

愛知県豊橋市高師原台地から産する「高師小僧」

Occurrence of 'Takashikozo' from Takashihara area, Aichi-Prefecture

吉田 英一 (YOSHIDA Hidekazu)¹⁾・松岡 敬二 (MATSUOKA Keiji)²⁾

1) 名古屋大学博物館

The Nagoya University Museum, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

2) 豊橋市自然史博物館

Toyohashi Museum of Natural History, 1-238, Oiwa, Toyohashi, 441-3147, Japan

Abstract

'Takashikozo' is a kind of iron-oxide, which occurs as cylindrical aggregates from a few mm to cm in diameter and which is commonly found in unconsolidated clayey to silty Quaternary sediments. Last several decades, the geology of the occurrence was described and recorded as a 'Natural Monument' due to its spectacular characteristics and structural interest. However, the iron oxide-forming process is little known. Results of a detailed structural and geochemical characterization reveal that 'Takashikozo' has been formed by a Fe redox reaction. Presumably certain microbial activity contributes to the formation of the iron oxide's zonal structure and preferential accumulation of certain elements, that may not be interpreted by a simple elemental diffusion process.

はじめに

高師小僧とは、堆積物の中から産出する鉄酸化物の直径数ミリ～2, 3センチの円筒状団塊のことである。古くは、土股げつ、キツネノコマクラ、管石(くだいし)などと呼ばれてきた。この高師小僧という名称は、猪間(1894)においてすでに用いられている。それより以前では、「参河国古歌名急蹟考」(羽田野, 1844)に豊橋地域の地方名で「タカシコゾウ」の名前がある。また明治中頃に記された「高師村誌」にも高師童(たかしこぞ)という記述が確認でき、高師小僧という名称は主に愛知県豊橋地方で使われていた名前であることがわかる(松岡, 1998)。その後、小藤文次郎が当時の豊橋高師村で採集された標本に基づいて地質学雑誌(小藤, 1895)に記載し、それ以降、高師小僧の名前が学術名として国内に定着していったものと考えられる。

日本国内においては、高師小僧の産出は北海道の名寄や滋賀県の別所からも報告されており、豊橋市以外のものは全て国の天然記念物に指定されている。一方、豊橋市の高師小僧は、戦後(1957年)に県の天然記念物に指定された(松澤, 1990)。

高師小僧は褐色を呈し、鉄の酸化物が二次的に濃集することによって形成されたものと考えられてきた。そのメカニズムについては、古くは小藤(1895)が論じている。しかし、その後も多くの記載や報告(立川ほか, 1966; 奥山, 1975; 高田, 1989など)がされているものの、その具体的な形成プロセスについては未だ明らかではない。

今回、豊橋市の高師原台地において、道路拡張等に伴う造成工事中に大量の高師小僧の産出をみた。本報告では、その産状、内部構造および化学成分分析結果から考えられる高師小僧の形成過程について報告する。

高師小僧の産出地層と産状

高師小僧の産出は、造成工事および道路の拡幅工事に伴って、愛知県豊橋市西幸町から野依町に分布する高師原～天伯台地にかけての範囲で確認された。この地域は、第四紀中部更新統の渥美層群が広く分布し、下位から二川累層、田原累層、豊橋累層に区分されている(黒田, 1958, 1966, 1967; 杉山, 1991; 島本ほか, 1994)。島本ほか(1994)は、渥美層群の地質年代としてESR, 古地磁気層序ならびに石灰質ナノ化石層序から、二川累層から豊橋累層下部までの年代が0.7～0.4Maであることを報告している。高師原台地には、この渥美層群のうち田原累層豊島砂層、豊橋累層豊南礫層および寺沢砂質粘土層が分布する。高師小僧は、寺沢砂質粘土層の主に層厚数メートルのシルト質な部分から産する(写真1a)。

高師原台地から産する高師小僧は、長さが主に数センチ～20センチ程度のもので、直径数ミリから数センチの筒状をなす。露頭では、地層に対してほぼ直交に埋没した状態で確認することができる。高師小僧の密集している部分では、数センチ間隔で「生えている」といったような産状を呈する(写真1b)。

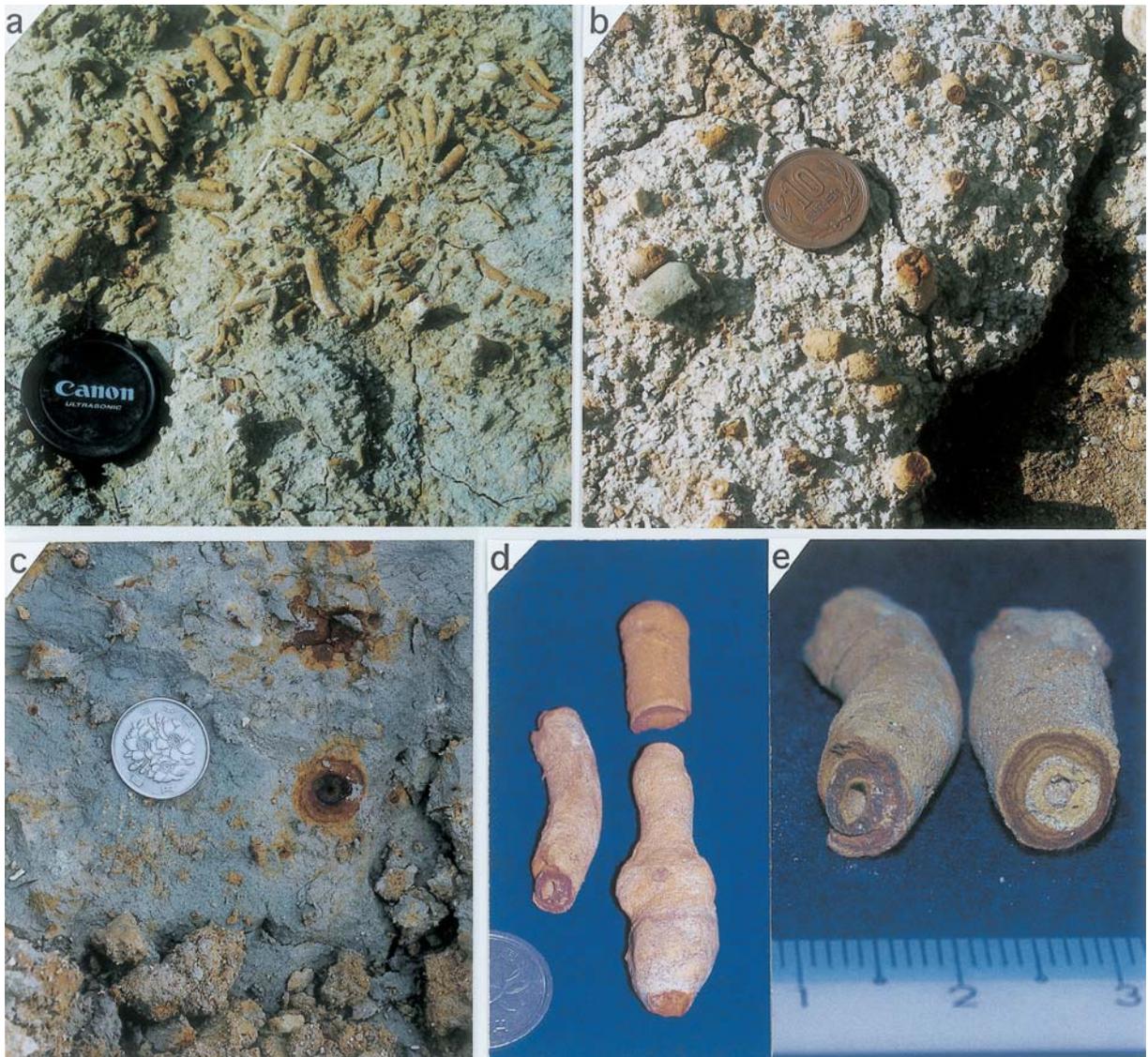


写真1：高師小僧の産状。a,b) 斜面露頭での産状。地層中にほぼ立った状態で産する。c) 露頭での高師小僧断面。d) 高師小僧の形態。棒状から凹凸のあるもの。また先端が丸くくびれたものなどが確認できる。e) 高師小僧の断面構造。リング状の構造が確認できる。

高師小僧を含むシルト質の未固結な地層は灰色～青灰色を示す。ハンマー等で掘り出した新鮮な青灰色のシルト層は、わずかながら硫黄臭を発生し、また有機質である。高師小僧の横断面は、鉄酸化物の濃集による赤褐色のリング状の構造を有し、多くの場合リングの中心に直径1～数ミリの孔を伴う(写真1e)。

このような形態・産状の高師小僧の形成、とくに鉄酸化物の濃集プロセスを検討するために、光学顕微鏡や分析走査電子顕微鏡(SEM-EDS)などを用いた微小組織構造調査および電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)による化学分析を行った。高師小僧は赤褐色を呈し、周辺シルト層よりも固くかつ重い。これは鉄の濃集によると考えられるが、何故鉄が濃集するのか、そのメカニズムについてはほとんど明らかとなっていない。以下に、それらのこれまでの結果と考えられる高師小僧の形成プロセスについて述べる。

調査結果：高師小僧の微小構造と地球化学的特徴

1) 高師小僧の内部組織構造

高師小僧は、基本的に円筒状の構造をなす。このような高師小僧の内部構造を詳しく調べるために、高師小僧を壊さないように約20～30センチ角の岩石ブロックを数個現地で採取した。そして、実験室内で高師小僧と周辺のシルト層の数センチ角の部分を用いてエポキシレジンを用いて固化させたのち、縦方向と横方向の断面薄片を作成した。写真2a,bは、高師小僧の縦断面および横断面の構造を示す顕微鏡写真である。

高師小僧の断面構造の特徴として、中心に空洞を有すること、そしてその空洞を中心に鉄酸化物の幅0.1～1ミリ程度のリズム的な同心円状の赤褐色の濃集部が形成されることが挙げられる。また中心部の空洞壁には、しばしば繊維質の植物片を確認することができる。鉄酸化物の濃集リングは、大型のものほど外側に濃い赤褐色のリングとして現れる傾向がある。また高師小僧の同心円構造は、大きくなるほど不明瞭になる傾向にあるものの、今回の調査では最大で外径約40ミリのものを確認した。

これらの鉄濃集部分の化学組成分析を行った結果について以下に述べる。

2) 高師小僧の元素マッピング

高師小僧の横断面における元素マッピングの結果を図1(a～d)に示す。分析したものは直径約1

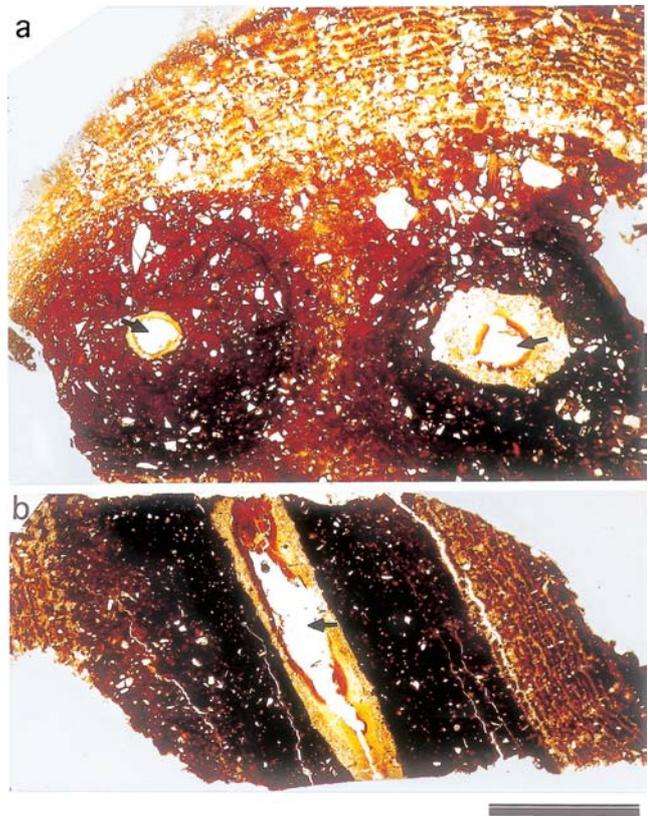


写真2：高師小僧の断面顕微鏡写真。a)横断面構造。この高師小僧は、2つの空隙(矢印)の部分から1つのものに成長したと思われる。外縁部分には、幅数十ミクロン程度の細かいリング構造が確認できる。b)縦断面写真。中心部分の空隙(矢印)周辺には植物起源と思われる繊維組織が観察される(スケールは2mm)。

センチの、肉眼でも同心円状の赤褐色リングが明瞭に発達した平均的な大きさの高師小僧である。

この分析結果からも分かるように、まず鉄(Fe)の濃集が顕著に認められる(図1b)。また硫黄やリン(図1c,d)もわずかながら濃集が認められる。その他の元素で、高師小僧にのみ濃集しているものは認められない。鉄の元素マップ像は、光学顕微鏡で観察した赤褐色の濃淡で示される同心円状のリングと同様の模様を示しており、明らかに鉄成分の濃集の濃淡によってリング模様が作られていることが分かる。これは元素マップの反射電子像(CP;図1a)とも一致する。

一方、今回採取したシルト層中には、外径が1~2ミリメートル程度の微小な筒状の高師小僧も多く確認することができた。この成長段階での高師小僧は、先に述べた比較的大型の高師小僧ほど鉄酸化物のリングと周辺のシルト層との境界が明瞭ではなく、漸移的に変化することが特徴である。この高師小僧においても、元素の濃集状態を確認するためにEPMAによって主要な化学成分の元素マップを作成した(図2a~c)。

この結果からは、大型の高師小僧と同様に、鉄(Fe)や硫黄(S)の濃集が確認できる。しかし鉄酸化物の濃集リングが、大型の高師小僧のものより明確ではなく、また外縁部の輪郭も不明瞭であることが分かる。そしてさらに特徴的なことは、硫黄の濃集は、鉄酸化物の濃集リングの部分よりも外側にまで広がっていることである。これは、高師小僧の形成に伴うシルト層中での二次的な元素移動は、単に中心の空洞近傍での高師小僧の本体を形作る酸化鉄の濃集部だけで特徴づけられるものではなく、より周辺部分の地層からの元素移動も関わっていることを示している。

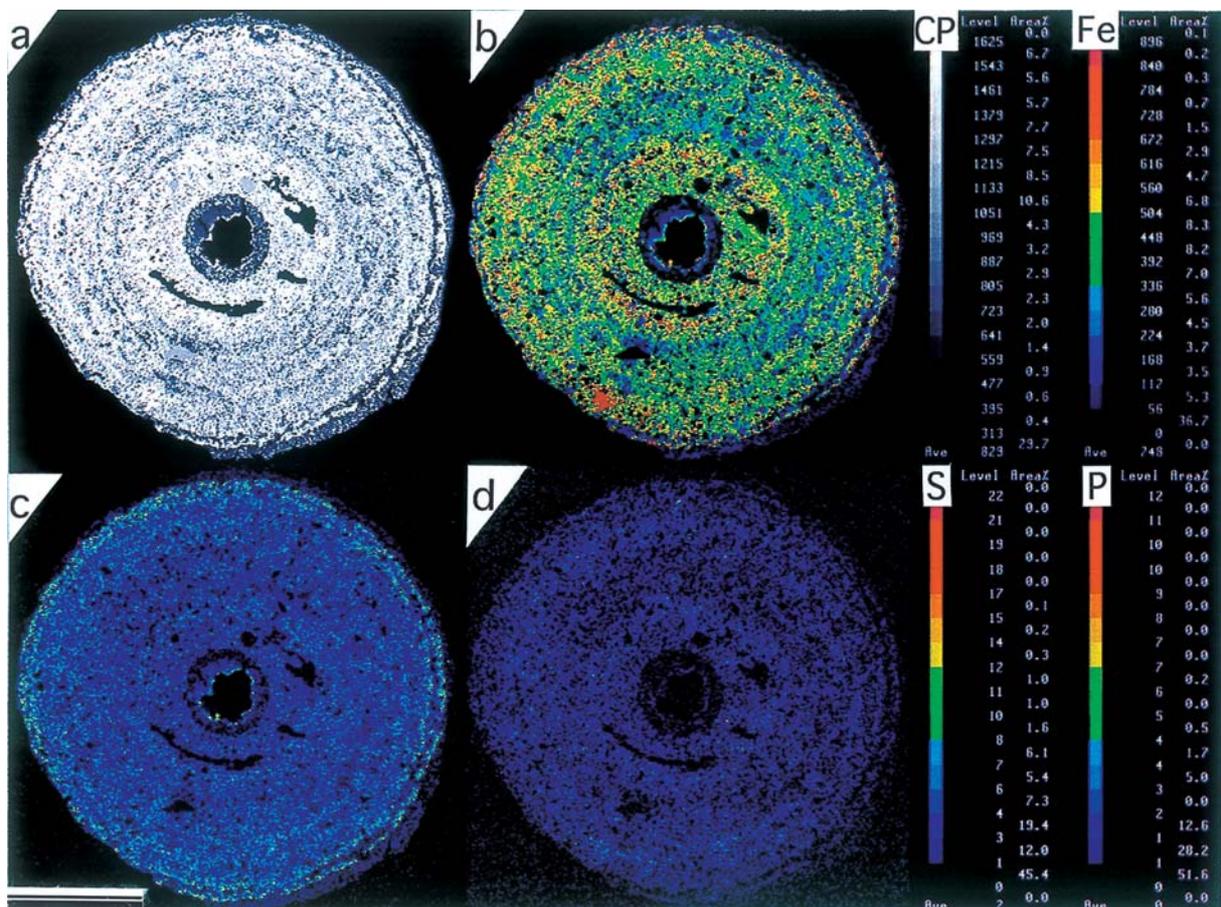


図1：高師小僧横断面の元素(b：鉄(Fe), c：硫黄(S)), d：リン(P))およびCP(a：反射電子像)マップ。リング状の二次的な元素濃集が明瞭である。鉄とともに硫黄については、外側に濃度の高い部分が確認できる(スケールは5 mm)。

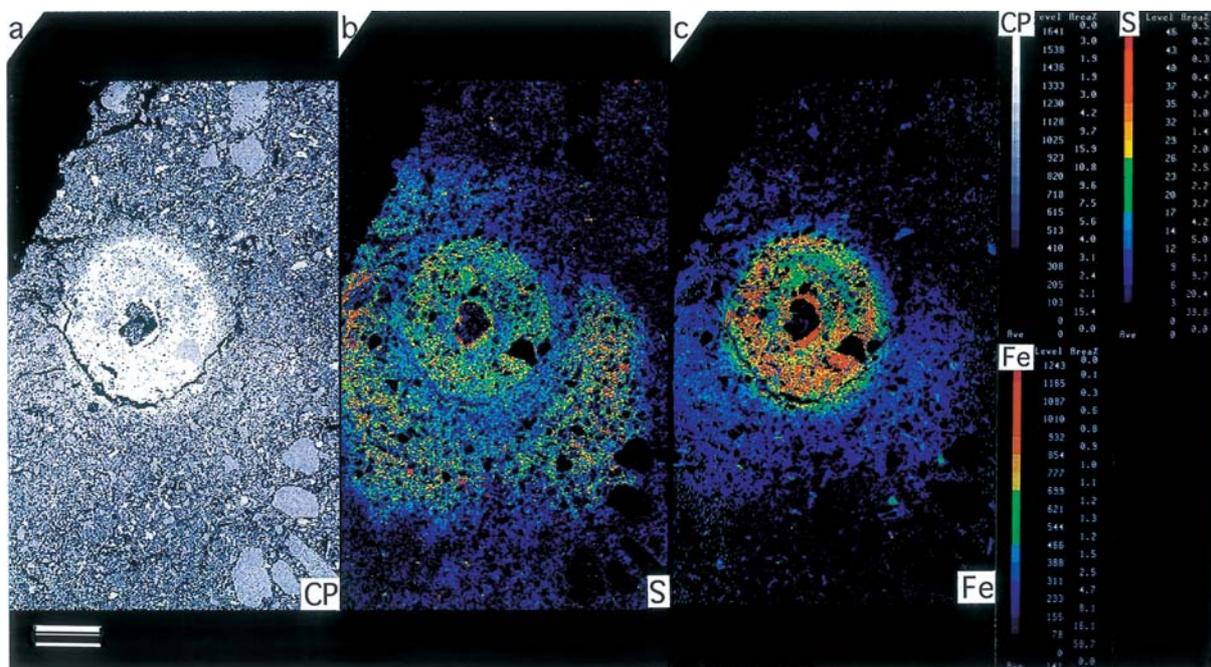


図 2：形成初期段階のものと思われる高師小僧および周辺地層の元素 (b: 硫黄 (S), c: 鉄 (Fe)) および CP (a: 反射電子像) マップ。硫黄の濃集が鉄の濃集範囲よりも外側まで広がっていることが確認できる (スケールは 0.5mm)。

考察：高師小僧の形成プロセス

これまでに見てきた高師小僧の産状と化学成分分析などの結果から、いくつかの特徴を確認することができる。

まず高師小僧は、地層としてシルト質の未固結な、ほぼ還元状態を保っている地層中に埋没していることである。これは、シルト層が硫黄臭を有すること、および青灰色を呈することなどから推測できる。またこの地層は湿った状態にある。今回採取した試料の湿潤重量と乾燥重量の差から、およそその含水率は最低でも 25% 程度と考えられる。つまり、シルト層中には多量の還元状態の空隙水が存在しており、この空隙水中に溶解している元素が高師小僧の形成に重要な役割をしているものと考えられる。

次に重要と思われるのは、高師小僧をなす同心円状の酸化鉄の中心部に、その多くが小さな空隙を有することである。またこの空隙には、植物片と思われる繊維組織が認められることが多い。つまり、この空洞は植物の茎あるいは根に由来するものと考えられる。このことは、多くの高師小僧がシルト層中に立った状態で産出することと矛盾しない。では、高師小僧はどのようなプロセスで形成したと考えることができるのだろうか。これまでの観察および分析結果から考えられる仮説を以下に提示する。

1) 高師小僧形成プロセス

高師小僧は、数十万年前に堆積した還元状態を保持する粘土～シルト層中(寺沢砂質粘土層)に認められる。このことは当時の堆積環境として、シルト～粘土が堆積するような例えば湿地帯のような堆積環境の存在が考えられる。そこには現在の湿地帯に見られるような葦類などの植物が繁殖していたと考えても不都合はない。高師小僧は、これらの‘植物根’と思われるような地中に埋まっている部分の周辺に形成される。その場合、これらの‘植物根’の部分は、おそらく酸素(酸化剤)をもたらす流動経路の役割を果たしていたのではないかと考えられる。

まず先にも触れたように、シルト層は還元状態に保たてられている。その場合シルト層内の空隙水中には、鉄イオンが主に二価の状態では溶解している。これらが酸化鉄として沈澱するためには、何らかの形で酸化されなければならない。しかし、シルト層のように石英や長石粒が多い有機質な堆積物中には、もともと酸化剤の役割をする材料はあまり多く含まれていない。したがって、このような環境下において、二価の鉄イオンが三価になるためには何らかの形で酸化剤(例えば酸素)が供給されることが必要となる。つまり高師小僧の中心に認められる中空状の空隙が植物由来のものであるならば、これが地表部(上部)から地層内(下部)に向かってこの空隙を伝って酸素(空気)か、酸素を含む地下水が流入したか、あるいは酸素のみが経路内を充たしている空隙水中を拡散することで、還元状態のシルト層およびその中に含まれている二価鉄を三価に酸化させ、空隙周辺に同心円状の酸化鉄層が形成されたと考えることができる。

次に高師小僧が、地層形成のどの段階に形成されたのかについて論じる。これについては、2つの可能性が考えられる。まず1つは、堆積当時、まだ植物が生きていたかあるいは死んだ直後の段階から形成されはじめるとする考え方である。この場合、植物が生命活動を維持したままでは、'植物根'の部分に空隙が形成されることは考えにくく、その空隙から酸素などの酸化剤がもたらされることが不可能なため、植物が生命活動を停止した後に、地層中に残されたそれらの茎や地下根の腐植した部分が選択的な経路として酸素を地表からもたらしたとする考え方である。この考えでは、高師小僧は数十万年前の堆積物の堆積当時あるいはそれに近い時期にすでに形成され、その後埋没し、現在は侵食によって再び地表に現れた高師小僧の「化石」を見ていることになる。

もう1つの考え方は、植物の茎や根を含むシルト質の地層が一度埋没し、それが数十万年後、隆起・侵食によって露出するか、あるいは地表近くになった時点で、堆積当時の植物の茎や根が腐植して後生的に形成された空隙の部分を、空気中の酸素や酸素を含んだ地下水が拡散・移動することによって酸化鉄を周辺に形成したとする考え方である。

現時点では、これらの仮説を1つに絞ることはできない。しかし、現地に認められるタイプ標本である長さ2メートル以上の地層に対して垂直方向の'根状'の成長構造を有する高師小僧の存在や、今回調査した造成工事による高師小僧の多産する地層が、その上下を数メートルもの青灰色(還元状態)の地層に挟まれている状況などから、後生的に多少の酸素の流入や拡散があったとはしても、高師小僧は堆積の段階か、比較的初期の段階ですでに形成されていた可能性が高いのではないかと考える。これは、例えば現在の琵琶湖周辺の湿地帯に、すでに高師小僧に似た酸化鉄の塊状物が産出するという事例(日本民俗文化大系, 1983; 高田, 1989)とも矛盾しない。

では、高師小僧の同心円状を持つ酸化鉄の濃集層はどのようにして形つくられるのだろうか。これにおいては、中心の微小空隙からの酸素の拡散と、それに伴う二価鉄から三価鉄の形成および沈澱、そして周辺シルト層中の空隙水からの二価鉄の拡散供給という複合プロセスを考える必要がある。この時系列モデルを図3に示した。

まず、中心の空隙を介して酸素の拡散あるいは流入がある。それによって、シルト層中の二価鉄が酸化される。酸化された二価鉄は、鉄酸化物としてシルト層中の空隙部分に沈澱し濃集する。すると、空隙水中の二価鉄の濃度が低下し、周辺のシルト層中から高師小僧の中心に向けて空隙水中の二価鉄の濃度勾配による拡散供給が生じる。空隙近くに供給された二価鉄は、酸素と反応してさらに鉄酸化物として沈澱する。この酸素の拡散、鉄イオンの酸化還元反応、鉄酸化物の沈澱、二価鉄の周辺部からの拡散供給という繰り返しによって、中心の空隙周辺に同心円状に酸化鉄の濃集層が形成されるというモデルである。これは、いわゆる酸化還元反応モデルであり、このような還元状態の堆積層中での酸化還

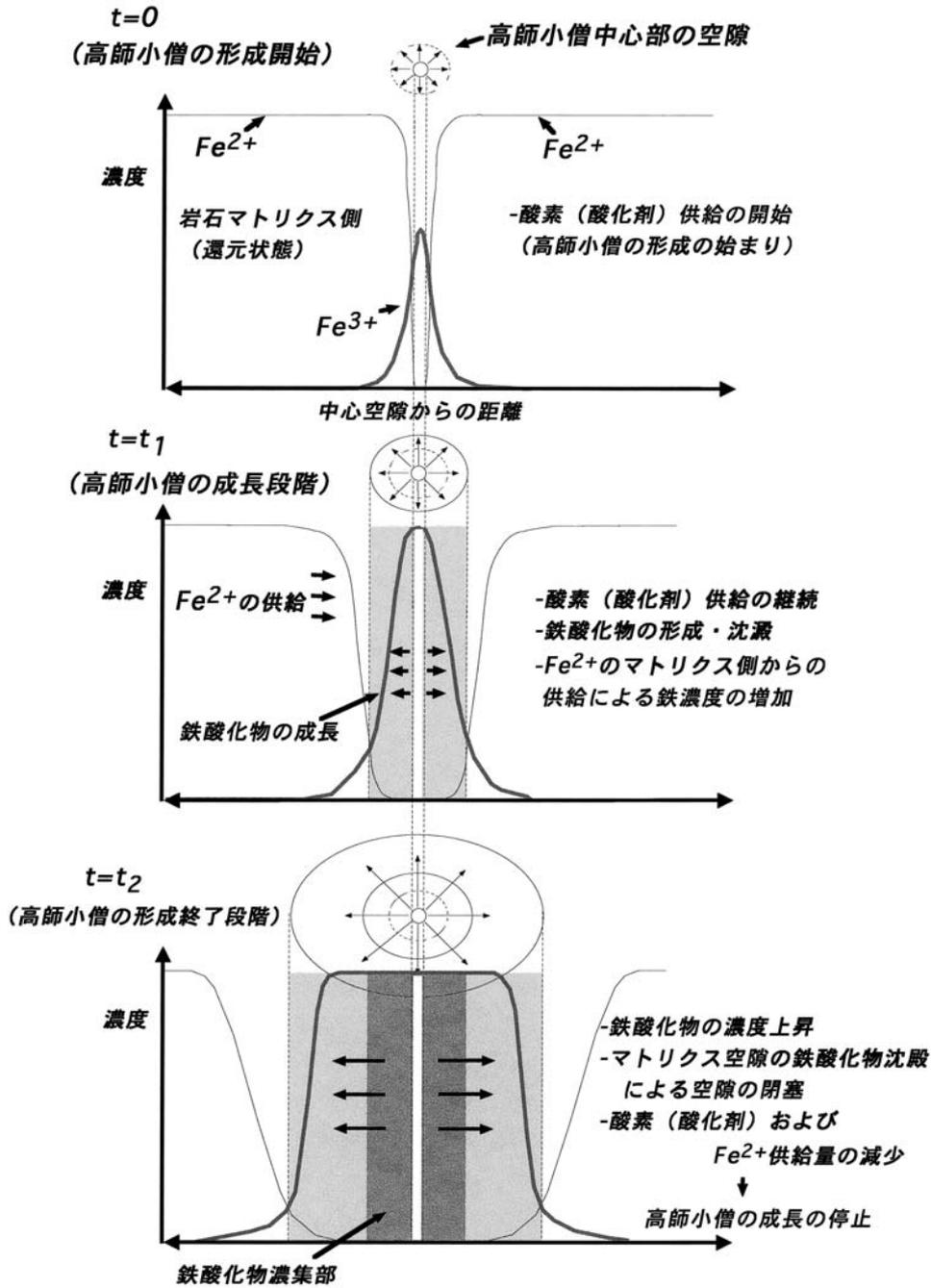


図3：高師小僧の無機的な化学反応プロセスのみによる形成過程モデル。ただし、無機的な化学反応は形成過程モデルでは、リング状の濃集形態や、外側ほど酸化鉄の濃集が高くなる高師小僧の形成過程を説明することはできない。

元反応に伴う元素の移動・濃集については、海洋底堆積物中の続成作用研究などでも見られる事例である（例えば Thomson *et al.*, 1993）。

2) 高師小僧形成プロセスにおける問題点

これまでに述べてきた高師小僧の形成モデルは、現地での産状や成分分析などから導き出すことのできるものであり、鉄イオンの供給源や高師小僧の中心にある空隙からの酸化剤の拡散・付加というプロセスが重要であることはほぼ間違いないと考えられる。しかしながら、以下に示すいくつかの点にお

いては未だ矛盾なく説明することができない。それらの問題点に対しては、今後さらに調査・分析を行なうことが必要と思われる。本論では、それらに対して、現時点で考えられる予察的な考察結果のみを述べる。

課題1：酸化鉄のリズミックな同心円状構造の形成メカニズム

まず先に述べた、酸素の拡散と二価および三価鉄イオンの酸化還元反応のみでは、高師小僧を形作るリズミックな酸化鉄の同心円構造を説明することは必ずしも容易ではない。つまり、酸素(酸化剤)が一方向的に高師小僧中心の空隙からシルト層内部へと供給されるならば、酸化反応は中心の空隙周辺でもっとも進行するはずであり、同様に中心の空隙周辺ほど鉄含有量の高い濃度プロファイル、同心円構造が形成されることとなる。しかし、実際の高師小僧の断面構造は、リズミックな同心円状構造を有しているだけでなく、中心部分よりも、外縁部分により鉄酸化物の濃集層が形成されていることがある。このことは、酸素や鉄イオンの酸化還元反応に伴う単なる濃度勾配による物質移動モデルでは単純に説明できないことを示唆している。では、どのような可能性があるのか、次の二次的な元素濃集プロセスの課題の検討と併せて論じる。

課題2：リン、硫黄、ヒ素などの濃集プロセスとその起源

検討すべき二番目の課題として、濃集する元素の種類と状態に関する問題がある。元素分析マップの結果から示されるように、酸化鉄の濃集層およびその周辺にはわずかではあるがリン、硫黄およびヒ素の濃集をも確認することができる。これまでの分析結果からは、これらの成分がシルト層内からもたらされたものか、中心の空隙を通して外部からもたらされたものを判別することは難しい。またこれらの濃集状態も、高師小僧を構成する鉄酸化物の層に一樣に濃集するのではなく、中心空隙周辺や酸化鉄の外縁部分といったように部分的な濃集層を形成している場合が多い。

鉄酸化物は、様々な元素を吸着させることのできるスカベンジャーとしての機能に優れていることはよく知られている事実である。したがって、そのような吸着機能によって、リン、硫黄、ヒ素などが吸着・濃集されたことも十分考えられる。このような事例は、地質汚染に関する研究事例からも最近報告されている(たとえば丸茂, 2003)。

また吉田ほか(2003)やYoshida *et al.*(2004)では、還元状態の堆積岩中において、酸化還元反応に伴って酸化鉄の濃集バンドが微生物活動によって形成・維持されている事例を報告している。そこでも鉄酸化物の濃集層に、リンが同様に濃集していることが確認されており、高師小僧の酸化鉄の濃集とリンや硫黄の濃集が、鉄酸化菌の働きで生じている可能性も十分考えられる。とくにリンは、ATP反応などの生物活動におけるエネルギー代謝反応の際に必要とされる元素である。また硫黄に関しても、硫黄を選択的に酸化還元反応に活用する酸化菌の存在が知られており、これらの元素が、そのような活動の結果として、酸化鉄層のある部分に濃集したとしても不思議ではない。

高師小僧に関しても、現在、微生物活動の有無についてタンパク質の染色試験やDNA分析を進めている。例えばSEMによる酸化鉄層内の詳細な観察結果からは、微生物の痕跡と思われる形態が認められている(写真3)。しかし、この痕跡がいつのものかは不明であり、また微生物についても、ただ単にその場所にいるだけなのか、あるいは積極的に酸化鉄の形成に関わっているのかなどについては、DNA分析のみならず、同定された微生物の培養実験によって同様の酸化鉄層が形成されるかどうかを確認するなど、いくつかの検証実験を行なうことが必要である。

さらに現時点では、高師小僧の中心部の空隙をもたらした植物が、どのような種類のものかについて

も不明である。微生物が関与している場合、植物と微生物の共生についても考慮しなければならない。なぜなら、植物と微生物の共生については古くから様々な植物について報告されてきており、今後の調査においては、植物の種類を同定することも重要な要素の1つであると思われる。

微生物活動が、何らかの形で高師小僧の成長プロセスに関与している場合、先に述べた鉄酸化物のリズミックな同心円構造や、単純な拡散現象では説明できない外縁部分の酸化鉄層の濃集についても、微生物のリズミックな活動状態によって形成されたと考えることもできるかもしれない。もちろん、このような考えについては、今後、先に示した微生物分析も含め具体的に検証される必要がある。



写真3：高師小僧の鉄酸化物中の微小空隙中で確認されたロッド状の微生物の痕跡(矢印)と思われる形態の電子顕微鏡写真。

3) 高師小僧の環境地質学的応用

高師小僧の調査・研究は、その形成プロセスのみでも十分に興味の引かれる題材の1つである。一方で高師小僧は、見方を変えると、長期にわたって鉄酸化物が還元状態の地層中でどのように維持されるのか、という応用地質学的な知見も提供してくれる。

例えば地層中での元素の移動・保存は、地下環境への廃棄物保存や処分に関するアナログ的な知見として有用である。とくに長期にわたる現象は、実験室では再現することが難しく、どうしても自然現象から学ぶしかない。高師小僧における鉄元素の移動と濃集、そして長期にわたって還元状態の地層中に埋設していたにもかかわらず、鉄酸化物がそのまま存在しているという事実は、地下で形成された鉄酸化物は、還元されずにそのまま保持される可能性を示唆している。また、高師小僧にみる鉄酸化物の形成プロセスは、例えば地下の処分場周辺に、鉄酸化物の自然沈澱を利用した長期的なシールド機能をもたらすなどの方法に応用できるかもしれない。

このようなアイデアは一例であり、今後微生物などの調査・研究が進めば、さらに多岐にわたった地下環境が有する機能に関する新知見が得られるかもしれない。高師小僧に見られる鉄酸化物の形成は、活用可能と考えられる事例の1つであり、今後、こういった身近にある題材を用いた応用研究をさらに進めていく予定である。

まとめ

愛知県豊橋市高師原台地から産出した高師小僧の産状および化学成分分析などによる、高師小僧の形成プロセスの検討を行なった。その結果、高師小僧の形成には、還元状態である周辺のシルト層と植物根の痕跡と思われる空隙が、鉄酸化物の同心円構造の形成に重要であることが示された。

また高師小僧を形作る鉄酸化物の濃集構造や、リンや硫黄などの元素濃集状態は、必ずしも無機的な元素の濃度勾配や拡散現象のみでは高師小僧は形成されないことを示すと同時に、予察的な微生物調査から微生物活動が関与していることが示唆される。

鉄酸化物で形つられている高師小僧の形成メカニズムおよび地層中での保存に関する研究は、単に高師小僧の形成プロセスを明らかにするだけでなく、高師小僧が、保存・維持されてきた地質環境が有する本質的な機能の理解にも役立つものと考えている。

謝 辞

高師小僧の調査を進めるにあたって、名古屋大学博物館長足立 守教授、大学院環境学研究科山本鋼志助教授、竹内 誠助教授には情報の提供およびフィールドでの助言を頂いた。名古屋大学全学技術支援センター與語節生氏には、高師小僧の岩石薄片を作成して頂いた。電力中央研究所の田中姿郎氏、名古屋大学博物館の野崎ますみ氏および岐阜朝日大学の堀田康明講師には、化学成分分析ならびにSEM-EDS分析などの協力を頂いた。また、豊川在住の大島信雄氏、豊川市南部中学校の中尾宜民氏、豊橋市地下資源館の家田健吾氏には文献を提供いただいた。最後に、名古屋大学年代測定総合研究センターの鈴木和博教授には本論文の査読をして頂いた。記して深く謝意を表する。

参考文献

- 小藤文次郎 (1895) 高師小僧。地質学雑誌, **2**, 238-240.
- 黒田啓介 (1958) 渥美半島の洪積統層序ならびに地質構造。地学しずはた, **16**, 38-45.
- 黒田啓介 (1966) 渥美層群中下部から産出する植物遺体。第四紀研究, **5**, 49-58.
- 黒田啓介 (1967) 渥美層群上部から産出する植物遺体。第四紀研究, **6**, 57-62.
- 羽田野敬雄 (1844) 参河国古歌名急蹟考。豊橋市。
- 猪間收三郎 (1894) 三河国宝飯郡辺に多産する高師小僧と称するもの。地学雑誌, 第6集第70巻, 589-590。
- 松岡敬二 (1998) 高師小僧の名前の由来 (演旨)。日本地質学会第105年学術大会講演要旨, 299-299.
- 松澤 勲 (1990) 東海の自然史。財団法人東海財団発行, 390p.
- 丸茂克美 (2003) 鉱物をういた地質汚染浄化, 資源環境地質学-地球史と環境汚染を読む。資源地質学会, 393-398.
- 日本民俗文化大系3 (1983) 「稲と鉄」。小学館, 227p.
- 奥山茂美 (1975) 高師小僧の研究, 地学研究, **26**, 127-138.
- 島本昌憲・東野浩史・鈴木秀明・田中裕一郎 (1994) 愛知県渥美半島に分布する更新統渥美層群の地質年代と対比について。地質学雑誌, **100**, 618-630.
- 杉山雄一 (1991) 渥美半島・浜名湖東岸地域の中更新統-海進・海退堆積サイクルとその広域対比。地質調査月報, **42**, 75-109.
- 立川正久・森川光郎・北川正和 (1966) 琵琶湖の堆積物の研究その2 - 湖琵琶湖層群中の高師小僧の成因 - 。滋賀大学紀要, 第16号, 37-42。
- 高田雅介 (1989) 京都府八幡市木津川河床に生じた高師小僧とその成因。地学研究, 38巻, 151-160。
- Thomson, J., Higgs, N.C., Croudace, I.W., Colley, S., and Hydes, D.J. (1993) Redox zonation of elements at an oxic/post-oxic boundary in deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 579-595.
- 吉田英一・山本鋼志・田中姿郎・与語節生・A.E. Milodowski (2003) 酸化還元フロントの形成と二次的物質移動現象 - 地質環境中汚染物質の長期的移動と固定に関するアナログ研究として - 。地質学雑誌, **109**, 548-558.
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Yogo, S. & Murakami, Y. (2004) An analogue of matrix diffusion enhanced by biogenic redox reaction in fractured sedimentary rock. *Jour. Geochemical Exploration*. (in press).

(2004年10月15日受付, 2004年11月15日受理)