

世界に分布する特異な風化土

Typical Duricrusts on the Earth

末 岡 徹 (すえおか とおる)

(大成建設技術研究所 主任研究員)

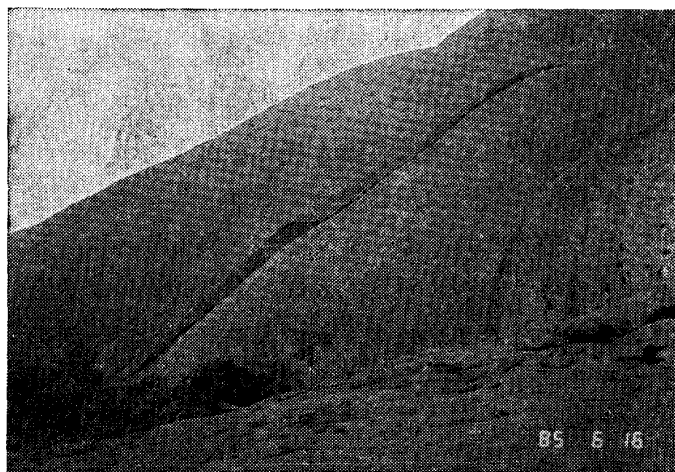
1. はじめに

土質工学で対象としている土そのものは、火山灰の場合を除き、もともとは岩石の風化の結果生成されたもので、その意味で、残積土（風化土）が土の起源と言っても過言ではない。日本では、まさ土が残積土として良く知られているが、世界、特に熱帯、亜熱帯や大陸の乾燥地域では、より長期にわたる苛酷な風化作用を受けるため日本で見られない特異な風化土（風化生成物）が存在する。このような風化土は、以前は、日本の地盤技術者にとってあまりなじみがなかったが、地球環境問題を含めた世界に対する日本の貢献が求められたり、オーストラリアやサハラ砂漠周辺の大規模緑化計画等の地球規模のプロジェクトが提案されてくると、世界に分布するこのような風化土も、日本の技術者が取り扱うべき研究対象となってきている。本文は、このような状況の中で、まず風化について概説した後、世界に分布する特異な風化土の種類や起源、工学的利用法等について、著者のアフリカ、オーストラリア、ブラジル等での現地調査の結果も踏まえ紹介したものである。

2. 風化と風化過程

風化および風化作用について、いろいろな定義が提案されており、例えば Reiche は、風化とは、岩石圏、気圏、水圏およびさらに重要な生物圏との接触位置、あるいはその近傍での条件に対する岩石圏内で平衡を保っていた物質の応答であるという定義を行っている¹⁾。つまり、風化とは、地球表面近く物質が、物理的、化学的、生物学的な力によって細片化され、新しい物理化学的平衡状態により近い物質へ変換することと言えよう。風化は一般に、物

理的風化と化学的風化の二つのカテゴリーに分けられる²⁾。物理的風化は、力学的な力によって岩石が細片化されることを指し、非常に寒い地域か、非常に乾燥の激しい地域で卓越する。そして図—1に示すように物理的風化は均質な新鮮岩の場合、脱色と物理的崩壊が顕著であり、ジョイントや層理のある岩盤の場合、オープニングとジョイントが増加する。写真—1に示すオーストラリア北部特別州エアーズロックに見られる岩盤のシーティング（岩盤面と平行な節理状の割れ目）は、物理的風化の典型的な結果である。



写真—1 オーストラリア・北部特別州エアーズロックで見られるシーティングの例

化学的風化とは、岩石やサプロライト（岩石が原位でぼろぼろに腐った状態のもの）が新しい化学的平衡状態を求めて変質し、さらに風化の進んだサプロライトや土の状態になる過程を指す。化学的風化は図—1に示すように大きく前半を地球化学的風化、後半を土壌化学的風化に分類され³⁾、均質な岩盤、ジョイントや層理のある岩盤とも、粒状風化を経て完全な風化（土）を呈する。

このような風化過程を経て進行する土壌形成の因子として、Jenny は気候、母岩、生物活動、地形、時間の5項目をあげている²⁾。この中で、最大の因子は気候であり、図-2に示すように気候の中でも、水(降水量)、気温は、強い相関があることを示している⁴⁾。水とは、具体的には、全降水量、降雨強度、降水に対する流出の比や蒸発比であり、蒸発が降水をしのいでいる場合、アルカリ性土壌や塩湖が形成される。写真-2は、オーストラリア中央部にある巨大な塩湖であるアマデウス湖の全景を示している。



写真-2 オーストラリア中央部の塩湖
アマデウス湖

母岩の種類も風化に影響を与える重要な因子である。一般的に粗い粒子を持つ岩石は、その大きな空隙と通水性のため、より早く風化されることになる。表-1は各種岩石の平均的な間隙率と相対的な透水性の比較⁵⁾であり、透水係数の大きなもの程、相対的に風化速度が早いと考えられる。

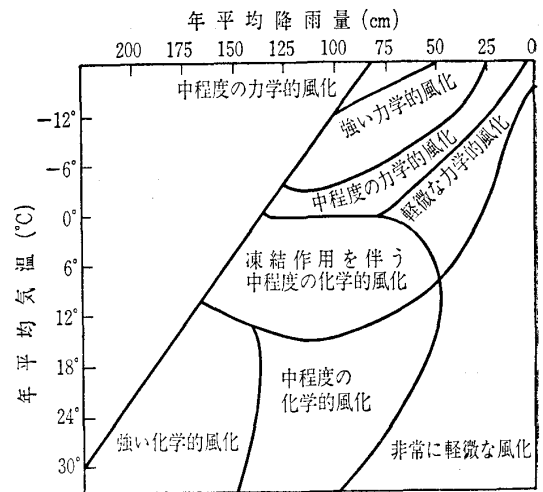


図-2 気温と降雨量の異なる条件下での種々の風化形態⁴⁾

表-1 一般の岩におけるおおよその平均間隙率と相対的透水性の関係⁵⁾

岩	種	間 隙 率 %	相対的な透水係数
花崗岩	深成岩	1	1
玄武岩	深成岩	1	5
石灰岩		10	10
砂岩		18	30
頁岩		18	500
粘土		45	—
シルト		40	1 100
砂		35	10 000
礫		25	

生物による風化作用は、化学的な面と物理的な面の両面がある。口絵写真-13は、オーストラリア・シドニーにおけるホークスベリー砂岩のユーカリの根による破壊例である。一方、熱帯地方では、しばしばシロアリが1mm以下の細粒土を集め蟻塚を形成する場合があります(口絵写真-14)、この場合、自然な土の粒度分布を生物が変化させていることになる。

風化における時間とは、風化の経過時間のことである。例えば、後述するアルクリートやフェリクリートは、このような長い時間をかけて安定した台地の上に風化残積物が発達した結果である。

地形については割愛するが、上述のように多くの因子による風化作用を受け、地球表面で、

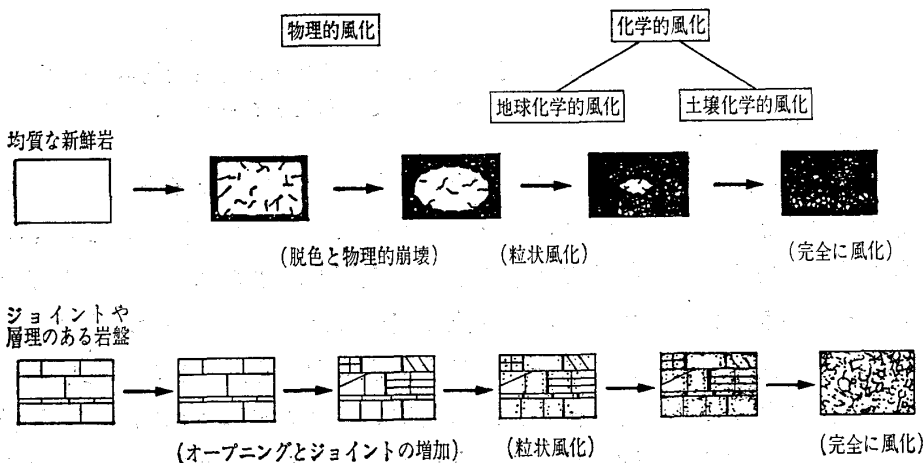


図-1 風化に伴う岩盤の変化(文献3)を参考)

表—2 風化硬盤の分類^{3),7)}

固結材料から	支配的な成分から	基本的な化学成分	典型的な結晶鉱物
シルクリート (silcrete)	シリティッククラスト (silitic crust)	SiO ₂	石英 (90~95%)
	シアリティッククラスト (siallitic crust)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	石英 (アルミナ分の混合体でしばしばアモルファス状か潜晶質)
	フェシリティッククラスト (fersilitic crust)	Fe ₂ O ₃ , SiO ₂	ヘマタイト, 石英
フェリクリート (ferricrete)	フェシリアリティッククラスト (fersiallitic crust)	Fe ₂ O ₃ , FeO(OH), SiO ₂ , Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O, +AlO(OH)	ヘマタイト, ゲーサイト, 石英, ギブサイト, ボーマイト
	フェラリティッククラスト (ferrallitic crust)	Fe ₂ O ₃ , FeO(OH), Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O, +AlO(OH)	ヘマタイト, ゲーサイト, ギブサイト, ボー マイト
	フェリティッククラスト (ferritic crust)	Fe ₂ O ₃ (80%まで) FeO(OH)	ヘマタイト, ゲーサイト
	フェマンギティッククラスト (fermangitic crust)	Fe ₂ O ₃ , MnO ₂	ヘマタイト, 軟マンガン鉱/硬マンガン鉱
アルクリート (alcrete)	ティアリティッククラスト (tiallitic crust)	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O	金紅石/銳錐石, ギブサイト
	アリティッククラスト (allitic crust)	Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O (60%まで) AlO(OH)	ギブサイト, ボーマイト
カルクリート (calcrete)	カルシティッククラスト (calcitic crust)	CaCO ₃	カルサイト (60~97%)
	カルシリティッククラスト (calcsilitic crust)	CaCO ₃ , SiO ₂	カルサイト (シリカ, しばしばろう質, その 他)
ジブクリート (gypcrete)	ジブシティッククラスト (gypsitic crust)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	石こう
サルクリート (salcrete)	ハリティッククラスト (halitic crust)	NaCl(たいてい不純物を含む)	岩塩

ギブサイト: Al₂O₃·3H₂O, ボーマイト: AlO(OH), ゲーサイト: FeO(OH), ヘマタイト: α-Fe₂O₃

様々な特徴ある風化生成物が形成されていることがわかる。

3. 風化硬盤について

熱帯、亜熱帯や大陸の乾燥地域に、しばしば塊状あるいは固結状態にある特異な風化生成物が存在することは既に述べたが、この風化生成物は総称して Duricrusts^{3),6),7)} と呼ばれている。

この Duricrusts という用語は、最初オーストラリアの Woolnough (1927年) により、オーストラリア大陸の地盤表層に存在する Crusts (殻, 硬盤) を指す言葉として提案された⁶⁾。Duricrusts は、激しい風化作用により鉄やアルミの三二酸化物、シリカ、炭酸カルシウム、ややまれであるが石こうや岩塩等を各々主成分として集積された風化生成物である。たいてい、頂上が水平に近い丘陵地形を形成したり、広く地中に分布しており、本論では、これ以後、Duricrusts を風化硬盤と訳すことにする。風化硬盤は表—2 に示すように、数種類あり、硬盤を結合している材料に注目する場合、(〜クリート) の

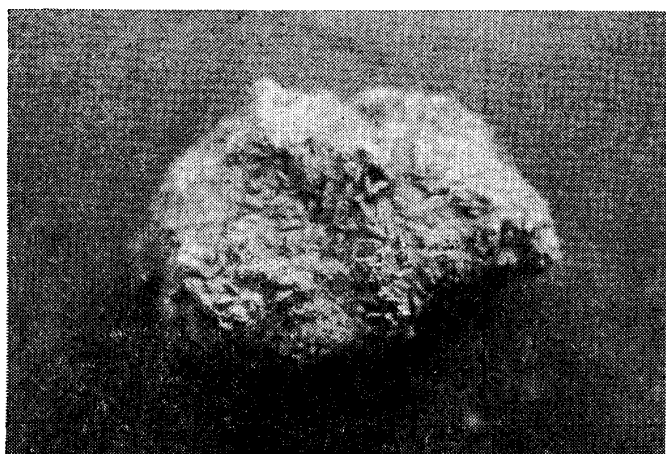
語尾を、主な成分に注目する場合は (〜クラスト) の語尾を付け加えて使用している。これらの風化硬盤は、硬盤を形成している材料以外の物質が風化作用により溶脱したり、水や風化による運積作用の結果形成された風化の最終形態生成物ともいうべきものであり、本章では表—2 の中の特徴ある風化硬盤について紹介する。

3.1 ジブクリート

ジブクリートは、温帯地域の砂漠地帯にしばしば出現し、一般的には、年間降雨量が 250 mm 以下の石こうのもとになる成分がある地域に存在する⁹⁾ (図—3 参照)。ジブクリートはたいてい海水の蒸発の結果生成され、石こう (CaSO₄·2H₂O) が緩いパウダー状か固結状あるいは結晶状態となったものである。写真—3 は、オーストラリア・ニューサウスウェールズ州ブローケンヒル付近の結晶性ジブクリートである。ジブクリートの層の厚さは数 mm から数 m まで変化し、石こうの量も 15 % からほとんど 100 % まで変化する。例えば、アフリカのチュニジアやナミブ砂漠に存在するジブクリートの平均化学



図—3 ジブクリートの分布（黒地），年間雨量 200 mm の等雨量線（破線と実線）に合わせて図示（Watson⁹⁾によるGoudie と Pye 編，1983を参考）



写真—3 オーストラリア・ブローケンヒルのジブクリート

成分は，石こうが 65～80%，炭酸カルシウム (CaCO_3) が 3～8%，強熱減量 (H_2O (土)) が 5～20%，その他塩化ナトリウム (NaCl) 等が微量含まれている。ジブクリートを工学的に扱おうとする試みもなされており，津田ら⁹⁾は，シリアの乾燥地域における農業プロジェクトにおいて，石こうの含有量が 30% 以内ならば土として扱えるが，またこの限界値を越えると水を加えても含水比が大きくなり，一般の土の締固め曲線の概念が適用できなくなると報告している。

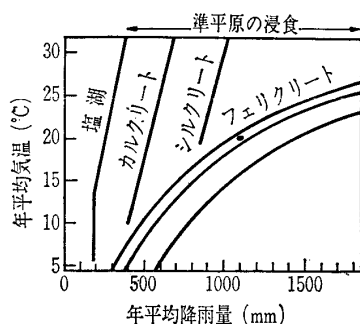
3.2 シルクリート

シルクリートは，南極大陸を除く各大陸に存在し，なかでもサハラ砂漠とその周辺，コンゴ盆地，アンゴラ，南アフリカ，ナミビア等で報告されている。また，オーストラリアでは，図—4に示すように，雨量等の気候条件の関係でその分布が論じられている^{8), 10)}（口絵写真—15参照）。シルクリートは，シ

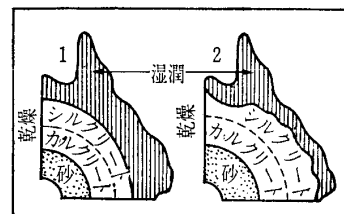
リカ (SiO_2) が溶脱し，さらにそれが集積した結果形成されたもので，風化抵抗性が強く，工学的にも有用な材料である。オーストラリアでは，鉄道用バラスト，コンクリートやアスファルト用骨材，道路舗装シーリングのスクリーニング材として利用されている。しかし，利用に際しては，粘土分などの細粒分が混入しないこと，アモルファス状シリカやオパール状シリカを含むため，セメントのアルカリ骨材反応に対し安全を確認してから利用することが重要である。

3.3 カルクリート

カルクリートは，炭酸カルシウム (CaCO_3) が土や埋積物と二次的に固結して形成されたものである。ある種のもは，より古い炭酸カルシウムの溶解後，再沈殿してできたものもあり，ほかは鉱物の風化後カルシウムが残積し，空気中の炭酸ガスにより炭酸カルシウムを形成したものである。カルクリートは主にアフリカや中近東の雨量が 500 mm 以下の乾燥および半乾燥地域に存在する。その主な化学成分は，80% 程度が炭酸カルシウム (CaCO_3) であり，その他シリカ (SiO_2)，アルミナ (Al_2O_3)，酸化第二鉄 (Fe_2O_3) 等が若干含まれる。カルクリートはその形態により石灰質土，粉状カルクリート，塊状カルクリート，蜂の巣状カルクリート，硬質カルクリート，薄片状カルクリート，玉石状カルクリートに分類される¹¹⁾。その厚さは，塊状だけの場合から 10m を越



(a) 風化硬盤と気候



1. 3.3°C 第3紀の気温低下 2. 現在

(b) クイーンズランドにおけるカルクリートとシルクリート

図—4(a) 気候と種々の風化硬盤の関係

図—4(b) オーストラリアにおける風化硬盤の分布と過去の気候変化の影響



図-5 ポーキサイト（アルクリート）の分布 Valetton¹²⁾, 1972を参考)

える厚い層の場合までである。カルクリートの中のカルシウムは普通、石灰岩、大理石や石灰質砂岩に由来し、近くに石灰のない場合には、洪水による堆積によってカルクリートが形成される。カラハリ砂漠やナミブ砂漠のものはこの起源である。塊状カルクリートは道路路盤材として適しており、アフリカの半乾燥地域では、ロサンゼルスすりへり試験実施後、良質のものを路盤材として利用している。

3.4 アルクリート（ポーキサイトあるいはアルミノクリート）

アルクリートはポーキサイトとも呼ばれ、主に熱帯湿潤気候の下で形成され、アルミニウムの原料であることから経済的にも非常に重要な風化硬盤である。アルクリートは、アルミナ以外の鉱物が風化によって大部分取り除かれた風化残積物であり、後述するフェリクリートと鉄とアルミナという主成分の

違いはあるが、その生成過程は似ている。アルクリートは、台地地形に存在するものと石灰岩・カルスト地形に存在するものの2種類があり、世界における分布¹²⁾は、図-5のとおりである。ポーキサイト（アルクリート）は、ギブサイト、ボーマイト、ダイアスポア、ヘマタイト等のアルミニウムの水酸化物と鉄の酸化物がその主な鉱物であるが、石英、チタン等の鉱物も若干含まれている（表-2参照）。世界各地のポーキサイトは、その生成時期が異な

っているが、主に石炭紀、三畳紀、白亜紀、第三紀後半、鮮新更新世から現在にかけての時期に集中している。オーストラリア西部のダーリングレンジ付近は、過去の熱帯湿潤気候のせいで世界最大のポーキサイト鉱床があり、口絵写真-16や写真-4に示すような粒状ポーキサイトや塊状ポーキサイトが出現する。

3.5 フェリクリート（ラテライト）

フェリクリートはラテライトとも呼ばれ、熱帯および亜熱帯湿潤気候地域に分布し、主に鉄酸化物および鉄水酸化物と若干のカオリン鉱物を含む粒状あるいは塊状、またはポーラスな状態の風化硬盤である。アフリカやオーストラリアでは、路盤材やタンク基礎として利用されている¹³⁾が、ラテライト自身の定義は、現在でも確定的なものがない。

(1) ラテライトの分類

フェリクリート（ラテライト）の分類に関しては、いろいろな手法が提案されているが、Young¹⁴⁾は、その形態的特徴から以下の分類法を提案している。

(i) 塊状ラテライト (Massive Laterite)

連続した固い構造を持っている。完全に均質なこともあるが、たいてい空洞か土で満たされた空洞を含むことが多い。しばしば石英粒子やほかの岩石と合体していることがあるが、岩の構造は見るできない。以下のようにセルラーラテライト (Cellular Laterite) とベシキュラーラテライト (Vesicular Laterite) の2種類がある。前者は空洞がほぼ丸まっており、それらは互いにつながっていないか、部分的につながっている。後者は空洞が主に管状になっている。



写真-4 西オーストラリア・ダーリングレンジ付近の塊状ポーキサイト

(ii) 粒状ラテライト (Nodular Laterite)

個々のほぼ円い粒状ラテライトで (ピヅリス状ラテライト, pea iron と呼ばれる), 固結粒状ラテライト (Cemented Nodular Laterite), 部分固結粒状ラテライト (Partly-Cemented Nodular Laterite), 未固結粒状ラテライト (Non-Cemented Nodular Laterite) に細分類される。

(iii) 再固結ラテライト (Recemented Laterite)

塊状ラテライト (Massive Laterite) や鉄化石 (Ferruginized Rock) の破片を含む。部分的に, または全体的に固結している場合もあるし, 破壊している場合もある。

(iv) 鉄化石 (Ferruginized Rock)

岩の構造は残っており, その構造を見ることができるが, 鉄によってかなりの部分が置き換わっている。

(v) 軟質ラテライト (Soft Laterite)

鉄分の多い斑状粘土であり, 空気にさらすか乾湿の繰返しにより固結するもの。

フェリクリートはアルクリートと同じように, 地形的な特徴がある¹³⁾。

(2) ラテライトの起源

ラテライトの起源については, 現在でも確定的なものはないが, おおよそ以下のプロセスで形成されたと考えられている¹⁴⁾。すなわち, ラテライトの主な成分である三二酸化物 (Fe_2O_3 , Al_2O_3) は地下水や浸透水の流れのある箇所では溶け出し, さらに下流域の土中で沈殿する。一方, 一つの土層内では, 垂直方向の水の動きによっても, 三二酸化物が集積する。特にサバンナ気候では, 規則的な地下水位の上昇と下降があり, 三二酸化物の集積に最も良い状態をつくるが, この過程は, 熱帯雨林気候地域でも, 短期間の乾期やほんのしばらくの乾燥時期があれば発生する。このように, 水平および垂直の三二酸化物の移動・集積により熱帯・亜熱帯のラテライトは形成され現在に至っている。

4. おわりに

風化硬盤は, 風化を受けた岩石が土になり, さらに風化が進んだ地質的循環の中の最終風化形態と位置づけられるが, 過去において日本の地盤技術者にとってあまりなじみがなかった。しかしながらグロ

ーバルな地球的視点が求められている現在, このような大地の風化生成物に対しても, 我々地盤技術者は興味を持ち, 研究対象とすることが求められているのではないだろうか。最後に, 本検討に際し, 西田一彦関西大学教授をはじめとした, 土質工学会風化残積土に関する研究委員会委員, オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学 I. K. Lee 教授, R. Fell 教授, 九州産業大学山内豊聡教授, 京都大学柴田徹教授, 足立紀尚教授, 嘉門雅史教授, 大成建設技術研究所地盤研究グループ名倉克博チームリーダーの御助言を受けたことに対し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ollier, C. D. : Weathering, 改訂版, Longman, pp. 1~3, 1984. (初版, 松尾新一郎監訳, 風化—その理論と実際, ラティス, 1971.)
- 2) Carrol, D. : Rock Weathering Prentice Hall Press, pp. 1~24, 1970.
- 3) Selby, M. J. : Hillslope Materials & Processes, Oxford University Press, pp. 1~29, 1982.
- 4) Peltier, L. : The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is related to Climatic Geomorphology, Ann. Assoc. American Geology, 40, pp. 214~236, 1950.
- 5) Embleton, C. and Thornes, J. : Process in Geomorphology, Edward Arnold, pp. 73~129, 1979.
- 6) Woolnough, W. G. : The Duricrust of Australia, Journal and Proceedings of Royal Society of N. S. W., pp. 24~53, 1927.
- 7) Dury, G. H. : Rational Descriptive Classification of Duricrusts, Earth Science Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 77~86, 1969.
- 8) Watson, A. : Gypsum Crusts, Chemical Sediments and Geomorphology, edited by Goudie, A. S. and Pye, K., pp. 133~161, Academic Press, 1983.
- 9) 津田・小池・本間・実方・会田 : 水路堤体材料としての Gypsiferous Soil (石こう土) —シリア, 土と基礎, Vol. 27, No. 1, pp. 37~46, 1979.
- 10) Watkins, J. R. : The relationship between climate and the development of landforms in Cainozoic rocks of Queensland, Journal of Geological Society of Australia, 14, pp. 153~168, 1967.
- 11) Goudie, A. S. : Calcrete, Chemical Sediments and Geomorphology, Goudie, A. S. and Pye, K. edited, Academic Press, pp. 93~131, 1983.
- 12) Valeton, I. : Bauxites, Elsevier Publishing Corp., pp. 11~12, 1972.
- 13) 末岡・高田・長野・藤原 : 路盤材としてのラテライトおよびラテライト性土—ナイジェリア, 土と基礎, Vol. 35, No. 7, pp. 9~14, 1987.
- 14) Young, A. : Tropical Soils and Soil Survey, Cambridge University Press, pp. 154~170, 1976.

(原稿受理 1991. 3. 1)