

nature

月刊 **ダイジェスト**

www.naturejpn.com

日本語編集版

vol.01, no.11

| November 2004

小さなヒト族が見つかった

ゼロから生命を作り出す

ヒトの協力を考える

東アジア地域の核兵器問題

Sponsored by



Agilent Technologies

nature

月刊ダイジェスト

vol. 1, no. 11

11

月号 目次

November 2004

www.naturejpn.com

editorial

2 「武器よさらば」を実現するには

news feature

3 生命を合成する

Philip Ball

6 若さを保つ魔法の薬?

Helen Pearson

books and arts

8 経済的利益がすべてではない

Reviewed by Herbert Gintis

essay concepts

9 究極の「時」をもとめて

Alexander E. Kaplan

news and views

10 宇宙鉱物学：よその太陽系の塵

Steve Desch

letters to nature

12 インドネシア東部のフローレス島で出土した新しい人類化石の考古学分析と測定年代

M J Morwood et al.

Publisher: Antoine E. Bocquet
Editor: Junko Tsuda, Sara Harris
Production: Takesh Murakami
Advertising Sales: Rinoko Asami
Marketing: Peter Yoshihara

ネイチャー・ジャパン株式会社

〒162-0841

東京都新宿区払方町 19-1

エムジー市ヶ谷ビル 5 階

Tel. 03-3267-8751

Fax. 03-3267-8746

© 2004 年 ネイチャー・ジャパン

掲載記事の無断転載を禁じます。

cover stories

(ページ数は当該号の数です)



16 September 2004 Vol.431/Issue no.7006

11月の米国大統領選挙が近づきつつあり、科学も政治的論争の議題の1つになっている。今週号のNews Featureでは、宇宙探索や気候変動の問題から、本土の安全確保と米国の科学研究を世界に開かれたものにしていくことの必要との間のバランスの取り方にいたる15の質問に、ジョージ・W・ブッシュとジョン・ケリーの二人が答えている。二人の大統領候補の回答から、読者はこの二人の科学問題に対するスタンスの取り方について、今まででもっとも確かな相対評価を得られよう。[News Feature, p.238] この記事とともに、news@nature.comでは9月15日から選挙特集を掲載する。表紙：2004年7月、民主党全国大会におけるジョン・ケリー上院議員(写真：Scott Olson/Getty Images)および2003年の共和党全国大会でのジョージ・W・ブッシュ大統領(写真：Alex Wong/Getty Images)



23 September 2004 Vol.431/Issue no.7007

ウイルスは全て、ある細胞から別の細胞に移動する際に遺伝物質を防護しなくてはならない。HIVのようなレトロウイルスも例外ではなく、RNAは6個のキャプシドタンパク質の配列からなるコアの中に包まれている。細胞への感染に続いて、この集合体は解体する必要がある。レトロウイルスであるマウス白血病ウイルスの6量体構造の基礎単位の原子レベルでの構造が、X線結晶学の手法を用いて分解能1.9 Åで決定された。この6量体分子は比較的不安定で研究を厄介にしていたため、その詳細な構造の解明は強く待ち望まれていた。この構造によってキャプシドの準安定といえる性質が説明され、キャプシドタンパク質をまとめあわせている相互作用が明らかになった。この知見により、キャプシドの安定性を妨げることでレトロウイルスの複製を阻害する薬剤の理論的デザインが可能になるかもしれない。[Letters, p. 481]



30 September 2004 Vol.431/Issue no.7008

物理学分野に良いニュースだ。粒子加速器はより安価で、小さくなる方向に向かいつつある。3つの研究グループが、超短・超高強度レーザーを使ってプラズマ中に極めて高い電場を作り出し、高品質の電子ビームを発生することに成功した。この相対論的ビームは、コンパクトなテーブルトップサイズの粒子加速器など多数の応用が期待できる。表紙は、予め成形しておいたプラズマチャンネルでレーザーパルスをガイドしたとき、レーザーパルスの放射圧によって生じるプラズマ密度変化を示している(Geddes et al., p.538)。パルスは上方向に進み、密度の違いは色の違いで表してある。この密度変化に伴って、モーターボートの航跡のように移動する電場が生じる。この電場は従来方式の加速器の電場より数千倍も強い。[Letters, pp.535, 538, 541; News and Views, p.515]



7 October 2004 Vol.431/Issue no.7009

高圧下では水素の特異な相が存在すると予測されており、特に固体水素の金属相については1930年代から探索されているが、未だに明らかになっていない。今週号でローレンスリバモア国立研究所のグループは、水素の相転移ではもっと意外なことが起こるのかも知れないと予想している。彼らは、水素融解の第1原理計算について報告している。それによると、圧縮された水素は、金属結晶相ができる前に、約400 GPa(400万気圧)で低温量子流体に転移するだろうと考えられる。この液体は、変わった性質をもつ超流動体であろう。彼らのシミュレーションによると、融解に伴って赤外吸収が増加し、これがこの現象を観測するための指標になる。表紙(L Kraussによるイラスト)は、分子固体から量子液体への転移を表している。[Letters, p.669]



14 October 2004 Vol.431/Issue no.7010

病理学では、病気にとまなう変化の顕微鏡を使った観察が長い間行われてきたが、こうした変化がすべて悪いことなのかどうかは、必ずしもはっきりしていない。ハンチントン病では、ポリグルタミン領域の伸長が原因でハンチンチンタンパク質が凝集して封入体になり、これがニューロン死を引き起こすと考えられている。今回この現象の研究が、新しいロボット顕微鏡を使って行われた。この顕微鏡は、いったん1個のニューロンに注目すれば、任意の間隔の後にも、まったく同じニューロンに戻って観察することができる。意外にも封入体はニューロンの死を引き起こさず、変異ハンチンチン量を減少させ、生存率を改善した。つまり、封入体形成は有益な反応であると考えられる。病原性の変化、副次的変化、有益な変化を識別できれば、病気についての理解が深まり治療標的も見つかりやすくなる。表紙は、1個のニューロンの3枚の写真を合成したもの。[Article, p.805; News and Views, p.747]

nature

「武器よさらば」を実現するには

北朝鮮に核兵器配備を断念させるためには、交渉担当者は、周辺諸国に核兵器を保有する意図のないことを北朝鮮に納得させる必要がある。

しかし最近の日本や韓国での動きでは、そのような交渉は難しいものとなるだろう。

原文：No farewell to arms?

Nature Vol.431(385)/23 September 2004; www.naturejpn.com/digest

全体主義国家では簡単にプロパガンダが作り出せる。そもそも内容の虚偽性を訂正できる独立系メディアが存在しないからである。北朝鮮の核兵器配備プログラムは、真実とも虚偽ともつかない情報で塗り固められている。その主張の中心にあるのは、隣国も核兵器の配備を望んでいるからプログラムが必要なのだ、という点である。おそらく、その主張には根拠がないと思われる。さらに日本や韓国が、北朝鮮の誤報製造装置に好材料を提供することをやめてくれれば、その主張をもっとたやすく無視できるようになるのだが……。

例えば、韓国では、2000年にウラン濃縮実験が実施され、その約20年前には核廃棄物からのプルトニウム抽出が実施されていたことが9月初めになって公表された。同国が、これらの研究プロジェクトを国際原子力機関(IAEA)に申告しなかったことは、核拡散防止条約違反である。この事実が明るみにでたのは、IAEAの査察官によって発見されたためであったことがさらに事態を深刻化させている。

北朝鮮は、同国の核兵器配備計画に関する交渉再開を引き延ばそうとしており、この新事実をすぐに利用し、自国での核保有能力の必要性を示す論拠にした。北朝鮮は虚偽をまじえた外交術に長けているため、核兵器アナ

リストは、同国が保有する核兵器の規模はどうか、核兵器自体が存在するのかどうかについても、明確に把握できていない。それでも北朝鮮では核開発計画が進行中であることは明らかであり、韓国での新事実発覚によって、この計画を破棄させるための交渉が近い将来に再開する望みは薄くなった。

残念ながら、北朝鮮の近隣諸国による「オウンゴール」は、これが初めてではない。2003年1月には、日本の核燃料再処理施設で約200キログラムの使用済プルトニウムが行方不明になっていることが判明した。同国では、使用済核燃料のための大規模再処理工場が建設中である。この施設を使えば、プルトニウムの生産が可能となる。北朝鮮が繰り返し指摘しているように、プルトニウムは原子炉の燃料物質であるのみならず、核兵器の燃料物質でもある。

韓国にも日本にも統一的な核兵器開発プログラムが存在することを示す証拠はない、というのが真相だ。日本での事実発覚から1ヵ月後、IAEAによる査察が実施され、日本での核物質管理上の不備はすさんだ監視体制によるものであり、秘密の核兵器配備計画があるわけではないと発表された。その後、IAEAは日本に対する信頼を高め、この9月には査察チームの規模を当初の半分に縮小している。

韓国に対して北朝鮮がみせるより重大な主張についても、10月に入ってIAEAの査察チームが「秘密実験」についての調査報告を行い、そこで根拠がないとされる可能性が非常に高い。しかし、これで韓国が完全に潔白だったということにはならないだろう。いつかある時点で、誰かが研究推進を決定し、研究者が手を貸していたのだ。この実験を兵器に応用できる可能性が明らかであることを考えると、基礎研究の名の下になされた実験だったという弁明は到底信じることはできない。多くの先進工業国には、そのような実験を行うだけの資源と専門知識が備わっている。この能力を保持することは核拡散防止条約に違反しないが、実験を行うことは、明白な条約違反である。

朝鮮半島では、このような条約違反があれば、北朝鮮が核兵器開発の権利を主張する上での新たな根拠となる。核資源管理の不行き届きも、民生用核資源の場合を含めて、同じことである。このことは、北朝鮮のように外交術が巧みで、正直とは言えない国家に対処していくために心すべき厳しい教訓のように思われるかもしれない。しかし、地域全体での核兵器開発競争の回避を目指すのであれば、核兵器開発禁止を約束した関係諸国の研究者も政府関係者もIAEAのルールを厳守しなければならないのだ。 ■

生命を合成する

遺伝子操作はもはや当たり前の時代になった。生物学者たちは今、ゲノムを合成し、遺伝暗号を変更し、新しい生命体の可能性を探り出そうとしている。もう、そうした研究の危険性を考えるべきときなのだろうか。

Philip Ball記者が専門家たちに尋ねた。

原文：Starting from scratch

Nature Vol.431(624-626)/7 October 2004; www.naturejpn.com/digest

「**生**命を設計し直す」。Steven Benner が1988年にスイスのインターラーケンで開いた会議につけようとしたタイトルだ。現在、米国のフロリダ大学(同州ゲインズビル)の化学者であるBennerは当時、生物の本質的特徴を備えた人工化学システムを生み出す可能性を探ろうと、会議を計画した。

しかし、このタイトルに出席予定者から反対意見が続出した。Bennerは、「生命の分子を設計し直す」とトーンダウンせざるをえなかった。「ノーベル賞受賞者のような研究者でも、このタイトルで会議を開けば、遺伝子組み換え反対の暴動がスイスで起こってしまおうと確信していた」とBennerは説明する。

Bennerの会議は、「合成生物学」という新しい研究分野のはじまりを明確にした。しかし、この分野は今、単に言いまわしを変えるだけでは隠しようがない懸念を引き起こしている。微生物を設計し直す方法は拡大しており、まったく新しい微生物を組み立てる方法さえ生まれようとしている。こうした進歩は、生物医学と環境工学に途方もない可能性をもたらす。しかし、遺伝子操作やナノテクノロジーについてすでに持ち上がっている懸念を上回るかもしれない潜在的危険性も抱えている。生物学者たちが本当に新しい生命を合成するとば口に立っていると見たなら、技術の悪用や不注意で起こる災害の範囲はきわめて大きなものかもしれない。

ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校のウイルス学者 Eckard Wimmer は2002年、合成生物学の潜在的な危険性を如実に示す研究結果を発表した。彼の研究チームは、通信販売されているDNA断片とインターネット上でだれでも容易に入手できるウイルスゲノムマップを使って、生きているポリオウイルスをゼロから作ったと発表した¹。この研究結果は、バイオテロリストたちが、もっと危

険な生物(エボラウイルスや痘瘡(天然痘)ウイルス、炭疽菌など)を作るかもしれないという可能性をあぶりだした。しかも、抗生物質に対する耐性を持たせるということもありえるのだ。

アシロマ会議再び？

それ以降、生物学者たちの生命を操作する能力は飛躍的に進んだ。Wimmerがポリオウイルスを作るには3年かかったが、ゲノム解読で名高い、代替生物エネルギー研究所(米国メリーランド州ロックビル)のCarig Venterらは昨年11月、細菌に感染するウイルスをたった3週間で組み立てたと発表した²。自然界には存在しない機能を持つよう、細菌の細胞内回路に手を加える研究も進んでいる。さらに研究者たちは、生きている細胞に必要な最小限の遺伝子セットを決定する目標にも近づきつつある。そうした最小セットが明らかになれば、新しい生命の創出が可能になるかもしれないのだ。

約30年前、組み換えDNA技術は人間の健康と環境に危険をおよぼすかもしれないという懸念が高まり、指導的な分子生物学者らによる前例のないリーダー会議が開かれた。1975年2月、米国カリフォルニア州パシフィックグループにあるアシロマ会議センターに集まった研究者らは、ある種の研究を自主的に差し控え、新技術の悪用を防ぐ対策を始めることを決めた。

今また、新たなアシロマ会議を開くべきときなのだろうか。合成生物学にかかわっている研究者たちは、危険回避の方法についてはさらなる議論が緊急に必要だということで見解が一致しているが、まだ公式にリーダー会議を招集する段階にはない。合成生物学にとまなう懸念の一部は、米国のマサチューセッツ工科大学(MIT、同州ケンブリッジ)で今年6

月に開かれた合成生物学第1回国際会議の特別セッションで議題にされたが、指針の勧告をまとめようとすることはなかった。

合成生物学にとまなう危険性の問題に向き合おうとするのは、合成生物学の研究を続けることで得られるかもしれないものがとても大きいからだ。米国のカリフォルニア大学サンフランシスコ校のタンパク質工学者 Wendell Lim は「合成生物学がうまくいけば、欠陥のある細胞機能を修復したり、腫瘍を標的にしたり、特定のタイプの細胞の成長や再生を刺激したりして、さまざまな病気の治療が可能になるかもしれない」と言う。別の研究者たちは、複雑な薬剤を作る細菌や、日光から水素を作る細菌を作り出したいと考えている。水素はきれいなエネルギーとして、車や発電所での利用が期待されている。

細胞は、機械や電子機器のように、巧妙に設計された装置だと理解されている(もちろん、その設計は製図板の上ではなく、進化によって行われたのだが)。合成生物学の登場は、そうした「設計された」細胞の仕組みを解明するうえでたどり着いた、当然の結果といえる。細胞の機能は、相互作用する遺伝子の回路によって生じる。科学者たちが1990年代にこうした回路の見取り図を作成し始めたとき、彼らは自然な成り行きとして、細胞の回路に手を加えることができるだろうかと考え始めた。

相次ぐ研究成果

2000年、プリンストン大学(米国ニュージャージー州)で研究していた生物物理学者 Michael Elowitz と Stanislas Leibler は、蛍光タンパク質の生産量が周期的に振動する遺伝子回路をゼロから設計した。この回路でプログラムされた細菌は、周期的に蛍光を発した³。別の研究者たちはこの成果をもとに、外部のシグナ

ルでオンやオフになる回路や、細菌の個体密度を制御できる回路を作った^{4,5}。

今、細胞の回路網を変える方法の研究に取り組む研究者が増えている。たとえばLimは、細胞内や細胞間でシグナルを運ぶタンパク質のいくつかを取り替えた。その結果、細胞は環境からの種々の入力に反応するようになった^{6,7}。ローレンスバークレー米国立研究所の化学工学者 Jay Keasling は、強力な抗マラリア薬「アルテミシニン」の前駆物質を合成するための回路を大腸菌(*Escherichia coli*)に組み込んだ。アルテミシニンはヨモギから得られる物質だが、今のところ、広く使われるには高価すぎる。回路を組み込むには、ヨモギやビール酵母などほかの生物から10個の遺伝子を大腸菌に導入し、その発現レベルを注意深く調節することが必要となる⁸。もし、この方法で安く確実に薬を作ることができれば、マラリアの治療方法が変わるかもしれない。

また別の研究者たちは、遺伝子やタンパク質の基本構成要素の研究を続けてきた。自然界のタンパク質は20種のアミノ酸でできている。この20種からは膨大な種類の機能を持つタンパク質が作られる。しかし、タンパク質の構成要素の種類を増やせば、新しい機能を持つ生体分子の設計が可能になるかもしれない。たとえば、タンパク質をベースにした、細胞内での分解作用に耐える薬などだ。

現在はスクリプス研究所(米国カリフォルニア州ラホーヤ)に所属する化学者 Peter Schultz は1989年、細菌の特定のタンパク質に自然界では使われていないアミノ酸を組み入れさせる方法を発見したと報告した⁹。この方法で、微妙に異なる活性を持つ酵素が得られた。それ以来Schultzは、自然界では使われていない80種を超えるアミノ酸をタンパク質に組み込んでいる。

細菌 DNA を合成へ

同じ1989年、Bennerは、自然界では使われていない塩基対を細胞のDNAに挿入させることに成功した¹⁰。従来のDNA塩基対とは異なるものの、DNA塩基対として機能する分子の理解が進めば、原始時代の地球に存在したかもしれないDNAの化学的祖先の候補や、ほかの世界で生命現象を担っているかもしれない遺伝システムについて知るきっかけとなるだろう。「私たちが開発した人工遺伝システム

は、5年ほど後には、繁殖し、進化し、学習し、環境の変化に反応する人工生命の遺伝システムとして働いているだろう。これは、地球起源ではない生命がどのように出現するかを明らかにするのに役立つはずだ」とBennerは予測する。

生物学者たちが細胞の回路やそれを構成する分

子を形作ることができるようになる一方で、DNAの自動化学合成技術も進歩し、全ゲノムを設計し、組み立てることが可能になりつつある。Venterが昨年11月に発表した短期間でのウイルス合成は、DNA合成装置の性能向上の証だった。予測されるところでは、来年の装置は約100万塩基対の配列を作ることが可能になるという。これは、性行為感染症を起こす細菌、クラミジアのゲノムとほぼ同じ大きさで、大腸菌ゲノムの約4分の1だ。

米国ワシントン州ボセルにあるDNA合成企業ブルー・ヘロン・バイオテクノロジーのJohn Mulligan社長は「細菌ゲノムは現在のDNA合成技術の射程圏内にある」と話す。しかし、細菌のゲノムは、細胞および細胞に備わっている生化学機構の中に埋め込まなければならない。このため、細菌の合成はウイルス合成よりもはるかに難しい。それでも挑戦は行われている。Venterは2002年11月、機械で合成したDNAから始めて単純な細菌を作る計画を発表し、世間の注目を集めた。

どう規制すべきか

しかし、新しい細菌ゲノムを作ることは、単なる化学の応用問題ではない。細胞内の回路網も設計しなければならないからだ。それが問題を難しくしているので、単純化するのはよい方法だ。MITのコンピューター科学者 Tom Knight は「複雑さを理解しようとするのではなく、複雑さを取り除くことを考えればよいのだ」と言う。彼は合成生物学に工学者の視点を持ち込んでいる研究者である。

Knightはこの方針に沿って、もっとも単純な生物のひとつである *Mesoplasma florum* を研究している。この細菌は682個の遺伝子しか持たない。この細菌のゲノムの概要配列



生命の再設計：Steve Benner(左)とWendell Limは、生きている細胞の中のタンパク質とDNAを設計し直す研究に取り組んでいる。

は昨年完成され、代謝経路はマッピングされている。ゲノムは793キロベースで、不必要なDNAはほとんど含んでいないように見えるが、Knightはさらに単純化できると考えている。彼は今、その回路網をマッピングしてコンピューター上でモデル化し、さらに何を取り除くことができるかを調べている。

これらの技術が、アシロマリーダー会議開催のきっかけとなったのと同じ問題を引き起こしている。分子生物学者たちは当時、細菌(場合によっては、さらに高度な生物も)の遺伝子をいかににも組み換えることができる道具を、すでにすべて持っていることに気づいた。細菌の遺伝子を操作して、ヒトインシュリンなどの薬を低コストで作らせることができるかもしれないと期待され、実際、すぐに実現された。心配されたのは、遺伝子を組み換えられた細菌が環境中でどう振る舞うのか、だれにも分からないことだった。たとえば、毒性を持つことはないのか、抗生物質に耐性を持つことはないのか、というようなことを。

合成生物学の登場によって、問題はますます難しくなった。合成の試みに制限を設けるべきか。もし設けるなら、どのような制限であるべきか。また、それをどのようにして守らせるべきか。たちのよくない組織や、さらには国家が資金を出している生物兵器開発計画などが、この技術を危険な微生物の合成に使わないようにさせるにはどのような対策がありえるか。

分子科学研究所(米国カリフォルニア州パークレー)のRoger Brent所長は、「ひとつの選択肢は、DNA合成には許可を必要とすることだろう」と提案する。しかし、Brentはこうつけ加える。「もっと重要なことは、コンピューター

▶ ターウイルスを多量に作り出しているようなハッカーたちのサブカル世界を、合成生物学では育てないようにすることだ。コンピューターハッカーたちは、特別に巧妙でずる賢いウイルスプログラムを作ることによって仲間の尊敬を得ようとする。Brentは、合成生物学の研究者たちには、研究目的ではない派手な芸当に夢中になったりせず、合理的に考え行動できる実験室文化を奨励するよう促している。

悪用防止と制御技術

今のところ DNA 合成は許可制とはなっていないが、一部の DNA 合成企業は、無責任な研究をうっかり手助けしてしまうことを避けるため、独自の自衛策をとってきた。ブルー・ヘロン・バイオテクノロジー社の Molly Hoult 上級副社長は「わが社への DNA 合成の注文はすべて、『生物学的危険物』のデータベースに照らしてクロスチェックしている」と話す。データベースに似通ったものが見つかった場合は、同社は注文品を生産する前に、顧客の研究についてさらに調べてみる。もし、問題がないことが調査で容易に確かめられなければ同社は注文を断る。「私たちは、問題があるかもしれないビジネスとは、かかわり合いになるのを避けている」と Hoult は話す。

このような自衛策はやがてだれもが守るべきルールとなるかもしれない。さらに、合成生物学の悪用を防ぐため、科学者たちは政府の情報機関に密接に協力することを求められるようになる可能性もある。昨年 11 月に発表された米中央情報局(CIA)の機密扱いでないレポートは、合成生物学は「既知のいかなる病気よりも危険な」病原体を作り出すかもしれない、と警告し、「情報機関と生物科学コミュニティとの従来とは質的に異なる協力関係」を提唱した。特に、生物科学コミュニティは、「生きているセンサー網」のように機能し、兵器として使えるかもしれない技術の進歩については政府に報告することを求められることもあり得るだろう¹¹。

しかし、合成生物学のもっとも深刻な問題がバイオテロの可能性であるかは明確ではない。プリンストン大学の電気工学者 Ron Weiss は、細菌の細胞内の回路に手を加える研究を行っている。彼は、有害な細菌に抗生物質耐性遺伝子を加えることは比較的簡単で、原理的には 1970 年代から可能だったと指摘する。

しかし、その方法は生物戦争の手段として、さして注目されてはこなかった。新しい生物を作るよりも、単に既存の有害な生物を増やし、放出するほうが簡単で安価だからだ。「私がテロリストなら、有害な細菌にさらに手を加えることは、限られた費用で最大の損害を与えるための最善策ではないと判断するだろう」と Weiss は話す。

合成生物学の、故意に引き起こされるわけではない危険性を予測することはさらにずっと難しい。たとえば、まったく新しい能力を持った細菌が開発されたら、いったいどうやってそれを制御下におけばいいのだろうか。

ひとつの方法は、組み込み型の安全装置を使うことかもしれない。たとえば、細菌には生まれつき、クオラムセンシング(密度依存性遺伝子発現)という、高い個体密度に反応する能力が備わっている。この能力を細菌に組み込んで自滅機構を活性化させる方法が考えられる。もうひとつの選択肢は、コンピューターの論理ゲートのように機能する遺伝子回路を作り、細胞分裂の回数を数える方法だ。細胞は、あらかじめセットされた回数、分裂してしまうと死ぬことになる。

Weiss は、こうした方法を試す実験をすでに行った。残念ながら、わずか数日で突然変異株が現れ、個体数制御メカニズムを回避してしまった⁵。しかし、Weiss は、数段階の防御を設けることで問題を解決できると考えている。実際、自然界でみられるクオラムセンシング能力を持つ細菌には、そのような冗長性が組み込まれているらしい。そうした細菌が、自身の個体数制御機構を回避するような進化をすることはない。「自然界では、私のやろうとしていることがすでに実現されているのだ」と Weiss は話している。

予測しきれないリスク

合成生物学はどんどんと発展していくものなので、悪意によるものにせよ、不注意によるものにせよ、起こる可能性のある問題すべてを予測するのは難しいだろう。アリゾナ州立大学バイオデザイン研究所(米国同州テンピ)の所長でバイオテロの専門家 George Poste は「今後 10 年で発生する問題は無限といえる。すべての危険性を予測することは無理だ」と話す。「ほとんどの研究者はまだ、細胞から分離した生物学的材料で研究をしている。だから

今のところ、実験室から逃げ出しそうなものではなく、当面の危険性についてはそれほど心配していない。しかし 20 年経てば、状況はまったく違っている可能性がある」と Poste はつけ加えた。

Poste は、危険が現れたときにそれを定量化するのに役立てようと、新しい技術発展について「危険因子」を数え上げる方程式を開発している。彼はこれを「リスク計算法」と呼んでいる。この方程式は、危険性があるしきい値に達すると警報を鳴らす。まだ未熟な道具であることは仕方がないことだが(Poste の方程式は、新技術を悪事に転用するのに必要な時間など、十分に定量できない因子を含んでいる)、少なくとも目前の危険と遠い将来の危険とを見分けるのには役立つかもしれない。

危険性を的確に予測することは難しく、アシロマ会議のような会議を今開いたとしても、出席した研究者たちは幻影と格闘することになるだけかもしれない。だから今のところ、話し合いは非公式にとどまっている。「確かにもっと議論すべき問題だ。私たちは、この問題をまだ十分に理解してはいない」と Weiss は話す。

合成生物学は遅かれ早かれ、現在予測されている危険性よりもはるかに多くの危険に直面するかもしれない。Poste が言うように「生物学がいつまでも無害なまの存在であるとは限らない」のだ。■

Philip Ball はネイチャーの編集顧問。

1. Cello, J., Paul, A. V. & Wimmer, E. *Science* **297**, 1016–1018 (2002).
2. Smith, H. O., Hutchison, C. A., Pfannkuch, C. & Venter, J. C. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **100**, 15440–15445 (2003).
3. Elowitz, M. B. & Leibler, S. *Nature* **403**, 335–338 (2000).
4. Gardner, T. S., Cantor, C. R. & Collins, J. J. *Nature* **403**, 339–342 (2000).
5. You, L., Cox, R. S., Weiss, R. & Arnold, F. H. *Nature* **428**, 868–871 (2004).
6. Dueber, J. E., Yeh, B. J., Chak, K. & Lim, W. A. *Science* **301**, 1904–1908 (2003).
7. Park, S.-H., Zarrinpar, A. & Lim, W. A. *Science* **299**, 1061–1064 (2003).
8. Martin, V. J. J., Pitera, D. J., Withers, S. T., Newman, J. D. & Keasling, J. D. *Nature Biotechnol.* **21**, 796–802 (2003).
9. Noren, C. J., Anthony-Cahill, S. J., Griffith, M. C. & Schultz, P. G. *Science* **244**, 182–188 (1989).
10. Switzer, C., Moroney, S. E. & Benner, S. A. *J. Am. Chem. Soc.* **111**, 8322–8323 (1989).
11. *The Darker Bioweapons Future* (Office of Transnational Issues, CIA, OTI SF 2003-108, 2001); <http://www.fas.org/irp/cia/product/bw1103.pdf>

若さを保つ魔法の薬？

テストステロン療法は、活力を取り戻し、性欲を高め、頭を冴えさせる。またはそうなると言われている。しかし、この強力な性ホルモンを使う者は自らの健康を危険にさらしているのではないだろうか。Helen Pearsonが報告する。

原文：A dangerous elixir?

Nature Vol.431 (500-501)/30 September 2004; www.naturejpn.com/digest

足取りを軽くし、性欲を高め、認知機能の低下を防ぐ。テストステロン補充療法の支持者たちは、このホルモンをバイアグラを超える強壮薬とみなしている。多くの男性はもちろん一部の女性までもが、この男性ホルモンを自ら使用していることは不思議ではない。

薬業コンサルタント会社 IMS Health 社(コネチカット州フェアフィールド)の試算によれば、2003年、テストステロンが処方されている米国人男性は200万人を超える。1999年には半分以下の90万人であった。この数字が下げ止まる気配はまだない。

ホルモン剤に手を伸ばす男性の多くが抱えている不安は、若き日の活力を失うことだ。一方、医学界では、通常は年齢と共にテストステロンが減ってゆく健康な男性が、ホルモン療法でいったい何らかの利益を引き出せるものかどうか議論されている。すでに研究されているところでは、テストステロンの補充も前立腺癌の発症を促進するかもしれない。さらに不安視されるのは、テストステロン療法が一部の男性で生涯にわたって続けられるだろうことである。というのも、このホルモンを現在使用している男性の約30%が18～45歳なのだ。

大きな問題は、リスクと利益を評価する元となる臨床データが不足している点にある。専門家は、テストステロン使用者は自らの健康な身体を「実験台」にしているようなものだと述べている。「テストステロン補充療法に対する人気の高まりでいま、詳細な臨床試験を実施して科学界がこれを支持できるものなのか否かを見極めるべき段階に来ている」と、ワシントン大学医学部(シアトル)の老年科医 Bill Hazzard は語っている。

臨床試験の必要性

Hazzard は米医学研究所が召集した専門家委

員会のメンバーで、同委員会は昨年、多くの短期臨床試験を実施することでテストステロン療法の効果の詳細に見極めるべきであると勧告した¹。米国立加齢研究所(メリーランド州ベセスダ)は今年中に、補充療法の利益を得る確率の最も高い高齢男性を対象として、こうした臨床試験を始める予定である。

しかし、このような試験で論争が終息する可能性は低い。研究者のなかには、大規模で長期間にわたる臨床試験でしかテストステロン療法の微妙な利益とリスクは明らかにならないと考える者もいる。「こうした臨床試験を実施しないのは、全く倫理的でないと思います」とワシントン大学(シアトル)の老人学者 Alvin Matsumoto は語る。

テストステロンを実際に使用している男性に尋ねてみれば、このホルモンの需要急増の理由がよくわかる。今年58歳になるボストン在住の測量士 Joe Marcklinger は、うつ病に悩んでいた2年前にテストステロンの使用を始めた。ホルモンを含むジェル剤を毎日規定量、肌に擦りこみ始めたところ、まずは抗うつ剤の世話になることがなくなった。さらに活力が増し、筋肉には張りが出てきた。食欲と性欲も増進した。「気分は上々です。10歳は若返った気がします」と Marcklinger は語る。

テストステロンは脳と行動に作用するほか、精子生産能力を高め、筋肉の成長を促し、骨を強化する。一方で男性型脱毛症の一因であるというマイナス面もある。

精巣によるテストステロン産生は思春期に上昇し、20代、30代は高レベルで保たれる。そしてその後は年に1%ずつ低下してゆく²。こうした自然低下は、女性の閉経^{メノポーズ}に対して「男性更年期^{アンドロポーズ}」と呼ばれている。また女性の卵巣と副腎でも、男性の10%未満と少量ながらもテストステロンがつくられる。そして女性の場合も、このホルモンの産生は年齢と共に

減少してゆくと考えられている。

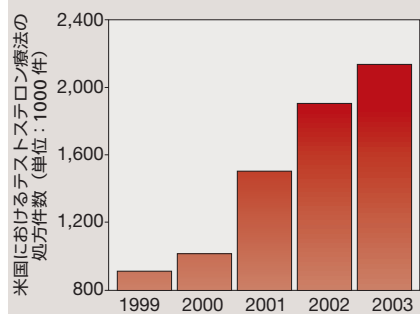
男性におけるテストステロン療法の適用は、精巣からのホルモン産生が極めて少なくなる、性腺機能低下症での経験に端を発する。この疾患を発症した若い男性には、筋肉の喪失、性欲減退、知力低下といった老化に関連した症状がみられるほか、ぜい肉の増加が認められる。この疾患の有効な治療法の1つがテストステロンである。

信頼できない証拠

医師たちは、果たしてホルモン量が性腺機能低下症と同様のレベルに落ちる高齢男性に利益がもたらされるかどうかについて、長く疑問視していた。しかし、テストステロンの使用は1990年代半ばに急増した。それまで注射剤だったのが、扱いの容易なジェル剤やパッチ剤に代わった時期にあたる。またテストステロンには精子の生産を止める能力もあるので、男性避妊薬としての検討も進められている。

専門家間の激しい論点の1つが、テストステロン産生の自然減に何らかの有害な作用があるのかどうかという点だ。ホルモン産生の低下を体力低下、性欲減退、骨密度低下と関連づけた一連の臨床試験の存在を指摘する専門家もいる。しかし、これらは加齢に伴う自然な機能低下で、テストステロンを唯一の原因とみなすのは難しいと一部の研究者は考えている。「テストステロンは何らかの役割を果たしてはいるでしょう。でも、唯一の原因ではないはずです」と、エモリー大学(ジョージア州アトランタ)の老年科医 Lisa Tenover は語る。もう1つの論点は、他の点では健康な中年以降の男性が、テストステロンの増加によって利益を得るかどうかという点である。ペンシルベニア大学(フィラデルフィア)の Peter Snyder たちが行った有名な臨床試験では、テストステロンパッチを36ヶ月間使用し

テストステロン療法の処方件数



▶ た65歳以上の男性では、プラセボ薬を使用した男性と比較して筋肉量が増し、脂肪量が多く減った³。しかし、2003年に米医学研究所が発表した報告書では、文献上の31の臨床試験の多くが、小規模で短期間の試験であり決定的なものではないと指摘されている。

また、テストステロンの補充によって、前立腺内に存在する潜在的な癌細胞が悪性転換して腫瘍化する確率を高めるのではないかと考えられている。一部の癌療法では、テストステロンレベルを減らすことで前立腺腫瘍の成長を遅らせるが、テストステロン療法と発癌リスクの上昇を関連づけるデータはほとんどない⁴。「説得力のある証拠はまだ得られていません」と、コーネル大学ワイルメディカルカレッジ(ニューヨーク州)の泌尿器科医で、前述の医学研究所専門委員会のメンバーでもあるDarracott Vaughanは語る。

血中テストステロンレベルの測定に広く用いられている方法があまり信頼できるものではないことで、話はさらに不確実なものになってくる。カリフォルニア大学ロサンゼルス校のChristina Wangたちが今年の初めに行った評価では、抗体を使用して血中テストステロン量を測定する8つの試験法が、クロマトグラフィーによる標準的な方法と比べ、高すぎたり低すぎたりする測定結果を数多く示すことが報告されている⁵。

こうした疑問をふまえて、Matsumotoとベイラー大学医学部(テキサス州ヒューストン)のGlen Cunninghamは4年前に共同で、テストステロンの効果を調べるための大規模臨床試験を提案した。この計画は、後に見直しが行われて拡張された。6年間にわたり40ヶ所、6,000人の男性を対象とする1億2,000万ドルのプロジェクトは、国立加齢研究所、退役軍人省、製薬業界の支援を取り付けた。

癌発症の恐れ

ところが、計画は2002年に暗礁に乗り上げた。研究共同体が、米国立衛生研究所の傘下の諸機関に財政的支援を求めている時期のことである。当時、社会ではホルモン療法に対する懸念が高まりつつあった。その理由は、2002年に中止に追い込まれた、女性ホルモン補充療法についての大規模試験、「女性の健康イニシアチブ」にあった。この試験では、ホルモン療法に起因する心臓病、乳癌、卒中の長期リスクが、利益を上回ると判断された⁶。研究者たちは試験の中止を受けて、エストロゲンやプロゲステンを長期使用している女性たちに対し、治療を見直すようアドバイスはじめた。

過去に、ある前立腺癌の研究プログラムを組織した経験をもつ米国立癌研究所の所長Andrew von Eschenbachは、テストステロンが試験参加者の一部に前立腺癌の発生を促す恐れがある、という不安を引合いに出して、試験の開始に異を唱えた。重責にあるEschenbachの反対表明などいくつかの理由で、この臨床試験は出鼻をくじかれる形となった。「本当に残念です」とCunninghamは語る。

状況を立て直すため米医学研究所の委員会では、大規模臨床試験を開始する前に、テストステロンの利益を示すより多くの証拠が必要だと指摘している。報告書では、65歳以上の男性における体力、性機能、認知、生活の質(QOL)に関する利益を明らかにするために、一連の小規模な調査を実施するよう勧告している。

しかし、MatsumotoやCunninghamをはじめとする研究者たちは、小規模試験の1年や2年という短い期間では、わずかな利益を示すのが関の山だと訴えている。それよりもむしろ「女性の健康イニシアチブ」のような大規模試験を開始し、もし深刻なリスクが明らかになったなら、その時点で中止する方がはるかによいとMatsumotoたちは述べている。「反対派が大規模試験実施の必要性を認めないのは大きな誤りです」と、セントルイス大学医学部(ミズーリ州)のテストステロン療法の擁護者John Morleyは批判する。「小規模試験の結果が明らかになる頃には、すでにベビーブーマーたちのテストステロン使用歴は10年を超える計算になります」。

男性のテストステロン補充療法をめぐる論争が長引く一方で、女性の存在が大きくなりつつある。特に、女性の性機能障害を治療する目的での、テストステロン使用に注目が集まっている。ボストンにあるマサチューセッツ総合病院のJan Shifrenたちが実施した臨床試験では、卵巣摘出後にテストステロンが低値となった女性がテストステロンパッチを使用したところ、プラセボ使用者と比較して性交回数が増えたことが報告されている⁶。プロクターアンドギャンブル社は現在、女性用テストステロンパッチの販売を2005年に開始するために、監督官庁による認可を求めている。他の製薬会社も類似の製品の開発を進めている。

このようなテストステロン剤が市場に投入されれば、「ライフスタイルドラッグ(生活改善薬)」としてこれを使う女性が出てくることが予想される。まさに、勃起力に大きな問題のない男性がバイアグラを使用するのと同じ構図だ。こうした予測に、内分泌学者は懸念を抱いている。というのは、テストステロンには、吹き出物の数を増やし、体毛を濃くする恐れがあり、そしておそらく、適切なモニタリングなしに長期使用することで未知の健康上の問題が引き起こされると考えるからだ。

こうした状況を背景に、女性を対象としたテストステロン療法の安全性と効能を調べるため、大規模で長期に及ぶ臨床試験の実施を求める専門家もいる。「さもないとコントロール不能の大規模な人体実験が展開されることになってしまいます」と、メルボルン近郊のモナシュ大学の泌尿器科医Susan Davisは語っている。そして言うまでもなく、男性ではこうした実験が既に始まっているのだ。 ■

Helen Pearsonは、ネイチャーオンラインのニュースチーム(ニューヨーク)記者。

1. Liverman, C. T. & Blazer, D. G. (eds) *Testosterone and Aging: Clinical Research Directions* (National Academies, Washington DC, 2003).
2. Gray, A., Feldman, H. A., McKinlay, J. B. & Longcope, C. J. *Clin. Endocrinol. Metab.* **73**, 1016–1025 (1991).
3. Snyder, P. J. *et al. J. Clin. Endocrinol. Metab.* **84**, 2647–2653 (1999).
4. Rhoden, E. L. & Morgentaler, A. *N. Engl. J. Med.* **350**, 482–492 (2004).
5. Wang, C., Catlin, D. H., Demers, L. M., Starcevic, B. & Swerdloff, R. S. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **89**, 534–543 (2004).
6. Rossouw, J. E. *et al. J. Am. Med. Assoc.* **288**, 321–333 (2002).

経済的利益がすべてではない

どうしても力を合わせなければならない事態になれば、赤の他人同士でも協力するのだろうか？

原文：Economic interests

Nature Vol.431(245-246)/ 16 September 2004; www.naturejpn.com/digest

The Company of Strangers: A Natural History of Economic Life

by Paul Seabright

Princeton University Press: 2004. 320 pp.

\$29.95, £19.95

Herbert Gintis

今から30年ほど前にEdward O. Wilsonが提唱した、生物学と社会科学の統合という考え方は当初、かなり手荒な扱いを受けた。いまなお「社会生物学」という概念に反対する伝統主義者はいる。こうした反感にもかかわらず、社会科学と自然科学を統合させるプロセスは本格化しているように思われる。Paul Seabrightの新刊書は、このプロセスの推進に貢献してゆくだらう歓迎すべき重要な一冊だ。

この世には社会性を有する種 (social species) が数多く存在しており、人間とそれ以外の生物の社会システムの差異を分析すれば、人間が自らについての理解を深めることができる、とする考え方が社会生物学の背景にはある。The Company of Strangers (「見知らぬ人との付き合い」) という本書のタイトルには、人間の社会性に見られるユニークな特徴が浮き彫りになっている。極めて複雑で分散的な分業制の発達した種はいくつもあるが、血縁関係のない個体同士が広範囲にわたって協力するのは人間だけなのだ。

Wilson が生物学と社会科学の統合を提唱してから、社会生物学が成熟する過程では、いくつかの重要な研究があった。その1つが「社会性」概念の拡張だった。多細胞生物の出現からホモサピエンスの台頭に至るまでのこの進化上の大きな移行において、生物学的実体もつ複雑な部分間に協調関係をもたらす新たなメカニズムが必要だったことが認識された。例えば、生体内の異常な細胞、産卵する働きバチや仕事をさぼる社員などを「処罰」する方法に類似性があると、今では普通に考えられている。もう1つ重要なのが遺伝子—文化共進化説だ。この説によれば、文化は世代

を超えた情報伝達の一形態であり、遺伝子の場合とほぼ同じような進化的な力が働くと考えられている。この学説が重要なのは、人間の社会性には、他の生物種よりもはるかに高い文化性があるからだ。

本書では、既存の研究領域の境界にとらわれずに数々の分野に踏み込んで、基本論点に対する答えを探索するといった新しいタイプの経済分析が例示されている。ただ、経済活動を学際的に研究する手法は別に目新しいものではない。例えばアダム・スミスは、「国富論」を書き記しただけでなく、ウィリアム・ジェームズ以前の時代における心理学の名著と思われる「道徳情操論」も手がけていた。20世紀初頭にはほぼすたれてしまったこの伝統が、ごく最近になって再認識されたのだ。

著者Seabrightはまず、分業、価格、貨幣や財貨といった経済学上のテーマについて、基礎的ではあるが、心がぐいぐいと引きつけられるような概説を示し、それから、失業、貧困、環境破壊や経済的不安定など経済学の定番論点について論じている。本書が斬新なのは、各論点について一貫して長期的進化の観点から取り組まれている点だ。本書は、明らかに経済政策に関する書物ではない。資本主義と社会主義、競争と規制のバランス、富と所得の分配といった伝統的な中心的論点は、他のテーマのついでに論じられているだけなのだ。

そして本書の革新性は、現代の経済活動における心理的前提条件の論じ方にあらわれている。著者は、序説で次のように記している。「現代社会は、便宜主義に基づく実験であり、人間が系統的な方法で他人に対処する必要が生じる以前に既に発達していた人間心理が基盤となっている」。この人間心理は2つの要素によって構成されている。そのうちよく知られているのが「合理的な計算 ("rational calculation")」と著者が呼ぶもので、他の動物をはるかに凌駕する論理的思考能力、情報

処理能力、テクニック習得能力を意味する。もう1つは、著者が「相互性 ("reciprocity")」と名づけているもので、行動科学の分野では、あまりよく知られていない。「受けた親切には親切で返し、裏切りには復讐で応じる気持ちのこと。合理的な計算によれば望ましくないとされる場合も含まれる」と定義されている。

まずは2つの用語の問題に決着をつけておくことが大切だ。第1に「相互性」だが、これは、私を始め、他の研究者たちがNature誌上で使った「強い相互性 ("strong reciprocity")」と同じ意味だ。私たちが「strong」という形容詞を用いたのは、生物学の文献で頻繁に見られる、自己利益に基づく概念としての相互性とは異なる行動であることを示すためだった。第2に、相互性を非合理的なものと捉え、「合理的な (rational)」という用語を「自分のことしか考えない」という意味で使う経済学の長い伝統に著者は従っている。しかし親切に親切を返す行動や、危害を加えてきた人に報復する行動のような強い相互性の要素は、たとえ物的な純費用が発生する場合でも何ら不合理なものとはいえない。

人間社会についての著者の論じ方には、今までにない新しさがある。これまで生物学者も経済学者も、自分の親族以外に対しては利己的に振る舞うのが人間であり、人間同士の協力は、長期的に見た自己利益によって説明しうる、と長い間考えてきた。加えて、《資本主義は強欲と利己主義を助長する》という特に政治的に左翼の人々からの批判には長い伝統がある。しかし、この批判はせいぜい部分的に正しいとしか言えない。市場経済では、公平な行動が少なくとも容認されており、おそらくは助長されてもいるからなのだ。本書で論じられている「実験経済学」では、確かにほとんどの人々が相互性を有し、数人よりも大規模な人間集団においては、自己利益に基づく協力という経済モデルも生物学的モデルも信頼できないケースがほとんどであることが

▶ 明らかにされている。

著者は、強い相互性の影の側面、すなわち「身内」同士の協力という名の下で「よそ者」に敵意を示す傾向についても分析している。「グループ内で協力関係があると、そのグループの人間がグループ外の人間に対して、殺人を行うほど攻撃的になることがある」と記す。また、複数の赤の他人を組織的に殺害する行為は、人間社会で頻繁に起こっており、これを「例外

的、病理的、あるいは精神障害と説明することはできない」と続ける。そして著者は、「アダム・スミスが『物々交換("truck, barter and exchange")』と巧妙に説明した人間の性癖は、それと対抗関係にある『奪取、脅迫、強要("take, bully, and extort")』への誘惑と常に居心地の悪い共存を続けてきた」と結論づける。

本書はとても読みやすく、幅広い読者層が期待できる。ただし、詳しい記述が不足して

おり、正式なモデル構築や詳細な分析的論証を避けている。そのため本書は、動的に進化するシステムとしての経済に関心を抱く人々にとっての、この分野への足がかりとしての意味をもつにとどまるだろう。■

評者の **Herbert Gintis** は、サンタフェ研究所に所属し、マサチューセッツ大学 (University of Massachusetts, 15 Forbes Avenue, Northampton, Massachusetts 01060, USA) の名誉教授である。

essay concepts

究極の「時」をもとめて

時間: どれほどの宇宙論的な時間スケールを我々は制御し、利用しているのだろうか?

原文: *The long and the short of it...*

Nature Vol.431(633)/7 October 2004; www.naturejpn.com/digest

Alexander E. Kaplan

「騙されやすいカモは分刻みで生まれてくる」とは、米国の興行師、P.T. Barnum の言葉だ。カモの新生児を数えてゆくのも、時間を測る良い方法かもしれない。ただし、分と比べたら、秒の方が大事だろう。なにしろ、我々の心臓の鼓動はほぼ1秒の長さなのだ。だが、この秒というスケールも、測るものによっては、帯に短し襷に長し、ということになる。ビッグバン理論によれば、我々の宇宙の年齢は約140億年で、秒に換算すると 5×10^{17} 秒だ。量子宇宙論の究極の時間スケール(プランク時間)は、ビッグバン誕生の閃光の長さで約 10^{-43} 秒、これは、時間の根本的な「最小単位」とみなすことができる。それより短くなると、四次元の時空からなる通常の物理現象は、「超ひも理論」の仮説のように、さらに多くの次元へと分かれる可能性がある。

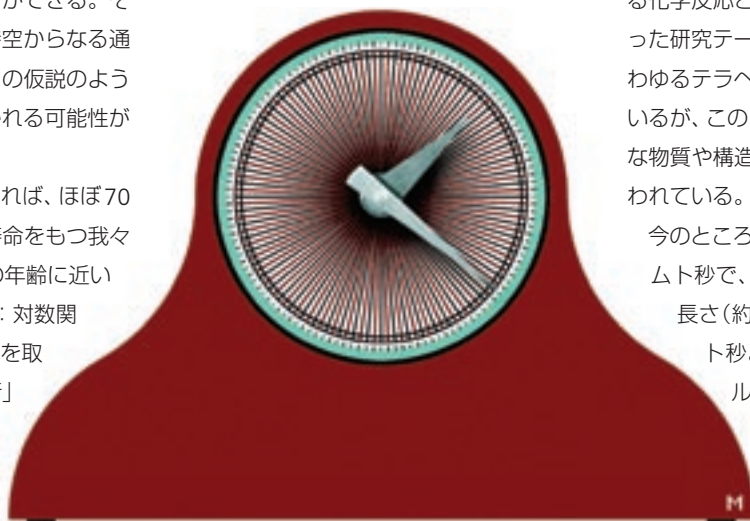
対数のアタマに切り替えてみれば、ほぼ70年(およそ 2×10^9 秒)という寿命をもつ我々は、プランク時間よりも、宇宙の年齢に近いスケールで生きている。(訳注: 対数関数は10の何乗、の「何乗」の部分を取り出してくる。いいかえると「桁」を見る関数である。だから、対数のスケールでは、宇宙は約17歳、プランク時間は

マイナス43歳、人間の寿命は9歳という勘定になる。)我々は長いこと、時間の経過を追う方法を学んできた。「時間的人間」(*Homo temporalis*)と呼んでも過言ではない。しかし、我々はその時間のどれくらいを制御し利用しているだろうか? その「長い方」のスケールは未だアカデミック世界での話に留まっているが、「短い方」はいまや活気あふれる科学と技術の frontline に躍り出てきた。その最もわかりやすい例が、情報伝達とコンピューターである。さらに高度なコンピューター演算をめざす際の、主な指標の1つがクロック周波数、あるいはその逆数のクロック周期だ。私の研究室の片隅には、1989年型UNIXコンピュー

ターの遺物があるが、そのクロック周波数は17メガヘルツくらいだ。現在、市販されているコンピューターのクロック数は3ギガヘルツ、つまり0.3ナノ秒(10^{-9} 秒)に達している。

レーザーはさらに日進月歩で、より短い時間領域に入ってきている。1959年にレーザーが発明されてからすぐに、光のパルス長さ(持続時間)はナノ秒、さらにはピコ秒(10^{-12} 秒)の閾値を越え、なおもより短いパルスを求めて競争が繰り広げられている。ピコ秒以下やフェムト秒(10^{-15} 秒)の領域は研究の宝庫となっており、超高速プロセスの記録、時間分解分光法、ピコ秒より短い緩和時間をもつ半導体の開発、強力なレーザーパルスによる化学反応とフェムト秒レベルでの制御といった研究テーマに事欠かない。この領域は、いわゆるテラヘルツ(10^{12} ヘルツ)技術も擁しているが、このようなパルスは、例えば、不透明な物質や構造を「透視」する診断装置などに使われている。

今のところ、最短レーザー記録は4~5フェムト秒で、近赤外線レーザーの1周期分の長さ(約3フェムト秒)に近い。1フェムト秒よりさらに短い、制御可能なパルスを発生させる努力も続けられている。どうしてそんなに短くしたいのか? 1周期分より短いパルスの場合、そ



の最も高いスペクトル周波数は、パルスの長さ τ に反比例するからだ。光子のエネルギーは周波数にプランク定数 h を掛けたものなので、パルスの最も高い光子エネルギーは $E_{\max} \approx h/\tau$ と計算できる。ピコ秒以下からフェムト秒の領域は、 $E \sim 0.1 - 0.01$ 電子ボルト(分子反応の典型的なエネルギー・スケール)に相当するが、 0.15 フェムト秒(150 アト秒、 150×10^{-18} 秒)以下の領域は原子物理学の分野だ(訳注: 電子ボルト(eV)は、電子1個を1ボルトの電圧で加速したときのエネルギー)。これは、水素原子の基底状態にある電子が陽子を一周するのにかかる時間だ。このようなパルスを発生させる方法がいくつか提案されてきた。最近、高次の調和成分を使って、フェムト秒より短いパルスが実験的に観測された。このような1周期以下、あるいは1周期ちょうどのパルスは、(電波から極紫外線領域までの)きわめて広いフーリエスペクトルをもっていて、(黒体放射のような)標準的な超広帯域の発生源から生じたパルスとは、著しく異なる特性をもっている。理想的な条件下では、スペクトル成分の全てが同じ位相になるのだ。このようなスケールの大きい、スペクトルの境を踏み越えたコヒーレンスは、通常の光学分野では決してお目にかかることができない。実際、(例えば太陽光のように)超短パルスは黒体放射に多く見られるものの、それらはいつやって来るかわからないし、どうふるまうかもわからない。ようするに完全にランダムなので役に立たないのだ。パルスの世界では、パルスが足並み揃えてやって来ること(=コヒーレンス)と、制御することができる、という点で、状況が一変する。

原子スケールの地平線のかなたに、重元素のイオンが鎮座している。最も重い安定な原子であるウランを例にとろう。ウランの周囲の電子を1個だけ残して、残りの電子を身ぐるみ剥いでしまった「極限のイオン」を思い浮かべることができる。この最後の電子を取り除くには、(ウランのK殻遷移に近い) 110 キロ電子ボルトが必要で、これは、さらに短い時間スケールの約 10^{-20} 秒を作り出す。それを超えると、原子・イオン物理学は、「量子の砂漠」へと迷い込んでゆく。なおも短くしていくと、我々は、根元的な興味をもたらす次の領域に遭遇する。量子電磁力学(QED)である。電子の静止エネルギーの2倍のエネルギー(約

1メガ電子ボルト)を要する電子-陽電子対の生成や、強い核反応、たとえば1.2メガ電子ボルトに近い陽子と中性子をつくる重水素の電子壊変、といった分野だ。このような現象は、原子の光イオン化を彷彿とさせるが、QEDでは、5桁以上も高いエネルギー・スケールが基準になっている。その時間スケールもzepto秒(10^{-21} 秒)まで縮まる。核反応を解明し、時間分解し、究極的には制御さえできるかもしれない、アト秒以下からzepto秒までのパルスを生成制御することが実現可能かどうか、近年議論されてきた。その構想は、密度の高い円周の中の自由電子に、現在可能な 10^{21} W/cm²という強度のレーザーを当てるものだ。このような状態を「leasetron」(lasetron)と呼ぶ。自由電子は、物質を構成しているナノ粒子の大規模なイオン化とともに、ほとんど瞬時に放出され、 $E \sim 50$ メガ電子ボルト程度のエネルギーにまで加速されるが、こうした電子は、QEDや原子核の領域の光子を生成できるに違いない。

この地平を過ぎると、我々は高エネルギー物理学の領域へと踏み込む。そこでは、巨大な加速器の中で、ほとんど光速に近づいた荷電粒子が、標的核(または逆向きに進んでくる

粒子)と衝突し、新しい素粒子の雲を生み出す。いつの日か、こうした衝突による粒子の生成を、コヒーレントに制御する方法がみつかったら、その放射は、これまでよりずっと速いものになるだろう。たとえば1テラ電子ボルト(100 万メガ電子ボルト)の最も高い光子エネルギーをもつパルスは、理想的な条件下では、約 10^{-27} という短さになるだろう。これでもまだ、究極の時間スケール、 10^{-43} 秒には程遠い。だが、思い悩む必要などない。なにしろ、好奇心、いいかえると、あくなき探究心という名のフル回転をつづけるエンジンに駆動され、我々は進み続けるにちがいないから。我々は、ようするに、騙されやすいカモなのだ。 ■

筆者の Alexander E. Kaplan は、ジョンズ・ホプキンス大学の電気・コンピューター工学部(the department of Electrical and Computer Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, USA)に所属している。

FURTHER READING

Paul, P. M. *et al. Science* **292**, 1689 (2001).
Hentschel, M. *et al. Nature* **414**, 509 (2001).
Zewail A. *Nature* **412**, 279 (2001).
Kaplan, A. E. & Shkolnikov, P. L. *Phys. Rev. Lett.* **88**, 74801 (2002).
Greene, B. *The Elegant Universe*, (Random House, New York, 2003).

news and views

宇宙鉱物学：よその太陽系の塵

Steve Desch

塵の円盤で取り囲まれている恒星は、形成中の太陽系なのかもしれない。塵から放射される光の解析から、恒星の周りを回っている彗星あるいは微惑星、さらには惑星までもがここに存在する可能性がでてきた。

原文: *Dust in another solar system*

Nature Vol.431(636-637)/7 October 2004; www.naturejpn.com/digest

宇宙鉱物学とは、天文学と鉱物学が組み合わさった新たな分野である。主に中間赤外線(MIR)の波長域($2 \sim 30 \mu\text{m}$)での天体観測によって、多くの場合は原始星のまわりにある、宇宙の塵粒子の大きさ、結晶構造、化学的構造を確定することを目的とする。このような観測で、原始惑星系の円盤における

塵の分布について多くのことが明らかにされる。塵の構造と進化の過程、そして新たに形成されつつある太陽系の岩石物質、つまり最終的に地球のような惑星を形作る物質について、詳しく調べられるのだ。赤外線の検出におけるかなりの技術的進歩が必要であったため、宇宙鉱物学的な観測が可能になったのは

比較的最近のことである。しかし、現在では十分に発達した分野となった。*Nature* 10/7号 p.660で、岡本美子¹は、がが座β星(β Pic)をとりまく円盤の空間分解MIRスペクトルによって、岩石物質の帯が存在すること、さらにはその円盤の組成が明らかになったことを示した。これは太陽系や地球のような惑星がいかにして形成されるかというパズルの新しい一片となる。

がが座β星系は若い恒星をとりまく塵の円盤の典型的な例であり、その塵のすべてがより大きな天体から新たに供給されている。塵は微惑星(生まれつつある惑星)間の粉碎衝突によって供給されているか、蒸発しつつある彗星から流れ出しているものである可能性がある。がが座β星の円盤には十分な量のガスがないので、塵粒子の力学は放射圧と重力の間のバランスで決まる²。直径1.5 μm以下の小さな塵粒子は、がが座β星の放射によって数十年の内に吹き飛ばされる³。しかし、もっと大きな塵粒子はエネルギーを吸収・放射し、その結果、数千年をかけて恒星に向かっていくらせん運動をする(ポインティング-ロバートソン効果⁴)。がが座β星の年齢は誕生後1,200万年であり⁵、この2つの過程のタイムスケールをはるかに超えているので、円盤中の塵は彗星か微惑星から新たに放出される破片で補給されているにちがいない。

この塵の大きさ、結晶構造、化学組成はMIR波長域での観測によって測定できる⁶。小さく暖かい(温度約300K)のケイ酸塩粒子は波長

約10 μmの光を強く放射する。アモルファス(非晶質)の橄欖石、(Mg,Fe)₂SiO₄は特に9.7 μmの光を最も強く放射する。また、結晶質の苦土橄欖石、Mg₂SiO₄は11.2 μmを含むいくつかの特定の波長の光を強く放射する。このような発光特性は、半径がλ/2π以下の小さな粒子で最もはっきりと現れる。ここで、λは放射光の波長である。より大きな粒子は、波長域全体でより連続的な黒体からの放射に似た光を放射する傾向がある。岡本¹は、さまざまな大きさや(アモルファスや結晶といった)鉱物学的特徴をもつ塵粒子について予測されるスペクトルが、がが座β星の円盤の塵から放射される光のスペクトルの観測結果と一致することを示した。

これに先立つ観測では、がが座β星の円盤中の塵が、恒星をまわる別個の帯に集まっていることが示唆されており⁷、これは塵を補給するより大きな天体が全く異なる距離の軌道を回っていることを暗示している。さらに前にWeinbergerら⁸によって観測された塵のMIRスペクトルから、がが座β星のまわり、半径20天文単位(AU)以内に半径10 μm以下の小さなケイ酸塩粒子からの放射が存在すると推測されていた(天文単位、あるいはAUは地球と太陽の平均距離である)。岡本¹はこのように観測の空間分解能を7.7AUから3.2AUへ改善し、さまざまな特定の鉱物のモデルを作成した。今回のデータでは、小さな非晶質ケイ酸塩粒子を示す9.7 μmの光が、約6.4、16、30AUという特定の半径の領域から過剰に強く放射されていることが明らかになった。大きな非晶質ケイ酸塩粒子は(ポインティング-ロバートソン抵抗から予測されるように)、がが座β星の近くに集まっているようである。

結晶質ケイ酸塩粒子もまた、がが座β星の近くに集まっている。これは約1,100K以上で非晶質ケイ酸塩粒子は焼きなまされ(結晶の形に変わる)こと⁹から、恒星の近くではより温度が高いためであると思われる。あるいは、これらの粒子はがが座β星の内太陽系に入ってきた彗星が放出したものかもしれない¹⁰。がが座β星から放射される紫外線によって容易に分解される一酸化炭素分子が、がが座β星の円盤中に検出されており³、彗星の継続的な蒸発によって入れ替わっていることを強く示している。我々の太陽系では、ヘール-ボッ

ブ彗星のような彗星から放出されるケイ酸塩粒子は、結晶である割合が高い(約30%)¹¹。

16AUおよび30AUという特定の半径に小さな非晶質粒子が存在することは興味深い。これらの半径は、がが座β星の円盤内に存在するとかねてから推測されていた塵の帯⁷の位置と一致する。岡本¹はこれらの半径にある塵粒子は非晶質ケイ酸塩であり、十分小さいために絶え間ない補給が必要であることを発見した。これらのデータは、がが座β星の円盤内のこのような半径に彗星か微惑星の帯が存在することを強く示唆している(図1)。しかしながら、岡本¹が示した解像度の向上したデータによって、半径6.4AUにさらに別の塵の帯が発見されることとなった。著者らが言うように、半径16AUと同様に半径6.4AUにも微惑星か彗星の帯が存在する配置は、半径12AUの位置にある羊飼い惑星の重力の影響を示唆している。

これらの帯に非晶質ケイ酸塩が優占的に存在することについては、(我々の太陽系の彗星から推測される状況とは異なり)この半径の領域には結晶質ケイ酸塩が存在しないのか、ケイ酸塩が微惑星内で結晶質から非晶質へ変質したのかもしれない。今後の研究によってこれらの仮説を確認あるいは否定できるだろう。しかし、宇宙鉱物学的な観測によって、がが座β星系や他の太陽系における岩石惑星の形成に関するさらに進んだ刺激的な知見が得られることは明らかである。 ■

Steve Desch はアリゾナ州立大学物理・天文学部 (the Department of Physics and Astronomy, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287-1504, USA)に所属している。
e-mail: steve.desch@asu.edu

- Okamoto, Y. K. *et al. Nature* **431**, 660–663 (2004).
- Lecavelier des Etangs, A. *et al. Nature* **412**, 706–708 (2001).
- Artymowicz, P. *Astrophys. J.* **335**, L79–L82 (1988).
- Mukai, T. & Giese, R. H. *Astron. Astrophys.* **131**, 355–363 (1984).
- Zuckerman, B., Song, I., Bessell, M. S. & Webb, R. A. *Astrophys. J.* **562**, L87–L90 (2001).
- Molster, F. J. & Waters, L. B. F. M. in *Astromineralogy (Lecture Notes in Physics no. 609)* (ed. Henning, T. K.) 121–170 (Springer, Berlin, 2003).
- Wahhaj, Z. *et al. Astrophys. J.* **584**, L27–L31 (2003).
- Weinberger, A. J., Becklin, E. E. & Zuckerman, B. *Astrophys. J.* **584**, L33–L37 (2003).
- Hallenbeck, S. L., Nuth, J. A. III & Nelson, R. N. *Astrophys. J.* **535**, 247–255 (2000).
- Li, A. & Greenberg, M. *Astron. Astrophys.* **331**, 291–313 (1998).
- Wooden, D. *et al. Astrophys. J.* **517**, 1034–1058 (1999).

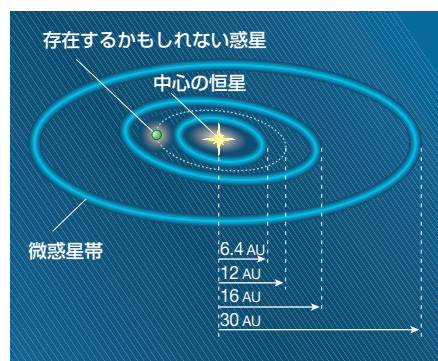


図1 がが座β星をとりまくリング。岡本¹は、がが座β星をとりまく塵の円盤から放射される中間赤外線波長域の光を解析し、塵粒子の大きさと化学組成を明らかにした。著者らは、彗星か微惑星(生まれつつある惑星)を含んでいるかもしれない3つの帯が、がが座β星をとりまいておりと示唆している。がが座β星を巡る軌道には惑星さえ存在する可能性がある。

インドネシア東部のフローレス島で出土した新しい人類化石の考古学分析と測定年代

ニューイングランド大学, M J Morwood et al.

原文: Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia Nature Vol.431(1087-1091)/28 October 2004; www.naturejpn.com/digest

東インドネシアのフローレス島にある石灰岩でできた大きな洞窟、リアン・ブア (Liang Bua) の発掘研究から、小柄なヒト族 (Hominini) の化石人類集団がいたことを示す証拠が得られ、解剖学的見地からこの人類は独立種とするに十分な特徴を備えており、新しい種、*Homo floresiensis* (ホモ・フローレンシエンシス) に分類された¹。見つかったのは、頭蓋と首から後方の一部の遺体化石が1体分、そして、それより古い堆積物中にあった別の個体由来の小白

歯1本である。今回我々は、これら遺体化石を取り巻く状況、意義、そして未だに残る考古学上の不確定部分について報告する。放射性炭素(¹⁴C)法やルミネッセンス法、ウラン系列法、電子スピン共鳴法(ESR)による年代測定では、*H. floresiensis*が存在したのは3万8,000年前より以前から少なくとも1万8,000年前までとなる。付随の堆積物には石器や、コモドオオカゲやステゴドン類(化石ゾウ類)の小型固有種といった動物の遺体化

石が含まれている。*H. floresiensis*は、フローレス島に到達したホモ・エレクトゥスの初期分散集団(ホモ・エルガステルやホモ・ゲオルギクス [*Homo georgicus*] と呼ばれる化石標本を含む)¹から生じ、この島が隠れ家となって比較的最近の年代まで生き延びた。*H. floresiensis*の生息年代はこの地域にいたホモ・サピエンスと有意に重なり合っている^{2,3}が、両種が互いに影響を及ぼし合ったかどうかや、その内容については不明である。

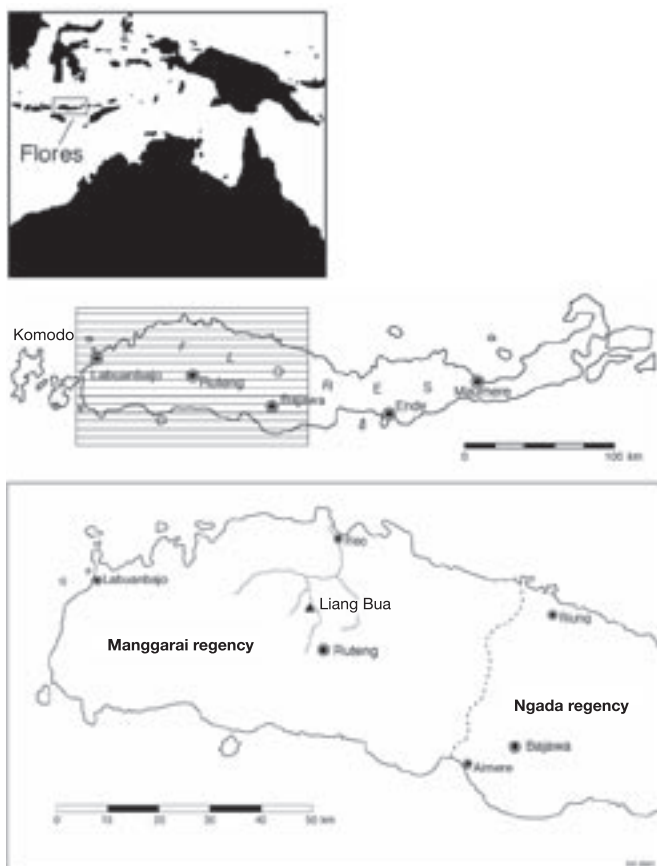


図1 インドネシア東部にあるフローレス島、およびフローレス島西部にある Liang Bua 洞窟のおよその位置関係。

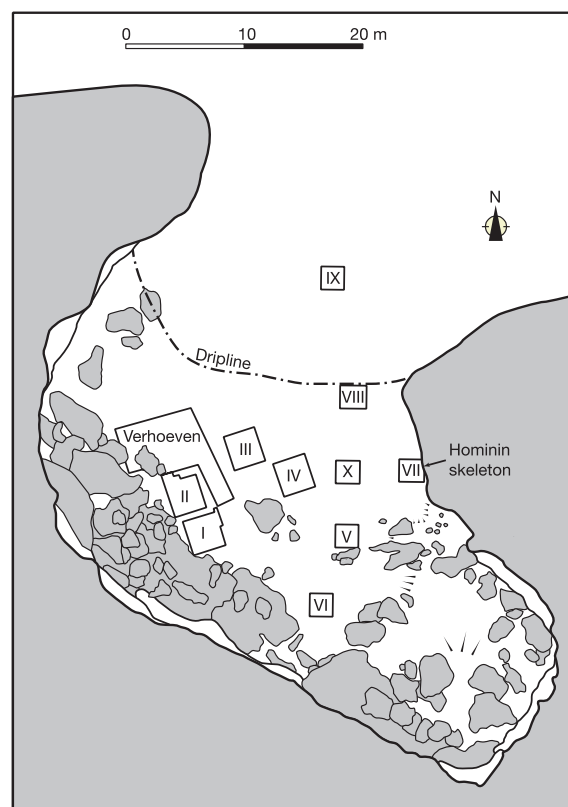


図2 発掘された領域(セクターと呼ぶ)と人骨(セクターVII)の位置関係を示す Liang Bua の図。この遺跡は1965年に Theodor Verhoeven 神父により初めて大規模な調査が行われ、1978～1989年には R P Soejono が10のセクターを発掘した。我々は、2001年の初めにセクターI、III、IV、VIIを掘り進めた。

Liang Bua は中新世の石灰岩でできた洞窟であり、インドネシア東部のアジア大陸とオーストラリア大陸の中間に位置するフローレス島にある(図1)。洞窟はルテン(Ruteng)の北14 km、北側の海岸から25 km、海拔500 mにあってワエ・ラチャン(Wae Racang)川の溪谷を見下ろしている(南緯08°31'50.4"、東経120°26'36.9")。入り口は幅30 m、高さ25 mで奥行きは最大で40 mである(図2)。カルスト形成の溶解作用で地下洞窟として形成されたのち、北側の端がWae Racang川の侵入により開口した。この川は現在、Liang Buaから200 m離れて30 m下を流れているが、溪谷には5段の河岸段丘があることから、相当な期間にわたって複雑な穿入作用を受けたとみられる。

Liang Buaにおける我々の調査の目的は、フローレス島での人類の進化や分散、文化や環境の変化の歴史を知る手がかりを掘り起こすことにある。この島では、84万年前の更新世前期までに人類が居住していたことを示す証拠が得られている^{4,5}。調査にあたっては発掘すみの4つのセクター(I、III、IV、VII)から埋め戻しの土を除去したのち、発掘を進めた。我々は、岩盤に突き当たらずに最大で11 mの深さまで掘り進んだ。

ここまでの段階で Liang Bua での最大の発見は、東側の壁に近いセクターVIIで見つかったヒト族の人骨1体である。遺体化石に含まれていたのは頭骨、下顎、骨盤、足の骨で、こ

れらのいくつかは発見時にまだ関節がつながっており(図3)、ヒト族の化石人類新種として *H. floresiensis* と命名するのに十分な独自の特徴を備えていた¹。

セクターVIIでは2 m×2 mの範囲を7.2 mの深さまで掘り進み、水流で丸められた巨礫の混じる赤粘土に達した(図4)。人骨は動物の遺体化石や石器と一緒に見つかり、深さ5.9 mにある濃茶色のシルト質粘土でできた緩やかな傾斜面に堆積していて、その上を斜面雨洗堆積物におおわれていた。意図的な埋葬を示すような層序や人工遺物の証拠はなかった。上に重なる粘土やシルト、落石類の層から、この傾斜は、セクターVIIのもっと下の北側部分に明るい茶色および灰色の(「白っぽい」)凝灰質シルトが積もるまで維持されたことがわかる。これらの凝灰質シルトは火山噴火に由来したもので、洞窟内の他の場所にもあることから層序の目安になる有用な層準となり、その年代は一緒に見つかった木炭から ABOX-SC (acid-base wet oxidation, stepped-combustion)¹⁴C 法を使って(参考文献6, 7と補足情報)、1万3,000年前と1万1,000年前との測定年代が得られた(補足情報の Table 1a 参照)。深さ4 mから地表面まで、堆積物は水平に積もり、同一の層序が洞窟の床全面に広がっていることから、堆積物の積もり方には一致したパターンがあることがわかる。

この遺体化石の年代(補足情報の Table

1a, b)を推定するために、放射性炭素法とルミネッセンス法を使った。骨格の完全さや関節結合の程度を考えると、この遺体は死後すぐに、まだ部分的に肉がついている状態で細かい堆積物でおおわれたに違いない。セクターVIIの一番奥深くにあった堆積物から見つかった3つの木炭標本を、前もって処理したのち ABOX-SC 法を使って黒鉛化した。そして、この最も信頼性のある成分の¹⁴C含有量を、加速器質量分析で測定した。人骨とともにあった2つの標本(ANUA-27116とANUA-27117)の較正暦年代(実年代)は中央値が1万8,000年前となり、統計的に区別できなかった(68%の信頼区間:それぞれ較正暦年代にして1万8,700~1万7,900年前と1万8,200~1万7,400年前)。

これらの¹⁴C年代の有効性を確かめるため、堆積物にルミネッセンス年代測定法を使った。とくに、「無限に古い」木炭が完新世の放射性炭素に汚染され、そのためにこれほど多くの原始的形質を備えた人骨に対して予想を超えた新しい年代が出てしまうことがないように確かめた。赤外線誘起ルミネッセンス(IRSL)法を使った、カリウムに富む長石粒の光学年代測定^{8,9}では、人骨の上および横で採集された試料について、それぞれ1万4,000±2,000年前(LBS7-40a)と6,800±800年前(LBS7-42a)という値が得られた。どちらの試料も、測定年代が新しくなりすぎるとする有意の変則的フェーディングを示す(補足情報を参照のこと)が、利用可能なフェーディング修正モデル¹⁰を用いても、我々はこの測定されたフェーディング率を信頼性をもって地質学的時間スケールまで拡張することはできなかった。したがって、どちらのIRSL年代測定値も、堆積物が最後に日光にさらされてからの経過時間の最小推定値と見るべきだろう。

堆積物の年代を示す最大値は、光感受性赤色熱ルミネッセンス(TL)法を使って石英粒から得られた^{11,12}。TLのシグナルはIRSLのシグナルよりもあせにくい、変則的フェーディングには損なわれない。2つの試料、つまり3万8,000±8,000年前(LBS7-40b)と3万5,000±4,000年前(LBS7-42b)についてのTL年代は統計的にみて弁別不可能であり、このことから人骨の持ち主は死後すぐに短時間で埋められたとする我々の主張が裏づけられる。TL年代とIRSL年代から、この人骨を含む堆積物

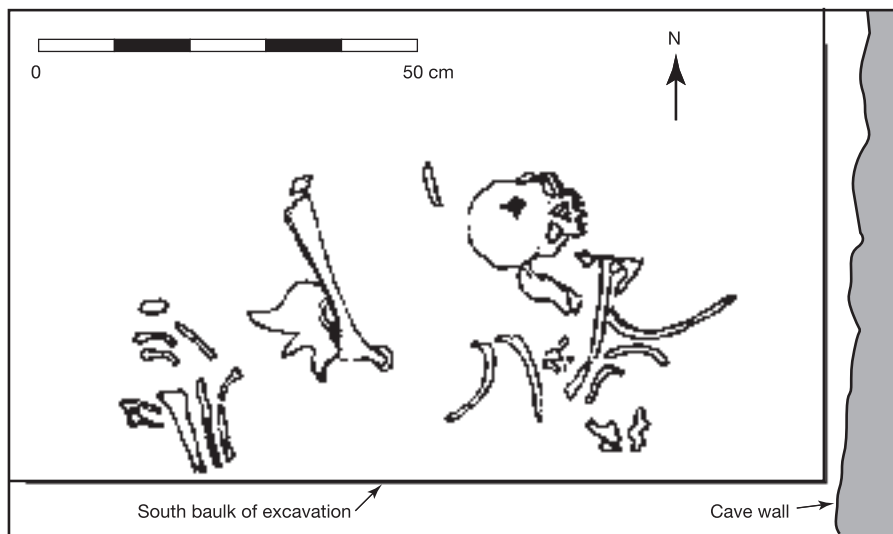


図3 Liang BuaのセクターVIIを発掘中に見つかった際の人骨の平面図。骨格の構成要素どうしの関係性と東および南の発掘境界線との位置関係を示してある。右の脛骨と腓骨は、右の大腿骨と膝蓋骨の下に隠れていた。腕など追加の骨格部分は南の境界線に隣接する未発掘の堆積物中に埋まっている可能性がある。

の堆積した時期は3万5,000 ± 4,000年前と1万4,000 ± 2,000年前の間にあり、この範囲は1万8,000年前に中央値がくる¹⁴C年代と矛盾しない。

Liang Bua 洞窟内のもっと古い年代の堆積物中にも *H. floresiensis* のものと判断される証拠が見つかったことから、我々の調査対象が異常な1個体なのではなく、長年にわたって存在した集団だとわかる。セクターⅣの深さ4.3 mで、層序的な不整合面の下にある堆積物から下顎の左臼歯が見つかったが、これはセクターⅦで出土した完全な人骨下顎

にある臼歯と同一の特徴的形態を備えていた。この不整合面の上に層序的に重なる流れ石は、熱イオン化質量分析(TIMS)ウラン系列年代測定では3万7,700 ± 200年前(試料LB-JR-6A/13-23、補足情報のTable 1c)という値になり、これは *H. floresiensis* の生息期間をさかのぼり拡大するための最小値となる。

加えて、単独で見つかった人類の臼歯の真下にあたる深さ4.5 mで出てきたステゴドンの子どもの臼歯は、ESR/ウラン系列年代測定法で7万4,000 + 1万4,000 前から1万2,000 年前と出た(試料LB-JR-8a、補足情報の

Table 1e)。この年代測定値の地層と、TL年代測定で得られた最古の堆積物年代値9万5,000 ± 1万3,000 年前にあたる深さ7.5 mの間で出た遺体化石(試料LBS4-32a、補足情報のTable 1b)は、まだ種の診断がなされていない。しかし、これらの遺物には、深さ5.8 mにあった推定身長およそ1 m(参考文献1)の成人の^{とう}焼骨が含まれ、大きさから我々はこれを暫定的に *H. floresiensis* に分類した。ただし、ホロタイプ(完模式標本)には直接比較するための腕の部分が欠けている。もし確認できていれば、この種同定により *H. floresiensis*

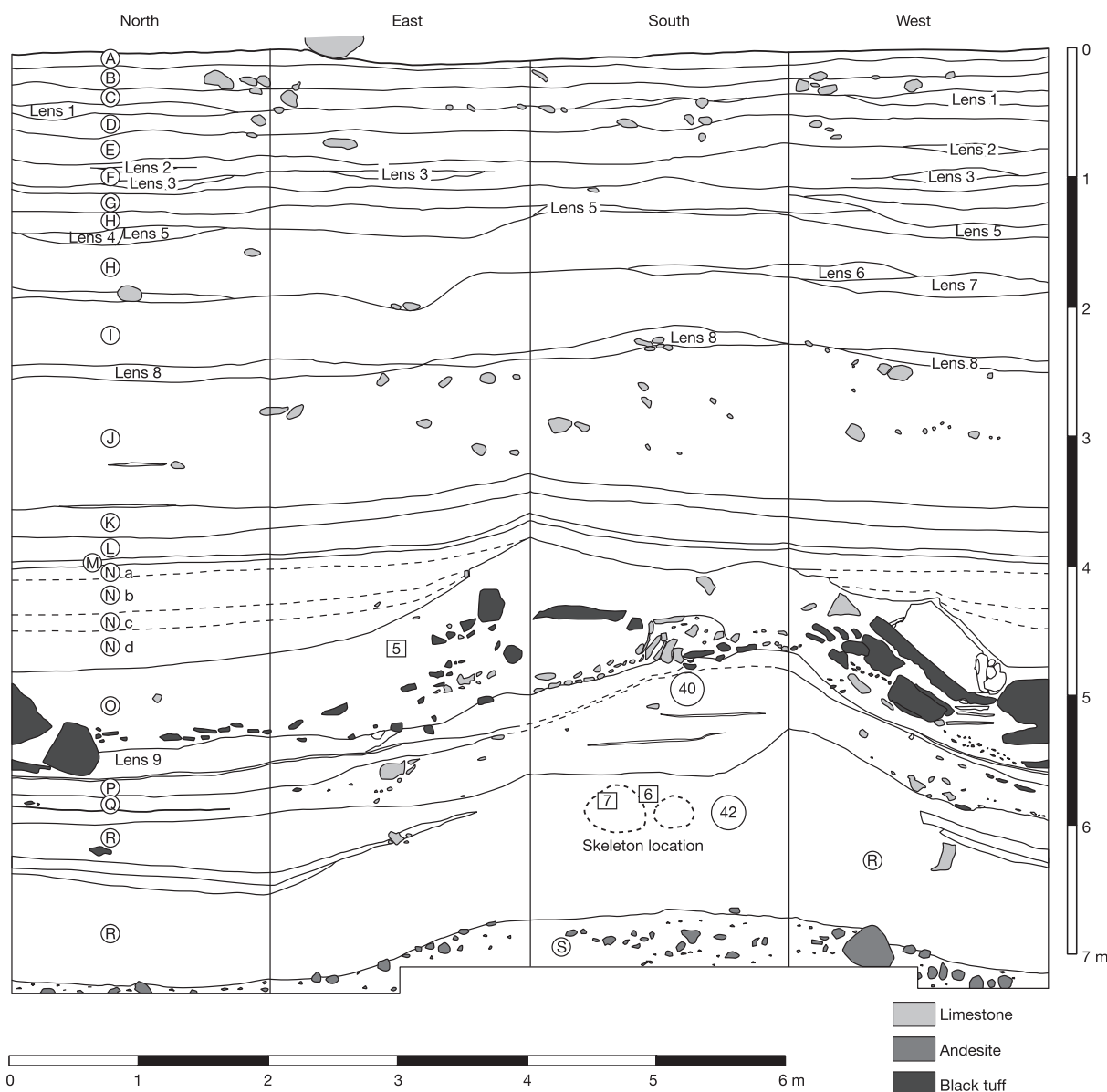


図4 Liang BuaのセクターⅦの発掘層序断面。人骨の位置も示してある。A、粗粒シルト；B、シルト；C-K、粗粒シルト；L、凝灰質シルト；M、粘土；N(a-d)、「白っぽい」凝灰質シルト；O、粘土と角礫；P、粘土；Q、シルト質粘土；R、砂質粘土；S、水作用を受けた火山性巨礫を伴う粘土。40と42の丸つき数字はそれぞれルミネッセンス試料LBS7-40とLBS7-42の位置を示し、5、6、7の四角つき数字はそれぞれ¹⁴C試料のANUA-27115、ANUA-27116、ANUA-27117の位置を示す。

は少なくともおよそ7万4,000年前には生息していたことになる。

*H. floresiensis*の行動に関係するものとして、共に出土した小規模な動物遺骨化石群には魚類やカエル、ヘビ、カメ、オオトカゲ、鳥類、齧歯類、コウモリなどが含まれる。多くは自然の作用で集まったものとみられるが、一部の骨は黒焦げになっていて、これは何も無い洞窟の床で自然にできたとは思われない。

この更新世堆積物の中で見つかった大型動物は、コモドオオトカゲともっと大きな別のオオトカゲ類、そして固有種の矮小型ステゴドン類だけである。ステゴドン類のうち少なくとも17個体はセクターIVに集まっており、少なくとも9個体がセクターVIIで見ついている。ステゴドンの臼歯にある歯のすり減り具合からも、大部分の個体が子どもであって(参考文献13の年齢グループ1)、セクターIVでは30%(5個体)が生まれたての赤ん坊だったことを示している。成体の遺物は、保存状態のよくない首より後ろの化石が2つと臼歯の隆起部分の破片1個のみである。マカクザルやシカ、ブタ、ヤマアラシといった他の大型哺乳類は、その上に重なる完新世堆積物内に初めて現れ、ここには*H. floresiensis*の存在を示す証拠は見られない。これらの動物は、ホモ・サピエンスによってフローレス島に持ち込まれたことがほぼ確実である。

セクターVIIの更新世堆積物に含まれる石器の数は比較的少ない。今回の人骨と同じ地層で見つかったのは32個のみである。ところがセクターIVでは、*H. floresiensis*と同じ水準で石器が集中して多数見つかり、1 m³あたり最大5,500個にもなった。目立つのは単純な剥片石器で、小さい放射型石核の両面を打ち剥がしたものであり、主に火山岩やチャート(硬い堆積岩)でできている。しかし、尖頭器や穴あけ器、石刃、細石刃(おそらく「かえし」の部分として柄に装着された)といった、もっと形式の整った石器類が、ステゴドンの証拠を伴ってのみ見つかった(図5)。この「大きな獲物」を狩るための石器製作技術は、一番古い文化的な証拠が見つかった堆積物の年代である約9万5,000~7万4,000万年前から、ステゴドン類が消えるおよそ1万2,000年前まで、発掘されたセクターすべてで続いて見られる。ステゴドン類が見当たらない層のすぐ上には、この化石ゾウ種の

絶滅と時を同じくして起こった火山噴火の噴出物に由来する「白っぽい」凝灰質シルトがある。これらの独自の石器類がステゴドン類化石のすぐ近くにあったことからみて、更新世後期にこの遺跡にいた人類は子どものステゴドンを選択的に狩猟していたようだ。

セクターIVとVIIの年代解析から、この遺跡に*H. floresiensis*がいたのは、この地域にホモ・サピエンスが到来した5万5,000~3万5,000年前^{2,3,7,14-18}から相当あとの、3万8,000年前から少なくとも1万8,000年前までとなる。しかし、更新世堆積物で見つかった遺体化石のうち、ホモ・サピエンスに属するとみられるものは皆無だった。こうした証拠がないことから、我々は、付随して出土したこれらの石器を製作したのは*H. floresiensis*

だという結論に達した。

Liang Bua 洞窟のもっと年代の古い堆積物の中からは、より強い力で打ちつけて製作された石器も出ている。たとえば洞窟の後部には川に堆積した礫岩に混じって、大きくて重いチョッパーなどの石器が含まれている。上に堆積している流れ石のTIMS ウラン系列年代測定からすると、これらの人工遺物は10万2,400 ± 600 年前よりも古いことになる(試料LB-JR-10B/3-8、補足情報のTable 1c)が、ヒト族のどの種がこれらの石器を製作したのかは不明である。

Liang Bua から東 50 km にあるソア(Soa)盆地には、更新世の前期および中期の遺跡があり、単純な剥片石器といっしょにコモドオオトカゲやステゴドンの遺体化石が出てくる^{4,5}。▶

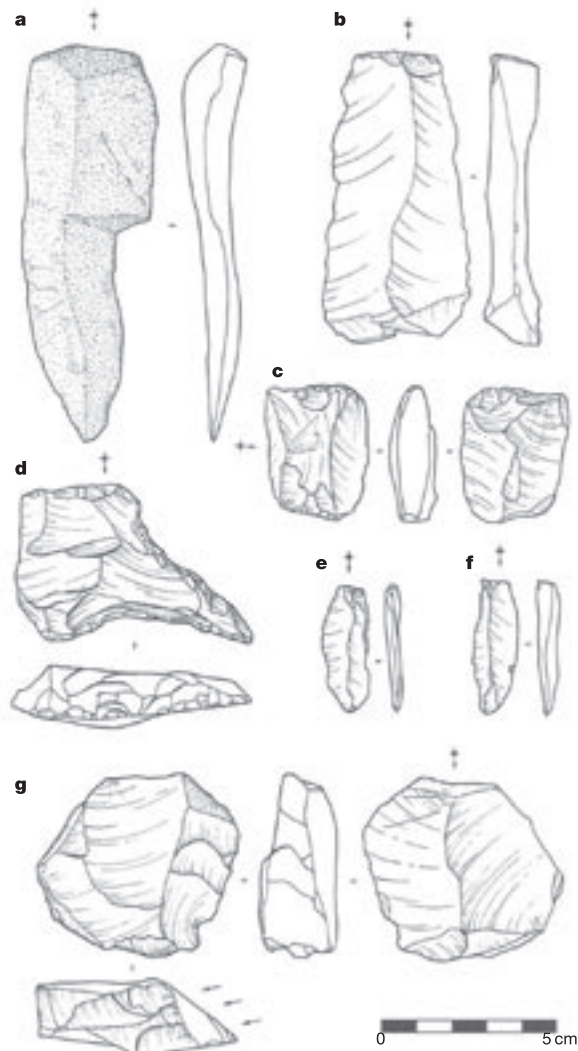


図5 *H. floresiensis* およびステゴドン類の遺体化石と共に見つかった石器の種類。a, b、大型細石刃；c、両面に刃がある石核；d、穴あけ器；e, f、細石刃；g、細石刃を製作するための彫刻刀形石核。矢印は打ち剥がしのプラットフォーム、つまり石器製作者が石のハンマーで直接、石核から剥片を打ち剥がした場所と向きをさす。

これまではホモ・エレクトゥスがこれらの石器類を作ったと考えられてきた¹⁹⁻²¹。Liang Buaの*H. floresiensis*の形態形質は祖先種の候補とみられるホモ・エレクトゥスと矛盾しないが、フローレス島に人類が居住していた年代の可能性の幅を考えると、今の段階では、どの種がSoa盆地の石器類を製作したのかは推測の域を出ない。

Liang Bua洞窟で得られた証拠は、少なくとも1万8,000年前まで生き延びていた祖先種的なホモ・エレクトゥス集団から別の人類が現れ、その生息年代がホモ・サピエンスとある時期有意に重なっていたことを示すものだ。更新世のフローレス島で人類以外の唯一の大型陸生哺乳類だったステゴドン類は、フローレス島を隠れ家に生き延びたが、我々の解釈では、*H. floresiensis*もそれとまったく同様に、ウォーレス線(生物分布境界線)上近くの島という隠れ家に到達して保存された残存系統である。これらの動物集団は隔離されて長期にわたり独自の変化をとげた。フローレス島は、知られるうちで最小のヒト属の種¹とステゴドン属の種¹³の生息地だったのだ。

現在の証拠からすると、フローレス島の遺伝的および文化的な隔離は、航海術をもったホモ・サピエンスが東アジアに現れて初めて崩れたことになる。その後、小柄で脳の小さい人類の集団がどうやってホモ・サピエンスとともに何万年もの間生き延びたかは不明である。というのも、両者の相互作用がどんなものだったかを知る手がかりが現在のところ皆無だからである。直接的な接触や共同生活、競争や捕食といった関係はほとんどないか、まったくなかったのかもしれない。

しかし、初期のヒト族の認知能力を過小評価すべきではないだろう。Liang Bua洞窟で*H. floresiensis*と一緒に見つかった石器の製作技術がそれを物語っている。人類が更新世前期までにフローレス島に移住できたこと^{4,5}も重大な意味をもっており、これに必要な海を渡る能力は、たとえ氷期の最中で海水面が低下していたとしても、他の多くの陸生動物の分散能力を上回るものだった。

フローレス島(と他のウォーレス線に近い島々も暗に含めて)での人類の居住や進化、文化の変化などの歴史が、これまで考えられていたよりもはるかに複雑なことは明らかである。たとえばロンボク島やスンパワ島は、人

類がアジア大陸やジャワ島からフローレス島に移住する足がかりとなった。もし初期の人類集団がこれらの島々で長期間生き延びたとすると、*H. floresiensis*に顕著に見られるのと同じような島の種分化圧を受けたことだろう。体の小型化は進化の傾向として予測できるが、他の傾向は島に特異的な適応や人口変動、火山噴火などの大災害の影響を反映したもののだろう。

Received 3 March; accepted 18 August 2004; doi: 10.1038/nature02956.

1. Brown, P. *et al.* A new small bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. *Nature* (submitted).
2. Barker, G. *et al.* The Niah Cave project: the second (2001) season of fieldwork. *Sarawak Mus. J.* **56** (new ser. 77), 37–119 (2001).
3. Bowler, J. M. *et al.* New ages for human occupation and climatic change at Lake Mungo, Australia. *Nature* **421**, 837–840 (2003).
4. Morwood, M. J., O'Sullivan, P. B., Aziz, F. & Raza, A. Fission-track ages of stone tools and fossils on the east Indonesian island of Flores. *Nature* **392**, 173–176 (1998).
5. Morwood, M. J. *et al.* Archaeological and palaeontological research in central Flores, east Indonesia: results of fieldwork, 1997–98. *Antiquity* **73**, 273–286 (1999).
6. Bird, M. I. *et al.* Radiocarbon dating of "old" charcoal using a wet oxidation, stepped-combustion procedure. *Radiocarbon* **41**, 127–140 (1999).
7. Turney, C. S. M. *et al.* Early human occupation at Devil's Lair, southwestern Australia 50,000 years ago. *Quaternary Research* **55**, 3–13 (2001).
8. Aitken, M. J. *An Introduction to Optical Dating* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1998).
9. Botter-Jensen, L., McKeever, S. W. S. & Wintle, A. G. *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry* (Elsevier Science, Amsterdam, 2003).
10. Huntley, D. J. & Lamothe, M. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Can. J. Earth Sci.* **38**, 1093–1106 (2001).
11. Franklin, A. D., Prescott, J. R. & Robertson, G. B. Comparison of blue and red TL from quartz. *Radiat. Meas.* **32**, 633–639 (2000).
12. Stokes, S. & Fattahi, M. Red emission luminescence from quartz and feldspar for dating applications: an overview. *Radiat. Meas.* **37**, 383–395 (2003).
13. van den Bergh, G. D. The Late Neogene elephantoid-bearing faunas of Indonesia and their palaeozoogeographic implications. A study of the terrestrial faunal succession of Sulawesi, Flores and Java, including evidence for early hominin dispersal east of Wallace's Line. *Scripta Geologica* **117**, 1–419 (1999).
14. Roberts, R. G., Jones, R. & Smith, M. A. Thermoluminescence dating of a 50,000 year-old human occupation site in northern Australia. *Nature* **345**, 153–156 (1990).
15. Roberts, R. G. *et al.* The human colonisation of Australia: optical dates of 53,000 and 60,000 years bracket human arrival at Deaf Adder Gorge, Northern Territory. *Quaternary Sci. Rev.* **13**, 575–583 (1994).

16. Gillespie, R. Dating the first Australians. *Radiocarbon* **44**, 455–472 (2002).
17. O'Connor, S., Spriggs, M. & Veth, P. Excavation at Lene Hara Cave establishes occupation in East Timor at least 30,000–35,000 years ago. *Antiquity* **76**, 45–49 (2002).
18. O'Connell, J. F. & Allen, J. Dating the colonization of Sahul (Pleistocene Australia–New Guinea): a review of recent research. *J. Archaeol. Sci.* **31**, 835–853 (2004).
19. Maringer, J. & Verhoeven, Th. Die steinartefakte aus der Stegodon-fossilschicht von Mengeruda auf Flores, Indonesien. *Anthropos* **65**, 229–247 (1970).
20. Sondaar, P. Y. *et al.* Middle Pleistocene faunal turnover and colonisation of Flores (Indonesia) by *Homo erectus*. *C. R. Acad. Sci. Paris (Série II)* **319**, 1255–1262 (1994).
21. O'Sullivan, P. B. *et al.* Archaeological implications of the geology and chronology of the Soa Basin, Flores, Indonesia. *Geology* **29**, 607–610 (2001).

補足情報 (Supplementary Information) は www.nature.com/nature に掲載されています。

Acknowledgements Our work is funded by a Discovery Project grant to M.J.M. from the Australian Research Council (ARC), and by grants from the University of New England (M.J.M.) and the University of Wollongong (R.G.R.). R.G.R. holds an ARC Senior Research Fellowship, and C.S.M.T. and J.-x.Z. hold ARC Queen Elizabeth II Fellowships. C.S.M.T. also acknowledges the support of the Australian Academy of Science (J. G. Russell Award), the Natural Environment Research Council and Queen's University Belfast. The 2003 excavations at Liang Bua were undertaken under Indonesian Centre for Archaeology Permit Number 1178/SB/PUS/BD/24.VI/2003. Other participants included Jatmiko, E. Wahyu Saptomo, S. Wasisto, A. Gampar, C. Lentfer, N. Polhaupessy, K. Grant, B. Walker, A. Brumm, Rikus, Deus, Leo, Ansel, Agus, Seus, Camellus, Gaba, Rius, Beni and Piet. H. Yoshida and J. Abrantes assisted with IRLS and TL analyses, J. Olley made the high-resolution gamma spectrometry measurements, D. Huntley and O. Lian provided advice on anomalous fading, and R. Bailey suggested the isothermal measurement of red TL. Wasisto, M. Roach and K. Morwood assisted with the stratigraphic sections, plans and stone artefact drawings, and P. Brown and P. Jordan commented on earlier drafts of this paper.

Author contributions M.J.M., R.P.S. and R.G.R. planned and now co-ordinate the research program funded by the ARC Discovery Project grant, which includes the Liang Bua project. T.S. directed aspects of the excavations and analyses. Ages were provided by R.G.R. and K.E.W. (luminescence); C.S.M.T., M.I.B. and L.K.F. (14C); W.J.R. (ESR); and J.-x.Z. (uranium-series). R.A.D. and G.D.v.d.B. analysed the faunal remains, and M.W.M. the stone artefacts. D.R.H. supervised the stratigraphic section drawings and other aspects of the project.

Competing interests statement The authors declare that they have no competing financial interests.

Correspondence and requests for materials should be addressed to M.J.M. (mmorwood@pobox.une.edu.au) and R.G.R. (rgrob@uow.edu.au).