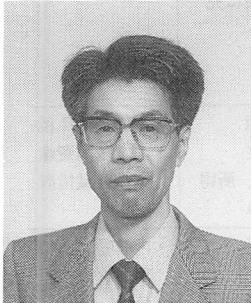


■ 展望・解説 ■

# 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

## Scope for the Necessary Area of Solar Energy Base for the Substitution of Total Fossil Fuels



佐野 寛\*  
Hiroshi Sano



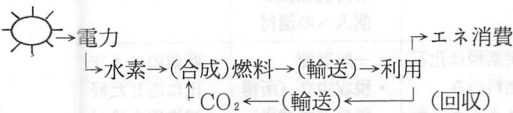
太田 修二\*\*  
Shuji Oota



本庄 孝子\*\*\*  
Takako Honjo

### 1. 目的

ポスト化石燃料時代のエネルギー源には、化石燃料需要の規模(約10TW)を代替できる資源が必須である。特にCO<sub>2</sub>リサイクル利用を目指す場合は、最終需要量の充足のみでなく、そのシステム<sup>1)</sup>(下掲)内の変換過程における損失もカバーできる、余裕のある巨大資源が必要である。



その要件を満たす資源候補は、太陽エネルギー(10<sup>5</sup> TW級)であろう。一般に現在のエネルギー需要10TWを賄うには、10%効率の太陽電池によって砂漠の4%を使用すれば十分<sup>2)</sup>といわれる。しかし太陽定数1.35 KW/m<sup>2</sup>は安定しているが、入射補正項すなわち、大気層・雲反射率、昼間率、地域により変わる緯度係数、不安定な晴天率、実施段階では設備間隙率、地形凹凸などが介入する。太陽電池の光変換効率(約10%)も時代の変数である。

これらの減損要素を積算すると、獲得率は太陽定数の1%にも満たず、太陽エネルギーの巨大さを無条件

で楽観できない。

さらに主要な受光面と期待される砂漠の面積も、定義しだいで陸地面積の4~25%まで激変する数値が報じられ、吟味が必要である。

なお、太陽電池以外の獲得手段によっても、多くの太陽エネルギー開発が進行中である。太陽利用の各種選択枝を図-1に示す。

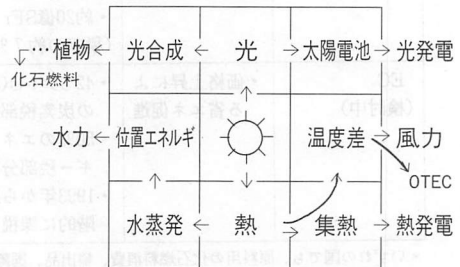


図-1 太陽エネルギー利用の各種選択枝

最も有名な植物光合成は、獲得効率が1~5%と低く(収穫・脱水・精製まで進めると約0.05%)、10TWを目指すには地球面積が足りなくなるため、今回の対象から除外した。

太陽熱発電は、集熱55%・タービン発電33%で総合17%の高効率を得られ、既に実施(モハベ砂漠、SEGS 270MW)されているが、熱帯や温帯に多い分散光は集光できず、明るくても直射光が減るとすぐ発電不能になり、極砂漠向きである。地球環境対策向けに獲得用面積の大幅な拡大を目指す本報の主旨から、少々

\*大阪ガス㈱開発研究所技術顧問  
 〒554 大阪市此花区西島6-19  
 \*\*関西電力㈱研究開発部課長  
 \*\*\*大阪工業技術試験所 無機機能材料部主任研究官

低効率（約10%）でも総光量に単純比例する太陽電池を、本報の基準としたい。

太陽間接利用である水力・風力は、希薄な太陽エネルギーを局所的に濃縮し、獲得を容易化されたものとして評価できるが、現エネルギー需要10TWには、はるかに及ばない<sup>3)</sup>（表1）。

表1 太陽起原のエネルギー資源量

地球受光太陽エネルギー	173k TW
同、大気吸収後の光エネルギー	81k TW
太陽電池獲得可能潜在量	8100 TW
高位雨水（位置エネルギー）	680 TW
河川水	85 TW
潜在水力	2 TW
空気対流エネルギー（温度差）	230 TW
潜在風力	1~3 TW
植物光合成	170 TW
植物体自己消費	50 TW
潜在収穫可能物	約8 TW

そこで、量的に豊富な太陽光直接利用（太陽電池方式）に限定し、設定条件に対応してどれほどの受光可能面積が見込めるか、見直しを行う。

なお、本稿では巨大な数値を扱うため $10^3$ をK（キロ）、 $10^6$ をM（メガ）、 $10^9$ をG（ギガ）、 $10^{12}$ をT（テラ）、と略記する。また1kWh=860kcalとするが、熱発電変換の場合は平均発電率（38~40%）を除いて2200kcalとする。

## 2. 基礎数値の吟味

### 2.1 太陽エネルギー資源量

太陽自身の発するエネルギーは3,800T・TWである。その内、全地球受光量は173K・TW（=2.7T・TJ、または1.3T・Tcal/年）であり、地球外宇宙発電<sup>4)</sup>成功までは、これが上限値になる。入射光エネルギーには反射（大気7%・雲25%）や吸収（大気17%・雲2%）があって、地表到達光は81K・TWとなる。それでも需要の10TWに対して数万倍級である。これが「資源量には問題がなく獲得法・輸送貯蔵法がネックの資源」とする背景である。

しかもこれらは放って置けばすべて海や陸の低位エネルギー（温熱）となり、やがて赤外放射により失われる。

大気圏外側における直達光密度は1.35kW/m<sup>2</sup>（ただし地球断面面積127.4M・km<sup>2</sup>に対応。地球表面積510M・km<sup>2</sup>に配分すると平均0.34KW/m<sup>2</sup>）である。

表2 太陽光学光密度の補正係数

		地球平均	熱帯雨林	亜熱帯砂漠	温帯
減損率	大気 吸収	-17%	-17%	-17%	-17%
	“ 反射	-7%	-7%	-7%	-7%
	雲* 吸収	-2%	-3%	-3%	-2%
	“ 反射	-25%	-33%	-3%	-28%
積算減損		-45%	-50%	-27%	-48%
分配比	昼間率	1/3	1/3	1/3	1/3
	緯度*	cosθ	1	0.9	約0.84
	積算残存率	1/4	1/3	0.3	0.28
総残存率		0.137	0.16	0.22	約0.15

\*地域、天候により変動。

各地域の太陽光受光密度の補正係数には、減損と分配の2種類がある。表2に整理して示す。入射光の総残存率の数値によって、亜熱帯砂漠域が、天候・緯度の点で断然有利であり、太陽エネルギー獲得基地候補として最良と認められる。

### 2.2 受光面積

地球面積関連値では、

☆半径（各km）平均：6,370（極半径：6,356，赤道半径：6,377），

☆面積（各M・km<sup>2</sup>）地球断面積；127.4，地球表面積：510，

陸地：149（29%），海洋：361（71%），

日本：0.375（対陸0.25%）

などが重要な定数である。

これらの定数に対して、「砂漠面積」値ははなはだ一定しない。たとえば一般の案内書には、オーストラリア（7.6M・km<sup>2</sup>）の41%は砂漠、サウジアラビア（2.15M・km<sup>2</sup>）の60%は砂漠である、とあるのに対して、学術書では豪州砂漠は1~2.5M・km<sup>2</sup>、アラビア砂漠は0.6~1.3M・km<sup>2</sup>、最大の砂漠サハラ的面積見積りは比較的安定しているがそれでも7.77~9.1M・km<sup>2</sup>と揺れている。それを受けて、全地球の砂漠率も、陸地の11~33%（17~50M・km<sup>2</sup>、平均30M）と変動する。このような状況では「砂漠の何%利用で充分」という表現は信用され難い。

#### 砂漠の定義

降雨量が少なく農業不適地とする概念が一般的である。Megisの乾燥地地図（1953年UNESCO作成）によって、Hagedornが1977年に算定<sup>5)</sup>したものは、全乾燥地=47.7M・km<sup>2</sup>（陸地の31%）のうち無植生地は14M・km<sup>2</sup>（陸地の9%）とされた。より定量的な表現として年間降雨量と蒸発量\*のバランスを湿润

指数として整理し、極砂漠・真砂漠・半砂漠と分類したものの<sup>9)</sup>が便利である。

極砂漠：湿潤指数-57以下（年間の降雨量25以下）

真砂漠：湿潤指数-40～56（年間の降雨量25～200）

半砂漠：湿潤指数0～-40（年間の降雨量300～500）

極砂漠（6M・km<sup>2</sup>、陸地の4%）・真砂漠（24M・km<sup>2</sup>、陸地の16%）は、本報における対象地としての砂漠であり、約30M・km<sup>2</sup>、陸地の20%となる。

半砂漠（24M・km<sup>2</sup>、陸地の16%）はサバンナ・ステップ、あるいはサヘル地域のように砂漠周辺の草原など半乾燥地域である。農業・牧畜との競合性\*があるので、太陽電池適用性としては面積を1/2でいどに見積ることが妥当であろう。

上記をまとめると、普通の砂漠面積=30M・km<sup>2</sup>（陸地の20%）、半砂漠～限界放牧地まで拾えば40M・km<sup>2</sup>（陸地の約27%）、とするのが妥当な見積りである。

### 2.3 エネルギー需要

現在、全地球で10 TW (=87.6T・kWh/年、=76 T・kWh/年、=7.6Gt石油/年)が定説であるが、暫定的な数値である。即ち電力需要も熱のような低級需要も単純合計している不明確さを含む。もし熱需要部分にコジェネレーションで拾う熱を評価できれば、熱/電比=1/1として発電部分と等しい量までの熱需要節減が可能になる（熱の輸送性がネック）。

一方、21世紀前半においては人口増加等の要因によりエネルギー消費倍増が推定<sup>7)</sup>されるので、対応する太陽受光面積ニーズも、巨大化するはずである。しかし今回は、不確定な変数を制限するため、需要→現状据え置き（10TW）と仮定して論議する。

ただし、需要地まで砂漠遠隔輸送を前提とするシステム<sup>8)</sup>においては変換・輸送の減損が必須であり、減

\* 註：年間降水量と砂漠の関係。

世界平均は750mm、日本は温帯の湿潤地域で約1600mm、熱帯雨林（陸地の5%）は2000mm以上である。250～500mm地域は半乾燥・要灌漑地域で陸地の30%を占める（ただし寒冷地では蒸発速度が遅くなるので同雨量でも上記より砂漠範囲は縮小する）。

だが境界降水量は決めにくい。灌漑を導入すると塩類が抽出され、表土に蓄積し無植生地帯となる。灌漑を停止すると地下水位が低下、塩類も後退して再び灌漑農業可能になる。サハラ周辺のサヘル地域では、このように絶えず灌漑農耕地と砂漠の間を往復している。

損率を1/2と抑えても20TWを確保する必要がある。

## 3. 太陽受光面の評価と規格化

### 3.1 有効受光面積

受光量は、どんな地域でも直角入射・無雲時には基本的に同じである。したがって、理論値に緯度補正を行い、天候による日射制限を加えた値がその地域の実際の受光量になる。緯度(θ)補正係数は、入射光量がcosθに比例するので、赤道(0度)で1、30度で0.87、45度で0.71、60度で0.5、90度で零となる(図-2)。亜熱帯(～30度)、温帯(～45度)までは僅かしか低下しないことに注意したい。

図-3に、代表的な各地の平均受光量(W/m<sup>2</sup>)を示す。日本は(札幌:140W/m<sup>2</sup>～那覇:160W/m<sup>2</sup>)で非常に低いが、その主な理由は高緯度ではなく、晴天率が低い(雨天のみでなく曇天も影響)ことにある。世界各地の晴天率あるいは日照度については、測定値が乏しく、年ごとの変動が激しく安定しない。しかし有効日照時間/日(日本:3.84hr/day、亜熱帯砂漠:約7hr/day、上限値:8hr/day)や年間雨量比例の仮定などを使えば、目安を得ることは可能である。

代表的な砂漠の実面積(周辺の半砂漠も1/2を乗じて加算)を、緯度補正および天候補正することにより、日照を緯度0度・快晴状態に規格化した「有効面

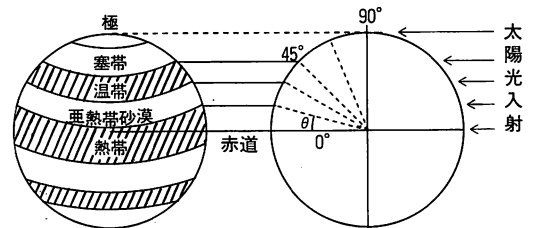
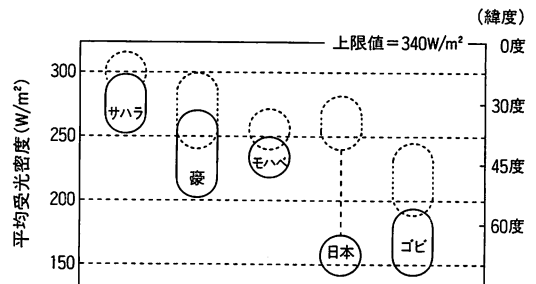


図-2 緯度補正の原理<sup>9)</sup>



緯度補正值(点線)と実測値(実線)  
理論(大気・昼間率控除)上限値は下式による。  
 $1.35 \times (1 - 0.24) \times 1/3 = 340 \text{ W/m}^2$

図-3 代表的な各地の平均受光量

表3 代表的な砂漠地の実面積および有効面積 (M・km<sup>2</sup>) A: 緯度補正係数, B: 天候補正係数

地名	実面積	A	B	有効面積	cf.
サハラ	9	0.9	0.95	8.0	周辺サヘル地域算入
リビア・エジプト	2	0.9	0.95	1.8	同上
ヌビア	0.3	0.95	0.95	0.3	同上
アラビア半島	1	0.9	0.95	0.9	
シリア・ネフド	0.6	0.88	0.8	0.4	
ベルシャ高原	0.2	0.88	0.8	0.15	山岳性の半砂漠を算入
タール (インド)	0.3	0.88	0.8	0.2	
タクラマカン	0.5	0.85	0.9	0.4	冬季低温
ゴビ・周辺	2	0.8	0.75	1.2	平均気温零度以下
中央アジア平原	1.5	0.85	0.75	1	カラクム・キジルクム等
オーストラリア	2.5	0.87	0.8	1.7	数か所分散, 間は半砂漠
カラハリ (南ア)	1	0.88	0.7	0.6	少雨量だが霧多発域含む
南米 (アカタマ, パタゴニア)	1.2	0.9~0.7	0.8	0.7	暑い高原から高緯度まで南北に
中米 (モハベ・メキシコ)	0.2	0.87	0.8	0.15	周辺半砂漠が多い
その他	約8	—	—	約6	
合計	約31			約23	

積」に導き, 表3に示す。太陽エネルギー回収に貢献するのは実面積ではなくてこの有効面積である。昼間率控除は年間平均で一律1/3とするが, 高緯度地帯では夏の昼間率が高く, その分だけ冬の昼間率が低くなるので実際の発電利用にはきびしい需給調整に遭遇する(極端には夏期のみ稼働)。地球規模エネルギー戦略では総量や絶対値のみが論議される初期段階で, やむを得ない。

さらに実施段階では設備被覆率, 標高凹凸補正などを考慮する必要がある。設備被覆率は, 現行のモハベ砂漠施設では1/16であるが, 通路や採光など確保しても1/3~2/3まで向上できる。標高凹凸補正は, 谷間部分の採光が実質的に困難(昼間の日射時間が短い)であり, それを尾根部分の有利さによって全部取り戻せない問題である。これらの定量化は今後の課題である。

### 3.2 エネルギー自給所要面積

入射光の地表到達1kW/m<sup>2</sup>(大気吸収反射のみを控除)は, 昼間率1/3控除で340W/m<sup>2</sup>に, 設備被覆率2/3, 地形の利用性などを加味すると200W/m<sup>2</sup>でいどが有効面積に対して用いられる数値になる。効率10%の太陽電池を適用すれば20W/m<sup>2</sup>である。

したがって, 10TWを得る有効面積には, 0.5Mkm<sup>2</sup>必要で, 表3の砂漠有効面積の和23M・km<sup>2</sup>に対して約2%, 20TW要求に対しては4%になる。砂漠の中で最も問題の少ない部分のみを利用するとすれば, 4%という値は実現性のある数値と考えられる。

しかし, もしこの資源で限界となるといささか心細い状況である。

21世紀需要倍増予測から見ても, 次の太陽資源探索が必要である。

## 4. 新資源地の探索

### 4.1 寒冷・乾燥地の可能性

太陽電池は, 植物と違って全く水供給を必要とせず, さらに寒冷や希薄空気にも耐える(むしろ寒冷は効率的に好ましい)。これまで, 砂漠のみに着目, 寒冷日照地を等閑にしていたのはむしろ奇異なことである。

チベット高原は, 大気対流圏の上層にあるため, 空気が希薄であり, 極端に雨量が少なく, かつ寒冷で植物にとって住民にとっても過酷な環境である。しかしこれらは太陽電池にとって過酷でなくむしろ好ましい条件になる。

もう一つは高緯度地帯である。先に緯度補正(cosθに比例)で高緯度の不利を述べたが, 面積が広大なことから, 資源化を考慮すべき対象の一つである。また, 氷河峡谷の多くでは, 広大な南急斜面が植物も生えずに放置されてきた。太陽電池板は緯度と同等角度(春分・秋分時に直角入射)が最適とされる。北緯60度では, 急斜面(植物が生える安息角を越えている)の方が太陽資源地として好適になる。

この見地から, 代表的な太陽受光候補地域の実面積および有効面積を抽出し表4にまとめた。グリーンランド南部は多雨地帯なので除いた。一般にデータが乏しく, 正確さを欠いているが, およその傾向は理解で

表4 代表的な太陽受光候補地域の実面積および有効面積 (M・Km<sup>2</sup>) A, Bは表3に準じる

地名	実面積	A	B	有効面積	cf.
チベット高原	1~6	0.8	0.8	0.7~.4	寒冷・空気希薄, 好適地の代表
アンデス高地	0.3~.1	0.8	0.9	0.2~.1	
北シベリア低地	4~2	0.3	0.8	0.7~.3	ツンドラ地帯
北カナダ	0.5~.3	0.3	0.7	0.1~.05	同上
グリーンランド高原	2~1.5	0.2	0.8	0.3~.2	水原
南極大陸高原	13~10	0.15	0.9	1~.5	同上, 気候は不明点多い
合計	20~15			3~1.5	

きる。実面積は広大であるが、チベット以外の地域で緯度補正による減少が激しいのはやむを得ない。

有効面積値の合計は、砂漠(表3)の23M・km<sup>2</sup>に比べるとかなり少ないが、まだ未開拓・未知数であるためでもある。

#### 4.2 海洋

地球上の他の資源地域は海洋である。海洋の長所は、

◎1.資源量が陸地に比べて膨大なこと。

◎2.設置条件が陸地に比べて、割合に均一。

一方、短所は、

●1.設置費用が莫大:気象・海象条件に耐えられる施設は、北海油田の例にあるように巨大化。

●2.需要地への送電設備の見通しが困難。

このような見地から、陸上太陽エネルギー基地を第1世代資源とすれば、海洋太陽基地は第2世代資源に相当するとみなされる。

陸地の数倍になる太陽受光海域の実面積361M・km<sup>2</sup>に対して緯度・天候補正を実施するにはデータがあまりにも乏しいが、概算すると約半分の140M・km<sup>2</sup>になり、潜在資源として巨大であることがわかる。

#### 5.まとめ

1)現在のエネルギー需要をまかなうに必要な太陽受光面積は、全砂漠の有効受光面積(規格化された砂漠)の約2~4%である。

2)有効受光面積とは、実面積を基礎控除(昼間率1/3, 大気補正-24%)した受光度(約1/3kW/m<sup>2</sup>)に規格化された面積に換算したものである。高

緯度域や湿潤地では地域変数(緯度効果:  $\cos \theta$ , 雲吸収: 10~60%, 地球平均では27%)によって実面積より大幅に縮小する。砂漠は実面積より約1/3縮小、温帯・熱帯は約1/2縮小する。実施においては、さらに技術変数(施設被覆率: 1/3~2/3, 太陽電池効率: 約1/10)を加味するとさらに1/15~1/30となる。

3)砂漠に告ぐ太陽資源地候補として有望なのは中緯度高原地帯である。高緯度地帯は実面積が莫大であるが、地域変数控除で激減することが多い。概算で、地球の有効受光面積を砂漠分の一割ほど増加させることができる。

#### 文献

- 1) 佐野 寛, 本庄孝子, 相馬芳枝: 脱化石システムに必要な太陽獲得面積の見直し, エネルギー経済コンファレンス, 5-4 (1992).
- 2) 例えばM. Garni: Solar Today, Aug. 1991; 太陽エネルギー, 17(5), 32 (1991); 桑野幸徳: 「ジェネシス計画の提案」, サンシャインジャーナル, 11(1), 8 (1990).
- 3) 平成2年度NEDO-ITE-9002-5, p.51, 4 (1991). 及びH.SANO: CO<sub>2</sub> Global Recycl-system Using Non-fossil Energy", Proc. IEA Conf., Work Shop C, 502 (1991) Kyoto.
- 4) 穴沢ら: エネルギー収支から見た月利用, 化学工学, 55(12), 932(1991).
- 5) 佐藤一郎: 砂漠の緑化, 環境技術, 14(10), 775(1985).
- 6) 大森博雄: 砂漠の現状と動向(1), エネルギー・資源, 13(5), 410(1992).
- 7) 平成3年度NEDO-ITE-9110-2, p.75, 165 (1992).
- 8) 佐野 寛: 「新エネルギー利用によるCO<sub>2</sub>リサイクルシステム」, システム/制御/情報, 35(9), (1991).