

動力伝達用平歯車のピッチングについて

Researches on the Pitting of Power Transmitting Spur Gears

橋 本 誠 也*
Seiya Hashimoto

内 容 梗 概

歯車負荷運転試験機による歯車試験片のピッチング実験について述べる。試験歯車は8モジュール40枚および19枚で、大歯車はS35Cを焼き入れ焼きもどしたものの、小歯車はS40Cを焼き入れ焼きもどし後歯面を高周波焼入れしたものである。負荷荷重、潤滑油温度（粘度）および歯車周速をいろいろに変えて負荷運転試験を行ない、大歯車に生ずるピッチング面積、歯形の変化、歯車の動的挙動の変化などを測定した。これらの実験から歯車ピッチングには進行性ピッチングと非進行性ピッチングが存在すること、ピッチングは潤滑条件（潤滑油粘度および歯車周速）の影響を著しく受けることが明らかになった。従来ヘルソ応力の大小によりピッチングの発生が論じられることが多かったが、この実験から、かみあい面に油膜の構成を考慮した理論解析をもとにしてピッチングの解析を行なわねばならないことが明らかになった。

1. 緒 言

歯車のピッチング (pitting) とは歯面に生ずる損傷の一種で、動力伝達用歯車の歯面に扇形の穴が発生する現象をいう。歯車の設計にあたっては、歯の曲げに対する強度とともに歯面のピッチングに対する強度を十分には握する必要がある。歯車のピッチングに関する研究はわが国においても、諸外国においても古くから行なわれている^{(1)~(8)}。しかし、これらの研究は歯車のかみあい面を互いにころがる二つのローラに置き換えた、いわゆるローラ形まだら摩耗試験機による研究が大部分であり、これらのローラによる実験結果と実際の歯車に生じるピッチングとの対応は必ずしも十分でないと考えられる。より実際に近いものとして、歯車を使用した負荷運転試験によりピッチングの性質を十分には握することが必要になる。

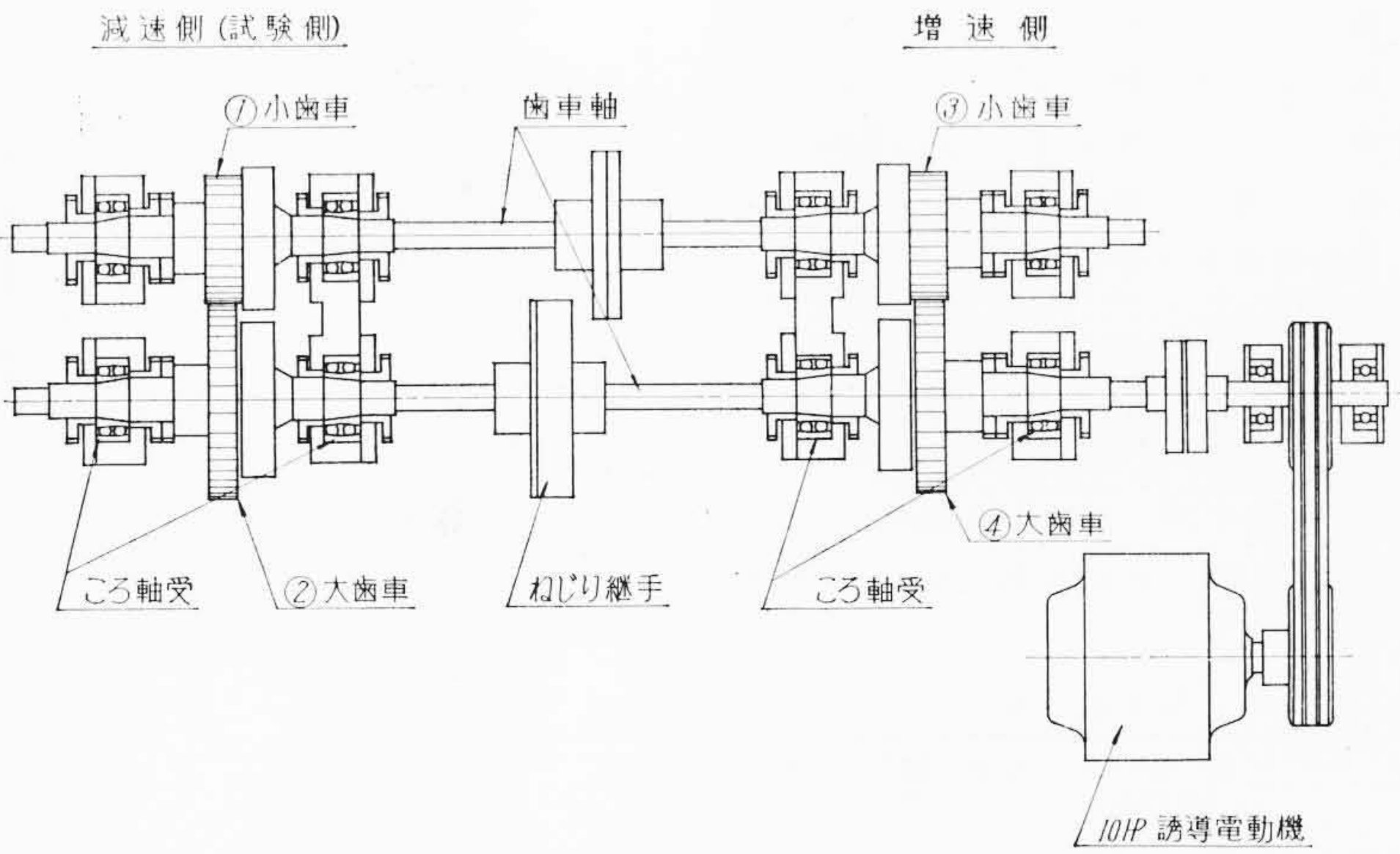
そこで平歯車の負荷運転試験を行なうため、動力循環式歯車負荷運転試験機を製作し、負荷条件を種々変えてピッチングの進行状態、歯形の変化、歯車の動的挙動の変化、歯車騒音の変化などを測定し、これらと負荷条件との関係を実験した。本報告では、さらに潤滑油粘度および歯車周速を変えた場合のピッチングおよびそれに付随する諸現象を実験した結果について述べ、ピッチングの発生は潤滑条件により大きく変化し、ピッチングの研究には潤滑に関する考慮が重要であることを明らかにする⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2. 試 験 機

動力循環式歯車負荷運転試験機の平面図略図を第1図に、第1表にそのおもな仕様を示す。

第1図にみるように試験機には試験歯車①、②の1対と反対側に増速歯車③、④の1対があり、それらの歯数比は同じにとってある。ねじり継手をねじると、これら2対の歯車はそれぞれ互いに歯面が押し合う状態になり、その状態でねじり継手を緊定し電動機より駆動すれば試験機内で動力は循環することになり、電動機からは試験機内の損失分に相当する動力を供給すれば試験機は回転を続けることになる。ねじりによって生ずるトルクは歯車軸にはった抵抗線ひずみゲージによって測定した。

潤滑油供給のため12ℓ/minのギヤポンプ2台を有し、それぞれ150メッシュのろ過器を通して増速歯車および試験歯車に別個に吹き付けている。増速歯車と試験歯車で別の潤滑油タンクを有し、そ



第1図 動力循環式歯車負荷運転試験機の平面略図

第1表 歯車負荷運転試験機の仕様

原 理	動力循環式
原 動 機	10HP 誘導電動機
変 速 方 法	Vプーリー交換 2段階
歯 車 中 心 距 離	237mm 固定
歯 車 モ ジ ュ ー ル	6~8
大 歯 車 軸 回 転 数	1,064 rpm, 575 rpm
小 歯 車 軸 ト ル ク	45 m·kg まで
循 環 動 力	130HP まで
潤 滑 油	常用タービン油 No. 180
潤滑用ギヤポンプ	12 l/min 2台
潤滑油温度	20°C ないし 80°C の範囲で制御可能 (±2°C)
潤滑油ろ過器	150 メッシュフィルタ 4 個
そ の 他	歯車動荷重測定用スリップリングあり

の容量は約150ℓである。

歯車ピッチングには後述するように潤滑油粘度が大きく影響する。そこで負荷運転中に潤滑油粘度を一定にするために潤滑油の温度を制御する必要がある、試験歯車に対する給油装置のほうには温度制御装置が付属している。

3. 試験歯車および実験条件

第2表は実験に使用した歯車の諸元を示す。平歯車であり、試験機の歯車軸間距離が237mmで固定であるため小歯車に+0.127の転位がしてある。試験歯車の精度をなるべく高くし、かつ精度がそろい、また歯面あらさの良好な歯車を得て実験後の解析を容易にするためマーズ研削を行なった。なおマーズ研削は5枚の試験歯車を重ねて同時に行ない、各試験歯車の精度の差異をなくすようにした。

* 日立製作所中央研究所 工博

単一法線ピッチ誤差は最大 5μ である。

第3表は歯車素材の化学成分を示し、第4表は試験歯車と同じ条件で焼入れ焼きもどしを行なった素材の機械的性質を示す。小歯車の歯面は高周波焼入れしてあるので、第4表のS40Cについての値は歯の心部における機械的性質と考えられる。

第5表は実験条件で、大別して四つのグループに分けられる。1, 2, 3のグループでは歯車の周速はすべて同一であるが、潤滑油の温度が異なる。油の粘度は温度により著しく変化するので油温を変えると種々の粘度のもとで実験することが可能である。4のグループでは歯車周速が約半分である。

潤滑油は試験歯車を代えるごとに新油と交換した。

第2表 試験歯車諸元

	大 歯 車	小 歯 車
モ ジ ュ ー ル	8	8
圧 力 角	20°	20°
歯 数	40	19
歯 幅	20	25
転 位 係 数	0	+0.127
材 質	S35C	S40C
熱 処 理	焼入れ焼きもどし	焼入れ焼きもどし, 歯面高周波焼入れ
歯 面 最 終 仕 上 げ	マージ研削	マージ研削

第3表 歯車素材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr
S35C	0.34~0.35	0.27	0.58~0.59	0.016~0.020	0.013~0.016	0.03~0.04
S40C	0.39	0.31~0.36	0.67~0.68	0.020~0.021	0.014~0.016	0.03~0.04

第4表 歯車素材の機械的性質

	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 り 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	硬 度 (H _B)
S35C	50.4~51.1	79.5	20~26	48	229~235
S40C	55.0~55.8	78.2	26~28	58	207~217

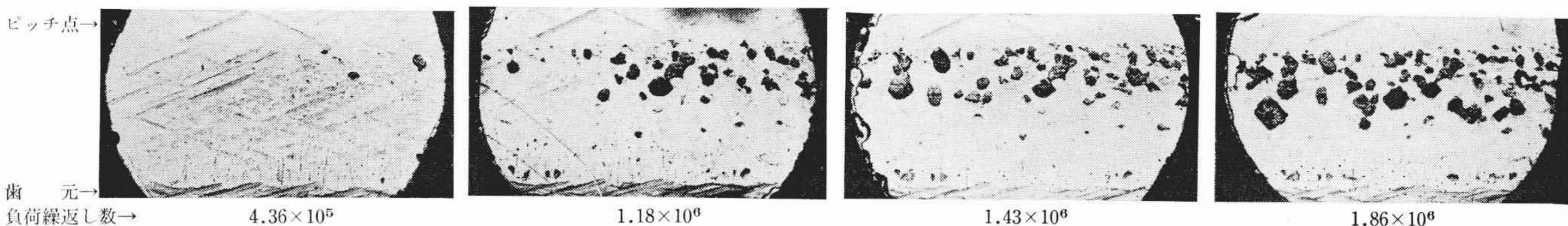
4. 実 験 結 果

4.1 歯 面 の 状 態

負荷運転中の試験歯車について適当な負荷繰返し数において、大歯車歯面のスンプ写真を撮影した。その代表例を第2図ないし第7図に示す。第2図および第3図は歯車周速17.9 m/s、潤滑油温度50℃の場合の例であり、第2図ではピッチングが発生後負荷繰返し数とともに急激に増加した。接線力が146 kg/cm以上ではいずれもこれと同様の傾向があった。これに対し第3図の例ではピッチングは発生したが、その発達速度はきわめておそく、またある程度負荷繰返し数を経過するとその発達が停止するような傾向があった。第2図のように、急激にピッチングが発達する場合を進行性ピッチング、第3図のようにピッチングの発達が停止するような傾向のものを非進行性ピッチングと称することにする。

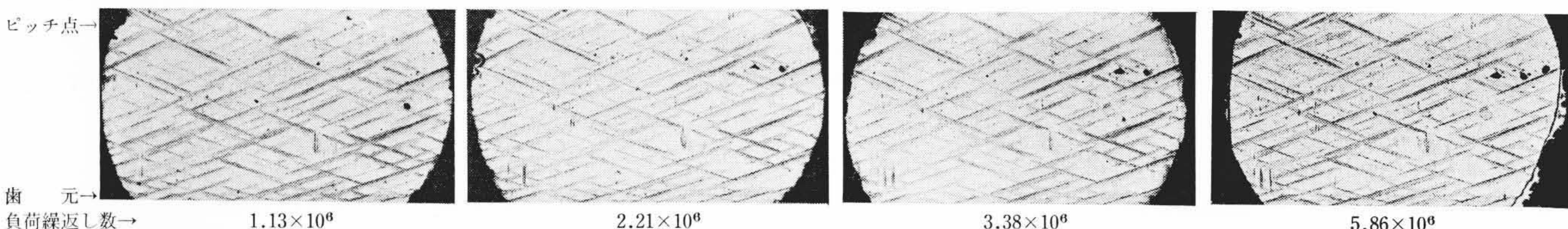
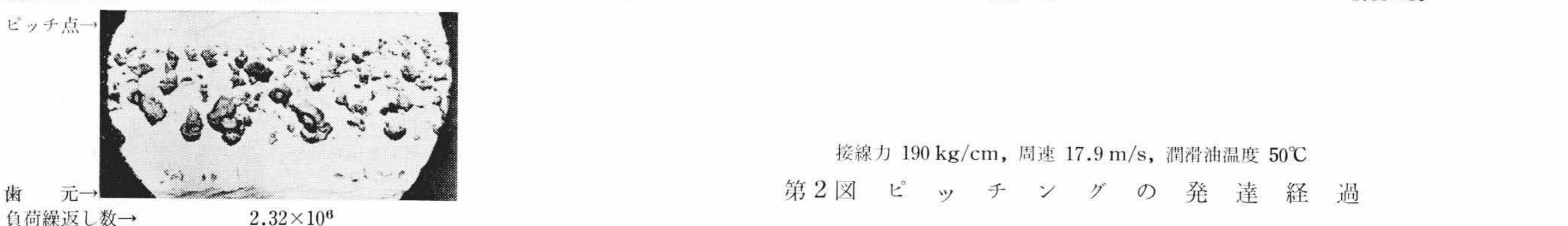
第5表 実験条件 (潤滑油タービン油 No. 180)

実験番号	接線力 (kg/cm)	伝達馬力 (HP)	ピッチ点 の最大接 触応力 (kg/mm ²)	回 転 数 (rpm)		ピッチ円 の周速 (m/s)	潤滑油温 (°C)
				大歯車	小歯車		
1-1	242	115.5	72.2	1,064	2,240	17.9	50
1-2	190	90.6	63.9				
1-3	151	72.0	57.0				
1-4	146	69.6	56.1				
1-5	138	65.8	54.5				
1-6	124	59.2	51.6				
2-1	302	144.0	80.5	1,064	2,240	17.9	20
2-2	257	122.6	74.3				
2-3	215	102.5	68.0				
2-4	186	88.7	63.3				
2-5	154	73.5	57.5				
3-1	133	63.5	53.5	1,064	2,240	17.9	80
3-2	131	62.5	53.1				
3-3	102	48.6	46.9				
4-1	131	33.8	53.1	575	1,210	9.67	50
4-2	129	33.3	52.7				
4-3	114	29.4	49.5				
4-4	99	25.6	46.1				



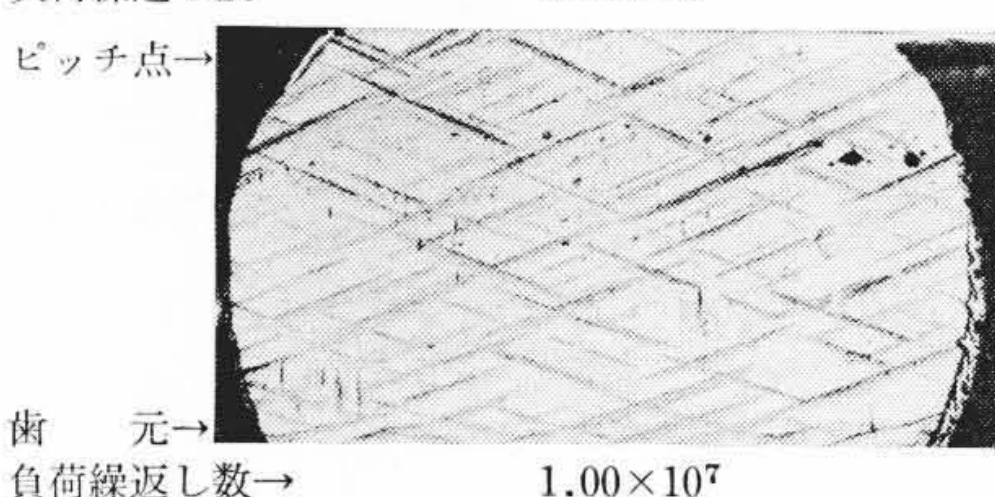
接線力 190 kg/cm, 周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50℃

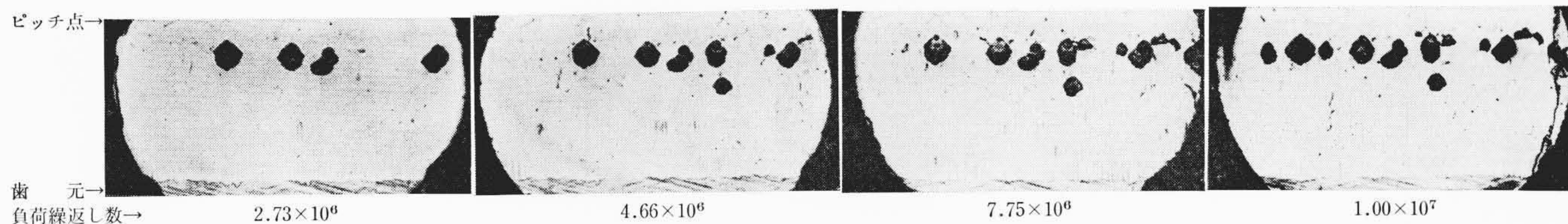
第2図 ピッチングの発達経過



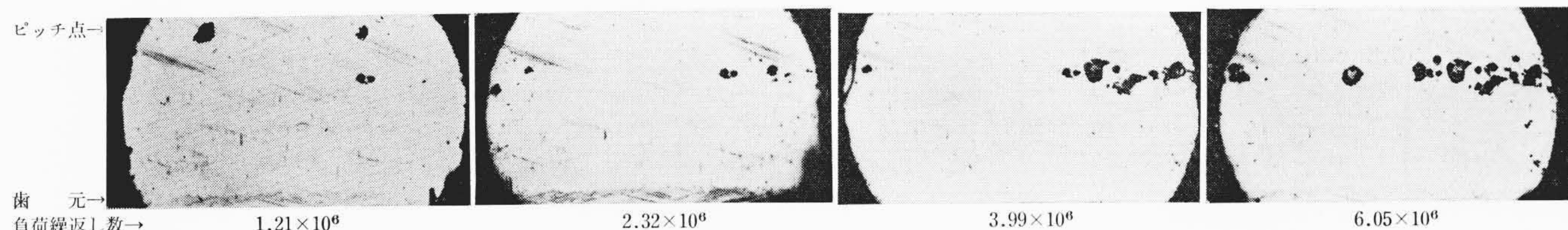
接線力 124 kg/cm, 周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50℃

第3図 ピッチングの発達経過

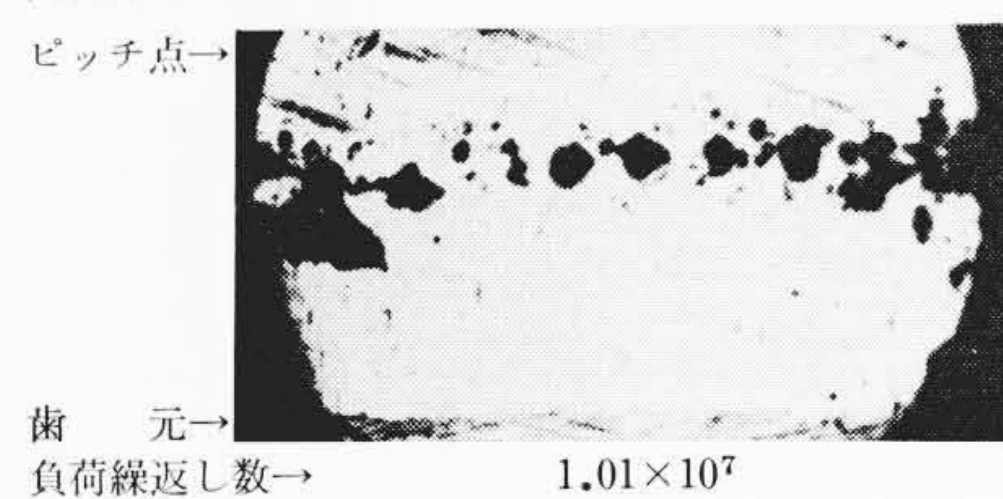




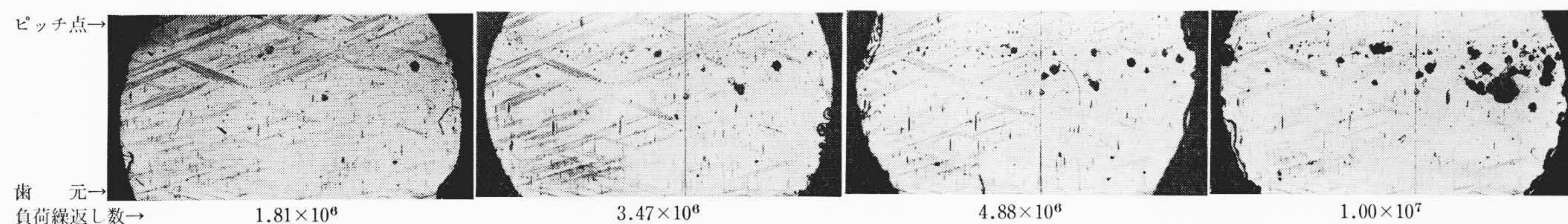
第4図 ピッチングの発達経過



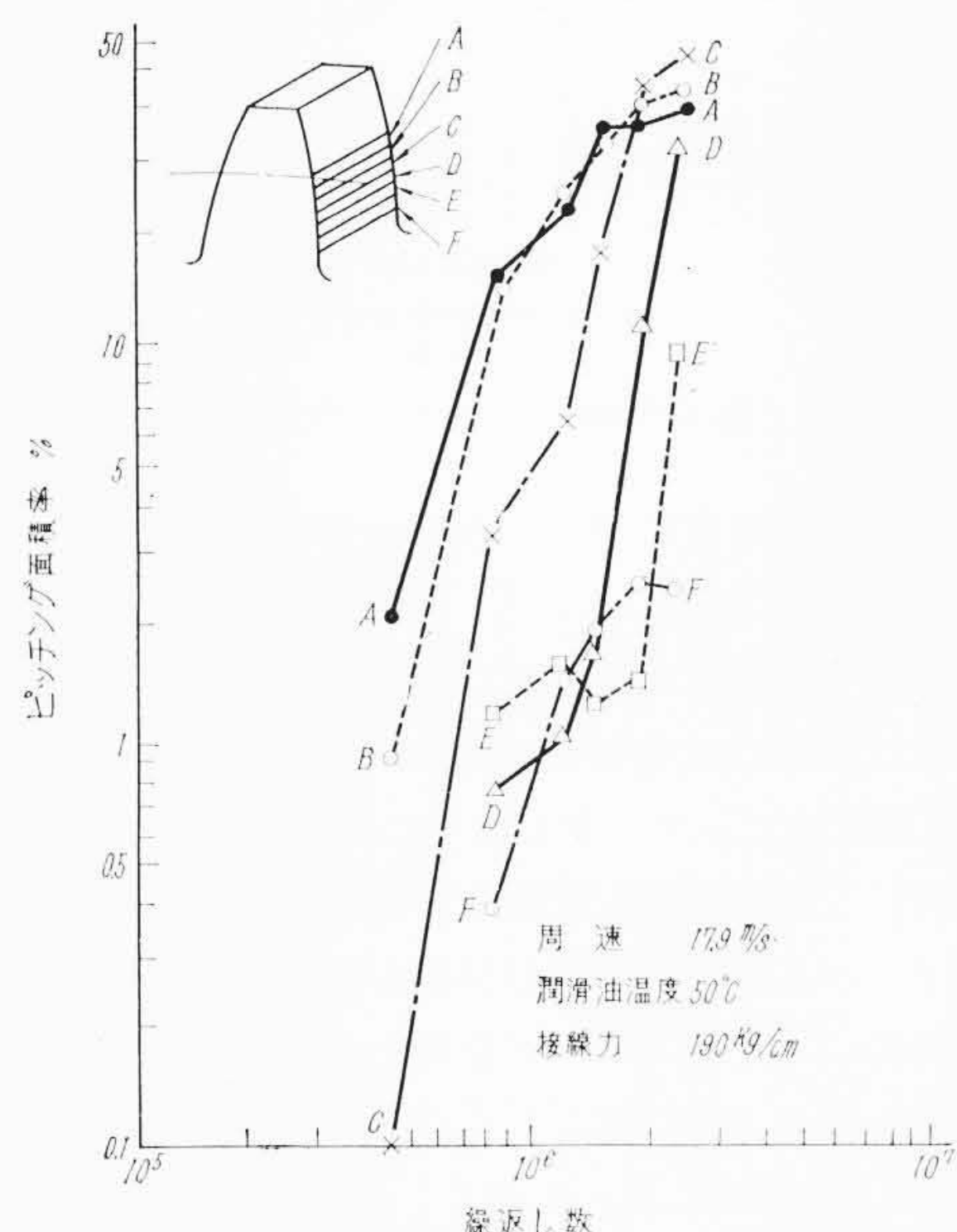
第5図 ピッチングの発達経過



第6図 ピッチングの発達経過



第7図 ピッチングの発達経過



第8図 ゾーン別ピッチング面積率と繰返し数の関係

第4図は歯車周速 17.9 m/s、潤滑油温度 20°C で進行性ピッチングとなった一例を示す。接線力 257 kg/cm 以下では非進行性ピッチングとなった。

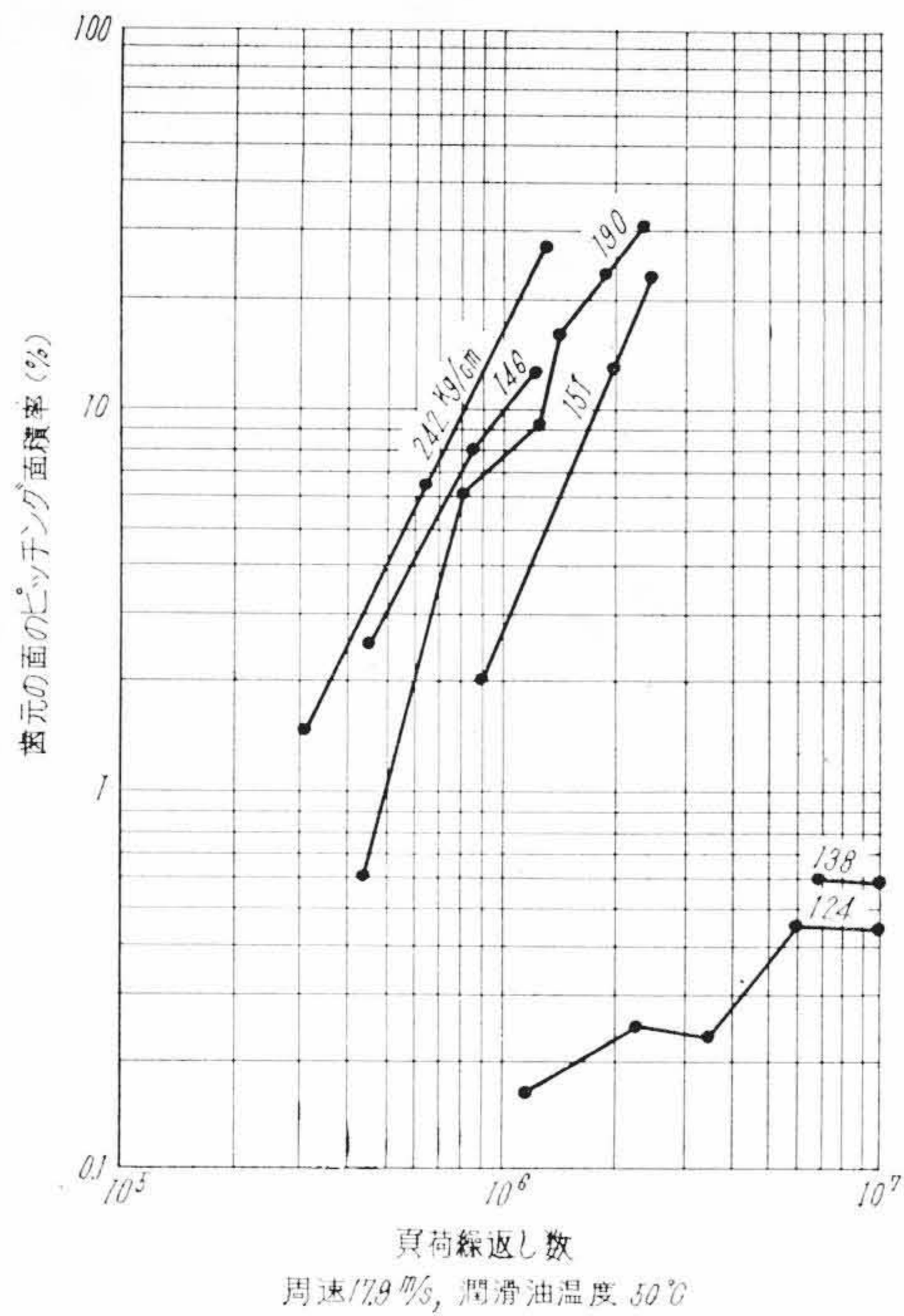
第5、6図は歯車周速 17.9 m/s、潤滑油温度 80°C の場合の例である。接線力 131 kg/cm 以上で進行性ピッチング、102 kg/cm では第6図のように非進行性ピッチングとなったがマージ研削目は完全に消失し、潤滑油膜が薄いことが示される。

第7図は歯車周速 9.67 m/s、潤滑油温度 50°C の場合の一例である。接線力が 114 kg/cm 以上では進行性ピッチングとなり、99 kg/cm では非進行性ピッチングとなった。

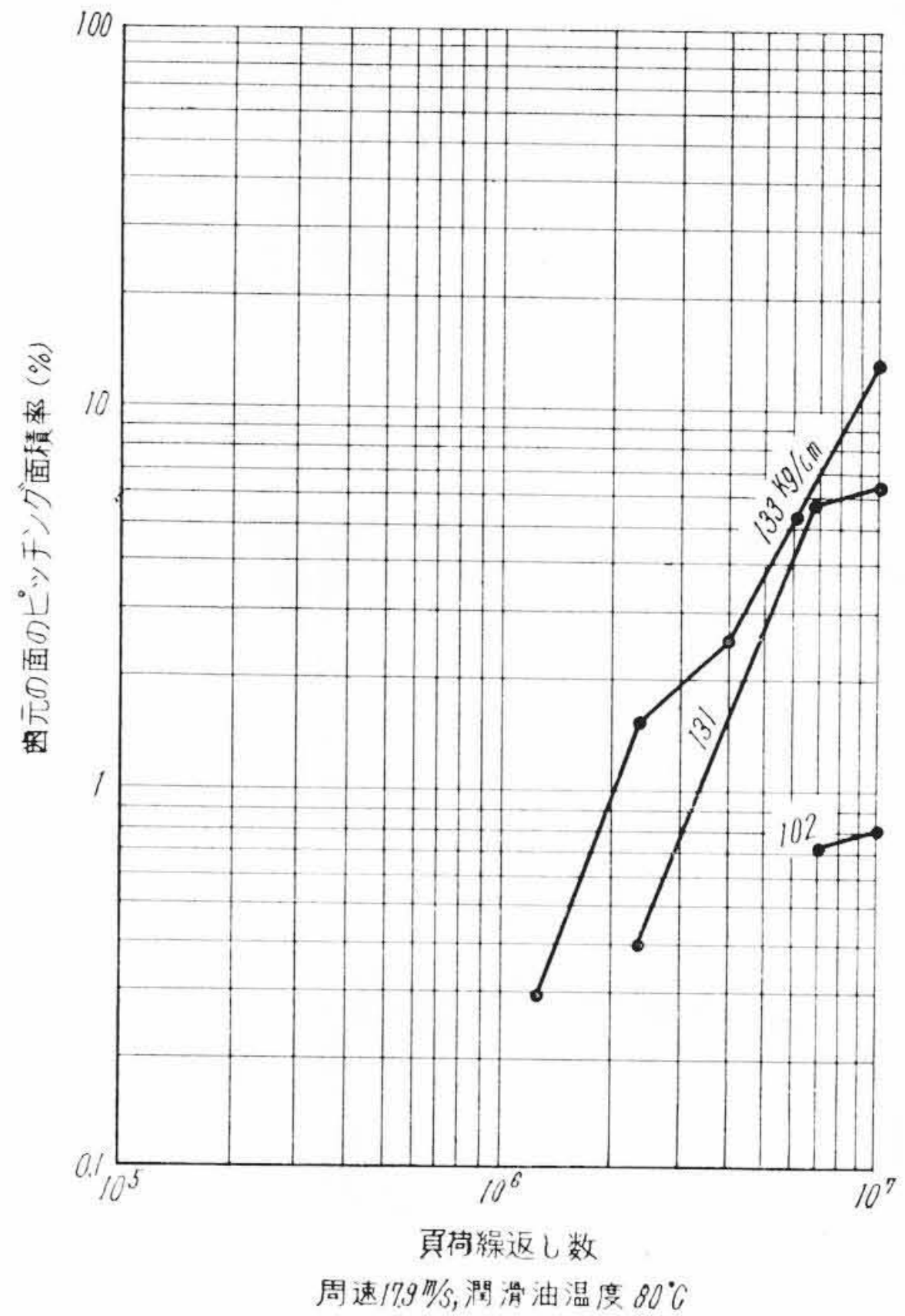
なお、小歯車の歯面は高周波焼き入れしてあるのでピッチングは発生しない。

4.2 ピッチング面積率

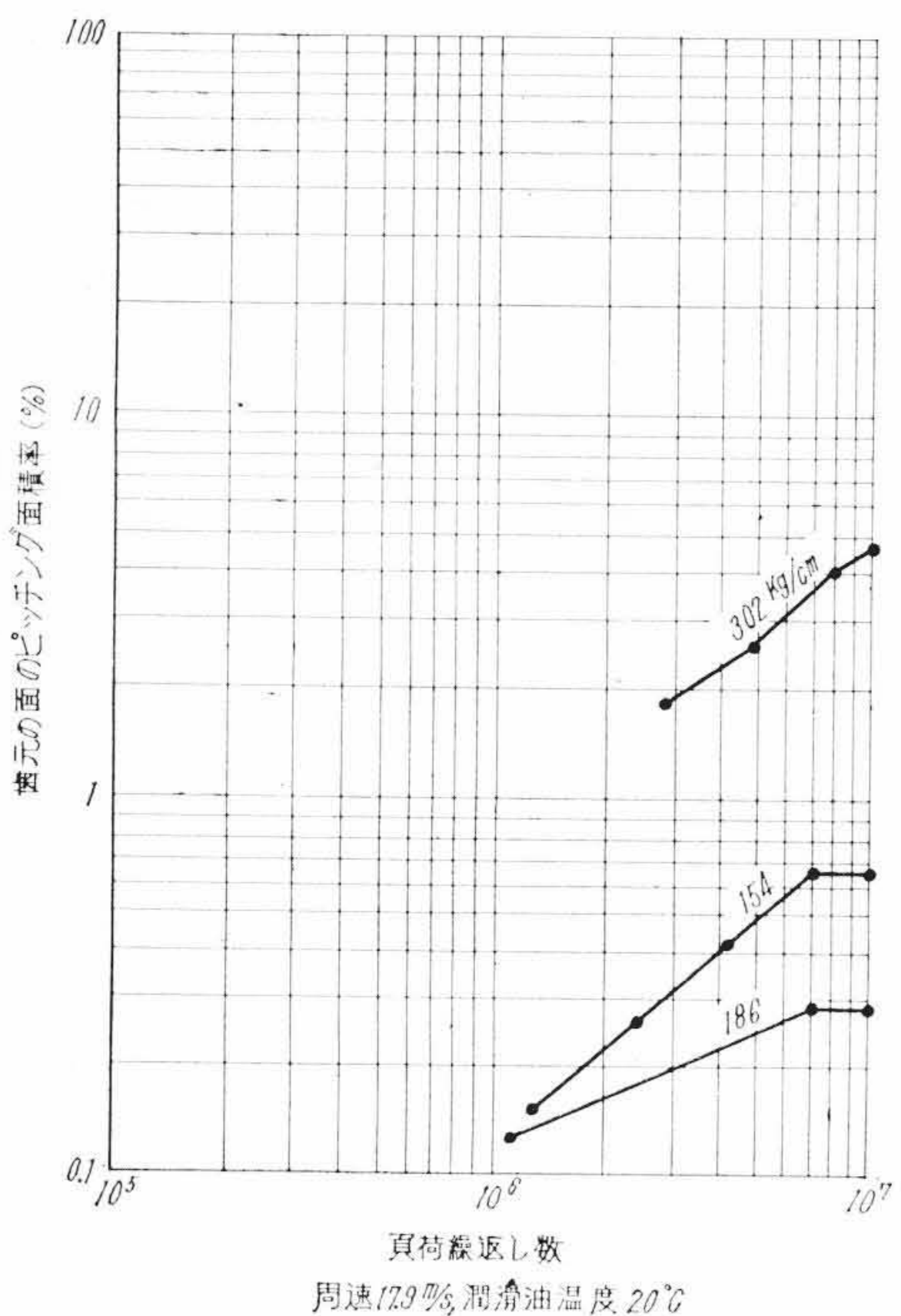
ピッチングが歯面の場所によりどのように増してゆくかを定量的に調べるために、第8図のように、大歯車の歯元の面を歯形に沿って六つのゾーンに分け、各ゾーンのピッチング面積率（ピッチング面積と全面積との比）と負荷繰返し数との関係を調べた。第8図はその一例で、これからピッチングは最初ピッチ点寄りのABゾーン付近に発生し、繰返し数とともに急激に増大するが、ある程度まで増すとそのふえ方が低下する。このようになると今度は歯元寄りの



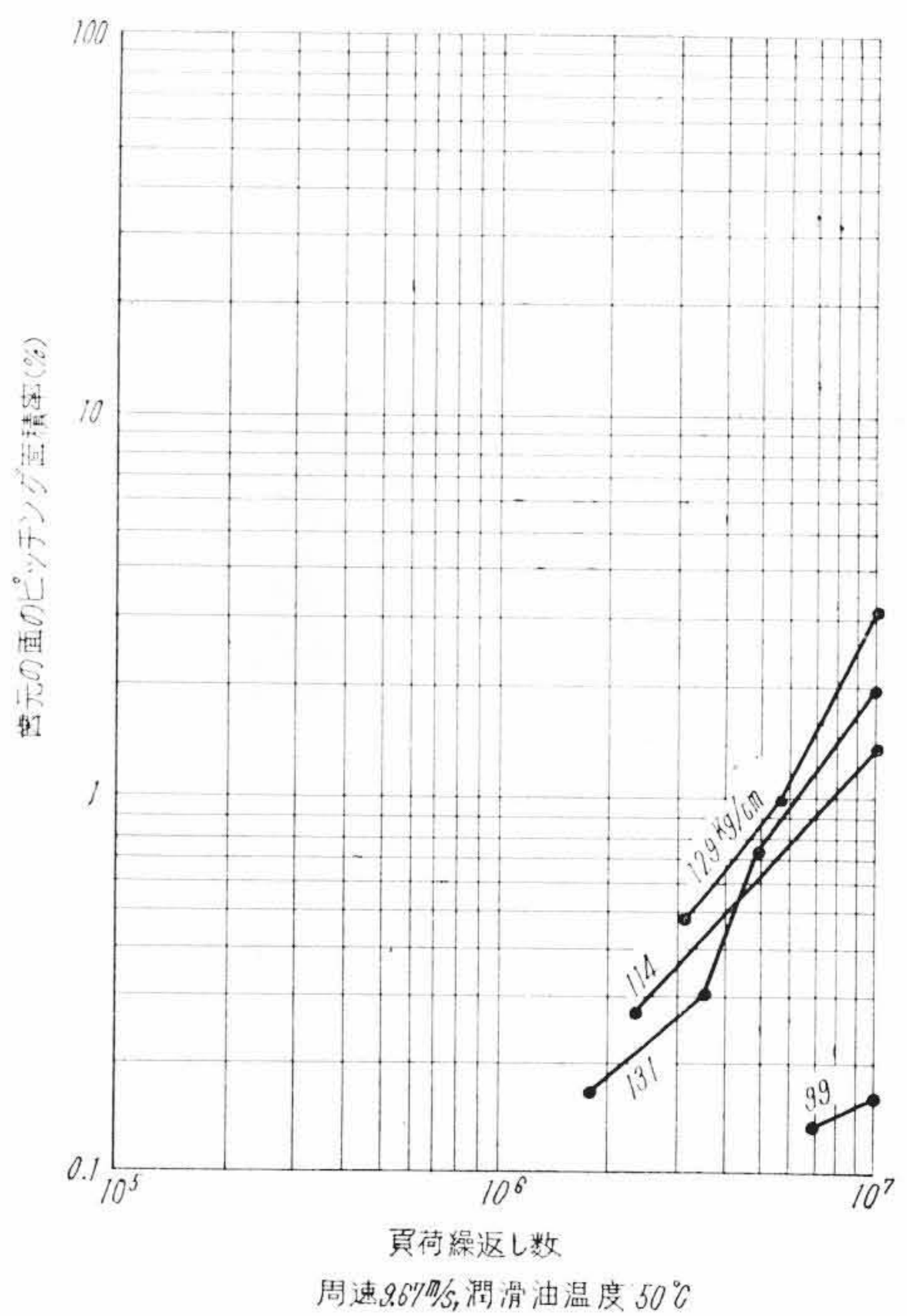
第9図 歯元の面のピッチング面積率の変化



第11図 歯元の面のピッチング面積率の変化



第10図 歯元の面のピッチング面積率の変化



第12図 歯元の面のピッチング面積率の変化

DEゾーンのピッチングが増しはじめる。進行性ピッチングとなる場合はいずれもこれと同様の傾向を有する。非進行性ピッチングの場合には、ピッチングはABゾーンのみに発生するが、その量も少なく、また負荷繰返し数とともにその発達が飽和ないし停止するような傾向を示す。

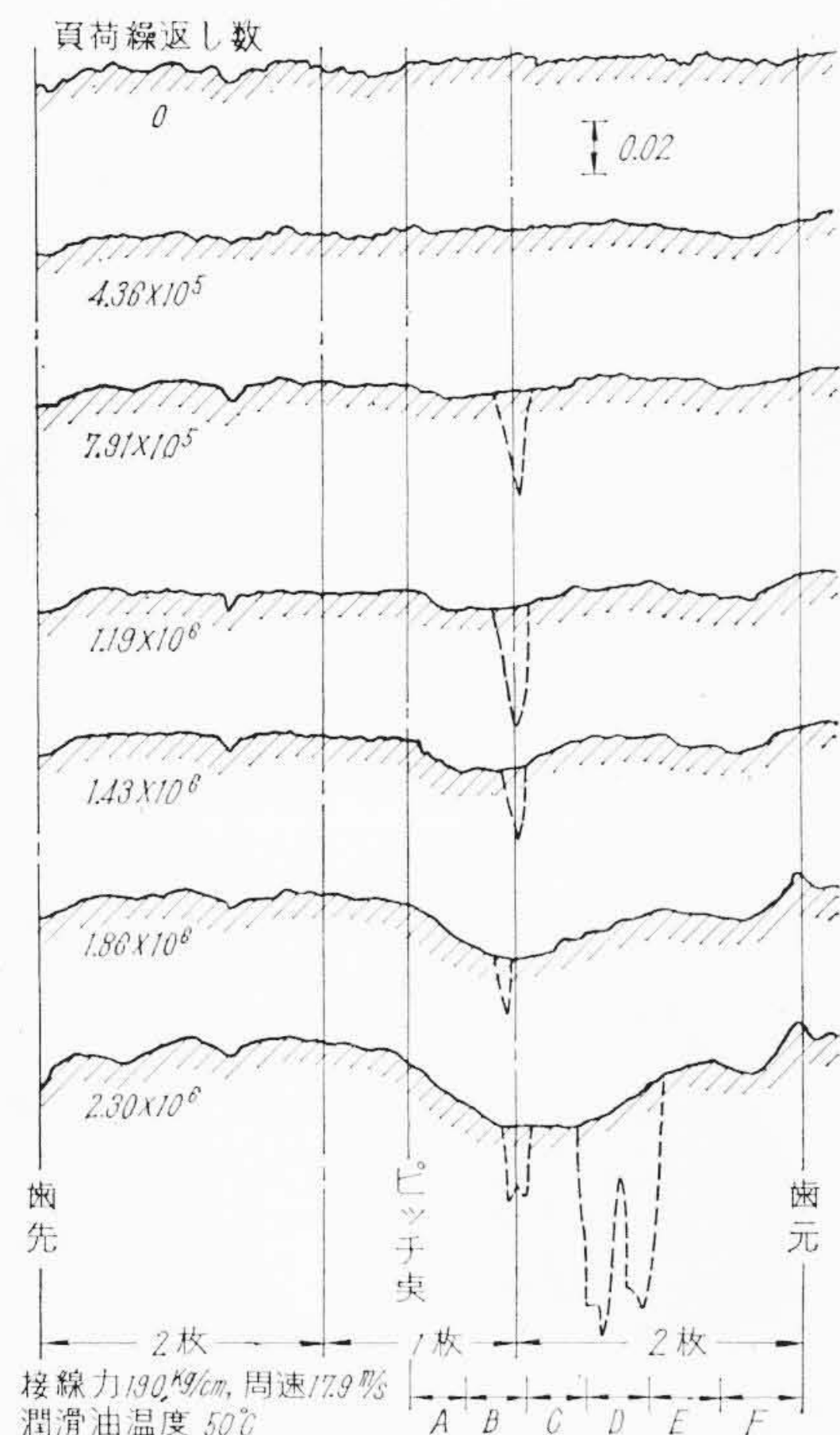
第9図ないし第12図は各実験グループごとに、接線力をパラメータとして、大歯車の歯元の面全体のピッチング面積率の変化を示す。これらの図から、各実験グループともに、ある接線力を境にして、それ以上ではいったんピッチングが発生すると以後急速に発達するが、ある接線力以下ではピッチングの発生はわずかであり、さらにその発達はおそく、負荷繰返し数とともに飽和ないし停止するような傾向を有することが示される。また、ピッチングの発生は潤

滑油粘度および歯車周速に著しく影響を受けることが示される。

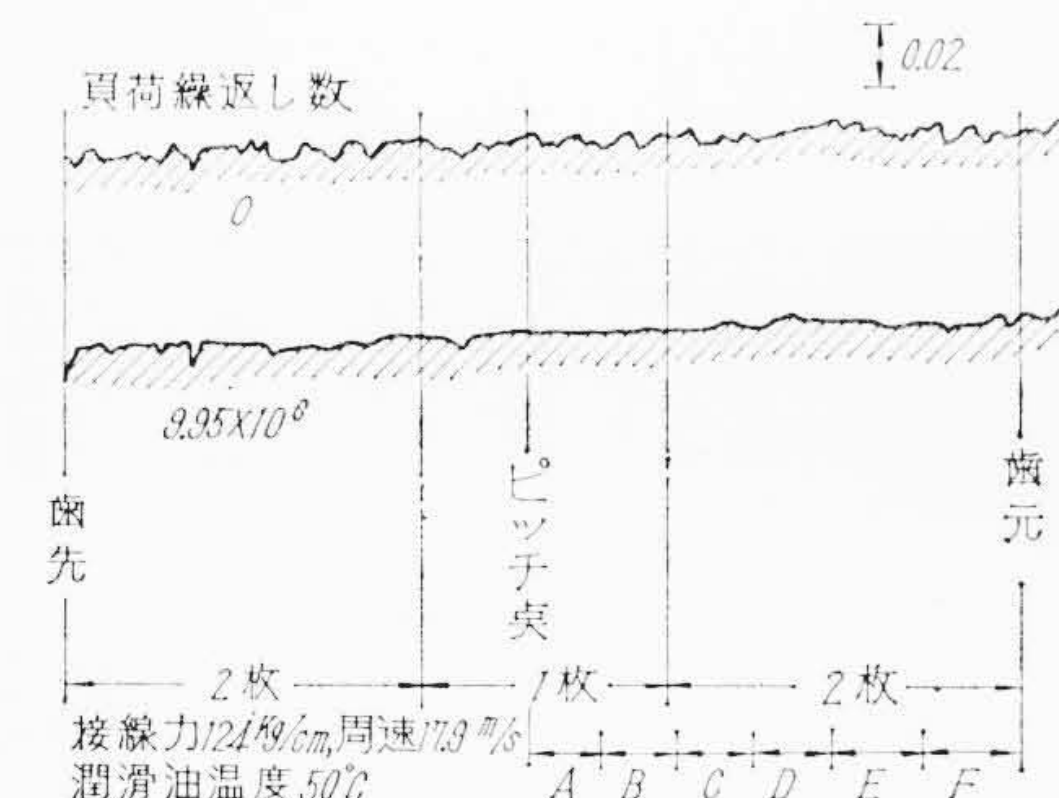
4.3 歯形の変化

各試験歯車とも適当な負荷繰返し数において歯形誤差を測定した。測定位置は歯幅のほぼ中央で常に同一場所である。

第13図は進行性ピッチングとなった場合の測定例を示す。図の点線の部分は、この歯形測定位置の歯面にピッチングが発生し、それにインボリュート試験機の触針が落ち込んだものである。この位置で歯幅方向にまだピッチングを起こさない部分の歯形はこの切れ込みの上部を図のように結んだものと考えられる。負荷運転開始前(繰返し数0)に歯面にあった細かい凹凸(おうとつ)は運転開始後間もなくその凸部がすり落ち、ピッチングが急激に発達するABゾーン付近では歯面に凹みを生じる。これは後述するように、ピッ



第13図 歯形の変化



第14図 歯形の変化

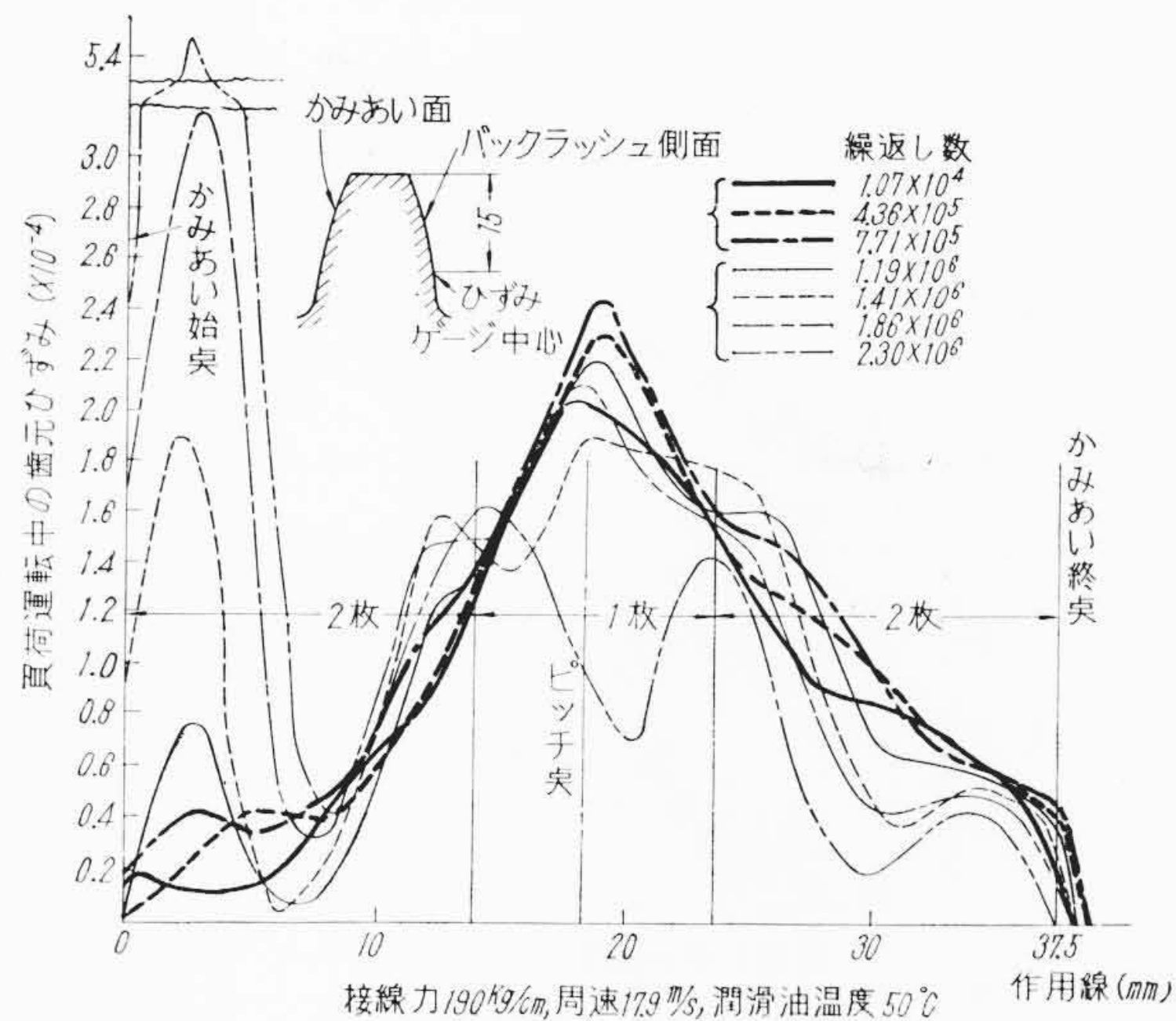
チングが多く発生した部分では歯面の受圧面積が減少し、その部分の歯面材料が plastic flow を起こし、そのため歯形に凹みを生じるものと考えられる。

第14図は非進行性ピッチングとなった場合の一例で、運転開始前にあった細かい凹凸の凸(とつ)部がすり落ちる以外に歯形の変化はない。なお小歯車の歯形はいずれの場合もまったく変化しない。

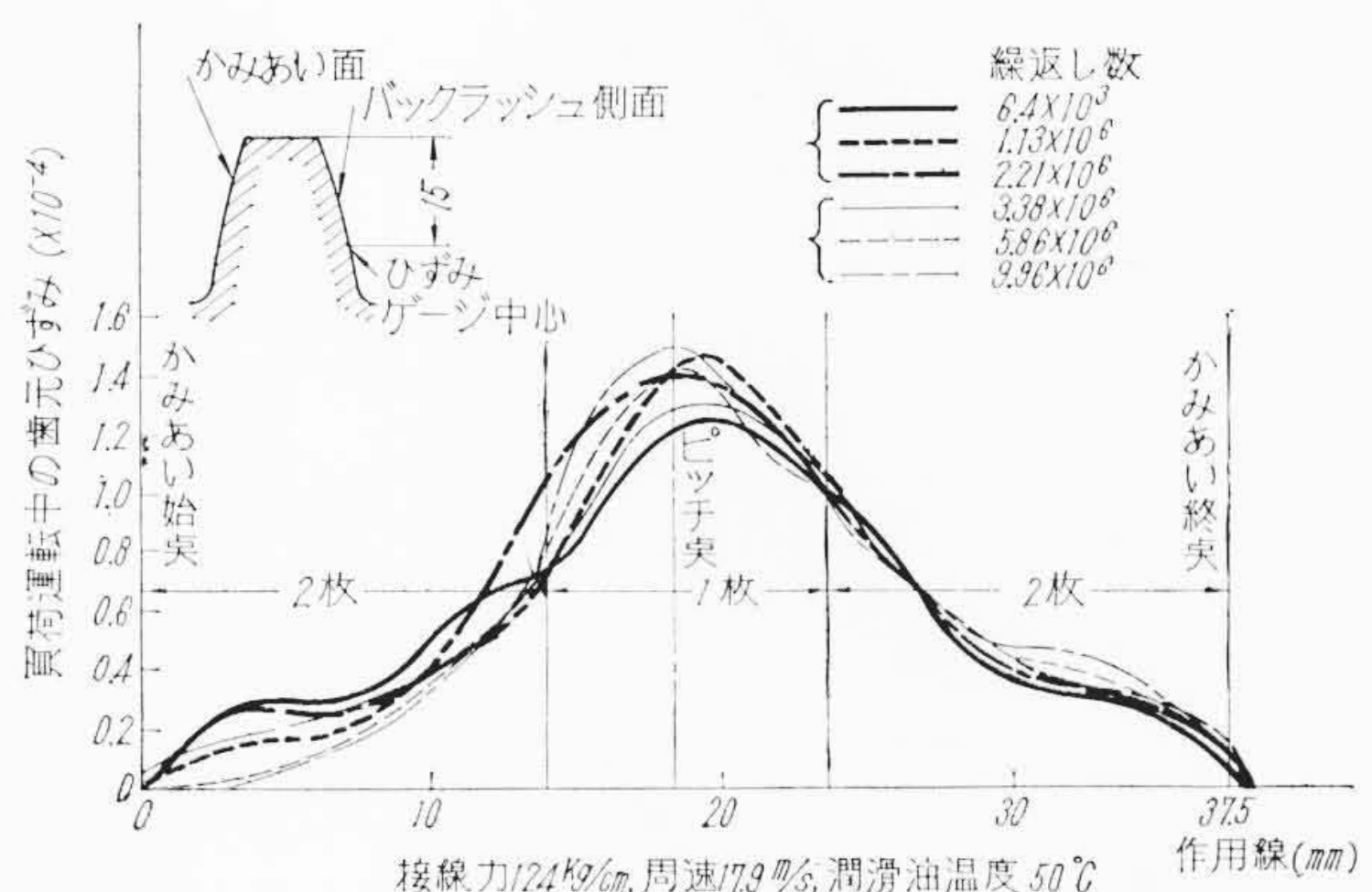
4.4 歯車の動的挙動の変化

適当な負荷繰返し数において運転中の歯にかかる荷重、すなわち動荷重を測定した。動荷重の測定法については報告⁽¹¹⁾があるので、ここでは詳しいことは省略する。第15図の左上に示すように各試験大歯車の歯のバックラッシュ側の歯元に抵抗線ひずみゲージをはり、スリップリング、増幅器、ブラウン管オシロスコープにより運転中のひずみの抵抗変化を測定し、動的ひずみ波形を求めた。

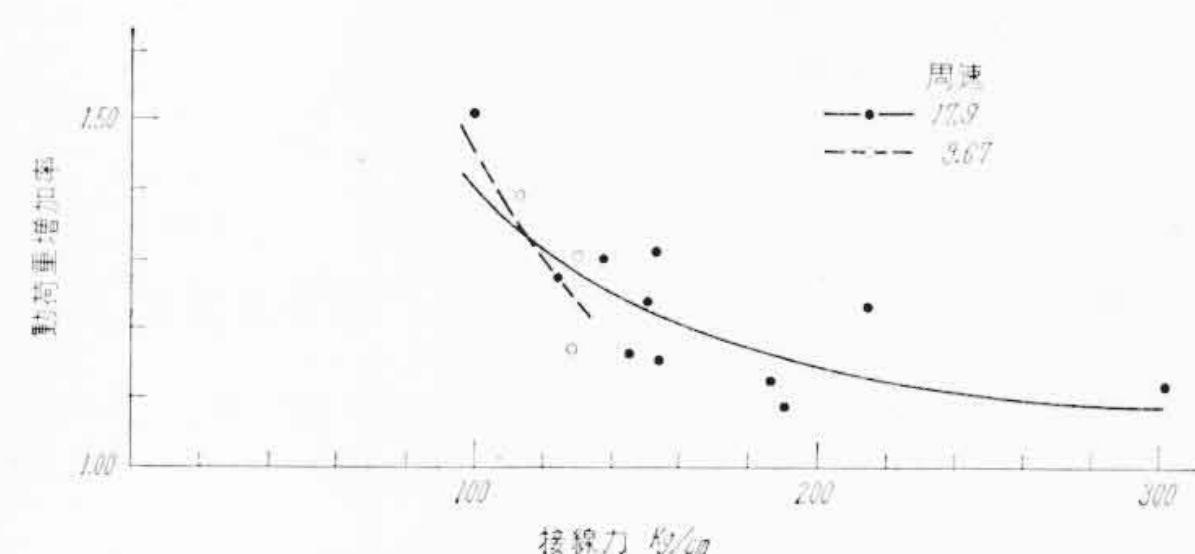
第15図は進行性ピッチングとなった場合の測定例を示す。横軸は作用線上のかみあい位置を示し、かみあいは左から右に向かって進む。幾何学的形状の正しい剛体歯車のかみあいを考えた場合の1枚かみあいおよび2枚かみあい範囲を示してある。運転開始後しばらくの間はひずみ波形にほとんど変化なく、最大歯元ひずみは1枚かみあい範囲に生じる。しかし、徐々にかみあいはじめ、すなわち大歯車の歯先に衝撃荷重が加わりはじめ、動的挙動が大きく変化する。歯元ひずみの最大値に注目すると、運転開始直後(繰返し数 1.07×10^4) では、かみあいがピッチ点付近にあるときに歯元ひずみは最



第15図 歯元ひずみの変化



第16図 歯元ひずみの変化

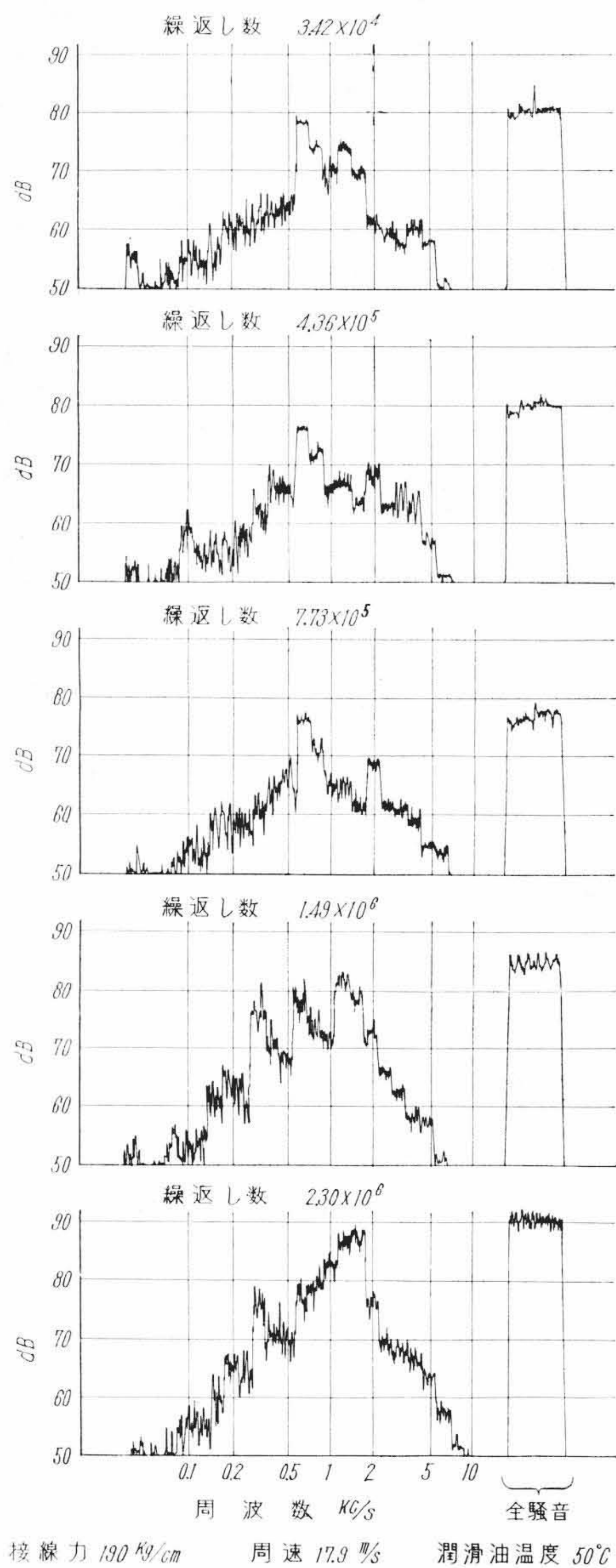


第17図 最初にピッチングが発生する場所の動荷重増加率

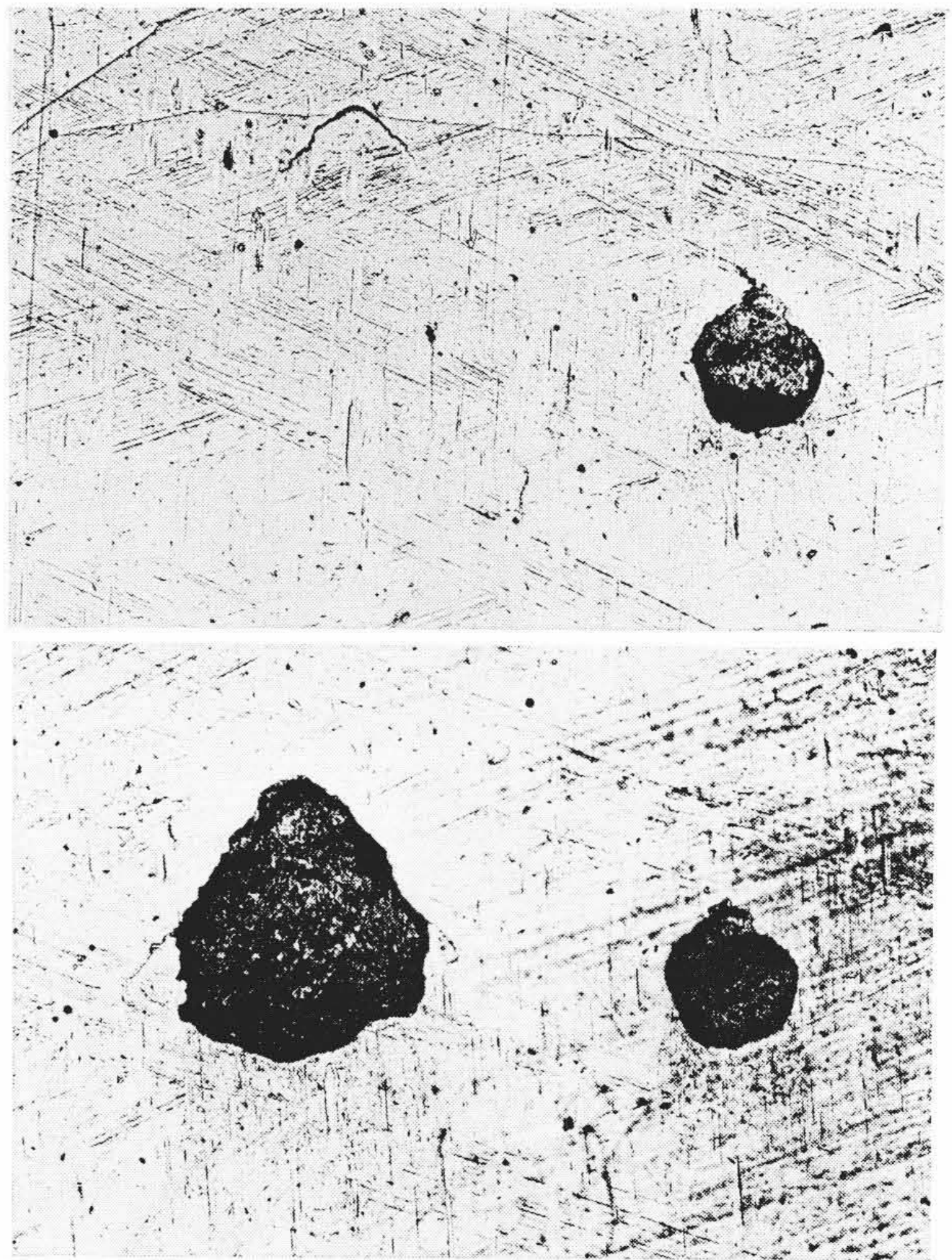
大になり、その大きさは 2.05×10^{-4} 程度である。しかし繰返し数 2.30×10^6 ではかみあいが大歯車歯先付近にあるときに歯元ひずみは最大になり、その値は 5.45×10^{-4} 程度に達し、運転開始直後に比べ約 2.65 倍になっている。

歯車の動的挙動は歯車の誤差と密接な関連があることは当然であり、負荷運転の継続による動的挙動の変化の主原因は、前節で述べたピッチングの発達に伴う歯形の変化に起因する。第16図は非進行性ピッチングの場合の測定例で、この場合は負荷運転によって歯形に変化が生じないから、動的挙動もほとんど変化せず、したがって歯車としての運転性能にも変化がない。

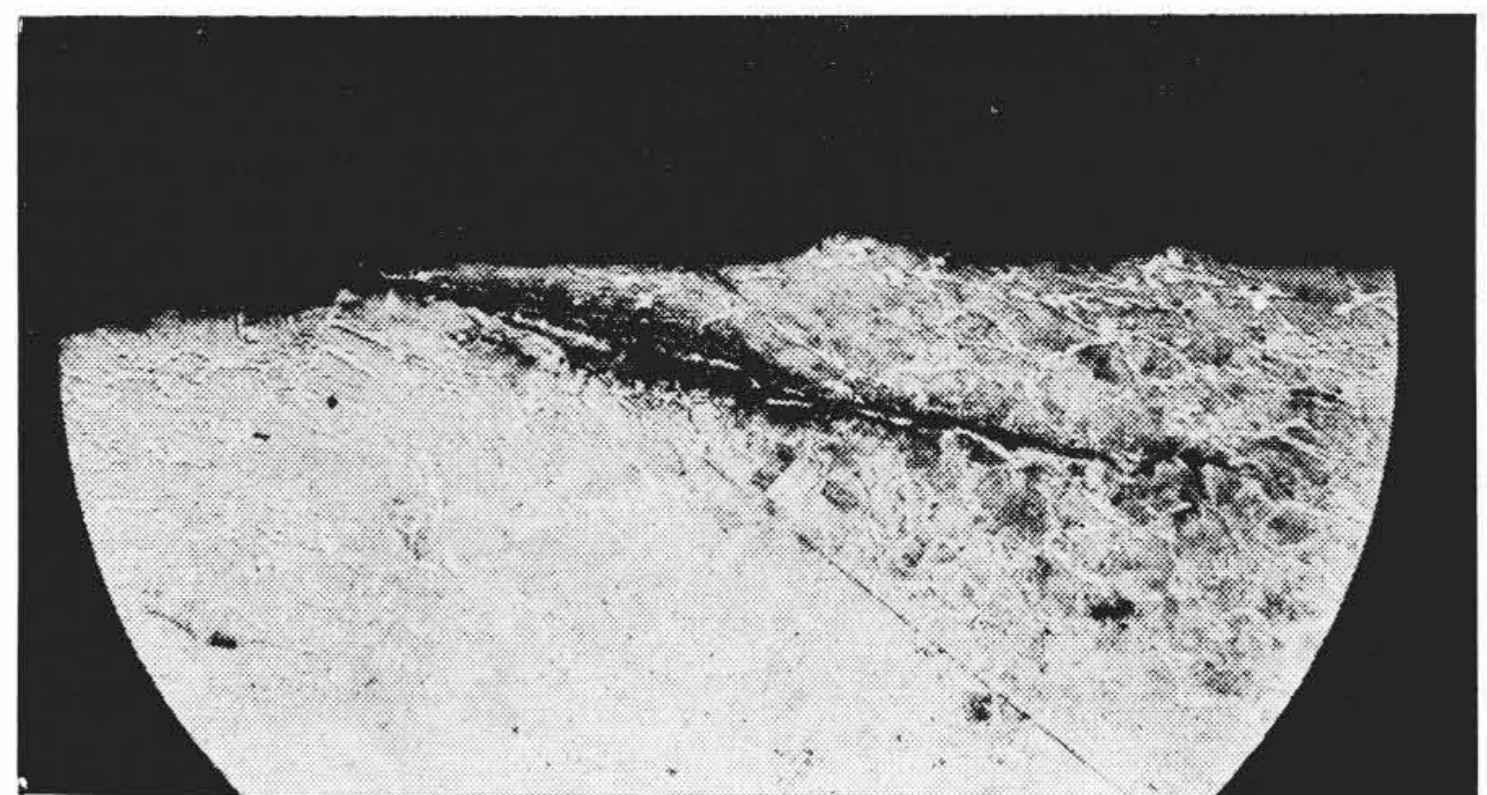
第17図は大歯車歯面の最初にピッチングが発生する場所(ピッチ点より約 1 mm 歯元寄りの部分)について、負荷運転開始時の動荷重増加率を求めたものである。前述のひずみ波形から、ピッチングがかなり発達するまではひずみ波形は大差ないと考えられるから、ピッチングが発生するまでのこの場所の荷重を算定する場合には、静的に加えた荷重にこの動荷重増加率を乗ずればよい。



第18図 歯車騒音の変化



第19図 歯面からみたピッチングの形成 (20倍)


 接線力 190 kg/cm, 周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C
 負荷繰返し数 2.30×10^5 , 倍率 96倍

第20図 歯断面の顕微鏡写真

4.5 ピッチングの発達と歯車騒音との関係

歯車周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C の場合についてのみ, 適当な負荷繰返し数において, 試験機から発生する騒音を測定した。マイクロホンは試験歯車のかみあい点から試験機の軸方向に試験機の外側 1 m の距離におき, 騒音レベルおよびその周波数分析を行なった。

第18図はその一例で, 進行性ピッチングの場合を示している。全騒音は負荷繰返し数とともに上昇する。その周波数分析結果では運転開始直後には毎秒かみあい歯数 (712 枚) にほぼ等しい周波数の騒音が著しいが, ピッチングの発達とともに毎秒かみあい歯数の 2 倍の周波数の騒音が顕著に増大する。非進行性ピッチングの場合は全騒音, その周波数ともに運転開始時と大差なく, 毎秒かみあい歯数にほぼ等しい周波数の騒音が顕著である。

5. 実験結果の取りまとめと考察

5.1 歯車ピッチングの特長

第19図はピッチングの形成を示すスンプ写真である。歯面から観察すると, ピッチングクラックはまず上の写真のようにピッチ点寄りに口をあけ, 次にこれが下の写真のように扇形の破片となって

歯面からはがれる。この場合, ピッチングの増し方には特長があり, 一つのピッチングに注目すると, すぐ隣りに発生したピッチングと連絡する場合を除き, そのピッチングの回りが徐々に欠けて穴の大きさが大きくなることはなく, 新たな場所に新たなピッチングが生じ, その数が増加する。

大部分のピッチングの形状は

- (1) 二つの直線および 1 本の曲線で囲まれた頂角 90 度ないし 120 度の扇形をなし,
- (2) 扇形の頂点のところは乳頭状をなすものがあり,
- (3) 歯車の軸直角断面に平行な直線に対称であり,
- (4) その大きさは大きいものでも 2 mm くらいである。

これらの形状の特長は A. Meldahl 氏のローラ実験⁽⁶⁾による結果と一致し, 一般にまだら形ピッチングと称されるものである。

第20図ないし第22図は実験終了後の歯車の歯断面の顕微鏡写真である。歯面には第20図のようにマイクロクラックが多数観察される。これらのクラックの歯面とのなす角度は 20 度前後のものが多く, いずれもピッチ点寄りに口をあけている。歯断面を少しずつ削り落とし, 顕微鏡でたんねんに観察したが表面下に発生したマイクロ



接線力 124 kg/cm, 周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C, 負荷繰返し数 9.55×10^6 , 倍率 325 倍

第 21 図 歯断面の顕微鏡写真



接線力 124 kg/cm, 周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C, 負荷繰返し数 9.93×10^6 , 倍率 96 倍

第 22 図 歯断面の顕微鏡写真

クラックは発見できなかった。なお、この写真は負荷運転終了後の歯断面であるため、歯面にはすでに多くのピッチングが発生し、歯形も変化してからの状態の歯断面であり、したがって表面の近くには plastic flow が見られる。

第 21 図は非進行性ピッチングとなった場合の歯断面を示す。この場合には plastic flow はほとんどみられず、plastic flow を生じなくてもピッチングが発生することがわかる。なお、ピッチングクラックは貫粒形である。

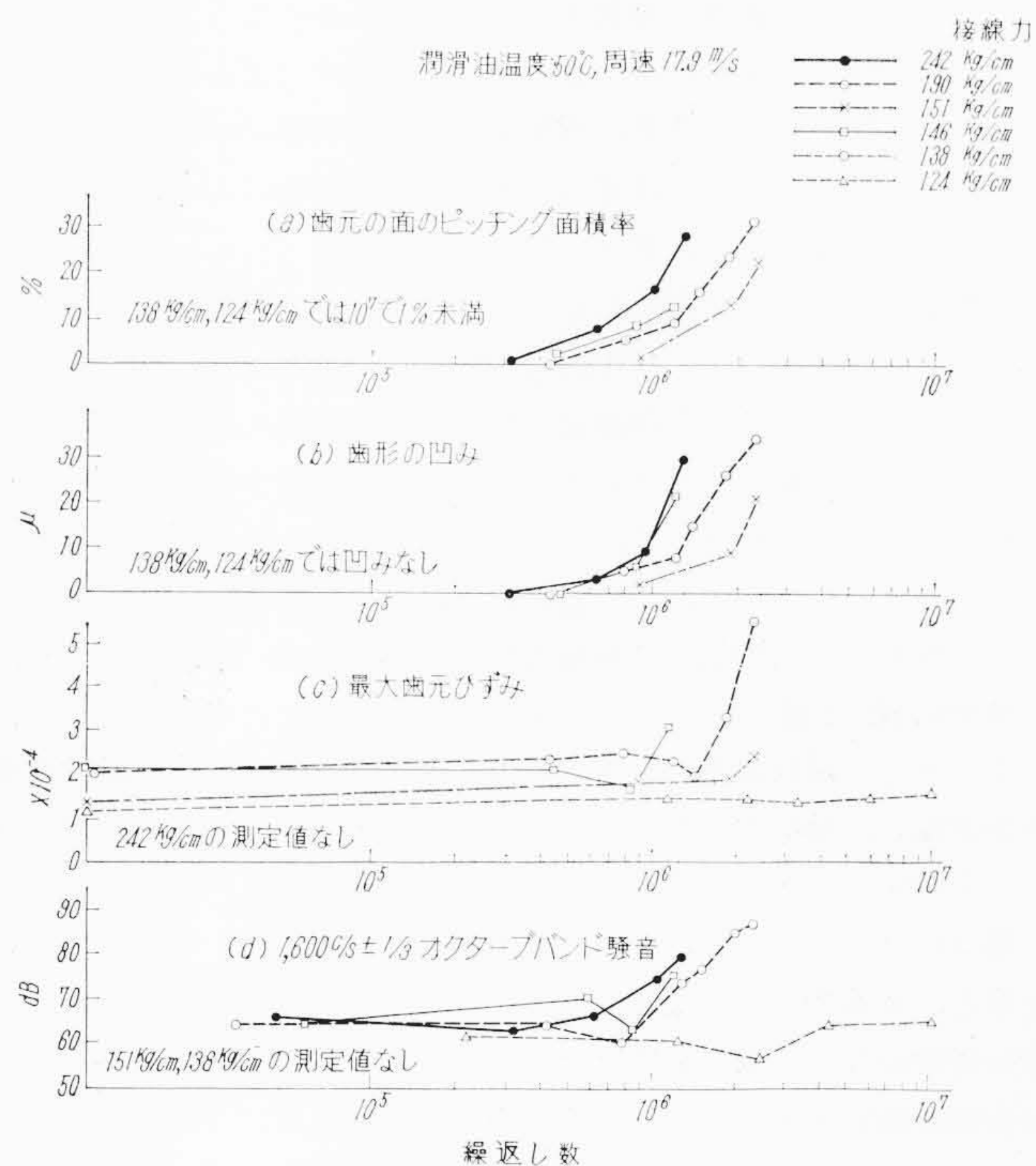
第 22 図は同じく非進行性ピッチングとなった場合の歯断面で、第 21 図では plastic flow がみられなかったが、この写真では部分的に plastic flow を起こしていることがわかる。これは、歯面のあらさに起因し、運転開始直後に荷重が集中すると考えられる歯面凸部では plastic flow を起こし、このようにして歯面の荷重分布が徐々に一様になるものと思われる。

5.2 負荷荷重とピッチングとの関係

第 23 図は歯車周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C の場合の実験結果をまとめて示し、比較対照したものである。

(a) 大歯車の歯元の面のピッチング面積率とは、歯元の面全面について考え、そこに生じているピッチングの面積と歯元の面全面積との比であり、接線力が 138 kg/cm および 124 kg/cm の場合は負荷繰返し数が 10^7 に達しても 1% 未満であったため図には記入されていない。

(b) 歯形の凹み量は第 13 図のような歯形誤差の測定結果から、ピッチングの発達による歯形の変化を表わしたものである。すなわち負荷運転開始前(負荷繰返し数 0)の歯形を基準にして、ピッチ点よりわずか歯元寄りの部分の歯形の凹み量(ピッチングを除く)を表わす。この凹み量はピッチングの発達に伴う歯形誤差の増大を表わすとも考えることもできる。接線力 138 kg/cm および 124 kg/cm の場合は運転開始前に歯面に存在した細かい凹凸の凸



第 23 図 負荷荷重と歯車性能の関係

部がすり落ちた以外に歯形の変化はなかったため、この図には記入されていない。

(c) 試験歯車の抵抗線形ひずみゲージをはった位置で一歯のかみあい中にひずみゲージが受ける最大ひずみを表わす。接線力 146 kg/cm 以上ではピッチングの発達とともに歯元ひずみの最大値も急激に増加するが、非進行性ピッチングとなる 124 kg/cm の

場合の歯元ひずみはほとんど変化しない。なお第15図よりわかるように、この歯元ひずみの最大値はピッチングがあまりひどくない場合にはかみあいピッチ点付近にあるときに生ずるが、ピッチングがある程度以上発達するとかみあい開始直後、すなわちかみあいが大歯車歯先にあるときに生ずるようになる。

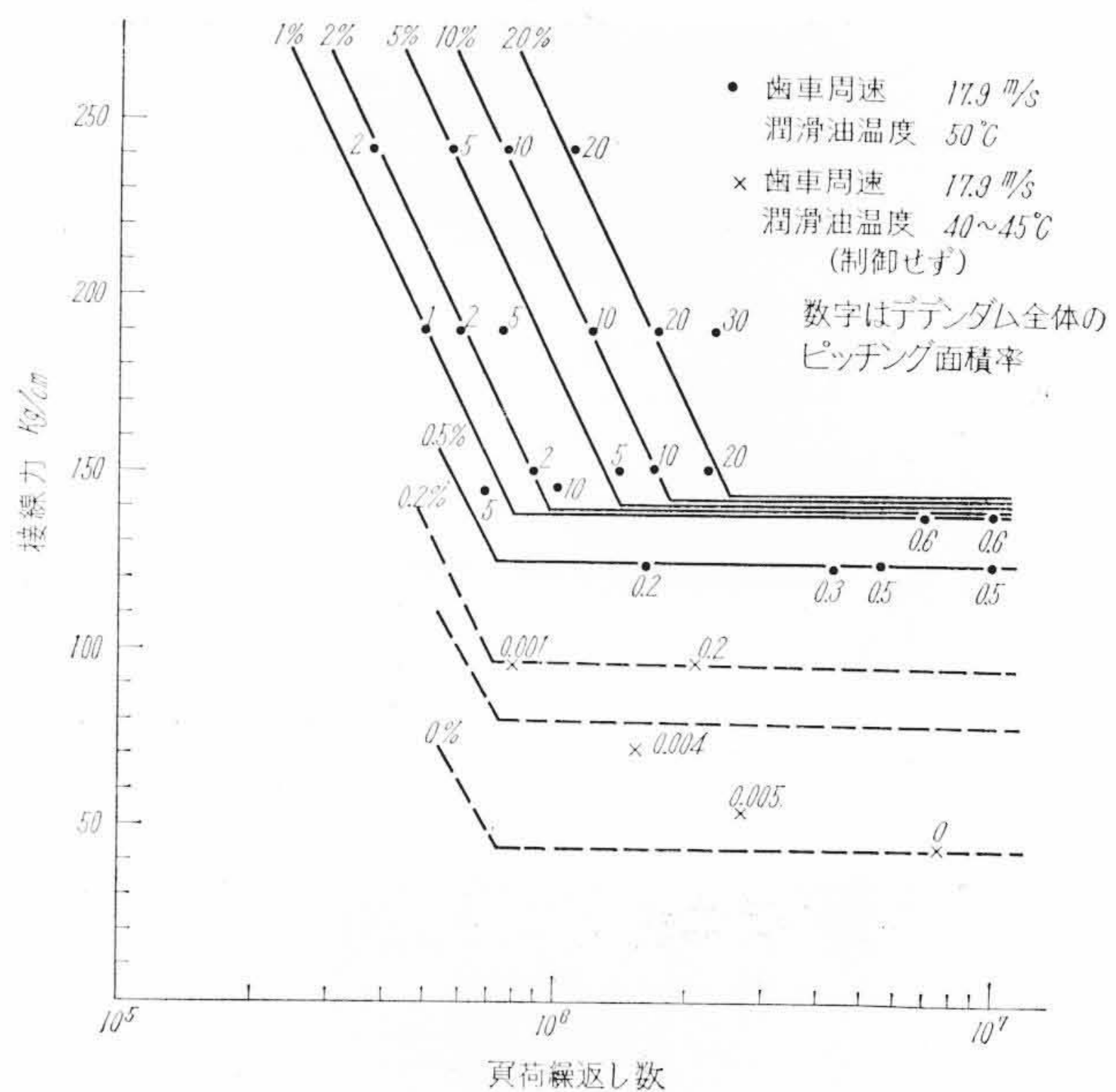
第15図に示す接線力 190 kg/cm の場合、運転開始時における歯元ひずみの最大値は 2.05×10^{-4} 程度であったが、これが繰返し数 2.30×10^6 では 5.45×10^{-4} となり約 2.65 倍になっており、またこのとき他の歯にはったひずみゲージでは 6.10×10^{-4} 程度のひずみが測定された。ひずみゲージの接着位置は歯底のすみ肉部よりやや歯先寄りにある。そこで上述のひずみをすみ肉部の応力集中を考慮してすみ肉部に生ずる最大応力に換算すると 25 kg/mm^2 程度になる(すみ肉部半径は約 2 mm)。一般にすみ肉部には歯車製作時に鋭いひっかき傷が生じやすいので、応力集中の程度はなお大きくなる可能性があり、したがって曲げ応力による歯の疲れ破断に対する考慮が必要になると考えられる。本報告の大歯車材料の引張り強さは、第4表に示ように、 79.5 kg/mm^2 であること、また試験歯車は一方向回転であるため片振れ曲げ応力であることなどから、上述の程度の応力では安全と考えられるが、ピッチングがさらに進行して動荷重がより増したり、あるいは回転方向が不定な場合には歯が曲げ破断する危険がある。すなわち、この実験結果から、進行性ピッチングの場合にはピッチングは単に歯面を損傷するのみならず、動荷重の増大をもたらすので歯の曲げ疲れ破断の原因となりうるということが明らかになった。

(d) 歯車騒音の測定結果からの引用である。前章で述べたように、ピッチングの発達とともに全騒音も増加するが、特に毎秒かみあい歯数の2倍の周波数に相当する $1,600 \text{ c/s} \pm \frac{1}{2}$ オクターブバンドの騒音が顕著に増加することが明らかになったので、この周波数の騒音に注目した。この図からピッチングの発達とともにこの周波数の騒音が急激に増加することが明瞭に示される。非進行性ピッチングとなる接線力 124 kg/cm の場合はこの周波数の騒音の大きさにほとんど変化がない。

第23図から負荷荷重とピッチングおよび歯車の諸性質との関係が明らかになった。すなわち、接線力 146 kg/cm 以上ではピッチングが発生すると負荷繰返し数とともに急激に発達する。ピッチングが多く発生するピッチ点からわずかに歯元寄りの部分(第8図A Bゾーン付近)では、受圧面積が減少するためにピッチングがいまだ発生していない部分の単位面積当たりの荷重が負荷繰返し数とともに増加し、歯面表層材料が plastic flow を起こし、歯形に第13図のような凹みを生じる。歯面にこのような凹みが生じると、歯形誤差の大きな歯車となり、負荷運転中の動的挙動が変化し、動荷重が増大する。大歯車のかみあいはじめ、すなわちその歯先に大きな衝撃荷重が加わるようになり、はなはだしい場合には一歯のかみあい中に歯面が互に分離する。このようになると、本報告のような運転条件では、かみあい歯面は毎秒かみあい歯数の2倍の周波数でたたき合うようになり、そのためこの周波数の騒音が顕著に増大するものと考えられる。

これに対し、接線力が 138 kg/cm 以下の場合にはピッチングの発生は少なく、また発生しても 146 kg/cm 以上に比べその発達速度はきわめておそく、また負荷繰返し数とともにその発達が飽和しないし停止する傾向がある。したがって、歯形誤差、動的挙動、騒音などは運転開始時と変わらず、接線力が 146 kg/cm 以上の場合と比べ、ピッチング発生現象に明確な差異がある。

第24図は歯元の面全体のピッチング面積率をパラメータとして等ピッチング面積率曲線を示したものである。測定点のわきの数字はその接線力および負荷繰返し数における歯元の面のピッチ

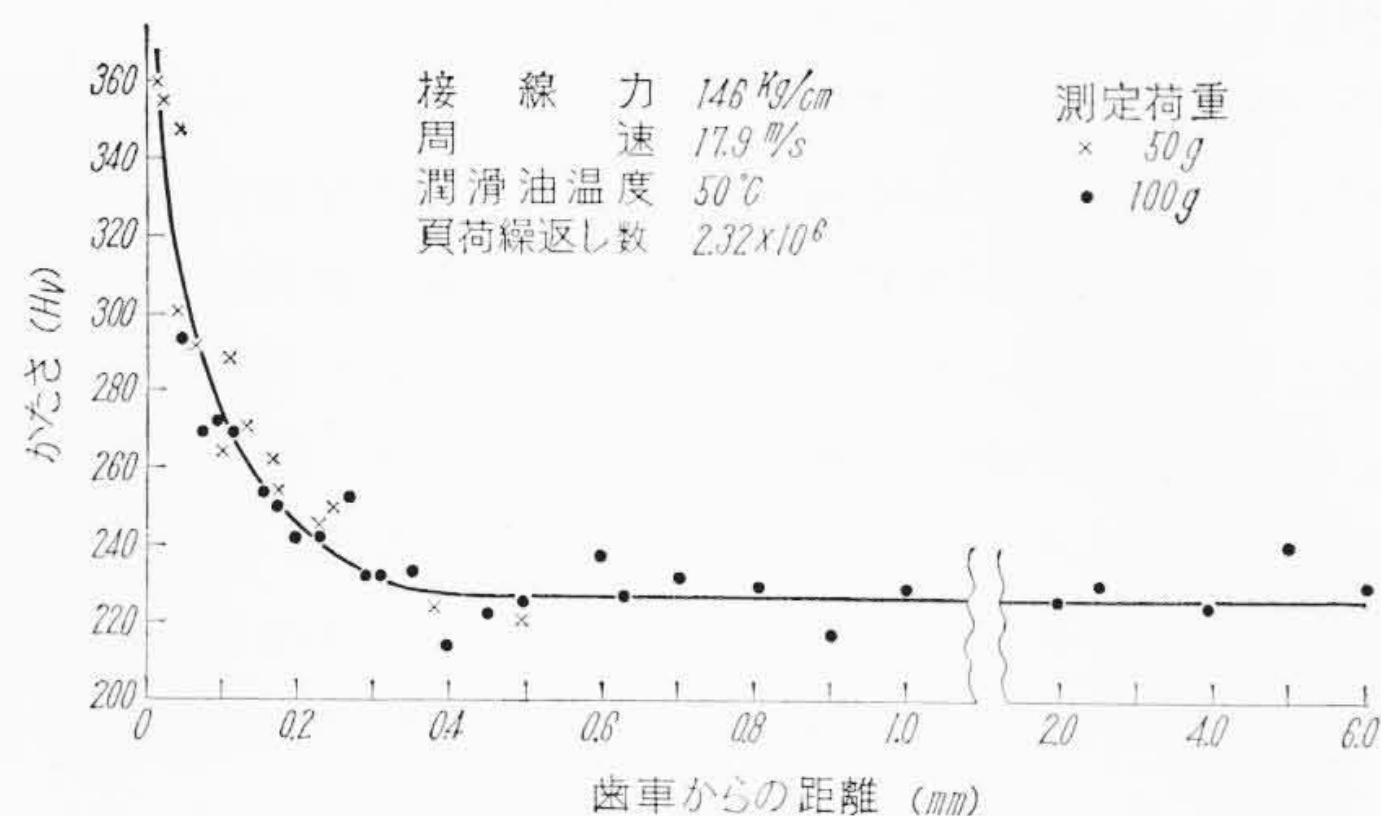


第24図 ピッチング状態図

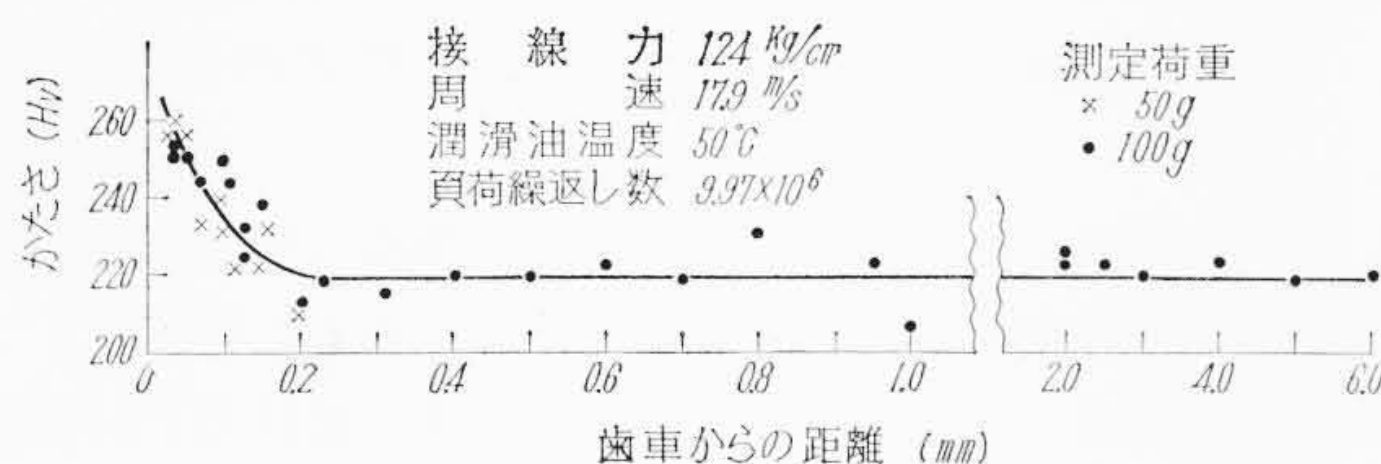
ング面積率を示す。接線力が 124 kg/cm 以上の測定値はいずれも本報告の実験結果を示し、これから図の実線に示すような等ピッチング面積率曲線を求めることができる。接線力が 96 kg/cm 以下の測定値は本報告の実験の前段階において行なった予備実験からの引用である。これらの予備実験は潤滑油温度を正確に 50°C に制御せず、潤滑油の温度を自然のままに放置したときの実験結果であり、油温は定常状態で大体 40°C ないし 45°C の範囲内にあった。したがって油温は 124 kg/cm 以上の場合と比べやや低く、潤滑油温度を下げるとピッチングが発生しにくくなることから考えて、潤滑油温度を正確に 50°C にしたときよりもピッチングの発生はやや少なかったと考えられる。したがって、これら 96 kg/cm 以下のデータと 124 kg/cm 以上のデータとを比較することは厳密に考えると正しいことではないが、両者の温度差がわずかであり、また 124 kg/cm 以下でピッチングの発生がどのようなになるかを調べるための参考データとしてこの図に記入した。データの数が少ないので正確に等ピッチング面積率曲線を求めることはできないが、図の点線のようなものと考えられる。

この図から、接線力が 140 kg/cm 付近を境にして、それ以上ではいったんピッチングが発生すると負荷繰返し数とともに急激に発達すること、 44 kg/cm ないし 140 kg/cm の範囲ではピッチングはある程度まで発生するがその量も少なく、またその発達が停止すること、 44 kg/cm 以下ではまったく発生しないことが明瞭に示される。このようにある荷重範囲で非進行性ピッチングとなる原因として、表面あらさおよび歯面の加工硬化が考えられる。

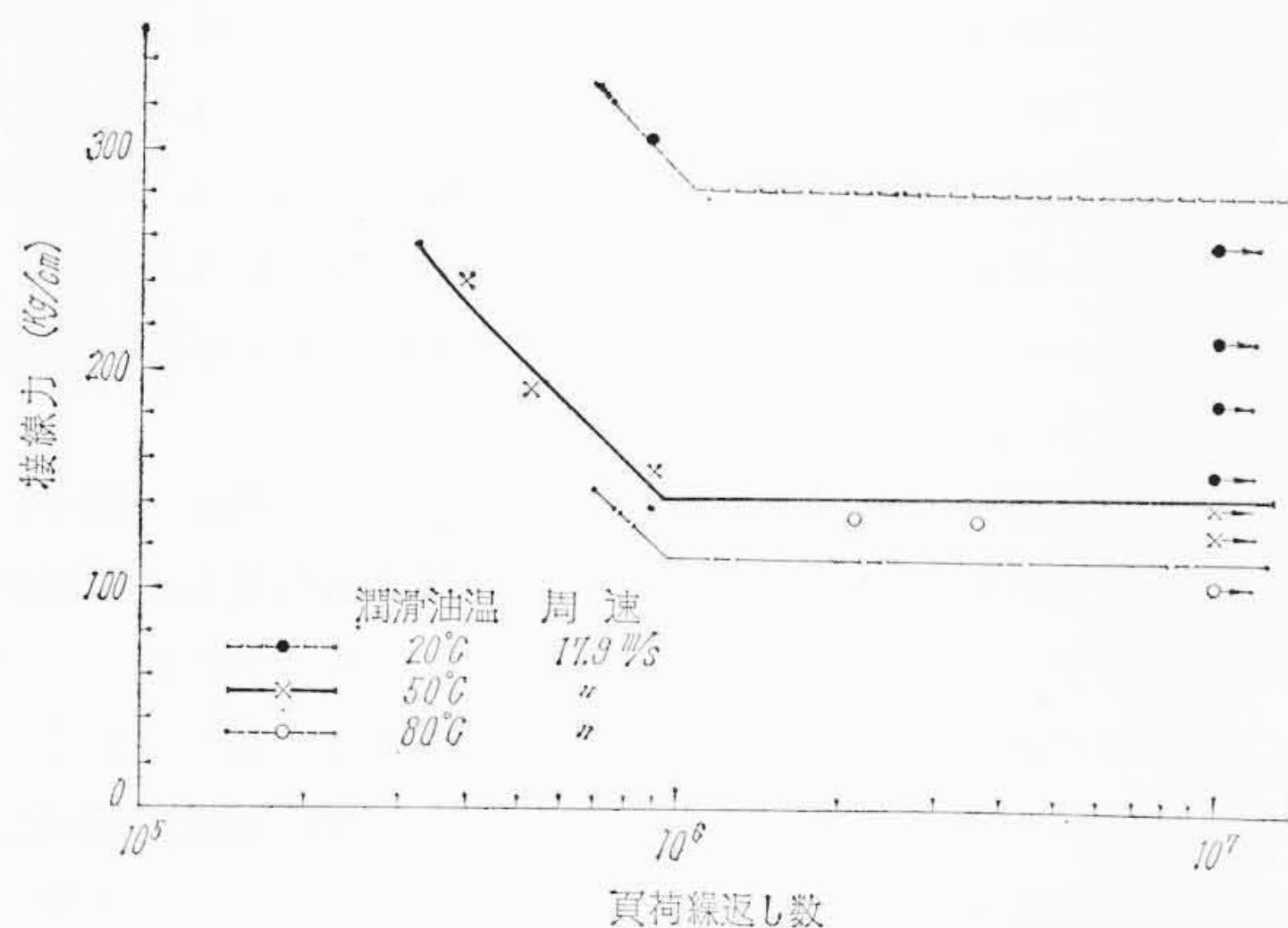
第3図接線力 124 kg/cm の場合のスンプ写真をみると、繰返し数 10^7 に至るまで歯車製作時のマージ研削目が残っているが、さらによく観察すると、深い研削目が特に明瞭に残っていると判断され、ピッチングはそこを避けて当たりが強い部分に生じていることがわかる。歯車製作直後にはかみあい歯面には多少なりとも凹凸はあるが、負荷運転を継続すると歯面凸部はすり減り摩耗および plastic flow によりなくなる傾向がある。これは第14図の歯形測定結果にも示される。そこで負荷運転開始後しばらくはこの歯面凸部に荷重が集中し、ある場合にはピッチングが生じる。負荷運転を継続すると、歯面凸部がすり落ちて歯面の荷重分布は徐々に様になり、この一様化された荷重が歯車材料の疲れ限度以下である場合には新たなピッチングの発生がなくなり、非



第25図 歯断面のかたさ分布



第26図 歯断面のかたさ分布

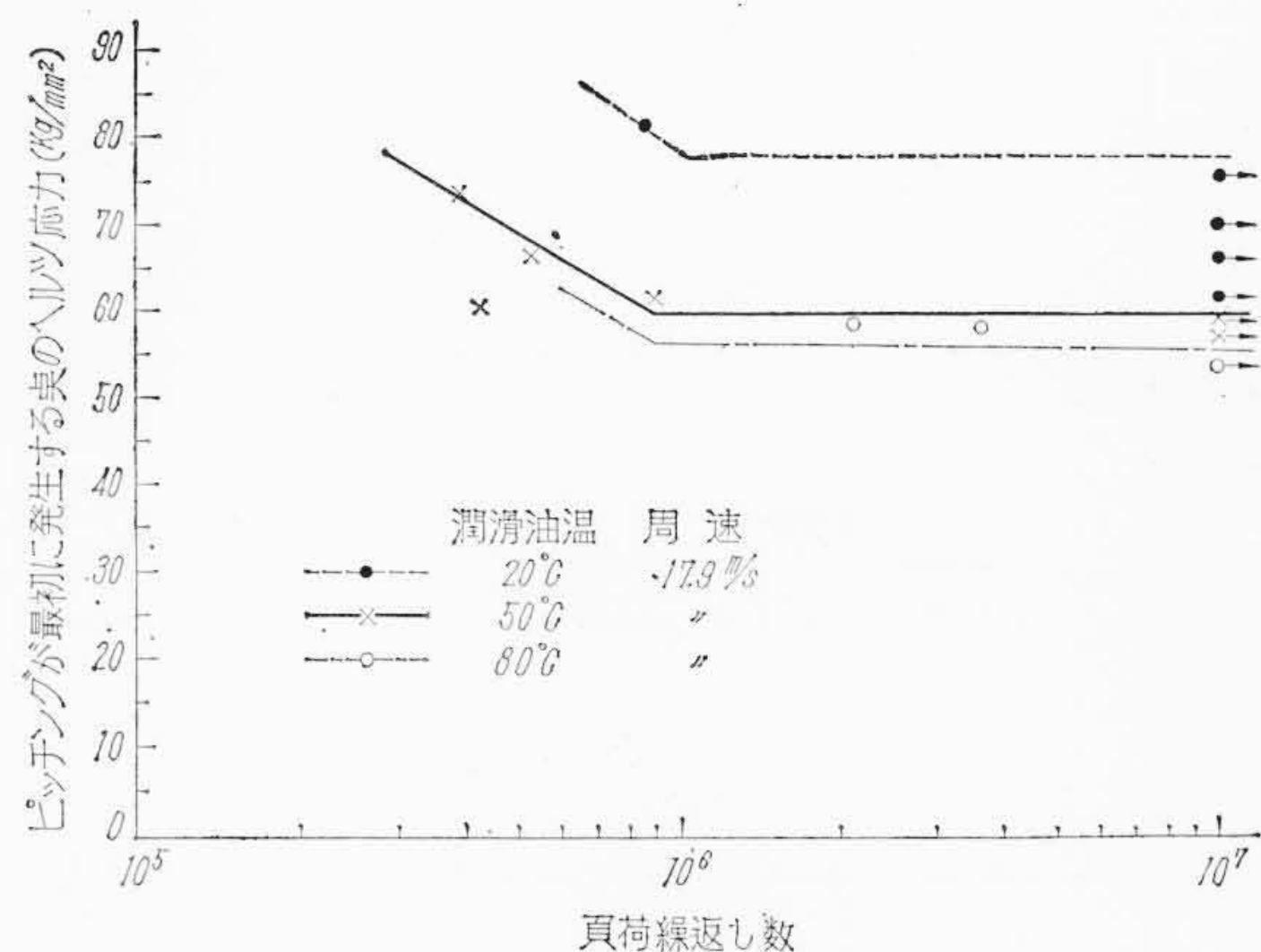


第27図 Wöhler 曲線

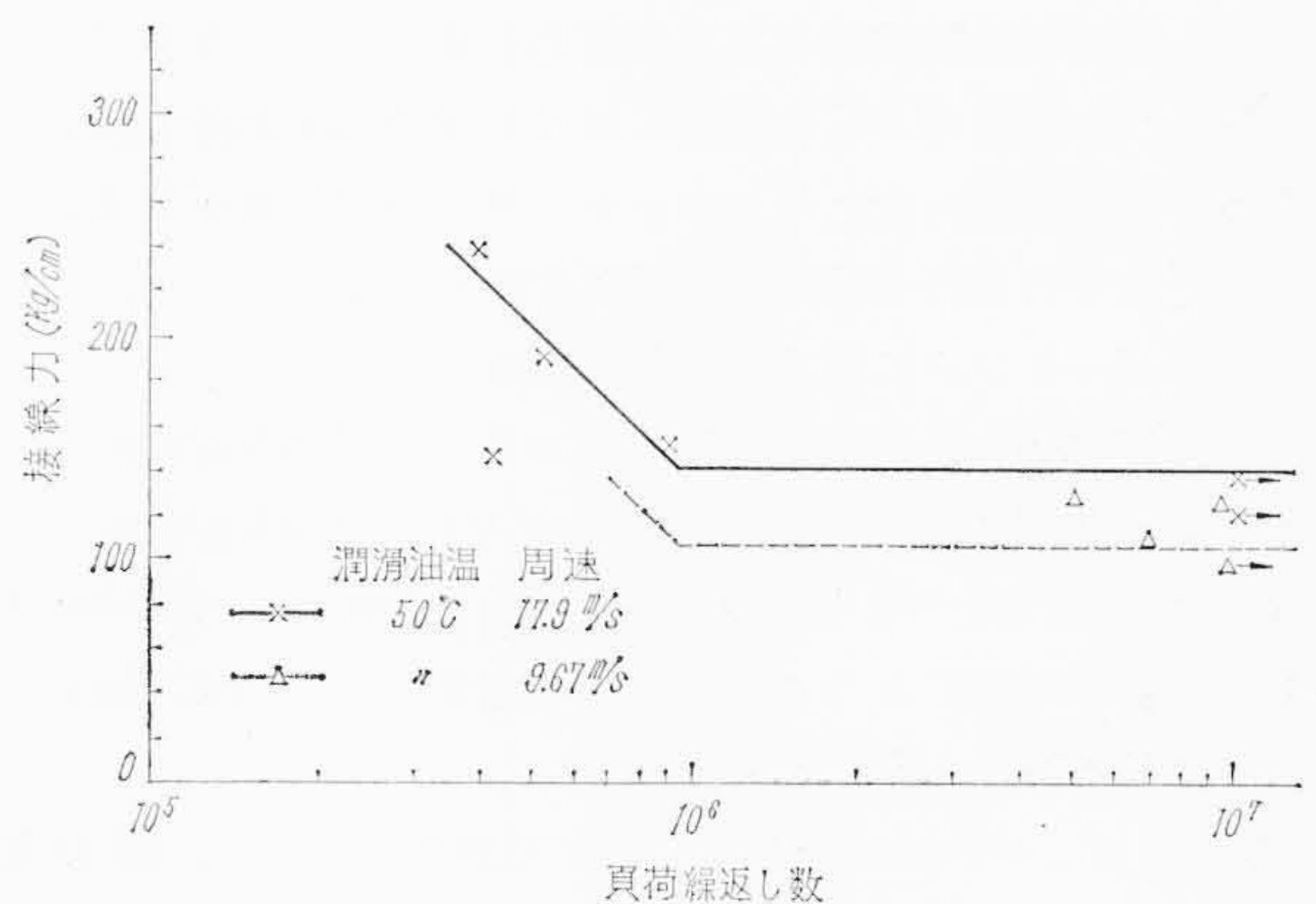
進行性ピッチングとなるものと考えられる。

次に考えられることは荷重の繰返しによる歯面材料の加工硬化である。第25図および第26図は試験終了後の歯車の歯を切断してピッチ点付近について歯面からの深さとかたさとの関係を測定した代表例を示し、第25図は進行性ピッチング、第26図は非進行性ピッチングとなった場合である。この測定結果から繰返し荷重により歯面近くのかたさは上昇し、加工硬化していることが示される。このかたさ測定は試験歯車の負荷運転終了後に行なったものであり、進行性ピッチング(第25図)の場合にはすでに歯面に大きな plastic flow を起こしてしまったのちの状態の測定結果である。したがって、ピッチングが最初に発生する負荷繰返し数のかたさは明らかでなく、またこの場合の歯面に作用した荷重は運転開始時から一定ではないので負荷荷重とかたさの上昇との関係も明確ではない。しかし非進行性ピッチングとなる場合(第26図)もかたさの上昇がみられる。そこで荷重が比較的小さい場合にはマイクロクラックの発生が材料の加工硬化の進行によって防げられ、ある程度までピッチングが発生するとその後の発生が止まり非進行性ピッチングとなるが、荷重が比較的大きい場合には加工硬化に打ち勝って新たなマイクロクラックが発生し、進行性ピッチングになると考えられる。

従来のピッチングに関する研究では、1個でもピッチングが発生すると以後継続的に発生すると考え、1個もピッチングが発生しない荷重をその材料のピッチングに対する疲れ限度と考えてい



第28図 Wöhler 曲線



第29図 Wöhler 曲線

た場合が多かった。しかし、本報告の実験から、ピッチングには進行性のものと非進行性のものとがあり、後者の場合は歯車としての運転性能に変化が起こらず、したがって歯車設計に対しては非進行性ピッチングに対する限界荷重が重要であることが明らかになった。

5.3 潤滑油粘度とピッチングの関係

第27図は歯車周速 17.9 m/s で潤滑油温度を 20, 50 および 80°C に変えた場合の実験結果から、接線力を使用して AB ゾーンの平均ピッチング面積率 3% の状態に対する Wöhler 曲線を示したものである。潤滑油温度すなわち粘度を変えるとピッチングの発達状態が変化し、油温によりそれぞれ別の Wöhler 曲線が求められる。

非進行性ピッチングに対する限界荷重は

油温 50°C では 138 kg/cm ないし 146 kg/cm

油温 20°C では 257 kg/cm ないし 302 kg/cm

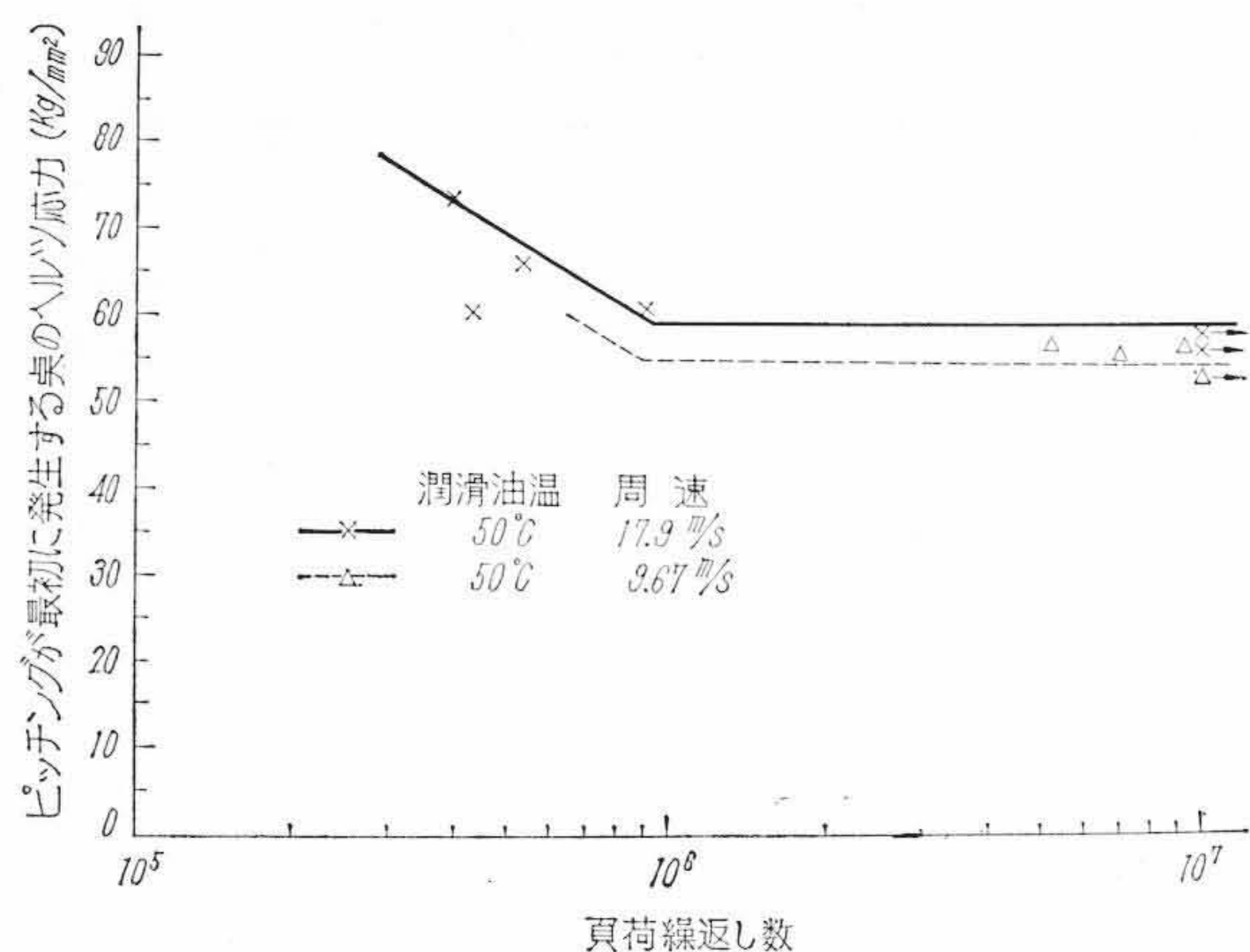
油温 80°C では 102 kg/cm ないし 131 kg/cm

の範囲内にあり、図ではその中間値をとると仮定して Wöhler 曲線を示した。潤滑油温度によりこの限界荷重は大幅に変化し、20°C では 50°C に比べ約 2 倍、80°C に比べ約 2.4 倍になる。これは歯車の許容伝達動力で考えても同じことになる。

第28図はピッチングが最初に発生する場所について、第17図の動荷重増加率を考慮して負荷運転中のヘルツ応力を計算し、Wöhler 曲線を求めたものである。この図から、非進行性ピッチングに対する限界荷重は動荷重増加率を考慮したヘルツ応力で整理しても、潤滑油温度により変化することがわかる。潤滑油温度が変わることはその粘度が変わることを意味するから、ピッチングに対しては潤滑油粘度が大きく影響することになる。

5.4 歯車周速とピッチングの関係

第29図は潤滑油温度 50°C で、歯車周速を 17.9 m/s および 9.67 m/s



第30図 Wöhler 曲 線

s に変えた場合の実験結果から、接線力を使用して、ABゾーンの平均ピッチング面積率3%の状態に対するWöhler曲線を示したものである。歯車周速を変えるとピッチングの発達状態が変化し、周速によりそれぞれ別のWöhler曲線が求められる。

非進行性ピッチングに対する限界荷重は

歯車周速 17.9 m/s では、138 kg/cm ないし 146 kg/cm

歯車周速 9.67 m/s では、99 kg/cm ないし 114 kg/cm

の範囲内にあり、図ではその中間値をとると仮定してWöhler曲線を示した。歯車周速によりこの限界荷重は変化し、9.67 m/s では17.9 m/s に比べ25%程度低い。

第30図はピッチングが最初に発生する場所について、第17図の動荷重増加率を考慮して負荷運転中のヘルツ応力を計算し、Wöhler曲線を求めたものである。この図から、非進行性ピッチングに対する限界荷重は動荷重増加率を考慮したヘルツ応力で整理しても、歯車周速により変化することがわかる。

従来ピッチングに対しては主としてヘルツ応力の大小によりその発生の難易が論じられることが多かったが、本報告の実験からピッチングは潤滑油粘度および歯車周速の影響を受けることが明らかになり、かみあい面に油膜の構成を考慮した理論解析をもとに論じなければならないことが明らかになった。

6. 結 言

この報告では歯車試験片を使用したピッチング実験について述べた。試験歯車は8モジュール40枚および19枚のマージ研削歯車であり、大歯車材料としてS35Cを焼入れ焼きもどしたものの、小歯車材料としてS40Cを焼入れ焼きもどしし歯面を高周波焼入れしたものを使用し、潤滑油としてタービン油 No. 180 を使用し、負荷運転試験を行なった。

(1) 潤滑条件(潤滑油粘度および歯車周速)を同じくして負荷荷重を変えると、ある荷重以上ではピッチングは負荷繰返し数とともに急激に発達し進行性ピッチングとなるが、ある荷重以下ではピッチングは発生するがその数も少なく、またその発達はきわめておそく、負荷繰返し数とともに飽和ないし停止するような傾

向があり、非進行性ピッチングとなる。

(2) 進行性ピッチングの場合には、ピッチングが急激に発達するピッチ点からわずかに歯元寄りの部分では歯面の受圧面積が減少し、ピッチングが生じていない部分の歯面材料が plastic flow を起こし歯面に凹みを生じる。したがって歯形誤差の増大した歯車となって歯車の動的挙動が変化し、動荷重、騒音が増大し、運転開始時とまったく異なった性能の歯車になる。動荷重の増大は急速かつ大きいので、歯面に生ずるピッチングは単に歯面の損傷をもたらすのみならず、歯の曲げ疲れ破断の危険性を生ぜしめる。

(3) 非進行性ピッチングの場合は歯形の変化はほとんどないので動荷重の増大もなく、歯車としての性能は運転開始時と大差ない。したがって非進行性ピッチングとなる限界荷重が重要である。

(4) 非進行性ピッチングの原因として歯面あらさによるものと歯面材料の加工硬化によるものの二つが考えられる。

(5) 非進行性ピッチングとなる限界荷重は接線力で以下の範囲内にある。

歯車周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 50°C で 138 kg/cm ないし 146 kg/cm

歯車周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 20°C で 257 kg/cm ないし 302 kg/cm

歯車周速 17.9 m/s, 潤滑油温度 80°C で 102 kg/cm ないし 131 kg/cm

歯車周速 9.67 m/s, 潤滑油温度 50°C で 99 kg/cm ないし 114 kg/cm

潤滑油温度が変わることはその粘度が変わることになるので、この実験結果から、歯車ピッチングは潤滑油粘度および歯車周速の影響を受けることが明らかになった。

(6) 上述の非進行性ピッチングに対する限界荷重は、歯車の動荷重を考慮したヘルツ応力で比較しても潤滑油粘度および歯車周速の影響を受けることが示された。従来ピッチングに対しては主としてヘルツ応力の大小によりその発生の難易が論じられることが多かったが、この実験結果から、かみあい面に油膜の構成を考慮した理論解析をもとにして論じなければならないことが明らかになった。

終わりに、ご指導をいただいた東京工業大学佐々木名誉教授、中田教授、石川教授に厚く謝意を表する。社内亀有工場山岸副工場長、平栗部長、小堀部長、森田課長、保延主任、中央研究所明山部長、須藤部長には種々ご指導、ご援助を得たことをお礼申し上げ、実験を担当した新井君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 西原, 小林: 機械学会論文集 3-13, 68 (昭12)
- (2) 西原, 遠藤: 機械学会論文集 14-46, 103 (昭23)
- (3) 西原, 遠藤: 機械学会論文集 15-50, 1 (昭24)
- (4) 西原, 遠藤: 機械学会論文集 18-75, 81 (昭27-11)
- (5) S. Way: J. Appl. Mech., 2, A-49 (1935)
- (6) A. Meldahl: Brown Boveri Rev., 26, 235 (1939)
- (7) E. Buckingham: Trans. ASME, 66, 297 (1944)
- (8) G. Niemann & H. Glaubitz: Z. VDI, 93, 121 (1951)
- (9) 橋本: 機械学会論文集 27-178, 877 (昭36-6)
- (10) 橋本: 機械学会論文集 28-190, (昭37-6)
- (11) 歌川: 機械学会誌 61-470, 296 (昭33-3)