

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23405024

研究課題名(和文) 熱帯林の孤立化は林冠木の枯死を招くか？異なる水利用体制化でのギャップ拡大機構

研究課題名(英文) Does the fragmentation of canopy in tropical forests promote the mortality of canopy trees? The mechanism of gap expansion.

研究代表者

水永 博己 (Mizunaga, Hiromi)

静岡大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：20291552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：林冠分断による林冠木周囲の局所環境(特に風環境)の変化を予測し、分断が林冠木に及ぼす物理的・生理的影響を評価することを主要な目的とした。

地上レーザスキャン法を応用して林冠木の葉分布推定を試み、熱帯の64個体の葉の三次元分布を解析できた。このような葉密度構造は風の抗力パラメータと密接な関係にあり、葉面積密度や複雑さの組み合わせによる簡易式が提案された。林冠の風環境はギャップによる林冠構造の複雑さと強い関係にあった。熱帯樹木の耐転倒モーメント特性を明らかにした。この情報は風害リスク評価に用いられる。なお、マレーシア雨林とベトナム季節林ではギャップ構造と林冠木衰退の関連は観察されなかった。

研究成果の概要(英文)：Our primary objective is to evaluate the physical and physiological impact of canopy fragmentation on canopy trees, through predicting the change in micro environment, especially wind synopsis, around canopy trees caused by the fragmentation.

We determined 3-dimensional leaf distribution of 64 canopy trees using terrestrial laser scanning method. The leaf distribution, the combination of leaf area index and the clumping structure determined the drag relations against crown with simple equation. The wind environment on canopy related to the complexity of canopy structure created by gaps. We also clarified the property of turning moment in tropical trees to use for the evaluation of wind damage risks. We could not observe clear relationship between the decline in canopy trees and the location from canopy gaps in both a seasonal forest in Vietnam and a rain forest in Malaysia.

研究分野：造林

キーワード：林冠木 風 林冠分断 樹冠 熱帯

## 1. 研究開始当初の背景

東南アジア熱帯地域で林冠木の枯死個体が増加傾向にあることが、長期固定調査地のデータから明らかにされつつある。こうした林冠木の衰退枯死の誘因を説明する仮説として、周辺植生のシフトカルティベーションに伴う森林孤立化の影響があげられることがある。しかしながら、孤立分断化の研究は、遺伝子フローの研究や生物多様性に関する研究に限られ、林冠木の健全性への影響を科学的に評価する試みはなかった。

ギャップの周囲で個体が枯死しやすくなるギャップ拡大現象は様々な森林タイプで知られている。しかしながら、ギャップ周辺個体が枯死する原因や影響度をメカニズム的に解析した例はなく、ギャップ拡大現象の研究は観察から得られた経験情報にとどまっている。このように孤立化やギャップ形成などの断片化が林冠木の局所環境やストレスに及ぼす影響を構造的に評価した研究はない。

ギャップ形成に伴って、林冠木の局所環境は大きく変化すると考えられ、なかでも風環境の変化に伴う生理的・物理的ストレスは無視できないと予想される。しかしながら森林生態学分野で非定常な風の動きを組み込んで林木のストレスを評価しようとした研究は少ない。

## 2. 研究の目的

「森林の孤立化は林冠木衰退・枯死の誘因になっている。」「ギャップ周囲の林冠木は枯死しやすく、ギャップは次第に拡大する。」このような断片化と林冠木の関係をめぐる経験的な仮説に対して、衰退実態を検証し、数値流体力学を応用して林冠疎開が林冠木周囲の局所環境に及ぼす影響を予測し、林冠木への物理的・生理的インパクトを評価することを本研究の主要な目的とした。また林冠木の枯死に伴う生態系サービスへの栄養を森林の炭素動態を中心に明らかにすることも試みた。

## 3. 研究の方法

### (1) 衰退実態の検証

マレーシア Pasoh の保護林と択伐二次林において、直径 30cm 以上の林冠木を対象に択伐ギャップに隣接する個体の衰退度を枝枯れの程度、樹体に対する葉量、主幹折れの有無、樹皮剥れの程度、ツルの本数、着生生物の程度、シロアリの程度の 7 項目について評価し、ギャップからの位置の影響を調べた。またベトナム Cuc Phuong 国立公園内の風害ギャップが点在する森林においても同様の測定を行った。

### (2) 三次元葉分布パターンの種特性

2011 年度と 2012 年度にベトナム Cuc Phuong 国立公園内の林冠木とエマージェント木の 80 個体を対象に回転ステージとレー

ザ距離計の組み合わせで、樹冠形状を測定した。

さらに 2013 年と 2014 年にタイ Mae Klong 理水試験地とベトナム Cuc Phuong 国立公園のそれぞれ 13 種 24 個体および 8 種 40 個体について、4 点以上のポイントから遮光物(枝葉・幹)点群の三次元位置をレーザスキャンにより測定し、葉の三次元分布を解析した。

樹冠を 0.5 m × 0.5 m × 0.25 m のヴォクセルに区切り、ポイントコードラート法によって葉面積密度を測定した。コードラート内の総プローブ長が 5m に満たないヴォクセルは測定不可能ヴォクセルとして、周囲ヴォクセルの値を用いて欠測値補完を行った。

### (3) 樹冠-林冠構造と風環境の解析(林冠分断化の風環境に及ぼす影響予測手法の開発)

樹冠は風を透過し、また風によって形状が変化する特有の物体であり、風に対する抗力パラメータの情報は少ない。そこで樹冠の抗力特性を曳行風洞実験により測定した。

さらに林冠の分断化が風の挙動に及ぼす影響を評価するために、林冠表面トポグラフィと LES モデルをリンクするモデルを開発した。このモデルを用いて、列状、群状、点在状の林冠ギャップが生じたときの風の挙動の解析を行った。

### (4) 耐転倒モーメントの種特性の測定

ベトナム北部の 3 か所(Cuc Phuong, Dai Lai, Tuan Hoa)から 18 種 92 個体について引き倒し法により転倒モーメントを測定した。引き倒した個体については板根の発達程度を測定し、板根の転倒モーメントに及ぼす影響を調べた。

### (5) 林冠分断による生理ストレス

ベトナム Cuc Phuong で新しいギャップに隣接する林冠木と林冠内の個体で樹液流速を測定した。

熱帯地域での生理的観測の継続が困難であったため、強いギャップに対して感受性の高いヒノキを対象に、ヒノキ個体の周囲を強度に疎開して、対象木の樹液流速、水ポテンシャル、AE センサーによるキャピテーションの評価を行い、林冠分断に伴う水ストレスの評価を行った。

さらにポット苗を用いて、乾燥処理と強風処理を行い、水ポテンシャル・浸透調節・通水抵抗、ガスコンダクタンスを測定した。

### (6) 林冠木枯死による森林生態系の炭素動態へのインパクト評価

Pasoh の 10 年間の毎木調査データと枯死材の推定から計算した NEP を渦相関法によるガスフラックスデータと検証したうえで、40 年間の NEP と林冠木枯死との関係を解析した。

## 4. 研究成果

### (1) 衰退実態の検証

Pasoh 保護林内の 3 年間の林冠木の生存率についてロジスティック回帰を行ったところ、林冠から突出した個体の枯死率は高かった。しかしながら、ギャップ隣接の影響は認められなかった。択伐後の二次林では、枯死木の周囲の伐採率は高かったが、小プロット内の伐採率と健全率には明らかな関係が認められなかった。

ベトナム Cuc Phuong で 3 年間の個体の枯死に、ギャップの影響は認められなかった。このように二つの地域ともに林冠分断構造と林冠木衰退の間に明瞭な関係は見られなかった。

### (2) 三次元葉分布パターンの種特性

巨大な樹木の葉分布を測定することは困難を伴うため、熱帯樹木の葉分布に関する情報は少ない。我々は地上レーザスキャン法の利用による測定を試みた。水平方向 0.5 m 垂直方向 0.25 m のヴォクセル単位で植物体面積密度を解析したところ、葉面積密度を入射プローブ長不足により測定できなかったヴォクセルは全体の 3% 未満であった。

得られた葉面積密度分布(図 1)について個体ごとに葉面積、樹冠投影面積、葉層の厚さ、葉面積密度の空間自己相関、樹冠表面の複雑度を計算し、種の特性を解析中である。

図 2 に *Dipterocarpus turbinata* の入射角ごとの受光効率の変化を示した。この個体は天頂角が 15 度から 45 度付近で受光効率がやや小さいものの、角度依存性は低く、入射角にまんべんなく光を受けることのできる葉分布を示している。このような個体ごとの受光体制の解析は、個体消失によって創出されたギャップにおける急激な光環境の変化の予測に利用できる。さらに(3)に述べるように樹冠内の光の透過は樹冠内の風挙動の指標となりうることから、個体の受風耐性の評価にも利用できる可能性がある。

### (3) 樹冠-林冠構造と風環境の解析(林冠分断化の風環境に及ぼす影響予測手法の開発)

樹冠が風圧を受ける効率である抗力係数は、側方からの葉面積指数と枝葉シルエット画像のフラクタル次元により決定された。すなわち、抗力係数は側方からのギャップフラクションを求める場合に用いられる Beer Lambert 則であらわすことができた。枝の柔軟性が小さく葉角の外力に対して可塑性が大きい樹種の流線化係数は、フラクタル次元に、枝の柔軟性が大きく葉の変形が小さい種の流線化係数は、葉面積指数により影響を受けた。このことから、さらに後者は風速に伴う面積の減少率と抗力の減少率の間に強い相関が認められたが、前者における両減少率の関係は明

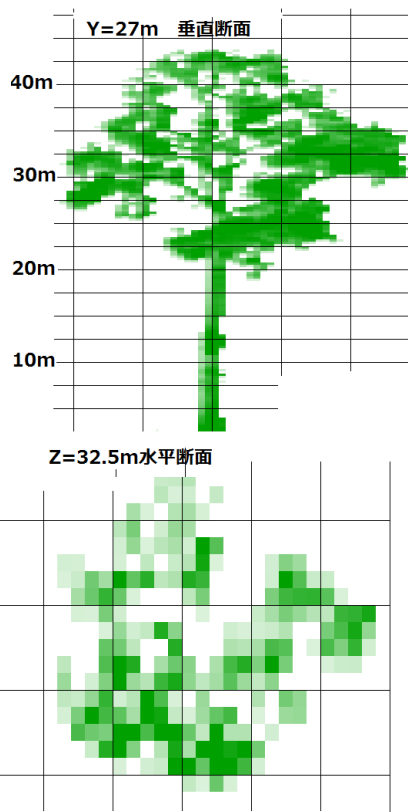


図1 *Dipterocarpus turbinata* の植物体密度分布

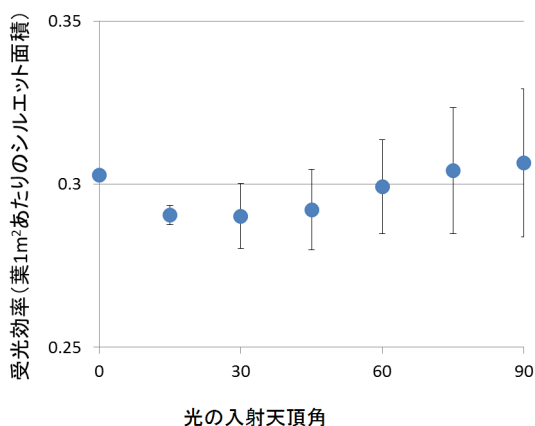


図-2 *Dipterocarpus turbinata* の受光効率

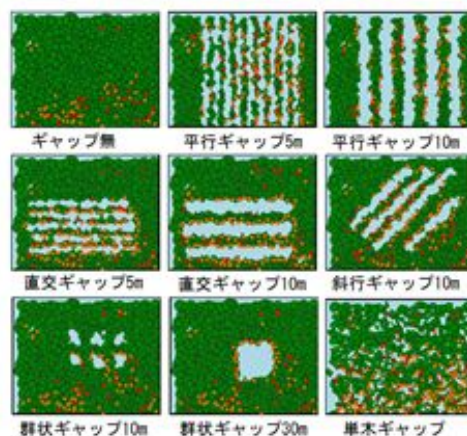


図3 ギャップ構造と強風を受ける個体マップ

瞭でなかった。このように種ごとの樹冠構造は抗力パラメータと深い関係にあった。

ギャップ構造はミクロな風環境に強い影響を及ぼした。主風方向に直交するギャップや単木状ギャップで乱流が発生する確率が高まり、主風方向に平行なギャップでの乱流発生率はギャップ無の場合より低下した。一方でギャップの大きさは乱流の発生との関連は明瞭でなかった。

強い風荷重のあたる個体のマップを図3に示した。大きい群状ギャップにおいて、強い風荷重が当たる個体はギャップ縁の個体のみであり、この場合もギャップサイズは風環境に大きい影響を与えていないことがわかる。一方で単木ギャップは他のギャップに比較して風リスクが大きく高まることが予想された。すなわちギャップの大きさではなく、ギャップによる林冠構造の複雑さが風環境に大きい影響を及ぼすことが示唆された。

#### (4) 耐転倒モーメントの種特性の測定

Cuc Phuong と Dai Lai で行った5種の耐転倒モーメントと地上部重量の関係を図4に示した。耐転倒モーメントを反応変数に、地上部重量、樹種、樹種と地上部重量の交互作用、被害タイプを説明変数に、個体を変数因子にして一般化線形混合モデルで解析したところ、樹種と地上部重量のモデルが選択され、*Eucalyptus* と *Pinus* は有意に *Pometia* より小さい値を示した。しかしその違いは20KNmより小さかった。

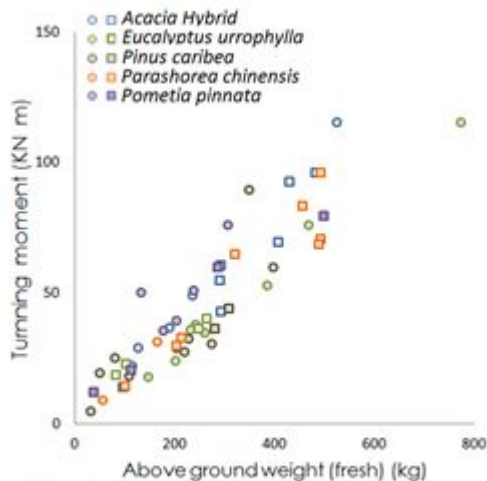


図4 耐回転モーメントと地上部重量の関係

しかしながら、それぞれの樹種特有の転倒抵抗戦略が観察された。*Pinus* は幹の柔軟性が高く、回転モーメントに対する傾斜量が他の樹種より大きく、このしなやかさによって耐転倒モーメントを維持していた。*Eucalyptus* は太い直根で、直根が折れる転倒形態を示した。

板根のある *Pometia* は他の樹種に比べてヒンジ方向での地面の沈み込みが他の樹種より小さく板根によってヒンジ側にかかる沈降圧を分散させていると推定された。

#### (5) 林冠分断による生理ストレス

ギャップに面した個体と林内の個体の間に、樹液流速のパターンに違いは認められなかった。

急激に疎開したヒノキの樹液流は、疎開後に上昇した。しかしながら、冬季に樹液流速が減少して以降、その低下した状態は翌年の成長期にも継続して見られた。キャピテーションは樹液流速との相関が観察され、キャピテーションが高まる主要因は蒸散であることが確認された。しかし、冬季に林冠疎開個体のキャピテーションが増加する傾向にあり、この増加は風による振動との相関が高かった。

風による通水障害の可能性を確かめるために、苗木を用いた試験を行った。送風処理のみによる葉の水分状態への影響は認められなかったが、乾燥と送風処理は乾燥処理に比較して通水抵抗が大きく夜明け前の葉の水ポテンシャルの低下が早まった。すなわち、風は単独で水ストレスを生じさせるといふより、幹や枝の通水抵抗によって、土壤の乾燥状態が生じたときに水ストレスが生じると考えた。

#### (6) 林冠木枯死による森林生態系の炭素動態へのインパクト評価

Pasoh 保護林において毎木調査のデータから推定した NEP が渦相関法で得られた NEP と高い相関にあった。そこで、過去 40 年間の NEP の予測を行ったところ、長期の NEP の変動の主要因は林冠木枯死の変動により生じていることがあきらかとなった。伐採や大量枯死などが生じると、イベントの約 5 年後に最低値に達し、負の状態は 10 年間継続することが推測された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Kenji Kitagawa, Shintaro Iwama, Sho Fukui, Yuuki Sunaoka, Hayato Yazawa, Atsushi Usami, Masaaki Naramoto, Takanori Uchida, Satoshi Saito, Hiroimi Mizunaga (2015) Effects of components of the leaf area distribution on drag relations for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *Eur J Forest Res* 査読有 134:403-414 DOI 10.1007/s10342-014-0859-6

[学会発表](計8件)

福井翔宇・片畑伸一郎・榎本正明・山田晋也・水永博己 風ストレスに対するヒノキの分子・生理応答 日本森林学会 2015年3月26日~29日北海道大学(札幌市・北海道)

Hiroimi Mizunaga Leaves for flexibility in silviculture, leaf distribution as a tool for silvicultural operation 2014年6月17~19日 IUFRO1.05 WSL, (チューリッヒ、スイス)

米田 健・水永博己・内村慶彦・新山  
馨・佐藤保・小杉緑子・高梨聡・谷誠・  
奥田 敏 統・E.R.KADIR, Abd.Rahman,  
Kassim, C. Fretcher Pasoh 熱帯多  
雨林での長期毎木調査資料に基づく  
NEP 経年変動の解析 日本熱帯生態学  
会・2014年6月13～15日 宇都宮大学  
(宇都宮市 栃木県)  
岩間慎太郎 内田孝紀 喜多川権士  
水永博己 風況シミュレーションを用  
いた異なる間伐方法下における風害発  
生リスクの評価 日本森林学会 2014年  
3月28日～2014年3月30日 大宮ソ  
ニック(大宮市 埼玉県)  
辻村史晃 榎本正明 林冠疎開による  
ヒノキの水ストレス応答 日本森林学  
会 2014年3月28日～2014年3月30  
日 大宮ソニック(大宮市 埼玉県)  
水永博己 岩間慎太郎 福井翔宇 ベ  
トナム北部の人工林の風攪乱耐性 根  
系支持力からのアプローチ 日本熱帯  
生態学会 2013年6月15～16日 九州  
大学(福岡市 福岡県)  
岩間慎太郎 間伐シナリオ別に見た、  
LES による林冠上部の突風率の解析  
日本森林学会 2013年3月26日～2013  
年3月28日 岩手大学(盛岡市 岩手  
県)  
辻村史晃 林冠疎開されたヒノキのス  
トレス評価 日本森林学会 2013年3  
月26日～3月28日 岩手大学(盛岡市  
岩手県)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水永博己(Mizunaga, Hiromi)

静岡大学・農学研究科・教授

研究者番号: 20291552

### (2) 研究分担者

榎本正明(Naramoto, Masaaki)

静岡大学・農学研究科・准教授

研究者番号: 10507635

小林繁男(Kobayashi, Shigeo)

京都大学・アジアアフリカ地域研究研究科・  
教授

研究者番号: 40353685

内田孝紀(Uchida, Takanori)

九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 90325481

米田 健(Yoneda Tsuyoshi)

鹿児島大学・農学部・教授

研究者番号: 40110796

(平成24年度まで研究分担者)