

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23405027

研究課題名(和文) 乾燥地における植林が地域の水収支に与える影響についての研究

研究課題名(英文) Study on the effects of reforestation on the local water balance in dry land

研究代表者

吉川 賢 (YOSHIKAWA, Ken)

岡山大学・その他の研究科・教授

研究者番号：50166922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：砂漠化する地域の森林は住民の生活に欠かせないが、森林は大量の水を使うので地域の水収支への影響が懸念される。そこで、ケニアのキツイ県で天然林の構造と人工林の生育経過と水収支を測定した所、地域の環境は多様で高密度な林分を維持できるものであり、高密度の植栽でも旺盛な成長が継続された。しかし、林床蒸発量は林冠の状態の影響を大きく受け、林分蒸発量は地域の降雨量と比べてかなり高いことも判明した。

研究成果の概要(英文)：Whereas dryland forests are important as woody materials for local people, a great amount of water exploitation by forest trees has a serious effects on the local water balance. Investigation on the structure of natural forests and the growth and the water balance of artificial forests in dry land of Kenya revealed that the environmental condition in Kenya dryland could support big natural forest with high density and high biodiversity. Moreover, trees planted in high density could grow vigorously for long period. However, the amount of evaporation from forest floor was controlled by the condition of canopy and the amount of transpiration from artificial forest showed very high value in comparison with the annual precipitation.

研究分野：樹木生理生態学

キーワード：ケニア アカシア メリア 半乾燥地 蒸散量 植林適地 ガイドブック

1. 研究開始当初の背景

アフリカの乾燥・半乾燥地では、植生の過剰利用による砂漠化・土地荒廃が広域で急速に進んでいる。1972年にUNEP(国連環境計画)の本部がケニアのナイロビに設置され、本格的な国際協力による砂漠化防止活動が始まったが、まだ砂漠化の進展が阻止された地域は限られている。住民の協力を得て、様々な方策が実施されているが、まだ砂漠化対策技術には改善の余地が大きく残っている。さらに、社会状況の変化(グローバル経済化)や人口増加で砂漠化土地の増加傾向にはいっこうに歯止めがかかる気配はない。

砂漠化対策としては人為的な作用を軽減することが第一義的に求められるが、いったん劣化した脆弱な乾燥地の生態系では、環境そのものが変化してしまっているため、砂漠化を引き起こした要因を取り除くだけでは、元に戻ることはない。人為的な働きかけを行って元の状態に修復をしなければならぬ。そのために最も有効な手段が緑化植栽である。しかし、植栽樹種の選定から植栽方法、植栽時およびその後の管理方法など、様々な局面について、まだ技術が確立したといえない場面が多い。特に、樹木の生育に伴う密度管理、あるいは個体サイズの調整の技術は全く整備されていないため、せっかく緑化植栽した効果が十分に発揮されず、むしろ負に働いている場合も多い。

生育に長期間を要する高木樹種を用いた緑化が、目標とする林分についてのビジョンのないままに、大規模に実施されたため、かえって周辺環境に悪影響を与えている場合が多い。植林木による水資源の異常な利用増大や、導入樹種による在来種の排除あるいは植林による生態系の構造変化による環境の劣化は、緑化植栽の成否に関連する重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究は、ケニアの内陸部でJICAが1997年に造成した *Melia volkensii* (以下、メリア) と *Acacia senegal* (以下、アカシア) の密度試験区を用いて、現在の造林木の蒸散量や土壌水分量の日変化、季節変化を測定することで、樹木個体および地域の水収支を明らかにする。さらに、間伐試験や伐倒・掘り取り調査で、生長経過や密度効果についての解析を行う。それらの結果から、乾燥地における樹木の生長が地域の環境や林分動態に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

研究対象地域は、ケニアのほぼ中央部に位置する低い丘陵地帯であるキツイ県ティバ試験林を中心に実施した。比較的人口密度は低いが、炭焼きや木材採取により樹林は継続的に利用されることで、天然林の分布は限られており、多くが2次林となっている。本研究では、天然林と2次林内に造成されて植林地に調査プロットを設定し、それぞれ林分構造とその水資源量の評価を実施した。

(1) 天然林の林分構造と立地特性

KEFRI (Kenya Forestry Research Institute ; ケニア林業試験場) の苗畑試験地(ティバ試験地)内の天然林を対象にした。自然状態での林分構造を解析するために20m四方の方形区を3つ設定し、樹高1.3m以上の全個体について、種を同定し、個体サイズなどを測定した。微地形測量により立地特性を明らかにした。

(2) 人工林の林分構造と立地特性

KEFRIではティバ試験地で1994年から様々な在来種を試験植栽し、2次林の有効利用と植生の回復を図ってきている。なかでも有用な樹種としてメリアとアラビアゴムを産出するアカシアが重点的に研究され、育成

されている。メリア試験区は2002年11月に4段階の植栽間隔（2.5m×2.5m、3.0m×3.0m、3.5m×3.5m、4.0m×4.0m）で造成され、アカシア試験区は1999年に5段階の植栽間隔（1.0m×1.0m、2.0m×2.0m、3.5m×3.5m、4.0m×4.0m、5.0m×5.0m）で造成された。これらの林分を調査対象地とした。すべての密度試験区に調査プロットを設定し、個体サイズと樹冠幅、および位置を計測した。

また、メリアとアカシアのフェノロジーを明らかとするため、リター量(リタートラップ)、肥大生長量(デンドロメータ)および林内の相対照度と展葉・落葉の季節変化(写真撮影)を観測・測定した。

(3) 気象測定と土壌水分量

ケニアの気象庁が計測した広域および長期の気象データを入手した。ティバ試験地には気象観測装置がないため、温湿度、降水量、蒸発量などの基本的な気象観測ができる施設を整備した。同時に、土壌水分をポータブルなTDR式土壌水分計(深さ100cmまで測定可)を用いて各調査地で測定することで、調査プロットにおける表層の土壌水分量の経時変化をモニタリングした。

(4) 主要造林樹種の樹液流速と蒸散量

林分の内外の蒸発量を測定するために、メリア密度試験林の林床と林外の空き地に直径12cmの蒸発パンをそれぞれ25個と2個、4月26日に設置し、5月29日まで日中の蒸発量を測定した。その後、5月25日に林冠木を4本伐倒し、林冠閉鎖度を低下させ、5月29日まで林内と林外の蒸発量の測定を続けた。

樹液流速の測定は、キツイのKEFRI敷地内の1本のメリア個体に樹液流センサー(SFM_R1-2、ITC社製)を設置し、日変化、季節変化を追跡した。樹液流センサーは幹と根に1つずつ2011年5月に設置し、測定頻度は1時間に1回とし、2011年5月から2012年10月までのデータを回収(ただし幹部データについては2012年4月以降欠測)した。

2012年11月の対象樹木の樹高は6.6m、樹幹直径は8.8cmであった。

樹木個体の蒸散量を推定するために、人工林調査プロットにおいて、個体サイズ(樹冠投影面積と樹冠厚)が異なる4個体を選び、樹冠を3層に分け、LI-1600(ライカ社製)を用いて、各層で日中に2時間間隔で3回ずつ蒸散速度を測定した。また、3層の樹冠ごとに葉面積を測定した。また、樹液流速を自動計測し、同時に測定した蒸散量との相関から、樹木個体の蒸散量の季節的变化を求めた。

4. 研究成果

(1) 天然林の林分構造と立地特性

0.12haの調査区に出現した樹種は17科20属31種(+不明10種)で、総個体数は357個体(平均立木密度は2975本/ha)であった。plot1では24種(未同定1種)90個体(2250本/ha)が、plot2では18種(未同定3種)58個体(1450本/ha)が、plot3では30種(未同定9種)209個体(5225本/ha)が出現した。各plotでの多様性をSimpsonの単純度指数に関連した指数である1/Dと比較すると、plot1が最も高くなり14.46を示した。また、最も低いのは、6.15を示したplot3であった。plot3では、全209個体のうち、*Acacia brevispica*が73個体と35%を占めたことで、種多様性は低くなった。この傾向はH'やJ'の指標でも同様であった。plot3の出現種数は30種と多いが、1個体のみという種も10種と多かったことで多様性が低くなった。胸高断面積合計は、plot1が9.6m²/ha、plot2が10.0m²/ha、plot3が12.4m²/haとなった。

(2) メリア人工林の林分構造と立地特性

メリアの植栽間隔の異なる林分(2.5m、3.0m、3.5m、4.0m)での生存率は、4.0m区が最も高く、3.5m区、3.0m区、2.5m区の順に低下した。2004年の平均樹高は、3.5m区

が他の密度区より有意に高かった。2007年以降は植栽密度区間で有意な差は認められなくなり、植栽から5年ほどでどの密度区もほぼ同じ樹高に達したことが明らかになった。胸高直径は2004年から2005年の間で最もよく成長し、その後林間閉鎖に伴って年成長量は急速に減少し、肥大成長はゆるやかになることが示唆された。林分密度が低いほど平均胸高直径は大きくなった。この傾向は植栽3年目ですでに認められるようになり、本試験で採用した植栽密度では、比較的速やかに密度効果が認められるようになることが明らかとなった。

メリアのプロット間で立地の標高が異なっていたが、ほとんどの個体は、生育している立地の標高に関わらず、樹高が一定となっており、標高と樹高の間に特段の関係は認められなかった。

全天空写真から求めた樹冠閉鎖度に植栽密度区間で有意な差はなかった。展葉期の終わりの12月と3～4月に林冠閉鎖度が最も高くなった（概ね60～80%）。2回の展葉期の間の1～2月には落葉が起こるため、林冠閉鎖度が高い期間は短く、1～2月と5～11月は概ね40～55%となり、一年のうち半分の期間は林冠閉鎖度が50%程度で推移していることが明らかとなった。乾季と雨季の林冠閉鎖度を植栽密度区間で比較したが、植栽密度区間に有意差は認められなかった。

年に2回、開花、結実、着芽、展葉、紅葉、落葉の順で変化が起こった。降雨期に葉面積指数が高く、乾期に開空率が高かった。リターフォールの内訳は、落葉が最も多く、次いで落枝で、樹皮は繁殖期に多かった。フェノロジーとリターフォール量の変化に植栽密度の違いは影響しなかった。低密度区（3.5m区と4.0m区）は雨季の月平均肥大生長量はそれぞれ0.21mmと0.38mmと大きく、太い材を短期間で作るのに適していると考えられた。

(3) アカシア人工林の林分構造と立地特性

アカシアの場合、植栽間隔（1.0m、3.5m、4.0m、5.0m）の違いによる生存率の差が若干認められた。すなわち、2012年に1.0m区で68%となり、他の密度区に比べて著しく低い値を示した。しかし、3.5m区、4.0m区、5.0m区では、1997年の植栽時から現在まで生存率は90%と高く、ほとんど枯死する個体が出現しなかった。

1998年の平均樹高に植栽密度区間で有意な差は認められなかった。一方、2012年には、1.0m区を除いた3つの密度区で平均樹高の減少がみられた。特に、5.0m区の平均樹高は1.0m区よりも有意に低くなった。これは高密度区で自然間引きによる小個体の枯死が進んだためである。

胸高断面積は、植栽直後を除くと、いずれの時期においても低密度区は高密度区よりも大きな値を示した。しかし、成長速度は1.0m区以外の密度区間に有意差は認められなかった。5.0m区は他の高密度区（3.5m区、4.0m区）よりも明らかに平均胸高断面積は大きく、植栽から14年を経過してもまだ樹幹は旺盛に肥大成長していた。

アカシア林のプロット間での標高の差は約160cmであり、植栽密度の高い試験地ほど標高の高い尾根筋にあるため、標高が高い所にある個体ほど、樹高が高くなる傾向がみられた。しかし、標高と植栽密度が独立していないので、樹高を決める要因を特定することはできなかった。

全天空写真から求めた樹冠閉鎖度の季節的变化はメリアと同様のパターンを示し、12月と3～4月は60～80%と高い値を示した。しかし、高い林冠閉鎖度は長くは続かず、1～2月と5～11月は概ね40～55%まで減少し、メリアと同様に、一年のうち半分の期間は樹冠が50%程度開いた状態であった。

開花、結実、着芽、展葉、紅葉、落葉についてもメリアと同様の順で変化が起こっ

た。降雨期は葉面積指数が高く、乾期には開空率が高くなった。リターフォールの内訳は、2013年3月以外、落葉がほとんどであった。4.0m区のリターフォール量は高密度区とほぼ同量であり、材生産量も高く、リターフォールの施肥効果も期待できるので、2013年の調査段階では、アカシア林で良質な大径材を得るためには4.0m間隔の植栽が適していると考えられた。

(4) 気象測定と土壌水分量

2010年6月の観測開始から2013年12月まで、降水量、日射量、照度、紫外線強度、気温、及び相対湿度の日平均値（降水量は日合計）を測定した。欠測や異常値（2011年6月～11月のキツイの紫外線強度）が含まれることがあったが、観測開始から約3年半にわたり得られたデータは、この地域の気候の特徴である年2回の乾季と雨季の入れ替わりを明瞭に捉えることができるものであった。

2010年6月以降、ティバ試験林内の天然林、メリア密度試験林およびアカシア密度試験林に設定した調査プロットならびに苗畑内の露場（草地）において、ADR法による土壌水分測定を実施した。用いた土壌水分センサー（Delta-T社PR2/6）は6深度（10、20、30、40、60、100cm深）の含水率を同時に測定できるものである。測定は原則として月1回の頻度で行った。メリア密度試験区とアカシア密度試験区の平均含水率は、どちらも最も高密度なプロット（メリアでは2.5m区、アカシアでは1.0m区）が最低で、その値は苗畑や天然林での平均値よりも低かった。これは植栽密度が高くなるほど土壌水分は多く利用されることを示すものであった。したがって、同じ密度でも樹種によって土壌水分量が異なることや、土壌を乾燥させにくいメリアでも、密に植栽しすぎると天然林や草地よりも土壌の乾燥を招く可能性があることが示唆された。

(5) 主要造林樹種の樹液流速と蒸散量

4月26日から30日までの樹冠上部、中部、下部でそれぞれ日蒸散量は7.74、5.77、1.42mm/dayと推定され、日射量の多い上部は下部の約5.47倍の速度を示した。日蒸散量と葉面積および樹冠投影面積から単位面積当たりの日蒸散量を求めたところ19.1mm/dayとなった。4個体のそれぞれの日蒸散量は13.32、14.92、21.10、27.10mm/dayとなり、個体間で2倍ほどの違いがあった。

一方、林内と林外の最大蒸発量はそれぞれ1.4mm/day、5.1mm/dayとなり、林冠被覆によって蒸発量は70%ほど減少した。しかし、林冠被覆率を2%ほど減少させると蒸発抑制効果は5%減少した。林外、林内とも蒸発量は植栽木の蒸散量より少なく、森林の造成が大量の水消費を引き起こしていることが示唆された。

この時期の水収支を試算すると、日平均の降雨量3.4mmに対して、裸地からは5.7mmが蒸発し、メリア林からは20.5mmが蒸発散で失われたことになる。葉量が最も多くなる時期の蒸発散量であるため、降雨量よりを大きく上回る結果となったが、乾期やその前後の落葉期の収支を求めて、年間を水収支と林分管理の関係を検討する必要があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計3件)

吉川 賢、乾燥・半乾燥地での森林造成について - ケニヤ共和国を中心に - 海外の森林と林業、査読有、vol.91、2014、pp. 15 - 19、

吉川 賢、乾燥・半乾燥地で樹木が水を利用するための戦略、海外の森林と林業、査読有、vol. 90、2014、pp. 3-7、

〔学会発表〕(計6件)

中村亮介・大藪崇司・Jamus K. Nudfa・Bernard K. Kigwa・吉川 賢、ケニア国半乾燥地の *Melia volkensii* 林の水収支、第126回日本森林学会、2015年3月27日、北海道・札幌市

吉川 賢、乾燥地に生育する樹木の特性と森林の動態、第126回日本森林学会、2015年3月27日、北海道・札幌市

Takashi OYABU, Yoshio TSUBOYAMA, Toshiaki MIZOBUCHI, Ken YOSHIKAWA, Phenology and Growth of *Acacia senegal* (L.) Eildd. and *Melia volkensii* Guerke planted in semi-arid area in KENYA, 3rd International Conference on Forests and Water in a Changing Environment, 2012年9月19日、福岡県・福岡市

溝淵俊彰・藁科明日香・大藪崇司・MUCHIRI David・矢幡 久・吉川 賢、ケニア半乾燥地における人工林の林分構造と成長経過、第123回日本森林学会大会、2012年3月27日、栃木県・宇都宮市

吉川 賢、乾燥地の環境と砂漠化問題、土木学会中国支部研究発表会、2011年5月21日、岡山県・岡山市

〔図書〕(計4件)

Yoshikawa, K. ed., Technical guideline for re-afforestation of dry lands in consideration of forest-water relationship、JIFPRO (Tokyo, 84pp.)、2014

Yoshikawa, K. and Chikamai, B. N. eds., Tree planting and management techniques techniques under limited water availability - Guideline for farmers and extension agents-, JIFPRO(東京、13頁)、2014

Yoshikawa, K. and Chikamai, B. N. eds., Re-afforestation and water conservation in drylands.-Guideline for students and researchers-, JIFPRO(東京、82頁)、2014

吉川 賢・大手信人・大西満信・大藪崇司・坪山良夫・藤枝基久・三島征一編、森

林・水環境に配慮した森林造成技術ガイドライン、国際緑化推進センター(東京、120頁)、2014

〔その他〕(計7件)

吉川 賢、乾燥地に生育する樹木の特性と森林の動態、第126回森林学会大会・生理部門特別セッション「樹木の生長と環境」、2015年3月27日、北海道・札幌市

Ken Yoshikawa, Re-afforestation and water conservation in drylands, Work Shop in Kenya, 2014年3月13日、Kitui, Kenya

吉川 賢、ケニアにおける森林経営の持続性に関する研究、第5回アフリカ開発会議(TIVCAD V)、2013年6月1日、神奈川県・横浜市

Ken Yoshikawa, Water availability in arid region, KEFRI Workshop, 2012年11月5日、Kitui City, Kenya

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉川 賢 (YOSHIKAWA, Ken)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・教授(特任)

研究者番号: 50166922

(2)研究分担者

大藪崇司 (OHYABU, Takashi)

兵庫県立大学・緑地景観マネジメント研究科・准教授

研究者番号: 70423902

(3)連携研究者

坪山良夫 (TSUBOYAMA, Yoshio)

森林総合研究所・研究室長

研究者番号: 10353773

大手信人 (OHOTE, Nobuhito)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号: 10233199