相関ゆらぎ解析による構造物危険予知システムの開発

杉谷嘉則、天野　力、武井尊也、畑中　健、藤原鎮男

神奈川大学 理学部
神奈川県平塚市土屋2946

1. 序

従来「安全」対策というと、事故や災害に対する応急の対応策を講ずることであった。ところが、近年の科学、技術は巨大化し、かつ、構造が多重的で相関的になったため、それが一旦事故を起こした場合は社会全体に大きな影響を及ぼし、場合によっては人類の生存、その将来まで左右することが懸念される事態となった。したがって、人類の生存、将来の安全のためには、従来のように事故や災害が起こってから後の対応策を考えるのでは不十分で、事故を未然に防ぎ、また起こりうる事故・災害を予め予知して、それが起こった場合の対応を事前に準備することが必要となってきた。

本研究は現代にあって最も緊急な社会的課題である「構造物」の安全に関わる問題《構造物の危険予知・診断》を行なおうとするもので、社会への貢献の意義は大きく、また対象の多種、多様のことを考えれば本研究の成果の波及効果は多大といえよう。とくに本法は室内のみならず野外における実在構造物を対象とする測定に有効なため、建物、橋梁、発電施設、航空機、車両、等々に適用が可能なことである。しかも信号の解析が実時間的に観測者にフィードバックされるシステムとなっているため、本法を実用目的に沿うべくさらに改良を加えれば、「完全自動モニタリングシステム」にグレードアップすることも可能といえる。

2. 原理

本研究における手法は、基本的には、対象物体に二つのレーザー光を照射し、反射光をそれぞれ検出し、そこに含まれる振動成分を比較・解析して異常を検出するものである。解析法の基礎はフーリエ解析を中心とするものであるが、これについての詳細は成書に委ねる。[1, 2] 比較・解析に際しては以下の二つの方法を採ったが、それ以前の測定に係わる部分は両者とも同じである。

1）周波数解析

対象物のゆらぎを表す時系列信号を信号処理器に取り込み周波数成分に分解する。これを対象物体上の二点について行ない、両者を比較する。対象物に亀裂等の異常がある場合、亀裂をはさんだ2点の振動の仕方は異なるはずである。両者の比較は、目視による方法とスペクトル相互の割り算による方法とを試みた。

2）相関解析

対象物の二点のゆらぎ信号に対し、両者の相互相関関数を演算・解析する方法は、前記の方法よりも感度性、迅速性において優れていると予想される。本研究におけるとくに新しい方法である。

相互相関関数は下記の通りであるが、これは二つの時系列信号の類似性を比較・判定するのに役立つ。

いま対象とする二つの関数ｆ（ｔ）、ｇ（ｔ）にたいしその相互相関関数

$$R_{fg}(\tau) = \langle f(t),\ g(t+\tau) \rangle$$

$$= \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\, g(t+\tau)\, dt$$

を定義する。この$R_{fg}(\tau)$は、f(t)と、g(t)の時間軸をτだけずらしたものの内積のアンサンブル平均である。内積は関数間の相関の強さを表し、これが時間軸のずれτの関数として表わされている。これを各関数の絶対値で割ると、

$$R_{fg}(\tau) = \frac{\langle f(t),\ g(t+\tau) \rangle}{\| f(t) \| \| g(t) \|}$$

規格化された相関値が得られ、その値は－1から1の値をとる。すなわち二点の揺らぎ信号の正の（ないし負の）相関が大きければ相関値の絶対値は1に近くなり、相関が小さければ相関値は0に近くなる。

3．測定

測定方法の概要を Fig.1 に示す。対象物体に二本のレーザー光を照射し、それぞれの散乱光を検出器で受光する。レーザーには ヘリウムーネオン（He-Ne）レーザーを使用した。野外等における実際的運用に当たってはより強力なレーザー光を利用するのが有効である。検出した光の強度変化の時系列信号をＦＦＴシグナル・アナライザに入力し、周波数成分に分解する周波数解析と、両者の信号の相互相関解析による方法を行った。ゆらぎ検出の感度を向上させるため本実験では対象物に微弱な振動を与える方法をとった。振動はファンクションジェネレーターからの 82 Hz の信号を装着した振動源を通じて対象物に与えた。

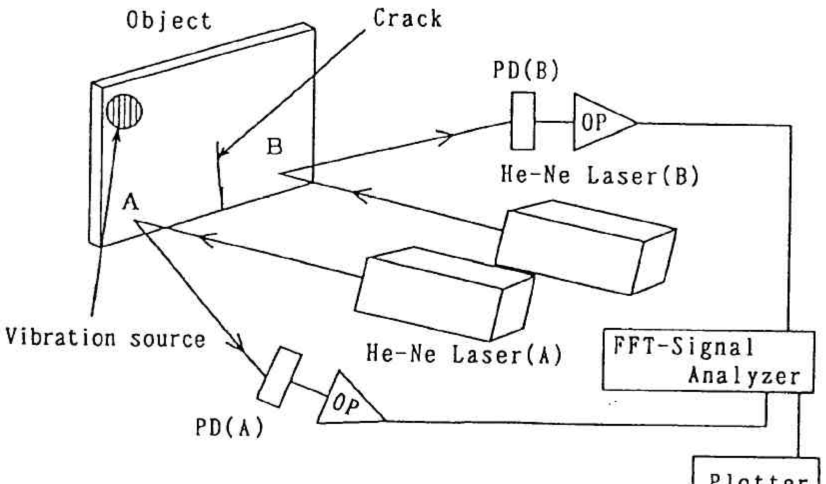


Fig.1　レーザー照射法によるゆらぎ計測システム
PD: 光検出用フォトダイオード、　OP: オペアンプ

対象物体として本実験ではアクリル板（250×320×3 mm）および金属アルミニウム板（同程度サイズのもの）を用いた。これらの対象物につき、①亀裂等の異常のない場合、　②約 14 cm の切れ込み（亀裂とみなす）を入れた場合、について実験を行った（Fig.2）。また相関解析の際は、亀裂の入った対象物の場合には照射点と亀裂の位置関係を変えた試料についての実験も行った。

測定に際しては、アクリル板に振動源としてオーディオスピーカーを装着し、これを通じて 82 Hz の振動を与えた。これは、実験室内の自然のゆらぎでなく、外部から加えた強制的な振動をモニターとして利用するほうが感度良い測定が可能だからである。とくに野外実験などでは自然に存在するゆらぎを利用するのが理想であるが、与えられた状況によって適宜に対処すべきであろう。

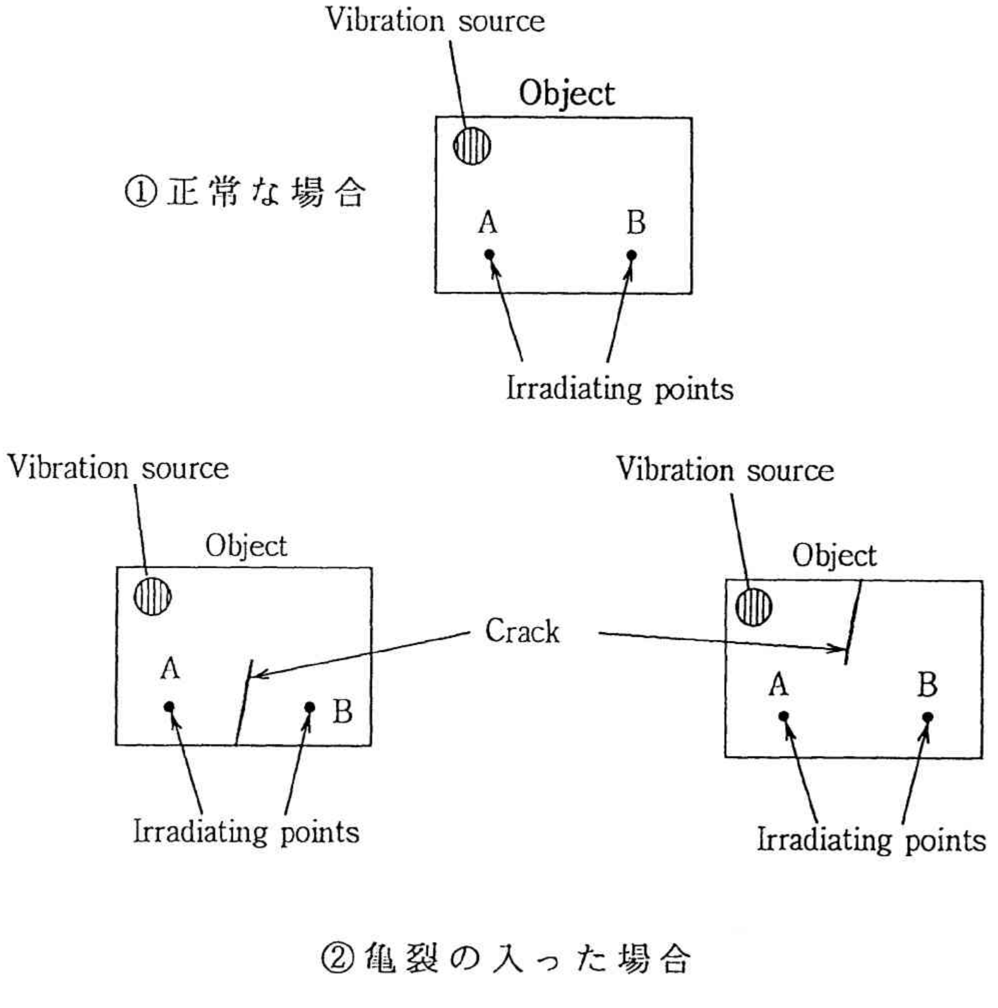


Fig.2　振動源、照射点 A,B、 および亀裂の位置関係

4。結果と考察

1） 周波数解析

対象物体に亀裂等の異常のない正常な場合は、2点 A,B からのゆらぎ信号の周波数スペクトルパターンは互いによく似ている。82 Hz およびその倍音 164 Hz が観測され、これは振動源に由来するものある。また 50 Hz と 100 Hz のピークは商用電源に由来するものと考えられる。30 Hz 近辺に現れている多数の細かいピークは実験室（実験台）に由来するものと考えられる。Fig.3a に、両スペクトルの類似性、相違点を見るために A 点の周波数スペクトルをB 点の周波数スペクトルで割り算した結果を示す。結果は各周波数成分でのピークの違いにより±60 dBV の相違が見られるが、82Hz 成分は 0 に近い値を示しており、振動源からの振動には類似性があるとみなすことができる。

Fig.3b は亀裂のある場合について、 A,B 2点それぞれの周波数スペクトルを割り算した結果である。とくに 82 Hz のピークに注目するとこの値が上昇している事がわかる。これは亀裂の存在によって照射点 B の側の振動成分が低下したためと考えられる。

周波数解析による異常の判定は、次の相関解析による方法と比較すると、状況によって判定の困難な場合があり得る。

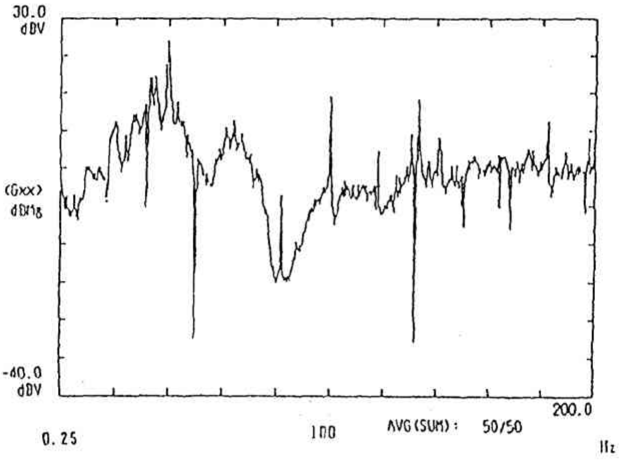
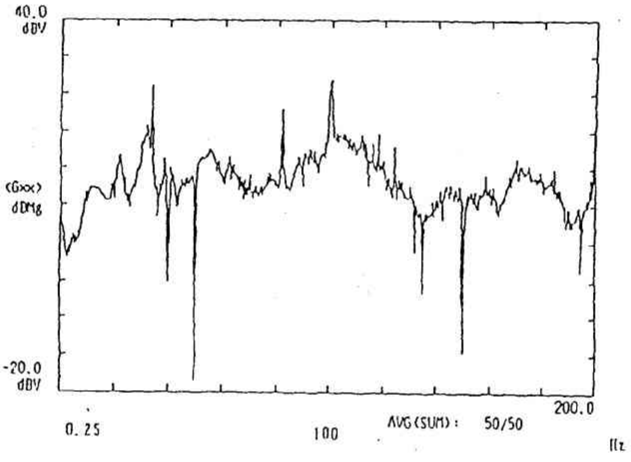


Fig.3
A 点の周波数スペクトルを
B 点の周波数スペクトルで
割り算した結果。
縦軸は割り算結果をdBで
表したもの、横軸は周波数
（0 ～ 200 Hz）を表す。
（a）正常な場合、
（b）亀裂のある場合。



2） 相関解析

照射点からの信号の処理に相互相関々数を用いると、より簡便かつ迅速に両者の比較が行える。

対象物体がアクリル板の場合ついての結果を Fig.4 に示す。亀裂等の異常がない正常な場合（Fig.4a）においては相関値が大きく、ほぼ1に近い値を示した。ここで相関値が約 12 msec 毎に振動して現れるのは、振動源による 82 Hz の振動周期に相当するもので、このことより正常な場合においては媒質が全体的に均質になっているため A、B の2点に同様な振動が伝わっていると考えられる。

亀裂のある場合（Fig.4b）では相関値が低くなり、約 0.6 であった。この場合、正常な場合より低い相関値を与えるのは、亀裂により振動の伝幡が妨げられているためと考えられる。Fig.4c は、同じ亀裂の入った対象物を上下逆さに設置して同様の実験を行った場合の結果である。相関値は約 0.2 となり、より低い値を示

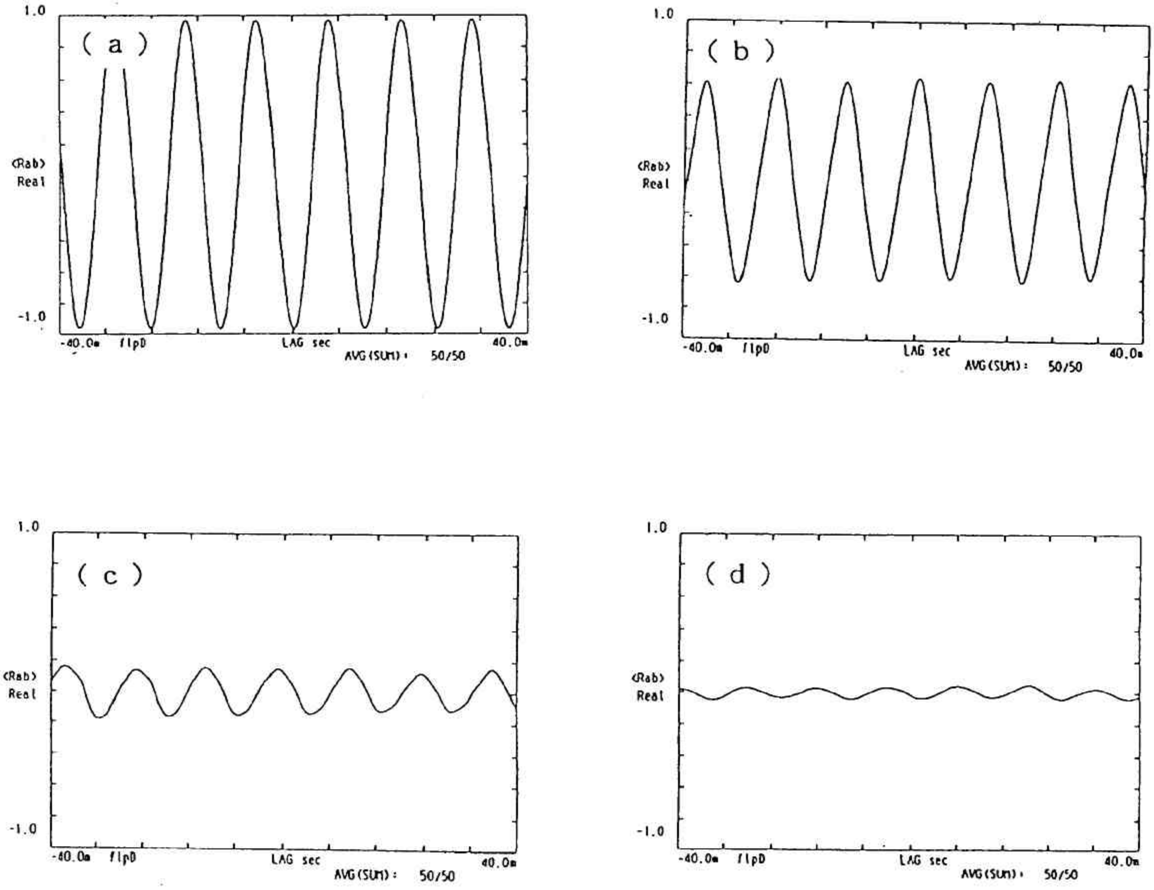


Fig.4 相互相関関数の出力図（対象物体：アクリル板）。
縦軸は相関値、横軸は時間軸（-40 ～ 40 msec）を表す。
（a）亀裂のない場合、（b）亀裂のある場合（亀裂部下側）、
（c）亀裂のある場合（亀裂部上側）、
（d）切断後テープで接合した場合。

した。これは振動源と亀裂の相対的位置関係が異なれば、照射点 A、B における振動のモードが異なるためであり、具体的には A、B の間に大きく亀裂が立ちはだかる場合とさほど大きく立ちはだからない場合いにおいて相関値が変わってくる事を意味する。Fig.4d は、対象物を一旦に 2 枚に切断したのち、テープにより接合したものについての結果を示すものである。相関値は 0.1 以下に低下した。しかしながら 約 12 msec の周期成分は観測されており、不完全ながら振動の伝播が接合部を通じて行われていることを示している。このことは周波数解析においても確認できた。

対象物体がアルミニウム板の場合にも、同様の結果が得られた(Fig.5a～5d)。物体の材質が変わると、板の振動モードにも変化が生じる。測定感度の関係から、振動源の周波数として 138 Hz を使用した。

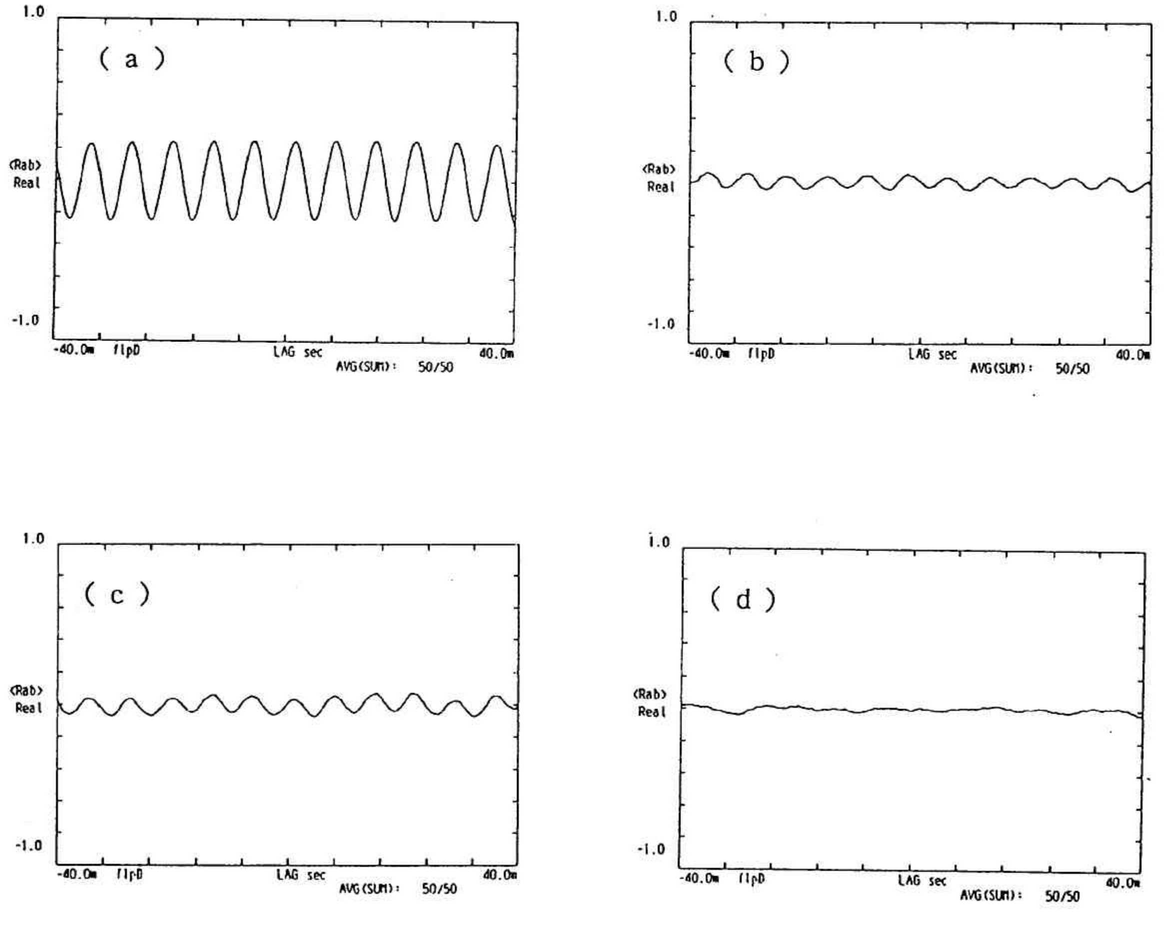


Fig.5 相互相関関数の出力図（対象物体：アルミニウム板）。
縦軸は相関値、横軸は時間軸（-40 ～ 40 msec）を表す。
（a）亀裂のない場合、（b）亀裂のある場合（亀裂部下側）、
（c）亀裂のある場合（亀裂部上側）、
（d）切断後テープで接合した場合。

以上の結果より亀裂等の異常がない正常な場合は相関値が高くなり、亀裂等の異常がある場合は正常な場合より低くなること、また異常等の大きさの度合いに応じて相関値がさらに低くなることが判明した。さらに同じ亀裂の場合でも、振動源や照射点の位置関係によって相関値が変わる事が確かめられた。本法は異常の検知に有用であり、危険予知、安全管理等に役立つと考えられる。

参考文献

1) 磯辺孝編「相関函数およびスペクトル－その測定と応用－」東京大学出版会(1968).
2) R.N.Bracewell,"The Fourier Transform and Its Applications", McGraw-Hill(1986).