

熱帯土壌中の鉄質形成物—特に結核と瘤塊について

久 馬 一 剛*

Secondary Ferruginous Formations in Tropical soils, especially Concretions and Nodules

by

Kazutake KYUMA

I ラテライトとは一いとかちにかえて

熱帯におけるラテライトおよびその類縁生成物については、19世紀初頭の Buchanan¹⁾ による最初の報告以後、きわめて多数の報告がなされている。この一世紀半余にわたる研究の歴史の中で、用語にはかなりの混乱がみられるが、現在ラテライトとよばれているものには、次の四つの形態のものが含まれているとしてよい。²⁾

- (1) 斑紋を有する未固結の粘土で、地表に曝されると不可逆的に硬盤 (hard pan あるいは crust) に変化する。
- (2) 嚢胞状構造をもつ硬盤 (cellular あるいは vesicular laterite crust)。
- (3) 非固結マトリックス中の結核 (concretion) や瘤塊 (nodule)。
- (4) これらの結核や瘤塊の連結された固塊。

これらのうち(1)は Buchanan によって最初に記載された ラテライト の概念を継承するものであり、最近のアメリカ農務省土壌調査スタッフ³⁾ による “Plinthite” の規定ともほぼ合致する。熱帯でしばしば建築材料として使われているラテライトは、この未固結の粘土を切り出して地上に放置し、不可逆的に固結させたものである。(2)と(4)はいずれも固結された盤層や固塊である。(2)が不規則な形に連結された、鉄分に富む隔壁と、その間を充填している白ないし黄白色のカオリン質粘土とよりなるか、あるいは後者が脱落した非常に空洞部の多い蜂の巣状構造を有するのに対し、(4)は(3)の結核や瘤塊が、鉄分に富む物質で二次的にセメントされたかのごとき外観を有する点で異なっている。

これらの soft plinthite や hard laterite crust の生成は、化学的風化の最終段階における残積性生成物として、あるいは、土壤水や地下水の動きに伴う三二酸化物の絶対的集積の結果

* 京都大学東南アジア研究センター

として、次の4とおりの生成機作により説明されている。

1. 三二酸化物の相対的集積

2. 三二酸化物の絶対的集積

(1) 水の水平的移動に伴う

(2) 水の垂直的移動に伴う

a. 上より下へ, b. 下より上へ

1.の相対的集積は、土壌学でいう典型的なラテライト化（あるいはアリット化）過程の結果であり、風化作用が土壌生成（層位分化）作用に優越している。一方2.の(2)aの上から下への水の動きに伴う絶対的集積は、ポドゾル化作用の結果と考えられるものであり、風化のみならず層位分化過程が、ラテライト生成に寄与しうる可能性を示すものとして、大きな意味をもつ。

ところで、これらの風化あるいは土壌生成作用によるラテライトの形成は、湿潤熱帯という化学的風化に最も好適な条件においてすら、きわめて長時間を要する過程であり、現存するラテライトの多くは、第三紀か更新世の前期ないし中期にかけて形成された地形面と関係づけられている。しかし、2.(1)の水平的な水の動きに伴い、三二酸化物の富化によって生成されるラテライトの場合などでは、比較的若い地形面を硬盤がおおっている例が知られている。

以上簡単に述べてきたことは、いずれも、ラテライトといわれているもののうち、多少とも面的なひろがりをもって出現する *soft plinthite* や *hard crust* の生成についてであった。鉄質の結核や瘤塊については、広くその存在が認められているにもかかわらず、その生成機作については不明の点が多い。

本稿では、これらの結核や瘤塊について、その種類や産状、化学的組成や生成過程に関する既往の文献の記載と、筆者らによる熱帯アジアでの観察とを総括し、これらのものの生成にかかわる問題点と、それがもつ熱帯土壌学研究上の意義を明らかにすることをめざしたい。

Ⅱ 結核および瘤塊の種類と産状

Fridland⁴⁾ は、北ベトナムのラテライトを作っている結核の種類として、次の4種をあげている。

(1) ピゾリス様結核——ととのった球状で、1～2mmから8～10mmの径をもつ。

(2) 嚢胞状結核——不規則な形状と大きさをもつが、表面は鉄質物でなめらかに被覆されている。

(3) 固結された結核——肉眼でみうる程度の大きさをもつ未風化の岩石や鉱物片が、鉄質物によって固結されている。

(4) 偽結核——比較的未風化の円礫が、うすい鉄質皮膜によっておおわれ、なめらかな表面をもつ。

土壌学で普通結核というのは、形が球に近く、かつ同心円的な成層構造を示すものをさし、形の不規則な、成層構造を示さないものを瘤塊として区別する。もとより、これらの間の区別は漸移的であって、明瞭な線を引くことはできない場合が多い。Fridland のいうピゾリス様結核はまさに結核であるが、嚢胞状結核や固結された結核といっているものは、むしろ瘤塊というべきであろう。Fridland が偽結核といっているものは、筆者らも観察しているし、他にも記載されている例があり、区別をするほうがよいと思われる。しかしこのものの重要性は低い。

したがって、以下に論議の対象とするのは、ピゾリス様結核（単に結核、あるいはピゾリスともいう）と瘤塊であり、これらの用語によって区別することにする。

これらの結核や瘤塊の産状として最も普通なのは、soft plinthite や hard laterite crust と同一の断面中に存在する場合である。硬盤が地表からある深さの所に出現する場合には、多数の結核や瘤塊が硬盤上部の風化殻あるいは土壌中に含まれる。もっとも、Humbert⁵⁾ はニューギニア東部のラテライトについて、laterite crust の下に厚く結核を含む層が出現するのを代表的としている。硬盤上の土層中の結核や瘤塊は、その場での生成によるもののほか、硬盤の破壊の結果生じたものであったり、他からの移動によるものであったりすることが知られている。

結核や瘤塊が、硬盤の存在しない土壌断面中に存在する例もきわめて多い。これらのうちには、あきらかに十分長期間の風化作用をうけながら、母材中の鉄含量の不足から、鉄集積部位が連続相を作りえず、そのために soft plinthite や hard laterite crust となっていないとみられる場合がある。筆者らがマラヤ、ジョホール州で観察したものはこの例で、網状斑は地表から約 3 m の下層では明瞭であるが、地表へ向かって鉄の分離、漸進的な硬化と、おそらくは風化・侵蝕による土壌体積の減少とが進行した結果、地表および表層約 15cm の部位には多数の瘤塊が集積するにいたっている。この場合下層の網状斑は不可逆的硬化を示さず、soft plinthite のうちにはいれられない。

しかし、結核や瘤塊の中には、このような長期の風化履歴を経ていない、非常に若い地形面上の土壌にみられるものも多い。Nye⁶⁾ は西アフリカの森林地帯の土壌カテナを研究した際に、クリープによる地表面の低下速度から判断して、これらの土壌中に含まれるピゾリス様結核が、過去 25,000 年以内に生成されたものとの推定を下している。

絶対年代はあきらかでないが、地形発達史的観点から、およその年代推定が可能な例は多い。Fridland⁴⁾ は北ベトナムにおいて、Ngan-Fo 川の氾濫原と第一段丘上の土壌中には結核が認められないが、第二段丘上の土壌中にはピゾリス様結核がみられることを報告している。また Zonn⁷⁾ はキューバにおけるラテライト形成が、第四紀の段丘面形成と関係づけられ、50m 面にはラテライトの硬盤が、20m 面には発達がよくない硬盤と瘤塊 (mokarrero とよばれる) が、そして最も低位の 10m 面には瘤塊のみが存在することを見ている。

高谷⁸⁾は、タイ国中央平原の第四紀層位学および地形発達史を研究し、最終氷期以後の形成にかかる第一段丘には、鉄の弱い集積ないし0.5~1 mm程度の小さいピゾリス様結核（まだ十分硬化していない）が、第二段丘の上部堆積物中には3~10mmの径をもつ典型的なピゾリス様結核が、さらに第三および第四段丘と時代をさかのぼると、うすいラテライト硬盤がみられるようになることを認めた。高谷はピゾリスおよび硬盤の発達過程を、堆積物が地上風化を受けた時間の函数としてとらえることができると考え、逆にピゾリスなどの風化生成物を、堆積物の層位判定の鍵として使う可能性を示した。

筆者ら⁹⁾もタイ国における水田土壌の調査に際し、新期の河川堆積物上の土壌と考えられているものの中にまで、明らかに *in situ* の生成物と考えられる、かたさ大きさとともにかなり発達したピゾリスが含まれている例をみている。

以上を要するに、soft plinthite や hard laterite crust と異なり、ピゾリス様結核や瘤塊は、更新世末から現世にかけての若い地形面上の土壌にも生成されうることが、重要な特徴であるといえる。

ピゾリス様結核や瘤塊の生成は、しばしば媒質の酸化還元条件の交替と関係づけられる。たとえば Sivarajasingham¹⁰⁾らは、熱帯アフリカにおけるカテナ的な土壌分布を示すところで、結核や瘤塊が斜面下部に向かって漸増している例を報告している。ところが他方で、Nye¹¹⁾は先にも述べた西アフリカのカテナの例で、ピゾリス様結核が斜面上部の土壌断面中の、しかも酸化的部位においてみられるのに反し、斜面下部の断面中で酸化還元の交替が起こる部位には、それがみられなくなることを示している。Raychaudhuri¹²⁾や Zonn⁷⁾も、ピゾリスの生成が、地下水の影響を全くうけない所でも起こりうる例を報告している。

このように、ピゾリスや瘤塊の生成における酸化還元条件の意義は必ずしも明瞭であるとはいえない。この問題については後にもう一度ふれよう。

結核や瘤塊の生成に及ぼす気候条件の影響を考えてみよう。多数の微細形態学的観察をもととして、Brewer & Sleeman¹³⁾は、一般にピゾリス様結核は湿潤と乾燥の交替する所に生じ、瘤塊は水分含量の変異があまり大きくない所に生ずると述べている。これは Fridland⁴⁾が、同一断面中に結核と瘤塊がともに出現する時には、結核は断面の上部に、瘤塊は下部に存在するといっているのとよく適合する。

化石的なラテライト硬盤と共存するピゾリス様結核や瘤塊を別とすれば、熱帯以外でこれらのものの生成する例はあまり多く知られていない。南西オーストラリア（南緯約30°）には、隆起した第三紀の準平原面遺物をラテライト硬盤がおおっている地帯があるが、ここでは若い地形面上の土壌にもピゾリスや瘤塊、偽結核の発達が広くみられる。¹⁴⁾ ここでも最も若いものは、更新世末から現世にかけてのものと考えられており、ほぼ現在と同じ気候条件（地中海気候）のもとで生成されたものという。

アメリカ合衆国では、南東部の赤黄色ポドゾル性土壌のあるものにピゾリス様結核を有するものが知られている。Tifton および Carnegie 統は、Florida, Georgia, Alabama, South および North Carolina の高位ないし中位の海岸段丘上に分布する排水良好な赤黄色ポドゾル性土壌で、A および B 層中に多数のピゾリスを有する。¹⁵⁾ Sivarajasingham¹⁰⁾ らによれば、B 層中のピゾリスは安定であるが、A 層中のものは明らかに溶解の過程にあるとされており、これらが現在の気候下での産物ではないことをうかがわせる。

わが国にも赤黄色ポドゾル性土壌と対比されるような土壌が、高位段丘上に発達し、また明らかに古土壌と思われ埋没された赤色土の存在も知られているが、いま問題にしているようなピゾリスや瘤塊は、いまだかつて土壌中に認められていない。

Ⅲ 結核および瘤塊の化学組成

結核や瘤塊の化学組成については、いくつかの分析数値が文献にみられる。Bennett と Allison¹⁶⁾ はキューバにおいてペルディゴン (Perdigon) とよばれているピゾリス様結核と、モカレロ (Mokarrero) とよばれている瘤塊とについて、表 1 のような化学組成を報告している。

表 1 キューバの結核 (ペルディゴン) と瘤塊 (モカレロ) の化学的組成*
(絶乾物中の%)

	SiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
ペルディゴン	15.60	0.85	46.38	17.41	2.79	0.46	0.26	0.20
モカレロ	55.60	0.95	23.05	12.70	tr.	0.05	0.22	0.08

*Bennett & Allison¹⁶⁾ による。

この結果からみるとピゾリスと瘤塊の最も顕著な差異は、ケイ酸と酸化鉄の含量である。ピゾリスは瘤塊にくらべ 1/3 弱のケイ酸含量と 2 倍の酸化鉄含量を示している。アルミナ含量もピゾリスで高いが、同時にカルシウム・マグネシウムなどの塩基やリン酸の含量も顕著に高い。ケイ酸含量の違いは、モカレロ中に遊離の石英粒子が含まれていることによる部分が大いと思われる。

Fridland¹⁷⁾ は北ベトナムで採取したピゾリス様結核と瘤塊 (嚢胞状結核) とについて分析を行なったが、その際同時に、それぞれを含んでいる土壌についても分析を行なった。結果は表 2 に示す。ここでもピゾリス様結核は瘤塊にくらべて、ケイ酸含量が著しく低く、逆に酸化鉄含量は顕著に高い。しかしアルミナ含量はピゾリスのほうが低くなっている。またそれぞれを含む土壌との比較においては、ピゾリスの場合のほうが違いが大きい。たとえば、ケイ酸はピゾリス中の含量が土壌の 1/3 弱、逆に酸化鉄はピゾリス中に 8 倍の濃縮を示している。

表2 北ベトナムのピゾリス様結核と瘤塊およびそれを含む土壌の化学的組成*
(絶乾物中の%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
ピゾリス様結核	21.12	8.42	68.18	0.23	tr.	0.20	0.06	0.10
同上を含む土壌	71.66	17.75	8.55	0.15	0.32	0.20	0.10	0.06
瘤 塊	58.85	13.50	25.82	0.22	0.32	0.23	0.05	0.03
同上を含む土壌	51.64	15.61	6.20	0.22	0.11	0.22	0.05	0.02

*Fridland¹⁷⁾ による。

Fridland は全分析のみならず、強酸の混液による溶解法を用い、その結果、ピゾリスとその周辺の土壌の酸不溶性物（化学的に安定な鉱物粒子が主体をなすと考えられる）は、化学組成に顕著な差を示すのに対し、瘤塊とその周辺土壌の場合、酸不溶部の化学組成の差は小さいことを明らかにした。Fridland はこれらの結果から、ピゾリスはそれを含む土壌物質を主たる材料として生成されるのではなく、土壌溶液や地下水によって運ばれてきたものから二次的に生成される；他方、瘤塊は、その場の材料が溶液から沈積する物質によってセメントされて生成する、というように考えている。またピゾリスの強酸不溶成分が、土壌のそれとくらべて多量のカルシウムやナトリウムを含んでいること、瘤塊ではかかることのみられないことから、ピゾリスは土壌物質がまだ強く風化されていない段階で形成されたものであるのに対し、瘤塊は母材がかなり激しい風化をうけた後に形成されたものであるとの推定を下している。

これらのほかにも、いくつかの分析例が報告されている。たとえば Thorp¹⁸⁾ は中国南部のポドゾル性赤色土中の round “shot” concretion についての分析データ 2 例をあげているが、その一例におけるケイ酸含量が著しく低いのを除けば、他はいずれもすでに述べたキューバや北ベトナムにおけるピゾリスのデータに近い。

Alexander¹⁹⁾ によれば、ピゾリス中の鉄含量は一般に高く、また加水酸化アルミニウム含量もかなり高い場合があるが、カオリンはほとんど含まれていない。彼らはまた、ピゾリスは易風化性の岩石中に、その場で早期に形成され、未風化の白雲母の結晶などを含むことがある、とも述べている。これは、先にピゾリスの生成に関し、Fridland のえた結論に近い。

IV 結核および瘤塊の生成

これまで産状や化学的組成に関して述べてきた中で、すでに結核や瘤塊の生成についての二、三の考え方にふれた。その中で対照的なのは、風化の末期段階における残留生成物としての瘤塊と、風化の初期における二次的新生物としてのピゾリス様結核という考えであった。

もとより、瘤塊の中にも、たとえばキューバの10m段丘にみられるモカレロや、南西オーストラリアの若い土壌中にみられるもののようにより、もっと新しい時期の生成物もある。しかし、これらについては、その生成に対する十分な説明が与えられていない。

不規則な形状をもつ瘤塊については、もう一つの成因が考えられる。それは母岩の風化過程で、その中の亀裂や空洞に、鉄・アルミニウムなどの無機質が滲出して、沈積、固化して生ずるものである (Alexander ら¹⁹⁾)。

ピゾリス様結核の生成について、Humbert⁵⁾は、苦土鉄鉱物の分解によって遊離された加水酸化鉄が、なんらかの核のまわりに配向し、脱水・結晶化してできたものと考えている。これらの結核のもつ同心円的な成層構造を説明するのに、Humbert はコロイド化学におけるリーゼガング現象を援用している。

Nye²⁰⁾は、一つのカテナにおいて、斜面上部の排水良好な土壌中で結核が生成されることを観察し、それが残積性母材中の風化岩片の孔隙における鉄の沈積に由来するとしている。彼はこの初生的な結核が、湿潤と乾燥のサイクルの中で成長すると考えているが、このことは必ずしも酸化還元の変換の必要なことを意味するものでなく、むしろかかる酸化還元条件がみられている斜面下部の土壌中では、上部からクリープによってもたらされた結核が溶解し始めるのが観察されている。

Cooray²¹⁾ はセイロンにおける結核の生成について観察し、それが母岩として分布の広いKhondalite統変成岩中に含まれるザクロ石結晶の風化生成物であるとしている。彼は鉄含量の高いザクロ石が、風化によってそのままピゾリスに転化する過程を想定していると思われる。

ピゾリス様結核と同様な球状生成物には、岩石学で知られている Oölite や Spherulite がある。Bucher²²⁾ はこれらの Oölite の生成が Schade²³⁾ の研究した生体内の結石類の生成と同じ機構によっていることを明らかにした。すなわち、ある物質が“emulsoid”(乳濁質)の状態から固化し、さらに結晶化する時には球状体を作り、しかも物質が単一でなく不純な時には、同心円的な成層構造を示すことを実験的にたしかめた。

結核および瘤塊の生成を考える時に、三つの重要な段階を設定しうる。それはまず鉄の可動化の段階であり、ついでその不動化(沈積)、最後に発達の段階である。酸化還元条件、湿潤乾燥条件などは、上記の三つの段階を制御する要因となるものであろう。以下には、これらの各段階ごとに問題となる点を考えてみよう。

まず鉄の可動化の段階である。Polynov²⁴⁾の風化に関する学説によれば、火成岩構成元素の易動度として Cl^- を100とすると、 Ca^{2+} は3.00、 SiO_2 は0.20、 Fe_2O_3 は0.04、 Al_2O_3 は0.02などの数値がえられている。このように鉄は最も動きにくい元素であり、このことが風化の最終段階での酸化鉄の集積——ラテライト生成の基礎にある。

化学的には $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の溶解積として $K_{\text{sp}}=6 \times 10^{-38}$ が与えられており、このことは pH 6 の

水溶液中の Fe^{3+} イオンの溶存量が、わずかに 10^{-9}mg/l 程度であることを示している。しかしながら天然の水の中には、上に理論的に計算された量よりはるかに多量の鉄が溶存している。たとえば日本の225河川の水中の平均鉄含量は Fe として 0.24mg/l (小林²⁵⁾) であり、Fridland⁴⁾ の報告している北ベトナムの川や井戸などの水の中の溶存鉄量もほぼ同程度である。まれには Sivarajasingham¹⁰⁾ らが引用している Harrison²⁶⁾ のデータのように、英領ギアナの塩基性岩地帯の川で Fe_2O_3 として約 4mg/l という高い値を示している場合すらある。

このように比較的高濃度の鉄が、水中に溶存している形態として考えられるのは、還元態の Fe^{2+} としてか、有機物によるキレート態、あるいはコロイドとしての鉄ゾルのいずれかである。しかし酸化的で有機物含量の低い川の水などでは、加水酸化鉄ゾルが唯一の考えうる形となろう。文献²⁷⁾に鉄ゾルの濃度として、上に例示した範囲の値が示されているのも、この考えを支持するものである。これらの鉄ゾルの安定化剤として、ケイ酸ゾルを想定することは、特に熱帯条件下では魅力的である。しかし近年の研究において、ケイ酸のかかる役割はほぼ完全に否定されており²⁸⁾、微量の有機物による保護作用などを想定しなければならないだろう。ちなみに有機物の保護作用による鉄ゾルの可動化の効率は高く、Deb²⁹⁾ は Fe 1 原子あたり C $0.24\sim 0.52$ 原子で半量解膠を起こしうると述べている。つまり重量で鉄の $1/10$ 以下の量の炭素があればよいことになる。

先にも述べたように、河川の水についてみれば、北ベトナムと日本とで、鉄の溶存量にはほとんど差がない。熱帯での結核や瘤塊の生成量の大きさを説明するためには、実際に土壤中で動いている土壤水中の鉄含量が、熱帯では日本にくらべて格段に多いことを仮定しなければならない。この点についての十分なデータはないが、風化の強度の違いを考えれば、土壤中でつぎつぎに遊離されている鉄の量は、熱帯においてはるかに多いことはまず間違いなく、これらの新たに遊離されてくる酸化鉄がゾル化される機会が多いであろうことも想像に難くない。しかしこのゾル化された酸化鉄の多くは土壤中で再沈殿され、川水中にはあまり多量の鉄が出てこないと考えることができよう。

土壤中での鉄の動きを考える場合には、当然酸化還元条件の関与をも考慮に入れなければならない。上に述べたところでは、結核や瘤塊の形成における酸化還元条件の関与は、認められる場合も、明瞭には認められない場合もあった。しかし soft plinthite や、発達した網状斑（日本でいうトラ斑のごとき）は、一般に媒質の酸化還元条件の交替と結びつけて考えられており、またあきらかに地下水の影響をうけて斑紋や瘤塊ができている場合が知られている（南西オーストラリアの例）。

いったい斑紋の形成は常に地下水の影響下においてしか起こりえないものであろうか。熱帯では、サバンナ気候といわれているところでも、雨期の降水量は一般にきわめて大きく、多くの土壤で年間のある時期、土層中に滞水が起こる可能性を無視できない。この滞水による還元条

件が、初期的な鉄の分離 (segregation) を可能にすると、その後かりに排水条件が変わって、もはや強度な還元条件が存在しなくなっても、後に述べる“量比”に支配された鉄の可動化（例えばゾルの形での）と不動化は、この初期的な分離を強める方向に作用し、網状斑はより鮮明に発達してゆく可能性がある。その極限として瘤塊の生成が可能なことは、すでに述べた。

このように酸化還元は、ある場合には鉄の可動化と不動化の全過程に重要な役割を果たすが、他の場合には初期的な条件を作り出すためにしか働いていないと考えることができよう。

ところで鉄がゾルあるいは二価鉄イオンとして可動化されたとして、結核や瘤塊を作るような不動化はどうして起こるかが次の問題となる。ここで最も有効と思われるのは、上にも少しふれた“量比”による可動化と不動化の支配という考え方である。^{30,31)} これは鉄と可動化剤（保護膠質あるいはキレート剤としての有機物）の比によって、可動化と不動化が支配されるとするもので、具体的には、鉄に富む固相の近傍では、土壤溶液中にいったん可動化された鉄まで吸着・沈殿されることを予見する。先に Humbert⁵⁾ は、風化によって遊離された加水酸化鉄が、なんらかの核のまわりに配向沈着して結核を作るとしているが、“量比”の考え方に従えば、この場合の核は、鉄に富む岩石の風化物であったり、初期的な結核であったり、鉄に富む斑紋であったりするはずである。Nye²⁰⁾ が風化岩片上における鉄の沈積を観察しているのも、Cooray²¹⁾ が鉄含量の高いザクロ石風化物の結核への転化を考えているのも、同様な意味で合理的である。この場合、核となるものが非常に小さい時には、吸着された鉄は、周辺に均等に配分されて球状のピゾリスを作り、核となるものが大きい時には、その形状に支配されて、瘤塊的な不規則な外形をもつものとなろう。このように考えると、ピゾリス様結核と瘤塊にみられる大きさの違いや、ケイ酸含量と鉄含量の差異を説明することも容易となろう。

ピゾリスが球状をとる理由として、溶解の機会を小さくするために、同一質量あたりの表面積を最小とすることが考えられる。換言すれば、球状をとらないものは、生成のごく初期に再溶解されて消滅する可能性が高いということである。

Bucher²²⁾ がいっているような Oölite 様結核の生成というのは、可能ではあっても多くはないと考えられる。なぜなら土壌中では、土壤溶液中の溶質（ゾルの分散質をも含めて）は、常に土壤物質の表面に吸着される機会が大きく、乾燥・濃縮によって溶質を析出する場合は少ないと思われるからである。

この不動化と次の発達の段階では、気候条件、特に乾燥期の存在が重要な意味をもつであろう。可動化—不動化過程が起こるのは、主として湿潤な雨期であり、その後続く乾期には、不動化されたゲル状物の乾燥・固化、さらには結晶化が進み、再溶出をうけにくい形になることが考えられる。年間を通じて湿潤な条件下では、一時的な沈積が起こっても、再溶出される可能性が大きく、成長する前に消滅してしまうであろう。日本に赤色風化殻は存在するが、結核や瘤塊が出現しないことの原因として、湿潤な気候条件がまず数えられねばならないのでは

あるまいか。

成長あるいは発達の段階については、すでに述べたように、“量比”の支配を受け、また湿潤・乾燥のサイクルに依存するところが大きいと思われる。

V 今後の研究への指針

以上、結核および瘤塊の生成に関して仮説的に述べてきたところを検証するために、さしあたって次のようなことがなされねばならないだろう。

- (1) 湿潤期における土壌水、地下水中の鉄の含量と存在形態の調査
- (2) 湿潤期における土壌中の酸化還元条件の調査——層位間および層位内における酸化還元電位の不均一性の検討

これらの調査が熱帯の現地において、母材の性格を異にする各種の土壌を対象として行なわれるならば、ひとり土壌学のみならず、地球化学的にも貴重な知見がえられるであろう。

- (3) 鉄の不動態化過程、およびピゾリスや瘤塊発達の初期段階の、微細形態学的ならびに化学的研究
- (4) 結核や瘤塊生成過程の実験室的再現

これらの調査研究によって、ピゾリスや瘤塊の生成条件が明らかとなれば、

- a. 現気候下における結核や瘤塊の地理的分布の差異
- b. ある地域の古気候条件や地形発達
- c. 土壌母材の風化過程や風化段階
- d. 土壌の自然肥沃度

などについて説明を与え、判定を下す上で、きわめて有用な情報をうることになるだろう。

〔謝辞〕 本稿を草するにあたって、貴重な文献をお貸し下さった、農林省九州農業試験場、環境部長・菅野一郎氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Buchanan, F. 1807. *A Journey from Madras through the Countries of Mysore, Canara, and Malabar, etc. (In 1800-1)*, London. (10) より引用。
- 2) Kellogg, C. E. 1949. *Commonwealth Bur. Soil Sci. (Gt. Brit.), Tech. Commun. No. 46*, 76-84. (10) より引用。
- 3) Soil Survey Staff. 1967. *Supplement to Soil Classification System (7th Approximation)*, USDA, Washington, D. C. [小山正忠訳「包括的土壌分類体系, 7次試案(1967年補遺)」『農技研資料』B14 (ミメオグラフ), 東京, 1968]
- 4) Fridland, V. M. 1964. *Soils and Weathering Crusts of Humid Tropics*. Nauka, Moscow. (in Russian)

- 5) Humbert, R. P. 1948. "The Genesis of Laterite," *Soil Sci.*, Vol. 65, 281-290.
- 6) Nye, P. H. 1955. "Some Soil-Forming Processes in the Humid Tropics, III. Laboratory Studies on the Development of a Typical Catena over Granitic Gneiss," *J. Soil Sci.*, Vol. 6, 63-72.
- 7) Zonn, S. V. 1968. "On Laterite and Laterite Formation in Cuba," *Izb. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Geograf.*, No. 2, 3-11. (in Russian)
- 8) Takaya, Y. 1968. "Quaternary Outcrops in the Central Plain of Thailand," In Takimoto, K. ed. *Geology and Mineral Resources in Thailand and Malaya*. Kyoto: The Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University, pp. 7-68.
- 9) Kawaguchi, K. and Kyuma, K. 1969. *Lowland Rice Soils in Thailand*. Kyoto: The Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University.
- 10) Sivaramasingham, S. *et al.* 1962. "Laterite," *Adv. in Agron.*, Vol. 14, 1-60.
- 11) Nye, P. H. 1954. "Some Soil-Forming Processes in the Humid Tropics, I. A Field Study of a Catena in the West African Forest," *J. Soil Sci.*, Vol. 5, 7-21.
- 12) Raychaudhuri, S. P. 1941. *Indian J. Agric. Sci.*, Vol. 2, 220-235. (10) より引用。
- 13) Brewer, R. and Sleeman, J. R. 1969. "The Arrangement of Constituents in Quaternary Soils," *Soil Sci.*, Vol. 107, 435-441.
- 14) Mulcahy, M. J. and Hingston, F. J. 1961. *Soils of the York-Quairading Area, W. A., in Relation to Landscape Evolution*. Melbourne: C. S. I. R. O. Soil Publication, No. 17.
- 15) Lee, W. D. 1955. *The Soils of North Carolina*. North Carolina Agric. Expt. Sta., Tech. Bul. No. 115.
- 16) Bennett, H. H. and Allison, R. V. 1928. *The Soils of Cuba*. Washington, D. C.: Tropical Plant Res. Found. (7) より引用。
- 17) Fridland, V. M. 1961. "Two Ways of Formation of Laterite-Forming Concretions," *Doklady Akad. Nauk, SSSR*, Vol. 137, No. 5, 1202-1205. (in Russian)
- 18) Thorp, J. 1936. *Geography of the Soils of China*. Nanking: Nat. Geol. Survey.
- 19) Alexander, L. T. *et al.* 1956. "Mineralogical and Chemical Changes in the Hardening of Laterite," *Trans. 6th Int. Congr. Soil Sci., Paris*, Vol. E, 67-72.
- 20) Nye, P. H. 1955. "Some Soil-Forming Processes in the Humid Tropics, II. The Development of the Upper-Slope Member of the Catena," *J. Soil Sci.*, Vol. 6, 51-62.
- 21) Cooray, P. G. 1967. *Introduction to the Geology of Ceylon*. Colombo: National Museums of Ceylon Publication.
- 22) Bucher, W. H. 1918. "On Oölites and Spherulites," *J. Geol.*, Vol. 26, 593-609.
- 23) Schade, H. 1910. "Ueber Konkrementbildungen beim Vorgang der trophigen Entmischung von Emulsionskolloide," *Kolloidchem. Beih.*, Vol. 1, 375-390.
- 24) Polynov, B. B. 1937. *The Cycle of Weathering* (Translated by A. Muir). London: Thomas Murby & Co. 160-208.
- 25) 小林 純 1961. 「日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究」『農学研究』48巻, 2号, 63-106.
- 26) Harrison, J. B. 1933. *The Katamorphism of Igneous Rocks under Humid Tropical Conditions*. Harpenden: Im. Bur. Soil Sci. England. (10) より引用。
- 27) Mellor, J. W. 1934. *A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry*. Vol. 13, Fe (Part II). London: Longmans, Green & Co.
- 28) McKeague, J. A. and Cline, M. G. 1963. "Silica in Soils," *Adv. in Agron.*, Vol. 15, 339-396.
- 29) Deb, B. C. 1950. "The Movement and Precipitation of Iron Oxides in Podzolic Soils," *J. Soil Sci.*, Vol. 1, 112-122.
- 30) Kawaguchi, K. and Matsuo, Y. 1960. "The Principle of Mobilization and Immobilization of Iron Oxide in Soils and Its Application to the Experimental Production of Podzolic Soil Profile," *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci., Madison*, Vol. 4, 305-313
- 31) Kyuma, K. *et al.* 1964 "On the Initial Process of Horizon Differentiation from a Uniform Parent Material," *Soil Sci. & Plant Nutr.*, Vol. 10, 116-122.