

打撃によるコンクリート部材の共振現象と 打撃音の周波数特性

浅野雅則¹・鎌田敏郎²・国枝稔³・六郷恵哲⁴

¹学生会員 工修 岐阜大学大学院 工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 工博 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

本研究では、打撃により生じるコンクリート部材の共振現象と、打撃音として計測される波動現象の関係について検討を行った。検討に際しては、曲げ試験用供試体（棒部材）と実構造物レベルのスラブ供試体（板部材）を用いて、たわみ共振現象と縦波共振現象に着目した実験を行った。打撃音とともに、供試体表面の振動も同時に計測し、打撃音と表面振動の関係を周波数特性を用いて詳細に検討した。これらの結果より、棒部材では、打撃音によってたわみ・縦波の両共振現象が評価できるが、板部材ではたわみ共振現象が卓越して評価できることが示された。この違いは、共振特性に関係しており、たわみ共振現象が縦波共振現象に比べて十分大きな振幅となるためであることがわかった。

Key Words : *nondestructive testing, Impact Acoustics, radiating sound, flexural resonance, longitudinal resonance, frequency characteristics*

1. はじめに

打音法は、コンクリートを打撃したときに生じる音（打撃音）を用いた非破壊検査法である¹⁾。このため、打撃音とコンクリートの振動状態との関係が明らかにされなければ、打撃音の物理的な扱いが不可能である。

この点に関して、伊東は、曲げ試験用供試体（コンクリート角柱供試体）を用いて、たわみ共振、縦波共振、およびねじり共振現象に起因するピーク成分が打撃音の周波数分布に明瞭に含まれていることを明らかにしている²⁾。

一方、著者らの既往の研究結果^{3), 4)}では、板厚や欠陥深さに相当する縦波共振現象を計測する場合において、それぞれの縦波共振周波数を十分にカバーする入力周波数を含む弾性波を用いた場合でも、表面振動では周波数分布において縦波共振現象に起因するピークが認められたが、打撃音には認められなかった。しかしながら、欠陥上側板状コンクリート部のたわみ共振現象に起因するピークについては両者に共通して現れることが確認できた。

以上のことは、対象とする部材の寸法あるいは形状が異なる場合、打撃音によって評価できる現象も、それに応じて異なる可能性のあることを示しているものと考えられる。この点については詳細な検討がなされていないのが現状である。この問題を解決するためには、共振現象と打撃音の関係を明らかにする必要がある。

例えば音響分野では、板のたわみを生じない振動は音の放射に関与しない⁵⁾ということや、板の屈曲振動（たわみ振動）により大きな音響放射が生じる⁶⁾ことが示されており、板部材における音響の放射源として第一に考えるべき現象は、たわみ振動であることがわかる。しかしながら、板のたわみ振動と縦波共振現象の、音響放射源としての大きさについては必ずしも明らかにされているわけではない。さらに、周波数特性の表現についても、統一的な分析方法はなく、様々な手法が用いられている。計測される物理現象の特徴を的確に表現するためには、各スペクトル計算手法の特色を十分に把握する必要がある。

そこで本研究では、コンクリート部材に生じる共振現象と打撃音の周波数特性との関係を検討した。供試体として、波動場の違いに着目して、図-1に示すような棒部材と板部材を用いて以下に示す検討を行った。

- ① 棒部材（図-1(a)）における共振現象と打撃音の周波数特性の関係に関する検討（各共振現象が独立して計測されるケース）
- ② 板部材（図-1(b)）において、縦波共振現象とたわみ共振現象が重ね合わさって生じる場合の打撃音の周波数特性に関する検討
- ③ 縦波共振現象が支配的な場合（図-1(c)）における打撃音の周波数特性の検討

そして、打撃音において支配的となる現象を明らかに

することを目的とした。

2. 棒部材における共振現象と打撃音の周波数特性

ここでは、棒部材を用いて、図-2に示すように、たわみ共振現象と縦波共振現象の2つの共振周波数測定を行った。なお、共振現象が生じていることを確認するため、加速度計による計測も同時に行った。ここでは、特に棒の波となる条件を考慮した検討を行った。

(1) 実験概要

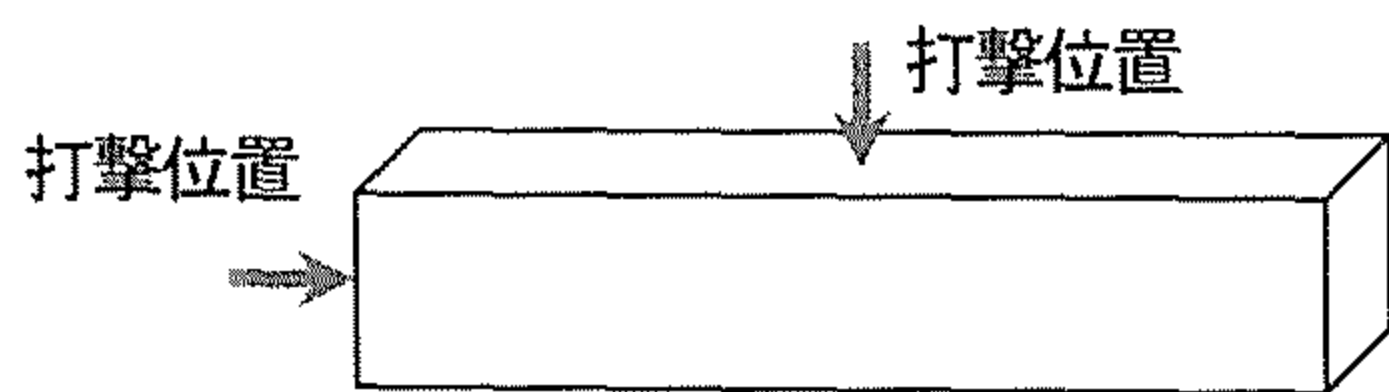
a) 供試体

本実験では、100×100×400mmの曲げ試験用コンクリート供試体を用いた。W/C：37%，圧縮強度：38.3MPa，静弾性係数：30.0GPa，弾性波伝播速度：4400m/s，動弾性係数：44.5GPa（弾性波伝播速度より算出）である。

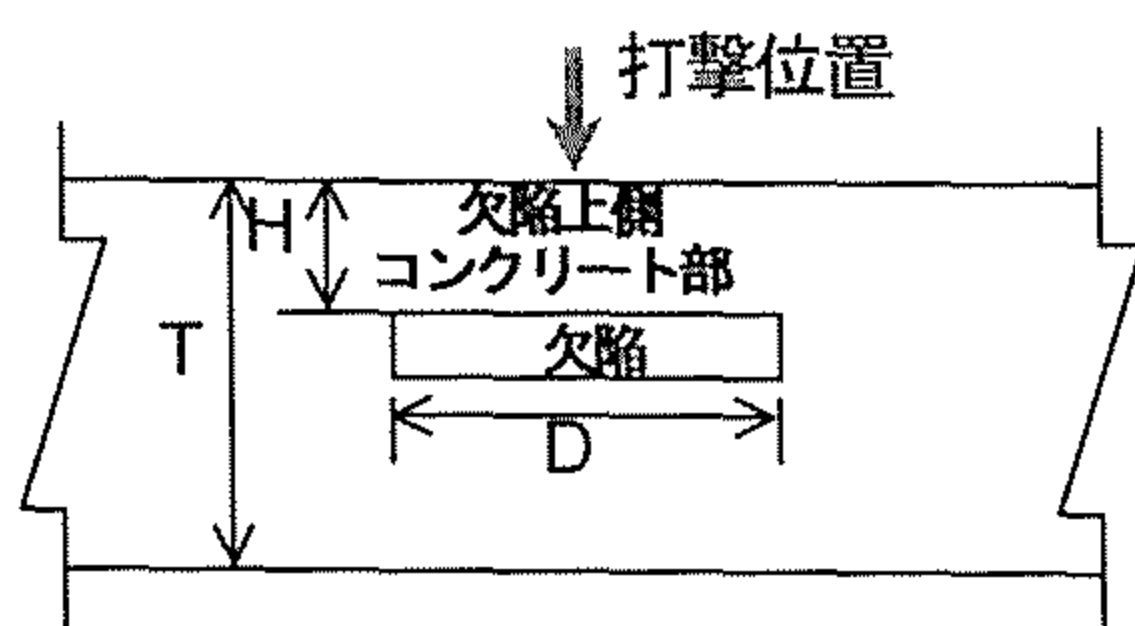
たわみ共振周波数測定における供試体の支持条件を写真-1に示す。支持点の位置は、次式（JIS A 1127）により決定した。

$$l = 0.224L \quad (1)$$

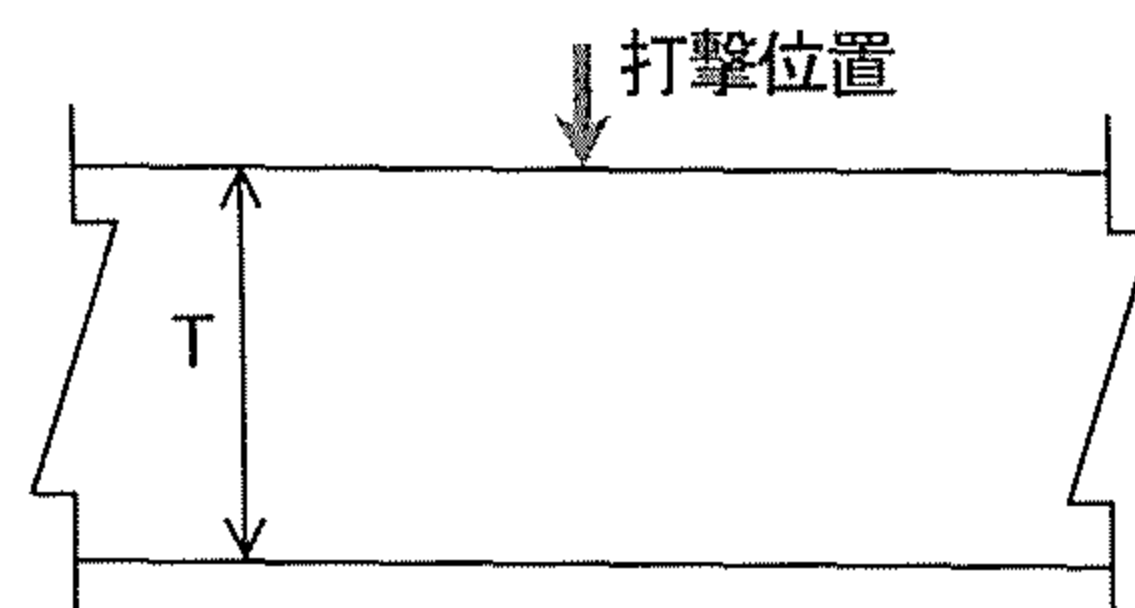
ここに、 l ：供試体端部から支持点までの位置、 L ：供



(a) 棒部材



(b) 板部材（欠陥上側板状コンクリート部）



(c) 板部材（平面寸法が厚さより十分大きい場合）

T：板厚，H：欠陥深さ，D：欠陥直径

図-1 本研究で対象とする部材

試体長さである。この場合、 $l=8.96\text{cm}$ である。

この供試体のたわみ共振周波数の理論値は、次式（JIS A 1127）により計算される。

$$f = \sqrt{\frac{E_D b t^3}{9.47 \times 10^{-4} L^3 T m}} \quad (2)$$

ここに、 E_D ：動弾性係数（N/mm²）， b ：供試体幅（mm）， t ：供試体厚さ（mm）， L ：供試体長さ（mm）， T ：修正係数， m ：供試体の質量（kg）である。

この条件におけるたわみ共振周波数の理論値は、2.39kHzとなる。

一方、縦波共振周波数の理論値は、次式⁷⁾により求められる。

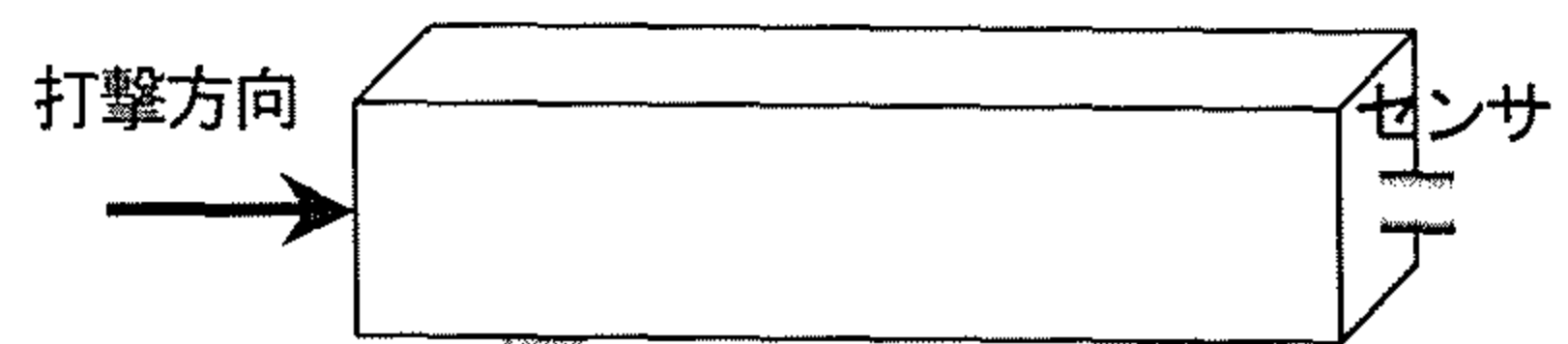
$$f = \frac{V}{2L} \quad (3)$$

ここに、 V ：弾性波伝播速度（m/s）， L ：供試体長さ（m）である。

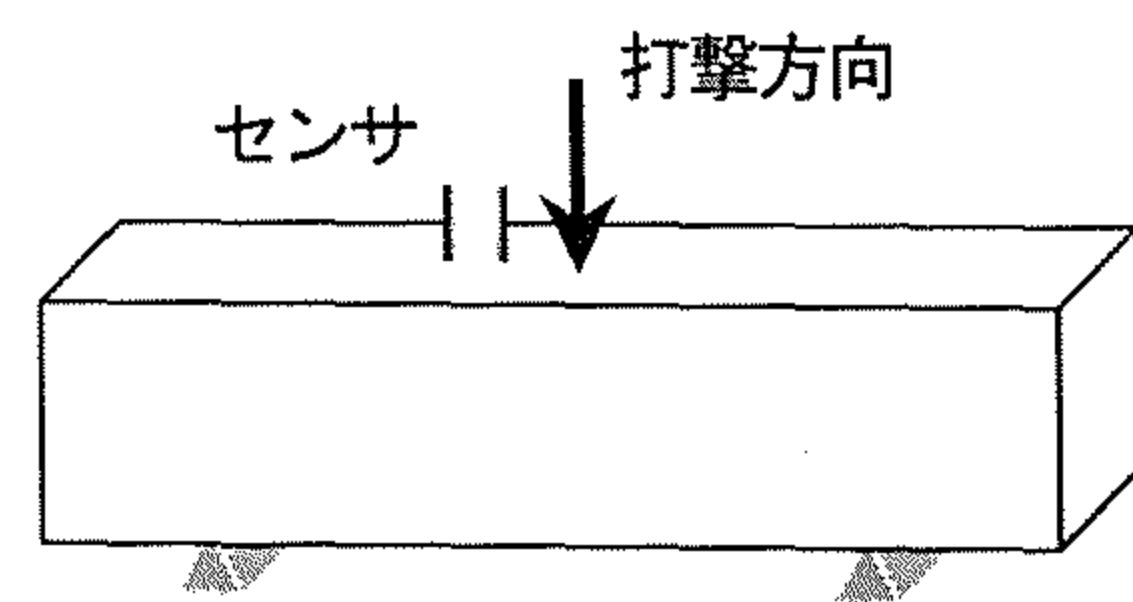
本実験条件における縦波共振周波数の理論値は、5.5kHzとなる。

b) 弾性波入力方法

弾性波の入力には、写真-2に示すような打撃装置を用いた。この装置の先端部分はφ25mmの鋼球である。この打撃装置を用いることによりコンクリート中に入射される弾性波の継続時間および上限周波数は、それぞれ次式⁸⁾により計算される。



①縦波共振周波数測定



②たわみ共振周波数測定

図-2 共振周波数測定方法

$$T_c = 0.0043d \quad (4)$$

$$f_{max} = \frac{1.25}{T_c} \quad (5)$$

ここで、 T_c ：鋼球の接触時間 (sec)、 d ：鋼球の直径 (m)、 f_{max} ：上限周波数 (Hz) である。

ここでの算定値は、 T_c ：107.5 μ s、 f_{max} ：11.6kHzである。この条件は、既に示したたわみ共振周波数および縦波共振周波数を十分に超える周波数成分を含んでいる。

c) 弾性波計測方法

弾性波の受振方法として、表面振動の計測には、加速度計（周波数範囲：0.2Hz～45kHz）を、打撃音の計測にはマイクロフォン（周波数範囲：0.3Hz～30kHz）をそれぞれ用いた。加速度計およびマイクロフォンにて計測された波形は、アンプにより増幅された後、A/D変換器を通してパソコン上に記録した。記録されたデジタル信号に対してFFT（高速フーリエ変換）により周波数分布を求めた。計測におけるサンプリングタイムは10 μ s（ナイキスト周波数：50kHz）であり、記録データ数は2500である。

ここで、1次の縦波共振周波数から求まる波長が、棒の波となる条件を満足していることを示す。

棒の波となる条件は、次式⁹⁾により示される。

$$a \leq 0.2\lambda \quad (6)$$

ここで、 a ：断面寸法 (m)、 λ ：波長 (m) である。縦波共振周波数の理論値は、5.5kHzであるので、この周波数から計算される波長は、 $V = f\lambda$ (V ：弾性波速度、 f ：周波数) の関係より、0.8mとなる。 $0.2\lambda = 0.16$ (m) $> a = 0.1$ (m) より、この場合、供試体断面において一様な棒波となっているものと考えられる。このことを確認するため、縦波共振現象を測定する場合には、図-3に示すように、断面内で計測位置を3パターンに変化させた。断面中央部 (①)、中央部と端部の中間部 (②) および断面端部 (③) である。なお打撃位置は、受振側断面の反対側の断面中央部とした。

たわみ共振現象の測定については、加速度計は打撃点（供試体軸方向中央部）より水平方向に5cmの位置に、マイクロフォンは加速度計設置位置より鉛直方向に10cmの位置に設置した。

(2) 共振現象測定結果

図-4および5に、たわみ共振現象および縦波共振現象測定において得られた波形の一例を示す。これらの図から、たわみ共振現象測定では、打撃音と表面振動の波形

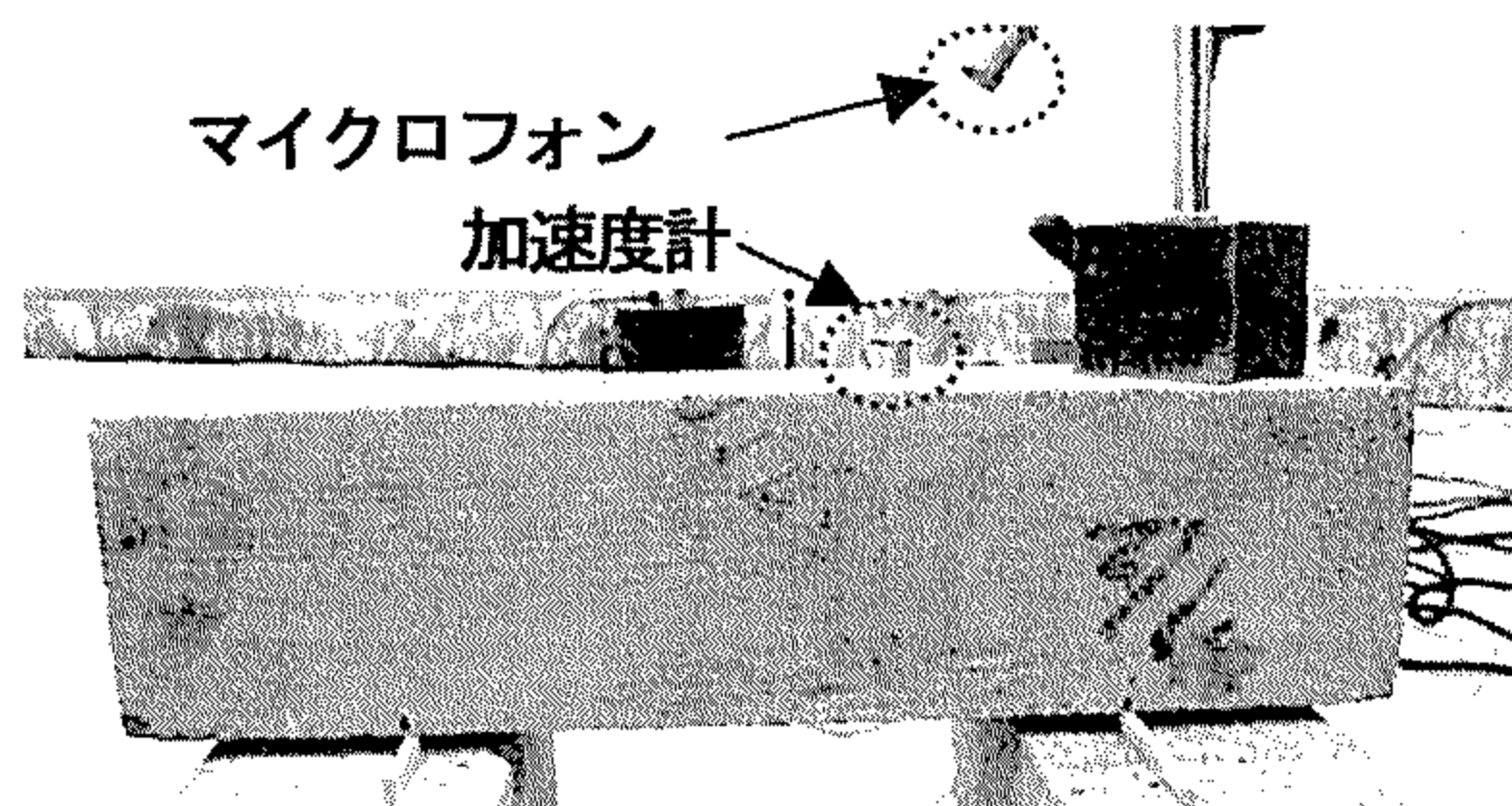


写真-1 たわみ共振周波数測定時の支持条件

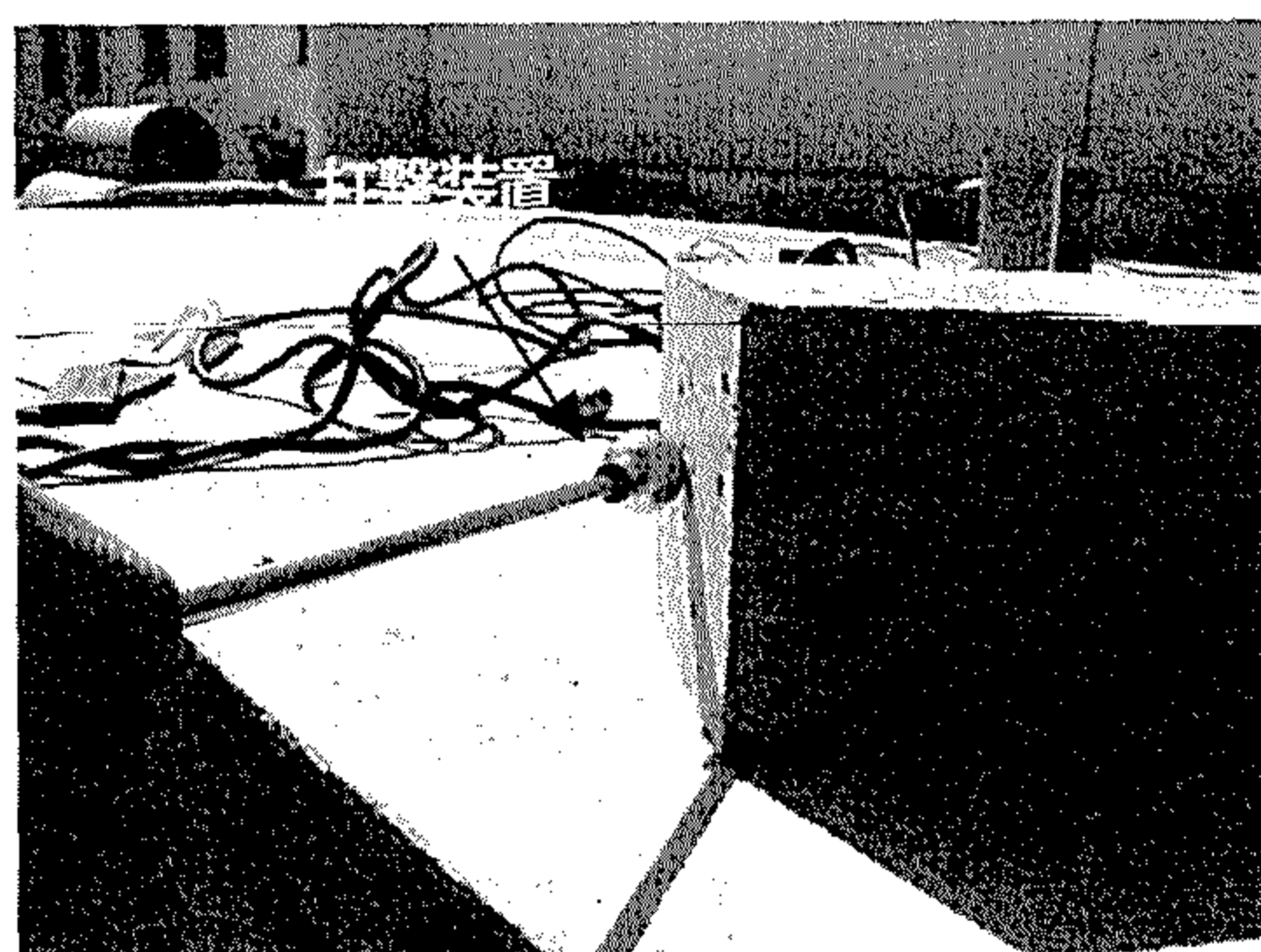


写真-2 打撃状況

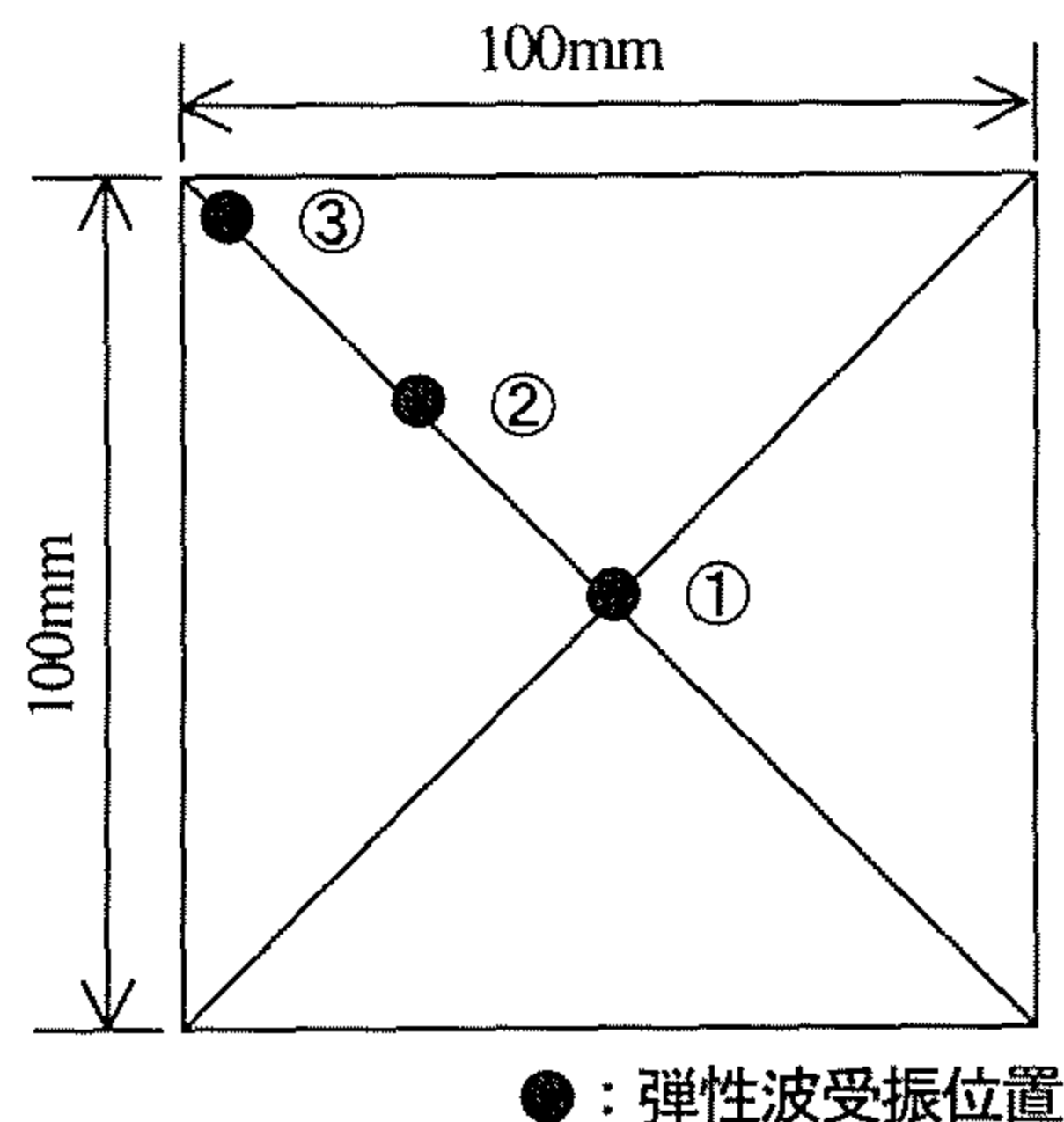


図-3 計測位置（縦波共振周波数）

は、周期がほぼ一致しており良い対応を示している。縦波共振現象測定では、両者の波形の傾向は似ているが、表面振動には、より短い周期成分を含んでいることがわかる。

図-6にたわみ共振現象計測の場合の周波数分布を示す。この図によれば、表面振動および打撃音ともに、周波数分布において、理論値に近い2.34kHzに明瞭なピークが認められる。この場合では、表面振動と打撃音は同様の現象を計測していると考えられる。

次に図-7に、縦波共振現象計測の場合の周波数分布を、

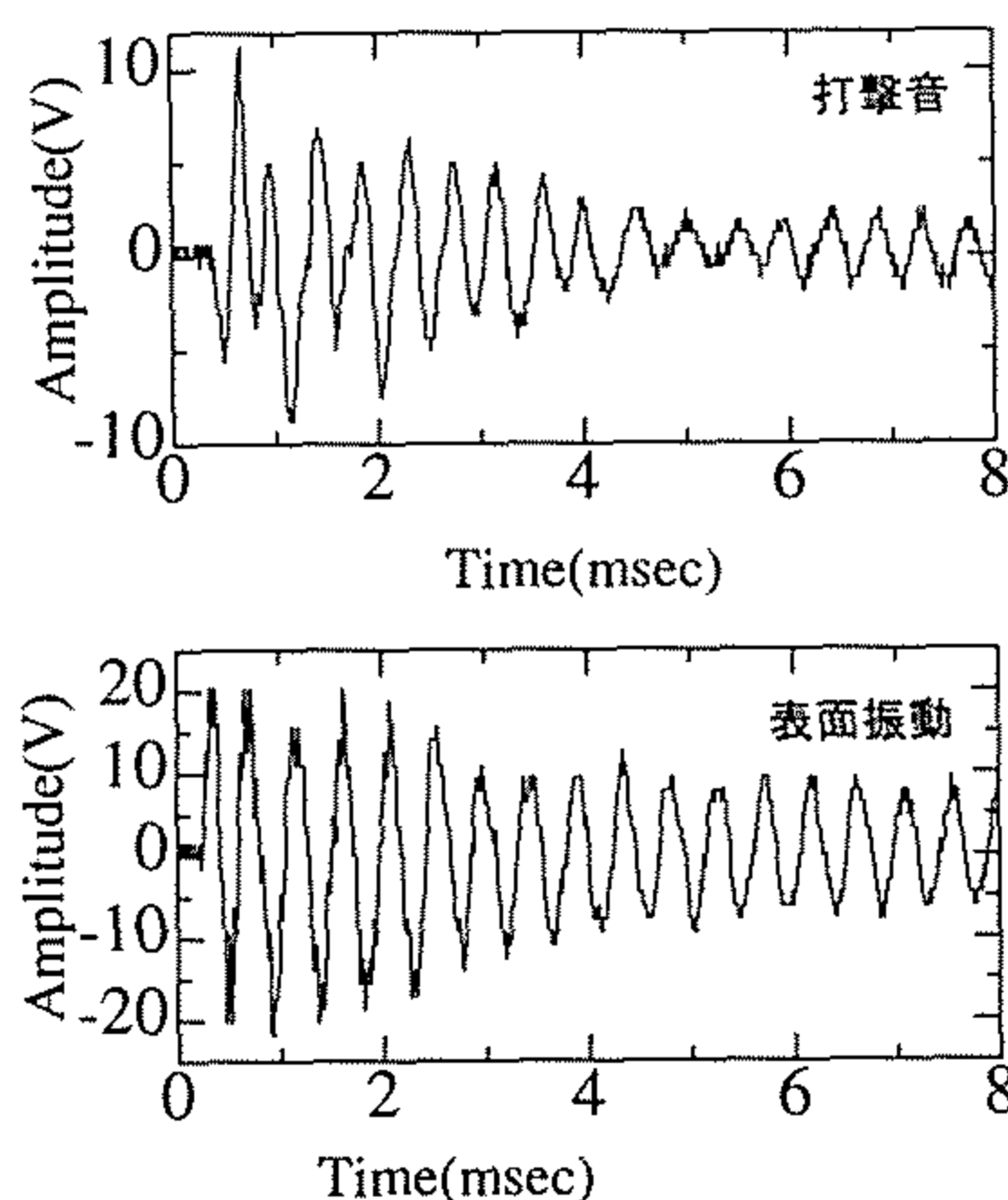


図-4 たわみ共振周波数測定時の波形

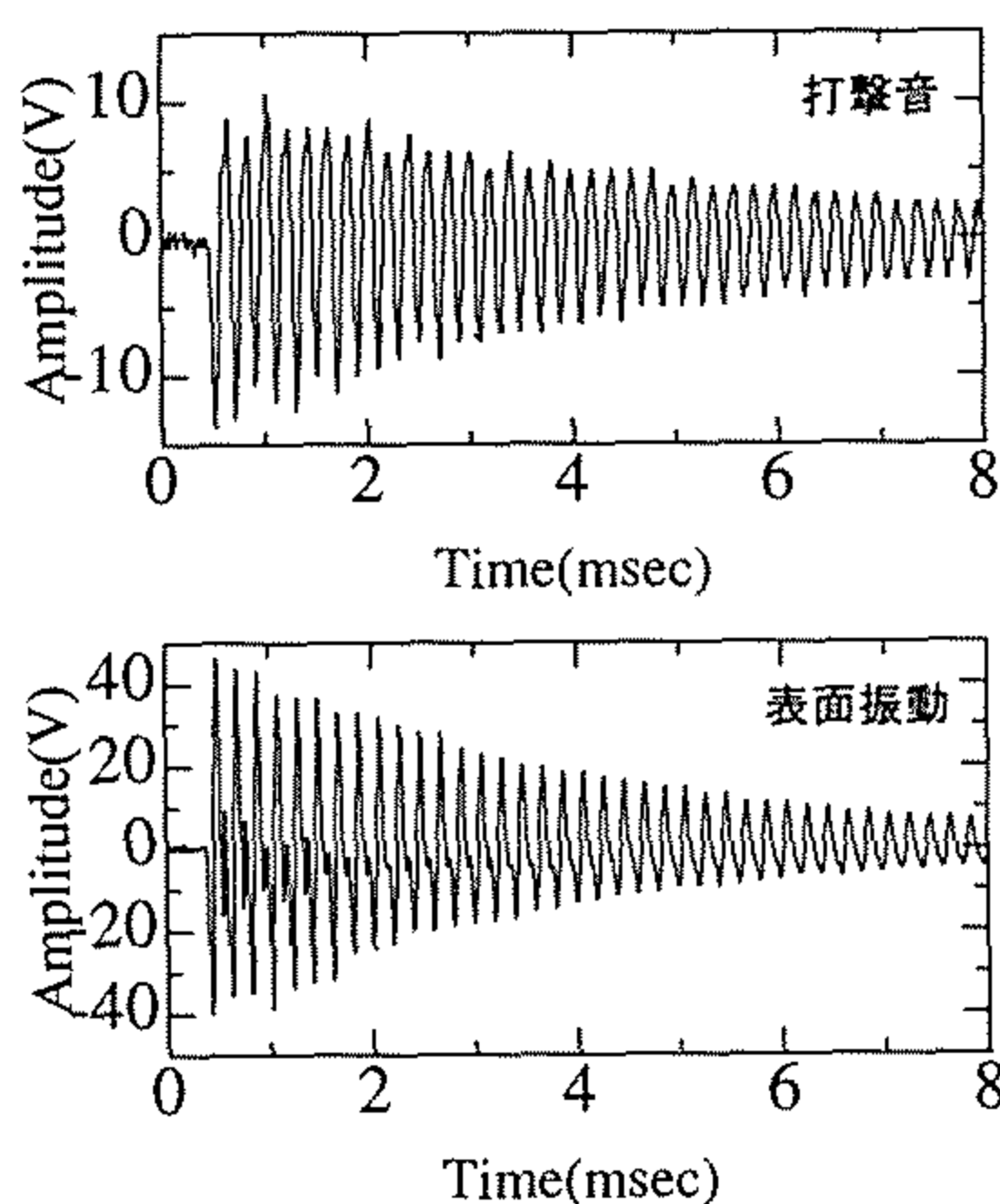


図-5 縦波共振周波数測定時の波形
(断面中央部)

各測定位置ごとにそれぞれ示す。これらの図によれば、打撃音および表面振動ともに、周波数分布において理論値に近い5.12kHzの位置に明瞭なピークが出現している。このピークは断面内の計測位置によらず出現しているため、断面内では一様な棒波となっていると考えられる。しかしながら、表面振動では、10.1kHz付近にも相対的に大きな成分を有するピークが同時に出現している。これは、2次の縦波共振周波数と考えられる。またこのピーク周波数は、端部の場合その他の計測位置に比べて成分が弱くなっている。これは、このピーク周波数に対応する現象が断面内で一様な棒波となっていないためである。ところで、このように複数のピーク成分が存在する場合、何れのピーク成分が支配的な現象であるかを明らかにすることは、生じている現象を正確に把握する上で特に重要であると考えられる。

そこで、本研究では、ウェーブレット解析（以降WTとする）を用いた検討を行った。なお、マザーウェーブレットとして、Gaborのウェーブレット¹⁰⁾を用いた。WTは、

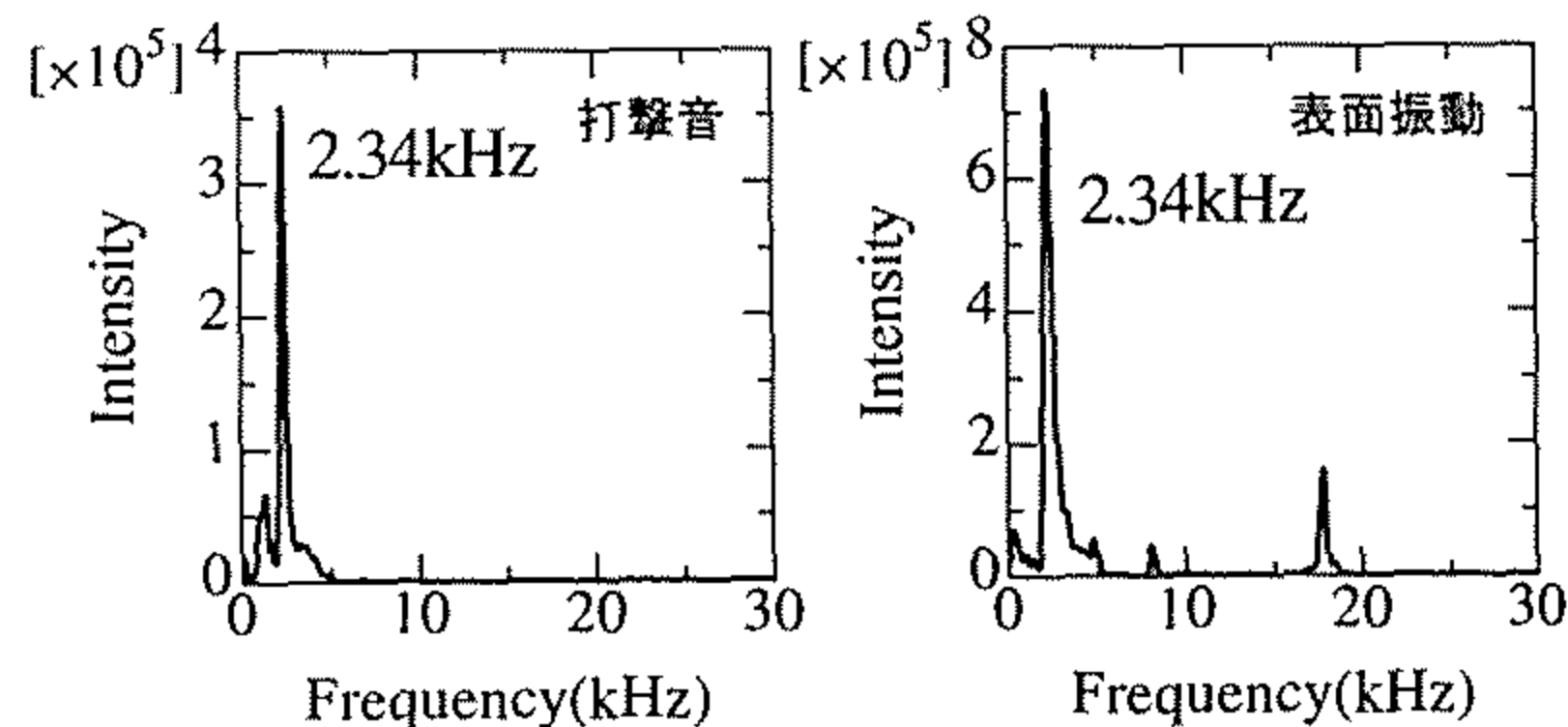
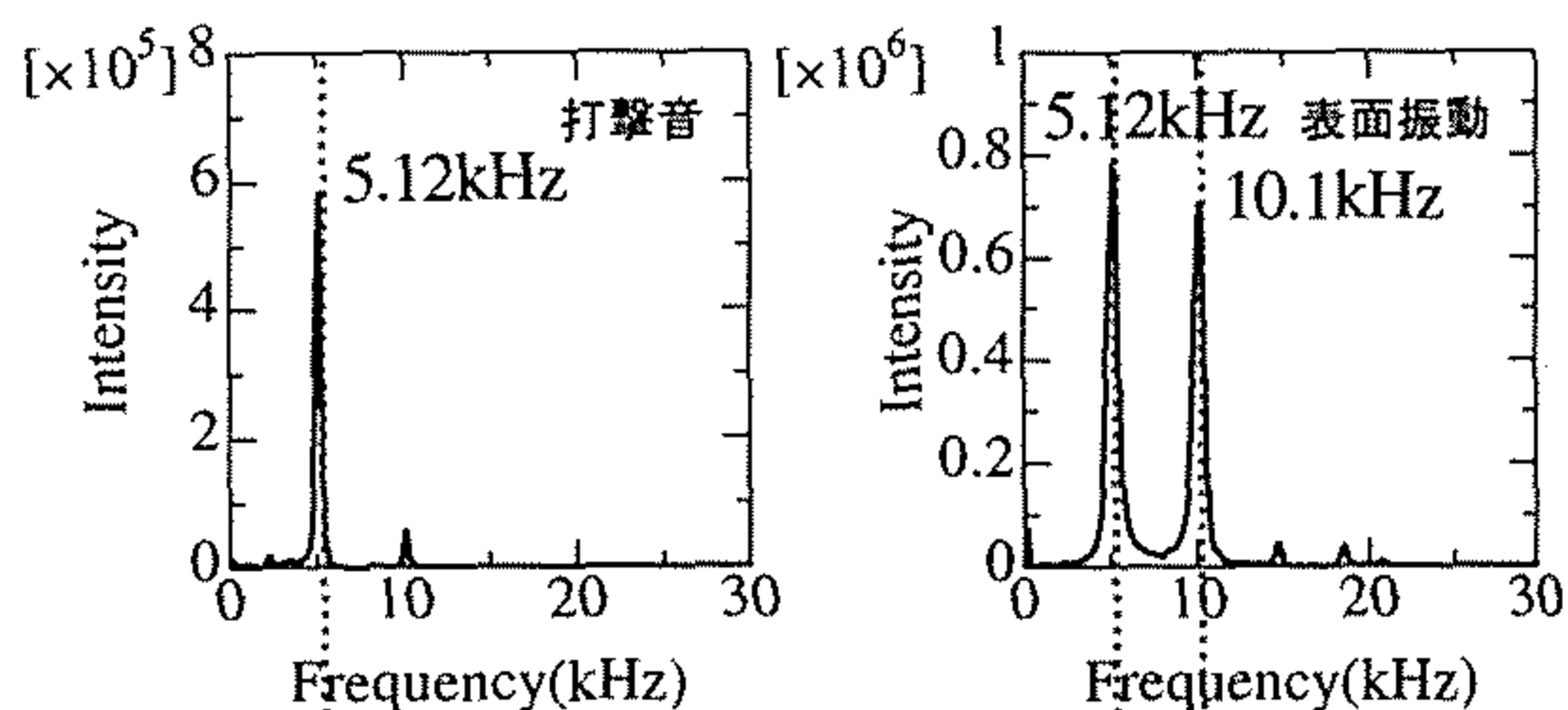
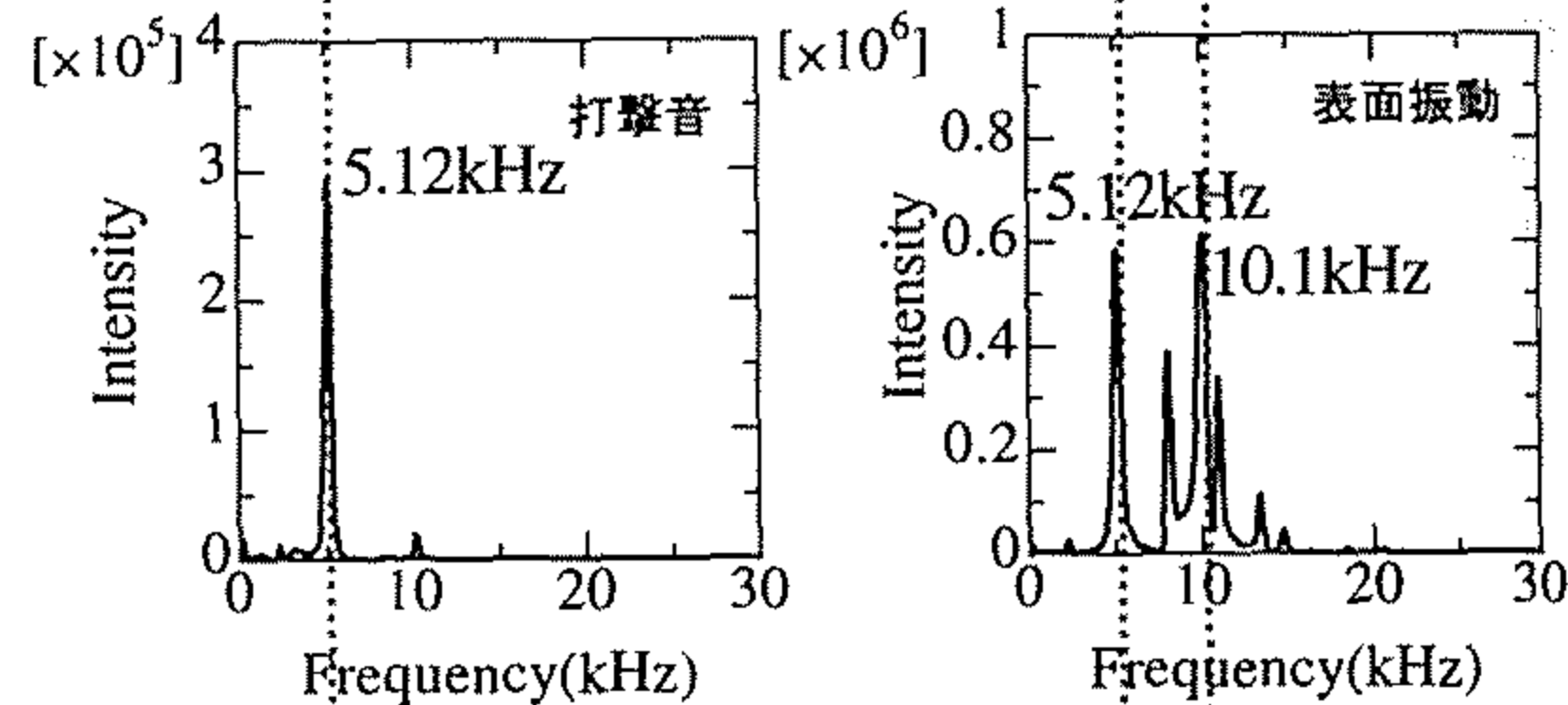


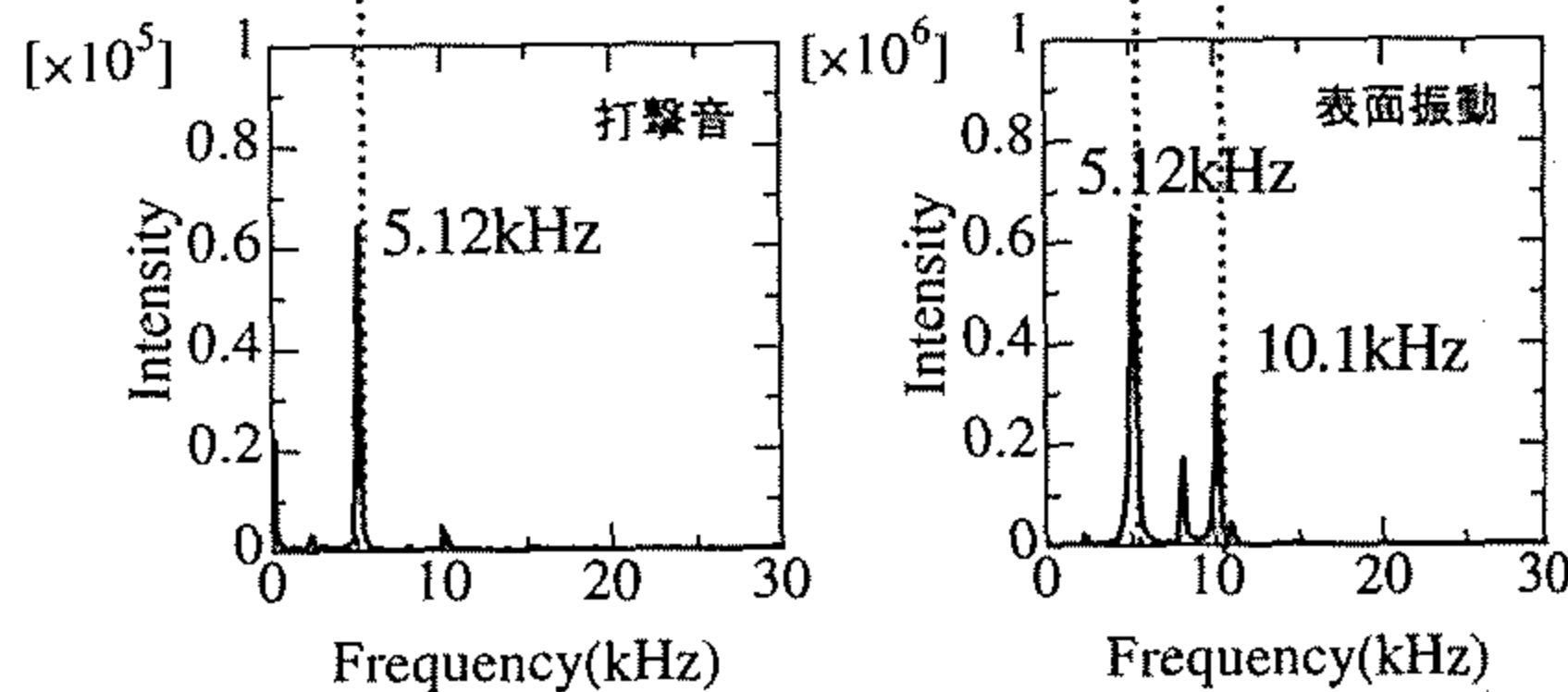
図-6 たわみ共振周波数測定結果



(a) 計測位置①（断面中央部）



(b) 計測位置②（断面中央部と断面の中間部）



(c) 計測位置③（断面端部）

図-7 縦波共振周波数測定結果

周波数成分の時間的な変化を解析できる。したがって、過渡的に生じている現象か、定常的に生じている現象かを区別する場合に有効となる。

図-8に、各計測位置において得られた表面振動の波形に対してWTを行った結果を示す。これらの図において、色が濃くなる程、スペクトル強度が大きいことを示している。各受振位置で、5kHz付近の周波数成分は、色が濃く（すなわちスペクトル強度が大きい）10msecまで継続していることがわかる。これは、図-7における5.12kHzのピーク成分に対応するものと考えられる。一方、10kHz付近にも成分が確認できるが、5kHz付近のものに比べて、相対的に色が薄く（すなわちスペクトル強度が小さい）

継続時間も短いことが確認できる。この成分は、図-7における10.1kHzのピーク成分に対応するものと考えられる。

これらの結果より、表面振動における周波数分布では、スペクトル強度は大きく、継続時間も十分長い1次の縦波共振現象が支配的な要因であると考えられる。打撃音ではこのピーク成分が支配的であるため、打撃音でも1次縦波共振現象が評価できるものと考えられる。

以上の検討により、棒部材において、たわみ共振現象および縦波共振現象の両者が、打撃音によって評価できることがわかった。

3. 板部材における共振現象と打撃音の周波数特性

ここでは、板部材を対象として、図-1(b)および図-1(c)のパターンについて検討する。前者はたわみ共振現象と縦波共振現象の両者が生じることが考えられる。このような場合における打撃音の周波数特性を検討した。さらに音の放射に寄与する現象について考察した。

また後者は、板厚に相当する縦波共振現象が支配的な要因と考えられるが、棒部材の場合と異なり、3次元的な弾性波伝播挙動となる。このような場合における打撃音の周波数特性を検討した。

(1) たわみ共振現象と縦波共振現象の両方生じる場合の打撃音の周波数特性

a) 実験概要

① 供試体

ここでは、長さ4m、幅2m、厚さ0.27mの鉄筋コンクリートスラブ供試体（W/C：50%、圧縮強度：69.4MPa、弾性波伝播速度：4500m/s）を用いた。内部には人工欠陥が配置されている。対象とした欠陥の条件は、深さ：10cm、欠陥直径：20および30cmである。欠陥の配置状況を、写真-3に示す。欠陥深さが10cmであれば、式(3)より計算される欠陥深さに相当する縦波共振周波数は22.5kHzであり、マイクロフォンおよび加速度計の周波数範囲よりも低い周波数領域に存在しており、実験条件として問題ない。供試体は厚さ10cmの砂層上に設置した。

② 弾性波入力および受振方法

弾性波の入力は、直径9.53mmの鋼球を高さ10cmからコンクリート表面に落下させることにより行った。この打撃の継続時間は式(4)により、 $41\mu\text{s}$ 、上限周波数は式(5)により、30.5kHzである。この条件は、欠陥深さ10cmの距離に相当する縦波共振周波数（22.5kHz）を十分満足するものである。

弾性波の受振には、2の場合と同様のものを用いた。計測状況を写真-4に示す。

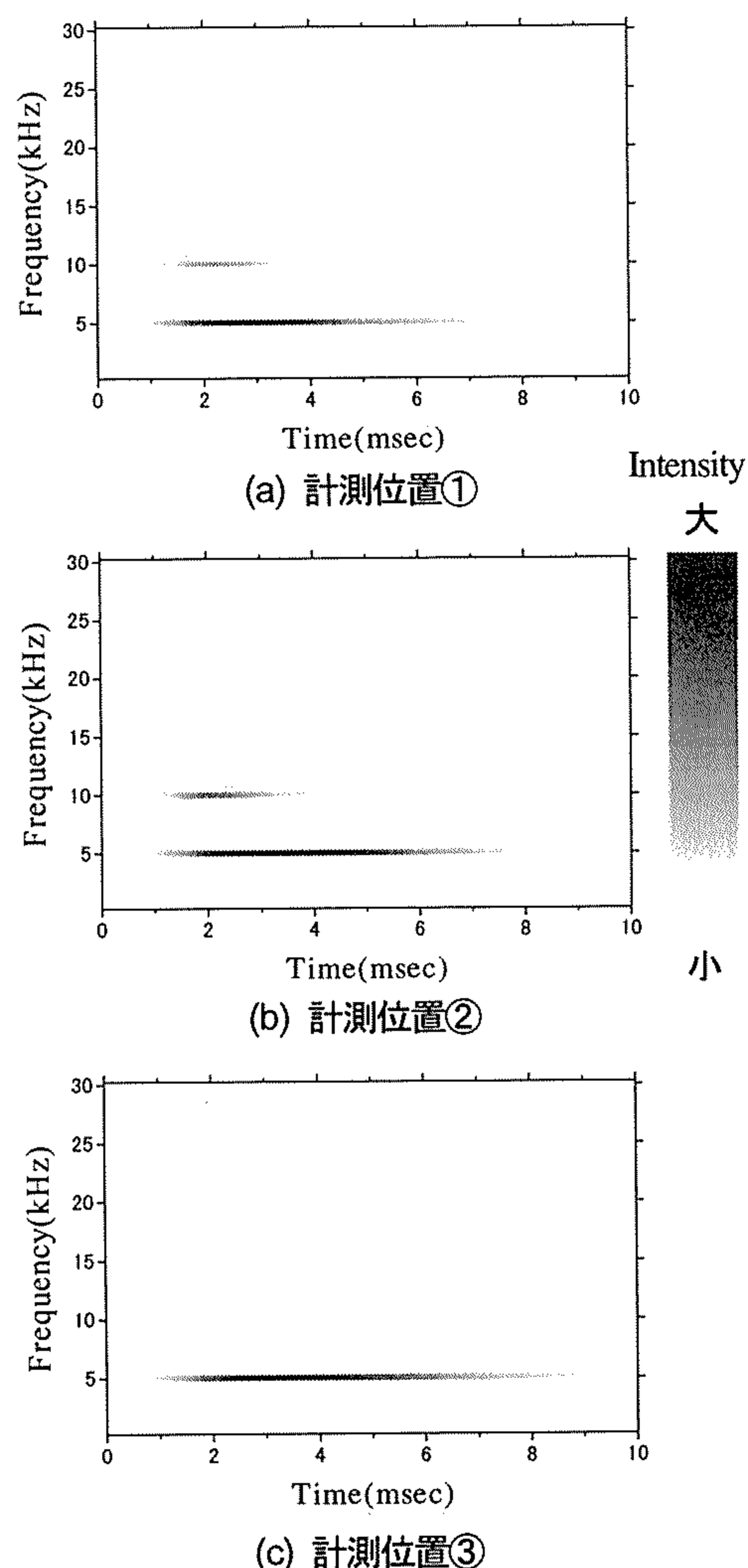


図-8 WT解析結果（縦波共振周波数測定）
（表面振動）

③ 打撃および受振位置

棒部材の場合（断面内で一様な波動場）と比較するため、ここでは、打撃位置を、欠陥上側コンクリート部の中央部とし、受振位置を3パターンとした。図-9に打撃位置と受振位置の関係を示す。なお、以降では打撃点より5cm離れた位置を計測位置①、7cm離れた位置を計測位置②、10cm離れた位置を計測位置③とする。

b) 受振位置の違いと各共振周波数の関係

図-10および図-11に、各受振位置における周波数分布を、欠陥直径20および30cmの場合について、打撃音および表面振動の両方についてそれぞれ示す。

これらの図より、欠陥直径が20cmおよび30cmの場合両方とも、弾性波受振位置の違いによらず、たわみ共振現象に起因するピークが、打撃音および表面振動の周波数

分布に明瞭に現れていることがわかる。打撃音において見られる10~25kHzの周波数成分は、健全部における特徴であるものと考えられる³⁾。打撃音の発生メカニズムとしては、(1)物体の接触による変形により発生する音および、(2)変形により発生した弾性波の伝播によって物体各部から発生する音が主要因であるとされている¹¹⁾。本研究では、(2)に対応する物理現象は、欠陥上側コンクリート部のたわみ共振現象であると考えられる。(1)に対応する物理現象は、鋼球がコンクリート表面に衝突した際に生じる変形であると考えられ、共振現象に起因するものではない。

これに対して縦波共振現象に起因すると考えられるピークは、打撃音については、計測位置によらず周波数分布には現れていない。表面振動の場合では、両欠陥直径で計測位置①および②については周波数分布に、この現象に起因すると考えられるピークが出現している。実験で得られたピーク値は、何れの場合も式(3)から計算される理論値と良く一致している。ただし、計測位置①に比べて、計測位置②の場合は相対的にピークの成分が小さくなっている。計測位置③では、このピークは周波数分布には明確には現れなかった。Impact-Echo Methodでは、打撃点より3~5cmの範囲で弾性波計測を行うことが望ましいとされている⁹⁾。これは、欠陥とコンクリート表面の間を多重反射する縦波成分を有意に計測するための条件

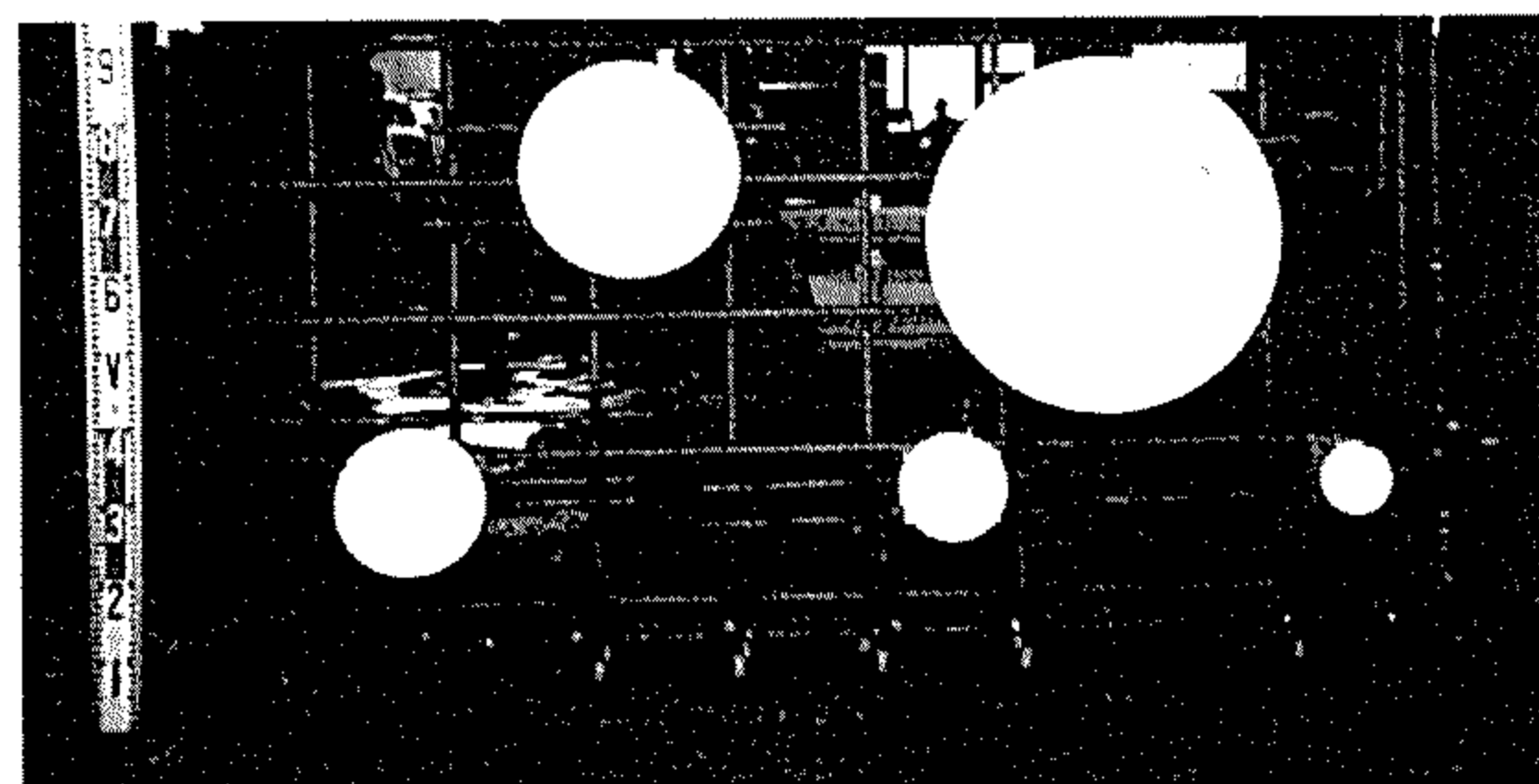


写真-3 欠陥設置状況

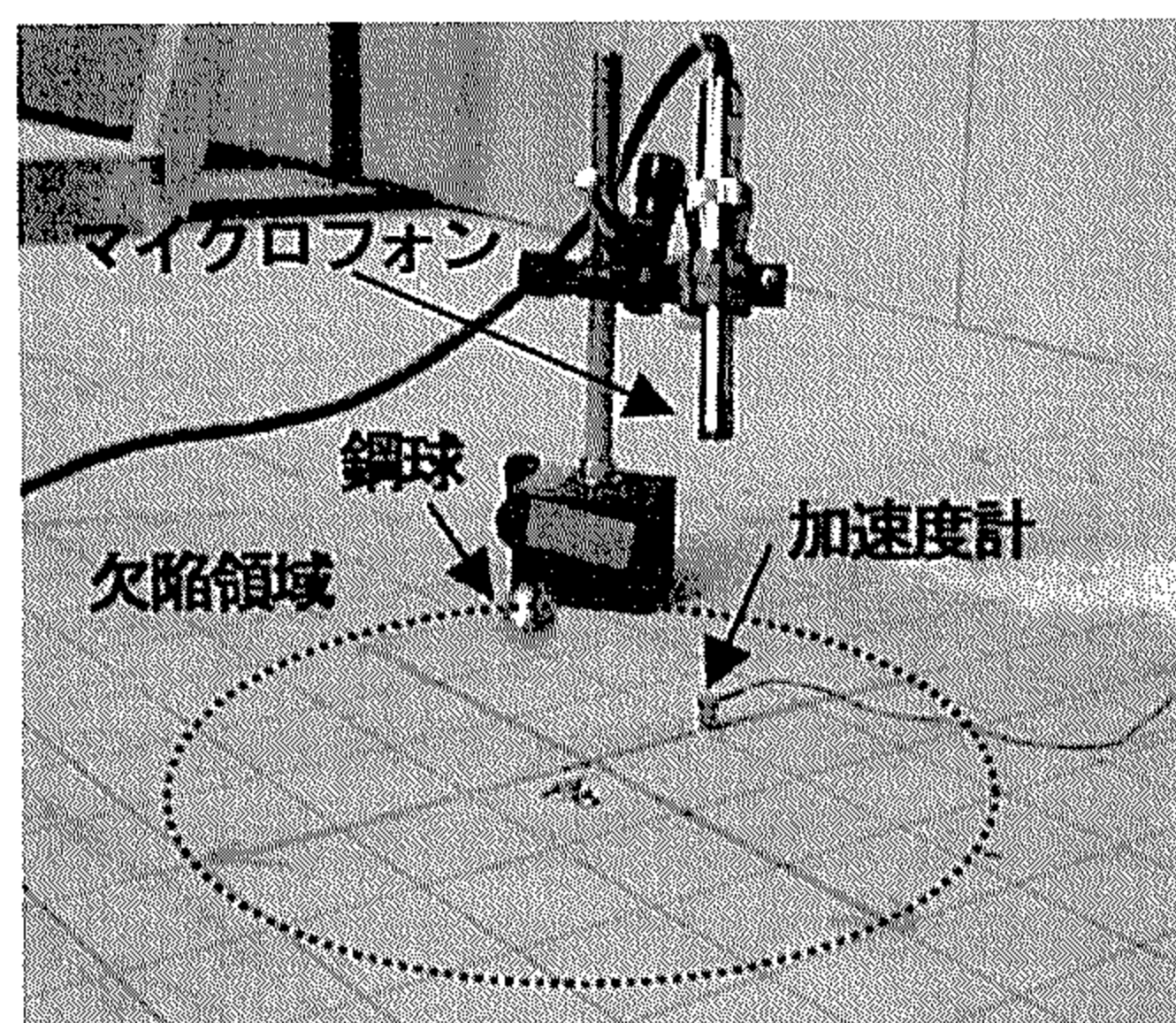


写真-4 計測状況の一例

と考えられる。このことから、計測位置③は、縦波共振現象を計測するには適していないものと考えられる。これより、板部材における縦波共振現象は、計測位置の違いの影響を強く受けることがわかった。このことについては、著者らの既往の研究における断面内の弾性波伝播挙動を視覚的に示した解析結果¹²⁾からも伺える。

ところで、図-10(a)および11(a)の表面振動の周波数分布では、たわみ共振現象と縦波共振現象による周波数成分の強度が同程度である。そこで、両現象の関係と特徴を把握するために、まず受振波形による検討を行った。

打撃音と表面振動の受振波形を、欠陥直径20および30cmの場合について図-12に示す。これらの図によれば、打撃音は何れの欠陥直径でも、最大振幅値を示した後、周期的な波形形状を示している。表面振動の場合、短い周期の現象と長い周期の現象が重なり合っており、打撃音と比較して複雑な形状となっている。また、表面振動では、周期の短い縦波共振現象は、周期の長いたわみ共振現象に比べて比較的継続時間が短いことが推察される。そこで、ここでも2と同様、この傾向を確認するためWTによる検討を行った。

図-13にWT解析結果を示す。これらの図から、打撃音および表面振動ともに、何れの欠陥直径の場合でも、たわみ共振周波数に対応する位置に、時間とともにスペクトル強度は小さくなっているものの、15msec程度の継続時間を示す周波数成分が見られる。一方、表面振動の場

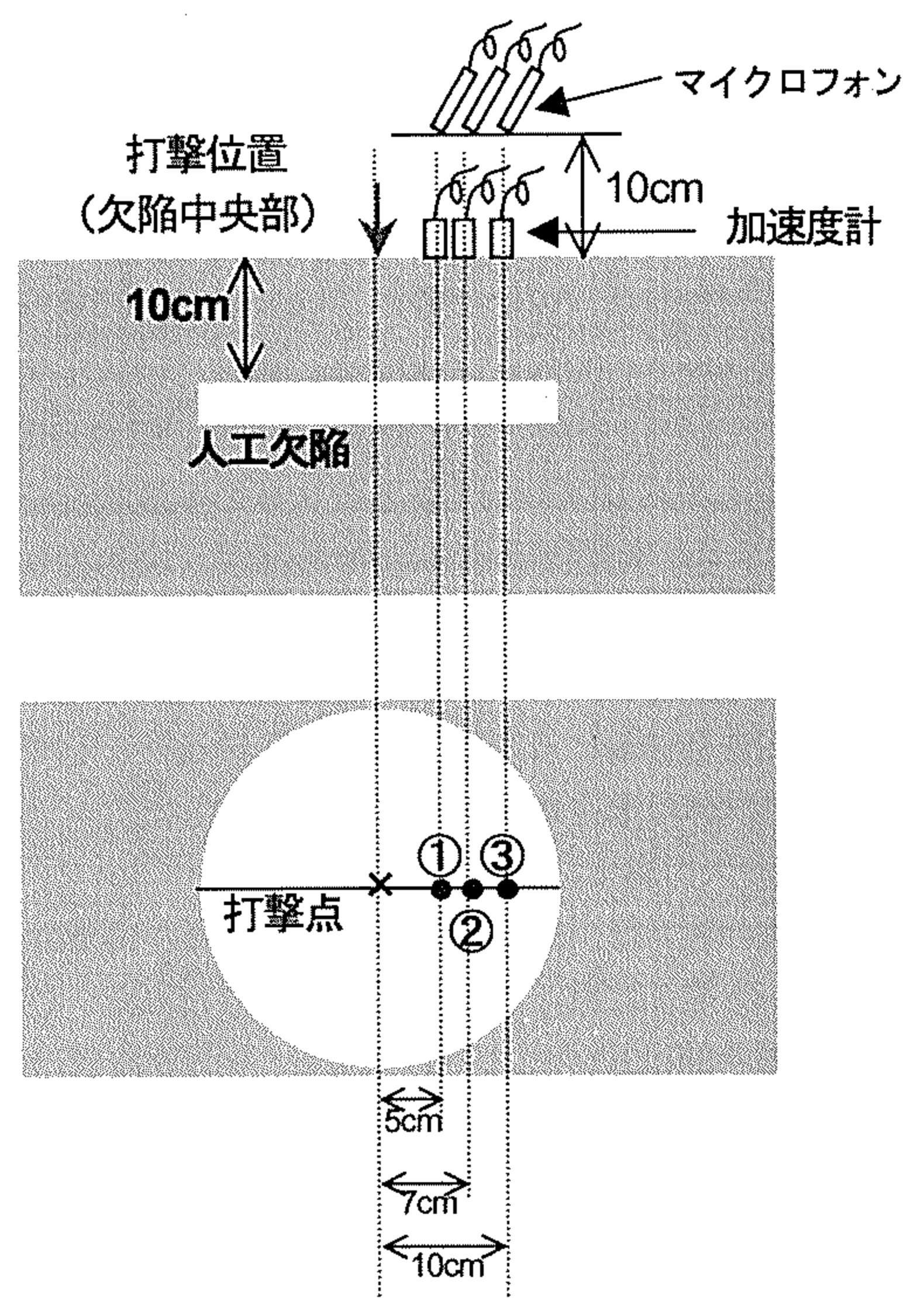
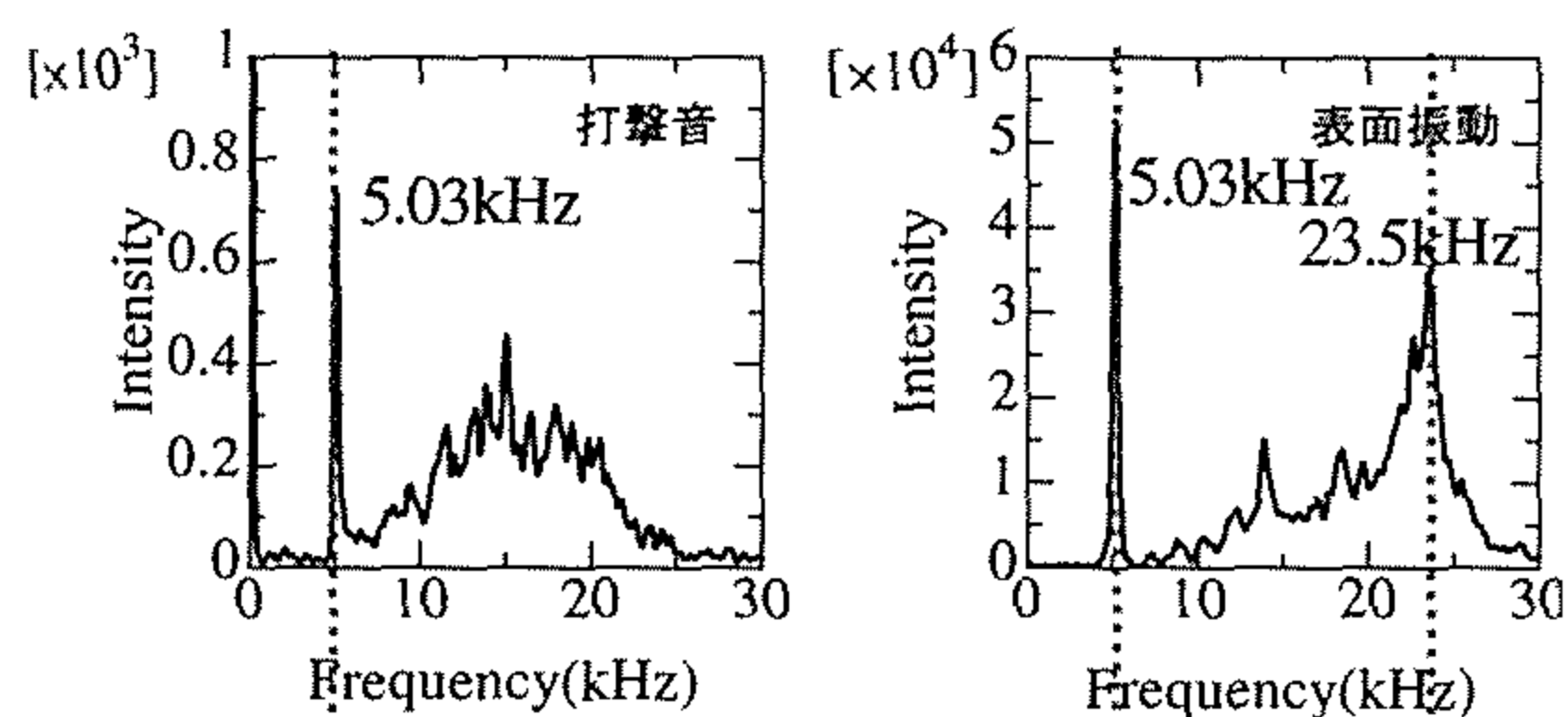


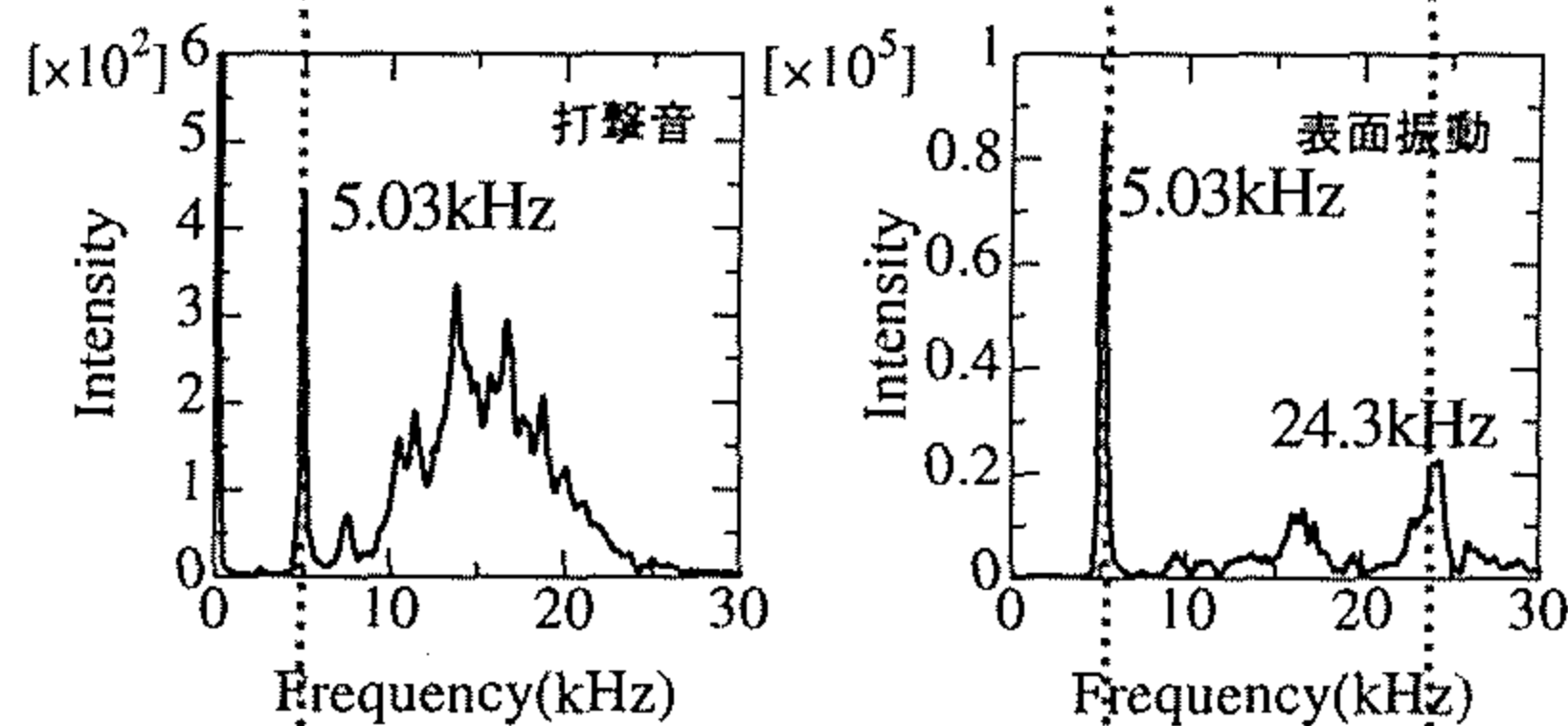
図-9 打撃位置と受振位置の関係

合では、縦波共振周波数を示す位置にスペクトル強度の強い成分として確認できるものの、継続時間は2msec程度

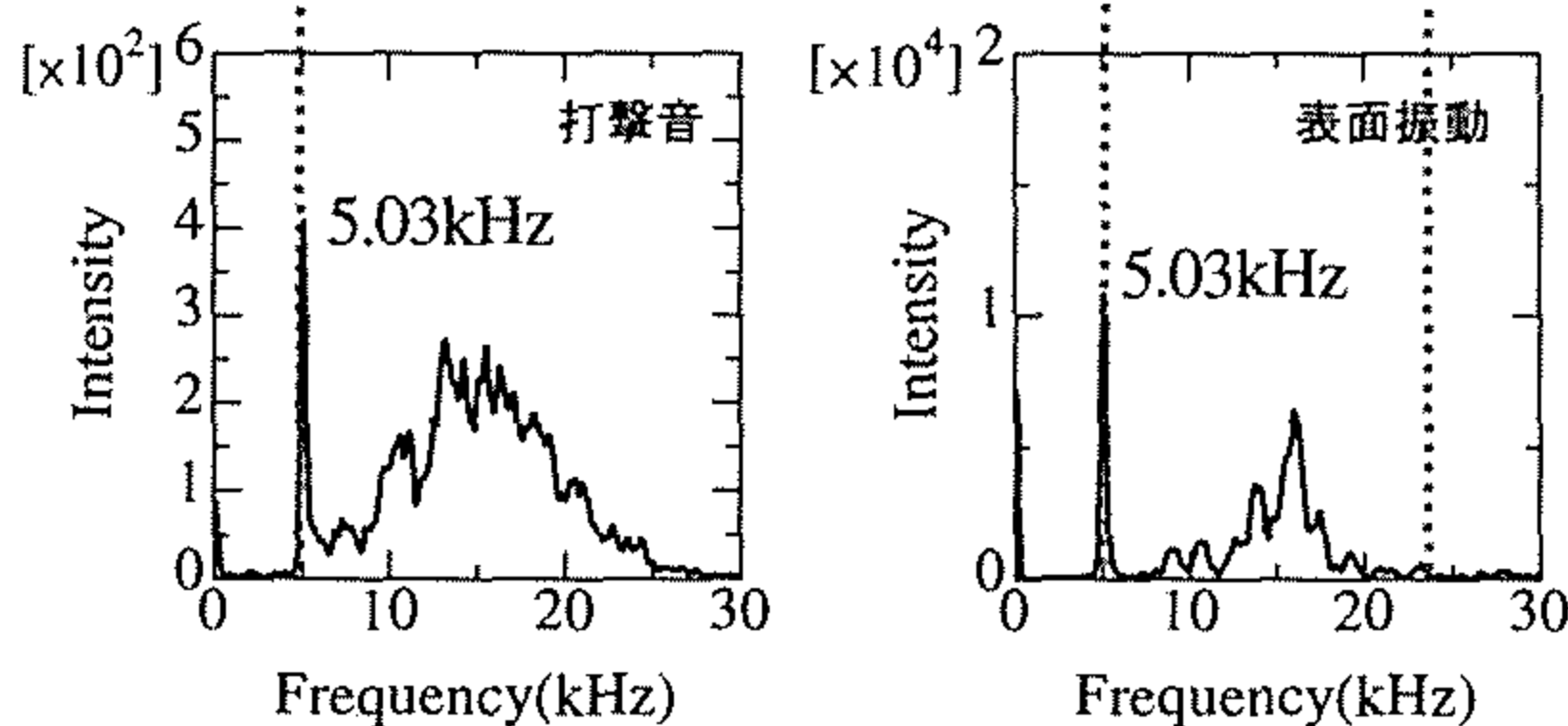
である。しかしながら、たわみ共振周波数と比べると明確ではないため、FFTの結果と併せて評価しないと、欠陥



(a) 計測位置① (打撃点から5cm)

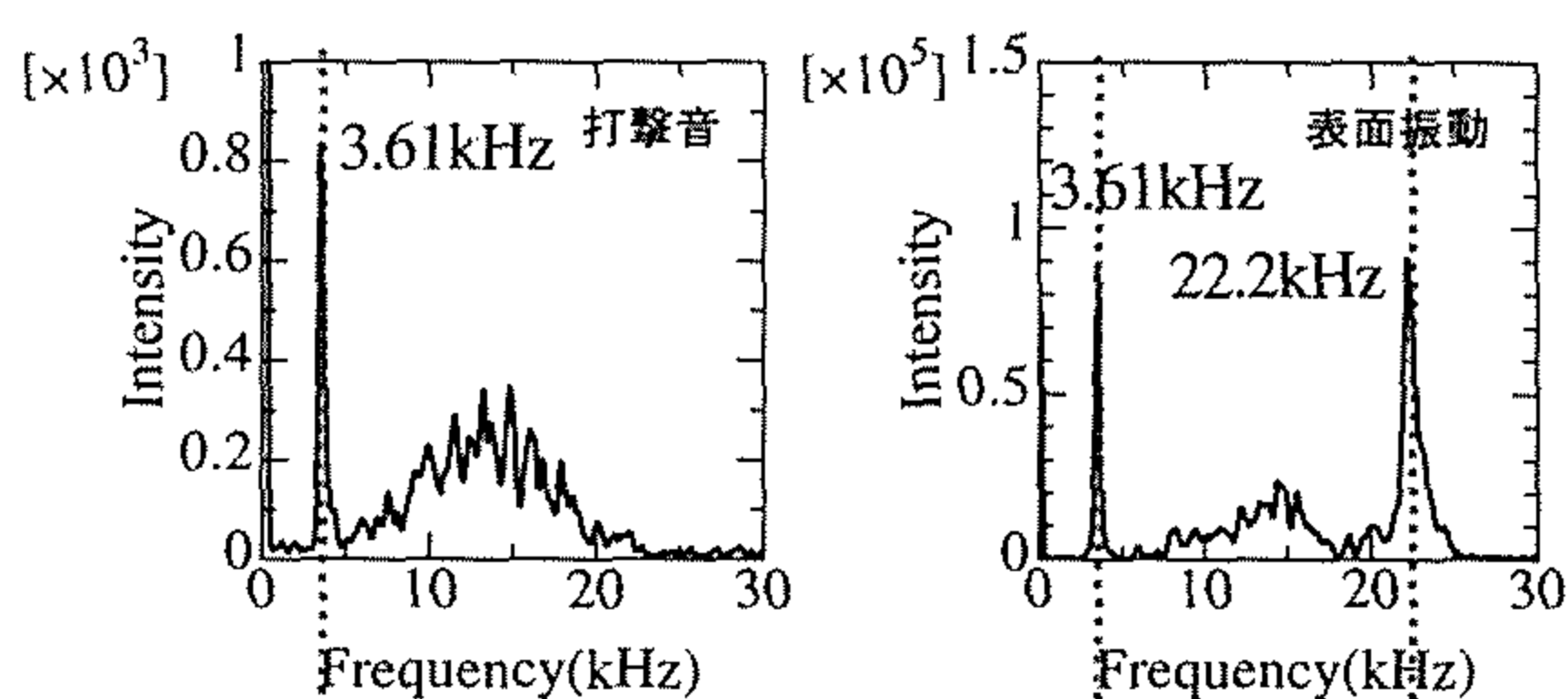


(b) 計測位置② (打撃点から7cm)

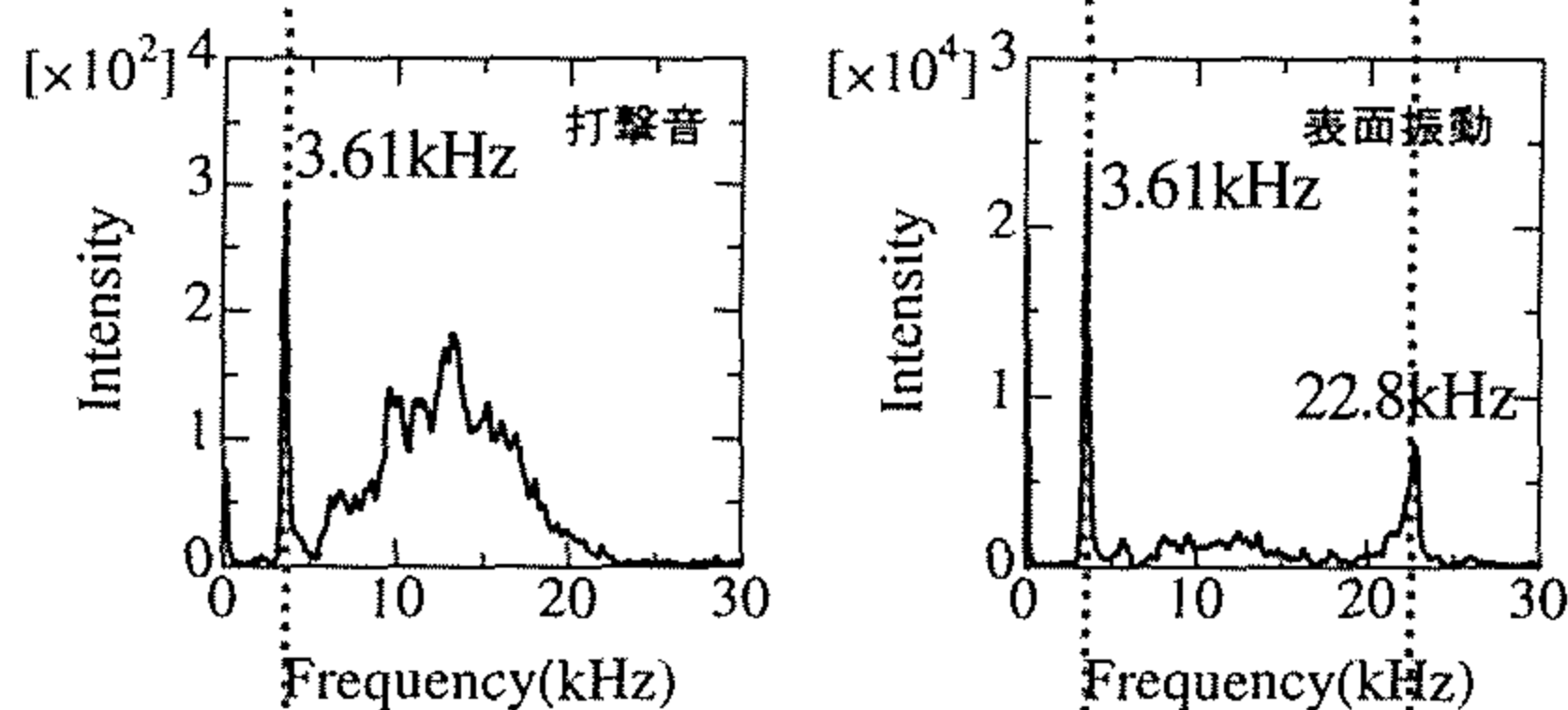


(c) 計測位置③ (打撃点から10cm)

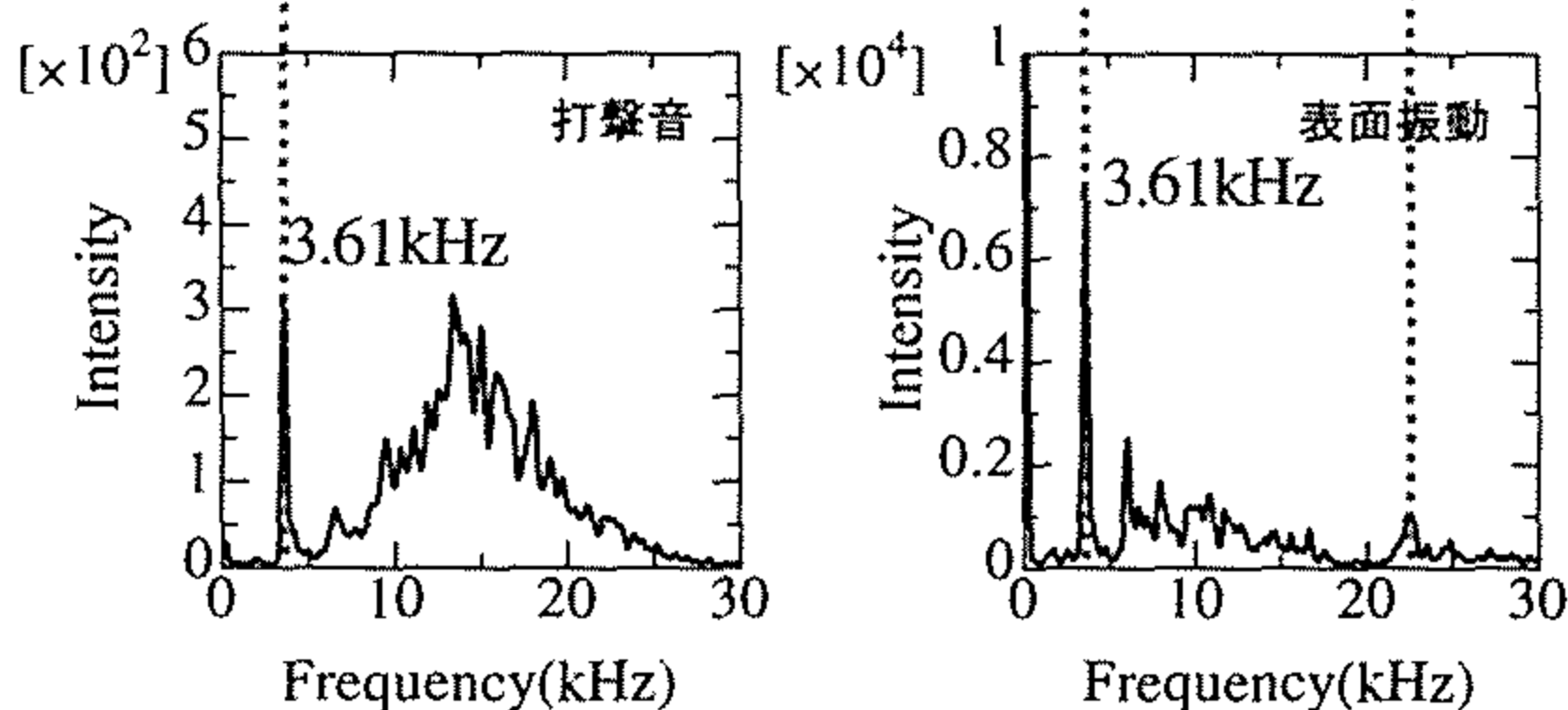
図-10 欠陥直径20cmの場合の周波数分布



(a) 計測位置① (打撃点から5cm)

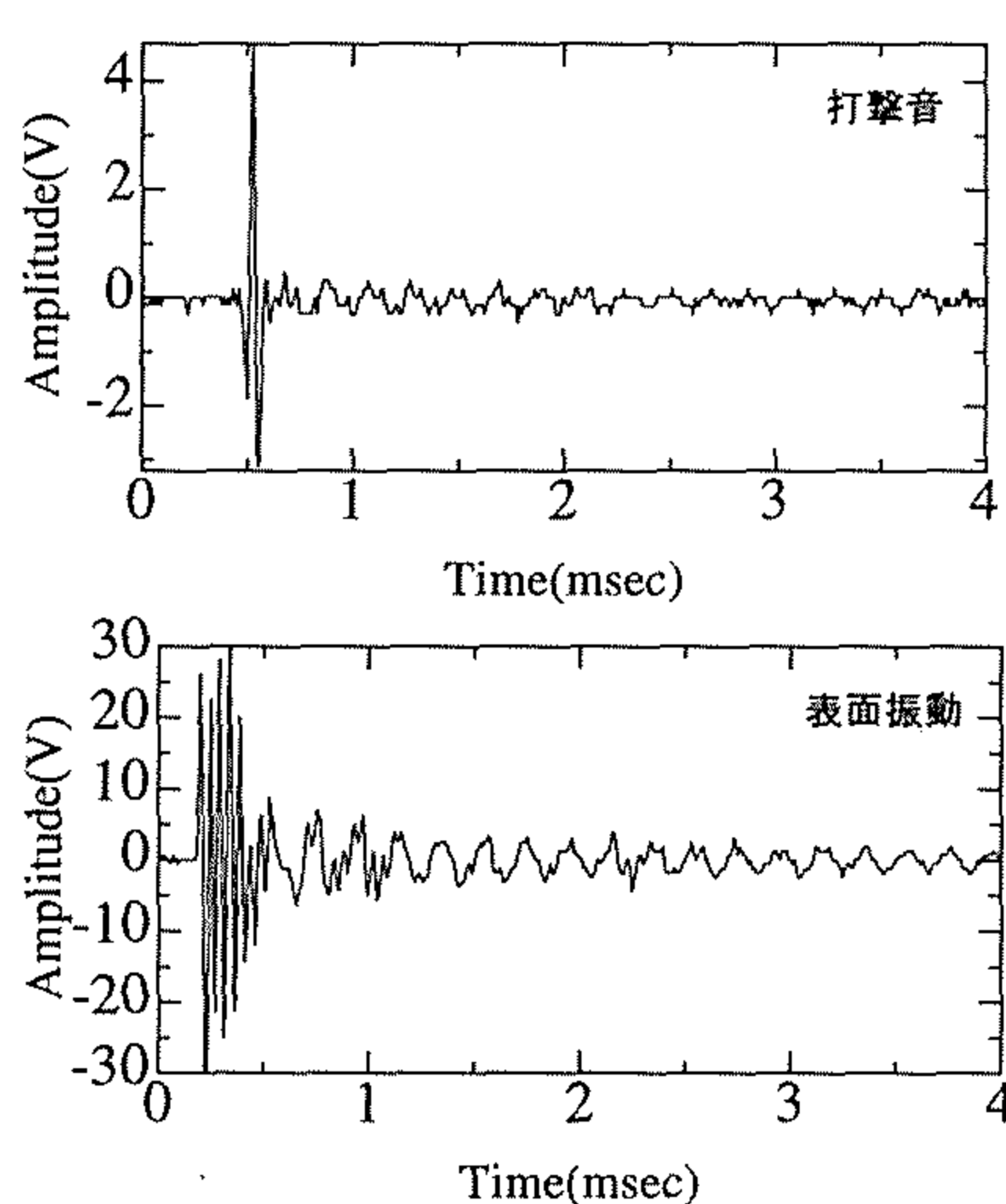


(b) 計測位置② (打撃点から7cm)

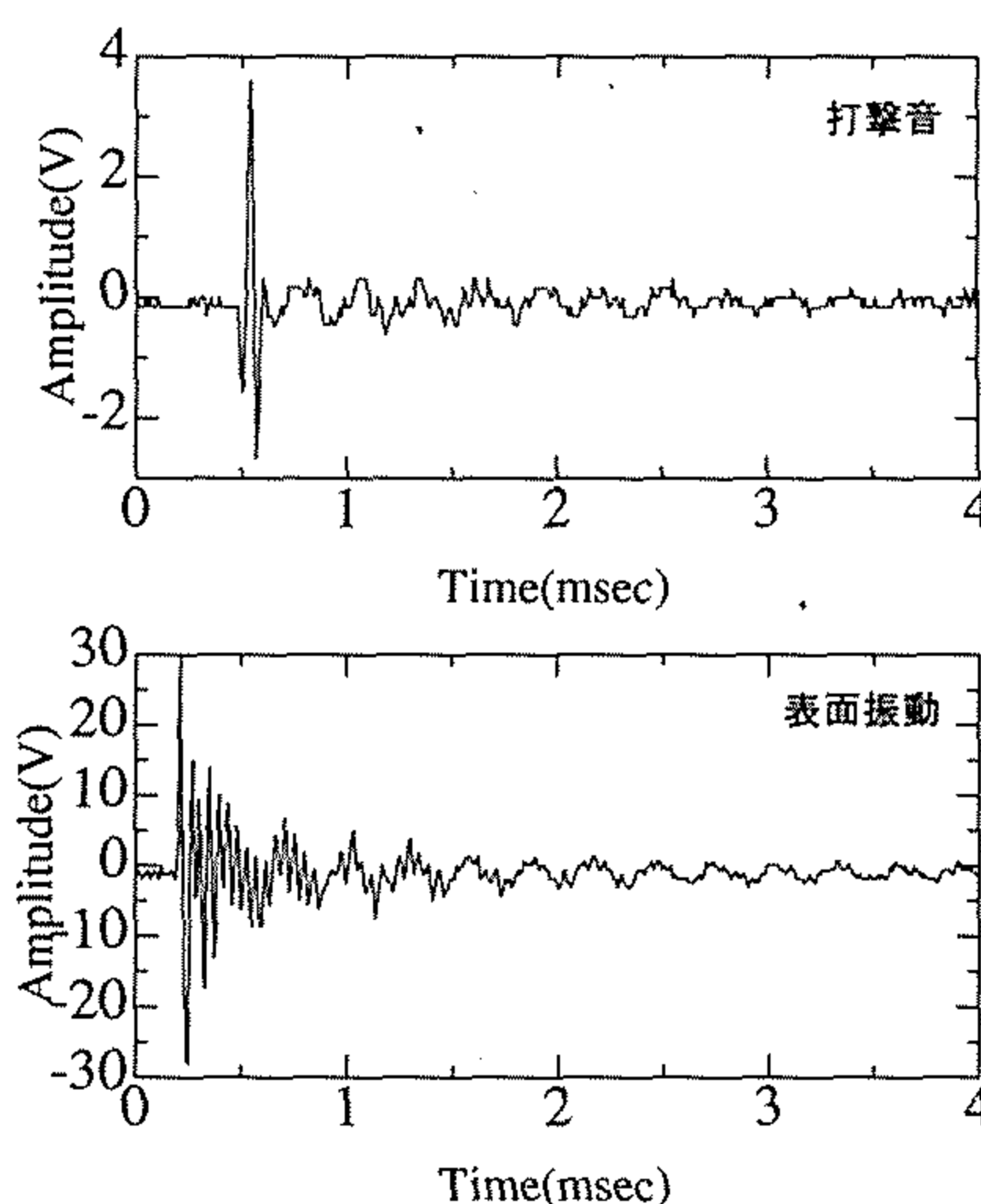


(c) 計測位置③ (打撃点から10cm)

図-11 欠陥直径30cmの場合の周波数分布



(a) 欠陥直径20cm, 深さ10cm



(b) 欠陥直径30cm, 深さ10cm

図-12 受振波形 (計測位置①)

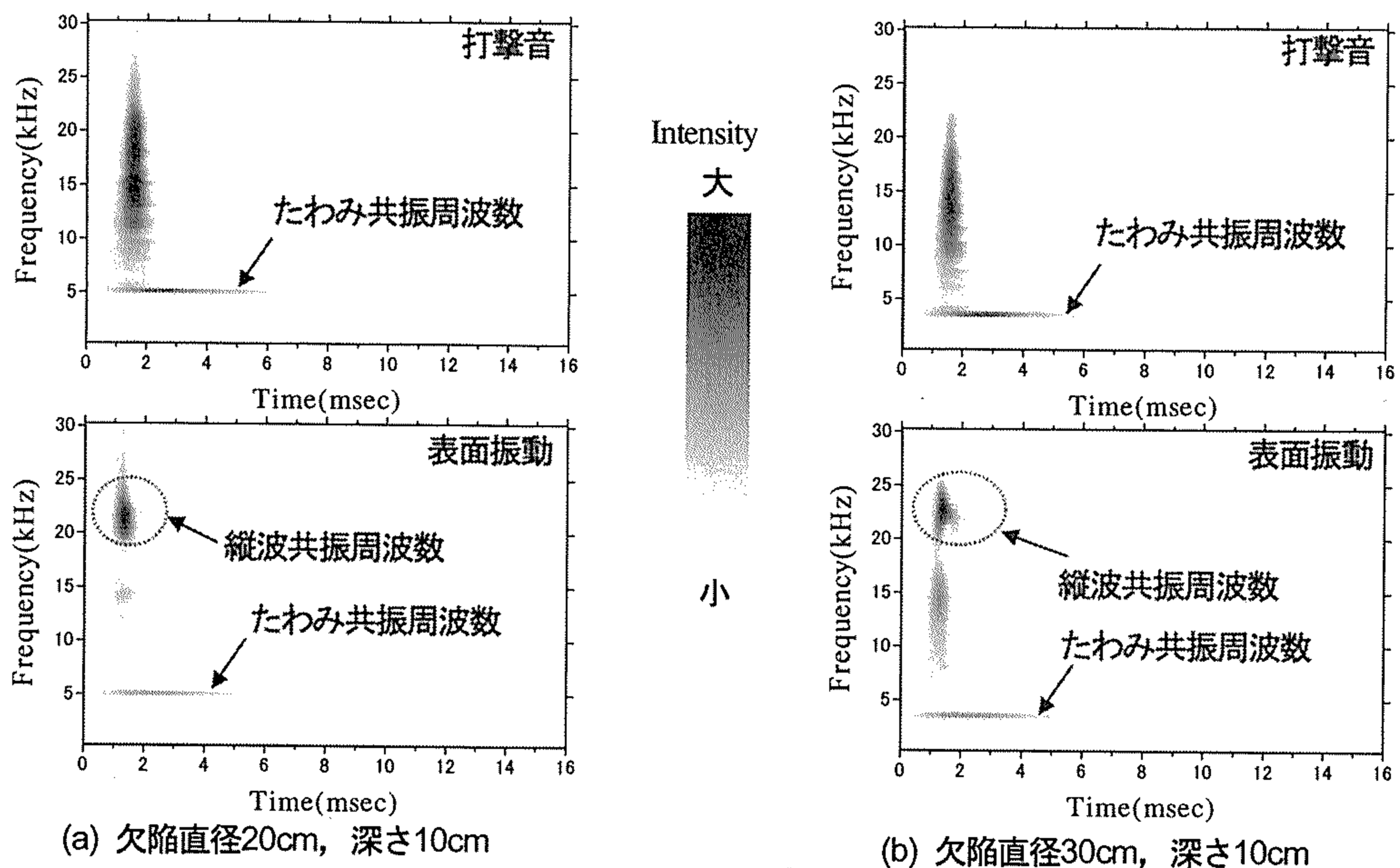


図-13 WT解析結果

深さが未知の場合には特定が困難である。縦波共振現象に起因するピーク成分が出現していない打撃音でもこの周波数領域付近（10～25kHz）に強い成分が存在していることから、このことが伺える。

以上のように、縦波共振現象とたわみ共振現象が混在している場合、縦波共振現象は、たわみ共振現象に比べて継続時間が十分短い現象であることがWTにより明らかとなった。

c) 音の放射に関する考察

ここでは、音の放射という観点から、縦波共振およびたわみ共振現象を考察する。

部材の振動が音として放射されるためには、振動現象が、部材周囲の空気を振動させるだけに十分なエネルギーをもつ必要がある。これに関しては、音の放射に関する物理量として、例えば体積速度¹³⁾が用いられ、次式のように定義されている。

$$U(t) = S \cdot v(t) \quad (7)$$

ここに、 $U(t)$ ：体積速度（ m^3/s ）、 S ：振動面積（ m^2 ）、 $v(t)$ ：振動速度（ m/s ）である。なお振動速度は、周波数と振動の振幅に関係する量である。この体積速度が大きいほど、放射される音のエネルギーは大きくなる¹⁴⁾。

この関係を参考に、各共振現象の音源としての大きさに関する考察を行う。

① 振動面積

図-10および11より、計測位置が(a)→(b)→(c)となるに従い、縦波共振周波数は、たわみ共振周波数に比べてスペクトル強度の成分が大きく減少しており、現象の発生領域は小さい。このことから、振動面積はたわみ共振現象の方が十分大きいことがわかる。

② 振動速度

振動速度は、振動の周波数と振幅の2つのパラメータに関係するため、これらそれぞれについて検討する。

まず周波数については、図-10および11より、縦波共振現象の方が十分大きい。

次に振動振幅については、波形には両共振現象が混在しており、直接各成分の振動振幅を求めることは困難である。そこで、各現象の挙動から考察を行うこととする。

図-13から、縦波共振現象の継続時間が2msecであるのに対して、たわみ共振現象の場合は15msecであり、継続時間の十分短い現象である。また、たわみ共振現象は部材全体で変形を生じる現象であるため、振動の変位振幅も縦波共振現象に比べて十分大きい。

一般的には、高周波数の現象は減衰が効果的に作用し、短時間で消失することや、局所的な現象が多いことがわかっており、全体現象となりにくい。ここでの実験結果は、このこととおおむね一致している。これにより、縦波共振現象は、部材全体の振動現象に対する寄与率は極めて小さなものであると考えられ、有効な音源とならないものと考えられる。

したがって、板部材の共振現象を打撃音により評価す

る場合、たわみ共振現象が主要因であることを留意すべきであると考えられる。

(2) 板部材で縦波共振現象が支配的な場合の打撃音の周波数特性

ここでは縦波共振現象のみ生じる場合（板厚計測）について検討した。棒の波との違いは、供試体の水平方向の寸法が半無限大に近い状態と考えられることである。

a) 供試体概要

供試体は、3.(1)で示したものと同一のものとした。なお、ここでは、写真-3中において欠陥が配置されていない場所を健全部として定義した。

b) 弾性波計測方法

弾性波の入力は、3.(1)と同様に、鋼球落下（高さ 10cm）により行った。用いた鋼球は、直径 9.53, 19.05 および 30.16mm の 3 種類とした。これらの鋼球を用いた場合の接触時間と上限周波数を表-1 に示す。3 種類の条件を用いた理由は、板厚計測時における入力弾性波の周波数特性の影響を詳細に検討するためである。なお本実験として用いたコンクリートの厚さ 27cm に相当する縦波共振周波数は、8.33kHz である。

弾性波の計測には、2.および 3.と同様の装置を用いた。加速度計は打撃点（鋼球落下位置）より水平方向に 5cm 離れた位置に、マイクロフォンは、加速度計から鉛直上方向に 10cm の位置にそれぞれ設置した。

c) 実験結果および考察

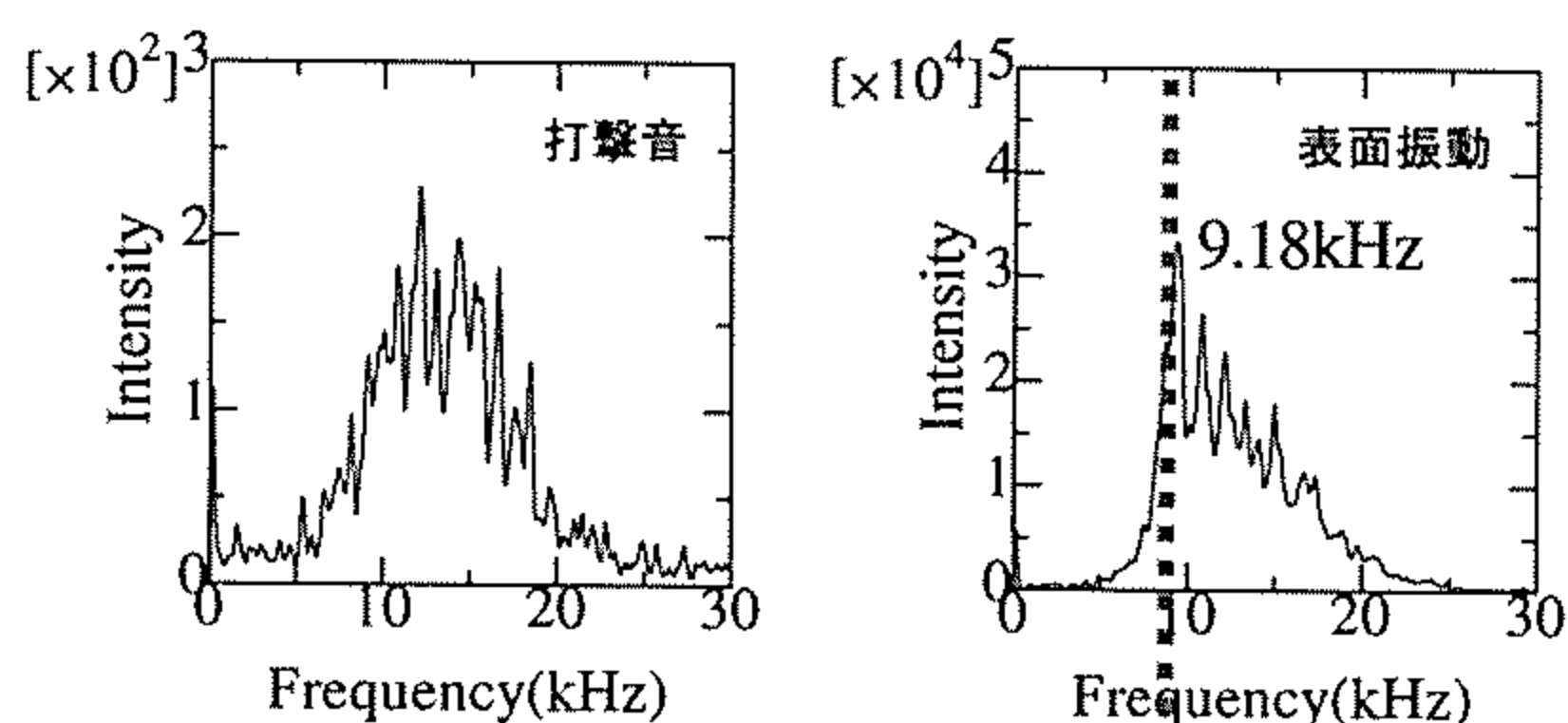
図-14に、周波数分布を各鋼球径ごとにそれぞれ示す。この図から、いずれの鋼球直径の場合においても打撃音には板厚に相当する縦波共振周波数はみられない。一方、表面振動では、値自体は若干異なるものの、各鋼球径でピーク周波数が確認でき、いずれも理論値に近い値である。この結果より、打撃音には板厚に相当する縦波共振周波数は含まれないことがわかる。これはすでに3.で考察したように、縦波共振現象が有効な音源となっていないためであると考えられる。

また表面振動では、ケース②と③は縦波共振現象が支配的な要因であるが、ケース①の場合では、縦波共振現象に起因するピーク以外にも、10~20kHzの周波数範囲に比較的大きな周波数成分が存在している。これは、縦波共振現象に対応するピーク周波数の成分が相対的に小さくなったためであると考えられる。Impact-Echo MethodによりPCグラウト充填度評価を行った研究結果¹⁵⁾でも同様の傾向が示されている。この結果は、打撃に用いる鋼球径が小さいものについては、周波数分布の扱いに注意が必要となる可能性があることを示唆していると考えられる。

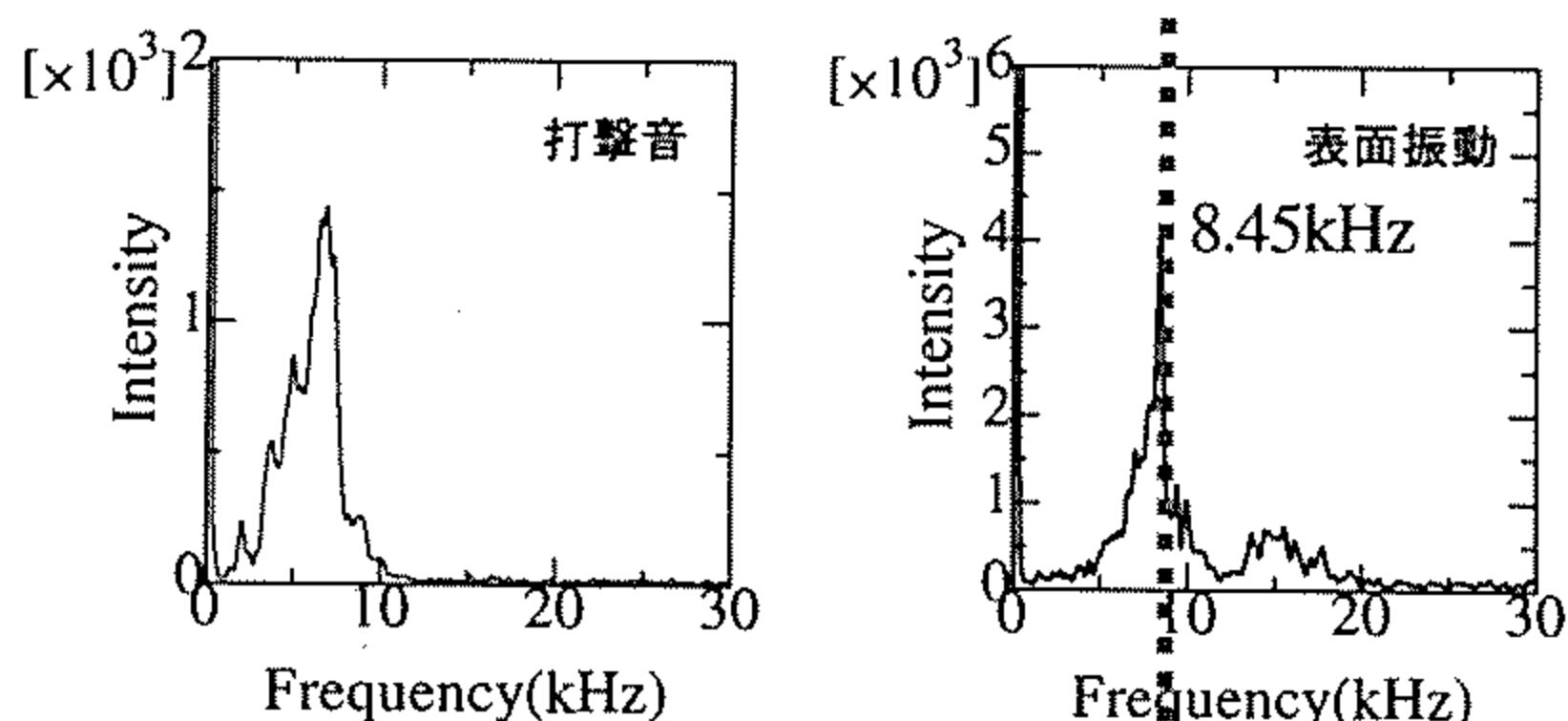
以上により、縦波共振現象が支配的な条件でも、打撃音には縦波共振現象に起因する成分は含まれていないこ

表-1 弾性波入力条件

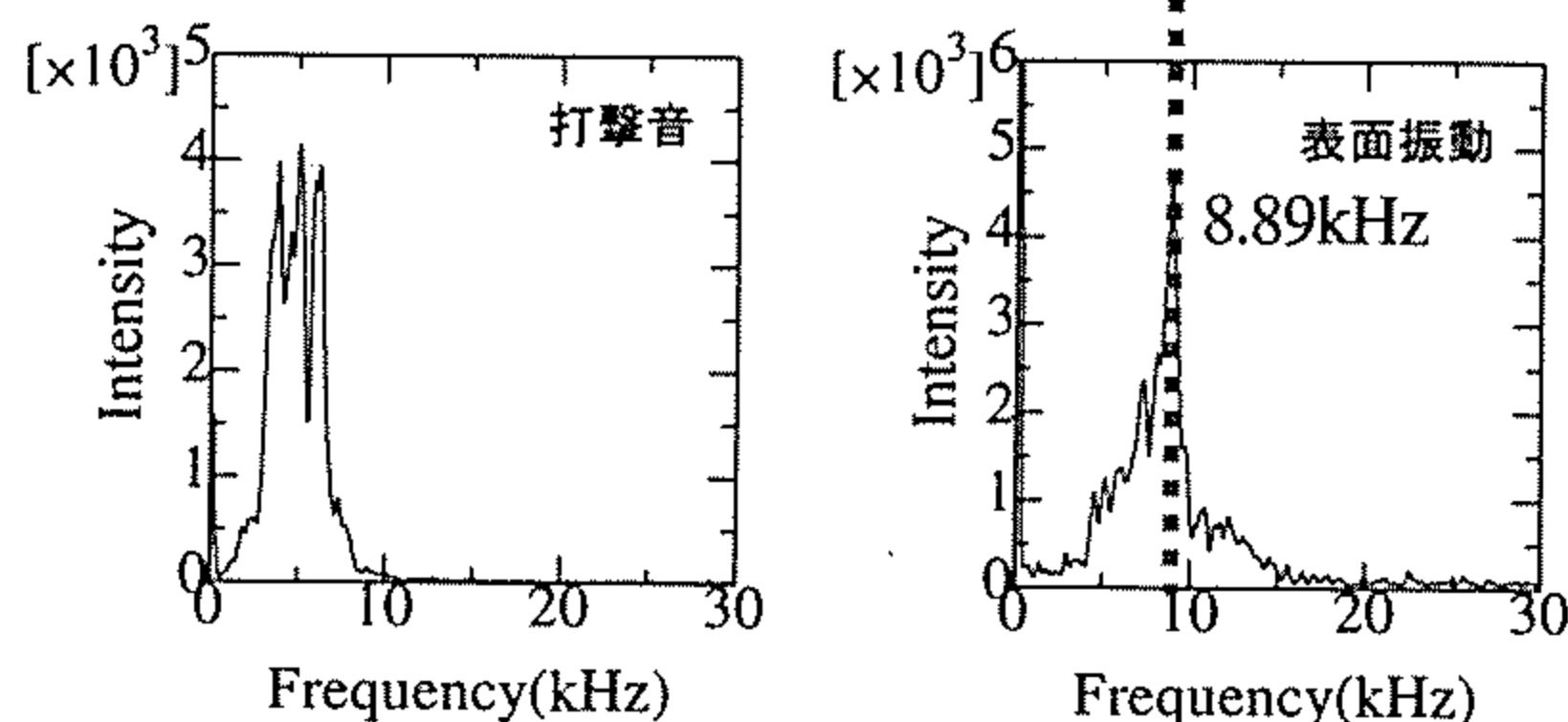
ケース	鋼球直径 (mm)	接触時間 T_c (μ s)	上限周波数 f_{max} (kHz)
①	9.53	40.98	30.5
②	19.05	81.92	15.3
③	30.16	129.7	9.63



(a) ケース①（鋼球径 9.53mm）



(b) ケース②（鋼球径 19.05mm）



(c) ケース③（鋼球径 30.16mm）

図-14 健全部における周波数分布

とが示された。この場合、打撃音と表面振動では全く異なった現象が評価されていると考えられる。したがって、板厚を評価する場合、縦波共振現象を適確把握するためには、加速度計等のセンサをコンクリート表面に接触させた弾性波計測を行うことが有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 衝撃により 100×100×400mm の供試体に弾性波を入

- 力し、その打撃音を計測した結果、たわみ共振現象および縦波共振現象に起因するピーク周波数が現れることが確認できた。このピークは表面振動の計測でも確認できたため、この場合打撃音と表面振動は同等の扱いが可能である。
- 2) 本研究で用いた実験条件下では、1次の縦波共振周波数に着目した場合、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体の断面内で様な棒波となっていることがウェーブレット解析により示された。
 - 3) スラブ供試体内部の表面より深さ10cmの位置に存在する欠陥の評価において、表面振動と打撃音を比較した結果、表面振動には縦波・たわみ両共振周波数が周波数分布に現れたが、打撃音の周波数分布にはたわみ共振周波数が支配的であることがわかった。
 - 4) 上記の傾向は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体の場合と異なるものであった。この違いは、断面内において様な波動場となっていないことが理由として考えられる。
 - 5) たわみ共振現象の方が縦波共振現象にくらべて振動面積・振動速度は十分大きく、体積速度が大きくなることがわかった。これにより、たわみ共振現象は音の放射に大きく寄与していることが明らかとなった。打撃音で主にたわみ共振現象が計測されるのはこのためである。
 - 6) スラブの厚さに相当する縦波共振現象のみが発生している場合においても、打撃音には縦波共振周波数は感知されなかった。これは板厚に相当する縦波共振現象が有効な音の放射源とはならないためである。
- 診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, 2001.
 - 2) 伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究, 東京大学学位論文, 1997.
 - 3) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 遠藤友紀雄：コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1545-1550, 2002.
 - 4) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 児玉一郎：コンクリートの欠陥評価における打撃音波形パラメータの役割, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1583-1588, 2003.
 - 5) 城戸健一編著：基礎音響工学, コロナ社, pp.60-63, 1990.
 - 6) 安全工学協会編：騒音・振動, 海文堂, pp.101-109, 1982.
 - 7) 伊藤毅：音響工学原論上巻, コロナ社, pp.126-130, 1974.
 - 8) Sansalone, M. and Streett, W. B. : *Impact Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997.
 - 9) Galan, A. : *Combined Ultrasonic Methods of Concrete Testing*, Elsevier, p.33-37, 1990.
 - 10) Torrence, C. and Compo, G.P. : *A practical guide to wavelet analysis*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 1998.
 - 11) Adan Akey : *A review of impact noise*, J. of Acoustic Soc. Am., Vol.64, No.4, pp.977-987, 1978.
 - 12) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002.
 - 13) 西山静男, 池谷和夫, 山口善司, 奥島基良共著：音響振動工学, コロナ社, pp.3-4, 1979.
 - 14) 中村健太郎：音のしくみ, ナツメ社, pp.54-55, 1999.
 - 15) 渡辺健, 大津政康, 友田祐一：インパクトエコー法によるPC グラウト充填度評価に関する考察, 材料, Vol.48, No.8, pp.870-875, 1999.

謝辞：本研究における供試体は昭和コンクリート工業（株）により提供されたものである。記してここに謝意を表する。

(2003. 9. 4 受付)

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の

RESONANCE VIBRATIONS AND SOUNDS OF CONCRETE MEMBERS DUE TO IMPACT

Masanori ASANO, Toshiro KAMADA, Minoru KUNIEDA and Keitetsu ROKUGO

The relation between vibrations of concrete members due to impact and radiating sounds is investigated. In experiments, resonance vibrations of the flexural mode and the longitudinal mode were studied by using bar-shape and flat-slab specimens. For the measurement, an accelerometer and a microphone were used to record the surface vibrations and radiating sounds generated by impact, respectively. The relation between the surface vibration and the radiating sound was investigated by frequency spectra. As a result, the difference of surface vibrations and radiating sounds was clarified from the viewpoint of the resonance vibration and the sound source.