

「応答音圧パルス勾配法」における 打診音の発生と伝播

稲森光洋¹・御手洗良夫²・船曳伸二³

鶴澤稔⁴・瀬崎満弘⁵・原田隆典⁶・横田漠⁶

¹正会員 博(工) (株)国土開発コンサルタント技術本部(〒880-0005 宮崎市大工3丁目155)

²正会員 工修 (株)熊谷組 土木事業本部(〒162-0821 東京都新宿区津久戸町17-1)

³正会員 工修 (株)建設技術研究所 技術第一部(〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

⁴学生会員 宮崎大学 大学院 土木環境工学専攻(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

⁵正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部 土木環境工学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

⁶正会員 工博 宮崎大学教授 工学部 土木環境工学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

本研究は、岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による判定」の定量的評価を目的としている。本論文では、著者が考案した「応答音圧パルス勾配法」における打診音の発生と伝播を空間的に把握することを目的として、セメントモルタルやセメントベントナイトモルタル等の材料で人工的に製作した模擬岩石の打診音を分析し、打診直後のハンマー(鋼球)周辺の音場での音圧分布の時刻歴変化をビジュアルに捕らえた。その結果、これまで著者が概念的に示してきた打診音の発生と伝播において、初期の打診音がマイクロフォンに伝播するまでの経路として1)鋼球中を通して空気中を伝播してくる音と2)空気中のみを伝播してくる音の2種類が存在すること等、打診音の空間分布特性を把握し解釈の妥当性を示す。

Key Words : quantitative evaluation index for rock mass classification, hammer tapping sound, response sound pressure pulse inclination, non-destructive testing of material

1. はじめに

岩盤分類は多くの分野で様々な形式のものがあり、利用の仕方も様々である¹⁾²⁾。岩盤分類の要素には、例えば一軸圧縮強さ、ハンマー打診音、風化の程度、地山の弾性波速度、割れ目の間隔、RQD等があり、大きくは構成岩石の性質と不連続面の性質に関するものに分けられる。これらの岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による判定」は、岩石、岩盤、ボーリングコア等の表面をハンマーでたたき、その手ごたえ、音、破面を観察することによって岩石や岩盤の硬さやゆるみを任意の段階に区分するもので、この判定方法は全ての岩盤調査の段階で行われ、岩盤調査の基本である。打診は医学のみならず日常の様々な分野で行われている原始的な方法ではあるが、直感的に岩盤の性質を体得できる現場的で簡易な方法である。しかしながら、この指標は例えばハンマーによって打診すれば、「澄んだ音を出す」または「濁った音を出す」といった定性的な表現で岩盤分類に用いられ

ているため、個人の能力と経験によるところが大きく、判定に個人差があり、定量的でない。

このような問題点を鑑み、著者らは定性的な表現で評価されている打診音の特徴を把握することを目的としてマイクロフォン等を使ってハンマーの打診音波形(音圧の時刻歴変化)を測定し、その波形の形状や振動数特性を分析することで、岩石や岩盤の力学的性質や物性値を定量的に評価することを試みている³⁾⁴⁾。その中で、セメントモルタルやセメントベントナイトモルタル等の材料で人工的に製作した模擬岩石を対象にした打診音実験の結果からは、供試体の形状・寸法や境界条件に影響されることなく、模擬岩石等の力学的性質や物性値を評価する指標になり得るものが音圧の立ち上がりに現れることを見出し、「応答音圧パルス勾配法」を提案した³⁾⁴⁾。また、金属(ステンレス鋼、銅、アルミニウム)、塩化ビニール、天然ゴム等といった供試体の製作や加工が容易な材料を対象にした打診音実験の結果からは、音圧の立ち上がりの勾配に影響を及ぼす領域が供試体の打診方向

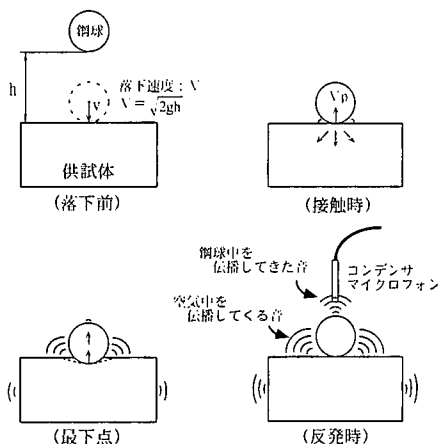


図-1 打診音の発生概念図

および打診直角方向にわたって存在することを確認し、この打診条件（鋼球の直径、質量、落下高さ）に応じた影響領域の大きさによって供試体の最小寸法が定められること、すなわち「応答音圧パルス勾配法」によって供試体の打診位置近傍の一定領域内の物性や状態が評価できることを示した³⁾。さらに、「応答音圧パルス勾配法」の実際問題への適用として、宮崎県児湯郡木城町で採取された中新世中期の中粒木城花崗閃緑岩の岩盤ボーリングコアを対象にした打診音実験からは、土質地盤のボーリングコア柱状図における標準貫入試験のN値のように地層の強度変化や変形性の変化を定量的に表現しうる指標、すなわち岩盤のボーリングコア柱状図において構成岩石の強度や変形性に関する定量的指標として、「応答音圧パルス勾配」は適用性があることを示した⁶⁾。

本研究は、岩盤分類において重要な地質要因である構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）と不連続面の性質（岩盤中に分布する割れ目の状態など）のうち、構成岩石の性質に関する定量的な評価指標の確立を最終目的としている。本論文は、「応答音圧パルス勾配法」に関する既往の研究において、これまで概念的に示してきた打診直後のハンマー（鋼球）周辺の音場における音圧の時刻歴変化をビジュアルに示し、著者らが概念的に述べてきた打診音の発生と伝播に関する解釈の妥当性を示すことを目的としている。

本論文では、セメントモルタルやセメントベントナイトモルタル等の材料で人工的に製作した模擬岩石を対象に、材質と物性が異なる供試体を打診し、その打診音波形（音圧の時刻歴変化）をマイクロフォンの位置を変えて測定し、各々の測定位置での音圧波形の形状や振動数特性を分析することで、「応答音圧パルス勾配法」における打診音の発生と伝播の空間分布特性を把握する。

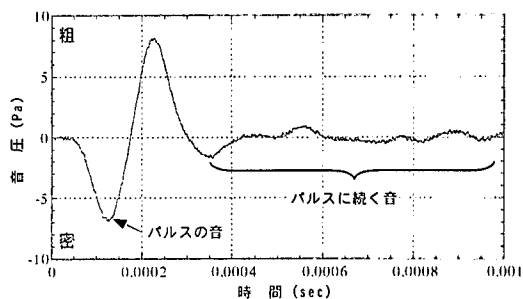


図-2 パルス音とパルスに続く音

2. 既往の研究における打診音の概念的な発生機構と応答音圧パルス勾配法の定義

物体と物体が衝突したときに発生する音の機構については、Adnan Akay によって次の5つの発生要因に分類されている⁹⁾。①衝突直前の物体間にある空気は排除により発生する音、②衝突による物体の急激な速度変化により発生する音、③物体の接触によって生じた接触面の変形により発生する音、④衝突による変形から生じた弾性波の伝播により物体各部から発生する音、⑤衝突によって生じた物体の破壊により発生する音。これらのなかで、「応答音圧パルス勾配法」で対象にしているような打診音の立ち上がりの時間内では、主に③あるいは④に起因する音が対象になるものと解釈している^{3)~4)}。すなわち、図-1の打診音の発生概念図に示すように鋼球が供試体に衝突すると、鋼球と供試体のそれぞれの接触面付近は瞬間的に変形する。このとき接触面付近では空気の体積は膨張し、相対的に負の圧力状態（粗の状態）になり、音波が発生し伝播する。また鋼球と供試体のそれぞれの媒質内においては衝突による変形から生じた弾性波が伝播するが、それぞれの媒質の変形モードを考えると、打診直後には接触面近傍で相対的に正の圧力状態（密の状態）になり、これに伴う音波が卓越して媒質内を伝播することが予想される。特に鋼球の場合には空気とのインピーダンスの違いが大きいため、鋼球表面から透過していく音圧は僅かで大半は反射するが、鋼球表面の粒子速度は約2倍に増幅する。この粒子運動によって鋼球表面においては常時絶えず衝突している空気中の分子が強く弾かれる。このために鋼球表面では相対的に正の圧力状態（密の状態）の音波が発生し伝播する。このように異なった発生要因で別々の場所に発生した音波はその周辺に伝播していき、時間の経過とともに大半は干渉を起こすが、「応答音圧パルス勾配法」で対象にしている音波は鋼球表面から発振される音波のなかでも他の音源からの音波との干渉が少ないことが実験的に説明できる音波の

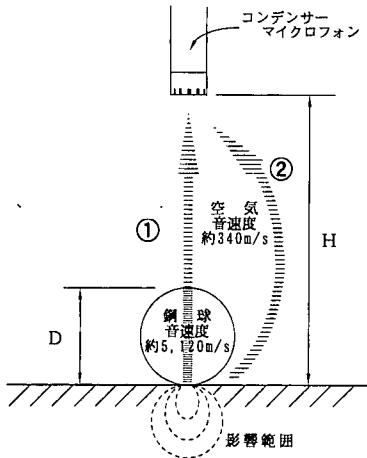


図-3 打診音の伝播経路と影響範囲の概念図

立ち上がりの部分であると考えられる^{3)~8)}(音波の厳密な分析は本研究では行っていない)。

例えば、図-2の打診音の例(鋼球を落下させたときに発生した打診音圧波)に示すように、ハンマーと被打診物の衝突時の急激な変形による音(パルス音)と、その後のハンマーと被打診物の各々に生じる自由振動や内部の共振による音(パルスに続く音)に分類できる¹⁰⁾。前者(パルス音)の成分は被打診物の材料特性(力学的性質と物性値)を主に反映し、後者(パルスに続く音)の成分は両者の材料特性に加えてハンマーの形状・寸法や、被打診物の形状・寸法および境界条件等の物理特性に強く支配されるものと解釈しデータを整理したところ、既往の研究^{3)~8)}で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。したがって、コンクリート構造物や木材のように形状・寸法や境界条件が予め明確なものについては、パルスに続く音すなわち固体中を伝播する振動を分析することで、その固体全体の平均的な物性や状態等を評価することが可能であろう。一方、岩石では形状・寸法がまちまちであり、岩盤では半無限状態に拡がり、さらに境界条件はまちまちで不明確である。このようなことを考慮すると、「パルス音すなわち衝突時の変形によって発生した音圧」を分析することで打診位置近傍の物性や状態等を評価することが重要と思われる。

既往の研究^{3)~8)}で供試体に用いた種々の材料に対する打診音の実験結果から、被打診物の材料特性は主に音圧波形の初期の部分に反映されていることが考えられるので、パルス音の中でも特に音圧波形の立ち上がりの勾配(音圧の時間的变化に相当する)に着目している。いま、初期の打診音がマイクロフォンに伝播するまでの伝播経路を考えると、図-3に示すように①の鋼球中を通して空气中を伝播してくる音と②の空気中のみを伝播してくる

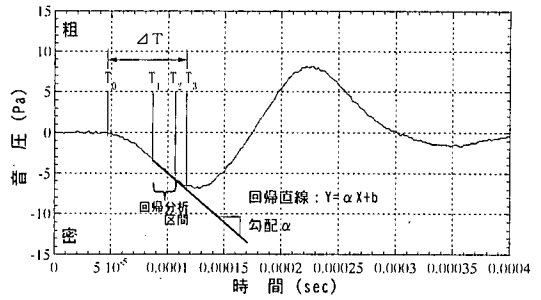


図-4 応答音圧パルス勾配の回帰分析区間

音の2通りが考えられる。この経路の違いによって生じる到達時間差を簡単に見積もるために、図-3に示す②の経路の長さ(本当の伝播経路は不明)をHとして、式(1)を求めた。したがって、少なくともこの ΔT 時間内には最初に鋼球中を通して伝播してきた音のみが存在する。すなわち、空気音速度(約340m/s)と鋼球音速度(約5120m/s)の違いから打診直後に鋼球中を最初に伝播してくる「被打診物の材質特性を含んだ音圧」が式(1)で見積もった ΔT 時間内に現れていると解釈した^{3)~8)}。また種々の音圧波形の立ち上がりの部分を見ると、 ΔT 時間程度の初期部分では、図-4の例に示すように到達時間差 ΔT の間において、音圧波形は曲線的な変化から直線的な変化に移行することが認められるので、解析ではこの直線的に変化する音圧波形の勾配に着目している。ここで、図-4に示すように音圧波形の立ち上がり部分の一定時間($T_1 \sim T_2$ 間)において、回帰分析した回帰直線の勾配の値を「応答音圧パルス勾配」と定義しデータを整理したところ、既往の研究^{3)~8)}で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。

$$\Delta T = \frac{H}{C_A} - \left(\frac{D}{C_S} + \frac{H-D}{C_A} \right) \quad (1)$$

ここに、 C_A 空気音速度(約340m/s)
 C_S 鋼球音速度(約5120m/s)
 H マイク高さ(80mm)
 D 鋼球の直径(27mm)
 $\frac{H}{C_A}$: 経路②での伝播時間

$\left(\frac{D}{C_S} + \frac{H-D}{C_A} \right)$: 経路①での伝播時間

直線部分の勾配を求めるために次のような方法に従った。

①目測によって音圧波の初動の原点 T_0 を決める(図-4参照)。

②式(1)の見積もり時間 ΔT (実験に用いた直径が27mm

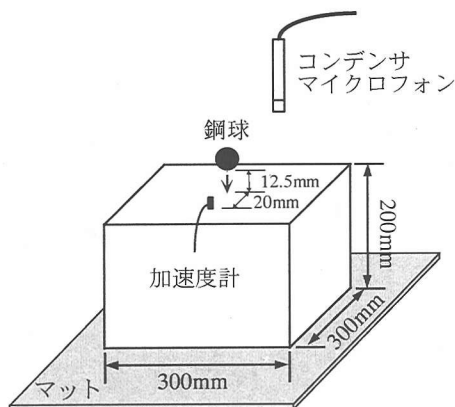


図-5 実験概念図

の鋼球の場合では0.074ms)に T_0 を加えた時刻 T_3 を決める。

③図-4の例に示すように音圧波形は時間 ΔT 内で曲線的な変化から直線的に変化し、かつ T_0 や ΔT は見積もり時間であるため、 T_3 よりも少しもどった T_2 と T_1 の時間内で直線勾配を決めるものとした。本研究の実験データは、 $T_2 = T_3 - 0.014\text{ms}$ 、 $T_1 = T_2 - 0.02\text{ms}$ として整理した。なお、0.02msは直線勾配を11個のデータ(サンプリング間隔:0.002ms)の回帰分析から決めるために設定した数値である。ここでは回帰分析による相関係数が0.9以上を採用した。また0.014msに関しては任意であるが、本研究の実験データではこのくらいの時間を設定する方が回帰分析の相関係数が最も高くなるようなので、これを決めている。また、ノイズは図-4に示す程度で小さいが、仮にノイズ等により T_0 の決め方に不確実性があっても、上記のように直線勾配を決めているので、その勾配には T_0 、 ΔT は影響していないと判断される。

3. 実験

(1) 実験概要

前章では、既往の研究³⁾⁻⁹⁾において概念的に示してきた打診音の発生機構と、応答音圧パルス勾配法の定義について述べたが、本章では「応答音圧パルス勾配法」における打診音の発生と伝播機構を空間的に把握することを目的とした実験について述べる。実験では図-5に示すようにマット(厚さが2mmの長繊維ポリエステル不織布)の上に設置した30×30×20cmの供試体を打診し、このときの供試体表面の一定位置での上下方向振動加速度の時刻歴と、図-6(a)に黒塗りで示した合計72箇所の各々

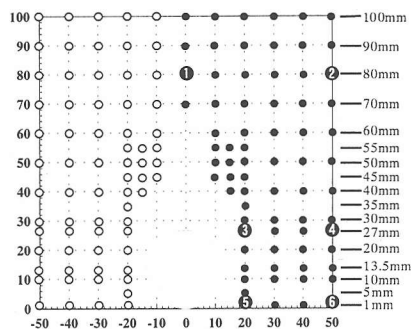


図-6(a) 測定したマイクロフォンの設置位置(黒塗り)

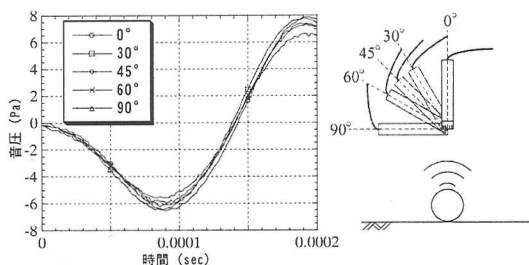


図-6(b) マイクロフォンの傾斜角度と音圧原波形の関係(M-5供試体)

の位置において音圧の時刻歴を同時に測定した。音圧を測定したマイクロフォンは実験の振動数範囲6kHz以下の指向性は極めて小さく、例えば図-6(b)のようにマイクロフォンの傾斜角度を変えても音圧波形の違いは小さい。そこで、実験ではマイクロフォンは供試体表面に対して垂直(0度)になるように下方に向けて全てセットした。ただし、音圧の測定は72箇所を同時に測定することが物理的に困難であったため、同一のマイクロフォンを用いて別々に72回の打診を行いデータを収集した。そこで、これら72組のデータの絶対時間を調整するために、各組の上下方向振動加速度波形の立ち上がりの時間を測定基準とし、この時間を原点($t_0=0.00\text{ms}$)とした。打診は供試体中央部付近に鉛直上方から、鋼球を落下させて行った。ここで、既往の研究³⁾では金属のように打診痕(圧痕)が見られ塑性変形が生じるような材料においては、一定の打診位置で連続して打診すると、1打診目に比べて2打診目以降の応答音圧パルス勾配の値が大きくなり、またその値は一定値に収束していく傾向があった。そこで、今回の供試体においても予備実験で確認した結果、5回程度の打診で一定値に収束することが分かったので、実験では一定の打診位置で10回の打診(空打診)を行った後に、実験を開始した。供試体には砂岩を模擬したものとしてセメントモルタルの1種類と、泥岩を模

表-1 供試体の示方配合

材質	供試体 No.	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	ベントナイト セメント比 B/C	セメント量 (kg/m ³)
セメントベント ナイトモルタル	B-4	1.52	—	0.132	530
	B-7	0.65	—	0.070	1000
セメントモルタル	M-5	0.50	1.80	—	630

セメント:早強性ポルトランドセメント

表-2 材令 28 日での供試体の力学的性質と物性値

材質	供試体 No.	密度 ρ (t/m ³)	縦波伝播速度 V_p (m/s)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	弾性係数 E (MPa)
セメントベント ナイトモルタル	B-4	1.43	1940	3.92	1983
	B-7	1.78	2900	24.20	10305
セメントモルタル	M-5	2.19	3930	49.50	20653

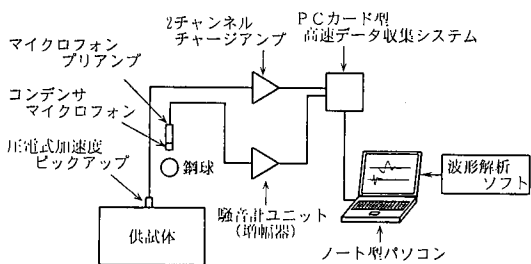


図-7 測定装置ブロックダイアグラム

擬したものとしてセメントベントナイトモルタルの2種類の合計3種類を製作し実験に供した。表-1に各供試体の示方配合を、表-2に同じ示方配合で製作した円柱供試体から得られた材令28日での力学的性質と物性値を示す。ここに、弾性係数は一軸圧縮強さの1/3の応力状態での割線係数である。

(2) 実験方法

打診は供試体の鉛直上方から電磁石を用いて鋼球 G4805-SUJ2（直径 27mm，質量 80.20g）を供試体の表面に対して 12.5mm の高さから自由落下させて行った。打診音は図-6(a) に黒塗りで示した合計 72 箇所各位でコンデンサーマイクロフォン（リオン株式会社製，UC-30 型）を用いて測定した。また，供試体表面の上下方向振動加速度は打診点から 20mm 離れた位置で圧電式加速度ピックアップ（リオン株式会社製，PV-90B）を用いて測定した。これらの測定結果は，データ間隔 0.002ms でノ

ート型パソコンにデジタル量として記録し解析に用いた。これらの機器の構成は図-7 の測定装置ブロックダイアグラムに示す。

4. 結果と考察

(1) 原波形と周波数解析

各供試体ごとに供試体表面での上下方向振動加速度原波形と図-6(a)に示した72個の音圧測定箇所の中で代表的な位置(①, ③, ⑤)での音圧原波形を図-8, 10, 12に示す。音圧波形の初期の部分を見てみると、供試体表面から1mm離れた位置(⑤)では最初にパルス状の「粗の音」が到達しているのに対して、鋼球の頭部より上方の位置(①, ③)では「密の音」が最初に到達している。これらのことから、打診直後には、鋼球の頭部から「密の音」が発振され、打診位置に近い供試体表面から「粗の音」が発振されていることが想定される。このことは、2章で述べたように打診直後の鋼球や供試体表面の変形モードと一致している。なお、図-8, 10, 12には参考までに波形の全継続時間(0.008sec)での周波数解析結果(パワー・スペクトル)を示している。

(2) 音圧原波形の初期の部分

図-6 (a) に示す代表的な位置 (①～⑥) での音圧原波形の初期の部分の拡大図を図-9, 11, 13 の上段 (a) に示す。これらの中で、「応答音圧パルス勾配法」におけるマイクロフォンの位置に相当する①において、3種類の供

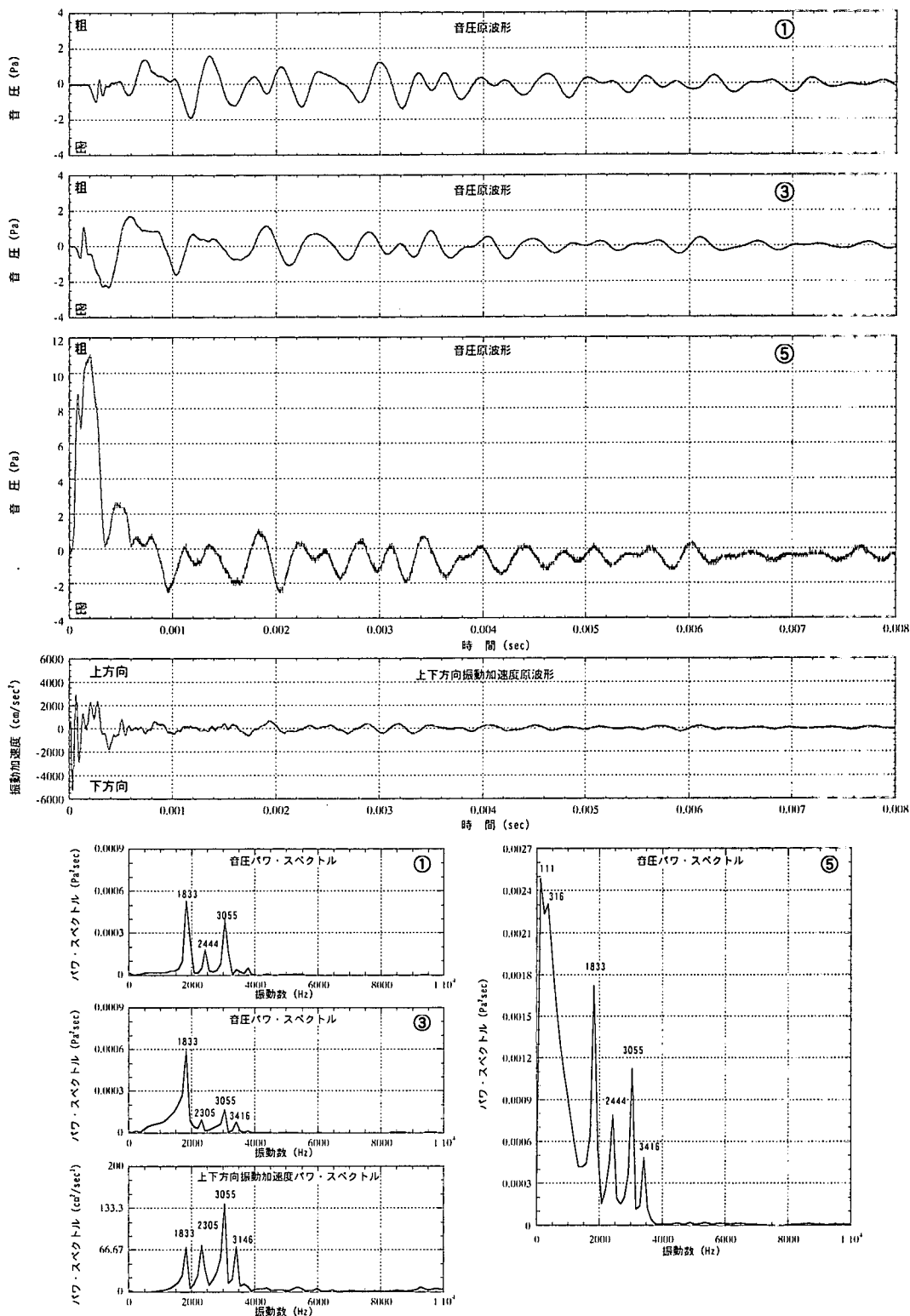


図-8 音圧原波形と上下方向振動加速度原波形、およびその周波数解析結果：B-4 供試体

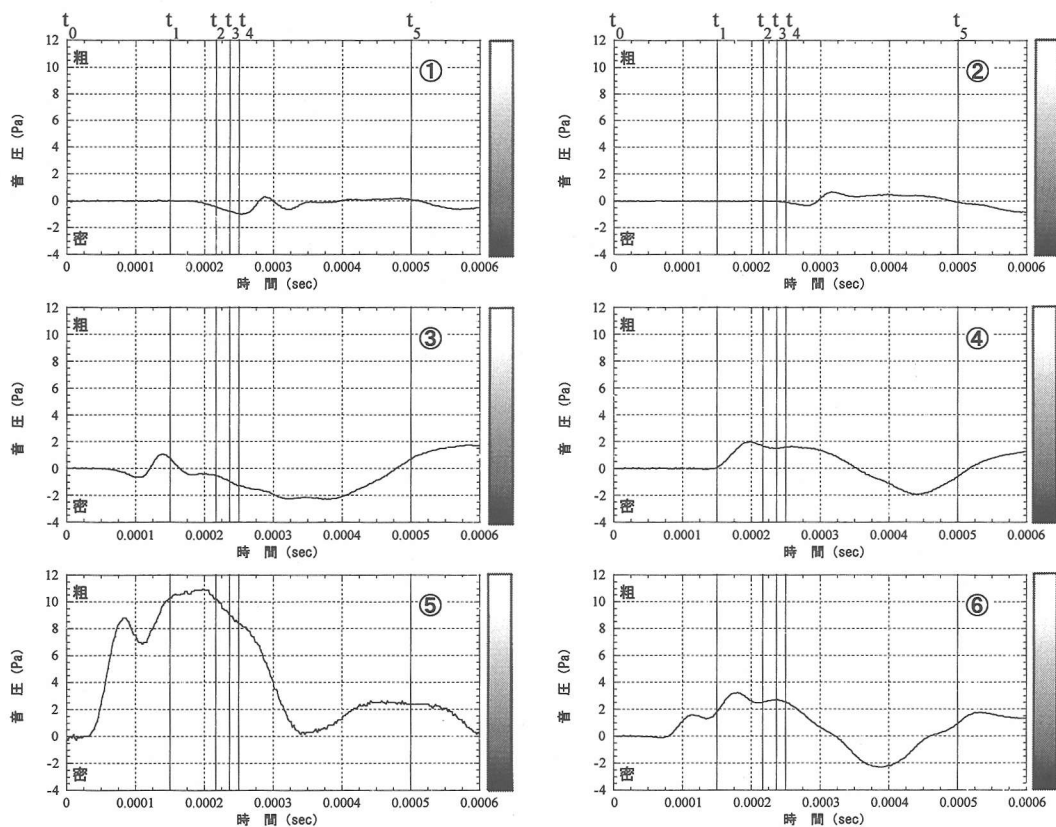


図-9 (a) 代表的な測定位置における音圧原波形の初期部分の拡大図:B-4 供試体

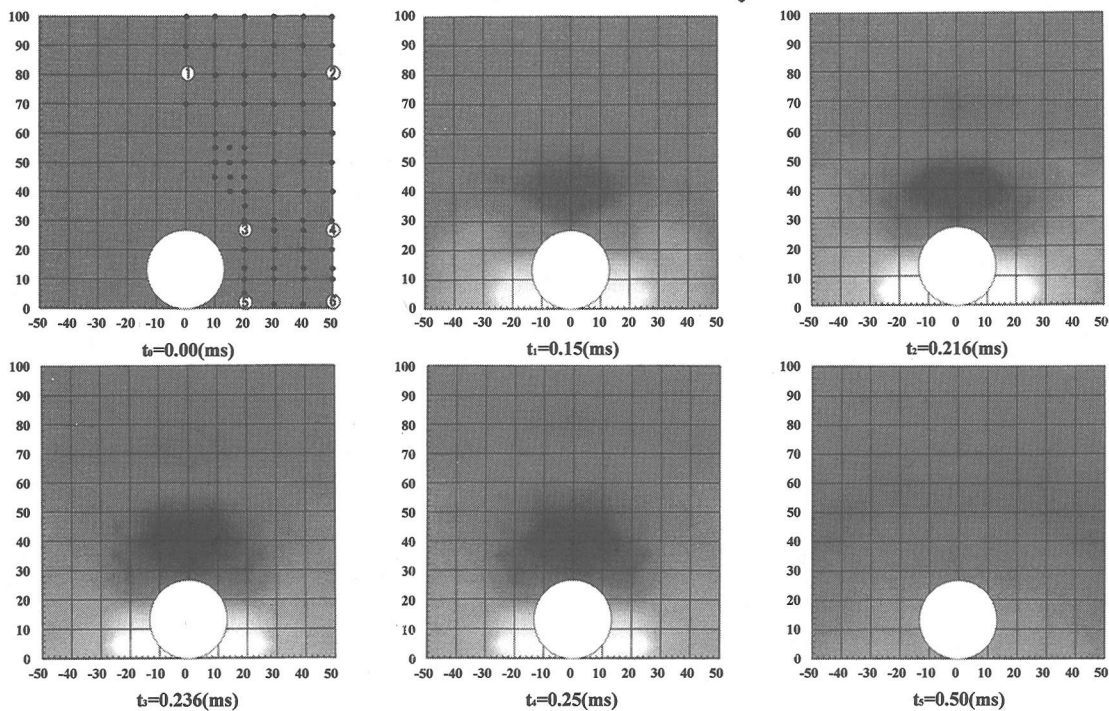


図-9 (b) 鋼球周辺の音場での音圧分布図:B-4 供試体

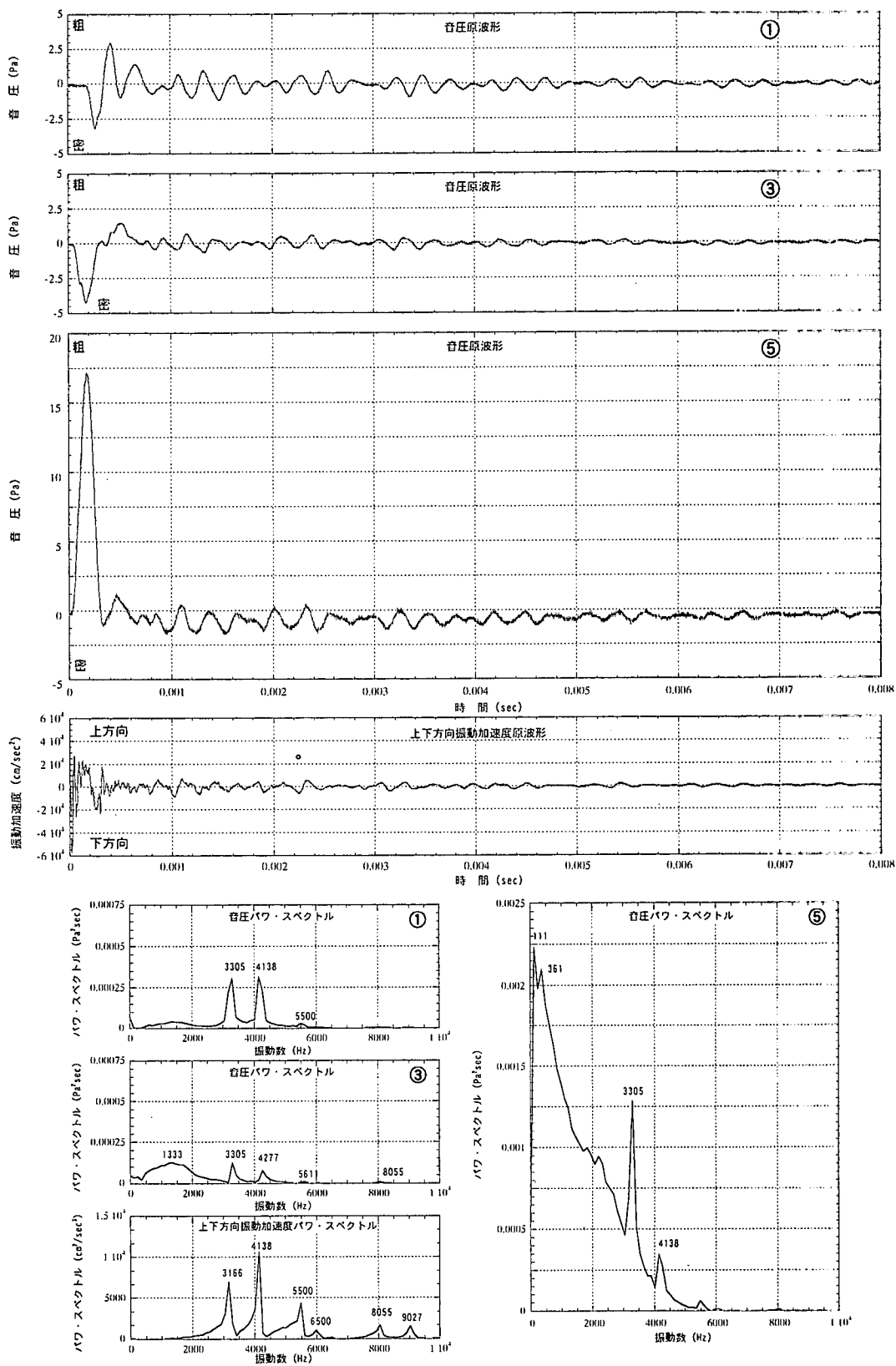


図-10 音圧原波形と上下方向振動加速度原波形、およびその周波数解析結果：B-7 供試体

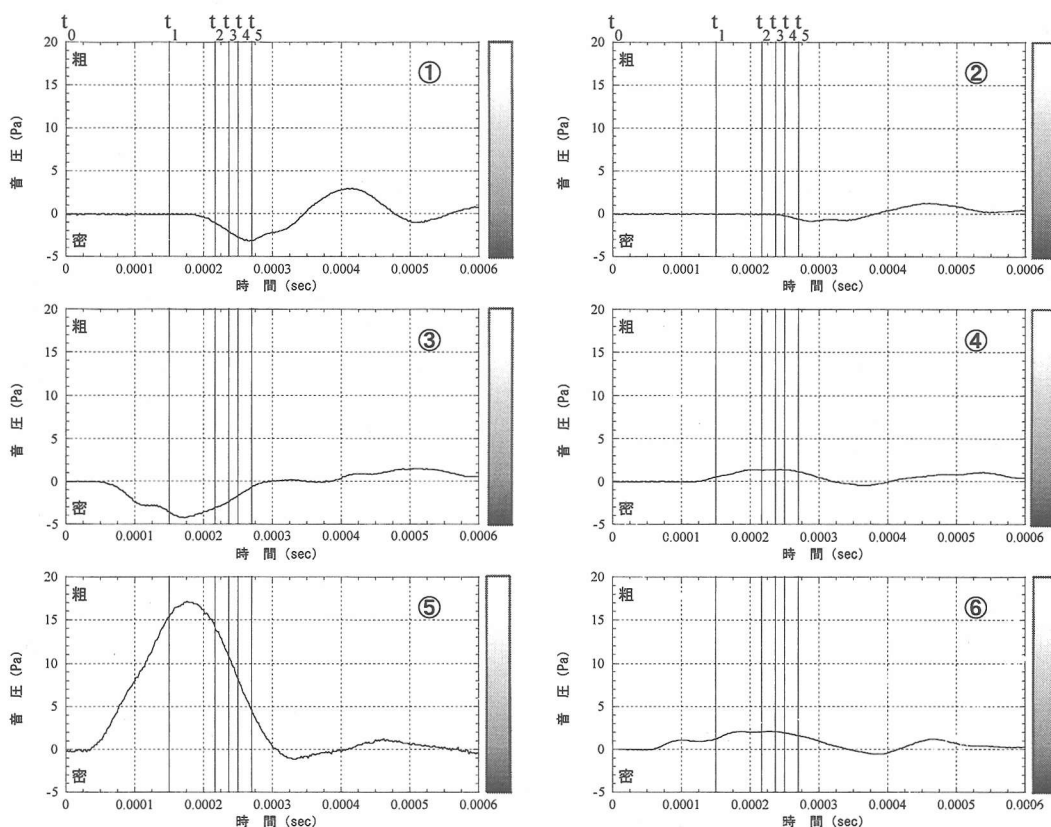


図-11 (a) 代表的な測定位置における音圧原波形の初期部分の拡大図:B-7 供試体

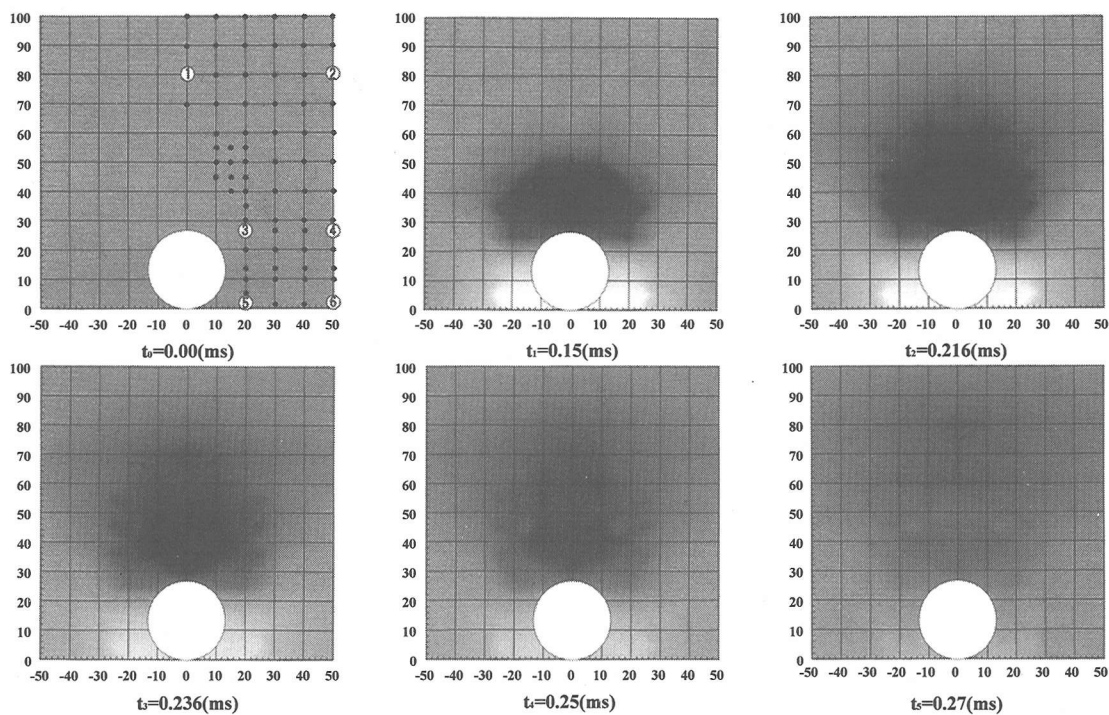


図-11 (b) 鋼球周辺の音場での音圧分布図:B-7 供試体

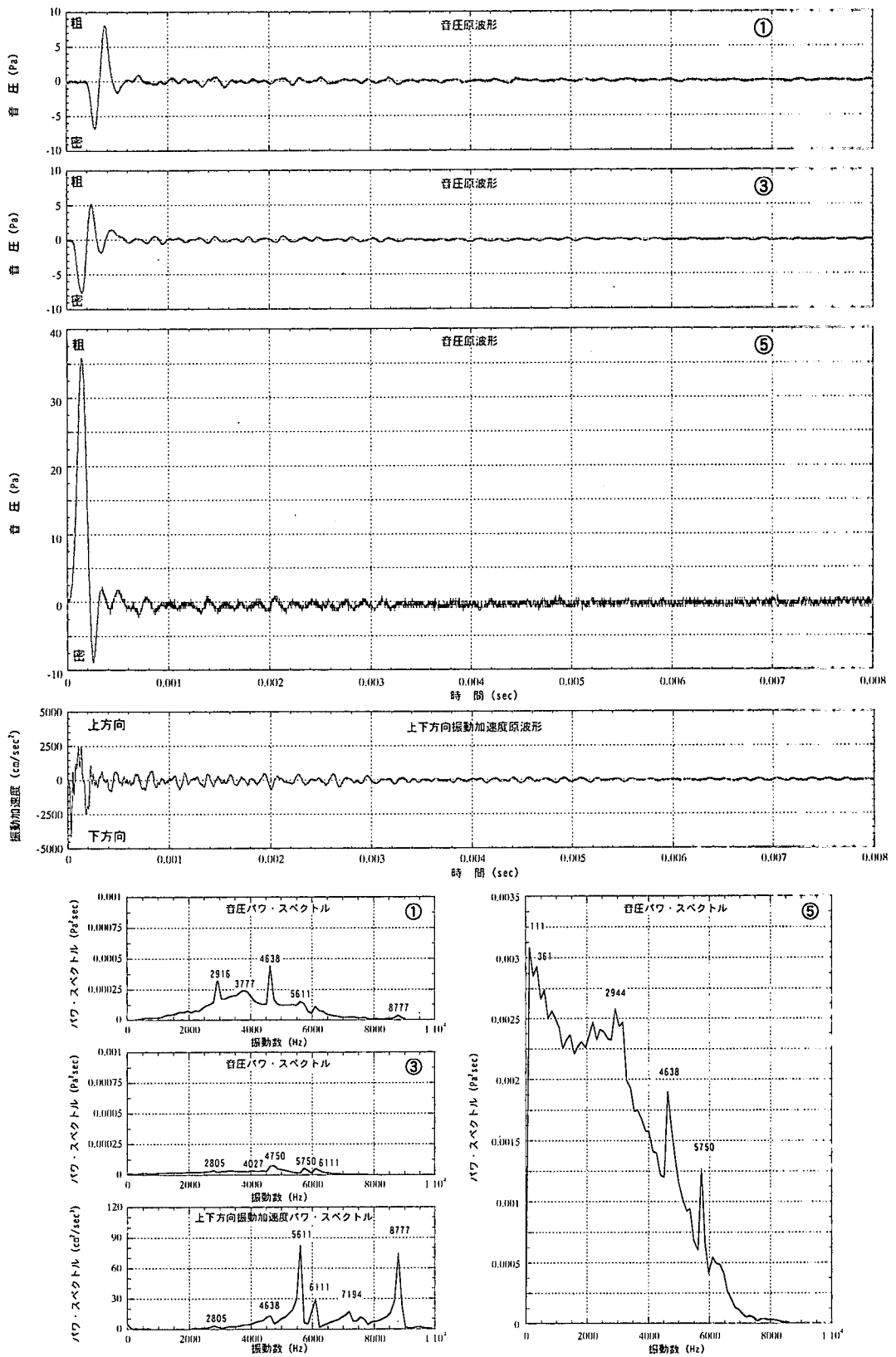


図-12 音圧原波形と上下方向振動加速度原波形，およびその周波数解析結果：M-5 供試体

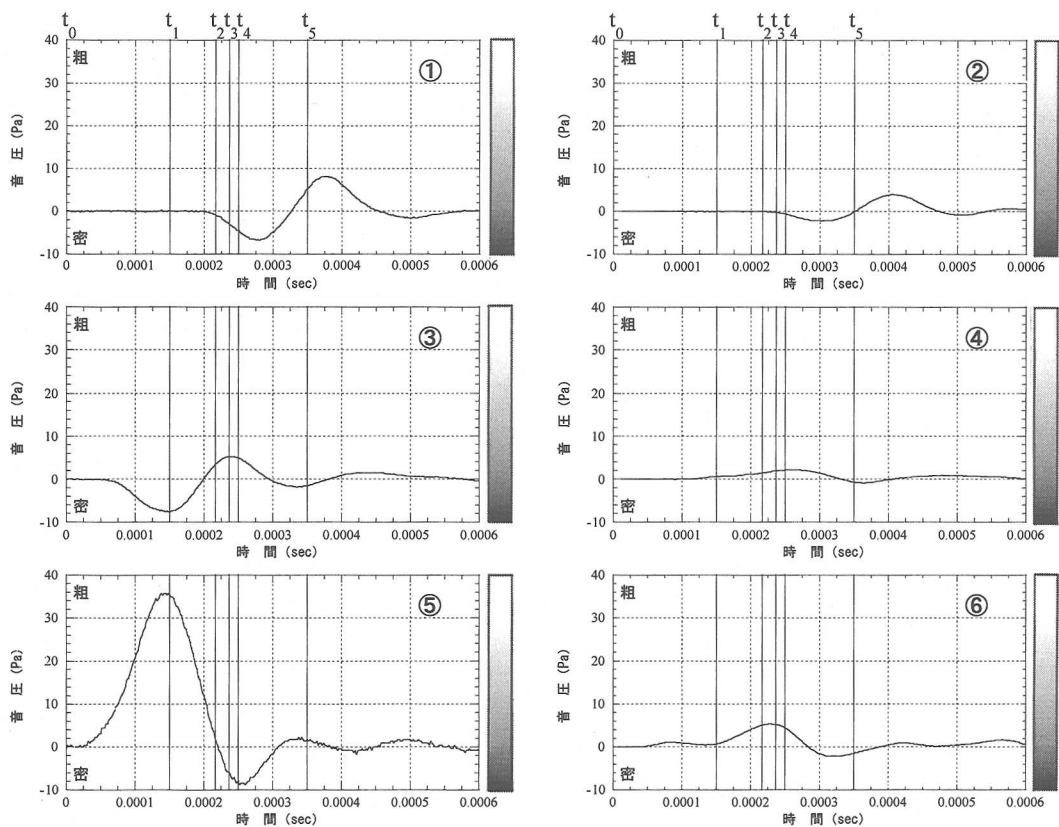


図-13 (a) 代表的な測定位置における音圧原波形の初期部分の拡大図:M-5 供試体

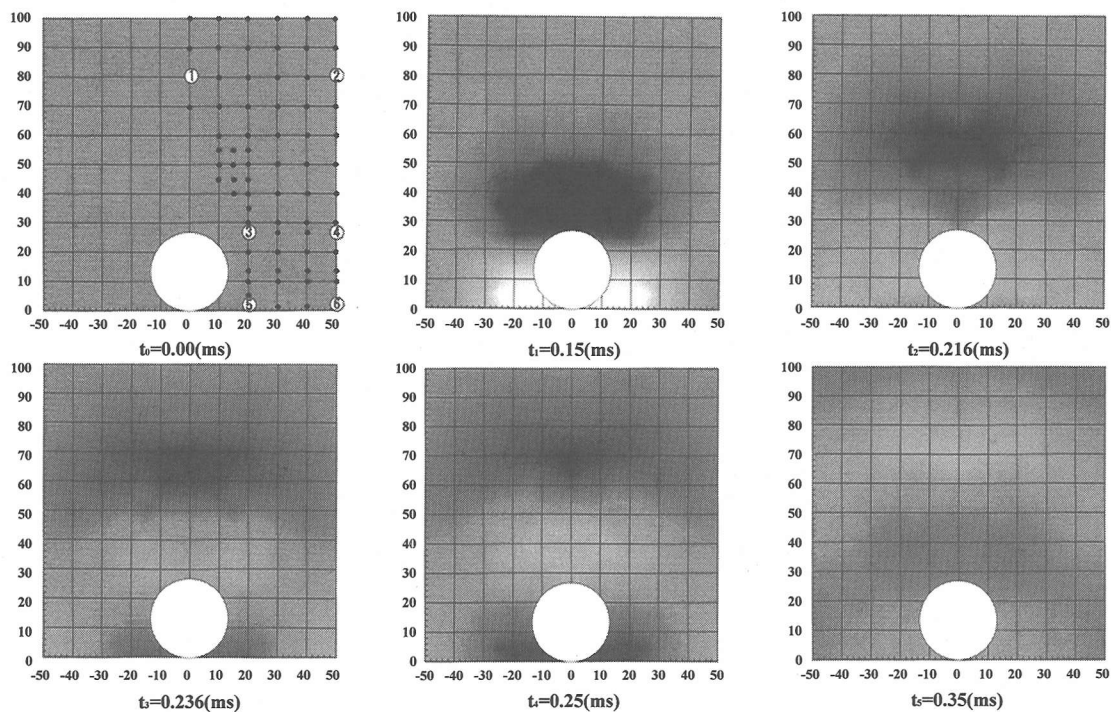


図-13 (b) 鋼球周辺の音場での音圧分布図:M-5 供試体

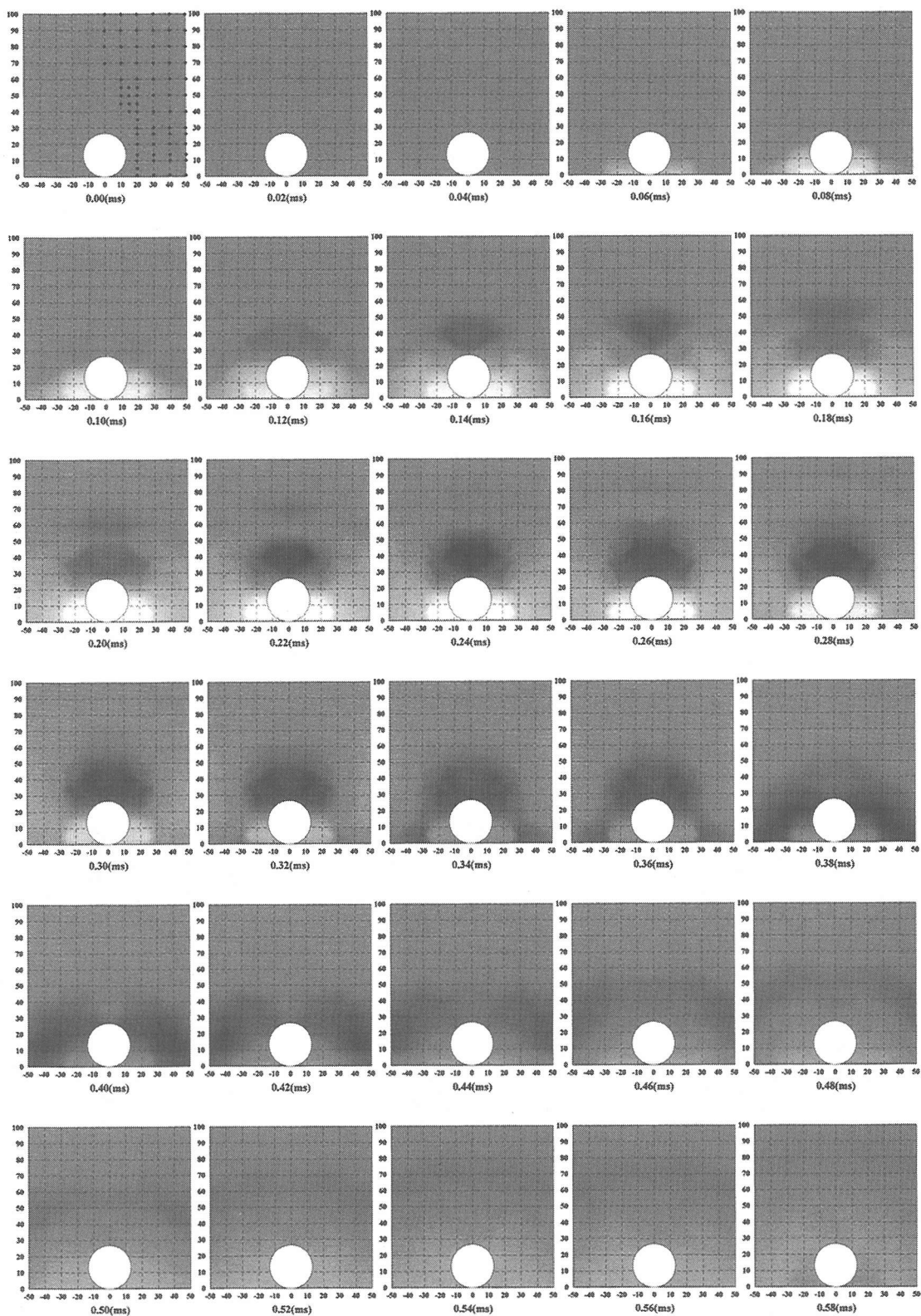


図-14 鋼球周辺の音場での音圧分布の連続図：B-4 供試体

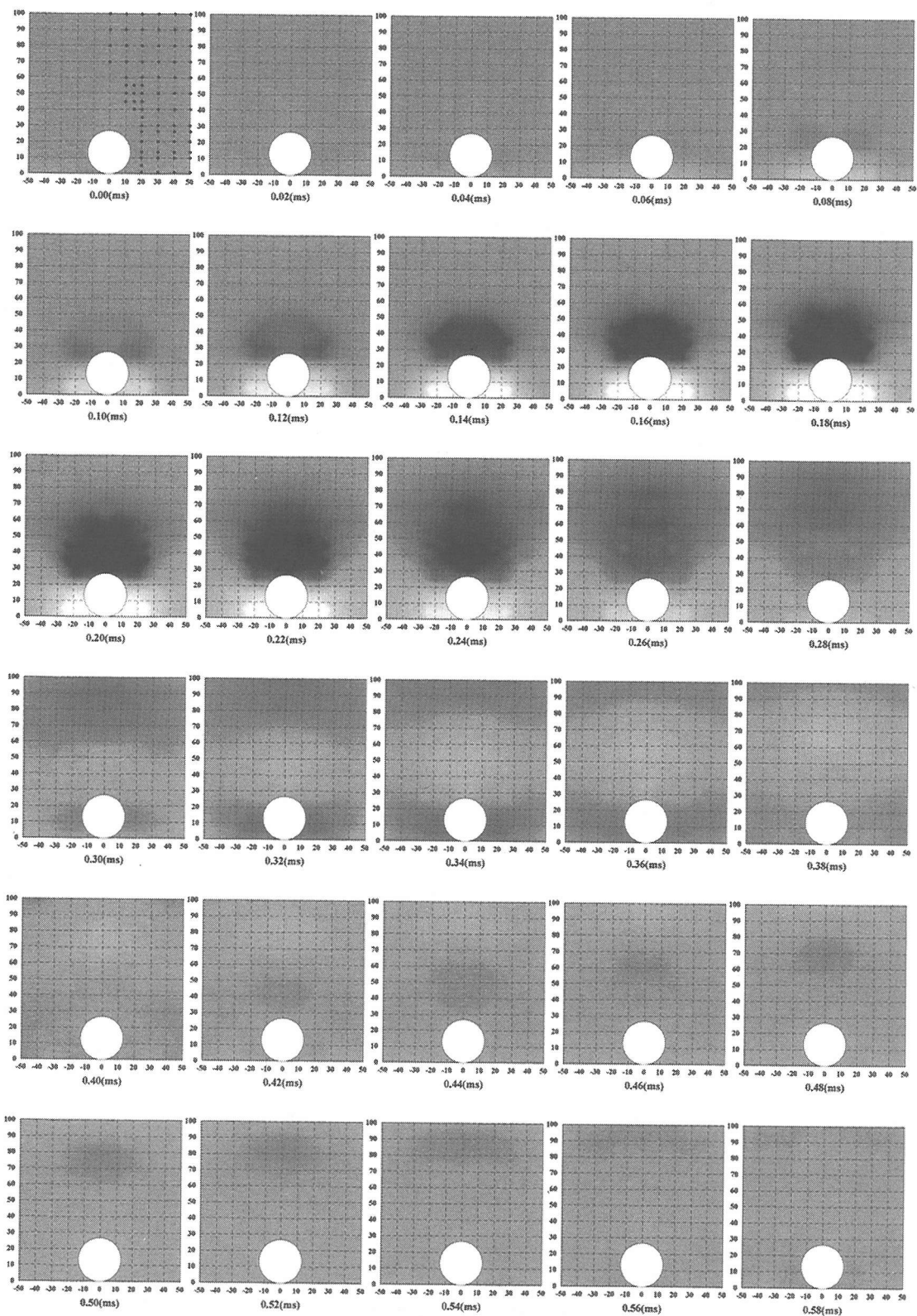


図-15 鋼球周辺の音場での音圧分布の連続図：B-7 供試体

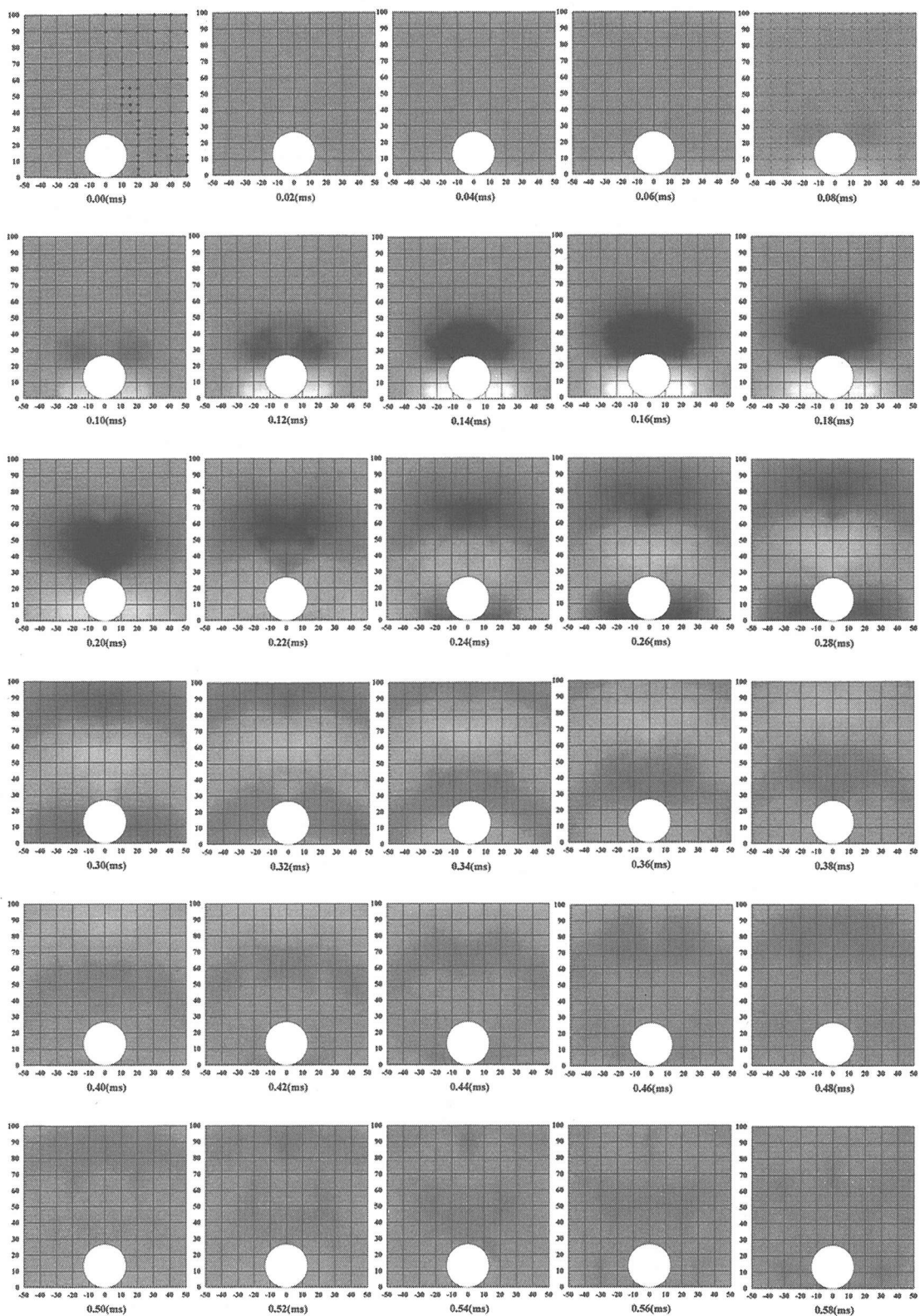


図-16 鋼球周辺の音場で音圧分布の連続図：M-5 供試体

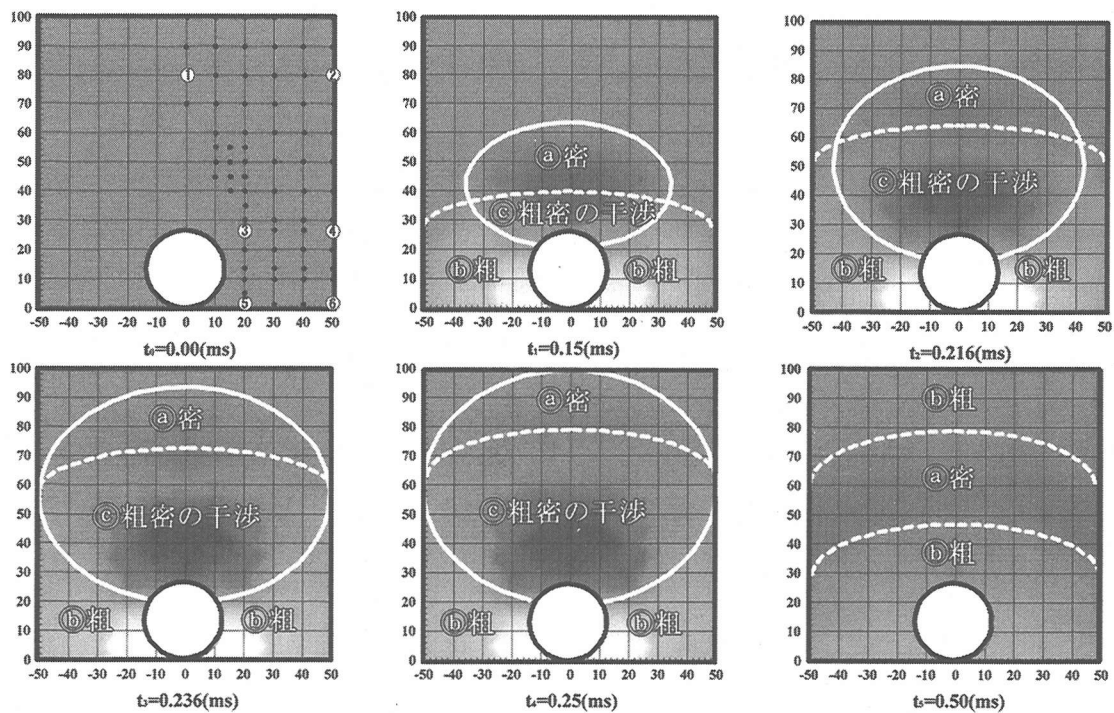


図-17 音圧分布と音の成分による領域 (a), (b), (c) の関係:B-4 供試体

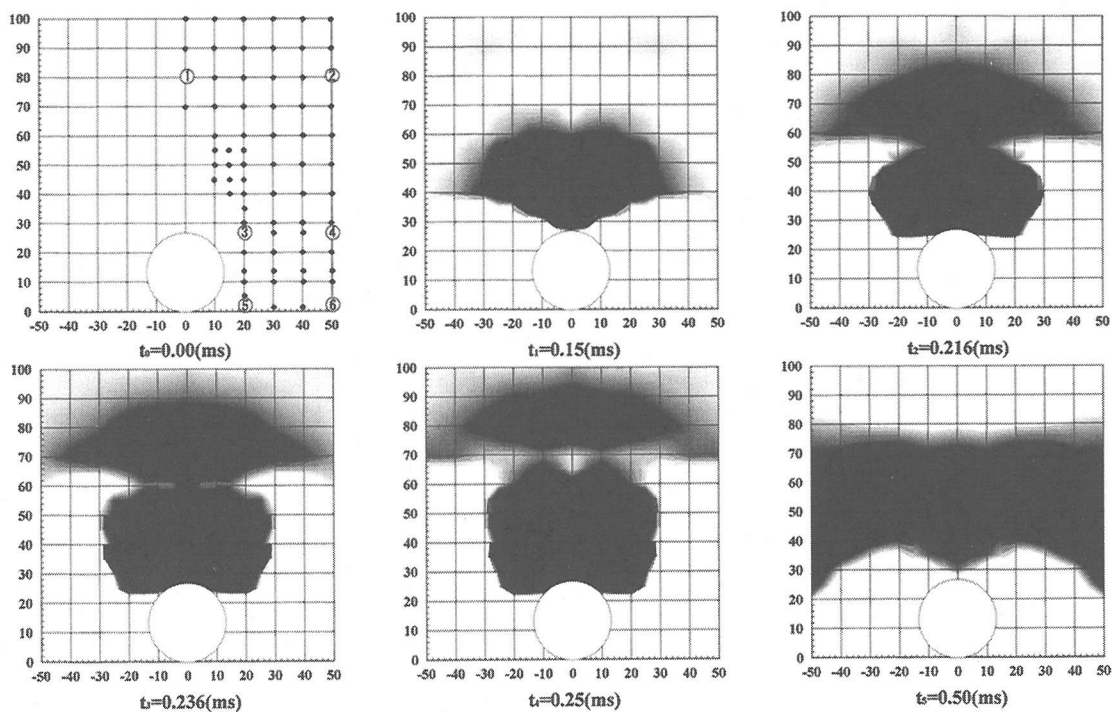


図-18 音圧分布における「密の音」の存在領域:B-4 供試体

試体で音圧の立ち上がりの部分を比較すると、これらはいずれも「密の音」であることが分かる。また、立ち上がりの時間 T_0 は目測で $T_0 = 0.000175 \text{ sec}$ (0.175ms) と読みとることができる。

(3) 打診直後の鋼球周辺の音場における音圧分布の時刻歴変化

図-9, 11, 13 の上段 (a) に示した $t_0 \sim t_5$ の各時刻における 72 個の音圧データを用いて、STANFORD Graphics (日本ビジュアルニューメリックス株式会社製) のスペクトラルプロットによりデータの補間を行って描いた音圧の分布図を図-9, 11, 13 の下段 (b) に示す。ここで、 t_2 (0.216ms) と t_3 (0.236ms) は実際に応答音圧パルス勾配を求めている時間帯の始まりと終わりの時間である。 t_1 (0.15ms), t_4 (0.25ms), t_5 (0.50ms) は音圧分布図をプロットする任意の時間である。また、図-14, 15, 16 には B-4, B-7, M-5 の供試体における各時刻の音圧の分布図をさらに連続的に示す。ここで、音圧の分布図を描く際には、あらかじめ予備実験で音圧の分布は打診点を中心にして左右で対称性があることを確認したうえで、図-6(a) に示すように黒塗りの位置での音圧の実測データを、これらと対称の位置にある白抜き位置のデータとして用いた。

これらの結果、図-9, 11, 13 に示した鋼球周辺の音場における音圧分布図から、打診直後には、鋼球の頭部付近で「密の音」が発振され、打診位置近傍の供試体表面からは「粗の音」が発振されていることが分かる。また、鋼球の頭部を透過した最短伝播経路の波、すなわち打診直後の鋼球頭部付近の「密の音」の継続時間は硬い供試体ほど短く、軟らかい供試体ほど長くなる事が分かる。このことは鋼球と供試体との接触時間と鋼球から発振される音の継続時間が密接に関係しているためと考えられる。一方、打診位置に近い供試体の表面からは「粗の音」と「密の音」が交互に発振されている様子が図-14, 15, 16 から示される。これらのことから、例えば図-16 では応答音圧パルス勾配を求める t_2 (0.216ms) から t_3 (0.236ms) までの時刻では鋼球頭部は密であり、一方、鋼球と供試体との接触面付近では粗となっており、その時刻より後ではその分布が逆転してくる ($t=0.24 \sim 0.32\text{ms}$)。それより後は音圧も小さく、明確な粗密分布を見ることはできない。このような傾向は 2 章の図-1 で概念的に説明した様子を具体的に示している。著者がこれまで「応答音圧パルス勾配法」において、概念的に示してきた打診直後の音圧分布特性を具体的に示したものである。

(4) 打診直後の鋼球周辺の音場における音圧分布特性

本節では打診直後に、鋼球の頭部付近に現れる「密の

音」と打診位置近傍の供試体表面の「粗の音」が時間の経過に伴って伝播し干渉する様子を、B-4 供試体のデータを用いて考察する。

図-17 は鋼球の頭部付近から発振される音を実線で、打診位置近傍の供試体表面から発振される音を破線で示し、時間の経過に伴ってこれらの音が伝播していく様子を概念的に表現したものである。また、「密の音」と「粗の音」の存在領域を明瞭にする目的で、「密の音」のみを着色して表現したものを図-18 に示す。これから、音に含まれる成分によって鋼球周辺の音場は 3 つの領域に分類されることが分かる。その領域は、①鋼球の頭部付近に現れる「密の音」のみが存在する領域、②打診位置近傍の供試体表面の音 (まず最初に「粗の音」が発振し、その後は「密の音」と「粗の音」が交互に発振する) のみが存在する領域、③鋼球の頭部付近から発振される「密の音」と打診位置近傍の供試体表面から最初に発振される「粗の音」が干渉する領域である。

また、「応答音圧パルス勾配法」におけるマイクロフォンの位置は鋼球直上 80mm (図-17, 18 に示した①) であることと、図-17, 18 で実際に応答音圧パルス勾配を求めている時間は t_2 (0.216ms) から t_3 (0.236ms) であることから、「応答音圧パルス勾配法」で捕らえている音は上記③の領域に属するものであることが具体的に示される。

5. まとめ

著者らは、岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診音による判定方法」の定量的評価を目的とした研究を進めている。本論文では、セメントモルタルやセメントベントナイトモルタル等の材料で人工的に製作した模擬岩石を対象に、材質と物性が異なる供試体を打診し、その打診音波形 (音圧の時刻歴変化) をマイクロフォンの位置を変えて測定し、各々の測定位置での音圧波形の形状や振動数特性を分析することで、「応答音圧パルス勾配法」における打診音の発生と伝播について空間的に把握するとともに、応答音圧パルス勾配を求める時間帯の設定が適切であることが示された。

また、得られたいくつかの知見を本論文の結論として以下に記す。

- ① 打診直後には、鋼球の頭部付近から「密の音」が発振され、打診位置に近い供試体表面から「粗の音」が発振されている。
- ② 鋼球の頭部付近から発振される「密の音」の継続時間は硬い供試体ほど短く、軟らかい供試体ほど長くなる。このことは、鋼球と供試体との接触時間と鋼

球から発振される音の継続時間が密接に関係しているためと考える。

- ③ 打診直後の鋼球周辺の音場は音に含まれる成分によって 3 つの領域に分類されることが明らかになった。それらは、①鋼球の頭部付近に現れる「密の音」のみが存在する領域、②打診位置近傍の供試体表面の音（まず最初に「粗の音」が発振し、その後は「密の音」と「粗の音」が交互に発振する）のみが存在する領域、③鋼球の頭部付近から発振される「密の音」と打診位置近傍の供試体表面から最初に発振される「粗の音」が干渉する領域である。また、「応答音圧パルス勾配法」で捕らえている音は、図-17 に示すマイクロフォンの位置①と「密の音」の分布位置から、上記②の領域に属するものであることが示された。

これらは、音圧の時刻歴を多くの点で同時に測定したデータから得られた結論ではない。しかしながら、「応答音圧パルス勾配法」において、これまで著者らが概念的に述べてきた打診音の発生と伝播に関する解釈の妥当性を示せたものと考ええる。

今後は、打診音の発生と伝播機構について理論的解析や数値解析によるアプローチを行っていくとともに、鋼球と被打診物の接触の問題や半無限弾性体の点振源としての Lamb の問題についても取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 吉中龍之進、桜井春輔、菊地宏吉編著：岩盤分類とその適用、pp.1-142,1988.
- 2) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計・施工への応用、pp.341-342,1989.

- 3) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘：岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」の定量的評価方法に関する基礎的実験と考察、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、Vol.29, pp.236-240, 1999.
- 4) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘、原田隆典、横田漠：岩盤分類の定量的指標としての「応答音圧パルス勾配法」、土木学会論文集、No.638/III-49, pp.335-351, 1999.
- 5) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘、原田隆典、横田漠：「応答音圧パルス勾配法」の材料非破壊試験への適用性に関する基礎的研究、材料、第49巻、9号、pp.1042-1049, 2000.
- 6) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘、原田隆典、横田漠：「応答音圧パルス勾配法」の花崗閃緑岩コアに対する適用例、土木学会論文集投稿中
- 7) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘：岩盤分類の定量的指標としての「応答音圧パルス勾配法」に関する事例研究、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、Vol.30, pp.183-187, 2000.
- 8) 稲森光洋、御手洗良夫、船曳伸二、瀬崎満弘：岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察（その3）－実務用ロックハンマーによる打診音の特徴と被打診物の物性について－、土木学会第54回年次学術講演概要集、III-A384, pp.768-769, 1999.
- 9) Adnan Akay : A review of impact noise, *J. Acoustical Soc. Am.*, Vol.64, No.4, Oct.pp.977-987, 1978.
- 10) 伊東良浩、高橋浩、白木徳夫、小池哲生：打診法のトンネル掘削背面空洞調査への適用について（その1）、（その2）、土木学会第48回年次学術講演会概要集、pp.534-537, 1993.

(2000.2.17 受付)

GENERATION AND PROPAGATION OF HAMMER TAPPING SOUND ON “RESPONSE SOUND PRESSURE PULSE INCLINATION METHOD”

Mitsuhiro INAMORI, Yoshio MITARASHI, Shinji FUNABIKI
Minoru TURUSAWA, Mitsuhiro SEZAKI, Takanori HARADA and Hiroshi YOKOTA

This is one of the studies aimed at quantitative evaluation of the indices for rock mass classification that deals with “judgment method by the hammer tapping”. In this study, we examined tapping test using specimens from an artificial rock and analyzed the tapping sound. We visualized that distribution of the sound pressure changes with time on the sound field around a hammer immediately after the tapping. As a result, we confirmed that the initial tapping sound had two propagation routes to the microphone as opposed to what was conceptualized until now. One is through the steel ball and the air afterwards, the other is through the air only.