論 文

坑井試料の残留磁化測定と地質解釈への意義

伊藤 康人*・長崎 康彦**

(Received May 6, 1999; accepted March 13, 2000)

Measurement of remanent magnetization of borehole
samples and its significance in geological interpretation

Yasuto Itoh and Yasuhiko Nagasaki

Abstract: Magnetic properties of core samples in stratigraphic test wells are presented in an attempt to apply to comprehensive geological interpretation. Stability parameter of magnetization of igneous basement cores in MITI "Kesennuma-Oki" and "Goto-nada" indicates that rock magnetic property is essential for reliable interpretation of geomagnetic anomaly in sedimentary basins. Sedimentary core samples from MITI "Kesennuma-Oki", "Soma-Oki", "Joban-Oki" are described to obtain information on core-orientation. Magnetic cleaning for them shows that drilling-induced secondary magnetization is common in deep borehole samples. After careful rock magnetic cleaning, a site-mean direction of primary remanent magnetization for the Cretaceous sample in MITI "Soma-Oki" has large westerly declination. Together with other paleomagnetic data, the present result suggests a differential tectonic movement and reorganization of sedimentary basins in northeast Japan since the Cretaceous. Thus rock magnetic study of borehole samples contributes to understand the origin of basement, tectonic history, and regional basin evolution.

Key words: magnetic property, core sample, geomagnetic anomaly, tectonic movement

1. はじめに

岩石は微量の強磁性鉱物(磁鉄鉱, 赤鉄鉱など)を含み, 一般に磁化を持っている。比較的強い磁化を持つ火成岩は地磁気異常の原因となるため, 磁気探査の対象となり, 石油・天然ガス探鉱の初期段階で実施されている。Itoh *et al.* (1997) は, 北海道南部に掘削された坑井のコア試料(カコウ岩質基盤)の磁化測定を行って, 油ガスを胚胎する苦小牧リッジの地磁気異常モデルを構築し, 成因を論じた。一方, 堆積岩の場合は磁化が極めて微弱で地磁気異常の原因とはならず, 古地磁気層序やテクトニクスを論じる際に参照される程度である。しかし, 構造補正を行うことができる堆積岩からは, 古緯度

や回転運動など堆積盆全体の起源についての情報が得られる。本論文では, 基礎試錐で得られたコア試料の磁化測定結果を解説し, 一般地球科学的な意味を考察するとともに, 資源探鉱への活用の可能性を論じる。岩石磁気獲得のメカニズムなどの物理学的基礎については, Dunlop and Özdemir (1997) など解説書に任せ, 本論では立ち入らない。また, 地質解釈への応用例が長崎(1997)によって報告されているので, 併せて参照されたい。以下, 対象坑井についての説明, 堆積岩の残留磁化測定結果, 基盤火成岩類の磁化パラメータと地磁気異常解析への応用の順序で記述し, 最後に残留磁化測定に基づく地史総合解釈の例として東北日本弧のテクトニクスについて論じる。

2. 対象坑井と試料

陸上の岩石の古地磁気学的研究(Otofuiji *et al.*, 1985 など)から, 棚倉構造線(図1)より北の東北日本ブ

* 大阪府立大学総合科学部 College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

** 石油公団 Japan National Oil Corporation

図1 インデックスマップ
坑井柱状図に付した数字は磁化測定試料番号。

ロックは、中新世(2,000~1,500万年前)の日本海拡大に伴って、反時計回り回転しながらアジア大陸から分離してきたと考えられている。その前弧域にあたる太平洋岸では、3坑の基礎試錐が実施されており、コア試料の残留磁化は、背弧拡大を含む中生代以降の構造運動を記録していると期待される。「気仙沼沖」は第三系・白亜系を貫通し、基盤岩に到達した。磁化測定に用いた試料は、白亜系の泥質堆積岩から2層準、カコウ岩質の基盤岩から2層準採取した。「相馬沖」では、厚い第三系堆積岩から3層準、白亜系から2層準試料採取した。石油探鉱におけるコア採取は貯留岩性状のよい砂質岩が卓越する層準で実施されるが、一般に安定な磁化を保持するのは泥質岩であることが多いので、コア観察を行ってなるべく細粒な部分を採取するようにした。「常磐沖」についても、同様の点に留意して、白亜系堆積岩から4層準の試料を採取した。

九州西方の基礎試錐「五島灘」は、厚い鮮新~更新統

と陸上の夾炭層に対比される古第三系を掘削したのち、厚い火山岩類を確認した。これは明瞭な地磁気異常を伴わず、探鉱の初期段階では認識されなかった。その原因を探るため、安山岩~玄武岩質火山岩類を2層準から採取し、磁化測定用試料とした。

3. 堆積岩の残留磁化：通常コア試料の方位決定

コア試料を上下に注意して縦4分割もしくは半割の状態で石膏型に固定し、ダイヤモンドドリルを用いてコア柱面に直角に、直径25mm高さ22mmの磁化測定用円筒試料を抜き取った。

基礎試錐ではコア採取に際して方位付けは行われない。この場合、残留磁化偏角の直接情報は得られず、層理の観察できる堆積岩コアについては地層傾斜を補正し、伏角だけを議論の対象とするのが普通である。学術深海掘削(ODP)では、消磁実験によって消去される磁化成分を現在の地球磁場に平行と仮定して方位を推定す

ることもあるが、次章で述べるように大深度坑井試料の二次磁化獲得プロセスは複雑であり、そのような仮定は成り立たない。しかし、物理検層によって地層の走向傾斜が連続的に測定されているので、それとコア自体の地層傾斜の比較から方位決定を試みた。

古地磁気試料を抜き取った縦4分割コアの直交する2平面上で見かけの傾斜を測定し、コア横断面に対する真の傾斜を計算した。測定対象の基礎試錐はほぼ垂直に掘削されているので、この値は実際の地層傾斜と考えることができる。図2の横軸がそのようにして求めた地層傾斜、縦軸がディップメーターのコア採取層準付近の平均傾斜を示している(地層面が水平に近く誤差が大きいコア試料は除外した)。検討対象とした基礎試錐「気仙沼沖(基盤岩コアを除く)」「相馬沖」「常磐沖」のいずれについても、両者はよく一致しているので、検層で得られた傾斜方位をコアの最大傾斜方位とみなすことができ、コア切断面に一定の角度を持つ古地磁気試料の方位を計算することができる。

斜交層理が発達して構造補正に必要な情報が得られない場合も考えられるので、堆積相の検討を行う必要があるが、多大の時間と労力を要する定方位コア採取を行わない坑井で試料方位を決定する簡便法として、有効と考えられる。

4. 堆積岩の残留磁化：信頼性に関する問題

岩石は、形成されてから現在までの間に、さまざまな物理・化学的プロセスによって二次的な磁化を獲得す

図2 コア観察から決定した地層傾斜(横軸)とディップメーターの平均傾斜(縦軸)の比較

る。形成当時の情報(初生磁化)を解読するためには、磁氣的クリーニングを試料に施して、二次磁化を消去する必要がある。通常は、試料を減衰する交流磁場の中に置いて保磁力の小さい磁化成分を消去する「交流消磁」と、無磁場空間で試料を加熱冷却してアンブロッキング温度の低い磁化成分を消去する「熱消磁」が行われる。これらはいずれも消磁レベルを段階的に増加しながら実施し、磁化ベクトルを分離する。

図3上段は、基礎試錐「気仙沼沖(KE)」「相馬沖(SO)」「常磐沖(JO)」の堆積岩コア試料の段階的交流消磁結果である。いずれの場合も、矢印で示される磁化方位の変化から、消磁の進行とともに伏角が深くなり90°に近くなる(等面積投影図の中心に近づく)ことがわかる。消去されずに残った磁化成分が初生磁化だとすると、白亜紀の東北日本は当時の地磁気北極付近にあったことになるが、これは地質学的情報から受け入れ難い。木川(1993)は、学術深海掘削(ODP)によって採取された南西インド海嶺の海洋底ハンレイ岩コア試料が、ドリルストリングス周辺の磁場(パイプの伸び方向にはほぼ平行)の影響で再磁化していることを示した。その事例においては、掘削によって獲得した「掘削残留磁化(drilling-induced remanent magnetization)」は一種の等温残留磁化であり、15 mT程度の交流消磁によって完全に消去された。これに対し、東北日本前弧のコア試料では、80 mTの交流消磁でもまったく効果が見られない。基礎試錐では厚い堆積層を掘削するため、原位置での試料温度は平均地表温度(あるいは海底面温度)よりかなり高い(図1の坑底温度参照)。コアバレル内の試料は、ドリルカラーの強い磁場にさらされながら揚管中に常温まで冷却し、鉛直下向きの部分熱残留磁化を獲得する。これが交流消磁では効果的に除去できないものと解釈される。

一方、図3下段は上段と同じコアから得られた試料の段階的熱消磁結果を示している。いずれの場合も、矢印の示す磁化方位の変化は交流消磁の場合と大きく異なっている。特に「相馬沖」のSO5層準(左端)や「常磐沖」のJO1層準(右端)は、初生磁化が逆帯磁の可能性すらある。このように、掘削によって付加する二次磁化の影響は大深度坑井ほど深刻になるので、十分な消磁実験を行わなければならない。我が国で建造が計画されているライザー掘削可能な学術掘削船でも、同様の問題が生じるものと予想される。

5. 磁化パラメータの地磁気異常解析への応用

5.1 東北日本沖

東北日本の前弧域には、南北方向の強い地磁気異常帯

Progressive Alternating Field Demagnetization

Progressive Thermal Demagnetization

図3 基礎試錐「気仙沼沖 (KE)」 「相馬沖 (SO)」 「常磐沖 (JO)」 の段階的交流消磁実験 (上段) と、同一コアから得られた試料の段階的熱消磁実験 (下段) 結果

等積投影図の黒丸は下半球、白丸は上半球への投影で、すべて傾動補正前の状態。矢印は消磁によってベクトル方位が変化するトレンド。熱消磁では多くの試料は500°Cを超える消磁温度で磁化が不安定になり、初期状態の10倍以上に二次磁化が成長したが、その部分は図に示されていない。

が存在する (図1)。これは大陸地殻に起源を持つと考えられ、従来さまざまな解釈が行われてきた。Segawa and Oshima (1975) は、北海道の基礎試錐「空知」のコア分析に基づいて、地磁気異常帯に沿って塩基性岩が伏在していると考え、磁化の偏角を $N 45^{\circ} W$ とした。現在の地磁気偏角は $N 8^{\circ} W$ 程度であるから、この解釈は誘導磁化 (現在の地球磁場に平行に成長する磁化) より残留磁化 (岩石が冷却あるいは堆積する際に磁場に平行に獲得し、その後保存されてきた磁化) を重視していることを意味する。

これに対し、Finn (1994) は上述のコア試料の Q_n 比 (ケーニヒスベルガー比; 残留磁化/誘導磁化で定義され、一般に Q_n が1より小さい試料では残留磁化は不安定である) が低すぎるため、残留磁化の寄与は考えられないとした。Finn は、地球磁場に平行に磁化した北上カコウ岩類の基盤岩を仮定すれば磁気異常を説明できると主張している。

これらのモデルは、各種の観測事実を矛盾なく説明するものとは言えない。帯状の伏在塩基性岩モデルの場合、地質学的解釈が困難であること、密度差から当然予

想される重力異常が不明瞭なことが問題となる。伏在カコウ岩モデルの場合は、磁化を担う岩体の分布・形状を任意に変更することで最適モデルを計算しているが、東北日本の太平洋沖では基礎物理探査「南三陸〜鹿島沖」が実施されているので、地震探査から決まる基盤形状を制約条件に用いるべきである。また、残留磁化を無視する根拠とした基礎試錐「空知」は、地磁気異常帯の上には掘削されていない。

図4に、Itoh *et al.* (1998) が「南三陸〜鹿島沖」M86-1 測線について行った重磁力モデリング結果を示す。この測線上の地磁気異常帯にあたる位置に基礎試錐「気仙沼沖」が掘削されているため、前述のように2層準の試料について基盤岩磁化特性を検討した。誘導磁化強度を計算するため、試料ごとに初期磁化率を測定し、スピナー磁力計を用いて残留磁化強度を測定した。その結果、すべての試料について Q_n 比は1より大きく (図4A)、残留磁化の寄与が無視できないことがわかった。さらに段階熱消磁実験を行い、残留磁化が単一の安定な成分からなることを確認した (図4B)。これらに基づいて二次元モデリングを行ったところ、対象測線の基盤岩

図4 基礎物理探査「南三陸～鹿島沖」M86-1 測線における磁力(上段)・重力(中段)モデリング (Itoh *et al.* (1998) を一部改変)

地下構造モデル(下段)の記号は、Dec=磁化偏角(°)、Inc=磁化伏角(°)、J=磁化強度(A/m)、D=比重(g/cm³)。Aは磁化測定コア試料のQn比。Bは段階的熱消磁実験の結果をベクトル投影図(黒丸は水平面、白丸は垂直面への投影、各ベクトル終点に付した数字は消磁温度)で示したもの。コアは定方位ではないため、任意の垂直面に対して作図されている。

は大部分が2.6程度の比重を持ちカコウ岩質と考えられること、基盤岩の磁化方向は偏角-90°(西向き)、伏角30°で最適モデルが得られることがわかった。

ここで注意しなければならないのは、南北に伸びる地磁気異常帯を扱っているため、磁化の南北成分の大きさについては議論できない。したがって、南北成分が無視できない場合は、モデルより実際の偏角・伏角は小さくなる。言いかえると、30°というのは基盤岩の持つ残留磁化伏角の最大値である。

通常、カコウ岩などの深成岩はゆっくりと冷却し、残留磁化を獲得する期間に何度も地球磁場反転が生じる。そのため、一般には反対方向の磁化が打ち消しあって全体としては磁化が発現しないが、「気仙沼沖」の基盤岩試料から得られた放射年代(Itoh *et al.*, 1998)から、東北日本前弧の基盤岩は白亜紀の非常に長い正磁極期(C 34n, 84-120Ma; Gradstein *et al.*, 1995)に形成され、

一様な磁化を獲得したと考えることができる。いわば特殊なケースであるが、同時期の火成活動は東アジアにおいて普遍的に見られる。そこで地磁気異常解析に基づく堆積盆評価を行う場合、基盤岩磁化モデル構築の根拠を十分に吟味する必要があるだろう。

5.2 九州西方沖

基礎試錐「五島灘」では、厚い安山岩～玄武岩質火山岩類を確認した。これらは基礎物理探査「対馬沖」の磁気探査結果に現れていない。図5のコア試料磁化分析結果を見ると、「五島灘」の火山岩類のQn比は非常に低く磁化強度自体も弱いため、地磁気異常の原因とはならないことがわかる。段階熱消磁実験でも、ベクトル投影図(図5左)の折れ曲がりから複数成分が存在することがわかり、複雑な磁化獲得履歴が想定される。このように、新鮮な岩体の時は強い磁化を持つ岩石であっても、産状や二次変質の影響によって磁化強度が数けた低

図5 基礎試錐「五島灘」コア試料段階熱消磁結果

ベクトル投影図の書式は図4に同じ。等積投影図(右)の黒丸は下半球, 白丸は上半球への投影(数字は消磁温度)。

下することがあるので, 合理的な解釈のためには試錐コアの磁化分析が重要である。また「気仙沼沖」と比較すると, 「五島灘」掘削地点での地温勾配(図1の坑底温度参照)は, 活発な新第三紀~第四紀火成活動を反映して高くなっている。このため磁化を保持しうる層が薄くなる効果も考慮しなければならない。

6. 地史総合解釈への応用例: 東北日本

6.1 古地磁気層序

基礎試錐や他の試掘坑井では, コアを常時採取するわけではないので, 連続記録が重要な古地磁気層序データとしては扱いにくい。しかし, 生層序・放射年代データなどでコア採取層準の時代が推定されている場合に, 古地磁気極性が有益な情報になる可能性もある。図1の坑井柱状図に, 今回までに得られた古地磁気極性データを添付した。基盤岩試料については, 地層傾斜データが存在しないので, 構造未補正で極性を判断している。基礎

試錐「気仙沼沖」では, 浮遊性有孔虫・石灰質ナノ化石群集から Albian に対比される層準で逆帯磁データが得られている。Albian は全体が長い正帯極期 C34n に対比されているが, 短周期の磁場反転の可能性も示唆されており(Gradstein *et al.*, 1995), 標準地磁気層序の更正時に考慮されるべき結果である。

6.2 テクトニクス

東北日本は, 日本海拡大によってアジア大陸から分離した大陸地殻の断片である。Otofujii *et al.* (1994) は東北日本を剛体ブロックと仮定し(その広がりには前弧の地磁気異常帯で決定しているが, 起源については議論されていない), その時点までに報告された古地磁気データから背弧拡大に伴う反時計回り回転運動の時期と量を見積もった(図6)。そこで示された回転角は, 古地理復元の制約を考えると上限に近い値と言える。しかし, 最近得られている白亜紀の古地磁気データ偏角は, 地磁気極移動の効果を相殺しても, 大きすぎる傾向にある。例

図6 東北日本北上帯の古地磁気情報

右下は今回得られた相馬沖 SO1 層準 (図1 参照) の平均古地磁気方位 (白四角で表示)。例として示したベクトル投影図の黒丸は水平面, 白丸は南北方向の垂直面への投影で, 傾動補正前の状態。等積投影図は, 伊藤ほか (1998) 以外は傾動補正後の状態で, 黒丸が下半球, 白丸が上半球への投影, 点線のだ円は平均方位の95%信頼円である。

えば, Otofujii *et al.* (1997) は太平洋岸の霞ヶ岳地域 (宮古市南方) に分布する白亜系原地山層の火山岩類から90°近い西偏を得ている。伊藤ほか (1998) は, 釜石鉾山の地下坑道から得られたカコウ閃緑岩試料の古地磁気方位を報告している。この場合は, 構造補正ができないため他のデータと同列に扱えないが, 西偏角はやはり80°近い。今回の古地磁気測定では基礎試錐「相馬沖」の白亜系 (SO1) のみ, 安定磁化成分を分離して平均古地磁気方位を計算することができた (図6)。この結果も, 定方位で構造補正を施した状態で, 大きな西偏を示している。Hoshi and Takahashi (1999) は, 東北日本の古地磁気データをレビューして同様の問題点を指摘した。彼らは, 北上帯から得られている古地磁気偏角が他地域に比べて大きいことに着目し, 仙台湾を横切る構造線を回転ブロック境界として, 背弧拡大時に差動的回転が生じたと述べている。ブロック境界となる断層の存在については, 地震探査データなどに基づいて, 改めて検

討される必要があるだろう。

東北日本から得られている白亜紀古地磁気データのもうひとつの特徴は, 伏角が異常に浅いデータが多いことである。西南日本の同じ時期の平均古地磁気伏角が60°を超える (Otofujii and Matsuda, 1987) ことを考慮すると, -20° (原地山層; Otofujii *et al.*, 1997) や30°以下 (地磁気異常モデル; Itoh *et al.*, 1998) の伏角を示す北上帯およびその前弧域が, 現在と似た地理的配置にあった (すなわち西南日本より北方にあった) とは考えられない。Otsuki (1992) はアジア東縁でのプレート境界の変遷をまとめ, 白亜紀の斜め沈み込みに伴って東北日本内部で左横ずれ断層運動とブロックの再配列が起こったと述べた。前述の大きな古地磁気方位西偏の一部は, 中新世の日本海拡大ではなく白亜紀の左横ずれに伴う変形を意味する可能性もある。東北日本前弧域の中生代以降の堆積盆発達史を明らかにするためには, このような変動に伴って堆積盆の形態そのものが大きく変化することを

理解する必要があるだろう。今回の基礎試錐コア試料の古地磁気測定では、「相馬沖」の1層準からしか方位データが得られなかったが、その伏角は他の北上帯データに比べて明らかに深い。これが畑川構造線(図6)を西限とし、地質学的には一体とみなされる北上帯が複数のブロックに分割されることを意味するのか、白亜紀中に大規模な南北移動が起こったことを意味するのかは、今後さらに信頼しうるデータを蓄積して議論することとしたい。

7. ま と め

東北日本前弧域と九州西方に掘削された4坑の基礎試錐コア試料について、磁化測定を行い、その地質学的意義を議論した。いまだ十分な質・量のデータが得られているとは言えず、さらに検討を行う必要があるが、現時点で次の諸点を指摘できる。

- (1) 通常コアの場合でも、コアの岩相記載と物理検層結果を比較することで、堆積岩類の水平方位を決定できた。層理を持たない火成岩類の基盤についても、コアのフラクチャー分布とFMI (Fullbore Formation MicroImager) などで得られたデータを対比することで、方位付けが可能と考えられる。
- (2) 大深度掘削で得られたコア試料は、強固な二次磁化が付着していることがあるので、入念な磁氣的クリーニングが必要である。
- (3) 基盤岩コア試料が得られている場合は、磁化測定を行って自然残留磁化強度、 Q_n 比などのパラメータを取得することで、地磁気異常解析の不確定要素を減らすことができる。東北日本前弧においては、コア分析から基盤隆起帯の起源を考察し、白亜紀カコウ岩類を主とすることが指摘された。
- (4) 東北日本前弧で得られている古地磁気情報は、東北日本が白亜紀以降に異なる回転・移動を被った複数ブロックの集合体であることを示唆している。基礎試錐で年代と方位が決定されたコア試料の古地磁気データを蓄積することによって、中生代以降の構造発達史や堆積盆評価に資する新たな知見が得られるものと期待される。

謝 辞

本稿を草するにあたり、坑井ならびに物理探査データの公表を許可していただいた通商産業省資源エネルギー庁、石油公団、帝国石油株式会社ならびに石油資源開発株式会社に御礼申し上げます。

石油資源開発株式会社の加藤 進氏と帝国石油株式会社の清水俊秀氏ならびに新潟鉱業所の皆様には、コア試

料採取に際し便宜を図っていただきました。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

引 用 文 献

- Dunlop, D. J. and Özdemir, Ö., 1997 : *Rock Magnetism-Fundamentals and Frontiers*. 573, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Finn, C., 1994 : Aeromagnetic evidence for a buried Early Cretaceous magmatic arc, northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22165-22185.
- Gradstein, F. M., Agterberg, F. P., Ogg, J. G., Hardenbol, J., van Veen, P., Thierry, J. and Huang, Z., 1995 : A Triassic, Jurassic and Cretaceous time scale. In Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. -P. and Hardenbol, J., eds., *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation : SEPM Special Publication No. 54*. SEPM, Tulsa, OK, 95-126.
- Hoshi, H. and Takahashi, M., 1999 : Miocene counterclockwise rotation of Northeast Japan : a review and new model. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 3-16.
- 伊藤康人・天野健治・檀原 徹, 1998 : 古地磁気解析からみた釜石鉱山・栗橋カコウ閃緑岩体の回転運動. 地質雑, **104**, 42-51.
- Itoh, Y., Nagasaki, Y. and Matsuda, T., 1997 : Geophysical and petrological character of the Cretaceous basement on the fore-arc shelf of Northeast Japan. *J. Geol. Soc. Philippines*, **52**, 115-128.
- Itoh, Y., Nagasaki, Y. and Matsuda, T., 1998 : Geomagnetic and gravity modeling of the fore-arc shelf of North-east Japan. *J. Asian Earth Sci.*, **16**, 59-66.
- 木川栄一, 1993 : 海洋ハンレイ岩掘削試料にみられる掘削中に獲得された残留磁化について. 海洋調査技術, **5**, 11-19.
- 長崎康彦, 1997 : 岩石磁気と磁気異常から得られる地質情報—A case study : 東北日本前弧陸棚における岩石磁気測定と地磁気異常解析. 石油の開発と備蓄, **30**, 116-129.
- Otofujii, Y., Kambara, A., Matsuda, T. and Nohda, S., 1994 : Counterclockwise rotation of Northeast Japan : Paleomagnetic evidence for regional extent and timing of rotation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **121**, 503-518.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1987 : Amount of clockwise rotation of Southwest Japan—fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **85**, 289-301.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985 : Paleomagnetic evidence for the Miocene counterclockwise rotation of Northeast Japan—rifting process of the Japan Arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 265-277.
- Otofujii, Y., Sato, K., Iba, N. and Matsuda, T., 1997 :

- Cenozoic northward translation of the Kitakami massif in northeast Japan : paleomagnetic evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **153**, 119-132.
- Otsuki, K., 1992 : Oblique subduction, collision of microcontinents and subduction of oceanic ridge : Their implications on the Cretaceous tectonics of Japan. *The Island Arc*, **1**, 51-63.
- Segawa, J. and Oshima, S., 1975 : Buried Mesozoic volcanic-plutonic fronts of the north-western Pacific island arcs and their tectonic implications. *Nature*, **256**, 15-19.