太陽エネルギー利用のための分光日射量 の測定と整理*

(第2報, ランク分けした分光日射スペクトルの規格化による整理)

馬場 弘^{*1}, 金山 公夫^{*1}
遠藤 登^{*1}, 金澤 浩志^{*2}

Measurement of Spectral Insolation and Processing of Data for Solar Energy Utilization

(2nd Report, Arrangement of Spectral Insolations Ranked by Normalization)

Hiromu BABA, Kimio KANAYAMA,
Noboru ENDOH and Hiroshi KANAZAWA

The measurement results of spectral insolation are ranked every 100 W/m² based on global insolation. It is clarified that the spectra for total radiation in each ranking are similar to each other. Although the peak value of the spectra can be found at the wavelength of 0.48 μm , on a clear day, energy of longer wavelength than the peak in the spectra is more attenuated than that on a cloudy day, so that the slope of the spectra is steep, and the absorption effect in the atmosphere is stronger than the other effect. Normal direct radiation is related to the rank amount of direct insolation or the altitude of the sun, and thus the peak value of wavelength on the spectra shifts from 0.48 μm to 0.76 μm . With respect to the total radiation ranked, the spectra normalized by its peak value gather each other, and ratios of the spectra are converged upon unity with a deviation ± 20 percent for all the rank.

Key Words: Solar Energy, Spectral Insolation, Global and Direct Insolations, Classified Radiation, Ranking of Radiation, Normalized Spectra, Ratios of Spectra, Solar Altitude, Transmittance of Atmosphere, Precipitable Water

1. ま え が き

第1報⁽¹⁾において, 分光日射量の測定結果を1日の時刻変化に伴うスペクトル変化と, 月間の測定値を100 W/m²ごとにランク分けしたスペクトル変化にまとめ, それらがBirdの分光日射モデルと一致し, 晴天時で雲量0~6の範囲では太陽高度と強い相関性を有することを明らかにするとともに, 大気混濁度および降水量をもとに晴天時の大気透過率と法線面直達日射量との関係を明らかにした。その結果, 全天日射および法線面直達日射のスペクトルは, そのときの全天日射量および法線面直達日射量に従ってランク分けすることにより, そのランクの平均値として精度よく推定できることを示した。全天日射量による全天日射スペクトルの推定に関しては, Crommelynck - Joukoff⁽²⁾が波長0.30~1.00 μm までのスペクトル分布を三角形で近似し, 特定の八つの波長帯から求める方法を示し, Soler⁽³⁾は全天日射スペクトルの1h当

たりの月平均値を推定している。羽生ら^{(4)~(6)}は田無におけ分光日射スペクトルの測定値をエアマス, 大気の混濁度と可降水量さらに雲量と雲の形によって整理している。その結果, これらの報告を参照する場合, 大気混濁度, 雲量など主観的データを必要とし, 客観的に日射スペクトルを推定することは難しい。また, 報告されているデータは波長域0.30~1.05 μm と狭く, 波長間隔も波長域0.80 μm 以上では0.50 μm ごとと粗く詳細な波長特性を検討するには不十分である。また分光日射スペクトルの測定は現在のところ使用する分光放射計が高価であること等から容易に測定できない。

こうしたことから本報告では第1報⁽¹⁾で行った各月ごとの日射スペクトルをランク分けする手法を半年間の分光日射の測定値に適用するとともに, 晴天時および曇天時のスペクトルを各スペクトルのピーク値で割って規格化し全ランクに対する平均した一本の日射スペクトルを求め各ランクのパラメータである全天日射量から対応するランクのピーク値を掛けることによって簡便に日射スペクトルを推定する方法を得た。そしてこの方法の確かさを検討するために, 規格化した

* 原稿受付 1996年1月11日。

*1 正員, 北見工業大学工学部 (〒090 北見市公園町165)。

*2 北見工業大学大学院。

日射スペクトルの測定値と Bird のモデルによる計算値との比較を行った。規格化することによって晴天時には太陽高度が 15° 以上において、また曇天時には太陽高度とは無関係に、いずれの場合も各ランクについて波長 1.4 μm および 1.8 μm において見られる大きな吸収帯を除いて ±20% 以内の誤差で日射スペクトルを推定できることが明らかになった。

記 号

- I : 日射エネルギー $W/m^2, W/(m^2 \cdot \mu m)$
- R : 日射量のランク
- R : 全ランクの平均スペクトルに対する各ランクのスペクトルの比 $R_{(f)} = I_{(Rf)H\lambda} / I_{(mf)H\lambda}$
- F : 規格化したスペクトル比 $= I_{\lambda} / I_{\lambda(max)}$
- h : 太陽高度 °
- W : 可降水量 cm
- λ : 波長 μm
- ρ : 反射率(アルベド)
- τ_{05} : 大気の混濁度指数
- 添 字
- H : 全日射量
- N : 法線面直達日射量
- (mf) : 全ランクの平均量(晴天時)
- (Rf) : 晴天時(日)のランク平均量
- (Rc) : 曇天時(日)のランク平均量
- CAL: Bird のモデルに基づく計算値
- λ : 波長特性

2. 結果および考察

図1は曇天日の日射スペクトルの例として1995年7月4日の時刻変化を示す。括弧内の数値は全日射量を示す。曇天時の場合、直達日射成分がなく太陽高度の影響を受けないことから、晴天時に見られるよう

な時刻変化に対応したスペクトル変化は見られない。日射量の多少に関わらずスペクトルの形状はほとんど変わらない。その形状はピーク値よりも長波長域においてスペクトルの減衰が強く鋭い形となる。曇天時のピーク値を示す波長は 0.46 μm で晴天時の 0.48 μm よりも短い。そして 0.94, 1.12, 1.40 μm 等で大気中の水蒸気による吸収の影響が晴天時より大きいことが特徴である。ここで晴天時、曇天時とは測定時の天候状況を示し、原則として雲量 6 以下で直達日射成分を含む場合を晴天、雲量 10 の場合を曇天と区別している。これらの集合の意味で晴天日、曇天日と表現した。

図2は、1995年1月から6月までの半年間の晴天日の全日射量を 100 W/m² ごとにランク分けし、各ランクごとの全日射スペクトル $I_{(Rf)H\lambda}$ と全ランクの平均スペクトル $I_{(mf)H\lambda}$ とを示す。各ランクの後に示す括弧内の数値はそのランクに属するデータ数を示す。ランク $R=4$ から $R=9$ に属するデータ数が多いことがわかる。冬期から夏期までの期間を取りまとめており、季節の影響を無視して整理した。これは太陽エネルギー利用の立場からは使用時の簡便さに重点を

Fig. 2 Spectral global insolation classified into every rank (Jan.~Jun.)

Fig. 1 Hourly change of spectra of the global insolation (Cloudy)

Fig. 3 All data at the 6th rank of fine days (R=6: 500~600 W/m²)

置いたことによる。各ランクのスペクトル形状は $0.48\ \mu\text{m}$ にピーク値をもつほぼ相似形を示す。ここで各ランクのスペクトルを表すのに $I_{(Rf)HA}$ の添字 R をランクの小さい方から順に $R=1, 2, \dots$ と示す。

ところで各ランクにおいて、ランク内でのデータのばらつきの程度と、スペクトルの形状の違いを調べておくことは重要である。図3は、図2において $500\sim 600\ \text{W/m}^2$ のランク $R=6$ に属する23個のデータのスペクトルを示す。波長 $0.48\ \mu\text{m}$ のピーク値付近で I_{HA} は $650\sim 1100\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ の範囲で変動するが、スペクトルの形状はほぼ相似形を示している。ただ一つだけ波長 1.2 および $1.55\ \mu\text{m}$ 付近で他のグループと離れたスペクトル(4/25)が見られるが、これは測定時の雲の動きの影響によるもので、こうしたデータはまれであり全体に対する影響は無視できる。

図4は、図3に示すランク $R=6$ の日射スペクトルをランク平均値との比 $I_{HA}/I_{(6f)HA}$ で示す。波長 $0.94, 1.12, 1.4\ \mu\text{m}$ 等の吸収帯においてばらつきが大きくなっているが、全体的に見るとばらつきはほぼ $\pm 40\%$ 以内である。またばらつきの大きい吸収帯付近は分母

の $I_{(6f)HA}$ が $0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ に近づくことによる結果であり、エネルギー量的には波長 $1.4\ \mu\text{m}$ 以上の波長域ではスペクトル比 $I_{HA}/I_{(6f)HA}$ を 1.0 ± 0.4 としても差し支えない。ただし、ランクが小さい程 $I_{(Rf)HA}$ が小さいことからスペクトル比は大きくなる。

図5は、図2において示した各ランク間のスペクトルの関係を見るために、全ランクのスペクトルの平均値 $I_{(mf)HA}$ と各ランクのスペクトルとの比 $I_{(Rf)HA}/I_{(mf)HA}$ を示す。 $0.28\sim 0.33\ \mu\text{m}$ の波長域において $I_{(Rf)HA}/I_{(mf)HA}$ はおよそ 3.6 の大きな値を示すが、それ以外の波長域では $0\sim 2.0$ 以下の範囲で各ランクの大きさの順にほぼ一定である。波長 $1.4\ \mu\text{m}$ および $1.8\ \mu\text{m}$ の付近では $I_{(Rf)HA}$ の値が小さくスペクトル比はばらついているが、全体としては各ランクに対応した一定値となる。このことはランクの平均値 $I_{(mf)HA}$ にスペクトル比 $I_{(Rf)HA}/I_{(mf)HA}$ を掛けることによって任意のランクのスペクトルを推定できることを意味する。

図6は、1995年1月から6月までの曇天日のランク分けした全天日射スペクトル $I_{(RC)HA}$ を示す。曇天日は $R=2$ および $R=3$ のランクのデータが多く、以後 R

Fig. 4 Relationship between wavelength and ratio of deviation of spectral global insulations in the 6th rank ($R=6 : 500\sim 600\ \text{W/m}^2$)

Fig. 5 Ratio of averaged spectral global insulations of all rank to spectral global insolation of the same rank

Fig. 6 Spectral global insulations classified into every rank (Cloudy days)

Fig. 7 All data at the 3rd rank of cloudy days ($R=3 : 200\sim 300\ \text{W/m}^2$)

=4,5とランクが大きくなるに伴ってデータ数は少なくなる。同時にランクの増加は雲の透過率が大きくなることであり、スペクトル形状はランクの増加に伴って大きくなる。図2の晴天日の場合と比較して、ピーク波長 $0.46\text{ }\mu\text{m}$ より長波長側のこう配が急であり、また波長 $0.94, 1.12, 1.4\text{ }\mu\text{m}$ 等で水蒸気による吸収の影響が大きい。

図7は、曇天時の $R=3$ のランクに属する33個のスペクトルを示す。ピーク波長 $0.46\text{ }\mu\text{m}$ 付近では $320\sim 560\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ の範囲に分布する相似形となる。このように晴天日および曇天日にかかわらず、ランク内のスペクトルの波長分布は相似形を示す。

図8は、同じ期間の晴天日のランク分けした法線面直達日射スペクトル $I_{(R)NA}$ を示す。法線面直達日射量 I_N は h によってのみ変化する。図8に示す各ランクの h は第1報⁽¹⁾で示したBirdのモデルに基づく両者の関係から、大気混濁度 $\tau_{05}=0.1$ 、可降水量 $W=0.5\text{ cm}$ とすると $R=6$ に相当する h は $10\sim 13^\circ$ であり、図中に示されている $R=10$ の h は $37\sim 67^\circ$ に相当する。また、このランクでのピーク波長は $0.48\text{ }\mu\text{m}$ であ

る。直達日射の場合、ピーク波長はランクまたはそれに対応する h の低下に伴って長波長側へずれる。これは h の低下に伴うエアマスの増加により大気吸収作用が短い波長で強くなることによるもので、Birdのモデルによると h が 45° 以上ではあまり大きくなずは見られないが、 45° 以下になるとその影響は大きくなり、特に 15° 以下でその影響は著しい。そして I_N が $500\text{ W}/\text{m}^2$ 以下のランクでは h は 10° 以下となり、スペクトルのピーク波長もおよそ $0.77\text{ }\mu\text{m}$ まで長波長側へずれ、そのため $0.3\sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$ の可視域にあるエネルギーの占める割合が小さくなる。

図9は、各ランクの法線面直達日射とその平均値とのスペクトル比 $I_{(Rf)NA}/I_{(mf)NA}$ の波長分布を示す。平均値 $I_{(mf)NA}$ は $R=5$ と 6 の間にありほぼ $R=6$ と重なっている。波長 $0.78\text{ }\mu\text{m}$ に不連続点があり、 $I_{(mf)NA}$ より小さいランクでは下側に、大きいランクでは上側にずれている。また $0.60\text{ }\mu\text{m}$ より長い波長域において見られる各吸収帯においては平均スペクトル $I_{(mf)NA}$ より小さいランクでは下側に、それより大きいランクでは上側にふくらむことがわかる。このようにランク分けしたスペクトル比は基本的にランクの大きさに従って順序付けられることが明らかになった。

図10は、晴天日および曇天日のランク分けした日射スペクトルをそのピーク値で割って規格化した

Fig. 8 Spectral direct insulations classified into every rank

Fig. 9 Ratio of averaged spectral direct insulations of all rank to spectral direct insolation of each rank

Fig. 10 Normalized spectral global insulations by its peak value

$F_{(rf)HA}$ および $F_{(rc)HA}$ を示す。図 10(a)の晴天日については、 $R=1$ を除いて互いに接近したスペクトルを示す。 $R=1$ のデータは、 h が 10° 以下であり、日の出、日の入り前後に相当し、他のデータと同列に扱うことはできないものと思われる。図 10(b)は、曇天日の結果を示す。晴天日と異なり日射ランクの大小が h とは無関係であることから、ランク $R=1$ から $R=7$ までのいずれのスペクトルも互いに近接する。ただ波長が長くなるのに伴って、ランク間の差が大きくなる傾向が見られる。この傾向は、波長 $1.5\sim 1.8\mu\text{m}$ の範囲で著しい。これは曇天日で日射量が大きくなる場合、相対的に赤外域の透過率が大きくなることによるものと思われる。

図 11 は、図 10 に示す晴天日および曇天日における全ランクを平均したスペクトルを示す。晴天日のスペクトル $F_{(f)HA}$ と曇天日のスペクトル $F_{(c)HA}$ を比較すると波長域 $0.28\sim 0.48\mu\text{m}$ では $F_{(c)HA}$ が $F_{(f)HA}$ より大きく、 $0.48\mu\text{m}$ 以上の波長域において、 $F_{(f)HA}$ が $F_{(c)HA}$ より大きい。また $0.6\mu\text{m}$ 以上の波長域に現れる吸収帯は、 $F_{(f)HA}$ より $F_{(c)HA}$ のほうが深く、大気中の水蒸

気による吸収の影響が強い。この $F_{(f)HA}$ または $F_{(c)HA}$ に対し図 2 または図 11 においてパラメータとした各ランクの全天日射量に対するピーク値を掛けることによって晴天日または曇天日に対する全天日射スペクトルを推定できることになる。

図 12 は、規格化した各ランクのスペクトル $F_{(rf)HA}$ に対する全ランクの平均スペクトル $F_{(f)HA}$ の比 $R_{(f)}$ を示す。規格化していない図 5 の場合と異なり、 $R=1$ 以外の全てのランクにおいて、波長 $1.4\mu\text{m}$ および $1.8\sim 1.95\mu\text{m}$ の吸収帯を除いて、 $R_{(f)}$ は 1 ± 0.2 の範囲に収まる。

図 13 は、曇天日の平均スペクトル $F_{(c)HA}$ に対する各ランクのスペクトル $F_{(rc)HA}$ の比 $R_{(c)}$ を示す。晴天日の場合と同じく、エネルギーが小さい $0.28\sim 0.33\mu\text{m}$ の波長域、 $0.72, 0.94\mu\text{m}$ および $1.12\mu\text{m}$ の吸収帯を除いて、 $1.30\mu\text{m}$ までは各ランクの比はほぼ一定で 1 ± 0.2 以内である。波長 $1.4\mu\text{m}$ 付近、および $1.9\sim 2.0\mu\text{m}$ の吸収帯では $R_{(c)}$ は $R_{(f)}$ と同様に不安定な様相を示すが、ランクが増すに伴って $R_{(c)}$ は大きくなる。これは長波長域のエネルギーは雲の中を相対的に透過し易いことによるもので、 $R_{(c)}$ は $R_{(f)}$ と異な

Fig. 11 Mean values of normalized spectral global insolation of every rank (Fine and Cloudy)

Fig. 13 Relationship between wavelength and $R_{(c)}$ for $F_{(c)HA}$ (Cloudy days)

Fig. 12 Relationship between wavelength and $R_{(f)}$ for $F_{(f)HA}$ (Fine days)

Fig. 14 Normalized spectral global insolation calculated by Bird's Model

Fig. 15 Averaged value of normalized spectral global insolation $F(f)H/CAL$ of solar altitude $15 \sim 90^\circ$

り $1.0 \mu m$ 以上の波長域において、ランクとともに上下に拡がる傾向を示す。 $R=1$ についてはエネルギーが小さいので無視する。

この結果、晴天日および曇天日について各ランクに対応して推定した全天日射スペクトルの誤差はおおよそ20%以下であると考えられる。

図14は、Birdのモデルに基づく全天日射量の分光日射スペクトルをピーク値で割って規格化した $F(f)H/CAL$ で、 h をパラメータとして $90, 60, 45, 30, 25, 20^\circ$ および 15° について示す。波長域 $0.6 \sim 1.75 \mu m$ では吸収帯にはさまれた透過帯において h の変化に伴うスペクトル値の違いが見られる。 h に対する規格化したスペクトル値の関係は、透過帯では h が低いときにスペクトル値は大きく、吸収が強い $0.90 \mu m$ 以上の波長域では、逆に h が高いときに吸収帯のスペクトル値は大きくなる。図10(a)に示した測定値は、 $R=1$ を除き、各ランクの曲線群は、図14の計算値と比較してランクの小さい方にとづきが見られ、水蒸気による吸収は測定値の方が強い。これらを除いて、全般に計算値と測定値は傾向が一致する。

図15は、図14の規格化したスペクトルの平均値 $F(f)H/CAL$ を示す。 $F(f)H/CAL$ は h が $90, 60, 45, 30, 25, 20^\circ$ および 15° に対する h の平均値 40.7° のスペクトルと同じになる。これを図11に示した $F(f)H$ と比較すると、波長 $0.30 \sim 0.70 \mu m$ の範囲では両者はほぼ等しく、 $0.70 \mu m$ 以上の波長域では $F(f)H$ が $F(f)H/CAL$ よりも小さい。計算値は h のみを変化させるのに対し、実測値は種々の大気条件が関係することから、こうした違いが現れるものと考えられる。任意の地点と季節に対する $F(f)H$ はその地点の h の最高値と 15° との平均値による $F(f)H/CAL$ を用いることが妥当と思われる。

図16は、 $F(f)H/CAL$ に対する各 h (各ランク) のスペクトル比 $R(f)CAL$ を示す。図16(a)は、 $\tau_{05}=0.1$, $W=0.5$ cm, $\rho_g=0.3$ に対する計算結果である。波長域

Fig. 16 Influence of solar altitude on $R(f)CAL$ by Bird's model

$0.33 \mu m$ 以上で、二つの強い吸収帯 $1.395 \mu m$ および $1.920 \mu m$ において $R(f)CAL$ は大きく変動するが、他の波長域では変動は小さい。また波長 $0.90 \mu m$ 以上に現れる吸収帯では、 $R(f)CAL$ への h の影響は透過帯に対して逆転するが、 $0.33 \sim 0.90 \mu m$ の波長域では $R(f)CAL$ は、ほぼ 1.0 付近に収束している。そして $1.395, 1.920$ および $2.5(2.70) \mu m$ の吸収帯を除いて、その変動は ± 0.2 以内である。図16(b)は、 $W=3.0$ cmの結果を示す。上記の吸収帯において、 $h=90^\circ$ および 60° に対して $R(f)CAL$ の変動幅は最大 4.0 と大きくなり、波長 $0.937 \mu m$ と $1.120 \mu m$ の吸収帯における変動も ± 0.8 まで増大する。しかしそれらを除いて $0.33 \sim 2.3 \mu m$ の波長域全体では $R(f)CAL$ は 1.0 ± 0.2 の範囲にあることがわかる。前述のように北見市の h の最大値は 68.3° であり $h=90^\circ$ は除かれる。しかも波長 $1.395 \mu m$ および $1.920 \mu m$ 付近の吸収帯は、吸収が強いので、エネルギーは、ほとんど $0 W/(m^2 \cdot \mu m)$ であり、これらの各吸収帯における変動は太陽エネルギー利用の立場からは無視し得る。Birdのモデルによる計算結果から、図12に示した測定結果から導かれた分光日射特性は十分根拠のあるものとする。今後さらに多くの測定を行ってデータを蓄積し、データの確度を高めるとともに、季節的な特性を明らかにすることが重要と思われる。

3. む す び

1995年1月から6月までの半年間にわたる分光日射スペクトルの測定結果を、全天日射量および法線面直達日射量でランク分けして整理した。さらに全天日射スペクトルを晴天日と曇天日とに分けて整理するとともに Bird の日射モデルを用いて同様の整理を行い、測定結果との比較によって以下の点が明らかにされた。

(1) 曇天日の分光日射スペクトルは、測定時の雲の透過率によって変化し時刻とは無関係である。また大気中の水蒸気による吸収の影響が大きい。

(2) 期間中の晴天日の全天日射スペクトルをランク分けすると、各ランクのスペクトルの大きさはほぼランクに比例する。各ランクのピーク波長はほぼ $0.48\ \mu\text{m}$ である。

(3) 一つのランク内での各スペクトルのばらつきは $R=6$ のランクではほぼ $\pm 40\%$ 以下で、吸収の強い波長帯を除いて一定である。

(4) 全てのランクの平均値に対する各ランクのスペクトル比 $I_{(Rf)H\lambda}/I_{(mf)H\lambda}$ もランクと同順に変化する。波長 $0.33\ \mu\text{m}$ 以上では、強い吸収帯を除いてスペクトル比はほぼ一定である。

(5) 曇天時のランク分けした全天日射スペクトルもランクに対応した分布を示す。しかし晴天時のスペクトルと比較してピーク波長より長波長側でこう配がわずかに急となり、大気中の水蒸気による吸収が大きい。曇天時のスペクトルにおいてピーク値を示す波長は $0.46\ \mu\text{m}$ である。

(6) 法線面直達日射のスペクトルは、ピーク波長がランクとともに変化する。したがって比

$I_{(R)N\lambda}/I_{(m)N\lambda}$ は波長に対して変動する。およそ $0.76\ \mu\text{m}$ までの短波長域において $I_{(m)N\lambda}$ より小さいランクでは $I_{(R)N\lambda}/I_{(m)N\lambda}$ は波長とともにゆるやかに増加し、 $I_{(m)N\lambda}$ より大きいランクでは $I_{(R)N\lambda}/I_{(m)N\lambda}$ は波長の増加とともに減少する。

(7) 晴天日および曇天日のいずれにおいても、規格化した全天日射スペクトル $F_{(Rf)H\lambda}$ は、すべてのランクに対してスペクトル形状は類似し互いに接近する。

(8) 晴天時の規格化した全ランクの平均スペクトル $F_{(f)H\lambda}$ と各ランクのスペクトル $F_{(Rf)H\lambda}$ との比 $R_{(f)}$ は、 $R=1$ の値および強い吸収帯を除いて1に収束し、そのばらつきはおおよそ $\pm 20\%$ 以内である。曇天時の場合も同様の傾向を示す。

(9) Bird のモデルを用いて太陽高度 $15\sim 90^\circ$ までの全天日射量を規格化したスペクトルの平均値と、各太陽高度について規格化したスペクトルの比 $R_{(f)CAL}$ は、測定値による $R_{(f)}$ と同様の傾向を示した。

本研究は文部省科学研究費一般研究(B)、課題番号 06452178 によった。

文 献

- (1) 馬場弘・金山公夫・遠藤登・金澤浩志, 機論, **62**-599, B (1996), 2847-2853.
- (2) Crommelynck, D. and Joukoff, A., *Solar Energy*, **45**-3 (1990), 131-137.
- (3) Soler, A., *Solar Energy*, **52**-3 (1994), 227-232.
- (4) 羽生光宏・鈴木守・長坂武彦, 電子技術総合研究所研究報告, 812 (1971).
- (5) 羽生光宏・鈴木守・長坂武彦, 電子技術総合研究所研究報告, 813 (1971).
- (6) 羽生光宏・鈴木守・長坂武彦, 電子技術総合研究所研究報告, 830 (1983).