

531.44 : 534.015

摩 擦 振 動 に つ い て*

(第4報, 乾性摩擦状態における自由自励系の振動に関する実験)

高 野 英 資**, 石 橋 達 弥**

1. 緒 言

一定速度で走行する面上を摩擦力をうけて運動する物体の挙動については多くの研究がなされている。自由自励系について亘理ら⁽¹⁾は理論的, 実験的に摩擦による振動を詳細に扱い, 摩擦形式などの区別を与えて理論解と実験値との対比を行ない, また加藤ら⁽²⁾や松崎⁽³⁾は静摩擦力, 動摩擦力に時間的な効果を考慮した摩擦による振動の発生について報告している。

著者らはこれまでに, いくつかの場合について断片線形系と考えた自由自励系の摩擦による振動について理論的な解の性質をあきらかにしてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。それによれば運動摩擦力速度特性曲線の不連続部分(前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾のI'-IV'部分)を内部にもつ定常振動解(ハ)形の発生がありうること, また特性曲線において, 相対速度が零のときの運動摩擦力が最大静止摩擦力と一致する場合とそうでない場合とでは振動解の様相を異にし, 最大静止摩擦力が孤立点となる後者の場合には2本の折れ線で近似した特性曲線の場合でも同じベルト速度に対し, 2個の安定な定常振動解が発生しえたり, さらに最大静止摩擦力の不連続性の程度によって途中のベルト速度範囲で振動が発生しない場合が存在したりすることのある場合を指摘した。

本報では後述の回転振動系による実験装置を用い, 著者らがおこなった実験においても運動摩擦力速度特性曲線が, 実験開始前の摩擦面の状態などによってかなり異なる性質をしめし, 観測される定常振動解も特性曲線の形状によって著しい影響を受けることを指摘したい。

なお, ここでは摩擦面としては通常, 乾性摩擦状態とよばれている状態での実験結果の報告である。

2. 実験装置と実験方法

図1は実験に使用した装置の主要部分をしめし, 一定速度で回転するロータ①(50φ)にはめあわされた

リング状の振り子②が接触面において摩擦力をうけながらロータ軸心のまわりに角振動をおこなう回転振動系となっている。振り子は軟鋼製, SCM-21製の2種類を使用し, それぞれに3種類の振り子用ばね③(A, B, C; A', B', C')を用いた。ロータはS45C製であり, 工作上的偏心は 5μ 以下であった。振り子, ロータとも摩擦面は熱処理され, 研削加工(鏡面仕上)がなされている。摩擦面の加圧はリング状振り子の切れ目にとりつけられた加圧ばね④により, 表1中の p_0 の値をかえて与えた。締めつけは各振り子とも弱, 中, 強の3種類(それぞれ1, 2, 3; 1', 2', 3')とし, ロータと振り子とのあいだの締め付けの定量的な測定はおこなわなかった。振り子は平行光線中におかれ, その運動は上部のしゃ光板⑤にあるスリットを通った光を, 電磁オシログラフ紙に記録することによりもとめた。また, ロータ周速は別の光学系を用い, ロータとともに回転する円板周辺にとりつけられたスリットを通して振り子の運動と同時に記録した。レンジ[I]ではストップウォッチによる測定を併用し, ロータ1回転の時間をはかり計算により周速度をもとめた。振り子下部の制振板⑥は運動摩擦モーメント・周速度特性曲線をもとめる際に粘性の高い油そうに浸し, ばね力と運動摩擦力によるロータ軸心まわりのモーメントがつ

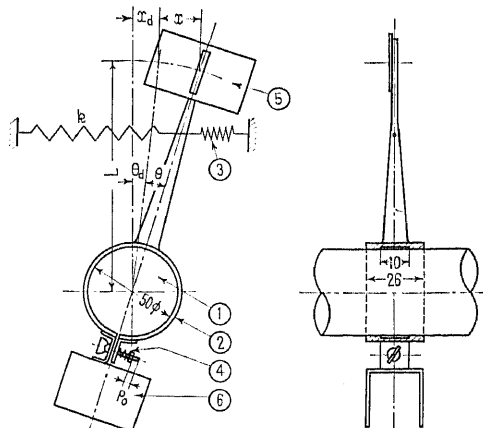


図 1

* 昭和44年9月10日 北陸信越支部金沢地方講演会において講演, 原稿受付 昭和46年8月21日。

** 正員, 新潟大学工学部(長岡市学校町1)。

りあう点 (後述の角度 θ_d の位置) の左右の角振幅を小さくする目的で使用された。振り子はしゃ光板および制振板をふくめてロータ軸心上に重心位置があるよう調整されている。ロータの変速は可変直流分巻電動機によりベルトを用い、歯車変速装置を介しておこなわれた。実験に使用した各部の仕様ならびに寸法が表 1 にしめされている。表中ロータ周速度の欄でレンジ

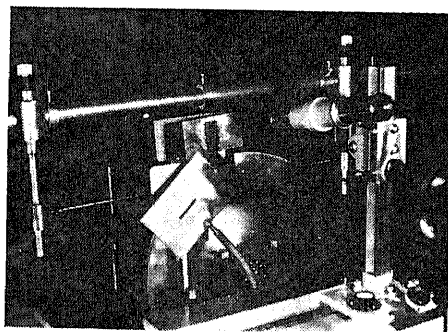


図 2

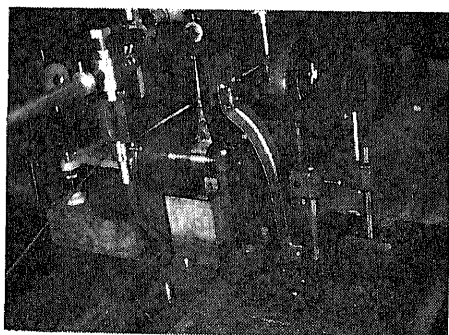


図 3

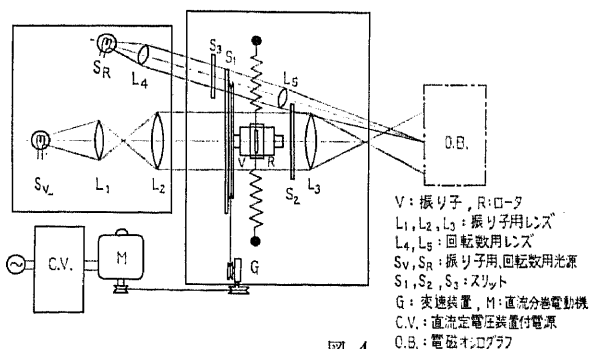
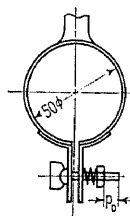


図 4

表 1

摩 擦 面	振り子 (リング)	材 質	熱 処 理	機械加工法	か た さ	慣性モーメント I
		軟 鋼	焼 入 れ	研 削		5.3215 g cms ² /rad
		SCM-21	浸炭焼入れ	研 削	HRC 52	4.6731 g cms ² /rad
ロータ	ロータ	S 45 C	高周波焼入れ	研 削		
回転ばい定数と 固有周期	SCM-21 製振り子			軟鋼製振り子		
	A	3879.2 g cm/rad	0.218 s	A'	3759.9 g cm/rad	0.236 s
	B	4901.5 g cm/rad	0.194 s	B'	5071.9 g cm/rad	0.204 s
	C	4304.8 g cm/rad	0.159 s	C'	7369.6 g cm/rad	0.169 s
摩擦面の加圧	弱いしめつけ	1	$p_0 = 4$ mm	1'	$p_0 = 2.5$ mm	
	中のしめつけ	2	7 mm	2'	8 mm	
	強いしめつけ	3	8.9 mm	3'	13.5 mm	
ロータ周速度	レンジ [I]	0.250 mm/s ~ 1.10 mm/s				
	レンジ [II]	1.40 " ~ 8.40 "				
	レンジ [III]	10.0 " ~ 34.0 "				
	レンジ [IV]	40.0 " ~ 235 "				
	レンジ [V]	310 " ~ 1730 "				
	レンジ [VI]	2000 " ~ 4360 "				



変位波形であり、図5はB-3（中ばね-強しめつけ）、図6はC-3（強ばね-強しめつけ）の場合である。また図7は振り子用ばねならびにしめつけをかえたときのある周速度における変位波形をしめしている。いずれも上段がロータの回転パルス、中段が振り子の変位波形、下段が時間軸をしめす。ロータの回転は低速時（レンジ〔I〕,〔II〕の場合）では1/36回転ごとに、高速時（レンジ〔III〕以上）では1回転ごとに回転パルスが与えられている。これらの図から変位波形は低速時には典型的な二歯状波形であり、高速になるにしたがい正弦波形に近い変位波形となることがわかる。しかし、われわれの実験では周速度に対する変位波形の振幅が、おおむねつぎの二つの種類に区別されるような変化のしかたをしめた。一つは図5にしめ

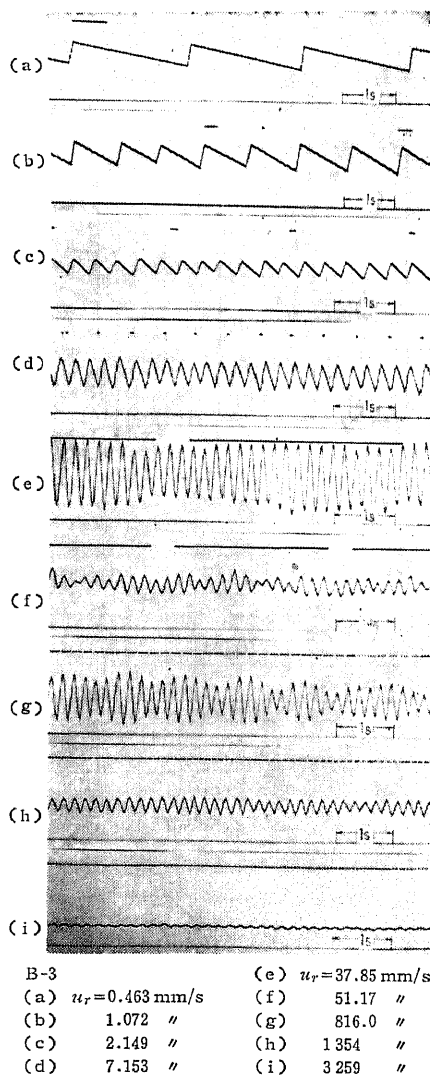


図 5

されたような変化であり、他は図6のような変化のしかたである。すなわち、図5は周速度の増加とともに

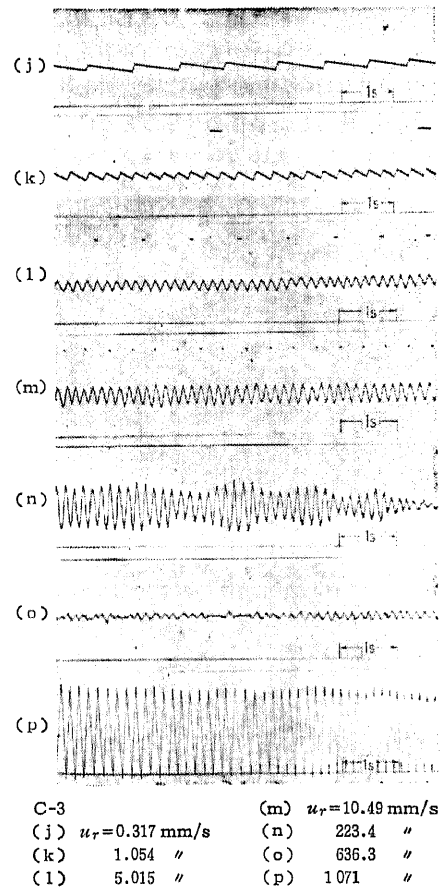


図 6

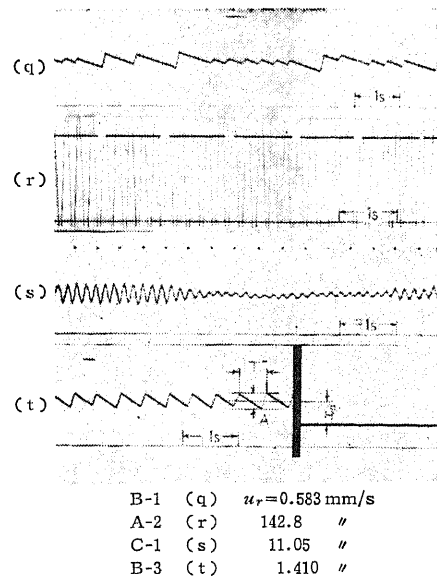


図 7

変位波形の振幅がしだいに増加し (わずかであるが、一時減少したのち増加するものも観測された)、かなり大きな振幅をしめした後、高速域で減少して非常に小さな振幅となる場合であり、図 6 はロータ周速度の増加とともにしだいに振幅は増加するが、中間のある速度のところで非常に小さな振幅となる速度領域が存在し、さらに高い速度領域で振幅が増大してわれわれの実験速度範囲では再び振幅が小となることがなかった場合である。しかしながら摩擦振動実験の場合、一般に他の自励振動がそうであるように、現象がはなはだしく再現性に欠け、同一条件下の実験をおこなっているつもりでも、振幅が大きくなる周速度位置が必ずしも一致しなかったり、図 7 (q) のように一定の周速度でおおよそ大小 2 群の振幅から成る振動となったり、時間とともに振幅が成長してある一定の値に近づくようすが随所にあらわれたりする図 (s) のような波形がえられることがあった。すなわち、われわれの摩擦振動実験の場合でも再現性という点ではかなりの困難さがあった。これらはいわゆる摩擦面の不安定さが原因になって起こるようであり、この点について実験開始前の摩擦面の処理の仕方を整理しておくことが必要であろう。

3.2 運動摩擦モーメント・周速度特性曲線 そこでつぎに摩擦面の性質、すなわち運動摩擦モーメント・周速度特性曲線に影響を与える因子として、実験開始前の摩擦面に対する予備的な処理が運動摩擦モーメントとその速度との関係にいかなる影響を与えるかなどについてのべておこう。

図 1 でしめされているように、一定速度で回転するロータにはめあわされたリング状の振り子は、振り子用ばねが摩擦による変形を与えられない静的平衡位置から角度 θ_d のところを中心としてその左右に角変位 θ の振動をおこなう。いまロータ中心より一定の高さ ($L=137\text{ mm}$) にあり、振り子の背後に別に用意した水平スリット (図 4 の S_2) を通して、平行光線中におかれた振り子がしめす水平方向移動成分を、 θ_d, θ に対応してそれぞれ x_d, x とするとき、 θ_d, θ が小さい場合には $x_d=L\theta_d, x=L\theta$ となるので、ロータ周速度に対する x_d の変化は運動摩擦モーメントの変化に比例し、また x の変化は振り子の運動をあらわす変位波形となる。われわれは x_d の値を定める場合、つぎの方法によった [図 7 (t) 参照]。すなわち電磁オシロ紙に記録された波形から振動中心をもとめる。一方、ロータ周速度の各レンジごとに、最初と最後に振り子用ばねの静的平衡位置を零位置として記録しておき、その平均の位置から前述の振動中心までの距離をも

とめ、記録倍率を乗じて x_d の値とした。したがって少なくとも記録は各レンジのあいだ連続した記録紙をもちいた。図 8 以下はこのようにしているいろいろな因子に対する x_d の変化するようすをもとめたものである。

3.2.1 一定周速度下での運動摩擦モーメントの時間的変化と休止期間の影響 図 8 は振り子の制振板を油そうに浸したままロータ表面の周速度を一定として時間の経過に対する運動摩擦モーメントならびにベルトかけ換えによるロータの一時停止時の最大静止摩擦モーメントの変化のようすを、それぞれ x_d, x_{st} を用いてしめたものである。ここでは x_{st} はレンジ切りかえ時にロータを一時停止させてベルト取りかえの前に手動により電動機回転子をほとんど速度零の状態まで可及的にゆっくりと回転させたとき、振り子が達した角変位の最大水平分変位であり、これは読取り顕微鏡によって読取られた。図 8 は設定したロータ周速度が大きい場合で、○印、△印はクリーニング後直ちに実験を開始したときの経過時間に対する変化曲線であり、●印、▲印は一定時間 (約 90 時間) 放置後の同様な曲線をしめす。設定したロータ周速度の値が大きいほど最初運動摩擦モーメントならびに最大静止摩擦モーメントの増加は著しく、休止期間をおくことにより、モーメントの値は増大するが、図 8 の例では 60 分以上経過して休止期間前後の x_d, x_{st} がそれぞれほぼ一致してくるようすがわかる。しかしロータ周速度が 0.940 mm/s 程度の非常に小さい設定速度では長い休止期間の前後で、ロータ周速の高い場合に比べ摩擦モーメントの増加はほとんどみとめられず、摩擦面の休止期間による性質変化がこの程度の測定時間内ではまだ緩慢であることをしめた。

3.2.2 実験周速度下の特性曲線のある種の再現性テスト 図 9 は、ロータ周速度を低速から順次高速にしなが、実際に運動摩擦モーメント・周速度特性曲線をもとめる際に測定を予定されている周速度の各点での運動摩擦モーメントおよび最大静止摩擦モーメントの変化のようすをしめたものであり、図 8 同様

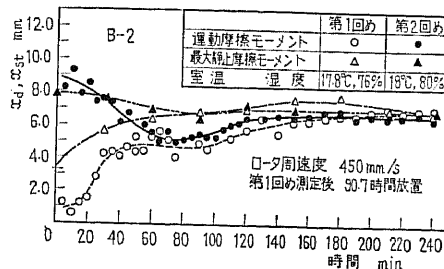


図 8

α_d, α_{st} で表わされている。図中、第一次などとあるのは摩擦面をクリーニングしたあと、ならし運転なしに直ちに測定を開始し、高速域まで測定してからそのままの表面状態でほとんど休止期間を与えることなく、第二次、第三次とひきつづき運動摩擦モーメントならびに最大静止摩擦モーメントのロータ周速度に対する特性変化のようすをもとめたものである。ロータ周速度がレンジ [I] の速度範囲 (0.25~1.1 mm/s) ではストップウォッチによるロータ回転速度の測定を併用したため、一つの測定点を得るのにだいたい 10~2.5 分を要し、レンジ [I] 終了までに約 60 分の測定時間を要している。他のレンジでは測定時間は 1 測定点当たり約 1~2 分で、各レンジともロータの周速度設定後およそ 1~2 分を経てから記録をとるようにした。また各レンジ終了後の最大静止摩擦モーメントの測定にはベルトの掛けかえ、ならびにモータの位置の移動をもふくめて約 10~20 分を要した。

図 9 において 第一次の運動摩擦モーメント-周速度曲線が、ほとんど互いに等しい測定値をしめた第二次、第三次の曲線と比較して低速域で一般に小さな摩擦モーメントの値を与えていることから、図 8 同様クリーニング直後では摩擦モーメントは小さく、ロータの総回転数 (各ロータ周速度とその周速度でのロータの回転時間の積の和に比例) の増加とともに摩擦モーメントは増大し、したがってクリーニング直後の非常に低い速度からの実験開始には摩擦面に対する予備的な運転による処理が大きな影響を有し、摩擦面の性質変化を考慮しなければならないことがわかる。しかしこの場合でも第一次の低速側での急激な変化は、レンジ [III] の終わりごろ (ロータ周速度約 50 mm/s 付近) によりやく着着き、第二次、第三次の場合の曲線にだいたい一致する。このときのロータの総回転数はおよそ 1000 回転前後であり、これは図 8 の長時間の休止を与えたあとでの休止前後の曲線の一致に要するロータの総回転数 (450 mm/s で約 60 分後に一致) 約 10000 回転と比べると約 1/10 となっており、予備的な運転による処理の与え方が運動摩擦モーメント-周

速度特性曲線の再現性に大きな関係をもつことは明らかである。

3.2.3 ならし運転の影響 そこで著者らは実験開始前のならし運転の与え方をかえて運動摩擦モーメント周速度特性曲線に与える影響を調べることにした。図 10 はこれらの実験例であり、図中の説明欄にもあるように全然ならし運転を与えず、いきなり実験にはいり、随時摩擦面のクリーニングを与えながら α_d, α_{st} の測定を行なう場合と、一定時間一定周速度下でならし運転を与えたのち実験にはいり、それ以後は 1 本の特性曲線を高速域まで得るあいだクリーニングをいっさい行なわないでえたものとはだいたいロータ周速度変化に対する運動摩擦モーメント曲線の様相を異にすることがわかる。後者の場合ならし運転速度が高いものほどおおむねロータ周速度に対する運動摩擦モーメントの高速域での増加を鈍らせ、極大値の生ずる位置は高速側に寄り、極大値の高さは低く、さらに高いロータ周速度で減少して小さくなっている。これは横軸を等間隔目盛でしめすと後述の図 14 のような特性曲線となる。ならし運転をしないで実験を開始し、さらに随時クリーニングをおこないながら速度特性をもとめたものでは測定値のばらつきは顕著となるが著者らの実験速度範囲では高速になるほど運動摩擦モーメントが増加するものが多かった。これは回転ばね定数 k が小さいほど、またしめつけ p_0 が強いほどこの傾向があるようである。しかし、ならし運転の有無あるいはならし運転速度の大小にかかわらず最大静止摩擦モーメントと運動摩擦モーメントとが連続した曲線としてえられることが少なく、ほとんど孤立点と考えられる状態でえられることが多かったことは注目されてよい。

3.2.4 運動摩擦モーメント周速度特性曲線の測定

以上特性曲線に影響を与えるいくつかの因子について述べたが、予備的な運転による摩擦面の処理の与え方が特性曲線の形状に大きな関係を有していることがわかった。そして以上のことからならし運転を与える場合には、実験開始前に 450 mm/s で 1 時間ロータを

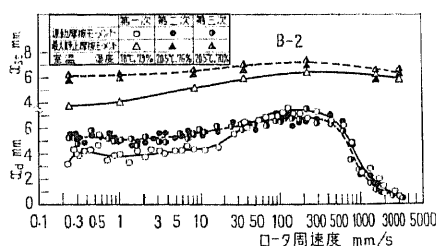


図 9

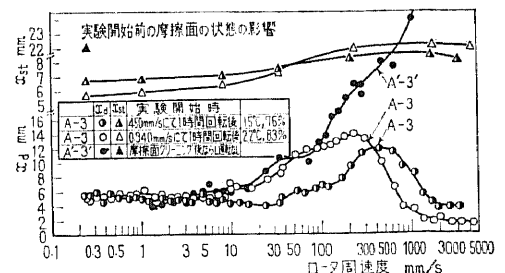


図 10

回転させたあと実験にうつることとした。特性曲線の実測例についてはすでに図 9, 10 の中でも与えられており, また図 11, 13 でもしめされる。

なお, 運転摩擦モーメント周速度特性曲線ならびに後述の変位曲線をもとめる際, 互理らは摩擦面の摩耗形式による区別を考慮しているが, 著者らの場合には摩擦面に明らかな条こんを残すほどはげしい摩耗は起きず, わずかに高速レンジの終わりにはいって薄茶色のさびが一部リング状の接触部周辺に発生する場合があった以外は摩擦面は一般にきわめてなめらかで光沢を有していた。薄茶色のさびが発生したときは互理らの実験と同様紙やすりなどで強く研磨して初めて除ける程度に強く付着していた。また, 条こんもかなり明るい場合でようやく存在を知りうる程度であったし, 白布で強くふきとったときにわずかに摩耗粉によるよごれを感じる程度であった。

3.3 摩擦による振動 図 11~13 はロータの周速度をかえ発生した摩擦による定常自励振動の全振幅, 振動周期をそれぞれ A, T [図 7 (t) 参照] として運動摩擦モーメント x_d の変化とともにしめたものである。図 11 はならし運転をしないで摩擦面クリーニング後ただちに実験を開始し, 随時クリーニングをおこないながらロータ周速度を 1~4300 mm/s の範囲で測定したものである。ここでも運動摩擦モーメントは図 1 の x_d であらわしており, x_d を中心とした左右のふれ x の両振幅が A である。特性曲線は小さなロータ周速度で負の傾斜, 大きいロータ周速度で正の傾斜を有し, 特性曲線は前報⁽⁹⁾における図 12 中の $(C_1), (C_2)$ に相当する形をしめしており, 振幅周速度曲線についてはロータ周速度の増加とともに連続的に振幅を増大させ, 振動波形が図 7 (e) のように記録紙をはみ出してもなお大きな振幅で振動して, かなり高速域で再び小さな振幅となってあらわれるようすが理解される。しかし, ならし運転をしないで随時クリーニングをし

ながら行なった実験の場合には前にも述べたように, 一般に運動摩擦モーメント-周速度特性曲線の測定値のばらつきが大きかったのに対し, 振幅-周速度曲線, 振動周期-周速度曲線のほうは割合に再現性よく, 振り子用ばねを一定にしてしめつけ力をかえた場合図 12 のように摩擦面加圧力の小さいものほど小さい値から振幅を増加する序列をしめし, また加圧用ばねのしめつけを一定として振り子用ばねをかえたときにも, ばね定数の大きい振り子用ばねほど小さい値からの振幅増加の序列をしめすなど比較的安定した測定値をうることができた。

これに対して高速ならし運転の場合には運動摩擦モーメント-周速度特性曲線は測定値があまりばらつかず, 割合なめらかな変化をしめすが, 振幅-周速度曲線の測定値のばらつきはかなり大きく, 同じ条件下の実験でもその都度振幅変化の傾向はほぼ似ているが振幅変化の周速度位置がちがうというように非常に不安定な現象をしめた。図 13 は高速ならし運転後実験を開始した場合の一例で, やはり振幅 A の測定値のばらつきは大となっているが, 運動摩擦モーメント-周速度特性曲線は等間隔目盛であらわすと小さいロータ周速度のところで正の傾斜, 大きいロータ周速度で負の傾斜となる。これは図 14 の特性曲線の形をしており, 振幅 A も前報の図 13 (G_1), (G_2) などに相当する変化曲

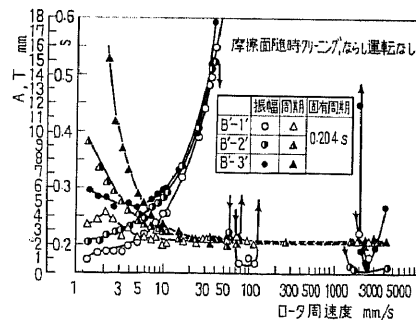


図 12

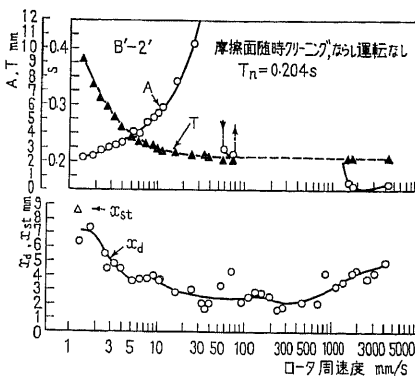


図 11

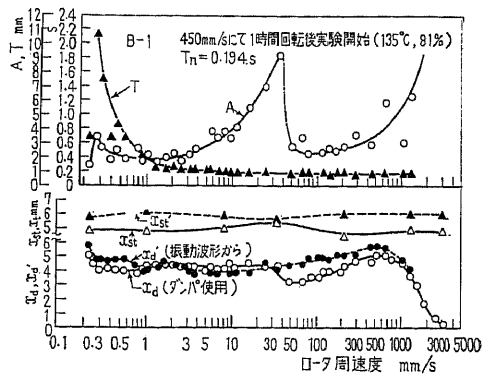


図 13

線としてえられていることがわかる。この場合, 中間のロータ周速度範囲で振動がほとんど発生しないか, 発生しても大小2群の振幅の振動となる領域が存在し, ロータ周速度の高速域にいたって非常に大振幅の振動が生じ実験速度範囲では再び小振幅の振動となることはなかった。図13はロータ周速度が0.2~4300 mm/sのあいだでおこなわれた。

ならし運転の有無はこのように運動摩擦モーメント-周速度特性曲線に顕著な差を与え, したがって発生する定常振動の振幅変化のようすにも異なる二つの形が得られることが観測された。しかるに振動周期については両者とも低速においてロータ周速度とともに急激に減少し, ロータ周速度の増加に対して振動系のもつ固有周期 T_n に漸近していくようすが理解できる。これは後述するように自励振動の特徴の一つである。なお, 図13の $x_d, x_{sl}; x_d', x_{sl}'$ は振り子の制振板を油そうに浸してもとめたものと振動波形記録から直接もとめたものとと比較であり, ほとんど両者には差がないと考えてよいと思われる。

4. 実験結果に対する考察

つぎに以上のようにしてえられた実験結果について若干考察してみよう。ロータ軸心に関する振り子の慣性モーメントを I , 振り子用ばねの回転ばね定数を k とし, ロータ周速度を u_r , 摩擦面にはたらく運動摩擦モーメントを $M(r d\theta/dt - u_r)$ (r : ロータの摩擦面半径), 角速度に比例する抵抗の係数を c とするとスリップ時における振り子の, ロータ軸心まわりの回転運動の方程式は

$$I \frac{d^2}{dt^2}(\theta + \theta_d) + c \frac{d}{dt}(\theta + \theta_d) + M \left\{ r \frac{d}{dt}(\theta + \theta_d) - u_r \right\} + k(\theta + \theta_d) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

であらわされる。また θ_d はロータ周速度が u_r のときに摩擦面にはたらく運動摩擦モーメントがばね力とつりあう位置であるから

$$M(-u_r) + k\theta_d = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

なる関係がある。すなわち θ_d はロータ周速度によって値をかえるが, 時間 t には無関係である。ゆえに時間 t を $\tau = \sqrt{k/I}t$ で置き換え, 微小振動 ($x \equiv L\theta$) を仮定すると振り子の運動は

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + f \left(\frac{dx}{d\tau} \right) + x = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表わされ, 式(3)は $dx/d\tau = y$ とおくことによりよく知られた次式

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{x + f(y)}{y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となって, Liénard の図式解法が適用できることをしめしている。ここで

$$f \left(\frac{dx}{d\tau} \right) = \frac{c}{\sqrt{kI}} \frac{dx}{d\tau} + \left\{ M \left(\frac{r}{L} \sqrt{\frac{k}{I}} \frac{dx}{d\tau} - u_r \right) - M(-u_r) \right\} \left(\frac{L}{k} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

である。図14は高速ならし運転が与えられた場合の運動摩擦モーメント-周速度特性曲線 $M(u_r)$ をモデルとして横軸を等間隔目盛でしめし, $O_1 \sim O_5$ の各点における振動の解曲線を Liénard の図的方法でもとめたものである。

摩擦面を随時クリーニングしならし運転をしない場合には, すでに前節までにしめされているように特性曲線はクリーニング後, つぎの測定点である周速度を設定するまでにロータに与えた総回転数とともに刻々とその形をかえる。したがって測定された $M(u_r)$ 曲線があるロータ周速度で測定している各瞬間瞬間の振り子の振動中の正しい運動摩擦モーメント-周速度曲線の姿を与えているかどうか疑わしくなんらかの修正が加えられる必要があるだろう。著者らはこの点について x_{sl} の u_r に対する変動と同様の変動を x_d に対しても考慮したいろいろな方法を試みたが, まだ定常振動を的確に表現できるまでに至っていない。それにもかかわらず振幅 A は測定されたままの $M(u_r)$ 曲線もちい, Liénard の図的方法や前報の断片線形系による近似法である程度推測したものと, 定常振動発生の周速度位置がロータ周速度の低速側に移動している点を除いて非常によく似た振幅曲線の変化のしかたをしめすことは興味のあることである。前出の図11の特性曲線は前報の図12中の特性曲線の場合に相当し, 定常振動解についても理論的に u_r の非常に大きいところで振幅が小さくなるか, 現われないことがあること

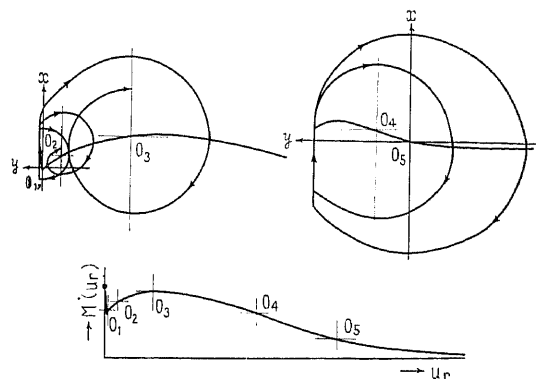


図 14

を定性的に知ることができる。そして前報図 12 の (B), (C), (D) では最大静止摩擦モーメントが孤立点となると同じ u_r の値において二つの安定なリミットサイクルが観測されることがある。いうまでもなく、回転振動系を用いた本報の運動摩擦モーメント-周速度曲線は前報における運動摩擦力速度特性曲線に対応し、前報の図 12, 13 の縦軸 A_s は本報での振幅 A に、また横軸の $1/K$ はロータ周速度 u_r に対応している。

高速ならし運転が与えられた場合には $M(u_r)$ 曲線は比較的安定であることは前述したが、随時クリーニングが与えられる場合に比べて特性曲線の様相は全然異なり図 14 のような形となる。そして前報図 13 にあるように x_{st} と相対速度が零のときの x_d とが不連続性を有し、低速で正の傾斜、高速で負の傾斜となる 2 本の折れ線で近似できる特性曲線の場合には、不連続性が小さい (G_1), (G_3) のとき中間の周速度で定常振動が発生せず、(G_1) の場合にはその速度範囲をこえた付近でやはり二つの安定なリミットサイクルが生じうることになる。したがって振動実験において観測される変位波形がどちらのリミットサイクルに所属するものであるかは直ちに判定が困難となろう。一方不連続性の大きい場合には、これに対して、(G_2), (G_4) のようにロータに固着して運動する部分を軌道の一部にもつリミットサイクルの振幅はロータ周速度の増加とともに連続的に増大していくが、そのリミットサイクルの内側に、特異点である原点以外に安定または不安定なリミットサイクルをもつ。しかし前報図 13 のように高速側で傾斜が負の値をとる特性曲線は u_r のある値以上では摩擦モーメントが負となることがないためロータに固着することのある定常振動解の振幅の成長はロータの実験周速度範囲をこえたある u_r の値のところで止まり、それ以後は第 2 の特性折れ線につづく第 3 の特性折れ線の形によって振幅の変化のしかたがちがってくる。

図 13 は定性的に前報図 13 の (G_1), (G_2) の形に似ており、ならし運転の与えられない場合に比べて振幅成長のしかたが異なる。しかし実測された振幅曲線はならし運転が与えられるときには一般に Liénard の図的な方法などでえがかれたものに比べて小さな値をしめすものが多かった。これはおそらくならし運転の過程でいわゆる乾性摩擦状態と呼ぶものよりは非常に微小な摩擦粉による薄層を介しての振動をしめしている、摩擦粉の生成などによるエネルギーの消散を伴っているからと考えられるが定量的な十分な説明はまだ得ていない。

周期についてはならし運転の有無にかかわらず u_r の増加とともに系の固有振動数 T_n に近づいていくが前報の図 14 ならびに文中の説明からも推察できるように x_{st} と相対周速度零のときの x_d との不連続性の大きいものほどスティック期間の長い振動が生じ、したがって観測される周期も大きく u_r の増大とともに低速域で急速に減少することが本報の図 11~13 からわかる。そしてロータ周速度の低速部ではこの不連続性の値の維持が時間的に断続する場合があるためか、このとき変位曲線の振幅もそれに合わせて大小いろいろにその値を変化しようすが特に低速部の測定値のばらつきの中に感じとれる。

5. 結 言

回転振動系による実験装置を用い乾性摩擦状態における自由自励系の摩擦による振動を実験的に扱った。摩擦面をクリーニングした後の摩擦面の予備的な運転による処理の与え方が運動摩擦モーメント-周速度特性曲線の形に著しい影響を与え、ロータ周速度に対する振幅、振動周期の変化曲線にも大きな相違を与えることがわかった。ならし運転をしない場合には特性曲線は一般に上に凹の曲線となるが、ならし運転を与えた場合には一般に上に凸の曲線をしめす。しかし一般に摩擦による振動ははなはだ再現性に欠けており、これらの特性曲線に対応する振動現象についてはまだ定量的に十分な説明を確立するまでに至っていない。とくに非常に低速から高速に至る広い周速度範囲における乾性摩擦による振動現象の説明は一般に非常に困難があるようだ。しかし振幅-周速曲線などが前報で指摘した理論曲線と定性的にきわめて類似した変化をしめしていることは興味深い。

最後に本研究遂行にあたり、名古屋大学教授山本敏男研究室からは実験装置の一部と多くの実験資料の提供ならびにご援助をいただいた。また本学下田 茂教授には終始変わらぬ激励を賜わった。さらに本学古川 洋文部技官ならびに昭和 41~44 年度本学卒業研究の卒業生諸君には装置の製作および実験・解析に協力いただいた。ここに記して感謝申し上げる。なお本研究の一部は昭和 44 年度文部省科学研究費補助金の交付をうけておこなわれたものであることを付記する。

文 献

- (1) 亘理・杉本, 機論, 29-200 (昭 38-4), 769.
- (2) 加藤・ほか, 機論, 35-273 (昭 44-5), 1138, 1147.
- (3) たとえば松崎, 潤滑, 12-5 (昭 42), 183.
- (4) 高野, 機論, 33-253 (昭 42-9), 1352, 1363.
- (5) 高野・石橋, 本論文集 3148 ページ.

討 論

〔質問〕 前沢成一郎(山梨大学工学部)

図5(e)~(g)および図6(n)のような概周期的な振動の場合には図11以下の振幅の値として, どのような値を採っているか.

またこのような概周期的な振動はどうして起こるのか, 何かお考えがあれば伺いたい.

〔回答〕 振動記録が概周期的である振動振幅の値についてのご質問であるが, 本実験ではこのような振動が観測された場合できるだけ長い記録をとって, 振幅の変動するようすをその周速度での記録全体のなかでながめ, 振り子の定常振動とおもわれる記録の部分から振幅を定めるよう心掛けた. すなわち図6(n)のように記録右端の, 振幅がほとんど零に近い値をしめしている部分は除き, うなりのようなものを伴ってはいるが, 他の比較的安定な振幅をしめしているとおもわれるところで最大最小の値をもつ数箇所の振幅をは

かり, それらの平均値をもって振幅の値と定めた.

このような概周期的な振動がなぜ生ずるのかという点については著者も非常に興味を感じているが, 運動摩擦力速度特性曲線がロータ周速度に対して全く一義的に定まるものとすれば, 自由自励系と考えている著者らの場合, けっしてこのようなことは起こりえないと思うし, したがって摩擦面の性質の時間的な変化がかなり重要な関係をもつのではないかと考えている. また一方, 井上らが扱っているように強制自励系の観測結果(付1)の中にはうなり現象を伴う例がしめされており, 著者がいま検討中であるロータ周速度が周期的な速度変動を伴う場合の理論解の中にもうなり現象を伴う場合の計算例をえている. この点からの検討も考えられるのではないか.

(付1) 井上・ほか2名, 機論, 35-274(昭44-6), 1242.