Sizing Technique of Water and Salt-water Solution Droplets: NGB (Dye)-gelatin Film Method

by

Ken-ichi USHIKI, Masafumi IMOTO, Seiji HANATANI and Koichi IINOYA

(Dept. of Chem. Eng., Kyoto University)

A Naphthol Green B (NGB) dyestuff gelatin film, coated on a slide glass, can be used for determining the size distributions of water or salt-water solution droplets. The stain sizes that remained after the evaporation of droplets that impacted a slide glass, are calibrated by using the solid particle tracer method, the silicone oil film method and the two-stages cascade impactor. The following results are obtained experimentally: 1) The calibration results using these three different methods agree well with each other, and the diameter of the droplets are 0.54 times the diameter of the stains, on the average; 2) The value 0.54 is almost independent of the droplet diameters, the concentration of NGB dyestuff and the velocity of the approaching droplet velocity within the experiment range; 3) The value of the ratio for 4% salt-water solution droplets is almost the same as that of water droplets; and 4) The best composition of gelatin sol is 10 ml of distilled water, 0.5 g of NGB dyestuff and 0.6 g of dried gelatine.

研究報告

鳴き砂の発音機構について*

Generating Mechanism of Harmonic Sound from Singing Sand

日 高 重 助**
Jusuke HIDAKA

三 輪 茂 雄**
Shigeo MIWA

1. 緒 言

砂の堆積層を適当な方法で圧縮すると明りょうな楽音を発生する鳴き砂***は Singing sand あるいは Musical sand などと呼ばれ世界中の多くの場所で見ることができる^①。したがってこの興味深い現象についての研究は古くからなされており、その粒子特性および発音機構に関して約40~50件以上にのぼる報告^②があるが、まだ十分納得できる発音機構の説明はない。

鳴き砂は適当な容器に充てんしてその堆積層に貫入棒を押し込むと容易に発音する。本報ではこの方法により発音させ鳴き砂粒子層が音を発生している状態の詳細な観察および粉体層の貫入現象の解析にもとづいて得られ

る鳴き砂粒子層の摩擦角特性と発生音の性質などについて調べ鳴き砂の発音機構を検討した。すなわち貫入棒により鳴き砂を発音させた時の発音現象は粒子同士の摩擦による音や粉体層の圧縮による層内の空気の噴出にもとづく空気力学的な音あるいは粒子層の振動による放射音ではなく、鳴き砂粒子層が顕著に示す Stick-slip 現象にもとづいて発生する周期的な貫入抵抗力が貫入棒に作用し貫入棒の縦振動を励振することにより放射される音であることを報告する。

2. 鳴き砂について

鳴き砂粒子の粒子特性について次の特徴が指摘されて

***“鳴り砂”と呼ばれることもあるが“鳴る”現象は注目する物体の固有振動が励振されて発音している状態をさす場合が多く、鳴き砂は後述する発音機構からも明らかのように摩擦音のうちの鳴き音を発生しているために“鳴き砂”が適当である。

昭和55年12月18日受付

*第18回粉体に関する討論会にて講演(1980.11 豊橋)

**同志社大学工学部化学工学科(〒602 京都市上京区烏丸今出川東入ル)

TEL 075-251-3847

Fig. 1 A representative particle of singing sand.

Fig. 2 Particle size distribution of the singing sands.

いる⁴⁾。(1)主に石英粒子から成り90%以上を占めている。(2)粒度分布の分布幅が非常にせまい。(3)粒子形状はやや丸みを帯び、特に粒子は鋭いエッジを持たず扁平状や針状の粒子を含まない。(3)一般の砂状粒子層に比べ静止摩擦係数が大きい。(静止摩擦角 ϕ_s が $36^\circ \sim 38^\circ$ 以上を示す。)

Fig. 1, 2 に本実験で用いた鳴き砂試料の粒子外観写真、粒度分布を示し、Table 1 に静止摩擦角を示した。これらの特徴は非常に長い間の風の力や海の波の力によって形成された鳴き砂に見られる特徴であるが、しかしこれらの特徴のすべてが音を発生するための必要条件とは考えられない。たとえば石英粒子90%以上を含むが音を発生しない海岸砂がある¹⁰⁾。また種々の粒度の鳴き砂試料を混合して粒度分布を広くしても音を発生する。上記(1)(2)(3)の特徴をすべて合せ持つガラスビーズやオタワサンドは通常の状態では音を発生しない。しかしガラスビーズの場合、粒子表面を良く洗浄した後粒子層の運動を適当に拘束するような容器に充てんして貫入棒を押し

Table 1 Angle of internal friction of the singing sand.

Sample	Angle of internal friction
Kotobikihama	38.6°
Kotogahama	37.5°
Kukunarihama	36.7°
Kugunarihama	36.3°

Table 2 Co-ordination number and compressibility of the singing sand.

◦ Compressibility (with powder Tester)

Kugunarihama sand	4.76%
Kukunarihama sand	4.12%
Soma silica sand (non-singing sand)	13.1 %

◦ Distribution of co-ordination number⁹⁾ (Kotobikihama)

Co-ordination number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Number of particles	0	0	1	1	1	4	9	13	7	17
Co-ordination number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Number of particles	13	11	5	4	5	5	2	0	1	1

Average of co-ordination number = 10.6

込むと調和音を発生する。これは容器壁からの受働抵抗力を作用させてガラスビーズの静止摩擦力が大きくなる状態にした効果によるものである。したがってこの現象や鳴き砂粒子の特徴(4)は鳴き砂の発音機構を考えるうえで粒子層の摩擦角特性の検討が重要であることを示唆している。

鳴き砂の発音機構についてもすでに多くの報告がある⁸⁾。それぞれの説明に微妙な差があるが、これらは(1)粒子間摩擦説、(2)空気クッション説、(3)空気噴出説、(4)粒子層振動説に大別できる。

Wilson³⁾ は「粒子径のそろった無数の清浄な砂粒子相互の摩擦」が原因であるとして粒子間摩擦説を提出した。しかし一般に単一粒子相互の摩擦により発生する音の音圧はきわめて低いこと、またその周波数は非常に高いと推察されることおよびランダムな場所から発生する摩擦音は純音に近い正弦波状の音波を形成しないと考えられることなどの疑問がある。これに対して Bolton²⁾ は空気クッション説を提出しているが粒子層内で砂粒子が弾性的に振動することに対する力学的説明がない。栗原⁷⁾ は「粒子層が摩擦すると、それにより粒子間空隙に

Fig. 3 Vertical force which acts on the shear surface resulting from a vertical push into a packed bed of particles.

存在する空気が圧縮されて噴出し空気の疎密波を構成する」と空気噴出説を提出した。しかし Table 2 に示すように鳴き砂粒子は配位数が大きく、圧縮度が非常に小さい粉体であること、さらに粉体層の圧縮流動過程を力学的に考察すると粉体層に力が作用した瞬間にわずかに粒子層が圧縮される過程* が、存在するが非常に短い時間に達成されその後は膨張する過程であることなどからこの説明にも疑問が残る。一方 Bagnold¹¹⁾ は砂層に対する詳細な力学的考察を行ない粉体層が圧縮される時層内に発生するすべり面上の粒子層の振動により音が発生することを報告した。すなわち Fig. 3 に示すようにすべりが発生する瞬間の垂直方向の力 N はすべり面上粒子層の自重よりも大きくなり粉体層を上方に移動させるがその過程で粉体層が膨張するために N は急激に減少し、その結果としてすべり面上の粒子層が振動し音を放射すると考えた。粉体層の力学的考察の面から興味深い、音の発生の点からはすべり面上の粒子層が 200~1000 Hz の高い周波数で共振することが困難であろうと考える。

現在までに提出されている発音機構に関する説明は以上であるが、まだいずれも基本的な点での疑問を残している。したがって発音機構の解明に際して、まずはじめにこれらの説明の妥当性を検討しておくことが必要である。

3. 鳴き砂粒子層から発生する音の音源

前説で述べた発音機構の諸説はいずれも鳴き砂の音が粒子の摩擦振動、粒子層空隙内の空気噴出、粒子層の振動に起因して粒子層表面から直接放射されていることを示している。またこれらいずれの説明においても粒子層内および粒子層表面近傍の空気は必要不可欠であ

*Fig.12 に示す貫入板 AA' 面下に三角形状で示される剛性域が形成する時圧縮される。この剛性域は砂状粒子層では瞬時に形成される。

Fig. 4 Experimental apparatus for measurement of sound pressure from the singing Sand in a vacuum.

Fig. 5 Sound pressure waveform and frequency spectrum from the singing sand in a vacuum.

り、もし粒子層内およびその表面近傍が真空状態にあったならば音は発生しないことになる。そこで Fig. 4 に示す装置により鳴き砂粒子堆積層の部分のみを真空状態にして貫入棒を鳴き砂粒子層に押し込み容器系外に音が放射されるかどうかの測定を行ない前節の発音機構に関する諸説を検討した。実験装置は鳴き砂を充てんした乳鉢の上端面に厚さ 15 mm の透明アクリル板を接着し、アクリル板上に立てた T 字状ガラス管の一方を真空ポンプにまた他方を真空度を測定するためのマクレオードゲージに接続した。粉体層を含む乳鉢内部の真空度が 0.1 mmHg に到達した時、針金入りビニール製フレキシブルホースに接着して中央部に設置した木製の貫入棒を鳴き砂粒子層表面から手で押し込んで発音させた。その時乳鉢系外に放射される音をコンデンサーマイクロホンで

Fig. 6 Experimental apparatus for measurement of the nature of sound.

検出し、ウェーブメモリーに記憶させた後音圧波形の記録および周波数解析を行なった。

Fig. 5 は鳴き砂粒子層の部分を真空状態にして発音させた場合と粒子層を大気中に開放して発音させた場合の音圧波形とその周波数スペクトルを比較したものである。貫入棒を手で押し込んで発音させるために発音条件（とくに貫入速度）を同じにすることが不可能であり発生音の性質を厳密に比較できないが、粉体層部分を真空下において貫入棒を貫入させても容器系外には大気に開放した場合とほとんど同じ高さの音圧でしかも良く似た周波数スペクトルを持つ音が放射されることが分る。この結果は前節で示した発音機構に関する諸説が鳴き砂からの音の発生を十分説明していないことおよび鳴き砂の音は粉体層から直接放射されているのではなく貫入棒から放射されている可能性を示唆しており、以下では鳴き砂が発音している状態をさらに詳しく観察し発音機構を検討する。

4. 実験装置および方法

〔鳴き砂から発生する音の測定〕 鳴き砂を発音させる条件と発生音の性質との関係を得るために用いた発音試験装置を Fig. 6 に示す。乳鉢に一定量の試料を充てんした後、貫入棒を試料表面から静かに落下させると貫入棒はその自重により粉体層へ貫入する。貫入棒の重量は貫入棒上部に荷重板を取り付けることで変えることができ、それにより貫入速度が変化する。貫入時に粉体層か

Fig. 7 Experimental apparatus for the measurement of friction characteristic of a packed bed of particles.

ら発生する音はコンデンサーマイクロホンにより検出しウェーブメモリーに記憶させた後、くり返し再生して音圧の測定、音圧波形の記録および周波数解析を行なった。また貫入棒の変位および貫入棒の加速度振動は歪みゲージ式変位計および圧電型加速度ピックアップにより検出し音圧波形とともに同時にウェーブメモリーに記憶させ記録した。

なお粉体層が貫入棒より受ける圧縮力 P は貫入棒の加速度波形から次式により算出した。

$$P = m(g - \alpha) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 m ；貫入棒の質量、 g ；重力加速度、 α ；貫入棒の振動加速度である。

〔粉体層の摩擦特性の測定〕 鳴き砂の発音機構を検討するためには粉体層の摩擦角特性、とくに静止摩擦角 ϕ_s と動摩擦角 ϕ_d を知ることが必要である。Fig. 7 はその測定に用いた装置であり、鳴き砂を発音させる場合と同様に粉体層へ貫入板を貫入させて粉体層の摩擦特性を知ることができる。以下ではこれを貫入試験と呼ぶことにする。試料を充てんした容器を一定速度で上昇する試料台に載せて上昇させると貫入板に接し、押し上げ式パネ秤により荷重がかかるので粉体層の強度に応じて貫入板が粉体層へ貫入する。貫入板の貫入過程における粉体層表面からの貫入深さ（変位）とその時貫入板にかかる荷重の刻々の変化をロードセルと差動変圧器により

Table 3 Particle size and angular property of silica sand.

sample	particle size [μm]	angle of repose
Silica sand (A)	525	37°
Silica sand (B)	525	38°
Silica sand (C)	525	35°
Silica sand (D)	525	34°

Fig. 8 Waveform of sound pressure and displacement, acceleration of the penetrating rod.

検出し、増幅器を経てレコーダーに記録した。用いた貫入板直径は 10 ϕ 、20 ϕ 、貫入容器の直径は 146 ϕ である。また試料台の上昇速度は 1.16[mm/s]とした。

〔試料〕 鳴き砂試料は琴引浜、十八鳴浜、九九鳴浜、琴ヶ浜から採取したものでその粒子特性はすでに **Fig. 1, 2, Table 1, 2** に示した*。ほかに鳴き砂と同質の市販のケイ砂を用いた。その特性を **Table 3** に示す。

* 琴引浜(京都府竹野郡網野町掛津)
琴ヶ浜(鳥根県仁万郡馬路)
十八鳴浜(Kugunarihama. 宮城県気仙沼市大島大初平)
九九鳴浜(Kukunarihama. 宮城県本吉郡唐桑町西舞根)

Fig. 9 Frequency spectra of sound pressure and acceleration of the penetrating rod.

Fig. 10 Relationship of the frequency spectrum of the sound from the singing sand and the fundamental frequency of the penetrating rod.

5. 鳴き砂からの発生音の測定結果と考察

5.1 貫入棒からの音の放射機構

貫入棒の振動加速度と発生音波の関係：鳴き砂発音時の変位、音圧、振動加速度の各波形は貫入条件により変化するが、[**Fig. 8**] は鳴き砂が音を発生する時の各波形を同時測定した例である。変位曲線の勾配から刻々の貫入速度および平均貫入速度を得ることができる。貫入棒の貫入初期において音圧波形、加速度振動波形はともに不規則な波形を示すが、貫入が進み、貫入速度が大きくなった時急に正弦波状の波形を示して高い音圧で調和音

Table 4 Frequency of longitudinal vibration of the penetrating rod.

Material	Length L [m]	Fundamental frequency f [kHz]	Density ρ [kg/m ³]	Young modulus E [N/m ²]
Wood	0.135, 0.27	9.35, 18.70	7.8×10^3	2×10^{11}
Aluminum	0.135, 0.27	9.46, 18.92	2.7×10^3	7.05×10^{10}
Steel	0.135, 0.27	9.83, 19.66	0.46×10^3	1.3×10^{10}

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Fig. 11 Penetration characteristic curves of the singing sands.

Fig. 12 Penetration process of the penetrator into a powder bed.

を発生する。ここで貫入棒の縦方向の振動加速度波形と音圧波形を比較すると二つの波形は非常に良く以ており、**Fig. 9**は二つの波形の周波数スペクトルを示している。二つの周波数スペクトルにおける各ピークの周波数はほとんど一致していることが分る。

Fig. 13 Penetration characteristic curve.

貫入棒の固有振動数と発生音の性質：**Fig. 10** は貫入棒の材質とその長さを変えて貫入棒の縦固有振動数と発生音の周波数スペクトルとの関係を示している。貫入棒として用いた材料、寸法およびその縦固有振動数を**Table 4**に示した。発生する音の性質は貫入棒の材質や長さによって変化し、その傾向は貫入棒の縦固有振動数が低下するにつれて発生音波の周波数も低下することが分る。

これらの結果と3節の結果から鳴き砂粒子層から発生する音は粒子層から直接放射されているのではなく粒子層が貫入棒の貫入により圧縮流動する過程で貫入棒に粒子層から周期的な力が作用し、貫入棒の縦振動を励振して放射しているものと推察される。

5.2 粉体層の摩擦角特性と発生音の性質

貫入棒の縦振動を励振するに必要な周期的な力が発生する原因は粉体層の摩擦特性によるものと考えられる。そこで貫入棒が貫入する時の粉体層の摩擦角特性および摩擦角特性と発生音の性質について検討する。

鳴き砂粒子の摩擦角特性：貫入試験により得られた各試料の荷重と変位の関係を示す曲線（貫入過程曲線と呼ぶ）を**Fig. 11**に示す。この貫入過程曲線から次の解析により粉体層の静止摩擦角と動摩擦角に関する知見が得られる⁵⁾。

Fig. 12に示す粉体層のAA'（破線）面に荷重が加えられるとその荷重が粉体層の極限支持力 P_u に達するまで貫入板は静止しているが P_u に達すると同時に粉体層はすべりを生じて急激に貫入し実線で示したAA'面で停止する。この停止する位置は簡単のためスベリ線上の水平方向の力の関係で示すと次式に示す力の平衡により決まる。

$$\begin{aligned} W \cdot \tan \phi_s &= (W + \Delta W) \cdot \tan(\phi_s - \Delta \phi) \\ &= (W + \Delta W) \cdot \tan \phi_a \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

ここで W : すべり面上の粉体層の重量, ϕ_s : 静止摩擦角, ϕ_d : 動摩擦角, ΔW : 貫入によって増加したすべり面上の粉体層の重量増加, $\Delta\phi = \phi_s - \phi_d$ を示す。停止した貫入板は試料台が上昇して荷重が増加するのでまたその深さにおける極限支持力に達するとすべりが生じ急激に貫入する。貫入板はこの過程をくり返して粉体層へ貫入する。したがって粉体層から貫入板に作用する力についても(2)式と同じ関係があるので貫入過程を Fig. 13 に示す貫入過程曲線上で考える。すなわち粉体層はA点で示される極限支持力に等しい力が貫入板に加えられるとすべりを生じ、すべりが生じると同時に粉体層の静止摩擦角 ϕ_s は ϕ_s より $\Delta\phi$ だけ小さい ϕ_d に移るので支持力は急激に低下して貫入板はすべり面上の粉体層の重量増加により最初の力と釣り合うC点まで貫入して停止する。しかし本実験では荷重をかけるためにバネ秤を用いているので貫入板が粉体層へ貫入するとバネが縮むために荷重が減少するのでバネ定数と変位で決まるC'点で停止する。したがって粉体層の各深さにおける粉体層の極限支持力を摩擦角をパラメーターとして得ることにより貫入試験結果から粉体層の静止摩擦角と動摩擦角を推測できる。各深さにおける粉体層の極限支持力の推定は貫入深さが比較的浅いので次式で示される Meyerhoff の式を用いた¹⁾。(ただし実験に用いた試料は非付着性の試料のため付着力に関係する項は省略した。)

$$P_u = \rho_B \cdot H \cdot N_q \cdot d_q + 0.6 \cdot \rho_B \cdot (D_p/2) \cdot N_r \cdot d_r \quad \dots(3)$$

ここで

$$N_q = \frac{1}{1 - \sin \phi_s} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{3\pi}{2} - \phi_s \right) \tan \phi_s \right\}$$

$$N_r = (N_q - 1) \tan(1.4 \phi_s), \quad d_r = 1 + 0.6(H/D_p)$$

Fig. 14 Penetration characteristic curves of silica sands.

Fig. 15 Frequency spectra of the sound from the singing sands.

$$d_q = 1 + 0.2(H/D_p)$$

ρ_B : かさ密度, H : 貫入深さ, D_p : 貫入板直径を示す。

Fig. 14 はその安息角(箱傾斜法による)が 37° , 38° , 35° の市販のケイ砂(A)(B)(C)による測定例であり図中の点線は(3)式により計算した粉体層の支持力曲線である。各すべり開始点を結ぶ支持力曲線の摩擦角から ϕ_s , 各すべり停止点を結ぶ支持力曲線から ϕ_d を推定できる。たとえばケイ砂(B)の場合 Fig. 14 から $\phi_s \doteq 37.5^\circ$, $\phi_d \doteq 34^\circ$, $\Delta\phi \doteq 3.5^\circ$ を得る。

Fig. 11 の鳴き砂試料の貫入過程曲線から琴引浜、琴ヶ浜(B)の鳴き砂の ϕ_s , ϕ_d は十八鳴浜、九九鳴浜のそれよりも大きく、静摩擦の状態から動摩擦に移るとその摩擦係数が急激に低下する性質を持っていることが分る。したがって鳴き砂の貫入曲線は規則的な階段状の曲線を示すのが特徴で Stick-Slip 運動を示す。それに対して市販のケイ砂(d)は ϕ_s , $\Delta\phi$ とも相当小さく、とくに $\Delta\phi$ の値が小さいために明瞭な階段型の曲線を示さないで不規則な曲線となる。

摩擦角特性と発生音の性質 : Fig. 15 は Fig. 11 に示した摩擦角特性を持つ各鳴き砂試料を同一条件で発音させた場合の発生音の周波数スペクトルを比較したものである。明りょうな Stick-Slip 摩擦現象を示さない市販のケイ砂(d)は人間の耳で聞きとるのが困難な程の低い音圧の音しか発生せず、発生音波の周波数は鳴き砂にくらべ非常に高い。それに対して明りょうな Stick-Slip 摩擦を示す鳴き砂はいずれもケイ砂より 10~20 dB 程度の高い音圧で正弦波状の音圧波形を持つ調和音を発生し、

Fig. 16 Waveforms of sound pressure of the singing sands from kotobbikihama and Kukunarihama.

周波数が低く人間の耳にははっきりと聞くことができる。鳴き砂粒子層の静止摩擦角 ϕ_s は発生音の音圧に関係し、 ϕ_s が大きくなるにつれ音圧が低下する傾向を示す。そこで ϕ_s の大きい琴引浜砂と ϕ_s の小さい九九鳴浜砂の音圧波形を比較すると音の発生状況が異なることが分る (Fig. 16)。すなわち ϕ_s 、 $\Delta\phi$ が大きい琴引浜砂は貫入初期から比較的低周波数の音を発生し貫入棒が停止する寸前に比較的高い周波数の音を発生するのにくらべ、 ϕ_s 、 $\Delta\phi$ の小さい九九鳴浜の鳴き砂は貫入初期の低周波音を発生せず、貫入棒は大きな貫入速度で貫入して停止する寸前に非常に高い音圧で高い周波数の音を発生する。一般には ϕ_s 、 $\Delta\phi$ の値が大きい鳴き砂が広い範囲の条件で音を発生しすぐれた鳴き砂といえるが、 ϕ_s 、 $\Delta\phi$ が小さい場合でも貫入速度が増大すると見掛けの ϕ_s 、 $\Delta\phi$ が大きくなることや貫入変位とともに粉体層の摩擦力が増大するために音を発生する。

発生音の周波数は上述のように ϕ_s 、 $\Delta\phi$ に依存し、 ϕ_s 、 $\Delta\phi$ が大きくなるにつれ周波数が低下する。またこの周波数は試料の粒子径には関係しない。これは琴ヶ浜(A)とその粒子表面を洗浄して ϕ_s 、 $\Delta\phi$ を大きくした琴ヶ浜(B)の周波数スペクトルを比較すると明らかである。またこの結果および琴引浜、琴ヶ浜(A)、九九鳴浜の各試料の周波数スペクトルを比較すると最大音圧を示すピークの周波数が粒子径に関係しないことが分る。この発生音の周波数と ϕ_s 、 $\Delta\phi$ の関係を貫入過程曲線上で考えると貫入過程曲線に現われる階段の数すなわちすべりの回数が減少するにつれ発生音波の周波数が低下することになる。

これらの結果から鳴き砂粒子層が示す Stick-Slip 摩擦現象が音を発生する原因であり、したがって発生音の性質は粒子層の ϕ_s 、 ϕ_d 、 $\Delta\phi$ の影響を受けることが分る。

Fig. 17 Influence of diameter of the penetrating rod on the nature of the sound.

Fig. 18 Influence of speed of the penetrating rod on the nature of the sound.

以上の結果と 5.1 節の結果とから鳴き砂の発音機構は次のように考えられる。鳴き砂粒子層に貫入棒を貫入させると粒子層が Stick-Slip 摩擦を生じるために貫入棒には粒子層から間欠的な力(周期的な力)が貫入抵抗力として作用するために貫入棒はその結果として間欠的な運動をしながら粒子層に貫入する。貫入棒の貫入過程でこの間欠的な貫入抵抗力が連続パルス状に貫入棒へ作用して貫入棒の縦振動を励振することにより音を放射するものとする。なお貫入棒自体の間欠的な運動が音を放射する可能性が考えられるが、材質の異なる同じ寸法の貫入棒を同一条件で貫入させた時に放射される音の性質

Fig. 19 Penetration characteristic curves for radiated and nonradiated harmonic sound of the singing sand.

が材質の影響を受け変化すること (Fig. 10) からその可能性は低いと考える。

このように鳴き砂における音の発生機構は一般的な二つの固体の摩擦接触により発生する音のそれとは異なるが粉体層の摩擦係数の速度特性にもとづいて発生する音であり粉体層における摩擦音である。また中井ら¹²⁾は二つの固体の摩擦接触による摩擦音を検討してこれをこすれ音 (Rubbing noise) と鳴き音 (Squeal noise) とに分類しているが、粉体層においてもその摩擦特性によりこすれ音 (ケイ砂(d)の場合) と調和音を発生する鳴き音 (鳴き砂の場合) とが発生することが分った。

貫入棒の直径および貫入速度の影響: Fig. 17, 18 は発生音の性質におよぼす貫入棒の直径および貫入速度の影響を示している。貫入棒の直径が大きくなるにつれ発生音の周波数が低下し、貫入速度の増大とともに高くなる傾向がある。貫入棒の縦固有振動数はその直径に無関係であるために直径が増大するにつれ摩擦力が大きくなり、Stick-Slip 摩擦にもとづく貫入抵抗力のパルスの回数およびパルスの大きさが低下するものと考えられる。実際に貫入試験において貫入板の直径を大きくするとすべりの回数は減少する⁹⁾。また貫入速度が増大すると逆にパ

ルス状に作用する貫入抵抗力の作用回数が増しパルスの大きさも大きくなるものと考えられる。ただし Fig. 18 (b)のように貫入速度の変化が小さい場合には逆に貫入速度の増大により見掛けの ϕ_s , $\Delta\phi$ が大きくなるために周波数が低下することがある。このように前節で推定した発音機構にもとづいて発音条件と発生音の性質との関係を説明することができる。

鳴き音の発生条件: 鳴き砂に貫入棒を貫入させても鳴き音を発生する場合としない場合がある。これは貫入棒にある大きさ以上のパルス状の貫入抵抗力が作用する必要があるからである。そこで貫入棒の重量をゆっくりと増加させて貫入速度を増大し鳴き音を発生した時とその直前の鳴き音を発生しない時の貫入過程曲線を求めて Fig. 19 に示した。なお粉体層に作用する荷重は(1)式を用いて貫入棒の加速度波形から求めた。また図中の点線で示す支持力曲線は(3)式による計算値である。鳴き音を発生する摩擦角の条件は試験条件によって異なるが本装置 (貫入棒木製) では $\phi_s \div 43^\circ$, $\phi_d \div 37^\circ$, $\Delta\phi \div 6^\circ$ であり鳴き音を発生しない場合の $\Delta\phi$ は約 4° であった。

6. 結 言

容器内に充てんした鳴き砂粒子層からの鳴き音の発生機構について実験的に検討した結果次の結論を得た。

(1) 鳴き砂はその貫入過程曲線が規則的な階段状の曲線を示し顕著な Stick-Slip 摩擦を示す。この Stick-Slip 摩擦が音を発生する原因であり、鳴き砂を貫入棒で発音させた場合の音の発生機構は鳴き砂の Stick-Slip 運動にもとづいて生じるパルス状の貫入抵抗力が貫入棒に連続的に作用して貫入棒の縦振動を励振することにより放射されるものである。

(2) したがって鳴き砂粒子層部分を真空中においても明らかに調和音を系外に放射する。すなわちこの発音方法による鳴き音は粒子の摩擦振動や粒子層空隙内の空気の出射および粒子層の振動にもとづいて発生する音ではない。

(3) 鳴き砂の発生音は一般的な固体摩擦音とその発生機構が異なるが粒子層の摩擦現象にもとづいて発生する摩擦音であり、粒子層の摩擦音の場合にも摩擦係数の速度特性に関してこすれ音と鳴き音とが発生する。鳴き砂粒子層は鳴き音を発生する曲型的な粒子群である。

使 用 記 号

D_p	: 貫入板の直径	[cm]	P	: 粉体層に作用する圧縮力	[gf/cm ²]
H	: 粉体層表面からの貫入板の貫入距離	[cm]	P_u	: 粉体層の極限支持力	[gf/m ²]
N_q	: 支持力係数 (貫入深さについて)	[—]	W	: すべり面上の粉体層の重量	[g/cm ²]
N_r	: 支持力係数 (剛性域について)	[—]	ΔW	: 貫入によって増加したすべり面上の重量増加	[g/cm ²]

d_q, d_r : 支持力に対する貫入深さの影響を考慮する係数	[-]	ϕ_d : 粉体層の動摩擦角	[°]
g : 重力加速度	[cm/s ²]	ϕ_s : 粉体層の静止摩擦角	[°]
m : 貫入棒の重量	[g]	$\Delta\phi$: 静止摩擦角と動摩擦角の差 ($\phi_s - \phi_d$)	[°]
α : 貫入棒の加速度	[cm/s ²]	ρ_B : 嵩密度	

Literature cited

- 1) Akai, K.: Tsuchi no Shijiryoku to Chinka P 18 Sankaido, Tokyo (1964)
- 2) Bolton, H.C.: *Nature*, 42, [1093] 568 (1890)
- 3) Carus, Wilson C.: *Nature*, 43, [1098] 30 (1890)
- 4) Hashimoto, M.: Chigaku Kenkyu, 21, [6] 157-163 (1970)
- 5) Hidaka, J. and S. Miwa: *Kagaku Kogaku Ronbunshyū*, 7, [2] (1981), to be published
- 6) John, F. Lindsay: *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, [3] 463-473 (1976)
- 7) Kurihara, K.: *Ōyō-Butsuri*, 6, [4] 18-20 (1937)
- 8) Miwa, S. and J. Hidaka: *Funtai to Kogyo*, 10, [9] 26-30 (1978)
- 9) Miwa, S., T. Wakita and M. Toda: *Funtai Kogaku Kenkyukaishi*, 10, [7] 379-385 (1973)
- 10) Nishiyama, K.: *Kagaku no jikken*, 20, [4] 329-336 (1978)
- 11) Bagnold, R.A.: *Proc. Roy. Soc.*, A295, 219-232 (1966)
- 12) Yokoi, M. and M. Nakai: *Nihon Kikaigakkai Ronbunshyū*, 45, [391c] 346 (1979)

Authors' Abstract

Generating Mechanism of Harmonic Sound from Singing Sand

by

Jusuke HIDAKA and Shigeo MIWA

(Dept. of Chem. Eng., Doshisha Univ., Kyoto, Japan 602)

The mechanism causing the generation of harmonic sound from singing sand into which a rod penetrates is investigated experimentally. Stick-slip behavior distinctly occurs on compression flow of the singing sand, which is the reason for generation of the harmonic sound. The stick-slip friction characteristic of a singing sand is measured with a penetration test for a packed bed of particles.

The relationship between material of the penetrating rod, the stick-slip friction characteristic of the singing sand and the nature of the sound from the singing sand are discussed. The mechanism by which the harmonic sound from the singing sand is generated be explained as follows: When the rod is penetrated into a packed bed of the singing sand, the impulsive force of resistance to penetration of the rod which occurs from the stick-slip friction acts on the penetrating rod. Therefore, longitudinal vibration of the rod is excited, and the harmonic sound is radiated to in atmosphere. The sound generation based on the friction of particles can be classified into a squeal noise and a rubbing noise related to the friction characteristic of the particles.