



## 緒説

# 南米太平洋沿岸域における珪藻質堆積物(岩)の形成史

Diatomaceous sediments along the Pacific coastal areas of South America  
and their evolution

小泉 格  
Itaru Koizumi

2021 年 2 月 25 日受付. 2021 年 10 月 8 日受理.  
北海道大学名誉教授 (itaru.koi@nifty.com)

**要旨** 南米の太平洋沿岸域は、アフリカ大陸南西部のベンガラ沖とともに世界の二大湧昇域である。ペルーからエクアドルにかけての沖合では、東風とコリオリ力が表層水を西へ転向させて、栄養塩に富んだ深層水が沿岸湧昇流となって湧き上がるのを、植物プランクトン(珪藻)が大量に繁殖して、珪藻質堆積物を形成する。沿岸陸-海域における珪藻質堆積物(岩)の産出層準の地質時代は、全球寒冷化による海水準低下と温度勾配の増強が極-赤道間の海洋循環流と沿岸湧昇流を活発化させた以下の 4 時期に形成された:(1)4000-3600 万年前の全球寒冷化と生物圏の変化をもたらした「始新世末期事件」,(2)2400-1600 万年前の珪藻群集の種組成入れ替えと分化を増強した「中新世前期氷河化」,(3)1400 万年前の漸移的な深層水の寒冷化をもたらした「東南極氷床の成立」,(4)310-250 万年前の中米海路の閉鎖による「北半球氷床の成立」。

キーワード：沿岸湧昇流，海洋循環，海生珪藻群集，始新世末期事件，南極大陸氷床，ヒマラヤ-チベット台地の上昇，中米パナマ海路，北半球氷床

## はじめに

南米太平洋沿岸陸域 (エクアドル, ペルー, チリ) における珪藻化石群集の研究 (Koizumi, 1990, 1992) は、国際海洋掘削計画 (Ocean Drilling Program: ODP) による Leg 112 でペルー沖の湧昇域における始新世以降のプレート沈み込みと海洋循環系の変動 (Suess et al., 1988, 1990) を、さらに Leg 202 ではエクアドル, ペルー, チリの沿岸-沖合における掘削コアの機器分析による高時間分解能の詳細なデータが漸新世以降の気候変動と海洋変動に追加された (Mix et al., 2003; Tiedemann et al. (Eds.), 2007).

これらの結果を導入して、南米太平洋沿岸の陸-海域における始新世以降の海成珪藻

質堆積物(岩)の地質時代と堆積環境を下記の4時期に区分して記述する。

(1) 始新世後期に、南極大陸から南米大陸が分離してドレーク海路、さらにオーストラリアが北東へ移動してタスマン海路が形成されて成立した「南極循環流」(Exon et al., 2004)は、極-赤道間の海洋循環を活発化させて沿岸湧昇流を引き起こした。全球寒冷化と生物圏の変化は「始新世末期事件; Terminal Eocene Event」と呼ばれ(Wolfe, 1978), Chira 層準の珪藻質堆積物が形成された。(2) 2300 万年前の漸新世と中新世の境界において、短期間の激しい氷河化「中新世前期 (Mi-1) 氷河化」(Miller et al., 1991; Wright and Miller, 1992) が起こり、珪藻群集における種群の入れ替えと分化が増強されて、Caballas 層準の珪藻質堆積物が形成された。(3) 始新世中期-中新世中期におけるプレートの沈み込みによって形成された大陸棚の後方(大陸棚側)と前方(海側)の縁辺域に、中新世中期の東南極氷床の成立(Kennett, 1980; Zachos et al., 2001)による漸移的な深層水の寒冷化が大量の有機物を含む半遠洋性泥岩-珪藻土(Pisco 層準)をもたらした(Dunbar et al., 1990)。(4) 鮮新世後期(310–250 万年前)に形成された北半球氷床(Zachos et al., 2001)が Mejillones 層準と Tablazo 層準をもたらした。

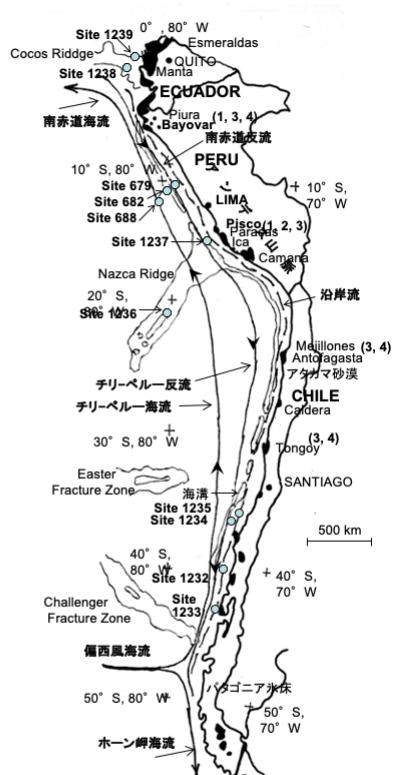


写真 1 チリとアルゼンチンの国境南方域に広がる南パタゴニア(Patagonia)大氷原は、氷床として南極やアルゼンチンに次ぐ規模である(1990 年 11 月撮影)。

図 1 南米太平洋沿岸域における海流系と国際掘削計画 Legs 112 と 202 の掘削地点(Sites), および主な新生代層の分布域(黒地)。(数字): 硅藻質堆積物(岩)の産出層準。

## 1. 南米太平洋沿岸域の海洋環境

南米の太平洋沿岸域は、アフリカ大陸南西部のベンガラ沖とともに世界の二大湧昇域である。ペルーからエクアドルにかけての沖合では、栄養塩に富んだ深層水が沿岸湧昇流となって湧き上るので、植物プランクトン(珪藻)が大量に繁殖してアンチョビー(カタクチイワシ)の世界的な豊漁場となっている。

この湧昇流は東部境界流に起因する。チリ南部の沖合では偏西風(流)が環南極循環流の寒冷水を南米大陸に衝突させて、南方へ流れるホーン岬海流と北方へ流れるチリペルー海流とに分離している(図1, 写真1)。偏西風は沿岸山脈やアンデス山脈へ激しい降雨をもたらし、風化作用によって生成された碎屑粒子は河川によって海洋へ流入する。寒冷で低塩分のチリペルー海流はチリから北方のエクアドル沖合へ移流するが(写真2), 南米沖では貿易風による東風とコリオリ力が表層水を西へ転向させるので、表層水は酸素に欠乏しているが、磷酸塩や硝酸塩などの栄養塩が豊富な表層下の寒冷水が湧昇して、生物(珪藻)の生産を盛んにする。それ故、沿岸湧昇流が生成する海底堆積物は大量の有機物を含有するシルトや磷酸土、苦灰土、珪藻土などである(写真3, 4; Suess et al., 1988; Mix et al., 2003)。



写真2 上：チリ北部のアントファガスタ(Antofagasta)付近のアタカマ(Atacama)砂漠は、南米大陸の西側沖を流れる寒流の海面付近を吹く偏西風の風下の大陸に形成される海岸砂漠である。寒流の上空で偏西風が冷却され飽和水蒸気量に達して、霧が発生して地表の岩石類を風化浸食した結果である(1986年12月撮影)。  
下：ペルー南部イカ(Ica)の高温乾燥地帯にある天日塩田(1990年12月撮影)。



写真3 アントファガスタ(Antofagasta)北60kmのメヒヨネス(Mejillones)海岸崖は、下部-中部の生碎砂(岩)と上部の珪藻土(中新統下部-中部と鮮新統、更新統)から構成されている(1986年12月撮影; Koizumi, 1990)。



写真4 チリ北部のアントファガスタ(Antofagasta)付近に分布するメヒヨネス(Mejillones)層は中新統下部-更新統であるが、典型的な珪藻土(写真の高さ約4m)は沿岸湧昇流によって生成された鮮新統である(1986年12月撮影)。

## 2. 南米太平洋沿岸陸域の珪藻土-珪藻質堆積物(岩)

太平洋地域における浮遊性微化石の基準面の同時性と時間的ずれの時空分布、および地史的事件との関連性の把握と、原因の究明を陸上の地層と海底堆積物(岩)とを統合して、検討することを目的とした「IGCP (International Geological Correlation Project: 国際地質対比計画) 246 (Pacific Neogene Events in Time and Space: 太平洋地域新第三紀事件の時空分布) 実施期間: 1986-1992 年」のプロジェクト代表者としての土 隆一を代表者とする文部省国際学術研究 (1987 年: 環太平洋地域新生界の対比と編年, 1988-1989 年: 日本と南米太平洋側の新第三紀地質学的事件の対比, 1990-1991 年: 日本と南米太平洋側の新第三紀イベントの年代と性格) による南米太平洋沿岸における 3 回の現地 (コロンビア、エクアドル、ペルー、チリ) 調査と試料採取 (1986 年, 1988 年, 1990 年), 室内研究, 各種会議の成果 (Tsuchi et al., 1988a, 1988b, 1988c, 1990a, 1990b, 1992a, 1992b) によって、南米太平洋沿岸陸域における珪藻質堆積物(岩)の产出層準の地質時代は、全球寒冷化による海水準低下と温度勾配の増強が極-赤道間の海洋循環流と沿岸湧昇流を活発化させた 4 時期に形成されたことが判明した (Koizumi, 1992; 図 2)。

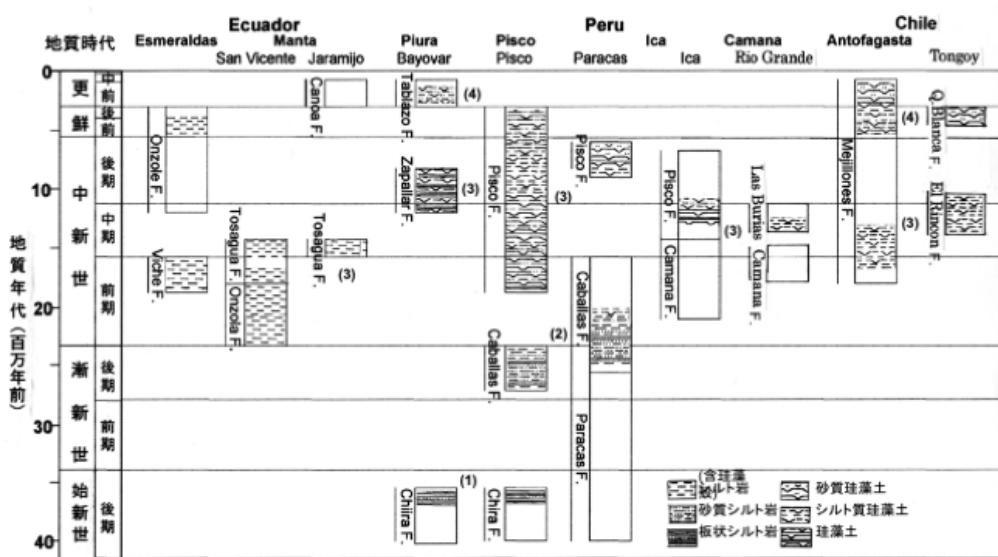


図 2 南米太平洋沿岸域(エクアドル、ペルー、チリ)における海成第三系の岩相と地質年代. (数字): 珪藻質堆積物(岩)の产出層準.

- (1) ペルー最北部のバヨバル (Bayovar) 海岸と南部のピスコ (Pisco) に分布する始新世後期 (4000-3600 万年前) のチラ (Chira) 層は、全球寒冷化による海水準低下、海洋循環の強化と生物圏の変化をもたらした「始新世末期事件」(Wolf, 1978) による.
- (2) ペルーのピスコ-パラカス (Pisco-Paracas) におけるカバラス (Caballas) 層は珪藻質堆積物(岩)を挟在した石灰質シルト岩と砂岩であり、浮遊性有孔虫と珪藻の化石層

序に基づいて、漸新世後期-中新世前期(2800-1600万年前)である(Tsuchi et al., 1988b). 珪藻化石群集は熱帯-赤道の種群である。(3)エクアドル、ペルー、チリにおける中新世前-中期(2000-1400万年前)の珪藻質堆積物(岩)(写真3,4)は中緯度域に分布する温暖種と寒冷種を含んだ珪藻化石群集である(Koizumi, 1992). ピウラ(Piura)南のザパラール(Zapallar)層の珪藻土は中新世中-後期(1140-680万年前)である。(4)ピスコ-イカ(Pisco-Ica)におけるピスコ層は中新世後期-更新世の珪藻土-珪藻質堆積物(岩)であり(写真5), ペルーのバイオバールにおけるタブラゾ(Tablez)層は更新世、チリのアントファガスタ(Antofagasta)におけるメヒヨネス(Mejillones)層は鮮新世-更新世、コルデラ(Caldera)のキューブランカ(Q. Blanca)層は鮮新世である。これらの珪藻質堆積物(岩)は沿岸湧昇流の珪藻種群である*Chaetoceros*属や*Thalassionema*属を大量に含んでいる。



写真5 ペルーのピスコ(Pisco)川北岸沿いのPisco層は、厚い珪藻質シルト岩が砂岩と珪藻土(岩)の互層に変化した後、シルト質で砂質珪藻土(岩)に移行する中新統-鮮新統である(1990年12月撮影)。

Dunbar et al. (1990)によれば、ペルー南部域(Pisco)の新生代に堆積した地層は海進期に形成された始新世後期のロス・チョロス(Los Choros)層と始新世後期-漸新世後期のユマキー(Yumaque)層から構成されるカバラス(Caballas)層群、漸新世後期-中新世中期のチルカタイ(Chicatay)層、中新世後期-鮮新世のピスコ(Pisco)層などから構成されており、白亜系上部/始新統中部、漸新統下部/上部、中新統中部、鮮新統上部、更新統/現世などは不整合関係である。生物源堆積物(岩)は4000-3600万年前、2400-1600万年前、1100-300万年前に形成されており、珪藻土-珪藻質堆積物(岩)は基盤岩に粗粒堆積物がアバットした海進-海退周期の最上部(海進期)に位置している。

### 3. 南米太平洋沿岸-沖合における海底堆積物(岩)

野外調査と地表試料の採集は、地表の風化や浸食作用による露頭の状況によって著しい影響を受けた結果であるので、地層の歴史を完全に記録していないために、地史の全部を復元できない。地層から歴史を解読するためには、地層を連続的に掘削して柱状試料(コア)として回収する必要がある。さらに、掘削孔は地層の物理学的性質を現場計測による孔内検層として活用できる。

新生代の古海洋変動史は、1968年に開発された以降に改善や改良が加えられた深海掘削計画(DSDP-ODP-IODP)が世界中の深海底から回収した掘削コアをさまざまな方法によって分析し解析した結果に基づいている。国際海洋掘削計画(ODP)のLeg

112(1986年)は、ペルー大陸縁辺域における10地点 (Sites 679–688) の掘削によって、プレートの沈み込みによる構造運動と海洋変動が沿岸湧昇流におよぼした結果を検証して、それらが始新世以降に起こったことを立証した (Suess et al., 1988, 1990). 珪藻質堆積物の堆積は中新世中期の1400万年前以降であり (図3,4), 東南極氷床の成立によって増強された温度勾配が極-赤道間の海洋循環と沿岸湧昇流を活発化させて、形成されたことを実証した。

ODP第2期 (Legs 151–176) 以降に地球物理学的手法による地震波探査と各種の物性検層、掘削地点における現場データの長期間収集、などが活発化して、時系列上の数値データに基づいた過去から現在への解析と未来予測が指向されるようになった。最終の第3期 (Legs 177–210) では、(1) 太陽活動と地球表層の大気-地表-氷床-海洋システムにおける相互作用を解明すること、(2) 掘削孔内に計測機器を設置して、地球のさまざまなプロセスを長期間モニターすること、(3) 地球内部の形成モデルを検証すること、などが課題とされた。

南米太平洋沿岸-沖合のチリ、ペルー、エクアドル、コロンビアにおけるODPLeg 202(2002年)では、これらの課題を解決するために11地点 (Sites 1232-1242) が掘削された結果 (Mix et al., 2003; Tiedemann et al., 2007), (1) 100万年スケールの構造運動では、中新世後期 (700万年前) 以降のアンデス山脈の上昇によって、アタカマ砂漠からの陸源碎屑物が増加するとともに、海洋の寒冷化が起こったことや鮮新世前期 (530-400万年前) の中米海路の閉鎖によって起こった熱帯域における水温躍層の浅化は鮮新世後期 (370万年前) に表層の塩分濃度を著しく低下させたことを明らかにした。 (2) 10万年周期の気候変動 (ミランコビッチ サイクル) では、中新世中期の1470-1270万年前に東南極氷床の成立によって寒冷化が顕著となり、更新世中期 (120-70万年前) 以降の北半球氷床の形成による第四紀氷河時代に先駆けているとした。 (3) 鮮新世-更新世における気候変動と生地化学システム (酸素、栄養塩、炭素) との関連は未解決の課題である。

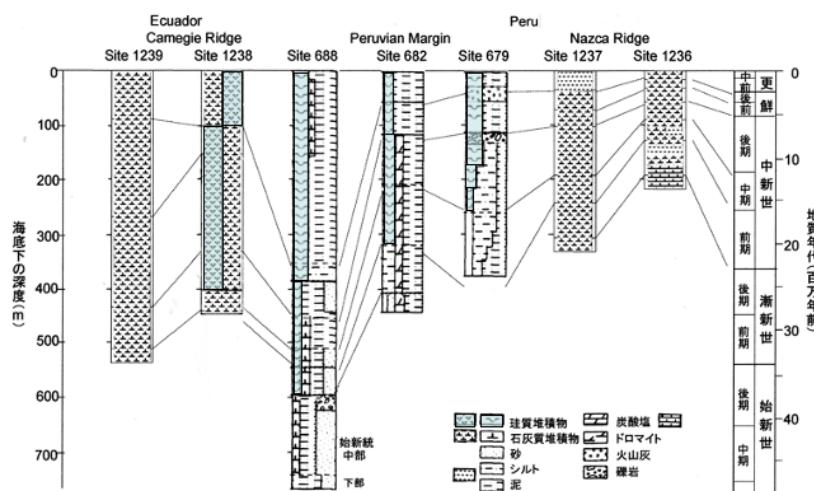


図3 南米太平洋沿岸-沖合域における国際掘削計画 (ODP) による海成第三系の岩相と地質年代 (ペルーのLeg 112, エクアドルとペルーのLeg 202)。

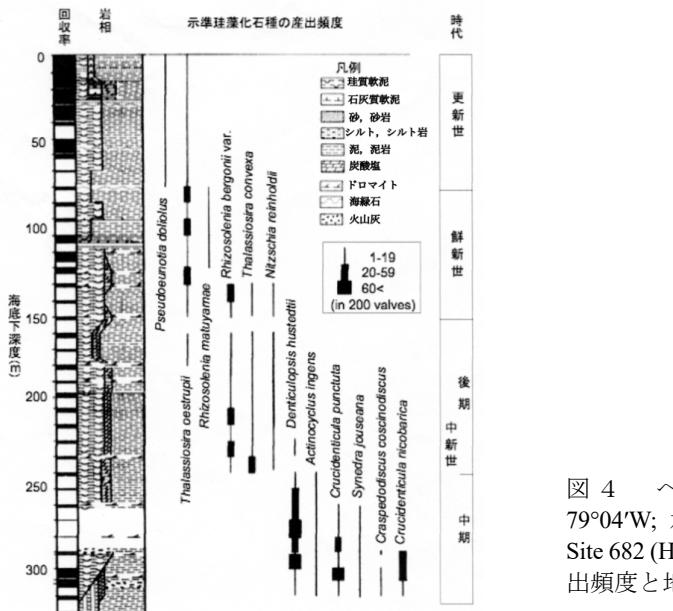


図 4 ペルー沖のリマ海盆西端 ( $11^{\circ}16'S$ ,  $79^{\circ}04'W$ ; 水深 3788.5m) に位置する ODP Leg 112 Site 682 (Hole 682A) における示準珪藻化石種の産出頻度と地質年代.

掘削コアの岩相記載は Initial Report (Mix et al., 2003) の Site 每の記述と Core Descriptions に記載されている。チリ南方沖合の Site 1233 (水深 838 m) は更新世の nannofossil clay, Site 1232 (水深 4069 m) は更新世の silty clay, サンチャゴ (Santiago) 南の Site 1234 (水深 1015 m) は更新世の nannofossil silty clay, Site 1235 (水深 489 m) は更新世の silty clay である。エクアドル マンタ (Manta) 沖合の Site 1238 では、海底下 100 m (更新統) まで nannofossil diatom ooze, 100-400 m (下部鮮新統-上部中新統) は diatom nannofossil ooze であり、珪藻化石と有機炭素の含有量が増加している。400-431 m は nannofossil ooze である (図 3)。

#### 4. 海生珪藻群集

珪藻は白亜紀に出現した後、新生代を通じて進化したので、海生珪藻種群の生態的重要性と生産性プロキシとしての多様度が高くなり (Falkowski et al., 2004), 減新世前期 (O1-1) と中新世中期 (Middle Miocene Climatic Optimum; MMCO) に著しく増加した (Lazarus et al., 2014; 図 5)。中新世と鮮新世の境界付近で、赤道太平洋におけるオパール沈積量が減少して、南極海で著しく増加した。この太平洋から南極海への「シリカシフト」(Keller and Barron, 1983)が、現在の南極海における主要な生物起源オパールの始まりである。新生代の海洋における一次生産の高い高緯度域群集の海域が拡散して発達することが珪藻の多様度を高める要因となっており、珪藻の多様度は全球気候変動のプロキシである酸素同位体比と対応している。

始新世前-中期のプレート運動による海洋底拡大がノルウェー-グリーンランド海を構造的に分断して、始新世から漸新世への移行期に北大西洋と北極海が開口した

(Poag, 1987). ノルウェー-グリーンランド海やロックオールにおいて形成された寒冷な表層水が沈降して、新たな底層水(北大西洋深層水)が北方海域で形成された。さらに、北東大西洋やカリブ海の火成活動に起源するシリカが底層水に含有されて、北アメリカ海盆では始新世前中期と中新世中期の高海水準期に、ニュージャージー沖の大陸棚-斜面境界に沿う湧昇前線が珪質生物の生産を増強させている (Sigurdsson et al., 2000)。

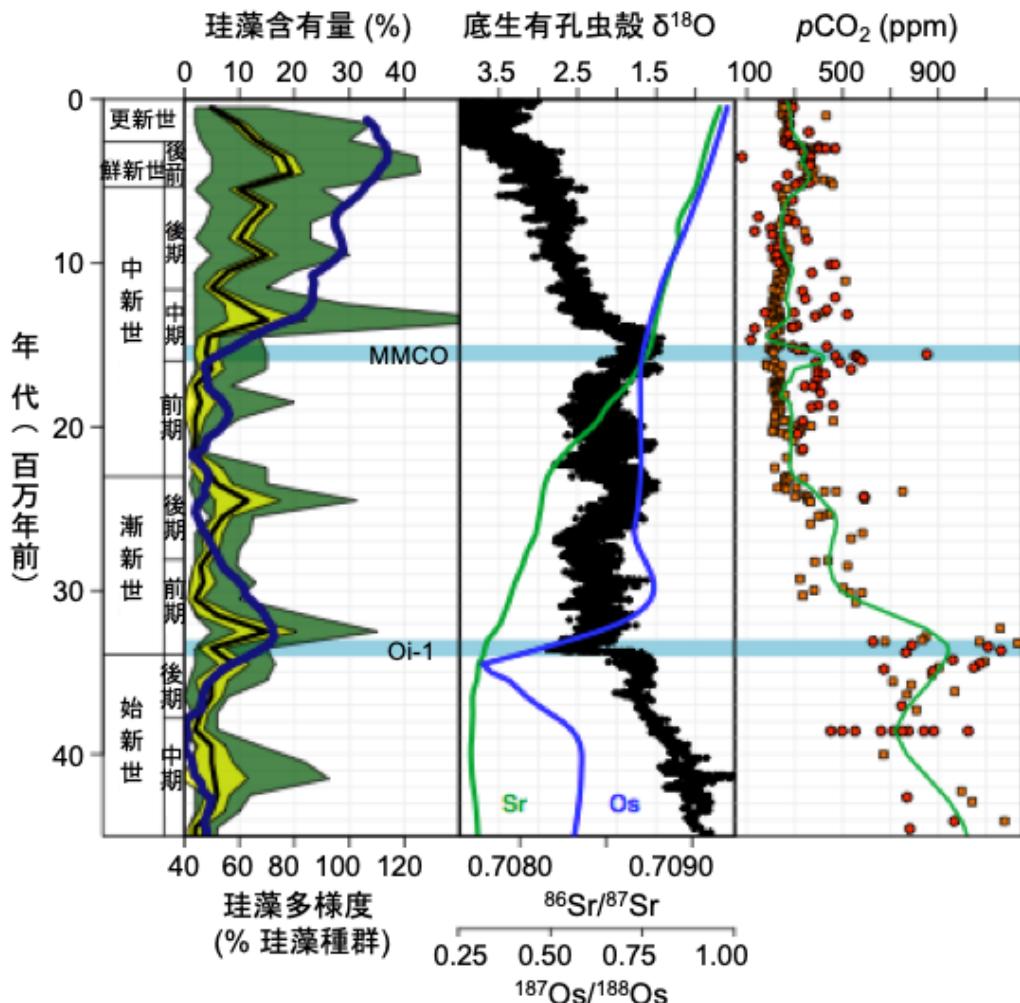


図5 海生珪藻化石群集に基づく海洋プロキシと気候プロキシの比較 (Renaudie, 2016). 左: 青太線は珪藻の多様度を示す (Lazarus et al., 2014). 中: 黒は底生有孔虫殻 (*Cibicidoidea* spp.) の  $\delta^{18}\text{O}$  (Zachos et al., 2008). 緑はレスにおけるストロンチウム (Sr), 青はオスミウム (Os) の同位体データ (Ravizza and Zachos, 2003) の回帰曲線 (Cleveland et al., 1992). 右: 四角は植物プランクトンのプロキシ, 丸は他のプロキシ (Beerling and Royer, 2011). 緑線はそれらのレスにおける回帰曲線 (Cleveland et al., 1992). Oi-1: 漸新世前期氷河化. MMCO: 中新世中期気候最良期.

ヒマラヤ-チベット山地はインド-ユーラシア大陸の衝突によって 5000 万年前に上昇し始めた。またそれはインドとアジアのモンスーンや北半球氷河化とに深く関連している (図 6; Zhisheng et al., 2001; Zheng et al., 2004).

南極半島と南米が始新世後期 (3800 万年前) に分離してドレーク海路が開口した後, 始新世-漸新世境界 (3400 万年前) に南極大陸とオーストラリアとの間のタスマン海

路に深層水が通過し始めた (Kennett, 1980) ので、深層水による寒冷化と表層水が南極大陸へ水分を供給した結果、東南極氷床が形成されて、全球的な大気と海水の循環が強化された (図 6; Exxon et al., 2004).

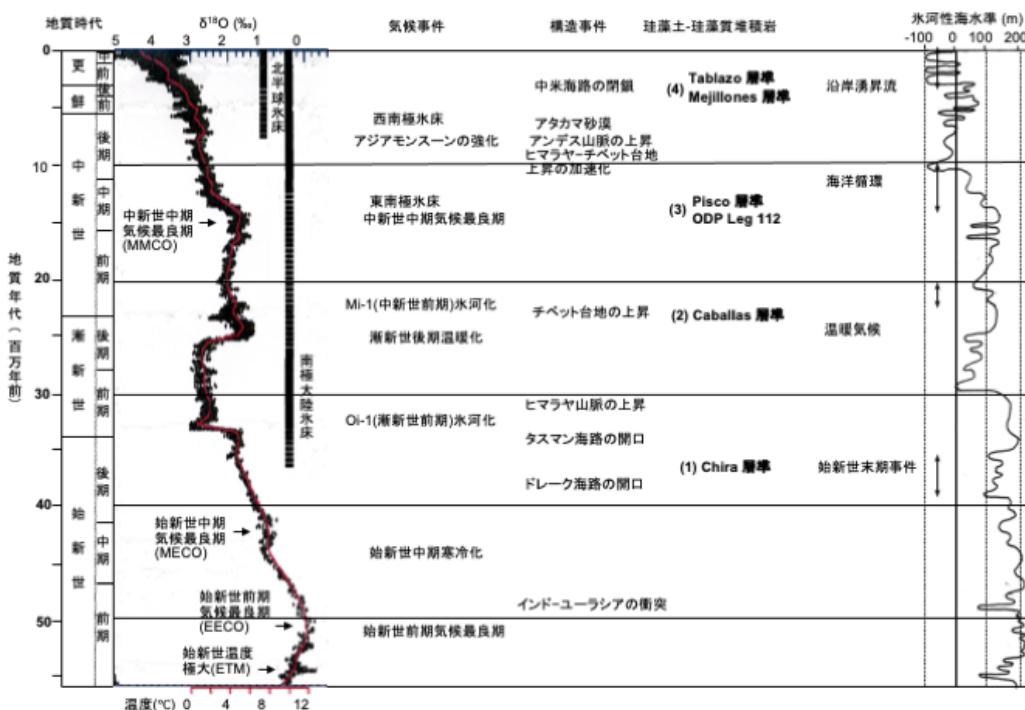


図6 南米太平洋沿岸陸域（エクアドル、ペルー、チリ）、および国際掘削計画（ODP）によるペルー沖合（Leg 112）とエクアドル、ペルー、チリ沖合（Leg 202）における海成第三系（珪藻土-珪藻質堆積岩）の地質時代と堆積環境史。DSDP と ODP による水深 1000 m 以深の軟泥とチョークに含まれる底生有孔虫（*Cibicidoidea* spp.）殻の  $\delta^{18}\text{O}$  記録に基づく気候変動と構造事件（Zachos et al., 1993, 2001; Tiedemann et al., 2007）。5 点移動平均値でスムージングした  $\delta^{18}\text{O}$  の温度尺度（下部）は 3500 万年前以前の南極大陸氷河がない海洋での 1.2%のみに適応される。それ以降の 70%以上は両極と北半球の氷河量を反映している。南極大陸と北半球の氷床における破線は 50%以上の氷河収斂、黒線は拡大を示す。水河性海水準変動は Haq et al., (1987) による。（数字）：珪藻質堆積物（岩）の産出層準。

風化作用によって抽出されたシリカと栄養塩が陸上から海洋へ流出して、海水中で溶解した海洋性シリカとなる。浮遊性珪藻が海水中の海洋性シリカから堆積性シリカ（オパール）を生成する (Tréguer and Pondaven, 2000) ので、珪藻は新生代後期の海洋で主役となった。珪藻は第一次生産者として、海洋生産量の約半分 (全球第一次生産量の 1/4) を賄なっており、海洋生物による炭素ポンプの最大成分である (Smetacek, 1999; Cermeño et al., 2008; Renaudie, 2016)。さらに、食物連鎖によって動物プランクトンや魚類を繁殖させ、深海へ有機炭素とシリカを供給して、全球の化学風化作用を均衡させている。

シリカが大気中の二酸化炭素( $\text{CO}_2$ ) に作用して、植物プランクトンの種組成を支配しているが、鉄や微量栄養塩は植物プランクトンの一次生産に不可欠である。表層水に溶解した  $\text{CO}_2$  は植物プランクトンにとって必須であり、硝酸塩や磷酸塩、珪酸塩（溶解したシリカ）などの栄養塩と表層水で限定的に利用される希元素は光合成作用によって吸収される。 $\text{CO}_2$  は呼吸作用と微生物活動の後に、大気へ放出されるので、均衡

となる。しかし、光合成作用による植物プランクトンの遺骸や有機物質の大部分が表層から表層下へ沈降すると、炭素は海水中に保有されて大気へ還元されない（生物炭素ポンプ）。

風化作用が鉄を含む風成塵を海洋へ流入させると、光合成活動が活発となり、炭素が表層から深層へ沈降する（鉄仮説: Martin and Fitzwater, 1988; Martin et al., 1994）。また、風成塵中のシリカは海水中で珪酸塩となって、珪藻が珪藻殻とする。珪藻の「珪」は殻が水分を含んだ無定形の二酸化珪素（オパール、 $\text{SiO}_2/n\text{H}_2\text{O}$ ）で、シャーレのように外（上）と内（下）の殻片を合わせた大きさが 10-100  $\mu\text{m}$  である。「藻」は光合成をする生物の一般名である。現在、河川による海洋への珪酸塩の流入は風成塵より多く、珪藻の繁殖が保持されている（Trégue and Pondaven, 2000）。

## 5. 南米太平洋沿岸域における珪藻土-珪藻質堆積物(岩)の生成

新生代を通じて起こった極の段階的な寒冷化気候が高緯度域と低緯度域の間の温度勾配を増大させて、大気と海洋の循環を活発化させた。大気輸送が海水中に欠乏している栄養塩類やシリカ、鉄元素を含んだ陸源物質を海洋へ運搬するとともに、湧昇流が深層水中の栄養塩類を表層へ運び上げて、生物源オパールの生産量を増大させた。植物プランクトンが生成した硫黄化合物が大気中へ放出されることによって、地球のアルベドが増加して寒冷化気候に向かう正のフィードバック機構が働いて、地表の冷却化がさらに進行した。

始新世：暁新世中期から引き続いた温暖化は中緯度の表層海水温度を上昇させ、始新世前期（5200–5000 万年前）にピークとなり、始新世前期気候最良期（Early Eocene Climatic Optimum; EECO）をもたらした（図 6）。始新世前期には、インド亜大陸がユーラシア大陸に衝突して、テチス海が閉鎖し、温暖で高塩分の深層水の形成が停止するとともに、ヒマラヤ山脈とチベット台地が上昇し始めて、風化作用が顕著になった。始新世中期（4400 万年前）には、緯度の温度勾配と水塊の分化が熱帯-亜熱帯域に幅広い湧昇流帯を形成して、小規模の寒冷化（始新世中期寒冷化）をもたらした。始新世後期に、南極大陸から南アメリカが分離してドレーク海路、さらにオーストラリアが北東へ移動してタスマン海路が形成された。南極循環流の成立は極-赤道間の海洋循環を活発化させ、沿岸湧昇流を引き起こした。全球的寒冷化と生物圏の変化は「始新世末期事件；Terminal Eocene Event」と呼ばれ（Wolfe, 1978）、Chira 層準が形成された（図 6）。

漸新世：始新世と漸新世の境界（3390 万年前）までに南極循環流が成立して（Exon et al., 2004），南極大陸氷床が出現し始めて、南極大陸が熱的に孤立した（DeConto and Pollard, 2003）。氷冠が増大してアルベドが増加するとともに、プレートの再編と拡大速度の減少が全球的な大気と海洋の循環を強化したので、極域の寒冷化が促進されて「漸新世前期（O1-I）氷河化」（Zachos et al., 2001）が発達した。漸新世前期（3000 万年前）にヒマラヤ山脈が上昇した（Zachos et al., 2001; Tiedemann et al., 2007）。漸新世は南極大陸氷床の形成による長期間の寒冷気候で特徴づけられる。

中新世：漸新世と中新世の境界（2303 万年前）において、短期間の激しい氷河化「中新世前期（M1-I）氷河化」（Miller et al., 1987; Wright et al., 1992）が起り、生物圏における種群の入れ替えと分化が増強されて、Caballas 層準が形成された。中新世前-中期（1700–1450 万年前）の気候最良期（MMCO）後、熱的に孤立した南極大陸における東南極氷床の成立と漸移的な深層水の寒冷化によって、現在の海洋循環系と堆積物の分布が成立して、Pisco 層準が形成された。中新世後期（1000–800 万年前）以降にヒマラ

ヤ-チベット台地の上昇が著しく増加した。山脈-台地の段階的上昇の増加を数値化した気候モデルによると、インドとアジア モンスーンの進化段階はヒマラヤ-チベット台地の上昇と北半球氷河化が密接に結合している (Zhisheng et al., 2001; Zheng et al., 2004).

始新世中期-中新世中期における大陸棚の後方 (大陸棚側) と前方 (海側) の2重になつた縁辺域の形成が中新世中期に大量の有機物を含む半遠洋性泥岩-珪藻土 (Pisco 層準) を形成して、デルタ系の急速な海側への進出を促進した (Dunbar et al., 1990).

漸新世後期以降の氷河性海水準の低下によって、中新世前期-中期境界、中新世中期-後期境界、鮮新世後期などで海底浸食が激しくなつた。地球全体が寒冷化して、中新世後期-鮮新世前期に北半球氷床の形成が開始された。

鮮新世：中米パナマ海路が開いている時期には、太平洋の低塩分水が中米海路-南カリブ海を経由して北大西洋へ流入し、北大西洋の塩分輸送を弱体化させていた。しかし、鮮新世前期 (460-270万年前) に中米パナマ海路が構造的に閉鎖された結果、大西洋-太平洋-北極海における表層水と深層水の循環が変化した。熱塩循環の熱と湿気が増加して、低緯度から高緯度へそれらが運搬された結果、鮮新世後期 (310-250万年前) に北半球に氷床形成 (Shackleton and Opdyke, 1977; Bonan et al., 1992) がもたらされ、Mejillones 層準と Tablazo 層準が形成された。

## 6. おわりに

「地球環境史学会」名誉会員称号の受賞を記念した「南米太平洋沿岸域における珪藻質堆積物の形成史」は、故・土 隆一 (静岡大学名誉教授) を代表者とする文部省国際学術研究 (1987-1991年) を基盤としています。故・首藤次男 (九州大学名誉教授) には野外調査においてたいへんお世話になりました。茨木雅子 (元 静岡大学助教授) からはODP Leg 112 Site 682 の珪藻化石を検鏡するために掘削コア試料を譲与されました。写真印刷はエプソン札幌修理センターの菊地充真さんにお願いしました。村山雅史博士、山本正伸博士にコメントいただき、原稿が改良されました。匿名査読者からは適切な修正をいただきました。以上の方々に感謝いたします。本稿を準備するにあたって、22224009 科学研究費補助金基盤研究 (S) 地球表層システムにおける海洋酸性化と生物大量絶滅および東京大学交付金を使用しました。

## 引用文献

- Beerling, D.J., Royer, D.L., 2011. Convergent Cenozoic CO<sub>2</sub> history. *Nature Geoscience* 4, 418-420.
- Bonan, G.B., Pollard, D., Thompson, S., 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature* 359, 716-718.
- Cermeño, P., Dutkiewicz, S., Harris, R.P., Folows, M., Schofield, O., Falkowski, P.G., 2008. The role of mutriculine depth in regulating the ocean carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 20344-20349.
- Cleveland, W.S., Grosse, E., Shyu, W.M., 1992. Local regression models. In Chambers, J.M., Hastie, T. (Eds.), *Statistical Models* 309-376. Chapman and Hall, New York.
- DeConto, R.M., Pollard, D., 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 421, 245-249.
- Dunbar, R.B., Marty, R.C., Baker, P.A., 1990. Cenozoic marine sedimentation in the Sechura and Pisco basins, Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 77, 235-261.

- Exon, N.F., Kennett, J.P., Malone, M.J., 2004. Leg 189 Synthesis: Cretaceous-Holocene history of the Tasmanian gateway. In Exon, N.F., Kennett, J.P., Malone, M.J. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 189. 1-37, College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Falkowski, P.G., Katz, M.E., Knoll, A.H., Quigg, A., Raven, J.A., et al., 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science* 305, 354-360.
- Haq, B.U., Hardenbol, J., Vail, P.R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science* 235, 1158-1167.
- Keller, G., Barron, J.A., 1983. Paleoceanographic implications of Miocene deep-sea hiatuses. *Geological Society of America Bulletin* 94, 590-613.
- Kennett, J.P., 1980. Paleoceanographic and biogeographic evolution of microfossil datums. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 31, 123-152.
- Koizumi, I., 1990. Successional changes of middle Miocene diatom assemblages in the northwestern Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 77, 181-193.
- Koizumi, I., 1992. Diatomaceous sediments along the Pacific coastal areas of South America and their evaluation. *Journal of the Faculty Science, Hokkaido University* 23, 227-245.
- Lazarus, D., Barron, J., Renaudie, J., Diver, P., Türke, A., 2014. Cenozoic planktonic marine diatom diversity and correlation to climate change. *PLOS ONE* 9, 1-18.
- Martin, J.H., Fitzwater, S.E., 1988. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the northeast subarctic. *Nature* 331, 341-343.
- Martin, J.H., Coale, K.H., Johnson, K.S., Fitzwater, S.E., Gordon, R.M., Tanner, S.J., Hunter, C.N., Elrod, V.A., Nowicki, J.L., Coley, T.L., Barber, R.T., Lindley, S., Watson, A.J., Van Scoy, K., Law, C.S., Liddicoat, M.I., Ling, R., Stanton, T., Stockel, J., Collins, C., Anderson, A., Bidigare, R., Ondrusek, M., Latasa, M., Millero, F.J., Lee, J., Yao, W., Zhang, J.Z., Friederich, G., Sakamoto, C., Chavez, F., Buck, K., Kolber, Z., Greene, R., Falkowski, P., Chisholm, S.W., Hoge, F., Swift, R., Yungel, J., Turner, S., Nightingale, P., Hatton, A., Liss, P., Tindale, N.W., 1994. Testing the iron hypothesis in ecosystems of equatorial Pacific Ocean. *Nature* 371, 123-129.
- Miller, K.G., Fairbanks, R.G., Mountain, G.S., 1987. Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion. *Paleoceanography* 2, 1-19.
- Miller, K.G., Wright, J.D., Fairbanks, R.G., 1991. Unlocking the ice house: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion. *Journal Geophysical Research* 96, 6829-6848.
- Mix, A.C., Tiedemann, R., Blum, P., et al., 2003. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 202. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Poag, C.W., 1987. The New Jersey transect: Stratigraphic framework and depositional history of a sediment-rich passive margin. In Poag, C.W., Watts, A.B., et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 95, Washington (U.S. Government Printing Office), 763-817.
- Ravizza, G., Zachos, J., 2003. Records of Cenozoic ocean chemistry. In Holland, H.D., and Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, Pergamon, Oxford 6, 551-581.
- Renaudie, J., 2016. Quantifying the Cenozoic marine diatom deposition history: links to the C and Si cycles. *Biogeosciences* 13, 6003-6014.
- Shackleton, N.J., Opdyke, N.D., 1977. Oxygen isotope and palaeomagnetic evidence for early North Hemisphere glaciation. *Nature* 270, 216-219.
- Sigurdsson, H., Kelley, S., Leckie, R.M., Carey, S., Bralower, T., King, J., 2000. History of circum-Caribbean explosive volcanism:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of tephra layers. In Leckie, R.M., Sigurdsson, H., Acton, G.D., Draper, G. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* 165, 299-314, College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Smetacek, V., 1999. Diatoms and the ocean carbon cycle. *Protist* 150, 25-32.
- Suess, E., von Huene, R., et al., 1988. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 112. College Station, TX (Ocean Drilling Program).

- Suess, E., von Huene, R., et al., 1990. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 112. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Tiedemann, R., Mix, A.C., Richter, C., Ruddiman, W.F. (Eds.), 2007. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 202. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Tréguer, P., and Pondaven, P., 2000. Silica control of carbon dioxide. *Nature* 406, 358-359.
- Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Fujiyoshi, A., Koizumi, I., Ibaraki, M., Rangel, Z.C., Tirado, G.R., 1988a. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of the Pacific coast of Ecuador. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 2, 23-43.
- Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Fujiyoshi, A., Koizumi, I., Ibaraki, M., Rangel, Z.C., Aldans, A.M., 1988b. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of the Pacific coast of Peru. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 2, 45-70.
- Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Fujiyoshi, A., Koizumi, I., Ibaraki, M., Martinez-Parardo, R., 1988c. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of Chile. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 2, 71-95.
- Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Koizumi, I., Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Koizumi, I., Fujiyoshi, A., Ibaraki, M., Aldana-A., M., Villavicencio, E., 1990a. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of the Pacific coast of Peru—Supplement. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 3, 47-57.
- Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Koizumi, I., Tsuchi, R., Shuto, T., Takayama, T., Koizumi, I., Fujiyoshi, A., Ibaraki, M., Martinez-P.R., 1990b. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of Chile—Supplement. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 3, 59-71.
- Tsuchi, R., Koizumi, I., Ibaraki, M., Aldana-A. M., Villavicencio, E., 1992a. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of the Pacific coast of Peru—Supplement 2. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 4, 33-40.
- Tsuchi, R., Koizumi, I., Ibaraki, M., Martinez-P. R., Martinez-G. R., 1992b. Fundamental data on Cenozoic biostratigraphy of Chile—Supplement 2. *Reports of Andean Studies*, Shizuoka University, Special Volume 4, 41-45.
- Wolfe, J.A., 1978. A paleo botanical interpretation of Tertiary climates in the northern hemisphere. *American Science* 66, 694-703.
- Wright, J.D., Miller, K.G., 1992. Control of North Atlantic deep water circulation by the Greenland-Scotland Ridge. *Paleoceanography* 11, 157-170.
- Zachos, J.C., Lohmann, K.C., Wilker, J.C.G., Wise, S.W., 1993. Abrupt climate change and transient climates in the Paleogene: a marine perspective. *Journal Geology* 101, 191-213.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to Present. *Science* 292, 686-693.
- Zachos, J.C., Dickens, G.R., Zeebe, R.E., 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouses warming and carbon-cycle dynamics. *Nature* 51, 279-283.
- Zheng, H., Powell, C.McA., Rea, D.K., Wang, J., Wang, P., 2004. Late Miocene and mid-Pliocene enhancement of the East Asian monsoon as viewed from the land and seas. *Global and Planetary Change* 41, 147-155.
- Zhisheng, A.Z., Kutzbach, J.E., Prell, W.L., Porter, S.C., 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature* 411, 62-66.