度と摩擦トルクとの関係を検討した結果、前2者と摩擦トルクとの関係は不定であった。しかし基油粘度と摩擦トルクとは回帰直線により比較することができ、かなり密接な関係がある。またグリース潤滑における定常摩擦トルクは、そのグリースから抽出した油のみによる場合と近似する。

1. 緒 言

わが国および欧米のころがり軸受潤滑に関する研究は膨大なものがあるにもかかわらず、グリース潤滑の場合については、単に油潤滑との比較にとどまるか、あるいは特定グリースについて荷重、速度などの機械的運動的要素をパラメータとしたものが大部分である。供試グリースの組成、物性あるいは銘柄などが不明の場合も多く、グリースの物性に着目したものは意外に少ない。

潤滑用グリースは増ちょう剤と油とを主構成成分としており、これらの組合せいかんによりグリースとしての特性を異にする。したがってころがり軸受の潤滑にグリースを使用する場合は、機械的諸条件以外にグリースの組成、あるいは物理化学的特性と軸受運転性能との関係を明かにしておく必要がある。従来この点が不明確であり、したがってグリースに規定されている種々の物理化学的試験の意義もはっきりしていない点がある。この問題に関連し筆者らはさきに物理化学的試験結果ところがり軸受運転寿命、ならびに低温起動性との関係について報告した⁽¹⁾⁽²⁾。これらの報告でグリースの蒸発性、離油度、酸化安定度などは軸受運転寿命に大きな影響をもつが、せん断安定性の良否はあまり関係がないことを述べた。また低温起動性には基油の粘度特性が顕著に影響するが、グリースの低温性はさらに動的運転特性を追究しなければ判定困難と考えられた。さらにせん断安定性試験はグリースが軸受内において受ける温度条件を無視した条件で行なう現行の方法ではあまり意味がないと考えられた⁽³⁾。このように究明を要する問題が多く、その後も検討を続けているが、本報には玉軸受の摩擦トルクとグリースの組成について行なった実験結果から得た若干の知見を述べる。

2. 実験の方法

2.1 実験装置

図1は実験装置を示す。本報では摩擦振子法によったので摩擦トルク M は変位角 θ と次の関係にある (図1参照)。

$$M = W \cdot \sin \theta \cdot l \quad \dots\dots\dots (1)$$

θ を読みとる角度目盛は 0~60 度まで 1 度ごとに度盛したものをを用いた。測定精度は摩擦トルク値として $\pm 5 \text{ g}\cdot\text{cm}$ である。

試験軸受は NSK 製、#6203 玉軸受、JIS 並級である。軸受内輪内径 16,996~16,994 mm のものを 6 個使用し、それぞれあらかじめ寸法精度を吟味してある試験軸、軸受箱と組み合わせて実験した。ここに用いた試験軸径は 16,994~16,985 mm のものである。なお試験軸受にかかる荷重はラジアル方向に全荷重として $455 \pm 5 \text{ g}$ とした。

2.2 玉軸受の洗浄およびグリースの充てん

試験軸受は供試前に約 20~30℃ で cp 級 (chemical pure) ベン

* 日立製作所日立研究所

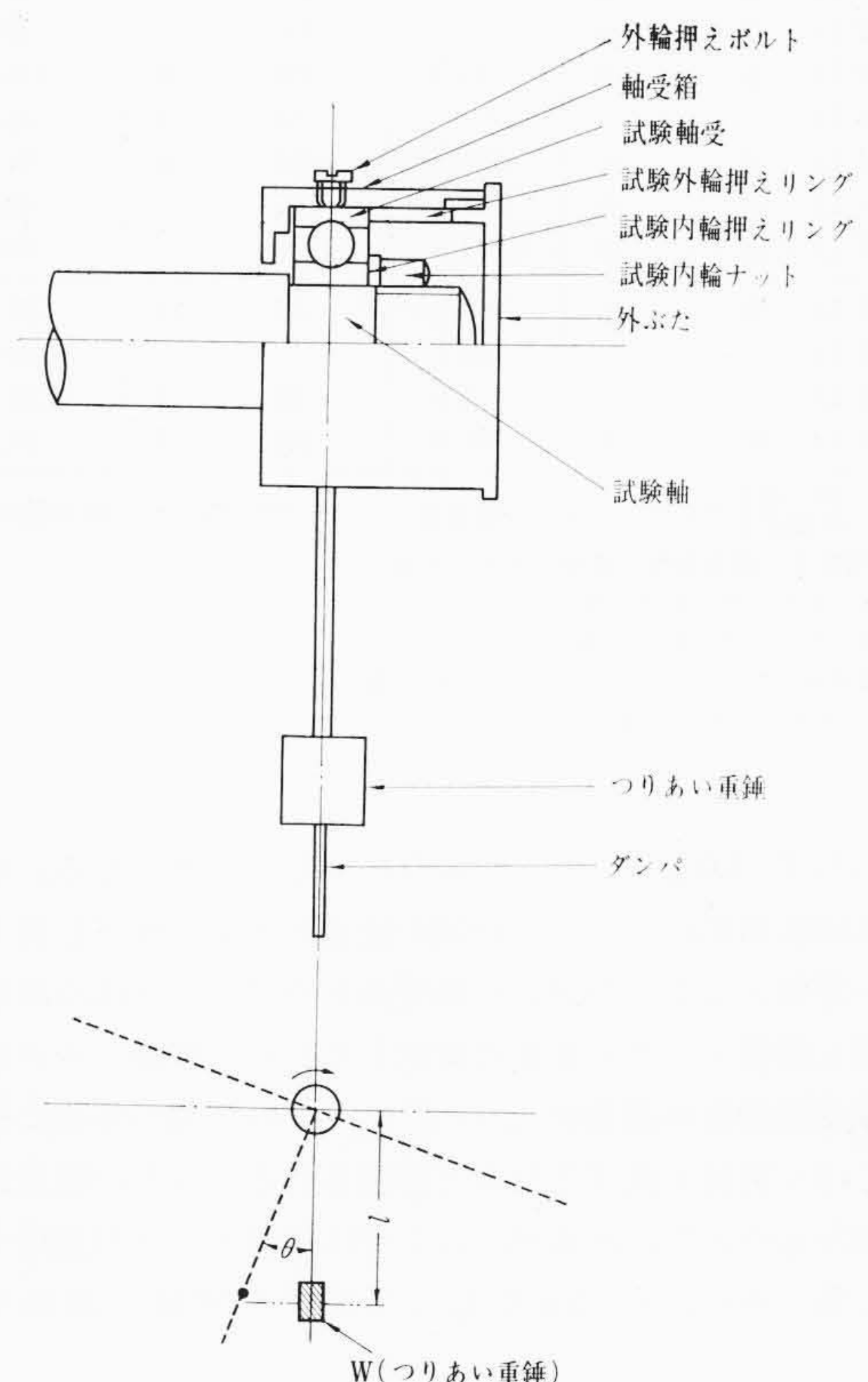


図1 実験装置略図

ゼン液中に浸し数回液を更新して洗浄し、さらに抽出洗浄器中に入れベンゼンで2~3時間処理した。これを70~80℃の空気浴中に1~2時間放置して乾燥した。グリースの軸受に対する充てん量は次項の吟味結果から 1.5 g とした。

3. 実験結果

3.1 グリース充てん量の決定

玉軸受に対する最適充てん量 Q (g) は、軸受内径 d (mm) と次の関係にあるとされている⁽⁴⁾。

$$Q = \frac{d^{2.5}}{900} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式によると #6203 軸受について $Q = 1.3 \text{ g}$ となる。これを確認するため 1.0~2.0 g の充てん量で摩擦トルク、軸受からのグリースはみ出し量を検討した。紙面の都合で詳細は省略するが、充てん量 1.0 g では、グリースのはみ出し量は一般に非常に少ない。充てん量の増加とともに、軸受からのグリースはみ出し量は直線的に増す傾向がある。摩擦トルクはグリース充てん量 1.0~1.5 g の間はほと

表1 汎用石けん基グリースの摩擦トルク

グリースの種類*	基油粘度 (cSt) at 37.8℃	摩 擦 ト ル ク**			
		起 動 値		定 常 値	
		M ₀ (g-cm)	S ₀	M ₁ (g-cm)	S ₁
内A 248 Ca-鋳油	—	61	6	22	0
内A 233 Ca-鋳油	—	94	8	45	8
内A 285 Na-鋳油	114.0	311	18	42	3
内A 298 Na-鋳油	40.8	—	—	36	3
内A 282 Na-鋳油	51.8	182	23	39	0
内B 275 Na-鋳油	58.8	167	39	41	4
内C 260 Na-鋳油	36.6	77	18	31	3
内C 317 Na-鋳油	37.7	110	31	50	—
外A 312 Na-鋳油	107.2	242	30	86	6
外A — Na-鋳油	—	274	—	58	3
外B 233 Na-鋳油	111.2	192	—	53	10
外C 308 Na-Ca-鋳油	108.0	220	15	65	6
内B 247 Li-鋳油	24.8	—	—	48	5
内B 290 Li-鋳油	—	189	—	95	5
内B 262 Li-鋳油	—	193	—	39	0
内A 282 Li-鋳油	83.3	231	39	116	30
内A 323 Li-ジ・エステル	—	66	16	24	10
内D 244 Li-鋳油	103.0	193	39	94	6
内D 277 Li-鋳油	32.5	77	—	42	3
内D 237 Li-鋳油	103.0	198	—	69	11
外B 267 Li-鋳油	100.0	116	24	62	13
外D 294 Li-ジ・エステル	14.1	77	—	22	1
外D 315 Li-ジ・エステル	13.0	83	7	28	6
外C 260 Li-鋳油	107.9	215	8	64	3

* 内…国産 } アルファベット…製造者
外…外国産 }
算用数字…標準条件で測定したちょう度
Ca…カルシウム石けん基
Na…ナトリウム石けん基
Na-Ca…ナトリウム-カルシウム石けん基
Li…リチウム石けん基

** S₀, S₁…標準偏差

んど変わらず、2.0 g 充てんした場合はかなり大きくなる。なお摩擦トルクは回転初期に大きく、時間の経過とともに低下し約2時間後にほぼ一定値となる。前記した軸受からのグリースはみ出し量と時間の関係も摩擦トルクの変化に対応しており、摩擦トルクの低下はおもに軸受転動体の運動によりグリースの一部が外部に押し出され、かくはん抵抗を減ずるためと理解される。以上の結果から(2)式は妥当なものと思われるが、ここでは摩擦トルクが急増する直前の充てん量とみられる1.5 gをもって以下の実験を進めることにした。

3.2 各種グリースの摩擦トルク

表1および表2に測定結果を示す。

3.2.1 汎用石けん基グリースの摩擦トルク

表1にみられるように起動値は定常値に比較し2〜3倍以上になる。またグリースの種類により相違するがその理由については別に検討する。測定結果の再現性は予期以上によい。しかし例外的に再現性不良のものもある。従来この種の測定結果は再現性が悪いといわれているが、これは特定グリースにのみみられる現象であり、グリースの組成に関連する軸受内での挙動に関するものと解すべきである。

3.2.2 特殊グリースの摩擦トルク

シリコーングリース、Non-Soap グリース、MoS₂ 入りグリースなどの特殊なものを表2にまとめた。一般に前記した汎用石けん基系よりも摩擦トルクが大きい。固体微粉末の介在、高粘度ベースの使用によるものがNon-Soap系であり起動値がかなり大きい。シリコーングリースは、ここではベース油としてポリメチルフェニルシリコーンを用いたものしか扱っていないが、起動値が大きい。定常値は割合低くなっている。このような特性を示すのはおそらくシリコーングリースの初期離油速度、潤滑特性などに

表2 特殊グリースの摩擦トルク

グリースの種類*	基油粘度 (cSt) at 37.8℃	摩 擦 ト ル ク			
		起 動 値		定 常 値	
		Mo (g-cm)	S ₀	M ₁ (g-cm)	S ₁
外E 313 Non-Soap-鋳油	—	>890	—	140	43
外F 305 Non-Soap-鋳油	—	>890	—	183	—
内E 300 Non-Soap-鋳油	—	>890	—	171	36
外G 273 Li-シリコーン	—	386	67	36	5
内F 220 Li-シリコーン	—	859	52	92	33
内F 257 Li-シリコーン	—	819	125	183	27
外H 273 Li-鋳油-MoS ₂	97.0	372	87	100	26
外H 348 Li-鋳油-MoS ₂	29~32	527	67	45	17
外H 330 Li-鋳油-MoS ₂	—	406	98	147	31
外H 313 Li-ポリグリコール-MoS ₂	—	564	111	70	25
外H 345 Li-ジ・エステル-MoS ₂	7.9	434	80	39	9
外H 314 -シリコーン-MoS ₂	—	516	117	71	20
外I -鋳油-MoS ₂	—	204	23	86	5

* Non-Soap…非石けん基
MoS₂…二硫化モリブデン

関係するものと思われる。既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾にフルオロシリコーン系、塩素化シリコーン系グリースの油膜負荷特性を報告したが、これらの玉軸受における摩擦トルクに興味をもたれる。しかし本報ではこれらを供試するに至らなかった。

MoS₂ 入りグリースは Non-Soap 系、シリコーングリースに比べ起動値が低く、定常値も比較的低いものがある。なお MoS₂ 配合量は数%から50〜70%に及ぶものもあるが、MoS₂ 配合量と摩擦トルクとの間には明瞭な関係はない。また基油にそれぞれジ・エステル、ポリアルキレングリコール、鋳油を用いたものがあるが、基油による差もはっきりしない。

また全般的に表2のグリースは測定結果の再現性が悪い。

Non-Soap 系や MoS₂ 入りグリースは、目下ころがり軸受用としての汎用性はないが、その特長としている性質から、今後の各種機器の進歩を考えると注目すべきものと思われる。製造者の側において汎用ころがり軸受に着目したいっそうの研究が望まれる。

4. 摩擦トルク関連因子について

グリースの組成、物性と摩擦トルクとの関係を明らかにするには、多くの研究が必要と思われるが、以下には石けん基、ちょう度、基油粘度に関して検討した結果を記す。なお前記した特殊グリースについては、それぞれの角度から検討を要し、石けん基-鋳油系グリースと同日には論じがたい。また特殊グリースの組成については不明の点が多いので他日を期することにし、以下には汎用石けん基系グリースの場合についてのみ検討する。

4.1 ちょう度または石けん基の影響

図2に示したとおり、ちょう度、石けん基の種類と摩擦トルクとの関係は不定である。この図にまとめられたグリースは種々の銘柄品であり製造者を異にしている。したがって別に同一製造者に対し、同一の粘度をもつ基油でちょう度の異なる Na または Li 石けん基グリースを提供してもらい検討した。この場合石けん基は両者とも短繊維状、ちょう度310〜320、260〜262のものであったが、摩擦トルク値の差は小さく、はっきりした結論は得られなかった。

4.2 基油粘度の影響

4.2.1 グリース潤滑におけるη-Mの関係

図3に基油粘度ηと摩擦トルクMの関係を示す。ばらつきがあるので相関係数を吟味した結果は

起動時のMとη.....相関係数 $\gamma_0=0.80$

定常時のMとη.....相関係数 $\gamma_1=0.65$

また回帰直線を求めると次のようになる。

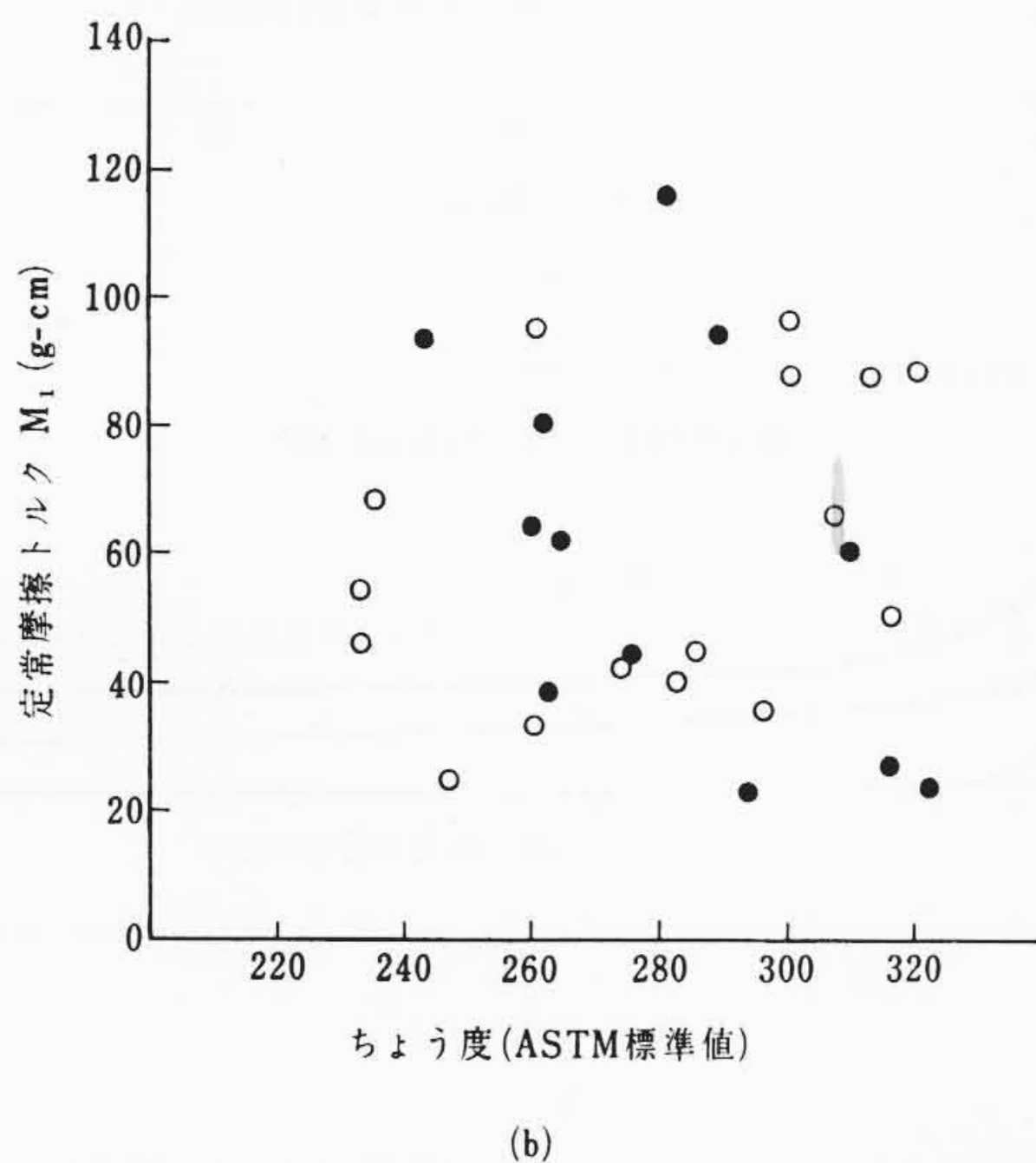
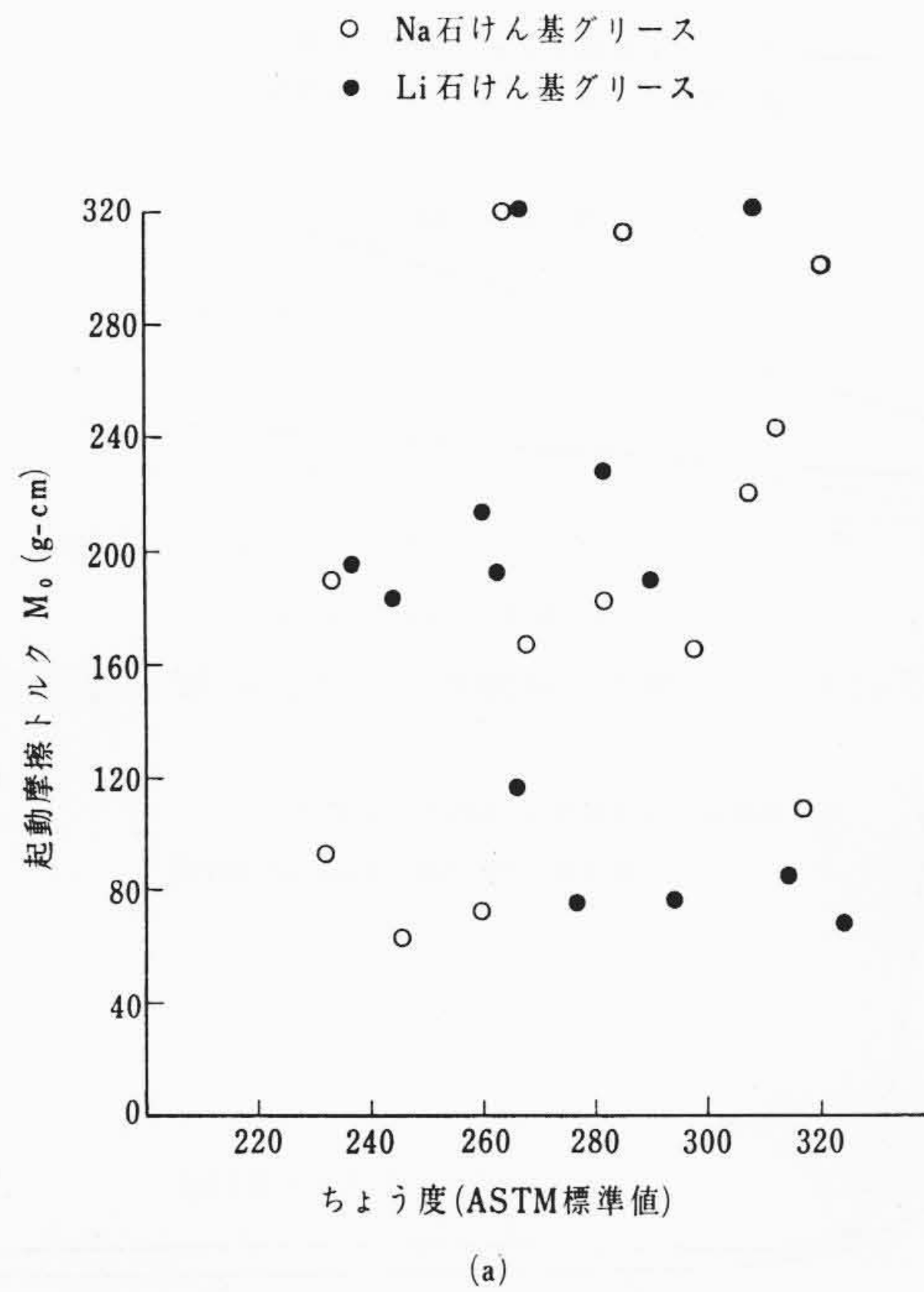


図2 ちょう度と摩擦トルク

$$\text{起動時} \dots \dots M_0 = 1.44\eta + 64 \dots \dots (3)$$

$$\text{ただし} \quad \frac{F_0}{F'_{15}(0.01)} = \frac{25.28}{8.68}$$

$$\text{定常時} \dots \dots M_1 = 0.43\eta + 24 \dots \dots (4)$$

$$\text{ただし} \quad \frac{F_0}{F'_{15}(0.01)} = \frac{10.38}{8.68}$$

4.2.2 油潤滑における η - M の関係

(1) 給油量と摩擦トルク

図4に示す各種潤滑油ならびにグリースから抽出分離した油について検討し、図5の結果を得た。いずれも定常時の摩擦トルクを示したもので、給油量の増加により摩擦トルクは増大する。

(2) η - M の関係

図6に示す結果から給油量 0.055~0.180 ml の範囲で各給油量ごとに η - M 関係はほぼ直線関係にある。平均的傾向をみるため給油量の差異を無視して統計的に処理すると

$$M'_1 = 0.90\eta + 4.0 \dots \dots (5)$$

となる。

4.2.3 グリース潤滑と油潤滑における η - M 関係の差異

前記した η - M 直線を比較すると図7のようになる。各直線の

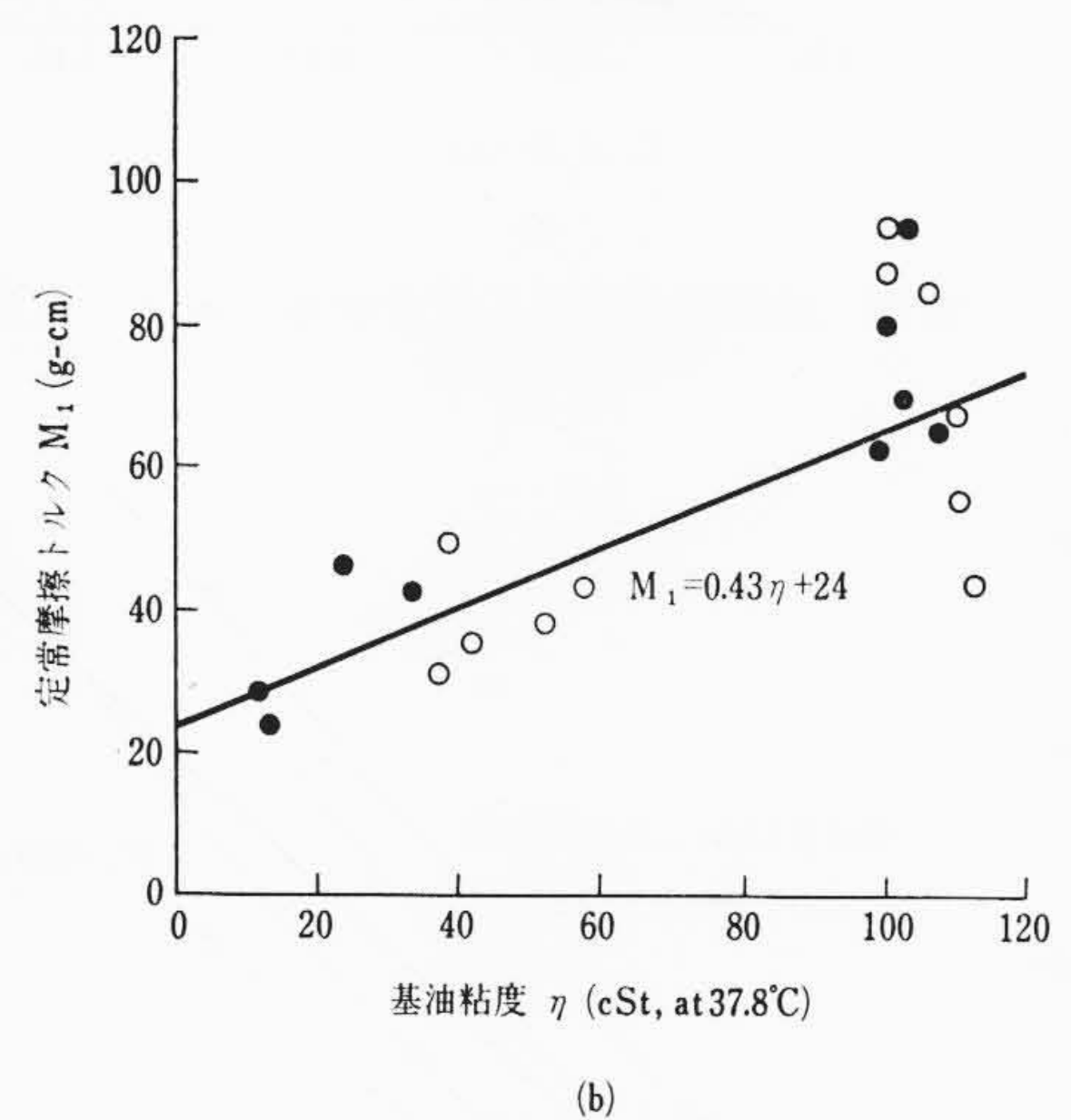
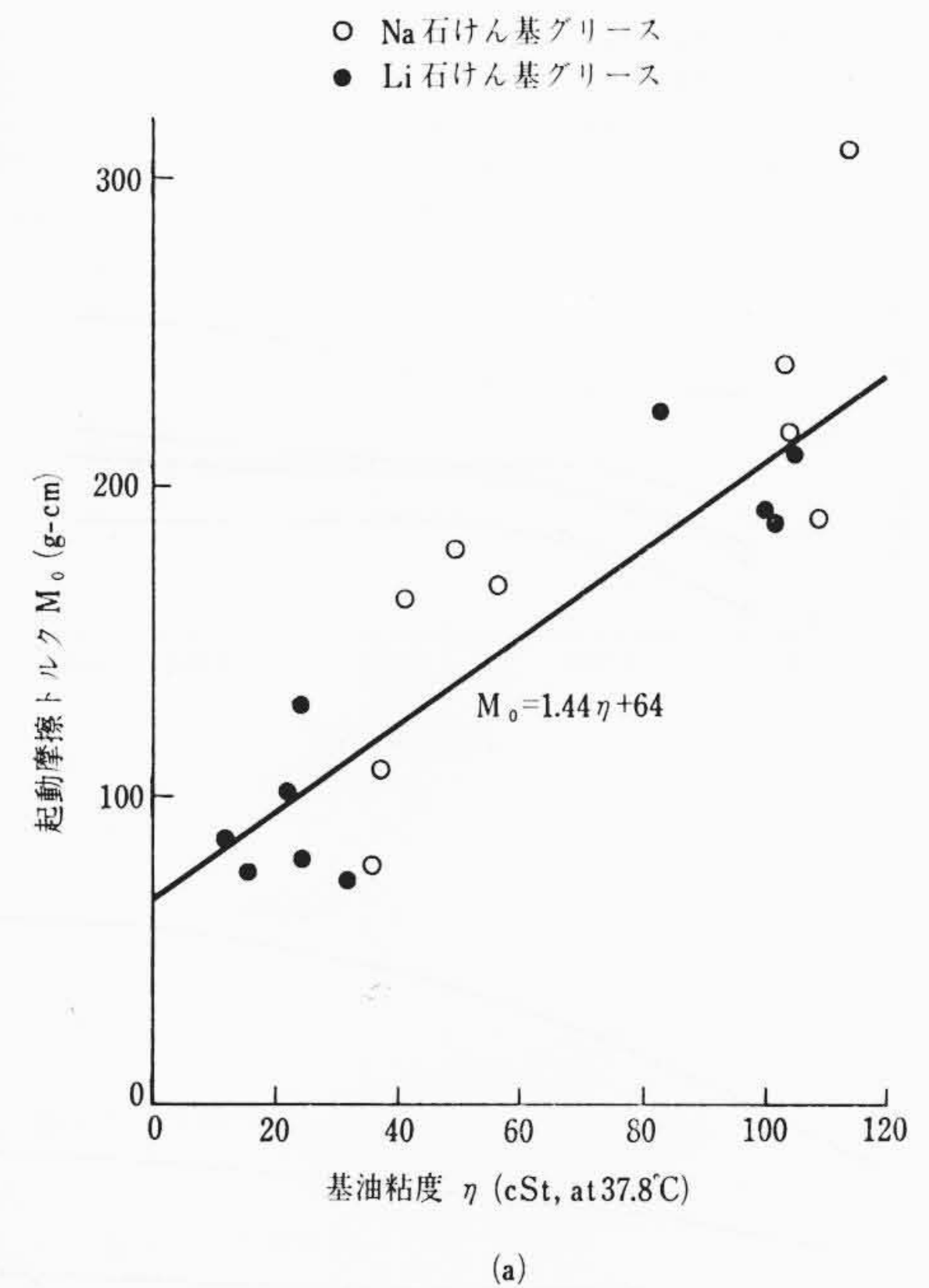
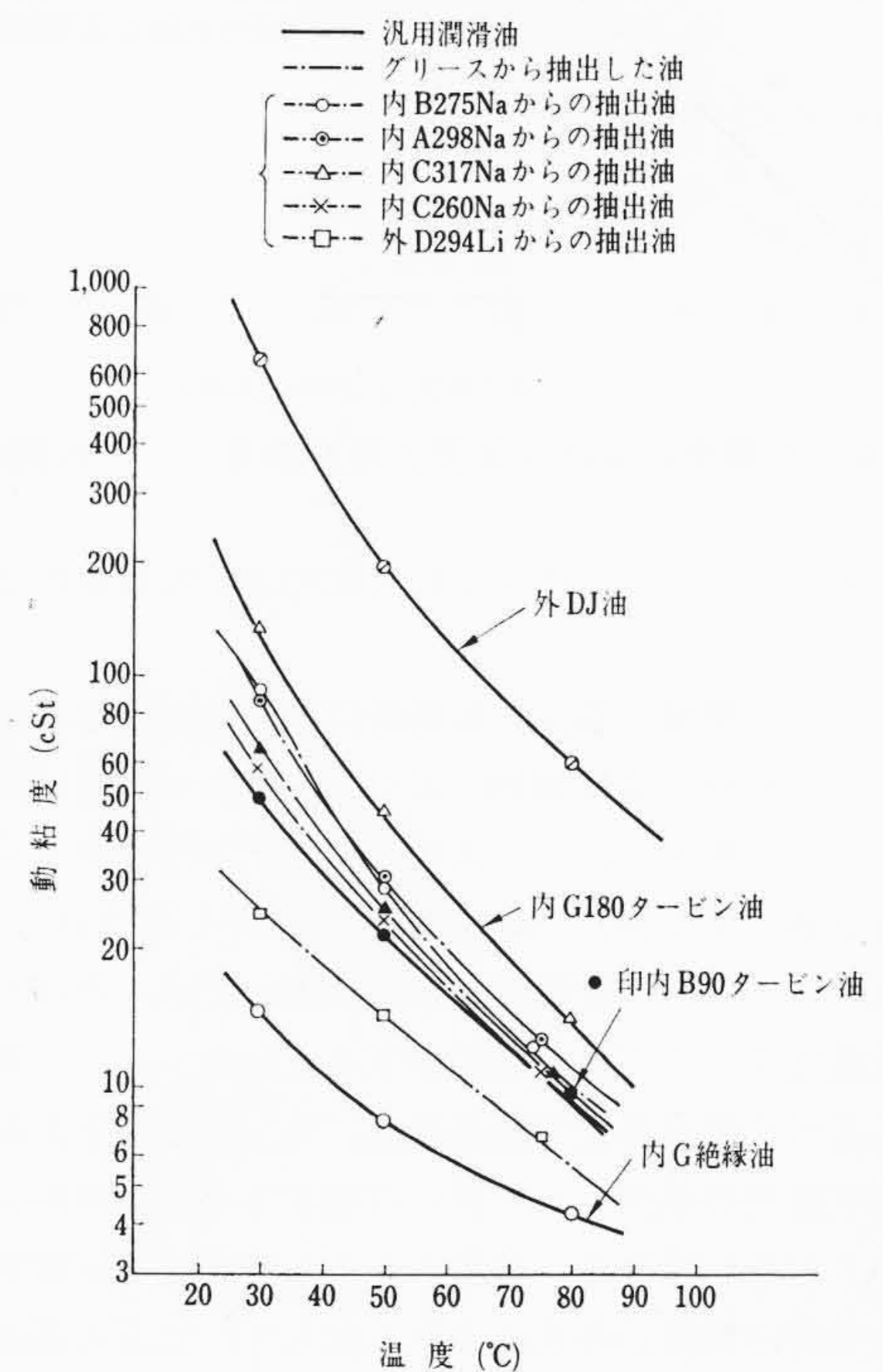
図3 グリースの基油粘度 η と摩擦トルクとの関係

図4 供試油の粘度

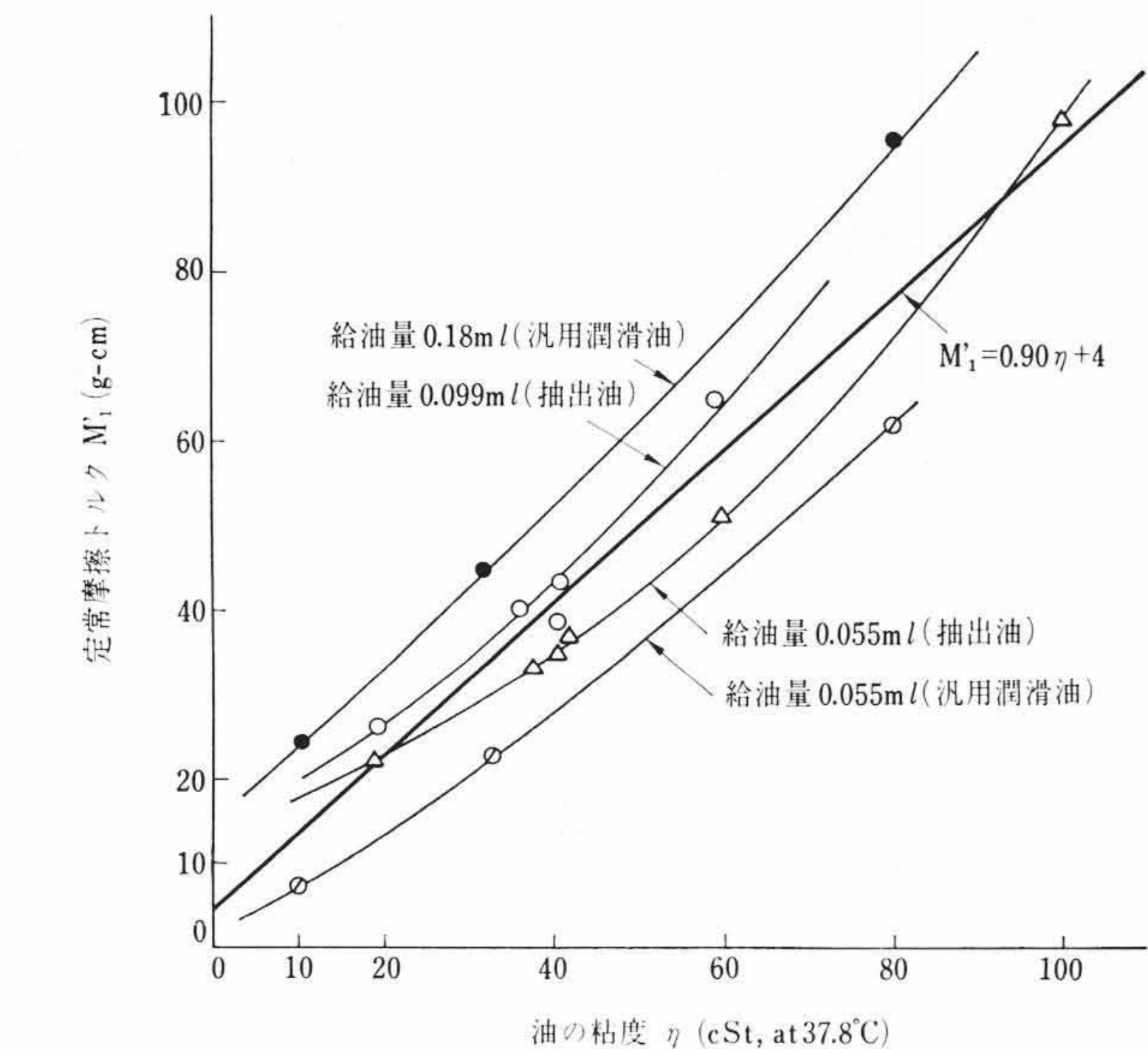
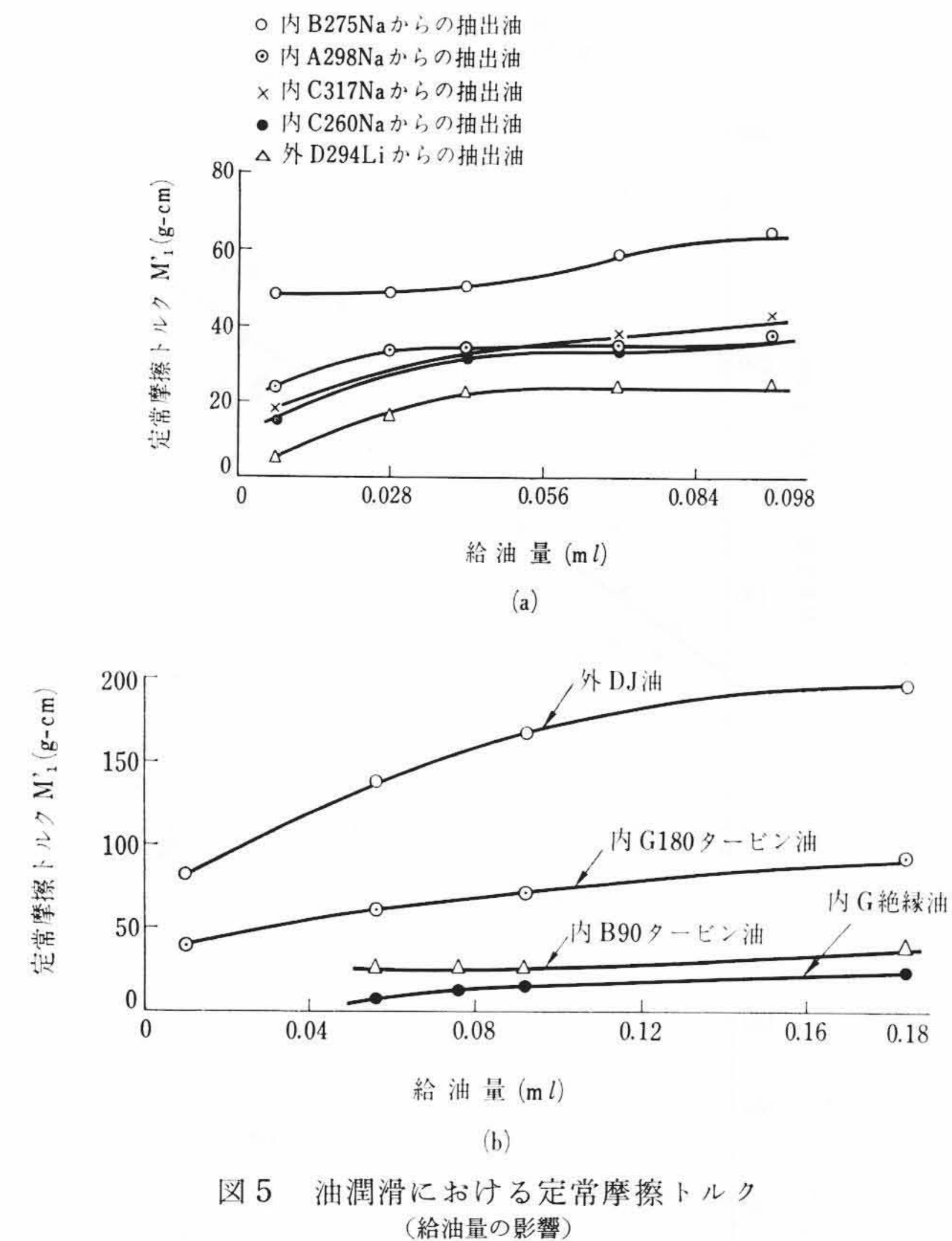


図 6 油潤滑における粘度と定常摩擦トルクの関係

角係数が異なっているのは主として次のような理由によるものであろう。

まずグリース潤滑の場合、起動時は摩擦熱の寄与を無視しうのに対し、定常時では摩擦熱によりグリースの物性に变化をきたしていることが考えられる。また軸受内におけるグリースは起動から定常状態に至る間、一部は軸受外部に押し出されることや、軸受転動部のグリースは極端なせん断効果をうけ、石けんミセルが著しく微細化する⁽⁷⁾⁽⁹⁾ことも関係するであろう。この場合おそらく摩擦に基づく温度効果で基油粘度、ちょう度低下が起こることと、定常状態での軸受レース面に存在するグリースがせん断作用を受けることが重なり、摩擦トルクを支配する定常状態下のグリースは見掛け粘度が非常に小さくなって、たぶん基油自体の粘度と近似的な状態におかれるものと思われる。このように考えれ

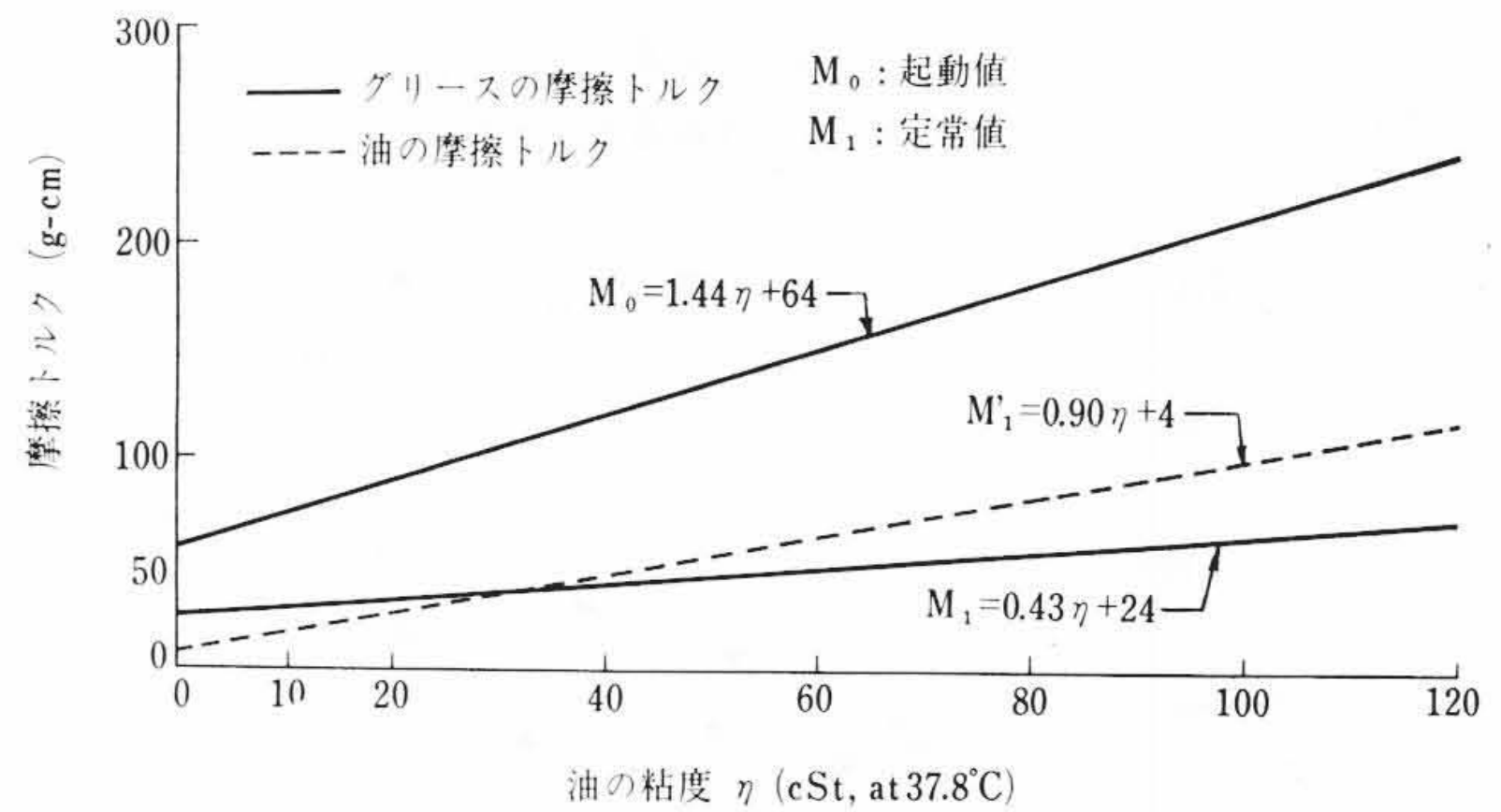


図 7 グリース潤滑と油潤滑における η - M 直線の差異

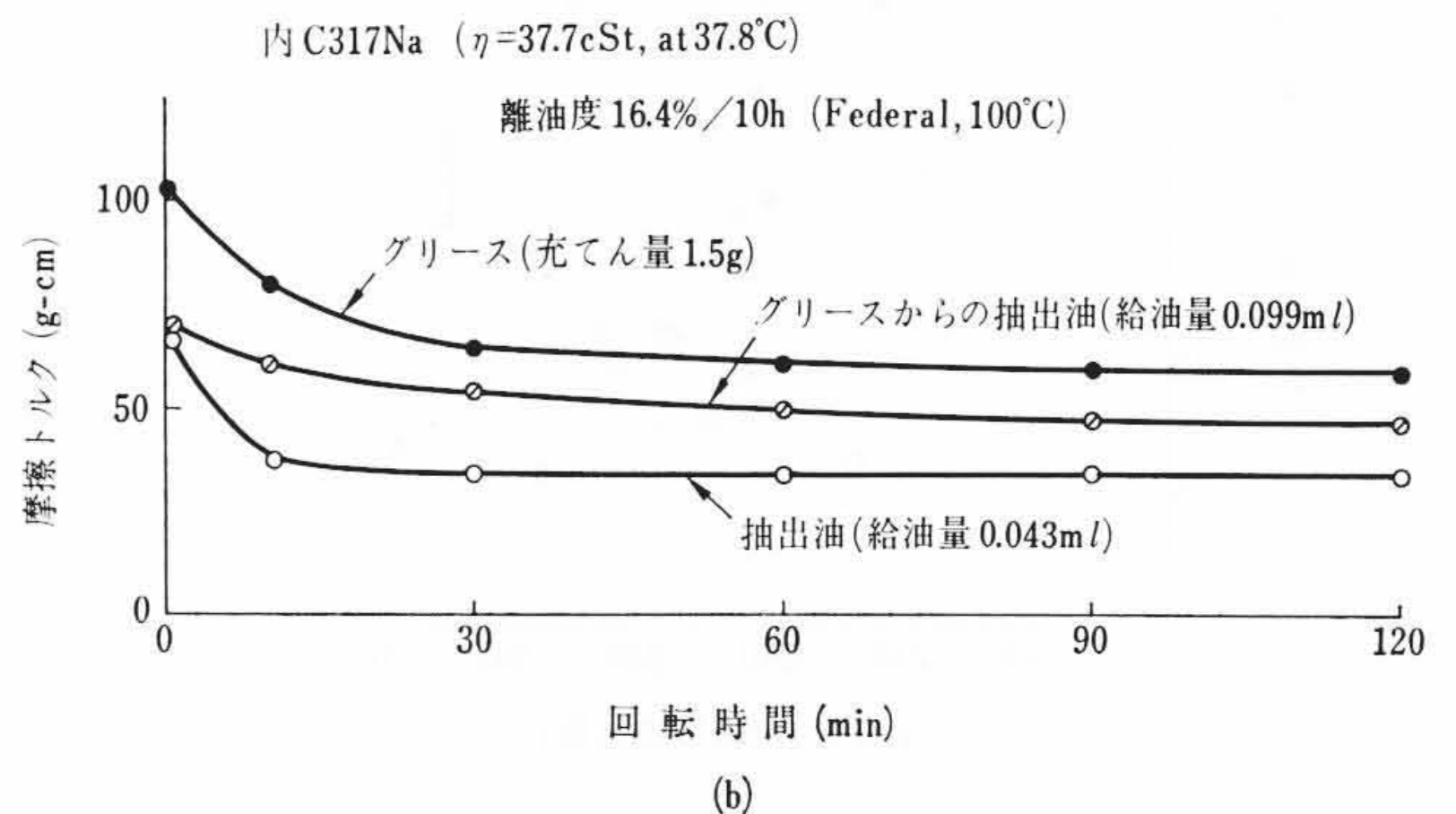
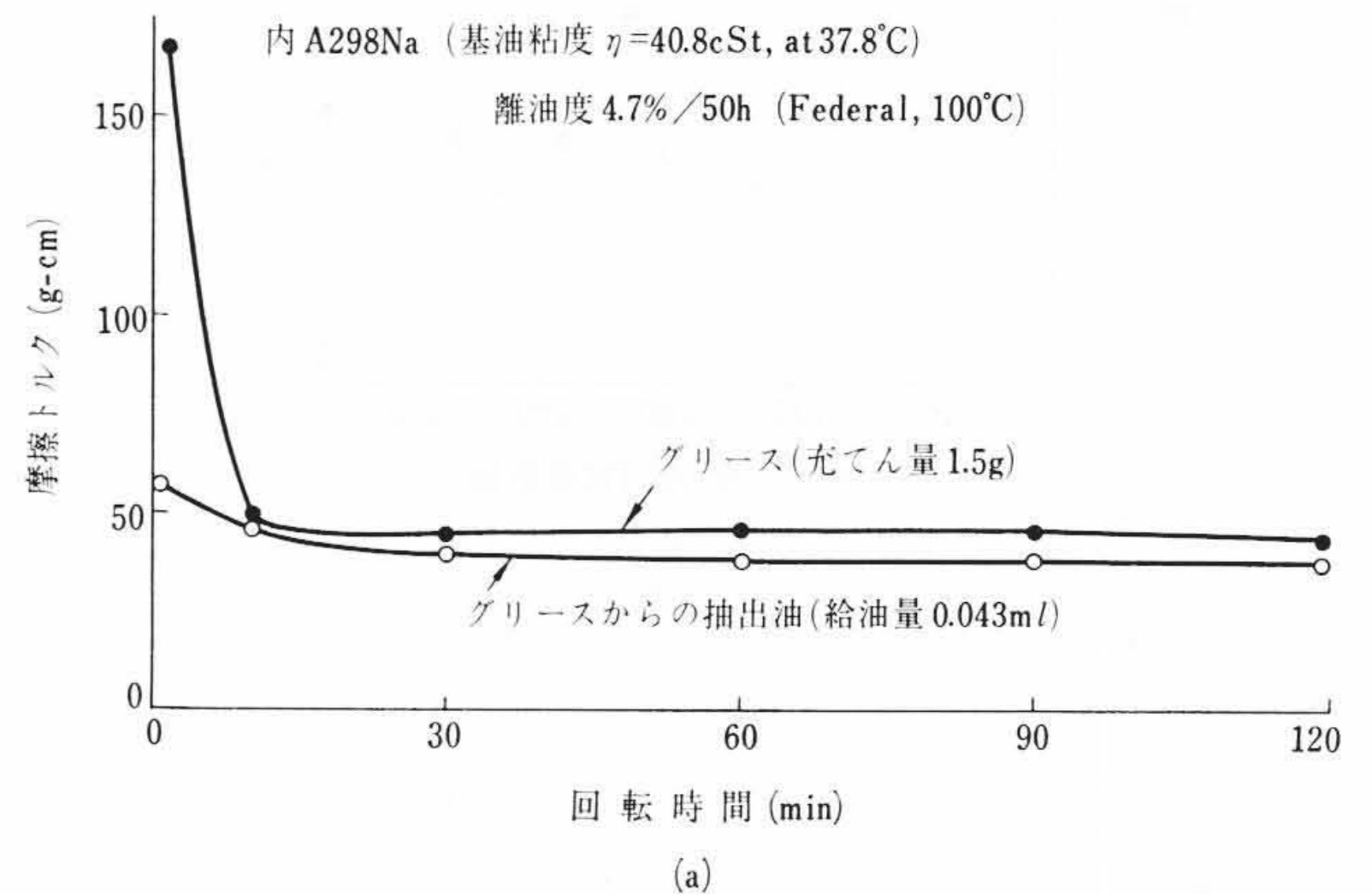


図 8 グリースとその基油の摩擦トルク比較例

ば起動時の η - M 直線のほうが、大きな角係数をとるべきである。

上記から油単独潤滑における摩擦トルクは、グリース潤滑における定常摩擦トルクに近似すべきである。図 7 に示すとおりほぼ近似しており上記の考察は妥当と思われる。ただ油単独潤滑におけるほうが角係数がやや大きく、粘度約 40 cSt で交差している。これも摩擦熱に基づく差異と思われる。

以上の考察における温度効果については、さらに実験的に確認したいと考えている。

η - M 直線は前記したように回帰直線であり、実際にはこの付近にかなりばらつきをもっている。このばらつきの原因は、グリース充てん量、充てん状態のばらつき、空調室でなく通常の実験室で行なったための回転開始温度のばらつき、そのほかが考えられる。さらに図 8 に示すように、グリース潤滑における定常状態下の摩擦トルクは、そのグリースから抽出した油のそれとときわめてよく近似する場合とあまりよく合わない場合とがある。後者の場合グリースの離油度は異常に大きかった。離油度が大きいことは軸受内を油がよく濡らす利点があるが、かくはん抵抗を増す結果となる。図 8 のグリースは基油粘度が 40 cSt 付近のものであるから、図 7 の関係からグリース潤滑と油単独潤滑とで摩擦トルクは

同じ程度になるべきである。しかし離油度の異なるグリースでは近似しないことを示している。

このことからグリースの離油度は注目を要する特性といえよう。

5. グリース潤滑における給油機構について

グリース潤滑における給油機構は、軸受形式、運転条件、グリースの種類などにより相違があるとともに、複雑なものと思われる。したがって本報の #6203 玉軸受, 20~30°C, 1,500 rpm, グリース充てん量 1.5 g という条件における結果は一例に過ぎず, これをもって一概に割り切ることとはできない。しかし比較的小形の玉軸受において, 軽荷重で回転数も特に大きくなく, 周囲温度が室温という条件はごくありふれたもので, このような場合は本報の結果によれば過充てん, あるいは 100% 充てんを避け, 適切な量のグリースを充てんすべきである。この場合グリースが潤滑に直接あずかるのはごく一部分であり, そのほかのグリースは軸受転動部の近傍に位置して徐々に油を補給する役割を果すものと考えられる。このようなモデルがすべてのグリースに成立するとはいえないが, 組成が適切ならば成立する。この際グリースの離油度は摩擦トルク, 軸受運転寿命上重要な意義をもつことになる。この見地からいえば理想的なグリースは, 軸受回転に必要な初期離油速度を有し, かつ必要最小補給量を永続的に供給する能力をもつものである。

大形高荷重軸受で高速回転するものと, 前記した小形軽荷重, 中速回転する場合とでは, グリースに要求する特性を異にしなければならないが, 原理的に上記のような給油を行なうとすれば, 軸受まわりのデザインは個々の場合に応じ適切にすべきである。筆者らはさきに玉軸受の潤滑寿命に対し, 離油度が蒸発量, 酸化安定度とともに重要な影響をもつと報告したが, GE 社においても実用的寿命試験結果から離油度の重要性を指摘している⁽⁸⁾。しかれば, 離油度はどのような値をとるべきかが問題になるが, 軸受の条件によるものであり, それぞれの場合に応じ検討しなければならない。筆者らは別にグリースの離油特性を詳細に検討しているが, 累積離油度のみでは不十分であり, 時間—離油度曲線の解析が必要と考えている。

6. 結 言

グリースの組成, 物性と玉軸受の摩擦トルクとの関係につき, #6203 玉軸受, 1,500 rpm, 周囲温度 20~30°C の場合について若干の実験を行ない, 次の結果を得た。

(1) 汎用の石けん基グリースは Non-Soap 系, シリコーングリース, MoS₂ 入りグリースなどに比較すると, 一般に摩擦トルクが小さく, かつ測定結果の再現性がよい。また汎用石けん基グ

ースのみに着目すると, グリースの組成により摩擦トルクはかなり相違する。

(2) 汎用石けん基グリースに関し, ちょう度や石けん基の種類と摩擦トルクとの関係は不定であった。

(3) グリースの基油粘度 η と摩擦トルク M との関係を統計的に処理し, 回帰直線を求めて検討したところ, 両者の間には密接な関係があると考えられる。 η - M 関係は起動時と定常時とはかなり相違し, 直線の角係数は前者のほうが大きい。

(4) グリース潤滑と, 油単独潤滑における定常時の摩擦トルクはだいたいにおいて近似するが, η - M 直線の角係数は油単独潤滑におけるほうがやや大きい。

(5) η - M 直線の角係数が異なるのは, 摩擦熱の寄与, 石けんミセルの影響などによるものと考えられる。

上記の η - M 関係はすべて汎用石けん基グリースに関するもので, Non-Soap 系, シリコーン系, MoS₂ 入りなどの特殊グリースは除外して検討した結果である。

従来グリース潤滑においては, その基油粘度よりもちょう度が重視される傾向にあり, 古い規格では基油粘度を検討項目にとり入れてなかった。その後新しく JIS ころがり軸受グリースの制定をみたが, 基油粘度については参考として試験成績表に付記する程度にとどまった。これはいったんグリースを作った後油分のみを分離する方法に問題が残っているためである。しかしグリースの使用者側としては, 常に基油粘度を明らかにしておく必要があり, 将来適切な油分離法を見出し, 試験項目としてとり上げる方向に進むべきである。

なお本報の研究結果は #6203 玉軸受, 1,500 rpm という限られた条件によるものであり, 今後さらに他の運転要素たとえば, 温度, 速度などを考慮して検討する必要がある。また本報の結果から離油度のもつ意味につき詳細の検討が必要と考えられる。

終わりに本研究の実施にあたり多大のご便宜をいただいたわが国石油会社の関係各位に厚くお礼申しあげる。またご指導, ご激励いただいた日立製作所中央研究所高橋治男博士, 日立研究所中牟田昌治博士に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 茂庭, 友部: 日立評論 42, 665 (昭 35-8)
- (2) 茂庭, 友部: 日立評論 43, 888 (昭 36-7)
- (3) 茂庭, 友部: 日立評論 44, 306 (昭 37-2)
- (4) 遠山: 滑潤剤および潤滑技術, 239 (昭 32-2, 白亜書房)
- (5) 友部, 茂庭, 本間: 潤滑 10, 51 (昭 40-1)
- (6) 茂庭, 本間, 友部: 潤滑 10, 101 (昭 40-3)
- (7) 小口: 昭石技報 3, 153 (Dec. 1959)
- (8) A. E. Baker: NLGI Spokesman 22, 271 (1958)
- (9) J. A. Brown, C. N. Hudson, L. D. Loring: NLGI Spokesman 15, 8 (1952)