

知は地球を救う 9. 訂正・補遺・エネルギー源の選択 —見過ごしに気づいたら直ちに改めよう—

白田 秀明

帝京大学教育学部教育文化学科 〒192-0395 東京都八王子市大塚 359

要 約

本論は主に以下の四部からなる。①既報の訂正。②人類進化に関して 2009 年にまとめたが、その後興味深いことが明らかになった。そのことを紹介し、それを含めホモ・サピエンスを中心とした人類の 700 万年の展開をごく簡単に通観する。③前報『知は地球を救う 8. 気候変動、過去・現在・未来—選択のために問われる価値観—』で残された課題「人為的な温暖化を軽減するためにわれわれはどのようなエネルギー源を選択するのか」について、エネルギー源の変遷と、各国のエネルギー源の選択の違いを含めて考察する。④最後に本シリーズを閉じるにあたり、全体を通して伝えたかったこと（一人一人が、将来世代に「持続可能な発展」が可能な地球を引継ぐためには多くのことを知り、様々な選択に積極的に関わることができる市民社会を構築することが重要であることなど）を簡略に述べる。

キーワード：エネルギー源、原子力発電、人為的な温暖化、人類進化、デニソワ人、電源構成、ネアンデルタール人、ホモ・サピエンス

目次〔頁数〕

はじめに	[124]
1. 訂正	[124]
1.1 知は地球を救う 2	[124]
1.2 知は地球を救う 4	[124]
1.3 知は地球を救う 5	[124]
1.4 知は地球を救う 6	[124]
1.5 知は地球を救う 7	[124]
1.6 知は地球を救う 8	[125]
2. 補遺	[125]
2.1 ラミダス猿人	[125]
2.2 最古の石器	[125]
2.3 ネアンデルタール人の滅亡した時期	[126]
2.4 ゲノム・遺伝情報・遺伝子	[126]
2.5 ネアンデルタール人とホモ・サピエンスは交配し、その子孫が現存している	[127]
2.6 デニソワ人（数万年前に絶滅）からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」があった	[130]
2.7 ネアンデルタール人からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」でもたらされた形質	[131]
2.8 ネアンデルタール人、デニソワ人、ホモ・サピエンスの関係	[132]
2.9 ホモ・フロレシエンシスの誕生・絶滅の時期	[133]
2.10 種の誕生から人類進化 700 万年についての概観	[134]
2.10.1 種の誕生	[134]
2.10.2 人類の種	[134]

2.10.3	哺乳類の繁栄、霊長類・類人猿の誕生	[135]
2.10.4	人類の誕生	[136]
2.10.5	最古の石器	[137]
2.10.6	出アフリカ	[138]
2.10.7	ホモ・エレクトスの子孫	[139]
2.10.8	ネアンデルタール人・デニソワ人は絶滅し、ホモ・サピエンスは生き延びた	[140]
2.10.8.1	ムステイエ文化	[141]
2.10.8.2	オーリニャック文化	[141]
2.10.8.3	ネアンデルタール人は滅び、ホモ・サピエンスは生き延びた	[142]
2.11	農耕の開始・国家の形成・文字の成立・産業革命・戦後の急成長	[143]
2.12	生物・人類の進化から明らかになる一つのこと	[143]
3.	人為的な温室効果を回避するためにわれわれはどのようなエネルギー源を選択するのか	[144]
3.1	人類の大きな画期	[144]
3.2	エネルギー使用量の増加	[145]
3.3	人類の利用するエネルギー源の大きな変遷	[145]
3.3.1	薪・炭と石炭・石油	[145]
3.3.2	19世紀以降のエネルギー源	[145]
3.3.3	水力・風力	[146]
3.3.4	電力	[146]
3.3.5	原子力	[147]
3.3.6	人為的な温暖化を軽減するための新たな再生可能エネルギー	[147]
3.4	エネルギーフロー	[148]
3.5	エネルギーの利用効率	[148]
3.6	石炭の傾斜生産による戦後の経済復興	[148]
3.6.1	戦前の動き	[149]
3.6.2	戦後の石炭増産プランの作成	[149]
3.6.3	経済復興の実態	[152]
3.6.4	炭鉱業の興亡	[152]
3.6.5	大衆の転進	[153]
3.7	現在のエネルギー事情	[154]
3.8	各国の電源構成などの比較	[154]
3.8.1	概略	[154]
3.8.2	電源構成	[154]
3.8.3	風力発電	[156]
3.8.4	太陽光発電	[156]
3.9	パリ協定	[157]
3.10	続いている人為的な温暖化	[158]
3.11	どのようなエネルギー源を選択しどのような暮らしをするのか	[158]
3.11.1	化石燃料利用削減の具体策	[159]
3.11.2	化石燃料削減に向けた誘導政策	[160]
3.11.2.1	ドイツの場合	[160]
3.11.2.2	固定価格買取制度	[160]
3.11.2.3	炭素税	[161]
3.12	原子力発電をどう考えるか	[162]
3.12.1	原子力の平和利用を選択した土壌	[162]
3.12.1.1	放射能研究	[162]

3.12.1.2 科学ユートピア	[163]
3.12.1.3 原子力政策と原子力発電への傾斜	[163]
3.12.2 福島原発事故後のエネルギー政策	[165]
3.12.3 原発をどう考えるのか	[166]
3.12.3.1 原発の安全性	[166]
3.12.3.2 原発の経済性	[167]
3.12.3.3 核廃棄物の処理	[167]
3.13 人為的な温暖化を軽減するための選択	[168]
結語	[169]
謝辞	[171]
文献	[172]

はじめに

2009年から発表し始めた『知は地球を救う』シリーズ(1-8¹)では、ポール・ゴーギャン(1848-1903)の「われわれはどこから来たのか われわれは何者か われわれはどこへ行くのか」という問いかけに対して、137億年前のビックバンから、地球の誕生(46億年前)・生命の誕生(約40億年前)・人類の誕生(700万年前)・農耕の開始(およそ1万年前)・産業革命(およそ250年前)・第二次世界大戦後の急速な経済成長と環境への負荷の増大(およそ70年前以降)を考えることで、筆者なりの答えを提示しようと試みた。それは、21世紀の後半に暮らす将来世代に恵まれた地球を引き渡したいという願いを込めたものであった。シリーズ最後の本報では要約に述べた3点を補い、最後にシリーズ全体を通して考えたことをごく簡単に述べる。大まかな内容は目次を参照していただきたい。

1. 訂正

1.1 知は地球を救う 2(2): ①105頁左下から5行目、106頁左下から15行目、(誤)1814 (正)1812。②107頁左23,28,31行目、右11行目、114頁右7行目、(誤)ウォーレンス (正)ウォレス。③107頁左21行目、(誤)1923 (正)1913。④114頁左下から8行目、右7行目、123頁右下から11行目、(誤)フローレンス (正)フローレス。⑤113頁右14,20行目、117頁右下から5,3行目、118頁、図2 説明文b、119頁左3行目、(誤り)チューゲンシス (正)トゥーゲンシス。⑥113頁右20行目、(誤り)チューゲン (正)トゥーゲン。

1.2 知は地球を救う 4(4): ①95頁右21行目、(檜)を削除。②95頁右22行目、96頁左21行目、101頁左3~7,9,14,17行目、(誤)檜 (正)オーク。西洋のオーク(*Quercus robur*)は、日本の檜よりは楡に似ているものが多い。文系の論文では往々に檜と誤訳されることがあり(9)、それを参照したために誤って記載した。

1.3 知は地球を救う 5(5): 195頁左7行目、(誤)なかった (正)なかったと言われている

1.4 知は地球を救う 6(6): 歳差運動に関する誤解(地球の恒星に対する歳差運動と太陽に対する歳差運動を同一視した)から生じた誤り(8の99頁参照)。①146頁

右下から12行目以下「更に地球の自転軸はコマが傾いて回っている時に軸が首を振るのと同じ、歳差運動と呼ばれる動きをする。地球の歳差運動の周期はおよそ2.6万年である。つまり図1の上の状態から下の状態に変化し、再び上の状態に戻るのに2.6万年かかるのである。」を、以下のように訂正する。訂正は下線部である。「更に一、歳差運動と呼ばれる動きをする。地球の歳差運動の恒星に対する周期はおよそ2.6万年である。一方、地球の公転軌道にも歳差運動がある。また地球の公転軌道の離心率も変化をする。これらを勘案すると地球の太陽に対する近日点は図1の上の状態から下の状態に変化し更に上の状態に戻る。この周期は2.2万年である。」また、②146頁右下から6行目以下の「即ち現在の冬至の日は約1.3万年後(歳差運動の周期約2.6万年の半分)に夏至となる。このように季節は1年におよそ365.25(日/年)×24(時間/日)÷26,000(年)=0.33時間≒20分ずれている。」の部分は「即ち現在の冬至の日は約1.1万年後(歳差運動の周期約2.2万年の半分)に夏至となる。このように季節は1年におよそ365.25(日/年)×24(時間/日)÷22,000(年)≒0.40時間=24分ずれている。」に訂正する。なお詳しくは文献8の99頁の図9をご覧ください。

1.5 知は地球を救う 7(7): ①17頁右23行目以下、「宇宙で生成されたものが隕石など(94-101)によって地球にもたらされたものと考えられている。」を次のように訂正する。「宇宙で生成されたものが隕石など(94-96,98-101)によって地球にもたらされた、あるいは隕石が地球に落下した際に生じた衝撃後蒸気流の中でつくられたと考えられている(97)。(また引用文献として現論文の文献10を追加する)。即ち、宇宙から持ち込まれた生体物質は、宇宙で生成されたものと隕石落下の際に生成されたものの両方があると考えられている。」②24頁左4行目以下、「④真核生物の細胞膜にはコレステロールが含まれているが、ミトコンドリアの内膜にはそれが含まれていない⁴³」を削除する。原核生物の細胞膜には、コレステロールが含まれないが、現生生物のミトコンドリア(20億年前の原核生物由来)の内膜にはコレステロールは含まれている。筆者の誤解であった。ミトコンドリアの包膜は内膜と外膜からなる。内膜は取り込まれた原核生物の細胞膜に由来し、外膜は取り込んだ細胞の細胞膜に由来する。二重膜をもつことも、共生進化の根拠の一つである。③94頁文献153の雑誌はNではなくS。

¹ 引用文献は通常書体の数字で示した。

1.6 知は地球を救う 8 (8) : 139頁図17 $\delta^{18}\text{O}$ の値の目盛りの数字にマイナスの符号が抜けている。

2. 補遺

既報の発表後に興味深い知見が多数報告されている。ここでは人類の進化 (2) について以下の5点に限って補足する。①ラミダス猿人 (440万年前頃に生息していた。2の112頁, 118頁参照)に関する詳細。②人類が使った最古の石器は二百数十万年前ではなく、三百数十万年前に遡る (2の121頁参照)。③ネアンデルタール人は4万年前に絶滅した。従来は2.5万年前まで生き延びていたとされていた (2の125頁参照)。④ネアンデルタール人とホモ・サピエンスが交配した子孫が現存のホモ・サピエンスの中に存在する。以前は、両者は交配した可能性が低いと考えられていた (2の125-126頁参照)。⑤約4万年前頃にロシア・アルタイ地方のデニソワに住み、その後絶滅したホモ・サピエンスとは異なるデニソワ人がホモ・サピエンスと共存していた。一部のホモ・サピエンスはデニソワ人と結ばれ、その子孫が現在まで生き続けている。これらを踏まえて、できるだけ重複を避け人類の進化700万年間を簡単に通観する。

2.1 ラミダス猿人

1992年にエチオピアのラミダスで440万年前頃の猿人 (アウストラロピテクス・ラミダス²) の歯の化石が見つかった (11)。ラミダス猿人よりも古い人類化石は、チャドで見つかったトゥーマイという渾名をもつ600~700万年前の猿人 (サヘラントロプス・チャデンシス) の頭蓋骨 (12) とケニアで見つかった600万年前のオロリン・トゥーゲンシスの大腿骨などだけである (13)。これらの頭蓋骨と大腿骨は直立二足歩行をしていた猿人のものと考えられ、彼らは人類の祖先に位置づけられている (2参照)。

人類の系譜を明らかにするであろうラミダス猿人について詳細な発表が待ち望まれたが、その公表は2009年までなされなかった。

2009年に公表された一連の論文は、ラミダス猿人36人に由来すると考えられる骨と15万点以上の動植物の化石の性状を明らかにした。その結果、ラミダス猿人の全体像と、彼らが暮らしていた当時の環境が明らかにされた (14-28)。

アルディという渾名をつけられたその人類は300~350ccの小さな脳をもち (22)、大きな個体で体重は50kg、身長は120cm (20, 27) であった。彼らは直立二足歩行をしていたが、チンパンジーのように足で木にぶら下がることも出来、樹上でも暮らせたと考えられている。地上を二足歩行する時にはチンパンジーのようなナックルウォーキングではなく、直立二足歩行をしていたとされている (24-27)。また犬歯の尖りは現在のチンパンジーのものよりは小さかったが、ホモ・サピエンスよりは大きかったことと、臼歯のエナメル質は、現在のチンパンジーよりは厚いが、ホモ・サピエンスよりは薄かったことが明らかにされている (23)。

アルディが発見されたエチオピアのラミダスの現在の様子は典型的な乾燥サバンナである。しかし、出土した動植物の化石からラミダス猿人が暮らしていた当時の環境は、木々の間から十分な日差しが地面に差し込む程度の疎林であって、乾燥サバンナでも密林でもなかったことが明らかにされている (16, 18-20, 28)。彼らが暮らした地域は、おそらく開けた森や木がまばらに生える草原などがモザイク状に広がるものであった。そこで彼らは樹上を器用に渡り歩くと同時に草原を直立二足歩行することで、森と草原の恵みに依存しながら暮らしていたと思われる。

2.2 最古の石器

従来人類が作った最古の石器は、ルイス・リーキー (1903-1972) が1930年代後半にタンザニアのオールドヴァイで見つけたオールドワン石器 (二百数十万年前以降) であると考えられていた (2参照)。ところが最近、より古い時代に石器が使われていたことを示す証拠が発見された。2010年には石器で処理をしたと思われる動物組織の化石 (339万年前) がエチオピアのディキカ遺跡から発掘された (29, 30)。その後、ケニアのトゥルカナ地方 (古い人類の化石が多く出土している地域) から330万年前の石器が見つかった (31-33)。

人類は、①初期人類である猿人、②ネアンデルタール人、ホモ・サピエンスを除くホモの仲間をひとまとめにした原人、③旧人 (ネアンデルタール人)、④新人 (ホモ・サピエンス) に大きく分類される (2参照)。原人の特徴の一つは石器を使用し始めたことが挙げられることが多い。しかし、上述したことは、240万年前頃に誕生した最初のホモの仲間である原人のホモ・ハビルス以前の

² 1994年に発見された時にはアウストラロピテクスと命名された (11)。しかし、約340万年前のルーシーと命名された有名な化石は (全身骨の多くが見つかった) アウストラロピテクス・アファレンシスである。それらと区別するために、この種はその後、アルディピテクスと改められた (16など)。

ヒトである猿人がかなり早い段階から石器を使用していた可能性を示しており、人類の進化を考える上で、重要である。ただし、その発見に疑問を差し挟む人もおり(34)、今後の詳細な研究が待たれる。

2.3 ネアンデルタール人の滅亡した時期

ネアンデルタール人が絶滅した時期は、従来2万数千年前であるとされていた(2参照)。それはイベリア半島の南端にあるジブラルタル海峡を臨むゴレーム洞窟で発見されたムスティエ文化層(ネアンデルタール人が関与していたと考えられている)(141頁、2.10.8.1³参照)に含まれる動物の化石骨の年代測定(炭素14の分析)を根拠としていた。炭素14は放射性元素で窒素14に変化する。その減衰は時間に対して規則的である⁴(8参照)ため、化石の骨に含まれる炭素14の割合を調べること、その動物が死んだ時代を推定することができる。炭素14は、およそ5万年経つと元の0.1%程に減る。しかし、そのような過去の遺物に、炭素14を多く含む現在の物質が僅かでも付着してしまうと、多くの炭素14が回収される結果、その動物骨の時代特定は、実際よりも現在に近いものになってしまう。

そこでトム・ハイナム(1966)らは、ネアンデルタール人が暮らしていたと思われる遺跡から回収した動物の骨(人が石器で処理をし、肉や骨髄を食べたことが明らかかなものや、骨製の道具)に様々な前処理をし、汚染物質を取り除く方法⁵を確立した。彼らは、ネアンデルタール人が住んでいたと思われる多くの遺跡の幾つもの試料について、その方法で年代を特定した。その結果、ネアンデルタール人が2万数千年前に絶滅したという従来の見積もりは、新しい時代の炭素14により汚染された結果であると考えられることと、ネアンデルタール人は実際には4万年前前後に滅びたことが明らかにされた(37)。彼らの結論は、フランス・イタリア・ドイツ・ベルギー・イギリス・スペイン・ギリシャ・レバノン・ロシアなどヨーロッパの各地の遺跡から集めた多数の試料

(従来は若い時代が特定されていた)に基づいたものであり、説得力がある。但し、最後のネアンデルタール人が住んでいたとされているゴレーム洞窟の試料は含まれていない。

2.4 ゲノム・遺伝情報・遺伝子

生物は四種類の塩基が対をなしているDNA(デオキシリボ核酸(deoxyribonucleic acid)の略)に含まれる遺伝情報に支えられて生きている(7参照)。ヒトのほとんどの細胞の核には父母それぞれから由来する約30億塩基対⁶からなるDNAが合計二組存在する⁷。各生物のDNAの全配列をゲノムと呼んでいる。ヒトゲノム計画などにより、現在ホモ・サピエンス、ネアンデルタール人、デニソワ人の約30億塩基対からなるゲノムの全配列が明らかにされている。ゲノムの情報は三つに大別できる。①狭義の遺伝子(DNAの塩基の三つの配列は、一つのアミノ酸に対応する。三つの配列のつながりからアミノ酸が順番に結合した特異的な機能をもつタンパク質が作られる。このようなタンパク質をつくる情報をもつDNAの配列)。ヒトの狭義の遺伝子は数万でゲノムの2%前後であると推定されている。②広義の遺伝子(tRNA⁸やrRNA⁹を作る情報、あるいは遺伝子の発現を調節する(例えば肝臓と胃で発現する情報は違う)物質をつくる情報をもつ)。広義の遺伝子はどのくらいあるか定かではない。かつては広義の遺伝子はそれ程多くないと考えられていたが現在ではそれがゲノムの数十%に及ぶと考えている研究者もいる(7参照)。③遺伝子以外の役割が明らかにされていない塩基配列、あるいは意味をもっていない塩基配列。ジャンクDNAと呼ばれる。かつてはヒトのゲノムの98%はジャンクDNAと考えられていたが、現在ではそれほど多くはないとされている(7参照)。

³ 本論文の項目は太字で示す。

⁴ 半分に減少する時間が半減期であり、それは核種によって決まっている。

⁵ 粉碎した骨に順次()内の操作(酸-アルカリ処理、ゼラチン化、コラーゲン抽出、ろ過による不溶物の除去、限外ろ過による低分子物質の除去)が行われ、分子量が3万以上の高分子であるコラーゲンが不純物を含まない状態で得られるようになった。それが時代分析の試料とされた(35, 36)。コラーゲンは腱、骨、目の硝子体、皮膚等に含まれる繊維タンパク質である。それは、脊椎動物では全タンパク質の25%程を占める重要な物質である。

⁶ DNAは二つの塩基が向き合って構成される高分子化合物で、向き合うものが塩基対と呼ばれている。

⁷ 精子や卵子は一組持っているだけである。肝臓の細胞にはDNAを含む核が一つの細胞に二つ存在するものも多く、そこには四組が存在している。一方成熟した赤血球の細胞では核が消失しており、そこには核のDNAは存在しない。

⁸ DNAの三つの塩基の並びに対応しアミノ酸をリボソームに運ぶ、トランスファーRNA(7参照)。RNAはリボ核酸(ribonucleic acid)の略である。RNAはDNAの情報に基づいてタンパク質が作られる過程などで重要な役割を担っている重要な生物物質である(7参照)

⁹ DNAの情報に応じてタンパク質を作る細胞器官であるリボソームを構成するRNA(7参照)。

2.5 ネアンデルタール人とホモ・サピエンスは交配し、その子孫が現存している

ネアンデルタール人とホモ・サピエンスは交配し、その影響が現代のホモ・サピエンスに及んでいるかどうかは「われわれはどこから来たのか われわれは何者か」という問いに答える意味でも大変興味深い。過去にもネアンデルタール人の血がホモ・サピエンスに流れていることを主張する研究者もいたが、従来の定説は絶滅してしまったネアンデルタール人からホモ・サピエンスには遺伝情報が伝達されることはなかったというものであった(2参照)。別の種の間では、減数分裂(7, 134頁、2.10.1参照)を伴う交配により遺伝情報が子孫に伝わることはないとされている。ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの間では、子孫を残すような交配が行われたことはなく両者は別の種であるとされてきた(2, 134頁 2.10.1参照)。

ところが、最近、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの間には、子孫まで継承される遺伝情報のやり取りが起こったことが明らかにされている。このことは、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスは同じ種のサブグループである亜種とするのが適当であることを示している。以下、①ネアンデルタール人とホモ・サピエンスは同じ種の別のグループであるとし、②そのような別のグループ間で交配が起こり子孫に遺伝情報が伝えられることを「遺伝子流動」と呼ぶことにする。「遺伝子流動」という言葉は、役割が明らかでゲノムに焦点を当てている。それは、ホモ・サピエンスにネアンデルタール人の血がどのような影響を与えたかを理解したいという気持ちの反映である。134頁、2.10.2で述べる「遺伝的混合」は意味の分からないゲノムの流動をも含めた言葉である。

まず、「遺伝子流動」について述べる。例えば、ネアンデルタール人からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」があったということは、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスが交わり、子供が生まれ、その子孫がホモ・サピエンスと主に交配し続けホモ・サピエンスと分類される場合である。逆にホモ・サピエンスからネアンデルタール人に「遺伝子流動」があったということは、両者が交

わり生まれた子孫が、ネアンデルタール人の社会で生き続け、絶滅し、その骨がネアンデルタール人の性状(形態あるいはミトコンドリアのDNA(以下参照)等)を留めていた場合である。両者は別の集団として別々に暮らしており、両者が交配した子孫はどちらかの集団に属し暮らしていたと考えられる。

このような「遺伝子流動」が起きていたことが明らかにされたのは、近年のDNAに関する分析技術の長足な進歩に負っている。その代表的なものは、1980年代に開発されたポリメラーゼ連鎖反応¹⁰(微量のDNAを大量に増幅できる)や1990年に始まったヒトの遺伝情報の全解読を目指したヒトゲノム計画の際にもたらされた様々な新技術・装置(微量DNAの増幅法の改良、DNAの塩基配列の自動解析、情報処理)などである。その結果20世紀の終わり頃から、化石の骨からその人の遺伝情報が明らかにされるようになった。その研究をリードし続けているのは、スウェーデン生まれで1997年以降ドイツの進化人類学研究所を本拠地としているスバンテ・ペーボ(1955-)である。

人を含む真核生物の遺伝情報は核とミトコンドリアのDNAに含まれている¹¹。DNAは4種類の塩基により構成されている。遺伝情報は塩基の並ぶ順番に託されている(7参照)。ミトコンドリアのDNA(以下mtDNAと省略する)の情報量(ホモ・サピエンスでは16,569の塩基対からなっている)は、核のそれ(約30億の塩基対二組¹²からなる)に比べて桁違いに少ない。また多くの生物では一つの細胞には多数のミトコンドリアがある。更に一つのミトコンドリアにはDNAが2~10コピー含まれている。その結果、一つの細胞につきmtDNAは100~10,000のコピーが存在することになる。一方、核は通常一つの細胞に一つである。つまり、mtDNAの情報量は少なく、核のDNAに比べ、一つの細胞に格段に多くのコピーが存在している。そのために化石からのmtDNAを回収することは、核のDNAに比べて比較的容易であり化石骨のDNA分析はまずmtDNAについて行われた。

一人のネアンデルタール人(1856年に発掘された)のmtDNAの塩基配列と現存のホモ・サピエンス(個人

¹⁰ DNAは相補的な塩基が向き合った二重らせん構造をとっている(7参照)。相補的というのは凸凹のようなイメージである。二重らせんをほどこき、そこに新たに材料を加えて二重らせんを作らせると、凸をもつ一重らせんの凸は新たな凹をもった一重らせんと組み合うことにより新たな二重らせんとなる。一方、元々の凸の相手だった凹をもった一重らせんには新たな凸をもった二重らせんが作られる。つまり一本の二重らせんがほどこかれて、新たな二重らせんが2本出来ることになる。この操作を10回繰り返すと一本の二重らせんは1024(2¹⁰)本となる。現在ではこのようなことを自動的に行う装置が廉価に販売されている。

¹¹ 植物などに含まれる葉緑体にも遺伝情報を持つDNAが存在する。

¹² ミトコンドリアは母方から来た情報(半数性)だけであるが、核のDNAは父・母に由来する(倍数性)ことを考慮すれば、核のDNAに含まれる情報量はミトコンドリアのその約36万倍となる。

差があるので、世界各地の人からおおよそ1,000のタイプを抽出し試料とした)のmtDNAの塩基配列の一部(400塩基弱の配列)の比較が、1997年に公表された。その結果、現生のホモ・サピエンス同志の塩基配列の違いは平均で 8.0 ± 3.1 (1-24の範囲)ヶ所であったが、ネアンデルタール人と現生のホモ・サピエンスの違いは 27.2 ± 2.2 (22-36の範囲)ヶ所であった¹³ (38)。この結果は、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの間には「遺伝子流動」がなく、両者は画然とした違いをもつ別の種であるということを示した。

ところでmtDNAの継承は、核のDNAとは大きな違いがある。mtDNAは母系のみで伝わる。母が息子だけを産み、娘を出産しなければ、その母のmtDNAの情報は息子経由では子孫に伝わらず、その情報は途絶えてしまう。

そこで、mtDNAの解析を確かにするために、ネアンデルタール人の試料数が増やされ、ホモ・サピエンスも現代人ではなく過去の人について調べられた。具体的には、24人のネアンデルタール人とチェコスロバキアやフランスから出土した過去のホモ・サピエンス40人のmtDNAの塩基配列が比較された。2004年のこの結果も、両者の遺伝情報が画然と区別されることが確かめられた(39)。これらのことから、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの祖先は別の種であり、両者が交配しその子孫が現存することはない(「遺伝子流動」はなかった)ことが結論された。

しかし、上述したようにmtDNAは情報量も少ないし、母系でのみ伝わるという特殊性があるので、より正確な比較を可能とするために化石骨を用いた核のDNAの分析が望まれた。とはいえ、多量の情報をもつ核のDNAの情報を微量な化石の骨から読み取ることは多くの困難が伴う。化石の骨は長い間、土などの中に埋まっており、その間に微生物が骨を養分として分解するため、骨には微生物のDNAが付着してしまう。また本来のDNAが分解・変化している可能性も高い。更に、発掘された当時は、それを試料としてDNAの分析が可能になるなど想像する人はおらず、人々が汗にまみれた手で化石を触っていた。汗から現代人のDNAが化石の骨に付着する可能性もある。即ち、化石の骨から本人の変化していない本来のDNAの塩基配列(遺伝情報)を読み取ることは容易ではないのである。

しかし、ペーボらは、上述したような新たな方法を駆使しながらネアンデルタール人の核のDNAの全塩基配列の解読に挑戦し、成功した。彼らの成功には、ネアンデルタール人が発見されたドイツの支援も大きく寄与した。ドイツ政府は、ネアンデルタール人のmtDNAの解析を成し遂げた彼らの成果を高く評価し、東ドイツの振興も兼ねて彼らの為にマックス・プランク協会の進化人類学研究所を1997年に創立した。彼らはライプツィヒに作られた研究所で潤沢な研究費に支えられ、1998年からネアンデルタール人の核のDNAの全塩基配列解読への挑戦を開始した。貴重な数gの化石の骨から苦労して増幅したDNAのうち4%がネアンデルタール人由来のものであることは極めてまれな恵まれたケースであった。そのような幸運は、骨が低温の洞窟の中で長い間保存されていたり、様々な工夫で現代のホモ・サピエンスからの汚染を区別できたりしたような場合に得られた。そのような困難を極めた研究がどのように成し遂げられたのかが内輪話を含めて本にまとめられている(40)。それは、推理小説並みに面白い、是非読んでいただきたいと思う。

2006年に、彼らはネアンデルタール人の核のDNAの部分解読を発表した(41)。ペーボから試料を分けてもらったグループも、別の方法で増幅した部分解読の結果を同時に発表した(42)¹⁴。二つのグループは、初めは協力しながら研究を進め部分解読を同時に発表した。しかし、次第に研究方法などで対立するようになり、熾烈な競争の中で全解読が目指された。ペーボは別のグループに出し抜かれぬかを心配しながら2010年に全解読の成果を初めて発表した(44)。そのあたりのことも上記の本の中で生々しく語られている。

この研究では北クロアチアのビンジャ洞窟から出土した3.8万年前頃¹⁵の三つの骨から再現されたネアンデルタール人の核のDNAの全情報と現代の5人のホモ・サピエンスのそれが比較された。その結果、面白いことが分かった。ネアンデルタール人のmtDNAは現存のホモ・サピエンスには引き継がれていないことが再確認された。しかし、ホモ・サピエンスの中には、ネアンデルタール人の核のDNAの1~4%程を引き継いでいる人もいることが明らかにされた(44-50)。フランス人・漢民族・パプアニューギニア人はネアンデルタール人の遺伝情報を引き継いでいた。しかし、アフリカのサン族・ヨルバ

¹³ 現存するホモ・サピエンスとチンパンジーのmtDNAの配列の違いは 55.0 ± 3.0 (46-67の範囲)ヶ所であった(38)。

¹⁴ 両者の研究結果は必ずしも整合的ではなかった。二つの結果の差は、現代のホモ・サピエンスのDNAの汚染が原因であると指摘されている(43)。しかし、はっきりした原因は特定されていない。

¹⁵ ネアンデルタール人の時代特定は最新の方法(126頁、2.3参照)でなされたものではない。

族の人はネアンデルタール人の核の遺伝情報を引き継いでいなかった (44-47)。

これらのことはホモ・サピエンスがアフリカを出た後 (数万年前頃) に中東あるいはヨーロッパなどでネアンデルタール人と出会いそこで交配した (一度とは限らない) 結果であると考えられている (44-47, 51)。ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの交配がどの程度の規模であったのかは不明である。一つの見積もりによると、両者の共存した期間はおよそ 13 万年間でその間に交配することが可能であったが、交配は極めてまれで¹⁶、交配の結果生まれた総人口は僅か 1 万人のオーダーであったと推計された (52)。その後、その子孫が各地に広がっていったと考えられる。このように、ネアンデルタール人から現代のホモ・サピエンスにまで引継がれている「遺伝子流動」が起こっていたことが明らかになった¹⁷。

また、西シベリアから発掘された 4.5 万年前のホモ・サピエンスの核の遺伝情報が解析された。その人は、現代のヨーロッパ人よりネアンデルタール人の遺伝情報を多く引き継いでいたことと、「遺伝子流動」が起きたのは、その人より 7,000 ~ 13,000 年前に生きていた祖先であったことが示唆された (55)。

しかし、過去に「遺伝子流動」が起きても、それが現代まで残っていないものもあることが分かった。ルーマニアのペシュテラ・ク・ワセ (骨の埋まった洞窟) から発掘された Oase1 の下顎骨は、4 万年前頃の人骨である (56)。その核の遺伝情報が分析された。その結果、① Oase1 の人は、ネアンデルタール人からの「遺伝子流動」をもったホモ・サピエンスであること、② 「遺伝子流動」はその骨の持ち主の 4 ~ 6 代前の祖先の時に起こったこと、③ しかし、Oase1 の人の遺伝情報は、現代のヨーロッパの人々の遺伝情報には実質的に寄与していないことが示された (57)。

このように、ネアンデルタール人と出会うチャンスがあったホモ・サピエンスにはネアンデルタール人からの「遺伝子流動」があったことが明らかにされた。しかし、アフリカに留まっていたホモ・サピエンスにはそのようなチャンスはなく、ネアンデルタール人からの「遺伝子流動」はなかったことも示された (37, 44, 46)。

最近、約 4 万 5,000 ~ 7,000 年前のホモ・サピエンスのユーラシア人 51 個体の核の DNA が解析された。その結果、ネアンデルタール人由来の DNA の比率はこの

期間に 3 ~ 6% から約 2% に低下していたことが明らかにされた。このことは、ネアンデルタール人由来の遺伝形質に自然選択が働いたことを示唆している (58)。

重要なことを繰り返しておくが、核の遺伝情報については、ネアンデルタール人からホモ・サピエンスへの遺伝子流動があったことが示された。ところが、ネアンデルタール人のミトコンドリアの遺伝情報はホモ・サピエンスに引き継がれなかった。ミトコンドリアの情報は母から娘へと引き継がれる (2 参照)。従って、ネアンデルタール人の女の人と交配した家系で娘が生まれなかった世代があれば、そこでその情報は途絶えてしまう。即ち、両者の間で交配が起こり、核からの「遺伝子流動」は現代まで引継がれたが、女系でのみつながるミトコンドリアの情報は現生のホモ・サピエンスには残っていないということは大いにありうる。

また 2016 年にペーボらは興味深い「遺伝子流動」について報告した。シベリアのアルタイ山脈で出土したネアンデルタール人とデニソワ人 (125 頁、2, 130 頁、2.6 参照) の各 1 体と、スペインおよびクロアチアで出土したネアンデルタール人 2 体の核の全部あるいは一部の遺伝情報を解析した。その結果、約 10 万年前にアルタイ山脈にいたネアンデルタール人にホモ・サピエンスからの「遺伝子流動」があったことが示された。一方、デニソワ人とヨーロッパのネアンデルタール人には、そのようなホモ・サピエンスからの「遺伝子流動」は認められなかった (59)。このことは、10 万年前のアルタイに住んでいたネアンデルタール人 (の祖先) は、それ以前にアフリカを出たホモ・サピエンスと交わったことを示している。この出会いは、現代のホモ・サピエンスの一部に引き継がれているネアンデルタール人からの「遺伝子流動」をもたらした出会いとは別のものである。10 万年前以前にアフリカを出たホモ・サピエンス¹⁸ が存在していた証拠が見ついている (2 参照)。イスラエルのスフル洞窟から 12 万年前頃のホモ・サピエンスの人骨が出土している (60)。また、最近では中国南部の道県にある福岩洞から 12 万年前 (推定年代の最古値) まで遡る可能性が強いホモ・サピエンスの歯が見つかった (61)。これらのことは、現在のユーラシアに住むホモ・サピエンスの祖先とは、一部違った特異な遺伝情報をもつホモ・サピエンスが 10 万年前以前にユーラシアのどこかでシベリアのアルタイ山脈のネアンデルタール人の

¹⁶ 両者が交配した夫婦は、両者が共存した間に 77 世代ごとに一組程度であると推測された (52)。

¹⁷ ただし、ネアンデルタール人の核の DNA の情報と共通の部分がホモ・サピエンスの一部に見られるのは、交配したからではなく両者が共通祖先からそれらを引き継いだポリモルフィズムである可能性を指摘する研究者もいる (53, 54)。

¹⁸ これらの人は子孫を残さず絶滅したか、アフリカに戻ったと考えられる (2, 59 参照)。

祖先と出会い交配した可能性が高いことを示している (59)。

以下に、①ネアンデルタール人とは別のグループであるデニソワ人が数万年前まで生きていたこと、②数万年前に彼らからホモ・サピエンスに遺伝子流動があったことを紹介する。

2.6 デニソワ人 (数万年前に絶滅) からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」があった

ネアンデルタール人の特長をもつ化石骨はヨーロッパ・中東から見つかっているが (2 参照)、部分的な骨の形態的特徴だけでは、その由来を特定できない。しかし、骨から遺伝情報を明らかにすることができればその骨の正体を突き止められる。2007 年にウズベキスタンおよびシベリア南部のアルタイ地区 (中央アジア) から出土した骨の mtDNA は、ヨーロッパに生息していたネアンデルタール人の mtDNA の塩基配列の多様性の中に収まることが明らかにされた。このことは、ネアンデルタール人が暮らしていた地域が、従来知られていたヨーロッパから西アジアに留まらず、更に東の中央アジアにまで広がっていたことを示した (62)。

そのアルタイ地区のデニソワ洞窟から 2008 年に小さな骨が発見された。その洞窟には 12.5 万年前頃から人類 (別々の時期にネアンデルタール人とホモ・サピエンス) が暮らしていた跡が残っていた。ペーボらは 2010 年 4 月に、その小さな骨が 4 万年前頃に生きていた少女の指の骨であることを示すとともに、30mg の骨粉から mtDNA の全塩基配列を明らかにした。その人の mtDNA の全塩基配列はホモ・サピエンスのそれと平均して 385 ヶ所で違っていた。一方、ネアンデルタールとホモ・サピエンスの違いは平均して 202 ヶ所であった。このことから、その指の骨は、ネアンデルタールとも違うグループのデニソワ人のものであると結論された。またこれらの違いから、デニソワ人、ネアンデルタール人、ホモ・サピエンスの共通の祖先はおおよそ 100 万年前頃¹⁹ に存在していたと推定された。またそのデニソワ人の近隣には、同時期にネアンデルタール人とホモ・サピエンスが暮らしていたと考えられる (63)。

デニソワ人が、ネアンデルタール人やホモ・サピエンスとどのような関係にあるかを明らかにするためには、mtDNA の塩基配列の比較では不十分で、デニソワ人の核の DNA の塩基配列の解読が待たれた。ペーボらは早

くも 2010 年 12 月には、その成果を発表した (64)。デニソワ洞窟は西南シベリアに位置しており、その洞窟の平均温度は約 0℃ であった。そのために化石の骨は、良い状態で保存されていた。その微量の試料から最新の技術を使い、DNA を大量に増幅し、速やかに塩基配列の解読がなされた。核の DNA の情報からもデニソワ人とネアンデルタール人は共通の祖先に由来することが明らかとなった。更に、現存するホモ・サピエンスの中では特にオセアニアの一部であるメラネシアの人々の中にデニソワ人特有の DNA が 4~6% 含まれていることもはっきりとした。しかし、アジアの人やアメリカの原住民への「遺伝子流動」は 0.2% 以下と極めて少ないことも分かった (48, 64)。

また、彼らは、デニソワ洞窟から出土した歯についても遺伝情報と形態的特徴を調べた。1 個の歯の mtDNA の塩基配列は、指骨のそれと極めて類似していた。またその歯の形態には、ネアンデルタール人もホモ・サピエンスとも異なる特徴が認められた (64, 65)。このことと、最近のデニソワ人の遺伝情報の解析結果 (66) から、デニソワ人はネアンデルタール人やホモ・サピエンスとは異なるグループであることが示されている。

ところで、日本人の祖先への「遺伝子流動」はどうなっているのだろうか？ およそ 3,000 年前の縄文人 (福島県三貫地貝塚から発掘された) の核の部分的な塩基配列 (6 千万) がデニソワ人とネアンデルタール人の核の全塩基配列と比較された。その結果、デニソワ人 (64) と北クロアチアのビンジャ洞窟に住んでいたネアンデルタール人 (44) のものと共通な配列が見つかった。この結果は、アフリカを出た日本人の祖先が、ユーラシアのどこかで、デニソワ人とネアンデルタール人と交配し「遺伝子流動」を受け、その子孫が日本に辿り着き、その分析された縄文人の祖先となったことを示している (67)。

デニソワ人の化石は 3 つしか発掘されていない。目下の所、彼らは数万年前に中央アジアのアルタイ地方に住んでいたことが分かっているだけで、頭蓋骨の形態などは分からない。しかし、ホモ・サピエンスは数万年前にはアジアに進出しており (2 参照)、両者はその頃、どこかで交配したことが「遺伝子流動」から明らかにされている²⁰。

では、なぜアジア本土の人にはデニソワ人の血がほとんど残らずオセアニアの人には多く残ったのだろうか。そこで、オセアニア・インドネシア・インドの沖合の

¹⁹ 核の DNA の比較からは図 1 に示すように 60~70 万年前に共通の祖先が居たと推定されている。

²⁰ デニソワ人にホモ・サピエンスからの「遺伝子流動」があったかどうかは、デニソワ人の遺伝解析の例が少ないし、デニソワ人は絶滅し現存しないので分からない。

アンダマン諸島・東アジア本土の現代人へのデニソワ人の核からの「遺伝子流動」が比較された。その結果、ウォレス線の西側の人にはデニソワ人の痕跡が見られず、オセアニアの人との際立った違いが明らかにされた (68)。このことは、最近行われたメラネシアの35人を含む世界各国の1,523人の核のDNAとネアンデルタール人とデニソワ人のそれとの比較研究からも確かめられた (69)。

ウォレス線はマライ諸島で生物の多様性を研究しダーウィンと同時に種が変わりうることを示したアルフレッド・ウォレス (1823-1913) が見つけたものである。それはインドネシアのバリ島とロンボク島の間のロンボク海峡からスラウェシ島の西側にあるマカッサル海峡を通りフィリピンのミンダナオ島の南に至る海域である。その東西の地域では生態系が異なっていることが明らかにされた。それは、その海域には流れの速い海流が存在するために、生物がその海流を渡り、島々を自由に行き来することができなかつたためであるとされている。つまり、ウォレス線は生物の分布の境界線である。その境界に隔てられたインドネシアのフローレス島では小型に特殊化した人類 (ホモ・フロレシエンシス) が6~10万年前まで生きていた (70) (133頁 2.9参照)。それは、その島が特異な環境であったためであると考えられている (2参照)。

このようなウォレス線を越えたオセアニアの人にデニソワ人からの遺伝子流動が比較的多く残っているのは、①ウォレス線は自由に行きすることが出来ず、それを越えることのできたオセアニアの人々の祖先はごく少数であった、②そのような困難な旅を成し遂げた人は特に免疫力などに恵まれていたはずで、デニソワ人からもたらされた形質が有利に働いたことなどが要因として考えられている (68, 71, 72)。

また、高地に住むチベット人は低酸素環境に対してヘモグロビンの濃度を増やして適応する能力があるが、それはデニソワ人からの「遺伝子流動」によりもたらされた可能性が示唆されている (73)。

デニソワ人から現代のホモ・サピエンスへの「遺伝子流動」があったことは確かだが、上述したように地域差が大きい。過酷な地域ではデニソワ人由来の形質が有利に働くが、平穏な環境では適応力の増加にはつながらなかったと考えられる。また、デニソワ人や本土アジアなどに住んでいた過去の人々にも遺伝的な多様性があったはずである。そのような人々 (74, 75) の遺伝情報を明らかにすることが待たれる。

2.7 ネアンデルタール人からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」でもたらされた形質

126頁、2.4で述べたようにDNAの全塩基配列を明らかにしても、それがもつ意味までは分からないものが多いといえる。つまりネアンデルタール人からもたらされた遺伝情報がどのような意味をもっているかは必ずしも明らかではないのである。しかし、デニソワ人からもたらされた高所への適応能力の例からも分かるように、ネアンデルタール人からもたらされた形質には、その後の激変する環境をホモ・サピエンスが生き延びるための適応力を増したのものもあるはずである。一方、かつての環境では適応的であったものが、めまぐるしく変化する現代社会 (例えば大きく異なる食生活) では逆に病気を誘発する場合もあることなどが明らかにされ始めている。

ネアンデルタール人からもたらされた遺伝情報の量は、現代の379人のヨーロッパ人と286人の東アジア人の遺伝情報を調べた結果、ネアンデルタール人の遺伝情報の~20%に及んでいると見積もられている (50)。

以下にネアンデルタール人からの「遺伝子流動」で現代のホモ・サピエンスにまでもたらされた形質を列挙する。

皮膚や爪そして髪の毛などに含まれるタンパク質のケラチンに影響を与える遺伝子が豊富に存在する部分がある程度まとまってネアンデルタール人から受け継いだ人々が存在している。これも適応度を増すことに寄与したと考えられている (48-50)。

この他、免疫系を活発にする遺伝情報 (76-78)、また紫外線の受容による悪影響を緩和する働きをもつ遺伝情報 (79) ももたらされた。また、3万人弱の現代のヨーロッパ人の病歴と遺伝情報を比較したところ、病気と関連する「遺伝子流動」があったことも明らかにされた (80)。この結果は、かつては当時の環境への適応度を増した遺伝情報であっても、環境条件や食生活が大きく変わった現在では病気を誘発する要因となるものもあることを示している (81)。

その他脳の肥大化に関連したもの (82, 83)、脂質代謝に関連したもの (84)、男性の繁殖力を低下させることに関連したもの (49) もあることも示唆されている。

上述したように遺伝情報が何を意味しているかを特定することは必ずしも容易ではない。そこで、ヒトの遺伝情報をハツカネズミに導入しどのような変化が現れるかを調べることで、その機能を明らかにしようとする試みが始まっている (85, 86)。ネアンデルタール人からもち込まれた遺伝子の機能を明らかにするためにはこのような研究手法も有効であろう。

一方、最近の研究によると、ホモ・サピエンスの女性とネアンデルタール人の男性の間の妊娠では、ネアンデルタール人の Y 染色体²¹からもたらさせる免疫関係の遺伝子が新生児に悪影響を及ぼすことが示された。即ちこのことは、ネアンデルタール人の男性がホモ・サピエンスの女性と交配した場合には、男児の子孫を残すことが難しいことを示している (87)。

2.8 ネアンデルタール人、デニソワ人、ホモ・サピエンスの関係

上述したように、ネアンデルタール人、デニソワ人、ホモ・サピエンスのそれぞれの mtDNA と核の DNA の情報が明らかにされ、それぞれの間で「遺伝子流動」が起こっていたことが明らかにされた。

もう一つの大きな発見は、更に時代を遡った 30～43 万年前の人骨の mtDNA と核の DNA の分析結果である。その人骨はスペイン北部のシエラ・デ・アタブエルカの洞穴群から発見されたもので、「シマ・デ・ロス・ウエソス (「骨の穴」という意味)」の人類と呼ばれている。そこからは 28 体分に相当する多くの化石人骨が出土している。

その人々は、形態的にはホモ・ハイデルベルゲンシスに似ているが、ネアンデルタール人の形態と似ている特徴もいくつか見られる (88)。一方、デニソワ人は発掘化石が少なく形態的特徴はよくわかっていないので、形態の比較からは彼らとデニソワ人との関係は分からない。

そのシマ・デ・ロス・ウエソスの人骨について、先ず mtDNA の分析が行われた。その結果、そのグループの mtDNA は、ネアンデルタール人よりもデニソワ人のそれに近いことが分かった (89)。ところが、そのグループの核の DNA はデニソワ人ではなくネアンデルタール人と近縁であることが明らかになった (90, 91)。上述したように mtDNA は母系でのみ伝わるもので、相互の関連性をすべて明らかにするものではない。シマ・デ・ロス・ウエソスの人類は、ネアンデルタール人の祖先である可能性が高いが、デニソワ人との関係など不明な点が残されている。

ネアンデルタール人、デニソワ人、ホモ・サピエンスの間で「遺伝子流動」が起こっていたことを明らかにした上述の論文と、それらに関する総説 (92-95) を参考に、シマ・デ・ロス・ウエソスの人類、ネアンデルタール人、

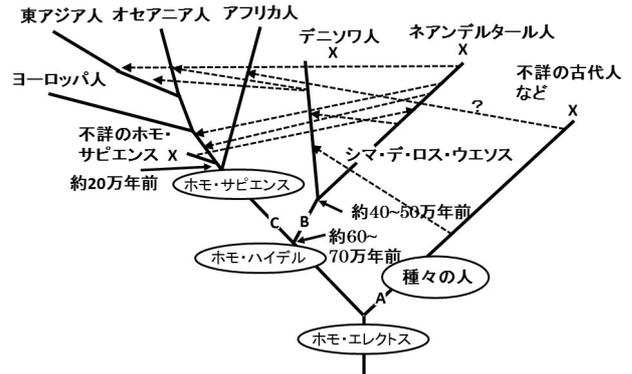


図1 ホモ・サピエンス、ネアンデルタール人、デニソワ人などの系統関係とそれらの中に起きた「遺伝子流動」。点線の矢印は「遺伝子流動」がどのような方向で起こったかを示している。Xは絶滅した人類を示している。分岐の時期はおおよその推測である。またそれぞれの線の長さは時代の長さを反映していない。また「遺伝子流動」の起きた時期は必ずしもはっきりしておらず、矢印の位置も概念的なものである。Aのグループには種々の人類 [アフリカに残ったホモ・エレクトス、アフリカをでたホモ・エレクトス (ドミニシ人・ジャワ原人・北京原人など)、ヨーロッパに初めて現れた人類 (ホモ・アンテセッサ)、ホモ・フロシエンシス、不詳の古代人など] が含まれる。ホモ・ハイデル=ホモ・ハイデルベルゲンシス。ホモ・サピエンスは20万年前にアフリカで誕生し、数万年前以降に全世界に展開した。紙幅の関係でヨーロッパ人は一段低い所に表示されているが、彼らは現存している。詳細は本文参照。

デニソワ人、ホモ・サピエンスなどの系統関係と「遺伝子流動」についての現在の理解を図1に示した。

180万年前頃に誕生したホモ・エレクトスからいくつかの子孫のグループが生まれた。いつ頃かは分からないが、ホモ・サピエンス・ネアンデルタール人・デニソワ人の祖先とはならない古代人のグループAが独自の進化を遂げた。ここでは、彼らはアフリカに留まった人と、百数十万年前からユーラシアに展開した多様な人を含むこととする。彼らの直系の子孫は減ってしまったが、ホモ・サピエンスの一部やデニソワ人に「遺伝子流動」をもたらした可能性がある。一方、60～70万年前頃にアフリカに留まったホモ・エレクトス (ホモ・ハイデルベルゲンシスとして区別する場合もある) からは、その後、将来デニソワ人とネアンデルタール人を生み出すグループBと将来ホモ・サピエンスを生み出すグループCが分岐し始めた。グループB (ホモ・ハイデルベルゲンシスの一部) はユーラシアからヨーロッパに進出したが²²、グループCはアフリカに留まった。そのためにグルー

²¹ 男性は性染色体としてX,Yを持っている。女性はXだけである。即ちY染色体は男性に特有のものである。

²² ヨーロッパに最初に人類が現れたのは、120万年前頃であった (96)。その人は、グループBとは別のグループであったと考えられている (ここでは便宜的にグループAとした)。

プBとCの間には地理的な隔離が起こり、交配する機会がなくそれぞれ独自の進化を辿った。ヨーロッパに進出したグループBからは40～50万年前頃にデニソワ人となるグループとネアンデルタール人となるグループが分岐し始めた。30万年前頃の人類であるシマ・デ・ロス・ウエソスの人々は、上述したようにデニソワ人よりはネアンデルタール人に近縁であると考えられるが、詳細は不明である(89-91)。

数万年前に絶滅したデニソワ人には、アルタイに住んでいたネアンデルタール人の核の遺伝情報が0.5%以上残っていた(48)。更に興味深いことには正体不明のグループA(ホモ・サピエンス・ネアンデルタール人・デニソワ人とは異なる)の核の遺伝情報がデニソワ人に0.5～8%程伝わっていると推定されている(48)。またネアンデルタール人には、初期の段階にアフリカから出たホモ・サピエンスからの「遺伝子流動」があったことが示されている(59)。

ホモ・サピエンスにはネアンデルタール人からの「遺伝子流動」が、数回起こったと考えられている。ネアンデルタール人の核の遺伝情報の流動は地域・人により異なるが最大で4%である。しかし、長い間アフリカで暮らし続けてきた人はネアンデルタール人と出会うチャンスがなくネアンデルタール人からの「遺伝子流動」は起こらなかった(44-50)。

ところが、そのようなアフリカ人の中には古代のグループAと思われる核の遺伝情報が～2%程度僅かに残っていると推定している研究者もいる(64, 92, 97-100)。最近、アフリカのピグミーには古代のグループから3万年前以内に「遺伝子流動」が起こっていた可能性があることが報告された(101)。

また、デニソワ人からホモ・サピエンスへの「遺伝子流動」は、メラネシアの人では最大6%程認められているが、東アジアの人では0.2%程度であった(48, 64)。

このように、いくつかの人類のグループの間で、「遺伝子流動」が起こっていたことが、数万年～数十万年前の人骨から得られたDNAの情報を解読することによって明らかにされている。

過去の骨から確かな情報を得るためには様々な工夫がなされている。その一例を紹介したい。

デニソワ人の存在を明らかにしたデニソワ洞窟からは多数の化石骨が出土している。デニソワ洞窟の東の回廊だけでも135,600の骨片が回収されている。しかし、残念ながらそのうち128,591もの骨は、形態的特徴からその由来を特定できない。つまり、その骨がどのような哺乳動物・ネアンデルタール人・デニソワ人のものであるかが分からない。それを試料としてDNAの分析を

行っても誰のDNAなのか分からないので、比較研究ができない。

ところが、それらの骨に含まれる重要なタンパク質であるコラーゲンの組成を調べると、その骨の由来を特定できる。それは、コラーゲンの組成が種やグループによって違っているからである。最近、微量の骨から得られたコラーゲンの組成を調べる技術が開発された。その技術を適用しデニソワ11と名付けられた骨の分析が行われた。その結果、その骨は人類の骨であることが分かった。更にそのmtDNAはデニソワ人ではなく、ネアンデルタール人のそれであることが判明した。またその骨は5万年前よりも古いことも分かった(102)。

これらのことは、多くの哺乳類・ネアンデルタール人・デニソワ人がデニソワ洞窟を棲家にし、そこに獲物を運んできたりしたことを示している。この洞窟は住むのに適しており、多くの動物や幾つかの人のグループが利用したと思われる。そこで得られる多くの化石により、われわれホモ・サピエンスの成り立ちがよりはっきりさせられることが期待されている。

2.9 ホモ・フロレシエンシスの誕生・絶滅の時期

70万年前頃にアフリカで誕生した人類は百数十万年前からアフリカを出て、ユーラシア各地に展開した。それらの人々は、北京原人・ジャワ原人・ネアンデルタール人・デニソワ人を含めて全て絶滅してしまった(図1参照)。

インドネシアの孤立したフローレス島では小型化(身長約1m、脳容量約400cc)した人類が見つかりホモ・フロレシエンシスと名付けられた(2参照)。彼らが生息していた地域では、彼らが作ったと思われる石器が70～84万年前の地層から出土された(103)。従来、彼らは70万年前頃から1.6万年前まで生息しており、ジャワ島に進出していたホモ・エレクトスの子孫と考えられていた(2参照)。最近の研究で、彼らの70万年前の化石とその頃に彼らが作ったと思われる石器が新たに発掘された(104-109)。更に、彼らの絶滅した時期の再調査が行われた。その結果、彼らが絶滅した時期は化石骨からは、6～10万年前、また石器からは5～19万年前であると推定され(70)、彼らが1.6万年前まで生息していたという従来の見解に疑いが差し挟まれた。

彼らの誕生と絶滅の時期が明らかにされたことを、ホモ・サピエンスとの関係でまとめておきたい。ホモ・サピエンスは20万年前にアフリカで誕生し、数万年前にアフリカを出て、世界各地に展開した。ホモ・サピエンスが、ジャワ島の周辺に進出したのはおよそ6万年前であると考えられている。最近の結果を踏まえると、ホモ・

サピエンスとホモ・フロレシエンシスが会おう機会があったかどうかは微妙であると考えられる。

2.10 種の誕生から人類進化 700 万年についての概観

上に紹介した最近の研究成果を踏まえ、種の誕生から人類の進化について既報 (2, 7) との重複をなるべく避け概観する。それは、本論の主要なテーマである人為的な温暖化を軽減するというわれわれに課せられた課題に対峙するために、現代人の立ち位置を歴史的に鮮明にするためでもある。

2.10.1 種の誕生：生命は約 40 億年前に誕生した一つの種 (共通祖先) から様々な突然変異・生命の合体・他の種からの「遺伝子流動」などにより、新たな種が元の種から枝分かれするように誕生することで進化してきた。一方、誕生した無数の種の 99% 以上は、多様な環境変動あるいは競争相手・捕食者により絶滅に追込まれた (7 参照)。

種の定義は確定的なものはない。人間は生物をその見ただけで区別してきた。その区別は恣意的な面を免れることはできない。無性生殖の分裂により次世代が生まれる生物では変異は連続的で、どこで線を引くのかは必ずしもはっきりしないこともある。そこで一般的には、容易に区別できるようになったものを別の種としている。一方、有性生殖で世代が交代する生物では、一般に交配をした場合に孫の世代まで生まれるようなもの同士を、同一の種としている。精子や卵子などの生殖細胞をつくる細胞分裂は減数分裂と呼ばれ、体細胞分裂とは異なる様式をもつ特殊なものである。例えばトラとライオンの受精卵からは体細胞分裂により、独特の個体が成長する。しかし、その個体では、正常な減数分裂が行われず不妊となり、次の世代を残せない (7 参照)。つまりトラとライオンは別の種である。一方、見た目が大きく違う柴犬とシェパードの間に生まれた子供は不妊ではなく子孫を残せる。つまり両者は同じ種である。人は、オオカミから自分たちと共に暮らせるイヌを家畜化し始めた。そのなかから、様々な能力に長けたイヌを選抜し、多くの犬種²³を生み出してきた。それらが分岐し始めたのは、どんなに古くても 2~3 万年前のことと考えられる (110, 111)。彼らは、分岐し始めてからの日が浅くまだ独立した種とはなっていない。またオオカミ (*Canis lupus*) とイヌ (*Canis lupus familiaris*) も、分岐後の日が浅く、両者は同じ種に属する別々の亜種である。このように形態は大きく異なっても孫まで残せるものは、同一の種の中のサブグループ、亜種 (あるいは犬種のような更

なる下位分類に属するもの) とされている。つまり、同一の共通祖先から別々の道を歩き始めて、暫くは繁殖力のある次世代を残せる。しかし時間が経つあるいは交配の頻度が少なくなれば、別の種となり、交配したとしても不妊の次世代を産むことになってしまう。

2.10.2 人類の種：人類進化の研究は、化石の頭蓋骨や歯などの形態を比較することで進んできた。それらを分類する場合には細部の違いに拘る研究者と、大きく括る研究者が存在する。一般的には過去 700 万年間に 20 弱の種が存在していたとすることが多い (2 参照)。そこから分かった重要なことは以下の二点である。①同一の時代に何種類かの別種のヒトが共存していたこと。②多くの種は子孫を残すことができず絶滅してしまい、現存するヒトはホモ・サピエンスだけである。

1856 年にネアンデルタール人の頭蓋骨が発見された。彼らがどのようなヒトであったのかが理解されるまでには、100 年以上が必要であった。彼らの頭蓋骨には目の上に膨らみ (眼窩上隆起) などがあり、われわれとは別の種であると考えられてきた。しかし、近年目覚ましい進歩を遂げた分子生物学は、化石の人骨から彼らの遺伝情報を明らかにした。その結果、上述したように現代のホモ・サピエンスの中には彼らの遺伝情報を 1~4% もっている人が多く存在していることが明らかにされた。このことは、ホモ・サピエンスとネアンデルタール人 (ホモ・ネアンデルターレンシス) は別の種ではなく、同一種の亜種であるとすべきだという説を支持するものである。以前から両者をホモ・サピエンス・サピエンスとホモ・サピエンス・ネアンデルターレンシスと記載する研究者もいた。

また、上述したようにネアンデルタール人の他に、デニソワ人あるいは正体不明の古代人 (大きくホモ・エレクトスの一つの子孫グループと考えることが可能である) とホモ・サピエンスの祖先が交配し、その血を引き継いでいる現代人がいることも明らかになった。

人類の過去の人骨の数は限られている。例えば 500 万年前以前のもは二体分であり、それらには別の種名が与えられている。その他の古い種は、散発的に見つまっている頭蓋骨などの骨の形・脳の大きさ・犬歯の尖り方などを指標として分類され種名が与えられている。即ち、人類のおよそ 20 種の分類は形態的な特徴に基づいたものである。それらが、交配の結果繁殖力のある子孫を残しうる亜種同士であるのか完全な別種であるのかは、区別する手段がなかった。

しかし近年、過去の人骨からそのもち主の遺伝情報が

²³ 亜種を更に分けた下位分類。

明らかにされるようになり、上述したようにネアンデルタール人からホモ・サピエンスに「遺伝子流動」が起こっていたことなどが明らかにされた。亜種同士の間で交配が起こり、「遺伝子流動」とそれ以外の意味が不明な遺伝情報が子孫に残されたような事象を、以下「遺伝的混合」(admixture)と呼ぶことにする(127頁、2.5参照)。

新たな種が生まれる仕組みとしてはまず生殖隔離がある。例えば、南アメリカ大陸に生息する新世界ザルは、もともとはアフリカ大陸と一体となっていた南アメリカ大陸に住んでいた旧世界ザルであったが、大陸の分裂により、新たな環境となった南アメリカ大陸に住むようになった。そこは、アフリカ大陸とは隔離されているため他亜種との「遺伝的混合」が起こる機会がなくなり、更に独特の環境で新たな種である新世界ザルへと進化した。

種の誕生には地理的な生殖隔離以外に、同じ地域に生息している種から新たな種が分岐する場合もある。例えば、大きな草の実と小さな草の実を好む鳥では、そのくちばしの大きさが大小に分離したり、体色が変化したり、次第に二つのグループの間の変異が大きくなる場合がある。その結果、二つのグループは、相互を交配相手と認識なくなり新たな種の誕生に向かうこともある。ガラパゴス諸島で数百万年の間に誕生した様々なフィンチ²⁴はこの例である。また、アフリカのビクトリア湖・タンガニカ湖・マラウイ湖で1,200万年前あるいは1万4,000年前から多様な種に分かれた魚のシクリッド²⁵も同様の例である。

分岐し始めた亜種が、物理的な生殖隔離が行われず、同一地域で暮らしていれば「遺伝的混合」が時々あるいはしばしば起こりうる。しかし、そのような中でも二つの亜種が違いを鮮明にしていけば、別の種となりうる。もしも、頻繁な「遺伝的混合」が起これば一つの種に収斂することもありうる。種の形成は、決して一本道ではない。

上述したようにホモ・サピエンスには主に以下の三つの「遺伝的混合」が起こっていたことが明らかにされている。その三つの「遺伝的混合」がどの程度継承されているかは、現代のホモ・サピエンスでは一様ではなく、地域により大きく異なっている。①20万年前にホモ・サピエンス(ホモ・エレクトスの子孫と考えられる)が誕生した後も古代人型のホモ・エレクトスが生き残って

おり、両者が出会いホモ・サピエンスへの「遺伝的混合」が起こった。古代人型のホモ・エレクトスの遺伝情報は明らかにされていないので、そのような「遺伝的混合」が起こった根拠は、現代のホモ・サピエンスの遺伝情報に、ホモ・サピエンス・ネアンデルタール人・デニソワ人のものとは思われない遺伝情報が存在することである。②ネアンデルタール人との「遺伝的混合」を起こした現生のホモ・サピエンスの祖先は、当時アフリカ以外に住んでいた人に遡れる。③デニソワ人との「遺伝的混合」の跡は特にオセアニアの人に多く見られる。

更に、重要なことは、ホモ・サピエンスに「遺伝子流動」をもたらした正体不明の古代人・ネアンデルタール人・デニソワ人は数万～数十万年前までに絶滅してしまったことである。

このように近年の遺伝情報に関する研究は、従来多くの成果を上げてきた化石の研究とは別のアプローチから人類の進化、「われわれはどこから来たのか われわれは何者か」について多くの事実を明らかにしている。化石の研究は、散発的に出土する離れ離れの点と点を結ぶものである。一方、現生の類人猿・ホモ・サピエンス、更に化石の人骨の遺伝情報の解析は、離れ離れの点の間の一部を埋めることができる。

また、近年研究が進んでいる古気候・古環境・古景観²⁶の研究は、人類が目まぐるしく変わる環境変化の中で、行きつ戻りつ回り道をしながら生き永らえてきたことを示している。その道程も、単純な一本道ではない。たまたま何とか耐え忍ぶことができる環境を幸運にも見出した集団、あるいは困難を乗り越えるのに役立つような新たな技術を獲得した集団が生き延びたのである(2, 8, 117)。

以下に地球誕生から人類が誕生した新生代までの変遷を駆け足で眺めて見たい。

2.10.3 哺乳類の繁栄、霊長類・類人猿の誕生：地球は約46億年前に誕生し、生命は40億年前頃、非生命である生体物質(タンパク質、脂質、RNA、DNAなど)が集合することで生まれた。その初期生命が多様に変化し、多くの生物種へと分岐した。大きく変わる地球環境の中で、子孫を残し続けた種が存在したので、今の地球には多様な生物が生息している。しかし、99%以上の種は子孫を残さず絶滅してしまった。大きな環境変化としては20～24億年前の大酸化事変、6～7億年前のスノー

²⁴ 例えば、112, 113。

²⁵ 例えば、114-116。

²⁶ 景観は環境の一部であるが、本論では、特に人類暮らしに大きな影響を与える植生の変化に重点を置く場合には、景観という語を用いた。

ボールアースなどがあったことは既報(6-8)で詳述した。

生命の多様性が増したことは、化石となる生物が爆発的に増えた5.4億年前のカンブリア紀以降について多くのことが明らかにされている(4, 7, 8)。

地球環境・気候は顕生代(5.4億年前の古生代カンブリア紀から現在まで)の間も大きく変動した。中生代は、大きな隕石の落下や地殻変動の影響で世界を席卷していた恐竜などが絶滅し、約6,600万年前に終わり、新生代が始まった(7参照)。このような大絶滅は過去に五回あった(7, 8参照)。現代まで子孫を残した種、あるいは生き続けている種は少数の例外である。

恐竜が栄えた中生代白亜紀は温暖であった。新生代初期も温暖であったが、次第に南極大陸や北極は、氷で覆われるようになり寒冷化へと向かっていった。その後は、氷床が大きく後退する温暖な時期もあったが、新生代は全体としては寒冷化が進行した。

重要なことは、自然は寒暖の変化により大きく影響され、環境・景観はその変化の都度大きく揺れ動いたことである。同じ場所が、時に応じて鬱蒼とした森、湿地、乾燥サバンナ、砂漠、ツンドラステップとなるなど大きく変容した。生物は食べ物を確保し、子孫を残せた種だけが生き延びることができる。大きな環境変化に対応できず絶滅してしまった生物種も多かった。

新生代は恐竜が減じた空間で、中生代に誕生した鳥類と哺乳類が繁栄した時代である。人類につながる霊長類(サル目)は、中生代の終わりから新生代の初めの頃に誕生した(118, 119)。類人猿は霊長類のなかのテナガザル・フクロテナガザル・オランウータン・ゴリラ・チンパンジー・ボノボチンパンジーなどのヒトに似た形態をもつ仲間の通称名である。時にヒトも類人猿に入れられる。

新生代は全体としては徐々に寒冷化が進んだが、中新世中期(1,400~2,100万年前頃)は暖かさが戻り(8参照)、温暖多湿を好む森が大きく広がった。その時が類人猿の全盛期であったと考えられている。また、1,900万年前頃にはアフリカプレートとアラビアプレートがユーラシアプレートに衝突し、ユーラシアとアフリカが陸続きとなった。アフリカで誕生し多様性を増していた類人猿が陸続きとなった東南アジアなどに広がる森林地帯まで進出していたことが、900~1,400万年前頃の類人猿の化石がユーラシアで見つかっていることから分

かっている。一方、アフリカからはその頃の類人猿の化石が見つかっていない(117, 120)。類人猿は密林の中で暮らしてきているので、その化石は見つかりにくく、900~1,400万年前の間にアフリカから類人猿が消えたと断定することはできない。しかし、現在、多くの人は、アフリカでは類人猿の化石が見つからない空白の期間があるので、その間ユーラシアで生き延びていた類人猿が再び故地であったアフリカに舞い戻り今日のアフリカの類人猿に至り、アジアに留まったものからオランウータンが誕生したと考えている(2, 117, 121, 122)。

類人猿の化石は稀であるため、進化の詳細を明らかにすることは容易ではない。そこで、現生の類人猿の遺伝情報を比較する分子時計の手法を用いて類人猿の進化が解明されてきている(7参照)。テナガザルが人類など多くの類人猿の共通祖先から分岐し、新たな種となったのは1,600万年前頃であったと推定されている(123)。その後、オランウータンが1,300万年前頃に、ゴリラが800万年前頃²⁷に、そしてチンパンジーと人類が600万年前頃に分岐したというのが分子時計の統計結果である(2参照)。分子時計による分岐年代の推定は一つの目安である。しかし重要なことは、分岐の順番はそれが示す通りであることである。

オランウータン²⁸は、現在、東南アジアだけにおよそ14,000頭生息するのみである(126)。またアフリカのゴリラの生息数は1995年には17,000頭と推定されていたが、2016年4月のWildlife Conservation Societyの報告によると3,800頭に減少しているとされている(127)。両者の絶滅が危惧される。

2.10.4 人類の誕生：アフリカでは、1,000万年前頃から地殻活動が盛んとなり大地溝帯が形成され始めたり、寒冷化が進んだりした結果、環境が大きく変化していったと考えられる。一部の地域では森林が後退し、木がまばらに生える開かれた林、あるいは所々に木が生える草原や湿地が生まれた(17, 18, 19, 20, 128)。

森に棲んでいた類人猿の中からそのような開けた環境に進出するグループが現れたのであろう。かつては大地溝帯の東から古い人骨が見つかることから、イヴ・コパン(1934-)は東側の乾燥サバンナで人類が誕生したというイーストサイドストーリーを提唱した(129, 130)(2参照)。しかし、約700万年前に生息していた最古の人類と思われる猿人のトゥーマイが発見されたチャド

²⁷ ゴリラの誕生の時期については、1,000万年前の地層からゴリラの特徴をもつ歯の化石が見つかったという報告がある(124)。しかし、その歯を種として確立したゴリラとするかどうかは意見の一致を見ていない(122)。分子時計による分岐時期の推定は統計的なものであり、化石の研究と相互に補完することが望ましい。しかし、化石が十分出土するとは限らない。

²⁸ 1種であると考えられていたオランウータンにも亜種が存在することが、親を亡くして保護した個体を調べたことにより明らかにされた(125)。

は、そのイーストサイドではなかった(2参照)。現在、そこは砂漠である。しかし、彼らが住んでいた頃の景観は、現在のボツワナのおカバンゴデルタのような湿地と疎林と草原がモザイク状に広がるものであったと推定されている(128, 131, 132)。人類が誕生したのは、大地溝帯の東ではなかったかもしれないが²⁹、人類誕生のきっかけの一つは、二足歩行による開けた新たな環境への進出であったとするコパンの考え方は今なお有力であると考えられる(2参照)。

また、440万年前頃にラミダス猿人のアルディが暮らしていたエチオピア(大地溝帯のイーストサイド)も現在見られるような乾燥サバンナではなく、開けた森・森の周縁部の疎林・木が点在する草原がモザイク状に広がる環境であったと考えられている(125頁、2.1参照)。この頃までの初期人類の脳容量は、現生のチンパンジーとほぼ同じ400cc弱であった(2参照)。

初期人類の一大特徴は二足歩行をすることであった(2参照)。彼らは、見通しがよい草原と生い茂る森の恵みの双方に依存し食料を確保し暮らしていたのであろう。チンパンジーのように足で木にぶら下がることもできたし、現生のチンパンジーと同じ様に樹上にその日のベッドをつくり寝ていたかもしれない。また、草原ではナックルウォーキングではなく器用に二足歩行していたと考えられる。自由になった手で、ものを長い距離運ぶこともできたであろう(2参照)。また日差しの強い熱帯地方の疎林で二足歩行をすることは、視界が開け獲物や敵を素早く見つけることができる、あるいは、暑さから身を守るなど有利な点を伴っており、新たな環境への適応度を増すために役立つと考えられている。彼らは、森に留まった類人猿とは違った生態環境を利用できるようになり、そこへ進出していったのであろう(2参照)。

2.10.5 最古の石器：ラミダス猿人の生息していた440万年前以降の地層からは様々な猿人の化石が見つかっている(2参照)。その後二百数十万年前の更新世の時代に、ホモの仲間(原人)が初めて現れ、猿人と共存し始めた。更新世はチャールズ・ライエル(1797-1875)が1839年に特徴的な生物相をもつ地層に対して命名した地質時代である。現在ではそれは約258万年前から約1万年前までの期間とされている。

更新世の特徴は、周期的な寒暖の差が激しくなりながら全体として寒冷化が増進した時期であったこと(8の15図参照)と、初めてホモの仲間が誕生したことなどである。

従来、気候変動とホモの誕生が関連づけられていた。気候が大きく変動し、過酷となった環境のなかで生き延びるために、新たな技術(石器の製作)を獲得したものが、適応度を増し次第に勢力を伸ばしていったと考えられた。その人々が最初のホモであったというのである(2参照)。

人類進化の研究を精力的に進めていたルイス・リーキー(1903-1972)は1930年代後半には、タンザニアのオルドヴァイから石器を見つけていた。彼はそれをオルドワン石器と名付けた。彼は、人類進化の研究の中で、「われわれは何者であるか」を考えた。彼も、多くの人が信じていた「ヒトだけが道具を作りそれを使うことができる唯一の生物である」という定義を受け入れていた。

化石の発掘を通して人類の進化を明らかにしていたリーキーは、「われわれはどこからきたのか」を知るためには、化石の研究だけでは不十分であると考え、近縁の現生類人猿の暮らしぶりを詳らかにする重要性を痛感していた。

彼の思いを受けて3人の女性が、それぞれチンパンジー、ゴリラ、オランウータンの野生での生活をつぶさに観察し始めた。密林のなかで暮らす彼らに受け入れられながら間近で見つめ続けるのには忍耐強さ・柔軟性が要求される。それは女性でなければできない息の長い仕事であった(133)。

その内の一人のジェーン・グドール(1934)は、野生のチンパンジーの暮らしぶりを徹底的に調べた。彼女は、1960年にチンパンジーが木の枝で、木のうろに住むシロアリを釣って食べている姿を目撃し、リーキーに「チンパンジーが道具を使う」と報告した。リーキーはその発見に驚き“Now we must redefine tool, redefine Man, or accept chimpanzees as humans.”と言ったと言われている。

実際にはカニクイザルが石を使ってカキ(貝)を開けて食べている様子が1887年に報告されていた(134)。しかし、このことは、「ヒトだけが道具を作りそれを使うことができる唯一の生物である」という定義を覆すものとしては捉えられなかった(135)。

ところがグドールの発見以来、多くの観察がなされ、道具を作ったり、使ったりする動物が少なからずいることが明らかにされている。以下にいくつかの例を挙げておく。①チンパンジーを始めとした類人猿(136-140)、②フサオマキザル(141)やカニクイザル(142-144)などのサル、③キツツキフィンチ(145)、カレドニアカラ

²⁹ トゥーマイは現生人類につながる祖先であったかどうかの確証はない。彼らの子孫は絶滅してしまった可能性もある。また、まだ発見されていない猿人あるいはラミダス猿人が現生人につながる初期人類であった可能性もなくはない。

ス (146-148) を含む鳥、④魚のシロクラベラ (149) などが知られている。

上述したように、人類が初めて作った石器は 260 万年前以降のオルドワン石器と考えられ、それが環境の変化 (寒冷・乾燥化) の下でホモが誕生した要因の一つであると捉えられていた。当時のヒトは、肉食動物が食べ残した骨を拾って安全な所までもち帰り、そこで石器を使って骨についている肉を削いだり、骨を砕き骨髄を食べたりしていたと考えられている。それは石器だけでなく、石器で処理をしたカットマークのついた骨が当時の地層から見つかっていることから推測されている (2 参照)。

そのような新たな技術はヒトが肉食を増やすことを可能にした。その結果、人類は腸による消化に必要なエネルギーを軽減できるようになった。余ったエネルギーは、多くのエネルギーを消費する脳に新たに向けられるようになったと考えられる。石器使用による肉食の増加が脳の肥大化をもたらしたという説が有力である (2, 150 参照)。脳が肥大化すると益々手を器用に使うことが可能となる。高機能の手は更に栄養の確保を容易にし、ますます脳の肥大をもたらす。このような相乗効果が石器の使用により人類にもたらされたと考えられている。また、石器の発明は咀嚼を容易にしたとも考えられている。食物を加熱することにより咀嚼が容易になったのは数十万年前以降であると考えられている (151)。

ホモ・サピエンスは、体重の割には大きな脳を維持している。それは上述したように肉食の割合を増やしたことが大きく影響したためと考えられている (2 参照)。その他に、現生のヒトは独特の代謝系を獲得し、エネルギーを多く消費する脳を維持できるようになったことが最近報告された。現生のヒトは、体のサイズや身体活動を考慮すると現生のチンパンジー、ボノボ、ゴリラと比べて、一日あたりそれぞれに対して 400、635、820kcal 多いエネルギーを消費していることなどが示唆された (152)。

1973 年に全身の骨の約 40% が見つかった 320 万年前頃に生きていた有名な猿人のルーシー (アウストラロピテクス・アファレンシス) の脳容量は 530cc であったと見積もられている。その後、240 万年前頃に誕生したホモ・ハピルス平均脳容量は 600cc 前後、180 万年前頃に誕生したホモ・エレクトスのそれは 900cc 前後、40 万年前頃に誕生したネアンデルタール人のそれは 1,350cc 前後で、20 万年前頃に誕生したホモ・サピエンスのそれは 1,300cc 前後と増加した (2 参照)。

オルドワン石器を作ったのは、ホモ・ハピルスであると考えられている (2 参照)。一方、同じ頃にエチオピ

アで暮らしていたアウストラロピテクス・ガルヒも石器で動物の骨から肉を削いでいたことを示す化石が発見された (153, 154) (2 参照)。しかしこれらの石器が作られたのは、いずれも二百数十万年前であった (155, 156)。

ところが、上述したように、330 万年前頃の地層から石器によるカットマークのついた動物の骨と人類が作ったと考えられる石器の遺物が見つかった (125 頁、2.2 参照)。当時はルーシーなどの猿人が暮らしていた時代である。このことは、ホモ誕生よりも約 100 万年遡る時代に生存していた初期のヒトも石器を使用していたことを示唆している。石器の使用は、二百数十万年前に突然始まったのではなく三百数十万年前頃から漸進的に始まり、ゆっくり時間をかけた連続性の中で次第に工夫が積み重なった可能性が考えられる。しかし、三百数十万年前の石器を作る技術は途絶えてしまい新たにオルドワン石器が作られた可能性もある。

散発的に出てくる遺物をどのように関連付けるかは難しい。困難な環境を乗り越えるのに役立つ新たな技術革新も、環境が好転すればすたれてしまうこともありうる。生物の進化は単純な一本道ではなく、様々な条件に左右される。イージーライフが可能であればのんびり暮らす「退化的」な進化も大いにありうる。人類の進化も例外ではなく、ジクザクしながら行きつ戻りつした可能性もある。われわれはともすれば、一本道で漸進的に変化したはずであるという思い込みに陥りやすいことを忘れないようにする必要がある。

2.10.6 出アフリカ：700 万年前に森に暮らしていた類人猿の仲間なかで、二足歩行により森と草原の両方に生息域を広げたグループが初期人類であったろう。その後、四百数十万年経った二百数十万年前には初期人類の 1.5 倍ほどの脳容量をもつホモが誕生した。180 万年前頃には初期人類の 2 倍以上の脳容量をもつホモ・エレクトスが誕生した。彼らは、オルドワン石器とはっきり区別ができるアシューリアン石器を作った。その代表的なものはハンドアックスである (157) (2 参照)。オルドワン石器は、一つの工程を繰り返すことでつくられる。一方、アシューリアン石器は二つの異なる工程を組み合わせられてつくられ、高機能を備えている。最古のアシューリアン石器はケニアのトゥルカナ湖畔から見つかっている。そこは、1984 年にトゥルカナ・ボーイと呼ばれているホモ・エレクトスの少年の全身骨が見つかった所である (158)。アシューリアン石器はホモ・エレクトスやホモ・ハイデルベルゲンシスなど多くの人類が数万年前頃まで作っていた (159)。

人類は 180 万年前頃に初めてアフリカを出た。それは、

ユーラシア大陸の各地から人骨やアシュリアン石器が出土していることから明らかにされた。人骨が見つからなくても人類が作ったとしか考えられないアシュリアン石器が出土することは、そこで人類が暮らしていた証拠である。ホモ・エレクトスの人骨は、グルジア共和国のドマニシ (180 万年前頃)、インドネシアのサンギラン (166 万年前)、中国の元謀や藍田 (百数十万年前)、北京 (北京原人、50～40 万年前)、ジャワ (ジャワ原人、100～70 万年前?)、スペインのアタプエルカ (120 万年前) (96) で発見されている。(2 参照)。また数十万年前よりも古いハンドアックスが、南インド (150 万年前) (160)、スペイン (90 万年前) (161)、イスラエル (80 万年前) (162)、中国 (80 万年前) (163) などユーラシア各地から発掘されている (164) (2 参照)。

以上のことは、180 万年前頃アフリカで誕生したホモ・エレクトス (アフリカの固有種をホモ・エルガスターと区別する場合もあるが、本稿ではそれを含める) は比較的早い時期から、アフリカを出てユーラシア大陸に進出していたことを明らかにしている。それ以前の人類がアフリカを出た証拠はない。アフリカで誕生したホモ・エレクトスのなかから、周縁部に広がっていったのは、肉食の割合が増え食料不足に直面しあふれ出た³⁰ 人々、あるいはたまたま獲物や果実を求めて周縁部に行き着いた人々、または進取の気質に富み積極的に新天地を目指した人々などであったろう。その人たちが、いつの間にかユーラシアに辿りついたのであろう。

アフリカに住んでいた一部の人が、アフリカを旅立ったのは百数十万年前であるが、二百万年前前後のアフリカには、ホモの他にも顎が張り、大きな臼歯をもち、頭頂にはゴリラと同じ矢状稜と呼ばれる隆起がある頑丈型と呼ばれる 2 種の猿人が暮らしていた。矢状稜は大きな顎の骨を支える咀嚼筋をつなぐ部分で、それは彼らが硬いものも食べていたことを示している。彼らは華奢型のヒトが食べられない異なる資源に主に頼って暮らしていたと考えられる。華奢型と頑丈型の人類は異なる資源に頼りながら共存していたのであろう。このように同時代に明らかに異なる近縁の種が共存することがある。ガラパゴス島のダーウィンフィンチなど多くの事例に同様なことが認められる (7 参照)。しかし、アフリカに留まった頑丈型の人々は子孫を残さず百数十万年前に絶滅してしまった (2 参照)。

2.10.7 ホモ・エレクトスの子孫： 180 万年前頃にアフリカで誕生したホモ・エレクトスの一部の人々は、ユーラシア大陸に進出し、アフリカ大陸に残ったものと

は違うグループを形成していった。一方、アフリカに残ったホモ・エレクトスからは、60～70 万年前頃にホモ・ハイデルベルゲンシスが誕生した (132 頁、図 1)。ちょうどその頃に、人類は火を制御して料理ができるようになったと考えられている (151, 165)。

スペインのアタプエルカで 120 万年前の人骨が発見された。それをホモ・アンテセッサーと命名する人もいるが (96)、それとホモ・ハイデルベルゲンシスあるいはホモ・エレクトスの関係は定かでない。アフリカを出てユーラシアに進出していたホモ・ハイデルベルゲンシスから、40～50 万年前頃までにネアンデルタール人とデニソワ人が分岐し始めていたと考えられる (132 頁、図 1、132 頁、2.8 参照)。また 30～40 万年前のスペインのシマ・デ・ロス・ウエソスの人は遺伝情報が解読され、彼らとネアンデルタール人およびデニソワ人との関連が調べられていることは上述した (132 頁、2.8 参照)。

一方、アフリカに残っていたホモ・ハイデルベルゲンシスからは、20 万年前頃にホモ・サピエンスが誕生した (2 参照)。10 万年前以前の比較的温暖な時期には、ホモ・サピエンスが中東に進出していたことが、カフゼヤスフル洞窟などから出土した頭蓋骨により明らかにされている (59) (2 参照)。しかし、その後、寒冷化が進むと中東におけるホモ・サピエンスの足跡は消えてしまった。その地に進出していた人々はアフリカに舞い戻ったのか、絶滅したのかは定かでない。その前後に、ネアンデルタール人がそのあたりで暮らしていた証拠が見ついている (56) (2 参照)。

中東から見つかる数万年前のホモ・サピエンスの人骨は、イスラエルの西ガリラヤから 5.5 万年前のホモ・サピエンスの部分的な頭蓋冠 (166)、レバノンから発掘された 4.5 万年前の人骨 (167) を除いては、出土例がほとんどなく、ホモ・サピエンスの足取りには不明な点が多い。また、ヨーロッパへのホモ・サピエンスの進出の時期も化石の出土は稀であり、判然としない所がある (168, 169)。ところが、現代人の mtDNA の塩基配列の多様性の研究から、数万年以前以降のホモ・サピエンスの世界への展開の経過が明らかにされている。ホモ・サピエンスが中東経由でユーラシアに再進出したのは 8 万年前頃で、その後東アジアやオーストラリア大陸には 6 万年前頃に、そしてヨーロッパには地中海沿岸・ドナウ川沿い・中央アジアからロシア平原を経て 4 万数千年前に、日本へは 4 万年前頃に、アメリカ大陸には 2 万年前頃には進出していたと考えられている。またこの研究からは、現生のホモ・サピエンスの女性は、19 万年前頃

³⁰ 同一地域で暮らせる個体数は、植物、草食動物、雑食動物、肉食動物と食物連鎖の上位になるほど減少する。

にアフリカで生きていた一人の女性（ミトコンドリア・イヴ、ミトコンドリアの遺伝情報は女系だけで伝わる）を共通の祖先にもっていることも分かった（2参照）。

ネアンデルタール人は、ホモ・サピエンスがヨーロッパを含んだユーラシアに進出する以前から、そこで暮らしていた。彼らは、30万年前頃から4万年前頃まで、ヨーロッパから中央アジアにまで広がっていたが、彼らの生息域はその間に激しく変動した気候の影響を受けて大きく変わったことが分かっている（2参照）。

10数万年前と数万年前にアフリカからユーラシアに展開したホモ・サピエンスはネアンデルタール人と出会うチャンスがあった。

ネアンデルタール人とホモ・サピエンスの「遺伝的混合」は、おそらく中東・狭義のヨーロッパ・中央アジアでネアンデルタール人が滅びてしまう4万年前以前に、一度ならず起き、それが現在まで引き継がれていると考えられている（132頁、図1参照）。また、デニソワ人からホモ・サピエンス（特に現代のオセアニア地域の人々の祖先）へ、またアルタイ地方のネアンデルタール人からデニソワ人へ、またアルタイ地方のネアンデルタール人にホモ・サピエンスからの「遺伝的混合」が起こっていたことも示唆されている（48, 59, 64, 127頁2.5, 130頁、2.6参照）。

更に、ホモ・サピエンスと正体不明の古代人の間に「遺伝的混合」が起こり、それが現生のホモ・サピエンスに僅かに残っていることも示唆され始めている（132頁、図1、132頁2.8参照）。

また、十数万～数十万年前の古代型のホモ・サピエンス（ホモ・サピエンスとホモ・エレクトスの頭蓋骨の中間的な形態をもつ）と呼ばれる人の頭蓋骨の化石がユーラシア大陸で発見されたり（170）、上述したように、ホモ・フロレシエンシスも数万年前まで生息していたことが明らかにされたりしている（133頁、2.9参照）。これらのことは、ホモ・サピエンスはネアンデルタール人やデニソワ人以外の今は絶滅してしまった人類とも出会い「遺伝的混合」を起こした可能性があることを示している。

以上のことから、人類が進化していく過程で種の間が分岐が起こったが、亜種段階で何度も交配が起こり「遺伝的混合」がもたらされたことが明らかとなってきた（132

頁、図1、132頁2.8参照）。一方、過去に起こった「遺伝的混合」で、今日まで引き継がれなかったものもあることも明らかとなった（57）。

これらのことは、現在生き残っている唯一のヒトの種であるホモ・サピエンスの形成も単純な一本道ではなく、ジグザグな道であったことをはっきりと示している。

現生のホモ・サピエンスの多様性についてまとめておく。①地域によりネアンデルタール人・デニソワ人・その他のグループの人との「遺伝子混合」の度合いが違う。②全ての生物に共通であるが、個体に起こる突然変異が次世代に引継がれて多様性が生じる。例えば鎌状赤血球は、DNAの塩基配列が一つ違うことによりおこる遺伝病である³¹（7参照）。また、最近では、個人の遺伝子解析から個人に合わせたオーダーメイド医療が目指されており、様々な病気³²の遺伝子が特定されている。これらのことは、突然変異は稀ではあるが、有意な頻度で起きていることを示している（7参照）。③有性生殖の生物に共通であるが、精子や卵子のもっている遺伝情報は、千差万別である。それは、減数分裂の際に組み換えが起こることと、二組の染色体のどちらか一方だけが精子や卵子に引き継がれることによっている。つまり、同じ親をもつ兄弟・姉妹でも形質や性質は似ている場合もあるが、大きく違う場合もある。生物の種内の多様性は、このような遺伝情報の違いと環境・経験などの違いにより生まれる。世界に広がっているホモ・サピエンスには遺伝的に多様な人種や個人が存在する。その人たちは、時間を遡れば共通祖先に行き着くが、アフリカを出た数万年前以降は、様々な要因により多様性が増したと考えられる。しかし、それら全ての多様な男女は、出会うチャンスがあれば子孫を残しうる一つの種である。

2.10.8 ネアンデルタール人・デニソワ人は絶滅し、ホモ・サピエンスは生き延びた：ホモ・サピエンスが誕生した20万年前以降の気候は、氷河期・間氷期が繰り返され大きく変動した。間氷期は短く、氷河期は数万年以上続く長いものであった。しかし、氷河期の中にも亜間氷期があり、寒暖はダンスガード・オシュガーサイクルと呼ばれる1,500～3,000年の周期で変化していた（8の図16, 17）。その間に環境・景観は大きく変化した。気候変動の大きさは場所により異なっていたが、平均気温が数℃以上変わる場所も多く存在した。特に6万年前

³¹ 突然変異が集団の中で広がるかどうかは、それが適応的であるかあるいは異性に好まれるかなどに左右される。鎌状赤血球は貧血を起こし適応的ではないが、それはマラリア原虫が住みにくい赤血球となるために、マラリアにかかりにくいという利点を生む。その結果、マラリアが多発する地域では鎌状赤血球の遺伝子をもった子孫が残り続ける。

³² 例えば、自閉症に関係する遺伝子も特定されている（171）。

³³ MISは海洋酸素同位体ステージである。それは海生物の有孔虫の殻に含まれる酸素の同位体が変動することを指標にし、気温の変化を推定するものである（8参照）。

から2万7千年前の MIS³³ と呼ばれる時期は気温・湿度が大きく変化した時期であった (8の図17)。ホモ・サピエンスより前に誕生していたネアンデルタール人とデニソワ人は、MIS3の4万年前頃に絶滅してしまった。

その頃のヨーロッパがどのような景観をもっていたかが、出土した花粉・動物の骨などから明らかにされている。当時の景観としては、鬱蒼とした森・疎林・湿地・サバンナ型草原・ツンドラステップ・砂漠・氷河が存在していたことが明らかにされている。イベリア半島の南部などの恵まれたところでは、様々な景観がモザイク状に残っていたが、多くの地域では森林・草原・ツンドラ・氷河などが拡大・後退を繰り返していたことが明らかにされた (172, 173)。また人々がどのような地域でどのように暮らしていたかが、遺跡の分布とそこから出土した人骨 (出土しているものは少ないが) や遺物 (人が作った石器・道具・洞窟壁画・アクセサリーあるいは人が利用した動物の骨など) から推し量られている (172, 173)。人々の暮らしは環境・景観の変化により大きな影響を受けたはずである。

人類が作った石器は大きく4つに分類されている。①原始的なオールドワン石器：二百数十万年前 (あるいは三百数十万年前に遡るかもしれない) からホモ・ハビリスなどによって使われた。②アシュリアン石器：百数十万年前以降ホモ・エレクトス、ネアンデルタール人、ホモ・サピエンスなどが使用した。二つの異なる製作工程があったと言われている。③ルヴァロワ石器：5万年前以降、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスが製作・使用していた。製作工程 (4段階ほど) は複雑になった。その中には、木の先に取り付け、接近戦で獲物を狩るためのある程度の大きさをもったものもあった。④石刃：

4万数千年前からホモ・サピエンスが製作・使用したと考えられている。製作工程 (9段階ほど) は更に複雑となった。石刃はカミソリのように鋭く、ルヴァロワ石器とははっきり区別される。石刃は尖っており、尖頭器とも呼ばれる。それは、槍の先に装着され投げ槍機を使い遠くから獲物に向かって発射されることもあった。

発掘された遺跡は石器の種類などから文化という名前が付けられ、区別されている。以下にヨーロッパと北アフリカで行われた発掘から明らかにされたことを主に二つの総説 (172, 173) に従ってまとめる。遺跡の時代特定は細心の注意³⁴を払ったものではなく誤差があるもの

と考えられ確定的なものではないが、前後関係や相互の関連性は既に明らかにされている通りであると考えられる。

2.10.8.1 ムスティエ文化：ルヴァロワ石器を伴った文化。それはネアンデルタール人とホモ・サピエンスにより営まれたと考えられている。ムスティエ文化をもった2.2～7万年前の遺跡が見つっている。6～7万年前頃には北緯45度以南から10ヶ所ほどの遺跡が見つっている。4.8～5.9万年前には北緯50度以北にまで進出し、発掘された遺跡も25ヶ所ほどと人々の生息域は大きく広がった。その後も消長を繰り返したが2万数千年前には数ヶ所に限定された。またムスティエ文化は3.8～4.8万年前にはアフリカの地中海沿岸地方にも広がっていた。

2.10.8.2 オーリニャック文化：石刃を伴う文化。ホモ・サピエンスが担っていたと考えられている。オーリニャック文化は2～4.7万年前頃のヨーロッパで営まれていた。4万数千年前には北緯39～52度まで広がり30ヶ所程度の遺跡が発掘されている。3万年前頃にはイベリア半島の南端 (北緯36度) からイギリスにまでその分布域が広がった。しかし、2.5万年前以降になると発掘された遺跡は数ヶ所となってしまった。

ムスティエ文化の特長を維持しながらオーリニャック文化の萌芽が見られる独特な移行期の文化も発掘されている。それが注目されるのは、ネアンデルタール人とホモ・サピエンスがどのような関係をもっていたかに関する手がかりが得られると考えられるからである。洞窟壁画・貝に穴をあけたネックレス・針・糸はホモ・サピエンスの文化であり、ネアンデルタール人はそのようなものを作らなかったと考えられている (2参照)。しかし、移行的な文化やオーリニャック文化をネアンデルタール人が友好的にホモ・サピエンスから教えてもらった、あるいは何らかの形で取り入れた可能性も考えられている。

一般的には、オーリニャック文化はホモ・サピエンスに特有のものとする場合が多い。しかし、移行期の文化やオーリニャック文化の石器が発掘された文化層と同じ地層からはっきり重種を特定できる人骨がほとんど見つからないために、ネアンデルタール人がそれらに関わっていたかどうかは不明である。しかし、2016年9月に移行期の文化の一つであるフランスのシャテルペロ

³⁴ 126頁2.3で述べたような過去の試料に後の時代の物質が少量付着することによる誤差を軽減する処理が行われていない。そのような方法が取り入れられるようになったのは、2004年以降のことで、ネアンデルタール人の絶滅時期が2万数千年前ではなく4万年前頃であったという報告がでたのは2014年である。ここで紹介する年代はこのことと必ずしも整合的ではない。

ン洞窟で見つかったシャテルペロン文化層から見つかった骨がネアンデルタール人の特徴を持ったコラーゲンと mtDNA を持った 4.2 万年前のものであることが、明らかにされた (173A)。このことは、ネアンデルタール人も移行期の文化を担っていたことを示すものである。ネアンデルタール人の実態を更に明らかにするためには今後の更なる研究が望まれる。

可能性を否定することはできないことをことわっておきたい。

2.10.8.3 ネアンデルタール人は滅び、ホモ・サピエンスは生き延びた：ルヴァロア石器は、身を隠しながら獲物に近づき奇襲攻撃をかけ獲物を接近戦で仕留めることができる道具である。一方、石刃を装着した投げ槍は視界のよい開かれた空間で距離を置いたところから攻撃するのに適した道具である。投げ槍や発射機を用いた発射体は、身を隠すような木があったり、背の高い草が生い茂ったりしているところでは、獲物をしとめる前にそれらにぶつかってしまい役に立たない。

数万年前のヨーロッパの環境・景観は大きく変わり人々は移動を余儀なくされたり、変化した環境・景観に対応する必要があったりしたと考えられる。ホモ・サピエンスは景観に応じて二つの異なった技術を使い、景観の変化に対応できた。しかし、ネアンデルタール人は、主にルヴァロワ石器を使った奇襲攻撃に頼っていたと考えられる。彼らは、身を隠すような所がなくなった景観では苦境に陥ったと思われる (172)。

ネアンデルタール人はヨーロッパから中央アジアにかけて 30 万年近くに亘って暮らしていた。そこに数万年前に新たにホモ・サピエンスが進出してきた。彼らは出会い交配したり、食料資源について競争関係に陥ったりしたと考えられる。

ムスティエ文化（営んだのはホモ・サピエンスとネアンデルタール人）・オーリニャック文化（ホモ・サピエンスの暮らしぶり）などの遺跡の頻度・規模などや化石骨などの遺伝情報の多様性から両者の人口推定が試みられている。但し、上述したように二つの文化が両者にどのように帰属していたのかは必ずしも確定的ではない。また発見された遺跡の分布と規模から漏れている生活跡³⁵もあるはずである。更に遺伝的多様性からの推定も統計的なもので、ある程度の誤差を伴う。これらの留保はあるが、ホモ・サピエンスとネアンデルタール人の関

係は以下のごとくであると大きく捉えられている。

遺情情報の多様性から、ネアンデルタール人の人口は 4.8 万年前以降に次第に減っていたことが示唆されている (174)。最初にネアンデルタール人の住んでいる地域に進出したホモ・サピエンスは少数であったろう。しかし、その後も流入が続いた、あるいは、過酷な環境条件のもとでの人口増加率はホモ・サピエンスの方がネアンデルタール人よりは有意に高く、時間経過とともにホモ・サピエンスの人口が凌駕したことは十分ありうることがモデルから示されている (175)。また遺伝的な多様性の比較から、数万～10 万年前のホモ・サピエンスの全人口は、ネアンデルタール人の 10 倍ほどであったと推定されている (59)。

5 万年前頃からの MIS3 の時期は、気温が大きく変動し、環境・景観は大きく変化した。その間の気候変動は海面のレベルからも明らかである。海面は 2 万年前頃には現在よりも 120m 低かった。一方、4～5 万年前では 80m 程低かった (176)。このことは、4～5 万年前から 2 万年前にかけては暖かさが戻ることもあったが、全体的には氷河が増加し、2.0～2.6 万年の最終氷期最寒冷期に向かって、人が暮らすには過酷な環境が増えていったことを示している (172, 173)。このような中でネアンデルタール人とデニソワ人は滅び、ホモ・サピエンスは生き延びた。

ネアンデルタール人が滅びた時期は 4 万年前頃であるという最新の説と 2 万数千年前という旧来の説がある。今後化石骨や遺物の分析結果が増え確定的なことがある程度分かっていくだろう³⁶。

ネアンデルタール人 (2 参照) やデニソワ人が絶滅した理由は明らかでない。しかし、ネアンデルタール人やデニソワ人とホモ・サピエンスの違いが影響したことも確かである。例えばホモ・サピエンスは十数万年前以降から小さな貝殻に穴をあけアクセサリーとしたり、赤い染料となるオーカーを使ったり、3.5 万年前以降は洞窟壁画を描いたりした。これらのことはホモ・サピエンスの抽象能力が優れていたことを示している。一方、ホモ・サピエンスはネアンデルタール人・デニソワ人との間で「遺伝的混合」を起こすほど似ている点もある。またヨーロッパではホモ・サピエンスが現れるまでは、ネアンデルタール人は気候変動により目まぐるしく変わる環境・景観の中を生き延びた。しかし、次第にネアンデルター

³⁵ 当時の人々は狩猟採集により分散して暮らしていた。それは現在東海道新幹線から見られるような途切れることなく住居が続くような世界とはまるで違う。彼らが一時的あるいは短期的に暮らしたキャンプサイトのようなものが遺跡となるとは限らない。洞窟など安定的な場所は、人々が間隔を空けて何度も利用したり、比較的長く留まったりしたので多くの痕跡が残されたのであろう。つまり、発掘された遺跡は、生活跡の一部と考えられる。

³⁶ 但し、彼らがより後の時代まで海辺で生き延びていたとしても、その痕跡は現在海中に没しており容易に発見されない。

ル人の社会は、衰退傾向となったと考えられる。そのような時に彼らは自分たちよりも大きな集団に成長したホモ・サピエンスと生息域を奪い合ったのかもしれない。彼らは避難地を求めたのかもしれないが、彼らの生存を支える地域が狭まり、近親結婚が増えるなどして絶滅した可能性も考えられる。

ネアンデルタール人が絶滅したのは、当時彼らが住んでいた環境と彼らの文化や能力のミスマッチが要因の一つとなったと考えられる。しかし、もしもホモ・サピエンスがその地に進出しなければ、ネアンデルタール人は生き延びたかもしれない。

人類の消長は気候変動に大きく左右され、環境・景観の変化の影響を大きく受けたと考えられる。われわれホモ・サピエンスの祖先はなんとか恵まれた土地を見つけ暮らし続けたのであろう。クライブ・フィレイソン(1955-)はホモ・サピエンスだけが生き残ったのは「当然の成り行きではなく、偶然の結果、あるいは幸運にも適切な時に適切な場所にいることができた」からであると主張している。例えば、現在のスペインのドニャーナ国立公園は過去12.5万年間、気候は現在とほぼ同様に、「ヨーロッパの中のアフリカ」が残された所であった。そのような恵まれた土地に避難できたような幸運な人々などが生き延びたのであろう(117)。

日本に目を向けると、1.5万年前から始まった縄文時代も温暖な時代と寒冷な時代が交錯した時代であった。暮らしやすい温暖な(約6千年前の縄文の海進)時代には人々の生息域は広がったが、寒冷となった縄文時代の晩期には人口はピーク時の1/3程に減少し、生息域が狭まったことが遺跡の数や規模から推定されている(2参照)。そのように人口が減少した時期に、朝鮮半島から新たな天地を求めて来訪したのが渡来系の弥生人であったと考えられている。その後両者は、頻繁な「遺伝的混合」を起し、現代日本人が形成されていった(2参照)。

2.11 農耕の開始・国家の形成・文字の成立・産業革命・戦後の急成長

本論の主題の一つは、特異的な戦後の急成長が人為的な温暖化を惹き起こしていることを考えることであるので、人類の700万年間の変遷を今一度、かいつまんでおく。

数百万年間の狩猟採集生活の後、早いところでは1万年前頃から農業が始まり、5,000年前頃から国が作られ、四大文明が興った。その頃には文字が発明され人類は新たな画期を迎えた。農業を始める前の世界の総人口は数百万人であったと推定されている。農業を始め国家が形成され、ギリシャやローマ帝国が栄え、18世紀初頭に

は世界の総人口は6億人程に達した。18世紀に始まった産業革命は、人類に新たな画期をもたらし、20世紀の初めの人口は約16億人となった。化石燃料を大量に使うようになった戦後の急成長の結果、2016年の人口は74億に達すると予測されている(1-8)。産業革命・戦後の急成長は、人類の長い歴史の中では極めて特異なもので、短時間に起こる急速な変化は人類・地球に大きな影響を惹き起こしていると考えられる。

2.12 生物・人類の進化から明らかになる一つのこと

現存する生物は、気候変動・地殻変動あるいは隕石の落下・宇宙の活動など様々な自然現象のもとで、幸運にも約40億年間生き続けた生物の子孫(同じ種とは限らない)である(6-8参照)。また人類の誕生・進化あるいはいくつかの人類の種の絶滅は、気候変動による環境・景観の変化に大きく影響された。

人類の使う道具は傑出しており、今使われている道具のどれをとってもそれは他の動物のものとは比較にならない。しかし、長い時間軸の中で考えると、それらは生物の連続した活動の延長線にあるものと考えられる(137頁2.10.5参照)。ホモ・サピエンスにはそれなりの特徴はあるが、とくに選ばれた特別なものとして生まれるべくして生まれ、生き延びているものではない。

しかし、我々は時に、自分たちは特別な存在で、世界・地球を管理・支配するものであると考えてしまうことがある。また、われわれの発達した認識力は、ストーリー性に酔い、そこに溺れて、事実を見誤ることもある。

本論の論点の一つは、われわれは見誤ることを避けられないことである。人類の進化の研究を振り返っても幾つもの勘違いがあった。その例を二つ取り上げておく。1912年にイギリスから大きな脳とサルに似た顎をもつ初期人類(ピルトダウン人と呼ばれた)の骨などが出土した発見は、ヨーロッパが人類の故地であることを願う専門家を始めた人々の意識が生み出した大捏造事件であった。それが暴かれたのは40年以上経過した1953年のことであった。また日本でも同様のことがあった。世界各地で数十万年前に人類が暮らしていたことが、明らかにされていく中で、専門家の大御所の中には日本にも数十万年前から人類が暮らしていたことを主張する学者がいた。その主張を聞いたアマチュアの考古学者・藤本新一(1950-)が、そのことを裏付ける石器を、1976年から発掘し始めた。彼の発見は多くの専門家から「神の手」による偉大なものであると称賛され、1980年代初頭には日本にも70万年前頃から人が住んでいたこと、日本にも前期・中期旧石器時代³⁷が存在していたことが受け入れられた。石器の発見の不自然³⁸さを批判する声

もあったが、学会全体として取り上げられることはなかった。それらの発見は公認され、宮城県大崎市の座散乱木遺跡は1997年に国の史跡に指定され、教科書にも日本には数十万年前の旧石器時代から人が住んでいたと記載され、モノグラフも出版された(180)。しかし、その発見を怪しげなものと考えていた毎日新聞の記者は張り込みを続けた。彼は、藤本が自分で埋めた石器を後で掘り出す決定的な写真を取り、その捏造を2000年11月5日の朝刊で報じた。アマチュアの考古学者が、専門家の思い込みで迎合するような形で、捏造にのめり込んでいったことが本人へのインタビューを含めて紹介されている(181)。またそのような捏造を生み出す原因をつくった上に、そのことを十分に検証できていない学会や専門家による自省もなされているが(179)、彼らに対する批判も行われている(177)。専門家や学会による自省は不十分であり、専門家は自説を喧伝することに汲々とするのではなく、情報の全貌について素人を含む全ての人に客観的に示すことを第一に考えるべきである。このことは全ての分野に共通する今日的課題である。

日本には4万年前頃にヒトが現れたことは、mtDNAの分析や、野尻湖から発掘された骨製のスクレイパー、関東ローム層から発掘されている石器などから確かなこととされている。日本で見つかった古い人骨は何れも沖縄で出土したものである。その要因は、本土の土壤は火山灰中心の酸性土壤が多く骨が溶けて化石が残りにくいものに対して、沖縄はサンゴ礁由来の石灰岩を多く含むアルカリ性地質が多く化石が残りにやすいためと考えられている(182)。沖縄から出土している人骨の最古のものは3万年前頃のものとして推定されている³⁹。

一方で、岩手県遠野市の金取遺跡と出雲市の砂原遺跡からは、それぞれ、8～9万年前、11万年前のものと考えられる石器が出土している。これらは捏造とは考えら

れないので、それらの石器については時代特定を含めて更なる研究が望まれている。

日本に初めて現れたヒトはmtDNAの分析から明らかにされている4万年前頃のホモ・サピエンス(2参照)ではなかったかもしれない。上述したように、ホモ・サピエンス以外の人類も百数十万年前にアフリカからユーラシア大陸に展開し始めており、所によっては古いタイプの人間が生きていたことは確かである。日本にもそのようなヒトが渡来し、石器をつくっていたが、子孫を残さずに絶滅したこともありうる。しかし、その年代の地層の多くは酸性土壤で化石骨が残りにくいので、そのようなヒトの化石が出土する可能性は低いと考えられる。

3. 人為的な温室効果を回避するためにわれわれはどのようなエネルギー源を選択するのか

3.1 人類の大きな画期

人類には、①700万年前の人類誕生、②二～三百数十万年前の石器の発明、③数十万年～百数十万年前の火の利用開始、④1万年前の農耕開始、⑤18世紀の産業革命、⑥第二次世界大戦後の急速な経済成長の6つの大きな画期があった。

石器の使用は、人の暮らしを大きく変えた(137頁2.10.5参照)。また磨製石器の発明は、新たな地平を切り拓いた。例えば、磨製石器の斧は、打製石器と比べて刃こぼれが少なく有用な道具となり木を伐ることを容易にした。世界のほとんどの地域では、磨製石器は新石器時代の1万年前以降に使用された。しかし、日本では、磨製石器は旧石器時代の3.5万年前から使用されていた(184)。それは、日本で暮らしていた人々が森の恵みに

³⁷ 日本では1946年に相澤忠洋が群馬県の岩宿で旧石器(2～3万年前)を発見したことがきっかけとなり、縄文時代(1.5万年前以降)より以前の後期旧石器時代(約1.5～4万年前)が存在していたことが明らかにされた。その発見を受けて芦沢長介(1919-2006)は日本の旧石器時代の研究を牽引していった。藤本の発見により数十万年前から始まる日本の前期・中期の旧石器時代の存在の可能性が検討された。上述したように、アフリカでは二～三百数十万年まえから旧石器時代は始まっており、日本と世界では時代名称の指す年代は異なっている。

³⁸ 1989年に戸田正勝(1948-2015)は栃木県七曲遺跡で後期旧石器時代の石器(鋸歯縁削器)を発見した。その一ヵ月後に戸田らと初めてその遺跡を訪ねた藤本は等間隔に埋まっていた別の石器を短時間の内に発掘した。それは「等間隔の原理」であると特筆された(177)。1997年に奥羽山脈をこえて30kmはなれた山形県の袖原遺跡で発見された石器の剥片と宮城県の中島山遺跡で出土したスクレイパーの断面が合致した。その藤本の発見は、旧石器時代研究の大御所の芦沢から遠距離接合の例として発表された(178)。捏造発覚後のシンポジウムで春成秀爾(1942-)は、藤本が1995年に宮城県上高森で発掘した石器の表にも裏にもカジリ(例えば、農地などで見つかった石器には鍬や鋤の跡が、あるいは、発掘をした場合にもシャベルの跡がつくことがある、このようにかじられた跡のようなものをいう)が認められると観察結果を報告した。その時の発掘は竹べらで行われていたので、その石器は一度出土していたものを、再度埋めたものであると結論した(179)。

³⁹ 那覇の山下洞窟で発見された大腿骨など(3.2万年前と推定)、石垣島の白保竿根田原洞穴遺跡の人骨片(2.4万年前)、具志頭村の港川人の頭蓋骨(0.8～1.7万年前頃)。最近、新たに石垣島の白保竿根田原洞穴から3万6千年前に生息していた推測される人を含む十数体分の旧石器時代の人骨が発掘された(183)。

大きく依存していたためと考えられる。

人類は既に数十万～数百万年前頃から火を使用しており、人々はかなり以前から草原や森に火を放ち、生態系を変えおいしい実のなる木を増やすなどしていたと考えられている(4参照)。人による自然の改変は古くから行われていたであろう。だが農業を始める(約1万年前)以前の世界の人口は数百万人程度であり(185)、人の自然に対する影響は限られたものであった。その後、都市文明が勃興し、産業革命、戦後の急速な経済成長を受けて2016年の人口は74億人に達すると推定されている。人類の環境に対する影響は、「(人口)×(一人当たりの地球への負荷量)」であり、両者がともに増えていることが、現在、人類が環境に大きな影響を与えている要因である。

3.2 エネルギー使用量の増加

このように画期が変わる中で、人類の地球への負荷量は増大している。例えば、一人当たり一日のエネルギー使用量は、狩猟採集に頼る移住生活では、2kcal、季節的な定住生活では5kcal、初期の農耕社会では12kcal、発展的な農耕社会では26kcalと推定された。それが、産業革命が始まると77kcalに増え、1970年には230kcalに達していたとされた(186)。最近について見てみると、2008年の一人当たりの化石燃料の消費量は1950年の約2倍となっている。大雑把に見積ると、現在の人口と一人当たりのエネルギー使用量は、直近の狩猟採集生活時代のそれぞれの1,000倍、200倍となっており、総量としては20万倍となる。それが現代を「Anthropocene(人間中心世)」という地質年代として区別しようという主張につながっている(187)(7,8参照)。

3.3 人類の利用するエネルギー源の大きな変遷

人類はエネルギー源として、薪・炭・石炭・石油・水力・風力・原子力・太陽エネルギーなどを利用している。電力は水力・火力・風力・原子力・太陽エネルギーなどを利用して生み出される二次的なエネルギーであるが、現在では電力は主要なエネルギー源であるので、ここでは電力を独立したものとして取り上げる。

3.3.1 薪・炭と石炭・石油：人類は数十万年前からは火をおこし、炉を使っていた。その燃料は、薪であったと考えられる。薪を燃やした燃えかすの炭も利用したはずである。木炭がいつ頃から積極的に作られたかは定かではないが、3万年以上前の洞窟壁画には、炭を使って描かれたものもあった。

人類は数千年前から石器に加えて金属器を利用するようになった。青銅器時代は、紀元前3,500年頃からメソ

ポタミア・エジプトで始まった。また鉄器文化は紀元前15世紀頃のヒッタイトに始まると言われているが、エジプトからは紀元前3,200年頃の人工物の小さな鉄の玉が出土している(188)。これらの金属を溶かすためには木炭や石炭が用いられていたと考えられる。石炭は紀元前4,000年頃に中国でも使われていたと言われている。

石油としては、原油を原料とするアスファルトが建築用材としてユーフラテス川流域で4,000年前には使われていた。また、中国では4世紀には地下240mの油井が掘られ、燃える水が得られ利用されていた(189)。

しかし、石炭と石油が、エネルギー源として有意なものとなるのは、それぞれ、19世紀後半以降、20世紀前半以降である。

人類は長い間、今でいう再生可能なエネルギーである木質エネルギーを主なエネルギー源として利用してきた。

木質エネルギーの使用は高炉による製鉄の普及により急増した。それは15世紀末以降のことであった。高炉による製鉄には多量の木炭が使われた。1581年にはロンドンの周辺20マイル以内では新たな製鉄所の建設が禁止されたように、燃料確保のための森林の伐採が問題となっていった(4参照)。当時は、ガラスの製造には石炭が奨励されたが、石炭には不純物として硫黄が含まれるので、製鉄には石炭があまり利用されなかった。製鉄に石炭が広く使用されるようになったのは、1709年にコークスを利用した製鉄法が確立されてからであった(4参照)。

3.3.2 19世紀以降のエネルギー源：木質以外に石炭・石油の使用量が次第に増えていった。19世紀の中頃のエネルギー源の95%は、薪や炭のバイオマスであり、残りの5%が石炭であった。また木材には燃料以外に建材など多様な用途がある。19世紀の初めに、燃料として利用された割合は木材の使用量の70%弱であった。(190,191)。

石油がエネルギー源に占める割合は、長い間、殆どゼロであった。19世紀中頃になると石油会社による機械掘りの油田が開発され、徐々に石油の利用が増えていった。

つまり、次第にバイオマス以外のエネルギー源の割合が増えていったのである。化石燃料としては石炭の利用が先行していた。例えば、1910年代のエネルギー源の構成は、バイオマスが約50%、石炭が50%弱で、石油は僅か4%程であった。長い間燃料の大部分を賄っていたのは木であり、その使用量は20世紀の初めまでは右肩上がりに上昇し続けた。その後1930年代中頃までは上下しながらも高止まり状態であった。しかし、それ以

降は急速に減少した。それらの結果、21世紀初頭のエネルギー源の構成は、バイオマスが約9%、石炭が約25%、石油と天然ガスの合計が約55%、そして新たなエネルギー源である原子力と従来から利用されていた水力はほぼ同じで約6%である(190, 191)。

3.3.3 水力・風力：人為的な温暖化について考える場合には、エネルギーが再生可能であるかを考えることが重要である。再生可能エネルギーとは、人が利用するよりも多くの量のエネルギーが自然によって供給されるものである。水力・風力・太陽光などは代表的な再生可能エネルギーである。

足で水車を回し、水をくみ上げる装置は紀元前4世紀にエジプトで初めて使われ、水流を利用した水車は紀元前3～1世紀のヘレニズム時代に始まったと言われている。初期には製粉に使われていたが、10世紀頃からは動力源としても利用されるようになった。

風は先ず帆船の動力として使われたと考えられるが、それは5,500年前以前であったと言われている。一方、動力源としての風車の利用は、1世紀のアレクサンドリアに始まったとされている。その後10～12世紀頃には、海水をくみ上げ塩田を作ったり、製粉用の風車が作られたりした。また15世紀になるとオランダで干拓後の排水に風車が多く用いられた。現在、水力や風力が、再生可能な電気エネルギー源として改めて注目されている。

水力発電は、今問題となっている化石燃料の削減という文脈とは違う意図のもと開発されてきた。それは、ダム建設という公共事業が経済成長をもたらすとともに電力を供給するという点であった。米国ではフランクリン・ルーズベルト(1882-1945、大統領在任期間：1933-1945)が1933年に大統領に就任し、世界恐慌の克服を目指してニューディール政策を決定した。テネシー川の流域開発はその政策の一つであった。日本でも高さ53mの大型ダムである石淵ダム(1946年着工1953年竣工)が北上川水系に建設された。また高さ186mの日本最大の黒部第四ダム(1956年着工、1963年竣工)も作られた。しかし、現在ではダムによる発電は、生態系への影響(サケやウナギの遡上の妨害⁴⁰)・海岸線の後退(本来流れ下る土砂がせき止められる)等の問題があることが明らかにされている。米国では1975年以降は大型のダムの建設は激減した。逆にその頃から、既存のダムが壊されるようになった。米国でのダムの取り壊しは、1976～

85年の間に47基、1986～95の間に147基、1996～2005年の間に298基、2006～14年の間に548基であった(192)。

ところが、世界を見渡すと現在でも新規の大型ダム建設が続いている。中国では、2009年に巨大ダムである三峡ダムが完成した。メコン川でも大規模なダム建設が計画されている(193)。そのような新規ダムの建設の是非は、環境アセスメントを含んだ十分な事前評価・人為的な温室効果ガスの排出削減とクリーンな電力の供給増加の二点を両睨みしながら考えられなければならない。

また、水力発電には揚水発電(夜間は電力需要が減少し過剰電力が生まれる。そこで、その電力を利用し水を高いところにもち上げ、昼間の電力需要が多い時に再び発電する。それは、電気は貯めておくことが難しいという欠点を補うものである。)・小水力発電(大型のダムではなく水車やある程度の落差を利用するなど小規模なもの⁴¹)もある。

3.3.4 電力：ここでは電力がどのように利用されるようになったのかをまとめる。電力は発電機により機械的なエネルギーを電気エネルギーに転換したもので現在、広く利用されている。トーマス・エジソン(1847-1931)が白熱電球を発明したのは1879年で、1880年代に入ると送電線を利用した配電が始まった。水力や火力などで動く発電機を備えた発電所からの送電により電気の利用が普及した。

初期の電力事業ではエジソンの導入した直流による送電が行われていた。しかし、電流は送電の間に減衰してしまう。減衰は、電圧を高くすることにより抑制される。交流は変圧することが容易で高圧送電が可能でロスが少ないため、次第に直流送電に代わり交流送電が主流となっていった。現在では、直流による送電はなくなった。しかし、鉄道では、交流を直流に整流し直して稼働している場合が多い。

電気は使い勝手の良いエネルギー源であり、急速に利用が広まった。例えば文明開化の象徴であるガス灯は、日本では1872(明治5)年に初めて横浜に設置された。一方、電灯は早くも1882年には東京の銀座の街頭に灯され、次第にガス灯⁴²から置き換えられていった。

日本では初めての電気事業者(東京電灯会社)が1886年に創立された。1887年には名古屋電灯、神戸電灯、京都電灯、大阪電灯の設立が続いた。1911年には「電

⁴⁰ 所によっては、階段式の魚道をダムの横に作り、サケが遡上できるようにしている。

⁴¹ 長野県大町市にある町川発電所は有効落差16.2mを利用した小水力発電所である。その最大出力は140kWである。ちなみに黒四ダムの最大出力は33.5万kWである。

⁴² モニュメントとして少数のガス灯が残っている。千葉県の上野街道には228基のガス灯が全長2km余りの通りに残っていた。しかし、そこでも、2015年の10月に、記念として残す6灯を除いてはLED灯に置き換えられるために消えていった。

気事業法」が制定され、電力事業者に各種の権利が与えられた。また一般人の妨害に対しては厳罰が課されることになった。電気の普及には事業者と地元民の間で軋轢があったこともあった。例えば、長野県の赤穂村では、電気事業の経営権が長野電灯会社に与えられていた。村は村営の事業の認可申請を1912年に行った。しかし、村への認可は下されなかった。そこで村では、長野電灯会社からの電力供給は受けないなどの取り決めのもと不点火同盟が結成された。しかし、電灯会社は一人の村民の私有地を借り、一本の電柱を立て営業許可を得た。村ではそのことを巡って大きな騒動が1913年に起きた。ところが最終的には不点火同盟の結束は崩れてしまった(194)。

当時の電灯料金は安くはなく⁴³、電気の普及には騒動もあった。しかし、電気の利用は、「スイッチ一つで」オンオフできる便利さにより次第に広がっていった(194)。

1927年には電灯普及率は87%になった(195)。最初は、多くの電力事業者が乱立したが、1927年には原則として一域一業者とすることや安定供給など公益事業として政府による規制が強められた。東京電灯は政友会に多額の寄付をするなど、現在に続く電力事業者と政界の太いパイプが作られていった。1938年には「電気管理法」が公布され、電気事業が国家管理されるようになった。更に戦時中には国益のために電力供給は国により統制された(194)。このような電力業界と政府の密接な関係は、その後更に強まり現在に至っている。電気料金が一定の利益を確保できるように保証されている総括原価方式は、その一例である。一方、電力会社は多額の政治献金を納め続けている。このような関係は「原子力村」を支える要因の一つとなっていると考えられる(196, 197)。また、東日本大震災による福島原発事故後の原子力発電の利用についての政府の決定に、電力会社が大きな影響を与え、国民世論との間に大きな乖離を生み出していると思われる。原子力発電を利用し続けるのかどうかについては、162頁3.12で論ずる。

1946年には石炭不足で電力の不足が起きたが、電力供給のための政策が採られたり、朝鮮特需による景気の高揚もみられたり、1953年には洗濯機・トースター・冷蔵庫などが発売される電気元年となった。1954年には国産の白黒テレビも発売された。その後の日本の暮らしは電気なしには考えられないものになっている。しかし、現在でも、タンザニアでは84.7%、インドでは

21.3%の国民は、電気を利用することが出来ない暮らしをしている(155頁、表1参照)。

3.3.5 原子力：人為的な温暖化を軽減するために、原子力発電をどのように位置づけるかは重要な問題である。そのことについては、162頁3.12で考察する。ここでは原子力の利用の推移だけを取り上げる。

原子力の利用は1895年のコンラート・レントゲン(1845-1923)によるX線の発見に始まる(162頁、3.12.1.1参照)。原子爆弾の開発は、米国・英国・ドイツ・日本で第二次世界大戦のさなかに始まった。米国は、1942年から始まったマンハッタン計画で精力的な開発を行い、原爆の初の実戦投下は1945年8月6日の広島への爆撃であった。

その後は、冷戦における原子力兵器の開発と原子力の平和利用が同時に進行した。しかし、問題は原子力の平和利用が、核兵器の開発と密接な関係にあることである。まず、原爆と原子力発電の反応原理は同じ核分裂の連鎖反応である。原爆は、その反応により瞬時に破壊的なエネルギーを生み出す。一方、原発は反応を制御しながら長期間に亘り得られるエネルギーを利用している。また、原発を稼働すれば、核兵器を作ることができるプルトニウム239が副産物として生じる(198)。このような点に注目すると原発は平和利用ではなく原子力の「平時利用」であり、核兵器は原子力の「軍事利用」ではなく「戦時利用」と捉えるべきだと主張されている(199)。以下通常使われるように「平和利用」という語を用いるが、将来の選択を考える場合にはこの点は特に重要であることを強調しておきたい。

動力源としての利用は、世界最初の米国の原子力潜水艦「ノーチラス」の1954年の竣工、世界初の米国の原子力空母「エンタープライズ」の1960年の進水を挙げることが出来る。史上初の原子力発電は1951年米国で行われた。その発電量は微弱で200Wの白熱電球4個を光らせるのがやっとであったと言われている。その後の平和利用は、ドワイト・アイゼンハワー米国大統領(1890-1969、大統領在任期間：1953-1961)が1953年12月8日のニューヨークの国際連合総会で行った「原子力の平和利用」の演説で弾みがつき、現在に至っている。

3.3.6 人為的な温暖化を軽減するための新たな再生可能エネルギー：現在問題になっている人為的な温暖化を軽減するためには、化石燃料の燃焼に由来する温室効果ガスを減少させる必要がある。そのためにも、再生可能エネルギーの利用を増やすことが緊急課題である。例

⁴³ 電灯が普及し始めた頃の電気料金は、電球の数で料金が決まる定額制であったために、一晩中つけっぱなしにしている家も少なくなかった(194)。

えば、バイオマスを燃焼させると温室効果ガスのCO₂が排出されるが、それは最近大気から光合成により吸収されたものであり、大気のCO₂は正味では増えない⁴⁴。一方、化石燃料は太古の大気から吸収したCO₂に由来しており、その燃焼は現在の大気のCO₂濃度を上昇させてしまうことは注意しなければいけない点である。

再生可能エネルギーは大きく二つに分けることが出来る。それは、①従来から利用されていた薪・炭・水力・風力と、②近年開発が進んでいる太陽光・太陽熱・その他の熱（深度地熱、地中熱、周辺熱）・風力・バイオマス（159頁、3.11.1参照）・潮力などである。

以下、本論で「新エネ」と呼ぶものは、従来の水力発電を除いた小水力発電と近年開発が進んでいる太陽光などの再生可能エネルギーを含意する。また、水力発電は大きな再生可能エネルギー源であるので、水力を含む再生可能エネルギーを意味する場合には煩雑であるが、「水力を含む再生可能エネルギー」と呼び、両者が含まれることを明確にする。

3.4 エネルギーフロー

エネルギーは様々な形に変えられながら利用されている。最初に利用されるエネルギーを一次エネルギーと呼ぶ。それは、最終的に消費されるエネルギーである最終消費エネルギーとは区別される。2013年度の日本の一次エネルギーの内訳は、原子力0.4%、水力を含んだ再生可能エネルギー7.5%、天然ガス24.2%、石油42.7%、石炭25.1%で、化石燃料が92%を占めている（200）。

留意すべき点は、発電の際のエネルギーの流れである。発電に用いられた一次エネルギーは、利用できる電気エネルギーに100%変換されることはない。それは、発電時に熱として失われたり、送電中に失われたりする結果である。熱などによる損失はおよそ60%で、40%が電気エネルギーとして利用されるに過ぎない。その結果、現在の日本では一次エネルギーの43.2%が発電に用いられているが、最終消費エネルギーに占める電気の割合は、17.2%となっている。世界全体の2004年のその平均は約17%であった。2030年にはそれは20%になると予測されている（200, 201）。使い勝手のよい電気エネルギーにはこのような特徴がある。

つまり、電気エネルギーについて考える場合には、電気として消費されるエネルギーではなく、発電に費やされた一次エネルギーの量とその源を考えなければならない。

3.5 エネルギーの利用効率

更に全てのエネルギーは、投入されたエネルギーのうち一部だけがわれわれの求める仕事に使われることにも注意しなければならない。例えば白熱電球では多くのエネルギーが熱として失われ光となる部分は3～5%である。一方、熱の損失を抑えたLEDでは25%が光となっている。ガソリンエンジンでは投入されたエネルギーの20～30%が走行に使われている。太陽電池も含めエネルギーのロスを少なくすることが求められている。

電気は、多くのエネルギーをロスしながら利用されている。また、電気は貯めておくことが難しいという欠点もある。それを補完するものの一つが揚水発電（146頁、3.3.3参照）である。21世紀初頭の日本の発電に占める揚水発電は0.7%程である（202）。今後は、安価で効率の良い蓄電池の開発が大きな課題である（203-205）。特に揺れ動くエネルギー源である太陽光や風力を能率的に利用するためには、効率の良い蓄電池の開発が重要である。更に電気の効率的な利用を可能にする新たな技術開発に期待が寄せられている（159頁、3.11.1参照）

本章の主題は、人為的な温暖化を軽減するために如何に温室効果ガスの排出を削減できるかを考察することである。ここまで人類はどのようなエネルギー源を使ってきたか、それらにはどのような特徴があるかをまとめた。人類はエネルギーの使用量を増やすことで経済成長を成し遂げてきたことが明らかとなった。特に、戦後の急成長は化石燃料の消費増大に支えられたもので、人為的な温暖化を顕在化した。しかし、そのような問題が俎上に上ったのは、1997年の京都議定書以降のことであったともいえる（8参照）。日本の戦後の復興は、落ち込んだ出炭量を優先的に復活させる政策により成し遂げられた。以下に将来のエネルギー源の選択を考える際の一つの手がかりを得るために、戦後の復興と石炭の増産を振り返る。

3.6 石炭の傾斜生産による戦後日本の経済復興

日本は第二次世界大戦により国富の25%を失い、実質的な国民所得は戦前の60%以下、輸入は25%、輸出は10%以下、都市勤労者の実質賃金は30%、家計費は40%と低下した（5参照）。また、採炭量は1940年度には5,630万トンであったのが、1945年度には2,234万トンに激減した（206）。

戦後の復興は、このような塗炭の苦しみを解消するために、多くの人の協力によって成し遂げられた。1945

⁴⁴ 例えば、多量の肥料を施肥し化石燃料を消費する農業機械で耕作されたトウモロコシを使うことは、大気中のCO₂濃度の軽減につながらない場合もある（159頁、3.11.1参照）。

年8月16日に開かれた「戦後問題研究会」は、戦後の復興に大きく寄与した。大来佐武郎(1914-1993)は、その研究会の世話役を務めた。また、有澤廣巳(1896-1988)は、その研究会などで石炭の傾斜生産構想を中心に進め、戦後の日本経済の復興に尽力した。その経緯を概観する。

3.6.1 戦前の動き：大東亜省⁴⁵ 総務局調査課に勤務していた大来は、日本の生産力などの資料を見ることができ立場にあった。鉄鋼生産は太平洋戦争に突入したところから、明らかに下降線を辿っていることが判明した。彼は近衛内閣(1937年6月4日-1939年1月5日、1940年7月22日-1941年10月18日)の有力なブレーンの一人であった風見章(1886-1961)に「戦争経済のカナメである鉄鋼生産がこんな状態ではとても戦争を遂行するのは無理である」と1942年⁴⁶末に訴えた(208)。

1944年に通信院の工務局長であった松前重義(1901-1991)は、海軍省軍務局の依頼で、日米の戦力比較を行った。彼はその結果(アメリカの生産力は日本の20倍、航空機は10倍以上、造船は一年間で日本の全船舶保有量を生産する能力がある)を報告し、東条内閣の軍需生産計画を「欺瞞に満ちている」と批判した。松前は、高級官僚としては例外的に陸軍二等兵として招集された。大来にも赤紙が来てソ連国境に出発することになっていた。しかし、彼は大東亜省の期待される若手で、風見が名前を出さなかったので出発寸前に大東亜省に呼び戻され、出兵することはなかった(208)。

1945年の2月に大来は「本邦経済の大陸資源依存度状況及び今後における大陸物資対日供給方針について」をまとめた。軍部も「本土決戦のための備蓄」として、塩26万トン、大豆など74万トンを緊急輸入した。これは戦後の食糧難を一部緩和することにつながった(208)。

大来は、大東亜省総務局長の杉原荒太(1899-1982)の了解と支援のもと戦後経済の研究を1945年6月に始めた。その研究は、昭和塾で教えを受けた平貞蔵(1894-1978)の助言・指導を受けながら、後藤誉之助(1916-1960)などの協力のもとに進められた。その時はまだ、いつどのような形で戦争が終わるかは分からなかったので、「日本自活方策研究会」と名付けられた会合が企画された。8月の初めに、その会の第一回会合の開催(8月16日)通知が10数名の人に送られた(208)。

一方、東大の経済学部の有澤廣巳は、大内兵衛(1888-1980)の弟子で、統計学を取り入れ経済の動きを客観的に把握する研究を行っていた。1937年に「臨時物価対策委員会」に参加し、初めて政府の仕事に協力した。しかし、1937年の7月の盧溝橋事件に始まる日中戦争の勃発により、大学の自由な学風は失われていった。1937年12月に、東大経済学部教授の矢内原忠雄(1893-1961)は、『中央公論』に発表した「国家の理想」が不穏当であるということで、辞任に追い込まれた。また、当時助教であった有澤は1938年2月1日に労農派の人民戦線結成の企てに関わったという人民戦線事件の第二次検挙で、大内兵衛などとともに逮捕された。彼は、1939年5月中旬まで巣鴨に拘置された。彼は保釈後に昭和研究会⁴⁷に加わり「日本経済再編成試案」(1940年8月に公表)の立案に中心的に関わった(209)。1941年7月の第一審の判決で、有澤らは有罪、大内らは無罪であった。1944年9月の二審の判決は全員無罪であった。しかし、彼らは大学への復職はかなわないままに終戦を迎えた(210)。

3.6.2 戦後の石炭増産プランの作成：前述した1945年8月16日に招集されていた「日本自活方策研究会」の会合は、突如終戦となったので、第一回「戦後問題研究会」として大東亜省の総務局長室で開催された。局長の杉原の挨拶で始まった会合には大内、蠟山政道(1895-1980)、中山伊知郎(1898-1980)、杉村広蔵(1895-1948)、東畑精一(1899-1983)、亀山直人(1890-1963)、石川一郎(1885-1970)、平、大来らが参加した。有澤は10月の第4回ぐらいの会合から参加した(208, 211)。東大を追われていた大内、有澤は1945年11月には東大に復帰した。

吉田茂(1878-1967)は、1945年9月に東久邇宮内閣の外務大臣、11月に幣原内閣の外務大臣に就任した。12月には貴族院議員に勅選され、1946年5月には、日本自由党総裁の鳩山一郎の公職追放によって、後任総裁に就任し、第一次吉田内閣を組織した。

大東亜省は1945年8月26日に廃止され、外務省に吸収された。大来は、外務省の調査局長になった杉原の誘いを受けて外務省に移り、研究会の世話役を続けた。それは、吉田外務大臣のもとに作られた特別調査委員会となった。戦中は、日本の経済などの現状は共有されるこ

⁴⁵ 1942年11月1日に、大東亜共栄圏諸国を、他の外国とは別扱いとして外務省の管轄から分離し、統治するために設置された。外務省は二重外交を批判し反対した。外務大臣の東郷茂徳(1882-1950)は、設立に抗議して辞任した。

⁴⁶ 1942年4月18日には東京・横須賀・名古屋に敵機来襲、1942年6月ミッドウェー海戦、1942年8月ガダルカナル島へ連合軍上陸。戦況は大きく変化したが、国民は事実を知らされず、1942年4月に行われた東條英機(1884-1948)の主導する翼賛選挙で誕生した議会在米英との決戦を目指していた(207)。

⁴⁷ 1933年12月27日-1940年11月19日まで近衛秀麿を支える政策集団で「東亜新秩序」・「大政翼賛会」への道を開いた(209)。

とも、公表されることもなく、砂上の楼閣のなかで国民が侵略戦争に組み込まれていった。そのような反省の上に立って、戦中でも一部で行われていた国情の把握に加え多くの統計資料が集められ、それに基づいた戦後の復興計画が構築されていった。その委員会により1945年12月には「日本経済再建の方途」が中間報告として発表された。そこでは石炭および肥料の増産が強調された(212)。

同じ頃に、衆議院・貴族院では、石炭増強の決議案が出された。しかし、その決議案は具体的な方策に欠けていた。1946年3月には中間報告を発展させた「日本経済再建の基本問題」が、更に1946年9月にはその改訂版が発表された。そこでは炭鉱の国営の可能性についても言及されていた(212)。

吉田は第一次内閣(1946年5月22日-1947年5月24日)を組閣するにあたり、特別調査委員会の委員である大内を大蔵大臣、東畑⁴⁸を農林大臣、有澤を新設されることになっていた経済安定本部の長につくよう要請した。しかし、大蔵大臣には石橋湛山⁴⁹(1884-1973)、農林大臣には和田博雄⁵⁰(1903-1967)が就任した。また、経済を安定させることを目的とした経済安定本部は8月12日に発足したが、長官には膳桂之助(1887-1951)が任命された。吉田の最初の構想は、いずれも実現しなかった。

ところが吉田は、農林大臣の和田を幹事とし、有澤、中山、東畑、茅誠司(1898-1988)、永田清(1903-1957)、内田俊一(1895-1987)、堀義路(1896-1972)、白洲次郎(1902-1985)、牛場友彦(1901-1993)を加えた昼食会を秋頃から開き、彼らをブレーンと頼むようになっていった。大来はその書記役を務めた(210)。

1946年9月に発表された「日本経済再建の基本問題」

の改訂版によれば、石炭、普通鋼材、硫安、セメント、電力の1945年10月の生産量はそれぞれ1943年度平均の13%、1%、17%、13%、40%であった。1946年9月にはそれぞれ、38%、8%、59%、32%、72%と増加してきた。しかし、それは戦後の復興が容易でないことを示していた(212)。

一方、1946年8月に政府はGHQの指令で戦時中に政府または軍部が軍需会社に約束した補償を打ち切った。その結果、打撃を受ける会社が出てきた。そこでGHQの最高司令官であるダグラス・マッカーサー(1880-1964)は、吉田に緊急物資の輸入を行ってもよいと申し出た。各省から提出されたリストを合わせると、数百の品目となった。吉田はそれらを鵜のみし、GHQに頼むのは一国の総理大臣として見識がなさすぎると思い、輸入すべき品目について昼食会の話題として取り上げた。その結果、緊急輸入物資として、鉄鋼・無煙炭・重油・ゴム・トレーラーバスの5品目が選ばれ、吉田は、それをGHQに申し入れた。しかし、鉄鋼はアメリカでも不足しているし、重油の輸入は日本の出炭を圧迫するというところで、二品目の緊急輸入は認められないという返答が届いた(210)。

また、昼食会のメンバーを中心に吉田の私的諮問機関である石炭委員会ができた。有澤が委員会を主導し、傾斜生産方式の構想を練ってきた稲葉秀三(1907-1996)、大来、後藤も加わり、第一回の会議が1946年11月5日に開かれた。石炭委員会で話し合われた傾斜生産方式は、輸入した重油を鉄鋼の生産に費やし、増産された鉄鋼を炭鉱に優先的に回し、石炭を増産させ、広範な経済活動を活発にさせるという経済再建計画であった。当時の炭鉱には、竹で作られた壊れやすい出炭用のレールがあっ

⁴⁸ 東畑は農業経済を研究していたが、戦後の食糧難を解決する具体的政策には目途が立たないことから、吉田の再三の要請を固辞した(213)。

⁴⁹ 石橋は、戦前は東洋経済新報社主幹などとして、台湾・朝鮮・満州の放棄を主張する小日本主義を唱えるなど、リベラルな言論人として活躍した。彼は1944年10月に大蔵省内に設立された「戦時経済特別調査室」の議長役を務めた。そこでは、表向きには話し合うことができない戦後構想が検討された。議題は、戦後の経済や世界のあり方などであった。そこで彼は、日本は台湾・朝鮮・満州を捨て四島でやっていくことにより世界平和を実現すべきであるという自説を主張した。委員の一人である中山はそれに反対した。中山は後に石橋の見解を「卓見」として高く評価した。戦前は、多くの人が八紘一宇の大東亜共栄圏を目指す膨張政策を強調した。その中で、彼が東洋経済新報などで展開した小日本主義は異彩を放っていたが、少数意見で取り上げられなかった(214-217)。彼は1956年12月23日-1957年2月25日まで総理大臣を務めた。彼は日中米ソを含んだ互助連関関係の構築を目指していた。それは米国を重視する保守主流派の政策とは違うものであった。しかし、彼は健康を害し、総理大臣を辞したために石橋内閣は短命に終わった。彼が体調を崩さず総理大臣に留まっていたら、戦後の日本の外交政策はどのようになっていたかは分からない。しかし彼は、総理大臣を退いた後も、日中の関係修復に尽力した(214)。東西冷戦はあったが、現在では緊張関係は残っているものの世界は日中米口欧を始めとした多くの国が、石橋の目指した相補関係を構築しようとしている。彼の重要な論説をまとめた本(214)が出版されている。そこでは、多くの人が短期的なものの見方をする中で、小国日本がグローバル社会でどのように公正に生き延び豊かになっていくかという彼の主張が一貫して論じられている。若い方には是非読んで頂きたい本の一つである。

⁵⁰ 戦前は農林官僚として、小作の廃止を模索していた。戦後は連合国軍最高司令官総司令部(GHQ, General Headquarters)の後押しもあり農地改革を行った(213)。また、社会党主導の連立片山内閣(1947年5月24日-1948年3月10日)では経済安定本部長官、その後、日本社会党書記長、日本社会党副委員長となった。

た。それを鉄製に代える、あるいは、鉄で炭車・巻き上げロープを作ることで石炭の増産が可能であると考えられた。

そのような議論を踏まえていた昼食会のメンバーは、緊急輸入について鉄鋼はあきらめるが、重油は石炭の増産につながるのを認めてほしいという意見を吉田に強く主張した。吉田はその案に賛同し、その場で白洲にマッカーサー宛ての手紙を書かせ、電話で面会の申し込みを行った。吉田は、12月2日(月)に再度、重油の輸入許可を求める書簡をマッカーサーに手渡した。その際に、彼は返事の期限を二日後の正午までと申し出た。

しかし、返事は遅れて土曜日に届いた。吉田は遅れた返事はロクなものではないと考え、ポケットに入れたまま大磯の別荘に向かった。吉田は月曜日にそれを読んだ。そこには「日本政府が、重油が入れば石炭3,000万トン掘り出すことができると考えるなら、申し入れ通り16.5万キロリットルの重油を入れよう」と書かれていた。それを受けて、有澤は1946年12月20日にラジオを通して国民に「要するに重油の輸入は瀕死の状態にある日本経済に対するカンフル注射であります。勿論これだけでは問題は解決せず日本経済の前途には尚多くの深刻な問題が横たわっておりますが、重油の輸入が産業界に一脈の生気を注入することとなるのは事実であります。此の生気を盛り育てて生産回復への力をつけ得るか否かは我々日本国民の決意と努力の如何によることとあります。」と訴えた。戦前の5,000万トンを目指す第一の目標として、3,000万トンの出炭が設定された。それには700万トンの増産が必要であった。彼らの政策には資材の傾斜配分の他に、坑内の実働時間の45分の延長も含まれていた(210)。

有澤は当時のことを振り返る中で、「石炭の傾斜生産を始めたときに、東大の理学部に茅(誠司)さんがいた、それから嵯峨根遼吉(1905-1969)さんがいた。僕を理学部に呼び出して、君らはいま傾斜産業とかいうものを作って日本の経済再建をやろうとしているそうだが、われわれも何か働くことができないか……。理学士が働くといっても大したことはできない。そこで僕が考えたのは炭住(炭鉱住宅)のラジオが故障してよく聞こえない、君たちは技術者だから、ラジオの修理ならできだろうといった。そうしたら、できますという。その理学士たちは自分のポケットマネーを出して部品を買って、それで常磐へ行ったんだ。それで片っ端から直した。そうすると炭鉱の連中は、とにかく理学士様が来てわれわれの

ラジオを直してくれた、よく聞こえるようになった。それというのも石炭を掘ることが大事だということで、そんなにまで政府は目を配ってくれているのか、大いに働かなければいかんということで、そのときに急に常磐炭鉱は、それまでは月に10トン足らずしか出ない炭鉱が、その次になってから15トンになった⁵¹⁾と語っている(211)。

経済安定本部では、1946年12月17日に『経済危機突破根本方針』が決定され、傾斜生産方式により経済再建を図ることが発表された。その政策の決定には昼食会が大きな役割を果たした。12月27日には「石炭小委員会」が取りまとめた出炭3,000万トンを含んだ『昭和21年度第四、四半期基礎物資需給計画策定並に実施要領』が閣議決定され、「国内施策の一切を石炭の増産に集中する」、さらに「石炭の配分に必要なる諸資材の確保に最重点を施行し」とされた。即ち、石炭の採掘に多くの資金と資源を回し、その石炭を利用して鉄鋼業を盛んにし、出来た鋼材を採炭に利用し経済の好循環をもたらす傾斜生産方式の具体化が目指された。しかし、このような政策はスムーズに進んだわけではなかった(208, 210)。

1947年年頭には吉田首相の挨拶における『不逞の輩』発言が大きな問題を引き起こした。吉田は、「いわゆる労働攻勢等と称して、市中に日々デモを行い、人心を刺激し、社会不安を激成せしめて敢えて顧みざるものあるは、私のまことに意外とし——私はかかる不逞の輩がわが国民中に多数あるとは信じませぬ。わが経済の現情を認識し、政府の政策の真相につき十分の了解が生ずるにおいては、由来愛国的熱情に富めるわが国民は、この経済事態克服に一致協力、経済再建に邁進せんとする国民運動の発生することを確信して疑わぬものであります」と演説した。演説の原稿は大来が有澤と相談して書いたものであった。原稿には不逞の輩という言葉は入っていなかった。何時、どこで誰が書き加えたかは闇の中である(208)。

この発言を受けて、労組はいっせいに反発した。1月9日に全官公庁労組拡大共同闘争委員会は要求を掲げて、ゼネラル・ストライキ実施を決定した。その後、要求に対する返答期限が2月1日と設定された。事態は緊迫したが、1月31日のマッカーサーのスト中止指令、労働者代表による中止宣言でゼネストは中止された。しかし、労働運動が終息することはなかった。

そのような中「石炭小委員会」は、1947年2月には自然解散となった。一方、その頃、吉田は有澤を経済安

⁵¹⁾ この時期がいつ頃であったのかは調べきれなかった。また、増産には様々な要因があったはずである。ここから分かることは、戦後の復興は“全員野球”でという意識が強かったということである。

定本部の長官に任命しようと考えていた。有澤は受諾に当たって三条件を出した。1947年2月の半ばの会談で、吉田は二つを受け入れたが、人事に関する案件については即答を避けた。その日の話し合いの中で、有澤は総理の思いに心を動かされたが、申し出を最終的に断った(210)。

また、大来は3月14日の日記に、有澤先生が承諾してくれるならば長官就任を即日決定するという言質を吉田から得たと書いた。大来は「石炭小委」は私的な機関であり実質的な権限をもっていなかったため、有澤の経済安定本部長官への就任に奔走した。3月20日に吉田は経済安定本部長官に高瀬壯太郎(1892-1966)を任命した。大来は24日に吉田に呼び出された。その時、大来は、意見書を手渡すとともに、有澤に依頼しておきながら実現しなかった理由が分からないと今後のお手伝いはご辞退申し上げると吉田に挨拶した。32歳であった大来は、翌日外務省に辞表を提出した(208)。

1947年4月25日の総選挙で吉田の率いる自由党は、片山哲の社会党に敗れた。連立工作は紛糾したが、5月23日に三党連立の片山内閣(48年3月10日まで)が誕生した。大来は1947年6月13日には経済安定本部長官の総裁官房調査課長に復職した。

3.6.3 経済復興の実態：ゼネストは中止されたが、労使の緊張関係は続き、石炭傾斜生産構想も暗礁に乗り上げた。そのような中、今の経済白書に当たる第一回『経済実相報告書』は、経済安定本部によって1947年7月4日に公表された。その作成には大来も加わったが、都留重人(1912-2006)が責任者であった。その報告書には「石炭の2割の増産は工業生産を4割増加する。増加した工業生産力は炭鉱に更に大きな増産のための資材機器類の供給を可能とする。かくて増産は増産をうむ。日本経済の矛盾はまず石炭の増産によって解決の緒を見いだすべきである」と傾斜生産方式が大きく取り上げられた。しかし、それは目標であった。1948年の第二回『経済実相報告書』では「石炭生産額は前年度に比し30%増加し、特に鉱工業用配炭は46%の増加を示し、生産回復の有力な原動力となった。」が、「製造業・電力消費・鉄道輸送では、それぞれ、前年度比20%、4%、12%の上昇にとどまっている。特に鉄道輸送は要請の85%を満たすのにとどまっている。」と問題点が指摘された。しかし、全体としては、経済再建の見通しは著しく明るさを加えてきたと総括された。大来は第二回から第五回の報告書の責任者であった。それらは「大来白書」と呼ばれている。初回の白書は「都留白書」と呼ばれ、政治的な性格が強いものと評価されている。一方、大来白書は実証的、客観的な経済状況の分析が平易に淡々と記述

されているとされ、「都留白書」と対比したものとして捉えられている。

大来の後を引き継いで経済白書を担当したのは後藤であった。彼は白書に短いキャッチフレーズをつけ、時代を短い言葉で的確に捉えた。その代表的なものは、「消費景気」(1953年度)、「すれ違いの悲劇」(1954年度)、「止まっているためにも二倍の速さで駆けねばならない」(1954年度)、「もはや『戦後』ではない」(1956年度)、「技術革新ブーム」(1956年度)であった(208)。

このような日本の戦後復興は、朝鮮戦争(1950年6月25日～1953年7月27日)による特需にも影響され加速していった。

戦後の経済は、経済安定本部などにより実施された統制型経済で復興していった。しかし、GHQと片山内閣、芦田内閣の後に再び首相の座に戻った(1948年10月15日)吉田が自由型経済を志向し始めたことにより、方向が転換されていった。それは、GHQが経済安定本部との1948年12月3日の定例会議席上「我々の政策は統制をできるだけ外し一方やるものについてはこれを強化し生産水準が上がった処で永久的に統制を廃止することにある」と言明したことにより如実に表れている(218)。

戦後の復興を支えた要因の一つは、石炭の増産であった。日本の採炭量は戦前では1940年度の5,630万トンが最高であったが、1945年度は2,234万トンと激減した。その後の増産は、統制色の強いものであったが、それは多くの人の善かれと思う協力と優先的な資材の投入により成し遂げられた。しかし、当時は化石燃料の燃焼が人為的な温暖化をもたらすことを考える人は、世界で殆どいなかった(8参照)。

戦後の復興を支えた国内の石炭産業の最盛期は短かった。1945年度の採炭量は1940年度の40%の2,234万トンと激減した。傾斜生産により増産が進み1950年度は3,933万トン、そして1961年度には戦前並みの5,540万トンとなった。1965年度は5,011万トンであったが、1970年度には3,832万トン、1980年度(1,810万トン)、1990年度(798万トン)、2000年度(297万トン)、2010年代(100万トン前後)と減少した。現在では国内の出炭量は、国内の需要量の1%以下と国内の石炭産業は壊滅してしまった(219)。

3.6.4 炭鉱業の興亡：炭鉱の労働は、きつい・汚い・危険な仕事であったが、多くの人が日本の石炭産業を支えてきた。その様子は、2011年にユネスコ記憶遺産となった山本作兵衛(1892-1984)の炭鉱画で知ることができる。(220)。彼は7歳から父の仕事を手伝い筑豊地方の炭鉱で50余年働き続けた。その後、鮮明な記憶をもとに1958年から絵筆を握り始め、採炭の様子や炭鉱

の人々の暮らしを描いた。夫が石炭を掘り出し、暑いのでろ肌になった妻がモッコを担ぎトロッコを押し出炭する様子などが生き生きと表現されている。その絵は、見るものに聞きしにまさる炭鉱の過酷な世界を教えてくれる。

危険な現場ではしばしば労働争議が起こっていたが、経営の合理化が強く求められるようになり労働争議は拡大していった。三井鉱山の三池炭鉱では、1953年の指名解雇に反対する争議が起こった。特に江戸時代から開かれていた古い鉱山では、効率を上げることができなかった。1959年1月には三井鉱山は三池炭鉱で6,000人の希望退職者を募ったが、応じるものは少なかった。同年12月には、会社は1,492名に対する指名解雇を発表した。労働組合は無期限ストライキで反対したが、ストライキが長期化する中で、第二組合を結成しストライキから離脱するものもあらわれ、労組は、1960年11月11日に無期限ストライキを解除した。

古い鉱山では生産性も低く、労働者の要求を受け入れて鉱山経営を続けることはできなかった。その後、炭鉱は縮小し多くの鉱山が廃鉱に追い込まれた。

元総理大臣の麻生太郎(1940)の曾祖父麻生太吉(1857-1933)は、1872年に麻生鉱業を起し炭鉱経営を始めた。その麻生鉱山も1960年代には縮小を余儀なくされ、1966年に閉山された。麻生鉱業は以前から手掛けていたセメントを主体とする会社へ変貌していった。一方、比較的生産性の高い夕張炭鉱は1960年代前半には最盛期に達した。しかし、1970年代には事故も続発し、安価な外国炭の輸入も増え閉山していった。高倉健主演の『幸せの黄色いハンカチ』は1977年に公開されたが、それは衰退していく炭鉱の町での物語であった。夕張市は人口流出が続く中、今なお財政再建の道を模索している。

石炭は1955年度には一次エネルギーの40%を占めていた。1959年頃には石炭がだぶつくようになり、1961年度には29%に低下していった。一方、石油のそれは、18%から36%に倍増した。更に1962年10月には原油の輸入自由化が決定され、安価な石油がますます大量に輸入されるようになった。その結果、国内炭の生産量は次第に減少し、1970年度には3,832万トンと戦後の最盛期の69%に減少した。その後は、優良な炭鉱だけを残し、競争力のない炭鉱を閉山するという合理化が急速に進み、上述したように国内の出炭量は激減した。ちなみに国内の炭鉱数は、1952年の1,047が最高であったが、現在は8炭鉱が稼行しているに過ぎない。

一方、日本の石炭使用量は年々増加している。それは次第に安価な外国産炭の輸入が増えているためである。1965年度では日本の石炭の総供給量は6,753万トンで、

輸入比率は25.8%であった。1988年には輸入の割合が90.2%と初めて9割を超え、総供給量も1億トンを超えた。2014年度の総供給量は、1.9億トンで輸入の割合は99.3%に達している。主な輸入先は、オーストラリア(65%)とインドネシア(19.3%)である(200, 219)

3.6.5 大来の転進：石炭の傾斜生産に大きな役割を果たした大来は1952年にはタイのバンコクにあるエカフェ(国連アジア極東経済委員会)の国際公務員となった。それは、後に大来が国際的に活躍する基礎となった。1954年には経済企画庁に戻り、1956年には経済企画庁計画部長として「新長期経済計画」の策定に当たった。それは1956年末に閣議決定された。その年の経済白書は、「もはや『戦後』ではない」で有名であった。その後の経済成長は、国際環境の好転、輸出の大幅な伸びにより計画を上回った。大蔵省財務調査官下村治は大来の計画の年率6.5%の経済成長は低すぎで、10%が可能であるという点から批判を展開した。下村の構想に支えられた所得倍増計画が池田勇人(1899-1965、総理大臣：1960-1964)内閣のもと1960年末から始まった。1964年の東京オリンピック、東海道新幹線の開通、白黒テレビからカラーテレビへの買い替えなど日本経済は好調に推移し、所得倍増は当初の計画の10年を待たず、1967年に達成された(208)。

1963年10月経済企画庁長官宮澤喜一(1919-2007)は事務次官に候補の一人であった大来ではなく、通産省局長の松村敬一(1921-1966)を選んだ。大来は11月1日に退職し、26年間の役人生活に終止符を打った。その後民間人として、人脈を広げながら国際問題にかかわっていった。1969年にはローマ・クラブの常任委員となり、1972年には国連の環境会議に向けてローマ・クラブがまとめた『成長の限界』の日本語の監訳を行うなど環境問題へも取り組んでいった。その後も、頻りに海外を飛び回り、外務大臣(1979年11月9日～1980年7月17日)として活躍した。1980年6月のベネチア・サミットには大平正芳(1910-1980、総理大臣：1978-1980)の急逝をうけて首相代理として出席した。彼はその後も多くの国際会議にタフネゴシエーターと呼ばれながら積極的に参加した。1992年4月にはAPEC「賢人会議」のメンバーに選ばれた。しかし、1993年2月9日「賢人会議」について国際電話で話しているときに急性心不全で突然倒れ急逝した。大来は官僚として経済政策の策定を行い、日本の戦後の経済発展の一翼を担った。一方で、彼は経済成長の負の側面ともいえる水俣病について積極的に発言することはなかったと言われている。彼が国際的な環境問題に取り組んだことは、評価されるべきである。しかし、人為的な温暖化の問題は緩和されず、現在ではま

すまず憂慮すべき問題となっている。われわれがその問題にどう対処すべきかについては、最後に論ずるが、当面の課題の解決を優先すると、未来に亘って重要な問題となる点を見落としてしまうことがある。それを避けることは難しいが、水俣病や福島原発事故などに学び、今後は極力将来に禍根を残さないように努めなければならない。

3.7 現在のエネルギー事情

以下においては、温室効果ガスである CO₂ やメタンの人類による発生を削減し、人為的な温暖化を如何に軽減するかを考える。人為的な CO₂ の排出源は、化石燃料の消費・セメント工業に由来するものと、森林伐採・土地改変に由来するものがある。前報 (8) で概説したように、人為的な温室効果の主要因は CO₂ である。人為的な温室効果に占める割合は、前者が 65% で後者は 11% である。

148 頁の 3.4 で述べたように 2013 年度の日本の一次エネルギーの 92% は化石燃料により賄われており、それをどのように削減するかが問われている。

化石燃料は製品の原材料・製鉄の熱源・自動車、船舶、飛行機の燃料などに利用されている。ガソリン自動車の燃費の向上を含め、多くの分野での省エネや代替物の開発が必要である。

また、ガソリン車の電気自動車への切り替えも自動車からの CO₂ 排出の削減につながる。それは、たとえ電気が化石燃料の使用から作られていたとしても、一か所で大量に CO₂ を排出する発電所には、開発が進められている CO₂ の回収・貯蔵技術が適用される可能性が高いと期待されているからである。一方、自動車のような分散している発生源に CO₂ の回収装置を備えることは、必ずしも容易ではないと考えられている。

多くの分野での新たな技術の開発が必要であるが、全てに言及することは、筆者の能力を超えるので、本論では電源構成に限定して考察し、水力を含んだ再生可能なエネルギーによる発電を如何に増やすかを主に考える。

3.8 各国の電源構成などの比較

3.8.1 概略：人為的な温暖化を軽減するために、各国の国民が実情を踏まえて「差異はあるが共通の責任」をどのように果たしていくのかを考える必要がある。そのために、いくつかの国の人口・一人当たりの GDP・

一人当たりの CO₂ の排出量（化石燃料の燃焼・セメント工業由来のもの、土地の改変由来のものは含んでいない）・HPI（地球幸福度指数）・使用総電力・一人当たりの使用電力・電源構成・電気の普及率をまとめた（表1）。

このシリーズでたびたび言及してきたが、世界の国々の間には大きな格差がある。一人当たりの GDP では最大 200 倍ほどの差がある。また、一人当たりの CO₂ の排出量は産油国（アラブ首長国連邦・カタールなど）と一人当たりの GDP が 1,000\$ 以下の最貧国（コンゴ民主共和国・タンザニアなど）では 100～400 倍の違いがある。

国としては世界最大の CO₂ 排出国である中国の一人当たりの排出量は産油国の 15～30% である⁵²。

一人当たりの電力使用量では米国はタンザニアの 600 倍以上である。また、タンザニアやコンゴ民主共和国では国民の 80% 以上の人、インドでは 20% 以上の人、電気にアクセスできない暮らしをしている。

既報 (5) で取り上げた、地球幸福度指数 (HPI) も表 1 に示しておいた。この指数は、一言でいうと、人間の幸福度を人による地球への負荷で割った数字である。地球に負担をかけ幸福が達成された場合にその値は低くなる。例えばこの値が最も高い国はコスタリカであるが、そこでは一人当たりの GDP は 1 万ドルに達し、電気の 90% 以上は水力を含んだ再生可能エネルギーで賄われている。コスタリカは、地球への負荷を多くせず、豊かさがある程度享受しているのである。一方、産油国の HPI はコスタリカの半分程度である。

このように違いと格差のある国々の今後の目指す大きな方向は既に論じたが (5)、三点にまとめることが出来る。重要なので繰り返しておくと、① GDP の低い国は、HPI と GDP をともに上昇させる。② GDP が中位の国は、高い HPI を維持しながら、あるいは低い場合にはそれを高めながら、豊かな暮らしを実現するように発展する。③ GDP の高い国は、HPI を高くする、即ち量的な拡大ではなく質的な改善を目指す。

3.8.2 電源構成：2012 年の世界全体の電源構成は石炭 (40.3%)、天然ガス (22.4%)、石油 (4.1%)、水力 (16.1%)、「新エネ」 (4.7%)、原子力 (10.8%) である⁵³。また、世界で電気を利用できる環境で暮らしている人は 84.6% である。(224)。

2012 年の各国の電源構成は表 1 に示した。ここからはっきりわかることは、電源構成が国によって大きく異

⁵² 各国の人為的な CO₂ の総排出量の現状あるいは産業革命以降の累積排出量やそれらに関する議論は前報 (8) の 153~154 頁で述べた。

⁵³ 一次エネルギーの供給源の構成については 159 頁、3.11.1 参照。

表1 いくつかの国の人口・GDP/人・CO₂排出量/人・HPI・総電力・電力/人・電力源・普及率。

国	人口 (百万人)	GDP/人 ^a	CO ₂ 排出/ 人 ^b	HPI ^c	総電力 ^d	電力/ 人 ^e	電力源等 (%) ^d						
							石炭	天然ガス	石油	水力	再生可能	原子力	普及率
コンゴ民主共和国	4.50	435 ^f	0.1	30.5	8.0	1.87	0.0	0.4	0.1	99.6	0.0	0.0	16.4
タンザニア ^g	51.82	955	0.2	30.7	5.8	0.12	0.0	50.7	20.1	28.6	0.6	0.0	15.3
コスタリカ	4.76	10415	1.7	64.0	10.2	2.19	0.0	0.0	8.2	71.1	20.7	0.0	99.5
インド	1295.29	1582	1.7	50.9	1128	0.89	71.1	8.3	2.0	11.2	4.5	2.9	78.7
インドネシア	254.45	3492	2.3	55.5	195.9	0.79	48.7	23.2	16.7	6.5	4.9	0.0	96.0
北朝鮮 ^h	25.03	622 ⁱ	3.0		19.2	0.78	27.0	0.0	2.9	70.2	0.0	0.0	29.6
ブラジル	206.08	11384	2.2	52.9	552.3	2.73	2.6	8.5	3.5	75.2	7.3	2.9	99.5
エジプト ^j	89.58	3199	2.7	39.6	164.4	1.92	0.0	75.8	15.2	8.1	0.9	0.0	100
スウェーデン	9.69	58939	5.5	46.2	166.4	17.48	0.5	0.5	0.4	47.4	11.6	38.5	100
トルコ共和国	75.93	10515	4.4	47.6	239.5	3.23	28.4	43.6	0.7	24.2	3.1	0.0	100
スイス	8.19	85594	4.6	50.3	68.2	8.53	0.0	1.4	0.1	56.6	2.8	37.3	100
フランス	66.21	42733	5.2	46.5	559.4	8.52	3.9	3.9	0.8	10.5	4.4	76.0	100
スペイン	46.40	29767	5.8	44.1	293.9	6.28	19.0	24.9	5.2	7.0	22.6	20.9	100
イタリア	61.34	34909	6.7	46.4	297.3	4.99	18.2	43.4	6.4	14.1	16.9	0.0	100
英国	64.51	46332	7.1	47.9	360.9	1.15	40.0	27.7	0.8	1.5	10.0	19.5	100
セルビア	7.13	29767	6.8	41.3	36.2	5.03	72.8	1.3	0.2	25.7	0.0	0.0	100
デンマーク	5.64	60707	7.2	36.6	30.7	5.49	34.4	13.6	1.3	0.1	48.2	0.0	100
中国	1364.27	7590	6.7	44.7	4995	3.70	75.9	1.7	0.1	17.3	2.7	2.0	100
イラン	78.14	5443	7.8	41.7	254.3	3.34	0.2	66.9	27.3	4.9	0.1	0.7	100
ベルギー	11.23	47353	8.8	37.1	81.8	8.08	6.7	28.8	0.4	0.4	12.4	49.3	100
ノルウェー	5.14	97307	9.2	51.4	146.8	29.25	0.1	1.8	0.0	96.7	1.3	0.0	100
ドイツ	80.89	47822	8.9	47.2	623.2	7.75	46.1	12.5	1.2	3.4	19.5	16.0	100
オランダ	16.85	52172	10.1	43.1	102.5	6.12	26.6	54.4	1.1	0.1	12.1	3.8	100
フィンランド	5.46	49824	10.2	42.7	70.4	13.00	10.8	9.6	0.4	23.9	16.6	32.7	100
日本	127.13	36194	9.3	47.5	1026	8.04	29.6	38.7	12.2	7.4	4.6	1.6	100
大韓民国	50.42	27970	11.8	43.8	530.9	10.62	45.1	21.1	4.0	0.7	0.6	28.3	100
ロシア	143.81	12736	12.7	34.5	1069	7.46	15.7	49.1	2.6	15.5	0.0	16.6	100
カナダ	35.54	50235	14.1	43.6	634.3	18.25	10.0	10.6	1.1	60.0	3.3	15.0	100
米国	318.86	54629	17.0	37.3	4271	67.05	38.5	29.6	0.8	6.5	5.5	18.8	100
オーストラリア	23.49	61925	16.5	42.0	248.9	10.95	68.8	19.9	1.6	5.6	4	0	100
アラブ首長国連邦	9.09	43963	20.4	31.8	100.9	11.27	0.0	98.6	1.4	0.0	0.0	0.0	97.7
カタール	2.17	96732	44.0	25.2	34.8	17.27	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	97.7

a GDP(US\$) / 人 2014 購買力で補正してない (221).
 b CO₂(t) / 人・年 2011 化石燃料とセメント生産 (222).
 c 2012 年の地球幸福度指数 (223).
 d 2012 年の kwh(x10⁹) 世界銀行 2015. (224).
 e 2012 年の電力使用量、kwh(x10³) / 人・年 世界銀行 (224) 世界銀行 (225).
 f 2015 予測国際通貨基金 (226).
 g タンザニア連合共和国.
 h 朝鮮民主主義人民共和国.
 i 2013 UN (227).
 j エジプト・アラブ共和国.

なることである。コンゴ共和国とコスタリカは水力と再生可能エネルギーで90%以上の電気が作られている。フランスでは原子力が76%を占め、水力を含んだ再生可能エネルギーは14.9%である。一方、スウェーデンでは原子力が38.5%であるが、水力を含んだ再生可能エネルギーは59.0%を占めている。産油国であるカタールとアラブ首長国連邦では天然ガスと石油で全ての電気が作られている。ノルウェーも産油国であるが、そこでは石油や天然ガスは輸出に向けられ、電気の97%は水力発電で賄われている。水不足で電力が不足すると、スウェーデンやロシアなどから電力を輸入している。陸続きであるヨーロッパでは国々の間で電力が輸出・入されている。

オランダとともに風車の伝統があるデンマークでは、風力発電の技術開発を積極的に行い、風力発電のタービンを輸出の目玉商品の一つとしている。風力発電のシェアは年々増え、2014年には電気の39%が風力発電によって供給された(228)。スペインも風力発電の導入には積極的である。北スペインのナバー地方では2006年に風力発電で供給される電力が50%を超えるとされた(229)。

ドイツは炭田に恵まれ、雇用を確保する政策も作用し出炭量が多く、電源に占める石炭の割合は46.1%と高い。しかし、ドイツでは「新エネ」の普及を目指した政策も取られている(160頁、3.11.2参照)。

各国は、それぞれの風土と伝統に支配されながらも将来的な見通し(CO₂の排出量の削減・化石燃料の枯渇・新たな技術を先行して開発することによる経済的メリットなど)を立てながら、電源構成の将来計画を立てている。

その際には国民的なコンセンサスを得ることが重要である。

「新エネ」による発電を増やしていくことが望まれているが、2014年の世界全体の消費電力に対して「新エネ」の占める割合は、風力発電(3.1%)、太陽光発電(0.9%)、バイオマス発電(1.8%)、地熱・太陽熱・潮力発電(0.4%)である(230)。

一方、日本の2012年の消費電力の電源構成は石炭(29.6%)、天然ガス(38.7%)、石油(12.2%)、水力(7.4%)、「新エネ」(4.6%)、原子力(1.6%)であった(224)。これは福島原発事故の影響を受けたものである。ちなみに原子力の消費電力に占める割合は、福島原発事故以前の1995～2010年度では30%前後であった(163頁、3.12.1.3参照)。一方、2012年度末の日本の総発電設備容量は、2.47億kWであり、それに対する電源構成の内訳は、原子力18.7%、天然ガス27.1%、石炭15.7%、石油18.8%、水力19.2%、「新エネ」0.4%であった(231)。この値は、稼働していない原子力発電所も含まれている。

また太陽光発電なども最大能力であり、夜間や曇りの日には能力が全て活かされるわけではない。

政府は2015年に2030年の電源構成の計画を発表した。それによると、原子力で電力の20～22%が賄われることになっている(232)。今後の電源構成の選択については168頁の3.13で論じる。

3.8.3 風力発電：人々は昔から風力を暮らしに役立てていた。帆船、風車による製粉・揚水などがそれにあたる。風力による発電は、1887年には、英国や米国で始まった(233)。1980～90年代になると現代的な風力タービンが開発された。それは地上だけでなく洋上にも据え付けられ風力発電は再生可能エネルギーの代表格に成長している。世界全体の風力発電容量は、1996年の610万kWから2014年末の3億7,000万kWへとおよそ60倍も増加し、世界全体の原子力発電所の設備容量と肩を並べるほどになった(234, 235)。この普及の促進は、太陽光発電同様、装置の効率化・価格の低下・固定価格買取制度(160頁、3.11.2.2参照)が大きく影響している。米国の2011年の風力発電のコストは1980年の10%程度である(236)。

風力発電用タービンの主な製造会社は、デンマークのベスタス社(11.6%)、ドイツのジーメンス社(9.5%)、中国のゴールドウインド(9.0%)、米国のGEウインド(8.7%)のほかドイツ、インド、中国、スペインの会社が続き、それら上位10社が2014年の生産の70%近くを占めている(237)。風力発電の能力では、中国、米国、ドイツ、スペイン、インドが五大大国である。一方、デンマーク、ニカラグア、ポルトガル、スペインでは風力発電が電源の20%を超えている(230)。日本の風力発電の能力は国際的に見ると極めて低く、中国の0.2%程度である(230, 235)。

3.8.4 太陽光発電：太陽電池の基本原理は1839年にアレクサンドル・バケレル(1820-1891)によって発見された。実際に発電が行われたのは、1884年にチャールズ・フリッツ(1850-1903)が、半導体性のセレンを利用するようになってからである。その後1954年には、ダリル・シャピン(1906-1995)らが、シリコン太陽電池を開発した。1958年に打ち上げられた米国の人工衛星ヴァンガード1号では太陽電池パネルが6年以上も作動し続けた。その後1960年代からは日本などでも量産が始まった。それに拍車をかけたのは1974年の石油ショックであった。

セレンを用いた太陽電池の変換効率は1%程度であったが、1990年代に入ると10%を超えるものが開発された。シャープは、2013年に集光機能を備えた多層のパネルで44.4%のものを開発した(238)。如何に安価に効

率のよい太陽光パネルをつくるかが大きな課題である (239-241)。

太陽光発電の普及には発電装置の価格も重要な要素である。例えば2014年の米国のシリコン太陽電池パネルの価格は、発電量当たりで1977年のその1/200以下となっている (242)。更に再生可能エネルギーを利用した発電の固定価格買取制度 (160頁 3.11.2.2 参照) を多くの国が採用しており、累積太陽光発電容量は増加の一途を辿っている。2014年の累積太陽光発電容量は、1億7,700万kWに達し、1994年の1,000倍となった。現在の発電容量は世界全体の原子力発電所の設備容量のほぼ半分に相当し、3年後には追い越す勢いとなっている (235)。固定価格買取制度には財政負担などの問題もあるが、新たな技術開発を含めた総合的な対策を実施し人為的な温暖化の軽減を図らなければならない (159頁、3.11.1 参照)。

日本は2004年末まで世界最大の太陽光発電導入国であった。しかし、その後ドイツ、イタリアが積極的に導入し始め、現在ではドイツの40%程となっている。また近年では中国が太陽光発電のパネルを積極的に開発し製品・技術の輸出を重点化している。その結果、2013年度までの累積太陽光発電の導入量は、ドイツ3,576万kW、中国1,972万kW、イタリア1,807万kW、日本1,360万kW、米国1,208万kWとなっている (200)。

また太陽光発電のパネルの生産シェアは、1995年には米国が43%を占め最大生産国であった。第二位は日本で約20%を占めていた。その後、太陽光発電は急速な需要の伸びで、価格競争などが激化し、生産シェアも大きく変化した。2000年代前半には日本がシェアを大きく伸ばし最高で50%に達した。米国は2005年には10%を割り込み、積極的な国策により急成長し始めた中国と並んだ。ドイツもその頃には20%を占めていた (243)。しかしその後、新たな参入も続き、シェアは大きく変わった。2013年では、中国 (64%)、日本 (6.1%)、その他マレーシア、韓国、台湾などのアジア諸国 (15.9%) でアジアの総計は86%に達している。ヨーロッパは9.2%、米国は2.4%である (244)。

3.9 パリ協定 (245)：人為的な温暖化を軽減するための取り組みは1992年のリオ・環境サミットに始まった。そこでは、世界はグローバルな環境問題に対して「差異はあるが共通の責任」のもと、旧来の経済優先とは異

なった新たなパラダイムのもと取り組まなければならないことが合意された (5 参照)。しかし、格差・利害が相反する国々の間で合意を実現することは容易ではない。京都議定書 [1997年の第三回気候変動枠組条約締約国会議 (COP3) で採択、2005年2月16日に発効] では先進国の温室効果ガスの削減が合意された。しかし、米国はそれを批准せず、その後最大の温室効果ガス排出国となっていく中国には削減義務がなかった。その結果、京都議定書は、人為的な温室効果ガスの削減には限定的な有効性しか発揮し得なかった。そこで新たな合意が目指された。幾つもの会議が重ねられたにもかかわらず、合意の形成には至らなかった。しかし、ようやく2015年末のCOP21でパリ協定が作られ、国際的な合意に一応辿りついた。

パリ協定では、世界の平均気温の上昇を産業革命前より少なくとも2℃以内、なるべく1.5℃以内に収めるために、先進国のみならず各国が自主的に削減目標を定め、それを実現するための方法などを届け出ることを義務化している。しかしそれには、多くの国際的な取り決め同様に罰則規定はない。パリ協定を話し合う前に各国が届け出た自主的な削減目標から推定すると2025～2030年の世界全体のCO₂の排出量は55gtとなる。それは、2℃以内という目標達成が可能と考えられる40gtをはるかに超えている。

産業革命前の数十万年間の大気中のCO₂濃度は280ppmを超えることはなかった。しかし、産業革命後には、大気中の濃度は上昇し続け、現在では400ppmを超えている (8の図16参照)。COP21で設定した気温上昇に収めるためには、大気中のCO₂濃度は450ppmに留めなければならないというのが現在の見積もりである。人為的に排出されたCO₂の60%が植物や海洋により吸収されるとすると、大気中のCO₂濃度を450ppmに保つために、人類に許された今後のCO₂の総排出量は1,000gtである。これは、目標の年間40gtのCO₂排出でさえ、25年分に相当するに過ぎない。つまり、このことは、人類が40gtのCO₂を25年間排出し続ける間に、新技術を開発すると同時に暮らしぶりをシフトさせ、化石燃料からのCO₂排出⁵⁴をゼロにしなければならないことを意味している (8参照)。

パリ協定は、京都議定書の延長線上の国際的な取り決めである。大きく変わったことは、先進国だけでなくすべての国が「差異はあるが共通の責任」を認め“全員参

⁵⁴ 例えば、一年間に成長した木質資源を燃やしたとすると、そこから発生するCO₂はその植物がその一年間に光合成で吸収したものである。このようなCO₂の発生はカーボンニュートラルで、正味にCO₂は増加しないので削減の対象には含めない。勿論、その木質資源を家具として長期間使用すれば燃料とした場合に比べて大気中のCO₂の低減につながる。

加”を目指した点である。そこでは京都議定書で導入された京都メカニズム（排出権取引・クリーン開発メカニズムなど、5参照）が引き継がれ、自主的な国際協力や先進国による援助・協力が義務化されている。更に、2013年のCOP19の取り決めであるワルシャワ国際メカニズム（246）で提起された気候変動による損失や被害を軽減することが強調されている。またそこでは、森林保全に加えて発電所などから放出されるCO₂を回収し貯留する新たな技術開発などについても言及されている。

各国は、主権国家として自主的なCO₂排出削減の目標や国際協力などについて、5年ごとに国連の事務局に届け出ることが義務化されている。またそれらの計画は、前回のものを上回らなければならないことも決まっている。

2016年4月22日から1年間の署名期間であるが、175ヶ国が初日に署名をした。協定は、批准した締約国が一定の基準（世界のCO₂の総排出量の55%以上の排出量を占める55カ国以上の国の締結）に達した30日後に効力をもつことになっている。2016年9月3日には二大排出国の米中が批准を行った。更に、その後インド、EUが批准し発効の条件が満たされ、2016年11月4日にパリ協定は実効されることになった。日本の批准は11月8日と遅れた。パリ協定の実施について話し合うCOP22は11月7日から18日までモロッコのマラケシュで開かれ、パリ協定の実効性を上げるための行動宣言が採択された（246）。日本は批准が遅れたために、正式参加は出来ず、オブザーバーに留まった。また、11月8日に実施された選挙により次期米国大統領は人為的な温暖化に対する懐疑派のドナルド・トランプ（1946-）が選出された。

パリ協定を結ぶ際に各国が提出した削減計画を足し合わせて21世紀後半の世界の平均気温を見積もると、それでは気温上昇を産業革命前の平均気温の2℃以内に収めるという目標は達成できないと言われている。このような国際的な取り組みは罰則を作れず、お互いの合意を優先するために限界があるのはやむをえない。過去数年のCOP（気候変動枠組条約締約国会議）では合意を形成できなかったことに比べれば、パリ協定の策定はある程度評価できる。しかし、世界の市民の一人一人はその不十分さを補うことと、米国の動向にも注意しながら、自覚を高め人為的な温暖化を食い止める必要がある。

人為的な温暖化は人々の生活の結果である。その回避は、上意下達では成しえない。国際的な取り組みを改善するためには、市民一人一人が自分たちの暮らしを支えるどのようなものが温室効果ガスの排出につながってい

るのかを知り、自らの責任を見つめ、生活スタイルを変えることも重要である。気温上昇を抑えるために十分なプランは一部の人たちに任せて作ってもらうことはできず、“全員参加”が不可欠である。われわれ一人一人が宇宙船地球号の一員であるという自覚をもち、自国のエネルギー政策や削減目標に積極的に関わることが肝要である。その時には、自分たちが世界の中でどのような立場にあるのかということ、歴史的な見地からあるいは地域の違いや格差にも目を向けて、明確にしなければならない。それは再生可能エネルギーや高気密住宅の普及促進あるいは比例的炭素税の導入などを、どのように価値付けるかということでもある。これらの問題についての議論なくしては、パリ協定の不十分さを補うことはできない。具体的な方策については158頁、3.11以下で論ずる。

3.10 続いている人為的な温暖化

人為的な気候変動に対する懐疑論を声高に喧伝する人がいる。しかし、多くの観察事実は人為的な温暖化が確実に進行していることを示していることは、前報で論じた（8）。以下にその後に示された二つの事柄を挙げる。このことは休みなく人為的な温暖化・気候変動が進行していることを示している。

①2015年の世界の平均気温は、過去に測定された中では、最も高く、1961～1990年の平均より0.76±0.1℃高く、産業革命前の平均気温より約1℃高くなっている（247）。②中東で2012年まで続いた干ばつは過去900年では最も厳しいものであった（248）。また2016年の1～3月の日本の暖かさ、8月の猛暑からも、温暖化が加速していることを実感させられる。

3.11 どのようなエネルギー源を選択しどのような暮らしをするのか

前報（8）を含めて人為的な温暖化が起きていることと、現世代は次世代以降の将来世代に「持続可能な発展」が可能な恵まれた地球を引き渡す責任があることを明確にしてきた。そこで残された課題は、具体的な方策であった。パリ協定も方向性は示しているが、それだけでは不十分であることは上述した通りである。

また、既にこのシリーズでたびたび触れ、繰り返したことであるが、上述したように各国は経済発展の度合いが大きく違う。更にそれぞれの国は、独自の伝統の上に立ち、その気候・風土に制約されながら、国民の多数の価値観を反映した将来像を選択せざるを得ない。しかし一方で、人為的な温暖化を軽減するためには、1992年のリオサミットからパリ協定まで一貫して唱えられてい

るように、格差のある主権国家が「差異はあるが共通の責任」を果たすことが求められている。

各国はそのような総意に答えるべく、暮らしのスタイルあるいはエネルギー源を選択しなければならない。第一に求められることは、化石燃料の使用の削減である。

「持続可能な発展」を実現するためには上述したような多くの専門的あるいは総合的な知識に基づいた技術や政策を網羅的に動員する必要がある。それらをどのように発展させるか、あるいはどれを積極的に選択するかは、政治家・官僚・専門家のような一部の人に任せる訳にはいかない。どのような分野の研究を税金で援助するのか、あるいは各自はどのような暮らしのスタイルをとるのかも含めて専門的な知識のない素人を含めた市民が、人為的な温暖化の軽減の問題については、総がかりで取り組まなければならない。

3.11.1 化石燃料利用削減の具体策：人為的な温室効果ガスは化石燃料の燃焼で発生するCO₂だけではない。しかし、人為的な温室効果ガスの65%は、化石燃料の燃焼とセメント工業に由来し、11%が森林伐採などの土地改変に起源している。CO₂以外の温室効果ガスの削減も試みられているが(8参照)、ここでは主に化石燃料由来のCO₂の削減について考える。2013年度の世界と日本の一次エネルギーの消費量は1965年度の約3.3倍に増加している。世界全体の一次エネルギー源の構成は2012年度で原子力(4.8%)、水力・地熱・太陽光などの再生可能エネルギー(13.5%⁵⁵)、天然ガス(21.3%)、石油(31.4%)、石炭(29.0%)である(200)。

一方、日本の一次エネルギー消費の2013年度の内訳は、原子力(0.4%)、水力・地熱・太陽光などの再生可能エネルギー(7.5%⁵⁶)、天然ガス(24.2%)、石油(42.7%)、石炭(25.1%)である。また最終エネルギー消費を部門別にみると、家庭(14.4%)、運輸旅客(14.1%)、運輸貨物(9.0%)、企業・事務所など(62.5%)である。化石燃料は製品の原材料・製鉄の熱源・自動車、船舶、飛行機の燃料などにも利用されている(200)。

化石燃料利用の削減には、①新たな技術開発・革新(省エネ製品の開発・水素エネルギー等新規エネルギー源の利用・既存の「新エネ」の効率化と低価格化・化石燃料由来のCO₂の回収と貯留・電力の効率的利用(スマートグリッド⁵⁷・送電時のロスの軽減・効率の良い蓄電池の開発)、②消費者の脱化石燃料に向けた選択などを誘

導する政策、③市民の啓蒙など、多くの分野の成果を結集する必要がある。現在われわれの直面する人為的な温暖化の軽減という課題は、質的な改良を行うという今までの量的な拡大を目指すということとは異なったものである。しかし、人類には新たな困難を乗り越える力があるはずであり、新たな画期を築くことが望まれている。

そのような取り組みの幾つかを取り上げておく。

①ガソリン車から電気自動車への切り替え：その切り替えは自動車からのCO₂排出の削減につながる。CO₂排出の削減の実現には、充電に必要な電力を供給する際のCO₂放出を抑制する必要がある。そのためには、発電所における発生したCO₂の回収と貯蔵という新技術の開発が必須である(154頁3.7参照)。

②バイオマスの利用：素材としては、食料と競合するような有用資源作物(サトウキビ、トウモロコシ、菜種、ネピアグラスなど)・林業、農業、建設業などで余ったもの(製材工場残材、建設用資材の廃棄物、農産物非食用部(稲わら・麦わら・もみ殻など)、林地残材)・ごみ(家畜排せつ物、下水汚泥、食品廃棄物)などがある。バイオエネルギーの種類としては、固形(バイオチップなど)・液体(バイオエタノール・バイオディーゼル)・気体(発酵によるメタンなど)がある。バイオマスの利用については、二つの問題がある。(I)食料との競合：

例えば食用トウモロコシの価格を上昇させてしまう。そこで、非可食部(セルロース)を分解し、ブドウ糖を得、それを原料にバイオエタノールを作ることが期待されている。牛やシロアリなどは体内の微生物の働きで、われわれが利用できないセルロースを栄養源にしている。現在でもセルロースから生物的・化学的にグルコースを得ることができるが、更にグルコースを多量に安価に得る方法が、微生物の分解様式を明らかにすることとともに模索されている(249-252)。(II)バイオマスは再生可能エネルギーか？現在の農業は多くのエネルギー(化石燃料)を農業機械や肥料に投入することで成り立っている。エネルギー多消費により育った作物から得られたバイオエタノールを燃料とした場合には、CO₂排出の削減につながらない場合がある(253)。植物を育て、収穫し、運送するために化石燃料がどれだけ消費され、最終的に如何に有効にバイオ燃料として使われたかを評価することは必ずしも容易ではない。しかし、植物種により数倍以上の差があることが示唆されている。例えばス

⁵⁵ 新エネは1.1%である。

⁵⁶ 新エネは約1.7%である(200, 224)。

⁵⁷ スマートメーター等の通信・制御機能を活用して各需要者の状態を把握し効率のよい送電網を選択することで、電力利用の効率化を図るシステム。

イスのジャガイモを材料とした場合には、CO₂という観点からは総計としての環境への影響はガソリンの5倍であると見積もられている(254)。そこで、育てる時に化石燃料を消費していない雑草などを利用することも始まっている(255)。

バイオマスを経済的に効率よく利用するためには課題がある。しかし、バイオマスを有効に循環させることは可能であり、問題点を解決する技術開発は可能なはずである(256)。

3.11.2 化石燃料削減に向けた誘導政策：化石燃料の利用の削減を誘導するために、多くの国では「アメ」と「ムチ」の二つ政策が採用されている。例えば、日本では2009年に、省エネ製品の普及とリーマン・ショックに対する景気対策として家電エコポイントが実施された。それは、省エネの冷蔵庫や冷暖房機などの販売促進の底上げを狙ったものであった。また車については、環境負荷の少ない車(窒素酸化物や粒子状物質の排出量を抑制したもの)・燃費の良い車に対するグリーン化税制が2002年から、電気自動車やプラグインハイブリッド車などの「次世代自動車」や低環境負荷の車・燃費の良い車に対する「エコカー減税」が2009年から導入されている。住宅に関しても、省エネ対策の充実した、あるいは耐震性の優れた住宅の建設を促進するために、「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」(2009年)や「都市の低炭素化の促進に関する法律」(2012年)が施行されている。

マイカーの利用規制としては、例えばロンドンでは2003年から渋滞緩和と公共交通機関の利用促進のために、中心部の特定の区域への乗り入れ(夜間・休日は除く)に対して課金システムが導入されており、北京ではナンバープレートの末尾(偶数か奇数)により乗り入れ制限が行われている。また公共交通機関の利用を促進するために、郊外に駐車場を作る(パーク&ライド)政策がドイツなどで採用されている。

このように、各国は、アメとムチの政策を導入することによって市民の行動を誘導しようとしている。しかし、ロンドンや北京の車の規制の取り組みは必ずしも期待通りの成果を上げていない。輸送部門における温室効果ガスの排出に対する更なる工夫、あるいは抜本的な改善が必要である(257)。

3.11.2.1 ドイツの場合：ドイツではエネルギーの4割が建物の冷暖房に使われている。そこで住宅や公共建築を省エネ仕様にするのが、官民の協力のもと積極的に行われている。官は、減税や補助金のようなアメ的な政策で省エネの実現を下支えしている。一方市民には、高気密住宅が建築費は割高であっても長期的には冷暖房

費は安くなるということが広く認識されており、住宅を選択する際の判断基準に化石燃料の消費削減が重要な要素となっている。パッシブハウスと呼ばれる高気密住宅は、窓は3重ガラスで、壁・天井・床には断熱材を入れ、南には大きな窓があり、北側は壁で出来ている。更に人体の発する熱も利用する熱交換機付きの空調を24時間使うので、アクティブな暖房は殆ど必要ないというものである。

ハノーファーでパッシブハウスを求める人が増えたのは2006年頃で、2015年には新築の家の3割に達していると言われている。ハノーファーの市議会では1998年頃から省エネのプログラムの実施に取り組み、省エネの電気製品の購入に補助金を出すなどの政策を取り入れた。また、市民も化石燃料の使用削減に積極的に取り組んでいた。更に、ハノーファーでは2000年の万国博を契機にエコタウン構想を充実させていった。例えばどの家からも600m以内に停留所があるように路面電車を充実させ、人々が公共交通機関を利用しやすい環境を整えた。ハノーファーでパッシブハウスが受け入れられたのは、そのような活動の下地があったからである。

また、南ドイツのシェーナウ電力会社は、1986年のチェルノブイリの事故を受けてシェーナウ・イム・シュヴァルツヴァルトの市民が始めた組合制の電力会社である。事故当時ドイツ政府は「状況はコントロール下にある。私たちに危険はない」と繰り返していた。その説明に納得しない人々が発電について学び始めた。その結果、彼らは原発の問題の他に自分たちが電気を無駄遣いしていることにも気づいた。そのような市民が集まり、個人の財産をリスクにさらしながらも1994年に「省エネと再生可能エネルギー使用の推進」を目指した有限会社のシェーナウ電力会社を設立した。ドイツではこのような市民を巻き込んだエネルギー対策が20年近くに亘って行われている(258, 259)。

3.11.2.2 固定価格買取制度：上述したように各国の電源構成は大きく異なっており(155頁、表1参照)、現在では、水力を含んだ再生可能エネルギーを積極的に利用している国とそうでない国が混在している。「新エネ」を積極的に取り入れている国は、その装置を開発し市場でのシェアを増やすことにより、輸出による利益を目指すなどの経済的なインセンティブと環境問題の解決を両睨みしている。固定価格買取制度は「新エネ」による発電を増やし、電力源としての化石燃料の消費を削減するための、「新エネ」優遇政策である。具体的には、電力会社が「新エネ」による電力供給を長期間(例えば20年間)固定した価格で買い取ることを政府が義務づけるものである。これには例えば、個人が太陽光パネル

を備え発電し自家用で使った電力の余剰分を電力会社に売ることなども含まれる。「新エネ」による発電の買い取りの費用の一部は、電気料金に上乗せされ利用者負担とされる。このような制度の原型は1978年に米国で始まった。現在のような制度はドイツ(1990年)、スイス(1991年)、イタリア(1992年)、デンマーク(1993年)、スペイン(1994年)で導入された。その後、多くの国でも同様の制度が実施されるようになった。日本でも2009年に取り入れられた。2014年現在100以上の国(州を含む)で実施されている(230)。

「新エネ」による発電には財政援助が必要であるが、上述したようにそのコストは著しく安くなっている。そこで、当初設定した価格や制度の見直しが頻繁に行われている。例えば、この制度の先進国であるドイツでは、2000、2004、2009、2012年に法改正が行われている。この制度によりドイツでは水力を含んだ再生可能エネルギーによる2012年の発電量は、1990年の約8倍となり、全発電量の25.3%に達している(260)。このことは、既に述べたように政策と市民の選択の両方が有効に働いた結果であると考えられる。

しかし、経済の低迷による固定価格買取制度の見直しが行われる場合もある。例えばスペインの2012年以降の見直しはそれにあたる。固定価格買取制度を維持するためには、更なる技術開発による「新エネ」のコストダウンが必要である。スペインも容易ではないが、ドイツ同様、太陽光・風力発電の導入には積極的な姿勢を保持しようとしている。スペインでは水力を含んだ再生可能エネルギーの累積発電容量は、2000年の330万kWから2012年では3,200万kWと約10倍となり、その年の「新エネ」の全発電量に占める割合は22.6%であった。

一方、米国では法制度の改正により新エネの導入は大きな影響を受けている。例えば、新規の年間風力発電設置容量は、1997年の20万kW以下から2012年の1,200万kWと全体としてはうなぎのぼりに上昇した。しかし、2000、2002、2004年の新規増設は、制度改正により、それぞれ前年に対して96%、76%、76%も低下した。また2013年では第三四半期までに前年の99%減となっている(260)。このことは、新たに作られる設備は、その時の誘導政策に大きく左右されることを示している。

固定価格買取制度は、導入以来の日が浅いこと、装置の効率化・低価格が進むこと、経済状況の影響を受けやすいことが影響し、制度の見直しがたびたび行われている。日本では、2009年11月1日「太陽光発電の余剰電力買取制度」が実施され、その後、2012年7月1日に「再生可能エネルギー特別措置法」が施行され本格的な運用が始まった。しかし、日本でも買取価格の見直しが組上

に上っている。

「新エネ」の導入を成功させるためには、先ず設備投資を行いその費用を長期的に回収しなければならない。市民は実情を知り、長期的展望が必要な「新エネ」の導入を電気代の支払いを通して支持するのかどうかを選択する必要がある。

日本では、2016年4月から電力の自由化が始まった。しかし、残念ながら各電力会社の電源構成は開示されず、市民は選択の判断基準を得ることができない。どのようなエネルギー源に頼りながら暮らしていくかの選択は市民一人一人に投げかけられている課題である。われわれは、実情の把握と未来の展望のなかから選択する必要がある。

以下に、日本・ドイツ・スペイン・イギリスの固定価格買取制度の実情などを列記しておきたい。それぞれの項目については、上記の国を順番に示した。国全体の負担額：6,500億円(2014年度見込み)、2兆6,850億円(2014年)、9,400億円(2013年)、4,600億円(2013年度上限)。固定価格買取制度を支えるために電気料金に上乗せされる賦課金の単価(円/kWh)：0.75(2014年度)、8.7(2014年)、3.5(2013年)、2.3(2014年)。標準家庭の電気料金月額(賦課金を含む)：7,000～8,000円、11,640円、7,150円、8,300円。標準家庭当たりの月額賦課金：225円、2,550円、1,020円、630円(260)。ちなみに各国の電源構成に占める水力を含んだ再生可能エネルギーの2012年の割合は、それぞれ、12%、22.9%、29.6%、11.5%である(155頁、表1)。この結果は、日本の買取制度が、ドイツ・スペイン・イギリスと比べると見劣りすることを明確に示している。

3.11.2.3 炭素税：前報(8)でも論じたように、炭素税は、温室効果ガスは汚染物質であり、それは汚染者負担原則によって軽減されるべきであるという考え方に基づいた「ムチ」的な対策である。1990年1月にフィンランドで温室効果ガスの排出抑制のために世界で初めて炭素税が導入された。その後、炭素税はスウェーデン(91年)、ノルウェー(91年)、デンマーク(91年)、オランダ(92年)に広がっていった(5参照)。炭素税の導入は、現在およそ40カ国と約20都市で行われているが、それは固定価格買取制度の導入と比べると少ない(261、262)。日本の炭素税は2016年4月に引き上げられ、化石燃料を輸入する事業者にはCO₂1トンあたり289円が課税されるようになった。2016年1月現在で、スウェーデン(16,704円)、フィンランド(7,834円)、デンマーク(3,103円)、フランス(2,972円)、アイルランド(2,702円)、ポルトガル(901円)がCO₂1トン当たり括弧内の金額を課税している(263)。

固定価格買取のための賦課金や炭素税の額の国際的な比較を行うと、単位当たりの日本の額は低く日本の取り組みは不十分であることがはっきりする。また、日本は化石燃料やウランを輸入に頼らざるをえないことを併せて考えると、われわれは再生可能エネルギーの利用を如何に積極的に増やしていくかを自分の問題として考える必要があることは明らかである。

また、国際的な問題としては、前回 (8) 論じたが、化石燃料の使用に対する炭素税は、各国間の格差を是正するために、国民一人当たりの GDP に比例した比例的炭素税 (264) を導入し、一部の資金を国際基金として開発途上国の援助に回すことも検討課題である。それは、人為的な温暖化の軽減は、地球の規模の問題だからである。

3.12 原子力発電をどう考えるか

今後のエネルギー源について考える場合には、原子力発電をどう位置づけるかは避けて通れない課題である。先ず、原子力の平和利用がどのように進んだかを振り返る。そして福島を事故を経験した現在、われわれはどのような問題意識をもって原発についてどう考えたらよいのかを考察したい。

3.12.1 原子力の平和利用を選択した土壌：日本は唯一の被爆国であるにもかかわらず、原子力の平和利用の道を選んだ。福島原発事故の原因は、「原子力村」が村の利益を優先し当然考えるべき地震の影響の評価が甘かったことに尽きる。しかし、原子力発電は国民のコンセンサスの上に成り立ったことも否定できない。一般人は、専門的な知識をもつことが出来ないし、専門家の発言を批判的に捉えることも難しい。しかし、日本の、そして世界の行く末を選択するのはそのような人々である。そのためには、原子力がどのように受け入れられ、何がどのように見過ごされたかを検証しなければならない。ここで一つ注意しなければならない重要なことがある。それは「原子力村」を構成する一部には、日本の核武装潜在的可能性を保持しておこうという勢力が含まれることである。原発の技術開発と核武装の研究は密接不可分の関係にある。岸信介 (1896-1987) は 1983 年に回顧録の中で「日本は国家、国民の意志として原子力を兵器として利用しないことを決めているので、平和利用一本槍であるが、平和利用にせよその技術が進歩するにつれて、兵器としての可能性は自動的に高まってくる。日本は核兵器をもたないが、潜在的な可能性を高めることによって、軍縮や核実験禁止問題などについて、国際における発言力を高めることができる」と述べている (265)。また防衛大臣を務めた石破茂 (1957-) は「核武装の研究をゼロから始めると 5～10 年かかってしまう

が、原発の技術があれば数ヶ月から一年程度で核兵器を持ちうる」「私は日本の原発が世界に果たすべき役割からも、核の潜在的抑止力を持ち続けるためにも、原発をとめるべきとは思いません」と 2011 年 9 月に語っている (266)。

日本人は被爆体験をもつにも拘らず、原子力の平和利用に大きく舵を切った。そのような選択の土壌は、戦前から存在していた科学が豊かな社会を実現してくれるという期待と信頼に根ざしていたと考えられる。中尾麻伊香 (1982-) は戦前の日本のメディアに発表された言説から、原子力に対する国民の期待を詳らかにした (267)。

以下に主に中尾の研究を参考に、放射能科学と原子力の平和利用の足取りを辿ってみたい。

3.12.1.1 放射能研究：原子力は原子内の原子核の変化に伴って起こるエネルギー変化を利用するものである。通常の化学反応は原子間の電子のやり取りなどによるもので、原子核には変化は生じない。

原子内の原子核に変化が起こることは放射線の発見により初めて明らかとなった。それには、① 1895 年のレントゲンによる X 線、② 1896 年のアンリ・ベクレル (1852-1908) によるウランからの放射線、③ 1898 年のピエール・キュリー (1859-1906) とマリー・キュリー (1867-1934) による放射性物質であるポロニウムとラジウムの発見が含まれる。1902～03 年にかけて、アーネスト・ラザホード (1871-1937) とフレデリック・ソディ (1877-1956) は、元素が放射線を放出すると核に変化が起こり別の元素に変わるという説を提唱した。このことは、錬金術が可能であるという夢を人類に与えた。さらに、原子核の変化は化学反応とは桁違いに大きなエネルギーを生み出すことが出来、人類は無尽蔵の新たなエネルギー源を得ることができるという希望を生み出した。

日本にも X 線の発見のニュースは 1896 年 2 月 20 日頃には到着していたようである。1896 年 3 月の讀賣新聞にはレントゲン写真で人間の頭の中で考えていることが写ることを示したイラストが掲載されるなど大きな衝撃をもって紹介された。またラジウムがガン治療に有効であることも 1903 年には「東京朝日新聞」で紹介された。その後、1913 年には陸軍軍医学校・東大・三井慈善病院が高額のラジウムを購入した。その動きは、1914 年には京大をはじめ多くの大学や病院に広がっていった。1910 年には日本の温泉にもラジウムが含まれていることが分かり、明治末から大正にかけては全国でラジウム温泉ブームが起きた。特に飯坂温泉はラジウム温泉として有名となり、ラジウム餅やラジウム煎餅が土産物として売られた。その頃にはラジウム石鹸などが健康グッズとして販売された。また放射能科学の進展を受

け、ハーバート・ウェルズ (1866-1946) は1914年に核分裂連鎖反応を予言したSF小説の『解放された世界』を発表した。そこには、科学によりもたらされるユートピア社会が描かれていた。

日本でも、科学研究の振興と原子核の研究を目指した理化学研究所 (理研) が1917年に設立された。その研究を主導したのは長岡半太郎 (1865-1950) であった。彼は1903年には土星型の原子模型を提出していた。それは、原子の中心に正電荷をもつ核があり、その周囲を負電荷の電子が数多く土星の輪のように回転運動するモデルであった。ニールス・ボーア (1885-1962) が水素模型⁵⁸を提出したのは1913年であった。

長岡は理研で原子番号80の水銀溶液に放電を行うとどのような変化が起こるかを調べた (268, 269)。1925年には、不純物を除いた水銀を含む溶液に放電を行ったところ微量の金 (原子番号79) が作られたことを報告した (270)。それは夢の“錬金術”としてマスコミで大きく取り上げられた。長岡は水銀還元実験を10年間続けた。この実験は、現在の科学的知見からすれば誤りである。長岡は生涯その実験が誤りであったことは認めなかったと言われている。

長岡の実験のインパクトは強く、原子物理学の研究が理研や阪大で精力的に続けられた。その研究を牽引したのは、仁科芳雄 (1890-1951) であった。彼はボーアの研究室から帰国した1928年から理研に所属し、長岡、嵯峨根⁵⁹ 遼吉 (長岡の五男、1905-1969) や朝永振一郎 (1906-1979) らとともに原子物理学の研究を本格化させた。ここでは荷電粒子を高速で加速し、核反応を調べることができるサイクロトロン⁶⁰の建設が目指された。科学者は、サイクロトロンにより人工的にラジウムなどの希少価値の高い物質を生み出すことができるという夢を熱く語った。それには、長岡の水銀還元実験が大きな後押しとなった。1937年4月には理研に日本初の小型のサイクロトロンが、1938年には大阪大学に、1939年2月には理研に大型サイクロトロンが完成した。これら3基のサイクロトロンと建設中であった京大の1基の合計4基は戦後占領軍によって破壊撤去された。このように戦前の日本には原子物理学などに基づいた科学ユートピアを夢見る気風が確かに存在していた。

3.12.1.2 科学ユートピア：日本でもウェルズのような科学ユートピアに関連したSF小説や漫画が出版されていた。例えば、小熊秀雄 (旭太郎、1901-1940) 作、大城のぼる (1905-1998) 画の『火星探検』 (復刻版、2003、透土社) が1940年に、また海野十三 (1897-1949) の『火星兵団』 (復刻版、2013、沖積舎) が1941年に出版された。海野は1937年には「全人類は科学の恩恵に浴しつつも、同時にまた科学恐怖の夢に脅かされる」と著した。また横井福次郎 (1912-1948) は1947年から「少年クラブ」に連載した『ふしぎな国のプッチャー』 (1975、復刻版、桃源社) を、手塚治虫 (1928-1989) は1951年に雑誌「少年」に『アトム大使』を発表した。それは1952年に『鉄腕アトム』となり、1963年からはテレビアニメとして放映された。ここでは“明るい原子力の利用”が謳われていた (ここまで267を参照した)。このような土壌が、被爆国日本が原子力の平和利用に踏み出すことに影響を与えたと考えられる。

3.12.1.3 原子力政策と原子力発電への傾斜：アイゼンハワーの「原子力の平和利用」の演説は、1953年12月8日に行われた。当時の日本の動きはどのようなものであったのだろうか？

茅と伏見康治 (1909-2008) は共に物理学者であった。彼らは1952年に、日本学術会議 (1949年設立) が政府に原子力委員会設置を申し入れるよう所属部に提案した。その提案は、部会では大差で否決されたが、総会ではその案と実質的に同じ別の案が提出され可決された。

日本の原子物理学の研究の一翼を担っていた嵯峨根は、戦前に米国のマンハッタン計画に参加したアーネスト・ローレンス (1901-1958) の研究室に留学していた。彼は1938年に帰国後、理研のサイクロトロンの研究に加わった。米国で原爆に携わった研究者はその時の縁で、長崎の原爆投下の際に彼に宛てた手紙を原爆の効果を測定する観測機器に忍ばせた。そこには、米国では原爆の量産体制が出来上がったことと、「あなたがすぐれた原子核物理学者としての社会的な影響力をもって、日本国の参謀たちに、これ以上戦争を続けるならば、日本国民が決定的な損害を受ける、というおそれるべき結果が起こることを知らせて欲しいのです」というメッセージが書かれていた (271)⁶⁰。嵯峨根は1949年には以前留学して

⁵⁸ 原子核の周りのとびとびの軌道に電子が存在し、電子が別のエネルギーの低い軌道に移る時にそのエネルギーの差が決まった波長の光として発光することを示したモデルである。それは水素の不連続の発光スペクトルをうまく説明できるものであった。不確定性理論が出るまではこのモデルで原子の構造が理解されていた。

⁵⁹ 嵯峨根家の養子となった。

⁶⁰ 嵯峨根に手紙が届いたのは9月末であった。また差出し人は匿名の3人であった。後に彼らはかつての同僚であったことが判明した。その一人は、ルイス・アルパレス (1911-1988) であった (271)。彼はノーベル物理学賞受賞者で、息子のウォルター (1940-) と共に、恐竜の絶滅の原因が隕石の落下によることを主張した。

いたローレンス研究所に戻っていた。彼は1953年に渡米した中曽根康弘(1918-)に原子力の平和利用を力説したと言われている。

日本では、中曽根、正力松太郎(読売新聞社社長、政治家、原子力委員会初代委員長、1885-1969)、松前(社会党)らが、アイゼンハワーの演説にも刺激され原子力の平和利用の政策化を進めた。1954年3月4日には2億3,500万円の原子力研究開発予算を含む予算案が衆議院で可決され、原子力の平和利用の道が開かれた。しかし一方で、理論物理学者の朝永は、国会で「日本などは地震があるので、地震があるときに原子炉を出して逃げ出せばいいが、七輪の火でも消して逃げないと大変なことになるのでありますが、原子炉をうっかりそのままにして逃げることもできない。そういう日本に特殊な問題もございます」と発言し、地震国日本の特殊事情に言及していた(272)。

そのような見解も述べられたが、1955年には自民党と社会党が共同提案した「原子力基本法」が成立した。そこには、茅や伏見が原子力研究の推進を平和利用に限るために必要であると主張していた「自主、民主、公開」の三原則が盛り込まれた。1956年に設置された原子力委員会は、その年に「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」を公表した。石炭の傾斜生産に尽力した経済学者の有澤は委員⁶¹となった。社会党は五人の内一人は社会党が推薦できるということを政府から示されており、有澤は原子力の専門家ということではなく、平和利用の三原則を守る番人の役割を社会党から依頼された⁶²(273)。

1957年8月27日には茨城県東海村の日本原子力研究所(略称原研、現在の日本原子力開発機構)の実験施設で日本初の核分裂反応が起こされた。1963年10月26日には東海村の原研で初めて原子力発電が成功した。

その後は、原子力発電に反対する人々もいたが、日本の発電に占める原子力の割合は1965年度(0.1%)、1970年度(1.6%)、1980年度(16.9%)、1985年度(27.2%)、1995年度(34.3%)、2010年度(29.3%)と増え続けた。福島原発の事故以前は約30%であったが2012年度は1.7%であった(200, 274)。原子力発電への依存を増やしていった理由の一つは、オイルショックなどを受けて

エネルギーの自給率を高めることが必要と考えられたことである。現実には原子力発電に必要なウランは全量輸入されている。しかし、発電用のウランは十分な備蓄があり、輸入が途絶えても直ちに発電が停止することはなく、対策を講じる時間的猶予があるということで、準国産エネルギーと位置付けられている。確かに、ウランは備蓄の少ない化石燃料とは違う面があるが、原子力を準国産エネルギーであるとするのは言葉のトリックである。

創立当初からの原子力委員会委員であった有澤は、1965～72年には委員長代理を務めた。彼は1974年の新春放談で「いろいろな新しいエネルギー源が考えられます。太陽熱の利用とか地熱発電とか。こういう新しいエネルギー源はこれから開発しなければなりません。しかしこれを実際に実用化するには、まだ10年か、15年かかるでしょう。そう考えますと、いま盛んに開発が進んでいる原子力ですね。これは日本でも相当に技術が進んでいますし、現にもう200万kW位の発電が原子力によって行われていますから、原子力をもっと開発する、ということが目前に迫っている問題としては、一番早い道じゃないか」と文化放送アナウンサーの落合恵子を相手に語った(275)。有澤は原子力委員会を辞めると、1973年には日本原子力産業会議の会長に就任し、原子力の平和利用の普及に努めた。彼は、原子力は「天恵」であると考えていた(273)。彼は1974年に『原子力発電』(日本経済新聞社)の監修を行い、そのはしがきを「原子力平和利用について、国民の期待と信頼が、定着するようになることを心から願ってやまない」と結んだ。その本は座談会や専門家の分担執筆で成り立っている。そのなかで戦前に理研の仁科研究室で原子爆弾の研究に加わっていた原子物理学者の田島英三(1913-1998)は、米国の研究者の見積もりである「炉心が溶けて放射能が外にもれ、死者100人以上の重大事故が起こる確率は、原子力発電所一基についていえば、運転年数100万年に一回以下の割合である」を紹介した。その上で、このような低い確率で、現実に重大事故が起きていない現実を踏まえれば、いたずらに不安を煽ることは問題であるという趣旨の発言を行っている。しかし、その本が出版された後に、米国のスリーマイル島(1979年)・ソ連のチェルノブイリ(1986年)・日本の福島(2011年)

⁶¹ 初代委員長は、正力松太郎、委員は石川、湯川秀樹(1907-1981)、藤岡由夫(1903-1976)であった。湯川は基礎研究を省略して原発建設を急ぐことには反対で、1年3ヶ月後に委員を辞任した。

⁶² 社会党は、当初原子力の平和利用を積極的に推し進めた。しかし、1978年11月2日の東京電力福島第一原子力発電所3号機事故を始めとしたトラブルが80年代にも起こり、社会党内では次第に原発反対の声が高まった。そのような社会党の方針転換に対して、有澤は梯子を外されたと不満を述べていた(273)。社会党では1986年のチェルノブイリ事故を受け91年の臨時党大会で「新しい原発建設を認めず『原発なき日本』を目指す」との決議が採択された。有澤は1988年に他界した。社会党は村山連立内閣で政権を握った1994年には原発容認に政策転換した。

で甚大な原子力発電所事故が起きた。事故の確率の推計は誤りであったことが明らかとなった。田島は、チェルノブイリの事故直後に「訪ソ原子力安全調査団」の団長として現地を訪れた。彼は、原子力の安全利用という長年の立場から調査を行い、あくまで原子力平和利用を推進しようとした(276)。チェルノブイリの事故から30年経った2016年現在、チェルノブイリの原発を閉じ込めるコンクリートの石棺は老朽化が進み、100年もつ更なる覆いが作られようとしている。しかし、炉心が融解、爆発し飛散した放射性物質の現状は把握されず、廃炉・放射性物質の除去の見通しは立っておらず、無人となった村に人が住めるようになるのはいつのことか分からない。これらのことは、人が必ずしも原子力の平和利用を完全な制御下においているわけではないことを明らかにしている。

3.12.2 福島原発事故後のエネルギー政策：日本では、福島原発事故後に経済産業省総合資源エネルギー調査会基本問題委員会が組織された。その会議の目的は、原発を含めた日本のエネルギー供給の将来計画を話し合うことであった。第一回会合は2011年10月3日に開かれ、2012年11月14日まで33回の会議が重ねられた。委員には、原発の廃止を支持する人と原発の推進を是とする人が含まれていた。2012年6月5日の第26回の会では、話し合いを踏まえて2020年の電源構成について6つの案を併記した将来計画が示された。原子力発電の占める割合は、0, 14, 21, 23, 26, 31%であった(277)。この会議では、それらの案を絞り込むこと、あるいは脱原発に向けた社会像や政策の方向性は検討されなかった(197)。

2012年12月26日に野田内閣は幕を閉じ、同日に安倍内閣が誕生した。安倍内閣は、基本問題委員会を廃止し、委員を選び直し、経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会を組織した。第一回会合は2013年7月24日に開催された。橘川武郎(1951-)は前身の基本問題委員会から継続して委員を務めている。彼は、基本問題委員会では2030年のエネルギーミックスについて、「再エネ⁶³30%、コージェネ⁶⁴15%、火力40%、原子力15%」との個人的見通しを示していた。彼は、2015年4月3日に公開された工藤泰志(1958-)の企画した討論会で、基本政策分科会には原発ゼロを主張する委員は再任されず、中間的な割合である15%を主張し

ていた私が、一番少ない割合を主張することになってしまった、それは委員の構成に問題があることを示しているという主旨の発言を行った(278)。2013年12月6日に示された基本計画の原案については1ヶ月間パブリックコメント(パブコメ)が求められた。朝日新聞記者の小森敦司(1964-)はそのパブコメの情報開示を求め18,711件の内容を精査した。「脱原発」の意見には同じ文面のファックスが数十件あるなど何度も意見を送った人がいたようであった。しかし、意見の割合は、廃炉や再稼働反対を求める「脱原発」は94.4%、再稼働を求めるなどした「原発維持・推進」は1.1%、賛否の判断が難しいなどの「その他」は4.5%であった。多くの人が「脱原発」の意見を示したが、経産省はパブコメについては「数ではなく内容に注目して整理した」と公表した(197)。最終的に、原発容認派だけからなる委員会の討論を踏まえた「長期エネルギー需給見通し」が2015年7月16日に決定された。それによると、2013年から2030年までの経済は年率1.7%で成長⁶⁵するが、2030年度のエネルギー需要は省エネなどにより2013年度の87%に減少すると予測されていた。また2030年度の消費エネルギーの28%程度が電力で、残りは、熱、ガソリン、都市ガスなどであると見込んだ。一次エネルギー供給の内訳は、おおよそ、再エネ13~14%、原子力10~11%、天然ガス18%、石炭25%、天然ガス3%、石油30%であると見積もられた。電源構成としては、おおよそ、地熱1.0~1.1%、バイオマス3.7~4.6%、風力1.7%、太陽光7.0%、水力8.8~9.2%、原子力20~22%、天然ガス27%、石炭26%、石油3%と見通した⁶⁶(232)。原子力を約20%としたのは有識者の討論を踏まえたものとされている。しかし、上述したように原発をゼロにすることが可能であると主張する人々は安倍政権の下では委員に再選されなかった。

この委員会の討論の様子はインターネット(280)で動画配信されており、誰でも見ることができる。各回の委員会は2時間ほどで、事務局からの説明や応答が半分程度を占めている。各委員は時に欠席・早退・遅刻をするが、出席した時には、ほぼ一回だけ数分意見を具申するだけで、賛否両論が激しくぶつかるということはない。原子力発電をどの程度利用するかの世論は、福島事故後は、「脱原発志向」と「原発再稼働」の間で分裂して

⁶³ 水力を含んだ再生可能エネルギー。

⁶⁴ 排熱も併せて利用する熱併給発電。

⁶⁵ 17年間1.7%で成長すると、1.33倍となる。

⁶⁶ ちなみに民主党の鳩山内閣時代の2010年に経済産業省は将来の電源構成として2020年には原子力及び再生可能エネルギー由来のゼロ・エミッション電源を50%以上、更に2030年には約70%とする計画を立てた。ゼロ・エミッション電源としては原子力に重点を置いていた(279)。

いる。しかし、経済産業省は有識者会議のお墨付きを得たということで、原子力発電を20～22%取り入れる決定をした。

政策に世論を如何に反映させるかは、必ずしも容易なことではないが、①パブコメや世論調査では、「脱原発」を支持する人は多数存在している⁶⁷。②政府の決定を裏打ちする委員会は、上述したような構成の委員による意見の奏上であり、異なる立場の人々が様々な可能性も含めて熟議することから生まれたものではない⁶⁸。③原発受け入れを巡る公聴会では、電力会社の関係者が一般人を装いそれを是認する意見を述べていたことも周知の事実である。

つまり、今回の政府の「原発再稼働・電源の20～22%を原子力で供給する」という方針は決して国民的なコンセンサスを得たものではないことは明らかである。今後のエネルギー問題は、市民一人一人が主体的に取り組むことがなければ解決できない。マスタープランが国民のコンセンサスを得たものでなければ、市民の主体的な取り組みは疎外され問題解決は歪んだものにならざるを得ない。

3.12.3 原発をどう考えるのか

3.12.3.1 原発の安全性：福島第一原発は、常磐の石炭業の衰退を一つの要因として1967年に着工され、1971年に営業運転を開始した。しかし、2011年福島第一原発は高さ14mを超える「想定外」の大津波に見舞われ炉心融解の重大事故を引き起こしてしまった。なぜこのようなことが起こってしまったのだろうか？ 政府が組織した事故調査・検証委員会の2011年12月26日の中間報告(281)と、2012年7月23日の最終報告書(282)の一部を抜粋・要約しながら考えてみたい。

福島第一原発に対する想定された津波の高さは、建設当時は3.1mであった。しかし、2002年には土木学会の津波評価を取り入れ、津波の予想最大波高は5.4～5.7mとされ、東電はそれなりの対策を立てた。ところが、2008年5～10月にかけて明治三陸地震⁶⁹クラスの地震が福島県沖で発生した場合、あるいは貞観津波⁷⁰と同じ様な津波が福島を襲った場合には、福島第一原発の敷地内でそれぞれ、9.3～15.7m、8.6～9.2mの波高になる

という試算が東電の会議に報告された。会議では、そのような津波に対する対策を行うとすると、数百億円規模の費用と約4年の時間が必要になるという見込みも示された。しかし東電の幹部は、それらの津波の波高の試算は十分に根拠のあるものではないと結論し、具体的な津波対策に着手することはなかった。「もしも、数百億円対策をたて、原発事故が起らなかった」とすれば、2014年3月に見積もられている原発の被害総額11兆円(283)は不要であったと思われる。

東電はその後も、2009年9月、2010年5月、2011年3月7日(東日本大震災発生の日)の3回にわたって、保安院の求めに応じて上述の津波の試算結果を報告した。しかし、保安院も東電も津波発生に対し切迫感を抱くことはなく、適切な対策は取られなかった。

地震により原発に起こる甚大な被害に対する予測が不十分であることは1997年にもすでに指摘されていた(284, 285参照)。

事故が起きると広範囲の被害をもたらすおそれのある原子力発電所のようなシステムの設計・設置・運用に当たっては、地域の避難計画を含めて、安全性を確実にするために、事業者や規制関係機関は「被害者の視点」からリスク要因の点検・洗い出しを行う必要がある。しかし、実際にはそのような視点に立った運営は行われなかった。つまり「見たくないものは見えない。見たいものが見える。」のであり、都合のよいものだけが「想定」され、「想定」された全てが共有されたのではなかった。「見たいものを見る」というのは、ピルトダウン人の捏造、日本の旧石器の捏造(143頁、2.12参照)などに現れているように、残念ながら人が陥りやすい性である。しかし、その捏造を暴いたのも人であり、われわれは過去に学び、見過ごしを減らすことができるはずである。

委員会は、10m前後の津波が福島原発を襲う可能性があるという予想がなされていたという事実を前にして、行政は何の誤りもなかった、「想定外」の大地震・大津波だったから仕方がないと言って済ますことはできるだろうかという疑問を投げかけた。委員会は、そのようなことでは、安全な社会づくりの教訓は何も得られないだろうと結論した。

⁶⁷ 2016年2月29日の日本経済新聞で紹介された世論調査では、原子力発電所の「再稼働を進めるべき」という人は回答者の26%、「再稼働を進めるべきでない」という人は60%であった。世論調査は少数のサンプルの結果であり、その評価は難しいが、他の世論調査でも脱原発派が60～70%を占めている場合が多い。

⁶⁸ 勿論、委員と官僚の担当者の間では公開されている会議とは別に打ち合わせが行われているが、その詳細は漏れ伝わるだけで、開示されていない。

⁶⁹ 1896年に起きた現在の釜石市の東方沖200kmを震源としたマグニチュード8.2～8.5の巨大地震。

⁷⁰ 平安時代前期の貞観11年(869年)に三陸沖を震源としたマグニチュード8.3以上と推定される地震によりもたらされた津波。ちなみに2011年の東北地方太平洋沖地震のマグニチュードは9.0であった。

このことは、福島原発の事故は多くの専門家の不十分な想定範囲、あるいは一部の人から指摘されていた想定範囲を全体としては無視したことが大きな要因となって引き起こされたことを示している。日本政府は非常用電源・津波や地震対策などの見直しを行い、規制基準を強化した上で原発を再稼働する方針を決定した。安倍首相は福島の状態を「under control」と強弁している。しかし、原子炉内がどうなっているかも分からず、日毎に増える汚染水の処理、廃炉も容易に行えない現状を「under control」と理解することを筆者は受け入れることはできない。また2016年3月現在で、福島県の4万人以上の人々が県外への避難を余儀なくされていることも(286)、われわれは問題を制御できず、多くの犠牲が継続していることを示している。後述する(169頁、**結語**)ように委員会は「被害者の視点」を強調している(282)。それは、甚大で長期的な被害を繰り返してはならないとの願いからである。

日本列島の近辺では3～4枚の地殻プレートがせめぎあっており、日本は地震・火山・津波国である。その点を考えると原発の事故のリスクをなくすことは不可能であると思われる。高度な技術を開発し、リスクを軽減することは可能であるかもしれないが、ひとたび事故が起こった時の被害は甚大である。もしも、原発を安全に稼働できるとするならば、仮想的に東京に建設することを考えてみてはどうだろうか。それは、恩恵を受ける人々が多く住む自治体が、積極的に原発を誘致しリスクも背負う覚悟があるかどうかを問うてみることである。もしも、リスクは他に預け、恩恵だけを受けるというのであればそれは公正ではない。実際には原発の立地審査基準では、原子炉からある距離の範囲内は非居住区域であると決められている(287)。このことは原発では重大事故が起こりうることを想定しているが、非居住区域であれば制御できると考えていることを示している。しかし、福島の事故で非居住区域でも制御できないことが明らかとなった。

原発を過酷な条件のもとでも制御できるかどうかはしっかり考えなければいけない問題である。原子力は原子核の変化により発生する大量のエネルギーを利用するものであり、通常の化学反応とは仕組みが全く異なる。核分裂と核融合はともに、核の変化の反応である。地球の営みは太陽で起きている核融合に依存している。しかし、太陽は離れたところに存在しており、地球は温和なエネルギーとして太陽エネルギーを利用している。原発を利用することは、身近な所に小さな太陽を置くことに

似ている。筆者は小さな太陽を、さまざまな条件下(地震や人為的なミスなど)で完全にいつでも制御することは無理であると考え。また169頁で総括的に述べるように地震国である日本では原発を再稼働せず、脱原発を目指すべきであると思う。原発の再稼働に賛成の人もある。しかし、福島の事故が起きた現在、日本としてどのような選択をするかを十分に国民的な熟議をした上で決める必要があると考える。

3.12.3.2 原発の経済性：原発は安価な準国産エネルギー源であると喧伝された。しかし、福島の事故の収束や補償のために必要な費用、また今後求められる安全基準を満たすための経費・廃棄物の処理費など全てを考慮した原発による発電コストは、今後効率化・経済性の向上が予想される「新エネ」による発電コストと比較すると、割高になるという試算が行われている(288, 289)。

3.12.3.3 核廃棄物の処理：原発に利用されたウランからは放射性廃棄物が不可避免的に生ずる。先ずその量であるが、2012年の日本の原発の設備容量はおよそ4,600万kWである(154頁、3.8.2参照)。上述したように原発と原爆は原理的には同じであり、4,600万kWの発電能力のある原子炉を一日稼働すると、約130発の広島型原爆を爆破したときに生ずる死の灰・放射性廃棄物が生成されると言われている。それは一年間では5万発に相当するほど多量なものとなる。更に、その廃棄物から放射性が失われるのには、およそ10万年かかる⁷¹と見積もられている。即ち、原発を利用するためには、多量の放射性廃棄物を長期間に亘って人々あるいは多くの生態系から隔離して安全に保存する技術を確立しなければならない。ところが、日本ではその保存をどこで行うのかが決まっていない。それが「トイレなきマンション」と言われるゆえんである。

一方、福島の事故以降も原発を利用する選択をしたフィンランド(原子力は電源構成の32.7%)・スウェーデン(原子力は電源構成の38.5%)では、廃棄物の貯蔵所の建設が、それぞれオルキルオトとフォルスマルクで進められている。スウェーデンでは1972年から商業的な原子力発電が始まり、現在では約10基の原発が稼働している。放射性廃棄物の処理については、1970年代から検討されていた。1983年にはKBS-3という方法が確立した(290)。それは二重の方法で容器内に閉じ込められた放射性廃棄物を30年間一時的に保管した後に、最終保管場所に移すというものであった。最終的な保管法や保管場所の検討が30年以上に亘って行われた。その結果、岩盤の安定性(過去10億年間安定であった)・

⁷¹ 原発の核廃棄物のプルトニウム239、ネプツニウム237の半減期は、それぞれ2.4万年、214万年である。

化学的組成・地下水の動態が適しているということで、フォルスマルクの地下およそ 500m の岩盤内を最終保管場所にすることが決定された。スウェーデンでは 2029 年から最終処分施設が稼働し放射性廃棄物はそこで 10 万年以上安全に隔離されることになっている。保管法や保管場所については動画で見ることができる (291)。フィンランドは 2022 年の稼働を予定している。また、原発を推進しているフランス (2025 年)、米国 (2048 年)、イギリス (2050 年頃)、スイス (2060 年頃) も最終保管場所の稼働を目指している (200)。

放射性廃棄物は隔離された安定な場所で 10 万年間程度、保管しなければならない。原発を選択するという事は既に発生しているものと今後生じる廃棄物を安全に処理する責任を含んでいる。

10 万年という時間は、日本に人が住むようになったのは 4 万年前であることを考えると如何に長い時間であるかということが分かる。地震国日本では、長期に亘って安全な保管場所を見つけることは容易ではないと思われる。日本では、使用済みの核燃料をリサイクルさせる計画がある。青森県六ヶ所村に建設中の再処理施設で使用済みの核燃料をウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX 燃料) に加工し、それを福井県敦賀市にある高速増殖炉のもんじゅなどで発電に利用する計画である。再処理を外国に依頼した MOX 燃料が既に一部の原発で使われていた。福島事故以来 MOX 燃料は使用されていなかったが、2016 年 9 月 7 日に再稼働が開始された愛媛県の伊方原発 3 号機で、MOX 燃料が利用されている。一方、核燃料リサイクルを担うことになっている六ヶ所村の施設 (建設中)・もんじゅ (2016 年 8 月現在、14 年余り運転停止中) にも問題がある。

再処理をした燃料を使っても、そこからは再度放射性廃棄物が出てしまう。例えば、六ヶ所村の再処理施設を 40 年間稼働すると、建設費もあわせると 19 兆円かかると 2004 年に試算された (197)。核燃料リサイクルによる発電は、放射性廃棄物の安全処理の問題に加え全体にかかる費用も高額であり、決して安価な電力源とはならない (288)。フランス、ベルギー、英国では MOX 燃料加工施設が稼働しているが、核燃料のリサイクルは、必ずしも多くの国で実施されているわけではない (200)。また「もんじゅ」には、1980 年以来既に総額で 1 兆円以上の国費が使われている (292)。しかし、再稼働の目途は立たず、2016 年 9 月 21 日に政府は原子力関係閣僚会議を開き、「もんじゅ」について、年末までに廃炉を含む抜本的な見直しをすることで合意した。

以上のことを踏まえて、筆者は日本では原発ゼロを目指すべきであると考え。その主な根拠を繰り返すと、

以下の 5 点となる。①日本のような地震・火山・津波大国では原発の事故のリスクを少なく稼働することは困難である。②原発の原理である核分裂の連鎖反応を常に完全な制御下に置くことは、人為的なミスを含めて不可能である。③安全性を高めた上で稼働するためには、コストがかかり、決して安価な電力源とはならない。④原発に頼ることは「新エネ」の開発への投資が少なくなり、世界における「新エネ」の開発競争に遅れをとる恐れがある。⑤日本では 10 万年オーダーで放射性廃棄物を安全に保管できる最終処分地を見つけることが難しい。

原子力発電については、多くの識者や社会党・民主党を含む革新勢力も積極利用に与した。しかし、福島の事故以降、原発についての国論は分裂し、コンセンサスを得るに至っていない。事故後の民主党政権は、従来の原発の積極利用を改め、脱原発を志向した。しかし、現安倍政権は上述したように原発の再稼働を選択している。保守勢力の小泉純一郎 (1942-) 前総理はフィンランドのオルキルオトの放射性廃棄物の最終処分地を 2013 年 8 月に視察し、同様の施設を日本に作ることは難しいと考え、それ以来脱原発の立場を鮮明にしている。

われわれ日本人は、上述したことや以下に述べるような事実や経験を踏まえて、日本で原発を稼働し続けるのか、脱原発を目指すのかについて一般市民を含めた熟議を行い、選択しなければならない。

3.13 人為的な温暖化を軽減するための選択

上述したように各国の現在の電源構成 (155 頁、表 1) は原発への依存度を含めて大きく異なっている。また各国の「新エネ」開発への意欲や、今後の原発の利用についての考え方も、大きく違っている。日本政府は、2016 年現在、2030 年において電気の 20～22% を原子力で賄う方針を取っている。一方、ドイツのメルケル首相は、福島の事故を踏まえて 2011 年 5 月 30 日には 8 つの原発を閉鎖し、残った 9 つの原発も 2022 年までに稼働を停止する決定をした。それは議会で 80% の賛成で可決された (293)。また、イタリアでは 2011 年 6 月 12、13 日に原子力発電の再開の是非を問う国民投票が実施された。投票率は 54.8% で成立の条件である 50% を上回った。94% の人々は政府の原発再開の計画に反対した (294)。

「新エネ」を主とした再生可能エネルギー導入に関する各国の目標を見てみたい (現在の状況は、155 頁、表 1 参照)。日本の水力を含んだ再生可能エネルギーの導入目標は 2030 年度において一次エネルギーの 13～14%、電源の 22.2～23.6% である (232)。

一方、幾つかの国の 2020 年の最終消費エネルギーに占める水力を含んだ再生可能エネルギーの割合の目標

は、ドイツ (18.0%)、スペイン (22.7%)、フランス (23.0%)、イギリス (15.0%)、イタリア (17.0%) である。また電源構成に占める水力を含んだ再生可能エネルギーの割合の目標は、ドイツ (38.6%)、スペイン (40.0%)、フランス (27.0%)、イギリス (31.0%)、イタリア (26.4%) である (260)。

これらの値を比較すると、日本の再生可能エネルギーの導入目標値は、見劣りする低いものであることが明らかである。この問題を直視するためには、以下に述べるように日本では市民の意識革命が必要である。

われわれの直面する問題は、化石燃料の燃焼による人為的な温暖化の軽減と、安全で再生可能なエネルギーの確保である。パリ協定に基づいて各国は、温室効果ガスの排出削減の目標を立てている。日本は2030年度の目標を2005年度比で25.4%減とすることを2015年7月17日に発表した。更に、2016年の伊勢志摩サミットに向けて2016年5月13日に既存の国際公約である2030年度の目標を再確認するとともに、「2050年度には80%削減する」ことを閣議決定した。しかし、この決定は、原発の積極的な再稼働と一体になったものである。それは2009年の自公政権のもと環境大臣の斉藤鉄夫により報告された『温室効果ガス 2050年80%削減のためのビジョン』(295)の延長線上のものである。そこでは、エネルギー需要を60%に減らし、低炭素化を70%改善し、温室効果ガスの排出を30%に抑える ($0.6 \times 0.3 \div 0.2$) 目標が立てられた。その計画では一次エネルギーに占める原子力発電の割合は26%であった。その後、民主党政権が誕生したが、そこでつくられた2010年のエネルギー基本計画でも、2030年までには少なくとも4基以上の原発を新設し、水力等に原子力を加えたゼロ・エミッションの電源比率を約70%とすることが目指された(279)。このような経緯を考えると、現在政府が進めようとしている温室効果ガスの削減は原発の再稼働の推進とセットになったものであることが明らかである。このような方針は、福島原発事故を経験した国民の多くの選択とは乖離している。このことも含めて、どのようなエネルギーを利用しながら人為的な温暖化を軽減するのかについて国民的な熟議が望まれる。具体策としては、原発の是非を巡る国民投票 (199) も検討すべきである。

各国は、化石燃料の使用の削減を行い、人為的な温暖化の軽減を図り、恵まれた地球を次世代に引き継いでいかなければならない。そのためには、それぞれの国が、気候・風土の制約の中で将来の幸福を求めながらも責任を果たすような暮らしぶりを選択する必要がある。その選択は一部の専門家が行うのではなく、市民の全員参加で行なわれなければならない。それは市民一人一人の暮ら

し方に直結するものだからである。このことは、現在日本を含む先進諸国が教育の目標の一つにシティズン・シップの確立を取り上げていることとも密接に関連することである (296)。

特に日本について考えるならば、現在政府が行っている「新エネ」による発電の固定価格買取の量が少ないこと、炭素税の価格が低いこと、また将来のエネルギー消費における「新エネ」の導入目標が貧弱であることを、われわれ市民は自覚すべきである。現状を把握した上で、将来へのビジョンを描く必要がある。このシリーズで強調してきたことは、戦後の急速な成長は特異なことであり、それはいつまでも続くものではないということであった。例えば、年率5%の成長が100年続くと、100年後には元の約130倍となるのである。

そのようなことと上述したことを踏まえると、筆者は、①日本では原子力による発電は停止する方向で進める、②「新エネ」は、暫く固定価格買取などで割高であってもそれを利用する、③それにより、技術革新を支え安価で効率のよいエネルギー源の積極的な創出を推し進める、④安価な「新エネ」の開発が不十分な場合には、人為的な温暖化を軽減することを優先させるために、炭素税などのムチ的な政策を強化し、「新エネ」の競争力を増す、あるいは消費するエネルギーの総量を削減すべきであると考ええる。

市民は、専門的な知識の有無に拘わらず、将来世代への責任という観点から暮らしぶり、どのようなエネルギー源を選択するのか、どのような国でありたいのかというビジョンについて、またそれらを実現するためのbackcasting的手法 (170頁、脚注73参照)を含めて国民的な議論を巻き起こす必要があると強く感じる。人類には困難に立ち向かいそれを乗り越える力があるはずである。われわれは、量的な拡大ではなく恵まれた地球を引き継ぐという質を重視した立場で問題に対処すべきであると考ええる。

結語

この『知は地球を救う』シリーズは、2009年から発表してきた。それは、文系の学生の方々に「理系」的な内容を踏まえた「一般教養」の授業 (宇宙・地球・生命・人類の物語) をしなければならぬことがきっかけであった。話をしていくうちに、給食はデコボコになったアルマイトの食器でまずい脱脂粉乳を飲まされ、たれる鼻水を拭きセータの袖口がガビガビに光っているのも珍しくなかった小学校時代を過ごした団塊の世代にとっては、鮮烈な印象を与えた東京オリンピックなどに象徴さ

れる戦後の急速な成長も、実は歪みを伴った未曾有のものであったことを強く再認識した。今授業を聞いてくれている諸君は、失われた20年とも言われる低成長・安定成長の時代に育った方々である。彼らにとっての東京オリンピックは、団塊の世代にとっての第一次世界大戦と同じ程昔の出来事である。そのような諸君に特に戦後の発展の特殊性や水俣病の被害などについて、心に響くように話せたかどうかは分からない。しかし、学生諸君のコメントを読むと興味をもってくれた人がいたことも確かであった。双方向のコミュニケーションは不十分であったが、授業を繰り返す中で、分野横断的に多くのこと知る「リベラルアーツ」が狭い専門に特化することと同時に重要であることに気づかされた。長い間続けた狭い分野の実験を続けることが、細かい目盛が見にくくなるなど面倒になり、結果的に137億年前のビックバンから豊かな生活をする一方で人為的な温暖化を起こしている現在までを分野横断的に学び直すことになった。その中で、話したいことは二つに収斂していった。一つは「われわれはどこから来たのか われわれは何者か われわれはどこへ行くのか」というゴーギャンの問いかけに、宇宙・生命・人類の誕生を一つの切り口として答えること。第二は、21世紀を担う学生の方々に「恵まれた地球を引き継いで欲しい」という思いであった。

このシリーズではこれらの伝えたいことを繰り返すきたきらいもあるが、最後に全体をごく短くまとめたと思う。

人類は、広大な宇宙に存在する極めて稀な温暖な水惑星である地球に約40億年前に誕生した生命を祖先にもっている幸運な生き物の一つである。恐竜は、巨大隕石の落下により約6,600万年前に絶滅してしまった。もし、その隕石が地球をそれていたら、恐竜は滅びることもなく、哺乳類や鳥類は現在のように繁栄せず、人類は誕生していなかったはずである。現存する生物は、何とか生き延び次世代を残したものだけである。わたしたちも、たまたま幸運に恵まれて今ここに生きている。われわれは、自分が生き延びようとする利己心と、他に善かれという利他心をもった存在である。われわれは、格差が少なく公正であるとともに進取の気質に富んだ活発な社会を創り、人為的な温暖化が軽減された恵まれた地球を是非将来世代に、市民総出で引き継げるようにしたいと望んでいるはずである。

そのためには、従来のforecasting⁷²的な考え方だけで

なく、backcasting⁷³的な考え方も取り入れた新たな行動様式が求められている。

例えば、上述したように日本の戦後の出炭量は2,200万トンに減少した。戦後の経済復興のためには、それを5,000万トンに回復させることが重要であると有澤・大来らは目標を立て、その実現のために傾斜生産方式を考えた。また、1960年に池田は10年間で所得倍増を目指す政策を実行した。その他多くの計画が将来の数値目標を設定し、策定された。これらもbackcasting的手法であると考えられる。

戦後の日本の復興・成長は、多くの人が過去のいきさつにとらわれずにbackcasting的手法も取り入れ、力を結集することで成し遂げられた。それは、人々の暮らしを良くしたいという善意に基づいていた。しかし、それらの施策には負の側面について見落とした点があり、水俣病の発生・福島原発事故・化石燃料の使用による温暖化を防ぐことあるいは被害を少なくすることができなかった。

有澤も大来も、現状を分析しもてる力を最大限に使い、人々の幸福を追求した。また、彼らの判断は、多くの人の支持を受けていたと考えられる。しかし、見通すことができないこともあったと言わざるをえない。想定範囲を広げる、あるいは被害者の実態に目を向けることは容易ではないが、それを実現させるようなシステムを構築する必要があった。

福島原発の事故について、事故調査・検証委員会は地震についての科学的知見はいまだ不十分なものであり、研究成果を逐次取り入れて防災対策に生かしていかなければならないことを強調した。つまり、ある時点までの知見で決められた方針を長期間にわたって引きずり続けることなく、地震・津波の学問・研究の進展に敏感に対応し、新しい重要な知見が分かった時には、適時必要な見直しや修正を行うことの必要性が論じられた(282)。このことは、このシリーズで度々触れている「われわれの判断はコンディショナルなもので、時々の判断の根拠を明記しておき、新たな知見などが得られた場合には果敢な見直しが必要である」ということと同じことである。

水俣病の場合は、発生後適切な対策が採られなかった。更に、マスコミを含め1959年から10年間の沈黙は、被害を拡大させてしまった。2006年に、政府は「水俣病問題に係る懇談会」で、水俣病に関する失敗の検証を行った(5参照)。その報告書では、「2.5人称の視点」の重

⁷² 例えば天気予報のように、現在の状況の延長線上から将来を捉える方法。

⁷³ 例えば21世紀中頃の気温上昇を産業革命前の2℃以内とするなど将来の着地点を設定し、そこから遡って当面の行動を決めるような方法。

要性と「行政の不作为」で被害が拡大したことの二点が強調された。

今、このことを福島事故調査委員会の「被害者の視点」が抜け落ちていたという報告に重ね合わせると、われわれは「喉元を過ぎれば熱さを忘れ」やすいことと、復興・成長など単一のものに注目しすぎると「見過ごしてはいけないものをないがしろに」してしまいがちであることが改めて浮き彫りにされる。

化石燃料を大量に消費しながら行われた戦後の復興も、原子力の平和利用を積極的に取り入れて継続された経済成長も、それらは正に「重点的な傾斜政策」により成し遂げられた。その計画を立案し、政策を主導した人々は、有能で私利私欲にとらわれることなく、人々の暮らしを良くすることを第一にした人々であったことが、大来や有澤らの足取りを見るとはっきりする(208, 210, 211)。しかし、その後起こったことを振り返ると見落とされた点があったことは明らかである。水俣病の被害拡大や、福島原発事故は人災である。

人為的な温暖化の軽減にはこれらの経験を活かし、例えば2030年の世界像を構築し、backcasting的な手法をとることが求められる。筆者は温室効果ガス排出の削減と脱原発を両立させた2030年の目標を設定することは可能であると考えている。

将来像を考える場合には、将来世代の取り分や自然の生存権などを考慮した価値観・倫理観に基づき、見落としがないように十分注意しなければならない。特に放射性廃棄物を10万年間安全に隔離しなければならないことは、将来世代との公平という観点からも深刻に考える必要がある。将来世代は、効率の良い再生可能エネルギーを利用できる技術を開発し、世界平和を実現し、脱原発・脱核兵器の世界を構築することが期待される。そのような将来世代に、現世代がとりあえず利用した原発のごみである多量の放射性廃棄物を残すことはアンフェアである。

全貌を捉え、禍根を残さない選択をすることは容易ではない。過去において石橋湛山(150頁、脚注49参照)、朝永振一郎(162頁、3.12.1参照)や東電の委員会で津波の波高の予測を述べた人(166頁、3.12.3.1参照)を始め多くの人が、後に気づく見落としを指摘していた。また、私たちは「水俣病」「福島の事故」を経験し、そこから多くのことを学んでいるはずである。現在でも多くの警告が発せられている。しかし、わたしたちは「喉元を過ぎれば熱さを忘れ」てしまう。将来の禍根を少なくするために、まず、日本の原発について福島の事故の経験を踏まえて国民的な議論を経て選択することに挑戦してみてもどうか。このことは、将来世代に恵ま

れた地球を引き継ぎ「持続可能な発展」を可能にするため、あるいは自覚に富んだ市民が将来の社会のビジョンを熟議するための一歩となるはずである。

このシリーズ『知は地球を救う』では、将来世代に恵まれた地球を引き継ぎ「持続可能な発展」を如何に実現するかを、137億年の宇宙誌の中で考えた。四つのことを繰り返し、本シリーズを一段落させたい。

「己の欲せざるところ人に施す勿れ」

「今生き延びている生物種は、たまたま幸運に恵まれたものの子孫である」

メドウズらの提言:「ビジョンを描くこと」「ネットワークをつくること」「真実を語ること」「学ぶこと」「愛すること」(297)。

「新たなことが分かったり見過ごしに気づいたりしたら、過去のいきさつにとらわれず、すぐに率直に改めよう」

謝辞

専門外の筆者による長文を読んでそれぞれの社会経験から貴重な助言を与えて下さった高木信一さん、石渡則子さん、林慶子さん、石原邦先生、また誤訳の檜について指摘して下さいました寺島一郎先生、質問に答えていただいた丹野研一先生・中村慎一先生に感謝いたします。また投稿規定よりも長いものの掲載を許可して頂いた紀要の歴代の編集長である田中教之先生・木谷敏先生・室井俊通先生、匿名の査読者の先生を始めとした教育学部・教育学部の先生方のご援助にあらためてお礼申し上げます。また、長文の一字一句をチェックし編集の援助してくれた娘の桃子を始め、準備を含めて10年近くの間、励ましてくれた妻の雅子と息子の英太郎、更にこのようなことを考え、話すことができる生を与えてくれた両親はじめ約40億年前まで遡る祖先にもこの場を借りて感謝の思いを述べたいと思います。

シリーズを書き始めてから数年経って、孫娘を一人授かりました。彼女にどうやって「恵まれた地球」を引き継ぐかと考えると「将来世代」が具体的に見えてきました。目下恋愛中(?)でとても孫のことなど実感できない学生の皆さんには、このシリーズのような授業は現実味がなかったかもしれません。しかし、皆さんに話すことで時空の広がり分野横断的に見始め、自分が宇宙の一員であることが実感できるようになりました。それは安心立命のかけらをつかんだような気分と責任感をも、もたらしてくれました。このようなことを考えるきっかけを与えてくれ、時に質問やコメントをして下さった多くの受講生の皆さんに感謝します、「みなさんお元気で」。

文献

(紙幅を節約する為に, Nature は N, Proceedings of the National Academy of Sciences は PNAS, Science は S と省略した.)

1. 白田秀明. 2009. 知は地球を救う 1. はじめに — 豊かな生命と環境の世紀をめざして— 帝京大学文学部教育学科紀要 34: 97-104.
2. 白田秀明. 2009. 知は地球を救う 2. 人類の進化 700 万年 — 予断に捉われないことの難しさ— 帝京大学文学部教育学科紀要 34: 105-144.
3. 白田秀明. 2010. 知は地球を救う 3. 作物の栽培化から遺伝子組み換え作物まで — 豊かさの広汎化と豊かな多様性・地域性の併存を目指して— 帝京大学文学部教育学科紀要 35: 123-180.
4. 白田秀明. 2011. 知は地球を救う 4. 森と人 — 森と人の共生から多様な生命が集う生態系の保存をめざして— 帝京大学文学部教育学科紀要 36: 79-152.
5. 白田秀明. 2012. 知は地球を救う 5. 我々の暮らしと地球への負荷 — 目を閉じて全体を静かに心で見よう— 帝京大学文学部教育学科紀要 37: 161-260.
6. 白田秀明. 2013. 知は地球を救う 6. 宇宙の誕生と進化—太陽・地球・生命はビッグバン・燃える星・爆発する星の内部でつくられた元素から出ている— 帝京大学教育学科紀要 1: 143-207.
7. 白田秀明. 2014. 知は地球を救う 7. 地球・生命の誕生とその後の変容—われわれはどこから来て、どこに向かおうとしているのだろうか— 帝京大学教育学科紀要 2: 1-107.
8. 白田秀明. 2016. 知は地球を救う 8. 気候変動, 過去・現在・未来—選択のために問われる価値観— 帝京大学教育学科紀要 4: 59-184.
9. 鳥飼玖美子. 2004. 『歴史をかえた誤訳』新潮社.
10. 中沢弘基. 2014. 『生命誕生 地球史から読み解く新しい生命像』講談社.
11. White TD, et al. 1994. *Australopithecus ramidus*, a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia. *N* 371: 306-312.
12. Brunete M, et al. 2002. A new hominid from the upper Miocene of Chad, Central Africa. *N* 418: 145-151.
13. Senut B, et al. 2001. First hominid from the Miocene (Lukeino Formation, Kenya) . *C R Acad Sci Paris, Ser Ila* 332: 137-144.
14. Alberts B. 2009. Understanding human origins. *S* 326: 17.
15. Science Editorial. 2009. Light on the origin of Man. *S* 326: 60-63.
16. White TD, et al. 2009. *Ardipithecus ramidus* and the paleobiology of early hominids. *S* 326: 64. 75-86.
17. Gabriele GW, et al. 2009. The geological, isotopic, botanical, invertebrate, and lower vertebrate surroundings of *Ardipithecus ramidus*. *S* 326: 65. 65e1-e5.
18. Louchart A, et al. 2009. Taphonomic, avian, and small-vertebrate indicators of *Ardipithecus ramidus* habitat. *S* 326: 66. 66e1-e4.
19. White TD, et al. 2009. Macrovertebrate paleontology and the Pliocene habitat of *Ardipithecus ramidus*. *S* 326: 67. 87-93.
20. Gibbons A. 2009. A new kind of ancestor: *Ardipithecus* unveiled. *S* 326: 36-40.
21. Gibbons A. 2009. The view from Afar. *S* 326: 41-43.
22. Suwa G, et al. 2009. The *Ardipithecus ramidus* skull and its implications for hominid origins. *S* 326: 68. 68e1-e7.
23. Suwa G, et al. 2009. Paleobiological implications of the *Ardipithecus ramidus* dentition. *S* 326: 69. 94-99.
24. Lovejoy CO, et al. 2009. Careful climbing in the Miocene: The forelimbs of *Ardipithecus ramidus* and humans are primitive. *S* 326: 70. 70e1-e8.
25. Lovejoy CO, et al. 2009. The pelvis and femur of *Ardipithecus ramidus*: The emergence of upright walking. *S* 326: 71 . 71e1-e6.
26. Lovejoy CO, et al. 2009. Combining prehension and propulsion: The foot of *Ardipithecus ramidus*. *S* 326: 72. 72e1-e8.
27. Lovejoy CO, et al. 2009. The great divides: *Ardipithecus ramidus* reveals the postcrania of our last common ancestors with African apes. *S* 326: 73. 100-106.
28. Lovejoy CO. 2009. Reexamining human origins in light of *Ardipithecus ramidus*. *S* 326: 74. 74e1-e8.
29. Braun DR. 2010. Australopithecine butchers. *N* 466: 828.
30. McPherron SP, et al. 2010. Evidence for stone-tool-assisted consumption of animal tissues before 3.39 million years ago at Dikika, Ethiopia. *N* 466: 857-860.
31. Callaway E & Francisco S. 2015. Oldest stone tools

- raise questions about their creators. *N* 520: 421.
32. Hovers E. 2015. Tools go back in time. *N* 521: 294-295
 33. Harmand S, et al. 2015. 3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. *N* 521: 310-315.
 34. Domínguez-Rodrigo, M, Alcalá L. 2016. 3.3-Million-Year-Old Stone Tools and Butchery Traces? More Evidence Needed. *Paleo Anthropology* 2016: 46-53.
 35. Ramsey CB, et al. 2004. Improvements to the pretreatment of bone at Oxford. *Radiocarbon* 46: 155-163.
 36. Higham TFG, et al 2006. AMS radiocarbon dating of ancient bone using ultrafiltration. *Radiocarbon* 48: 179-195.
 37. Higham T, et al. 2014. The timing and spatiotemporal patterning of Neanderthal disappearance. *N* 512: 306-309.
 38. Krings M, et al. 1997. Neanderthal DNA sequences and the origin of modern humans. *Cell* 90: 19-30.
 39. Serre D, et al. 2004. No evidence of Neanderthal mtDNA contribution to early modern humans. *Plos Biol* 2: 313-317.
 40. Pääbo S. 2014. 『Neanderthal man. In search of lost genomes』 Basic Books. 和訳 野中香方子. 2015. 『ネアンデルタール人は私たちと交配した』 文芸春秋.
 41. Green RE, et al. 2006. Analysis of one million base pairs of Neanderthal DNA. *N* 444: 330-336.
 42. Noonan JP, et al. 2006. Sequencing and analysis of Neanderthal genomic DNA. *S* 314: 1113-1118.
 43. Wall JD & Kim SK. 2007. Inconsistencies in Neanderthal genomic DNA sequences. *Plos Genet* 3: 1862-1866.
 44. Green RE, et al. 2010. A draft sequence of the Neanderthal genome. *S* 328: 710-722.
 45. Gibbons A. 2010. Close encounters of the prehistoric kind. *S* 328: 680-684.
 46. Gibbons A. 2011. A New view of the birth of homo sapiens. *S* 331: 392-394.
 47. Wall JD, et al. 2013. Higher levels of Neanderthal ancestry in east Asians than in Europeans. *Genetics* 194: 199-209.
 48. Prüfer K, et al. 2014. The complete genome sequence of a Neanderthal from the Altai Mountains. *N* 505: 43-49.
 49. Sankararaman S, et al. 2014. The genomic landscape of Neanderthal ancestry in present-day humans. *N* 507: 354-357.
 50. Vernot B & Akey JM. 2014. Resurrecting surviving Neanderthal lineages from modern human genomes. *S* 343: 1017-1021.
 51. Sankararaman S, et al. 2011. The date of interbreeding between Neandertals and modern humans. *Plos Genet* 8: e1002947
 52. Neves AGM & S Maurizio. 2012. Extremely rare interbreeding events can explain Neanderthal DNA in living humans. *PLoS One* 7: e47076.
 53. Eriksson A & Manica A. 2012. Effect of ancient population structure on the degree of polymorphism shared between modern human populations and ancient hominins. *PNAS* 109: 13956- 13960
 54. Lowery RK, et al. 2013. Neanderthal and Denisova genetic affinities with contemporary humans: Introgression versus common ancestral polymorphisms. *Gene* 530: 83-94.
 55. Fu Q, et al. 2014. Genome sequence of a 45,000-year-old modern human from western Siberia. *N* 514: 445-449.
 56. Trinkaus E, et al. 2003. An early modern human from the Peștera cu Oase, Romania. *PNAS* 100: 11231-11236.
 57. Fu Q, et al. 2015. An early modern human from Romania with a recent Neanderthal ancestor. *N* 524: 216-219.
 58. Fu Q, et al. 2016. The genetic history of Ice Age Europe. *N* 534: 200-205.
 59. Kuhlwilm M, et al. 2016. Ancient gene flow from early modern humans into Eastern Neanderthals. *N* 530: 429-433.
 60. Grün R, et al. 2005. U-series and ESR analyses of bones and teeth relating to the human burials from Skhul. *J Hum Evol* 49 : 316-334.
 61. Liu W, et al. 2015. The earliest unequivocally modern humans in southern China. *N* 526: 696-699.
 62. Krause J, et al. 2007. Neanderthals in central Asia and Siberia. *N* 449: 902-904
 63. Krause J, et al. 2010. The complete mitochondrial DNA genome of an unknown hominin from southern Siberia. *N* 464: 894-897.
 64. Reich D, et al. 2010. Genetic history of an archaic hominin group from Denisova cave in Siberia. *N*

- 468: 1053-1060.
65. Reich D, et al. 2011. Denisova admixture and the first modern human dispersals into Southeast Asia and Oceania. *Am J Hum Genet* 89: 516-528.
 66. Sawyer S, et al. 2015. Nuclear and mitochondrial DNA sequences from two Denisovan individuals. *PNAS* 112: 15696-15700.
 67. Kanzawa-Kiriyama H. 2013. Ancient genomic DNA analysis of Jomon people. *Department of Genetics School of Life Science The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI) 博士論文*
 68. Cooper A & Stringer CB. 2013. Did the Denisovans cross Wallace's Line? *S* 342: 321-323.
 69. Vernot B, et al. 2016. Excavating Neandertal and Denisovan DNA from the genomes of Melanesian individuals. *S* 352: 235-239.
 70. Sutikna T. 2016. Revised stratigraphy and chronology for *Homo floresiensis* at Liang Bua in Indonesia. *N* 532: 366-369.
 71. Abi-Rached L, et al. 2011. The shaping of modern human immune systems by multiregional admixture with archaic humans. *S* 334: 89-94.
 72. Rasmussen M, et al. 2011. An Aboriginal Australian genome reveals separate human dispersals into Asia. *S* 334: 94-98.
 73. Huerta-Sánchez E, et al. 2014. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA. *N* 512: 194-197.
 74. Skoglund P, et al. 2011. Archaic human ancestry in East Asia. *PNAS* 108: 18301-18306.
 75. Fu Q, et al. 2013. DNA analysis of an early modern human from Tianyuan Cave, China. *PNAS* 110: 2223-2227.
 76. Dannemann M, et al. 2016. Introgression of Neandertal- and Denisovan-like haplotypes contributes to adaptive variation in human toll-like receptors. *Am J Hum Genet* 98, 22-33.
 77. Deschamps M, et al. 2016. Genomic signatures of selective pressures and introgression from archaic at human innate immunity genes. *Am J Hum Genet* 98: 5-21.
 78. Abi-Rached L, et al. 2011. The shaping of modern human immune systems by multiregional admixture with archaic humans. *S* 334: 89-94.
 79. Ding Q, et al. 2013. Neandertal introgression at chromosome 3p21.31 was under positive natural selection in East Asians. *Mol Biol Evol* 31: 683-695
 80. Simonti CN, et al. 2016. The phenotypic legacy of admixture between modern humans and Neandertals. *S* 351: 737-741.
 81. Gibbons A. 2016. Neandertal genes linked to modern diseases. *S* 351: 648.
 82. Lari M, et al. 2010. The microcephalin ancestral allele in a Neandertal individual. *PLoS One* 5: e10648.
 83. Evans PD, et al. 2006. Evidence that the adaptive allele of the brain size gene microcephalin introgressed into *Homo sapiens* from an archaic *Homo* lineage. *PNAS* 103: 18178-18183.
 84. Khrameeva EE, et al. 2014. Neandertal ancestry drives evolution of lipid catabolism in contemporary Europeans. *N Commun.* 5:3584.
 85. Boyd. JL, et al. 2015. Human-chimpanzee differences in a FZD8 enhancer alter cell-cycle dynamics in the developing neocortex. *Curr Biol* 25: 772-779.
 86. Pennisi E. 2015. Of mice and men. *S* 349: 21-23.
 87. Mendez FL, et al. 2016. The divergence of Neandertal and modern human Y chromosomes. *Am J Hum Genet* 98: 728-734.
 88. Arsuaga JL, et al. 1997. The Sima de los Huesos crania (Sierra de Atapuerca, Spain). A comparative study. *J Hum Evol* 33: 219-281.
 89. Meyer M, et al. 2014. A mitochondrial genome sequence of a hominin from Sima de los Huesos. *N* 505: 403-406.
 90. Callaway E. 2016. Oldest ancient-human DNA details dawn of Neanderthals. *N* 531: 286.
 91. Meyer M, et al. 2016. Nuclear DNA sequences from the Middle Pleistocene Sima de los Huesos hominins. *N* 531: 504-507
 92. Stringer C. 2012. What makes a modern human. *N* 485: 33-35.
 93. Gibbons A. 2015. Revolution in human evolution. *S* 349: 362-366.
 94. Gibbons A. 2015. Humanity's long, lonely road. *S* 349: 1270.
 95. Gibbons A. 2016. Five matings for moderns, Neandertals. *S* 351: 1250-1251.
 96. Carbonell E, et al. 2008. The first hominin of Europe. *N* 452:465-470.
 97. Plagnol V & Wall JD. 2006. Possible ancestral

- structure in human populations. *PLoS Genet* 2: e105.
98. Wall JD, et al. 2009. Detecting ancient admixture and estimating demographic parameters in multiple human populations. *Mol Biol Evol* 26: 1823-1827.
99. Hammer MF, et al. 2011. Genetic evidence for archaic admixture in Africa. *PNAS* 108: 15123-15128.
100. Lachance J, et al. 2012. Evolutionary history and adaptation from high-coverage whole-genome sequences of diverse African hunter-gatherers. *Cell* 150: 457-469
101. Hammer MF, et al. 2016. Model-based analyses of whole-genome data reveal a complex evolutionary history involving archaic introgression in Central African Pygmies. *Genome Res* 26: 291-300
102. Brown S, et al. 2016. Identification of a new hominin bone from Denisova cave, Siberia using collagen fingerprinting and mitochondrial DNA analysis. *Sci Rep* 6:23559.
103. Brumm A, et al. 2006. Early stone technology on Flores and its implications for *Homo floresiensis*. *N* 441: 624-928.
104. Nature Editorial. 2016. Humanity's forgotten family. *N* 534: 151.
105. Callaway E. 2016. Hobbit relatives hint at family tree. *N* 534: 164-165.
106. Gómez-Robles A. 2016. The dawn of *Homo floresiensis*. *N* 534: 188-189.
107. Brumm A, et al. 2016. Age and context of the oldest known hominin fossils from Flores. *N* 534: 249-253.
108. van den Bergh GD, et al. 2016. *Homo floresiensis*-like fossils from the early Middle Pleistocene of Flores. *N* 534: 245-248.
109. Culotta E. 2016. Likely hobbit ancestors lived 600,000 years earlier. *S* 352: 1260-1261.
110. Ovodov ND, et al. 2011. A 33,000-Year-old incipient dog from the Altai mountains of Siberia: evidence of the earliest domestication disrupted by the Last Glacial Maximum *PloS One* 6: e22821.
111. Thalmann O, et al. 2013. Complete mitochondrial genomes of ancient canids suggest a European origin of domestic dogs. *S* 342: 871-874.
112. Abzhanov A, et al. 2006. The calmodulin pathway and evolution of elongated beak morphology in Darwin's finches. *N* 442: 563-567.
113. Grant P & Grant R. 2006. Evolution of Character Displacement in Darwin's Finches. *S* 313:224-226.
114. Albertson RC, et al. 1999. Phylogeny of a rapidly evolving clade: The cichlid fishes of Lake Malawi, East Africa. *PNAS* 96: 5107-5110.
115. Wagner CE, et al. 2012. Ecological opportunity and sexual selection together predict adaptive radiation. *N* 487: 366-369.
116. Malinsky M, et al. 2015. Genomic islands of speciation separate cichlid ecomorphs in an East African crater lake. *S* 350: 1493-1498.
117. フィレイソン クライブ 2013. 『そして最後にヒトが残った』上原直子訳. 白揚社.
118. Bloch JI, et al. 2007. New Paleocene skeletons and the relationship of plesiadapiforms to crown-clade primates. *PNAS* 104:1159-1164.
119. Williams BA, et al. 2010. New perspectives on anthropoid origins. *PNAS* 107: 4797-4804.
120. 山極寿一. 2005. 『ゴリラ』東京大学出版会.
121. Begun DR. 2003. Planet of the apes. *Sci Am* 289: 64-72.
122. Gibbons A. 2007. Fossil teeth from Ethiopia support early, African origin for apes. *S* 317: 1016-1017.
123. Lucia C, et al. 2014. Gibbon genome and the fast karyotype evolution of small apes. *N* 513: 195-201.
124. Suwa G et al. 2007. A new species of great ape from the late Miocene epoch in Ethiopia. *N* 448: 921-924.
125. Banes GL, et al. 2016. Reintroduction of confiscated and displaced mammals risks outbreeding and introgression in natural populations, as evidenced by orang-utans of divergent subspecies. *Sci Rep* 6:22026
126. Nature Editorial. 2016. Number crunch. *N* 531: 144.
127. Nature Editorial. 2016. Gorilla decline. *N* 532: 11.
128. Vignaud P, et al. 2002. Geology and palaeontology of the Upper Miocene Toros-Menalla hominid locality, Chad. *N* 418: 152-155.
129. イヅ・コパン. 2002. 『ルーシーの膝』馬場悠男・奈良貴史紀訳. 伊国屋書店.
130. Coppens Y. 1994. East side story, the origin of humankind. *Sci Am* 270: 88-95.
131. Gibbons A. 2002. First member of human family

- uncovered. *S* 297: 171-173.
132. Cerling TE, et al. 2011. Woody cover and hominin environments in the past 6 million years. *N* 476: 51-56.
133. サイ・モンゴメリー . 1993. 『彼女たちの類人猿』 羽田節子訳 . 平凡社 .
134. Carpenter A. 1887. Monkeys opening oysters. *N* 36: 53.
135. Crain BJ, et al. 2013. A tool for every job: Assessing the need for a universal definition of tool use. *Int J Comp Psychol* 26: 281-303
136. Boesch C & Boesch H. 1990. Tool use and tool making in wild chimpanzees. *Folia Primatol* 54: 86-99 .
137. White A. 2013. Archaeology meets primate technology. *N* 498: 303-305.
138. Cohen J. 2007. The world through a chimp's eyes. *S* 316: 44-45.
139. Whiten A. 2014. Incipient tradition in wild chimpanzees. *N* 514, 178-179. ,
140. Haslam M. 2009. Primate archaeology. *N* 460: 339-344.
141. Elisabetta V, et al. 2013. Use of stone hammer tools and anvils by bearded capuchin monkeys over time and space: construction of an archeological record of tool use. *J Archaeol Sci* 40: 3222-3232.
142. Malaivijitnond S, et al. 2007. Stone-tool usage by Thai long-tailed macaques (*Macaca fascicularis*). *Am J Primatol* 69: 227-233.
143. Wheatley BP. 1988. Cultural behavior and extractive foraging in *Macaca fascicularis*. *Curr Anthropol* 29: 516-519.
144. Tan A, et al. 2015. There is more than one way to crack an oyster: Identifying variation in burmese long-tailed macaque (*Macaca fascicularis aurea*) stone-tool use. *PLoS ONE* 10: e0124733.
145. Tebbich S, et al. 2001. Do woodpecker finches acquire tool-use by social learning? *Proc R Soc Lond B* 268: 2189-2193.
146. St Clair JJH & Rutz C. 2012. New Caledonian crows attend to multiple functional properties of complex tool. *Phil Trans R Soc B* 368: 20120415.
147. Troscianko J, et al. 2012. Extreme binocular vision and a straight bill facilitate tool use in new Caledonian crows. *Nat Commun* 3: 1110.
148. Rutz C, et al. 2010. The ecological significance of tool use in New Caledonian crows. *S* 329: 1523-1526.
149. Jones AM, et al. 2011. Tool use in the tuskfish *Choerodon schoenleinii*? *Coral Reefs* 30: 865.
150. Gupta S. 2016. Clever eating. *N* 531: S12-S13.
151. Zink KD & Lieberman DE. 2016. Impact of meat and Lower Palaeolithic food processing techniques on chewing in humans. *N* 531: 500-503.
152. Pontzer H, et al. 2016. Metabolic acceleration and the evolution of human brain size and life history. *N* 533: 390-392
153. de Heinzelin J, et al. 1999. Environment and behavior of 2.5-million-year-old Bouri hominids. *S* 284: 625-629.
154. Asfaw B, et al. 1999. *Australopithecus garhi*: A new species of early hominid from Ethiopia. *S* 284: 629-635.
155. Semaw S. 2000. The World's oldest stone artefacts from Gona, Ethiopia: Their implications for understanding stone technology and patterns of human evolution between 2.6-1.5 million years ago. *J Archaeol* 27: 1197-1214.
156. Semaw S, et al. 2003. 2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia. *J Hum Evol* 45 :169-177.
157. Lepre CJ. 2011. An earlier origin for the Acheulian. *N* 477: 82-85.
158. Brown F, et al. 1985. Early *Homo erectus* skeleton from west Lake Turkana, Kenya. *N* 316: 788-792
159. Sheppard PJ & Kleindienst MR. 1996. Technological change in the earlier and middle stone age of Kalambo Falls (Zambia). *Afr Archaeol Rev* 13: 171-196.
160. Pappu S, et al. 2011. Early Pleistocene presence of Acheulian hominins in South India. *S* 331: 1596-1599.
161. Scott GR & Gibert L. 2009. The oldest hand-axes in Europe. *N* 461: 82-85.
162. Goren-Inbar N, et al. 2000. Pleistocene milestones on the out-of-Africa corridor at Gesher Benot Ya' aqov, Israel. *S* 289: 944-947.
163. Yamei H, et al. 2000. Mid-Pleistocene Acheulean-like stone technology of the Bose Basin, South China. *S* 287: 1622-1626.
164. ゴア・リック . 1997. 人類の起源 アジアへ広がった

- た原人たち ナショナルジオグラフィック . 5月号: 118-143.
165. Gibbons A. 2007. Food for thought. *S* 316: 1558-1560.
166. Hershkovit I, et al. 2015. Levantine cranium from Manot Cave (Israel) foreshadows the first European modern humans. *N* 520: 216-219.
167. Bosch MD, et al. 2015. New chronology for Ksâr 'Akil (Lebanon) supports Levantine route of modern human dispersal into Europe. *PNAS* 112: 7683-7688.
168. Trinkaus E. 2005. Early modern humans. *Annu Rev Anthropol* 34: 207-230.
169. Callaway E. 2015. Europe's first humans: what scientists do and don't know. *Nature News*. 6/22
170. Johanson D & Edgar B. 2006. 『From Lucy to language.』 Simon & Schuster.
171. Yi F, et al. 2016. Autism-associated SHANK3 haploinsufficiency causes Ih channelopathy in human neurons. *S* 352: 672. aaf2669.
172. Finlayson C & Carrión JS. 2007. Rapid ecological turnover and its impact on Neanderthal and other human populations. *Trends Ecol Evol* 22: 213-222.
173. van Andel TH & Davies W. eds. 2003. 『Neanderthals and modern humans in the European landscape during the last glaciation』 McDonald Institute Monograph.
- 173A. Frido Welker F, et al. 2016. Palaeoproteomic evidence identifies archaic hominins associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne. *PNAS* doi/10.1073/pnas.1605834113.
174. Dalén L, et al. 2012. Partial genetic turnover in Neandertals: Continuity in the east and population replacement in the west. *Mol Biol Evol* 29: 1893-1897.
175. Gilpin W, et al. 2016. An ecocultural model predicts Neanderthal extinction through competition with modern humans. *PNAS* 113: 2134-2139.
176. Siddall M, et al. 2003. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *N* 423: 853-858.
177. 竹岡俊樹 . 2014. 『考古学崩壊 前期旧石器捏造事件の深層』 勉誠出版 .
178. 日本考古学年報 50 (1997 年度版) 1999 年 7 月 1 日 .
179. 春成秀爾 . 2006. 『考古学はどう検証したか』 学生社 .
180. 戸田正勝 . 1999. 『考古学ライブラリー 67 旧石器』 ニューサイエンス社 .
181. 上原善広 . 2014. 『石の虚塔：発見と捏造、考古学に憑かれた男たち』 新潮社 .
182. 神谷厚昭 . 2015. 『地層と化石が語る琉球列島三億年史』 ボーダーインク .
183. 朝日新聞 . 2016 年 6 月 30 日夕刊 . 「旧石器時代の人骨、十数体 国内最大規模 沖縄・石垣」 .
184. 海部陽介 . 2005. 『人類がたどってきた道』 日本放送出版協会 .
185. Hawks J, et al. 2007. Recent acceleration of human adaptive evolution. *PNAS* 104: 20753-20758
186. Cook E. 1971. The flow of energy in an industrial society. *Sci Am* 225: 134-144.
187. Zalasiewicz J, et al. 2012. The Anthropocene. In Gradstein FM, et al ed. 『The geologic time scale 2012』 Volume 2. pp 1033-1040. Elsevier.
188. Rehren T, et. 2013. 5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron. *J Archaeol Sci* 40: 4785-4792.
189. Totten GE. A timeline of highlights from the histories of ASTM committee D02 and the petroleum industry. http://www.astm.org/COMMIT/D02/to1899_index.html
190. Caine M. New Energy Sources: Possibilities and Prospects. <http://theenergycollective.com/markecaine/173971/new-energy-sources-possibilities-and-prospects>.
191. Williams M. 2006. 『Deforesting the earth』 The Univ of Chicago Press.
192. O'Connor JE, et al. 2015. 1000 dams down and counting. *S* 348: 496-497.
193. Grumbine RE & Xu J. 2011. Mekong hydropower development. *S* 332: 178-179.
194. 田中聡 . 2015. 『電気の事件史 電気は誰のものか』 晶文社 .
195. 電気事業連合 . 電気の歴史 (日本の電気事業と社会 . <http://www.fepc.or.jp/enterprise/rekishi/>
196. 若杉洸 . 2015. 『原発ホワイトアウト』 講談社
197. 小森敦司 . 2016. 『日本はなぜ脱原発できないのか』 平凡社 .
198. 高木仁三郎 .1981. 『プルトニウムの恐怖』 岩波書店 .
199. 佐藤嘉幸、田口卓臣 . 2016. 『脱原発の哲学』 人文書院 .
200. 経済産業省 . 2015. エネルギー白書 2015. <http://www.enechometigo.jp/about/whitepaper/2015pdf/>
201. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/share-of-electricity->

- consumption-in-final-energy-consumption-by-region-in-2004-and-projections-for-2030
202. 経済産業省 . 2010. エネルギー白書 2010 .
<http://www.enechometi.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/>
203. Palacín MR & de Guibert A. 2016. Why do batteries fail? S 351: 574. 1253292.
204. Polman A, et al. 2016. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. S 352: 307. aad4424.
205. Service RF. 2016. The battery builder. Science 352: 1046-1049.
206. 石炭エネルギーセンター . http://www.jcoal.or.jp/coaldb/country/06/post_9.ht
207. 保坂正康 . 1988. 『東條英機と天皇の時代 下』 文芸春秋 .
208. 小野善邦 . 2004. 『わが志は千里に在り 大来佐武郎評伝』 日本経済新聞社 .
209. 伊藤隆 . 1981. 『昭和十年代史断章』 東京大学出版会 .
210. 有沢広巳 . 1957. 『学問と思想と人間と』 毎日新聞社 .
211. 有澤廣巳 . 1989. 『戦後経済を語る』 東京大学出版会 .
212. 有沢広巳 監修 . 1990. 『資料・戦後日本の経済政策構想 第一巻 日本経済再建の基本問題』 東京大学出版会 .
213. 吉田茂 . 1999. 『日本を決定した百年』 中央公論新社 .
214. 石橋湛山著・増田弘編 . 1984. 『小日本主義—石橋湛山外交論集』 草思社 .
215. 牧野邦昭 & 小堀聡 . 2014. 石橋湛山と「戦時経済特別調査室」一名古屋大学所蔵「荒木光太郎文書」より . *自由思想* 135: 38-54.
216. 牧野邦昭 & 小堀聡 . 2015. 「戦時経済特別調査室」資料 (I) 一名古屋大学所蔵「荒木光太郎文書」より . *自由思想* 136: 66-80.
217. 牧野邦昭 & 小堀聡 . 2015. 「戦時経済特別調査室」資料 (II) 一名古屋大学所蔵「荒木光太郎文書」より . *自由思想* 137:57-67.
218. 井上寿一 . 2015. 『終戦戦後史 1945-1955』 講談社 .
219. 石炭エネルギーセンター . http://www.jcoal.or.jp/coaldb/country/06/post_9.html
220. 山本作兵衛 . 2011. 『新装版 画文集 炭鉱に生きる 地の底の人生記録』 講談社 .
221. 世界銀行 . [http://data.worldbank.org/indicator/ NY.GDP.PCAP.CD](http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD)
222. 世界銀行 . <http://data.worldbank.org/indicator/ EN.ATM.CO2E.PC>
223. nef. <http://www.happyplanetindex.org/data/>
224. 世界銀行 2015. 3.7 World Development Indicators: Electricity production, sources, and access [http:// wdi.worldbank.org/table/3.7](http://wdi.worldbank.org/table/3.7)
225. 世界銀行 . 人口 <http://data.worldbank.org/indicator/ SP.POP.TOTL>
226. International Monetary Fund.
<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2014/02/weodata/weorept.aspx?pr.x=73&pr.y=2&sy=2012&ey=2019&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&c=636&s=NGDPD%2CNGDPDPC%2CPPGDP%2CPPPPC&grp=0&a=>
227. UN data 2013. <http://data.un.org/CountryProfile.aspx?crName= Democratic%20People's%20Republic%20of%20Korea>
228. Worldwatch Institute Europe. <http://www.worldwatch-europe.org/node/304>
229. Fairless D. 2007. Renewable energy: Energy-ground. *N* 447: 1046-1048
230. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2015. 『Renewables 2015 Global Status Report』 http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
231. 経済産業省 . 2014. 『エネルギー白書 2014』
232. 経済産業省 . 2015. http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf
233. Price TJ. 2005. James Blyth — Britain's First Modern Wind Power Pioneer. *Wind Engineering* 29: 191-200.
234. Global Wind Energy Council. 2009. Global Wind Report 2009. <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2009/#>.
235. 環境エネルギー政策研究所 . 2015. Renewables 2015 Japan status report (summary) . <http://www.isep.or.jp/jsr2015>
236. RoeJ J. Mathematics for Sustainability: Fall 2015. <http://sites.psu.edu/math033fa15/>
237. Statista. <http://www.statista.com/statistics/271031/market-share-of-the-largest-wind-turbine-manufacturers-in-the-world/>
238. Mathias. 2013. Solar Cell Efficiency World Record Set By Sharp — 44.4%. <http://cleantechnica.com/2013/06/23/solar-cell-efficiency-world-record-set-by-sharp-44-4/>
239. Lewis NS . 2016. Research opportunities to advance solar energy utilization. S 351: 353. aad1920.
240. Polman A, et al. 2016. Photovoltaic materials:

- Present efficiencies and future challenges. *S* 352: 307. aad4424.
241. Zhao W, et al. 2016. Fullerene-free polymer solar cells with over 11% efficiency and excellent thermal stability *Adv Mater* DOI: 10.1002/adma.201600281
242. Brierley M. 2015. The changing cost of solar panels. <http://minuszeroeco.blogspot.jp/2015/08/the-changing-cost-of-solar-panels.html>
243. Le M. 2011. Sun Shot: The Apollo mission of our time. US Department of Energy. <http://www.slideshare.net/gwsolar/minh-le-doe-solar-program>.
244. Shyam Mehta . 2014. Global 2013 PV module production hits 39.8GW; Yingli is the shipment leader. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Global-2013-PV-Module-Production-Hits-39.8-GW-Yingli-Leads-in-Production-a>
245. United Nations. 2015. ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
246. UN. 2014. Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013 . <http://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a01.pdf>
- 246' UN. 2016. MARRAKECH PARTNERSHIP FOR GLOBAL CLIMATE ACTION. http://unfccc.int/files/paris_agreement/application/pdf/marrakech_partnership_for_global_climate_action.pdf
247. WMO.2016. <https://www.wmo.int/media/content/2015-hottest-year-record>
248. Cook BI, et al. 2016. Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *J Geophys Res Atmos* 10.1002/2015JD023929
249. Eastwood DC, et al 2011. The plant cell wall-decomposing machinery underlies the functional diversity of forest fungi. *S* 333: 762-765.
250. Binder JB & Raines RT. 2010. Fermentable sugars by chemical hydrolysis of biomass. *PNAS* 107: 4516-4521.
251. Martínez AT. 2016. How to break down crystalline cellulose. *S* 352: 1050-1051.
252. Kracher D, et al. 2016. Extracellular electron transfer systems fuel cellulose oxidative degradation. *S* 352: 1098-1101.
253. Scharlemann JPW & Laurance WF. 2008. How green are biofuels? *S* 319: 43-44.
254. Zah R et al. Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa, St. Gallen, Switzerland.
255. Fairley P. 2011. Next generation biofuels. *N* 474 : S2-S5.
256. Hu P, et al. 2016. Integrated bioprocess for conversion of gaseous substrates to liquids. *PNAS* 113: 3773-3778.
257. Kelly FJ & Zhu T. 2016. Transport solutions for cleaner air. *S* 352: 934-936.
258. 田口理穂. 『なぜドイツではエネルギーシフトが進むのか』学芸出版社. 2015.
259. Benstem A. Hannover Kronsberg: model of a sustainable new urban community. <http://www.rudi.net/node/7346>
260. 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社. 2014. 平成 26 年度資源エネルギー庁委託調査『平成 26 年度新エネルギー導入促進事業調査事業（海外における新エネルギー等導入促進政策に関する調査）報告書』http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000525.pdf
261. World Bank. Pricing Carbon . <http://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>.
262. World Bank. Putting a Price on Carbon with a Tax. http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/SDN/background-note_carbon-tax.pdf
263. 朝日新聞 . 2016/4/2 朝刊 . 温暖化対策税を完全実施 排出削減効果「わずか」環境省
264. 宇沢弘文 . 2000. 『社会的共通資本』岩波書店 .
265. 岸信介 . 1983. 『岸信介回顧録』廣済堂出版 .
266. 石破茂 . 2011. 「核の潜在的抑止力」を維持するために私は原発をやめるべきとは思いません . *Sapio* 10 月 5 日号 . 85-87.
267. 中尾麻伊香 2015. 『核の誘惑』勁草書房 .
268. Nagaoka H, et al. 1924. Isotopes of mercury and bismuth revealed in the satellites of their spectral lines. *N* 113: 459-460,
269. Nagaoka H, et al. 1924. Binding of electrons in the nucleus of the mercury atom. *N* 113: 567-568.
270. Nagaoka H. 1925. Preliminary note on the transmutation of mercury into gold. *N* 116: 95-96.
271. 檜山良昭 . 2007. 原爆投下秘話 一通の手紙. <http://www.slownet.ne.jp/sns/area/culture/>

- reading/kansanyoroku/200708090922-9592430.html
272. 常石敬一. 2015.『日本の原子力時代』岩波書店.
273. 濱地一樹 2013.『マルクス ワイマール 原子力—有澤廣巳先生に学んだこと—』アマゾン Kindle 版
274. 電気事業連合会. <http://www.fepc.or.jp/>
275. 左高信. <http://ameblo.jp/sataka/entry-11103601563.html>
276. 田島英三. 1995.『ある原子物理学者の生涯』三秀舎.
277. 2012年6月5日 第26回総合資源エネルギー調査会基本問題委員会.「2020年におけるエネルギーミックスの推計について」(事務局提出資料) http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/026/pdf/26-5.pdf
278. 言論NPO. 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=6dqkt4bg48o>
279. 経済産業省 2010.『エネルギー基本計画』 http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf
280. 総合資源エネルギー調査会. http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/
281. 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 2011. 中間報告書. http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202c.pdf
282. 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 2012. 最終報告書. <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-2.htm>
283. NHK 2014/3/11. http://www3.nhk.or.jp/news/genpatsum-fukushima/20140311/1516_songaigaku.html
284. 石橋克彦. 1997. 原発震災 破滅をさけるために. 科学 67: 720-724.
285. 石橋克彦.『原発震災』七つ森書館.
286. 復興庁. 2016/3/29. 全国の避難者等の数. http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat2/sub-cat2-1/20160329_hinansha.pdf
287. 原子炉立地審査指針について. 2013. <https://www.nsr.go.jp/data/000050240.pdf>
288. 大島堅一. 2011.『原発のコスト—エネルギー転換への視点』岩波書店
289. レスター・ブラウン. 2015.『大転換 新しいエネルギー経済のかたち』枝廣 淳子訳. 岩波書店.
290. World nuclear news. 2009/6/3. Forsmark for Swedish nuclear waste. http://www.world-nuclear-news.org/WR_Forsmark_for_Swedish_nuclear_waste_0306091.html
291. SKB. Final repository for spent nuclear fuel . <https://www.youtube.com/watch?v=xq1VJ0fbpIg>
292. 日本原子力研究開発機構 <http://www.jaea.go.jp/04/turuga/anncer/page/kaitou/kaitou2-1.html>
293. Clean energy wire. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>
294. Referendum 12/06/2011 <http://elezionistorico.interno.it/index.php?tpel=F&dtel=12/06/2011&tpa=Y&tpc=A&lev0=0&levsut0=0&es0=S&ms=S>
295. 齊藤鉄夫. 2009.『温室効果ガス 2050年80%削減のためのビジョン』 <https://www.env.go.jp/earth/info/80vision/vision.pdf>
296. 内閣府. 2013.『平成25年版 子ども・若者白書』第2節 子ども・若者の社会形成・社会参加支援
297. メドウズ DHら. 2005.『成長の限界 人類の選択』枝広 淳子訳. ダイアモンド社.