

筑波大学陸域環境研究センターに隣接する アカマツ林の胸高直径と立木密度の変化について

The Change of Diameter at Breast Height and Stand Density of
Japanese Red Pine Forest Adjacent to the Terrestrial Environment
Research Center, University of Tsukuba

飯田 真一*・濱田 洋平**・田中 正**

Shin-ichi Iida, Yohei Hamada and Tadashi Tanaka

I はじめに

筆者らは水文学の観点から、水循環において森林が果たす役割を理解することを目的として、筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林を対象とし、主に樹液流速測定に基づいた蒸散量の推定について研究を行ってきた（飯田ほか、2000）。森林の熱収支や水収支を考える場合、林分構造を定量的に把握することは非常に重要である。特に、樹液流速測定で得られる単木の蒸散量から林分蒸散量を見積もる場合には、林分構造に関わるデータ、すなわち対象とする樹木の立木密度や胸高直径（Diameter at Breast Height ; DBH）の空間分布といった情報が必要不可欠である（例えばGranier *et al.*, 2000など）。

本研究対象地域のアカマツ林は人工林であるが、1980年から低層木の伐採が中止され、さまざまな陰樹が林内へ侵入している。山下・林（1987）はつくば市内の人工的な手入れがなされていないアカマツ林を対象に調査を行った結果、調査地域がいずれシラカシ・コナラ林へ遷移することを予測した。本研

究対象地域と同一林分での調査結果（宇佐美・及川、1993）では、アカマツ林床に存在するシラカシ稚樹の成長速度とアカマツの年枯死率から、シラカシ林への遷移には少なくとも20年以上を要するとの結論を得ている。

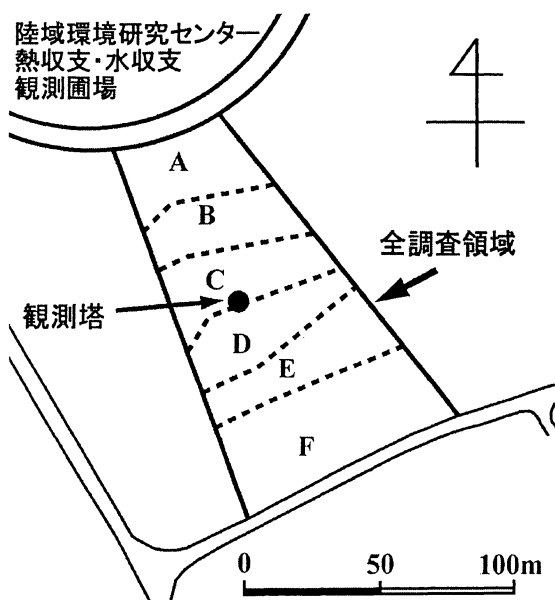
このように、本研究対象地域では過去に詳細な植生調査が行われているが、その後調査は行われていないため、現在のアカマツの立木密度やDBHの分布を把握した上で、アカマツ林の蒸散量の推定を行う必要がある。そこで本研究では、現在のアカマツの立木密度とDBHの空間分布を明らかにすることを目的とし、広範囲にわたるアカマツの毎木調査を行った。

II 調査方法

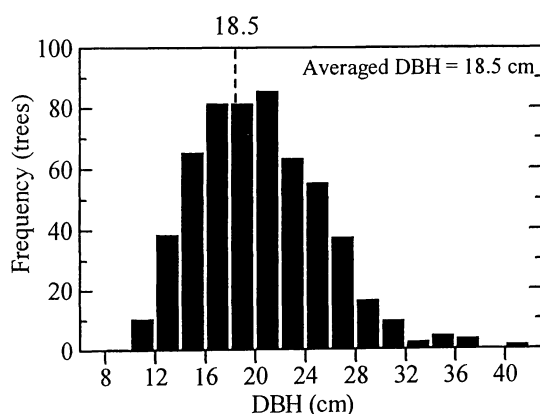
調査対象地域は筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林である（第1図）。前述のように、本アカマツ林には多くの陰樹が侵入している。主な低層木を構成しているのはシラカシ、ヒサカキ、ヤマウルシ、コナラ、クリ、ウワミズザクラである。一方、草本層では、特にアズマネザサとチヂミザサ

*筑波大学 大学院 地球科学研究科

**筑波大学 地球科学系



第1図 調査対象地域および領域区分の概要



第2図 調査全領域におけるアカマツ胸高直径のヒストグラム

が卓越している。これらの樹種は山下・林（1987）による調査結果と一致し、低層木・草本層を構成する植生には大きな変化は見られない。

本研究対象地域のアカマツ林の総面積は1.9haに及ぶが（Sugita, 1985）、調査を行う人数による物理的な制約を考慮し、林内微気象観測塔を中心にしたおよそ0.9haの領域を対象にし、さらに調査の便宜上から6つの小領域（A～F）に分け（第1図）、領域内に存在するすべてのアカマツについてDBHを測定した。

DBHの測定では、巻尺を用いて胸高周囲長を測定し、アカマツの樹幹が円であると仮定してDBHを算出した。測定は1999年4月に行った。

一方、アカマツ林のほぼ中央に位置する林内観測塔付近において、観測塔を中心に半径15mの領域を設定し、アカマツの空間分布状況を把握した。具体的には、半径15mの領域内に存在する48本のアカマツについて、林内観測塔からの距離と方位をそれぞれ巻尺とクリノメータを用いて測定し、アカマツの位置を同定した。こちらの測定は1999年12月に行った。

Ⅲ 調査結果および考察

(1) 毎木調査の結果

第2図に調査全領域（約0.9ha）内に存在するアカマツのDBHのヒストグラムを示す。なお、本領域内のアカマツの本数は566本であり、立木密度は6.4本/100m²、平均DBHは18.5cmであった。全領域におけるアカマツのDBHのヒストグラムでは、平均DBHを含む階級を中心とする3つの階級が最も卓越していることが分かる。この卓越した階級からDBHが大きい階級へ向かうにしたがって、頻度はなだらかに減少するのに対し、DBHが小さい階級では、頻度は急激に減少する傾向が見られる。1985年におけるアカマツのDBHのヒストグラム（山下・林, 1987）と比較してみると、当時のヒストグラムではDBHの階級が小さい領域で若干の凹凸がみられるものの、平均DBHを含む階級よりも大きな階級になるにしたがって頻度はなだらかに減少しており、アカマツのDBH頻度分布の形態はそれほど変化していないことが分かる。しかしながら、アカマツの成長に伴いDBHの絶対値は大きく異なり、1985年当時に比べて本調査結果で得られた最大DBHの値は約2倍大きい。一般に、閉鎖した林分が形成される頃には、個体間に優劣の差が生じ、競争により自然間引きをおこして、自然に本数を減少しながら群落を維持する（四手井, 1963）。特に、アカマツの耐陰性は低いため、周囲の樹高成長に追いつかないアカマツでは、弱い光環境に耐えることができず枯死する割合が高いものと考えられる。そのため、第2図において、平均DBHよりも小さい領域におけるアカ

第1表 各調査小領域(A～F)における毎木調査の結果

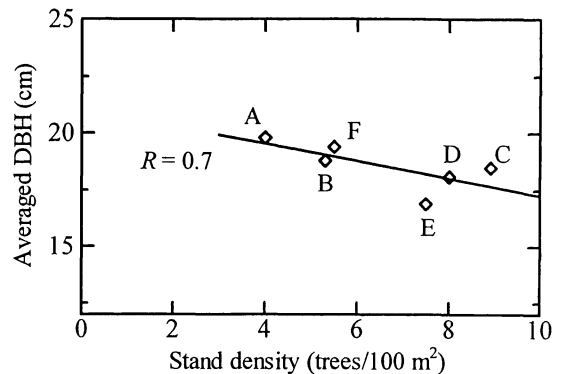
領域	面積 m ²	アカマツの本数 本	立木密度 本/100m ²	平均胸高直径 cm
A	1286	52	4.0	19.8
B	1090	58	5.3	18.8
C	1328	118	8.9	18.5
D	1147	92	8.0	18.1
E	1322	99	7.5	16.9
F	2686	147	5.5	19.4

マツ（≒相対的に樹高の低いアカマツ）の頻度が急激に減少しているものと推察される。

次に、アカマツの毎木調査を行った領域A～Fにおける測定結果を見てみる（第1表）。なお、前述の通り、これらの領域は毎木調査の便宜上設けたものであり、各領域の面積は異なっている。各領域間において、アカマツの立木密度は大きく変化し、各領域間の差は最大で2.2倍にも達する。領域Fの面積は他の5領域に比べて非常に大きいため、これを除外して考えても大きな立木密度の差が観測されている。本研究地域は元来人工林であり、低層木の刈り取りを中止する以前のアカマツの分布状況は比較的均質であったことが予想され、現在の不均質なアカマツの立木密度は、アカマツの枯死が全領域内で不均質に生じた結果であると考えられる。

(2) 調査小領域の平均DBHと立木密度の関係

第3図に各調査領域A～Fにおける平均DBHと立木密度の関係を示す。この図から、領域全体の平均DBH=18.5cmを上回る領域A、B、Fにおいて立木密度は相対的に小さいのに対して、平均DBHを下回る領域C、D、Eにおける立木密度は相対的に大きく、各領域のプロットには明白な負の相関が見られた。この事実は、DBHが小さい（≒樹高が低い）アカマツから選択的に枯死が生じたため、立木密度の減少に伴って平均DBHが増加したことを示唆している。アカマツは典型的な陽樹であり、その耐陰性は陽樹全体の中でも、カラマツ、シラカンバに次いで低い（四手井、



第3図 各調査小領域(A～F)におけるアカマツの平均胸高直径と立木密度の関係 (R は相関係数)

1963)。このため、何らかの原因で樹冠に到達する光が遮断されることがアカマツの枯死の主要因として考えられ、相対的に樹高の高いアカマツが重要な因子として挙げられるが、これは自然間引きによる影響であるものと考えられる。例えば、林（1990）によれば、菅平のアカマツ林において生じたアカマツの自然間引きの結果、平均DBHは10年間で約4cmの増大が観測され、個体間の競争から樹高の低いアカマツが枯死したことが報告されている。一方、この低い耐陰性のために、林冠により光が遮られるような林床ではアカマツ稚樹は成長できず、弱い光環境に耐えうる陰樹がアカマツ林内へ侵入する。このため、林内へ侵入した陰樹の人工的な伐採を行わない限り、アカマツ林は陰樹林へ遷移することになる。このような成長初期段階の陰樹は樹高が低いため、その成長速度はアカマツ林冠下に到達する光環境により大きく影響を受ける。宇佐美・及川（1993）は、本研究対象地域のアカマツ林内に存在する59個体のシラカシ稚樹（陰樹の低層木）の樹冠上で観測された光合成有効放射量（PAR）が、アカマツ林冠の構造に大きく影響を受けた結果、最大で6倍もの違いがあり、シラカシ稚樹の成長速度へ大きく影響していることを報告している。さらに、彼らの研究によれば、アカマツ林内の光環境は高度によって変化するため、シラカシ稚樹が成長し、その樹高が高まった結果、より良い光環境が得られ、シラカ

第2表 本アカマツ林における過去の毎木調査との比較

文献	調査実施年	立木密度	平均胸高直径	平均樹高
	西暦	本/100m ²	cm	もしくは樹高* m
山下・林 (1987)	1985	27.5	11.8	10.5
宇佐美・及川 (1993)	1992	16.5	13.7	13.1
本研究	1999	6.4	18.5	13 - 17*

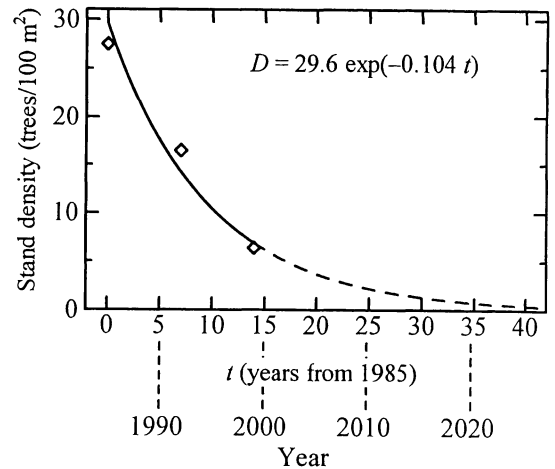
シ稚樹の成長が促進される可能性のあることを指摘している。このことを考慮すると、アカマツ林冠下で不均質に存在する木漏れ日（陽斑）や、それに近い光環境に位置する低層木の樹冠がアカマツの樹冠における光環境を悪化させる因子として機能する可能性がある。このような環境に生育する低層木は成長速度が早く、アカマツの枯死に対して影響を及ぼすだけではなく、林冠優占種の入れ替え、すなわち植生遷移過程に対しても重要な役割を果たすものと考えられる。

(3) アカマツの年枯死率の算出

本アカマツ林において毎木調査を行った過去の研究（山下・林，1987；宇佐美・及川，1993）と本調査の結果を第2表に示す。前述のように、本アカマツ林では低層木の伐採が1980年から中止されており、この時点から陰樹の進入が始まったものと考えられる。山下・林（1987）による調査以降、本研究まで7年間隔でアカマツの毎木調査が行われているが（山下・林，1987；宇佐美・及川，1993の調査が行われたのはそれぞれ1985年，1992年である）、アカマツの立木密度が急激に減少していることが分かる。そこで、宇佐美・及川（1993）にしたがい、アカマツの減少曲線が指数関数にしたがっているものと仮定し、回帰分析からアカマツ年枯死率の算出を行った（第4図）。

$$D = 29.6 \exp(-0.104t) \quad (1)$$

ここで、 D はアカマツの立木密度（本/100m²）、 t



第4図 1985年を基準としたアカマツ立木密度の減少過程

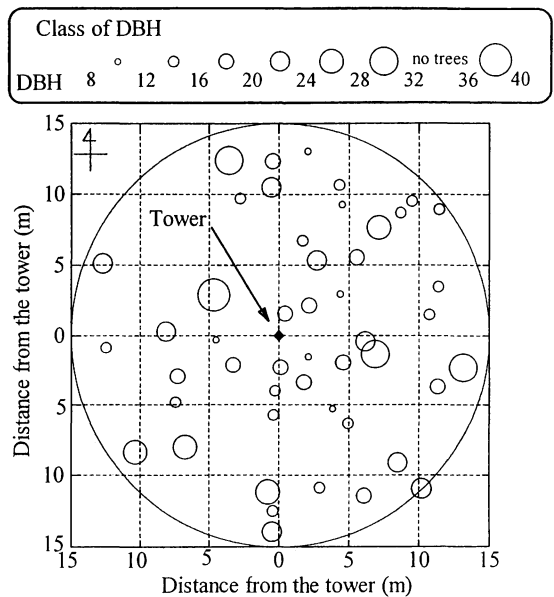
は1985年からの経過年数（年）を表す。（1）式からアカマツの年枯死率は10.4%と推定される。

(4) 半径15mの小領域におけるアカマツの空間分布

第5図に、観測塔を中心とする半径15mの領域内に存在するアカマツの立木位置図を示す。アカマツの分布には非常に高い不均質性が確認された。図中に示した5m間隔の調査区域（コドラート）で考えると、各コドラート内に存在するアカマツの個体数は大きく異なっており、全くアカマツが存在していないコドラートから、4本存在しているコドラートまでが確認された。また、面積を4倍にした10m間隔のコドラートで考えても、3本しか確認できないものから、11本のアカマツが存在しているコドラートまで大きな差が認められた。すなわち、仮に一边10mの正方形領域をコドラートとして毎木調査を行った場合、立木密度が3倍以上異なる可能性がある。この事実は、本研究対象地域の様な不均質性の高い林分において代表的なコドラートを設定する場合、一边10m程度の正方形領域では不十分であることを示している。林（1990）によれば、地形が比較的平坦な温帯の森林において、代表的なコドラートを設けるためには一边20m以上の正方形領域を確保する必要があると指摘している。この領域内における一边20mのコドラートに存在するアカマツの本数は29本であり、立木密度に換算すると、7.3本/100m²に相当する。この値は、

全領域の立木密度6.4本/100m²に比べて若干高いものの、本アカマツ林において見られる立木密度の不均質性（第1表）、すなわち林分の中央付近で立木密度が高い傾向にあることを考慮すれば妥当な値であると考えられ、林（1990）による指摘に一致するものである。

一辺5mの各コードラートに位置するアカマツの本数が大きく異なるという調査結果は、アカマツの枯死が半径15m程度の小さな領域においても不均質に生じていることを示唆している。林内観測塔から眺めた低層木（主にシラカシとヒサカキ）の樹冠は、最大で高度約10mに達しているが、この高度はアカマツの樹冠の下部に近いものの、アカマツの得る光環境に大きく影響を及ぼす高度ではない。したがって、観測塔から肉眼で確認しうる範囲においては、アカマツの枯死に対する低層木の樹冠による影響は低いものと判断される。しかしながら、林内観測塔から離れた領域A、Bにおいてアカマツの樹冠に達する様な低層木が少数ながら確認されることから、アカマツの枯死はアカマツの成長そのものに伴う自然間引きの影響のみならず、低層木の成長に伴う光環境の悪化によっても生じている可能性が高いものと判断される。自然間引きによってアカマツの立木密度が低下した領域においては、密度の高い状態に比べて個体間の競争は低くなることが予想されるが、立木密度の低下はアカマツ林冠下の光環境を改善すると考えられるため、低層木の成長が促進され林冠優占種の交代が促進されるものと推測される。このように、これら2つの枯死プロセスは、ある領域を考えた場合、その林分構造を反映してアカマツの枯死への影響が異なるものと判断される。第1表で見られた各小領域の立木密度は、林分の中央付近で高く、南北の境界付近で低い傾向を示していたが、上述のアカマツ枯死のプロセスを考慮すると、林分の南北境界付近に近いほどアカマツ個体間の競争による影響は少なく、低層木の成長による林冠樹種交代が進行している可能性がある。また、本アカマツ林の年枯死率が10.4%と見積もられ、この値は、宇佐美・及川（1993）による8.5%という年枯死率に比べて大きくなっているが、この枯死率の増加と、ここ7年間で見



第5図 観測塔を中心とした半径15m内に存在するアカマツの立木位置図

られた大きな平均DBHの増加（第2表）を説明するためには、アカマツの自然間引きのみの結果とするよりも、低層木の成長による影響を含める方が妥当と考えられる。

(5) 植生遷移過程の評価

本アカマツ林がこのまま放置され、(1)式で今後のアカマツの立木密度が予測できると仮定した場合、2015年には1.3本/100m²、2025年には0.5本/100m²にまで立木密度は減少することになる。しかしながら、アカマツの枯死は樹高の低いものから生じることが示唆されるため、最後に残ると考えられる樹高の高いアカマツが完全に枯死し、遷移が終了するまでの時間を(1)式のみから特定することは困難であると考えられる。さらに、不均質な分布を示すアカマツの立木密度は、アカマツ枯死のプロセスが不均質に生じていることを示唆している。これらのことから、遷移終了時点の正確な推定のためには、低層木の成長速度を同時に評価する必要がある。

IV まとめ

筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林において、アカマツの毎木調査を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 毎木調査を行った面積0.9haの領域に存在するアカマツは、過去の調査結果に比べて著しく少なく、全領域を6つに区切った各小領域の立木密度や平均DBHは均質ではないことが明らかとなった。この原因としては、本アカマツ林がシラカシ林への遷移過程にあり、アカマツの成長に伴う自然間引きと、低層木の成長に伴う光環境の悪化によるアカマツの枯死の双方が、林分内で不均質に生じていることが考えられる。
- 2) 過去の研究例を考慮し、指数回帰分析からアカマツの年枯死率を求めた結果、10.4%という値を得た。この値は1992年時点の報告例と比べて大きい。この事実と、1992年から7年間でアカマツの平均DBHが急激に増加したことから、低層木が成長した結果、低層木が得る光環境が改善され林冠優占種交代速度が高まったことが示唆された。しかしながら、本調査の対象はアカマツに限定されており、低層木を含めた調査を行った上で再度議論する必要がある。
- 3) 半径15mの領域内に分布するアカマツの立木位置を同定した結果、分布は非常に不均質で本アカマツ林において代表的なコードラートを設定するためには100m²程度の領域では不十分であり、林(1990)が指摘した一辺20mないしはそれ以上のコードラートを設定する必要があることが明らかとなった。

本アカマツ林では植生調査のみにとどまらず、樹冠通過雨量や蒸発散量測定といった水収支に関する研究が多数行われている(たとえば、間島・田瀬, 1982; Sugita, 1987など)。これらの研究が行われていた時点におけるアカマツ林の構造と比較すると、陰樹(主にシラカシ)林への遷移過程の結果、アカマツ林の構造が大きく変化していることが明らかとなった。今後、筆者らは水文学の立場から、陰樹林への遷移による林分構造変化に伴い、林外雨再配分

過程や蒸発散のソースが変化したかどうかに着目して研究を進める予定である。

謝辞

本調査を行うに当たり、筑波大学大学院生物科学研究科の宇佐美哲之氏には、低層木の樹種判別の際にご教授を頂いただけではなく、結果の考察に関してさまざまなご助言を頂きました。記して、感謝いたします。

参考文献

- 飯田真一・小林義和・田中 正(2000): 樹液流速データに基づく林分蒸散特性について. 2000年度日本水文科学学会学術大会発表要旨集, No. 14, 30-33.
- 宇佐美哲之・及川武久(1993): アカマツ林内の光微環境とシラカシ稚樹の成長特性. 筑波大学水理実験センター報告, No. 17, 79-89.
- 四手井綱英(1963): 「アカマツ林の造成—基礎と実際—」. 地球出版, 326p.
- 林 一六(1990): 「植生地理学」. 大明堂, 269p.
- 間島政紀・田瀬則雄(1982): アカマツ林内の降雨量の空間分布について. 筑波大学水理実験センター報告, No. 6, 75-82.
- 山下寿之・林 一六(1987): 茨城県筑波におけるアカマツ林からシラカシ林への遷移過程の解析. 筑大演報, No. 3, 59-82.
- Granier, A., Biron, P. and Lemoine, D. (2000): Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agric. For. Meteorol.*, 100, 291-308.
- Sugita, M. (1985): Factors affecting evapotranspiration of a forest. *Geograph. Rev. Jap., Ser. B*, 58, 74-82.
- Sugita, M. (1987): Evaporation from a pine forest. *Environmental Research Center Papers, Univ. Tsukuba*, No. 10, 61 p.