

# サブハーモニック超音波のレーザー干渉計測による ステンレス鋼疲労き裂の定量的非破壊評価

研究代表者

東北大学大学院工学研究科 教授 山中 一司

## 1. はじめに

超音波探傷で1.0mmと評価されたき裂の深さが、実測によると8.5mmあったという例が原子炉部材の応力腐食割れで報告されている（例えば原子力安全・保安院資料「原子炉再循環系配管の健全性評価について」(II) p13 平成15年2月26日）。何故このような大きな誤差が生じるのであろうか。この問題については現在でも議論がなされており、完全には決着していないが、応力腐食割れき裂がなんらかの原因で閉じているという見方がある。閉じたき裂であるとするれば、Fig. 1に示すように超音波を透過させてしまうため、反射波や散乱波を用いる現在の超音波探傷法で検出できないことは理解できる。そこで、大振幅の超音波が励起するき裂の開閉振動による波形のひずみに着目して、閉じたき裂を検出する非線形超音波法[1,2]に注目が集まっている。

しかし、この方法にも問題があり、ひずみによる高調波はき裂だけでなく圧電素子や無き裂材でも生ずるため、き裂と区別しにくい。これに対して最近、基本周波数の半分の周波数のサブハーモニック波が、医用超音波の分野で血流の映像化に用いられ[3]、固体でもき裂で観測されている(Fig. 1) [2,4]。これは媒質や圧電素子による妨害を受けないだけ、閉じたき裂の選択的検出法として有望である。しかし、サブハーモニックはき裂面の接触振動による強い非線形現象であり、まだ現象の把握が十分進んでいない。一方き裂面の接触状態は、最近普及しているナノスケールの計測法である原子間力顕微鏡における試料と探針の接触状態と、意外にもよく似ている。著者らは、超音波計測を発展させて、表面だけでなく表面下の欠陥もナノスケールの分解能で検出する超音波力顕微鏡[5]および超音波原子間力顕微鏡[6]の開発と実用化に成功している。そこで本研究では、閉じたき裂の例として疲労き裂を取り上げ、これに大振幅(30nm以上)の超音波を照射して発生するサブハーモニック波の波形を、超音波原子間力顕微鏡の理論[5,6]を応用して解析する[7]。計算波形と残留応力により閉じたステンレス鋼およびアルミ合金の疲労き裂の実験との比較を行い、実験結果[9-13]を説明することにより、現象の基礎的な理解を得ることを目的とする。

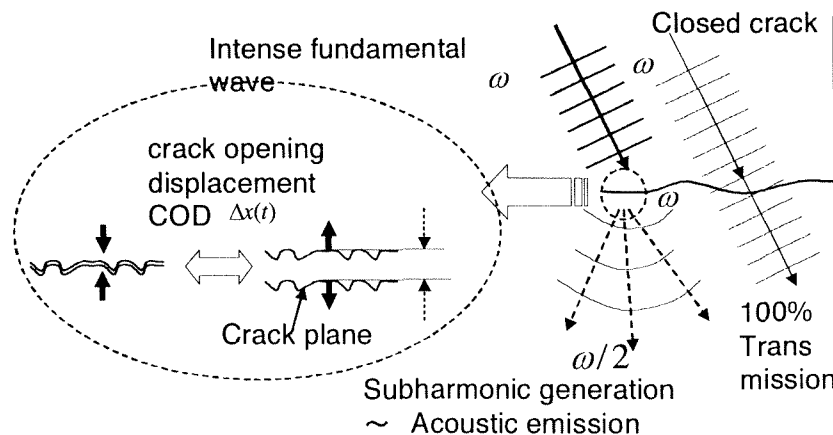
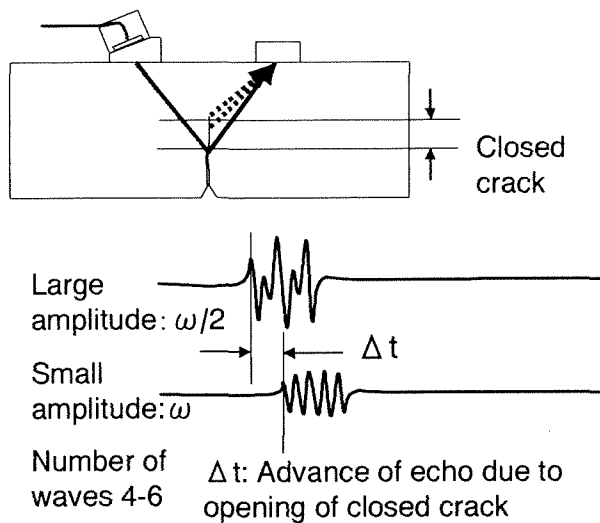


Fig. 1 Model of subharmonic generation at closed crack

## 2. サブハーモニック（分調波）発生と利用の原理

Fig.2のように低振幅のトーンバースト信号を入射させると、開いたき裂端部から線形散乱波が戻る（実線）。これでは、閉じた部分を見逃すので過小評価になる。しかし大振幅波を入

射すると、閉じた部分の開閉振動によりサブハーモニックが発生し受信される(点線)。その伝搬距離は線形散乱波より短いので線形散乱波と到達時刻が $\Delta t$  変化する。この $\Delta t$  が、閉じたき裂の長さに対応し、その波形がき裂面の情報を持つ。



**Fig.2 Amplitude dependent subharmonic generation (a) Apparatus (b) Typical waveform of subharmonics**

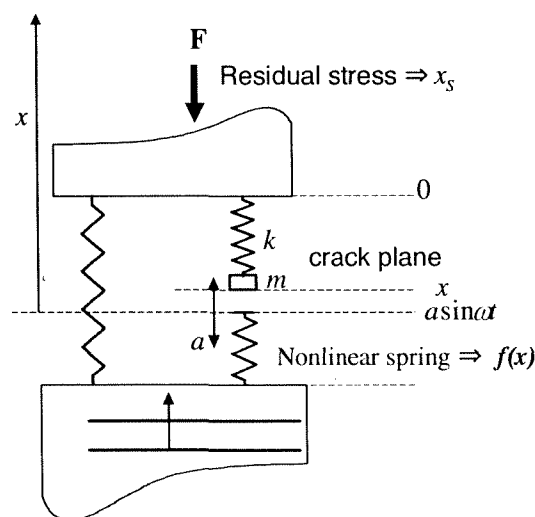
応力腐食割れのように、分岐した複雑なき裂面の場合、Fig. 2 のような単純な TOFD 配置では、サブハーモニック波形も不均一になり、定量化が困難になると予想される。しかし、フェーズドアレイにより受信し処理することで、閉じたき裂形状の映像化が可能になる。

### 3. 解析法

はじめに述べたように、サブハーモニックは強い非線形現象なので、カオスの発生なども含む複雑系と捉える必要がある。そこで現象の本質を把握することが最も重要である。そこで、き裂におけるサブハーモニック発生を、Fig.3 のような有効質量を持ったき裂面の振動とする考え方を提唱し、その時間波形を次の方程式で解析する。

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + k(x - x_s) = f(x - a \sin \omega t) \quad (1)$$

$$f(x) = f_0 \left[ \kappa \left( \frac{\sigma}{x} \right)^M - \left( \frac{\sigma}{x} \right)^N \right] \quad (2)$$



**Fig.3 A model of crack**

ここで、 $x$ はき裂面の位置、 $m$ は有効質量、 $\gamma$ は減衰、 $k$ は弾性、 $x_0$ は $f(x)=0$ の場合の平衡位置、 $f_0$ はき裂間力の大きさ、 $M$ は斥力指数、 $N$ は引力指数、 $\kappa$ は斥力引力比、 $\sigma$ はき裂面間の特性距離、 $a$ は振動振幅、 $\omega$ は角周波数である。

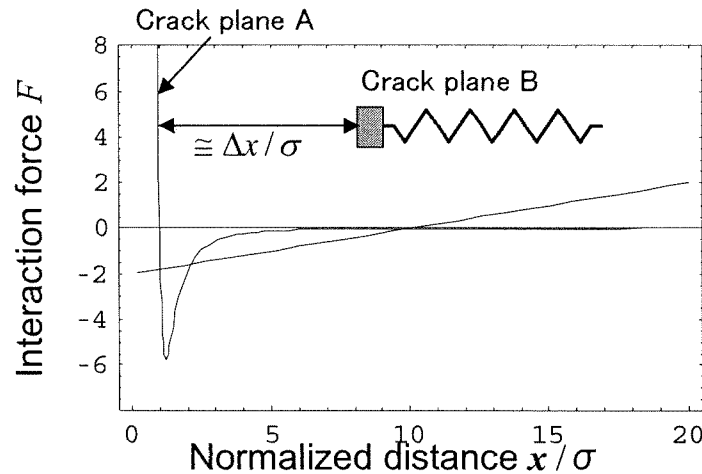


Fig. 4 Interaction force between crack planes

さらに、 $(\kappa, M, N)$ がき裂面を特徴づける重要なパラメータであり、相互作用部分の形状により表1のようになる[8]。き裂の場合は、そのナノスケールの物性分布により、異なる値を取る可能性があるが、ここでは(3)平面-半無限体として解析する。

表1 積分力	斥力 M	引力 N	比 $\kappa$
(1) Lennard-Jones	13	7	2
(2) 球-半無限体	8	2	1/30
(3) 平面-半無限体	9	3	1

Table I Parameters used in calculation

#### 4. 実験と解析

本研究ではシグナルジェネレーターで生成した 8.4MHz、20 波のバースト波を RITEC GA5000 で増幅し、き裂面で $\pm 24\text{nm}$ の変位をもつ超音波を入力した。

受信に PZT 探触子を用いると、受信波形は探触子の周波数特性を含む。そのため、周波数解析により変調波成分を検出・定量測定する非線形測定では正確な非線形現象の把握の妨げになる。特に、サブハーモニック発生モデルを構築するためには、より帯域の広い受信センサーによる測定が望ましい。受信は市販 PZT 探触子と、広帯域で非接触測定であるレーザー干渉計で行った。レーザー干渉計受信による実験装置を Fig. 5 に示す。本研究で用いた試験片(アルミニウム合金 A7075T651 および 低炭素ステンレス鋼 SUS316L)の形状と寸法を Fig. 6 に示す。閉口き裂を 3 点曲げ疲労試験で作製した。具体的には、疲労試験時に精密探傷に用いられる TOFD 法(縦波ピッチキャッチ法)により、き裂端部エコー強度をモニターし、き裂が閉口する疲労条件で疲労き裂を作製した[9]。また、開口量変化に伴う非線形挙動を観察するため、無負荷状態から線形の範囲内で負荷することで定量的にき裂の開口を制御する手法を用いた。

ステンレス鋼における典型的なサブハーモニックの波形を Fig. 7 に示す。最初入力超音波と同じ周波数で振動していた基本波の波形が、時刻  $23\mu\text{s}$  頃から周期が倍になる。これが周波数を半分にするサブハーモニックである。なお、波形の最後に周波数の低いパルスが見えるが、これは Tail 効果である。基本波やサブハーモニックがき裂面の強制振動に相当するが、Tail 効果は固有振動に相当することを最近見出した。き裂の解析において、多様な情報を得る手段として有用である。

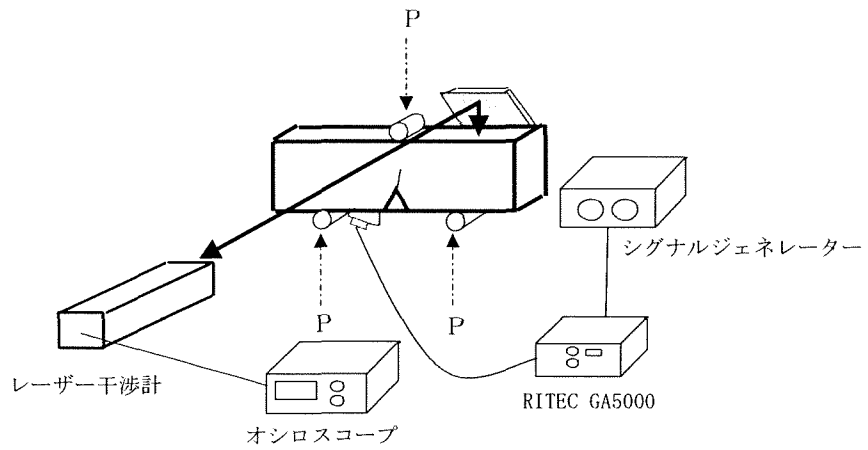


Fig. 5 Experimental setup

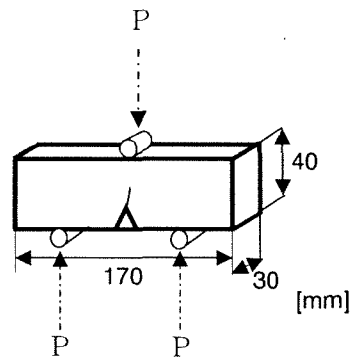


Fig. 6 Bending fatigue test specimen

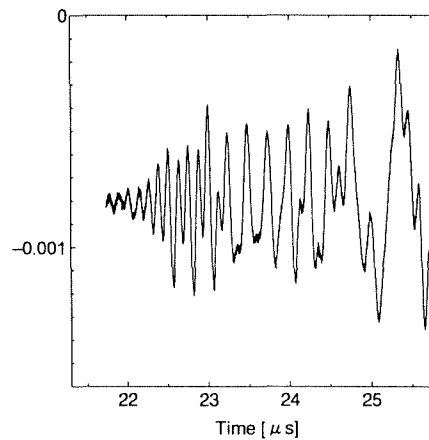
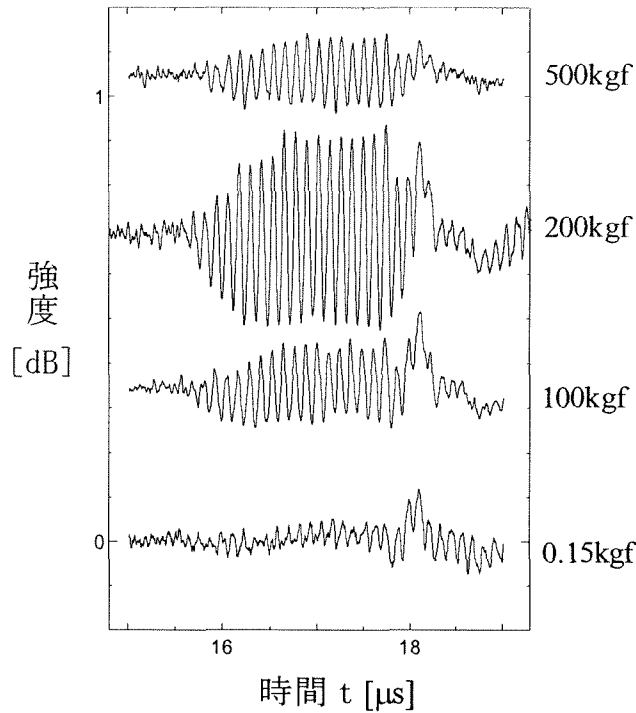


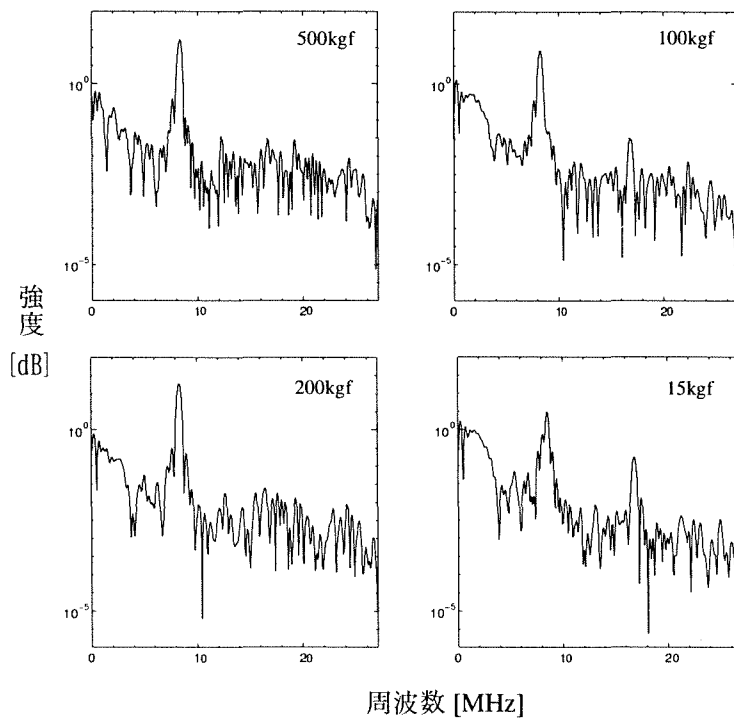
Fig. 7 Subharmonic waveform in low carbon stainless steel(SUS316L)

次にレーザー干渉計を用いて、き裂開閉に伴う非線形挙動をき裂長さ 10mm の試験片で測定した。測定波形を Fig. 8 に、周波数特性を Fig. 9 に示す。

測定結果から、レーザー干渉計を用いた測定でも PZT を用いた時と同様に、荷重の変化(き裂開口)に伴い強度比やスペクトルが様々に変化したことが確認できた。



**Fig. 8 Observed waveform**

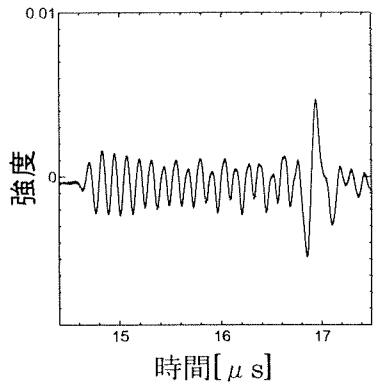


**Fig. 9 Power spectra of observed waveform**

次に、Al 合金(A7075T651)に導入した部分的に閉じた疲労き裂を用いて、3 節の解析法を検証する。まず PZT 受信での比較を行った。Fig. 10 の実験データはき裂長さ 9.8mm、負荷 300kgf の場合の受信波形である。

計算結果は入力超音波変位  $a=4\text{nm}$ 、き裂開口  $x_s=2.95\text{nm}$ 、質量  $m=1$ 、角振動数  $\omega=1$ 、粘性減衰項  $\gamma=0.5$ 、バネ定数  $k=0.2$ 、の条件のもとで(1)および(2)式を数值的に解いた。その結果を Fig. 10 (右図) に示す。シミュレーション結果により、実験データの隣あう山の高さが交互に変わる波形を再現でき、またスペクトルの特徴も模擬することができた[10]。

実験データ(き裂長さ9.8mm 300kgf)



計算結果

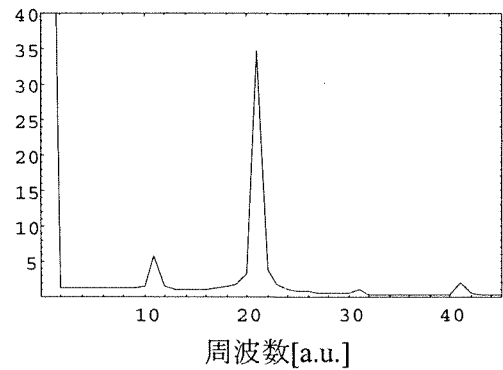
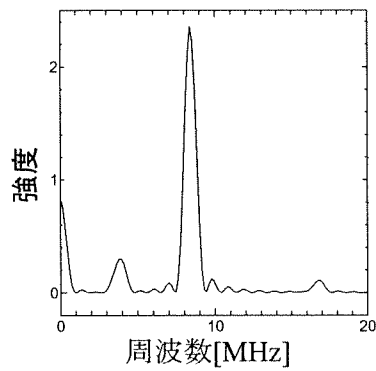
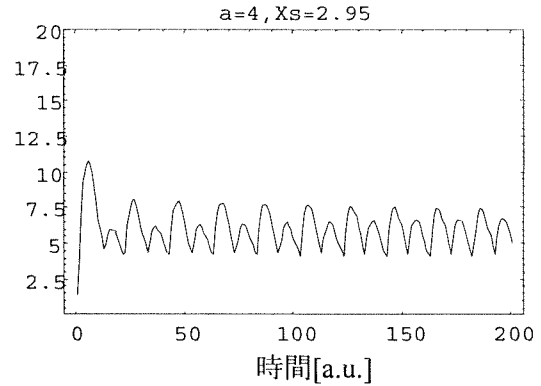


Fig. 10 Experiment and theory of waveform

Fig.11 (a)に、より明瞭なサブハーモニック発生の入射超音波振幅依存性を示す。これに対して、(2)式を  $M=9, N=3, \kappa=1, \omega=1, m=1, k=0.2, \gamma=0.5$  の条件で数値的に解いて得たき裂開口変位 (crack opening distance; COD)  $\Delta x = x - x_s$  の時間波形の振幅依存性を Fig.11(b)に示す。

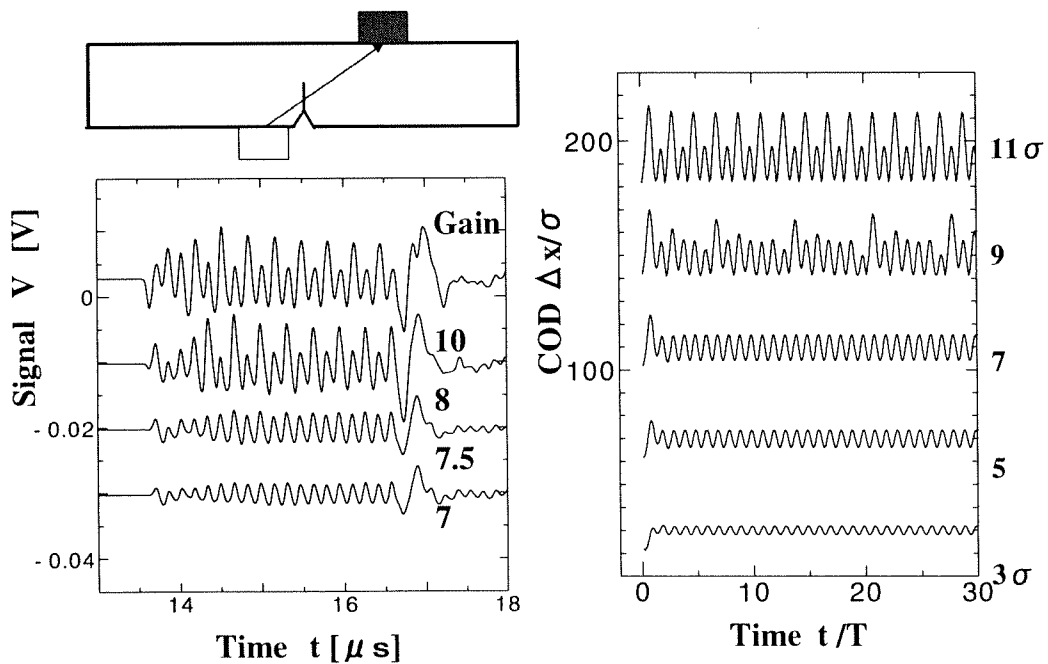


Fig. 11 (a) experiment and (b) Calculation of subharmonic generation due to increased amplitude of input wave.

ここでは現象を式(2)に現れる特性距離 $\sigma$ によって整理(規格化)して検討する。ここで $\sigma$ は、き裂の代表的なサイズであり、状況によってき裂長さ、凹凸の周期、結晶粒径、原子間距離などに対応する。振幅 $a$ が $7\sigma$ 以下の場合にはサブハーモニックは見られないが、 $9\sigma$ では初期条件に依存するカオス的な7分調波が得られ、 $11\sigma$ では安定したサブハーモニックが得られた。この特徴は観測波形の入射波振幅依存性( $a$ )と半定量的に一致する。

残留応力により閉じたき裂では、Fig.12(a)のように、外部荷重によりき裂を部分的に開くとサブハーモニックが発生したが、計算では式(2)のき裂初期位置 $x_s$ を増加してバネによる圧縮を解除すると、Fig.12(b)のように傾向が再現できた。本解析によりサブハーモニックの波形からき裂面の情報が得られることがわかった。

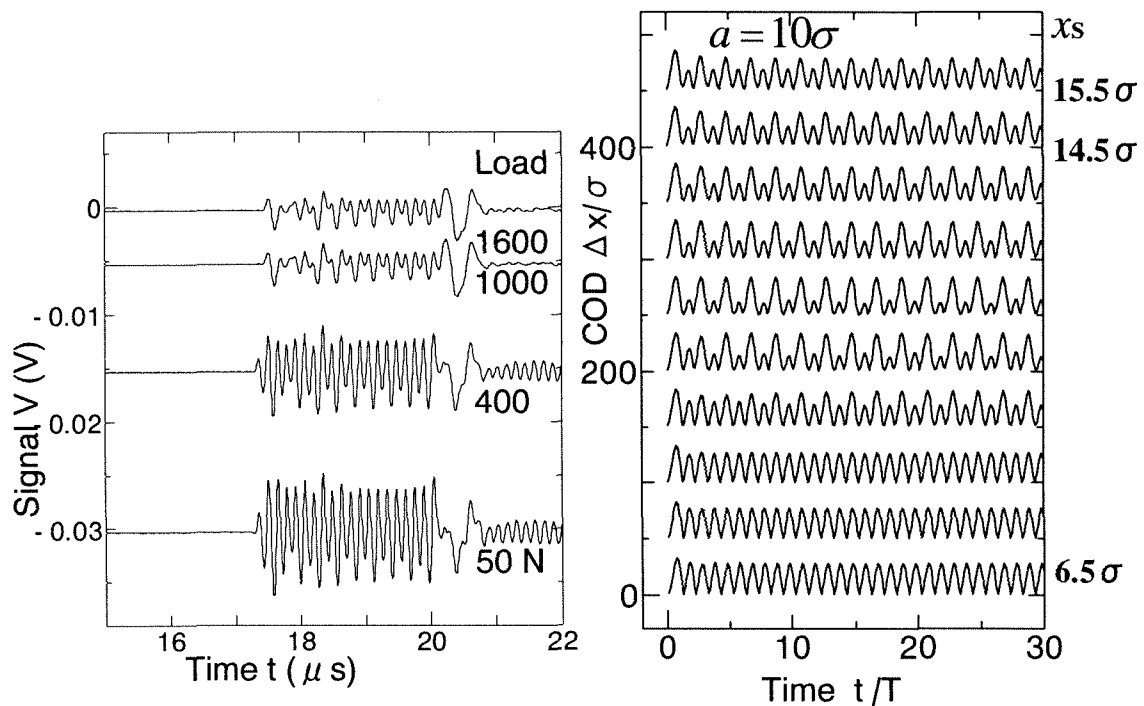


Fig.12 (a) experiment and (b) Calculation of subharmonic generation by opening of closed crack.

## 5 総括と今後の展望

疲労試験機にレーザー干渉計を組み込み、大振幅(30nm)超音波発生器によるサブハーモニック超音波の変位波形をレーザー干渉計により精密計測し、従来の圧電素子による波形と比較した。また、き裂面の接触状態と、原子間力顕微鏡における試料と探針の接触の本質的類似性に着目し、原子間力顕微鏡の解析方法を発展させて、入射超音波の振幅やき裂面を閉じる残留応力に対するサブハーモニック波形の変化を計算できた。最後に計測波形を再現するよう計算波形を最適化して、残留応力により閉じたステンレス鋼の疲労き裂の検出とそのパラメータ推定を可能とする方法を開発した。

サブハーモニックは入射波と周波数が異なるので、同一周波でき裂における境界条件を考えると入射波が無い。そこでサブハーモニック発生はAEに近い。AEの分野では、多素子(アレー)受信による原波形解析を行ってき裂の大きさ、開口モード(I,II,III)などの評価が可能だが、サブハーモニックにも同様の解析がより有利な条件で適用できると考えられる。

現在問題となっている原子炉部材のき裂の計測誤差の解消には、強力超音波発生源とアレーを組み合わせたサブハーモニックフェーズドアレーの適用が有効と思われる。また、危険

環境中での自動計測には、非接触で行えるレーザーホログラフィー振動映像法が有望だが、フォトリフラクティブ結晶を用いた粗面の振動の実時間全視野映像法において参照光を $\omega/2$ の周波数で変調すれば、サブハーモニック振動の映像化ができると期待される。

#### 引用文献

- [1] O. Buck, W.L. Morris and J.M. Richardson, Appl. Phys. Lett. 33 (1978) 271.
- [2] I.Yu. Solodov, N. Krohn and G. Busse, Ultrasonics 40 (2002) 621-625.
- [3] P.M. Shanker, P.D. Krishna and V.L. Newhouse “Subharmonic backscattering from ultrasound contrast agent”, J. Acoust. Soc. Am. 106, 2104-2110 (1999).
- [4] A. Moussatov, V. Gusev and B. Castagnede, Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 124301
- [5] K. Yamanaka, H. Ogiso and O. Kolosov, Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 178-180.
- [6] K. Yamanaka, A. Noguchi, T. Tsuji, T. Koike and T. Goto: Surf. And Interface Anal. 27 (1999) 600.
- [7] K. Yamanaka, T. Mihara and T. Tsuji: Jpn. J. Appl. Phys. 43-5B (2004) 3082.
- [8] D. Maugis: Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solid (Springer , 1999).
- [9] M. Akino, T. Mihara and K. Yamanaka: Rev. Prog. QNDE 23-B (2004) 1256.
- [10] 佐々木良太、尾形寿弘、三原毅、山中一司、サブハーモニック超音波の波形解析によるき裂のパラメータ推定、日本非破壊検査協会 超音波分科会資料、21725, p1(2004).
- [11] 尾形寿弘、佐々木良太、三原毅、山中一司、日本非破壊検査協会平成 16 年度秋季大会講演概要集 p5 (2004)
- [12] Ryouta Sasaki, Toshihiro Ogata, Yoshikazu Ohara, Tuyoshi Mihara and Kazushi Yamanaka, Proc. Symp. Ultrason. 25, 77 (2004)
- [13] Yoshikazu Ohara, T. Mihara and K. Yamanaka, Proc. Symp. Ultrason. 25, 77 (2004)