

E-051 森林-土壌相互作用系の回復と熱帯林生態系の再生に関する研究
 (5) 熱帯林の生物多様性評価と再生指標に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

アジア自然共生研究グループ

清水英幸

<研究協力者>

独立行政法人国立環境研究所

小林祥子・矢ヶ崎泰海・許振柱

[客員研究員] 広島大学 大学院理学研究科

山口富美夫

[客員研究員] 佐賀大学 文化教育学部

宮脇博巳

独立行政法人森林総合研究所 森林微生物研究領域

阿部恭久

(株) ウイジン

田渕尚一

インドネシア国 インドネシア科学研究院(LIPI) 生物学研究センター(RCB)

Herwint Simbolon, Florentin Indah Windadri, Ida Haerida, Ruliyana Susanti, Alham Laode

平成17~19年度合計予算額 12,688千円

(うち、平成19年度予算額 2,459千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 2,927千円を含む

[要旨] 1997~1998年に大規模森林火災が発生した東カリマンタン州のブキットバンキライで、2005年9月~2008年2月に、環境に敏感な蘚苔類、地衣類の多様性調査および微環境計測を行った。重度被害林(HD1・HD2)、軽度被害林(LD1・LD2)、無被害林(K1・K2)で、火災後の植生回復に伴う種組成変化を解析し、2001~2003年の調査と比較し、森林再生に伴う多様性、植生指標を検討した。光、大気温湿度、地温・土壌水分に関する微環境を計測し、生物多様性との関係を解析した。

蘚類種数には各調査区で顕著な差が認められなかったが、苔類種数は明らかにHD1区<LD1区<K1区であった。この差は、樹上・生葉上に着生するRadulaceae、Frullaniaceae、Lejeuneaceaeの種であった。着生苔類の種数・増加率は自然度の指標/森林再生評価の指標になると考えられた。また、*Mizutania riccardioides*、*Arachniopsis major*、*Zoopsis liukuensis*を指標植物として提示した。

地衣類種数はHD1区<LD1区<K1区であった。特に*Cladonia* spp.、*Coccocarpia pellita*、など大型地衣類は森林自然度の指標性が高い種だと思われた。*Durio acutifolius*と*Syzygium incarnatum*の2樹木の着生地衣類を対象に、地衣類活力評価値による森林再生評価法を検討した。本評価値は、HD1区<LD1区<K1区の順に高く、LD1区やHD1区では評価値の上昇が認められ、森林再生過程にあることが示唆された。生葉上地衣類は森林内でも目立ち、森林再生指標に適すると思われた。

蘚苔類・地衣類の多様性に対する森林再生中の微環境変化の影響を解析するため、生物/非生物的要因に有効な微環境計測システムを開発し現地計測した。K1区に比べHD1区では、日最高光量子束密度が高く、日最低相対湿度が低く、また日最高気温/地温が高い等が判り、蘚苔類・地衣類の多様性の違いや分布状況をある程度説明可能であった。

苔類や地衣類の多様性は、樹木の多様性とは相関がなく、土壌水分以外の微環境要因、特に湿度と相関が高かった。また、各調査区の種の共通率からも蘚類や樹木とは異なる結果を得た。

[キーワード] 森林火災、生物指標、蘚苔類、地衣類、微環境

1. はじめに

焼き畑農業や大規模土地開発に起因する森林火災が頻繁に発生しているインドネシアでは、火災による熱帯林の消失が、森林の物質生産性ばかりでなく、その基盤となる土壌の肥沃土、そこに生育する生物の種数・個体数・遺伝的多様性等に影響を及ぼすことが懸念されている。1997～1998年にはエルニーニョによる異常乾燥も影響し、インドネシアでは過去最大規模の森林火災が発生したが、基準となる熱帯林の環境や生物の記録が未整備のため、このような森林-土壌生態系への影響評価が困難であり、森林管理に支障をきたしている。そこで、森林火災が生態系・多様性に及ぼす影響および多様性を有する森林再生過程を評価するために、熱帯林における環境要素や多様な生物相を調査し、それらの相互作用等を解析した上で、適当な生物指標を用いた熱帯林再生評価手法の開発が望まれる。本研究では、森林と土壌の両面から森林再生過程について検討するが、多様性に富む森林再生を的確に評価するためには、熱帯林の環境変化に鋭敏に反応すると共にモニタリングが容易な生物種や生物現象を調査解析し、森林再生の生物指標を提示する必要がある。

蘚苔類や地衣類は生育に必要な水分や養分を植物体全体から吸収するため、大気や土壌等の環境要因に敏感で環境の指標植物となりうる¹⁾。森林火災による樹木焼失は、蘚苔類/地衣類にとって重要な生育の場（基物）が失われるだけでなく、光や水などの物理・化学的な生育環境も変化させるため、その構成種に大きく影響すると予想される。森林火災後のこれらの植物相の変化については、北米や欧州など温帯地域での報告はあるが^{2,3,4,5)}、熱帯地域からの報告はほとんど無い。さらには低地熱帯多雨林における蘚苔・地衣植物相の基盤的情報そのものが不十分である^{6,7,8)}。

2. 研究目的

本サブテーマでは、火災後の森林再生を森林環境に敏感な植物群（樹木以外）を用いて、生物多様性的観点から解析し、再生評価に有効な植生指標を提示することを主な目的とする。具体的には、1997～1998年に発生した過去最大規模の森林火災の影響地域の一つである、インドネシア国東カリマンタン州ブキットバンキライの火災被害度の異なる調査地域（重度被害林、軽度被害林および無被害林）で、以下の検討を行う。

（1）既存研究⁹⁾から、環境指標になりうると考えられる低地熱帯多雨林の蘚苔類相・地衣類相^{7,8)}を継続的に調査し、生物多様性の観点から森林再生過程を評価するために有用な植生指標、指標植物を抽出、提案する。（2）森林火災後の微環境変化を継続的に計測し、各調査地域の特性を明らかにし、森林樹木や蘚苔類/地衣類の多様性および植生指標との関連性を解析する。（3）低地熱帯多雨林における、蘚苔類・地衣類の種多様性に関するデータ、微環境データに関する情報を計測・整備し、基盤的情報として提供する。

3. 研究方法

インドネシア国東カリマンタン州バリクパパン北方約60km、東経116.52度、南緯1.15度、海拔約100mのブキットバンキライ地域（図5-1A）は、1997～1998年の大規模森林火災によって、ほとんどの地域が消失したが、火災の影響が比較的少ない林分、火災を免れた林分が残存していた。

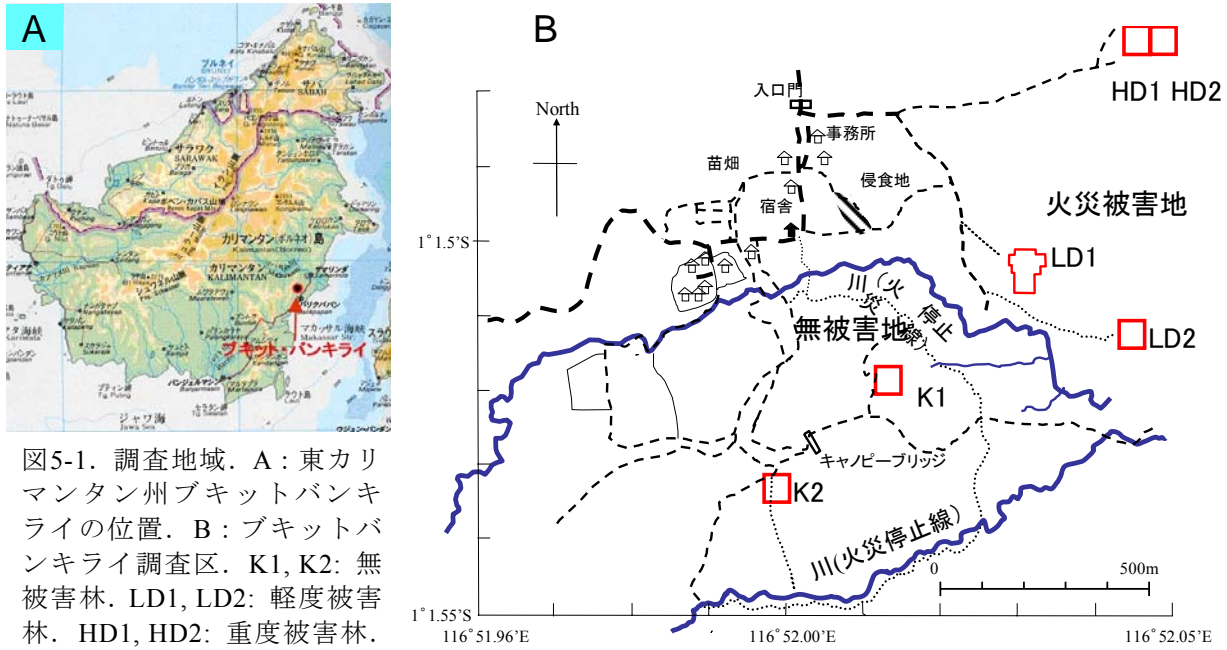


図5-1. 調査地域. A: 東カリマンタン州ブキットバンキライの位置. B: ブキットバンキライ調査区. K1, K2: 無被害林. LD1, LD2: 軽度被害林. HD1, HD2: 重度被害林.

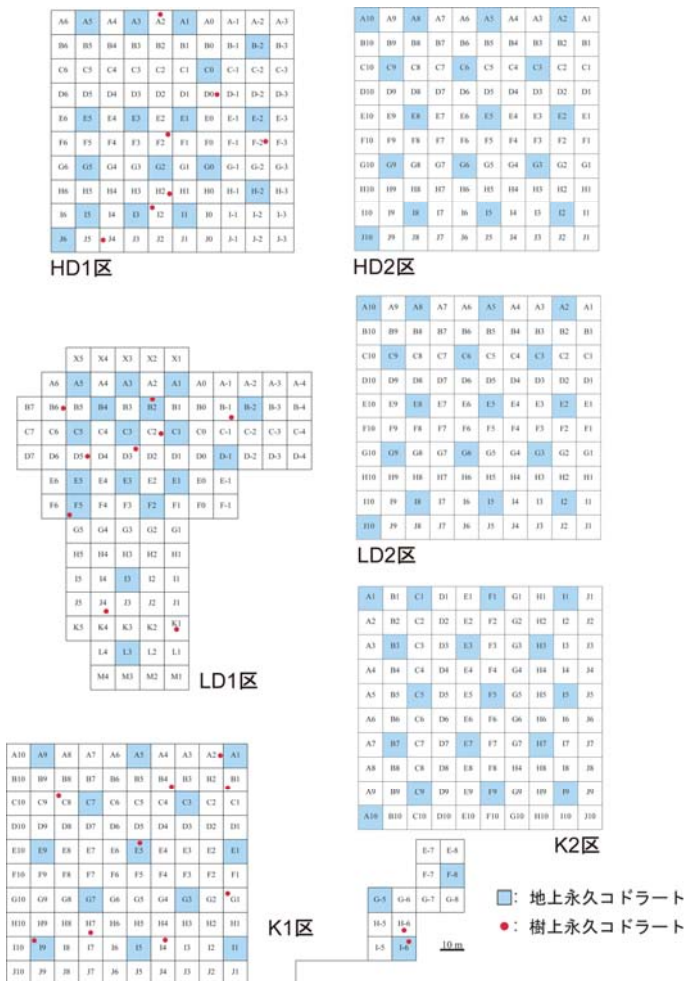


図5-2. 各調査区における調査畝区(地上永久コドラート)と樹上永久コドラートの分布.

そこで、同地域において森林火災の無被害林、軽度被害林、重度被害林と思われる場所に、各々約1haの継続調査区を、2001年に設定し、K区、LD区、HD区とした。2000～2002年度に掛けて、同地域で「森林火災の影響と回復に係わる調査研究」を行った⁹⁾。その後、今回の研究(2005～2007年度)を開始したが、以前の調査時に作成した調査区を再調査すると共に、無被害林、軽度被害林、重度被害林に、1つずつ新たな調査区を設置した。そこで、以前からの調査区をK1区、LD1区、HD1区とし、新しい調査区をK2区、LD2区、HD2区とした(図5-1B)。2005年9月、2006年9月、2007年9月の3回、蘚苔類と地衣類に係わる野外調査を行い、また、2006年3月～2008年2月にかけて、微環境計測器機を現地に設置し、低地熱帯多雨林の微環境を連続計測した。

(1) インベントリー調査

約1haの各調査区(K1, K2, LD1, LD2, HD1, HD2)内とその周辺部に出現する蘚苔類・地衣類のインベントリー調査を行い、低地熱帯多雨林のフロラ解明のための基盤データを集積した。



図5-3. 樹上永久コドラート調査の方法。

(20cm×20cm) を設置し、出現する植物の種および植被率を透明シートに記録した(図5-3)。現地で未同定の種については、樹上コドラートの周辺部に着生している同種のサンプルを採集して標本として持ち帰り、顕微鏡で観察して細胞形態レベルで植物分類学的研究を行った。また、透明シートの記録から、各植物種の植被率を算出した。

(4) 地衣類活力評価値による森林再生評価法

6つの調査区内の*Durio acutifolius*と*Syzygium incarnatum*の2樹木を対象木として、地上0～50cm、50～100cm、100～150cmを調査範囲とした。そこに生育する地衣類個体の生育型(葉状、樹状、固着、不完全地衣等)に、子器の有無や活力(緑色)度などを考慮した配点(地衣類の森林再生指数:Fi値)を与えた(表5-1)。これと生育個体数とを掛け合わせ、その合計値を地衣類活力評価値として算出し、森林再生評価を検討した⁸⁾。

表5-1. 地衣類の森林再生指数“Fi”値。生育形・繁殖器官・活力から算出^{1,2)}。

Thallus growth forms and taxonomical groups	“Fi” value
Fruticose lichen (Cladoniaceae) with apothecia	3.5
Fruticose lichen (Cladoniaceae), active ³⁾	3.2
Fruticose lichen (Cladoniaceae), less active ⁴⁾	3.2
Fruticose lichen with green photobionts (<i>Coenogonium</i> sp.), active	3.2
Filamentous lichen with green photobionts (<i>Coenogonium</i> sp.), less active	3.0
Crustose lichen (e.g. <i>Phaeographis</i> spp., <i>Thelotrema</i> spp.) with apothecia	1.5
Crustose lichen (e.g. <i>Phaeographis</i> spp., <i>Thelotrema</i> spp.), active	1.2
Crustose lichen (e.g. <i>Phaeographis</i> spp., <i>Thelotrema</i> spp.), less active	1.0
Filamentous lichen with cyanobacteria (<i>Dictyonema</i> cf. <i>moorei</i>)	1.0
Imperfect lichen (<i>Lepraria</i> spp. ⁵⁾)	0.5

¹⁾ HD区、LD区、K区の各地点において*Durio acutifolius*と*Syzygium incarnatum*の2樹種1本毎に、0～50cm、50～100cm、100～150cm 毎に調査した。“Fi”値は生育型(0.5、1.0、3.0)に、子器の存在(+0.5)、活力(+0.2)で決定した。

²⁾ 本調査地域内では、葉状地衣類と懸垂状地衣類の生育型は観察されなかった。

³⁾ 表中の“Active”とは、現地での観察で活力のある個体であり、きれいな緑色を有している。

⁴⁾ 表中の“Less active”とは、現地での観察において、緑色度が低く、活力が弱いと判断された個体である。

⁵⁾ *Lepraria* (レブラリア属)とされた中には、HD区やLD区で、森林火災の影響で皮層構造が破壊されたために*Lepraria* 状になった固着地衣類を含む可能性がある。なお、現地観察から明らかに死んでいる個体の評価は0点とした。

(5) 微環境計測システム

前回の研究(2000~2002年度)で、低地熱帯林の微環境計測を予備的に行ったが、その経験から、以下の問題点を整理した。日本等の温帯林と比べると、(a)一年中、強光かつ高温多湿であり、気温較差も大きく、またスコール型の豪雨が降る環境であり、特にデータロガー内の結露等による故障が多い。(b)強い蟻酸を持つ蟻や頑強な顎を持つ昆虫類もあり、特に土中のコード類が噛み切れ、ショートし易い。(c)猿やマレーグマ等の大型ほ乳類による、データロガーへの物理的損傷や、コード類が引きちぎられる等の被害が多い。

これらの問題点への対応として、(1)センサからデータロガーまでの防水性を最大限考慮した完全密閉型のセットとした。(2)また、コード類はステンレス製の自在管によって強度を増した。(3)データロガーの結露防止のため、防水型のポリカーボネート性の容器に収納した。容器の中には十分な乾燥剤を入れた。さらに、温度較差の影響を少なくするため、これを地中に埋めて使用した。以上の諸点を改良した微環境計測システムを開発し、K1、LD1、HD1の調査区内に各々5セット設置し(図5-4、5-5)、光量子束密度、気温、相対湿度、地温および土壌水分含量の微環境データを連続計測した。今回微環境計測に用いた機器の情報を表5-2に一覧としてまとめた。

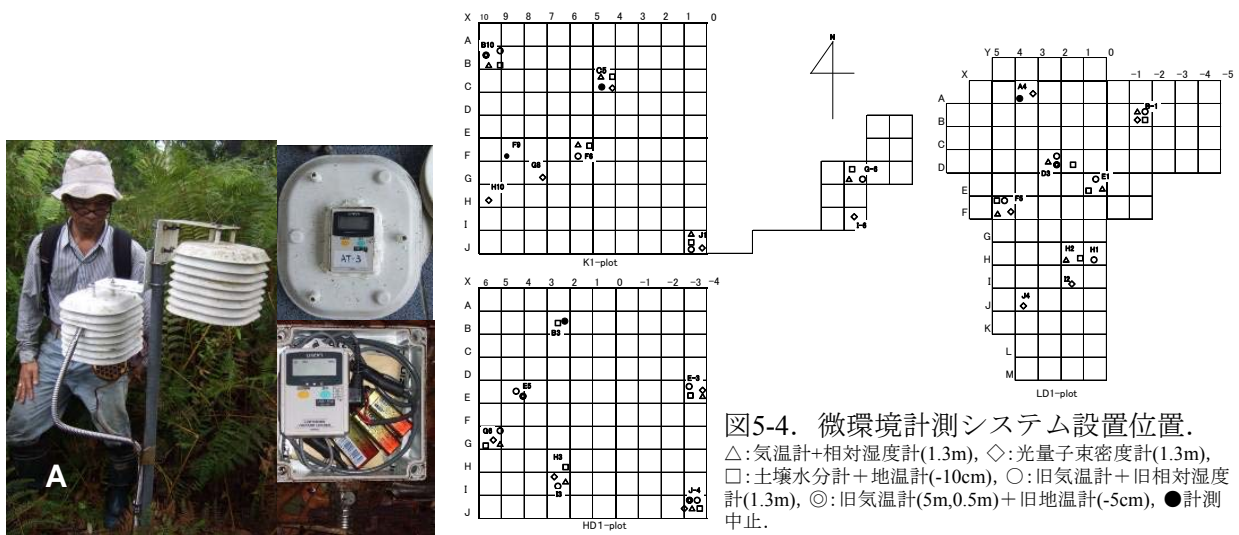


図5-5. 微環境計測システム. A: 大気温湿度, B: 光量子束密度, C: 土壌温度, D: 土壌水分.

表5-2. 各調査区に設置した微環境計測のためのセンサ・ロガー等器機一覧

微環境計測センサ	気温計	相対湿度計	光子束密度計	地温計	土壌水分計
測定形式	サーミスタ式	電気容量式	シリコン受光式	サーミスタ式	ADR式 ¹⁾
型番	UIZ3633(内蔵)	TA502	ML-020P	9631-01	SM200
会社名	(株)ウイジン	トウラスエンジニアリング(株)英弘精機(株)	(株)ウイジン	(株)ウイジン	Delta-T Devices(UK)
センサ保護容器	ソーラーラジエーションシールド	ソーラーラジエーションシールド	光子計保護容器	ステンレスパイプ	-
型番	RS1	RS1	ポリカーボネート製	φ8mm-6mm	-
会社名	オンセットコンピュータ(USA)	オンセットコンピュータ(USA)	(株)ウイジン製作	(株)ウイジン製作	-
ケーブル保護	-	水道用フレキパイプ ²⁾	水道用フレキパイプ	水道用フレキパイプ	水道用フレキパイプ
型番	-	0784-13×800, 2本	0784-13×800, 2本	0784-13×150, 1本	0784-13×600, 1本
会社名	-	(株)カクダイ	(株)カクダイ	(株)カクダイ	(株)カクダイ
対応データロガー	温度ロガー	プレヒート付き電圧ロガー	弱電圧ロガー	温度ロガー	プレヒート付き電圧ロガー
型番	UIZ3633	UIZ3635	UIZ3635-50mV	UIZ3633	UIZ3635
会社名	(株)ウイジン	(株)ウイジン	(株)ウイジン	(株)ウイジン	(株)ウイジン
ロガー保護容器	-	プラボックス ³⁾	プラボックス	プラボックス	プラボックス
型番	-	PBH7-1313G	PBH7-1313G	PBH7-0813G	PBH7-1313G
会社名	-	日東工業(株)	日東工業(株)	日東工業(株)	日東工業(株)

¹⁾ Amplitude-Domain Reflectometry(振幅領域反射率測定法)の略。

²⁾ センサやロガーとの結合部は全て防水剤(バスコーク白:セメダイン(株))を使用。

³⁾ 耐水性の保護容器で、フィンランドで制作されているものを輸入。
全てのボックス内には、乾燥剤(シリカゲル)を封入して使用。

4. 結果・考察

前回の一連の調査(2000~2002年度)で、ブキットバンキライのK1区、LD1区、HD1区における蘚苔類相や地衣類相を一応把握していた。今回の調査では、前回の標本試料も含めて整理し、再度チェックを行い、分類学的研究を進めた。また、生物指標を用いた森林回復の評価法については、継続的に解析すると共に、蘚苔類・地衣類の多様性と樹木の多様性の比較、さらに今回詳細に計測した微環境因子との関係等についても解析を試みた。これらの観点から、森林火災後の低地熱帯多雨林における生態系の回復過程を考察した。

(1) 低地熱帯多雨林の蘚苔類の多様性と植生指標による森林再生評価

2000~2002年度の調査を含めて、本研究では合計約6,000点の標本をブキットバンキライ地域から採集した。各調査期の標本数は次のとおりである。2001年2月(598点)、2001年9月(601点)、2002年2月(768点)、2002年7月(591点)、2003年1月(約100点)、2005年9月(411点)、2006年9月(1380点)、2007年9月(1535点)。これらの標本のうち、2003年1月に採集されたものはボゴール植物標本庫(BO)に保管されており、分類学的研究は完了していない。その他の標本は全て2分割し、BOおよび広島大学植物標本庫(HIRO)に保管した。

1) 低地熱帯多雨林の蘚苔類相

調査域の大部分は1997~1998年の大規模森林火災の影響を受けたが、被災後9年を経た2007年には植生がある程度回復し、重度の被害林分でも蘚苔類相の変化が見られた。調査地域である低地熱帯多雨林で、被害林分も含めて通常見られる蘚苔類の種および自然林で良く見られる種を図5-6に示す。各調査区の概況は以下のとおりである。

〔HD区〕森林火災による影響を強く受けたHD1区では、林冠部が消失したことにより林床部が明るくなり、被災後2年目には羊歯類が繁茂していた。羊歯類などの草本層の密度が高く、直射日

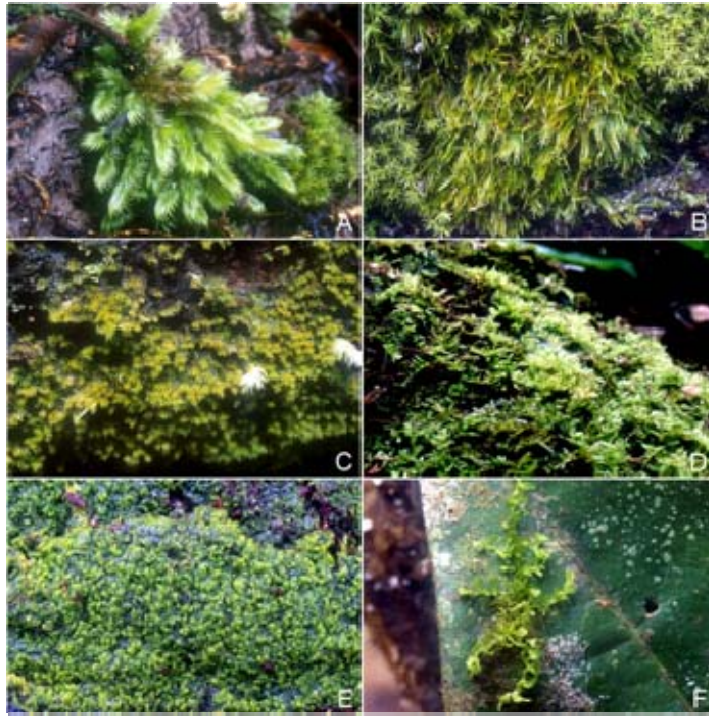


図5-6. 東カリマントン調査地域に普通に生育する蘚苔類 (A~E) および自然林に生育する蘚苔類 (F) .

A: *Leucobryum aduncum* Dozy & Molk. var. *teysmannianum* (Dozy & Molk.) T.Yamag., B: *Arthrocormus shimperi* (Dozy & Molk.) Dozy & Molk., C: *Syrrhopodon albovaginatatus* Schwägr., D: *Acanthorrhynchium papillatum* (Harv.) M.Fleisch., E: *Riccardia spongiosa* Furuki, F: *Colura* sp.

の高木が倒れたが、それによってギャップが生じ、ギャップ内の倒木上には蘚類の大きな群落も認められた。このような林内のギャップ構造は蘚苔類の多様性をむしろ高める効果があると考えられた。2007年の調査では苔類の種数が増加し、全体的に蘚苔類相の回復が認められた。LD2区はLD1区に比べて、やや乾燥した立地条件にあり、出現する蘚苔類種数も比較的少なかった。

〔K区〕森林火災の影響を受けなかったK区には、*Shorea*などからなる高木層が発達し、林床部は蘚苔類の生育には照度が低過ぎるようであった。そのため、多くの蘚苔類は樹幹部に着生したり、倒木によって生じたギャップ内に生育したりしていた。K1区の谷部では高湿度が保たれる場所が存在し、生葉上にも苔類の生育が認められた。2007年の調査まで、K1区内では大きな変化は認められなかったが、いくつかの大口徑の樹木の倒木、また落枝によってギャップの位置が変化した。とくに谷部で生じたギャップ内では多くの蘚苔類の着生が認められた。K2区は比較的乾燥した立地にあり、周囲の伐採の影響によってか、蘚苔類の出現種数はK1区よりも少なかった。

2000~2002年度の調査を含め、全調査区内外から合計約6,000点の標本を採集した。顕微鏡下での分類学的研究によって、これまでに変種を含めて、蘚類55種、苔類69種、合計124種の蘚苔類を確認した(表5-3)。ただし、苔類の多くについては種以下の同定が困難であり、形態的に識別可能な分類群として暫定的に分けた。種レベルで同定された蘚苔類のうち、37種については東カリマントン地域での新記録種である(表5-3)。一般に、熱帯において蘚苔類の生育に適しているのは、海拔1,000m付近の雲霧林である。例えば、ボルネオ(カリマントン)島は蘚苔類の多様性に富む地域として知られており、キナバル山を中心に約1,300種の蘚苔類が報告されている。しかし、

光によって土壤温度が上昇し、林内が乾燥するため、林床部は蘚苔類の生育に適していないと考えられた。また、わずかに残った高木にも着生蘚苔類はほとんど認められなかった。2001年には、裸地の炭化した木片上あるいは樹幹部付近にわずかに蘚苔類が生育している程度であった。しかしその後、*Macalanga*などの陽性樹木が成長し、とくに谷部では陰湿な環境が回復した。2007年の調査では、そのような陰湿地に生育する高等植物の生葉上に、クサリゴケ科苔類の着生が認められるほど蘚苔類相は回復していた。一方、斜面上部から丘部では羊歯類が繁茂し、乾燥した状態が続いていて、蘚苔類相の回復はほとんど認められなかった。HD1区に隣接したHD2区においても、蘚苔類相はほぼ同様であった。

〔LD区〕森林火災の影響が中程度だったLD1区では、2001年にも半数以上の高木が生残していた。火災によって一部

本研究調査地を含む東カリマントンからは、これまでにわずか266種の蘚苔類が報告されているだけであり、研究例がきわめて少ない^{10,11,12)}。本研究は、東カリマントン、特に低地の蘚苔類相を明らかにするうえで貴重な資料となった。

表5-3. ブキットバンキライで全調査期間中（2001～2007）に確認された蘚苔類リスト*

科名	種名	調査区	HD1	HD2	LD1	LD2	K1	K2
	BRYOPHYTA (蘚類)							
Polytrichaceae	<i>Pogonatum piliferum</i> (Dozy & Molk.) Touw	.	.	.	2	4	.	.
Fissidentaceae	<i>Fissidens crassinervis</i> Sande Lac.**	6	.	12	1	33	7	.
	<i>Fissidens gangulei</i> Nork. ex Gang.**	11	.	2	1	3	1	.
	<i>Fissidens hollianus</i> Dozy & Molk.**	.	.	.	.	1	.	.
	<i>Fissidens pellucidus</i> Hornsch.**	3	1	16	4	7	.	.
Dicranaceae	<i>Dicranella</i> sp.1	.	.	1	2	.	.	.
Leucobryaceae	<i>Leucobryum aduncum</i> Dozy & Molk.	15	.	12	.	1	.	.
	<i>Leucobryum aduncum</i> Dozy & Molk. var. <i>scalare</i> (Müll.Hal. ex M.Fleisch.) A.Eddy	31	1	9	1	3	.	.
	<i>Leucobryum aduncum</i> Dozy & Molk. var. <i>teysmannianum</i> (Dozy & Molk.) T.Yamag.**	38	.	29	1	12	.	.
	<i>Leucobryum chlorophyllosum</i> Müll.Hal.	9	1	15	3	26	3	.
	<i>Leucobryum sanctum</i> (Brid.) Hampe	52	1	61	1	93	5	.
Calymperaceae	<i>Arthrocormus shimperi</i> (Dozy & Molk.) Dozy & Molk.	97	19	185	17	226	37	.
	<i>Calymperes fasciculatum</i> Dozy & Molk.**	.	.	.	.	1	1	.
	<i>Calymperes lonchophyllum</i> Schwägr.	.	.	2	.	.	.	.
	<i>Calymperes palisotii</i> Schwägr.**	.	.	6	.	1	2	.
	<i>Calymperes serratum</i> A.Braun ex Müll.Hal.	.	.	1	.	.	.	.
	<i>Exostratum blumii</i> (Nees ex Hampe) T.L.Ellis	.	.	.	.	1	1	.
	<i>Leucophanes angustifolium</i> Renaud & Cardot**	8	2	3	5	.	13	.
	<i>Leucophanes glaucum</i> (Schwägr.) Mitt.**	4	.	.	.	.	.	.
	<i>Leucophanes octoblepharioides</i> Brid.**	48	2	31	1	29	.	.
	<i>Mitthyridium constrictum</i> (Sull.) H.Rob.**	.	.	1	.	.	.	.
	<i>Mitthyridium fasciculatum</i> (Hook. & Grev.) H. Rob.	1	.	1	.	1	2	.
	<i>Mitthyridium flavum</i> (Müll. Hal.) H. Rob.**	1	1	8	2	6	13	.
	<i>Mitthyridium repens</i> (Harv.) H.Rob.	32	6	55	11	13	3	.
	<i>Mitthyridium undulatum</i> (Dozy & Molk.) H.Rob.	1	.	18	.	14	6	.
	<i>Mitthyridium wallisii</i> (Müll.Hal.) H.Rob.	4	.	8	.	2	1	.
	<i>Octoblepharum albidum</i> Hedw.**	32	1	22	4	8	1	.
	<i>Syrrhopodon albovaginatus</i> Schwägr.	114	27	133	33	169	25	.
	<i>Syrrhopodon aristifolius</i> Mitt.	3	.	14	.	13	1	.
	<i>Syrrhopodon armatus</i> Mitt.**	16	6	16	9	14	1	.
	<i>Syrrhopodon ciliatus</i> (Hook.) Schwägr.	63	16	12	4	7	2	.
	<i>Syrrhopodon confertus</i> Sande Lac.	1	1	8	1	10	3	.
	<i>Syrrhopodon croceus</i> Mitt.	31	4	54	1	18	2	.
	<i>Syrrhopodon gardneri</i> (Hook.) Schwägr.**	4	2	16	1	12	8	.
	<i>Syrrhopodon hispidissimus</i> Dixon	3	1	7	2	9	1	.
	<i>Syrrhopodon involutus</i> Schwägr.	14	5	3	1	.	.	.
	<i>Syrrhopodon loreus</i> (Sande Lac.) Reese	5	.	7	.	16	6	.
	<i>Syrrhopodon muelleri</i> (Dozy & Molk.) Sande Lac.	.	.	.	1	14	24	.
	<i>Syrrhopodon rufescens</i> Hook. & Grev.**	1	2	3	1	.	.	.
	<i>Syrrhopodon sarawakense</i> (Dixon) W.D.Reese**	.	.	.	.	4	11	.
	<i>Syrrhopodon spiculosus</i> Hook. & Grev.	173	38	158	11	238	11	.
	<i>Syrrhopodon trachyphyllum</i> Mont.	2	.	11	2	.	4	.
Rhizogoniaceae	<i>Pyrrhobryum spiniforme</i> (Hedw.) Mitt.	13	2	77	1	160	15	.
Hypnaceae	<i>Pseudotaxiphyllum pohliaecarpum</i> (Sull. & Lesq.) Z.Iwats.**	.	.	.	.	1	.	.

表5-3. ブキットバンキライで全調査期間中（2001～2007）に確認された蘚苔類リスト（つづき）

科名	種名	調査区	HD1	HD2	LD1	LD2	K1	K2
Pylaisiadelphaceae	<i>Isopterygium minutirameum</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger**		2	.	3	.	1	.
	<i>Taxithelium kerianum</i> (Broth.) Broth.**		.	.	1	1	2	.
Sematophyllaceae	<i>Acanthorrhynchium papillatum</i> (Harv.) M.Fleisch.		77	4	198	5	169	41
	<i>Acroporium convolutum</i> (Sande Lac.) Fleisch.		1	1	2	.	2	3
	<i>Acroporium convolutum</i> (Sande Lac.) Fleisch. var. <i>elatum</i> (Dixon) B.C.Tan**		.	.	2	.	.	.
	<i>Acroporium diminutum</i> (Brid.) M.Fleisch.		20	4	47	7	134	11
	<i>Acroporium lamprophyllum</i> Mitt.**		9	.	12	1	14	5
	<i>Acroporium secundum</i> (Reinw. & Hornsch.) M.Fleisch.		.	.	.	1	.	.
	<i>Papillidiopsis ramulina</i> (Thawites & Mitt.) W.R.Buck & B.C.Tan**		.	.	4	.	1	1
	<i>Radulina borbonica</i> (Bél.) W.R.Buck**		1	.	.	.	.	.
	<i>Trichosteleum boschii</i> (Dozy & Molk.) A.Jaeger**		11	.	17	6	6	1
蘚類種数合計			39	24	45	34	43	35
MARCHANTIOPHYTA (苔類)								
Pallaviciniaceae	<i>Pallavicinia</i> sp.1		.	.	1	.	8	2
Aneuraceae	<i>Aneura</i> sp.1		.	.	.	.	.	1
	<i>Riccardia baumannii</i> Huerl.**		14	.	9	1	9	.
	<i>Riccardia graeffei</i> (Steph.) Hewson**		2	.	3	.	3	.
	<i>Riccardia spongiosa</i> Furuki**		4	.	5	1	4	.
	<i>Riccardia tenuicostata</i> Schiffn.**		2	.	7	1	5	.
Radulaceae	<i>Radula anceps</i> Sande Lac.		.	.	1	.	.	.
	<i>Radula javanica</i> Gottsche**		.	.	.	.	2	.
	<i>Radula</i> sp.1		.	.	7	.	2	1
	<i>Radula</i> sp.2		.	.	.	.	.	1
Frullaniaceae	<i>Frullania neosheana</i> S.Hatt.**		.	.	.	.	1	.
	<i>Frullania</i> sp.1		.	.	2	.	8	1
Lejeuneaceae	<i>Acrolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	.	1
	<i>Aphanolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	1	1
	<i>Archilejeunea planiuscula</i> (Mitt.) Steph.**		.	.	.	.	2	.
	<i>Ceratolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	3	1
	<i>Cheilolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	1	.
	<i>Cololejeunea</i> sp.1		1	.	.	.	.	1
	<i>Cololejeunea</i> sp.2		1	.	.	.	1	4
	<i>Cololejeunea</i> sp.3		1	.	1	.	.	1
	<i>Cololejeunea</i> sp.4		.	.	.	.	2	6
	<i>Cololejeunea</i> sp.5		.	.	11	.	20	2
	<i>Cololejeunea</i> sp.6		.	.	.	.	2	1
	<i>Colura</i> sp.1		7	.	13	.	4	2
	<i>Colura</i> sp.2		2	.	2	.	.	.
	<i>Drepanolejeunea</i> sp.1		.	.	1	.	4	2
	<i>Drepanolejeunea</i> sp.2		.	.	1	.	4	8
	<i>Drepanolejeunea</i> sp.3		.	.	.	.	2	4
	<i>Drepanolejeunea</i> sp.4		.	.	.	.	.	1
	<i>Drepanolejeunea</i> sp.5		.	1	.	.	.	.
	<i>Lejeunea anisophylla</i> Mont.**		.	.	.	.	4	.
	<i>Lejeunea</i> sp.1		.	.	11	2	23	5
	<i>Lejeunea</i> sp.2		.	.	.	1	.	1
<i>Lejeunea</i> sp.3		.	.	.	.	.	2	
<i>Lepidolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	.	3	
<i>Lepidolejeunea</i> sp.2		.	.	.	.	.	4	
<i>Lepidolejeunea</i> sp.3		.	.	.	.	.	6	

表5-3. ブキットバンキライで全調査期間中（2001～2007）に確認された蘚苔類リスト（つづき）

科名	種名	調査区	HD1	HD2	LD1	LD2	K1	K2
	<i>Lepidolejeunea</i> sp.4		.	.	.	.	.	1
	<i>Leptolejeunea</i> sp.1		3	.	32	1	15	17
	<i>Leptolejeunea</i> sp.2		4	.	3	.	.	3
	<i>Leptolejeunea</i> sp.3		.	.	.	.	.	1
	<i>Lopholejeunea</i> sp.1		.	.	1	1	2	2
	<i>Lopholejeunea</i> sp.2		.	.	.	.	2	.
	<i>Pictolejeunea</i> sp.1		.	.	2	.	2	.
	<i>Pictolejeunea</i> sp.2		.	.	.	.	1	.
	<i>Ptychanthus</i> sp.1		.	.	.	.	1	1
	<i>Ptychanthus</i> sp.2		.	.	2	.	.	.
	<i>Pycnolejeunea</i> sp.1		.	.	.	.	.	1
	<i>Thysananthus spathulistipus</i> (Reinw., Blume & Nees)		.	.	.	.	2	.
	Lindenb.**		.	.	.	.	.	.
	<i>Thysananthus</i> sp.1		.	.	1	.	.	.
	<i>Thysananthus</i> sp.2		.	.	1	.	.	.
	<i>Thysananthus</i> sp.3		.	.	1	.	5	.
	<i>Tuyamaella</i> sp.1		.	.	.	.	.	2
Cephaloziaceae	<i>Cephalozia</i> sp.1		7	1	1	1	.	1
	<i>Cephalozia</i> sp.2		2	.	.	.	.	.
Calypogeiaceae	<i>Calypogeia arguta</i> Nees & Mont.**		.	.	.	.	3	1
Mizutaniaceae	<i>Mizutania riccardioides</i> Furuki & Z.Iwats.**		.	.	.	.	.	2
Geocalycaceae	<i>Heteroscyphus</i> sp.1		.	.	.	1	2	.
	<i>Lophocolea</i> sp.1		.	.	.	.	1	.
Plagiochilaceae	<i>Plagiochila</i> sp.1		.	.	.	.	1	3
Lepidoziaceae	<i>Acromastigum inaequilaterum</i> (Lehm. & Lindenb.) A.Evans		.	.	35	.	75	13
	<i>Arachniopsis major</i> Herzog**		.	.	2	.	1	.
	<i>Bazzania densa</i> (Sande Lac.) Schiffn.		.	.	.	.	2	.
	<i>Bazzania</i> sp.1		1	.	.	.	4	9
	<i>Bazzania</i> sp.2		3	.	8	.	16	2
	<i>Bazzania</i> sp.3		.	.	.	.	.	4
	<i>Bazzania</i> sp.4		.	.	.	.	.	1
	<i>Lepidozia wallichiana</i> Gottsche		.	.	2	.	7	.
	<i>Zoopsis liukuensis</i> Horik.		.	.	7	.	18	13
苔類種数合計			15	2	29	9	42	43
蘚苔類の全種数合計			54	26	74	43	85	78

*表中の各種に対する数値は、各調査区で採集されたその種の標本数を示す。

**東カリマンタン地域（Kalimantan Timur, Indonesia）での新記録種を示す。

一般に、熱帯の低海拔地域は高温・乾燥のため蘚苔類の出現種数も限られる。しかし、今回確認された124種は、限られた調査面積からすると決して少なくはない。本調査地のように低海拔地域で新たに37種が確認されたことから、山岳部を含めればさらに多くの新記録種が見出される可能性が極めて大きい。熱帯林の蘚苔類多様性については、まだ未開拓の分野であり、今後さらに広域の調査を実施することが重要であろう。

調査地域で見出された蘚類55種のうち31種がCalymperaceae（図5-6 B、C）に属していた。Calymperaceaeは葉先に無性散布体である小形の無性芽を多数形成し、それらを風によって分散させ、個体群を維持・拡大することが可能である。観察したCalymperaceaeの個体群内には、無性芽ばかりでなくしばしば孢子体形成も認められた。このような旺盛な繁殖力と、葉細胞に乳頭状突起を密生させることによって乾燥に対しても耐性をもつ形態的特徴は、熱帯低地の環境に適応し

ているものと考えられた。その他、Sematophyllaceae（図2-D）の9種、Leucobryaceae（図2-A）の5種が頻繁に出現するなど、本調査地域は熱帯低地の特徴を良く示していた。

本調査地域で、全調査期間中に確認された蘚苔類の種数を調査区別にみると、HD1区：54種、HD2区：26種、LD1区：74種、LD2区：43種、K1区：85種、K2区：78種となり、森林火災の影響を強く受けた調査区ほど種数が減少していた（表5-3）。しかし、蘚類に関してだけ言えば、各調査区でそれほど顕著な差は認められなかった（図5-7）。それに対し苔類の出現種数は、HD1区：15種、LD1区：29種、K1区：42種であり、明らかに森林火災の影響が重度な林分ほど苔類の種数は減少していた。3区間で出現に差がみられた苔類の大部分は、樹上あるいは生葉上に着生するRadulaceae、Frullaniaceae、Lejeuneaceaeの種であった。これら樹上や生葉上の苔類の生育には、安定した高湿度条件が必要であると考えられた。

2) 森林火災回復過程の蘚苔類植生の遷移と種多様性

① 林床の蘚苔類相の遷移

HD1区、LD1区、K1区では2001～2007年に、HD2区、LD2区、K2区では、2005～2007年に地上永久コドラートで調査を行った（図5-2）。種レベルでの同定が終了した蘚類について、調査期間中の蘚類種数の変化を図5-7に示す。調査期ごとに若干の出現種数に変化が認められるが、HD1区、LD1区において、一定の傾向（植生回復に伴う種数の増加など）は認められなかった。地上永久コドラート各亜区の変化をみても、同様に一定の傾向は認められなかった。全体的にみて蘚類では、LD1区で出現種数が最も多く、HD1区もK1区とほぼ同数であった。出現する蘚類の多くが、陽地生で耐乾性、繁殖力にすぐれるCalymperaceaeであり、これに属する種にとっては、攪乱された森林環境が生育に適しているものと考えられた。

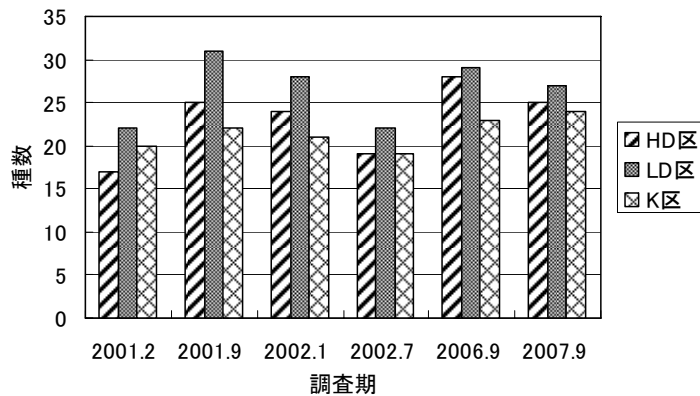


図5-7. 地上永久コドラートに出現した蘚類の合計種数。HD1, LD1, K1のデータのみを比較。同定が不完全な2003年1月、2005年9月のデータは除外。

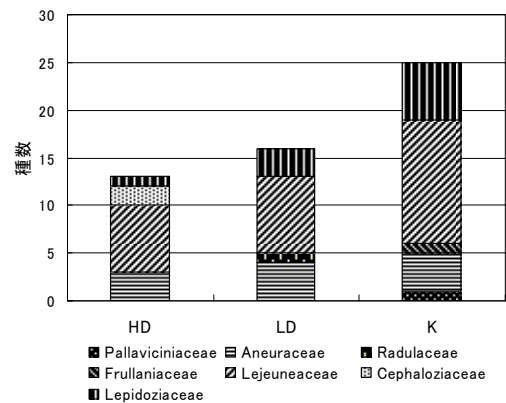


図5-8. 2007年9月調査時の地上永久コドラートに出現した苔類の種数。HD1, LD1, K1のデータのみを比較。

苔類の同定は完全とは言えないまでも、森林火災の影響が大きいほど種数は少なくなっていた。湿った土上や朽木上に生育する苔類、Pallaviciniaceae、Aneuraceaeでは（図5-6 E）、3区間に顕著な差は認められないが、樹上および生葉上に着生するRadulaceae、Frullaniaceae、Lejeuneaceaeの苔類では、 $K1 > LD1 > HD1$ の順で種数が多くなっていた（表5-3、図5-8）。2007年の調査では、以前に

比べ、各調査区の苔類種数が急激に増加しており、K1区では谷部の地上永久コドラート内の倒木によるギャップ生成が、また、LD1区やHD1区では樹木植生回復が影響したと考えられた。特にHD1区の谷部では、2007年の調査で多くの生葉上生苔類（図5-6 F）が初めて確認された。このHD1区谷部は、部分的ではあるが、蘚苔類の生育環境としては自然林に近付いたものと考えられた。

② 樹上の蘚苔類相の遷移

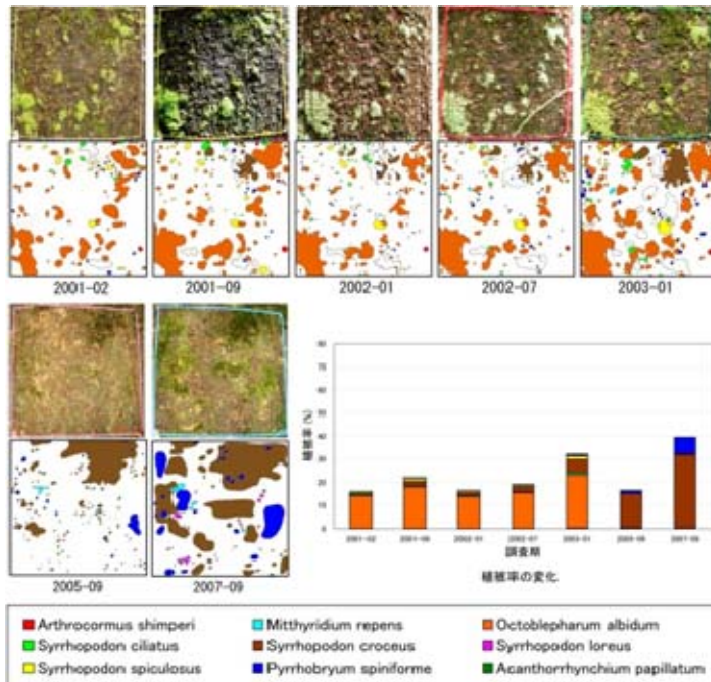


図5-9. HD1区樹上永久コドラートA2区区の着生蘚苔類の経年変化。被着生樹種: *Dehaasia* sp.

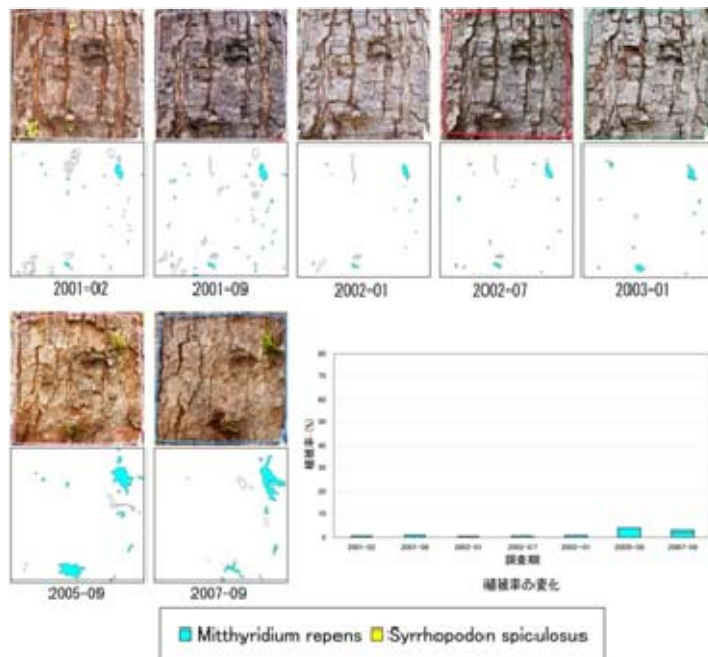


図5-10. HD1区樹上永久コドラートJ4区区の着生蘚苔類の経年変化。被着生樹種: *Schima wallichii*.

調査期間中（2001～2007年）存続していた、樹上永久コドラートは、HD1区で7個、LD1区で9個、K1区で9個であった（図5-2）。地衣類が主に生育していたコドラートもあり、蘚苔類が着生していたのは、HD1区で3個（A2、I2、J4）、LD1区で5個（B2、B6、B-1、C2、D3）、K1区で8個（B1、B4、C8、G1、H7、H-6、I4、I-6）であった。これらの樹上永久コドラート内の蘚苔類相の遷移を図5-9～5-13に示した。

HD1区の谷部にあるA2区区は、比較的陰湿な環境下であり、HD区内では例外的に種数も多く、植被率も高い。本樹上コドラートでは、2005～2007年にかけて、それまで優勢であった陽地生の *Octoblepharum albidum* が減少・消滅し、陰地生の *Pyrrhobryum spiniforme* が急激に増加していた（図5-9）。これは、谷部における生葉上苔類の増加の時期とも一致していた。この時期に植生が回復し、陰地生蘚苔類の生育に適した環境になったと考えられた。これと同様にHD1-I2区区でも、陽地生蘚類の減少が認められた（図5-13）。一方、丘上にある最も乾燥したJ4区区では、周辺の樹木が消失した中で残った孤立木に、樹上永久コドラートを設置した。ここでは、陽地生の *Mitthyridium repens* がわずかに着生し、その群落が7年を経て、徐々に植被を増加させたが、顕著な変化は見られなかった（図5-10）。このように、HD1区内の樹上着生蘚苔類相の遷移は場所によって大きく異なる

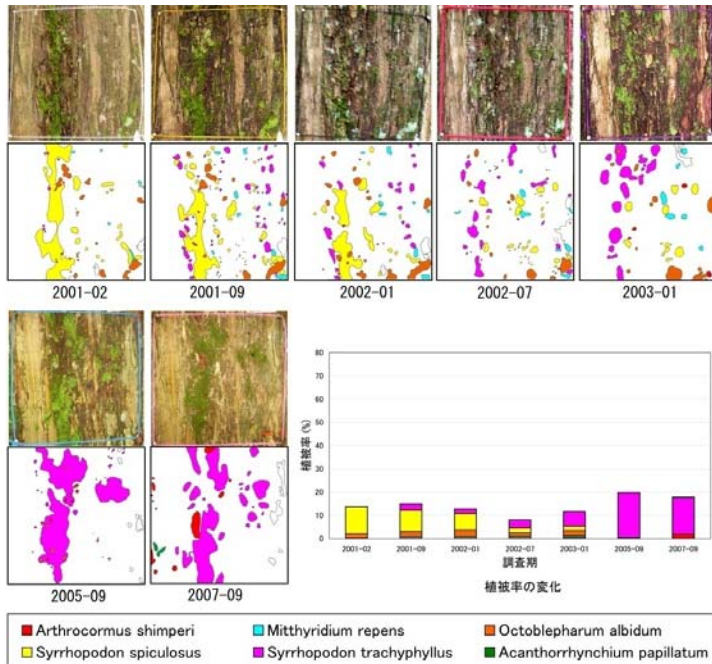


図5-11. LD1区樹上永久コドラートC2亜区の着生蘚苔類の経年変化. 被着生樹種: *Scorodocarpus borneensis*.

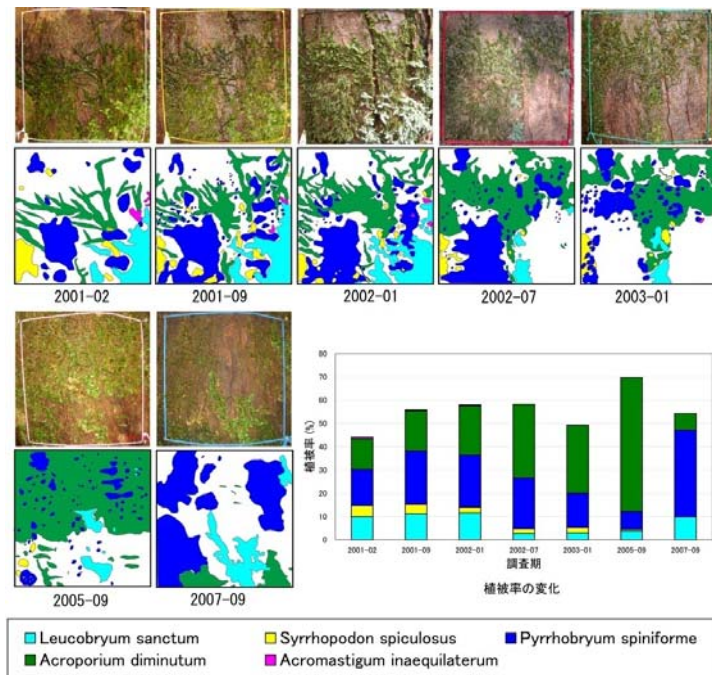


図5-12. K1区樹上永久コドラートH7亜区の着生蘚苔類の経年変化. 被着生樹種: *Shorea laevis*.

として換算した。 β 多様度指数の値が大きいほど、出現種数と各種の植被率からみて多様性が大きいことを示す。LD1区とK1区は、HD1区に比べて、樹皮着生蘚苔類の多様度が大きいことが明らかになった。個々の樹上コドラートの多様度の経年変化はばらつきがあり、一定の傾向は認められなかった。これは、前述したようにギャップ形成などによって、林床の光環境をはじめとする微環境が変化し、種の侵入・消失等が引き起こされ、多様度が変化するためと考えられた。

っていた。

LD1区のC2亜区では、*Syrrhopodon spiculosus*の植被率が減少し、同属の*S. trachyphyllus*の植被率が増加した(図5-11)。両種は生育型や植物体のサイズは似ているが、微環境の変化あるいは種間競争によって減少・増加したものと考えられた。その他、LD1区においては同一種の増減や(図5-13: B2、B-1)、HD1区とは逆の、陰地生種から陽地生種への遷移(図5-13: D3)などが認められた。これは、倒木や落枝により、光環境が変化したためと考えられた。

K1区のH7亜区は陰湿な環境下にあり、全体的に植被率が高く、*Acromastigum inaequilaterum*などの苔類の着生も認められた(図5-12)。K1区のコドラートでは、LD1区と同様に種間競争や(図5-12、図5-13: I-6)、同一種の増減(図5-13: B1、B4、C8、G1、H-6)の他、陽地生種から陰地生種への変化(図5-12: I4)などが認められた。ここでも、倒木や落枝などの影響により、着生蘚苔類相が変化したものと考えられた。K1区では蘚類のほかに、*Acromastigum*や*Bazzania*などの苔類種が出現していた。これらの苔類の出現は、HD1区、LD1区と比較して、K1区がより安定した湿度条件を有しているためであると考えられた。

出現種数と各種の植被率をもとに、森下¹³⁾(1967)の β 多様度指数を、調査区ごとに算出した(図5-14)。ただし、ここでは植被率を個体数に相当するもの

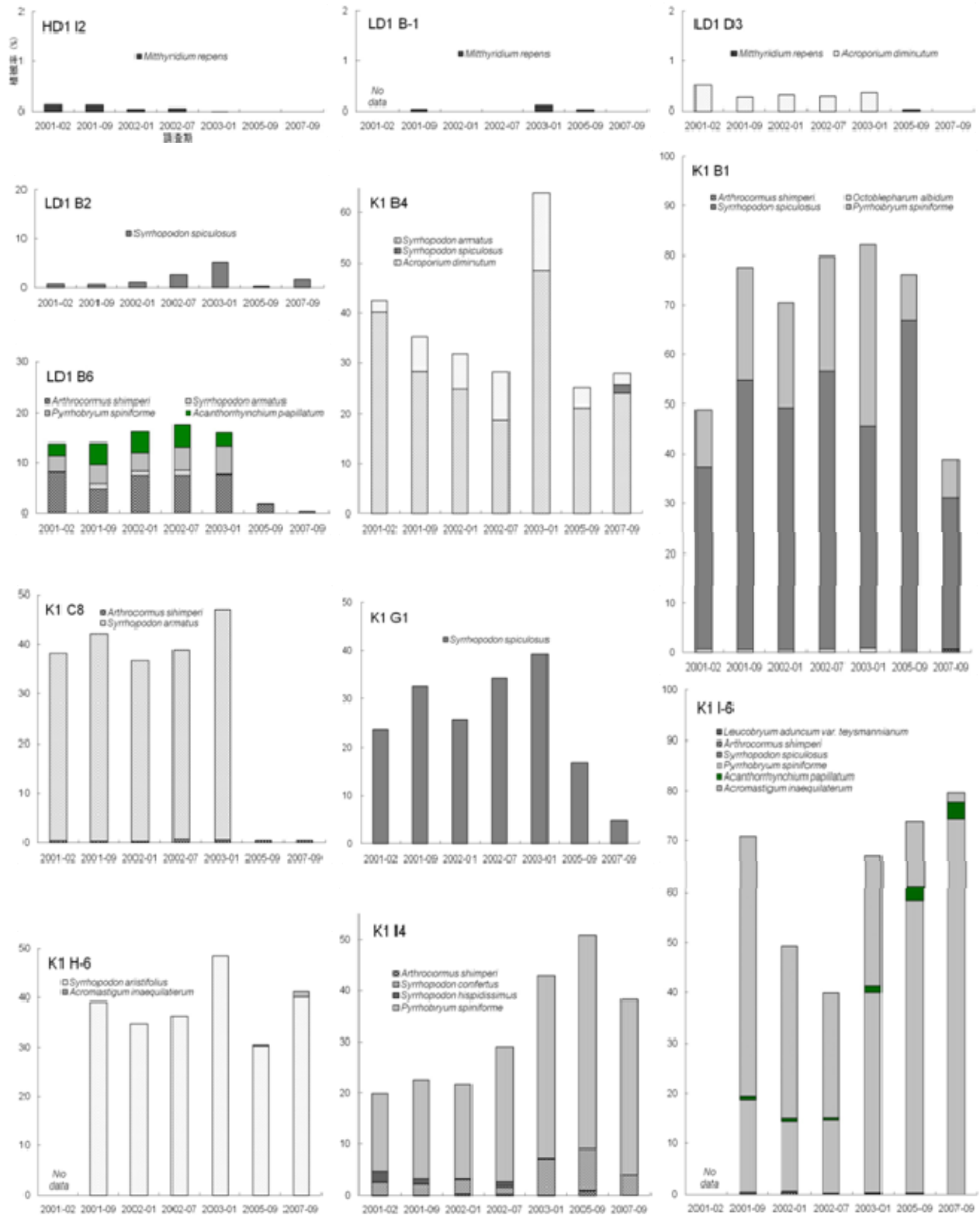


図5-13. 樹上永久コドラート上の着生蘚苔類の植被率の経年変化. HD1区I2亜区のコドラートは2005年以降、LD1区D3亜区のコドラートは2007年に、被着生樹木が倒木したためにデータは無い. LD1区B-1亜区およびK1区H-6亜区とI-6亜区の樹上コドラートは、2001年9月から調査を開始した.

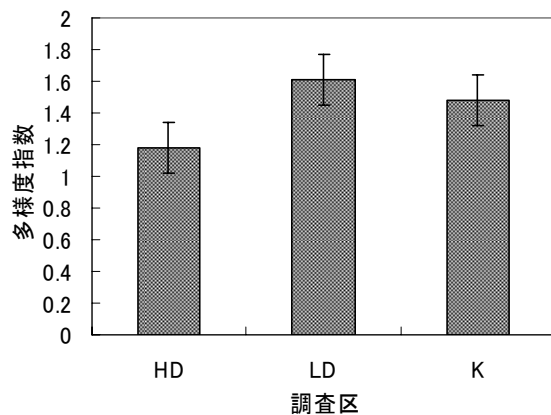


図5-14. 樹上永久コドラートに出現した蘚苔類の各調査区の平均値および標準誤差. 多様度指数は、森下(1967)¹³⁾の β 指数を一部改変.

$$\beta = \frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

森下(1967)ではNは総個体数、 n_i はi番目の個体数となるが、ここでは各々全体の被度およびi番目の種の被度とした. この指数の値が大きいほど多様性の高い、複雑な群落といえる.

3) 低地熱帯多雨林の自然度を示す植生指標

森林火災の影響を受けた重度被害林 (HD1区、HD2区) や軽度被害林 (LD1区、LD2区) に最初に出現する種は、影響を受けなかった無被害林 (K1区、K2区) に生育する種のうち、繁殖力と耐乾燥性に優れたCalymperaceaeなどの蘚類種が再侵入し、定着したものと考えられる。火災後の強光の下での高温・乾燥条件下では、蘚苔類相全体に占めるCalymperaceaeの種数の割合が大きくなる傾向が見出された (表5-3)。

K1区、K2区および自然林内における林床は、火災の影響を受けずに十分に腐食した朽木が存在する。これらは、周囲が高木・亜高木層に被覆され、安定した温度・湿度条件下に置かれていると考えられる。このような朽木が微地形的に安定した高湿度条件下に存在した場合、比較的微小な苔類である、*Mizutania riccardioides*、*Arachniopsis major*、*Zoopsis liukiensis*など (図5-15) が特徴的に出現した。出現する頻度はそれほど高くないが、*M. riccardioides*はK2区のみ、*A. major*はL1区とK1区に見いだされた。また、*Z. liukiensis*はL1区とK1区、K2区に比較的高い頻度で出現した。重度被害林では、林床部の焼失および木本層の倒壊によって、上記の苔類の生育可能な環境条件も損なわれたと考えられる。すなわち、これら3種は、低地熱帯多雨林における高い自然度を示す指標植物であると考えられた。また、樹上あるいは生葉上に着生する苔類は、森林火災の影響を受けなかった林分ほど、また被災林では火災後の経過期間が長いほど、種数が増加していた。このことから着生苔類の種数および増加率も自然度の指標、すなわち森林再生を評価する良い指標になると考えられた。

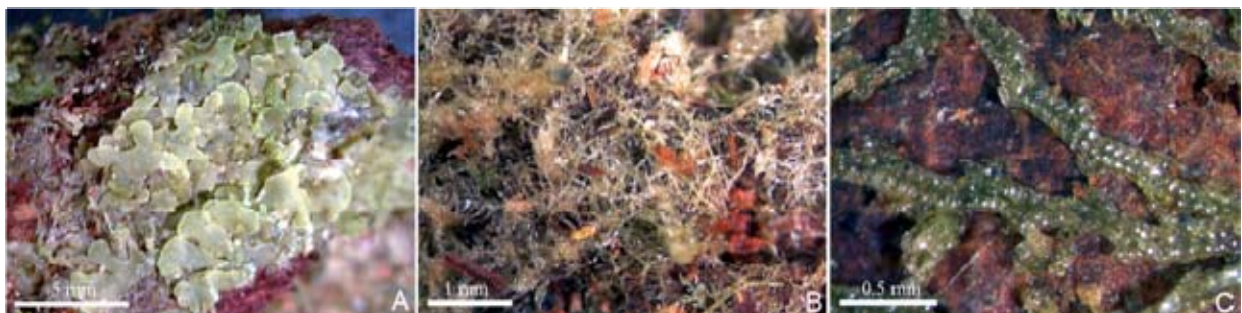


図5-15. 自然林内で特徴的に出現する苔類. A : *Mizutania riccardioides* Furuki & Z.Iwats., B : *Arachniopsis major* Herzog, C : *Zoopsis liukiensis* Horik.

(2) 低地熱帯多雨林の地衣類の多様性と森林火災回復評価手法の開発

蘚苔類の調査と並行して、森林火災からの回復過程における地衣類の多様性を調査し、植生指標を利用する森林再生評価手法の開発について検討した。2000～2002年度に調査したK1区、LD1区、HD1区に加え、2005～2007年度に新たに3地点（K2区、LD2区、HD2区）設置した（図5-2）。2001～2007年にかけて、これまで合計8回の調査を行った。2005～2007年度では403点の標本を採集した。2001年からの調査では、合計1730点の標本を得、48分類群を確認した。標本の一部はボゴール植物標本庫に、また佐賀大学の宮脇研究室に保管され、分類学的な研究が続けられている。

1) 低地熱帯多雨林の地衣類相

東カリマンタンのブキットバンキライで、森林火災の無被害区、軽度被害区、重度被害区で地衣類相の調査を行ったが、2005～2007年度に新たに設置したK2区、LD2区、HD2区に関しては、まだ同定作業が完了しておらず、今回は、2001年から継続的に標本を採集してきたK1区、LD1区、HD1区の結果を中心に解析した。なお、同定は、吉村（1974）による形態・化学分析法を改良して行った。暫定的なものを含めているので分類群といった方が正しいが、ここでは種と記載する。各調査区における2000～2002年度の種数と2005～2007年度の種数を表5-4にまとめた。

表5-4. ブキットバンキライで2000～2002年度と2005～2007年度に確認された地衣類リスト*

種名	共生藻 ¹⁾	生育形 ²⁾	2000-2002			2005-2007		
			HD1	LD1	K1	HD1	LD1	K1
<i>Arthonia</i> sp.1	G	crustose	0	2	0	1	4	2
<i>Arthonia</i> sp.2	G	crustose	1	1	1	0	1	1
<i>Arthonia</i> sp.3	G	crustose	0	1	1	0	2	1
<i>Bacidia</i> sp.	G	crustose	0	0	2	0	2	1
<i>Badimia</i> sp.	G	crustose	0	1	4	0	0	4
<i>Brigantiaea</i> sp.	G	crustose	0	1	2	1	1	4
<i>Buellia</i> sp.	G	crustose	0	0	0	0	1	2
<i>Byssoloma</i> sp.1	G	crustose	1	2	5	0	1	5
<i>Byssoloma</i> sp.2	G	crustose	0	0	0	0	2	0
<i>Calicium</i> sp.	G	crustose	1	1	4	0	1	0
<i>Candelariella</i> sp.	G	crustose	0	0	1	0	1	4
<i>Cladonia</i> sp.1	G	squamulose	0	1	5	0	0	1
<i>Cladonia</i> sp.2	G	squamulose	0	1	1	0	1	5
<i>Coccocarpia pellita</i>	cb	foliose	0	1	2	0	1	2
<i>Coenogonium</i> sp.1	G	filamentous	0	0	1	1	1	1
<i>Coenogonium</i> sp.2	G	filamentous	0	1	1	0	2	1
<i>Coenogonium</i> sp.3	G	filamentous	0	0	1	0	0	1
<i>Cyclographina</i> cf. <i>macgreorii</i>	G	crustose	0	1	1	0	1	1
<i>Cryptothecia</i> sp.	G	crustose	0	1	0	0	1	0
<i>Dictyonema</i> sp.1	cb	blanket-shaped	5	0	0	0	1	0
<i>Dictyonema</i> sp.2	cb	blanket-shaped	2	1	0	1	0	0
<i>Dimerella</i> sp. **	G	crustose	1	1	4	0	5	7
<i>Dimerella</i> cf. <i>epiphylla</i> **	G	crustose	1	1	1	0	1	1
<i>Dimerella</i> cf. <i>fallaciosa</i> **	G	crustose	0	1	1	1	2	1
<i>Dimerella</i> cf. <i>flavicans</i> **	G	crustose	0	0	1	0	1	2
<i>Echinoplaca</i> sp.1	G	crustose	0	1	1	3	5	5
<i>Echinoplaca</i> sp.2	G	crustose	0	2	4	0	0	2
<i>Fellhanera</i> sp.	G	crustose	0	2	1	0	1	0

表5-4. ブキットバンキライで2000～2002年度と2005～2007年度に確認された地衣類リスト(つづき)

種名	共生藻 ¹⁾	生育形 ²⁾	2000-2002			2005-2007		
			HD1	LD1	K1	HD1	LD1	K1
<i>Graphis</i> sp.	G	crustose	0	3	2	0	1	5
<i>Graphina</i> sp.	G	crustose	0	1	2	0	1	3
<i>Gyalectidium</i> sp.	G	crustose	0	2	4	0	1	4
<i>Lasioloma</i> sp.	G	crustose	0	1	0	0	0	4
<i>Lecanora</i> sp.	G	crustose	0	1	2	0	2	4
<i>Lepraria</i> sp.1	G	crustose	25	30	24	22	24	21
<i>Lepraria</i> sp.2	G	crustose	0	8	9	7	8	7
<i>Lepraria</i> sp.3	G	crustose	2	2	2	0	1	1
<i>Lepraria</i> sp.4	G	crustose	0	1	1	0	1	1
<i>Leptogium</i> sp.	cb	foliose	0	0	0	0	0	1
<i>Mazosia</i> sp.	G	crustose	0	0	4	0	4	4
<i>Megalospora</i> sp.	G	crustose	0	1	1	1	1	2
<i>Ocellularia</i> sp.1	G	crustose	0	1	1	0	2	1
<i>Ocellularia</i> sp.2	G	crustose	0	0	4	1	1	2
<i>Ocellularia</i> sp.3	G	crustose	0	2	2	1	5	1
<i>Ocellularia</i> sp.4	G	crustose	0	0	3	1	1	5
<i>Ocellularia</i> sp.5	G	crustose	0	1	1	1	0	1
<i>Opegrapha</i> sp.	G	crustose	0	1	2	0	2	1
<i>Pertusaria</i> sp.1	G	crustose	1	2	1	0	0	1
<i>Pertusaria</i> sp.2	G	crustose	0	0	5	0	1	1
<i>Pertusaria</i> sp.3	G	crustose	2	1	1	0	1	4
<i>Pertusaria</i> sp.4	G	crustose	0	1	1	0	1	4
<i>Phaeographina</i> sp.	G	crustose	1	1	2	1	1	8
<i>Phyllobathelium</i> sp.	G	crustose	1	1	1	1	2	3
<i>Porina</i> sp.1	G	crustose	1	4	5	1	3	1
<i>Porina</i> sp.2	G	crustose	1	2	1	0	1	2
<i>Porina</i> sp.3	G	crustose	0	3	4	2	2	6
<i>Porina</i> sp.4	G	crustose	0	1	2	0	1	1
<i>Porina</i> sp.5	G	crustose	1	2	3	0	1	1
<i>Pyrenula</i> cf. <i>gigas</i>	G	crustose	0	1	1	0	1	2
<i>Sarcographa</i> sp.	G	crustose	0	5	2	3	3	8
<i>Sarcographa</i> cf. <i>Leprieurii</i>	G	crustose	0	1	1	0	1	5
<i>Semigyalecta</i> sp.	G	crustose	0	4	1	0	1	2
<i>Squamella</i> sp.	G	squamulose	0	2	1	0	1	5
<i>Strigula</i> sp.1	G	crustose	0	3	3	0	1	5
<i>Strigula</i> sp.2	G	crustose	0	3	1	3	9	1
<i>Strigula</i> sp.3	G	crustose	0	1	1	0	1	6
<i>Thelotrema</i> sp.1	G	crustose	2	5	4	4	12	10
<i>Thelotrema</i> sp.2	G	crustose	0	2	2	1	8	14
<i>Thelotrema</i> sp.3	G	crustose	1	2	3	1	2	4
<i>Thelotrema</i> sp.4	G	crustose	5	0	1	1	1	1
<i>Tricharia</i> sp.	G	crustose	1	1	4	1	4	6
<i>Trichothelium</i> sp.	G	crustose	1	1	1	0	1	2
<i>Trypethelium</i> sp.	G	crustose	2	5	7	4	7	10
地衣類の全種数(分類群)合計			22	58	64	25	63	66
				69			72	

*表中の各種(分類群)に対する数値は、各調査区で採取されたその種(分類群)の標本数を示す。

**Lücking & Kalb (2000)¹⁴⁾は、繁殖器官の特徴から*Dimerella*は*Coenogonium*に入れるべきであるという。

しかし、ここでは経年変化を示すために*Dimrella*として記載した。

¹⁾共生藻. cb: cyanobacteria(シアノバクテリア), G: green algae(緑藻).

²⁾地衣類の生育形. crustose: 固着状, squamulose: 鱗片状, foliose: 葉状, filamentous: 糸状, blanket-shaped: 毛布状。

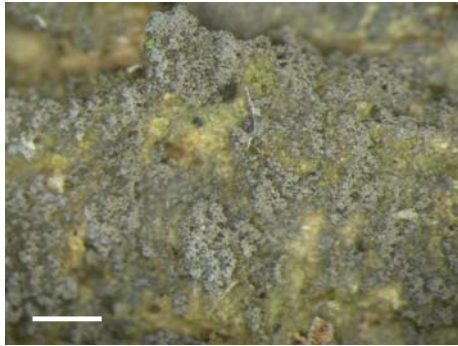
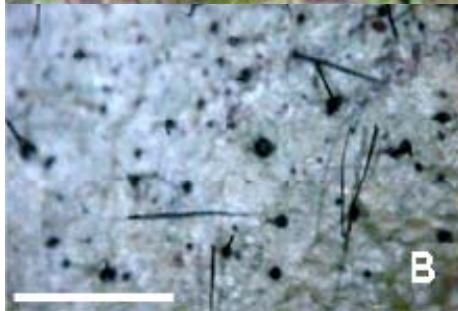


図5-16. 森林火災跡地に侵入・生育する地衣類 *Dictyonema* sp.1. hm 13718, LD区, Scale: 1mm.



2000～2002年度の種数と2005～2007年度の種数を比較すると、森林火災の被害が重度であったHD1区では、22種から25種へと、成長の早い葉上地衣類を中心に若干の種数増加が認められた。また、軽度の被害林分であったLD1区では、58種から63種へと種数の増加が認められ、無被害林であるK1区とほぼ同様な種数に達していた。なお、立枯れの残るHD1区やLD1区ばかりでなく、無被害林であるK1区でも、調査期間中に大径木が倒れて森林内にギャップができ、所々で強光環境が存在していた。K1区は、全体的には陰湿であるが、部分的にはこのように高温・乾燥の場所もあるため、多様な地衣類が共存できるのではないかと考えられた。

HD1区に集中して見られた種として、*Dictyonema* sp.1、2が挙げられる（図5-16）。本種はLD1区にもわずかに認められたが、K1区では全く確認できなかった。森林火災の跡地に特異的か、あるいは高温・乾燥に対する耐性が極端に高いかと思われた。

一方、自然度の豊かな森林を示す種群としては、大型地衣類である*Cladonia* spp.（図5-17 C）、*Coccocarpia pellita* (Ach.) Müll. Arg.（図5-17 D）、*Squamella* sp.、さらには糸状の地衣類である*Coenogonium* spp.（図5-17 A）が挙げられた。また、固着地衣類でも、*Cyclographina macgregorii* (Vain.) D.D. Awasthi & M. Joshi、*Graphis* sp.、*Pyrenula gigas* Zahlbr.、*Sarcographa Leprieurii* L. (Mont.) Muell. Arg. var. *leptastra* (Mass.) Zahlbr.などが繁殖器官を備えて生育できることも、重要な森林再生・回復度の指標として考えられた。

7年間の調査期間中、特にLD1区で頻度高く出現してきた種としては、最近では*Coenogonium*として扱われるようになったが、糸状の基本葉体を伴わずに器物に圧着する基本葉体を持つ*Dimerella* sp. や、生葉上に生育する、*Arthonia* spp.、*Strigula* spp.、*Tricharia* sp.（図5-17 B）などがあった。生葉上の地衣類は森林内でも比較的目に付きやすく、森林再生の指標としては適していると思われた。

図5-17. 無被害林に生育する森林再生指標候補地衣類。A: 糸状地衣類の *Coenogonium* sp., B: 生葉上生の *Tricharia* sp., C: 鱗片状の *Cladonia* sp., D: 葉状の *Coccocarpia pellita*. Scale : 5mm (A, C, D); 0.5mm (B).

なお、無被害林周辺では興味深い地衣類をいくつか採集した。ほとんどが固着地衣類であり、同定は容易ではないが、2007年の調査では、樹皮上(被着生樹種: *Knema* sp.)で子器付きの *Lecanora* sp.を採集した。上下の皮層を欠き、地衣成分も欠けるが、卵形の胞子を持ち、新種の可能性があり、詳細を検討中である。

その他、*Squamella spumosa* S. Hammerの生殖器官付きの標本を樹皮上で採集した。これは、報告上2番目の標本であり、ブキットバンキライが世界で2つ目の産地となった。また、カリマンタン島では最初に確認された、*Sarcographa Leprieurii* var. *leptastra*や、新種の可能性のある *Graphis* sp.、カリマンタン島が2度目の産地である *Coccocarpia pellita*が確認されるなど、低地熱帯多雨林の地衣類相に新たな基盤情報を付加できた。

2) 樹上地衣体の成長

K1区、LD1区、HD1区に設置したいくつかの樹上永久コドラートで、地衣体の生育を継続的に記録した。K1区のI4亜区の樹上コドラートに発達していた *Phaeographina* sp.の生育状態の写真を図5-18に示す。最後の写真では、コドラート内がペンキで塗られており、地衣体の被度が減少していることが分かる。

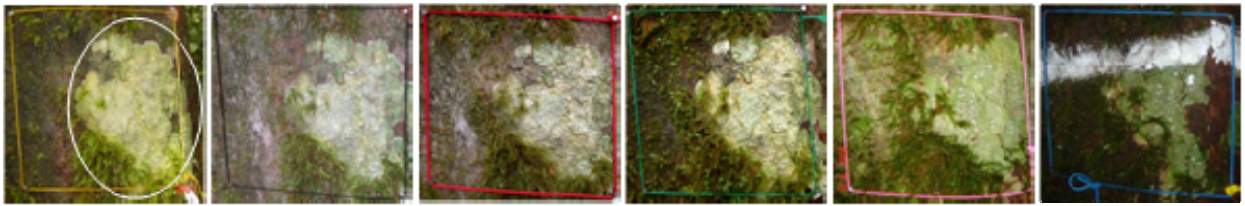


図5-18. K1区I4亜区の樹上永久コドラート内の地衣類 *Phaeographina* sp.の地衣体の成長。左から、2001年10月3日,2002年2月3日,2002年7月18日,2003年1月18日,2005年9月26日,2007年9月2日。

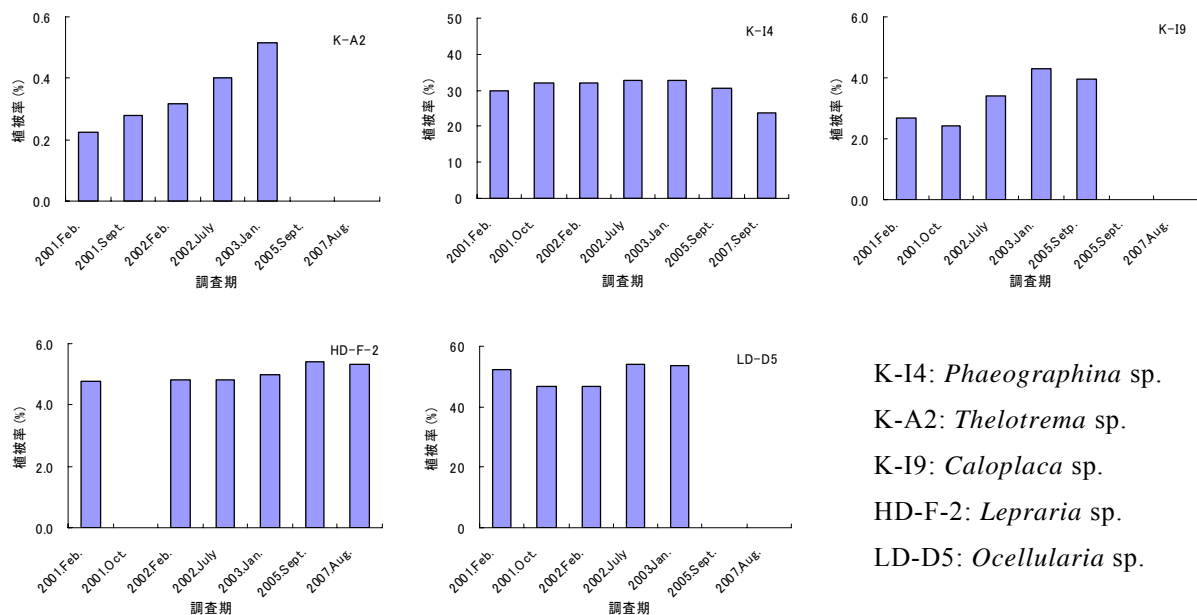


図5-19. 各樹上コドラートの地衣類の成長 (被覆面積の割合)。

図5-19は、樹上永久コドラートの各地衣体植皮率を透明シートに記録し、そのデータを経時的にグラフ化したものである。非常に小さい地衣体の場合、時間と共に被覆率が徐々に増大しているが(K-A2)、多くの場合は、7年間経っても地衣体の被覆面積はそれほど増加していない。これは重度被害林でも無被害林でも調査区間で格差は少ないように思われた。部分的には蘚苔類との競争に負けて地衣類の被覆面積が減少する場合もあり、熱帯林での種間競争という点では興味深い。一般に熱帯では樹木の成長は極めて速いが、それと比較すると地衣類の成長はかなり遅かった。地衣類の成長量計測による環境評価は、熱帯地域では有効性が乏しいのではないかと思えた。

3) 地衣類活力評価値による森林再生の評価

地衣類を用いた大気環境評価法が報告されているが^{15,16,17)}、これらを参考に、地衣類を用いた森林再生評価を行った⁸⁾。生育形として、懸垂状地衣、葉状地衣、樹状地衣、繊維状地衣は、固着地衣に比べ、良好な大気環境を好み、さらに子器の存在は環境の良好さを示すと考えられている¹⁸⁾。各調査区の対象樹木に生育する地衣体毎に、生育型と子器の有無、外見での活力度(緑色度)等を加味して重み付けを行ったFi値を当てはめ(表5-1)、生育個体数を掛け合わせた地衣類活力評価値を考案した⁸⁾。本地衣類を用いた森林再生評価法は、森林火災から生き残る確立が高く、さらに現地の住人から有用木ではないとされ、人為伐採の確立も低い*Durio acutifolius*と*Syzygium incarnatum*の2樹木に着目した。各樹木の樹幹を地面から、0~50cm(Class I)、50~100cm(Class II)、100~150cm(Class III)の高さ毎に検討した。

2006年9月には、HD1区、LD1区、K1区以外に、HD2区、LD2区、K2区でも同様な方法で調査を行った。ここでは、以前の調査との比較を行うため、HD1区、LD1区、K1区について、地衣類活力評価値を算出し、森林再生状態について検討した。なお、各調査区の調査対象樹木数は、*D. acutifolius*については、8~15本、*S. incarnatum*については、1~6本であった。これまで対象樹木毎に地衣類活力評価値を算出したが、*S. incarnatum*の本数が少ないこと、またこれまでの算出値が、両樹木でそれほど変わらなかったことから、今回はこれらをまとめて、地衣類活力評価値を算出し、各調査区の数値を経時的に整理した(図5-20)。対象樹木数は各区10~17の範囲であった。

2002年当初には、この評価値には各調査区間で顕著な違いがあり、K1>LD1>HD1の順番が明瞭であった。また、高さ別に比較すると、どの調査区でも地面に近い方(Class I)の数値が明らかに大きいなど、位置の影響が明確に示されていた。地面から離れるほど乾燥してくるため、地衣類の再定着が簡単には起こらないことが推測された。年々の乾季と雨季の気候条件の違いや、調査対象木が時によっては倒れるので、本評価値には若干の振れ幅がある。しかし相対的に見ると、地衣類活力評価値は徐々に調査区による違いが少なくなってきた。また、位置による違いについても、差が縮まってきていた。1997~1998年の大規模森林火災から10年近く経ち、重度被害林や軽度被害林では、着実に回復の兆しが見て取れた。しかし、それでもまだなお、K1に比べると、HD1区は遠く及ばず、LD1区でも十分な違いが見て取れる。

本地衣類活力評価値は、対象木を特定すること、比較的大型の地衣類を生育形だけで分類することから、方法さえマスターすれば、専門の地衣類分類学者でなくても利用可能であると思われた。生葉上の苔類などとは違い、比較的長期に森林再生をモニタリングするのに有用な手法であろうと思われた。

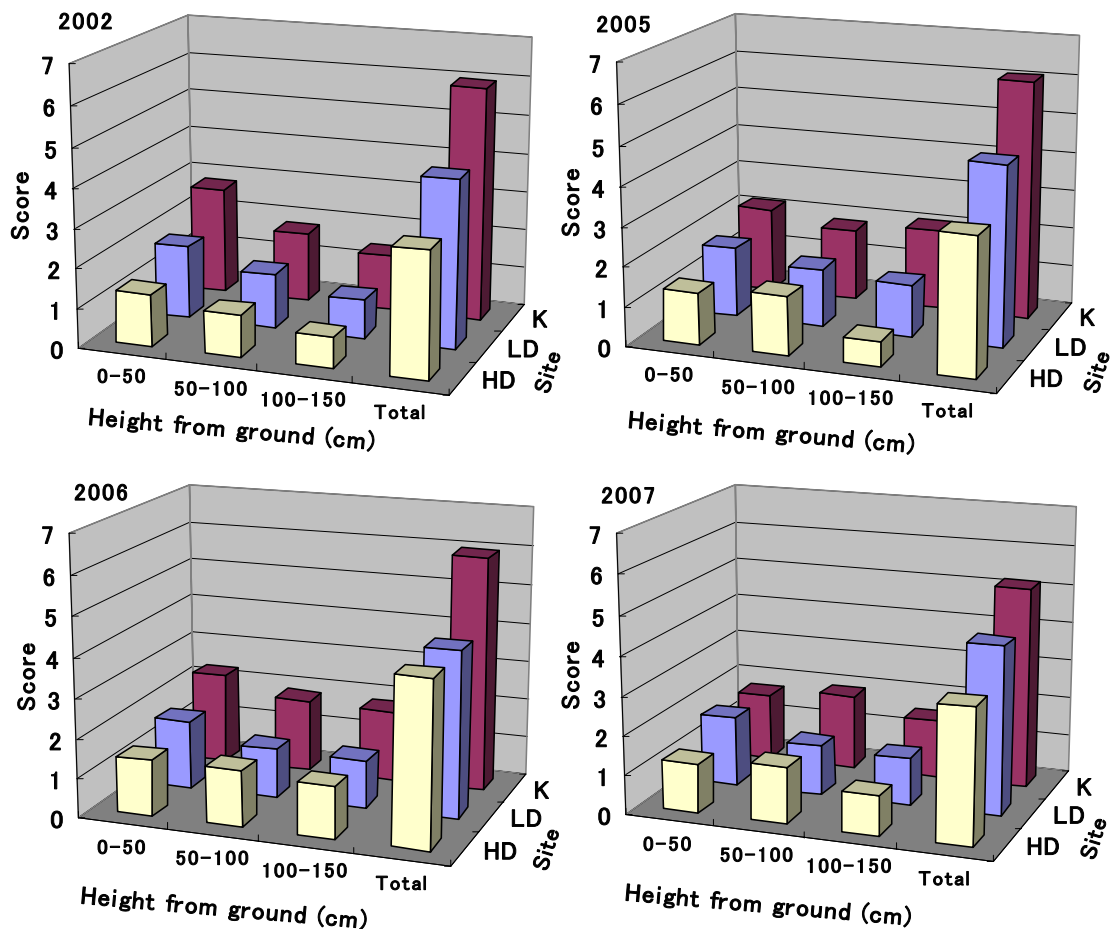


図5-20. 樹木着生地衣類を利用した地衣類活力評価値の比較（2002～2007年）。

（3）低地熱帯多雨林の微環境と森林火災回復過程

森林火災によって樹木をはじめとした植生が焼失することにより、森林地域の微環境は激変する。特に熱帯の場合には、植生という覆いがなくなると、強烈な日射が直接地上に到達し、地温、気温、そして土壌水分や大気湿度に影響すると思われる。このような状況は、特に周囲の微環境に敏感な蘚苔類や地衣類の生存に直接影響し、また微環境の回復は蘚苔類・地衣類の回復に密接に関係すると思われる。熱帯林が再生するに従い、微環境も徐々に回復すると考えられるが、低地熱帯多雨林において、しかも森林火災の影響とその回復過程における微環境の変化については、ほとんど研究されていない。我々は、2000～2002年度に掛けて実施した研究の中で、一部微環境計測を行ったが、気象・気候的に過酷で有害な昆虫や大型哺乳類が生息する熱帯特有の生物的、非生物的な厳しい環境のため、継続的なデータの収集が困難であった。今回の研究では、これらの欠点を改良した微環境計測システムを、ブキットバンキライのHD1区、LD1区、K1区に設置し、光量子束密度、気温、相対湿度、地温および土壌水分含量の微環境要因を連続計測した。なお、温湿度等については、菌類多様性との関係で同じ場所で計測していたが、経時的な劣化が大きくなったため、最終的にこれらの環境要因も本システムで連続計測した。

1) 微環境の日変動

乾季の終期である2006年10月12日～14日にかけての各環境要因の30分ごとのデータを図5-21に、また、雨季である2007年1月12日～14日にかけての同様のデータを図5-22に示す。

乾季には、長期に渡り降水が無いため、各調査区とも土壤水分含量はほとんど変化しなかった。特にHD1では5ヵ所の全ての土壤が乾燥しているようであった。雨季には、降水があれば、土壤水分含量は一時的に上昇し、その後減少する。現段階ではその減少パターンに調査区間で顕著な差は確認できなかった。

なお、各土壤のセンサキャリブレーションは現在進行中であるため、正確には換算できていない。そこで、以下の式により、熱帯に多い無機質土壤を想定して、土壤水分含量を算出した。

$$\text{土壤水分含量 } \theta = (\sqrt{\varepsilon} - a_0) / a_1$$

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.0 + 16.103 \cdot V - 38.725 \cdot V^2 + 60.881 \cdot V^3 - 46.032 \cdot V^4 + 13.536 \cdot V^5$$

ここで、 V はセンサからの電圧出力、 a_0 は1.6、 a_1 は8.4である。

大気湿度に関しては、雨季には、降水時および夜間はほぼ相対湿度100%になっていた。昼間は減少するが、K1区が最も湿っており、HD1区が最も乾燥する傾向であった。乾季にはこの傾向はより明確になり、HD1区ではどの地点でも昼間の相対湿度が50%近くまで下がっているのに対し、K1区では、60～80%と計測地点により分散していた。LD1区は、ほぼそれらの中間を示していた。

この湿度の変化は、ほぼ光量子束密度の変化、つまり光強度を反映していた。特に乾季で明白であるが、K1区ではどの地点でも直射光が少なく、かなり暗い状態が維持されていた。このことは地温にも反映されており、K1区では乾季でも26℃を越えなかった。一方、乾季のHD1区では、直射光が到達しており、昼間の地温は30℃近くまで上昇していた。なお、気温は地温と同様な動きであったが、HD1区では、最高温度も最低温度も地温より激しく変動した。

2) 乾季と雨季の微環境変動

乾季（10月）と雨季（1月）における、日最低湿度、日最高光量子束密度、および日最高地温の1ヶ月間の変動を図5-23に示す。上記のように、森林内の光環境は森林の回復状態を最も端的に反映していた。日平均光量子束密度は、HD1区ではLD1区やK1区と比較して明らかに高く、特に乾期には明瞭な差が認められた。光量子束密度の日最高値を比較すると3調査区で明確な差があり（HD1>LD1>K1）、LD1区でもK1区に比べると森林構造にまだ差があることが伺えた。平均大気湿度は、雨期では3調査区でほとんど差が無く、日最低湿度でも明瞭な差は認められなかった。しかし、乾期における日平均大気湿度は3調査区で差があり（HD1<LD1<K1）、LD1区や特にHD1区の森林は乾燥していた。この傾向は日最低湿度ではさらに明瞭であり、火災後10年近く経っても、被害林では森林全体としては乾燥しており、十分な森林環境を回復していないことが判った。地温（地下10cm）も直射光の到達を反映しており、平均値、最高値共にHD1>LD1>K1であり、乾期により顕著な差が認められた。

HD1区のような重度被害林では、見かけ上森林の再生がある程度進んでいるように見えても、特に乾季で、かなりの長期に渡り、このような強光、高温、乾燥状態が森林内で続いており、生育する植物、特に乾燥に敏感な樹上や生葉上に着生する苔類や地衣類の生育に影響を及ぼしていることが示唆された。前述した多様性の違いや分布状況をある程度説明可能であると思われた。

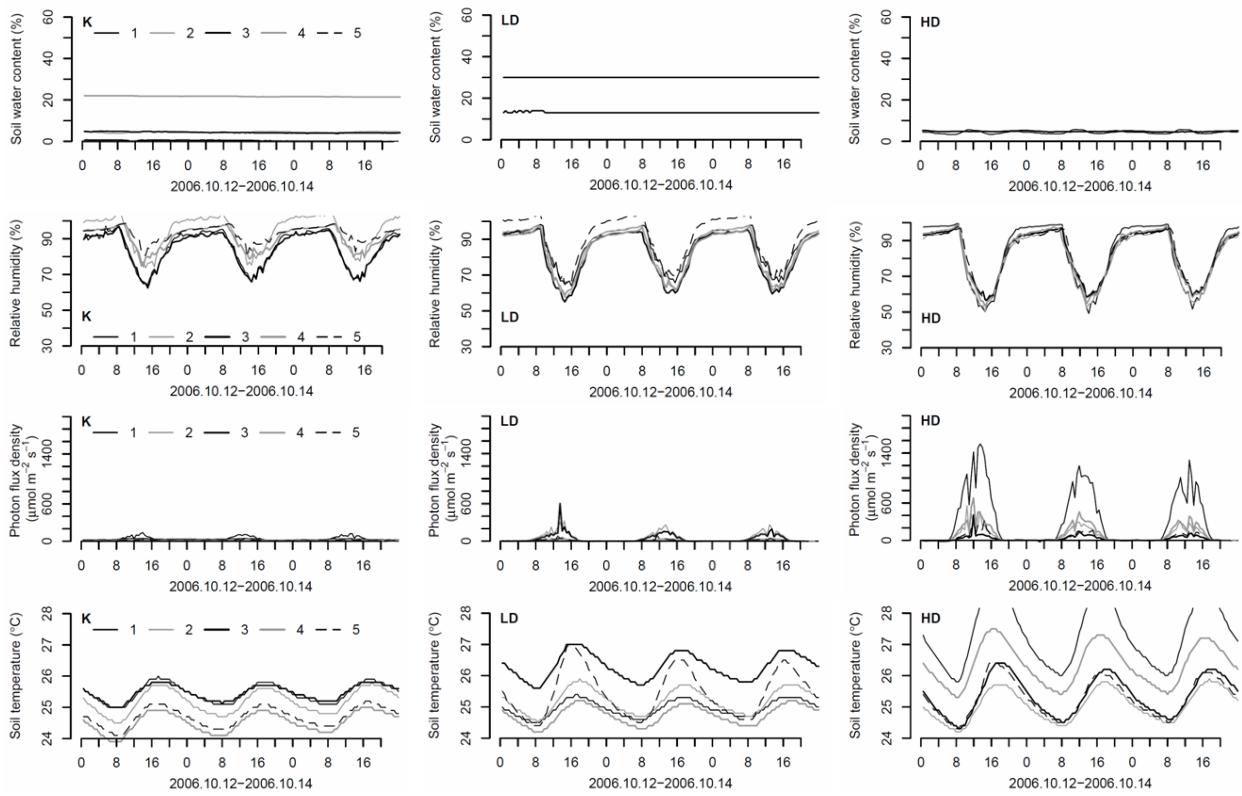


図5-21. 2006年10月12～14日における各調査区の土壤水分含量，大気湿度，光量子束密度，地温。

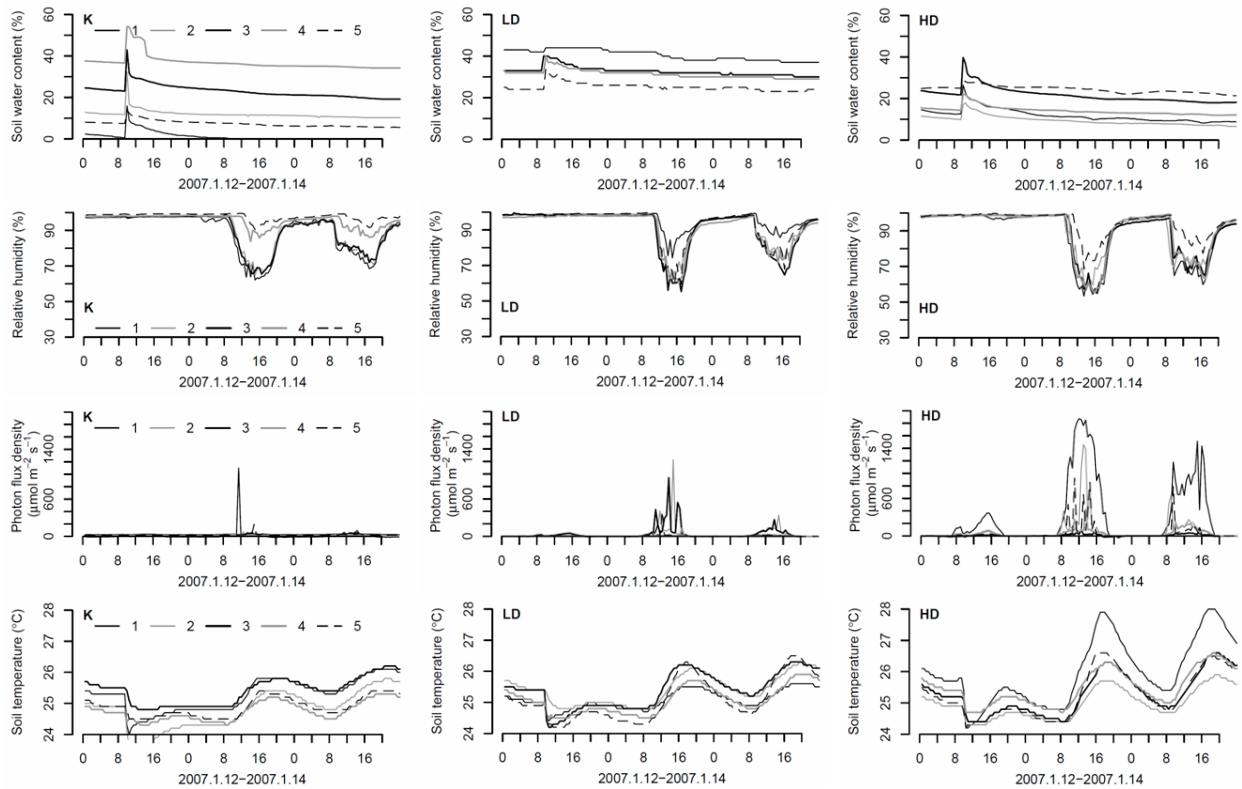


図5-22. 2007年1月12～14日における各調査区の土壤水分含量，大気湿度，光量子束密度，地温。

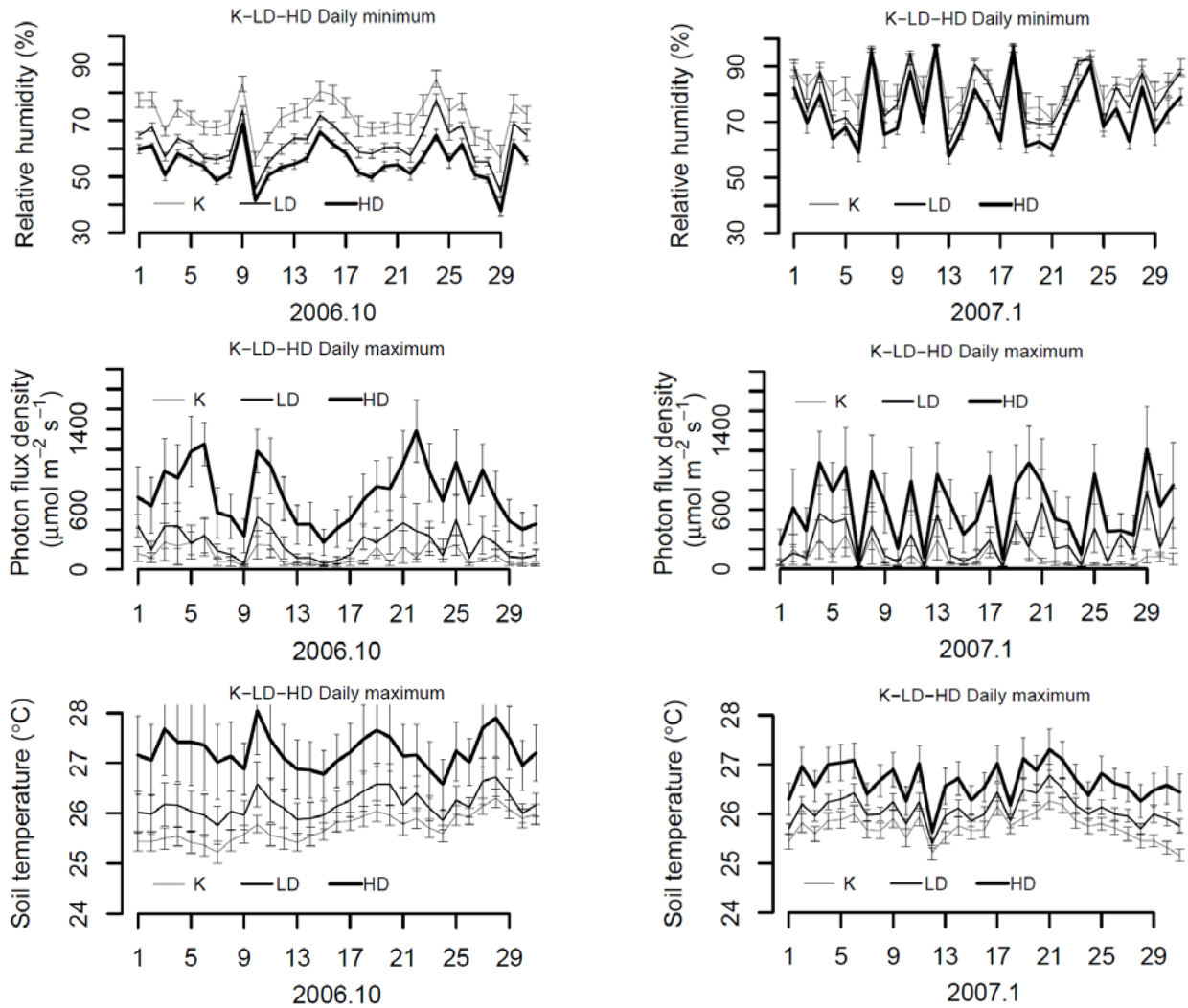


図5-23. 2006年10月（乾季）および2007年1月（雨季）における各調査区の日最低湿度，日最高光量子束密度および日最高地温の1ヶ月間の変動.

3) 微環境の年間変動パターン

次に、2年間に及ぶ微環境計測のデータを集計し、各々の環境要因について、日平均値、日最高値、日最低値を算出し、各月の平均値を求めてグラフ化した(図5-24)。日変動や月変動で判ってきた微環境が、年間を通じて明らかにされた。光量子束密度の平均値や最高値を見ると、直射日光に直接曝されるHD1区では、不規則ではあったが、乾季・雨季の変動パターンを明確に表現していた。LD1区ではかなり平準化されていたが、HD1区と同様な変動を示した。しかし、K1区ではほぼそのような変動は見られなかった。気温や地温はこの光量子束密度に応答した変動を示しており、平均値はHD1>LD1>K1であったが、それほど顕著な差はなかった。しかし、最高値や最低値は3調査区で顕著な差が認められた。乾季では、HD1区では日最高気温の月平均値が31℃を越えていた。逆に最低気温もHD1区で最も下がっていた。大気相対湿度もこれらに応答する変動を示しており、日最低湿度の月平均値は、3調査区で著しく異なった。HD1区では特に乾季の湿度が低くなっており、LD1区でも乾季にはHD1区に近い低湿度値を示していた。

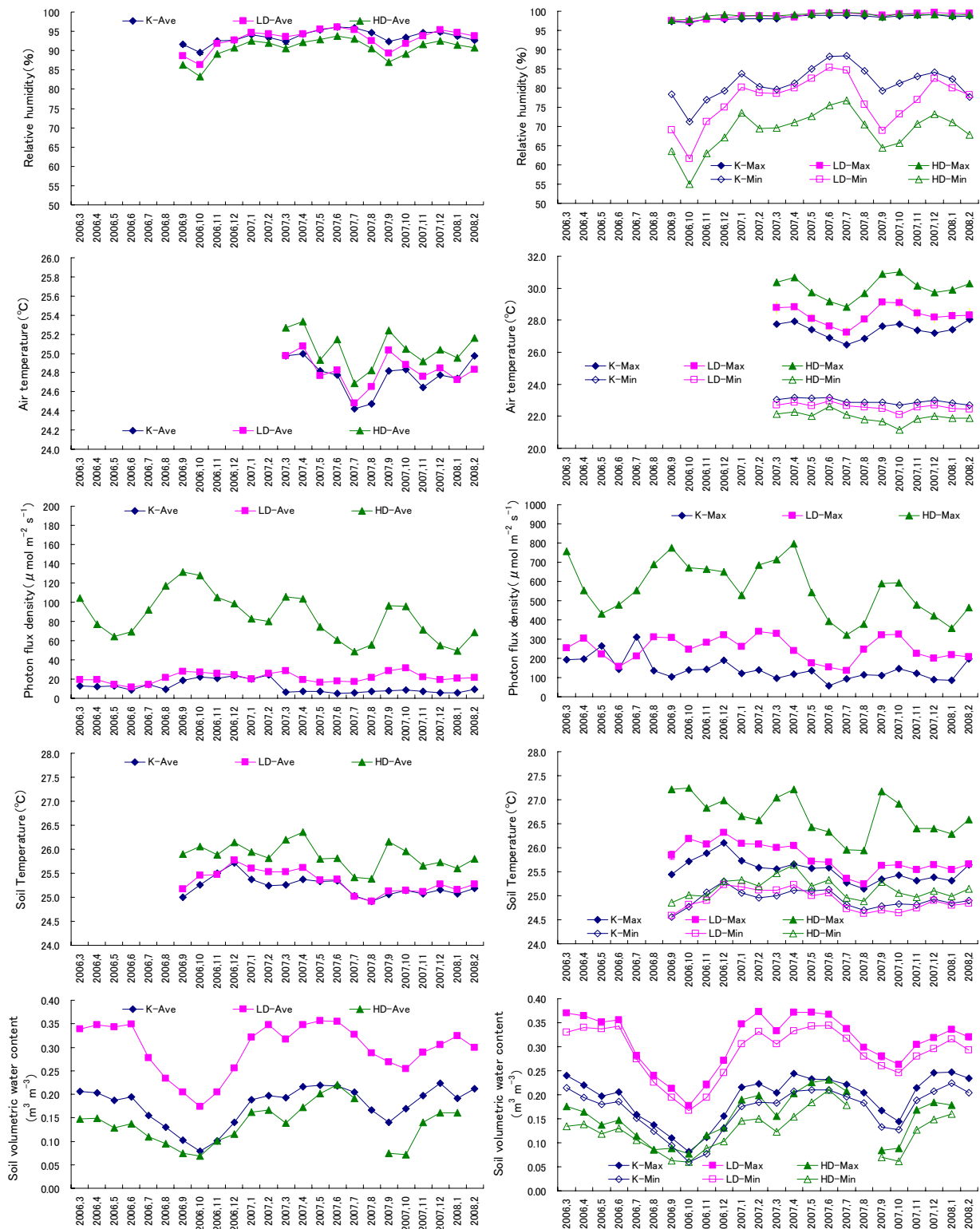


図5-24. 2006年3月～2008年2月における各調査区の大気湿度，気温，光量子束密度，地温，土壌水分含量の変動．日平均値（左）と日最高値・日最低値（右）の各月の平均値．各々5ヵ所の平均値．2007年8月にHD1区の土壌水分値が抜けているのは，落雷等によりシステムが不良になったためである．

土壤水分含量は全体としては、雨季・乾季の変動に良く応答していた。ブキットバンキライの降水量変動（サブ4）や光量子束密度パターンと連動していた。3調査区では、HD1区が最も乾燥していたが、LD1区の水分含量が異常に高かった。正確なキャリブレーションが済んでいないという問題もあるが、LD1区の土壤水分センサは5台とも常に高い数値を示していた。土壤調査（サブ2）によると、本調査地域は基本的には砂質ローム土が広く分布している。しかし、K1区とHD1区には、現地でケランガスと呼ばれる白色砂質土壤層も分布しており、保水性が低く、乾燥し易いという特徴があった。一方、LD1区では、砂質ロームおよび砂質粘土ロームが分布しており、土壤特性は比較的均一であった。LD1区は軽度被害林分であるが、この周辺で森林火災が停止したことを考えると、このような土壤の特性も関係していたのかも知れない。土壤水分環境を除く微環境に関しては、LD1区はHD1区とK1区の中間的な変動を示していた。

（4）森林再生過程における多様性と微環境

ブキットバンキライの3調査区あるいは6調査区で得られた、多様性や微環境に関するいくつかのパラメータ（樹木の種数や多様性指数、環境に敏感だとされる蘚類・苔類・地衣類の種数や評価値、乾季および雨季の最低湿度、最高気温、最高光量子束密度、最高地温、最低土壤水分）を用いて、各々の相関係数を調べてみた（表5-5）。

表5-5. 種々の多様性・微環境パラメータ間の相関係数

	No. of tree	Basal area	No of tree species	Shannon Wiener value	Fisher's alfa	Dipterocarpaceae(%)	Pioneer Macaranga (%)	No of Bryophyta	No. of Marchantiophyta	Morishita's beta	No of lichen	Miyawaki's score	Min. RH(%) rainy	Max. air temp.-rainy	Max. photon flux density-rainy	Max. soil temp.-rainy	Min. water content-rainy	Min. RH-dry	Max. air temp.-dry	Max. photon flux density-dry	Max. soil temp.-dry	Min. water content-dry
No of tree (/ha)	0.86	0.85	0.75	0.73	0.69	-0.71	0.74	0.83	0.95	0.87	0.68	0.99	-0.99	-1.00	-1.00	0.44	0.89	-0.97	-0.97	-1.00	0.59	
Basal area (m2/ha)		0.91	0.93	0.86	0.94	-0.96	0.32	0.98	0.74	0.82	0.95	0.96	-0.97	-0.91	-0.89	0.05	1.00	-0.99	-0.99	-0.90	0.23	
No of tree species			0.97	0.98	0.76	-0.79	0.48	0.80	0.96	0.83	0.83	0.99	-0.98	-1.00	-1.00	0.47	0.87	-0.95	-0.96	-1.00	0.63	
Shannon Wiener value				0.97	0.83	-0.88	0.28	0.89	0.90	0.72	0.91	1.00	-1.00	-0.99	-0.98	0.32	0.94	-0.99	-0.99	-0.98	0.49	
Fisher's alfa					0.72	-0.76	0.37	0.80	0.96	0.72	0.81	0.99	-0.98	-1.00	-1.00	0.47	0.87	-0.95	-0.96	-1.00	0.62	
No. of Dipterocarpaceae(%)						-0.98	0.08	0.98	0.42	0.69	0.90	0.77	-0.79	-0.68	-0.64	-0.34	0.95	-0.86	-0.85	-0.66	-0.17	
No. of Pioneer Macaranga(%)							-0.08	-0.99	-0.50	-0.66	-0.97	-0.83	0.84	0.74	0.71	0.26	-0.97	0.90	0.90	0.72	0.08	
No. of Bryophyta								-0.58	0.31	0.53	0.05	-0.12	0.16	-0.01	-0.06	0.89	-0.47	0.28	0.26	-0.04	0.80	
No. of Marchantiophyta									0.60	0.80	0.96	0.88	-0.90	-0.81	-0.78	-0.15	0.99	-0.95	-0.94	-0.79	0.03	
Morishita's beta										0.96	0.80	0.90	-0.89	-0.95	-0.97	0.71	0.69	-0.83	-0.83	-0.96	0.82	
No. of lichen											0.66	0.99	-0.98	-1.00	-1.00	0.48	0.87	-0.95	-0.95	-1.00	0.63	
Miyawaki's score												0.98	-0.99	-0.94	-0.92	0.13	0.99	-1.00	-1.00	-0.93	0.31	
Min. relative humidity(%) rainy													-1.00	-0.99	-0.98	0.34	0.93	-0.99	-0.99	-0.99	0.50	
Max. air temperature(C) rainy														0.99	0.98	-0.30	-0.95	0.99	0.99	0.98	-0.47	
Max. photon flux density-rainy															1.00	-0.46	-0.88	0.96	0.96	1.00	-0.61	
Max. soil temperature(C) rainy																-0.50	-0.85	0.94	0.95	1.00	-0.65	
Min. water content-rainy																	-0.02	-0.18	-0.20	-0.49	0.98	
Min. relative humidity(%) dry																		-0.98	-0.98	-0.86	0.16	
Max. air temperature(C) dry																			1.00	0.95	-0.36	
Max. photon flux density-dry																				0.95	-0.37	
Max. soil temperature(C) dry																					-0.64	
Min. water content-dry																						

今回用いた個々のパラメータのデータ数はあまり多くないので試行的ではあるが、樹木関係のパラメータと蘚苔類・地衣類関係のパラメータ間にはあまり高い相関が得られなかった。このことは、「樹木だけに注目しても熱帯林全体の生物多様性は語れない」ということを意味する。ま

た、微環境との関係を見てみると、樹木関係のパラメータは、最低湿度、最高気温、最高光量子束密度、最高地温と高い相関があった。また、地衣類種数も、最低湿度、最高気温、最高光量子束密度、最高地温と高い相関があった。地衣類活力評価値も、同様にこれらの微環境要因と高い相関を示した。苔類種数は最低湿度との間に相関が認められたが、蘚類に関するパラメータほどの要因ともあまり相関を持たなかった。今回のデータの限りでは、最低土壌水分含量は、多様性パラメータとも他の微環境パラメータともほとんど相関関係を示さなかったが、他の微環境要因は相互に高い相関関係を示した。

今回調査した6調査区の内、種数のデータが全て揃っている、HD1区、LD1区、K1区の間の各植物分類群から見た種の類似度（共通率）を、野村・Simpsonの指数およびJaccardの共通係数を算出して比較した（図5-25）。蘚類、苔類、地衣類の共通率を、野村・Simpsonの指数からみると、樹木やキノコに比べて、むしろ細菌に近く、各調査区間の共通率は高かった。一方、Jaccardの共通係数を比較すると、どの調査区間でも蘚類の共通率は高かったが、苔類では逆に低く、樹木やキノコと同程度だった。地衣類では、LD1区とK1区でのみ高い共通率を示した。

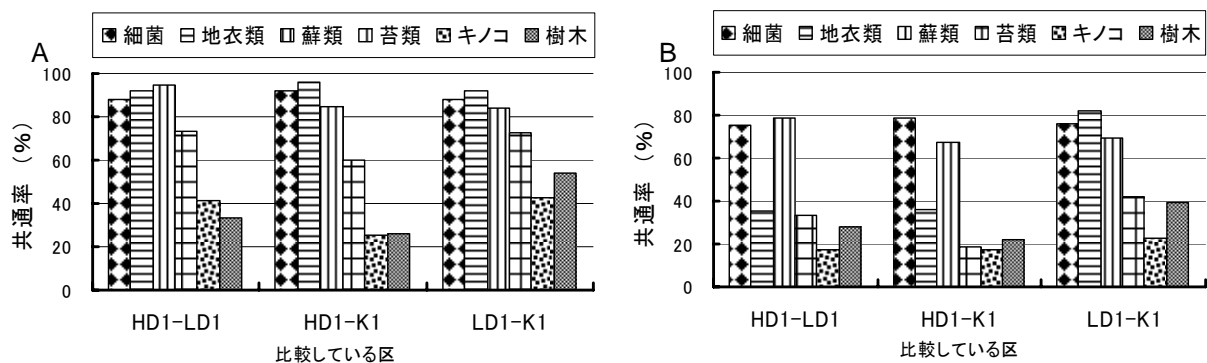


図5-25. 調査区間の種の共通率。A：野村・Simpsonの指数（=共通種数/少ない方の区の種数），B：Jaccardの共通係数（=共通種数/（各区種数合計-共通種数））。細菌はDNAバンドの共通率。

この結果は、ブキットバンキライで、蘚苔類や地衣類のインベントリー調査を実施して得た印象と一致した。基本的には、重度被害林や軽度被害林で出現する種は、無被害林に生育する種から孢子等が提供されると考えた。無被害林には林床の陰湿な環境ばかりでなく、ギャップ等によって比較的高温・乾燥な環境もあるので、陰地生、陽地生の多様な種が生育している。これらから放出された孢子などが、被害林に飛ばされ、そこで条件が合えば、発芽生育するのであろう。蘚類は比較的環境適応性が高いためか、若干の差はあるものの、現在、3調査区間で種組成に大きな差はない（表5-3、図5-7）。しかし、苔類や地衣類では異なっており、地衣類にとって、軽度被害林は何とか生育可能な環境になったが、まだ多くの種にとって、重度被害林は生育に適していないと思われた（表5-4）。一方、苔類にとっては、軽度被害林でさえもまだ生育に適してはいないと思われた（表5-3）。特に生葉上に生育する苔類は十分な湿度環境が必要だと言われており、このことは苔類種数と最低湿度との相関にも示された（表5-5）。また、LD1区でも、乾季の最低湿度はかなり低下することが計測されており（図5-21～24）、このような微環境によって、被害林への苔類の進出が制限されていると思われた。これらの苔類や地衣類は樹木とは別の多様性的観点から、低地熱帯多雨林の再生指標として有効ではないかと考えられた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、低地熱帯多雨林地域から合計約6,000点の蘚苔類標本を採集し、ブキットバンキライ地域の蘚苔類多様性を明らかにした。現在までに東カリマンタン新産37種を発見するなど、低地熱帯多雨林の蘚苔類相に新たな基盤的情報を整備した。また、低地熱帯多雨林における森林火災後の樹上着生蘚苔類の遷移を初めて定量的に解析すると共に、森林火災後の蘚苔類相の変遷を明らかにした。さらに、低地熱帯多雨林の自然度を示す蘚苔類種を提示し、森林再生を評価するための植生指標として提案した。

同様に、低地熱帯多雨林地域から合計1,730点の地衣類標本を採集し、ブキットバンキライ地域の地衣類多様性を明らかにした。これまでに、カリマンタン島新産数種や新種の可能性の高い *Graphis* sp. の確認など、低地熱帯多雨林における地衣類相に新たな基盤的情報を整備し、植物分類学・地理学に関する新知見を蓄積した。また、低地熱帯多雨林における森林火災後の地衣類相の変遷を明らかにした。さらに、熱帯林の回復の指標となるような地衣類種を提示すると共に、樹上着生地衣類を用いた地衣類活力評価値による森林再生評価法を提案し、2002～2007年に掛けて、その有用性を現地で検証した。

森林火災の回復過程において、樹木の多様性と、蘚苔類（特に苔類）や地衣類の多様性との間には相関が小さい事を明らかにし、多様な分類群の視点から森林再生を評価する必要があることを示した。

気象・気候的に過酷で、有害な昆虫や大型哺乳類が生息する熱帯特有の生物的、非生物的な厳しい環境のため、長期間にわたって安定した環境計測が困難であった熱帯林において、有効な微環境計測システムを開発し、低地熱帯多雨林の微環境が連続的に計測可能であることを、現地で実証した。本システムを用いて、火災の被害程度の異なる森林地域における微環境の変動を明らかにし、微環境要因相互の関連や、森林再生過程における生物多様性などとの関係を解明した。

(2) 地球環境政策への貢献

樹上や生葉上に着生する、蘚苔類（特に苔類）や地衣類の出現が、判りやすい森林再生の植生指標になることを示した。また、*Arachniopsis major*、*Mizutania riccardioides*、*Zoopsis liukiensis* などの蘚苔類や、*Cladonia* spp.、*Coccocarpia pellita*、*Coenogonium* spp.、*Tricharia* sp. などの地衣類を、森林再生の植物指標として提示した。さらに、高度な分類学的知識を必要とせずに、地衣類の生育形や繁殖器官の有無などで数値化する、「地衣類活力評価値による森林再生評価法」を提案した。これらは、生物多様性的観点を含めた健全な森林生態系の再生を評価し、適切な森林管理を行うためのモニタリング手法として、応用することが可能である。

熱帯林における有効な微環境連続計測システムを開発した。本手法は、今後多くの熱帯林で応用可能であり、森林再生に伴う森林環境のモニタリングや、森林管理で何か対策を施工した場合の、微環境から見た環境影響評価にも応用可能である。

今後、これらの植生指標や微環境計測によるモニタリングが熱帯林における森林管理に有効であること、また生物資源や多様性的観点から熱帯林生態系の再生が重要であることなどを社会に訴えるとともに、本研究の成果を、論文や国際学会等への発表、あるいはセミナー、ワークショップなどを通じて、インドネシア現地の研究者、森林管理者等への広報にも務める予定である。

6. 引用文献

- (1) W. E. Winner. (1988) Responses of bryophytes to air pollution. *Bibl. Lichenol.* 30, 141-173.
- (2) D. Duncan and P. J. Dalton: (1982) Recolonisation by bryophytes following fire. *J. Bryol.* 12, 53-63.
- (3) D. R. Foster. (1985) Vegetation development following fire in *Picea mariana* (black spruce)-*Pleurozium* forests in south-eastern Labrador Canadaian *J. Ecol.* 73, 517-534.
- (4) J. de las Heras and J. M. Herranz. (1990) Bryophyte colonization of soils damaged by fire in south-east Spain: a preliminary report on dynamics. *J. Bryol.* 16, 275-288.
- (5) J. Garty. (1995) Establishment of pioneer lithobiontic cyanobacteria, algae, microfungi, and lichens subsequent to a severe forest fire in Israel” - In: Daniëls, FJA/Schulz, M/Peine, J (eds.): *Flechten Follmann. Contributions to lichenology in Honour of Gerhard Follmann.* Geobotanical and Phytotaxonomical Study Group, Botanical Institute, University of Cologne, Cologne, pp. 111-121.
- (6) I. Haerida, T. Yamaguchi, F. I. Windadri, H. Shimizu and H. Simbolon. (2004) *Frullania neosheana*, a new record to the hepatic flora of Borneo. *Hikobia* 14: 185-186.
- (7) T. Yamaguchi, F. I. Windadri, I. Haerida, H. Simbolon, A. Kunimura, H. Miyawaki and H. Shimizu. (2005) Effects of Forest Fires on Bryophyte Flora in East Kalimantan, Indonesia. *Phyton* 45: 561-567.
- (8) H. Miyawaki, I. L. Sudirman, H. Simbolon, M. Nakanishi, T. Yamaguchi and H. Shimizu. (2005) Effects of Forest Fires on Some Lichen Species in East Kalimantan, Indonesia. *Phyton* 45, 569-574.
- (9) 阿部恭久他. (2003) 環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書「森林火災による自然資源への影響とその回復の評価に関する研究 (H12~14年度)」229 pp. 環境省.
- (10) A. Touw. (1978) The mosses reported from Borneo. *J. Hattori Bot. Lab.* 44, 147-176
- (11) M. Menzel. (1989) Annotated catalogue of the Hepaticae and Anthocerotae of Borneo. *J. Hattori Bot. Lab.* 65, 145-206.
- (12) M. Suleiman, H. Akiyama, and B. C. Tan. (2005) A revised catalogue of mosses reported from Borneo. *J. Hattori Bot. Lab.* 98, 107-183.
- (13) 森下正明. (1967) 京都付近における蝶の季節分布. 森下・吉良 (編), 自然—生態学的研究, 95-132. 中央公論社, 東京.
- (14) R. Lücking and K. Kalb. (2000) Foliikole Flechten aus Brasilien (vornehmlich Amazonen), inklusive einer Checkliste und Bemerkungen zu *Coenogonium* und *Dimerella* (Gyalectaceae). *Botanische Jahrbücher für Systematik. Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie* 122, 1-61.
- (15) O. L. Gilbert. (1970) A biological scale for estimation of sulfur dioxide pollution. *New Phytologist*, 69, 629-634.
- (16) F. LeBlanc and J. De Sloover. (1970) Relation between industrialization on the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian Journal of Botany* 48, 1485-1496.
- (17) Y. Nakagawa and T. Kobayashi. (1990) Estimation of air pollution based on the distribution and the component of epiphytic lichens by means of the modified IAP method. *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 25, 233-241.
- (18) I. M. Brodo, S. D. Sharnoff, and S. Stephen: (2001) *Lichens of North America.* 795pp, Yale University Press, New Haven.

7. 国際共同研究等の状況

本研究においては、日本－インドネシア科学技術協力協定に基づき、日本国立環境研究所とインドネシア科学研究所生物学研究所の間で、“MoU between RDCB-LIPI and NIES concerning Scientific and Technical Cooperation on the Biodiversity and Forest Fire” を2001年1月11日に取り交わし、この覚書きに基づき、共同現地調査を実施した。

本研究におけるインドネシア側カウンターパート

- ・ Herwint Simbolon, Research Centre for Biology-LIPI, Bogor-Indonesia : 微環境計測
- ・ Ruliyana Susanti, Research Centre for Biology-LIPI, Bogor-Indonesia : 微環境計測
- ・ Alham Laode, Research Centre for Biology-LIPI, Bogor-Indonesia : 土壌環境計測
- ・ Florentin Indah Windadri, Research Centre for Biology-LIPI, Bogor-Indonesia : 地衣類調査
- ・ Ida Haerida, Research Centre for Biology-LIPI, Bogor-Indonesia : 蘚苔類調査

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Simbolon H., Siregar M., Wakiyama S., Sukigara N., Abe Y., Shimizu H.: *Phyton (Austria)* 45, 551-559 (2005).

“Impacts of Forest Fires on Tree Diversity in Tropical Rain Forest of East Kalimantan, Indonesia.”

- 2) Yamaguchi T., Windadri F. I., Haerida I., Simbolon H., Kunimura A., Miyawaki H., Shimizu H.: *Phyton (Austria)* 45, 561-567 (2005).

“Effects of Forest Fires on Bryophyte Flora in East Kalimantan, Indonesia.”

- 3) Miyawaki H., Sudirman I. L., Simbolon H., Nakanishi M., Yamaguchi T., Shimizu H. *Phyton (Austria)* 45, 569-574 (2005).

“Effects of Forest Fires on Some Lichen Species in East Kalimantan, Indonesia.”

<査読付論文に準ずる成果発表>（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

<関連誌上発表>*

- 1) Deguchi H., Yamaguchi T.: *Hikobia* 14: 357-358 (2005)

“Bryophytes of Asia. Fasc. 12.”

- 2) E. Oguri, T. Yamaguchi, M. Shimamura, H. Tsubota and H. Deguchi: *Bryologist*, 111, 2 (2008)

“Phylogenetic and morphological re-evaluation of *Leucobryum boninense* Sull. & Lesq. (Leucobryaceae, Musci), endemic to the Bonin Islands” (in press)

*これらの研究の一部に、本研究で採集した蘚苔類標本が使用された。

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 小栗恵美子、坪田博美、山口富美夫、出口博則：日本植物分類学会第4回大会（2005）

「ムニンシラガゴケ（シラガゴケ科、蘚類）の分子系統的位置と形態」

- 2) E. Oguri, T. Tsubota, T. Yamaguchi and H. Deguchi: XVII International Botanical Congress (2005)
“A molecular phylogeny of the genus *Leucobryum* (Leucobryaceae, Musci) in Asia and the Pacific”
- 3) 宮脇博巳、山口富美夫、清水英幸、H. Simbolon、鈴木英治：日本植物分類学会第5回大会 (2006).
「インドネシア、カリマンタンで発見された希産地衣類数種」
- 4) 小栗恵美子、坪田博美、山口富美夫、出口博則：日本植物分類学会第5回大会 (2006)
「ムニンシラガゴケ (シラガゴケ科, 蘚類) の遺伝的多様性」
- 5) 小栗恵美子、坪田博美、山口富美夫、P. J. Dalton、出口博則：日本蘚苔類学会第35回大会 (2006)
「南太平洋産*Leucobryum candidum*の形態的特徴とその系統的位罫」
- 6) 宮脇博巳、山口富美夫、清水英幸、Simbolon H.、鈴木英治：日本植物分類学会第6回大会 (2007)
「インドネシア、東カリマンタンで発見された地衣類数種の分布」
- 7) 津島堯也、山口富美夫、宮脇博巳、清水英幸、H. Simbolon、鈴木英治、嶋村正樹、出口博則：
日本植物学会中国四国支部第64回大会 (2007)
「東カリマンタン低地熱帯多雨林における森林火災と蘚苔類の関係」
- 8) H. Masuzaki, T. Furuki, M. Shimamura, H. Tsubota, T. Yamaguchi, H. Mohamed and H. Deguchi:
World Conference of Bryology 2007 (2007)
“A phylogenetic study on the Metzgeriineae (Metzgeriales, Hepaticae)”
- 9) 宮脇博巳、山口富美夫、清水英幸、H. Simbolon、鈴木英治：日本植物分類学会第7回大会 (2008)
「インドネシア、東カリマンタンの樹皮着生および葉上生稀産地衣類数種」
- 10) 山口富美夫、森順子、嶋村正樹、出口博則、宮脇博巳、清水英幸、F. I. Windadri, Ida Haerida、
H. Simbolon、鈴木英治：日本植物学会中国四国支部第65回大会 (2008)
「東カリマンタン低地熱帯多雨林における森林火災後の蘚苔類相の変化」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし