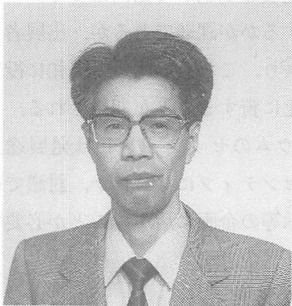


■ 展望・解説 ■

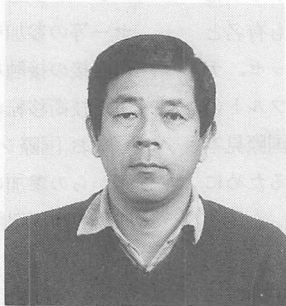
# 極地風力エネルギー基地システム

## Feasibility of a Wind Energy Base System in Polar Zone



佐野 寛\*

Hiroshi Sano



太田 修二\*\*

Syuji Oota



本庄 孝子\*\*\*

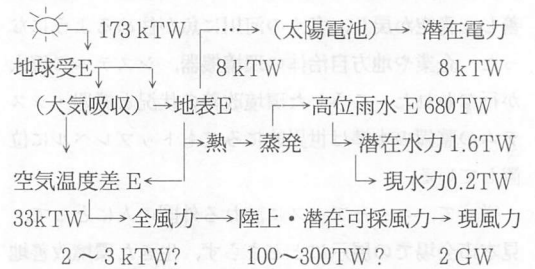
Takako Honjou

### 1. はじめに

巨大な化石燃料需要 10TW (=7.6Gt 石油/年) を代替すべき再生可能な自然エネルギーの候補は太陽エネルギーであることはいうまでもない。太陽の地球受光総エネルギー (173kTW) の絶対量に不足はないから、これを地球規模でいかに活用して行くか、人類の知恵が求められている。

ふつう、直接利用として [太陽電池/砂漠] 等による獲得が第一に着目され、その資源評価も進められている<sup>1)</sup>が、その他にも、エネルギー供給の多様化も並行して追求せねばならない。

太陽エネルギーの大部分は熱に変化する。太陽間接エネルギーの代表、水力と風力は下記のように元は大きいが適地制約が強く (太陽直接利用より集中性がよい長所にもかかわらず) 潜在資源は小さく算定されている。なお本稿では巨大数値を吸うため、以下<sup>3)</sup>をk (キロ), <sup>6)</sup>をM (メガ), <sup>9)</sup>をG (ギガ) <sup>12)</sup>をT (テラ), と略記する。



潜在水力の精度はかなり高いが、潜在風力はまだ可採地域の定義さえも不明確で、拡大の余地が大きい。今回は空気対流が地球規模で両極地域に濃縮される機構に着目し、風力資源の適地拡大の候補として、地球上で最も地域温度勾配の激しい南極大陸を検討した。

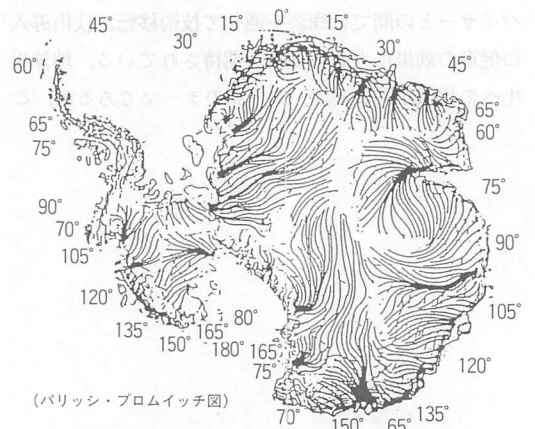


図-1 南極大陸における地上風の流線<sup>1)</sup>

\*大阪ガス(株)開発研究所技術顧問

〒554 大阪市此花区西島 6-19

\*\* 関西電力(株)赤穂発電所所長

〒618-02 赤穂市加里屋

\*\*\*大阪工業技術研究所 エネルギー変換材料部主任研究官

〒563 池田市緑ヶ丘 1-8-31

広大な南極氷床の冷気がより暖かい南極海へ向かって吹出す風がカタバ風として知られている。温度差の少ない大陸内部氷床の上では風は弱い。カタバ風は大陸周縁に集中的に発達する(図-1)。

## 2. 自然エネルギーの中の風力の位置付け

太陽直接利用には、太陽電池(効率 $\geq 10\%$ 、近未来)および太陽熱発電(集熱 $55\%$ ・タービン発電 $33\%$ =総合 $17\%$ 、SEGS 270MW実績。ただし分散光は集熱不能で適地が極限)がある。エネルギー密度が希薄で、実績では、最大  $150\text{MW}/\text{km}^2$ (素子)、モハベ砂漠でも日間稼働率は $1/3$ 、 $10\text{MW}/\text{km}^2$ (敷地、実績)の水準である。

一方、太陽間接利用である風力は、原理的に希薄な太陽光エネルギーを局部的に濃縮し、獲得を容易化されたものとしても評価できる。後述の風力実績でも最高は定格出力/敷地面積 $=170\text{MW}/\text{km}^2$ (ただし稼働率は約 $1/3$ )で、特定地域では太陽熱発電より優位である。

図-2に、間接的太陽エネルギー利用の連関図を示す。間接化するほど、エネルギー資源量が減損する代わりに、集中化が進み採取し易くなる傾向がある。

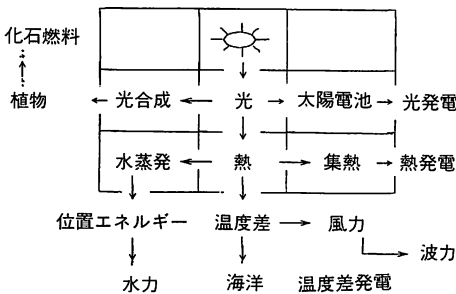


図-2 太陽エネルギー間接利用の連関体系

## 3. 風力発電のバックグラウンド

風力の資源量は、採取可能限界設定によって激変する。風力エネルギー密度は風速 $10\text{m/s}$ の時、約 $400\text{W}/\text{m}^2$ であり、風速の3乗に比例( $V^3$ 則)するので、實際上 $4\sim 5\text{m/s}$ 以下の風は有効資源と見なされない。さらに時間・日間・季節による出力の不均一度(稼働率に影響)に強く支配される。 $V^3$ 則によると $\pm 10\%$ 風速変動 $=\pm 30\%$ 風力変動<sup>9)</sup>となる。風の乱れは、地表面粗度<sup>9)</sup>により増大する。強過ぎる風は乱れが大きく使えない(暴風域の定義 $=25\text{m/s}$ 以上<sup>9)</sup>)。

また、実用風車のエネルギー獲得率<sup>9)</sup>は $0.3\sim 0.4$ で

ある。

風力の源泉=空気の熱対流は、地球規模の太陽熱駆動エンジン<sup>2)</sup>といえる。ただし摩擦が大きく対流運動への転換率は低く、 $2\sim 3\text{kTW}$ 程度になる。次に、陸上率と風車効率をかけると $1/10$ に減少する。それでも現在のエネルギー需要 $10\text{TW}$ の数十倍はある。世界の風力データには空白区が多いので資源推定には図-3のような地図からトップダウン型で行う<sup>9)</sup>ことになる。図の数値は、年間稼働可能時間である。熱帯を除く沿海地域と高山と、極地方とが風力資源候補地になる。

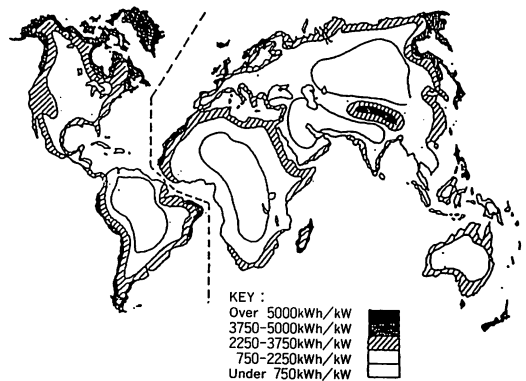


図-3 世界の風力資源分布(米国DOE資料)

### 3.1 テハチャビ風力発電の例<sup>9),9)</sup>

(カリフォルニア・モハベ砂漠)

この砂漠はすぐ西に太平洋と接する。テハチャビは海岸(西)と砂漠(東)の境の峠にあり、毎日、後背地の砂漠加熱が高まる午後3時頃に東西の温度差が最大になり、西風が吹く。

年間平均風速は $8\pm 2\text{m/s}$ 、朝風・夕風があるが、日間変動が一定しているため風力発電の適地となった。

風力発電機: 定格出力 $=275\text{kW}$ (風 $=13\text{m/s}$ )。風速:  $5\text{m/s}$ で始動、徐々に出力を増し、 $13\sim 24\text{m/s}$ 間が定格出力、 $24\text{m/s}$ 以上で安全のため停止(出力 $\rightarrow$ ゼロ)。年間の平均稼働率 $\approx 1/3$ 。

プロペラ直径 $28\text{m}$ 、高さ $30\text{m}$ 、間隔 $40\text{m}=1$ 基最小占有面積 $1600\text{m}^2$ 。定格出力/面積 $\leq 170\text{MW}/\text{km}^2$ (=平均実動 $60\text{MW}/\text{km}^2$ )、 $5000$ 台が稼働しており、施設単価は $1100\$/\text{kW}$ 、電力コストは $7\phi/\text{kWh}$ (将来は $3.5\phi/\text{kWh}$ )、売価価格は $8\text{c}/\text{kWh}$ (=9円/kWh)で、電力需要地が接近しているため商業的に成立している。ただし、 $1\text{km}$ 距離でも騒音があり、さらに電力需要地接近を進めることは困難である。

カリフォルニア州には他にアルタモント、サンゴルゴニオなど200MW級巨大風力基地が集中し、世界全風力発電量の70%を占めている。2000年には10GW以上を生産する見通し。

### 3.2 マグラープ風力発電所<sup>7,10)</sup> (北欧)

安定した西風(常時8 m/s) 海岸地帯に立地し、世界一の稼働率(63%, 1984年)を誇る。国内電力の2%を自給しており、先行き10%を風力で賄う目標をかかげ、ここ数年の進展が注目される。

風力発電機: 定格出力=3 MW(風=14 m/s)。風速: 始動8 m/s, 14 m/s 以上では3 MWに抑制, 25 m/sで停止。プロペラ直径78 m, 高さ80 m, タワー高77 m, 鋼鉄厚16~65 mm。将来は海上に進出し, 5 km沖で3~5 MWを目標とする。

### 3.3 竜飛ウィンドパーク<sup>11)</sup>

275kW定格(13 m/s) 5基を持つ日本最大基地である。5.5 m/s始動, 24 m/s以上で停止, 平均風速10 m/s始動, 24 m/s(地上20 m), 卓越風向は東・西北西・南西とかなりばらつく。1991年建設, 1992年から実証試験中である。

日本には沿海砂漠のような強い海陸風がなく, 安定した強風は冬季の北西季節風が主となる。台風・低気圧の強風は危険かつ一時的で, 巨大な不良資源である。むしろ南西諸島における穏やかな偏西風(平均6 m/s)が良資源と見なされる。

NEDOによる日本風況調査<sup>12)</sup>によれば, 6 m/s以上の土地が5万km<sup>2</sup>, その半分の土地に0.6MW風力発電機を粗く(4基/km<sup>2</sup>)設置すると, 稼働率が半分として25GW, 日本の電力需要の約2割を補うと計算している。もし環境破壊を無視し, ウィンドパーク専用として50 m間隔で配列(=400基/km<sup>2</sup>)した最大値では, 供給量は100倍に達する。

現在, 世界の風力発電は2GW程度であるが, 各国の予定など<sup>4)</sup>を総合すると, 4~10GW(200年), 10~30GW(2010年), 約100GW=0.1TW(2030年)となる。潜在風力に比べて非常に少ない理由は, 技術的遅れもさることながら, 地球最大の風力資源地域である極地方を対象から除外しているためである。

極地方の風力データは空白部が多く, 推定にはトップダウン的に行うしかない。Lauscherの世界風速図(1951)からの判定では, 南緯50度付近が最強という推定がある<sup>13)</sup>。以下に南極風力の構成を検討する。

## 4. 南極風力の資源量

### 4.1 南極風力の資源地域

高緯度域では日照が緯度効果( $\cos \theta$ に比例で減少)によって南緯65度くらいから急激に縮小する。図-4に南半球の地表温度分布(東経30~60度)を示す<sup>14)</sup>。赤道で上昇気流・極で下降気流という対流が一様に起きているのでなく, 南極大陸の線(平均70度)付近で急激に起きることがわかる。南極風も図-5に示す大気大循環の一環ではあるが, このように極めて特異的である。

南極大陸のこの異常低温は, 大陸の半分を占めるGreat Antarcticaの高氷原(大陸の平均高度は2300 m, 氷厚さは2450 m)が, 真砂漠なみの降水量50 mm/年であり, 無雲・白色で放射冷却に適する(日射の8割反射)表面に起因する。さらに日射量は冬はもちろん夏でも低日射角なため極めて少ない。

一方, 南緯65度以上北の南極海は, 太平洋・インド洋からの海流より海水が絶えず更新されるので0~20℃(夏~冬)と暖かい。

その結果, 南極中心部と沿岸までの2000 kmの間に約

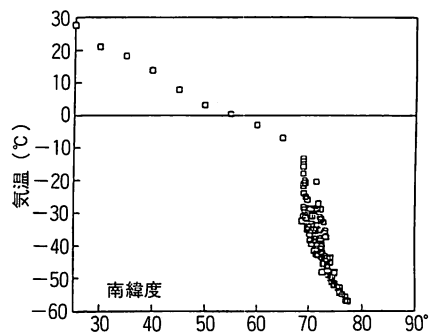


図-4 南半球の温度分布

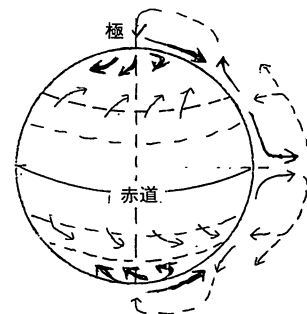


図-5 地球の大気大循環

40℃の温度差(勾配20℃/kkm)を発生する。この値は、強い季節風で知られるシベリア～北太平洋の冬期温度勾配の約2倍である。

南極大陸は世界で最も風の強い地帯として知られるだけでなく、普通ならば低気圧の通過の際に現れるような20m/s 程度の強風が、継続的に・何千kmにもわたる広範囲に起こるのが特徴である。

これは、南極高原の広大な氷床(約6 Mkm<sup>2</sup>)から重い冷気が氷床斜面(摩擦抵抗の低い<sup>14)</sup>)を駆け降りるカタバ風として知られている。先に示した図-1の収れんする風の流線は、より低地へ流れ落ちる冷気流として理解できる。風向・風速の安定性、持続性などもその属性で、これら[強風、風向き一定、風速安定、継続的、広範囲]は、風力発電にとって非常に好都合な因子である。

図-6にその地域が定量的に観察される。

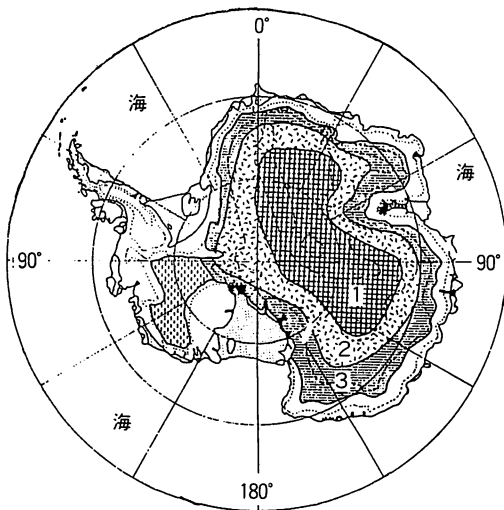


図-6 南極の気候区分(Darntple, 1966)内側から、  
1) 氷床高原(寒極)、2) 寒冷内陸気候帯、  
3) 寒冷カタバ風帯

注) 南極大陸の地勢と気象：南極大陸の面積は13.6 Mkm<sup>2</sup>、豪州大陸の約2倍の面積があり、観測基地は60箇所ほどしかなく、そのほとんどは海岸部にある。内陸部の気象データは乏しく、大部分は平均的な推定値に頼る。ただし大陸は平均2450m厚い氷床に覆われていて地形変化に乏しく、複雑な気象は発現し難い。ブリザードなどの地吹雪の発現高さは20m程度で、真の降水量はきわめて少ない(氷床上では砂漠なみの年100mm前後)。通例の風車の高さ30mでは地吹雪の上へ抜け出て、風質の乱れも少ないと見られる。これらの

要素は風力発電にとって好都合である。

#### 4.2 南極風力の潜在発電量

1) 氷床高原(寒極)は冷気製造地域であって、無風に近い。その周辺部(図-6の2)寒冷内陸気候帯)は1/100以下のゆるやかな斜度の氷床高原で、ここから冷気が動き出す。氷床高原の周辺部は、3) 寒冷カタバ風帯であって、ここで温度勾配も急になり、地球上最大の強風帯を形成する。これら1) 2) 3)の面積は、読み取り方によって多少の変動はあるが、それぞれ3 Mkm<sup>2</sup>、3 Mkm<sup>2</sup>、3 Mkm<sup>2</sup>づつである。

図-6において、白地で示されている沿岸地域も、急な温度勾配域ではあるが、頻繁に海上を通過する低気圧によって安定したカタバ風は乱され、海洋の温暖な影響が強く穏やかな日が多くなる(昭和基地や各国の南極沿岸基地など)。

しかし奥地に谷でつながっている海岸地域では合流・集中してきた強い沿岸カタバ風(図-6)が吹く。沿岸カタバ風地帯は風力資源地域として上記3)寒冷カタバ風帯ほど大きくないが、研究・調査・実験活動するための地の利はよい。

また、南極大陸の1/10位にも広大な氷棚(図-6: ウェッデル海、ロス海)は、斜度の小さな氷原で、南極低気圧通過時の強風以外には静穏である。

カタバ風は冷気流出風の特徴として地表近くの薄い層をなしており、地上15~100mの高さで風速最大となる(一般の風では表層流の上、100~1000m<sup>5,19)</sup>高

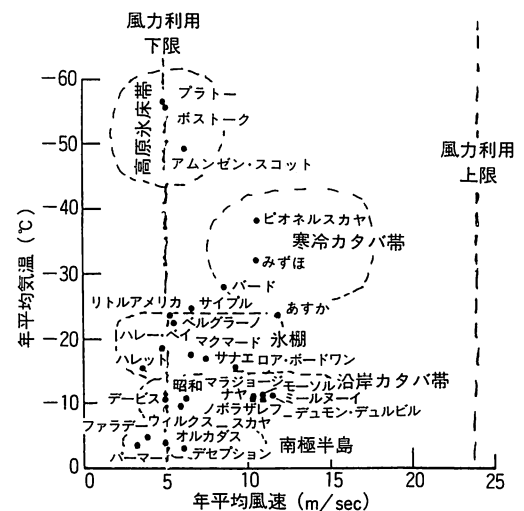


図-7 気温と風速による南極各地の分類とカタバ風帯の位置付け<sup>14,17)</sup>

度の0.1~0.3乗に比例して風速が増大)。これは、通例の風力発電の塔高が30~80mであることと対応して極めて好都合である。

なお、南極大陸周囲を常時次々と回転するように巡る巨大・多数の南極低気圧の風力は、規模としても最大級のものであるが、現在の風力発電技術では25m/s以上の風を危険として捨てているので、この突風型の風力資源を利用できる見込みはない。

今、南極風力資源を寒冷カタバ風帯（およそ3Mkm<sup>2</sup>）に限って評価する。テハチャビ風力発電の実用出力上限/面積=60MW/km<sup>2</sup>を基礎に換算し、地形利用率1/3とすると61TWとなり、現在エネルギー需要10TWの数倍になる。砂漠太陽電池の資源に次ぐ、有力な資源可能性が見出される。カタバ風帯の高い風質水準に最適化（南極のカタバ風は安定・持続性が高いので稼働率は倍増、また地形が単純なので地形利用率も高められると期待）すれば、この風力資源はさらに拡大できよう。図-7に、南極の風力の性格を分類した。

南極風力の実用例としては、小規模の観測用電源であるが、あすか基地（155km内陸、氷床600m高、平均風速15±5 m/s、平均気温-20℃、卓越風向は東南東のみ）で1991年に運転され<sup>15,16)</sup>、すでにいくつかの課題を解決している。

## 5. 南極大陸は巨大な風力発電機

南極大陸は極点を中心にした巨大な冷却円盤の形をしており、南半球の大気を連続的に冷却吸引して地表へ吐出している。それは極心部ではカタバ風、周辺の南極海では南極低気圧として、世界一の強風地帯を形成する一種の冷熱エンジンである。

これを利用するための技術は、少なくともカタバ定常風については次第に備わっている。ここで、南極大陸氷床を全く死の世界とみなしてきた偏見を、今や拭うべき時期がきているのではなからうか。直接太陽光では極端に貧困な南極大陸には、間接太陽エネルギーである風力が、世界一濃縮されている。

なお、北極においては、南極大陸に匹敵する陸地がないので、このような大きな大気温度差=風力が発生する場がないが、小規模にはグリーンランド高原氷床（2Mkm<sup>2</sup>）が北大西洋に対して類似した配置にあり、冬季-50℃、夏季-10℃となり周辺との温度勾配も南極対南極海の関係に近似しており、カタバ風型の風力資源としてよい研究開発モデルとなる可能性がある。

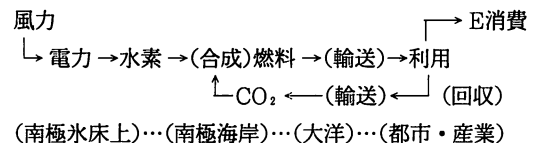
## 6. 南極風力の用途開発

南極大陸自体は、広大（13.6Mkm<sup>2</sup>、豪州7.3Mkm<sup>2</sup>の倍近く、米国9.4Mkm<sup>2</sup>、中国9.6Mkm<sup>2</sup>を上回る）ではあるが、観測基地以外にエネルギー需要が現存しない。従ってこのままでは、いかに化石燃料代替規模の巨大風力が得られても、その用途はない。

エネルギー需要の存在しない地において大量の風力エネルギーを獲得する場合、これを活かすために、このエネルギーを海を越えてグローバルに利用するシステムの立上げが不可欠である。

さいわい、ここ数年、砂漠の太陽エネルギーを電力から水素に変換して、これをCO<sub>2</sub>キャリアによって長距離輸送する「CO<sub>2</sub>グローバルリサイクルシステム」については詳細な検討がなされている<sup>7)</sup>ので、このシステムを転用して南極風力に利用の道を与えることができよう。CO<sub>2</sub>源がそのために必要であるが、幸い南極氷床がCO<sub>2</sub>の大量・長期貯蔵適性がある<sup>18)</sup>ことが指摘されており、併せて解決の糸口は見えている。

したがって太陽基地<sup>7)</sup>を風力基地に置き換えたグローバル輸送システム<sup>17)</sup>（例：下記）を構築するのは不可能ではなく、今後の大きな地球的課題の一つであろう。



## 7. まとめ

地球上において、亜熱帯砂漠と極地氷床とは、最も巨大な無生物地帯である。この両者が、それぞれ太陽直接発電・風力発電によって、化石燃料エネルギー消費水準をはるかに上回るエネルギー宝庫となることを示した。特に、南極大陸内部は永らく完全な死の大陸としてしられていたものが、希望の大陸に変身する可能性を、ここに提示することができた。

1) 極地風力は、海陸風や季節風に依存する従来の風力発電に比較して風向・風速の安定性が高く、風力発電に適した資源である。

2) 極地風力資源は、地球規模大気循環を直接利用するので資源規模が大きく、カタバ風帯のみでも現在の化石燃料の需要レベルを越えることが可能である。

3) 南極風力の資源開発には、二つのネックがある。第一は現地需要の開発であり、第二はエネルギー輸送

である。

4) CO<sub>2</sub> グローバルリサイクルシステムを応用して、極地風力を液体燃料に変換して需要地域へ輸送することは、極地風力利用に有力な手段になるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 佐野寛, 太田修二, 本庄孝子: 化石燃料全代替のための太陽エネルギー基地所要面積の評定, エネルギー・資源, 13(6), 498~502 (1992).
- 2) 清水幸丸: 風力発電技術, パワー社, 237P (1990).
- 3) 東 昭: 風力発電, エネルギー・資源, 6(6), 577 (1985).
- 4) 松宮輝: 風力エネルギー, 日エネ誌, 71(7), 612(1982).
- 5) 本間琢也: 風力エネルギー読本, オーム社 (1979).
- 6) 坂本雄吉: 風と送電線, 電学論B, 112(9), 755(1992).
- 7) 「自然エネルギーによるCO<sub>2</sub> グローバルリサイクルシステムの可能性調査」, NEDO-ITE-9002-5 (1991) p.64; NEDO-GET-9210-2 (1992) p.89, NEDO, RITE, およびエネルギー・資源学会.
- 8) 玉貫 滋: 世界の風力発電, クリーンエネルギー, 1993-5, p.57.
- 9) 欧米新エネルギー利用技術調査報告, p.66~74「テハチャビ風力発電プラント」, 大阪科学技術センター (1991).
- 10) 松宮輝: 風力発電, エネルギー・資源, 11(1), 60 (1990); 同: 風力エネルギー技術の実用化, 太陽エネルギー, 18(5), 11 (1992).
- 11) 土屋敬一, 他4名: 風力発電システムの運転特性・竜飛ウィンドパーク, 電学論B, 113(7), 752 (1993).
- 12) 朝日新聞1993. 8. 30: 年間電力の2割を風力で/全国風況調査.
- 13) 近藤裕昭: 日本の風力資源, 日エネ誌, 71(6), 422 (1992).
- 14) 井上治朗: 極地気象の話, (1992) 技報堂
- 15) 石沢賢治: 南極風力発電システム自然エネルギーによるCO<sub>2</sub> グローバルリサイクル調査WG資料 (1992).
- 16) S. Kimura, et al.: Field test of small WECS in antarctica, Eur. Comm. Wind E. Conf., March, 1993, p. 732.
- 17) 佐野寛, 太田修二: 南極風力エネルギー基地システム, 第9回エネルギーシステム経済コンファレンス, 2-5 (1993)
- 18) 佐野寛, 本庄孝子: 南極大陸CO<sub>2</sub>貯蔵の技術的可能性, 第9回エネルギーシステム経済コンファレンス, 特4-6, 389 (1993)
- 19) 源由樹, 他2名: 大型風車の回転に及ぼす風速の高度分布の影響, 太陽エネルギー, 19(4), 57 (1993).

### 他団体ニュース

## 「ニューアース '93 (地球環境技術展)」

### “—— 地球環境再生への挑戦 ——” について

1. 主催 (協)大阪国際見本市委員会,  
(協)日本産業機械工業会,  
(助)地球環境産業技術研究機構
2. 特別協力 新エネルギー・産業技術総合開発機構他
3. 会期 平成5年12月7日(火)~10日(金)
4. 会場 インテックス大阪  
(大阪市住之江区南港北1-5-102)
5. 出典物
  - ①地球環境監視技術 ②リサイクル技術
  - ③省エネルギー・新エネルギー技術
  - ④廃棄物処理・排水処理・大気汚染防止技術他
6. 国際シンポジウム (各日とも13:00~16:30)
  - ・8日 (セッションI: 地球温暖化問題)
    - ・記念講演 真鍋 淑郎 (米国海洋大気庁)

- ・パネルディスカッション  
コーディネーター 鈴木 胖 (大阪大学)  
パネリスト 真鍋 淑郎, 田中 正之,  
内嶋善兵衛, 堺屋 太一
- ・9日 (セッションII: 技術移転と国際協力)
  - ・基調講演 UNEP事務局より1名
  - ・パネルディスカッション  
コーディネーター 深海 博明 (慶應大学)  
パネリスト 應 白樺, 藤本 忠生,  
ニサコーン・コシトラット,  
宮田 満, 田守 栄一
- 7. 問合せ先
  - ・(協)大阪国際見本市委員会  
大阪市住之江区南港北1-5-102  
インテックス大阪  
TEL 06-612-3883