

機械の疲労寿命算出法と今後の問題点 (続)

川崎重工業(株)技術研究所 中 村 宏*

7.2.1 重畳波形をふくむ場合 (回転曲げ)

実験結果は図25に示すようで、応力の高い時には正弦波のみと、重畳波を含む場合であまり差がないがくりかえし数が 10^7 以上になると差がでてくるようである。図26²⁸⁾にみるようにき裂進展に対しては微小重畳波の影響は顕著であり、特に、応力の小さい時に差が甚しい。

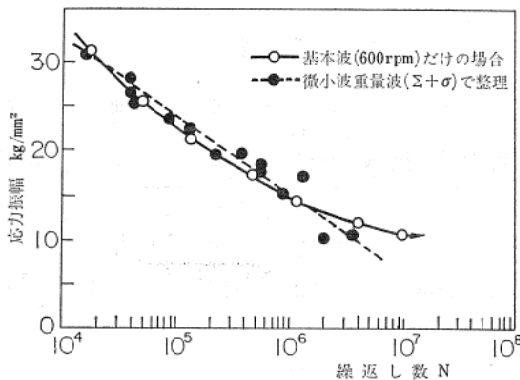


図25 微小波重畳する場合の回転曲げ疲れ試験結果

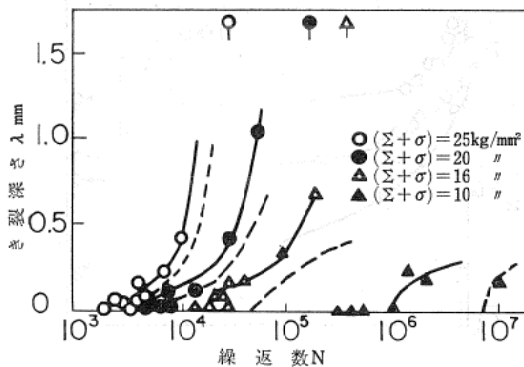


図26 き裂の進展に対する微小重畳波形応力と正弦波形応力 (点線) の比較

この図で、点線は正弦波のみの場合、実験点は重畳波形の場合である。

7.2.2 データー処理法

7.2.1と同様な実験が田中(道)²⁹⁾によって行はれてい

る。

この場合を整理したのは図27(a)で、実験点を整理しなほしたのはいくつかの●で示す。この図で $\sigma/\Sigma=0$ は重畳波のついていない場合、 (Σ/σ) は重畳波のみの場合である。この両者は図15の(b)及び(c)に相当する。

この例は $(\Sigma+\sigma)=26\text{kg/mm}^2$ の例で、D点は 26kg/mm^2 をくりかえした時のくりかえし数である。A点はD点のくりかえし数を(1次波 Σ 1サイクルにのっている σ の数)でわつたものである。回転曲げ応力 σ を重畳しない時は平面曲げで与えている**ので、平面曲げで 26kg/mm^2 を加へたときのくりかえし数がB点である。

この図でみるように、実験点は $\left(\frac{\log N_A + \log N_B}{2}\right)$ の点C'とD点を結ぶ直線上にほのっている***。

$(\Sigma+\sigma)=20\text{kg/mm}^2$ の時の実験例を図27(b)に示す。

図27のような実験が各種形状、材質についてえられれば、もつと知識が豊富になるであらうが、今の処7.2.1と7.2.2の例しかないので、これ以上の事をいうのは差控えた方がよからう。

しかし、実験資料がでる迄は図27のような整理をして処置をする事も一法である。

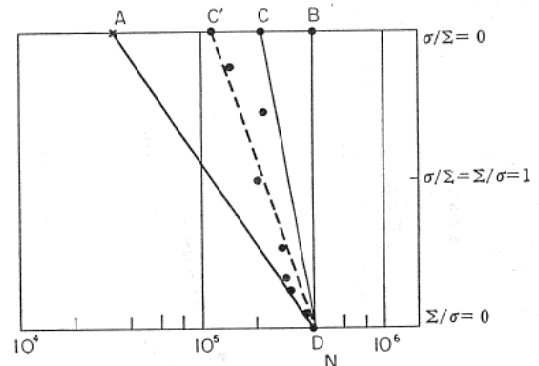


図27(a) 回転曲げ疲労試験において基本波に微小応力波が重畳した場合 ($\Sigma+\sigma=26\text{kg/mm}^2$ のとき)

*神戸市生田区東川崎町2-14.

**平面曲げと回転曲げ同一応力でもかなり繰返し数が異

ることも学問的にはあまりまだわかっていない事柄である。

***このようになる理由はわからない経験的事実にすぎない。

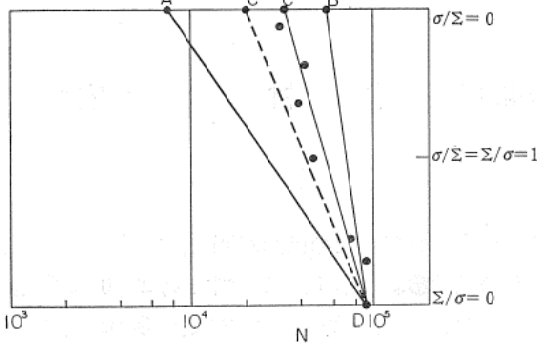


図27(b) 回転曲げ疲労試験において基本波に微小応力波が重畳した場合 ($\Sigma + \sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$ のとき)

7.3 回転曲げ応力の途中に衝撃応力を1回加えた時⁴²⁾

2.2kgの重錘を25cmの高さからおとした時、 $\sigma = 15 \text{ kg/mm}^2$ (基本の回転曲げ応力) の場合には、き裂発生時に、衝撃を加へることにより80%の破断寿命の減少がおこり、き裂深さ $\lambda = 0.1 \text{ mm}$, $\lambda = 0.2 \text{ mm}$ において加

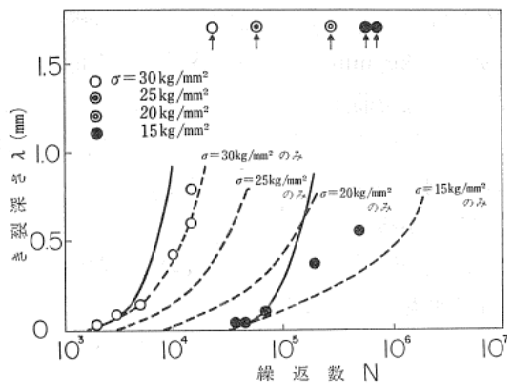


図28(a) き裂発生時に衝撃荷重を加へた時の $\lambda-N$ 曲線

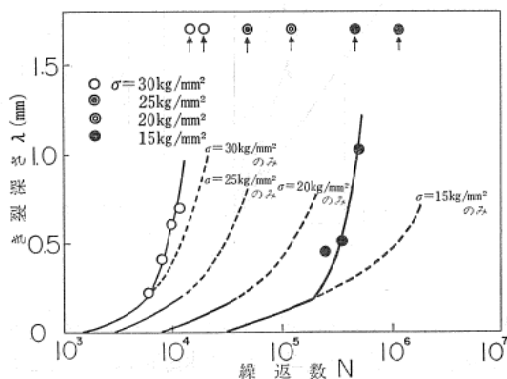


図28(b) き裂が0.2mm入ったときに衝撃荷重を加へた時の $\lambda-N$ 曲線

えた衝撃の影響は更に大きい。(図28参照)

7.4 回転曲げ応力の途中に間欠的に衝撃応力を加えた場合³¹⁾

図29のような波形の場合である。実験結果は基本の回転曲げ応力が 15 kg/mm^2 に対して、衝撃応力を3種類(表2)かへた時のき裂進展の実験結果を図30に示す。

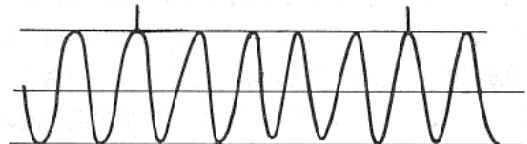


図29 回転曲げ応力の途中に間欠的に衝撃応力が加はった時の波形のモデル

表 2

周 期	I	II	III	IV
衝撃応力重畳比	24:1	34:1	43:1	81:1
カ ム	A	B	C	D
落 差 (mm)	138	103	55	11

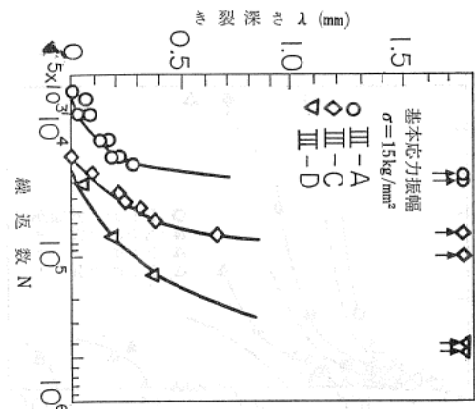


図30 回転曲げ疲労試験中に間欠的に衝撃応力を加へた時のき裂進展曲線

この実験は回転曲げ応力のくりかへし数43回に1回衝撃応力を加へた場合である。

III-Cの場合について Miner の法則をつかって求めた曲線は図31の点線であり、頻度分布から「き裂の平行則」を用いて破断点をもとめたものがB曲線である。◇印は実験点を示す。基本応力の小さい所ではなほ実験点の方が破断迄のくりかへし数は少ないが、大きい応力の所

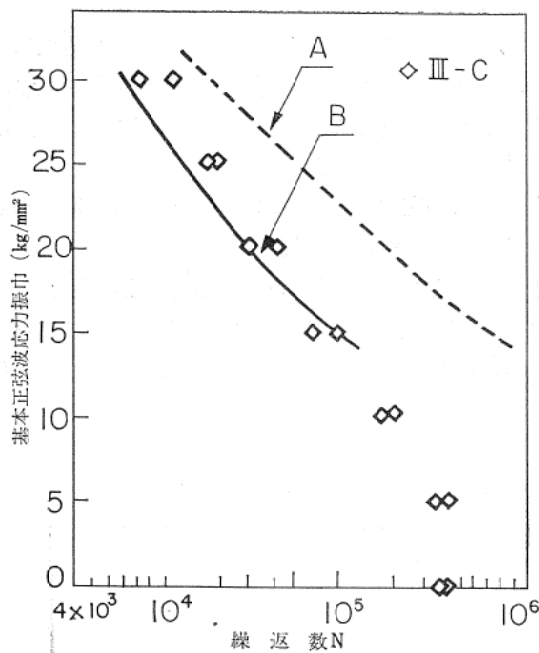


図31 間欠的に衝撃応力を含む場合の疲労試験結果

では「き裂の平行則」の方が「重ね合わせ則」よりは実験点に近いことを示す。

7.5 回転曲げ応力に連続的に衝撃応力が加わった場合

表1 m)⁴³⁾ のように、連続的に衝撃応力が加わった場合の疲労試験結果はごくわずかしかない。

図32は実験の一例であり、応力が疲労限より高い時に

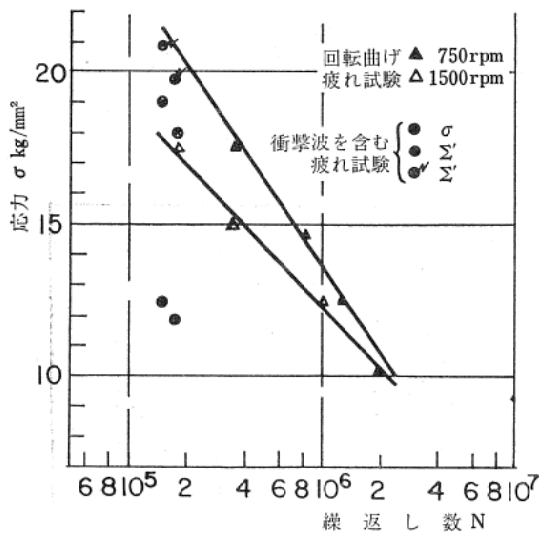


図 32

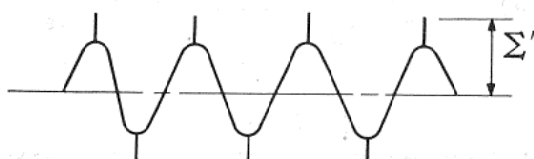


図 33

は図33の Σ' で資料を整理してよいことがわかる。

但し、 Σ' の値がひくく正弦波形の応力をうける時の疲れ限度に近い時の資料はないのでよくわからない。

しかし、7.4までの結果をみて、 Σ' で整理しても、不安全側にいくものと考えられる。

7.6 正弦波荷重変動と階段荷重の組合はせ

表1 q)³⁰⁾ 場合の実験で、破断寿命に対して以下に示す掛算則が成立する。

寿命の計算例を下記に示す。

図34(a)はその方法を図示したものである。その考え方としては図34(a-ハ)の変動二段二重々繰り返し応力による実験を図34(a-イ)(a-ロ)の二つの形式の変動荷重による実験から合成されるものとする。すなわち、変動二段二重々繰り返しかえし応力による実験の σ_{1max} , σ_{2max} を結ぶ階段状の包絡線を存する二段二重々複線返し応力による実験と、単に正弦波状に応力振巾が変動する実験とを考へ、前者の実験により図34(a-ハ)の変動波形中に点線で示したように階段状に変動させた場合の寿命減少率を測り、後者によって正弦波状に応力振巾を変動させた場合の寿命減少率をもとめ、それらの寿命減少率の積をもって、34図(a-ハ)の変動二段二重々繰り返し応力による実験の寿命を算定するものである。

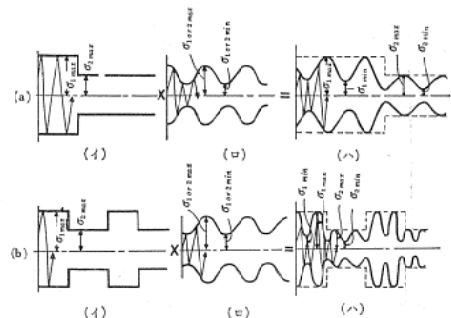


図 34

具体的に示すと、図34(a-ハ)の実験による破断寿命の予測は、図34(a-イ)のように、一次応力を σ_{1max} 、二次応力を σ_{2max} にひとしくとした二段二重々繰り返し応力による実験を行ない、実験によりえられた破断くりかえし数とき裂進展の重ね合せ則によりえられた破断くりかえし数の比、すなわち、寿命減少率 R_{fs} をもとめ、つぎに図34(a-ロ)のような正弦波状変動荷重を加えた時の破断繰返し数の実験値とき裂進展の重ね合せ則により予想される破断くりかえし数との比 R_{fs} をもとめる。このようにしてえられた R_{fs} と R_{fs} との積をもつ

て図34(a-h)の実験の場合の減少寿命比, すなわち, き裂進展の重ね合はせ則により予想される破断寿命の何%の所で破断するかを算定するものである. ただし, R_{fv} の値は一次変動応力下でえられるものと, 二次変動応力下でえられるものは一般には異ると考えられるために, 次のようにして R_{fv} の平均的値をもとめる.

今, 一次変動応力のみを加えた時の破断くり返し数を N_{1v} , その場合の減少寿命比を R_{fv1} , 実際に加へた一次変動応力繰返し数を n_{1v} , 二次変動応力のみを加えた場合の減少寿命比を R_{fv2} として

$$R_{fv} = \left\{ \frac{n_{1v}}{N_{1v}} R_{fv1} + \left(1 - \frac{n_{1v}}{N_{1v}} \right) R_{fv2} \right\} \quad (2)$$

の計算を用いて求めた.

このような計算でもとめた寿命減少比は図35の点線で示される曲線であり, ◎印で示す実験点と比較的よ

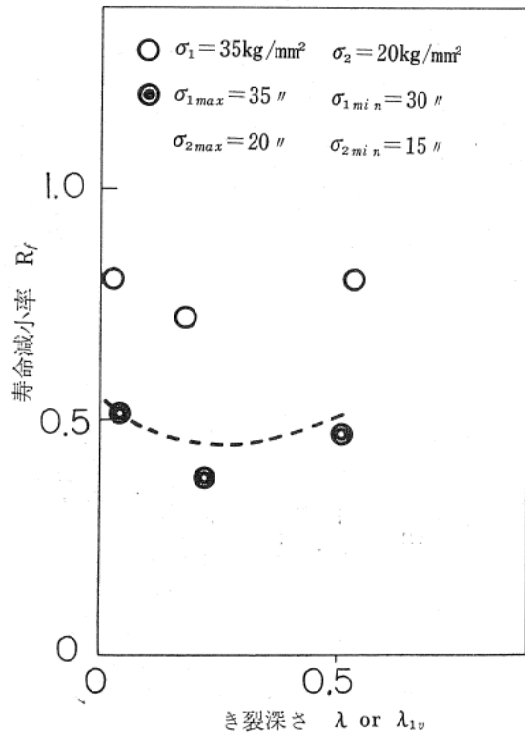


図 35

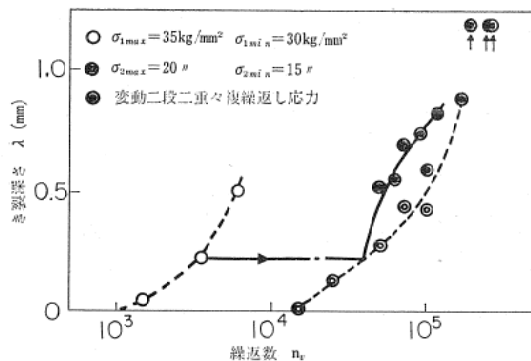


図 36

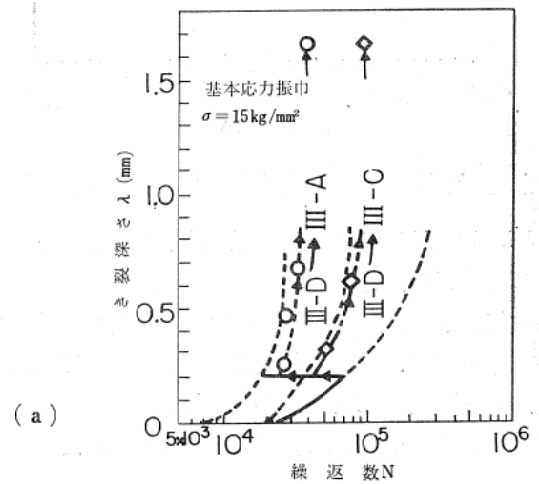
い一致を示す.

このことから上にのべたように簡単な変動荷重による疲れ実験からえられる減少寿命比の積により本実験のような複雑な変動荷重下の疲れ寿命を予測する方法, これを「掛算則」と名づけた.

なお, この実験においてのき裂進展の様子は図36に示もようで平行則は成立しない.

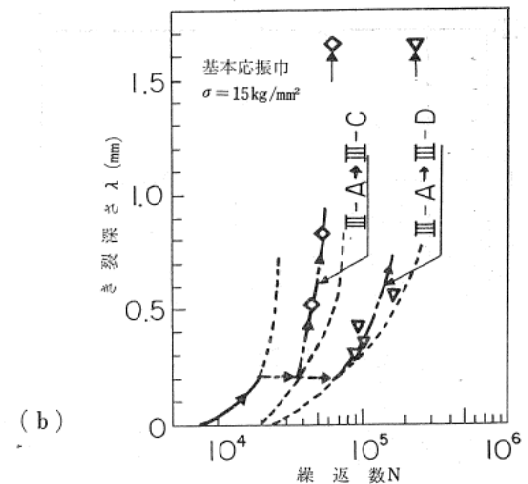
7.7 衝撃応力を含む場合の二段二重の組合はせ

表1s)²¹⁾の場合で, この場合, 夫々についての $\lambda-N$ 曲線 (図30) がでておれば, 図37のように平行則をもち



(a)

(a) 応力上昇の時



(b)

(b) 応力下昇の時

図37 衝撃応力を間欠的にうける回転曲げ疲労試験において, 途中で応力をかえた時の $\lambda-N$ 曲線。

いることによって、き裂の進展を予測しうる。

8 異った種類の荷重による応力の組合せ³⁴⁾

推進軸はその変動応力の大部分は曲げてあり、時に振り応力の大きいものが働く、また台車枠、船体などで上下の振動による応力と振り荷重による応力が時を異にしておこり、また同時に発生する。

このような時の資料をうる為、(i)繰返し振り応力をおよそ程度加え、のち繰返し曲げ応力を加へた時、(ii)繰返し曲げ応力を加へ、のち繰返し振り応力を加へた時の疲労試験を行った。

実験の一例を図38、図39に示す。図38の場合は、 σ と

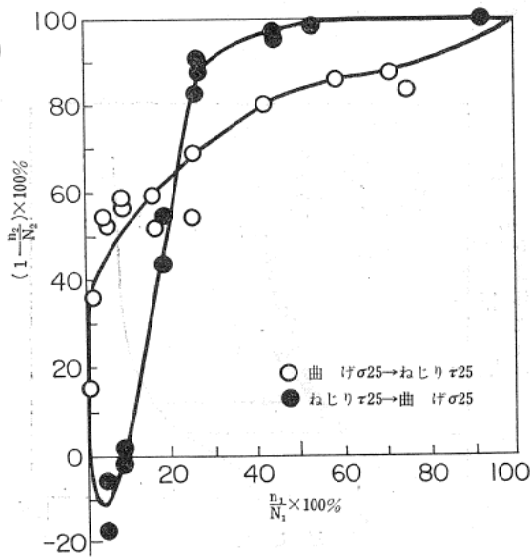


図38 曲げ応力を繰返しのちねじり応力を繰返した時およびその逆の場合(応力の絶対値ひとしい時)

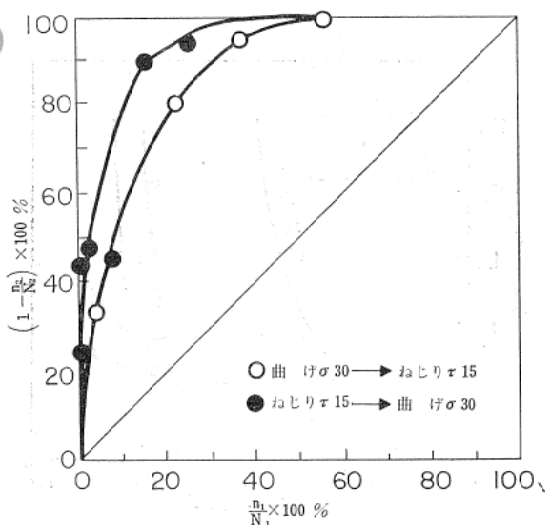


図39 曲げ応力を繰返しのちねじり応力を繰返した時およびその逆の場合(剪断応力がひとしい時)

τ の応力の数値をあはせたもので、図39の場合は剪断応力をおはせる為に曲げ応力の数値を振り応力の数値の2倍にしたものである。

図38、図39で斜め右上に 45° の線の上に実験点がのった時は $\Sigma(n/N)=1$ になったといいうる。

図38の場合は、 $\tau \rightarrow \sigma$ と $\sigma \rightarrow \tau$ で大分その傾向がことなるが、図39の場合は $\tau \rightarrow \sigma$ 、 $\sigma \rightarrow \tau$ の間で傾向にあまり差がない。

この実験はV形切欠試片の破断に関するものであるが、 $\Sigma(n/N)$ としては最低0.3のものがある事は注意を必要とする。

9 周波数が途中で変化した場合

表1のw)²¹⁾の場合である。あまり資料はないが、著者らの実験の例では、

$$\text{低い周波数} \rightarrow \text{高い周波数} \quad \Sigma\left(\frac{n}{N}\right) < 1$$

$$\text{高い周波数} \rightarrow \text{低い周波数} \quad \Sigma\left(\frac{n}{N}\right) > 1$$

この実験では同一応力でも高い周波数の方が寿命が長いので、応力が小さい場合にあたると考えると、この実験は

$$\text{応力大} \rightarrow \text{応力小} \quad \Sigma\left(\frac{n}{N}\right) < 1$$

$$\text{応力小} \rightarrow \text{応力大} \quad \Sigma\left(\frac{n}{N}\right) > 1$$

に対応すると考へると理解できる。

10 疲労試験の途中で試験温度をかへた時³⁶⁾

この場合も興味ある実験結果がでていいる。あまりこの種の実験は見当らない。

図40、図41は実験の一例で、A曲線は 20°C における $\lambda-N$ 曲線、B曲線は -196°C のものである。 $\sigma = \pm 15 \text{ kg/mm}^2$ の引張圧縮応力をSS41で作ったV形切欠試片に加えたものである。

図40は試験温度を低下した場合である。

20°C でき裂深き 0.1mm までき裂を入れた(C点)、のち -196°C に切りかへた時のき裂進展曲線はDEFとなる。DEの停留区間があったのち、EFのようにDB曲線に平行に進展する。

図41は試験温度を上昇した場合で、 -196°C で 0.1mm までき裂を入れた(D点)のち 20°C にして疲労試験を続行したものである。この場合には、き裂はCAとすすむ。即ち、 Σ 重ね合せ則が成立する。

Hudsonら⁴³⁾がAl合金板7075-T6について片振引張りで調べた実験結果を模式的に示したものは図42のよ

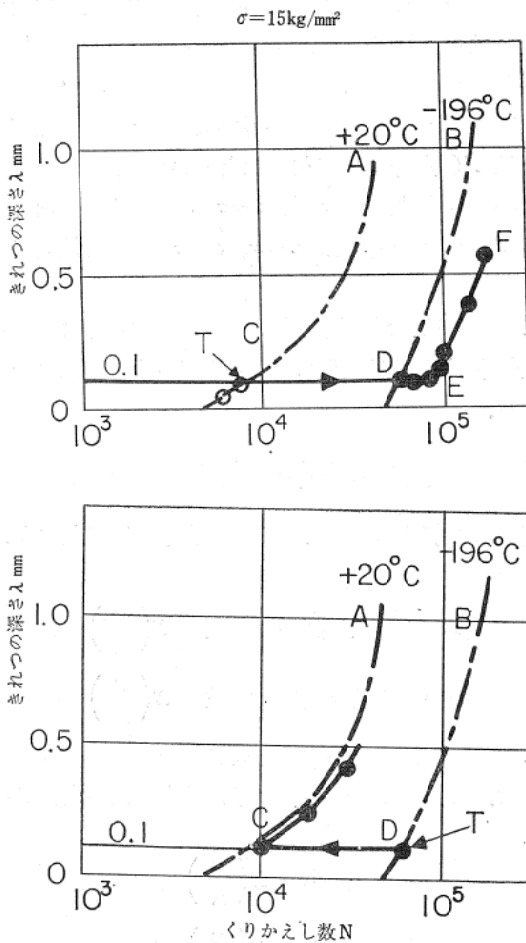


図40(上) 試験温度をかへた時のき裂進展 (温度下降の時)

図41(下) 試験温度をかへた時のき裂進展 (温度上昇の時)

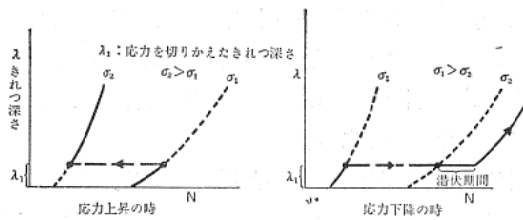


図42 Hudson 等の実験結果の模型図

うで、応力上昇の時には「重ね合せ則」が成立するが、応力下降の時には停留期間があることが報告されている。応力下降の時、図8の場合と全く逆に寿命はのびている訳であるが、40図と比べると、よく似た現象であるので興味がある。

11 直径が大きくなった時の変動荷重時のき裂進展¹⁹⁾

直径が 10mm 程度のV形切欠試片の時には、途中で応力をかへた時には図9のように比較的規則正しいき裂の進展をするが、直径が大きくなるとそれ程簡単でない。

図43は応力上昇の時で大体重ね合せ則が成立している。図44は応力下降の時で、応力をかへた時のき裂の深さが浅い時には、平行則に従っているが、き裂の深い時にはかへってき裂進展はおそくなっているのが認められる。材料の影響かとも考えられ、直径 10mm のV形切欠試片についての実験を行った所、図45のようで、平行則が成立していることがみとめられる。従って、材質の影響ではないことがわかる。

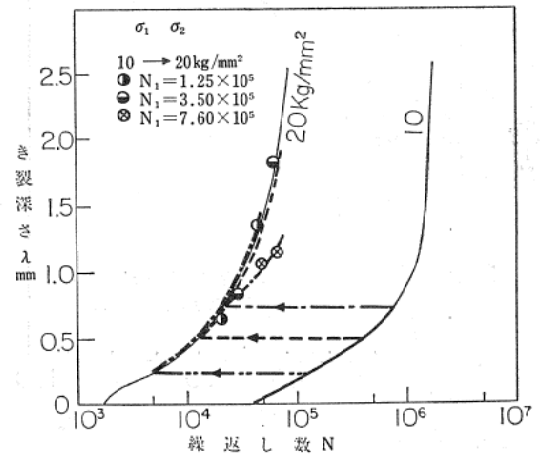


図43 二段二重における λ-N 曲線 (25mm) (応力上昇)

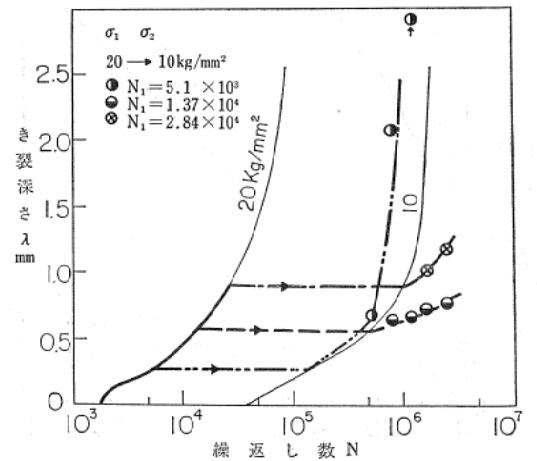


図44 二段二重における λ-N 曲線 (25mm) (応力下降)

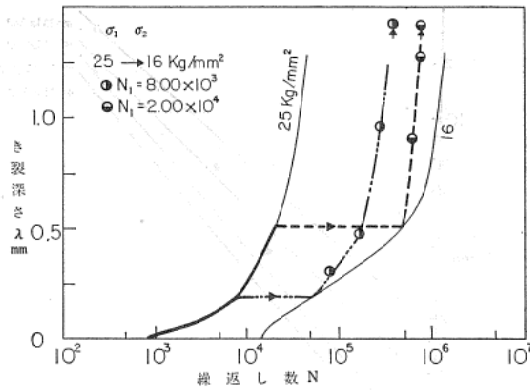


図45 二段二重における λ-N 曲線 (10mm) (応力下降)

12 き裂が入りその後応力をかへる時に加熱をしたもの

最初に大きい応力を加へてき裂を入れたのち、小さい応力にきりかへる時に、同時に 300°C×1hr で加熱し、その時のき裂進展を、加熱しない時と比べたのが図46¹⁹⁾である。

この程度の加熱ではき裂進展速度がかはらないことを示している。

き裂の進展を支配するものは、i) き裂先の加工硬化層等金属組織的な原因 ii) 残留応力、および iii) き裂の中、先端の曲率半径等幾何学的形状等を考へられる。

今回の実験は焼鈍温度も低いので明白にはいえないが i), ii) の影響は支配的でなく、iii) の影響が大きいことがみとめられる*。なほ、詳しくは、切欠形状や焼鈍温度を上げて調査する必要がある。

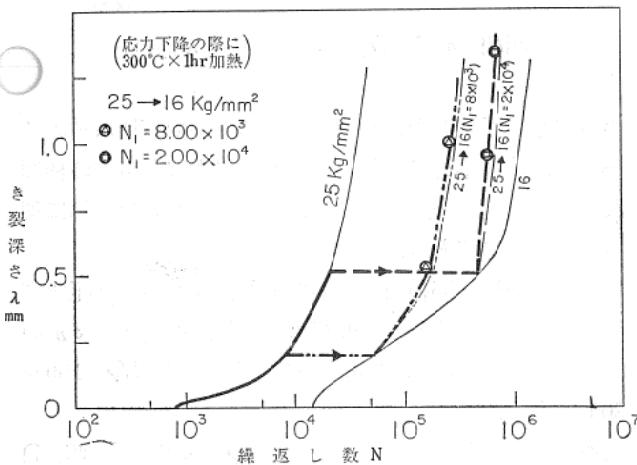


図46 応力変動時に熱処理を行なった場合の影響 (応力下降, 300°C×1hr, 10mm)

13 き裂進展速度に対する寸法の影響⁴⁾

き裂進展速度は寸法が大きくなると一般に大になる。大試片の回転曲げの資料はあまりないが、 $d=50\text{mm}$ 、および $d=100\text{mm}$ の圧入試片についての実験結果を図47に示す。

この資料から $d\lambda/dN$ をとったのを第3表に示す。

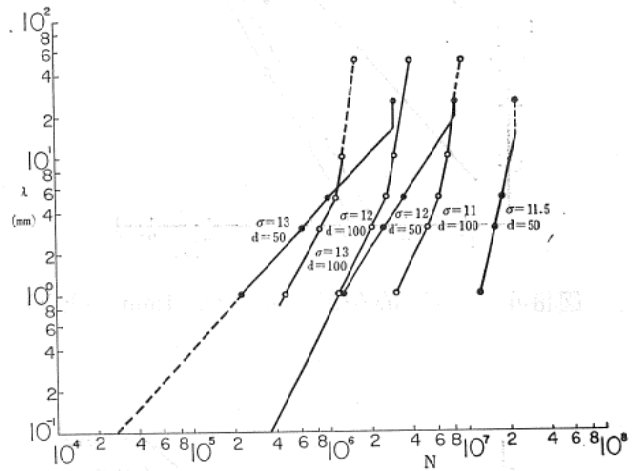


図47 $d=50\text{mm}$, $d=100\text{mm}$ の圧入試験片の λ-N 線図

表3 圧入試片の $d\lambda/dN$, σ , D の関係

λ mm	$\times 10^{-6}$ mm					
	1		3		5	
d mm	50	100	50	100	50	100
σ kg/mm ²						
13	5.2	6.2	5.2	6.2	5.2	6.2
12	1.78	1.4	1.78	3.1	1.78	5.1
11.5	0.26	—	0.76	—	1.3	—
11	—	0.6	—	1.35	—	—

直径のもっと大きいものについての資料は殆んどないが直径 480mm のクランク軸についての資料⁴⁵⁾では次の実験式で表はされる事がわかっている。即ち

$$\frac{d\lambda}{dN} = \frac{\{(Z_0/Z) - 7.3\}}{1.3} \times 10^{-6} \text{mm} \quad (3)$$

但し、 σ_0 : 称呼応力

Z_0 : 最初の断面の断面係数

Z : きずが入ったあとの断面係数

そこで、第3表と(3)式から λ の 5.3.1mm に対して $d\lambda/dN$ と D (直径) の関係を図示したのが図48⁴⁶⁾である。

図48から大胆に、 λ - σ - $d\lambda/dN$ 曲線を σ のひくい所迄つづつたのが図49⁴⁶⁾である。

* 但し、高周波焼入した試片の時はい) の影響が支配的である。

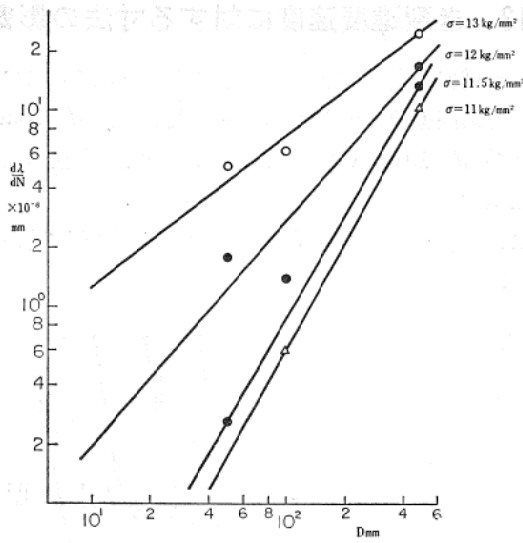


図48(a) 直径と $d\lambda/dN$ の関係 ($\lambda=1\text{mm}$ のとき)

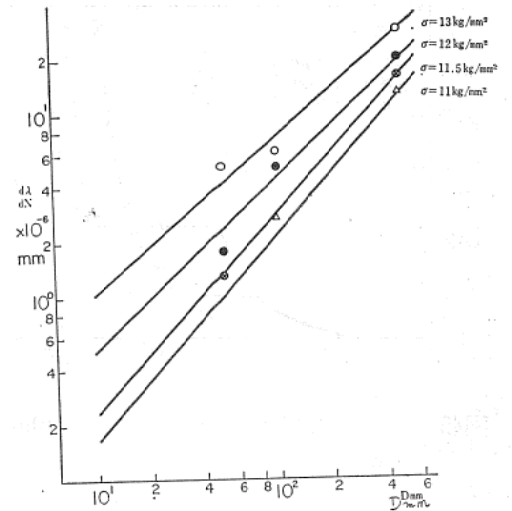


図48(c) 直径と $d\lambda/dN$ の関係 ($\lambda=5\text{mm}$ のとき)

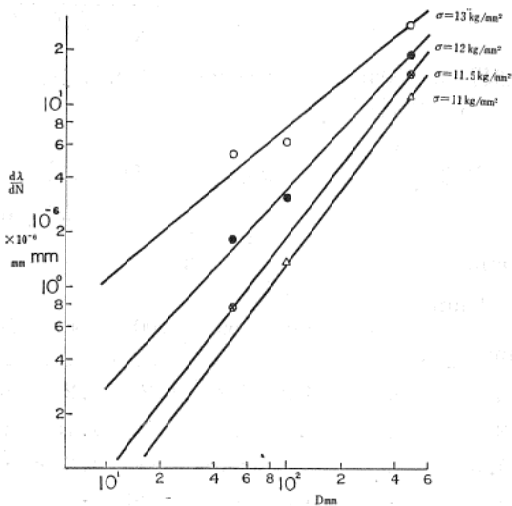


図48(b) 直径と $d\lambda/dN$ の関係 ($\lambda=3\text{mm}$ のとき)

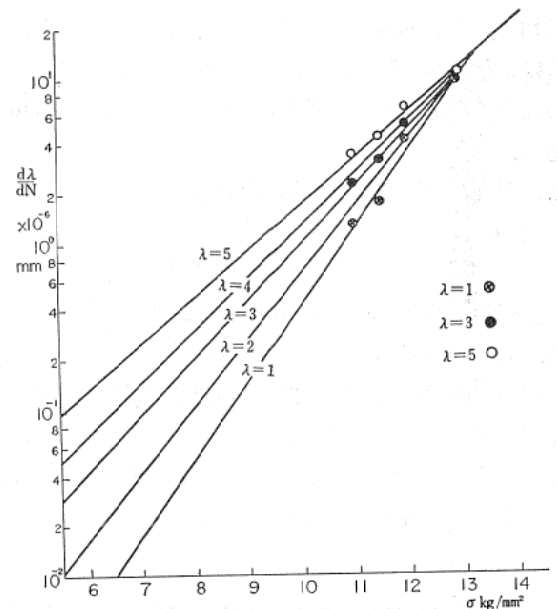


図49 σ と $d\lambda/dN$ の関係 (λ 毎の)

図49は今後の多くの資料の出現により修正せねばなるまいが、現時点でのき裂の進展を予想するには役立つ資料である。(但し直径は150~200mm⁴⁷⁾) のとき

14 疲労強度のばらつき

13までの疲労試験結果は何れも材料、熱処理、工作法に帰因する疲労強度のばらつきについてはあまり積極的に考へてはいないが、実際のトラブルをおこす時には、この疲労強度のばらつきが非常に問題になる。地味な研究課題であるので公表されたものはあまりないが、車軸材についての資料を以下に示す。

この資料は、国鉄において使用している12 t長軸の輪坐部(直径 175mm)から長さ方向が軸方向に一致する

ようにして採取した試料についてのもので、採取軸のメーカー、溶鋼年月日、使用期間、使用された車両の種類などは必ずしも一定ではなく、現物車軸から無作為に切り出したものである。

材料は SFA 55相当のものであり、今回の調査範囲では、炭素含有量は0.25~0.44%であり、引張強さ σ_B のばらつきは 47~64kg/mm²、硬度はおよそ $H_V=150\sim 200$ である。

22本の車軸から採取した試験片 ($\rho=0.25$, $d=15$, $D=30$, $\theta=60^\circ$) の疲れ限度 σ_{w2} を求めた結果を4表に示す。平均疲れ限度は 9.6kg/mm² であり、最大と最小で40%異なる。

各応力での破断割合を図50に示す。

表4 疲れ限度

σ_{w2} kg/mm ²	頻 度
11	4
10	8
9	7
8	3
計	22

平均 9.6 kg/mm²

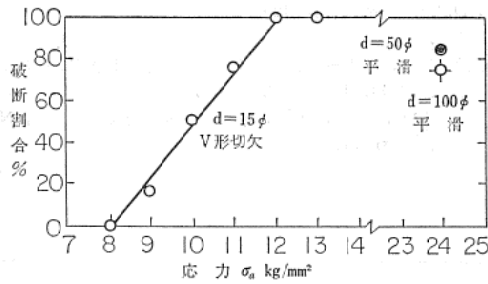


図50 車軸材V形切欠試片各応力での破断割合

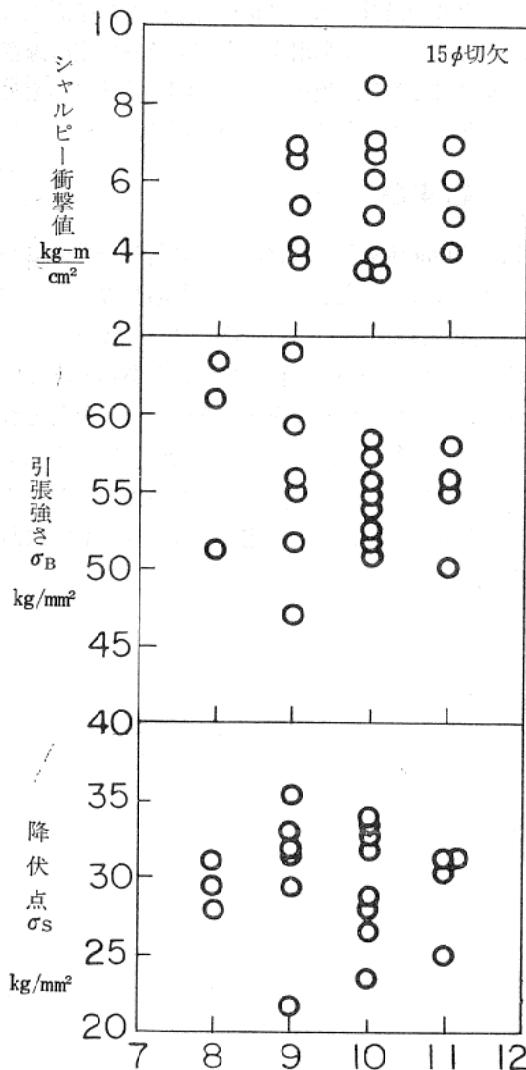


図51 疲れ限度と静的強さの関係

図51は求めた疲れ限度 (σ_{w2}) と静的試験の結果の相関をみたもので、降伏点 σ_S 、 σ_B シャルピー値などは明白な関係はえられなかった。

図52は疲れ限度と炭素含有量C%の関係をみたもので、C%と σ_{w2} との関係は通常えられている関係とは逆の結果であるが、その原因は不明である。

53図は 15 ϕ V形切欠試片について同一応力振巾での破断迄のくり返し数とその累点したものである。応力振巾 11kg/mm² 以下では1本の直線とならず途中で折点を生ずる。また破断くりかえし数のばらつきは応力が低くなる程増加している。

寿命勘定の際にはここでのべた疲労強度のばらつきが一番問題となり、且つつかまへ難いものである。

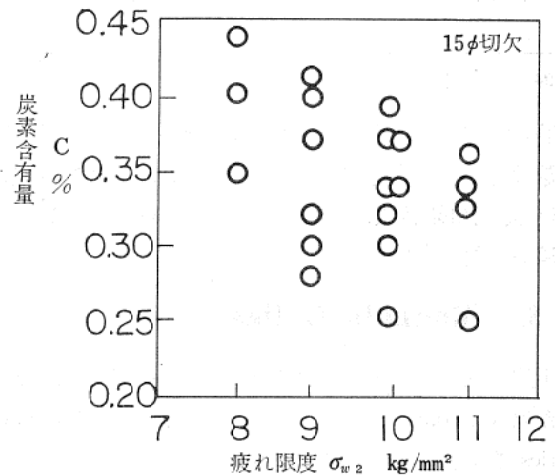


図52 C%と疲れ限度の関係

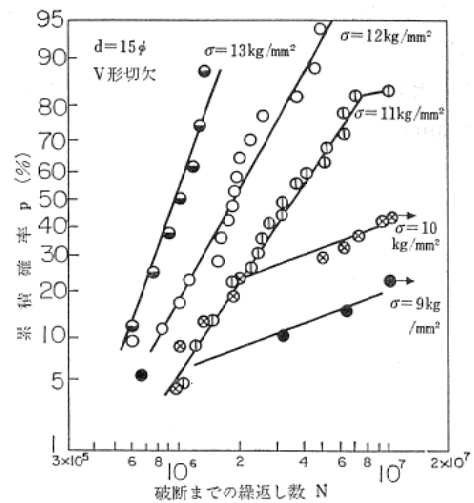


図53 破壊確率曲線 (対数正規確率紙)

参考文献

- 25) 萩原, 青木, 中村, 国尾, 機論, Vol. 34. No. 264 (昭43. 8), p. 1356.
- 26) 萩原, 初野, 中村, 国尾, 機論 Vol. 34, No. 268 (昭43. 12).
- 27) 青木, 初野, 中村, 国尾, 機論, Vol. 31. No. 222 (昭40. 2) p. 189.
- 28) 村木, 飯野, 萩原, 青木, 国尾, 機械学会講演論文集 (昭41. 10).
- 29) 田中 (道), 機論, Vol. 33. No. 249 (昭42. 5) p. 679.
- 30) 萩原, 初野, 中村, 国尾, 機論, Vol. 35. No. 271 (昭44. 3) 掲載予定.
- 31) 国尾, 萩原, 島田, 中村, 青木, 機械学会東海支部講演論文集, (昭43.3) p. 109.
- 32) 青木, 初野, 中村, 国尾, 材料, Vol. 14. No. 146 (昭40. 11), p. 892.
- 33) 中村, 堀川, “実働応力と疲労強度 (その27)” 機械学会北陸, 信越地方講演論文集, (昭43. 9) p. 17.
- 34) 中村, 星, 青木, “働応力と疲労強度 (その26)” 機械学会, 北陸, 信越地方講演論文集 (昭43, 9), p. 13.
- 35) 恒成, 中村, 機械学会関西支部講演論文集, (昭43. 11).
- 36) 中村, 藤井, 水川, 吉村, 材料力学連合講演会前刷. (昭43. 9), p. 143.
- 37) 中村, 田中, 夏井, 矢口, 機論. Vol.33. No.251 (昭42. 7) p. 1034.
- 38) 中村, 初野, 材料, Vol. 16. No. 165 (昭42. 6). p. 420.
- 39) 中村, 田中, 機論, Vol. 33. No. 256 (昭42. 12) p. 1902.
- 40) 田中, 初野, 毛利, 矢口, 中村, 鉄研速報, 68-1006 (昭43. 1) p. 1.
- 41) 中村, 初野, 機論, Vol. 33. No. 256 (昭42. 12) p. 1893.
- 42) 村木, 萩原, 島田, 青木, 国尾, 中村, 機論, Vol. 35. No. 271 (昭44. 3) 掲載予定.
- 43) C. M. Hudson & H. F. Hardrath, NASA TND-960 (1961).
- 44) P. Nakamura, H. Nakamura, N. Oda, 4th Int. Conf. N.D.T. (昭38. 9) p. 120.
- 45) 未公表.
- 46) 中村, 田中, “車軸の強さに関する研究 (第2報)”, 機械学会講演論文集. (昭44. 4) の予定.
- 47) 田中, 初野, 矢口, 吉村, 中村, 機械学会講演論文集, No. 195 (昭43. 8) p. 57.

24頁より続く

に沿って作られた磁壁に生ずる zig-zag 模様が容易軸と困難軸との合成磁界により困難軸方向に移動する現象に注目し, 雲形磁区によるシフトレジスタの構成について実験を行なっている。

6. Magneto-Optics

上述の磁区の動作の観察には磁気-光学効果 (Kerr または Faraday 効果) を利用するが, 最近 Magneto-optics を直接応用したものが開発されてきた。

Mn-Bi 膜や Orthoferrite 膜では磁化が膜面と垂直に存在しうるので, 非常に高密度の記憶が可能となる。Honeywell 社では 10^6 bit/inch² のものを作ったが, 電子線で加熱してキュリー点以上に上げて書込み, レーザ・ビームで読出す方法は有望視されている。

表示素子としては磁性膜上に酸化鉄のコーロジョンを置いた Spain の方式やフェライトの上に隣を塗った方

式などがアメリカで研究されているが, 筆者の研究室でも, 直接効果を利用したニクシー管式のものを開発した。また, 磁気光学効果を利用すると磁気テープ上の録音情報を可視的にしたり, 微小部分の B-H 特性を測定したりすることも可能であるので将来性明るい分野である。

7. むすび

以上, Magnetism と呼ばれる最近の新しい分野について述べた。ここでは紙面の都合でふれられなかったが, 超電導を利用した機器——たとえばクライオトロンや磁石, ジャイロなど——にも面白いものがあらわれているし, パラメトロンや半導体と磁気との関連効果などものべられるべきであろう。いずれにせよ磁性物理と工学との提携はさらにこの分野を広げてくれるだろうし, それに従ってさらに新しい応用が述べられる機会も別にあるであろう。