

屋久島にみられる泥ダイアピル様メランジュ

殿谷 和樹・山本 由弦・安間 了

筑波大学地球科学系

1. はじめに

泥ダイアピルは、テクトニックメランジュとともにメランジュを形成する重要なメカニズムとして知られている。現世のそれはバルバドス (Brown and Westbrook, 1988) や南海トラフ (Ujii, 2000) などの付加体やその近傍で報告されているが、その三次元的な構造は音響探査によって推定されているにすぎない。陸上に現れた付加体の中にも泥ダイアピルの報告例がある (Brown, 1990; Speed, 1990; Brown and Orange, 1993) が、三次元的構造を観察できる露頭は少ない。また、テクトニックメランジュとどのように微細組織がちがうのか、その判定基準は明らかになっていない。小論では屋久島北部の海岸線に露出する、平面および断面露頭で三次元的構造を観察できる小規模な泥ダイアピル様メランジュについて記載するとともに、付近で見られるテクトニックメランジュの組織との比較検討を行う。

2. 調査地域の地質

今回記載した泥ダイアピル様メランジュは、屋久島北部の深川集落から志戸子集落の間地点、通称「ウマオトシ」と呼ばれる岬に露出している (図1)。本地域は、四万十層群に相当する古第三系とされる宮之浦累層楠川頁岩砂岩部層 (橋本, 1956) の最上部に位置する。

層理面は一般に北東-南西方向の走向をもち、北西へ約 60~70° 傾斜している。大規模な背斜を挟んで地層が局部的に逆転しているところも頻繁に観察されるが、一般には北西上位である。泥ダイアピル様メランジュの下位側の地層は主に砂岩層・砂岩泥岩互層からなり、数十メートル幅の泥岩層をはさむこともある。砂岩は粗粒で青灰色を呈し、一般に無層理塊状あるいは成層状であるが、まれにクロスラミナが発達する。泥岩層は黒~黒灰色を呈し、一般に劈開が発達している。東側の境界ごく付近には 1~2 m 幅の礫岩層と泥岩の偽礫を含んだ礫岩層が分布している。泥ダイアピル様メランジュの北西側上位には礫岩層、その上位には泥岩の偽礫を含む礫岩

層が堆積している。上位層の礫岩は下位層のそれよりも粗粒である。礫岩層の上位には、泥質優性泥岩砂岩互層の中に大規模なスラストアンチクラインが発達するゾーンが見られ、さらにその北側では、宮之浦累層志戸子泥質岩部層に移行する (橋本, 1956)。

泥ダイアピル様メランジュの属する楠川頁岩砂岩部層は、東側の下位に向かって次第に泥優勢になり、互層する砂層の厚さも減少する傾向にある。山本ほか (本報告)・堀内ほか (本報告)・遠藤 (本報告) にあるように、本累層の泥質優勢部では一定方向のフェルグエンツを示すテクトニックメランジュ、デュープレックス、褶曲構造が発達しており、付加体の中でこれらの変形構造が実現したものと考えられる。ここに報告する泥ダイアピル様メランジュは、宮之浦累層中で比較的粗粒な砂岩・礫岩・擬礫岩が広範囲にわたって分布する中に形成されている。

3. 泥ダイアピル様メランジュ

泥ダイアピル様メランジュは、北側のテラス上に露出する基部の平面露頭、北西方向の湾をはさんで南側に位置する北西-南東方向の断面露頭と、断面露頭直上の平面露頭にわたって露出する (図2)。基部平面露頭とその南西側の断面露頭について、平板測量を行い、構造的記載をしたうえで、鏡下観察、帯磁率異方性 (anisotropy of magnetic susceptibility: AMS) 測定を行った。

基部平面露頭のダイアピル様メランジュは南北に長さ約 40 m、幅約 16 m にわたって露出する (図3)。メランジュ中には多くの砂岩及び砂岩泥岩互層のブロックが取り込まれている。メランジュ中心部では径 2~4 m に達する巨大ブロックが存在するが、メランジュと母岩との境界近くでは、細かくちぎれたレンズ状砂岩となる。ブロックの層理面の走向傾斜はマトリック層の走向傾斜とほぼ一致することが多いが、上位方向が逆転したり、全く異なる走向傾斜を示すブロックも存在する。全体に劈開が見られるが、肉眼では母岩との境界部に近いほど顕著に発達するようである。南端付近では北側に急傾斜する鉛

筆状劈開 (pencil cleavage) が発達する。

南東に面した高さ 25 m の崖に、同じダイアピル様メランジュの断面が観察できる (図 4)。ダイアピル様メランジュは一部で母岩の構造を明瞭に切っており、上方に先細りになる形態をもつ。中央部では巨大なブロックを含むが、母岩との境界に近いほど小さくなる傾向は、基部平面露頭と同じである。断面露頭の上部では北西側と南東側境界は明瞭に認められるが、南西側の延長は植生に覆われて不明である。ここではおよそ $N30^{\circ}E70^{\circ}W$ の層理面をもつ多数の砂岩泥岩互層のブロックを取り込んでいるのが確認された。ブロックの層理面もマトリックスの劈開も、基部平面露頭の層理面に比べわずかに南北よりの走向を持つ。

メランジュ中には後期に形成された断層が多数認められ、断面では 4 m に達する変位をもつ逆断層、平面では 8 m 近い変位をもつ南北方向の左横ずれ断層が見られた。一部には母岩に連続する断層も見られ、ここではメランジュ境界は後期断層によって改変されている。明瞭な破断面の発達していない癒着した境界も認められ、このような部分では初期のメランジュ境界を保存しているものと思われる。

中央部で巨大なブロックが存在し、周縁部ではレンズ状の小ブロックしか分布していないことは、境界部でより大きな剪断歪みが生じたことを示す。また、先細りつつ母岩の構造を切る形状をもつメランジュの中で、大小ブロックは北東-南西方向の軸に対して対称に分布する。これらの観察は、北東-南西方向に長軸を持つ岩体が、母岩との摩擦により、境界部で strain rate weakening を起こしながら定置したことを示唆する。メランジュ中に全体的に発達する後生的な脆性破断のために構造は改変されており、信頼できる剪断方向を認定することは困難であったので確証は得られなかったが、おそらくこのメランジュは泥ダイアピルの上昇時に形成されたのであろう。南方の延長は植生におおわれており確認できないが、北東-南西方向に伸張して露頭範囲では閉じておらず、形態的には泥注入 (mud injection) とよばれるものである。

4. 薄片観察

微細組織の発達状況、変成鉱物の組み合わせを調べるため、薄片を制作し、鏡下観察を

行った。境界部に近い基部平面露頭南端や断面露頭上部では圧力溶解と思われる黒い筋状の組織と鉱物の伸張が鏡下で観察された。これに対し、ダイアピル様メランジュの中央部では、鉱物粒子が変形を受けた痕跡は観察できなかった。このことは、境界部でより強い剪断変形を受けたとする露頭での観察結果を支持する。

5. 帯磁率異方性測定法

泥ダイアピル様メランジュ内の組織の発達を定量的に評価するため、定方位柱状試料を採取し帯磁率異方性 (AMS) の測定を行った。

AMS 測定用のサンプルは、泥ダイアピル様メランジュのマトリックスから連続的に採取した。本研究では、露頭から定方位で採取したブロックサンプルを持ち帰り、実験室でコア柱状試料を堀り抜いて帯磁率異方性の測定用試料を調製した。測定には、産業技術総合研究所に設置の KLY3S-Kappabridge 帯磁率異方性測定器を用いた。測定結果から Flinn 図、T-P' 図、帯磁率異方性の主軸方向を示すステレオ投影図を作成した。定方位試料の採取・測定法や図の見方の詳細については、堀内ほか (本報告) を参照されたい。

比較のため、近傍の泊川付近で見られた覆瓦状のデュープレクス構造をふくむテクトニックメランジュの泥質部とその近傍の整然層からも AMS 測定用試料を採取した (図 5)。泊川テクトニックメランジュに関しては、山本ほか (本報告) に記載があるので参照されたい。

なお、本地域は中期中新世の屋久島花崗岩の貫入によって、紅柱石-堇青石-黒雲母-緑泥石のアイソグラッドで特徴づけられる接触変成を受けているが、泥ダイアピル様メランジュの分布する北部の海岸線沿いでは紅柱石-堇青石帯の外側にあり、顕著な再結晶化や堇青石など逆磁性をもつ常磁性変成鉱物は生じていない。緑泥石は観察されるが、黒雲母や緑泥石などのフィロシリケートは、堆積物中の粘土鉱物を置き換えて成長していくことが期待されるので、AMS 組織楕円体も比較的初期に形成された組織の形を反映していると考えられる。全体的に強磁性鉱物の寄与が見込まれる。二次的に生成した強磁性鉱物の寄与は、今のところ不明である。

6. 起源の異なるメランジュの帯磁率異方性組織

Flinn 図 (図 6) から、泥ダイアピル起源と思われるメランジュでは、面構造の強いオプレート型 AMS 組織楕円体 (Flinn 図上で X 軸付近にプロットされる) が全体的に発達することが理解できる。3 軸平面型 AMS 組織楕円体 (Flinn 図の原点から伸びる対角線上に落ちるもの) を示すコア試料も、わずかながら見られた。AMS 組織楕円体の分布を地図に落としてみた結果、平面型楕円体の発達している場所に顕著な傾向はみられなかった。一般に K_{min} の方位 (図 6 のステレオ投影図) は、メランジュ内に発達する劈開の法線と平行である (図 3 と比較)。このことは、帯磁率異方性面構造と岩石組織が良く一致することを表している。帯磁率異方性線構造 (K_{max}) と中間軸 (K_{min}) は大円上に乗るが、完全にオーバーラップせず、それぞれ極大をもつ。このことは面構造の強い 3 軸オプレート型の AMS 組織楕円体が全体的に発達していることを支持する。

これに対し、泊川テクトニックメランジュで採取された試料 (図 5 の 4 番から 17 番コア、図 6 左下図で白抜き丸で表した試料) は、異方性強度が低く (Flinn 図で原点近くにプロットされる)、全体に平面型組織楕円体が発達している。泥ダイアピル様メランジュと異なり、ステレオ投影図上で K_{max} が極大集中を示し、 K_{int} と K_{min} は大円上に乗る。 K_{max} の方位は、図 5 の挿図に見られるデュプレックス構造を示す砂岩層のルーフスラスト・フロアスラストと各ホースとの交線とほぼ平行であり、山本ほか (本報告) にあるように、運動方向に直交する線構造の発達を示している。 K_{min} と K_{int} はステレオ投影図上でオーバーラップしており、Flinn 図上からも読みとれるように、面構造の発達が弱い傾向を支持する。

堆積時の構造が保存されている未変形の整然層 (図 5 の 1 番から 3 番コア、図 6 左下図で黒丸で表した試料) では、テクトニックメランジュに比べて面構造がより発達している傾向がみられる。面構造の発達度を示す F 値は、泊川地域の整然層では 1.06-1.07 程度であるが、屋久島のほかの地域では、1.17 程度まで増加する (堀内ほか、本報告)。帯磁率異方性強度は、強磁性鉱物の含有量が増加するに従って、強くなる傾向にあるので、泊川地域の異方性が比較的弱いのは、強磁性鉱物の含有量の少なさを反映しているのかも知れない。

7. 考察

露頭規模でのテクトニックメランジュと泥ダイアピル起源のメランジュの認定基準を図 7 に示す (Orange, 1990)。テクトニックメランジュは、均質な地殻応力下で、付加体の中に歪みの集中帯が形成されることによって発達する。このため、平面的な広がりを持ち、剪断方向はメランジュの中で一定する。一方、泥ダイアピルは、砂岩・礫岩と泥岩のコンピテンスコントラストが埋没に伴って増大し、インコンピテントな泥岩が過剰圧によって不安定になり、母岩 (砂岩・礫岩) の脆性的な (あるいは局所的な延性) 変形を伴いながら、能動的に上昇することによって形成される円柱状から板状のローカルな構造である。このようにして噴出する泥ダイアピル (あるいは泥注入) の両端の境界では逆向きの剪断センスを示すことが期待される。ここで記載した泥ダイアピル様メランジュは、後期の脆性的な断層によって初期の構造が乱されており、剪断センスを露頭で見積もることは困難であった。露頭での泥ダイアピルの判定は、母岩の構造を切っていること、上方に先細る形態と、泥ダイアピルに期待される栓流が生じているという証拠 (大小ブロックの分布状況) が見られたからに過ぎない。鏡下で、泥ダイアピルの境界付近で変形組織が見られたことも、境界付近で歪みの集中が生じていたことを支持する。

明らかなテクトニックメランジュの AMS 組織楕円体と、泥ダイアピル起源と思われる本構造の AMS 組織楕円体を比較した結果、明瞭な差が確認された。テクトニックメランジュの場合、形成される深度はさまざまであるが、比較的深部と考えられる屋久島地域 (泊川メランジュ: 山本ほか、本報告) でも、浅部の三浦・房総地域 (久光・金松, 2001; Yamamoto, 2003) でも同様に、異方性の低い平面型の AMS 組織楕円体の発達を示すことが知られている。本構造にこれらと異なるオプレート型の帯磁率異方性組織楕円が発達することは、少なくともこのメランジュがテクトニック起源ではないことを示唆するかもしれない。

泊川メランジュ付近で採取した整然層は、一様な形をもつ層理面に平行なオプレート型の AMS 組織楕円体を発達させており、これは初期に形成された圧密組織を反映しているのであろう。泥ダイアピルでも全体に劈開面に平行なオプレート型の AMS 組織楕円体が

発達しており、Flinn 図上で整然層の AMS 組織楕円体の分布範囲とオーバーラップするが、一部平面型楕円体もみられるという点で異なる。また、露頭内での AMS 組織楕円体の形状や強度にばらつきが大きい。これは、泥ダイアピルの流動のために、整然層中に発達していた圧密組織が一部破壊されたためであろうと解釈できる。

これに対して泊川テクトニックメランジュでは、整然層より異方性強度の低い平面型の帯磁率異方性組織楕円体が発達するという差違が顕著に見られる。また、泥ダイアピルの K_{min} が劈開方向と良く一致するのに対して、テクトニックメランジュでは、運動方向と直交する方向に線構造を発達させ、面構造には大きなゆらぎがみられる。これは、テクトニックメランジュでは、初期圧密組織の破壊と粒子の再配列がより激しく生じたものと解釈できるであろう。

8. まとめ

屋久島に見られる泥ダイアピルの特徴は以下のようにまとめられる。1) 泥ダイアピル中央部では径数メートルに達する砂岩泥岩互層や砂質優性互層の巨大ブロックが分布するが、母岩との境界付近ではレンズ状の小さな砂岩ブロックが卓越するようになる。これは、泥ダイアピルの中で栓流が生じていたことを示唆する。2) 全く異なる走向傾斜をもつブロックや上下方向が逆転しているブロックも見られる。3) 母岩との境界付近では圧力溶解劈開や鉛筆状劈開が発達する部分がある。4) 帯磁率異方性の K_{max} と K_{int} が大円上に乗り、 K_{min} は劈開と直交する。一般に面構造の発達したパンケーキ型の AMS 組織楕円体をもつ。

これに対し、テクトニックメランジュでは、1) ブロックの長軸には指向性があり、ブロックの非対称性から推定されるフェルゲンツにも一貫性がある。2) 帯磁率異方性は一般に平面型で、 K_{max} が極大集中することに反映されるように、線構造の発達が見られる。

上述のような泥ダイアピルとテクトニックメランジュの構造や組織の対照は、メランジュの成因を認定する基準となる。AMS 組織楕円体の形状は、テクトニックメランジュとダイアピル起源のメランジュを区別するツールとして使える可能性がある。

謝辞

独立行政法人産業技術総合研究所の山崎俊嗣博士には、帯磁率異方性測定のための機器使用を快諾していただいた。海洋科学技術センターIFREEの木村学博士と氏家恒太郎博士には、携行式岩石カッターの使用の便宜をはかっていただいた。以上の方々に感謝いたします。

引用文献

- Brown, K. and Westbrook, G. K., 1988, Mud diapirism and subcretion in the Barbados ridge accretionary complex: the role of fluids in accretionary processes. *Tectonics*, 7, 613-640.
- Brown, K. M., 1990, The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Jour. Geophys. Res.*, 95, 8969-8982.
- Brown, K. M. and Orange, D. L., 1993, Structural aspects of diapiric mélange emplacement: the Duck Creek Diapir. *Jour. Struct. Geol.*, 15, 831-847.
- 橋本勇, 1956, 屋久島の時代未詳層群の層序とその地質構造および種子島西部の熊毛層群に関する 1, 2 の事実. 九大教養地学研究報告, No. 2, 23 - 36.
- 久光 敏夫・金松 敏也, 2001, プレート沈み込み帯における堆積物の初期変形. 月刊地球号外, 32, 191-199.
- Orange, D. L., 1990, Criteria helpful in recognizing shear-zone and diapiric mélange: Examples from the Hoh accretionary complex, Olympic Peninsula, Washington. *Geol. Soc. Amer. Bulletin*, 102, 935 - 951.
- Speed, R., 1990, Volume loss and defluidization history of Barbados. *Jour. Geophys. Res.*, 95, 8983-8996.
- Ujiie, Y., 2000, Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean. *Marine Geology*, 163, 149 - 167.
- Yamamoto, Y., 2003, Deformation history and related change of physical properties in shallow part of accretionary prism. Ph. D. Thesis, Univ. Tsukuba, pp153.

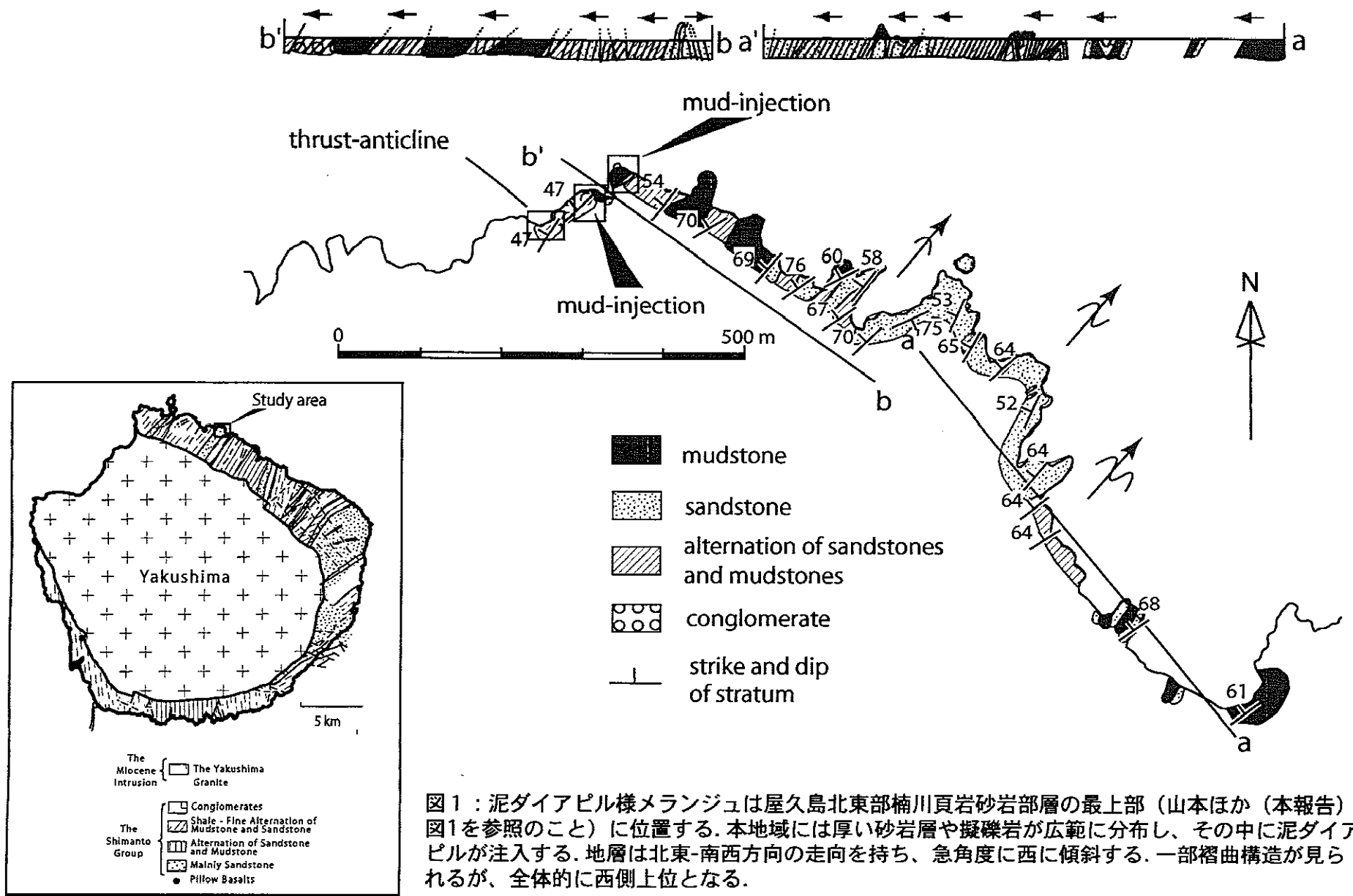


図1：泥ダイアピル様メランジュは屋久島北東部楠川頁岩砂岩部層の最上部（山本ほか（本報告）図1を参照のこと）に位置する。本地域には厚い砂岩層や擬礫岩が広範に分布し、その中に泥ダイアピルが注入する。地層は北東-南西方向の走向を持ち、急角度に西に傾斜する。一部褶曲構造が見られるが、全体的に西側上位となる。

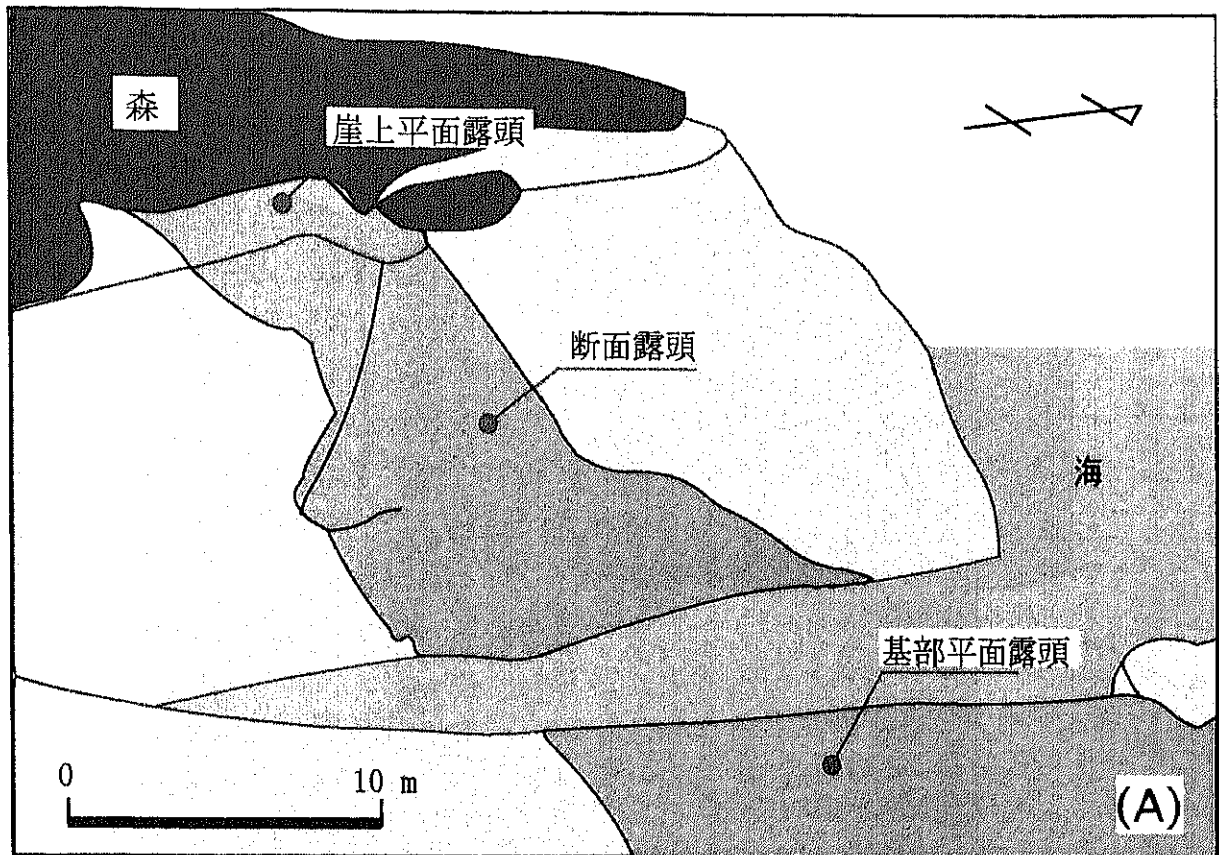


図2：本地域に観察される泥ダイアピル様メランジュの全体図 (A)。泥ダイアピルは図手前の基部平面露頭、湾をはさんで断面露頭、断面直上の平面露頭にわたって露出しており、構造の三次元的な検討が可能である。南方の延長は植生におおわれて確認できない。Bは断面露頭の写真。ダイアピル中央部の互層したブロックに注意。

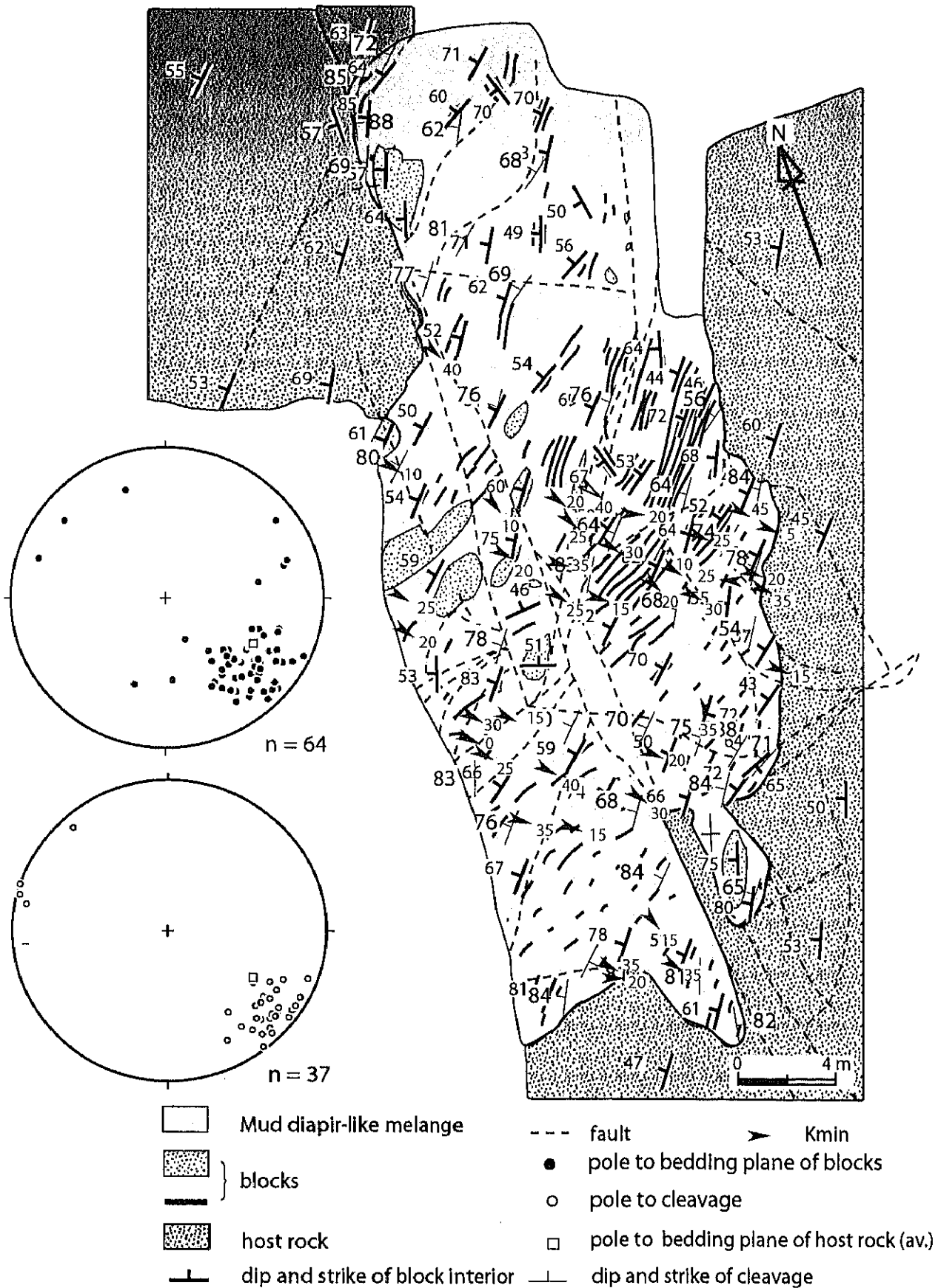
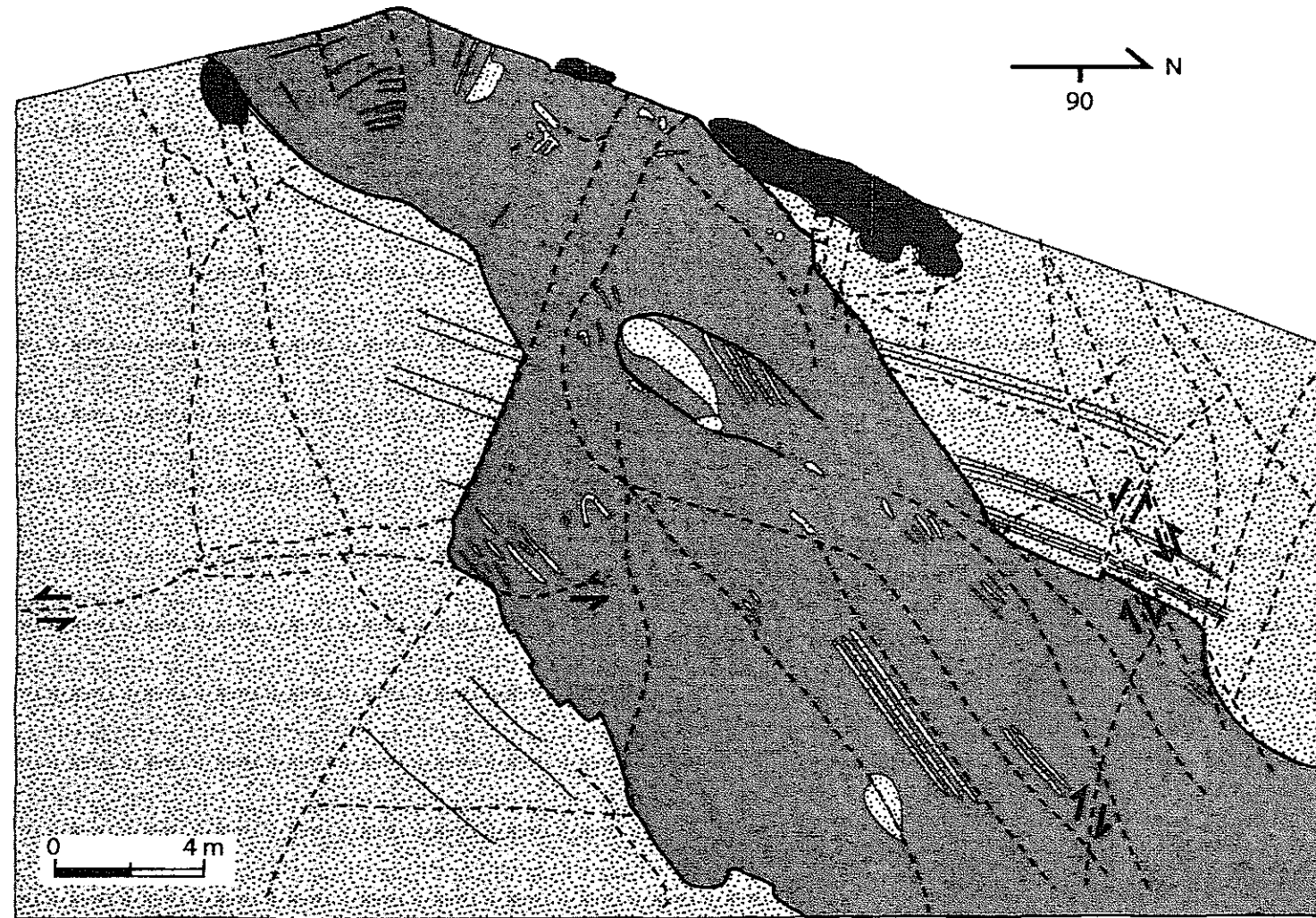


図3：泥ダイアピル様メランジュ基部平面露頭の平板測量図と構造。ダイアピル内に発達する劈開はほぼ平行である。ダイアピル中央部に大きなブロックが散在するのに対し、ダイアピルの境界部では小さなレンズ状のブロックが卓越する。ブロック内部構造の姿勢は大きく変化する。帯磁率異方性測定用の試料採取地点を矢印（Kminのトレンドとプランジ）で示す。






- | | | | |
|---|----------------------------|--|-----------|
|  | mud diapir-like
melange |  | host rock |
|  | sandstone blocks | --- | fault |

図4：泥ダイアピル様メランジュ断面露頭のスケッチ。ダイアピル中央部には、径数メートルに達する巨大なブロックが見られる。母岩の砂岩泥岩互層・擬礫岩の構造は、ダイアピルによって明らかに切られる。図2にも見られるようにダイアピル内には後期の断層が発達し、母岩中に連続するものもある。境界はこれらの後期の断層によって改変されているであろう。

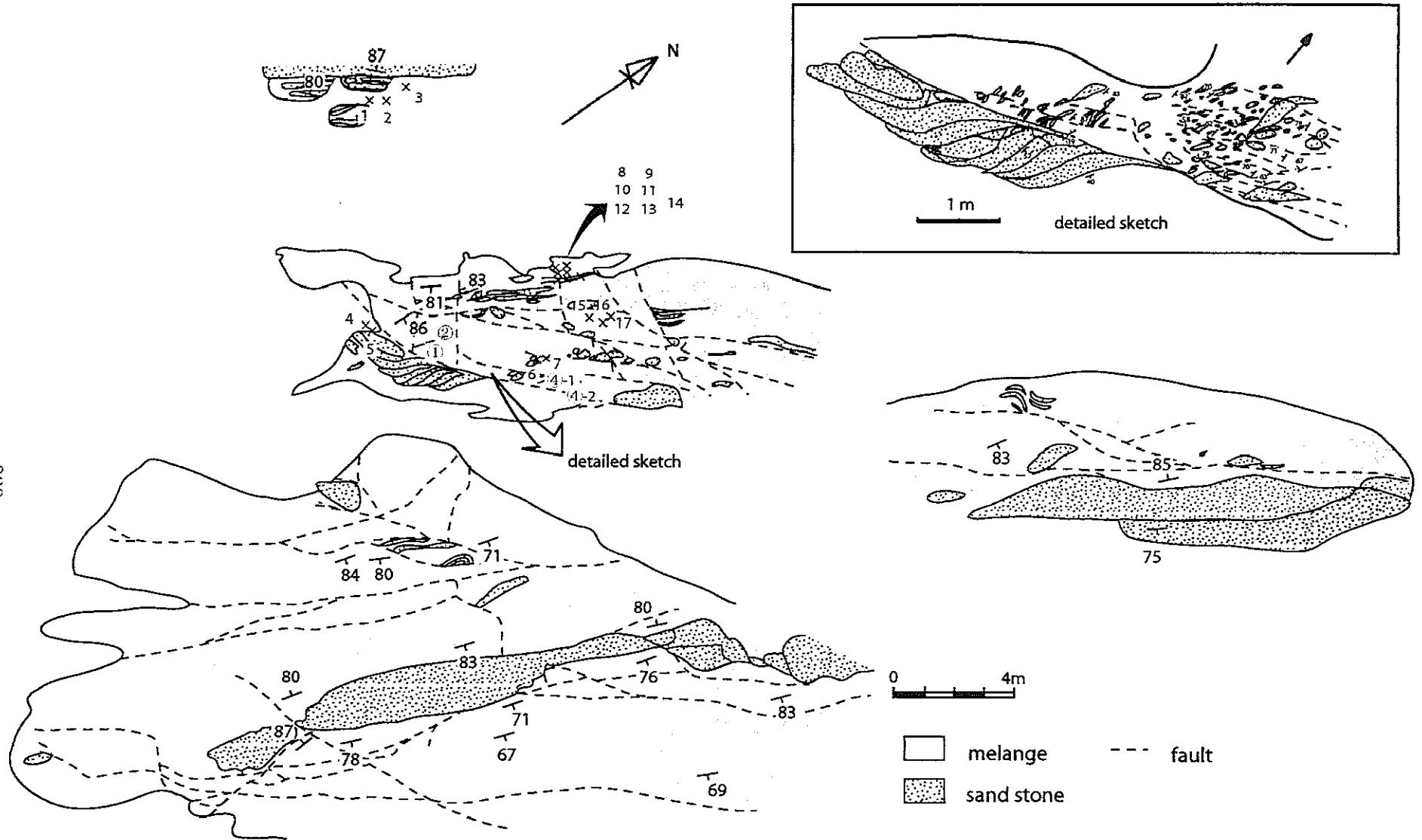
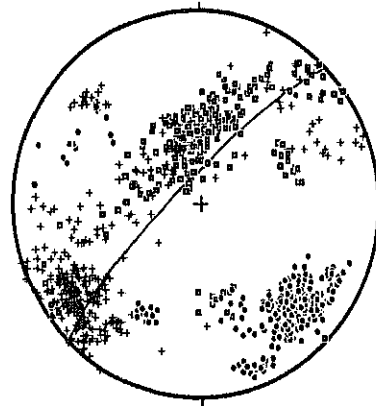
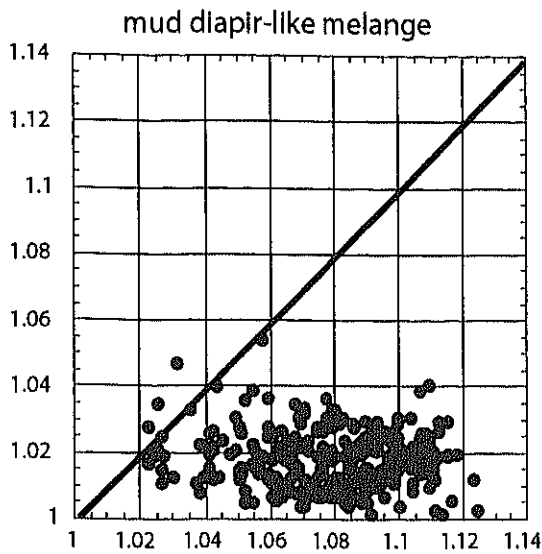


図5：泥ダイヤピル様メランジュの東側に発達する泊川テクトニックメランジュ（山本ほか（本報告）を参照のこと）のスケッチ。砂岩層が覆瓦状に積み重なるデュプレクス構造が一部に発達する（挿入）。変形集中帯では、砂岩はレンズ状にちぎれ、非対称組織が発達する。帯磁率異方性測定用の試料採取地点を×印で示す。



Great circle presents strike and dip of cleavage in melange.

- Kmax
- + Kint
- Kmin

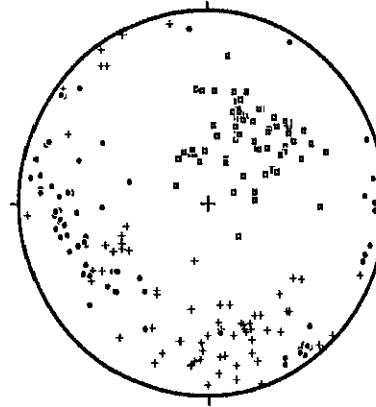
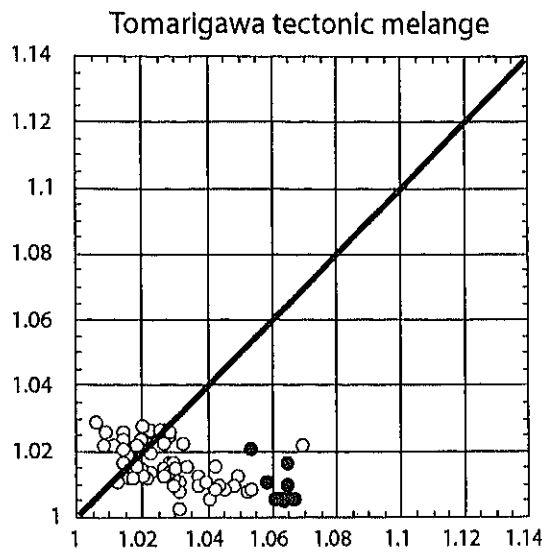


図6：泥ダイアピル（上）とテクトニックメランジュ（下）の帯磁率異方性（AMS）のコントラスト。泥ダイアピルはKminの集中が良く、その方位はダイアピル中に発達する劈開のS-poleと一致する。鉱物の伸張方向と一致すると思われるKmaxと、Kintは大円上に乗る。一方、テクトニックメランジュはKmaxの集中が良く、KintとKminが大円上に乗る。Kmaxの方向は、デュープレックスのルーフスラスト・フロアスラストと各ホースの交線とほぼ平行である。

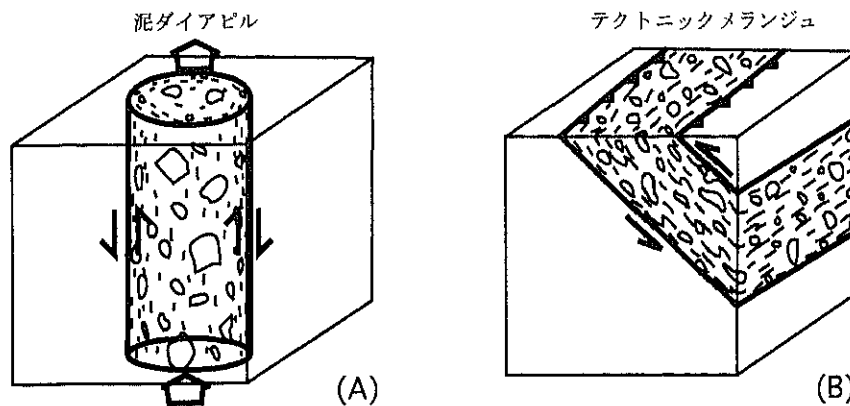


図7：泥ダイアピル (A) とテクトニックメランジュ (B) (Orange, 1990).