

## 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 : 九州大学農学部学藝雑誌. 26 (1/4), pp.117-123, 1972-03. 九州大学農学部  
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>1)6)</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った難点があつた。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、<sup>3)7)</sup> 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。<sup>2)3)7)</sup> 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が、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 $R$ をとることによっ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

$$R = E_s / E_b \quad (1)$$

となる。それぞれの照度は、それぞれの反射率  $r_s, r_b$  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

$$E_s = I \times r_s \cdot K, E_b = I \times r_b \cdot K \quad (2)$$

$I$  が  $I'$  に変化した場合の照度  $E_s', E_b'$  は

$$E_s' = I' \times r_s \cdot K, E_b' = I' \times r_b \cdot K \quad (3)$$

のように表わされる。

したがって、 $R$  は

$$R = E_s / E_b = r_s / r_b = E_s' / E_b' \quad (4)$$

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  $150 \times 150 \times 2$  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って刻々に測定する。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

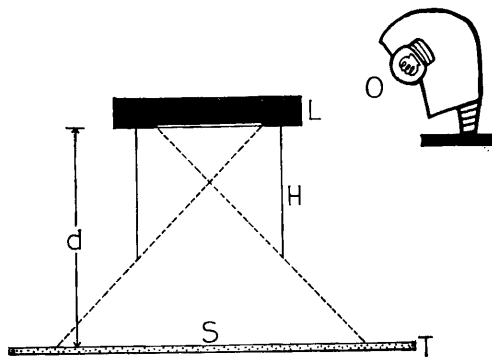


Fig. 1. Schematic outline of experimental system.

$L$ : 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、 $T$  面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った基礎的なものと、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った問題がある。

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 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、タンゲ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、 $E_s, E_b$  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っており、その直線式は

$$E_s = 4.3 E_b \quad (5)$$

であらわされる。つまり、④の関係が實際上成立していることになる。

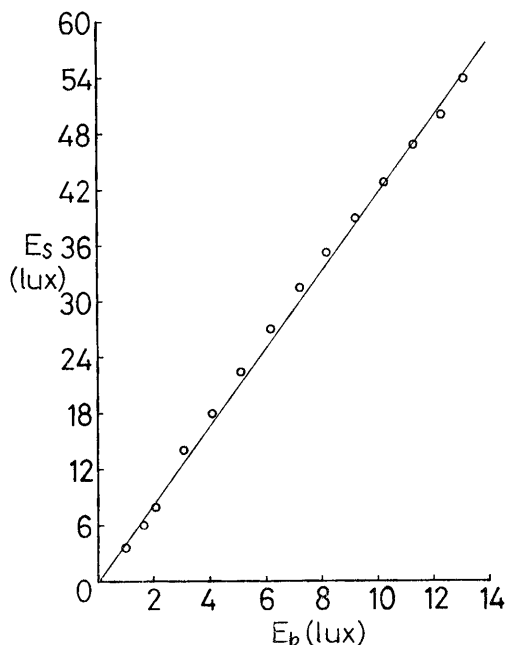


Fig. 2. Relationship between  $E_b$  and  $E_s$  under different luminous intensities.

$E_s$ : 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わり、微細な陰影にも長短を生じて  $R$  が変化する場が考えられる。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

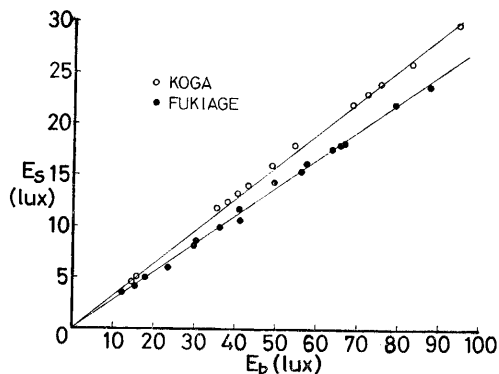


Fig. 3. Relationship between  $E_b$  and  $E_s$  under changes of distance from light source to sample surface.

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かる。

(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、 $d$  によって決定される  $S$  と  $R$  との関係を試料 a) について示したものが

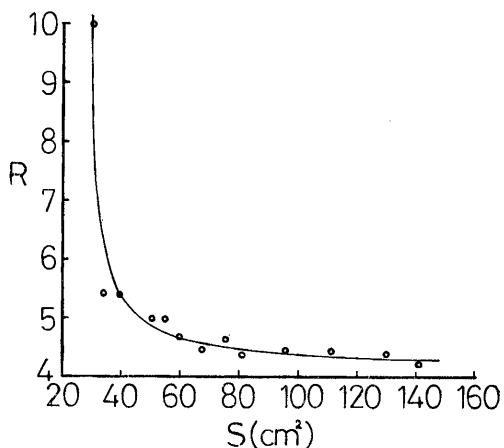


Fig. 4. Relationship between area of reflection surface  $S$  and  $R$ .  $R = E_s/E_b$

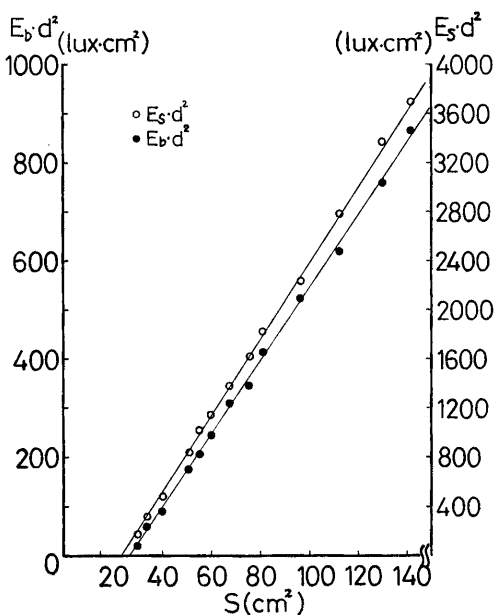


Fig. 5. Relationship between area of reflection surface  $S$  and  $E_b \cdot d^2$ , and between  $S$  and  $E_s \cdot d^2$ .

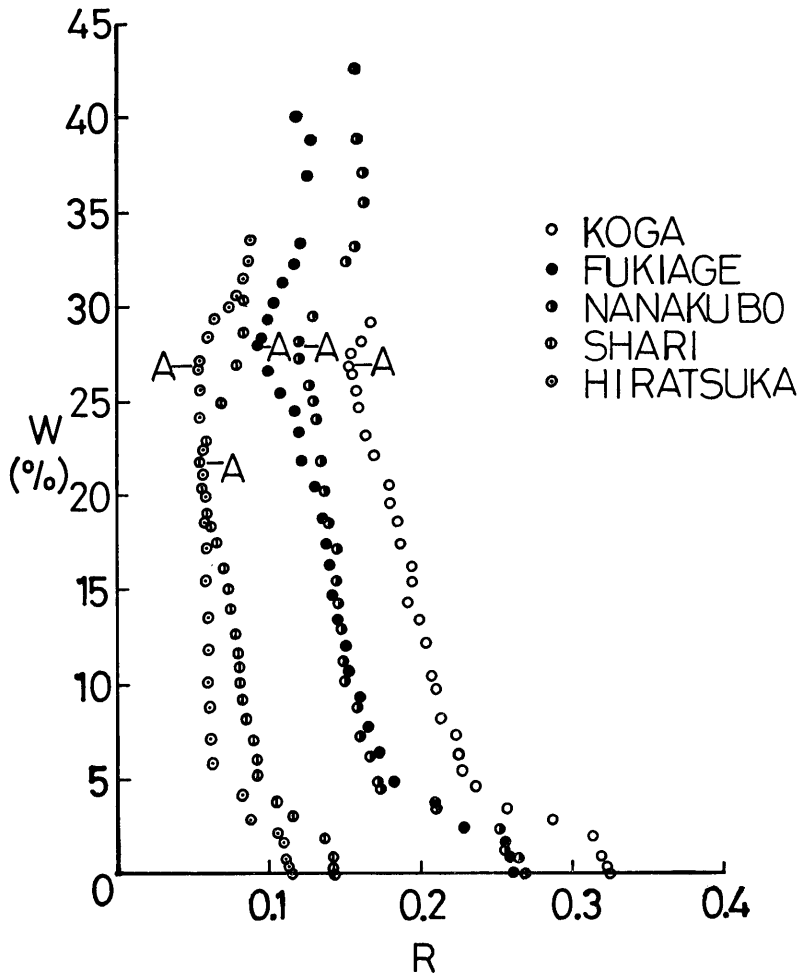


Fig. 6. Relationship between R and moisture content W using magnesium oxide as reference standard. Bending point A shows disappearance of standing water on the sand surface.

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

$$E_s \cdot d^2 = 31.36 S - 745.72 \quad (8)$$

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

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。

$$R = (31.36 S - 745.72) / (7.47 S - 204.01) \quad (10)$$

S が  $60 \text{ cm}^2$  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  $100 \text{ cm}^2$  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

### (1) R と W との関係

前述の基礎的実験結果をもとに、 $d=83 \text{ mm}$  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。

$$a) \quad W = R / (0.733 R - 1.840) \quad (r = 0.970) \text{ ⑪}$$

$$b) \quad W = R / (0.777 R - 1.696) \quad (r = 0.994) \text{ ⑫}$$

$$c) \quad W = R / (0.631 R - 1.114) \quad (r = 0.996) \text{ ⑬}$$

$$d) \quad W = R / (1.319 R - 1.342) \quad (r = 0.980) \text{ ⑭}$$

$$e) \quad W = R / (0.630 R - 0.459) \quad (r = 0.998) \text{ ⑮}$$

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

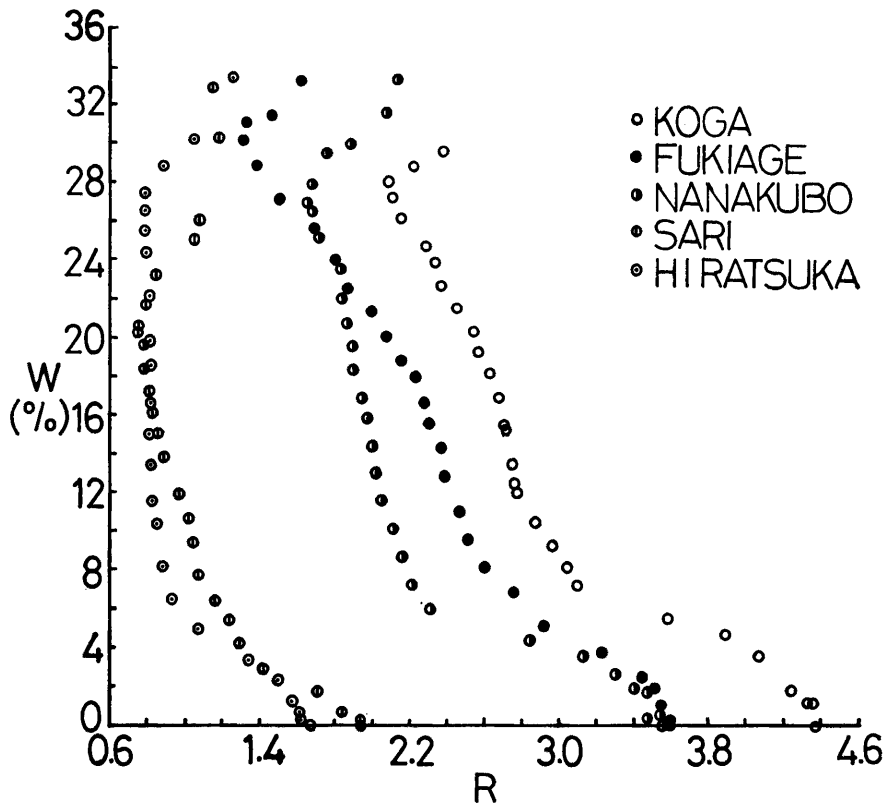


Fig. 7. Relationship between R and moisture content W using black wool-coated paper as reference standard.

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)  $W = -17.080 R + 28.035$  ( $r = -0.992$ )

それゆえ、試料の厚さが 2 mm の場合における  $W \leq 15\%$  の R と W との関係はつぎの実験式によって一般的にあらわされる。

$$\begin{aligned} 3 \leq W \leq 15\% & \quad W = R / (a \cdot R - b) \\ W < 3\% & \quad W = -c \cdot R + d \end{aligned}$$

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って変化する。

#### (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

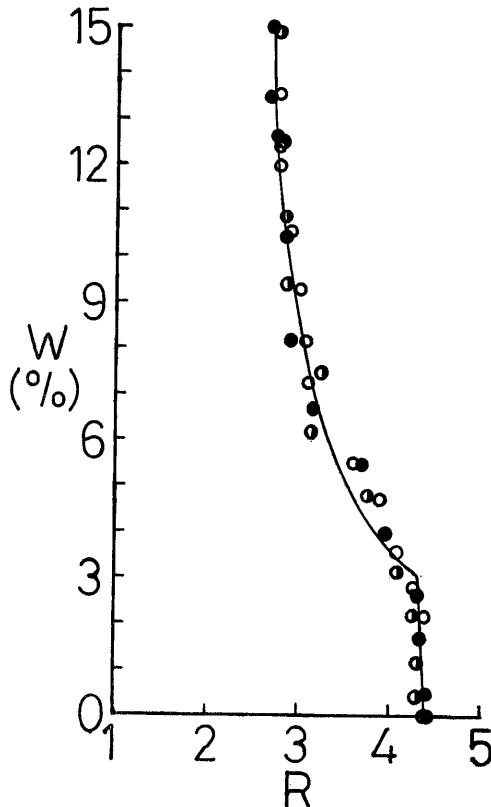


Fig. 8. Relationship between R and moisture content W under the natural light.

- : 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、 $W \leq 15\%$  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を検討した。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  $3 \leq W \leq 15\%$  について数式化すると次式ようになる。

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

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

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。

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

また、上式は前記の人工照明の場合の実験式⑩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

基礎的実験によって明らかとなつたことは、⑩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。⑪また、光源の位置が変化しても R は一定値をとる。⑫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。

⑬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つて説明される。

検定的実験では、⑭R 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。⑮飛砂との関連からみて、 $W \leq 15\%$  ではつぎの実験式が R と W との間に成り立つ。

$$3 \leq W \leq 15\% \quad W = R / (a \cdot R - b)$$

$$W < 3\% \quad W = -c \cdot R + d$$

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。⑯自然光の場合にも⑩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と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っている場合には、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目し、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.
- 2) Keitz, H. A. E. (1955) : Light calculations and measurements. Philips' Technical Library, London.
- 3) Kubelka, P. and F. Munk (1931) : Ein Beitrag zur Optik der Farbenanstriche. Z. techn. Physik 12, 593-560.
- 4) 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.
- 6) 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 surface 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  $R$  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  $R$  independently of the environmental brightness.