房総半島南部江見層群砂岩層中に発達する web structure

Web structure in the sandstone beds of the Emi Group in the southern part of the Boso Peninsula, central Japan

Abstract

廣野哲朗*

Tetsuro Hirono*

1996年2月23日受付.
1996年7月26日受理.

* 筑波大学第一学群自然科学類.
College of Natural Science, First Cluster of
Colleges, The University of Tsukuba,
Tsukuba 305, Japan
現在 東京大学大学院理学系研究科地質学専攻.
Department of Geology, Graduate School of
Science, The University of Tokyo, Hongo,
Tokyo 113, Japan

Web structure, originally defined as an irregular network of dark veins in sandstone, was studied in the volcanoclastic sandstone within the Emi Group in the southern part of the Boso Peninsula, central Japan. This study led to a classification according to its mode and feature of occurrence on the two-dimensional outcrops, and to the consideration of the formative process and deformation mechanism of web structure.

On the outcrops, the dark veins are classified into the following six types according to their direction.

type A : veins parallel to bedding, subdivided according to their mode of occurrence into A-1 : dish-shape, A-2 : multiple, partly sub-parallel to bedding, A-3 : branching and merging laterally.

type B : veins at right-angles to bedding, B-1 : tube-shape, light color, branching upward, B-2 : multiple.

type C : veins of NE-striking reverse fault.

type D : veins of NW-striking reverse fault.

type E : veins derived from types C and D.

type F : veins of NW-striking normal fault.

Based on observations with the optical microscope and SEM, the deformation mechanism that produced each type is thought to be as follows ;

type A-3 : fluid flow.

types A-2, C, D, B-2, and E : independent particulate flow and fluid flow.

type F : cataclastic flow.

From the results of observations and the discussion on the deformation mechanism, the stages and conditions for formation of web structure are interpreted as follows. (1) Sand liquefaction and fluidization produces types A-1, A-3, and B-1 soon after deposition. Type A-1 is dish structure, type B-1 is tube dewatering structure, and type A-3 is laterally injection structure. (2) As sands increase in strength but still unlithified, compressive stress whose maximum stress axis lies on the bedding plane generates types A-2, C, and D as reverse faults, and types B-2 and E are derived from them. (3) Later differential stress generates type F as a normal fault in sands of greater strength.

Thus, although web structure consists of apparently irregular networks, it has definite origins.

Key words: web structure, liquefaction, fluidization, layer-parallel fault, fluid flow, independent particulate flow, cataclastic flow, accretionary prism

はじめに

Web structure (くもの巣状構造; 本論では web structure を用いる) は, 砂岩に発達する不規則なネットワークを持つ暗色の筋として, Cowan (1982) によって定義された構

造である. さらにこの用語は Byrne (1984) によって, 砂岩に発達する不規則な方位を持つ破碎剪断帯 (cataclastic shear zones) として用いられた. 本研究では, この用語を砂岩に発達する一見不規則な方位を持つ暗色の筋 (ただし3次的には面) というように, 成因を含まない記載用語として

Fig. 1. Geological map and stratigraphy in the southern part of the Boso Peninsula, adopted from Saito (1992) with addendum.

用いる。個々の筋は脈状を呈するので vein と呼ぶ。

Web structure は世界各地の付加体の砂岩のブロックに共通して発達している (Cowan, 1982; Byrne, 1984)。四万十帯白亜系堆積岩 (Mackenzie et al., 1987; Hada, 1988; Agar, 1990) にもその発達が報告されている。房総半島南部江見層群中の砂岩にも、この web structure がよく発達している (小川・石丸, 1991)。また江見層群は、現在の相模トラフ類似の沈み込み境界において付加作用により形成された付加体であるとの報告がある (小川・石丸, 1991)。

Byrne (1984) はアラスカ、コディアック島の Ghost Rocks Formation 中の砂岩のブロックに発達する web structure について次のように述べている。Web structure はメランジュ内のすべての砂岩に共通して発達しており、その内部は cataclasis (破碎作用; 本論では cataclasis を用いる) による粒径の減少で特徴づけられる。Web structure を形成させた原動力は層理に平行な剪断応力であり、歪が進行するに従い web structure に沿って砂岩層が分断化される。つまり web structure はメランジュ内の地層の分断化によるテクトニックな変形を反映している。

また Lucas and Moore (1986) は、メキシコ沖の中米海溝の付加体中 (DSDP Leg 66) から採取したコアサンプルに発達する分断した地層中の破碎帯と、バルバドス島の Scotland Formation 中のブーディン構造を呈する砂岩およびコディアック島の Sitkalidak Formation 中のブーディン構造を呈する砂岩に発達する web structure の形成過程を、次のように議論した。付加体に取り込まれた砂岩が初めに高間隙水圧下で変形する。その変形機構は particulate flow である。有効差応力の増加によってその変形機構は cataclasis へと移行する。さらに高封圧下で変形が進行すると、最終的には剪断帯沿いに破壊が生じブーディン構造を形成する。その過程においてブーディン構造を形成するまでに至らなかった破碎剪断帯が、web structure として岩石中に保存される。

その原動力は鉛直方向の堆積物の自重によるものではなく、付加体内での特有のテクトニックな応力であるとしている。

江見層群の地層は前二者が観察を行った陸上のものや四万十層群のものに比べて、初期の構造形成後の強い変形が見られない。石灰質物質の空隙への沈殿によって間隙率は約 20% (乾燥重量と水に飽和した状態での重量および水中に吊した状態での重量より求めた) と減少しているものの、粒子間の接触は依然として ridge-ridge, face-ridge の様式を示し、また pressure solution などは観察されない。さらに液状化、流動化現象などの初生的な構造がよく保存されている。これらのことから、Cowan や Byrne が観察を行った変形が進んだ陸上での砂岩よりも、江見層群中の砂岩はより初期の変形を残していると考えられる。しかも前二者の研究では、web structure を形成させた原動力を、砂岩のブーディン構造や pinch and swell structure を形成させた付加作用に伴う層理に平行な剪断応力と安易に関係させて推定しており、その成因や原動力についての議論が不十分である。本研究では江見層群の地質構造の解析、web structure の露頭における観察、および内部構造の記載を通して、web structure の形成過程と変形メカニズムおよび原動力について考察を行う。

地質概説と地質構造

本研究地域は房総半島嶺岡帯の東南方の、鴨川市の江見に広がる海岸である (Fig. 1)。この海岸に露出する地質体は従来から江見層群波太層および江見層 (河井, 1957)、安房層群波太層 (中嶋ほか, 1981)、保田層群増間層 (鈴木ほか, 1995)、保田層群青木山層 (斎藤, 1992) などと呼ばれており、珪質鞭毛藻化石によって中・下部中新統に対比されている (沢村・中嶋, 1980)。本研究では河井 (1957) による区分を採用する。

Web structure の研究対象とした地域は江見漁港東方の海食台である (Fig. 2)。ここには凝灰質シルト岩を主とし凝

灰岩、凝灰質または火山質砂岩を挟む地層（江見層群波太層）が露出する。この砂岩には級化層理が残されている場合があり、タービダイト起源であると考えられる。ポイントカウンターによるモード分析によれば、この砂岩は細粒凝灰質ワッケである（石英粒子20%、斜長石粒子1%、火山ガラス粒子27%、単斜輝石などの重鉱物粒子7%、基質45%）。またこれらの砂岩には堆積構造の消失、コンボルト葉理、web structure、珪質凝灰岩の角礫状ブロックの注入などが観察される（小川・石丸、1991）。

江見海岸に露出する地質体の産状のスケッチと模式柱状図を Fig. 3 に示す。地層の走向はほぼ東西で傾斜は約90度、北上位である。そのためこのスケッチは地層を水平に戻したときの断面の図でもある。この露頭は地層の特定の方向の構造を強調する2次元的なものであるが、他の3次元な露頭でも水平面に平行な面構造はほとんど観察されないため以下の議論にはあまり影響しない。地層の連続性は著しく悪く、様々なスケールの断層によって分断され、一見カオティックな岩相を呈する。それらは主に6つの断層系から構成され、交差関係・変位より4段階の断層形成ステージに区分できる（Table 1）。ただし第4ステージの断層は Fig. 3 中の露頭には存在しない。小川・石丸（1991）は、本研究の第4ステー

ジの断層に相当する断層が形成される前に地層の褶曲が生じ、東西方向に長軸を持つドーム・ベースン構造が形成された、と報告している。第1, 2ステージの断層は褶曲構造と調和的であるため、本論では第1, 2ステージの断層のセンスは地層を水平に復元したときのものを採用し、第3, 4ステージ

Fig. 2. Occurrence of the Emi Group on the bench to the east of the Emi fishing harbor. Looking to south.

Fig. 3. Lithological map and representative columnar section of the Emi Group on the bench to the east of the Emi fishing harbor shown by arrow in Fig. 2.

Table 1. Characteristics of the fault systems of the four stages at the Emi coastal line.

Stage	Strike and type*	Displacement	Characteristics
1	NW, reverse	little	healed
	NE, reverse	little	healed
	E-W, reverse or layer-parallel	?	healed
2	NW, normal	large	healed
3	N-S, strike-slip	little	brecciated
4	NE, strike-slip	large	not-healed

* Type from stage 1 to 3 is given as the bed to be horizontal.

Fig. 4. The sandstone bed of the Emi Group for web structure in this study, shown by arrow in Fig. 3. Looking to north.

の断層のセンスは現在の水平面を基準としたものを採用する。第1ステージのE-W走向の逆断層もしくはlayer-parallel fault (地層の層理面に平行な断層; 本論ではlayer-parallel faultを用いる) によって、地層が何度も繰り返している (小川・石丸, 1991)。地層の繰り返しがduplexによるものか imbricate fan thrust によるものかについては、江見海岸に3次元的露頭が十分に存在しないため確認できない。NW走向の逆断層, NE走向の逆断層, E-W走向の逆断層もしくはlayer-parallel faultの3つの断層は互いに切ったり切られたりする交差関係を持ち、それらはほぼ同時期に形成されたと推定される。さらにNW走向の逆断層とNE走向の逆断層は共役関係にあることが多い。

Web structure の露頭における観察

Web structure は江見層群のすべての砂岩層に発達している。Web structure は3次元的な形態を持つが、最も典型的に発達している露頭は平面的であるため2次元的なveinとして観察を行う。主に観察を行った砂岩層 (Fig. 3中の矢

印で示す砂岩層) の露頭写真を Fig. 4 に、その平面スケッチを Fig. 5 に示す。

Web structure は一見不規則なネットワークを持つが、層理に対する方向性、分布、変位、交差関係、形態に基づき、いくつかのタイプに分類が可能である (Fig. 5)。まず層理に対する方向性により A~F の6つの基本タイプに分類し、さらにそのうちの A タイプと B タイプを形態や分布によりいくつかのサブタイプに分類した。A タイプは層理に平行な vein であり、次の3つのサブタイプに分類可能である。皿状である A-1 タイプ (Fig. 6-(a)), 同一方向に複数の筋が存在するという複合した形態 (以下、複合脈としての形態と記述する) を持ち、部分的に層理にわずかに斜行する場合のある A-2 タイプ (その場合は逆断層のセンスを持つ; Fig. 6-(c)), 側方に向けて分岐・合流している A-3 タイプ (Fig. 6-(c)) の3つである。B タイプは層理にほぼ直交する vein であり、さらに砂岩層上部にのみ分布し、地層の上方に向けて分岐し、チューブ状で明色な B-1 タイプ (Fig. 6-(b)) と砂岩層全体に分布し上方に分岐・合流する B-2 タイプ (Fig. 6-(c)) に分類される。C タイプはNE走向の逆断層を形成する vein である (Fig. 6-(a))。D タイプはNW方向の逆断層を形成する vein である (Fig. 6-(c))。E タイプはCタイプとDタイプから派生し上方に向けて分岐・合流する vein である (Fig. 6-(c))。F タイプはNW走向の正断層を形成する vein である。個々のタイプの特徴を Table 2 に示す。特にCタイプとDタイプが全体的に卓越して発達している。

Web structure の内部構造の記載

上記のように分類した web structure の各タイプの主なものについて内部構造の記載を行う。

A-3 タイプの顕微鏡写真を Fig. 7 に示す。Web structure を構成する vein は矢印間の部分である。周辺の部分の主な構成物質は石英、斜長石、粘土鉱物などの鉱物粒子と火山ガラスであるのに対し、vein 内の主な構成物質は火山ガラスと粘土鉱物である。一見火山ガラスから成る堆積性葉理に類

Fig. 5. A two-dimensional sketch of the sandstone bed shown by arrow in Fig. 3, showing mode of occurrence of web structure of types A-2 to F. Types A-1 and B-1 are too small to be sketched at this scale.

似しているが、周辺の部分との境界がかなり明瞭であり、かつ分岐・合流し堆積構造上に overprint して発達しているため、堆積性ではなく別の要因を持つ構造であると考えられる。さらに vein 内では vein の方向と平行な粒子の形状定向配列が観察される。しかし粒子の破損は観察されない。62.5 μm 以上 (フェイスケール 4 以下) の粒径を持つ粒子を grain とし、それ未満の粒径を持つ粒子を matrix とすると (ただし粒径は粒子の長軸と短軸の積の平方根とする), grain の割合は周辺の部分では 52% であり、vein 内では 57% である (Table 3)。薄片法による粒度分析の結果、周辺の部分では粒径 62.5 μm 付近にピークがあり、vein 内でも同様に粒径 62.5 μm 付近にピークがある。

C タイプの顕微鏡写真を Fig. 8 に示す。Web structure を構成する vein は矢印間の部分である。Vein と周辺の部分との境界は明瞭でなく漸移的である。Vein 内では vein の方向と平行な粒子の形状定向配列が観察される。Vein 周辺の基質中では vein の方向とほぼ直交する細粒な粒子の形状定向配列が観察される。Grain の割合は周辺の部分では 55% であるのに対し、vein 内では 28% である。さらに粒度分析の結果、周辺の部分では粒径 62.5 μm 付近にピークがあるのに対し、vein 内では粒径 15.6 μm 付近にピークがある。Vein 内の matrix の構成物質は主に粘土鉱物である。Fig. 8 において中央の矢印で示される vein 内の粒子には若干の破損が認められるが、vein 内および周辺の部分は一般には粒子の破損はほとんど観察されない。また XRD 分析の結果、vein 内には粘土鉱物、方解石、石英、斜長石、単斜輝石、普通角

閃石、黒雲母のピークが観測される。C タイプの web structure の内部の SEM (走査型電子顕微鏡) 写真を Fig. 9-(a) に、その模式的スケッチを Fig. 9-(b) に示す。これによると、vein の方向と平行な砂サイズの粒子の形状定向配列が観察される。さらにシルト以下のサイズの粒子が、同様に形状定向配列をなし濃集しているのがわかる。粒子の破損は観察されない。

A-2 タイプと D タイプの内部の観察結果は C タイプの結果に類似しており、それらは粒子の形状定向配列、grain の量比の減少、粒径の減少、および粒子の未破損で特徴づけられる。

F タイプの顕微鏡写真を Fig. 10 に示す。Web structure を構成する vein は矢印間の部分であり、vein が平行に 2 本存在する。Vein と周辺の部分との境界は比較的明瞭である。Grain の割合は周辺の部分では 54% であるのに対し、vein 内では 20% である。さらに粒度分析の結果、周辺の部分では粒径 62.5 μm 付近にピークがあるのに対し、vein 内では粒径 7.8~15.6 μm 付近にピークがある。Vein 内の matrix の構成物質は、主に粘土鉱物と細粒な鉱物粒子である。また vein 内では粒子の破損が広範囲に観察される。中央右下の矢印で示す単斜輝石が破損している。

Web structure の成因

露头における交差関係に基づく各タイプの形成順序は次のようになる。ステージ 0; A-1 タイプ・A-3 タイプ・B-1 タイプ。ステージ 1; A-2 タイプ・B-2 タイプ・C タイプ・

Fig. 6. Occurrence of each type of web structure. (a) types A-1 and C are developed. (b) types A-3 and B-1 are developed. (c) types A-2, A-3, B-2, D, and E are developed.

Dタイプ・Eタイプ。ステージ2; Fタイプ。ただし、ステージ1と2の形成時期は後述するように、Table 1における断層形成ステージの第1, 2ステージに対応することを考慮し、混乱を避けるため、それら以前の最初期のステージをステージ0とした。

さらに以上の観察結果より web structure の各タイプの成因について考察を行う。

1. ステージ0; 堆積直後に形成したと考えられる構造

A-1 タイプ: 砂岩層の下部にのみ分布し、層理にほぼ水平

に皿状をなす。長さは3~10cmで、vein内はより細粒な物質で構成されている。これらの観察結果は、タービダイト起源の砂岩によく発達する dish structure (皿状構造) と定義するための必要十分条件を満たしているため、A-1タイプは dish structure であると結論づけられる。またこの砂岩層には堆積構造の消失やコンボルト葉理が観察される。堆積構造の消失は底生生物による攪乱もしくは液状化・流動化による消失であろう。さらに辻・宮田 (1987) は、コンボルト葉理は砂岩層の流動化時にレイリー-テイラー波擾乱が生じることによって形成し、dish structure は砂岩層の流動化によって形成すると報告している。また山縣・小川 (1989) は急激な堆積作用が行われた場合、下位の未固結層中の間隙水圧が上昇し異常間隙水圧が生じ、異常間隙水圧下では液状化・流動化が発生しやすいと述べている。よって、これらのタービダイト起源の厚い砂岩層の堆積時には過剰間隙水圧もしくは異常間隙水圧が発生し、何らかの trigger (例えば地震動など) によって液状化・流動化が生じた見込みが強い。また A-1タイプは他のタイプに切られることが多く、しかも他のタイプを切ることはないため、最初期の段階に形成したことがわかる。つまり A-1タイプは最初期の段階に砂岩層の流動化によって形成した dish structure である。

A-3 タイプ: Vein内の主な構成物質は火山ガラスと粘土鉱物であり、vein内には veinの方向と平行な粒子の形状定向配列が観察される。粒子の破損は観察されない。また変位は存在しない。よってこの構造の変形は流体の移動によるもので、そのメカニズムは fluid flow に相当する。また、砂岩層の側方に向けて分岐・合流を行い、変位は存在しないが堆積構造上を overprint して発達することがある。さらにガラス質な凝灰岩の岩片を多く含む地層が角礫化されて、付近の同一層準の砂岩層に注入している構造が観察される (小川・石丸, 1991; ただしその砂岩層は Fig. 3の岩相図中には存在しない)。これらの観察結果と変形メカニズムの考察から、その構造は側方からの流体の注入によると考えられる。Vein内には火山ガラスが多く存在するため、火山ガラス粒子を含む流体が側方から注入したのであろう。また A-3タイプは他のタイプに切られることが多く、しかも他のタイプを切ることはないため、最初期の段階に形成したことがわかる。つまり A-3タイプは最初期の段階に形成した側方への注入構造である。

B-1 タイプ: 砂岩層の上部にのみ分布し、層理とほぼ垂直にチューブ状をなす。幅は2~4mm、長さは5~30cmである。地層の上方に向けて分岐する。これらの観察結果はチューブ状脱水構造と定義するための必要十分条件を満たしているため、B-1タイプはチューブ状脱水構造と結論づけられる。前述したように、この砂岩層の堆積時には液状化・流動化が発生した見込みが強い。辻・宮田 (1987) は、チューブ状脱水構造は砂岩層の流動化によって形成すると報告している。また B-1タイプは他のタイプに切られることが多く、しかも他のタイプを切ることはないため、最初期の段階に形成したことがわかる。A-1タイプは砂岩層の上部にのみ発達するのに対し、B-1タイプは下部にのみ発達することから、

Table 2. Classification of web structures based on direction in two dimensional outcrops, and their characteristics.

Type of web structure	Localization in sandstone bed		Displacement	Width	Relation of dislocation	Pattern or shape
A veins parallel to bedding	A-1	lower part	none	1~4mm	dislocated by B-2, C, D, E, and F	dish-shape
	A-2	throughout	0~5cm	5~25mm	dislocate B-1, dislocated by F	multiple, partly sub-parallel to bedding
	A-3	throughout	none	1~4mm	dislocated by B-2, C, D, E, and F	branching and merging laterally
B veins at right-angle to bedding	B-1	upper part	none	2~4mm	dislocated by A-2, C, D, and F	tube-shape, light color, branching upward
	B-2	throughout	0~5cm	2~6mm	dislocate A-1 and A-3, dislocated by F	branching and merging
C veins of NE-striking reverse fault	throughout		1~20cm	5~25mm	dislocate A-1, A-3, and B-1, dislocated by F	multiple
D veins of NW-striking reverse fault	throughout		1~20cm	5~25mm	dislocate A-1, A-3, and B-1, dislocated by F	multiple
E veins derived from types C and D	throughout		0~5cm	2~6mm	dislocate A-1 and A-3, dislocated by F	branching and merging
F veins of NW-striking normal fault	throughout		50cm	5~30mm	dislocate A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, C, D, and E	multiple

B-1 タイプは最初期の段階に、A-1 タイプの形成に対応して、それとはほぼ同時期に形成した砂岩層の流動化によるチューブ状脱水構造である。

2. ステージ 1; 地層の層理面と平行な圧縮応力により形成したと考えられる構造

A-2 タイプ, C タイプ, D タイプ: C タイプと D タイプは露頭における形態の特徴と内部構造が互いに類似する。これらは複合脈としての形態をなし、変位を持つ断層を形成する vein である。Vein 内では粒子の破損がほとんど観察されない。また vein 内には vein の方向と平行な粒子の形状定向配列が観察される。これは剪断面形成時に粒子が回転したため、もしくは剪断面形成時にその面内を流体が流れたためと考えられる。流体が剪断面固結後に注入したと仮定すると vein と周辺の部分との境界はより明瞭になるはずであるが、観察結果では漸移的であるため、その可能性は低い。さらに vein 周辺の基質中では vein の方向とはほぼ直交する細粒な粒子の形状定向配列が観察されるため、剪断面形成時に vein 内と周辺の部分との間に流体の移動が存在したと考えられる。後述するように、これらのタイプ形成時にこの砂岩層は側方から圧縮応力をうけていたと考えられる。そのような状態では砂岩は過圧密状態にあり、この剪断面形成時の砂岩の間隙比は臨界間隙比（剪断時に体積変化が起こらない臨界状態での砂の間隙比）より小さいであろう。密詰め（臨界間隙比より小さい間隙比を持つ場合、密であると呼ぶ）の砂岩の剪断時には、vein（剪断面）内に粒子が互いに乗り越えよう

Fig. 7. Photomicrograph of type A-3 of web structure. Vein part is between two arrows. Small arrows show volcanic glasses.

とする粒子のバックングの変化に起因する正のダイレイタンスが発生し、vein 内の間隙水圧を周辺の部分より減少させるということが理論的、実験的に証明されている（河上, 1982）。よって、この剪断面形成時の vein 内の間隙水圧は周辺の部分の間隙水圧より低いことが予想される。さらに、正のダイレイタンスを起こした剪断面内の permeability は増加することが容易に推定される。局所的に permeability の高い部分は、間隙水の排水路になるかもしれない。また vein 内の grain の量比が周辺の部分より小さいという結果

も、周辺の部分から vein 内への細粒物質を伴った流体の流入を示唆する。これらの考察より、vein 内の粒子の形状定向配列は、剪断による粒子の回転よりむしろ剪断面形成時のその面内の流体の移動による可能性が強い。

これらの観察結果と考察より、C タイプ、D タイプでは粒子自身の变形を含まず粒界すべりによって粒子が相対的に移

Table 3. Volume ratio of grain to matrix in vein of web structure and host rock.

	Web structure		Host rock*1
	grain*2		
A-3	grain*2	57%	52%
	matrix*2	43%	48%
A-2	grain	28%	55%
C	matrix	72%	45%
D			
F	grain	20%	54%
	matrix	80%	46%

*1 Host rock is defined as the surrounding part of web structure.

*2 Grain is defined as the diameter is larger than 62.5 μm . Matrix is vice versa. Diameter is defined as the square root of the product of the long axis and short axis of grain.

動し、その剪断面内の流体の移動が存在するため、その変形メカニズムは independent particulate flow (Handin et al., 1963; Kerr and Drew, 1968; Ashby and Verrall, 1977; Borredaile, 1981; Morrow et al., 1982; Maltman, 1984) と fluid flow に相当する。Independent particulate flow は低封圧、高間隙水圧下における岩石、堆積物の典型的な変形メカニズムである (Knipe, 1986)。また剪断面は開口しながら剪断しているため、破壊の様式は hybrid extension/shear fracture (Price and Cosgrove, 1990) に相当する。Hybrid extension/shear fracture とは、堆積物や岩石の破壊面に働く応力の垂直応力が負 (引張応力) であるときの剪断破壊の様式である。この様式の破壊は低差応力下において、堆積物全体にかかる有効応力が高間隙水圧のため減少したときに生

Fig. 8. Photomicrograph of type C of web structure. Vein part is between two arrows. Rare breakage of grain is indicated by oblique arrow.

Fig. 9. (a) SEM photomicrograph of inside of type C. (b) Schematic sketch of (a).

じる (Lucas and Moore, 1986).

互いに共役する C タイプと D タイプの剪断面のうち代表的なものをステレオネットに示す (Fig. 11). 共役セットの認定はそれぞれの剪断面の変位がほぼ等しい点, 内部構造が類似する点, 共役する面の両側の転移の方向が逆であるという点 (平山・垣見, 1965) に注意して行った. この 2 つのタイプを形成した最大主応力は地層の層理面にほぼ平行な方向, 中間主応力は斜交する方向, 最小主応力はほぼ垂直方向であることがわかる.

また A-2 タイプは, 露頭において層理に対し平行なものが多いが, わずかに斜交するものも存在し, その場合は逆断層のセンスを持つ. さらに内部構造が C タイプと D タイプに類似している. このことから A-2 タイプは C タイプと D タイプと同時期に形成した逆断層のセンスを持つ vein であると考えられる.

つまり A-2 タイプ, C タイプ, D タイプは, 地層の層理面に平行な方向に最大主応力を持つ圧縮応力によって堆積物中に高間隙水圧が生じ, そのため砂岩層全体に作用する有効応力が減少し破壊に至った逆断層のセンスを持つ剪断面である. 剪断面形成時にはその剪断面内の体積が膨張することによって, その面内の間隙水圧が減少し, 周辺の部分からその面内へ流体が流入する. 同時に剪断面内の permeability は増加するため, この面内は間隙水の排水路として機能するかもしれない. このようにして形成された細粒物質をより多く含む破壊面は, その後の応力によって閉じる前に固結し vein として保存される.

B-2 タイプ, E タイプ: B-2 タイプは C タイプと D タイプから派生し, 一方 E タイプは下位の凝灰質シルト岩から続くのが特徴である. 両タイプとも上方に向けて分岐・合流を繰り返す, 変位が存在しないものとわずかに存在するものがある. Vein 内では粒子は破損されず, vein の方向と平行な粒子の形状定向配列が観察される. これらの観察結果より B-2 タイプと E タイプは, A-2 タイプ, C タイプ, D タイプ形成時に地層の上方への脱水を伴いつつそれらより派生し形成した vein で, その変形メカニズムは independent particulate flow と fluid flow であると結論づけられる.

3. ステージ 2; より後期の差応力によって形成したと考えられる構造

F タイプ: このタイプは複合脈としての形態をなし, 変位をもつ断層を形成する vein である. さらに vein 内では広範囲に粒子の破損が観察される. つまり, 粒界すべりを伴って粒子が破損され広範囲に破断面が生じ, 破断した各部が相対的に移動することによって変位が生じているため, F タイプの変形メカニズムは cataclastic flow (Mitchell, 1976; Sibson, 1977, 1983; Paterson, 1978; Logan, 1979; Krantz, 1984) に相当する. Vein 内での grain の量比が周辺の部分より小さいため, 粒子の破損が全体の粒径を減少させたのであろう. また, 露頭において肉眼的に 1 本の vein として観察されるものを顕微鏡下で観察を行うと, その vein 内にさらに複数の破碎帯が互いに平行に密に存在するため, 次のように考えられる. 一旦粒子が破損し粒子の細粒化が生じた部分では, 粘着力は低下するが粒子の細粒化や角礫化, 淘汰度の悪化, 間隙率の低下によって内部摩擦角が増大する. その結果としてその部分の歪硬化を引き起こし, 変形はまだ未変形の部分に移動し, 新たな剪断帯を形成する (Aydin and Johnson, 1983; Moore and Byrne, 1987; Underhill and Woodcock, 1987). Cataclastic flow は, independent particulate flow が発生する変形相より

Fig. 10. Photomicrograph of type F of web structure. Two vein parts are indicated by two bi-directional arrows. Small arrow shows the breakage of grain.

σ_1 , σ_2 , and σ_3 are principal stress axes at present.

Fig. 11. Principal stress axes for web structure of types C and D. Arrow indicates sense of dislocation shearing.

Table 4. Formative process of web structures, and correlation to development of geological structures at the Emi coastal line.

Stage	Deformation mechanism of web structure	Development of geological structure observed at the Emi coastal line		
0	liquefaction and fluidization soon after deposition (types A-1, A-3, and B-1)	liquefaction and fluidization (disappearance of sedimentary structure, convolute laminations, etc.)		
1	independent particulate flow and fluid flow produced by compressive stress whose σ_1 lies on the bedding plane under high pore-fluid pressure (types A-2, B-2, C, D, and E)	NW-striking reverse faults	NE-striking reverse fault	E-W-striking reverse fault or layer-parallel faults
2	cataclastic flow (type F)	NW-striking normal faults		
3	_____	N-S-striking strike-slip faults		
4	_____	NE-striking strike-slip faults		

lithification が進行した物性を持つ変形相、もしくは歪速度がより大きい場を持つ変形相のときの変形メカニズムである (Knipe, 1986)。露頭における交差関係より、F タイプは A-2, B-2, C, D, E タイプより後期に形成したことは明らかであるため、F タイプ形成時の砂岩の lithification はそれらのタイプ形成時より進行していたであろう。よって、歪速度の影響よりむしろ、F タイプはステージ 1 よりも堆積物の lithification がより進行した条件下で形成した見込みが強い。

4. 他の地質構造との関係

江見海岸に発達する web structure と他の地質構造の形成プロセスの関係を Table 4 に示す。C タイプの泥岩部への延長が NE 走向の逆断層となり、D タイプの泥岩部への延長が NW 走向の逆断層となるため、ステージ 1 の A-2, B-2, C, D, E タイプの web structure を形成させた応力と、共役する NW 走向の逆断層と NE 走向の逆断層を形成させた応力は、同一のものである。また F タイプの泥岩部への延長は NW 走向の正断層となる。

先にも述べたが、小川・石丸 (1991) によると江見層群は付加体である見込みが強い。ステージ 1 の web structure を形成させた応力、つまり最大主応力を地層の層理面に平行な方向に最小主応力を垂直な方向に持つ圧縮応力は、付加作用と大いに関係があると思われる。堆積物が海溝底に堆積した直後は鉛直応力が水平応力に卓越するが、その後付加体に取り込まれるにつれて水平応力が鉛直応力に卓越していく (Moore and Byrne, 1987; Moore, 1989; Maltman, 1994)。Byrne (1984), Lucas and Moore (1986) によると、web structure が発達する砂岩のブロックを形成させた原動力は付加体内のテクトニックな応力であると報告している。Web

structure がこうした付加体特有の条件でのみ形成されるものかについては、今後付加体と認定されている地質体において、より詳細な研究を通じて明らかにすべきものであろう。

ま と め

Web structure の一般的な形成プロセスと成因は次のようにまとめられる。

ステージ 0；堆積直後の砂岩層の液状化・流動化により地層の上方への脱水を伴う dish structure とチューブ状脱水構造が形成される。さらにほぼ同時期に側方への注入構造が形成される。

ステージ 1；地層の層理面と平行な方向に最大主応力を持つ圧縮応力によって高間隙水圧が生じ、逆断層のセンスを持つ vein が形成される。その変形メカニズムは independent particulate flow と fluid flow である。

ステージ 2；正断層を形成させる差応力が生じ cataclastic flow タイプの変形メカニズムを持つ vein が形成される。

この 3 つのプロセスによって一見不規則な方位を持つ暗色の筋が形成する。ステージ 0 における側方への注入構造と砂岩層の液状化・流動化現象の成因的關係については、今後の室内実験を通じて明らかにする必要がある。また Byrne (1984) や Lucas and Moore (1986) が報告した、顕著な cataclastic flow タイプの変形メカニズムを持つ web structure は今回は観察されなかった。それらは堆積物の lithification がより進行した条件下、もしくはより速い歪速度をもつ条件下で形成されるのであろう。

本研究では、不規則なネットワークを持つと従来から考えられていた web structure の規則性を示し、その成因を明ら

かにした。このように web structure はいくつかの形成ステージと変形メカニズムを持ち、江見層群の堆積以降の一連の応力履歴を記録している。このような形成ステージを持つ web structure の存在は、江見層群が付加体である見込みをさらに強める。他の付加体における web structure もこのような規則性と成因を持つのか、今後検討を行い、web structure の一般的な成因を明らかにしたい。さらに、web structure 形成時の物性・応力条件をより具体的に決定するためには、現世の付加体内の構造の詳細な観察、物性条件の測定、および室内実験との比較が必要であろう。

謝 辞

本研究は筑波大学第一学群自然科学類在籍中に卒業研究の一部をまとめたものである。本研究を行うにあたり、筑波大学小川勇二郎教授には終始御指導いただき、粗稿の査読をしていただいた。英国 Wales 大学 Alex Maltman 博士には Abstract の査読と未固結堆積物の変形についての議論をしていただいた。筑波大学滝沢 茂博士には未固結堆積物の薄片作成の方法を教えていただいた。東京大学芦寿一郎博士には剪断面内の流体の移動について議論していただいた。九州大学鈴木清史氏には砂のダイレイタンス特性について議論していただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

文 献

- Agar, S.M., 1990, The interaction of fluid processes and progressive deformation during shallow level accretion: examples from the Shimanto Belt of SW Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **95**, 9133-9147.
- Ashby, M.F. and Verrall, R.A., 1977, Micromechanisms of flow and fracture and their relevance to the rheology of the upper mantle. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, **288**, 59-95.
- Aydin, A. and Johnson, A.M., 1983, Analysis of faulting in porous sandstones. *Jour. Struct. Geol.*, **5**, 19-31.
- Borradaile, G.J., 1981, Particulate flow of rock and the formation of cleavage. *Tectonophysics*, **72**, 305-321.
- Byrne, T., 1984, Early deformation in melange terranes of the Ghost Rocks Formation, Kodiak Islands, Alaska. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **198**, 21-51.
- Cowan, D.S., 1982, Deformation of partly dewatered and consolidated Franciscan sediments near Piedras Blancas Point, California. *Geol. Soc. Lon. Spec. Pub.*, **10**, 439-457.
- Hada, S., 1988, Physical and Mechanical properties of sedimentary rocks in the Cretaceous Shimanto Belt. *Modern Geol.*, **12**, 341-359.
- Handin, J., Hager, R.V., Friedman, M. and Feather, J.N., 1963, Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Pore pressure effects. *Amer. Assoc. of Petrol. Geol. Bull.*, **47**, 717-755.
- 平山次郎・垣見俊弘, 1965, 地層中の応力場の解析法とその実例について. *地球科学*, **78**, 23-31.
- 河井興三, 1957, 千葉県鴨川町付近の地質. *石油技誌*, **22**, 190-197.
- 河上房義, 1982, 土質力学. 森北出版, 276 p.
- Kerr, P.F. and Drew, I.M., 1968, Quick-clay slides in the U.S.A. *Engin. Geol.*, **2**, 215-238.
- Knipe, R.J., 1986, Deformation mechanism path diagrams for sediments undergoing lithification. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **166**, 151-160.
- Krantz, R.L., 1984, Microcracks in rocks; A review. *Tectonophysics*, **100**, 449-480.
- Logan, J.M., 1979, Brittle phenomena. *Reviews in Geophysics and Space Physics*, **17**, 1121-1132.
- Lucas, S.E. and Moore, J.C., 1986, Cataclastic deformation in accretionary wedges: Deep Sea Drilling Project Leg 66, southern Mexico, and on-land examples from Barbados and Kodiak Island. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **166**, 89-103.
- Mackenzie, J.S., Needham, D.T. and Agar, S.M., 1987, Progressive deformation in an accretionary complex: An example from the Shimanto belt of eastern Kyushu, southwest Japan. *Geology*, **15**, 353-356.
- Maltman, A.J., 1984, On the term "soft-sediment deformation". *Jour. Struct. Geol.*, **6**, 589-593.
- Maltman, A.J., 1994, *The Geological deformation of sediments*. Chapman & Hall, 362 p.
- Mitchell, J.K., 1976, *Fundamental of soil behavior*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 422 p.
- Moore, J.C., 1989, Tectonics and hydrogeology of accretionary prisms: role of the decollement zone. *Jour. 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.
- Morrow, C.A., Shi, L.Q. and Byerlee, J.D., 1982, Strain hardening and strength of clay-rich fault gouges. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 6771-6780.
- 中嶋輝允・牧本 博・平山次郎・徳橋秀一, 1981, 鴨川地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 166 p.
- 小川勇二郎・石丸恒存, 1991, 房総半島南部江見海岸における江見層群の地質構造. *地学雑誌*, **100**, 530-539.
- Paterson, M.S., 1978, *Experimental rock deformation; The brittle field*. Berlin, Springer-Verlag, 245 p.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, 494 p.
- 斎藤実篤, 1992, 房総半島南部の新生界の層序学的研究. 東北大地質古生物研邦文報, **93**, 1-37.
- 沢村孝之助・中嶋輝允, 1980, 房総半島中新統の珪質鞭毛藻化石群集による層序区分. 地質調査所, 月報, **31**, 333-345.
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. *Jour. Geol. Soc. London*, **133**, 191-213.
- Sibson, R.H., 1983, Continental fault structure and the shallow earthquake source. *Jour. Geol. Soc. London*, **140**, 741-768.
- 鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨 昂・岡 重文・ト部厚志・遠藤毅・堀口万吉・江藤鉄人・菊地隆男・山内靖喜・中嶋輝允・徳橋秀一・楡井 久・原 雄・中山俊雄・奈須紀幸・加賀美英雄・木村政昭・本座栄一, 1995, 東京湾とその周辺地域の地質. 特殊地質図 (20), 10 万分の 1, 地質説明書. 地質調査所, 109 p.
- 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—. *地質雑誌*, **93**, 791-808.
- Underhill, J.R. and Woodcock, N.H., 1987, Faulting mechanisms in high-porosity sandstones; New Red Sandstone, Arran, Scotland. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, **29**, 91-105.
- 山縣 毅・小川勇二郎, 1989, 混在岩の形成における泥ダイアピルの役割. *地質雑誌*, **95**, 297-310.

(要 旨)

廣野哲朗, 1996, 房総半島南部江見層群砂岩層中に発達する web structure. 地質雑, 102, 804-815. (Hirono, T., 1996, Web structure in the sandstone beds of the Emi Group in the southern part of the Boso Peninsula, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 102, 804-815.)

本研究では, 房総半島南部江見層群中の砂岩に発達する web structure の露頭における観察と内部構造の記載を行い, 砂岩に発達する不規則なネットワークを持つ筋として定義されている web structure の規則性と成因を次のように明らかにした. (1) 堆積直後の砂岩層に液状化・流動化が生じ, dish structure, チューブ状脱水構造, 側方への注入構造が形成される. (2) 地層の層理面に平行な方向に最大主応力を持つ圧縮応力により逆断層のセンスを持つ vein が形成される. その変形メカニズムは independent particulate flow と fluid flow である. (3) さらに強度を増した砂岩層に差応力が生じ, cataclastic flow タイプの変形メカニズムを持つ vein が形成される.