

第1図 観測地点の谷断面図

- 水平面直達日射量 I_D
- 水平面天空散乱日射量 I_S
- 水平面太陽周辺日射量 I_{aur}
- 水平面天空日射量 I_{sky}
- 等方成分 I_{iso}
- 非等方成分 I_{aniso}

・ 斜面日射量 I' (谷底を含む)

- 斜面直達日射量 I_D'
- 斜面散乱日射量 I_{SN}'
- 対岸反射日射量 I_R'
- 斜面天空散乱日射量 I_S'
- 斜面太陽周辺日射量 I_{aur}'
- 斜面天空日射量 I_{sky}'
- 等方成分 I_{iso}'
- 非等方成分 I_{aniso}'

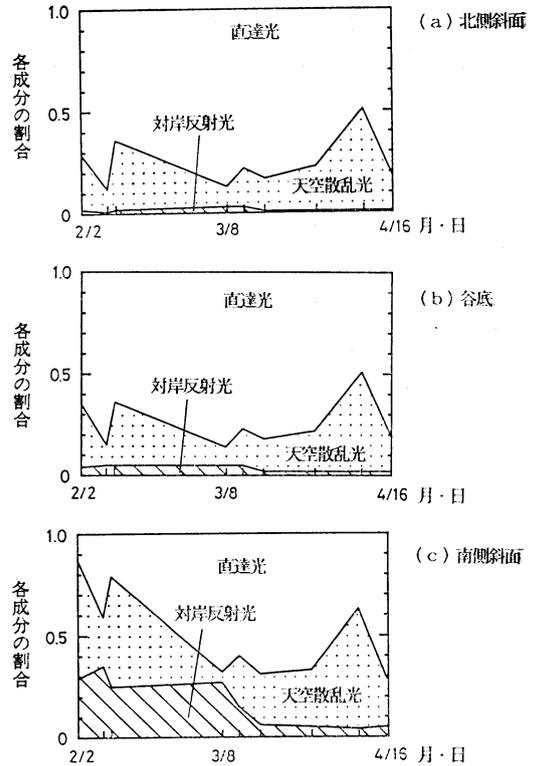
なお、水平面日射量は水平な単位面積に単位時間に入射する量、斜面日射量は傾斜した単位面積に単位時間に入射する量である。また、記号の上につけたバーは日平均を表す。

2.3 観測結果

各斜面と谷底について晴天日の日射各成分の寄与の時間変化(2月2日から4月16日まで)を比較したのが第2図である。谷は3月中旬まで雪で覆われていた。谷底と北側(南向き、B地点)斜面では、大部分が直達光と天空散乱光だけで占められていて、対岸反射光は雪の有無に関わらず無視できるほど小さい。南側(北向き、D地点)斜面では積雪期には全日射量の30%近くが対岸反射光で占められていて、無視できない。

3. モデルによる二次元谷の日射特性

この節では二次元谷の数値モデルを使って、谷の側斜面の傾斜やアルベード・太陽の位置によって、谷が受ける日射量がどのように変化するかを調べる。

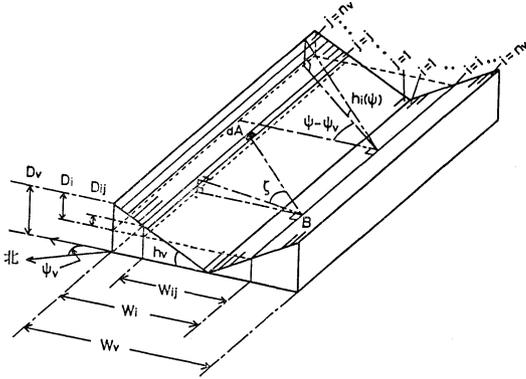


第2図 斜面日射量に占める各成分の割合の時間変化, (a) A地点, (b) B地点, (c) C地点

3.1 モデルの概要

3.1.1 計算方法

このモデルでは、水平面直達日射量と水平面天空散乱日射量を与えて、谷の各部分の斜面日射量を成分毎に求め、最終的に谷全体としてのアルベードを求める。第3図に示すように、側斜面のアルベード A_s の無限に長い二次元谷を考える。また、太陽の方位角、高度角を (ϕ_0, h_0) とする。各斜面を水平な直線で n_v 本に区切り、それぞれ i 面(南側)、 j 面(北側)と呼ぶ。各面での量や



第3図 二次元谷の模式図

位置はその面の中央を通る水平な直線上で代表させる。
各面に入射する斜面直達日射量, 斜面天空散乱日射量は, 幾何学的に求めることができる。すなわち i 面に入射する斜面直達日射量は,

• $h_0 \geq h_1(\phi_0)$ のとき

$$I_{Di}' = I_D(\cos h_v + \sin h_v \cdot \cot h_0 \cdot \cos(\phi_0 - \psi_v)) \quad (1)$$

• $h_0 < h_1(\phi_0)$ のとき

$$I_{Di}' = 0 \quad (2)$$

ただし, $h_1(\phi)$ は i 面から見た ϕ 方向の地平線の高度角である。また i 面の斜面天空散乱日射量は, 下式で表される。

$$I_{Si}' = I_{aur}(\cos h_v + \sin h_v \cdot \cot h_0 \cdot \cos(\phi_0 - \psi_v)) + I_{iso}V_{isoi} + I_{aniso}V_{anisoi} \quad (3)$$

V_{isoi} と V_{anisoi} はそれぞれ i 面の天空光等方成分, 非等方成分に関する view factor である。また, 右辺第1項は太陽周辺光であり, 直達光と同様に $h_0 < h_1(\phi_0)$ のときは0である。 j 面についても同様に計算することができる。

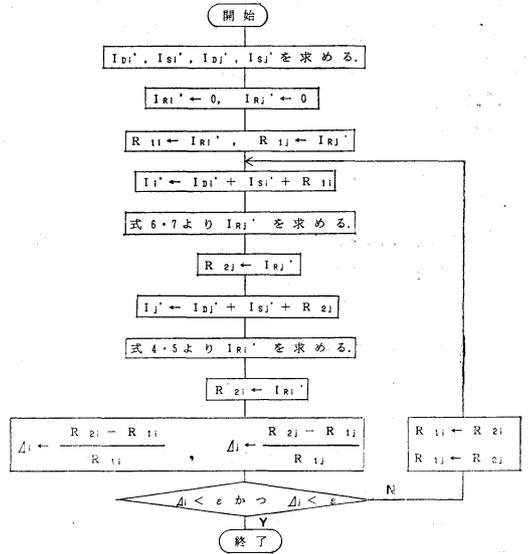
対岸反射光については, 斜面間の多重反射を考慮しなければならない。ここでは, 簡単のため斜面の反射特性を等方的と仮定する。すると i 面に入射する対岸反射光 I_{Ri} は, i 面に入射する j 面からの反射光を I_{Rij}' , j 面の斜面全日射量を I_j' とすれば

$$I_{Rij}' = A_s I_j' V_{ji} = A_s (I_{Dj}' + I_{Sj}' + I_{Rj}') V_{ji} \quad (4)$$

$$I_{Ri}' = \sum_j I_{Rij}' \quad (5)$$

$$I_{Rji}' = A_s I_i' V_{ij} = A_s (I_{Di}' + I_{Si}' + I_{Ri}') V_{ij} \quad (6)$$

$$I_{Rj}' = \sum_i I_{Rji}' \quad (7)$$



第4図 対岸反射光計算のフローチャート, 各過程とも $i = 1, 2, \dots, n_v, j = 1, 2, \dots, n_v$ の計算を行う。なお, ϵ は許容誤差である。

ただし, V_{ji} は j 面が i 面に対して占める view factor である。

実際の計算では各斜面を33個に分割し, 第4図のフローチャートに従った。この方法で求めた解は, 各 i, j 面間の無限回の多重反射を含む対岸反射光の近似値となっている。

このようにして谷の各部分での斜面日射量がわかれば, 谷全体としてのアルベード A_v は次のように求まる。谷の幅を W_v , 谷上端での全天日射量を I とすれば, 谷で吸収されるエネルギーは

$$(1 - A_v) I W_v = (1 - A_s) (\sum_i I_i' \delta_v + \sum_j I_j' \delta_v) \quad (8)$$

よって

$$A_v = 1 - \frac{1 - A_s}{I W_v} (\sum_i I_i' \delta_v + \sum_j I_j' \delta_v) \quad (9)$$

ただし,

$$\delta_v = \frac{W_v}{2 n_v} \sec h_v \quad (10)$$

は, 分割された面の幅である。 $(\sum_i I_i' \delta_v + \sum_j I_j' \delta_v) > I W_v$ だから式 (9) によれば $A_v < A_s$ となる。つまり, 同じアルベード A_s の平坦地に比べ, 谷全体としてのアルベード A_v は小さい。

なお, i 面からみた地平線 (尾根) の高度角 $h_1(\phi)$, j 面からみた高度角 $h_2(\phi)$, i 面の天空光等方成分, 非

等方成分に対する空の view factor: V_{isoi} , V_{anisoj} , j 面が i 面に対して占める view factor V_{ji} は幾何学的に求めることができる (付録参照).

3.1.2 水平面直達日射量と天空散乱日射量

日射量は実験式を使用する (近藤・三浦, 1983; Kondo and Miura, 1985).

・水平面直達日射量

$$I_D = (c + 0.75 \cdot 10^{-fm})(1-p)I_0 \quad (11)$$

I_0 : 大気上端水平面日射量

$m = \text{cosec } h_0$

$c = 0.15 - 0.2\beta$, $\beta \leq 0.3$

$= 0.09$, $\beta \geq 0.3$

$f = 0.075 + 0.65\beta$

$p = 0.02(m + 5.5 + 1.5 \log_{10} W) \log_{10} W$

β : 大気混濁係数

W : 可降水量 (cm)

・水平面全天日射量

$$I = (c + 0.7 \cdot 10^{-fm})(1-p)(1+q)I_0 \quad (12)$$

$c = 0.21 - 0.2\beta$, $\beta \leq 0.3$

$= 0.15$, $\beta \geq 0.3$

$f = 0.056 + 0.16\sqrt{\beta}$

$p = 0.014(m + 7 + 2 \log_{10} W) \log_{10} W$

$q = (0.066 + 0.34\sqrt{\beta})(A_c - 0.15)$

A_c : 周辺の平均的アルベード

水平面天空散乱日射量 I_s は下式で定義される.

$$I_s = I - I_D \quad (13)$$

水平面太陽周辺日射量 I_{aur} と水平面天空日射量 I_{sky} は, Hay (1979) のモデルに基づき

$$I_{aur} = \frac{I_D}{I_0} I_s \quad (14)$$

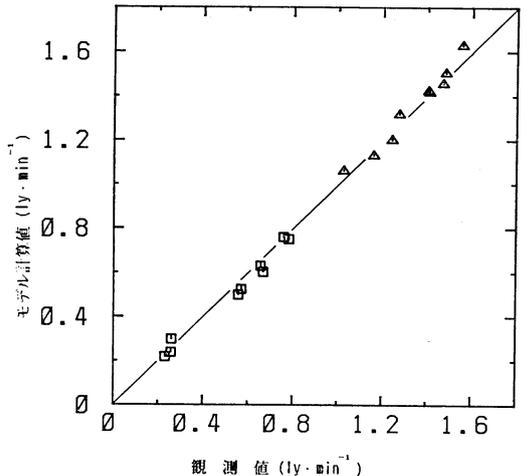
$$I_{sky} = \left(1 - \frac{I_D}{I_0}\right) I_s \quad (15)$$

とした. さらに, 水平面天空日射量 I_{sky} は等方成分 I_{iso} と非等方成分 I_{aniso} の重ね合わせとする. 非等方成分は, Yamanouchi (1983) に基づいて散乱光強度が光路長 $m = 1/\sin h$ (h : 天底角) に比例するとして求める. それが水平面天空日射量 I_{sky} に占める割合 $I_{aniso}/I_{sky} = \alpha$ は, 前述の川渡での観測に基づき I_D/I_0 の関数として下記のように与える.

$$\begin{aligned} \alpha &= 3.88 I_D/I_0 - 0.58, & 0.15 \leq I_D/I_0 \leq 0.66 \\ &= 0, & 0.15 \geq I_D/I_0 \\ &= 2, & 0.66 \leq I_D/I_0 \end{aligned} \quad (16)$$

3.2 観測との比較

モデルの検証のために前節の観測結果と比較した. 第



第5図 斜面日射量のモデル計算値と観測値の比較. Δ : 北側斜面, \square : 南側斜面

5図に斜面日射量 (各成分の和) の例を示す. また, 各成分ともそれぞれ $\pm 0.1 \text{ ly} \cdot \text{min}^{-1}$ 以内で合っており, このモデルの妥当性が示された.

3.3 モデル計算

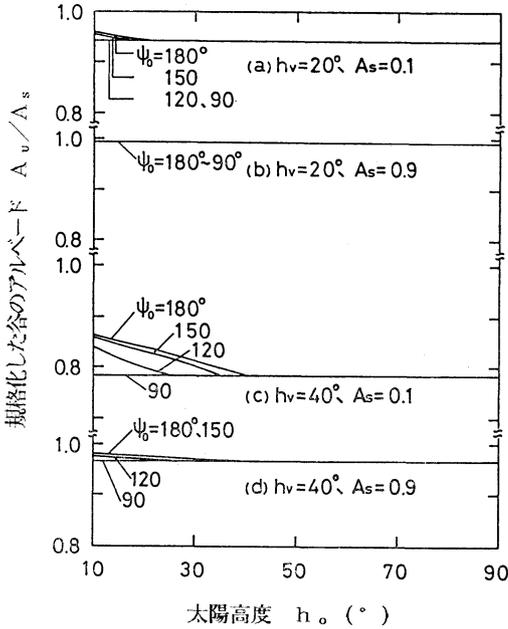
3.3.1 日射条件

大気の状態として, 大気混濁係数 $\beta = 0.02$, 可降水量 0.1 cm という快晴で極めて澄んだ理想的な条件を与えた. 緯度は北緯 38.5° , 季節変化として太陽赤緯 $\delta = -10, 0, 10^\circ$ を与えた. それぞれ2月下旬, 3月中旬, 4月中旬に相当する.

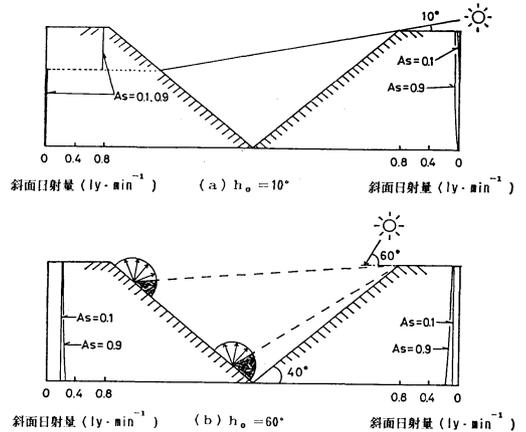
3.3.2 谷のアルベードと太陽の位置の関係

第6図に太陽高度 h_0 に対する谷のアルベード A_v の依存性を示した. 縦軸は側斜面のアルベード A_s で規格化してある. なお, ここでは $\phi_v = 0^\circ$ (東西谷) とするので $\phi_0 = 90^\circ$ は太陽が谷の真東つまり走行方向にあること, $\phi_0 = 180^\circ$ は真南つまり直角方向にあることを意味する.

$\phi_0 = 90^\circ$ は谷全域に直達光が当たっている場合で A_v は h_0 に関係なく一定である. それに対し $\phi_0 > 90^\circ$ では h_0 の低下にともない A_v は増加する. 増加し始める h_0 は, ちょうど谷の中に陰がで始める角度と一致している. また, 増加が起きている範囲では ϕ_0 が大きいほど A_v は大きい. この傾向は同じ A_s では h_v が大きいほど強く (図 a と c, または図 b と d), また同じ h_v では A_s が大きい方が弱い (図 a と b, または図 c と d). ただし, A_v の増加の絶対値は A_s が大きい方



第6図 太陽高度に対する谷のアルベードの依存性。パラメータは太陽の方位角 ψ_0 、側斜面のアルベード A_s で規格化して示した。



第7図 h_0 が異なる場合の斜面日射量分布。(a)、(b)とも谷上端での水平面全天日射量は約 $0.2 \text{ ly} \cdot \text{min}^{-1}$ 。(b)の矢印と半円は、仮に两部分で同じ日射量が反射された場合の反射光の強度分布を示し、灰色の部分は反射光のうち対岸に入射する分を表す。上部の反射光の方が谷から出ていく日射量が多いことがわかる。

が大きい。

この傾向の原因は、谷の下部に陰ができると谷全体に入射するエネルギーが谷の上部に偏り、反射された光が谷の外に出やすいためである。詳しくは各斜面に占める空の view factor が谷の上部と下部で異なることで、次のように説明できる。

いま、第7図のように同じ谷に異なる太陽入射角で同じ水平面日射量が入射したとする。 $S \uparrow$ 、 $S \downarrow$ をそれぞれ谷上端の水平面全体を上向き、下向きに通過する日射量とすれば、谷のアルベードは $S \downarrow / S \uparrow$ で定義される。この場合、 $S \downarrow$ は等しいから $S \uparrow$ の大きさを比べればよい。(b)では入射したエネルギーは各斜面ではほぼ一様に分布しているのに対し、(a)では上部に偏っている。ところで谷のある部分に入射した光 I' のうち、谷から出ていく光は $I' A_s V_{180}$ で表される。 V_{180} は谷の上部ほど大きいので、上部に入射した光ほど谷から出ていく割合が大きい。だから谷の上部に日射が偏って入射している方が相対的に反射光は大きく、谷全体のアルベードは高いわけである。

なお、谷が深いほどこの依存性が強いのは、同じ太陽

の傾きで生じる日射の偏りが大きいこと、view factor の上部と下部での差が大きいためである。

3.3.3 谷のアルベードの日変化

今度は谷の走行方向の異なる東西谷・南北谷・北西—南東谷について計算する。

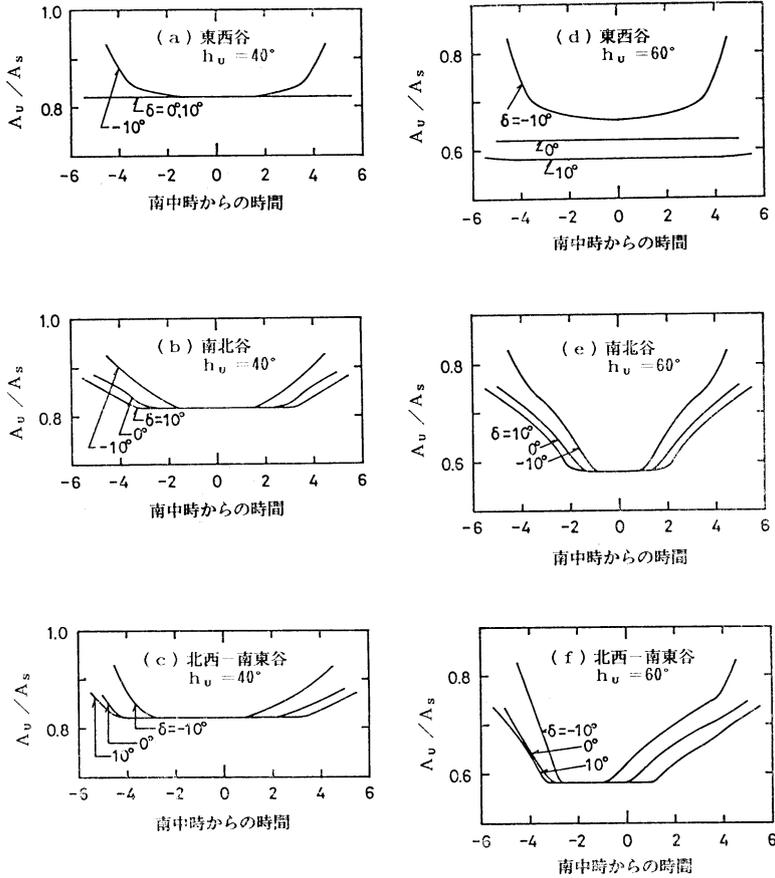
第8図に谷のアルベード A_v の日変化を示す。(a)~(c)は谷の側斜面の傾斜角が $h_v = 40^\circ$ 、(d)~(f)は $h_v = 60^\circ$ の例で、いずれも側斜面のアルベード $A_s = 0.3$ である。

南北谷(図bとe)と北西—南東谷(図cとf)では、 δ や h_v にかかわらず日中のある時間帯は谷全域に直達光が当たる。したがって、この間 A_v はある一定値をとり、陰のできる朝夕は増加する。この傾向は h_v が大きいほど強く、また北西—南東谷では一定値をとる時間帯が朝側に偏っている。

一方、東西谷(図aとd)では δ や h_v によっては谷底までは直達光が届かない場合があり、そのときには谷のアルベード A_v は高い値をとる。東西谷では、いずれの場合でも $\delta = 0$ (春・秋分) では日変化はない。

3.3.4 日平均の谷のアルベード

日平均の谷のアルベード \bar{A}_v は、谷上端の水平面を1日に出ていく全エネルギーと入射する全エネルギーの比



第8図 谷のアルベードの日変化。側斜面のアルベード $A_s=0.3$ の場合について A_s で規格化して示した。

であり、次式で定義できる。

$$\bar{A}_v = 1 - \frac{1-A_s}{I W_v} \left(\sum_i \bar{I}_i^+ \delta_v + \sum_j \bar{I}_j^- \delta_v \right) \quad (17)$$

第9図に東西谷の日平均のアルベード \bar{A}_v を示した。実線は $\delta=0^\circ$ 、点線は $\delta=10^\circ$ 、破線は $\delta=-10^\circ$ の場合である。なお、南北谷や北西-南東谷は $h_v \leq 40^\circ$ では東西谷と全く同じ、 $h_v \geq 40^\circ$ では、季節変化は多少あるものの図の破線と実線の間に収まっているので、特に示さない。通常の地形では $h_v < 40^\circ$ だから、日平均の谷のアルベード \bar{A}_v は A_s と h_v だけで決まり、この範囲では谷の走行や季節には依存しないとしてよい。

この図によれば、 \bar{A}_v は谷が深いほど、また A_s が小さいほど低下する。ただし、谷のアルベード絶対値の平坦地に対する低下量そのものは第10図のように $A_s=0.5$

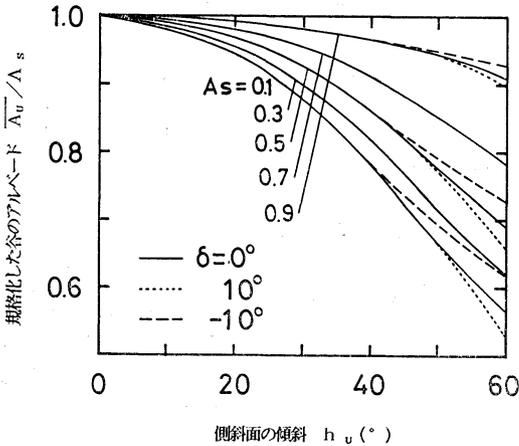
~0.6 のときもっとも大きくなる。これは、式(17)から導出される次式からわかる。

$$A_s - \bar{A}_v = \frac{(1-A_s)}{I W_v} \left(\left(\sum_i \bar{I}_i^+ \delta_v + \sum_j \bar{I}_j^- \delta_v \right) - \bar{I} W_v \right) \quad (18)$$

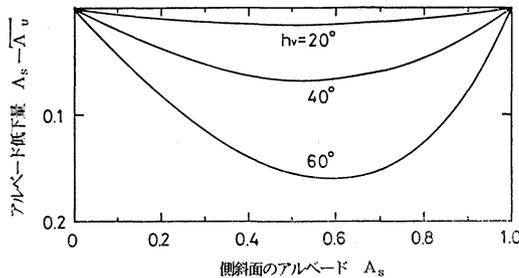
アルベードの低下量は谷全体の対岸反射光吸収量に比例し、 A_s が大きいときは対岸反射日射量は大きいがあまり吸収せず、 A_s が小さいときは吸収はするが対岸反射日射量は小さく、中間で反射光の吸収量が最大になるからである。

3.3.5 大気状態に対する依存性

これまででは、入力日射として大気が非常に澄んだ理想的な場合を考えてきた。最後に、大気をもっと濁って散乱光が多い場合について簡単に調べる。



第9図 東西谷の日平均アルベードと h_v の関係。パラメータは A_s 、 $\delta=0, 10, -10^\circ$ の場合について A_s で規格化して示した。



第10図 地形に起因する谷の日平均アルベード低下量と A_s の関係。パラメータは h_v 、東西谷で $\delta=0^\circ$ の場合について示した。

条件として

①大気混濁係数 $\beta=0.2$ 、可降水量 $W=5\text{ cm}$ (晴れだが空がやや濁った状態。この場合は日中の水平面天空散乱日射量が水平面全天日射量の20~30%を占める)。

②等方散乱光のみ (完全な曇り)

の2例を考え、東西谷で $\delta=0^\circ$ の場合について日平均の谷全体のアルベード \bar{A}_v を比較したところ、いずれも前記の理想的条件に対する結果と1%以内で一致した。

天空散乱光のみの場合、直達光のような明らかな陰はできないが、光が空の view factor に比例して入射するため斜面日射量はやはり谷の上部に偏る。谷が深くなれば谷の上部と下部の view factor の差が大きくなるため、陰が大きくなるのと実質的に同じくらい偏る。そのため、日平均として多少陰の影響のある理想的条件の

$\delta=0^\circ$ での値に近い値をとることになる。

4. まとめ

二次元谷の日射モデルを使って谷全体としてのアルベードのパラメータ依存性を調べた。谷全体の日平均アルベード \bar{A}_v は、通常の地形では側斜面のアルベード A_s と傾斜角 h_v だけで決まり、同じアルベード A_s の水平面に比べ $h_v=40^\circ$ で最大0.07程度(約20%)も低下する。

この結果を複雑地形の熱収支への応用として考えてみると、地表は様々な地物で覆われ、空間的・時間的にアルベードは0.07程度以上に变化する。しかし、傾斜角がそれほど大きくなければアルベードの低下は小さく、通常の地形では、広域平均としては近似的に平坦地として扱える。この日平均値特性は、大気混濁係数などの条件にもほとんど依存しない。

以上は、斜面での局所的な反射特性を等方的とした結果である。しかし積雪面のように多少の鏡面反射の性質を持つ(Dirmhirn and Eaton, 1975) 場合、谷の日射特性は少し違って来るであろう。今後は、こうした反射の非等方性を考慮したモデルで谷の日射特性を調べてみる必要がある。

5. 謝 辞

本研究を行うにあたり、東北大学付属農場副農場長の阿部篤郎教授、渋谷暁一技官、末永俊男氏ほかの皆様にお世話になりました。東北大学理学部気象学講座の皆様には観測や議論にご支援を頂き、また同超高層物理学研究施設気候物理学部門の早坂忠裕氏には有益な助言を頂きました。

[付 録]

(a) 地平線(尾根)の高度角

i 面からみた地平線(尾根)の高度角 $h_i(\phi)$ は

• $\cos(\phi - \phi_v) \leq 0$ のとき

$$h_i(\phi) = \cos^{-1} \left(\frac{\cos h_v}{\sqrt{1 - \sin^2 h_v \sin^2(\phi - \phi_v)}} \right)$$

• $\cos(\phi - \phi_v) \geq 0$ のとき

$$h_i(\phi) = \tan^{-1} \left(\frac{D_i}{W_i \sec(\phi - \phi_v)} \right)$$

ただし

$$W_i = \frac{W_v}{2} \left(1 + \frac{1}{n_v} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$D_i = D_v \left(1 - \frac{1}{n_v} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right)$$

j 面からみた高度角 $h_j(\phi)$ は、谷の対称性から下式が成り立つ。

$$h_j(\phi) = h_i(\phi + \pi)$$

(b) 空の view factor

i 面の天空光等方成分, 非等方成分に対する空の view factor: V_{iso_i} , V_{aniso_i} は下式から求められる。

$$V_{iso} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \cdot \int_{h(\phi)}^{\pi/2} \cos \theta_1 \cdot \cos h \, dh$$

$$V_{aniso} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \cdot \int_{h(\phi)}^{\pi/2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos h}{\sin h} dh$$

なお、谷の対称性から

$$V_{iso_i} = V_{iso_j}$$

$$V_{aniso_i} = V_{aniso_j}$$

である。

(c) 対岸各斜面の view factor

谷の方向には無関係に求まるので $\phi_v = 0$ とする。

$$W_{ij} = \frac{W_v}{2n_v} (i + j - 1)$$

$$D_{ij} = \frac{D_v}{n_v} (j - i)$$

ベクトル \overline{AB} と i 面・j 面の法線ベクトルのなす角をそれぞれ θ_{ij} , θ_{ji} とすれば面 j 上の面 dA が面 i 上の B に対して占める view factor dV_A は

$$dV_A = \frac{dA}{\pi \cdot |\overline{AB}|^2} \cos \theta_{ij} \cdot \cos \theta_{ji}$$

$$= \frac{1}{\pi} \left(\left(\frac{W_v}{2n_v} \right)^2 + \left(\frac{D_v}{n_v} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\times (W_{ij}^2 \cdot \sin^2 h_v - D_{ij}^2 \cdot \cos^2 h_v) \frac{\cos^2 \zeta}{\sqrt{D_{ij}^2 + W_{ij}^2}^3}$$

よって、j 面が i 面に対して占める view factor V_{ji} は

$$V_{ji} = \int dV_A$$

$$= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{W_v}{2n_v} \right)^2 + \left(\frac{D_v}{n_v} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\times (W_{ij}^2 \cdot \sin^2 h_v - D_{ij}^2 \cdot \cos^2 h_v) \frac{1}{\sqrt{D_{ij}^2 + W_{ij}^2}^3}$$

と表される。これは対称性から $V_{ji} = V_{ij}$ である。なお、実際の計算では正確のために、各面をさらに約10等分して計算し、それらを足し合わせて V_{ji} , V_{ij} とした。

文 献

- Dirmhirn, I. and Frank D. Eaton, 1975: Some characteristics of the albedo of snow, *J. Appl. Meteor.*, 14, 375-379.
- Hay, J.E., 1979: Report No. 79-12, Atmospheric Environmental Service, Downsview, Ontario.
- 近藤純正, 三浦 章, 1983: 地表面日射量の実験式と日射計をチェックする簡便な方法, *天気*, 30, 469-475.
- Kondo, J. and A. Miura, 1985: Surface heat budget of the Western Pacific for May 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 633-646.
- Yamanouchi, T., 1983: Variations of incident solar flux and snow albedo on the solar zenith angle and cloud cover, at Mizuho Station, Antarctica, *J. Met. Soc. Japan*, 61, 879-893.

第28回理工学における同位元素研究発表会のお知らせ

会 期: 1991年7月1日(月)~7月3日(水)

会 場: 国立教育会館(東京都千代田区霞が関3-2-3
文部省となり)

共同主催: 日本気象学会

発表者の資格: 発表申込者が所属する主催学・協会の年会(大会)等の規定または慣例に従います。

発表申込み: 所定の申込書(1件1通)によりお申込み下さい。所定の申込書は下記にて請求して下さい。

〒113 東京都文京区本駒込2-28-45

日本アイソトープ協会内
理工学における同位元素研究発表会運営委員会

☎(03) 946-9684

発表申込締切: 1991年2月28日(木) 必着

講演要旨: 講演要旨集を発行します。発表申込みがあり次第、所定の原稿用紙をお送りします。口頭発表、ポスター発表とも1件原稿用紙1枚です。

講演要旨原稿締切: 1991年4月15日(月) 必着