

総説

ケニア地溝帯におけるヒト誕生前後の環境変遷史を如何にして解読するのか？

沢田順弘¹⁾・酒井哲弥¹⁾・三瓶良和¹⁾・大平寛人¹⁾・Mukokya Yogolelo¹⁾・瀬戸浩二²⁾・田中里志³⁾・
實吉玄貴⁴⁾・板谷徹丸⁵⁾・兵頭政幸⁶⁾・仲谷英夫⁷⁾・中務真人⁸⁾・国松 豊⁹⁾・中野良彦¹⁰⁾・辻川 寛⁸⁾
清水大輔¹¹⁾・高野 智⁹⁾・荻原直道⁸⁾・Stephen Mathai¹²⁾・Eliud. M. Mathu¹³⁾・N. Opiyo-Akech¹³⁾
Daniel O. Olago¹³⁾・Kurkura Kabeto¹⁴⁾・Martin Pickford¹⁵⁾・Brigitte Senut¹⁶⁾・石田英実¹⁷⁾

**Deciphering the history of environmental change related to human evolution
in the Kenya Rift**

Yoshihiro Sawada¹⁾, Tetsuya Sakai¹⁾, Yoshikazu Sampei¹⁾, Hiroto Ohira¹⁾, Mukokya Yogolelo¹⁾, Koji Seto²⁾,
Satoshi Tanaka³⁾, Mototaka Saneyoshi⁴⁾, Tetsumaru Itaya⁵⁾, Masayuki Hyodo⁶⁾, Hideo Nakaya⁷⁾,
Masato Nakatsukasa⁸⁾, Yutaka Kunimatsu⁹⁾, Yoshihiko Nakano¹⁰⁾, Hiroshi Tsujikawa⁸⁾, Daisuke Shimizu¹¹⁾,
Satoshi Takano⁹⁾, Naomichi Ogiwara⁸⁾, Stephen Mathai¹²⁾, Eliud. M. Mathu¹³⁾, N. Opiyo-Akech¹³⁾,
Daniel O. Olago¹³⁾, Kurkura Kabeto¹⁴⁾, Martin Pickford¹⁵⁾, Brigitte Senut¹⁶⁾ and Hidemi Ishida¹⁷⁾

Abstract

We are now carrying out an international project investigating the theme: "The Neogene history of environmental change in the Kenya Rift: contribution to evolution from ape to early hominid". In this paper, we first review earth science and paleo-primatology in the East African Rift System, mainly the Kenya Rift. We then outline the main components of the project, which comprise: (1) Detailed geological mapping and stratigraphy of the Nachola-Samburu Hills, Nakali and Tugen Hills areas, where middle to latest Miocene beds yielding very important hominoid and hominid fossils are distributed. (2) Research on middle Miocene flood volcanism in the entire Kenya rift; spanning age determination, petrological and volcanological characteristics, and estimation of influence on earth- and bio-environments. (3) Radiometric ages, paleomagnetic stratigraphy and biostratigraphy of the middle to latest Miocene beds. (4) Investigation of sedimentary processes in the rift, as related to rift dynamics. (5) Deciphering the history of environmental change, using mammal fossils. (6) Comparative geochemical studies of modern lacustrine and terrestrial sediments, and sedimentary rocks deposited between 5 and 16 Ma. (7) Proposal for seismic research and drilling of 2000 m of strata spanning 16 Ma, as representative of the Kenya rift basin. Geological, geochronological, paleontological and geochemical studies would be made of the drill core. (8) Deciphering the history of environmental change from 16 to 5 Ma, based on synthesis of the above research.

Key words: Kenya rift, Miocene, Human evolution, Environmental change, Geology, Lake deposits, Radiometric age, Paleomagnetic stratigraphy, Seismic research, Drilling

¹⁾ 島根大学総合理工学部
Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504, Japan
²⁾ 島根大学汽水域研究センター
Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University
³⁾ 京都教育大学
Kyoto University of Education
⁴⁾ 新潟大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science, Niigata University
⁵⁾ 岡山理科大学自然科学研究所
Institute of Natural Science, Okayama University of Science
⁶⁾ 神戸大学内海域環境教育研究センター
Research Center for Inland Seas, Kobe University
⁷⁾ 香川大学工学部
Faculty of Technology, Kagawa University

⁸⁾ 京都大学大学院理学研究科
Graduate School of Science, Kyoto University
⁹⁾ 京都大学霊長類研究所
Primate Research Institute, Kyoto University
¹⁰⁾ 大阪大学大学院人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, Osaka University
¹¹⁾ Department of Human Anatomy and Cell Biology, The University of Liverpool
¹²⁾ National Museum of Kenya, Nairobi, Kenya
¹³⁾ The University of Nairobi, Nairobi, Kenya
¹⁴⁾ Mekele University, Mekele, Ethiopia
¹⁵⁾ Collège de France, CNRS, Paris, France
¹⁶⁾ Muséum national d'histoire naturelle, CNRS, Paris, France
¹⁷⁾ 滋賀県立大学
Shiga Prefectural University

はじめに

東アフリカ大地溝帯は現在でももっとも活発な活動を続けている地球上の第一級のリフト（地溝）帯である。それはアフリカ大陸の東側、北はアフール三角地帯から南はモザンビークにかけて、全長約4,000 km にわたって南北に連なる地球の裂け目である。この大地溝帯は北西側へは紅海-アカバ湾を経て死海に通じる約2,000 km のリフト帯が、また東北東にはアデン湾リフト帯がある。紅海とアデン湾には海洋地殻が形成されている。東アフリカ大地溝帯（アフロアラビア地溝帯）は巨大な割れ目帯であると同時に標高3,000 m を越す巨大な広域隆起帯でもあり、さらに火山活動が活発な地帯でもある。この地帯は地球科学の上で2つの大きな課題を我々に提供する特異な場所である。即ち、一つは大陸の分裂をリアルタイムで観察できる点であり、他の一つは人類を生み、育ててきた揺籃の地という点である。東アフリカ大地溝帯における巨大な割れ目と隆起帯の形成、またそこで起こった大規模でかつ短期間の火山噴火、特に総体積が数10万から100万 km^3 に達するような玄武岩とホノライトの洪水的火山活動は、少なくともアフリカ大陸北東部における環境変化に大きな役割を果たしたであろうし、そのことは当然、生物の棲息環境と進化過程に重大な結果を引き起こしたことは想像に難くない。

2000年から2002年にかけて人類進化を明らかにする上で重要な発見が相次いだ。すなわち、ケニア (Senut et al., 2001)、エチオピア (Haile-Selassie, 2001)、チャド (Brunet et al., 2002) におけるヒトとおぼしき化石の発見である。これらの化石の帰属については論争的ではあるが、人類の起源が600-700万年前まで遡ることは間違いないであろう。「人類が何時、どこで、いかにして地球上に登場し、そしてやがて放散していったのか」は地球史の上でも第1級のテーマとして、我々を魅了してやまない。

環境変化の支配要因は気圏・水圏での変化、構造運動・地殻変動、火山活動、隕石の衝突、地球の惑星としての運動など多岐にわたり、またそれらは密接に連動している。影響を及ぼす範囲も裏山から全地球規模まで、また、作用する時間も地震のように数分間の変動から大陸の分裂と衝突のような数百~千万年にわたるようなものまで広範囲に及ぶ。さて、我々が主にターゲットとしている環境変遷史は人類が登場する前後（1600万年-500万年前）であるが、その歴史解読の分解能は第四紀（160万年前以降）に比べ著しく悪い。しかし、このことは、江戸時代と大正時代以降の歴史を比べるのに似て、致し方ないことであり、限られた断片的資料から歴史を復元していかなくてはならないし、そのことはかつて我々の祖先が過酷な環境に耐え、ある時はその環境を変え、挑戦していった壮大なドラマの復元でもある。

人類が登場するのは、むろん2足歩行できる可能性を秘めた類人猿の存在が不可欠であるが、これに加えて、2足歩行を促した環境変化も重要な要素として考えなくてはならない。我々は「ケニアリフトにおける新第三紀環境変遷史：類人猿から初期人類に至る進化史への貢献」を研究テーマとし

てプロジェクトを進めている。小論ではケニア・リフトを中心とした東アフリカ大地溝帯の地球科学の現状と課題を簡単にまとめ、その上で、我々の目指している環境変遷史解読の課題について述べる。

東アフリカ大地溝帯の地球科学的研究の概観と課題

1. 東アフリカ大地溝帯の構造

東アフリカ大地溝帯はエチオピアドームとケニアドームの二つのユニットに分けられる。またリフトはエチオピア-ケニアからタンザニアにかけての東ブランチとコンゴ東部からモザンビークにかけての西ブランチに分けられる。構造運動の様式、年代、火山活動の年代と岩系などは各ドームやブランチによって異なっている (Ebinger, 1989; Kampunzu and Mohr, 1991; Schluter, 1997 など)。リフトにおける主要な断層によって落ち込んだ地溝は幅が30 km から60 km で、平均的にみると40 km である。断層の落差は3000 m に達するところもある。ケニア・リフトにおいて主断層に対してそれと斜交する雁行状の断層群の存在がはじめて指摘されたのは、おそらく矢入 (1974) による研究であろう。その後、このような雁行状の断層群は他のリフト系からも多数報告されており (例えば Sengor, 1995)、地溝帯の断層や褶曲を特徴づけるものと言える。

ケニア・リフトでは、これまで The Kenya Rift International Seismic Project (KRISP) として、リフトを縦断及び横断する地震波探査や重力探査が1985年 (KRISP 85)、1989-90年 (KRISP 90)、1993-95年 (KRISP 94) に行われ、マントル最上部から地殻にかけての構造が明らかになってきた [Tectonophysics, vol. 236 (1994) と 278 (1997) の特集号など]。Mechie et al. (1997) や Birt et al. (1997) などによれば、リフト中軸部における地殻の厚さは南部で厚く約35 km、北部のツルカナ湖で20 km と見積もられている。ブーゲ重力異常のデータはケニア・リフト南部の中軸部には、最上部マントルに低密度 (3.20 g/cm^3) 物質が存在することを示している。地震波探査で明らかになった地溝帯を横切る地下構造は一般に非対称的であり、半地溝 (群) であることが多い (例えば Rosendahl et al., 1986; Dunkelman et al., 1989; Einsele, 1992; Morley et al., 1992; Hendrie et al., 1994; Mugisha et al., 1997; Morley, 1999 など)。

東アフリカ大地溝帯の基盤は先カンブリア時代の岩石であるが、それらは大きく見て3つに区分される (Rogers et al., 2000)。即ち、始生代のタンザニア・クラトン、原生代末のパンアフリカン・モザンビーク帯、原生代末の地殻変動を通じて再動したクラトンの縁辺部である。東アフリカ大地溝帯の南北の構造はモザンビーク帯の大構造を基本的に反映している。東アフリカ大地溝帯にはNW-SE方向の構造もあるが、これもモザンビーク帯中に剪断帯としてすでに原生代末に形成されたと推定されている。Rogers et al. (2000) は火山活動の噴出量やマグマの組成はリフトの下の大陸性リソスフェアの厚さ、その時代や組成と関連していると述べている。ケニア・リフトやエチオピア・リフトの主要部はモザンビーク帯

にあり、火山活動も活発である。一方、タンザニア・クラトン中に起こった火山活動は一般に小規模で、アルカリ成分に富み、またカーボナタイトなど炭酸塩に富むものも見られる。1990年代におけるリフト帯研究での特筆すべき点は全マントル地震波トモグラフィである。リフトの形成機構に関しては未だに能動説と受動説の論争が続いているが、いずれにしてもリフト帯の下にマントル・ブルームが存在すると考えられている (White and McKenzie, 1989; Ebinger and Sleep, 1998)。ただし、アフール三角地帯の下のマントル中の地震波の低速度層は半径約 1,500 km, 厚さ 100 km, 根は地下約 350 km 付近にあり、スーパーブルームから枝分かれしたものと考えられている (Zhang and Tanimoto, 1993)。スーパーブルームは African Superplume (Fukao et al., 1994), あるいは Great African Plume (Su et al., 1994) と呼ばれ、その核-マントル境界における根はアフリカ大陸の南西の大西洋中にある。

2. 構造運動

大陸性リソスフェアを分裂させることは容易なことではない。すでに McConnell (1972) は東アフリカ大地溝帯における主要な構造は基盤構造に支配されていることを指摘している。また、Zeyen et al. (1997) は東アフリカ大地溝帯の東西のブランチの間には周囲より厚い大陸リソスフェアからなるタンザニア・クラトンがあり、それに対して上昇してくるマントル・ブルーム、インド洋中央海嶺やアフール・ブルームからの押しの結果として、力学的にもっとも弱い部分でリフトが形成されるというモデルを提起した。

東アフリカ大地溝帯も含めてリフト帯の発生モデルとしてはマントル・ブルームの突き上げを主原因とする能動説と引っ張りを先行させる受動説がある。しかし、この成因論区分はさほど明瞭なものとは思えない。Dunbar and Sawyer (1988) の「能動的であっても受動的であっても地域的な水平引張は存在する。ただし、受動的なものはリソスフェアに pre-existing weakness が存在する」という指摘が正しいと考える。アフリカ大陸におけるリフト発生には初期の割れ目、あるいは基盤構造の違い、あるいはその古傷が重要な役割を果たしている可能性は高い。というのはアフリカ・プレートは北側以外はすべて海嶺によって囲まれている。つまり、水に浮かんだ氷の板のようなものである。このような板の場合、それを下からの突き上げでドーム状に隆起させることより、むしろ初めに横ずれ断層などの割れ目が出来たことにより、そこにマントル中の熱いブルームが上昇し、その結果としてドームアップが生じるというモデルの方がエネルギー効率を考えると合理的である。丁度、餅を焼いている時に箸でつつくと初めに割れ目が出来、その後、そこが膨らむことに似ている。いずれにしてもリフト発達史の根本問題である発生期の問題を明瞭にすることは未だに残された重要な課題である。

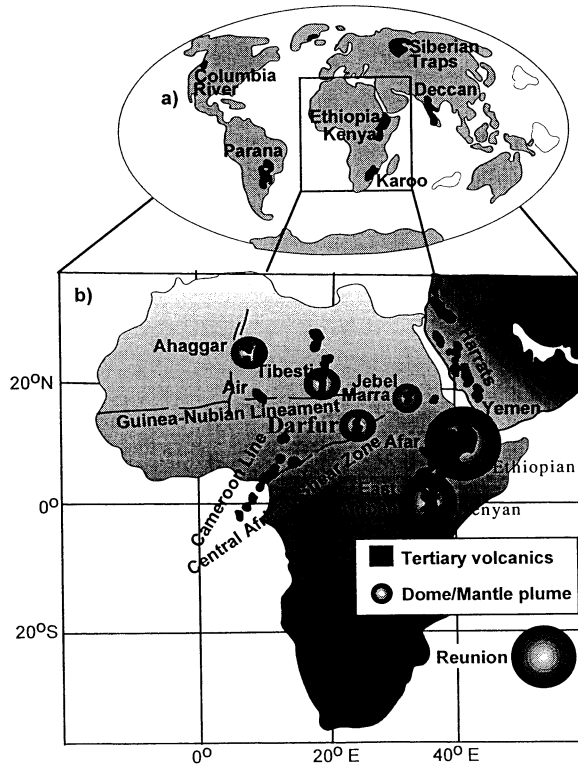
東アフリカ大地溝帯における隆起運動、リフティング、断層運動の時期や様式については未だに不明な点も多い。地層に残された浸食平坦面からドローイングの時期や規模を推定した Baker et al. (1972, 1978) の古典的な研究がある。1990年代に入って基盤の先カンブリア系中のアパタイトのフィッショ

ン・トラック熱史法を用いて上昇に伴う急速な削剥と冷却史を推定する研究がある。しかし、Foster and Gleadow (1992) と Wagner et al. (1992) は同じ手法で研究したにもかかわらず、結論は一致せず課題を残している。Omar and Steckler (1995) はアパタイトのフィッショントラック法により、紅海リフトにおけるリフティングは 34 Ma と 21–25 Ma の 2 段階あることを指摘した。

最近、石油開発がらみで、堆積盆の発達史の解明のために、地質学、地質年代学、人工地震波の解析、重力異常からの総合的研究が試みられ、堆積物や火山岩類で充填されたリフト・グラベン部の内部構造が明らかにされつつある (Mugisha et al., 1997; Morley, 1999 ed. など)。構造運動も火山活動と同じで北から南に向かって若くなる。ケニア・リフトについてはリフティングは北部のトルカナ湖で後期漸新世-前期中新世に始まり、その後、鮮新世に至るまで、幾つかの盆地がエピソードに形成された。

3. 火山活動

地球史上では短期間に莫大なマグマを噴出するようなカタストロフィックな火山活動がある。このような火山活動を洪水的火山活動と呼び、陸上で起こったものとしては、古生代と中生代の境界で起こったシベリア台地玄武岩の活動、大西洋が出来る時のパラナ台地玄武岩、中生代と新生代の境界で起こったデカン台地玄武岩の活動が有名である (第 1 図)。東アフリカ大地溝帯における火山活動は一般にリフティングと期を一にして進行している。火山活動とリフティングはアフール三角地帯で古第三紀前期に始まり、30 Ma 頃と 20 Ma 頃に洪水的火山活動があり、15 Ma 以降も火山活動は断続的に続いている。一方、ケニア・リフトでは火山活動は北部のトルカナ湖で約 33 Ma 頃から始まった。ただし、エチオピア南部における 45–35 Ma の火山活動をアフール・ブルームに起因するものではなく、ケニア・ブルームに起因するものとする考えもある (George et al., 1998)。ケニアでは 16–15 Ma にホノライトートラカイトの洪水的火山活動があり、クライマックスを迎える。その後も現在に至るまで火山活動は続いている。タンザニアでは 5 Ma 頃から火山活動が始まり、現在まで続いているが、1960年に噴火したオールドイニョレンガイ火山はカーボナタイト噴火が初めて記載されたことで有名である (Dawson, 1962; Suwa et al., 1975)。ケニア・リフトにおける洪水的火山活動は北部では玄武岩が優勢であり、中央部から南部にかけてはホノライトートラカイトが優勢である。Hay et al. (1995 a, b, c) の一連の研究では、地殻が薄い北部では玄武岩マグマが直接噴出したが、南部では玄武岩マグマが地殻下部にアンダープレATINGし、それが再溶解することによりホノライトートラカイトを生成したと考察し、このモデルは物理探査による地殻構造とも調和的であるとされた。西リフト・ブランチにおける火山活動は東ブランチほど活発ではなく、北方のキブ湖周辺のビルンガ火山地域で 13 Ma 頃から始まり (Schluter, 1997)、この地域では現在も活発な活動を続けているニエラゴンゴやニアムラギラ火山などがある (Hamaguchi et al., 1992; Hayashi et al., 1992 など)。中部のマラウイ湖北の Rungwe では 10 Ma 頃に火山活



第1図 地球上での洪水的火山活動の産物の分布とアフリカ大陸における新生代火山岩類の分布 [George (1997) から引用].

動は始まった (Schluter, 1997).

近年, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が東アフリカ大地溝帯の火山岩類について報告され (Zumbo et al., 1995; Baker et al., 1996; George et al., 1998; Ebinger and Sleep, 1998 など), 特に洪水的火山活動は短期間 (<100 万年) に起こり, 地球環境に大きな影響を及ぼしたとする考えも出されている (Hofmann et al., 1997).

1980-90 年代は化学分析技術が発展し, 東アフリカ大地溝帯における火山岩類の化学組成や同位体比組成データが多量に報告された時代でもある (Barrat et al., 1990; Altherr et al., 1990; Tatsumi and Kimura, 1991; Schilling et al., 1992; Stewart and Rogers, 1996; Kabeto et al., 2001 a, b). 同位体比組成, 特に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位体比初生値はマグマの起源物質を探るのに適している. Sr, Nd, Pb 同位体的にみると玄武岩マグマの発生源であるマントルは主に中央海嶺玄武岩の供給源である DM (Depleted Mantle), 海洋島や大陸の玄武岩の供給源である Sr や Nd に富んだ EM 1 や EM 2 (Enriched Mantle), 高い Pb 同位体比をもつ HIMU (High- μ : $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) に区分されている (Zindler and Hart, 1986; Sun and McDonough, 1989; Franz et al., 1999). リフトにおける多種多様なマグマの起源やプルームの区分とマグマの帰属に関するモデルが地球化学的研究から提起されている (上記文献参照).

近年, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定によって, 従来の K-Ar 年代では分散していた年代が集中することがわかり, 特に洪水的火山活動は比較的短期間に起こったことが解ってきた. マグマの

静的な成因論はほぼ収束しつつあり, 今後は地震波トモグラフィを含む地球物理探査, 地質, 火山岩の化学組成や同位体比組成を使ってマントル-アセノスフェア-リソスフェア-地殻におけるマグマ・ダイナミクスと構造運動史の解明が望まれる.

4. グローバルな環境変化

ケニアピテクス類が棲息していた中期中新世 (15 Ma 頃) に地球規模で急激な寒冷化があったとされる (例えば, Miller et al., 1987, Zachos et al., 2001 など). Cerling et al. (1997) は 8-7 Ma に化石歯 (Equid と Elephantid) の $\delta^{13}\text{C}$ 値の急激な変化があることを報告し, その原因を Raymo et al. (1988) の示すヒマラヤ山脈の上昇に関連した大気中の CO_2 濃度の減少に伴う寒冷化と関連させて考えた. しかし, ケニア・リフトの地層, 様々な科の化石歯の $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定した Kingston (1999) は, Cerling et al. (1997) に示されるほどの明瞭な植生変化はなかったことを示しており, 同位体からの古環境解析については, 解釈のみならず, その測定自体についても課題を残しているといえる.

フランスの古人類学者コパン (1994) は「中新世に東アフリカ大地溝帯が急速に隆起し, 西側の熱帯雨林地帯と東側のサバンナ地帯に分かれ, 類人猿も必然的に東西に分かれた. 西側の熱帯雨林地帯にいったものはゴリラ, チンパンジーとなり, 東側のサバンナ地帯に進出していった類人猿が二足歩行するようになり人類へと進化していった」という人類進化と構造運動, 環境変化とを関連させたモデル, 所謂, 「イーストサイド物語」を提起した. しかし, 最近の研究では, 例えばエチオピアでの古人類化石とともに産出する動・植物化石から見て, サバンナではなくむしろ生物が多数棲息できるような森林環境であった可能性も指摘されている (諏訪 元私信). 同様なことはケニアのオロリンを含む層に多種多様かつ多数の動・植物化石が発見されていること (後述) から支持される. もっとも, チャドで発見された 7-6 Ma のサヘラントロプスが人類だとすると「イーストサイド物語」は根底から覆ってしまう. ただし, サヘラントロプスについてはヒトの祖先か類人猿の祖先かの激しい論争がある. 例えば, Nature 誌上で, Wolpoff et al. (2002) は *Sahelanthropus* ではなく類人猿 *Sahelpithecus* だといい, それに対し, Brunet et al. はオーストラロピテクス発見者ダートも 1925 年発表した時に「それはゴリラの祖先だ」と学会から冷たく扱われた, それと同じ批判だと反論する. いずれにしても, 東アフリカ大地溝帯における構造運動や大規模な洪水的火山活動について, 内容, 特に年代や規模, 火山ガスの放出量などを明らかにし, 地域的環境変化, 地球規模の気候変動への影響を定量的に見積もり, さらに生物・人類進化との関連について明らかにすることは環境変遷史や生物進化を考える上で重要である.

人類進化史概観と課題

人類の特質を古生物学的研究から解明する上で, 人類とアフリカ類人猿の分岐の様相を明らかにすることは最大の課題

である。人類とチンパンジーの系統が分岐した時期は、分子生物学的なデータからも、古生物学的な証拠からもまず確実に1000–500万年前(後期中新世)にある。チャドからは700–600万年前のサヘラントロプス(Brunet et al., 2002)、ケニアのツゲン・ヒルズからは600万年前のオロリンが発見され(Senut et al., 2001)、エチオピアのミドル・アワシでも500万年を遡るアルディピテクス猿人が発見されている(Haile-Sellasie, 2001)。しかし、時代が遡るほどヒト科としての派生形質が希薄になるため、これら化石ヒト科の系統関係、またヒト科としての位置づけすら、研究者間で意見が多様である。これらが事実ヒト科であれば、人類・類人猿の最後の共通祖先は700–600万年前以前に求めなければならない。これら最初期のヒト科の系統、また、後の鮮新世猿人との系統関係の分析を進める上で、確実に分岐以前で、しかも分岐年代に近い類人猿化石資料に基づく、骨格特徴の極性、またその生息環境の特定がきわめて重要である(Pickford et al., 2002)。人類・アフリカ類人猿の分岐に関するシナリオを描くには懸垂運動適応、地上性・せき行性(踵をおろして歩く)の起源、そしてナックルウォークの起源が重要な鍵となる。初期のホミニドにナックルウォークに関連する痕跡的特徴があり、人類はナックルウォークを経験して進化したとする見解もあるが(Richmond and Strait, 2000)、議論は続いている(Dainton, 2001; Lovejoy et al., 2001; Corruccini and McHenry, 2001; Richmond and Strait, 2001 a, b)。こうしたイベントのタイミングについて結着がつかない限り、人類とアフリカ類人猿の進化については複数のシナリオを描くことが可能である。それぞれのシナリオの是非を検討し、蓋然性の高いものを選ぶには、後期中新世アフリカ類人猿化石資料が必須である。ケニア、サンプルヒルズからは、970–950万年前の類人猿サンプルピテクスが知られているが、残念なことに、その資料は第1標本発見(Ishida and Pickford, 1997)以降見つかっていない。この時期(中期中新世末期または後期中新世最初期)の化石サイトはアフリカ全体を見渡しても少なく、東アフリカではサンプルヒルズ(9.7–9.5 Ma)、ナカリ(10?–8 Ma)、ンゲリゲロワ(10–9.5 Ma)、ンゴロラ(12.5–10.5 Ma)しか知られていない。この中でナカリ地域は、スペイン、イギリス、ケニア等の調査隊による予察によって後期中新世前葉の動物相を産出することが知られていた(Aguire and Leakey, 1974)。しかし、本格的な発掘調査はおろか放射年代、層序分析など地質学的調査は一切行われず、ケニアにおいて現在ただ一つ残された、未調査の後期中新世化石サイトとなっている。今後、注目される化石サイトの一つである。

ケニア・リフトにおける環境変遷史解読のプログラム

我々の目指しているケニア・リフトにおける中期から末期中新世の環境変遷史解読のプログラムは以下の通りである。ケニア・リフトにおける重要な類人猿–ヒト化石産地は第2図に示した。

(1) 最も重要な霊長類化石を産出し、地質の基礎データがあるナチョラーサンプル・ヒルズ、ナカリ、ツゲン・ヒルズに

おける詳細な地質調査。1600–500万年前の地層に記録された地質現象の解明。年代決定のための正確な地質層序の確立。

(2) 汎ケニア・リフトで起こった1500万年前前後の洪水性火山活動の年代、実態把握とその地球–生物環境への影響の見積もり。

(3) 放射年代、古地磁気層序年代、生層序からの正確な年代決定。

(4) リフト帯での地層形成過程の解明

(5) 哺乳類化石を用いた環境変遷史復元

(6) 1600–500万年前と現世堆積物(陸成と湖沼成)の地球化学的比較研究。

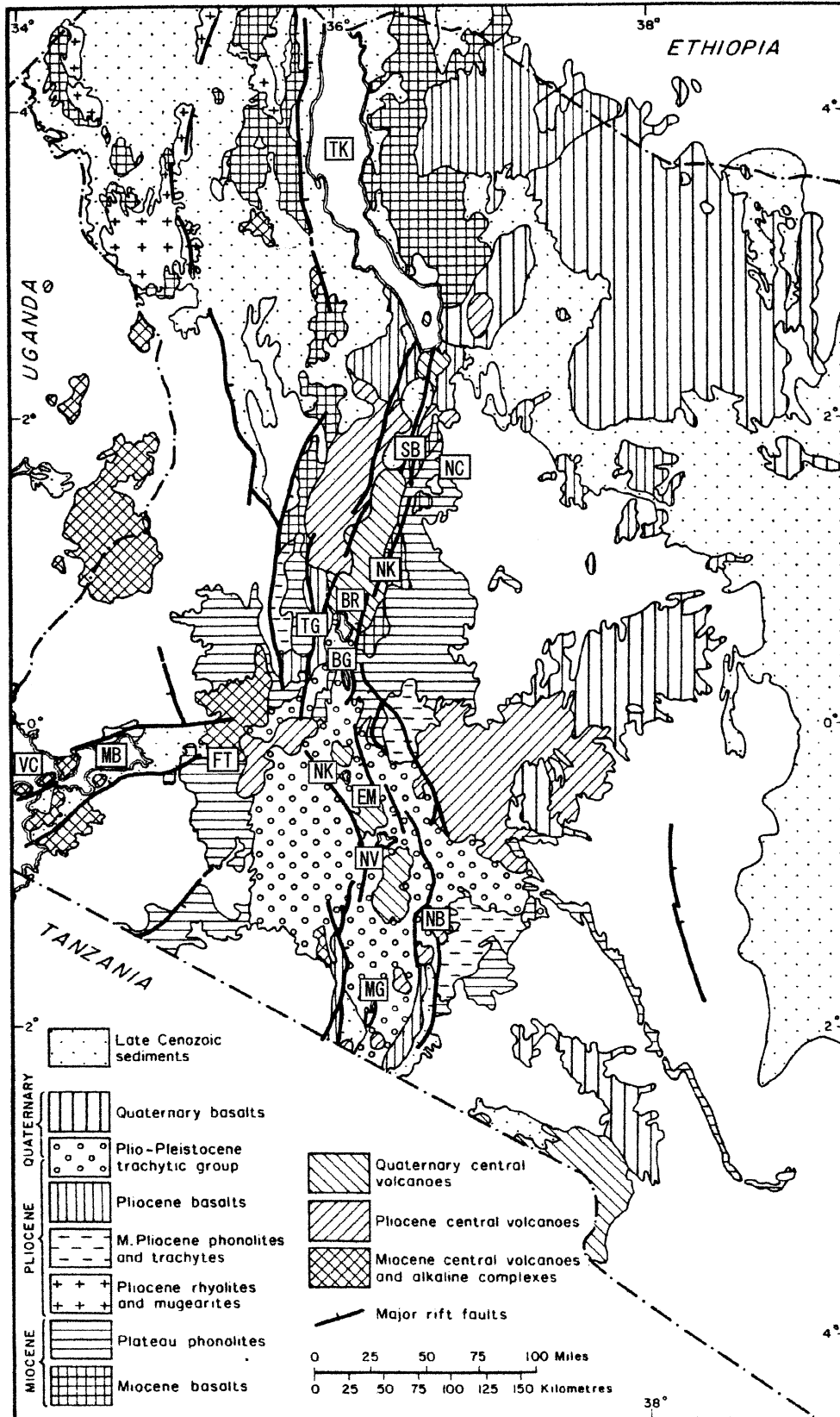
(7) ケニア・リフト底の地震波解析と2000 m掘削計画の提案。ケニア・リフト底の地震波解析を行い、2000 m以内で16 Ma以降の地層が連続的に分布する地域において掘削コアを採取し、その地質学、年代学、古生物学、地球化学的検討を行う。

(8) 地表付近の立体的な研究成果と掘削コアからの連続的情報を総合化し、環境変遷史を推察する。

1. 地質調査からの解読

言うまでもなく、地質時代に起きた現象を解読する基本は地質調査である。地質学的バックグラウンドのない環境変遷史はまったく意味のないものである。化石も初生的なのか(in situ)、2次的なのか(derived)を判定するのは地質学的調査である。化石の年代にしても化石を含む層、およびその上下の地層についての地質学的な正確な知識なくしてはとんでもない過ちを犯す危険性がある。例えば、人類化石を含む地層中に含まれる礫の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を測り、その値が化石の年代として一流の国際誌に掲載された例がある。ケニアにおいては、広域的な地質図の公表は1980年代に終わっている。しかし、それらは25万分の1、古くは12万5千分の1の精度のもので、その後、精密な地質図を作成した研究で少なくとも国際誌に載るようなものはほとんどない。我々が基本としているのは精密な地域地質であり、また、露頭記載である。ここでは地質を基礎とした研究の方向について述べる。

(1) ナチョラーサンプル・ヒルズ ナチョラーサンプル・ヒルズは北部ケニア・リフト、トルカナ湖の南端から南へ約60–80 km、リフトの東側フランク～ショルダーにあたる。石田英実京都大学名誉教授(現滋賀県立大学教授)を中心とする日本–ケニア共同プロジェクトチームは1980年以降、主にこの地において発掘調査にあたり、人類進化史にとって重要な鍵となる霊長類化石、すなわち16–15 Maのナチョラピテクスと、9.7–9.5 Maのサンプルピテクスを発見した(Ishida and Pickford, 1997; Nakatsukasa et al., 1998)。霊長類化石のみならず、多数の脊椎動物、貝や植物の化石、足跡化石も発見され、生物進化や古環境の推定にも大きく貢献している(Nakaya et al., 1984, 1987; 中野ほか, 2001, Pickford et al., 1984 a, b; Tsujikawa, 2003 MS など)。ナチョラーサンプル・ヒルズはケニア・リフトの中でも、もっともよく地質調査がなされている地域であり、詳細な地質図が作成されている(Makinouchi et al., 1984; Sawada et al., 1987, 1998)。また、多数のK–Ar年代が報告され(Itaya and Sawada, 1987; Tatsumi and Kimura,



第2図 ケニア・リフトにおける新生代火山岩類の分布と重要な類人猿-ヒト化石産出地点。地名の略号は以下の通り。SB：サンプル・ヒルズ (Samburu Hills), NC：ナチョラ (Nachola), NK (北)：ナカリ (Nakali), TG：ツゲン・ヒルズ (Tugen Hills), FT：フォート・ターナン (Fort Ternan), MB：マボコ島 (Moboko Island), TK：トルカナ湖 (Lake Turkana), VC：ビクトリア湖 (Lake Victoria), BR：バリンゴ湖 (Lake Baringo), BG：ボゴリア湖 (Lake Bogoria), NK (南)：ナクル湖 (Lake Nakuru), EM：エルメンテータ湖 (Lake Elmenteita), NV：ナイバシャ湖 (Lake Naivasha), MG：マガディ湖 (Lake Magadi), NB：ナイロビ (Nairobi)。[地質図は Baker et al. (1971) から引用]

1991; Tatsumi et al., 1991), 構造運動や火山活動史の解明, 堆積環境の解析を通じて, 地史が明らかにされてきた. この地域における新生代の地層は下位からナチョラ累層 (20–16 Ma), アカ・アイテバス累層 (16–10 Ma), ナムルングレ累層 (10–9 Ma), コンギア累層 (7–5 Ma), ティルティル累層 (4 Ma), 及び第四紀の堆積物と火山岩からなる (Makinouchi et al., 1984; Sawada et al., 1987, 1998). 構造運動史と火山活動史は以下のようなシナリオが考えられている. 20 Ma 頃からドーミングを伴った玄武岩ートラカイトの火山活動があり, 16–15 Ma にクライマックスを迎え, 大規模なホノライトートラカイトに代表される洪水的火山活動があった. この活動は単に北ケニアにとどまることなく, ケニア・リフト全域で起こったものである. 10 Ma 頃にサンプル・ヒルズでは火山活動が終息するとともに, 著しい赤色風化土壌や陸成チャート, 炭酸塩岩が形成された. この時期, 大規模な堆積盆地 (リフト・グラベン) が形成された. その後, 9–8 Ma に大規模な断層運動を伴う地層擾乱が起こった. この時期にも堆積盆が広がり, 傾動した地層は平坦化された. その後, 7 Ma から再び火山活動が活発になり, 第四紀まで断続的に続く. また, 4 Ma にも規模は 9–8 Ma のものより小さいが地殻変動があった.

(2) ナカリ ケニア・リフト中央部の東側リフト・ショルダーに位置する. この地域にはサンプル・ヒルズのナムルングレ累層に類似した層相の地層や火山砕屑岩層が広く分布することから霊長類ー人類進化を探る上で重要なフィールドとなっている. 2002 年と 2003 年には中務真人・国松 豊を中心とする日本ーケニア合同調査隊が発掘調査を行った. 2003 年夏には多種多量の脊椎動物の化石を採取するとともに, 広域地質図作成, K–Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代と古地磁気層序の為の試料採取, 堆積相解析調査が行われた (沢田順弘, 酒井哲弥, 田中里志, 田山良一, 松田優子). この地より, 人類に至る過程の霊長類化石が発見される可能性は高い.

(3) ツゲン・ヒルズ ツゲン・ヒルズはケニア・リフト西部にあたり, 先カンブリア代の基盤岩と火山岩からなる 1000 m に及ぶ急崖があり, その東側にはリフト底を埋積する堆積岩 (物) や火山岩が分布する. この地域もナチョラーサンプル・ヒルズと同様に後期新生代の火山活動が断続的にあり, それらとともにリフト底を埋積した堆積岩 (物) も分布する (Pickford, 1999; Behrensmeyer et al., 2002). この地からは 15 Ma 頃の霊長類化石 (Pickford, 1988; Ward et al., 1999) とともに, 東アフリカリフトでは最古の人類化石と考えられる 5.9–5.8 Ma のオロリン・ツゲンネンシスが発見された (Senut et al., 2001; Pickford and Senut, 2001; Sawada et al., 2002). オロリン・ツゲンネンシスとともに多種多量の脊椎動物や植物遺体が発見され, 生物にとって豊かな棲息環境であったことが予想される. また, 現在ボゴリア湖で見られる石灰質トラバーチンも地層中に多量に見られ, 類似した環境と考えられる.

(4) フォート・ターナン ケニア・リフトから派生し, ビクトリア湖に抜けるリフトがあり, カピロンド・リフトと呼ばれる. カピロンド・リフトのフォート・ターナンとビクトリア湖北端のマボ湖という小さな島から中期中新世の霊長類化

石が発見されている (Pickford, 1986 a; Benefit and McCrossin, 1989; Benefit, 1999; McCrossin and Benefit, 1993). フォート・ターナンにおける霊長類化石の時代を正確に調べるための調査と化石包有層を挟む火山岩試料の採取が 2003 年夏に行われた (沢田, Pickford, Senut, 田山, 松田).

2. 汎ケニア・リフトで起こった 15 Ma 前後の洪水性火山活動の年代, 実態把握とその影響の見積もり

中期中新世にケニア・リフトの全域にわたり, 大規模な火山活動が起こった. この時期は世界的に寒冷化する時期であり, また, ケニア・リフトではケニアピテクス類として一括される霊長類の棲息時期に一致する. このような環境変化や生物進化に中期中新世の洪水的火山活動が影響しているのかどうかは重要な課題である. エチオピア・リフトにおける 30 Ma の洪水的火山活動が地球の寒冷化に関連するという見解がある (Hofmann et al., 1997) が, その翌年にはこのような見解に反対する論文 (George et al., 1998) も出され, 地球環境変化と洪水的火山活動の因果関係の解明はたやすいものではない. 因果関係の解明のために我々は次のような筋道に沿って研究を進めている. (1) 化石包有層とその上下の地層や岩石の精密な調査, (2) 正確な K–Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定と古地磁気層序, (3) ホノライトの全岩主成分・微量成分分析, CHNS 分析. (1) に関してはナチョラピテクスの包有層に限られた層準にあることが明らかになり, また珪質物によって置換されているマトリックスを詳細に調べたところ, それらは火山灰起源であることや花粉や珪藻化石を含むことがわかり, 火山泥流によってナチョラピテクスを含む多種多様な生物が呑み込まれたというダイナミクスを推定した (沢田ほか, 2001).

(2) 現在, 中新世洪水性ホノライトについて, Yogolelo, 沢田, 板谷によって精密な K–Ar 年代が明らかにされつつある. 当然のことではあるが, K–Ar 年代には過剰 Ar と岩石形成後の Ar の逃散の問題がある. 一見新鮮に見える試料でも $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代と比べた時, 若い年代を示すことが多い. 我々は, ケニアのホノライト試料については, 粉碎, 篩いがけして, 200–300 メッシュ (127–85 μm) の粒度のアルカリ長石を K–Ar 年代測定用試料としている. このようにして準備した試料と, それをさらに塩酸で leaching した試料の 2 種の試料について K–Ar 年代測定を行っている. その結果は 2 種の試料で年代値がほとんど変わらないものもあるが, ほとんどの試料は塩酸で leaching した試料の方が古い年代を示し, その値は $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代に近い (Yogolelo, 2003 MS). このことは一見新鮮に見える試料でも変質の影響を受けて, 年代が若返っていることを示している. このような観点から我々はこれまで報告された K–Ar 年代値の見直しのために, 台地を形成している中期中新世洪水性ホノライトの柱状図を作成し, K–Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代とともに古地磁気層序もあわせて研究している.

(3) 洪水性ホノライト溶岩と火砕岩が露出する Elgeyo Escarpment, Tugen Hills, Tangulbei – Laikipia において詳細な柱状図を作成した (沢田, Yogolelo). Elgeyo Escarpment と Tugen Hills では基盤の末期原生代の片麻岩と花崗岩を不整合に覆って, 中期中新世の火山岩類が分布するが, 前者の地域

では、その最下部には火砕岩が見られ、それを覆って高度差約 500 m のホノライト溶岩が分布し、後者では高度差約 800 m で、下位に火砕岩、上位に溶岩という組み合わせが 2 サイクル見られる。溶岩中のイオウ含有量を見ると、興味ある事実がわかる。すなわち、上記の 3 地域において、最下部の溶岩にはイオウが濃集しているが、その量は上方に向かって急速に減少する。このことはマグマ溜りにおける脱ガス過程に対応している可能性が高く、また、マグマバッチの識別にも有効となる可能性を秘めたデータといえる。

3. 放射年代、古地磁気層序年代、生層序からの正確な年代決定

K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は板谷徹丸を中心として、また、古地磁気層序年代は兵頭政幸を中心として行われている。フィッシュン・トラック年代は大平寛人が担当する。ヒト化する前後の環境変遷史を解明するためには、正確な年代を知る必要があるのは言うまでもない。その中でも特に重要なのは、ケニアピテクス類が棲息していた時代である中期中新世(ビクトリア湖、マボコ島のマボコ層、フォート・ターナン、ツゲン・ヒルズの Muruyur 層、ナチョラのアカ・アイテバス累層最下部の年代)、サンプルピテクスの 10–8 Ma、オロリンの 6 Ma 前後である。ケニアピテクス類に属する霊長類の分類については論争的であるが[国松(2002)のレビュー参照]、それらの一つである Equatorius (Ward et al., 1999) を含むツゲン・ヒルズの Muruyur 層の年代は Bishop et al. (1969) で 14–13 Ma とされていたものが、その後、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代では 15.5 Ma (Hill et al., 1991) や 15.8–15.4 Ma (Behrensmeyer et al., 2002) の値が報告されている。このようにかつて報告された K-Ar 年代値については再検討の余地がある。

K-Ar 年代や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代とあわせて、古地磁気層序も行わなくてはならない。オロリンを含むツゲン・ヒルズ、Lukeino 累層について Deino et al. (2002) は $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を報告し、古地磁気層序では Lukeino 累層を C3r とした。しかし、Sawada et al. (2002) は K-Ar 年代とともに、Lukeino 累層下部に正磁極期を確認し、オロリンを含む Lukeino 累層を C3 An. 1–n と C3r, 5.9–5.7 Ma と結論づけた。(付帯的な研究テーマとして C3 An. 1–n と C3r の境界に当たるところに、連続的に地層があることから、地磁気逆転の過程も推察できる)。このように地質層序学、K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代、古地磁気層序を併せることによって化石を含む層のより正確な年代を求めることができる。現在、我々のグループによって霊長類—人類進化にとって重要な化石を含む地層であるフォート・ターナン、ナチョラのアカ・アイテバス累層最下部、ナムルングレ累層、ナカリの地層、Lukeino-Kaparaina-Chemeron 累層について、広域マッピング、精密な地質層序に基づいて、K-Ar 年代や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定、古地磁気測定が行われつつある。霊長類—人類化石を含む地層には多種多様な化石が含まれるので、生層序も併せて検討し、より精密な年代を決定していくことが可能である。

4. リフト帯での地層形成過程の解明

この課題には酒井哲弥、実吉玄貴、田中里志があたっている。サンプル・ヒルズにはおよそ 16 Ma 以降の火山岩類、堆

積岩類が露出している。このサンプル・ヒルズの中新統(ナムルングレ層)は類人猿化石サンプルピテクスを産出しており、人類進化を考える上でも重要な場所である。

調査の目的はリフト帯での地層形成の解明である。一般にリフト帯での地層形成は極めて複雑である。それは、リフティングに伴ってできる複雑な地形のみならず、海が侵入するかどうか、どのような火山活動があったかなどによって、結果として形成される地層の特徴が大きく変わるからである。今までに統一的なリフト帯での地層形成についてのモデルは提唱されていない。調査のターゲットは類人猿化石の産出のあったナムルングレ層である。ナムルングレ層の露出地域は極めて植生が少なく、地層のほぼすべてを露頭で確認することができる。また、地層も大規模な変形を受けていないため、地層形成についての研究を行うには最適といえる。

これまでに堆積学的な視点からいくつか明らかになったことがあるが、それについて、以下に簡単に列挙する。(1) ナムルングレ層の下部は砂泥互層からなる厚い氾濫原の堆積物を主体とするが、そこには河川の流路堆積物がほとんど見られない。また、ここに挟まれる砂層にはウェーブリップル葉理等の波浪に伴う堆積構造が見られ、泥岩には根痕、乾裂が見られた。このことは、氾濫原環境で沈水と陸化が繰り返し起きたことを示す。ナムルングレ層はリフティング初期の盆地内での水系発達期待されない時の地層であり、河川による大量の堆積物運搬は期待できない。堆積物の主体が再堆積した細粒な火山噴出物であることをふまえると、火山噴火に伴ってこの場に供給された火山砕屑物が、沈水時に波浪によって水中に舞上げられ(小規模な河川が発達してもこの時にそのほとんどが侵食された可能性がある)、それが再堆積、そして陸化する、ということは何度も繰り返した結果、地層ができたことと説明できる。

(2) ナムルングレ層下部に記録された氾濫原の沈水と陸化の繰り返しは、この地層上部堆積期には起きていないことがわかった。その原因の 1 つに、気候の乾燥化が推定されるが、これまでにこの時期の気候乾燥化は具体的に示されていない。この原因は、こうした外的要因というよりも、埋積に伴って盆地の平坦部(平野と湖部分の面積)が拡大したことで説明できる。盆地に供給される水量が一定であれば、面積が広い方が沈水しにくいのは当たり前のことである。

まだケニア・リフトでの堆積学的手法を使ったりリフト発達史、リフトでの地層形成過程の解明はまだほんの一部を手がけたにすぎない。今後、詳細なケニア・リフトでの研究は、リフトの発達、人類進化といった極めて重要な問題に解明の糸口を与えてくれることと信じている。

5. 哺乳類化石を用いた環境変遷史復元

この課題には主に仲谷英夫や辻川 寛があたっている。哺乳類動物群の変遷を追跡するためには、哺乳類の系統解析とその結果により確定された分類群(種や属と言った生物の系統分類学的単位)の出現と消滅が、連続よく追跡されなければならない。そのための証拠を固めていくためには、地道な野外における化石採集、その産出層準の正確な記録、そして化石のクリーニング作業が行われる。これらの作業の結果、

形態の明らかになった標本と世界中の博物館などに収蔵されている、いままでに知られていた標本と比較する研究が進められる。

このような19世紀以来の古典的哺乳類化石研究に1970年代以降、急速に進展した放射年代や古地磁気層序研究の成果を組み合わせることによって、例えば、西ヨーロッパでは新第三紀をMN 1~17といった17の陸上哺乳類生層序帯に区分している(Steiniger et al., 1989, 1996など)。この生層序区分は海成層の微化石(浮遊性有孔虫N 4~21, コッコリスNN 1~18)による生層序帯(Berggren et al., 1995など)と変わらない精度をもっている。東アフリカもまた、西ヨーロッパや北アメリカと同様、哺乳類による陸上生層序帯が最もよく確立されている地域の一つである(Pickford, 1986 b)。ケニア・リフトでは、生層序帯が人類サイトの年代問題に対して重要な役割を果たした例として、KBS タフの年代確定に対するイノシシ進化の研究(Harris and White, 1979)がよく知られている。

日本の調査隊によるサンプル・ヒルズの哺乳類化石調査が、ヒト上科からヒト科への進化の舞台となったケニア・リフトの後期新生代の環境変遷史復元に果たした役割は非常に大きい。

サンプル・ヒルズ調査の初期には放射年代や古地磁気層序の精度の問題もあり、サンプルピテクスを産出したナムルングレ層の年代が6.7 Ma, 16 Maなどとばらついていたが(Matsuda et al., 1984)、ナムルングレ層産の哺乳類化石の組み合わせ(Nakaya et al., 1984; Kawamura and Nakaya, 1984)から、いち早く後期中新世初期(10 Ma 前後)との生層序学的見解(Pickford et al., 1984 b)を示した。この結果は、より精度の高い放射年代研究(Sawada et al., 1998)で、支持されることとなった。

また、ナムルングレ動物群は、東アフリカではあまり知られていなかった後期中新世前期の動物群(Nakaya, 1993; Nakaya et al., 1987; Kawamura and Nakaya, 1987; 仲谷, 1987; Nakaya and Watabe, 1990; Tsujikawa, 2003 MS)であり、東アフリカにおける新第三紀哺乳類動物群の変遷史における大きなギャップを埋めるものであった。このナムルングレ動物群とそのほかの東アフリカ新第三紀動物群との比較検討から中期中新世中期(16~15 Ma 前後)に東アフリカの動物群構成に大きな変化が起こり、その主な原因は草原型哺乳類の増加にあることが明らかとなった(Nakaya, 1994, 1997)。

ナムルングレ動物群の足跡化石も保存の良さから今後の更なる研究(中野ほか, 2001)が期待されており、脊椎動物化石のタフォノミーについての研究も実吉によってはじまったところである。

さらに、中期中新世後期(16 Ma)のナチョラ動物群はその構成要素の多くを霊長類が占める特異な動物群である(Pickford et al., 1984 a, 1987)。この動物群の霊長類以外の分類群に関する研究の進展が期待される。

以上のような、後期新生代の環境変遷史に関する哺乳類化石研究成果をみると、ケニア地溝帯は、化石がもつ古典的な二面性、すなわち、示準化石として、また、示相化石として

の側面を研究する上で最適なフィールドであり、今後も十二分な成果が期待できる地域である。

6. 16~5 Ma と現世堆積物(陸成と湖沼成)の地球化学的比較研究

この課題は主に田中里志、瀬戸浩二、三瓶良和が担当している。東アフリカ大地溝帯(およそ東経30~40°地帯)には、南北に35を超える大小さまざまな湖が存在する。これらの湖の主骨格は、東アフリカ大地溝帯の形成に伴う断層運動や火山活動とともに形成されたと考えられている。特に、東アフリカ大地溝帯は、ビクトリア湖を挟むかたちで西ブランチと東ブランチに分けて考えられ、西ブランチにはタンガニカ湖に代表されるような水深の深い大規模な湖が分布し、東ブランチにはトルカナ湖は例外として規模が小さく(最大30 km×20 km)、水深の浅い(5 m~数10 m)湖が点在するという特徴が指摘されている(Tiercelin and Lezzar, 2002)。本プロジェクトでは、湖盆の形状の特徴、湖の性質ならびに環境の変化過程など総合的なデータの収集ならびに解析を進めることを主な目的としているが、これらの基礎的なデータは、現在の湖そのものの形成過程を明らかにするとともに、リフトに沿って広く分布する中新世以降の陸水成層堆積物の形成過程や環境変遷史を考える上で多大な情報を提供するものと考えられる。すなわち現世の湖環境を基礎的資料として過去の環境へとさかのぼる、およそ1600万年前から現在までの陸水成層の形成過程を総合的に関連づけて考えることができるのである。このような湖研究の展開は、現在の地球上で起きている環境問題や気候変動についても新たな提言をもたらすものと考えられる。

今年度(2003年夏)の湖研究のプログラムでは、東ブランチのケニア・リフトに分布する5つの湖をターゲットにして調査を実施するとともに試料のデータ解析を進めている。これらの湖は、ナイロビから南西方向へ約100 km、タンザニア国境近くに位置するマガディ湖(Lake Magadi)、ナイロビから北西方向へそれぞれ約80 kmに位置するナイバシャ湖(Lake Naivasha)、120 kmのエルメンテイタ湖(Lake Elmenteita)、300 kmのボゴリア湖(Lake Bogoria)、350 kmのバリンゴ湖(Lake Baringo)である。これらの五湖はケニアにある代表的な湖として知られており、部分的に観光地化されているため比較的アプローチがし易く、何よりも様々な環境がコンパクトにまとまっている湖群としてリフト湖のスケールモデルを考える上で最も適していると考えられる。特筆すべき点は、マガディ湖、エルメンテイタ湖、ボゴリア湖はいずれも温泉水が流入し、フラミンゴが飛来する強塩水環境にあり、他方ナイバシャ湖とバリンゴ湖は河川水の流入だけによる淡水環境の特徴をもつという全く異なる環境下におかれていることである。

これら五湖の基礎的な性格を把握するため、その面的な広がりを考慮して、各々において数地点~数10地点の湖底(表層)堆積物の観察およびエクスマンバージによる採泥、水質調査(水温、塩分濃度、溶存酸素量など)を実施した。また野外調査の結果を受けて、淡水のナイバシャ湖と塩水のボゴリア湖において簡易ボーリングを実施し、約1 mの湖底堆積

物の採取を行った。これらの試料については、粒度解析、XRF化学分析、酸素・炭素同位体解析、帯磁率解析、珪藻・花粉などの微化石解析、 ^{14}C 年代測定などとともに野外で直接得られたデータを合わせて総合的な研究を進める予定である。

さらにこれらの成果を受け次年度に行われる研究へと進めていく必要がある。特に、今回得られた1 m ボーリング試料の堆積年代は明らかになっていないが、それらの具体的な年代値が得られればさらに新たな問題点、興味深い点など抽出されることが予想でき、今後より具体的な検討ができるものと期待している。また、今年度は湖の性格を知るために水質と湖底表層堆積物を調査の主なターゲットとして進めてきたが、構造湖の発生と湖盆形成のプロセス、そして湖の始まりから現在までの長期的な環境変遷、さらにはアフリカ全地域の気候変化を議論するためには、中期中新統に達するような学術ボーリングを実施する必要がある。

なお、今年度の湖底調査ならびに簡易ボーリングによる試料採取は、瀬戸浩二、Stephen Mathai、田中里志が行った。

7. ケニア・リフト地地震波探査および掘削計画

ドレーミングはリフト・ショルダーやフランクの岩石や堆積物の風化、浸食、削剥を促進し、構造運動史の証拠隠滅の役割を果たす。リフト・ショルダーやフランクの物質は消失しても、リフト底には過去の堆積物や火山活動の産物が充填されている。人工地震波探査によって内部の構造が徐々に明らかになってきているが、パイロサイズ探査によってさらに鮮明に構造を推定する必要がある。

石田英実滋賀県立大学教授を代表とする科学研究費補助金「特定領域研究：人類進化と環境変動」の一部として「ケニア・リフト盆地の物理探査と2,000 m掘削」計画を申請している。その目的は、年代的に連続した堆積物が得られる可能性の高いリフト底を掘削して連続コアを採取し、それを多角的に研究して後期新生代（16 Ma以降）の東アフリカ大地溝帯における環境変遷史を明らかにすることである。同時に地表における地質調査を通じて、リフトの構造運動史や莫大なマグマを放出した洪水的火山活動の起源、およびそれらが地球環境に及ぼした影響を明らかにする。さらに、コア解析から得られたデータと合わせ、東アフリカにおける総合的な環境変遷史を構築した上で数値実験を行うことにより、環境変遷のメカニズム解明に向けてのアプローチも試みる。本申請では、従来行われてきた重力探査や屈折法地震探査に加え、パイロサイズ震源を用いた分解能の良い反射法地震探査を実施することで、より詳細なリフト盆地の構造解析が可能となる。また2,000 mに及ぶ不攪乱の連続コア（時代的には16 Ma以降の）試料を採取する試みは、これまで東アフリカ大地溝帯では行われていない。この計画が実行されれば、東アフリカ大地溝帯の構造発達史の解明に大きく貢献することはいうまでもなく、同時に霊長類から人類へと進化する人類誕生時の環境変動を、世界で初めて連続量として明らかにすることが出来る。

近年、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定から、洪水性火山活動が短期間に起こったとされるようになり、この活動の地球環境への影響についても検討されている。しかし、人類誕生直前のケニア・

リフトにおいて、莫大な噴出量で、かつ広域的な活動をしたホノライトについては、年代幅が大きいので放射年代の見直しが必要である。また揮発性物質などの放出量の見積りを行ったような研究はない。さらにカーボナタイトは、噴出量は少ないものの、揮発性物質、特に CO_2 を多く含むため地球環境、生物環境への影響が大きいので、その噴出量を定量的に見積もることは意義あることである。

海域においては、東京大学の玉木賢策氏、諏訪元氏、兵庫県博の加藤茂弘氏（日本以外ではP. B. deMenocal氏やT. D. White氏他4名が加わっている）が中心となって、アデン湾（政情が許せばソマリア沖）の深海底掘削計画が国際深海底掘削プロジェクト（ODP）に申請されていた。ODPは2003年9月30日に終了したが、それを発展させたIODPへと引き継がれて申請されていくことであろう。深海底掘削では地球規模の気候・海洋環境が復元される他、東アフリカ北部の乾湿変動の歴史が明らかにされる。ケニア・リフトの掘削調査の成果は深海底掘削調査の成果と比較研究され、東アフリカにおける人類誕生と古人類進化に関与した環境変動を、地球規模及び地域的スケールに分けて具体的に検討できることになり、多くの新しい知見が得られることが期待される。一方、東アフリカを噴出源とする火山灰は、東アフリカ大地溝帯でUターンし東に向かうソマリジェット気流に乗り、ソマリア沖に降下する。ケニア・リフト北部に堆積した火山灰とソマリア沖の深海底堆積物から見出された火山灰を同定・対比することにより、東アフリカ大地溝帯における火山活動の年代と構造発達史の全体像が見えてくるのは間違いない。

8. 地表付近の立体的な研究成果と掘削コアからの連続的情報の総合化と環境変遷史の解読

以上の1~7の課題を追求し、それらを総合化する中で、地球史最大の謎である「ヒトの発生と進化：ヒトが何時、どこで、どのようにして発生し、進化していったのか？」、そして「環境変化がヒトの発生と初期の進化過程において、いかなる役割を果たしたのか？」という課題に肉薄していきたい。霊長類や人類の進化史上における環境変化の役割、とりわけ霊長類のホミニゼーション（ヒト化）に果たした環境変化の役割を解く鍵は東アフリカ大地溝帯周辺や地溝帯底の堆積物中にある。進化した初期人類はやがて発生地であるアフリカを離れ、多様な環境に適応しつつ世界へと放散していく。この末裔である我々はそのルーツを明らかにする責務を負っている。

おわりに

この小文は飯泉滋教授、山内靖喜教授の退官記念に寄せたものである。沢田は両教授の主宰する団体研究に大学院生の頃より参加し、まさに自然教室の中で育った。地質学は教科書では学べない多くのことをフィールド調査を通じて学ぶものである。両教授は常に軸足を大地におろし、そこをベースにして教育と研究を進めてきた。現在の地球資源環境学部の地質学的基礎をつくり、多くの学生や弟子を世に送り出してきた。我々の存在意義は地質学にあり、それがなくなった

時に、現在の地球資源環境学科も消滅すると思う。それはそれで時代の要請であるなら仕方がないのかもしれないが、日本列島のような地震と火山災害の直接的な影響を受ける地域に住んでいる我々にとって、地質学はますます必要なものでありこそすれ、捨て去るものではないことは明らかである。

このケニアにおける国際プロジェクトには多くの島根大学関係者が参加している。島根大学地質学科、地球資源環境学科は多岐に亘る専門家を育て、また、故中山勝博さんを始めスタッフとして迎えて来た結果といえる。アフリカ、アラビア半島の地質調査には多くの島根大学学生が私費で参加しているが、一部は共同研究者として論文を公表している。最初にアフリカ調査に同行したのは折橋裕二氏（現東京大学地震研究所）である。彼は学部の2年生の時からケニア、ザイール（現コンゴ共和国）の調査に2回参加し、卒業論文はイエメンで行い、それが彼の博士論文となった（Orihashi et al., 1998）。東アフリカ大地溝帯をテーマとした博士論文（Kabeto, 2001 MS）、修士論文（実吉, 2000 MS; Yogolelo, 2003 MS）や卒業論文（三浦 環, 2001 MS）の研究も行われている。以上の他に、調査には、小林伸治氏、糸井重樹氏、麻原慶憲氏、森山哲朗氏、福江美智子さん、松野貴子さん、館野満美子さん、櫻根知夏子さん、藤井宏和氏、今井雅浩氏、南出幸代さん、田山良一君、松田優子さんが参加した。彼らが広大なアフリカから何を学んだのかは人それぞれに異なるであろうが、何かの形で彼らの財産となれば幸いである。

なお、レビューの一部は沢田ほか（2001 a）から引用した。

謝 辞

ケニアの調査にあたっては常に現地の多くのケニア人（特にトルカナ、ポゴット、カレンジンの人々）、National Museum of Kenya, Community Museum of Kenya, The University of Nairobi, 日本学術振興会ナイロビ研究連絡センターにサポートして頂いている。上記の島根大学学生とOB、OGには地質調査や試料採取を手伝って頂いた。諏訪兼位名古屋大学名誉教授・前日本福祉大学学長、諏訪 元東京大学助教授、星野光雄名古屋大学教授、朝日新聞社の河合信和氏、ナイロビ大学のJ. P. Patel教授、ボツワナ大学のKampunzu教授にはアフリカの地球科学や古人類学について教えて頂いている。島根大学のBarry Roser博士には英文要旨をチェックして頂いた。このプロジェクトは日本学術振興会科学研究費補助金海外学術調査（代表：沢田順弘）によって財政的にサポートされている。以上の方々、機関に深く感謝する。

参 考 文 献

Aguire, E. and Leakey, P., 1974, Nakali: nueva fauna de Hipparion del Rift Valley de Kenya. *Estudios Geologicos*, **30**, 219-227.
Altherr, R., Henjes-Kunst, F. and Baumann, A., 1990, Asthenosphere versus lithosphere as possible sources for basaltic magmas erupted during formation of the Red Sea: constraints from Sr, Pb and Nd isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **96**, 269-286.
Baker, B. H., Williams, L. A. J., Miller, J. A. and Fitch, F. J., 1971,

Sequence and geochronology of the Kenya Rift volcanics. *Tectonophysics*, **11**, 191-215.
Baker, B.H., Mohr, P.A. and Williams, L. A. J., 1972, Geology of the eastern rift system of Africa. *Geol. Soc. Am., Spec. Paper*, No. 136, 67 p.
Baker, B. H., Crossley, R. and Goles, C. G., 1978, Tectonic and magmatic evolution of the southern part of the Kenya rift valley. In Neumann, E. R. and I. B. Ramberg, eds., *Petrology and geochemistry of continental rifts*. Holl. Reidel Publ., 29-50.
Baker, J., Snee, L. and Menzies, M., 1996, A brief Oligocene period of flood volcanism in Yemen: implications for the duration and rate of continental flood volcanism at the Afro-Arabian triple junction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **138**, 39-55.
Barrat, J.-A., Jahn, B.M., Joron, J.-L., Auvray, B. and Hamdi, H., 1990, Mantle heterogeneity in northeastern Africa: evidence from Nd isotopic compositions and hygromagmaphile element geochemistry of basaltic rocks from the Gulf of Tadjoura and southern Red Sea regions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **101**, 233-247.
Benefit, B. R., 1999, *Victoriapithecus*: the key to Old World monkey and catarrhine origins. *Evol. Anthropol.*, **7**, 155-174.
Benefit, B. R. and McCrossin, M. L., 1989, New primate fossils from the middle Miocene of Maboko Island, Kenya. *Jour. Hum. Evol.*, **18**, 493-497.
Behrensmeyer, A. K., Deino, A. L., Hill, A., Kingston, J. D. and Saunders, J. J., 2002, Geology and geochronology of the middle Miocene Kipsaramon site complex, Muruyur Beds, Tugen Hills, Kenya. *Jour. Hum. Evol.*, **42**, 11-38.
Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, C. C. and Aubry, III, M. - P., 1995, A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M.P. and Hardenbol, J., eds., *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation*, *SEPM Special Publication* **54**, 129-212.
Birt, C.S., Maguire, P.K.H., Khan, M.A., Thybo, H., Keller, G.R. and Patel, J., 1997, The influence of pre-existing structures on the evolution of the southern Kenya Rift Valley - evidence from seismic and gravity studies. *Tectonophysics*, **278**, 211-242.
Bishop, W. W., Miller, J. A. and Fitch, F. W., 1969, New potassium-argon age determinations relevant to the Miocene fossil mammal sequence in East Africa. *Amer. Jour. Sci.*, **267**, 669-699.
Brunet, M., Guy, F., Pilbeam, D., Mackaya, H. T., Likius, A., Aounta, D., Beauvillain, A., Blondel, C., Bocherens, H., Bolosserie, J. R., de Bonis, L., Coppens, Y., Dejax, J., Denys, C., Durringer, P., Elsenmann, V., Fanone, G., Fronty, P., Geraads, D., Lehmann, T., Lhoreau, F., DeLeon M. P., Rage, J. C., Sapanet, M., Schuster, M., Sudre, J., Tassy, P., Valentin, X., Vignaud, P., Viriot, L., Zazzo, A. and Zollikofer, C., 2002, A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature*, **418**, 145-151.
Cerling, T. E., Harris, J. M., MacFadden, B. J., Leakey, M. G., Quade, J., Eisenmann, V. and Ehleringer, J. R., 1997, Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, **389**, 153-158.
Coppens, Y., 1994, イーストサイド物語 人類の故郷を求めて（諏訪元訳）（原題：East side story: The origin of humankind. *Sci. Amer.*, May 1994）。日経サイエンス, 7月号, 92-100.
Corruccini, R. S. and McHenry H. M., 2001, Knuckle-walking hominid ancestors. *Jour. Hum. Evol.*, **40**, 507-511.
Dainton, M., 2001, Did our ancestors knuckle-walk? *Nature*, **410**, 324-325.
Dawson, J. B., 1962, Sodium carbonate lavas from Oldoinyo Lengai, Tanganyika. *Nature*, **195**, 1075-1076.
Deino, A. L., Tauxe, L., Monaghan, M. and Hill, A., 2002, ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and paleomagnetic stratigraphy of the Lukeino and lower Chemeron Formations at Tabarin and Kapcheberek, Tugen Hills, Kenya. *Jour. Hum. Evol.*, **42**, 117-140.
Dunbar, J. A. and Sawyer, D. S., 1988, Continental rifting at pre-existing lithosphere weakness, *Nature*, **333**, 450-452.
Dunkelman, T.J., Rosendahl, B.R. and Karson, J.A., 1989, Structure and stratigraphy of Turkana rift from seismic reflection date. *Jour. African Earth Sci.*, **8**, 489-510.
Ebinger, C.J., 1989, Tectonic development of the western branch of the East African rift system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **101**, 885-903.
Ebinger, C.J. and Sleep, N.H., 1998, Cenozoic magmatism throughout east

- Africa resulting from impact of a single plume. *Nature*, **395**, 788-791.
- Insele, G., 1992, *Sedimentary Basins*. Springer-Verlag, 629 p.
- Foster, D. and Gleadow, A. J. W., 1992, The morphotectonic evolution of rift-margin mountains in central Kenya: Constraints from apatite fission-track thermochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 157-171.
- Franz, G., Steiner, G., Gesine, Volker, F., Pudlo, D. and Hammerschmidt, K., 1999, Plume Related alkaline magmatism in central Africa-the Meidob Hills (W Sudan). *Chem. Geol.*, **157**, 27-47.
- Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M. and Inoue, H., 1994, Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **100**, 4-23.
- George, R., 1997, Thermal and tectonic controls on magmatism in the Ethiopian Province. Ph.D. thesis, Open Univ. 182 p.
- George, R., Rogers, N. and Kelly, S., 1998, Earliest magmatism in Ethiopia: Evidence for two mantle plumes in one flood basalt province. *Geology*, **26**, 923-926.
- Haile-Selassie Y., 2001, Late Miocene hominids from the Middle Awash, Ethiopia. *Nature*, **412**, 178-181.
- Hamaguchi, H., Nishimura, T. and Zana, N., 1992, Process of the 1977 Nyiragongo eruption inferred from the analysis of long-period earthquakes and volcanic tremors. *Tectonophysics*, **209**, 241-254.
- Harris, J. M. and White, T. D., 1979, Evolution of the Plio-Pleistocene African suidae. *Trans. Amer. Philosophical Soc.*, **69**, 128.
- Hay, D. E. and Wendlandt, R. F., 1995 a, The origin of Kenya rift plateau-type flood phonolites: Results of high-pressure / high-temperature experiments in the systems phonolite-H₂O and phonolite-H₂O-CO₂. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 401-410.
- Hay, D. E., Wendlandt, R. F. and Wendlandt, E. D., 1995 b, The origin of Kenya rift plateau-type flood phonolites: Evidence from geochemical studies for fusion of lower crust modified by alkali basaltic magmatism. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 411-422.
- Hay, D. E., Wendlandt, R. F. and Keller, G. R., 1995 c, The origin of Kenya rift plateau-type flood phonolites: Integrated petrologic and geophysical constraints on the evolution of the crust and upper mantle beneath the Kenya Rift. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 10,549-10,557.
- Hayashi, S., Kasahara, M., Tanaka, K., Hamaguchi, H. and Zana, N., 1992, Major element chemistry of recent eruptive products from Nyamuragira volcano, Africa (1976-1989). *Tectonophysics*, **209**, 273-276.
- Hendrie, D. B., Kusznir, N. J., Morley, C. K. and Ebinger, C. J., 1994, Cenozoic extension in northern Kenya: a quantitative model of rift basin development in the Turkana region. *Tectonophysics*, **236**, 409-438.
- Hill, A., Behrensmeier, A. K., Brown, B., Deino, A., Rose, M., Saunders, J., Ward, S. and Winkler, A., 1991, Kipsaramon: a lower Miocene hominoid site in the Tugen Hills, Baringo District, Kenya. *Jour. Hum. Evol.*, **20**, 67-75.
- Hofmann, C., Courtillot, V., Feraud, G., Rochette, P., Yirgu, G., Ketefo, E. and Pik, R., 1997, Timing of the Ethiopian flood basalt event and implications for plume birth and global change. *Nature*, **389**, 838-840.
- Ishida, H. and Pickford, M., 1997, A new Late Miocene hominoid from Kenya: *Samburupithecus kiptalami* gen. C. R. Acad. Sci. Paris, **325**, 823-829.
- Itaya, T. and Sawada, Y., 1987, K-Ar ages of volcanic rocks in the Samburu Hills area, Northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 5, 27-45.
- Kabeto, K., 2001 MS, Petrogenesis of bimodal volcanic rocks in the Kenyan and Ethiopian Rifts: Evidence for source mantle variations, crustal contributions, and basement control on magmatism. Ph.D. thesis, Tottori Univ. 202 p.
- Kabeto, K., Sawada, Y., Iizumi, S., and Wakatsuki, T., 2001 a, Mantle sources and magma-crust interactions in volcanic rocks from the northern Kenya Rift: Geochemical evidence. *Lithos*, **56**, 111-139.
- Kabeto, K., Sawada, Y. and Wakatsuki, T., 2001 b, Different evolution trends in alkaline evolved lavas from the northern Kenya. *Jour. African Earth Sci.*, **32**, 419-433.
- Kampunzu, A. B. and Mohr, P., 1991, Magmatic evolution and petrogenesis in the East African Rift System. In Kampunzu, A. B. and R. T. Lubala, eds., *Magmatism in extensional structural settings*. Springer-Verlag, Berlin, 85-136.
- Kawamura, Y. and Nakaya, H., 1984, Thryonomid Rodent from the late Miocene Namurungule Formation, Samburu Hills, Northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 2, 133-139.
- Kawamura, Y. and Nakaya, H., 1987, Additional materials of the late Miocene Rodents from the Namurungule Formation of Samburu Hills, Northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 5, 131-139, pl. 1.
- Kingston, J. D. 1999, Environmental determinants in early hominid evolution: issues and evidence from the Tugen Hills, Kenya. In Andrews, P. and Banham, P., eds., *Late Cenozoic Environments and Hominid Evolution: a tribute to Bill Bishop*. Geol. Soc. London, 69-84.
- 国松 豊, 2002, ヒト上科の出現—中新世におけるヒト上科の展開—, 地学雑誌, **111**, 798-815.
- Lovejoy C. O., Heiple K. G. and Meindl R. S., 2001, Did our ancestor knuckle-walk? *Nature*, **410**, 325-326.
- Makinouchi, T., Koyaguchi, T., Matsuda T., Mitsushio, H. and Ishida S., 1984, Geology of the Nachola area and the Smburu Hills, west of Baragoi, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no.2, 15-44.
- Matsuda, T., Torii, M., Koyaguchi, T., Makinouchi, T., Mitsushio H. and Ishida, S., 1984, fission-track, K-Ar age determinations and palaeomagnetic measurements of Miocene volcanic rocks in the western area of Baragoi, northern Kenya: ages of hominoids. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 2, 57-66.
- McCrossin, M. L. and Benefit, B. R., 1993, Recently discovered *Kenyapithecus mandible* and its implications for ape and human origins. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **90**, 1962-1966.
- Mechie, J., Keller, G.R., Prodehl, C., Khan, M.A. and Gaciri, S.J., 1997, A model for the structure, composition and evolution of the Kenya rift. *Tectonophysics*, **278**, 95-119.
- Miller, K. G., Fairbanks, R. G. and Mountain, G. S., 1987, Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion. *Paleoceanography*, **2**, 1-19.
- 三浦 環, 2001 MS, ケニア・リフト, ツゲン・ヒルズにおける最上部中新統の地質と年代. 鳥根大学総合理工学部地球資源環境学科, 卒業論文, 46 p.
- Morley, C. K., 1999, Patterns of displacement along large normal faults: Implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa. *AAPG Bulletin*, **83**, 613-634.
- Morley, C. K., 1999 ed., *Geoscience of rift systems - Evolution of East Africa*. AAPG Studies in Geology #44. Bulletin, 242 p with Appendix.
- Morley, C. K., Wescott, W. A., Sone, D. M., Happer, R. M., Wigger, S. T. and Karanja, F. M., 1992, Tectonic evolution of the northern Kenyan Rift. *Jour. Geol. Soc. London*, **149**, 333-348.
- Mugisha, F., Ebinger, C. J., Strecker, M. and Pope, D., 1997, Two-stage rifting in the Kenya rift: implications for half-graben models. *Tectonophysics*, **278**, 63-81.
- 中野良彦, 辻川寛, 仲谷英夫, 中務真人, 石田英実, 2001, ケニア北部, サンプルヒルズ地域から発見された足跡化石について. アフリカ研究, **59**, 101-114.
- Nakatsukasa, M., Yamanaka, A., Kunimatsu, Y., Shimizu, D. and Ishida, H., 1998, A newly discovered *Kenyapithecus* skeleton and its implication for evolution of positional behavior in Miocene East African hominoids. *Jour. Hum. Evol.*, **34**, 657-664.
- 仲谷英夫, 1987, アフリカ(サハラ以南)の新第三紀哺乳動物群. アフリカ研究, **30**, 107-115.
- Nakaya, H., 1993, Les faunes de mammifères du Miocène supérieur de Samburu Hills, Kenya Afrique de l'Est et l'environnement des préhominidés. *l'Anthropologie*, tome 97, no. 1, 9-16.
- Nakaya, H., 1994, Faunal change of Late Miocene Africa and Eurasia, mammalian fauna from the Namurungule Formation, Samburu Hills, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 20, 112.
- Nakaya, H., 1997, Evolution of the Late Cenozoic mammalian fauna of Sub-Saharan Africa. In Fukui, K., Kurimoto, E. and Shigeta M., eds., *Ethiopia in Broader Perspective*, vol. I, 405-420, Shokado, Kyoto.
- Nakaya H., Pickford, M., Nakano, Y. and Ishida, H., 1984, The late Miocene large mammal fauna from the Namurungule Formation, Samburu Hills, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 2, 87-131, 9 pls.
- Nakaya, H., Pickford, M., Yasui, K. and Nakano, Y., 1987, Additional large

- mammalian fauna from the Namurungule Formation, Samburu Hills, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 5, 79-129, pls 1-10.
- Nakaya, H. and Watabe, M., 1990, Hipparion from the upper Miocene Namurungule Formation, Samburu Hills, Kenya, phylogenetic significance of newly discovered skull. *Geobios*, **23**, 195-219.
- Omar, G. I. and Steckler, M. S., 1995, Fission track evidence on the initial rifting of the Red Sea: Two pulses, no propagation. *Science*, **270**, 1341-1345.
- Orihashi, Y., Al-Jailani, A. and Nagao, K., 1998, Dispersion of the Afar plume: Implications from the spatiotemporal distribution of the Late Miocene to recent volcanics, southwestern Arabian Peninsula. *Gondwana Res.*, **2**, 221-234.
- Pickford, M., 1986 a, Sedimentation and fossil preservation in the Nyanza Rift System, Kenya. In Frostick, L. E., Renaut, R. W., Reid, I. and Tielelin, J. J., eds, *Sedimentation in the African Rifts. Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **25**, 345-362.
- Pickford M., 1986 b, Cainozoic paleontological sites of western Kenya. *Müncher Geowiss. Abhandl. Reihe A, Geol. und Paläontol.*, **8**, 151 p.
- Pickford, M., 1988, Geology and fauna of the middle Miocene hominoid site at Muruyur, Baringo district, Kenya. *Jour. Hum. Evol.*, **3**, 381-390.
- Pickford, M., 1999, The geology and palaeobiology of the Tugen Hills, Kenya. *Community Museums of Kenya*, 72 p.
- Pickford, M., Ishida, H., Nakano, Y. and Nakaya, H., 1984 a, Fossiliferous localities of the Nachola-Samburu Hills area, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 2, 45-56.
- Pickford, M., Nakaya, H., Ishida, H. and Nakano Y., 1984 b, The biostratigraphic analyses of the Faunas of the Nachola area and Samburu Hills, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 2, 67-72.
- Pickford, M., Ishida, H., Nakano, Y. and Yasui, K., 1987, The Middle Miocene fauna from the Nachola and Aka Aiteputh Formations, northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, no. 5, 141-154.
- Pickford, M. and Senut, B., 2001, The geological and faunal context of Late Miocene hominid remains from Lukeino, Kenya. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **332**, 145-152.
- Pickford, M., Senut, B., Gommery, D. and Treil, J., 2002, Bipedalism in *Orrorin tugenensis* revealed by its femora. *C. R. Palevol*, **1**, 191-203.
- Raymo, M. E., Ruddiman, W. F. and Froelich, P. N., 1988, Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles. *Geology*, **16**, 649-653.
- Richmond, B. and Strait, D., 2000, Evidence that humans evolved from a knuckle-walking ancestor. *Nature*, **404**, 382-385
- Richmond, B. G. and Strait D. S., 2001 a, Reply: Did our ancestors knuckle-walk? *Nature*, **410**, 326.
- Richmond, B. G. and Strait D. S., 2001 b, Knuckle-walking hominid ancestor: a reply to Corruccini and McHenry. *Jour. Hum. Evol.* **40**, 513-520.
- Rogers, N., Macdonald, R., Fitton, J.G., George, R., Smith, M. and Barreiro, B., 2000, Two mantle plume beneath the East African rift system: Sr, Nd and Pb isotope evidence from Kenya Rift basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **176**, 387-400.
- Rosendahl, B.R., Reynolds, D.J., Lorber, P.M., Burgess, C.F., McGill, J., Scott, D. Lambiase, J.J. and Derksen, S.J., 1986, Structure expression of rifting: lessons from Lake Tanganyika, Africa. In Frostick, L.E., Renaut, R.W., Reid, I. and Tiercelin, J. J., eds., *Sedimentation in the African Rifts, Geol. Soc. Spec. Publ.*, **25**, 29-43.
- 実吉玄貴, 2000 MS, ケニアリフトにおける中新世の堆積過程と脊椎動物化石のタフオノミー. 鳥根大学大学院理学研究科(地質学専攻)修士論文. 61 p.
- Sawada, Y., Tateishi, M. and Ishida, S., 1987, Geology of the Neogene System in and around the Samburu Hills, Northern Kenya. *African Study Monogr., Supple. Issue*, No.5, 7-26.
- Sawada, Y., Pickford M., Itaya T., Makinouchi T., Tateishi M., Kabeto K., Ishida S. and Ishida H., 1998, K-Ar ages of Miocene Hominoidea (*Kenyapithecus* and *Samburupithecus*) from Samburu Hills, Northern Kenya. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **326**, 445-451.
- 沢田順弘・Kurukura Kabeto・中山勝博, 2001 a, 東アフリカ大地溝帯の地球科学的研究: 回顧と展望. *アフリカ研究*, **58**, 11-18.
- 沢田順弘・中山勝博・実吉玄貴・山中淳之・国松 豊・中務真人・中野良彦・辻川 寛・清水大輔・高野 智・荻原直道・Pickford, M.・石田英美, 2001 b, 火山泥流に埋もれたナチョラピテクス群: ケニア・リフト北部における 1500 万年前のアルメロの悲劇. 鳥根大学地球資源環境学研究报告, **20**, 13-23.
- Sawada, Y., Pickford, M., Senut, B., Itaya, T., Hyodo, M., Miura, T., Kashine, C., Chujo, T. and Fujii, H., 2002, The age of *Orrorin tugenensis*, an early hominid from the Tugen Hills, Kenya. *C. R. Palevol.*, **1**, 293-303.
- Schilling, J.G., Kingsley, R.H., Hanan, B.B. and McCully, B.L., 1992, Nd-Sr-Pb isotopic variations along the Gulf of Aden: Evidence for mantle plume-continent lithosphere. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 10927-10966.
- Schluter, T., 1997, Geology of East Africa. Gebruder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 484 p.
- Senog, A. M. G., and Burke, K. 1978. Relative timing of rifting and volcanism on Earth and its tectonic implications. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 419-421.
- Senog, A. M. C., 1995, Sedimentation and Tectonics of Fossil Rifts. In Busby, C. J. and Ingersoll, R. V., eds., *Tectonics of Sedimentary Basins*, Blackwell Sci. Publ., Oxford, 53-117.
- Senut B., Pickford M., Gommery D., Mein P., Cheboi K. and Coppens Y., 2001, First hominid from the Miocene (Lukeino Formation, Kenya). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **332**, 137-144.
- Steininger, F., Bernor, R. L. and Fahlbusch, V., 1989, European Neogene marine/continental chronologic correlations. In Linsay, E. H., Fahlbusch, V. and Mein, P., eds, *European Neogene Mammal Chronology*, NATO ASI series A: Life Sciences, vol. 180: 15-46, Plenum Press, New York.
- Steininger, F. F., Berggren, W. A., Kent, D. V., Bernor, R. L., Agust, S. and Sen, J., 1996, Circum-Mediterranean Neogene (Miocene and Pliocene) marine-continental chronologic correlations of European Mammal Units. In Bernor, R. L., Fahlbusch, V. and Mittmann, H.W, eds, *The Evolution of Western Eurasian Neogene Mammal Faunas*, 7-46, Columbia University Press, New York.
- Stewart, K. and Rogers, N., 1996, Mantle plume and Lithosphere contributions to basalts from southern Ethiopia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **139**, 195-211.
- Su, W. J., Woodward, R. L. and Dziewonski, A. M., 1994, Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 6945-6981.
- Sun, S. -S. and McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes. In Saunders, A. D. and Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., London, **42**, 313-345.
- Suwa, K., Oana, S., Wada, H. and Osaki, S., 1975, Isotope geochemistry and petrology of African carbonatites. *Phys. Chem. Earth*, **9**, 735-745.
- Tatsumi, Y. and Kimura, N., 1991, Secular variation of basalt chemistry in the Kenya Rift: evidence for the pulsing of asthenospheric upwelling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **104**, 99-113.
- Tatsumi, Y., Kimura, N., Itaya, T., Koyaguchi, T. and Suwa, K., 1991, Intermittent upwelling of asthenosphere beneath the Gregory Rift, Kenya. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1111-1114.
- Tiercelin, J.-J. and Lezzar, K.-E., 2002, A 300 million years history of rift lakes in Central and East Africa: An update broad review. In Odada, E.O. and Olago, D.O., eds., *The East African Great lakes: limnology, palaeolimnology and Biodiversity*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 3-92.
- Tsujikawa, H., 2003 MS, The Late Miocene large mammal fauna and palaeoenvironment in the Samburu Hills area, northern Kenya. PhD thesis of Department of Zoology, Graduate School of Science, Kyoto University. 120 p.
- Wolpoff, M. H., Senut, B., Pickford, M. and Hawks, J., 2002, *Sahelanthropus* or '*Sahelpithecus*'? *Nature*, 2002, **419**, 581-582. (Brunet et al. の reply を含む)
- Wagner, M., Altherr, R. and van den Haute, P., 1992, Apatite fission-track analysis of Kenyan basement rocks: constraints on the thermotectonic evolution of the Kenya dome: A reconnaissance study. *Tectonophysics*, **204**, 93-110.
- Ward, S., Brown, N. B., Hill, A., Kelly, J. and Downs, W., 1999, *Equatorius*, a new hominoid genus from the middle Miocene of Kenya.

- Science*, **285**, 1382-1386.
- White, R. and McKenzie, D., 1989, Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 7685-7729.
- Williamson, P. G., and Savage, R. J. G., 1986, Early rift sedimentation in the Turkana basin, northern Kenya. In Frostick, L. E., Renaut, R. W., Reid, I., and Tiercelin, J. J., eds., *Sedimentation in the African Rifts*. Geol. Soc. Spec. Publ., **25**, 267-283.
- 矢入憲二, 1974, アフリカ大地溝帯にみられる雁行断層系. アフリカ研究, **14**, 21-46.
- Yogolelo, M., 2003 MS, Middle Miocene flood volcanism in the Kenya Rift: geology, age, and geochemical characteristics. Masters Thesis, Course of Geoscience, Graduate School of Sci., Shimane Univ. 95 p.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomass, E. and Billups, K., 2001, Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**, 686-693.
- Zeyen, H., Volker, F., Wehrle, V., Fuchs, K., Sobolev, S. V. and Altherr, R., 1997, Styles of continental rifting: crust-mantle detachment and mantle plumes. *Tectonophysics.*, **278**, 329-352.
- Zhang, Y. S. and Tanimoto, T., 1993, High-resolution global upper mantle structure and plate tectonics. *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 9793-9823.
- Zindler, A. and Hart, S., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.
- Zumbo, V., Feraud, G., Bertrand, H. and Chazot, G., 1995, ⁴⁰Ar/³⁹Ar chronology of Tertiary magmatic activity in Southern Yemen during the early Red Sea-Aden Rifting. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **65**, 265-279.

(受付：2003年11月28日，受理：2003年12月9日)