

# 2010年度研究項目 BO2 研究報告書 B02 Research Report 2010

# 旧人・新人時空間分布と気候変動の関連性の分析

Reconstructing the Distribution of Neanderthals and Modern Humans in Time and Space in Relation to Past Climate Change

文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究)2010-2014 Grant-in-Aid for Scientific Research on Inovative Arears 2010-2014



ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相:学習能力の進化に基づく実証的研究 "Replacement of Neanderthals by Modern Humans: Testing Evolutionary Models of Learning"

# 2010 年度 研究項目 B02 研究報告書

# **B02 Research Report 2010**



文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究)2010-2014 Grant-in-Aid for Scientific Research on Inovative Arears 2010-2014 文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究)2010-2014 「交替劇」(ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相:学習能力の進化に基づく実証的研究) (領域番号 1201) 研究項目 B02「旧人・新人時空間分布と気候変動の関連性の分析」 2010 年度 報告書 2012 年 3 月 15 日 発行

[編集・発行] 研究項目 B02 班 研究代表者 米田 穣 〒 277-8562 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学 新領域創成科学研究科 Tel. (04)-7136-3683

[印刷・製本] 株式会社 ブレインズ・ネットワーク 〒 162-0801 東京都新宿区山吹町 347 番地 藤和江戸川橋ビル 3 階 Tel. (03)-3267-8711

Grant-in-Aid for Scientific Research on Inovative Arears 2010-2014 "Replacement of Neanderthals by Modern Humans: Testing Evolutionary Models of Learning" (Area Number 1201) Research Team B02 "Reconstructing the Distribution of Neanderthals and modern humans in Time and Space in Relation to Past Climate Change" Research Report 2010

Copyright 2012 Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8562 JAPAN. Tel. +81-4-7136-3683 (Research Leader: Minoru YONEDA)

研究組織	iii
研究報告	
旧人・新人分布域の年代学的検討と行動復元の試み	1
米田 穣, マーク C. ディアブ(東京大学 新領域創成科学研究科)	I
WebGIS を用いた考古・古環境情報の発信	8
小口 高(東京大学 空間情報研究センター),近藤 康久(東京工業大学 情報理工学	4研究科)
西部北大西洋における古海洋環境とネアンデルタール絶滅	18
ステファン P. オブラクタ,横山 祐典(東京大学 大気海洋研究所)	
最終氷期 - 間氷期サイクルの気候モデリング	34
陳 永利, 阿部 彩子(東京大学 大気海洋研究所)	
<b>疝</b>	
第1回班会議	42
第2回班会議	42
第3回班会議	43
第4回班会議	44
一般公開セミナー	45

目 次

# 研究業績

46

# **Table of Contents**

Member List	iii
Research Reports	
Chronological reevaluation and behavioral reconstruction of Neanderthals and Anato	mically
Modern Humans.	1
Minoru YONEDA, Mark C. DIAB (Graduate School of Frontier Science, the University of Tokyo)	
Distribution of archaeological and paleoenvironmental information using WebGIS.	8
Takashi OGUCHI (Center for Spatial Information Science, the University of Tokyo),	
Yasuhisa KONDO (Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology	')
North Atlantic environmental conditions during Neanderthal Extinction.	18
Stephen P. OBROCHTA, Yusuke YOKOYAMA (Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of	of Tokyo)
Modeling the Climate of the Last Glacial-Interglacial Cycle.	34
Wing-Li CHAN, Ayako ABE-OUCHI (Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo)	
Meeting	
the 1st Team Meeting	42
the 2nd Team Meeting	42
the 3rd Team Meeting	43
the 4th Team Meeting	44
Seminar	45
Publications	46

# 研究組織

# 研究代表者

米田 穣	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	准教授

# 研究分担者

阿部 彩子	東京大学 大気海洋研究所	准教授
小口高	東京大学 空間情報研究センター	教授
横山 祐典	東京大学 大気海洋研究所	准教授
森 洋久	国際日本文化研究センター	准教授
丸川 雄三	国立情報科学研究所	特任研究員

# 連携研究者

川端 穂高	東京大学	学大気海洋研究所	f 教授		
マーク・ディフ	ァブ	東京大学大学院	新領域創成科	学研究科	博士後期課程

## 研究協力者

陳 永利	東京大学 大気海洋研究所	特任研究員
近藤 康久	東京大学 空間情報研究センター	特任研究員

# 海外共同研究者

BOU KHEIR, Rania	レバノン大学 GIS 研究所 ( レバノン )
EAST, M. Tezer	オーストラリア国立大学 (オーストラリア)
KAGEYAMA, Masa	気候環境学研究所 (フランス)
RAMSTEIN, Gilles	気候環境学研究所 (フランス)

# **Member List**

## **Team Reader**

YONEDA, Minoru Associate Professor Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

### **Co-investigators**

ABE-OUCHI, AyakoAssociate ProfessorAtmosphere and Ocean Research Institute, The University of TokyoOGUCHI, TakashiProfessorCenter for Spatial Information Science, The University of TokyoYOKOYAMA, YusukeAssociate ProfessorAtmosphere and Ocean Research Institute, The University of TokyoMORI, HirohisaAssociate ProfessorInternational Research Center for Japanese StudiesMARUKAWA, YuzoProject ResearcherNational Institute of Informatics

## **Collaborating Investigators**

KAWAHATA, Hodaka Professor Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo DIAB, Mark Graduate student Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

## Collaborators

CHAN, Wing-Li	Project Researcher
Atmosphere and	Ocean Research Institute, The University of Tokyo
KONDO, Yasuhisa	Project Researcher
Center for Spati	al Information Science, The University of Tokyo

## **Overseas Collaborators**

BOU KHEIR, RaniaProfessorLebanese University (Lebanon)ESAT, TezerPhDAustralian National University (Australia)KAGEYAMA, MasaPhDLaboratoire desSciences du Climat et de l'Environnement (France)RAMSTEIN, GillesPhDLaboratoire desSciences du Climat et de l'Environnement (France)

v

## 旧人・新人分布域の年代学的検討と行動復元の試み

米田 穣,マーク・ディアブ 東京大学 新領域創成科学研究科

ネアンデルタール(旧人)およびホモ・サピエンス(新人)における学習能力の進化と古気候・古 環境変動の関係性を明らかにすることを目標に,我々は両者の生存した地域と時間をより高精度に評価す るための研究に着手した。また,ひとつの定点に着目し,ネアンデルタールやホモ・サピエンスの行動の 時間的変化と,古気候・古環境変動との関連を明らかにすることを目標に,シリア共和国デデリエ洞窟出 土動物骨の動物考古学および同位体生態学的な分析を行っている。これら2つのアプローチを組み合わせ ることで,氷期の不安定な気候環境のなかで,ネアンデルタールとホモ・サピエンスが種全体としてどの ように振る舞ったのか,また集団・個体としてどのように行動したのかを知ることができる。

#### 旧人・新人を巡る年代学の進展

ネアンデルタールとホモ・サピエンスの交替劇に関して,欧州では後期旧石器文化の拡散とネアン デルタールの絶滅に着目した遺跡年代の見直しや(e.g., Mellars 2006),詳細な古気候・古生態環境の復元 が行われている(van Angel & Davis 2003; Finlayson 2004)。しかし,他の地域では理化学年代に関するデー タ集成が必ずしも十分ではない。本研究では、データ集成が不十分なアフリカ・西アジア一帯に特に留意 して,交替劇はどこで,いつ、どのような経過をたどって進行したかを復元するための理化学年代を網羅 的に収集し GIS を用いてデータベース化することで、遺跡の時空分布の詳細重層図を作成することを目 標のひとつとしている。

これまでにも、ネアンデルタールの絶滅と後期旧石器の拡散については、理化学年代の集成が考古 学者によってなされている(e.g., Bar-Yosef 2002)。しかし、これらの総説では、近年の年代測定における 技術的な進展を評価に加えておらず、年代学的観点から信頼性に疑義のある年代が含まれている危険性が ある。そこで本研究では、アフリカおよびユーラシア西半の地域について、ネアンデルタールとホモ・サ ピエンスの遺跡について報告されている様々な理化学年代を、その試料選択・前処理方法・測定方法・続 成作用(汚染)評価方法・データ解析などについて、その妥当性・信頼性を点検・評価し、GISを用いて データベース化することで旧人・新人の分布変動を詳細に復元する(図1)。

これまでにも、ネアンデルタール人と現生人類(ホモ・サピエンス)の交替劇に関する研究におい て、年代測定技術の進歩は大きな役割を果たしてきた。著名な事例としては、1980年代に新たに考案さ れた熱ルミネッセンス法(TL)や電子スピン共鳴法(ESR)によって、西アジアに住む解剖学的現代人 が考古学的な予想に反して,ネアンデルタール人よりも古い段階で西アジアに進出していたことを明らか にした研究があげられる (Valladas et al. 1987, 1988)。

近年の欧州における現代人の出現とネアンデルタール人の消滅に関する研究においても、年代測定 法の技術的発展は極めて重要である。加速器質量分析法(AMS)が広く用いられるようになった 1980 年 代以降,数多くの遺跡で放射性炭素を用いた年代値が報告された。その結果,両者は欧州のいくつかの地 域を中心に相当の期間にわたって共存したと考えられてきた(Hublin et al. 1995; Smith et al. 1999)。しかし, 同じ遺跡でネアンデルタール人と現生人類が同時代の地層から出土した事例は報告されておらず,両者の 同時代性は各々の遺跡で示された年代値によるところが大きい。とくに,異なる物質文化を有していた可 能性がある異種間で,居住年代を比較する場合には,文化編年に頼ることが困難であり,理化学年代が非 常に重要な証拠となる。

近年, さらに厳密な化学処理法がいく つか提案され、放射性炭素年代では測定下限 に近い交替劇に関する年代についても、 再検 討が進められている。例えば、人骨や動物骨 の試料では、残存するタンパク質コラーゲン を精製・抽出して、グラファイト化してから 放射性炭素年代測定に供する。コラーゲンの 抽出法は 1960 年代に考案されたアルカリ処理 とゼラチン化を組み合わせた方法が有効であ るとされてきた (Longin 1971)。これは, 土 壌から浸潤してきた有機物のうち主要な成分 (フミン酸とフルボ酸)がアルカリ成分に溶け やすく,またコラーゲンが約60℃で熱変性し て水に可溶化することを利用した方法である。 しかし、土壌有機物に含まれるアルカリ不要 成分(ヒューミン)が残存する可能性がある こと、コラーゲン鎖と結合したフミン酸が容 易に除去できないという問題があった。そこ で, Bronk Ramsey ら (2004) は, 抽出したゼ ラチンをさらに分子量でふるい分けする限外 ろ過法を骨試料の前処理に導入した。その結 果. 終末期のネアンデルタールと初期クロマ ニオンの年代として報告されていた年代のい くつかが古いことが明らかになり, 交替劇の 詳細を再検討することが必要であることが示 されている (Mellars 2006)。このように、同じ 骨試料を扱っている場合でも, 前処理方法に よってその年代の信頼性には相違がある。



図 1. トナカイ洞窟における放射性炭素年代(較正)と層序の関係(Higham et al. 2010, Fig. 2 を改変)

Figure 1. Evaluation of calibrated radiocarbon dates reported from Grotte de Renne in its stratigraphic context (adopted from Higham et al. 2010).

#### 骨資料の評価基準の検討

新しい前処理方法の応用と,統計学的なデータ解析を行った年代学的研究の一例として,フランスの Arcy-sur-Cure にあるトナカイ洞窟 (Grotte de Renne)の研究をあげることができる (Higham et al. 2010)。ネアンデルタールが象徴をあつかう能力を有していた有力な証拠としてしばしばあげられる,骨や歯でできた装飾品が出土したシャテルペロン文化層の年代について,著者らは人為的な加工や破壊の跡があきらかな骨資料について新たに 31 点の放射性炭素年代を加速器質量分析法 (AMS)で測定している。また前処理方法として,広く行われているゼラチン化に加えて,限外ろ過法を応用している。そうして得られたコラーゲンは生体に由来すると期待されるが,土壌有機物からの汚染を受けている可能性は否定できない。そこで,コラーゲンの品質を検討するために炭素・窒素のモル比 (C/N 比),コラーゲン回収量,コラーゲンにおける炭素含有率,炭素安定同位体比 (δ<sup>13</sup>C)を評価の基準とし,一定の基準を満たさなかったものについては,信頼性が低いデータとして解釈にあたって,考慮することとしている。

さらに、本研究では各資料の放射性炭素年代と、出土位置の層序学的な対応関係を検討すること を目的に各層から多数の資料を採取し、得られた年代について解析ソフト OxCAL に実装されているベイ ズ統計的検定法を用いて(Bronk Ramsey 1998, 2009)、データの整合性について検討している。その結果、 装飾品を産出したシャテルペロン層で得られた放射性炭素年代のうち3分の1以上が上層または下層から の混入である可能性が示唆された(図1)。トナカイ洞窟以外で「装飾品」を伴っている遺跡は、層序や 年代について未報告の Quincay 洞窟のみである。

本研究は、ネアンデルタール人の認知能力について重要な証拠のひとつである、シャテルペロン文 化に帰属すると考えられた装飾品の絶対年代に疑問を呈する重要な研究であるが、放射性炭素年代のコン トロールをどのように行うべきかという方向を明確に示している点でも重要である。放射性炭素年代は次 の観点から慎重に検討されねばならない:(1)測定法が AMS であるか、大量の資料を必要とする β 線計 測法であるか、(2)測定に用いた資料にはどのような資料が含まれているのか、(3)骨の前処理はどのよ うな方法を用いたか、(4)抽出されたコラーゲンの品質はどのように評価されているか、(5)得られた年 代は層序的関係からみて信頼性が高いものか。同様の観点が、本研究における理化学年代の集成にも求め られることになる。

2010年度は,現代的な行動の考古学的証拠を中心に理化学年代データの文献調査を開始した。特に, 欧州を中心に先行研究がある約6~3万年前の時期を対象に,西アジア・欧州地域を中心に調査を行った。 とくに,近年報告が増加している,現代的行動に関する年代データに留意しながら文献調査を行っている。 また,次年度以降にアフリカおよびユーラシア西半全域に調査域を拡大するにあたって使用する,年代 データ評価基準を確立することを目指している。骨資料については,上述した Higham et al. (2010)を参 照して基準を設定した。一方,多くの遺跡で層序の年代決定に用いられている木炭資料について,品質を 評価するための明確な方法がない。来年度,いくつかの鍵となる遺跡で,層序的な整合性などを検討する ことで,その信頼性を評価する方法を開発する必要がある。



図 2. レシリレンス理論における「ハナーキー」の概念図 Figure 2. The circulation of "panarchy" in the resilience theory.

#### 動物考古学と同位体分析を用いたネアンデルタールの行動復元

一方,レバント地方北部に生息したネアンデルタールが不安定な氷期の環境のなかでどのような行動を変化させることができたのかを,長期間にわたって連続的な堆積を示しているデデリエ洞窟(シリア 共和国)の資料から復元する試みを開始した。ネアンデルタールは,数十万年間の不安定な環境のなかで 生き抜いてきた。しかし,彼らの絶滅については多くの研究が行われているのに対し,ネアンデルタール がヨーロッパとレバント地方において長期間にわたり拡散・生息することを可能とした,生態学的・社会 的レジリエンス(回復性)についてはほとんど議論されていない。

もともとレジリエンスという概念は、生態系の変化・進化を説明しようとする概念であり、Holling (1973)によって最初に提唱された。この理論では小さな変化から大きな大規模な崩壊を引き起こし、再び 新しい安定な時期に至るという枠組みが描かれる。この循環を「パナーキー」と呼ぶ(図2)。このパナー キー論に基づいて考えると、生態学的・社会的なストレスに対してネアンデルタールは技術的・社会的・ 生業的な可塑性をもつ、変化の早い適応システムを持つことができず、再編成期に新たな食料を開拓した り、新しい適応戦略を生み出すことができなかったりしたと考えられる。一方で、ホモ・サピエンスは多 様な食物を利用することが可能であったため、新しい適応戦略を再編することが可能であった。また、集 団レベルで考えると、レジリエンス論は生産性の高い生息地と生産性の低い生息地の間における、集団間 の関係や産地と消費地のダイナミクスに関連しても理解することが可能である。このアプローチは、シリ ア共和国デデリエ洞窟から得られた動物考古学的なデータを用いて、ネアンデルタールの土地利用につい て説明するために有向な視座を与えてくれる。

これまでに得られた予備的結果によれば、デデリエ洞窟の重要な動物種(ヤギ、ガゼル、アカシカ) の年齢構成は、南レバントやコーカサス地域の遺跡と類似しており(Adler et al. 2008)、ネアンデルタール が優秀なハンターであり、季節的に周遊する獲物にあわせて土地利用のスケジュールを持っていた可能性 を示唆する。また、歯エナメル質におけるストロンチウム同位体は季節的な移動の指標として、酸素同位 体比は季節的な降水・気温の季節的変動について良好な指標となる可能性が示唆された。

#### 引用文献

- Adler, D.S., O. Bar-Yosef, A. Belfer-Cohen, N. Tushabramishvili, E. Boaretto, M. Mercier, H. Valladas and W.J. Rink (2008). Dating the demise: Neanderthal extinction and the establishment of modern humans in the southern Coucasus. *Journal of Human Evolution*, 55: 817-833.
- Bar-Yosef, O. (2002). The Upper Paleolithic revolution. Annual Review of Anthropology, 31: 363-3930.
- Bronk Ramsey, C. (1998). Probability and dating. Radiocarbon, 40: 461-474.
- Bronk Ramsey, C. (2009). Dealing with outliers and offsets in radiocarbon dating. Radiocarbon, 51: 1023-1045.
- Bronk Ramsey, C., T. Higham, A. Bowles and R. Hedges (2004). Improvements to the pretreatment of bone at Oxford. *Radiocarbon*, 46: 155-163.
- Higham, T., R. Jacobi, M. Julien, F. David, L. Basell, R. Wood, W. Davies and C. Bronk Ramsey (2010). Chronology of the Grotte de Renne (France) and implications for the context of ornaments and human remains within the Chatelperonian. *Proceedings of National Academy of Sciences of U.S.A.*, 107: 20234-20239.
- Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4: 1-23.
- Hublin, J.J., C.B. Ruiz, P.M. Lara, M. Fontugne and J.L. Reyss (1995). The Mousterian site of Zafarraya (Andalusia, Spain) - dating and implications on the Paleolithic peopling processes of Western-Europe. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II Fascicule a- Sciences De La Terre Et Des Planetes, 321: 931-937.
- Longin, R. (1971). New method of collagen extraction for radiocarbon dating. Nature, 230: 241-242.
- Mellars, P. (2006). A new radiocarbon revolution and the dispersal of modern humans in Eurasia. Nature, 439: 931-935.
- Smith, F.H., E. Trinkaus, P.B. Pettitt, I. Karavanic and M. Paunovic (1999). Direct radiocarbon dates for Vindija G(1) and Velika Pecina Late Pleistocene hominid remains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96: 12281-12286.
- Valladas, H., J.L. Joron, G. Valladas, B. Arensburg, O. Bar-Yosef, A. Belfer-Cohen, P. Goldberg, H. Laville, L. Meignen, Y. Rak, E. Techrnov, A.M. Tillier and B. Vandermeersch (1987). Thermoluminescence dates for the Neanderthal Burial site at Kebara in Israel. *Nature*, 330: 159-160.
- Valladas, H., J.-L. Reyss, J.-L. Joron, G. Valladas, O. Bar-Yosef and B. Vandermersch (1988). Thermoluminescence dating of Mousterian Proto-Cro-Magnon remains from Israel and the origin of modern man. *Nature*, 331: 614-616.

## Chronological reevaluation and behavioral reconstruction of Neanderthals and Anatomically Modern Humans.

Minoru YONEDA and Mark C. DIAB

Graduate School of Frontier Science, the University of Tokyo

The goal of our research project is to reveal the relationship between the cognitive evolution of Neanderthal and Anatomically Modern Humans (AMH) in light of palaeoclimate and palaeoenvironmental changes. For this purpose we are archiving the radiometric data for quality-controlled materials, methods, and analyses. At the same moment, we are analyzing a series of faunal remains, excavated from the Dederiyeh cave for a study using zooarchaeology and isotope ecology. The former will show the response of each human as a species and the latter will show the actual response by a population and individuals against past climate changes.

#### Chronological Studies on Neanderthal and AMH

The progress of dating techniques has played an important role in the course of researches on the replacement of Neanderthal by AMH. It is an obvious example that the newly developed thermo-luminescence (TL) and Electron Spin Resonance (ESR) results revealed the much older ages on Anatomically Modern Humans from the West Asia than those of Neanderthal from the same region (Valladas et al. 1987, 1988). For more recent studies on the emergency of modern human and the disappearance of Neanderthal in Europe, the dating techniques have been quite important as well. Since late 1980s, the accelerator mass spectrometry (AMS) has been applied to radiocarbon dating and produced bunch of absolute age data, indicating a significant coexistence of both humans in limited regions for a significant period (Hublin et al. 1995; Smith et al. 1999). Although no archaeological layer has produced both species simultaneously so far, the coexistence of these species solely on the chronological data of radiometric methods including radiocarbon. Furthermore, new recent results using newly developed chemical treatments suggested the some Chatelperronian layers which produced Neanderthal skeleton and some symbolic ornaments may be disturbed seriously.

Additionally, some technical progresses on chemical pretreatments improve the age determination of this evolutionary event. For example, pretreatment of bone materials have improved from the traditional "the gelatination method" proposed by Longin) 1971 to a combination of gelatination and ultrafiltration which can remove soil organic matters with small molecular weights (Bronk Ramsey et al. 2004). Some new data applied ultrafiltration technique produced controversial results (Mellars 2006). The quality control of chronological data is also required for more detailed discussions.

#### **Qualification of Radiocarbon Dates on Bone Materials**

The recent case study on the Grotte de Penne at Arcy-sur-Cure, France, is a striking example which showed the importance of reasonable qualification of radiocarbon ages (Higham et al. 2010). This cave site is very famous with significant appearance of personal ornaments and the usage of simbols in the layers layers assigned to the Chatelperronian industry which had been produced by Neanderthals, indicating an obvious evidence of their developed cognition. Higham et al. (2010) reported 31 more radiocarbon results on artificially modified bone materials with very strict criteria on the measured organic matters, coherence of radiocarbon ages in stratigraphic order. This approach showed one third of results might be outliers from statistical point of view (Bronk Ramsey1998, 2009), indicating significant disturbance with Chatelperonian layers. We believe this approach is also fruitful to make a reliable dataset on the distribution of both human species.

#### Zooarchaeology and Isotope Ecology for the Reconstruction of Human Behavior

Despite decades of focused investigation the question of why Neandethals became extinct still remains. One explanation may come from a body of concepts defined within socio-ecological "resilience theory" that attempts to explain changes in adaptive systems that are 'transforming'. Resilience theory, as first espoused by Holling (1973), is based on an adaptive cycle nested in a space-time hierarchy involving stabilizing and destabilizing effects that can cause small-scale transformations to explode into larger-sale crises, followed by reorganization and new stable states; this general framework is called "panarchy".

In other words, unlike anatomically modern humans, in times of socio-ecological stress, some Neanderthal groups lacked technological, social, and subsistence flexibility in a rapidly changing adaptive system and were incapable of reorganization strategies (i.e. expanding diet breadth). On a population scale, resilience theory can be linked to metapopulation biology and source-sink dynamics that deal with groupings of populations separated by regions of rich biota (sources) and poor biotic diversity (sinks). This combination of theory allows for a strong inferential explanation of Neanderthal land-use dynamics and changes based on zooarchaeological data extracted from the Dederiyeh Cave, Syria, which produced a series of Neanderthal remains.

Age profiles of key prey species (wild goat, gazelle, and red deer) from the Dederiyeh Cave are similar to sites in the southern Levant and the Caucasus region (Adler et al. 2008), supporting the view that Neanderthals were capable hunters and proficient at organizing their land use schedules based on the seasonal procurement of key herbivore resources. Preliminary isotopic analyses shows that strontium and oxygen isotopes are quite useful to reconstruct the change in precipitation and temperature and the seasonal migration patterns of ancient animals, respectively.

## WebGIS を用いた考古・古環境情報の発信

小口 高<sup>(1)</sup>,近藤 康久<sup>(2)</sup> <sup>(1)</sup>東京大学 空間情報科学研究センター <sup>(2)</sup>東京工業大学 情報理工学研究科

#### 1. はじめに

WebGISは、ウェブ・ブラウザを用いて操作可能な動的な地図をインターネットを通じて提供する システムである。縮尺,表示範囲,および表示内容が可変の地図画像とともに、地図上の地点に関するテ キスト情報や写真を提供可能である。WebGISは、企業や官庁の情報発信などに広く活用されているが、 学術的用途にも利用可能である。本稿では、最初にWebGISの歴史的発展の経緯を述べる。次に、日本の 地形・地質情報と世界の古環境情報を発信するために過去に構築されたWebGISの事例を紹介する。最後 に、科研費・新学術領域研究「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相」との関連で構築されつつあ る WebGIS を紹介する。

#### 2. WebGIS の歴史

1990年代にインターネットが急速に普及した。当初は電子メールや Gopher を用いたテキスト・ベースの情報交換が主体であったが、ウェブ・ブラウザと html 言語の開発により、画像情報を多数の人が容易に閲覧できるようになった。その結果、印刷をせずに地図を広く公開することが可能となった。その後、Java 言語の開発などを通じて動的なウェブ・ページが作成されると、ウェブ・ブラウザ上で縮尺や表示位置を自由に変えながら地図を閲覧することが可能となった(Plewe 1997)。この種のウェブ・ページを提供するシステムはインターネット・マップ・サーバー(IMS)と呼ばれており(Harder 1998)、地点の探索や、地点と周辺との位置関係の把握に有用である。地点の属性情報も同時に提供できるため、官庁や民間企業の情報発信にも用いられている(Peterson 2003)。

当初は,情報科学・工学の素養を持つ人が自前でソフトウエアを整備して IMS を構築する必要があっ た。しかし,1990 年代後半になると,ESRI 社などの主要な GIS ベンダーが GIS とリンクした IMS のエ ンジンを販売し始めた。その結果,多数の人が WebGIS を公開可能になった。ネアンデルタールとホモ・ サピエンスの交替劇に関して,欧州では後期旧石器文化の拡散とネアンデルタールの絶滅に着目した遺 跡年代の見直しや (e.g. Mellars 2006),詳細な古気候・古生態環境の復元が行われている (van Angel and Davis 2003; Finlayson 2004)。しかし,他の地域では理化学年代に関するデータ集成が必ずしも十分ではな い。本研究では、データ集成が不十分なアフリカ・西アジア一帯に特に留意して、交替劇はどこで、いつ、 どのような経過をたどって進行したかを復元するための理化学年代を網羅的に収集し GIS を用いてデー タベース化することで、遺跡の時空分布の詳細重層図を作成することを目標のひとつとしている。

#### 3. 日本の地形・地質情報を提供する WebGIS

小口(2000),小口ほか(2000), Oguchi et al. (2000, 2001)は、日本の地形・地質情報を地図 と共に提供する WebGIS を構築した。この際には ESRI 社の ArcView IMS をエンジンとして利用した。 ArcView IMS は、Windows 上で稼働する GIS ソフトウエア ArcView 3.x 上で稼働する拡張機能(extension) である。公開した情報は、扇状地の基本情報(斉藤 1988)、テフラ等の第四紀堆積物の露頭情報(第四紀 露頭集編集委員会編 1996)、文献等から収集した河川堆積物に関する情報、および何人かの研究者が撮影 した地形の景観写真である。また、基本的な地図情報として標高、道路網、鉄道網、主要都市を表示可能 とした。また、日本の地形・地質に興味を持つ外国人への情報提供を可能とするために、全ての情報を英 語で記述した。

ウェブ・ページのレイアウトは, ArcView IMS のデフォルトをほぼそのまま用いている (図1~2)。 これは, 作成者の重点がウェブのデザインよりも提供する内容 (コンテンツ) にあったことを反映してい る。ただし,内容に関する解説や景観写真を別のウインドウに表示するといった目的のために (図3~4), 多少のカスタマイズを要した。

#### 4. 世界の古環境情報を提供する WebGIS

Oguchi et al. (2002, 2003) は,世界の古環境情報に関する WebGIS を構築した。主に論文として 公表された研究について,対象地域の位置,古環境復元のために使用した地形や地質の情報,復元の対 象となった年代・時期,論文の著者,雑誌名,掲載巻などの情報を閲覧可能とした。コンテンツは古 環境に関する国際的な学術雑誌に 1990 年代中期~ 2002 年に掲載された論文から主に収集された。対象 誌 は Boreas, Catena, Geomorphology, Holocene, Journal of Quaternary Science, Quaternary International, Quaternary Research, Quaternary Science Reviews などである。基本的な構成や使用言語は上記の日本の事 例と同様であり(図 5~6),写真を掲載していないため,構成はより単純である。この WebGIS の構築 時には、すでにオンライン・ジャーナルが普及していたとはいえ、約6千ヶ所に関する情報の収集は労力 を要した。特に、論文中に掲載された地点の位置座標の決定に時間を要することが多かった。

#### 5. 公開後の経緯と今後の予定

上記の WebGIS は、地形・地質を含む古環境情報に興味を持つ人への情報提供、特に研究の初期段 階における基本情報の収集を支援することを重視していた。日本の地形・地質情報に関する WebGIS は、 トップページに対して年 2000 ~ 3000 件のアクセスがあった。また、掲載されている地形写真について、



図 1. 日本の地形・地質情報 WebGIS の初期画面 Figure 1. Initial page of WebGIS to serve geomorphological and geological information for Japan.



図 2. 関東地方の拡大図と露頭情報の表示 Figure 2. Map of Kanto and display of outcrop information.



図 3. 露頭情報のコードを解説したページの表 Figure 3. Page explaining codes used for describing outcrops.



図 5. 世界の古環境情報 WebGIS の初期画面

Figure 5. Initial page of WebGIS to serve paleoenvironmental information for the world.



図 4. 地形写真の表示例 Figure 4. Example of landform photographs.



- 図 6. 英国付近の拡大図と古環境情報の表示
- Figure 6. Map around England and display of paleoenvironemtnal information.

高校の教員から転載利用の希望が寄せられた。したがって、教育への貢献という点も含め、このシステム は有意義であったと思われる。

一方,世界の古環境に関する WebGIS へのアクセスは少なかった。この WebGIS は国際的な出版社 である John Wiley & Sons からの書籍で紹介されたが (Oguchi et al. 2003),そのインパクトは限られていた。 この理由として,2003 年以降に出版された論文の情報が追加されなかったために,反復的な利用が進ま なかったことが挙げられる。この種のデータ収集には膨大な労力が必要であり,資金面でのサポートも不 可欠である。現状ではコンテンツの新たな拡充の目処は立っていないが,長期的にはデータを増強し,利 用に貢献したいと考えている。

#### 6.「交替劇」プロジェクトにおける WebGIS と考古・古環境情報の統合

科研費・新学術領域研究「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相」の B02 班では,年代学・ 気候学・地形学・情報工学の研究分担者による学際共同研究を迅速かつ円滑に推進するために,サーバ 型 GIS「NEANGIS」と遺跡年代値データベース「NEANDAT」,バックアップディスク「NEANBAK」か らなる研究成果統合・共有システム(図 7)を構築した。これらのサーバは東京大学空間情報科学研究セ ンター(CSIS)に設置した。「NEANDAT」に関する報告は次稿にゆずり,ここでは「NEANGIS」の機能 と役割を紹介する。「NEANGIS」は、Windows Server 2008 Enterprise 上で稼働する ESRI ArcGIS Server 9.3.1 とマップデータ作成用の ArcGIS Desktop 9.3.1 から構成される。さらに、Desktop GARP という、遺伝的ア ルゴリズム(Stockwell 1999)に基づいて既知の遺跡分布と地形・気候データから未知の遺跡分布を予測 する生態文化ニッチモデリング(eco-cultural niche modeling; Banks et al. 2007, 2008)のツールも搭載した。 今後、Google Earth のテクノロジを用いて自前の地理空間情報を提供する Google Earth Server も導入する 予定である。



図 7. 交替劇 B02 班 GIS・データベースサーバシステムの構成(左)とネットワーク概念図(右) Figure 7. System components and the network model of the WebGIS and database server system provided by the study group B02 of the *Koutaigeki* project.



図 8. ArcGIS Server 9.3.1 ベースの WebGIS における遺跡属性検索の例. 左:ネアンデルタール人の石器製作伝統「ムステリアン」の存在が確認されている遺跡. 右:一時的寒冷期ハインリッヒ・イベント 4 (40.2–38.6 kyr) に該当する年代測定値をも つ遺跡

Figure 8. Two examples of attribute retrieval using the *NEANGIS* WebGIS system based on ArcGIS Server 9.3.1. Left: Neanderthal sites evidenced by Mousterian lithic industry. Right: Sites with records of the paleoenvironment during the Heinrich Event 4 (40.2–38.6 kyr). Data source: Stage 3 Project – http://www.esc.cam.ac.uk/research/research-groups/oistage3

「NEANGIS」で稼働する ArcGIS Server は、GIS データおよびマップの公開を主たる機能とする点 において旧来の ArcIMS と同様であり、ユーザがインターネットブラウザ(厳密にいえば HTTP プロトコル) を介してデータを編集・追加することは可能であるが制約が多い。そのため、研究分担者が各専門領域の 研究を進める際には、ArcGIS Desktop を用いて「NEANGIS」に認証アクセスすることになる。たとえば、 行政界・河川図・標高モデル・地質図・植生図など各分野共通の背景地図データをダウンロードし、それ に自前の地理空間データをオーバーレイして分析を進め、さらに「NEANGIS」にアップロードしてメンバー 間で共有するという活用法が考えられる。また、研究成果を班内で取りまとめ、さらに他班と恊働してプ ロジェクト全体で成果を評価・議論する段階では、ArcGIS Server または Google Earth Server を活用し、プ ロジェクトメンバー限定の WebGIS マップを提供する予定である。とりわけ、A01 班の遺跡データと B02 班の年代測定値・古気候・古地理データを重ね合わせることによって(図 8)、旧人・新人交替劇の真相 に関する学際的な新知見が得られるであろう。

#### 引用文献

小口 高 (2000). 地理情報とインターネット GIS. 歴史と地理. No.533: 15-22.

小口 高・斉藤 享治・原 美登里・門村 浩・林 舟 (2000). 扇状地データベース-インターネット・マップ・サー バーによる地理情報の提供-. 地理雑誌. 109: 120-125.

斉藤 享治(1988). 日本の扇状地. 古今書院.

第四紀露頭集編集委員会(編)(1996).第四紀露頭集-日本のテフラ.日本第四紀学会.

- Banks, W.E., F. d'Errico, A.T. Peterson, M. Vanhaeren, M. Kageyama, P. Sepulchre, G. Ramstein, A. Jost and D. Lunt (2007). Human ecological niches and ranges during the LGM in Europe derived from an application of ecocultural niche modeling. *Journal of Archaeological Science*, 35: 481-491.
- Banks, W.E., F. d'Errico, A.T. Peterson, M. Kageyama, A. Sima and M.-F. Sanchez-Goni (2008). Neanderthal extinction by competitive exclusion. *PLoS ONE*, 3(12): e3972.
- Harder C. (1998). Serving Maps on the Internet: Geographical Information on the World Wide Web, ESRI Press, Redlands.
- Oguchi, T., K. Katsube, K. Saito and H. Kadomura (2000). Presenting information about fluvial geomorphology and paleohydrology using an Internet map server. Abstracts, Fourth International Meeting on Global Continental Palaeohydrology GLOCOPH 2000, Moscow, Russia, 113-115.
- Oguchi, T. and K. Saito, H. Kadomura and H. Aoki (2001). Presenting geomorphological data for Japan using an Internet map server. Abstracts, Fifth International Geomorphology Conference, Tokyo, Japan, C-173.
- Oguchi, T., M. Nishikata and Y. Hayakawa (2002). PHEIMS: A web-based database for the global paleoenvironment. Abstracts, Fifth International Meeting on Global Continental Palaeohydrology GLOCOPH 2002, Pune, India, 6-7.
- Oguchi, T., J. Branson and M.J. Clark (2003). Data sharing in palaeohydrology: changing perspectives. In: K.J. Gregory and G. Benito (eds.) Palaeohydrology: Understanding Global Change. John Wiley and Sons, Chichester, 261-271.

Peterson, M.P. (2003). Maps and the Internet. Pergamon/Elsevier, Amsterdam.

- Plewe, B. (1997). GIS Online: Information, Retrieval, Mapping, and the Internet, Onward Press, Santa Fe.
- Stockwell, D.R.B. (1999). Genetic algorithms II: spatial distribution modelling. In: Fielding, A.H. (ed.) Machine Learning Methods for Ecological Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, 123-144.

# Distribution of archaeological and paleoenvironmental information using WebGIS.

Takashi OGUCHI<sup>(1)</sup> and Yasuhisa KONDO<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Center for Spatial Information Science, the University of Tokyo
<sup>(2)</sup>Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

#### 1. Introduction

WebGIS (Web-based Geographical Information Systems) provide interactive maps via the Internet. Users can handle the maps using a web browser to change mapping scale as well as the contents and extent of a displayed map. WebGIS can also provide text descriptions and photographs for sites on a map. Many governmental agencies and private companies have been using WebGIS to distribute geographical information. WebGIS may also be useful for academic purposes. In this paper we first describe the historical development of WebGIS. Then we introduce two examples of WebGIS for academic purposes. One was constructed to distribute paleoenvironmental information for Japan and the world. The other is being constructed for the project "Replacement of Neanderthals by Modern Humans" (*Kotaigeki* project), supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, the Japanese Government.

#### 2. History of WebGIS

The propagation of the Internet during the 1990s began with text-based information exchange using e-mail and Gopher. Then the development of web browsers and the html language permitted the distribution of graphic images. As a result, maps can be distributed widely without printed hardcopies. Then the development of interactive web pages based on technological development including the Java language enabled flexible viewing of maps using a web browser – for example, the scale and extent of a map can be changed. The web pages of this kind are called WebGIS (Web-based Geographic Information Systems). They can distribute not only map images but also attribute data. WebGIS have often been used for distributing information from governments and private companies.

In earlier days WebGIS could be realized only by people having the background of information technology or engineering because original systems had to be developed. However, in the late 1990s, major GIS vendors such as ESRI started selling the engine of WebGIS. As a result, various people commenced information distribution using WebGIS.

#### 3. WebGIS to distribute geomorphological and geological information for Japan

Oguchi et al. (2000, 2001) constructed a WebGIS system to enable the browsing of geomorphological and geological data for Japan. They used ArcView IMS from ESRI for the main engine of the system. ArcView IMS is an extension of ArcView 3.x, a GIS software package from ESRI. The system contained data for alluvial fans, fluvial deposits, representative outcrops of Quaternary sediments including tephras, and photographs of landforms taken in the field. Basic cartographic data including elevation, road networks, rail lines, and major cities were also included. All web pages are in English for the benefit of foreigners.

The layout of the web pages basically followed the default setting of ArcView IMS (Figures 1 and 2), reflecting the fact that the system focused on its contents rather than the design of the web pages. However, the setting was customized to some extent for showing text information about the contents and photographs in separate windows (Figures 3 and 4).

#### 4. WebGIS to distribute paleoenvironmental information for the world

Oguchi et al. (2002, 2003) constructed another WebGIS system concerning paleoenvironmental information for the world. The information was collected from published references mainly original journal articles. It included the location of areas studied, geomorphological and geological data used for paleoenvironmental reconstruction, target ages and eras, and references such as article titles, the names of authors and journals, and volume numbers. Most contents were taken from papers published in international journals during the mid 1990s to 2002. The journals include *Boreas, Catena, Geomorphology, Holocene, Journal of Quaternary Science, Quaternary International, Quaternary Research* and *Quaternary Science Reviews*. The basic structure and the language used were similar to the WebGIS for Japan (Figures 5 and 6), and the structure was simpler because the web pages did not include photographs. It was not easy to collect data for some 6,000 sites, although on-line journals were already available. It took particularly long to decide the geographic coordinates of some sites.

#### 5. Evaluation of the WebGIS systems and future plan

The main purpose of the two WebGIS systems was to provide information to those who are interested in paleoenvironmental information including landforms and geology. In particular, the systems intend to support studies at the early stage when researchers need to collect basic information. The initial web page of the system for the Japanese data had 2000 to 3000 accesses per year. A high school teacher also asked for a permission to use photographs in the system. Therefore, the system made some contributions including those to education.

In contrast, access to the system for the global paleoenvironmental data was limited. Although the system was introduced in a book published by John Wiley & Sons (Oguchi et al. 2003), its impact has been limited. One possible reason is that information about literature published after 2003 was not added to the database, limiting the repeated use of the system. This type of data collection requires tedious work and financial support. At this moment we have no plan to expand the database, but we hope to do it in the future.

# 6. WebGIS and integration of archaeological and paleoenvironmental information in the *Koutaigeki* project

The research group B02 of the *Kotaigeki* project has developed an information sharing system in order to expedite the interdisciplinary collaboration between geochronologists, climatologists, geomorphologists, and informatics specialists. The system comprises a WebGIS server (*NEANGIS*), a radiometric sample database (*NEANDAT*), and an intranet backup disk (*NEANBAK*) (Figure 7). These servers were placed at the Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo. The *NEANGIS* is operated by Windows Server 2008 Enterprise, on which ESRI ArcGIS Server 9.3.1, an Internet map server, and ArcGIS Desktop 9.3.1, a map editor, are installed. Desktop GARP, a software package for eco-cultural niche modeling by the genetic algorithm for rule-set production (Banks et al. 2007, 2008; Stockwell 1999) has been also installed in order to predict the probability of human occupation from the location of known archaeological sites and a paleoenvironmental dataset (such as elevation, temperature, and precipitation) as parameters. In addition, we plan to employ Google Earth Server to publish the results in the near future. The role and functions of the *NEANDAT* will be explained in another occasion.

From the technical viewpoint, ArcGIS Server on the *NEANGIS* is similar to the previous ArcIMS: Both are primarily designed for the online publication of GIS data and map sources, and it is still difficult to edit data through an Internet browser via the HTTP protocol. Alternatively, by means of ArcGIS Desktop, authorized members can download common map sources, such as administrative boundary, drainage, digital elevation model (DEM), geology, and vegetation, from the *NEANGIS* server. They can also upload the original data, which are created through the spatial analysis with the downloaded data, to the server so as to allow collaborators to share. ArcGIS Server and Google Earth Server are also useful to provide WebGIS maps at the final phase of the project, at which results of the research are assessed and discussed by a larger group of researchers from other fields. For instance, the integration of the outputs from the B02 group and those from the A01 group (archaeology) will yield a new, multi-faceted explanation on the replacement of Neanderthals by anatomically modern humans (Figure 8).

#### North Atlantic environmental conditions during Neanderthal Extinction

Stephen P. OBROCHTA and Yusuke YOKOYAMA

Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo

#### 1. Introduction

#### 1.1. Proxies

Common proxies used in paleoceanographic studies in the North Atlantic ocean include sediment of both biogenic and inorganic origins (Figure 1). Ice-rafted debris (IRD), is sediment that is entrained in continental glaciers and carried to sea by calved icebergs that eventually melt, dropping the IRD to the ocean floor. Common types of IRD in the North Atlantic include aluminosilicate minerals such as quartz and feldspar, that may occasionally be stained with hematite (e.g. Bond and Lotti 1995), and Paleozoic dolomite-rich limestone sediment derived from the Canadian Shield (e.g. Heinrich 1988). Increased deposition of IRD indicates increased melt (fresh) water input derived from continental glaciers, decreasing surface salinity (e.g. Bond et al. 1992).



Figure 1. Common North Atlantic proxies. A-C are IRD, D-F are biogenic. A) Hematite stained grain (~100 μm), B) Canadian limestone (~250 μm), C) rounded quartz (~200 μm), D) benthic foraminifer (~1 mm), E) planktic foraminifer (~300 μm), F) coccolithophores (~5 μm).

図 1. 北大西洋でよく使われる環境指標プロキシ. A-C は IRD, D-F は生物源のプロキシ. A) 赤鉄鉱の付着し た粒子(約100 μm), B) カナダ起源の炭酸塩(約250 μm), C) 円磨度の高い石英(約200 μm), D) 底棲有 孔虫(約1 mm), E) 浮遊性有孔虫(約300 μm), F) 石灰質ナノ化石(およそ5 μm). Micro- and nano-fossils composed of calcium carbonate are also commonly used, and include planktic and benthic foraminifers, as well as coccolithophores. The species assemblage of planktic foraminifers recovered from seafloor sediment cores provides information regarding sea surface conditions, such as sea surface temperature and the location of major frontal boundaries (e.g. CLIMAP 1976). Trace element content and stable isotope ratios of the shells of planktic foraminifers can also be measured to provide information on sea level, salinity, and sea surface temperature (SST). Similarly, benthic foraminifers can also be analyzed to provide information on bottom water conditions and can be particularly useful for identifying southern- versus northern-sourced waters (e.g. Boyle and Keigwin 1982). Organic compounds produced by coccolithophores and preserved in sediments can be used to determine sea surface temperature (Brassell et al. 1986; Prahl and Wakeham 1987; Prahl et al. 1988). Therefore, three independent means for determining sea surface temperature from plankton fossils exist: 1) species assemblages, 2) inorganic geochemical, and 3) organic geochemical.

#### 1.2. Glacial-Interglacial Variability

Climate is currently in an interglacial state, and there are approximately 72 meters of sea level equivalent (msle) ice contained in continental glaciers. Approximately 6 to 7 msle is currently stored in Greenland, with most of the rest in Antarctica (Flower 1999). During the last glacial maximum (LGM), approximately 20,000 years ago, sea level decreased by ~ 120 m due to the increased size of Northern Hemisphere glaciers (Fairbanks 1989) (Figure 2).



Figure 2. Modern conditions during the current interglacial with only ~6-7 msle of ice in Greenland (upper right). Much of the 120 msle increase during the LGM was stored in the northern hemisphere (upper left).

図 2. 現在の北半球には 6-7 m 海水準上昇に寄与すると考えられているグリーンランド氷床しか存在しないが (右), 最終氷期最盛期(約2万年前)には全球的な海水準を120 m 以上下げるほどの淡水が陸上に存在し, 北半球にも大規模大陸氷床が存在していた.



Figure 3. Stacked benthic foraminifer oxygen isotope record from the past 4 million years showing the MIS 2-4 glaciation (white) that was preceded by the MIS 6 and 8 glaciations.

図3. 深海堆積物コアの底棲有孔虫の炭酸塩殻酸素同位体比分析結果を60本以上スタックして得られた過去400 万年間の水温および海水量変動曲線。白で示してあるのが最終氷期でMIS2-4. それ以前の氷期であるMIS6 と8については数字の6と8で示してある。

Since approximately 2.5 million years ago, this so-called glacial-interglacial cycle has repeated on orbital time scales (Figure 3), with continental ice waxing and waning corresponding to slight variations in incoming solar radiation as a function of changes in the earth's orbit and orientation relative to the sun (Imbrie et al. 1984). Currently, the Earth's axis is tilted at ~  $23.5^{\circ}$ , which is the reason for seasonality. Every 41,000 years, the angle of tilt, known as obliquity, varies between ~  $21.0^{\circ}$  and  $24.5^{\circ}$ . During times of relatively low obliquity, seasonality is reduced, resulting in warmer winters and cooler summers. low obliquity is favorable for creating large continental glaciers because relatively less of the winter snowfall melts during the following summer in high latitudes. This increases the high latitude albedo, resulting in increased reflection of solar radiation and cooler temperatures, that in turn cause more ice to persist though the summer. This positive feedback slowly drives the earth into an ice age. As obliquity begins to increase, the feedback works in the opposite direction to drive the climate back to an interglacial state.

Beginning approximately 1 million years ago, the timing of ice ages changed from a 41,000 year periodicity to a 100,000 year periodicity (Mudelsee and Schulz 1997) (Figure 3) in apparent correspondence to variations in the eccentricity of the Earth's orbit, which describes the deviation in orbital path from a perfect circular to a parabola. The actual change in total insolation received by the earth due to variations in eccentricity is extremely small requiring this weak signal to be amplified by highly nonlinear internal feedbacks. That nonlinear feedbacks are at work is evidenced by the asymmetrical nature of recent glacial cycles; climate slowly deteriorates into an ice age as ice builds up in the northern hemisphere but glacial termination geologically rapidly, in the space of a few thousand years.

Much of the information regarding climatic conditions during ice ages is based solely on the last glaciation, which lasted from approximately 80,000 to 15,000 years ago and is commonly referred to as Marine Isotope Stages (MIS) 2-4. The preceding two glaciations are MIS 6 and 8. Due to the relative paucity of records from older glaciations, the conditions during the previous glaciations is often assumed to be similar to the last glaciation.

The reason for the lack of older records is due primarily to the following. The first reason is due to ease of recovering last glacial marine sediments with traditional coring methods (e.g. gravity and piston cores). In high sedimentation rate areas, which provide expanded, high resolution climate information, extremely specialized equipment is required to penetrate beyond last glacial strata, and only three, perhaps four research vessels in the world are sufficiently outfitted at any particular time. The next reason is due to the half life of radiocarbon (<sup>14</sup>C) and the calibration from radiocarbon years to actual calendar years, which together only allow for absolute dating for marine sediments to approximately 50,000 years ago (Reimer et al. 2009). In the absence of an appropriate radiogenic nuclide for age dating, there is still a means for assigning age to marine sediments cores: correlation of a proxy sea surface temperature record to Greenland ice core proxy air temperature records. North Atlantic sea surface temperature within the radiocarbon dated portions of sediment cores appears to correspond to variations in Greenland air temperature (Bond et al. 1993). This relationship can be used to export the ice core chronology to the a sediment core in the interval beyond 50,000 years. However, the oldest, continuous Greenland ice core recovered to data does not extend beyond the last interglaciation, the peak warmth of which occurred approximately 125,000 years ago during MIS 5.5 (North GRIP Project Members 2004). Therefore, there are no ice core records suitable for providing enhanced chronological constraint for marine sediment cores of previous glaciations.

#### 1.3. Last Glacial Millennial Scale Variability

The last glaciation was relatively unstable climatically, especially in the high latitudes (Figure 4). Approximately every 1,500 to 4,500 years, temperatures abruptly warmed to near full interglacial values within the space of several decades to hundereds of years. These warming events are commonly referred to Dansgaard/Oeschger (D/O) Events. Every 5,000 to 7,000 years drastic cooling primarily in the North Atlantic Ocean, known as Heinrich Events, occurred (Heinrich 1988; Bond et al. 1992).

#### 1.3.1. Dansgaard-Oeschger Events

The cause of D/O Events is unknown. No definitive outside trigger has been identified, so D/O are likely, to some extent, an internal product of the Earth's climate system. Detailed statistical analyses indicate that D/O Event recurrence occurs in multiples of 1,500 years (Schulz 2002; Rahmstorf 2003). A 1,500 year wait time between events occurred with the highest frequency, with an exponential decrease in the frequency of occurrence for longer wait times. This pattern is consistent with stochastic resonance, whereby a weak periodic signal (e.g. 1,500 years) is "broadcast" together with random noise (Alley et al. 2001). Constructive interference between the periodic signal and random noise would produce "events" primarily every 1500 years. However, events would be skipped in the case where deconstructive interference occurred, and intervals such as 3,000, and 4,500 years (multiples of the primary frequency) would also occur, but with decreased frequency. While this explanation is consistent with Greenland ice core results, there are only approximately 20 D/O Events, which is too few to confidently indicate an origin from stochastic resonance.

The most likely source of a periodic forcing driving D/O Events would be variations in the amount of energy received by the Sun. However, a 1,500 year periodic forcing has not been identified in proxy records for solar variations such as <sup>14</sup>C incorporated in tree cellulose or <sup>10</sup>Be fallout accumulated in polar ice cores. Shorter, centennial scale periods have been identified and attributed to variations in solar activity. A 1,500 year periodic cycle could be mathematically produced internally through interactions between these shorter periods (e.g. combination tones or heterodynes) that could produce a response at a lower frequency due to the

large thermal inertial of ice sheets (Braun et al. 2005; Clemens 2005). There is in fact evidence of 1500 year ice sheet variability surround the North Atlantic basin during the last glaciation. Variations in the amount of hematite stained quartz and feldspar IRD grains occurred every 1500-years, though it is unclear exactly how this small meltwater forcing would then be amplified to produce abrupt swings in temperature (Bond et al. 1997).

#### 1.3.2. Heinrich Events

Heinrich Events were a surging of the North American Laurentide Ice Sheet during glaciations, which results in a massive number of icebergs exiting into the North Atlantic Ocean through the Hudson Strait. This occurs during periods of extremely cold conditions in Greenland, with basin-wide cooling in the North Atlantic (Figure 4). Strata recovered from sediment cores during Heinrich Events are typically devoid of planktic micro fossils, indicating inhabitable surface conditions, and contain extremely high amounts of IRD, with in excess of 20% consisting of paleozoic carbonate derived from the Hudson Strait of Canada (Heinrich 1988; Bond et al. 1992). The large number of IRD indicates a large number of melting icebergs, the freshwater from which is thought to have severely slowed, perhaps even entirely stopped, the production of North Atlantic Deep Water (NADW).

The Gulf Stream is a western boundary current (similar to the Kuroshio) that transports a large amount of warm, saline water to the northern high latitudes, where it is rapidly cooled. The combination of low temperature and high salinity causes density to increase critically and the water to sink, forming NADW and the beginning of the global thermohaline circulation. Water (and heat) is pulled north from all latitudes to replace this sinking water (Crowley 1992). Therefore, the slowdown or cessation of NADW production has a warming effect on the southern hemisphere, resulting in an anti-phased warming/cooling relationship between the northern and southern hemispheres. Warming events know as Antarctic Cold Reversals (ARC) occur during Heinrich Events (e.g. EPICA Community Members 2006) (Figure 4).

#### 2. Last Glacial Iberian Margin Variability

Climate changes associated with Heinrich and D/O Events resulted in large scale migration of the polar front (e.g. Bond et al. 1999), resulting in profound changes in temperature along western Europe and particularly off shore of Iberia (Schönfeld et al. 2003; de Abreu et al. 2003; Martrat et al. 2004; Bard et al. 2004; Martrat et al. 2007). Neanderthal extinction appears to have coincided with a major North Atlantic cooling event 40,000 years ago, Heinrich Event 4 (H4). One objective of the current project is to determine the extent to which climate may have played a role. The state of ecological niches in Europe was sensitive to the magnitude of sea surface temperature change in the Eastern North Atlantic. However, a comprehensive reconstruction of Earth surface conditions 40,000 years ago does not exist. Researchers have used conditions during the Last Glacial Maximum, 20,000 years as a proxy for the conditions during H4, such as the CLIMAP SST reconstruction (CLIMAP Project Members 1976). Therefore understanding the magnitude of temperature change off the Iberian margin is important to understanding the climate effects, if any, on Neanderthals. Current niche models are assuming a 4-5°C temperature change in the North Atlantic, off Iberia. However, differing techniques used for determination of SST results in differing results, requiring evaluation of whether 4°C is a reasonable reconstruction (See Section 2.2)



Figure 4. NGRIP ice core D/O Events (black), EDML ice core ARCs (red), Site 609 N. pachyderma (left coiling) percentagebased SST proxy (blue), and Canadian limestone IRD (green) Heinrich Events.

#### 2.1. Last Glacial Maximum

Conditions were reconstructed over the entire Earth's surface during the LGM by the CLIMAP project (1976). The transfer function technique using species assemblage of planktic foraminifers in last glacial maximum strata recovered from sediment cores was used to estimate sea surface temperature. Off Iberia, the modified CLIMAP temperature, which has been lowered by 1°C (Crowley 2000; Ballantyne et al. 2005), is between 12 and 13°C during the last glacial maximum. This is in contrast to 4-5°C from MD95-2040 (de Abreu et al. 2003). The record for MD95-2040 is also based on planktic foraminifers, though using a slightly different method, the modern analogue technique. However, the CLIMAP reconstructed temperature is in good agreement with values derived from alkenones of coccolithophores in MD01-2443 and 2444, 11-12°C (Martrat et al. 2007) (Figure 5).

The MD95-2040 SST record is probably too cold. DSDP Site 609, located farther to the north in the central basin, does not have a SST proxy record but it does have quantitative counts of the polar planktic foraminifer species N. pachyderma (left coiling), which is the only North Atlantic species remaining when SST is below 5°C (Bond et al. 1993) (Figure 4). During the last glacial maximum, the percentage of this foraminifer was approximately 95% of the total assemblage at DSDP Site 609, indicating that while SST was extremely

図4. NGRIP(グリーンランド)氷床コアに認められる D/O イベント(黒), EDML(南極)氷床コアの気温記録と AIM(赤),コアリングサイト 609の N. pachiderma (left coiling)の量比を用いて導いた表層水温復元,そしてカ ナダ起源の炭酸塩 IRD が示すハインリッヒイベント(緑).

cold, it was likely above 5°C. This is in agreement with CLIMAP, which indicates that the SST at Site 609 was 6-7°C (Figure 5). However, the percentage of this foraminifer at MD95-2040 during the LGM was less than 90%. Therefore, the 4-5°C temperature estimate derived from MD95-2040 is likely too extreme.

#### 2.2. Heinrich Event 4

Extrapolating the LGM SSTs to H4 may give a good indication of minimum temperature, but the change in temperature from the warm interstadial conditions prior to H4 cannot be reconstructed by CLIMAP, which presents only a single time slice over a large spatial area. However, sediment cores cover a restricted spatial area but over a long temporal interval, providing the means to ascertain the magnitude of SST change, which in turn would have affected ecological niches in Europe. The more drastic the change in SST, the higher the likelihood that climate contributed to Neanderthal extinction. Of the three proxy SST records from Iberia that encompass H4, two are from the North Atlantic (MD95-2040 and MD01-2443,4) and on from the western Mediterranean (ODP 977a) (Figure 6). MD95-2040 is reconstructed from planktic foraminifer assemblages, while the other two are based on alkenones derived from coccolithophores (e.g. Figure 1e and f). Both should be recording summer temperatures, when plankton blooms would have occurred. The alkenone records indicate a 5°C drop and a 4°C drop in the Atlantic and Mediterranean, respectively (Martrat et al. 2007; Martrat et al. 2004). The foraminifer SST proxy record indicates a drop of approximately 13°C, with temperature dropping from 19°C to 5 or 6°C (de Abreu et al. 2003). However, this 5°C temperature from MD95-2040 is accompanied by only 80% N. pachyderma (left coiling). The other two cores, on the other hand, indicate 10°C was the minimum temperature off Iberia during H4. While 5°C is likely too low, 10°C may be too high. Therefore, the model sensitivity to the absolute change in temperature should be investigated to determine if a reasonable amount of uncertainty would affect the modeled results.



Figure 5. Modified CLIMAP SST for the LGM North Atlantic basin showing locations of sediment cores discussed in the text. 図 5. CLIMAP の LGM における表層海水温復元結果の改訂図.本文で議論している堆積物コアの採取サイトが示してある.



Figure 6. Site 609 Canadian limestone Heinrich Events (black) compared to the planktic foraminifer SST record of MD95-2040 (green) and the coccolithophore alkenone SST records of MD01-2443,4 (red) and ODP 977a (blue), showing a large discrepancy in the magnitude SST change during H4

図 6. コアリングサイト 609 におけるカナダ起源の炭酸塩の量(黒線),浮遊性有孔虫の群集組成解析に基づく表層海水温 復元結果(緑線),そしてアルケノンによる水温復元(赤線,MD01-2443,2444;青線,ODP977a). それぞれの復 元結果が大きく食い違うことがわかる.

#### References

- Alley, R.B., S. Anandakrishnan and P. Jung (2001). Stochastic resonance in the North Atlantic. *Paleoceanography*: 16190–198.
- North GRIP Project Members (2004). High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431(7005): 147–151.
- Ballantyne, A.P., M. Lavine, T.J. Crowley, J. Liu and P.B. Baker (2005). Meta-analysis of tropical surface temperatures during the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 32(5): L05712.
- Bard, E., F. Rostek and G. Ménot-Combes (2004). Radiocarbon calibration beyond 20,000 <sup>14</sup>C yr B.P. by means of planktonic foraminifera of the Iberian Margin. *Quaternary Research*, 61(2): 204–214.
- Bond, G.C. and Lotti, R.. (1995). Iceberg discharges into the North-Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 267(5200): 1005–1010.
- Bond, G.C., W. Showers, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. deMenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas and G. Bonani, (1997). A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278(5341): 1257–1266.
- Bond, G.C., W. Showers, M. Elliot, M.N. Evans, R. Lotti, I. Hajdas, G. Bonani and S. Johnsen (1999). the North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: relation to Heinrich events, Dansgaard/Oeschger cycles and the little ice age. in: P.U. Clark, R.S. Webb and L.D. Keigwin (eds.), Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. AGU, Washington D.C., pp. 35–68.

- Bond, G.C., H. Heinrich, W. Broecker, L. Labeyrie, J. McManus, J. Andrews, S. Huon, R. Jantschik, S. Clasen, C. Simet, K. Tedesco, M. Klas, G. Bonani and S. Ivy (1992). Evidence for Massive Discharges of Icebergs into the North-Atlantic Ocean During the Last Glacial Period. *Nature*, 360(6401): 245–249.
- Bond, G.C., W. Broecker, S. Johnsen, J. McManus, L. Labeyrie, J. Jouzel and G. Bonani (1993). Correlations between Climate Records from North-Atlantic Sediments and Greenland Ice. *Nature*, 365(6442): 143–147.
- Boyle, E.A., and Keigwin, L.D. (1982). Deep Circulation of the North Atlantic over the Last 200,000 Years: Geochemical Evidence. *Science*, 218(4574): 784–787.
- Brassell, S.C., G. Eglinton, I.T. Marlowe, U. Pflaumann and M. Sarnthein (1986). Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment. *Nature*, 320(6058): 129–133.
- Braun, H., M. Christl, S. Rahmstorf, A. Ganopolski, A. Mangini, C. Kubatzki, K. Roth and B. Kromer (2005). Possible solar origin of the 1,470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*, 438(70695): 208–211.
- Clemens, S.C. (2005). Millennial-band climate spectrum resolved and linked to centennial-scale solar cycles. *Quaternary Science Reviews*, 24(5-6): 521–531.
- CLIMAP Project Members. (1976). The surface of the ice-age Earth. Science: 1911131-1137.
- Crowley, T.J. (2000). CLIMAP SSTs re-revisited. Climate Dynamics, 16(4): 241-255.
- Crowley, T.J. (1992). North Atlantic Deep Water Cools the Southern Hemisphere. Paleoceanography: 7489-497.
- de Abreu, L., N.J. Shackleton, J. Schönfeld, M. Hall and M. Chapman (2003). Millennial-scale oceanic climate variability off the Western Iberian margin during the last two glacial periods. *Marine Geology*, 196(1-2): 1–20.
- EPICA Community Members (2006). One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444(7116): 195–198.
- Fairbanks, R.G. (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342(6250): 637–642.
- Flower, B.P. (1999). Cenozoic Deep-sea Temperatures and Polar Glaciation: The Oxygen Isotope Record, Geological Records of Global and Planetary Changes. *Terra Antartica Reports*: 327–42.
- Heinrich, H. (1988). Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29(2): 142–152.
- Imbrie, J., J.D., H., D.G. Martinson, A. McIntyre, A.C. Mix, J.J. Morley, N.G. Pisias, W.L. Prell and N.J. Shackleton (1984). The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine δ18O record. in: A.L. Berger (ed.), Milankovitch and Climate. Springer, New York, pp. 269–305.
- Martrat, B., J.O. Grimalt, C. Lopez-Martinez, I. Cacho, F.J. Sierro, J.A. Flores, R. Zahn, M. Canals, J.H. Curtis and D.A. Hodell (2004). Abrupt temperature changes in the Western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science*, 306(5702): 1762–1765.
- Martrat, B., J.O. Grimalt, N.J. Shackleton, L. de Abreu, M.A. Hutterli, and T.F. Stocker (2007). Four Climate Cycles of Recurring Deep and Surface Water Destabilizations on the Iberian Margin. *Science*, 317(5837): 502–507.
- Mudelsee, M. and Schulz, M. (1997). The Mid-Pleistocene climate transition: onset of 100 ka cycle lags ice volume buildup by 280 ka. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(1-2): 117–123.
- Prahl, F.G., and Wakeham, S.G., (1987). Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for palaeotemperature assessment. *Nature*, 330(6146): 367–369.

- Prahl, F.G., L.A. Muehlhausen and D.L. Zahnle (1988). Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(9): 2303–2310.
- Rahmstorf, S. (2003). Timing of abrupt climate change: a precise clock. *Geophysical Research Letters*, 30(10): 10.1029/2003GL017115.
- Reimer, P.J., M.G.L. Baillie, E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, P.G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C.E. Buck, G.S. Burr, R.L. Edwards, M. Friedrich, P.M. Grootes, T.P. Guilderson, I. Hajdas, T.J. Heaton, A.G. Hogg, K.A. Hughen, K.F. Kaiser, B. Kromer, F.G. McCormac, S.W. Manning, R.W. Reimer, D.A. Richards, J.R. Southon, S. Talamo, T.S.M. Murney, J. vanderPlicht and C.E. Weyhenmeyer (2009). IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4): 1111–1150.
- Schönfeld, J., R. Zahn and L. de Abreu (2003). Surface and deep water response to rapid climate changes at the Western Iberian Margin. *Global and Planetary Change*, 36(4): 237–264.
- Schulz, M. (2002). On the 1470-year pacing of Dansgaard-Oeschger warm events. *Paleoceanography* 17(2) 10.1029/2000PA000571.

## 西部北大西洋における古海洋環境とネアンデルタール絶滅

ステファン P. オブラクタ,横山 祐典 東京大学 大気海洋研究所

1. はじめに

#### 1.1. 北大西洋古環境復元のための間接指標

気候変動復元研究で用いられる地球科学的試料をプロキシ(Proxy:間接指標)とよぶ。気温や塩 分その他の気候情報を間接的に記録している媒体のことを指す。ここではまず,当時の気候変化の情報を 復元するプロキシについていくつか紹介する(図1)。氷期に広く北大西洋を取り囲んでいた巨大な氷床 (後述)の消長は,気候変化に大きな影響を与えていたため,氷床の消長のタイミングを決定することが 重要である。それに広く用いられているのが IRD (Ice Rafter Debris)とよばれる氷山起源の岩屑である。 IRD は大陸氷床が流動する過程で氷床に取り込まれた基盤岩片が海洋に流出し,氷山として極前線まで運 ばれ,融解する過程で海洋底に堆積したものであり,極前線の位置と氷床融解イベントの直接的な指標と して使われている。IRD には赤鉄鉱が付着した石英や斜長石(図1A:例えば Bond and Lotti 1995)のほか, カナダ盾状地に分布する,古生代のドロマイトに富んだ石灰岩片からなるもの(図1B:例えば Heinrich 1988)などが存在する(図1)。堆積物中のIRD 量の増減により,過去の氷山流出量,すなわち淡水の流 入量の増減を復元することが可能となる(例 Bond et al. 1992)。

古海洋学において主に用いられている3つのプロキシについて以下に紹介する。ひとつめは,浮遊 性(図1D)および底棲有孔虫(図1E),石灰質ナノプランクトン化石(図1F)といった石灰質の殻をも つ微化石である。浮遊性有孔虫の群集組成解析は,水温や極前線などの水塊境界の移動など,海洋表層環 境復元を行うことができる指標である(例 CLIMAP 1976)。それらの殻に含まれる微量金属の量比変化や 同位体比組成変化は,海水量(海水準として近似),塩分,そして水温の指標とすることができる。また 底棲有孔虫についても同様の分析が可能で,深層水の環境復元を行うことができる。北大西洋起源の深 層水と南極周辺海域起源の深層水の分布変化の復元に利用されている方法である(例 Boyle and Keigwin 1982)。一方,石灰質ナノプランクトンが生成する有機化合物が水温指標となることも知られている (Brassell et al. 1986; Prahl and Wakeham 1987; Prahl et al. 1988)。このように,海洋の水温復元のプロキシには, 1)微化石を使った群集組成解析,2) 無機地球化学指標,そして3) 有機地球化学指標の3種が存在する。

#### 1.2. 氷期 - 間氷期の変動

現在の気候状態は間氷期とよばれる時期にあり,およそ 72 m の全球平均海水準(msle)上昇を引 き起こす量の淡水が陸域に存在している。そのうち約 6-7 msle がグリーンランド,残りが南極氷床である (Flower, 1999)。約 20,000 年前の最終氷期最盛期(LGM)には,南北半球の氷床が拡大し,全球的な海水 準は 120 m ほど下がった(Fairbanks 1989; Yokoyama et al. 2000a; 2001a)。(図 2)

大陸氷床の消滅や出現を繰り返す,氷期-間氷期サイクルはおよそ 250 万年前から始まった(図3)。 これは、地球の公転軌道要素の変化にともない、太陽からの日射量分布がわずかに変化することが原因で あると考えられている(Imbrie et al. 1984)。公転軌道要素の変化として挙げられる 3 つの要素の一つは、 季節性をもたらす地軸の傾きである(現在は 23.5°)。この地軸傾斜角の変動には 41,000 年の周期性があ り、21.0°から 24.5°の角度で変化する。地軸傾斜角が小さい時には季節性が弱められ、夏の暑さも冬の寒 さもマイルドになる。そのため、冬に降った雪が融け残ることが可能となり、氷床拡大の時期と大まかに は一致する(Yokoyama and Esat 2011)。さらに氷床の存在は日射の反射率を高める(アルベドの増大)の ため、正のフィードバック機構として地球を冷やす方向に働き、地球は氷期へと移行する。地軸傾斜角が 小さくなると逆に間氷期へ戻る。

氷期 - 間氷期の周期は,およそ 100 万年前から 100,000 年周期に変わった(Mudelsee and Schulz 1997:図3)。これは,地球公転軌道要素の中で氷期 - 間氷期の変化が最も小さい離心率の変化の周期と 同調する。もたらされる日射量変化は極めて小さいため,地球気候システム内のフィードバック機構の存 在を示唆する。この非線形のフィードバック機構は,緩やかな寒冷化に伴う氷床の成長と,数千年という 地質学的には急激な温暖化に伴う氷期の終焉(ターミネーション)をもたらすという点で,寒暖現象に一 様に機能しているわけではない。

過去の氷期についての古気候データは、8万年前から1万5千年前まで続いた最終氷期のものが多い。 これらは海洋酸素同位体ステージ(Marine Isotope Stage: MIS) 2から4として区分される。それよりも 前の氷期は MIS6 および MIS8 などである。後者のデータは少ないため、これらの氷期の状態も最終氷期 と同様であったのではないかと考えられていることが多い。

直近の氷期よりも古い時代の氷期のデータが少ない理由は以下のようにまとめられる。まずはサン プリングの問題である。最終氷期のサンプルは、一般的なコアリング法(例:グラビティーコアやピスト ンコア)で採取可能である。過去の情報を高時間分解能で採取するためには、堆積速度の大きい堆積物を 採取する必要があるが、そのような試料採取には特別にデザインされたコアリング装置とそれを備えた研 究調査船が必要となる。現在までにこのようなサンプリングが可能な調査船は、世界にも 3-4 隻しか存在 しない。次に年代決定法の問題がある。放射性炭素(<sup>14</sup>C)の年代決定摘要可能範囲は、過去 50,000 年間だが、 放射性炭素年代の暦年代校正カーブが完全に存在しているわけではないので(Reimer et al. 2009; Esat and Yokoyama 2008)、例えば海洋コア試料の表層水温データとグリーンランド氷床コアの気温データを対比 して年代軸をもとめる方法などがとられてきた(Bond et al. 1993)。この方法は 50,000 年をこえる年代に ついても摘要可能だが, グリーンランド氷床コアの最長記録データは, MIS5.5 とよばれる最終間氷期(12 万5千年前)までに限られる(North GRIP Project Members 2004)。したがって, MIS6 や8 といった氷期 の年代決定には使用できない。

#### 1.3. 最終氷期の千年規模気候変動

古気候データは,最終氷期の気候が,特に高緯度で不安定だったことを明らかにした(図4)。お よそ1,500 年から4,500 年の間隔で,数十年の時間スケールにより,急激に間氷期レベルまで気温を上昇 させるという大規模な環境変化が繰り返されていた。これらはダンスガード / オシュガー(D/O)イベン トとよばれている。一方で5,000 年から7,000 年の時間間隔をおいて繰り返していた北大西洋の急激な寒 冷化現象をハインリッヒイベントとよぶ(Heinrich 1988; Bond et al. 1992)。

#### 1.3.1. ダンスガード - オシュガーイベント

いまのところ D/O イベントの究極の原因は解明されていない。しかし外部要因についても特に有 効なものが提唱されていないことから,地球の気候システム内にその原因があるのではと考えられてい る。氷床コアコアデータの統計学的な検討からは,D/O イベントは1,500 年周期およびそれと関連した周 期によって引き起こされると報告されている (Schulz 2002; Rahmstorf 2003)。1,500 年の主要な周期にラン ダムノイズが重なり確立共鳴を起こしてイベントを起こすため,基数である1,500 の倍数である3,000 年 や4,500 年での変化が起こるとしている研究もある (Alley et al. 2001)。しかしグリーンランド氷床コアに 認められる D/O イベントは 20 回のみで,この説明による確証となるまでには至っていない。

もっとも可能性がある原因として考えられるのは太陽からのエネルギー変化であるが,木材年 輪中のセルロースから抽出した放射性炭素(<sup>14</sup>C)やアイスコアの<sup>10</sup>Beにはそのような周期変動はみつ かっていない。より短い数百年スケールの変動と太陽活動との関連性についての報告のみである(例: Yamaguchi et al. 2010; Hong et al. 2011)。1,500年周期については,数学的にはこれらの短い周期が相互作 用し氷床の熱応答性についての時間スケールに関連した変調を施されることによって出現する可能性も 議論されている(Braun et al. 2005; Clemens 2005)。実際最終氷期の北大西洋周辺の氷床は,1,500年周期 で変動していたことが,赤鉄鉱が表面に付着した石英や斜長石のIRDの出現の周期性によって確認され ている。しかしこのIRDをもたらした氷床変動は相対的に小規模で,これがどのように北大西洋全域の 大規模な気温の変化をもたらしたかということについての一致した見解はまだない(Bond et al. 1997)。

#### 1.3.2. ハインリッヒ イベント

ハインリッヒイベントとは北アメリカのローレンタイド氷床が部分崩壊してハドソン海峡をとおし て北西太平洋に大規模氷山をもたらしたイベントである。これはグリーンランドにおいて極めて寒い時期 と同時期に起こっており,北大西洋全域に寒冷な気候をもたらした(図4)。海洋堆積物コアのハインリッ ヒイベント相当層からは浮遊性有孔虫の化石の存在が極めて限られ,厳しい海洋環境だったことが想像 される。さらにそのほとんどが IRD により占められている.また IRD の 20% 以上は古生代の炭酸塩岩で, カナダのハドソン海峡周辺からもたらされたものであることがわかる(Heinrich 1988; Bond et al. 1992)。 多量の IRD が検出されるということは、多量の淡水が氷山として北大西洋域に供給されたということを 示しており(Yokoyama et al. 2001b; Yokoyama and Esat 2011),結果として北大西洋深層水(NADW)の形 成を極端に弱化または完全に停止させた可能性がある(Yokoyama et al. 2000b; Yokoyama and Esat 2004)。

メキシコ湾流は黒潮のように西岸境界流のひとつで、あたたかく高塩分の水塊を高緯度へ運び、そ こで急激に冷却される。これにより高塩分・低温の水塊が移動し、沈み込むことにより NADW が形成さ れ、全球的なサーモスタットとして重要な役割を果たしている、熱塩循環の起点を形成している。この NADW を補填するため、水塊(温暖)が北上し、北大西洋高緯度が温暖となる。一方でこの NADW が形 成されなくなると、熱の移動が起こらなくなり、結果として南半球が温暖化する。このため、北半球で寒冷、 南半球で温暖な南北熱シーソーとよばれる現象がおこる。最終氷期に認められる南極温暖期(AIM)はハ インリッヒイベントの際に起こっている(例: EPICA Community Members 2006; 図 4)。

#### 2. 最終氷期のイベリア半島沖に認められる古海洋変動

ハインリッヒイベントや D/O イベントに付随した気候変動は、大規模な極前線の移動をともない (Bond et al., 1999),西ヨーロッパとりわけイベリア半島沿岸域に大規模な気温 - 水温の変化をもたらす (Schönfeld et al. 2003; de Abreu et al. 2003; Martrat et al. 2004; Bard et al., 2004; Martrat et al. 2007)。ネアンデ ルタールの絶滅は 40,000 年前のハインリッヒイベント 4 (H4) に付随した寒冷イベントと同期している ように見える。現在のプロジェクトの目的のひとつは、ネアンデルタールの絶滅と、この寒冷イベントと の関連性について研究をすすめることである。東大西洋における浮遊性生物の群集組成解析にもとづく古 海洋情報は、高い信頼度をもつと考えられ、海洋表層水温の復元も盛んに行われているが、40,000 年前に 特化した研究はみうけられない。国際的な大規模気候復元プロジェクトであった CLIMAP の LGM に関す る情報である 4°C の寒冷化(現在と比較して)というデータに基づいた議論が多い。しかし群集組成解 析以外の水温指標をもちいた復元結果は異なる値を示しており、果たして 4°C の寒冷化という仮定自体 が適当であるか検討を要する(セクション 2.2 参照)。

#### 2.1. 最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum: LGM)

最終氷期最盛期の全球表層の気温復元は、CLIMAP 計画において行われた(CLIMAP 1976)。群集 組成解析結果を変換関数により過去の水温情報として導き出すという手法により得られた。この手法を やや改良した方法により求められた結果(Crowley 2000; Ballantyne et al. 2005)は、現在と比べた LGM の 時の表層海水温低下を 12-13℃ とした。これは MD95-2040 コアの解析から求められた報告(4-5℃:de Abreu et al. 2003)よりもかなり低い。MD95-2040 の解析結果も、浮遊性有孔虫の群集組成解析により求 められているが、モダンアナログ法という、やや異なる手法により得られた結果である。一方で CLIMAP により求められた値は有機地球化学的手法であるアルケノン温度計により、MD01-2443 および 2444 に対 して得られた結果(11-12℃:Martrat et al. 2007)と整合的である。

MD95-2040 コアの記録はおそらく低すぎるのではないかと考えられる。ここで北大西洋の北部に位置する DSDP609 コアの、浮遊性有孔虫の寒帯指標種解析結果を紹介する。このコアからは前述のようなアルケノンの結果などは報告されていないが、北大西洋で表層水温が 5°C 以下になった時に卓越して存在可能な種として知られている(Bond et al. 1993)N. pachiderma(left coiling)の存在比を用いて古海洋情報を復元している(図 4)。それによると LGM 相当層には N. pachiderma (left coiling) が 95% 以上含まれており、極めて低水温である 5°C をわずかに上回る程度お水温であったと考えられる。これは CLIMAP の復元値である 6-7°C という結果と整合的である(図 5)。一方で MD95-2040 の LGM 相当層に含まれる N. pachiderma (left coiling) は 90% を下回っており、MD95-2040 の復元水温である 4-5°C という水温はおそらく過大評価している可能性が高い。

#### 2.2. ハインリッヒイベント4

LGM の表層海水温復元結果をもちいた H4 の古海洋情報復元は最低水温の検討を行うには適当で あるかもしれないが,LGM のある時間断面の広範囲なデータの平均値として求めている CLIMAP の結果 をそのまま当てはめることは危険である。なぜなら H4 はハインリッヒイベントが起こった直前の温暖イ ベントの影響も考慮されるべき現象であるからである。堆積物コアは限られた地域の情報を保存している 環境記録媒体であるが,より長時間の変動も正確に保存しているため,それらの変動が持つ,時系列変化 として捉えた場合の生態学的ニッチへ与える環境負荷の大小を評価する上で有効である。ネアンデルター ルの絶滅もこれらを複合的に考慮して検討する必要がある。

イベリア半島周辺の H4 の古気候情報を持つ 3 点のコアリングサイトのうち 2 点は北大西洋(MD95-2040, MD01-2443, 2444) でもう 1 点は西部地中海である (ODP 977a) (図 6)。MD95-2040 の古海洋デー タは浮遊性有孔虫の群集組成解析により求められたもので,他の 2 点は石灰質ナノプランクトンが生合成 したアルケノンによって得られたデータである (Martrat et al., 2007; 2004)。有孔虫による水温復元では, 水温が 19℃ から 5 または 6℃ まで 13℃ も低下したと報告している (de Abreu et al. 2003)。しかしこの 5℃ という MD95-2040 における水温であるが,該当する堆積物の中の N. pachiderma(left coiling)の存在率は わずか 80% である。一方で他の 2 点のコアは,H4 における最低水温が 10℃ を切ることはなかったとし ている。おそらく N. pachiderma(left coiling)の結果を勘案すると 5℃ という水温見積もりは低すぎて, 10℃ という値は高すぎると思われる。したがって気候モデルの感度確認を行うことが必要で,どの程度 のプロキシの水温復元の誤差が,モデルのアウトプットに大きな影響をおよぼすのか検討を行う必要があ る。

#### 和文報告書 追加引用文献

- Esat, T.M. and Y. Yokoyama (2008). Issues in radiocarbon and U-series dating of corals from the last glacial period, *Quaternary Geochronology*, 3(3): 244-252.
- Hong, P.K., H. Miyahara, Y. Yokoyama, Y. Takahashi and M. Sato (2011). Implications for the low latitude cloud formations from solar activity and the Quasi-Biennial Oscillation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (5-6): 587-591.
- Yamaguchi, Y. T., Y. Yokoyama, H. Miyahara, K. Sho, T. Nakatsuka (2010). Synchronized Northern Hemisphere Climate Change and Solar Magnetic Cycles during the Maunder Minimum, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 107 (48): 20697-20702.
- Yokoyama, Y., K. Lambeck, P. De Deckker, P. Johnston, L.K. Fifield (2000a). Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima, *Nature*, 406: 713-716.
- Yokoyama, Y., T.M. Esat, K. Lambeck, L.K. Fifield (2000b). Last ice age millennial scale climate changes recorded in Huon Peninsula Corals, *Radiocarbon*, 42: 383-401.
- Yokoyama, Y., P. De Deckker, K. Lambeck, P. Johnston, L.K. Fifield (2001a). Sea-level at the last glacial maximum: evidence from northwestern Australia to constrain ice volumes for oxygen isotope stage2, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 165: 281-297.
- Yokoyama, Y., T.M. Esat, K. Lambeck (2001b). Coupled climate and sea-level changes deduced from Huon Peninsula coral terraces of the last ice age, *Earth and Planetary Science Letters*, 193: 579-587.
- Yokoyama, Y. and T.M. Esat (2004). Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in surface seawater as recorded in corals, *Global environmental change in the ocean and on land*: 279-309.
- Yokoyama, Y. and T.M. Esat (2011). Global Climate and Sea Level- Enduring variability and rapid fluctuations over the past 150,000 years-, *Oceanography*, 24: 54-67.

#### Modeling the Climate of the Last Glacial-Interglacial Cycle

Wing-Le CHAN and Ayako ABE-OUCHI

Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo

Several hypotheses have been put forward to explain the demise of the Neanderthals. One of them is related to the climate, in particular, sudden climatic fluctuations, although its exact role is still being debated. During the period OIS-3 (oxygen isotope stage 3), spanning roughly 65,000 to 25,000 years ago, the climate across and beyond Europe was characterized by abrupt changes known as D-O (Dansgaard-Oeschger) events which brought about rapid warming episodes, followed by cooling over a longer period. Preceding some of the D-O events were Heinrich events, observed during the last glacial period and coinciding with the break-up of ice shelves in the northern hemisphere and release of large amounts of freshwater into the North Atlantic Ocean. Evidence for temperature fluctuations come from sources such as Greenland ice cores.

In order to better understand the effect of climate on the change in distribution of both the neanderthal and modern human population, it is vital that we have a clear picture of the climate and landscape during the OIS-3. For this, it is also important to include simulations of the extent of the ice sheets as they can have a substantial effect on the climate over paleoclimate timescales. However, a direct coupling between a general circulation model (GCM) with an ice sheet model is extremely costly in terms of computational resources, even more so when models of higher resolution are used. For example, a 100,000 year simulation of the atmosphere, oceans and ice sheets could require 30 years to complete.

To circumvent this problem, there are several approaches to modeling the climate of the past glacialinterglacial cycle, and it is usually necessary to combine these various methods as each one serves a particular purpose and yet has its own limitations. Firstly, an ice-sheet model (eg IcIES, the Ice sheet model for Integrated Earth system Studies, Abe-Ouchi et al. 2007) can be used to simulate the extent of the northern hemisphere ice sheets at various times of the glacial cycle. To overcome the issue of computing time, a simple climate model is run to obtain typical climates at certain periods of interest, such as the Last Glacial Maximum, and these mean-climate states are then used as input data to drive the ice sheet model. Secondly, a fully coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM) can be used to simulate the global climate while also incorporating land processes. For a grid resolution of 200km, a 500-year model integration requires at least 5 months of real computing time. Thirdly, a simpler model consisting of an atmospheric component coupled to a one-layer ocean slab (ASGCM) may be used. Designed to model atmospheric and land processes only, a 50year model integration with the same grid resolution requires merely 2 days to complete. Finally, AOGCMs of higher resolution can be employed to overcome spatial inadequacies. The obvious drawback is the huge computation time involved - for a 60 km grid resolution, a 10-year integration requires 10 days and 1000 node hours. In some cases, a high resolution model can be nested within a lower resolution global GCM and analysis is focused on the area covered by the regional model.

A coupled atmosphere-oceanland GCM was used to simulate snapshots of the climate at every 10,000 years within the last glacialinterglacial cycle, which dates back to approximately 125,000 years before present, up to the Eemian interglacial. The model employed is called the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), developed at the institutes CCSR/ NIES/FRCGC in Japan (K-1 Model Developers 2004). This comprises of separate components, namely the atmosphere, ocean and land surface, which are linked to one another by the exchange of heat and water which drive the climate on our planet. More complicated versions of this and other models in general can incorporate



Figure 1. Insolation (calculated for latitude 65°N during July), atmospheric CO2 concentration and sea level changes during the last glacial cycle. Sea level changes calculated from the ice sheet model, IcIES, are plotted for comparison.



additional components to simulate the growth of ice sheets or the dynamics of surface vegetation. The atmospheric component of the present model has a horizontal resolution of T42, or about 2.8° latitude by 2.8° longitude, which roughly translates to a grid size of 200 km over the European continent. MIROC has already been used for a wide variety of climate simulations, ranging from 21st century global warming projections to simulations of the distant past, such as the mid-Holocene, 6 ka BP (Ohgaito and Abe-Ouchi. 2007) and the Last Glacial Maximum, 21 ka BP (Otto-Bliesner et al. 2009).

Conditions need to be specified within the model for each time period. These include orbital forcing and atmospheric carbon dioxide concentration. Orbital forcing, as described by the Milankovitch theory, is the combined effect of the changes in the Earth's movement and is well understood. The separate parameters are the eccentricity, obliquity (axial tilt) and precession of the Earth's orbit. Eccentricity is a measure of the departure of the earth's orbit from a circular path. Obliquity refers to the variation in the earth's axial tilt with respect to the plane of its orbit and varies between 22.1° and 24.5°. With decreasing obliquity, the surface receives less insolation during the summer in either hemisphere. This tends to favor glaciation by melting less snow during the summer. Precession is the change in direction of the earth's axis relative to the fixed stars. Each parameter contributes with a certain periodicity (about 100 k 41 k and 26 k years, respectively) and their collective effects are used to calculate the insolation forcing (Figure 1). Atmospheric carbon dioxide variations of the past come from sources such as Greenland and Antarctic ice cores which contain trapped bubbles of air.



Figure 2. Left: Present-day temperature and precipitation over Syria. Right: Simulated change in temperature over the same region and the contributions from orbital parameters alone and from orbital parameters and greenhouse gases together.
 (左) 現在のシリアにおける年間気温と降水量の変化. (右) 同地域における軌道パラメータのみを寄与させた 古気温および軌道パラメータと温室効果ガスを合わせて寄与させた古気温の変化.



Figure 3. Comparison of surface air temperatures determined from ice core data in Antarctica (DomeF) and Greenland (GRIP) with those simulated by models and the individual contributions from orbital parameters and greenhouse gases.
 図 3. 南極大陸 (DomeF) とグリーンランド (GRIP) の氷床コアデータから決定される地表気温と軌道パラメータ および温室効果ガスをそれぞれ寄与させたモデルから算出される古気温の比較.

Results from time slices at every 10,000 years give a time series of the changes in temperatures as in Figure 2. The individual effect of each forcing can be isolated by leaving other forcing parameters unchanged from the present day and repeating the experiments. As the figure shows, the effect on temperature of greenhouse gases is much larger than that of orbital parameters. Figure 3 highlights the importance of the effects of ice sheets. The orbital and greenhouse gas forcings together, during most periods, fail to give a proper simulation of the temperatures recorded in the ice cores of Greenland and Antarctica. Simulated temperatures are not sufficiently low for most of the glacial cycle. Including the extent and topography of the northern hemisphere ice sheets which have been specifically computed for each relevant time slice, simulated temperatures are better reconciled with ice core data, although the experiments do not appear to capture the minimum temperatures of the stadials in Greenland. Over Antarctica, inclusion of changes in the ice sheet there gives good agreement during the Last Glacial Maximum.



Figure 4. Dansgaard-Oeschger cycles and Heinrich events as inferred from Greenland ice core data. 図 4. グリーンランド氷床コアから推定されるダンスガード - オシュガーサイクルとハインリッヒイベント

The release of freshwater into the North Atlantic Ocean during the abrupt Heinrich events is thought to have reduced the strength of the North Atlantic Deep Water current and thus reduce temperatures over Europe. To mimic the effects of the release of freshwater into the North Atlantic Ocean, some model simulations may include 'water hosing' whereby fresh water is artificially released over the northern North Atlantic (Manabe and Stouffer 1997). Water hosing in our experiments lasts for a period of 500 years, after which the hosing is switched off. The rate of fresh water released is set to either 0.05 Sv or 0.1 Sv (1 Sverdrup=106 m<sup>3</sup>/s). These experiments are carried out for three glacial states (Figure 5): an interglacial climate, as in the pre-industrial (conditions circa 1850); a mid-glacial climate, as in the geologically brief cold climatic conditions of the Younger Dryas, 12 ka BP or OIS-3; a full glacial climate, as in the Last Glacial Maximum, 21 ka BP. For a 0.1 Sv hosing (Figure 5), results show that, in all cases, irrespective of the glacial state, Antarctica warms after 400-500 years, except over the Weddell Sea during an interglacial. In the northern hemisphere, there is an opposite effect, with temperatures decreasing, particularly over the northern North Atlantic. However, the cooling is much smaller during a full glacial.



Figure 5. Change in temperature due to 0.1Sv hosing for (a) interglacial, (b) glacial and (c) full glacial. Values are averaged over years 400-500.
図 5. 0.1 Sv の放水実験による(a) 間氷期(b) 氷期(c) 氷期最盛期の気温変化。気温は,400-500 年の平均を示す.

We plan to further investigate the influence of the changes in the glacial-interglacial cycle and of the D-O events on the climate and vegetation of Africa and Eurasia using methods already described. Snapshots at intervals less than 10,000 years will be the objective, and results will be verified carefully with available proxy data The factors of climate change which are important for human evolution will also be examined, for example, the expansion or reduction of deserts and forests, and changes in seasonal precipitation. Moreover, the changes in climate, hydrology and vegetation that are associated with abrupt climate changes of D-O events will be investigated.

#### References

- Abe-Ouchi, A. and F. Saito (2007). Climatic Conditions for modeling the Northern Hemisphere ice sheets throughout the ice age cycle, *Clim. Past*, 3: 423-438.
- Dansgaard, W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel, G. Bond (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature*, (364): 218-220.
- K-1 Model Developers (2004). K-1 Coupled GCM (MIROC) Description, K-1 technical report [Eds: Hasumi, H. and Emori, S.], Center for Climate System Research, The University of Tokyo, Japan, 34.
- Manabe, S. and R.J. Stouffer (1997). Coupled ocean-atmosphere model response to freshwater input: Comparison to Younger Dryas Event, *Paleoceanography*, 12: 321-336.
- Ohgaito, R. and A. Abe-Ouchi (2007). The role of ocean thermodynamics and dynamics in Asian summer monsoon changes during the mid-Holocene, *Climate Dynamics*, 29, 39-50.
- Otto-Bliesner, B.L., R. Schneider, E.C. Brady, M. Kucera, A. Abe-Ouchi, E. Bard, P. Braconnot, M. Crucifix, C.D. Hewitt, M. Kageyama, O. Marti, A. Paul, A. Rosell-Melé, C. Waelbroeck, S.L. Weber, M. Weinelt, Y. Yu :(2009) A comparison of PMIP2 model simulations and the MARGO proxy reconstruction for tropical sea surface temperatures at last glacial maximum, *Climate Dynamics*, (32): 799-815.

### 最終氷期 – 間氷期サイクルの気候モデリング

## 陳 永利, 阿部 彩子 東京大学 大気海洋研究所

ネアンデルタール絶滅の原因については、いくつかの仮説が提唱されている。その影響について は議論があるが、急激な気候変化がネアンデルタール絶滅の原因のひとつとして考えれている。およそ 65,000 年から 25,000 年の OIS-3 (酸素同位体ステージ 3) ではヨーロッパ全域からその周辺域にかけて、 D-O (ダンスガード - オシュガー) イベントと呼ばれる急激な温暖化とその後に続く長期的な寒冷化によ る突発的気候変動が発生したことは特筆に値する。いくつかの D-O イベントの前には北半球の棚氷崩壊 と北大西洋への大量の淡水流入が同時に見られるハインリッヒイベントが観測されている。このような気 温変動は、グリーンランド氷床コアなどのデータから明らかにされてきた。

ネアンデルタールと現代人類集団の分布変化における気候変動の影響を詳細に議論するためには, OIS-3 の気候や景観を解明することが極めて重要となる。また,古気候時間スケールでの気候変動を議論 するときに実質的な影響力を持つ氷床についても,その挙動をシミュレートすることが必要となる。し かし,氷床モデルを直接組み込んだ大循環モデル(GCM)では,計算リソースに莫大なコストがかかり, 高解像度のモデルシミュレーションは現実的ではない。例えば,100,000年間の大気,海洋および氷床の シミュレーションの計算には,およそ 30年かかる。

この計算コストの問題を回避して,過去の氷期-間氷期サイクルの気候をモデリングする手法はい くつか存在するが,ある目的に特化しており,それぞれ限界があるモデルを組み合わせることが必要とな る。第一に,氷床モデル(例えば,IcIES,the Ice Sheet model for Integrated Earth system Studies, Abe-Ouchi et al. 2007)は,北半球の氷床拡大を様々な時代でシミュレートすることができる。計算時間の課題を乗 り越えるためは,まず最終氷期最盛期のような研究対象時期の典型的な気候を単純な気候モデルでシミュ レートし,得られた平均的気候状態を氷床モデルの入力データとして利用する。また第二に挙げられる大 気 - 海洋結合大循環モデル(AOGCM)は,地陸での作用も含めた地球規模の気候をシミュレーションで きる。ただし,200 km グリッドの解像度で 500 年間のモデルを積分すると,シミュレートに少なくとも5 ケ 月が必要となる。第三に挙げられる方法には,海洋を1層のスラブとして大気コンポーネントと結合する ことで単純化をはかる手法(ASGCM)がある。大気と陸地だけのモデルを構築した場合,50年スケール のモデルを,上記と同じ解像度で計算した場合,2日間で完了する。最後に高解像度のAOGCMでは,空 間的なシミュレーションの欠点を補うことが可能である。このモデルの欠点も,莫大な計算時間である。 例えば,60 km グリッドの解像度で10年積分のシミュレーションを行った場合,10日間で1,000ノード・ 時間が必要となる。場合によっては、高解像度のモデルで,低解像度の全球 GCM の内挿することができ、 局地的なモデルを研究対象とする地域にだけに焦点を当ててシミュレートすることもできる。

大気 - 海洋 - 陸地結合モデルは、エーミアン間氷期を含む 125,000 年前から今日に至る氷期 - 間氷

期サイクルまでの古気候分布を 10,000 年ごとにシミュレートすることが可能である。採用したモデル は、MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) と呼ばれ、東京大学大気海洋研究所気候シス テム研究系、国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センターの共同開発で作成された (K-1 Model Developers 2004)。このモデルは、大気、海洋、陸地といった独立した構成要素から成り、各要素は、地 球の気候変化を生み出す熱と水の交換を行うことで互いに結びつけられている。一般に、より高次のバー ジョンや他のモデルでは、氷床の成長や地表植生の動態をシミュレートするための追加コンポーネントを 組み込むことができる。現在のモデルの大気コンポーネントでは、水平解像度 T42 を採用している。こ の解像度は、およそ緯度 2.8°、経度 2.8°を1 グリッドとし、ヨーロッパ大陸で概算すると1 グリッド 200 km<sup>2</sup> となる。MIROC は、21 世紀の地球温暖化予測のみならず、6 千年 BP の完新世中期 (Ohgaito and Abe-Ouchi 2007) あるいは 2 万 1 千年 BP の最終氷期最盛期 (Otto-Bliesner et al. 2009) のような古気候のシミュ レーションへ既に応用されている。

各時代のシミュレーションモデルを定義するために,軌道強制力と大気中二酸化炭素濃度といった 条件設定が必要となる。ミランコビッチ理論で取り上げられている軌道強制力とは,地球の運動に関する 周期変動を結合した複合効果で示されており,理解が進んでいる。軌道強制力を決定する独立変数として, 離心率,傾斜角および自転軸の歳差運動が挙げられる。離心率とは,円軌道に対する地球の公転軌道のず れの大きさを示す。傾斜角は,地球の公転軌道面に対する地軸の傾斜角変化を表し,22.1°から24.5°の間 で変化している。傾斜角の減少により,北半球一帯で地表が受ける夏期の日射量が減少する。この効果は, 夏期の融雪を阻害し氷河作用を促進する。歳差運動とは,恒星の位置から観測される地軸自体の回転運動 である。各パラメータは,一定の周期性(各周期はそれぞれ,約100万年,約4.1万年および約2.6万年) を持っており,これらの複合効果から日射強制を算出することができる(図1)。過去の大気中二酸化炭 素濃度変動は,グリーンランドや南極の氷床コアに捕捉された空気から復元されている。

10,000 年毎の古環境シミュレーションは,図2のように気温変化を時系列で示すことが可能である。 各強制力によってもたらされる個々の効果は,他の強制力パラメータを今日と同じままにしてシミュレー ションを繰り返し試行することで分離できる。図でも示されているように,温室効果ガスによる気温へ の影響は軌道パラメータによる寄与よりも大きい。また図3 では,氷床効果がはっきりと示されている。 大部分の時期では,軌道と温室効果ガスの強制力を一緒に算出しても,グリーンランドおよび南極大陸の 氷床コアから復元された古気温データと一致しない。氷河期に対しては推定された気温の低さが十分でな い。該当時期において北半球に存在する氷床の地勢と広がりをシミュレーションに含めることで,推定さ れる気温が氷床コアデータと良く整合する。ただし,この手法では,グリーンランドの亜氷期における最 低気温を推定することはできない。南極大陸における氷床変化もシミュレーションに用いることで,最終 氷期最盛期の古気温推定がプロキシデータと良く一致するようになるのである。

突発的に発生するハインリッヒイベントによってひきおこされる北大西洋への淡水流入は、北大西

洋の深層海流を弱め、結果としてヨーロッパの気温を低下させる。北大西洋への淡水流入の温度効果を再 現するため、いくつかのモデルシミュレーションは人工的に北大西洋海域へ淡水を放出する淡水流入実験 を実装している(Manabe and Stouffer 1997)。淡水流入実験では、淡水放出を停止させてから 500 年間の 気温変化をシミュレートしている。淡水の放出量は 0.05 Sv または 0.1 Sv(1 Sverdrup = 106 m<sup>3</sup>/s)に設定し、 3 通りの氷河状態下でシミュレーションを試行した(図 5)。3 通りの氷河状態は、以下の時代で代表した: 間氷期を代表して産業革命前(AD 1,850 年頃);氷期として 12 Ka BP あるいは OIS-3 の短期的な寒冷イベ ントであるヤンガードリアス;氷期最盛期として 21 ka BP の最終氷期最盛期。0.1 Sv にてシミュレーショ ンを行った結果を図 5 に示した。間氷期のウェデル海域を除き、氷河状態に関係なく 3 通り全てで、南極 大陸が放水後 400-500 年で温暖化する。また北半球では、特に北大西洋域において気温の低下が見られ、 南極大陸とは反対の効果をうける。ただし、この寒冷化は氷期最盛期では非常に小さい。

我々は、ここで取り上げたシミュレーションモデルを用いて、氷期-間氷期サイクルやD-O イベ ントにおけるアフリカやユーラシアの詳細な古気候変化および古植生変化の復元を計画している。また、 10,000 年よりも短い時間間隔でのシミュレーションを実施して、地球化学プロキシとの比較から詳細な検 証を行う事ができる。以上から、砂漠や森林の拡大や縮小、降水量の季節変化など、人類進化に重要な気 候要素の検討が行えると期待される。加えて、D-O イベントの突発的な気候変化に関連する気候、水循環 や植生の変化についても研究を進める。

### 班会議

#### 第1回班会議

日時:2010年8月31日(火) 会場:東京大学柏キャンパス生命棟502

#### 第2回班会議

日時:2010年11月25日(水) 会場:東京大学 柏キャンパス 図書館セミナー室 参加者:米田 穣 (B02 代表者),阿部 彩子 (B02 分担者),小口 高 (B02 分担者),中橋 渉 (B01 班研究協力者),仲田 大人 (A01 班研究協力者),大学院生などオブザーバ 15 名

#### 研究紹介

"Modeling climate impacts on the environment of the last Neanderthals during the last glacial period: some results from the collaborations between climatologists from LSCE and archaeologists from PACEA and University of Montreal"

Masa KAGEYAMA

(海外共同研究者: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement)

これまでフランスで行われてきた考古学者と古気候研究者の共同研究について紹介が なされた。とくに, Banks et al. (2008a, b) に関する方法論について, 紹介いただいた。加え て, Europe Research Counsil によって今年度よりサポートが開始された Advanced Project "Tracing the evolution of symbolically mediated behaviors within variable environments in Europe and southern Africa." が紹介された。 "Eco-cultural niche modeling (ECNM) by the Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction (GARP): an intensive review"

近藤 康久 (研究協力者:東京大学 空間情報研究センター)

Banks et al. (2008 a) では、Genetic Algorithm for Role-set Prediciton を用いて、最終氷期最 盛期頃の後期旧石器文化の分布状況(Solutlean と Epigravettian)と生態パラメータの関係性を抽 出した。生態学的な予測では両者の分布はおおまかに重なると考えられたが、実際の分布から は前者がより寒く湿潤な環境に適応していたことが示された。さらに、Banks et al. (2010b)では、 旧人・新人の生態学的ニッチについて、気温および降水量を生態学的なパラメータとして、分 布予測が行われ実際の遺跡分布状況と比較検討することによって、ハインリッヒイベント4(H4) 前後にみられた旧人の分布縮小は新人の影響が考えられるとしている。生態学的予測モデルの 原理と方法について紹介した上で、新人の学習能力進化と気候変動の関係について、応用が可 能であろうという見通しが示された。

#### "Neanderthal hunting ecology in the northern Levant during OIS-3"

Mark DIAB

(研究協力者;東京大学大学院新領域創成科学研究科)

動物考古学的に新人と旧人の狩猟対象の比較研究から,両者の狩猟パターンについて比 較検討が行われている。欧州および西アジアでは,狩猟対象動物の種組成,年齢構成,出現部 位頻度について,明確な相違が認められていない。一方,歯セメント質の偏光顕微鏡による年 輪観察から,狩猟季節を復元した研究からは新人では遺跡の季節的な利用が示されたのに対し, 旧人の通年的な利用が指摘されている。本研究ではシリア共和国デデリエ洞窟から出土した動 物遺存体を用いて,ガゼルの年齢構成を復元したところ,西アジアの旧人および解剖学的現代 人の傾向と一致することが示された。また,歯エナメル質のストロンチウム同位体を成長方向 に従って連続分析し,季節的な移動の復元を試みた予備的な結果について報告した。

#### 第3回班会議

日時:2010年11月27日(水) 会場:東京大学 柏キャンパス 図書館セミナー室

#### 第4回班会議

日時:2010年12月28日(火)

会場:東京大学 柏キャンパス 新領域生命棟講義室

参加者:米田 穣(研究代表者),阿部 彩子・小口 高・横山 祐典(研究分担者),丸川 雄三(総括 班研究分担者),仲田 大人(A01 班研究協力者),Masa KAGEYAMA(海外研究協力者),近藤 康 久(研究協力者),Wing-Le CHAN(研究協力者),Mark DIAB(研究協力者),Stephen OBROCHTA(研 究協力者候補),大学院生オブザーバー15名

#### 演題

- (1)「学術用途向けのインターネット GIS と考古研究」 小口 高(東京大学 空間情報科学研究センター:研究分担者) 近藤 康久(東京大学 空間情報科学研究センター:研究協力者)
- (2)「地球化学プロキシを用いた古環境復元と人類進化研究」 Stephen OBROCHTA(東京大学 大気海洋研究所 横山研:研究協力者候補)

#### 講演要旨

(1)「学術用途向けのインターネット GIS と考古研究」小口 高, 近藤 康久

小口から,現在研究に主に使用している GIS サーバーである ArcGIS について,その機能 が紹介された。また,小口らによって作成された日本列島における扇状地地形データベースに ついて,そのサーバー運用方法などが紹介された。現在,当データベースは運用が停止してい るとの報告があったが,丸川によって国立情報学研究所のサーバーでの運用・公開の可能性に ついて提案がなされた。

続いて,近藤からは本計画研究で構築した ArcGIS システムのデモンストレーションが行われた。また,今年度 Access を用いて構築されたで西アジア地域のデータについての年代データの情報変換方法についての報告がなされた。

(2)「地球化学プロキシを用いた古環境復元と人類進化研究」Stephen OBROCHTA

講演者が博士論文研究で行った北大西洋の深海コアを用いて,地球化学プロキシからど のような情報を抽出することができるのか,また交替劇でしばしば注目される MIS3 (海洋酸素 同位体ステージ3)における急激な環境変動 (ハインリッヒイベントとダンスガード・オシュガー サイクル)のデータ紹介と,ホモ・サピエンスの進化によって重要であった MIS6(2~1.2万年前) の対比がなされた。MIS3 と比較して MIS6 は安定した気候状態であり,ハインリッヒイベント やダンスガードオシュガーサイクルが弱かった可能性があることが指摘された。さらに,アフ リカの地上情報との対比などが可能となれば人類進化への影響を検討できることが期待される。

## 一般公開セミナー

日時:2011 年 1 月 19 日 (水) 17:30-20:00 会場:国立科学博物館 新宿分館 資料館 1F 会議室

演題

(1) "Modeling climate impacts on the environment of the last Neanderthals during the last glacial period: some results from the collaborations between climatologists from LSCE and archeologists from PACEA and University of Montreal"

Masa Kageyama (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) 通訳:近藤 康久

(2)「古気候変動と人類の進化:シミュレーション実験の到達点」 阿部 彩子(東京大学 大気海洋研究所)

講演要旨

(1) "Modeling climate impacts on the environment of the last Neanderthals during the last glacial period: some results from the collaborations between climatologists from LSCE and archeologists from PACEA and University of Montreal" Masa KAGEYAMA

日本の考古学者を対象として、この10年ほどの間にフランスとカナダで実施してきた、 古気候シミュレーションと考古学との共同研究について、自身の経験を踏まえて紹介された。 ネアンデルタールとクロマニオンの交替劇については、GAAP(遺伝的アルゴリズム)を用い た生態・文化ニッチモデルの応用について紹介があった。基本的に全球モデルを使用するため、 研究対象とする地域の解像度を上げる必要があるが、気候モデル研究ではそれが非常に挑戦的 であることが指摘された。

(2)「古気候変動と人類の進化:シミュレーション実験の到達点」 阿部 彩子

気候シミュレーションがどのような原理によって行われているかについて, ミランコビッ チサイクルから,現在の大気・海洋・氷床結合モデルまでの紹介があった。我が国における考 古学への応用はほとんど行われていないが,現状では植生を正確に復元するための手法も開発 しており,気候変動と人間活動の関係について,より具体的な因果関係を議論することが可能 であることが紹介された。

旧人・新人の生態学的ニッチについて、気温および降水量を生態学的なパラメータとして、 分布予測が行われ実際の遺跡分布状況と比較検討することによって、ハインリッヒイベント 4 (H4)前後にみられた旧人の分布縮小は新人の影響が考えられるとしている。生態学的予測モデ ルの原理と方法について紹介した上で、新人の学習能力進化と気候変動の関係について、応用 が可能であろうという見通しが示された。

#### 研究業績 Publications

#### 原著論文(查読付) Research papers

#### 米田 穣 Minoru YONEDA

- Naito, Y.I., N.V. Honch, Y. Chikaraishi, N. Ohkouchi, M. Yoneda 2010 Quantitative evaluation of marine protein contribution in ancient diets based on nitrogen isotope ratios of individual amino acids in bone collagen: an investigation at the Kitakogane Jomon Site. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 31-40.
- Niato, Y.I., Y. Chikaraishi, N. Ohkouchi, H. Mukai, Y. Shibata, N.V. Honck, Y. Dodo, H. Ishida, T. Amano, H. Ono, M. Yoneda 2010 Dietary reconstruction of the Okhotsk Culture of Hokkaid, Japan, based on nitrogen isotopic composition of amino acids: implication for the correction of radiocarbon marine reservoir effects on human bones. *Radiocarbon* 52: 671-681.
- Yoshida, K., T. Hara, D. Kunikita, Y. Miyazaki, T. Sasaki, M. Yoneda, and H. Matsuzaki 2010 Pre-bomb marine reservoir ages in the Western Pacific. *Radiocarbon* 52: 1197-1206.
- Nakagawa, R., N. Doi, Y. Nishioka, S. Nunami, H. Yamauchi, M. Fujita, S. Yamazaki, M. Yamamoto, C. Katagiri, H. Mukai, H. Matsuzaki, T. Gakuhari, M. Takigami, M. Yoneda 2010 The Pleistocene human remains from Shiraho-Saonetabaru Cave on Ishigaki Island, Okinawa, Japan, and their radiocarbon dating. *Anthropological Science* 118(3): 173-183.
- Ono, R., S. Speghondo, M. Yoneda 2010 Changing marine exploitation during Late Pleistocene in Northern Wallacea: shellfish remains from Leang Sarru Rockshelter in Talaud Islands. *Asian Perspectives* 48(2): 318-341.
- 山崎 真治・片桐 千亜紀・米田 穣 2010「白保竿根田原洞穴遺跡の発掘調査と沖縄における更新世人類研究の現 段階」『考古学研究』 57(3): 1-6.
- Zin-Maung-Maung-Thein, M. Takai, H. Uno, J.G. Wynn, N. Egi, T. Tsubamoto, Thaung-Htike, Aung-Naing-Soe, Maung-Maung, N. Nishimura, M. Yoneda 2011 Stable isotope analysis of the tooth enamel of Chaingzauk mammalian fauna (late Neogene, Myanmar) and its implication to paleoenvironment and paleogeography. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 300: 11-22.

#### 阿部 彩子 Ayako ABE-OUCHI

- Kurahashi-Nakamura, T., A. Abe-Ouchi, Y. Yamanaka 2010 Effects of physical changes in the ocean on the atmospheric pCO<sub>2</sub>: glacial-interglacial cycles. *Climate Dynamics* 35(4): 713-719.
- Yanase, W., A. Abe-Ouchi 2010 A Numerical Study on the Atmospheric Circulation over the Mid-latitude North Pacific during the Last Glacial Maximum. *Journal of Climate* 23: 135-151.
- Saito, F., A. Abe-Ouchi 2010 Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheet to the advance of the grounded area. *Annals of Glaciology* 51(55): 41-48.
- Lu, J-M., S-J. Kim, A. Abe-Ouchi, Y. Yu, R. Ohgaito 2010 Arctic Oscillation during the mid-Holocene and last glacial maximum from PMIP2 coupled model simulation. *Journal of Climate* 23 (14): 3792-3813.
- Calov, R., R. Greve, A. Abe-Ouchi, et al. 2010 Results from the Ice-Sheet Model Intercomparison Project-Heinrich Event INtercOmparison (ISMIP HEINO). *Journal of Glaciology* 56 (197): 371-383.
- Okazaki, Y, A. Timmermann, L. Menviel, N. Harada, A. Abe-Ouchi, M.O. Chikamoto, A. Mouchet, H. Asahi 2010 Deepwater Formation in the North Pacific During the Last Glacial Termination. *Science* 329(5988): 200-204.

- Siddall, M., A. Abe-Ouchi, M. Andersen, et al. 2010 The sea-level conundrum: case studies from palaeo-archives. *Journal* of Quaternary Science 25(1): 19-25.
- Timmermann, A, J. Knies, O. E. Timm, A. Abe-Ouchi, T. Friedrich 2010 Promotion of glacial ice sheet buildup 60-115 ka B.P by precessionally paced Northern Hemispheric meltwater pulses. *Paleoceanography* 25: PA4208.
- Tachiiri, K., J. C. Hargreaves, J. D. Annan, A. Oka, A. Abe-Ouchi, M. Kawamiya 2010 Development of a system emulating the global carbon cycle in Earth system models. *Geosci. Model Dev.* 3: 365-376.
- Blatter, H., R. Greve, A. Abe-Ouchi 2010 A short history of the thermomechanical theory and modelling of glaciers and ice sheets. *Journal of Glaciology* 56(200): 1087-1094.
- Yokoyama, Y., A. Suzuki, F.Siringan, Y. Maeda, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, H. Kawahata, H. Matsuzaki 2011 Mid-Holocene palaeoceanography of the northern South China Sea using coupled fossil-modern coral and Atmosphere-Ocean GCM model. *Geophysical Research Letters* 38: L00F03, doi:10.1029/2010GL044231.
- Greve, R., F. Saito, A. Abe-Ouchi 2011 Initial results of the SeaRISE numerical experiments with the models SICOPOLIS and IcIES for the Greenland Ice Sheet. *Annals of Glaciology* 52: 58.
- Menviel, L., A. Timmermann, O. Timm, A. Mouchet, A. Abe-Ouchi, M.O. Chikamoto, N. Harada, R. Ohgaito, Y. Okazaki 2011 Removing the North Pacific halocline: effects on global climate, ocean circulation and the carbon cycle. *Deep-Sea Research II Special volume*, In press.
- Murakami, S., R. Ohgaito, A. Abe-Ouchi 2011 Atmospheric Local Energetics and Energy Interactions between Mean and Eddy Fields. Part II: An Example for the Last Glacial Maximum Climate. *Journal of Atmospheric Research*: In press.
- Oka, A., E. Tajika, A. Abe-Ouchi, Kubota 2011 Role of the ocean in controlling atmospheric CO2 concentration in the course of global glaciations. *Climate Dynamics*: DOI: 10.1007/s00382-010-0959-z, In press.
- Chikamoto, M.O., L. Menviel, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, A. Timmermann, Y. Okazaki, N. Harada, A. Oka, A. Mouchet 2011 Variability in North Pacific intermediate and deep water ventilation during Heinrich events in two coupled climate models. *Deep-Sea Research II Special volume*: In press.
- Oka, A., A. Abe-Ouchi, M. Chikamoto, T. Ide 2011 Mechanisms controlling export production at the LGM: effects of changes in oceanic physical fields and atmospheric dust deposition. *Global Biogeochemical Cycles*: In press.

#### 橫山 裕典 Yusuke YOKOYAMA

- Hanebuth, T. J. J., H. K. Voris, Y. Yokoyama, J. Okuno, Y. Saito 2011 Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications. *Earth Science Reviews* 104: 92-110.
- Sagawa, T., Y. Yokoyama, M. Ikehara, M. Kuwae 2011 Vertical thermal structure history in the western subtropical Pacific since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters* 38: L00F02, doi:10.1029/2010GL045827.
- Shiau, L.-J., M.-T. Chen, S. Clemens, C.-A. Huh, M. Yamamoto, Y. Yokoyama 2011 Warm Pool hydrological and terrestrial variability near southern Papua New Guinea Over the past 50k. *Geophysical Research Letters* 38: L00F01, doi:10.1029/2010GL045309.
- Yokoyama, Y., A. Suzuki, F. Siringan, Y. Maeda, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, H. Kawahata, H. Matsuzaki 2011 Mid-Holocene palaeoceanography of the northern South China Sea using coupled fossil-modern coral and Atmosphere-Ocean GCM model. *Geophysical Research Letters* 38: L00F03, doi:10.1029/2010GL044231.

- Araoka, D, M. Inoue, A. Suzuki, Y. Yokoyama, R. L. Edwards, H. Cheng, H. Matsuzaki, H. Kan, N. Shikazono, H. Kawahata 2010 Historic 1771 Meiwa tsunami confirmed by high-resolution U/Th dating of massive Porites coral boulders at Ishigaki Island in Ryukyus, Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 11: Q06014, doi:10.1029/2009GC002893.
- Ando, A., T. Nakano, H. Kawahata, Y. Yokoyama, B.-K. Khim 2010 Seawater Sr isotope ratios on a glacial-interglacial timescale: An application of latest high-precision thermal ionization mass spectrometry. *Geochemical Journal* 44 (5): 347-357.
- Chen, M.-T., X.P. Lin, Y.-P. Chang, Y.-C. Chen, L. Lo, C.-C. Shen, Y. Yokoyama, D. W. Oppo, W. G. Thompson, R. Zhang 2010 Dynamic millennial-scale climate changes in the Northwestern Pacific over the past 40,000 years. *Geophysical Research Letters* 37: L23603, doi:10.1029/2010GL045202.
- Esat, T. M. and Y. Yokoyama 2010 Coupled Uranium Isotope and Sea-Level Variations in the Oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74 (24): 7008-7020.
- Fujita, K., A. Omori, Y. Yokoyama, S. Sakai, Y. Iryu 2010 Sea-level rise during Termination II inferred from large benthic foraminifers: IODP Expedition 310, Tahiti Sea Level. *Marine Geology* 271 (1-2): 149–155.
- González, C., L. E. Urrego, J. I. Martínez, J. Polanía, Y. Yokoyama 2010 Late Holocene mangrove dynamics in the Colombian Caribbean: a history of human and natural disturbances. *The Holocene*: DOI: 10.1177/0959683610365941.
- Inoue, M., Y. Yokoyama, M. Harada, A. Suzuki, H. Kawahata, H. Matsuzaki, Y. Iryu 2010 Trace element variations in fossil corals from Tahiti collected by IODP Expedition 310: Reconstruction of marine environments during the last deglaciation (15 to 9 ka). *Marine Geology* 271: 303-306.
- Kubota, Y., K. Kimoto, R. Tada, H. Oda, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki 2010 Variations of East Asian summer monsoon since the last deglaciation based on Mg/Ca and oxygen isotope of planktic foraminifera in the northern East China Sea. *Paleoceanography* 25: PA4205, doi:10.1029/2009PA001891.
- Miyahara, H., K. Kitazawa, K. Nagaya, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki, K. Masuda, T. Nakamura, Y. Muraki 2010 Is the Sun heading for another Maunder Minimum? -Precursors of the grand solar minima. *Journal of Cosmology* 8: 1970-1982.
- Miyaji, T., K. Tanabe, Y. Matsushima, S. Sato, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki 2010 Response of daily and annual shell growth patterns of the intertidal bivalve Phacosoma japonicum to Holocene coastal climate change in Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 286: 107-120.
- PALSEA (PALeo SEA level working group) 2010 The sea-level conundrum: case studies from palaeo-archives. *Journal* of Quaternary Science 25: 19-25.
- Shiroya, K., Y. Yokoyama, H. Matsuzaki 2010 Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic 10Be and 26Al depth profile. *Geochemical Journal* 44 (6): e23-e27.
- Suganuma, Y., Y. Yokoyama, T. Yamazaki, K. Kawamura, C. S. Horng, H. Matsuzaki 2010 10Be evidence for delayed acquisition of remanent magnetization in marine sediments: Implication for a new age for the Matuyama-Brunhes boundary. *Earth and Planetary Science Letters* 296: 443-450.
- Tyler, J., Y. Kashiyama, N. Ohkouchi, N. Ogawa, Y. Yokoyama, Y. Chikaraishi, R. A. Staff, M. Ikehara, C. Bronk Ramsey, C. Bryant, F. Brock, K. Gotanda, T. Haraguchi, H. Yonenobu, T. Nakagawa 2010 Chlorin specific carbon and nitrogen isotopes track aquatic change over the last deglaciation in Lake Suigetsu, Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11: Q09010, doi:10.1029/2010GC003186.
- Yamaguchi, Y. T., Y. Yokoyama, H. Miyahara, K. Sho, T. Nakatsuka 2010 Synchronized Northern Hemisphere Climate Change and Solar Magnetic Cycles during the Maunder Minimum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 107 (48): 20697-20702.

横山 裕典 2010 「ターミネーションの気候変動」『第四紀研究』49 (6): 337-356.

Yokoyama, Y., M. Koizumi, H. Matsuzaki, Y. Miyairi and N. Ohkouchi 2010 Developing ultra small-scale radiocarbon sample measurement at the University of Tokyo. *Radiocarbon* 52(2-3): 310-318.

#### 近藤康久 Yasuhisa KONDO

近藤康久 2010「オマーン・パート遺跡群」『考古学研究』 57 (2): 118-120.

#### 著書・総説 Books and Overviews

#### 米田 穣 Minoru YONEDA

- 米田穣 2010「同位体食性分析からみた縄文文化の適応戦略」小杉康・谷口康浩・西田泰民・水ノ江和同・矢 野健一編『縄文時代の考古学4人と動物の関わり食料資源と生業圏』同成社. 207-222.
- 米田穣・陀安一郎・石丸恵利子・兵藤不二夫・日下宗一郎・覚張隆史・湯本貴和 2011「同位体からみた日本 列島の食生態の変遷」『環境史をとらえる技法』文一総合出版.印刷中.

### 小口 高 Takashi OGUCHI

- 小口高2010「西アジアの自然地理」安田喜憲・後藤明・木村善博編『朝倉世界地理講座 西アジア』朝倉書店. 9-26.
- Oguchi, T., T. Wasklewicz 2011 Geographical Information Systems in geomorphology. In Geregory, K.J., A. Goudie (eds) The SAGE Handbook of Geomorphology. Sage Publications. In press.
- Oguchi, T., Y. Hayakawa, T. Wasklewicz 2011 Data sources. In Smith, M., P. Paron, J. Griffiths (eds) Geomorphological Mapping: Methods and Applications. Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15. Elsevier. In press.

#### 近藤 康久 Yasuhisa KONDO

- 近藤康久 2010「オマーン青銅器時代の墳墓群の空間構造に関する一考察」『日本西アジア考古学会第 15 回大 会要旨集』23-28.
- Kondo, Y., Y. Seino 2010 GPS-aided walking experiment and data-driven travel cost modeling on the historical road of Nakasendo-Kisoji (Central Highland Japan). Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). In B. Frischer, J.W. Crawford, D. Koller (eds) Proceedings of the 37th International Conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22-26, 2009. BAR Int. Ser. 2079. Oxford, Archaeopress. 158-165.
- 近藤康久・門脇誠二・西秋良宏「考古学におけるネットワーク・コンピューティング:「旧人・新人交替劇」 関連遺跡データベースの取り組み」『情報処理学会シンポジウムシリーズ』2010(15): 173-180.
- 近藤康久 2010「2010 年代の考古データベースはどう展開するか?」『公開シンポジウム「人文科学とデータベース」 論文集』16:19-28.

#### 講演・学会発表 Oral/Poster Presentations

#### 米田 穣 Minoru YONEDA

- Yoneda, M. 2010 Tempo-spacial variation of Jomon subsistence: An isotopic perspective. The Symposiumu on "Climate Change and Subsistence in Prehistoric Japan". University of California, Berkeley, 20 June (招待講演).
- 米田穣・土肥直美・片桐千亜紀 2010「白保竿根田原洞穴遺跡から見つかった更新世人骨とその人類学的意義」 『国際シンポジウム「後期旧石器時代のシベリアと日本-最終氷期における人類の環境適応行動-」』 慶應義塾大学 2010.11.28.(招待講演)
- 米田穣 2010「琉球諸島へのヒトの拡散:陸橋はあったのか?」『国立民僕学博物館共同研究「人類の移動誌: 進化的視点から」第4回研究会』沖縄県立博物館 2010.5.30.
- 米田穣 2010「人骨の化学分析からわかること」『公開シンポジウム「白保竿根田原洞穴と旧石器時代人骨の発見』 石垣市 2010.7.31.
- 米田穣・瀧川渉・竹中正巳・向井人史 2010「同位体で見た古墳時代から古代の食生態とその地域性」『2010 年 度骨考古分科会シンポジウム,第64回日本人類学会大会』伊達市 2010.10.2.
- 米田穣・阿部彩子・横山祐典・小口高 2010「旧人・新人時空分布と気候復元の関連性の分析」『第 64 回日本 人類学会大会』伊達市 2010.10.2.
- 米田穣・覚張隆史・瀧上舞・板橋悠・土肥直美・片桐千亜紀・向井人史 2010「白保竿根田原洞窟出土人骨に おける同位体分析」『第 64 回日本人類学会大会』伊達市 2010.10.3.
- 米田穣 2011「ネアンデルタール絶滅と気候要因:年代学的研究の役割について」『新学術領域研究「交替劇」 第2回研究集会』神戸学院大学 2011.2.20.
- 米田穣 2011「白保竿根田原洞穴遺跡でみつかった 2 万年前の人骨の意義と今後の社会的活用」『第 158 回沖縄 問題研究会』東京 2011.3.4.
- 門脇誠二・近藤康久 2011「レヴァント地方における中期・後期旧石器インダストリーの消長パターン」『科学 研究費補助金(新学術領域研究)「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相:学習能力の進化 に基づく実証的研究」第2回研究大会』神戸学院大学 2011.2.20.

#### 近藤 康久 Yasuhisa KONDO

- 近藤康久・門脇誠二・西秋良宏 2010「考古学におけるネットワーク・コンピューティング:「旧人・新人交替劇」 関連遺跡データベースの取り組み」『じんもんこん 2010』東京工業大学 2010.12.
- 近藤康久 2010「GIS と高精度センシング技術の活用によるオマーン青銅器時代遺跡群の空間構造の研究」『CSIS DAYS 2010』東京大学 2010.11.
- 近藤康久 2010「2010 年代の考古データベースはどう展開するか?」『第 16 回公開シンポジウム「人文科学とデー タベース」』 花園大学 2010.11.
- 門脇誠二・近藤康久 2010「旧人・新人に関わる石器製作伝統のデータベース化:その目的と方法」『科学研究 費補助金(新学術領域研究)「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相:学習能力の進化に基 づく実証的研究」第1回研究大会』学術情報センター 2010.10.
- 近藤康久 2010「オマーン青銅器時代の墳墓群の空間構造に関する一考察」『日本西アジア考古学会第 15 回大会』 2010.6.