

鳴き砂

み 三 輪 しのぶ 茂 雄*

1. はしがき

鳴き砂,あるいは鳴り砂,英語では singing sand, sonorous sand, musical sand などと呼ばれる特異な発音特性を有する石英砂がある。自然条件では,激しい波浪や風的作用を受け,新しく土砂などが入りこまないような場所で,極めて長い年月,同じ場所に石英砂が堆積する場合,海岸や砂漠で生成することがある。

この砂の上を歩いたり,棒などでつつくと,クックツとか,プーというような大きい音を発するため,珍しい現象として古くから知られ,その発音メカニズムについても,物理学的研究が行われてきた。

しかしながら,その現象は,ただ単に珍しいというのにとどまり,それ自体では何かの役に立つこともなかったためか,本格的に取り組む人も少なく,今日に至っている。

筆者は,粉体工学の立場から,この種の特異な砂を人工的に作りだすことを最終目標として,自然に存在する鳴き砂の研究に取り組んで,既に十数年経過したが,最近になって,新しい知見がかなり得られるようになった。鳴き砂に関する東西古今の文献の集約と,研究の経緯については,近著¹⁾に詳しく述べたが,本稿では,特に,その特性について,2,3の知見を解説したい。

2. 天然の鳴き砂の存在状況

図一1に,世界的分布の概要を示した。また図一2には,特に我が国の状況を示した。キュウキュウ鳴くから九九鳴,九九=十八などは地名として面白いし,能登半島では,伝説にちなんで,ごめき(泣く)浜と名づけられている(現在は地図に琴ヶ浜と書かれているが明治以降に改められたもの)。京都府の丹後半島には,琴引浜,島根県仁摩郡には琴ヶ浜があるが,これらは,琴の音がすることから名付けられたという。しかしながら,最近では,各種の自然破壊が行われたため,浜砂が著しく汚れ,発音特性を完全に失った場所も多い。十八成浜,ごめき浜,青谷,福岡北部がそれである。辛うじて,発音特性を保っているのは,九九鳴浜,十八鳴浜,竹浜,琴引浜,琴ヶ浜である。飯豊山ろくの遅谷は,現在の海岸ではないが,太古の地層から,最近発見された珍しいものである。これについては後で詳

しく述べる。

さて,これらの鳴き砂は,日本列島では,ほぼ直線状に存在する。その地史的必然性について,筆者には論ずるだけの専門的知識はないが,興味深い事実だと思う。この直線から外れた場所には鳴き砂が存在しないことは確かであると私は考えている。これは私の踏査結果からの結論である。勿来や九十九里浜にも鳴き砂があると報告されたこともあるが,後に述べるように,異質のものであって,軋り砂(スキッキングサンド)という確かに発音特性はあるが,音質が全く違っている。

3. 鳴き砂の徹底的洗浄

浜辺に存在する天然の鳴き砂は,その場所の自然的条件に制約される。ことに最近浜の環境破壊が著しいので砂の汚れが著しい。したがって,鳴き砂の研究には,まず,理想的な状態は何かを明らかにしておかねばならない。

何が理想なのかは難しい問題だが,筆者は一つの試みとして,汚れを完全に洗浄してみることにした。ポリエチレン容器に水とともにに入れてシェーキングする方法や,ボールミルのように回転させる方法,流水法などを試みたが,最も効果的なのは,ふるい分け機械として販売されているジャイロシフターを改造したジャイロウォッシャーであることが分かってきた。円筒形ポリエチレン容器に砂を水とともに入れ,これをジャイロシフターに取り付けて,定半径旋回運動²⁾を与える。この方法で,ときどき新しい水に取り替えながら洗浄する。ジャイロウォッシャーにかけると,現在,最もきれいな砂とされている十八鳴浜や,琴引浜,琴ヶ浜などの鳴き砂から,著しい赤濁りの水が出る。三角フラスコに砂と水を入れて軽く振とうしただけで濁るようでは,浜辺で発音特性を示さない。能登のごめき浜がそれである。太平洋岸のように汚れの進んだ浜辺の砂からは,下水のように黒ずんだ汚濁水が出る。さすがに琴引浜,琴ヶ浜などは,軽く振ったくらいでは,それはわずかに濁る程度であってきれいな状態が保たれていることをうかがわせるが,ジャイロウォッシャーにかければ,やはり著しい濁り水が出る。そのわずかの汚れも洗浄する能力がある。

このようにして約100時間洗浄した砂は乾燥させれば,自然の状態では観測できない,優れた発音特性を示す。ところが,あるとき試みに,水道水そのままではなく,蒸留

*同志社大学教授,工学部化学工学科

特別寄稿

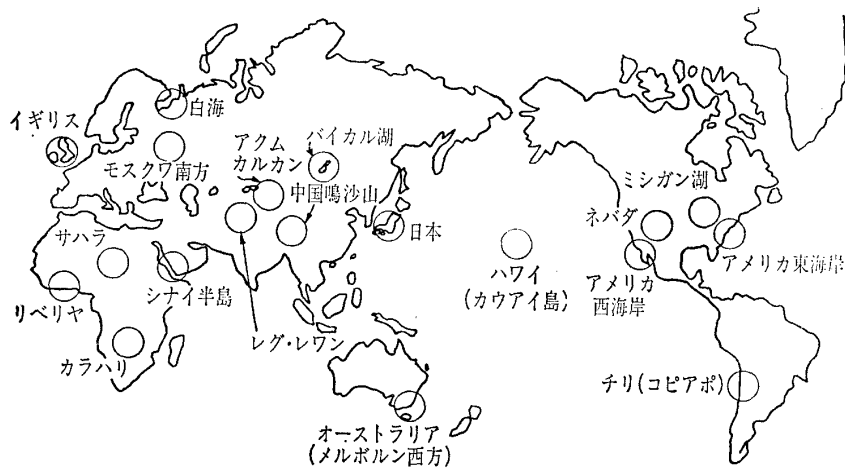


図-1 世界の鳴き砂



図-2 日本の鳴き砂

水を使って洗浄したところ、思いがけない現象が起こった。ポリエチレン製 1ℓ 容器の中の砂を、水が入ったままで軽くゆさぶるとき、ブブブ……と大きな音を発したのである。従来、鳴き砂は十分乾燥した状態でのみ発音特性をもつとされていたが、よく洗浄すれば水中でも音を発することが分かった。たかが砂を洗うだけのことから、蒸留水を使うには及ばないと思っていたのが誤りであった。水道水中に含まれる、ほんのわずかな鉄分や微生物なども、鳴き砂の発音特性に大きな影響を与える。そんなわけであるから、洗浄後のすすぎ洗いは徹底的に行うことはもち論だし、乾燥も、ろ紙の上などにおいて十分水切りをしてから天日乾燥するのが望ましい。乾燥前に、蒸留水で煮沸するのも効果的である。

このようにして徹底的な洗浄を行った砂は、紙の上に厚み 1 cm ぐらいに広げておいて、鉛筆ぐらいの棒で軽くつつけば、ポツ、ポツという音を発することが認められる。直径 20 mm、重さ 40 g のガラス棒を砂層の表面から 1 cm の高さから落下させて、発音するのを、一つの目安としている。「雀が歩く、砂が鳴く」と古人は言い伝えているが、現在ではそのように発音特性のよい鳴き砂の浜は残ってい

ない。昔は余程きれいだったらしいことが推測される。

4. 太古の鳴き砂

砂の洗浄法が確立し、かなり大量の処理も可能になったので、こんどは、砂丘の砂や、地層に含まれている山砂を洗浄してみた。丹後半島から山陰地方の日本海岸に点在する古砂丘の砂は、いずれも鳴き砂であることが判明した。しかし鳥取砂丘の大部分を占める新砂丘の砂は鳴き砂にならなかった。石英砂に、長石などが著しく混入しているためである。愛知県の瀬戸地方に分布する蛙目粘土に含まれる蛙目珪砂は、長石分を除去しても、鳴き砂にならない。粒子の形状が破砕物状であるためである。福島県の相馬地方に産する相馬珪砂も、長石分が著しいため鳴き砂にならなかった。

ところが山形県西置賜郡飯豊町遅谷から産する粘土中に含まれる石英砂は、図-3 に示すように著しく円摩された海浜砂の特性をもち、図-4 にみるように、海浜で円摩されたことを示すV字型の凹みを有し、洗浄すると、鳴き砂になった。この砂は、すべて無色透明の石英粒から成り、

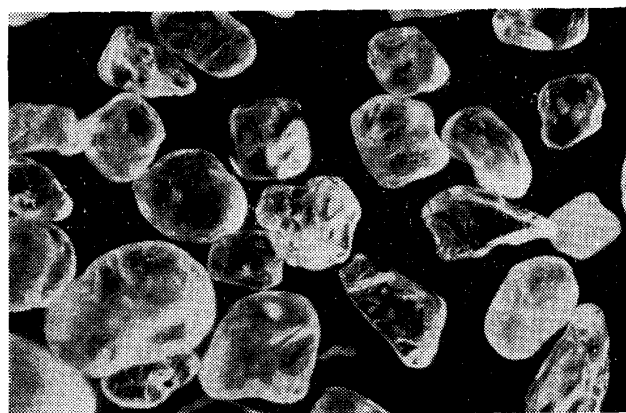


図-3 飯豊町遅谷の石英砂

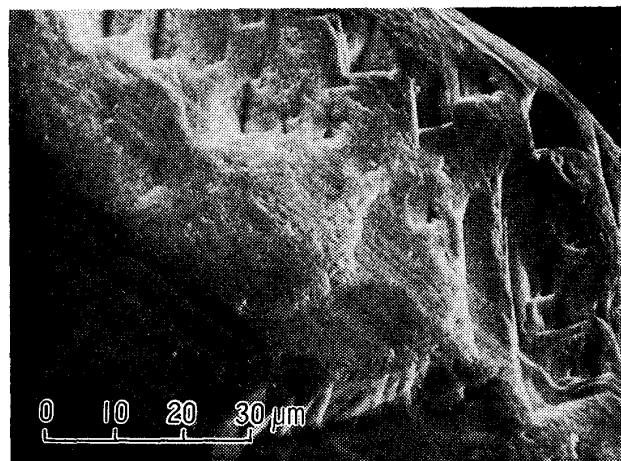


図-4 遅谷石英砂の走査電子顕微鏡写真

異物は全く含まれていない。この砂層は新第三紀層，鮮新世^{3),4)}と報告されている。200~500万年前，この地方は日本海がまだ形を整えていなかったころ，波と風の力で砂が洗われる海岸だったのであろう。酸化鉄をほとんど含まないから，文字どおりの白砂である。現在の日本列島で，白砂青松と観光宣伝の文句に出てくる砂浜は，たくさんあるが，顕微鏡でよく調べてみると，酸化鉄の斑点が無数にみられる。純粋な白砂など存在しない。今や幻想の世界にしか白砂青松はない。筆者は，人類出現以前の太古の白砂を，この遅谷の砂に見てから，浜砂の表面にある酸化鉄の斑点は，人類が汚したものだと思うようになった。人間の肌も老化すると染みが出てくるように，日本列島の白砂の染みも，大自然の老化の兆候ではなからうか。

遅谷の石英砂が，現存する砂浜の鳴き砂に比べて，はるかに優れた発音特性を示したことは，鳴き砂研究に大きく貢献した。現存の浜砂について研究していると，砂に含まれる石英砂以外の鉱物の存在が気になるが，遅谷の石英砂の出現によって，鳴き砂は純粋な石英砂から成り，ほかの成分は不純物にすぎないことが明確になった。更に，次節で述べるように，遅谷の石英砂は粒度分布範囲が著しく広く，現存している鳴き砂のすべての粒度範囲をカバーしていることも，研究上，極めて幸いなことである。諸外国にも，このような地層から発見された鳴き砂は前例がない。

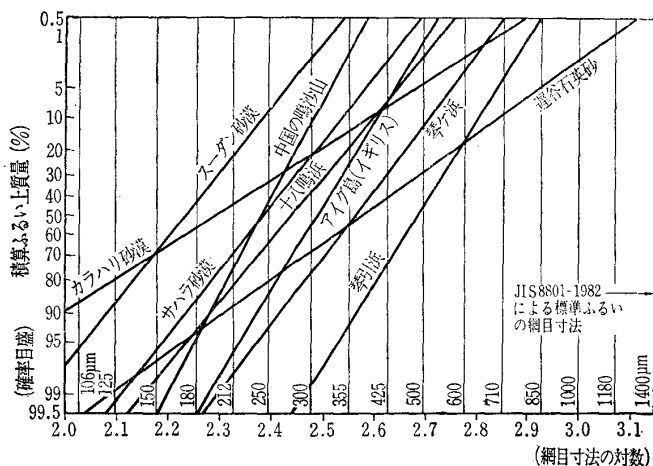
5. 鳴き砂の粒度

日本工業規格 JIS Z 8801—1982 に規定されている標準ふるいを用いて測定した粒度分布を，図—5 のように対数正規分布図表を用いて比較した。外国の砂は文献値から換算した。おおよそ 1 mm から 100 μ m の間にあり，微粉は波ないし風によって完全に除去されている。遅谷石英砂は前記の洗浄法によりつくったものである。浜砂は浜全体にわたって，場所により偏析が多いので，代表値を決めにくい，大よそ平均的と思われる値を選んでいる。琴引浜，琴ヶ浜，十八鳴浜の順に相対的に細かい値になっていることは確かである。粗粒砂，中粒砂および細粒砂の範囲にある。

粒度と発音特性との関係は，粗いほど周波数が低い音，細くなるにつれ，周波数が高くなる傾向がある。しかしこれには洗浄のしやすさが関係していることに注意する必要がある。

6. 発音特性

現在，我が国の鳴き砂は，現地の条件が急速に悪化しつつあって，現地を訪ねても，がっかりすることが多い。現地の人々は，ここ20年ぐらいの間に次第に悪くなってきたことに気づいていないのが普通であるが，非常に微妙な変化であるから，余程注意ぶかい人でなければ無理なのかもしれない。



図—5 対数正規分布による鳴き砂の粒度比較

聞いた音の表現として，ブォー，ブブブというのは，手のひらで砂の表面をなでたとき発する，比較的低周波(300 Hz 以下)の音である。琴ヶ浜の観測報告にこの種の表現が多いが，ここは護岸壁のために土砂の混入が少ないことと，海水浴などで人が入ることが，まだまだ他の地方に比べれば少なく，きれいな状態が保たれているためと思われる。

琴引浜でも春先の，晴れた日にはこういう状態に出あうことがある。もち論，洗浄すればブォー，ブブブになる。足で踏めばクックツという音がする場合は，約 400 Hz をピークにもつ周波数のときである。更に砂が汚れてくるにつれ，発生音の周波数は次第に高い方に移行し，砂により高速の衝撃を与える必要がある。足を強く砂の表面にこすりつけるとき，キュツ，キュツというのがそれで，周波数は 1000 Hz に近い。

一般に鳴き砂と呼んでいるが，このように発音特性はピンからキリまでである。筆者は低速の軽い衝撃で 400 Hz 以下ぐらいの比較的低い周波数の音を発する砂を，ミュージカル・サンド，高速の強い衝撃を加えなければ発音しない砂を，スキーキングサンド(軋り砂)と区別することになっている¹⁾。軋り音は快い楽音というには程遠く，単に音が出るにすぎない。これに比し，ミュージカルサンドが発する音は，妙音というにふさわしく，誰でもその音に魅せられる。

妙音とはいったい，どんなものか。ここでは聞いていただくわけにはゆかないので，図—6 に典型的なミュージカルサンドの音圧波形を示しておく。この砂は，ミシガン湖(アメリカ)に近い砂丘の砂を採掘し，これを前記の方法で洗浄したもので，遅谷の石英砂と同じくらい優れた発音特性を示し，筆者が現在までにつくり出した最高のミュージカルサンド特性である。非常に規則的な波形で，しかも特色ある形をしている。周波数解析結果は 20~100 Hz という極めて近い値にピークがみられる。この砂を手で押せば，手に強い振動を感じ，誰でも驚きの声を発する。

特別寄稿

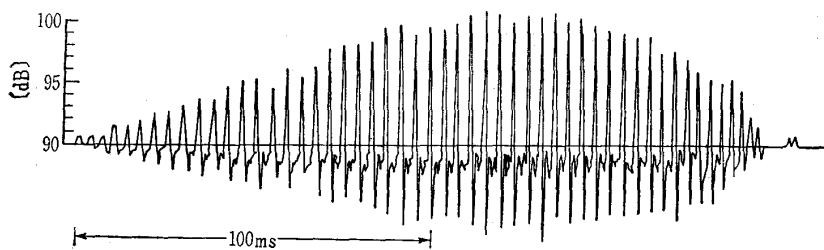


図-6 代表的なミュージカルサンドの音圧波形

このようにミュージカルサンドの不思議さは、低周波部にあり、音を聞くとともに、体で感じなければ実感はわからないが、現在では鳴き砂の浜辺でそれを体験することも、ほとんど不可能に近い。そこで筆者は拙著¹⁾の読者に、実験に供したミシガン湖畔のミュージカルサンド洗浄品を、希望者におわちすることを試みたところ、多くの方々から、その感動をお聞きできるようになった。ことに子供たちから聞くのが楽しい。その体験はいつの日か目ざめることもあろうかと期待している。

7. 実験的諸事実

19世紀半ばから、最近までに、発音メカニズムについて、いくつかの説が唱えられてきた。その詳細は著書¹⁾で紹介したが、いずれも説得力に欠けるところがあった。筆者らは、前述した発音特性の優れたミュージカルサンドをベースにして、あらためて従来の諸説を、ひとつひとつ検討し、新しい実験法を加えて、完全な説明に到達すべく努力している。まだいくつか検討を要する事項が残っているので、歯切れのいい説明はし難いが、おおよその方向について述べることにする。まずいくつかの実験的事実をあげると、次のとおりである。

7.1 段階的貫入特性

図-7に示すようなペネトロメーターを用いて、棒の貫入過程を調べる。図-8は前記ミシガン湖の砂を徹底的に

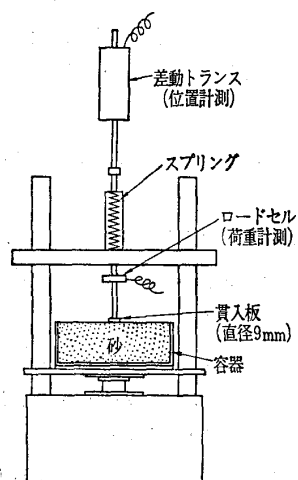


図-7 ペネトロメーター (容器内径 200 mm, 深さ 100 mm)

洗浄してつくった非常に発音特性のよいミュージカル・サンドと、それを繰り返して発音させて発音特性が劣化した砂、すなわちスキーキング・サンドおよび、微量の硫酸カルシウム粉末を加えて、発音特性を失わせたキルド・サンドについて、貫入過程曲線を比較した結果である。ミュージカル、スキーキング、キルドの順に、貫入過程曲線の段階的特性が失われてゆく。

直径の大きい容器に砂を

入れ、直径の小さい貫入板を貫入させるので、貫入初期は砂粒の運動範囲が狭くて、容器の影響を受けていない。貫入が進むと、容器壁の影響を受け階段は次第に大きなステップを示すようになる。ミュージカル・サンドは貫入初期にも、大きいステップを示して、発音している。スキーキングサンドになると初期には小さなステップしか示さず、ほとんど発音しないが、貫入が進む

につれ、容器壁の影響を受けて、砂粒の運動が制約され、ステップが大きくなって、音を発する。この場合の音は、ミュージカル・サンドに比べ周波数が高くなる。キルド・サンドは段階的特性が著しく少なく、ほぼ連続的に貫入する。

キルド・サンドになった砂は、洗浄すれば再びミュージカル・サンドになる。キルド・サンドの復活は、10数回繰り返してみたが、確実に回復し、回復した発音特性が、劣化する傾向はみられなかった。

7.2 内部摩擦係数の変化

上記の段階的特性は、砂粒子の相互摩擦によって砂粒子表面に生ずる微粉のために、粒子表面の摩擦係数が変化するものと考えられる。粒子表面の摩擦係数を直接測定することは困難なので、その代わりに、一面せん断試験および、安息角測定により、砂粒子群の内部摩擦係数を測定してみると、表-1のような結果が得られた。明りょうな差が認められる。

7.3 砂粒子の配位数

充てん状態にある1個の砂粒が、何個の砂粒と互いに接触し合っているかを示す値を、配位数という。直径の等しい球を最密充てんしたときの理論的配位数は12である。密充てんした砂を墨汁に浸してから遠心機にかけ、墨汁を振り切ると、墨汁は毛管力によって接触点にだけ残る。このまま乾燥すれば砂粒子の上に黒い点が印される。これを顕微鏡で調べて集計する。表-2はその測定例である。ミュージカルサンドはすべての粒子の角が丸められているので、黒い点が確認しやすい。配位数が12を超える粒子があるの

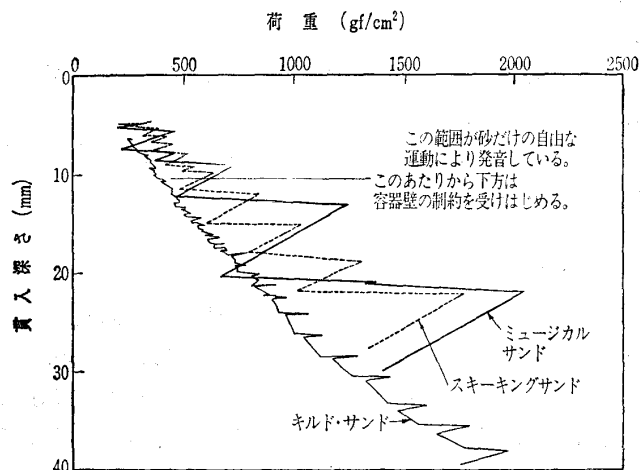


図-8 貫入過程曲線

表一 内部摩擦係数(かっこ内は内部摩擦角)

	一面せん断試験	安息角	貫入試験
ミュージカル・サンド	0.986(44.7°)	0.906(41.7°)	0.839(40°)
スキーキング・サンド	0.952(43.6°)	0.854(40.3°)	0.810(39°)
キルド・サンド	0.900(42.0°)	0.810(39.0°)	0.700(35°)

表二 配位数測定例(琴引浜砂)

配位数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
粒子数	0	0	1	1	1	4	9	13	7	17	13	11	5	4	5	5	2	0	1	1

測定個数 100個 平均配位数 10.6

表三 ミュージカル・サンドのかさ密度

	疎充てん	密充てん	圧密度
琴引浜	1.55	1.72	0.099
十八鳴浜	1.52	1.73	0.12
琴ヶ浜	1.38	1.62	0.15
遅谷石英砂	1.56	1.75	0.11
ミシガン湖	1.59	1.78	0.11

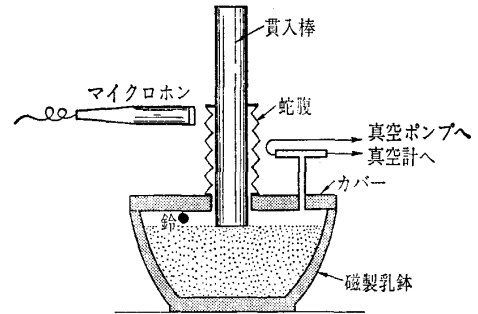
は、粒子径が均一でなく、大きい粒子の周りに小さい粒子がたくさん配位するためである。平均配位数は10.6であった。このような配位数で充てんしている粒子層に、貫入棒などを貫入させようとする、はじめ、粒子間の摩擦抵抗によって動かないが、更に力が加わると抵抗し切れず粒子群が動く。配位数が大きいから、運動は広い範囲に伝播されることが予想される。

7.4 疎充てんと密充てん

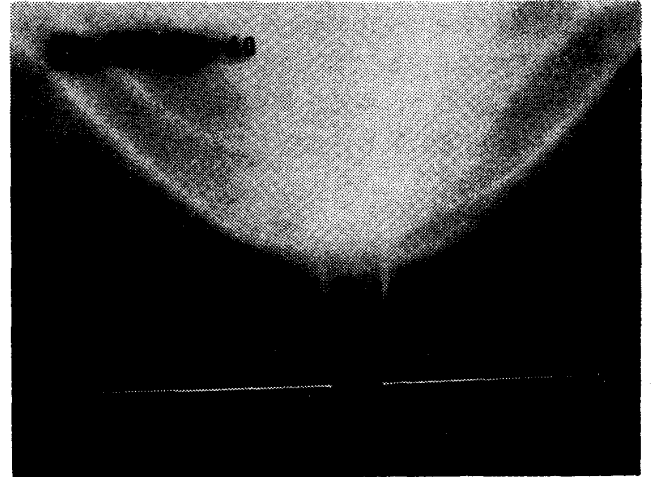
かさ(嵩)密度を測定する場合、大部分の粉体は、充てん容器の上でふるい分けながら充てんすれば疎充てんがえられ、容器に振動を加えると密充てんになる。ところがミュージカルサンドは、逆であって、ふるい分けながら充てんしたときに、密充てんがえられる。これに振動を加えるとあふれ出す現象がみられる。砂粒子の形状が丸みをおびており、ふるいでゆっくり充てんすると、石垣を積んだように、整然と充てんされるので密充てんになる。疎充てんにするには、容器の上でろう斗を置き、急速に流し込む。表一3はこのようにして測定したかさ密度の値である。密充てんかさ密度と疎充てんかさ密度の差を密充てんかさ密度で割った値を、圧密度と呼ぶ。ミュージカルサンドの場合、約10%である。円摩されていない石英粉砕物などの場合の1/2~1/3の圧密度になる。このように疎充てんかさ密度と密充てんかさ密度の差が小さいことは、砂の層を圧縮した場合に、砂粒子間のすき間は、ほんのわずかしかな変化しないことを示している。ここで求めた圧密度は最大値である。音を発生させるときの圧縮はこれよりはるかに小さいから、粒子間のすき間の変化は極めて少ない。粒子間の空気が噴出するときの音であるという空気噴出説が成立しないことはいうまでもない。

7.5 真空中でも砂は振動する

粒子間に空気が存在することは必要条件かどうかを調べ



図一9 真空中で貫入棒を押し込む実験



写真一1 砂の中に発生するすべり面のX線断面

るため、図一9のように真空中で貫入棒を押し込む実験を行った。念のため鈴をつるしておき、真空に引いて鈴の音が聞こえなくなったことを確かめた後、棒を押し込むと、空気中とほとんど変わらぬ音を発生した。真空中でも砂粒は振動し、これが乳鉢や乳棒に伝わって音を発生しているのである。この実験により、粒子間に空気が存在することを前提とした諸説はすべて否定された。

7.6 水その他の液体中でも発音する

従来の諸研究では、砂が乾燥していることを必要条件とするものがほとんどであった。しかしながら、十分洗浄して発音特性を改善した高感度のミュージカルサンドは、水、アルコールなど種々の液体中でも音を発生することを確認した。このことはさきに砂の洗浄法の説明のときにも述べたように水中で砂が移動するときの音によっても確かめることができる。空気の存在はこの事実からも必要条件から除外される。

7.7 静電気の発生

ミュージカルサンドが高感度になるにつれ、粒子の移動は著しい静電気の発生を伴う。繰返し発音させることにより、スキーキングサンドを経てキルドサンドになるにつれ、静電気の発生は少なくなる。これは微粉の発生により静電気が発生しにくくなるためである。このことは真空放電によっても確かめることができる。静電気は発音特性にとって、付随的現象と考えられる。

特別寄稿

7.8 すべり面の断面写真

Bagnold⁶⁾ は砂の中へ棒を押し込むときに砂層中で発生するすべり面の間接的発生について論じ、ミュージカルサンドの音の発生メカニズムを説明した。最近日高^{6),7),8)}はこのすべり面の発生模様を強力X線断面写真撮影に成功した(写真-1)。すべり面の発生状況はかなり複雑であるが、このすべり面の発生と、そのときに出る音との関係を目下詳しく解析中である。前述したように非常に発音特性が優れたミュージカル・サンドを、洗浄によって大量につくり出せる態勢が整ったので、いろいろな実験が可能になった。同じ試料でミュージカル、スキーキング、キルドの3条件が実現できる。換言すれば粒子の摩擦係数だけを変えて実験できるわけで、特異なすべり面の発生と、これに伴う砂粒子層の振動による音の発生を追求することができる。

8. 結 言

鳴き砂の発音機構について、今から百年以上も前から数多くの研究者たちが解明を試みてきたが、いずれも説得力に欠け、定説がなかった。今にして考えてみれば、解明の前提となる実験手段が整わなかったためであった。筆者ら

は、自然に産出する鳴き砂を洗浄して、自然界に存在するままでは到達するのに困難と思われるような、発音特性を得る方法の開発を、粉体工学的な見地より実現することができたので、これをベースにして、あらためて、発音機構の解明に努めている。本稿では、今までに得られた実験的諸事実の紹介にとどまったが、鳴き砂について考えるうえで、新しい知見と方向を模索している現状をご理解願えたならば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 三輪茂雄：鳴き砂幻想，ダイヤモンド社，1982.
- 2) 三輪茂雄：ふるい分け読本，徳寿工作所，1974.
- 3) 井上秀雄：地質調査所月報，Vol. 23, No. 12, pp. 697-719, 1972.
- 4) 皆川信弥：地質学雑誌，Vol. 65, No. 765, pp. 364-373, 1959.
- 5) Bagnold, R.A.: Proc. Roy. Soc., Vol. A 295, pp. 219-232, 1966.
- 6) 日高重助・三輪茂雄：粉体工学会誌，Vol. 18, No. 5, pp. 301-310, 1981.
- 7) 牧野和孝・日高重助：昭和56年度粉体工学会秋期研究発表会要旨集，1981.
- 8) 日高重助・三輪茂雄：化学工学論文集，Vol. 7, No. 2, pp. 184-190, 1981.

(原稿受理 1982.10.1)

書 籍 紹 介

「GROUND FREEZING 1980」

〔「地盤凍結 1980」〕

P.E.Frivik ほか編

近年、世界各国とも建設工事における施工技術の進展には目ざましいものがある。この中でも、急激な進歩を遂げたのが地盤処理技術であり、特に都市の地下工事における軟弱地盤処理法としての凍結工法は飛躍的に増加している。また、液化ガス貯蔵用地下タンクの建設に伴って、地盤を人工的に凍結させる機会も多くなってきている。

このような時代的背景をもとに地盤凍結に関する第1回国際シンポジウムが1978年、西ドイツのBochum(ボッヘム)で開かれた。第2回目のシンポジウムは1980年6月24～26日、ノルウェーのTrondheim(トロンヘイム)で、17か国から150名の人達が参加して、開催された。

本書は、地盤凍結に関する第2回国際シンポジウムに寄せられた91編の論文の中からP.E. Frivikを議長とする組織委員会が厳選した論文を一冊の本としてまとめたものであり、通常の教科書ではなく高度な内容の論文集である。

地盤凍結に関する研究成果と最近の知見を可能なかぎり豊富に網羅した内容となっているので、この方面に興味を持っておられる研究者や実務家で会議に参加されなかった方には貴重な書となるであろう。

本書は次の4部からなり、各部の冒頭にChairman's report(議長総括)とState-of-the-art report(現況総括)が収録されている。

- A. 力学的性質と過程(Mechanical Properties and Processes) — 論文数8編—
- B. 熱的性質・過程・設計(Thermal Properties, Processes and Design) — 論文数7編—
- C. 土の凍結作用(Frost Action in Soils) — 論文数7編—
- D. 設計と事例研究(Design and Case Histories) — 論文数7編—

(青山清道)

Reprinted from the journal: Engineering Geology,
Vol. 18, Nos. 1~4
B 5 判 420ページ
発行所: Elsevier Scientific Publishing Company