

# 砂塵嵐の帯電\*

## (The Electrification of Dust Storms)

C. D. Stow\*\*

三崎方郎\*\*\*訳

**概要** これは塵や砂の嵐の帯電現象についての総合報告である。本文中には野外観測に関するものと、実験室内の研究とを、項を別けて述べてあるが、どちらもまだまだ研究が足りないことがわかる。おわりに、こうした帯電現象の解明をめざして筆者が現在行なっている研究にも言及したい。

### 1. 緒言

大気電気の研究は便宜上晴天時の電気現象と、擾乱時のそれとに2大別することができる。前者は殆んどが平静な天気状態のときの電荷消失に関するものであり、後者は下層大気中の烈しい垂直混合にともなった電荷の生成または分離の問題である。この場合には帯電粒子やエアロゾルは、大気中の落下速度の差により分離され、それら粒子の大きさとか密度によって、分離電荷の極性と大きさがさまじり、そして電場がつくり出される。

晴天時に地表面で観測される垂直電場は1mあたり100ボルトの大きさで、地球表面全体としては負の電荷をもっている。この負電荷が中和されずに平衡状態が保たれるのは、全地球的な雷活動が主因であると信じられている。つまり、対地放電と、雷の直下の地表における尖端放電がその負電荷を供給しているのだというわけである。雷以外の擾乱天気による帯電ではこの逆に働くものもしばしばある。たとえば、吹雪やブリザードの起きている場所では晴天電場が強まる方向だが\*\*\*\*、砂嵐の場合はそれが逆である。

吹雪の電気については近年研究が盛んに行なわれ、その電荷分離は氷晶の一時的接触か、非対称摩擦によっておこる温度勾配が原因で起こると現在では考えられている。

砂嵐も吹雪と性状は似たものであるが、その電荷分離機構は、氷の場合のような温度勾配下のプロトン移動と類似のものではありえない。砂や塵の嵐を形成する物質は高絶縁性のものであり、粒子の物質中の不純物、または表面の汚れによって、観測される電荷は変わってくるにちがいない。砂塵嵐に関する研究はいままでのところ多くはないがそれを総合し、筆者が現在行いつつあり、また計画中の実験についても簡単に述べよう。

### 2. 砂嵐

砂または塵の嵐にははっきり違った二つの型がある。それぞれは異なった気象条件で起こるものであって、目でみたところでもその違いがわかる。このうちより普通に起こるのがHaboobと呼ばれるもので、かなり強い垂直混合を起した強い水平風に伴って生ずる。この風が次第に強まって疾風となるにつれ、砂の動きを増してくる。砂壁のようになって、たちまち押し寄せてくるのがよくあり、それから安定な状態から突然不安定に変る。Haboobは常に地表面での砂の強いシャワーをもっており、垂直混合によって細かい砂粒は空高く吹き上げられる。こうした嵐は広範囲にわたり、数日も続くことがある。

第2の型はDust DevilまたはTwisterと呼ばれるもので、急速回転している空気のコアが本体で、直径は10mそこそこだが、高さは100m程にもなる。対地移行速度は遅い。通常砂漠地帯で地表面が過熱されると、熱い空気層がより冷めたい上の空気によって地面に押えつけられた形になる。極度に不安定になっているので、マッチ一本点火しても、小動物が動いても、強烈な対流を起し、熱い上昇空気柱の回転が始まる。dust devilが見られるのは大抵水平風速が1m/secそこそこの場合である。風が強くなると乱流のために不安定層が出来に

\* 本論文は他誌よりの転載ではなく、著者の希望により日本気象学会に提出された論文の訳である。

\*\* University of Manchester Institute of Science and Technology Manchester, England

\*\*\* 気象研究所

—原論文 1968年3月2日気象学会受理、訳文 1969年1月20日受理—

\*\*\*\* 訳者註：吹雪やブリザードの場合、測定高度によって電場の符号が変わるので必ずしも、こうはいえない。

くくなる。したがって、4 m/sec 以上でこれが起ることは滅多にない。dust devil の柱の中では粒子の重力分離が起る。大きな dust devil となると、動物や灌木を巻き上げ、建物に被害を与えることすらまれにあることも知られている。

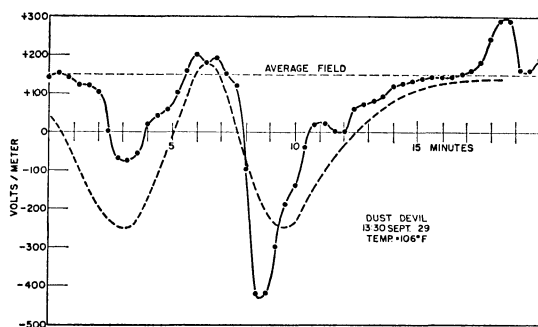
### 3. 砂塵嵐の帯電の野外測定

砂塵嵐の帯電に関して記述されたものは極めて少い。畠山と久保(1947)は1943年から1944年に行われた前橋測候所での砂塵嵐の結果を述べている。それによると、砂塵嵐で生ずる電位傾度の極性には季節変化があるようで、嵐の中の空間電荷密度は  $1 \text{ e.s.u./m}^3$  を超えることはなかった。しかしながら、彼等の結果はばらついているので、その結論もやや試行的なものと考えられる。Freier (1960) は仏領西アフリカ、Kidal 地区のサハラ砂漠の一部を横切った大きな dust devil による電場を記録した。この dust devil は高さが 100 ないし 200m で、直径は 8 m 程とみつもられ、砂漠を横切った移行速度は約 4 m/sec であった。第一図にその時の電場の記録を転載しておく、大体、負極性(負が上、正が下)の電気双極子とみることができよう。高さ  $h$  にある  $M$  能率の双極子がその中心から距離  $R$  にある観測点につくる電場は近似的に次式で表わされる。

$$E = -\frac{2M}{R^3} \left(1 - \frac{3h^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

Freier によると、この dust devil の双極子能率は  $1.7 \times 10^6 \text{ e.s.u.cm}$  であった。Bicknell (1967, 私信) はサハラ砂漠の北西部を旅行中、筆者の代りにフィールドミルを用いて、地表および地上 1 m における電場の観測を行なった。それぞれ違った場所での 13 ヶの観測例がある。そのうち一つだけを除いた他はすべて Haboob 型の嵐で、風速は巾広い範囲にわたっている。そのときの電場は晴天電場とは逆方向、つまりフィールドミルの上に負電荷、または下に正電荷が分布している型で、例外は一回のみであった。中規模の嵐でその強さは地上 1 m の高さで 5 kV/m、地表で 50 kV/m にまで強くなっている。もっと強い嵐になると、地上 1 m で 20 kV/m を超え、地表では 200 kV/m 以上にもなった。筆者が解析したところでは、この電場は主として地表に沿って吹きとばされている正帯電の粒子によるものであって、1 m 以上の高さに拡がった負帯電粒子雲によるものではないと思われる。通常、風の息に合せて地上 1 m の電場は極性の反転を見たが、地表にはそれがなかった。このことは丁度その瞬間に正帯電の重い粒子が 1 m 以上の高さま

で吹き上げられたのだと考えられる。Bicknell の観測には dust devil が一つあって、それは直径 6 m で移行速度 2 m/sec であった。中心部での電場は一時的な正方向のふれもあったが大体 100 kV/m の負電場が記録されている。晴天電場の代表値は正で 500 V/m であった。この他に参考資料としては、観測点から数百哩離れた砂塵嵐の記録が数多くあるが、こうした場合に測られた電場は、重力によって分離され上空を長距離運ばれてきた微小砂塵がもつ電荷によるものであると考えている。



第1図 大きな dust devil による電場 (Freier, 1960)

### 4. 吹きつけ砂塵の帯電に関する室内実験

砂塵を吹きつけたときに起る帯電について、発表されている実験の最初の一つは Rudge (1914) である。彼は砂やその他さまざまなもの、たとえば鉛丹、小麦粉、鉄の鱗屑、白墨等を空気ジェットで吹きとばし、飛ばされた大粒子や、空中に浮んだ小粒子の帯電を金箔電器で測定した。この二つはいつも反対の極性を持ち、たとえば砂の場合には常温常湿で大粒子が正に、小粒子が負であることがわかった。大小 2 種の水晶の単結晶を摩擦し合った場合には、結晶面の差異にかかわらず、大きな結晶が正、小さな方が負であった。しかしこれ等の実験はいずれも定量的ではない。Shaw (1927) は同種類の材料の棒を“非対称”に、つまりそれぞれの接触面積が違うように擦り合せた時に分離する電荷を調べたが、妙なことにガラスの場合も、ガラス様シリカの場合にも帯電現象が現われなかった。ただ、一方の棒を他方に当てたときに、それ等全体が負電荷を持っただけだった。Shaw は砂塵の帯電にこの過程が関係しているのではないかと考えた。この後でも Shaw (1929) は再実験を試みている。この時はさまざまな粉をチューブを通して吹きつけた。そして、チューブの内壁を種々の材質に変えてみた。その一つはサンドペーパーで内張りしたチュー

ブと砂である。その結果はサンドペーパーが正に、砂が負になった。またその量は空気ジェット velocities が大きい程、またジェットの温度が高い程大きかった。Shaw 自身はこれに満足すべき説明を与えることはできなかった。

Debeau (1944) はニッケルの漏斗にシリカを注ぎ込んだ時に生ずる電荷を測った。シリカは負に、ニッケルは正に帯電した。その量を周囲の気体を酸素、窒素、水素といろいろ変えて、また圧力も変えて測った。Debeau は気体の圧力の効果は、それがシリカの中に吸収されるガスの量を変えるためだと考えたが、Gill (1948) は Debeau のこの結果を再検討し、気圧効果は粒子から起こるコロナ放電の開始電圧に影響があるためだとみなした。

Gill and Alfrey (1949) は電場のなかにおかれた傾斜金属板上で砂粒を滑り落してみた。落ちてきた砂を法拉デーケージで受けとめ、その電荷を測った。電場をかけないと砂粒は負に帯電していた。かけられた電場によって砂の帯電は極性も量も変わったが、それは単に電場による誘導電荷であったことがわかった。それで Gill and Alfrey は、粒のもつ電荷は大抵の場合、対向面に生じている表面電場の結果、誘導された電荷であろうと推論している。この実験を拡張したのが Peterson (1949) で、彼はポロシリケートガラスの球を傾斜ニッケル板にそって転がした時の誘導による帯電を測った。この時も周囲の温度、球の回転速度、気圧を変えてやっている。実験には十分な注意が払われたにもかかわらず、結果は表面の汚れのために、ニッケル・ガラスの対向面を通して電荷の移動があったことを示していた。

もっと詳細な研究で、しかも砂塵嵐の帯電に直接関係するものが Kunkel (1950) により行われている。この研究では空気中に飛散した塵粒子の電荷が粒径とともに測られた。この結果によると、同一材料の容器から空中に飛散した粒子、たとえば石英の容器からの石英粉では、どの粒径についても帯電は対称的（正負同量）であり、異種の材質でできた容器の場合には非対称で、粒径分布全体を通じて、一方向の極性を持つものが多かった。

Henry (1952) は非対称摩擦法を用いて実験した結果、それがどんな物質であろうと、自由電荷の担い手の濃度が温度の関数である場合には、その試料に温度勾配が与えられている時、または同一物質の2ヶの試料がそ

れぞれ違った温度をもっていて、それが互に接触した時には、電荷の授受が必ず起るということを示した。彼が更に指摘したことは、そのような温度差は非対称摩擦の結果として起ること、また非対称摩擦は砂嵐の中にも必ず起っている過程であるということである。しかし、石英については結論的な実験がなかった。

Harper (1955) は石英の結晶間に起こる電荷授受をはかる実験を行ったが、それは著しく非等方的であることを観察した。Wagner (1956) は Peterson の筋を追ったが、この時には実験材料の表面を清浄にするために、近代的なアウトガス処理を行なっている。人工結晶、自然結晶いずれの石英でも、Harper の述べたような非等方性帯電が見当らなかった。恐らくは清浄処理の技術が進んでいた事による違いかもしれないが、この点まだ疑問が残っている。

Balcilon (1967) は dust devil の理論的実験的なモデル研究を行なった。ここでは流れの場の研究であって、電荷分離のことは取り扱ってないが、この結果から塵粒子の重力分離の度合いを求めることは可能で、dust devil がどの程度有効な発電機の働きをしているか確かめてみる事が出来る筈である。

砂や塵の嵐の研究に大いに参考になる著書が四つ程ある\*。そのうちの二つ——Loeb (1958) と Harper (1967)——は主として帯電現象をかなり詳しく取り扱っており、電荷分離の問題に直接関係のある材料が載っている。他の二つは力学的な問題を説いた Bowden and Tabor (1950, 1964) と Bagnold (1941) の著書である。前者は固体同志の接触の物理で、後者は空中またはいろいろの型の砂漠表面における砂の輸送を論じている。

## 5. 結論

野外観測にしても、室内実験にしても、研究がまだ足りないことは明らかである。たとえば野外観測では現在までのところ、地表面附近の垂直電場の変化といった初歩的な測定しか行なわれていない。Haboob 型にせよ、dust devil 型にせよ、自然の砂嵐が帯電する仕組みを十分に理解するためには、いろいろな高度におけるイオン数密度や空間電荷、砂粒子の電荷と粒径の関係、地表面電荷と風速の関係、はたまた気温、塵の型等を総合的に考える必要がある。筆者の知る限りこのような研究はまだない。さて、自然の嵐で類似の現象が再び起こるまで待っていたのでは時間がかかりすぎるから、実験室内で模擬嵐をつくることも必要であろう。実験室内なら風速、風の温度、砂塵の種類も意のままに変えられるか

\* 日本語で書かれたものとして「静電気ハンドブック」(高分子学会編, 地人書館) がすすめられる。

ら、最も帯電に効果的な因子はどれかを見定めるのも容易だろう。Latham and Stow (1965) はそういった種類のことを吹雪の帯電研究のために行ない、かなりの成功をおさめている。ただしこの反面、模擬実験というものには環境室の広さに制限があるため、入力エネルギーに限度があるという欠点は避けられない。

野外観測や室内の模擬実験で砂塵嵐の電氣的なふるまいを調べれば電荷発生機構をさぐることはできるが、その機構にあらわれる特定の電荷授受の過程となると、もっと念入りな実験によらざるを得ない。Rudge や Shaw の実験は定性的にすぎず、それが行なわれた条件もあきらかでない。Debeau, Gill and Alfrey, Peterson の実験は定量的であるといっても、表面汚染の影響が入ってすっきりしない。Wagner の結果は一番再現性をもっていると考えられるが、残念なことにこれは砂と金属の接触による帯電である。わずかに Kunkel の観測だけが定量的であり、信頼できるもので、しかも砂と砂の間の帯電をとり扱っているのだが、この実験は特に砂嵐の帯電をねらって行はわれたものではない。

以上述べたように、砂嵐帯電の問題を解決するには模擬実験と合せて、純度の効果、砂の粒径や接触の特性等がわかるように、条件をいろいろに変えて、砂、塵の電氣的ふるまいの研究を実験室内で強力に行なう他はない。現在筆者は Rudge や Shaw がやった型の実験を定量的に行ないつつある。これによって、不規則な砂または塵粒子が持ちうる最大電気量を測定し、粒子構造と粒子の電荷の関係も、非対称摩擦による帯電の可能性と合せて解明すること、また発塵装置を用いる実験では、電荷分離を検出し、dust devil で上空に舞い上る物質の粒径とそれとの関係を決定することなどが筆者の目指していることである。さらに野外観測も充分な装置でやることも考えている。

#### 参 考 文 献

- 1) Bagnold, R.A. (1941) : The physics of blown sand and desert dunes. Methuen Press, London.
- 2) Barcion, A. (1967) : A theoretical and experimental model for a dust devil. J. Atmos. Sci., **24**, p. 453-466.
- 3) Bicknell, J.A. (1967) : Private communication
- Physics Dept., U.M.I.S.T., Manchester.
- 4) Bowden, F.P. and Tabor, D. (1950) : The friction and lubrication of solids I. Oxford University Press, London.
- 5) Bowden, F.P. and Tabor, D. (1964) : The friction and lubrication of solids, II. Oxford University Press, London.
- 6) Debeau, D. (1944) : Phys. Rev., **66**, p. 9.
- 7) Freier, O.D. (1960) : The electric field of a large dust devil. J. Geophys. Res., **65**, p. 3504.
- 8) Gill, E.W.B. (1948) : Frictional electrification of sand. Nature, **162**, p. 568.
- 9) Gill, E.W.B. and Alfrey, G.F. (1949) : Frictional electrification. Nature, **163**, p. 172.
- 10) Harper, W.R. (1955) : Proc. Roy. Soc. A. **231**, p. 388.
- 11) Harper, W.R. (1967) : Contact and frictional electrification. Oxford University Clarendon Press.
- 12) Hatakeyama, H. and Kubo, T. (1947) : On the variation of the atmospheric potential gradient caused by the dust storm. J. Met. Soc. Japan, **25**, p. 45.
- 13) Henry, P.S.H. (1952) : The role of asymmetric rubbing in the generation of static electricity. Brit. J. Appl. Phys., Suppl. **2**, p. 531.
- 14) Kunkel, W.B. (1950) : The static electrification of dust particles on dispersion into a cloud. J. Appl. Phys., **21**, p. 820-832.
- 15) Latham, J. and Stow, C.D. (1965) : A laboratory investigation of the electrification of blowing snow. J. Met. Soc. Japan, **43**, p. 23.
- 16) Loeb, L.B. (1958) : Static electrification. Sringer-Verlag Press, Heidelberg.
- 17) Peterson, J.W. (1949) : Phys. Rev., **76**, p. 1882.
- 18) Rudge, W.A.D. (1914) : On the electrification produced during the raising of a cloud of dust. Proc. Roy. Soc. A. **90**, p. 256-272.
- 19) Shaw, P.E. (1927) : Electrical separation between identical solid surfaces. Proc. Phys. Soc., **39**, p. 449-452.
- 20) Shaw, P.E. (1929) : Electricity due to air-blown particles. Proc. Roy. Soc., A. **122**, p. 49-57.
- 21) Wagner, P.E. (1956) : J. Appl. Phys., **27**, p. 1301.