

風車とトロミロの木

山本 健治

倉敷芸術科学大学産業科学技術学部

(1996年9月30日 受理)

1. はじめに

夏も終わり近くなつたある日曜日の朝、最近ではめずらしく感動的な記事を新聞の日曜版のしかも全面広告のページ¹⁾で読んだ。“過去から未来への警告”という見出しのついたそのレポート記事を読みながら、私はダリウス型風車^[A]のことを考えていた。この小論では、風力発電などのソフト・エネルギー・パスについて簡単な考察をおこないたい。

巨大な石像で知られる南東太平洋のイースター島^[B]には、そのモアイが、現存する数だけでも1000体以上散在している。また石組みの祭壇アフも300箇所以上が確認されている。それは、かつての居住者が時間や食糧に恵まれて豊かな生活をしてきたことを物語っている。イースター島の文明の起源は、BC1000年ごろから始まったとされる太平洋地域でのポリネシア人の広範囲にわたる移動の最終段階に位置づけられる。日本では古墳時代にあたるAD400年ごろ、数十人程度のポリネシア人の小規模集団が、瀬戸内海の小豆島より少し大きな孤島に西方から移住してきたのがその始まりであつたらしい。そこには大家族を基本単位とした宗教儀式を重んじる血縁氏族社会が成立した。他のポリネシア人社会と比較して特異なのは、祭礼に十分な時間と労力が振り向けられた結果、世界的にみても希有な社会が誕生したことにある。人々が食糧生産のための労働から解放され、全力をあげて精巧な石組みの祭壇や石像の建造に取り組むことができた、ということは十分に文化の名を冠するに値する。島に持ち込まれたサツマイモは土壌とよくなじみ、その栽培とニワトリの飼育にかかる時間はとるに足らぬものであつた。漁業には不向きな深い海や飲料水源の貧弱さにもかかわらず、最盛期の16世紀の人口は約8000人にまで膨れ上がり、いわゆる“人口爆発”が起きている。近年行われた花粉分析などの調査からは、この島にトロミロの木やヤシの類木が生い茂っていたことが突き止められた。しかし、石像建立の競争や人口増加により莫大な量の木材を消費したので、森林破壊は全島にまで及んだ。オランダ人たちが島を発見した17世紀には森林すべてが姿を消していた。実はヤシ類の花粉は8世紀以降の地層から急に減り始め、11世紀の初めには消滅しており、その代わりにイネ科の花粉が増加している。森林の激しい伐採が行われたのはそのころらしい。

イースター島はもともと資源の乏しい島だった。その枯渇する資源をめぐる氏族間の争いがもとで島の人口は漸減し、貴重な文明は消滅してしまった。木材の切り出しは、表土の流失をもたらしただけでなかった。荒廃した土壌は、国立公園で保護栽培されているトロミロの苗木

が根付く見込みの少ないことを示している。絵空ごとには過ぎないが、もし2～3基の風車と発電機、そして電気を利用するための少しばかりの設備がこの離れ小島にあったとしたら、島の歴史は現実のものとは違っていただかも知れない。

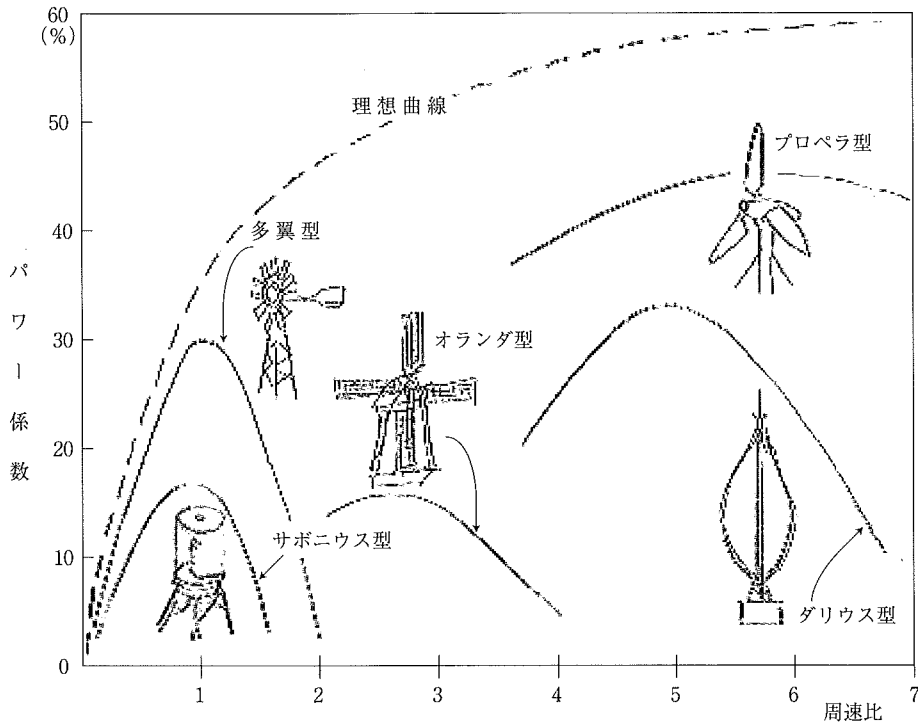


図1. 風車のパワー特性

2. 風力発電と風車

風車のしくみを中心に風力発電を概観しよう。風車には大別して、風の抗力だけで羽根または翼（ブレード）が回る抗力式風車と、風で翼に生じる揚力によって回る揚力式風車の2種類がある。プロペラ型風車やダリウス型風車は揚力式風車の仲間である。抗力式のものといえば、気象観測用の風力計を思い浮かべればよい。一般に揚力式風車は風速より速い周速度で回ることができる。風のエネルギーから取り出せるパワー、つまり効率に関してはおよそ揚力式風車のほうに利がある。風車のパワーは図1のように周速比（＝ローター円周速度÷風速）に依存する²⁾。

風がよく吹く地点を選んで風車を設置し、その回転エネルギーを発電機軸に伝達して発電するのが普通である。利用されている揚力式風車の型式には水平軸プロペラ型と鉛直軸ダリウス型がある。採用数の上からは、2枚または3枚のブレードを持った水平軸プロペラ型が最も一般的だ。その形はちょうどプロペラ飛行機の胴体の前半分に似ている。日本の民間企業からア

アメリカなどへ向けて数多く輸出されているものはこのプロペラ型が中心である。プロペラ型は電力会社も導入しており、たとえば九州電力が鹿児島県に持っているプロペラ型の発電所などはすでに商業ベースにのっている。他方、このごろ鉛直軸ダリウス型も見なおされていて、関西電力宮津エネルギー研究所の5kW発電機や、北九州市若松区にある電源開発若松総合事業所の15kW発電機などがある。写真は後者のもので、支柱の高さは18m、ローターの直径は10mである。この規模だとダリウス型風力発電機は風速6.5m/s（メートル毎秒）以上で発電を開始し、12m/sで定格の15kWを出力する。風速12m/sのときの回転数は毎分85回転になる。支柱に取りつけた風車軸の安定度を増すために、支柱をワイヤで頭頂から地上へ向けて四方に張って支持する。写真はこの型では日本最大のものである。

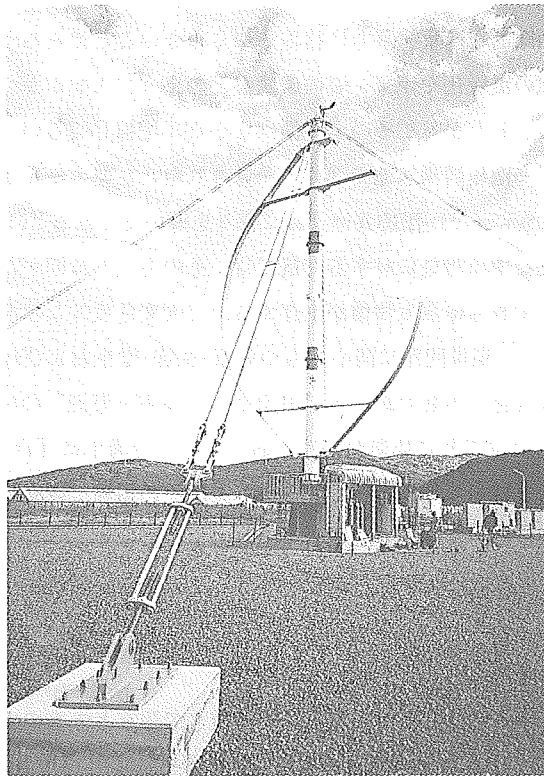


図2. ダリウス型風力発電機

いずれの型でも風力発電には風速10~30m/s程度の風が最適で、これ以上のときは電磁ブレーキなどで過大回転を防止するように設計されている。数百W（ワット）の実験用のものから1000kW（キロワット=1000ワット）級の大型機まで製作されているのが現状だ。プロペラ型はプロペラが絶えず風上を向くように、回転軸の向きを水平面内で変える必要がある。それに対してダリウス型では、対称翼断面をもつ2枚のブレードが鉛直軸のまわりで縄跳びの紐のように回転する。ギリシャ文字Φの形をした回転枠（ローター）がぐるぐる回ると思えばよいだろう。縦型風車つまり回転が水平面内なので風向きの変化に影響されることがなく、よって羽根

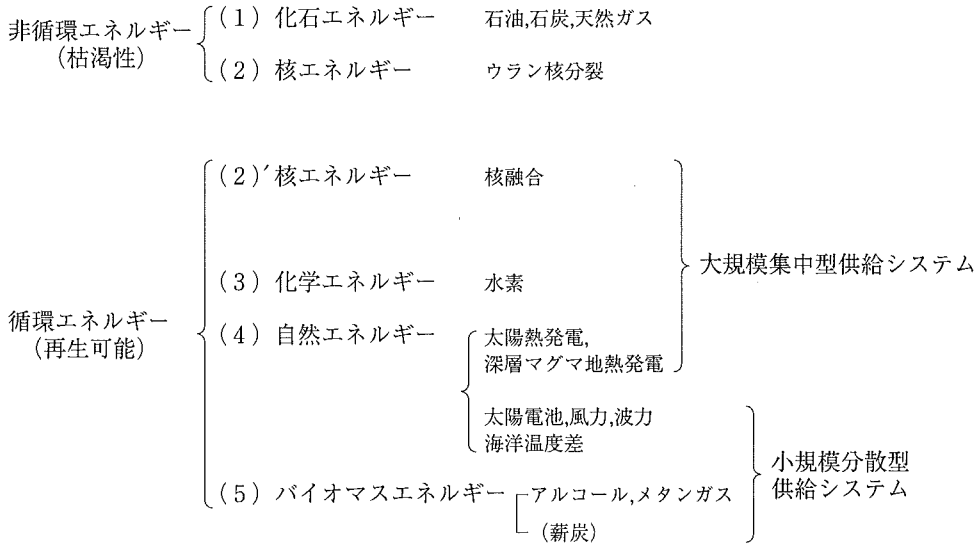
(ブレード)を風の方向に向ける制御機構が不要である。したがってまた、誘導発電機等の電気系統部をすべて地上に設置することができるという大きな利点もある。第3の長所は突風に対して安全性が高いことである。ただし始動には外部から動力をかける必要があり、通常それには発電時に蓄えておいた電力が用いられる。

現在の社会構造は、エネルギー源として化石燃料を大量に消費することによって成り立っている。化石燃料を消費する際に排出する二酸化炭素^{〔C〕}を完全になくすことは技術的に不可能である³⁾。技術面だけでなく法的な措置という点でも、二酸化炭素の排出を違法な行為として取り締まるのは難しい。だが1990年代に入ってから、フィンランド、オランダ、ノルウェー、スウェーデンのように炭素税^{〔D〕}を導入することにより環境破壊の程度を経済的に定量化し、あわせて化石燃料の消費量を削減しようとする国々が現れた。理想をいえば世界一斉に同じような税制を導入し、国際的な産業競争力に格差をつくらないことであろう。1980年代以降の環境汚染の規模は、地球の温暖化やオゾン層の破壊などのように人類がかつて経験したことのない広範囲なものである。したがってその全体像はなかなか把握しづらい。必ずしもすべての環境問題がスマートに——南極観測基地で初めて発見されたオゾンホールがフロンとの因果関係の同定に結びついたように——国際的共通認識に我々を導いてくれるとはとても思えない。が、そのようなグローバルな環境汚染に対する対策では、その方法と時期がたいへん重要で、それを誤ると人類のみならずあらゆる生物種が生存する上で大変危機的な状況を招くことになりかねない⁴⁾。この見地から、環境問題に関心をもつ児童・生徒・学生および社会人の育成、いわゆる環境教育はもっとも重要な事業である⁵⁾。“社会とエネルギー資源”の授業に際して私は思い切った教材の準備を1コマごとに数週間かけておこない、受講生に『自分でも調べてみよう』と思わせるような作戦を練って教室に行くことにした。その過程で役立ったのは「授業をどうする」⁶⁾であった。地球はいま生きている我々だけのものではなく、将来世代も含めた“みんなのもの”だと気持ちを引き締めながら、今後も作戦を続けるつもりである。

3. 自然エネルギー論考

人間活動の源泉はエネルギーである。エネルギー抜きで現在と未来の生活を考えることなど不可能である。それは、はるか昔の原始社会の生活にもどることを想像できないのと同じだ。表1にエネルギー利用方法の大まかな分類をした。過去の太陽エネルギーが変換され貯蔵された石油、石炭、天然ガスなどの化石エネルギーやウランなどの核エネルギーのように、一度燃やしてしまえばそれで終わりであったり(非循環的)、あるいは資源量に限界(枯渇性)があるようなエネルギーを追求する路線をハード・エネルギー・パスといい、それとは反対に水力、風力、地熱、太陽、潮力、海流、波力などの自然エネルギーやアルコール、メタンガスなどのバイオマスエネルギーのように、人々の身近にあって何度でも使えるか無尽蔵な供給が可能な(再生可能で循環的)なエネルギーを追求する路線をソフト・エネルギー・パスという⁷⁾。

表1. エネルギー・パス⁸⁾



人類は一次エネルギー^[E]の大部分を化石燃料に依存しているが、最近の本格的な資源調査に基づくローマクラブ^[F]での報告によると、石油の可採年数は40年から50年程度である。石炭は300年間ほど保つというが、現在の調子で燃やし続けていくと底をつくまえに地球のエネルギー循環^[G]は破綻し、人類の生存にかかわる難問が生じてくる可能性はたいへん高い。とりわけ、燃料消費が主というのは無駄遣いだらう。

膨大な新エネルギーとして注目されているものに、太陽熱、太陽光、風力、地熱、波力等の自然エネルギーと核融合エネルギーがある。太陽エネルギーはそれを地上で直接利用する(太陽炉発電、太陽光発電、太陽熱温水器など)にしても、あるいはまた、太陽エネルギーから変換された風や波のエネルギーを利用するにしても、空間的・時間的なエネルギー密度が小さいという難点がある。エネルギー密度は発電などの効率に直接かかわってくる。したがって、自然エネルギーの利用は従来から山間部や離島での生活エネルギー資源として、または災害時の応急的な電力資源などに限定されていたのだった。しかし今日では資源の有効利用や環境保護のための代替エネルギーとして、発電などの際の変換効率の改善という課題を背負いながらも、その活用範囲の拡大が検討されつつある。風力エネルギーは地球に降り注ぐ太陽エネルギーのなかのごく一部分に過ぎないが、他の自然エネルギーと同様に設備の製造段階を除けばクリーンで、しかも利用方法のはっきりしたエネルギー資源なのである。クリーンといえば、日本などの地震国でとくに有望な地熱発電や、剰余農産物を利用して作られるアルコール燃料^[H]と有機廃棄物から取りだして利用できるメタンガス等のいわゆるバイオマスも忘れてはならない。使用済みの天ぷら油からも自動車の燃料が精製される時代だ。そういった点でソフト・エネルギー・パスというエネルギー戦略^[I]は、環境を重視し省エネを意図したエネルギー消費

者側からの考え方である。

一方、核エネルギーの主なものには現在の主要な原子力発電である“核分裂”を利用する方法と、太陽でのエネルギー発生のおしくみと同じ“核融合”を利用する方法とがある。後者は多くの先進国で現在も大型研究が続けられており、共同研究も盛んに行われ、実用化の見通しがあると考えられている。ところで核分裂エネルギー資源のウラン235は、あと40～50年程度で枯渇する。そのため、ウランの大部分を占めるウラン238を高速増殖炉で分裂性のプルトニウムに変換して用いる方法が検討された。その試験を行っていた2国のうちフランスは中止したので、現在も試験運転をおこなっているのは日本だけである。

さて、太陽で発生したエネルギーの約20億分の1が地球に降り注ぐ。現在人類が使っているすべてのエネルギーの量はさらにその1万分の1にすぎない。10年前は2万分の1弱であった。これほど豊かな太陽エネルギーも、地上で1平方メートルの平面に垂直にあたるエネルギー密度でみると、最大でも1キロワット程度である。人間1人の身体表面から放射されるエネルギー発生率が約100ワットである。地表が受ける太陽エネルギーの面密度の規模は、ちょうど人間が土地1㎡あたりに10人ずつぎっしりと立ち並んでエネルギーを放射するのに匹敵する。この太陽熱放射を高水準で直接利用する完全に実用化された技術として太陽熱温水器^[1]やソーラーハウス^[K]がある。ここでは太陽電池を使って発電する場合を考えてみよう。電池の効率を約10分の1（地上に並ぶ人の混み具合が1㎡あたり10人から1人に減る）とすると、強い日照でも100ワット、年平均では30ワット程度の電力に過ぎない。1平方センチメートル当たり1日中照射を受けたとして、100cal/(cm²・day)といったところだろうか。そういったエネルギー密度の低さが原因で、いま地熱やバイオマスを含めて自然エネルギーを最もよく利用している国でさえ、国全体のエネルギー消費量に占めるその割合は高々2～3%にとどまっているのである。しかし将来はエネルギーの複合的利用（コジェネレーション）などの需要構造^[L]を再考したり、省エネルギー^[M]の検討を徹底する必要もありそうだ。都会生活で必然的に生じる種々の温廃熱の利用等々^[N]とも合わせて、新エネルギーの能動的利用の範囲は今後拡大する可能性をもっている。そして、太陽エネルギーをもっと積極的に利用しようとする動きも、最近10数年間で先進工業国の気象条件の適ったところを中心として盛り上がりを見せてきている。エネルギー政策的には、ハード・エネルギー・パスだけに固執し過ぎないことが重要ではないだろうか。

4. 持続的成長と地球温暖化防止条約

通産省工業技術院を中心に持続的成長とエネルギー・環境問題の同時解決をめざす技術開発がなされている。その名をニューサンシャイン計画といい、三つの技術体系からなっている^[9]。第一は地球温暖化防止行動計画の実現を目標とする革新的なエネルギー技術の開発、第二は地球再生計画の推進を目的とする国際大型共同研究プログラム、そして、第三は近隣途上国のエネルギー・環境制約に対応した適正技術の共同研究促進プログラムである^[10]。計画の期間は

1993年～2020年で年間平均550億円の予算が予定されている。

1996年7月ジュネーブで“気候変動枠組み条約”（いわゆる温暖化防止条約）の第2回締約国会議が開かれた。いまから適切な対応をとらなければ、21世紀には平均気温の上昇など温暖化の影響が目に見えて表れてくるという。残念なことにジュネーブ会議では温暖化防止の具体的な討論、たとえばCO₂排出権取引^[P]に関する議論などは行われなかった。その背景には、温暖化を「不確かなこと」ととらえる懐疑論があった。温暖化防止条約によれば1997年に京都で開かれる第3回締約国会議では、西暦2000年以降の規制を盛り込んだ議定書を採択する予定になっている。京都會議で気候の変動予測という「あいまいさ(?)」を受け入れ、経済的な打撃さえ伴う規制と対策に踏み出せるかどうかは、主催国日本の取りまとめ方にかかっている。

5. まとめ

実際にはあり得ないことだが、たとえば、ダリウス型風車を本学のグランドの中央付近に設置したと仮定する。その発電時の回転の豪快さは、風車から十分離れた教養学部棟の中にもあなたを威圧するだろう。風車の販売PRにあたっている訪問者から研究室で聞いたこのような話題は、見せてもらった写真とともに、実際この目で実物を見たいという強い気持ちを私に引き起こした。それがソフト・エネルギー・パスについて考察する契機にもなった。さらにスケールの大きな話題として多数の風力発電機を設置したいいわゆる風力発電農場^[Q]などもあるが、ここ中国地方にダリウス型風車を設計し製造している民間会社が存在することは初耳であった。日本ではカリフォルニアやオランダのように数多くの風車を配置する場所を見つけにくい、風力発電の実用性は明確なので、小規模分散型のエネルギー供給源として次第に評価されていくことだろう。

さて想像力は人間の特質である。地球をイースター島に置き換えて考えてはならない理由は何もない。もはや、地球が熱帯雨林や化石燃料などの有限資源に対する人類の収奪に対して屈服するのは時間の問題なのだろうか。少なくとも「多数の証拠を天秤にかけると、人間活動は地球気候に識別可能な影響を与えている¹⁰⁾」ことは確かである。われわれは誰でも未来を楽観したい。地球はイースター島とは違う。なぜなら、人類はいま地球の状況を客観的に眺め、未来を予測しうる知恵と条件をそなえている、と自己暗示をかけて...

貴重な時間を費やしダリウス型風力発電機の構造を明解に説明して下さった、磯部鉄工株式会社秋枝進、有光哲也の両氏と中国電力の藤原淳氏に感謝いたします。また、そのような機会を設けていただいた河邊誠一郎教授にもお礼申し上げます。

解説

[A] ダリウス型風車：フランス人のM.G.ダリウスによって今世紀初頭に考案されていた。これをカナダのテンプリンらが1960年代に再認識してから実証的研究が始まった。揚力式風車が回転する原理は飛行機が飛ぶのと同じくみである。回転する縄跳びの紐のような曲線を保ったブレードの断面は飛行機の翼と同じ形をしている。対置した2枚のブレード（2本の紐というべきか？）がO文字を形づくってローターとなり、そ

れが揚力を受けてその回転方向成分によって回転トルクまたは力のモーメントが生じる。

- [B] イースター島：南東太平洋，南緯27°，西経109°にあるチリ領の孤島。その名は1722年復活祭の日に発見されたことに因む。別名ラパヌイ島ともいう。火山島で現在は樹木がなく牧羊地となっている。ポリネシア系の原住民の人面巨石像，石碑などの遺跡や未解読の文字で知られ，遺跡保存のため国立公園に指定されている。
- [C] CO₂回収固定技術：燃焼ガスからCO₂を回収したり，大気中のCO₂を固定する技術はいろいろな方法が検討されているが，どちらかといえば見通しは明るくない。
- [D] 炭素税：化石燃料の炭素含有率に応じて税金をかける。ただし，これを実施した国では二酸化炭素の排出は減少するが，実施しなかった国では増大するおそれがある。
- [E] 一次エネルギー：自然界から直接採取された石油，石炭，天然ガス，水力，風力，地熱などのエネルギー。一次エネルギーを加工（精製，乾留，発電など）してつくり出されたエネルギーを二次エネルギーという。エネルギー統計では，たとえ二次エネルギーであっても輸入されたものは一次エネルギーに含める。
- [F] ローマクラブ：財界人，経済学者，科学者などで構成された，人類の生存にかかわる問題を研究する国際的な研究・提言グループ。
- [G] エネルギー循環：地球上に降り注ぐ太陽エネルギーは自然現象，気候変動や動植物の生存の源であり，そのエネルギーの流れは一つのサイクルを形成している。太陽エネルギーのうち30%は宇宙空間に反射され，47%は大気や地上に吸収されたのち赤外線放射として宇宙へ放出される。22%は海水などを蒸発させ水循環を生み出し，残りのわずかな部分が，風，波，対流，光合成に変換される。そして結局すべてのエネルギーが宇宙へ放出されて地球は一定温度を保持している。
- [H] アルコール燃料：ガソリンに10~20%のアルコールを混ぜたガソホールは，そのまま自動車用エンジンに使用できる。アメリカでは余剰農産物から，ブラジルではサトウキビからエタノールを精製して自動車用燃料にしている。また，天然ガスから生産し化学原料にされているメタノールも燃料として利用することができる。
- [I] ソフト・エネルギー・パス：最も経済性が高く現実的なエネルギー供給路線は，エネルギー利用効率の向上と自然エネルギーの利用に重点をおき，エネルギー消費と環境への負荷を軽減することだ，とロビンスは考えた。反対に原子力と石炭の利用効率を高めていこうとする現行の路線は，硬直的で危険だと指摘している。
- [J] 太陽熱温水器：年間の太陽熱放射のおよそ50~60%を利用することができるので経済性が高い。太陽熱で温めた温水を供給する装置で，太陽熱コレクターと蓄熱槽とからなり，汲み置き式と自然循環式とがある。
- [K] ソーラーハウス：太陽エネルギーを利用して温水供給と暖房をおこなう住居のことであるが，最近では太陽電池による電力供給を含めるようである。
- [L] エネルギー需要構造：エネルギーを最終的に利用する段階でのエネルギー需要の構成のこと。その構造を分析することによって，エネルギーの複合的利用や多段階熱利用のような工夫が生まれ，また，エネルギーの質に応じた資源利用のあり方が再考された。
- [M] 省エネルギー：一般に，利用方法と技術の改善によってエネルギー利用の効率を向上させることは，石油代替エネルギーを探すよりも経済的な投資である。日本では石油危機以降エネルギー需要は横ばいであるが，国民総生産は増大している。
- [N] 都市ゴミ焼却熱利用：熱の利用のみに限定するよりも，発熱量の大きなゴミの焼却熱で発電するほうが利便性が高い。多くの清掃工場では所内電力を供給したり電力を販売したりしている。発電した後の蒸気で地域暖房や温水プールへの熱供給を行う。現状ではゴミ発電の規模は36キロワットだが，試算ではその10倍の有効利用が可能である。
- [O] ニューサンシャイン計画：計画に組み入れられた開発中の技術としてガス複合サイクル発電がある。石炭を燃焼させて蒸気タービンを回転させるのに加え，石炭から出るガスでガスタービンも回転させる発電方法。石炭液化などが高コストであるのと比較し，こちらは発電コストを10%引き下げ酸性雨対策にも役立っている。

[P] CO₂排出権取引：二酸化炭素を排出する権利を市場で売買可能な形に設定し、化石燃料を使用する国や企業がこれを購入する制度。地球温暖化を市場メカニズムによって効果的に防止する経済的手段として検討されている。ある国や企業が排出権の価格より低いコストで省エネルギーを行えば、この排出権の一部を他に売って利益を得ることができる。問題点は、開始時期の排出許可総量を決めて各国に割り当てる方法である。

[Q] 風力発電農場：アメリカのカリフォルニア州では2万基を越す風力発電機で200万kW以上の発電が行われている。日本では数も大きさも小規模である。たとえば北海道寿都町は5基の風力発電機で82.5kWを、青森県竜飛の5基では1375kWを、また、山形県立川町の3基では82.5kWの発電を行っている。そのほかに1~2基だけの設置例もいくつかあり、現在建設中のものや計画中のものもある。

参考文献

- 1) 石 弘之：『世界遺産のいま =21= イースター島』朝日新聞1996年9月22日（日曜版）；次の書物には、移住者が島々の固有種の存続を脅かした数々の報告例の一つとして、ラパヌイ島（Rapa Nui）とトロミロの木（*sophora toromiro*）のことが触れられている：「植物が消える日」大場秀章訳，PP.161-162（八坂書房，1993）；“Plant Extinction—A Global Crisis—” by Harold Koopowitz and Hilary Kaye, 1983, Stone Wall Press, Inc.
- 2) 牛山 泉：「さわやかエネルギー風車入門」（三省堂選書）；本文の図1は、この本を全面的に参考している。
- 3) 富永博夫：“エネルギーと環境—二酸化炭素の人工的リサイクルをめぐる—”，学術の動向，創刊号（1996, Apr），PP.55-57.
- 4) 米本昌平：「地球環境問題とは何か」（岩波書店，1994）
- 5) 長谷川三雄：「人間と地球環境」（産業図書，1996）
- 6) 香取草之助ほか：「授業をどうする」（東海大学出版会，1995），原書は“ABC's of Teaching with Excellence” by B. G. Davis et. al.（1983）
- 7) 室田泰弘ほか：「ソフト・エネルギー・パス」（時事通信社，1979）；原作者の Amory B.Lovins はこの本の中でエネルギー問題への基本的なアプローチのありかたを提案し、新エネルギー開発への広範な活動の契機をつくったといわれる。
- 8) 池田長康ほか：「エネルギー基礎学—地球環境時代のエネルギー利用技術—」（パワー社，1994）
- 9) 佐藤重夫：政府関係資料1996年版「エネルギーと環境—地球環境時代におけるエネルギー—」（産業技術会議，1996）
- 10) 梶根 勇：“地球温暖化論争”，学術の動向，創刊号（1996, Apr），PP.53-54.

Extinction of Sophora Toromiro in Easter Island Reminds Me the Windmill

Kenji YAMAMOTO

College of Science and Industrial Technology

Kurashiki University of Science and the Arts

2640 Nishinoura, Tsurajima-cho, Kurashiki-shi, Okayama 712, Japan

(Received September 30, 1996)

We consider the soft energy paths advocated by Amory B. Lovins. They involve several kinds of natural energy resources, such as wind power, solar radiation energy, nuclear fusion energy, etc. Especially we pay attention to future popularization of windmill, for example, as a possible candidate for a usefull way of energy recycle in Japan. Discussions are also made on some distinctive or better points of the Darius type machine among varius different kinds of windmill.