

乾燥地域の土質と地形

Soils and Landforms in Arid Zones

末 岡 徹 (すえおか とおる)
大成建設㈱技術研究所
土質基礎研究グループチームリーダー

中 尾 健 児 (なかお けんじ)
大成建設㈱技術研究所 主幹研究員

佐 野 拓 (さの たく)
大成建設㈱土木本部
計画推進部第二計画推進室長

1. はじめに

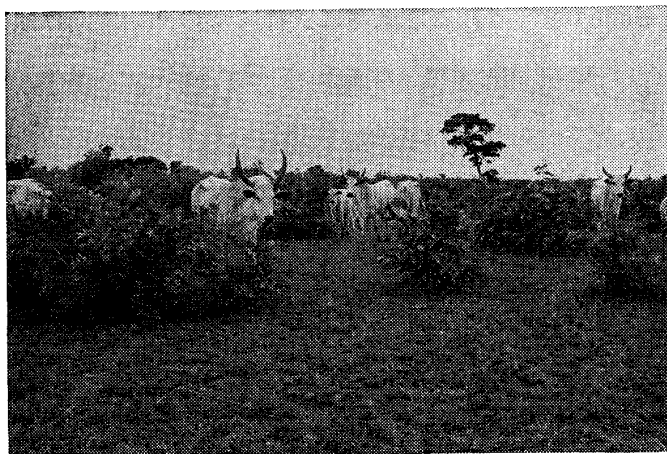
近年、人口の爆発的増加や家畜の過放牧（写真—1 参照）、さらには地球規模の気象変化が原因で、人間の存在にとって最も重要な土・土壌が砂漠化し、流失化しているという報告が数多く出ている^{1)~3)}。そしてアフリカ・サヘル地域に見られるように砂漠化・土の流失化している地域は、主に乾燥地であり、乾燥地の土質を含めた諸性状を知ることは、基本的に重要なことである。一般に、年間降雨量が 500～250 mm の半乾燥地および 250 mm 以下の強乾燥地を合わせて乾燥地と考えると、地球の全陸地に占める乾燥地の面積は 40～50% にもなる^{4)~6)}。すなわち“地球の立場”から見れば砂漠を含めた乾燥地の土

質は地球の代表的土質ということになる。しかしながら、日本は温帯モンスーン地域に属するため雨の少ない地域や砂漠に関する知識・経験も多くなく、これらの地域に関する地盤工学・土質工学の知識や体験も十分なものとは言えない。そこで本報告では、著者らのアフリカ・ナイジェリア・マリ・ニジェール、中近東、中国の黄土高原、オーストラリア中央部の砂漠や乾燥地での経験を踏まえ、これらの地域の砂漠土 (Desert Soils) を中心に地形、風化、土壌、地盤工学的特性等について紹介する。

2. 乾燥地域の自然

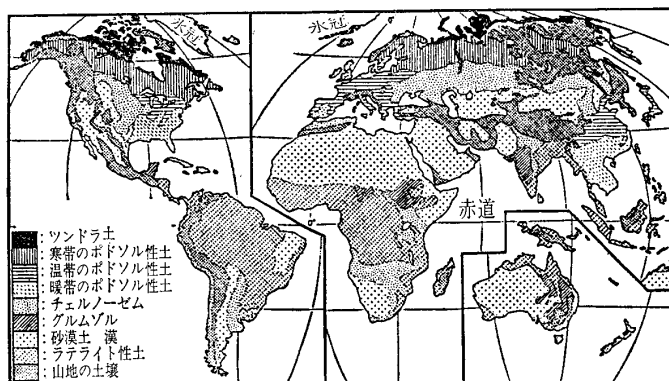
2.1 乾燥地域の気候と土壌

一般的に、土を農業的な立場から見る場合、土壌 (Soils) という用語が使われる。土壌の種類の定義については、いくつかの提案がなされているが、一般に世界の土壌の分布は、ほぼ気候帯と対応しており、例を示すと図—1 のようになる。そして、気候と土壌の定量的な関係に関しても、数多くの提案が



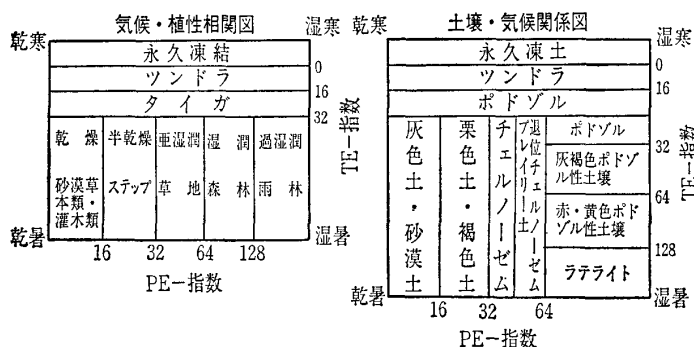
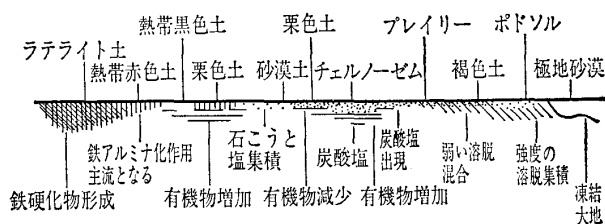
写真—1 アフリカ・ナイジェリア北部地域における牛の放牧

アフリカ・ナイジェリア北部地域は現在サバンナ気候であるが、人口増加、家畜の過放牧により植生が減少し、土壌砂漠化の危機にさらされている。



図—1 世界土壌図（アメリカ農務省土壌保全局により作成された地図）⁷⁾

あり⁷⁾、その中で代表的な Blumenstock and Thornthwaite (ブルメンストックとソーンスエイト, 1941) のものを示すと、図-2 のようになる^{7)~9)}。ここで、PE 指数：毎月の降水量対蒸発量の比の年間統計を10倍したもの、TE 指数：毎月の降水量対月平均気温の比の年間統計と定義される。簡単に言えば、砂漠土は降水量と比較して蒸発量が多く、平均気温に関しては高めだがかなり幅のある地域に分布していることがわかる。なお、図でポドゾル性土壌とは、一般に森林下に発達した土壌で表層が珪酸の漂白層、その下に鉄・アルミの集積層を持つ土壌のこと、チェルノーゼムとは、ドイツ、ポーランド、ルーマニア、ウクライナ、北南米に広く分布し、表層1 m程度の黒色の有機層とその下に石灰核層があり、小麦、とうもろこし、てんさい等の栽培に最も適した土壌のことである。極から赤道にかけて、土壌の断面関係を示すと図-3 のようになる。北から南へポドゾルが現れ氷は消え、やがて有機物の集積が増加し、層位ははっきりしなくなる。ついで炭酸塩が現れ、徐々に表層近くに現れる。しかし乾燥地域では炭酸塩はより溶けやすい塩類に置き換えられる。赤道に向かって赤色土とラテライトが現れる⁷⁾。一方、乾燥地域の土壌については、最近のアメリカ農務省の呼称、あるいはFAO, UNESCOの学術的な呼称があり、詳細な分類および内容については、参考文献を参照されたい^{7), 10)}。

図-2 気候・植生・土壌分布関係図⁸⁾図-3 極から赤道へかけての成帯性土壌の断面関係の模式図(参考文献⁷⁾を一部修正)

2.2 乾燥地域の風化と地形

砂漠・乾燥地域における土質も、一般の土質と同じように風化の生成物であり、気候、母岩、生物活動、地形、時間の五つの大きな風化影響因子に左右されている¹¹⁾。しかも、砂漠地域では、昼夜の温度差(30~40℃にも達する)と加熱された岩石の急冷により、物理的(機械的)な風化が卓越し¹¹⁾、岩石は破壊・細片化され最終的には砂が生成される。岩石の構成鉱物も化学的変成作用をあまり受けずに直接砂粒化することが多い¹²⁾。岩盤の除荷を含む物理的風化の結果、乾燥地域では口絵写真-10に示すオーストラリア中央部で見られるように島状丘(Inselbergs, または Bornhardts)とも呼ばれる半球形の岩山が残される。また岩盤の強度不均質性や薄片化作用(Flaking), さらに飛砂による風食の結果、口絵写真-11や写真-2に示すような岩盤表面にくぼ地や洞穴が出現することもある。

砂漠の砂は、主に風による作用により独特の地形を呈することが多い。風の作用は、一般に風食とデフレーションとに分かれる⁸⁾。風食は、風によって吹きつけられる砂粒が地表に働く侵食である^{8), 12)}。デフレーションは、風が砂粒やシルト・粘土を運搬する作用である。中国の黄土高原、ウクライナ、アメリカ中央部で見られるレス(Loess)はデフレーションの結果形成された風成層である。

砂漠の砂は、比較的砂の供給が少ない場合、トルキスタン由来のバルハン⁸⁾(三日月砂丘, Barchan dune)と呼ばれる風上側に三日月形の凸面を向け傾

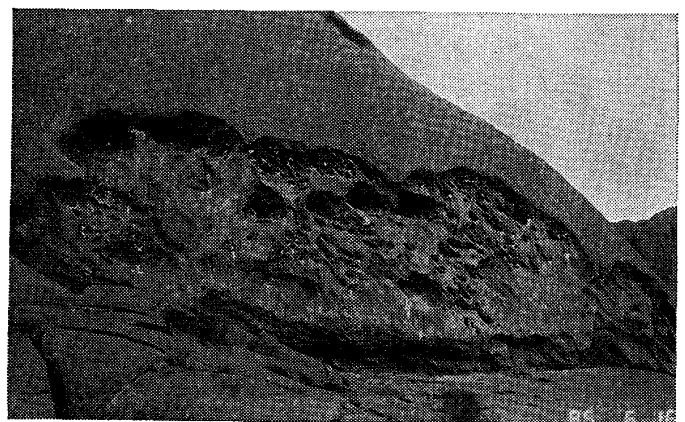
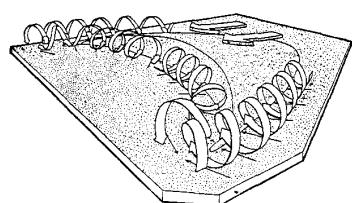


写真-2 オーストラリア・北部特別州エアーズロックにおける風化状況

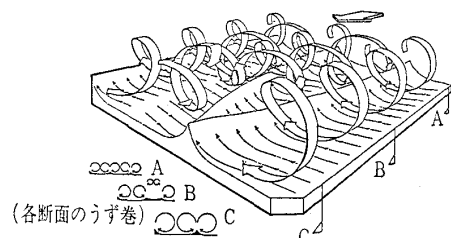
岩の薄片化作用(Flaking)と風食によりくぼ地や洞穴のある異様な岩盤面が出現する。

斜は穏やかで、風下側にはその凹面を向け急斜している砂丘を発達させる^{8), 13)}。三日月砂丘は、図—4のように風の方向、風のうずの方向の組合わせの結果、形成されると言われている。三日月砂丘の規模は、高さ最高 30m、最大幅 400m 程度である。固定されていない三日月砂丘は、風下側に 1 日 10 cm ぐらいの速度で移動するものもある。

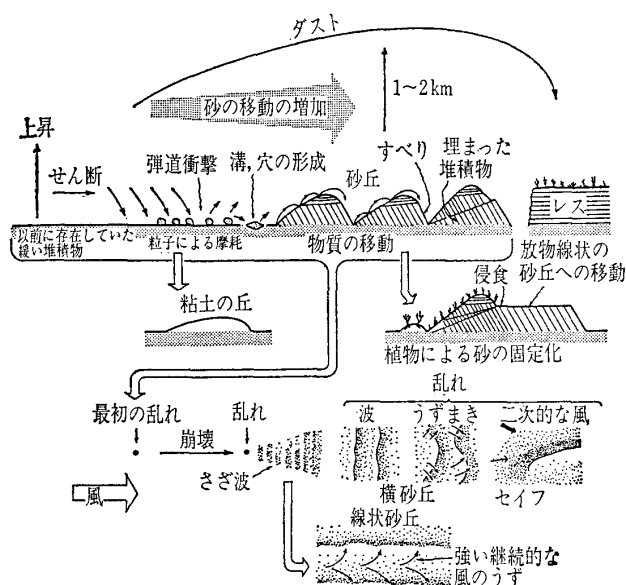
砂の供給が少し多くなると卓越風の方向に鋭く長く稜をもった線状砂丘¹²⁾ (縦砂丘⁸⁾, Longitudinal dune) が形成される。エジプトやイランでは類似の砂漠地形がセイフ (Seifs) と呼ばれ、大きなものでは高さ 100~200m、長さは時には 100 km 以上になることもある^{8), 12)}。この線状砂丘は、図—5 に示す



図—4 独立した三日月砂丘における風の流れ
アルジェリアのデータに基づき P. Knott
が作成した (参考文献¹³⁾を一部修正)



図—5 風のうずと線状砂丘—地表の熱が主な原因 (参考文献¹³⁾を一部修正)



図—6 砂漠地域の風による地形形成過程
(参考文献¹³⁾を一部修正)

ように地表の熱が原因で発生した風のうずによって形成されるという説が提案されている¹³⁾。もちろん実際の砂漠においては、この二つのタイプだけでなく、両者を組み合わせた中間的な砂丘や星形砂丘と呼ばれる二つのほぼ直交する風向に発達する砂丘が形成されることもある¹²⁾。一方、砂漠の植物はわずかの降雨量でも生育し、砂漠の植生は風による砂の移動を防ぐ働きをしていることになる (口絵写真—12 参照)。以上、砂漠における砂・風の相互作用による風成地形形成過程をまとめると、図—6 に示すようになる¹³⁾。

砂漠を含む乾燥地域には、上述したほかに様々な特異地形が発達する。例えば、風化硬盤 (Duricrusts) は風化の結果特定化学成分のみが集積し、塊状あるいは固結状態の風化生成物のことである¹¹⁾。乾燥地域における代表的風化硬盤には年間降雨量が 250 mm 以下の地域に発達し石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を主成分とするジブクリート、年間降雨量 500 mm 以下の地域に発達し炭酸カルシウム (CaCO_3) を主成分とするカルクリートおよび鉄分 (Fe_2O_3) を主成分としたラテライト等がある¹¹⁾。

また乾燥地域には、豪雨が降った時のみ河川になるワジと呼ばれる谷が存在する場合がある (写真—3 参照)。ワジの周辺は垂直に近い壁面を有する谷地形が見られ、河床は堆積物で覆われている場合が多く、地下ダム建設の候補地としてワジへの関心が集まっている。

3. アフリカ・サヘル地方の場合

世界で最も新興独立国が多く、人口増加も著しい



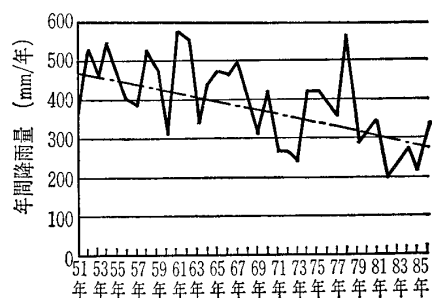
写真—3 乾燥地域に存在する谷地形ワジ

サウジアラビア国・ラビ付近に見られるワジ、雨期のための若干の水がたまっているが、数週間のうちに水はなくなる。

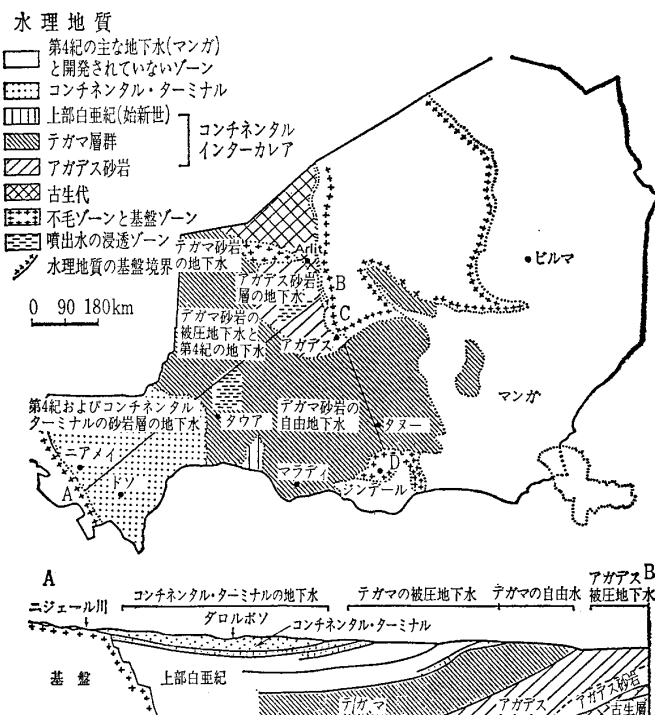
アフリカ大陸は、現在砂漠化の被害を受ける危険性が最も高い地域である^{1), 2), 4)}。本節では、アフリカ・サヘル地方の気候・土質状況に合わせた砂漠化防止対策として、地下貯水プロジェクトが計画されつつあり、主にその土質工学的特性について紹介する。

3.1 サヘル地方の自然条件

サヘル(Sahel)とは、トアレグ語でサハラ(Sahara)が完全な砂だけの砂漠を指すのに対し、草原を含んだ半砂漠をいう。西アフリカでは、既に図—1～3で示したように、南部海岸の多雨ジャングル地帯、疎林と草原を主とするサバンナ地帯、ステップから土漠とラテライト化した原野に変化するサヘル地帯、砂・礫からなる砂漠地帯と降雨量の減少とともに順次変化している。このサヘル地帯は、幅 300 km、長さ約 4000 km にわたって分布しており、現在年平均10数 km の速度で砂漠化していると言われている^{14), 15)}。



図—7 ニジェール国タウアにおける過去40年間降雨量の変化

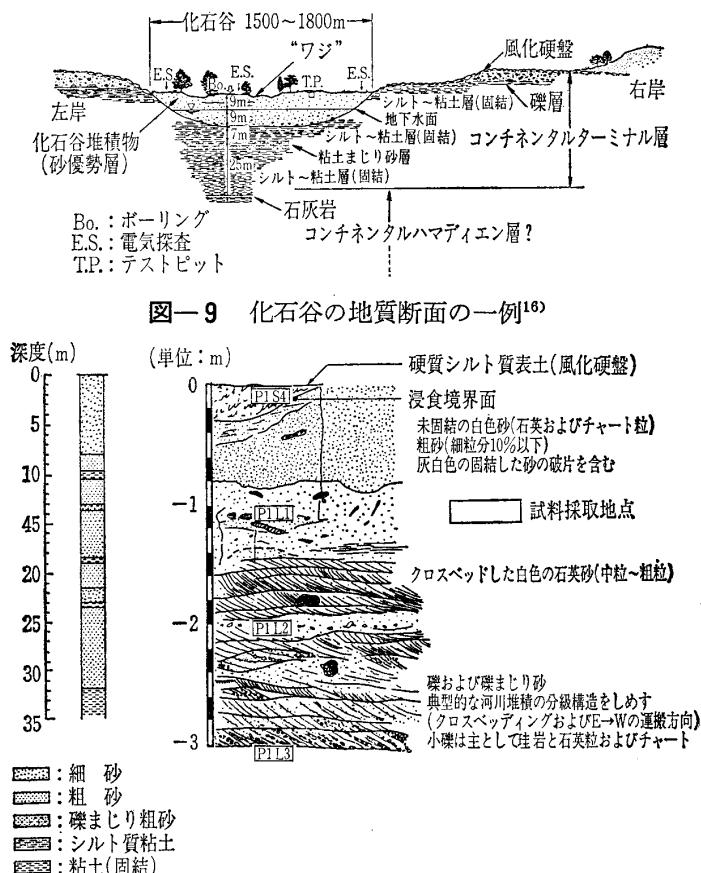


図—8 ニジェールの地質と地下¹⁶⁾

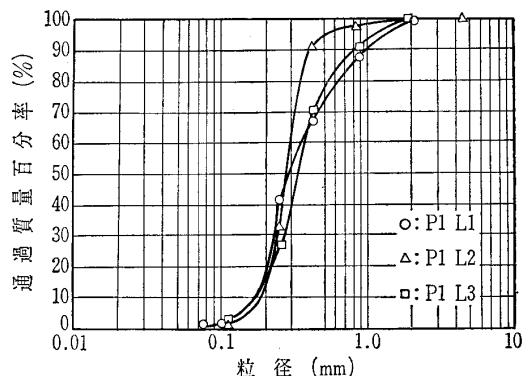
調査地であるサヘル地方のうち、ニジェールの地質・地下水状況・調査地点を示すと、図—8 のとおりである。第三紀の代表的な堆積岩層であるコンチネンタルターミナル中の砂岩層は、台地における重要な地下水資源として滞水層となっている。また、化石谷 1500～1800m “ワジ” 風化硬盤 礫層 砂岩層 粘土層(固結) シルト層(固結) 粘土まじり砂層 シルト層(固結) 石灰岩 コンチネンタルハマディエン層? Bo.: ボーリング E.S.: 電気探査 T.P.: テストピット

3.2 サヘル地方の地形と土質

図—9 化石谷の地質断面の一例¹⁶⁾



図—10 化石谷堆積物の状況(ニジェール①地区)と地質構成



図—11 サヘル地方(ニジェール国)におけるワジ内砂堆積物の粒度分布

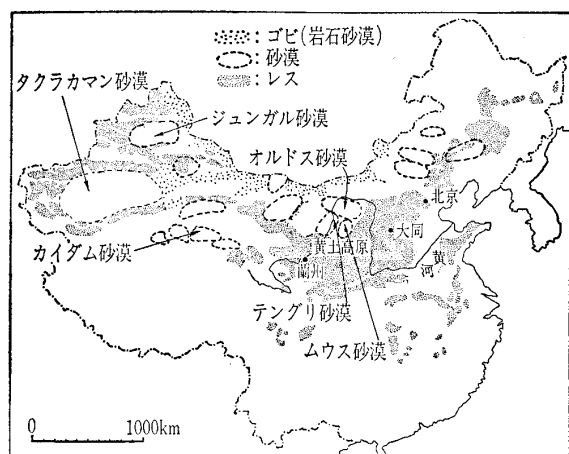


図-12 中国における砂漠・戈壁(岩石砂漠), レスの分布 (参考文献¹⁸⁾を一部修正)

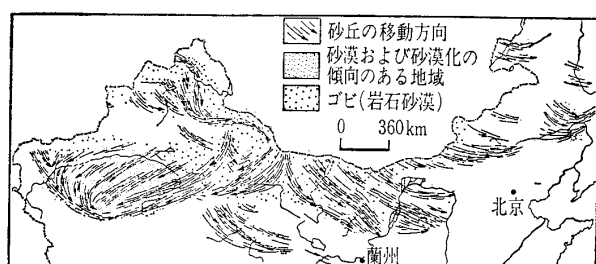


図-13 中国北部における乾燥地域の砂丘の移動方向¹⁷⁾

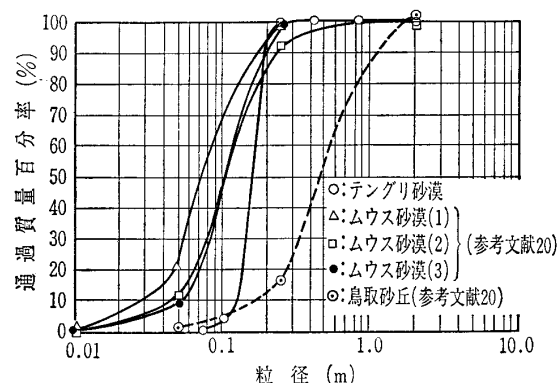


図-14 黄土高原砂漠地域の砂の粒度分布

この地方には, 2. で紹介したワジが発達しており, 8000年程前からの“化石谷”として砂漠の砂あるいは旧河川堆積物で埋めつくされている(図-9 参照)。調査地点①地区にワジにおける土層断面を示すと図-10のようになり, 地下貯水システムの候補地としては適していると考えられる。採取した試料の粒度分布および粒形を図-11および写真-4に示す。平均粒径がそろい砂粒の角がとれ丸まった形状の砂であることがわかる。なお, これらの砂質堆積物の透水係数は $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ で, 間隙率は35~40%であった。

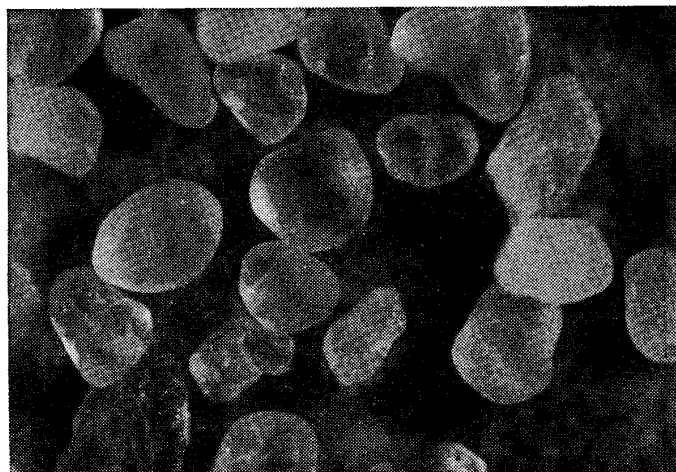


写真-4 ニジェール①地区 P1L3 試料
角のとれた丸まった砂で粒径も 0.3 mm程度で一定の大きさである。

4. 中国・黄土高原の場合

中国の乾燥地域は, 図-12に示すように中国北部, 西部を中心に国土の14%を占めている^{17), 18)}。降雨量は平均 400 mm 以下であり, タクラマカン砂漠にいたっては, 25 mm 以下である。中国でも砂漠化は, 過度の農業開墾, 過放牧, 樹林伐採が原因で発生しており, 1950年代から中国国務院・科学院が中心になって砂漠化防止の努力がなされている¹⁷⁾。

4.1 黄土高原の自然条件

調査地域の黄土高原・ Tengri 砂漠は, 中国で 4 番目に大きな砂漠で, 砂丘部分が 7 割を越え, また, 砂漠の中には, 数百の湖が存在する¹⁹⁾。平均気温は 9.6℃ (最高 38.1℃, 最低 -25.1℃), 年平均降雨量は 177 mm で 7~9 月に降雨の 60% を占め, 乾期は 10~4 月である。10~5 月の風向きは北西で, 3~5 月は強風, 砂丘は南東方向に 4 m 程度移動する (図-13 参照)。

4.2 黄土高原の地形と土質

黄土高原は既に述べたように風成土層であるレスで形成されている。しかも, その周辺には, 図-12に示すように数多くの砂漠, ゴビ(岩石砂漠)があり, 荒涼な地形群を形成している。調査地点である Tengri 砂漠の砂丘で採取した試料の粒度試験および粒形の顕微鏡写真を図-14, 写真-5に示す。平均粒径 0.16 mm 程度の粒径のそろった細砂であり, 鉄分を含み赤色を呈し粒子はやや角ばっている。中国のほかの砂漠, 日本の鳥取砂丘の試料も合わせて

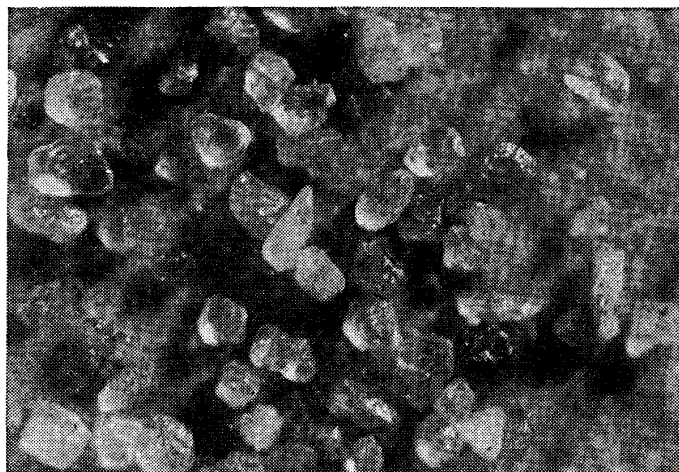


写真-5 テングリ砂漠(中国)の調査地点における砂の顕微鏡写真
平均粒径0.16mm程度の均質な砂で、鉄分を含んでいる。

図示するが²⁰⁾、中国の砂丘の砂は細砂がほとんどで鳥取砂丘と比較すると非常に細かいことがわかる。中国では、このような砂丘の風による移動防止に努力しており、草方格と呼ばれる麦わら等を1m格子状に埋め込んだものと飛砂防止柵、防風林、防砂林の組合わせで対処している^{17), 20)}。

5. あとがき

砂漠の土質と一口に言っても、ゴビ砂漠のような岩石砂漠から、土漠、砂丘を有する砂漠まであり、様々な風化生成物が見られ地形・地質的に多様性に富んでいる。本報告はその一端を紹介したに過ぎないが、少しでも読者の方々が砂漠や乾燥地域についての興味を持たれるきっかけになれば著者らの望外の喜びである。

参考文献

- 1) アメリカ合衆国政府特別調査報告：西暦2000年の地球 (The Global 2000 Report to the President) 2 環境編, 家の光協会, pp.121~136, 1981.
- 2) レスター, R. ブラウン編著, 松下和夫監訳：地球白書 '89~'90, ダイヤモンド社, pp.33~66, 1989.
- 3) 朝日新聞朝刊：熱帯雨林1億500万ヘクタールが消失 (81~90年) 貧困が原因, FAO 報告, 1993年8

月11日.

- 4) P. ブーリング著, 菅原道太郎訳：熱帯土壌学提要, 鹿島出版会, pp.22~57, 1974.
- 5) S.W. Buel, F.D. Hole, R.J. McGracken, 和田・久鳥・音羽・浜田・井上 訳：Soil Genesis and Classification (ペドロジー), 博友社, 1977.
- 6) 安富六郎・六瀬 眞・石原 邦・三野 徹：乾燥地の土地利用, 農業土木学会誌, Vol.60, No.11, pp.1011~1014, 1992.
- 7) C. Ollier: Weathering, Second Edition, Longman, pp.148~175, 1984. (初刊は, 松尾新一郎監訳昭和46年ラテイス社)
- 8) 多田文男監修：地形と土壌, 東海大学出版会, pp.104~112, pp.36~38, 1976.
- 9) 船引真吾：土壌学講義, 養賢堂, pp.181~214, 1972.
- 10) E.A. Fitzpatrick: Soils, Their Formation, Classification and Distribution, Longman, 1980.
- 11) 末岡 徹：世界に分布する特異な風化土, 土と基礎, Vol.39, No.6, pp.63~68, 1991.
- 12) F. マハチェック, H. ブラウン, C. ラチェンス著, 松尾新一郎監訳：地形学, 技報堂, pp.121~127, pp.147~162, 1975.
- 13) C. Embleton and J. Thornes 編：Process in Geomorphology, Aeolian Processes, Edward Arnold Ltd., pp.325~351, 1979.
- 14) 柴田健一・村山忠一：LANDSAT によるサバンナ地域の経年的植生変化, 農業土木学会誌, Vol.60, No.2, pp.133~138, 1992.
- 15) 嶋田義仁：人間の生産活動から見たサハラ南緑地帯の乾燥化—マリ国の事例—, 沙漠研究, Vol.1, pp.1~17, 1992.
- 16) 中尾健児・大塚義之・桑原 徹：サヘル地帯の水資源とその利用システム, 応用地質, 第33巻, 6号, pp.35~46, 1993.
- 17) Zhu Zhenda, Liu Shu, Di Xinmin: The International Center for Education and Research on Desertification Control Lanzhou, Desertification and Rehabilitation in China, 1988.
- 18) E. Derbyshire and T.W. Mellors: Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain, Engineering Geology; 25, pp.135~175, 1988.
- 19) Zhu Zhenda, Liu Shu, Wu Zhen, Di Xinmin: Deserts in China, Institute of Desert Research Academia Sinica Lanzhou, 1986.
- 20) 小池正之：内蒙古自治区毛烏京砂漠の緑化計画と農業機械化について(1), 農業機械学会誌, 第48巻2号, pp.267~270, 1986.

(原稿受理 1993.9.8)