

地域生産力評価への一試み

——日射・地形・生産諸条件からの考察——

松田松二*¹・星川和俊*¹

I. まえがき

近年、エネルギーに関する問題がいろいろと論議される中で、太陽エネルギーがもつ恒常性とクリーンエネルギーとしての意義が再認識され、その積極的な活用を目指して多方面で研究・開発が続けられている。本来、太陽エネルギーは我々地球上に住む人類にとって、外部から供給される唯一のエネルギー源であり、これによって我々の廻りの自然環境(気象、水象、生態系 etc.)や生活環境(社会、文化 etc.)が成立していると言っても過言ではあるまい。例えば、我々の日常生活での「食糧」を一つとっても、その源は太陽からのエネルギーであることは論をまたないのである。

このような状況において、太陽エネルギーの更なる有効利用のための新しい手段や方法の開発が必要となろう。また、そのことと同時に、太陽エネルギーがもともと有している潜在的なエネルギー資源としての可能性を評価することも一層重要となると考えられる。つまり、太陽エネルギーは日射という形で地面上に到達するのであるが、この日射エネルギーの質および量に関する時空間的な分布の特性を把握すること、ならびにこの日射エネルギーを基礎として活動している植物生産の諸現象を把握することが、とりわけ重要な意味をもってくるであろう。

このため、本報告では日射を量的な観点から見た場合、その時空間的な分布特性を大きく支配する因子と考えられる地形的な条件を取り上げ、この条件と日射との関係を考慮している。そして、それらの結果に基づいて、日射と植物生産力の関係をモデルとして組み立て、このモデルによる生産力評価の可能性について、基礎的な検討を試みたものである。

II. 地形・日射・生産力

ある一定の地域において、そこの地表面に到達する日射エネルギー(つまり、太陽エネルギー)は、大気中を通過してくる間に、 H_2O 分子、 O_2 分子あるいは雲等によって吸収や散乱を受け減衰される。このように日射の地表面への到達量は、大気の状態や気象条件によって左右される場合も多いが、一般的に言って日射が到達する地表面の地形によって、より根本的な影響を受けていると考えられる。すなわち、その地表面が有する方位、傾斜角、あるいは周囲の凸凹などの地形的な諸条件が関係してくるのである。例えば、これらの地形条件によって、その地点の日の出あるいは日没時刻が変化し、日射の質

と量の面において多大な影響を受けることも予想され、地形諸条件と日射の関係を検討することが重要となろう。

また、これらの影響は当然のことながら、日射をそのエネルギー源として生命活動を維持している植物にも大きな作用を与えるものと考えられる。特に、その中でも光合成作用に対する影響は直接的であり、極論すれば各々の地点に到達する日射のエネルギーの時空間特性によって、生産力の構造が支配されていると言えるかもしれない。しかし、現実的には植物生産を支配する因子として、その他にも数多くの植物の内的・外的因子を挙げられている。⁽¹⁾

ただ、本報告ではマクロ的な観点からの生産の評価をその第一歩としているため、特に地形条件、日射ならびにその結果としての生産力を取り扱い、それらの相互間の関連を検討することに主眼を置いている。

III. 日射量の理論的推定

1. 全短波放射

太陽から受ける日射量、つまり全短波放射量は、一般に(1)式で表現される。

$$Q = S + D \quad \dots\dots\dots (1)$$

Q: 全短波放射量

S: 直達太陽放射量

D: 散乱放射量

(1)式の中で、散乱放射量(D)は大気中のいろいろな分子や雲によって、引き起こされるものであり、大気の組成、気象条件あるいは地表面の状態等によって変化する訳である。このため、散乱放射量の推定を正確に行なうことは難しく、未だに数多くの問題を残している。しかし、従来の観測結果⁽²⁾によると、散乱放射量は直達太陽放射量の30~40%程度であるということ、あるいは散乱放射の強さは、直達太陽放射の強さに密接に関係あるものとして取り扱われていることなどを考慮し、ここでは散乱放射を無視するという仮定を置いた。そのため、ここで取り扱う日射量は、直達太陽放射に限ったものである。

2. 斜面の受ける日射

我国のような急峻な表形をもつ国土においては、そのほとんど地の表面は平地でなく、傾斜を有する地表面となっている。このような傾斜が受ける日射のエネルギー量は、季節、方位ならびに傾斜角によって大きな差が存在しており、その地域に住む人類、動植物あるいは気象や土壌条件に大きく関与することは、前に述べたとおりである。

* 1 信州大学教養部

このような傾斜をもつ斜面での日射量の計算は非常に面倒な方法であったが、岡上⁽³⁾は座標軸の設定の方法を変更することによって、斜面での日射強度の理論解を(2)式のごとく得た。

$$I_s = I_0 \left\{ \left[1 - (m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta)^2 \right]^{1/2} \cdot \cos (wt + \alpha) \cdot \cos \delta + (m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta) \cdot \sin \delta \right\} \quad \cdots (2)$$

I_s ; 斜面での日射強度

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{1}{n \cdot \cos \theta - m \cdot \sin \theta}$$

I_0 ; 太陽光の垂直な面が受ける日射強度

θ ; 緯度, δ ; 赤緯, w ; 地球自転の角速度

l, m, n ; 斜面の単位法線ベクトルの x, y, z 成分

ここでは、この(2)式を用いることにより、任意の方位や傾斜角を有する地表面での日射の強度を推定することが可能となる。

3. 日射量

(2)式は、太陽の時角が与えられた時、その時点での地表面が受ける日射の強度を表わしている。よって、この式に太陽の日の出・日没時間を導入し、時間積分を行なうことから、日射量が求められる。

一般に、水平面における日の出時刻 $-t_0$ 、または日没時刻 t_0 はつぎの(3)式により定義される。⁽⁴⁾

$$\cos t_0 = -\tan \theta \cdot \tan \delta \quad \cdots (3)$$

しかし、この解は小沢が指摘したように、傾斜地の日の出・日没時刻の場合とは異なってくることもありうる。つまり、いつも $-t_0$ や t_0 となるとは限らないのである。このため、小沢は(2)式を0と置いた場合、すなわち傾斜が無限に続いていると仮定した(4)式を解き、

$$\left\{ 1 - (m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta)^2 \right\}^{1/2} \cdot \cos (wt + \alpha) \cdot \cos \delta + (m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta) \cdot \sin \delta = 0 \quad \cdots (4)$$

これを満足する日の出・日没時刻 (t_R, t_S) を求めた。そして、 $-t_0$ と t_R ならびに t_0 と t_S を各々比較し、絶対値の大きい値を斜面における日の出・日没時刻として採用した。

この小沢の方法によって得られる日の出・日没時刻をそれぞれ t_1, t_2 とすると、(2)式を t_1 から t_2 まで積分することにより、(5)式のように日射量が求められる。

$$\int_{t_1}^{t_2} I_s dt = I_0 \left\{ \frac{1}{w} (1 - m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta)^2 \right\}^{1/2} \cdot \sin (wt + \alpha) \cdot \cos \delta + (m \cdot \cos \theta + n \cdot \sin \theta) \cdot \sin \delta \cdot t \Big|_{t_1}^{t_2} \quad \cdots (5)$$

なお、この(5)式によってある一地点の日射量を求積する場合には、それ程大きな支障はないが、後述するように地域を面として取り扱い、その地域面全体の日射量を求めていく場合等には、問題を残している。何故なうば、我国のように地表面の凸凹のはげしい所では、地

域全体の中で地表面自身が複雑で非連続的な曲面を形成しているため、ある地点を考えるとその周りのより標高の高い地物の影となる可能性もあるからである。このため、小沢の提案した日の出・日没時刻が常に正確であるとは限らない。また、日の出から日没の間、いつも定期的に直達太陽放射を受けるとは限っていないのである。以上のことから、本報告ではV章の地域面全体に渡る日射量の算定の際には、次のような検討をモデルに組み入れている。⁽⁶⁾つまり、前述の t_1, t_2 を起点として、各々南中側に向かってある一定の短い時間ステップ Δt (たとえば、10分) 毎に、その時刻の太陽方位と太陽高度を推定し、他の地物の影にならないかどうかを判定し、その結果によってより正確な日の出・日没時刻を採用するようにしている。また、同様な方法によって、太陽の日の出から日没に至る、個々の時間ステップにおいても周囲の地物に対する影判定を行なった。この判定の結果、影とならない時間ステップに限り、日射を該当地表面が受けるとして、V章では計算を行なうこととしている。

4. 計算結果とその考察

これまでに述べてきた理論式と計算手順によって、夏至、春分(秋分)ならびに冬至の代表的な季節の日射強度に関する時間分布曲線を北斜面と南斜面の場合に対して、求めた結果がFig. 1~Fig. 6である。なお、冬至の場合に対しては、Fig. 7, 8に示すようにそれぞれ東斜面、西斜面の計算結果も載せている。これらの結果によれば、夏至、春分(秋分)あるいは冬至のどの季節の場合でも、北斜面と南斜面の日射強度が大きく違っており、斜面の傾斜角度が大きくなるにつれ、その傾向が増大することが判る。特に、この特徴は冬至において顕著となっている。例えば、冬至の北斜面では、その傾斜角が大きくなるにつれ日射強度は減少していくが、傾斜角が30°以上になると一日中陽が当たらないということさえ起こるのである。また、夏至の北斜面、冬至の東西の斜面の結果を見ると、太陽時に対する各々の日射強度が各斜面によって特徴的となっている。一般に東向きの斜面では午前中が、逆に西向きの斜面では午後の日射強度が大きく、各々の地表面に達する日射の質(波長)にも密接に関連するものと考えられる。

次に、(5)式で述べたように、日射強度の時間分布曲線を日の出から日没まで積分し、日射量を求めた。そして、代表的な季節毎に、日射量と地表面の傾斜角度との関係をプロットするとFig. 9~Fig. 11のとおりとなる。これらの結果を見ても、やはり冬至の場合が傾斜角、方位の影響が日射量に直接的に反映するようであり、次いで春分(秋分)が続いている。しかし、夏至の場合には、一般的に言って地形的条件が、それ程大きく影響していないようである。

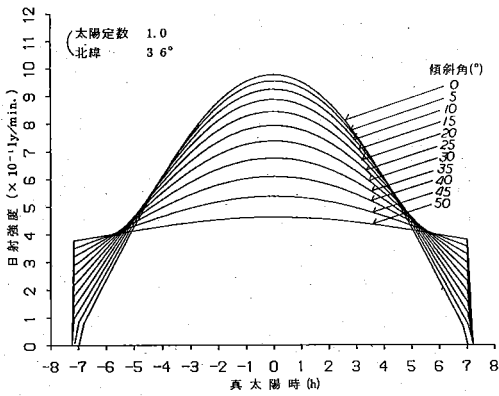


Fig. 1 日射強度分布 (夏至, 北斜面)

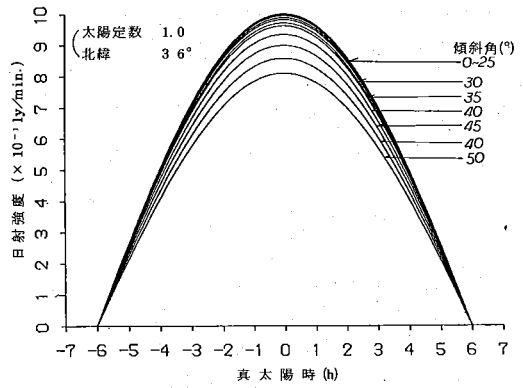


Fig. 4 日射強度分布 (春・秋分, 南斜面)

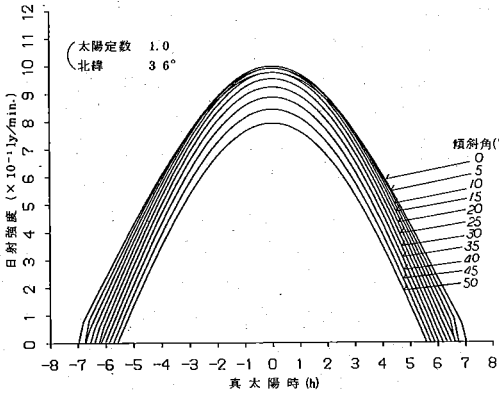


Fig. 2 日射強度分布 (夏至, 南斜面)

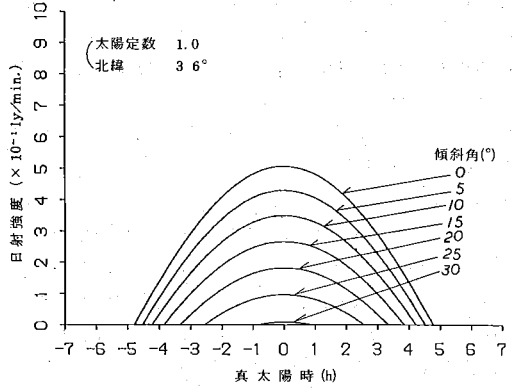


Fig. 5 日射強度分布 (冬至, 北斜面)

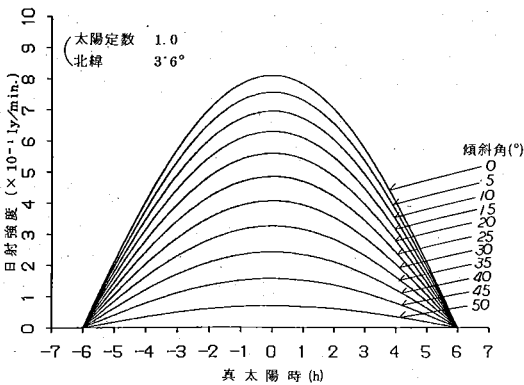


Fig. 3 日射強度分布 (春分・秋分, 北斜面)

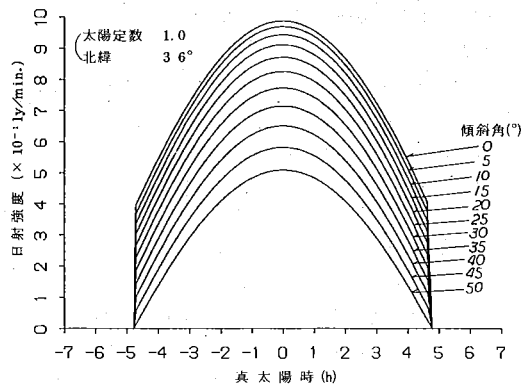


Fig. 6 日射強度分布 (冬至, 南斜面)

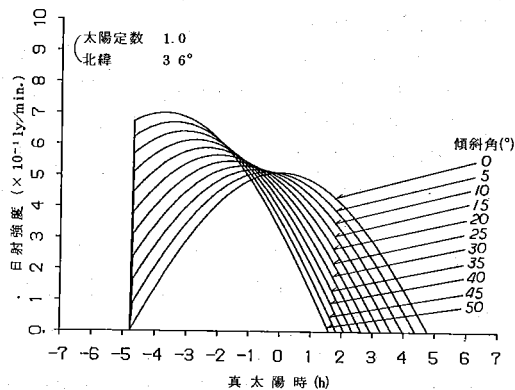


Fig. 7 日射強度分布 (冬至, 東斜面)

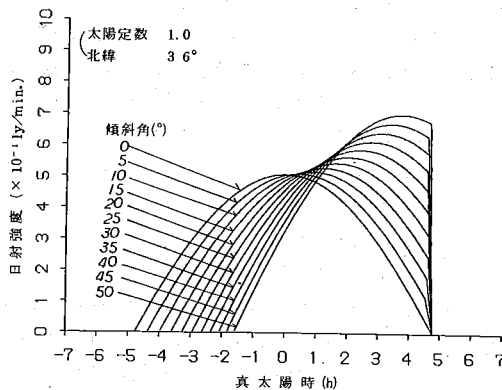


Fig. 8 日射強度分布 (冬至, 西斜面)

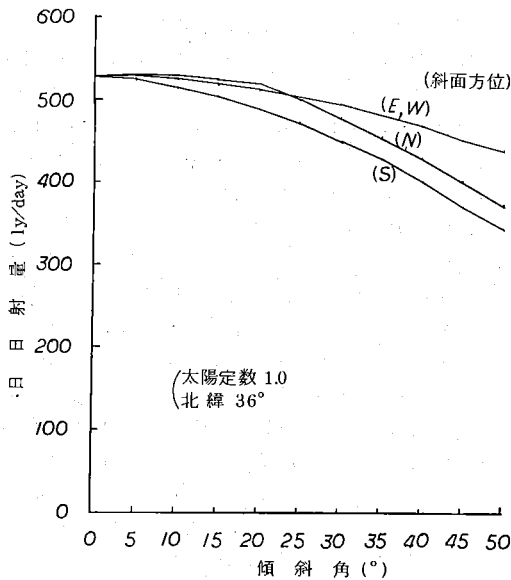


Fig. 9 日射量と地形の傾斜 (夏至)

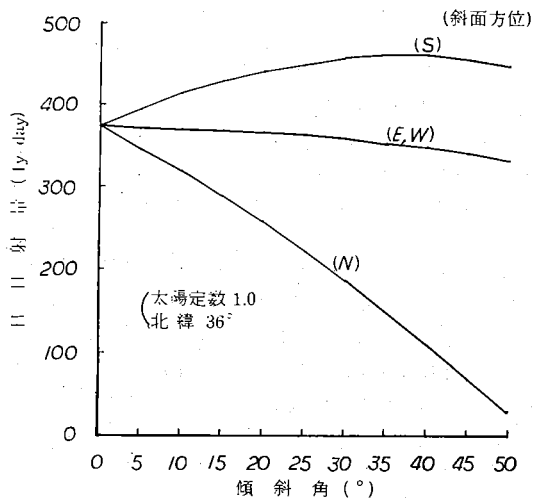


Fig. 10 日射量と地形の傾斜 (春・秋分)

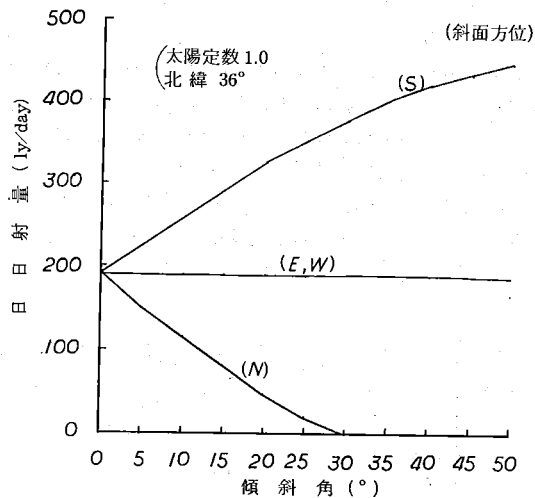


Fig. 11 日射量と地形の傾斜 (冬至)

以上述べてきたように、日射量はこれを受ける地表面の方位や傾斜角等の地形条件によって、大きな影響を受けており、この影響が長期間の年月に渡って累積する結果となるので、その地表面での自然環境を大きく支配していると言えよう。

VI. 日射と生産力

1. 生産力モデル

Ⅲで述べてきた方法によって、いろいろな地形条件を有する地表面が受ける日射のエネルギー分布は推定可能となった。このエネルギー分布に基づいて、それらの各地表面で生育している植物の生産力を推定する必要がある。このためには、この目的に合った適当な生産力推定のためのモデルの選定、あるいは新しいモデルの作成が不可欠となる。このモデルの決定については、多角的な観点からの検討が必要となるが、本報告ではこの問題を

複雑にする以前に、まず日射と植物生産を結びつけ、これにより生産力評価の可能性を探ることを基本的な狙いとしている。このため、生産力推定モデルとしては植物生理・生態の分野において、ある程度確立されたモデル（もしくは、理論）を利用することの方が妥当となるであろう。

上述の観点から、生産力推定モデルとして当該分野でよく利用されてきた単葉の光・光合成曲線を用いて、総生産力の評価を行なうこととした。この光・光合成曲線は門司・佐伯によって明らかにされたものであり、一般に(6)式のような単純な双曲線関数として定義される。⁽⁷⁾

$$P = \frac{bI}{1 + aI} \quad \dots\dots\dots (6)$$

P ; 単葉の光合成量
I ; 葉面照度
a, b : 定数

この式の定数 a, b は、植物の種あるいは葉の内的・外的条件によって決定される値であり、それぞれのケースに応じて a, b を求めなければならない。ここでは、いくつかの光・光合成曲線に関する文献レビューを行ない、Fig. 12 に示す岩城等の測定したセイタカアワダチソウの単葉（杜令葉）の光・光合成曲線を利用することとし、これによって、定数 a, b を決定した。

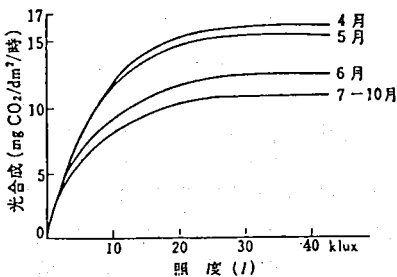


Fig. 12 セイタカアワダチソウの単葉(杜令葉)の光合成—光曲線 (岩城ほか, 1966)

このFig. 12の結果では、セイタカアワダチソウの各季節別の光・光合成曲線が求められているため、生産に関わる各生長段階での植物の外的・内的要因（ex. 温度 etc.）の影響がインプリシットな形で、各季節の光・光合成曲線に反映されていると予想され、生産力の季節変化をしらべる際には好都合である。なお、この光・光合成曲線の季節別の定数 a, b は、図上から数個の値を読みとり、最小二乗法によって各々の値を求めた。また、セイタカアワダチソウの生育期間は4月～10月であるが、春分あるいは冬至等の生産をしらべたいため、それぞれ春分には4月、冬至には10月の光・光合成曲線が対応するものと想定して、計算を行なっている。

2. 光合成有効放射

地表面に到達する日射すべてが、光合成にとって有効であるとは限らない。このため植物の生存ならびに正常な生命活動の必要条件として、光合成有効放射エネルギー(PAR)が定義される。この光合成有効放射エネルギーの決定に対しては、次に記すような問題点を解決しなければならないであろう。

- (1) 光合成有効放射の波長帯域の決定
- (1) 光合成有効放射の各波長に対する植物の活性の程度とその選択性

これらの問題に対しては、現在論争中でありまだ未解決の状況である。ただ、植物生理・生態の分野では、0.4～0.7μmの波長域、つまり可視放射の領域を光合成有効放射として取り扱うことが一般的となっている。本報告でも、光合成有効放射を従来の定義に従って可視放射域のエネルギーであると仮定して、この換算を行なっている。つまり、日射のエネルギー（直達太陽放射）に対して、適当な換算関数を導入することから、有効放射を決定している訳である。その換算関数としては(7)式のような形のものを用いている。

$$T = f(h, c) \quad \dots\dots\dots (7)$$

T ; 換算値
h ; 太陽高度
c ; 大気の状態(清澄度)

(7)式の関数形の決定に対しては、ソビエト領で実際に測定された値⁽⁹⁾を用いることによって、2次もしくは3次の回帰式を作成し、本モデル中に組み入れている。

N-1で述べた光・光合成曲線の測定に対しては、従来から「光」という概念が用いられ、生産力と照度との関係に基づいて、実測が行なわれることがしばしばである。Fig. 12のセイタカアワダチソウの場合もその例外でない。このため、この照度からエネルギー強度への換算も必要となる。この点についてはいくつかの問題を残すが、Rvachev等⁽¹⁰⁾が作成した換算表を用いて、照度から日射のエネルギーへの変換を行なった。

3. 生産力の推定結果とその考察

これまでに述べてきた、日射、生産力推定モデル、光合成有効放射への換算換数等を一つのモデルとして組み立てれば、いろいろな地形条件下での生産力評価モデルが出来あがる。このモデルの計算手順をFlow Chartとしてまとめると、Fig. 13のとおりとなる。

このモデルによって推定された生産力のいくつかの代表的な季節における北斜面と南斜面の生産力分布曲線をプロットするとFig. 14～Fig. 19のごとくである。またFig. 20, 21は、日射の時間分布曲線にならって、冬至の場合の東西斜面の生産力を示したものとなっている。これらの結果から見ると、南斜面、東斜面、西斜面では、

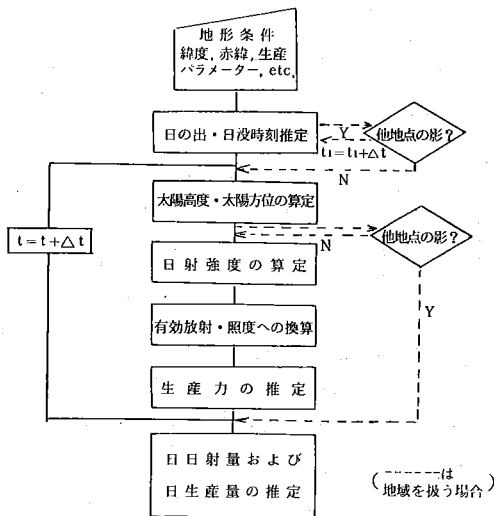


Fig. 13 生産力評価モデルの Flow Chart

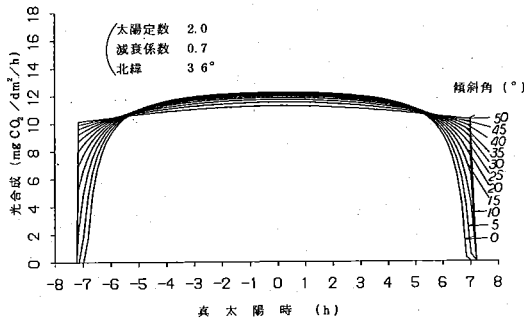


Fig. 14 生産力分布曲線 (夏至, 北斜面)

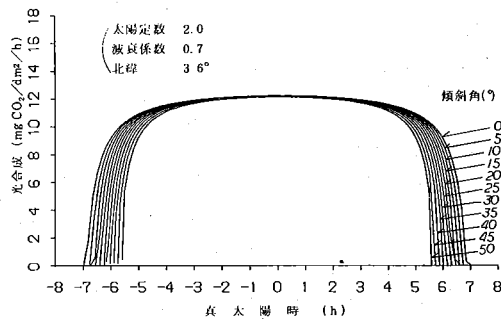


Fig. 15 生産力分布曲線 (夏至, 南斜面)

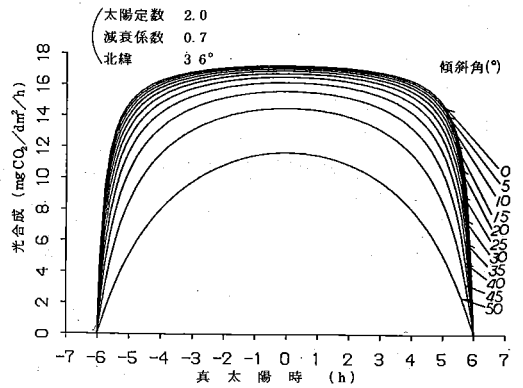


Fig. 16 生産力分布曲線 (春分, 北斜面)

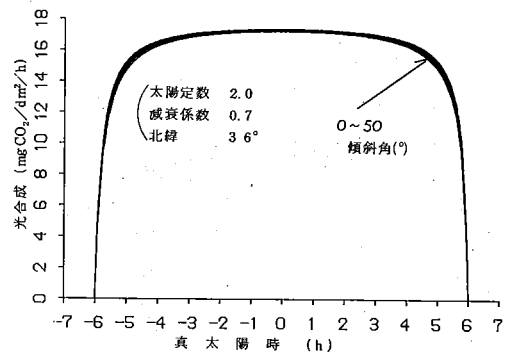


Fig. 17 生産力分布曲線 (春分, 南斜面)

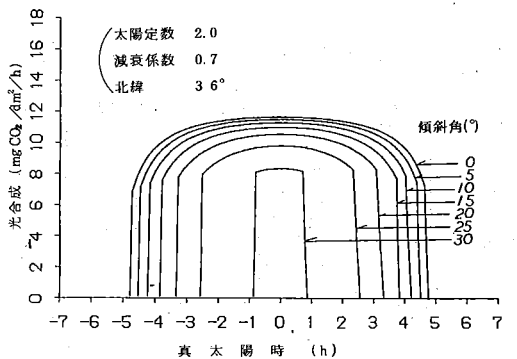


Fig. 18 生産力分布曲線 (冬至, 北斜面)

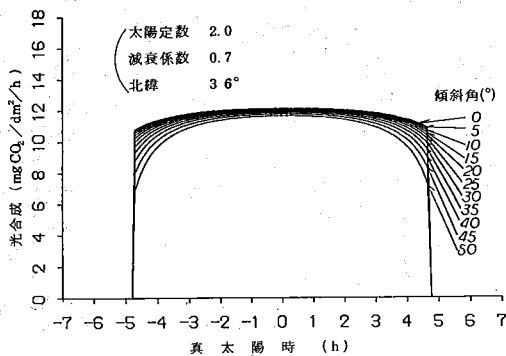


Fig. 19 生産力分布曲線 (冬至, 南斜面)

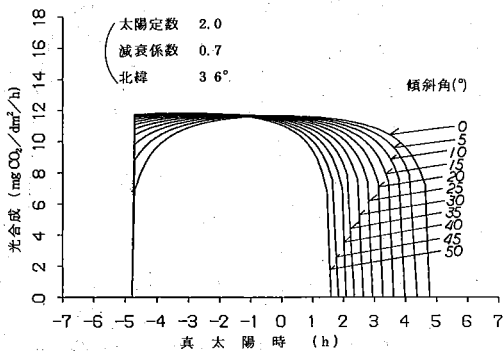


Fig. 20 生産力分布曲線 (冬至, 東斜面)

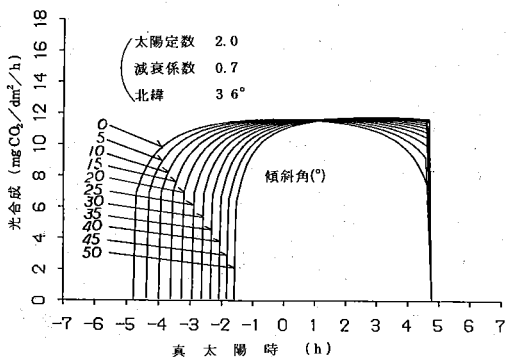


Fig. 21 生産力分布曲線 (冬至, 西斜面)

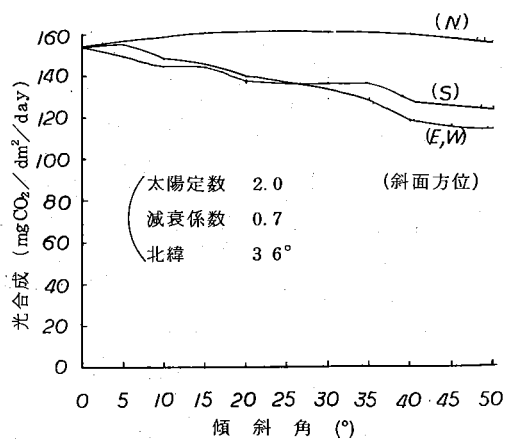


Fig. 22 日生産力と傾斜面 (夏至)

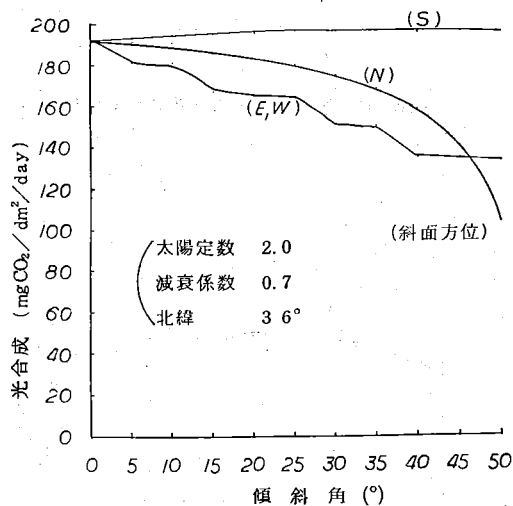


Fig. 23 日生産力と傾斜面 (春分)

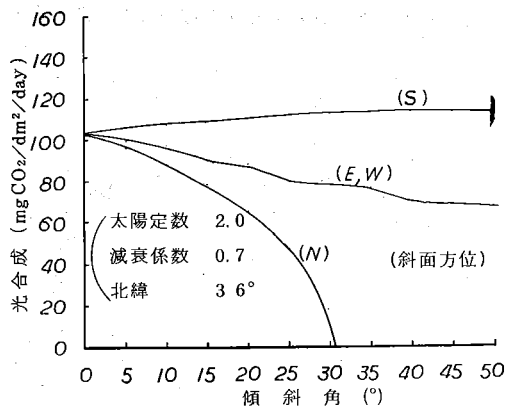


Fig. 24 日生産力と傾斜面 (冬至)

いつの季節でも日射強度（有効放射）が大きくなり、すぐに光合成の飽和強度にまで達する傾向がある。しかしながら、冬至の北斜面では日射強度が小さく、傾斜角が大きくなるにつれ生産力は急激に低下している。そして、 35° を超える斜面では一日中陽が当たらず、その結果生産も行われないような状況を呈している。

また、これらの生産力曲線を日積分し、その結果と地表面の傾斜角を各季節毎にまとめたものを示すと、Fig. 22～Fig. 24 のとおりである。これらの結果を見ても、斜面方位や傾斜角の地形条件が日射を通して植物生産に大きく影響することが判り、植物生産における地形の重要性の一端を知ることができる。

なお、本章での計算結果は、Ⅳ－1 で述べたセイタカアワダチソウの光・光合成曲線を用いて推定したものであり、他の植物の場合や群落における生産力評価を行なう時、当然のことながら異なった結果となるであろう。しかし、ここで述べた地形条件と植物生産の定性的な関係は変化することがないと考えられる。

V. 地域生産力評価の可能性

これまで述べてきた論議は、各地点毎の太陽エネルギーと植物生産力の評価の可能性に対する試みであり、地点別の生産力評価モデルであった。ここには、更に本モデルを精度の高いものとするための、多くの検討課題が残されている。例えば、それらは散乱放射の取り扱い、群落生産推定のモデルの導入、呼吸による負の生産の検討、あるいは温度条件・ CO_2 条件などの植物の内的・外的条件の検討等である。これらについては、また稿を改めて論議する予定であり、ここでは検討課題として残しておく。

しかし、本報告の狙いであった地形条件・日射から生産力を推定し、その評価を試みるという点については、まだ十分ではないにしても一応の方向性が得られたと言えよう。そこでこの地点別の生産力評価モデルをより広域な地域（つまり、点モデルを空間的に積分することによって面モデル）に拡張する可能性について、最後に若干論述する。

ここでは、上述の目的のために、まずその第一段階として架空の地域（例えば円形状の盆地 etc.）をコンピュータ上で作り出し、この地域をメッシュで区切り、各メッシュ毎の地形条件（標高、傾斜、方位）を推定した。そして、これらの地域毎の地形条件を用いて、各メッシュ毎に前述の生産力評価モデルを適用していくと、Fig. 25 に示すような地域生産力の結果が得られる。なお、この計算を行なうに当たっては、Ⅲ－2 で述べた日射の影判定も考慮されており、地域全体としての地形的条件が夏至の時でさえも、生産力に大きく関わっていることの一

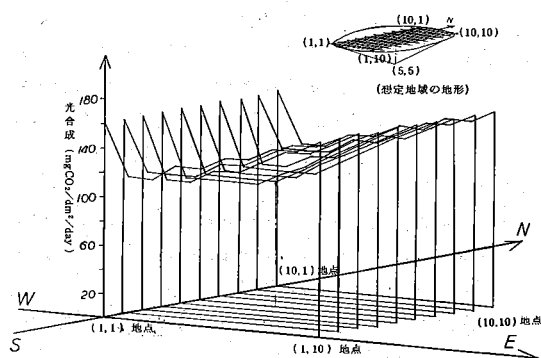


Fig. 25 地域生産力評価
（北緯 36° 、夏至の場合の日生産力）

がうかがえる。非常に簡単な例ではあったが、本モデルを一地点からより広域な地域へと拡張することにより、また別な観点からの地域生産力評価の可能性を与えてくれるであろう。

Ⅵ. あとがき

太陽エネルギーがもつ資源としての可能性は、一見すると無限であるかのように考えがちである。しかし、太陽エネルギーの潜在的な資源としての可能性を探り、その中でより有効な利用の方途を求めることが今後重要である。ここでは、地形条件・日射・植物生産力の関係を探るため、いくつかの既存の理論や測定結果等を組み合わせ、地点別の生産力評価モデルを作成した。そして、本モデルを使って具体例のシミュレーションを行ない、その有効性について検証を進めた。この結果によれば、まだいくつかの問題点を残してはいるが、一応のモデル化への見直しが得られたものと考えられる。

今後は、本モデルをより精度の高いものとするために、Ⅴで述べた問題点を検討し、更には食料資源や地域環境に関連する応用的な側面への本モデルの適用の可能性を検討していく予定である。

最後になるが、本報告の中で光合成曲線について御教示頂いた本学教養部土田勝義博士に謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、戸刈義次監修；“作物の光合成と物質生産”，養賢堂，1971.
- 2) 鈴木清太郎；“農業物理学”
- 3) 岡上正夫；“斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法”，日林誌，1957.
- 4) 例えば、渡辺要編；“建築計画原論Ⅰ”丸善，1962.

- 5) 小沢行雄; “斜面の日射量について”, 農業気象,
Vol. 18, 1, 1962.
- 6) 松田・星川; “諏訪湖水系の土地利用および生産力
評価に関する基礎的研究”, 土地分級体系
における評価基準の実証的研究, S55年度
科研報告書(穴瀬真編), 1981.
- 7) (1) の文献など
- 8) Iwaki, H. et al. “Dry matter production of
some herb communities in Japan”, The 11th
Pacific Sci. Cong, 1966.
(岩城英夫; 陸上植物群落の物質生産Ⅱ—草原—,
共立出版, 1973.)
- 9) 農林省資料, “光合成有効放射の測定”, 1971
(原著は1967年モスクワ科学アカデミー
刊) 所収の kler, lygera, Tiraspele で
の測定データによる。
- 10) (9) と同じ資料による
- 11) (6) に同じ