

## 論文内容の要旨

森林科学 専攻

平成 19 年度博士課程 入学

氏 名 五十嵐 康 記

指導教員名 鈴木 雅 一

論文題目 Studies on heat, water and carbon exchanges between atmosphere and forest at a tropical deciduous forest in Northern Thailand

(タイ北部・熱帯落葉林における大気-森林間での熱・水・炭素交換に関する研究)

本研究は、雨季・乾季がある熱帯季節林気候下の熱帯落葉林を対象とし、大気-森林間での熱・水・炭素交換の季節変動・年々変動について、複数年での現地観測と展葉と落葉により葉量が変化することを組み込んだ蒸発散モデルを構築し、明らかにするものである。

第 1 章では、熱帯林における大気-森林間での熱・水・炭素交換研究を整理した。また、落葉林特有の季節変化が熱・水・炭素交換に与える影響について温帯林を含む既存研究を整理し、本研究の目的を提示した。通年で太陽放射エネルギーが大きい環境下に成立する熱帯林は、潜熱の供給源として地域や地球の気候形成に影響する。また、気候変動に伴う地球規模での水・炭素循環の変化を予測する上でも、熱帯域での大気-森林間での熱・水・炭素交換研究は重要である。近年、数十分から年までの幅広い時間スケールで大気-森林間での熱・水・炭素交換を直接計測できる渦相関法を用いた研究が世界各地でおこなわれてきた。しかしながら、アジアの熱帯落葉林においては、大気-森林間での熱・水・炭素交換

の季節変動・年々変動が未解明であった。同地域ではモンスーンの開始と終了のタイミングが変化する影響で、落葉林の蒸散量を決める着葉期間が年々で変動することが現地観測により明らかにされており、降雨量の他に着葉期間の長さが蒸発散量を規定する大きな要因と考えられる。その影響を定量的に評価する事が熱帯落葉林での蒸発散を理解する上で重要である。さらに、温帯の落葉林では、葉の成熟・老化のプロセスが特に炭素交換に大きく影響することが既存研究から示されている。しかし、熱帯の落葉林において、葉の成熟・老化が群落の熱・水・炭素交換にどのような影響を与えるのかについては未解明のままである。本研究では、大気-森林間での熱・水・炭素交換を直接計測できる渦相関法を用い、熱帯落葉林における熱・水・炭素交換の季節性と年々変動について、複数年での現地観測とモデル構築による解明を目的とした。この目的を達成するため、タイ北部において代表的な落葉樹であるチークの一斉人工林を研究対象とした。対象試験地は樹種構成が単純であるため、葉面積(LAI)の季節変化が大気-地表面の相互作用に与える影響を明確に示す事ができる。

第 2 章では、本研究で対象とするタイ北部ランパン近郊に位置するタイ林業公社のメーモ・チーク人工林(以下、メーモ)の試験地及び気象観測と渦相関法による観測の概要を述べた。チーク林は 1968 年に植栽され、植栽密度、平均樹高、平均胸高直径は、それぞれ 400 木 ha<sup>-1</sup>、21.0 m、23.5 cm (2012 年 2 月毎木調査)である。熱帯落葉林における蒸発散量・光合成量に影響する要因を明らかにするため、2006 年 3 月から 2012 年 2 月までの 6 年分の一般気象(降雨、放射 4 成分、気温、大気飽差、風速)・土壌水分観測と、葉面積(LAI)の季節変化と年々変動の実態を明らかにした。観測期間中の平均年降水量とその標準偏差は 1415.5 ± 296.8 mm であった。年間降水量の 58.6%は日降水量が 40mm を超えるイベントによりもたらされていた。毎年の葉面積(LAI)の最大値は 2.8 から 3.2 となり、展葉完了後の樹冠はほぼ閉鎖された状態であった。また、40 m 高の観測タワーにおける渦相関法によるフラックス計測の妥当性も検討した。スペクトル解析を用い樹冠上フラックスの品質チェックをおこない、顕熱・潜熱・CO<sub>2</sub> フラックス、運動フラックスの計測が適切に行われたことを確認した。フットプリント解析の結果から、日中の顕熱・潜熱・CO<sub>2</sub> フラックスの放出・吸収源の大部分は対象としたチーク人工林からであることを確認した。渦相関法によるフラックス計測では、計算された顕熱・潜熱フラックスの和が純放射に対し過小になるというエネルギーインバランス問題が知られており、メーモで観測された顕熱・潜熱フラックスの和は純放射に比べ約 30%過小評価であった。この割合は季節や年によらずほぼ一定であった。顕熱・潜熱フラックスはインバランス補正をおこない 3 章以降の解析に使用した。

第 3 章では、森林からの蒸散を制御する気孔コンダクタンスの季節性と年々変動とその制御要因を明らかにした。純放射は LAI に対応し樹冠と林床へ配分されると考え、樹冠と林床それぞれから放出される潜熱を推定した。落葉時 (LAI = 0) について、林床面蒸発モデルを構築し、着葉時期には樹冠上で計測される潜熱から林床面蒸発(E<sub>ts</sub>)を引くことで樹

冠における蒸散量(Etc)を推定した。Etc からチーク人工林の群落コンダクタンス(Gc)と単位葉面積あたりの気孔コンダクタンス(gs)を推定した。その結果、LAI の最大値は毎年ほぼ一定であるにも関わらず、雨季最中の gs は土壌水分と気象条件により年々変動を示した。大気飽差(VPD)が 1kPa 時の基準となる気孔コンダクタンス( $g_{Sref}$ )と、土壌水分との間には明瞭な正の相関がみられ、土壌水分が gs の季節変化と年々変動に大きく影響していることが示された。また、着葉期間を前期・中期・後期に 3 区分し、gs と VPD との応答関係を求めた結果、最も土壌水分が高い着葉期間・中期は、他の期間に比べ VPD に対する gs の応答が鈍くなっていた。

第 4 章では、Big-leaf モデルを用い 6 年分の蒸発散量を推定し、年蒸発散量とその年々変動に与える降水量、着葉期間の影響を検討した。Big-leaf モデルでは、粗度長( $z_0$ )、地面修正量( $d$ )を用い樹冠上の風速から空気力学的抵抗( $R_a$ )を求め、第 3 章までで明らかとなった  $g_a$  の環境応答を Jarvis 型の気孔コンダクタンスモデルとして Big-leaf モデルへ組み込み、遮断蒸発は Rutter モデルを使用した。乱流観測の結果から求めた  $z_0$  と  $d$  は、LAI の季節変化に関わらず通年でほぼ一定であった。よって Big-leaf モデル中では  $z_0$  と  $d$  を、それぞれ 1.93 m と 20.73 m として、通年で与え計算をおこなった。気孔コンダクタンスモデルでは gs を算出する関数について、日射( $S_d$ )、VPD、10cm から 60cm 深さの土壌水分( $\Theta_{0-60}$ )、気温( $T_a$ )を変数とし、変数を順次増やし観測値とモデル値との残差を比較し、係数を決定した。その結果、 $S_d$ 、VPD、 $\Theta_{0-60}$  の 3 変数の場合が最も誤差が少なくなった。メーモで別途なされた遮断量計測の結果、LAI の大小に関わらず樹冠遮断率は通年でほぼ一定であった。よって、樹冠遮断蒸発モデル中のモデルパラメータである単位 LAI 当たりの樹冠貯留量( $S_{cmax}$ )は観測された年遮断量が再現されるように求めた。その結果、 $S_{cmax} = 0.26 \text{ mm}$  とした場合に観測された年遮断量との誤差が最も小さくなった。このモデルによる蒸発散量の計算値は、タワーで観測された潜熱フラックスの日変化、季節変化を良好に再現した。タワーで観測された潜熱フラックスが欠測の期間を含め Big-leaf モデルの計算は 10 分毎におこなった。6 年分の蒸発散量を積算した結果、蒸発散量、蒸散量、地表面蒸発量、遮断蒸発量の年平均値と標準偏差はそれぞれ  $1154.6 \text{ mm} \pm 105.1 \text{ mm}$ 、 $792.1 \text{ mm} \pm 89.4 \text{ mm}$ 、 $256.6 \text{ mm} \pm 19.5 \text{ mm}$ 、 $105.9 \text{ mm} \pm 18.4 \text{ mm}$  となった。本試験値の蒸発散量は、同じ気候下に位置し同等の降水量があるカンボジア中部や中国南部で報告されている結果と近い値を示した。メーモの蒸発散量(ET)は、年降水量と LAI > 0.2 の期間で定義した着葉期間の長さ(GSL)と年降水量( $P_G$ )の影響を受けて年々変動している。ET を  $P_G$  と GSL の 6 年平均値からの偏差 ( $\Delta P_G$  と  $\Delta GSL$ ) で回帰し、 $ET = 0.10 \Delta P_G + 4.96 \Delta GSL + 1154.60$  ( $R^2 = 0.91$ ) を得た。この回帰式により  $P_G$  と GSL、2 つの変数がそれぞれ 6 年間の観測記録から得た標準偏差 ( $1\sigma$ ) だけ変動した時に想定される年蒸発散量の変化量を求めると、それぞれ 30.05 mm、83.45 mm 変動するという結果を得た。既存研究と同様に、この森林においても年蒸発散量は年降水量によって増減するが、それに加えて着葉期間の長さの年々変動が寄与し、着葉期間の長さの年々変動の影響が大きいことが定量的に示された。

第5章では、熱帯落葉林における大気-森林間での水・炭素交換の季節性を明らかにした。純生態系交換量(NEE)は、潜熱同様、雨季開始とともに上昇した。その後、雨季後半では潜熱低下より先に NEE が低下していた。群落光合成能の季節変化をみるため、月毎に光-光合成曲線の係数を決定し、最大光合成速度(Pmax)を求めた。その結果、Pmax は展葉完了の約1か月後を最大として雨季の間は漸減し、雨季後半の潜熱低下が現れる1か月前から急激に低下した。雨季の間中は、日射、気温、飽差、土壌水分はほぼ一定であり潜熱も季節変化を示していなかった。以上の事から、雨季最中の Pmax 低下を説明する要因として葉の老化が示唆された。落葉林では葉の成熟・老化は特に光合成の季節変化に大きく作用するという既往研究とも整合する結果となった。今後、熱帯落葉林の炭素交換をモデル化するには、葉の成熟・老化過程をサブモデルとして組み込んだ光合成モデルの構築が必要であると考えられる。

本論文を総括して第6章とした。本論文は、アジアモンスーン気候下にある熱帯落葉林の水収支について、葉面積の変化を反映した蒸発散量推定モデルを構築し、年蒸発散量を求め、その年々変動を形成する要因として、年降水量とともに着葉期間の長さがあり、年降水量よりも着葉期間の長さの影響が大きいことを明らかにした。また炭素交換については、葉の成熟・老化が群落の光合成能力の季節変化に大きく寄与している可能性が示唆され、熱帯落葉林においては樹冠状態の季節・年変化が大気-森林間での熱・水・炭素交換に強く影響していることを明らかにした。