

東京支部第51回例会(2012年7月8日)

話題提供 資料

次の氷期(氷河期)はいつはじまるか？

- 近年の論文から -

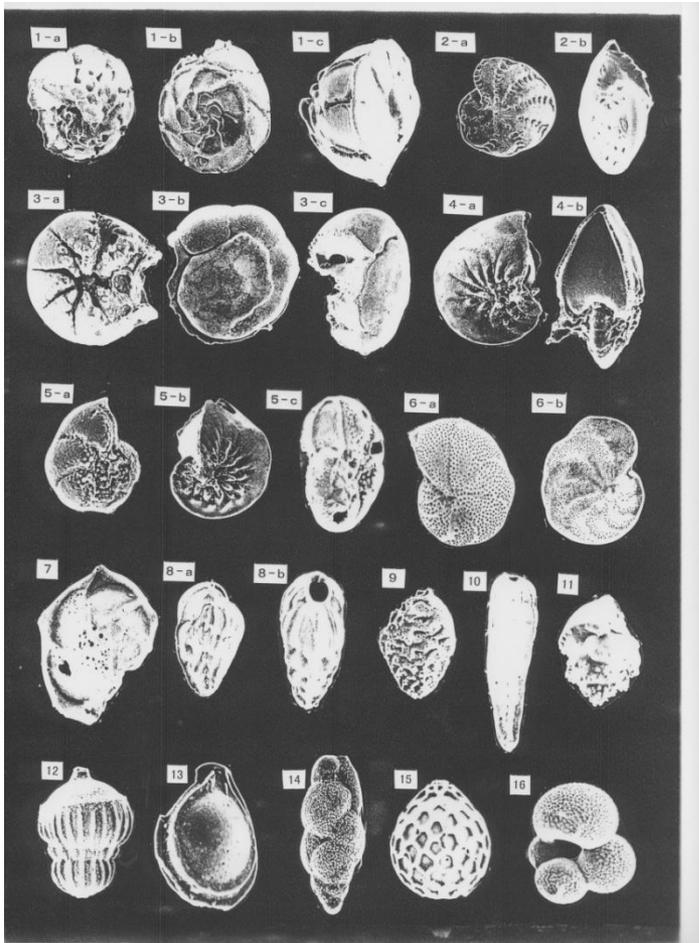
日本気象予報士会東京支部

田家 康(No.3365)

Round 1

次の氷期到来をめぐる議論
(1970年代まで)

チェーザレ・エミリアーニ 大西洋の海底の有孔虫を分析 「更新世の気温」(1955)



酸素同位体による気温分析

酸素16
(99.763%)

酸素17
(0.0375%)

酸素18
(0.1995%)

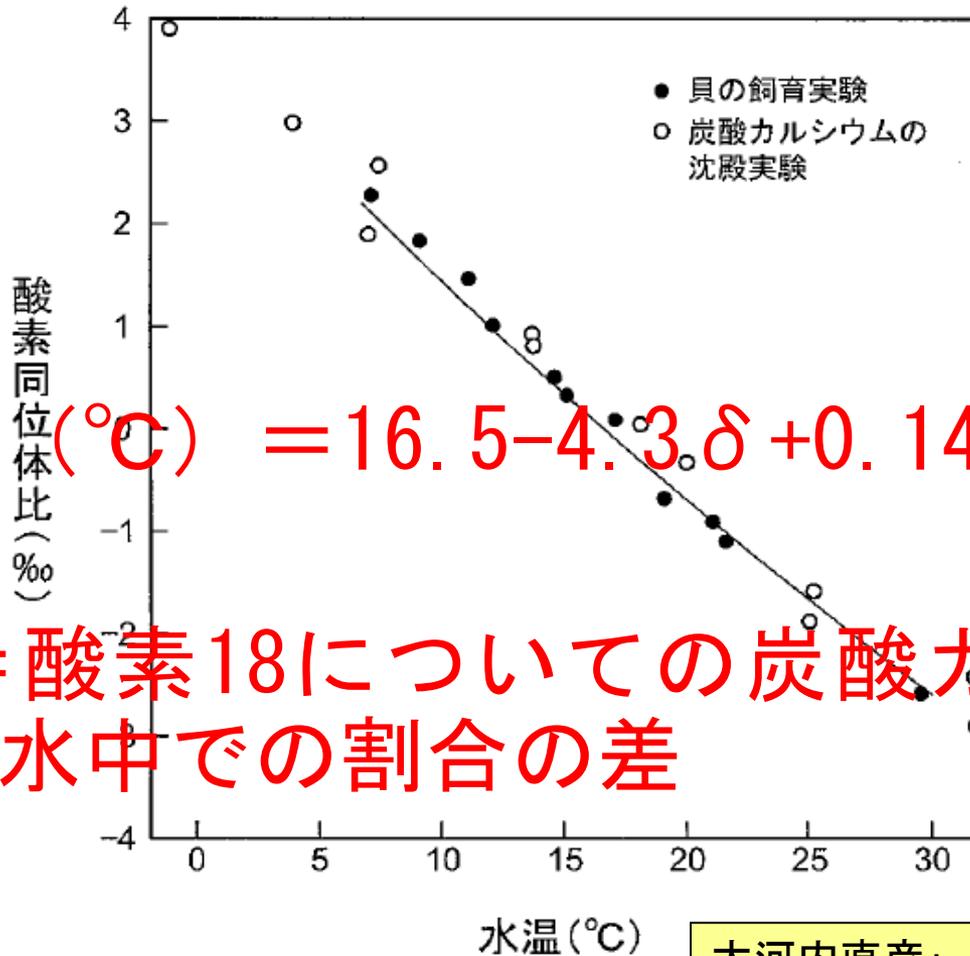
海洋酸素同位体ステージの分析に利用

- 有孔虫内の炭酸カルシウムの中の酸素18比率から、過去の海水温を測定する方法。
- 氷床コア(氷の柱)に含まれる酸素18比率から、過去の気温を推定する方法。

有孔虫内の酸素同位体濃度

- 有孔虫が体内に取り込む炭酸カルシウム (CaCO_3) の中の酸素に着目。
- 酸素同位体の水中での構成比
– $^{16}\text{O} = 99.763 \%$, $^{17}\text{O} = 0.0375 \%$, $^{18}\text{O} = 0.1995 \%$
- 炭酸カルシウムは水よりも ^{18}O の比率が高い (分子の振動エネルギーの関係)
- この差は温度に依存する。
- 有孔虫の中の炭酸カルシウムの比率を見れば、その時代の海水温を推定できる。

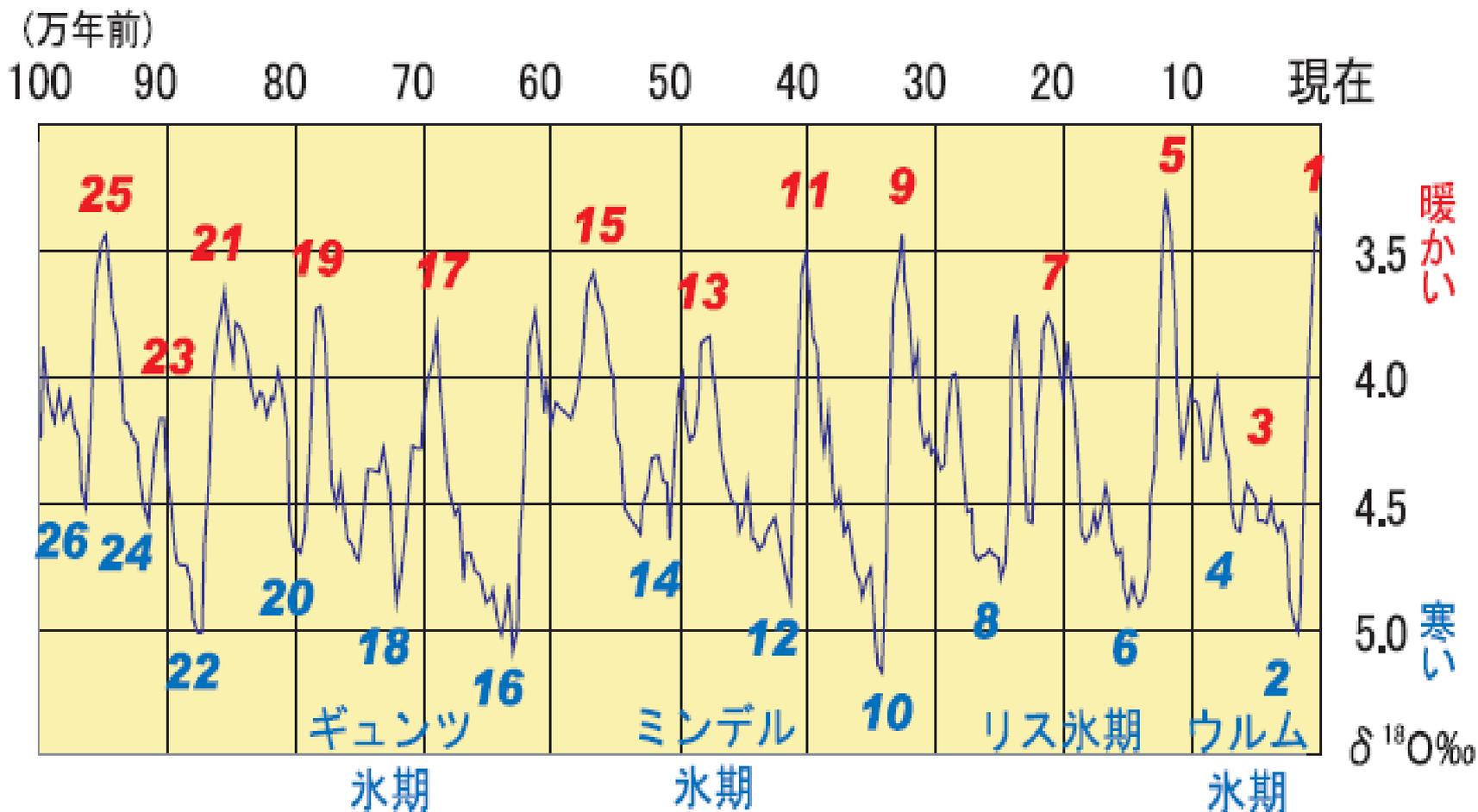
海洋酸素同位体比率と水温の関係 (貝の体内での炭酸カルシウム)



● 水温(°C) = 16.5 - 4.3δ + 0.14δ²

δ = 酸素18についての炭酸カルシウムと水中での割合の差

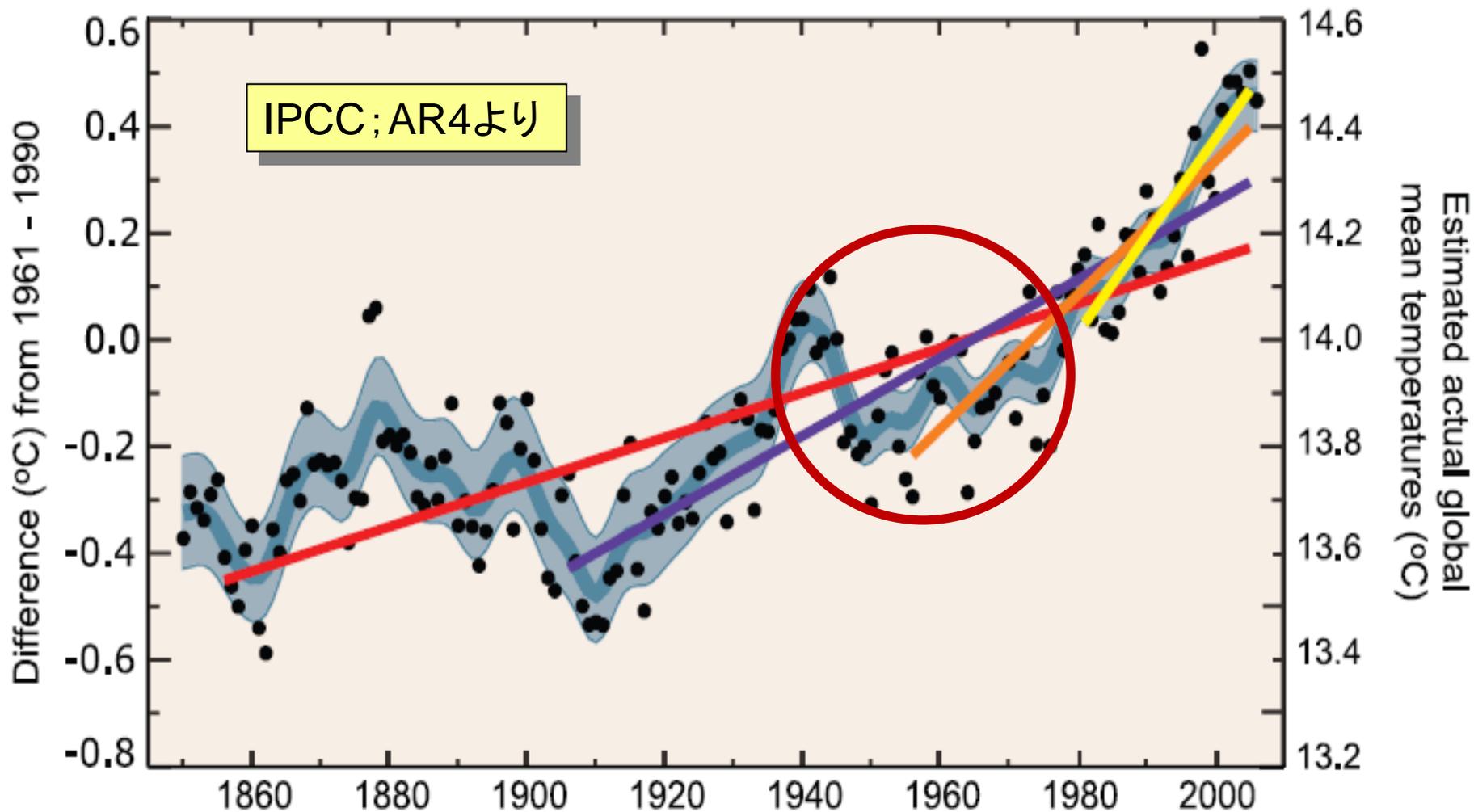
海洋酸素同位体ステージ (Marine Oxygen Isotope Stage)



次の氷期が迫っている・・・？

- 議論の背景； 過去の間氷期
 - MIS 5(エーミアン間氷期)
 - MIS 7(ホルステイン間氷期)
 - MIS 9(クローマー間氷期)との比較
 - いずれも、1～3万年程度で、終わっていた
- 1960年代は地球規模で寒冷傾向；日本では、「38豪雪」
 - Time； 1974年6月24日
 - Newsweek； 1975年4月28日
 - National Geographic； 1976年5月
 - 根本順吉 『冷えていく地球』（1981年）

1940年代末から1970年代までの 全球平均気温



日米の気象中枢の見通し

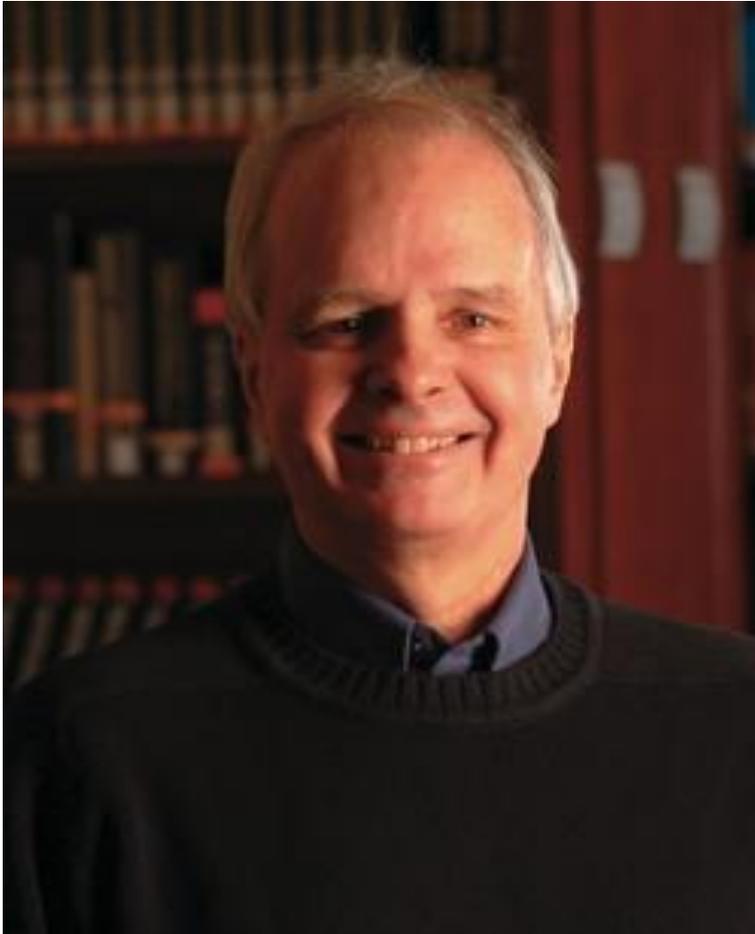
- 1974年3月、気象庁発表「気候変動調査研究会」
 - 今後は寒冷化と予測
 - 異常気象は数十年から百数十年の時間軸で起きる気候変動にともなうものも多く、北半球高緯度では寒冷化傾向が顕著
 - 19世紀以前の低温期に似た気候に近づくことも考えられる1960年代は地球規模で寒冷傾向
- 米国海洋気象庁(NOAA)
 - 気象庁からのアンケートへの返答(1973年)
 - 「現在の間氷期はすでに1万年くらい経過しており、あまり長くは続かないかもしれない。今後千年から数千年のうちに、さらに氷期の気候状態に急速に移行する時期があると想像できる」

Round 2

次の氷期到来をめぐる論争 (IPCC AR4まで)

- ウィリアム・F・ラディマン
 - ヴァージニア大学教授(環境科学)
- EPICAグループ
 - European Project for Ice Coring in Antarctica
 - 欧州系の南極氷床調査チーム
 - 南極ドームC(コンソーシアム)で調査
- IPCC: 第四次評価報告書(AR4)
 - 6章; 古気候学(Palaeoclimate)

William F. Ruddiman



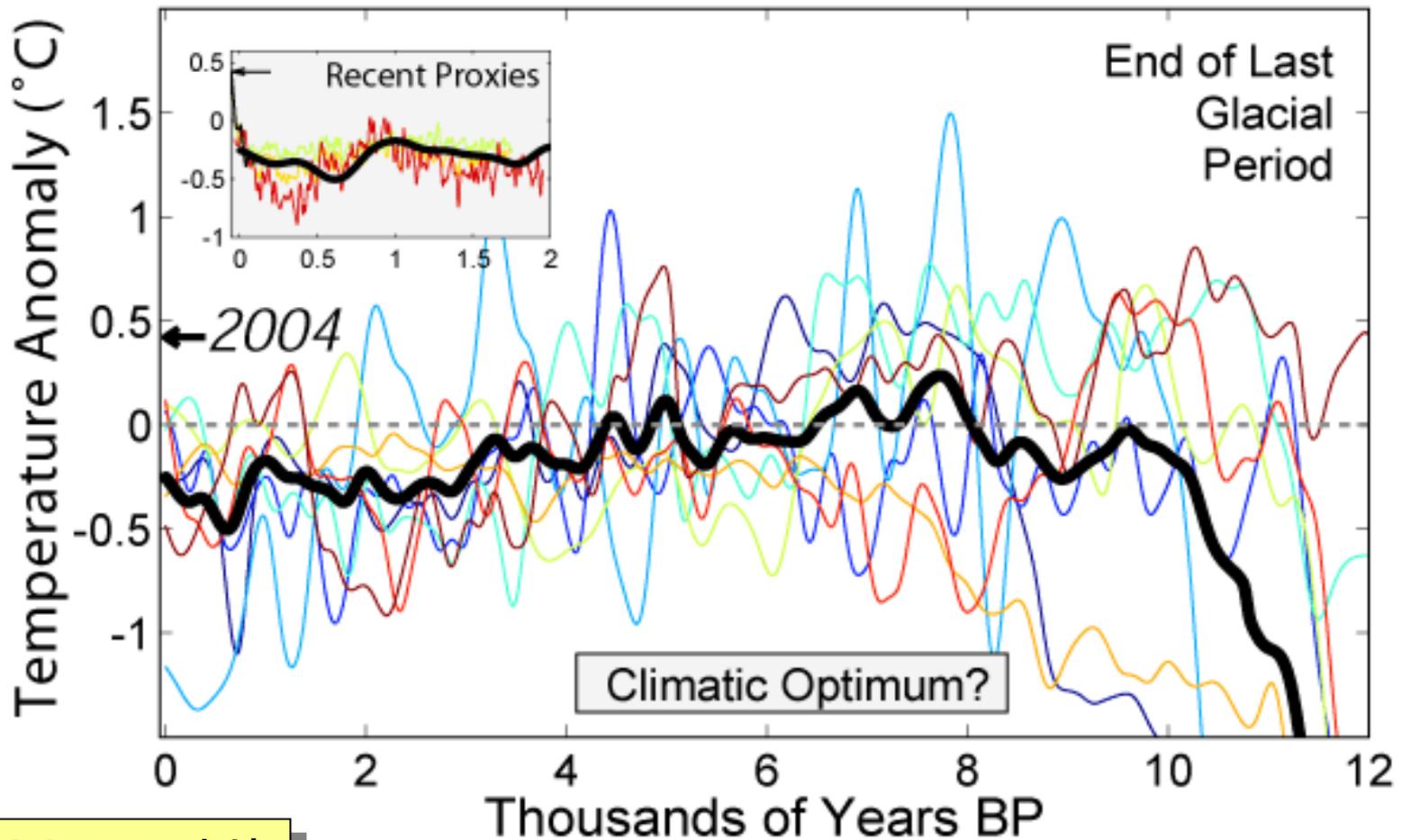
- ヴァージニア大学教授
- 長年、コロンビア大学で地球環境を研究
 - Doherty Senior Research Scientist at Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University.
- “Plows, Plagues & Petroleum”
 - 2006年ファイ・ベータ・カップ科学賞受賞

ラディマンの仮説

- 地球の気候は「完新世の気候最適期」以降、寒冷化の道をたどっていた
 - 過去の間氷期の期間は1万年強。直ぐにピークが来て緩やかに寒冷化。過去事例と同様の動き
- ところが、今回の間氷期では大気中のメタンや二酸化炭素の含有量は7000年前から上昇傾向にある。
- この現象は過去の気候サイクルにはない
 - 過去の氷期・間氷期の気候サイクルでは、気温が上昇→大気中のメタン・二酸化炭素が増加
 - 自然要因では、温室効果ガスの大気中での増加は原因ではなく、結果であった

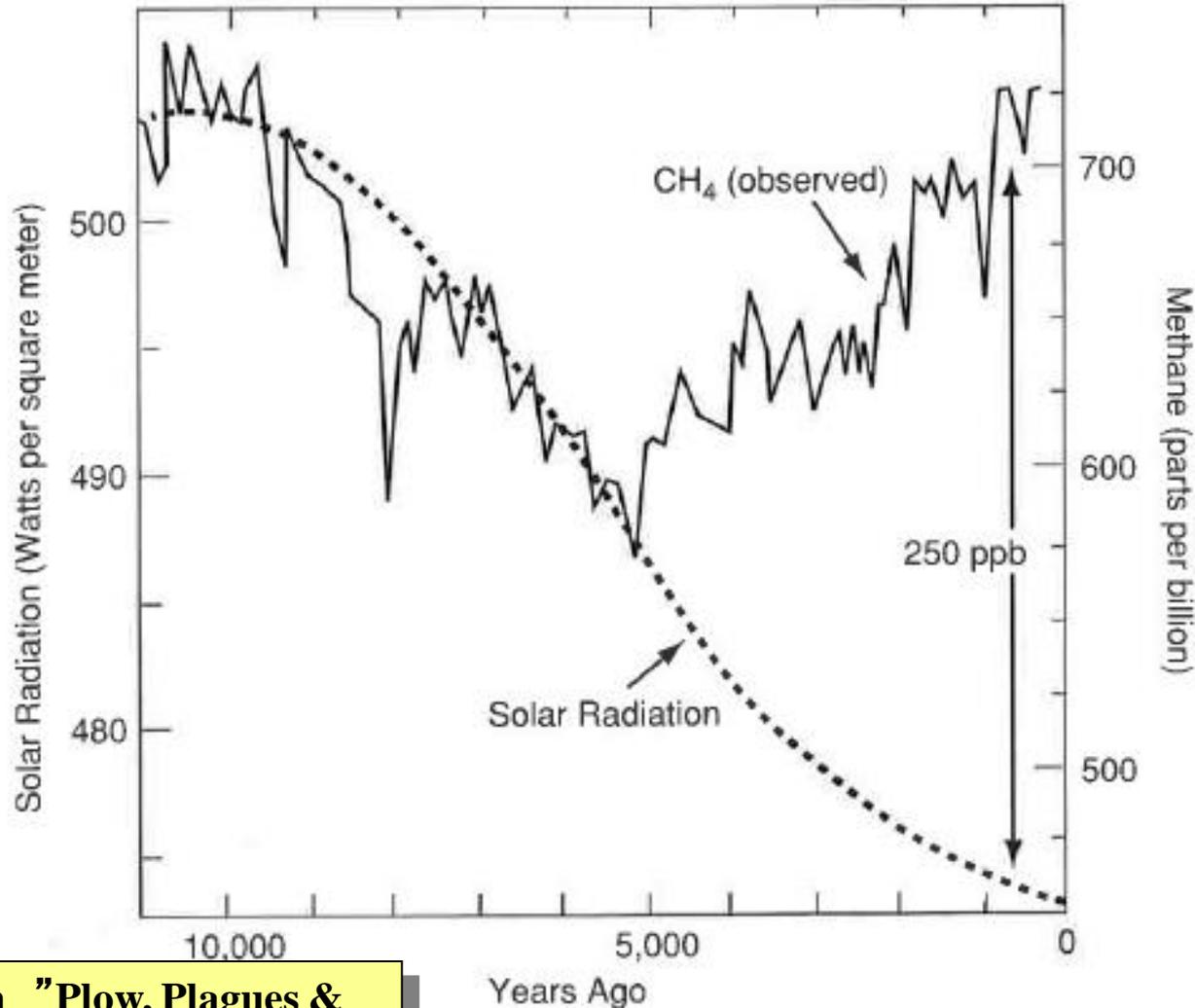
「最適温暖期」の気温

Holocene Temperature Variations



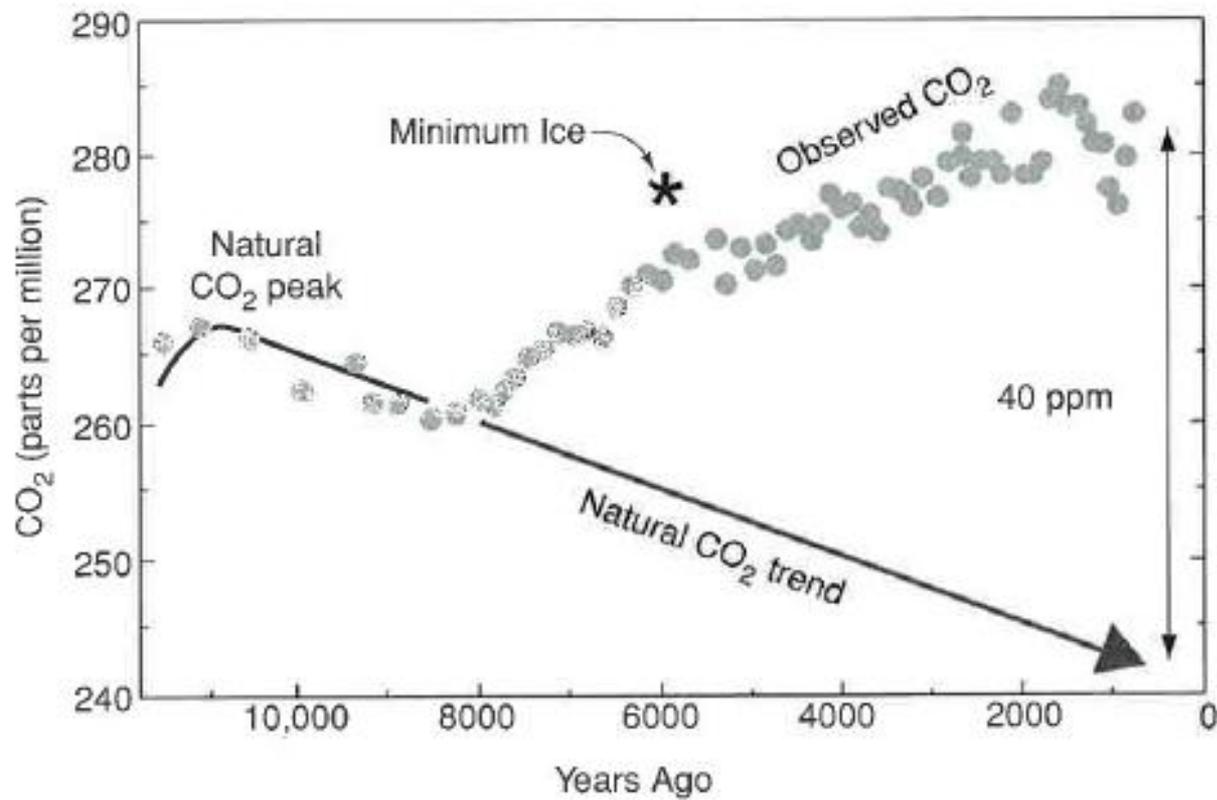
IPCC; AR4より

太陽放射量とメタンの推移 (5000年前からメタンが増加)



W.F.Ruddiman "Plow, Plagues & Petroleum"より

二酸化炭素も8000年前から増加 (産業革命以前も不自然に上昇)



W.F.Ruddiman "Plow, Plagues & Petroleum"より

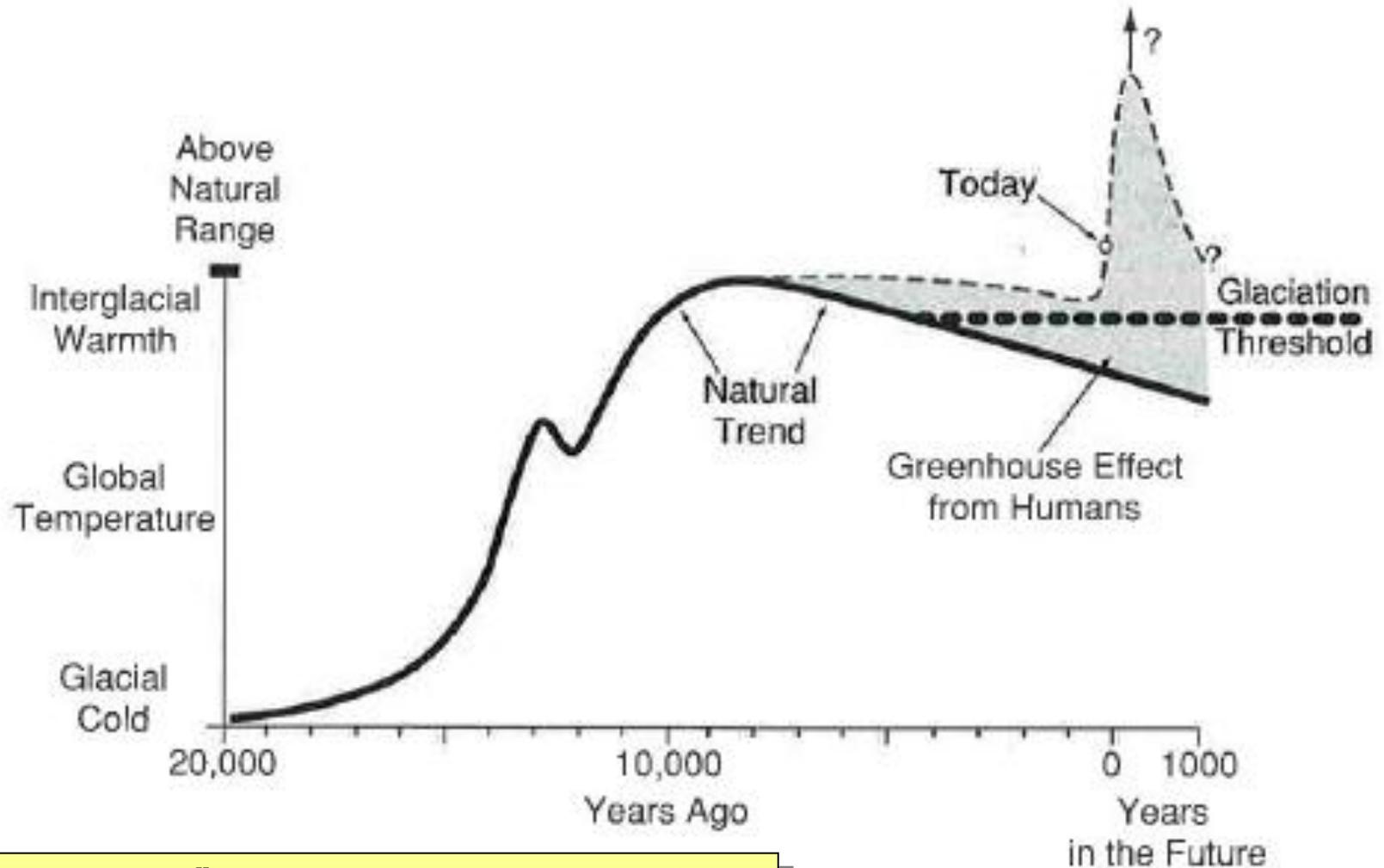
「初期人類起源温暖化」説 (Early Anthropogenic Hypothesis)

- 8000年前まで; 自然が気候をコントロール
 - 氷河期の終焉
 - 太陽の活動(放射量)や北半球での入射量が増加
 - これに伴いメタン・二酸化炭素という温室効果ガスが増加
 - 8000年前～2000年前まで; 人間が気候をコントロールし始める
 - 人類による温室効果ガス排出
 - ヨーロッパ南部やアジアで森林伐採が開始
 - 農耕地(特に水田)や酪農がメタンを増加
 - 2000年前～現在; 人間が気候をコントロール
 - 工業化により二酸化炭素やメタンの排出量が急増
- ⇒人為的要因がなければ8000年前から地球の寒冷化が現出しはじめていたろう

ラディマンの描く気候の将来

- 過去数千年の北半球での太陽入射量の減少を人為的な温室効果ガスが補って、温暖な気候が継続
- しかし現在の水準での人為的な温暖化ガス放出量は、あと200～300年しか続かない
- ただし、すぐに急速な寒冷化に向かうことはない
 - 産業革命以前の温室効果ガス排出量は不変
 - 大気中に残された温室効果ガスが海洋や陸地に吸収されるには時間がかかる
 - 自然のトレンドよりは気候は温暖に推移
- いずれにせよ、ゆっくりと寒冷化し、1000年後には新しい氷河期の入り口に入るのではないか

ラディマンのシミュレーション

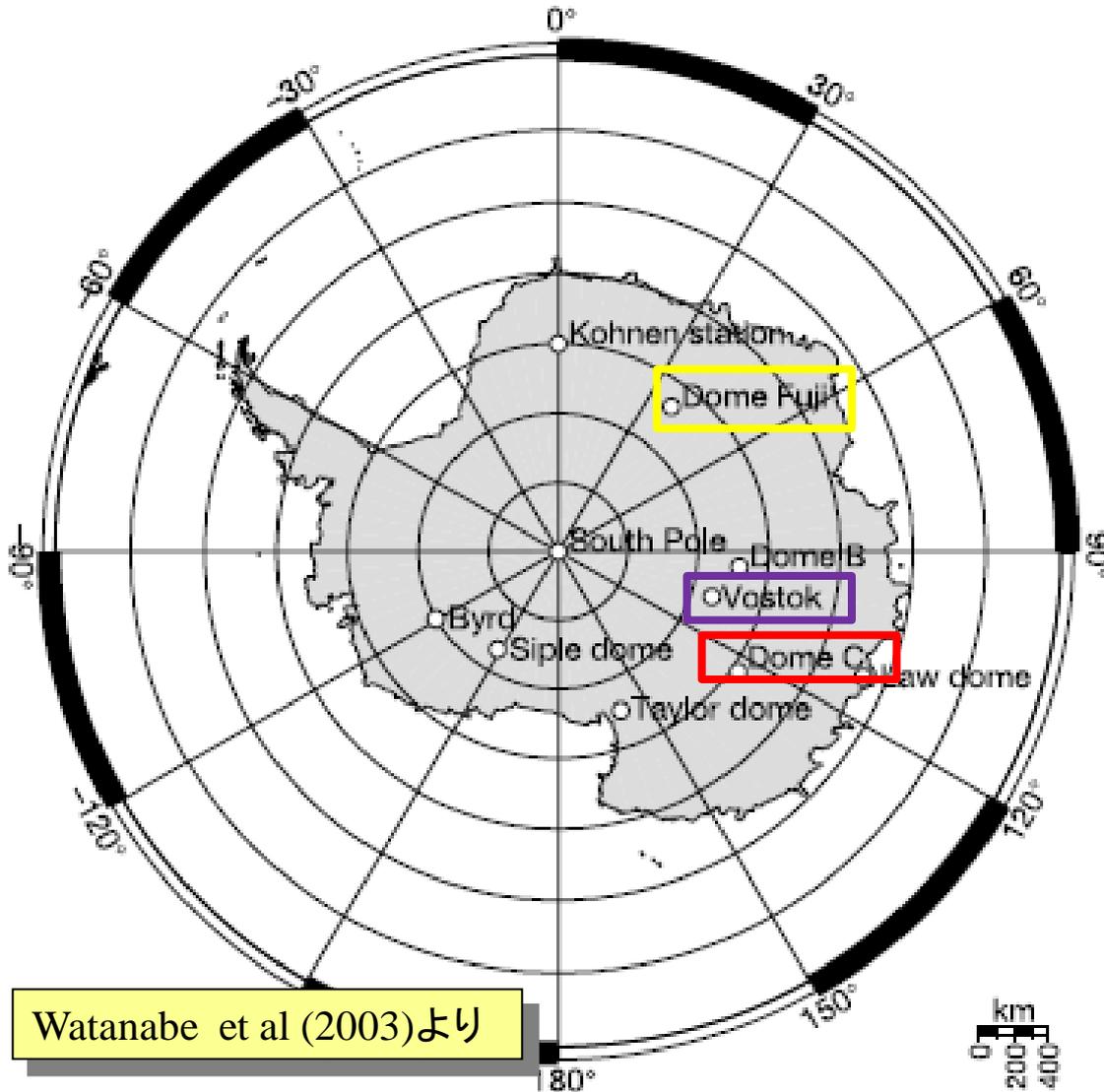


W.F.Ruddiman "Plow, Plagues & Petroleum"より

ラディマン仮説への反論

- 初期人類の森林伐採による二酸化炭素排出は定量的にみて、それほど大きくない。
 - 過去8000年間に大気中の二酸化炭素の増加40ppmv。このためには7000Gtもの排出量が必要。(Indermuhle et al 1999)
 - 産業革命前の森林伐採による二酸化炭素の排出量は、せいぜい60~80Gt。大気中の二酸化炭素濃度の増加への寄与は4~6ppmvに過ぎない。(de Fries et al, 1999)
- 完新世中期から後期の大気中のメタン濃度の増加は、北半球での湿地の増加、大河川下流でのデルタの生成という自然要因で説明できる。(Schmidt et al, 2004)

EPICAグループ



- European Project for Ice Coring in Antarctica
 - 欧州系の南極氷床調査チーム
 - 南極ドームCで氷床コア採取
 - 80万年前までの気候を分析
- IPCC; AR4の、「6. 古気候」で採用

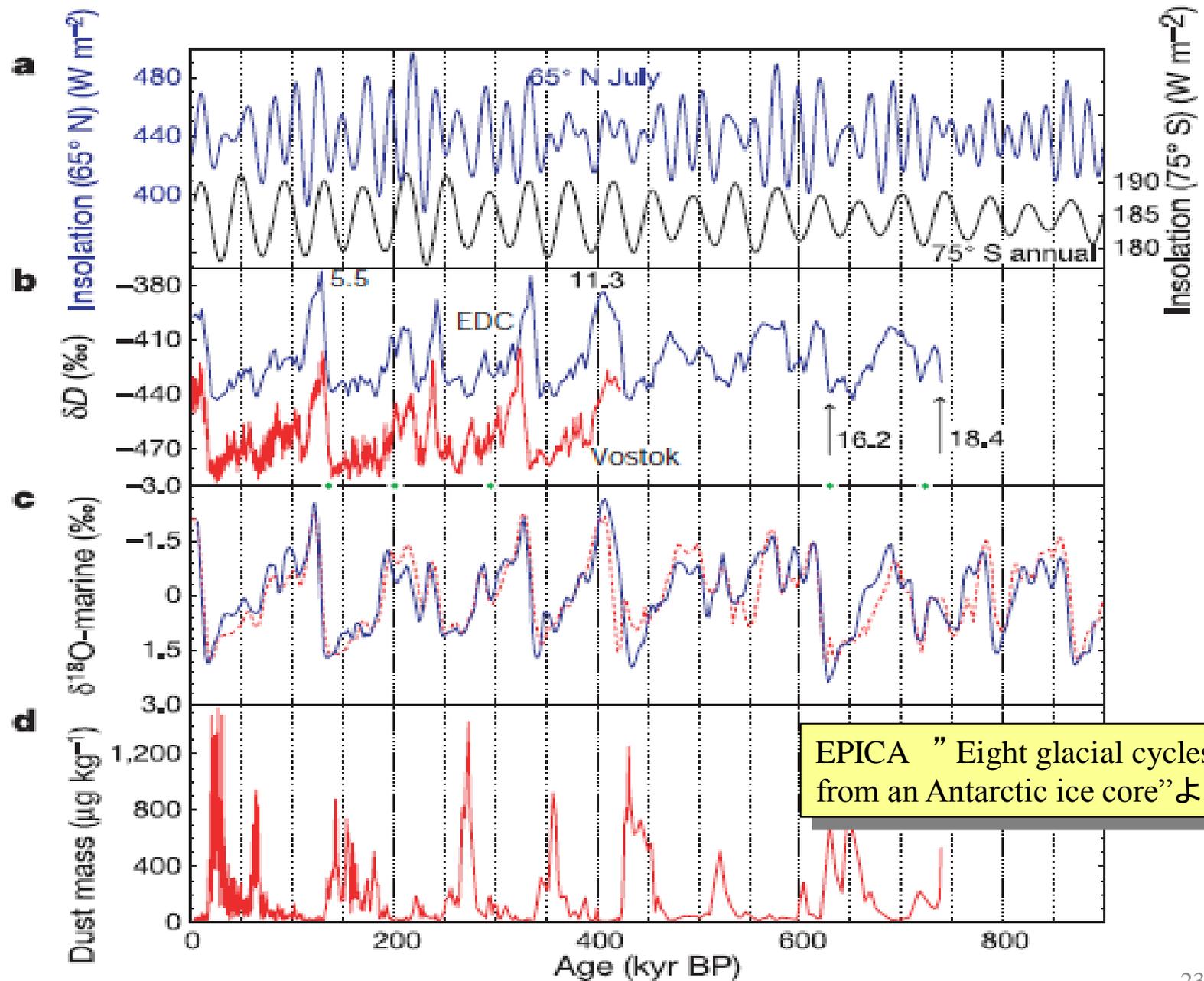
氷床コアに含まれる酸素同位体

酸素16
(99.763%)

酸素17
(0.0375%)

酸素18
(0.1995%)

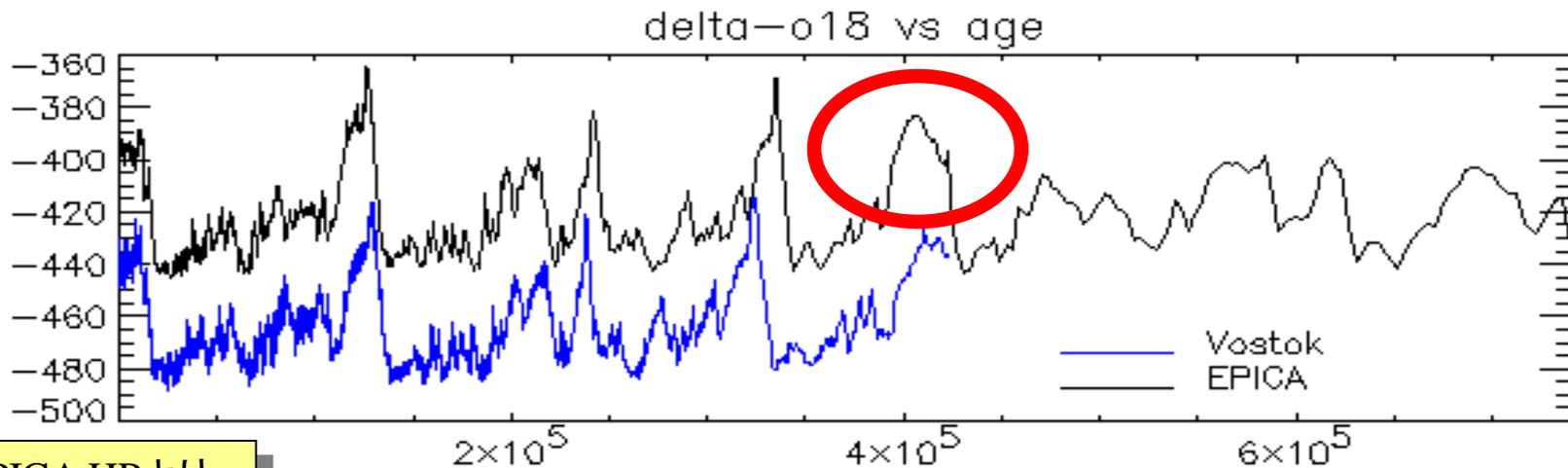
- 水素と化合すると水になる。
- 酸素16＝軽い水、酸素18＝重い水
- 海洋の水が蒸発する時、軽い水の方が蒸発しやすい。
- 気温が上昇すると重い水でも蒸発する。
- 氷床コアに含まれる酸素18比率を見れば、降雪した時代の気温が解析できる。



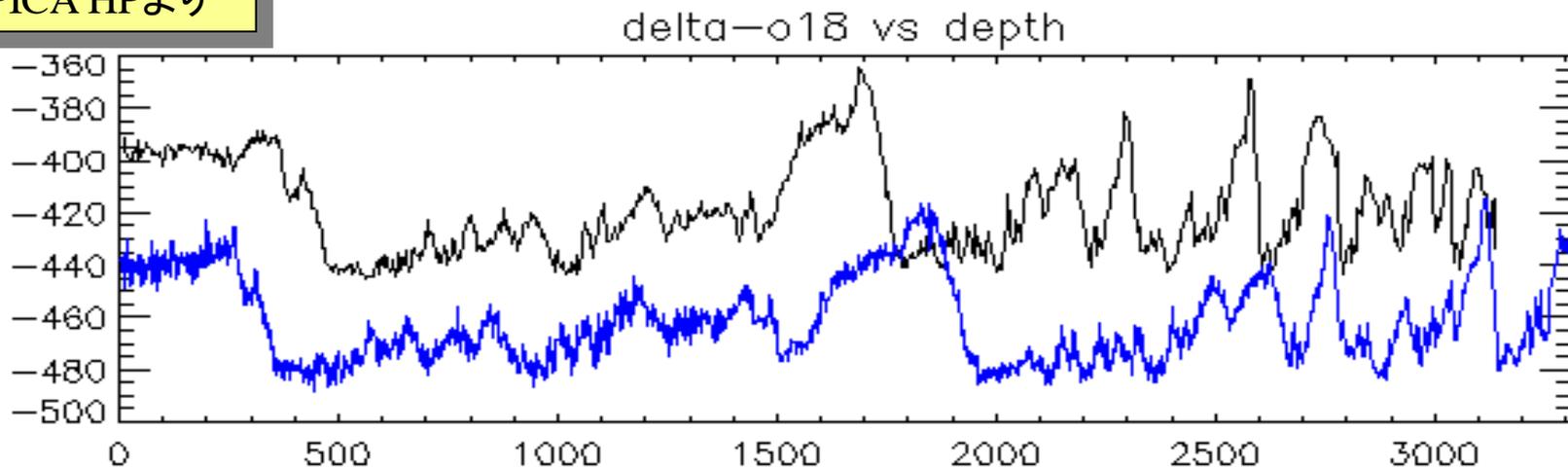
EPICA "Eight glacial cycles from an Antarctic ice core"より

ヴォストーク基地 vs 欧州連合

(42万年前) (80万年前)



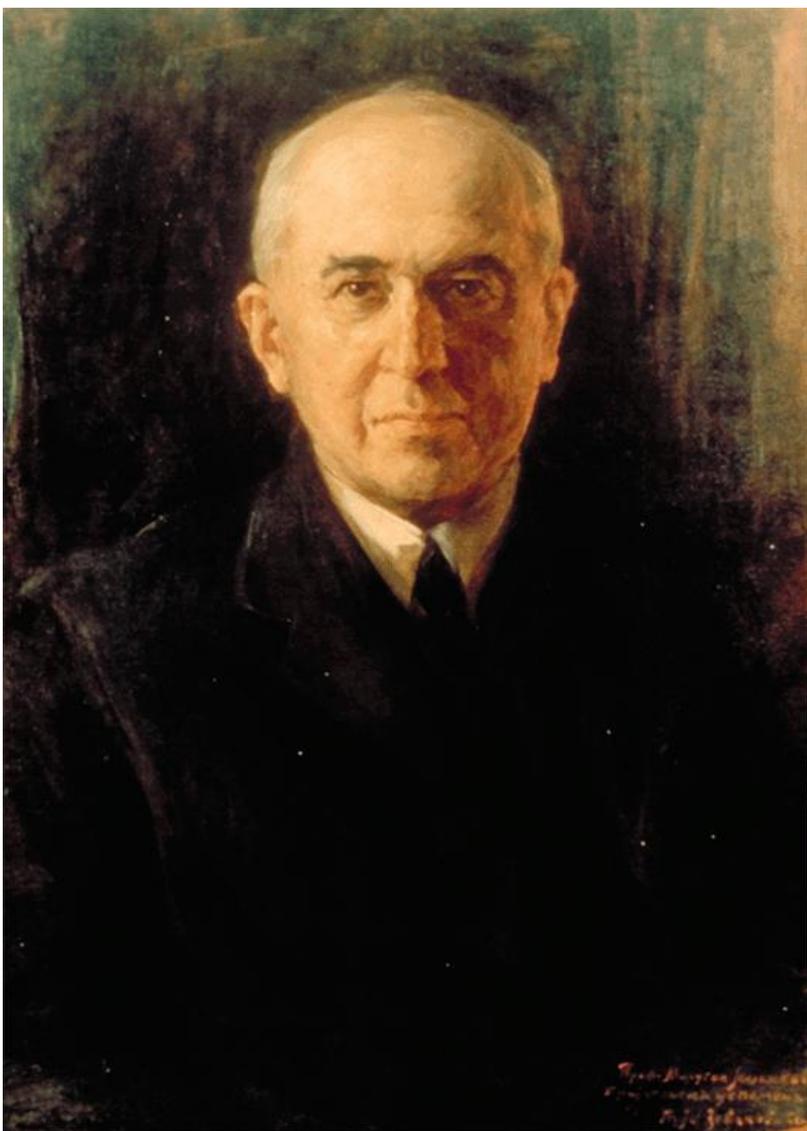
EPICA HPより



EPICA;ドームCでの分析結果

過去の間氷期との比較

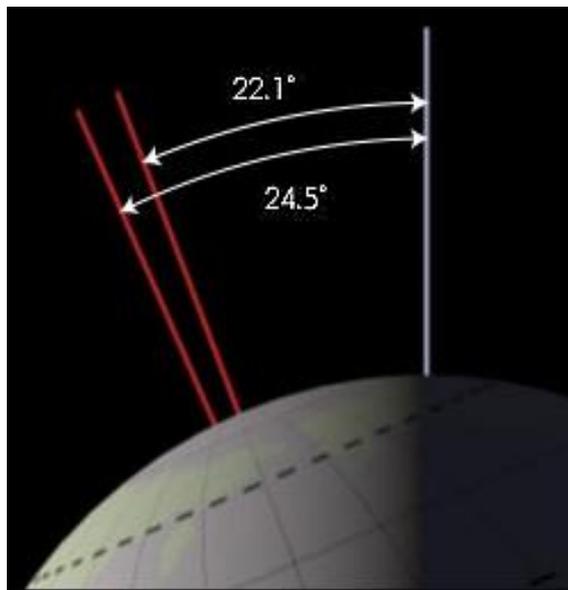
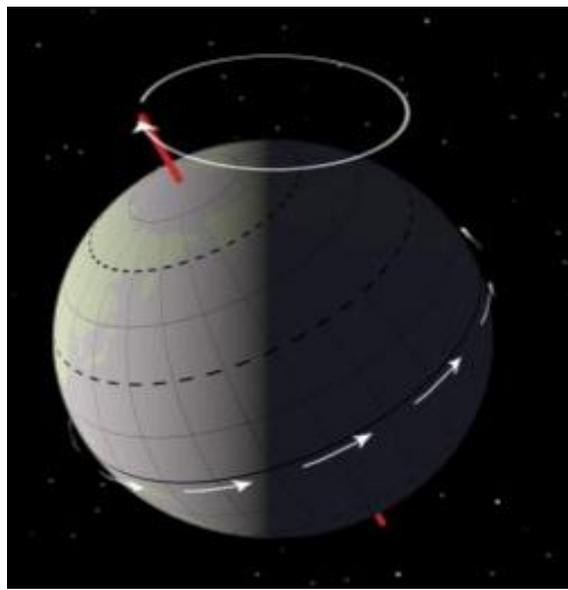
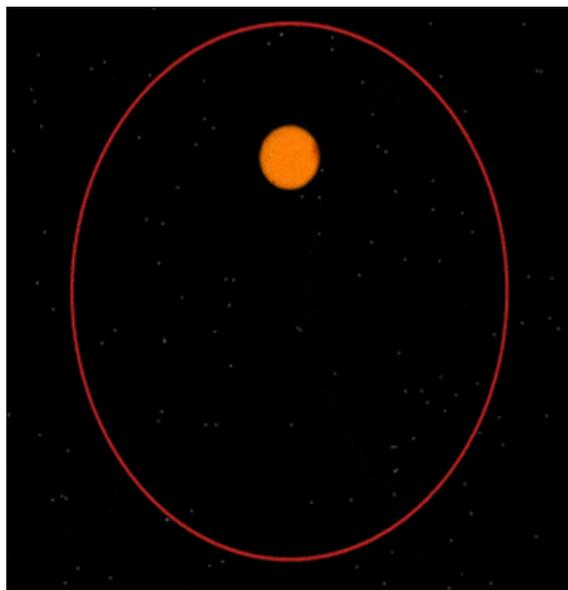
- MIS5; 前回氷期、12万年前がピーク
 - 1万年強続く。海面水位は現在よりも高い(下末吉海進)
 - ただし、現在の間氷期とは日射量の変化が違う
- MIS7; 24万年前
 - 温暖化の程度弱く、短命(1万年で氷期へ)
- MIS9; 32万年前
 - ステージ5に似ており、短命
- MIS11; 41万年前
 - 過去78万年で最大・最長の温暖期。2万8000年間続く
 - MIS11と現在のMIS1は、ミランコヴィッチ・サイクルでの軌道による日射量の変化が似ている



Milutin Milankovitch (1879~1958)

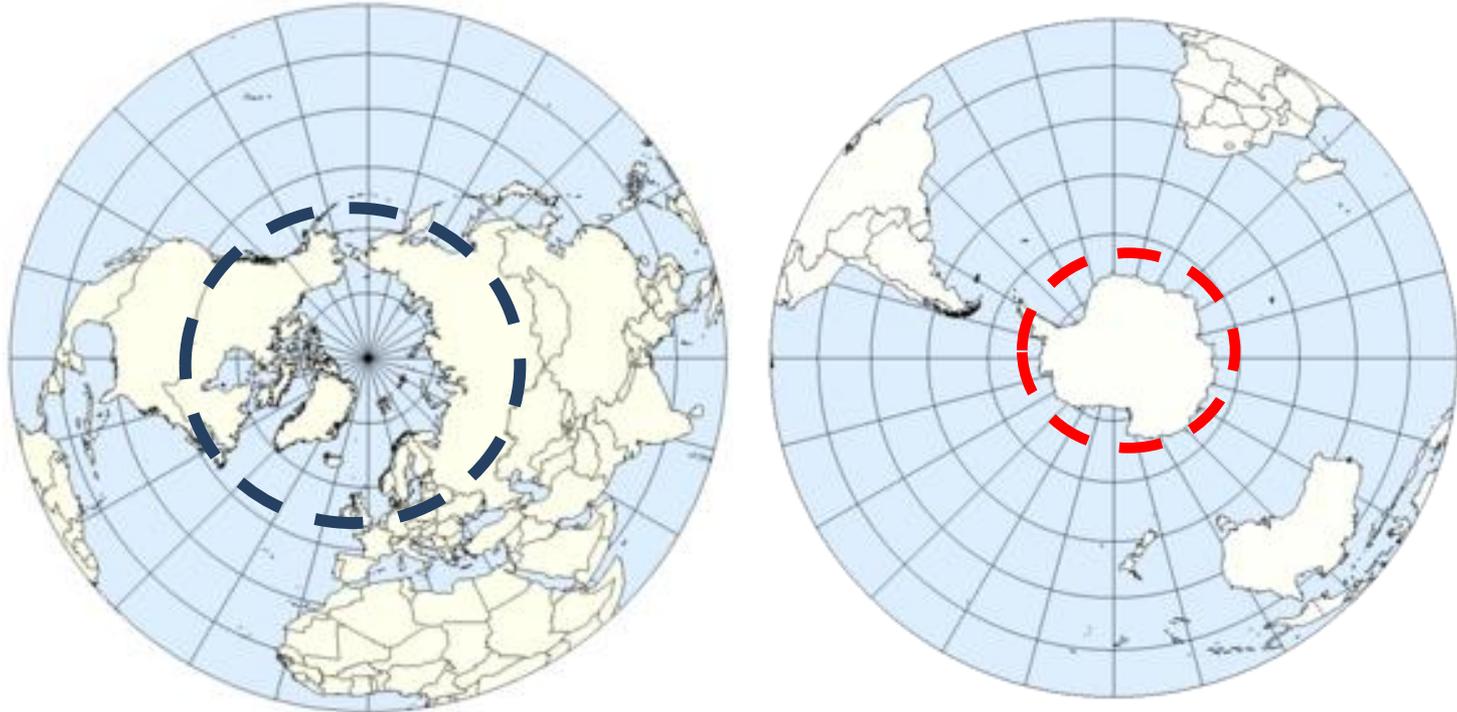
- セルビアの天文学者
- 軌道要素と気温の変化を30年間計算し続ける
- 歳差運動と地軸の傾きのサイクルがともに極値になったとき地球の一方の半球に届く日射量は極小になる→寒冷化が起きる

地球軌道のパラメータ3要素



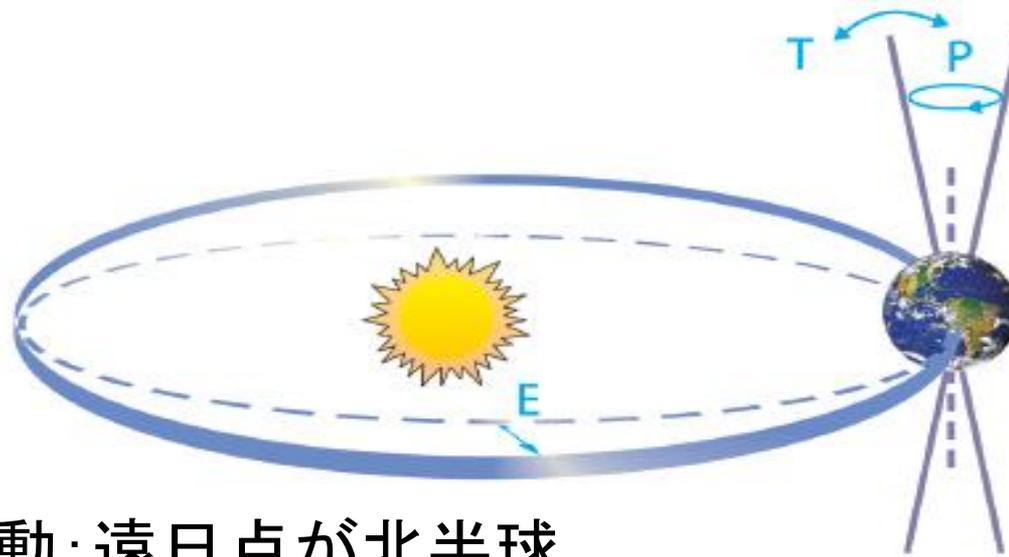
- 公転軌道の変化 : 9.5万年
- 歳差運動 : 2.17万年
- 地軸の傾きの変化 : 4.1万年

北半球と南半球：アルベド変動の違い



- 地形上、巨大氷床の出来やすい北半球の日射量がポイント
⇒北緯65度の日射量が気候モデルではよく使用される
- 北半球の万年雪・万年氷が増加⇒氷期に入る

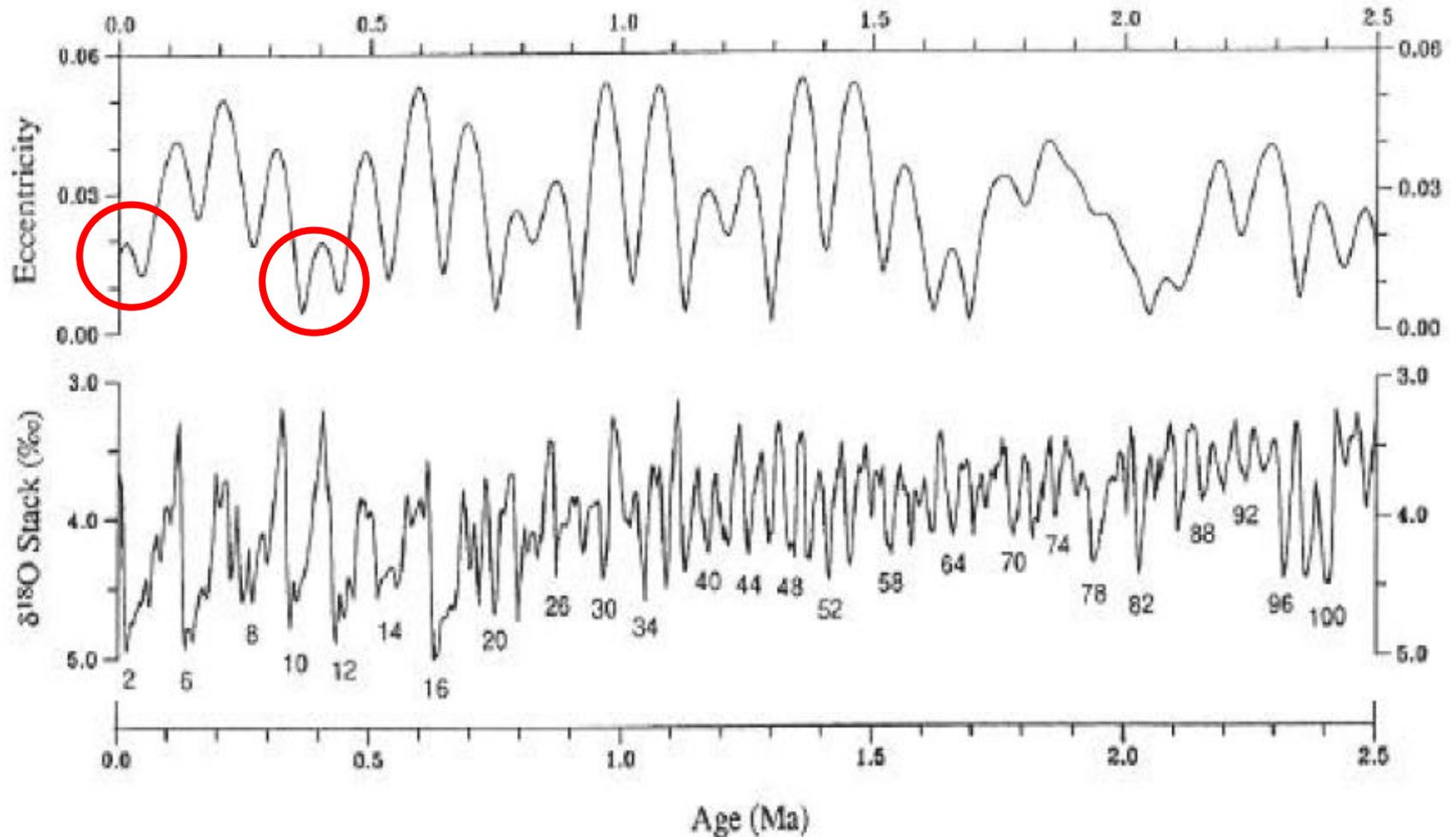
氷期が始まる条件



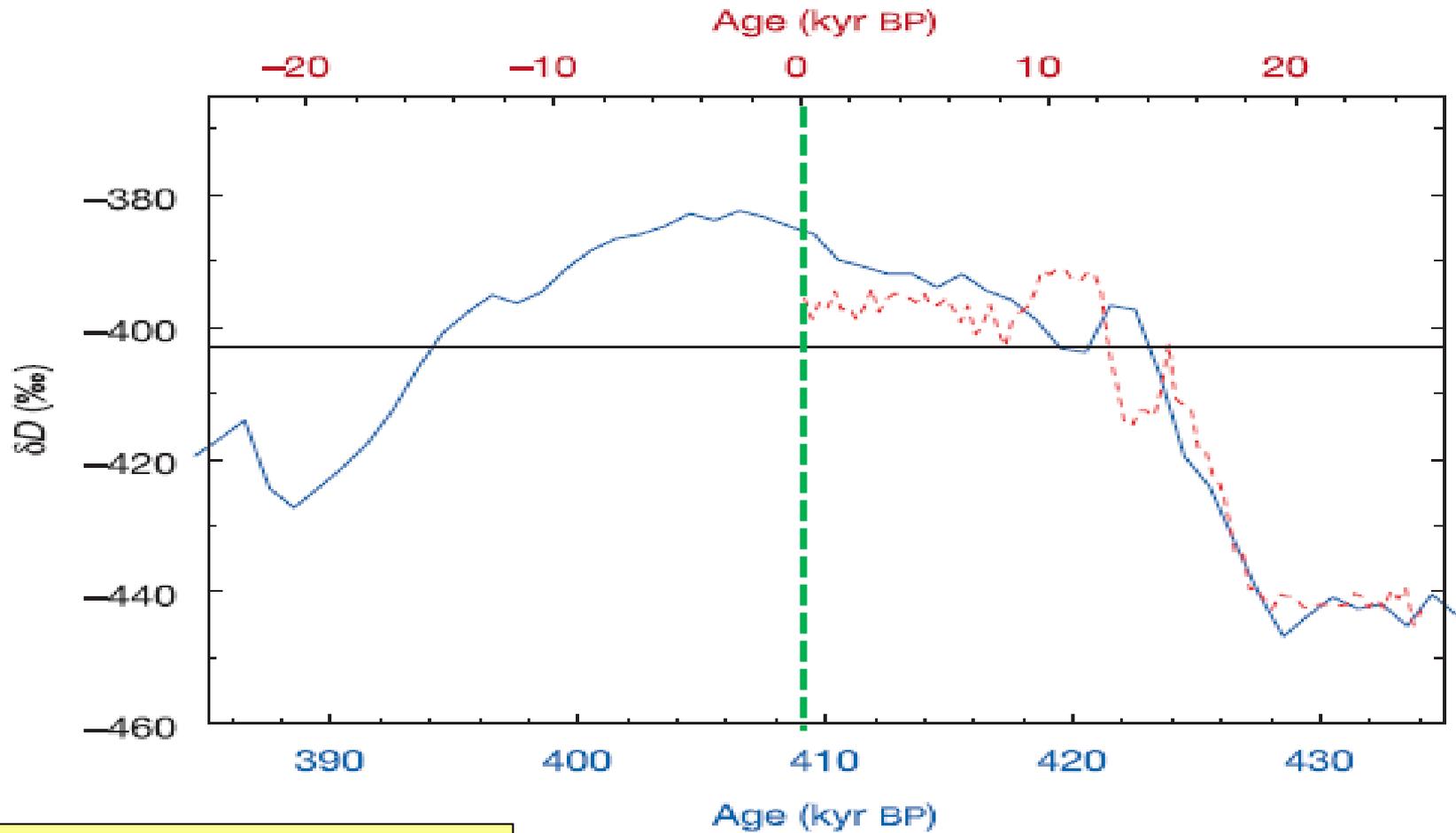
- 歳差運動; 遠日点が北半球の夏(冬の万年雪が溶けにくい)、南半球の冬
 - 地軸; 傾きが小さい; 夏の高緯度での日射量が少ない
 - 離心率; 大きくなる
- ⇒ 北半球の夏季の日射量が少なくなる時に、万年雪・万年氷が拡大

⇒ 離心率小さいと、歳差運動と地軸の傾きの影響が少なくなる(氷床面積拡大せず)

公転軌道の離心率と酸素同位体ステージ



EPICAの主張 現在の間氷期はまだまだ続く



EPICA "Eight glacial cycles from an Antarctic ice core"より

IPCC AR4 6.4.1.8

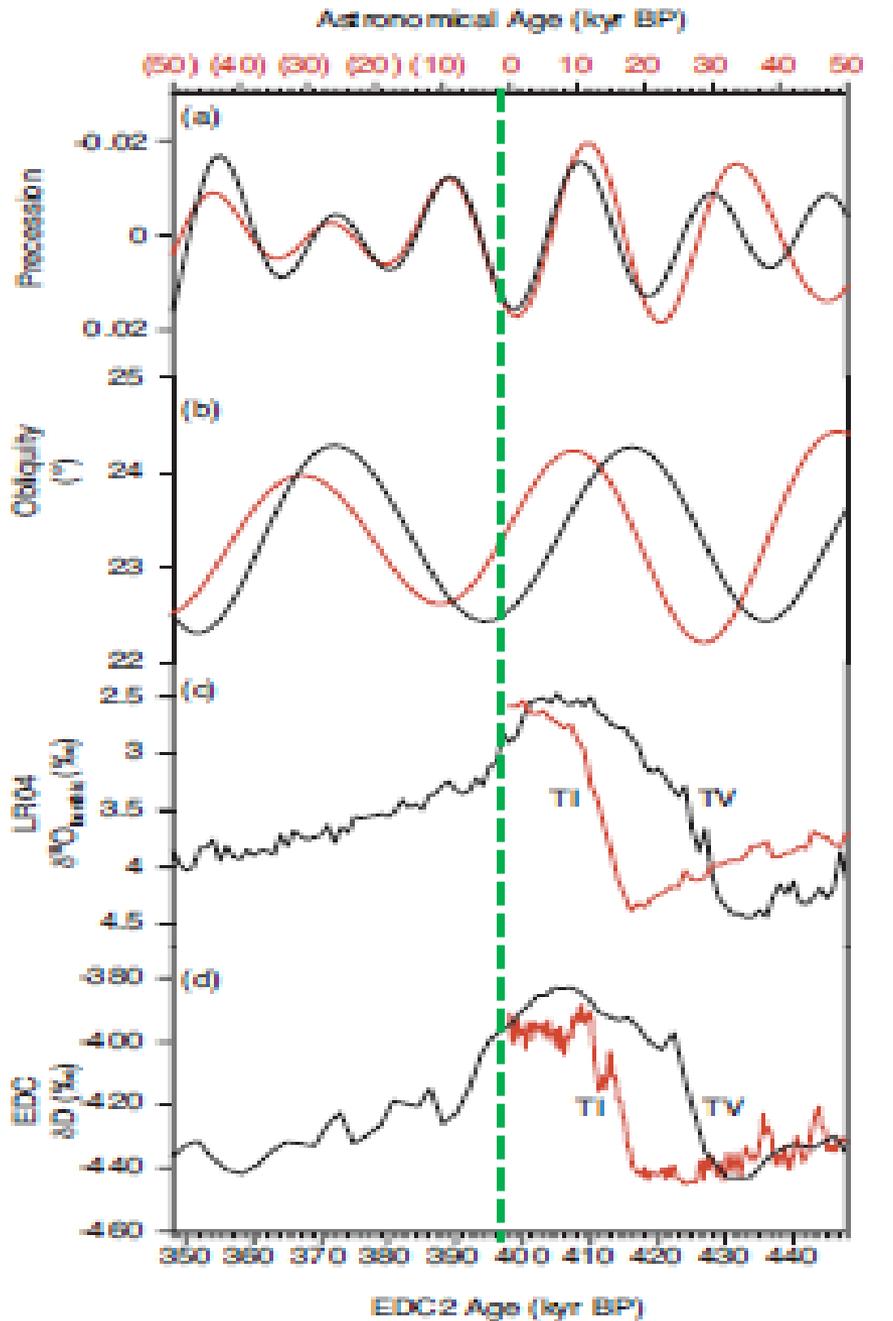
There is no evidence of mechanisms that could mitigate the current global warming by a natural cooling trend. Only a strong reduction in summer insolation at high northern latitudes, along with associated feedbacks, can end the current interglacial. Given that current low orbital eccentricity will persist over the next tens of thousand years, the effects of precession are minimised, and extremely cold northern summer orbital configurations like that of the last glacial initiation at 116 ka will not take place for at least 30 kyr

- 低い離心率は今後数万年は続く
- このことが歳差運動の影響を極小化する
- 前回の間氷期(MIS5)の際の11万6000年前に起きたような、地球の軌道要素によって北半球が急激に寒冷化することは、少なくとも3万年は起きないだろう

Round 3

その後の動向 (IPCC AR4以後)

- MIS 1とMIS 11の詳細な比較
- EPICAドームCのアイスコア以外での代替資料による検証
- MIS 11以外でのMIS 1との類似ステージの検証



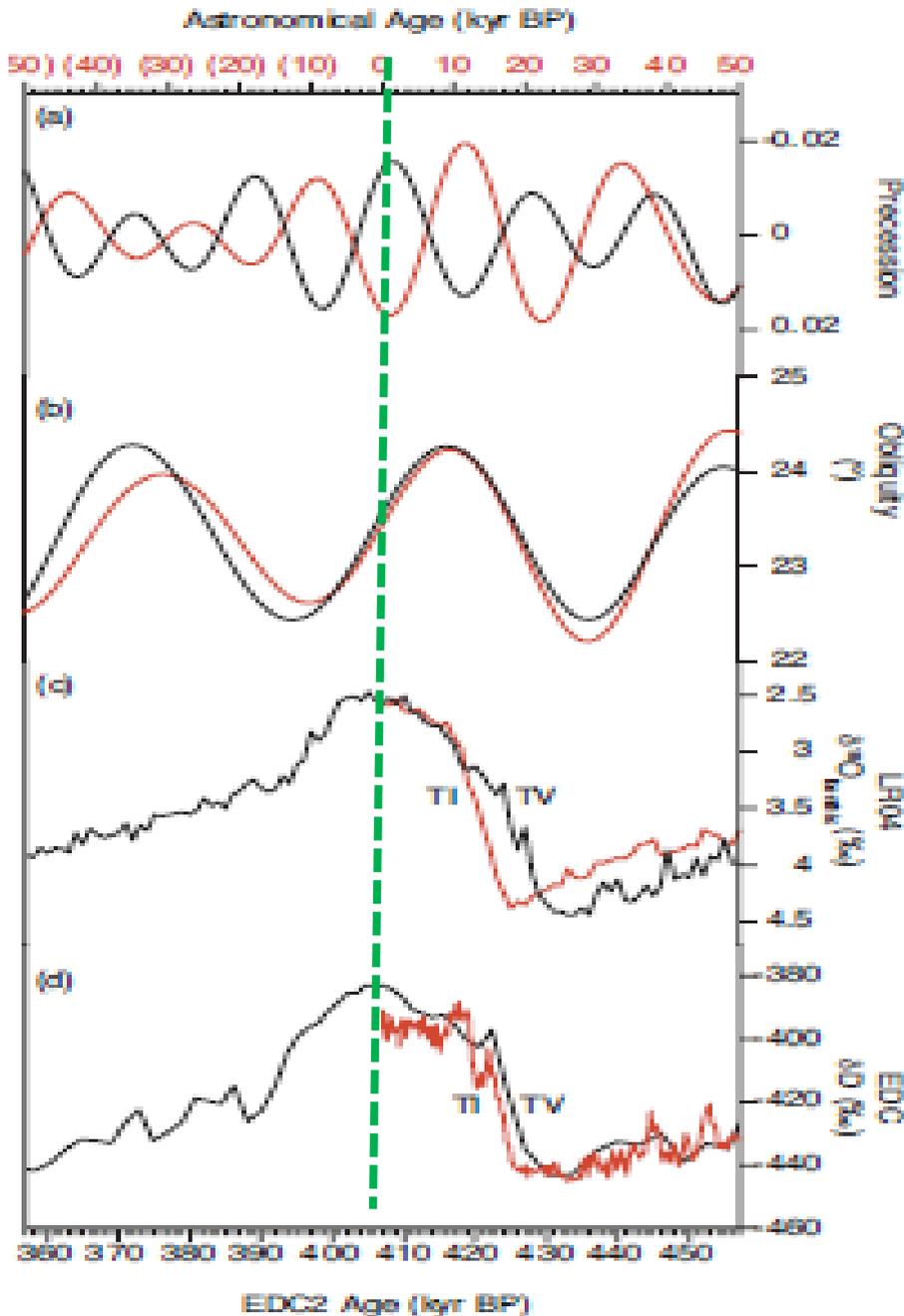
MIS 1とMIS 11①

Ruddimanの見たて

- 歳差運動を一致させることで類推 (Ruddiman 2005)
- 現在は、MIS 12の39万5000年前に相当
- 今は、氷期に突入するがけっぷち

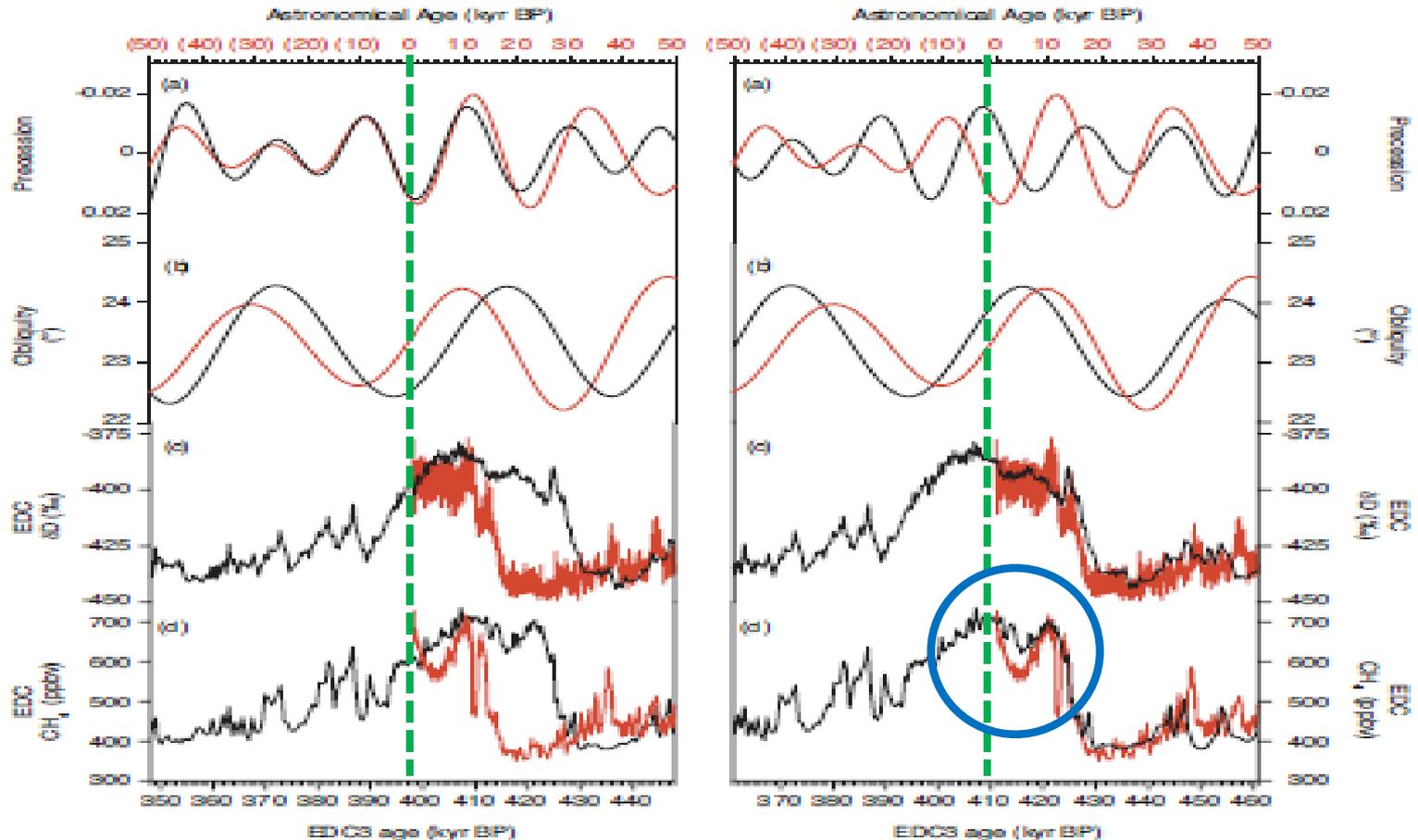
MIS 1とMIS 11②

Ruddimanへの反論
(Mosson-Delmotte et al,
2006)



- 地軸の傾きで一致させる
- 歳差運動で δD の動きの相関もいい
- 現在は、MIS 12の40万7000年前に相当
- あと1万2000年は間氷期は続く

間氷期後期のメタンの増加について



- 地軸の傾きを一致させればMIS 11でもメタン増加傾向。
- おそらくは南半球熱帯域での自然要因による増加であろう

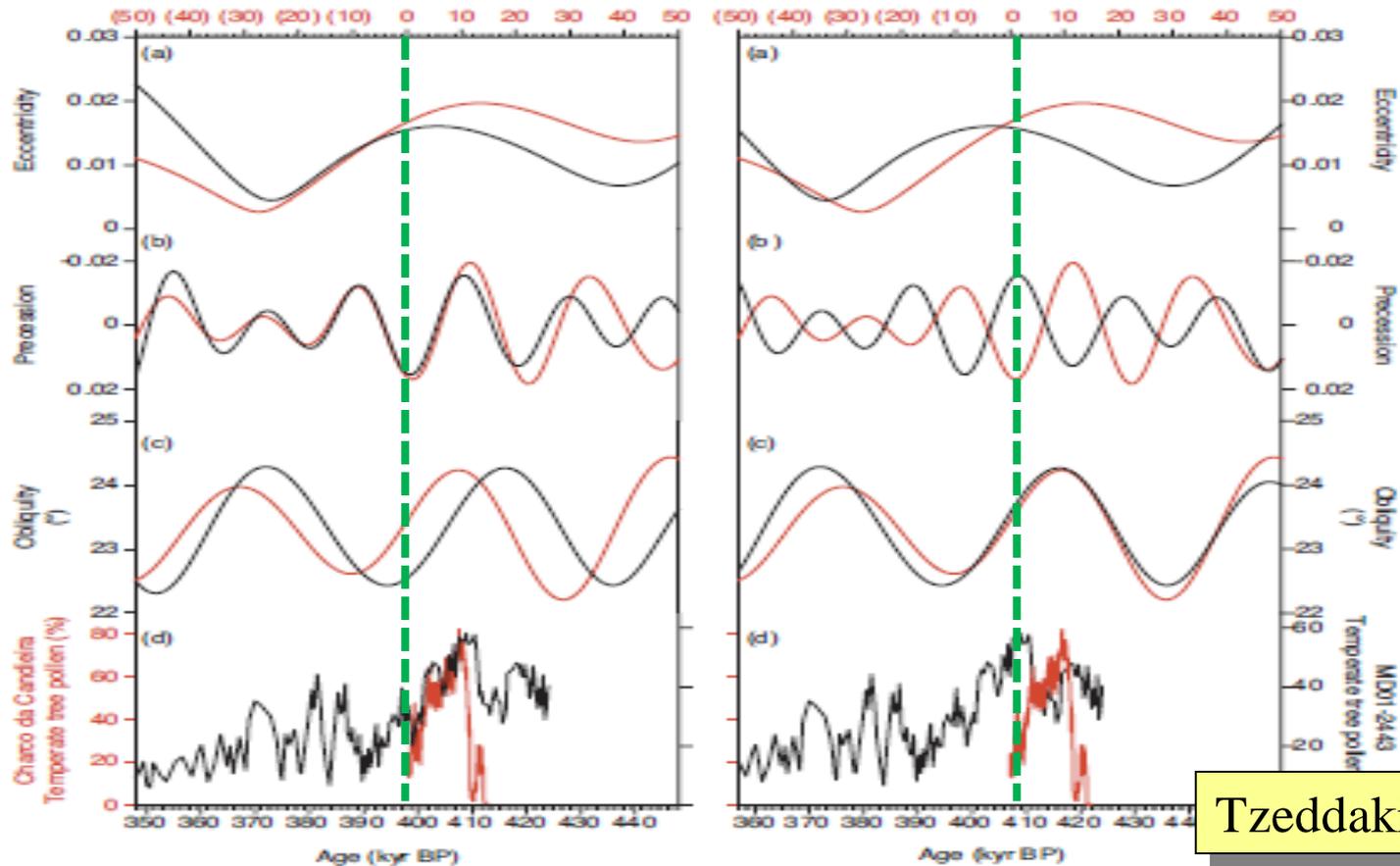
他の代替資料での検証

- EPICAのドームCの氷床コア分析以外の代替資料
- ポルトガル沖の海底コアに含まれる花粉分析 (Tzedakis et al, 2009)
 - 欧州南部の植生の変化からアプローチ
 - 同地域は、地軸の傾きでIPCZが横断する場所
- 氷期⇒間氷期⇒氷期のサイクルの中での植生の変化
 - ヒース、針葉樹
 - マツ、カバノキ、落葉性オーク(ナラ)
 - 地中海性硬葉植物
 - 落葉性オーク(ナラ)
 - ヒース、針葉樹

MIS 1とMIS 11の比較でいいのか？

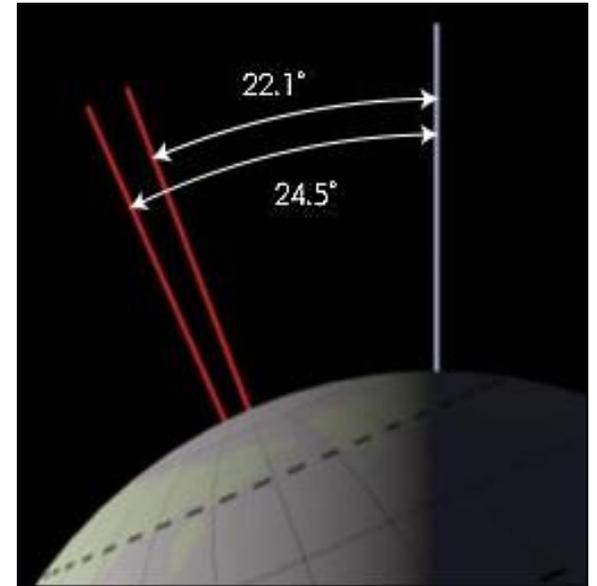
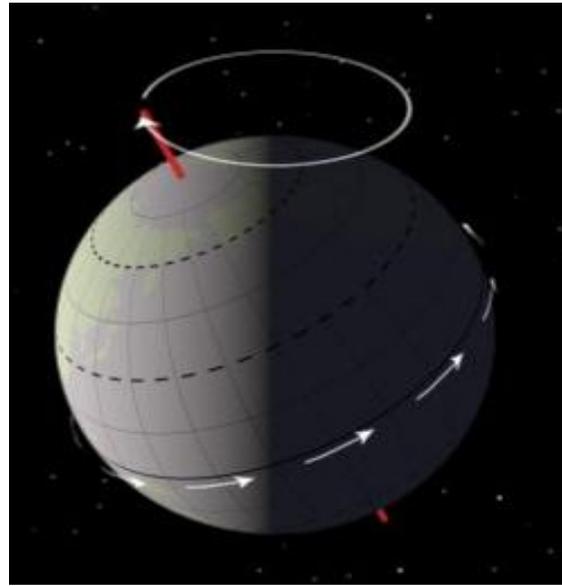
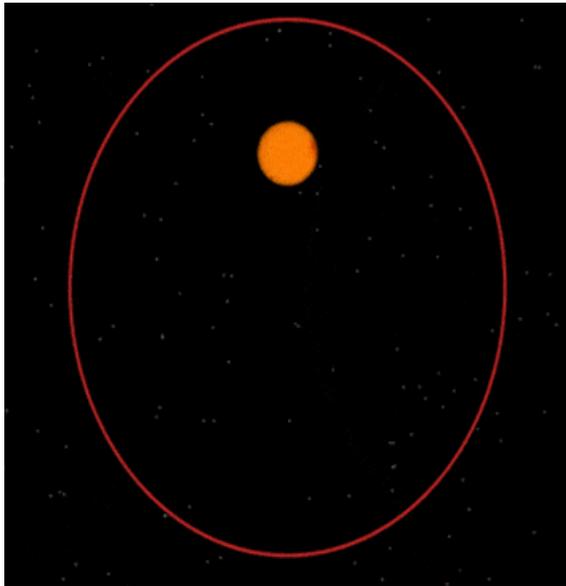
- MIS 1とMIS 11のグラフの推移をどう合わせるか
 - 歳差運動
 - 地軸の傾き
 - 北緯65度での6月21日の日射量
 - 海面水位の動き
- MIS 1とMIS 11の相違
 - MIS 11では北半球の日射量極大が二度あった
 - これが、例外的に長い間氷期をもたらした理由
 - MIS 1はそうではない・・・
 - MIS 11との比較でいいのか？
 - 氷床コア以外にないのか？

リスボン沖の海洋コアの花粉分析 39万5000年前との一致(左図)を支持



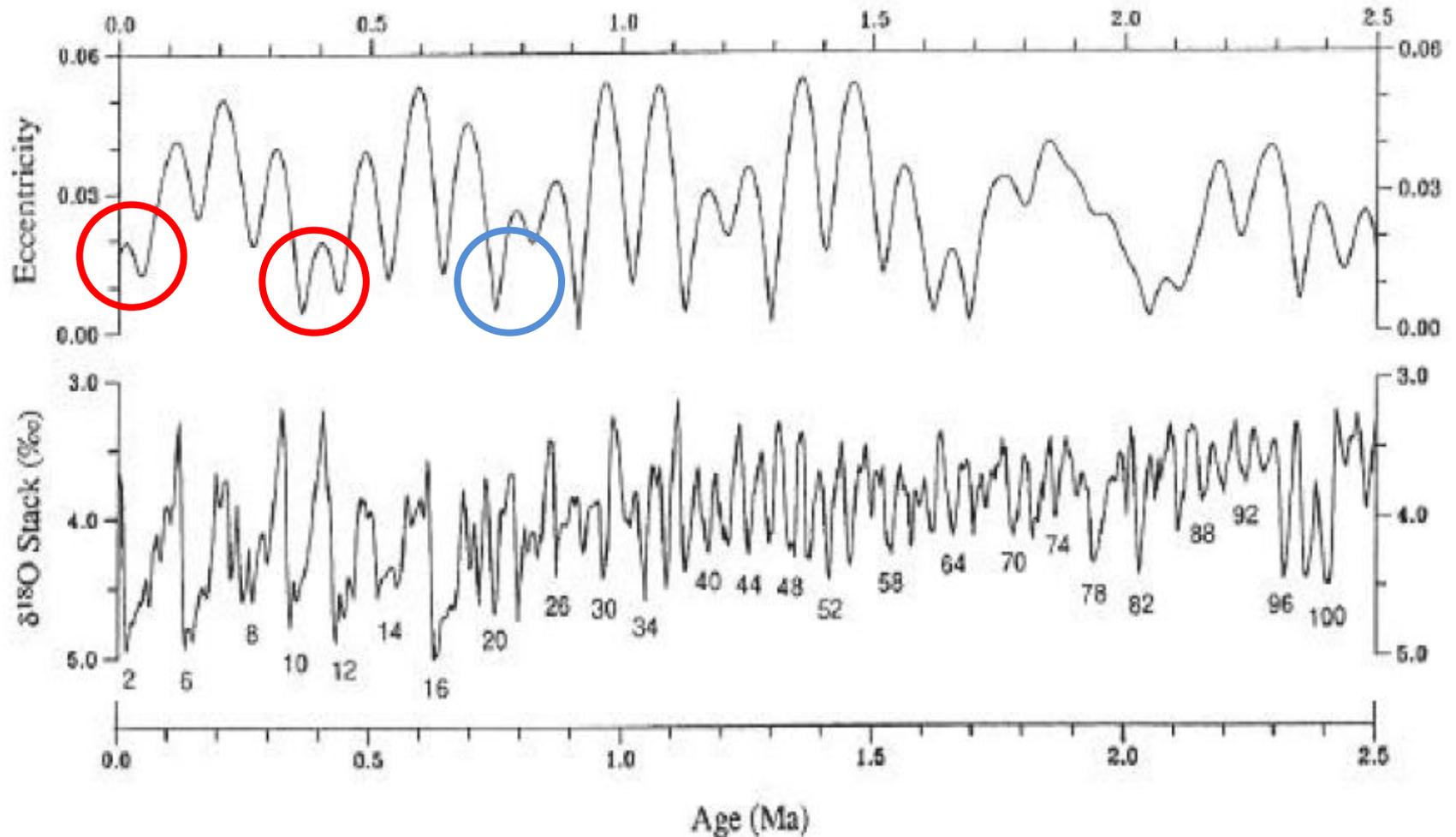
- 海底コアに含まれる花粉量で合わせると、歳差運動との相性がいい。離心率も同様。
- Rudimanに軍配が上がる・・・？

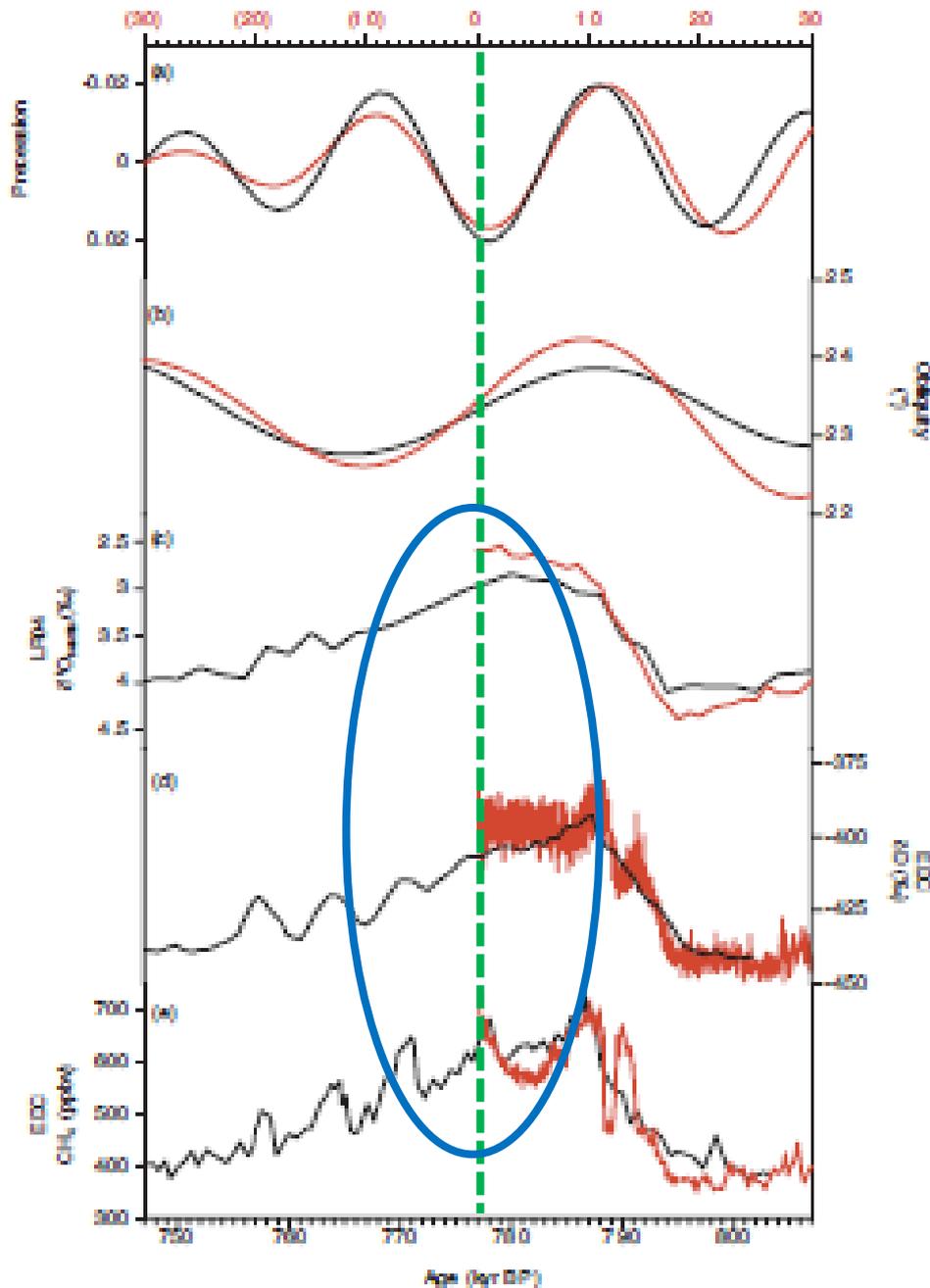
公転軌道での離心率のもう一つの周期



- 公転軌道の変化 : 9.5万年 ⇒ 40万年周期がある
- 歳差運動 : 2.17万年
- 地軸の傾きの変化 : 4.1万年

公転軌道の離心率と酸素同位体ステージ

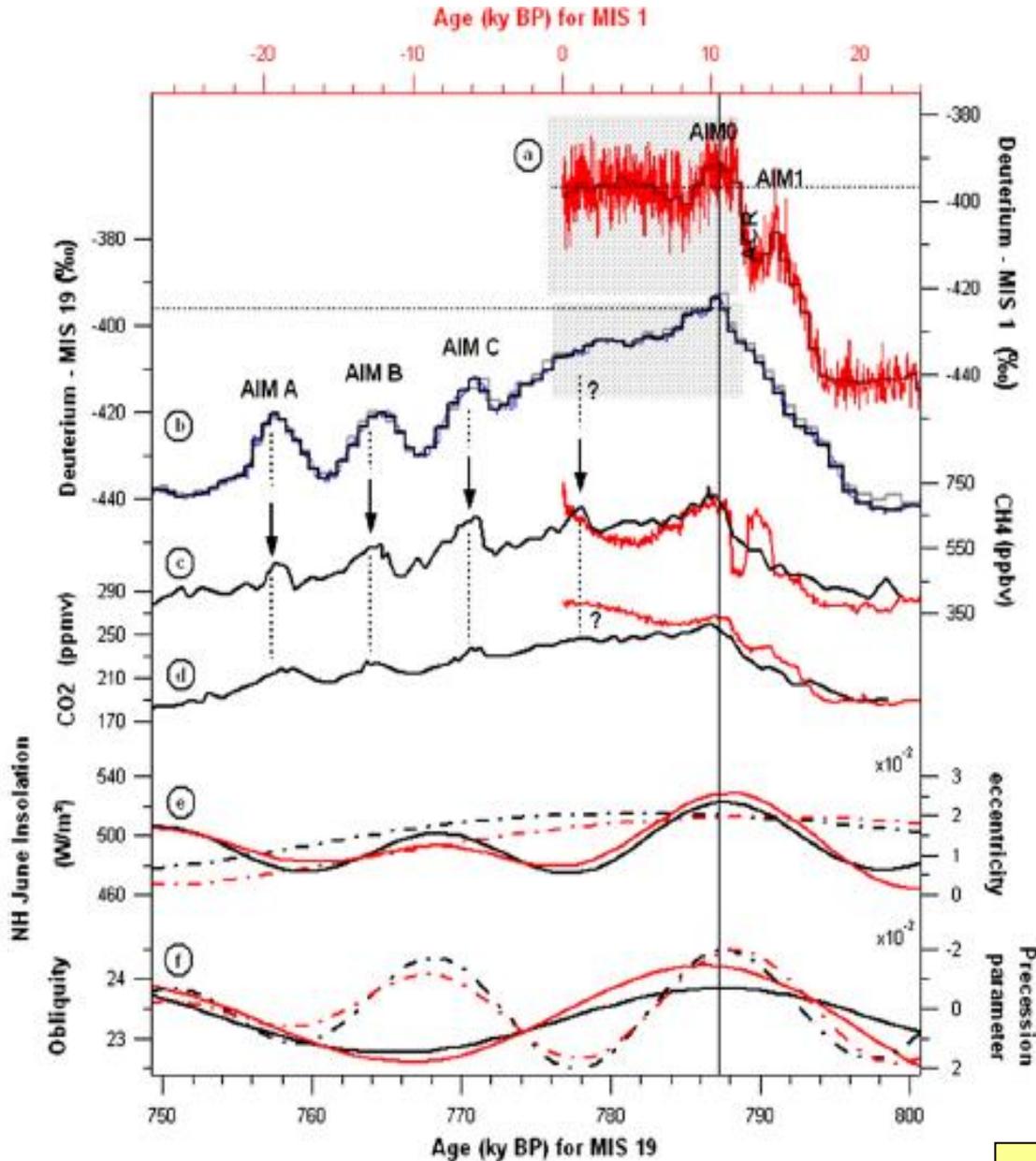




MIS 19を参考にすべきかもしれない

- 歳差運動を一致させた場合、離心率の動きも非常に近い
- 現在は、MIS 19の77万8000年前に相当
- メタンの動きも一致
- 氷期に入っていくようにも見えるが...

MIS 19の 重要性



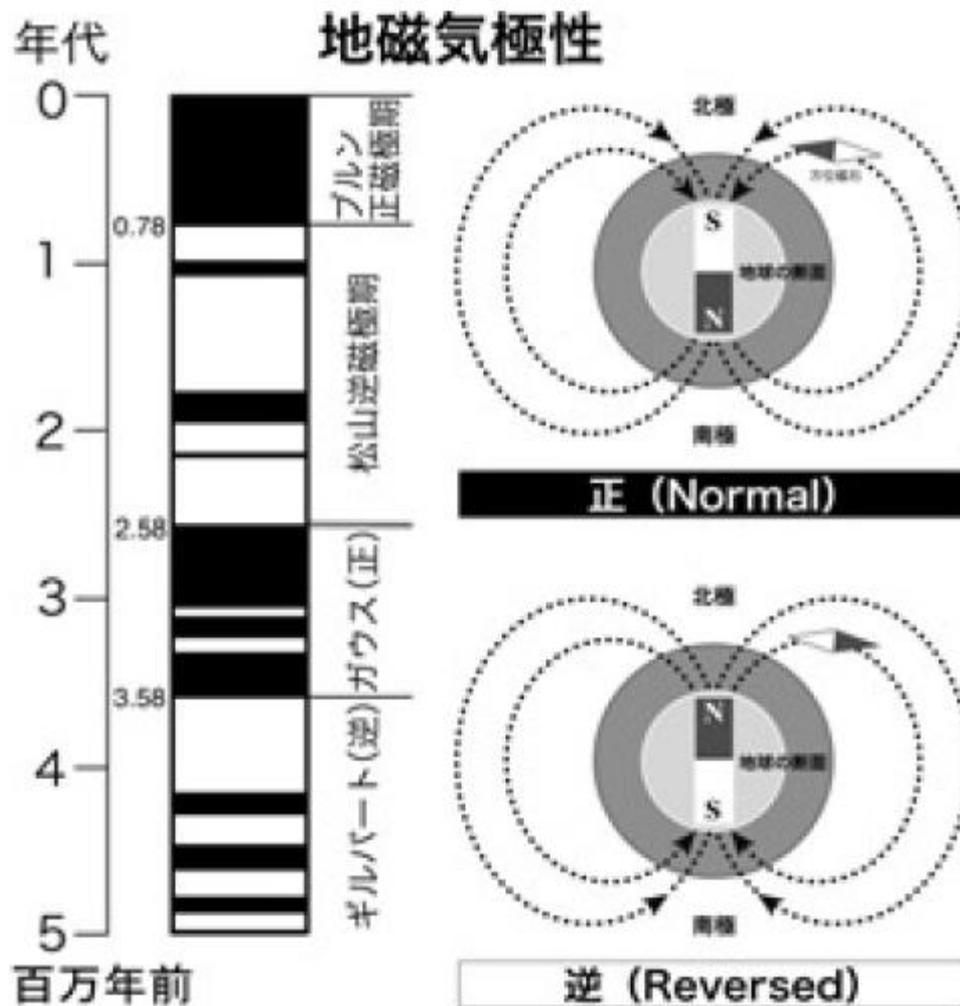
- ミランコヴィッチ・サイクルはMIS1とほぼ近似
- 北緯65度の日射量も等しい

地磁気の逆転(78万年前) マツヤマ期からブリュヌ期へ

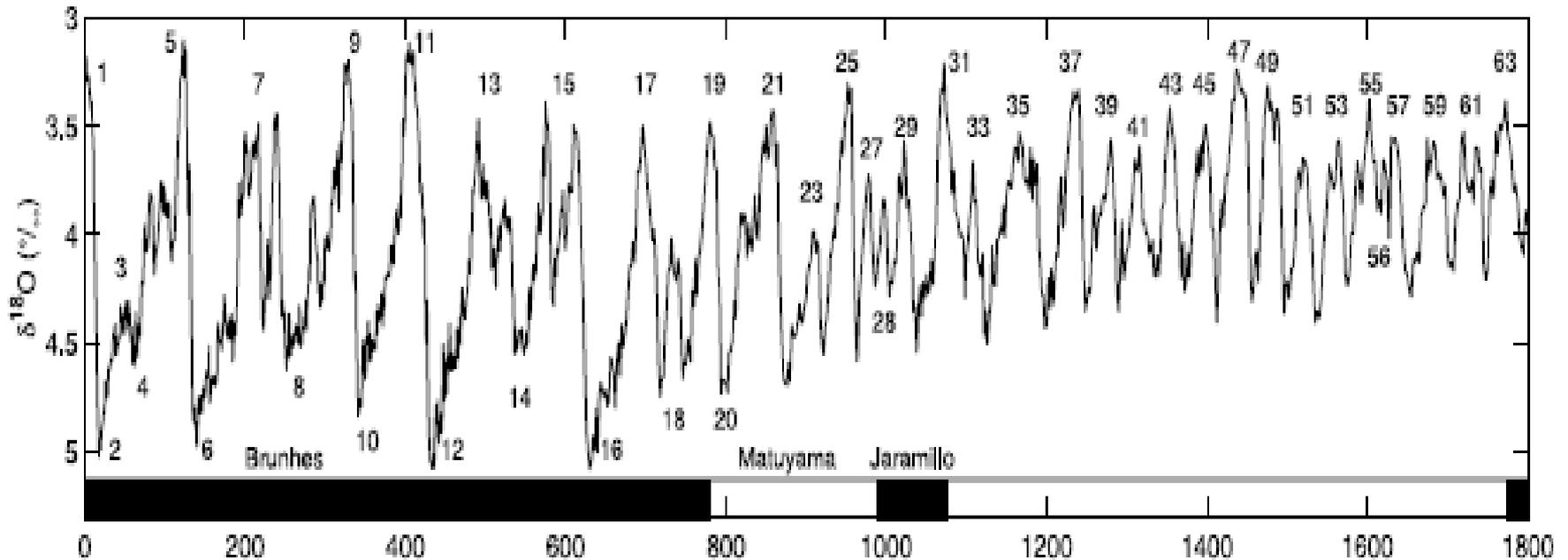


写真1 松山基範博士(1884~1958).

山崎俊嗣(2005)より



氷期-間氷期サイクル 4万年周期から10万年周期へ



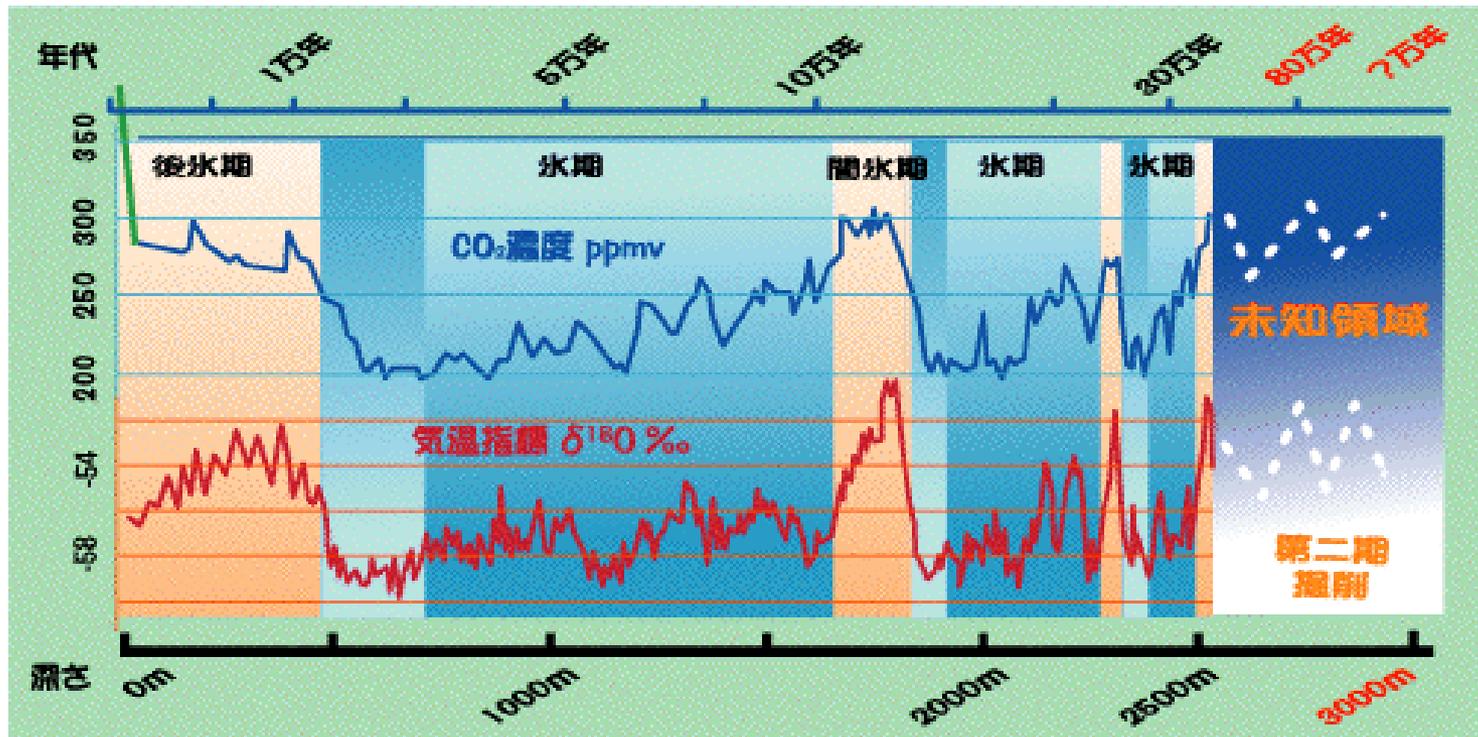
- 78万年より前は、10万年周期でなく、4万年周期

ドームふじ; 観測基地



国立極地研究所HPより

第2期掘削では100万年前を狙った



- 第2期では100万年間の氷床コア発掘が目標
- 3035.22mを掘削
- 78万年前の氷床コアまでで、MIS 19に届かず！

まとめ

- 現在の間氷期(MIS 1)の今後について、ミランコヴィッチ・サイクルに着目し、過去の間氷期の長さから類推する手法がある。
- 従来、約40万年前のMIS 11を考慮すべきケースとしており、IPCC;AR4でもEPICAの論文を採用している。
 - 「今後3万年近くは、自然要因での寒冷化は起きない」
- しかし、IPCC;AR4の後、MIS19の重要性が浮かび上がる。AR5ではどう扱われるか。
 - 80万年前のターニングポイント
 - 次の氷期到来時期の再考

おまけ : Tzedakisの最新論文

nature
geoscience

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 8 JANUARY 2012 | DOI: 10.1038/NGEO1358

Determining the natural length of the current interglacial

P. C. Tzedakis^{1*}, J. E. T. Channell², D. A. Hodell³, H. F. Kleiven^{4,5} and L. C. Skinner³

- 大気中の二酸化炭素濃度が現在のように390ppmvであると、北半球の日射量が小さくなくても雪氷面積は増えず、間氷期から氷期への移行はない。
- しかし、工業化以前の280ppmvまで下がった場合、あと1500年で地球は次の氷期に突入するだろう。

参考文献

- William F. Ruddiman (2005): *Plow, Plagues & Petroleum*. Princeton University Press
- EPICA member group (2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *2004 Nature Publishing Group*
- IPCC (2007): IPCC 4th assessment report. Group 1, 6 Paleoclimate
- Tzedakis (2010): The MIS 11-MIS1 analogy, southern European vegetation, atmospheric methane and the “early anthropogenic hypothesis”. *Climate of the Past*
- V. Masson-Delmotte et al (2010): A comparison of the present and last interglacial periods in six Antarctic ice cores. *Climate of the Past*
- Rohling et al (2010) : Comparison between Holocene and Marine Isotope Stage-11 sea-level histories. *Earth and Planetary Science Letters*
- Pol et al (2010): New MIS 19 EPICA Dome C high resolution deuterium data: Hints for a problematic preservation of climate variability at sub-millennial scale in the “oldest ice”. *Earth and Planetary Science Letters*
- Tzedakis et al (2012): Determining the natural length of the current interglacial. *Nature Geoscience Letters* January 8