

# 人類は原料革命から卒業できるのか？

## 温暖化問題あるいは産業革命観への一視角

おのづか・ともじ 東京大学大学院経済学研究科教授  
一九五七年生まれ。著書に『第一次世界大戦開戦原因の再考』、『国際分業と国家心理』、『経済史—いまを知り、未来を生きるために—』(有斐閣)など。

**小野塚知二**

### はじめに

地球温暖化は、産業革命以降何度の気温上昇とか、何メートルの海面上昇というように、しばしば産業革命を基準点として議論されている。いうまでもなく、そこには、人類の活動によって人為的に排出される温暖化ガスの量と温暖化ガスの吸着・固定化の様相とが、産業革命以後はそれ以前とはまったく異なる局面に入ったという歴史認識——現生人類の歴史から見ると産業革命以後の二五〇年間は〇・一パーセントほどの長さにすぎないから、現状認識と

いっても差し支えない——が反映している。では、これまでの歴史研究、なかならず経済史学は、温暖化問題をもとらえうる人類史的な観点から産業革命を描いてきたのだろうか。

本稿が述べたいのは、ごく簡略にいうなら、以下の諸点である。①産業革命は技術史的には、機械革命、エネルギー革命、原料革命の三つの側面があるが、これまで、原料革命は明晰には論じられてこなかった。②人類は今後も機械をITやAIと結合した仕方で用い続ける(機械革命から卒業する可能性はない)が、産業革命のエネルギー革命という

側面から卒業する可能性と必要性は眼前に開かれている。

③しかし、エネルギー革命から卒業しただけで、温暖化ガス排出ゼロを達成することはできない。なぜならば、原料革命から卒業する見通しが立っていないからである。

だから、温暖化問題に対処するのは絶望的に困難であると諦めるのか、それとも、原料革命から卒業する可能性が当面ない以上、むしろ、エネルギー転換の重要性と緊急性はなお一層高いと考えるのかは、将来世代に対するわたしたちの責任感のあり方(つまり、各自の思想や価値観の問題)に依存している。そこに「科学的な最適解」が一義的に存在しているわけではなく、議論は思想闘争・政策闘争の局面に委ねざるをえない。本稿はそうした闘争に一つの材料を提供することを目的として書かれている。

### 1 機械革命とエネルギー革命

「産業革命」という語は、英国で発生していた産業上の変革に気付き、魅了された一九世紀初頭の北フランスやベルギーの人びとによって使われ始めた。彼らを魅了したのは産業革命の三つの側面のうち、機械革命であったことは想像に難くない。職人が道具を操作するのに比べて機械は百倍の効率でものを産み出し、しかも疲れないから連続運転が可能である。こうした機械の力に魅せられたヨーロッパ

大陸のひとびとは、英国から機械製造職人を引き抜き、また、機械の図面や部品を密輸して、その力をわがものにしてしようとした。英国はそれに対して、機械輸出と職人渡航を禁止する法律を制定して機械の秘密を独占しようとした。

#### (1) 機械革命

このように産業革命とはまずは何よりも機械革命としてドゥヴァー海峡の兩岸で認識され始め、この認識は直ちにヨーロッパ諸国に、アメリカ合衆国に、さらに日本にも波及した。幕末の日本が「鎖国」を解除して世界資本主義への参入を選択した最大の理由は、黒船とその武装、そしてペリー艦隊が幕閣の前で見せた蒸気機関車(模型)など、機械とそれがもたらす軍事力を身に付けなければ独立を守れないという支配階級と民衆の一部に共有された焦慮にあった。日本の開港の数年後に執筆された『資本論』においてマルクスは、産業革命がもたらした「機械と近代産業」の特質を、ある業者が同業他社よりも多くの利潤を上げることのできる理由(分業と機械に基盤付けられた生産力)に関わらせて論じている(『資本論』第一巻「資本の生産過程」第四篇「相対的剰余価値の生産」の第三章「機械群と大産業」)。もし、ある業者(国)が同業他社(他国)よりも多くの利潤を上げられるのであれば、当然、同業他社(他国)も、その分業・技術を模倣しなければ市場から淘汰されてしまう。機械革命が世

界中に波及せざるをえないということは、こうして、国民の独立自存という政治的課題とは別に、経済学的な論理としても解明されたのである。

産業革命の機械革命としての側面は現在も継続している。人類の経済活動の主たる労働手段が機械から道具に戻る可能性はまずない。一部の高級な工芸品を除けば、ひとびとが求める財・サービス(のうち、商品形態で供給されているもの(拙著『経済史』第八章参照)の多くは機械によって産み出され、輸送されている。今後も情報技術や人工知能と結び付いて、巷間言われる「Industry 4.0」などの仕方で機械は使われ続けるであろう。こうした意味で、人類は機械革命から卒業する可能性はない。機械が人にもたらす害悪は、産業革命期の「ラダイト(機械打ち壊し)」以来、何度も非難されてきた。たとえば、日本でも、京都学派の一人であった歴史家の鈴木成高は「産業革命」(弘文堂、一九五〇年)で、近代機械文明の害悪を資本主義・社会主義といった体制とは独立の問題として指摘した。だが、いま、この問題意識を継承する者はいない。この害悪は機械そのものの本質というよりも、機械を使う人間・社会の側(あるいは、人間と機械との関係)の問題として、今後も処理されうるであろう。

(2) エネルギー革命

機械革命の側面が産業革命当時から認識されていたのに

している。人力・畜力・薪炭の消費から発生する二酸化炭素も短期間のうちに光合成で植物体に固定化される。これに対して熱機関の熱源である化石燃料は過去に地球が太陽から受け取ったエネルギーによって形成された数千万年、数億年前の生物体が、長い時間をかけて変性したものである。長い時間をかけて生成したものを短期間で採掘し、燃やし尽くせば、いずれ枯渇するし、他方では、現在の地球の植物では光合成しきれないほどの二酸化炭素を排出するであろう。すなわち、資源問題と温暖化問題である。

一九世紀後半の英国を代表する経済学者W・S・ジェヴォンズが『石炭問題』(一八六五年)で示した懸念は、近代産業文明が享受している熱機関のエネルギーは、有限の資源である石炭に依存しているから、永続的ではないということであった。しかも、過去の石炭消費量の推移から推計するならば、石炭消費量は今後も幾何級数的に増加するから、いずれは石炭採掘量の限界に到達してしまう。それゆえ、石炭に依存しない文明に早く移行しなければ、近代文明は立ち行かなくなるといのがジェヴォンズの心配事であった。しかし、彼の心配は同時代から後世にいたるまでほとんど共有されていない。その第一の理由は石炭の埋蔵量の大きさにあった。一八六〇年代に世界の石炭消費量は年間たかだか数億トン、現在でも八〇億トンだが、可採埋蔵量

対して、エネルギー革命という側面が認識されるようになったのは、はるかに遅い。その理由の一つは、エネルギー革命が熱機関の登場として現れ、それは当初、機械革命の一部と認識されたからである。確かに、一八世紀末から一九世紀にかけて普及した往復式の蒸気機関も、一九世紀末以降に登場した蒸気タービンや諸種の内燃機関もそれ自体は機械である。その機械(動力機)が他の機械(作業機)と結合して原動力を供給し、また発電機を駆動して電力という新種のエネルギー形態をも実用化した。さらに交通機関と結合して鉄道、汽船、自動車、航空機などをもたらした。これらはいずれも機械革命の様相を呈しているが、それら他方では労働手段(道具・機械)の駆動力や調理・暖房の熱源という点では、伝統的な再生可能エネルギー(人力・畜力・水力・風力・薪炭)のみを用いる状態から化石燃料依存への大きな転換(エネルギー革命)であったことは明らかである。

伝統的な再生可能エネルギーとは、地球のエネルギー収支という観点からみるなら、人力・畜力・水力・風力・薪炭を消費した時点から遡るごく短い期間(数日から一〇〇年程度)に地球が太陽から受け取ったエネルギーの一部を何らかの仕方で利用している。人力・畜力・薪炭は、植物が太陽光のエネルギーを光合成に用いて大気中の二酸化炭素を炭水化合物(植物体)という形で固定化した化学エネルギーを利用

は約一兆トンである。ジェヴォンズの心配は当時としては数千年後に訪れることであって、現在の消費量でも、石炭は優に一〇〇年以上はもつ。ジェヴォンズの懸念が共有されなかった第二の理由は、石炭以外にも石油、天然ガス・シェールガス、原子力など、二〇世紀に新たなエネルギー源が次々と実用化されてきたことにある。

むしろ、ジェヴォンズの懸念は定性的にはまったく正しい。有限の資源は使い続けられいつか枯渇し、価格は急騰する。価格が急騰するなら、化石燃料の消費量は減少するはずだが、化石燃料に代わるエネルギー源が実用化されないならば、近代産業文明は崩壊する。そして、まさに、この新種のエネルギー源という点で、われわれは化石燃料に依存したエネルギー革命からは卒業可能な地点に差し掛かっている。水力、風力、地熱、潮汐、太陽光発電など再生可能なエネルギーで人類が必要とするさまざまなエネルギーを供給することは原理的にも技術的にも可能である。その点について詳細に論ずる余裕はないが、直感的に了解可能な数字を示すことにしよう。

現在、人類が一年間に消費しているエネルギー総量は約一三一PWh(一三・一京Wh)である。これは出力一〇〇万kW(一〇GW)の発電所二万五〇〇〇基を一年間ずっと運転して得られるエネルギーに等しい。こう書くといかにも巨

大なのだが、地球が太陽から一年間に照射されているエネルギーの総量は一五二万PWh(一五二〇〇京Wh)である。このうち三割は大気・雲・地表に反射されて(アルベド)、ただちに宇宙に放射されているが、残りの七割(一〇七万PWh)は、地球(地表・海水・大気・雲)にいったん吸収されて、冬季・夜間に冷えた気温・水温を上昇させ、また風や雲・降水を発生させている。人類は長い間、そのごく一部を風力や水力として利用してきたが、いまでは太陽光発電という技術でも地表に降り注ぐ太陽のエネルギーを利用することができ、地球に吸収される太陽のエネルギーのわずかに〇・〇一二パーセント(八二〇分の二)を人類のさまざまな活動に必要な仕方に変換できるなら、現在消費している一三一PWhをまかなうことは可能なのである。

エネルギーの規模としては太陽よりはるかに小さいが、地熱の三五PWh、潮汐の二六PWhもある。地熱をすべて人類にとって利用可能なエネルギーに変換する技術的な条件は整っていないが、総量でいうなら地熱だけで、現在の人類が必要としているエネルギーの三倍になるのである。これら再生可能エネルギーのごく一部を利用できれば、人類は化石燃料と原子力に頼らずに、必要なエネルギーを入手できる。かりに、一三一PWhのすべてを発電効率二〇パーセントの太陽光発電で調達しようとするなら、地球

表面積の〇・八四パーセントに太陽光パネルを設置すればよい。むろん、緯度による日照時間の差や、天候による発電量の変動などがある。こうした変動は水力、風力などにもあるから、再生可能エネルギーで必要量を安定的にまかなうためには、蓄電や遠隔地間の送電などによる補充と設備の冗長化も必要となるが、化石燃料と原子力に依存しないエネルギー供給が原理的に可能であることは直感的には明らかだろう。

産業用の動力・熱源、家庭の照明・暖房・調理用のエネルギー、そして交通機関の動力のほとんどは、こうした再生可能電力に置き換えることができる。大型長距離の船舶輸送は風力(帆)と太陽光発電・蓄電を組み合わせることで化石燃料への依存は極小化しうる。航空輸送がおそらく最後まで化石燃料に依存し続ける分野となるが、その排出する二酸化炭素は国際航空(国別排出量に含まれない)が全世界の排出量の一・七%で、これに国内航空と軍用航空の排出量を合わせても、たかだか現在の排出量の三%程度である。つまり、各種のエネルギーのために排出している二酸化炭素のうち九七%は排出せずに済みますことを具体的方策とともに展望できる地点にわれわれは到達しているのである。

むろん、風力発電・太陽光発電・地熱発電などのエネルギー変換効率や単位価格当たりの獲得エネルギー量を高め、したい問題である。産業革命は、道具・作業場を機械・工場に変え、伝統的な再生可能エネルギーに加えて熱機関(化石燃料をエネルギー源とする動力)を人類にもたらした。われわれは、いままその延長上にいるが、エネルギー革命からは卒業可能なところに来ている。しかし、いま一つの根源的な変革が産業革命によってもたらされた。それが原料革命であり、この変革も大量の温暖化ガスを排出し続ける大きな原因となっている。つまり、エネルギー転換だけではゼロエミッションは達成できないのである。

人類は原始時代から一九世紀にいたるまで、土木・建築・造船・機械製造の主たる資材として木材(森林資源)を用いてきた。ピラミッドや西洋中世の大聖堂のように石材も土木・建築の資材ではあったが、一つが数トンにもなるような重い石材は人力や荷駄では移動できず、木製のコロヤクレーンを用いなければ、運搬することも、高所に吊り上げて設置することもできない。プリーゲルの「パベルの塔」の細部を見るなら、あちこちに木製のクレーンや足場が描き込まれていることがわかる。つまり、石を利用可能な資材にしてきたのは木材だったのである。製鉄原料も古代から一九世紀にいたるまで鉄鉱石・砂鉄と木炭であった。農業原料としては人糞尿や畜糞のほかに多用されたのは森や野で刈り取られた枝葉(緑肥)や草木灰であった。

また、蓄電・充電・送電などの点でエネルギー供給を安定化させるために必要なことはいままも多いが、それらはすべて、必要な原理を解明し、技術を開発し、実用化するための研究にどれほどの費用・人員・時間を割くかという問題に還元可能であろう。すでに、EUや中国は急速に再生可能エネルギーの方向に舵を切っているが、それは、エネルギー革命から卒業可能な地点を見通せるところに人類が到達していることを示す証左であるし、また、新しいビジネスチャンスでもある。言い換えるなら、あれこれの理屈を並べて再生可能エネルギーへの転換の困難性に拘泥するのは、古いエネルギー業界の利権と古い発想から脱却できない政策の限界を示しているにすぎない。日本やアメリカなど、基礎研究でも技術開発でも潜在的に高い力を持ち、かつ、エネルギーを大量に消費している国がエネルギー転換に最前線に見ても積極的でないのは、こうした古い利権と古い政策のもたらす害悪であるといっても差し支えない。

## 2 原料革命

### (1) 原料革命の前・森林資源による制約

温暖化への関心のほとんどはエネルギー転換(エネルギー革命からの卒業)にとどまっておらず、もう一つの大事な側面を見落としているのではないかというのが、本稿が提起

こうして、人類の生存にとって必要な土木・建築・造船・機械製造、製鉄、農業のすべてにおいて、森林資源が本源的な原料を供給し続けてきたのである。したがって、森林資源を使い尽くした文明は、現在知られている限り一つの例外を除いて、すべて滅亡している。たとえば、シュメール（現在のイラク）では五〇〇〇年以上前に大規模な農耕牧畜を展開して、世界で最初の都市文明ウルクが栄え、そこでは世界最古の文字が用いられた。都市の宮廷・官僚・軍隊・学者・商工業者は食料を生産せず消費するだけであったが、彼らに食べさせるだけの食料と都市文明に必要な木材を供給するために、シュメールの伝説的な王ギルガメシは、森林を伐採して大量の木材・薪炭を確保するとともに、その土地を農地・牧地にして食料生産に振り回した。叙事詩では、ギルガメシと彼の盟友が、森の大王フンババとの凄絶な闘いにおいて奸智を用いたことも記されている。こうして、周囲の諸民族から仰ぎ見られるほどの繁栄を謳歌したシュメール文明は、しかし、数百年後には表土流出・塩害・干ばつに見舞われ、雨が降り続くと森林を失った土地は保水力がないため一気に洪水をもたらし、この大洪水は、シュメール語の洪水神話やアッカド語のギルガメシ叙事詩として残り、さらに、イストラエルの民によってノアの方舟伝説として記憶され、周辺の諸民族

近代の歴史の中では、ほかにいくつも判明している。

## (2) 原料革命のもたらした変化

森林資源を使い尽くしたのに滅亡しなかった唯一の文明が、原料革命を経験した近代産業文明である。それはイギリスに始まる。

イギリスでは、すでに一八世紀初頭から人口と一人当たりGDPの両面で経済成長が常態化し、食糧需要に応えるために低湿地の干拓・排水事業や、輸送需要増大に対応した港湾や道路・橋梁の整備などに、大量の鉄材を用いるようになっていた。イギリスは鉄鉱石は豊富に産出するが、製鉄のもう一つの原料である薪炭を獲得するために国内各地にあった森林を短期間のうちに伐採してしまい、森のない土地へと変貌した。長大な木材が得られなくなったため、一六世紀以降の近世イギリスを特徴付けてきた木骨造り(Catwalk)の建築は廃れて、煉瓦建築に取って代わられ、また、造船用の木材は輸入に依存するようになった。森林資源の枯渇はイギリスの建築・造船・製鉄に甚大な影響を及ぼし、豊富な森林資源の残っていたスウェーデンやスペインから大量の鉄を輸入するようになった。一八世紀のイギリス経済は、森林資源の枯渇と鉄材輸入という点で危機に瀕していたのである。

ところが、こうした状況に対応して、イギリス各地で産

の間にも同様の記録が残っている。栄華を誇った人類最初の都市文明は森林破壊によってあっけなく滅んだのである。もう一つのよく知られた例がイースター島の巨石文明である。南西太平洋の絶海の孤島で、最も近い無人島から四〇〇キロ以上、有人の島からは三〇〇〇キロも離れている。この島が一八世紀にヨーロッパ人に発見されたとき、木は一本もなく、大きな家畜もいなかったし、船もなく、わずかな人口は島内に逼塞していた。ところがこの不毛の島の海岸部には五七〇トンもある巨石像(モアイ)が林立している。オランダ人の船長ヤーコブ・ロツヘフェーンはそれから巨石像がいかに造られ、運ばれたのか訝しんだが、それは、巨石を採石地で掘り出し、それを運び、立てるのに必要な長大な木材を調達できる森林がこの島にはなかったからである。イースター島の巨石像は長い間、謎とされてきたが、二〇世紀末に花粉考古学等の方法で調査した結果、かつては巨木を調達できる森林があり、土木・建築・造船業に利用されていたのだが、一八世紀までには森林資源は枯渇して、巨石工事も造船もできなくなっていた。イースター島の最後の巨木を切り倒したあと、彼らはモアイ像を新造できず、船の修理もできず、小さな島に細々と暮らさなければならなくなっていた。

森林資源を使い尽くした文明が崩壊するという事例は前

出する石炭を製鉄原料にしようとする試みが登場する。とはいえ、石炭には硫黄・燐・珪素など炭素以外の成分も含まれているため、そのまま製鉄に用いるなら、使い物にならない低品位の鉄しか得られない。イングランド南部のエイブラム・ダービー(同姓同名で三代続いた金属製錬業者。初代は一六七八年生一七二七年没)は一八世紀初頭から一九世紀初頭までかけて、石炭を乾留して炭素純度の高いコークスに加工して製鉄原料に用いる技法を開発し、実用の域にまで洗練させた。コークス製錬法による鉄は当初は鍋ややかんなどの小物用に、高価な黄銅の代替材として用いられたが、ダービー一族は次第にコークス法による鉄の生産性と品質を改善し、一八世紀末にはニューコメン機関の気筒や橋梁用の長大鉄材など強度と耐久性を要するものも生産できるようになった。さらに、水車用の巨大な軸、蒸気機関、鉄道車両とレールなどにもコークス製錬法による鉄材は用いられるようになり、産業革命の原料面での基盤を形成した。しかも、コークスは木炭よりも機械的強度が高いため、高炉を大型化しても、底部の木炭が潰れて通気を妨げるこどがなくなつたため、製鉄量は飛躍的に高まった。こうして、イギリスは森林資源の枯渇という危機を凌いで、むしろ、その後の近代産業文明に道を拓いたのである。

原料革命はこれに留まらなかった。一九世紀後半には製

鋼技術の一連の革新（一八五六年ベッセマー転炉、一八六四年ジームンス・マルタン平炉、一八七八年トマス塩基性転炉、さらにその後の塩基性転炉）があり、鉄鉄（鋼鉄）よりも可鍛性の高い鋼を大量に、安定的な品質で産み出すことが可能となった。さまざまな機械や蒸気機関（殊に汽機）、さらに鉄砲の性能が飛躍的に向上するのは、この一九世紀後半の製鋼技術の成果である。

二〇世紀初頭には、ドイツの化学者ハーバーとボッシュによって、石炭と水と空気がアンモニアを合成する安価な方法が開発された。ハーバー・ボッシュ法は、一方では硫安・燐安・塩安などの化学肥料の、他方ではダイナマイトなど現在まで用いられる窒素系爆発物の原料を供給し、二〇世紀の農業と戦争のあり方を大きく変えた。肥料はながらく人畜の糞尿や家畜の敷き糞、林野で採取された落ち葉・刈草・柴、さらに油粕や魚粕を施す伝統的な有機肥料であったが、それに加えて、一九世紀中葉以降はリービヒの無機栄養説などもあって鉱物（チリ硝石、グアノなどアンモニア原料）や骨粉を原料とする肥料が用いられ始めたが、それで養うことができた世界人口はただか二〇億人であった。ところが第一次世界大戦後に化学肥料が世界中で使われ始めるようになってから、二〇〇年もせずに世界の人口はおおよそ四倍に増加する。いうまでもなく、それは化学

肥料が可能にした農業生産力に支えられた人口である。逆に見るなら、いま、人類が化学肥料を用いられなくなったから、いかに食料配分を効率化し、また、食料廃棄（フードロス）を減らしても、現在の人口を養うのは不可能である。

### 3 原料革命と温暖化ガスとプラスチック問題

ここまでは、従来も経済史学が描いてきたバラ色の側面である。産業革命によって人類は自然の——とりわけ森林資源と農地面積の——制約から初めて「解放された」という物語である。

ところが、原料革命も無視できない量の温暖化ガスを発生し続けてきた。原料革命では石炭・石油・ガスは何かを製造する原料に用いられているのだから二酸化炭素は発生しないだろうと考えるのは早計である。コークス製錬法では、コークスは鉄鉱石を還元するために投入される。炭素が酸化鉄から酸素を奪うことによって、鉄鉱石は鉄に還元されるのであるから、ここでは炭素は酸素と化合して、最終的には二酸化炭素となって大気中に排出される。製錬された鉄には炭素が多く含まれている（還元している）が、それは製鋼工程で酸素と化合してやはり二酸化炭素が排出される。H・ベッセマーは自らが開発した方法を「燃料不要の製鋼法」と宣伝したが、それは、溶けた鉄鉄に強制送

風して、鉄鉄中に含まれる炭素を「燃やす」ことによって鉄鉄の高温を維持し、かつ脱炭するという所期の目標を達成していたからであって、製鋼工程で二酸化炭素が発生しないことを意味するのではない。

鉄鋼業に投入される炭素のほぼすべては、さまざまな工程を経て、最終的には二酸化炭素として大気中に排出されている。かつての木炭による製鉄なら、発生する二酸化炭素は過去数年〜一〇〇年ほどの間に植物が光合成した量の範囲内であって、同程度の時間で、その二酸化炭素は再び植物体に光合成される。しかし、近代鉄鋼業に用いられるコークスは過去数千万年〜数億年かけて地球に蓄積されたものであって、それを一挙に用いるなら、地球上の植物が光合成できる量を超える二酸化炭素が排出されるのは、エネルギー源としての化石燃料であれ、製鉄原料としての化石燃料であれ、変わることはない。

ハーバー・ボッシュ法によるアンモニア合成に投入される石炭ないしメタンは、水を水素と酸素に分解するために用いられる。そこで発生した水素と大気中の窒素を化合させてアンモニアを得るのだが、水から発生した酸素はすべて投入された炭素と結合して最終的に二酸化炭素となって大気中に放出される。

また、セメント製造や製陶業・窯業、製紙業など多くの

産業の工程では化石燃料が用いられており、二酸化炭素を排出している。たとえば、土工事は土建機材やダンプ・トラックの燃料として化石燃料を用いるだけでなく、その原料となる鋼材やセメントの製造工程も化石燃料に依存しているのである。

化石燃料の原料用途のうち、石油・天然ガスからプラスチックを製造する工程では、化石燃料に含まれる炭素のほとんどは酸素と化合することなく、製品が産み出されている。したがって、プラスチック工業は化石燃料の他の用途と比べるなら温暖化ガスという点では「クリーン」であるが、膨大に生産され、回収・再利用されないプラスチックの膨大な生産と、回収・再利用されないプラスチックのプラスチック海洋ごみ問題等々は実に大きい。諸種のプラスチック製品、たとえばペレット、ペットボトルやポリ袋が細かく分解して海洋や大気を汚染しているだけでなく、工業用研磨剤や化粧品・洗顔料の研削材、紙おむつなどの高吸水性ポリマー、衣料品の化学繊維、塗料や包装材料など、われわれの生活のほとんどあらゆる局面からプラスチックが回収困難な微細片となって環境中にばらまかれ、それは海産物や食糧にも含まれて、生活の中に忍び込んでいもいる。本稿の主題は原料革命が地球温暖化にどれほどの重さを持っているかを示すことだから、プラスチックに関わる問題に

はこれ以上立ち入らないが、これも原料革命——容器・包装・繊維・研磨剤・吸水材の原料が陶磁器ガラス製品や植物由来のものから、石油・天然ガスに由来するプラスチックに転換した原料革命の二〇世紀後半の最終局面——が、人類に突き付ける問題の一つであることは確認しておこう。

#### 4 エネルギー転換だけでは温暖化を統御できない (1) 原料革命由来の温暖化ガス

では、原料革命はどれほどの温暖化ガスを排出しているのだろうか。化石燃料の用途別の消費量に関しては、さまざまな数字が氾濫していて決定版というべき信頼しうるものはないので、さまざまな統計を用いておよその見当を付けることにしよう。

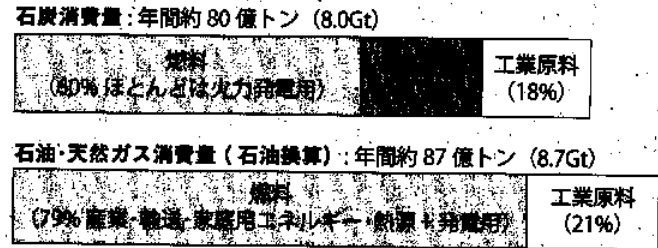
下図に見られるように、石炭の年間消費量約八〇億トンのおよそ二二％が鉄鋼業に、一八％がその他工業原料に用いられている。鉄鋼業用の二二％のほとんどは最終的に二酸化炭素として大気中に排出されているし、工業原料の一八％も、セメントに含まれる石炭灰やクレオソート油（カーボンブラックなど塗料原料）などを除くなら、やはり大半は二酸化炭素として排出されている。石油・天然ガスのうち工業原料となる約二二％の大半はプラスチックやアスファルトとなるため、ここでは単純化して、二酸化炭素はほと

トンの二酸化炭素となるから、燃料用の六・九ギガトン（八・七ギガトンの七九％）で四・九ギガトンの炭素（二七・九ギガトンの二酸化炭素）を排出している。つまり、少なめに見積もっても年間一〇・二ギガトンの炭素が大気中に排出されているのである。このうちエネルギー用が七・九ギガトン（七七％）で、原料用が二・三ギガトン（二三％）となり、原料革命は温暖化ガス排出量でみるなら四分の一の重さを占めている。

国際エネルギー機関は二〇一九年のエネルギー関連二酸化炭素排出量を三三・三ギガトン（炭素に換算するなら九ギガトン）と発表しているが、これは原料として投入された化石燃料から排出する二酸化炭素をほとんど含まないか、あるいは石炭の炭素含有率をありえないほど低く計算するなど、過小な見積もりと考えられる。人類が諸種の経済活動で一年間に排出している二酸化炭素は、化石燃料の消費量から算出するなら、三八ギガトン前後にはなるはずである。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第五次報告書（二〇一三年）によるなら、産業革命以前からの世界平均気温上昇を最も高い確率で2℃以内に抑えるためには、七九〇ギガトンの炭素が累積排出量の上限である。二〇一一年までに人類の活動によってすでに五一五ギガトンが排出されているから、それから九年を経て今年中に六〇七ギガ

石炭・石油・天然ガスの年間消費量と内訳（2018年、概数）



んど排出しないと考えると、  
では、現在、年々どれほどの二酸化炭素が排出されているの  
であろうか。石炭も石油も炭素  
が質量の過半を占めるが、むろ  
ん一〇〇％ではない。純炭素一  
トンを完全燃焼させると三・六  
七トンの二酸化炭素が発生する  
が、火力発電用燃料炭は一トン  
当たりおよそ二・三トンの二酸  
化炭素を産み出す（資源エネルギー  
庁「エネルギー源別標準発電量・炭  
素排出係数一覧表」二〇一八年度版よ  
り算出。以下同様）。四・八ギガト  
ン（八ギガトンの六〇％）の火力発  
電用石炭消費で約三・〇ギガト  
ンの炭素（二・一ギガトンの二酸化

炭素）を排出している。鉄鋼業や工業原料の原料炭は燃料炭よりも炭素含有量が高いため、一トン当たり少なくとも二・六トンの二酸化炭素となる。三・二ギガトン（八ギガトンの四〇％）の原料炭消費で約二・三ギガトンの炭素（八・三ギガトンの二酸化炭素）を排出している。原油はトン当たり二・六

トンに達し、残りは一八三ギガトンにすぎない。仮にこれからも年々一〇・二ギガトンの炭素を排出し続けるとするならば、一八年後（二〇三八年）には累積排出量は七九〇ギガトンに到達してしまう。むろん、このことは、一八年後にただちに世界平均気温が産業革命以前と比べて2℃上がることは意味しないが、数十年・数百年後には非常に高い確率で2℃上昇させる条件が二〇三八年までに確定してしまう。温暖化とはそれほど喫緊の課題なのである。

化石燃料から得ているエネルギー（電気・動力・熱源）をすべて再生可能エネルギーに転換しえたとしても、現在の鉄鋼・セメント・化学肥料の生産量（＝原料革命のもたらした社会を維持しようとするなら、その化石燃料消費により年間二・三ギガトンの炭素は排出され続けざるをえない。それだけでも残り一八三ギガトンは八〇年で使い切ってしまう。  
(2) 原料の回収・再生・再利用とそのための研究資源  
化学肥料は施肥後に分解・吸収されるから再利用は不可能だが、鉄鋼やセメントは素材から新規製造するだけでなく、廃材を回収・再生・再利用することが可能である。コンクリートは土建構造物を解体後、鉄筋・鉄骨や被覆材などと分離したうえで粉砕して、コンクリートがらとして路盤材などに再利用できるし、アスファルト舗装も剣がした後の廃材を粉砕して、アスファルトを含有する砕石として

新規アスファルトに混入して、再利用可能である。いずれも廃材の九割程度は再利用されているし、その工程で発生する温暖化ガスもわずかである。コンクリートの微粉末を分級して、再生セメントを製造する技術も確立しており、その品質は天然素材から製造されたセメントと遜色ない。

鉄鋼(鉄屑)も古くから回収・再生・再利用の技術は確立している。江戸時代には木炭や砂鉄の相対価格は高かったから、手間暇をかけた再利用は経済的にも充分成立したのである。現在、鉄鋼の再利用はおもに電炉によってなされており、アメリカでは鋼材生産量の過半を占めているが、日本では電炉鋼の比重は半分には達していない。電炉は鋼材をアーク放電によって発する熱で溶かすため、コークスへの依存度は低く、二酸化炭素発生量も四分の一ほどに収まるが、元の鋼材に合金として含まれていたり、鍍金や部品(鋼線、電線、電子基板、電動機など)として付着していたりする銅、ニッケル、鉛、錫などの元素が電炉再生を繰り返すたびに高濃度で鋼材中に蓄積されてしまう。鉄鋼の酸化処理を行う電炉では、鉄より酸化しにくいこれらの元素は鉄の中に滞留し続けるため、「浮浪者元素(Tramp elements)」というありがたくない名称が電炉工業では用いられている。再利用を繰り返すたびにこれら元素の蓄積によって鋼材の品位は低下する。土建用の鉄筋はほとんどが電炉鋼だが、

鉄鋼生産量(年間約二億トン)を維持しなければならぬと日本鉄鋼連盟は予測している(日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」二〇一八年一月)。むしろ、コークス比を低減するなどの努力はなされるのだろうか。この予測は鉄鋼の新規生産だけで、IPCC第五次報告書が気温上昇を2℃以内に収めるための炭素累積排出量七九〇ギガトンをはば使い切ってしまうことを物語っている。

むすびにかえて「想像力と責任感の問題」

産業革命の原料革命としての側面は、化石燃料を用いることによって、人類を自然(森林資源と農地)の制約から一時的には「解放」した。その結果が現在の人口であり、「豊かな」産業社会である。土木・建築・造船資材を木材から鉄鋼とセメントに変え、肥料と農業も化石燃料から合成できるようになり、さらに大量のプラスチックが生活のあらゆる局面に浸透している。しかし、この原料革命も、エネルギー革命とともに地球温暖化の大きな原因であり続けている。原料革命の方がエネルギー革命よりも始末が悪いのは、そこから卒業する見通しが立っていないことである。巨大建造物、道路・橋梁・隧道、防波堤にダム。これらはいずれも膨大な鉄鋼とセメントの固まりである。こうしたものの新規造成を鉄鋼やセメントの再利用の範囲に収

通常のH形鋼だと高強度を要さず、長大でないものなら電炉鋼が用いられるものの、大型の建築物・橋梁などの長大鋼材では、表面にヒビが出たり、内部に亀裂が発生したりするおそれがあるため電炉鋼は不向きと考えられている。さらに、自動車や家電の外板のように複雑な曲面を成型するために高品位の高張力鋼材の薄板を製造するには、電炉鋼はほとんど用いられず、現在も素材(鉄石とコークス)から製錬された鋼材が重用されている。日本の電炉鋼比率が低いのは、こうした高品位鋼材に日本の鉄鋼業の競争分野が特化しているためである。

むしろ再生鋼材の品質を高めるための努力や技術開発も進んではいるが、いずれも問題は、費用と品質の点で新規製錬と競争しうるかという点にある。再生鋼の品質と競争力を高めるための研究開発は温暖化問題の観点からも決定的に重要なのだが、残念ながら科研費などの競争的資金はこうした地味な分野にはなかなか付きにくい。

いま一つ、鉄鋼再利用の大きな課題は一人当たり鉄鋼蓄積量(すでに鉄鋼として社会に存在している量)が概ね一〇トンを超えないと安定的な鉄鋼再利用社会には到達しがたいと予想されていることである。先進国はこの水準を超えているが、今後、中国、インドなどの巨大人口国が一人当たり一〇トンの蓄積量に達するためには、二一〇〇年まで現在の

め、地球の総人口を化学肥料を用いないで養える二〇億人ほどに収め、プラスチックはすべて再利用し、吸水性ポリマー(紙おむつやリハビリパンツ)には依存しない社会に移行できるのはいつのことであろうか。

原料革命から卒業できる時期は、残念ながら現時点では明確に答えられない。それゆえにこそ、エネルギー革命からの卒業は喫緊の課題なのだが、それすら遅々として進まない現状を納得のいくように説明できる言葉をわれわれは持っているだろうか。東京駅や横浜駅が水没する将来を、世界の若者に、さらにその先の将来世代に説明する理屈なら捻り出せるかもしれない。しかし、そこで欠けているのは将来世代への責任感である。驚くべき危機的な状況なのに、世界は意外なほどに危機感に満ちていない。ルイ一五世の愛人ボンパドゥール夫人が「吾が亡き後に洪水は来たれ」と曰ったように、おのれの栄華の後のことなど知りたくもないという気分は確かにありうると思うが、それは世界を認識する哲学が根源的に衰弱した後を特徴付ける、想像力を欠いた言説である。フランス絶対王制は民衆によって倒され、その後に共和制が成立した。では、原料革命の後の社会は誰が構想し、実現するのだろうか。今般の疫病禍はそうした難問を熟考するのによい機会かと思うのだが、さて、誰がその先頭に立つ勇氣を持っているだろうか。