

## ひずみ波形解析による疲労き裂発生を検出法\*

真壁朝敏<sup>\*1</sup>, 西田新一<sup>\*2</sup>  
兼城英夫<sup>\*3</sup>, 玉城史郎<sup>\*4</sup>Method of Detecting Fatigue Crack Initiation  
through Analysis of Strain WaveformChobin MAKABE, Shin-ichi NISHIDA,  
Hideo KANESHIRO and Shiro TAMAKI

A method of detecting fatigue crack initiation in some weak section in an actual working machine is examined using a partially notched specimen. The waveform of the strain function composed of strains in the vicinity of the partial notch is successively observed. It is found that such a strain waveform changes its shape at crack length 1mm due to the crack closure behavior. Therefore, in this experiment, the crack initiation can be detected at about crack length 1mm. Since the engineering crack initiation size is frequently taken to be 1 mm, the present method for detection of crack initiation can be applied to actual machine equipment. Also, this waveform is analyzed with FFT. The power spectrum density of the waveform changes immediately after the crack length reaches 1 mm. Furthermore, the shape of the coherence of two waveforms composed of same strains clearly varies at the same length, 1 mm. Thus, the engineering size crack initiation is expected to be easily detected through the analysis of the strain waveform.

**Key Words:** Fatigue, Detection, Crack Initiation, Engineering Crack Size, Strain Interference Method, Waveform, FFT

## 1. 結 言

機械構造物の破壊事故の多くは疲労が関連していることは周知のことである<sup>(1)</sup>。疲労被害は疲労き裂の発生・伝ば挙動と密接に関連しているため、機械要素の寿命を評価する際には、き裂の発生・伝ば挙動を把握できれば、より適切な評価ができる。このようなことから、疲労き裂の検出のために非破壊検査手法が発達してきており、種々の手法が提案されている<sup>(2)</sup>。著者らも前報<sup>(3)(4)</sup>において、ひずみゲージを用いて、機械構造物の稼働中にき裂の発生を検出する手法を提案した。一般に、疲労き裂は切欠部等の機械要素の弱い部分に発生しやすいことと、日常的に機械要素すべてをくまなく検査するのは困難かつ不合理であることなどから、著者らの手法においては、き裂発生前後における切欠き等の周辺のみひずみ波形の変動に着目した。

本報においては、前報<sup>(3)(4)</sup>の手法をさらに発展させ、FFT手法<sup>(5)</sup>によるひずみ波形のスペクトル解析によ

って効果的なき裂の発生を検出が可能か検討した。また、本報では西谷ら<sup>(6)</sup>によって考案された実質的に平滑材と見なせる部分切欠きを有する試験片を用いて、疲労ゲージ的な観点から(部品の交換時期を把握する立場から)、部分切欠きからの工学的寸法のき裂発生検出について考察した。

## 2. 試験片および実験方法

素材であるS35C丸棒材の化学成分および機械的性質をそれぞれ表1, 2に示す。試験片は、図1の形状に加工した後に、試験部を鏡面仕上げしさらに600°Cで1時間、真空焼なまし後実験に供した。また、き裂発生を早め、より観察等を容易にするため、さらに真空焼なましの前に部分切欠きの中央部付近に半径約0.1mmの半球状の微小穴(ピット)を放電加工した試験片も用いた。以下においては、微小穴を有するものを微小穴材、微小穴のないものを平滑材と称する。なお、実験結果は微小穴材、平滑材ともほぼ同様な傾向を示したので、本報では微小穴材の結果について示し考察する。

部分切欠き付近には試験片軸上に2個の二軸形ひずみゲージ(ゲージ長さ、1mm)をはり付け、それらのゲージからのひずみ信号を前報<sup>(3)(4)</sup>と同様な手法によ

\* 平成4年4月3日 第69期通常総会講演会において講演。原稿受付 平成4年1月30日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学短期大学部(〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

<sup>\*2</sup> 正員、佐賀大学理工学部(〒840 佐賀市本庄町1)。

<sup>\*3</sup> 正員、琉球大学工学部(〒903-1 沖縄県西原町千原1)。

<sup>\*4</sup> 准員、琉球大学工学部。

って検出しひずみ波形解析を行った。図2はき裂発生箇所が特定できる微小穴材におけるき裂とひずみゲージの位置関係を示す。き裂に近いひずみゲージは部分切欠きの縁にできるだけ近付け、また、試験片平行部の寸法の制約から試験片両部の曲率のひずみ変動に及ぼす影響が少なくなるように2つのゲージ間隔もできるだけ近くなるように配置した。疲労試験は両振りの一定荷重振幅で行った。また、引張・圧縮の繰返し周波数は約0.1 Hzと約5 Hzであり、波形は正弦波である。

なお、図2(b)のようにゲージを配置した根拠は、き裂とゲージの方向による測定感度差の検討と、大きいき裂の場合、き裂面に対し45°方向にゲージをはるとき裂先端付近のひずみを用いても精度よくき裂開閉口点が求まる<sup>(7)(8)</sup>ことにある。

表 1 化学成分(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.36	0.22	0.67	0.014	0.012	0.015	bal.

表 2 機械的性質

Yield strength $\sigma_f$ (MPa)	Ultimate tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\nu$ (%)
360	814	33	61

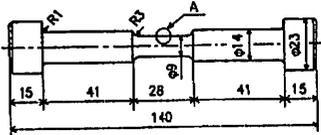


図 1 試験片形状と寸法(mm)

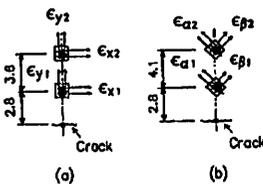


図 2 ひずみゲージの配置(mm)

3. 実験結果および考察

3.1 寿命曲線とき裂伝ば曲線 繰返し応力振幅  $\sigma_a$  と破断繰返し数  $N_f$  の関係と、相対繰返し数  $N/N_f$  で整理したき裂伝ば曲線の1例をそれぞれ図3, 4に示す(微小穴材は  $\sigma_a=231$  MPa で実験した)。工学的にはき裂発生寸法を便宜的に1 mm とする<sup>(9)</sup> ことがあるが、本実験の場合にはこの寸法に達するとすでに寿命の8~9割程度の応力繰返しがなされたことになる。一般に、機械部品の交換時期のき裂寸法は部材寸法や荷重条件によって異なるが、本研究では1 mm のき裂の発生が検出できれば、安全に部品交換ができるものとして考察した。

3.2 ひずみ干渉法におけるひずみ関数の定義

前報<sup>(3)(4)</sup>に示すようにひずみ干渉法では、き裂開閉口挙動に基づき、き裂発生前後で次式に示すひずみ関数の波形が変化することによってき裂発生を検出する。

$$h = \eta \epsilon_a + \lambda \epsilon_b \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\epsilon_a, \epsilon_b$  は図2に示す位置の局所ひずみあるいはひずみ差である。 $\epsilon_{y1}, \epsilon_{x1}$  をそれぞれ荷重軸方向ひずみとき裂進展方向のひずみ、 $\epsilon_{a1}, \epsilon_{\beta 1}$  を荷重軸に対しほぼ45°傾いた方向のひずみとして定義(それらの添字  $i$  は測定箇所を示す数字  $i=1, 2$  である)すると  $\epsilon_a, \epsilon_b$  は次のように表せる。

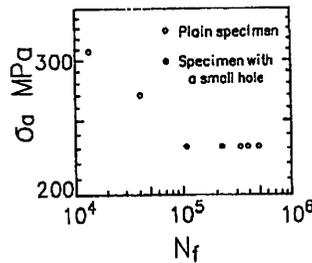


図 3 繰返し応力振幅  $\sigma_a$  と破断繰返し数  $N_f$  の関係

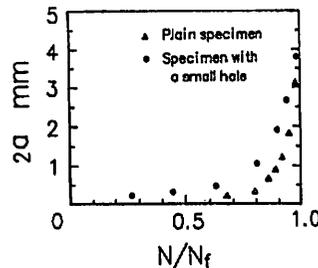


図 4 き裂伝ば曲線( $\sigma_a=231$  MPa)

ひずみ測定箇所が一箇所の場合は

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a &= \epsilon_{y1}, \epsilon_b = \epsilon_{x1} \\ \text{または} \\ \epsilon_a &= \epsilon_{a1}, \epsilon_b = \epsilon_{b1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

この場合、式(1)の係数  $\eta$  は1であり、 $\lambda = \pm \Delta\epsilon_a / \Delta\epsilon_b$  である。

ひずみ測定箇所が2箇所の場合

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a &= \epsilon_{y1} + \delta\epsilon_{y2}, \epsilon_b = \epsilon_{x1} + \rho\epsilon_{x2} \\ \text{または} \\ \epsilon_a &= \epsilon_{a1} + \delta\epsilon_{a2}, \epsilon_b = \epsilon_{b1} + \rho\epsilon_{b2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

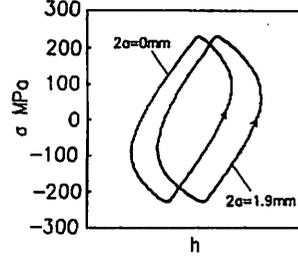
係数  $\delta = \pm \Delta\epsilon_{y1} / \Delta\epsilon_{y2}$ ,  $\pm \Delta\epsilon_{a1} / \Delta\epsilon_{a2}$ , そして  $\rho = \pm \Delta\epsilon_{x1} / \Delta\epsilon_{x2}$ ,  $\pm \Delta\epsilon_{b1} / \Delta\epsilon_{b2}$  である。さらに、この場合の式(1)における係数  $\eta$  は0または1.  $\lambda$  は  $\eta$  が0の場合は1,  $\eta$  が1の場合は  $\Delta\epsilon_a / \Delta\epsilon_b$  を目安とした値または0である。

き裂開閉口点を求めるためには、式(1)の係数  $\lambda$  の符号は正、式(3)の係数  $\delta$ ,  $\rho$  の符号は負としたほうがよい<sup>(4)(10)</sup>。つまり、それらの符号はひずみ関数  $h$  を構成する2つのひずみあるいはひずみ差の方向が一致する場合は負、異なる場合は正とするほうがよい。しかし、本研究で後述するひずみ波形のスペクトル解析を行う際にはそれらの係数の符号を変化させた場合についても検討した。そして、本報では長さ1mmのき裂が発生しているか否か(以下、長さ1mmのき裂発生とする)を検出することを主眼として考察する。

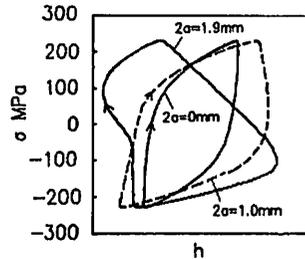
**3.3 繰返し応力-ひずみ関数線図による疲労き裂発生を検出** 微小穴材を用いた場合のひずみ関数  $h$  と繰返し応力  $\sigma$  の関係を図5に示す。図5では式(1)で示されるひずみ関数  $h$  のひずみ成分を種々に変化させて検討した。図5(a)の場合は単一箇所の式(2)に示すひずみによる関数  $h$  を用いた場合の例である。このように単一箇所のひずみを用いた場合においては本実験範囲のひずみ測定位置・方向によらず、 $\sigma$ - $h$  線図の形状の変化によるき裂の発生を検出は困難であった。

それに対し、式(3)のように2箇所のひずみを干渉させたひずみ関数  $h$  を用いた場合、表面き裂長さ  $2a$  (穴径を含む)がある程度以上になると、式(1), (3)の係数の値を適当に選ぶことによって、 $\sigma$ - $h$  線図からき裂の発生が判定できる。すなわち、繰返し応力  $\sigma$  とひずみ関数  $h$  の関係から得られる閉曲線は、き裂発生前には点対称的な曲線となる。しかし、その線図の形状はき裂の発生によって図5(b)~(d)に示すように、しだいに点対称的な形からくずれしていく。この変化はき裂開閉口挙動に基づく部材のコンプライアンスの変化に起因している。図5(b)に示すように荷重軸方向

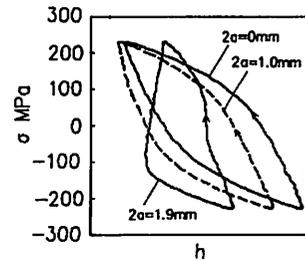
のひずみ同士を用いると前述した線図の変化はき裂長さ  $2a$  が1mm程度になると生じる。それに対し、き裂



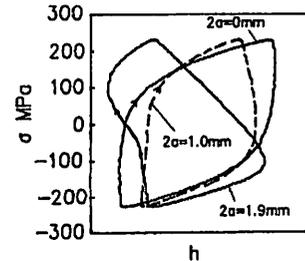
(a)  $h = \epsilon_{y1} + \lambda\epsilon_{x1}$ ,  $\lambda = \Delta\epsilon_{y1} / \Delta\epsilon_{x1} = 3$



(b)  $h = \epsilon_{y1} + \delta\epsilon_{y2}$ ,  $\delta = -\Delta\epsilon_{y1} / \Delta\epsilon_{y2} = -1$



(c)  $h = \epsilon_{x1} + \rho\epsilon_{x2}$ ,  $\rho = -\Delta\epsilon_{x1} / \Delta\epsilon_{x2} = -1$



(d)  $h = (\epsilon_{y1} - \epsilon_{y2}) + \lambda(\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2})$ ,  $\lambda = 0.5$

図5 繰返し応力  $\sigma$  とひずみ関数  $h$  の関係 (横軸のスケールは省略)

方向のひずみや荷重軸に対し  $45^\circ$  方向のひずみを用いると図5(c)に示すようにき裂長さが2 mm程度にならないと  $\sigma$ - $h$  線図の点対称性はくずれない[図5(c)にはき裂方向のひずみの場合を示した]。したがって、き裂発生を検出感度は荷重軸方向のひずみを用いた場合がそのほかのひずみの場合よりすぐれている(このことは、コンプライアンスの変化の方向性からも予測できる)。また、図2(a)に示す四つのひずみを干渉させた場合においても式(1)の  $\lambda$  の値を  $\Delta\epsilon_a/\Delta\epsilon_b$  より小さめの負の値(き裂発生を検出感度の高い荷重軸方向のひずみに重みをおいた)を選ぶことによって、図5(d)に示すように図5(b)の場合と同様な線図が得られる。ただし、この場合、試行錯誤によって  $\lambda$  の値を選んだ。

これらのことから、本実験の実験条件では2箇所のみずみを用いることによって、長さ1 mmのき裂発生は  $\sigma$ - $h$  によってもある程度判断できることがわかる。

3.4 ひずみ関数の波形解析によるき裂発生を検出前節の結果から  $\sigma$  と  $h$  による閉曲線の形からも疲労き裂発生がある程度検出可能であることがわかった。

しかし、ひずみと応力が同時に測定できない場合や解析上の問題から考えると、ひずみ関数の波形変化(時間による変化)を補らえたほうがより効果的にき裂の発生が検出できる。そこで、次に前節で明らかになったき裂発生を検出感度の高い荷重軸方向のひずみ  $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$  を用いた場合と4つのひずみ  $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$ ,  $\epsilon_{x1}$ ,  $\epsilon_{x2}$  を用いた式(3)と式(1)に基づくひずみ関数  $h$  の波形について検討した。

微小穴材において式(1), (3)の係数を  $\eta=1$ ,  $\lambda=0$ ,  $\delta=-1(=-\Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2})$  とした場合( $\epsilon_{y1}$  と  $\epsilon_{y2}$  を用いた場合)のひずみ関数  $h$  の波形の変化例を図6に示す。図6(a)はき裂発生前、(b)はき裂長さ  $2a$ (穴径を含む)が0.4 mmの場合、(c)は  $2a=1.0$  mmの場合、(d)は  $2a=1.9$  mmの場合である。図7に式(1), (3)の係数  $\eta=1$ ,  $\lambda=0.5(\Delta\epsilon_a/\Delta\epsilon_b)$  の値は約1.5である、 $\delta=\rho=-1$  とした場合( $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$ ,  $\epsilon_{x1}$ ,  $\epsilon_{x2}$  を用いた場合)のひずみ関数  $h$  の波形を示す。図7(a)はき裂発生前、(b)は  $2a=1.0$  mmの場合である(き裂長さ  $2a=0.4$  mm と  $1.9$  mm の場合は図6と同様な傾向を示すので省略)。

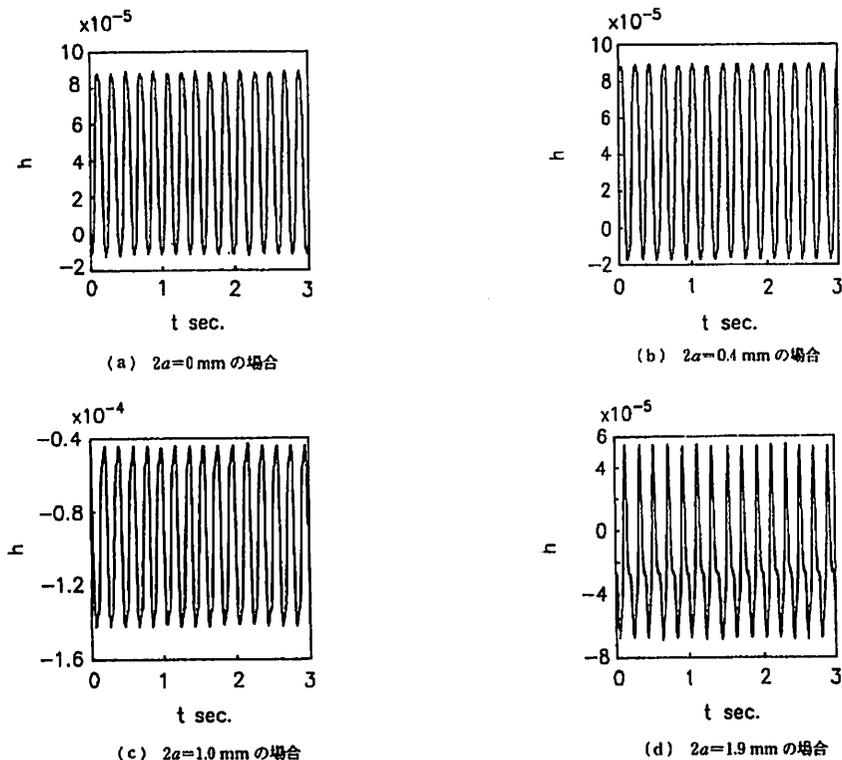


図6 ひずみ関数  $h$  の波形のき裂長さに対する変化( $h=\epsilon_{y1}+\delta\epsilon_{y2}$ ,  $\delta=-\Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2}=-1$ )

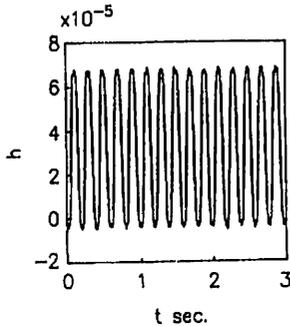
これらの図からき裂長さがある程度以上になると波形の変化によってき裂が発生しているか否かが判断できることがわかる。図5に示した  $\sigma$ - $h$  線図の形状変化に関連して関数  $h$  の波形にも変化が現われる。特に、図5(d)に対応する図7の場合においてはき裂発生前とき裂長さが1.0 mm になった時点では明らかに波形が異なっている。したがって、この波形変化から長さ1 mm のき裂発生が検出できる。しかし、図5(b)に対応する図6においてはき裂長さが1.0 mm では、はっきりした波形変化はみられない。

前報<sup>(3)(4)</sup>の切欠材(非貫通穴材)の場合においては、切欠底から測定したき裂長さが1 mm 以下の場合でも、ひずみ干渉法によってき裂の発生が十分に検出可能であった。それに対し、図6, 7の結果によると、本実験において検出可能な最小き裂寸法は1 mm 程度である。しかしながら、実際の機械の部品交換時期などは1 mm のき裂発生を検出で対応できる場合が多々あるものと考えられるので、本実験手法は疲労破壊する箇所が特定でき、軸力が加わる要素において実

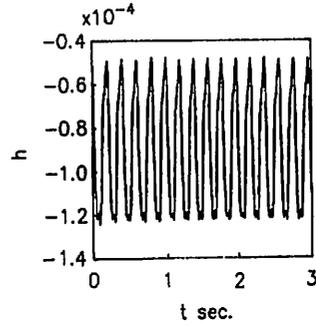
際に応用できる可能性があると考えられる。また、部材形状と負荷条件等によって、き裂発生を検出できるき裂長さも異なると思われるが、ゲージ位置は、長さ1 mm のき裂発生を検出に対しては図2(a)の場合のように荷重軸方向に並べて2箇所にはり付けた配置が参考になると思われる。

ところで、微小穴材の場合は寸法を考慮するとき裂長さが0.2 mm のき裂を初期から含んだものと見なせる。そして、1 mm の工学的寸法のき裂発生を議論する場合、この微小穴材は平滑材と同等に扱える。実際、図1の平滑材でも図3の各実験点において1 mm 程度のき裂発生は検知できた。

一定荷重の場合は、波形の変化を目視で捕らえることによって、き裂発生が検出できる。しかしながら、変動荷重の場合には、目視での判断があいまいになることが考えられる。そこで、次にFFT手法<sup>(5)</sup>によるひずみ波形のスペクトル解析によってき裂の発生を検出することを試みた。この場合は、同じひずみ信号から式(1), (3)の係数の符号を変化させ2種類のひずみ関

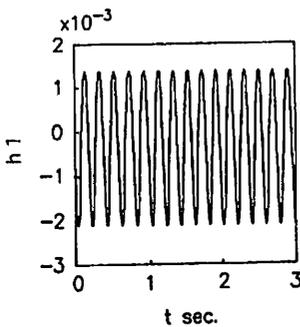


(a)  $2a=0$  mm の場合

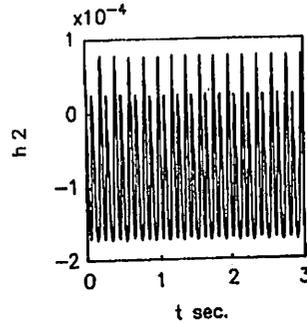


(b)  $2a=1.0$  mm の場合

図7 四つのひずみを用いた場合のひずみ関数  $h$  の波形の変化 [ $h=(\epsilon_{v1}-\epsilon_{v2})+\lambda(\epsilon_{z1}-\epsilon_{z2})$ ,  $\lambda=0.5$ ]



(a)  $h1=\epsilon_{v1}+\delta\epsilon_{v2}$ ,  $\delta=\Delta\epsilon_{v1}/\Delta\epsilon_{v2}$



(b)  $h2=\epsilon_{v1}+\delta\epsilon_{v2}$ ,  $\delta=-\Delta\epsilon_{v1}/\Delta\epsilon_{v2}$

図8 破壊直前に計測したひずみによる波形 ( $2a=3.8$  mm)

数の波形を作成し検討した。この2種類の波形の例を図8に示す。図8は式(1)の係数を $\eta=1, \lambda=0$ とした場合( $\epsilon_{y1}$ と $\epsilon_{y2}$ を用いた場合)のひずみ関数 $h$ の破断直前の波形である。 $\delta$ の符号を変化させ、図8(a)は $\delta = \Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2}$ 、(b)は $\delta = -\Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2}$ としてある。(a)の場合においてはき裂開閉口挙動の波形に及ぼす影響がほとんど現われないため、波形はほぼ正弦波状になる。そのため、この波形の周波数分布は定性的には入力としての荷重波形とほぼ一致する。それに対し、(b)に示すように $\delta = -\Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2}$ とすると荷重軸方向のひずみ同士の引き算になるため、波形の二次的变化が検出されやすくなり、き裂開閉口挙動に基づく波形変化が明りようになる。なお、以下においては、波形にき裂開閉口の影響が現われないひずみ関数を $h1$ 、き裂開閉口が影響するものを $h2$ として区別する(図8の縦軸の記号も $h1, h2$ を用いた)。

ひずみ関数 $h$ のフーリエ変換 $H$ は次式のように表せる。

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $t$ は時間(秒)、 $f$ は周波数(Hz)を表わす。 $H(f), h(t)$ はそれぞれ周波数、時間に関する関数を意味し、以下に現われる関数についても同様である。

パワースペクトル $Ph$ は式(4)に示したフーリエ変換 $H$ を用いて次式のように表わせる。

$$Ph(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} [1/T |H(f)|^2] \dots\dots\dots (5)$$

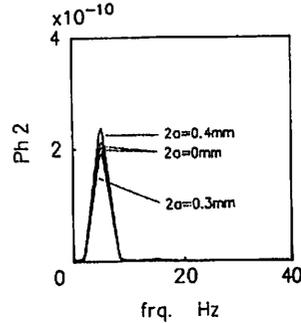
ここで、 $T$ は周期関数の区間であるが、この場合、無限として考えている。

また、二つの波形の相関性等を検討するため、クロススペクトルが提案されているが、それを本実験のひずみ関数 $h1, h2$ に適用すると

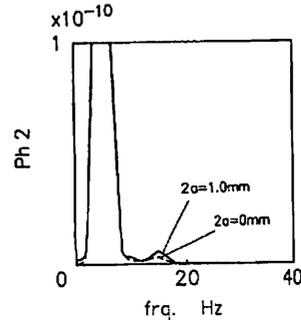
$$Ph12(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} [1/T H1^*(f)H2(f)] \dots\dots\dots (6)$$

$H1^*$ は $H1$ と共役の関係にあり、 $H1, H2$ はそれぞれ $h1, h2$ のフーリエ変換である。

そして、クロススペクトルは一般に現象の把握に不便であるとされるので、クロススペクトルに基づくコヒーレンスを次のように定義する。



(a) き裂長さ $2a$ が1mm以下の場合



(b)  $2a=0$  mm (破線)と1mm(実線)の場合の比較

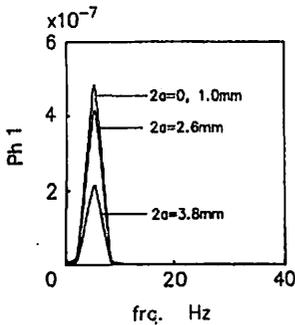
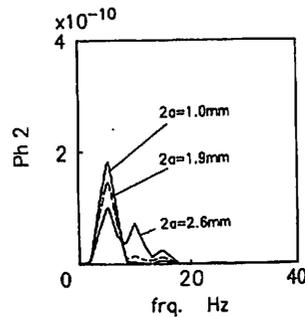


図9 パワースペクトル密度 $Ph1$ の変化 ( $\epsilon_{y1}, \epsilon_{y2}$ を用いた場合)



(c)  $2a$ が1mm以上の場合

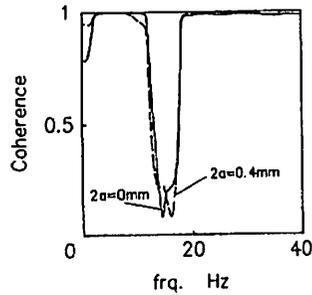
図10 パワースペクトル密度 $Ph2$ の変化 ( $\epsilon_{y1}, \epsilon_{y2}$ を用いた場合)

$$\text{Coherence}(f) = \frac{|Ph12(f)|}{\sqrt{Ph1(f)Ph2(f)}} \dots\dots\dots(7)$$

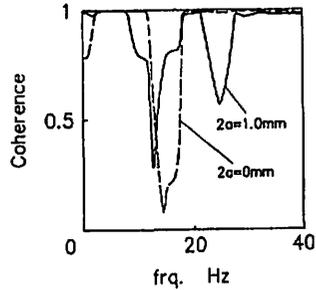
本研究ではこれらの式によるひずみ波形のスペクトル解析を日野のプログラム<sup>10)</sup>に基づき、有限離散化したフーリエ変換を用いて行った。図9は図6の場合の係数 $\delta$ の符号を変化させ、 $\delta = \Delta\epsilon_{y1}/\Delta\epsilon_{y2}$ とした波形 $h1$ に対するパワースペクトル密度 $Ph1$ を示したものである。この場合、き裂のある、なしにかかわらず、スペクトルには繰返し周波数約5 Hz付近以外にはピークが見られない(入力荷重信号と同様になる)ことがわかる。図10に図6の波形に対応するパワースペクトル密度 $Ph2$ を示す。図10(a)がき裂長さ $2a$ が1 mmに達する以前、(b)が $2a=0$  mmと1 mmの場合の比較である。また、(c)は $2a$ が1 mmを超えた場合のものである。 $Ph1$ と異なり、 $Ph2$ はき裂発生前から応力の繰返し周波数5 Hz以外にも若干のピークがみられる。これは部分切欠きの存在による波形の乱れに関連したものであると考えられる。そして、き裂長さが1 mm以上になると $Ph2$ のスペクトル密度分布が変化するのが図10(a)~(c)の比較によってわかる。また、図11は図7の波形に対応するスペクトル密度 $Ph2$ を $2a=0$  mmと1 mmの場合で比較したものである。図10, 11からわかるようにひずみ波形のスペクトル密度によって長さ1 mm以上のき裂の発生が検出できる。しかしながら、長さ1 mmと0 mmのき裂の場合のこれらのスペクトル密度の差はあいまいである。したがって、長さ1 mmのき裂発生検出はスペクトル密度を調べるだけでは不十分である。そこで、次に式(7)に基づくコヒーレンスについて検討した。

ひずみ波形 $h1$ の定性的な周波数分布は入力波形とほぼ同一であるので、波形 $h1$ と $h2$ の比較によって、間接的な入力波と出力波の定性的な比較ができる。そ

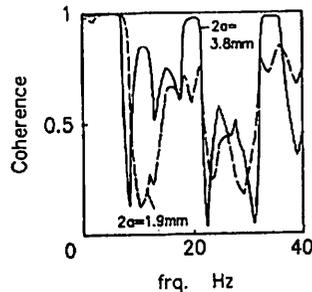
して、その比較が図12に示すようにコヒーレンスを求めることによって、より効果的になる。図12は図9, 10のスペクトル $Ph1$ ,  $Ph2$ に対するコヒーレンスである。(a)がき裂長さ $2a$ が1 mm以下の場合、(b)が $2a=0$  mmと1 mmの比較、(c)が1 mm以上の場合である。これらの図で特に注目すべきことは、コヒーレンスはき裂長さが1 mmの場合、明らかにき裂発生前と異なり、1 mm以上にき裂が伸びるとコヒーレン



(a) き裂長さ $2a$ が1 mm以下の場合



(b)  $2a=0$  mm(破線)と1 mm(実線)の場合の比較



(c)  $2a$ が1 mm以上の場合

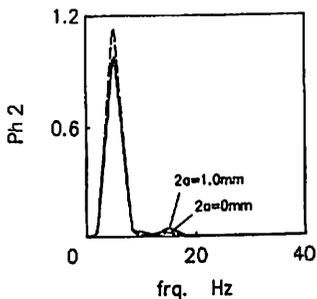


図11 四つのひずみ( $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$ ,  $\epsilon_{x1}$ ,  $\epsilon_{x2}$ )を用いた $Ph2$ の $2a=0$  mm(破線)と1 mm(実線)の場合の比較

図12 二つのひずみ( $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$ )を用いた関数におけるコヒーレンスの変化

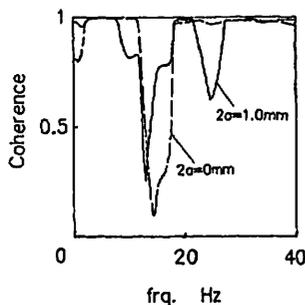


図 13 四つのひずみ( $\epsilon_{y1}$ ,  $\epsilon_{y2}$ ,  $\epsilon_{z1}$ ,  $\epsilon_{z2}$ )を用いた関数におけるコヒーレンスの  $2\sigma=0\text{mm}$ (破線)と  $1\text{mm}$ (実線)の場合の比較

スは大きくくずれる点である。また、詳細な説明は省略するが、図 13 に示すように 4 つのひずみを用いて得られた図 11 に対応するコヒーレンスも全く同じ傾向を示す。このようなことから、直接的な波形の観察やスペクトル密度の調査よりもコヒーレンスを調べたほうがより効果的に長さ 1 mm のき裂発生が検出できることが明らかとなった。

したがって、以上のことから FFT 法等による波形解析により、ひずみ干渉法によるき裂発生を検出がより容易になる可能性があることがわかった。また、本手法では入力としての荷重信号は不要であり、出力側のひずみ信号のみによって波形解析ができるのは利点である。前報の結果から判断すると、本実験の丸棒試験片の場合よりも比較的大きな切欠きを有する部材では、このような現象がもっと明りょうになることが予想される。よって、切欠材あるいは破壊制御設計<sup>(11)</sup>の思想が取入れられた機械要素として西谷ら<sup>(6)</sup>の考案した部分切欠的な形状の要素があれば、それらに本手法が応用できる可能性があるものと考えられる。変動荷重への本手法の応用は検討中である。

#### 4. 結 言

機械構造物の稼動中にその構成要素から発生する疲労き裂の発生を検出法について検討した。一般に機械要素は強度的に弱い部分からき裂が発生するので、本研究では部分切欠きを有する試験片を用いて実験した。そして、工学的なき裂発生寸法を 1 mm とみなし、長さ 1 mm のき裂発生を検出の可能性について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 部分切欠き付近の荷重軸上の 2 箇所のみずみを用いたひずみ関数  $h$  の波形の変化やその関数  $h$  と繰返し応力  $\sigma$  の関係から得られる閉曲線の形状の変化によって、長さ 1 mm のき裂の発生を検出は可能であった。

(2) ひずみ関数のスペクトル解析を行うことによって、変動荷重の場合にも 1 mm のき裂発生が検出できる可能性がある。そして、特に、同じひずみを用いた 2 つのひずみ関数のコヒーレンスによって、より効果的にき裂発生が検出できることが期待される。

(3) 本実験手法は疲労破壊を考慮して、き裂発生箇所がある程度の範囲で特定できるように設計した機械要素に対して十分に応用可能であると考えられる。

最後に、卒業研究として実験を手伝っていただいた琉球大学学生、森川洋哉君、川崎正資君に感謝します。

#### 文 献

- (1) 例えば、西田、機械機器破損の原因と対策、(1986)、4、日刊工業新聞社。
- (2) 例えば、村上、機械の研究、41-10(1989)、1109。
- (3) 真壁・兼城、機論、56-531、A(1990)、2223。
- (4) 真壁・糸数・大場・兼城、機論、58-546、A(1992)、186。
- (5) 日野、スペクトル解析、(1990)、193、朝倉書店。
- (6) 西谷、疲労強度学、(1985)、13、オーム社。
- (7) 真壁・兼城・西田、機論、No. 918-2、(1991)、121。
- (8) 真壁・崎浜・西田・兼城、材料、投稿中。
- (9) 村上・原田・谷石・福島・遠藤、機論、49-447、A(1983)、1411。
- (10) 真壁・兼城・西田・屋富机、材料、41-465(1992)、951。
- (11) 小林、日経メカニカル、10-16(1989)、72。