

He-Neレーザーを用いた飛砂速度分布測定装置の開発

吉田, 瑞樹

中山, 牧

中島, 勇喜

末, 勝海

他

<https://doi.org/10.15017/10803>

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 53, pp.235-254, 1983-03-25. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

He-Ne レーザーを用いた飛砂速度分布 測定装置の開発

吉田 瑞樹・中山 牧・中島 勇喜
末 勝海・富田 義一

Method for Measuring the Speed Distribution of
Blown Sand Using Laser Beam

Mizuki YOSHIDA, Osamu NAKAYAMA,
Yuhki NAKASHIMA, Katsumi SUE,
and Giichi TOMITA

目 次

- §1 緒 言
- §2 装置の構成とその原理
- §3 パルス巾分布分析器
- §4 装置の検定に関する考察
- §5 装置の検定結果
- §6 風洞実験とその結果
- §7 結 論

§1 緒 言

砂浜海岸を持つ地方では、飛砂による災害は古来大きな問題であった。この飛砂現象を物理的に解明するためには、飛砂量と風速の関係、空気中での砂の沈降に及ぼす空気の流れの影響等を流体力学的に把握する必要がある。この論文では、それらのうち、飛砂速度分布測定問題に限定し、新しい測定方法の開発に関して論述する。

従来、飛砂量は、種々の形をしたトラップ（集砂器）で測定されてきた。これらは屋外調査に用いられるため、頑丈で、測定そのものは簡単である。しかしこれらを用いた飛砂量測定は、トラップを風向に対して直角に、砂の流れを遮断するように設置するため、その構造の相違により、捕集率が異なることが河田¹⁾により指摘されている。河村²⁾はこれを避けるため、砂が存在する時に光量が変わることを利用して飛砂量の推定が可能であることを報告している。また捕集精度の向上を目的とした、トラップの構造の改良に関する堀川、SHEN³⁾の研究も報告されている。

現在使用されているトラップでは各型式間の構造に相違があり、同じ現象であっても、得られたデータには差が認められる。従って後述するような理由から、非接触方式の飛砂量測定装置の早急な開発が望まれる。

現在使用されている飛砂量測定法の問題点を挙げると次の3点に要約される。

1) トラップを風向きに直角に設置するため、空気の流れが変わり、正確な飛砂現象としてとらえ難い。砂の運動を止めるための目の細かい網の影響などの問題がある。

2) 野外実験を行う際、トラップの基礎を砂中に埋めてこれを固定するため、対象とする砂表面の物理的性質が変化する。

3) トラップを使用して、飛砂量を測定するのは、これを一定時間設置し、捕集した砂の量を計測するという、一種の積分方式である。例えば、風洞実験に於て、トラップを設置のちにファンの回転数を上げて風速を増し、一定時間ののちファンを止め、トラップに捕集された砂の量を測定するという過程が必要である。故にこの方法では風速と飛砂の関係のようなデータを採ることは、大変な手数と労力を必要とするし、また時間的、空間的微分のような測定は容易ではない。従って新しい測定方法は、風の中にその流れを妨げるトラップを入れない、かつ砂表面と接触しないものを開発すべきである。

我々は以前レーザービーム中を砂粒が通過する際、ビームの光量が増加することに着目し、その変化の回数を計数することにより、飛砂粒数を測定できる装置を作って、これを飛砂カウンターと名づけ、実用化することができた⁴⁾。

この論文では、砂粒がビームを横切る回数だけではなく、その時に生じる電気的パルスのパルス巾分布が採れる装置の開発について述べる。これを利用すれば、粒径がある程度そろっている場合、飛砂の速度分布が測定可能であり、また任意高さでの飛砂粒数と風速の関係のみならず、その高さでの速度分布を知ることにも可能である。

この論文の内容の一部は応用物理学英文誌 *Jpn. J. Appl. Phys* **21**: 885, 1982. に報告したが⁵⁾、紙数の制限で掲載できなかった図表があり、設計の段階で検討したことも発表できなかった。そこでここでは、そのようなことに紙数を補なって、全体を詳細に報告する。

この論文の特色はレーザービームを砂粒が横切る際に生ずる光量変化を電気的パルスを生じさせ、そのパルス巾の分析により、ある条件のもとで、飛砂の速度分布を測定可能とした点にある。

なおこの方法ではパルス巾は、飛砂の速さと粒径で決定される。どちらかを一定に保たなければ、一方は決定できない。現在飛砂速度を一定にする方法はないため粒径をそろえて速さを測定する方法を開発することにした。

現在流体の精密な速度分布の測定は *Laser Doppler Velocimeter* で行われている。これの測定原理は *YEH*⁶⁾ 等が考案したもので、流体あるいはその中に浮遊するほりにレーザー光をあて、その散乱光の *Doppler* シフトを分析することにより速度を知るといものである。また二つのレーザーを用い、粒子サイズ、速度を知る方法を *BACHALO*⁷⁾ が1980年に開発したが、いずれも複雑な光学系では野外測定用に不相当であろう。従ってこの論文ではこれらとは異なる原理による測定方法を開発した。

§2 装置の構成とその原理

2-1 測定原理

装置のブロックダイアグラムを図1に示す。図中、Lは He-Ne レーザーで、682.9nmの波長の指向性の鋭い、単色光の光源である。この光ビームを受光部Pで受ける。この

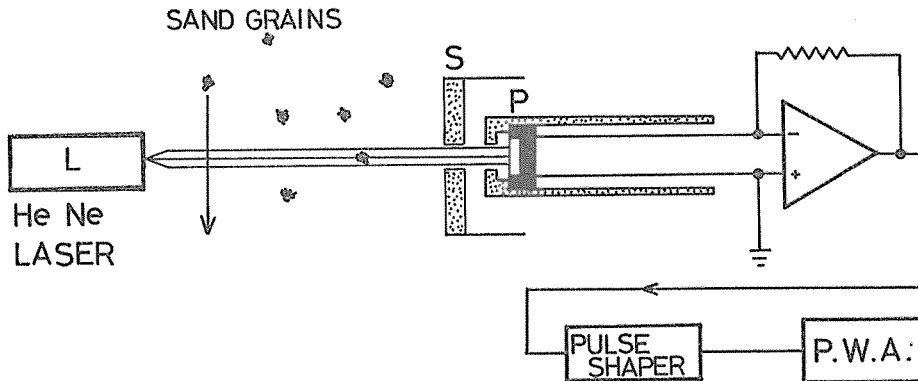


図1 装置の原理図。Lは出力1mWのHe-Neレーザー。Sはスリット、Pは光検出器で、シリコン・フォトダイオードであり、レーザーのビームはPに垂直にあたる。砂粒がビームを通過すると光量が変わる。これをPと引き続いた増巾器で、増巾し、パルスに整形し、これをパルス巾分析器で分布を測定する。

ビーム中に光学的に不透明なものが通過すると、受光部に入る光量が減少する。この光量を受光部のシリコン・フォトダイオード（以下 S.P.D. と略記する）で電圧に変換しその変化分だけを増巾し、それをレベル・コンパレーター（Level Comparator）によりパルスに整形し、このパルスの中をパルス巾分析器により分析するようになっている。

一般に砂の形は不規則であり、ふるい分けしたとしても、砂粒の空気中の運動は、理論的に取り扱えない。そこでここでは、砂粒の短径、長径を測定しその算術平均をとり、これを等価球の直径 d として、この球の運動について考えることにする。

光ビームの平行度は良く、拡りは 0.5 m rad 以下であり、平行光線と見なすことができる。受光部の前に巾 w のスリットがあり、ここを直径 d の球が速さ V で通過したときの、ビーム中の砂粒の

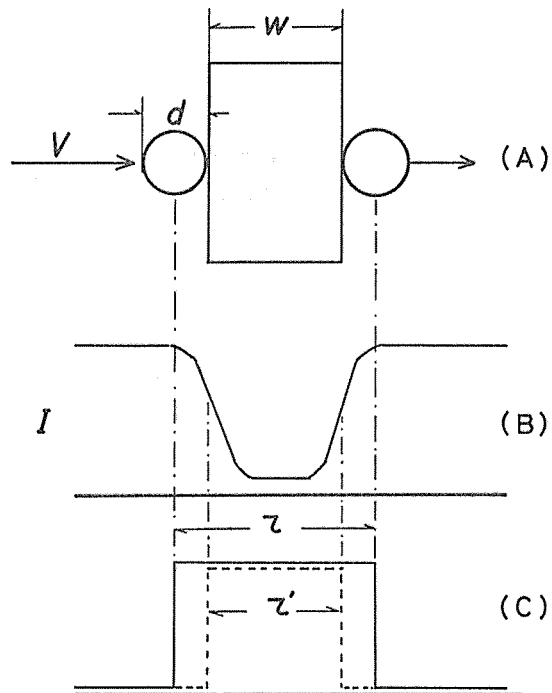


図2 粒径 d の砂粒がレーザービームに入ったときの、位置 (A) と光量 I の変化 (B) との砂が移動した結果生じたパルス (C) の関係を示す。生じたパルス中は、レベル・コンパレーターの閾値を零レベルに選んだ時の場合を τ 、ビームの端に砂粒の重心が入った時の電圧に閾値を選んだ時が τ' である。

位置 (A) と光量 I (B) と出力パルス (C) の関係を 図2 に示す。

このとき得られたパルス巾 τ は V, w, d により次のように表わされる。

$$\tau = \frac{d+w}{V} \quad (1)$$

図2(C) の τ' については後述する。

通常の条件下では飛砂あるいは砂漠の砂の粒径の分布はそれほど広くはない²⁾¹¹⁾。ある程度粒径分布をそろえて、風洞実験を行っても対象とする自然の条件とは大した相異はない。

もし粒径がそろっていて、 d の分布がスリット巾 w に比較し小さければ、 τ は V のみの関数である。従ってパルス巾 τ の分布を知ることが可能であれば、飛砂の速さの分布を知ることが可能になる。

2-2 測定器の構成

図1に於てLは日本科学工業 株式会社 製型番 NEO-1M の He-Ne レーザーで出力は1 mW である。Pは受光部であり、光電変換素子として、浜松テレビ 株式会社 製 S-1133-01 の S.P.D. を使う。この S.P.D. の受光部は長方形で、その面積は $2.8 \times 2.4 \text{ mm}^2$ である。Sは受光部の前に置かれたスリットであり、高さ30 mm、巾は0.01~3.00 mm の範囲で連続可変で、 $10 \mu\text{m}$ の精度でスリット巾を設定できる。図3に受光部の設計図を示す。

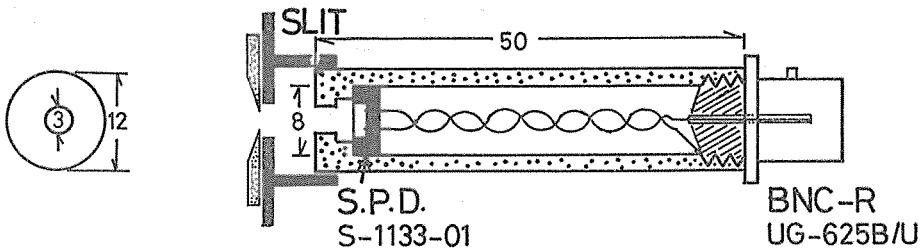


図3 光検出器の図。外側は12 mmφの黄銅をくり抜いて作った。S.P.D. の受光部の面積は $2.8 \times 2.4 \text{ mm}^2$ である。光電流は BNC 接栓で取り出し、本体との間を2 m の同軸ケーブル 3C-2V で接続する。

この図で大きさは mm 単位で記入され、外筒は12 mm の黄銅丸棒をくり抜いて作った。

光量は原理的には S.P.D. の光電流を測定する。速さ測定の都合で、光検出回路は、光量に対して直線性の良いこと、かつ高速応答性が要求される。図4に光電流—電圧変換回路、交流増幅器、レベル・コンパレーターの回路図に定数を入れたものである。

図4において、 Q_1, Q_2 は高速オペレーショナルアンプ (以下 Op-Amp) LF-357 を使用する。S.P.D. と Q_1 を接続する方法は WITHERELL と FAULHARBER⁹⁾ らが光量測定のために考案した方法である。この方法の利点は二つある。一つは負荷抵抗 Z_f を $10 \text{ k} \sim 10 \text{ M}\Omega$ の間に変化させることにより、 $10^{-3} \sim 10^{-12} \text{ A}$ の広い電流領域にわたり、光電流—電圧変換に直線性を保証できること。第二に S.P.D. との組合せでは、ほぼ Op-Amp のスルーレイト (Slewing Rate) で光量測定の応答時間が決定される点である。

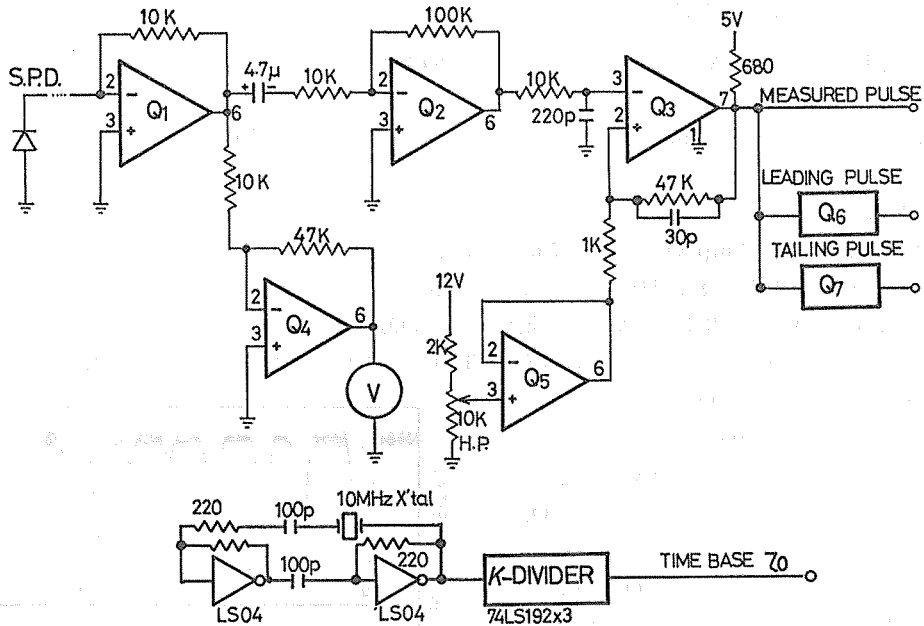


図4 装置のアナログ部分の回路図。Q₁ は電流電圧変換回路、Q₂ は利得 10 の A.C. 増中器、Q₃ はレベル・コンパレータである。Q₁、Q₂ は光電変化が速いので、DC-250 kHz まで増中可能なように LF-357 を使った。Q₆、Q₇ で被測定パルスの立ち上がり、下りでリーディングエッジパルス (L.E.P.)、テイリングエッジパルス (T.E.P.) をワンショット・マルチバイブレータで発生させる。Q₄ は Q₁ の出力を 4.7 倍直流増中し 10 V の電圧計 V でレーザーの光量をモニターするため設けられた。

Q₁ の負荷抵抗の選び方はレーザー出力、スリット巾等を考慮して決定する。Q₄ の出力は、ビーム光量のモニター用として使う。電圧は 10 V の電圧計で監視する。Q₄ の利得は 47 kΩ/10 kΩ で与えられ、これは V_{cc}、-V_{cc} に 12 V を使うため 10 V 以下である必要がある。Q₁ の出力は 2.2 V 以下である必要がある。Q₁ の出力はレーザービーム光量の範囲で線型でなくてはならず、1 V 以上 2 V 以下になるように Z_f を決定する。今回の組合せでは Z_f = 10 kΩ に選んだ。

一般に S.P.D. の光強度に対する直線性は、その等価負荷抵抗の大きさにより決定される。S.P.D. に直列に接続される抵抗が大であれば、弱光に対して感度は良いが、強光下では出力電圧は飽和してしまい、直線性が失われる。この回路を用いることにより、S.P.D. の等価負荷抵抗 Z_{in}^{eff} は Op-Amp のフィードバック・インピーダンス (Feed back impedance) Z_f、Op-Amp のオープン・ループゲイン (Open Loop Gain) A、入力インピーダンス Z_D を用いると次のように表わすことができる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

$$Z_{in}^{eff} \cong \frac{Z_f}{1+A+Z_f/Z_D} \cong \frac{Z_f}{A} \quad (2)$$

Op-Amp として LF-357 を選んだが、これは A ≅ 10⁵、Z_D = 10¹² Ω の値を持つ。Z_f = 10 kΩ とすると、Z_{in}^{eff} = 0.1 Ω となり、Q₁ はほぼ理想的な電流計となる。出力電圧 e (Q₁ 段階での) は光電流を i_p とすると次のように表される⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

$$e_0 = -i_p Z_t. \quad (3)$$

この光検出系は 1 mA までの光電流に対して直線性を有する。

この検出系はさらに高速応答性が要求される。例えば $w=0.5$ mm のスリットを 0.5 mm の砂粒が速さ 10 m/s で通過したとすると (1) 式により $100 \mu\text{s}$ の巾を持つパルスが発生する。1% の精度で光量変化をパルスに変換しようとする立ち上り、立ち下り時間 $1 \mu\text{s}$ の光検出系が望ましい。

S.P.D. と Op-Amp Q_1 の間を 2 m の同軸ケーブル (3C-2V) で接続して、半値巾 $1 \mu\text{s}$ のパルス光をこれに照射した場合、検出系は $2 \mu\text{s}$ の立ち上り立ち下り時間を持った。図 4 の Q_2 は利得 10 の AC 電圧増巾回路で、 Q_3 はレベル・コンパレータ LM-311 でここで光量変化のため生じた電圧変化を TTL レベルのパルスに変換する。 Q_5 はレベル・コンパレータ Q_3 に基準電圧を与えるためのもので、 $10 \text{ k}\Omega$ のヘリカルポテンシオメータの電圧 (0~10V) を十分に低い出力インピーダンスの電圧にして Q_3 に与えるための回路である。図 5 に実際に砂がビームを通過したときの Q_1 の出力 (光量 I に対応する)、(A) と下向きに生じたパルスを示す。

この図で Q_3 の閾値は 3V 附近に設定しているため、小さな光量変化は無視されている。

ここで生じた被測定パルスの立ち上り、立ち下りで $0.5 \mu\text{s}$ の短いパルスを Q_6, Q_7 のワンショット・マルチバイブレータ (SN 74121) を使ってリーディング・エッジパルス (Leading Edge Pulse, L.E.P.), テイリング・エッジパルス (Tailing Edge Pulse, T.E.P.) を発生させる。これらはパルス巾分析のために使用する。図 4 の下部はパルス巾分析のための 10 MHz の水晶発振子を使った発振器と K 分周器 ($K: 1\sim 999$) を示している。

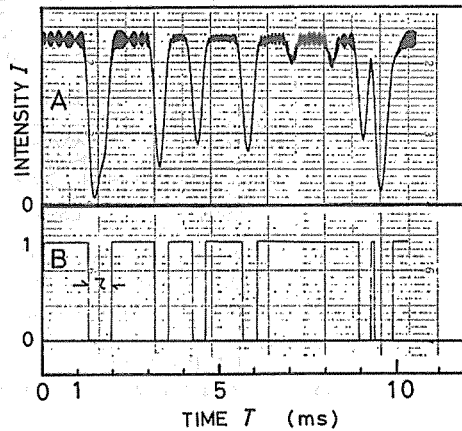


図 5 実際にビーム中を砂を通過させたときの Q_1 の出力 (光量 I を表わす) (A) と Q_3 の出力パルス (B) を示す。図では閾値を 3V 附近に設定したので、初量変化の小さいものは、パルスとしては無視されている。

2-3 レベル・コンパレータの閾値の設定方法

ここでレベル・コンパレータの閾値の設定と粒子の速さ V , スリット巾 w , 粒径 d がパルス巾 τ にどのような影響を及ぼすかについて議論する。閾値等の設定には二通りの方法がある。

(I) レベル・コンパレータの閾値を 0 レベルに設定する。このとき砂粒の端がビームの中に入り、出るまでの間のパルスを生じる。この関係を図 2 (C) に実線で示す。このときパルス巾 τ と d, w, V の関係は (1) 式により表わされる。もし $d > w$ の条件で実験を行えば、一定の速度で砂が飛んでいればパルス巾の分布は粒径の分布に対応する。そのような条件は、今回風洞の実験で観測されたが (§ 6) 風が強い場合に近似的に成立

する。又そう高くない所 ($h < 1 \text{ m}$) から砂を落した場合にも、多少のパラッキはあるが、速さが一定になる。これについては後述する。

(II) 閾値を平均粒径 \bar{d} の中心がレーザービームの端にあるときの電圧に設定し、かつ $\bar{w} > d$ のような条件で実験を行う。このとき生じたパルス巾を τ' とすると (図 2 (C) の点線) τ' は次のように簡単に表現できる。

$$\tau' = \frac{w}{\bar{v}} \quad (4)$$

実際の砂粒の粒径 d は、たとえふるい分けしたとしても分散は大きい。実際に飛砂災害が問題になるような地域の砂の粒径の分布を調べてみる。BAGNOLD が解析した砂漠の砂の粒径の分析データ¹¹⁾ では、中央粒径は 0.3 mm で、0.15 mm から 0.5 mm の中に重量で 85 % の砂が入っている。

我々が装置の検定のために使用する砂は、第 I グループは 0.4 mm と 0.5 mm、第 II グループは 0.5 mm と 0.6 mm のメッシュサイズのふるい分けしたもので、写真を図 6 に示す。これは日本光学製万能投影機 Model 6C により拡大投影したものの写真である。第 I グループ、第 II グループとも無作為に 200 個の砂を選びだしその粒径分布のヒストグラムを作った。これらを図 7、図 8 に示す。

図 7 によると粒径は 0.3~0.6 mm の中に入っており、平均粒径 $\bar{d} = 0.413 \text{ mm}$ であ

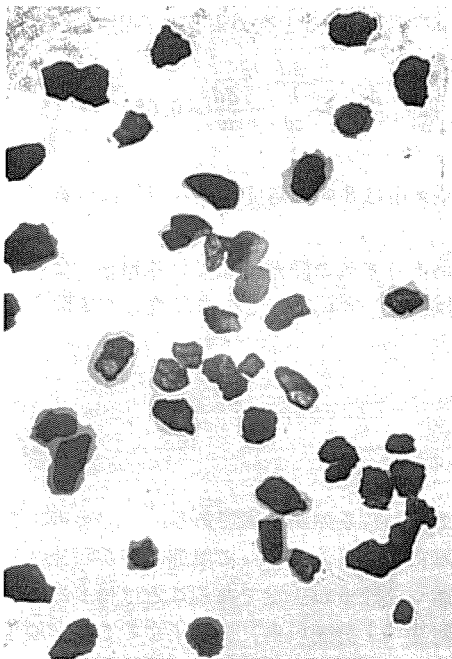


図 6 装置の検定のために使用された砂粒。これは $\bar{d} = 0.413 \text{ mm}$ のものの写真である。砂の形は不規則である。

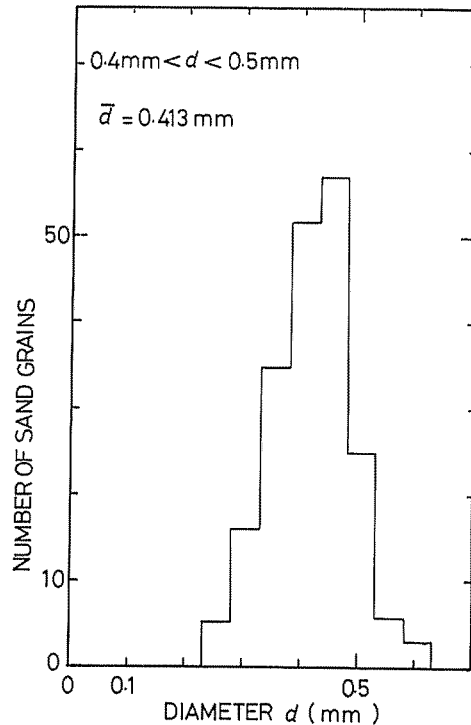


図 7 $\bar{d} = 0.413 \text{ mm}$ の砂の粒径の分布のヒストグラム。これは 0.4 mm と 0.5 mm のメッシュサイズのふるいで分別されたものである。

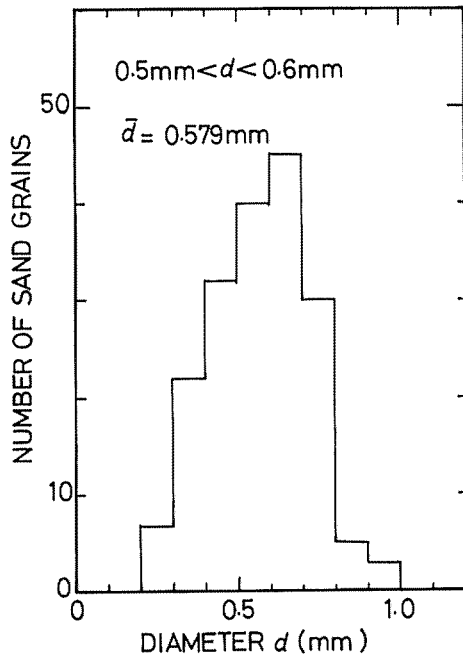


図8 メッシュサイズ 0.5 mm と 0.6 mm のふるいで分別されたもの、粒径 d のヒストグラム。 $\bar{d}=0.579$ mm であった。

った。図8の第IIグループの平均粒径は $\bar{d}=0.579$ mm であった。

日本で飛砂として研究対象になっている砂の粒径は 0.2~0.7 mm の範囲に入り、平均粒径 $\bar{d}=0.35\pm 0.12$ mm のものである。いずれにしろ 0.1 mm 以上 0.8 mm 以下の粒径を考えれば良い。

例として BAGNOLD の砂漠の砂のデータ¹¹⁾ を使って、このような粒径を持つ砂粒がレーザービームを通過したとき、生じたパルス巾が粒径の変動によりどの程度影響を受けるかを検討をしてみる。

この場合 $|\bar{d}-d|=0.2$ mm であり、 $\bar{d}=0.3$ mm である。スリット巾 $w=2.50$ mm に設定する。このときビーム径はビームエキスパンダー (Beam Expander) により 3 mm まで拡げる。

パルス巾の変動の割合 $\Delta\tau'/\tau$ は $\Delta d=|d-\bar{d}|$ とすると次のように表現できる。

$$\frac{\Delta\tau'}{\tau'} = \frac{\frac{\Delta d}{V}}{\frac{w}{V}} = \frac{\Delta d}{w} = 0.08 \quad (5)$$

この程度の変動がある砂であっても、生じたパルス巾は 8% の精度で速さ V は有意である。

しかし 2.50 mm のスリット巾を用いることにより多数の砂が飛んでいる場合、ビーム中に分解時間内 (10 μ s 以下) で 2 個以上存在する場合があります、この点注意して実験を取り行わなくてはならない。

§3 パルス巾分布分析器

3-1 測定方法の概要

飛砂量測定は、風の強い海岸とか、砂丘に於て行われるのが普通であり、かつそのような場所にもみ飛砂は存在し、飛砂による害を我々に与える。それ故に風速制御が可能な風洞での実験と異なり、現地では一定の時間、風速や飛砂量が一定であることは稀である。従って我々の実験装置のパルス巾分布測定は短時間 (1 分間以内) に終了することが要求される。次にこの装置使用の手順について述べる。

3-2 レーザー、光検出系の設置

砂表面から高さ H のところにレーザービームが、砂面に平行に横切るようにレーザーを設置する。ビームが光検出面に垂直にあたるように図3に示した検出器を設置する。レ

レーザービームが垂直にあたっているかどうかは図4の Q_4 の出力電圧を監視し、これが最大値を取るように光検出器の角度、高さを微調整すればよい。この操作は生じたパルス巾に大きな影響を与えるのでこの検出器はゴニオメーター等で精密に位置決定を行うことが望ましい。

3-3 パルス巾分布の測定手順

レーザーを発振させ、風により砂を飛ばす。砂に光があたると、散乱光を生じるので、砂がビームの高さに存在していることを肉眼で確認する。

次に5個のカウンターのゲート巾をスイッチ N により最大 ($N=20$) にして、スイッチ K ($K: 1\sim 999$) により、チャンネル2の中央値を変化させ、このカウンターが最も多く計数するようにする。チャンネル1あるいはチャンネル5が著しく少ない場合は N を小さくしてやる。パルス巾の分布のピークを探す場合はさらに N を小さくして探す。

3-4 パルス巾分布測定原理

図4の Q_3 で、被測定パルスを作り、パルス巾分布を TTL で製作されたパルス巾分析器で測定を行う。その原理について簡単に述べる。

時間の基準として 10 MHz のクロックパルス (Clock Pulse) 水晶発振器を用い発振させる。このパルスを3個のダウンカウンター (Down Counter) を用い K ($K: 1\sim 999$) 分周する。分周されたパルスの時間間隔 τ_0 は $K \times 10^{-7}$ s である。

パルス整形回路で作られた被測定パルスの立ち上り、立ち下りで L.E.P., T.E.P. を Q_6, Q_7 (図4) の A, B 入力に被測定パルスを入力することにより発生させる。このとき発生した L.E.P. によりプリセット可能な遅延回路を働かせ、L.E.P. の生じた時間より T_0 秒後に5個のカウンターのゲートパルス (G.P.) をつぎつぎに発生させる。この G.P. のいずれかと T.E.P. のタイミングが一致した時、そのカウンターが1だけ計数する。 T_0 と各々のカウンターの G.P. の巾は独立に設定可能である。これは最大計数率のカウンターをチャンネル2とし、かつそれぞれのチャンネルのゲート時間を独立に設定可能にし、分布のピークを素早く決定できるようにしたいためである。

チャンネル2の G.P. の時間巾の中央値を $100\tau_0$ とすると $100\tau_0 = K \times 10^{-5}$ s であるから、デジタルスイッチ K により中央値を設定すると、チャンネル2の周りのカウンターの G.P. の巾は表1に与えられるように $2N\tau_0$ のきざみでパルス巾の弁別を行い得るものとする。

このとき N は1から20まで可変 (N : 整数 $1\sim 20$) であり、 $100\tau_0$ を中心に G.P. の

表1 それぞれのカウンターのゲートパルスのタイミング表

Channel 1		$100\tau_0 - 3N\tau_0 \leq \tau \leq 100\tau_0 - N\tau_0$
Channel 2		$100\tau_0 - N\tau_0 \leq \tau \leq 100\tau_0 + N\tau_0$
Channel 3		$100\tau_0 + N\tau_0 \leq \tau \leq 100\tau_0 + 3N\tau_0$
Channel 4		$100\tau_0 + 3N\tau_0 \leq \tau \leq 100\tau_0 + 5N\tau_0$
Channel 5		$100\tau_0 + 5N\tau_0 \leq \tau \leq 100\tau_0 + 7N\tau_0$
Channel 6	{ ex. 1 ex. 2	Total Counter.
(Extra Counter)		$0 \leq \tau \leq 100\tau_0 - 3N\tau_0$

巾を変えられる。例えば、 $N=20$ の場合パルス巾の測定範囲は $40\sim 240\tau_0$ で各チャンネルの G.P. の巾は $40\tau_0$ である。

被測定パルス巾が、それほど広がっていない場合は N を小さくして測定することも可能で、これによってヒストグラムの刻み目が小さくできる。例えば $N=2$ の場合パルス巾の測定範囲は $54\sim 114\tau_0$ までの範囲で、刻み巾は $4\tau_0$ である。

もし風速あるいは、飛砂量に定常性が期待できれば、次の操作により、2 倍の数 10 チャンネルのヒストグラムを作ることも可能である。

1) $N=20$ とすると、G.P. 巾は $2N\tau_0=2\times 20\times \tau_0=40\tau_0$ 。

2) 次に $N=7$, $\tau'_0=3\tau_0$ とする。 K を 1 回目より 3 倍にし、 N を $1/3$ にする。 $2N\tau'_0=2\times 7\times 3\tau_0=42\tau_0$ となり、前回の G.P. の巾とは 5% の精度で一致する。以上の結果を表一 2 に示す。

表 2 5 個のカウンターで 10 チャンネルの分布測定する方法
 $\tau_0 = K \times 10^{-7} \text{s}$, $N = 20$, where $2N\tau_0 = 40K \times 10^{-7} \text{s}$.

Channel 1	$40\tau_0 \leq \tau \leq 80\tau_0$
Channel 2	$80\tau_0 \leq \tau \leq 120\tau_0$
Channel 3	$120\tau_0 \leq \tau \leq 160\tau_0$
Channel 4	$160\tau_0 \leq \tau \leq 200\tau_0$
Channel 5	$200\tau_0 \leq \tau \leq 240\tau_0$
$\tau_0 = 3K \times 10^{-7} \text{s}$, $N = 7$, where $2N\tau_0 = 42K \times 10^{-7} \text{s}$.	
Channel 1	$237\tau_0 \leq \tau \leq 274\tau_0$
Channel 2	$279\tau_0 \leq \tau \leq 321\tau_0$
Channel 3	$321\tau_0 \leq \tau \leq 363\tau_0$
Channel 4	$363\tau_0 \leq \tau \leq 404\tau_0$
Channel 5	$404\tau_0 \leq \tau \leq 446\tau_0$

1 回目のチャンネル 5 が計数するパルス時間巾は $200\sim 240\tau_0$ である。2 回目のチャンネル 1 のパルス巾は $T'_0 - 3N\tau'_0$ から始まるが、これは $100 \times 3\tau_0 - 3 \times 7 \times 3\tau_0 = 237\tau_0$ ($\tau'_0 = 3\tau_0$) であり、前回の最後のパルス巾と 2% の一致をする。

3-5 パルス巾分布測定のエレクトロニクス

パルス巾分析器 (P.W.A.) は TTL IC で図 9 のような回路を構成する。ここでその回路の働きについて説明するが飛砂現象そのものに興味のある場合はこの節はとばしていただいても差支えない。

被測定パルス (Measured Pulse) の立ち上り、立ち下りでそれぞれ $0.5\mu\text{s}$ のパルス巾の L.E.P., T.E.P. をワンショット・マルチバイヴレーター (One Shot Multivibrator) Q_6, Q_7 (図 4, 図 10 参照) で発生させる。L.E.P. パルスにより、 Q_8, Q_9 のダウンカウンター (Down Counter) に 20 の数を入れ (Load する) かつ Q_{10}, Q_{11} のダウンカウンターに N (N : 整数, $1\sim 20$) が入る。同時に FF-1 を待機状態に置く。 Q_{14} により Q_{10}, Q_{11} へのパルス ($2\tau_0$ のパルス間隔で持つ) の入力に FF-1 に次のパルスが来るまで禁止される (T_0 まで)。

パルス巾測定用のクロックパルスは 10 MHz の水晶発振子を使用しこれを K 分周した

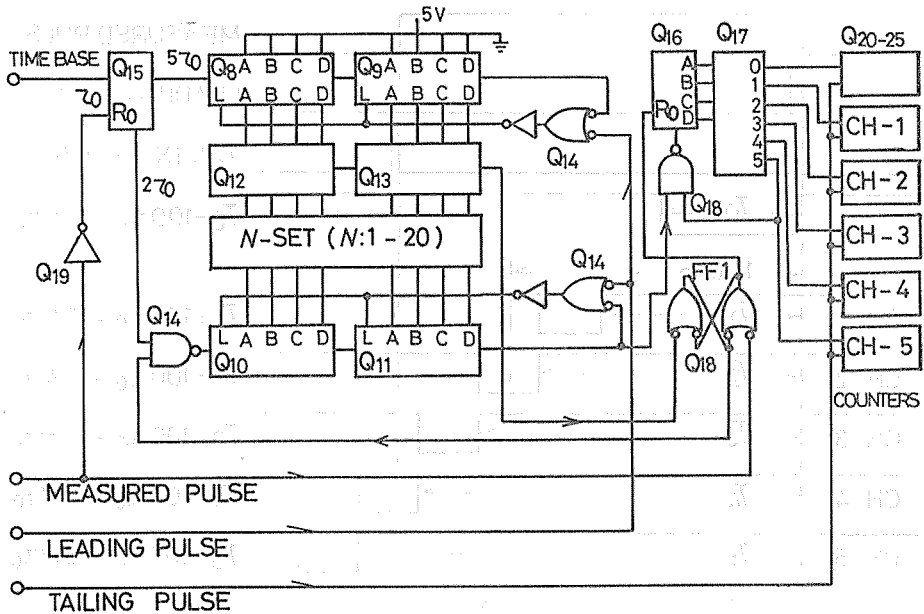


図9 P.W.A. の TTL 部分の回路図。IC は低電力消費型 74LS シリーズを使っている。カウンターは C-MOS 型 6 桁カウンター MOSTEK MK-50398 を 6 個使用している。これは 12V の別電源が必要とされる。

もの ($K: 1 \sim 999$) のパルス間隔を τ_0 ($\tau_0 = K \times 10^{-7} \text{s}$) とする。

τ_0 のパルス間隔を持つパルスは Q_{15} (74LS90) の 5, 2 分周回路に入る。5 分周したパルス (パルス間隔 $5\tau_0$) はダウンカウンター Q_8, Q_9 に入る。このパルスにより, $Q_{8,9}$ に入っている数は 20 より $5\tau_0$ 秒毎に 1 だけ減る。この数とゲート巾を決定するスイッチ N ($N: 1 \sim 20$) の値とを 8 ビット比較器 Q_{12}, Q_{13} (74LS85) により比較し, N と $Q_{8,9}$ の内容が一致した時短い負パルスを出す。この時間を L.E.P. が発生した時間より測って T_0 とする。

この負パルスにより FF-1 の状態は変り, Q_{10}, Q_{11} の前に置かれたゲートが開き, $2\tau_0$ のパルスが N 分周のダウンカウンター Q_{10}, Q_{11} (74LS192) に入る。 $Q_{10,11}$ は $2\tau_0 \times N \text{s}$ に 1 回の割合でボローパルス (Borrow Pulse) を発生させる。このパルスは BCD カウンター Q_{16} (74LS90) に入り, カウンター出力 A, B, C は Q_{17} の BCD-10 進変換器 (BCD-to-10 Decoder, 74LS42) に入る。デコーダ出力は図 10 のタイミングチャートのように $2N\tau_0$ 秒毎に $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 2$, というようにハイレベルが移ってゆく。これらの出力は 5 個のカウンターのゲート, パルスとして使用される。

それぞれのパルスのタイミングは次のようにして決定される。 T_0 は L.E.P. が発生した時より測って N とダウンカウンター $Q_{8,9}$ の内容が一致した時であり, 内容は $5\tau_0$ 秒毎に 1 だけ減るので,

$$T_0 = (20 - N)5\tau_0 = 100\tau_0 - 5N\tau_0 \quad (6)$$

となる。この時より Q_{10}, Q_{11} の前の NAND ゲートが開き, $2\tau_0$ のパルスが $Q_{10,11}$ に入りそれらは $2N\tau_0$ 秒に 1 つのボローパルスを出し, これは BCD カウンター Q_{16} に入

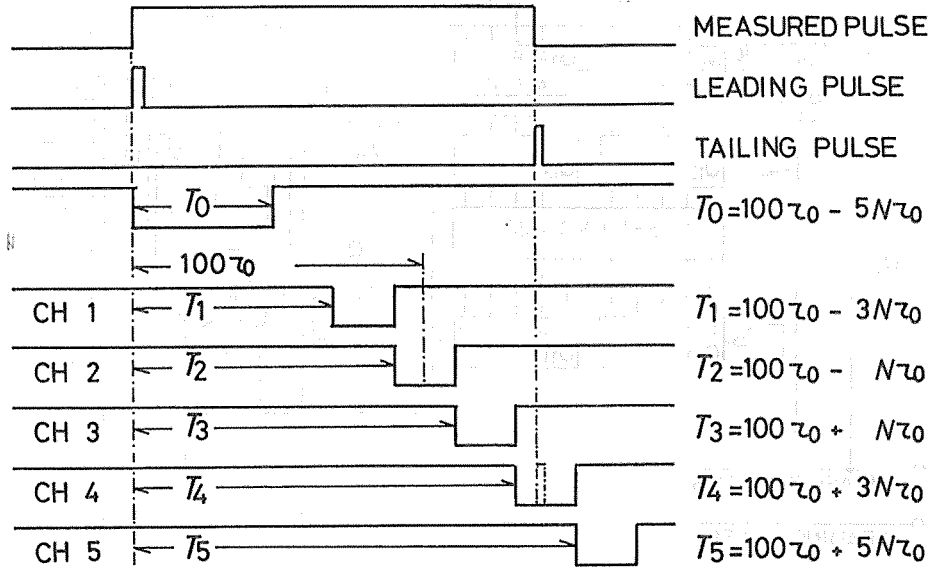


図 10 P.W.A. のパルス中分布測定タイミングを表わす図である。この図で、被測定パルスはチャンネル 4 (CH-4) のゲートパルスと T.E.P. はタイミングが一致しており、このチャンネルのカウンターだけ 1 計数する。CH-2 の中央値は $100\tau_0 = K \times 10^{-7}s$ であり、各チャンネルのゲート時間中 $2N\tau_0$ とは独立に設定できる。

る。パルスが入った瞬間 Q_{16} は 1 だけ計数し、デコーダー出力 1 は (0→1) レベルへと変化する。次のパルスは $2N\tau_0$ 秒後にきて、出力 1 は (1→0) に、出力 2 は (0→1) 変わり、チャンネル 2 のゲートは $2N\tau_0$ 秒間だけ開く。

図 10 よりチャンネル 2 のゲートが開いている時間は $(100\tau_0 - N\tau_0) \sim (100\tau_0 + N\tau_0)$ の間、開きこのチャンネルの中央値は $100\tau_0$ で N には依らない。

パルス中分布測定は、原子核関係の測定に採用されている Time of Flight 法を流用しても良い。例えば NIM 規格¹⁵⁾ の Time-to-Amplitude Converter (T.A.C., 例えば Ortec 社 457 Biased T.A.C.) で L.E.P. と T.E.P. の間隔をパルスの高さに変換し、マルチチャンネルアナライザー (パルス高分析器) Inoteck IT-5300 でパルス高の分析

表 3 装置に使用した集積回路表

Q_1 and Q_2	LF-357	High speed Operational Amp.
Q_3	LM-311	Voltage Comparator
Q_4 and Q_5	μA -741	General Purpose Operational Amp.
Q_6 and Q_7	74LS121	Monostable Multivibrator
$Q_{8,9,10,11}$	74LS192	Up-Down Decade Counter
$Q_{12,13}$	74LS85	4-bit Magnitude Comparator
Q_{14} and Q_{18}	74LS00	Quadruple 2 input Positive Nand Gates
Q_{15} and Q_{16}	74LS90	Decade Counter
Q_{17}	74LS42	4-line-to-10-line Decoder
Q_{19}	74LS04	Hex Inverters
$Q_{20\sim 25}$	MK50398	6 digit C-MOS Counter

すれば目的は果せる。

表3にこの装置に使用した集積回路 IC のリストをかかげる。IC は図4, 図9の通し番号でつけている。Q₁~Q₂₅まで使用している。それぞれの IC の規格は各社の IC マニュアルを参考にされたい。

3-6 パルス巾分析器の精度

前節で述べたパルス巾分析器に巾のわかったパルスを入力し、設定値とどの程度ずれているかを K, N の各々の値について検討した。

発振器から出たパルスのパルス巾は Y.H.P. 1725A オシロスコープの Δt 測定装置とデジタルボルトメーターで測定し、このパルスを P.W.A. に入力した。パルス巾の測定は 0.5% の精度で行われた。

設定値とのずれを表わす指標として ϵ を次のように定義する。

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{(t_{oi} - t_{si})^2}{t_{si}^2}} \quad (6)$$

ここで t_{oi}, t_{si} は $i-1$ チャンネルと i チャンネル ($i: 1 \sim 6$) の境界のパルス巾の設定値であり、添字の s は設定値, o は観測値を示す。各 K, N についての ϵ を図11に示す。

この図で $\epsilon=1$ が 1% の誤差に相当する。 $K=10$ (中央値 $100 \mu\text{s}$) より K が小さくなると ϵ は増大する。 $K=30$ 以上 ($300 \mu\text{s}$) では 1% 以内の精度で測定可能である。この原因は P.W.A. の応答時間のため、改善の余地はある。

§4 装置の検定に関する考察

実際にこの装置で、飛砂の速度分布が測定可能かどうかの検定は、その速さを知ることが可能な砂粒をビームを通過させるしかない。現在までの飛砂の速度の測定例は、ストロボ写真の撮影での測定例があるだけで¹²⁾、飛砂でのこの装置の検定は不可能に近い。

我々はここで砂粒をある高さ h から落して、それをレーザービームを通過させる方法を用いた。砂粒を空気中で自由落下させた時の速さ V は、 $\sqrt{2gh}$ より小である。 Reynolds 数 Re がそれほど大きくない範囲では ($Re: 1 \sim 100$)、速さ V は計算可能である¹³⁾。計算された V の値とパルス巾の分析より得られた V の値を比較することにより

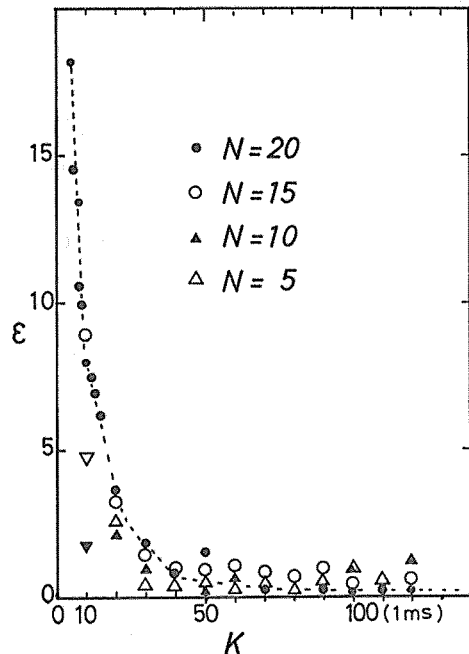


図11 P.W.A. のパルス巾測定の設定誤差 ϵ (6式で定義) の K, N との関係を示す。 K が 10 以下 ($100 \tau_0 = 100 \mu\text{s}$) では誤差が大きくなる。 $100 \tau_0 = 300 \mu\text{s}$ 以上の時間領域では 1% 以下の精度でパルス巾分布を測定できる。

検定を行う。

砂粒の形は図6に見られるように、形は不規則である。これのある半径 a を持つ等価球を考え、その球が空気中を h だけ落下する場合の速さ V を計算する。砂の場合この運動は Re にして1~100の間であり、空気による抵抗力として Stokes 項と空気の慣性項を考慮に入れる必要がある¹³⁾¹⁴⁾。

今質量 m 、半径 a 、(断面積 $S=\pi a^2$) の球が、重力の下で速さ V で落下している場合の運動方程式は次のようになる。

$$m \frac{dV}{dt} = mg - 6\pi\eta aV - \frac{1}{2}A\rho SV^2. \quad (7)$$

ここで g は重力の加速度、 η は空気の粘性係数、 ρ はその密度、 A は慣性項の比例定数で砂粒の大きさと空気との相対速度で決定される比例定数で Re が1~100の間は1として良い¹³⁾。(7)式を $t=0$ で $V=0$ という初期条件のもとで解くと、時間 t での速さ V が与えられる。ここで $B=6\pi\eta a/m$ 、 $C=A\rho S/2m$ 、 $D=\sqrt{B^2+4gC}$ 、 $F=(B-D)/(B+D)$ とすると、その解は

$$V = \frac{D-B}{2C} \cdot \frac{[1-\exp(-Dt)]}{[1-F\exp(-Dt)]} \quad (8)$$

である。(7)式に於て、例えば粒径が小になると、断面積 S は半径の2乗で小さくなり、第二項に比べて第三項が小さくなる。この状態は Re が小なる場合に対応する。粒径が大きくなれば第三項が主となり Re が1~100の状態に対応する。

以上の関係式から任意の高さ h の位置から砂粒を落した場合の速さを求める。これは、式(8)を時間 t に関して積分し、 $t=0$ で $x=0$ の初期条件を代入することにより得られる。

$$x = \int_0^t V dt = \frac{D-B}{2C} \int_0^t \frac{1-\exp(-Dt)}{1-F\exp(-Dt)} dt. \quad (9)$$

式(9)の x に h を代入し、積分が h を越える時間 t を求め、その時間を式(8)の t に代入することにより、任意の高さ h から落下された砂粒の速さ V を求められる。式(9)の t に関する積分は数値積分で行い Y.H.P. マイクロカリキュレーター モデル 97 で積分を実行した。これにより h と砂粒の大きさ(等価球の半径 a) が与えられれば、速さ V が求められる。この結果はのちに利用する。

§5 装置の検定結果

この装置の検定は、現在速度の前もってわかった飛砂の集団を作り出すことが困難であることより、ある高さ h ($h < 1$ m) より、砂を自由落下に近い状態で落下させ、その速さはこの方法で測る。粒径が知られている場合は §4 に述べた方法で落下距離 h での速さを計算できる。この両方の結果を比較することにより検定を行った。

ここで使用された砂の写真は日本光学製拡大投影機 6C により撮影したもので、図6にこれを示す。図7、図8の粒径分布のヒストグラムは拡大投影機で拡大したものを200個の砂粒を拾いだしその長径短径を測定しその算術平均を粒径 d として書いたものである。図7の平均粒径 $\bar{d}=0.413$ mm、図8の平均粒径 $\bar{d}=0.579$ mm である。

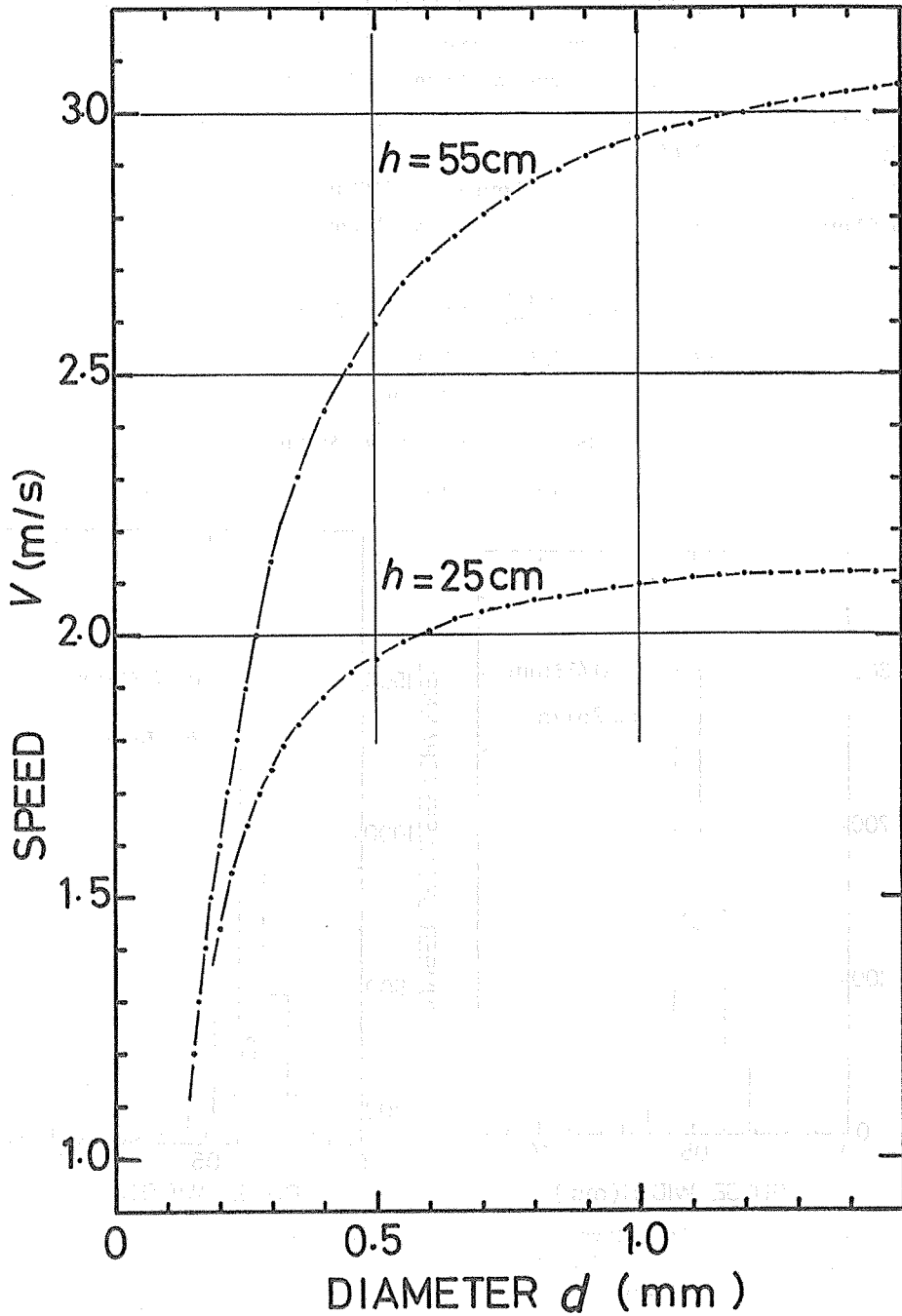


図 12 15°C, 1 気圧のもとで砂を高さ h のところから落下させた時, 速さ V と粒径 d の関係を表わす。この図では $h=25$ cm, 55 cm の高さから落した場合粒径 d を変えたときの §4 で述べた計算により速さ V を計算したもの。

計算によると $\bar{d}=0.413 \text{ mm}$ のとき、気温 15°C 1気圧のもとで、 $h=25 \text{ cm}$ の高さから砂を落下した場合 $V=1.88 \text{ m/s}$ 、 $h=55 \text{ cm}$ の場合 $V=2.40 \text{ m/s}$ の値が得られる。

§4で述べた計算により、 $h=25 \text{ cm}$ 、 $h=55 \text{ cm}$ の場合、粒径 d のときの速さ V を計算し図12に示す。この計算に於て、温度 15°C のときの空気の密度、粘性係数の値を用いた。又砂の密度は 2.65 gr/cm^3 を使用した。

この図より第Iグループ ($\bar{d}=0.413 \text{ mm}$) の砂が自由落下した場合、粒径 d が $0.32 \sim 0.52 \text{ mm}$ の範囲に分布していると考え、 $h=25 \text{ cm}$ の高さからの自由落下の場合速さ V は計算によると

$$V = 1.88^{+0.081}_{-0.094} \quad (\text{m/s}) : (h=25 \text{ cm})$$

の範囲にあり、基準値に対して $+4.3\%$ 、 -5.0% の誤差を持つことになる。5%以内で速さが一致していると考えて良い。この砂を 55 cm の高さから落した時は、

$$V = 2.45^{+0.17}_{-0.23} \quad (\text{m/s}) : (h=55 \text{ cm})$$

であった。これは基準値に対し $+6.9\%$ 、 -9.4% の誤差を持つことになる。

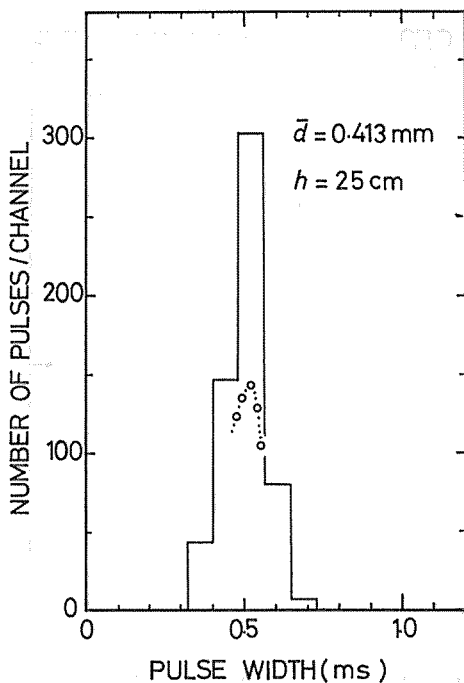


図13 $\bar{d}=0.413 \text{ mm}$ の砂粒を 25 cm の高さから、落したときのパルス巾分布のヒストグラム。点線は N を小さくし ($N=5$) にしてパルス巾分布のピークをはっきりさせるため、 $\tau_p=510 \mu\text{s}$ にあった。このときスリット巾 $w=0.50 \text{ mm}$ であり(1)式により V_{ob} を計算すると $V_{ob}=1.80 \text{ m/s}$ 。図12によると計算値 $V_{th}=1.88 \text{ m/s}$ である。

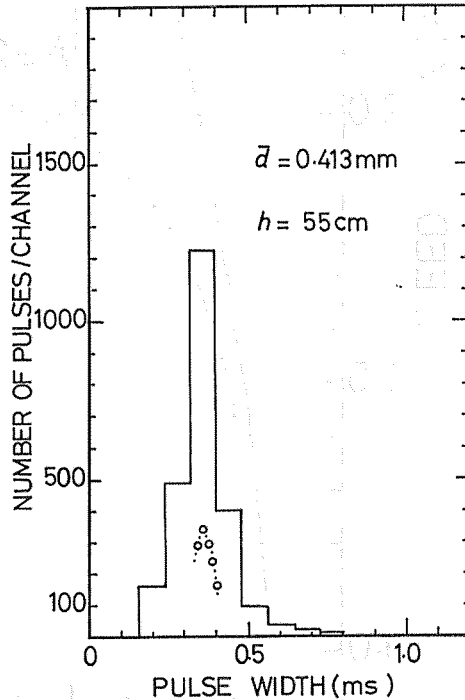


図14 $\bar{d}=0.413 \text{ mm}$ の砂粒を $h=55 \text{ cm}$ の高さから落したときのパルス巾ヒストグラム。 $\tau_p=350 \mu\text{s}$ で $V_{ob}=2.45 \text{ m/s}$ である。計算値は $V_{th}=2.42 \text{ m/s}$ である。

以下パルス巾分布測定に際し、スリット巾 $w=0.50 \text{ mm}$ に設定する。これは §2-2 の方法 I でやったことになる。

図 13, 14 は $\bar{d}=0.413 \text{ mm}$ のグループをそれぞれ $h=25 \text{ cm}$, $h=55 \text{ cm}$ のときのパルス巾分布のヒストグラムである。

図 13 に於てパルス巾のピーク時間は $N=5$ にして測定し、結果を点線で示している。このときピーク時間は $5.1 \times 10^2 \mu\text{s}$ にある。これより式 (1) により速さ V を計算すると $V_{\text{ob}}=1.8 \text{ m/s}$ で、理論値は $V_{\text{th}}=1.88 \text{ m/s}$ である。

図 14 は $h=55 \text{ cm}$ の場合で §3-4 で述べた方法で合計 10 チャンネルのヒストグラムになっている。ピーク時間間隔は $3.5 \times 10^2 \mu\text{s}$ であり $V_{\text{ob}}=2.5 \text{ m/s}$, $V_{\text{th}}=2.45 \text{ m/s}$ であり、満足のゆく一致が得られた。

図 15, 16 は $\bar{d}=0.579 \text{ mm}$ のグループの砂の結果である。それぞれ $h=25 \text{ cm}$ の場合 $V_{\text{ob}}=2.1 \text{ m/s}$, $V_{\text{th}}=2.00 \text{ m/s}$ であり、 $h=55 \text{ cm}$ の場合 $V_{\text{ob}}=2.7 \text{ m/s}$, $V_{\text{th}}=2.71 \text{ m/s}$ であった。

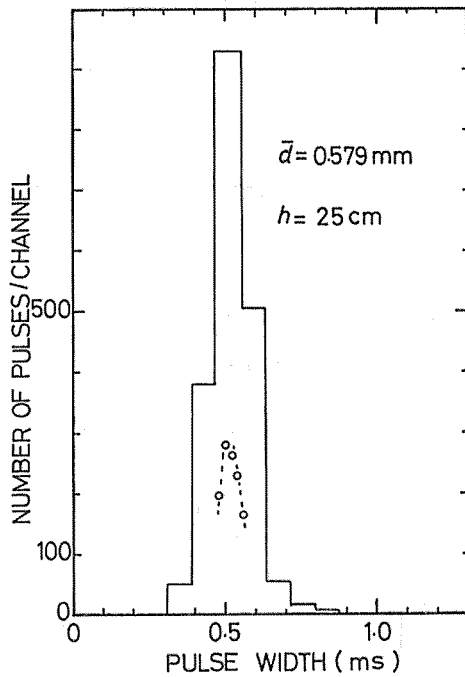


図 15 $\bar{d}=0.579 \text{ mm}$ の砂粒を $h=25 \text{ cm}$ の高さから落したときのパルス巾分布を表わす。 $\tau_p=505 \mu\text{s}$ であった。 $V_{\text{ob}}=2.1 \text{ m/s}$, $V_{\text{th}}=2.00 \text{ m/s}$ であった。

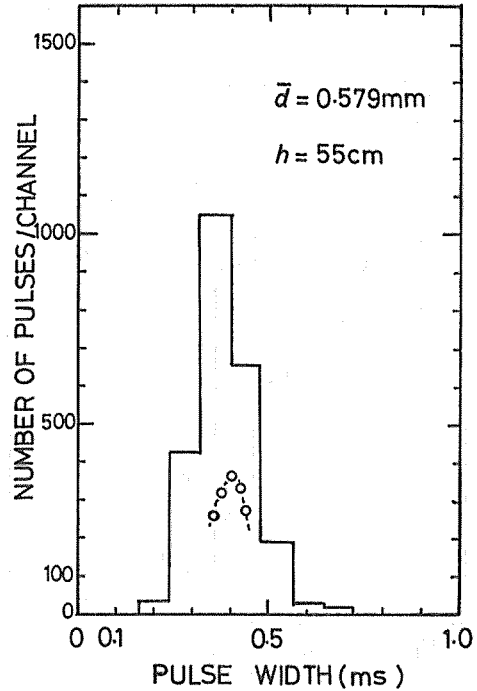


図 16 $\bar{d}=0.579 \text{ mm}$ の砂を高さ $h=55 \text{ cm}$ の所から落したときのパルス巾分布ヒストグラム。 $\tau_p=400 \mu\text{s}$ にあり、 $V_{\text{ob}}=2.7 \text{ m/s}$, 計算値は $V_{\text{th}}=2.71 \text{ m/s}$ である。

この時両方のヒストグラムを ($h=25 \text{ cm}$ のとき $\bar{d}=0.413 \text{ mm}$, $\bar{d}=0.579 \text{ mm}$) 見るとほとんど同じようなヒストグラムをしている。平均粒径を知る必要があると §2-2 で述べたことが実証されている。

§6 風洞実験とその結果

前章の実験により、この方法により、かなりの満足の得られる結果を得たが、実際の飛砂に対し、その速度分布が、我々が考案したこの方法で、十分に把握できるかどうかの検討をする必要がある。

風洞は九州大学農学部にある風洞を使用した。この風洞の測定部分は長さ 10.0 m, 巾 25.0 cm, 高さは 50.0 cm であり, 風速はモーターの回転数を変えることにより変化させられる¹⁶⁾。

風洞の側面はアクリル板になっており, 内部の様子を観察することができる。風洞の一方の側にレーザーを置き, 側板に垂直にあてる。もう一方の側で光ビームの光強度を S.P.D. でモニターする。アクリル樹脂はもともとほこりが附着しやすく, 飛砂もこれに衝突する際に傷をつける。このため測定の前に市販の極細コンパウンド (ラビングコンパウンド, ソーラー 7, # 5000 以上) で光の通過する場所を磨いてやる必要がある。これは光検出器に到達する光量に影響を及ぼすので, §2-2 で言及したレベル・コンパレーターの閾値の設定に関係する。スリット巾は §5 と同じ $w=0.50\text{ mm}$ に選んだ。ビームの高さ H は砂表面より 6.5 cm, 風速は 18.5 cm の高さで, 熱線風速計で測定した。

図 17(A) は 0.15 mm と 0.30 mm のメッシュサイズのふるいで分別されたものの実験結果で, 風速と飛砂数の関係を表わす。砂は風洞の測定部に長さ 5.0 m, 厚さ 5.0 cm

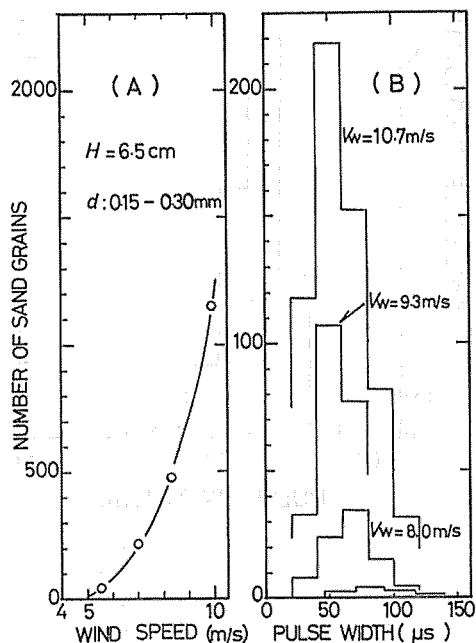


図 17 粒径 d が 0.15~0.30 mm 分布をしている砂を風洞にしきつめ (厚さ 5 cm, 長さ 5.0 m) で, レーザービームの高さ $H=6.5\text{ cm}$ の所を通過させたときの, 風速 V_w と全個数 (A), パルス巾分布のヒストグラム (B)。

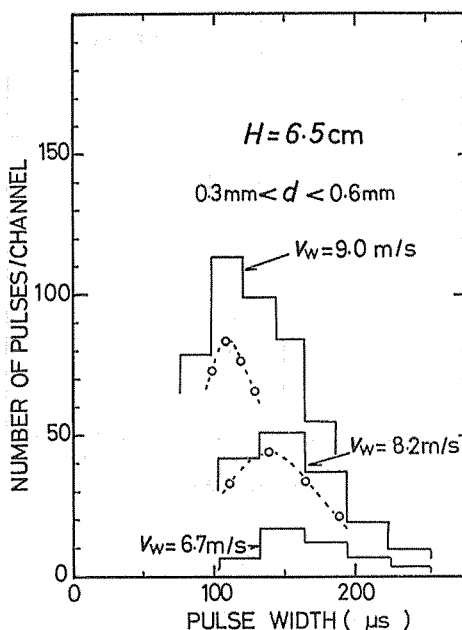


図 18 風洞の条件は図 17 に同じ, 粒径 d は 0.3~0.6 mm に分布している砂を実験した。 V_w が大きくなると, 風速と砂の速度が一致して来る。低速領域では飛砂速度のパラツキが大きい。

にしきつめた。図 17(B) はそれぞれの風速のときの、パルス中の分析結果である。風速が大となるとピークの時間がより短い方へ移行するとともに、その広がり小さくなって行くのがわかる。風速が大となるとほぼ風速と同じ速さで飛ぶようになる。

図 18 は 0.6 mm と 0.3 mm のメッシュサイズのふるいで分別したものを実験してみた。条件は図 17 の実験と同じである。一応前実験と同じような結論が得られる。

§ 7 結 論

我々の新しい方法で、飛砂速度分布が粒径をそろえていれば、測定可能になった。設定が集砂器に比し、面倒ではあるが、風の流線を乱すことなく測定できる。空間的に微少部分の測定を行えるので、これを利用し、砂表面からの高さ毎の飛砂の様子、その他の物理性質が解明できるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 河田三治：防災林に関する調査報告，林野庁 10, 1950.
- 2) 河村龍馬：飛砂の研究，東大理工研報告，5: 95, 1950.
- 3) HORIKAWA, K., and H. W. SHEN.: Sand Movement by Wind Action, Bull. Beach Eros. Boad. Techn. Memo. No. 119: 1, 1960.
- 4) 中島勇喜, 吉田瑞樹, 末 勝海: He-Ne レーザーを利用した飛砂粒数計測装置の試作とその適用限界, 日林誌, 59: 458, 1977.
- 5) YOSHIDA, M., Y. NAKASHIMA, K. SUB, and G. TOMITA: Method for Measuring Rate of Movement of Sand Using Laser Beam. Jpn. J. Appl. Phys. 21: 885, 1982.
- 6) YEH, Y., and Z. CUMMINS: Localized Flow Measurements with a He-Ne laser Spectrometer. Appl. Phys. Lett. 4: 176, 1964.
- 7) BACHALO, W. D.: Method for Measuring Size and Velocity of Spheres by Dual-Beam Light Scatter Interferometry. Appl. Opt. 19: 363, 1980.
- 8) WITHERELL, P. G., and M. E. FAULHARBER: The Silicon Solar Cell as a Photometric Detector. Appl. Opt. 9: 73, 1970.
- 9) TOBEY, G. E., J. G. GRAEME, and L. P. HUELSMAN: *Operational Amplifiers, Design and Applications*. McGraw-Hill, New York, 1971.
- 10) 角戸秀夫：オペアンプの基本と応用, p. 106, 東京電機大学出版局, 1977.
- 11) BAGNOLD, R. A.: The Size-Grading of Sand by Wind. Proc. Roy. Soc. A163: 250, 1937.
- 12) 田中貞雄, 柿沼 計：風による土壌の運動, 農業気象, 16: 77, 1960.
- 13) PLANDTLE, L.: *The Physics of Solids and Fluids*. Blackie & Son, London, 1936.
- 14) BAGNOLD, R. A.: *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Chapman & Hall, London, 1954.
- 15) 河田 燕：放射線計測技術, p. 117, 物理工学実験 9, 東大出版会, 1978.
- 16) 中島勇喜：飛砂制御に関する基礎的研究, 九大演習林報告, p. 145, No. 51, 1979.

Summary

A new method for measuring the speed distribution of blown sand grains using He-Ne laser beam has been developed. This method enables us to measure the rate of sand movement as well as the number of blown sand at the some region in the wind tunnel and field. The apparatus is composed of a He-Ne laser (1 mW), a photodetection system with a slit (width: 0.3–3.0 mm), a five channel pulse width analyzer and a multi-purpose counter.

When a sand grain passes across the laser beam, a shadow is thrown upon the light sensitive area of photodetector. The change in photocurrent after amplification and pulse shaping, is fed to the pulse width analyzer. The pulse width has information on both the speed and size of blown sand. Using nearly uniform size of sand grains, the speed distribution of blown sand can be measured.

This method has many merits for studying the physical phenomena of blown sand in the field.

First, the laser beam does not disturb the stream line of wind, but this condition is not satisfied in the case of using the sand trap.

Second, in case of use of sand trap, the base of this must be buried in the sand surface and this handling affect the physical properties of sand surface.

Third, this method is strong in differential method in time and space, whereas the sand trap is strong in integral method and easy handling.