

# 構造用特殊鋼の振り疲労過程における歪変化

福井 伸二, 三木 教\*

(1955年1月21日受理)

## Change of Strain during Torsional Fatigue by Special Steel for Constructional Use

Shinji Fukui and Satoshi Miki

(Received January 21, 1955)

**ABSTRACT:** Change of strain amplitude, maximum strain and residual strain during torsional fatigue by Ni-Cr-Mo and Cr-Mo steels for constructional use, are shown in this paper. Results for both steel by mean stress of 0~40 kg/mm<sup>2</sup> are as follows. Strain amplitude and maximum strain increase from about 10<sup>4</sup> reversal of stress for fatigue limit and reach to maximum at about 3~5×10<sup>5</sup> then settle to certain values. They increase monotonously when the specimens break down. Amounts of both change are larger by Cr-Mo steel than Ni-Cr-Mo steel. Results for Ni-Cr-Mo steel having residual strain by pre-stressing of 60~80 kg/mm<sup>2</sup> are as follows. Torsional fatigue limit decreases a few for pre-stress up to about 70 kg/mm<sup>2</sup>. Strain amplitude and maximum strain decrease slightly from about 10<sup>4</sup> reversal of stress for fatigue limit, but the amount of change are small. Pre-worked residual strain decreases gradually and residual stress is thought to decrease also.

### 1. 緒言

工業用材料の疲労についてはすでに多くの人々により、色々の方向から沢山の研究がなされており、その過程中的歪、或は変形の変化についても同様であるが、特殊鋼については比較的少ない様に思われる。そこで、構造用 Cr-Mo 鋼, Ni-Cr-Mo 鋼について、熱処理のまま、及び予め振り塑

性変形を与えた状態で、平均応力を色々に変え、振りモーメント振幅を規定の値に調節した疲労試験を行い、繰返し数による最大歪、及び歪振幅の変化を調べた結果を報告する。

### 2. 実験材料及び方法

実験材料としては第1表に示す化学成分、及び熱処理の物を用い、これらの機械的性質、並びに

第1表 実験材料の化学成分と熱処理条件

実験材料	成 分 %										熱 処 理	
	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	W	Cu	P	S	焼 入	焼 戻
Ni-Cr-Mo 鋼 I	0.22	2.93	1.19	0.29	0.45	0.24	0.30	0.18	0.016	0.009	825°C 40分油中	585°C 40分油中
Ni-Cr-Mo 鋼 II	0.25	3.45	1.22	0.35	0.48	0.22	—	—	0.029	0.024	870°C 20分油中	600°C 1時間油中
Cr-Mo 鋼	0.28	—	1.02	0.29	0.36	0.20	—	—	0.017	0.002	850°C 1時間油中	520°C 1時間水中

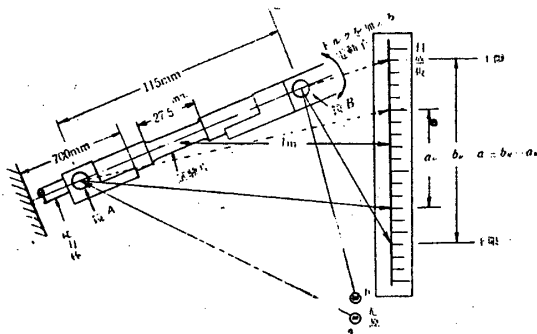
\* 兵庫県立中央工業試験所

試片寸法は前報告<sup>1)</sup>に示した通りで、又表面仕上げ状態も同様であつて、旋盤仕上げ後に粗度 0000 の研磨紙でバイト傷の残らない程度に仕上げ、表面粗さは 0.001 mm 以下である。

試験機は倉石-久野式 繰返し振り試験機を用いたので、振りモーメントの変化範囲は実験中規定値に等しい様に調節された。実験は試片取付後中心の狂いは 0.005 mm 以内で、毎分 1,800 回の繰返し数割合で行い、疲労限は全繰返し数  $10^7$  で破

断しない値をとつた。

変形の振幅、並びに最大値は、第1図に示す様に試片の両端、即ち応力棒側と電動子側とに取付けた小鏡に光源の像を反射せしめ、それを目盛ガラス板上に結ばせ、夫々の振幅、並びに位置を測定して求めた。夫々の像の位置は鏡の取付部の角変位に实际的に比例し、又その比例常数は測定の誤差範囲内で等しい。応力棒側の像の振れ  $a_R$  は変化のない様に調節され、電動子側の振れ  $b_R$  との差  $a = b_R - a_R$  は歪の振幅に、又  $b_R$  の上限と  $a_R$  の上限の差は歪の最大値に対応し、それらの変化は試片平行部の歪変化に主として由来するとみる事が出来る。

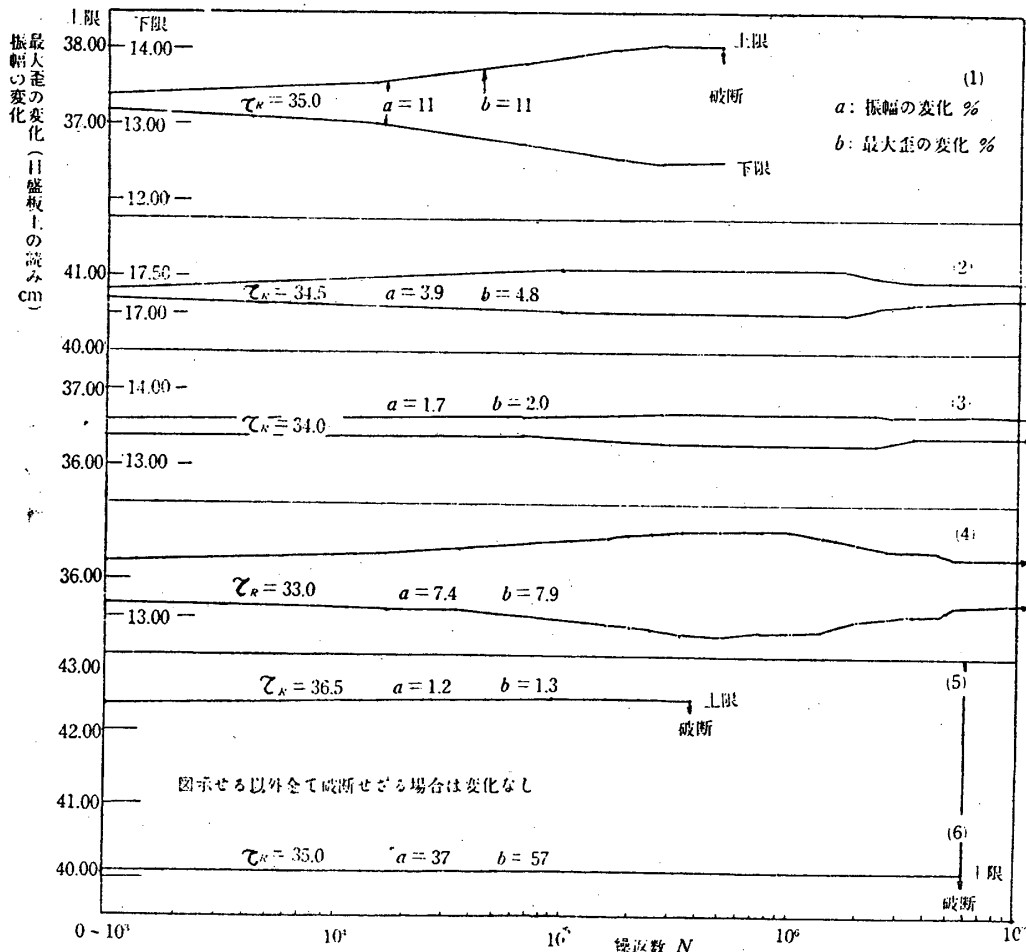


第1図 実験装置の略図

### 3. 実験結果とその考察

#### 1) 熱処理後仕上げたままの状態

Ni-Cr-Mo 鋼 I, 及び Cr-Mo 鋼について前述の様に仕上げたままの状態、平均応力  $\tau_m$  を  $0 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$  の範囲に変え、その上に繰返し応



第2図 平均応力  $\tau_m = 0$  の場合の振幅並びに最大歪の変化, Cr-Mo鋼 研磨紙仕上 (1)~(4), Ni-Cr-Mo鋼 I 研磨紙仕上 (5)~(6), 図中 a, b の数字は最大値を示す。

力  $\tau_R$  を附加して実験を行った。第 2~9 図は繰返し数と上限の変位との関係によつて最大歪の変化を示したものであつて、併せて下限の変位をも図示して振幅の変化をも示した。但し上限及び下限の図示には夫々独立に目盛をとつたので、図上の幅がそのまま振幅を定量的に表わしているものではない。

第 2~5 図は Cr-Mo 鋼について平均応力が夫々 0, 10, 20, 35 kg/mm<sup>2</sup> の場合における繰返し数と最大歪の変化との関係を示したものであり、第 2, 及び 7~9 図は Ni-Cr-Mo 鋼 I について平均応力が夫々 0, 20, 33.5, 40 kg/mm<sup>2</sup> の場合における同様な結果である。尚疲労限の近くで破断しなかつた場合の振幅、並びに最大歪の最大変化率を第 2 表に示した。

これらによると Cr-Mo 鋼では疲労限の近くで破断しなかつた場合でも、平均応力が 0 の両振りで振幅、並びに最大歪は繰返し数が 10<sup>4</sup> 回頃に既

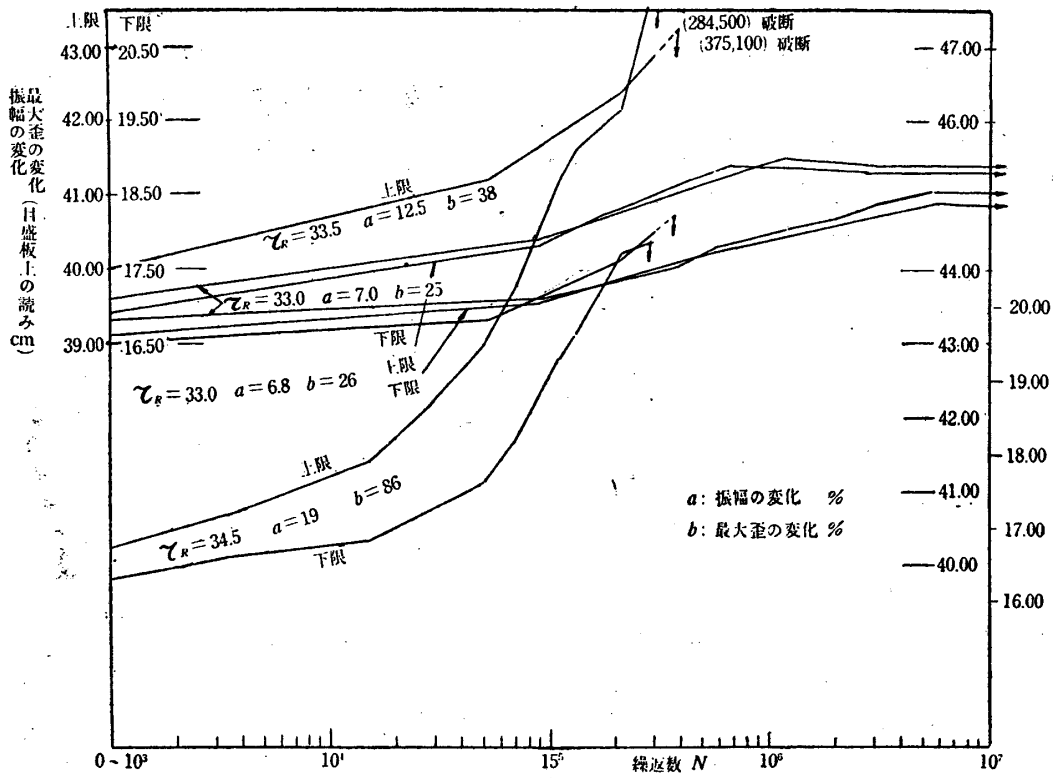
に増加し始め、次第に増加して行き 3~4×10<sup>5</sup> 回頃に最大値に達し、その増加率はいずれも約 4~5% となつて居る。この状態が持続して 1~2×10<sup>6</sup> 回頃から減小し始め、3~5×10<sup>6</sup> 回で大体或る一定値に落ち着き、以後は変化は少ない。従つて例え破断しなくても変形がおこり工業上に時として問題を起す事があり得るのを示して居る。

以上の傾向は平均応力を加えた場合にも同様であるが、唯振幅、殊に最大歪が最大値になる時の繰返し数が異り、平均応力が増すに従つて繰返し数も増し、歪増加の期間が永く続き、勢い最大歪の変化量も大きく 20% 以上になる。10 kg/mm<sup>2</sup> では略 10<sup>6</sup> 回、20 kg/mm<sup>2</sup> では約 2×10<sup>6</sup> 回、35 kg/mm<sup>2</sup> になると 8×10<sup>6</sup> 回にも及ぶが、いずれの場合もそれより以後繰返し数が増しても最大歪は殆んど減小する事なくそのままの値を持続する。しかし振幅の最大増加率は平均応力が増しても殆んど変化しないで数%の程度である。又この

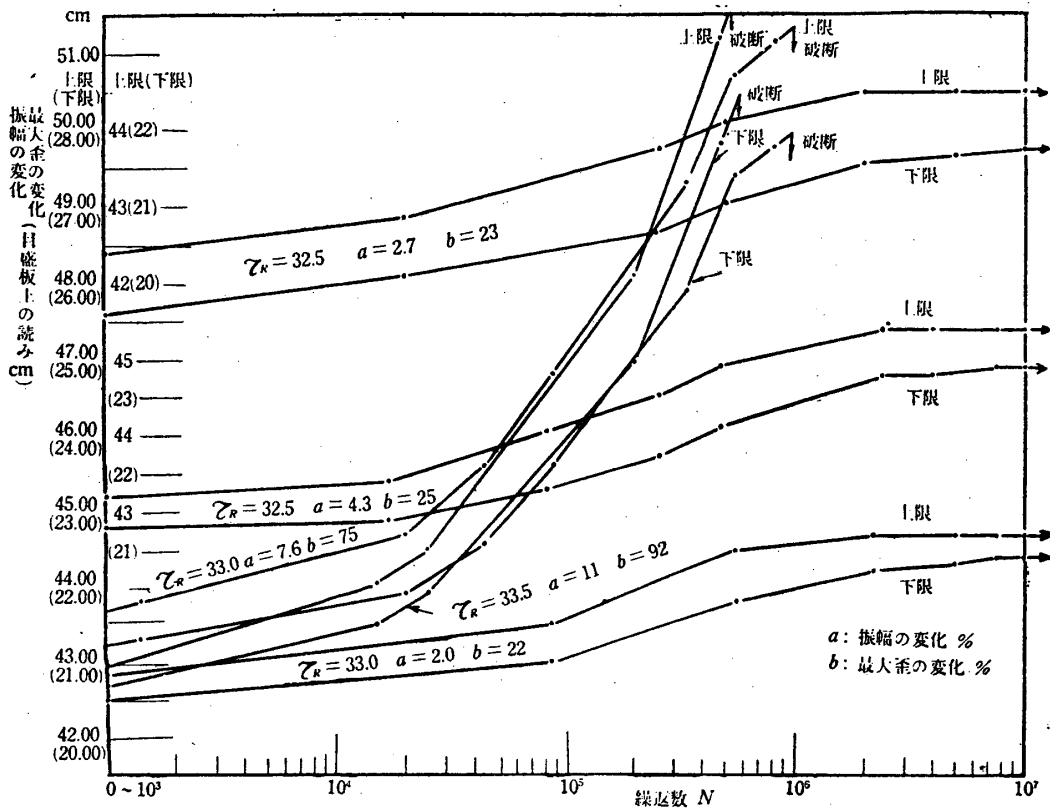
第 2 表 破断しなかつた場合の振幅及び最大歪の最大変化率

材 料		Cr-Mo 鋼		Ni-Cr-Mo 鋼 I	
平均応力 $\tau_m$ kg/mm <sup>2</sup>	繰返剪断応力 $\tau_R$ kg/mm <sup>2</sup>	振幅の変化 %	最大歪の変化 %	振幅の変化 %	最大歪の変化 %
0	33.0	7.4	7.9	0	0
	34.0	1.7	2.0	0	0
	34.5**	3.9	4.8	0	0
10.0	33.0*	7.0	25	—	—
	33.0	6.8	26	—	—
20.0	32.5*	2.7	23	—	—
	32.5	4.3	25	—	—
	33.0	2.0	22	—	—
	33.5*	—	—	0.3	1.2
	33.5	—	—	-0.7	1.9
	34.0	—	—	0.3	2.3
33.5	34.0*	—	—	-0.5	8.8
	34.0	—	—	0.4	15
	34.5	—	—	-0.4	4.0
35.0	29.0*	1.5	3.9	—	—
	29.5	3.9	25	—	—
	31.0	4.4	39	—	—
40.0	31.0	—	—	2.6	33
	31.5*	—	—	1.6	21
	31.5	—	—	7.7	47

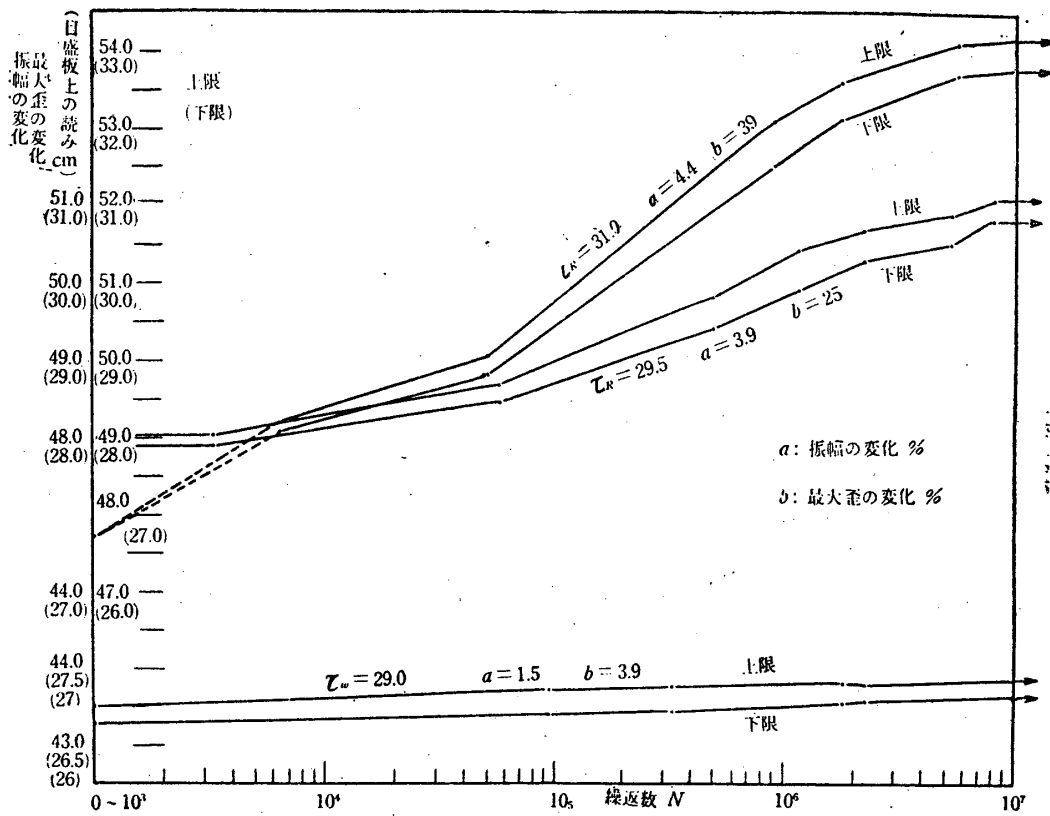
註 \* 振り疲労限



第3図 Cr-Mo 鋼 研磨紙仕上  $\tau_m = 10 \text{ kg/mm}^2$  の振幅並びに最大歪の変化



第4図 Cr-Mo 鋼 研磨紙仕上  $\tau_m = 20 \text{ kg/mm}^2$  の振幅並びに最大歪の変化



第5図 Cr-Mo鋼 研磨紙仕上 τ<sub>m</sub>=35 kg/mm<sup>2</sup> の振幅並びに最大歪の変化

材料の静的振り比例限は 44.5 kg/mm<sup>2</sup>, 降伏点は 51.1 kg/mm<sup>2</sup> で, 平均応力が 20 kg/mm<sup>2</sup> 以上の場合は繰返し応力の上限は明かに降伏点を越えて居るけれども, その影響は顕著には現れない。

次に疲労限より少し大きい応力で破断する場合は繰返し数が 10<sup>4</sup> 回位で既に振幅, 及び最大歪は増加し始め, それ以後は増加しつづけてゆき, 遂に破断する。この際振幅の変化は平均応力に関らず大体 10~20%程度であるが, 最大歪は 100%以上に達する事もあつて一定しないが, 増加率は大きい場合が多い。

Ni-Cr-Mo 鋼 I においては τ<sub>m</sub>=0 の場合は振幅, 最大歪ともに変化少く, ことに破断しない場合は変化量は省略し得る。静的振り比例限は 42.8 kg/mm<sup>2</sup>, 降伏点は 53.4 kg/mm<sup>2</sup> で, τ<sub>m</sub>=20 kg/mm<sup>2</sup> 以上の場合は繰返し応力の上限は降伏点を越え, 以上の Cr-Mo 鋼と同様な傾向を示す。即ち疲労限で破断しない場合でもやはり繰返し数が 10<sup>4</sup> 回程度で既に振幅, 最大歪に変化があり, 繰返し数が増すと共に増加し, 4~5×10<sup>5</sup> 回頃で最大値に達し, 10<sup>6</sup> 回程度で安定し, 以後は変化しない。しかし τ<sub>m</sub>=40 kg/mm<sup>2</sup> 程度に大きい場合は 7~8×10<sup>6</sup> 回に至るまで最大歪は増加して行き, 安定しない。破断の場合も Cr-Mo 鋼と同様

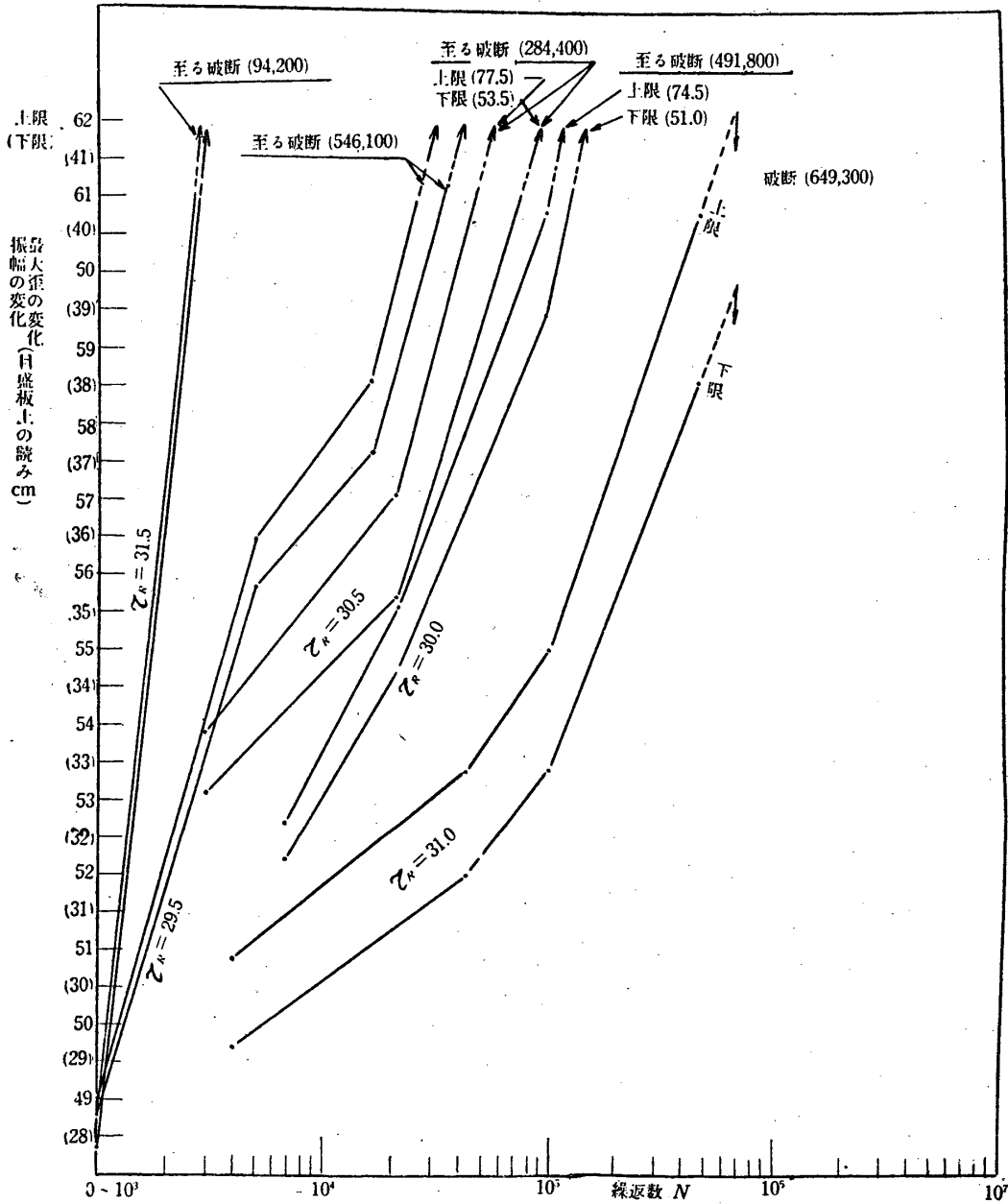
な傾向を示す。

唯 Ni-Cr-Mo 鋼は Cr-Mo 鋼に較べて振幅も最大歪も変化量は小さい為, Cr-Mo 鋼程顕著には認められない。第2表によれば τ<sub>m</sub>=35 kg/mm<sup>2</sup> までの範囲では振幅の増加率は 1% 以下で, 最大歪は平均応力の増加と共に増し, 33.5 kg/mm<sup>2</sup> で約 9%に達する。τ<sub>m</sub>=40 kg/mm<sup>2</sup> となると振幅は約 4%, 最大歪は急激に約 35%増加する。

ロ) 予め残留歪を与えた後の状態

以上の実験により降伏点以上の応力をかけて塑性変形を生じ, 又それが進行しても破断しない場合がある事が明かになつたので, 降伏点以上の振り剪断応力 τ<sub>0</sub> を予め加えて永久歪を生ぜしめた後に荷重を除去し, 残留歪, 残留応力のある状態であらためて繰返し剪断応力 τ<sub>R</sub> をかけて疲労実験を行つた。主に炭素鋼について, この種の研究は多くの人々<sup>2)</sup> によつて行われて居るが, ここでは第1表の Ni-Cr-Mo 鋼 II についての結果をのべる。

この材料の静的振り弾性限は 50 kg/mm<sup>2</sup> 程度であるから, τ<sub>0</sub>: 60, 70, 74, 80, 95 kg/mm<sup>2</sup> とし, 先づ 0 の場合と両振り疲労限を較べて見た。第10図は τ<sub>R</sub> - 繰返し数 N の関係で, 疲労限 τ<sub>w</sub> と τ<sub>0</sub> の関係に直したのが第11図である。τ<sub>0</sub> が



第6図 Cr-Mo鋼 研磨紙仕上  $\tau_m = 35 \text{ kg/mm}^2$  破断の場合の振幅並びに最大歪の変化

約  $70 \text{ kg/mm}^2$  附近までは疲労限繰返し応力は殆んど変化しないが、それ以上になると急激に減少する。又疲労限繰返し応力  $\tau_w$  を  $10^7$  回加えた後の歪振幅、最大歪、最初与えた残留歪の変化率は第3表に示す通りである。振幅、及び最大歪は減少する傾向を示し、その量は  $\tau_{s0}$  が  $60 \text{ kg/mm}^2$  以下では殆んど0であつて、それ以上ではたいした量にはならない。ただ残留歪の変化率は大きく、この量は繰返し応力を0にした時の変形量で示されるが、常に最初与えられた量が減少するので、特に  $\tau_{s0}$  が  $70 \text{ kg/mm}^2$  位までは減少率が大きい。この様に永久歪が減少すれば、残留応力も減少すると推察され、前述の炭素鋼の結果と同傾

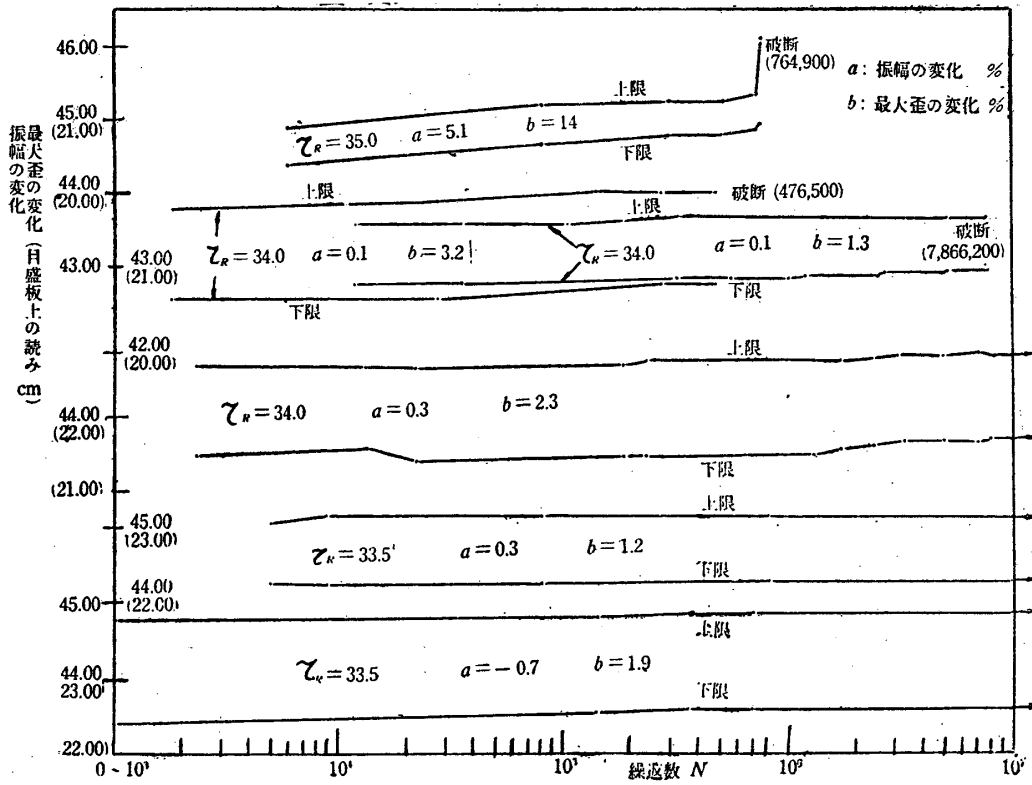
向と考えられる。

#### 4. 総括

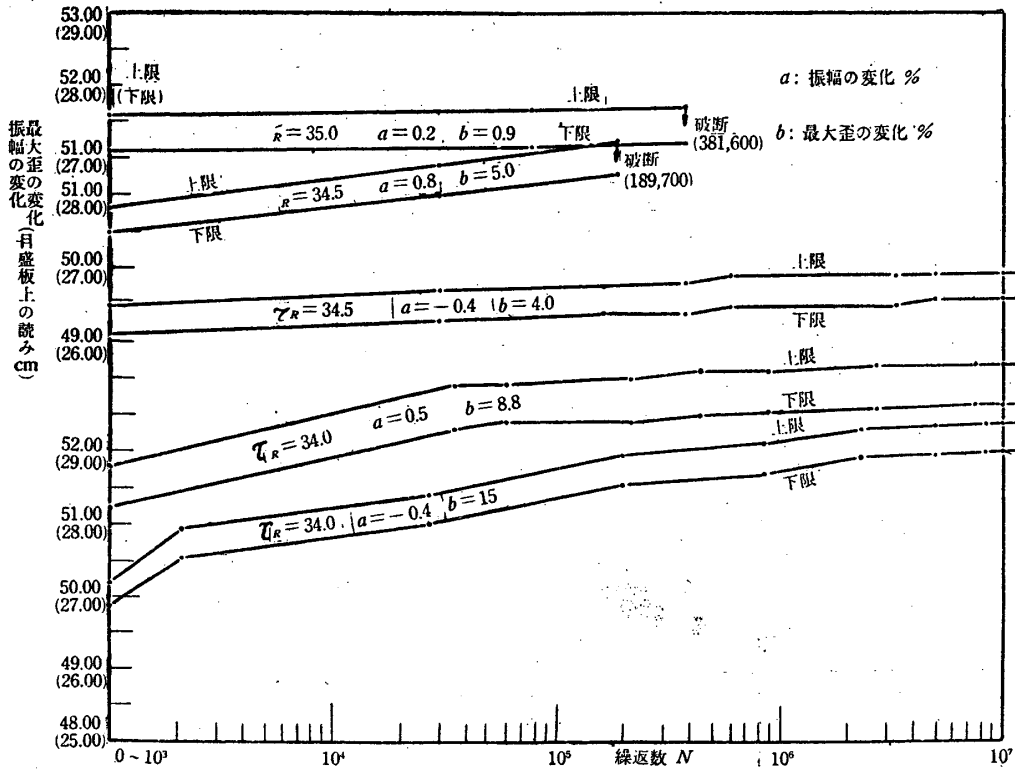
以上を総括すると、構造用 Ni-Cr-Mo 鋼、Cr-Mo 鋼の振り剪断疲労において、平均応力を  $0 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$  として、

1) 疲労限附近の繰返し応力をかけ、 $10^7$  回で破断しない場合は、歪振幅、最大歪とも  $10^4$  回附近から増加し、 $3 \sim 5 \times 10^5$  回で最高値に達し、以後減少してある値に落ち着く。従つて破断しなくとも相当な残留歪を生ずる場合がある。

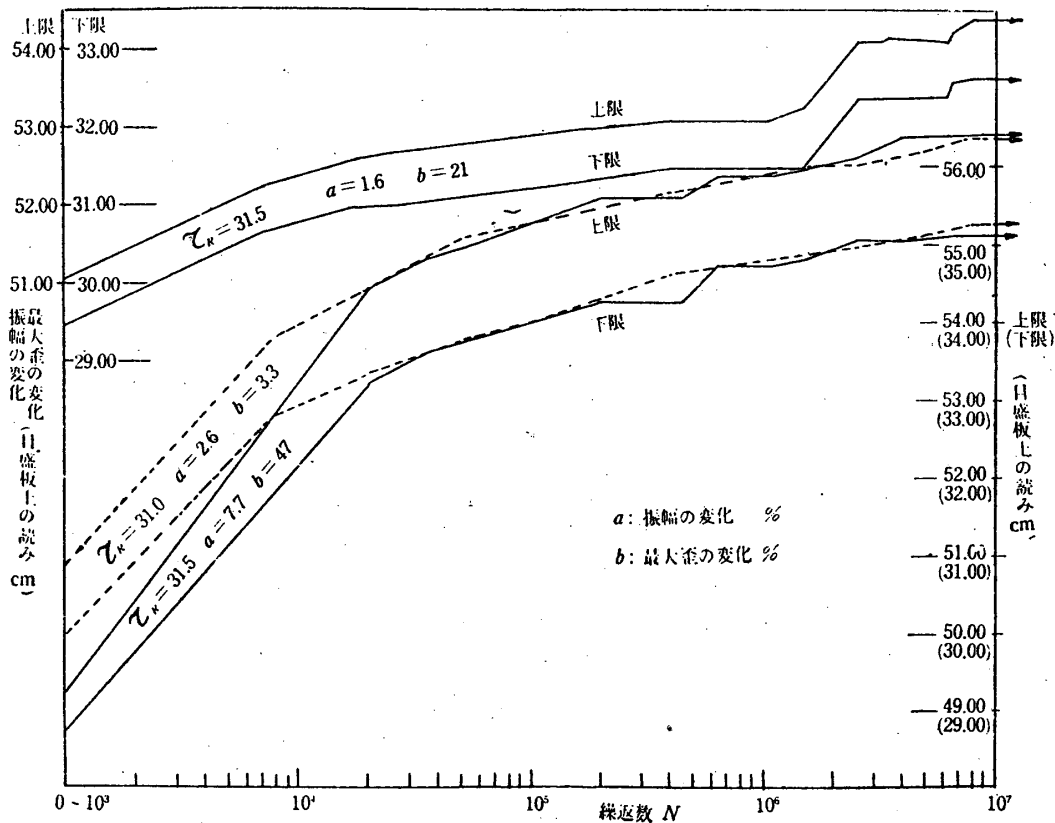
2) 破断する場合は  $10^4$  回附近から増加し始め、そのまま遂に破断する。



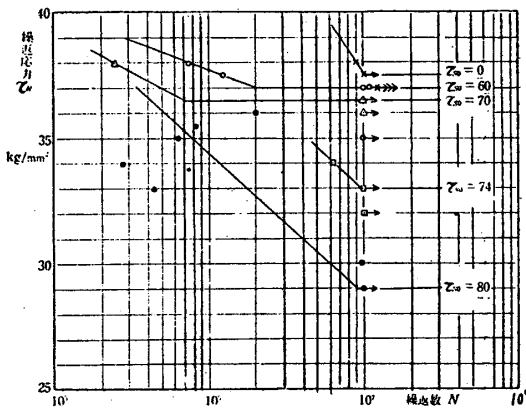
第 7 図 Ni-Cr-Mo鋼 I 研磨紙仕上  $\tau_m = 20 \text{ kg/mm}^2$  の場合の振幅, 最大歪の変化



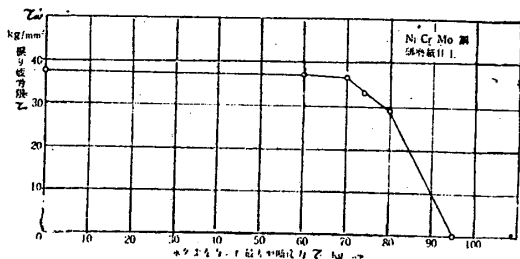
第 8 図 Ni-Cr-Mo鋼 I 研磨紙仕上  $\tau_m = 33.5 \text{ kg/mm}^2$  の場合の振幅, 最大歪の変化



第9図 Ni-Cr-Mo鋼I 研磨紙上  $\tau_m = 40 \text{ kg/mm}^2$  の場合の振幅, 最大歪の変化



第10図 Ni-Cr-Mo鋼I 研磨紙上  $\tau_{s0}$  を与えた場合の  $\tau_w - \log N$



第11図 Ni-Cr-Mo鋼II 研磨紙上の振り疲労限  $\tau_w - \tau_{s0}$

第3表 Ni-Cr-Mo鋼II の予め永久歪を与えた場合の歪振幅, 最大歪, 及び永久歪の変化

永久歪を与えた剪断応力 $\tau_{s0} \text{ kg/mm}^2$	疲労限 $\tau_w \text{ kg/mm}^2$	永久歪の変化 %	振幅の変化 %	最大歪の変化 %
0	37.5	0	-0.4	-0.4
60	37.0	-55	-0.5	-0.9
70	36.5	-50	-2.0	-4.7
74	33.0	-18	-2.4	-5.0
80	29.0	-22	-1.2	-1.0

4) 以上全ての傾向は Cr-Mo 鋼で著しく, Ni-Cr-Mo 鋼では比較的小さい。

予め静的降伏点以上 60~80 kg/mm<sup>2</sup> の剪断応力をかけ, 永久歪を与えた Ni-Cr-Mo 鋼に両振り繰返し応力をかけた場合は,

5) 振り疲労限応力は最初応力 70 kg/mm<sup>2</sup> 付近まではたいして低下しないが, それ以上では低下する。

6) 歪振幅, 最大歪は繰返し数 10<sup>4</sup> 回附近から次第に減少する傾向を示すが, その量は小さい。

7) 最初与えた残留歪は次第に減少し, 従つて残留応力も概して減少すると考えられる。

3) 歪振幅の変化は例え上限応力が静的降伏点をこえても平均応力にはたいして関係しない。



## 文 献

- 1) 井口常雄, 福井伸二, 三木教: 東大理工研報告, 8, (1954) 79.
- 2) 例えば, 西原利夫, 河本実: 日本機械学会論文集, 14, (1948) 110.  
福井伸二, 佐藤四郎: 東大理工研報告, 5, (1951) 259. 7, (1953) 135. 7, (1953) 245.