

「ヒマラヤの上昇と人類の進化」再考 —第三紀末から第四紀におけるテクトニクス・気候生態系・人類進化をめぐって—

安成哲三

名古屋大学地球水循環研究センター

本稿では第三紀末から第四紀にかけてのヒマラヤ・チベット山塊の上昇と、それに伴う気候・生態系変化が人類の起源と進化にどう影響を与えてきたかを、最近 30 年の地球科学、人類学の研究をレビューしつつ、考察を試みた。チベット・ヒマラヤ山塊の上昇は、第三紀末からアジアモンスーン気候と西南アジアから北アフリカにかけての乾燥気候を強化していった。特に 5～10Ma (Ma: 百万年前) 頃の、東アフリカの大地溝帯の形成による赤道東アフリカの気候の乾燥化と草原生態系の拡大は、原人類の起源に重要な意味を持っていることが明らかとなった。チベット・ヒマラヤ山塊の上昇に伴うモンスーン降水の増加は山塊の風化・侵食過程を通して大気中の CO₂ 濃度減少を引き起こし、地球気候を第三紀から第四紀の寒冷な氷河時代へと導入していった。CO₂ 濃度の低い大気環境による C₄ 植物の草原の拡大は有蹄類の動物の多様な進化を促し、このことは原人類の進化にも大きく影響したと考えられる。第四紀は氷床の拡大縮小を伴う 4 万年から 10 万年周期の激しい気候変動の時代となったが、チベット高原における雪氷の拡大縮小は、気候変動を増幅する役割を持っていた可能性が高い。氷期サイクルに伴い東アフリカの湿潤・乾燥気候の分布が大きく変動したことは、原人類の更なる進化とユーラシアへの移動を促す重要な契機となった。第四紀の寒冷な気候とアジアモンスーンの弱体化に伴う中央アジア・西南アジア地域の広大な草原・ステップの形成は、多様な草食性動物の棲息の場となったが、この地域に移動した新人類の進化にとって、これらの草食性動物との共存関係は重要な意味を持つと考えられる。最終氷期が終わった 10Ka (Ka: 千年前) 1 万年前以降、温暖で比較的安定な完新世の気候の下で、チベット・ヒマラヤ山塊の東と西で、人類はイネと麦類を中心とする農耕を始めて新たな文明の時代に入ったが、同時に地球環境を人類自らが大きく変化させるといふ新たな問題を生み出す時代の始まりにもなっている。

1 はじめに

今から 33 年前、大学院博士課程を終え、京大東南アジア研究センターの助手になったばかりの私は、京大霊長類研究所で主催されていた「ホミニゼーション研究会」で人類の進化にからんだ気候変化の話しを何かせよと、探検部のある先輩からいきなり言われた。大学院ではヒマラヤの気候と氷河の研究に明け暮れていたが、まだ学位もない駆け出しの研究者の卵である。私は大変戸惑った。しかし、これは自分にとっていい勉強の機会であると聞き直って、覚悟を決めて「ヒマラヤの上昇とモンスーン気候の成立」の話をした。当日の研究会の最前列には、今西錦司先生も陣取っておられ、「ヒマラヤがそんなに地球の気候を決めとんのか？」というような、半ば呆れたふうな質

問をされたと記憶している。この時の報告は、「生物科学」にまとめた¹⁾。この論文の冒頭に、「ラマピテクスの化石がヒマラヤの麓、シワリク丘陵で発見されたということはまことに示唆的である。この化石人類をもって人類の歴史が開かれたとするならば、われわれの現在住む地球の気候体制もまた、ヒマラヤの上昇とともにほぼ同じ頃(第三紀末)より形成が始まったと考えられるからである。」と私はイントロで書いている。

しかし、その後 30 年余、人類の起源と進化に関する研究は大発展しており、ラマピテクスはむしろオランウータンの祖先で人類の祖先ではないこと、人類の起源は、分子時計や DNA 分析などの新しい手法も加わり、大きく進展した。一方で、このような人類の起源と進化の舞台となった第三

紀末から第四紀のヒマラヤ・チベット山塊の上昇やアフリカ地域のテクトニック変化と気候・環境変化についての地球科学的研究も、安定同位体分析や気候モデルによる数値実験なども含め、飛躍的に進んだ。ちなみに、恐竜類が絶滅し、哺乳動物類や鳥類が適応放散を開始した65Ma以降は、新生代とよばれており、新生代は第三紀と第四紀に分けられている。第四紀は、人類が活動を開始した時代と定義されており、その開始時期は、約2.6Maとされている。

そこで本稿では、チベット高原・ヒマラヤ山脈を中心とする地球規模の山岳の隆起が重要な役割を果たしてきた第三紀末から第四紀にかけての気候・生態系の変化が、人類の起源と進化をどのように規定し、あるいは促したのか、地球科学、古気候学・古生態学（過去の気候や動植物相・生態系を研究する分野）、人類学分野での最近の成果を踏まえつつ、改めて再考を試みる。

2 人類の起源・進化と環境変化—なぜアフリカか

チベット・ヒマラヤの上昇に関するテクトニクス研究で有名な Molnar は、第三紀から第四紀にかけての地球規模での山岳の隆起と人類の起源・進化の連関を初めて指摘した²⁾。図1に、第三紀始めの60Maから現在に至るヒマラヤ・チベット山塊の平均高度変化と、第三紀末のMa以降の（猿人アウストラロピテクスから新人のホモサピエン

スに至る）人類の頭脳容量の変化を示す。Molnar はこれらの図がいずれも特に第三紀末以降、現在に近くなるほど急激な増加を示しており、山岳の上昇に代表される地球規模のテクトニックな変化と人類の進化が、単なる偶然ではなく、密接に関係して起こっている可能性を示唆した。もちろん、地球科学、人類学双方の最近の成果は、地球のテクトニック変化とそれに関連した気候・環境の変化と人類進化の関係が、後述するように、それほど単純でないことも示している。

人類の祖先は数百万年前に猿類から分岐した猿人（アウストラロピテクス）に始まり、原人、旧人（ネアンデルタール人）、そして私たちの直接の祖先として十数万年前に出現した新人（ホモサピエン）に分けられてきた。最近の人類学はこれらの区別についても再考がされているが、本稿では、この問題そのものには立ち入らず、原人・新人などの呼称はそのまま用いている。むしろ、ここで問題にしたいのは、猿人に始まり、原人から新人へと至る進化の舞台が、なぜアフリカだったのかということである。人類が熱帯雨林に棲息する猿の仲間から進化したとするなら、南米や東南アジアが人類の起源地であってもいいはずである。ここで第三紀初め（50Ma）と山岳の上昇が開始されだした頃の第三紀後半（20Ma）の海陸分布をみてみよう（図2）。第三紀始めには、どの大陸にも赤道直下周辺にはすでに熱帯雨林があり、猿類は棲息していたはずである。ただ、南米

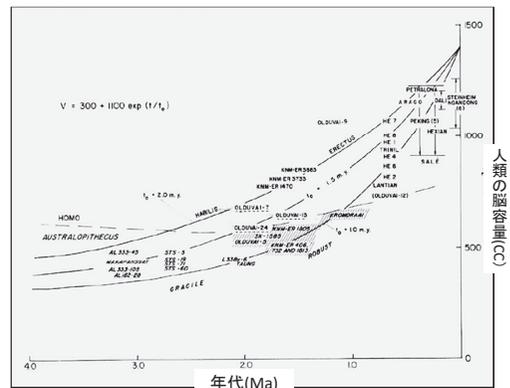
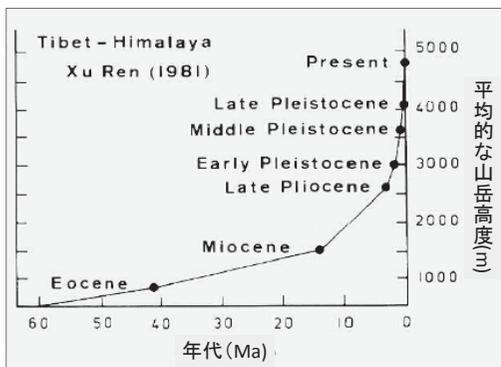


図1 (左) 第三紀後半 (60Ma) 以降のチベット・ヒマラヤ山塊の平均高度と、(右) 第三紀末 (4Ma) 以降の人類の頭脳の容量の変化。実線はいくつかの推定にもとづく変化、破線は Australopithecus 属と Homo 属を分けている (Molnar, 1990 を改変)。

大陸は、現在のパナマ地峡付近がまだ海であり、北米大陸とは切り離されており、アフリカ大陸もテーチス海（古地中海）によりユーラシア大陸とは切り離されていた。東南アジアの熱帯は、陸続きでユーラシア大陸とはつながっていたが、すでに存在していた大陸東南アジア・東アジア沿岸ぞいのモンスーン気候のため、熱帯・亜熱帯の森林が赤道から亜熱帯まで広範に広がっていた。第三紀中頃（20Ma）になると、テーチス海（古地中海）は閉じて、アフリカ大陸の赤道付近の熱帯域はユーラシア大陸とつながったが、両大陸のあいだには亜熱帯の乾燥・半乾燥地域が広がりつつあった。東南アジアとアフリカの熱帯におけるこの気候・生態系の南北方向の地理分布の違いは重要である。第三紀後半に入って顕著になってきた山岳の上昇は、次にのべるように、アフリカと東南アジアのこれらの気候・生態系の違いをさらに強化していくが、この違いこそ、アフリカ大陸のみが人類の発祥と進化を可能にした条件と深く関係していると考えられる。

3 チベット・ヒマラヤの隆起と第三紀後半の地球気候の変化

3-1 チベット・ヒマラヤ山塊の上昇はいつ起こったか？

インド亜大陸（インドプレート）がユーラシア大陸に衝突した50Ma以降、ヒマラヤ・チベット山塊の隆起が開始され、20Ma頃にはすでにある程度の高さを持った山塊として出現している（図2）。この時期、テーチス海（古地中海）はすでになく、アフリカ大陸とユーラシア大陸はほぼつながった状態となっている。また、ヒマラヤ・チベットだけではなく、ロッキー、アンデス、アルプスなど、現在の世界の主だった山脈は、ほぼ同時に隆起を開始している。

ヒマラヤの上昇とチベット高原の成立のテクトニクスについては過去数十年多くの議論がなされた。第四紀（2.6Ma～）に入ってから急激に現在の高度まで上昇したという推定もあるが、最近では、インド亜大陸（プレート）がユーラシア大陸に衝突した50Ma以降しだいに隆起がすすみ、第三紀後半（23Ma～）にはすでにかなり高くなっていたことを指摘する研究が増えてきた。Molnarら³⁾は、テクトニック力学や構造地質学的研究を

踏まえて、8Ma頃までには少なくとも平均で1000～2500m程度の高さの山塊にはなっていたとしている。酒井らは構造地質学的調査から11～14Ma頃には高原のかなりの部分はすでに現在の高さには達していたと推定している^{4,5)}。Rowley and Currie⁶⁾はチベット高原上の湖の水の同位体分析から、ヒマラヤ山脈から高原南部はすでに35Ma頃には、現在の高度に達し、次第に北に向かって拡大したと推定している。C.Wangら⁷⁾は、高原中部はすでに30Maより古い時期に現在のような高原になっていたが、高原北部や最南部のヒマラヤ山脈の上昇はつい最近の10Ma以降だとしている。一方で、例えばY.Wangら⁸⁾は、7Ma頃の高原で棲息していた草食動物の歯の分析から、より暖かい気候を好むC₄植物（後述）を食べていたことから、高原はまだ7Maの頃には、せいぜい3000m程度の高度であり、7Ma以降にかなり上昇して現在の高度になったと推定している。というわけで、広大なヒマラヤ・チベット山塊が、その地域性も含め、いつ頃、どの程度の高さになったのかについては、現在も多くの議論がなされており、まだ確定的な結果がでていないわけではない。ただ、この山塊の地球規模の気候への影響を考えた時には、平均的な高度も重要な指標であるが、高原への水蒸気輸送や大気への影響を評価する上で、チベット高原に広く植生被覆があったのかどうか、高原の南端を障壁のように縁取る8000m級のヒマラヤ山脈がいつ現在のように形成されたかも重要である。

3-2 第三紀後半のCO₂濃度の減少と気候の寒冷化

ここで、第三紀、第四紀を通しての地球全体の気温の推移を見てみよう。図3は、60Maから現在に至る、地球全体の平均気温（精確には海水温）の変化を海水の酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）変化で推定した図である⁹⁾。50Ma頃の温暖期をピークに、地球は全体として寒冷化に向かっていることがわかる。40Ma～10Ma頃の気温の推移には南極大陸の分離に伴う南極氷床の形成・融解等、そして再拡大に伴う変化が見られる。その後、10Ma（Miocene 中期）頃から第四紀を通し、現在に至る急激な寒冷化が顕著であるが、これこそ、ヒマラヤ・チベット山塊の隆起が大きく関与している

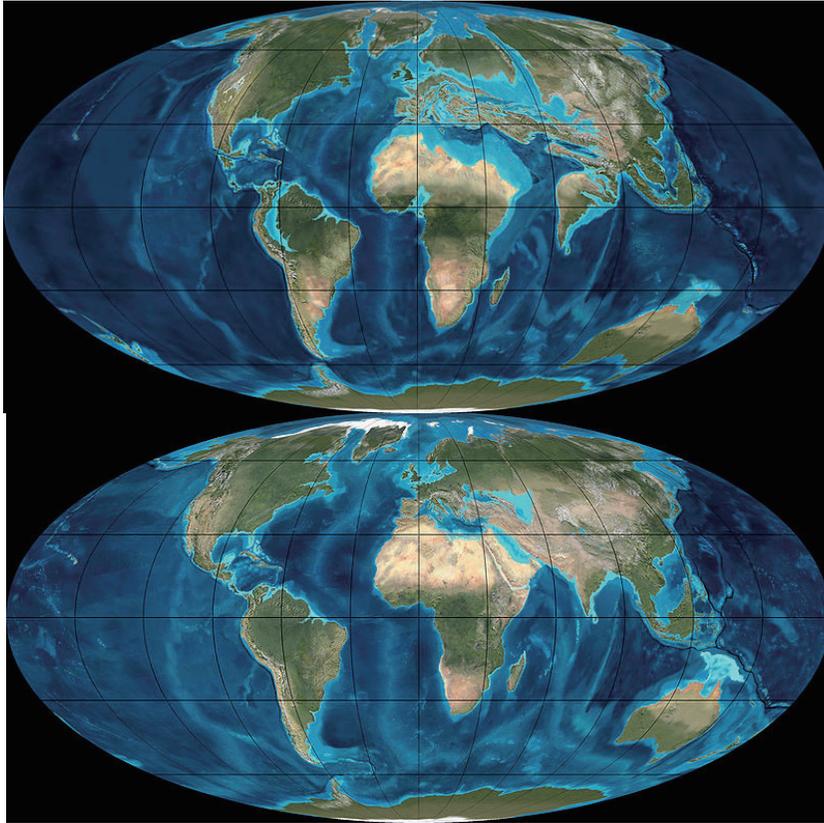


図2 (上) 古第三紀始新世 (50Ma) と (下) 新第三紀中新世 (20Ma) 頃の海陸分布。
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Neogene-MioceneGlobal.jpg>

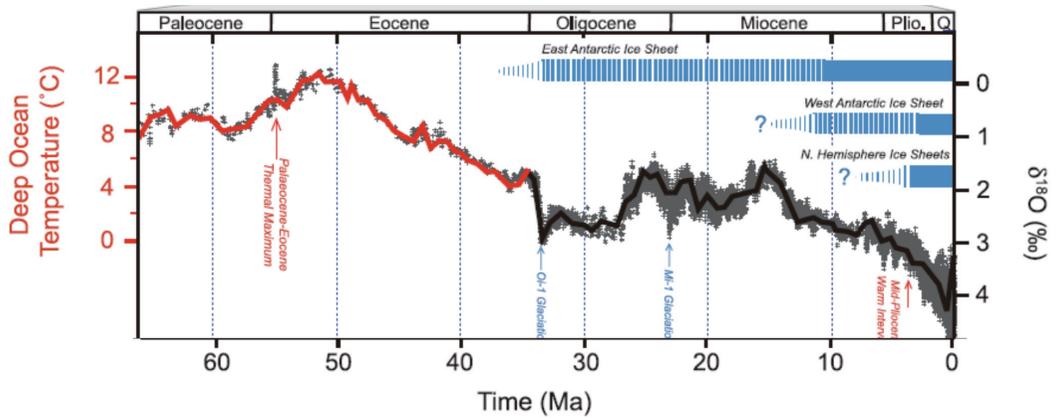


図3 海洋底堆積物コアの酸素同位体比 (δO^{18}) を指標にした第三紀から第四紀 (現在) に至る過去 6500 万年の全球海洋水温の変化。特に第三紀末 (5Ma) 頃からの急激な寒冷化が顕著にわかる (Zachos et al. (2001) を IPCC (2007) から一部改変)。

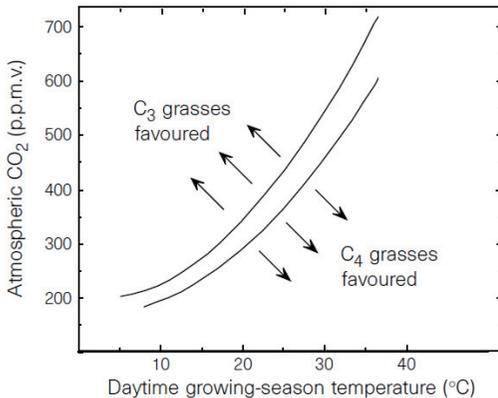


図4 気温（生長期の日中気温）と大気中のCO₂濃度を関数にした草本科のC₃植物とC₄植物の卓越性 (Cerling et al. Nature. 1997)。

ことが分かってきた。

熱帯・亜熱帯にまたがるヒマラヤ・チベット山塊の顕著な隆起は斜面での雨や河川水による激しい風化・侵食を同時に引き起こす。特に、次のように、この山塊の隆起はモンスーンを強化し、大量の雨が斜面の風化・侵食を強める。岩石の主成分であるケイ酸塩はこの化学的な風化・侵食（chemical weathering）の過程で、大気中のCO₂を取り込み、炭酸カルシウムとケイ酸を生成して水に流しこむため、この風化・侵食を通して、山岳の隆起は地球大気中のCO₂濃度を減少させる働きをしている。図3に見られる第三紀後半（10Ma頃）から第四紀にかけての地球の全体的な寒冷化にはヒマラヤ・チベット山塊での活発な風化・侵食が、大気中のCO₂濃度を減少させ、温室効果を弱めるかたちで進んできたわけである^{10,11}。ここで注目すべきは、図4に示すように、大気中のCO₂濃度と生育時期の気温により、C₃、C₄植物という、異なる光合成・生理特性をもった草本類が卓越することである。C₃植物とは、従来の光合成特性を持った植物であるが、C₄植物は、さらにCO₂濃縮のためのC₄経路とよばれる回路を組み込んだ植物であり、光合成（CO₂吸収）の効率がC₃植物よりも高い。また、C₄植物は、C₃植物より、水分条件の厳しい乾燥気候での光合成の効率がよく、また図4のように、低濃度のCO₂大気での適応も高い。特に、6-8Ma頃には、世界各地の乾燥地

域の草原では、高いCO₂濃度を好むC₃植物から、低いCO₂濃度により適応したC₄植物への変化が起こっており、この時期に風化・侵食による大気中のCO₂濃度減少が全球レベルで生じていたと推定されている^{12,13}。ヒマラヤ・チベット山塊が隆起することにより、風化過程を通してCO₂レベルが減少し、気候が寒冷化してきたことは、4節で述べる氷期サイクルの出現の条件として重要であるが、同時に、人類が進化してきたのもこの気候寒冷化の時期であるという事実は、現在の地球環境問題を考える前提としても示唆的な意味を持っている。

3-3 アジアモンスーンと乾燥気候の出現

比較的低緯度の亜熱帯に位置するこの広大な山塊は、夏季の大陸上の大気加熱や大気力学的な効果により、強大なモンスーンをこの山塊の南から東の大陸周辺に、また、その西と北西側に乾燥気候を作り出すことがすでに1970年代から大気大循環モデル（GCM）による数値実験で指摘されている¹⁴⁻¹⁷。著者らは、大陸上の変化が大気循環を介して海洋循環の変化にも影響し、さらに大気にもフィードバックする過程も含め、ヒマラヤ・チベット山塊の異なる高度がどう気候形成に影響するかを、大気海洋結合気候モデル（CGCM）による数値実験により、より定量的な研究を行った¹⁸⁻²⁰。この数値実験の結果は、図5に示すように、この山塊の平均高度が現在の60%程度になった時に、アジアモンスーンが顕著になってくること、チベット高原の西に広がる乾燥地域も、アジアモンスーンの出現と並行的に、ほぼ同じ時期に顕在化することを示している。この結果を、アジア・アフリカ地域の古気候学・古生態学の推定結果と合わせることで、山塊の上昇過程と気候形成をある程度推定することができる。これらの研究によると、この地域の気候は、7-10Ma頃には、現在に近いインド（南アジア）モンスーンが成立し、ほぼ同時に北アフリカ、西南・中央アジアの乾燥地域も出現していたことを示している²¹。古生態学的な研究によると、乾燥気候を示す動植物相が、やはり10Ma前後からこの地域に顕著に出現している^{12,22}ことから、この時期のチベット高原は平均高度は60%程度には達していたと推定される。

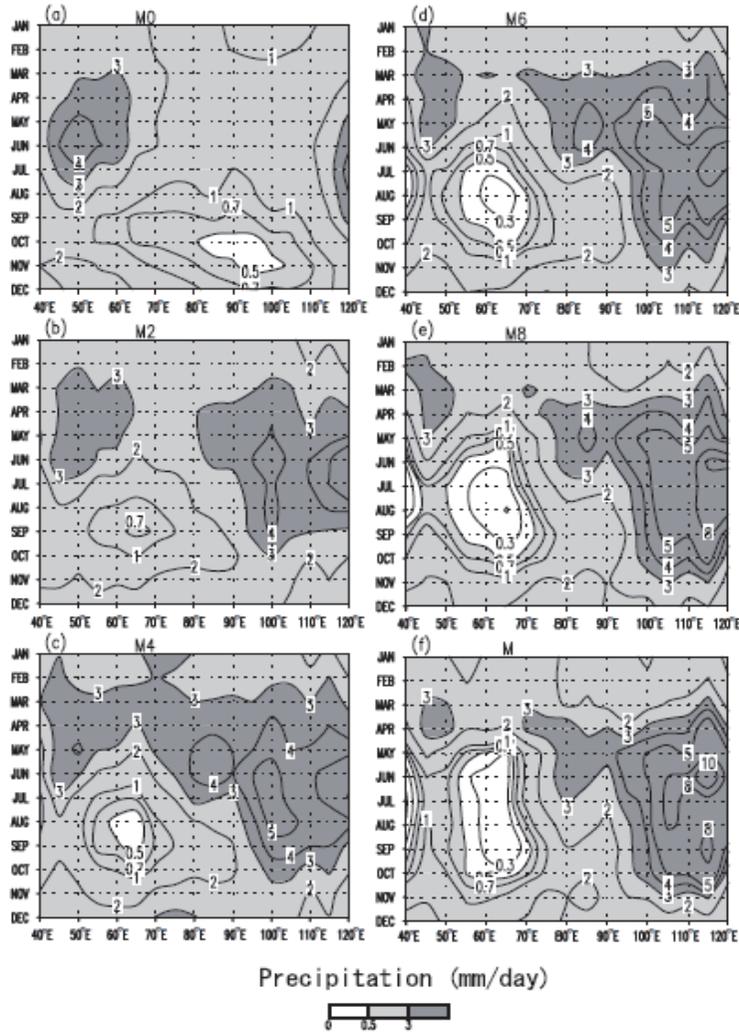


図5 ヒマラヤ・チベット山塊の平均高度を変えた時の北緯30－45N沿いの夏季モンスーン期（6－8月）降水量の変化。山塊の平均高度が現在の(a) 0% (M0 山なし) (b) 20% (M2)、(c) 40% (M4)、(d) 60% (M6)、(e) 80% (M8)、(f) 100% (M 現在高度) の時の降水量分布を示す (Abe et al., 2005)。単位は mm/day。濃いハッチは 3 mm/day 以上の地域、白抜きは 0.5 mm/day 以下の地域を示す (Abe et al., 2005)。

一方、熱帯を中心とする東アフリカでは、南北7000 kmにおよぶ大地溝帯 (Great Rift Valley) の形成がほぼこの時期 (5～10Ma) にあたり、西端には5000 mに達する火山や深い溪谷を持ちながら、全体として1000～2000 mの高さの長大な高原が形成された。この高原は、赤道インド洋上

の湿った偏東風に対する障壁となり、北半球夏季には赤道を超えてインドに雨をもたらす南西モンスーン気流系を強化すると共に、赤道東アフリカを乾燥化し、現在のサバンナ気候の形成に大きな役割を果たしていることが、著者らのCGCM気候モデルを用いた数値実験結果²³⁾でも示されて

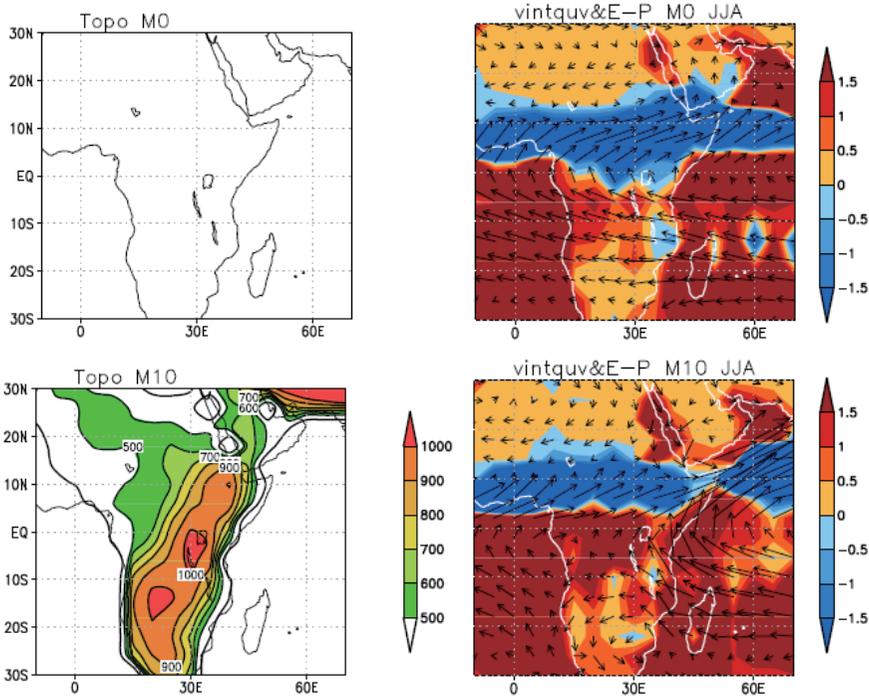


図6 CGCMによる東アフリカ高原のなかった時 (M0) (右上) と現在 (M10) (右下) の北半球夏季 (JJA) 降水量の変化。青色は実質降水量 (P-E)。矢印は大気下層の風ベクトル。左は、モデル計算に用いた地形高度 (Yasunari, Abe and Kitoh, 2013)。

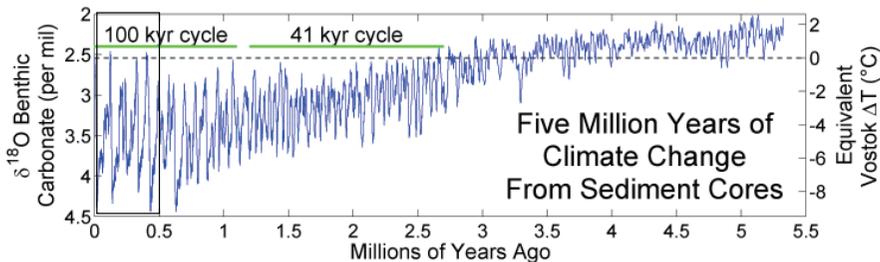


図7 過去550万年の地球全体の気温変化。破線は、現在の地球の平均気温を示す (Lisiecki, L. E., and M. E. Raymo, 2005)。

いる (図6)。この大地溝帯の形成時期と風化・侵食速度 (に関連した CO_2 濃度変化) から推定されるヒマラヤ・チベット山塊の顕著な上昇期はほぼ対応しており、夏季南アジアモンスーンの活発化と広域の乾燥地域の出現および東アフリカの乾燥 (サバンナ) 化は、5～10Ma 頃にはほぼ同時に進行していったと考えられる。

4 第四紀の氷期サイクルとヒマラヤ・チベットの役割

4-1 氷河時代の開始と4万年周期の気候変動

第四紀とは、現在を含む地球史の中で最も新しい時代で、人類が出現し爆発的な進化を開始した以降の時代として定義され、その始まりは、それまでの1.8Ma から2.6Ma に最近修正された²⁴⁾。

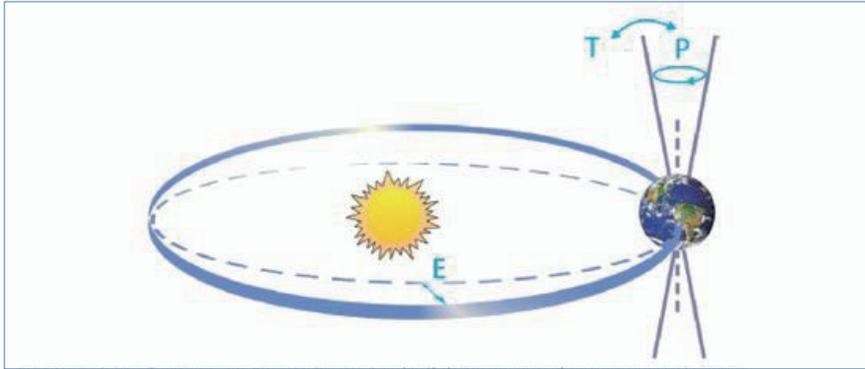


図8 氷期サイクルを駆動する地球軌道要素の変化（ミランコビッチサイクル）の模式図。”T”は地軸の傾きの変化,”E”は楕円軌道の離心率の変化,”P”は歳差、すなわち軌道上の与えられた点における軸の傾きの方向（みそすり）の変化を示す。（IPCC第4次報告書第6章古気候FAQ 6.1より。原出典はRahmstorf and Schellnhuber（2006））

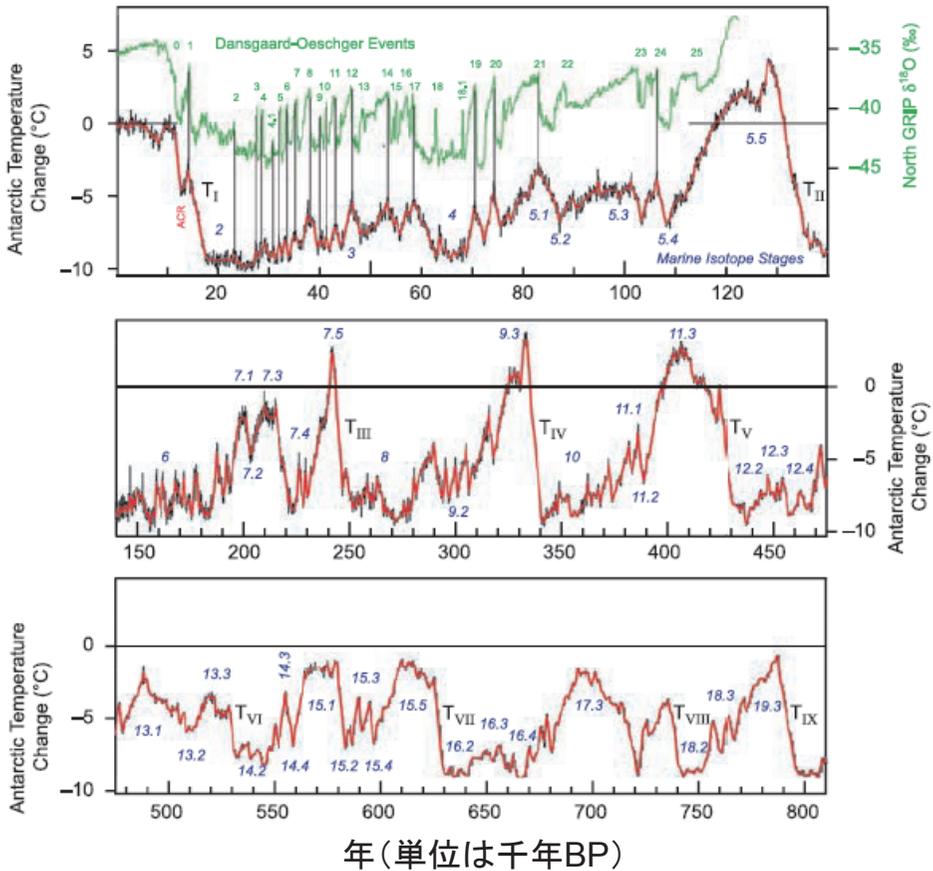


図9 南極氷床の Dome C の氷床コアから復元された、過去810Kyrにおける地球の平均気温。120Kyr以降は、グリーンランドの氷床コアから復元された気温偏差も示されている（Jouzel et al. Science, 2007）。

ほぼ同時に、この時期は全球的に気候が寒冷化し、北半球にも氷床・氷河の拡大縮小が繰り返されている氷河期 (Ice Age) に対応している。人類の進化の時期と氷河期が対応しているのは、先にも述べたように、単なる偶然ではなく、むしろ必然的な関係と考えるべきであろう。

図7は、5.5Ma以降の全球的な気温変化を示す²⁵⁾が、2.5～3Ma頃から気温の低下傾向はさらに強まり、また、変動も大きくなっていることがわかる。5.5～2.5Maの前半には2～3万年周期で振幅も小さかったのが、第四紀前半の2.5～1Maには4万年周期が、そして1Ma以降現在まで、10万年周期が卓越し、振幅も非常に大きくなっている。このような氷河期の気候変動周期の変調がどのような仕組みで生じているのか、現在も多くの議論があるが、本稿の主題ではないので詳細は省略する。ただ、図8に示すように、地球と太陽および太陽系の他の惑星間の引力の非線形相互作用で生じている地球の軌道要素 (公転運動の特性を決めている要素) である公転離心率、軌道傾斜角、歳差の周期的運動の組み合わせにより、地球表面への日射量の季節変化と緯度分布が複雑に変動することが基本のメカニズムであることが指摘されている。このメカニズムを最初に指摘したミランコビッチの名前を取って、この変動はミランコビッチ・サイクルと言われている。公転離心率は約10万年と約40万年、軌道傾斜角は4.1万年、歳差運動は約2万年の周期が卓越しているが、それぞれの周期に対応した気候変動が、図7のように、なぜ時期ごとに変化・変調するのか、まだ決定的な答えは出ていない。ミランコビッチ・サイクルによる日射量変動が、地球内部の仕組みで変化している海洋・大陸系の分布や雪氷分布、さらに大気組成変化などと複雑にからんで、このような変化・変調を引き起こしていると考えられている²⁶⁾。

さて第四紀前半 (2.6～1Ma) には約4万年周期の軌道傾斜角 (地軸の傾き) 変動に対応して北半球高緯度に氷床が拡大縮小する氷期サイクルが続いていたが、第四紀の寒冷な氷河時代に突入したきっかけは何か。3.2節で述べたように、ヒマラヤ・チベット山塊の隆起に伴う風化・侵食による大気中のCO₂濃度の減少 (温室効果の弱化) と寒冷化傾向がひとつの重要な条件にはなっていた

が、氷期サイクルの出現など、まだ決定的な答えは出ていない。地軸の傾きは現在23.5°であるが、22.5°～24.5°の範囲で変動しており、傾きが小さい時期は日射量の極大緯度がより低緯度側に来るため、南北の温度傾度が大きくなる可能性があるが、極地域がより低温になるためには、南北の熱輸送効率 (熱輸送の強さの程度) を小さくするような気候システム内の何らかのしくみの変化が必要である。この時期 (3Ma前後) に起こったテクトニックな変化としては、パナマ地峡の成立 (大西洋・太平洋の分離) やオーストラリア・ニューギニア大陸の北縁が赤道にまで達したことがある。前者は赤道東部太平洋での湧昇流の強化 (と東西の水温差の増大) により、熱帯域での大気・海洋が結合した東西循環 (Walker循環) 系を成立させたこと²⁷⁾、後者は太平洋からインド洋に流れ込むインドネシア通過流 (throughflow) を南太平洋起源の暖かい海水から北太平洋起源の冷たい海水に変化させ、赤道インド洋全体の海水温を低下させたこと²⁸⁾が、氷河時代の開始に関連していると推定されている。

赤道アフリカの気候変化については、赤道インド洋 (特に西部インド洋) の海水温の低下は、東アフリカの降水量減少・乾燥化をもたらした^{29,30)}。熱帯太平洋域でのWalker循環は1.7Ma頃からより強化され、高緯度への熱輸送が弱められて、極域での寒冷化と氷河拡大により寄与したと推定されている³¹⁾。さらにWalker循環系のゆらぎは、アフリカ地域も含む熱帯での干ばつ・多雨などの極端な気候イベントを地域的に引き起こすENSO (エルニーニョ・南方振動) 現象そのものであり、ENSOサイクルがこの時期から開始し、熱帯域での気候の年々変動幅も大きくなったことを意味している。ところで、太平洋・インド洋にまたがる現在のWalker循環系は、アジアモンスーンと密接に結合して存在しており、強い (弱い) アジアモンスーンがラニーニャ (エルニーニョ) 状態を作り出しやすいこと^{32,33)}が現在の気候下で示されている。そして、このようなENSOとモンスーンの結合は、著者らのCGCMによる数値実験では、ヒマラヤ・チベット山塊が現在の高さの80%程度以上になった時に強く現れることが示されている¹⁸⁾。この時期 (3Ma～) には、最近のテクトニクス研究では、ヒマラヤ・チベットはすでに十分

にこの高さには達していたと推定されるが、次節（4-2）で述べるように、氷期におけるアジアモンスーンは弱かったことが古気候データからも気候モデルからも示されている。であるならば、現在とは異なる、氷期における強い Walker 循環と弱いアジアモンスーンの組み合わせはどう解釈できるか。上記にのべたように、赤道沿いの海面水温の東西の勾配が現在とは異なる仕組みで維持されていたと推定されるが、今後の課題として残されている。

4-2 10 万年周期の氷期サイクルの謎

第四紀の寒冷化はさらに進行し、1Ma 頃には氷期サイクルは約 10 万年周期が卓越し、寒冷期の氷床・氷河の拡大も非常に大きくなった。この時期の変動は、海洋底コアや南極・グリーンランドの氷床コアなどからかなり詳細に明らかにされてきた。図 9 には、南極の氷床コアから明らかにされた過去 80 万年の全球規模の気温変動が示されている³⁴⁾。この変動は気温だけでなく、全球の雪氷（氷床・氷河・積雪）量、海水温や温室効果ガスである大気中の CO₂ 濃度や CH₄ 濃度などもすべて気候の寒暖を説明するかたちで変動していることが分かっている。即ち、この 10 万年周期は、極域から熱帯まで、また深層水循環も含め、文字通り全球規模での気候要素のすべてが関与して変動しているといえる。この周期の変動は地球軌道要素の 10 万年周期（離心率変化）と調和的とされているが、実際には大きな振幅を持つ 4 万年周期（地軸の傾き）と 2 万年周期（歳差）の非線形な重複効果により、北半球夏季の日射量が大きく減少（増加）するタイミングが変動的に生じていることが重要であることも多くの研究により指摘されている。

北半球夏季の日射量変動が重要な理由は、大部分の陸地を占めるユーラシア大陸・北米大陸上の夏季の積雪域の拡がりがあるかないかで、積雪のアルベード（反射率）効果により、実質的に地表面を加熱できる日射量が大きく変わるためである。現在の夏季は、大陸上の積雪はほとんど消えているが、夏季にもかなりの面積の積雪が残る状態が続けば、全球スケールでの気候の寒冷化と高緯度の氷床・氷河の拡大の引き金にもなる。かつて、Trinkler という地理学者は、チベット高原に

は氷期には「チベット氷床」が存在していたと提唱³⁵⁾したが、この説は証拠不十分のまま立ち消えになっていた。その後、1980 年代に入り、ドイツの Khule という氷河地形学者は、チベットの氷河地形を隈なく調査してこの「チベット氷床説」を復活させ、さらにこの氷床の形成が北半球高緯度を覆う大氷床形成を誘発し、氷期の引き金になったと主張して世界の氷河学者や気候学者の間で物議をかもした^{36,37)}。大論争の末、現在はこの説は再び否定的になっている。しかし、氷床形成を考えなくても、低緯度の高原上での積雪の有無が、日射量変化に与える影響は非常に大きい。特に夏季のチベット高原上の積雪の拡がりには重要と考えられる。現在の気候下では、チベット高原上の夏季の積雪分布域は非常に小さく、大部分は雪のない裸地になり、日射量の吸収も大きく、大気に対しては、むしろ強い熱源となることは、3-3 節でも述べたとおりである。しかし、もし、夏季を通して、高原全体に積雪が残れば、アジアモンスーンが弱まるだけでなく、北半球全体の大気も冷やし、大気循環も大きく変える可能性もある。著者らは、図 9 でも示されている約 12 万年前（120Ka）の間氷期ピークから急速に寒冷化に向かい、日射量が北半球夏季に極小を示した 115Ka の時にチベット高原上の積雪の拡大がどう全球スケールの寒冷化に寄与した可能性があるかを、CGCM による数値実験で調べてみた。その結果、120Ka から 115Ka の夏季の日射量変化は、北半球の大陸上の夏季気温を 5-8℃ 程度低下させること、積雪が高原上に存在すると中低緯度を中心にさらに数度、気温が低下すること、さらに北極域周辺の積雪も拡大し、越年する積雪域となることなどが明らかになった³⁸⁾。即ち、十分に高くなったチベット高原は、積雪のアルベード効果を通して、地球表面が吸収する日射量の減少を効果的に大きくし、半球スケールの気温低下をさらに促進して、氷期・間氷期サイクルを引き起こすための重要な一要素となっていることを示された。なぜ 1Ma 頃から 4 万年周期が 10 万年周期に代わり、気候の振幅も大きくなったのかはまだよくわかっていないが、中・低緯度を中心とする日射量変動の効果を全球的に拡大するためには、チベット高原での積雪によるアルベード効果を増幅器とした気候システムの変化が必要であることを強く示唆

させる。

5 人類の起源・進化における気候・環境条件の変化

5-1 人類(猿人)発祥を促した気候・生態系の変化

人類の祖先とされる猿人の定義は、直立二足歩行と犬歯の退化(縮小)といわれている³⁹⁾。その定義による猿人が出現したのは5~7Ma頃、場所は赤道直下の東アフリカ地域といわれてきた。その頃は、3-2節でも述べたように、エチオピアから南アフリカに至る東アフリカの南北数千キロの大地溝帯の形成により、この地域の気候の乾燥化が進み、森林から草原への移行がその地域の猿類が直立二足歩行を開始し、猿人となったという「イーストサイドストーリー」説である。ただ、その後西アフリカサヘル地方のチャド湖付近で、より古い猿人(*Sahelanthropus tchadensis*)が発見され、その説は揺らいでいるという。ただ、この時期は、ヒマラヤ・チベット山塊の上昇に伴い、東に湿潤なアジアモンスーン、西に乾燥気候の東西コントラストが強められつつあり、チャド湖周辺を含め、アフリカ北部域は全体として乾燥化していった時期であったと考えられる。問題にすべきは、森林から草原への気候・生態系変化の下で、初期人類の直立二足歩行が、かれらの生存にとって、どのような必然性・必要性があったか、を明らかにすることであろう。東アフリカでもチャド湖周辺でも、ゆっくりとした乾燥化の下で、おそらく森林から草原、湖などが入り混じった生態系へと変化する時期が長く続いたはずである。この時期(6~8Ma)の乾燥化には、低CO₂濃度により適したC₄植物の草原が急激に拡大しており¹²⁾、このC₄植物の草原の拡大こそが現在の草食動物群(およびその捕食者としての肉食動物群)の進化を促したと考えられる。そのような生態環境の中で、森林内で木の実などを採集するだけの食糧確保から草原に生きる動物群を食糧の対象とする必要性が出てきたとすれば、木の枝などを手につため二足歩行が促されるとも考えられる。猿人は草原に生きる草食動物群やそれをねらう肉食動物群の中で生き延びる生存戦略として、直立二足歩行を獲得していったのではないだろうか。

5-2 原人の進化と第三紀末から第四紀前半の気候・生態系の変化

猿人から石器などの道具の使用を本格的に行ったとされる原人は、3Ma頃のオーストラロピテクスに始まり、ホモ・ハビリス、ホモ・エレクトスへと進化し、そして0.1~0.2Ma頃に出現した新人ホモ・サビエンスへとつながる進化をたどった。ここでは、この人類進化の研究を詳細にレビューすることはしない。最近の研究の進展は例えば、三井³⁹⁾、印東編⁴⁰⁾などを参照されたい。図10には、deMenocal⁴¹⁾によりまとめられた、3~4Ma以降の原人から新人に至る進化の系統とその間の地球規模およびアフリカでの気候変動、東アフリカでの植生変化が同じ時間軸で示されている。この図から一目瞭然のように、第三紀末から第四紀の前半(3Ma~1Ma頃)に、オーストラロピテクスは多様に分化し、その一部から新人の系統であるホモ・ハビリス、ホモ・エレクトスへと進化している。また、堅い木の実などの採集に適応した強い顎が発達したパラントロプス(*Paranthropus*)系統が分岐したが、1Maまでに絶滅したとされ、原人の分化・淘汰などが劇的に起こった時代である。この時期は、図にも示されるように、地球規模での寒冷化が進行し、4万年周期の氷期サイクルが卓越していた(4-1節参照)。東アフリカでは乾燥化が2.8Ma前後、1.7Ma前後、1.0Ma前後と進行し、森林から草原への移行が段階的に進んでいたことがわかる。2.8Maは第四紀の氷河時代に入り、全球的な寒冷化が始まった時期であり、1.0Maは、10万年周期の氷河サイクルが始まった時期にほぼ対応している。1.7Ma前後は、熱帯の東西循環により西インド洋の(湧昇による)低温化が進み、東アフリカの乾燥化はさらに進んだ。この段階的な気候・生態系変化とも対応するように、石器利用の進化も含めて新人(*Homo*)へと進化していった原人と、パラントロプスのように絶滅した原人などと、分化が進んでいったこともこの図は強く示唆している。気候の乾燥化と原人の進化(分化)の関係を定める鍵のひとつは、生態系変化に対応したアンテロープ(ガゼル、インパラなどを含むウシ科偶蹄類の総称)などの草食動物群の進化である⁴²⁾。森林の縮小、草原の拡大に伴い、これらの草食動物群は、上記のほぼ3段階の時期に対応して爆発的に種分化をしており、

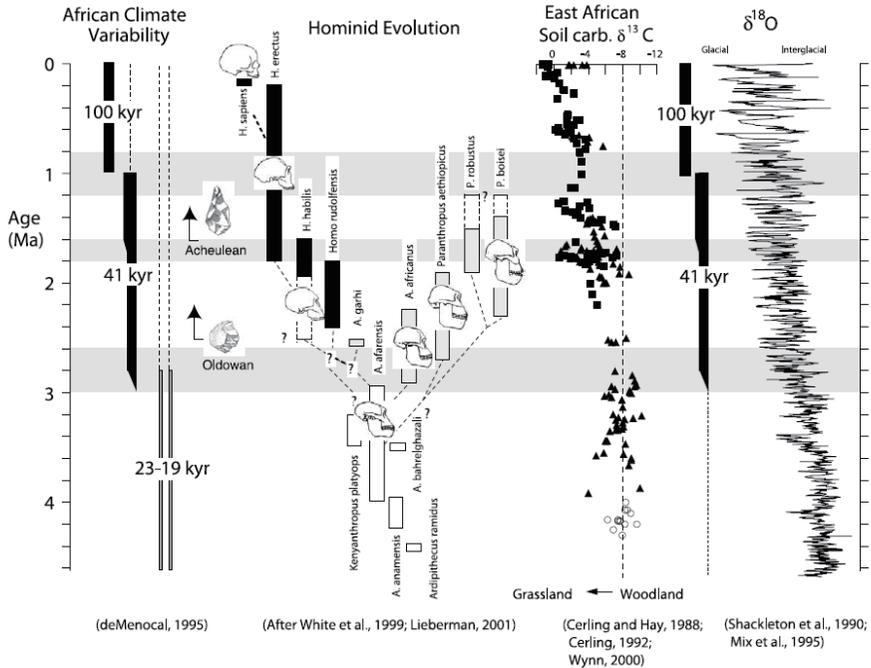


図 10 第三紀末(4.6Ma)から現在にいたる原人類から新人類への進化過程。地球気候の変動($\delta^{18}\text{O}$)と東アフリカの草原植生の進化過程($\delta^{13}\text{C}$)も同時に示されている (deManocal, 2004)。

石器も含め、それらを狩猟の対象とした原人の進化を促し、一方で、森林での採集にこだわった原人は衰退していったと考えられる。狩猟を中心にシフトした原人の *Homo erectus* は、この時期、アフリカを出て、遠く中央アジア、ヨーロッパ、東アジアへ移動した。その背景には、東アフリカの気候の乾燥化の進行に伴う動植物相の変化が狩猟や採集の状況の悪化をもたらしたことが当然あったとも考えられる。北アフリカから中東のレバント地方から中央アジアに至る広大な地域には、ヒマラヤ・チベット山塊の存在による乾燥気候が広がっている (3-2 節参照)。すでに寒冷な氷河時代であり、アジアモンスーンも乾燥気候もともに弱い状態が卓越することにより、砂漠地域の周辺ではステップ草原が拡大し、西南アジアから中央アジアにかけて回廊のようにつながって広大に存在していたはずである。ヨーロッパも、北半分にはすでに氷床が広がり、その南の地域は草原が広がっていた。原人たちはそのステップ回廊で動物群を追いつつ、ゆっくりと北上、あるいは

東・西進していったと想像できる。東アジアまで達した原人の一部が、北京近郊周口店の北京原人などと考えられている。北京原人は火を使ったともいわれているが、おそらく氷期の寒い気候に対応できず、絶滅していった。また、はるか南方のインドネシア・ジャワ島まで渡ったのが、ジャワ原人とされているが、氷期には南シナ海の海面が低下して陸化してスダランドが出現していたが、そのタイミングに南下してジャワに達したと考えられる。

5-3 ホモ・サピエンスの出現と第四紀後半の氷期サイクル

約 1Ma 以降の地球の気候は、4-2 節で述べたように、全球的に非常に寒冷な気候となり、現在確認されている限り、0.8Ma 以降、顕著な 10 万年周期の氷期・間氷期サイクルが卓越していた。過去 1 万年以降現在まで後氷期と言われているが、現在もそのサイクルは続いており、私たちはまだ続く長い寒冷な氷河時代の中の、短い間氷期

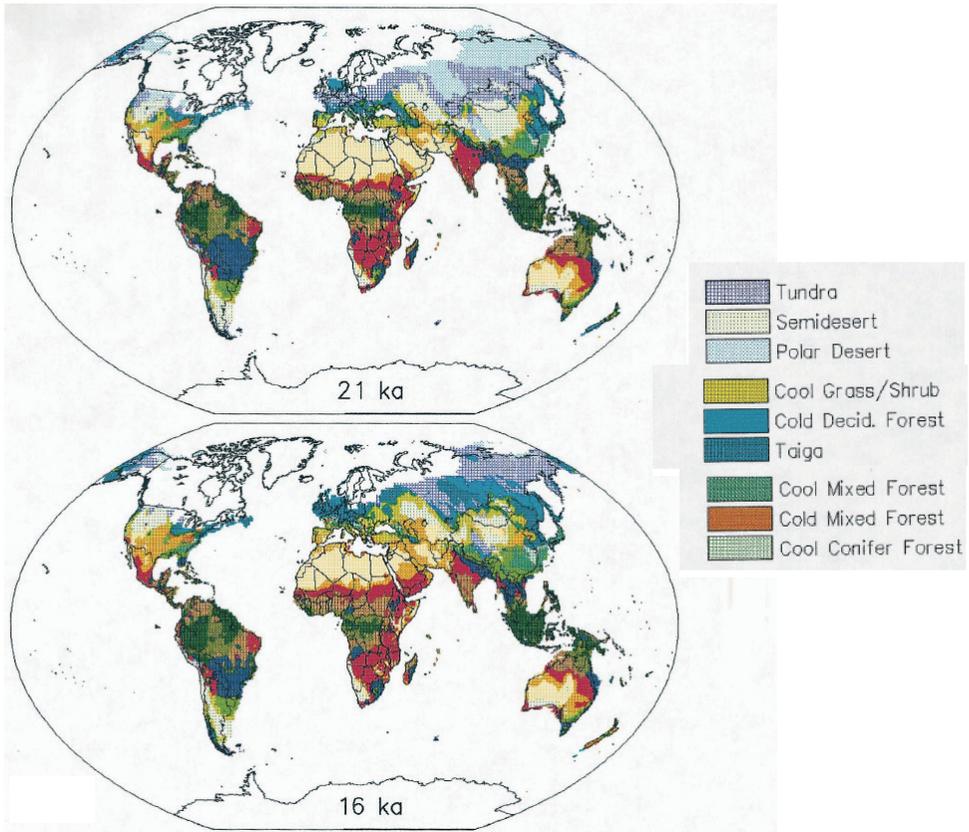


図 11 気候モデルによる気温、降水量、日射量と植生モデルを用いて推定した間氷期 (21Ka) と氷期 (16Ka) の植生分布 (Kutzubach et al., 1998)。

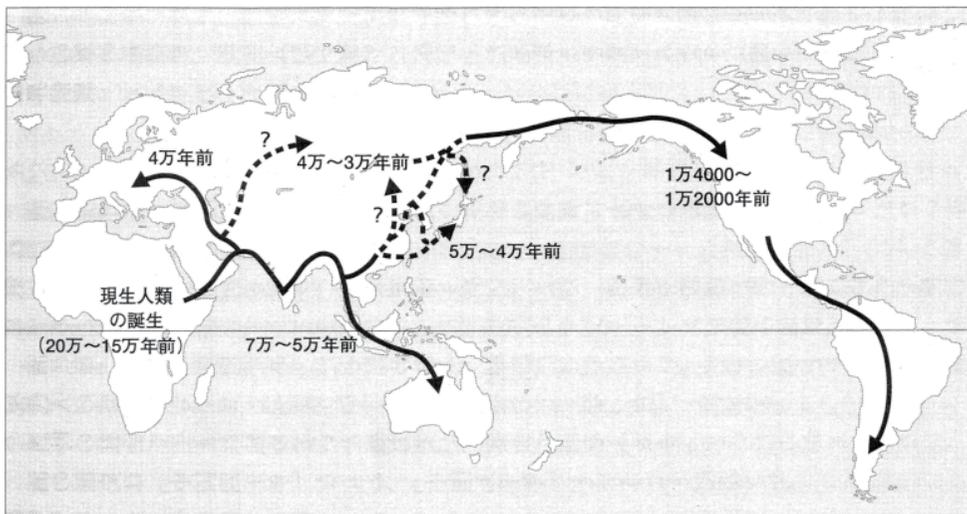


図 12 新人類の世界的な拡散 (年代は推定) (三井、2005)。

に生きているというべきであろう。

さて、現人類であるホモ・サピエンス（Homo sapiens）の直接的な祖先は、ミトコンドリアDNA分析から150～200Ka頃、やはりアフリカに現れたとされている⁴³⁾。この時期は、図9からも分かるように、10万年周期で二つ前の間氷期（200ka頃）から氷期に向かって寒冷化していた時期である。この時期以降、私たちの祖先はアフリカからユーラシア大陸へと移動あるいは拡散しつつ、現人類ホモ・サピエンスへと進化していったわけである。この間、120Ka頃に間氷期が再び訪れるが、その期間は短く、地球全体は基本的に寒冷な氷期の気候であった。このような時期になぜ現人類の進化が進んだのだろうか？

現在の東アフリカ熱帯域にみられるC₄植物が卓越する（たとえばセレンゲッティ国立公園のよ

うな）典型的なサバンナ草原はようやく1Ma以降に出現し⁴³⁾、同時に、この草原に適応した現在の動物相につながる有蹄類の動物などの種分化が活発になった⁴⁴⁾。東アフリカの熱帯・亜熱帯域からアラビア半島、西南アジア・中央アジアにかけては、氷期にはむしろ、アジアモンスーンの弱体化と対になって、この地域の乾燥気候も弱まって現在よりも湿潤な気候となっており、草原がほぼ途切れることなく回廊のように続いていた可能性が高い。あるいは、氷期サイクルに伴う乾燥・湿潤気候帯の南北の変位の繰り返しが、草原の南北の変位あるいは拡大・縮小を引き起こしていた可能性も高い。例えば、最終氷期（21ka, 16ka）の気候・植生を植生モデルを結合させた気候モデルで再現した数値実験では、図11に示すように、現在は完全な砂漠地帯になっているアラビア半島も、氷

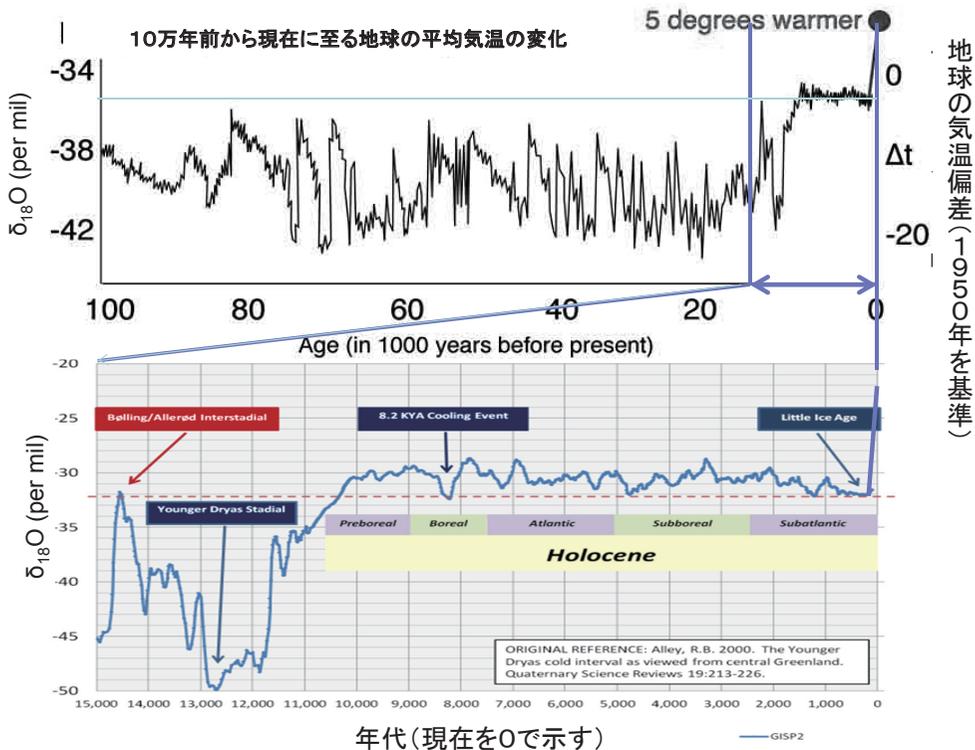


図13 (上) グリーンランド氷床コア等から推定した10万年前から現在に至る地球の平均気温の変化。20世紀後半の気温の急上昇も示されている（原図はRockstrom et al., 2009原図）。(下) 1万5千年前以降の氷期末期から完新世の期間の変化を拡大して示す（原図はAlley, R.B., 2000）。1950年以降の観測にもとづく気温上昇も示されている。縦軸はδ¹⁸O比で示されているが、上と下で気温換算の基準が異なることに注意。

期には草原植生が広がっていたことを推定している⁴⁵⁾。そのような気候・生態的環境条件を考えると、原人の出アフリカ時と同様、新人(の一部)も、草原に多様に広がった有蹄類動物を追いつつ、草原の拡大・縮小に促されて、次第にユーラシア大陸へと移動していったのではないかと推定されている。狩猟を中心としつつも、やがて野生の牛、羊などの草原の有蹄類を飼い馴らす過程で、遊牧そして家畜化につながったのであろう⁴⁶⁾。ここでは、現在最有力視されているアフリカでのホモサピエンスからのいわゆる「アフリカ単一起源説」に乗ったかたちで議論を展開したが、この説にはもちろん反論もあり、本稿での推定は確定的なものではない。ただいえることは、原人の起源・進化と同様、私たちの直接の祖先である新人も、氷河時代という寒冷な気候下で、しかもヒマラヤ・チベット山塊の存在により形成された比較的乾燥した気候・生態系の地域を中心として進化したことである。私たち東アジアのモンゴロイドの形成という問題を考えた時、その新人のアフリカからの拡散の地理的分布(図12)は興味深い。この図では、ヒマラヤの南、インド亜大陸経由で東南アジアへ新人は入ってきたのがメインルートのように描かれているが、果たして、モンスーン気候の下での密な熱帯・亜熱帯林であった雲南・アッサム地域を越えて入って来たのだろうか。むしろ、氷期には、現在の西シベリア低地に形成されていたとされる巨大な古シベリア湖(?)の南縁とチベット高原の間のステップ草原を経由して入ってきたルートがメインであった可能性も高い。あるいは、両方のルートからの人類の混血がモンゴロイド特有の特徴を作り出したのかもしれない。

6 モンスーンアジアでの人類の展開—沖積地での水田稲作農業の発見

そして、18Ka以降、地球は最終(もっとも最近の)氷期が終了し、一時的な寒の戻りであるヤンガー・ドライアス期(13-12Ka)を経て、数百年から千年にも満たない短い期間に後氷期(間氷期)の温暖で比較的安定な気候の時代に入った。この時代は現在まで続いており、地質学の区分では完新世(Holocene)と命名されている(図13^{47,48)})。温暖のピークは8~6千年前で、日本では縄文時代にあたる。この完新世になって、人類

は始めて、ヒマラヤ・チベットの南東域に広がる活発なモンスーン気候の湿潤な地域に入り込み、水田稲作農業を發明(あるいは発見)した。ヒマラヤ・チベット高原の隆起に伴い、この山塊から東・東南側に流れ出した河川がつくりだした複雑な山ひだは活発な侵食により谷間と河口付近に沖積平地を作り出し、そこが稲の起源となるイネ科の草本の自生地となっていたわけである⁴⁹⁾。稲の起源については、近年雲南説よりも江南説が有力視されているが、いずれにせよチベット・ヒマラヤ山塊の活発な造山運動の過程で、中国南部から東南アジアの山間部とその裾野に発達した多くの河川系により形成された沖積地の存在こそが、稲作農耕の開始にとっての必要な地形的条件であった⁵⁰⁾。それ以降数千年、モンスーンアジアでの稲作は大発展し、現在のように、世界人口の60%が集中するに至っている。水田稲作農業を基層として、この湿潤地域に多様な伝統的な文化を生み出し、モンスーンアジアは、世界文明の一大センターとなっている。氷河時代の乾燥気候下の草原で、第四紀乾燥地特有のC₄植物や有蹄類とともに進化してきた人類は、マalariaなどが蔓延し、「魑魅魍魎が跋扈する」としてそれまで避けてきたモンスーン気候下の湿潤な山地の森林の谷間や湿地に入りこみ、水田を開墾することになり、それまでの100万年とは全く異なる大発展を、しかも高々数千年から1万年(以下)の非常に短時間のあいだに、することになった。水田稲作農業は、モンスーン気候・生態系とヒマラヤ・チベット山塊を中心としたアジアの変動地形を巧みに利用した持続可能な農業として発展・改良され、現在の人口をこの地域で養えるまでになっている。ちなみに、三大作物のもう一つである小麦は、西南アジアの乾燥気候下でその起源種が見出された。ここでは、ザクロス山脈からの豊富な融雪氷水による湿潤な谷沿いの湿地生態系の形成が多様な起源種形成に重要であったと考えられる。この地域での麦類農業も、やはり後氷期の1万2千年前頃に開始され、メソポタミア文明の基礎となったが、完新世以降の気候の乾燥化は、灌漑農業の展開を促したが、土壌の塩類化などを引き起こして持続できず、最終的にメソポタミア文明の崩壊にもつながることになった。

7 まとめ

冒頭で著者が1980年の論文¹⁾で問題提起した、第三紀末から第四紀にかけてのチベット・ヒマラヤ山塊の上昇と人類の進化の関係は、単なる偶然でもなく、けっして荒唐無稽な話でないことが、1980年代以降の多くの地球科学、古気候学・古生態学、人類学などの研究から明らかになってきたと言えそうである。もちろん、チベット・ヒマラヤ山塊の高度が地球の気候に顕著な影響を与え出したと考えられる第三紀後半以降、ざっと20Ma以降のさまざまな地球科学的、気候学的イベントと人類進化のイベントの整合性など、まだまだ精確さに欠ける議論も多い。しかし、ユーラシア大陸の中・高緯度と陸続きとなったアフリカ大陸の湿潤熱帯の森林で進化を遂げていた猿類が、5～10Ma頃にチベット・ヒマラヤ山塊の隆起と、ほぼ同時並行的に起こった東アフリカの大地溝帯形成に伴う隆起により、気候の乾燥化と森林から草原生態系へ移行していったことが、原人の起源に重要な意味を持っていることはほぼ間違いないであろう。乾燥気候の成立はアジアモンスーンの成立と対になっており、チベット・ヒマラヤ山塊では、上昇に伴うモンスーン降水の増加が風化・侵食過程を通して大気中のCO₂濃度減少を引き起こし、第三紀から、寒冷な気候が卓越する第四紀の氷河時代へと導入していった（図7）ことに加え、CO₂濃度の低い大気環境により適応したC₄植物（図4）の草原が拡大し、有蹄類の動物の多様な進化が進んでいったことは、原人類の進化に関連して重要であろう。

第四紀（2.6Ma以降）に入って、氷床の拡大縮小に伴う全球的な気候変動が2、3万年から10万年周期で卓越する氷期サイクルの時代となる。この氷期サイクルにチベット・ヒマラヤ山塊がどのような役割を果たしたかについては、未だ確定的な答えは出ていないが、雪氷のアルベド効果を通じた気候変動の増幅器としての役割の可能性を気候モデルによる研究は示唆している。原人の進化は、この氷期サイクルの中で進んでいく（図10）が、この時期は、氷期サイクルに伴い、（アジアモンスーンの強弱を通して）、東アフリカの湿潤－乾燥の気候の繰り返しが卓越しており、これが原人類の進化を促す重要な契機であったと考えられる。東アフリカからアラビア半島にかけて

の地域は、図6や図11で示されるように、南北に湿潤・乾燥・湿潤という気候・生態系の分布があり、氷期と間氷期で、この分布が変位したり、コントラストの強弱が生じていることが特徴的である。このような変動は原人にも新人にも進化圧にもなり、ユーラシアへの移動の契機にもなったはずである。ただ、第四紀は、気候変動のサイクルでも、図8のように、寒冷な氷期の期間が長く、ユーラシア大陸に移動した人類にとって、厳しい気候であったはずだが、その主な舞台となった中央アジア・西南アジアは、現在のような砂漠に代わって、広大な草原・ステップが拡がり、そこに多様に棲息していた草食性動物との共存関係こそが、人類を進化させた大きな条件ではなかったか。

そして、最終（最新）氷期が終わった1万年前以降、完新世の温暖で比較的安定な気候の下で、チベット・ヒマラヤ山塊の東と西で、それぞれ、イネと麦類を中心とする農耕が始まり、人類は初めて定着の生活形態を取り、人類は新たな文明の時代に入り、現在に至っている。ただ、農耕は、それまでの氷期のような、寒冷でしかも大変動する気候下ではとても成り立たない。過去約100万年の地球規模の氷期サイクル（図9）では、過去の間氷期は、長くても2万年程度しか継続していない。現在の間氷期がすでに1万年を経過していることを考えると、自然サイクルとして現在の間氷期は、せいぜいあと1万年程度しか続かないことも示唆している。

ただし、過去と現在での大きな違いは、農耕革命に続き、産業革命を成し遂げた人類は、地球表層システムそのものに大きな影響を与えつつあることである。人類活動が地球表層を大きく変えつつあるこの時代は、Anthropocene（人類世あるいは人新世と仮に訳されている）と定義することも提唱されている⁵¹⁾。人類は、第三紀後半以降のチベット・ヒマラヤ山塊の上昇に伴う気候・生態系の変化と闘いながら、あるいはこの変化に適応しながら現在の文明を築くまでに至ったが、バラントロプスやネアンデルタールのように適応できずに滅亡した人類や、地域の文明も多々あったことを、これまでの人類史は示している。人類世（人新世）は、人類活動がグローバル化しており、気候生態系の変化も、地域レベルだけでなく、地球規模で起こりつつあることを強く示唆している。

図 13 には、人類世（人新世）にあたる最近数十年の「地球温暖化」も記されているが、それまでの完新世の気温変動の幅をすでに大きく超していることが分かる。ヒマラヤ・チベット山塊は、テクトニックなメカニズムによって現在も上昇を続けており、氷期サイクルの基本的なメカニズムは現在もなお続いていると考えられるが、IPCC⁵²⁾などにより、ほぼ間違いなく人間活動に因るとされている現在の「地球温暖化」が、完新世の比較的温暖で安定な気候を持続する方向に働くかどうか。地球（気候）システムの複雑な非線形性を考えると、必ずしもそれは成り立たないであろう。人類世（人新世）の人類活動は、このような地球システムに対し、過去数百万年間のような受動的な対応ではなく、結果の見えないままの能動的な働きかけを行って、システムそのものを変えつつあるともいえる。

本ヒマラヤ学誌で議論されているヒマラヤ・チベット地域の自然と人の関係も、比較的安定だった完新世の気候・生態系の下で維持されてきたことを忘れるべきではない。人類世（人新世）での自然と人の関係はどうあるべきか。ヒマラヤ・チベット地域でもその問題は喫緊の課題であろう。

参考文献

- 1) 安成哲三 (1980): ヒマラヤの上昇とモンスーン気候の成立—第三紀から第四紀にいたる気候体制の変化について—。生物科学, 32, 36-44
- 2) Molnar, P. (1990): The rise of mountain ranges and the evolution of humans: A causal relation? *Irish Journal of Earth Sciences*, 10, 199-207.
- 3) Molnar, P., P. England and J. Martinod. (1993): Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau and the Indian Monsoon. *Review of Geophysics*, 31, 357-396.
- 4) 酒井治孝 (2005): ヒマラヤ山脈とチベット高原の上昇プロセス—モンスーンシステムの誕生と変動という視点から—。地質学雑誌, 111, 701-716.
- 5) Sakai et al. (2006): Pleistocene rapid uplift of the Himalayan frontal ranges recorded in the Kathmandu and Siwalik basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241, 16-27.
- 6) Rowley, D. B. and B. S. Currie (2006): Paleo-Altitude of Late Eocene to Miocene Sediments from the Lunpola Basin, Central Tibet: Implications for Growth of the Tibetan Plateau. *Nature*, 439, 677-681.
- 7) Wang, C., X. Zhao, Z. Liu, P. C. Lippert, S. A. Graham, R. S. Coe, H. Yi, L. Zhu, S. Liu, and Y. Li (2008): Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proceedings of National Academy of Sciences (PNAS)*, 105, 4987-4992
- 8) Wang, Y., T. Deng and D. Biasatti (2006): Ancient diets indicate significant uplift of southern Tibet after ca. 7 Ma, *Geology*, doi: 10.1130/G22254.1, 34, 4, 309-312
- 9) Zachos, James, Mark Pagani, Lisa Sloan, Ellen Thomas, and Katharina Billups (2001). "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present". *Science* 292 (5517): 686-693.
- 10) Molnar, P. and P. England (1990): Late cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature*, 346, 29-34.
- 11) Raymo, M.E., Ruddiman, W.F. (1992): Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359, 117-122.
- 12) Cerling, T. E., Wang, Y. and Quade (1993): J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene. *Nature*, 361, 344-345.
- 13) Cerling, T. E. et al. (1997): Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature* 389, 153-158.
- 14) Manabe, S. and Terpstra, T.B. (1974): The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments. *Journal of Atmospheric Sciences*, 31, 3-42.
- 15) Hahn, D.G. and Manabe, S. (1975): The role of mountains in the south Asian monsoon circulation. *Journal of Atmospheric Sciences* 32, 1515-1541.
- 16) Manabe, S. and A. J. Broccoli (1990): Mountains and arid climates of middle latitudes. *Science*, 247, 192-195.
- 17) Ruddiman, W.F. ed., (1997): Tectonic uplift and

- climate change. Plenum Press, NY.
- 18) Abe M., A. Kitoh and T. Yasunari (2003): An Evolution of the Asian Summer Monsoon Associated with Mountain Uplift -Simulation with the MRI Atmosphere-Ocean Coupled GCM-. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 78, 81, 5, 909-933
 - 19) Abe M., T. Yasunari and A. Kitoh (2004): Effects of Large-scale Orography on the Coupled Atmosphere-Ocean System in the Tropical Indian and Pacific Oceans in Boreal Summer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 2, 745-759
 - 20) Abe M., T. Yasunari and A. Kitoh (2005): Sensitivity of the Central Asia Climate to Uplift of the Tibetan Plateau in the Coupled Climate Model (MRI-CGCM1). *The Island Arc* 14, 4, 378-388
 - 21) 酒井治孝 (1997) : モンスーン気候はいつ始まったのか? 地学雑誌, 106, 131-144.
 - 22) Amer S.A.M. and Y. Kumazawa, 2005: Mitochondrial DNA sequences of the Afro-Arabian spiny-tailed lizards (genus *Uromastyx*; family Agamidae): phylogenetic analyses and evolution of gene rearrangements. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2005, 85, 247-260.
 - 23) Yasunari, T., M. Abe and A. Kitoh (2013): Impact of Rift valley formation in East Africa on climate of Africa (To be submitted.)
 - 24) Gibbard et al. (2009) Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. *J. Quaternary. Sciences.*, 25, 96-102.
 - 25) Lisiecki, L. E., and M. E. Raymo (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* 20: 1003.
 - 26) Ravelo, C., Andreasen, D., Lyle, M., Lyle, A.O., Wara, M.W. (2004): Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch. *Nature*, 429, 263-267.
 - 27) Maslin M. and B. Christensen (2007): Tectonics, orbital forcing, global climate change, and human evolution in Africa: introduction to the African paleoclimate special volume. *Journal of Human Evolution* 53, 443-464.
 - 28) Cane, M.A. and P. Molnar (2001): Closing of the Indonesian Seaway as the missing link between Pliocene East African aridification and the Pacific. *Nature*, 6834, 157-161.
 - 29) Hastenrath, S., A. Nicklis, and L. Greischar (1993): Atmospheric-hydrospheric mechanisms of climate anomalies in the western equatorial Indian Ocean. *J. Geophysical Research*, 98, 20219-20235.
 - 30) Goddard, L. and N. E. Graham (1999): Importance of the Indian Ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa. *J. Geophysical Research*, 104, 19099-19116.
 - 31) Molnar, P., and Cane, M.A. (2002): El Niño's tropical climate and teleconnections as a blueprint for pre-Ice Age climates. *Paleoceanography*, 17, 2, 1021.
 - 32) Yasunari, T. (1990): Impact of Indian Monsoon on the Coupled Atmosphere/Ocean System in the Tropical Pacific. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 44, 29-41.
 - 33) Yasunari, Y. (1991): The Monsoon Year -A New Concept of the Climatic Year in the Tropics. *Bulletin of the American Meteorological Society of Japan*, 72, 9, 1331-1338.
 - 34) Jouzel, J. V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J. M. Barnola, J. Chappellaz, H. Fischer, J. C. Gallet, S. Johnsen, M. Leuenberger, L. Loulergue, D. Luethi, H. Oerter, F. Parrenin, G. Raisbeck, D. Raynaud, A. Schilt, J. Schwander, E. Selmo, R. Souchez, R. Spahni, B. Stauffer, J. P. Steffensen, B. Stenni, T. F. Stocker, J. L. Tison, M. Werner, E. W. Wolff (2007): Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science*, 317, 793-796
 - 35) Trinkler, E. (1930): The ice-age on the Tibetan plateau and in the adjacent regions. *Geographical Journal*, 75, 225-232.
 - 36) Khule, M. (1987): Subtropical Mountain- and Highland-Glaciation as Ice Age Triggers and the Waning of the Glacial Periods in the Pleistocene.

GeoJournal 14.4 393-421

- 37) Khule, M. and H. Kraus (1989): On the Ice Age Glaciation of the Tibetan Highlands and its Transformation into a 3-D Model. *GeoJournal* 19.2 201-206.
- 38) Yasunari et al. (2006): Abstract of the Int. Conference on the Ice Age Climate. Nagoya Univ. 21st Century COE Program. (To be submitted).
- 39) 三井 誠 (2005) : 人類進化の700万年 書き換えられる「ヒトの起源」講談社現代新書. 265pp.
- 40) 印東道子編 (2012) : 人類大移動 アフリカからイースター島へ. 朝日新聞出版, 255pp.
- 41) DeMenocal, P.B. (2004): African climate change and faunal evolution during the Pliocene-Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 220, 3-24.
- 42) Vrba, E. (1995): E. Vrba, The fossil record of African antelopes (Mammalia, Bovidae) in relation to human evolution and paleoclimate, in: E. Vrba, G. Denton, L. Burckle, T. Partridge(Eds.), *Paleoclimate and Evolution With Emphasis on Human Origins*, Yale University Press, New Haven, CT, 385-424.
- 43) Cann R.L., M. STONEKING and A.C. WILSON (1987): Mitochondrial DNA and human evolution. *Nature*, 325, 32-36.
- 44) Cerling, T.E. (1992): Development of grasslands and savannas in East Africa during the Neogene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, 97 (1992) 241-247.
- 45) Kutzbach et al. (1998): Climate and biome simulations for the past 21,000 years. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 17, pp.473-506.
- 46) 今西錦司 (1995) : 遊牧論そのほか. 平凡社文庫.
- 47) Rockstrom, J. et al. 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14, 32
- 48) Alley, R.B., 2000. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews* 19, 213-226.
- 49) 佐藤洋一郎 (1996) : DNA が語る稲作文明—起源と展開 (NHK ブックス)
- 50) 安成哲三 (2012) : 自然災害と地球環境問題の統合的な取り組みに向けて—東日本大震災とモンスーンアジアにおける環境問題からの教訓—, 学術の動向. vol.17. no.8 53-59.
- 51) Crutzen, P.J. (2002): Geology of mankind: the Anthropocene. *Nature* 415:23.
- 52) Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Summary

Revisit to the Issue of “the Himalayan Uplift and the Human Evolution” — On the Connection among the Tectonics, Eco-climate System and Human Evolution during the Late Tertiary through the Quaternary Era —

Tetsuzo Yasunari

Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

This paper reviews the recent studies on the uplift of the Tibet-Himalaya mountains (TH) and its association with the human origin and evolution through the climate and ecosystem changes in Afro-Eurasian continents.

The uplift of TH since the late Tertiary Era gradually formed the Asian monsoon system and dry climate in southwest Asia through North Africa. Meanwhile, during 5-10 Ma the formation of the Rift valley of east Africa brought about drier climate and grassland in the equatorial east Africa, which has an important implication to the early hominid evolution. The uplift of TH also caused and/or enhanced decrease of atmospheric CO₂ content through chemical weathering of mountain slopes, which has induced colder climate through the late Tertiary to the Quaternary Era. The lowering of CO₂ content caused expansion of grassland of the C₄-plant and associated evolution of Ungulata (e.g., antelope), which may have also affected the early hominid evolution.

The Quaternary Era was characterized with glacial cycles of 40 to 100k year periods. The ice/snow albedo feedback of Tibetan Plateau may have played as an amplifier of the climate change of this Era. Large temporal and spatial variability of wet/dry zones in east Africa affected by the glacial cycles is very likely to induce further human evolution and diffusion, including the migration to Eurasia. The cold climate and weakened Asian monsoon during this Era formed a broad zone of steppe and grassland in central Asia through Europe, and enabled large variety of herbivorous mammals there. The codependent relation between these mammals and the hominid species was essential for the evolution of the later hominid species (*Homo erectus*) to the modern hominid (*Homo sapiens*).

Under the warm and stable climate of the Holocene since 10ka the modern hominid heuristically started agriculture and civilization, which has, however, been causing a new Era named "Anthropocene" when the human beings are drastically changing the earth system itself.