植物群落内の光の強さについて (続)

儀 部 誠 之

(農業技術研究所 気象科)

An Analytical Approach to the Expression of Light Intensity
in Plant Communities (Continued)

S. ISOBE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

論文 (1) 及び (2) について修正された結果が提出される。

(1) で述べられたように水平な葉から成立っている群落では角度について一様な分布をなす入射光の減衰は

$$\frac{I}{I_0} = e^{-A}$$

で表わされるから消費係数は 1 である。これに対して葉が垂直な場合には

$$\frac{I}{I_0} = 2 \int_0^{\pi/2} \exp(-A \tan \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$

Fig. 1. Penetration of isotropic incident radiation.

① : $\theta_0 = 0^\circ$, ② : $\theta_0 = 90^\circ$, ③ : $\theta_0 = 30^\circ$, ④ : $\theta_0 = 60^\circ$

で表わされ、この値を計算すれば Fig. 1 の曲線 ② のようになる。これから消費係数を計算すると 0.5~0.4 の値が得られる。この曲線は上に凹となるが、このことは消費係数が A が大きくなるほど小さくなることを意味している。一般の角の場合にも消費係数は A が大きくなるほど小さいが角度について一定の極限值をもっている。水平な葉の場合入射光の減衰は方向に無関係であることから光強度の測定に用いられる測器の方向別感度がどんなものであっても光強度の比、また消費係数は同じ

になることになる。他方垂直な葉から成立っている群落では消費係数は入射方向によつて変化するので方向について一様な入射の場合の光強度の比は測器の方向別感度によつてこととなる。今まで測定に用いられた照度計は入射角が大きくなると感度が減少するようなものであつたからこの効果は入射角の大きな光線の全強度に対する割合を小さくさせる。上に述べられたように垂直な葉の群落では入射角が大きい光線ほど消費係数が大きいから、このような照度計で得られる消費係数は上に計算で求められる値よりも小さくなることになる。今までに測定さ

れた消費係数の値は水平な広い葉を持つた群落では 0.7~1.0、葉が垂直な禾本型の群落では 0.3~0.5 の範囲であるから葉が水平な場合の計算から得られる消費係数は測定値の上限と一致していることがわかる。また垂直な葉の場合の消費係数は測定された係数の範囲で大きい方に入ることもわかる。この計算では光の葉による反射と透過を無視したから (2) の (2.4) 式からわかるように計算値は消費係数の最大値を与えることになる。葉が垂直な場合に方向について一様な入射光があるとき計算値で測定値の中の最大にならないのは実際の測定では茎による減衰も加わっているためと思われる。

以上のように光の葉による反射及び透過を無視して入射光が方向について一様な場合計算された消費係数が実測と比較して不合理なものでないことが明らかにされた。次に葉の角度が 30° と 60° の場合について計算した一様な入射光の減衰の様子を Fig. 1. の曲線 ③, ④ で表わしてある。これらから消費係数は葉の角度が 30° の場合 0.6, $\theta_0 = 60^\circ$ の場合 0.7 のようにえられる。これらはいずれも $\cos \theta_0$ よりも大きい。葉が水平な場合の消費係数が 1 であることを考えると、一様な入射光の消費係数は水平な葉の消費係数に葉の角度の cosine をかけたものより大きくなることはいえる。このことは消費係数が (2) において次の様に表わされた

$$K(c_*) = \frac{2}{\pi} \left[\left(\xi - \frac{\pi}{2} \right) \cos \theta_0 + \sin \xi \sin \theta_0 \cdot \tan \Theta \right]$$

Fig. 2. Relative intensities of light, showing distribution with respect to angle of incidence.

ことから予想されるものである。何となれば上の表現は $\frac{\pi}{2} - \theta_0 \geq \theta$ であれば $K(c^*) = \cos \theta_0$ であるが θ がより大きくなれば一層大きくなるものであるからこれらの一種の平均である一様な入射光の消費係数は $\cos \theta_0$ より大きくなる。群落内の光強度の方向分布を図示すれば Fig. 2 のようになりこれから葉が傾いていると水平方向に伝わる光は急激に減衰することがわかる。

植物群落の反射能について：葉 dA による角度 θ 方向の反射強度は

$$\frac{dA}{\cos \theta} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} r I_{l'm'}' \cos \theta' \sin \theta' d\theta'$$

で表わされるが水平な葉の全葉面積指数が A_0 なる群落では

$$\frac{r I_{em}^0 \cos \theta}{2 \cos \theta} \left\{ 1 - \exp(-2A_0) + \frac{r_e}{r} \exp(-2A_0) \right\}$$

となる。但し反射係数 r は入射方向に関係しないものとしてある。この式から明らかなように反射係数が入射方向に依存しないときには反射能が一定となり入射角に無関係である。更に上式は角度の大きな方向の反射強度が極めて大きくなることを示している。またこのような群落の反射強度の方向分布は一枚の葉の方向分布でおきかえることは出来ないが反射能は一枚の葉の反射能に等しくなることが導びかれる。

葉が水平でない群落からの反射では、入射方向が $\frac{\pi}{2} - \theta_0 \geq \theta$ なる条件では $\frac{\pi}{2} - \theta_0 \geq \theta$ なる方向には全葉面積指数が $A_0 \cos \theta_0$ の水平な葉の群落からの反射に等しくなるが θ がより大きくなると Fig. 2 から明ら

かなように、このような方向への反射に急に小さくなる。これは傾いている葉が光をとじこめることを意味するが、この結果傾いた葉の群落の反射強度の方向分布に最大値が起ることが期待される。

植物群落の構造解析について：上に述べられた植物群落に対する角度について一様な入射光の消費係数の計算値と実測値が一致すること及び (1) の Fig. 4 から明らかなように直達光の消費も上述の式から計算されたものとよく一致するという結果が得られた。従つて葉の分布に関する次の表現

$$P_{ZA}(a, b, c) = \frac{1}{2\pi} \delta(c - c_0)$$

を用いても今までのところ不合理な結果は得られていない。このことから一般の場合の葉の分布を表わすものとして (1) におけるように

$$P_{ZA}(a, b, c) = \int \frac{1}{2\pi} \xi_{AC*} \delta(c - c_*) dc_*$$

とし光強度の測定から葉の分布を求めることを行つて見る。1960年7月28日の結果からは (1) にのべたように上から 42cm までの葉は垂直即ち $\theta_0 = 90^\circ$ で $A = 0.95$ である。(1) の Fig. 4 で早朝の値のばらつきが大きいのは日射量の絶対値が小さくなるのが主な影響と考えられる。日射計のガラスにつく水滴は測定値をそれほど小さくしないと思われる。この例では高さ 42cm の日射強度は計算値と十分によく一致した。この計算は Fig. 1 によつて一様な入射光の減衰から葉面積数を求めるのであるが Fig. 1 はもともと葉による光の反射と透過を無視したものであるから実際の葉面積指数よりも小さいものが得られることになり計算される日射の強度は測定値から反射と透過を除いた値よりも大きくなることが予想される。(1) の Fig. 4 で測定と計算値が一致したのは葉面積の評価が小さかつたために生ずる減衰の減少と葉の反射と透過による減少とがほぼ一致したためであると思われる。一般の場合にこれらが一致するものであるかどうかはまだ明かでない。1960年9月の測定では日射が測定された高さ 65cm の位置は葉が水平に伸びている層の中に入つたので7月のように直接に葉面積指数を求めることは出来ない。そこでこれを求めるためにこの高さまでは葉は水平のものと垂直なものとで表わされるものとする。曇つた場合の日射量の群落内外の比は 0.26 となつた。既にのべられたように一様な入射光の消費係数は最大値が1で最小値は垂直な葉の群落に起ることになるから Fig. 1 で日射の比が 0.26 ということによつて葉面積は 1.35 と 2.55 との間に入ることになる。水平な葉の消費係数は入射方向によらないから直達光だけを考えた場合日射量の比は一日中一定と

Fig. 3. Relation between albedo of upright leaves and effective LAI $\left(\frac{2}{\pi} A_1 \tan \Theta\right)$.

なる。今このような水平な葉の葉面積指数を A_0 とすると垂直な葉の葉面積指数は $1.35 - A_0$ と $2.55 - A_0$ の間に入るとことになる。水平な葉の内部での光の強度の方向分布は Fig. 2 に示されているから、これを用いると垂直な葉に入射した光は Fig. 1 の $\theta_0 = 0$ の線にそつて減衰する筈であるからこれを差引くと垂直な葉の葉面積指数が一樣な入射光の減衰から求められることになる、この値を使つて直達光の比を求め実測された値と比較する。この方法を続けて一樣な光の入射から得られる葉面積指数と直達光の比の日変化から得られる葉面積指数が一致するまで行う。このようにして9月の例では上から高さ65 cm までの葉は垂直な葉 $A_{90} = 1.4$ 、水平な葉 $A_0 = 0.5$ が得られ、これらの和として65 cm までの葉面積指数は1.9となることが得られた。

上の場合に得られたものは7月及び9月の結果がいず

れも葉面積指数の小さな範囲であつた。このような範囲では葉による光の散乱の効率は直達光の強度が大きいので相対的に小さいと考えられる。従つて上の結果を反射の解析に用いる場合入射光は直達光だけを考えればよいことになる。上部に垂直な葉があり下部に十分大きな葉面積指数をもつ水平な葉から成立つている群落を考える。このような場合垂直な葉の反射能は(1)によつて

$$\frac{R_*}{I_{lmm}^0 \cos \Theta} = \alpha - \alpha_0 e^{-\frac{2}{\pi} A_1 \tan \Theta}$$

1960年9月の測定から計算すると $A_1 = 1.4$ として Fig. 3 に示すように $\frac{2}{\pi} A_1 \tan \Theta$ と垂直な葉の反射能の間

に $\frac{R_*}{I_{lmm}^0 \cos \Theta} = 0.16 \frac{2}{\pi} \times 1.4 \tan \Theta$ になる関係があることがわかる。ここで比例係数0.16は垂直な葉の垂直方向への反射能であると考えられる。このとき垂直入射の反射能 α_0 は0.182である。 α_0 はこのような群落については次のように表わされる。

$$\alpha_0 = \pi r_0 \{1 - \exp(-2A_2)\} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-A_1 \frac{2}{\pi} \tan \Theta\right) \sin \theta d\theta$$

従つて水平な葉の葉面積指数 A_2 が十分大きいとすれば $\pi r_0 = 0.67$ となる。 πr_0 は反射係数が一定のときの一枚の葉の反射係数である。葉の反射能が0.67というのは通常の緑葉の反射能より大きい。この原因は葉の反射係数で一定であるとしたことであると考えられる。

結局このような方法では現在のところ入射光に対しては十分有効な結果を、少なくとも葉面積指数の小さな範囲では与えることが出来ると考えられる。

文 献

- 1) 磯部誠之 (1962): 植物群落内の光の強さについて, 農業気象 17(4)
- 2) ISOBE, S (1962): 農研報告 A 第9号, 29~67