

現地調査に基づくチーク人工林の水・炭素循環研究

田中延亮

1. 研究の背景

チーク材は耐久性、抗虫性、耐水性、加工性の面で優れており、家具、船舶、住宅の用材として用いられ、熱帯産の高級材の一つである^{1,2)}。天然のチークの分布域は、インド、ラオス、ミャンマー、タイといったアジアの熱帯モンスーン地域とされている¹⁾。天然のチークは、主に混交落葉林 (Mixed deciduous forest) と呼ばれる森林の一構成樹種として生育しているため、上に挙げた4カ国では、ふるくから、混交落葉林から択伐するという形で、チーク材の生産がおこなわれてきた²⁾。その後、主に1980年代の各国での禁伐令の施行により、現在では、ミャンマー以外の国では、天然林からのチークの択伐による施業はおこなわれていない²⁾。チークは、造林による材の生産が比較的容易なことから、かつての択伐に代わって、現在のチーク材の生産の主力は人工林によるものに移っている。現在では、上記4カ国だけでなく、インドネシアをはじめとする他のアジアの熱帯域、中南米やアフリカの熱帯域、オセアニア地域にも、チーク人工林が導入されるに至っている^{1,2,3)}。FAOの統計²⁾によれば、1970年代には13,000 km²程度であった世界のチーク人工林の総面積は、2010年には、少なくとも見積もっても43,464 km²まで増加したとされている。この増加の背景には、上で述べた各国の禁伐令が施行された影響があると思われる。同統計でのチークの人工林面積が大きい国を順に挙げると、インド (16,670

km²)、インドネシア (12,690 km²)、ミャンマー (3,900 km²)、ガーナ (2,140 km²)、ナイジェリア (1,460 km²)、タイ (1,280 km²) となっており²⁾、アジア地域が世界の人工林によるチーク材の生産において重要な位置を占めていることがわかる。

チーク人工林を造成する主目的は、商品価値の高い材を生産することにある。ただし、上で述べたような近年のチーク人工林の面積的增加を考慮すると、チークの造林が周辺の大気・水文環境、あるいは、生物相に与えるインパクト^{1,4)} について科学的に検討して、負のインパクトがある場合には、それを緩和するような方策を提示し、造林計画や管理計画の立案にフィードバックしてゆくことが、今後、周辺環境に配慮したチーク人工林経営には不可欠といえる。また、一般的なチーク人工林のような一斉造林地は、病虫害被害への脆弱性が高いとされ¹⁾、この点についても検討しておく必要がある。筆者は2000年から、東京大学のほか、(独)海洋開発研究機構、京都大学、名古屋大学、タイのカセツァート大学の研究者グループの一員として、タイ北部のチーク人工林の水・炭素循環について、長期に渡った現地調査を続けてきた。ここでは、一連の長期研究で得られた結果の概要と今後の課題について整理したい。

2. 試験地と調査項目の概要

本研究の対象地は、タイ北部のランパン県のメモプランテーションに位置する (図1)。同プラン

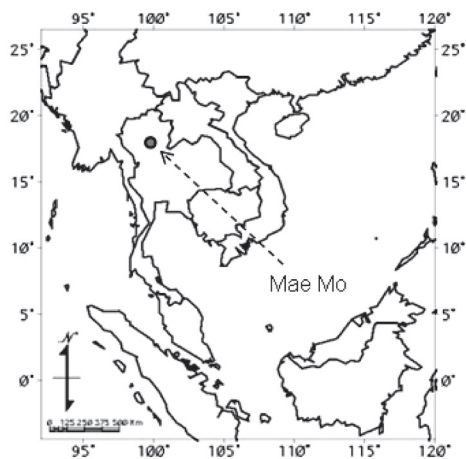


図1 メーモ試験地 (Mae Mo) の位置

テーションは、タイの林業公社 (Forest Industrial Organization) によって、タイ全土に展開されているプランテーションの一つであり、一部の他樹種による試験的な造林を除いて、同プランテーションの面積 (約 2400 ha) のほとんど全てがチーク造林地となっている。1968年にチークが植栽された林分 (以下、メーモ試験地、植栽木の胸高直径と樹高の平均は、それぞれ約 30 cm と約 20 m) において、1996年から東京農工大学による森林微気象に関する学術調査⁵⁾が実施されていたが、同試験地において、上述の研究者グループによる森林水文に関する予備的な調査が2000年から、また、本格的な調査が2004年から順次開始された。その調査項目は、チーク人工林における降水・蒸散・樹冠遮断といった水文過程、森林タワーを用いたチーク樹冠上と樹冠内の物理環境 (日射量、温湿度、風速)、林分スケールでの葉量、同タワーを用いた大気-森林間の熱や二酸化炭素の交換量 (フラックス) などである。

2001年から2008年のメーモ試験地における年降水量と年平均気温は、それぞれ 1361 (±243) mm と 25.4 (±0.3) °C である (括弧内は8年間の標準偏差)。その季節変化を見ると (図2)、年降水量の多くは4月から10月の雨季に集中しており、1月から3月および11月から12月の乾季には、月降水量が 50 mm 以下になることがわかる。また、雨季

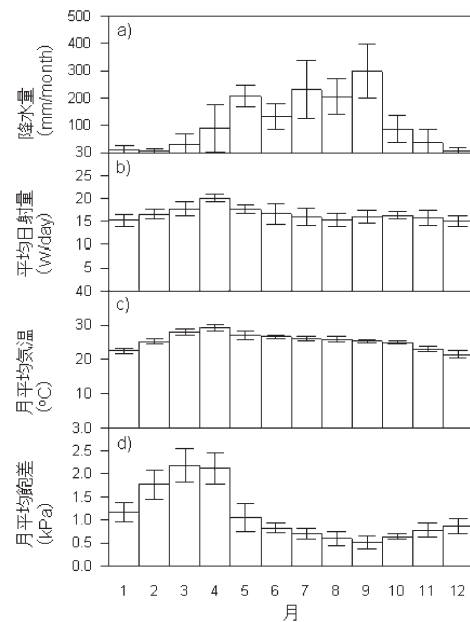


図2 メーモ試験地の a) 降水量, b) 日射量, c) 気温, d) 大気飽差の季節変化
各項目とも2001年から2010年の平均値を棒グラフで、標準偏差をエラーバーで示した。

の開始と終了時期にあたる3月、4月、11月の月降水量の平均値と標準偏差の値はほぼ同等であり、両時期の降水量は年によって大きく変動することもわかる (図2)。気温は、わが国のような温帯地域ほど明瞭な季節変動は示さないが、それでも、乾季前半が低く、乾季后半に急激に上昇し、雨季を通してゆっくり低下するという季節変化を示す。また、飽差については、乾季后半の気温上昇に伴って急激に上昇するというパターンを示す (図2)。これらの気象の季節変化は、いわゆる熱帯モンスーン気候下の森林気象の典型的なパターン⁶⁾といえる。また、落葉性樹木であるチークの葉フェノロジーは、このような気象の変化とおおむね対応している。すなわち、雨季には着葉し、乾季に落葉するというパターンを示す (写真1)。

3. 現在までに得られた成果

3-1 フラックスの季節変化

メーモ試験地での一連の研究成果を理解するため

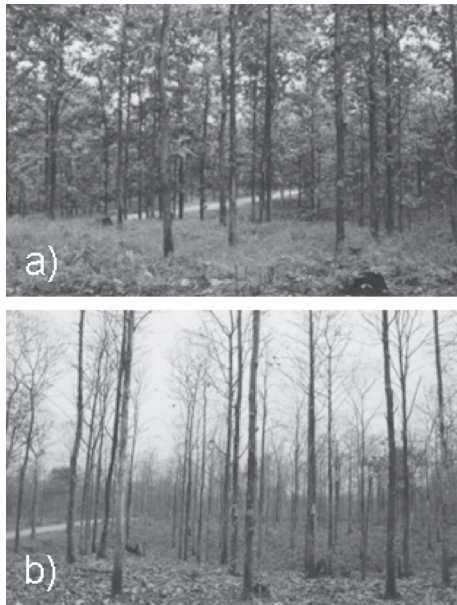


写真 1 メーモ試験地のチーク人工林の a) 着葉期と b) 落葉期の様子

の基礎として、まず、同試験地の潜熱（水蒸気）と二酸化炭素フラックスの単年の季節変化について述べる。図3は、メーモ試験地で2006年に観測された顕熱、潜熱、二酸化炭素フラックスの季節変化を林分スケールでの葉量変化等と共に示したものである⁷⁾。上で述べたように、林分スケールでの葉量は、雨季の開始後に増加し、乾季に入るとしばらくすると減少することがわかる（図3）。また、同試験地に入力される純放射量の配分先として、雨季には主に蒸散や土壌面蒸発を起源とする潜熱（水蒸気）フラックスが卓越する（図3）。一方、葉量が低下し、降水量の少ない乾季には、純放射量の多くが顕熱フラックスに配分される（図3）。このことは、チーク人工林の葉量とそこからの潜熱フラックスが密接に関係していることを示しており、一見、当然の結果のようだが、同じ気候下に成立する常緑タイプの森林では乾季に潜熱フラックスが高くなること^{8,9)}と対比すると興味深い。

図3に示されたメーモ試験地の二酸化炭素フラックス（純生態系交換量、NEE）をみると、雨季前半においては、葉量増加に伴ってNEEが減少する

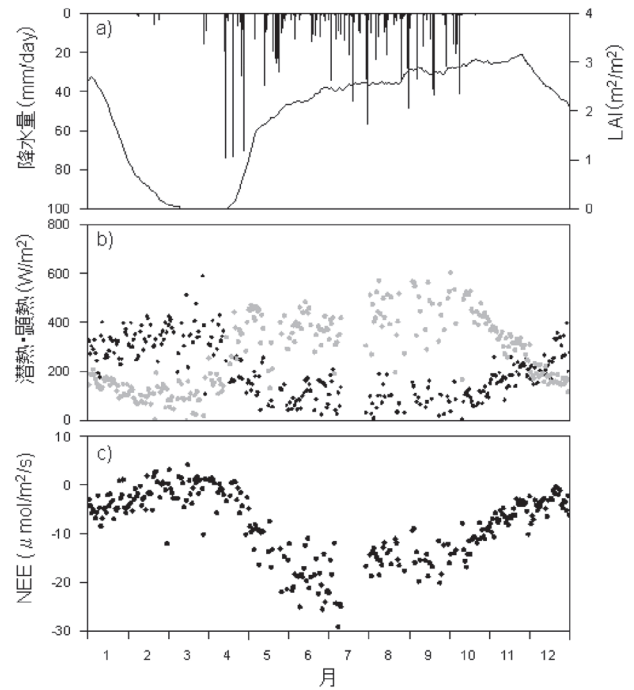


図3 2006年に観測されたチーク人工林の a) 降水量とLAI, b) 大気への顕熱（黒点）と潜熱（灰点）フラックス, c) 純生態系交換量 NEE^{注1)} (Igarashi, Y. *et al.*, 2012 を一部改変)

が、雨季中盤から後半にかけては、主に蒸散や土壌面蒸発を起源とする潜熱フラックスが高いレベルのまま維持される一方で、日中のNEEが増加してゆることがわかる。フラックス調査とは別に実施したメーモ試験地の土壌呼吸量の調査から、同試験地では、雨季全体を通して土壌呼吸量が高く維持されることがわかっていることから¹⁰⁾、生態系呼吸量が雨季後半に上昇するとは考えにくい。したがって、ここで観測された雨季中盤からの日中のNEEの増加は、雨季（着葉期）中盤から後半にかけて、光合成による総一次生産量が低下し、チークの水利用効率が低下することを示唆するものである。現在、メー

^{注1)} NEEは生態系呼吸量から総一次生産量を差し引いたものであり、正の値は生態系から大気への二酸化炭素の放出、負の値は吸収を示している。NEEについては、夜間データを除外し、日中データのみをプロットしている。

モ試験地では、チークの個葉レベルの蒸散・光合成特性を通年調査して、この点について検証する取り組みが実施されている。

3-2 着葉期間の年々変動

メーモ試験地における長期の葉量変化の調査結果から、1年のうちチークが着葉している期間の長さ(以下、着葉期間長)が、年々、大きく変動していることがわかってきた。その変動幅は2001年から2004年のわずか4年間で40日もあり、既往研究が温帯落葉林について報告してきた変動幅と比較すると、その変動幅は非常に大きかった¹¹⁾。前節で述べたように、チーク人工林の葉量変化は、そこでの水・炭素循環過程に大きな影響を及ぼすことから、着葉期間長の年々変動は、年間の蒸発散量や二酸化炭素フラックスが大きく変動することを示唆する。そこで、着葉期間長の年々変動と気象要因の応答関係を検討した結果、雨季の開始と終了の時期の年々変動が大きく、その変動に応じて、各年の着葉期間長が決まっていることがわかった。すなわち、雨季の開始が早く、雨季の終了が遅い年ほど、着葉期間が長くなる傾向があることがわかった。これは、熱帯モンスーン気候を代表するフタバガキ科の落葉樹の葉フェノロジーが、単に降水量や土壌水分の季節変化だけでは説明できないこと¹²⁾とは対照的な結果である。

最近では、メーモ試験地におけるチークの展葉時期の年々変動についての理解がさらに深まっており、1) 各年の雨季開始時期のチークの展葉とそれに伴う蒸散開始日は、同時期の土壌水分データや降水量データを用いて精度良く再現できること¹³⁾、2) 雨季の開始が早く展葉開始日が早い年は、雨季が本格的になるまでに一時的な早魃が起こりやすく、展葉が完了し林分スケールでの葉量が一定になるまでの日数が長くなること¹⁴⁾、3) 展葉開始日が早い年には、展葉後に虫の食害を受けるケースが多く、結果として、当該年の林分スケールの葉量は少なくなる傾向があること¹⁴⁾、4) 例えば2月などのように、あまりにも早い時期の降水では、チークは展葉に至らないことがわかってきている。現在、メーモ試験

地では、乾季後半にチークに対して人為的に灌漑操作を加えることにより、チークの葉フェノロジーに対してどのような影響が現れるかを調査中である。

3-3 年蒸発散量

着葉期間長の変動に伴う、チーク人工林の年間の蒸発散量やNEEの変動幅について、多層植生モデルを用いた数値シミュレーションにより予測することは可能であった¹⁵⁾。そのうち年間蒸発散量については、2006年から2011年の6年間のタワーで実測された潜熱フラックスデータと樹冠遮断量の調査結果から、その実態を検討することができた(表1)。降水量と蒸発散量のバランスを年毎に見ると(表1)、比較的少雨であった2007年~2010年の4年間において、降水量の大部分は蒸発散量となっており、チーク人工林が下流域に供給する水資源賦存量は年間100mm程度であることがわかる。一方で、2006年と2011年の多雨年における年蒸発散量の大きさは少雨年のそれと大きな差はなく、結果として、水資源賦存量の大きさは少雨年の5倍以上(500mm以上)であった。また、各年の年蒸発散量は、年降水量よりも着葉期間長との相関は高く(図4)、前節で述べたような各年の着葉期間長を用いて年蒸発散量を予測する道筋が見ついた。以上の結果は、少雨

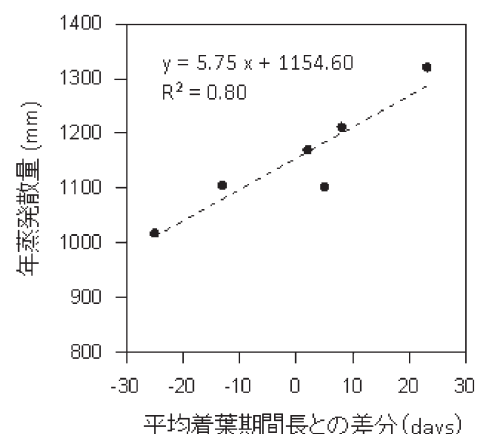


図4 チーク人工林の年蒸発散量と着葉期間長の関係 (Igarashi, unpublished を一部改変) 横軸は各年の着葉期間長を、その6年間平均値からの差分で表している。

表 1 チーク人工林の6年間の降水量, 蒸発散量, 着葉期間長 (Igarashi, unpublished を一部改変)

年 ^{注2}	2006	2007	2008	2009	2010	2011
降水量 (mm)	1720.4	1130.2	1204.7	1306.5	1278.9	1852.4
蒸発散量 (mm)	1104.4	1017.6	1102.7	1211.5	1170.1	1321.3
成長期間長 (days)	297	285	315	318	312	333

年と多雨年のそれぞれで, また, 着葉期間長の長い年と短い年のそれぞれで, チーク人工林がどの程度の水を利用し, どの程度の水資源を下流に供給しているかを示しており, 今後のチーク人工林の造林計画や下流の河川管理計画を策定する上で, 貴重な情報を提供できたといえる。

4. 今後の課題など

メモ試験地での10年以上にわたる長期観測の結果から, チーク人工林では, 降水量の季節変化の年々変動に応じて, チークの展葉・落葉のタイミングが年々変動し, 結果として, 年蒸発散量に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。炭素循環については, 本稿では季節変化を紹介するにとどまり, 年間 NEE 値については言及しなかった。その理由の一つは, フラックスの観測における, いわゆる夜間データの取り扱いの難しさにある。チーク人工林の NEE の理解は, 同森林による大気中の二酸化炭素の吸収量評価のために重要な情報であり¹⁶⁾, また, チーク人工林経営の本来の目的と関係の深い材成長量の評価にも間接的に役立ってゆく情報と考えられる。夜間データの取り扱いに関する問題を解決し, NEE を定量的な数値を提示することが課題となっている。

本稿で述べたことの多くは, メモ試験地というタイ北部地域にある「固定されたチーク人工林サイトでの事例研究」と位置づけることができる。冒頭で述べたように, チーク人工林の造林計画や管理計画へ科学的知見をフィードバックさせるという立場

に立てば, 固定サイトの事例研究だけではなく, 固定サイトで得た結果の広域性と普遍性についても検証すべきであろう。ここで, 本稿冒頭のチーク人工林面積の統計値をあらためて概観すると, チーク人工林面積が圧倒的に大きい国はインド, インドネシア, ミャンマーの3カ国であり, メモ試験地が立地するタイは, 世界で6番目であるに過ぎない。今後は, 本稿で述べたような, 降水量の季節変化の年々変動に伴うチーク人工林の着葉期間長の変動が, 上に挙げた3カ国が保有する広大なチーク人工林についてもあてはまるのかどうかについて解明してゆく必要がある。

謝 辞

本稿で紹介した研究は, 科学研究費 (24405031, 24310018) の補助を受けたものである。本稿作成にあたり, 鈴木雅一博士 (東京大学) との議論の内容を参考にさせていただき, また, 五十嵐康記 (名古屋大学) 氏からは作図等で多大なるご協力をいただいた。本稿で用いた長期データの収集やその後のデータプロセスにおいて, 吉藤奈津子博士 (京都大学), 久米朋宣博士 (台湾大学), 佐藤貴紀氏 (東京大学), 田中克典博士 ((独)海洋開発研究機構) タンタシリル・チャチャイ氏 (カセツアート大学) にご協力をいただいた。記して感謝いたします。

〔引用文献〕 1) Pandey, D. and Bworn, C. (2000) Teak : a global overview. *Unasylva* 201, 3-13. 2) FAO (2012) Teak resources and market assessment 2010. *Working Paper FP/47/E*, Forestry Department of FAO, Rome, Italy. 3) Krishnapillay, B. (2000) Silviculture and management of teak plantations. *Unasylva* 201 : 14-21. 4) Niskanen, A. (1998) Value of external environmental

^{注2}年の区切りは, 毎年のチークの落葉がほぼ完了する2月末日とした。例えば, 2006年の場合は2006年3月1日~2007年2月末日の間の1年間を示す。

- impacts of reforestation in Thailand. *Ecol. Econom.* 26 : 287-297.
- 5) Attarod, P. *et al.* (2006) Estimation of crop coefficients and evapotranspiration by meteorological parameters in a rain-fed paddy rice field, cassava and teak plantations in Thailand. *J. Agric. Meteorol.* 62 : 93-102.
- 6) Tanaka, N. *et al.* (2008) A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions. *Agric. Forest Meteorol.* 148 : 807-819.
- 7) Igarashi, Y. *et al.* (2012) Seasonality of water and carbon dioxide exchanges at a teak plantation in northern Thailand. *Ecohydrol.* 6 : 134-141.
- 8) Tanaka, K. *et al.* (2003) Transpiration peak over a hill evergreen forest in northern Thailand in the late dry season : assessing the seasonal changes in evapotranspiration using a multilayer model. *J. Geophys. Res.* 108 (D17), 4533, doi:10.1029/2002JD003028.
- 9) Nobuhiro, T. *et al.* (2009) Evapotranspiration characteristics of a lowland dry evergreen forest in central Cambodia examined using a multilayer model. *J. Water Resour. Protection* 1 : 325-335.
- 10) Kume, T. *et al.* (2012) Soil respiration in response to year-to-year variations in rainfall in a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Ecohydrol.* 6 : 134-141.
- 11) Yoshifuji, N. *et al.* (2006) Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Forest Ecol. Manag.* 229 : 333-339.
- 12) Elliott, S. *et al.* (2006) Leaf flushing during the dry season : the paradox of Asian monsoon forests. *Glob. Ecol. Biogeograph.* 15 : 248-257.
- 13) Yoshifuji, N. *et al.* (2011) Interannual variation in transpiration onset and its predictive indicator for a tropical deciduous forest in northern Thailand based on 8-year sap-flow records. *Ecohydrol.* 4 : 225-235.
- 14) Tanaka, K. *et al.* (2011) Interannual variation in leaf expansion and outbreak of a teak defoliator at a teak stand in northern Thailand. *Ecol. Appl.* 21 : 1792-1801.
- 15) Tanaka, K. *et al.* (2009) Water budget and the consequent duration of canopy carbon gain in a teak plantation in a dry tropical region : Analysis using soil-plant-air continuum multilayer model. *Ecol. Modell.* 220 : 1534-1543.
- 16) Takahashi, M. *et al.* (2012) Carbon cycling in teak plantations in comparison with seasonally dry tropical forests in Thailand. *More than Just Trees* (eds.) Juan, A. and Blanco, A., InTech.