東京都あきる野市の中新統五日市町層群に 見出された cone-in-cone 構造

菊池 芳文* 安達 修子* 猪郷 久義**

Cone-in-cone Structure in the Itsukaichimachi Group (Miocene) in Akiruno City, Tokyo

Yoshibumi KIKUCHI*, Shuko ADACHI* and Hisayoshi IGO**

Abstract

Cone-in-cone structure is observed in the Kosho Alternation Member of the Itsukaichimachi Group (Miocene) exposed along the Akigawa River in Akiruno City, Tokyo. This sedimentary structure has long been studied in Europe and North America but there remains many problems still in debate. Study of this structure, however, has mostly been ignored in Japan, and the present cone-in-cone structure was misinterpreted as stromatolites by the previous authors. We describe this material and briefly introduce studies in foreign countries in this occasion.

One of the well-preserved cone-in-cone structures in the Kosho Alternation Member is covered with thin banded clay and calcareous ironstones of which iron minerals are mostly siderite. The present samples indicate that the structure was formed by crystallization of calcite in free from the stress field and fibrous crystal behaved similar to ice needles in the ground. Microscopic observation of the structure shows that calcite and siderite were almost syngenetically crystallized immediately below the sea-floor of more than -200m depth.

Key words : Cone-in-cone, concretion, diagenesis, Itsukaichimachi Group, Miocene, sedimentary structure

キーワード : 重円錐構造, 結核, 続成作用, 五日市町層群, 中新世, 堆積構造

I. はじめに

Cone-in-cone 構造は主に頁岩など泥質岩中の石灰質の薄層や細脈, また亀甲石 (septarian) のような大きな結核 (concretion) の表面などに形成される堆積構造で, その多くは方解石からな

る円錐が, 同心円状に多数密に重なり合ったものである。円錐の頂角は $30\sim 60^\circ$ で, 高さは 10 mm ~ 10 cm 程度である。個々の円錐の間には, 斜面を縁取るように粘土やシルトなどの薄層が挟まれていることが多い。円錐が方解石でなくアンケル石, 菱鉄鉱, 石膏, 黄鉄鉱の場合も報告されてい

* 筑波大学地球科学系

** 筑波大学名誉教授・国立科学博物館客員研究員

* Institute of Geoscience, The University of Tsukuba

** Professor Emeritus, The University of Tsukuba and Research Associate, National Science Museum, Tokyo

る。同様な構造は石炭層にも知られている。さらに、かつてこの構造として報告されたものには、巨大隕石等の衝突によって形成された衝撃円錐 (shatter cone) と混同されたものもある。Cone-in-cone 構造は先カンブリア界から第三系まで知られ、主としてアメリカ合衆国、イギリス、フランス、ベルギー、ドイツなどの研究者によって記載され、すでに 100 年以上も前から成因等が論じられてきた。これらの研究によると、この構造は続成作用の比較的初期に炭酸カルシウムの結晶化や荷重などによる圧力下で、堆積物が完全に固結する前に形成されたとする考えが主流を占めている。しかし、見解の一致しない点や未解決の問題も多く、さまざまな論議が繰り返されてきた。わが国ではこれまでこの構造には特別な注意が払われず、筆者らの知る限り詳細な報告には接していないが、木村ほか (1973) では「重円すい石」、木下 (1971) は「累錐構造」として簡略に記述している。筆者らはこれらの名称が誰のつくった訳語か特定はできなかった。本論ではこれを cone-in-cone 構造、単に cone-in-cone、また記述の際に個々の cone を円錐とよぶことにする。さらに、この構造に対して訳語を用いるとすれば重円錐構造が適当であろう。またこの構造の記述に関連する用語で、わが国で広く用いられている nodule は団塊とし、concretion には結核の訳をあて、Pettijohn (1975) あるいは Bates and Jackson (1987) などの見解に従って両者を区別し、内部構造のないものは団塊、構造を有するものは結核とする。

本研究で取り扱った標本は数点であるが、主として記載したものは、菊池が 1974 年秋に東京都西多摩郡五日市町 (現在あきる野市) 小庄の秋川左岸の河床で採集したものである (図 1, Loc. 1)。当時この露頭には菅野・新井 (1964) の小庄砂岩・泥岩互層が露出していたが、その後の河川改修で露頭は失われてしまった。大森昌衛は 1983 年日本古生物学会年会で、菊池と同一の露頭か、近接した別の露頭から得られたと見られる標本をストロマトライト化石として報告した。同様な口頭発表は石田ほか (1983) によって日本地質学会第 90

年学術大会でも行なわれ、彼らはそれがオーストラリアの現世のストロマトライトの gelatinous mat structure に類似するとしている。さらに五日市盆地団体研究グループ (1983) と五日市盆地団研古生物グループ (1985) はクモヒトデ化石の産出を報告し、ストロマトライトの存在についてもふれている。後者のクモヒトデ化石は、詳細は不明であるがそのストロマトライト産出地点と同じ露頭付近の転石から得られたと見られる。彼らはこのストロマトライトを堆積環境を論ずる一つの重要な指標とし、五日市町郷土博物館の刊行物「化石は語る五日市むかしむかし」、大森 (1977) などの普及書にも紹介している。また最近の入門ほか (1990)、足立 (1994) などの報文にもこのストロマトライトの産出はそのまま引用されている。

本小論は五日市町層群に見出された堆積構造の cone-in-cone が、上述のように誤って化石として広く紹介されているので、これを訂正し記載することを主な目的とした。さらにこの機会にわが国では関心の薄いこの種の堆積構造に対し、大方の関心を促す意味で従来の海外での研究の概要を紹介し、検討した主要文献をリストした。

II. Cone-in-cone 構造の研究

この研究は外国ではすでに 100 年以上の歴史があり、堆積岩石学、層位学、岩石学、構造地質学、鉱物学、結晶学などさまざまな立場から検討されてきた。以下主なものについて概略時代順にその要点を紹介する。

1) 古典的研究

筆者らは原著に直接当たれなかったが、古くイギリスの Sorby (1860) やアメリカの Marsh (1868) がすでに成因を論じている。Sorby は方解石がある軸の回りで放射状に晶出すればウーライトになり、点に集中して晶出すれば cone-in-cone になるとした。これに対して Marsh は結晶の成長に伴う圧力を主な要因としているようである。後に Sorby (1908) はこの構造に関係して結核や団塊の形成等についても興味深い論文を書いている。

19世紀末から1920年代にかけて、Cole (1893), Gresley (1894), Keyes (1896), Reis (1903), Steinmann und Hock (1912), Tarr (1922, 1932), Richardson (1923) などの研究がある。Cole (1893) は単層の表面、または結核の内部の多くの点から放射状に結晶成長が進み、円錐をつくると考えた。円錐間の縁取りである粘土は、方解石の結晶化の途中で押し出された残渣とした。彼は方解石のc軸が円錐の軸に平行に配列している可能性を指摘した。Gresley (1894) や Keyes (1896) は炭酸カルシウムの結晶が結核状に成長することによって、この構造が引き起こされるとした。Reis (1903) はこの構造は泥質岩の中で炭酸カルシウム溶液が長期にわたって結核状に結晶したもので、この間に圧力が加わり有機物の分解(decay)がこれを助長したとしている。Tarr (1922) は炭酸カルシウムがアラゴナイトとして晶出し、方解石に再結晶する際に生ずる圧力によってこの構造ができるとした。しかし、彼はその後(Tarr, 1932) 1922年の自説を訂正し、cone-in-cone形成に関与する圧力は堆積物の荷重と主張した。

Richardson (1923) はイギリスのDorsetのライアスの地層に古くから知られている「beef」入り頁岩に見られるcone-in-cone構造を、岩石学的に研究し成因を論じた。この奇妙な名称の頁岩は採石場の石工達が使っていた俗語で、「bacon」入りともよばれ、方解石・硬石膏・石膏・岩塩等の繊維状の結晶からなる脈や薄層が、頁岩の層理面に平行に含まれ、「beef」の断面のように見えることによる。この構造は特別な剪断が加わったものではないが、堆積物の荷重による主応力場で結晶成長によって生ずる圧力が要因で形成され、方解石は比較的短期間に晶出したとしている。

2) 1930年代から1960年代の研究

この期間には堆積学の基礎的な諸問題の研究が著しく進展したが、この構造に関しても多くの注目すべき研究がある。近代堆積岩石学の創始者フランスのCayeux (1935) は、石膏や石炭など方解石以外のこの構造に強い関心を示した。アメリカのShaub (1937) はコネチカット川の氾濫源に

できるconical cupsに成因が類似するとした。彼はcone-in-coneは堆積物の水抜けの途上で起こる収縮・沈殿・体積減少などによって形成されるとしている。Hendricks (1937) はマンガン菱鉄鉱からなる珍しいcone-in-cone構造をアーカンソー州のシルル系から報告した。

この構造に強い関心を払ったベルギーのDenaeyer (1939, 1940a, b, c, 1945, 1946, 1947-48, 1952, 1954) とフランスのBonte (1942, 1945a, b, 1952) は、一連の論文でcone-in-coneの形成を繰り返し論じたが、両者はその成因で長いこと対立し論争をつづけた。しかし、Bonteは1947年になってGoguelを共著者に加えて(Bonte *et al.*, 1947) Denaeyerと妥協し、両者の折衷案を提唱してこの論争に終止符を打った。彼らの一連の研究の詳細は省略するが、成因は破断面の内部、または結核状の固まりとして繊維状の方解石が晶出し、張力によって変形してこの構造ができるとしている。張力は堆積物の変形や、方解石の結核状の成長の途上で生ずるとしている。同じくベルギーのLhoest (1962) やフランスのGay (1942), Thorat (1942) もこの構造の成因を論じ、生物起源有機物の関与を強調した。また、David (1952) は“beef”とcone-in-coneをアルジェリアの白亜系から報告した。ニュージーランドのBartrum (1941) やGage and Bartrum (1942) は石炭層中のcone-in-coneを報告した。

米国地質調査所のBrown (1954) は奇妙な産状のcone-in-coneを報告し、従来の成因論などに疑問を投げかけた。彼はワイオミング州の始新世のGreen River層の魚の化石が、層理面で厚さ2 cmのcone-in-coneで上面(雄型)と下面(雌型)に分けられているものを図示した。またカンブリア紀の三葉虫の背側と腹側が、厚さ2~3 mmのcone-in-coneで分離した標本のあることも指摘した。アメリカの堆積岩石学や堆積学の教科書、Twenhofel (1950), Weller (1960), Pettijohn (1957, 1975) にもcone-in-coneが取り上げられ、彼ら自身のレビューがなされている。

ドイツではこの構造をもった岩石をTutenmergelまたはNagelkalkとよび、Linck

und Noll (1928), Linck (1930), Herrmann (1930), Noll (1931), Morawietz (1961), Müller (1962), Schöne-Warnefeld und Dahm (1962), Usdowski (1963) などが研究を公表している。Tutenmergel の Tute は角, mergel は泥灰岩である。Nagelkalk の Nagel はわが国でかつて登山靴の略称に用いられたように、爪とか鉋で、円錐状の方解石を爪に見立てたものであろう。

Linck (1930) は当時流行したコロイド化学的な見地からその成因を論じたが、その後の研究者はこの見解に否定的である。Herrmann (1930) は繊維状の方解石の結晶化が圧力場で進んだものと結論している。Morawietz (1961) は、cone-in-cone 石灰岩は水に富み、硫化水素、炭化水素を伴った石灰質泥の続成作用のごく初期に形成され、上からの圧力は必要でないことを強調した。炭酸塩の結晶は堆積物が一時的に海水面上に露出し、炭酸カルシウムの溶解度が低下し晶出したと考えた。

Usdowski (1963) はドイツのライアスの cone-in-cone, さらにハンガリーとイランのものを化学組成や結晶学的に研究し、形成時期は続成作用のごく初期と結論している。彼は繊維状方解石からなる円錐の前面に次々と新しい円錐が成長して集合体をつくるとし、模式的な成長モデルを図示している。またこの構造の炭酸塩鉱物の微量元素 Sr の含有量が炭酸塩岩全般の平均値より少ないことから、方解石が初生的にアラゴナイトであったという見解を否定した。筆者らは旧ソ連の研究例を十分検討できなかったが、Zaritsky (1963) は方解石からなる cone-in-cone が、小さな菱鉄鉱を含む結核を取り巻いているものを報告している。

3) Woodland (1964) の総括的研究

アメリカの Woodland (1964) は cone-in-cone について最もまとまった研究を公表するとともに、従来の研究を丹念にレビューした。彼はシカゴ自然史博物館の所蔵する北アメリカ産の多くの cone-in-cone 構造を詳細に記載した。Brown (1954) の三葉虫の cone-in-cone については、ユタ州のカンブリア紀の *Elrathia kingi* などを薄片で観察して記載した。彼はこの構造は続成作用の初期に繊

維状の方解石の結晶化によって形成され、円錐構造はフランボイアン様式の成長の結果であるとした。また、これまで論議されたような剪断応力場や、結晶化による圧力の関与については否定した。さらに彼はこの構造の起源と形成条件について下記の8つの問題点をあげ、それぞれについて論じた。これを要約すると次のようになる。

①炭酸カルシウムの初生的沈殿の原因：炭酸カルシウムの沈殿はカルシウムの供給、二酸化炭素の活動度、pH などの物理化学的な条件で規定される。また多くの研究者によって指摘されているように、有機物の分解が炭酸カルシウム沈殿の引き金になっている。

②炭酸カルシウムの起源：この問題は意外と難問であるが、その多くは貝殻など化石から供給されたものであろう。

③周辺の堆積物の堆積と固化に関連し結核形成がどの段階で生じたか、また堆積物の状態はどのようであったか：微細構造、特に粘土粒子の小円錐表面への転置から見て、円錐形成時に周辺堆積物は未固結で間隙水の保水も十分であり、結晶化が進行中の方解石が粒子間に侵入して、粒子を動かした。

④組織の型は何によって規定されるか：基本的には方解石の結晶格子のもつ異方性と、周辺の物理化学的な環境の特性によってその方向性が支配される。

⑤堆積物の初生的な厚さが上方にどれだけ膨張するか：結晶化が始まる時点での堆積物の量と、上に重なる地層の固結による影響が判明しないので特定はできない。しかし、三葉虫など化石に生じた事例では膨張の量が判明する。

⑥上方に重なる地層の垂直的な圧力がもし存在するならばその効果は何か、また方解石の結晶化によって生じる力の影響は何か：両者とも cone-in-cone 形成に大きな影響は与えないが、結晶化によって生じる力は好条件を提供する。地層の荷重も方解石の c 軸が繊維状結晶の伸長方向と平行に配列するのに影響を与える程度である。

⑦円錐の大きさ、頂角、個別化を規制するものは何か：円錐の大きさと頂角は粘土の固結度や葉

層理組織などの堆積物の物理的な特性、また粒子の大きさを規定する核形成の密集度と方解石成長の速度などによる。

⑧成長の休止は何が原因か：これは炭酸塩の供給の停止や、沈殿のための物理化学的条件が満たされなくなったことに原因がある。また粘土の適当な物理的環境が得られなくなれば、方解石の沈殿は継続しても cone-in-cone は形成されなくなる。

4) Woodland 以後の研究

Woodland の研究以後もかなりの研究例が公表され、結核や団塊、続成作用、堆積環境の解析などとの関連で議論されている。Durrance (1965) はイギリスのヨークシャーのライアス上部の cone-in-cone を新しい手法で研究した。彼は円錐を分離し、軸に平行と直角方向の切片を塩酸で弱くエッチングし、プラスチックに封入して破断面を偏光弾性装置で観察した。その結果この cone-in-cone 構造によって示される螺旋状の割れ目パターンは、可塑性をもった堆積物の中で方解石の結晶成長の過程で円錐の頂上に上向きの圧力が加わったことを解析した。

Gilman and Metzger (1967) はニューヨーク州のデボン系の Canadaway 層の結核中の cone-in-cone 構造の研究を公表した。この事例では結核の上半部は円錐が頂点を下方に向け、下半部は逆に上方を向き、中央部は葉層理の発達したシルト岩で占められている。さらに二方向の大小の割れ目系が円錐の発達を規定し、円錐割れ目 (cone fracture) が発達し、フィルム状の粘土が円錐を縁取っている。この粘土のフィルムは細かく剪断されて、劈開が生じ鋸歯状になっている。このため円錐はその底部が顕微鏡のスケールで少しずつずれて、結核の周辺部を縁取りしている。この縁取りは多くの研究者が報告しているが、彼らの図示したものでは、鋸歯の頂点から劈開に沿ってさらに薄い粘土フィルムが上に重なる円錐の中に侵入している。彼らはこの点から cone-in-cone 構造は剪断を生ずるような応力場で形成されたことを強調した。さらに円錐の方解石を X 線回折や光学的に解析した。すでに古くは Tarr (1922) など

によって指摘されているように、円錐の部分によって方解石の結晶の性質が異なることを観察している。例えば、円錐の頂上付近の方解石に放射状の線または割れ目が見えるが、これは初生的な炭酸塩鉱物が繊維状の性質を有していたことを示すとした。これは繊維状のアラゴナイトを検鏡すると見える現象と酷似し、初生的にこの方解石はアラゴナイトであったと結論している。また少数ではあるが、円錐によっては頂上部で放射状の消光をする方解石の粒子がほぼ円形な固まりになっていて、球粒状の消光 (spherulitic extinction) を示す。これも初生的鉱物が残した性質で、バーテライト (vaterite) の可能性が高いとしている。なお、バーテライトは低温で実験的につくられた炭酸カルシウム鉱物である。彼らは Tarr (1922) が提唱し、後に破棄した仮説を復活させ、続成作用の初期に繊維状のアラゴナイトが微細な粒状の方解石に再結晶したときに生ずる圧力で円錐構造ができた結論している。

Franks (1969) はカンサス州の白亜系 Kiowa 層の頁岩中に cone-in-cone 構造が不連続のレンズ状や楕円形の結核、ならびに方解石でセメントされた砂岩中に不規則な層として現われるとし、詳細な研究を公表した。砂岩中の cone-in-cone 構造は繊維状の方解石が羽毛状に集合し、頁岩中のものは微細な粒状の方解石からできている。この方解石は汽水環境下で初生的に繊維状方解石として続成作用の初期に晶出し、後に微細な粒状の方解石に再結晶したと結論している。また再結晶作用は化石に富む下位の地層の有機物の分解によって惹起されたとした。この Kiowa 層の cone-in-cone は方解石、白鉄鉱、炭質物が一定の割合で含まれるが、これは堆積物が可塑性を保っている段階で、水と堆積物の境界面からある深さで独特な物理化学的な条件のセットが生じ、これがこの構造形成の本質的なものであると結論している。バクテリアによる有機物の分解で発生した二酸化炭素とアンモニア、ならびに間隙水中の硫酸塩還元バクテリアの作用は、堆積物中の還元環境下でカルシウムと炭酸塩の平衡関係を限定し、繊維状方解石の晶出をもたらし、結果的に cone-in-cone 構

造の成長を促進した。Kiowa 層の中には菱鉄鉱からなる結核が含まれる岩相があるが、cone-in-cone 構造をもった結核を含む岩相は、これよりは弱い汽水環境下で堆積したと見られる。Franks はこの構造は特別な剪断を伴うような応力場で形成されたものでないことを強調し、Gilman and Metzger (1967) が重要視した、円錐斜面の縁取りをつくる cone scale や corrugations など断裂によるものではないとしている。さらに彼は、円錐の頂角は周辺の堆積物が水を含んだ状態での塑性に関係するとし、頁岩中の円錐の頂角は 15~70° であるのに対し、砂岩中のものは 70~100° と大きくなることを指摘している。

Raiswell (1971) は南ウエールズのカンブリア系の泥質岩と、Dorset のライアスの結核について研究し、cone-in-cone 構造について言及している。カンブリア系の結核は亀甲石と変形した葉層理を含むものと、cone-in-cone 構造と平行葉層理を伴う 2 つのタイプがある。前者は堆積物の孔隙率が約 70 % のときに形成が始まり 40 % 以下になるまで継続したが、後者は約 30~40 % で固化がやや進んだ状態で形成が始まるとしている。ライアスのものは平行葉層理が発達し特定の層準に集中しているが、堆積物の固化以前の堆積休止中に成長したと結論している。またカンブリア系の結核は海水に対して閉鎖系で形成され、ライアスのものは部分的に開放系のもとで成長したとしている。これらの結核の中で cone-in-cone 構造は結核形成後、堆積物が部分的に固結した状態のもとでできたと結論している。

Füchtbauer (1971) はドイツの下部石炭系の乱泥流堆積物中の cone-in-cone 構造について論じた。この事例は鉄を含む粒状の方解石からなり、embryonal stage つまり円錐ができかけた状態のものを図示し、223 の c 軸の方向をユニバーサルステージで測定して頻度を求め、3 つの最大値すなわち、層理面に鉛直、25~40°、60~70° それぞれ傾斜するものがあることを解析した。彼はこの構造は続成作用の初期に周辺の粘土中で形成されたとしている。さらに他の cone-in-cone 構造で繊維状の方解石からなるものはアラゴナイトの再結

晶によるものとし、作業仮説として浅海で形成されたものはアラゴナイト、深い海成層のものは方解石であると述べた。しかし、Füchtbauer (1974) ではこの作業仮説に反するような表現で、アラゴナイトから方解石への変換は明確でないとし、この構造はスタイロライトよりも早期、結核形成後に形成されるとしている。

Carstens (1985) は北欧オスロー地域のオルドビス系のアルム頁岩の黄鉄鉱結核中に cone-in-cone 構造を見出して記載している。この構造は樹枝状に成長した黄鉄鉱が円錐をつくるが、その成因は結晶成長が大きく関与しているとし、Endo (1976) が秋田の阿仁鉱山から報告した結晶成長の事例を引用している。

以上 cone-in-cone 構造に関するこれまでの主な研究を概観したが、その成因や形成時期などにも異論が多い。また報告された組織にもさまざまなものが認められ、この構造のすべてが同じ条件で形成されたものではないと見受けられる。これまでの研究の紹介の最後に、上述の Woodland (1964) の論文の最後の 6 行 (p. 300) を訳しそのまま引用する。「cone-in-cone 構造はさまざまな地質時代の多くの地層中に地理的にも広く分布しているにも関わらず普遍的に産出するわけでもないし、すべての泥質石灰岩に存在するということもない。この限定された産出の理由としては、結核形成作用が起こる時点での粘土の物理的状態の特別な環境の組み合わせが必要なのである」。

III. 五日市町層群中の cone-in-cone 構造について

あきる野市周辺の第三系は藤本 (1926) を始め多くの研究者によって古くから注目され、金子 (1955) の地質構造、菅野・新井 (1964) の層序、Kanno (1967) の軟体動物化石、Kurihara (1980) の有孔虫化石の研究などでその大要が判明した。その後は五日市盆地団体研究グループ (1981, 1983)、五日市盆地団研古生物研究グループ (1985) による層序やクモヒトデ化石などの研究、中田ほか (1984) の粘土鉱物学的研究、酒井 (1987) の五日市図幅調査と関連した記述などがある。堀田・本間 (1988) は菱鉄鉱によって貝殻

の一部が交代された二枚貝化石 *Portlandia tokunagai* を館谷泥岩部層から発見した。彼らはその成因の詳細な論議は避けているが、この菱鉄鉱が「極めて限定された状況下で形成されたことは間違いない」と述べている。Ito (1989) は新しい堆積学的見地から五日市町層群を再検討し、興味ある結論を得ている。また 入月ほか (1990) は層序や時代論について再検討し、足立 (1994) は五日市盆地から多摩川に沿う地域に五日市-多摩川帯を提唱し、五日市盆地第三系の構造地質学的意義を論じた。

菅野・新井 (1964) はこの第三系を五日市町層群として一括し、下位から幸神層、小庄砂岩・泥岩互層、館谷泥岩層、横沢砂岩・泥岩互層、網代層と区分した。五日市盆地団体研究グループ (1981) は五日市町層群を踏襲し、本層群を秋川層と網代層に区分し、前者を下位から幸神礫岩部層、小庄泥岩部層、羽生凝灰岩部層、館谷泥岩部層、高尾凝灰岩部層、伊奈砂岩部層、横沢砂岩・泥岩部層と細分した。酒井 (1987) はこの区分に、Kurihara (1980) ならびに Ito (1989) は菅野・新井 (1964) の区分をほぼ踏襲している。

1) Cone-in-cone 構造を含む地層

1974 年秋、菊池が最初に標本を採集した露頭は五日市町小庄の東の秋川左岸の河床である (図1, Loc. 1)。ここには菅野・新井 (1964) の小庄砂岩・泥岩互層が模式的に露出し、走向はほぼ NS、傾斜は $40\sim 50^{\circ}$ E、シルト質黒灰色泥岩が卓越し、厚さ $10\sim 20$ cm の細粒砂岩を数枚挟み、スランプ構造が発達する。この露頭はその後の河川改修工事で消滅し現在は見られない。問題の cone-in-cone 構造は層理面にほぼ平行に、厚さ $5\sim 10$ cm、長さ 60 cm 程度で凸レンズ状に含まれていた。しかし、この地層は剝離され、cone-in-cone 自体も上面が磨耗し詳細な産状は不明で、大型の結核の一部であった可能性もある。周辺のシルト質泥岩は部分的に植物化石片が密集していたが、軟体動物化石は含まれていなかった。

1996 年 1 月には、上記の産地近くの秋川右岸の崖 (図1, Loc. 2) で黒灰色泥岩中に挟まれた石灰質シルト岩に付着した cone-in-cone 構造を見出

図1 Cone-in-cone 構造の存在が確認された地点.

Fig. 1 Map showing localities observed cone-in-cone structures in the Itsukaichi district.

した。このシルト岩は厚さ約 9 cm、長さ約 15 cm でスランプによる岩塊か結核の一部と見られ、cone-in-cone 構造はそのほぼ上下面に厚さ 2 cm 程度で層状に発達していた。この場所の地層は Loc. 1 のものより若干上位を占め、より強く擾乱を受け、厚さ最大 60 cm の砂岩など挟みが多くなる。またシルト質泥岩中には植物化石片がかなり目立つ。同年 6 月には Loc. 3 でも同じような産状の cone-in-cone を見出した。

石田ほか (1983) のストロマトライト産出の報告は講演要旨であるが、その記述や挿図、ならびに同氏らが執筆者となっている五日市郷土博物館の出版物「化石は語る五日市むかしむかし」に掲載されている写真も明らかに cone-in-cone 構造であるが、これが 2 地点の顕著な乱堆積構造の発達した小庄泥岩部層から産するとしている。これらの報告から見て、cone-in-cone 構造はこの付近だけでも 4 地点に存在していたと考えられる。

小庄砂岩・泥岩互層の堆積環境に関しては、菅野・新井 (1964) によるとこの累層は模式地で著しいスランプ構造が発達するが、北部では正常な堆積状況を示すとしている。Kanno (1967) は貝化石 *Portlandia tokunagai* (Yokoyama), *Venericardia shiogamensis* Nomura, *Malletia*

図 2 層状構造を示す A 標本から作成した薄片写真 (scale bar=2 cm).
Fig. 2 Thin-section photograph showing zonal structure in Specimen A.

(*Neilo*) *inermis* (Yokoyama), *Yoldia sagitaria* Yokoyama 等を報告し、本層の堆積環境を水深 200 m 以深の泥底とした。五日市盆地団研古生物研究グループ (1985) は小庄泥岩部層は、基盤の隆起に伴って海底斜面で滑り、層間異常構造が形成され、化石は浅海と比較的深い海底の生息種が混在するとしている。浅海性のものとして *Callianassa* sp., *Natica* sp., *Thracia* sp., *Fabulina* sp. などの貝化石に加えて、問題のストロマトライトに多量の材の破片の存在を挙げている。一方クモヒトデの現世類似属は水深 100~300 m に知られ、*Yoldia sagittalia* と *Portlandia tokunagai* などはやや深い海底に生息したものとしている。筆者らはこれまでの研究を総合的に判断して小庄砂岩・泥岩互層の堆積環境は、Kanno (1967) の結論した水深 200 m 以深の泥底、ならびに Ito (1989) の上部漸深海帯 (200~400 m) の大陸棚斜面が妥当と判断した。

2) Cone-in-cone 構造の記載

筆者らの手元にある最も保存状態の良い標本は 1974 年秋に Loc. 1 で採集したもので、これを A 標本とし、肉眼、顕微鏡、X 線などによる検討結果を記載する。またやや異なった様子を示す B 標本は Loc. 2 から採集したもので、薄片観察について記述する。外観を図示するにとどめた C 標本は Loc. 1 で得られた。

a) A 標本

この標本は大きさ約 15 cm×10 cm×7.5 cm で、層理面に対し直交する面で切断し、大型薄片一枚と研磨標本を 3 片作成した。断面では大きく分けて 4 層識別されるので、便宜的に外側 (上位) か

ら内側 (下位) へ第 1, 2, 3, 4 層とする (図 2)。薄片では第 1 層は厚さ約 15 mm で粘土鉄岩 (clay ironstone), 石灰質鉄岩 (calcareous ironstone), あるいは含菱鉄鉱石灰質岩 (siderite-bearing calcareous rock) とともによぶべき岩石からなる葉層が縞状互層している。この部分全体は便宜的に含鉄縞状岩とよぶことにする。次いで厚さ 4~8 mm の小型の cone-in-cone からなる第 2 層、厚さ 20 mm 前後で主として大型の顕著な cone-in-cone 構造が良く発達した第 3 層、そして厚さ 8 mm でやや小型の cone-in-cone 構造からなる第 4 層からできている。なお、この第 4 層は標本全体では厚さ 20 mm に及ぶ。

表面の外観は第 2~4 層は cone-in-cone 構造をつくる円錐が露出し、極めて顕著な皺をもったカップ状を呈する円錐の内側が、多数密に配列している (図 3-1)。各層は暗赤褐色の粘土鉄岩あるいはシルト岩ないし泥岩の葉層で境されている。多数の方解石細脈が層状構造をほぼ直角から急角度で切っている。この細脈の中には含鉄縞状岩中に枝分かれしたり、不規則にジグザクを呈するものや、葉層理にほぼ平行に入り込んでいるものも認められる (図 5-1)。また葉層が上下に転位した微細な「断層面」に沿っている細脈もある。これらミクロな「断層」の多くは「正断層」であるが、まれに「逆断層」もある (図 6-4)。

[第 1 層] 薄片でこの層は厚さ 15 mm の間に、葉層が約 10 枚数えられる (図 2, 5-1)。葉層はほぼ平行な葉層理で境され、第 2 層の cone-in-cone 構造の上面の波曲面を覆うように緩く波形を呈する。各葉層は厚さ 1 mm 以下から 2 mm 程度で、

図 3 Cone-in-cone 構造の外観と研磨面 (scale bar=2 cm).

1. A 標本の外観.
2. A 標本の研磨面.
- 3, 4. C 標本の外観 (3 は層理面の斜め上方から, 4 は層理面に水平方向からそれぞれ撮影).

Fig. 3 Outer and polished surfaces of cone-in-cone structure.

1. Outer view of Specimen A.
2. Polished surface of Specimen A.
- 3, 4. Outer views of Specimen C (upper and horizontal views, respectively).

研磨面では色調の差となって見えるが全般に赤色縞状を呈し、先カンブリア界の縞状鉄鉱床の鉄岩を彷彿とさせる。色調の濃い部分は研磨面では暗赤褐色（チョコレート色）であるが、薄い部分は灰赤色から薄赤褐色（えび茶色）、さらに褐灰色（いわゆる赤銅色に近い）を呈する。

薄片を鏡下で観察すると、葉層は生物擾乱を受け部分的に不連続となっているものも認められ、放散虫、有孔虫、二枚貝、貝形虫、棘皮動物の刺、所属不明の化石などが断面として認められ、貝形虫にはジオペタル構造を示すものがある。ごくま

れに含まれる二枚貝の貝殻は、極めて薄く小型で凸面を下方に向けている（図 6-6）。

暗赤褐色の葉層は大部分が同色の粘土状の基質からなるが、径 0.01~0.03 mm 程度の楕円ないし亜円形の粒状の集合体、短冊、多角形などを呈する菱鉄鉱が方解石によつて充填されている（図 5-2, 3 の下半部）。自形の菱鉄鉱の明瞭な菱面体の断面と見られるものは、薄片ではなかなか見当たらない。方解石は微細な結晶がモザイク状組織を呈する。径 0.05~0.3 mm 程度の碎屑性と見られる角張った方解石や石英の破片が、葉層中に散在する部分もある。これらの方解石片や石英片は流理構造や不明瞭な級化構造を示す（図 5-1 矢印）。さらに葉層によっては石灰質の粒状体が集まっている部分がある。これらは径 0.1~0.3 mm で亜円形ないし楕円形を呈し、ペレットであろう（図 5-5）。また部分的であるが葉層中に大きさ 0.2 mm 前後で角張った粒状の方解石集合体が含まれている。この粒子は高倍率で観察すると上述のペレットと見られるものとは異なり、方解石の繊維状結晶の集合体からなり、後述の不明瞭な cone-in-cone 構造をもった方解石主体の葉層が部分的に削剥され、取り込まれたものと見られる。類似したものは第 2 層との境界をつくる濃色の葉理にも含まれるが、これに関しては第 2 層のところで述べる。

さらに不透明鉱物の微細な集合体が、特定の濃色の葉層中や葉層理面に少量認められる。これらを反射光で観察すると微細な粒状の黄鉄鉱の集合体で、長さ 1~3 mm、厚さ 0.5 mm 程度で不規則な形であるが、長軸が葉層理に沿って伸長している。また一部褐鉄鉱によって置換されたものもある。これら黄鉄鉱の集合体は、初生的には生物起源のフランボイドであったものが圧密作用で変形したものと判断される。

灰赤色から薄赤褐色の葉層を検鏡すると、方解石が粘土分や菱鉄鉱より量的に多く、基本的には方解石がつくる葉層である。これらの葉層には、生物源石灰質硬組織やその破片、碎屑性方解石片が粘土分などの基質中に多く含まれて淡色を呈する部分と（図 5-4）、方解石が基質をつくり、赤褐

色を呈する径 0.01 mm オーダーの微細な菱鉄鉱が散在する部分とが認められる (図 5-2, 3 上半部)。菱鉄鉱は直線的な辺で囲まれた不規則な 5~6 角形の単結晶, あるいは粒状の集合体に見えるものが多い。さらにこれらが集まって不規則な形のより大きな集合体として, 方解石基質中に含まれる。濃色部と同様に明らかに自形の菱面体の断面と見えるような菱鉄鉱は見当たらない。さらに碎屑性の径 0.1~0.03 mm の角張った石英片も少量認められる。葉層の色調の濃淡は透明な方解石と, 濃色の菱鉄鉱や粘土分の量比で決まる。

方解石主体の葉層には不明瞭ながら cone-in-cone 構造が部分的に形成されているものがある。これは Franks (1969) らが “incipient cone-in-cone” あるいは “embryonic cone-in-cone” とよんだものに相当し, 「萌芽円錐構造」とでも訳するのが適当であろう。この円錐をつくる方解石は繊維状と粒状結晶が共存し, 円錐の斜面に沿って微細な菱鉄鉱が縁取りとして点在する。第 2 層に近い方解石主体の葉層には, かなり明瞭な incipient cone-in-cone 構造が形成されている (図 5-1 ★印, 2)。この円錐は最大でも高さ 1 mm, 底辺は長さ 0.8~0.7 mm, 頂角は約 45° で, その中に多数の小円錐が密に重なっている。方解石は大部分が繊維状で, 各円錐の境界はやや不明瞭, 第 3 層などの典型的な円錐斜面の粘土やシルトの鋸歯状の縁取りは発達が悪い。しかし, 菱鉄鉱粒子が円錐斜面に沿って多数配列する部分は, 比較的明瞭な cone-in-cone 構造に見える (図 6-1)。この石灰質葉層には全般的に粘土分などの不純物が多く含まれる傾向がある。

第 1 層から抽出した試料の X 線回析で菱鉄鉱, 方解石, 石英が確認され, 蛍光 X 線分析による方解石の化学組成は最大数%の $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ を含むものがあるが, 鏡下で大部分の方解石中に微細な粘土分や菱鉄鉱の存在が確認されるので, 酸化鉄はこれらに由来する可能性が高い。MgO の含有量は 1% 程度である。

〔第 2 層〕この層は厚さ 4.0~8.0 mm で第 3 層の波曲面を覆い, その境界には暗赤褐色の葉層が挟在する。第 2 層は比較的大きな円錐からなる

図 4 Cone-in-cone 構造の模式図。

- a: 一次オーダーの円錐の内部構造。
- b: 二次オーダーの円錐の内部構造。
- c: 二次オーダーの円錐を構成する繊維状方解石の配列。
- d: 円錐頂部を上方から見た繊維状方解石の配列。
- e: 円錐斜面の鋸歯状の縁取りの拡大図。

Fig. 4 Schematic illustration of detailed cone-in-cone structure.

- a: Internal structure of the first order cone.
- b: Internal structure of the second order cone.
- c: Arrangement of fibrous calcite crystals in the second order cone.
- d: Upper view of arrangement of fibrous calcite crystals at an apex of cone (upper view).
- e: Enlarged corrugated (serrated) clay coating along cone slopes.

cone-in-cone 構造からなる部分と, その上方と下方にそれぞれやや小さな円錐が配列した部分とともに, 全体として cone-in-cone 構造が良く発達する (図 5-1 最下部層)。上方の部分は厚さ 1.0~1.5 mm で, 小型の円錐が主部をつくる大きな円錐を覆う。最上部に配列する円錐の多くは頂部が破損したり, 第 1 層との境界をつくる暗赤褐色の葉層によつて削り取られ, 破片となって取り込まれている。この壊れた円錐頂上部の多くは横転して葉層中に含まれ, その転位の状態は繊維状方解石の消光の状態から容易に判断できる。このいわば「侵食」された円錐の破片の多くは, 頂上部だけが壊されたものと判断される。

主部をつくる個々の円錐は, 粘土や微細な菱鉄鉱の配列で明瞭に縁取られて, 高さ 1.5~3.0 mm, 頂角は小さく 40~45° である。この円錐の中により小型の円錐がジグザグに緻密に重なり合っている。大きな円錐を便宜的に一次オーダーの円錐と

図 5 A 標本の薄片顕微鏡写真 (平行ニコル) (scale bar 1=3.0 mm; 2, 3, 4=0.2 mm; 5=1.0 mm).

1. 第1層 (含鉄縞状岩) と cone-in-cone 構造からなる第2層 (矢印は碎屑性石英, 方解石などが示す流理ならびに級化構造, ★印は incipient (embryonic) cone-in-cone 構造).
- 2, 3. 第1層中の石灰質葉層 (上半部) と菱鉄鉱主体の葉層 (下半部).
4. 第1層中の碎屑性方解石や生物源石灰質硬組織などからなる葉層.
5. 第1層中の流理構造を示すペレットを含む濃赤褐色菱鉄鉱主体の葉層.

Fig. 5 Microphotographs of thin section of Specimen A (open Nicol).

1. The first layer (banded iron-bearing rock) and the second layer with cone-in-cone structure (arrows indicating flow structure of clastic quartz and calcite, ★ indicating incipient cone-in-cone structure).
- 2, 3. Calcareous lamina (upper half) and sideritic lamina (lower half) in the first layer.
4. Calcareous laminae including clastic calcite and calcareous bioclasts in the first layer.
5. Dark red-brown sideritic lamina including pellets showing flow structure in the first layer.

図 6 A 標本の薄片顕微鏡写真 (平行ニコル) (scale bar=0.2 mm).

- 1, 2. 第1層下部の incipient (embryonic) cone-in-cone 構造の形成された石灰質葉層.
3. 第3層に見られる碎屑性方解石, 繊維状方解石, 碎屑物などから形成された cone-in-cone 構造.
4. 第1層中の葉層に見られる微細な逆断層 (すべり劈開).
5. 第1層中の incipient (embryonic) cone-in-cone 構造の形成された石灰質葉層と生痕 (?) を含む菱鉄鉱主体の葉層.
6. 第1層中の二枚貝殻を含む石灰質葉層.

Fig. 6 Microphotographs of thin section of Specimen A (open Nicol).

- 1, 2. Calcareous lamina with incipient cone-in-cone structure in the lower part of the first layer.
3. Cone-in-cone structure composed of clastic calcite, fibrous calcite, and other clastic grains in the third layer.
4. Minor reverse faults (slip cleavage) observed in calcareous and sideritic laminae of the first layer.
5. Calcareous laminae with incipient (embryonic) cone-in-cone structure and sideritic lamina including burrow (?) in the first layer.
6. Calcareous lamina including a shell of pelecypod in the first layer.

図 7 A 標本の薄片顕微鏡写真 (平行ニコル) (scale bar 1=2.0 mm; 2=1.0 mm; 3, 4=1.0 mm).

1. 第2層と第3層の cone-in-cone 構造 (鋸歯状の粘土分の円錐縁取りの発達状況ならびに右半部は碎屑物と粘土分主体の cone-in-cone 構造を示す).
2. 第3層下底部に見られる流理構造ならびに級化構造を示す碎屑物と粘土主体の葉層が鋸歯状の円錐縁取りに侵入している状態 (矢印は流理構造を示す石英片).
3. 第3層中の鋸歯状の円錐縁取りの拡大写真 (右下の矢印は流理構造を示す石英片; 中央左の矢印は劈開によって破損した方解石片).
4. 鋸歯状の円錐縁取りと cone-in-cone 構造に見られる微細なすべり劈開.

Fig. 7 Microphotographs of thin section of Specimen A (open Nicol).

1. Cone-in-cone structure in the second and third layers showing corrugated clay layers. Lower right showing cone-in-cone structure composed of clastic calcite, fibrous calcite, quartz grains, clay, and other clastic grains.
2. Laminae consisting of clay, silt, clastic quartz, and calcite showing flow structure and grading which are penetrated into corrugated clay layers along slope of cone in the third layer (arrow indicates flow structure of quartz grains).
3. Enlarged part of corrugated clay layers in the third layer (lower right arrow indicates flow structure of quartz grains and middle left arrow indicates a fractured fragment of cone-in-cone calcite).
4. Minor slip cleavage in a corrugated clay layer and cone-in-cone in the third layer.

し、その中に重なる小円錐を二次オーダーの円錐とよぶことにする(図4)。各円錐を構成する方解石は繊維状で、その内部や境界部に微細な菱鉄鉱や粘土粒子がさまざまな割合で散在している。一次オーダーの円錐斜面に見られる縁取りは、ときに厚くなり鋸歯状を呈するが、これは Woodland (1964) によって corrugated clay layer, Tarr (1922), Gilman and Metzger (1967) など従来の研究者が clay rings, cone scale, corrugations, annual rings などとよんだものである。鋸歯の大きさは変化に富むが、次に述べる第3層のものよりは一般に小型である。この主部をつくる cone-in-cone 構造の下には、より小さな円錐からなる cone-in-cone が配列し、大部分は円錐の基底が粘土葉層理と直線的な境界で接しているが、モザイク状の方解石の集合体をあたかも土台として、その上に円錐が形成されている部分もある。

〔第3層〕この層の大部分は大型の顕著な円錐からなる cone-in-cone 構造が発達している。円錐の多くは透明な繊維状方解石からなり、この部分は上方に盛り上がり、第1層と第2層の葉層をゆるやかに波曲させている。円錐は大きなものは高さ10 mm以上に達し、頂角は40~60°であるが、頂上部は丸みを帯びて爪状のものが大部分である。これらの一次オーダーの円錐の中には、他と同様により小さな二次オーダーの円錐がジグザグに多数密に重なり合って配列している。さらにこの第3層の下方には、粘土分主体の大型の円錐が配列する部分がある。この部分は基質をつくるシルトや粘土、碎屑性の石英片、方解石片、菱鉄鉱、さらに炭質物、不透明鉱物などが円錐をつくり、ごく少量の繊維状あるいは粒状の方解石が加わって cone-in-cone 構造を形成している(図6-3, 7-1)。本層の小型の円錐からなる部分は、波曲する第1層と第2層の谷の部分进行形成し、円錐の高さは5 mm程度であるが、頂角や輪郭の形は大型のものとはほぼ同様である。この部分には基質をつくる粘土やシルト分が円錐の基底部にかなり顕著に挟在している。

一次オーダーの大型の円錐斜面には粘土分による縁取りが顕著に見られ、大型の鋸歯が多数配列

している。これらの鋸歯には粘土、シルト、菱鉄鉱、碎屑性の微少な石英片などが下方から上方に向かって流理構造や級化構造を呈するように配列する。このような現象はこれまでの多くの研究でも報告され、円錐が成長する時点で周囲の基質をつくる粘土分などは未固結で、水分を十分に含み流動性に富んだ状態であったとする有力な証拠とされてきた。本標本では特にこの第3層の下底部で水平の葉層理をつくる粘土、シルト、石英片などが円錐の斜面に沿って持ち上げられ、鋸歯状の縁取りを形成している状況が極めて明瞭に見える(図7-2, 3, 4)。

Gilman and Metzger (1967) はこの鋸歯状の clay rings が、円錐の方解石に見られる fracture と密接に関係している点を強調した。本標本でも fracture との関連性が見られるものが多いが、彼らが図示したよう顕著な fracture は見られない。この fracture はすべり劈開とよぶべきであろうが、いわば顕微鏡的スケールの「断層」で、円錐の斜面に沿って上昇した粘土分からなる基質が上方の円錐とともに急角度で階段状に切れたもので、ほとんどが「逆断層」である。このすべり劈開、いわば断層面は上方の円錐をつくる繊維状結晶の中にしばしば入り込んでいるが、下方の円錐にまで達している例は少ない。また侵入している場合でもごく僅かの転位を伴う程度である。さらにこの劈開によって上方の円錐の繊維状方解石の一部が微細な破片となって鋸歯の中に取り込まれているものも見られ、劈開の形成は円錐構造形成後でしかも粘土が可塑性を保っていた段階だったことを示している(図7-3)。なお、粘土分の起源は方解石が結晶化する際の pressure solution で絞り出された残渣(residue)とする考えも、多くの研究者によって指摘されているが、本標本ではそのような考えは全く否定的である。

上述の一次オーダーの円錐には二次オーダーの円錐が密に充填されているが、その頂角は30~40°で、一次オーダーのものより鋭角で、微細な繊維状の方解石の多くは円錐の斜面に平行に配列し、ごく薄い粘土分や菱鉄鉱の微細な結晶配列で縁取られ、ときには小さな鋸歯を伴うものもある。

図 8 B 標本の薄片顕微鏡写真（平行ニコル）（scale bar=2.0 mm）.

1. 破壊された cone-in-cone 構造の最上部.
2. 破壊された cone-in-cone 構造の中央部. 不規則な形状の円錐とそれを構成する粒状方解石や網目状の粘土の縁取りを示す.

Fig. 8 Microphotographs of thin section of Specimen B (open Nicol).

1. Uppermost part of crushed cone-in-cone structure.
2. Central part of crushed cone-in-cone structure composed of irregular shaped cones and corrugated clay layers. The cones consist of granular calcite and the clay layers showing irregular meshwork pattern.

粘土分等は結晶の内部にもさまざまな割合で散在する。また方解石にはかなり顕著な劈開が発達したり、不純物の少ない透明な大型の繊維状の結晶が円錐をつくる場合もある。さらにこの第3層の中には二次オーダーの特に小さい円錐が集まっている部分が見られるが、このような部分は小型の円錐のジグザグ配列が極めて密となり、方解石は繊維状というよりは粒状や短柱状を呈するものが目立つ。

〔第4層〕この層は薄片では僅かしか保存されていないが、流理構造や級化構造を示すシルトあるいは泥岩の薄層で上方を断ち切れ、大型の円錐が集まって cone-in-cone 構造を形成している。円錐斜面の縁取りは粘土、シルト、菱鉄鉱などが充填する顕著な鋸歯を伴う。部分的に不純物が少なく透明な大型の繊維状の方解石からなる円錐も見られる。本層は下底が保存されていないので不明であるが、第3層と同じように円錐形成によって相対的に上方を押し上げたように見える。

b) B 標本

この標本は葉層理に平行に保存されているが、長さ 35 mm、厚さ 17 mm の板状のものを薄片に

して観察した。この cone-in-cone 構造は形成された直後、部分的に壊されて泥質岩に覆われたと見られる点で興味深い（図 8-1, 2）。

この cone-in-cone 構造の一次オーダーの円錐は大きさがさまざま、かつ変形して頂部が丸みを帯びたものが多く、その斜面は平滑でなくジグザク状や波状を呈する。円錐の高さは数 mm から 10 数 mm、頂角は 30° ~ 60° である。二次オーダーの円錐もかなり変形したものが多く、山型や爪型を呈し、頂角は 30° 前後とやや鋭角である。円錐をつくる方解石は微細な繊維状を呈するが、粒状の部分もかなり認められる。また繊維状の結晶が円錐の斜面に平行するものと、鉛直方向に平行配列する部分もかなり目立つ。方解石の中の不純物は、粘土分、炭質物、黄鉄鉱などの不透明鉱物と若干の菱鉄鉱が認められる。また円錐斜面の縁取りは、一次オーダーの円錐でも鋸歯状のものは見られず、厚さも変化して不規則な凹凸のある斜面を被覆するが、シルトサイズの石英、不透明鉱物片と粘土分が上方に向かって流動したことを示すものがある。また縁取りが樹枝状や編目を呈する部分もある。さらに興味深い現象がこの構造の

上限に見られ、円錐を覆っているシルト岩は粘土と径0.05~0.1 mm程度の碎屑性の石英、方解石、黄鉄鉱などが葉層理を構成し、破壊された円錐の上部を明らかに切断している。また円錐に生じた割れ目を、これら構成粒子が充填している。構成粒子の方解石片の多くは繊維状や粒状の結晶で、消光させると円錐の頂上部の破片と判断できる。なお、この方解石片がシルト岩中にかなり濃縮した部分もある。

上記の顕微鏡的な特徴と産状から、この cone-in-cone 構造は形成直後に付着していた母岩とともにスランプなどによって機械的に破壊され、円錐をつくっていた方解石はバラバラになり、シルト質泥質岩中に取り込まれたものと判断した。

IV. Cone-in-cone 構造の成因の考察

すでに紹介したように cone-in-cone 構造の成因に関し、これまでさまざまな見解が公表され、長らく論議されてきた。今回取り扱った標本から得られた成因の私見も、公表された多くの見解と完全には合致しない点がある。筆者らはこれまで研究された cone-in-cone 構造には異なった成因のものがかなりあるものと考えている。以下は本研究で取り扱った cone-in-cone 構造の成因の私見である。

1) 炭酸カルシウムの起源

炭酸カルシウムの起源については、多くの研究者が述べているように難問である。筆者らの cone-in-cone 構造を含む地層は泥質岩で、植物化石片以外に二枚貝などの大型化石はほとんど含まれず、堆積相からも炭酸カルシウムが過飽和の暖海水の浅海成堆積物とは考えにくい。小庄砂岩・泥岩部層には球形や棒状の結核や団塊が含まれ、それらの多くは泥灰岩質であり、ある特定の層準の間隙水中に炭酸カルシウムがかなり濃縮されていたと見られる。この炭酸カルシウムの起源は鏡下でも確認された有孔虫、貝形虫、棘皮動物などの石灰質硬組織が当然浮上する。これらの溶解や黄鉄鉱による置換によって、炭酸カルシウムが間隙水中に供給されたと考えられる。

2) 方解石の晶出

炭酸カルシウムの結晶化についてはこれまで多

くの見解が出されている。本標本の場合は CO_2 と pH の制御が重要な役割りを果たし、顕微鏡的特徴から方解石の晶出は泥質岩の堆積中に海水と堆積物との境界面、すなわち海底の堆積面直下で始まり、続成作用の初期まで進行したと結論する。特に堆積物の大きな荷重や、歪みによる応力場の存在を強調する必要性は認められないが、結晶成長は堆積物が未固結の状態で埋没後まで継続したと考えられるので、この時点では当然荷重は受けたが、強い圧力は考えられない。筆者らは炭酸カルシウムの結晶化、方解石の晶出に重要な役割を果たした CO_2 と pH の制御とは、Lalou (1957) による実験的研究や、多くの研究者が指摘しているバクテリアによる有機物の分解に伴う CO_2 分圧の上昇、硫酸塩の還元と H_2S の生成で惹起される pH の上昇といった物理化学的な好条件を考える。その時期については、これまでの研究例では用語の不統一もあるが、続成作用の初期 (early diagenetic) という見解が大勢を占めている。Pantin (1958) は用語の統一を提唱し、syngenetic を周辺堆積物の堆積と同時に、diagenetic を周辺堆積物が未固結の状態、epigenetic を周辺堆積物の固結後と定義した。この表現も曖昧さは大いに残るが、筆者らの標本ではこの定義からすると明らかに syngenetic といって差し支えない。また炭酸カルシウムが初生的にアラゴナイトとして晶出し、その後方解石に再結晶したとする見解については鉱物化学的に十分吟味できなかったが、これまでの研究者の中で初生的に方解石であったとする立場に賛同して論議する。

上記の結論を導いた理由はすでに記載のところでふれたが、重要な点を再度ここに述べる。まず第3層などの上限で cone-in-cone 構造をつくる個々の円錐が、その上を覆う泥質岩の葉層によって断ち切られ、円錐の頂部の破片がこの中に取り込まれているものが認められる点はいわば「不整合」関係で、炭酸カルシウムの結晶化と円錐の形成が堆積とはほぼ同時期、syngenetic に始まったと結論した根拠である。当然のことながら結晶化の始まった時点での周辺の堆積物は、水を十分に含んだ可塑性の状態であった。円錐斜面の縁取りに見られ

る鋸歯の中の流動を示す粒子配列や級化構造は、これを裏付けている。なお、円錐上部の破壊や流理構造などが埋没後の水抜けで形成されたとする考えも全くは否定できない。しかし、葉層中の微細な流理構造や級化構造の連続性などからこれらは堆積初生構造と判断した。

筆者らは方解石の結晶化に CO_2 と pH の制御が重要な役割りを果たしたと考えたが、このような物理化学的な好条件が得られるのには、堆積物が埋没し間隙水中のいわば閉鎖系を考える必要がある。Pantin (1958) が syngenetic に堆積物と海水の境界面で形成されたとする石灰質結核を報告しているように、筆者らは海底面直下の堆積物中でもこのよう好条件をもたらず閉鎖系が生じたのではないかと考える。さらに、Dix and Mullins (1987) はニューヨーク州のデボン系 Hamilton と Genesee 両層群中の有機物に富んだ頁岩中の方解石結核を研究し、方解石の $\delta^{13}\text{C}$ は $-2.0 \sim -2.5$ の範囲で、海底面直下埋没深度 $2 \sim 30$ cm で形成されたものが多数あることを報告している。これも筆者らの考える閉鎖系の生じる可能性を支持する例である。本標本の cone-in-cone 構造の形成が始まった時点での埋没深度を不特定のままに海底面直下としたが、これは円錐頂上部の削剥が極めて少ないことを勘案して数 cm 以下と考えている。

3) 菱鉄鉱の晶出

菱鉄鉱は堆積岩中にはしばしば結核を形成して産出し、汽水から淡水成堆積物中にむしろ良く知られている (Weber *et al.*, 1964; Fritz *et al.*, 1971; Oertel and Curtis, 1972; Gautier, 1982 ほか)。これまでの cone-in-cone 構造の研究でも菱鉄鉱を伴うものがしばしば報じられている。わが国でも堆積岩からの菱鉄鉱の産出報告は少なくない。猪郷は飛騨山地の石炭系石灰岩中の高アルミナ頁岩に菱鉄鉱の存在を (Igo, 1960; 猪郷, 1961), 池上 (1959, 1960) は北海道幾春別の夾炭層中の菱鉄鉱を報告した。その後 Iijima (1972) や松本 (1978), 松本・松久 (1983) の一連の研究がある。特に松本は菱鉄鉱の生成は海成層の場合は埋没深度のかなり深いことを明らかに

している。

筆者らの標本中の菱鉄鉱はすでに述べたように、方解石とともに円錐構造を形成しているものと、それを覆う含鉄縞状岩の葉層中に凝集して含まれるものがある。これらの菱鉄鉱と方解石は syngenetic から続成作用のごく初期にほぼ同時に晶出したと見られ、深い埋没深度は考えにくい。菱鉄鉱晶出の物理化学的条件の熱力学的考察は、Krumbein and Garrels (1952) の古典的研究以来、Huber and Garrels (1953), Huber (1958), Curtis (1967) など多くの研究がある。筆者らは方解石の晶出と同様に、海底面直下の間隙水中で菱鉄鉱晶出に対する物理化学的好条件、すなわち CO_2 の分圧上昇と酸化還元電位 (Eh) の低下がセットとして生じたものと考えた。Cone-in-cone 構造を覆う含鉄縞状岩は方解石の多い部分と、菱鉄鉱の多い部分が薄互層したものであるが、それぞれカルシウムと鉄イオンの供給の増減と、Eh の微妙な変動が頻繁に繰り返したものであろう。なお、還元性下とはいえ黄鉄鉱がこの含鉄縞状岩中に極めて少ないことは、菱鉄鉱晶出の好条件を提供したものと考えられる。

4) 円錐の形成

従来の研究では円錐の形成には、外部からの歪みによる応力や方解石の結晶成長に伴う圧力が関与するという考えがかなり支配的である。著者らの標本では、特にこのような圧力を必要としたとは考えにくく、Woodland (1964) や Franks (1969) らの結論に同調できる。しかし前者が主張するように単に方解石の繊維状結晶が形成されるとき crystal habit, あるいはフランボワイヤン様式の成長が円錐の形成に大きく関与したとする考えにも疑問がある。筆者らが観察した標本の方解石の多くは繊維状結晶であるが、方解石がごく少量、あるいはほとんど関与しないで粘土やシルト、石英片などが円錐を形成している部分も認められるからである。極言すれば方解石が全くなくても円錐は立派に形成されるのである。円錐の形成に伴って上向きの力が生じたことは、円錐斜面に発達する鋸歯やそれに伴う逆断層状のすべり劈開の存在、さらに大きな円錐が成長した部分

では、上位の葉層が湾曲する点などから読みとれる。しかし、これは地面の凍結によって泥が持ち上げられる「霜柱」の現象と同じ程度のものであろう。方解石の繊維状結晶や菱鉄鉱の晶出をもたらし、cone-in-cone 構造形成の引き金として多くの研究者が考える圧力がもし必要ならば、筆者らの標本では海底面での水圧と間隙水中の CO_2 分圧の上昇ぐらいしか思いつかない。

筆者らは方解石と菱鉄鉱による円錐の形成は、周辺の泥質岩の堆積とほぼ同時に開始され、第3層や第4層の大きな円錐が形成されている部分は、上位の含鉄縞状岩の葉層理を上方に湾曲させているので、結晶化は堆積の進行とともに継続したと考えた。その後に方解石細脈が微細な「断層面」に沿って侵入しており、その多くが「正断層」であることは、押し上げられた部分が逆に崩壊(collapse)して陥没が起こったことを示している。これらは syngenetic というより early diagenetic での出来事であったと見られる。これら cone-in-cone 構造形成の一連の過程は、基本的には前述のように冬季の地面に見られる霜柱の形成に類似する現象であろう。

なお、筆者らが気付いた類似の円錐構造としては、珪灰石やアスベストの結晶集合体がある。また宮野 敬博士から見せていただいた南アフリカの青石綿(リーベック閃石)も同様な構造をもっていた。

V. あとがき

本論では五日市層群に見出された cone-in-cone 構造を記載し、その成因を論じたが、改めて外国に於ける研究例の多さに驚嘆した。著者らが引用したものだけでも実にさまざまなタイプのものが認められ、今後日本のものについても大いに研究を進める必要性を痛感した。今回の研究では結晶学的考察、微量元素や同位体組成の解析などが筆者らの能力の範囲外で手が届かなかった。今後機会があればこの点も含めて更なる検討を行ないたい。読者諸賢の御叱正・御教示を切望する次第である。

謝 辞

この研究に用いた大型薄片を注意深く作成された筑波大学地球科学系の須崎和俊技官、X 線回折や鉱物鑑定で御指導を頂いた宮野 敬、木股三善両博士、挿図を作成された小崎四郎技官に感謝する。また、菊池がこの構造を最初に発見した当時指導を受けた(元)桐朋学園の高岡善成博士にもお礼申し上げる。さらに、五日市産の菱鉄鉱結核について有益な助言を頂いた東京学芸大学地学教室の本間久英博士、同じく鉱物の同定に尽力を惜しまなかった中田正隆博士、滞米中に文献の探索に協力された東京工業大学地球惑星科学教室の磯崎行雄博士に感謝する。

文 献

- 足立久男 (1994): 五日市-多摩川帯について. 地質学雑誌, **100**, 249-262.
- Bartrum, J.A. (1941): Cone-in-cone and other structures in New Zealand coals. *New Zealand J. Sci. Tech.*, **22**, 209B-215B.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1987): *Glossary of geology*. Amer. Geol. Inst., Alexandria, Virginia, 887p.
- Bonte, A. (1942): Sur l'origine sédimentaire de la structure cone-in-cone. *Acad. Sci., C.R.*, **214**, 498-500.
- Bonte, A. (1945a): Observations sur les nodules à structure cone-in-cone de l'Arenig de la Montagne Noire. *Soc. Géol. France, Bull., ser. 5*, **15**, 452-478.
- Bonte, A. (1945b): Sur les gradins concentriques propres à structure cone-in-cone. *Acad. Sci., C. R.*, **221**, 507-509.
- Bonte, A. (1952): Réfrections sur le "beef," à propos d'une note de M. L. David. *Soc. Géol. France, Bull.*, **7**, 110-112.
- Bonte, A., Denaeyer, M.E. et Goguel, J. (1947): Les facteurs mécaniques dans la genèse de la structure "cone-in-cone." *Soc. Géol. France, C. R.*, **9**, 182-184.
- Brown, R.W. (1954): How does cone-in-cone material become emplaced? *Amer. J. Sci.*, **252**, 372-376.
- Carstens, H. (1985): Early diagenetic cone-in-cone structures in pyrite concretions. *J. Sed. Petrol.*, **55**, 105-108.
- Cayeux, L. (1935): *Les roches sédimentaire de France, Roches carbonatées*. Masson et Cie, Paris, 463p.
- Cole, G.A.J. (1893): On some examples of cone-in-cone. *Min. Mag.*, **10**, 136-141.
- Curtis, C.D. (1967): Diagenetic iron minerals in some British Carboniferous sediments. *Geo-*

- chi. *Cosmochi. Acta*, **31**, 2109-2123.
- David, L. (1952): Présence de la structure "beef" et "cone-in-cone" dans le Crétacé de l'Est-Constantinois (Algérie). *Soc. Géol. France, C. R.*, **3**, 51-52.
- Denaeyer, M.E. (1939): La reproduction expérimental de la structure cone-in-cone. Ses conséquences au point de vue de la tectonique. *Acad. Sci., C. R.*, **208**, 2004-2006.
- Denaeyer, M.E. (1940a): Sur la microstructure et la composition des "cone-in-cone" du Siegenien métamorphique de Morhet (Ardennes belges). *Soc. belge Géol., Paléo., Hydro., Bull.*, **49**, 119-125.
- Denaeyer, M.E. (1940b): Résultats d'expérience relative à la genèse de la structure "cone-in-cone." *Soc. belge Géol., Paléo., Hydro., Bull.*, **49**, 313-318.
- Denaeyer, M.E. (1940c): Les schists arénigiens à structure "cone-in-cone" de la tranchée de Sart-Bernard (province de Namur). *Soc. belge Géol., Paléo., Hydro., Bull.*, **49**, 318-326.
- Denaeyer, M.E. (1945): Essai d'une théorie mécanique de la structure cone-in-cone. *Soc. Géol. France, Bull., ser. 5*, **15**, 141-160.
- Denaeyer, M.E. (1946): Sur les cone-in-cone et les septaria. *Acad. Sci., C. R.*, **223**, 953-954.
- Denaeyer, M.E. (1947-48): Les gisements de cone-in-cone de France de Grand Bretagne. *Soc. belge Géol., Paléo., Hydro., Bull.*, **56**, 21-46; 382-411.
- Denaeyer, M.E. (1952): Sur la signification des "filons" transversaux à structure "beef" et "cone-in-cone." *Soc. Géol. France, C. R.*, **8**, 138-140.
- Denaeyer, M.E. (1954): Sur l'existence de "filons" de calcite à structure "beef" et "cone-in-cone." *XIX Congr. Géol. Intern. Alger 1962, C. R., sec. 13*, fasc. **15**, 387-396.
- Dix, G.D. and Mullins, H.T. (1987): Shallow, subsurface growth and burial alteration of Middle Devonian calcite concretions. *J. Sed. Petrol.*, **57**, 140-152.
- Durrance, E.M. (1965): Cone-in-cone structures; A new investigation. *Geologists' Assoc. Proc.*, **76**, 83-90.
- Endo, Y. (1976): Morphological features and growth process of dendritic pyrite from Ani Mine, Akita Prefecture. *Prof. T. Takeuchi Mem. Vol.*, 15-18.
- Füchtbauer, H. (1971): Cone-in-cone, a low-nucleation cement in marls. In Bricker, O.P. ed.: *Carbonate cements. John Hopkins Study in Geology*, **19**. John Hopkins Press, Baltimore, Maryland, 193-198.
- Füchtbauer, H. (1974): *Sediments and sedimentary rocks 1*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 464p.
- 藤本治義 (1926): 関東山地東縁部の地質学的考察. 地質学雑誌, **33**, 119-134.
- Franks, P.C. (1969): Nature, origin, and significance of cone-in-cone structures in the Kiowa Formation (Early Cretaceous), North-central Kansas. *J. Sed. Petrol.*, **39**, 1438-1454.
- Fritz, P., Binda, P.L., Folinsbee, F.E. and Krouse, H.R. (1971): Isotopic composition of diagenetic siderites from Cretaceous sediments in western Canada. *J. Sed. Petrol.*, **41**, 282-288.
- Gage, M. and Bartrum, J.A. (1942): Cone-in-cone and ring-fracture in coal from Grey-mouth, New Zealand. *New Zealand J. Sci. Tech.*, **24-B**, 86B-98B.
- Gautier, D.L. (1982): Siderite concretions: Indicators of early diagenesis in the Gammon shale (Cretaceous). *J. Sed. Petrol.*, **52**, 859-871.
- Gay, R. (1942): Théorie de la formation de la structure cone-in-cone. *Acad. Sci., C. R.*, **214**, 500-502.
- Gilman, R. and Metzger, W.J. (1967): Cone-in-cone concretions from western New York. *J. Sed. Petrol.*, **39**, 1438-1454.
- Gresley, W.S. (1894): Cone-in-cone: How it occurs in the Devonian Series in Pennsylvania, U.S.A., with further details of its structure, varieties, etc. *Quart. J. Geol. Soc. London*, **50**, 731-739.
- Hendricks, T.A. (1937): Some unusual sepecimens of cone-in-cone in manganiferous siderite. *Amer. J. Sci.*, **33**, 458-561.
- Herrmann, R. (1930): Tutenmergel und Nagelkalk. *Leopoldina (Walther-Festschrift)*, **6**, 125-158.
- 堀田信子・本間久英 (1988): 東京・五日市盆地中期中新統産二枚貝化石を交代した菱鉄鉱. 東京学芸大学紀要, 第4部門, 数学・自然科学, **40**, 177-181.
- Huber, N.K. (1958): The environmental control of sedimentary iron minerals. *Econ. Geol.*, **53**, 123-140.
- Huber, N.K. and Garrels, R.M. (1953): Relation of pH and oxidation potential to sedimentary iron mineral formation. *Econ. Geol.*, **48**, 337-357.
- Igo, H. (1960): First discovery of non-marine sediments in the Japanese Carboniferous. *Proc. Japan Acad.*, **36**, 498-502.
- 猪郷久義 (1961): 一ノ谷層 (石炭系) に認められた非整合と礫土質頁岩について. 地質学雑誌, **67**, 261-273.
- Iijima, A. (1972): Latest Cretaceous-Early Tertiary lateritic profile in northern Kitakami Massif, northeast Honshu, Japan. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. 2*, **18**, 325-370.
- 池上茂雄 (1959): 北海道三笠市幾春別夾炭層中に産する菱鉄鉱質鉄質岩に就いて. 北海道学芸大学紀要, 第

- 2部, 10, 166-173.
- 池上茂雄 (1960): 北海道三笠市幾春別, 奔別地域の菱鉄鉱質鉄質岩に就いて. 北海道学芸大学紀要, 第2部, 11, 159-173.
- 入月俊明・高橋雅紀・田中裕一郎・尾田太良 (1990): 五日市盆地新第三系の地質と年代. 地質学雑誌, 96, 759-770.
- 石田吉明・樽良平・川北敏章・大森昌衛・五日市盆地団研古生物研究グループ (1983): 五日市盆地の中新統より産出したストロマトライト化石について. 日本地質学会第90年学術大会講演要旨集, 275.
- Ito, M. (1989): Itsukaichimachi Group: A Middle Miocene strike-slip basin-fill in the south-eastern margin of the Kanto Mountains, central Honshu, Japan. In Taira, A. and Masuda, F. eds.: *Sedimentary facies in the active plate margin*. Terra Pub., Tokyo, 659-673.
- 五日市盆地団研グループ (1981): 五日市盆地の新第三系. 地球科学, 35, 183-194.
- 五日市盆地団研グループ (1983): 五日市盆地中部中新統産の化石クモヒトデ. 地球科学, 37, 219-224.
- 五日市盆地団研古生物研究グループ (1985): 五日市盆地中部中新統産の化石クモヒトデ (第2報). 地球科学, 39, 186-194.
- 金子史郎 (1955): 東京都五日市第三系の地質構造. 地質学雑誌, 61, 471-480.
- 菅野三郎・新井重三 (1964): 五日市盆地の第三系について. 秩父自然科学博物館研究報告, 12, 1-15.
- Kanno, S. (1967): Molluscan fauna from the Miocene Formation in the Itsukaichi Basin, Tokyo Prefecture. *Prof. H. Shibata Mem. Vol.*, 396-406.
- Keyes, C.R. (1896): Note on the nature of cone-in-cone. *Iowa Acad. Sci., Proc.*, 3, 75-76.
- 木村敏雄・竹内均・片山信夫・森本良平編 (1973): 新版地学辞典Ⅲ. 古今書院, 799p.
- 木下亀城 (1971): 岩石鉱物辞典. 風間書房, 1213p.
- Krumbein, W.C. and Garrels, R.M. (1952): Origin and classification of chemical sediments in term of pH and oxidation-reduction potentials. *J. Geol.*, 60, 1-33.
- Kurihara, K. (1980): Miocene foraminiferal fauna of the Itsukaichimachi Group of the Itsukaichi Basin, Kanto region, central Japan. *Prof. S. Kanno Mem. Vol.*, 233-239.
- Lalou, C. (1957): Studies on bacterial precipitation of carbonates in sea water. *J. Sed. Petrol.*, 27, 190-195.
- Lhoest, A. (1962): À propos de structures "cone-in-cone" dans les charbons. *Soc. belge Géol., Paléo., Hydro., Bull.*, 71, 146-148.
- Linck, G. (1930): Tutenmergel und Nagelkalk. *Chemie der Erde*, 6, 227-238.
- Linck, G. und Noll, W. (1928): Über Tutenmergel. *Chemie der Erde*, 3, 699-721.
- Marsh, O.C. (1868): On the origin of the so-called lignites or epsomite. *Amer. Assoc. Adv. Sci., Proc.*, 16, 135-143.
- 松本良 (1978): 炭田地域における自生炭酸塩鉱物及び炭酸塩岩の生成段階とその起源. 地質学論集, 15, 35-52.
- 松本良・松久幸敬 (1983): 酸素同位体比に基づく炭酸塩団塊の生成深度の推定. 月刊海洋科学, 15, 753-760.
- Morawietz, F.H. (1961): Zur Genese des Nagelkalkes. *Neues Jahrb. Geol., Pal.*, 112, 229-249.
- Müller, A.H. (1962): Fossil oder Pseudofossil? *Geol. Jahrg.*, 11, 1204-1213.
- 中田正隆・高橋康明・本間久英・藤井隆 (1984): 東京西部, 五日市盆地の第三系中の沸石. 地質学雑誌, 90, 311-318.
- Noll, W. (1931): Über Nagelkalke und neurartige Kegelbildungen aus dem Thüringer Unterkeuper. *Zbl. Min.*, A, 169-181.
- Oertel, G. and Curtis, C.D. (1972): Clay-ironstone concretion preserving fabrics due to progressive compaction. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83, 2597-2606.
- 大森昌衛編 (1977): 東京の地質をめぐって. 日曜の地学, 4. 築地書館, 184p.
- Pantin, H.M. (1958): Rate of formation of a diagenetic calcareous concretion. *J. Sed. Petrol.*, 28, 366-371.
- Pettijohn, F.J. (1957): *Sedimentary rocks*. 2nd ed. Harper & Brothers, New York, 718p.
- Pettijohn, F.J. (1975): *Sedimentary rocks*. 3rd ed. Harper & Row, New York, 628p.
- Raiswell, R. (1971): The growth of Cambrian and Liassic concretions. *Sedimentology*, 17, 147-171.
- Reis, O.M. (1903): Ueber Stylolithen, Dutenmergel und Landschaftenkalk (Anthrakolith zum Theil). *Geol. Jahresh. Kgl. bayr. Oberbergamt in München*, 1902, 157-279.
- Richardson, W.A. (1923): Shales-with- 'Beef,' a sequence in the Lower Lias of the Dorset coast. In Lang, W.D., Spath, L.F. and Richardson, W.A. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 79, 47-98.
- 酒井彰 (1987): 五日市地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 75p.
- Schöone-Warnefeld, G. und Dahm, H. (1962): Tutenmergel im Ruhrkarbon. *Fortschr. Geol. Rheinl. und Westf.*, 3, 643-646.
- Schaub, B.M. (1937): The origin of cone-in-cone and its bearing on the origin of concretions and septalium. *Amer. J. Sci.*, 5th Ser., 34, 331-334.
- Sorby, H.C. (1860): On the origin of "cone-in-cone." *British Assoc. Adv. Sci., Report of 29th meeting, 1859, Trans. Sec., Geol.*, 124.
- Sorby, H.C. (1908): On the application of quantitative methods to the study of the structure and history of rocks. *Quart. J. Geol. Soc.*

- London, 64, 171-233.
- Steinmann, G. und Hock, H. (1912): Das Silur und Cambrium des Hochlandes von Bolivia und ihr Fauna. *Neues Jahrb. Mineral., Geol., Pal., Beil. B.*, 34, 176-256.
- Tarr, W.A. (1922): Cone-in-cone. *Amer. J. Sci., Ser. 5*, 4, 199-213.
- Tarr, W.A. (1932): Cone-in-cone. In Twenhofel, W.H.: *Treatise on sedimentation*. 2nd ed. Williams and Wilkins Co., Baltimore, 716-733.
- Thoral, M. (1942): À propos de la structure cone in cone. *Soc. Géol. France, C. R.*, 13, 144-146.
- Twenhofel, W.H. (1950): *Principles of sedimentation*. 2nd ed. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 673p.
- Uzdowski, H.E. (1963): Die Genese der Tutenmergel oder Nagelkalke (cone-in-cone.) *Beitr. Min. Petrol.*, 9, 95-110.
- Weber, J.N., Williams, E.G. and Keith, M.L. (1964): Paleoenviromental significance of carbon isotopic composition of siderite nodules in some shales of Pennsylvanian age. *J. Sed. Petrol.*, 34, 814-818.
- Weller, J.M. (1960): *Stratigraphic principles and practice*. Harper & Brothers, New York, 725p.
- Woodland, B.G. (1964): The nature and origin of cone-in-cone structure. *Fieldiana: Geology*, 13, 1-305.
- Zaritsky, P.V. (1963): The time of formation of carbonates with cone-in-cone structures. *Dokl. Akad. Nauk, S.S.S.R.*, 151, 133-135. (in Russian)

(1997年3月27日受付, 1997年5月19日受理)