

未固結～半固結堆積物中の変形構造形成の解釈

小川 勇二郎* 田中 勝法** 鈴木 清史**

Interpretation of Some Geologic Structures of Unconsolidated or Partially Consolidated Sediments

Yujiro OGAWA*, Katsunori TANAKA** and Kiyofumi SUZUKI**

Abstract

It has long been recognized that unconsolidated or partially consolidated sediments can be intensely deformed during burial, either from gravity-driven subhorizontal extension, or from tectonic shortening. Such deformation can be evaluated in the context of experimental and empirical results from engineering geology literature. We try to summarize this knowledge using several submarine and on-land examples that illustrate the concepts of pore-fluid pressure, shaking, permeability, and consolidation, and are applicable to the interpretation of geologic structures that develop in unconsolidated or partially consolidated sediments. We first review dish, web, and vein structures, scaly clay and liquefaction features, which are typical of unconsolidated or partially consolidated sediments along convergent plate margins. Then, some experimental aspects of permeability test results are applied to fluid flow phenomena in and around accretionary prisms to characterize the role and the importance of fluid flow parallel to the σ_2 direction. The results are further applied to explain the concentration of hot springs of a non-volcanic origin along active, strike-slip faults, as well as how seepage along convergent margins occurs in an en echelon pattern on conjugate sets of strike slip faults. Additional experimental work is suggested to develop a better understanding of these geologic structures.

Key words : pore-fluid pressure, permeability, shaking, scaly cleavage, geologic structure, unconsolidated sediments, partially consolidated sediments

キーワード : 間隙水圧, 浸透率, 振動, 鱗片状へき開, 地質構造, 未固結堆積物, 半固結堆積物

I. はじめに

間隙水圧の働きが地質現象や地質構造の形成に決定的な役割を果たすことは、すでに20世紀の前半に Terzaghi (1925) によって指摘されていた。しかし、その具体的な地質構造形成の解釈への適

用は、比較的近年に断層面(ゾーン)内部の間隙水圧上昇が摩擦抵抗を下げるということを、Hubbert and Rubey (1959) が示すことによってやっとなされたに過ぎない。遅れた理由は実際の現象が観察されるのが稀であったからであろう。摩擦の概念の正確な理解は、レオナルド・ダ・

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科地球進化科学専攻

** 産業技術総合研究所メタンハイドレート研究室

* 現所属：学校法人鎮西敬愛学園中・高等学校

* Earth Evolution Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

** Methane Hydrate Laboratory, Institute of Advanced Industrial Science and Technology

* Present address: Chinzei-Keiai High School

ヴィンチやアモントン、クーロンの時代（16 18 世紀）になってやっとなされたことを考え合わせると（曾田, 1971）、圧力や浮力また摩擦や強度といった面に働く力（応力）やそれを含む概念の理解が難しかったことが分かる。摩擦や強度は、現在でも材料科学、地震現象や破壊現象の理解などの研究の最先端で議論されている（大橋, 1977）。

近年、間隙水圧をコントロールした各種の三軸変形破壊（または圧密）実験が行われるようになり、浸透率や圧密現象が具体的に議論されるようになった。しかし、未固結～半固結堆積物の実際の露頭や、天然の岩石・堆積物試料で観察される地質構造や変形破壊挙動へのそれらの概念の適用が具体的に整理されている例は少ない。このような議論は、地質学的な、たとえばテクトニクスの議論、特に堆積間もない時点で脱水変形をする付加体の形成メカニズムの議論に応用可能である。また実用面では付加体に類似してはいるがその相違点が明確でない、地すべり岩体のメカニズムの議論にも欠かせないものである。そのような現象は、軟弱表層における地震動による変形構造形成にもかかわっている。なぜならば、振動にともなって液状化を起こす上に、それによって浮力と振動の加速度が岩体に効果的に働いて、相乗効果をもたらすからである。現在、このような概念を現実の現象に適用して、総合的に理解することが求められている。そこで、本論では間隙水圧、浸透率、圧密、振動などをキーワードとしてみたときの、固結が比較的進んでいない、いわゆる未固結～半固結堆積物に形成される地質構造の成因的解釈への現時点でのそれらの概念の適用をまとめたい。

1) 間隙水と間隙水圧の役割

純粋物質の場合と異なり、岩石の微視的破壊現象に関しては、微小な欠陥周辺の応力集中に起因するとのグリフィス・クラック説が適用されているが（Jaeger, 1962）、そこに間隙水圧の概念を持ち込むことによって、はるかに現実的な理解をもたらす。たとえば、粘性が十分小さな流体では、剪断応力が無視できるほど小さいので、間隙

を満たす流体の圧力を垂直応力の値から算術的に差し引いた値が、その面に有効に働いている、と考えるのが Terzaghi の原理である。ただし、剪断応力の値は（流体が剪断応力を保持しないと考えられるので）、間隙水圧の値に影響されない。間隙が連続している場合は、剪断面はほぼ連続した一つの面として形成されるので、面のどこでも流体圧が垂直に働く。ただし、そうでなく有効間隙率が十分小さな物質では、流体圧力に 1 より小さい正の係数（境界空隙率 α ）を掛けた値分を垂直応力（ σ_n ）から差し引くこととなる（Paterson 1978）。これを 1 次元表示で表すと、

$$\sigma_n^* = \sigma_n - \alpha P_f \quad (1)$$

（ P_f : 間隙水圧、流体圧； α : 境界空隙率（ $0 < \alpha < 1$ で、一般には 1 に近い）なお、 σ_n^* は有効法線応力）

と書きうる。 α が 1 でない現象は、有効間隙率の小さな細粒の岩石（たとえばミクライト質の石灰岩）で実際に示されている（Rutter, 1972）。しかし、流体圧は方向によらず一定の値であり、有効間隙率がそれほど小さくない岩石、特に未固結の堆積物では、(1) 式の α の値は 1 にきわめて近い値と考えてよいので、剪断、引っ張り双方の割れ目（面）には、 $\alpha = 1$ とした場合の応力が有効にかかるとして、近似的に十分である。（有効応力、有効圧力と言われる所以である。）

剪断面形成の条件は、クーロンの内部摩擦角説に従えば、

$$\tau = C + \mu \sigma_n^* \quad (2)$$

（ τ : 剪断応力、 C : 粘着力、 μ : 摩擦係数）

また、引っ張り割れ目形成の条件は、グリフィスクラック説に従えば、

$$\sigma_n^* = T_0 \quad (3)$$

（ T_0 : 引っ張り強度で、マイナスの値）

このような応力と間隙水圧が変形破壊現象に与える影響の基本的概念が地質構造にどのように適用できるかについて、またこれと関連して後述の浸透率がどのような意義を持つかについては、Fyfe

et al. (1978) の教科書にすでに基礎的な事項が網羅されている。最近でも *J. Geophysical Research* などの特集号にも取り上げられている (*J. Geophysical Research*, 1990, B6; 1995, B6 など)。さらに Nakashima (1993, 1995) などの理論的研究もなされている。本論に関連のある、未固結～半固結堆積物の変形を、土質力学と構造地質学の境界領域として発展させる基礎となった研究には Jones and Addis (1986)、Jones (1994) を初め多くの研究があり、またその概念の付加体の構造形成への適用についての研究には、Moore (1989)、Moore *et al.* (1988; 1991)、Platt (1990)、Behrmann (1992)、Maltman (1994a)、Brown (1994)、Byrne (1994)、Karig and Morgan (1994)、Morgan and Ask (2004) などがある。本邦でも、透水試験の最近の成果の土質力学・岩石力学上の論文集が資源・素材学会 (2003) に発表されている。

一方、構造地質学的見地からは、南海トラフや日本海溝の海底調査の進展に伴って多くの地質データが提供され、それらを踏まえて上記の問題はいくつかの興味深いテーマの中で論じられている (廣野・芦, 1998; Morgan and Ask, 2004)。

一般に地下水面より深部では、堆積物や岩石の内部の間隙 (空隙) は流体で飽和している。それは一般には水である。ガスを含む場合や、流体中に泥を主とする固体物質が混在し、全体が“泥圧力” (mud pressure) として機能していると考えられるべき場合も多い。ガス相が分離している場合は、気液二相として扱う必要がある。ガスは圧縮率 (コンプレシビリティ) が大きいので、上昇や減圧時にしばしば急激な膨張をきたし、泥圧力が大きくなり、泥ダイアピルとして注入したり (Brown, 1990; Brown and Orange, 1993)、また「ガス突出」などの特別な地質現象を引き起こす。ガス突出に関しては、浸透率が低い場合のほうがより急激な突出をしやすい。この問題に関しては、Li (2001)、Li and Ogawa (2001)、Li *et al.* (2003) によって石炭を例としてその変形組織と関連があることが述べられており、それらを参照願いたい。

流体の圧力変化や移動に関しては、浸透率の理解を避けて通ることはできない。必ずしも一面的理解では十分ではないが、浸透率は有効間隙率にほぼ比例することが多い。間隙率が大きい場合には (碎屑性堆積岩では、およそ 30% 程度以上)、間隙は連続していて、その中の流体も自由に移動しうると考えられる。つまり圧力が連続的に伝播しう。このような、連続して深さに比例する流体圧は、一般に静水圧 (hydrostatic pressure) と呼ばれ、重力による流体の荷重のみを考えればよいので扱いが容易である。すなわち、

$$P'_i = \rho_w g z \quad (4)$$

(P'_i : 静水圧, ρ_w : 流体の密度, g : 重力加速度, z : 深度)

実際の場合では、間隙は連続しているとは限らず、浸透は流体密度や粘性率にも関連するので、時間の関数ともなり、遅れが生じやすい。さらにその間の圧密や変形によって間隙流体圧 (間隙水圧) が上昇しやすいので、部分的には間隙水圧は静水圧の値より大きい場合が多いであろう (過剰間隙水圧)。さらに静岩圧 (上の (4) 式において岩石の密度を考慮したもの) に近いより大きい (異常間隙水圧) と解釈できる場合 (たとえば水圧破碎現象 (hydraulic fracturing)) もある。

このように実際の間隙水圧がしばしば静岩圧に近いことの原因には、上に述べた浸透率の低い物質の介在による流体圧の伝播の遅れのほかに、圧密やテクトニックな応力による組織の圧縮による浸透率の低下や、地震などによる応力の伝播や液状化、温度上昇による密度の低下に基づく浮力の増大などによるポンプの存在などが考えられる。地質学史上では、この問題は、Sibson (1975) が、鉱物脈の形成に際しての理論と実例から、間隙水圧の上昇と破壊の繰り返しに関して、サイズミック・パンピング (seismic pumping) の概念で説明できることを提唱したことに始まる。すなわち地震時に形成された破断面が流体の通り道になると同時に、その後の鉱物の沈着によって閉鎖され、そのために破断面が破壊を起こしうるまでに強度をもつことによって、それらの現象が繰り返

し起こる、という考え方であり、地震学の面からも注目されている。

また、間隙水圧が静水圧の値より小さいか、そうでなくても応力解放や条件の変化によって、小さい方へ変化する場合もありうるとされる。Robert *et al.* (1995) MacCaig *et al.* (2000) は、陰圧の発生に左右されるサクシオンによる流体移動 (dilatancy pumping) を議論している。

多くの教科書などですでに繰り返して述べられているように (例えば, Twiss and Moores, 1992), 有効封圧の概念を適用すると, 上に述べた, 式 (1), (2) が一般に適用されると考えてよい。ここで, その場所で引っ張り割れ目 (モード I) が形成されるか, それとも剪断割れ目 (モード II, 面に沿う回転の場合はモード III) が形成されるかは, 応力テンソル (2 次元的にはモールの円の大きさ (差応力)) に基本的によっている。また, 割れ目を作って変形するか (破断), 作らずに変形するか (延性流動, ダクタイル・フロー) については, 温度・圧力などの外部からの条件のほかに, 堆積物・岩石の物性条件が効いてくるので, 一意的には決まらない。また, 変形履歴によっても歪進行度によっても変わってくる (Donath, 1961; 植村, 1971; Uemura, 1981)。他方, 変成作用やマグマの貫入を伴うような条件での流体の注入現象については, Nakashima (1993, 1995) の研究を参照願いたい。

ごく一般的な理解のためには, 上に述べたモールの円と破壊曲線との関係で議論されるが, ここで, ハイブリッド・シア テンション・フラクチャー (hybrid shear/tension fracture; ここでは, 剪断引っ張り同時割れ目とする) に簡単に触れておきたい。すでに Suppe (1985) の教科書でも述べられ, また Platt (1990) にもよってもその重要性が指摘されている通り, 差応力が小さいときは垂直応力がマイナスの条件で剪断割れ目が発生するというものである。これはグリフィス・クラック説

$$\tau^2 - 4T_0\sigma_n^* - 4T_0^2 = 0 \quad (5)$$

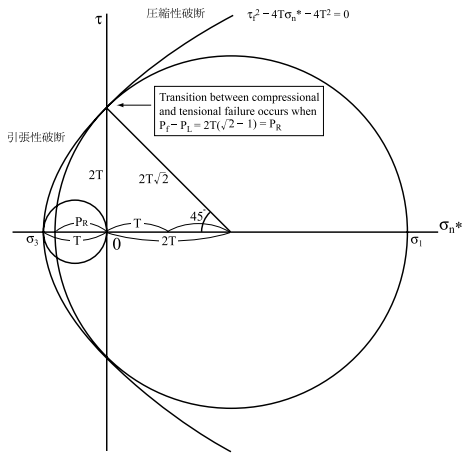
を考えると, 差応力すなわちモールの円の直径

($\Delta\sigma$) が $-4T_0 < \Delta\sigma < -4\sqrt{2}T_0$ の場合は (ここで T_0 = 引っ張り強度) P_f が十分に大きいと, σ_n^* が負の, すなわち引っ張り条件で剪断割れ目が形成されるということである (図 1)。これは, グリフィス・クラック説による破壊強度曲線 ((5) 式) が放物線を描くために, また粘着力 C が $C = -2T_0$ であるために, 理解と計算が容易である。図 1 に示すように, 差応力が $-T_0$ の $4\sqrt{2}$ 倍までこの条件が満たされ, 間隙水圧が高ければマイナスの垂直応力で剪断割れ目が発生する。これは引っ張られつつ剪断割れ目が形成されるという, 摩擦の概念の一見矛盾であるが, 間隙水圧のなせるわざというべきであろう。これこそが, 剪断割れ目に沿って鉱物が次第に成長する場合があることの理論的裏付けであり, 先のハイブリッド・シア テンション・フラクチャーを特徴づける。実際, 天然でもジョグには剪断割れ目に平行に脈鉱物が発達している例をしばしば目にする (slickenfiber) (図 2) (山路, 2002)。

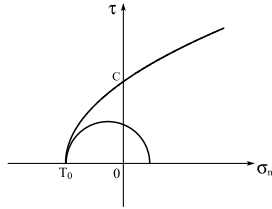
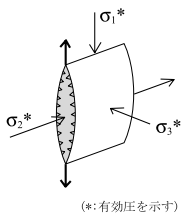
一方, 上に述べた現象は静的ないわば応力の伝播が十分に遅い場合であり, 逆に応力の伝播が弾性的に瞬時に行われる場合には, このような静的な議論だけは不十分である。それが, 振動による変形破壊現象である。

2) その他の条件 (振動と浸透, 気液二相問題)

間隙水圧に伴う現象を地質構造に適用する場合, 振動の効果と浸透率の概念をも同時に取り入れる必要がある。なぜなら振動が水中の (あるいは地下水面以下の) 物体に加速度を与え, 変形させるからであり, また振動現象が間隙水圧上昇を惹起することが多いからである。そのような振動の影響は新潟地震 (1968 年) に伴って液化化現象が生じ, 地層の噴砂や不等沈下が起こることが注目されたことに端を発する。それに引き続いて多くの事象が振動に結びつく液化化で解釈された。工学的にも日本では岡 (2001) などの教科書が何冊か出版されており, 日本やアメリカを中心に多くの研究例がある。地球科学分野では, サイズマイトなる構造用語が提唱され (Sibson, 1975) また, パレオサイズミシティーに関する教科書や論文集が出版されている (McCalpin,

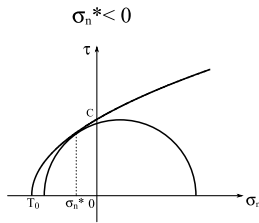
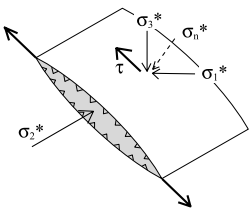


引っ張り割れ目



剪断割れ目

a) ハイブリッド剪断/引っ張り割れ目



b) 摩擦すべり

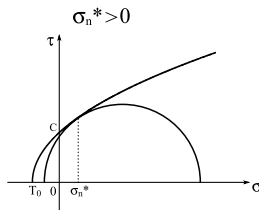
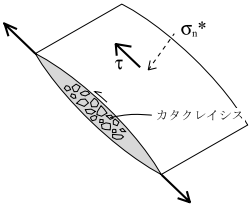


図 1 Platt(1990)に示されたグリフィス・クラック説に基づくモールの2次元表示(上)と3種類の割れ目(破断)の有様(下)。下の図では、伸張割れ目の表示を分かりやすくするために、横軸が誇張されている。

Fig. 1 2-D expression of a Mohr diagram based on Griffith crack theory after Platt (1990) (upper), and three types of fracture (failures) (lower). The horizontal axis below is exaggerated to show the tension fracture.

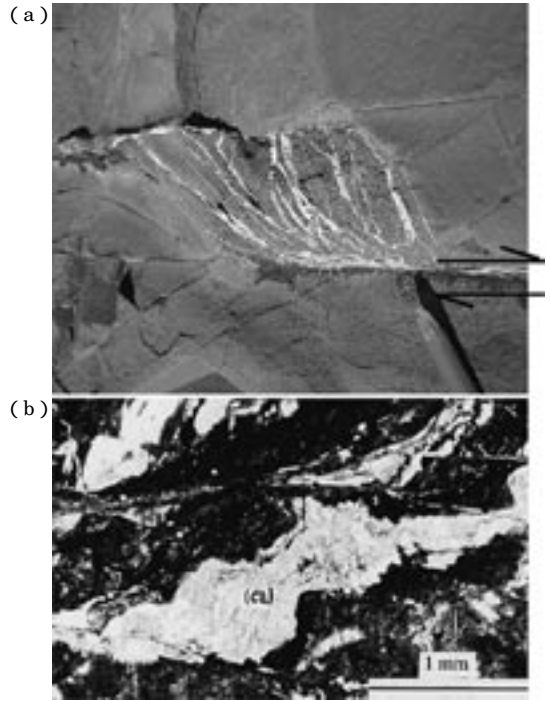


図 2 (a)房総半島、千倉層群白浜層におけるジョグに沿うゼオライト脈。水平な露頭。右水平ずれを示す。この場合、流体は画面に垂直に注入したと考えられる。(b)房総半島、嶺岡帯中の破砕された玄武岩に見られる引張り同時剪断(ハイブリッド・シアテンション・フラクチャー)を暗示する方解石脈。Takahashi *et al.* (2003) による。

Fig. 2 (a) Zeolite vein arrangement in a jog in the Shirahama Formation, Chikura Group, Boso Peninsula. Horizontal outcrop. (b) Calcite vein suggesting a hybrid-shear tension fracture in the sheared basalt of the Mineoka Belt, Boso Peninsula. After Takahashi *et al.* (2003).

1996)。日本でも、古地震学が遺跡調査に関連して横断的研究として行われている(太田・島崎, 1995)。日本海溝海側斜面で潜水船によって最初に見出された裂隙にも、振動による成因論が適用された(小川, 1994; Ogawa *et al.*, 1997)。

また水中の構造物の振動時の不安定性問題は、社会的にも大きな問題であり、その結果の一部は地球科学にも応用可能である。地質構造は海底下で形成されることが多く、構造が形成される岩体

が水で囲まれている場合には、物体には水の浮力が常時働いている。しかし応力は面積あたりの力であり、その力は質量と加速度の積である。そこにもし水平方向から応力（加速度に比例）がもたらされたとすると、それは質量に比例する値であるので、浮力が極めて小さい空中と違って、水中では、水平方向の応力と垂直方向の水中重量の比は大きくなり、その結果、物体は転倒しやすくなる。水中構造物が波を受けた場合や、地震（横波）の際に不安定になる理由である（嶋津, 1992）。同じことがスランプ礫の不安定性や、亀裂の形成、海底の密度流にも適用できると思われる（小川, 1994; Ogawa *et al.*, 1997）。これはまた、ハワイ諸島周辺で明らかにされたように、海底火山の崩壊による地すべり岩体が極めて遠方でも分布することを説明する。

ここで、多孔質物質がどのような浮力を受けうるかを考慮する必要がある。間隙率が高い場合でも、間隙水の移動が小さい（即ち浸透率が小さい）または表面張力などによって移動が制限されている場合は、間隙水は浮力を受ける物体と一体となって挙動すると考えられるので、一般に、瞬時に近い変形の場合には、浮力は多孔質物体全体の体積にかかると考えるべきで、浮力の影響は大きい。一方、枠でできているかご（cage）のような場合は、浮力は著しく小さなものとなる。これに関しては、本邦での液状化や振動時の現象、またスランプ堆積物と考えられるものについての（後述 II-1, 2）のような解釈がある。

一方、浸透（permeation）については、概念は古いものであるが、破壊や変形に伴う浸透率の変化については、各所で精力的な研究がなされているにもかかわらず、全体的な理解と適用が十分に なされているとはいいいがたい。浸透率（permeability）と透水率（hydraulic conductivity）は、ほぼ同一の概念で、後者が粘性率と密度を含んだ、実際の流体の流動に関するものであるだけの違いである。1次元の透水率を用いた流量の表現は、

$$Q = -\chi A dh/dl \quad (6)$$

（ダルシーの法則； Q : 流量, χ : 透水率（hydraulic conductivity） A : 多孔質物質の断面積, dh/dl : 動水勾配（hydraulic gradient））これを、3次元の浸透率テンソルで表すと、

$$Q_i = -(k_{ij} A / \mu) \partial (P + \rho g x_3) / \partial_j \quad (7)$$

（ Q_i : 流量ベクトル, k_{ij} : 浸透率テンソル（permeability tensor）; μ : 粘性率, ρ : 密度）（たとえば、徳永, 2003）（一次元で表すと、 $\chi = k \rho g / \mu$ ）となる。

概念的には、透水係数はその方向の浸透率に密度（と重力加速度の積）を掛けて、粘性率で割った値と理解すればよい。ただし透水率は速度と同じ次元をもつものなので、現実の比較には適している。実際の地質構造や変形破壊現象への適用に関しては後述する。

気液二相問題は鉱床学では以前からメインテーマの一つとして研究されてきた。また石油や石炭の採掘現場や工事現場では、しばしば生じる現象として知られ、多くの事故や事件が起きていたが、都心でも先ごろこの問題に関連するガス突出事件があったばかりであり（2005年2月）、今後十分対応する価値がある。また、地質時代のダイアピル上昇問題（山縣・小川, 1989; Brown, 1990; Brown and Orange, 1993など）、先に述べた石炭におけるガス突出、さらに断層面に沿う流体の移動などの各種現象の理解や温度、圧力の推定などにも適用されており、理学、工学双方に大きな重要性を持っている。

以上のように、破壊現象や噴出現象には、間隙水圧や泥圧力、振動や浸透、気液二相の概念は必用である。簡単な説明にはおおよその理解で十分であるが、過去の地質体に記録された変形に厳密な適用をし、解釈するとすると、理論と実験（アナログ、デジタル、三軸・圧密などの）および産状とをつき合わせたより厳密な議論が必要である。日本や世界の多くの地域に近年このような議論の適用がいくつかなされ、従来成因が不明であった多くの地質構造の成因が解釈されるようになった。露頭に立った時の見方や考え方に役立てるべく、以下にそのいくつかを整理してみることに

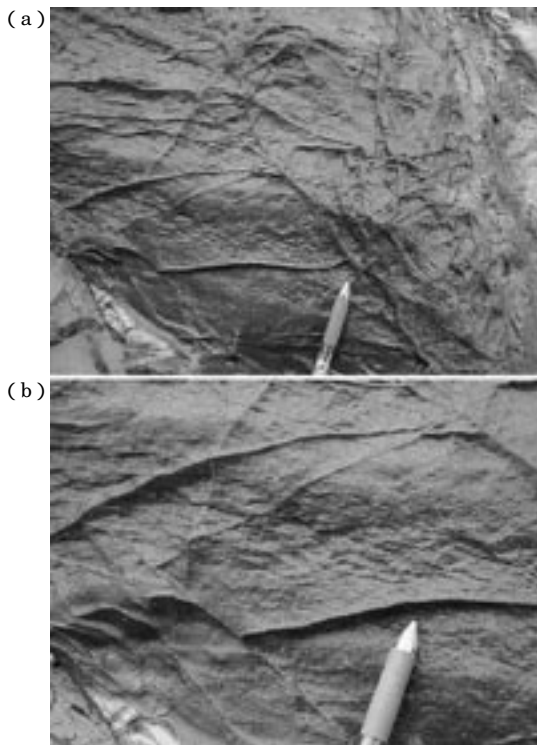


図 3 (a)房総半島，江見層群中の皿状構造(凹部)とそれより後期のくもの巣状構造(凸部)。(b)同，いくつかのステージが認められるくもの巣状構造。地層が水平であったと過程すると，多くは逆断層として形成されたことが分かる。

Fig. 3 (a) Dish structure (concave part) and later web structure (convex part), Emi Group, Boso Peninsula. (b) Web structures at several stages. Many are of reverse faults in the horizontal reference frame.

とする。

II. 地質構造形成メカニズムの解釈への適用

1) 皿状構造 (dish structure) とくもの巣状構造 (web structure)

「皿状構造」(一例を図 3a に示す)は，未固結の砂(砂岩)中に起きた何らかの脱水構造であろうと考えられていたが，その具体的成因の解明には成功していなかった(Allen, 1984; p. 367)。ところが，九州大学の修士課程の院生であった辻隆

司氏(現，石油資源株式会社中央研究所)が，世界で初めて実験的に作成することに成功し，一気に解決した(辻・宮田, 1987)。これは，急激に堆積した砂を主とする堆積物が，下方からの間隙水の脱水時に流動化を起し形成されるとするものである。それにより上昇する水(浮遊・懸濁した泥を含む)が，水平に広がる cm オーダーの大きさの眉状(円盤状)の空隙(水洞)を作り，それがしばらくの間(数分のオーダー)砂層下部に留まり，そのとき泥が沈殿して皿状の構造を作り，その後水洞が左右上方に位置を移動し，類似の構造が次々にできていくというものである。この実験で示された構造上の特徴は，天然で観察される特徴をすべて説明できることから，その後のサイズマイト(地震岩, seismite)の研究に多くの影響を与えた(たとえば, Moretti *et al.*, 1999)。

皿状構造形成時に振動が加わると，次に述べる「くもの巣状構造」となるとも予想される。実際，皿状構造によく類似したほとんど水平なくもの巣状構造もあり，またそれが相互に漸移するようで見られることもあるので(図 3)，その場合は，先に述べた水中物体に側方から力が働くことによる「軽量化」が効果的に働いたためではないか，と筆者らは予想している。くもの巣状構造には，鉛直上方への脱水とも取れるものも多いが，露頭表面における産状としては，皿状構造は風化によってへこみ(泥を主とするため)，逆にくもの巣状構造は，出っ張るという特徴がある(図 3)。後者には実際は逆断層が多いことも事実である。

辻・宮田(1987)が皿状構造のモデルとし，最初の系統的研究を行った日南海岸の猪崎付近では，その他にも多くの初生的変形構造が観察される。その多くは未固結～半固結状態の砂泥互層が，間隙水圧や振動の役割によってあるときは静的で，あるときは動的な(速度が速く，力すなわち加速度が関わる)状況下で形成される構造である。また，あるものは地すべりに伴って形成されたことが予想される。土木工学分野では静的な流状化を流動化(fluidization; 下方からの脱水による水の供給によって間隙水圧が上昇することにもとづく現象)，動的なものを液状化(liquefaction;

振動による間隙水圧の上昇にもとづく現象)として、区別している(Allen(1984)は両者を合わせて流液化をliquidizationとして定義している)。辻・宮田,(1987)では、この地で観察されるほとんどの変形構造が、堆積直後の変形で説明可能とされている。特に、water sill(Fyfe *et al.*, 1978)や水洞(辻・宮田, 1987)の存在は、急速に堆積した砂泥互層ではごく一般的な現象のようであり、それによって解釈される地質構造は多い。

「くもの巣状構造」(図3)については、筑波大学の学部学生であった廣野哲朗氏(現、大阪大学大学院)が、房総半島の中新世の江見層群の砂岩層に発達するものを詳細に記載、議論した(廣野, 1996)。彼は記載上、断面で筋状に見えるすべての面構造を区分し、それがステージごとに次第にあるいは急激に様式や内部構造を変化させることを示した。その初期のものほど脱水による構造(脱水脈)の性格を帯びており(particulate flow)、後期のものほど摩擦すべりを示す断層(frictional sliding)であることを見出した。その中で「くもの巣状構造」と従来考えられていたものは、すべて若干の変位を伴う何らかの断層であり(逆断層である場合が多い)、次第に摩擦すべりによるカタクレーサイト化が顕著になるのは、埋没に伴う荷重による圧密や構造的な圧縮によって、地層が強度を増して行くためである、との累進的変形作用を考えた(廣野・芦, 1998)。この考察は、堆積直後に剪断歪が生じる変形場での間隙水の移動や圧密化に伴う構造形成を、単に脱水だけとして簡単に解釈せずに、具体的に議論したものと見える。

アラスカのコディアク島などで記載されたくもの巣状構造(Byrne, 1984)は、江見層群の最後のステージのものに対応するものであり、本邦の四万十層群の砂岩中に普通に発達するものとも共通し、カタクレーシスの特徴とする断層である。このくもの巣状構造は、今までのところ付加体とされる岩体以外からは見出されていない。また筆者の観察および多くの研究者からの聞き取り調査によっても、逆もまた真であるようである。おそ

らく、急激な堆積と、その直後の剪断歪を生じさせるに足る剪断応力の発生という、くもの巣状構造への形成条件が同時に働く場所としては、付加体以外ないのかもしれない。また振動(地震による)が重要であるとの辻(1993)の予想も、下に述べる脈状構造との対応において興味深い。

2) 液状化現象と注入岩

上に述べた振動によって惹起された粘着力の喪失による液状化や、下位からの高い間隙水の上昇による流動化は、液状態となった堆積体全体の圧力や水洞の圧力が、以前の堆積物中の全体の圧力を凌駕することを意味する。その結果、そのような状態になった堆積体の周辺への注入が容易に起きうる。

液状化、流動化、注入現象、地すべりなどの現象の中で注目すべきは、未固結～半固結状態の泥と砂の圧密・固化の過程における力学特性および物性の差異である。泥は圧密・固化の過程で、砂よりも一般に早く未固結から半固結状態になり、強度や粘着力を持つようになる。しかし、浸透率は泥のほうが(間隙率が大きいにもかかわらず)砂よりも低い。これは間隙水が粘土鉱物や粘土サイズの粒子に吸着しているからである。一方、砂はセメント化が遅れるため、粘着力を持つようになるのが泥よりも後であり、堆積直後は粒子間の接着が弱い(粘着力 C がゼロに近く、 ϕ (摩擦角)だけで議論できる)。そこで、粒子間を切り離そうとする間隙水圧の上昇や振動が生じると、粒子間のつながり(作用反作用)で支えられていた荷重などの圧力(流体の圧力よりも大きい)が、液状化して(粒子がバラバラになって)浮遊状態になった全体にかかる。そのため、全体の圧力は以前よりも瞬時に増大し、液状化した部分がまわりの岩盤に割れ目を作りつつ注入・貫入しやすくなる。

このことが三浦層群の三崎層中の混在岩(従来、海底地すべり堆積物ないしはオリストストロームと解釈されていた(小島, 1980, 1981))に適用され、その多くが液状化とそれに伴った注入岩であると解釈された(Yamamoto *et al.*, 2000; 小川ほか, 2003)(図4)。このような構造(ブロックと

基質の組み合わせ)には、地層に平行な、いわゆるシルト、高角度の岩脈(ダイク)が最も普通である。しかし、後者の場合、ネプチュニアン・ダイク(海底面の割れ目に落ち込む貫入岩体)もかなり頻繁に観察される(Yamamoto, 2003)。三浦・房総半島の新第三紀層などの浅所でのこのような構造形成の例で重要な点は、ブロックを作る岩相が泥岩であるのに対して、マトリックス(基質)が砂質ないし礫質であることである(小川ほか, 2003)(図 5a)。これは比較的深部(たとえば四万十層群など)での混在岩でのブロック・基質関係とは逆である(図 5b)。三崎層に見られる液状化のブロックには、逆断層や脈状構造(後述) またある場合にはデュープレックスなどが含まれている(図 4a, b, c)。それらのブロックは比較的近い層準から移動してきたと考えられるので、ブロック化とそれを伴う液状化堆積物の注入は、逆断層や脈状構造が形成された後に生じ、またそれらのすべての構造は未だに砂層が固結していない、海底下比較的浅いところで形成されたことが分かる(Yamamoto *et al.*, 2000; Hamed, 2004)。そこでは、10 m スケール以上の巨大な岩体が、周りを液状化した粗粒堆積物に囲まれていたり、また、液状化したものがあかまマグマの上昇の一つのメカニズムであるストーピング(stopping; 上方の岩石に注入しつつ上昇する貫入方式)に類似した構造をとって貫入している様子も観察される(図 6a)。前者は比較的短時間の現象であると思像できるのに対して、後者は液状化が一瞬に生じた後も、圧力を保ったままのマグマ状の流動化した物体がゆっくりと上昇したものと考えられる。

これに反して、四万十層群などで普通に見られる混在岩でのブロックと基質の組み合わせでは、より延性的変形をする泥岩がより脆性的変形をする砂岩へ注入する例であることが多く、プーダンから発展した、いわゆるピンチ・アンド・スウェル構造(よりコンピtentな岩石が引き伸ばされて、ソーセージ状の形態をとる構造)である(図 5b)。一般に、砂岩は脆性破壊、泥岩は延性流動したとして理解される。その場合は泥圧(mud pressure)が問題になる。このような現象で説明

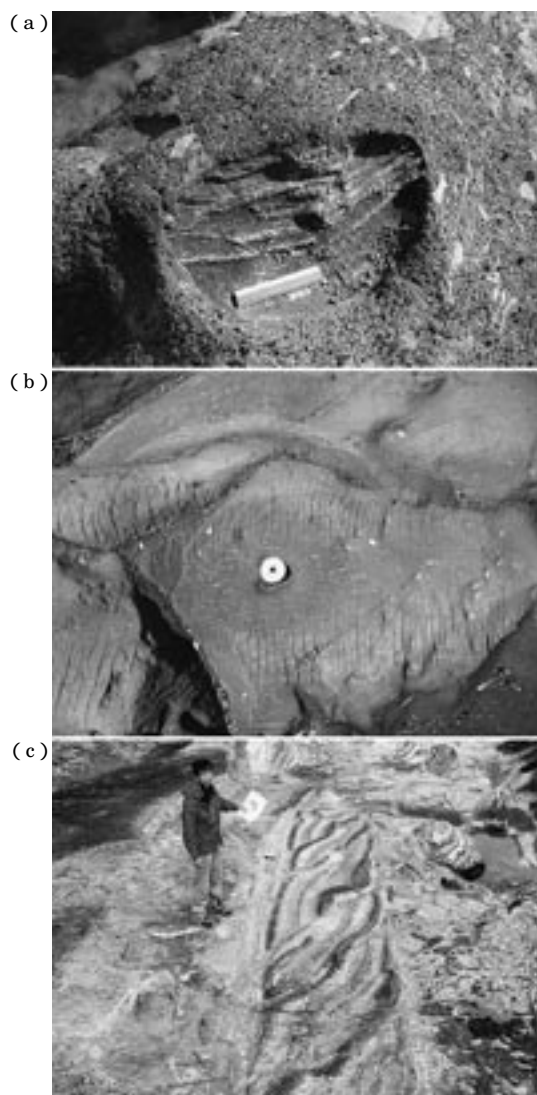


図 4 液状化による注入岩のブロックと周囲との関係、およびブロック内の各種の構造。(a) ブロックに逆断層(数 cm の変位を示す共役性のもの)が含まれる例。(b) 脈状構造が含まれる例。(c) デュープレックスが含まれる例。(いずれも三浦半島三浦層群三崎層中の例)。

Fig. 4 Relations between blocks and surrounding strata of injection bodies caused by liquefaction, and some structures in the blocks. (a) Example of reverse faults (with displacement of conjugate sense of some centimeters) in the block. (b) Example of a block with a vein structure. (c) Examples of a block with a duplex structure. All from the Misaki Formation of Miura Group, Miura Peninsula.

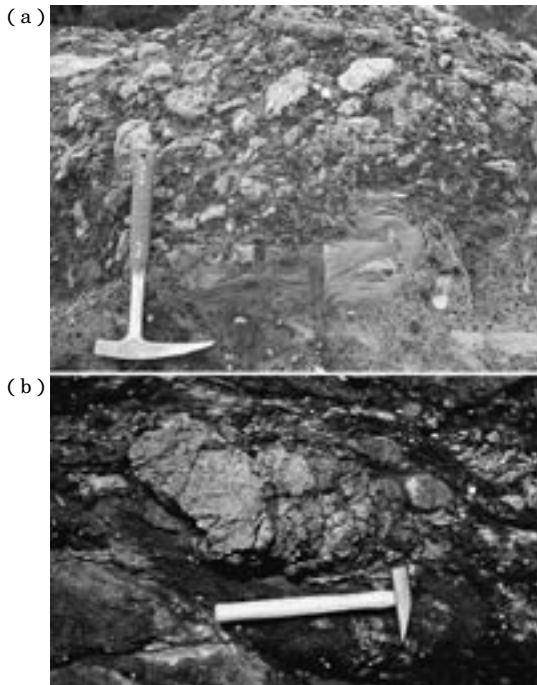


図 5 (a) 三崎層の液状化層のブロックの周りの小礫の産状。あるものは、泥質岩ブロックに押し込んであり、あるものは脈状に注入している。(b) 四万十層群に普通に見られる砂岩泥岩混在層(ブロック・イン・マトリックス関係)。高知県四万十市の例。泥岩と砂岩の関係は三崎層の場合とは逆である。

Fig. 5 (a) Occurrence of small clasts around blocks within liquefied strata, Misaki Formation. (b) Chaotic deposit commonly developed in the Shimanto Group (block-in-matrix relation). Shimanto City, Kochi Prefecture. Relation of mudstone to sandstone reversed in the two examples.

される露頭は高知県四万十市(旧中村市)及び土佐清水市周辺や屋久島などで普通に観察される。三浦・房総半島の新第三紀層の例と、四万十層群の例の違いは、深さ(埋没深度;有効封圧)の違いによる延性の差で説明ができるが、浅い場合での各種の変形例は、さらに以下のように説明される。

三浦・房総半島の例では、液状化した砂岩に米粒大の楕円形の泥岩がブロックからこぼれるよう

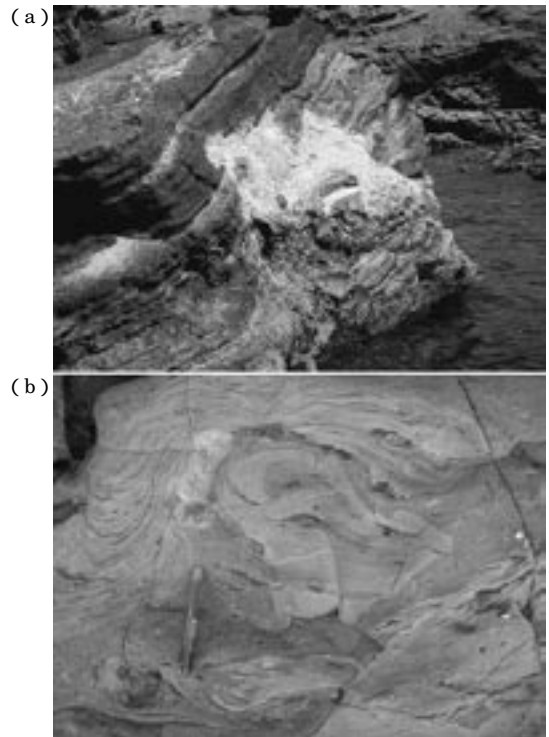


図 6 (a) 三崎層中に見られるストーピング状に貫入する液状化層。(b) 房総半島、三浦層群西崎層の墨流し状構造。泥岩のブロックと礫・砂を含む液状化層とが一体となって流動している。

Fig. 6 (a) Stopping-like intrusion of liquefied strata, Misaki Formation. (b) Flowage of muddy layers, Nishizaki Formation, Miura Group, Boso Peninsula. Muddy layers and liquefied surrounding pebble- and sand-bearing strata behave together.

に配列し、しかもその配列に沿ったゾーンに炭酸塩が沈殿していることがある。泥岩ブロックはクラスト(礫)状となって、砂層部分に注入したり、あるいは砂岩中の皿状構造と共存して層理に並行な位置を保って残存しているように見られることもある。これは、砂泥互層が差別的に液状化、流動化して、強度がより強かった泥岩部分がクラスト状となって注入するか、そのような形状を保ったままその層準に残存するかしたものである(図7)。また、砂層も泥層も一体となって墨流し

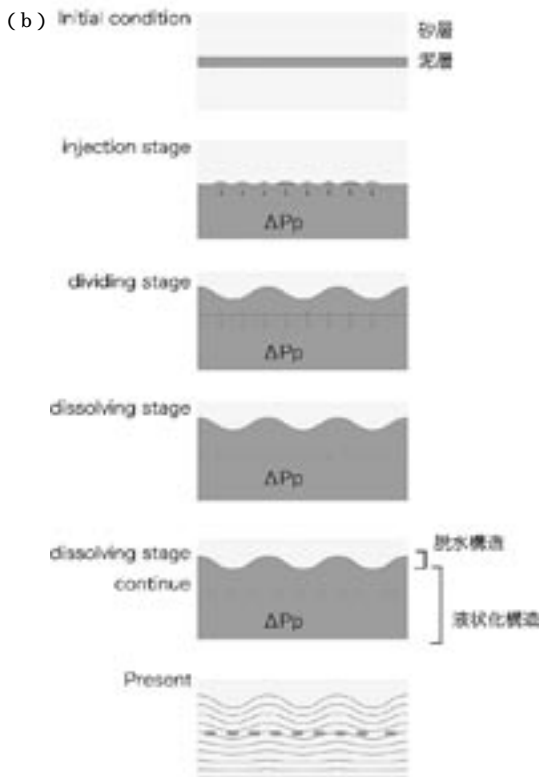
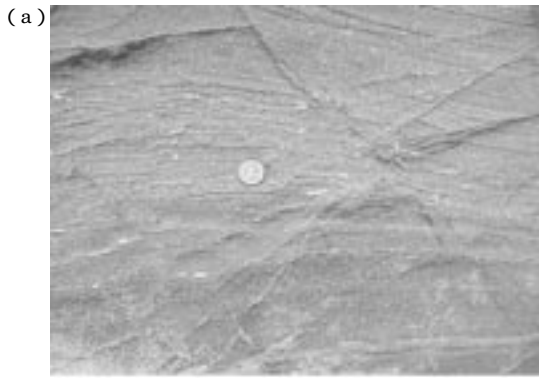


図 7 (a)江見層群に見られる楕円状の泥岩の残存構造 . 水平なラミネーション類似の面構造を伴うのが普通である .(b) 泥岩の残存構造を砂層の流動化で説明する図 . 高い間隙水圧をもった流動化層が下位から次第に上昇し、強度を保持した泥岩が流動化を免れてひきちぎられ、楕円状となり残存する . 周辺の砂岩には、皿状構造類似のラミネーションが再堆積構造として形成される .

Fig. 7 (a) Muddy layers of an ellipsoidal shape remaining in fluidized sand layers, Emi Group, commonly associated with lamination-like foliation. (b) Model explaining the layers remaining after fluidization of sand layers. Fluidization extends upward gradually, letting high fluid pressure invade and stretch the muddy layers, which have some strength. The muddy layers remain ellipsoidal in shape, and dish structure-like laminations form in the surrounding sand layers.

状に変形している例も多い (図 6b) .

これについては、最近の半固結砂泥質堆積物の実験と浮力および浸透率との考察から、以下のように解釈しうる。それまで上載荷重による摩擦で安定していた砂 (・礫) 層は液状化とともに全体が媒質となり、上載荷重に応じた圧力を持つ相対密度のより大きい液状の物質となる。液状化した

媒質に取り囲まれたブロックは、その媒質に応じた浮力を受けることになる。媒質の相対密度は液状化前の値 (ほぼ水と同程度) より大きくなるので、粒径が大きいほど受ける浮力は大きい。

一方、泥層は、砂層の液状化時に低浸透性の故に (砂に比べて数桁も低い浸透率を示す ; 高橋ほか, 2002)、間隙水圧の増加が遅れ気味になる。

ここで砂層が液状化し高間隙水圧になるまでに要する時間が、泥層に水が浸透する時間よりはるかに短いとき、泥層・砂層境界は間隙水圧の増加に伴う有効応力の減少の場になり、泥層内での引張割れ目・注入・泥層のブロック化がこの順序で起りやすい。そして注入が生じることにより間隙水圧が減少し、基質の粒子同士に摩擦が復活した瞬間（有効応力の増大）、剪断歪み形成のために粒子間同士が乗り越えることにより、砂・礫層はダイラタントな性質を復活させるので、間隙水圧はさらに低下し、各種の液状化構造が固定される（図7b）。

このような液状化による各種の現象の議論では、三崎層中のブロック化した泥岩の形状が、傍証となる。ブロック化した泥岩のブロックの形態は、境界面がシャープなもの（図4a）、スコリア礫が食い込んでいるもの（図5b）、あるいは、墨流し状に引き延ばされたもの（図6b）など、大まかにいえば3種類ある。泥層と基質の浸透率が同じなら周囲の基質と短時間で水圧が同化でき、そのため基質と伴に流動し墨流し状になる。大きなブロックでは内部に圧力がなかなか伝播しないので、内部は外部とは差応力が異なる状態を保ったままとなる。そのため、内部では外部とは別個の応力状態が出現し、逆断層や脈状構造の形成の場になることもありうる。ブロック内部にしばしば逆断層、脈状構造、デュープレックス構造などが見られることがある。これは、一般には、それらの構造が形成されてからブロック化した、と考えられているが、ほぼ同時である場合もありうる、ということになる。どちらかについては、地質学的状況証拠（たとえば、切っているか、切られているか、など）を基準に判断することになる。また、泥層ブロック内部には水が浸透しない一方、周囲には流動化した基質が存在するので、ブロック自体に浮力が働く。これは、混在岩中にしばしば大きなブロックが存在する理由である。今後、変形挙動に際しての物性の定量的考察と、それを応用したさらに詳しい天然現象への適用が課題である。

上に述べたように、液状化現象の理解には、間

隙水圧（泥圧、全体圧）注入、浮力といった概念の応用が必要である。ただし、液状化した物体がどの方向へ注入するかはそれほど簡単な問題ではない。浮力だけの営力を考える場合は鉛直上方へのみの貫入を考えればよいが、割れ目を作りつつ注入するのであるから、注入方向は割れ目の先端での応力場に支配されると考えられる。注入は一般には σ_3 に垂直な方位かつ σ_1 への引っ張り割れ目（モードIのクラック）に沿うとされているので（図1）、その場合、クラック形成に伴うクラック進展方向の浸透率が增大する。しかし一方で、圧力差（水頭差）は、クラックが生じると下がる。圧力注入に際しての単位断面あたりの流量は、重力場では透水係数と水頭差との積であるので（前式（6））、その値が最大になる方向に最も流れやすい。よって、割れ目形成によって浸透率が変化する場合には、どの方向に水が流れるかは一義的には決まらない。先に述べたように、液状化に伴う間隙水圧の上昇と、ダイレイタンスによる間隙水圧の減少があいまって、液状化したものが、しばらく滞留する場合もあるであろう（上に示したストーピング類似の露頭がそれを示している）。

また、高い圧力を持つ水洞が等間隙圧力面である水平面内に水のシル（water sill; Fyfe *et al.*, 1978）のような形態を保ちつつゆっくりと上昇する場合には、強度が大きいために先の皿状構造の時のように、液状化は発生せず、その場に残留する泥岩が水平方向へちぎれ、周りからゆっくりと破壊・侵食されて楕円形の形状をなすことが考えられる（図7a）。これは、注入ステージ、分断化ステージ、楕円形侵食ステージの3ステージに分けて考えられる（図7b）。そのような条件で形成された、いわば流動化した堆積物中での再堆積作用も、房総半島の江見層群、三浦層群相当層などで普通に見られる。流動化した堆積物が周りの岩体に注入しているケースもしばしばあるが、注入方向が絶えず σ_3 に垂直面で σ_1 への方向とは限らない。それは、液状化や注入など高間隙圧の流体に侵入される側の地層では、有効応力が刻々と変化して、クラックの形成方向に影響

を与えているためであろう。

上に述べたことを総合すると、以下のようにまとめられる。ある密度、粘性率、水頭差をもった液状物体が、別の浸透率をもった地層に作用し、その結果として有効応力を変化させ地層に新たな割れ目を形成する。これは同時に、新たな水頭差、浸透率、有効応力の場の形成、液状物体の密度、粘性率の変化の原因を作る。このため露頭における構造解釈に、液状物体の密度、粘性率、水頭差、それに既存ないし新しく形成された割れ目の方向を含めた浸透率の値の4つの時系列変化が関わることになる。

3) 鱗片状へき開とデコルマン・ゾーン

堆積物に関してさまざまな構造に伴うことがかなり以前から判明していたにもかかわらず、成因に関しての研究にそれほどの進展がなかったものの例として、鱗片状へき開 (scaly cleavage) がある。これは、鱗(うろこ)状 (scale は「うろこ」のこと) に引き裂かれるようなへき開として、泥質堆積物にしばしば見られるもので、風化や乾燥化によってその存在が誇張されるが、実際は粘土鉱物の定向配列によって特徴づけられた、S-C 構造類似のある種の複合面構造である (S-C 構造とは、2 ステージの剪断面が交わってできる、引きずり状の変形葉理構造のこと) (Moore, 1989; Takizawa and Ogawa, 1999; Vannucchi *et al.*, 2003)。イタリア中北部、ポローニャ地方の第三紀の泥岩にしばしば発達し、アーシル・スカグリオッサ (scaly clay) と呼ばれていた (図 8a)。それが、堆積直後の形成になるものが、それとも構造的 (断層など) によるものかの議論が長い間続いた。しかし、最近では、両者があると考えられている (Pini, 1999; Pini *et al.*, 2004)。

同様な鱗片状へき開が、泥火山・泥ダイアピルの内部や付加体のプレート境界にあるほぼ水平の引き剥がし断層 (デコルマン) にも発達することが知られており、後者の例としてはバルバドス付加体での掘削における研究が知られている (Moore, 1986; Moore, 1989; Labaume *et al.*, 1997; Takizawa and Ogawa, 1999) (図 8b)。バルバドス付加体におけるデコルマン・ゾーンは地

層面にほぼ平行な水平方向の剪断に伴うものである。泥ダイアピルもデコルマン・ゾーンも、どちらも単純ズリ (simple shear) が勝った歪場での形成とされる。バルバドスのデコルマン・ゾーンの例では厚さ 20 30 m の幅の断層帯内部に、S-C 構造を呈する鱗片状へき開卓越部分 (図 8c) と、伸張節理や正断層による地層に平行な伸びを示す、いわゆるひきちぎれ (stratal disruption) が、数 cm オーダーで互層状に繰り返す特徴的な構造を呈する (Labaume *et al.*, 1997)。同様の構造は陸上でも江見層群に知られている (Chiba, 2003)。このような軟弱な泥質試料の薄片や SEM サンプル作成に関しては、自然乾燥以前に凍結乾燥処理を行わないと組織が激変してしまうので、注意が必要である。従来の研究では、乾燥時の表面張力による変形を見ているものが多い。処理の方法は滝沢ほか (1995)、滝沢 (1997) を参照されたい。

デコルマン・ゾーンが厚く発達する例は、陸上からはそれほど多くは知られていないが、Byrne and Fisher (1990) がアラスカのコーディアク島で報告したほか、Ujiie (1997, 2002) は沖縄の名護層群でのメランジュ状の例を詳しく議論している。そこでは非常に厚い (100 m に達する) 断層帯がプレート間の逆断層ゾーン (デコルマン・ゾーン) として認定されている。Ujiie (1997, 2002) は、デコルマン・ゾーンが次第に陸方へ持ち込まれるほど歪み硬化が進むために、シアゾーンがより厚く発達すると考えた。アラスカと沖縄からの研究例はデコルマン・ゾーンが深部へと次第に厚くなり、やがてメランジュ岩体に発展するという、Moore and Byrne (1987) の先駆的な考察の実例である。

上に述べたものに類似の構造をもつ断層は、三浦・房総半島の南部の新第三紀層に断層面として普通に見られる。これはほとんどの場合、泥質岩層内の、地層に平行な数 mm ~ 数 cm ほどの薄いゾーンであり、Hanamura and Ogawa (1993) は “layer-parallel fault” と呼んだ。内部の構造は、雲母・粘土鉱物 (多くの場合イライト) の定向配列に特徴づけられ、しばしば、S-C 構造をと

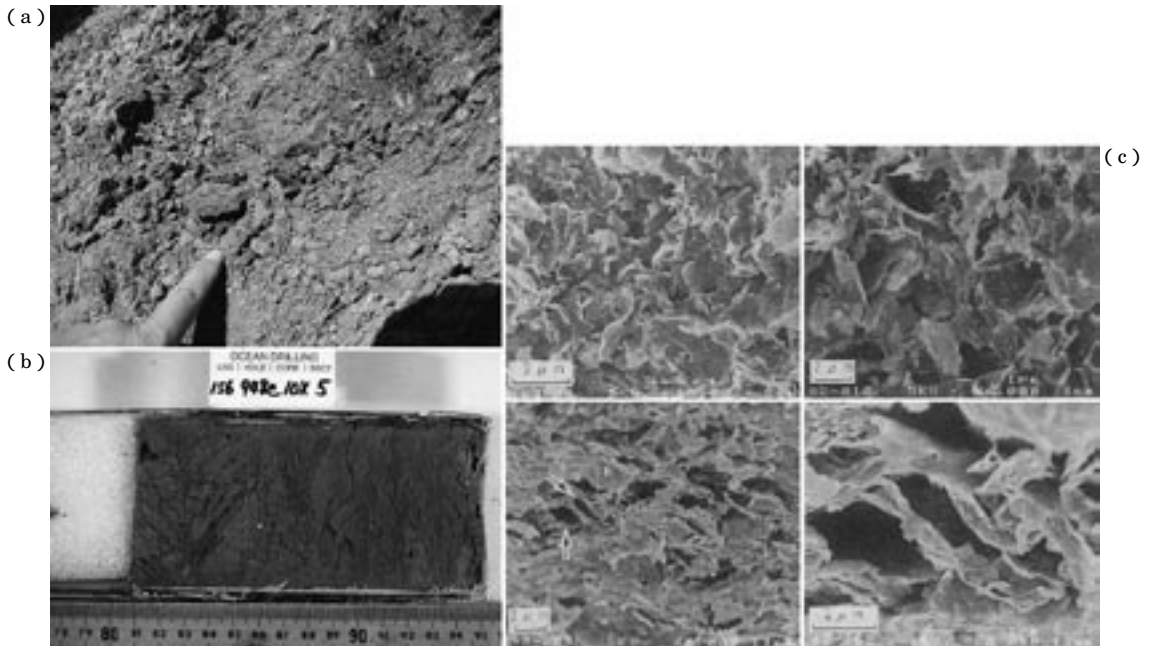


図 8 陸上および海底下の典型的な鱗片状劈開の例。
 (a) 鱗片状劈開のタイプロカリティーのイタリア、ボローニャ付近の白亜紀層中の例。
 (b) バルバドス付加体の海底下 500 m 深度の中新世のデコルマン・ゾーンのコアの断面。
 (c) デコルマン・ゾーンに持ち込まれる以前の組織(上 2 例)と、デコルマン・ゾーン中の組織(下 2 例)。
 凍結乾燥後の走査電子顕微鏡写真 (Takizawa and Ogawa (1999) による)。

Fig. 8 Typical examples of scaly cleavages on land and under the sea. (a) Type locality of scaly clay in the Cretaceous example from Bologna area, Italy. (b) Example in the decollement zone of Miocene age from Barbados accretionary prism at 500 m below the sea floor. (c) SEM photographs of clayey sediments of the Barbados accretionary prism; before the decollement zone (two above), and in the decollement zone (two below) after Takizawa and Ogawa (1999). Samples are treated by the freeze-dry method.

る (Yamamoto, 2003; Yamamoto *et al.*, 2005) おそらく、間隙水圧が高いゾーンが泥層に平行に発達し、それに沿って地層に平行なすべり面が形成されたものである。これはしばしば逆断層へ移行する。したがって、地層面すべり断層は基本的には逆断層であろう、と我々は考えているが、それが正断層から前方へ逆断層へ連続する場合もあり、大規模な地すべり岩体の底面を見ている可能性もある。つまり、部分的に逆断層であっても、全体が水平短縮に関わるものでもなく、あるものは地すべり性の現象の一部を見ている場合もあると考えられる (千倉層群など; Aung, 2003)。

地層に平行な断層の場合、たいていは砂質部分

との境界から下方へ入った、泥質部分の地層の厚さの上から 1/4 程度の部位に発達している例が多い。それはその部分が泥質堆積物において、上位への脱水と下位からの水の供給が釣りあって、最も間隙水圧の高まる層準となるからだろうと解釈される。またこの地層面すべり断層が、しばしば以下に述べる脈状構造と切りつ切れつしていることも多い (Hanamura and Ogawa, 1993)。このことから、両者は同一シリーズの変形ステージに相前後して形成されるものと考えられる。またこの水平断層内部に砂粒子が配列していることもある(これを我々はフィールドでは sand-fault(砂断層)と呼んでいる)。これはおそらく液状化あ

るいは流動化した砂層中を断層が横切るときに、その粒子を高間隙水圧の断層面内の流体が浮遊状態で運搬してきたものであろう。なお脈状構造に関しては現在論文を公表準備中であるので今回は要点の一部だけを記述する。また、地層に水平な断層とその他の現象との時代順序については、以下の浸透率の項で述べる。

4) 脈状構造 (vein structure)

脈状構造は世界に先駆けて日本で最初に本格的に記載された構造の一つで、陸上では小川 (1980) が三浦・房総半島の新第三紀系三浦層群で初めてその産状と成因論を詳しく調べたのに始まる (図 9a)。丁度同じころ、世界中の海溝地域 (主として海溝陸側斜面の斜面堆積物) の深海掘削計画 (DSDP) で得られたコア試料からもその存在が知られてきた。その中でも詳しい記載が行われたのは、Cowan (1982)、Ogawa and Miyata (1985) によるガテマラ沖中米海溝域の斜面堆積物からのものである。彼らや、その後日本海溝やチリ海溝からの掘削試料を研究した、Leggett *et al.* (1987)、Knipe (1986a, b)、Kemp (1990)、Kemp and Lindsley-Griffin (1990)、Lindsley-Griffin *et al.* (1990) などは、vein structure は泥の入った単純な引っ張り割れ目 (mud vein) ないし脱水脈 (dewatering vein) であると考えていた。しかし、Hanamura and Ogawa (1993) は新たに地震動成因説を唱えた。

現在多くの研究者が信じるこの地震動成因説は、九州大学の大学院生であった飯野英明氏が、乾燥した粉状態の岩石粉を入れた透明容器を横に傾けたり、振動したりすることで 1990 年ころに実験的に形成に成功したのが始まりである。それをビデオ撮影した同大学院生の花村泰明氏 (現、ジャパンエナジー) は、修士論文でその成因を横方向の振動によるものとした。そして三浦層群の三崎層での露頭の産状、内部の構造、組織の記載、実験とともに、その成因を地震動によるものとした (Hanamura and Ogawa, 1993)。その後、英国サウスハンプトン大学の院生であった Richard Brothers 氏は同大学の Allan Kemp 博士およびウェールズ大学アベリストウィス校の Alex

Maltman 博士の指導のもとに、カリフォルニア州の上部中新統のサンタクルズ泥岩と呼ばれる珪藻質泥質岩に発達する三浦層群とほとんど同様な脈状構造 (図 9b) について研究していたが、小川から室内実験の成功を知り、その指導のもとにより具体的な実験を行い、追試的論文を書いた (Brothers *et al.*, 1996)。そして、この構造が往復振動によって堆積物中に生じる共振によるものではないか、またそれには振動の腹にできる割れ目であるいわゆる mud vein (泥質ベイン) と、節に細粒物質が残存することによる ghost vein (ゴーストベイン) の 2 種があると述べた。

その後、小川の研究室では何人かがこの脈状構造の研究をフィールドでまた実験で繰り返した。小川は筑波大学の大学院生であった仁平麻奈美氏 (現、茨城県立銚田第一高校) および同科目等履修生であった大角恒雄博士 (日本工営株式会社中央研究所) とともに、三浦・房総半島の三浦層群相当層の露頭でより詳細な産状を検討した。その結果、地震動によるものとの成因の基本は Brothers *et al.* (1996) と変わらないが、いくつかの新しい事実を見出している。その詳細については現在発表準備中であるので、それに譲りたい。

このような脈状構造は、現在では海溝域の海側および陸側のかなりの個所から知られているが、いずれも地震多発地帯であり、かつ岩相が珪藻質の泥質堆積物であることが特徴である。中新世の深海・半深海堆積物によく見られるのも特徴であり、この岩相がその時代に発達しやすいためではないかと考えられる。また、この種の岩相に脈状構造が発達しやすい理由は、珪藻のガラス質オパールによるセメント化と珪藻の破片が絡み合うことによる粘着力の発生にあるものと、筆者のうちの一人の小川は予想している。ただし、類似の規則的な配列で特徴づけられる構造は、砂岩中にも、また石灰岩や蛇紋岩、チャートなどにも産することがある。このようなものすべてが、振動によるものかどうかは分からない。今後の検討としたい。

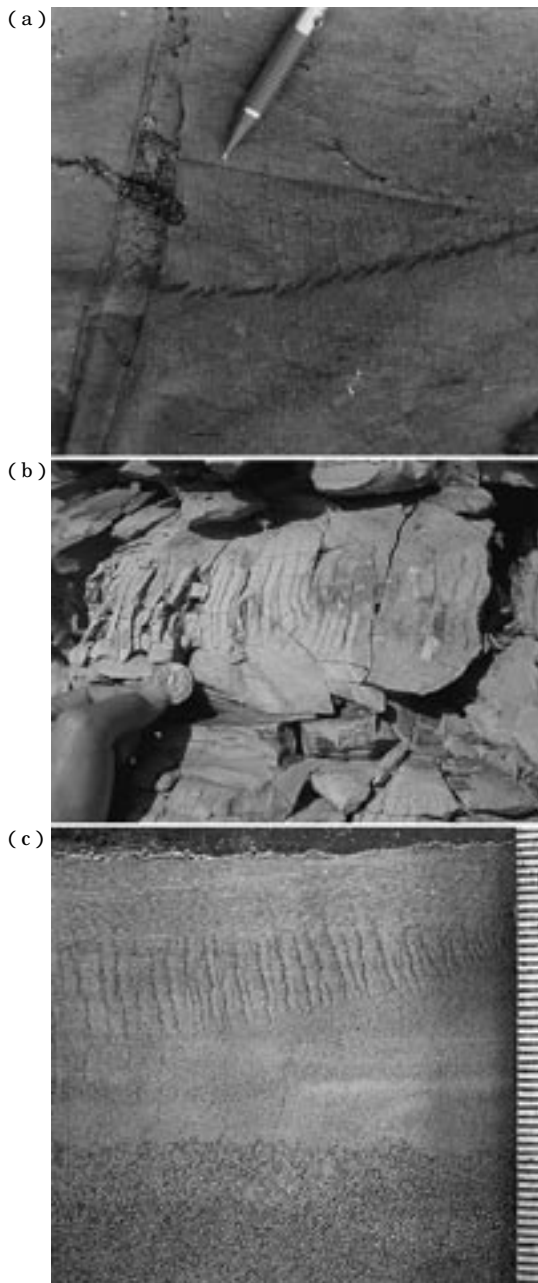


図 9 脈状構造 (vein structure) の産状例。(a) 三浦半島荒崎の三崎層の例。(b) カリフォルニア州サンタクルズ北方での例。(c) 振動実験で形成される例。脈のゾーンの直上に、流動した層が発達すること、および太い脈の間に、細いやや短い脈が形成されていることに注意。

Fig. 9 Examples of vein structure. (a) Example from the Misaki Formation at Arasaki, Miura Peninsula. (b) Example from the north of Santa Cruz, California. (c) Example formed by shaking experiment. Notice that thin and shorter veins form between the bold veins.

III . 圧密過程での変形

泥質堆積物の変形には土質力学の知識が非常に役に立つ。これは地すべりや土木工事上の実用に伴って発達してきた分野であるが、未圧密～過圧

密のそれぞれの条件下で変形挙動と組織の変化を大いに異にする。これについての地質学分野からの研究成果としては Maltman (1994a) の教科書的な論文集が非常によく知られており、特にその中の、Jones (1994)、Karig and Moran (1994)、

Brown(1994), Byrne(1994), Maltman(1994b)が、地質構造の形成メカニズムを実例に則して解説している。また、廣野・芦(1998)のレビューと Kawamura and Ogawa(2004)の深海堆積物での圧密作用と組織の変化の研究例があるので、それらも参照されたい。

上に述べた鱗片状へき開の場合は、堆積物の深部への運搬が、脱水作用よりも早い場合(あるいは間隙水圧を保ったまま埋没が進行する場合)に相当し、いわば未圧密状態が保たれていることで起きやすい。すなわち脱水と圧密が荷重の増加に追いつかず、堆積物は未圧密にとどまり、組織が破壊されないまま保持される。また泥質堆積物は粘土粒子主体のため浸透率は小さい。そのようなところに大きな剪断歪みをもたらされると、堆積物の組織は脱水とともに破壊され、鱗片状へき開が形成されると考えられる(Moore, 1989; Takizawa and Ogawa, 1999)。このような視点からの議論や解釈が、付加体のような、急速な堆積直後に変形が起こる場合の研究に大いに役立つので、以下にそれについて簡単に述べる。

1) “圧密作用”(consolidation)の概念と地質構造への適用

従来、圧密という用語は土質工学(地盤工学)の分野で用いられる言葉であり、特に粘土鉱物や粘土粒子を多く含む泥質堆積物(粘性土と呼ばれる)が時間の経過と共に間隙水を排水して圧縮する場合に見られる独特の挙動を指している。沿岸部の平野(地盤)を構成する地質は、軟弱な粘性土を主体とする沖積層であり、土木構造物を構築する場合や地下水を取水する際に、地盤沈下などの独特の挙動が常につきまってきた。20世紀末に開港した関西国際空港の、継続的な圧密沈下問題は記憶に新しい。これは圧密問題抜きに議論できない。

粘性土の圧密現象は人間活動に直結する問題であり、土質工学の大きなテーマの一つとなっており、圧密問題を扱う多くの教科書がこれまでに出版されている。とりわけ、圧密現象を最も明解に解釈した Terzaghi(1925)の一次元圧密理論は有名である。Terzaghiは、間隙水圧の散逸に着

目して、粘性土の微小要素における応力と歪みの関係(フックの法則)と、間隙水の移動速度の変化(ダルシー則)に保存則が成立するとして、拡散型の問題としての一次元圧密論を展開している。これは、地質的な組織の問題としては、粒子と間隙の組み合わせによる物質の脱水変形として議論できる。つまり地質的には堆積後、堆積物は鉛直方向の圧密を受け、間隙に存在していた流体(多くの場合水としてよい)が脱水しつつ変形する。その場合、その物質がその時に受けている有効封圧(土質工学的には土被り圧という)が、従来受けた最大の有効封圧よりも大きいかわ小さいかを基準に、大きい場合を未圧密条件、小さい場合を過圧密条件、等しい場合を正規圧密条件という。これらの用語は、地質学でも使われており、後に述べるように、セメント化作用を受けていない堆積物に関しては、組織の機械的な変化だけの議論ですむので、便利な概念である。

2) 圧密試験と地質学的解釈

現在、土質工学分野では、地盤の人工改変に伴って生じる土(地質学的には堆積物)の圧密の程度を評価する目的で、いわゆる標準圧密試験(JGS0411)が広く行われている。標準圧密試験は圧縮の方向と排水の方向が等しい一次元圧密を達成するために、側方歪みを拘束させる金属製の圧密リングを使用している。加重方法は24時間毎に荷重を倍増させていく段階載荷方法がとられる。この試験で計測される項目は基本的に、載荷重 p 、各載荷段階の24時間目の変位(歪み)、各載荷段階の変位の時間変化の3項目である。特に変位を間隙比 e (間隙率と粒子の体積率との比)に変換し、荷重との関係に着目して圧密特性を把握するものが $e \log p$ 曲線(図10)、また各段階の変位(間隙比)の時間変化に着目して、時間依存性の挙動を把握するために $e \log t$ 曲線を用いることもある。これは、地質学的な時間の尺度から考えると非常に短い期間での試験であるが、試料の力学特性を判定するのに便利な方法である。

$e \log p$ 曲線において、通常載荷重に対して弾性的な挙動を示す領域(図10のA部分)と、不可逆的な圧縮挙動を示す領域(図10のB部分)

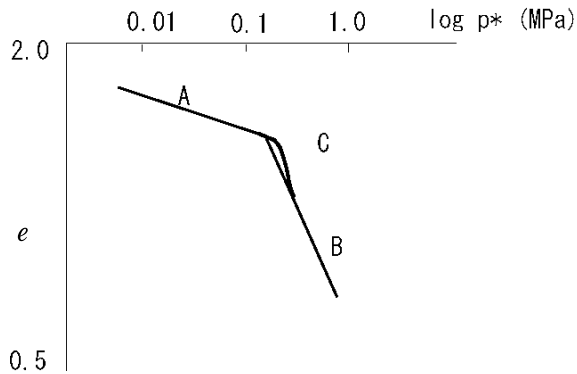


図 10 泥質物質の圧密試験において標準的に現れる曲線。試験結果は、側方拘束のもと圧密応力（上載圧）をかけたつ脱水させる。そのときの空隙比（ e ）を縦軸に、圧密応力（ p^* ）（有効応力）の対数を横軸にとって表す。初期の直線部分（左上部分 A）は弾性的変形を表し、その後、傾斜が変化して塑性的変形へ移る（B）。C の張り出し部分は、続成過程でのセメント化作用などによる。第四紀層などの代表的な尺度を目盛りとして表した。

Fig. 10 A typical diagram of a consolidation test with a muddy material. In the test, vertical compression stress under a horizontal constraint is increased, and the results are shown. Vertical axis is void ratio (e), and horizontal axis is logarithm of vertical stress ($\log p^*$) (p^* : effective stress). The early stage straight line (upper left, A) represents elastic deformation, and the later straight line (B) is a different angle of dip. The right-convex part (C) is due to cementation etc. during diagenesis. Representative values of the two axes are shown.

が見出される (Lambe and Whitman, 1979)。前者はそれまでの荷重による土内部の構造形成を示し、後者は地盤の埋積過程を示すものと解釈されている。また両者の境界を圧密降伏点と呼び、圧密降伏点の荷重を先行圧密圧力と呼んでいる。これは弾性的な挙動をするのはその有効封圧（圧力）までであって、その値を経験した最大の有効封圧つまり先行圧密圧力を示すと考えるのが妥当であることを示している。また先行圧密圧力が現在の土被り圧（上載圧）よりも大きな値を示す場合があり、かつて上位に分布していた地層が浸食・削剥された事に起因すると解釈され、このような場合を「過圧密状態」と呼ぶ。一方先行圧密圧力と現在の土被り圧が等しい場合に対しては、「正規圧密」の表現が用いられる。この用語は、圧密だけで変形が生じたと仮定する限りにおいては、それらの堆積物がこうむった過去の最大有効封圧（ほぼ深さに比例）を示すので、地史の議論に有

効である。

しかし、従来から、圧密曲線の圧密降伏領域が右側へ張り出す場合のある事が知られている（図 10 の C）。これは圧密降伏圧が大きい事を表すもので、その要因として土質工学分野では粘性土内の構造の変化ないしセメンテーション等の年代効果が考えられており、「見かけの過圧密」や「擬似過圧密」と呼ばれている。よって、地質学的な解釈にあたっては、単純な圧密以外にも、微小な構造（組織）の変化、セメント化作用、また有効封圧などの詳細な検討が必要である。さらに、重力だけでなく、テクトニクスな応力（特に変動帯や付加体などでは側方の圧縮応力）が働いている場合には、その要因についての検討が必要である。

一般に静止状態の土について、鉛直応力（ σ_v ）に対する側方応力（ σ_h ）は一定の関係にある事が知られており、 $\sigma_h = K_0 \sigma_v$ で表される。これら

2つの応力を関係づける K_0 が、(わが国ではケイゼロと呼び慣わされているが、実際はケイオーである)いわゆる静止土圧係数 (coefficient of earth pressure at rest) と呼ばれ、この時の側方応力を静止土圧と呼んでいる。沖積層や一般の堆積盆地など天然の地盤で生じる圧密は、 K_0 の応力条件下で進行すると考えられている。(なぜならば、天然の圧密条件では側方歪みは生じないからである。)そこで、このような条件での地質学的現象を議論するためには、天然に近い状態での圧密状態を実験で再現し、その詳細な過程を追跡するべく、側方応力を制御するなどの工夫が必要で、そのためには、三軸試験装置を導入し、載荷速度ないし歪み速度を制御し、 K_0 圧密試験を行う事が必要である。

さらに、地球上で起きる圧密変形現象の中には、重力だけでなく、テクトニックな力が作用する環境 (付加体など) で生じるものもある。その場合は、圧密と剪断変形が同時に生じている可能性が考えられる (Karig and Morgan, 1994)。現世の付加体のデコルマン・ゾーンでは、しばしば高間隙水圧を保持した未圧密粘性土の分布が確認されているが (Moore and Vrolijk, 1992)、今後、より複雑な条件での変形挙動やそれと構造や組織の変化との関係を考えるためには、さらなる天然試料の検討と実験的検討が必要である。

IV . 浸透率テンソルと流体移動の方向

1) 破壊時の組織と浸透率の変化との関係

浸透率 (permeability) は2階のテンソルである (Middleton and Wilcock, 1994; 徳永, 2003)、つまり、応力や歪と同じく、面に関して定義される概念である。浸透性のある物体内部には、流体はあらゆる方向に浸透しうるが、浸透率は互いに直交する3面に直交する方向、面内で平行する方向へ、それぞれ、別の値を持つ。それが、変形に際して、あるいはすでに既存の面がある場合にどのような方向でどのような値をとるかが、流体移動に関して重要である。これには、実験的研究と観測事実が重要である。変形実験に際する浸透率テンソルの測定は、始まったばかりであり、今

後多くの実験が必要である (資源・素材学会, 2003)。流体移動が議論され、また掘削コアの観察や掘削孔を用いた計測などが行われている付加体での研究例は、Moore (1989) 以降、多くの研究例がある (Screaton *et al.*, 1990; Tarney *et al.*, 1991; Saffer and Bekins, 1998, 1999, 2002; Morgan and Ask, 2004)。ただし、3次元的な考察はまだ緒についたばかりである (Ogawa and Vrolijk, 2006)。

泥質堆積物での剪断時の浸透率の変化とそれに伴う組織の形成に関する実験的研究が、Alex Maltman 研究室などで行われた (Bolton and Maltman, 1998; Bolton *et al.*, 1998, 1999; Dewhurst *et al.*, 1996 など)。それによると、破壊時に浸透率が增大する場合と減少する場合がある。これは、先に述べた過圧密と未圧密の場合に対応し、組織の変化が開いた割れ目を作るか、つぶされて (多くの場合細粒化によって) 閉じたものとなるかに対応している。しかも、相互の値は数桁かそれ以上も異なるので、地球科学的にももちろん、社会問題としても重要である。今後の一層の研究が望まれる。これは、先に述べた堆積物から岩石へと変化する圧密・変形過程での力学特性の変化の議論にも適用される。

2) 浸透率最大方向の実験的解決

破壊に関連した浸透率変化の問題については、すでに Sibson (1975) が、 σ_2 方向問題として論じており、まさに慧眼というべきであるが (図 11)、最近剪断面発生時の浸透率に関して、新しい事実が実験的に示された。それは浸透率は剪断面 (断層面) に沿っての σ_2 方向に最大であるということである (高橋ほか, 2002; Takahashi *et al.*, 2004)。これは、従来一般に単に断層面に沿って最大であるとの2次元的な考察に留まっていた考えを飛躍的に前進させる、真3軸実験装置による画期的な研究である。これに関しては、 σ_2 方向を含む剪断面にジョグが生じそこを流体が流れることによって全体の浸透率が飛躍的に増大するとして理解される。すなわち剪断面では浸透率は変位の方向に最大のようにも思えるが、実際はそれに直交する方向が最大なのである

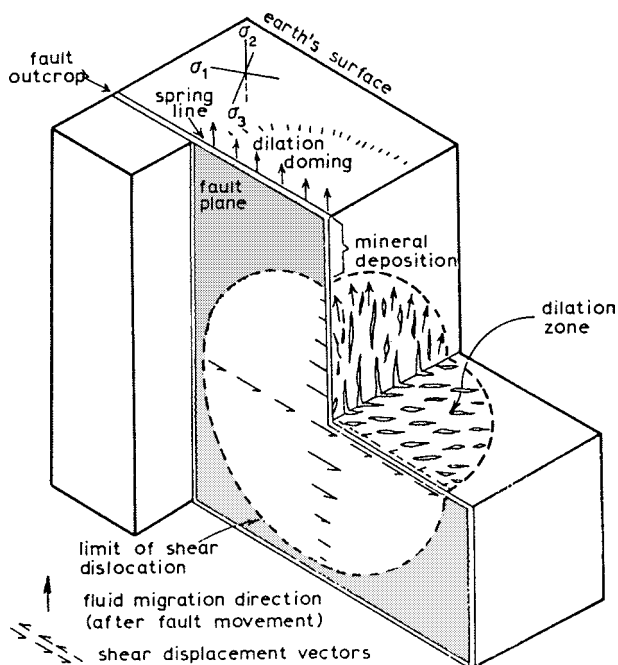


図 11 水平ずれ応力場での鉛直の断層面に沿って σ_2 方向に効果的に流体が流れることを最初に示した Sibson(1975)の図。(Fyfe *et al.* (1978) から引用)。

Fig. 11 A diagram first shown by Sibson (1975), who explains how the fluid flows effectively in the direction of toward σ_2 on the fault plane in the strike-slip stress regime. After Fyfe *et al.* (1978)

(高橋ほか, 2002)。 σ_2 の方向へ浸透率が最大になることについての天然における例については、以下の3つが挙げられる。

3) 浸透率の σ_2 方向最大問題の天然での例

3-1) 付加体での主応力方位分布と流体の流れについて

付加体内部は、プレート沈み込みの相対運動が海溝に直交する場合、プレートの側方移動と重力の寄与によって、 σ_1 は水平やや下向き（陸から海溝軸へ向かって）であると考えられている (Davis *et al.*, 1983; Byrne and Fisher, 1990; Behrmann, 1992)。一方、付加体へ持ち込まれる堆積物は、深海底か海溝軸にたまったもので、そこでは state at rest (定常状態) の圧密を受けているだけであるので、 σ_1 は鉛直である。この初期堆積場から付加体内部の変形場への過程において、図 12 に示すごとく、ごく限られた場所であるが、 σ_2 が鉛直になる場がありうる。つまり、付加体の前進によって、逆断層直前では、その圧力が水平押しになること、また中間主応力 σ_2 が

鉛直になり、水平ずれ断層の応力場となる。このことは、実は Westbrook and Smith (1983) によって、バルバドス付加体の前面においてすでに指摘されており、彼らは付加体の荷重による “boot pressure” が働くためである、としている。

一般に、付加体や海溝陸側斜面では、逆断層に沿ってメタンに富む流体が流れ、それが、海底面に湧出する部分に、シロウリガイコロニーが分布する、すなわち、コロニーが逆断層の海底面への現出を1対1で示している、と言われている (Kobayashi, 2002)。これは概略では正しい認識であり、サイズミック・プロファイルや掘削、潜水船でのこれまでの観察で確かめられている。しかし、日本海溝北部での潜水船による詳しい観察により、それぞれのコロニーはゾーンとしてはこの逆断層のトレースに沿って直線状に分布はするが、一つ一つのコロニーはエシェロン状の分布をとることが分かった (Ogawa *et al.*, 1997)。しかも、しばしば σ_2 が鉛直である共役剪断面を示す (図 13a)。これは、この付加体や海溝陸側斜面に

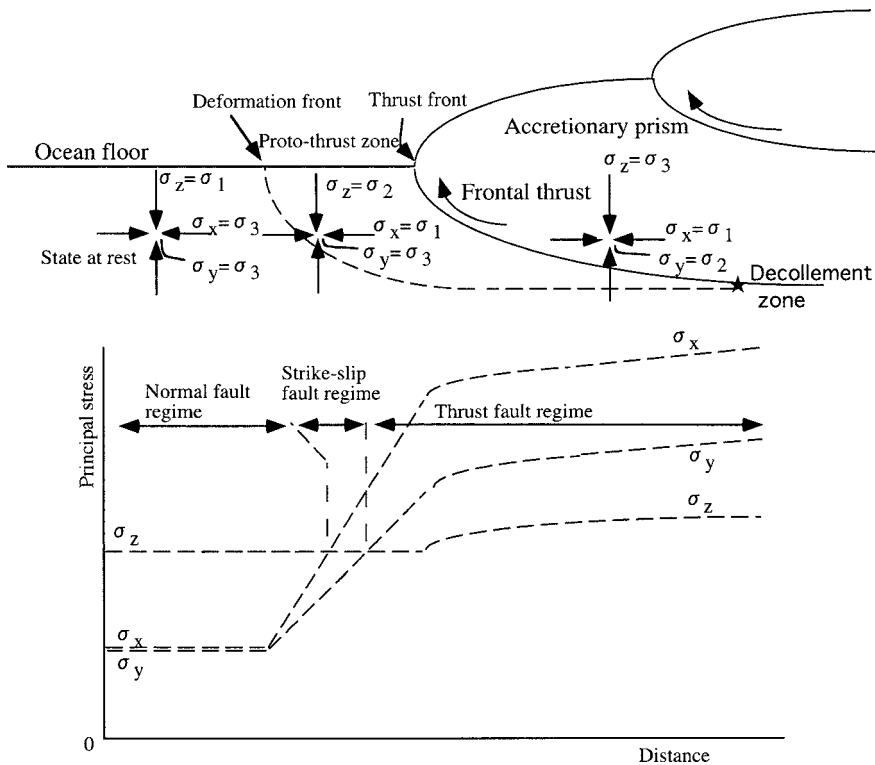


図 12 付加体の逆断層の前面において σ_2 が鉛直となることを示す模式図 .

Fig. 12 A schematic diagram showing the possible site of vertical σ_2 stress just in front of a reverse fault system as in the accretionary prism.

おける逆断層の前面で、水平ずれ断層の応力場にもとづく共役剪断面やエシェロン状のクラックが海底面に生じ、それに沿ってメタンを含む流体が湧出しているからと解釈できる。先の日本海溝北部のほか、相模湾初島沖、御前崎沖の南海トラフなどの多くの海溝斜面基部の逆断層崖でも、シロウリガイコロニーが、エシェロン状に分布していることも分かっている（小川、未発表資料）。おそらく、メタンを含む流体は基本的には深部から続く逆断層に沿って流れているのであろうが、水平ずれ成分を持たない逆断層の場合であっても、上述のように逆断層の前面に水平ずれ断層の応力場が局所的に生じ、 σ_2 が鉛直の方位を示す、いわゆる水平ずれ断層の応力場にもとづく共役剪断面やエシェロン状のクラックが出来やすく、それに沿って浸透率が最大になるので、流体が湧出する

のであろうと考えられる。

3-2) 陸部の水平ずれ型の活断層に沿う温泉

水平ずれ型の活断層に沿って温泉が湧出しやすいという現象も上の考えで説明可能である。特に、中部から西日本にかけての火山性でない温泉の多くがそうである。例えば、根尾温泉、有馬温泉、道後温泉、曾呂温泉等である。これも、 σ_2 が鉛直で、かつその方向に浸透率が最大なために、そこに温泉が深部からもたらされるものと解釈できる（Curewitz and Karson, 1997）（図 14）。これは、I-1) で述べた、ジョグに沿うそれに直交方向からの流体移動と鉱物脈の沈積と同じ問題である。つまり、水平ずれ断層の応力場では σ_2 は鉛直で σ_3 は水平であるので、引っ張り割れ目は σ_3 に垂直になるから、その面は鉛直となり、周囲のものより密度の小さい流体は鉛直方向に流

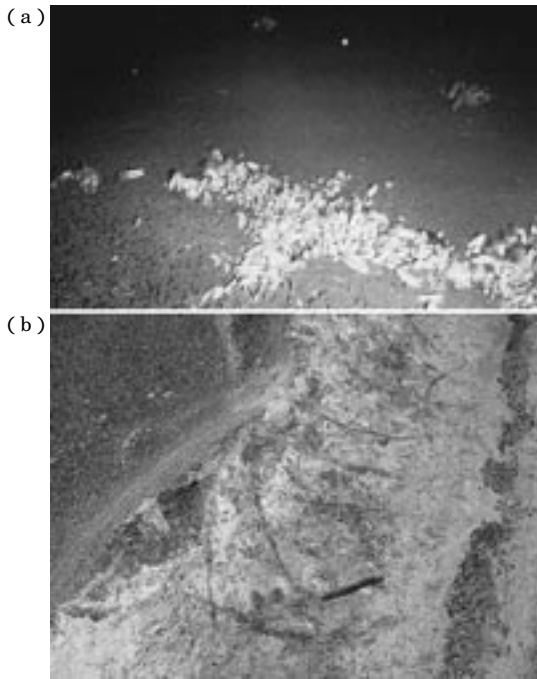


図 13 逆断層の前面における σ_2 が垂直のもとでの断裂を示す例。(a) 日本海溝陸側斜面, 三陸海底崖におけるシロウリガイ・コロニーの2方向配列。互いにずらしていることから, リーデルシアと判断される。画面の幅は約3m程度(上)および約5m程度(下)。北に向かって撮影。Ogawa *et al.* (1997) による。(b) 三浦市浜諸磯における, 地層面に垂直に水平ずれ断層の応力場で形成されたと考えられる共役剪断面に注入したスコリア・ラピリ礫。これも, リーデルシアと判断される。

Fig. 13 Examples of the occurrence of fractures under σ_2 , which are vertical in front of a reverse fault. (a) Conjugate sets of *Calyptogena* colonies show displacement, suggesting Riedel shears. After Ogawa *et al.* (1997). (b) Scoria-lapilli injecting the conjugate shear planes under a strike-slip stress regime, Misaki Formation at Hamamoroiso, Miura City. These are also considered to be Riedel shears.

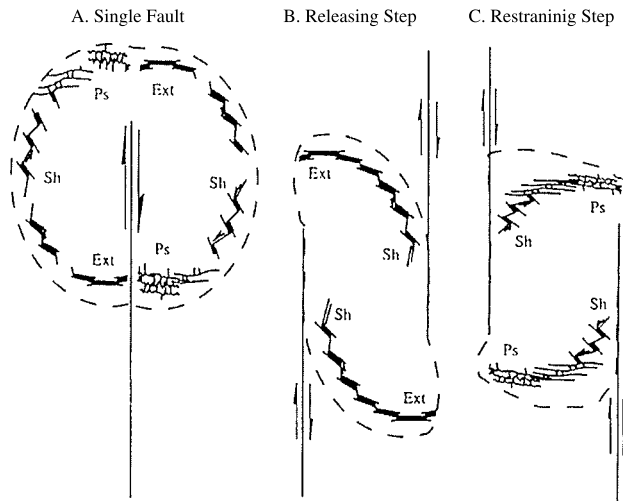


図 14 水平ずれ断層の停止ないしステップ・オーバーの3種における変形の様式の分布を示す図。Ps: 水平圧縮, Ext: 水平引っ張り, Sh: 剪断。Curewitz and Karson (1997) から引用。温泉が効果的に湧出するのは, 水平引っ張りの場である。

Fig. 14 Deformation styles at three places at the edge and step-overs of strike-slip faults. Ps: Horizontal compression, Ext: Horizontal extension, Sh: Shear. After Curewitz and Karson (1997). Hot springs occur at extension areas.

れやすいために、断層面に沿って温泉が湧出しやすくなる。これが上述の非火山性の温泉の多くが水平ずれ断層 (σ_2 が鉛直方向) に多く見られることを説明する。同様のことはすでに述べたように、Sibson (1975) によって指摘されており、今後、 σ_2 方向の浸透率の値については、さらに実験的研究の進展によって流体移動がより定量的に議論されるに違いない。

3-3) パルバドス付加体におけるデコルマン・ゾーンに沿う流体の移動

最近、筆者らの一人小川はパルバドス付加体におけるサイズミック・プロファイルにおいて、デコルマン・ゾーンに沿う流体の移動が、全体的には逆断層に沿って深部から海溝軸へ向かっているが、詳しく見ると σ_2 方向 (この場合はほぼ水平で、南北) へ流れているのではないかと考えるようになった (Ogawa and Vrolijk, 2006)。これは、デコルマン・ゾーンが、間隙水圧が異常に高いゾーンでかつそこに沿う鱗片状劈開をもつ粘土 (スケーリークレイ) のために断裂浸透性が高くなっており、そのためにそこに沿って選択的に流体の通路が形成されている、との Moore *et al.* (1988)、Shipley *et al.* (1997) 以来の研究を進展させた DiLeonardo *et al.* (2002) への議論の形で提出されたものである。もし、 σ_2 方向に最大浸透率があり、しかも動水勾配がその方向に成分をもつと、両者の掛け併せがその方向に最大ならば、その限りにおいて流体は σ_2 方向へ選択的に流れるだろう、との予想が成り立つ。今後、スケールに応じた流体の移動のメカニズムを、岩石や地層の組織や構造との関連でより詳しく考察する必要がある。

V. あとがき

以上簡単にレビューしたように、堆積した当初は 70 ~ 80% にもおよび間隙率を持ち、ほとんど水と同じようなものであった碎屑物は時間経過と共に、圧密・セメント化して固化する過程でさまざまな変形を受けるが、それらの堆積物の変形様式は単なる変形時の温度・圧力だけではなく、圧密履歴 (未圧密か過圧密かなど) に大いに依存し

ており、さらに静的な応力場だけでなく外から加えられる短周期の振動などの動的応力履歴 (大地震による短時間の振動に起因する) に密接に関連する間隙流体圧上昇の影響を受けているだろう。さらに堆積物の浸透率は、岩相の違いや割れ目の存在によって数桁以上も変化する。そのため、流体の移動方向はそれらの多くの条件の場所や時間による変化によって、複雑な様相を呈する。未固結 ~ 半固結堆積物の圧密変形時の構造形成は、このようなさまざまな条件や要素の組み合わせによる現象として理解する必要がありますと求められているといえる。

謝 辞

本稿は、筆者の一人の小川が九州大学および筑波大学に在職中に、多くの学部、大学院生、職員とともに行った野外調査や室内実験の引用および筆者のパルバドス付加体での深海掘削航海の 2 回の参加に基づく経験を基礎にしている。さらに、これらの知見に最近の田中と鈴木の結果を取り入れた。このような機会を与えて下さった関係機関と、本特集に招いてくださった徳永朋祥氏に感謝するとともに、ともに研究に従事した諸学兄の英知に感服し、その地道な努力と深い洞察力に敬服する次第である。パルバドス付加体研究に際して、A. Maltman, J.C. Moore, P. Vrolijk 氏からは多くのご教示を受けた。また、著者の三人は、地質調査所 (現在は、産業技術総合研究所) の高橋学氏とその研究室の方々、特に、現在山口大学の宮田雄一郎氏、現在産業技術総合研究所の竹村貴人氏、および筑波大学に在職・在籍されていた多くの方々にお世話になった。徳永朋祥氏と匿名査読者には初期の原稿を読んで下さり、有益な助言をいただいた。ただし、もし本項に誤りや未熟な点があったとしたら、それはすべて著者の責任である。

なお、本論に書かれた研究の一部に、砂防・地すべり技術センター研究開発助成金を使用した。記して感謝申し上げる。

文 献

- Allen, J.R.L. (1984) *Sedimentary Structures: Their character and physical basis*. Elsevier, New York, I and II, 593p and 663p.
Aung, T.T. (2003) *Tectono-sedimentary deformation in trench slope sediments: Example from the Pliocene Chikura Group, southern Boso Peninsula*.

- PhD Thesis, University of Tsukuba, 112p.
- Behrmann, J.H. (1992) Conditions for hydrofracture and the fluid permeability of accretionary wedges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 550 558.
- Bolton, A. J. and Maltman, A.J. (1998) Fluid-flow pathways in actively deforming sediments: the role of pore fluid pressures and volume change. *Mar. Pet. Geol.*, **15**, 281 297.
- Bolton, A.J., Maltman, A.J. and Clennell, M.B. (1998) The importance of overpressure timing and permeability evolution in fine-grained sediments undergoing shear. *J. Struct. Geol.*, **20**, 1013 1022.
- Bolton, A.J., Clennell, M.B. and Maltman, A.J. (1999) Nonlinear stress dependence of permeability: A mechanism for episodic fluid flow in accretionary wedges. *Geology*, **27**, 239 242.
- Brothers, R.J., Kemp, A.E.S. and Maltman, A.J. (1996) Mechanical development of vein structures due to the passage of earthquake waves through poorly-consolidated sediments. *Tectonophysics*, **261**, 227 244.
- Brown, K.M. (1990) The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8969 8982.
- Brown, K.M. (1994) Fluids in deformation sediments. in *The Geological Deformation of Sediments* edited by Maltman, A.J., Chapman & Hall, London, 203 237.
- Brown, K.M. and Orange, D.L. (1993) Structural aspects of diapiric melange emplacement: the Duck Creek Diapir. *J. Struct. Geol.*, **15**, 831 847.
- Byrne, T. (1984) Early deformation in melange terranes of the Ghost Rocks Formation, Kodiak Island, Alaska. in *Melanges, Their Nature, Origin and Significance* edited by Raymond, L., *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, **198**, 21 51.
- Byrne, T. (1994) Sediment deformation, dewatering and diagenesis: illustrations from selected melange zones. in *The Geological Deformation of Sediments* edited by Maltman, A.J., Chapman & Hall, London, 239 260.
- Byrne, T. and Fisher, D. (1990) Evidence for a weak and overpressured decollement beneath sediment-dominated accretionary prisms. *J. Geophys. Res.*, **95**, 9081 9097.
- Chiba, J. (2003) *Deformation process within off-scraped accretionary complex; an example from the Miocene Hota Group, south Boso Peninsula Central Japan*. PhD Thesis, University of Tsukuba, 125p.
- Cowan, D.S. (1982) Origin of 'vein structure' in slope sediments on the inner slope of the Middle America Trench off Guatemala. in von Huene, R., Aubouin, J. *et al.*, *Init. Repts. DSDP*, **57**, College Station TX (Ocean Drilling Program) 645 650
- Curewitz, D. and Karson, J.A. (1997) Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **79**, 149 168.
- Davis, D., Suppe, J. and Dahlen, F.A. (1983) Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *J. Geophys. Res.*, **88**, 1153 1172.
- Dewhurst, D.N., Brown, K.M., Clennell, M.B. and Westbrook, G.K. (1996) Fabric and hydraulic conductivity of sheared clays. *Geotechnique*, **46**, 761 768.
- DiLeonardo, C.G., Moore, J.C., Nissen, S. and Bangs, N. (2002) Control of internal structure and fluid-migration pathways within the Barbados Ridge decollement zone by strike-slip faulting: Evidence from coherence and three-dimensional seismic amplitude imaging. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **114**, 51 63.
- Donath, F.A. (1961) Experimental study of shear failure in anisotropic rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**, 985 990.
- Fyfe, W.S., Price, N.J. and Thompson, A.B. (1978) *Fluids in the Earth's Crust. Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 395p.
- Hamed, D.E.Md.K. (2004) *Earthquake-triggered chaotic deposits: Field and experimental study*. PhD Thesis, University of Tsukuba, 126p.
- Hanamura, Y. and Ogawa, Y. (1993) Layer-parallel faults, duplexes, imbricate thrust and vein structures of the Miura Group: Key to understanding the Izu fore-arc sediment accretion to the Honshu forearc. *Isl. Arc*, **2**, 126 141.
- 廣野哲朗 (1996) 房総半島南部江見層群中の砂岩に発達するウェッジ構造. *地質学雑誌*, **102**, 804 815 .
- 廣野哲朗・芦 寿一郎 (1998) 未固結堆積物の変形挙動. *地質学論集*, **50**, 33 46 .
- Hubbert, M.K. and Rubey, W.W. (1959) Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **70**, 115 160.
- Jaeger, J.C. 著, 飯田淑事訳 (1962) 弾性・破壊・流動論. *共立全書*, 213p.
- Jones, M. (1994) Mechanical principles of sediment deformation. in *The Geological Deformation of Sediments* edited by Maltman, A.J., Chapman & Hall, London, 37 71.
- Jones, M. E. and Addis, M. A. (1986) The application of stress path and critical state analysis to sediment deformation. *J. Struct. Geol.*, **8**, 575 580.
- Karig, D. and Morgan, J. (1994) Tectonic deformation: stress paths and strain histories. in *The Geological Deformation of Sediments* edited by Maltman, A.J., Chapman & Hall, London, 167 204.
- Kawamura, K. and Ogawa, Y. (2004) Progressive change of pelagic clay microstructure during burial process: examples from piston cores and ODP cores. *Mar. Geol.*, **207**, 131 144.
- Kemp, A.E.S. (1990) Fluid flow in "vein structures" in Peru forearc basins: Evidence from back-scattered electro microscope studies. in Suess, E., von Huene, R., *et al.* (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, **112**, College Station TX (Ocean Drilling Program)

- 33 41.
- Kemp, A.E.S. and Lindsley-Griffin, N. (1990) Variations in structural style within Peruvian forearc sediments. in Suess, E., von Huene, R., *et al.* (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, **112**, College Station TX (Ocean Drilling Program) 17 31.
- Knipe, R.J. (1986a) Faulting mechanism in slope sediments: Examples from Deep Sea Drilling Project cores. in *Structural fabrics in DSDP cores from forearcs* edited by J.C. Moore, *Geol. Soc. Am. Mem.*, **166**, 45 54.
- Knipe, R.J. (1986b) Microstructural evolution of vein arrays preserved in DSDP cores from the Japan trench, Leg 57. in *Structural fabrics in DSDP cores from forearcs* edited by J.C. Moore, *Geol. Soc. Am. Mem.*, **166**, 75 88.
- Kobayashi, K. (2002) Tectonic significance of the cold seepage zones in the eastern Nankai accretionary wedge - an outcome of the 15 years' KAIKO projects. *Mar. Geol.*, **187**, 3 30.
- 小島伸夫 (1980) 三浦半島南西部の三崎累層にみられる乱堆積層について (第1報). *地質学雑誌*, **86**, 313 326.
- 小島伸夫 (1981) 三浦半島南西部の三崎累層にみられる乱堆積層について (第2報). *地質学雑誌*, **87**, 197 210.
- Labauve, P., Maltman, A. J., Bolton, A., Tessier, D., Ogawa, Y. and Takizawa, S. (1997) Scaly fabrics in sheared clays from the decollement zone of the Barbados Accretionary Prisms, ODP Leg 156. in Shipley, T.H., Ogawa, Y., Blum, P., and Bahr, J.M. (Eds.) *Proc. ODP, Sci. Results*, **156**, College Station, TX (Ocean Drilling Program) 59 77.
- Leggett, J. K., Lundberg, N., Bray, C. J., Cadet, J. P., Karig, D. E., Knipe, R. J. and von Huene, R. (1987) Extensional tectonics in the Honshu forearc, Japan: integrated results of Deep Sea Drilling Project Legs 57, 87, and reprocessed seismic reflection profiles. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, **28**, 593 609.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979) *Soil Mechanics, VI version*. John Wiley & Sons, New York, 553p.
- Li, H. (2001) Major and minor structural features of a bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield, northern China. *Int. J. Coal Geol.*, **47**, 101 113.
- Li, H. and Ogawa, Y. (2001) Pore structure of sheared coals and related coalbed methane. *Environ. Geol.*, **40**, 1455 1461.
- Li, H., Ogawa, Y. and Shimada, S. (2003) Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery. *Fuel* (Elsevier) **82**, 1269 1277.
- Lindsley-Griffin, N., Kemp, A. and Swartz, J.F. (1990) Vein structures of the Peru margin, Leg 112. in Suess, E., von Huene, R., *et al.* (Eds.) *Proc. ODP, Sci. Results*, **112**, College Station, TX (Ocean Drilling Program) 3 16.
- MacCaig, A.M., Wayne, D.M. and Rosenbaum, J.M. (2000) Fluid expulsion and dilatancy pumping during thrusting in the Pyrenees: Pb and Sr isotope evidence. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **112**, 1199 1208.
- McCalpin, J.P. (1996) *Paleoseismicity*. Academic Press, London, 588p.
- Maltman, A.J. (ed.) (1994a) *The Geological Deformation of Sediments*. Chapman & Hall, 362p.
- Maltman, A.J. (1994b) Deformation structures preserved in rocks. in *The Geological Deformation of Sediments* edited by Maltman, A.J., Chapman & Hall, London, 261 307.
- Middleton, G.V. and Wilcock, P.R. (1994) *Mechanics in the Earth and Environmental Sciences*. Cambridge University Press, 459p.
- Moore, J.C. (ed.) (1986) *Structural fabric in deep sea drilling project cores from forearcs*. *Geol. Soc. Am. Mem.*, **166**, 160p.
- Moore, J.C. (1989) Tectonics and hydrogeology of accretionary prisms: role of the decollement zone. *J. Struct. Geol.*, **11**, 95 106.
- Moore, J.C. and Byrne, T. (1987) Thickening of fault zones: A mechanism of melange formation in accreting sediments. *Geology*, **15**, 1040 1043.
- Moore, J.C. and Vrolijk, P. (1992) Fluids in accretionary prisms. *Rev. Geophys.*, **30**, 113 135.
- Moore, J.C., Mascle, A., Taylor, E., *et al.* (1988) Tectonics and hydrogeology of the northern Barbados Ridge: Results from Ocean Drilling Program Leg 110. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **100**, 1578 1593.
- Moore, J.C., Brown, K.M., Horath, F., Cochrane, G., MacKay, M. and Moore, G. (1991) Plumbing accretionary prisms: effects of permeability variations. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., A*, **225**, 275 288.
- Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O. and Canas, J.A. (1999) Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, **304**, 369 383.
- Morgan, J.K. and Ask, M.V.S. (2004) Consolidation state and strength of underthrust sediments and evolution of the decollement at the Nankai accretionary margin: Results of uniaxial reconsolidation experiments. *J. Geophys. Res.*, **109**, B03102, doi: 10.1029/2002JB0023335.
- Nakashima, Y. (1993) Buoyancy-driven propagation of an isolated fluid-filled crack in rock: implication for fluid transport in metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **114**, 289 295.
- Nakashima, Y. (1995) Transport model of buoyant metamorphic fluid by hydrofracturing in leaky rock. *J. Metamorph. Geol.*, **13**, 727 736.
- 小川勇二郎 (1980) 三浦・房総両半島の新第三系シルト岩中に見られる細脈状破断劈開. 九大理研報, *地質学*, **13**, 321 327.
- 小川勇二郎 (1994) 「しんかい6500」によって観察された宮古沖日本海溝海側斜面の裂か群の特徴と成因.

- 地学雑誌, **103**, 706 714 .
- Ogawa, Y. and Miyata, Y. (1985) Vein structure and its deformational history in the sedimentary rocks of the Middle America Trench slope off Guatemala, Deep Sea Drilling Project Leg 84. in von Huene, R., Aubouin, J. *et al.*, *Init. Repts. DSDP*, **84**, College Station TX (Ocean Drilling Program) 811 829.
- Ogawa, Y. and Vrolijk, P. (2006) Control of internal structure and fluid-migration pathways within the Barbados Ridge decollement zone by strike-slip faulting: Evidence from coherence and three-dimensional seismic amplitude imaging: Discussion. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **118**, 253 254, doi: 10.1130/B25513.1.
- Ogawa, Y., Kobayashi, K., Hotta, H. and Fujioka, K. (1997) Tension cracks on the oceanward slopes of the northern Japan and Mariana Trenches. *Mar. Geol.*, **141**, 111 123.
- 小川勇二郎・山本由弦・仁平麻奈美 (2003) 三浦半島南部の三浦層群三崎層の地質構造とテクトニクス . 地質学会第 110 年学術大会見学旅行案内書, 143 162 .
- 岡 二三夫 (2001) 地盤液状化の科学 . 近未来社, 178p .
- 大橋一利 (1977) 破壊のメカニズム . 丸善フロンティアサイエンスシリーズ, 161p .
- 太田陽子・島崎邦彦 (1995) 古地震を探る . 古今書院, 215p .
- Paterson, M.S. 著 (1978) 荻野正二・水田義明・佐野修共訳 (1986) 実験岩石力学 . 古今書院, 242p .
- Pini, G.A. (1999) Tectonosomes and olistostromes in the Argille Scagliose of the Northern Apennines, Italy. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, **335**, 70p.
- Pini, G.A., Luciente, C.C., Cowan, D.S., De Libero, C.M., Dellisanti, F., Landuzzi, A., Negri, A., Tateo, F., Del Castello, M., Morrone, M. and Cantelli, L. (2004) The role of olistostromes and argille scagliose in the structural evolution of the northern Apennines. *IGC field trip guide book*, B13, 40p.
- Platt, J.P. (1990) Thrust mechanics in highly over-pressured accretionary wedges. *J. Geophys. Res.*, **95**, 9025 9034.
- Robert, F., Boullier, A.-M. and Firdaous, K. (1995) Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *J. Geophys. Res.*, **100**, 12861 12879.
- Rutter, E.H. (1972) The influence of interstitial water in the rheological behavior of calcite rocks. *Tectonophysics*, **14**, 13 33.
- Saffer, D.M. and Bekins, B.A. (1998) Episodic fluid flow in the Nankai accretionary complex: Timescale, geochemistry, flow rates, and fluid budget. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30351 30371.
- Saffer, D.M. and Bekins, B.A. (1999) Fluid budgets at convergent plate margins: Implications for the extent and duration of fault-zone dilation. *Geology*, **27**, 1095 1098.
- Saffer, D.M. and Bekins, B.A. (2002) Hydrologic control on the morphology and mechanics of accretionary wedges. *Geology*, **30**, 271 274.
- Screaton, E.J., Wuthrich, D.R. and Dreiss, S.J. (1990) Permeabilities, fluid pressures, and flow rates in the Barbados ridge complex. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8997 9007.
- 資源・素材学会 (2003) 岩の室内透水試験手法小特集 . 資源と素材, **119**, 497 610 .
- 嶋津晃臣 (1992) 地震時の土圧の話 . 福岡正巳編 : 新しい土圧入門 . 近代図書, 1 20 .
- Shibley, T.H., Moore, G., Tobin, H. and Moore, J.C. (1997) Synthesis of the Barbados decollement seismic reflection response from drilling-based geophysical observations and physical properties. in Shipley, T.H., Ogawa, Y., Blum, P., and Bahr, J.M. (Eds.) *Proc. ODP, Sci. Results*, **156**, College Station, TX (Ocean Drilling Program) 293 302.
- Sibson, R.H. (1975) Generation of pseudotachylite by ancient seismic pumping. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **43**, 775 789.
- 曾田範宗 (1971) 摩擦の話 . 岩波新書, G33, 214p.
- Suppe, J. (1985) *Principles of Structural Geology*, Prentice-Hall, 537p.
- Takahashi, A., Ogawa, Y., Ohta, Y. and Hirano, N. (2003) The nature of faulting and deformation in the Mineoka Ophiolite, NW Pacific Rim. in *Ophiolite in Earth History* edited by Dilek, Y. and Robinson, P., *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, **218**, 299 314.
- 高橋 学・李 小春・林 為人・成田 孝・富島康夫 (2002) 中間主応力の透水係数測定技術について . 応用地質, **43**, 43 48 .
- Takahashi, M., Li, X. and Kwasniewski, M. (2004) Characteristics of hydraulic conductivity along the final fault plane under true triaxial stress. *Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics Regional Symposium, European Rock EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy*, 507 510.
- 滝沢 茂 (1997) 凍結乾燥処理された不安定含水鉱物の SEM 観察 . 鉱物学雑誌, **26**, 211 214 .
- Takizawa, S. and Ogawa, Y. (1999) Dilatant clayey microstructure in the Barbados decollement zone. *J. Struct. Geol.*, **21**, 117 122.
- 滝沢 茂・川田多加美・大野良樹 (1995) 含水未固結堆積物の固結および凍結乾燥法 . 地質学雑誌, **101**, 941 944 .
- Tarney, J., Pickering, K.T., Knipe, R.J. and Dewey, J.F. (1991) The behaviour and influence of fluids in subduction zones. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., A*, **335**, 225 418.
- Terzaghi, K. (1925) *Erdbaumechanik*. Franz Deuticke, Vienna. in Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979)
- 徳永朋祥 (2003) 地殻浅部での水の移動 . 笠原順三・島海光弘・川村雄行編 : 地震発生と水 地球と水の

- ダイナミクス . 東大出版, 135-154 .
- 辻 隆司 (1993) 砂層の液状化と流動化現象 . 月刊地球, **15**, 608-614 .
- 辻 隆司・宮田雄一郎 (1987) 砂岩層中にみられる流動化・液状化による変形構造: 宮崎県日南層群の例と実験的研究 . 地質学雑誌, **93**, 791-808 .
- Twiss, R.J. and Moores, E.M. (1992) *Structural Geology*. Freeman, 532p.
- 植村 武 (1971) 流動変形の研究に関する若干の問題 . 地質学雑誌, **77**, 273-278 .
- Uemura, T. (1981) Deformation facies, series and grades. *J. Geol. Soc. Jpn.*, **87**, 297-305.
- Ujiiie, K. (1997) Off-scraping accretionary process under the subduction process of young oceanic crust: the Shimanto Belt of Okinawa Island, Ryukyu Arc. *Tectonics*, **16**, 305-322.
- Ujiiie, K. (2002) Evolution and kinematics of an ancient decollement zone, melange in the Shimanto accretionary complex of Okinawa Island, Ryukyu Arc. *J. Struct. Geol.*, **24**, 937-952.
- Vannucchi, P., Maltman, A., Bettelli, G. and Clennel, B. (2003) On the nature of scaly fabric and scaly clay. *J. Struct. Geol.*, **25**, 673-688.
- Westbrook, G.K. and Smith, M.J. (1983) Long decollements and mud volcanoes: Evidence from the Barbados Ridge Complex for the role of high pore-fluid pressure in the development of an accretionary complex. *Geology*, **11**, 279-283.
- 山縣 毅・小川勇二郎 (1989) 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割 . 地質学雑誌, **95**, 297-310 .
- 山路 敦 (2002) 「ゆっくり地震」の化石 . 日本地震学会ニュースレター, **13**(5) 表紙 .
- Yamamoto, Y. (2003) *Deformation history and related change of physical properties in shallow part of accretionary prism*. PhD Thesis, University of Tsukuba, 153p.
- Yamamoto, Y., Ohta, Y. and Ogawa, Y. (2000) Implication for the two-stage layer-parallel faults in the context of Izu forearc collision zone: Examples from the Miura accretionary prism, central Japan. *Tectonophysics*, **325**, 133-144.
- Yamamoto, Y., Mukoyoshi, H. and Ogawa, Y. (2005) Structural characteristics of shallowly buried accretionary prism: Rapidly uplifted Neogene accreted sediments on the Miura-Boso Peninsula, central Japan. *Tectonics*, **24**, TC5008, doi: 10.1029/2005TC001823.

(2005年12月16日受付, 2006年6月23日受理)