

鳴り砂と汚れ

Musical Sand and Impurity

川村 國夫 (かわむら くにお)
金沢工業大学教授 土木工学科

森 影 篤 史 (もりかげ あつし)
真柄建設(株)技術研究所

田所 篤 博 (たどころ あつひろ)
運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所

林 研 介 (はやし けんすけ)
金沢工業大学大学院 工学研究科

1. はじめに

古来より砂の中には、その上を歩くとキュッ・キュッと言音のする鳴り砂(鳴き砂)と呼ばれるものがある。筆者らは、平成2年度よりこれまでに日本全国の海岸調査^{1),2)}を行い、北海道・三陸海岸・北陸・山陰・北九州に現在27箇所の鳴り砂海岸の存在を確認し、それらの鳴り砂の発音特性についても報告してきた。近年、これらの海岸で、妙音を奏でなくなったのは、環境の変化や海岸地形の変化などが原因と思われる。とくに、鳴り砂は、わずかな汚れが混入することにより鳴らなくなる³⁾。鳴り音を低下させる汚れとして第一にあげられるのは、土の細粒分や有機物の混入である。

本報告は、貴重な自然遺産である鳴り砂海岸の保全を目的として、鳴り砂に混入する細粒分、特に粘土分に注目し、鳴り砂への混入の程度や、混入の仕方によって、鳴り音がどの程度変化するかを室内実験と現場調査により検討したものである。また、鳴り音の持続のためには、海岸における波による洗浄効果が不可欠となるが、この海水の鳴り音への影響についても、残留塩分の観点から検討を行っている。

2. 汚れと鳴り音の関係

2.1 試験方法

(1) 使用砂

使用した鳴り砂は、自然海岸に存在する自然鳴り砂と、人工的に精製された人工鳴り砂の2種類を用いた。

① 自然鳴り砂

石川県門前町千代浜より、現地で手でならずと鳴るほど良く鳴る海岸砂(石英含有率62.4%、平均粒径0.34mm)²⁾を、採取して使用した。ただし、初期条件を一定とするため、前処理として煮沸洗浄⁴⁾を行った。

② 人工鳴り砂

山形県飯豊産の5号珪砂(平均粒径0.46mm)を使用して、人工的に精製した鳴り砂である。

(2) 粘土材料

実際の汚れの成分を知るために、石川県門前町琴ヶ浜より、汚れによって鳴らなくなった鳴り砂を採取した。この試料は、煮沸洗浄すると鳴り音を回復する鳴り砂である。この試料より汚れ成分を抽出し、汚れの蛍光X

表一 1 現地汚れおよび混入粘土蛍光 X 線解析結果

	Al	Si	Fe	K	Ca	Na	Cl	Mg	Ti	S	P
現地 汚 れ	44.9	159.7	37.5	19.8	7.4	1.3	1.6	1.3	1.8	4.7	0.2
ベントナイト	32.1	136.3	116.0	3.8	5.6	0.6	0.2	0.4	2.0	0.6	0.1
カオリナイト	34.0	96.0	32.7	66.6	0.4	0.2	0.2	0.1	5.0	1.5	0.6
現地 粘 土	17.4	55.1	231.5	17.4	19.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2

単位：蛍光 X 線相対強度 (KCPS)

線解析を行った。その結果を表一 1 内の現地汚れとして示す。

一方、混入する粘土材料は、上記の現地の汚れの結果をもとに、成分の近い粘土材料 2 試料(ベントナイト・カオリナイト)を用いた。さらに、門前町琴ヶ浜の砂浜の後浜部より採取した粘土(以下現地粘土と呼ぶ)も使用した。これらの混入した3種類の粘土材料の蛍光 X 線解析結果を表一 1 に示す。

(3) 粘土材料の混合法

1) 気中混合法

粘土分の空気中からの混入モデルとして、前処理した乾燥鳴り砂(自然鳴り砂・人工鳴り砂)に所定の質量の粘土材料を直接混合した。

2) 水中混合法

河川、海からの粘土分混入モデルとして、純水および塩水(塩分濃度3.51%)に粘土材料を加え、濁度(SS)を調整した濁水と鳴り砂(自然鳴り砂)を混合した。混合の方法は、以下に示す。

① メスシリンダー法⁵⁾

沈降分析用メスシリンダーに試料砂および所定の濁度に調整した濁水を入れ、逆さまにしたり、戻したりして、1分間混合する。混合終了後、すばやくふるい(74 μm)にあけ、炉乾燥(60~80℃)する。

② ボールミル法

振動ボールミルにより試料砂および所定の SS に調整した濁水を20分間振動混合させる。振動終了後、すばやくふるい(74 μm)にあけ、炉乾燥(60~80℃)する。

(4) 鳴り音測定⁴⁾

鳴り音の測定方法は、乳鉢に鳴り砂を入れ、空気圧シリンダーにより突き力を一定にした乳棒により発音させた。発音した鳴り砂は、サウンドレベルメーターで集音し、FFT アナライザーにより解析した。測定された音

波特性（時間軸波形）より図-1に示すように鳴り音の継続時間および音の大きさを求めた。また、これらの時間軸波形よりスペクトル特性も計測した。

継続時間 → 時間軸波形からの継続時間 (s)
音の大きさ → 時間軸波形からの最大振幅 (V)

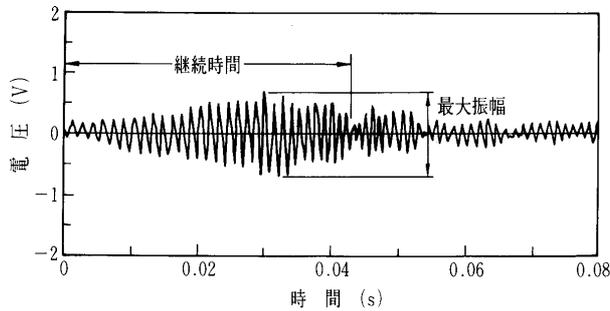


図-1 計測結果概略図

2.2 試験結果

表-2に気中混合法における試験条件の一覧を示し、以下気中混合法の結果を示す。図-2には、現地粘土の混入による人工鳴り砂の、時間軸波形とスペクトル特性の変化を示す。また、図-3、4に混合質量比と発音の継続時間、および最大振幅の関係を示す。

まず、時間軸波形の変化は、図-2(1)のような規則的な波形から、混入粘土が増加すると波形に大きな乱れが現れ始め、以後、乱れた波形が全体を占めるようになる。そして、最後には、図-2(2)に示すように、顕著な発音波形は消えていく。また、スペクトル特性におい

表-2 気中混合法

試料砂	混入粘土	混合質量比 (%)				
		0.016	0.024	0.032	0.040	
自然 鳴り砂	ベントナイト	0.000	0.040	0.060	0.080	0.100
	カオリナイト		0.017	0.033	0.050	0.083
	現地粘土		0.100	0.140	0.200	—
人工 鳴り砂	ベントナイト	0.000	0.100	0.140	0.200	—
	カオリナイト		0.020	0.040	0.060	0.100
	現地粘土		—	—	—	—

— : 鳴かなくなった試料

ては、粘土分が無い場合、図-2(1)のように、約600 Hzに最大レベルの基音周波数があり、その倍数となる周波数値に、鳴り砂特有の倍音構造²⁾が明確にみられる。そして、それらピーク値を結ぶエンベロープ（図中点線）も明確に現れ、ふくよかな音色であることを示している。しかし、混入粘土量が増加するに従って、図-2(2)に示すように、どの周波数帯にも卓越したピークがみられず、いわゆる楽音は発音されていない。これらの現象は、自然鳴り砂やほかの粘土材料に対しても同様な傾向がみられた。

次に、図-3の継続時間の変化をみると、自然鳴り砂、人工鳴り砂ともに粘土分の増加によってほぼ直線的に減少する。しかし、その減少の程度は両者によって異なる。

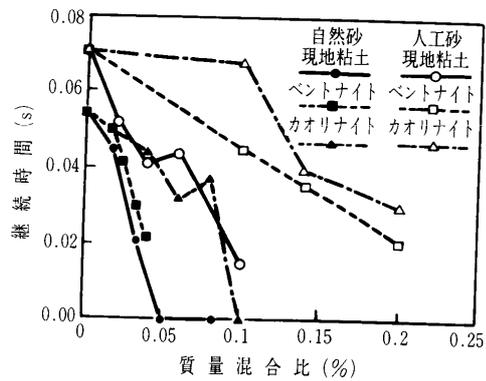


図-3 混入粘土量と継続時間の関係

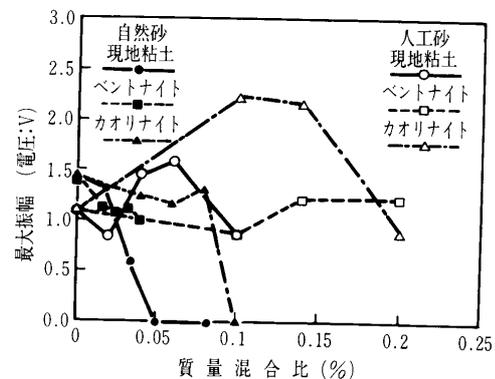
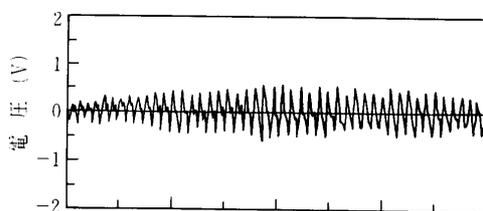
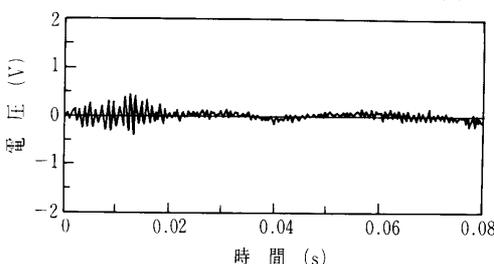
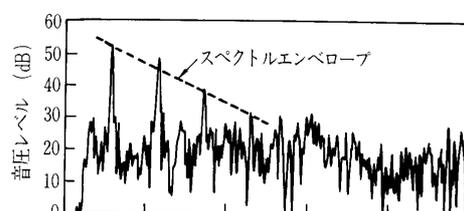


図-4 混入粘土量と最大振幅の関係



(1) 粘土混合質量比0%



(2) 粘土混合質量0.1%

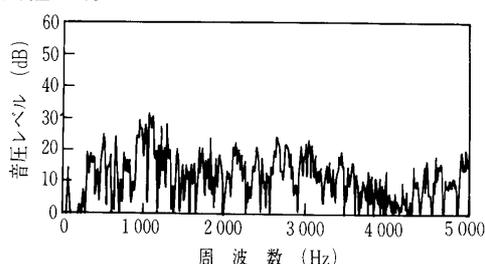


図-2 現地粘土混入による人工鳴り砂の時間軸波形およびスペクトル特性

人工鳴り砂は0.1~0.2%の粘土の混入があっても、まだかすかに鳴いているのに対して、自然鳴り砂は、0.03~0.05%でほぼ鳴らなくなる。このことは、自然鳴り砂の鳴り音よりもはるかに高感度に精製された人工鳴り砂は、自然鳴り砂よりも細粒分の混入に対する抵抗力が高いことを示している。

また粘土材料別に見ると、自然鳴り砂・人工鳴り砂ともに、最も悪影響を与えるのは現地粘土で、最も影響が少ないのがカオリナイトであった。つまり、粘土分の性質によって鳴り音への影響に違いがあることがわかる。

図-4の最大振幅の変化において、自然鳴り砂は、粘土分増加に伴い最大振幅の減少傾向がみられるが、人工鳴り砂ではあまり変化がみられない。自然鳴り砂の最大振幅の低下は、写真-1に示すように、砂の粒子に粘土分が付着して、本来の粒子間摩擦を減少させ、その結果、発音が減少することに起因するものである。これに対して、人工鳴り砂は、石英100%の珪砂を高感度に精製したもので、自然鳴り砂の石英含有率62.4%²⁾よりも石英をはるかに多く含むものである。したがって、この程度の粘土分の混入では可聴音としての発音は減少するものの、一部の石英粒子間の摩擦によって、粘土分混入前と音色が大きく異なる高周波の発音が発生するため、最大振幅に変化がないものと思われる。

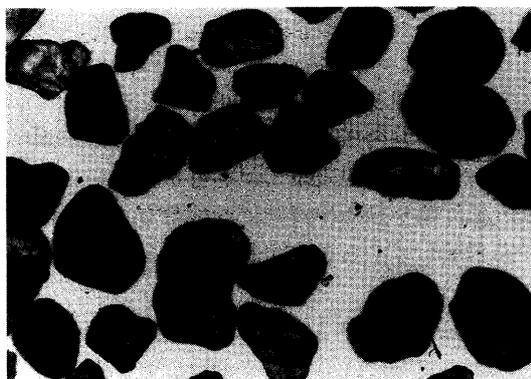


写真-1 砂の粒子に粘土分が付着している顕微鏡写真

ただ、いずれにおいても、粘土分の混入は、鳴り砂の妙音、美音の低下に大きな影響を及ぼすといえる。

次に表-3に水中混合法における試験条件の一覧を示し、水中混合法における試験結果を述べる。図-5に濁度(ppm)と継続時間の関係を示す。

図-5に示すように、継続時間の変化は、メスシリンダー法では、どの粘土についても1000ppmを越えてから短くなり始める。一方、ボールミル法についてみると、継続時間はメスシリンダー法に比べて早くから短くなる。さらに、粘土材料の違いによる影響については、気中混合と同様に、現地粘土の影響が大きく、カオリナイトの影響が少なかった。

最大振幅においては、気中混合と同様の傾向が見受けられた。

以上の結果から、混合力の強いボールミル法の方が、

表-3 水中混合法(試料砂:自然鳴り砂)

水種	混合法	混入粘土	濁度(ppm)				
			500	1000	1500	2000	
純水	メスシリンダー法	ベントナイト	0	500	1000	1500	2000
		カオリナイト		500	1000	1500	2000
		現地粘土		250	500	1000	2000
	ボールミル法	ベントナイト	0	250	500	1000	—
		カオリナイト		250	500	1000	—
		現地粘土		250	500	1000	—
塩水	メスシリンダー法	ベントナイト	0	—	500	—	—
		カオリナイト		—	500	—	—
		現地粘土		—	500	—	—
	ボールミル法	ベントナイト	0	250	500	1000	—
		カオリナイト		250	500	1000	—
		現地粘土		250	500	1000	—

□: 鳴かなくなった試料

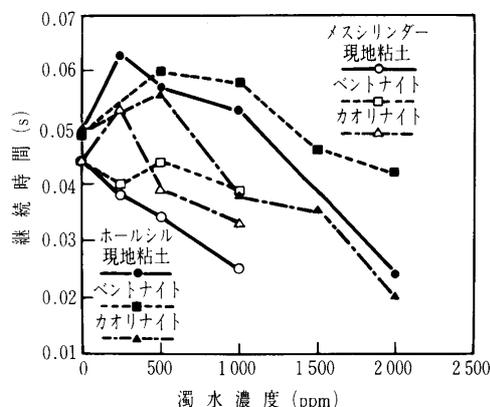


図-5 濁水濃度と継続時間の関係

粒子破碎等の影響によりメスシリンダー法より早く鳴り音の劣化が生じている。しかし、ボールミル方法でも1000ppmで、かすかに発音しているという状況である。1000ppmという値は通常、海や河川ではかなり大きな値である。今回の実験結果から考えると、無機質な粘土分は水中では鳴り砂粒子にあまり付着せず、実際の有機物や油脂分を含む状況と比較して、鳴り音への影響が少ないものと思われる。

これら気中混合実験と水中混合実験の結果から考えると、水中の粘土分の影響よりも空気中からのほこりや粉塵等の影響が大きいと思われる。

3. 塩分と鳴り音の関係

前述の水中混合法において、海水からの粘土分混入モデルとして、混合水を海水と同じ濃度の塩水として実験したところ、表-3に示すように、塩水で混合した鳴り砂は、メスシリンダー法・ボールミル法いずれにおいても、粘土分を混入しなくても鳴らなかった。

そこで、自然鳴り砂の残留塩分量について調査するとともに、鳴り音との関係について実験を行った。

3.1 自然鳴り砂の残留塩分量

鳴り砂海岸の中で、様々な位置に分布している鳴り砂中の塩分濃度をまず調査した。

(1) 試料砂

報文-2431

サンプルとしてまず以下に示す鳴り砂を用意し、その砂に残留している塩分を測定した。

前浜砂 } この3試料は、前述千代浜において図-6に
汀線砂 } 示す位置より採取した。
海中砂 }

自然鳴り砂①→現地手で鳴る高感度の試料
自然鳴り砂②→表-3中の海水・メスシリンダー法・濁度0ppm作成試料

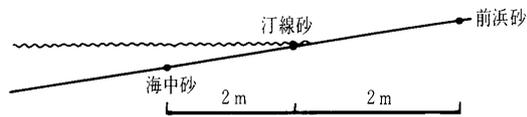


図-6 試料採取位置

表-4 残留塩分量測定結果

	残留塩分量 (gf/250g 砂)	質量比 (%)
前 浜	0.495	0.197
汀 線	2.761	1.105
海 中	3.338	1.335
自然鳴り砂①	0.006	0.002
自然鳴り砂②	1.095	0.438

(2) 残留塩分量測定結果

表-4に5種の鳴り砂の残留塩分量の測定結果を示す。測定法は、硝酸銀による滴定法を用いた。

この表より、前浜・汀線・海中の試料では陸に近いほど塩分量が少なくなっていることがわかる。このことは砂が、海から打ち上げられて間もなくは塩分量が多く、時間の経過とともに塩分が溶脱して、減少していくことを示している。

また、現地手で鳴る自然鳴り砂①は、海から程近い場所にありながら、残留塩分量が質量比0.002%と非常に低い値を示す。しかし、今回の塩水を用いて鳴らなくなった試料の自然鳴り砂②は、残留塩分量が質量比0.44%と前者に比べ約200倍の高残留率を示した。この0.44%という量は、粘土分の混入試験で鳴らなくなった粘土分量が約0.05%であり、この値よりもはるかに大きい。

3.2 残留塩分量と鳴り音の関係

自然海岸における鳴り砂の塩分量を調査した結果、採取した位置によって残留塩分量が、かなり異なることと、良く鳴る鳴り砂の残留塩分量が、非常に低い値を示すことが明らかとなった。そこで、煮沸洗浄により塩分を除去した自然鳴り砂を、濃度を種々変化させた塩水中で混合し、残留塩分量と鳴り音との関係を調べた。混合の方法は、2.1(3)のメスシリンダー法とした。

各塩分濃度(0.0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5%)の塩水で混合した鳴り砂の残留塩分量と鳴り音の関係を図-7に示す。図に示すように、塩水濃度が2.5%を越えると完全に鳴らなくなり、0.5%では若干発音が認められるが、発音しているとは言いがたい。この0.5%濃度時の残留塩分量は、質量比で0.081%あり、この値は先の気中混

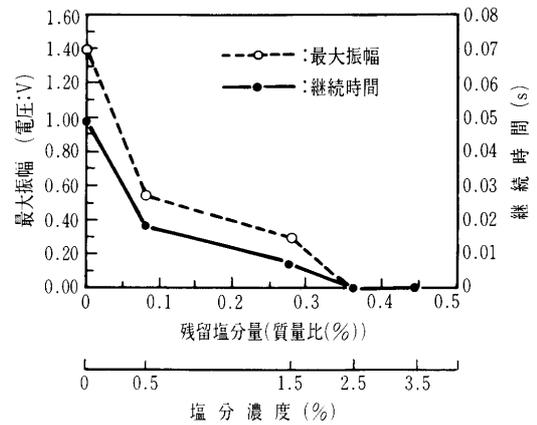


図-7 残留塩分量と発音特性の関係

合試験で鳴らなくなったときの粘土分量の結果とほぼ同じ値を示している。つまり、塩分についてもそれが乾燥して結晶状態になれば粘土分とほぼ同じ影響を鳴り砂に与えると考えられる。

以上の結果から、鳴り砂は海から打ち上げられて間もなくは塩分を含んでいるため、鳴らない状態にあると思われる。その後、時間の経過とともに降雨などによって砂中の塩分が薄められ、表-4の自然鳴り砂①のような塩分量になり、鳴り音を発するようになると考えられる。

4. おわりに

鳴り砂海岸を保全し後世に残すという目的で、鳴り砂の汚れに対する検討を行った。その結果、鳴り砂に質量比で0.1%以下という極めてわずかな粘土分や塩分などが混入すると、鳴り砂の妙音が消えてしまうことがわかった。粘土分などの混入ルートに関しては、水圏からよりも気圏からの方が現段階では影響が大きいと思われる。したがって、鳴り砂海岸背後に緑地帯などを設け、道路などから飛散してくる粉塵等を遮断し、保護に努めなければならない。

なお、今回の調査では、無機質の粘土分や塩分だけに注目したが、実際には有機物や油脂など様々な汚れがある。今後は、それらの物質についての調査を行い、海浜の水質改善などからの保護も検討していかなければならない。

参 考 文 献

- 1) 川村國夫・船越晴世・佐久間敏昭・髭本裕昌：日本の鳴り砂，土と基礎，Vol. 42, No. 4, pp. 3~8, 1994.
- 2) 川村國夫・田端竹千穂・鈴木幸一・髭本裕昌：鳴り砂の音，土と基礎，Vol. 43, No. 4, pp. 27~31, 1995.
- 3) 川村國夫・杉山秀幸・髭本裕昌：画像処理技術による鳴き砂の粒度と鉱物組成，第37回土質工学シンポジウム講演集，pp. 53~60, 1995.
- 4) 川村國夫・船越晴世・髭本裕昌・西出幸雅：鳴り砂の音波特性，第1回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 73~78, 1994.
- 5) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp. 54~67, 1990.

(原稿受理 1995.5.9)