

3. 地球環境変動：

固体地球ダイナミクスー気候変動ー海洋変動

リンケージの解明

1. はじめに

固体地球のダイナミクスが、山脈の形成や海峡の開閉などに伴う大気・海洋循環変動を通じて、あるいは、化学風化や有機物の埋没、火山活動など炭素循環系の変動に伴う大気中二酸化濃度の変化を通じて、地球の気候や環境に影響を与えて来たのではないかとこの疑問は、昔から繰り返し問われ続けてきた。しかしながらこの問いに対して、いまだに明確な解答が得られているわけではなく、これらの問題は、地球科学第一級の研究課題として解明を待っている。また最近では逆に、地球表層環境の変動が、慣性モーメントの変化などを引き起こし、その結果として固体地球のダイナミクスに影響を受ける可能性も注目を集めている。しかしこの考えも先と同様、個々の現象の因果関係が検証されるには至っていない。

J-DESC 地球環境部会では、IODP においては、深海掘削を用いた地球環境研究の重点が深海底から大陸縁辺部へと移り、先に述べたような造山運動ー気候変動リンケージや、陸域ー海洋環境変動リンケージが重要な研究テーマになると考えている。また、より実現性の高い掘削計画を育ててゆくためには、日本列島がアジア大陸の東縁部に位置するという特性を活かし、また、わが国の得意とする科学技術分野を生かした計画を立てることが必要であると考えている。そこで、こうした視点に立って、以下の3つのテーマに重点を置いて、掘削計画の育成を目指している。

- 1) ヒマラヤーチベットの隆起と、アジア・モンスーンの開始・発達との因果関係の解明。
- 2) 中生代温室世界から新生代氷室世界への転換と、海洋無酸素事変との因果関係の解明。
- 3) 地磁気変動と気候変動のリンケージの解明。

ここでは、上記3つのテーマについて、その目的と意義、検証すべき仮説と検証方法、掘削を実現する上での課題などについて紹介する。

2. ヒマラヤ-チベットの隆起とアジア・モンスーンの開始・発達

2.1 序論

インド亜大陸の衝突とそれに伴うヒマラヤ-チベットの隆起がアジア・モンスーンを発生、強化させたとする仮説（ここではヒマラヤ-モンスーン仮説と呼ぶ）は、造山運動-気候変動リンケージの代表例として、多くの研究者の興味を集めて来た。ヒマラヤ-モンスーン仮説は、気候モデルシミュレーション結果に基づいて 70 年代に提唱され、その後のより詳細な研究で、ヒマラヤ-チベットの隆起が、モンスーン循環の強化や、偏西風蛇行の促進、チベット高原の冷却、などを通じてアジア・モンスーンを強化させた可能性が指摘された。更に、ヒマラヤ-チベットの隆起に伴う侵食により、多量の碎屑物が生産されるようになり、それらが化学風化を受ける事により、大気中の CO₂消費速度が増し、大気中の CO₂濃度を低下させて新生代における地球寒冷化を引き起こしたとする仮説も提唱されている。しかし、当時はこれらの仮説を検証するに足る地質学的データが揃わず、仮説は検証されるに至らなかった。

しかし、こうした状況は、ここ数年変わりつつある。その一つは、主に中国研究者らの調査に基づく北部および東部チベットの隆起時期・様式に関する知見の急増であり、もう一つは、主に黄土台地や日本海堆積物中の風成塵研究に基づく東アジア・モンスーンの発達・変動様式に関する理解の進展、冬期モンスーンおよび偏西風の緯度、強度変動の高時間解像度復元法の確立である。更に、気候モデルの改良に伴って、より複雑なプロセスを含み、空間解像度の高いシミュレーションが可能になって来た。この様に、上記の仮説を検証する下地が急速に整いつつある。

ヒマラヤ-チベットの隆起を引き起こしたインド亜大陸の衝突はまた、オホーツク海、日本海など東アジアを取り巻く縁海の形成に深く関わっている可能性がある。そして、これらの縁海の形成が、モンスーンに象徴される気候変動や、それに伴う水循環変動を通じて、海洋環境を大きく変化させてきた事も、近年、次第に明らかになってきた。特に、縁海と外洋をつなぐ海峡の開閉や、その水深変化は、黒潮や対馬暖流、親潮などの海流の流路や流量に影響を与えてきたし、高緯度縁海表層への淡水供給や冬期の冷却は、そこで形成される中・深層水の密度や生産速度に影響を与えている。つまり縁海の形成や発達は、陸域気候・水循環変動および海峡の位置、深度変動は、表層海流系や中深層水循環を通じて、グローバルな熱輸送や生物地球化学サイクルへ影響を及ぼしてきた可能性が高い。

この様に、東アジアおよびその縁辺海域は、地球環境システムのダイナミクス理解の鍵となる造山運動-気候変動-海洋変動リンケージを研究する上で最適な場所である。

その上、ODP 時代には、余り掘削がなされておらず、しかも日本が有する事前調査データも比較的豊富で地の利がある。そこで J-DESC 地球環境部会では、東アジア縁海域および北西太平洋～西赤道太平洋海域を重点海域の 1 つと見なし、造山運動－気候変動－海洋変動リンケージをキーワードに、東アジア諸国の研究者を積極的に取り込んで、互いに有機的に連携した掘削計画群を作成、実現させてゆく事を目指している。

2.2 検証すべき仮説とその検証法

① ヒマラヤチベットの隆起がアジア・モンスーンを引き起こした可能性の検証：

これは、前述のヒマラヤモンスーン仮説である。この仮説を検証するには、以下の過程の繰り返しによる検討が必要である。

- a) ヒマラヤチベットを一括して取り扱うのではなく、各部位ごとに詳細に隆起の時期・様式を復元する、
- b) アジアモンスーンを、夏期モンスーン、冬期モンスーン、偏西風に分けて、それらの開始・発達の時期、および様式を空間的に詳しく復元する、
- c) 上記 a) の結果を基に、気候モデルシミュレーションによりヒマラヤチベット隆起がアジアモンスーンに与える影響を復元し、b) で復元したモンスーンの発達過程と比較検討して、ヒマラヤチベット隆起とアジア・モンスーンの発達をつなぐメカニズムを推定する、

a) の作業を行なうには、ヒマラヤチベットの各部位から流出する河川から供給される堆積物を掘削し、碎屑物供給速度や碎屑物組成の時代変化を復元する方法が有効だろう。

一方、b) の作業を行なうには、中国内陸部のレス堆積物中の風性起源粒子に加えて、中緯度半遠洋～遠洋堆積物中の風成塵について、その起源や粒度、化学風化度の時間、空間（特に緯度方向）変動を復元する事が有効だろうと考えられる。

② 突然かつ急激な気候変動が、ヒマラヤチベットの隆起によって始まった可能性の検証：

日本海堆積物を利用した風成塵研究は、東アジア・モンスーンが、ダンスガード・サイクルと呼ばれる数百～数千年周期でくり返す全球規模の突然かつ急激な気候変動と連動している事、それが偏西風蛇行経路の振動を伴うらしい事を明らかにしつつある（図 3.1）。偏西風蛇行経路の安定化にはヒマラヤチベットが重要な役割を果たしていると考えられる事から、ヒマラヤチベットの隆起が、偏西風蛇行経路に複数の準安定状態を生み出し、ダンスガードサイクルを発生させる要因になった可能性が出て来た（図 3.2）。そこで、我々は、「ヒマラヤチベットの隆起が偏西風経路に複数の準安定状態を生み

出し、偏西風経路がその間をジャンプする事により、急激な気候変動が励起された」とする仮説を立て、前述のヒマラヤーモンスーン仮説と併せてそれらを検証すべく、掘削計画の立案を行なっている。具体的検証方法は、基本的には①と同じであるが、より高い時間解像度を必要とするため、対象は日本海、オホーツク海、東シナ海など縁海の半遠洋性堆積物に限定されるだろう。

③ 突然かつ急激なアジア・モンスーン変動が、水循環、栄養塩循環を通じて、東アジア縁海、北太平洋の海洋環境、生物相に影響を与えた可能性の検証：

夏期モンスーンが中国にもたらす降水量は、氷期一問氷期変動や突然かつ急激な変動に伴って2倍以上変動したと推定されるが、そのほとんどは、揚子江、黄河などの河川を通じて東シナ海や南シナ海に流出する。こうした淡水流出は、東シナ海や南シナ海的环境に大きな影響を与え、更には、黒潮の流路や流量にまで影響を及ぼした。そうした変動は、例えば琉球列島の珊瑚礁やその生物相にも多大な影響を及ぼしたと考えられる。揚子江、黄河から流出した淡水の約7割は日本海に流入する。日本海における生物基礎生産は、東シナ海から流入する栄養塩および日本海深部から湧昇する栄養塩により維持されているが、前者は夏期モンスーンに、後者は冬期モンスーンに制御されている。日本海表層水の塩分も、こうした淡水流入の影響を受けており、それが、日本海における深層水の形成にも影響を及ぼしたと考えられている。オホーツク海表層水の塩分も、アムール川を始めとする河川の影響を大きく受けている。そして、アムール川の河川流出もまた、夏期モンスーンの影響を受けている。オホーツク海における海水の形成には、表層塩分と、冬期モンスーンによる冷却過程が大きく拘わっており、それらは更に、北太平洋中層水の形成過程に影響を及ぼしている。亜極前線の位置は、海洋環境のみならず、周辺陸域環境にも大きな影響を与える。日本海や北太平洋における亜極前線の位置は、偏西風により規定されていると言われている。ただし、その位置が、過去にどう変動したかについては、必ずしも明らかでない。この様に、東アジア縁海や北太平洋における海洋環境、生物地球化学的循環は、アジア・モンスーン変動に大きく影響されて来たと考えられる。それらは更に、黒潮の流路や亜極前線の位置、北太平洋中層水の形成過程にも影響を与えてきた可能性が高い。

これらの可能性を検証するためには、東アジア縁海域および北西～西赤道太平洋縁海域を緯度方向、経度方向、および深度方向に切るように掘削地点を立体的に配列させ、一つのコアから複数の環境指標を取り出して、それらの時間空間変動を高解像度で復元すると共に、相互の関係を調べる事が重要である。また、陸域や海岸域のデータと比較検討する事も重要である。

ここで述べた①から③の仮説は、相互に関係しあっており、また、個々の仮説の検証のために掘削すべき海域も複数にまたがっている。したがって、検証のためには、海域ごとに、明確かつ達成可能な目標を設定した掘削計画を立案すると共に、海域ごとの掘削計画相互の関係を明確にし、全体を統合的に見渡す視点が必要である。また、海域間での古環境指標データの互換性、データ組み合わせの柔軟性なども重要であり、個々の海域ごとの掘削計画を緩くつなぐ、統合的研究計画が必要と考えられる。

3. 中生代温室世界から新生代氷室世界への転換と海洋無酸素事変

3.1 序論

顕生代は、大規模氷床発達の有無により「氷室期」と「温室期」に大別される。白亜紀～第三紀始新世は最も新しい「温室期」にあたり、白亜紀後期セノマニアン末（約93.5Ma）の最温暖期以降、地球は寒冷化してきた。最温暖期であるセノマニアン末期はまた、世界規模の海洋無酸素事変の発生時期(Oceanic Anoxic Event 2)としても知られ、温室世界と海洋無酸素事変、それに伴う炭素循環様式変化の関係が示唆されている。こうした「温室期」の地球の姿を理解し、「温室期」から「氷室期」への移行過程と要因を明確にすることは、現在温暖化が進行しつつある地球の未来を予測する上でも重要である。

現在、様々なモデルを駆使して、将来の地球環境を予測する試みが行われている。しかし、それら予測に用いられる大気-海洋結合大循環モデル(AGCM)を使って白亜紀の地球気候を推定すると、極域の海水温・気温は、化石データから得られている値より低く復元される。このようなモデルとデータの不一致は、モデルが温室状態の地球を正確に復元できない可能性もしくは、化石データが不正確である可能性を示唆する。この問題を解決するためには、化石データの精度を吟味するとともに、従来の研究で十分なデータが得られていない地域のデータを集め、モデルへより強い制約をかける必要がある。

北西太平洋は白亜紀当時最も広い面積をもつ海域であったにも拘らず、その後の海洋プレートの沈み込みにより当時の堆積物の多くが失われてしまい、白亜紀の海洋環境データが非常に少ない地域である。従って、日本付近の前弧海盆から白亜紀の海洋堆積物を取得することが出来れば、このデータの空白域を埋めると同時に、白亜紀の海洋循環に関する以下の仮説を検証することも可能となる。

3.2 検証すべき仮説とその検証法

① 白亜紀における北太平洋寒冷中（深）層水存在の有無の検証：

温室期と氷室期の気候の違いをつくり出す主要因のひとつとして海洋鉛直循環がある。現在の氷室地球では極域で海水が冷やされること、そして結氷により低塩水が除去されることにより高密度となり、主要な中層水・深層水および底層水が形成されているが（熱-塩循環）、白亜紀の温室地球では、中緯度域での蒸発によって高塩分・高密度海水が形成され、中・深層水のソースになったと考えられている（塩-熱循環）。

セノマニアン/チューロニアン期境界の温暖化極大期以降氷室期に向かう過程で、現在のような寒冷な中・深層水はいつ、どこで、どのように形成され、塩-熱循環から熱塩循環への転換が始まったのだろうか？そして、それは地球全体の寒冷化において、どのような役割を果たしたのだろうか？気候シミュレーション結果、酸素同位体比データ、北海道・サハリンの古生物記録から総合的に判断すると、白亜紀には一時的に北太平洋に中（深）層水のソースがあった可能性が高い。これを白亜紀北太平洋寒冷中（深）層水（North Pacific Cold Intermediate Water: NPCIW）と呼ぶことにする。NPCIWは東アジアの古気候を支配するのみでなく、地球規模で気候に影響を与えたと考えられる。寒暖差の小さい地球における熱輸送の謎に加え、プロキシデータが白亜紀後期の温室期赤道域の水温を現在よりも低く見積もり、モデルは極付近がデータより遥かに低温であったことを示唆するという、白亜紀後期のいくつかの気候パラドクスを解く鍵がNPCIWにある可能性が高い。それにも拘らず、温室期地球における中・深層水の形成・消滅やそれらが白亜紀の気候に与える影響については、これまで十分議論されてこなかった。

そこで、「セノマニアン/チューロニアン境界期以降、北太平洋において NPCIW が間欠的に形成されるようになり、その強化が南北熱輸送や炭素循環変化を通じて温室世界から氷室世界への移行を促進した」という仮説をたて、その検証の準備を進めることが重要となる。具体的には、NPCIW の供給源の入れ代わりによって海洋環境が大きく変化したと推定される東北日本沖を掘削候補地と定め、セノマニアン期からコニアシアン期の堆積物に焦点を当て、底生有孔虫の群集構成や炭素・酸素同位体比を検討する事により、NPCIW の動態が明らかにすることを提案する。もし、NPCIW の存在が実証されれば、更にその形成・消滅および強弱に関する数万～数千万年オーダーの時系列変化を明らかにし、これを世界の他地域における古気候・古海洋記録と高精度で対比することにより、軌道要素変動と無氷河期地球の古気候振動、そして中・深層水の変動の関連を議論し、無氷河期における気候変動のメカニズムを明らかに出来ると期待される。

上記の目的を達成するための有望な掘削地域の1つとして、本州東北地方と日本海溝の間に位置する宮城県女川沖の前弧海盆を挙げることができる。北海道の空知-蝦夷帯から三陸沖にかけては、白亜紀の前弧海盆堆積物が分布している（図 3.3）。良好な酸素

同位体比分析試料を得るためには、白亜紀堆積物より上位の堆積物からの荷重は最小限である必要がある。基礎試錐「気仙沼沖」では、深度約 200m 程度で白亜系に到達しており、白亜系最上部付近ではピトリナイト反射率は 0.2%程度と、有機物熟成度指標が極めて低いため、この堆積盆の白亜系からは古水温、古気候プロキシである酸素・炭素同位体比分析のための良好な保存の有孔虫化石が期待できる（図 3.4）。

4. 地磁気変動と気候変動・地球軌道要素変動のリンケージ

4.1 序論

地球磁場は地球中心核内の流体運動（地磁気ダイナモ）によって生成・維持されていると考えられているが、その詳細なメカニズムは依然として未解明である。地磁気ダイナモは核内で閉じたシステムであり、内核の成長により解放される重力・熱エネルギーにより駆動されているという考えが今まで主流であった。一方で、古気候変動が地磁気変動に影響するかもしれない、つまり地磁気ダイナモのエネルギー源は核外にもあるかもしれないという漠然としたアイデアは 25 年以上前から存在したが、これを実証的に議論するに必要な、数万年～数十万年オーダーの古地磁気変動（ここでは「長周期永年変動」とよぶ）の実態が明らかでなかった。

海底堆積物は、地磁気変動を連続的に記録している可能性のある唯一の物質である。1990 年代になって、堆積物を用いた古地磁気強度の復元に関する研究が急速に進展し、古地磁気強度の長周期永年変動中にミランコビッチ周期が存在する可能性を議論できるようになってきた（図 3.5）。さらに、強度だけでなく方位（伏角）にも長周期永年変動が存在する可能性が提案されている（図 3.6）。

このような状況を踏まえ、地磁気変動と地球軌道要素変化及び古気候変動との関連を解明するため、地球環境部会では、過去約 1000 万年間の古地磁気強度及び伏角の長周期永年変動を深海掘削により明らかにすることを考えている。

4.2 検証すべき仮説とその検証法

① 地磁気変動と気候変動・地球軌道要素変動のリンクの検証：

この仮説は、気候変動にともなう氷床の消長や地球軌道要素変動が、慣性モーメントなどの変化を通じて、核外エネルギー源として地磁気ダイナモに影響を及ぼしたとする考えである。この仮説を、データに基づき検証していくためには、まず、古地磁気変動におけるミランコビッチ周期の存在の確認を行なう必要がある。

地磁気変動にミランコビッチ周期が存在するか否かについては、国際的に激しい議論

が戦わされている。この問題を決着させるためには、以下の問題点を克服することが必要である。

- a) 地磁気以外の変動要因を排除し、真に地磁気変動を反映した高品質な古地磁気記録を得ること。そのためには、適当な堆積速度で均質な磁気特性を持った海底堆積物を用いる必要がある。また、ローカルな地磁気変動の影響を除くため、グローバルなデータセットを整備することが肝要である。
- b) 過去 500~1000 万年間にわたる長期間の連続的古地磁気記録を得ること。変動周期の存否を確認するとともに、ミランコビッチ周期が存在する場合、地球軌道要素の変化そのものが地磁気変動を引き起こしているのか、気候変動を介して地磁気変動に影響するのかを確かめるためには、500 年以上の長さが必要である。氷期・間氷期変動の卓越周期は、約 90 万年前を境に 4 万年周期（地軸の傾き）から 10 万年周期（離心率）へと変化したことが知られている。氷床量変動が地磁気変動を引き起こすのであれば、地磁気変動の卓越周期にも相応の変化が見られるはずである。また、氷床量変動との関係を見るためには、約 260 万年前に北半球氷床が発達したこと、中期中新世以降南極氷床が成長して地球が寒冷化していることなどの気候変動と地磁気変動との関連の有無も調べる必要がある。

② 古地磁気強度と伏角の間の相関に関するモデルの検証：

赤道太平洋のピストンコア試料を用いた古地磁気研究において、古地磁気強度と伏角の間に相関が発見され、これを説明するため「双極子磁場成分の大きさが長周期永年変動する一方、停滞性非双極子磁場成分は変動しない」とするモデルが提案された。このモデルの真偽を確かめることは、地磁気変動にミランコビッチ周期が含まれる場合、核内流体運動のどの部分がそれを担っているかを知る上で重要である。また、停滞性非双極子磁場は、過去 500 万年程度の平均的な磁場の形からその存在が知られているが、これは地磁気ダイナモの境界条件を反映する重要な情報である。

③ "asymmetric sawtooth pattern"仮説の検証：

"asymmetric sawtooth pattern"仮説とは、地磁気逆転直後に古地磁気強度が極大となり以降は次の逆転へ向けて徐々に強度が減少する、そして逆転直後の強度が大きいほど次の逆転までの時間が長いという説である。これが事実であれば、核が逆転直後の状態を長く記憶していることになり、核が長期のメモリーを持たないとする常識を覆す事となる。

4.3 仮説検証のための事前研究

深海掘削により過去 1000 万年間の長周期地磁気永年変動を解明するための掘削点決定のため、古地磁気研究に適した磁気特性を持つ堆積物がどこに存在しているかを明らかにしておく必要がある。特に、従来あまり研究の行われていない次の海域の調査が必要である。

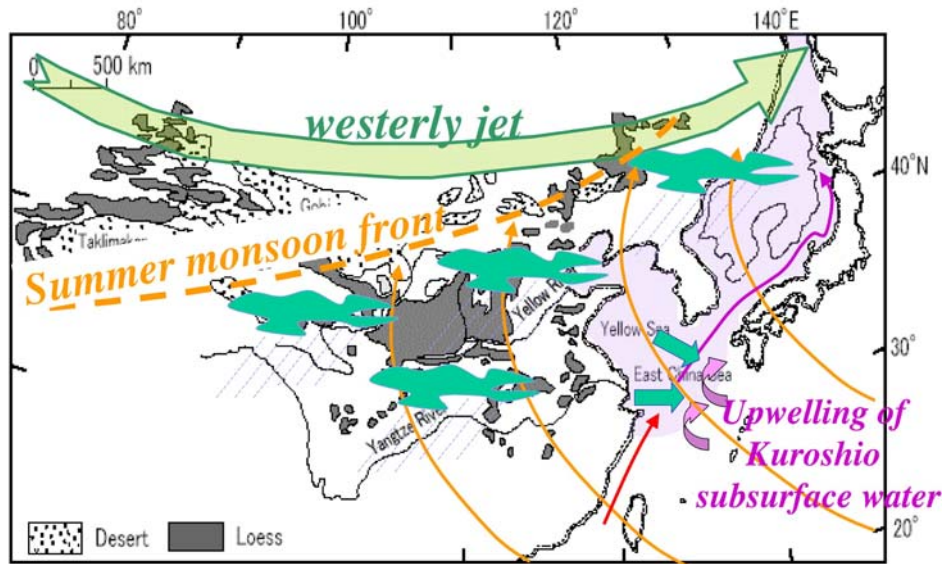
① 南東太平洋海域

停滞性非双極子磁場の存在は、伏角異常（伏角観測値から地心双極子磁場より計算される伏角を引いたもの）として観測される。南東太平洋海域は、正磁極期に正の伏角異常、逆磁極期に負の伏角異常となる特異な海域である(図 3.7)。他の多くの海域では逆に、正磁極期には負、逆磁極期には正の伏角異常となっている。地磁気強度と伏角の相関に関する、「双極子磁場の強度が変動をすることにより、停滞性非双極子磁場の影響の割合が変化して、伏角の変動として現れる」とするモデルが正しければ、南東太平洋と赤道太平洋では古地磁気強度と伏角の永年変動の相関が逆位相になるはずである。これを確かめるため、南東太平洋海域の調査航海が必要である。

② 南インド洋海域

太平洋の殆どの海域は、間氷期に比べ氷期に生物生産量が増加し、有機炭素フラックスが増加して堆積物が還元的となっているが、南インド洋では逆に間氷期に生物生産量が増加していることが知られている。従って、堆積物の酸化／還元に伴う磁性鉱物の変化も、太平洋と南インド洋では逆位相になっていると考えられる。これらの海域から得られる古地磁気強度データと堆積物の磁気的特性を比較することにより、堆積物の性質の変化の影響を評価することができる。

Interstadials (Dark layers deposition)



Stadials (Light layers deposition)

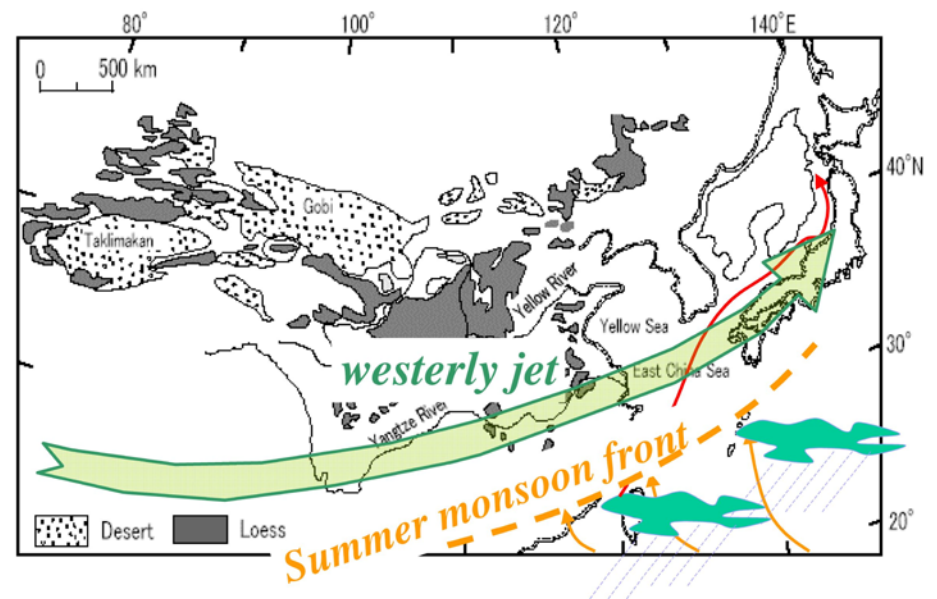


図3.1 ダンスガード・サイクルに伴う東アジア夏期モンスーン変動。ダンスガード・サイクルの亜間氷期には、夏期モンスーンフロントは北上し、揚子江流出量が増して、日本海には、有機物にとんだ暗色層が堆積する。亜氷期は、その逆である。

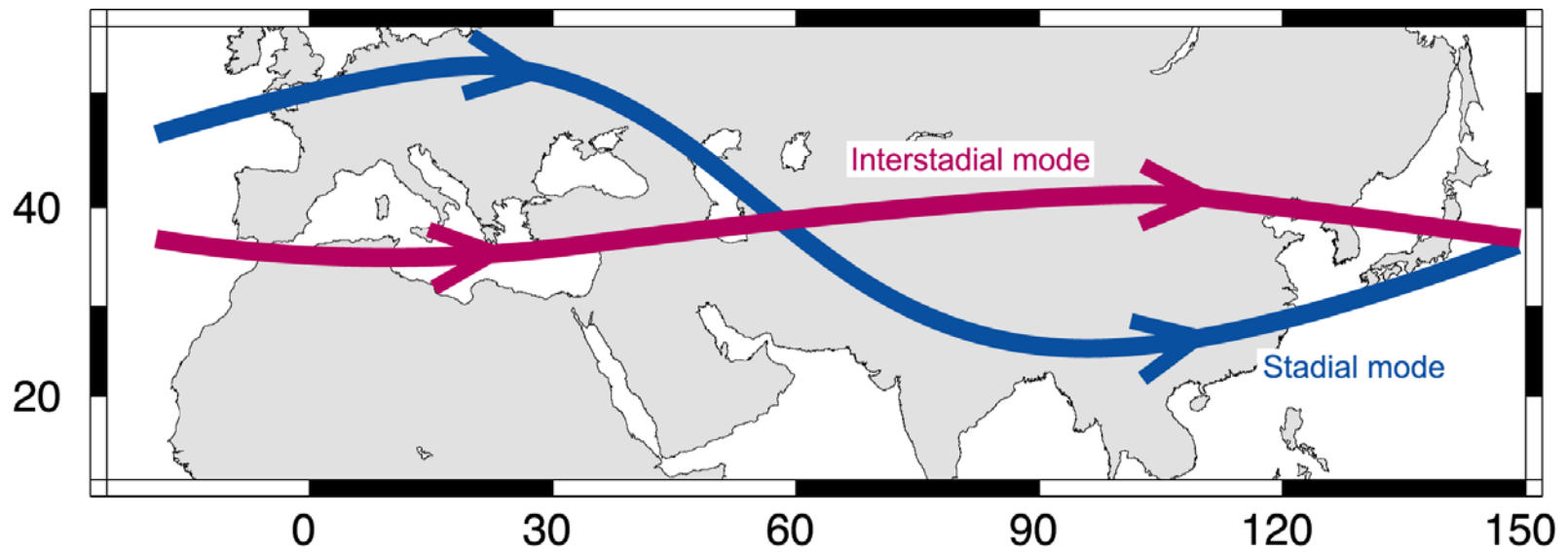


図3.2 ダンスガード・サイクルの亜氷期 (stadials)、亜間氷期(interstadials)に対応する2つの偏西風循環モード。ヒマラヤ - チベット高原の存在が、2つの準安定な循環モードを作り出している。

- 1: south Sakhalin
- 2: Chikappu
- 3: Tenpoku
- 4: Nakatonbetsu
- 5: Enbetsu
- 6: Nakagawa
- 7: Chikubetsu-Haboro
- 8: Rumoi
- 9: Ashibetsu
- 10: Mikasa
- 11: Yubari
- 12: Oyubari
- 13: Hobetsu
- 14: off Hachinohe
- 15: off Sanriku
- 16: off Kuji
- 17: Taneichi
- 18: Kuji
- 19: Kogawa
- 20: Iwaizumi
- 21: Kesenuma
- 22: Soma
- 23: off Iwaki
- 24: off Joban
- 25: Iwaki
- 26: Kashima
- 27: Nakaminato

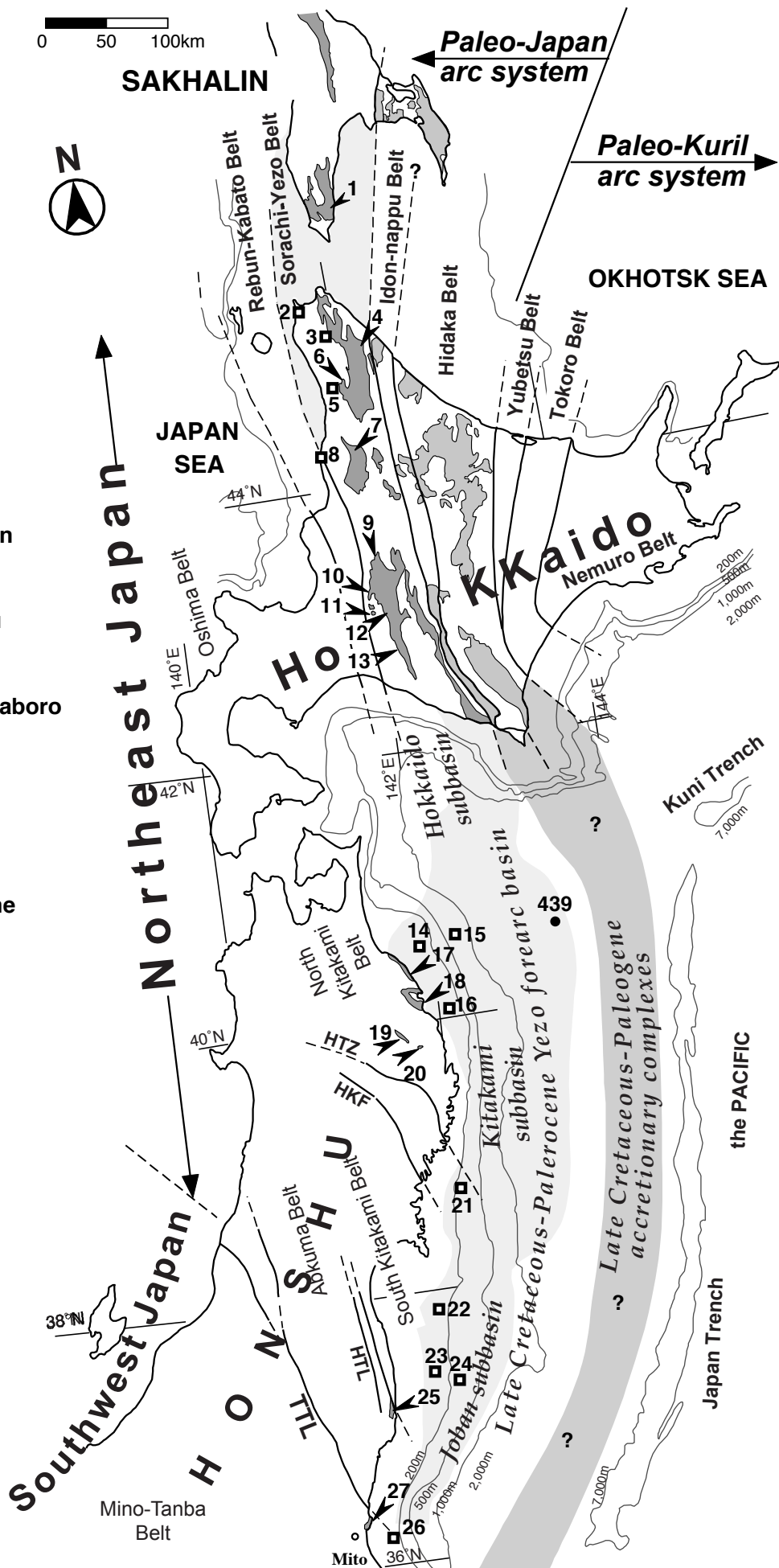


図3.3 北日本太平洋側における白亜紀前弧海盆堆積物の分布。

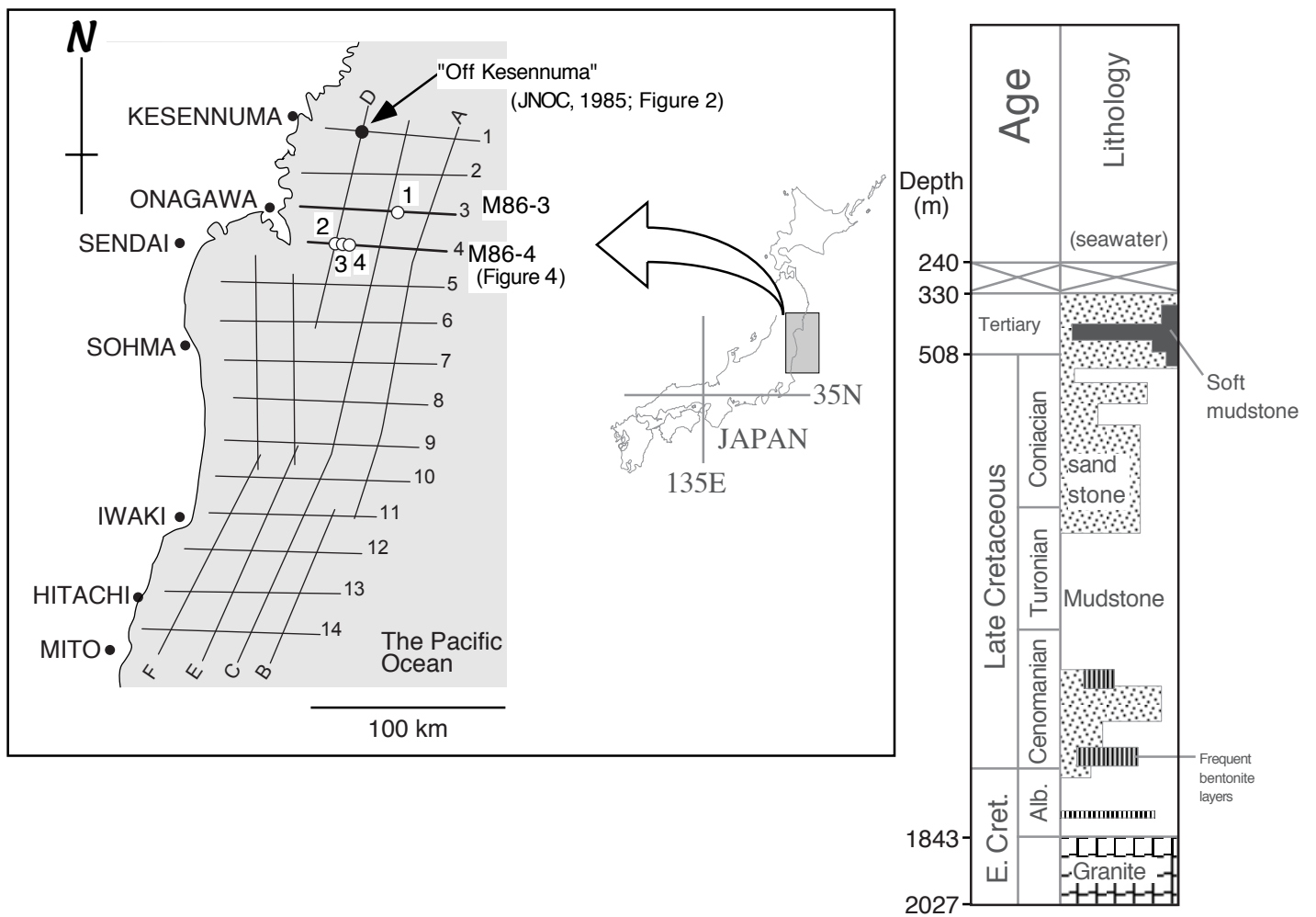


図3.4 基礎試錐「気仙沼沖」における白亜系の深度と岩相。

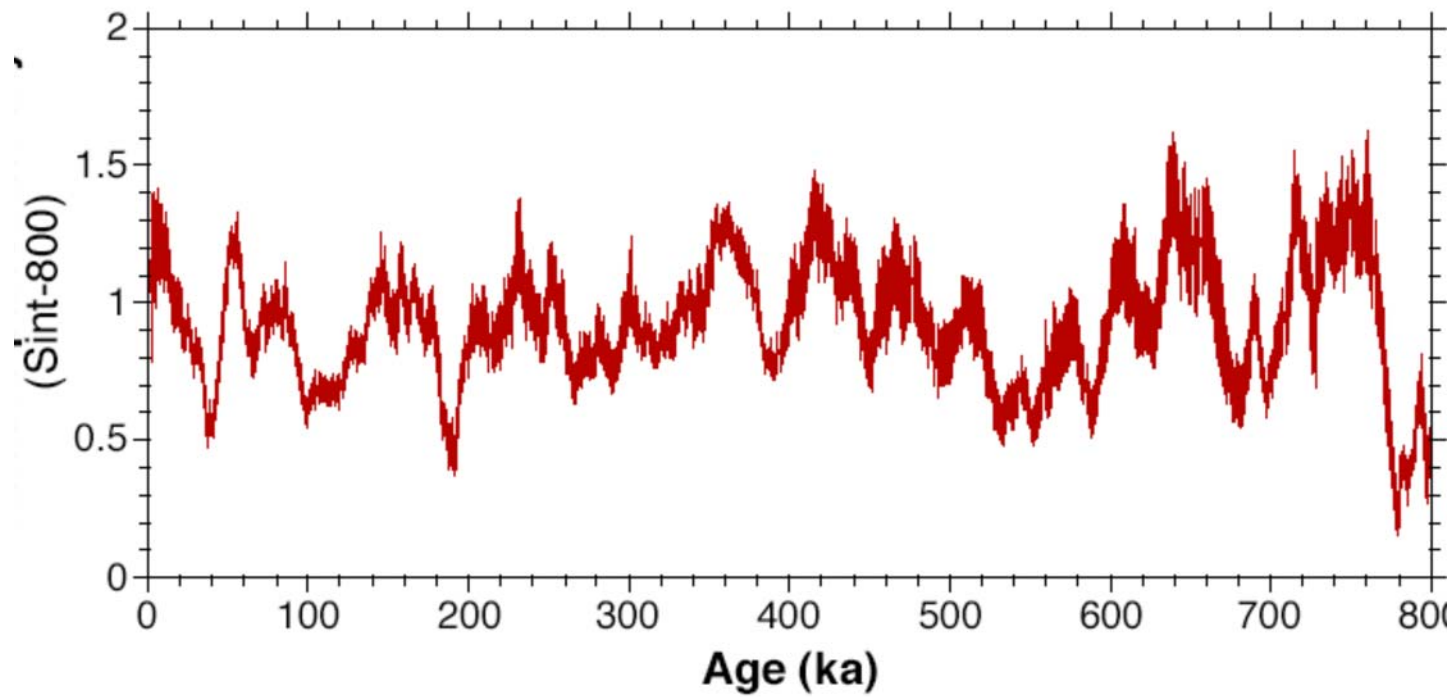


図3.5 過去80万年間の相対的古地磁気強度変動の概要。

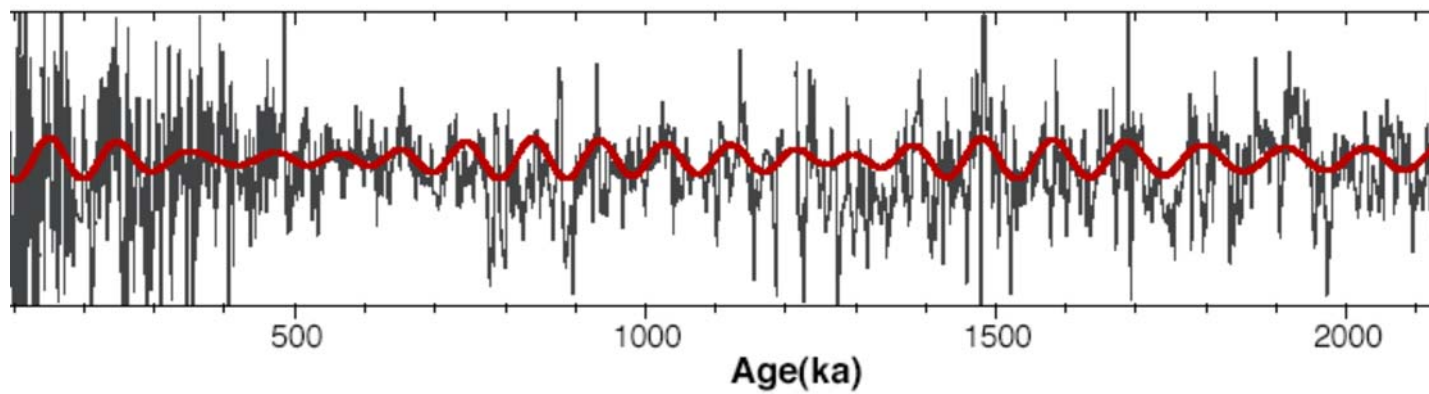
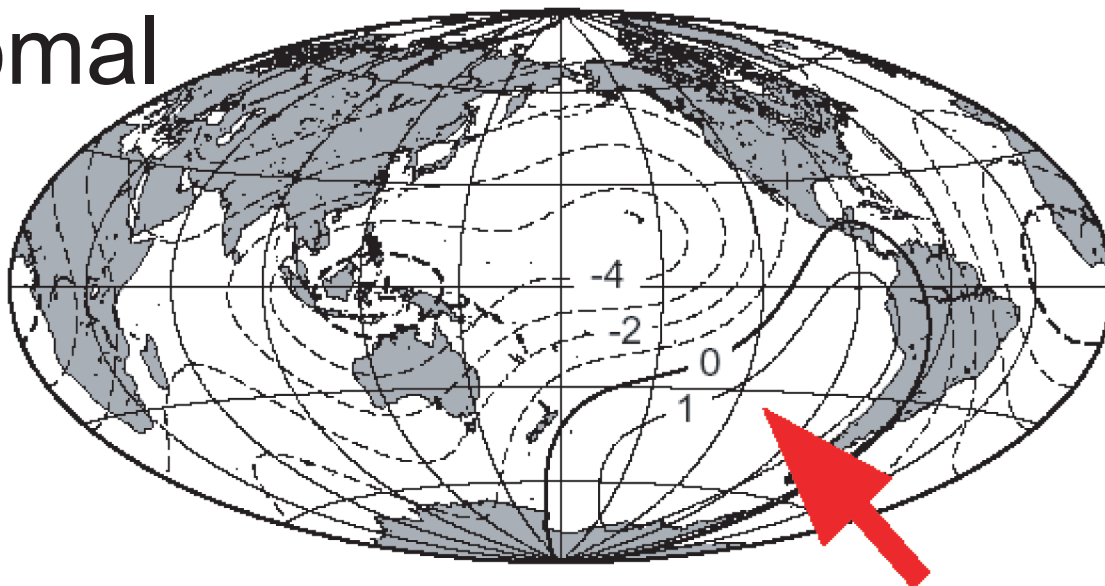


図3.6 西部赤道太平洋の堆積物コアから得られた、地磁気伏角の長周期永年変動。赤線は10万年を中心とするバンドパスフィルターを適用したもの。

Nomal



Reversed

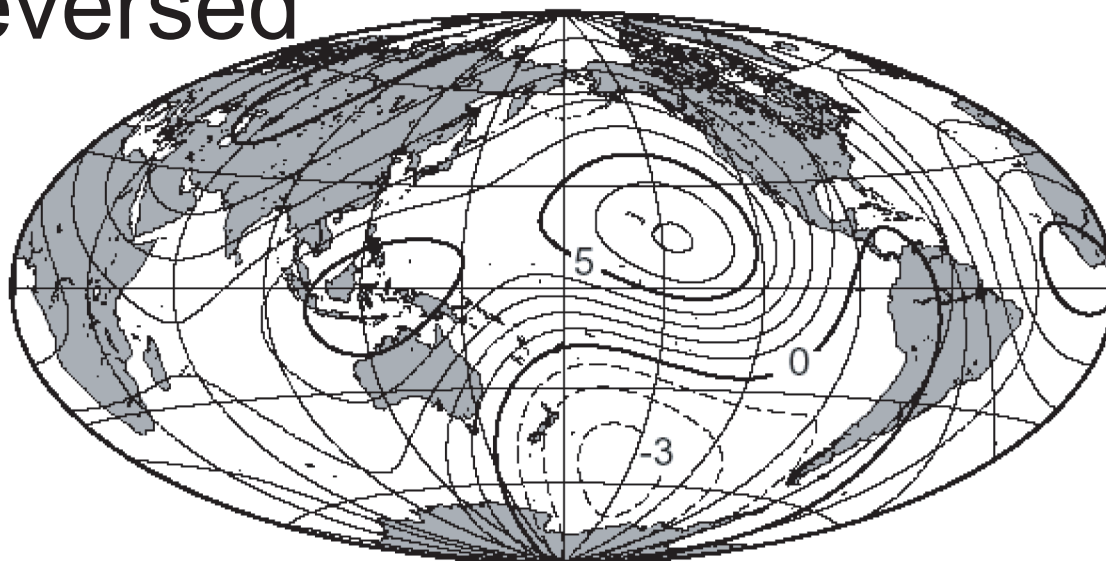


図3.7 過去500万年間の平均的な伏角異常の地理的分布。伏角異常は、伏角観測値から地心双極子磁場より計算される伏角を差し引いたもので、停滞性非双極子磁場に起因する。実線は正、点線は負を示す。コンターは1度間隔。南東太平洋海域(矢印)は、他の海域と伏角異常の符号が反対であることに注意。また、地磁気極性反転に伴い伏角異常の符号が反転する。