

UDC 620.178.3:  
669.715:  
539.4.016:  
620.169.1

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-359

ストップホールによる 2024-T3 アルミニウム  
合金板材の疲れき裂停止効果

寺 田 博 之 ・ 角 田 義 秋

1974 年 3 月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# ストップホールによる 2024-T3 アルミニウム合金板材の疲れき裂停止効果\*

寺 田 博 之\*\* 角 田 義 秋\*\*

## On Fatigue Crack Arresting by a Stop-hole in 2024-T3 Aluminum Alloy Sheet Specimens

By

Hiroyuki TERADA and Yoshiaki KAKUTA

As one of the primary repair methods of fatigue crack occurring in the sheet structures of the aircraft, a stop-hole is often applied in the vicinity of the crack tip. But concerning the arresting effect of the stop-hole, this repair method has not always been successful because the optimum size or location of the stop-hole was somewhat uncertain so far.

The aim of the present study was to find out the most effective way to arrest the fatigue crack by the stop-hole. The influence of the following three parameters on the crack propagation life was studied; the size of the stop-hole, the distance between the front edge of the stop-hole and the tip of the crack occurred, and the crack length at the moment of repair.

Single edge notched sheet specimens of 2024-T3 aluminum alloy were tested under partially tensile fatigue loads with constant stress amplitudes.

The conclusion of the present study is as follows;

Repairing fatigue cracks of shorter length is more effective.

The radius of the stop-hole must be large enough to release the stress near the crack tip sufficiently.

The distance between the front edge of the stop-hole and the tip of the fatigue crack occurring must be short enough to leave sufficient residual width and to leave an effective residual compressive stress region around the crack tip.

### 1. ま え が き

近年、疲れき裂進展に関する研究は盛んであるが、疲れき裂の停止、修理に関する研究<sup>1),2)</sup>はあまり見られない。

航空機などに発生した疲れき裂の修理方法としてはその程度や規模によって、一時的修理と永久的修理の二つの方法がある。前者は永久修理より簡単なもので、き裂の進行を一時的に食い止めることにより耐航空性を維持するためのものであるが、修理が比較的容

易に行なえることが特長である。一方、後者は損傷部材全体の交換によって安全性を確保するためのものであるが、その実施にあたっての設備、期間および経済性などに問題が残る。

ここでは航空機の疲れき裂の一時的修理方法の一つであるストップホールに注目する。ストップホールによる修理の方法は発生した疲れき裂先端に穴あけ加工を施し、き裂先端の応力集中を緩和させることによって、進展を一時的に停止させる方法である。しかし、従来この方法は経験に頼る面が多く、必ずしも最適な方法で行なわれているとは言えない。そこで、航空機用材料として用いられる高力アルミニウム合金 2024-T3 板材について、いくつかの負荷々重レベルで疲れ

\* 昭和 49 年 1 月 14 日受付

\*\* 機体第二部

き裂進展試験を行ない、ストップホールの位置や大きさなどが疲れ寿命に及ぼす効果について調べた実験結果を報告する。

## 2. 記号と単位

- $N$ : 疲れ寿命〔サイクル〕  
 $l$ : 疲れき裂長さ〔mm〕  
 $l_0$ : 初期切欠き長さ〔mm〕  
 $l_1$ : 修理時のき裂長さ〔mm〕  
 $l_m$ : 有効寿命比を求めるき裂長さ〔mm〕  
 $G$ : 疲れき裂有効寿命比  
 $G^*$ : 見かけの疲れき裂有効寿命比  
 $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ : き裂有効寿命比の比  
 $\sigma$ : 応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_r$ : 降伏応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_{\max}$ : 最大応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_{\text{mean}}$ : 平均応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_{\min}$ : 最小応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_{\text{amp}}$ : 振幅応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $\sigma_{\text{nom}}$ : 公称応力〔kg/mm<sup>2</sup>〕  
 $R$ : 応力比  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$   
 $K$ : 応力拡大係数〔kg/mm<sup>3/2</sup>〕  
 $F$ : 応力拡大係数の修正係数  $F = K / \sigma \sqrt{l}$   
 $r$ : き裂先端からの距離〔mm〕  
 $f(\theta)$ : 極座標成分  $\theta$  の関係係数  
 $\rho$ : 切欠き底の曲率半径〔mm〕  
 $\alpha$ : 応力集中係数  
 $\phi$ : ストップホールの直径〔mm〕  
 $H$ : ストップホール先端と疲れき裂先端の距離〔mm〕  
 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ : 塑性域の大きさ〔mm〕  
 $W$ : 板幅〔mm〕  
 $C_1, C_2$ : 定数

## 3. 試験片および試験機

試験に供した材料は板厚 3 mm の航空機用高力アルミニウム合金 2024-T3 材で、その化学成分および機械的性質を表 1 に示す。なお、材料の機械的性質を調

べるために用いた引張り試験片は JIS Z 2201 に定める 5 号標準平滑試験片で、その形状寸法を図 1 に示す。試験機はアムスラー型万能試験機（最大容量 100 トン）を用い、8 枚の標準平滑試験片について標点間距離 50 mm の精密伸び計を使用して計測を行なった。表 1 にはそれら実験結果の平均値を与えた。

疲れき裂進展試験に用いた試験片は長手方向がすべ

表 1 化学成分および機械的性質

化学成分 (%)	Cu	Mn	Mg	Al
材料				
2024-T3	4.3	0.6	1.5	残部
機械的性質	引張強さ $\sigma_B$	降伏強さ $\sigma_{0.2}$	伸び (%)	縦弾性係数 $E$
材料	(kg/mm <sup>2</sup> )	(kg/mm <sup>2</sup> )	(%)	(kg/mm <sup>2</sup> )
2024-T3	50.5	40.1	15.6	7230

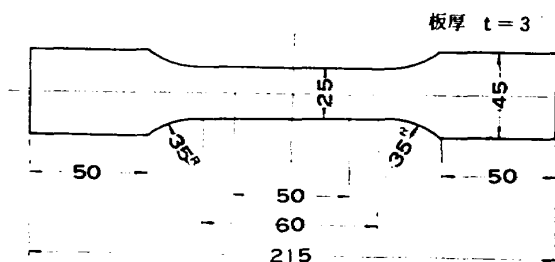


図 1 静試験用引張試験片

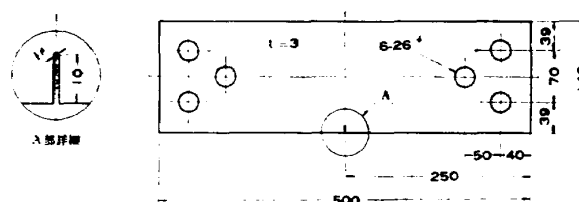


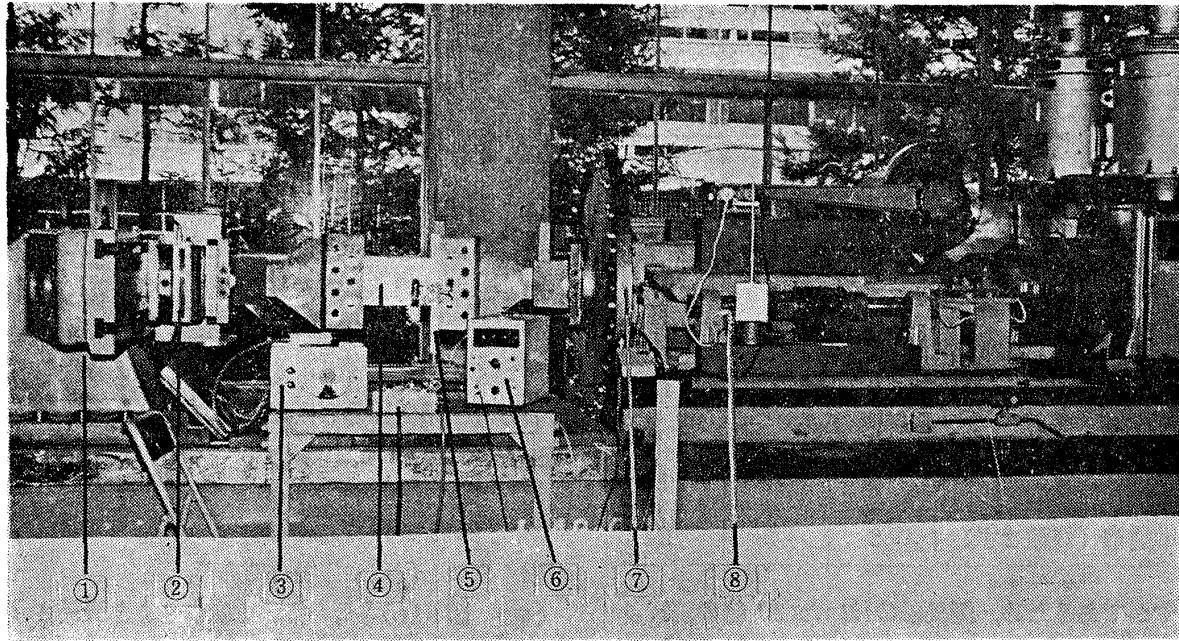
図 2 疲れ試験片形状

て母材の圧延方向と一致するように切り出したものについて、おのおの一個の片側端部切欠き ( $\alpha=7.5$ ) を施したが、その形状寸法を図 2 に示す。

疲れ試験に用いた試験機は準共振型試験機に属する シェンク PB30 型疲れ試験機（写真 1 参照）で、その主要々目を表 2 に示す。

表 2 疲れ試験機の主要々目

荷重	変動荷重 (ton)	静荷重 (ton)	最大組合せ荷重 (ton)	最大変位 (mm)	荷重サイクル (cycle/min)
機械式作動	$\pm 0.7 \sim \pm 10$	$0 \sim \pm 16$	$\pm 26$	$\pm 40$	$350 \sim 2,600$
油圧式作動	$\pm 0.5 \sim \pm 16$	$0 \sim \pm 16$	$\pm 30$	$\pm 63$	max. 100



- ① 固定端支持台                      ⑤ 読取顕微鏡  
 ② ダイナモメーター                ⑥ 計数器  
 ③ ストロボ装置                      ⑦ 加振端（ディスクスプリング）  
 ④ 試験片                              ⑧ 光電管式検出器

写真 1 シェンク PB30 型疲れ試験機

#### 4. 試験方法

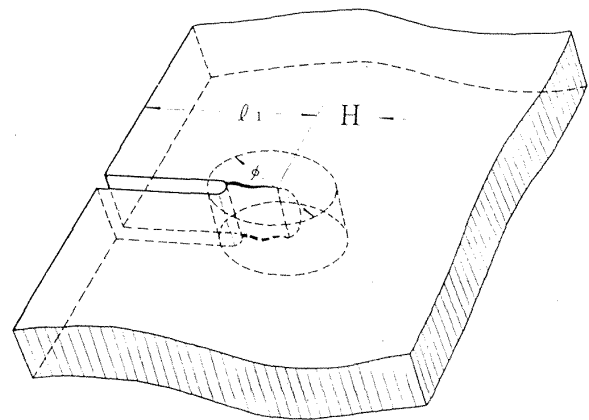
試験は表 3 に示すような三種の一定振幅の部分片振り引張り荷重をそれぞれ負荷して疲れき裂を発生・進展させ、き裂の修理時期がき裂寿命に及ぼす効果を検討するために、初期切欠きを含めたき裂長さか 15mm あるいは 25mm まで成長したとき荷重を一旦除荷し、試験片を試験機から取り外してストップホールを加工する。なお、以後負荷々重の大きさは表 3 の記号によって示す。

表 3 負 荷 々 重

(定振幅荷重) $\sigma_{\text{mean}} \pm \sigma_{\text{amp}}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	負荷方式	荷重記号	応 力 比 $R = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$
8.5±7.0	油圧式	A	0.1
8.5±3.0	機械式	B	0.5
4.5±2.5	機械式	C	0.3

ストップホールの穴径が疲れき裂の停止特性に及ぼす効果を検討するために、ここでは穴径を 4 mm と 8 mm の二種類について試験を行なった。

また、ストップホールを施す位置が疲れき裂の停止特性に及ぼす効果を検討するために、き裂先端とストップホール先端の距離を 1 mm および 4 mm の二種類



- φ：ストップホール直径  
 ℓ₁：修理時の疲れき裂長さ  
 H：ℓ₁とストップホール先端との距離

図 3 ストップホール加工の様子

について試験を行なった。なおストップホールの仕上げ面を一定にするため、ここではすべてエンドミルを使用したフライス加工によった。このストップホール加工の様子を図 3 に、また各負荷々重に対する試験片の修理状況と数量を表 4 に示す。ストップホールを加工した後、再び試験片を試験機に取り付け、修理前と同一の荷重で最終破断に至るまで負荷した。

負荷応力が最も高く油圧式作動で試験を行なった場合のき裂の測定は、負荷速度が 50 c.p.m 程度で比較

表 4 試験片の修理状況と数量

$\phi$ (mm)	$l_1$ (mm)	$H$ (mm)	試 験 片 枚 数		
			A	B	C
4	15	1	2	2	2
		4	2	2	1
	25	1	1	2	2
		4	1	1	1
8	15	1	3	3	2
		4	2	2	2
	25	1	2	2	2
		4	2	1	1
基準曲線（修理せず）			2	2	2

的緩やかであるため、測長器の付いた 20 倍の読取り顕微鏡を用いき裂が 1 mm 進展することに試験機の累積繰返し数を 1 サイクル単位の精度で記録し、それ以外で負荷応力が比較的低いため機械式作動により行なった場合には負荷速度が 1,500 c.p.m 程度と高いため、ストロボ装置を併用して試験片の振動周期に同期させ、き裂を開口状態に保持して観測し、繰返し数を 10 サイクル単位の精度で記録して解析に供した。

## 5. 試験結果と解析

### 5.1 試験結果

ストップホールによって修理を行なった試験片の疲れき裂進展曲線を図 4.1~4.3 に示す。図には比較のために疲れき裂を修理することなく破断まで負荷した場合の基準曲線をも合せて示した。図において、き裂修理時における基準曲線と修理試験片の寿命の差はあまり大きくないことがわかる。

行なったいくつかの実験結果におけるき裂進展速度とき裂長さの関係を図 5.1~5.3 に、片対数表示によって示す。

### 5.2 修理効果の評価方法と解析

試験片の切欠き底に発生したき裂をストップホールで修理することがどの程度疲れき裂進展寿命延伸に役立つのかを評価するため、き裂有効寿命比 ( $G$ ) を用いる。図 6 にき裂有効寿命比 ( $G$ ) を説明するための疲れき裂進展挙動の模式図を示す。図中の曲線①は修理効果の比較のために、き裂を修理することなく最終破断に至るまで同一の疲れ荷重を負荷した場合のき裂進展挙動を示したもので、これを基準曲線と呼ぶ。また鎖線で示される曲線②はストップホールを施すべき

試験片において、切欠き底 ( $l_0$ ) から疲れき裂が発生進展して修理を施す長さ ( $l_1$ ) に到達した後も修理を施さなかったと仮定した仮想的なき裂進展挙動を示すものである。Leeuwen ら<sup>2)</sup> は仮想曲線の求め方として図 6 (a) および (b) に示すような二通りの考え方を提案しているが、これらについて以下に略述する。

(イ) 図 6 (a) は、修理を施すべきき裂長さ  $l_1$  における基準曲線と実際に修理を施した試験片の寿命の違いが仮想曲線上においてき裂長さ  $l$  に比例して増大していく場合、すなわち修理後の任意のき裂長さ  $l_m$  における基準曲線①と仮想曲線②の寿命値をそれぞれ  $N_{li,①}$ ,  $N_{lm,②}$  とすれば、

$$\frac{N_{li,③}}{N_{li,①}} = \frac{N_{lm,③}}{N_{lm,②}} \quad (1)$$

が成り立つと仮定する場合である。

(ロ) 図 6 (b) は、修理を施すべきき裂長さ  $l_1$  における基準曲線と実際に修理を施した試験片の寿命の差が仮想曲線上の任意のき裂長さ  $l_m$  においても一定に保たれる場合、すなわち (イ) における式 (1) の代りに次式が成り立つと仮定する場合である。

$$N_{li,③} - N_{li,①} = N_{lm,③} - N_{lm,②} \quad (2)$$

式 (2) の仮定は次の事柄を意味する。

すなわち、基準曲線と修理試験片の寿命の差は初期切欠きからき裂が発生する寿命のパラツキのみである。

また、曲線③はストップホールを施すべき試験片について、初期切欠きを含めたき裂長さ  $l_1$  において実際に修理を施した後のき裂進展挙動を示したものである。

ここでは図 6 (b) で示される式 (2) の関係式を用いることとする。それは次の理由による。

疲れき裂の進展速度 (1 サイクル当たりのき裂進展量) についての研究に関しては近年きわめて多くの論文があり、疲れき裂の進展速度が応力拡大係数 ( $K \propto \sigma \sqrt{l}$ ) の指数関数で表わし得ることが多くの研究者によって認められている<sup>3)</sup>。ここで、き裂進展速度が  $K$  の関数であるとすれば、試験片形状および応力を一定に保持した試験においてはき裂長さが一定であればき裂進展速度、すなわち図 6 における曲線の勾配は等しくなければならない。

従って、図 6 (b) に示される関係 (すなわち式 (2) の関係) を用いることは妥当である。

また、式 (2) の関係を用いれば、基準曲線およびストップホールを施した試験片のき裂進展曲線からそれぞれ切欠き底からき裂が発生するまでの寿命を差引

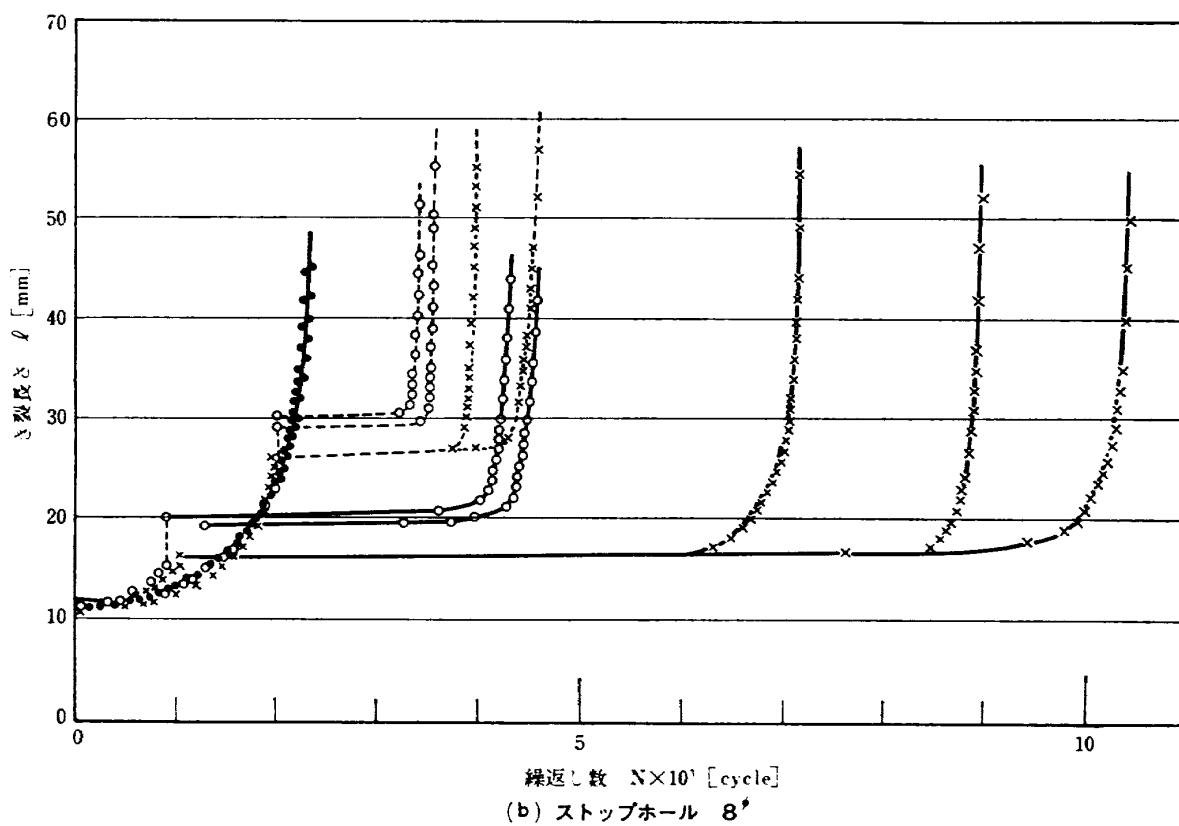
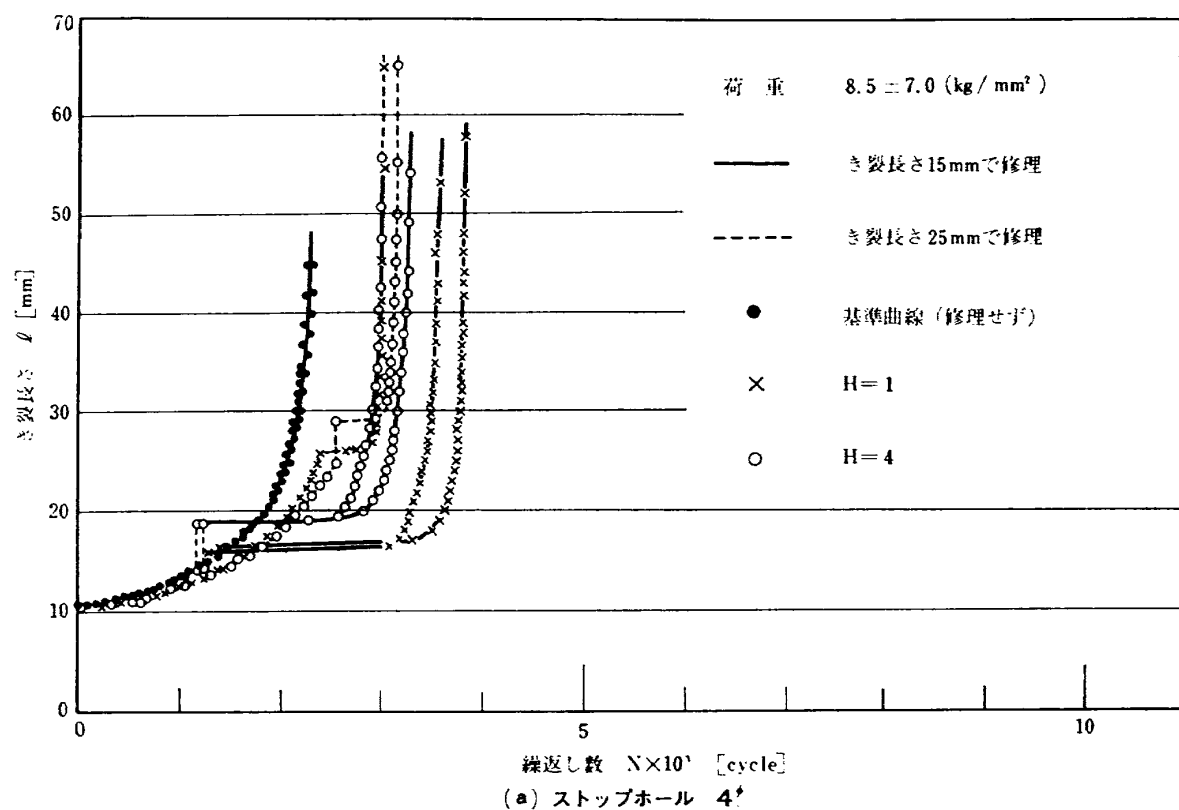


図 4.1 き 裂 進 展 曲 線

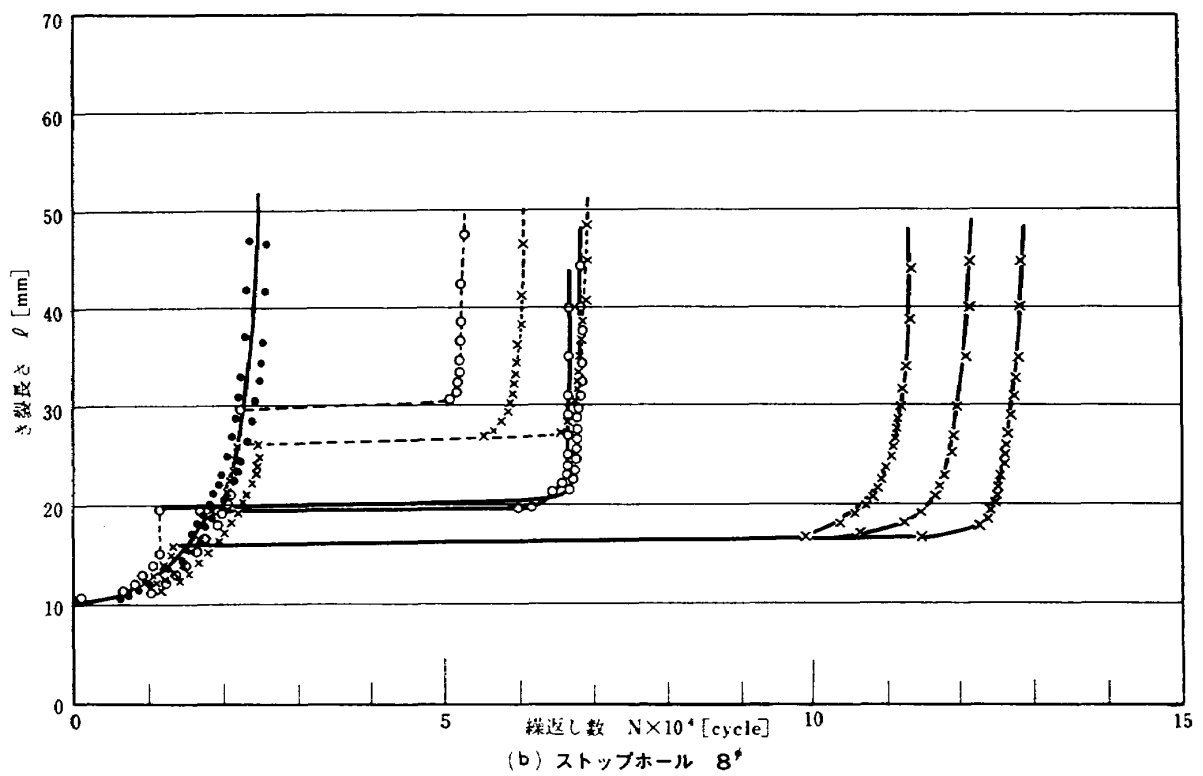
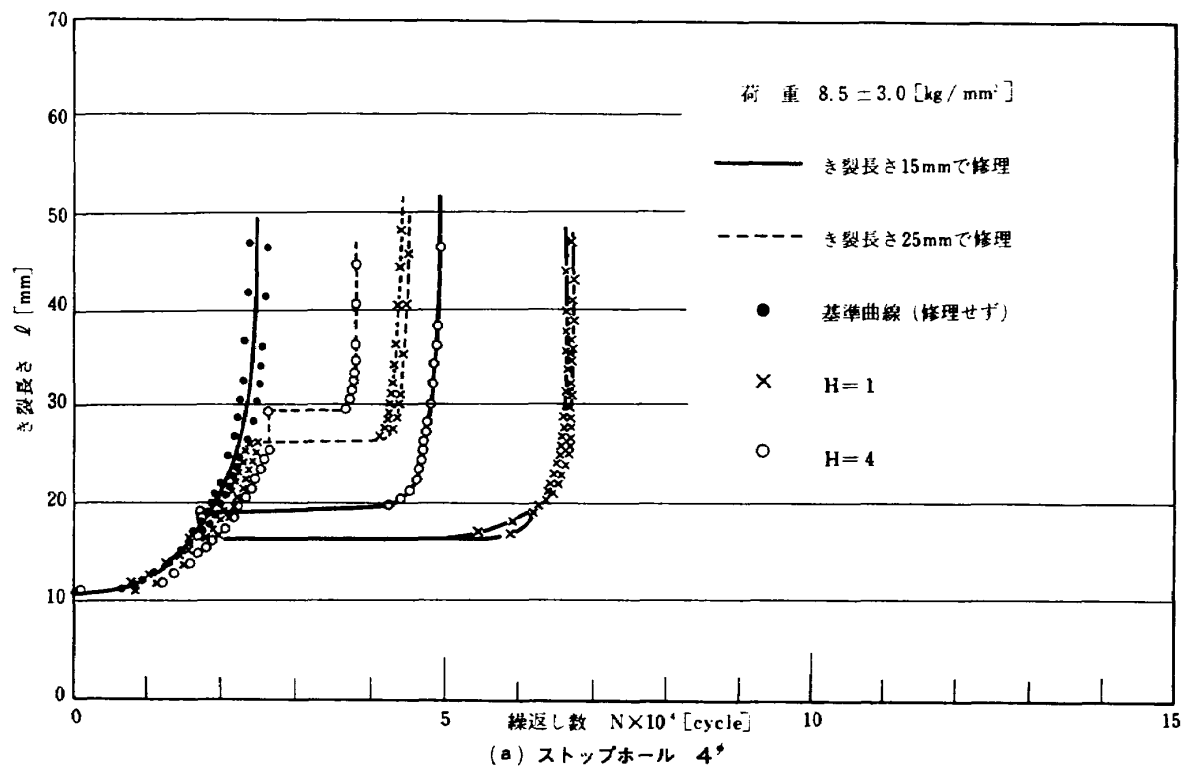
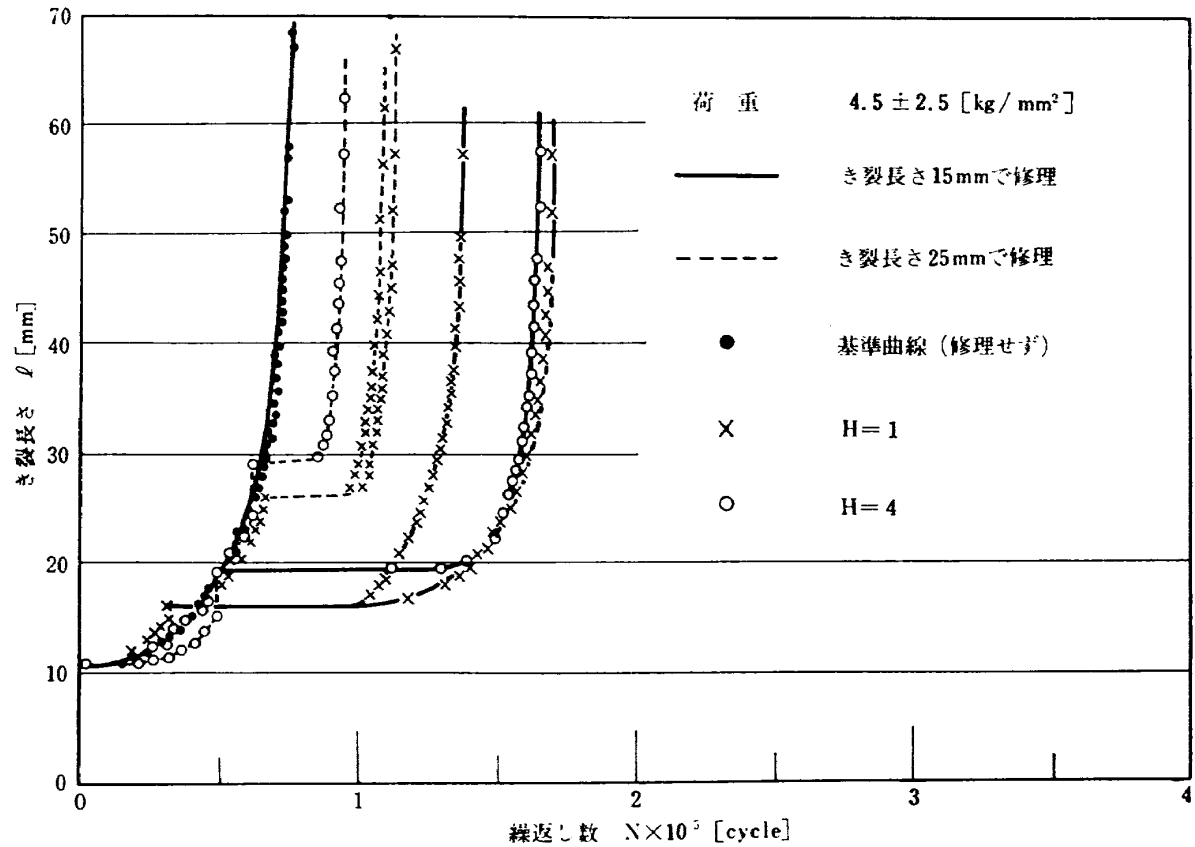
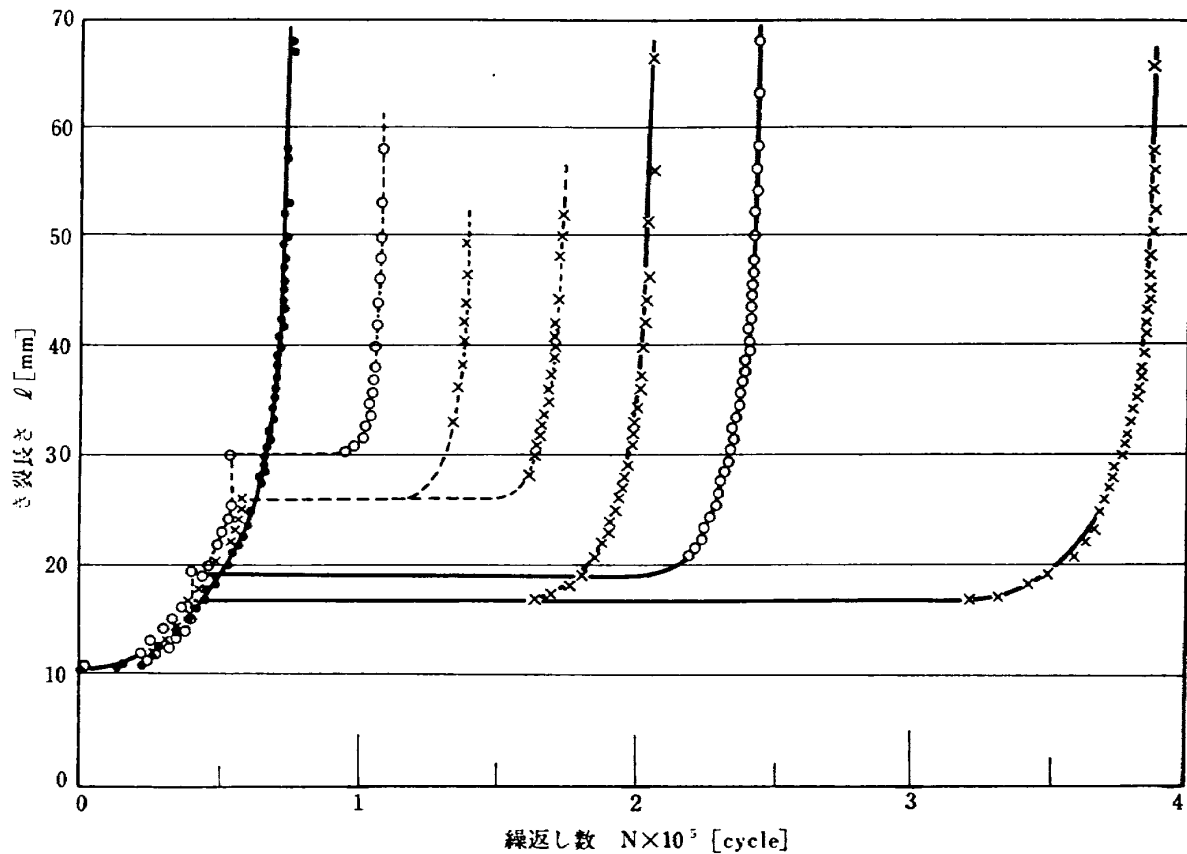


図 4.2 き 裂 進 展 曲 線



(a) ストップホール 4 $\phi$



(b) ストップホール 8 $\phi$

図 4.3 き 裂 進 展 曲 線



くことによって、曲線①と曲線②は完全に重ね合せることができる。実際にはき裂発生寿命を正確に求めることは困難であるので、切欠き底からき裂が1mm進展した時の寿命をき裂発生寿命とし  $N_{i0+1}$  と表示する。また、このような操作を行なうことによって、切欠きの形状に依存するき裂発生寿命のバラツキを無視した純粋なき裂進展期間の寿命を得ることができる。

以上の考察によって、疲れき裂を修理することによるき裂進展寿命延伸の効果を評価するためのき裂有効寿命比 ( $G$ ) を、修理後の任意のき裂長さ  $l_m$  における基準曲線①と修理を施した試験片のき裂進展曲線③から、次式のように定義する。

$$G = \frac{N_{lm, ③} - N_{i0+1, ③}}{N_{lm, ①} - N_{i0+1, ①}} \quad (3)$$

ここで、 $G$  値が1の場合は修理を施したき裂進展曲線と基準曲線が一致し、修理効果がないことを意味する。

なお、き裂発生までの寿命値および基準曲線と修理試験片における修理時き裂長さでの寿命のバラツキを無視した見かけのき裂有効寿命比 ( $G^*$ ) を、

$$G^* = \frac{N_{lm, ③}}{N_{lm, ①}}$$

と定義すれば、初期切欠きの応力集中係数や負荷され

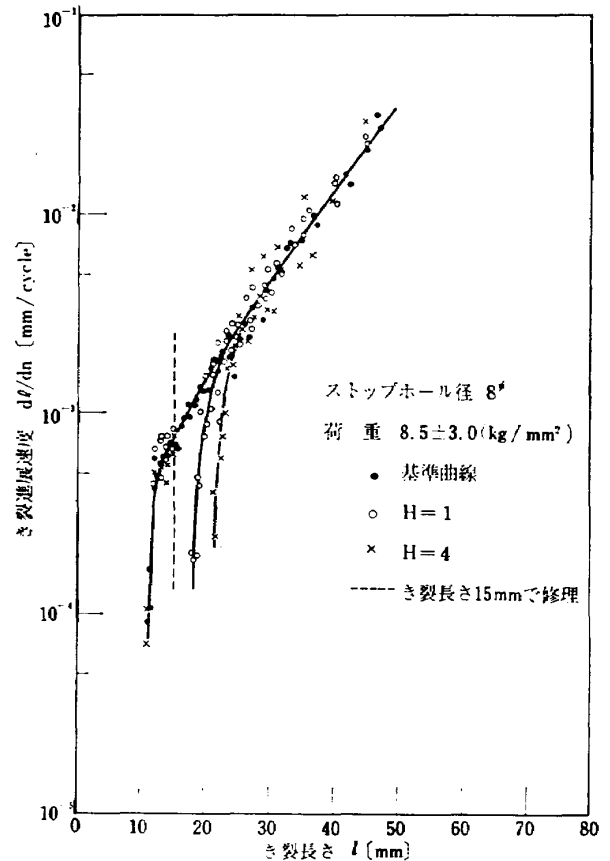


図 5.2 き裂進展速度曲線

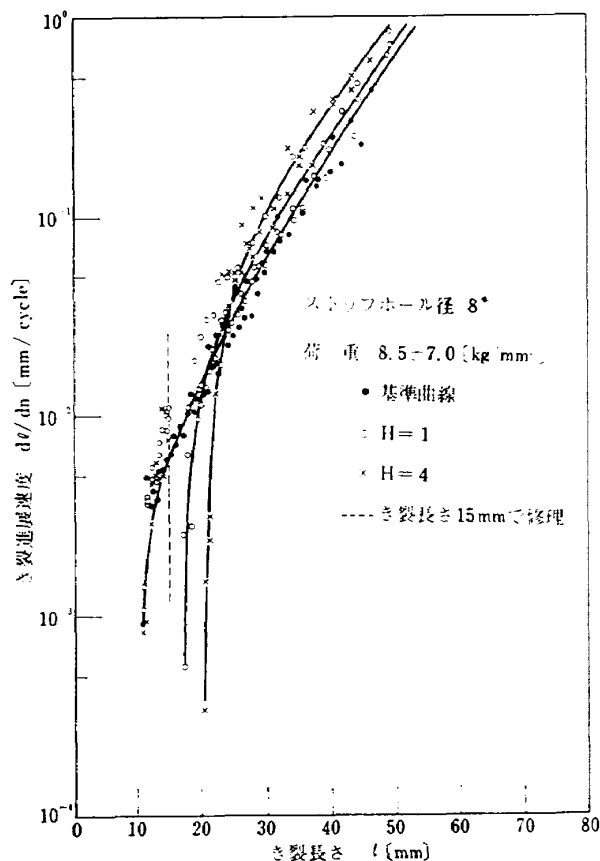


図 5.1 き裂進展速度曲線

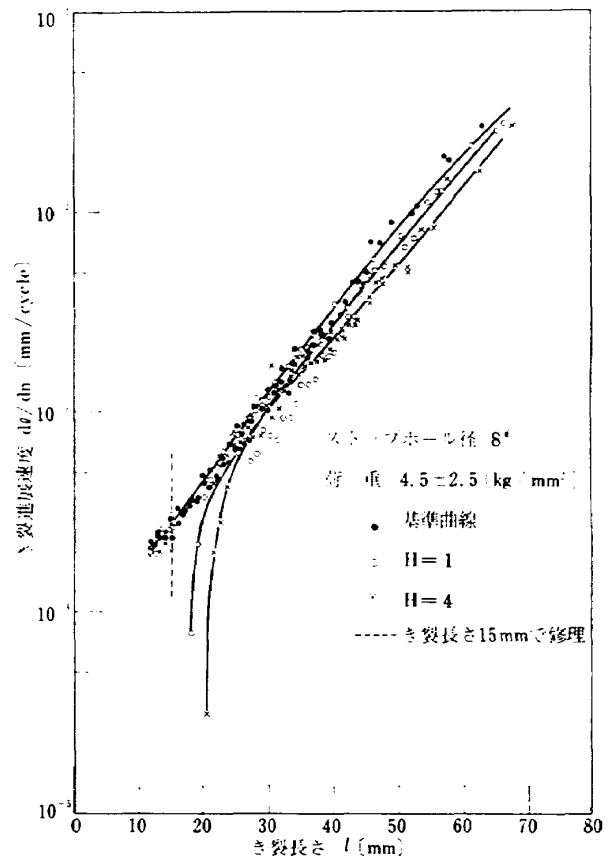


図 5.3 き裂進展速度曲線

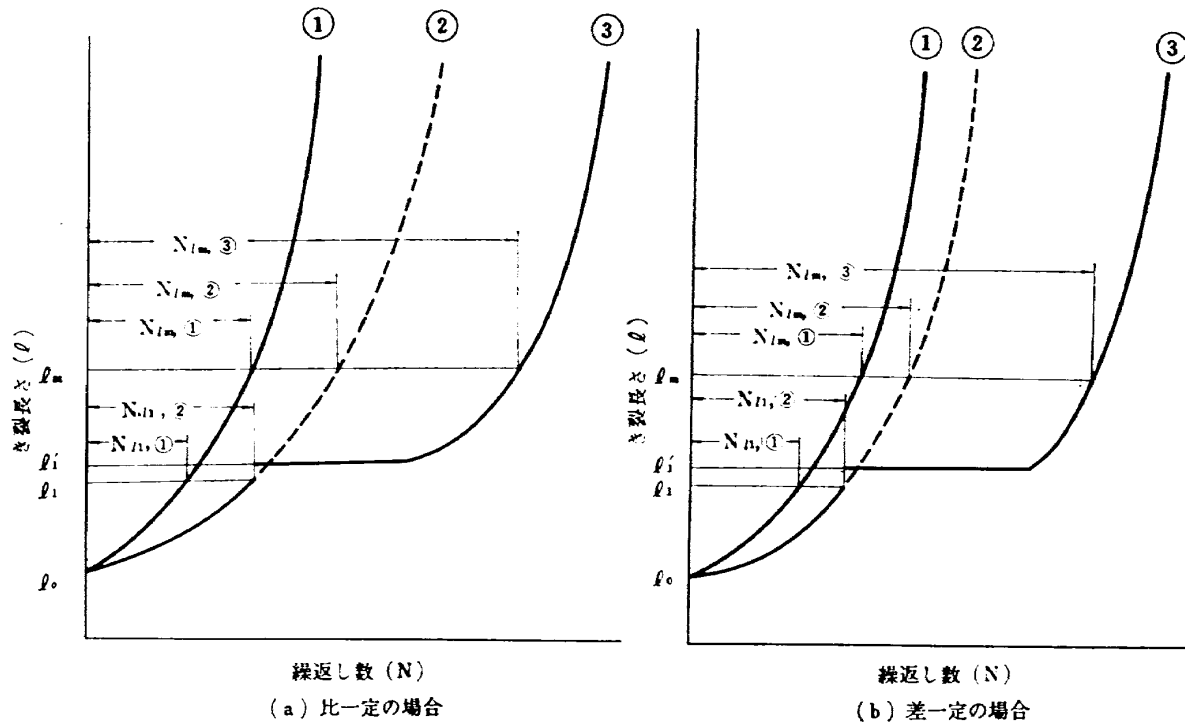


図 6 き裂進展挙動の模式図

る疲れ荷重の違いにもよるが、一般には式 (3) における  $N_{i0+1,①}$ ,  $N_{i0+1,③}$  がそれぞれ  $N_{lm,①}$ ,  $N_{lm,③}$  に比べて無視できない程度の大きな値となるので、 $G^*$  は  $G$  に比べてかなり小さな値となる傾向にある。

き裂有効寿命比を求めるための修理後の任意のき裂長さとしてはストップホールから十分離れたき裂長さにおいて行なうことが望ましいが、ここではき裂長さ 15 mm において修理した場合にはき裂長さ 23 mm における寿命値から  $G$  を算出し、25 mm において修理した場合には 33 mm における寿命値から  $G$  を算出した。なお比較のために 25 mm において修理した場合については、き裂長さ 38 mm における  $G$  についても求めた。

行なったすべての試験について  $G^*$  値で整理した結果を、それぞれ表 5.1~5.3 および図 7 に示す。図 7 の値は表 5.1~5.3 で求めた  $G$  値の平均値を示したものである。表 5.1~5.3 において、き裂長さ 38 mm の場合について求めた  $G$  値は 33 mm について求めた  $G$  値より幾分低めとなっているが、大きな誤差は認められない。図 7 において、白抜き部分のストップホールの穴径が 4 mm の場合であり、斜線部分はそれが 8 mm の場合である。

## 6. 考 察

以上の試験結果を整理すると、次のようなことが考

察される。

### 6.1 ストップホールの穴径が疲れき裂寿命に及ぼす効果

き裂を有する平板の弾性応力解析により、き裂先端付近の応力場は応力拡大係数によって、次式のように表示することができる。

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2r}} \cdot f(\theta) \quad (4)$$

従って、き裂先端  $r \rightarrow 0$  では無限大の応力が作用することになる。一方、先端半径が  $\rho$  なる切欠きを有する切欠き材の最大応力は次式によって表わされる有限値となる。

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{nom}} \cdot \alpha = \sigma_{\text{nom}} \left( C_1 + C_2 \sqrt{\frac{l}{\rho}} \right) \quad (5)$$

式 (5) において、外力および切欠き長さが一定であれば、切欠き部先端半径  $\rho$  を増すことにより応力集中の緩和を図ることができる。

このことから疲れき裂先端には出来るだけ径の大きいストップホールを施すことが望ましいと言える。

図 7 において、ストップホールの穴径がき裂寿命に及ぼす効果を検討するために、荷重、修理時のき裂長さおよびストップホール先端とき裂先端の距離 ( $H$ ) などの条件が同一である穴径が 4 mm (いずれも  $\alpha \approx 4.3$ ) と 8 mm (いずれも  $\alpha \approx 3.2$ ) の場合の  $G$  値の比を求め、これを  $\eta_1$  ( $G_{\phi=8}/G_{\phi=4}$ ) と表わせれば、 $\eta_1$  は

表 5.1 荷重記号 A における試験結果

○修理しない場合

試験片番号	$N_{10+1}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{23}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{33}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{38}$ 〔サイクル〕	平均値
1	560	600	2010	1980	2260	2220	2320	2270
2	630		1940		2170		2210	

○修理した場合

試験片番号	ストップ ホール直 径 $\phi$ 〔mm〕	修理時の き裂長さ $l_1$ 〔mm〕	$H$ 〔mm〕	初期 欠き長さ $l_0$ 〔mm〕	切 き 長さ $l_1'$ 〔mm〕	$N_{10+1}$ 〔サイクル〕	$N_{23}$ 〔サイクル〕	$N_{33}$ 〔サイクル〕	$N_{38}$ 〔サイクル〕	$G_{23}$	$G_{33}$	$G_{38}$
3	4	15	1	10.50	16.60	720	3680	—	—	2.14	—	—
4				10.60	16.05	520	3370	—	—	2.06	—	—
5				10.50	18.85	560	3000	—	—	1.76	—	—
6				10.50	18.90	640	2750	—	—	1.52	—	—
7	4	25	1	10.35	25.90	660	—	2950	2980	—	1.41	1.38
8			4	10.50	29.00	850	—	3050	3100	—	1.35	1.34
9	8	15	1	10.50	16.20	650	10110	—	—	6.85	—	—
10				10.50	16.15	530	8750	—	—	5.95	—	—
11				10.50	15.70	570	6870	—	—	4.56	—	—
12				10.50	19.01	630	4360	—	—	2.70	—	—
13	8	25	4	10.50	19.70	510	4110	—	—	2.64	—	—
14			1	10.30	26.00	740	—	3880	3900	—	1.93	1.89
15				10.50	26.10	740	—	4430	4470	—	2.27	2.23
16			4	10.35	28.90	610	—	3490	3510	—	1.77	1.73
17				10.50	30.00	820	—	3330	3370	—	1.54	1.52

$N$ : 繰返し数  
 $G$ : き裂有効寿命比  
 $l_1'$ : ストップホール修理時の切欠き深さ

添字はき裂長さを表わす  
 添字はき裂有効寿命比

表 5.2 荷重記号 B における試験結果

○修理しない場合

試験片番号	$N_{10+1}$ [サイクル]	平均値	$N_{23}$ [サイクル]	平均値	$N_{33}$ [サイクル]	平均値	$N_{38}$ [サイクル]	平均値
1	8620	9120	20000	20900	22450	23710	22960	24210
2	9610		21800		24970		25460	

○修理した場合

試験片番号	ストップホール径 $\phi$ [mm]	修理時のき裂長さ $l_1$ [mm]	$II$ [mm]	初期欠き長さ $l_0$ [mm]	$l_1'$ [mm]	$N_{10+1}$ [サイクル]	$N_{23}$ [サイクル]	$N_{33}$ [サイクル]	$N_{38}$ [サイクル]	$G_{23}$	$G_{33}$	$G_{38}$
3	4	15	1	10.50	16.20	8280	65210	—	—	4.83	—	—
4				10.50	16.30	11060	66080	—	—	4.67	—	—
5				10.25	18.90	11220	46490	—	—	2.99	—	—
6				10.55	19.39	6650	56180	—	—	4.20	—	—
7	4	25	1	10.30	26.10	11650	—	43160	43700	—	2.15	2.12
8				10.40	26.35	10580	—	43840	44300	—	2.27	2.23
9				10.30	29.25	10770	—	37570	38000	—	1.83	1.80
10	8	15	1	10.50	15.97	8220	117980	—	—	9.33	—	—
11				10.50	16.05	10270	109670	—	—	8.43	—	—
12				10.50	16.20	9170	125480	—	—	9.87	—	—
13				10.40	19.30	10580	70060	—	—	5.04	—	—
14		25	4	10.55	19.39	6650	66830	—	—	5.01	—	—
15				10.30	26.60	11100	—	67940	68600	—	3.89	3.81
16				10.40	26.25	9350	—	59660	60200	—	3.44	3.36
17				10.45	30.05	9710	—	51220	51800	—	2.84	2.78

表 5.3 荷重記号 C における試験結果

○修理しない場合

試験片番号	$N_{10+1}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{23}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{33}$ 〔サイクル〕	平均値	$N_{38}$ 〔サイクル〕	平均値
1	24440	24000	58120	58570	68910	71590	71320	
2	23550		59010					

○修理した場合

試験片番号	ストップ 直 径 $\phi$ 〔mm〕	修理時の き裂長さ $l_i$ 〔mm〕	$l_i$ 〔mm〕	初期 欠き長さ $l_o$ 〔mm〕	切 き長さ $l_i'$ 〔mm〕	$N_{10+1}$ 〔サイクル〕	$N_{23}$ 〔サイクル〕	$N_{33}$ 〔サイクル〕	$N_{38}$ 〔サイクル〕	$G_{23}$	$G_{33}$	$G_{38}$
3	4	15	1	10.45	16.10	19740	148020	—	—	3.71	—	—
4				10.30	16.00	17390	118880	—	—	2.93	—	—
5		25	4	10.50	19.00	33510	149110	—	—	3.34	—	—
6			1	10.45	26.00	22610	—	106430	108900	—	1.86	1.82
7	8	15	4	10.50	26.20	23810	—	103830	105700	—	1.78	1.73
8				10.40	29.40	24300	—	88870	91000	—	1.43	1.40
9		25	1	10.40	16.55	23520	365000	—	—	9.87	—	—
10				10.30	16.35	23910	190010	—	—	5.02	—	—
11	8	15	4	9.50	18.80	21410	223600	—	—	5.84	—	—
12				10.50	19.25	23560	226160	—	—	5.86	—	—
13		25	1	10.50	26.30	20040	—	135090	136800	—	2.56	2.46
14				10.45	26.25	18510	—	166200	169500	—	3.28	3.19
15	8	15	4	10.45	29.75	19240	—	103090	105600	—	1.86	1.82
		25	1									

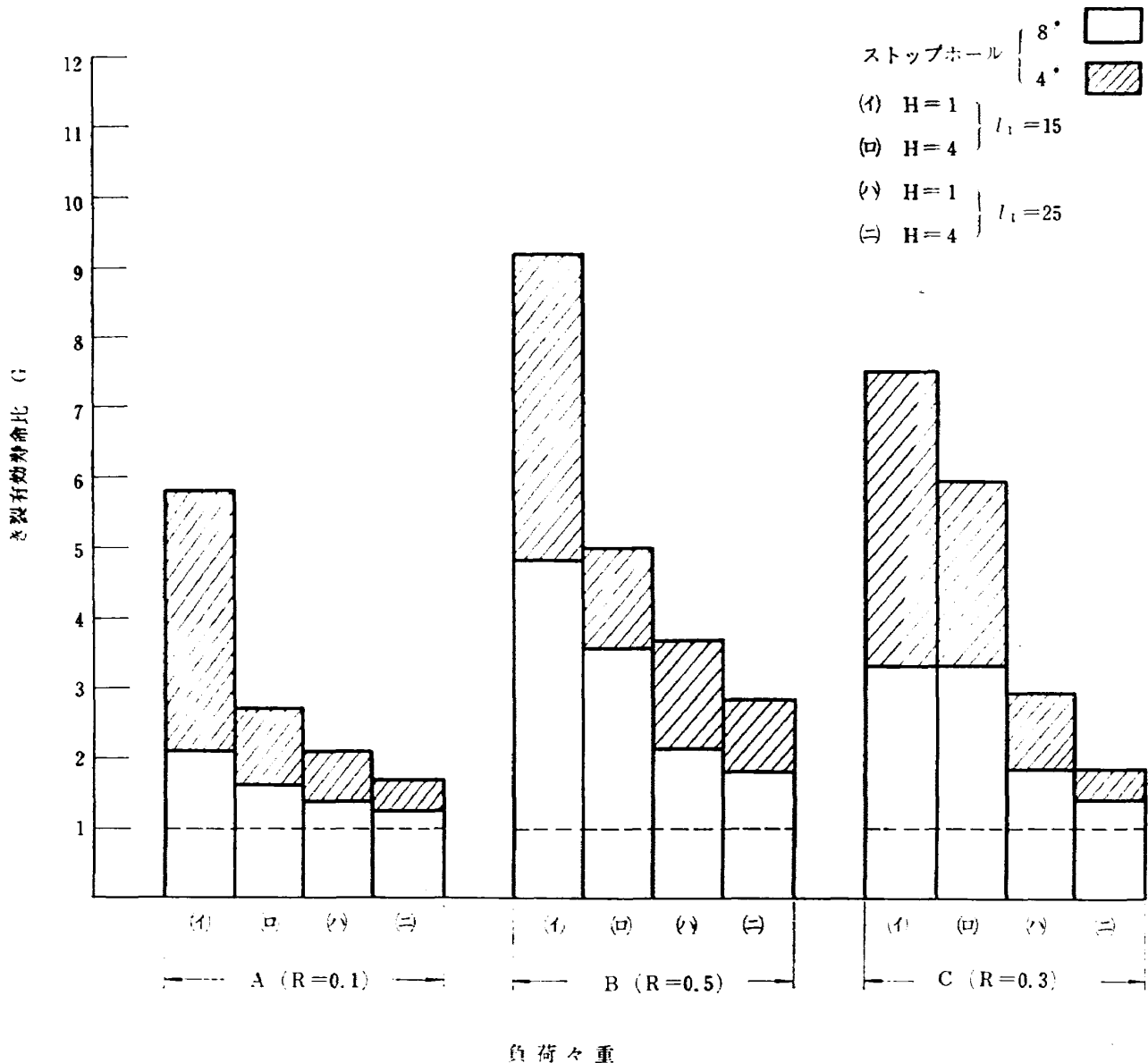


図 7 き裂有効寿命比

1.2~2.8 となり、穴径を大きくしてき裂先端の応力集中を緩和することが疲れ寿命の改善に大きく役立つことがわかる。

また、き裂がかなり進展した段階（修理時のき裂長さが 25mm）においては穴径が 4 mm 程度のストップホールで修理を行なっても、ほとんどき裂の停止効果がないことがわかる。

## 6.2 ストップホール 先端とき裂先端の距離がき裂寿命に及ぼす効果

図 2 に示すストップホール先端とき裂先端の距離 ( $H$ ) が 1 mm と 4 mm の場合の  $G$  値について 6.1 におけると同様、他の条件をすべて等しく選んだ場合の両者の比を  $\eta_2$  ( $G_{H=1}/G_{H=4}$ ) とすれば、 $\eta_2$  は図 7 からほぼ 1.2~2.2 となる。従ってストップホールの加工に際しては穴縁なるべく修理を施すべき疲れき裂

の先端近傍に位置させることが望ましい。これは次に示す理由によるものであると考えられる。

(イ) 疲れき裂先端にストップホールを施すことにより、距離  $H$  だけき裂材の残留面積を無条件に減少させることになる。従って、距離  $H$  をあまり大きく取るとは荷重負担部面積をそれだけ減少させることになり好ましくない。

(ロ) 疲れき裂先端にはきわめて高い応力が集中するために塑性域を生ずる。繰返し荷重を受けるき裂材の塑性域としては、最大荷重時に生ずる最大塑性域とその内部のき裂先端のごく近傍に生ずる繰返し荷重に特有な両振り塑性域が考えられる。この両振り塑性域とは疲れ荷重が片振り引張りの場合には、塑性域内の他の大部分が疲れ荷重の除荷時において弾性的な挙動を示し、最小荷重時においても弾性域にとどまるのに

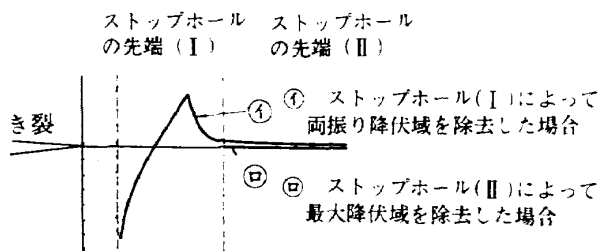
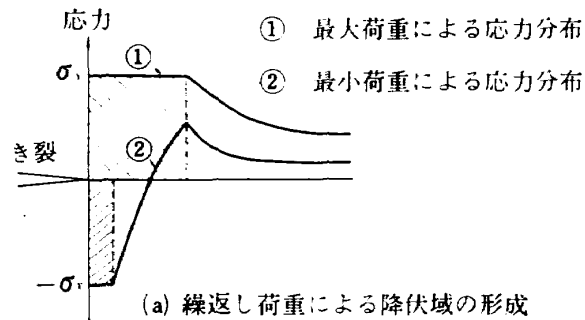


図 8 ストップホール近傍の応力状態

対し、除荷時の一定応力レベルに達したとき圧縮降伏を起すに至る領域であり、従って疲れ荷重1サイクル毎にヒステリシスループを描き、累積損傷を受ける領域である。両振り塑性域外の塑性域においては、除荷サイクルにおいてもすべて弾性的に変形し、無負荷時においては塑性域外のまわりの弾性領域の影響によ

て残留圧縮応力場となる。き裂先端近傍の応力状態を模式的に図8に示す。

ストップホールを施すことによって図に示した塑性域の一部もしくは全部を除去することになるが、加工に際してはき裂先端のごく近傍に存在する累積損傷を受けた両振り塑性域を取除くことは好ましいが、き裂先端において最大負荷によって生じた最大塑性域まで取除くことは、それによって生ずる有効な残留圧縮応力場を除去することになって好ましくない。

き裂先端の塑性域を求める方法がいくつか提案されているが、表6に1個の端部き裂を有する引張り荷重を受ける場合の塑性域の計算結果を示す。表にはここで行なった三種類の荷重レベルについて修理を施したき裂長さにおける最大塑性域および両振り塑性域の大きさを示した。表中  $\omega_1$  は Gross ら<sup>4)</sup> による選点法を用いた片側き裂を有する有限板の応力拡大係数から、筆者がき裂先端塑性域がき裂長さなどに比べて十分小さい、いわゆる小規模降伏(small scale yielding)であることを仮定し、式(4)の弾性応力分布に対して Rice<sup>5)</sup> の提案による塑性域に対する応力再分布を考慮して求めた塑性域の大きさである。また  $\omega_2$  は Smith<sup>6)</sup> による提案式で、一直線上に等間隔に存在する弾完全塑性挙動を示すき裂材(Dugdale モデル<sup>7)</sup>)の解析値である。 $\omega_3$  は片側き裂を有する半無限板の引張り問題の応力拡大係数の理論値から  $\omega_1$  におけると

表 6 塑性域の大きさ

荷 重 記 号			A		B		C	
$\sigma_{\max}$ (kg/mm <sup>2</sup> )			15.5		11.5		7.0	
$\sigma_{\text{amp}}$ (kg/mm <sup>2</sup> )			7.0		3.0		2.5	
き裂長さ (mm)			15	25	15	25	15	25
塑性域の大きさ mm	$\omega_1$	最大値	3.17	5.91	1.74	3.25	0.65	1.21
		振幅値	0.65	1.21	0.12	0.22	0.08	0.51
	$\omega_2$	最大値	3.30	5.62	1.68	2.85	0.58	1.00
		振幅値	0.58	1.00	0.11	0.18	0.07	0.12
	$\omega_3$	最大値	2.82	4.70	1.55	2.59	0.58	0.96
		振幅値	0.58	0.96	0.11	0.18	0.07	0.12

$$\omega_1 = \frac{\sigma^2(\max, \text{amp}) \cdot W \cdot F'}{\pi \sigma_Y^2} \quad F': \text{応力拡大係数の修正係数}^{4)}$$

$$\omega_2 = l \left\{ \frac{W}{\pi l} \arcsin \left[ \sin \frac{\pi l}{W} \sec \frac{\pi \sigma(\max, \text{amp})}{2 \sigma_Y} \right] - 1 \right\}$$

$$\omega_3 = \frac{(1.1215 \sigma(\max, \text{amp}) \sqrt{l})^2}{\sigma_Y^2}$$

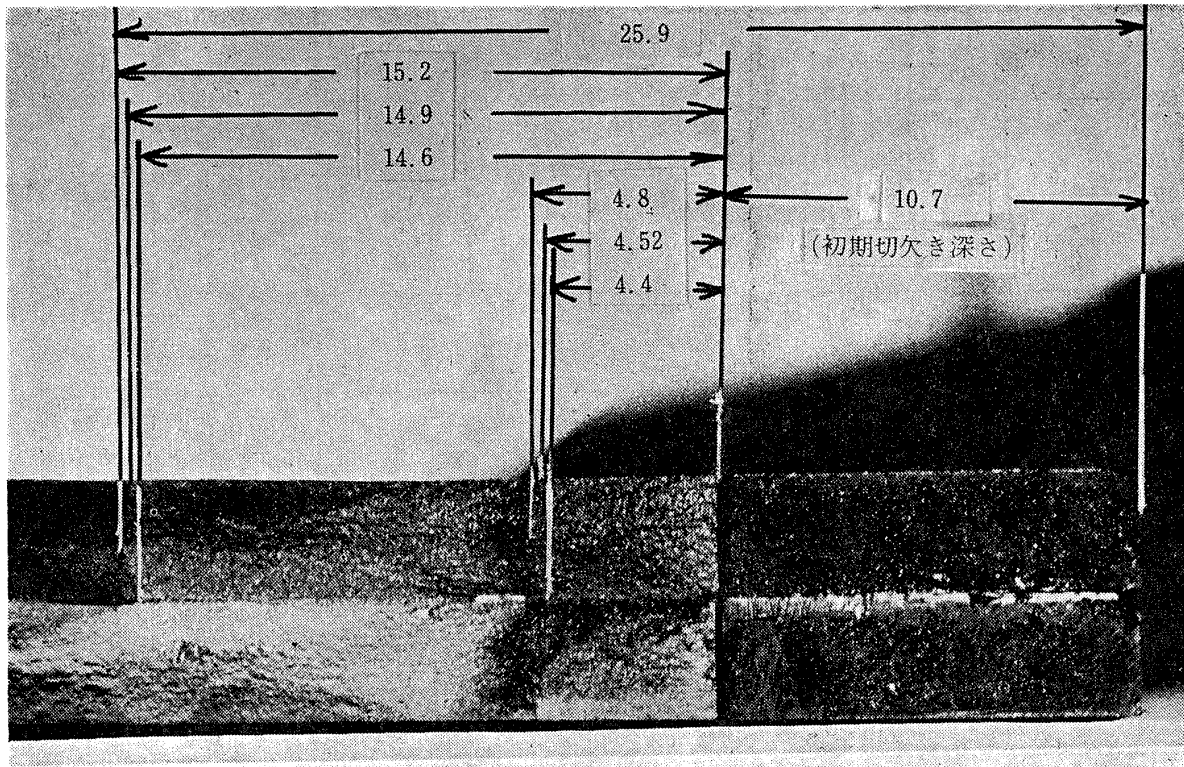


写真 2 試験片の破断面例

同様の手順によって求めた塑性域である。表 6 から、き裂先端に生ずる両振り塑性域の大きさはいずれの荷重レベルにおいてもほぼ 1 mm 以内、また最大塑性域の大きさはほぼ 4 ~ 5 mm 以内であることがわかる。

また写真 2 に、参考のために試験後の破断面を示す。き裂先端の板厚方向形状については板中心部の方が板表面部より若干長い、その差は最大で 0.6 mm 程度であった。従って今回用いた疲労荷重においては  $H$  を 1 mm 程度除去することが適当である。

### 6.3 き裂の修理時期がき裂寿命に及ぼす効果

疲れき裂をストップホールによって修理を施す時期がき裂寿命に及ぼす効果を検討するために、修理時の初期切欠きを含めたき裂長さを 15 mm と 25 mm の二種類について試験を行なった。図 8 において前の 6.1, 6.2 と同様に他のすべての条件が同一である場合の 15 mm で修理を施したときの  $G$  値と、25 mm で修理を施したときの  $G$  値の比を  $\eta_3$  ( $G_{l=15}/G_{l=25}$ ) とすれば、 $\eta_3$  は 1.4 ~ 2.7 となる。

図 4.1 ~ 4.3 のき裂進展曲線において、いずれの荷重段階においてもき裂長さ 25 mm における曲線の勾配は 15 mm における勾配に比してかなり高いことがわかる。従って、き裂進展速度がかなり加速された段階においてはストップホールによる修理効果が低いため、き裂は出来るだけ早期に発見し修理を施すことが

望ましい。

### 6.4 疲れき裂進展速度の挙動

図 5.1 ~ 5.3 に基準曲線および修理を施した試験片の進展曲線から求めたき裂進展速度を示したが、ストップホールによって修理を施した近傍を除いて、両者の間のき裂進展挙動にはいずれの荷重段階においても大きな差異は認められず、ほぼ基準曲線によって求められるき裂進展速度に等しい。

ストップホールからき裂が再発生する近傍におけるき裂進展速度は、基準曲線の値に比べていく分低い進展速度となる。

### 6.5 き裂有効寿命と疲れ荷重の関係

疲れき裂の進展挙動と負荷される振幅応力や平均応力などは複雑な関係<sup>3)</sup>にあり、従ってき裂有効寿命比 ( $G$ ) と疲れ荷重の関係もまた単純ではないが、表 3 に示した荷重  $A$  と  $B$  は平均応力が等しいため  $G$  値と振幅応力の関係を調べるのに便利である。

図 9 (a), (b) は一例としてストップホールの穴径が 8 mm の場合で、負荷応力がそれぞれ  $8.5 \pm 7.0$  (記号 A)  $\text{kg/mm}^2$  および  $8.5 \pm 3.0$  (記号 B)  $\text{kg/mm}^2$  のときのき裂進展挙動を縦軸にき裂長さ ( $l$ )、横軸に初期切欠きからき裂が 1 mm 進展したのちの寿命 ( $N - N_{l0+1}$ ) を選び、 $H$  および  $l_1$  が同一条件である場合の実測値の平均値をとって示したものである。負荷し



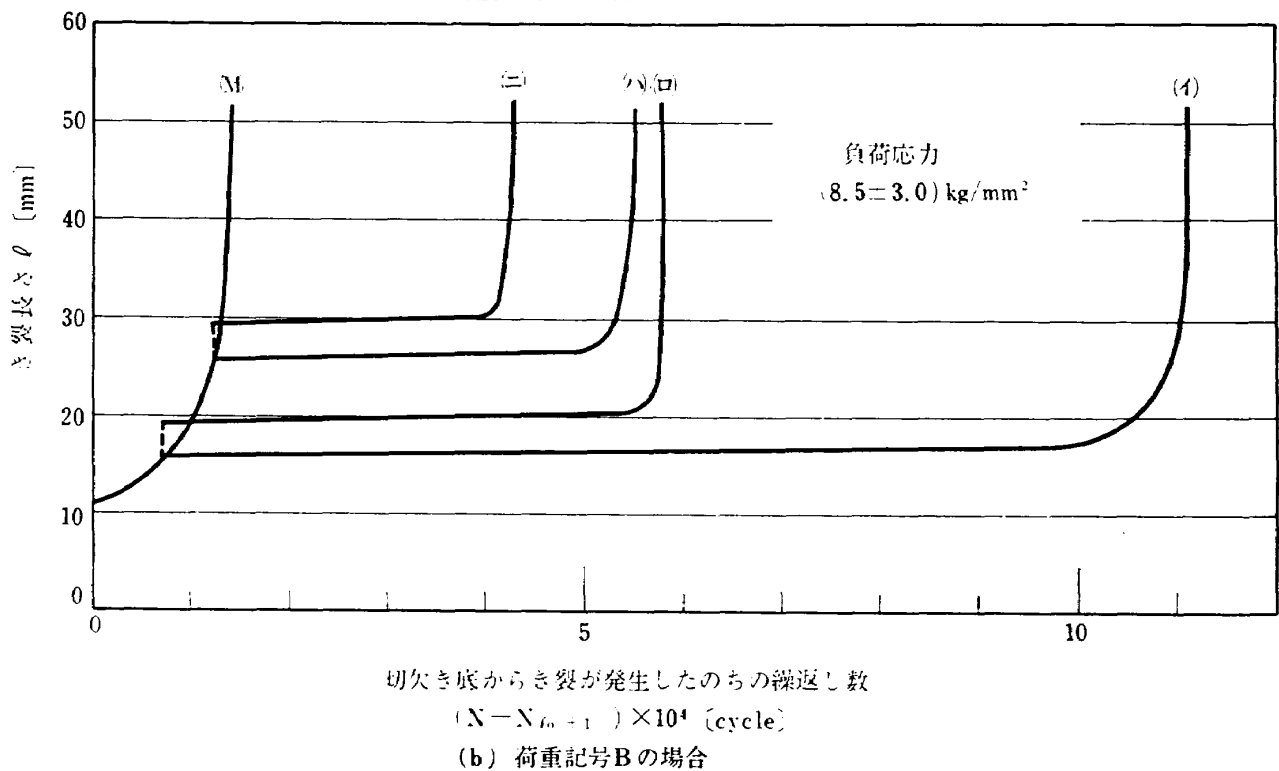
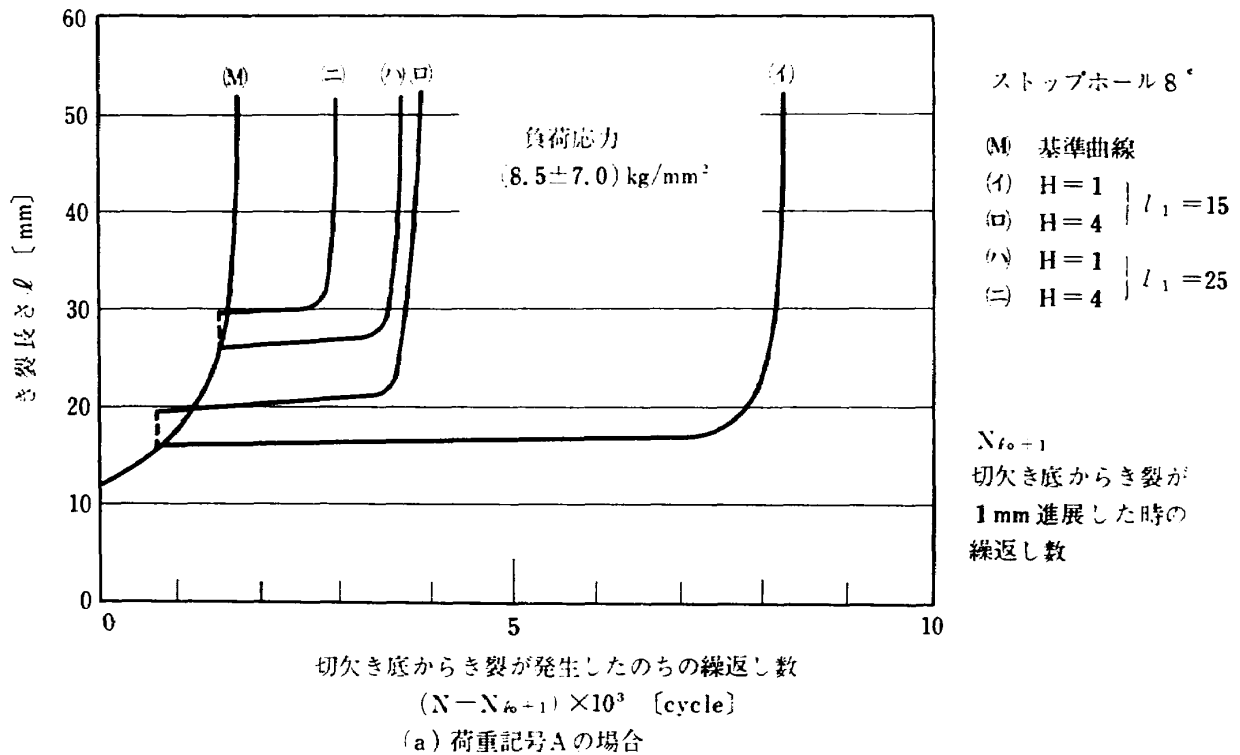


図 9 切欠き底からき裂が発生したのちのき裂進展曲線

た振幅応力が異なるため当然両者のき裂進展挙動も異なり、振幅応力の小さい荷重 B の場合にはき裂が発生してから最終破断にいたる寿命およびストップホールによって修理を施したのちき裂が再び進展し始めるまでの停留期間はともに大となるが、図に示すように両者の横軸の尺度を調整して修理を施さない試験片のき裂発生から最終破断に至る寿命曲線の形状を見かけ

上はほぼ等しくとることができる。

図 9 (a), (b) において、 $H$  および  $l_1$  が等しいときの両者のき裂進展挙動の比較から負荷した平均応力が一定で振幅応力が小さい場合にはき裂がストップホールから再び進展し始めるまでの停留期間が著しく長くなるために、 $G$  値は振幅応力の大きい場合に比べて大きな値をもつことになる。

## 7. ま と め

一個の片側切欠きをもつ航空機用アルミニウム合金 2024-T3 板材について、疲れき裂の一時的修理方法の一つであるストップホールのき裂停止効果に注目して行なった実験の結果は次のようである。

(1) ストップホールの径はき裂先端の応力集中を十分緩和するように出来るだけ大きい方が阻止効果が高い。

(2) ストップホールは荷重負担部面積を出来るだけ損なわず、疲れ荷重に含まれる最大応力に対応する塑性域を残すように加工するのが効果的である。

(3) 疲れき裂は出来るだけ早期に発見し、き裂長さの短かいうちに修理を施すことが効果的である。

なお、本解析にあたり実験に参加された日本大学生産工学部研修生 加藤博、峰村三喜夫の両君に感謝の意を表す。





## 参 考 文 献

1) P. de Rijk & A.A.M. Otter; Empirical In-

vestigation on Some Methods for Stopping the Growth of Fatigue Cracks, NLR TR 70021 LI (1969).

- 2) H.P. van Leeuwen, L. Schra & A.E. Meulman; The Repair of Fatigue Cracks in Low-alloy Steel Sheet, NLR TR 70029 U (1970).
- 3) たとえば、北川英夫; 疲れき裂への破壊力学の適用, 日本機械学会誌, Vol.75, No.642 (1972) pp.1068~1080.
- 4) B. Gross, J.E. Srawley & W.F. Brown, Jr; Stress Intensity Factors for a Single Edge Notch Tension Specimen by Boundary Collocation of a Stress Function, NASA TN D-2395 (1964).
- 5) J.R. Rice; Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue, ASTM STP 415 (1967) pp.247~309.
- 6) E. Smith; Fracture at Stress Concentration, Proceeding of International Conference on Fracture, (1965) pp.133~151.
- 7) D.S. Dugdale; Yielding of Steel Sheets Containing Slits, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol.8, No.2 (1960) pp.100~104.

## TR-359 正誤表

頁	誤	正
13 図7	ストップホール { <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> <math>8\mu</math>    <math>4\mu</math>   </div>	ストップホール { <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> <math>4\mu</math>    <math>8\mu</math>   </div>

---

## 航空宇宙技術研究所報告359号

昭和49年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)☎182

印刷所 日新図書印刷株式会社  
東京都港区芝3-33-5

---

