
化石硬組織の続成変質と 埋没環境解析

研究課題番号 07454122

平成7・8年度科学研究費補助金 基盤研究(B)(2)
研究成果報告書

平成9年3月

研究代表者 鈴木 清 一
(福岡教育大学教育学部教授)

はしがき

古生物学は、生物の歴史と生物の活動舞台である地球表層環境の変遷を解明する学問である。研究材料は、無論、化石であるが、化石は「過去の生物（古生物）の遺物」であって、古生物そのものではない。したがって、現生生物と同等の情報量を化石に期待することはできない。古生物のもつ情報は「死」によって失われ、さらに「死」後も、化石として我々の目に触れるまで、多種多様なダメージを被ることが普通である。それ故に、化石に残された情報は大変貴重なものであり、古生物学研究従事者にはそれを最大限に読み取る努力が求められる。このような観点から、近年の古生物学研究は伝統的な記載・分類の枠を越えて、多彩な領域に及んでいる。“化石生成論”と訳されるタフォノミー（taphonomy）はその例である。これは古生物の死後、化石として保存されるまでの過程に受けた種々の影響とその要因を研究する分野である。化石化作用（fossilization）と内容的にほぼ同義である。いずれの用語を用いるにせよ、この過程は古生物の死から堆積物として地層に埋没するまでの過程と、埋没後の過程に細分される。本研究は後者の過程を扱ったものである。この埋没過程に生ずる現象は続成作用として、主に堆積学の分野で検討されてきたが、化石は脇役的な位置付けにすぎなかったように思われる。本研究ではこれを主役として扱い、古生物学的な情報を引き出すとともに、堆積学へも貢献しようとするものである。なお、生物の保有する硬組織は組成的に極めて多様であるにもかかわらず、今回対象としたのは、軟体動物殻体を主とする炭酸塩質硬組織の化石である。この理由は、1) 硬組織として炭酸塩を保有する生物の種数が最も多く、化石も豊富である、2) 元来、炭酸塩の種類が多様であり（アラレ石、高マグネシウム方解石、低マグネシウム方解石）、埋没環境の変化に対する各炭酸塩の振る舞いは異なっている、3) シリカなど他の鉱物による多様な交代現象が知られている、からである。

「研究成果」

目 次

I. 序論	1
II. 試料と方法	2
1. 試料	2
2. 方法	5
3. ルミノスコープ ELM-3RX (カソードルミネッセンス発光装置) の利用と操作法	5
III. 碎屑岩に含まれる炭酸塩化石の保存と変質	11
1. 炭酸塩鉱物の安定性	11
2. 母岩セメントと化石硬組織の保存	13
3. 炭酸塩化石の他鉱物による交代現象	14
4. カソードルミネッセンス像の観察	24
IV. 化石硬組織の産状と続成変質	31
1. 芦屋層群 (漸新統・福岡県北東部—山口県下関市)	31
2. 万田層群勝立累層 (中部始新統・福岡県大牟田市一帯)	41
3. 杵島層群杵島累層 (上部始新統・佐賀県杵島郡北方町一帯)	45
4. 下島層群 (中部始新統・熊本県牛深市一帯)	52
5. 西彼杵層群七釜砂岩層 (上部始新統・長崎県西彼杵郡西海町一帯)	58
6. 豊西層群吉母累層 (下部白亜系・山口県下関市吉母—豊浦町室津)	60
7. 出雲層群 (中部中新統・島根県松江市—出雲市)	66
8. 訓縫層 (中部中新統・北海道山越郡長万部町紋別川上流域)	73
9. 上部蝦夷層群浦河累層 (上部白亜系・北海道浦河市乳呑川上流域)	77

「研究組織」

研究代表者： 鈴木 清一（福岡教育大学教育学部教授）

研究分担者： 上野 禎一（福岡教育大学教育学部助教授）

研究分担者： 小山内康人（福岡教育大学教育学部助教授）

「研究経費」

平成7年度	5, 100千円
平成8年度	900千円
計	6, 000千円

「研究発表」

ア. 学会誌等

- ・鈴木清一・都郷義寛・疋田吉識：軟体動物における殻層とその機能. *海洋生物の石灰化と硬組織*（和田浩爾・小林巖雄，編），東海大学出版会，東京，179 - 190. 1996年8月.

イ. 口頭発表

- ・鈴木清一・都郷義寛・疋田吉識・島本昌憲：原始腹足類サザエの殻体構造とその発現期. 日本古生物学会1996年年会（大阪市立大学）. 1996年1月.
- ・鈴木清一・荷宮嗣麿・石崎 陽：珪化貝化石の新産地. 日本地質学会第103年年会（東北大学）. 1996年4月.
- ・鈴木清一：貝殻微細構造研究の歩みと展望. 地学団体研究会第50回総会シンポジウム（千葉県教育会館）. 1996年5月.
- ・鈴木清一：軟体動物の殻体構造とその分化. 第5回マリンバイオテクノロジー研究会（東北大学）. 1996年5月.
- ・鈴木清一・都郷義寛：ヒレシャコガイ（二枚貝）殻体における交差板構造の変異. 日本古生物学会1997年年会（京都大学）. 1997年1 - 2月.

I. 序 論

化石硬組織は地層埋没中に様々な変質作用や変形作用を被り、その内部の微細構造を消失させることが多い。生物の硬組織は、組織の種類が豊富であるばかりでなく、組成的にも多種多様である。炭酸塩硬組織は無脊椎動物の他、脊椎動物、植物など生物界に最も広く分布し、化石硬組織としても最も一般的に産出するものである。このため、炭酸塩硬組織を用いた古生物学的研究（微細構造に基づく系統分類、進化論など）や古環境学的研究（同位体組成に基づく環境解析）が行なわれている。一方で、炭酸塩硬組織は、通常の続成環境下では溶解、再結晶化、他鉱物による交代などで、容易に内部構造を損失してしまうことも良く知られている。とくに国内に分布する後期中生界、新生界では、含化石層が通常碎屑岩類であることが多く、この傾向はより顕著にみられる。

本研究の目的は、微細構造の研究など近代古生物学の研究方法に利用できる保存良好な化石標本を合理的に入手するため、化石化のメカニズムと続成環境の関連を包括的に把握しようとするものである。今回はとくに、アラレ石質殻体の方解石化を含む炭酸塩鉱物の変化と母岩セメントの関係、内部構造保存を伴う炭酸塩硬組織のシリカや緑泥石、海緑石、黄鉄鉱などによる交代作用に焦点をあて、流体相の挙動という観点から、母相（母岩）－流体相－変質相（化石）間の元素移動のメカニズムおよびその地質学的背景（特に埋没環境）を解明することを主目的とする。

本研究の主な特色は、続成作用に伴う化石化作用について、一般論としての化石の崩壊過程を対象とするのではなく、“特殊な”化石保存のメカニズムを把握することにある。しかし、これまでの検討から、この“特殊性”は国内の第三系にかなり普遍的に認められ、化石化の主要な現象の一つとみなされる。また、実体を直接的に検出することができない流体相を、母相や変質相の化学分析、両相境界部の微視的観察など多角的な方面からのアプローチを行い、総合的に検討しようとする試みは、極めてユニークなものといえる。さらに、このような低温低圧下における地球化学的研究は環境科学との関連が注目され、今後の発展が期待される研究領域と思われる。

国内外において、化石化作用の研究は、主に古生態学的立場から生息環境復元を目的に、産状や形態保存などに関して検討されており、埋没後の続成変質についての研究例は少ない。一方、堆積学分野からの化石硬組織の検討は、石油貯溜岩として重要な炭酸塩岩の形成過程の研究に付随して行なわれている。このため、化石－セメント質－母岩粒子－流体相間では、主に炭酸塩の反応相と関連微量元素移動の問題に限定される傾向がある。また、その早期埋没環境として熱帯（亜熱帯）の生物礁を前提としている。しかし、上述したように、本研究の目的は温帯域において通常碎屑岩類に含まれる炭酸塩質化石の続成変化とその環境解析であり、必ずし

も充分な解明がなされていないのが現状である。

II. 試料と方法

1. 試料

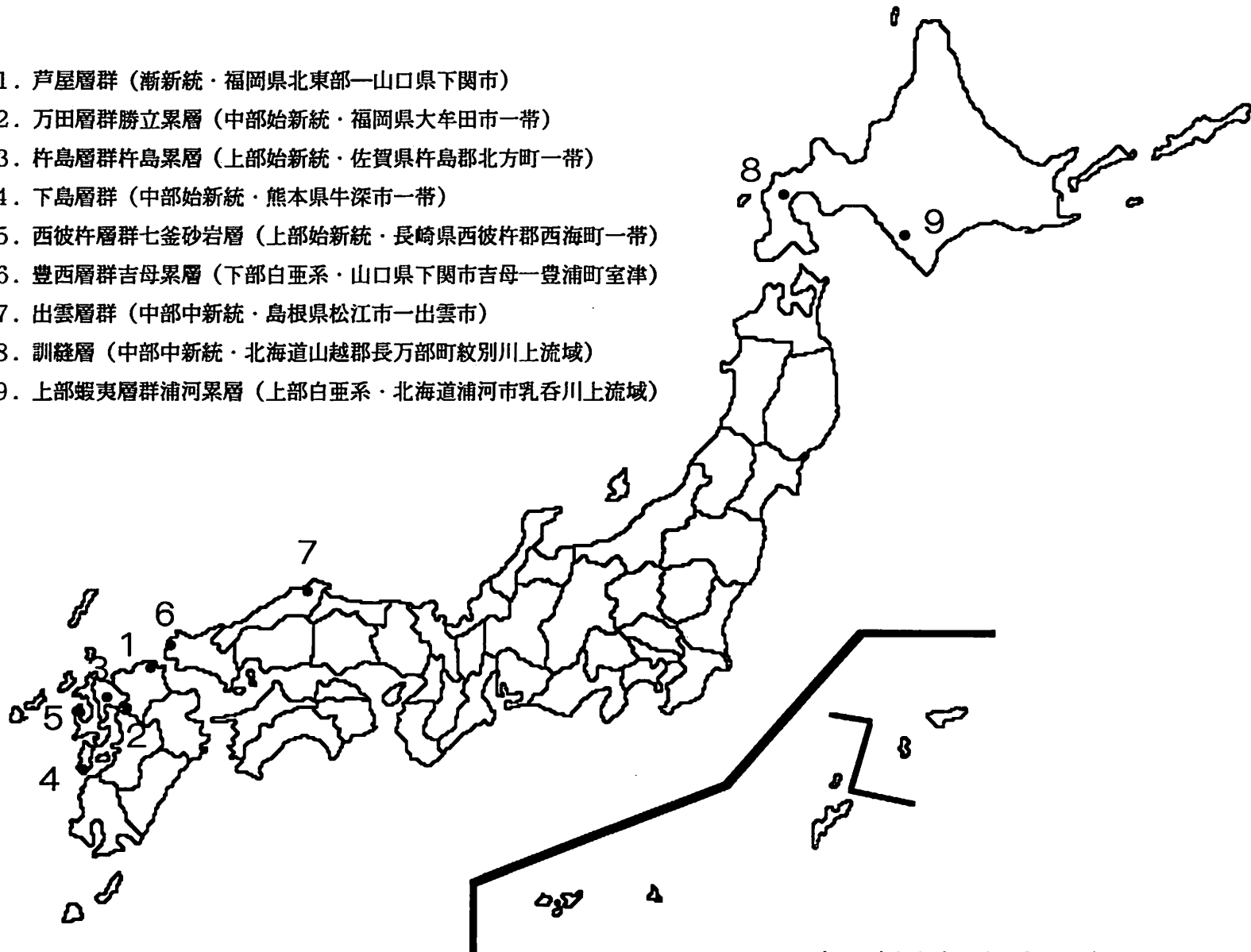
今回は、下部白亜系から中部中新統に渡る以下の地層群を調査し、軟体動物殻体を主とする化石の保存状態と母岩のセメント質の特徴について記載した。

1. 芦屋層群（漸新統・福岡県北東部—山口県下関市）
2. 万田層群勝立累層（中部始新統・福岡県大牟田市一帯）
3. 杵島層群杵島累層（上部始新統・佐賀県杵島郡北方町一帯）
4. 下島層群（中部始新統・熊本県牛深市一帯）
5. 西彼杵層群七釜砂岩層（上部始新統・長崎県西彼杵郡西海町一帯）
6. 豊西層群吉母累層（下部白亜系・山口県下関市吉母—豊浦町室津）
7. 出雲層群（中部中新統・島根県松江市—出雲市）
8. 訓縫層（中部中新統・北海道山越郡長万部町紋別川上流域）
9. 上部蝦夷層群浦河累層（上部白亜系・北海道浦河市乳呑川上流域）

この他、次の地層群の化石についても予察的な検討を行なっているので、総括的考察においてはそれらのデータも併用した：

- 1) 姫浦層群（上部白亜系・熊本県天草郡竜ヶ岳町）；
- 2) 中部蝦夷層群三笠累層（上部白亜系下部・北海道三笠市）；
- 3) 日置層群黄波戸累層（漸新統・山口県豊浦郡豊北町）；
- 4) 益田層群（中部中新統・島根県益田市）；
- 5) 備北層群（中部中新統・広島県庄原市）；
- 6) 深川層群幌加尾白利加累層（鮮新統・北海道雨竜郡沼田町）；
- 7) 宮崎層群児湯累層高鍋部層（下部更新統・宮崎県児湯郡高鍋町）；
- 8) 姫島累層（下部更新統・大分県東国東郡姫島村）；
- 9) 多賀層群富岡累層（下部更新統・福島県双葉郡広野町）；
- 10) 瀬棚累層（下部更新統・北海道山越郡長万部町ボクサタナイ）；
- 11) 更別層（下部更新統・北海道稚内市抜海）。

1. 芦屋層群（漸新統・福岡県北東部—山口県下関市）
2. 万田層群勝立累層（中部始新統・福岡県大牟田市一帯）
3. 杵島層群杵島累層（上部始新統・佐賀県杵島郡北方町一帯）
4. 下島層群（中部始新統・熊本県牛深市一帯）
5. 西彼杵層群七釜砂岩層（上部始新統・長崎県西彼杵郡西海町一帯）
6. 豊西層群吉母累層（下部白垩系・山口県下関市吉母—豊浦町室津）
7. 出雲層群（中部中新統・島根県松江市—出雲市）
8. 訓縫層（中部中新統・北海道山越郡長万部町紋別川上流域）
9. 上部蝦夷層群浦河累層（上部白垩系・北海道浦河市乳呑川上流域）



主要調査地域一覽

主要調査地 層序表

			長崎・熊本西部		福岡南部・佐賀		関門・北九州		島 根		北 海 道	
新第三系	鮮新統								出雲層群 松江累層 布志名累層 来待累層		黒松内層	
	八雲層											
	訓縫層											
古第三系	漸新統	上部	西彼杵層群 呼子ノ鼻砂岩層 釜敷山互層 釜敷山凝灰岩層 七釜砂岩層 福島砂岩層 坂ノ浦砂岩層		杵島層群 畑津頁岩層 畑津砂岩層 行合野砂岩層 佐里砂岩層 杵島層	芦屋層群 脇田層 坂水層 山鹿層						
		下部										
	始新統	上部							相知層群			
		中部							坂瀬川層群			
			下島層群 砥石層 志岐山層 福運木層	万田層群 四ツ山累層 勝立累層								
	下部											
	暁新統											
	白亜系	上部										
		下部				吉母累層						
									蝦夷層群 上部 乳香川累層 浦河累層 中部 絵笛累層 歌笛累層 下部 ベチャリ累層 ツケナイ累層 空知層群			

2. 方 法

採集試料は常法により薄片を作製し、偏光顕微鏡観察を行なった。一部は化石殻体の変質状況と母岩セメント質の形成過程の検討のため、カソードルミネッセンス発光装置（プレミアアメリカンテクノロジー社製「ニュークライド ルミノスコープ ELM-3RX 型」）を偏光顕微鏡に装着して、カソードルミネッセンス像（CL像）観察を行なった（装置の利用法は別記する）。微小領域における変質状況の検討には、走査型電子顕微鏡（日本電子製 JEOL-JSM 5200）（SEM）による観察を行なった。鉱物同定には粉末X線回折法を用いた他、炭酸塩鉱物同定のために、必要に応じて、フィーグル氏液染色法、マイゲン染色法（以上、アラレ石の識別）、アリザリンレッドS染色法（高Mg方解石の識別）、チタンイエロー染色法（ドロマイトの識別）などを行なったこともある。なお、電顕下でのアラレ石同定のため、マイゲン染色応用法（Suzuki et al., 1993）を使用した。また、構成鉱物の元素組成はエネルギー分散型元素分析装置（日本電子製 JEOL-JED 2000）（EDS）により測定した。

3. ルミノスコープ ELM-3RX（カソードルミネッセンス発光装置）の利用と操作法

A. 原 理

カソードルミネッセンス（CL）はある物質に電子線を照射した際に生ずる発光現象である。紫外光から赤外光までを含むが、一般には可視光領域の観察、分光分析に利用する。原理的には、電子線照射による刺激で物質内の電子が励起状態に遷移し、再び基底状態に戻る時のエネルギー差が光として放出されることに由来する。主な発光要因として、結晶中に含まれる不純物質、結晶に内在する構造欠陥、試料温度などが指摘されている。地質学的に期待される応用領域として、次の項目が挙げられている（塚本, 1994）；1）鉱物種の同定、2）碎屑性鉱物と自生鉱物の識別、3）鉱物の累帯構造の解析、4）ファブリック解析、5）続成過程で生じた組織・構造の解析、6）圧力溶解に伴う空隙率減少の評価、7）後背地解析、8）流体抱有物と鉱物内部組織の関係の検討、9）同位体分析試料の事前鮮度評価。

CL発光装置には、冷陰極型、熱陰極型、SEM/EPMA付属型の3タイプがある。このうち、冷陰極型は他のタイプと電子銃（電子線照射源）の様式が異なり、小型であるために光学顕微鏡に装着して用いることができる。ルミノスコープはこのタイプの装置である。本装置の利点は、1）CL像と光学顕微鏡像が容易に比較できること、2）取扱が容易であること、3）大型試料を観察できること、などである。一方で、1）電流値が真空度に依存して安定しない、2）試料面に対して電子線を低角で照射するため、CL輝度にむらが生じる、3）加速電圧が低い（通常、5-15 kV）ため、一部の珪酸塩鉱物など発光の弱い鉱物には不向きである、などの難点も指摘

されている。

B. 試料

- a. 試料形状：表面が平滑であること。鏡面研磨が望ましいが、# 3000以上で研磨されたものであれば、観察可能。薄片試料、片面研磨試料（チップ）とも利用できるが、偏光観察と併用できる薄片が望ましい。チップの場合、厚さは5 mm以下にしないと観察不可（電子ビームが表面に照射しない）。
- b. 試料サイズ：50 mm × 75 mm まで可能。通常の岩石薄片の場合、2枚同時に装着できる。
- c. 使用不可：接着剤等の可燃物や高温で気化し易い物質にビームが直接照射される恐れのある試料は絶対に使用しないこと！ 接着剤がはみ出ている薄片の場合、はみ出し部位にビームがあたらないよう、充分注意する。

C. 使用方法

<注意事項>

- 1) このマニュアルの方法に従って操作すること。
- 2) 本体操作パネルのスイッチ類は基本操作で指示されたもの以外に触れないこと。
- 3) チャンバー部のソレノイドバルブには絶対触れないこと。
- 4) リークバルブを閉じる時は、きつく締めすぎないこと。
- 5) トップウインドーの鉛ガラスに衝撃をあたえないこと。特に対物レンズをぶつけないように注意する。
- 6) 上記（B）の条件を満たさない試料は挿入しないこと。
- 7) 応用操作でビーム条件を変更する場合、電圧と電流の積算値が "12" を超えてはいけない！（例えば、10kVの時は最大電流値は1.2 mA である）
- 8) 試料交換時は綿手袋をはめて、油脂類、水等の付着を防ぐ。

C-1. 起動前の点検

1) チャンバー部

- a. チャンバーが顕微鏡試料台に固定されている。試料台の回転不可。
- b. メインバルブは閉じている（取っ手が前後方向を向き、導管と直交している）。

2) 本体操作パネル

- a. METER FUNCTION ダイアル：VOLTAGE (30kV) 位置。
- b. メインダイアル：OFF 位置。
- c. ビームスイッチ：BEAM OFF 側。
- d. VALVE CONTROL/LIMIT ダイアル：500 位置。
- e. 電圧 (kV) ダイアル：10 kV 位置。
- f. 電流 (mA) ダイアル：0.5 mA 位置。

g. FOCUS ダイアル：25～50の中間位置。

C-2. 起動

- 1) ロータリーポンプのスイッチをONにする。→排気音とともに、白煙が発生するが、故障ではない。
- 2) チャンバー部のリークバルブが閉じていることを確認の上、チャンバーカバーを軽く押し付けながら、メインバルブを開く。→排気音有り。
- 3) 本体操作パネルのメインダイヤルスイッチをポンプダウンに合わせる。→表示盤のランプが点灯し、気圧計の針が左側に移動し始める。また、顕微鏡の光源はこの操作で使用可能となる。→約20分放置。
- 4) 気圧が30 (millitorr) 以下になっていることを確認したら、ビームオンにする。→電圧計が作動して10kVを示し、試料は電子線が照射されて既に発光している。
- 5) メインダイヤルスイッチをレギュレイトッドに合わせる。→本体内部のファンが作動し、バルブコントロールダイヤル上部のランプが、LOW (黄) から REG. (緑) を経由してHIGH (赤) に至り (気圧が 50+ まで上昇)、再び REG.に戻り安定する。→安定しなければ、メインダイヤルを一度ポンプダウンに戻し、気圧が30以下になってから再度レギュレイトッドにする。安定するまで繰り返す。

C-3. 観察・写真撮影

- 1) トップウィンドーを覗きながら、偏向磁石を操作して、鏡筒直下の位置でビームスポットサイズを12mm (左右) × 8mm (前後) 程に調整する。→スポットサイズを絞り過ぎると高熱が発生し、接着剤等が燃焼して装置が故障する！
- 2) 対物レンズは専用の長作動レンズを使用する。→×4 と×10が使用可能であるが、×10は偏向磁石にぶつかることがあるので、切り替えの際には充分留意すること。
- 3) 試料移動ツマミ (X軸とY軸) を回して、観察位置に合わせる。→長時間 (数分) ビームスポットを固定すると、1) と同様に高温となるので、時々移動すること。
- 4) 写真撮影にはASA400以上の高感度フィルムを使用する。
- 5) 専用撮影装置を取り付け、通常の方法で撮影する (露光時間はASA400のフィルムで10～50秒かかる)。→1分以上かかる場合は、一旦ビームを切り、試料を十分に冷却した後に撮影し直す (この場合でも、2分以上かかるようであれば、撮影を中止する)。
- 6) CL像撮影時には、顕微鏡の光源を切っておく。また、アナライザー (上方ニコルを引き抜いておく)。

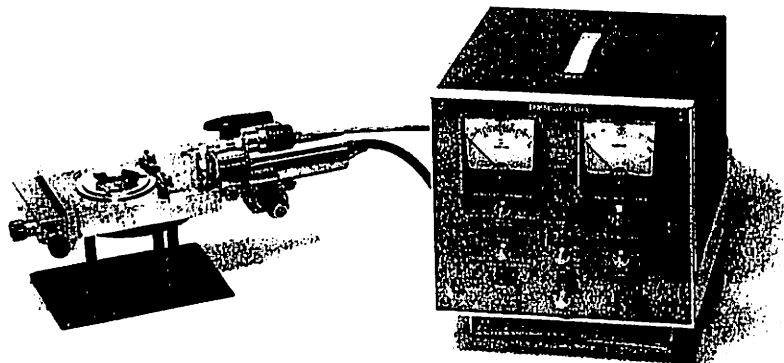
7) CL像以外の撮影（通常の偏光顕微鏡像撮影）時には、ビームを切っておく。

C-4. 試料交換

- 1) ビームオフにして、メインダイヤルスイッチをポンプダウンにする。
- 2) メインバルブを閉じ、リークバルブをゆっくり開ける。
- 3) チャンバーカバーを引き出し、試料を交換する。
- 4) 起動操作（C-2）の2）～5）を行う（”3）”の放置時間は数分程度）。

C-5. 停止

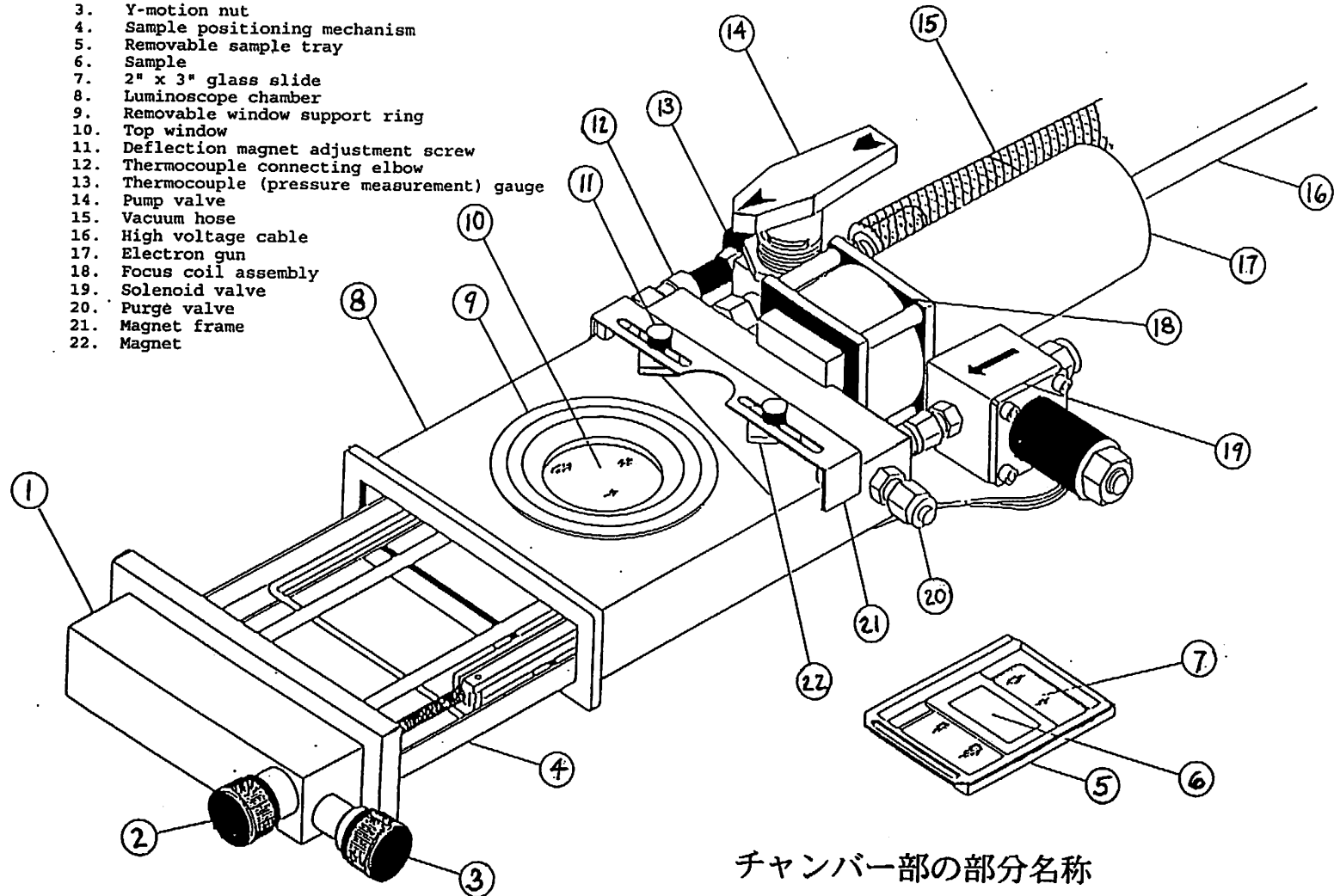
- 1) ビームオフにして、メインダイヤルスイッチをポンプダウンにする。
- 2) メインバルブを閉じ、リークバルブをゆっくり開ける。
- 3) 試料を取り出し、チャンバーカバーを閉じる。
- 4) メインダイヤルスイッチをオフにし、ロータリーポンプのスイッチを切る。
- 5) コンセントプラグを抜き、顕微鏡にカバーをかける。



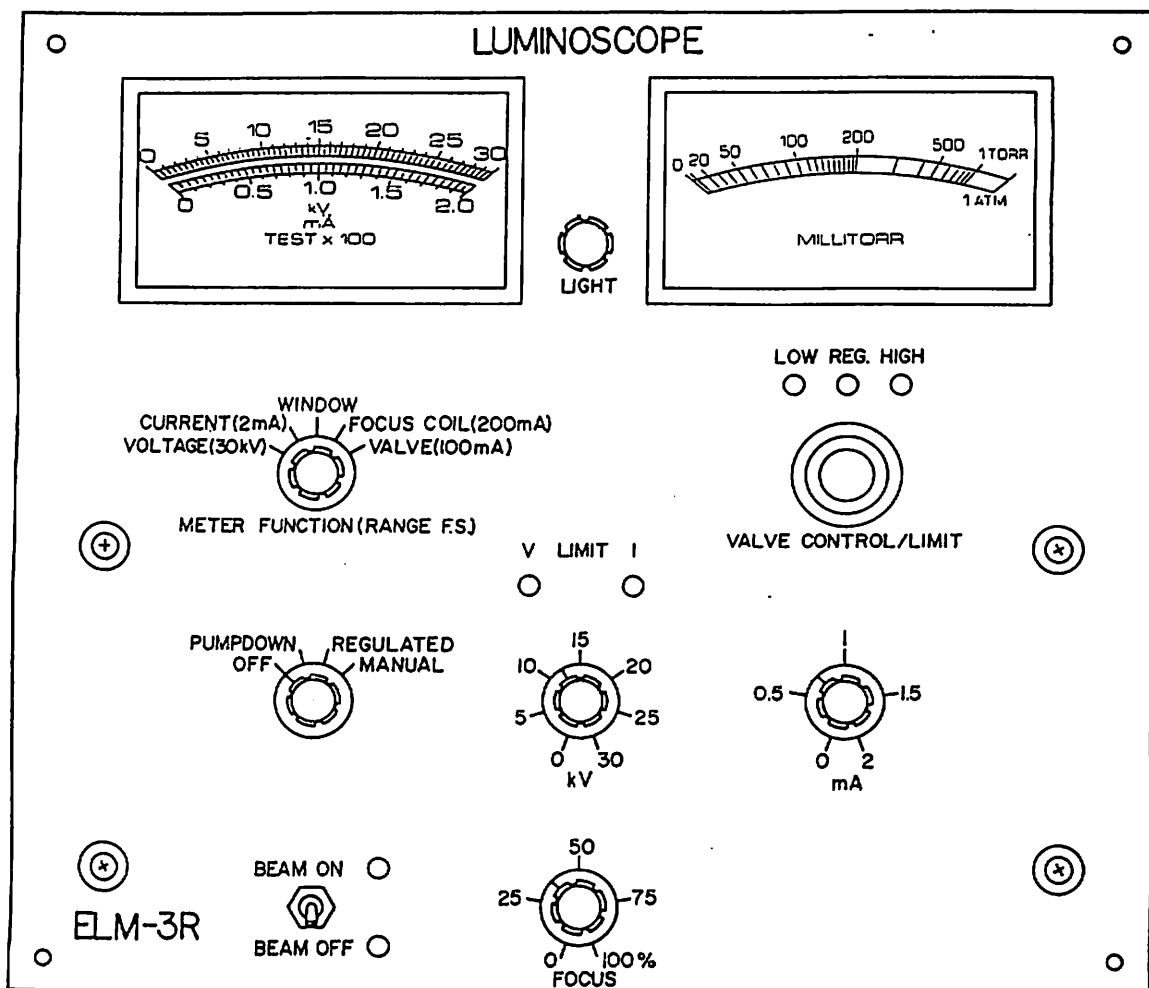
カソードルミネッセンス発光装置
(ルミノスコープ ELM-3RX)

Legend

1. Chamber end cover
2. X-motion nut
3. Y-motion nut
4. Sample positioning mechanism
5. Removable sample tray
6. Sample
7. 2" x 3" glass slide
8. Luminoscope chamber
9. Removable window support ring
10. Top window
11. Deflection magnet adjustment screw
12. Thermocouple connecting elbow
13. Thermocouple (pressure measurement) gauge
14. Pump valve
15. Vacuum hose
16. High voltage cable
17. Electron gun
18. Focus coil assembly
19. Solenoid valve
20. Purge valve
21. Magnet frame
22. Magnet



チャンバー部の部分名称



本体操作パネル

III. 碎屑岩に含まれる炭酸塩化石の保存と変質

1. 炭酸塩鉱物の安定性

生物の硬組織を構成する主な炭酸塩鉱物として、方解石とアラレ石が知られている。方解石はMgを少量含むことがあり（0～25 mol % MgCO_3 ），その割合は生物種によって異なる。一般に4 %以下のものを方解石または低Mg方解石と呼び（本報告中では、必要がない限り単に「方解石」を用いる），それ以上含むものを高Mg方解石と呼称して区別する。方解石は軟体動物殻体ではカキ、ホタテガイなど翼形類二枚貝やカサガイなどの巻貝に分布する他、無関節腕足類、フジツボ、脊椎動物（耳石）などにもみられる。一方、高Mg方解石は軟体動物ではアオイガイなど一部の頭足類の偽殻を構成するにすぎないが、底棲有孔虫、ウニ類、カニ類、石灰藻類などの外骨格をなして、広く分布する。また、アラレ石は軟体動物殻体の主要構成鉱物であり、六方サンゴの骨格はすべてアラレ石である。いずれの鉱物も生物界に広く分布するが、どの硬組織がどの鉱物種であるかは生物種によって特定しており、ある分類単位で共通する（Lowenstam and Weiner, 1989）。このため、絶滅種の硬組織についても一定の範囲で推定することは可能であり、また、その化石の続成変化も識別可能である。

これら3種の鉱物は地表環境下における安定性が異なる（北野, 1990；他）。高Mg方解石は最も不安定で、蒸留水（天水）やNaCl水溶液（海水）中で容易に溶解し、溶解量はMg含有量が多いほど多くなる。次いでアラレ石、方解石の順である。また、アラレ石と方解石は同質多形であり、常温常圧下では方解石が安定である。このため、アラレ石は加熱や加圧処理によって方解石に転移する。この反応は水の存在下ではより効果的に行なわれることが知られているが、続成過程など地表環境下において実際に生ずるアラレ石→方解石の変化は転移によるものではなく、"thin solution film" を介してアラレ石の溶解と方解石の晶出が同時平行的に行なわれるというメカニズムが考えられている（Pangitore, 1982）。同様なメカニズムで高Mg方解石の低Mg方解石化が生ずるが、これは、アラレ石の方解石化よりも生じ易い現象である（Tucker, 1991）。

ところで、化石硬組織の保存には硬組織体自身の残存の問題と、硬組織の構成物や内部構造の変化（変質）の問題とがあり、炭酸塩硬組織の場合、前者は構成鉱物の溶解に関連し、後者は安定な鉱物への変化（方解石化）、再結晶化、溶解、他鉱物による交代などを含む総合的なメカニズムに関連する。これまでの調査結果を通覧すると、炭酸塩硬組織自体の残存様式は母岩セメントとの関わりが深いので、次項で述べる。他鉱物による交代についても互述する。ここでは、炭酸塩硬組織が炭

酸塩質化石として残存する場合の、構成物と内部構造の保存状態を扱うこととする。その保存状態は、初生構成鉱物がアラレ石、方解石、高Mg方解石のいずれであるかにより、以下のように大幅に相違する。

最も安定なのは方解石で、吉母累層のカキ化石のように、下部白亜系でも初生内部構造が残存することが確認された。上部白亜系以上では通常の場合はほとんど未変質で安定している。しかし、吉母累層の接触変成作用の影響のない部分で再結晶化による構造破壊の進行も認められることから、方解石も経年的な続成変質を生ずることは免れ得ないものといえる。また、芦屋層群など第三系においても、方解石稜柱構造の微小結晶が再結晶化を受けていることがみられたことから、見かけ上、未変質であっても、微視的なオーダーでの変化が開始していることがあり得るものとみななければならない。

アラレ石質硬組織は、方解石質のものと比べるとかなり不安定で容易に方解石化し、これに伴って内部構造は消失することが普通である。方解石化は大局的には経年的増加の傾向がみられる。下部第四系、鮮新統ではむしろまれであるが、中新統では方解石化したものとアラレ石のままのものがケースバイケースでどちらも普通にみられる。古第三系以下になると、大半が方解石化し、アラレ石は方解石化が進んだ殻体中に部分的に残存する程度となり、化石硬組織全体が未変質アラレ石として認められることは極めて少ない。しかし、上部蝦夷層群浦河累層の例のように、上部白亜系においてもアラレ石が未変質で残存することがある（この層準は国内における未変質アラレ石の産出報告として、最古のものである）。これは、方解石化の進行は、経年的変化であると同時に、母岩の性質に強く依存することを示している。一般に古い未変質アラレ石は、杵島層群杵島累層、出雲層群、益田層群の例にみられるように、泥岩のような細粒碎屑岩類に含まれていることが多い。この岩相では、アラレ石の方解石化に関与する間隙水の流動性が低いことに起因すると思われる。しかし、今回の検討では、粗粒碎屑岩類中にアラレ石が残存することも、芦屋層群、浦河累層など数例認められており、要因について明確な言及は困難である。なお、化石硬組織に残るアラレ石には、チョーク化（粉状化）、結晶の“融合”などの変質現象が生ずることがあるが、今回は一部の記載に留めた。

高Mg方解石は、これまでの検討では、中期中新世以前のものはすべて低Mg方解石化しており、未変質のまま残存することはなかった。下島層群福連木累層など一部で有孔虫殻から周囲の方解石セメントより高い濃度のMgが検出されるが、現生種から推定される初生値に比較すると、多少なりとも低下しており、まったく未変質のものは認められない。なお、低Mg方解石化したものでも、内部構造が残存していることがあり、方解石化に伴う構造破壊の度合いは、アラレ石よりも少ないように思われる。

2. 母岩セメントと化石硬組織の保存

上述のように、炭酸塩硬組織の残存様式には経年的に進行するパターンが認められると同時に、母岩の性質に左右される。直接的には間隙水の問題であり、その容量（間隙率）、流動性、化学的性質などが関与すると思われる。これらの一部は母岩の碎屑粒子サイズとの関わりが深いが、主要にはセメント質に反映されていると考えられる。

これまでの調査結果からみると、炭酸塩硬組織が炭酸塩質化石として残存する場合、その母岩のセメント質は炭酸塩（主に方解石）からなることが普通である。逆に、溶解してキャスト化している場合は、母岩のセメントが非方解石質（石英、曹長石、緑泥石、その他の粘土鉱物、方沸石などの混合物であることが多い）であったり、セメント自体の形成が不十分であることが一般的である（芦屋層群の項参照）。後者の場合は、硬組織の構成鉱物の如何を問わずに、すべて溶解していることが多い。これは、初生セメントが非方解石質のケースの他、方解石セメントが溶脱して二次的に非方解石質セメントが形成されたケースでも同じである。これらのことから、方解石セメント中で生ずる化石硬組織の続成変質には、基本的に、炭酸塩に対してほぼ飽和した間隙水が関与し、非方解石質セメント中での続成変質には、未飽和の間隙水が関与するものとみなされる。

方解石セメント中でおこなわれる続成変質は、硬組織の構成鉱物種の安定性に依拠した多様なパターンがみられる。特徴的なことは、アラレ石質硬組織の挙動である。アラレ石質硬組織は方解石セメント中において前述した方解石化、他鉱物による交代（後述）の他、しばしば溶解—キャスト化がみられる。しかも、アラレ石質組織の溶解は、方解石質組織や高Mg方解石質組織の溶解を伴わず、選択的に生ずるものである。選択的アラレ石の溶解は、芦屋層群や西彼杵層群七釜砂岩層において、典型例をみることができる。この現象は鉱物間の安定性から説明が可能である。アラレ石質組織と方解石質組織の間では、前者のほうが不安定で溶解し易い。すなわち、この場合の間隙水はアラレ石に対して未飽和であるが、方解石に対しては飽和状態にあると考えられる。しかし、アラレ石質組織と高Mg方解石質組織の間では、後者のほうが溶解し易いとされ、矛盾がある。この場合、高Mg方解石質組織はアラレ石質組織の溶解が生ずる以前に、既に低Mg方解石化してしまったものとするのが妥当であろう。

また、アラレ石質硬組織の方解石化現象に関わる間隙水の挙動についてみると、興味深い事実が認められる。これは杵島累層に典型例をみることができるが、方解石化そのものは"thin solution film"を介して行なわれるため、方解石化部位の化学組成はアラレ石質組織の組成を反映している。このため、周囲の方解石セメントにMg, Mn, Feなどの元素が含まれていても、方解石化部位にはこれらの元素はほとんど含まれていない。しかし、再結晶化を繰り返し受けると、方解石化部位は周囲の方解石セメントと次第に同化して、類似の傾向をもつ化学組成をとるようになる。

なお、方解石化後の変質過程はカソードルミネッセンス像において識別されることもある。これらの検討は変質度の解明に活用することができると思われる。

ところで、方解石セメントには共通して一定量の Mg, Mn, Fe が含まれている。これは浅海性堆積物の一般的な特徴と思われるが、その量と量比は地域によって異なり、同一露頭でも異なることがある。現段階ではこれを定量化していないが、堆積環境および続成環境の解明の手掛かりになるものとみられる。この他の炭酸塩セメントとして、布志名累層上部では局所的に高Mg方解石セメントがみられ、一部では少量のドロマイイト層が形成されていた。この地層の通常の方解石セメントも広範囲に渡ってMg量が高いことから、堆積環境としての特殊性が伺える。ドロマイイトセメントは更別層において確認されているが（都郷・鈴木, 1987）、この場合は軟体動物殻体もドロマイイト化しており、埋没後のドロマイイト化作用によるものであって、初生的なドロマイイト沈着とは区別される。また、各地の方解石セメント中に燐灰石とともに細粒のドロマイイト結晶が晶出しており、これらも続成環境の解析にりようできるものと考えられる。

3. 炭酸塩化石の他鉱物による交代現象

続成環境下における炭酸塩化石の他鉱物による交代現象は極めて多様である。化石の鉱物「交代」は、広義には初生鉱物が単に別種の鉱物で置き換わっている場合に用いられるが、ここでは、初生鉱物の溶解と交代鉱物の形成が同時進行的に行なわれる現象に対して用いる。初生鉱物が完全に溶解して空洞化した後に、そこに新鉱物が形成された場合は「充填」として区別する。今回の検討では、狭義の交代は方解石質硬組織では吉母累層において珪化現象が認められたにすぎず、また、高Mg方解石質組織ではいくつかの地層において有孔虫殻の珪化や粘土鉱物による交代がみられた。ただし、後者の場合、低Mg方解石化後の交代や充填である可能性も否定できず、狭義の交代に当るか否かは不明である。これらに反して、アラレ石質硬組織では顕著な交代現象が多数識別された。とくにアラレ石質殻体の選択的な交代により、内部構造を保存することが、珪化、緑泥石化、海緑石化、黄鉄鉱化で確認された。このようなアラレ石質硬組織の選択的交代現象は、世界的にみてもほとんど報告されていないが、今回の調査では、珪化や緑泥石化は様々な地質時代と地域を通じて普遍的に生じており、選択的交代が必ずしも特殊ではないことを強調しておきたい。なお、一部では方解石化後にも珪化が生じ、2段階の交代作用が認められた。この他、アンケライト、菱鉄鉱、重晶石、方沸石の晶出例があったが、交代か溶脱後の充填か不明である。

炭酸塩硬組織の鉱物交代現象が生じている層準

		長崎・熊本西部	福岡南部・佐賀	関門・北九州	島 根	北 海 道
新第三系	鮮新統					黒松内層
	中新統	上部				八雲層
		中部			出雲層群 松江累層 布志名累層 S 来待累層	訓縫層 S
		下部				
古第三系	漸新統	上部				
		下部	西彼杵層群 呼子ノ鼻砂岩層 並敷山互層 並敷山凝灰岩層 七釜砂岩層 福島砂岩層 坂ノ浦砂岩層	杵島層群 畑津頁岩層 畑津砂岩層 行合野砂岩層 佐里砂岩層 杵島層 S	芦屋層群 脇田層 坂水層 S,C 山鹿層 S,C	
	始新統	上部				
		中部	板瀬川層群 砥石層 志岐山層 福運木層 S	相知層群 万田層群 四ツ山累層 勝立累層 G		
		下部				
	暁新統					
白亜系	上部					蝦夷累層群 上部 乳呑川累層 浦河累層 S
	下部					中部 絵笛累層 歌笛累層 下部 ベチャリ累層 ツケナイ累層 空知層群
				吉母累層 S		

C : 緑泥石化, G : 海緑石化, P : 黄鉄鉱化, S : 珪化.
(吉母累層は方解石質組織, 他はすべてアラレ石質組織)

(1) 珪化

アラレ石質硬組織の選択的珪化が確認されたのは、上部白亜系から中部中新統に渡る6地層群の11層準、17地点に及ぶ。これらの地点では珪化の程度などに多少の差異があるが、共通的な特徴が多く、同一の環境下で生じたものと考えられる。ここでは、典型的に珪化がみられる芦屋層群を例にメカニズムとプロセスについて考察する。

珪化化石を産出する4地点（竹の子島、岩屋、洞山、恋の浦）は地理的に隔たっている上、層序的にも異なっている。しかし、いずれの地点においても、貝殻は石灰質の中粒～粗粒砂岩に化石層をなして含まれており、珪化は部分的に生じている。なお、竹の子島では珪化後に化石層の上半部が脱灰作用を受けて、非珪化貝殻や母岩の方解石セメントが溶出し、見かけ上、石質アレナイト中に珪化化石のみが含まれるという特異な産状も観察された。

珪化が認められたのは、*Glycymeris cisshuensis*, *Acila ashiyaensis*, *Venericardia* sp., *Callista* ? sp., *Turritella infralirata*, *Euspira ashiyaensis*, *Dentalium* sp. の7種の殻体であり、珪化部に残存する構築構造やそれらの種と近縁な現生種の殻体構成鉱物から判断して、いずれも初生的にアラレ石質のものである。ただし、アラレ石質殻体の非珪化部は大半が方解石化し、初生殻体構造が消失している。一方、初生的に方解石質の *Chlamys ashiyaensis*, *Ostrea* sp. などの殻体や、Mg 方解石質の底生有孔虫とウニの骨格（低 Mg 方解石化している）、さらには母岩の方解石セメント（特徴的に少量の Fe, Mn, Mg を含む）には、珪化が認められない。

化石貝殻を交代しているシリカ鉱物は石英とlength-slow chalcedony に識別され、前者が初生殻体構造を良好に保存するのに対し、後者は球晶状集合体を形成して初生構造を破壊する。石英部における構造保存様式には4パターン（ghost, pseudomorph, carbonate inclusion, organic inclusion）が認められ、珪化の進行過程が示唆される。また、珪化化石付近の方解石セメント内に残存する間隙孔はしばしばlength-fast chalcedony で充填されている（セメント自体の珪化ではない）。

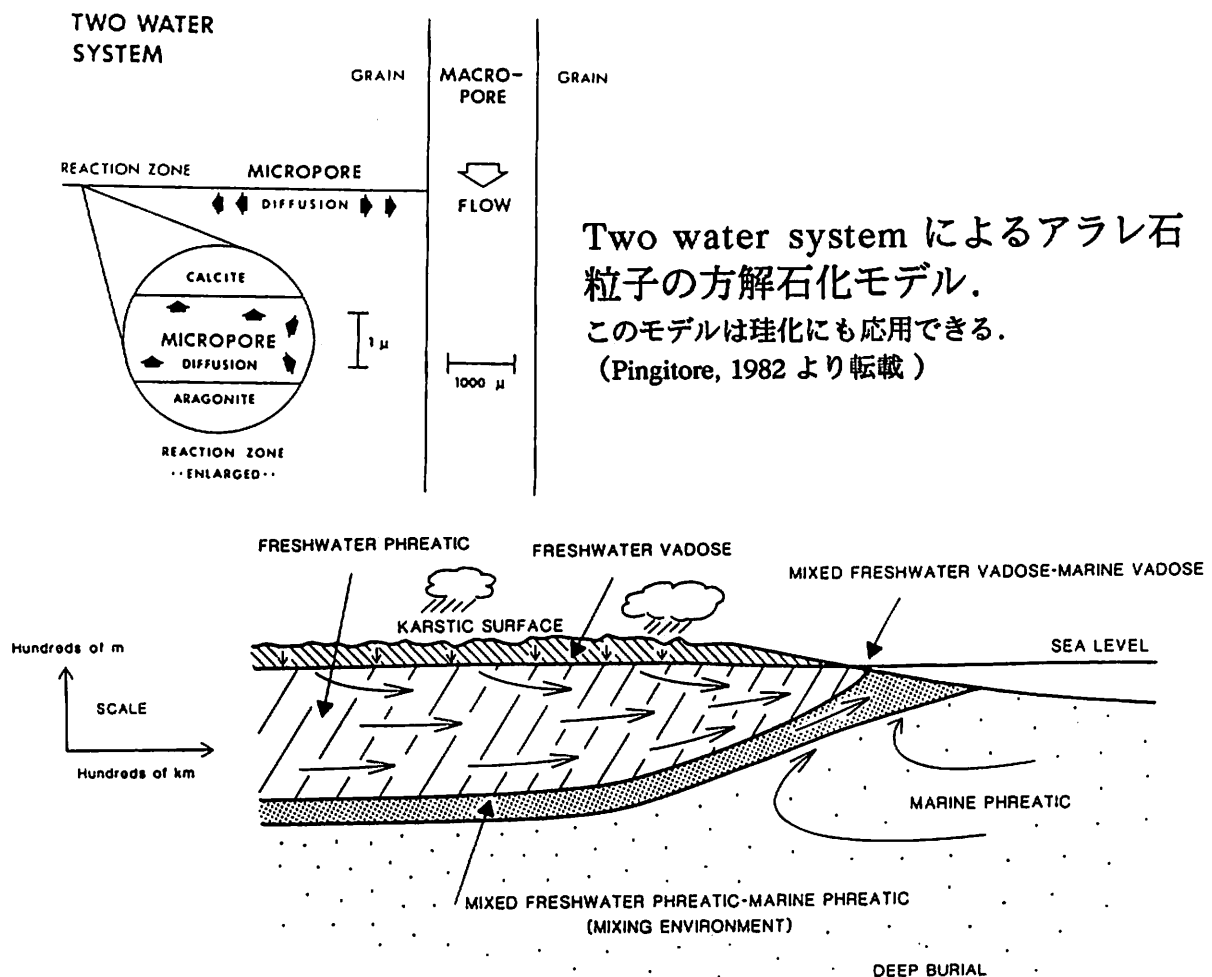
一般に、炭酸塩化石の珪化は"thin solution film" を介して炭酸塩の溶出とシリカの沈着が平行して行なわれることによると考えられている。このモデルを芦屋層群の珪化現象に適用すると、選択性は炭酸塩の溶解度の差異に起因するものと思われる。通常の埋没環境下ではアラレ石は方解石より溶解し易いからである。Mg 方解石の溶解度はMg量や微細構造によって変化し、アラレ石のそれより高い場合がある。しかし、芦屋層群においては、Mg 方解石は珪化以前に方解石（低 Mg 方解石）化した可能性がある。初生構造の保存を伴う石英と球晶状集合体をなすlength-slow chalcedony の形成の相違は、"solution film" の厚さに起因すると考えられる。即ち、これが超薄の場合は、アラレ石質の初生構造に支配されたシリカ沈着が行なわれ、相対的に厚ければ、シリカ独自の結晶成長が行なわれるであろう。また、方解

石セメント内の充填性 length-fast chalcedony の存在は、化石貝殻の珪化に要するシリカの供給様式として、Pingitore (1982) の "two-water system" を応用できることを示唆する。

以上の観察結果、珪化のメカニズムの考察等から、芦屋層群における大局的化石化のプロセスをまとめると、以下ようになる：

- 1) 炭酸塩骨格を主とする生物遺骸の集積と砂質底への埋没。
- 2) 砂粒と生物遺骸の方解石セメントによる膠結。
- 3) アラレ石質殻体の選択的珪化。
- 4) アラレ石質殻体の方解石化。
- 5) 竹の子島における脱灰作用（珪化化石のみの残存）。

このような比較的早期の埋没段階に珪化が生じた環境条件として、化石内容や産出層準、方解石セメント中の微量元素なども含めて判断すると、海岸付近における海水と地下水（淡水）の混合帯（Knauth, 1979）が想定される。



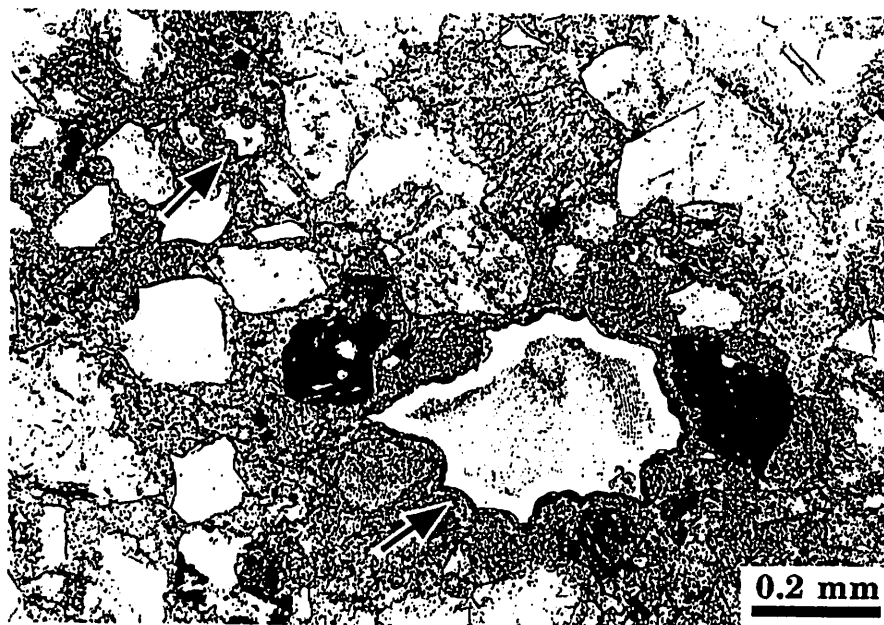
沿岸付近の続成環境モデルの一例

(Carozzi, 1993 より転載)



アラレ石質殻体に生じた珪化現象

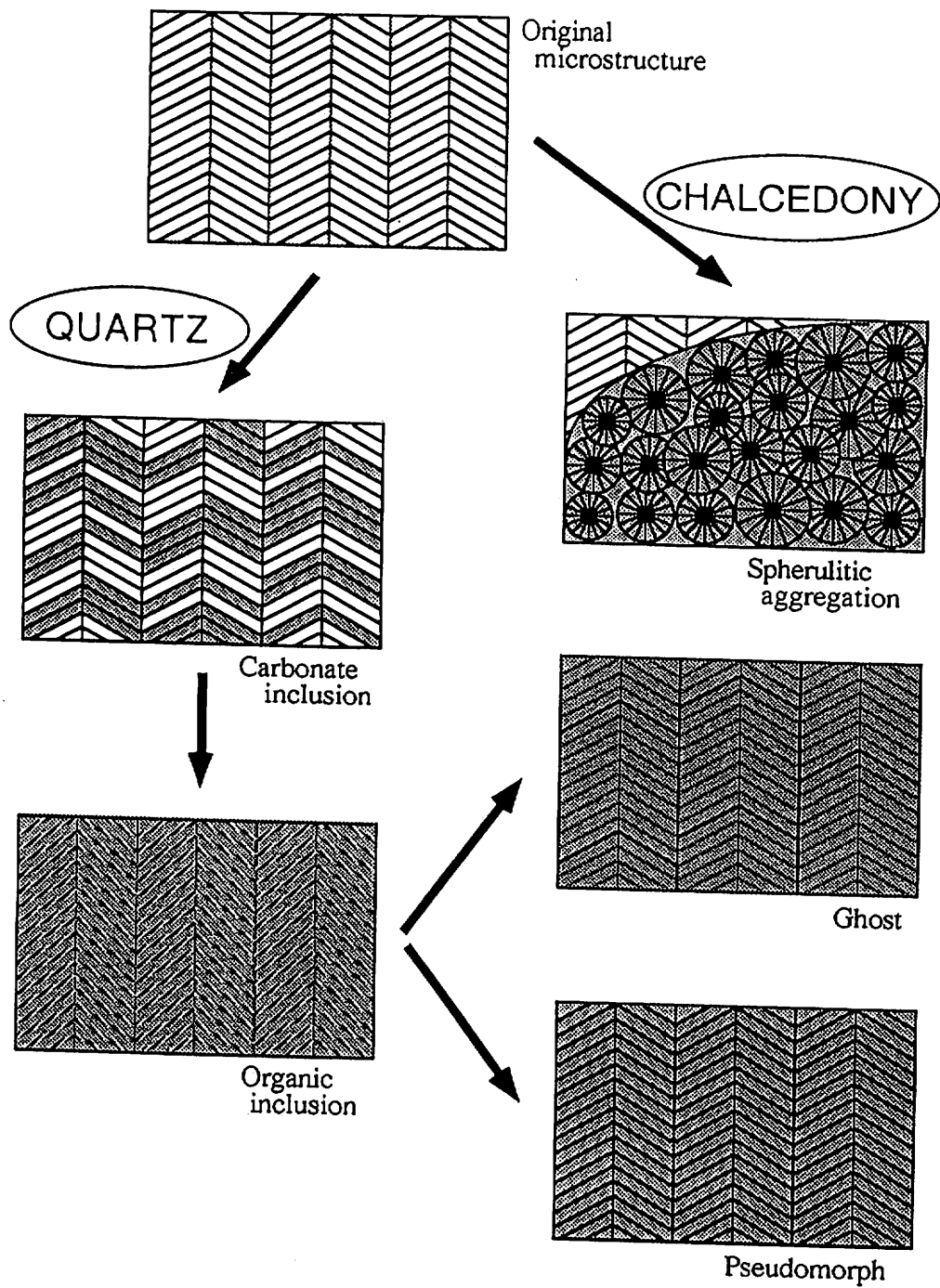
周囲は方解石化している。クロスニ科尔。



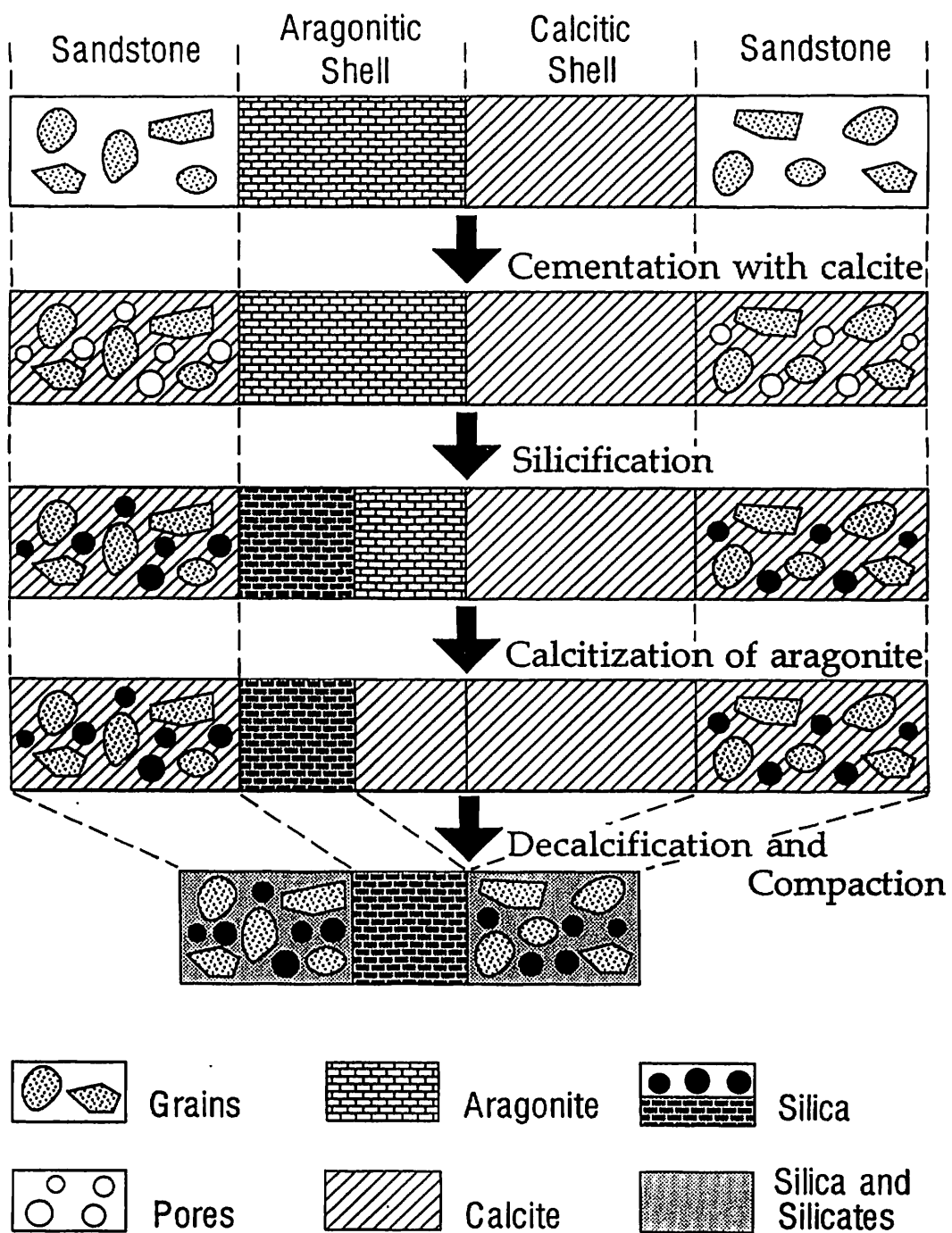
方解石セメント中の空洞を充填する

Length-fast chalcedony (矢印)

オープンニ科尔。



珪化パターンとその進行過程



芦屋層群における珪化を伴う続成変質過程

(2) 緑泥石化

これまでに緑泥石化殻体が見出されたのは、芦屋層群、下島層群、出雲層群である。いずれも石灰質砂岩を主体とし、珪化殻体を産出することがある。緑泥石化は、*Glycymeris*, *Venerocardia*, *Turritella* など初生鉱物がアラレ石質の殻体で、部分的に行われており、他の部位は方解石化している。芦屋層群（竹の子島）では、同一殻体内に緑泥石化、珪化および方解石化が見られることもある。この場合、珪化が殻体内部から進行するのに対し、緑泥石化は殻体表面から内部に及んでいく傾向が認められる。また竹の子島では、石灰質砂岩の一部が脱炭酸塩化を受け、殻体の大半も溶失しているにもかかわらず、緑泥石化（および珪化）部位のみが残存する例が見られる。薄片の鏡下観察において、緑泥石化部に交差板構造、複合交差板構造、均質構造などが識別された。クロスニコル観察では、交差板構造の第1次薄板などの集合体が消光パターンとして識別される。また、オープンニコル観察でこれらの構築構造の最小構造要素である針状結晶の配列を識別できることは、珪化部よりも更に良好な保存形式であると言える。一方で、緑泥石化部は珪化部よりも外圧による変形を受け易いことも認められる。緑泥石化の時期については、アラレ石質構築構造が保存されていることから、方解石化以前であることは疑いない。珪化との関連でみると、産状からは、少なくとも一部は同時期に行なわれた可能性がある。

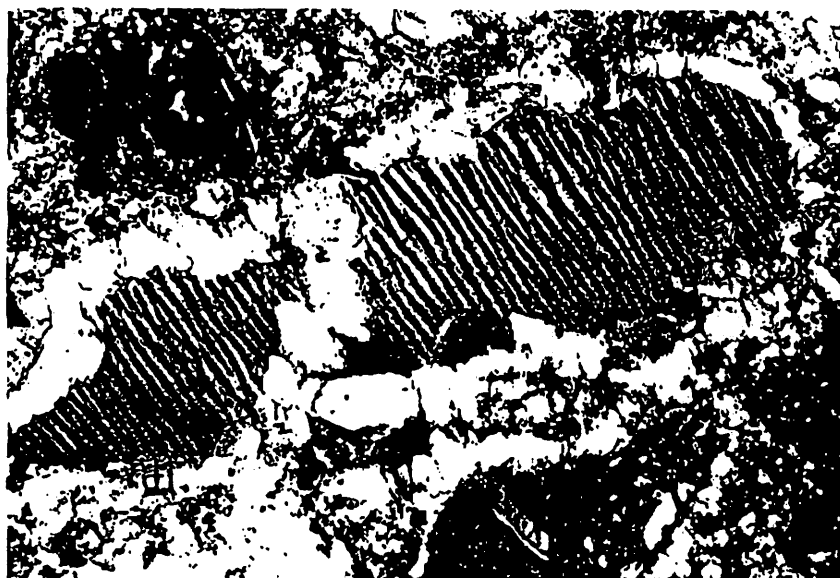


緑泥石化殻体中に残存する交差板構造

芦屋層群坂水累層（竹の子島）。クロスニコル，×83.

(3) 海緑石化

アラレ石質硬組織の海緑石化が認められたのは、万田層群勝立累層のみである。海緑石化殻体の母岩の特徴は、珪化や緑泥石化がみられる他の地層のそれと酷似しているが、海緑石化以外の交代現象はまったく認められなかった。通常、海緑石は碎屑粒子と同様の粒子として分散している。これは粗粒碎屑岩類に含まれる海緑石の産状としては普通にみられるものである。しかし、クロスニコル観察でこの粒子内部にアラレ石質軟体動物殻体特有の構造を識別することができ、アラレ石質硬組織の海緑石化であることが確認される。まれに方解石化殻体中に部分的な海緑石化部位が観察される。海緑石化は方解石質組織や高Mg方解石質組織には認められず、アラレ石質硬組織のみの選択的交代現象である。また、ここではアラレ石質殻体でも小型のものに限られ、化石層の主体をなす厚質の二枚貝殻体や六方サングには生じていない。一般に、海緑石の形成は堆積速度の小さい浅海底で、底質物と海水の反応で行なわれると考えられている。勝立累層における海緑石の産状は、これと同様な形成メカニズムを示唆する。したがって、アラレ石質硬組織の選択的ハ緑石化は埋没以前に行なわれたものとみられる。

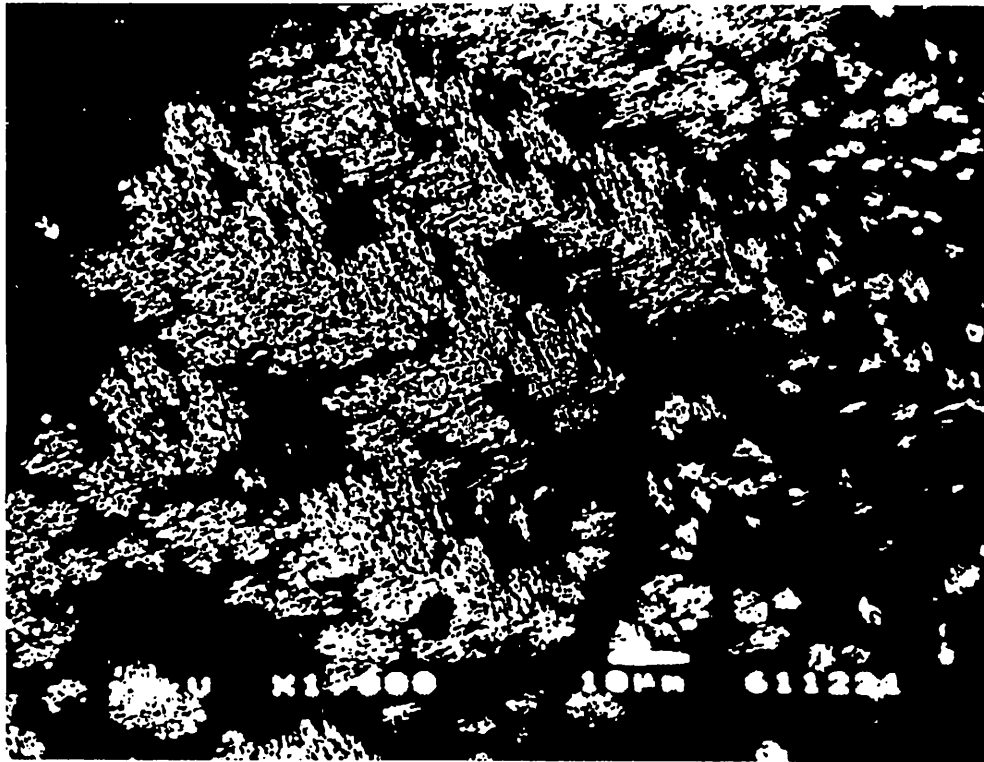


海緑石” 粒子” 中に残存する交差板構造

万田層群勝立累層。クロスニコル，×165。

(4) 黄鉄鉱化

黄鉄鉱化は出雲層群来待累層基底礫岩部で認められた。この部分では、母岩セメントが非晶質シリカからなり、アラレ石質硬組織の多くは珪化している。一部は未変質で残存するが、方解石化は生じていない、黄鉄鉱化は珪化した殻体中に局部的にみられた。ここでは、黄鉄鉱が交差板構造の第3次薄板に対応した針状の形態をとり、この構造特有の配列をなしている。この場合、周囲が珪化していることを考慮すると、珪化後に取り残された針状結晶が溶解し、その空洞を充填して黄鉄鉱が形成された可能性も否定できない。しかし、シリカセメントや珪化殻体には自形の黄鉄鉱粒子が多量に含まれ、この黄鉄鉱形成が珪化に先行していることは明らかである。アラレ石質殻体の構造形態をとる黄鉄鉱が自形のものと同時期に形成されたものとすれば、交代現象である可能性が強い。



交差板構造特有の配列を示す黄鉄鉱

周囲は珪化している。出雲層群来待累層。

反射電子像，×1000。

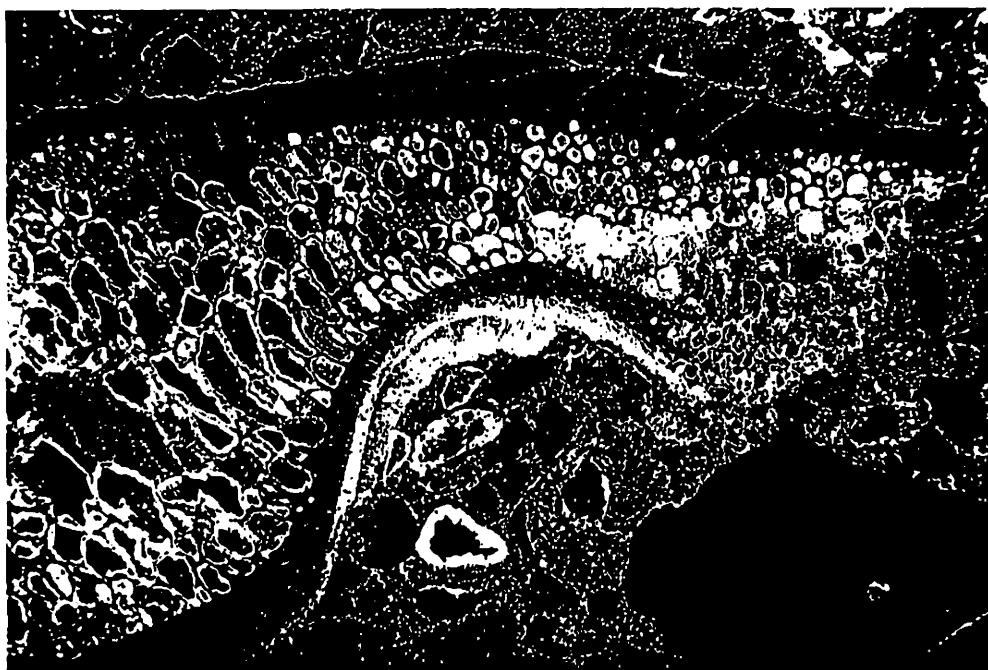
4. カソードルミネッセンス像の観察

炭酸塩鉱物の発光パターンは、これまでに観察した限りでは、基本的にオレンジ系の色調を呈し、明度差によりパターン化されることが普通である。色調の差異が認められたのは、一部のドロマイトが黄色を帯びて、オレンジを呈する周囲の炭酸塩（高Mg方解石など）と区別された例がある程度である。しかし、ドロマイトがオレンジ色をとることも多く、必ずしも鉱物種による相違とは言えない。また、明度差についても、EDS分析との対応では要因となる元素を特定できなかった。ここでは、実際の発光パターンの概要と期待できる解析効果について述べる。

まず、比較のために現生の炭酸塩硬組織について、カソードルミネッセンス像（CL像）の観察を行なった。現生軟体動物殻体はアラレ石質、方解石質を問わず、極めて発光が弱く内部構造の観察は困難である。これはアラレ石質の六方サンゴなど軟体動物以外の組織でも同様である（高Mg方解石質組織については未検討）。

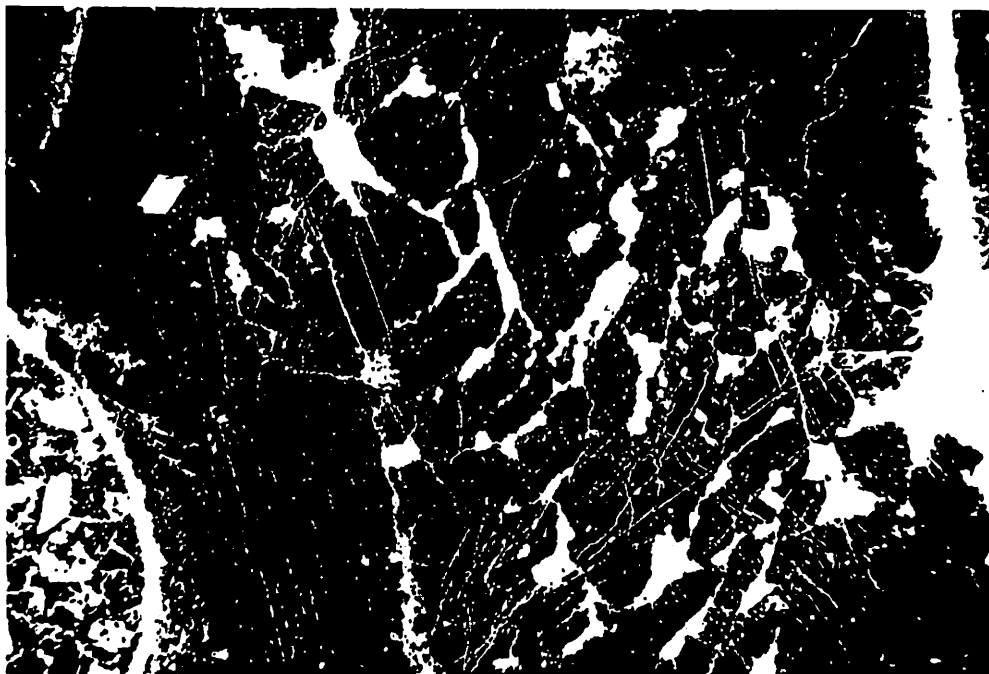
化石硬組織についてみると、アラレ石のまま未変質で残存するものは現生と同様に発光が弱い。ただ、弱くチョーク化した部分で、不明瞭ながら構築構造が明度差により識別された例がある。方解石化している場合は、その後の再結晶化の度合によってパターンが異なる。方解石化直後（と判断されるもの）は、未変質のものと同様に弱いが発光が、再結晶化が進行したものは、次第に明度を増す傾向がある。また、一部では、埋没中に殻体が物理的に破壊され、その後に破断片の間隙を方解石が充填したと判断されるCL像がみられた。未変質の方解石質組織も一般に弱い発光であるが、吉母累層ではカキの殻体中に発光のやや強いものがみられた。ここでは、ある程度再結晶化が行なわれている。有孔虫など高Mg方解石質組織はほとんど低Mg方解石化しているが、個体レベルで異なる発光パターンをとる。これらの観察から、化石硬組織のCL像解析により、炭酸塩セメント中における化石形状の識別、変質の度合、変形構造の有無などの検討が可能であると思われる。

一方、セメント質についてみると、光学顕微鏡下ではまったく一様に見える方解石セメントが、CL像観察では2種類以上に識別されることがある。この識別は必ずしもEDS分析による微量元素の存在量を反映していない。しかし、成因的に何らかの相違を示すものであり、複数の形成段階が伺える。また、しばしば、結晶粒界とは異なる累帯構造が識別され、粒子間の空隙を充填する結晶成長パターンが読み取れることがある。詳細は未検討であるが、CL像観察により、セメント質の形成過程をミクロのオーダーで解明し、化石硬組織の続成変質との関連を検討することが期待できる。



カキガイの殻体内部構造を示すカソードルミネッセンス (CL) 像

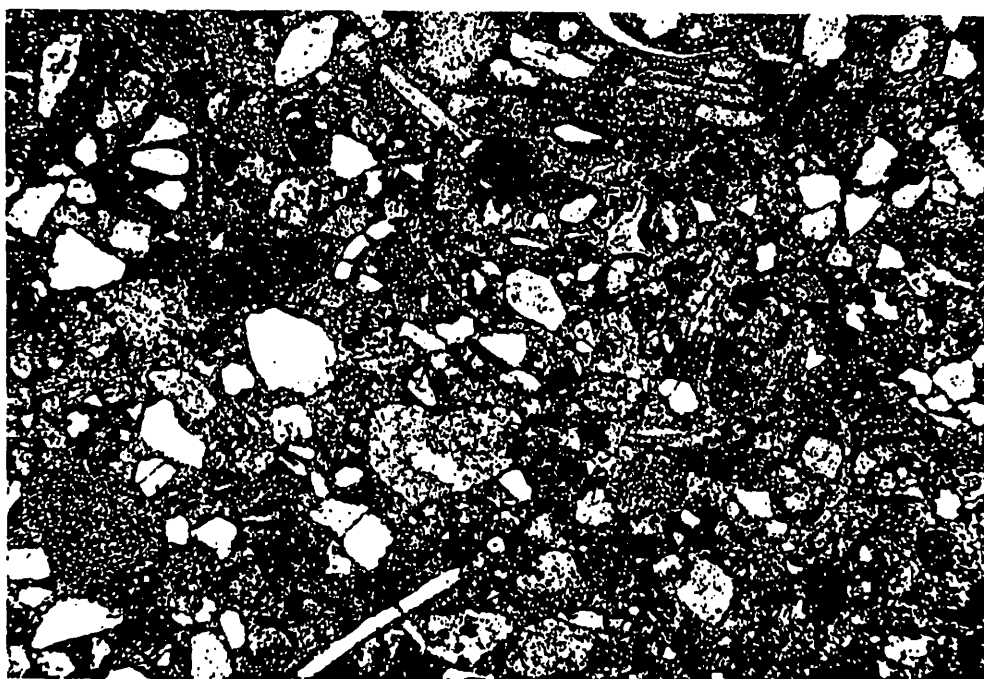
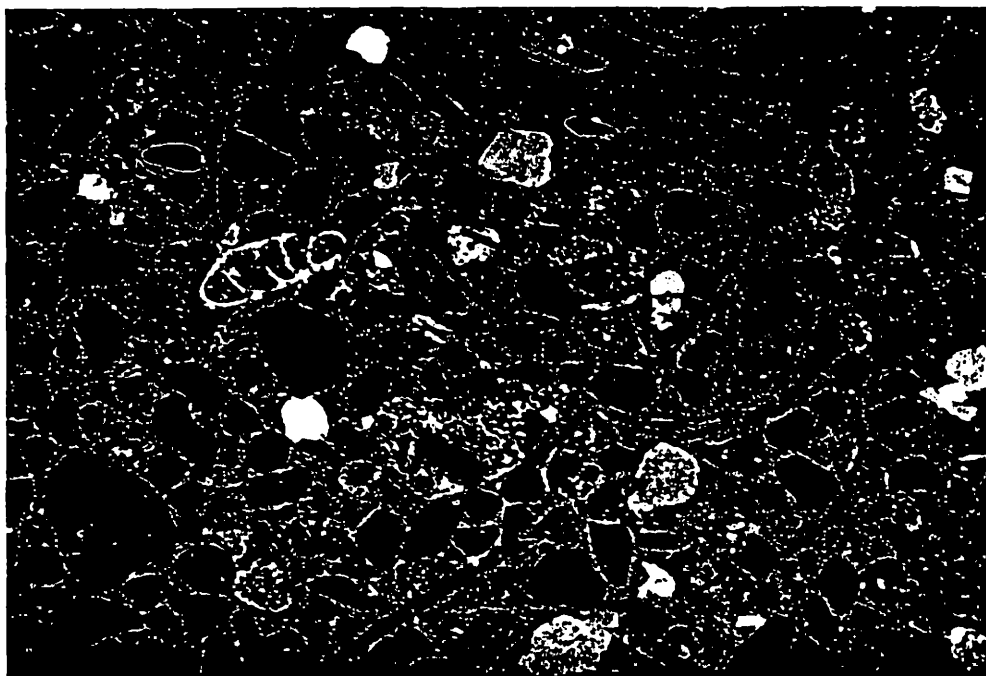
上下の葉状構造層の間に泡状の構造が存在する（この正体は不明）。
訓縫層。上段：CL像，下段：クロスニコル，×40。



方解石化殻体の内部破壊を示すCL像

下島層群福連木累層.

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40.

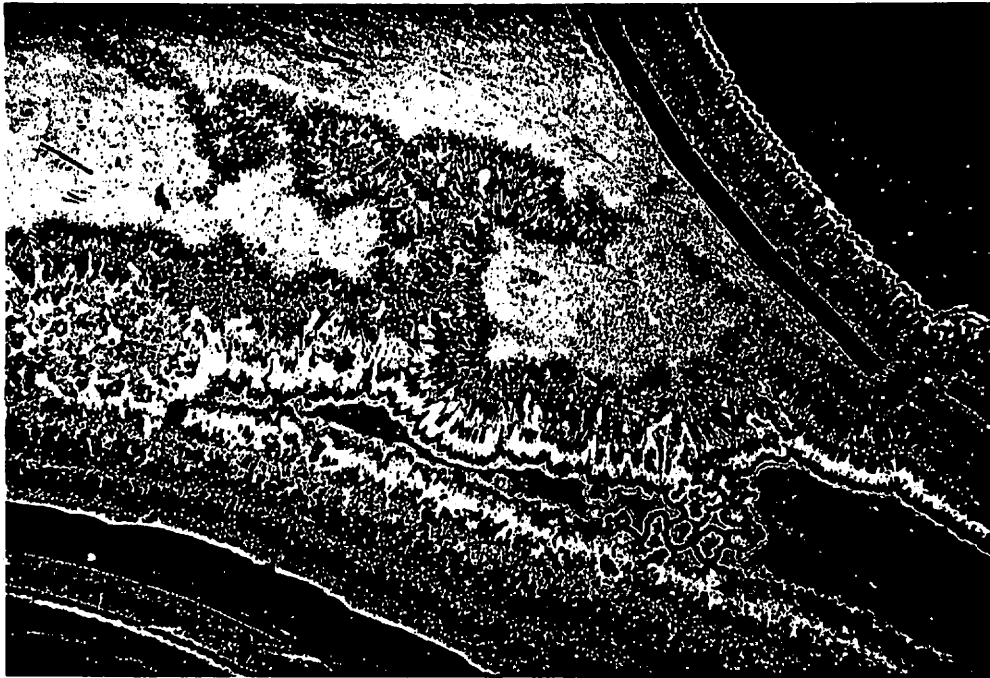


ドロマイト質砂岩のCL像

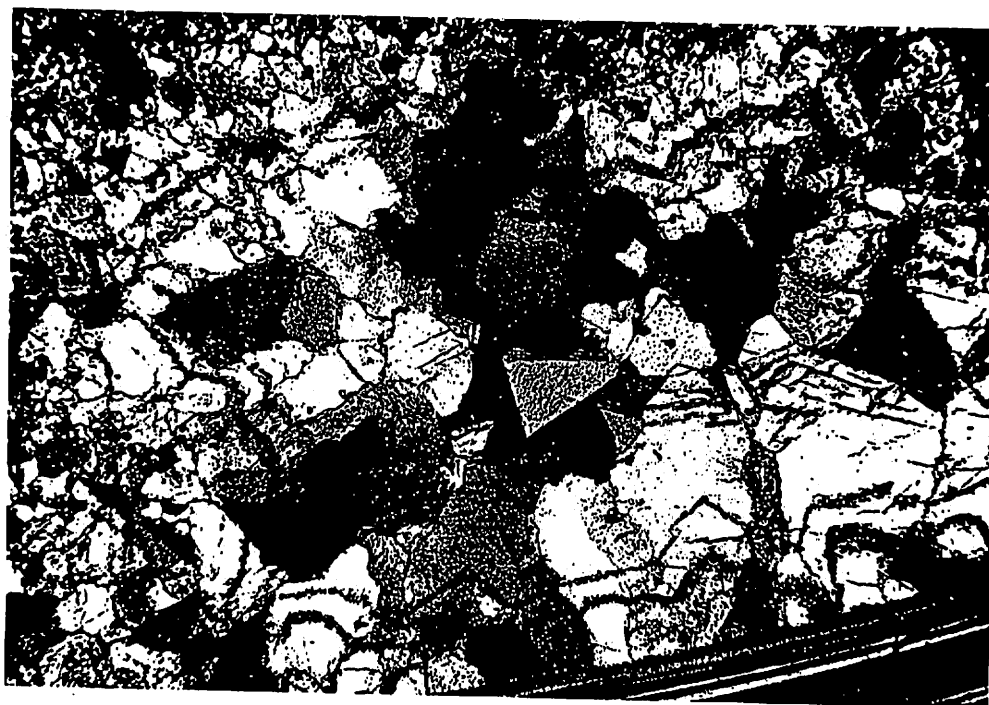
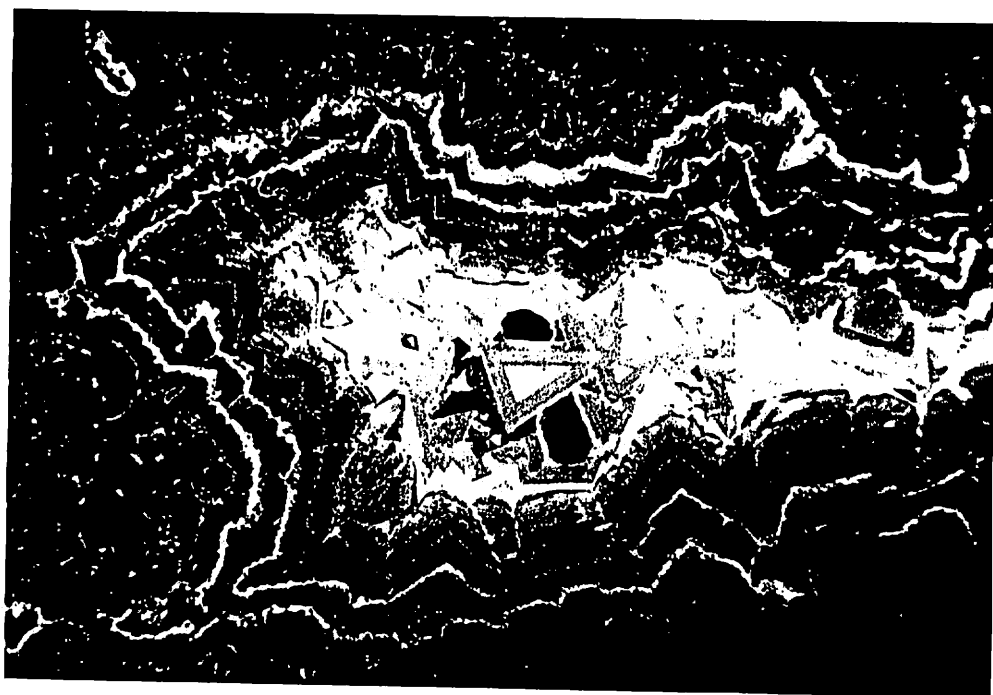
微小な二枚貝，有孔虫，ウニの棘が識別される。

これらの化石とセメントはドロマイト。

更別層．上段：CL像，下段：クロスニコル，×40．



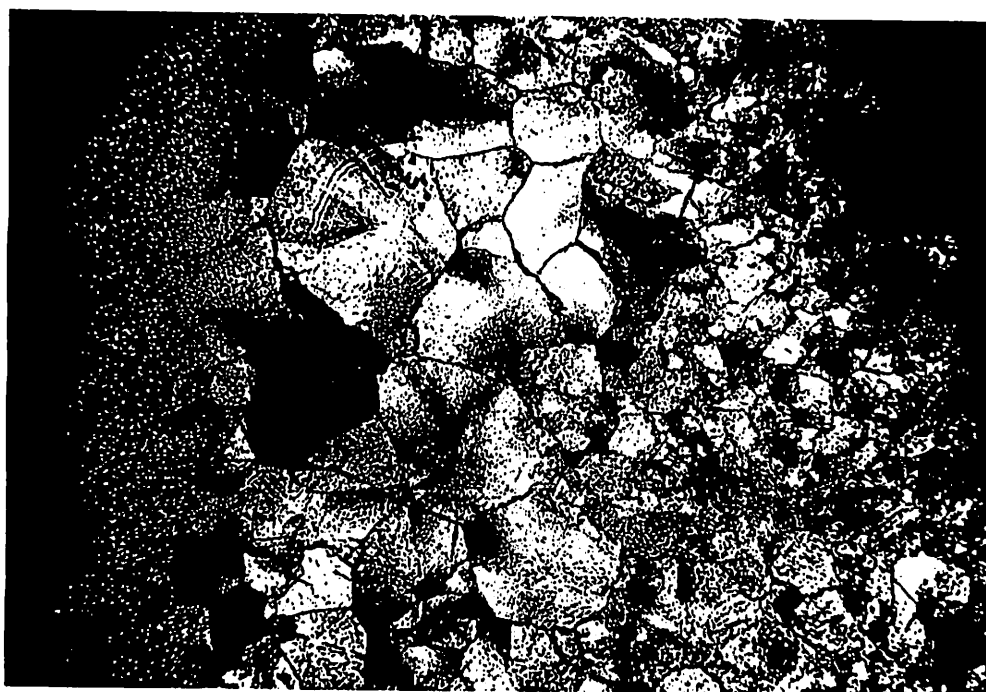
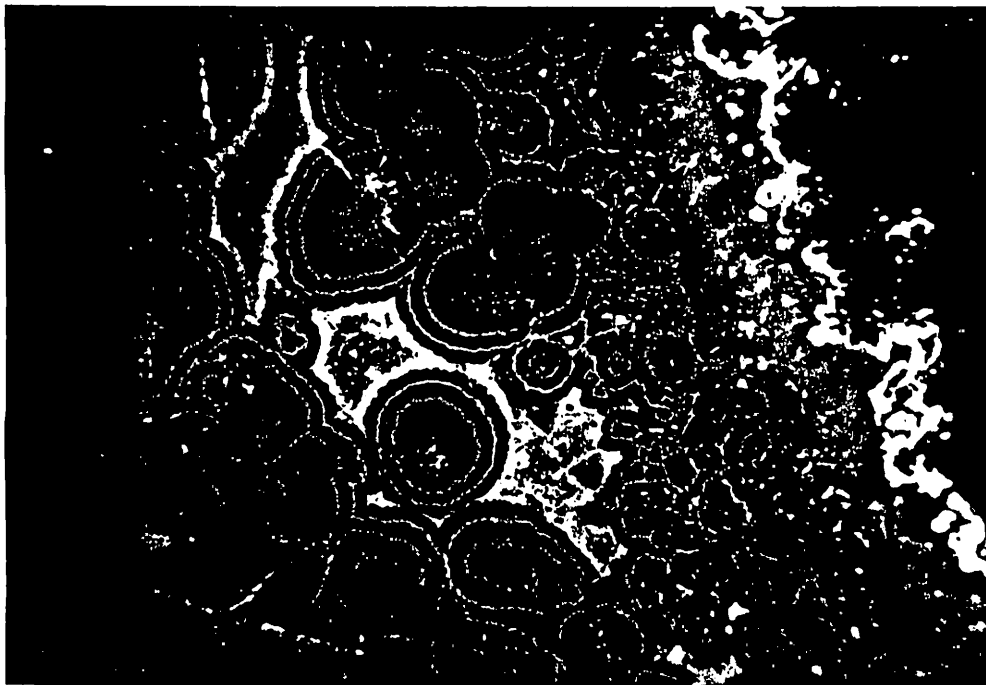
流木に穿孔したフナクイムシ殻体と
 穿孔痕に二次沈着した高Mg方解石
 出雲層群布志名累層。
 上段：CL像，下段：クロスニコル，×40。



貝化石と母岩の間の空洞を充填する方解石

出雲層群布志名累層。

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40。



母岩中の空洞を充填する方解石

出雲層群布志名累層.

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40.

IV. 化石硬組織の産状と続成変質

1. 芦屋層群（漸新統・福岡県北東部—山口県下関市）

北部九州から山口県西部にかけて広く分布する漸新統・芦屋層群は、全層厚 1000 m 以上におよび、下部の山鹿累層、中部の坂水累層、上部の脇田累層に区分される。本層群は砂岩、泥岩およびその互層からなり、時に礫岩の薄層を挟む。また、全層準を通じて浅海生軟体動物化石を豊富に産出する。今回は主に響灘沿岸域について検討した。

（1）山鹿累層

本累層は模式地の山鹿地区（遠賀川河口）の他、津屋崎町恋の浦地区、下関市西方（彦島、藍ノ島、竹の子島）などに分布する。最下部に頁岩を主とする頃末泥岩層があり、その上位に緑青色砂岩を主とする折尾砂岩層、頁岩を主とし、しばしば砂岩薄層を挟む則松頁岩層が順次累積する。砂岩部の構成粒子は石英、斜長石、アルカリ長石、黒雲母、普通角閃石、海緑石、チャート岩片、火山岩片、不透明鉱物などからなる。また、海緑石を除く有色鉱物粒子は緑泥石で置換されていることがある。通常、化石包含部の粒子間はモザイク状方解石セメントで充填され、泥質基質は少ない。EDS 分析では、このセメントは少量の Mg, Mn, Fe を含んでいる（平均値：0.7 mol % MgCO_3 , 2.2 mol % MnCO_3 , 1.2 mol % FeCO_3 ；以下、陽元素のみを略記する）。また、黄鉄鉱のフランボイダル集合体を伴う。さらに、化石殻体の空洞部を充填する方解石セメントは、ドロマイトや燐灰石の小粒を伴うことがある。一方、無化石帯砂岩のセメントは石英、斜長石（すべて曹長石）、緑泥石、方沸石、黄鉄鉱などの微粒結晶集合体からなり、炭酸塩をまったく含まない場合（以下、珪長質セメントと仮称する）と、これらの集合体中にモザイク状方解石が散在する場合（以下、混合セメントと仮称する）の 2 つのタイプがある。軟体動物化石は *Glycymeris cisshuensis*, *Acila ashiyaensis*, *Venericardia* sp., *Callista* ? sp., *Turritella infralirata*, *Euspira ashiyaensis*, *Dentalium* sp. などのアラレ石質殻体を有するものと *Chlamys ashiyaensis*, *Ostrea* sp. などの方解石質殻体を有するものの両タイプが含まれる。この他、高 Mg 方解石質の底生有孔虫殻とウニの骨格もまれに観察される。

アラレ石質殻体は一般に方解石化している。この方解石はモザイク状を呈し、初生的内部構造は消失していることが多いが、時に構築構造や成長構造に沿った結晶形態をとることがある。また、構築構造の一部がダスト状に残存することもある。方解石化部位には Mg, Mn, Fe などの元素はほとんど含まれておらず、母岩セメントとは明らかに異なる。極めてまれであるが、方解石化殻体中に部分的にアラレ石が未変質で残存し、構築構造も保存されていることが観察された。アラレ石部位と

方解石化部位は明瞭な境界を示す。また、一部で殻体の珪化や緑泥石化がみられ、それらの部位に構築構造が保存されているが、詳細は後述する。この他、方沸石の自形結晶が晶出している例が山鹿地区と恋の浦地区でみられた。さらに、方解石セメント中で殻体の一部が溶解してキャスト化しているケースがみられた。これに反し、方解石質殻体はまったく変質を受けず、構築構造を良好に保存している。ただし、*Ostrea* sp. の外層の稜柱構造は再結晶化を受けているように観察される。一方、底生有孔虫とウニの骨格は低 Mg 方解石化しており、ウニの一部は方沸石化していることがある。

アラレ石質殻体に珪化が生じているのは洞山（山鹿地区）と恋の浦である。このうち、恋の浦では初生構造の保存がみられない。一方、洞山では次のような珪化現象が観察される。珪化が認められたのは *Acila ashियाensis*, *Turritella infralirata*, *Dentalium* sp. の3種の殻体で、部分的に生じている。珪化部に残存する構築構造（交差板構造、繊維構造、真珠構造）やそれらの種と近縁な現生種の殻体構成鉱物から判断して、いずれも初生的にアラレ石質のものである。ただし、アラレ石質殻体の非珪化部は大半が方解石化し、初生殻体構造が消失している。一方上述のように、初生的に方解石質の *Chlamys ashियाensis*, *Ostreasp.* などの殻体や、Mg 方解石質の底生有孔虫（低 Mg 方解石化している）、さらには母岩の方解石セメント（特徴的に少量の Fe, Mn, Mg を含む）には、珪化が認められず、アラレ石質殻体のみの選択的珪化である。また、これら2地域では、アラレ石質殻体の部分的な緑泥石化もみられる。この部位は茶褐色を呈し、EDS分析では Fe に富む特徴が顕著である。初生構造が残存するが、不明瞭である。

（2）坂水累層

本累層は北九州市八幡西区の他、下関市西方（彦島、竹の子島）に分布する。全体に砂岩泥岩の互層からなる。岩石学的特徴は山鹿累層とほとんど同様で、個々のサンプルレベルでは区別がつかない。ただし、竹の子島においては珪化や緑泥石化を受けた化石帯の上半部の顕著な脱炭酸塩化が認められる。この部分では碎屑粒子密度が増し、セメントは珪長質になっており、炭酸塩化石の非珪化部位、非緑泥石化部位はすべてキャスト化している。軟体動物化石は山鹿累層とほとんど同様であるが、*Glycymeris cisshuensis* の密集層が頻繁に挟まれる。底生有孔虫とウニなどの化石も同様に産する。また、珪化木が含まれることもある。

アラレ石質殻体は一般に方解石化しているが、*Glycymeris* など厚質の殻体では部分的に未変質のまま残存することがある。また、上部の層準で化石密集層全体がアラレ石を残存していることが認められた。ただし、化石の多くはチョーク化して構造破壊を生じている。方解石化部位の微量元素含有はほとんど認められない。しばしば自形の方沸石が晶出していることもある。この他、一部地域で珪化や緑泥石化が確認された。方解石質殻体は未変質で、初生内部構造の保存も良好である。高 Mg 方解石質殻は低 Mg 方解石化している。

珪化がみられるのは、竹の子島と北九州市八幡西区の岩屋である。この2地域は層準的に異なり、竹の子島の産出地点が坂水累層下部にあたるのに対し、岩屋の産出地点は本累層中部に相当する。竹の子島では、珪化は厚さ約 50 cm の化石密集層全体にみられ、*Glycymeris cisshuensis*, *Venericardia* sp., *Callista* ? sp. *Turritella infralirata* の5種類の殻体で確認された。多くは部分的珪化で、非珪化部は大半が方解石化しているが（一部は緑泥石化している）、殻体全体が珪化している個体も含まれている。部分的珪化の場合、珪化は殻体内部で生じる傾向がある。化石殻体を交代しているシリカ鉱物は石英とlength-slow chalcedony とに識別され、前者が初生殻体構造を良好に保存するのにに対し、後者は球晶状集合体を形成して初生構造を破壊する。石英部における構造保存様式には次の4パターンが認められる。

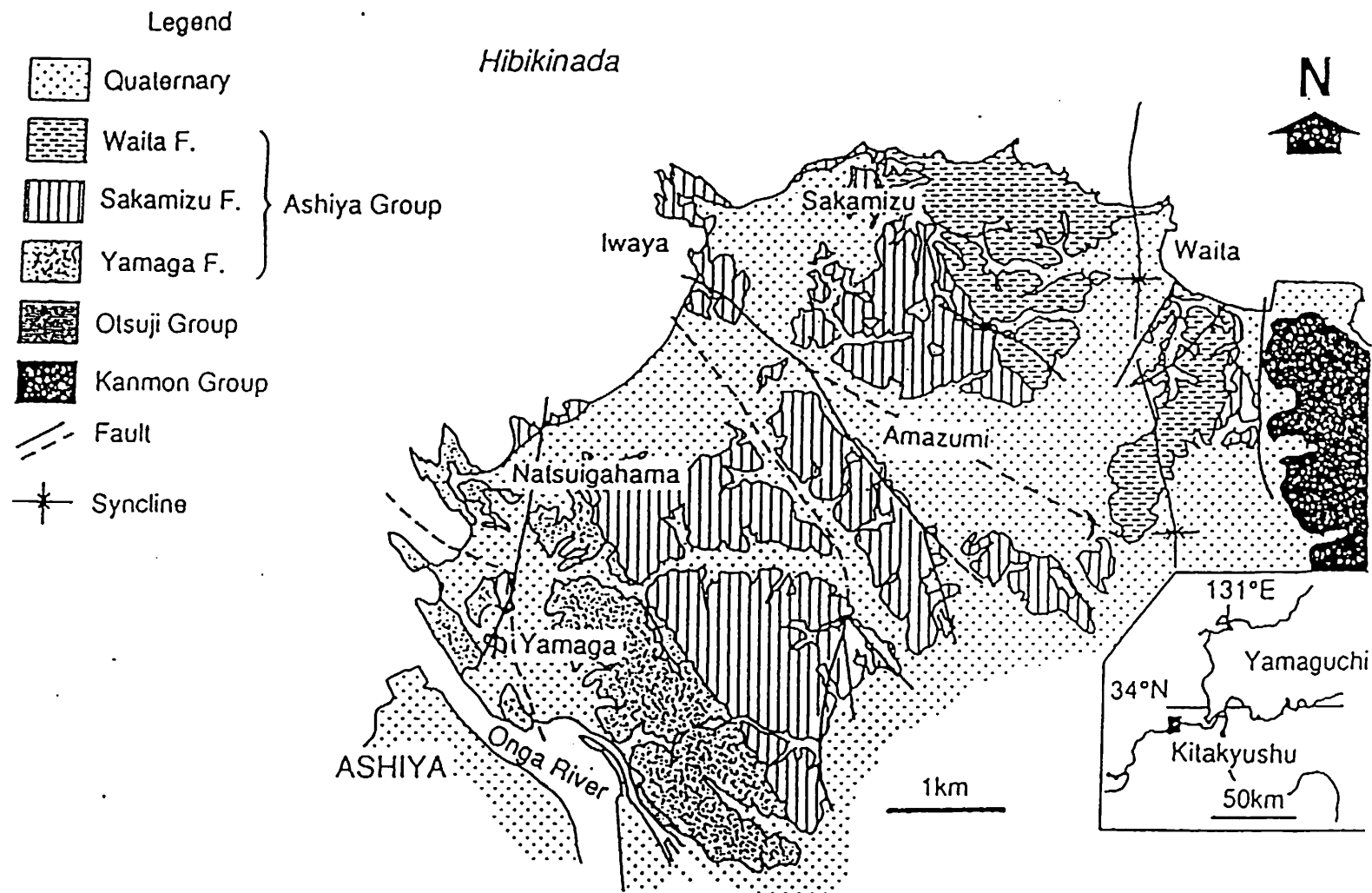
1) "ghost" type : オープンニコル観察では識別されず、クロスニコル観察で結晶内の波動消光パターンにより識別される、2) "pseudomorph" type : 石英が初生構築構造のアラレ石結晶体（またはそれが数個単位で融合したもの）に対応した形態とサイズをなすもので、通常 オープンニコル観察では識別しにくく、クロスニコル観察で識別される、3) "carbonate inclusion" type : 珪化部位にアラレ石結晶（多くは方解石化している）の一部が残っているもので、オープンニコル観察でも識別可能であるが、クロスニコル観察の方が判別し易い、4) "organic inclusion" type : 初生殻体の有機基質に由来すると思われる黒色または暗褐色物質が構築構造の配列パターンをとるもので、オープンニコル観察で識別される。また、珪化化石の周辺において、方解石セメント内に残存する間隙孔はしばしば length-fast chalcedony で充填されている。しかし、セメント自体は珪化を受けていない。岩屋では、珪化は *Glycymeris* の密集層の一部で小規模に散在して認められた。ここでは同一殻体内にアラレ石未変質部、方解石化部、珪化部が共存し、方解石化部位の周囲（のアラレ石部位）が珪化するものの、方解石化部位はその影響を受けていないことが確認された。これは、珪化は大局的に方解石化に先行するが、両作用が同時進行的に行なわれることもあり、局部的には方解石化が珪化に先行する場合もあり得ることを示唆する現象として注目される。

緑泥石化は竹の子島において、珪化化石の産出層準で認められた。しばしば同一殻体内に緑泥石化、珪化、方解石化がみられることがある。この場合、珪化が殻体内部から進行するのに対し、緑泥石化は殻体表面から内部に及んでいく傾向が認められる。薄片の鏡下観察において、緑泥石化部位に交差板構造、複合交差板構造、均質構造などの初生構築構造が識別された。とくにオープンニコル観察でこれらの構造の最小構造要素である針状結晶の配列を識別できることは、珪化部よりもさらに良好な保存形式であるといえる。一方で、緑泥石化部は珪化部よりも外圧による変形を受け易いことも認められる。

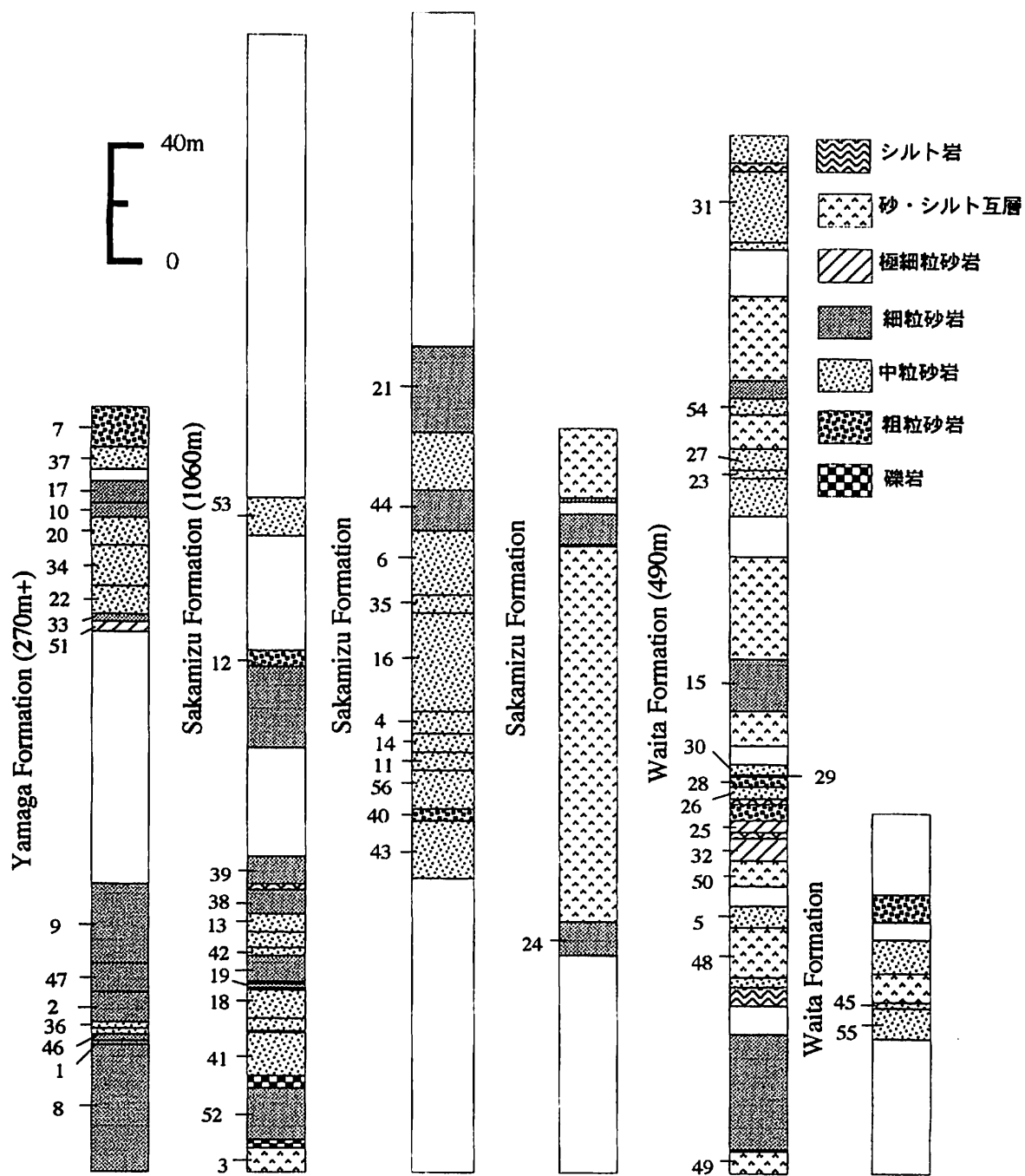
（3）脇田累層

本累層は模式地の北九州市八幡西区脇田周辺に分布する。砂岩と泥岩が数 m 以上

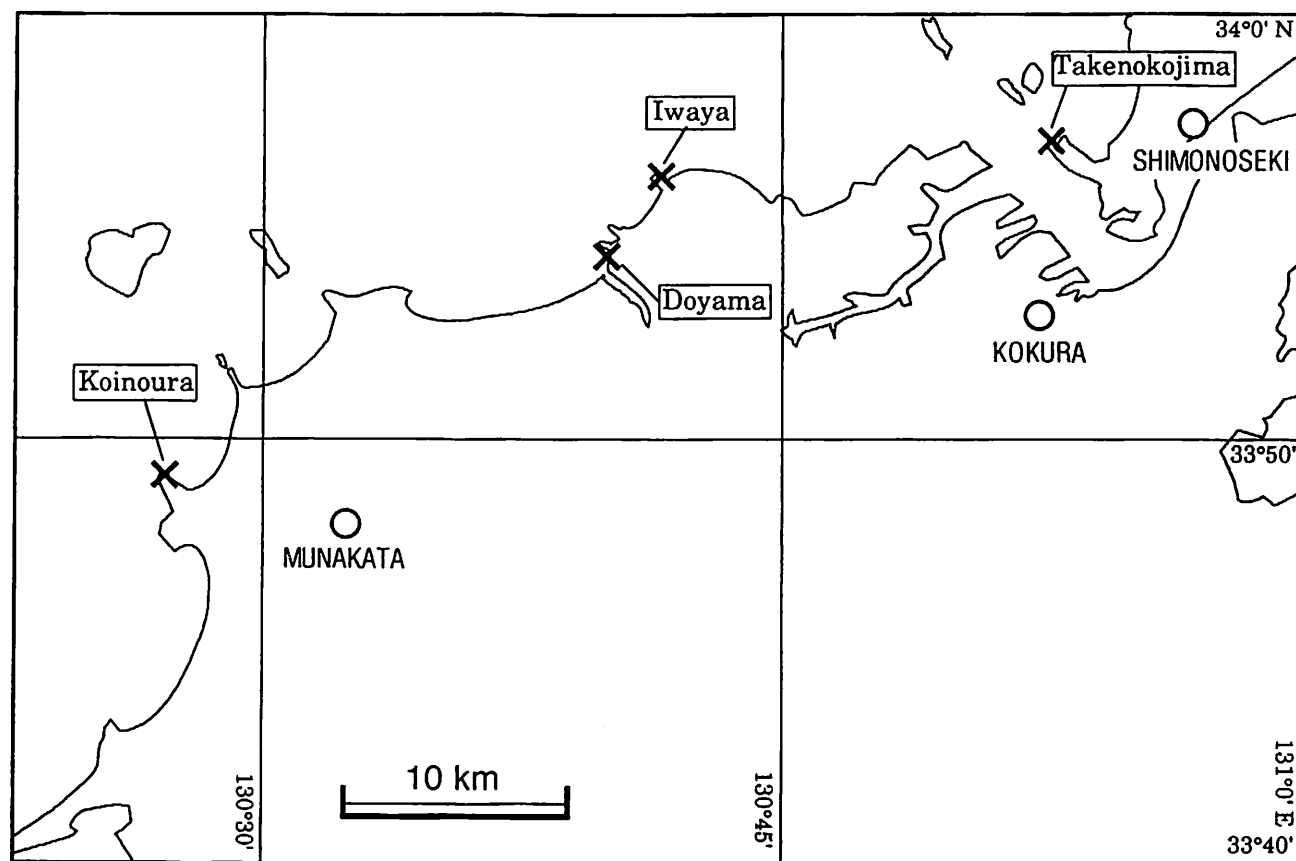
の単位で繰り返す厚互層となっている。一般に本累層は、一部の砂岩を除いて、固結度が低いことが大きな特徴である。弱固結部位はセメント質として緑泥石、緑泥石－モンモリロナイト混合層、イライトなどの粘土鉱物が少量検出されるか、ほとんど認められないこともある。この部位では、炭酸塩質殻体の大半が溶解してキャスト化している。一方、固結度の比較的高い部位は、フジツボ殻片の密集層を含む砂岩の一部に限られ、この部位では方解石セメントが発達する。炭酸塩質殻体が残存するのもこの部位に限られる。アラレ石質殻体は産出が少ないが、ほとんど方解石化している。*Ostrea* sp., フジツボなど方解石質のものは未変質である。



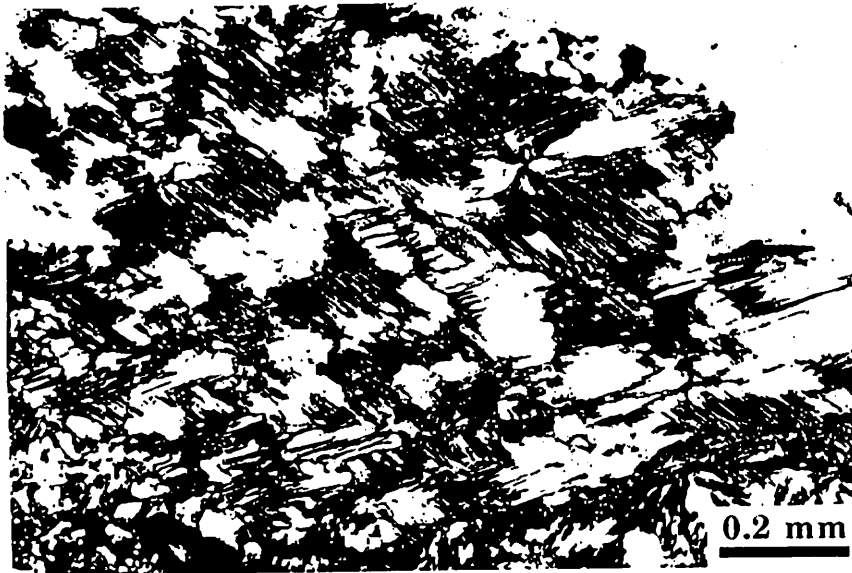
北九州・芦屋付近の地質図 (岡部・小原, 1972)



芦屋層群の地質柱状図



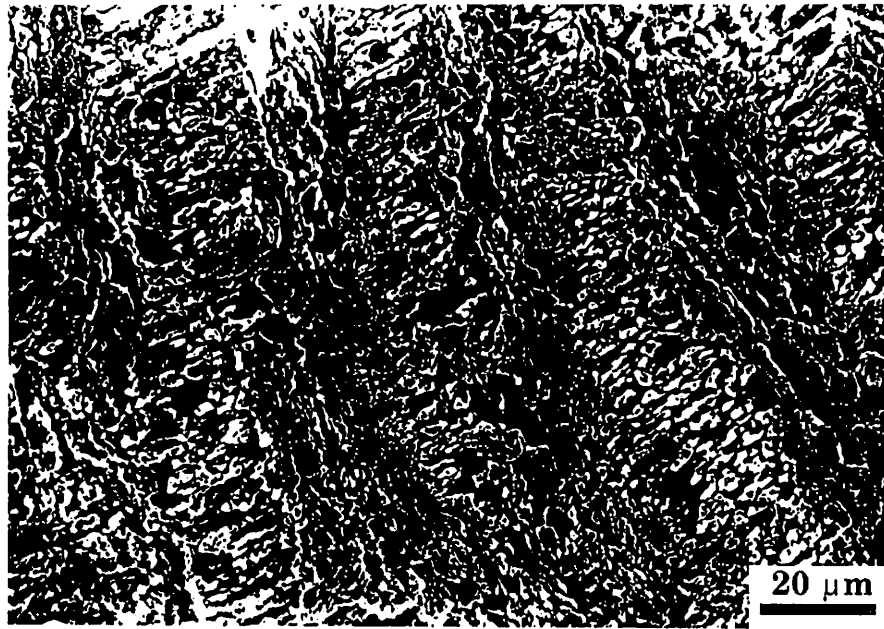
芦屋層群の珪化石産地



珪化殻体における"ghost" type の構造保存
クロスニコル



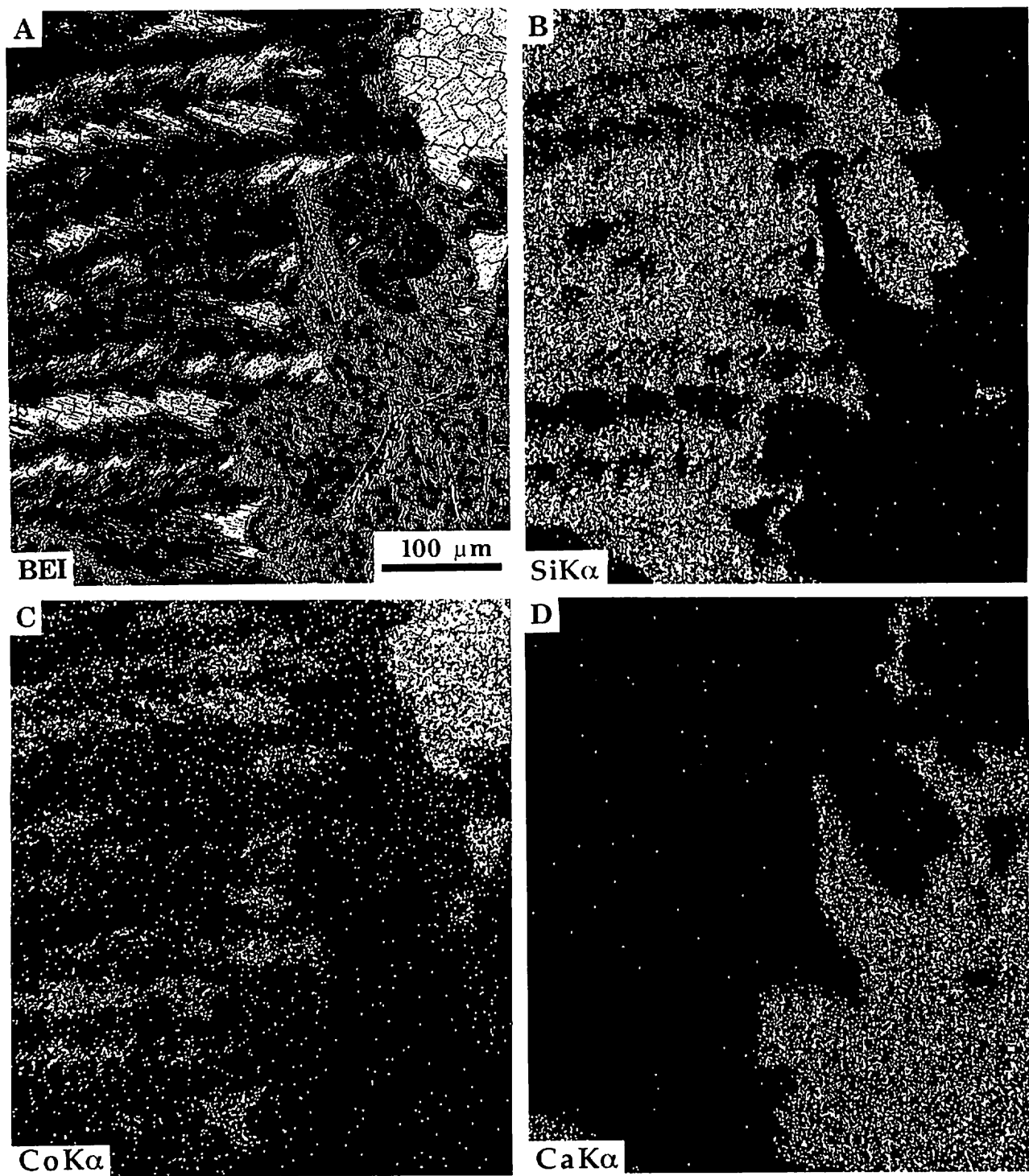
珪化殻体における"organic inclusion" type
の構造保存
オープンニコル



珪化殻体の交差板構造のSEM写真
4 % フッ酸によるエッチング.



珪化殻体中の自形石英のSEM写真
4 % フッ酸によるエッチング.



マイゲン染色を施したアラレ石一方解石一石英共存殻体の
元素分布像

A: 反射電子像, B: 珪素の分布 (石英=珪化部), C: コバルトの分布 (初生アラレ石部),
D: カルシウムの分布 (方解石化部) .

2. 万田層群勝立累層（中部始新統・福岡県大牟田市一帯）

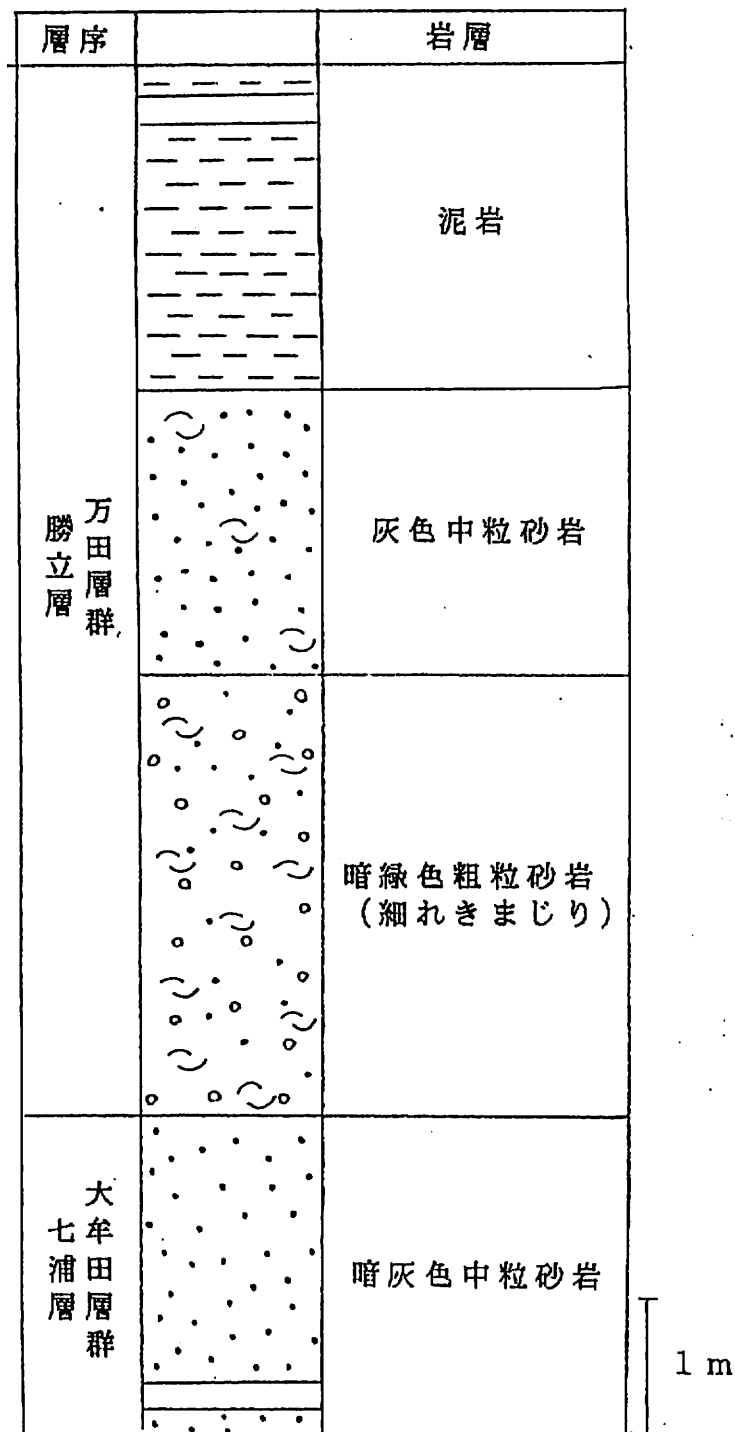
万田層群は下部の勝立累層と上部の四山累層からなり、下位の大牟田層群七浦累層を整合的に覆う。模式地である大牟田市勝立地区における本累層は、粗粒～中粒の灰緑色砂岩を主体とし、下部に砂質礫岩、上部に泥岩を伴う。ほぼ全層準から軟体動物化石を産出するが、砂岩部から多産する。この砂岩には *Glycymeris* sp., *Ostrea* sp., *Venericardia nipponica*, *V. mandaica*, *Cardium miikensis* などの二枚貝の他、巻貝、六方サンゴ、有孔虫などの化石が密集して含まれている。また、この砂岩は構成粒子として緑色鉱物を多量に含んでおり、X線回折とEDS分析の結果、その一部は緑泥石であるが、大部分は海緑石であることが確認された。薄片の鏡下観察では、緑泥石が帯緑褐色であるのに対し、海緑石は鮮やかな黄緑～緑色を呈することで区別し得る。海緑石粒子は他の碎屑粒子と同様のサイズ範囲で、一般に垂円状に円磨されている。砂岩のセメント質はモザイク状方解石からなり、少量のMg, Fe, Mnを含んでいる（3元素合計で3～5%）。しばしば碎屑粒子（海緑石を含む）の周囲を縁どって、柱状方解石が形成されていることがみられる。

初生的にアラレ石質であるものはほとんど方解石化し、この部位では初生的内部構造も、厚質の二枚貝殻体に局部的に残存する場合を除き、すべて消失している。有孔虫類の殻も低Mg方解石化している。一方、方解石質の殻体は未変質で初生構造も良好に保存されている。また、海緑石粒子内はオープンニコル観察で無構造であるが、クロスニコル観察では消光パターンにより、しばしば交差板構造、複合交差板構造など軟体動物殻体のアラレ石質構築構造を識別することができる。ある粒子では交差板構造の第3次薄板（針状結晶体）のオーダーまで認めることができるなど、構造保存は極めて良好である。方解石質構築構造はまったく認められなかった。上述のように、通常のアラレ石質殻体は方解石化し、海緑石による交代現象は認められない。しかし、多数の薄片を観察した結果、数個の所属不明の二枚貝殻体片において一部が海緑石で交代され、その内部に交差板構造が残存することを確認した。これら海緑石化殻体は共通して小型であることが特徴であり、通常の高体と異なる環境で生息していた可能性がある。また、殻体から遊離している海緑石粒子は砂岩中に分散しており、近接する場合でも、保存されている構築構造の連続性は認められないことから、海緑石による殻体の交代は、埋没以前に生じた現象と考えられる。ある環境で海緑石化した殻体が、碎屑粒子とともに運搬され、非海緑石化殻体などに混合されて埋没したものであろう。

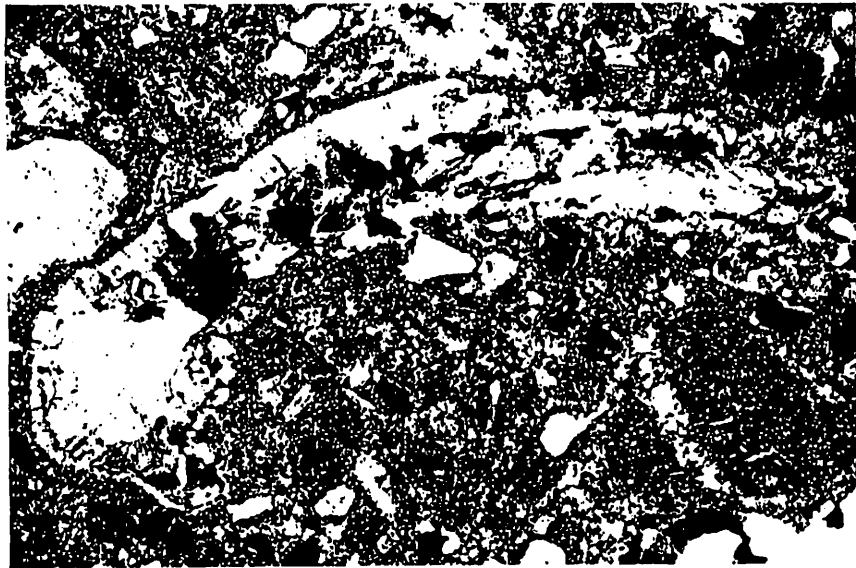
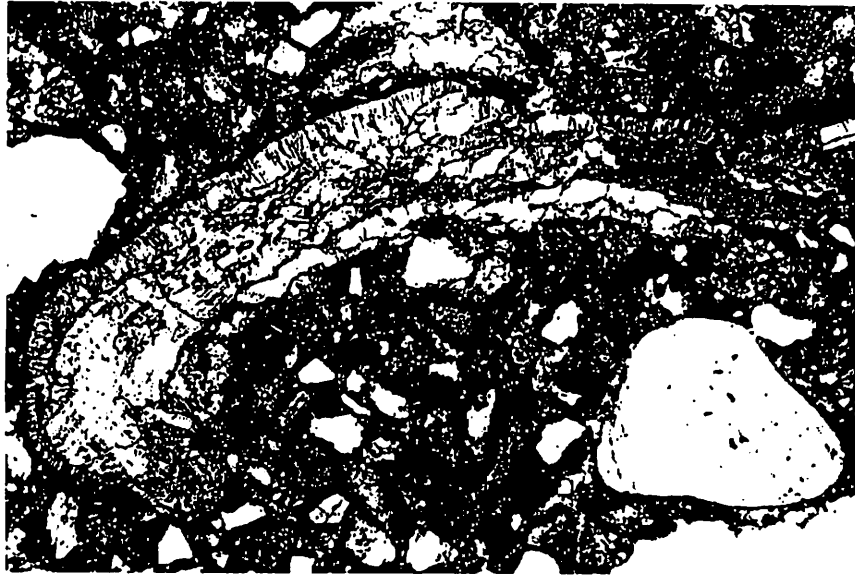
この他、局所的な脱炭酸塩化が認められる。この部分では碎屑粒子密度が増し、セメントは珪長質になっており、炭酸塩化石はすべてキャスト化している。しかし、脱炭酸塩化部位においても海緑石粒子内のアラレ石質構築構造は良好に保存されている。



大牟田市勝立地区における海緑石化殻体の主要産地



勝立地区における地質柱状図



部分的に海緑石化した小型二枚貝

上段：オープンニコル，下段：クロスニコル，×33.

3. 杵島層群杵島累層（上部始新統・佐賀県杵島郡北方町一帯）

杵島層群の最下部を占める杵島累層は下位よりA層～D層の4部層に細分される（井上，1972）。A層はアルコース質砂岩，B層は泥岩・砂岩互層，C層はグレイワック質砂岩，D層は泥岩主体の砂泥互層からなる。このうち化石が認められたのはB層とD層であり，A層とC層では確認できなかった。多くの場合，化石は殻体が溶脱してキャスト状になっているため，今回は比較的多量に産する上に炭酸塩殻体が残存するB層1地点（朝日町東方）とD層2地点（馬神，大峠）において検討した。各地点における母岩と化石の特徴は次のとおりである。なお，母岩の方解石セメントについては，結晶サイズから細粒セメント，中粒セメント，粗粒セメントに区分し，中粒セメントはさらに，再結晶による融合が認められないもの（中粒セメント1）と認められるもの（中粒セメント2）に細分した。

朝日町東方：この地点のB層は泥岩および淘汰不良の細粒砂岩からなり，いずれの部位からも化石を産するが，細粒砂岩からの産出が多い。泥岩部ではノジュール中から化石を産する。細粒砂岩の碎屑粒子の円磨度は低く，石英，長石類，流紋岩岩片，海緑石などからなる。この砂岩のセメントには珪長質と方解石質の2つのタイプがあるが，含化石部は方解石セメントである。さらに，このセメントは中粒セメント2と粗粒セメントの2つのタイプに識別される。前者の場合，化石殻体との境界は明瞭であるが，後者の場合は，その境界が不明瞭となっている。*Turritella karatsuensis* などアラレ石質殻体は大半が方解石化し，初生構造は消失している。また，方解石化した殻体の多くに，局部的にシリカによる交代が生じ，交差板構造などの構築構造が残存している。構造保存のタイプとしては，"carbonate inclusion" type と "gohst" type が認められる。前者のタイプでは，アラレ石結晶を未変質のまま取り込んでいることもある（炭酸塩染色法で確認した）。*Ostrea* と思われる方解石質殻体は未変質で，葉状構造が良好に保存されている。有孔虫殻は低Mg方解石化している。

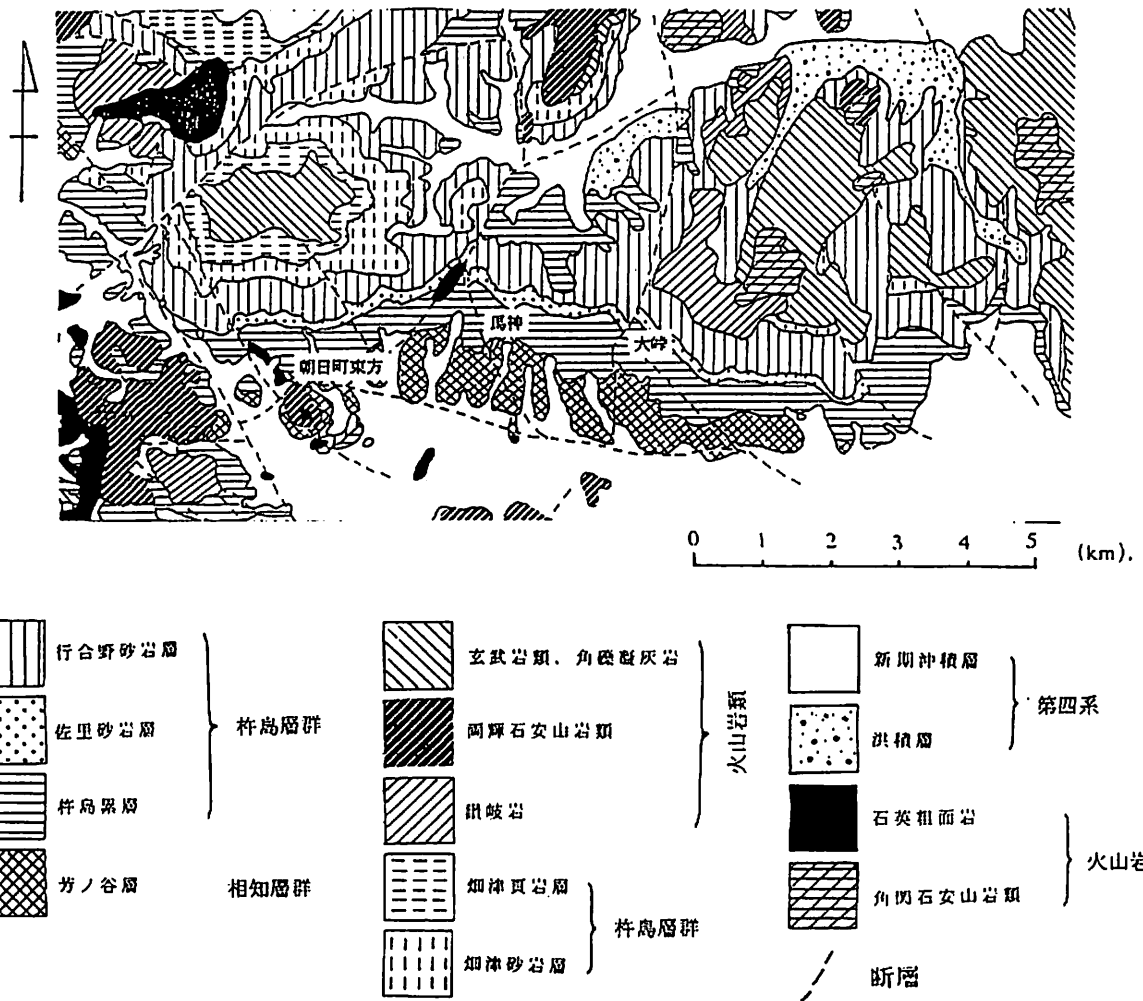
馬神：D層中部に位置する本地点は，淘汰不良の砂質シルト岩で構成されている。セメント質は珪長質と方解石の混合セメントである。方解石セメントは中粒セメント2に相当する。この地点では碎屑粒子の間隙はセメント質による充填が不完全であるが，この傾向はこの砂質シルト岩が固結度が全体に弱いことと調和的である。また，中粒セメント2の部位では，化石殻体が溶解して薄化しており，この傾向は珪長質セメントが優勢になるにつれて顕著になる。アラレ石質殻体は方解石化しているが，構築構造は不明瞭ながら識別することができるケースが多い。また，珪化も部分的に生じていることが確認された。これまでのところ，方解石質殻体は産出しておらず，続成変質状況は不明である。有孔虫殻についても未検討である。

大峠：この地点はD層上部に位置し，淘汰不良の中粒シルト岩で構成される。セメント質は方解石セメントで，細粒セメントから中粒セメント1までが識別される。細粒セメントの部位では，アラレ石質殻体が未変質で構築構造がほぼ完全に保存さ

れる。一方で、中粒セメント1の部位では、殻体の溶解・薄化や部分的な方解石化・珪化も認められるなど、多様な続成変質が生じている。なお、珪化に伴う構造保存のタイプは朝日町東方と同じである。方解石質殻体は含まれていない。有孔虫殻は低Mg方解石化している。

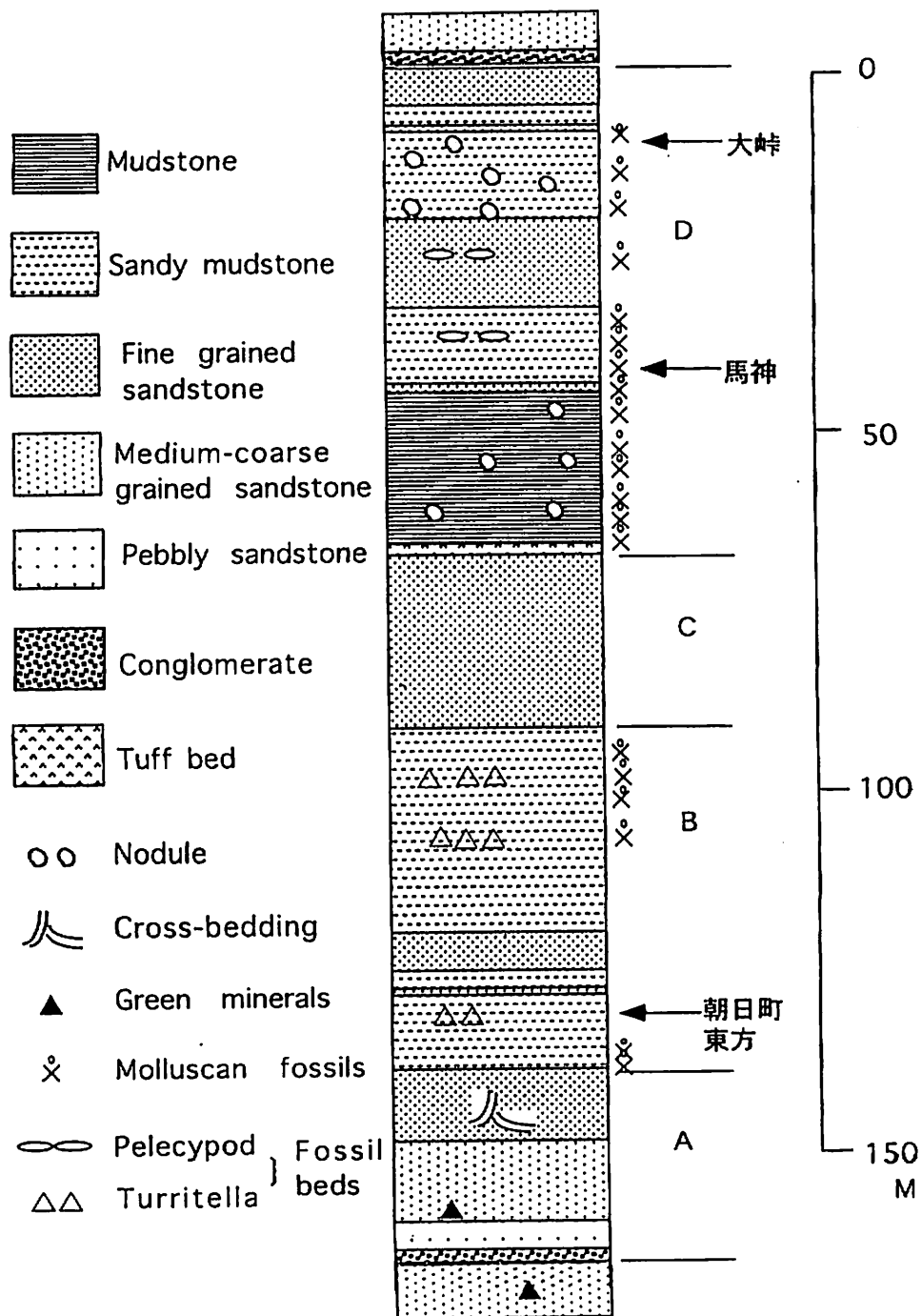
以上3地点のアラレ石質殻体の変質状況を比較すると、大峠→馬神→朝日町東方の順で方解石化（およびこれに伴う構築構造の崩壊）の程度が進行しており、母岩の方解石セメントの粒径変化に対応している。すなわち、細粒セメント→中粒セメント1→中粒セメント2→粗粒セメントの順に化石殻体の方解石化が進んでいる。一方、アラレ石質殻体の珪化現象はいずれにおいても認められ、すべて局部的なものであり、顕著な地域差は確認されない。これは、珪化が埋没段階の比較的早いステージで行なわれ、その後のステージでは進行しないことを示唆するものと考えられる。方解石質殻体は1地点（朝日町東方）で産出したにすぎないが、この地点ではアラレ石質殻体の変質が最も進行しているにもかかわらず、未変質であることから、杵島層の他の地域においても方解石質殻体の変質はとくに生じ得ないものと判断される。また、高Mg方解石質の有孔虫殻は大峠において既に低Mg方解石化していることから、埋没過程の極めて早い段階でMgの離脱が生ずるものとみられる。

EDS分析によれば、方解石セメント中には少量のMg, Mn, Feが含まれる（3元素合計で6%前後）。未変質のアラレ石質殻体にはこれらの元素はまったく含まれていない。方解石化した殻体では、これらの元素を少量含むようになり、大峠→馬神→朝日町東方の順で含有量が増加してセメント中の含有量に近くなる傾向がみられる。この傾向は上記の方解石化の進行過程およびセメント質の変化過程と極めて調和している。3地点は層準的に異なるばかりでなく、この地域の杵島層堆積盆地における地理的位置が異なっている。朝日町東方は堆積盆地の中心に近く、馬神、大峠の順で中心から縁辺域に向かう。このことから、大峠が最も埋没深度が浅く、馬神、朝日町東方の順で深くなるとみなされる。したがって、アラレ石質殻体は、埋没深度の増加に伴い、方解石化して母岩の方解石セメントとともに再結晶化を繰り返し、次第にセメント質と同化して行くものと考えられる。



佐賀北方町付近の地質図

建設省九州地方建設局久留米事務所（1968）を一部改変。



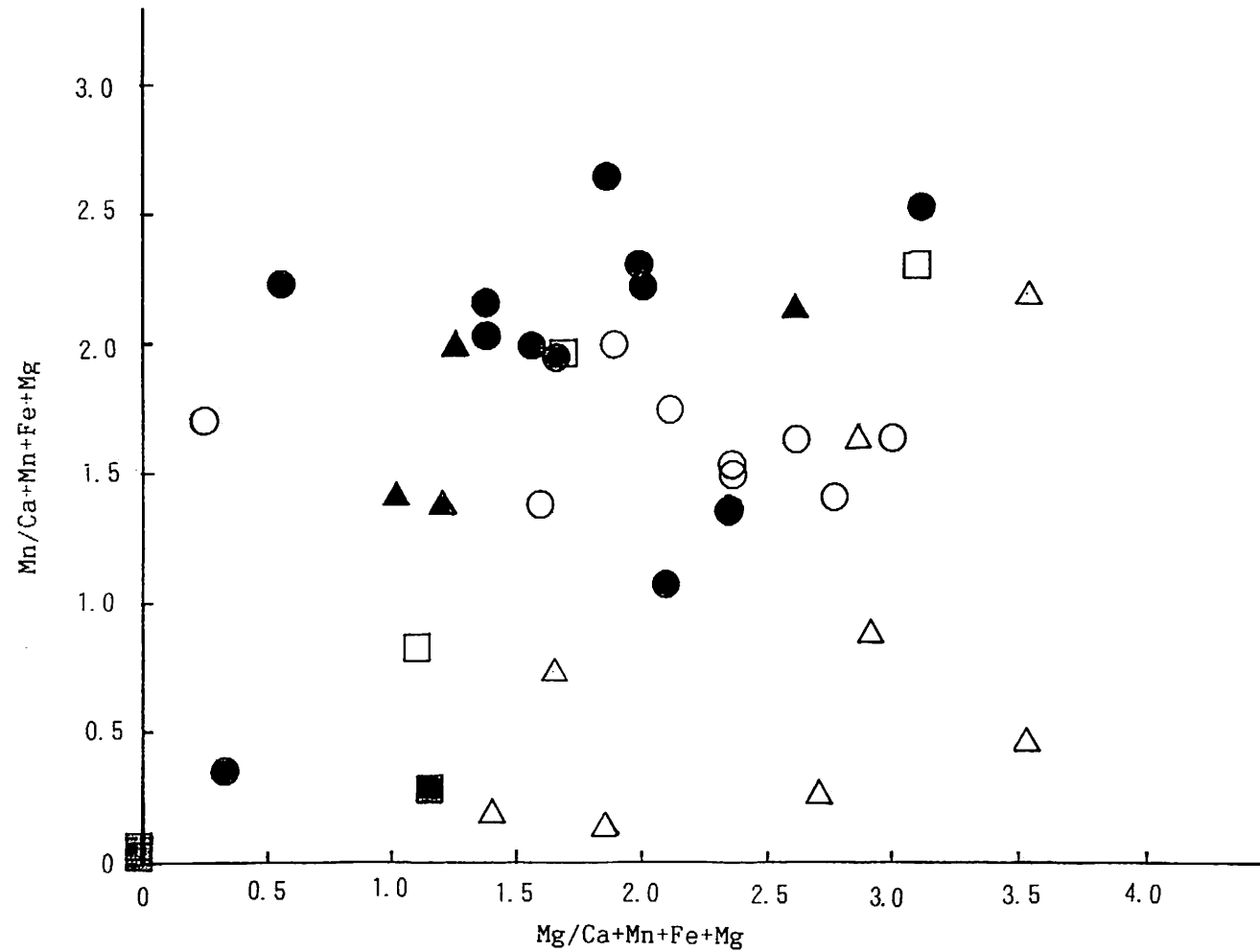
杵島累層の模式柱状図
井上（1972）に加筆.



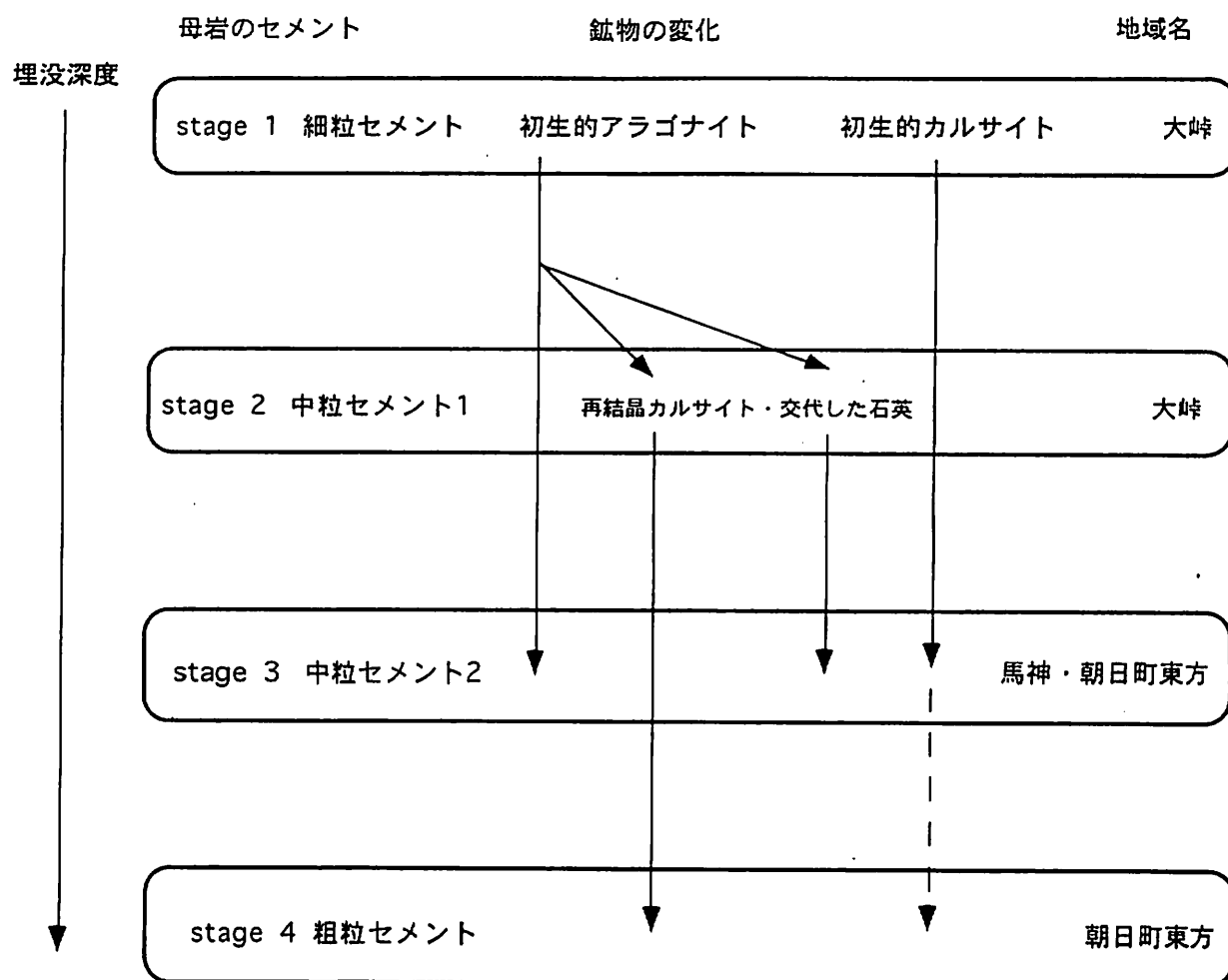
馬神 珪化部 95050301-4 × 8 8



朝日町東方 珪化部 T1e × 8 8



杵島累層における炭酸塩鉱物の元素組成



杵島累層における続成変質概念図

4. 下島層群（中部始新統・熊本県牛深市一帯）

下島層群は白亜系姫の浦層群を不整合に覆い、下位より福連木累層、志岐山累層、砥石累層からなり、天草下島に広く分布する。牛深市内では、これらの全層序を確認することができるが、砥石累層においては軟体動物殻体の大半が溶脱してキャストとなっているため、今回は福連木累層と志岐山累層を対象とした。

（1）福連木累層

本地域における本層は明石岬付近と市南部の下須島東岸に狭長に分布する。基底礫岩層とタービダイト相の砂泥互層からなり、互層中には礫岩薄層がしばしば介在する。また、全体に異常堆積相を示し、スランプ褶曲やオリストリスが頻繁にみられる。全層準に渡って*Turritella (Colpospira) okadai*を産出し、砂岩部ではこれが密集層をなすことがある。基底礫岩や砂岩部からは、*Glycymeris* sp., *Ostrea* sp. の他、所属不明の軟体動物や六方サンゴ、サメの歯、コケムシ類、フジツボ等を散点的に産出する。また、砂岩部からはしばしば*Nummulites*などの有孔虫を多産する。含化石部位のセメント質は細粒方解石であることが多く、黄鉄鉱のフランボイダル集合体を伴う。時に珪長質セメントを主とし、モザイク状方解石が散在することもある。方解石セメントは少量のMg, Mn, Feを含有する（3元素合計で5%前後）。下須島の黒崎南岸では、セメント質がアンケライトであることが確認された。巻貝類の螺管内や母岩と化石片の間隙はモザイク状方解石で充填されることが多いが、黒崎南岸ではセメント質同様にアンケライトにより、また、黒崎北岸では方解石による充填後に燐灰石結晶が多量に形成されている例が認められた。さらに、明石岬、下須島正平などではカルセドニーで充填されるものもみられた。この他、明石岬では螺管内に重晶石結晶が形成されている例も認められた。

アラレ石質殻体は一般に方解石化し、初生構造が消失している。方解石化殻体のMg, Mn, Fe含有量は同一地域でも個体または部位によって異なり、0～7%の範囲に及び、変質が初期的なものからほとんどセメントと同化しているものまでみられる。この他、地域により多様な変質現象が観察される。珪化はかなり普遍的に認められ、明石岬、黒崎北岸、黒崎南岸、正平等で確認された。とくに正平では殻体の大半が珪化しており、方解石化部位は小範囲でみられるにすぎない。珪化部には"carbonate inclusion" type と"ghost" type の保存様式で構築構造が残存していることが多い。また、珪化部周囲は多角状を呈し、自形をしめす石英結晶を確認できる。なお、明石岬では、方解石化した殻体の表面や割れ目に沿って細粒の石英が密集し、殻体内部に向かって自形結晶を晶出させている例が認められた。この場合、石英中に構築構造などは残存せず、通常の珪化パターンとは異なる。黒崎南岸では、セメント質とともにアラレ石質殻体も珪化部以外はアンケライト化している。アンケライト結晶は細粒で自形をとることが多く、結晶内部に構築構造はまったく残存しない。下須島髪掃除ではシルト岩から産し、殻体は菱鉄鉱となっているが、殻体表面から内部に向けて自

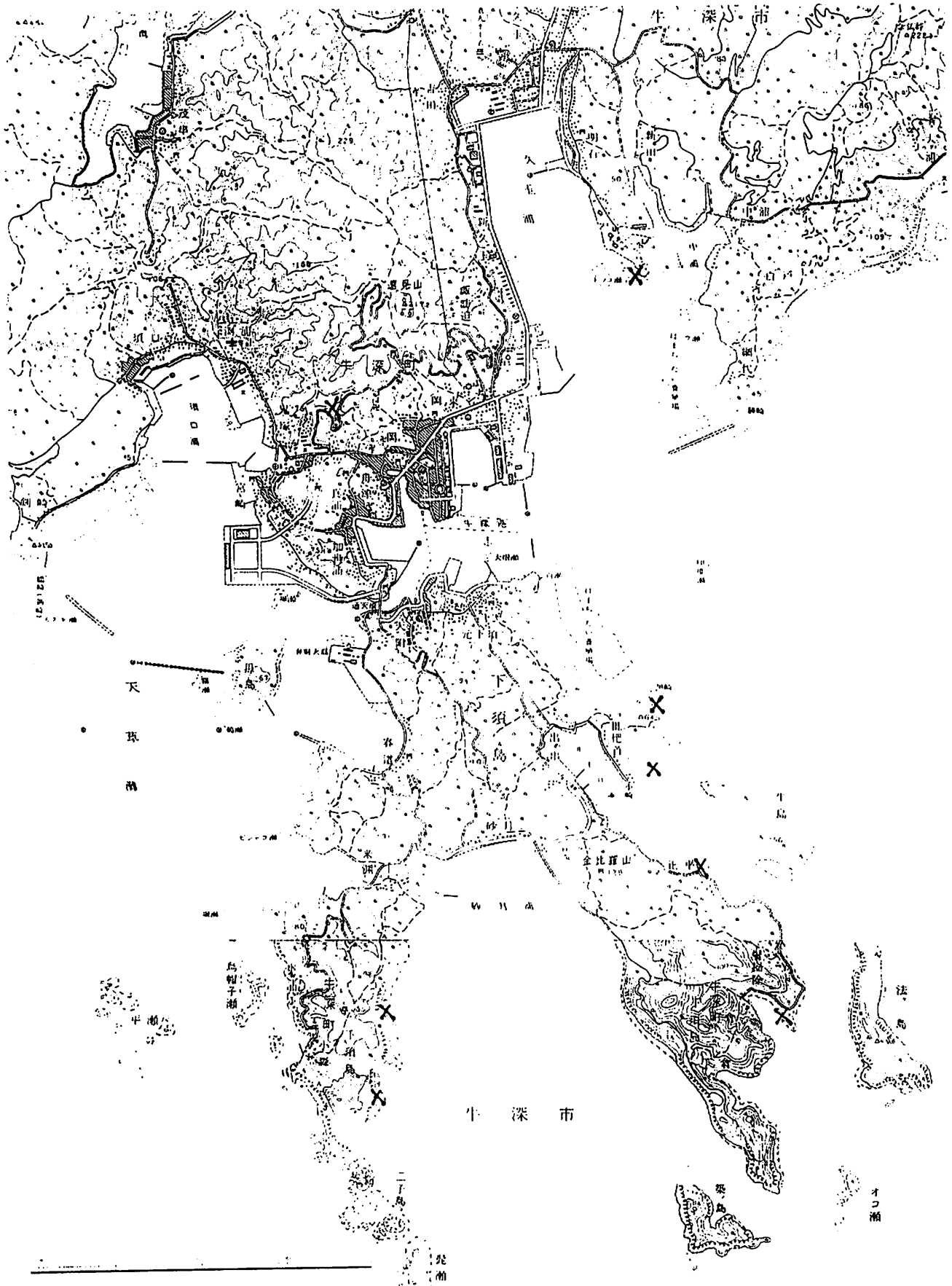
形結晶が成長する部位もあり，中央は空洞となっている．さらに，明石岬では，重晶石がアラレ石質殻体内に形成されていることが確認された．

Ostrea sp. など方解石質殻体は未変質で，葉状構造やチョーク層などの初生構築構造が良好に保存されている．一方，有孔虫殻は低Mg方解石化しているが，アラレ石質殻体の方解石化部位に比較すると，Mg量はやや多い．これは元来高Mg方解石である有孔虫殻の変質（Mgの離脱）を示すのか，あるいは低Mg方解石化後のセメントとの同化を意味するのかは不明である．黒崎南岸では，有孔虫殻もアンケライト化している．明石岬と黒崎南岸では，有孔虫殻内に石英が形成されているが，高Mg方解石質殻の珪化か，溶脱後のシリカによる充填かは判断できない．

（２）志岐山累層

本層は砂岩泥岩互層からなり，上部に”遠見山化石帯”と呼ばれる *Venericardia* を主とする軟体動物化石の密集層がみられる．この化石層の母岩は細粒砂岩～シルト岩で，セメント質は不明瞭であるが，細粒の方解石からなる．化石はすべてアラレ石質の殻体で，方解石質のものは含まれていない．また，有孔虫も確認されなかった．

アラレ石質殻体は一般に方解石化し，初生構造は消失している．遠見山公園と下須島砂月浦では，部分的に石英により交代され，初生構築構造を保存している．保存様式は"carbonate inclusion" type が多い．珪化部周辺で石英は自形を示す．また，遠見山公園では *Venericardia* 殻体の一部が緑泥石によって交代され，交差板構造を極めて良好に保存していることが見いだされた．この緑泥石化部位は開放ニコル観察では褐色で無構造であるが，クロスニコル観察で，上記構造を確認することができる．



下島層群の主要化石産地

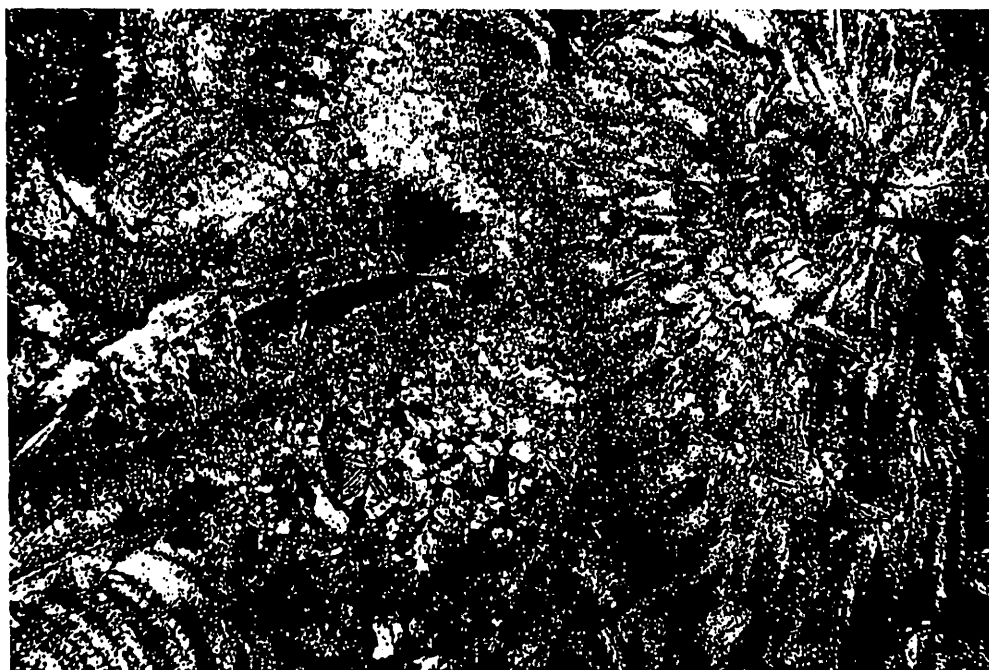


方解石化巻貝殻体の内部構造

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40.

CL像で観察されるパターンは交差板構造第1次薄板の配列に酷似するが，殻体の他の部位ではみられない。

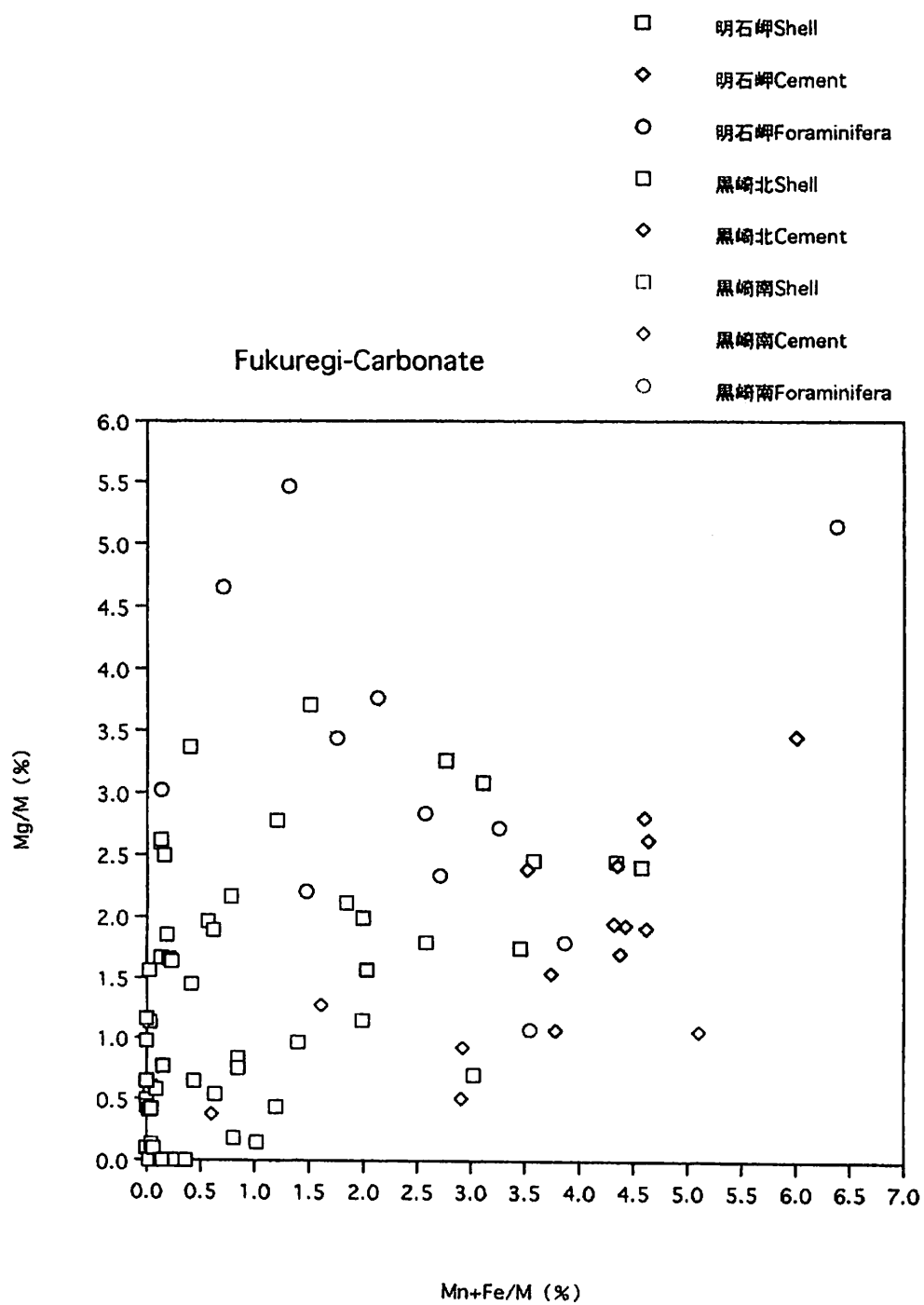
クロスニコル像で右上方に散在する白斑は珪化部。



有孔虫化石を分断する方解石細脈

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40.

この細脈はクロスニコル像では識別できない.

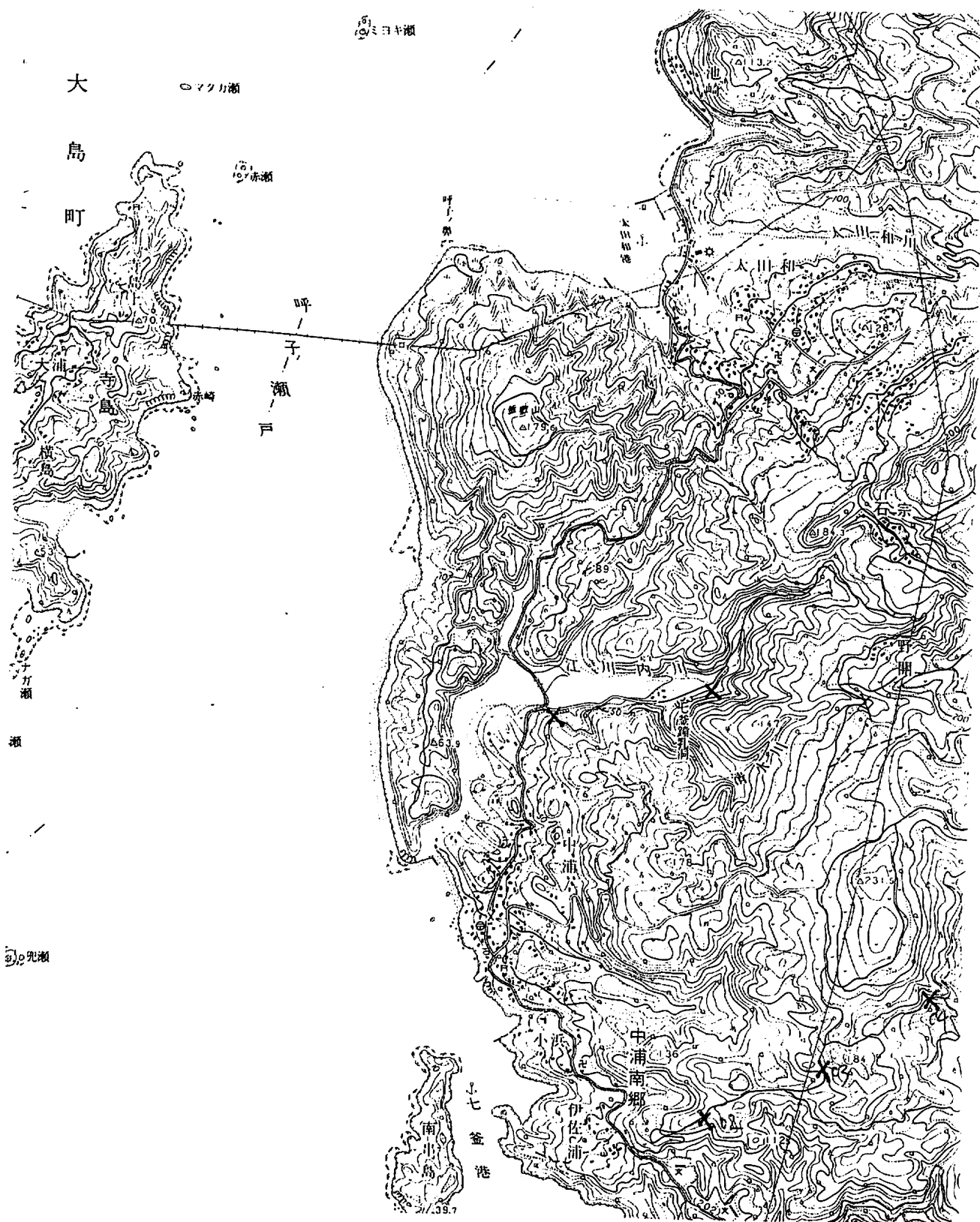


福連木累層の炭酸塩鉱物の元素組成

5. 西彼杵層 群七釜 砂岩層（上部始新統・長崎県西彼杵郡 西海町一帯）

西彼杵半島の西彼杵層群は、岩相から6部層（下位より板ノ浦砂岩層、福島砂岩層、七釜砂岩層、釜敷山凝灰岩層、釜敷山互層、呼子ノ鼻砂岩層）に区分される（井上，1963）。本部層は間瀬階相当層で、直径数 cm に達する球状の石灰藻化石（*Lithothamnion* sp.）を多産し、この密集層は石灰岩となって鍾乳洞（七釜鍾乳洞）を形成している。*Glycymeris* sp., *Venericardia vestitoides*, *Ostrea lunaefirmis* などの二枚貝化石も産するが、今回は *Ostrea* を確認できなかった。砂岩部は、地域全体を通じてモザイク状方解石セメントが発達している。大型化石を産しない部位においても、石灰藻の破片が多数含まれ、有孔虫も認められる。石灰岩部では、石灰藻球間がその破片や少量の細粒碎屑粒子を伴って細粒方解石セメントで包埋されている。

石灰藻は網の目状の内部構造を良好に保存している。一方、有孔虫殻は方解石セメントとの同化が進行し、痕跡的に観察されることもある。これらはともに高Mg方解石質で、Mg含有量は石灰藻の方が多いため、石灰藻がより同化し易いと思われるが、観察結果はその想定とは矛盾する。さらに、一部地域においてなどのアラレ石質殻体が完全に溶解してキャスト化しているにもかかわらず、石灰藻が方解石セメントとともに良好に保存されていることが確認された。EDSによる元素分析を行っていないが、現段階では、石灰藻は堆積直後（あるいはそれ以前）に低Mg方解石化して、アラレ石が溶解し得る埋没環境になっても溶解せずに残存したものと考えられる。



七釜砂岩層の石灰藻化石採集地

国土地理院発行2万5千分の1地形図「面高」を使用。

6. 豊西層群 吉母累層（下部 白亜系・山口県 下関市 吉母一 豊浦町室津）

豊西層群は山口県南西部に分布し、下部の清末累層と上部の吉母累層に区分される。吉母累層は主に砂岩と頁岩の互層からなり、汽水生の軟体動物化石を大量に産出する。又、本層の一部は白亜紀末期の花崗岩の貫入によると思われる接触変成作用を受けている。この影響は通常の続成変質とは異なるが、続成変質の実態を知る上で有効な比較資料となるため、変成部も含めて検討した。今回は以上の点と露頭状況を考慮し、下関市吉母地区北方と豊浦町室津地区の響灘沿岸を対象にした。なお、吉母地区北方域においては、東西方向に伸びる背斜構造のため、背斜軸部に清末累層が露出しており、吉母累層は南北に二分されている（以下、吉母南岸、吉母北岸と仮称する）。

吉母南岸：本地域では、清末累層との境界付近から南方に約 200 m 付近まで、層厚約 150 m に渡って *Ostrea* sp. を主とする化石密集層（厚さ 20～150 cm）が 20 枚以上挟まれている。通常、この密集層は砂岩部にみられ、頁岩部には *Astarte* sp., *Corbura* sp. などの二枚貝や小型の巻貝類が散在する。有孔虫などの化石はまったく確認できなかった。また、一部にヒン岩岩脈の貫入がみられる。含化石部の母岩セメント質は、一般に細粒の方解石からなるが、しばしば、方解石セメントと珪長質セメントが混合していることもある。吉母南岸全域を通じて、次のような化石の続成変質が認められる。アラレ石質殻体は方解石化して初生構造は完全に消失している。また、黄鉄鉱で充填されていることもある。一方、方解石質殻体は未変質で構築構造を良好に保存しているものから、再結晶によって粒状化して構造を消失しているものまで多様な段階が認められる。粒状化している場合、方解石は細粒であり、アラレ石質殻体の方解石化とは容易に識別される。この他、比較的下部の化石密集層において方解石質殻体が部分的に珪化していることが確認された。珪化部位に初生構造は残存していない。非珪化部位は粒状化が始まっているが、不明瞭に構造を識別することができる。なお、ヒン岩の貫入による影響はとくに認められなかった。

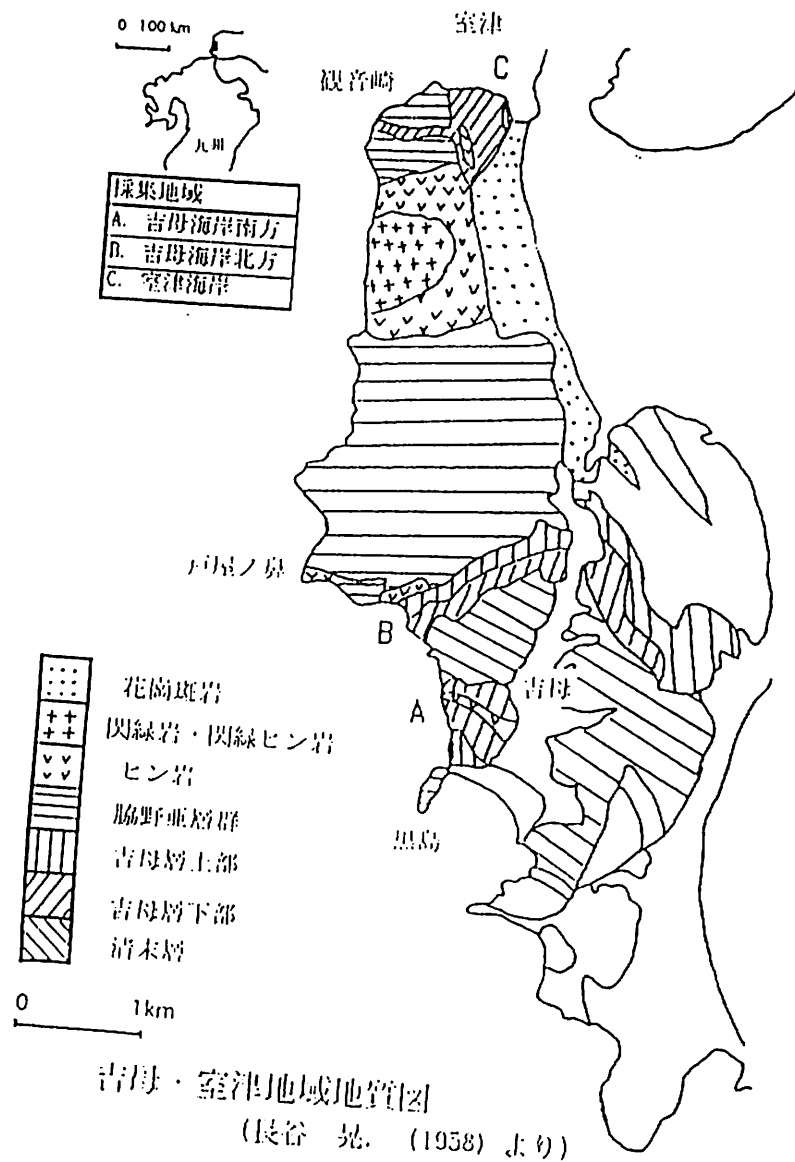
吉母北岸：本層は断層や褶曲の発達で構造的に乱れているが、基本的に吉母南岸と同一層準にあたり、岩相や化石の産状もよく似ている。ただし、上部層準においては化石殻体が溶脱しキャストとなっており、セメント質の方解石も消失している。この部分は肉眼的にも白色を呈し、通常部位とは区別できる。しかし、本地域における最大の特徴として、部分的にホルンフェルス化しており、化石もその影響を受けていることである。ホルンフェルス化部位は非変成部位中に島状に点在するが、大局的には北方ほど多くみられる傾向がある。非変成部位の化石の変質状態は吉母南岸と同様で、方解石質殻体では構築構造が良好に保存されていることもある。ただし、珪化については確認していない。ホルンフェルス化部位の化石殻体には次の

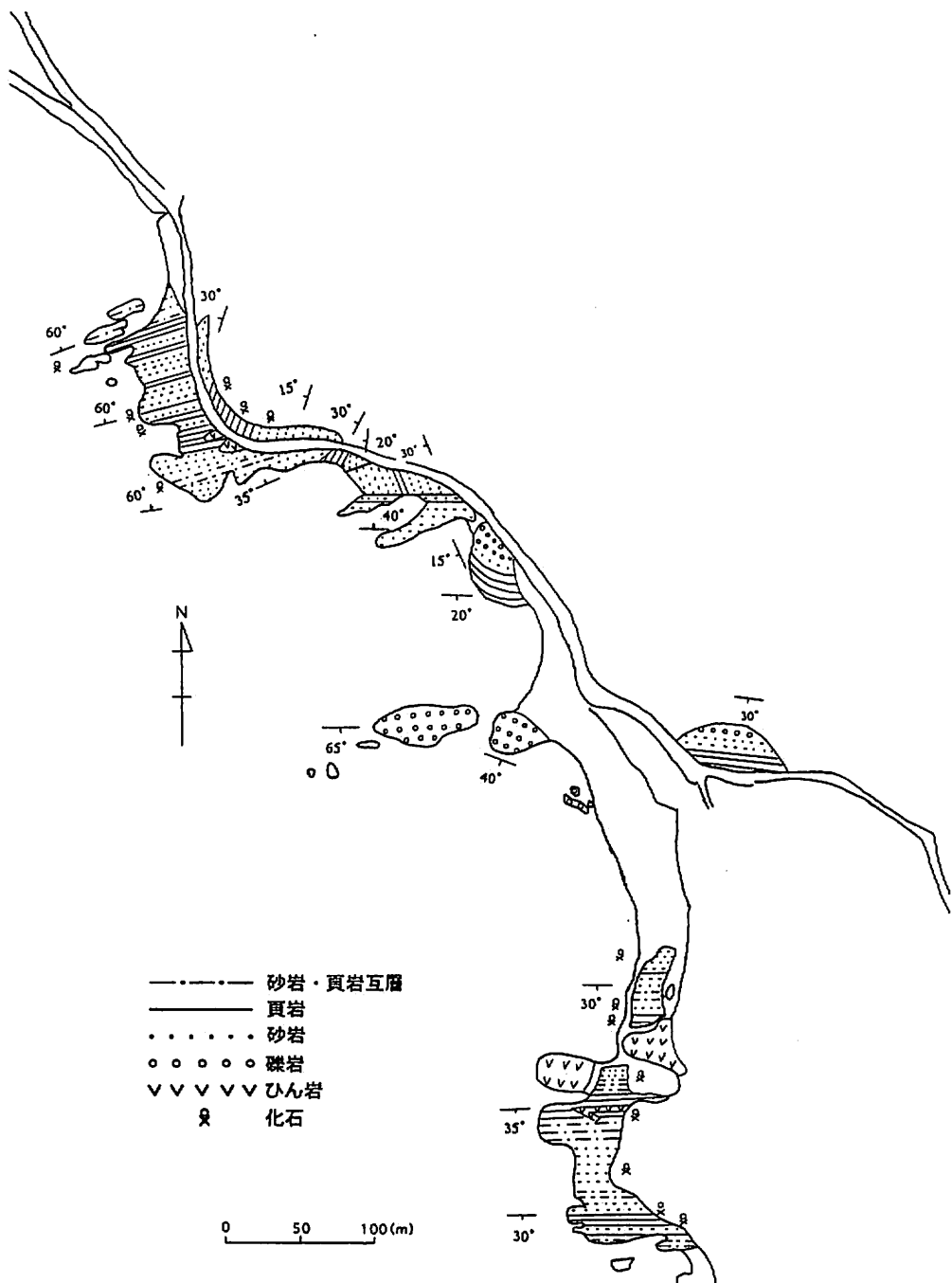
ような鉱物組合せが観察される；a) 方解石—緑泥石—黄鉄鉱，b) 方解石—緑泥石—緑レン石—石英—黄鉄鉱，c) 単斜輝石—アクチノ角閃石—珪灰石—黄鉄鉱—緑泥石—緑レン石，d) 黄鉄鉱—緑泥石—石英—緑レン石—アクチノ角閃石—単斜輝石，e) 黄鉄鉱—白雲母—黒雲母—緑泥石—石英．いずれの場合も初生構造は残存しない．

室津地区：本地域の吉母累層はすべてホルンフェルス化しており，未変成部位は分布しない．肉眼的には個々の化石殻体を識別することができるが，薄片の鏡下観察では，殻体と母岩は同化しており，その境界を識別することは困難である．初生構造は完全に消失している．含化石部とその周囲は珪灰石，灰長石，石英からなり，しばしばザクロ石や単斜輝石を伴う．

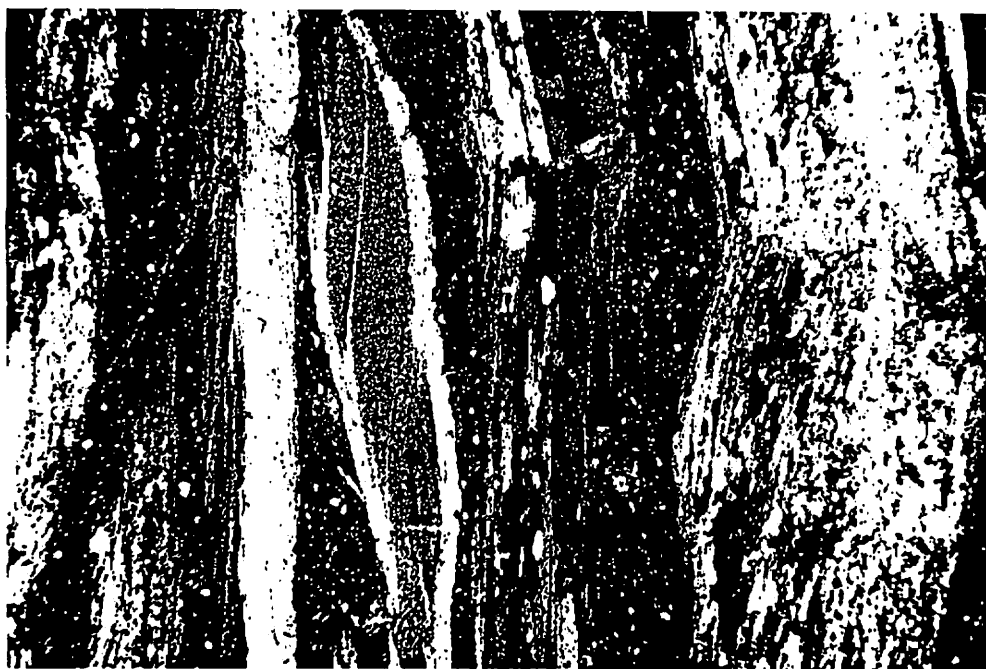
層序表

時代	層序		
白亜紀	関門層群	脇野亜層群	
	豊西層群	吉母層	上部
			下部
ジュラ紀		清来層	
	豊浦層群		





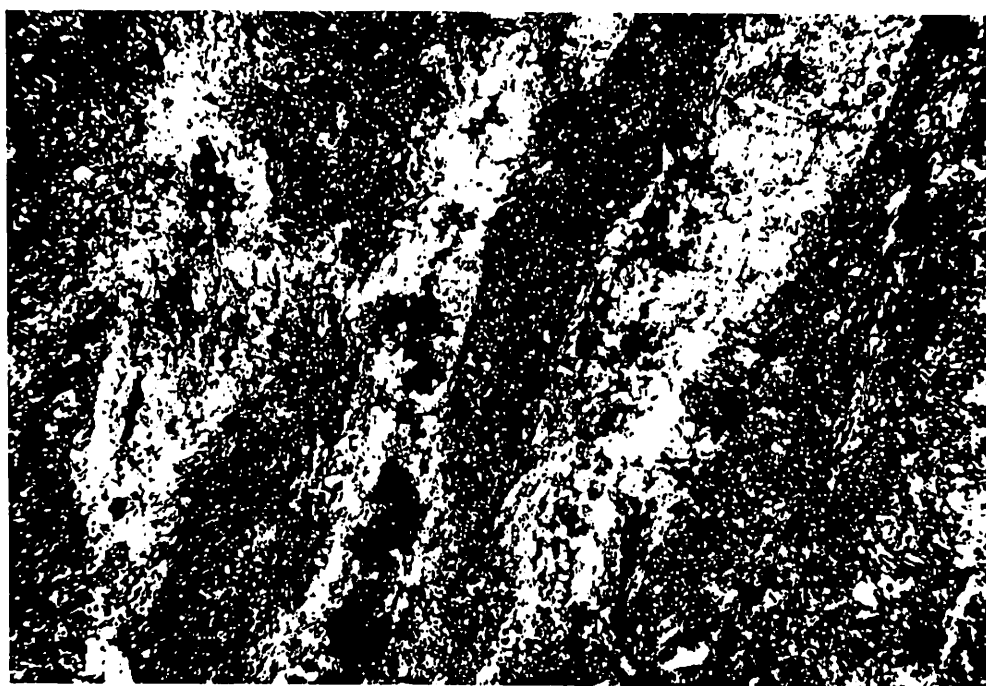
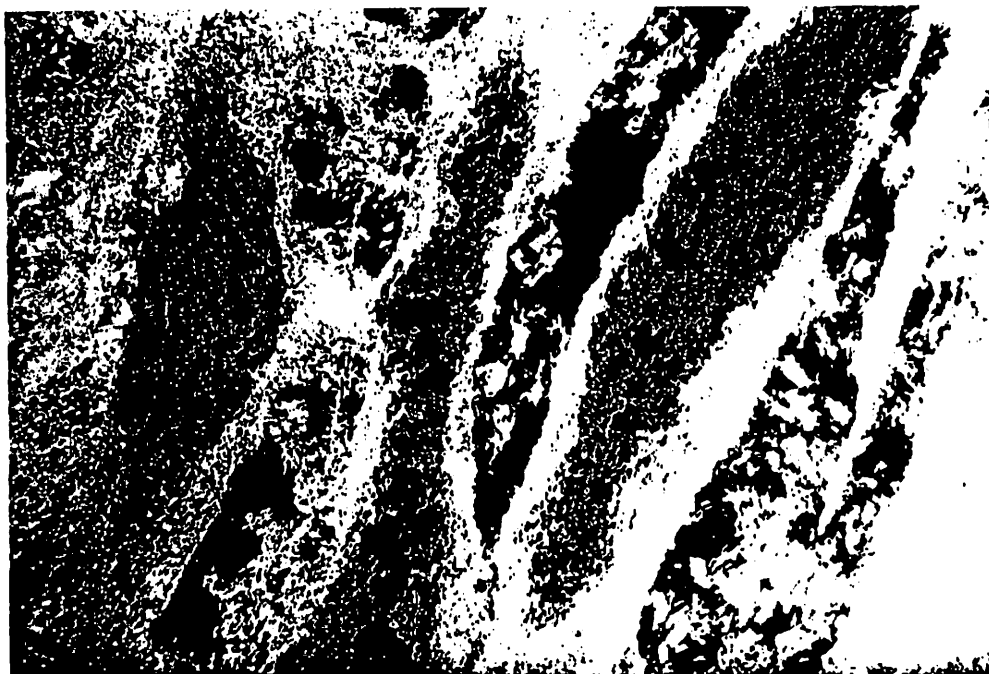
吉母地区のルートマップ



吉母南岸の方解石質二枚貝殻体

上段：CL像，下段：クロスニ科尔，×40.

Ostrea sp. 右端の殻体では再結晶化がみられる.



吉母北岸の方解石質二枚貝殻体

上段：CL像，下段：クロスニコール，×40.

Ostrea sp. 殻体の中央部を除き，ほとんど緑泥石が生じている.

7. 出雲層群（中部中新統・島根県松江市一出雲市）

宍道湖南岸には白亜系～古第三系火成岩類を基盤として、新第三紀の石見層群、出雲層群が東西に延びて分布する。出雲層群は海生軟体動物化石を豊富に産出することで知られ、下位より来待累層、布志名累層、松江累層に区分される。このうち、来待累層については松江市南方の布志名地区において、布志名累層については布志名地区と出雲市南方の菅沢地区において、松江累層については松江市北東方の南家地区において、各々炭酸塩化石の続成変質の検討を行なった。

（1）来待累層

布志名地区における本層は石見層群大森層の安山岩を不整合で覆っており、基底部の礫岩層と主部の含礫砂岩層からなる。化石は全層準で認められるが、基底部に密集しているのに対し、主部ではやや散在型の産状を示す。化石群は pectinid 類、ostreid 類、mytilid 類を含む多種類の浅海生軟体動物、有関節腕足類の *Coptothyris grayi*、六方サンゴ、有孔虫などからなる。このうち六方サンゴは群体で礁を造っていたものとみられるが、長径数cm～10数cmの塊状となっており、基底部礫岩層に集中して見られる。

基底部の礫は下位の大森層に由来する安山岩からなり、凹凸の激しい不整合面直上では長径1mをこえる角礫状を呈し、上方に向かい急激に細粒化して主部の砂岩層に移化する。礫間には多量の安山岩岩片や海緑石を特徴的に含む淘汰不良の砂質粒子と化石からなり、粒間空隙は非晶質シリカとカルセドニーによって充填されている。また、このシリカセメント中に、フランボイダル（framboidal）組織の黄鉄鉱粒が多数形成されている。なお、シリカ物質は本層の基盤となっている大森層安山岩中にも脈状、塊状をなしてふくまれることが頻繁に観察される。基底部の化石の保存様式は以下の通りである。

・初生的にアラレ石質の軟体動物殻体は大半がシリカ（石英）によって交代され、不明瞭ながら、初生構築構造を保存している。光学顕微鏡下では殻体全体に黄褐色を呈し、EDS分析ではCaが検出されることから、交代は不完全で未交代の炭酸塩結晶（アラレ石か方解石かは未確認）を含んでいると思われる。したがって、構造の保存形式は "carbonate inclusion" type に相当する。一部には非晶質シリカが殻体を占めていることも認められる。この殻体は開放ニ科尔下で不明瞭な輪郭が識別されるにすぎず、直交ニ科尔下ではまったく識別できない。また、シリカで交代された殻体中にもフランボイダル黄鉄鉱粒が形成されているが、まれに、交差板構造の第三次薄板に対応した針状の黄鉄鉱がこの構造特有の交差配列をとることがあり、アラレ石は黄鉄鉱によっても交代されていることが認められた。

・六方サンゴは初生的にアラレ石質であり、塊状片の周辺では部分的に珪化しているが、未変質部位が主体である。個体中心部では、隔壁間がしばしばカルセドニーと方解石稜柱状結晶で充填されている。この稜柱状結晶は隔壁表面をフリンジ状に覆っ手形成されており、カルセドニーはその後に残りの空隙を埋めて形成されてい

る。稜柱状結晶自体は珪化を受けていない。

・方解石質の軟体動物殻体（pectinid類，ostreid類，mytilid類）と同じく方解石質の*Coptothyris grayi*の殻体は，未変質で構築構造も極めて良好に保存されている。特に，*Coptothyris grayi*では管状構造が発達し，殻体を貫通する多数の孔隙が非晶質シリカで充填されているにもかかわらず，殻体自体の珪化はまったく認められない。

・有孔虫類の殻は初生的に高Mg方解石であるが，EDS分析ではMgはまったく検出されず，低Mg方解石化している。殻自体の珪化は認められない。

来待累層主部の砂岩層下部では，セメント質の多くは緑泥石様珪酸塩鉱物からなり，少量の非晶質シリカと方解石を伴う。また，上部では，モザイク状の方解石セメントである。方解石質殻体は未変質で，初生構造が良く保存されているが，アラレ石質殻体は方解石化して，初生構造は成長構造を除きほとんど消失している。

（2）布志名累層

布志名地区，菅沢地区ともに本層は，砂岩を主とする下部層と泥岩を主とする上部層に区分され，種々の層準に多数の軟体動物，有孔虫などの化石が含まれる。また，化石を含むノジュールも普通にみられる。セメント質の特徴や化石の続成変質も地区間で共通するが，多少の相違もみられる。

下部砂岩層では，一般に方解石セメントが発達する。このセメントはMg, Fe, Mnを少量含んでおり（3元素合計で5～10%），芦屋層群など他の含化石砂岩層の方解石セメントと同様な傾向を示すが，比較的，Mgに富む傾向が認められる。アラレ石質殻体は未変質のものから一部方解石化したもの，完全に方解石化したものまで，多様な方解石化の進行段階がみられる。この進行段階は露頭ごとに異なり，下部層内の層準の相違には関係しないようである。また，一般的に通常部の殻体に比較してノジュール内のものの方が進行している傾向を示す。方解石化部位におけるMg, Fe, Mn含量は極めて小さく，3元素合計で1%に満たない。なお，両地区において，アラレ石質殻体の一部が緑泥石様珪酸塩鉱物で交代され，初生構造が良好に保存されていることが確認された。さらに，菅沢地区においてアラレ石質殻体の珪化現象も認められた。方解石質殻体は未変質であり，内部構造も変化がない。有孔虫殻は低Mg方解石化しているようである。

上部泥岩層は一般に固結度が弱く，セメント質の特徴は不明なことが多いが，ノジュールが発達するところでは，方解石セメントからなる。布志名地区の試料のEDS分析によれば，このセメントはMg, Fe, Mnを少量含んでいるが（3元素合計で7%前後），とくにMgに富み，6%に達することから，高Mg方解石とみなすのが適当である。また，材化石中にみられるフナクイムシ（*Teredo* sp.）の穿孔痕は高Mg方解石（Mg量最大値11%）と少量のドロマイト（Ca : Mg \approx 6 : 4）で充填されている。これらは孔壁に沿って薄層状に累積し，孔中央に向かって成長している。概して，ドロマイトは後半に形成される。この他，材化石の細胞壁内部も高Mg方解

石で充填されている。この高Mg方解石からは少量のPも検出される。しばしば、燐灰石粒を伴うこともある。上部泥岩層のアラレ石質殻体は上記フナクイムシの殻体を除き、未変質であり、初生構築構造は良好に残存している。フナクイムシの場合、厳密な鉱物同定を行っていないが、Mgを1～5%含んでいることから、方解石化しているものとみられる。内部構造はほとんど消失している。また、少量のSを含むこともこの化石特有の特徴である。方解石質殻体には、顕著な変質は認められず、構造の保存も良い。有孔虫殻は高Mg方解石であるが、Mg含量の初生値が不明であるので、変質状態について検討できない。

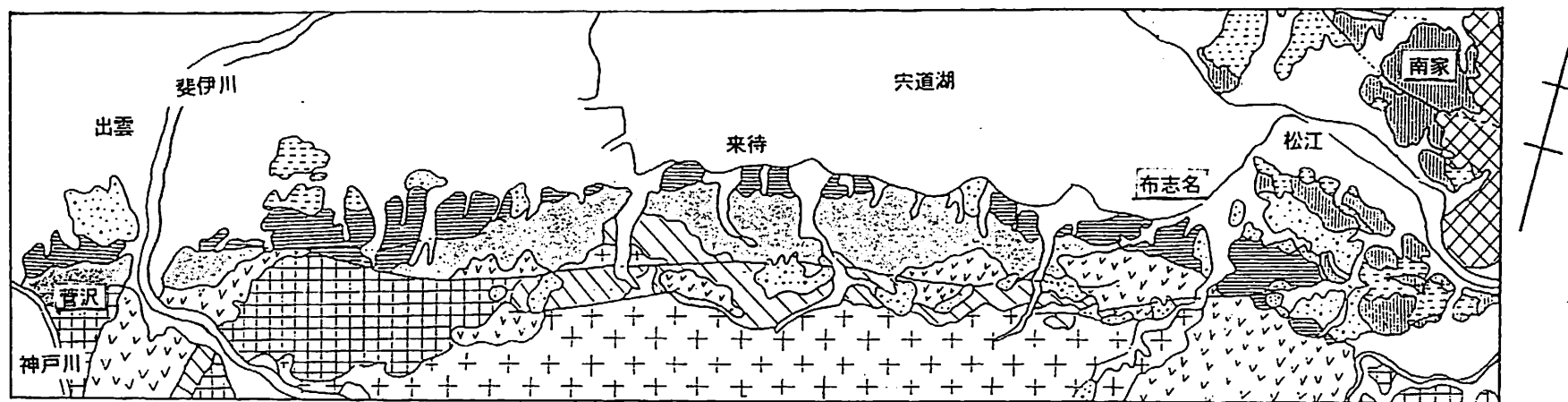
(3) 松江累層

本層は玄武岩溶岩と同質火砕岩層からなり、今回検討したのは、南家地区に分布する火山礫凝灰岩中より産出した軟体動物化石である。含化石部位は火砕岩類であるが、セメント質はモザイク状方解石である。アラレ石質殻体は方解石化し、内部構造は不明瞭な成長線構造の他は残存していない。一方、方解石質殻体は未変質で構造保存も良好である。

中期中新世	出雲層群	松江層
		布志名層
		来待層
	石見層群	大森層
		川合・久利層

松江・出雲新第三系層序表

鹿野ほか(1994)を一部改変



穴道湖南岸の地質概略図 鹿野ほか(1994)一部改変

花崗岩、布部花崗岩

石見層群の砂岩

石見層群の火成岩

大森層安山岩

来待層

布志名層

松江層火成岩、それらの再堆積物

松江層砂岩

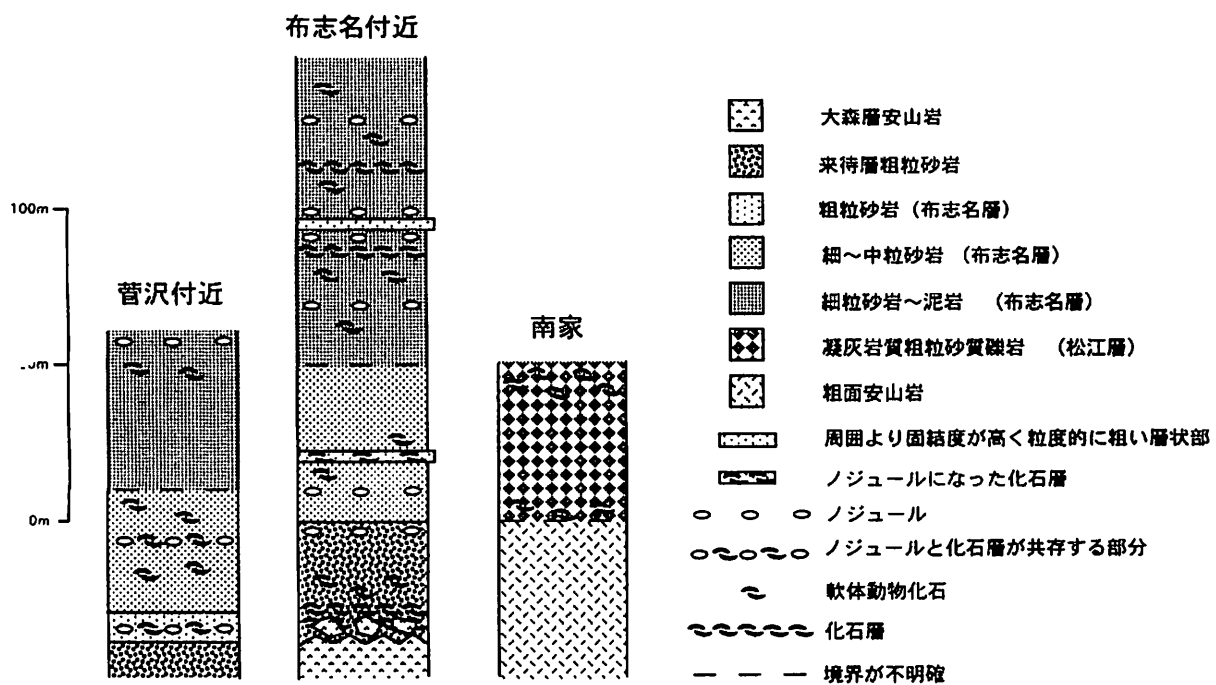
和久屋山安山岩

更新統

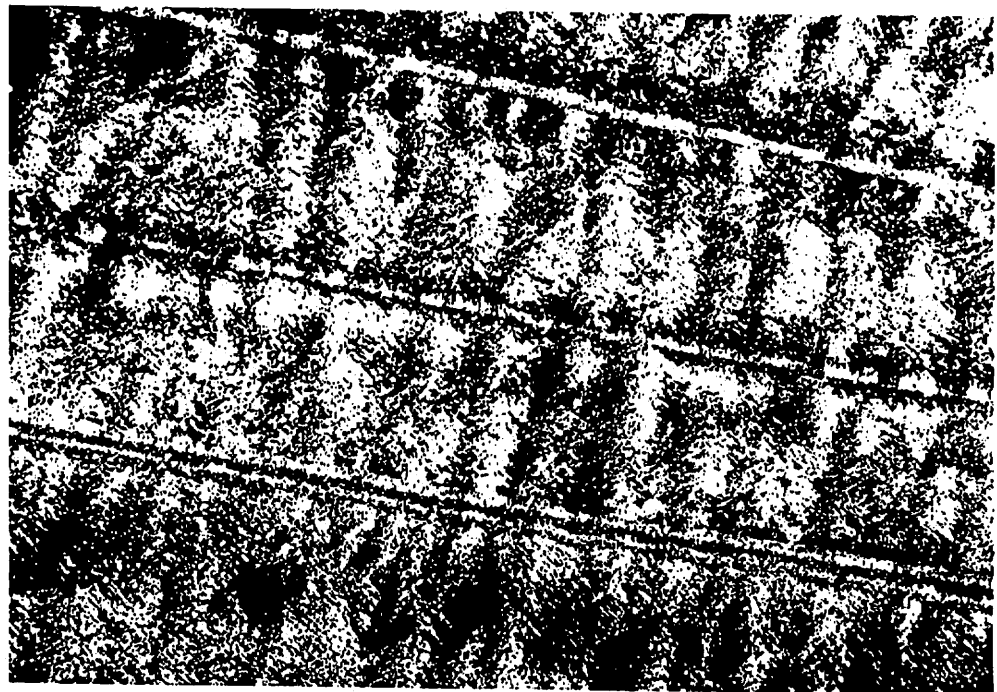
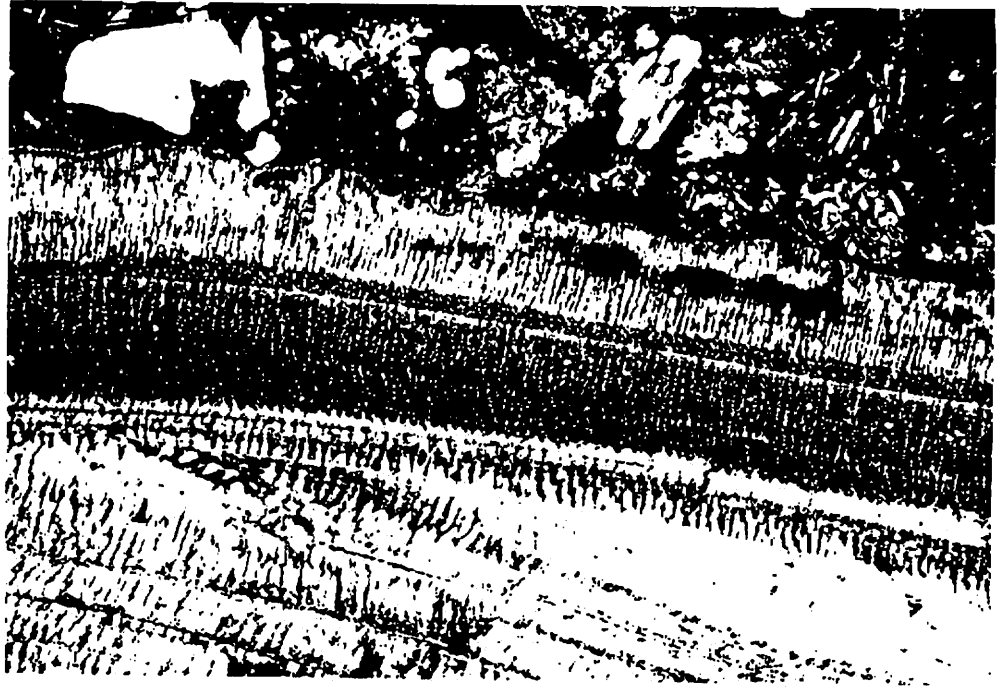
完新統

断層

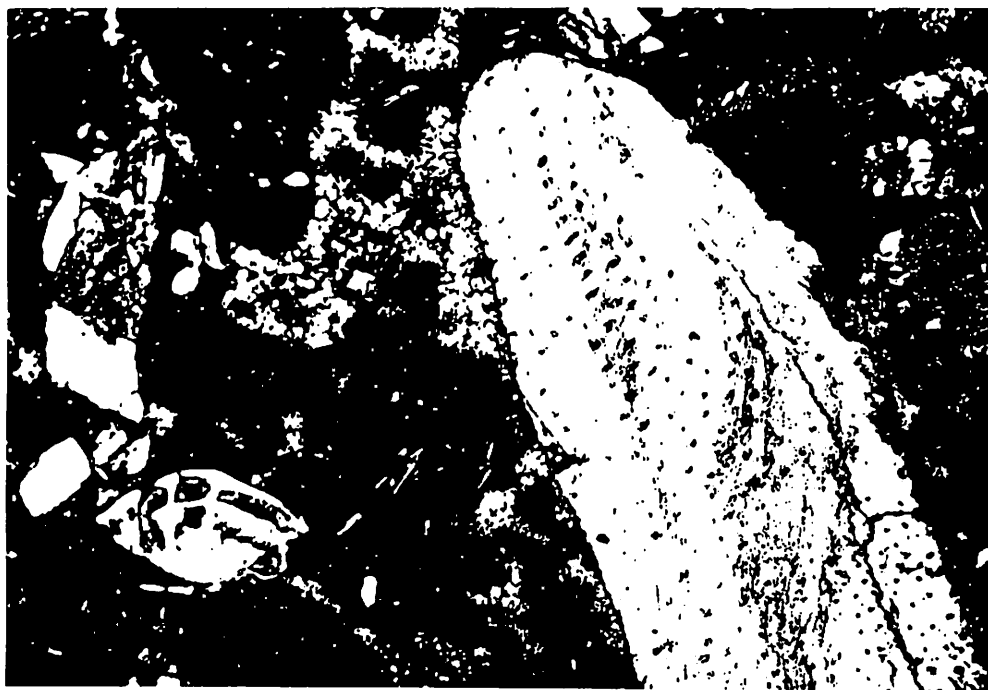
0m 10km



調査地域の簡略柱状図



珪化二枚貝殻体に残存する構築構造
来待累層。クロスニ科尔。上段：×40，下段：×200。



腕足類化石と非晶質シリカセメント

来待累層．クロスニコル．上段：×40，下段：×400．

方解石質の腕足類殻体は未変質で内部構造を保存している．

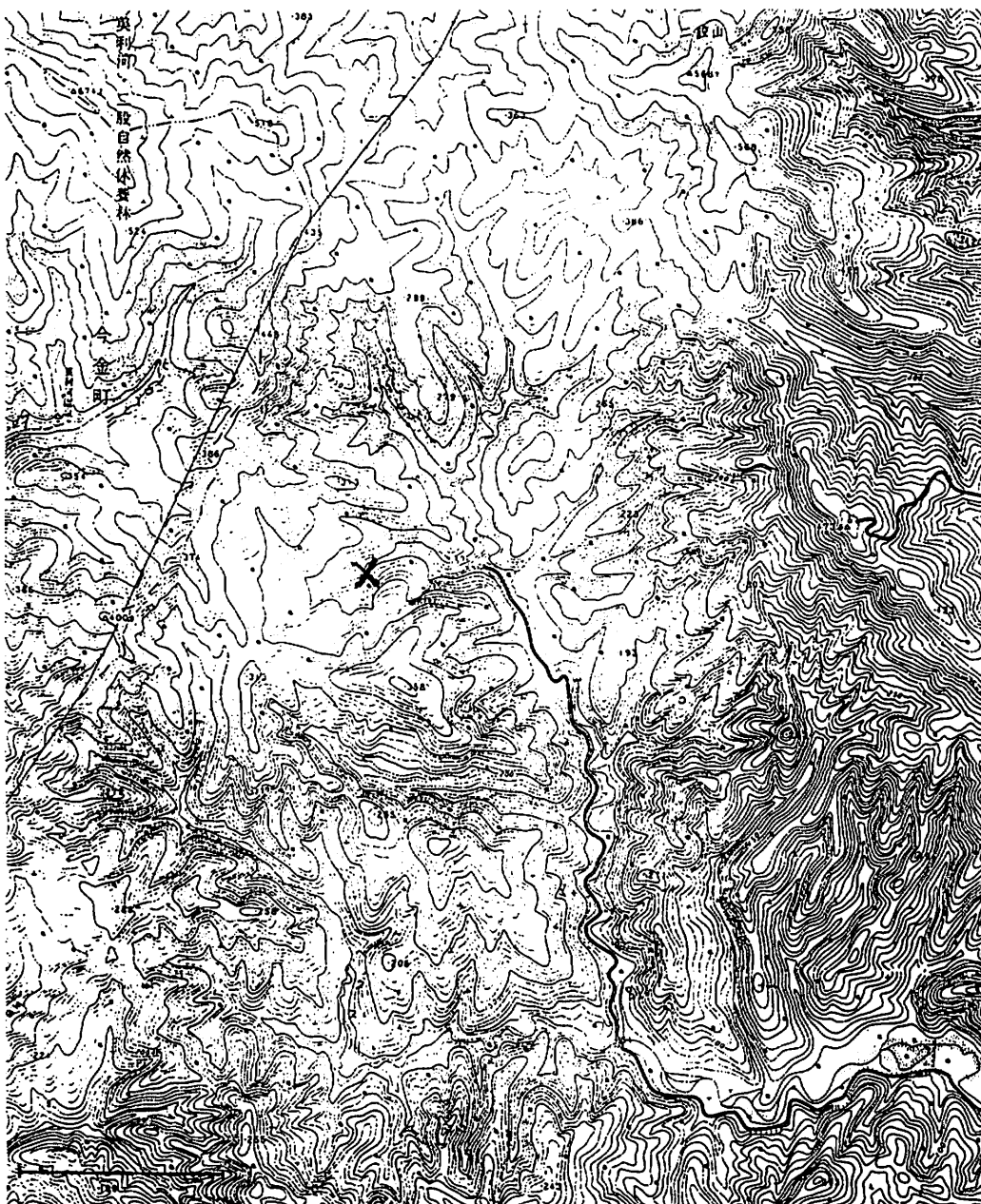
管状部内は非晶質シリカで充填．上段左下は有孔虫殻．

8. 訓縫層（中部中新統・北海道山越郡長万部町紋別川上流域）

この地域には訓縫層の下半部が分布し、主に細粒砂岩とシルト岩からなり全体に凝灰質である。しばしば凝灰岩層をはさむ。

本層基底部付近には門の沢動物群の軟体動物化石が含まれており、*Vicarya* の産出が報告されている (Kanno et al. 1988)。ここでは淘汰不良の細粒砂岩中に数層の化石層があり、含化石層母岩のセメント質はモザイク状方解石である。この方解石セメント中には少量のMg, Mn, Feが含まれる（3元素合計で5%前後）。アラレ石質殻体の続成変質の検討には多産する*Vicaryella ishiana* を用いた。検討した6個体すべての殻体において、珪化現象が認められた。珪化部は殻体の約3割を占め、非珪化部との境界は多角状を呈し、しばしば石英の自形結晶粒を認めることができる。珪化部には交差板構造に由来する針状結晶が多数含まれているため、この初生構造を識別することができる。非珪化部は方解石化して構築構造が消失し、螺管内充填方解石（母岩セメントと同様にMg, Mn, Feを含む）とともに再結晶による粗粒化が進行して、殻体と充填物の境界が識別しにくくなっている。なお、方解石化部位にはMg, Mn, Feが2～3%程含まれており、再結晶作用によるセメントと殻体の同化がある程度進行しているものと判断される。その他、薄片の鏡下観察では、初生的にアラレ石質と思われる小型の二枚貝殻体が少数認められたが、いずれも方解石となっており、珪化は観察されなかった。これらの場合、殻体の周辺部で結晶サイズが小さく、中央部で粗粒化する傾向があり、殻体溶脱後に方解石で充填された可能性がある。また、*Crassostrea gravitesta* の殻体には方解石質構築構造（葉状構造、チョーク層）が未変質のまま残存するが、一部に石英からなる部位が認められた。これは交代によるものか、孔隙部の充填かは不明である。

上記以外の層準の細粒砂岩では、セメント質は緑泥石、斜長石、石英などを主とすることが多く、その場合、モザイク状方解石セメントが、非炭酸塩セメントで充填されていない孔隙を補填するように、分散して形成されている。また、まれに方解石セメントが主体となっている部分もあるが、貝化石包含部と異なって方解石結晶粒は細粒である。これらの細粒砂岩には有孔虫殻が頻繁に観察されるが、セメント質の如何に関わらず、保存はあまり良くない。溶脱して薄化したもの、再結晶して細粒化しているもの、周囲が方解石セメントの場合には、再結晶によって、セメントとの識別が困難になっているものなど、多様な変質パターンがみられる。ただし、珪化はまったく認められなかった。

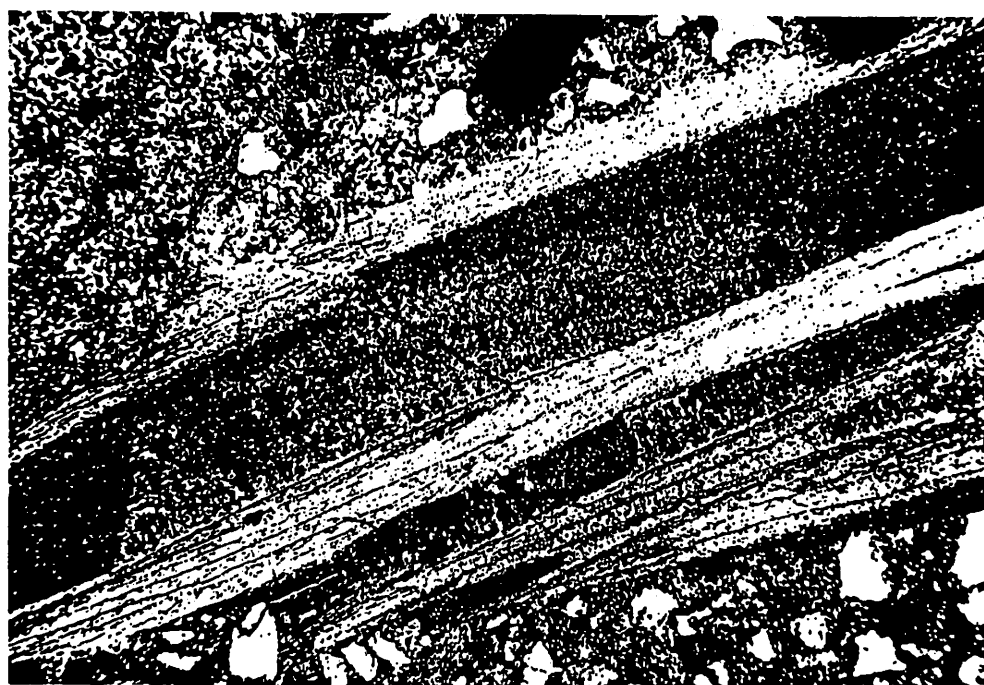
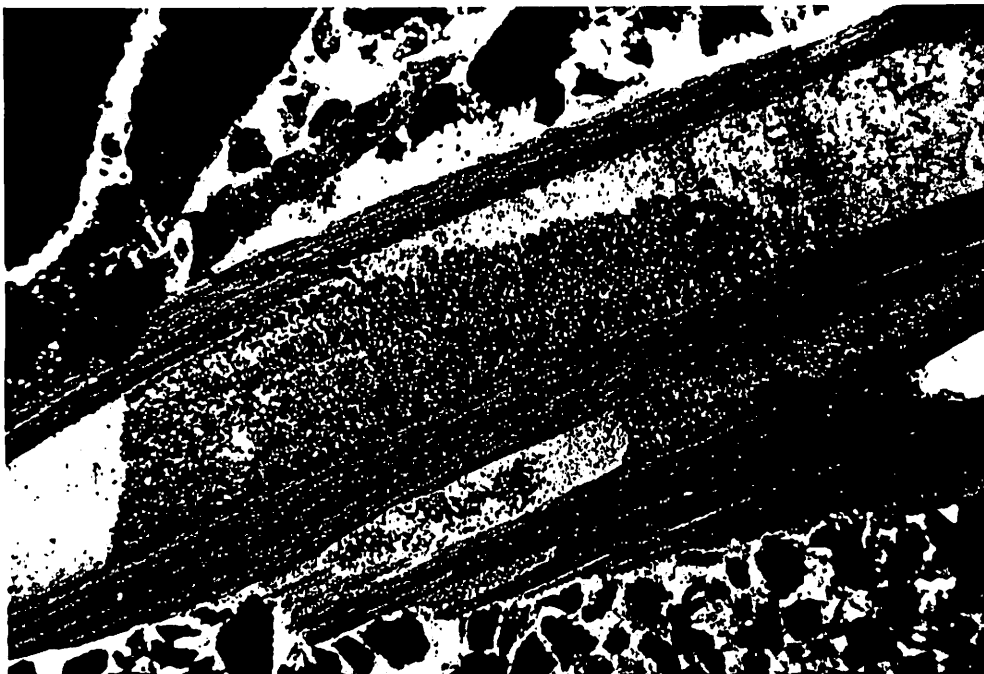


訓縫層の珪化化石産出地点



Vicaryella 殻体の珪化現象

上段：オープンニコル，下段：クロスニコル，×40.



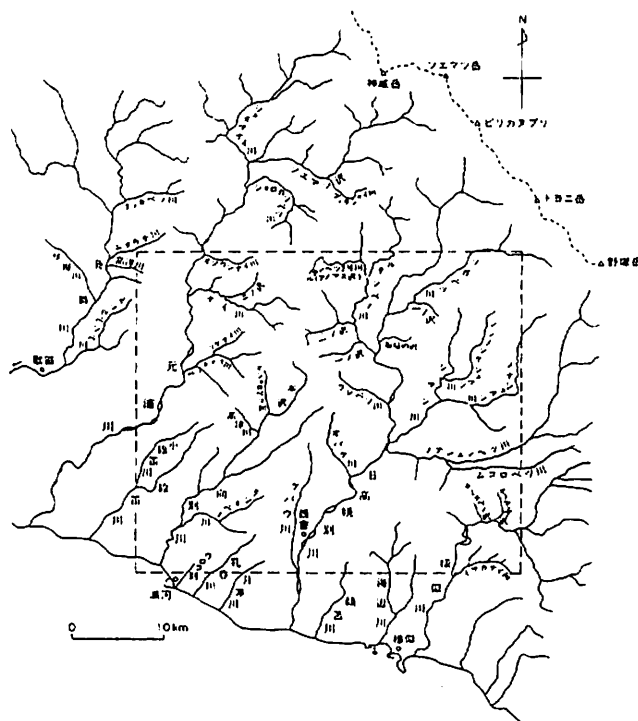
Crassostrea 殻体のシリカ充填

上段：CL像，下段：オープンニコル，×40.
 チョーク層のみにみられることに注目.

9. 上部蝦夷層群浦河累層（上部白亜系・北海道浦河市乳呑川上流域）

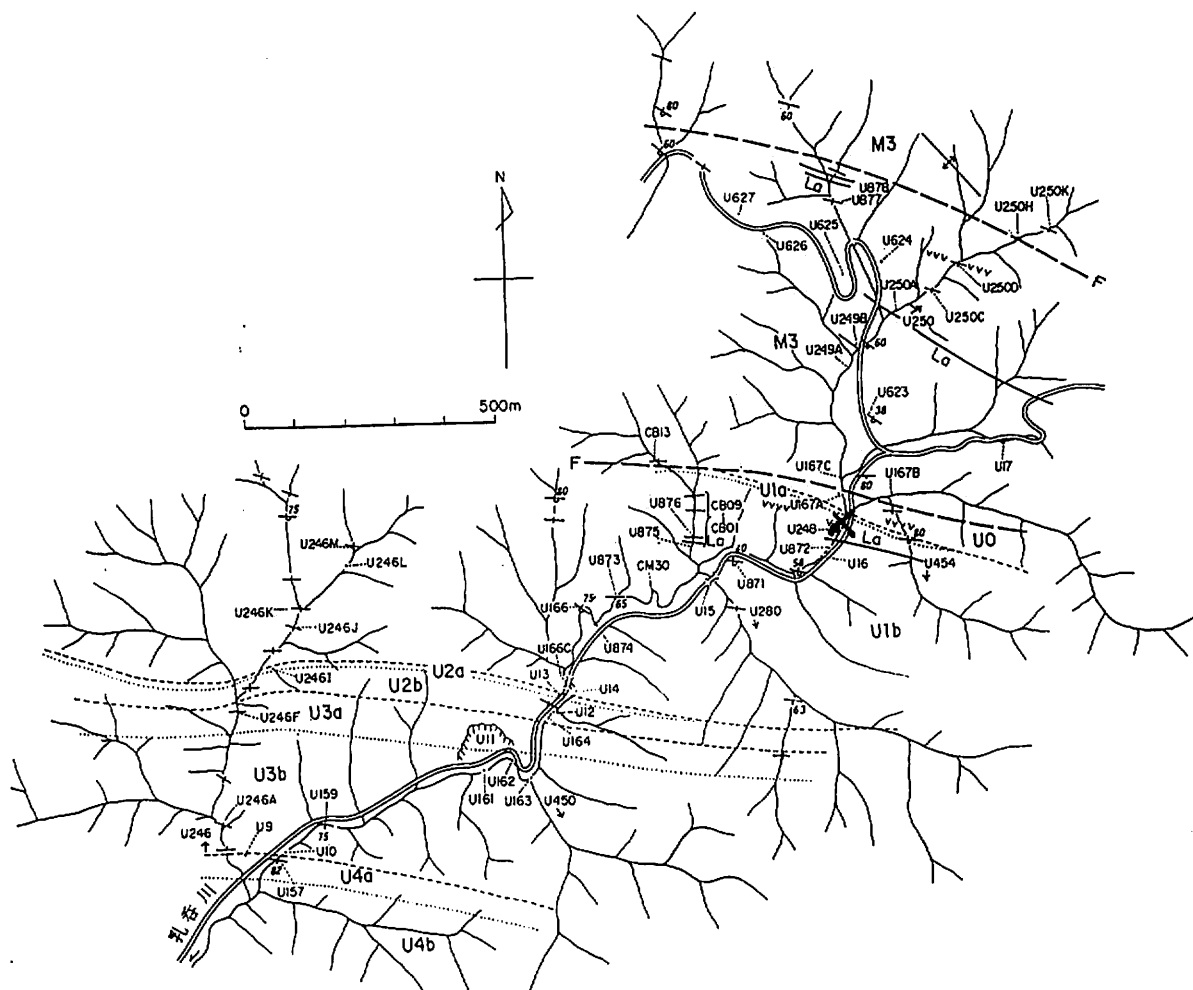
対象とした化石は礫交じり粗粒砂岩からなる転石中に含まれていたものであるが、岩質や分布状態からみて浦河累層のものと判断される。化石は離弁状の二枚貝がやや密集して産し、*Glycymeris* sp. が大半を占める。母岩のセメント質はモザイク状方解石結晶からなり、一部の碎屑粒子には方解石の細脈が発達している。また、碎屑粒子と同サイズの海緑石粒子もしばしば散在するが、この粒子中に小型有孔虫の殻が含まれていることがある。

Glycymeris の殻体は一部方解石化しているものの、多くは初生鉱物であるアラレ石として残っており、構築構造（交差板構造、複合交差板構造）や管状構造の保存が良好である。方解石化はゾーンをなしている場合もあるが、交差板構造の第一次薄板と同サイズの小パッチとして散在することが多く、識別しにくい。また、管状構造をなす小管の周囲に細粒の方解石が形成されている部位もある。*Glycymeris* 殻体の外表面付近の外層で珪化が小規模に生じていることが認められた。この珪化部位では交差板構造のゴースト状の保存様式がみられる。なお、方解石化した部位や小管内部（方解石や緑泥石様鉱物結晶で充填）、母岩の方解石セメントには珪化現象は認められない。



浦河市東方の水系図

酒井・蟹江（1986）より

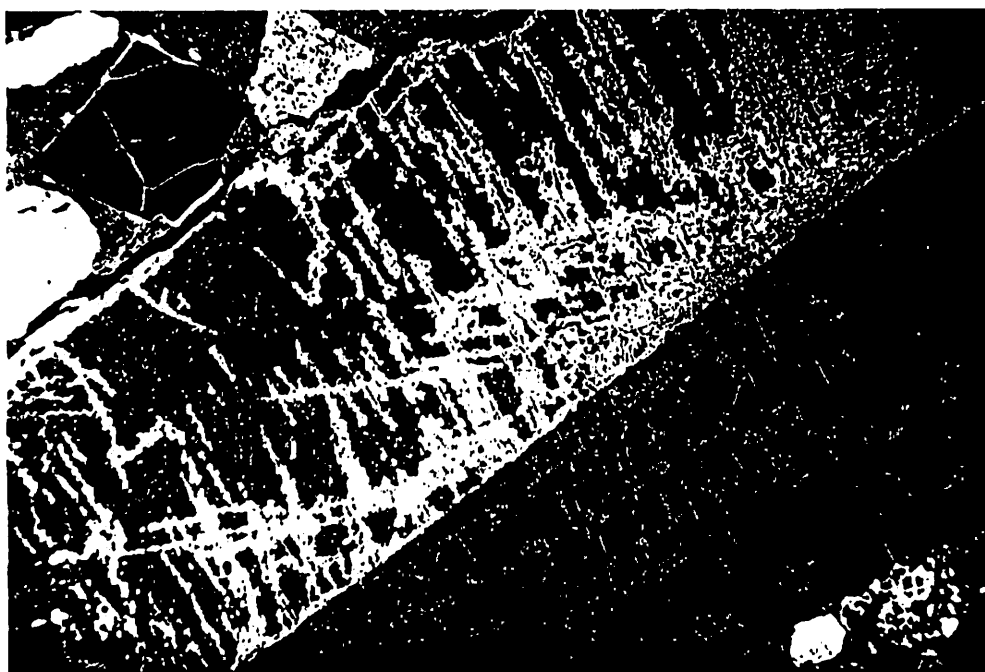


乳呑川中・上流域のルートマップと化石産出地点
酒井・蟹江（1986）に加筆。



Glycymeris 殻体の未変質アラレ石

上段：オープンニコル，下段：クロスニコル，×40.
 殻体外表面付近で珪化現象がみられる。



Glycymeris 殻体の管状構造

上段：CL像，下段：クロスニコル，×40.
管状部周辺で方解石化が始まっている。