

海浜底質の粒度特性と透水係数について

GRAIN SIZE CHARACTERISTICS AND COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF CARBONATE AND SILICA SAND

マリオ デ レオン¹⁾・西 隆一郎²⁾・北村良介³⁾

Mario de Leon, Ryuichiro Nishi, Ryosuke Kitamura

¹⁾学生会員 M. of Eng. 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目50-20)

²⁾正会員 博(工) 鹿児島大学准教授 水産学部水産科 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4丁目50-20)

³⁾正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目50-20)

This paper deals with the physical characteristics of three types of beach sediments, carbonate, silica and black sand, taken from natural and nourished beaches in the Philippines and Japan. Nineteen sediment samples were collected and analyzed for basic soil properties. Experimental procedures based on the American Society for Testing and Materials (ASTM, 1958)¹⁾ standards were applied to determine grain size and coefficient of permeability where the latter was verified by a numerical analysis using Kitamura model (1998)²⁾. As a result, this study has confirmed that grain size is directly proportional to coefficient of permeability. In addition, the field of coastal engineering uses median grain size D_{50} to describe beach sediment size and has been conveniently applied to estimate permeability. However, in the field of geotechnical engineering, D_{10} proves to be technically and empirically recognized as a better index for permeability determination.

Key Words : Grain size, coefficient of permeability, carbonate sand, silica sand, black sand.

1. まえがき

海域利用の場である自然海浜および養浜による人工海浜は、高波に対する消波機能を供する場であるとともに、海域利用者に対する親水空間の機能、および、間隙生物を含む海岸生態系の重要な生息地でもある。親水空間としての水質保全や海岸生態系保全のためには、砂浜の代表的な物理パラメーターである中央粒径以外にも、砂浜内部の透水特性や間隙の大きさなども重要な指標である。

例えば、透水係数や間隙の関連する現象として、沿岸域では、河川からの栄養塩流入以外に砂丘-砂浜背後地から地下水を通して碎波帯に栄養塩が供給され貧栄養化を防いでいる可能性がある(写真-1参照)。栄養塩の供給以外にも、生物生産性の高いサンゴ礁内の海水の富栄養化が進行しないのは、満潮時に砂浜に浸透した海水が干潮時に砂浜で濾過・浄化され礁池(イノー)内に滲出するためとも考えられる。しかしながら、海浜底質材料の透水特性に関する研究は、底質粒度(中央粒径)に

関するものと比較して十分とはいえない。さらに、今後増加する可能性がある養浜工法のように、現地海浜材料と砂質(中央粒径、比重、淘汰係数、色相、細粒分の含有率など)が異なる材料を用いる可能性のある人工海浜に対して環境アセスメントを行う場合は、粒径だけでなく、前述の海浜の濾過(浄化)機能を考慮に入れた海浜砂の透水特性にも注目しなければ、結果として、親水利用や環境保全を満足できないことも起こりうる。

そこで本研究では、海岸地下水の流れ、遡上域での up-rush・down-rush時の海水の砂浜内部への浸透、海浜安定化のための遡上域での吸水工法(写真-2参照)、潮汐変動に伴う海水の砂浜内部への浸透と滲出、背後地から極浅海域への地下水を通しての栄養塩供給、地下水および海水の浄化・濾過機能などを支配する主要なパラメーターである粒度および透水特性(透水係数)に関して考察することにする。具体的には、鹿児島県所海域の自然海浜砂、宮崎沿岸の海浜砂、沖縄県のサンゴ礁海域の底質、北海道沿岸の黒砂(砂鉄砂)、同じく北海道紋別港の養浜砂(オーストラリア輸入砂)、および、フィ

リピンのセブ島の養浜砂を用い、透水係数に関する室内実験ならびに数値実験を行い、粒度特性と透水係数の関係を定量的に求める。なお、我が国沿岸で一般的に見られるシリカ性の底質と、亜熱帯および熱帯海域に存在するサンゴ礁内海浜の一般的な底質である生物起源の炭酸カルシウム性材料とで、透水特性に相違があるのかに関しても、土質実験結果に基づいて検討することにした。



写真-1 サンゴ礁海浜への地下水の湧出状況



写真-2 吸水による海浜保全工法の試験施工状況

2. 底質サンプリング

鹿児島県内の吹上浜の10m水深の底質、養浜砂、飛砂、宮崎市住吉海岸のサンドバイパスされた砂、沖縄県石垣島吉原海岸のサンゴ礁海浜底質、北海道能取湖右岸側海浜の黒砂（砂鉄砂）、同じく北海道紋別港内の人工海浜に使用された養浜砂（オーストラリア輸入砂）、および、フィリピンのセブ空港のあるマクタン島のサンゴ礁海域内で養浜されたリゾート海浜地の底質をそれぞれ現地で採取し、計19個の試料を得た。得られた資料は大別すると、海浜で一般にみられるシリカ性の砂と、比重の高い砂鉄、そして、生物活動により生成された炭酸カルシウム性の底質（写真-3 参照）である。我が国の海岸線の

多くはシリカ性の底質が主要な構成材料と考えられるが、東京都、鹿児島県、そして沖縄県あるいは東南アジアなどにおいてはサンゴ礁海浜の環境も保全する必要がある。加えて、本土の海浜では海浜侵食が進むと比重の重い砂鉄が出現しやすいので、それぞれサンプリングの対象とした。

なお、フィリピン国内で採取された底質の一部は、セブ島のサンカルロス大学土木工学科で土質試験を行い、その他のものはすべて、鹿児島大学工学部海洋土木工学科内の土質実験室内で試験を行った。土質試験においては、まず、底質サンプルをふるいわけし、粒度分布と中央粒径、淘汰係数などを求めた。そして、密度試験、間隙比試験、飽和度試験、透水試験を順次行った。このような土質試験に加えて、粒状体モデルを用いた土質数値実験により、透水係数の算定も行い、室内実験結果と比較することにする。



写真-3 サンゴ礁海浜を構成する代表的な底質材料

3. データ解析

(1) 粒度特性

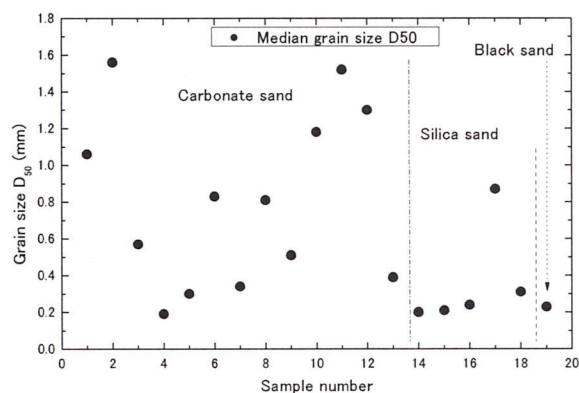
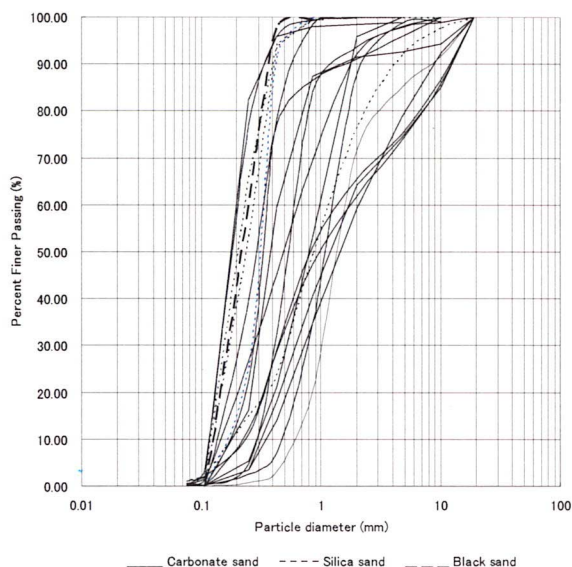


図-1 各底質サンプルの中央粒径 D_{50}

表－１ 土質試験に用いた底質材料の中央粒径，淘汰係数，密度，間隙比，飽和度，透水係数

Sample No.	Source	Type of sand	Median Size D_{50}	Sorting coefficient S_0	Particle density ρ_{sand} g/cc	Void ratio e	Degree of saturation $S_r(\%)$	Coefficient of permeability (Simulated) $k_{20}(\text{cm/s})$	Coefficient of permeability (Experimental) $k_{20}(\text{cm/s})$
1	Hilton beach	Carbonate	1.06	3.71	2.67	1.05	62.93	0.2517	0.0561
2	Hilton beach	Carbonate	1.56	2.55	2.72	1.13	65.69	0.3411	0.0839
3	Hilton beach	Carbonate	0.57	1.43	2.77	1.30	70.24	0.8853	0.0621
4	Hilton beach	Carbonate	0.19	1.27	2.69	0.98	77.10	0.0750	0.0139
5	Hilton beach	Carbonate	0.30	1.45	2.66	0.95	69.24	0.0647	0.0272
6	Hilton beach	Carbonate	0.83	3.51	2.69	1.89	41.48	0.5927	0.0467
7	Shangrila beach	Carbonate	0.34	1.27	2.65	0.83	74.56	0.0998	0.0322
8	Shangrila beach	Carbonate	0.81	1.74	2.66	0.66	71.88	0.1223	0.0475
9	Shangrila beach	Carbonate	0.51	2.17	2.68	0.77	64.82	0.0385	0.0149
10	Shangrila beach	Carbonate	1.18	1.57	2.66	0.67	75.80	0.3316	0.0569
11	Shangrila beach	Carbonate	1.52	1.68	2.65	0.89	68.50	0.9319	0.1071
12	Yoshiwara beach	Carbonate	1.30	3.00	2.67	0.89	81.37	0.7443	0.0381
13	Yoshiwara beach	Carbonate	0.39	1.52	2.66	0.90	88.27	0.1931	0.0098
14	Fukiage hama	Silica	0.20	1.29	2.37	1.37	68.08	0.1832	0.0198
15	Fukiage hama	Silica	0.21	1.39	2.55	0.84	100.00	0.0825	0.0024
16	Fukiage hama	Silica	0.24	1.41	2.57	0.97	90.13	0.1337	0.0040
17	Sumiyoshi river mouth	Silica	0.87	2.09	2.41	0.53	92.34	0.1182	0.0036
18	Okhotsuka Monbetsu	Silica	0.31	1.00	2.53	0.65	91.37	0.0640	0.0106
19	Lake Notoro	Black	0.23	1.39	4.17	0.64	87.57	0.0321	0.0090



図－２ シリカ性底質，サンゴ礁性海浜砂および砂鉄砂の粒径加積曲線

底質粒径は海浜勾配や砂浜の安定性，そして，平衡海浜断面形状（Dean 2002）³⁾を支配する最も重要なパラメーターの一つである．そこで，通常のシリカ性の砂とサンゴ礁性海浜砂および黒砂の土質試験結果を表－１に，そして，図－１に各底質の中央粒径を，図－２に粒径加積曲線をそれぞれ示す．なお，表－１には底質の種類，密度，間隙比，飽和度，そして，シミュレーションにより求めた透水係数と実測による透水係数も示してある．図－１，２と表－１より，本研究で採取したサンゴ礁性海浜砂と通常海浜砂の中央粒径は，それぞれ，0.19～1.56mmと0.20～0.87mmの範囲にあり，かつ，シリカ性の砂は比較的に粒径の小さなサンプルが多かったことが分かる．また，能取湖右岸の海浜侵食部で採取した黒砂（砂鉄砂）は，中央粒径が0.23mmと，細砂に分類される底質であったが，後述するように比重がシリカ性の砂よりも重いために，侵食過程であっても細かい粒子の底質が海浜に存在すると考えられる．

(2) 比重

ここで対象とした底質は，シリカ性，炭酸カルシウム性，砂鉄性の材料である．底質の比重としては，シリカ性材料は2.37～2.55g/cm³で，炭酸カルシウム性材

料は2.6～2.77g/cm³，そして，黒砂（砂鉄砂）が4.17g/cm³と最も重い材料であった．有孔虫の殻や貝殻片そしてサンゴ礫などで生成されるサンゴ礁性海浜砂（炭酸カルシウム性海浜砂）は，通常海浜を構成するシリカ性海浜砂よりも比重が軽いように思われがちであるが，比重の観点からは，粒径が同じであればシリカ性材料よりも比重がやや高めであるために，比較的安定した底質であると言える．また，砂鉄砂はシリカ性材料よりも比重が約1.7倍大きいために，海浜構成材料としてはより安定した底質材料と言える．

(3) 淘汰係数

底質の淘汰係数は，シリカ性材料は1.00～2.09で，炭酸カルシウム性材料は1.27～3.71，そして，黒砂（砂鉄砂）が1.39であった．なお，図-3に中央粒径と淘汰係数の相関図を示す．分散は大きい，平均的には中央粒径が大きくなるにつれ淘汰係数が大きくなる，つまり，粒度分布がより広がることが分かる．

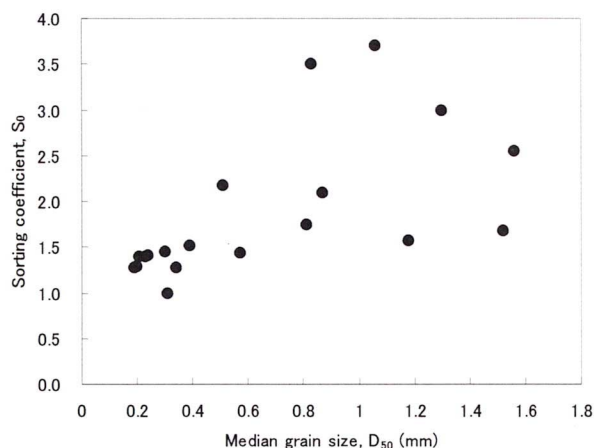


図-3 各底質サンプルの中央粒径と淘汰係数の相関

(4) 透水係数

一般的に，海浜保全の観点からは自然海浜および養浜ともに海浜構成材料の粒径が大きいほど海浜が安定しやすい．また，海浜および碎波帯の水質環境保全の観点からは，透水係数が大きいほど海水浄化機能が発揮されると推測される．海浜は，「保全・環境・利用」の重要な機能を持っているが，海浜環境が良いほど親水利用も増加すると思われる．そこで，海浜や砂丘の濾過・浄化機能を支配する主因の一つである淘汰係数に関して，水温20°の条件で，定水位透水試験を行った．

表-1に示されるように，透水係数（k₂₀）は，それぞれシリカ性材料で0.0024～0.0198cm/s，炭酸カルシウム性材料で0.0098～0.1071cm/s，そして，黒砂（砂鉄砂）で0.0090cm/sという値を示した．本実験ではサンゴ礁性海浜材料（炭酸カルシウム砂）の方が，シリカ性海浜砂よりも粒径が大きいために，透水係数が大きい，つまり海水の浄化機能が強い傾向があると言える．

透水係数は底質粒子の間隙サイズに依存するために，

中央粒径D₅₀よりもより粒径の細かいD₁₀の方が，透水係数との対応が良いと推測される．しかし，養浜などの海浜保全工事や，海浜の環境アセスメントなどでは一般的にD₅₀が使用され，公開される調査報告書でも，D₅₀以外の粒径パラメーターが記述されることは少ない．そこで，図-4に中央粒径D₅₀と実測された透水係数k₂₀の相関を示す．データは比較的線形の傾向を示しているが，中央粒径が最も大きい領域でデータのばらつきが顕著であり，相関係数Rは0.76である．

一方，図-5に間隙特性をより表現すると思われるD₁₀と透水係数の関係を示す．D₅₀ではうまく表現されなかった粒径の大きい領域が，D₁₀を用いると相関係数R=0.87と比較的良好に表現されていることが分かる．図-4と図-5の回帰直線は，それぞれ，式（1）と（2）により表わされる．砂浜の浄化機能や地下水流動特性を解明するために透水係数を推定しなければならない場合には，現実的にはD₅₀を用いることが多いと思われるが，底質サンプルが入手できるなどしてD₁₀の値が特定できる場合には式（2）を用いるべきと思われる．

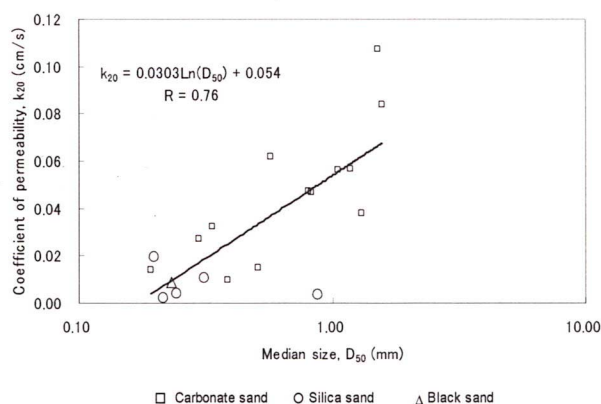


図-4 透水係数 k₂₀と中央粒径 D₅₀の相関

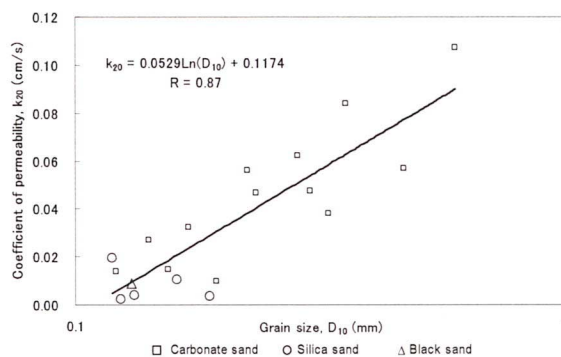


図-5 透水係数 k₂₀と中央粒径 D₁₀の相関

$$k_{20} = 0.0303 \ln(D_{50}) + 0.054 \quad (1)$$

$$k_{20} = 0.0529 \ln(D_{10}) + 0.1174 \quad (2)$$

式 (1) あるいは式 (2) を用いると、底質粒径だけに基づいて透水係数を推定することが可能である。しかしながら、透水係数は、粒度分布、間隙比、水温、飽和度、表面張力などに依存しているので、科学的にはそのような要因をすべて取り込んだうえで、透水係数の推定を行うことが望ましい。そこで、透水係数に寄与と思われる各種要因を取り込んだ数値シミュレーション手法の一つであるKitamuraモデル (1998)²⁾を用いて透水係数の予測を行った。なお、Kitamuraモデルにおいて透水係数を数値計算する場合の入力パラメータは、底質 (粒状体) 比重、間隙比、粒径、飽和度である。その結果を、 D_{50} との比較で図-6に、そして、 D_{10} との比較で図-7に示す。なお、数値計算に用いた各種パラメータの値は、実際に透水試験で用いた底質材料の特性値を用いている。

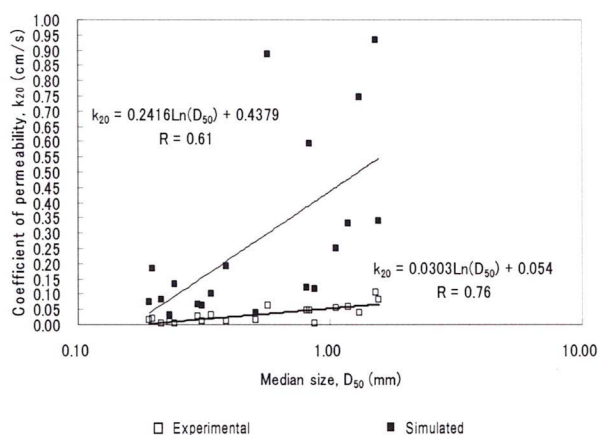


図-6 透水係数 k_{20} と中央粒径 D_{50} の相関 (数値計算と実測値の比較)

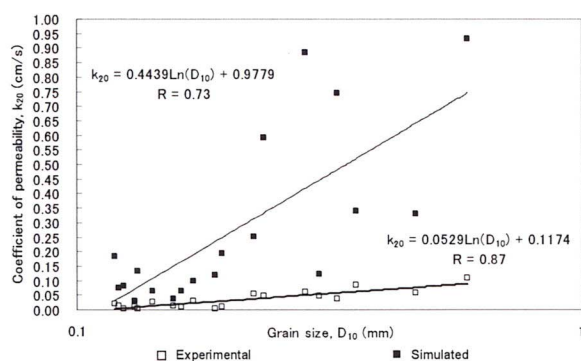


図-7 透水係数 k_{20} と中央粒径 D_{10} の相関 (数値計算と実測値の比較)

それぞれ、粒径が増加すると透水係数が増加する傾向は表現されているが、実測された透水係数に比べて、本数値計算で推定された透水係数は、オーダー的に合っているが、絶対値としては過大評価している。数値モデルは、取り扱う底質材料の詳細な土質特性を考慮できるメ

リットはあるが、現状では、透水係数の算定には式 (1) および (2) で示す簡単な線形回帰式の方が良好な結果となった。したがって、工学的には本論文で提案されるような簡便な線形の回帰式を当面は使用しながら、数値モデルの改良を継続することが望ましい。

(5) サンゴ礁内の養浜海浜勾配

通常の砂質 (シリカ性) 海浜では、海浜保全手法として養浜が一般的な保全工法になりつつある。養浜においては、養浜高さ、海浜勾配、海浜幅、延長、割増量などが重要な設計要素の一つであり、これらに関し様々な報告がなされている。一方、サンゴ礁海浜でも生態系保全や親水機能及び景観保全などの観点から養浜は望ましい海岸保全工法と言えるが、設計諸条件に関する報告例は少ない。そこで、サンゴ礁内の養浜海浜での養浜砂粒径と海浜勾配を図-6にプロットした。なお、図-8には既往の研究による値も比較のために示してある。底質粒径が大きくなると海浜勾配が陰しくなるという一般的な傾向は、サンゴ礁海浜での養浜に対しても保持されているが、図中では、シリカ性の材料よりもやや勾配がきつくなりがちな傾向が表れている。ただし、サンゴ礁海浜養浜のデータ数が12点と少ないために、今後ともデータを追加する必要がある。

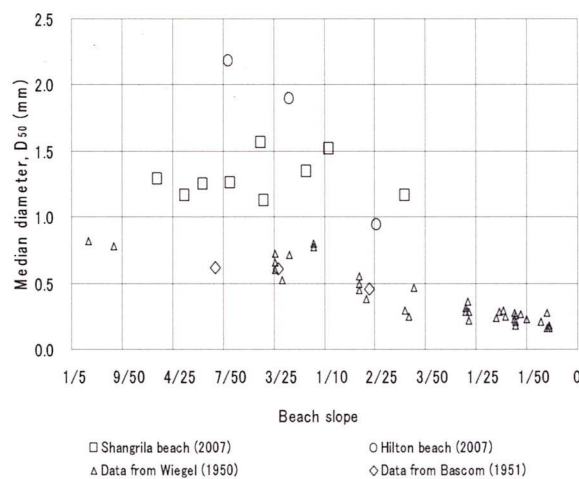


図-8 中央粒径と海浜勾配の相関 (Bascom, 1951⁴⁾ と Wiegel, 1965⁵⁾ のデータも含む)

4. 結論

本研究による主要な結論は、以下に示すとおりである。

- 1) 土質実験により求めた底質サンプルの中央粒径は、0.19～1.56 mm の範囲にあり、透水係数は0.0036～0.1071 cm/s の範囲にあった。
- 2) 室内実験で求めた透水係数と中央粒径の関係は、基本的に中央粒径が増加すると、透水係数も増加する線形の傾向を有していた。この傾向は、シリカ性の底質、サンゴ礁性海浜砂および砂鉄砂 (黒砂) とも類似して

おり、材料による大きな相違は見られなかった。したがって、本実験の粒径の範囲では、一次近似として回帰直線による透水係数を用いることが可能であると考えられる。

- 3) 北村 (1998) による粒状体モデルによって求めた透水係数と実測の透水係数では、ともに中央粒径が増加すると透水係数が増加するという定性的な傾向は一致したが、数値計算値の方が過大評価となった。
- 4) 海岸保全を対象とする場合には、海浜底質特性として中央粒径の値しか利用できないことが多い。このような場合には、本研究で提案する回帰直線を透水係数の第一次近似として利用し、底質サンプルそのものが得られる場合には、室内実験ないしは数値実験で透水係数を求めることが望ましい。

謝辞

本研究を実施するに当たり、フィリピンSan Carlos大学土木工学科のRamon Girtamondoc氏、Romeo Prieto氏、Hilton Cebu Resort and SpaホテルのAntonio Dizon氏、Shangri-Las Mactan Resort and SpaホテルのGiles Leonard氏、鹿児島大学海洋土木工学科城本技官、鹿児島大学理工学研究科鈴木君と下川君には施設の使用許可および実験の

補助を頂いた。紙面を借りて、謝意を表させていただくことにする。

参考文献

- 1) ASTM Committee D-18 on Soils for Engineering Purposes, (1958), Procedures for Testing Soils, American Society for Testing Materials, USA.
- 2) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, G., and Seyama, N., (1998), A Numerical Model For Seepage Through Unsaturated Soil, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 4, 261-265.
- 3) Dean, R.G., (2002), Beach Nourishment Theory and Practice, Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 18, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 21p.
- 4) Bascom, W., (1951), The Relationship Between Sand Size and Beach Face Slope, Transactions, American Geophysical Union, 32 (6), 866-874.
- 5) Wiegel, R.L., (1965), Oceanographical Engineering, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 531 pp.