

# 修士論文

## 南極氷床コアの永年ダスト記録を使用した 氷河時代における気候遷移メカニズムの解明

Study on climate shift mechanisms of the ice age  
using secular dust records in Antarctic ice cores

三重大学 生物資源学研究科  
共生環境学科  
自然環境システム学講座  
環境解析学研究室  
510M233 坂田 晴香  
指導教員 福山 薫 教授

## 概要

本論では、第四紀の気候遷移のメカニズムを考察する。とりわけ、氷期から間氷期へ遷移するメカニズムは、過去に氷体積やCO<sub>2</sub>記録を用いて調べられてきたものの、その決定的なメカニズムは未だに解明されていない。そこで、上記の観点から、これまでほとんど注目されることが少なかった南極氷床コアの永年ダスト（風成塵）記録に着目し、ダスト擾乱の特徴から過去の気候遷移を考察する。

ダストが持つ気候周期や日射応答、他の記録（氷体積やCO<sub>2</sub>記録）との比較等を調べることで、ダスト独特の変動傾向を把握した。これにより、ダストは、局所的な挙動だけではなく、全球的に変動する時期があることが示唆された。ダスト擾乱が全球的であるとき、放射強制力等を通して、気候へ大きな影響を与えることが考えられる。このような気候に対するダストのアクティブ作用から、ダストと気候遷移との関連性を議論する。

# 目次

第1章	序論	1
第2章	氷河時代における気候遷移メカニズム	3
2.1	氷河時代とミランコビッチ理論 . . . . .	3
2.2	地球の軌道要素とその効果 . . . . .	4
2.3	ミランコビッチ強制に対する気候の非線形応答 . . .	6
2.4	非線形問題における氷床モデル説とCO <sub>2</sub> 主因説 . . .	9
2.5	ダスト記録を用いた気候遷移論 . . . . .	12
第3章	ダストに関する既往研究	14
3.1	ダストの発生 . . . . .	14
3.2	ダストと気候とのつながり . . . . .	16
第4章	ダストのパッシブ効果とアクティブ効果	18
第5章	研究手法	19
5.1	他の気候因子（氷体積・CO <sub>2</sub> ）との比較 . . . . .	19
5.2	ダスト特有の累積・閾値効果 . . . . .	20
第6章	結果と考察	21
6.1	他の気候因子（氷体積・CO <sub>2</sub> ）との差異点と類似点 .	21
6.2	ダスト特有のパッシブ・アクティブ作用 . . . . .	26
第7章	結論	29

## 目 次

1.1	東南極 EPICA Dome C (EDC) における過去約 80 万年間のダストフラックス (上) と気温のプロキシとなる重水素 (下) の擾乱。氷期最盛期に、ダスト濃度はピークに達している。	2
2.1	地軸と公転軌道における惑星摂動の効果を表した概略図。	5
2.2	(a) 地軸の歳差運動、(b) 楕円歳差、(c) 2 つの歳差を組み合わせた分点歳差。	5
2.3	亜南極圏における 2 つの深海底コアから構成された (PATCH) 気候変動スペクトル ( $T_s$ , $\delta^{18}O$ , 放散虫の $C$ 含有率)。	7
2.4	過去 46.8 万年における軌道と日射量変動の高解像スペクトル。	8
2.5	有効日射量変動から駆動されるアクティブな氷床と氷床重量下にある地殻沈降の影響を受けた氷床から成る古気候モデル (Peltier, 1982 [2])。	9
2.6	ETP (日射量変動値の E (Eccentricity; 離心率), T (Obliquity (Tilt); 地軸傾斜角), P (Precession; 歳差)) とのクロススペクトル解析より得られた太平洋の深海水温の線形分散スペクトル。	11
3.1	(a) 南極ダストの起源地の一つであるパタゴニア周辺地図と (b) 南極とパタゴニア周辺の堆積物との Sr・Nd 同位体組成の比較。	15

3.2	東南極における過去 80 万年間のダストと気温の関係． 横軸は気温を，縦軸はダスト濃度を表す．Lambert <i>et al.</i> (2008) より	16
5.1	南極大陸の観測基地	19
6.1	東南極における過去 80 万年間のダスト擾乱（1 段目） とその対数値（2 段目），および氷体積（3 段目）と CO <sub>2</sub> （4 段目）擾乱	21
6.2	東南極における過去 80 万年間の（a）ダスト擾乱の スペクトルと（b）対数値のスペクトル．ka は，kilo year age を意味する．スペクトルの破線部は，99.8% の false-alarm level[11]	22
6.3	（a）日射（破線部）とダスト擾乱（実線部）のスペク トル（上図）とそのクロススペクトル（下図）（b）日 射（破線部）とダスト擾乱の対数値（実線部）のスペク トル（上図）およびそのクロススペクトル（下図）．下 段の青色破線部は信頼区間を表す．青色実線部は 95% の信頼水準．	23
6.4	（a）ダスト（実線部）と氷体積（破線部）擾乱のスペ クトル（上図）とそのクロススペクトル（下図）（b） ダスト（実線部）と CO <sub>2</sub> （破線部）擾乱の対数値のス ペクトル（上図）およびそのクロススペクトル（下図）．	25
6.5	過去 80 万年間を約 10 万年毎に区分した気温の指標と なる重水素擾乱（1 段目）とダスト量擾乱（2 段目）， およびダスト量の累積曲線（3 段目）．	28

表 目 次

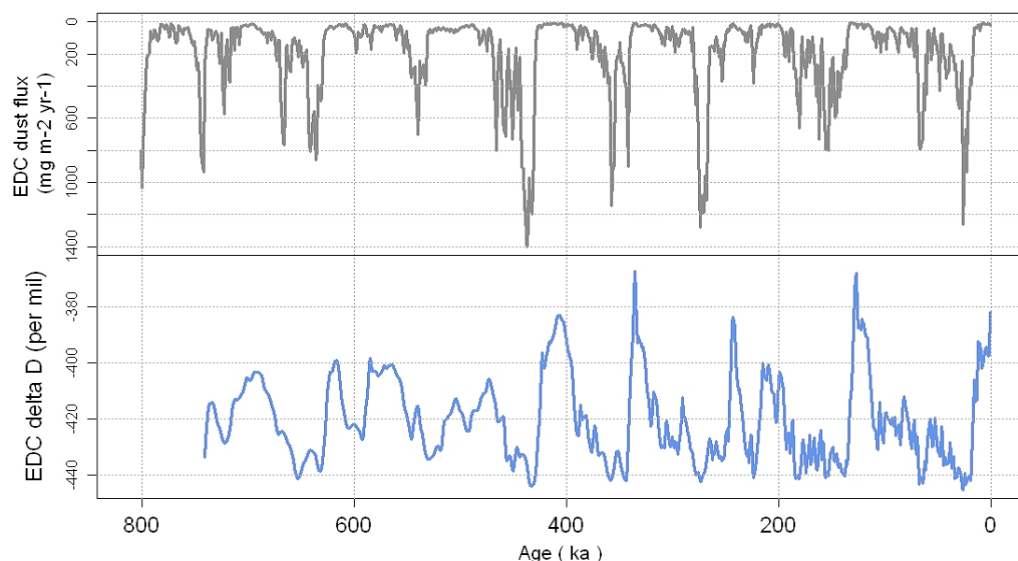
## 第1章 序論

ダスト（風送塵）は，発生・輸送される過程において，発生地や大気循環などの気候に影響される（パッシブ作用）．しかし，輸送・堆積される過程で，放射強制力や陸域から海洋への物質供給などを通じて気候にも影響を与えている（アクティブ作用）．このようにダストを気候因子として捉えると，ダスト濃度の永年変動から，氷河時代における気候擾乱のメカニズムを考えることができる．

東南極のダスト濃度は氷期最盛期にピーク（ダストスパイク）に達する（Fig.1.1）．そのため，氷期最盛期から間氷期への遷移（ターミネーションとも言われる）に関するメカニズムの解明において重要な手がかりとなる．約10万年ごとに現れるこの遷移の原因として，一般に氷体積変動に求めるもの[1, 2]と $\text{CO}_2$ に求める説[3]とがある．しかし，その決定的なメカニズムは未だに解明されていない[4]．遷移期におけるダストの気候への影響力を評価することで，上述の氷体積や $\text{CO}_2$ 変動をより理解できる．遷移のメカニズムを検討するほとんどの研究は，氷体積や $\text{CO}_2$ の記録のみを使ってなされてきた．

昨今では，氷体積や $\text{CO}_2$ の記録を使った遷移に関する解析はますます発展していき，年代測定の精度向上も数多くなされてきた[5, 6]．その一方で，それ以外の気候因子　ダスト　とのつながりに関する研究が極めて少なくなっている．あるいは，ダストの研究例はあるものの，気候因子として捉えられることなく研究されているケースが多い[7, 8]．

遷移に関わる氷期最盛期から退氷期にかけて，ダスト量は他の時期の約20-50倍となり（Fig.1.1），この時期に気温と有意な相関が認められている[7, 8]．例えば，D. E. Sugden *et al.* が遷移期に注目した東南極ダストの発生地を特定した[7]．さらに，F. Lambert *et al.* は，東南極におけるダスト記録と気温の指標となる重水素記録との相関



**Fig. 1.1:** 東南極 EPICA Dome C (EDC) における過去約 80 万年間のダストフラックス (上) と気温のプロキシとなる重水素 (下) の擾乱．氷期最盛期に，ダスト濃度はピークに達している．

を示した [8]．しかし，ダストは約 80 万年という長い時系列がありながら，これまで氷体積や  $\text{CO}_2$  記録になされてきたようなミランコビッチ理論 (2.1 および 2.2 節を参照) [9] の観点ではほとんど注目されていない．また，遷移期におけるダストと気温との有意な相関や発生地が示唆されているが，ダストの気候へのパッシブ・アクティブな作用が十分に検討されていない．

本論では，ダストの永年変動の特徴と他の気候因子 (氷体積・ $\text{CO}_2$ ) との関連を紹介する．また，気候の遷移に関連してくるダストスパイクに注目し，ダストが持つアクティブ・パッシブ作用について議論する．

上述の観点から，氷体積・ $\text{CO}_2$  記録とのクロススペクトルやダスト量の累積曲線を用いて，ダストと他の気候因子とのつながりやダスト特有のパッシブ・アクティブ作用について述べる．これらの解析より，ダスト擾乱は，他の気候因子と有意に関係するミランコビッチサイクルを持つことが認められた．また，ダストがパッシブなときとアクティブなときでは，それぞれ時定数の異なる現象が関与することが示唆された．



## 第2章 氷河時代における気候遷移メカニズム

### 2.1 氷河時代とミランコビッチ理論

本研究の背景となる氷河時代とは、地球上に氷床が存在する期間を意味する。地球は、誕生してから現在に至る約46億年ものあいだ、幾度も断続的な氷河時代を経験してきた。今日の氷河時代の開始は、南極大陸に氷床が形成し始めた約3000万年前に遡る。

とりわけ、現在から過去約200万年間にあたる時代は、第四紀と呼ばれる。この時代は、周期的な氷期-間氷期が顕著である。氷期とは氷床が拡大する寒冷期を、間氷期は氷床が縮小する温暖期をさす。本研究では、この第四紀に着目し、周期的な氷期-間氷期がどのようなメカニズムでもたらされるかを考察する。そのようなメカニズムの基本原則となるのが、氷床に関与する永年日射量周期を用いたミランコビッチ理論である。

ミランコビッチ理論の歴史は、約一世紀前の1910年代に遡る。当時、セルビアの数学者であったM. Milankovitch (1879~1958) によって提唱された。彼がこの理論を提唱する約20年程前には、既に、氷床の形成と消失(氷河作用)が天文学理論に帰するという定性的な議論が、フランスの数学者J. Adhemar (1842) やスコットランドの地質学者J. Croll (1864, 1867) によってなされていた。しかし、J. Crollの死後、研究者たちの関心は次第に薄れていった。

M. Milankovitch は、先の二人の天文学理論を蘇らせ、天体力学の法則を利用し、初めて、日射量の地理的収受における惑星摂動の効果を計算した(1930, 1941)。まだ計算機も存在しない時代のなか、彼のその作業は、全て手計算によってなされた。その結果は、今日のコンピュータ計算とほぼ相違ないほど高精度なものであった。

これらの計算結果と、地理学者のW. P. Köppen と地質学者のA.

Wegener の助言により、「北半球高緯度で減少した夏の日射量は氷河時代の開始に最も決定的な変数である」という彼の仮説を発展させた．そのメカニズムは，北半球の夏の日射量が弱まると，冷涼な夏が続くので，冬に降った雪が夏を越して何年も残るため氷河が拡大し，しまいには大陸氷床に成長するというものである．しかし，この仮説が提唱された 1930 年代は，未だ掘削技術が存在しておらず，氷床変動を示す地質記録を得ることができなかった．よって，彼の理論は検証不可能なものとされ，この問題は再び忘れ去られていった．

## 2.2 地球の軌道要素とその効果

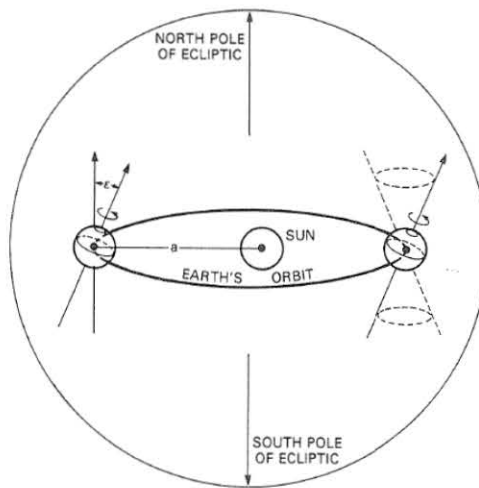
2.1 節で述べた，Milankovitch による日射量計算には，以下に示す地球の 3 つの軌道要素（離心率，地軸傾斜，歳差）が考慮されている．

（1）軌道離心率は，地球の公転軌道の変化を示すパラメータである．離心率は，円形に近い状態からわずかに楕円形（ $e \approx 0.06$ ）に変動する．その周期は，約 10 万年と 40 万年である（Fig.2.1）．

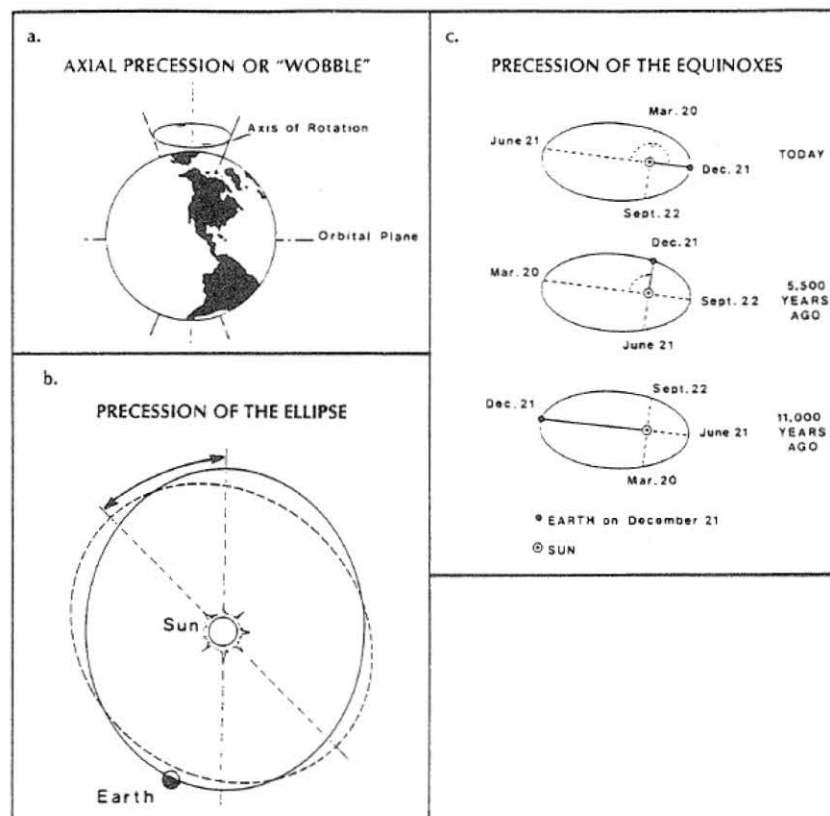
（2）地軸の傾斜（黄道傾斜）は約  $22^\circ$  と  $25^\circ$  のあいだを約 4.1 万年周期で変化する．地軸傾斜の摂動は両半球高緯度の季節サイクルを同時に増幅させる傾向がある．その効果の強さは，熱帯で小さく極で最大になる（Fig.2.2）．

（3）歳差には，2 つの要素が含まれる．軸歳差では，地球の赤道付近のふくらみで太陽と惑星のトルクがコマのように回転軸の“ぐらつき”を引き起こす．その正味の効果は，北極が 2.6 万年周期で，宇宙空間に円を描くことである．分点歳差では，分点（3 月 20 日と 9 月 22 日）と至点（6 月 21 日と 12 月 21 日）が地球の軌道上を 2.2 万年周期でゆっくりと移動する．この項は，歳差周波数を分離する離心率によって変調された．変調後の周期は 1.9 万年と 2.3 万年である（Fig.2.2）．

以上の 3 つの主要摂動項がもたらす 5 つの基本周期（40，10，4.1，2.3，1.9 万年周期）は，実際の地質記録に刻まれるであろう予測周期である．M. Milankovitch によるこれらの永年日射量周期は，ミランコビッチ・サイクルと呼ばれる．



**Fig. 2.1:** 地軸と公転軌道における惑星摂動の効果を表した概略図。  
公転軌道の焦点は、離心率 ( $a$ ) , つまり楕円軌道の変化や、極で回転する地軸の傾き ( $\epsilon$ ) を引き起こす



**Fig. 2.2:** (a) 地軸の歳差運動 (b) 楕円歳差 (c) 2つの歳差を組み合わせた分点歳差

## 2.3 ミランコビッチ強制に対する気候の非線形応答

理論提唱から約 40 年後，ミランコビッチ理論は再び注目されることになる．掘削技術の発達によって，氷床コアや深海底コアといった地質記録からその理論が確認され始めた．

Hays *et al.* は，1976 年の研究論文 [14] の中で，深海底コアからミランコビッチ・サイクルの痕跡について新たな証拠を報告した．彼らの記録に確認されたミランコビッチ周期（歳差・地軸傾斜・離心率）は，歳差と地軸傾斜強制に対して線形に応答していた（Fig.2.3）．しかし，相対的に弱い離心率強制（Fig.2.4）に対しては，はるかに大きい非線形な応答だった．

このような応答は，この記録に限らず，様々な緯度帯で掘削された他の地質記録にも同様に確認されている（Imbrie and Imbrie, 1980 など）．過去数 10 万年以上の地質記録に一般に認められるように，約 10 万年の周期成分が最も卓越している．ところが，約 10 万年の周期を持つ軌道要素の離心率強制は，他の軌道要素成分に比べてはるかに弱い（Fig.2.4）．こうして，ミランコビッチ理論における次なる関心は，離心率周期の非線形問題に向けられていく．

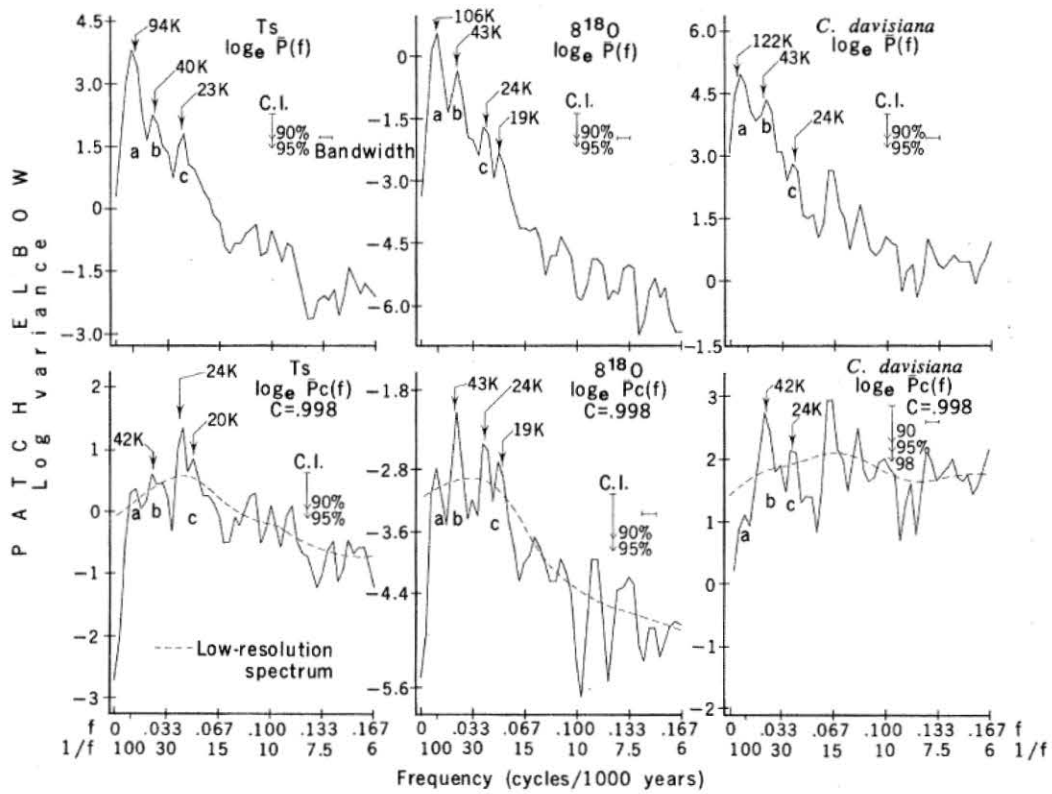
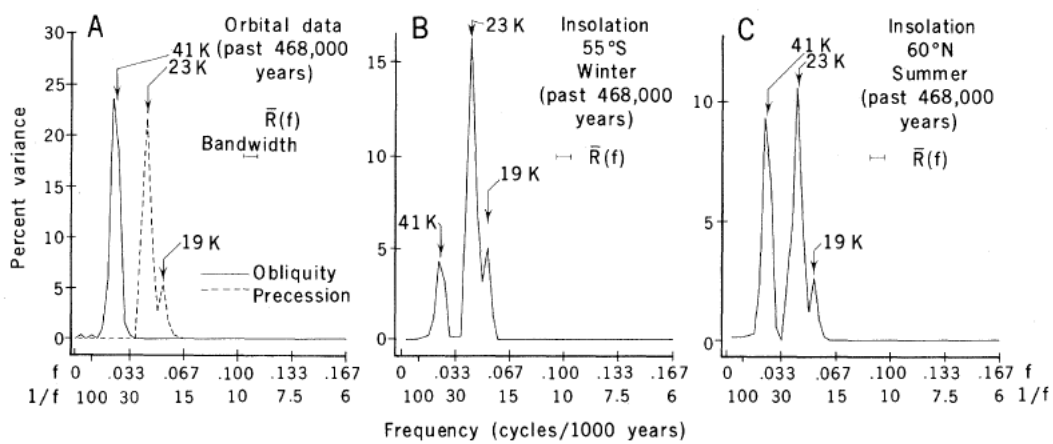


Fig. 2.3: 亜南極圏における2つの深海底コアから構成された (PATCH) 気候変動スペクトル ( $T_s$ ,  $\delta^{18}O$ , 放散虫の  $C$  含有率)

横線のある矢印は、高解像スペクトルで見積もられる片側信頼区間 (C.I.) である。卓越スペクトルピークは、a と b, c とラベルしている (Hays *et al.* 1976)



**Fig. 2.4:** 過去 46.8 万年における軌道と日射量変動の高解像スペクトル .

分散（単位周波数バンドに対して全分散のパーセンテージとなる）は、周波数の関数としてプロットされる（周期は 1/1000 年）。矢印は、スペクトルピークの平均周期（1000 年単位）を意味する（A）地軸傾斜と歳差（ $\Delta \epsilon \sin \Pi$ ）（B）北緯 55°における冬の日射量スペクトル（C）北緯 60°における夏の日射量スペクトル（Hays *et al.* 1976）

## 2.4 非線形問題における氷床モデル説と $\text{CO}_2$ 主因説

離心率周期の非線形問題を説明するものとして、最も主流となっているものが、勢力的に改良がなされてきた氷床モデル説 (Hyde and Peltier, 1985 など [1, 2]) である。このモデルは、日射によって変化する氷床負荷と岩盤の応答との非線形な相互作用を説明し、これが、10 万年の周期を生じさせるものとしている (Fig.2.5)。

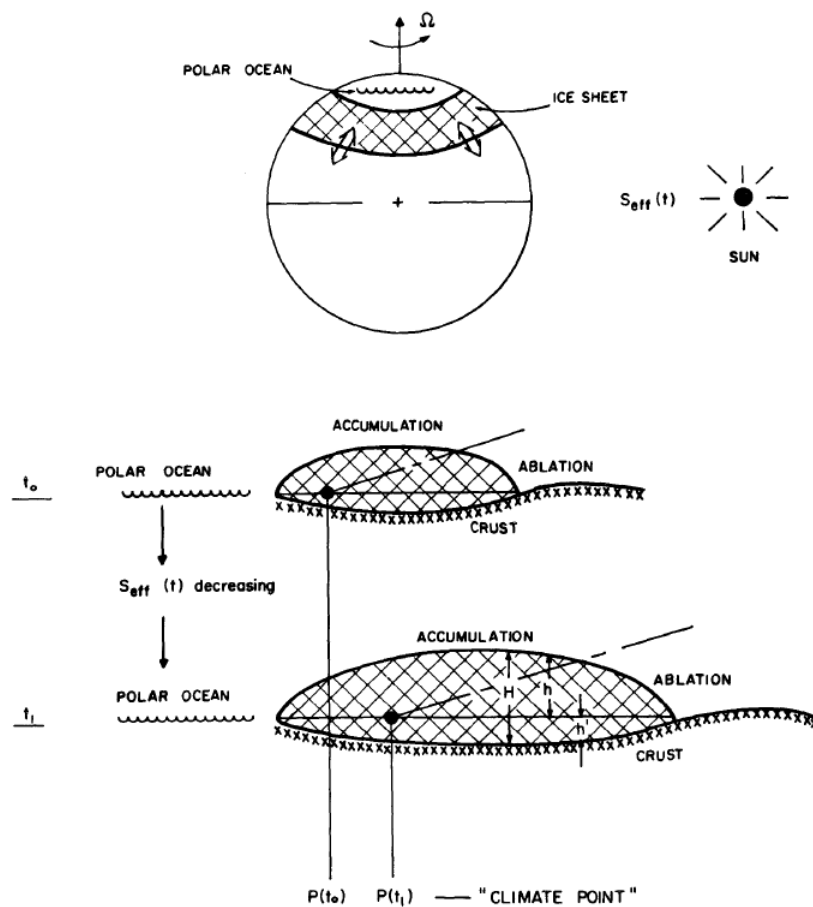


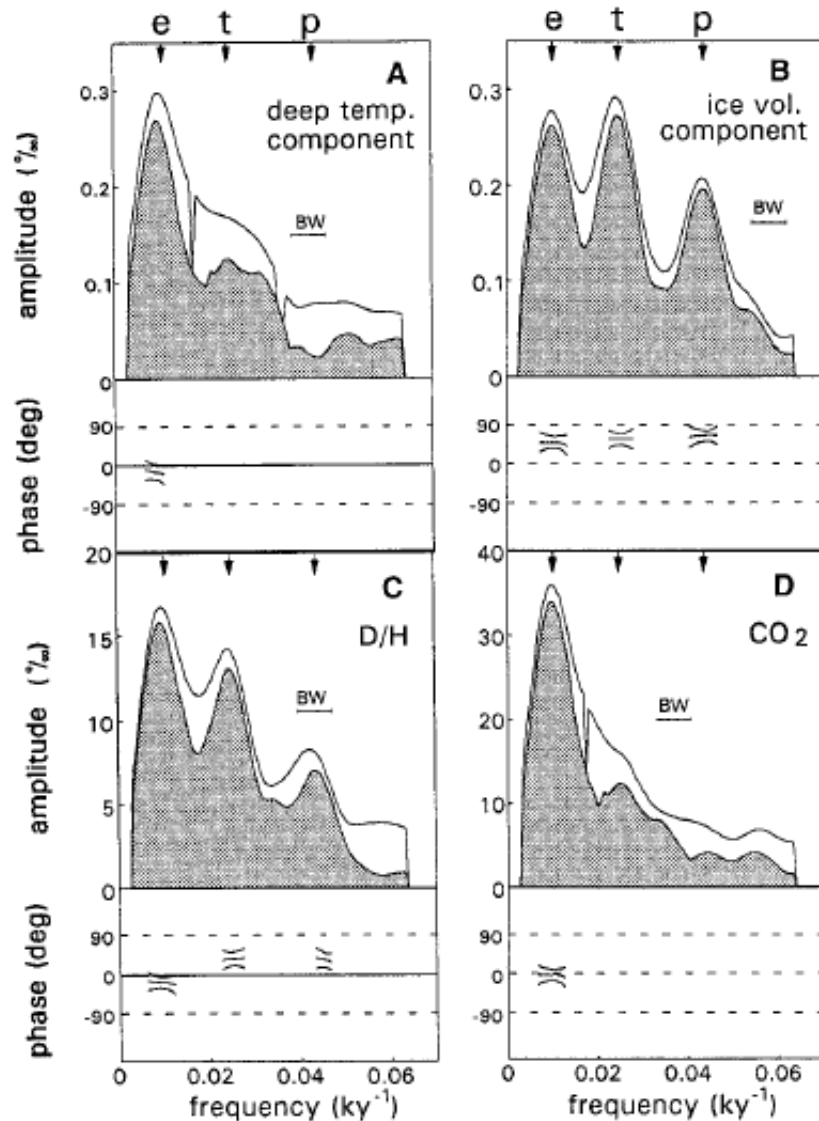
Fig. 2.5: 有効日射量変動から駆動されるアクティブな氷床と氷床重量下にある地殻沈降の影響を受けた氷床から成る古気候モデル (Peltier, 1982 [2])

“ CLIMATE POINT ” (氷床が形成される緯度とされない緯度を隔てる点) から南へ広がる斜線 (この線より上では零下となり、氷床が形成される) は、気候面 (氷床が形成される地帯とされない地帯を表す面) となる。

しかし、この説はN. J. ShackletonのCO<sub>2</sub>主因説[3])によって否定されている。彼は、有孔虫の $\delta^{18}\text{O}$ 記録より復元した海洋深層水温の変動と南極ボストーク氷床コアの $\delta^{18}\text{O}$ 記録より復元した氷体積変動、そして同じくボストーク氷床コアのCO<sub>2</sub>記録を用いてクロススペクトル解析をおこなった(Fig.2.6)。その結果、10万年周期をもつ分散が卓越しているのは、氷体積ではなく海洋深層水温とCO<sub>2</sub>であり、これは離心率と同じ位相で変化していることがわかった。よって、「軌道の離心率の効果は、大気CO<sub>2</sub>濃度に及ぼすある影響を通して古気候記録に入り込んでいる」と結論づけた。しかし、この説を裏付ける明確なメカニズムは、未だに解明されていない。

このように、微弱な離心率強制(周期10万年)に対する気候の顕著な10万年応答の謎について、数々の仮説が唱えられ、多くの解釈がなされてきた。けれども、それらにより却って一致する意見が得られにくくなってしまったのが現状である。このように、10万年周期の決め手となるメカニズムとその証拠は完全には解明されておらず、理論提唱より一世紀過ぎた今もなお、この問題は未解決のままである。





**Fig. 2.6: ETP**（日射量変動値の **E**（**E**ccentricity；離心率），**T**（**O**bliquity（**T**ilt）；地軸傾斜角），**P**（**P**recession；歳差））とのクロススペクトル解析より得られた太平洋の深海水温の線形分散スペクトル

（A）太平洋の深海水温（B）有孔虫の  $\delta^{18}\text{O}$  記録（氷体積および海水準の変動を表す），（C）南極 Vostok 基地の重水素記録（南極の気温を表す）（D）Vostok の大気中  $\text{CO}_2$  記録，各パネルの，上部分はその振幅とETPとのコヒーレント振幅（影付き部）のスペクトルを示す．下部分はその軌道のバンドにたいする位相（95%信頼区間）を表す（正の位相は，ETPにたいして角度 degree での遅れの度合いを表す）．“e”，“t”，“p”と標識された矢印は周波数を識別したもので，それぞれ離心率，地軸傾斜，歳差に関連する．“BW”とは，バンド幅を意味する（N.J.Shackleton，2000）

## 2.5 ダスト記録を用いた気候遷移論

氷体積やCO<sub>2</sub>記録は、2.4節で述べたように、氷河時代の気候の内部強制力として注目され、数々の研究がなされてきた。それに対して、ダスト記録は、そのような観点からはほとんど注目されてこなかった。しかし、ダスト記録は、先述の10万年の非線形問題を考える上で、重要な情報を持っている。

ダストの過去数10万年間の変動には、氷体積やCO<sub>2</sub>記録と同様に、明瞭な10万年周期が見られる。さらに、鋸歯状の振幅を持つ氷体積やCO<sub>2</sub>記録に対して、ダスト記録は、10万年ごとに値の急騰を見せるスパイク状の擾乱を成している (Fig.1.1)。このように、他の記録 (氷体積とCO<sub>2</sub>記録など) と共通する10万年の気候周期を持ちながらも、ダスト独自の変動傾向を持つ。これらのダストの特徴は、非線形問題の謎を解く手掛かりになるかも知れない。

上記のように、氷体積やCO<sub>2</sub>記録に共通しながらも異なる特徴を持つダストを用いることで、先の氷床モデル説やCO<sub>2</sub>主因説を再評価することができる。再評価する上で最も重要なのは、振幅の大きな気候遷移 (周期10万年) のメカニズムを解明することである。他の記録 (氷体積とCO<sub>2</sub>記録など) とは異なるダスト擾乱での10万年周期には、どのような現象が絡んでいるのかを知ることができれば、メカニズムに関するより詳細な情報を得ることができるだろう。

また、ダスト擾乱における気候遷移に関する“場所”の議論を加えることで、氷体積やCO<sub>2</sub>記録と異なるアプローチが望める。氷体積やCO<sub>2</sub>記録は、液体や気体として存在するため、それらの粒子の発生や輸送について言及することは極めて困難である。一方、ダストは、固体粒子であるため、発生地を特定しやすい。現に、ダストの成分や同位体組成等から、その起源や輸送経路に関する議論がなされてきた。

さらに、氷体積やCO<sub>2</sub>による気候強制力だけでなく、ダストが持つ強制力を評価することも重要である。というのも、気候の振幅が大きく変動する氷期最盛期 (約10万年周期) にダストの値は、ピークに達しているからである。その値は、通常のダスト量の約25倍を

示しており、気候への強制力を持っていた可能性がある。氷期最盛期におけるダストの気候への影響力を評価することで、ダストが10万年周期の遷移メカニズムにどれだけ関与し得るのかを把握することができるだろう。

このように、ダスト記録を用いることで、氷体積やCO<sub>2</sub>記録による既往の研究とは異なる観点から、気候遷移のメカニズムを考察することができる。

## 第3章 ダストに関する既往研究

本章では，氷河時代に及ぶ過去数10万年の時系列を持つ南極のダスト記録に関する既往の研究を紹介する．

### 3.1 ダストの発生

南極のダスト記録に関する最近の研究(D .E .Sugden *et al.*, 2009[7])では，パタゴニア (Fig.3.1) の氷堆石平野が南極ダストの支配的な発生源であることが示唆されている．

氷堆石平野とは，氷河によって運搬され堆積した岩屑が広がる平野である．氷堆石平野は，風成塵の重要な発生源として長いあいだ認識されてきた．それは二つの重要な特徴のためである．

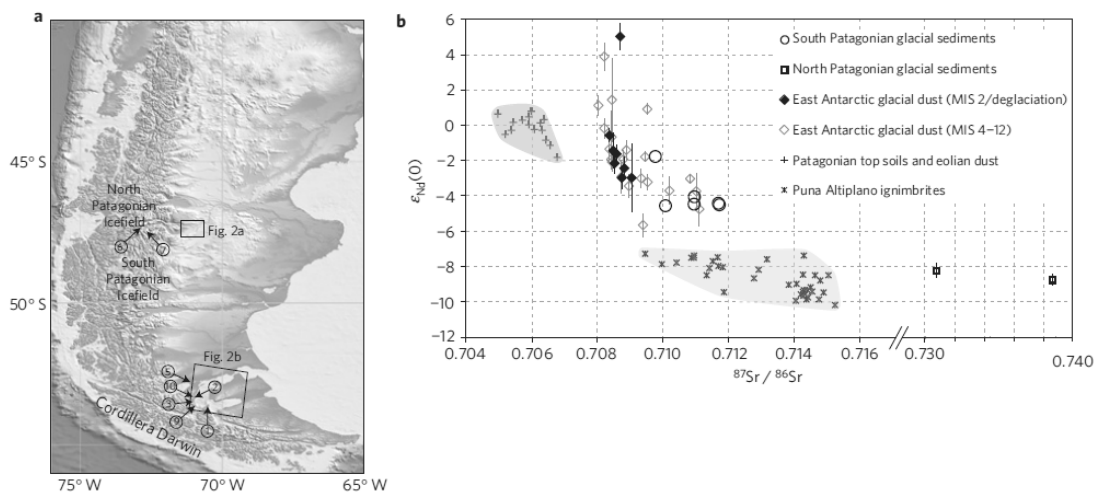
一つは，氷河が運んだ堆積物の強い負荷がダストサイズの微粒子を高い割合で含むからだ．氷堆石平野内では，網状流路が絶えず移動するため，植生もなく風にさらされた地表が広がっていくことになる．

二つ目は，氷堆石平野での，日・季節変動が著しいことである．毎日の擾乱が意味するのは，堆積物が日々強い流れで広範囲にわたり堆積され，すぐに乾燥することで除去され得ることだ．季節変化については，夏季の融氷によって懸濁性堆積物の負荷が，氷河床の掃出として生じることを意味する．さらに，パタゴニアでは氷期のあいだ，大陸棚の広大な地域が海水準の低下によってさらされる．

D .E .Sugden *et al.* は，南極においてダストフラックスがピークに当たる，パタゴニアでの氷期下の堆積物を解析した (Fig.3.1) ．そこでは，最盛氷期と最終氷期衰退期と年代決定された湖底堆積層の粘土とシルトの試料が採取された．南極の堆積物と比較するために，これらの堆積物の微粒子断片 ( $< 5 \mu m$ ) の Sr と Nd の同位体組成

を解析した。

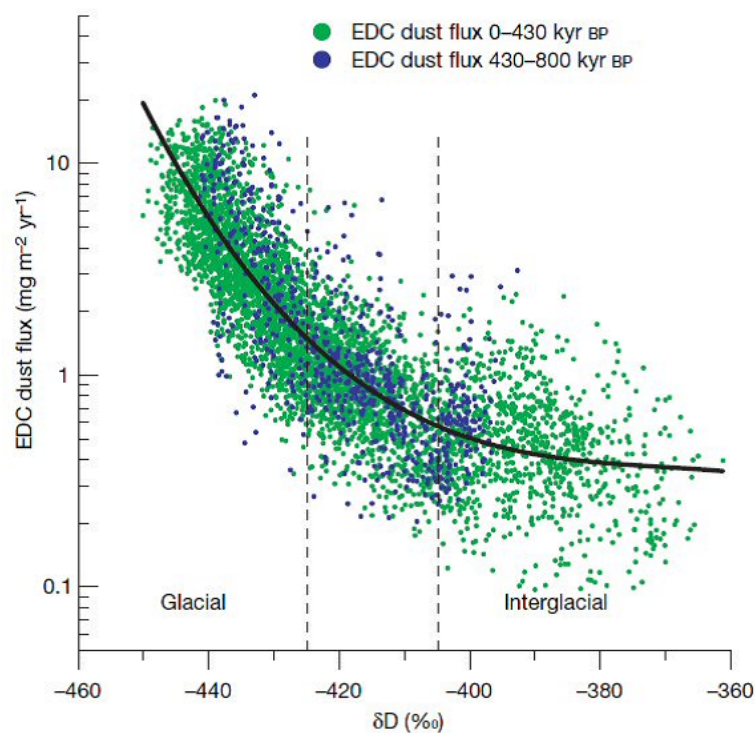
Fig.3.1 に示されるように、南極大陸におけるダストの氷期の同位体組成と南パタゴニアの氷河湖堆積物の同位体組成がほぼ一致している。D. E. Sugden *et al.* は、このような同位体組成の均一性から、南アメリカのパタゴニア周辺がダスト源として寄与していたと結論づけた。



**Fig. 3.1:** (a) 南極ダストの起源地の一つであるパタゴニア周辺地図と (b) 南極とパタゴニア周辺の堆積物との Sr・Nd 同位体組成の比較

### 3.2 ダストと気候とのつながり

F. Lambert *et al.*[8] は、南極の永年ダスト記録を用いて、ダストと気候との関連性を説明した。重水素記録で示されてる気温の記録と比較し、氷期におけるダストフラックスと気温の記録には有意な相関があることを示した (Fig.3.2)。これは、間氷期にはみられないことから、寒冷な気候になるほどダストフラックスと南極の気温との相関はますます高くなることを示唆した。これを南極と低緯度帯における気候の累進的なつながりとして解釈した。



**Fig. 3.2:** 東南極における過去 80 万年間のダストと気温の関係。横軸は気温を、縦軸はダスト濃度を表す。Lambert *et al.*(2008) より

ダストが大気中に浮遊する寿命は、湿性堆積によって抑制され、乾性堆積によって延長される。それゆえに水含有量や気温によって寿命が強えられる。仮に、ダストが低緯度帯から、極域への経路を持つ場合、ダストは輸送時に周囲の気温減少を被る。そのために、飽和蒸気圧の減少により、乾性化したダストは、寿命が延長され、ダストフラックスは増大される。したがって、ダストフラックスは、気候が寒冷になるほど、累進的に増加していく。

このように、氷期のダストの高い入力を支配する要因の一つに、ダストの供給源と寿命があることを示唆している。さらに、過去の8つの氷期全てにわたる氷期のダストフラックスで観測された25倍の増加に関しても、南アメリカのダスト源の強まりに加えて、氷期のあいだに減少した水循環の結果として生じる対流圏上層での大気中のダスト微粒子の寿命の延びによるものだと結論づけた。

## 第4章 ダストのパッシブ効果とアクティブ効果

ダストが発生し、大気大循環などによって輸送され、最終的に堆積される過程において、ダストと気候とのつながりには、多様な側面が存在する。それらは、ダストが気候から影響を受けるパッシブな（従属的な）要素と、逆に、影響を与えるアクティブな（支配的な）要素に分けられるだろう。

ダストが気候に対してパッシブな状態であるとき、周囲環境の変化によって、その値や寿命（発生から堆積するまでの期間を意味する）が変動する。例えば、気候が寒冷化すると、乾燥化により起源地となる沙漠や砂丘、氷堆石平野が拡大する。そのような陸域の変化によって、ダストの生成が増大していたことが考えられる。また、寒冷な気候による大気大循環の強化により、ダストフラックスも増大するだろう。さらに、飽和蒸気圧の低下による乾性堆積は、ダストに長い寿命を与える。

ダストが気候に対してアクティブに作用するとき、大気の放射バランスに影響したり、海洋への微量元素源にもなり得る。例えば、大気上層に浮遊するダストは、日射を遮断する日傘効果によって寒冷化を招く可能性がある。一方、ダストが氷床表面を覆うことで、アルベドの低下をもたらし、温暖化に作用することも考えられる。また、海洋に溶解したダストは、鉄分などの栄養塩を供給し、海洋表層での生物生産の増大に寄与する。



## 第5章 研究方法

本研究では，第二章で述べたミランコビッチ理論の観点から南極のダスト記録を解析した．その結果に対して，第三章で述べたようなダストのパッシブ効果・アクティブ効果に着目して考察をおこなった．

### 5.1 他の気候因子（氷体積・ $\text{CO}_2$ ）との比較

ダスト擾乱を氷河時代での気候遷移の主要強制力として注目されてきた氷体積や $\text{CO}_2$  擾乱と比較する．そのために，東南極の EPICA Dome C（以下，EDC，Fig.5.1）における過去 80 万年に遡るダスト記録を用いた．

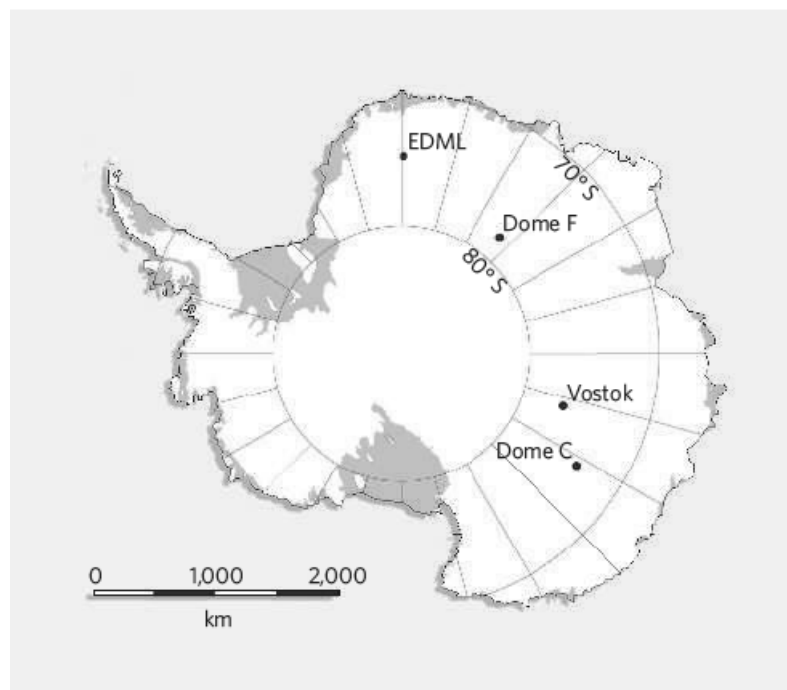


Fig. 5.1: 南極大陸の観測基地

まず，ダストの永年変動の特徴を把握するために，ダスト量の元の値と対数値を用いた．ダストの増減は独立したものではなく，発生や輸送，堆積される過程で，特定の気候要素に大きく依存する副次的な変動も考えられる．よって，そのようなバイアスをなくす処置として，ダスト量の対数値も共に扱った．

次に，外部強制力である日射に対して，ダスト擾乱がどのように応答しているのかをクロススペクトル[10, 11]を用いて調べた．この日射応答（ミランコビッチ・サイクル）を，氷体積およびCO<sub>2</sub> 擾乱と比較し，周波帯ごとの相互の関連性を調べた．氷体積擾乱には，全球的な氷体積記録[12]を，CO<sub>2</sub> 擾乱にはEDCの記録[13]を用いた．

## 5.2 ダスト特有の累積・閾値効果

気候遷移に関連してくるダストスパイクに注目したダストの気候へのアクティブ・パッシブ作用を検討する．約10万年周期の気候遷移を診るために，過去80万年間のダスト記録を8つの時代に区分した．

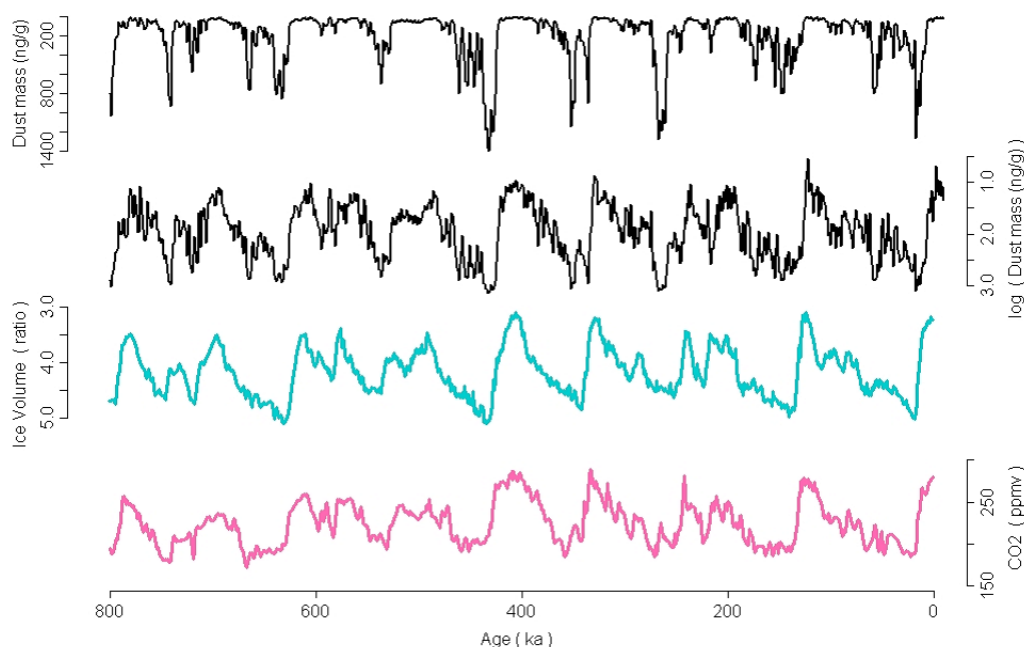
ダストは，氷期最盛期でその値が急騰するまで，気候の様々な側面から影響を受けて徐々に増加していくと考えられる（累積効果，パッシブ作用）．しかし，ある一定の閾値を超えダスト量がピークに達する中で，ダストは気候の影響を受ける側から，与える側へと主従が逆転する時期が存在するかもしれない（閾値効果，アクティブ作用）．

上述の累積・閾値効果の観点から，区分した各サイクルにおけるダスト量の累積曲線を用いて，累積効果と閾値効果が，どの時期に，どの程度持続するのかを定量的に解析した．この際に，気温の指標となるEDCの重水素記録[6]を用いた．Lambert *et al.* (2008)によると，ダストと気温の相関は，氷期で高く，間氷期で低くなる（Fig.3.2）[8]．この事実から，ダストが気候に対して最もアクティブに作用しやすい時期を抽出できる．さらに，これらの解析から，気候遷移のてがかりとなるダストスパイクが生じる背景について考察した．

## 第6章 結果と考察

### 6.1 他の気候因子（氷体積・CO<sub>2</sub>）との差異点と類似点

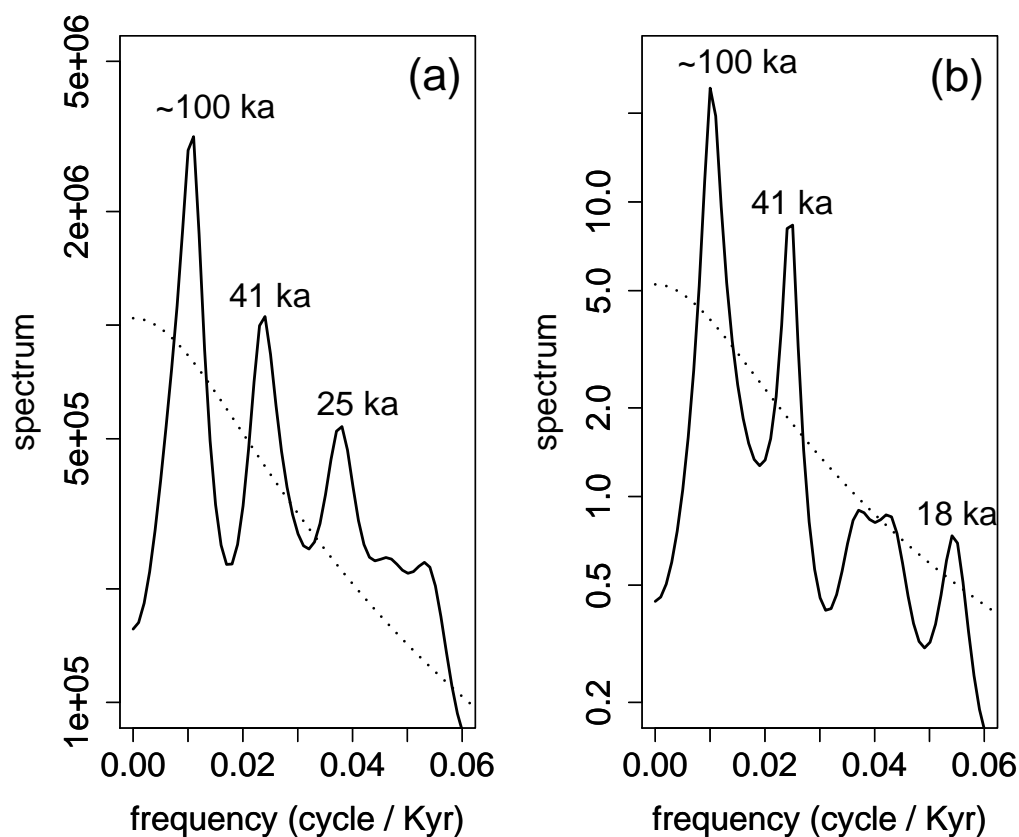
過去 80 万年間におけるダストの永年変動の特徴として、以下のような他の気候因子（氷体積・CO<sub>2</sub>）との類似点や差異点が見られた。ダスト擾乱（Fig.6.1 の 1 段目）は、氷体積・CO<sub>2</sub> 擾乱と共通の過去 80 万年で 8 つの氷期 間氷期サイクルを反映する。しかし、鋸歯状に変動する氷体積・CO<sub>2</sub> 擾乱（Fig.6.1 の 3, 4 段目）とは異なり、ダスト擾乱は氷期最盛期で値が急騰するスパイク状の振動（Fig.6.1 上段）を見せる。



**Fig. 6.1:** 東南極における過去 80 万年間のダスト擾乱（1 段目）とその対数値（2 段目）、および氷体積（3 段目）と CO<sub>2</sub>（4 段目）擾乱

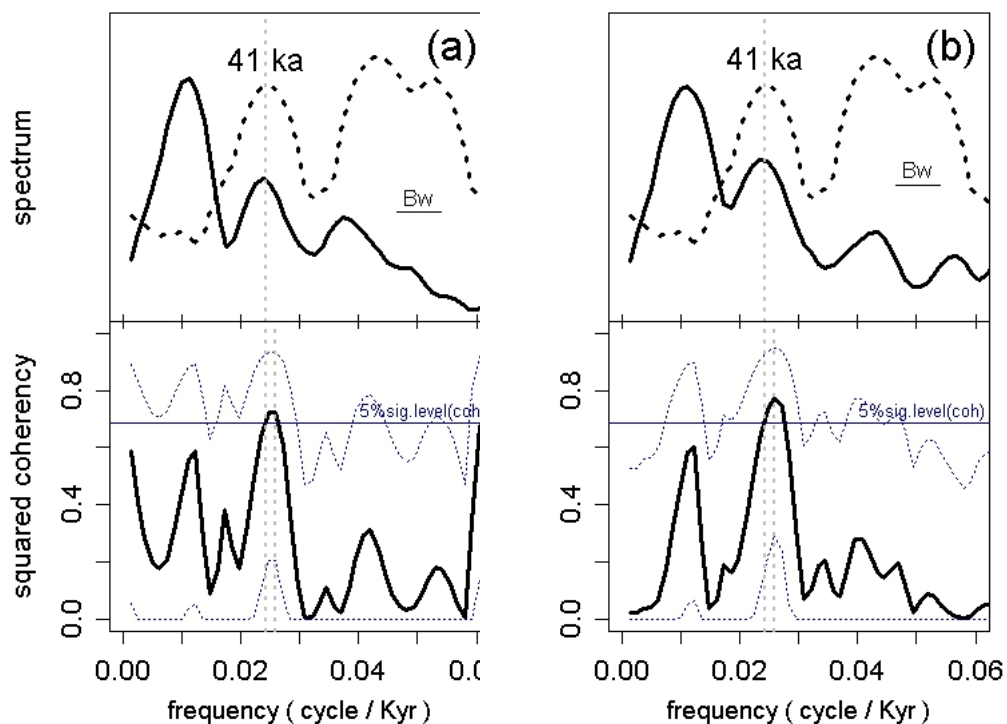
ところが，ダストを対数表示（Fig.6.1 の 2 段目）すると，それまでは抑制されていたかのように，鋸歯状サイクルが顕著に現れてくる．これは，ダストが氷体積や  $\text{CO}_2$  擾乱と共通の現象を被りながらも，異なる累積効果を持つことを意味するだろう．

スペクトル解析より，ダスト擾乱にも氷体積・ $\text{CO}_2$  擾乱と同様な有意なミランコビッチ・サイクルが認められた（Fig.6.2）．対数値では，有意な 10 万年と 4.1 万年周期が見られる（Fig.6.2b）．これらの周期は，それぞれ離心率周波帯と地軸傾斜周波帯に存在する．一方，元の値では，有意な 10 万年と 4.1 万年周期に加え，歳差周波帯で有意な 2.5 万年周期が認められた（Fig.6.2a）．



**Fig. 6.2:** 東南極における過去 80 万年間の (a) ダスト擾乱のスペクトルと (b) 対数値のスペクトル．ka は，kilo year age を意味する．スペクトルの破線部は，99.8% の false-alarm level[11]

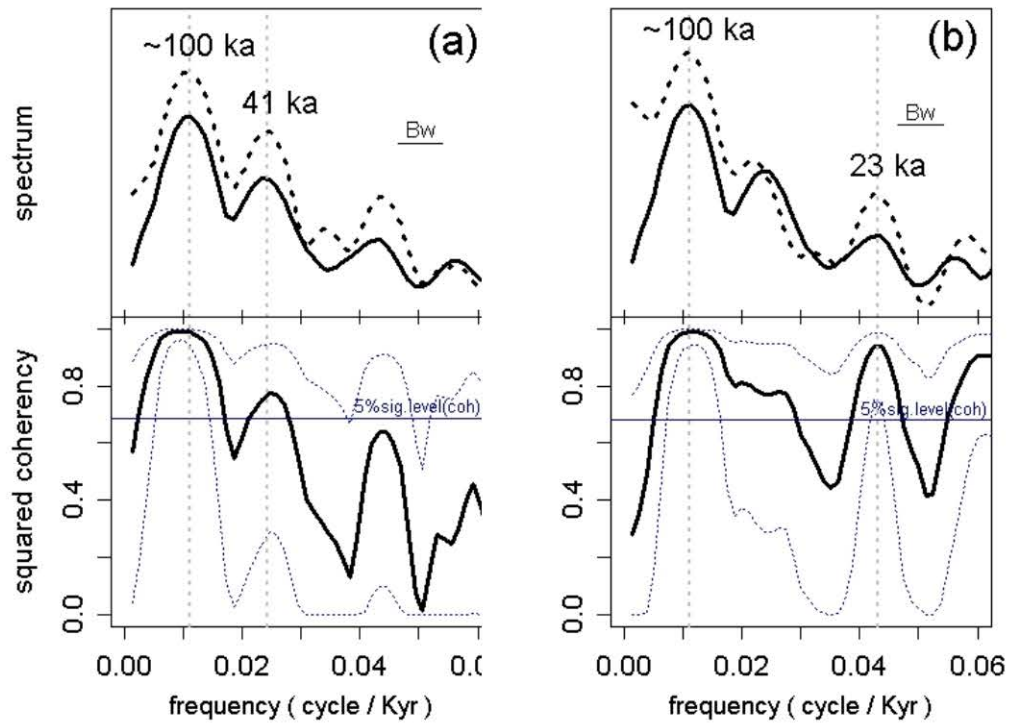
ダスト擾乱におけるこれらのミランコビッチ・サイクルを日射と比較したところ，元の値も対数値も共に，地軸傾斜周波帯で有意なコヒーレンスが認められた (Fig.6.3)．これは，ダストが地軸傾斜強制に対して，線形に応答していることを意味するだろう．けれども，離心率と歳差強制に対しては，非線形に応答することが考えられる．



**Fig. 6.3:** (a) 日射 (破線部) とダスト擾乱 (実線部) のスペクトル (上図) とそのクロススペクトル (下図) (b) 日射 (破線部) とダスト擾乱の対数値 (実線部) のスペクトル (上図) およびそのクロススペクトル (下図) . 下段の青色破線部は信頼区間を表す . 青色実線部は 95% の信頼水準 .

氷体積・CO<sub>2</sub> 擾乱との比較からわかったことは、ダスト擾乱は、氷体積擾乱と約 4.1 万年周期地軸傾斜周波帯で (Fig.6.4a) , CO<sub>2</sub> 擾乱とは、約 2.3 万年周期の歳差周波帯 (Fig.6.4b) でそれぞれ有意なコヒーレンスを持つことである。また、双方の比較において共通するのが、約 10 万年周期の離心率周波帯における高いコヒーレンスである (Fig.6.4a,b) 。

一般に、地軸傾斜強制への応答は高緯度ほど大きくなり、歳差強制への応答は低緯度ほど大きくなる。よって、上記の結果より、ダスト擾乱は、高緯度で氷体積擾乱と関連する地軸傾斜応答を、低緯度においてはCO<sub>2</sub> 擾乱に関する歳差応答をすることが考えられる。さらに、日射量変動で無視できるほど小さい離心率強制 (周期約 10 万年, Fig.6.3a,b で破線部で示される日射量変動のスペクトル) にもかかわらず、ダスト擾乱も氷体積とCO<sub>2</sub> 擾乱と同様の約 10 万年周期の駆動に大きく関連することがわかった。



**Fig. 6.4:** (a) ダスト（実線部）と氷体積（破線部）擾乱のスペクトル（上図）とそのクロススペクトル（下図）(b) ダスト（実線部）と CO<sub>2</sub>（破線部）擾乱の対数値のスペクトル（上図）およびそのクロススペクトル（下図）.

## 6.2 ダスト特有のパッシブ・アクティブ作用

各時代におけるダスト量の累積曲線 (Fig.6.5) から、以下に示すダストの累積・閾値効果の特徴が見られる。

各時代の始まりからダスト値の最初のピークが生じるまで、累積曲線の傾きは緩やかである。この時期のダスト量は、0-200ng/g と比較的小さい値を示し、平均 6.5 万年の持続期間を持つ。また、気温との相関も比較的低い (Fig.6.5 の桃色実線より上の値)。よって、この時期のダストは、全球的な気候擾乱よりも、周囲環境の影響を受けて徐々に累積していくパッシブな状態であることが考えられる。

一方、各ダスト値の第一ピークが生じてからそれが収束するまでの間、つまり、ダストスパイクの期間では、累積曲線の傾きは急である。このときのダスト量は、800-1500ng/g と比較的大きな値を示す。持続時間については、時代によって差はあるが、おおよそが数千-2 万年程度である。また、このとき気温との相関が高く (Fig.6.5 の水色実線より下の値)、氷期最盛期でもある。これらより、ダストがピークとなるこの時期に、閾値効果を通して、気候にアクティブな作用を及ぼすだろう。

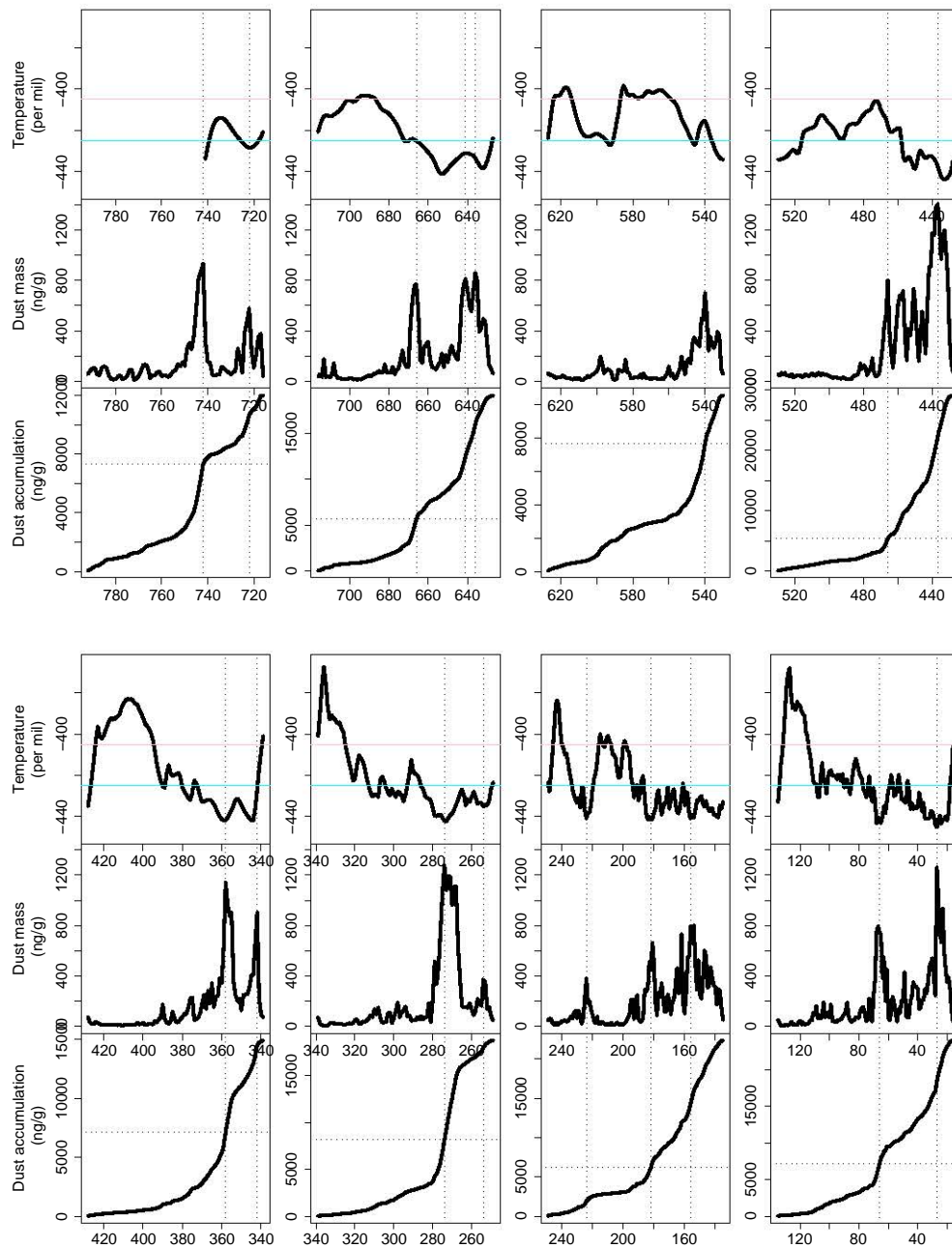
また、気温との相関が最も高い時点では、次のような特徴が見られる。ダストの第一ピーク時は、どの時代においても共通して、累積値が約 7000ng/g 前後を示している。ダスト量の最大ピークについては、8 つの時代の平均が、1050ng/g である。これらは、ダストが気候に対して、パッシブな状態からアクティブな状態へ主従が逆転するおおよその閾値となるだろう。

以上のことから、ダストの累積効果の背景には、比較的時定数の長い現象 (約 6-7 万年) が考えられる。例えば、ダストの発生地である陸域の比較的緩やかな変化が挙げられる。ダスト値が低いことから、ダストの生産や輸送は低い状態にあるだろう。

逆に、閾値効果の背景には、比較的時定数の短い現象 (数千-2 万年) が関与するかも知れない。これには、大気循環や海洋循環、アルベドの変化といったものが考えられる。氷期最盛期であるこの時期は、陸域の乾燥化や大気循環の強化により、ダストの生産・輸送



が高くなっている．気温への感受性も強い状態にあるため，このような環境の中，何らかの気候要素に強く応答することで，ダスト濃度が短期間に閾値を超えピークに達すると考えられる．



**Fig. 6.5:** 過去 80 万年間を約 10 万年毎に区分した気温の指標となる重水素擾乱（1 段目）とダスト量擾乱（2 段目），およびダスト量の累積曲線（3 段目）．横軸は，時間軸（単位は，ka）を表す．気温のグラフの水色実線より下（寒冷期）の値では，ダストと気温の相関が有意に高い時期となる．桃色実線より上（温暖期）の値では，気温との相関がない．

## 第7章 結論

前述したように、ダストが気候に対してパッシブであるとき、気温への感受性が弱い。これは、どの時代においても、気温に感受性のある氷体積やCO<sub>2</sub> 擾乱と大きく異なる特徴である。この時期のダスト濃度は、全球的な気候擾乱ではなく、局所的な周囲の環境に大きく左右されていると考えられる。そのために、ダスト擾乱は氷体積やCO<sub>2</sub> 擾乱などの他の気候因子とは異なるスパイク状振動 (Fig3.a) になると推測できる。

氷河時代において、最も寒冷な氷期最盛期では、全球的にダストの生産・輸送・堆積が増大している。この時期のダストは、気温への感受性が高く、その擾乱は、氷体積やCO<sub>2</sub> 擾乱と同様の全球的な変動を含んでいるだろう。このように、日射に対して、他の気候因子と同じように応答する一方、ダストそのものの放射強制力などを通して、独自で気候に作用する可能性がある。つまり、この時期のダストは氷体積やCO<sub>2</sub> の変動にも作用すると考えられる。

したがって、これからの課題として、ダストの放射強制力が、実際にどの程度かを評価する必要がある。6.3 節で述べたダストの閾値効果をふまえ、気温との相関が最も高い氷期最盛期に着目する。そこで、ダストによるアルベド変化が気温変化にどれだけ寄与するかを検討する。

上記の観点から、氷期最盛期におけるダストのアクティブな作用を再現することで、気候遷移のメカニズムに関するより詳細な情報を得ることができるだろう。約10万年に一度生じる、氷期最盛期から間氷期への振幅の大きい気候遷移において、ダストは氷体積擾乱にもCO<sub>2</sub> 擾乱にも大きな関連性がある (Fig.5a,b)。したがって、ダストによる気温変化がもたらした氷体積やCO<sub>2</sub> 擾乱の振幅変化は、気候遷移にも大きく関与する可能性がある。

## 引用・参考文献

- [1] J. Imbrie and Z. Imbrie, **Modeling the Climatic Response to Orbital Variations**, *Sci* **207**, 943-953 (1980)
- [2] W.T. Hyde and W.R. Peltier, **Sensitivity Experiments with a Model of the Ice Age Cycle: The Response to Harmonic Forcing**, *Journal of the atmospheric sciences* **42**, 2170-2188 (1985)
- [3] N. J. Shackleton, **The 100,000-Year Ice-Age Cycle Identified and Found to Lag Temperature, Carbon Dioxide, and Orbital Eccentricity**, *Sci* **289**, 1897-1902 (2000)
- [4] T. J. Crowley, **Cycles, Cycles Everywhere**, *Sci* **295**, 1473-1474 (2002)
- [5] L. E. Lisiecki, **Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle**, *Nature geoscience* **3**, 349-352 (2010)
- [6] W. F. Ruddiman, **A Paleoclimatic Enigma?**, *Sci* **328**, 838-834 (2010)
- [7] D.E. Sugden *et al.*, **Influence of Patagonian glaciers on Antarctic dust deposition during the last glacial period**, *Nature geoscience* **2**, 281-285 (2009)
- [8] F. Lambert *et al.*, **Dust-climate coupling over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core**, *Nature* **452**, 616-619 (2008)
- [9] A. Berger, **Milankovitch theory and climate**, *Reviews of geophysics* **26**, 624-657, (1988)
- [10] R.H.Shumway and D.S.Stoffer, **Time Series Analysis and Its Applications**, *Springer Chapter4*, 174-220 (2006)
- [11] Michael Schulza and Manfred Mudelseeb , **REDFIT estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series**, *Computers & Geosciences* **28**, 421-426 (2002)
- [12] L. E. Lisiecki and M.E. Raymo, **A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic D18O records**, *Paleoceanography* **20**, 1003 (2005)
- [13] L. hi *et al.*, **High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present**, *nature* **453**, 379-382 (2008)
- [14] J.D . Hays *et al.*, **Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages**, *Sci* **294**, 1121-1131 (1976)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導・ご尽力頂きました指導教員の福山先生には，大変感謝しております．また，立花先生には，毎週の Holton のゼミ等で，ご指導いただき大変お世話になりました．葛葉先生には，就学カウンセラーとして，一年次からご指導いただきました．この場をお借りしてお礼申し上げます．その他，自然講座の先生方には，合同ゼミでの発表等，日頃よりアドバイスいただいておりますこと，心より感謝申し上げます．

また，研究室の方々には，日々，様々な場面で，支えていただきました．家族には，研究生活を陰ながら支えていただきました．おかげ様で，有意義な研究生活を送ることができました．

これからも，まだまだ勉強途中で，現在の様な自分の立場であったとしても，地球人類のお役に立てるという真摯な心持ちだけは忘れずに，研究して参りたいと思います．自然講座の先生方には，今後ともご指導の程よろしくお願い申し上げます．