九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# 照度計による砂表層含水比測定法

中島, 勇喜 九州大学農学部

**末,勝海** 九州大学農学部

https://doi.org/10.15017/23069

出版情報:九州大學農學部學藝雜誌.26 (1/4), pp.117-123, 1972-03.九州大學農學部 バージョン: 権利関係:

# 照度計による砂表層含水比測定法

中 島 勇 喜·末 勝 海

Measuring method of moisture content of sand surface layer by illuminometer

Yuhki Nakashima and Katsumi Sue

## I. はじめに

飛砂は砂表層が湿潤状態にある場合は,乾燥状態の 場合に比較していちじるしく少なくなるが,この現象 は飛砂特性の究明上にとどまらず,飛砂害防止上に有 効な手段を提供しうる可能性をも有している.それゆ え,この現象の解明は海岸砂防上きわめて重要な問題 である.しかしながら,砂表層の含水比と飛砂現象と の定量的関係についての研究例は少なく,<sup>106)</sup>まだ明 確になっていない.

これは世界の砂丘地帯の多くが乾燥地域に位置して いることにも原因しているであろうが、一面では、風 や飛砂によつて時間の経過とともに変化する砂表面の 状態に対応しながら、砂表薄層の含水比を風や飛砂に 影響することなく計測することが、従来の方法では不 可能であつたために、実験的研究が困難であつたこと にも起因していると考えられる. すなわち, 従来の方 法では,計測エレメントを上空から地面に接触させる と風や飛砂の状態を乱し、砂中に埋設すれば砂の移動 にともなつて露出したり、深く埋没したりして砂表層 の値を測定できず、また大きなエレメントでは時間的 に遅れを生じ, 試料を採取する方法では砂面の自然状 態をそこなうといつた難点があつた、したがつて、計 測エレメントが砂表面から遠隔的なもので,しかも多 少の砂面の変動にも対応が可能であり、試料を採取す る必要もない新測定法を開発しなければ、この方面の 実験的研究の進展は困難である.

中島(1970)は砂表面が含水比によつて、その色お よび粗度などの光学的反射条件が変化することに着目 して、砂面の光の反射率をゴルチンスキー自記日射計 によつて測定することから含水比を求める方法を開発 した.しかし、この方法は交流電源を必要とするのみ ならず、計器も大重量で室内実験用にしか使用できな いため,より簡便でしかも精度を下げず,また,計測 範囲も広い方法として市販の携帯用照度計を用いる方 法について後述のような種々の実験を試みた結果,実 用に供しうる目算をえた.この方法は単に海岸砂防上 のみならず,土砂表層の含水比測定法として広く農林 土木各方面の研究,諸技術に応用しうると考えられる ので,ここに紹介する.

## II. 実験装置および実験方法

物体に照射された光が反射する場合,直線反射と拡 散反射の2大別があるが, ³ンフン 砂表面は 構成砂粒子が 粗大であるため, 飽和冠水状態以外では拡散性の反射 となる. 拡散反射の 精密な計測には 積分球が 用いら れ、定波長光源による酸化マグネシウム面を基準とし た反射係数が求められ、これによつて反射量の多少が 判定される.2)3)7) しかし,飛砂を生じている砂表面の 光反射を計測するのに,積分球の中に実験装置を組み こむわけにはいかない、そこで、これに代わる方法と して内径 55 mm, 長さ 52 mm のフードを照度計にと りつけ、目的面外からの反射光が入らないよう配慮す ることにした.また光源としては一定の 500W. タン グステン電球を暗室中で使用するか,太陽光線による 散乱光,つまり日陰の自然光を使用するかして,波長 の変化による誤差が入らないようにした.直射日光の 場合は、灰色フィルターを装着しないと、照度計がス ケールアウトするが、フードを用いる場合には、その 装着が困難であるのと、雲のある日には時間的変動が いちじるしく、また強い影を生じて計測に支障を来た しやすいなどの理由から使用しないことにした.

このように配慮しても試料が湿潤状態から絶乾状態 に到達するまでには長時間を要し,その間には光源の 電圧や太陽光度の変化による強弱の差を生じるが,数 分間程度であればほとんど一定であることが,ゴルチ ンスキー自記日射計を用いた前回の実験で確かめられ ていた.そこで,反射率の一定な基準面からの照度を, 砂面についての計測の直後に同位置で計測し,両者の 比Rをとることによつてこの影響を除去しようと考え た.すなわち砂表面からの乱反射光による照度を  $E_s$ , 基準面からの照度を  $E_b$  とすれば

R=E<sub>s</sub>/E<sub>b</sub>
となる.それぞれの照度は、それぞれの反射率 r<sub>s</sub>, r<sub>b</sub>
に比例するものとし、入射光の強さを I とすれば、K
を測定距離やフードによる係数とすると

E<sub>s</sub>=I×r<sub>s</sub>·K, E<sub>b</sub>=I×r<sub>b</sub>·K ② I が I' に変化した場合の照度 E<sub>s</sub>', E<sub>b</sub>' は E<sub>s</sub>'=I'×r<sub>s</sub>·K, E<sub>b</sub>'=I'×r<sub>b</sub>·K ③

のように表わされる.

したがつて, Rは

 $R=E_s/E_b=r_s/r_b=E_s'E_b'$  ④ となつて光源の明るさの強弱には関係なく一定値をと ることになる. また,  $r_b$  は一定値であるから, Rは とりもなおさず  $r_s$  に比例する.

実験装置の概要は Fig. 1 のごとくである. 同図中, Lは照度計, Hは照度計にとりつけたフードで, Oは 光源である. Tは試料面あるいは基準面で, Lが受光 するT面上の面積をS, TからLまでの距離をdとす る. 試料は 150×150×2 mm のブリキ箱に平らに敷 きならし, 冠水状態から徐々に乾燥させる. その途中 の含水比を秤量によつて刻々に測定する. 秤量した 後, 試料をすぐ所定の位置におき砂表面からの照度を



Fig. 1. Schematic outline of experimental system.

- L: illuminometer.
- H: hood.
- T : sample surface.
- (sand surface or standard surface)
- S: area of reflection surface.
- d : distance between illuminometer and sample surface.

計測することを, 試料が絶乾状態になるまでくりかえ す.またそのつど, T而上におきかえた酸化マグネシ ウム粉末面あるいは黒ラシャ紙面について照度を計測 する.

このような実験装置を用いて行うべき実験としては つぎのようなものを考えた.まず,暗室中で人工光に よりIの変化によつても,一定含水比の砂面について のRは実際に変化しないかどうか,また光源の位置の 変化によつて入射角とIが同時に変化してもRに影響 はないか, dの変化はどう影響するかといつた基礎的 なものと,実際に含水比Wを測定するための検定的な RとWとの関係,その場合の基準面としては酸化マグ ネシウム面と黒ラシャ紙面のどちらがより高精度にR からWを求めることができるのか,実用上の実験式は どうなるのか,それに自然光の場合にも人工光の結果 が適用されるのか,くりかえしても同じ計測値がえら れるかといつた問題がある.

実験試料としては Table 1 に示したような 丘砂を 用いた. 試料名は採集した地名を用い, a), b), c), d) e) の略号で示した. 粒径は 200 粒について 写真濃度 計によつて計測した.<sup>5)</sup> 土色は気乾状態のものについ て土色帖により決定した.

Table 1. Average diameter and color of<br/>dune sand.

Name of sample	Average diameter (mm)	Color of sample
a) KOGA	0. 43	10 YR7/2
b) FUKIAGE	0. 41	7.5YR7/1
c) NANAKUBO	0. 54	7.5YR7/3
d) SHARI	0. 79	5 YR6/1
e) HIRATSUKA	0. 47	7.5YR3/1

#### III. 実験結果と考察

1) 基礎的実験

(1) 光源強度の変化の影響

試料 a) の気乾状態のものについて、タングステン 電球に送る電気の電圧をスライダックでランダムに変 化させて、光源に強弱をつけ、E<sub>s</sub>、E<sub>b</sub>の関係を調べ た.結果を Fig. 2 に示す. この実験での基準面は黒 ラシャ紙で、d=83 mm である.かなりの精度で直 線上に乗つており、その直線式は

$$E_{s} = 4.3 E_{b}$$

であらわされる.つまり,④の関係が実際上成立して いることになる.

(5)



Fig. 2. Relationship between  $E_b$  and  $E_s$  under different luminous intensities.

- E<sub>s</sub>: intensity of illumination on the sand surface.
- $E_b$ : intensity of illumination on the standard surface.

#### (2) 光源位置の変化の影響

光源の位置が変化すると I も変化するが、その入射 角も同時に変り、微細な陰影にも長短を生じて Rが変 化する場合が考えられる.そこで、光源の位置をラン ダムに変化させて  $E_s$ ,  $E_b$  を計測した結果を示すと Fig. 3 のようになる.この場合、基準面としては酸 化マグネシウム粉末面を、試料には a)、b)を用い



Fig. 3. Relationship between  $E_b$  and  $E_s$  under changes of distance from light source to sample surface.

た.図中の直線式は

a)  $E_s=0.313 E_b$  (6)

b)  $E_s=0.275 E_b$  (7)

となり,位置の変化も④式同様の結果となり,Rに影響をあたえないことがわがる.

#### (3) 測定距離の影響

TからLまでの距離dの変化が, Rにどのような影響をあたえるかを調べるために, dによつて決定されるSとRとの関係を試料 a) について示したものが



Fig. 4. Relationship between area of reflection surface S and R.  $R=E_s/E_b$ 



Fig. 5. Relationship between area of reflection surface S and  $E_b \cdot d^2$ , and between S and  $E_s \cdot d^2$ .



Fig. 6. Relationship between R and moisture content W using magnesium oxide as reference standard. Bending point A shows disappearance of standing water on the sand surface.

Fig. 4 である. これでは実験式を求めがたいので,  $E_s \cdot d^2$ ,  $E_b \cdot d^2$  と S とを座標軸に とつて 図示すると Fig. 5 のようになり,実験式を求めると

 $E_s \cdot d^2 = 31.36 \text{ } \text{S} - 745.72$  (8)

 $E_b \cdot d^2 = 7.47 \, S - 204.01$  (9)

となる. すなわち, Fig. 4 のRは①式によつて次式 で表わされる.

R = (31.36 S - 745.72)/(7.47 S - 204.01)

(10)

Sが 60 cm<sup>2</sup> 以下のところでは,砂面の微小な位置 の変動もRに大きく影響してくるから,なるべくそれ 以上となるように,できれば 100 cm<sup>2</sup> 以上なるよう dを定めた方が測定誤差を生じる危険が少ないことが わかる. 2) 検定的実験

R と W との関係

前述の基礎的実験結果をもとに、 d=83 mm とし て, Table 1 に示した各試料についてのRとWとの測 定結果は Fig. 6 のようになる. 同図中, Aは試料上 に冠水していた水がなくなる点を示す。各試料とも共 通してつぎのような定性的傾向が認められる.

(a). 各曲線ともA点で反転している. これはWが A点以上では冠水により直線反射が増大するためと考 えられる.

(b). A点の位置は砂粒径が大であるほどWの小さい位置に生じる. これは同一含水比であつても,砂粒径の大なるほど,砂表面の冠水状態が保たれるためである.

(c). 各試料のRとWとの関係とも変曲点を数点有 する特有な曲線関係にある. これはA点に端的にみら れるように,砂表面の含水状態や形態が各変曲点で含 水量の多少により 質的に 変化するためだと 考えられ る.

(d). 明度すなわち反射率の大なる試料ほど検定曲 線は緩傾斜となり, RからWを高精度に求めることが 可能となる. 黒色に近い砂では一定量の水分を含んだ 場合に明度の高い試料に比べ,明度の低下範囲が狭い ためだと考えられる.

#### (2) 基準面の選択

Fig. 6 は基準面として 完全拡散面にもつとも 近い とされている酸化マグネシウム粉末面を用いた結果で あるが,同じ試料について,黒色標準にかなり近似し ていると考えられる黒ラシャ紙面を基準面として用い た結果について示すと Fig. 7 のようになる. Fig. 6, 7より,基準面は後者を採用した方がいずれの場合も Rの変化範囲が広くなり,RからWを高精度に求めう ることになる.

#### (3) 実用曲線式

前記したように、本論の目的とするところは飛砂と 含水比との関係を定量的に把握するために有効な含水 比測定法を開発することである.ところで、飛砂との 関連を調べる場合の含水比は、風速や砂の粒径を考え あわせると W $\leq$ 15%が測定できれば十分使用可能で ある.そこで、W $\leq$ 15%のRとWとの関係を数量化 するために、Fig.7の曲線について検討した.その 結果、各試料について、3 $\leq$ W $\leq$ 15%の範囲において はつぎの実験式がえられた.

- a) W=R/(0.733 R-1.840) (r=0.970) (1)
- b) W=R/(0.777 R-1.696) (r=0.994) (2)
- c) W=R/(0.631 R-1.114) (r=0.996) (3)
- d) W=R/(1.319 R-1.342) (r=0.980) (4)
- e) W=R/(0.630 R-0.459) (r=0.998) (5)

つまり、 $3 \leq W \leq 15 \%$ ではかなり高い相関のもとに RとWとの関係は双曲線で近似することができること になる.また、W < 3 %では各試料とも測定個数が少 ないが、次式のように一次式によつて近似されるよう



Fig. 7. Relationship between R and moisture content W using black wool-coated paper as reference standard.

である.

a) W=-55.278 R+243.054 (r=-0.740) b) W=-15.935 R+57.741 (r=-0.977) c) W=-9.491 R+34.120 (r=-0.885) d) W=-6.667 R+13.061 (r=-0.974) e) W=-17.080 R+28.035 (r=-0.992)

3 <b>∠</b> W <b>∠</b> 15 %	$W = R/(a \cdot R - b)$
W< 3 %	$W = -c \cdot R + d$

ただし, a, b, c, d は正の係数で砂の粒径や色, ま たは基準面の明度によつて変化する.

(4) 自然光のもとでの R と W との関係およびその定常性

以上の暗室内における人工照明を用いての実験結果 をもとに、自然光のもとでも人工照明の結果が適合す



Fig. 8. Relationship between R and moisture content W under the natural light.

- O: measured value under the artificial light.
- •: 1st measured value.
- •: 2nd measured value.

るかどうか, a)の試料を用いて, W ≤15%の範囲で RとWとの関係を求めた.また,同一試料について再 度, RとWとの関係を計測し,自然光のもとで, Rと Wとの関係に定常性があるかどうかも検討した.その 結果を Fig. 8 に示す.

Fig. 8 中の自然光のもとでの実験結果を 3 <u>∠</u> W <u>∠</u>15 %について数式化すると次式のようになる.

1. W=R/(0.704 R-1.806) (r=0.984)

2. W = R/(0.749 R - 1.883) (r=0.968)

これらの実験式間には有意差は認められない. それ ゆえ, RとWとの関係は次式であらわされる.

 $3 \leq W \leq 15 \%$  W=R/(0.721 R-1.812) (r=0.967)

また、上式は前記の人工照明の場合の実験式@とも 有意差はないので、自然光にも人工照明の結果が適用 されることになる.また、W<3%では、Rの変化範 囲が狭いので、ここでは実験式は算出しなかつた.

IV. 実験結果の総括およびその実用法

基礎的実験によつて明らかとなつたことは、③同一 含水比,同一試料では,光源の光度が変化しても,砂 表面と基準面との照度を同時的に計測することができ れば,その比Rは定常的に一定値をとる. ⑤また,光 源の位置が変化してもRは一定値をとる. ⑥しかし, dが変化しそれにともなつてSが変化すると,RとS とには次の関係がなり立つ.

 $R = (A \cdot S - B)/(C \cdot S - D)$ 

ただし, A, B, C, Dは正の係数.

④これらの基礎的実験の結果は理論的には、試料面あるいは基準面の反射率が入射光の強弱に関係なく一定であると考えることによって説明される。

検定的実験では、**(a)** RとWとは変曲点を数点有する 特有な曲線関係にある.またその関係は試料の明度が 高く、基準面の明度が低いほど緩傾斜となり、Rから Wを高精度に求めることができる.**(b)** 飛砂との関連か らみて、W**仁15**%ではつぎの実験式がRとWとの間 に成り立つ.

 $3 \leq W \leq 15\% \qquad W = R/(a \cdot R - b)$  $W < 3\% \qquad W = -c \cdot R + d$ 

ただし, a, b, c, d は正の係数.

しかし, W<3 %においてはWの変化にくらべて, R の変化範囲が狭いので, RからWを高精度に求めるこ とは期待しがたい. ©自然光の場合にも⑥が適合し, 人工光の結果がそのまま適合する.また, RとWとの 関係は定常的に再現される.

実際の計測には以上の法則性を利用して、目的とす

る試料について検定曲線を作成し、実験砂面上に検定 時と同じ位置関係になるよう照度計を設置し、刻々の 照度を計測するごとに同じ条件で照明されている基準 面の照度を計測して、両者の比を求め、検定曲線によ つて含水比を求めればよい.

#### V. 摘 要

飛砂量は砂表層が湿つている場合には,乾いている 場合よりいちじるしく少なくなるが,それらの定量的 関係はまだ明らかではない.この問題は海岸砂防研究 上には重要であるが,従来の土壌水分測定法では,試 料を採取したり,測定エレメントを砂中に埋設した り,砂面に接触したりするため,飛砂や風の状態に影 響して,正確な実験ができなかつたために実験的研究 は進展しなかつた.

筆者らは砂表面の色が,砂表層の含水比によつて変 化することに着日し,光学的にその変色度合を測定す ることによつて目的を達する新方法を開発してきた. 本報には市販されている照度計による簡便な方法につ いて述べた.乱反射光による照度を,目的とする砂面 と,ある基準面との両方について計測し,両者の比R と,その時の砂表層含水比Wとを計測して検定曲線を Fig. 6 および Fig. 7 のごとく求めておけば, その砂 表層については, 周囲の明るさに関係なくRからWを 求めることができる.

#### 引用文献

- 1) 秋葉満寿治(1933): 砂土含水量と飛砂限界風 速度との関係. 農業土木研究, 第5巻, 第2 号, 159-174.
- Keitz, H. A. E. (1955): Light calculations and measurements. Philips' Technical Library, London.
- Kubelka, P. and F. Munk (1931): Ein Beitrag zur Optik der Farbenanstriche. Z. techn. Physik 12, 593-560.
- 中島勇喜(1970): 光反射率による砂表面の含 水比測定(I). 砂丘研究,第17巻,第1号, 35-39.
- 5) 中島勇喜・末 勝海(1968): 写真濃度計によ る粒径分布計測の自動化について、日本林学会 九州支部研究論文集,第22号,146-147.
- 末 勝海(1968): 海岸砂防工に関する基礎的 研究. 九州大学農学部演習林報告,第43号,29 -40.
- 7) Walsh, J. W. T. (1949): Photometry. Constable & Company Ltd., London.

#### Summary

When the sand sutface layer is wet, the mass of sand moving is remarkably decreased compared with the case when it is dry, but a quantitative relation has not been clarified yet. Notwithstanding the importance of this problem for the research of coastal sand dune stabilization, in the conventional measuring methods of soil moisture content, it was attempted to take out the sample and to embed the measuring element in the sand or to make it contact with the sand surface, so that the conditions of blown sand and wind are influenced, making it impossible to carry out accurate experiment, retarding the progress of technique.

Having noticed the fact that the color of sand surface changes by the moisture content of sand surface layer, the authors have been developing new methods of measuring optically the degree of color change, by which our object has been achieved.

Here a simple method using an illuminometer on the market is mentioned. Namely, the intensities of illumination due to scattered reflected light on the sand surface in question and on the standard surface are measured, and the ratio  $\mathbf{R}$  of the both intensities and the moisture content W of sand surface layer measured each time are employed for drawing calibration curves as shown in Figs. 6 and 7, then the value of W in the sand surface layer under consideration can be determined from the value of  $\mathbf{R}$  independently of the environmental brightness.