レス・湖沼堆積物記録からみたアジアモンスーンと氷期-間氷期サイクルの関係

The linkage of Asian monsoon activities and glacial-interglacial cycles recorded in loess and lacustrine deposits

Abstract

山田和芳* 福澤仁之**

Kazuyoshi Yamada * and
Hitoshi Fukusawa **

2004年11月9日受付.

2005年3月2日受理.

* 島根大学汽水域研究センター
Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504 Japan

** 首都大学東京都市環境学部都市環境学科地理環境コース
Department of Urban Environmental Sciences, Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 192-0397 Japan

Corresponding author: K. Yamada, kyamada@soc.shimane-u.ac.jp

In this paper, we reviewed and discussed the recent progress and perspectives mentioned in the research of paleo Asian monsoon activities from the records of loess-paleosol sequences and lacustrine sediments in East Asia. Loess-paleosol sequences and lacustrine sediments in East Asia have been recorded terrestrial environmental changes associated with East Asian monsoon activities since the beginning of Quaternary. The researches to reconstruct the activities of paleo East Asian monsoon started in 1982 by Heller and Liu (1982), and has been stored much information on the formation and variability of the monsoon in the last two decades. Onset of loess deposition might begin in 2.6 Ma, and after that the fluctuations of the monsoon activities have been reflected the glacial-interglacial cycles controlled by the Milankovitch forcing. Also, the millennial time-scale variation of the monsoon activities can be recognized in the last glacial time. The recent research on Red Clay underlying the loess-paleosol sequence may point out that the formation of the monsoon activities dates back to 7 or 8 Ma.

Key words: loess-paleosol sequence, lacustrine sediment, Asian monsoon, Red Clay, glacial-interglacial cycle, Chinese Loess Plateau

アジアモンスーンとレス・湖沼堆積物 —まえがきにかえて—

東アジアモンスーンは、夏季と冬季のモンスーンにそれぞれ区分される。夏季モンスーンは、夏季における西部太平洋暖水海域上の高気圧とチベット高原上の低気圧間の気圧勾配によって発生する南東季節風であり、海域の湿った大気を大陸内部に運搬する。この湿潤大気は、偏西風の主軸付近で寒冷前線帯となることで収束して前線性降雨をもたらす。夏季には、偏西風の主軸がチベット高原北方に位置するので、夏季モンスーンが内陸奥深いところまでも容易に侵入することができ、大陸内部の広範囲で湿潤気候になる。一方、冬季には、シベリア上空に高気圧が形成され、それに伴いアリューシャン列島付近で低気圧が形成され、両者間で北西季節風が卓越する。シベリア上空の高気圧は高緯度地域の乾燥かつ寒冷な大気を南東側に向かって吹き出すことで、中国大陸内部に乾燥気候をもたらす。その際、冬季モンスーンは、地表面上のダストを巻き上げて、風成塵を風下に向かって運搬させ、大陸内部でレスの堆積を促進させるばかりでなく、日本列島ひいては太平洋海域にまで風成塵を飛来させる (Pye, 1987)。このように東アジアモンスーンは、日本列島を含めた東アジア陸上域の気候を決定づけるものであり (例えば, An,

2000), チベット高原の地形あるいは高度的影響を大いに受ける大陸面-海面-大気システム間の相互作用の結果生じた汎世界的な大気循環の一つとされている (安成, 1987)。今までの古環境研究の結果では、東アジアモンスーンは氷期-間氷期サイクルに伴って変動して (Prell and Kutzbach, 1987), 大陸内部の乾湿変動を強く規制してきたと考えられている (Heller and Liu, 1982; Liu, 1985; Li et al., 1995; An et al., 2001)。そして、それらモンスーンの成立時期やその変動傾向は、ヒマラヤ/チベット山塊の隆起・上昇史と密接な関係があると考えられている (Ruddiman and Kutzbach, 1991; Li et al., 1995; An et al., 2001; Guo et al., 2002)。

過去から現在までの大陸域の古気候を大きく支配した東アジアモンスーンの変動を連続して記録した堆積物として、レス古土壌堆積物 (Liu, 1985; Li et al., 1995) や湖沼堆積物 (Beer and Strum, 1995; Fukusawa, 1999) があげられる。レス古土壌の研究においては、おもに中国やヨーロッパにおいて、それらの性質、分布特性、堆積年代および起源に関する研究が古くから行われていた (Liu, 1985)。1982年に、Heller and Liu (1982) の研究によって、レス古土壌が陸上の古環境を記録しているとして世界的に注目されはじめた。彼らの研究では、中国黄土高原中央部 Luochuan におけるレス古土壌シークエンスが、深海堆積物の酸素同位体比変動記

Fig. 1. The distribution area of loess deposits in China (Liu, 1985)

録と同調することを示した。その後、わずか20年間で、レス古土壌を用いた東アジアモンスーン変動に関する古気候学的研究は飛躍的に発展して、黄土高原を中心として時・空間的にも莫大なデータが蓄積され、現在では、陸上の古環境変動を長期間にわたって記録する堆積物として広く認識されている (Liu and Ding, 1998)。最近では、レス古土壌の直下に堆積する紅粘土 (Red Clay) が注目され、それがレス古土壌と同様に東アジアモンスーンによって形成されたと考えられている (Sun D. H. et al., 1998a)。

一方、湖沼堆積物の研究においても、琵琶湖・バイカル湖など大きな面積を有する淡水湖沼 (Horie, 1984; Meyers and Horie, 1993; 井上ほか, 1998) から、水月湖・東郷池などの比較的小さな汽水湖沼 (福澤, 1995; 加藤ほか, 1998) まで、大小さまざまな湖沼において柱状試料が採取・分析され、古環境復元のための研究が進展している。とくに、汽水湖沼での年縞 (福澤, 1995) の発見は、気候変動研究における年代精度を格段に高めて、他地点間の環境変動の先行・遅延といった地球環境変動のトリガーに関する研究に対して大きく貢献した (福澤ほか, 2003)。

本論では、レス古土壌と湖沼の堆積物について、東アジアモンスーンの成立とその変動に注目して、近年の古気候学的な研究成果を中心に紹介する。なお、中国のレス古土壌堆積物の一般については Liu (1985) に、レス古土壌の初磁化率とその古地磁気特性については鳥居・福間 (1998) および Maher and Thompson (1999) に、湖沼年縞堆積物については福澤 (1995) に、最終氷期以降のグローバルな気候変動メカニズムに関するレビューについては福澤ほか (2003) に詳しい記述がある。本稿では、まずレス古土壌の研究について、研究対象の移り変わりを考慮に入れて項目ごとに分けて比較的重要な論点だけを紹介した後、紅粘土についての研究経過について述べる。最後に、最終氷期以降の環境変動に関連した湖沼堆積物の研究について述べることとする。

中国黄土高原におけるレス層序

レスと古土壌の周期的な互層から主として構成されるレス古土壌堆積物は、中国大陆内部の黄土高原を中心とする内陸域に広く分布している (Fig. 1)。その分布面積は中国国土の約5%に相当する面積440,000 km²といわれ、層厚は100～300 mであり、南および東方向に向かって次第に薄くなる傾向がある (Liu, 1985; Li et al., 1995)。中国大陆に分布する多くのレス古土壌は、鮮新世の紅粘土層を覆っていて (Liu, 1985)、その境界は、古地磁気層序より2.4～2.6 Maの年代が与えられている (Heller and Liu, 1982; Kukla, 1987; Kukla and An, 1989; Liu et al., 1999)。レス古土壌の堆積特徴として、レス層は黄褐色を呈する無層理の堆積物であり、炭酸塩鉱物を多量に含むシルトで構成されている。一方、古土壌層は赤味を帯びた褐色を呈する微細な有機物濃集やスポンジ構造などの土壌化の特徴および炭酸塩ノジュールが認められる粘土～シルトで構成される (Rutter and Ding, 1993; Fang et al., 1994)。

80年代前半の初期の研究には、黄土高原中・南部におけるいくつかのレスセクションで精力的な研究が行われた。最初にレス層序を詳細に検討したのは、Liu (1985) による Luochuan (N35°45', E109°25') と、Kukla (1987)、Kukla and An (1989) による Xifeng (N35°38', E107°25') である (Fig. 2)。

Liu (1985) は、Luochuan レスセクションにおける掘削長140 mのコアを用いて岩相および古地磁気層序学的研究を行った。同セクションでは、層厚136 mのレス古土壌が認められ、30数枚の古土壌層が挟在していた。レスおよび古土壌層は、それぞれL層およびS層と表記して、上位よりS₀, L₁, S₁, L₂…のようにそれぞれ命名して、堆積層相の違いから判断して、上位よりMalan loess, Lishi loess, Wucheng loessに岩相層序区分した。Malan loessは後期更新世に時代区分されるL₁より上位のユニットで構成され、

Fig. 2. Eolian deposition zones and locations of several loess sections on the Chinese Loess Plateau. The original index map is modified from Liu (1985).

層厚は 10 m 以下である。Lishi loess は中期更新世に区分される 14 枚のレス古土壌の互層で構成される。古土壌層は S_{14} から S_{14} まで、レス層は L_2 から L_{15} までの層準が相当して、ユニット全体の層厚は 70 m である。最後に、Wucheng loess は、前期更新世に区分される風化が進行した 3 層準のレスと古土壌グループの互層で構成される。Wucheng loess では、堆積物の風化が著しく進行しているため、個々の古土壌層を認定することが困難である。そのため、古土壌層が発達している層準をグループ化することで 3 層準の古土壌グループを認定している。そのため、命名法は上位のレス古土壌とは差別化して表記し、上位より W_{S-1} , W_{L-1} , W_{S-2} , W_{L-2} , W_{S-3} , W_{L-3} と命名している。Wucheng loess の下位には鮮新世に区分される紅粘土が堆積している。また、同地域の古地磁気学的研究の結果 (Heller and Liu, 1982; Sasajima and Wang, 1984; Liu, 1985; Kukla and An, 1989) は、ブルネ／松山境界が S_8 古土壌層の上位もしくは、 L_7 レス層の基底に存在すること、ハラミヨおよびオルドヴァイイベントが、それぞれ S_{11} 古土壌層から L_{10} レス層までの間、 W_{S-2} 古土壌グループに位置していることを明らかにした。また、レスと紅粘土の境界部より 2 m 下位の位置に松山／ガウス境界 (2.58 Ma; Cande and Kent, 1995) が存在することから、レスの基底は約 2.6 Ma と考えられている (なお、80 年代後半では、松山／ガウス境界が 2.48 Ma と定義されていたため、レスの基底は約 2.4 Ma とされていた)。なお、レス古土壌のブルネ／松山境界について、Zhou and Shackleton (1999) は、レス古土壌の特有の残留磁化の獲得が行われることを指摘して、その境界が S_7 古土壌層に位置すると解釈している (山田, 1999)。

一方、Kukla (1987) および Kukla and An (1989) は、Luochuan より西方に 175 km 離れている Xifeng セクション (Fig. 2) において露頭から採取した試料による岩相およ

び古地磁気層序学的研究を行った (Fig. 3)。その結果、同セクションでは、Wucheng loess に 4 枚の古土壌グループが存在して、Luochuan セクション (Liu, 1985) より一枚多いことが明らかになった。それ以外はほぼ同じ岩相層序であり、なおかつ古地磁気年代結果も調和的であることから、2 地点でのレス層序の広域対比は可能であると考えられた (Kukla and An, 1989)。

黄土高原南部では、Weinan ($N34^{\circ}20'$, $E109^{\circ}29'$)、Baoji ($N34^{\circ}24'$, $E107^{\circ}18'$)、および Lingtai ($N35^{\circ}04'$, $E107^{\circ}39'$) におけるセクション (Fig. 2) での研究が行われ、いずれも Luochuan セクション (Liu, 1985) の層序と大まかに同調していた (Rutter et al., 1991; Ding et al., 1992, 1993, 1994, 1997; Liu et al., 1999)。とくに、Baoji セクションの研究 (Rutter et al., 1991) では、Wucheng loess に肉眼で 18 枚の古土壌層を認定することができ、2.6 Ma 以降のレス古土壌シークエンスに 30 枚以上の古土壌層が挟在する。一方、黄土高原西縁部では、Chen et al. (1991), Li et al. (1997) の研究によって、Luochuan セクションと対比可能な S_{21} 古土壌層より上位の 1.6 Ma 以降のレス古土壌が存在していることが明らかになっている。同地域では、レスの堆積速度が大きく、個々のレス・古土壌層の層厚が厚いことや、1 枚のレス層中に他地域では認められない複数の古土壌層が挟在していることが明らかにされている (An et al., 1993; Li et al., 1995; Fang et al., 1999)。

今までのレス層序に関する研究結果を総括した現状認識として、黄土高原上の各レスセクションで得られた岩相層序や古地磁気層序年代を対比すると、①レス古土壌堆積物の岩相はほとんど同じである (Fig. 4) こと、②古地磁気による層序対比が可能であること、③レスの基底が 2.6 Ma であること、④セクションによっては、レス層準に古土壌層準がいくつか挟在する場合があります、それは北西部にいくほどその傾向

Fig. 3. Stratigraphic column of the Xifeng loess section (modified from Kukla, 1987). VGP: Virtual geomagnetic pole position. S_0 , L_1 , WS_1 , ...: Liu (1985), see text for details. See Fig. 2 in this paper for location.

が強いことが明らかになっている。これらのことは、中国黄土高原に分布するレス古土壌が、少なくとも 2.6 Ma 以降に連続的かつ広域で同時に堆積・形成していたと判断できる。この広域同時連続性の証拠がレス古土壌を用いて陸上古気候変動を解明することが非常に有効であることを決定づけている (Liu and Ding, 1998)。

レス堆積物に見出される環境変動指標について

レス古土壌堆積物から東アジアモンスーン変動を解明するために、堆積物中の環境磁気分析、無機化学分析による環境変動指標 (proxy) がいくつか提唱され、広く用いられている。

東アジア夏季モンスーン変動は、その強弱を母材であるレスが土壌化する度合いに置き換えて推定することができる。最も用いられているのは初磁化率である (鳥居・福間, 1998)。

Fig. 4. Correlation of Baoji, Luochuan, Xifeng and Lanzhou loess sections. Note the position of magnetic reversals (quoted from Rutter et al., 1991). S_0 , L_1 , WS_1 , ...: Liu (1985), see text for details. See Fig. 2 in this paper for locations.

初磁化率は堆積物に含まれる磁性鉱物の種類・量・粒径の他に、含水率の差でも変化する。レス堆積物中の初磁化率は、レス層に比べて古土壌層ではその値が 3～4 倍以上高くなる (Heller and Liu, 1986)。また、黄土高原上の同時期面の初磁化率は南にいくほど高い値を示す (Porter et al., 2001) ことから、初磁化率は降水量の変化を敏感に反映していると考えられている (Heller et al., 1993; Liu and Ding, 1998; Maher and Thompson, 1999)。そのため、夏季モンスーン変動を最も反映する指標と思われる。Feng and Chen (1999) は、夏季モンスーン変動指標としての初磁化率の有効性に疑問を投げかけているものの直接的な証拠に乏しい。また、初磁化率が変化する原因については、環境磁気学的に見解の相違がある (Kukla et al., 1988; Maher and Thompson, 1991) が、少なくとも初磁化率の増加が湿潤気候時のレスの土壌化によるものであることについては見解が一致している (鳥居・福間, 1998; 鳥居, 2000)。

また、初磁化率と同様に夏季モンスーン変動指標として注目されているのが、堆積物の色調・色彩である。最初にレス古土壌の色調・色彩の検討を行った大井ほか (1997) の研究によると、レス層に比べて古土壌層では明度を示す L^* 値が低く、反対に彩度を示す a^* 値が高くなることを明らかにして、これら変化の原因を古土壌層が土壌化によって有機物と鉄を多く含むため暗色化したと解釈している。色調・色彩の変化が初磁化率の変化と相関性をもつこと (Porter, 2000; Chen et al., 2002: Fig. 5) や、現在の黄土高原の表層堆積物の色調が南東部にいくほど暗色化すること (Chen et al., 2002) から、堆積物の色調・色彩は初磁化率と同じように夏季モンスーン変動を反映していると思われる。他のレスセクションでも同様の研究が行われ、堆積物の色調・色彩が夏

Fig. 5. Upper : Lithology, whiteness intensity and magnetic susceptibility of the upper part of the Luochuan loess section. Lower: Relationship between whiteness and magnetic susceptibility for loess and paleosol samples in the Luochuan. S₀, L₁, ... : Liu (1985), see text for details. B/M: Brunhes and Matuyama Boundary. After Chen et al. (2002). See Fig. 2 in this paper for locations.

季モンスーン変動指標として有効であることが指摘されている (Fang et al., 1999; Ji et al., 2001; Chen et al., 2002; Qi et al., 2003).

その他, 夏季モンスーン変動指標として, Rb/Sr 比 (Chen et al., 1999, 2003), レス中に含まれる有機物の炭素同位体比 (Hatte et al., 2001; Xie et al., 2004), 鉄鉱物量 (Balsam et al., 2004), 二価鉄/三価鉄比 (Guo et al., 1999), 初磁化率の周波数依存性 (Heller et al., 1991), 化学組成分析による化学的風化度 (Guo et al., 1996) や, 有機炭素量 (Li et al., 1995) も有効とされているが, 初磁化率や色調・色彩ほど理論的・実験的な検討が十分ではないように思われる。

一方, 東アジア冬季モンスーン変動は, モンスーンの風力の強弱を指示すると思われる風成塵を構成する粒子の粒度組成やレスの堆積量の変化を指標として用いている (An et al., 1991; Zhang et al., 1994; Ding et al., 1995; Porter and An, 1995; An and Porter, 1997; Xiao et al., 1999; Kohfeld and

Fig. 6. Correlation of magnetic susceptibility variation in Luochuan loess section with oxygen isotope curve in deep-sea core of Pacific region (modified from Heller and Liu (1986)). M₅-M₅₅: Magnetic susceptibility stage number. O₅-O₅₅: Oxygen isotope stage number. After Torii and Fukuma (1998).

Harrison, 2003). 一般的に, レス層では古土壤層に比べて, 粒径と堆積量の両方のパラメータとも大きくなると考えられている (An et al., 1991). 粒径パラメータとして, 平均中央粒径 (An et al., 1991), U (44~16 μ / 16~5.5 μ) 比 (Vandenberghe et al., 1997; Nugteren and Vandenberghe, 2004), 2 μ / 10 μ 比 (Ding et al., 1994, 1995), > 16 μ フラクション含有量 (Nugteren et al., 2004; Zhang et al., 1997) および化学処理によって抽出した石英粒子の平均中央粒径 (Porter and An, 1995; Xiao et al., 1999) などが用いられている。このように粒径パラメータに統一性がみられないことや, Zhang et al. (1999) が指摘している現在におけるダストフラックスとダスト構成粒子の粒径間に明瞭な相関が認められないことを考慮に入れると, 冬季モンスーン変動指標としての粒度組成にはまだまだ検討の余地が残っていると思われる。Sun Y. B. et al. (2000) は, 構成粒子全体の粒度組成よりも化学処理によって抽出した石英粒子の中央粒径が, 最も冬季モンスーン変動を反映していることを指摘している。今後, さらなる理論的・実験的な検証が必要であるものの, 現在までのところ他に有効な冬季モンスーン変動指標が存在しないのも事実である。

レス堆積物からみたアジアモンスーン変動

1. ミランコビッチ (氷期-間氷期) サイクルとの関係

Heller and Liu (1982) に発端をもつ黄土高原中部 Luochuan セクションでのレス古土壤堆積物の研究によっ

Fig. 7. The results of spectrum analysis of grain-size time-series record in Baoji loess section over four different time intervals (Ding et al., 1994). B.W. : Band Width.

て、レス古土壌の初磁化率の変動が、深海底コアの酸素同位体比変動と酷似していて、レス層は氷期に、古土壌層は間氷期に対応し、少なくとも過去 2 Ma 以降はミランコビッチフォーシング（増田・阿部 1996）に起因する氷期-間氷期サイクルに伴ってレス古土壌の一連のシークエンスが形成されたことが明らかにされた（Fig. 6: Heller and Liu, 1982, 1984, 1986）。これによって、中国のレス古土壌堆積物は、第四紀の陸上古環境変動を精緻にかつ連続的に記録する堆積物として広く知られることになった。

一方、Ding et al. (1990, 1991, 1992, 1994) は、Baoji セクションにおいて初磁化率と粒度組成を高密度で明らかにして、過去 2.5 Ma 以降の東アジアモンスーン変動を復元した。その結果、氷期には冬季モンスーンは強化され、反対に夏季モンスーンは弱化する、そして間氷期は全く逆の傾向になること、さらに冬季モンスーンと夏季モンスーンはお互いに負の強い相関をもちながら変動していることを明らかにした。そして、これら変動は、SPECMAP における酸素同位体比変動と同調していることから、その変動要因をミランコビッチフォーシングに求めることができた。そのことを検証するために Ding et al. (1994) ではスペクトル解析による周期性の検討を行った。それによると、2.5 ~ 1.6 Ma までは、400, 55, 23, 19 ka 周期が卓越して、1.6 ~ 0.6 Ma は 41 ka 周期が、0.6 Ma 以降は 100 ka 周期がそれぞれ卓越していることが明らかにされた（Fig. 7）。これらの周期は、どれもミランコビッチサイクルを構成する地球軌道の三要素（公転軌道、地軸の傾き、歳差）の周期に相当するため、東アジアモンスーンはいわゆるミランコビッチサイクル変動によって変化するという仮説を立証したと言える。Liu et al.

(1999) の見解によれば、1.6 Ma および 0.6 Ma 付近におけるモンスーンの変動周期の変化は、前者は北半球の氷床がグローバルな大気循環を変化させる程度まで増大させたことに、後者は深海底コアの酸素同位体比曲線（Raymo et al., 1989; Ruddiman et al., 1989）にも認められることからグローバルな氷床量変化にその原因を求められている。しかしながら、Li (1991) および Li et al. (1997) では、1.5 Ma 付近に青海-チベット高原の最近の隆起によって引き起こされた黄河の河成段丘の形成開始期があることを明らかにしている。そのため、前者の 1.6 Ma 付近のモンスーン変動の周期性の変化は、Liu et al. (1999) による気候寒冷化という解釈ではなく、ヒマラヤ/チベット山塊の地形変化に起因するものかもしれない。一方、Luochuan および Xifeng セクションのレス古土壌の周期性を新しい時間軸のもとに検討した Lu et al. (2004) では、400 および 100 ka のモンスーンの変動周期が 1.3 Ma 以降に顕著になることを明らかにしている。この結果も、ヒマラヤ/チベット山塊の段階的な隆起による地形の変化が東アジアモンスーンの変動パターンを変化させたことを示しているのかもしれない。さらに、Lu et al. (2004) では、ミランコビッチサイクルでは説明できない数万~数十万年周期のモンスーン変動を検出し、それを古土壌の形成時間を反映しているのではないかと主張している。以上の研究を総括すると、レス古土壌シークエンスから復元する長期的な東アジアモンスーン変動が、氷期-間氷期サイクルと同調するため、地球軌道要素であるミランコビッチサイクルの影響を受けていることを疑う余地はないと思われる。しかしながら、時代的に卓越するモンスーンの変動周期が異なる原因については、ヒマラヤ山脈もしくはチベット高原の

Fig. 8. Time-series comparing magnetic susceptibility and grain-size variations in Luochuan loess section with North Atlantic Heinrich events (Heinrich, 1988) and oxygen isotope variation in GRIP Greenland ice core during the last glaciation (quoted from Porter and An, 1995).

隆起上昇史を考慮に入れてもう少し精査する必要があると思われる。

2. ダンスガード・オシュガーサイクルとの関係

90年代初頭に、グリーンランド氷床コアの地球化学的研究によって、MIS 5e以降に急激な温暖化と引き続く緩やかな寒冷化を示す変化が、酸素同位体比や大気メタン濃度の変化として24層準に認められ、これら鋸歯状の変動は、約1,000～3,000年の周期をもち、突然かつ急激な気温変動の繰り返しであったことが明らかにされた (Johnsen et al., 1992; Chappellaz et al., 1993; Dansgaard et al., 1993; Taylor et al., 1993). この突然かつ急激な気温変動の繰り返しは、ダンスガード・オシュガーサイクル (Dansgaard-Oeschger Cycles: 以下D-Oサイクルと略す, Dansgaard et al., 1993) と呼ばれ、北半球の高緯度地域における氷期-間氷期サイクルより一桁オーダーの小さい数千年周期の気候変動として広く認識された (Bond et al., 1993; Adkins et al., 1997).

この頃のレス研究は、東アジアモンスーン変動にもD-Oサイクルのような千年スケールの変動が認められるのか、ということに注目が集まり、最終氷期に相当するMalan loess中の高時間分解能な環境解析が各地で行われた (例えば, Sun, J. M. et al., 1998; Zhou et al., 1999; An et al., 2000; 2001). 最初にレス古土壌から千年スケール気候変動を検出したのは, Porter and An (1995) の研究である。彼らは, Luochuan セクション (Fig. 2) のMalan loess中から、主に化学処理により石英のみを抽出してその平均粒径を連続時系列変化としてとらえ、冬季モンスーン変動を高時間分解能で復元した。その結果、ハインリッヒ寒冷イベント (Heinrich, 1988) と時期的に同調するように、石英粒子径が大きくなっていることを明らかにして、それが冬季モンスーンの強化と解釈した (Fig. 8)。そして、その原因をヨーロッパと

中国大陸の両地域間の気候 (大気循環) をつなげている偏西風の流路変化に求めた。彼らが指摘した冬季モンスーン変動と北大西洋の気候変動との連関性は、当時センセショナルであったが、レス古土壌からD-Oサイクルの特徴である鋸歯状の変動傾向までは明らかにすることができていない。その後、黄土高原内の他所のレスセクションで復元された冬季モンスーン変動にも鋸歯状の変動傾向は認められていない (Chen et al., 1997; Lu et al., 1999)。

一方、夏季モンスーン変動については、Malan loessが厚く堆積している黄土高原西縁部で中心的に研究が行われている (Guo et al., 1996; Fang et al., 1999; Yamada et al., 1999)。そのうち、Fang et al. (1999) では、Lanzhou (N35° 52', E103° 45') セクション (Fig. 2) で、1試料あたりが150年以下の時間分解能をもつ試料を用いて夏季モンスーン変動を明らかにした。その結果、過去6万年前以降の最終氷期中に17回の1,000～2,000年の間隔で夏季モンスーンが一時的に強化していること、また、その変動傾向に鋸歯状変動パターンが認められることを明らかにした。そして、17回の夏季モンスーンの一時的な強化ピークが、グリーンランド氷床コア中に認められるD-Oサイクルと同期・同調することを示した (Fig. 9)。この原因をチベット高原上空での偏西風の軸変化とそれに伴う夏季モンスーン進入限界の変化 (Overpeck et al., 1996) に求めている。現在、この「チベット大気循環説」 (Fang and Li, 1999; Fang et al., 1999) は、東アジアモンスーン変動を解明しようとする研究者に広く受け入れられているように思われる。

以上のように東アジア冬季および夏季モンスーン変動にD-Oサイクルのような千年スケール気候変動が認められる可能性が高いということは、前述の地球軌道要素以外に、局所的な大気循環変動の影響を受けてモンスーンは変動していることを暗示するものである。

Fig. 9. Correlation of major summer monsoon enhancements (SME) and their grouped peaks (GP) suggested by magnetic susceptibility, carbonate and color time series from the Lanzhou loess section, together with isotope warm peaks (IS No.) of the Greenland GRIP ice core (Dansgaard et al., 1993) and Bond Cycles (Bond et al., 1993). Placement of Bond Cycles and Heinrich events (H) in the GRIP record was taken from Bond et al. (1993) after Fang et al. (1999). See Fig. 2 in this paper for location.

紅粘土 (Red Clay) とアジアモンスーンの成立時期

東アジアモンスーンの成立時期について次に考えてみる。従来は、レス古土壌の堆積が開始された紅粘土とレス古土壌の境界が、モンスーンの成立時期と考えられ、古地磁気学的研究によって2.6 Ma という年代が与えられている (Heller and Liu, 1982; Liu, 1985; Kukla, 1987; Kukla and An, 1989)。この2.6 Ma 付近は、北半球全体で寒冷化が急激に進行し氷床が形成された時期であり (Shackleton et al., 1984)、北半球の大気循環が大きく変化したことが考えられる。この原因として、ヒマラヤ/チベット山塊の間欠的な隆起によって、2.6 Ma 付近にアジアモンスーンを生じさせる高度まで山塊が達したためではないかと主張されている (Ruddiman and Kutzbach, 1991)。一方で、90 年代末から2000 年代にかけて、レス古土壌に覆われる紅粘土に関する研究が盛んに行われアジアモンスーンの成立時期に関する新見が得られはじめている (例えば, An et al., 2001)。

紅粘土は、大型哺乳類の Hipparion 属が含まれる三趾馬赤土層を簡素化した略名であり、その層厚は30～130 m といわれている (Liu, 1985)。紅粘土に関する基本的な堆積層相の特徴を列記する。紅粘土の分布域はレス堆積物の分布域とほぼ同じで黄土高原南部に向かって層厚は薄くなる (Liu, 1985)。層相は上部は強い土壌化を受けている暗赤色シルトで、下部は弱い土壌化を受けている黄褐色シルトである。紅粘土がレス堆積物と比べて赤色化している原因は、紅粘土の堆積環境が現在より温暖かつ湿潤気候であったためと考えられている (Ding et al., 1999)。また、紅粘土には大きく7枚の赤味を帯びたレス層と古土壌層のシークエンスが存在する (Sun D. H. et al., 1998b)。さらに、構成粒子はレス古土壌より細粒な粒子で構成しており (Lu et al., 2001)、黄土高原

の南部にいくほど細粒化する傾向がある (Yang and Ding, 2004)。古地磁気層序年代 (Fig. 10) によると、Lingtai セクションでは、2.6～7.0 Ma (Sun D. H. et al., 1998a)、Xifeng セクションでは、2.6～7.2 Ma (Sun D. H. et al., 1998b)、Jingchuan (N35° 16', E107° 30') セクションでは、2.6～7.6 Ma (Ding et al., 2001)、Jiaxian (N38° 16', E110° 50') セクションでは、2.6～5.2 Ma (Ding et al., 1998) の年代が得られていて、どのセクション (Fig. 2) でも大きな堆積間隙はなくほぼ連続的に堆積している。以上のような結果から、①紅粘土の特徴がレス堆積物と酷似すること、②紅粘土は広範囲にわたって同じ環境を反映した一連のレス層と古土壌層のシークエンスを形成しているという証拠が示されて、紅粘土はレス堆積物と同じように風成堆積物であると考えられている。したがって、東アジアモンスーンの成立は、従来よりも約5 Ma ほど遡り、7.0～7.6 Ma 付近の可能性が。An et al. (2001) では、紅粘土とレス堆積物のそれぞれの堆積開始時期が、チベット高原の間欠的な隆起時期と同期することを提唱している。さらに、Guo et al. (2002) では、黄土高原南西部において、22 Ma まで遡ることができる風成堆積物の存在を報告して、モンスーンの成立時期がさらに古くなることを主張している。しかしながら、これら研究で扱っている紅粘土の起源については未だ議論中の問題であり解決されていない (Mo and Derbyshire, 1991; Guo et al., 2001, 2004)。現在は、少ない証拠に基づく紅粘土の解釈が独り歩きしているように思われる。そのため、モンスーンの成立時期についても不確実な要素は多く残されている。今後、黄土高原内における紅粘土の空間層序などを確定するようにデータを蓄積していき、気候変動とテクトニクスの両方の観点に基づいて慎重に議論する必要がある。

Fig. 10. Magnetic susceptibility (expressed as SUS) and median grain-size (expressed as Md) records of the 'red clay'–loess sequences at Lingtai and Jingchuan section, together with the magnetic reversal polarities. The contacts between the loess and the 'red clay' at Lingtai and Jingchuan sections are at a depth of about 175 m and 199 m, respectively, as marked by the dashed lines (Yang and Ding, 2004). See Fig. 2 in this paper for locations.

湖沼堆積物からみた最終氷期以降のアジアモンスーン変動

レス古土壌シーケンスと同様に陸上の古気候変動を記録する湖沼堆積物には、①放射性炭素年代測定によって絶対年代を堆積物に入れることができること、②海洋リザーバ効果の影響を考慮しなくてもよいこと、③海洋堆積物と比べて堆積速度が大きく高時間分解能で過去の環境を復元できること、④陸上古気候変動を検出することができること、以上4点に集約される大きな利点がある。日本列島などの東アジアに位置する湖沼堆積物の場合は、精緻に東アジアモンスーン変動を復元することができるということである。本稿では、湖沼堆積物を用いた最終氷期以降の東アジアモンスーン変動に限って言及する。

最新の研究動向をレビューした福澤ほか (2003) ですでに指摘されているように、東アジア夏季モンスーンの発現域である熱帯低緯度地域の気候変動が、グローバルな気候変動に

かなり大きな影響を与えていることが主張されはじめている (Visser et al., 2003)。それは、地域間の気候変動の位相という形でまとめられ、従来の地球環境変動のトリガーといわれていた北大西洋地域の気候変動 (例えば、Broecker and Denton, 1989) より、東アジア地域のそれが時期的に先行することを海洋堆積物の研究結果は報告しつつある (Wang et al., 1999; Stott et al., 2002)。今後、東アジアの湖沼堆積物が、高時間分解能かつ高精度に陸上域の環境変動を精緻に復元することができ、その結果は、グローバルな気候変動とのリンクや将来の気候変動を予測する上で非常に重要となるといわれている (福澤ほか, 2003)。

現在まで東アジアにおける高時間分解能かつ高精度な東アジアモンスーン変動の検討は、日本列島では、水月湖や三方湖堆積物の花粉分析 (Nakagawa et al., 2002, 2003) や風成塵量・炭素量分析 (福澤ほか, 2003)、琵琶湖堆積物の珪藻分析 (加ほか, 2003) や風成塵量 (Xiao et al., 1997)、有機炭

Fig. 11. Time-series changes of illite flux, total organic carbon flux and total carbonate carbon flux in varved lacustrine sediments of Lake Suigetsu in comparison with oxygen isotope profile of GISP2 core in Greenland (Stuiver et al., 1995) from 20,000 to 6,000 yrs BP (modified from Fukusawa et al., 2003).

素量 (Yamada, 2004), 野尻湖堆積物の有機炭素・花粉分析 (公文ほか, 2003) がある。その他では、韓国済州 (Cheju) 島マール堆積物 (Yatagai et al., 2002), 中国岱海堆積物 (Wang et al., 2001) などが挙げられる。とくに、年縞堆積物を用いて年単位での編年が可能な水月湖堆積物の検討 (Nakagawa et al., 2002, 2003; 福澤ほか, 2003) では、風成塵・炭素フラックスの結果 (Fig. 11) から東アジアにおける晩氷期の温暖化時期が北大西洋周辺のそれと比べて1,000年程度先行し、その温暖化は気温にして約5℃程度の上昇であ

ることが明らかにされた。この東アジアで認められる環境変動の先行性は、他の湖沼堆積物の検討では、野尻湖堆積物 (公文ほか, 2003) にしか認められない。なぜ多くの地点で検出できないのかについては、最終氷期以降の堆積物を安定して連続的に保持する湖沼が海洋や陸上風成層と比較して絶対的に少ないことや、既に公表されている湖沼堆積物においては、環境解析に用いた試料の分析分解能が低いか、あるいは、放射性炭素年代や降下火山灰など堆積物に時間軸を入れることができる数が少ないことが原因として考えられる。その結

果、環境変動の先行・遅延の議論を困難にしている。とくに、中国大陸内部に位置する湖沼堆積物の検討がほとんど行われていないことは、非常に残念である。今後、青海湖やエルハイ湖などでの早急の研究が待たれる。

おわりに

ーまとめとモンスーン研究の今後の課題ー

本論では、陸上域の第四紀古環境変動を精緻に記録するレスおよび湖沼堆積物を用いた東アジアモンスーン変動の解明に関するレビューを行い、その現状認識と今後解決すべき研究課題の洗い出しを行った。現在までの研究成果は次のようにまとめることができる。

- ①黄土高原全体で、2.6 Ma 以降のレス層序は精緻に確立されている。32 ないしは 33 枚の古土壌層が挟在していることが明らかになった。少なくとも黄土高原内では広域層序対比することが可能である。
- ②レス古土壌シークエンスから東アジアモンスーン変動を明らかにするための環境変動指標としては、冬季モンスーンは粒度組成が、一方夏季モンスーンは初磁化率や堆積物の色調・色彩が最も良いと思われる。
- ③レス古土壌の粒度組成や初磁化率記録から復元される東アジアモンスーン変動は、長期と短期の異なる 2 つの変動周期をもつ。前者は、ミランコビッチサイクルに起因する氷期-間氷期サイクルであり、1.6 Ma 付近と 0.8 ~ 0.6 Ma 付近の 2 つの時期に変動周期が変化している。後者は、D-O サイクルに同調する千年スケールの気候の振幅であり、チベット高原という地形的障壁効果に起因する大気循環変動で説明される。
- ④レス古土壌の下位にある紅粘土に関しての古地磁気学的、環境磁気学および地球化学的検討が行われ、東アジアモンスーンの成立が 7 ~ 8 Ma まで遡る可能性が指摘されている。
- ⑤東アジアの湖沼堆積物においては、高精度に東アジアモンスーン変動を検出することが可能であり、今後、最終氷期以降のグローバルな気候変動のトリガーについての明確な解答を導き出せる可能性が高い。

また、今後の課題としては、すでに各章の最後などで述べているが、いま一度強調しておきたい点として以下の 2 点があげられる。

- (1) 東アジアモンスーンの成立時期に関して、紅粘土の層序を空間的に広げて、紅粘土層序を確立するとともに、それら堆積物の起源を特定する決定的な証拠を見つける必要がある。ヒマラヤ/チベット山塊の隆起上昇などのテクトニクスと気候変動との関係を解明するためにもより一層の努力が必要であろう。
- (2) 東アジアモンスーン変動に関して、東アジア地域各地における変動の地域性を解明していく努力が必要である。例えば、レス古土壌の分布は、黄土高原以外にも、チベット高原上や東北部などにも認められる (Liu, 1985: Fig. 1)。そのような地域でのレス古土壌の古環境学的研究を進めていくことによってより一層東アジアモンスー

ン変動を明確に解明することができると思われる。中国大陸内部における湖沼研究も、最終氷期以降の気候変動トリガーの解明に対して非常に重要な研究になっていくであろう。

謝 辞

本稿をまとめる機会を与えて下さった東京大学大学院理学系研究科の多田隆治教授に深く感謝する。また、幾度となくレスや湖沼堆積物がもつ古環境変動を検出する有効性についてご教示していただいた東京都立大学大学院理学研究科 (現首都大学東京都市環境学部) の岩田修二教授、塚本すみ子博士、国際日本文化研究センターの安田喜憲教授、蘭州大学地理学教室の Li Jijun 教授、Fang Xiaomin 教授、Pan Baotian 教授には大変お世話になった。査読者である愛媛大学沿岸環境科学研究センターの井内美郎教授と 1 名の匿名査読者、および編集担当である信州大学の保柳康一助教授からは有意義なご指摘をしていただき、本稿を改善することができた。以上の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Adkins, J. F., Boyle, E. A., Keigwin, L. and Cortijo, E., 1997, Variability of the North Atlantic thermohaline circulation during the last interglacial period. *Nature*, **390**, 154-156.
- An, Z. S., 2000, The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quatern. Sci. Rev.*, **19**, 171-187.
- An, Z. S., Kukla, G., Porter, S. C. and Xiao, J. L., 1991, Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, **18**, 125-132.
- An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L. and Porter, S. C., 2001, Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, **411**, 62-66.
- An, Z. S. and Porter, S. C., 1997, Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China. *Geology*, **25**, 603-606.
- An, Z. S., Porter, S. C., Kutzbach, J. E., Wu, X., Wang, S., Liu, X., Li, X. and Zhou, W., 2000, Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. *Quatern. Sci. Rev.*, **19**, 743-762.
- An, Z. S., Porter, S. C., Zhou, W. J., Lu, Y. C., Donahue, D. J., Head, M. J., Wu, X. H., Ren, J. Z. and Zheng, H. B., 1993, Episode of strengthened summer monsoon climate of Younger Dryas age on the Loess Plateau of Central China. *Quatern. Res.*, **39**, 45-54.
- Balsam, W., Ji, J. F. and Chen, J., 2004, Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility. *Earth Planet. Sci. Letters*, **223**, 335-348.
- Beer, J. and Strum, M., 1995, Dating of lake and loess sediments. *Radio-carbon*, **37**, 81-86.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J. and Bonani, G., 1993, Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 143-147.
- Broecker, W. S. and Denton, G. H., 1989, The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 2465-2502.
- Cande, S. C. and Kent, D. V., 1995, Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 6093-6095.
- Chappellaz, J., Blunier, T., Raynaud, D., Barnola, J. M., Schwander, J. and Stauffer, B., 1993, Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature*, **366**, 443-445.
- Chen, F., Bloemendal, J., Wang, J. M., Li, J. J. and Oldfield, F., 1997, High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75 kyr. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **130**, 323-335.
- Chen, F., Li, J. J. and Zhang, W. X., 1991, Loess stratigraphy of the

- Lanzhou profile and its comparison with Deep-sea sediment and ice core record. *Geojournal*, **24**, 201-209.
- Chen, J., An, Z. S. and Head, J., 1999, Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quatern. Res.*, **51**, 215-219.
- Chen, J., Ji, J. F., Balsam, W., Chen, Y., Liu, L. W. and An, Z. S., 2002, Characterization of the Chinese loess-paleosol stratigraphy by whiteness measurement. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **183**, 287-297.
- Chen, Y., Chen, J., Liu, L. W., Ji, J. F. and Zhang, J. X., 2003, Spatial and temporal changes of summer monsoon on the Loess Plateau of central China during the last 130 ka inferred from Rb/Sr ratios. *Science in China, Ser. D*, **46**, 1022-1030.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjornsdottir, A. E., Jouzel, J. and Bond, G., 1993, Evidence for general instability of the past climate from 250-kyr ice core record. *Nature*, **364**, 218-220.
- Ding, Z. L., Han, J. T., Liu, C. and Liu, T. S., 1991, Preliminary determination of an abrupt climatic shift in North China at about 2.5 Ma. *Chinese Sci. Bull.*, **36**, 852-856.
- Ding, Z. L., Liu, T. S., Liu, X. M., Chen, M. Y. and An, Z. S., 1990, Thirty-seven climatic cycles in the last 2.5 Ma. *Chinese Sci. Bull.*, **34**, 1494-1496.
- Ding, Z. L., Liu, T. S., Rutter, N. W., Yu, Z., Guo, Z. L. and Zhu, R., 1995, Ice-volume forcing of east Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years. *Quatern. Res.*, **44**, 149-159.
- Ding, Z. L., Rutter, N. M., Han, J. and Liu, T. S., 1992, A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma over eastern Asia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **94**, 223-242.
- Ding, Z. L., Rutter, N. M. and Liu, T. S., 1993, Pedostratigraphy of Chinese loess deposits and climatic cycles in the last 2.5 Ma. *Catena*, **20**, 73-91.
- Ding, Z. L., Rutter, N. W. and Liu, T. S., 1997, The onset of extensive loess deposition around the G/M boundary in China and its palaeoclimatic implication. *Quatern. Int.*, **40**, 53-60.
- Ding, Z. L., Sun, J. M., Liu, T. S., Zhu, R. X., Yang, S. L. and Guo, B., 1998, Wind-blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China. *Earth Planet. Sci. Letters*, **161**, 135-143.
- Ding, Z. L., Sun, J. M., Yang, S. L. and Liu, T. S., 2001, Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 901-913.
- Ding, Z. L., Xiong, S., Sun, J., Yang, S., Gu, Z. and Liu, T. S., 1999, Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **152**, 49-66.
- Ding, Z. L., Yu, Z., Rutter, N. M. and Liu, T. S., 1994, Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quatern. Sci. Rev.*, **13**, 39-70.
- Fang, X. M. and Li, J. J., 1999, Millennial-scale monsoonal climatic change from paleosol sequences on the Chinese western Loess Plateau and Tibetan Plateau: a brief summary and review. *Chinese Sci. Bull.*, **44**, 38-52.
- Fang, X. M., Li, J. J., Derbyshire, E., Fitzpatrick, E. A. and Kemp, R. A., 1994, Micromorphology of the Beiyuan loess-paleosol sequence in Gansu Province, China: geomorphological and paleoenvironmental significance. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **111**, 289-303.
- Fang, X., Ono, Y., Fukusawa, H., Pan, B., Li, J., Guan, D., Oi, K., Tsukamoto, S., Torii, M. and Mishima, T., 1999, Asian summer monsoon instability during the past 60,000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau. *Earth Planet. Sci. Letters*, **168**, 219-232.
- Feng, Z. and Chen, F., 1999, Problems of the magnetic susceptibility signature as the proxy of the summer monsoon intensity in the Chinese Loess Plateau. *Chinese Sci. Bull.*, **44**, 97-104.
- 福澤仁之, 1995, 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物. 第四紀研究, **34**, 135-149.
- Fukusawa, H., 1999, Varved lacustrine sediments in Japan: recent progress. *Quatern. Res.* (Daiyonki-kenkyu), **38**, 237-243.
- 福澤仁之・斎藤耕志・藤原 治, 2003, 日本列島における更新世後期以降の気候変動のトリガーはなにか?—チベット高原と West Pacific Warm Water Pool の役割—. 第四紀研究, **42**, 165-180.
- Guo, Z., Liu, T., Guiot, N., Wu, H., Lu, J., Han, J., Liu, J. and Gu, Z., 1996, High frequency pulses of east Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic. *Clim. Dyn.*, **12**, 701-709.
- Guo, Z. T., Peng, S. Z., Hao, Q. Z., Biscaye, P. E. and Liu, T. S., 2001, Origin of the Miocene-Pliocene Red-Earth Formation at Xifeng in Northern China and implications for paleoenvironments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **170**, 11-26.
- Guo, Z. T., Peng, S. Z., Hao, Q. Z., Biscaye, P. E., An, Z. S. and Liu, T. S., 2004, Late Miocene-Pliocene development of Asian aridification as recorded in the Red-Earth Formation in northern China. *Global and Planetary Change*, **41**, 135-145.
- Guo, Z. T., Peng, S. Z., Wei, L. Y. and Liu, T. S., 1999, Weathering signals of millennial-scale oscillations of the East Asian summer monsoon over the last 220 ka. *Chinese Sci. Bull.*, **44**, 20-25.
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., Wu, H. B., Qiao, Y. S., Zhu, R. X., Peng, S. Z., Wei, J. J., Yuan, B. Y. and Liu, T. S., 2002, Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, **416**, 159-163.
- Hatle, C., Antoine, P., Fontugne, M., Lang, A., Rousseau, D. D. and Zoller, L., 2001, $\delta^{13}\text{C}$ of loess organic matter as a potential proxy for paleoprecipitation. *Quatern. Res.*, **55**, 33-38.
- Heinrich, H., 1988, Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast North Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quatern. Res.*, **29**, 143-152.
- Heller, F. and Liu, T. S., 1982, Magnetostratigraphic dating of loess deposits in China. *Nature*, **300**, 431-433.
- Heller, F. and Liu, T. S., 1984, Magnetism of Chinese loess deposits. *Jour. Rev. Astron. Soc.*, **77**, 125-141.
- Heller, F. and Liu, T. S., 1986, Paleoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1169-1172.
- Heller, F., Liu, X. M., Liu, T. S. and Xu, T. C., 1991, Magnetic susceptibility of loess in China. *Earth Planet. Sci. Letters*, **103**, 301-310.
- Heller, F., Shen, C.-D., Beer, J., Liu, X. M. and Liu, T. S., 1993, Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and palaeoclimatic implications. *Earth Planet. Sci. Letters*, **114**, 385-390.
- Horie, S., 1984 ed., *Lake Biwa*. Dr. W. Junk Publishers, Netherlands, 672p.
- 井上源喜・柏谷健二・箕浦幸治, 1998, 地球環境変動の科学 バイカル湖ドリリングプロジェクト. 古今書院, 東京, 269p.
- Ji, J. F., Balsam, W. and Chen, J., 2001, Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan loess section (China) based on diffuse reflectance spectrophotometry. *Quatern. Res.*, **56**, 23-30.
- Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C. U., Iversen, P., Jouzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J. P., 1992, Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, **359**, 311-313.
- 加藤めぐみ・福澤仁之・安田喜憲・藤原 治, 1998, 鳥取県東郷池湖底堆積物の層序と年縞. *LAGUNA* (汽水域研究), **5**, 27-37.
- Kohfeld, K. E. and Harrison, S. P., 2003, Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess Plateau. *Quatern. Sci. Rev.*, **22**, 1859-1878.
- Kukla, G., 1987, Loess stratigraphy in central China. *Quatern. Sci. Rev.*, **6**, 191-219.
- Kukla, G. and An, Z. S., 1989, Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **72**, 203-225.
- Kukla, G., Heller, F., Ming, L. M., Chun, X. T., Liu, T. S. and An, Z. S., 1988, Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, **16**, 811-814.
- 公文富士夫・河合小百合・井内美郎, 2003, 野尻湖湖底堆積物中の有機炭素・全窒素含有率および花粉分析に基づく約 25,000 ~ 6,000 年前の気候変動. 第四紀研究, **42**, 13-26.

- 加 三千宣・吉川周作・井内美郎, 2003, 琵琶湖湖底堆積物の年間珪藻殻堆積量記録からみた過去 14 万年間の降水量変動. 第四紀研究, **42**, 305-319.
- Li, J. J., 1991, The environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. *Quatern. Sci. Rev.*, **10**, 479-483.
- Li, J. J. et al. (unnamed), 1995, *Uplift of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and global changes*. Lanzhou University Press, Lanzhou, 207p.
- Li, J. J., Fang, X. M., van der Voo, R., Zhu, J. J., MacNiocail, C., Ono, Y., Pan, B. T., Zhong, W., Wang, J. L., Sakaki, T., Zhang, Y. T., Cao, J. X., Kang, S. C. and Wang J. M., 1997, Magnetostratigraphic dating of river terraces: rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary. *Jour. Geophys. Res. Ser. B*, **102**, 10,121-10,132.
- Liu, T. S., 1985, *Loess in China*. 2nd ed., China Ocean Press and Springer-Verlag, Berlin, 224p.
- Liu, T. S. and Ding, Z. L., 1998, Chinese Loess and the paleomonsoon. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **26**, 111-145.
- Liu, T. S., Ding, Z. L. and Rutter, N., 1999, Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quatern. Sci. Rev.*, **18**, 1205-1212.
- Lu, H. Y., van Hussteden, K., An, Z. S., Nugteren, G. and Vandenberghe, J., 1999, East Asia winter monsoon variations on a millennial time-scale before the last glacial-interglacial cycle. *Jour. Quatern. Sci.*, **14**, 101-110.
- Lu, H. Y., Vandenberghe, J. and An, Z. S., 2001, Aeolian origin and palaeoclimatic implications of the 'Red Clay' (north China) as evidenced by grain-size distribution. *Jour. Quatern. Sci.*, **16**, 89-97.
- Lu, H. Y., Zhang, F. Q., Liu, X. D. and Duce, R. A., 2004, Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China. *Quatern. Sci. Rev.*, **23**, 1891-1900.
- Maher, B. A. and Thompson, R., 1991, Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Geology*, **19**, 3-6.
- Maher, B. A. and Thompson, R., 1999 ed., *Quaternary climates, environments and magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 390p.
- 増田耕一・阿部彩子, 1996, 第四紀の気候変動. 住 明正ほか (編) 岩波講座地球惑星科学 11 気候変動論, 岩波書店, 東京, 103-147.
- Meyers, P. A. and Horie, S., 1993, An organic carbon isotopic record of glacial-postglacial change in atmospheric pCO₂ in the sediments of Lake Biwa, Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **105**, 171-178.
- Mo, D. W. and Derbyshire, E., 1991, The depositional environment of the late Pliocene red clay, Jing-Le Basin, Shanxi Province, China. *Sediment. Geol.*, **70**, 33-40.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y. and Yangtze River Civilization Program Members, 2003, Asynchronous climate changes in the north Atlantic and Japan during the last termination. *Science*, **299**, 688-691.
- Nakagawa, T., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y., 2002, Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and late Quaternary spectra. *Quatern. Sci. Rev.*, **21**, 2099-2114.
- Nugteren, G. and Vandenberghe, J., 2004, Spatial climatic variability on the Central Loess Plateau (China) as recorded by grain size for the last 250 kyr. *Global Planet. Change*, **41**, 185-206.
- Nugteren, G., Vandenberghe, J., vanHuissteden, J. K. and An, Z. S., 2004, A Quaternary climate record based on grain size analysis from the Luochuan loess section on the Central Loess Plateau, China. *Global Planet. Change*, **41**, 167-183.
- 大井圭一・福澤仁之・岩田修二・鳥居雅之, 1997, 中国内陸部のレス・古土壌堆積物と日本海深海堆積物の粘土鉱物からみた東アジアにおける過去 240 万年間のモンスーン・偏西風変動. 地学雑, **106**, 249-259.
- Overpeck, J., Rind, D., Laci, A. and Healy, R., 1996, Possible role of dust-induced regional warming in abrupt climate change during the last glacial period. *Nature*, **384**, 447-449.
- Porter, S. C., 2000, High-resolution paleoclimatic information from Chinese eolian sediments based on grayscale intensity profiles. *Quatern. Res.*, **53**, 70-77.
- Porter, S. C. and An, Z. S., 1995, Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, **375**, 305-308.
- Porter, S. C., Hallet, B., Wu, X. H. and An, Z. S., 2001, Dependence of near-surface magnetic susceptibility on dust accumulation rate and precipitation on the Chinese Loess Plateau. *Quatern. Res.*, **55**, 271-283.
- Prell, W. L. and Kutzbach, J. E., 1987, Monsoon variability over the past 150,000 years. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 8411-8425.
- Pye, K., 1987, *Aeolian dust and dust deposits*. Academic press, London, 334p.
- Qi, F., Endo, K., Zheng, X. M. and Zhou, L. M., 2003, Proxy for millennial climate change during the last 50,000 years in the loess-paleosol sequence at Shengshan Island in the East China Sea: Estimation by soil color reflectance indices (L*, a* and b*). *Quatern. Res.* (Daiy-onki-kenkyu), **42**, 113-119.
- Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., Backman, J., Clement, B. M. and Martinson, D. G., 1989, Late Pliocene variations in Northern Hemisphere ice sheet and North Atlantic Deep Water circulation. *Paleoceanography*, **4**, 413-446.
- Ruddiman, W. F. and Kutzbach, J. E., 1991, Plateau uplift and climate change. *Sci. Amer.*, **264**, 42-50.
- Ruddiman, W. F., Raymo, M. E., Martinson, D. G., Clement, B. M. and Backman, J., 1989, Pleistocene evolution: Northern hemisphere ice sheets and North Atlantic ocean. *Paleoceanography*, **4**, 353-412.
- Rutter, N. and Ding, Z. L., 1993, Paleoclimates and monsoon variations interpreted from micromorphogenic features of the Baoji paleosols, China. *Quatern. Sci. Rev.*, **12**, 853-862.
- Rutter, N., Ding, Z. L., Evans, M. E. and Wang, Y. C., 1991, Magnetostratigraphy of the Baoji loess-paleosol section in the north-central China Loess Plateau. *Quatern. Int.*, **7/8**, 97-102.
- Sasajima, S. and Wang, Y., 1984 ed., *The recent research of loess in China*. Kyoto Institute of Natural History, Kyoto, 232p.
- Shackleton, N. J., Backman, J., Zimmerman, H., Kent, D. V., Hall, M. A., Roberts, D. G., Schnitker, D., Baldauf, J. G., Desprairies, A., Homrighausen, R., Huddleston, P., Keene, J. B., Kaktienback, A. J., Krum-siek, K. A. O., Morton, A. C., Murray, J. W. and Westberg-Smith, J., 1984, Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, **307**, 620-623.
- Stott, L., Poulsen, C., Lund, S. and Thunell, R., 2002, Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scale. *Science*, **297**, 222-226.
- Stuiver, M., Grootes, P. M. and Braziunas, T. F., 1995, The GISP2 $\delta^{18}O$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanos. *Quatern. Res.*, **44**, 341-354.
- Sun, D. H., An, Z. S., Shaw, J., Bloemendal, J. and Sun, Y. B., 1998a, Magnetostratigraphy and palaeoclimatic significance of Late Tertiary aeolian sequences in the Chinese Loess Plateau. *Geophys. Jour. Int.*, **134**, 207-213.
- Sun, D. H., Shaw, J., An, Z. S., Cheng, M. Y. and Yue, L. P., 1998b, Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 85-88.
- Sun, J. M., Ding, Z. L. and Liu, T. S., 1998, Desert distributions during the glacial maximum and climatic optimum: example of China. *Episode*, **21**, 28-31.
- Sun, Y. B., Lu, H. Y. and An, Z. S., 2000, Grain size distribution of quartz isolated from Chinese loess/paleosol. *Chinese Sci. Bull.*, **45**, 2296-2298.
- Taylor, K. C., Lamorey, G. W., Doyle, G. A., Alley, R. B., Grootes, P. M., Mayewski, P. A., White, J. W. C. and Barlow, 1993, The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, **361**, 432-436.
- 鳥居雅之, 2000, 黄土層の磁性. 月刊地球, **22**, 146-148.
- 鳥居雅之・福岡浩司, 1998, 黄土層の初磁化率: レヴィユー. 第四紀研究, **37**, 33-45.
- 山田和芳, 1999, レス古土壌堆積物の年代決定法とその問題点. 月刊地球, 号外 **26**, 192-200.
- Yamada, K., 2004, Last 40 ka climate changes as deduced from the lacus-

- trine sediments of Lake Biwa, central Japan. *Quatern. Int.*, **123/125**, 43-50.
- Yamada, K., Fukusawa, H., Fang, X. M., Pan, B. T., Li, J. J. and Iwata, S., 1999, High-resolution multi-proxy records of Asian monsoon activities from terrestrial sediments over the last 75,000 years. *Chinese Sci. Bull.*, **44**, 223-229.
- Yang, S. L. and Ding, Z. L., 2004, Comparison of particle size characteristics of the Tertiary 'red clay' and Pleistocene loess in the Chinese Loess Plateau: implications for origin and sources of the 'red clay'. *Sedimentology*, **51**, 77-93.
- 安成哲三, 1987, ヒマラヤの造山とモンスーンの成立をめぐる諸問題. 月刊地球, **9**, 685-690.
- Yatagai, S., Takemura, K., Naruse, T., Kitagawa, H., Fukusawa, H., Kim, M.-H. and Yasuda, Y., 2002, Monsoon changes and eolian dust deposition over the past 30,000 years in Cheju Island, Korea. *Geomorphology (Chikei)*, **23**, 821-831.
- Vandenberghe, J., An, Z. S., Nugteren, G., Lu, H. and Huissteden, K., 1997, New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis. *Geology*, **25**, 35-38.
- Visser, K., Thunell, R. and Stott, L., 2003, Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation. *Nature*, **421**, 152-155.
- Wang, H. Y., Liu, H. Y., Cui, H. T. and Abrahamsen, N., 2001, Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **170**, 115-132.
- Wang, L., Sarnthein, M., Grootes, P. M. and Erlenkeuser, H., 1999, Millennial reoccurrence of century-scale abrupt events of East Asian monsoon: A possible heat conveyor for the global deglaciation. *Palaeogeography*, **14**, 725-731.
- Xiao, J. L., An, Z. S., Liu, T. S., Inouchi, Y., Kumai, H., Yoshikawa, S. and Kondo, Y., 1999, East Asian monsoon variation during the last 130,000 years: evidence from the Loess Plateau of central China and Lake Biwa of Japan. *Quatern. Sci. Rev.*, **18**, 147-157.
- Xiao, J. L., Inouchi, Y., Kumai, H., Yoshikawa, S., Kondo, Y., Liu, T. S. and An, Z. S., 1997, Eolian quartz flux to Lake Biwa, central Japan, over the past 145,000 years. *Quatern. Res.*, **48**, 48-57.
- Xie, S. C., Guo, J. Q., Huang, J. H., Chen, F., Wang, H. B. and Farrimond, P., 2004, Restricted utility of $\delta^{13}\text{C}$ of bulk organic matter as a record of paleovegetation in some loess-paleosol sequences in the Chinese loess plateau. *Quatern. Res.*, **62**, 86-93.
- Zhang, X. Y., Arimoto, R. and An, Z. S., 1997, Dust emissions from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 28041-28047.
- Zhang, X. Y., Arimoto, R. and An, Z. S., 1999, Glacial and interglacial patterns for Asian dust transport. *Quatern. Sci. Rev.*, **18**, 811-819.
- Zhang, X. Y., Arimoto, R., An, Z. S., Chen, T., Zhang, G. and Ray, B. J., 1994, Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the center of the Chinese loess plateau. *Quatern. Res.*, **41**, 35-43.
- Zhou, L. P. and Shackleton, N. J., 1999, Misleading positions of geomagnetic reversal boundaries in Eurasian loess and implications for correlation between continental and marine sedimentary sequences. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **168**, 117-130.
- Zhou, W., Head, M. J. and Deng, L., 2001, Climate changes in northern China since the late Pleistocene and its response to global change. *Quatern. Int.*, **83/85**, 285-292.
- Zhou, W., Head, M. J., Lu, X., An, Z. S., Jull, A. J. T. and Donahue, D., 1999, Teleconnection of climate events between East Asia and polar, high latitude areas during the last deglaciation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **152**, 163-172.

(要 旨)

山田和芳・福澤仁之, 2005, レス・湖沼堆積物記録からみたアジアモンスーンと氷期-間氷期サイクルの関係. 地質雑, **111**, 679-692. (Yamada, K. and Fukusawa, H., 2005, The linkage of Asian monsoon activities and glacial-interglacial cycles recorded in loess and lacustrine deposits. *Jour. Geol. Soc. Japan*. **111**, 679-692.)

本論では, これまでの東アジアのレス・湖沼堆積物の研究を概観し, 約 120 編の文献を取り上げて紹介した. 東アジアのレス・湖沼堆積物には, 陸上域での第四紀古環境変動が記録されている. この研究史は新しく, 現在までの約 20 年間で東アジアモンスーンの成立やその変動について多くの証拠が蓄積されてきた. その結果, レスの堆積開始時期は 2.6 Ma であり, それ以降ミランコビッチフォーシングによる氷期-間氷期サイクルに伴ってモンスーン変動が生じたこと, および, 最終氷期以降のモンスーンには, D-O サイクルと同調する短時間周期の変動が生じていたことが明らかにされた. さらに, レス古土壌の直下に堆積する紅粘土の研究から, モンスーンの成立時期が 7~8 Ma まで遡るかもしれないという新知見が明らかにされてきた.