

4-1 里山の環境・水文学的機能の評価手法の開発

朴 昊澤（(財)科学技術交流財団）

1. 研究の目的と概要

里山は都市-森林との循環系におけるインタフェースとして、水循環に深くかかわっている。広域に分布している里山は、地表面に入射する太陽エネルギーの多くの部分を蒸発散に消費して地表面の熱環境を緩和すると同時に、蒸発散により大量の水を循環させている。また、光合成により太陽エネルギーを物質に変換し、地域的物質循環にも大きく影響している。しかし、里山流域内における水・物質循環過程は、気象・立地などの環境条件と樹種や群落構造などの森林条件に大きく依存する。特に森林管理と密接に関わる森林構造の時空間的な変化すなわちその特異性は、里山流域の降雨配分と放射環境を制御し、植生の成長や林内の水及び気象環境の形成に大きく影響する。したがって、里山の代表的樹種である広葉樹二次林の流域を対象に水量と水質を長期的・連続的にモニターすることにより、水・物質循環の実態を解明するとともに、森林条件の違いが水・物質循環に及ぼす影響を定量的に評価する。特に、土壌-植生-大気連続系における各因子の系間での相互依存性や日・季節変化などの時間的応答特性の解析は、水・物質の輸送モデルの構築ならびに適正な森林管理技術の開発に不可欠である。一方、森林に取り込まれた放射量は熱エネルギーとして潜熱、顕熱、地中熱、光合成に変換・利用される。この熱収支のあり方により森林の微気象環境、ときには地域気象環境が決まる。そのため、里山林において熱収支を計測し、里山林のエアコンディショナーあるいはラジエータとしての機能を定量的に評価するとともに、林型と機能との関係性を評価する。

里山流域における水循環特性を解明し、環境影響物質の適正管理の観点から、これらの流域に適した森林管理あり方やそれを支える施業技術の開発に資する。そのため、①森林条件の違いが降雨配分特性や環境影響物質の動態に及ぼす影響を定量的に評価し、そのモデル化を進める、②都市-里山循環系における水循環プロセスの時空間的変動を検知し、その影響を評価するモニタリングシステムを構築する、③水循環の観点からみた都市-里山循環系における里山の役割やそのあり方を評価することを研究目的にする。

水・物質循環に対する多くのデータが蓄積されている奥山と異なり、研究の例が極めて少ない里山において、従来のような水、大気といった個別的対応を中心にした部分的な研究ではなく、諸研究分野と連帯した総合的研究システムを構築した上、森林、土壌及び気象に関する流域の基盤的環境情報の収集を始め、環境影響物質の輸送媒体としての水の収支と動態すなわち水循環特性を多角的に観測・解析した。さらに、里山周辺域の二次的自然は、本来周辺域の文化、社会、経済活動などの帰結として形成された側面が極めて大きいことから、単に里山流域のみのスポット的な研究にとどまらず、周辺域の環境や構造を踏み込んだ広域スケールに発展させ、そこでの相互関係や里山の機能の全体象を明らかにする研究への発展が本研究の特徴である。

2. フェーズ I の成果

2-1. 目的及び目標

長い歴史のなかで、人間と深いふれあいを保ってきた人間の生活場であり、自然生態系の物質とエネルギーの循環を人工的に管理する二次的自然である里山は、その立地条件から開発の対象とされることが多い。こうした場合には、開発と自然環境保全とのバランスをいかに保っていくかが問題に

なる。しかしながら、保全すべき里山生態系の特性が十分明らかにされていないため、開発という人間活動と自然環境保全との軋轢が時々問題となっている。この問題に対処するためには、あくまでも科学的なデータに基づいて、自然のプロセスに人間の開発をどのように当てはめていくべきかを決める必要がある。しかしながら従来、里山で行われた研究の例は極めて少ない。

したがって、都市近郊の里山を対象にした長期・連続的なモニタリングを通して里山空間における物質・エネルギー循環の実態を明らかにする必要がある。その上で、里山生態系を構成する個々の環境空間の変化に伴う生態系変動が検知できる。さらに、本研究の目的である都市との循環系における里山の役割の評価及び水循環に望ましい森林管理法の技術的指針の提案が実現できる。このような目的を達成するための第一ステップとして、フェーズ I には、小流域レベルにおいての降雨から渓流水までの降雨－流出応答関係、エネルギー及び放射収支、それらの季節変化の特性を定量化した。

2-2. 方法及び結果

フォレストヒルズ内の落葉広葉樹二次林に試験流域（東経 137° 11'，北緯 35° 02'）が 2000 年に設置され、2000 年 4 月より様々な水文・気象観測が行われた。試験流域の流域面積は 1.47ha，標高は 41m～105m である。地質は風化花崗岩で、土壌は花崗岩を母材とした泥あるいは砂礫の多い堆積岩から成る。植生はコナラ・アベマキ・ヤマザクラなどが上層，リョウブ・アラカシ・ソヨゴ・ヒサカキなどが中下層を形成しており、一部にマツ枯れによって衰退したアカマツがみられる。また林内には萌芽株が多い。流域の立木密度は 3651（本/ha），平均胸高直径 9.1cm，胸高断面積合計は 30.2（m²/ha）で、そのうち落葉広葉樹は 79.1%，常緑樹は 20.8%を占めた。

流域内には高度 20m の観測タワーが設置されており、日射量・純放射量・気温・風速の連続観測が表 1 に示す設置高で行われた。流域からの潜熱・顕熱は CO2&H2O 変動計（Advanet, E009B）と超音波風速温度計（Kaijo, DAT600）を用いて渦相関法で求めた。Tanaka ら（1994）が開発した幹熱収支法を用いて 4 供試木（コナラ×3、クスノキ×1）を対象にし樹液流を測定した。土壌温度はサーミスターを用いて 6 深度で測定した。さらに、土壌水分は 4 深度の 2 ヶ所で TDR により測られた。流域からの流出量は流域の出口に設けられた量水堰で観測した。

表 1 微気象観測項目の機器名および設置高

観測項目	機器名（メーカー；EKO）	設置高（m）
日射量	全天日射計：MS-401	1.7, 4.5, 7.3, 10.1, 15.5
純放射量	放射収支計：MF-11	1.2, 8.6, 19.5
気温	乾湿球温度：MH-020T	2.8, 6.6, 11.8, 16.5
風速	超音波風向風速計：MA-130	1.0, 10.5, 15.5

林分と天空の間では常に放射エネルギーのやり取りが生起しており、しかもそれは時間的に変動している。しかし、どのような時間単位を取り出しても、そこには放射エネルギーの保存則が成立する。そして、その様子は (1)、(2) の放射収支式で表現される。

$$R_n = (Q - Q_{ref}) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (1)$$

$$R_n = (1 - \alpha)Q + L_n \quad (2)$$

ここで、 R_n は純放射量、 Q と Q_{ref} はそれぞれ全短波放射量、反射短波放射量、 $L \downarrow$ と $L \uparrow$ はそれぞれ大気放射量、林分からの長波放射量、 α はアルベド、 L_n は有効長波放射量である。

(1) 式は、純放射が短波および長波放射の収支の和として与えられることを示している。そして、

そこには林分構造や各要素の放射特性と関係する。 Q_{ref} 、 $L\uparrow$ が含まれることから、放射収支や R_n には、林分条件が影響することが知られる。また、(1) 式中の $L\uparrow$ は次式で与えられる。

$$L\uparrow = \varepsilon\sigma TH^4 + (1 - \varepsilon)L\downarrow \quad (3)$$

ここで、 ε は長波放射の射出率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 TH は表面温度である。

$L\uparrow$ の計算にあたり、 $\varepsilon = 1$ とし、また、 TH は林分を対表する表面の設定が困難なこと、葉温の測定が行われていないことから、地上高 11.8m の林冠頂部付近の気温で代用した。

林冠に与えられた純放射量 (R_n) は、潜熱輸送量 (LE)、顕熱輸送量 (H)、地中熱流量 (G) に配分される。したがって、(1) の熱収支式が成立する。

$$R_n = LE + H + G \quad (4)$$

植被面からの蒸発散は、主として水を水蒸気に変換するための熱エネルギーと、植被面から大気中への水蒸気輸送の抵抗に支配されると知られている。Monteithは、その抵抗に空気力学的抵抗 (r_a) と群落抵抗 (r_s) を導入することにより、植被面からの蒸発散量を (2) 式で表現した。

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_s - e) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (5)$$

ここで、 e_s と e は高度 11.8mでの飽和水蒸気圧と大気の水蒸気圧、 ρ は空気密度、 C_p は空気の定圧比熱、 γ は乾湿計定数である。

植物の気孔は日射量 $Q\downarrow$ が多いと開き、葉の水分が減ると閉じ、葉と空気間の水蒸気圧差 Δe が増加すると閉じる。また、ある最適な温度の時によく開く。しかし、個々の要因に対する応答は互いに独立ではない。また、植物の種類、葉の位置、生育段階によっても異なる。したがって、気孔抵抗あるいは群落抵抗は蒸発散量を左右し、葉面温度を決める重要な因子である。ここで、個葉単位の気孔コンダクタンスモデル (Jarvis, 1976) を群落に拡張した群落コンダクタンス (群落抵抗の逆数) モデルを用いて、日射 (Q)、飽差 (Δe)、気温 (T) の影響を組み入れた次の関数で群落コンダクタンス (g_s) を表した。

$$g_s = g_{s,max} f(Q) f(T) f(\Delta e) f(\psi_s) f(LAI) \quad (6)$$

ここで、 $g_{s,max}$ は群落コンダクタンスの最大値、 ψ_s は土壌水分ポテンシャル、 f は個々の要因に対する応答を表す関数であり、それぞれ 0~1 の値をとる。ここでは、 ψ_s やLAIのデータが不足しているため省略した。

表 2. 年間及び月平均の放射収支

ここで、Totalは各収支の項目の年総量であり、単位はGJ m⁻²である。月平均値の単位はMJ w⁻² d⁻¹である。

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Total
Days	16	26	30	25	31	15	25	30	26	27	27	31	309
R_n	10.7	11.0	9.4	13.4	13.9	8.9	4.9	2.9	1.6	1.1	2.3	3.6	2.29
Q	17.3	18.0	14.1	19.3	19.4	12.9	9.2	7.9	7.9	7.5	11.0	13.0	4.02
Q_{ref}	2.1	3.2	2.3	2.9	2.7	1.7	1.1	0.9	0.9	0.8	1.1	1.4	0.54
Q_{abs}	15.2	14.8	11.8	16.4	16.7	11.2	8.1	7.0	7.0	6.7	9.9	11.6	3.48
$L\uparrow$	32.8	35.6	36.9	39.5	39.7	38.0	34.7	32.6	29.6	28.1	29.1	30.4	10.45
$L\downarrow$	28.3	31.8	34.5	36.5	36.8	35.7	31.5	28.6	24.2	23.6	23.7	26.0	9.27
L_{net}	-4.5	-3.8	-2.4	-3.0	-2.9	-2.3	-3.1	-4.0	-5.4	-4.5	-5.4	-4.4	-1.18

当林分の放射収支を明らかにするため、1年間の各種放射量を表 2 に整理した。なお、表中の Q_{abs} と L_n は $Q - Q_{ref}$ 、 $L\downarrow - L\uparrow$ に相当する。年間放射収支を Q に対する百分率で表すと、 Q_{ref} 、 Q_{abs} がそれぞれ

13.5%、86.5%、 R_n が57.1%、 L_n が-29.4%となる。当林分における57.1%の R_n/Q は、70年生のNorway spruce林の68% (Tajchman, 1972)、ヒノキ林の58.4% (服部, 1986) より低い、Parkら (1999) が落葉広葉樹林で得た56.4%よりは若干大きい。これらの差は、気象、林分条件の違いによるものと考えられる。Baumgartner (1967) は草地の R_n/Q が裸地より約10%高いと述べた。さらに、Stanhillら (1966) は草地の R_n/Q を30~50%、果樹園の R_n/Q をKalmaら (1976) は56%と報告した。これらのことから、閉鎖した林分の R_n/Q が他の植物群落より大きいことが分かる。

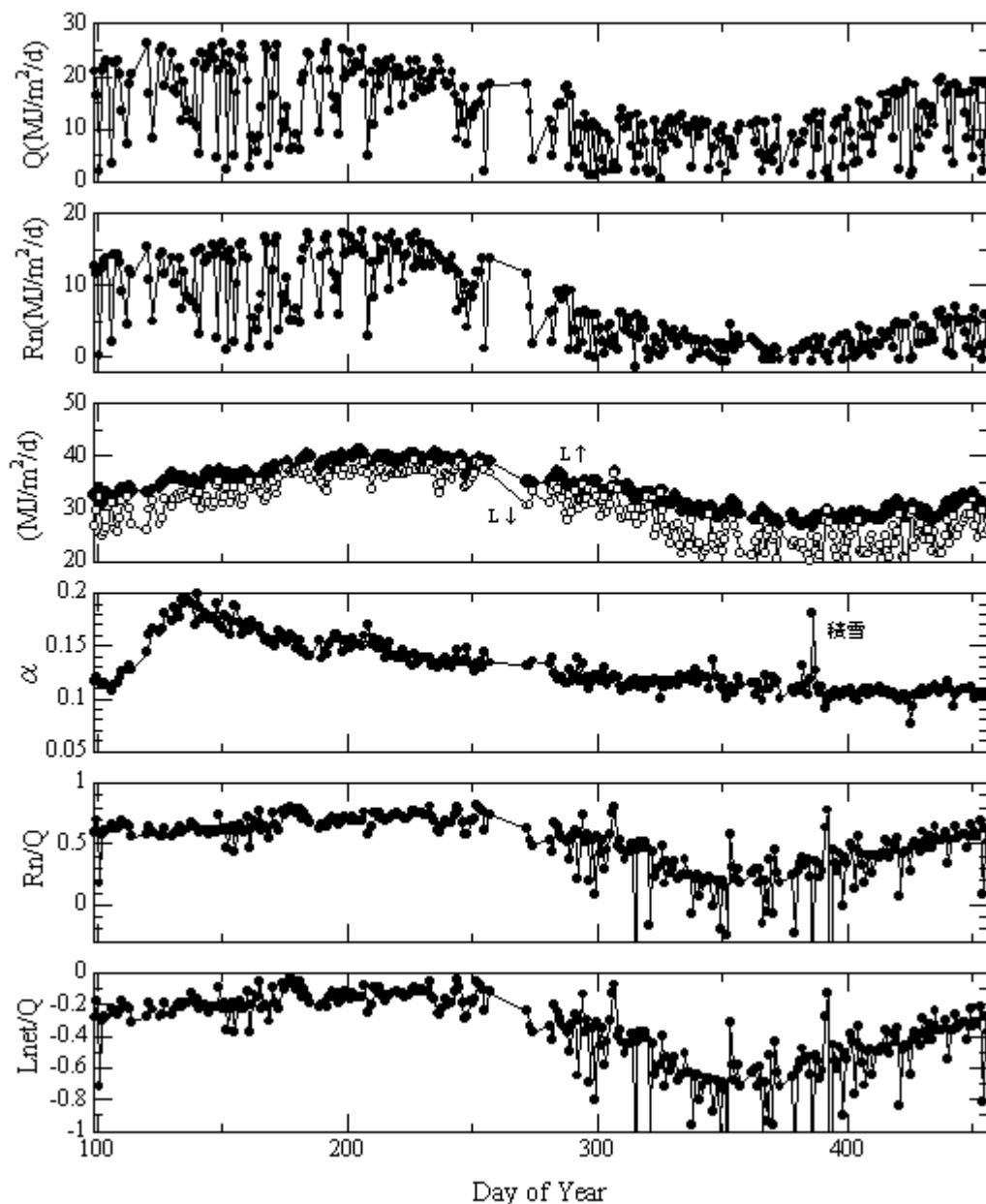


図1. 日射量、純放射量、長波放射量、アルベド、 R_n/Q 、 L_{net}/Q の季節変化

植物群落間の R_n/Q の差は、群落構造とかかわる α と L_n に依存する。多くの研究から落葉樹林の α は9%~20%に分布すると知られている。当林分の α はその範囲内にある。しかし、世界の19針葉樹林から得られた平均値である10% (Jarvisら, 1976) より、また服部 (1986) によるヒノキ林の10.7%よりはるかに大きい。このような差の原因として、林分構造、LAI、気象条件の違いがあげられる。当林分における-29.4%の L_n/Q は、Stanhillら (1966) が報告した森林における-40~-30%の範囲外で

あるが、服部（1986）のヒノキ林の-30.9%より若干大きい。地表面と大気間の温度勾配が大きくなると L_n の負の値は大きくなる。したがって、林分からの大量の蒸発散により、地表面と大気間の温度勾配が小さくなり、 L_n/Q の値は大きくなる。服部（1986）は、同一緯度帯に位置する林分間の L_n/Q の差が極めて少ないことから、植物群落間の R_n/Q の違いは、 L_n/Q より α に左右されると述べた。しかしながら、Parkら（1999）は緯度帯により日照時間と気候が異なることから、 R_n/Q に影響する因子は緯度帯により異なると論じた。 Q_{ref} と $L\uparrow$ の値の大きさから考えると、 R_n/Q に対しては α よりむしろ L_n/Q の影響が大きいと考えられる。

図1に日単位の Q 、 R_n 、 $L\downarrow$ 、 $L\uparrow$ 、 α 、 R_n/Q 、 L_n/Q の季節変化を示した。 Q と R_n は新葉とともに増加し、夏期にピークを示してから紅葉及び落葉につれて減少する明確な季節変化を示した。しかし、 Q と R_n のピークの時期が若干異なっていることが認められる。 Q は太陽高度がピークになる7月初旬に最大値（ $26.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）を示すが、 R_n は Q より20日くらい遅れて、植物の生理的活性が活発である7月下旬に最大値（ $17.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）を示した。しかし、 Q と R_n の月平均値を見ると、両者の最大値は8月に見られる（表1）。このような差は、天候の違いにより解明できる。 Q と R_n の最大値を示した7月には、図2で分かるように両者の日変動幅が8月に比べて大きい。このような差異は、降雨量、雲量により生じることである。例えば、7月の降水時間は23時間であり、8月は16時間であった。

局地的な気象環境の違いは、同一気候帯に位置する林分との放射収支の違いをもたらす。服部（1986）は茨城県のヒノキ林において、 Q と R_n は5月にピークがあると報告した。同一気候帯において、太陽が放出する日射量はほぼ同一であるが、最後に林分に流入する日射量は地表面付近の気象環境によりそれぞれ異なる。勿論、林分条件の違いとも関係があるが、大気からの流入エネルギーに限っては林分条件よりその地域の気象環境に大きく依存する。

エネルギー収支は周辺の微気象と密接な関係があると知られている。したがって落葉広葉樹林が持つ、例えば都市気候の緩和などの機能を評価する上で、エネルギー収支を明らかにするのは重要である。図2はエネルギー収支の季節変化を示す。当林分の R_n 、 LE 、 H 、 G はそれぞれ年間2.30、1.51、0.81、 -0.02 GJ m^{-2} である。有効放射量（ $R_n - G$ ）に対して LE 、 H の百分率はそれぞれ65.2%、34.8%である。当林分の LE が有効放射量に対して占める65.2%は、京都山城流域の落葉広葉樹林で得られた55%（玉井、1997）に比べて約10%大きい。Parkら（1999）が東京大学愛知演習林内の南谷の落葉広葉樹林で得た67.2%よりは少ない。林分間のこのような差には、林分条件、気象環境、地理的な違いが

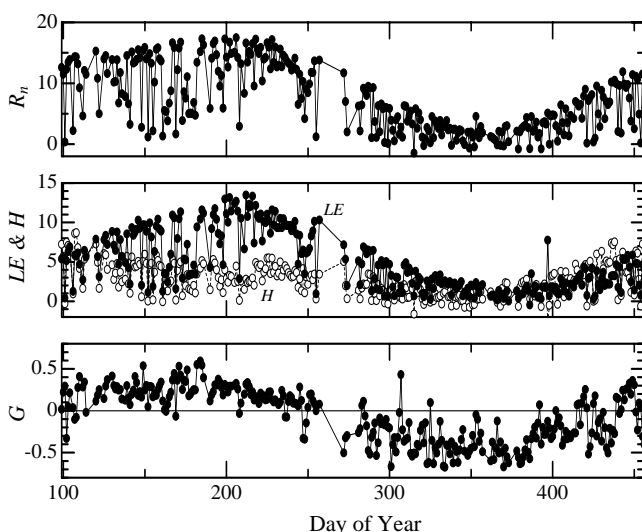


図2. 当林分のエネルギー収支の季節変化

起因したものと考えられる。Wilsonら（2000）はアメリカの落葉広葉樹林において3年間観測を行い、 LE/R_n は45.7%であると報告した。Wilsonらの結果は当林分と相当の違いがある。その差は、測定法の違いから説明される。当林分の LE はエネルギー収支から求められたが、Wilsonらは渦相関法から LE を求めた。渦相関法は林分からの潜熱・顕熱フラックスを過少評価する傾向があり、エネルギー収支においてインバランスを招く。Wilsonらは有効放射量に対して $LE+G$ は約75%を占め、25%のインバランスが生じたと述べた。

LE は R_n とほぼ同様の季節変化を示してい

る。 LE は新葉する4月中旬から急増し、7月下旬に $13.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最大値を示してから減少し始め、1月に最小値を示した。落葉期に R_n のわずかが LE として使われるのは、落葉により樹冠の開空度の増加により林床面における有効放射量が増加し、それとともなって林床面蒸発量が増加したからである。また、常緑樹からの少量の蒸散もその一つの原因であると思われる。 H の場合は、 LE と異なる季節変化を示している。 H は4月初旬にピークを示して、 LE が増加する時期には逆に減少し、12月から LE を上回って春季に向かって徐々に増加していく。冬期に LE より H が大きいことは、大気温度が地表面温度より低いため、地表面から大気に放出するエネルギー量が増加するためである。エネルギー収支に対する樹冠構造の影響は、 H/LE と LAI の関係からも明確に分かる(図3)。 LAI の高い暖候期には H/LE が1以下であって、有効放射量の相当の量が LE として使われている。ところが、 LAI が低下すると、前述したように H の割合が大きくなっていく。ここで、 LAI の1を基準にして、 LE から H への転換が著しくなる。 LAI が1のときは、落葉が終結して常緑樹の葉のみが存在する時期である。このような結果から、 LAI はエネルギー収支に影響する決定的因子であることが認められる。

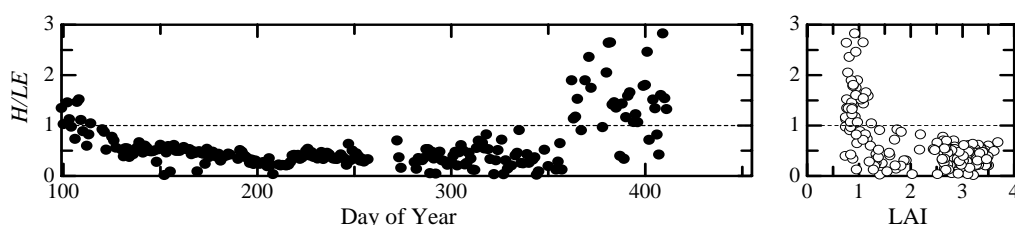


図3. H/LE の日々変化 (左) 及び LAI と H/LE との関係

地表面から大気への熱の移動は、 G のフラックスからも説明できる(図2)。 G の季節変化はエネルギー収支の他項目とほぼ同様のパターンを示す。 G は4~9月に正であるが、10月からは負の値を示す。ここで、負の記号は、土壌から大気へ向かう熱の移動を表す。夏期に、地表面に日射が入ると、まず地表面付近の薄い地層の地温が上昇し、温度勾配が生じ、熱が地表面から深い層へ伝わる。冬期には逆に、地表面が冷却し、下層から上に向かって熱が移動する。

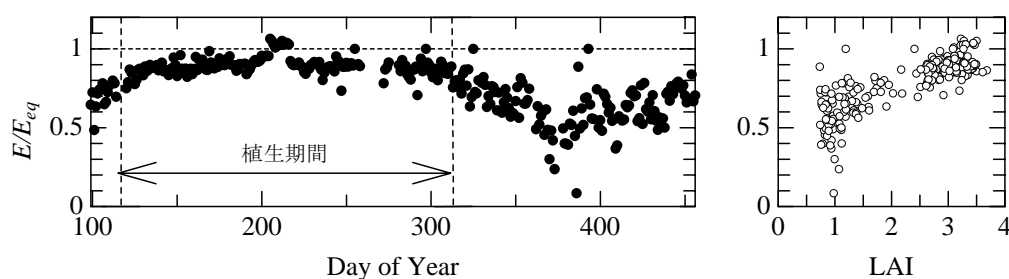


図4. 当林分における蒸発散量 E を可能蒸発量 E_{eq} で割り算した無次元蒸発散量の日々変化(左)及び E/E_{eq} と LAI との関係(右)

蒸発散量の季節変化は水に関する気候条件と森林の状態が密接に関係していることを表している。蒸発散量 E を可能蒸発量(E_{eq})で割り算した無次元蒸発散量は、粗度や土壌水分などの森林状態のみに依存することになる。また、無次元蒸発散量は、他の流域との比較が容易になる。図4は無次元蒸発散量 E/E_{eq} の日々変化と E/E_{eq} と LAI との関係を示す。植生期間は葉が展開してから落葉し始める期間である。葉の成長にしたがって E/E_{eq} は増加し、植生期間に0.85前後になる。葉の展開のあと、日数と

ともに葉量は大きくなり、蒸発散が盛んになる。さらに、樹冠遮断も大きくなる。寒候期には落葉により暖候期とは逆現象がみられる。当林分の 0.83 の平均 E/E_{eq} は、日本の多数の流域が示す 0.5~1.4 の範囲内(近藤、2000)に分布しているが、Parkら(1999)が白坂流域で得た 0.86 よりはずか少ない。両流域間 E/E_{eq} の差は、遮断蒸発、土壌水分などの違いと関係があるが、 E/E_{eq} には気候条件が取り除かれたため、厳密にいうと両流域間における植生による土壌水分利用率の違いを表す。間接的に本流域より白坂流域の植生の成長及び活性がよいと判断できる。

2-3. 考察及びフェーズ I のまとめ

試験流域であるトヨタフォレストヒルズにおける葉面積指数は着葉期に 4.5、落葉期に 0.8 の季節変化を示した。樹冠変化に伴って放射収支の各項目も明確な季節変化を示した。アルベドは 5 月中旬に 19%のピークを示したが、日射吸収率と放射転換率は 8 月に最大値を示すそれぞれ若干異なる季節変動を表した。林分は 5 月から 11 月間に入射する日射量の約 75%を吸収する効率性を示したが、放射転換率は 9 月から急減して 1 月から再び増加する日射吸収率とは異なる季節パターンを示した。樹木の活性は 9 月から落葉あるいは紅葉とともに低下するが、葉が展開する前から少ない日射量を効率よく樹木の活性に利用するメカニズムが明確にされた。林分が 1 年間吸収した日射量は 2980.3MJ/ha であり、日射量 1MJ が 0.31g の樹木純生産を引き起こしたことが明らかになった。

流域の流出率は降雨量の 36%であり、落葉期には落葉による林内到達雨量の増加と蒸発散量の減少によって流出率が増加する傾向が見られた。流出プロセスは植生及び土壌などの物理的因子の空間的分布に大きく依存するため、そのような一連の特性を考慮した流出モデルを構築し、流出量を再現した。一方、降雨量に対して約 63%の割合を示した蒸発散量は着葉期と落葉期間に明確な季節的な差が見られた。本流域の水収支は奥山の流域とは異なる特徴がみられる。例えば、瀬戸市に位置する東京大学愛知演習林の白坂流域は降雨量の 55%が蒸発散、45%が流出に配分される水収支を示している。すなわち、本流域の蒸発散量が白坂流域より約 10%高い。このような差は、林分構造、流域環境と関わるが、それらより地理的特性の違いによる影響も大きいと考えられる。豊田市中心部から約 6km 離れた本流域は、豊田市から輸送される熱の影響により多量の蒸発散が生じたと考えられる。蒸発散と風向の間にも正の関係が見られた。さらに、2003 年 4 月を対象にした都市-森林広域循環モデルの計算においても同様の結果が確認された。潜熱は純放射量の 75.7%であったが、潜熱とは異なる季節変化を示した顕熱は純放射量の 25%を示した。

3. フェーズ II の成果

3-1. 目的及び目標

愛知県における里山は都市部と山間部の境界面に位置している地理的特徴から、都市部から発生する熱や汚染物質を吸収し、地域気候の緩和及び大気環境を改善する機能が高いと推測される。しかし、里山の森林構造や気候環境が場所により異なるため、その機能性も場所によって異なる。里山の環境機能は長期観測やシミュレーションなどを通して評価可能になるが、幅広く分布している全里山を対象に現地観測を長期間行うことは現実的に大変難しい。そのため、その代わりに里山の環境機能を評価する数値モデルなどを開発する必要がある。当事業においては 2000 年から里山林であるトヨタフォレストヒルズ内に試験地を設けて微気象や水文環境を観測してきた。構築したモデルをトヨタフォレストヒルズに適用し、観測値との比較を通してモデルの有用性を検証した。さらに、いくつかのシナリオを想定しモデル計算を行い、今後予想される気候及び森林構造の変化が里山の水文環境に及ぼす影響を評価し、森林管理手法を決定するに当たって有用な情報を提供することを研究の目的にする。

3-2. 方法及び結果

開発したモデルは土壌-植生-大気間における熱、水蒸気及びCO₂交換を評価する1次元構造の多層モデルである。各プロセスの評価は微気象モジュールと生態・生理学的モジュールを結合することにより可能になった。具体的に、微気象モジュールは葉と土壌表面のエネルギー収支、乱流拡散及び放射収支モデルで構成される。エネルギー収支はエネルギーの各項目以外に各表面温度を計算する。微気象のプロファイル計算にはクロージャモデルが用いられる。同一層においても個々の葉の光環境はその場所、角度によって異なる。その違いが諸プロセスに及ぼす影響を評価するため、陽葉と陰葉に分けて計算を行う。微気象モジュールから計算された因子は生態・生理学的プロセス（光合成、蒸散、呼吸量）の計算を駆動させる。さらに、当モデルは樹冠における降雨配分も計算可能である。ここでは当モデルを構成する式の中で、モデルの骨格になる式だけを記述する。

平均樹高が12mである地上部を20層に分層した。さらに、樹冠部で行われる交換プロセスが大気境界層に及ぼす影響を考慮するため、大気は地上部の2倍に伸ばし、総40層(24m)を計算の対象にした。モデルには葉面積指数(LAI)や葉面積密度の分布がモデルの必須不可欠な情報である。LAI-2000により得られたデータを用いた。

個々の葉と群落内大気との間で交換される運動量、熱及び物質などは、乱流によって上下方向に輸送され、群落上の大気との間で交換が行われる。このとき、葉によるシンク・ソースの強度と乱流による輸送効率のバランスによって、群落内部の風速や気温などの平均的な分布が決まる。それらの過程は higher-order closure 原理に基づいた微気象乱流モデルにより計算される。平均流及びスカラの運動方程式は、場が定常で水平一様るとき、

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} = 0 = -\frac{\partial \langle \bar{u}'w' \rangle}{\partial z} + f_{F,u} + f_{V,u} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{x} \rangle}{\partial t} = 0 = -\frac{\partial \langle \bar{w}'x' \rangle}{\partial z} + S_x \quad (8)$$

と書ける。 u' と w' は水平及び垂直流の変動成分であり、 x はスカラ成分(気温、比湿、CO₂濃度)を表す。式(7)の右辺の F と V は圧力輸送項と粘性項である。 S_x はスカラ成分のソースを表す。

スカラ成分のフラックスは

$$\frac{\partial \langle \bar{w}'x' \rangle}{\partial t} = 0 = -\langle \bar{w}'^2 \rangle - \frac{\partial \langle \bar{x} \rangle}{\partial z} - \frac{\partial \langle \bar{w}'w'x' \rangle}{\partial z} - \left\langle \frac{x' \partial p'}{\partial z} \right\rangle + g\beta \langle \bar{\theta}'_v x \rangle \quad (9)$$

により計算される。ここで、右辺第1項はシアー生成項、第2項は拡散項、第3項は圧力による再配分項、第4項はシンク・ソース項である。群落よりも上の接地境界層では、平均風速に比べ、シアーストレスは高さ方向にあまり大きく変化しない。そのため、上式における拡散項の寄与は大きくないと考えられる。ところが、群落内では、風の運動量は群落上部で強い吸収を受け、シアーストレスの大きさが群落上部からの深さとともに急速に減少する。ここに乱流輸送の効果が加わる結果、シアーストレスは正味として群落上部から下方へ輸送されることになる。微気象モデルの理論及び計算方法などは Meyers and Paw (1987)を参考したい。

群落の上端に入射する日射エネルギーは、群落中の葉などに遮られ、吸収・反射・透過の過程を経て、下層に入るにしたがって少なくなる。植物の葉は、日射の全成分を吸収するわけではなく、光合成に有効な波長(PAR)をよく吸収し、それより波長の長い近赤外域(NIR)はほとんど吸収しない。

樹冠を透過する日射光において散乱光と直達光により透過過程が異なる。このようなプロセスを考慮し、単層で各放射を平均化した。群落上端から入射した日射が散乱されずに透過する確率は

$$I_B = \exp\left(\frac{LG\Omega}{\sin H}\right) \quad (10)$$

のように表せる。ここで、 H は太陽高度、 L は葉面積指数、 G は葉層内の葉面積と太陽光の入射方向に垂直な面への投影面積との比、 Ω は葉の固まりを表す係数である。日射・放射エネルギーの伝達モデルは Norman (1979)により詳細に説明された。

個々の葉によって吸収される放射エネルギーは顕熱、蒸発散の潜熱、長波の再放射及び貯熱に配分される。それぞれへのエネルギー配分の割合は、葉の周辺における風速・気温・湿度など気象条件の他、気孔の開閉度によって変化する。個葉のエネルギー収支は次式で表される。

$$R_n = 2\varepsilon_L\sigma T_s^4 + 2C_p\rho g_b(T_s - T_a) + 2L_v\rho\frac{g_b g_s}{g_b + g_s} [q_s(T_s) - q_a] \quad (11)$$

この式の右辺各項は順に、葉が放出する長波放射エネルギー、顕熱及び潜熱交換を表す。上式の未知数である表面温度 T_s はPaw (1987)が提案した2次方程式の解として与えられる。計算プロセスと各記号はSu et al (1996)も詳しく記述した。

個葉における光合成の生化学的環境反応は Farquhar et al (1980)のモデルを用いて計算した。

$$A_n = V_c - 0.5V_0 - R_d = \min[J_R, J_E] \left(1 - \frac{\Gamma}{C_i}\right) - R_d \quad (12)$$

個々で、 A_n は CO_2 同化速度、 V_c はカルボキシレーションの反応速度、 V_0 は酸素の同化速度、 R_d は呼吸速度である。このモデルにおいて単位葉面積あたりの CO_2 同化速度は、葉内 CO_2 分圧に応じて、Rubisco酸素律速による同化速度、光科学系電子伝達活性律速による同化速度及びリン酸再利用律速の同化速度の最小値で与えられる。モデルの詳細はSu et al (1996)により詳しく書かれた。

植物は気孔を通して、まわりの大気と CO_2 だけではなく H_2O も同時に交換している。葉内の CO_2 同化速度と気孔コンダクタンス (g_s) との関係は、Collatz et al. (1991)によって、

$$g_s = \frac{mA_n rh}{C_s} + g_0 \quad (13)$$

が半経験式として与えられる。ここで C_s は葉表面の CO_2 分圧、 rh は相対湿度、 m と g_0 は係数である。このモデルは、葉に吸収されるPAR、大気と葉面の温度、大気の CO_2 分圧、水蒸気圧、および葉面境界層のコンダクタンスが既知であれば、 A_n , g_s , 葉表面の CO_2 分圧、水蒸気圧、葉内 CO_2 分圧の変数が連立方程式によって与えられる。それらすべての変数は互いに非線形関係を持っているため、解を解析的に得ることはできず、数値的に繰り返し計算を行って求めることになる。

個葉における水収支及び降雨遮断過程は Tanaka (2001)のモデルの用いて計算した。

土壌中の熱の移動は、主に伝導によって行われる。その他に、水、ガスの移動に伴っても輸送される。土壌は土粒子、水、気体から構成され、熱の移動はこれら3相の混合状態に大きく左右される。熱移動は

$$c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_H \quad (14)$$

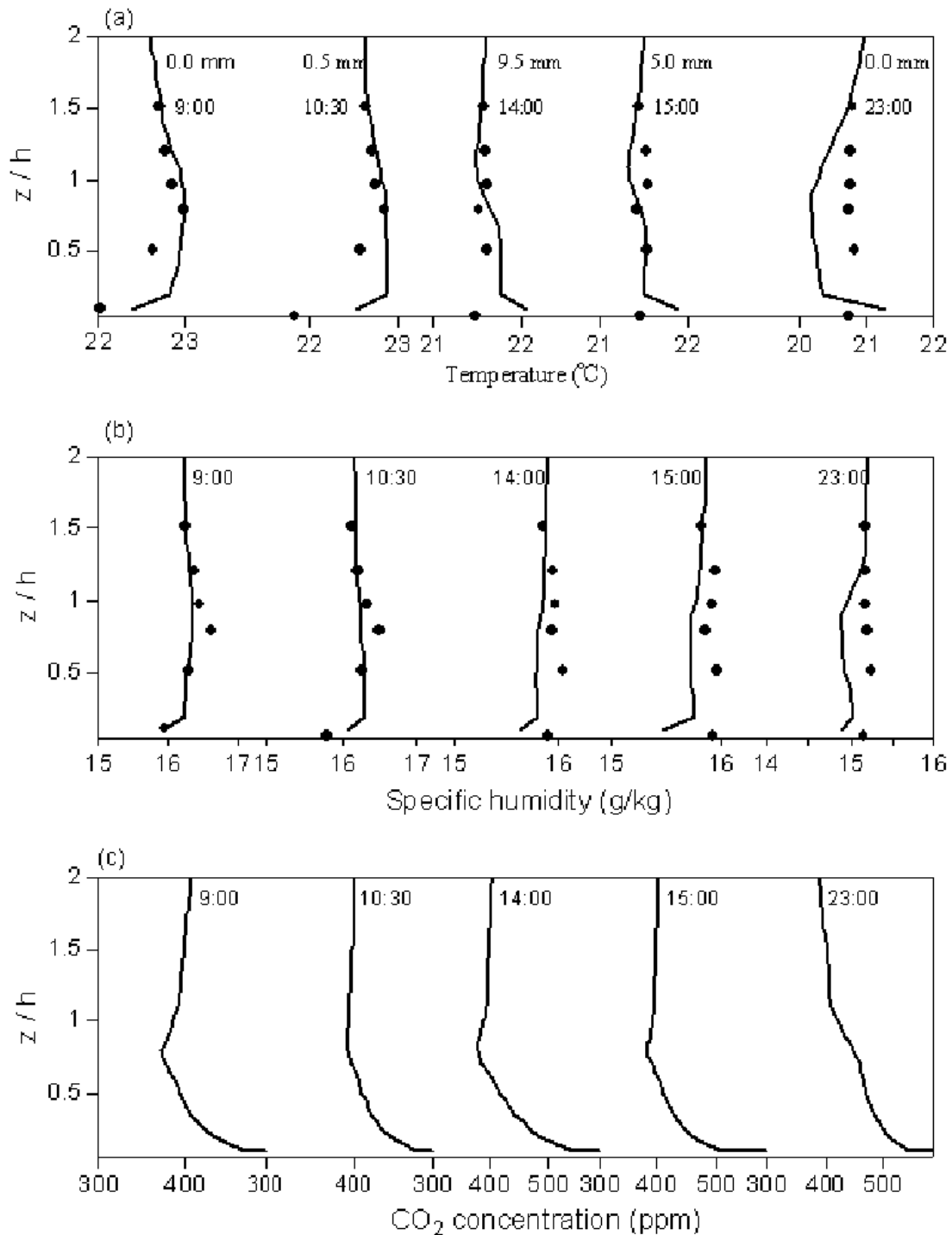
で与えられる。ここで C_s は土の体積熱容量、 λ_s は熱伝導率、 Q_H は熱貯留量である。土壌中の温度分布

は、時間変化するが、それは地表面に与えられるエネルギーで駆動される。したがって、地表面の放射、顕熱、潜熱フラックスの収支が境界条件になる。

水のポテンシャル差によって移動が決まる土壌水分の分布は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_s g \right) - U \quad (15)$$

で与えられる。 K_s は飽和透水係数、 g は重力加速度、 U は植物の根からの吸収を表す。土壌水分は、流入する降雨、地面からの蒸発量、蒸散及び流出により変化する。降雨量及び地面蒸発量が境界条件として与えられる。



葉量の増減が諸プロセスに 図 5.温度、比湿及び CO2 濃度の鉛直分布 及びその影響を調べ

るため、モデル計算に用いた全条件は同様にした上で、ただ葉面積指数だけを2, 4, 6に変化させ計算を行った。さらに、単層林と複層林の樹冠構造を想定し、樹冠構造の違いと諸プロセスとの関係性を評価した。今後予想される気候変化が流域内の諸プロセスに及ぼす影響を評価するため、大気温度を1.5°C、CO₂濃度を600ppmに増加させた上、シミュレーションを行い、気候と樹冠構造両者が同時に変化した時の諸プロセスへの影響も評価した。

葉量が地上部9m付近に集中していた樹冠構造は林内外の微気象環境形成に大きく影響を及ぼした。モデルにより計算結果はその高さに置いて明らかな温度、湿度及びCO₂濃度の変化を示している(図5)。多量の葉量は蒸発散による大気への水分損失を増加させ大気気温を緩和すると同時に、光合成を促進させ大気のCO₂濃度を減少させることにより大気環境に変化が起きる。雨などによって林内外に特有の微気象環境が形成されるが、そのような現象がモデルによってよく再現できた。

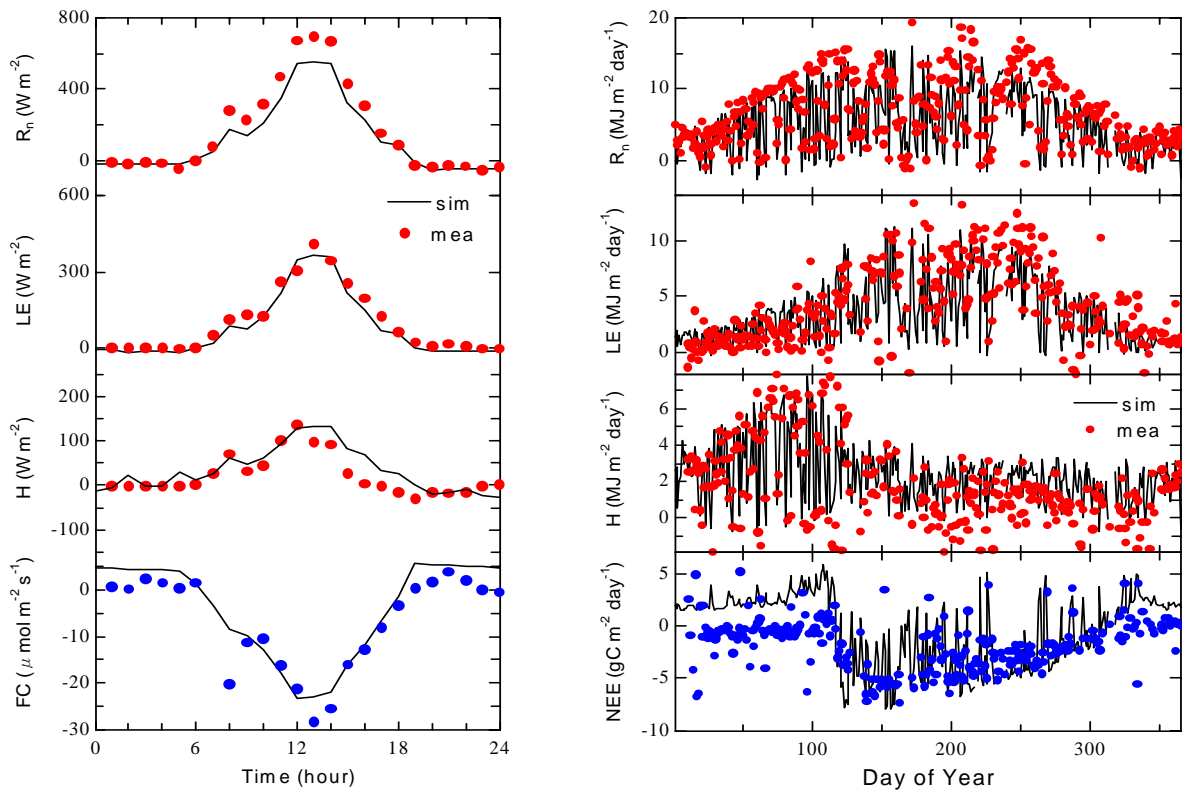


図6. エネルギー収支及びCO₂フラックスの日及び季節変化の計算値と実測値との比較

エネルギー収支に対するモデル計算値と測定値はよく一致する結果が得られた(図6)。太陽エネルギー量が多くなる夏に純放射量も多くなり、その純放射量の約75%が植物の蒸発散のエネルギー源である潜熱として使われた。その残りは顕熱、地中熱流量やバイオマス貯留量として使われた。潜熱がピークに達する夏に顕熱は最小値を示したが、落葉期に徐々に増加し始めて新葉が展開する直前に最大値を示す季節変化を表した。そのような特性がモデルによりよく再現できた。モデル計算値は実測値とよく一致したが、エネルギー収支の全項目がピーク時に計算値が若干過少評価される傾向が見られる。モデルによる過少評価はモデル計算に用いられた多数のパラメータの影響であると考えられる。特に、植物の蒸散速度を表す気孔コンダクタンスや光合成の最大速度を現すV_{cmax}などの影響が潜熱に大きく影響したと推測される。

植物の光合成が活発に起きる時期に対してモデルは実測値とよく一致する計算を示した(図6)。植物のCO₂吸収力は光合成有効放射量がピークに達する前に最大値を示すCO₂フラックスの日変化もより正確にモデルによって表現された。しかし、落葉期には植物によるCO₂吸収よりむしろ呼吸に

よる放出が多い実態がよく表現されたが、計算値と実測値間には大きな不一致がみられる。呼吸は葉、幹や土壌から発生する。その中でほとんどは土壌呼吸が占める。モデルで土壌呼吸は土壌温度の関数でシンプルに計算している。土壌呼吸は土壌温度を含め、多数の因子の影響を受ける。そのため、土壌温度のみで土壌呼吸量を推測することは大変難しい。この部分は今後充分考慮すべきである。

CO₂ フラックスの季節変化の計算値と実測値はよく一致しているが、前述したように落葉期に計算値が課大評価されたことが明かにされた。新葉が展開するとともに植物によるCO₂ 吸収が活発になることがモデルによって明確に表現された。1年間林分によって固定される炭素量は 322g m⁻²であることがモデルによって得られた。

林内に流入した降雨は樹冠により一部が遮断され蒸発として大気に還元される。その残りが樹幹流と樹冠通過雨量として土壌に流入する。そのプロセスの計算値と実測値との比較を図7で示す。樹冠通過雨量の計算値と実測値は高い相関を示しているが、樹幹流は実測値より計算値が過少評価される傾向がみられる。その傾向は降雨強度が強い時に著しい。樹幹流は幹に直接流入する雨量と葉から流入する雨量により発生する。このような事実を考慮してみると、モデルによる樹幹流の過少評価は葉からの流入量だけを考慮したモデル構造の問題点を現す。モデルの計算時、葉から幹への流入量を表すパラメータの季節変化を考慮せず同一値を使用したことも過少評価の原因の一つである。樹冠遮断量の計算値と実測値はよく一致したが、樹幹流と同様に降雨強度が強い時若干過少評価された。

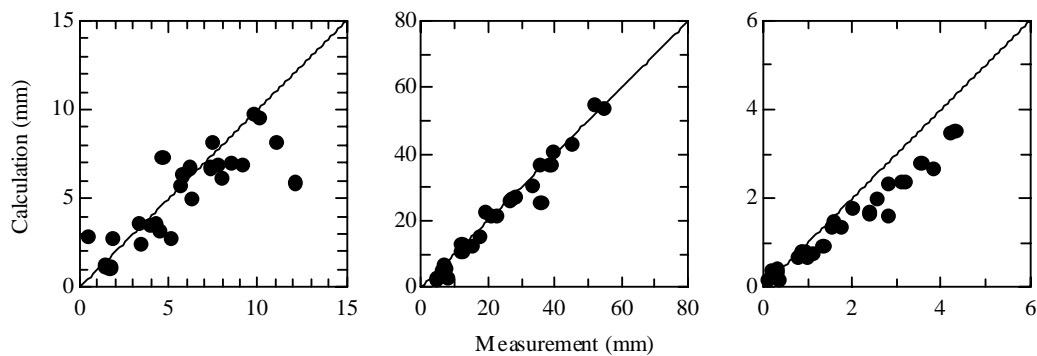


図7. 降雨配分プロセスの計算値と実測値との比較。左から樹冠遮断量、樹冠通過雨量、樹幹流を現す。

モデルにより計算された熱、水分及びCO₂ に対するソース・シンクの時空間分布を図8に示す。3つの成分はそれぞれ異なる分布を示す。CO₂ ソース・シンクは樹冠の上段50%内に幅広く分布している。熱は樹冠の上部25%付近で最大値を示す。一方、水蒸気は熱より若干低い樹冠の30%付近で最大値を示している。3つのソース・シンクの最大値を現す高さが異なるのは、それぞれが大気との交換のしやすさを現す粗度の違いを意味する。運動量及び放射エネルギーの吸収などの生・物理学的現象は主に樹冠の上部で起きている。樹冠上部において高い放射エネルギーの吸収は葉面温度を増加させ大気との温度差及び飽差を増大し熱や水分の交換を促進させる。

CO₂ のシンクは樹冠の9mで活発に起きている。そのシンクの大きさは気候条件に大きく依存しているが、CO₂ ソース・シンクの分布は葉量と密接に関わっていることを現している。樹冠の上段部においては放射エネルギーの利用度が高いにも関わらず低いシンクを示している。その理由としては、樹冠上段部は乱流による混合度が非常に高いため、CO₂ が滞在する時間が短くなり、大気とのCO₂ 濃度の勾配を小さくする。さらに、その高さにおいて高い放射エネルギーによる葉面と大気との高い飽差は、気孔の閉に起因して光合成を低下させる。一方、樹冠の下層は少ない葉量は土壌からの呼吸によりCO₂ に対してソースとして働いていることを示す。さらに、低い放射エネルギーの流入もそ

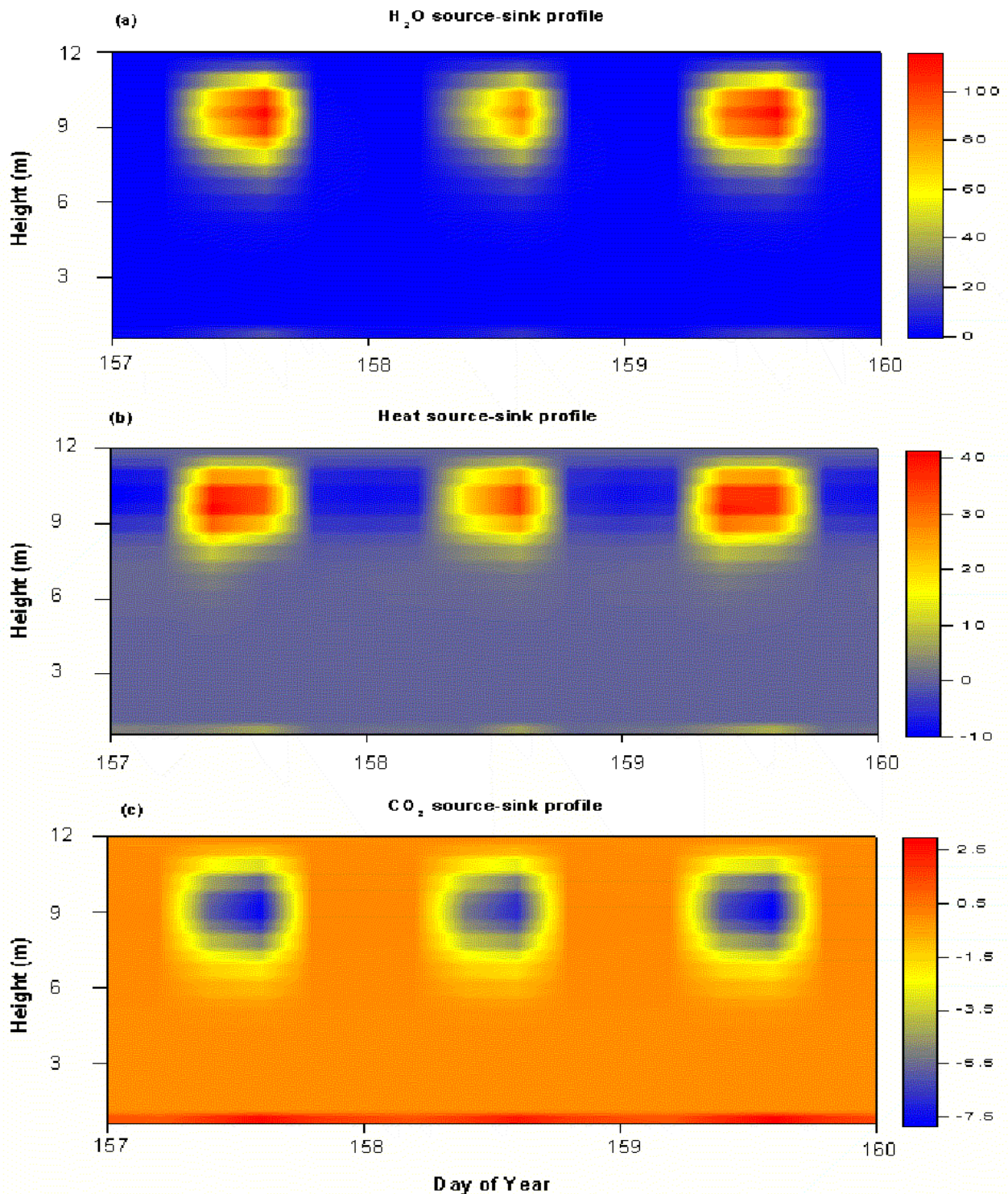


図 8. 熱、水蒸気及び CO₂ の時・空間スケールにおけるソース・シンクの鉛直分布

の原因の一つである。

現在 4 であるトヨタフォレストヒルズの LAI を 2 又は 6 に変化した時、樹冠構造を単層林と複層林に変えた時、および大気温度と CO₂ 濃度が増加した時の蒸発散量及び CO₂ 吸収量の結果を図 9 で示す。葉量の増加は放射エネルギーを多く吸収してそれを蒸発散に使用する。同時に、蒸発散量が多くなるにつれて顕熱が減少する。そのような現状がモデル計算によって明らかにされた。しかし、LAI が 2 に減少した時、蒸発散量は LAI 4 より約 10mm 多かった。LAI の減少は土壤への放射エネルギー

一の流入を増加して地面蒸発量の増加に起因することが明確になった。参考に、LAIの地面蒸発量はLAI 4より2倍多い371mmであった。計算時、葉面積以外の条件はすべて同一にした。葉面積指数2の差が蒸発散量にたいして年間約10mmの差をもたらすことが分かった。シミュレーションに用いられた各条件の中で蒸発散に対しては大気温度の増加が著しく影響することが分かった。温度の増加は飽差を大きくして蒸発散のポテンシャルを高めるためである。一方、CO₂濃度の増加はむしろ蒸発散量を低下させる従来の報告のような結果が確認された。樹冠構造の違いからは蒸発散に対して複層林より単層林の方が効率よいことが分かった。複層林の場合、葉が下層まで密に存在しているため、地面に流入する放射エネルギーが減少し地面蒸発量が減少する。反対に単層林においては林内の光環境が複層林よりよいため地面蒸発量の割合が大きくなるにつれ蒸発散量が増加する傾向がある。

葉面積指数が増加するにつれてCO₂吸収量も同時に増加したが、その増加率は4→6より2→4の方が大きかった。この結果は葉面積指数の増加による土壌呼吸量の減少によるものである。CO₂濃度や大気温度の増加もCO₂吸収量を増加させたが、温度増加がCO₂吸収量に対して著しく影響した。CO₂濃度と温度両者が同時に増加した時の増加率は温度増加による増加率より若干大きかった。CO₂吸収量に対する樹冠構造の変化の影響は気象条件の変化よりもっと顕著であったことを示している。複層林構造の場合、現在の森林より約130 g C m⁻²のCO₂を吸収していた。しかし、森林が単層林の構造を維持している時、CO₂吸収量は現在の林分が吸収する量の1/3しか吸収しないことを示した。単層林と複層林間では約400 g C m⁻²の差が見られた。このような大きな差は樹冠構造と光環境との関係からその原因がある。複層林構造は全樹冠層の約2/3が均等なLAIの分布を示している。そのため、葉が光を直接に吸収する確率が大きくなっている。すなわち、陽葉の割合が非常に大きい。これは光合成のポテンシャルが高いことを示唆する。しかし、単層林は樹冠層の50%以下は葉が存在しないと仮定した。そのため、土壌へ流入する光量が増加し、土壌呼吸量が著しく増加した。

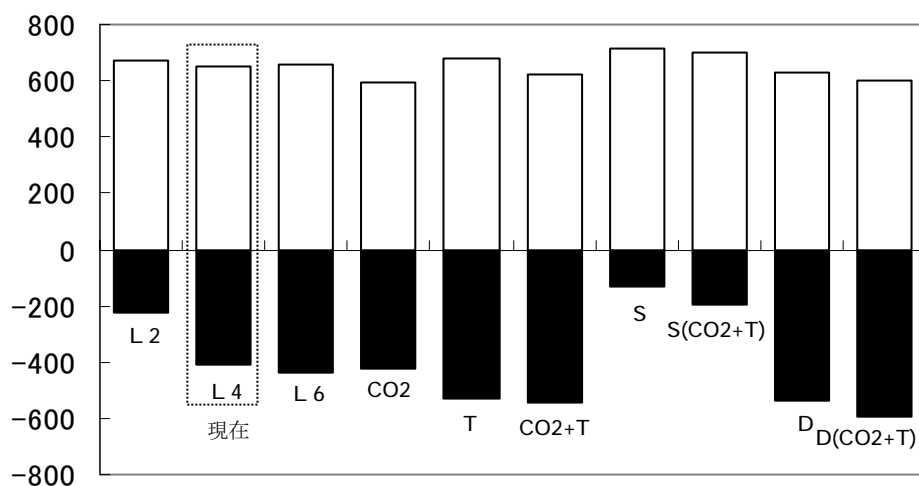


図9 LAI、気候及び樹冠構造の変化が蒸発散量（白棒、mm yr⁻¹）とCO₂吸収量（黒棒、g C m⁻² yr⁻¹）に及ぼす影響のシミュレータの結果。ここでLはLAI、CO₂は600ppmのCO₂濃度、Tは1.5°Cの大気温度の増加、CO₂+Tは温度とCO₂濃度両者の増加、Sは単層林、Dは複層林を意味する。

いくつかのシナリオに基づきシミュレートした結果、葉面積指数の変化は蒸発散よりCO₂吸収量に対してより大きく影響したことが分かった。気候変化の場合は大気温度の増加が蒸発散とCO₂吸収量の両者を同時に増加させる効果があることが確認された。特に、樹冠構造の変化はCO₂吸収量の対しては複層林構造が顕著な能力をもっていたが、単層林構造は逆に土壌呼吸量に好む環境を形成

し林分の CO₂ 吸収量を減少させる原因になった。これらの結果は、今後予想される気候変化や樹冠構造の変化に備えて、森林の管理法やその方向性を決定するに当たって有益な情報源になると考えられる。

3-3. 考察及びフェーズIIのまとめ

林分構造が土壌-植生-大気間における熱、水及び CO₂ 交換に及ぼす影響及び相互作用のメカニズムを解明・評価する数値モデルを構築し、その有用性を検証した。当モデルは従来開発されたモデルとは、林内外における微気象の計算モジュール、葉面における水収支の考慮や土壌における物理環境の計算などが異なる。そのような違いにより今まで評価困難であったいくつかのプロセスに関する評価が可能になった。例えば、モデル計算は降雨中にも植物は光合成を行い、CO₂ を吸収していると説明している。勿論、降雨強度や気候条件により CO₂ 吸収量は異なるが、降雨中には一時光合成が抑制され降雨後に光合成が急増する傾向が確認された。樹冠に遮断された降雨の蒸発は大気との飽差を減少し光合成を促進させる機能を果たすことが明らかになった。さらに、低い放射環境で行われている降雨遮断は顕熱の流入により増大することが分かった。さらに、大気の不安定条件で長波エネルギーの入出によって発生する逆転現象がモデルによって明確に表現された。

モデルはエネルギー収支やCO₂ フラックスの日・季節変化をよく表現したことが実測値との比較を通して確認した。1年間通してトヨタフォレストヒルズにおいて植物の蒸発散により消費されるエネルギーは 0.8 GJ m⁻²であった。さらに、林分によるCO₂ 吸収量は 410 g C m⁻² y⁻¹であった。トヨタフォレストヒルズの年間炭素吸収量は日本内の森林が吸収する 250~450 g C m⁻² y⁻¹ の範囲に分布するが、平均的に当林分の吸収量が若干大きい。その差は、モデルに用いた一部のパラメータの不正確性や既存のCO₂ フラックス計算時、降雨中のCO₂ フラックスを過少評価したことが原因として考えられる。この問題はこれから充分検討すべきである。しかし、貧弱な当林分の環境を考慮してみる時、当林分の炭素吸収量は決して少ない量ではない。このような現状を踏まえた上、今後予想される気候変化の影響をいくつかのシナリオに基づきシミュレーションを行った。計算結果によると、温度の増加は林分の蒸発散及びCO₂ 吸収を同時に増加させることが分かった。しかし、CO₂ 濃度の増加は林分のCO₂ 吸収量を増加させるが、蒸発散は減少させる従来の研究結果と一致する結果が得られた。一方では森林始業により林分構造の変化を想定して計算した結果、林分の複層林構造は炭素吸収に優れた能力をもっていることが明確にされた。さらに複層林構造の時、大気温度とCO₂ 濃度の同時増加は現在の林分より約 180 g C m⁻² yr⁻¹の炭素を吸収することが分かった。また、葉面積指数のみの変化は炭素吸収又は蒸発散量に大きくは影響しないことも確認した。

モデルは多層構造を持っているため、林内外における微気象環境の形成や諸プロセスの発生量の評価が可能である。ある特定期間に対する計算によると林分による熱、水分および CO₂ のソース・シンクの最大値が発生する高さがそれぞれ異なることが分かった。すなわち、熱、水分及び CO₂ に対する粗度高がそれぞれ異なることの意味である。これは、従来エネルギー収支の計算時、熱、水及び CO₂ に対する空気力学的抵抗を同一に仮定した計算法の間違いを指摘することになる。各ファクタのソース・シンクプロファイルからは熱と水分は同様の分布型を示している反面、CO₂ のプロファイルは林分構造と有意なパターンを表した。この結果は、CO₂ 吸収は葉量に左右されることを示唆する。

4. 成果の達成度

落葉広葉樹が優占しているトヨタフォレストヒルズ内に試験流域を設け、降雨から流出までの一連の水循環プロセスの時空間変動あるいは特異現象を明らかにするために、ある特定領域でのプロセス

を特化した研究から個々の因子の相互関連を検出する研究へと転換する観測システムを構築した。この観測システムを用いる長期観測を通して流域の水、物質およびエネルギー収支の日、季節及び経年変化やその特性などが定量化できた。さらに、他流域との比較ができ本流域の場合、都市とのかかわりが深く森林からの多量の蒸発散により都市の熱環境を緩和する現状が把握できた。また、流域における水・物質やエネルギー収支と樹冠構造との関係や今後予想される気候変化が流域の諸プロセスへの影響を評価、及び他流域への適用が可能なモデルを構築し、そのモデルの有用性を検証した。モデル計算からは、樹冠構造が熱、水蒸気及び CO₂ の大気との交換に異なるメカニズムで影響することや気候変化が諸プロセスに及ぼす影響の定量化ができた。さらに、樹冠構造変化と諸プロセスとのシミュレーションからも将来を備える意味でこれからの森林の管理のあり方に対しての有益な情報の提供ができた。しかし、森林は広域に分布しているため、異なる気候や地理的環境によりそれぞれ異なる環境機能を所有する。本事業を通して構築した観測システムやモデルは広域的森林への適用に限界があり、追加的研究が要される。

5. 今後の課題

上記したように森林は広域に分布している。そのため、地理的及び気候環境が異なる。そのような違いが諸プロセスに及ぼす影響を評価するためには、気候、地理的環境及び林分構造の違いを考慮した分布型多層モデルの開発を進める必要がある。従来のモデルの中、分布型水文モデルは多数存在しているが、地上の植物圏を多層に分割して林分構造の影響を考慮したモデルはほとんどない。その上、それぞれの森林において水文プロセスが地域環境へ及ぼす影響を定量化する広域モデルへの発展させる必要がある。GCM のような地球モデルでは地上部の生物圏におけるプロセスをモデル化してそのプロセスが地球スケールでの気候形成に及ぼす影響を評価したが、ある地域スケールにおいて気候に対する森林の影響を評価するモデルは少ない。そのため、愛知県の里山のように特殊な環境にある森林の役割を評価するためには森林構造を考慮した地域スケールのモデル開発が要求される。