

5. 森林の微気象

5.1 森林とは

森林は「樹木の密生している所」として扱われることが多いが、森林法では「木竹が集団して生育している土地及びその土地の上にある立木竹、その他、木竹の集団的な生育に供される土地」と定義されており、日本では1995年現在、国土の約68%を占めている（農林統計協会，2003）。ただし、科学的には森林は「樹木を中心とした植物群と土壌中の微生物や地上の動物等の生物群が相互に影響を及ぼしながら生きている場」であり、森林生態系という名で表すのがふさわしい。

5.2 森林の種類と分布

森林は地球上の植物現存量の約90%を占め、その純一次生産量¹NPP（net primary production）は陸上生態系のNPPの約43%を占めている。図5.1に示すように、森林が優占するのは、放射乾燥度²がおおよそ0.3~1の地域である。この領域を下回るとツンドラとなり、この領域を上回るとステップ、半砂漠、砂漠へと移行していく。森林は、純放射量によって、さらに熱帯雨林から、常緑広葉樹林、落葉広葉樹林、針葉樹林に分類される。

日本の場合、年降水量が全国平均で約1,800mm、寡雨地域でも約1,000mmと豊富であるため、森林の分布は気温に依存している。気温は、緯度が高いほど、また標高が高いほど低くなるので、図5.2に示すように、日本の森林分布は緯度および標高によって決まっている。沖縄や奄美の島々には亜熱帯多雨林が分布し、西日本の標高の低いところには照葉樹林と呼ばれる常緑広葉樹林が広がっている。西日本の標高の高いところ、および東日本・北海道の標高の低いところには落葉広葉樹が分布している。東日本の標高の高いところや北海道の中央部・東部には常緑針葉樹が分布し、亜寒帯相当の高山にはハイマツ等の低木林が分布している。図5.2に示した分布は、地域の環境条件で長期間安定を続ける「極相」状態の森林を表しており、温量指数（warmth index）と呼ばれる各月の平均気温から5°Cを差し引いた値の年積算値の分布と良く一致する。ただし、森林は永年にわたる人為的改変等によって図5.2のように分布しているわけではない。例えば、日本の森林の41%は人工林であり、その多くはスギやヒノキ等の常緑針葉樹林で被われている（農林統計協会，2003）。また、従来多様な森林を形成していた里山は、土地利用変化、管理放棄等に伴い遷移が進み、竹林の拡大や照葉樹林の単相林化などが進んでいる。

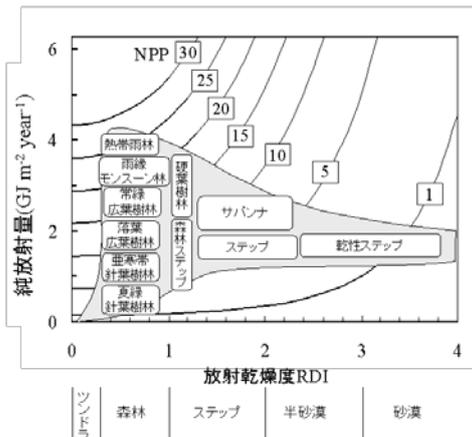


図 5.1 放射乾燥度、純放射量と植生、気候の関係 (Seino et al., 1992)

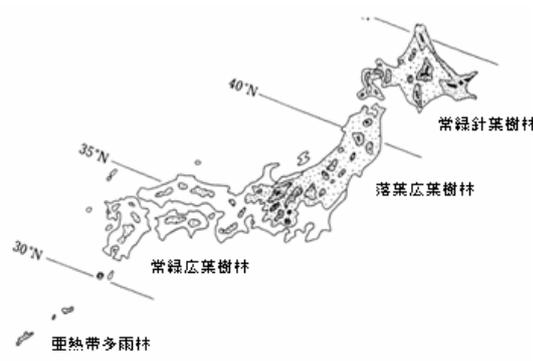


図 5.2 日本の森林帯の水平・垂直分布(只木, 1996)

5.3 森林の構造

森林は地上高く樹木を伸ばし、非常に複雑な階層構造（stratification）を形成している。木本植物を骨格とした群落（canopy）の最上層には高木の樹冠（crown）が広がる高木層（tree layer）があり、その下に亜高木層（subtree layer）、低木層（shrub layer）、草本層（herb layer）、地表のコケ層（moss layer）と連なっている。熱帯雨林では、高木層を突き出した巨木が点在しており、これは巨木層（emergent layer）と呼ばれている。このような多様な植生を、地下深くにまで張り巡らせた根群が支えている。

多数の層からなる林は多層林（図5.3.a）と呼ばれる。一定の区域を全て伐採（皆伐）した跡地に単一樹種を植林した場合、単一の樹冠からなる単層林（図5.3.b）となる。単層林施業では、森林の水源涵養機能、水土保全機能等が失われることが多いため、近年は広葉樹の導入や、2~3層程度の複層林（図5.3.c）となるような施業も普及し始めた。森林の構造が変わると、群落の葉面積分布が変化し、林内の気象環境は大きく変化する。

5.4 森林における気象環境

本節では、森林の気象環境について概観するが、森林の環境は樹種や群落構造によって大きく異なることに注意する必要がある。また、日本の場合、森林は主として山や丘陵などの傾斜地に存在しているため、森林の気象は地形と深く関わっている。ただし、ここでは地形に関しては考慮しないこととする。

(1) 森林における放射環境

放射環境における森林の特徴は、海洋に次ぐ日射の吸収体として地域・地球環境に大きな影響を及ぼしていることである。表5.1に示すように、森林のアルベドは、針葉樹林5~15%、広葉樹林10~20%で、平均すると約10%であり、森林は陸域最大の日射吸収体として機能している。したがって、アルベドの高い雪水で覆われる機会の多い寒冷地では、森林の有無が局地気

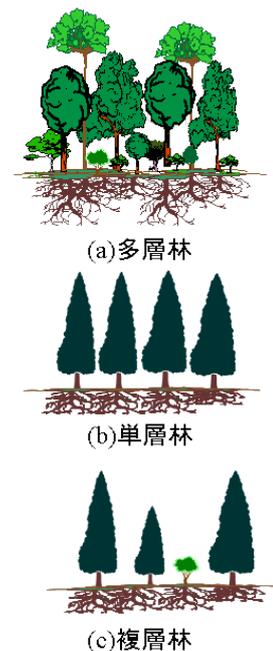


図 5.3 森林の階層構造の例 (Bernes et al., 1998)

¹総光合成量から総呼吸量を差し引いた値で、植物の乾物生産量に相当する。

²年降水量が気化するのに必要なエネルギーに対する年純放射量の比。

象に多大な影響を及ぼしている。近年、シベリアにおいて森林伐採・火災により森林が減少しており、局地気象のみならず、地球規模の気象にも影響を及ぼすことが懸念されている。

なお、着葉・落葉を繰り返す落葉広葉樹のみならず、常緑針葉樹・広葉樹のアルベドも季節的に変化することに注意する必要がある。図 5.4 は福岡県の常緑広葉樹マテバシイ林におけるアルベドと林床面における日射透過率の年変化を示したものである。アルベドは、夏から冬にかけて 13~14% でほぼ一定であるが、開葉期の 4 月頃から開花期の 5 月下旬にかけて 19% まで増加し、6 月に急減している。

樹冠を透過して林床に届く日射は群落構造によって大きく異なる。間伐が行われていない常緑針葉樹人工林や、1 年を通じて樹冠が鬱閉している常緑広葉樹林では、林床に光がほとんど届かず、林床植生は乏しい。上述の常緑広葉樹マテバシイ林の場合、林床における日射透過率は約 5% に過ぎない。

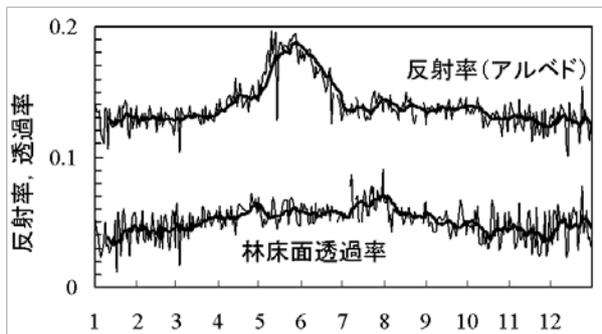


図 5.4 福岡演習林のマテバシイ林における反射・透過率の年変化

表 5.1 様々な地目の代表的なアルベドの値 (Campbell and Norman, 1998)

表面	反射率	表面	反射率
イネ科草原	0.24-0.26	雪 (新しい)	0.75-0.95
コムギ	0.16-0.26	雪 (古い)	0.40-0.70
トウモロコシ	0.18-0.22	土壌 (湿, 暗色)	0.08
ビート	0.18	土壌 (乾, 暗色)	0.13
ジャガイモ	0.19	土壌 (湿, 明色)	0.10
落葉樹林	0.10-0.20	土壌 (乾, 明色)	0.18
針葉樹林	0.05-0.15	砂 (乾, 白色)	0.35
ツンドラ	0.15-0.20	道路, アスファルト	0.14
ステップ	0.20	市街地域(平均)	0.15

森林内の日射は、群落の上端からの積算葉面積指数が増加するに従って指数関数的に減少する (Monsi and Saeki, 1953) :

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-k \cdot \text{LAI}) \tag{5.1}$$

ここに、 $I(z)$ は高度 z の日射あるいは光合成量子フラックス密度、 k は吸光係数、 LAI は群落上端から高度 z までの積算葉面積指数である。森林における吸光係数は、水平葉で構成される広葉双子葉の植物群落と、垂直葉で構成されるイネ科の植物群落の中間的な値を示す。ただし、樹冠の隙間 (ギャップ) を通じて日射が差し込むことがあり、林床の特定の場所・特定の時間に光斑が現れることがある (図 5.5)。林床植生が見られるのは、このような光斑が現れる場所であることが多い。

なお、緑色植物の葉は、特異な分光反応特性を有している。緑色の葉は、光合成有効放射域の放射の 60~80% を選択的に吸収する。一方、近赤外域 (0.7~1.35 μm) の放射はほとんど吸収されず、大半は反射・透過される。したがって、林床においては光合成有効放射域の放射が少なく、光合成にとって無用な近赤外域の放射が多い傾向にある。その意味でも、ギャップから透過してくる光は林床の植物にとって貴重な光資源として作用する。

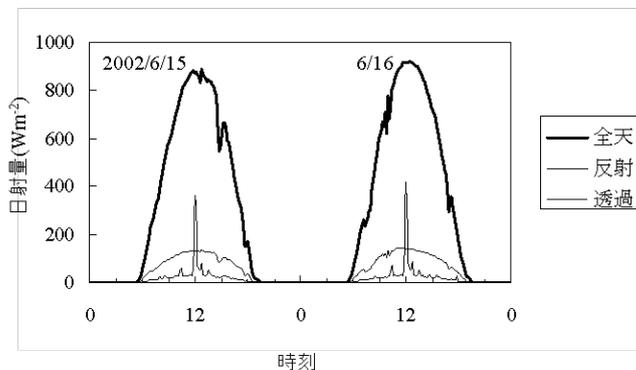


図 5.5 福岡演習林マテバシイ林における全天・反射・透過日射の日変化

(2) 森林における雨水の配分

日本では、平成 13 年に林業基本法が森林林業基本法に改正されたのに伴い、森林の多面的機能が重要視されるようになった。その結果、2000 年現在、日本の森林の約 1/3 は保安林に指定されており、中でも水源涵養機能と土砂災害防止機能に対する期待は高く、両機能を主目的とした保安林は全保安林の約 90% を占めている。ここでは両機能と深く関わっている森林における雨水配分について概説する。

雨天時の森林における水の動態を示したのが図 5.6a である。森林に降った雨水は、一部は樹木に触れずに直接林床に到達するが (直達雨)、残りは樹冠に捕捉される。捕捉された雨水は、一部は葉から林床に滴下し (滴下雨)、一部は葉、枝、幹を伝って林床に流下する (樹幹流)。直達雨と滴下雨を分離するのは難しいため、通常は両者を合わせて林内雨あるいは樹冠通過雨 (throughfall) として扱っている。林床に達する正味林内雨量 (net rainfall) は、樹冠通過雨量と樹幹流量 (stem flow) から成る。樹冠に捕捉された雨水で林床に到達しない水分は、蒸発によって大気中に失われ、樹冠遮断量 (canopy interception) あるいは遮断蒸発量と呼ばれる。森林における雨量配分は、次式で表される。

$$P_G = P_I + P_N = P_I + (P_T + P_S) \tag{5.2}$$

ここに、 P_G は林外雨量 (gross rainfall), P_I は樹冠遮断量, P_N は正味林内雨量, P_T は樹冠通過雨量, P_S は樹幹流量である。

日本では、樹冠遮断率 P_I/P_G は 13~26% の間にあるが、20% 前後に集中している (服部, 1992)。熱帯林でも、樹冠遮断率は降水量に関係なく概ね 10~20% の範囲にあるが、樹冠の蒸発強度が大きい森林と樹冠貯留量が大きい森林では 35~48% という高い樹冠遮断率を

示すことが報告されている(蔵治ら, 2003). 一般に, 降水量が少なくなると樹冠遮断率は増加する傾向にあるが, 乾燥地では林分の現存量が少ないため遮断率は逆に低い. すなわち, 樹冠遮断量は, 気候・気象と樹種・樹冠構造の組み合わせによって決まる.

従来, 世界的に雨水の大半(70~90%)は樹冠通過雨量 P_T として林床に達するといわれており, 樹幹流量 P_s は無視あるいは軽視されてきた. しかし, 近年研究事例が増え, 最大樹幹流量率 P_s/P_g の平均は, 熱帯林 3.5%, 温帯林 11.3%, 半乾燥-乾燥地の森林で 19.0% であることが報告されている(Levia Jr. and Frost, 2004). 上述のマテバシイ林では, 樹幹流量率 P_s/P_g は平均でも約 50% を占めており(佐藤ら, 2002), 樹幹流量量に関しても, 気候・気象, 樹種・樹冠構造の組み合わせに依存していることに注意する必要がある.

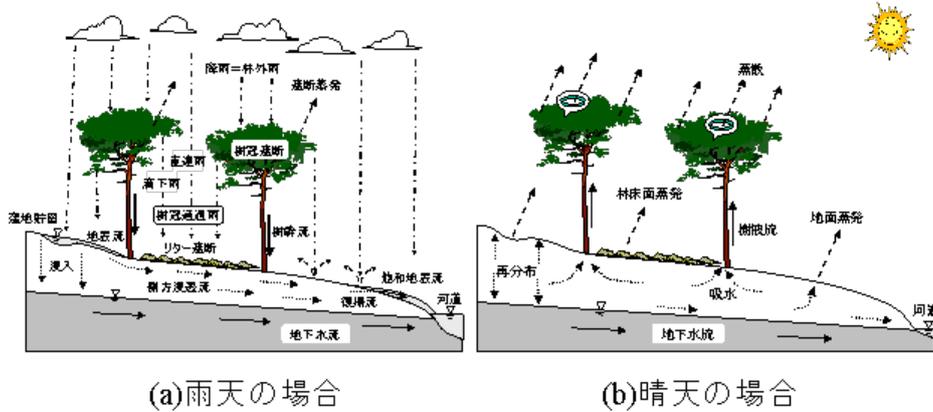


図 5.6 森林斜面における水の動き (a)雨天時, (b)晴天時

(3) 森林の風環境

森林は高い樹木を骨格とした群落であるため, 風に対して強い摩擦力を及ぼし, 風環境に大きな影響を及ぼしている. 樹冠上に風速の対数分布が成立すると仮定すると, 樹冠上の風速分布は次式で近似できる.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \tag{5.3}$$

ここに, z は樹冠上の高さ, $u(z)$ は樹冠上の高さ z における風速, u_* は摩擦速度, k はカルマン定数, d は地面修正量, z_0 は粗度長である. 森林および農地の d, z_0 の群落高さ h に対する比を表 5.2 に示す.

表 5.2 森林と作物の植生高 $h(m)$ と粗度長 $z_0(m)$ および地面修正量 $d(m)$ の関係

比率	d/h	z_0/h
草地・畑地	0.61~0.83 (0.63)	0.03~0.16 (0.13)
森林	0.61~0.92 (0.78)	0.02~0.14 (0.07)

※ () 内は平均的な値

図 5.7a は, 15m 高さの森林と 1m 高さの作物の群落上 2m で風速 $2m s^{-1}$ の風が吹いていると仮定して計算した風速プロファイルである. 図に示すように, 農地と比較すると森林では樹冠上の風速勾配が大きく, 森林が風速分布に大きな影響を及ぼしていることがわかる.

なお, 風速が対数分布すると仮定すると, 図 5.7a のように風速は樹冠直下付近でゼロになる. しかし, 実際には樹冠上の風が森林内の空気を引っ張り, 森林内にも風が吹く. ただし, 樹体が風に抵抗するため, 森林内では風は樹冠から徐々に減速し, 地表面近くで弱いピークを持つ形の風速分布を取る(近藤, 1994). 風に対する樹体の抵抗は葉量が多いほど大きいので, 落葉広葉樹では落葉期の方が着葉期より林内の風は強くなりやすい(渡辺, 1998).

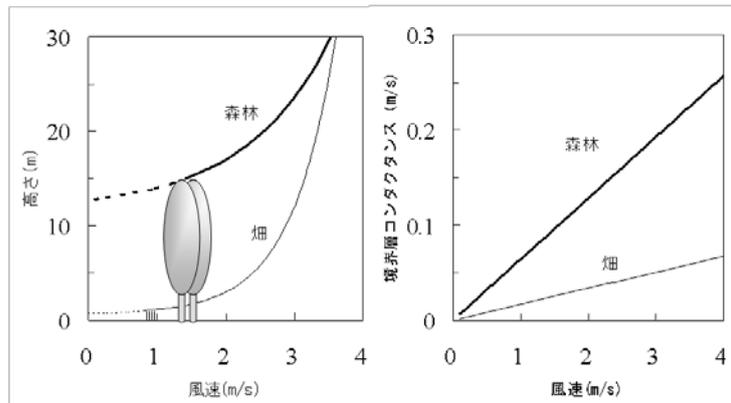


図 5.7 典型的な森林と畑地における風速プロファイルと境界層コンダクタンスの関係

風は大気中の様々な物理量の輸送と密接に関っている. フラックス密度 F と呼ばれる単位面積・単位時間当たり輸送される物理量は, 抵抗 r あるいはコンダクタンス g の概念を導入すると次式で表される.

$$F = \frac{C_s - C_a}{r} = g(C_s - C_a) \tag{5.4}$$

ここに, C_s, C_a は地表面および大気中の物理量である. 運動量に関するコンダクタンス g_a は, 境界層コンダクタンスあるいは空気力学

的コンダクタンスと呼ばれ、次式で表される。

$$g_a = \frac{k^2 u(z)}{\left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2} \tag{5.5}$$

図 5.7(a)の条件で算定した境界層コンダクタンス g_a を図 5.7(b)に示した。図より、森林では樹冠上の風速勾配が大きく、境界層コンダクタンス g_a が大きいため、樹冠上で運動エネルギー輸送が盛んであることがわかる。境界層内における各種物理量の輸送メカニズムは類似していることから、樹冠上では水蒸気（潜熱）、顕熱、 CO_2 の輸送も盛んであることがわかる。

(4) 森林における蒸発散

晴天時の森林における水の動態を示したのが図 5.4b である。蒸発散は、一般には「土壌面蒸発と植物体からの蒸散」の和として扱われている。しかし、森林の場合、土壌面蒸発は少なく、樹冠に遮断された雨水の蒸発が多いため、蒸発散は「遮断蒸発と蒸散の和」であると考えることができる。

滋賀県の針葉樹林（主としてアカマツ、ヒノキ）における遮断蒸発量と蒸散量の年変化の測定例を図 5.8 に示す。森林の蒸散量は概ね日射量に対応し、夏に多く冬に少ないという明確な季節変化をするのに対し、遮断蒸発量は降雨の頻度と強度に依存し、年間を通じて 15~35mm/month の値を示すことがわかる。蒸散の場合、気孔コンダクタンスの制限を受けるが、樹冠に雨水が遮断された場合には気孔コンダクタンスの影響を受けないため、遮断された雨水は短時間の内に蒸発してしまう。日本の森林の年間蒸発散量は湖面の蒸発散量より約 30% 多いが、これは降雨中の遮断蒸発に起因するといわれている（近藤，1994）。

日本の場合、森林からの年蒸発散量は約 700mm/year（大槻，1984，近藤，1994）で、年降水量 1,800mm/year の約 39% を占めている。残る 61% が河川に流出し水資源として利用されるので、森林からの蒸発散は水資源に大きな影響を及ぼしている。森林の年蒸発散量の値を潜熱エネルギーに換算すると 1.75GJ m⁻² で、日射量の約 36%、純放射量の約 60% を占めており、森林が気象の緩和に大きく寄与していることがわかる。

蒸発散量の推定モデルとして、次に示す Penman-Monteith 式（Monteith, 1965）が様々な分野では利用されている。

$$E_c = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p D / r_a}{\lambda \rho_w \{ \Delta + \gamma(1 + r_c / r_a) \}} \tag{5.6}$$

$$D = e_{sat}(T_a) - e_a \tag{5.7}$$

ここに、 E_c は蒸発散量 ($m s^{-1}$)、 Rn は純放射量 ($W m^{-2}$)、 G は地中熱フラックス ($W m^{-2}$)、 ρ_a, ρ_w はそれぞれ空気および水の密度 ($kg m^{-3}$)、 c_p は空気の定圧比熱 ($J kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$) である。 D は飽差 (hPa) で、気温 T_a における水蒸気圧 $e_{sat}(T_a)$ (hPa) と大気の水蒸気圧 e_a (hPa) の差である。 λ は水の蒸発潜熱 ($J kg^{-1}$)、 Δ は温度-飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($hPa K^{-1}$)、 γ は乾湿計定数 ($hPa K^{-1}$) である。 r_a, r_c はそれぞれ境界層抵抗 ($s m^{-1}$)、群落抵抗 ($s m^{-1}$) である。

近年、Penman-Monteith 式における放射項と移流項の蒸発散量に対する貢献度を表すため、McNaughton and Jarvis (1983) による Penman-Monteith 式の変形式が広く利用されている。

$$E_c = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p g_a D}{\lambda \rho_w \{ \Delta + \gamma(1 + g_a / g_c) \}} = \Omega E_{eq} + (1 - \Omega) E_{imp} \tag{5.8}$$

$$E_{eq} = \frac{\Delta(Rn - G)}{\lambda \rho_w (\Delta + \gamma)} \tag{5.9}$$

$$E_{imp} = \frac{\rho_a c_p}{\lambda \rho_w \gamma} g_c D \tag{5.10}$$

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + g_a / g_c)} \tag{5.11}$$

ここに、 E_{eq} は平衡蒸発量 ($m s^{-1}$) と呼ばれ、Penman-Monteith 式の放射項であり、水平で一様な湿潤面からの蒸発量に相当する。 E_{imp} は強制蒸発量 ($m s^{-1}$) と呼ばれ、Penman-Monteith 式の放射項であり、飽差とコンダクタンスに依存する。 g_a, g_c はそれぞれ境界層コンダクタンス ($m s^{-1}$)、群落コンダクタンス ($m s^{-1}$) で、それぞれ抵抗 r_a, r_c の逆数である。 Ω はオメガ（乖離率：decoupling coefficient）と呼ばれ、蒸発散量 E_c に占める平衡蒸発量 E_{eq} の割合であり、0~1 の値を取る。

図 5.9 は、マレーシアの熱帯林（平均群落高：約 40m, LAI: 4.8~6.8, 平均 6.2）における蒸散量と関連要素の日変化を示したものである。蒸散量 E_c は日射量 R_s と良く似た変化をしていること、群落コンダクタンス g_c は境界層コンダクタンス g_a のほぼ 10% のオーダーで蒸散量に似た変化をしていることがわかる。日単位で見ると、土壌が湿潤になるほど蒸散量 E_c 、群落コンダクタンス g_c は増加し、乖離率 Ω も増加する傾向がある。乾燥期には、乖離率 Ω が小さく、蒸散量 E_c は群落コンダクタンス g_c に対応して変化するのに対し、湿潤期には乖離率 Ω が大きく、群落コンダクタンス g_c に対する蒸散量 E_c の依存性は低下する（Kumagai, 2003）。

McNaughton and Jarvis (1983) は、様々な植生における乖離率 Ω を計算し、草地では 0.8~0.9、農地では 0.4~0.7、森林では 0.1~0.2 という値を報告した。その後、この値が広く引用され、森林のように高い植生では、境界層コンダクタンス g_a が群落コンダクタンス g_c に比べてかなり大きいため、乖離率 Ω は小さく、森林からの蒸発散は主として風速と飽差の影響を受けることが一般性をもった事実のように扱われてきた。しかし、小松（2003）は既存の文献から広葉樹林 15 例、針葉樹林 20 例の乖離率 Ω の値を整理し、針葉樹林では Ω はほぼ 0.1~0.2 の値をとるが、広葉樹林の Ω は約 60% が 0.2 を超え、0.4~0.7 となるものも 27% と珍しくないことを報告している（図 5.10）。このように大きな Ω が針葉樹林にみられず広葉樹林に限られるのは、広葉樹林の方が針葉樹林よりも境界層コンダクタンス g_a が小さく、群落コンダクタンス g_c が大きい傾向にあることに起因する（小松，2003）。

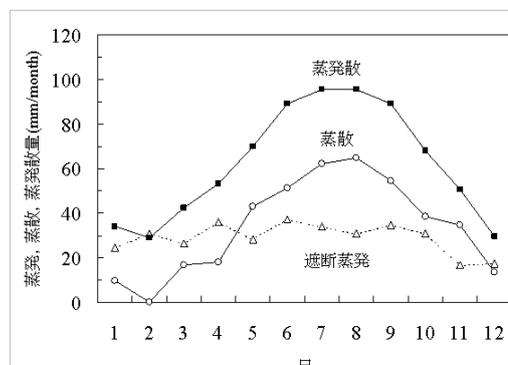


図 5.8 滋賀県桐生試験流域(1972~1976 年)における蒸散量と遮断蒸発量の年変化 (Suzuki,1980)

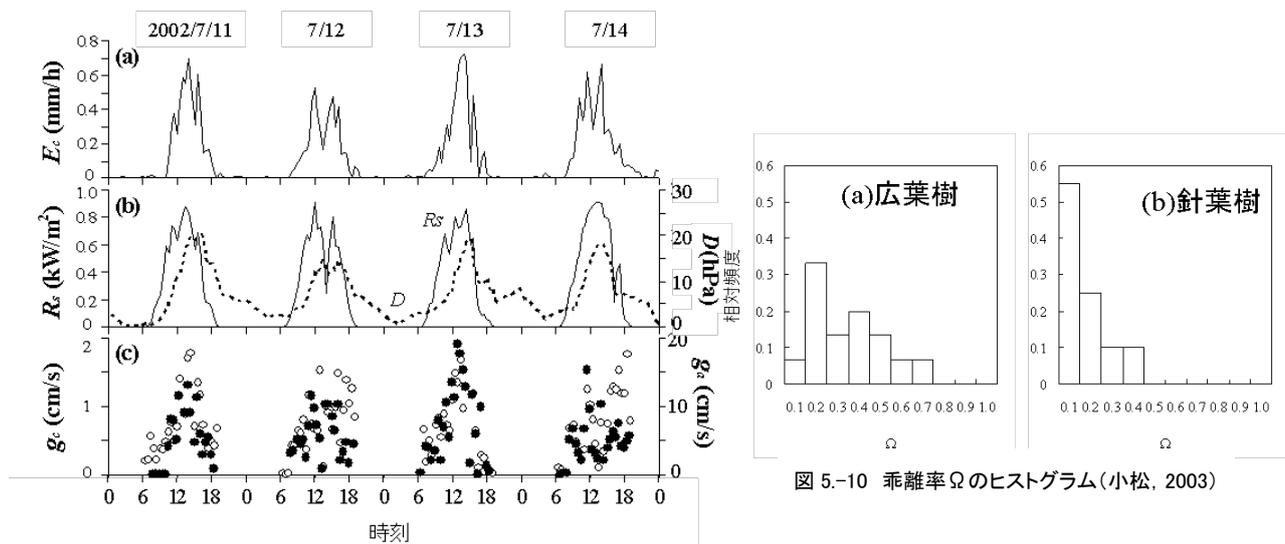


図 5-10 乖離率Ωのヒストグラム(小松, 2003)

図 5.9 マレーシア・ランピルの熱帯林における蒸発散量と関連要素の日変化(Kumagai et al., 2003)

(5) 森林が局地気象に及ぼす影響

日本の森林の約 39%は保安林として指定され、様々な機能を発揮するよう管理されている。局地気象改善機能として森林が期待されているものには、防風、飛砂防備、潮害防備、干害防備、防雪、防霧、防火などの機能がある。その中で最も有名なものは、防風効果で、防風林が局地気象の緩和に役立てられている。ただし、台風などで強風が吹き、限界風速 (30m s⁻¹程度) を超えると風倒木被害が発生しやすい。放棄人工林では、立木の過密化が原因で風倒木被害が生じやすくなっており、森林管理の健全化が急がれている。

保安林の機能として挙げられていない森林の局地気象改善機能で重要なものとして、気象緩和機能がある。森林は純放射量の約 60%を潜熱エネルギーとして消費している。図 5.11 はリモートセンシングによる潜熱フラックスの地目別相対頻度を示したものである。図より、森林は他の地目と比較して潜熱フラックスがかなり大きいことがわかる。この大量の潜熱消費が気温の上昇を緩和させる効果を発揮するため、近年、都市緑化による熱環境緩和対策が様々な形で実行されている。一方、森林における純放射量の約 40%は顕熱フラックスとして配分されている。冬には蒸散がほとんどないことと気温が低いことにより、純放射の大半が顕熱として消費され、付近の大気を暖める効果を有している(渡辺, 1998)

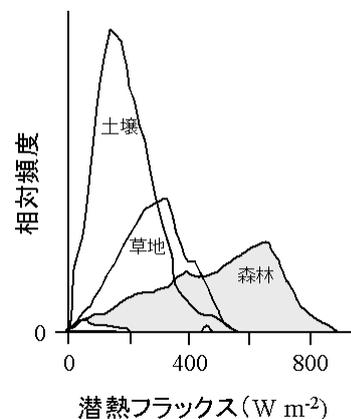


図 4.11 潜熱フラックスの地目別相対頻度分布(川島, 1986)

近年、森林の多面的機能が個別に議論されることが多いが、環境が森林に及ぼす影響や、森林が環境に与える影響は複雑であり、森林では様々な現象が複雑に絡み合っている。したがって、森林における現象を個別に評価するべきではなく、できる限り総合的に評価する必要がある。一方、森林の機能や適切な管理方法を策定するための基礎となるデータが不足しているのも事実である。したがって、今後は森林生態系に関する長期的、学際的、広域的な研究が急がれており、現在、森林を主体とする長期生態研究 (Long Term Ecological Research) のネットワークが世界的に広まりつつある。

参考文献

Campbell, G. S. and Norman, J. M. : An Introduction to Environmental Biophysics, Springer (1998)
 服部茂昭 : 森林蒸発散の構成成分, 森林水文学 (塚本良則編), pp.78-102, 文永堂出版(1992)
 川島茂人 : 航空機 MSS データによる地表面熱収支分布の評価, 天気, 33, pp.333~344(1986)
 小松 光 : 森林群落で計測される乖離率 (decoupling factor) の値, 水文・水資源学会誌, 16(4), pp.423-438 (2003)
 近藤純正 : 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 東京(1994)
 Kumagai, T., Saito, T., Sato, Y., Morooka, T., Manifroi, O., Kuraji, K. and Suzuki, M. : Transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effect, Journal of Hydrology, (in press).
 蔵治光一郎, 田中延亮 : 世界の熱帯林における樹冠遮断研究, 日本林学会誌, 85(1), pp.18-28 (2003)
 McNaughton, K.G and Jarvis, P.G. : Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation, in Water deficits and plant growth, vol.VII, ed. by T.T.Kozlowski, pp.1-47, Academic Press, New York (1983)
 Monsi, M. and Saeki, T. : Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften, seine Bedeutung fur die Stoffproduktion, Jpn J Bot., 14, pp.22-52 (1953)
 Monteith, J. L. : Evapotranspiration and environment, Symp. Soc. Exp. Biol., 19, pp.206-234 (1965)
 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 : 気象資料から推定したわが国の蒸発散量, 農業土木学会論文集, 112, pp.25-32, (1984)
 林野庁 : 図説森林・林業白書 (平成 14 年度版), 農林統計協会(2003)
 佐藤嘉展・大槻恭一・小川 滋 : リター層による降雨遮断量の推定, 第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集, pp.609-614 (2002)
 Seino, H. and Uchijima, Z. : Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation, J. Agric. Met., 48(1), pp.39-48 (1992)
 Suzuki, M. : Evapotranspiration from a small catchment in Hilly Mountains (I), J. Jap. For. Soc., 62(2), pp.46-53 (1980)
 鈴木雅一 : 森林地の蒸発と蒸散, 森林水文学 (塚本良則編), pp.53-77, 文永堂出版 (1992)
 只木良也 : 森林環境科学, p.14, 朝倉書店 (1996)
 渡辺 力 : 気象利用学 (気象利用研究会編), 森北出版, pp.90~94 (1998)