

総説 (Review Article)

森林の生物多様性モニタリングの歴史と生態学的視点からの将来展望

岡部貴美子^{1)*}・小川みふゆ²⁾

History and future perspective of monitoring of forest biodiversity

Kimiko OKABE^{1)*} and Mifuyu OGAWA²⁾

Abstract

The importance of biodiversity monitoring has increased because of processes and initiatives for sustainable forest management and the Convention on Biological Diversity (CBD) after the United Nations Conference on Environment and Development, in 1992. Forest ecosystem monitoring has been remarkably developed in terms of methods and scale in Japan through the Montreal Process and CBD, although several long term monitoring projects had been conducted since before the 1940s. For biodiversity monitoring, 1) explicit objectives and goals, 2) a relevant institution to organize the monitoring, and 3) a source of funding are generally decided upon first. Next, 4) selection of indicators, 5) development of monitoring methods using the indicators, and 6) analysis and practical use of monitoring results should be conducted based on 1)~3). Thus, collaboration between policy makers and scientists is necessary to select and develop both indicators and monitoring methods for adaptive forest management. With the monitoring data, scientists should work to find thresholds of ecosystem resilience for the conservation of forest biodiversity. CBD post-2010 targets require that not only checking on achievement of the numerical goals, but also validation monitoring for adaptive forest management for biodiversity and sustainable use of ecosystem goods and services. For this, we need to develop monitoring methods for ecosystem services. We also have to analyze relationship between biodiversity and mitigation of climate change to enable development of relevant monitoring methods for associated forest degradation.

Key words : adaptive management, ecosystem diversity, ecosystem service, genetic diversity, indicator, species diversity, sustainable forest management

要旨

1992年の環境と開発に関する国連会議の後、持続可能な森林管理のためのワーキンググループや生物多様性条約がつくられたことにより、生物多様性のモニタリングの重要性が増した。日本でも1940年代以前から長期観測は実施されていたが、モントリオールプロセス加盟および生物多様性条約の締結により、森林生態系のモニタリングは規模、手法共に大きく発展した。生物多様性のモニタリングに際しては、まず1)明確な目的と目標、2)実施可能な組織、3)継続を可能にする資金源が決定される。これらに基づき、4)指標の選択、5)指標を用いた測定手法の開発、6)モニタリング結果の解析と利用が行われる。従って順応的森林管理手法のために、行政と研究者が連携し、指標とモニタリング手法の選択や開発を行なうべきである。このようなモニタリング結果を利用して、研究者は生物多様性保全のための生態系の回復力の閾値を解明してゆく必要がある。生物多様性条約のポスト2010年目標に対しては、数値目標の達成だけでなく、生物多様性の保全と生態系サービスの持続的利用のための順応的管理に対する検証モニタリングが求められる。そのためには生態系サービスのモニタリング手法の開発が必要である。また今後は森林劣化のモニタリング手法の開発のための生物多様性と気候変動緩和の関係解析が必要である。

キーワード: 遺伝的多様性、持続可能な森林管理、指標、種の多様性、順応的管理、生態系サービス、生態系の多様性

原稿受付：平成23年4月11日 Received 11 April 2011 原稿受理：平成23年8月11日 Accepted 11 August 2011

1) 森林総合研究所森林昆虫研究領域 Department of Forest Entomology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 元森林総合研究所森林昆虫研究領域 former affiliation : Department of Forest Entomology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所森林昆虫研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Forest Entomology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: kimikook@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

18～19世紀の産業革命以来、世界は工業的、経済的に飛躍的な発展を見せたが、その一方でさまざまな環境問題が浮上した。そのため各国で大気汚染や水質汚染など、化学物質による汚染状況の調査が行われるようになり、その後環境モニタリングとして発展した。20世紀後半の数十年間には、地球上の各地で急速に土地改変が進行した(WRI, 2005)。その中で森林の改変の割合は温帯の森林ステップや疎林などで70%を超えるほか、寒帯林やツンドラなどを除くとどの森林タイプも概ね20～70%という非常に高いものだった(WRI, 2005)。国連食糧農業機関(FAO)の定義による森林は、世界中で約40億haにのぼり全陸地の約30%を占める(FAO, 2005)。1990年から2000年までの10年間に毎年850万haの森林が失われた(純損失に基づく計算結果; FAO, 2005)。このような森林の変化は森林のモニタリングによって明らかになったものであるが、モニタリングを続けることは変化を具体的に認識することにつながり、結果的にネガティブな変化に対して対応が可能になる。たとえば2000年以降も森林の減少は続いているが、純損失は年間520万haに減少しつつあり、地域ごとに見ると森林面積が増加している地域もある(FAO, 2010)ことは森林減少の認識と対応の現れといえるだろう。

生物多様性(biodiversity)という言葉は、1986年に米国科学アカデミーが主催するフォーラムに際して造られた新語である(Takacs, 1996)。その後この用語は生態学だけでなく経済学や社会学などを含む幅広い分野で受け入れられたが、生物多様性という言葉が造られる以前から希少種保全や環境保全などの概念は確立しており、これらとの違いが明確にしにくかった。つまりそれぞれの専門家にそれぞれの定義があるといわれるほど、曖昧な言葉であった。現在では生物多様性は、景観の多様性あるいは群集の多様性(生態系の多様性)、生物の種類の多様性(種の多様性)、それぞれの種内における個体群の多様性や遺伝子レベルで測定される多様性(遺伝的多様性)という3つのレベルの多様性からなるとされる(Noss, 1990; WRI, IUCN & UNEP, 1992など)。すなわち生物多様性は生態系の機能の一つではなく、様々な機能を提供する生態系の特質の一つである。またその価値は、科学的価値、現在～将来的な資源としての経済的価値、病気などから人の健康を守る保健衛生的な価値などから、我々の文化を構築する社会的アメニティとしての価値まで様々な形で認識されつつある(Costanza et al., 1997; Takacs, 1996; WRI, 2005; Kumar & Muradian, 2009)。しかし生物多様性の特徴の一つが冗長性(複数の生物が類似の機能を持っている)であることから(Walker, 1992; Luck et al., 2003)、生物多様性の減少や劣化の直接的影響は見えにくく、たとえば持続可能

な森林管理のためにどのように自然生態系を維持すればよいのかという疑問への答えは見つかっていない。

生物多様性に関する研究は、いかに生物が多様であるかを記述することと、なぜ生物は多様なのかを解明することを中心に研究が進められてきた。生物多様性の保全とモニタリングに科学者の貢献が必要なことは認識されていたものの、研究では科学的精度の高さを追求するあまり調査地の規模が小さくなる傾向があること、個々の研究は長期的な継続が困難であることなどから、必ずしも既存の研究結果が利用できず、国家スケールの長期的モニタリング手法の開発には時間を要した。これらの問題点を解決するために、アメリカでは農務省(USDA)と大学が連携し長期生態学研究を実現させた(US - Long Term Ecological Research)(本間・日浦, 2006)。また日本でも大学演習林などが中心となってJaLTER(Japan Long Term Ecological Research)と呼ばれる長期生態学研究サイトのネットワーク化が進みつつある(本間・日浦, 2006; 新山ら, 2007)。このような長期生態学研究では森林生態系の変化要因をも明らかにできることから、対応策の検討など応用的な場面での利用が期待される(Peters, 2010)。現在世界的に実施されている森林の代表的なモニタリングシステム(プロセスの基準・指標に基づくモニタリング、森林資源モニタリングなど)では持続可能な管理のためにモニタリング実施主体ごとに結果を分析し、森林管理に生かすことが想定されている。モニタリングで得られた情報を解析し活用するためには生態学的知識が不可欠であり(Schulte et al., 2006)、今後行政担当者や科学者の協力がより重要となることだろう。

持続可能な森林管理に関するプロセスや生物多様性条約に基づく森林のモニタリングは必ずしも観測・測定を指すものではなく、既存のデータから変化そのものや変化の傾向を発見する過程を含む一連の作業あるいは、過程そのものを含むようになってきた。そこで本文中では生態系の変動を示すことができる長期的なデータ収集については、モニタリングの一種と見なし、言及することとした。本総説では持続可能な森林の利用のために今後どのような生物多様性のモニタリングが必要であり、モニタリング結果をどのように活用すべきかを生態学的な視点から明確にすることを目的とする。そのためにまず生物多様性のモニタリングの歴史を概観することによって、森林のモニタリングがどのように発展、あるいは改善されてきたかを明らかにし、モニタリングにおける問題点(あるいは困難さ)を整理する。またモニタリング手法やデータ解析手法を主に生態学的な視点から紹介し、本総説が森林の生物多様性のモニタリングにおける指標や調査手法決定および開発の一助となることを期待する。

2. 生物多様性モニタリングの歴史

2-1. 海外諸国のおよび国際的な森林モニタリングの発展

1972年にストックホルムで開催された国連人間環境会議が設立の契機となった国連環境計画(UNEP)では、国連の諸機関を中心とした様々な国際機関のモニタリングを網羅する地球環境モニタリングシステムが構築され、モニタリングが計画の重要な部分を占めている(Sors & Wiersma, 1981)。しかし1970～80年時代は、大気や水の汚染に対するモニタリングが主流を占めていた。たとえば1980年に創刊された *Environmental Monitoring and Assessment* という科学雑誌の創刊号に掲載された論文は、すべてが化学物質のモニタリングに関するものだった。1980年代にはヨーロッパで森林の健全性と活力が劣化していることへの懸念が広がり、国連欧州経済委員会(UNECE)による長距離越境大気汚染条約(CLTAP)に基づき、1985年にヨーロッパを網羅する大気汚染の影響評価を主要な目的とした森林モニタリングシステムが確立した(Vries et al., 2003)。このモニタリングシステムは1990年から開催されている欧州森林保護閣僚会議(MCPFE)の持続可能な森林管理ともリンクし、現在では温暖化の影響や生物多様性保全状況のモニタリングなどにも対応できるようになっている(Vries et al., 2003; Linser, 2004)。当初から政策提言だけでなく科学的仮説の検証を視野に入れた画期的なシステムで、10年以上に及ぶ徹底したモニタリングが行われてきた。その結果、物質循環と森林生態系の持続性との関係から森林残渣のエネルギー利用に関する知見が得られたこと、大気汚染や気候変動のトレンドと樹木の成長やフェノロジーとの関係など、環境変化に対する反応について様々な興味深い事実が提示された(Vanguelova et al., 2007)。またFAOは1946年以来、世界森林資源評価と呼ばれるアセスメントを行っている。このアセスメントは元々第二次世界大戦後の木材資源の枯渇に対する懸念から始まったものだが、長期的な情報が集約されていることに加え、今日では森林の健全性や生物多様性まで評価しており、持続可能な森林管理手法の開発にとって重要な資料を提供している(FAO, 2005)。現在森林資源モニタリングは各国で行われているが、それらの結果は国別レポートやGlobal Forest Resource AssessmentとしてFAOから出版されている(Holmgren & Marklund, 2007)。

1992年にリオデジャネイロで行われた環境と開発に関する国連会議(別名 地球サミット、リオサミット)では、持続可能な開発に向けた地球規模での新たなパートナーシップの構築が主要なテーマとなり、この会議に基づくアジェンダ21、生物多様性条約、気候変動枠組条約のいずれにおいても森林の重要性が強く認識された(Montreal Process, 2010)。その後世界各地で

持続可能な森林の開発と利用のために、地域ごとあるいは森林タイプごとに様々なワーキンググループ(プロセスまたはイニシアティブと呼ばれる)が作られた。これらのワーキンググループはそれぞれが森林の多面的機能に相当する基準と、モニタリングにおける測定項目である指標を設定し、森林開発や管理による影響などをモニタリングしている。現在までにグループ間や、各グループと国際機関との協力関係が構築され、指標の開発やモニタリング手法に関する情報交換等が行われており、順応的管理(adaptive management: Stankey et al., 2005など参照)手法の開発と向上を目指している(例 Montreal Process, 2010)。現在9つを数えるこれらのワーキンググループは、それぞれが生物多様性の保全のための基準と指標を設定している(Table 1: FAO, 2011)。プロセスの一つである国際熱帯木材機関(ITTO)は、地球サミットに先立つ1991年にいち早く熱帯天然林の持続可能な経営に関する基準と指標の策定を行った(ITTO, 1993a)。さらに1993年には、完全保護区域(TPA)という保護地区の設定が進まず生物多様性保全手法に対する懸念が広まるのを受けて、熱帯生産林における生物多様性保全のガイドラインを策定した(ITTO, 1993b)。この中で生産林の生物多様性に関する情報の欠如を懸念し、順応的管理のための調査やモニタリングの重要性を指摘した。このようなモニタリングの継続や結果に基づく科学的な知見や提言の蓄積から、ITTOは国際自然保護連合(IUCN)と共同で2009年にこれを改訂した(ITTO, 2009)。改訂版の中でも順応的管理にとってモニタリングが欠かせないことが指摘されている。

生物多様性保全のためのモニタリングの重要性が今日ほど明文化される以前から、鳥や生物の調査は世界各国で比較的古くからおこなわれてきた。たとえばBritish Trust for Ornithologyによる鳥のモニタリングは70年以上継続され、環境保全にとっても生態学にとっても貴重なデータを提供している(BTO, 2011)。鳥の調査の一つ標識調査は世界各国で行われており、日本でも1924年から世界大戦中の中断を経て継続されている(山階鳥類研究所, 2011)。また研究者は研究目的で様々な生物の個体群情報を収集し、論文化する際にこれを公表する。このような研究上の分散した生物情報を集約し電子データ化することによって、一機関が継続するモニタリングデータと同様に利用することが可能になった例もある(例 イギリス自然環境研究委員会帝国大学個体群動態データベース)。このような長期的な生物情報は現在CBDが発行するGlobal Biodiversity Outlookなどで、生物多様性の変化を示す貴重な資料として利用されている(Loh et al., 2005; CBD, 2006)。生物多様性保全を目的としたモニタリングは、地球サミット以降急速に発展した。1992年に作られた生物多様性条約(CBD)では、その成立時から

Table 1. 森林の生物多様性モニタリングのための基準・指標を設けている持続可能な森林管理のためのワーキンググループ (FAO, 2011)
Working groups on sustainable forest management that have criteria and indicators for monitoring of forest biodiversity (FAO, 2011)

| ワーキンググループ | 参加国の概要 | 生物多様性に関する基準 | 指標 | モニタリング |
|---------------------|--|------------------------------------|--|--|
| 国際熱帯木材機関 (ITTO) | 60 カ国 (ボリビア、ブラジルなどの 33 の生産国とオーストラリア、カナダ、日本など 27 の消費国を含む) | 基準 5. 生物多様性 | 生態系の多様性 (森林を含む保護地域面積など)、種の多様性 (絶滅危惧種などの数など)、遺伝的多様性 (生息地内外の保全状況など)、生産林における生物多様性の供給源 (非攪乱地の維持など) | 基準・指標に基づき、熱帯の加盟国で実施し、結果を出版 |
| 汎欧州プロセス (ヘルシンキプロセス) | 寒帯林、温帯林、地中海林を含む 42 カ国 | 基準 4. 森林生態系における生物多様性の維持、保全及び適切な増進 | 一般的な状態 (法的な規制の枠組みなど)、代表的かつ稀で脆弱な生態系、絶滅危惧種、生産林における生物多様性 | 森林資源評価などと重複するが、モニタリングを実施 |
| アフリカ木材機構 (ATO) | 13 カ国 | 原則 2. 基準 3-2. 生物多様性への負の影響を最小化する | 保護地域の面積、希少種や絶滅危惧種が保護されているか、など | 国際銀行がモニタリングに資金提供している |
| モントリオールプロセス | 環太平洋の日本を含む寒帯～温帯林地域の 12 カ国 | 基準 1. 生物多様性の保全 | 生態系の多様性 (森林タイプごとの面積など)、種の多様性 (在来の森林に関連する生物種数など)、遺伝的多様性 (危機的状況にある種の地理的分布など) | 各国が定期的にモニタリングを行い、国別レポートで報告 |
| タラボトプロポーザル | アマゾン協力条約に加盟する 8 カ国 | 基準 4. 森林と生物多様性の保全 (国レベルの基準) | 保護地域における森林タイプごとの面積など | モニタリングを実施し、結果を報告書にまとめている |
| 乾燥アフリカプロセス | 27 カ国 | 基準 2. 森林生態系における生物多様性の保全と増強 | 生態系 (植生タイプごとの面積など)、種 (森林依存種の数と変化など)、遺伝子 (供給源の平均値など) | 持続可能な森林管理に関する政策等 (基準 7) の指標にモニタリングの実施が含まれる |
| 中近東プロセス | 30 カ国 | 基準 2. 森林生態系における生物多様性の保全 | 生態系 (植生ごと、人工林/天然林ごとの面積など)、種 (森林依存種の数など)、遺伝子 (種子供給の範囲など) | モニタリングの実施について具体的に言及していない |
| レバテリック中央アメリカプロセス | 中米 7 カ国 | 基準 5. 森林生態系の生物多様性 (国レベルの基準) | 保護地域における森林タイプごとの面積、絶滅危惧種・固有種などの数など | モニタリングの重要性を指摘 |
| 乾燥アジアイニシアティブ | ブータン、中国など 8 カ国 | 基準 1. 生物多様性の保全 (国ごとに設定する。ここでは中国の例) | 生態系の多様性 (人工林の割合など)、種の多様性 (森林依存種の数など)、遺伝的多様性 (生息地が縮小した種の数など) の 10 指標 | なし (必ずしも国レベルのモニタリングシステムが確立していない) |

モニタリングの重要性が指摘され、明文化されていた (CBD, 1992)。特に 2002 年の CBD/COP6 (第 6 回締約国会議) で 2010 年目標が採択されてからは、さらにモニタリングの手法開発が進んだ。CBD の科学技術助言補助機関 (SBSTTA) は 2010 年目標評価のために、目標ごとの指標を 2003 年に提案した。たとえば森林に関しては、「目標 1. 生態系の顕著な消失の低減」の指標としてタイプごとの森林面積を、「目標 4. 生息地の消失や分断化による (生物多様性に対する) 脅威の制御」の指標として森林等の生態系ごとの土地改変の面積を提案している (CBD, 2003)。また主に研究者によってモニタリングの対象として有望な生物群の選出や、地域的な既存のモニタリングのネットワーク化が進んだ (Pereira & Cooper, 2006)。モントリオールプロセスなど各プロセスの基準には生物多様性の保全が含まれており、生態系や種、遺伝的な多様性の変化を知るための指標に基づくモニタリングが行われている (Table 1: 例 Montreal Process, 2010)。

生物多様性条約が目標に基づいて不明瞭ながらも数値目標を設定している (生物多様性消失速度の低

減、すなわち以前よりも消失速度を遅らせるというベースラインの設定がなされている) のに対して、持続可能な森林管理のための各プロセスは明確な目標値や閾値に基づくモニタリングを求めている。しかしながら長期モニタリングによって修復不可能になるような転換点 (= 閾値) を解明することが望ましい。長期的なデータの蓄積がなされれば通常とは異なる大きな変動を発見することができ、順応的管理手法の開発が可能と期待される。FAO の森林資源評価に情報提供している各国の森林資源モニタリングも、ほとんどが統計的意味合いで実施されており、目標値や閾値の設定や解明を明確な目的としていない。しかし長期的な情報の蓄積とその公開により研究者の利用が可能になることで、持続可能な森林管理手法の開発と高度化への利用が期待できる。生物多様性保全のための順応的管理手法の開発には、科学的解析と提言が不可欠であり (Lindenmayer et al., 2000; Gardner, 2010)、アメリカ合衆国やカナダなどでは順応的管理手法を開発するための長期研究サイトが設定された (例 アメリカ合衆国: Hobbie et al., 2003; カナダ: Vaughan et al.,

2001)。

社会的な利益にかないたまた経済的にも継続可能な森林管理を行っているかどうかを評価し認証する森林認証では、モニタリングとその結果による森林管理の評価が必須である (Rametsteiner & Simula, 2003)。森林管理協議会 (FSC) はモニタリングと評価という原則 (原則 8) を設け、森林の状態、林産物の生産量、生産・加工・流通各段階、管理作業およびそれらが社会や環境に与える影響を評価するために、森林管理の規模と内容に応じた適切なモニタリングを行うことを求めている (FSC, 2010)。FSC 認証では「原則 6. 環境への影響」で森林管理における生物の多様性の保全が義務づけられており、森林の更新と遷移や遺伝子、生物種、生態系の多様性、森林生態系の生産性に影響を及ぼす自然サイクルなどについて、モニタリングを行う必要性が示されている。モニタリングの目的が原則と指標によって明確に示されていることから、すべての森林に共通する固定的な数値目標はないものの、モニタリング結果が森林の更新や遷移過程に問題がないこと、遺伝子・種・生態系の多様性が維持されていることを定量的に示すことが期待されている。

生物や生態系のモニタリングは地球サミットを境に単に盛んになっただけでなく、目的が大きく変化した。森林の生物多様性保全などの施業や管理に対して行うモニタリングは最近の研究によって整理され、(施業の) 実施状況、効果/状態 (= 目標に対する到達度)、検証 (= 施業効果の評価) の 3 つのタイプに分類された (Stem et al., 2005; Gardner, 2010)。実施状況のモニタリングは施業が計画通りに行われたかどうかを確認するもので、生態学的知見は特に必要とされない。効果/状態のモニタリングは、施業によって状態が好転したかどうかを指標を使って具体的に示すことを目的とする。従って実施状況のモニタリングと効果/状態のモニタリングは、施業や管理がコストに見合っているかどうかの確認にも有効である (Gardner, 2010)。しかし両モニタリングともその状態に至った要因を示すことが目的ではないので、必ずしもどのような施業が適切かを示すことはできない。今日重要と考えられている順応的管理のような設問に回答するためには、仮説を設定した検証のモニタリングを行う必要がある (Stem et al., 2005; Thompson, 2006; Gardner, 2010)。検証のモニタリングを実施する際は、効果/状態のモニタリングとは異なる手法が必要なこと (たとえば、異なる指標や指標の測定手法など) に留意しなければならない (Thompson, 2006)。近年、特に地球サミット以降は、施業あるいはこれに関わる政策の評価や順応的管理などの検証のモニタリングの要素が強くなってきた。検証のモニタリングでは結果の科学的解析が前提であるため、新たな指標の開発や提案が必要になってきた。

2-2. 日本の森林生態系長期観測データおよびモニタリング

日本の森林にかかわる長期調査のうち長い歴史をもつものの一つは収穫試験地調査で、1934 年に始まり、1959 年には試験地の一部廃止と新設 (現在は全国 220 地点) が行われると共に調査方法の統一が計られて、現在まで継続されている。収穫試験地の目的は間伐方法と収穫量の関係を解明し収穫表を作成することで、人工林の胸高直径や樹高などの測定が行われたことから、日本の人工林の長期的な蓄積量の変化などを知ることができる (家原ら, 1998)。より自然な森林生態系の調査としては、1972 年の「自然環境保全法」の制定に伴い、翌年に環境省による自然環境保全基礎調査 (緑の国勢調査) が実施された。この基礎調査によって全国的に動植物の分布が明らかになったことから、1995 年に発表された第一次生物多様性国家戦略の中では、本調査が充実すべきモニタリングと位置づけられた。このほか自然保護を目的として 1919 年に史蹟名勝天然記念物保存法が制定され、天然保護区域が指定された。これに先駆け 1915 年には国有林の保護林制度が始まっていた (林野庁, 2011)。また自然環境保全法に基づく自然環境保全地域や自然環境保全基礎調査の結果を受けて特定植物群落などが指定されたが、これらの保全すべき地域に対しては当時モニタリングが義務づけられていなかった。

1992 年の地球サミットを受けて持続可能な森林管理のためのモンリオールプロセスに参画したこと、生物多様性条約や気候変動枠組条約に加盟したことなどから、国レベルの森林のモニタリングはより重要性を増した。日本では戦前から森林資源調査が行われており、蓄積に関する統計資料はある程度揃っていた。しかしモンリオールプロセスで持続可能な基準・指標が作られ、これまで測定されたことのない測定項目 (指標) が含まれていたこと、資源量に関しても国際的な基準ができつつあったことなどによって、新たな調査手法に基づくモニタリングが必要になり、1999 年に第 1 回目の森林資源モニタリングが行われた (家原, 1999)。森林資源モニタリング調査では、地況 (標高、方位、傾斜、土壌浸食、道路からの距離)、法的規制、立木 (種名、個体数、胸高直径、樹高、枯損、剥皮、うる)、伐根や倒木の状態、植生、被害の状態などが指標 (測定項目) となり、国土全体に 4km 間隔の格子が置かれてその格子点に円形プロットが設定された (格子点が森林でない場合はこれを除く)。これら全国 15700 点のプロットのうち五分の一の調査地点を 1 年間で完了させ、5 年間で一巡する設計である (家原, 1999; 吉田, 2008)。2010 年に林野庁はこのモニタリングを森林生態系多様性基礎調査事業と改称した。プロットが全国の森林に分布することや、植物の種と個体数という生物の調査が行われていることなどから、

バイオマスだけでなく生物多様性の広域的なモニタリングとして今後解析にも利用することが可能だろう。このほかに生物や生物多様性の保全を明確な目的とした森林のモニタリングには、林野庁が国有林事業として実施する緑の回廊モニタリングや保護林モニタリングなどがある。保護林は1991年に現在の制度に改正され、それぞれの設定目的に合わせて森林生態系保護地域、森林生物遺伝資源保存林、林木遺伝資源保存林、植物群落保護林、特定動物生息地保護林、特定地理等保護林、郷土の森の7種類に分類されている。しかしながらモニタリングの制度は確立していなかったことから、2007年に、国民の要望や期待にこたえ現状に応じた保全管理を推進するための現状把握を目的とした保護林モニタリング調査マニュアルが作成された。このマニュアルに従って、全国を5年で一巡するモニタリングが行われている（林野庁，2007）。緑の回廊は原生的な天然林や貴重な野生動植物の生息・生育地等を保全・管理することを目的とし、保護林を連結し野生動物の移動経路を確保するために、2000年に全国に先駆けて奥羽山脈で設定された（長岐，2008）。2008年までに全国で24カ所に設定された緑の回廊では、野生動植物の移動実態や森林施業との因果関係等を把握するために、モニタリングが行われている。林分構造として林分の発達段階や階層、動物の生息地として林相、枯死木などの林木の状況、攪乱の状況などが測定項目の候補として示されている（林野庁，2003）。これらのモニタリングの結果や結果解析後の評価の公表については、現時点では明確にされていない。

モニタリングサイト1000（重要生態系監視地域モニタリング推進事業）は、第二次生物多様性国家戦略（新・生物多様性国家戦略）を背景に、様々なタイプの生態系にモニタリングサイトを設定し、我が国の自然の質的量的変化を早期に発見することを目的として始まった（石原，2007）。モニタリング1000のうち森林生態系のモニタリングサイトは、大学や森林総合研究所で継続調査を行って来た調査地を中心に55地点からなる（天然性林50、人工林5）。これらの調査地点には毎年データ収集を行うコアサイトと、おおむね5年に1度データ収集を行う準コアサイトが含まれ、樹木、地表徘徊性甲虫、鳥類が指標として用いられている。コアサイト・準コアサイトで取られた樹木に関するデータ（毎木調査データ）の概要は、2010年に公表された（石原，2010）。研究者による解析が前提にあることから、モニタリング結果は少なくとも加工された二次的なデータとして公表される。生物多様性総合評価報告書（生物多様性総合評価検討委員会，2010）では、生物多様性を総合的に評価するための全国スケールの種の分布や個体数の長期データが不足しているとの指摘がある。長期生物調査の結果は、現在ほとんどの実施機関で調査結果の公表を前提としているが、日本で

は非公開のため科学的に利用できないものが多い。行政機関によるモニタリングはモニタリングを行うことそのものではなく、順応的管理等に利用することを目的とし、結果を解析して適切な管理の普及に貢献すべきである。このほか特定の生物の長期的な分布変化の情報は、アマチュアやボランティアなどの努力によって各地に存在している。これらの一部は県別のレッドリストの作成に使われたり、環境変化と生物分布の関係解明に利用されるなど、高い価値を有する（例 瀬能，2009）。また Yamaura et al. (2009) や山浦・天野 (2010) は、自然環境保全基礎調査の鳥やほ乳類のモニタリングデータ（1970年代と1990年代）を用いて、社会的経済的变化がもたらす森林利用の変化が生物の分布に影響を与えていることを明らかにした。全国をカバーする情報がなくても、多地点調査の結果から老齢林の変化傾向を解明するなどの試みも行われている（Ogawa et al., 2011）。大学の演習林などの努力によって蓄積された長期生態学研究サイトをネットワーク化し情報公開を促進する取り組み（JaTER）も行われていることから（本間・日浦，2006；新山ら，2007）、今後はさらに生物多様性の変動要因の解明が進むことが期待される。

3. モニタリングの実際

3-1. モニタリングの実施手順

モニタリングにはまず1) 明確な目的や目標、2) 継続が可能な実施組織、3) 継続を可能にする資金源が必要である。主なものとして1) では条約やプロセスの目標、国家戦略、委員会などの取り決めなど、2) では政府または非政府機関、3) は日本では省庁や地方自治体の事業などが該当する。モニタリング実施には更に4) 指標の設定、5) 指標の測定手法の決定が必要である。また条約やプロセスは順応的管理を期待していることから、6) モニタリング結果の解析と利用も重要である。モニタリングは概ね1) が与えられて2) と3) が決定され4)以降へと進行する。目標が条約等による大目標（例：生物多様性の減少速度を低減させる）のように漠然としたものである場合は、実施組織がモニタリングによって検証すべき項目を決定し、これに合わせてより具体的な数値目標に改変した方がモニタリングしやすい。たとえば特定の生物個体数の減少を止めるというような具体的な目標は、定期的に個体群のモニタリングを行うことで目標達成が確認できる。さらにモニタリングを行う際のベースラインや閾値を示すことができれば、森林管理が適当であったかどうか検証し、適切な管理手法の開発に貢献できる。

生物多様性条約愛知目標の戦略目標C目標11の「2020年までに、少なくとも陸域及び内陸水域の17%、（中略）生物多様性と生態系サービスに特別に重要な

地域が、効果的、衡平に管理され、かつ生態学的に代表的な良く連結された保護地域システムやその他の効果的な地域をベースとする手段を通じて保全され（後略）」のような数値目標は明確で具体的である（CBD, 2010a）。しかしここで示された保全地域の目標値に到達すれば生物多様性を持続的に保全できるという科学的な根拠は示されていない。保全面積だけでなく、保全地域の設定方法やそれぞれの連結性が重要であると予想されることから、適切な指標によって数値目標を検証するための研究を行う必要があるだろう。また指標を決定する際は、測定手法の選択と同時進行を進めることが望ましい。たとえばモントリオールプロセスの基準1.「生物多様性の保全」、1.1「種の多様性保全」の指標は「森林に依存する種の数」だが、この全種数を測定することは現状不可能である。従って各国はいくつかの代表的な生物を具体的な指標として測定しているが、その選出に当たっては次章で示すように調査手法が確立しているかどうかや、その調査法がコストに見合うかなども検討する必要がある。また指標を選定する際は解析が可能な数値データが得られるか、解析結果から得られる結論が施業に生かせるものであるかを検討するべきで、このためには指標開発に科学委員会の助言が欠かせない（Niemi & McDonald, 2004; Gardner, 2010）。今日、条約やプロセスに加盟する国々のほか非政府組織、国連などの国際機関、EUなどの連合などがそれぞれの目的や目標（基準や原則などと呼ばれることもある）に基づき、科学委員会や科学者の助言を得てモニタリングのための指標を設定している。

3-2. モニタリングの指標

モニタリング実施が決定されてから実際に開始されるまでの間の最も重要な決定事項は、変化の傾向や減少を明確にするもの（Hammond et al., 1995）、すなわち指標であることが前章から明らかになった。指標は変化を知らせるものであることから、「モニタリング指標」という場合は概ね指標＝測定項目だが、測定結果を更にわかりやすく加工したもの（たとえば物価指数のような指数）が指標と呼ばれることもある。本総説ではできる限り指標（測定項目とする）と指数（ここでは評価のために測定値を加工した数値とする）を分けて概説する。指標は1) 目標達成を明確に評価する、2) 科学的な精度を持つ（測定値の解析が可能である）、3) コストに見合うことが必要である。それぞれにとってどのようなスケール（通常はモニタリングを実施する面積）でモニタリングをするかは、指標を決める上で重要な事項である。以下で、1)、2)、調査法と3)、スケール、持続可能な森林管理の評価のそれぞれと指標との関係について、順に解説する。

近年の森林のモニタリングは検証のモニタリングを

含んでいることから、指標を選ぶ際には順応的管理を目標の一つとし、森林管理の効果を評価できるかどうかを検討しておくのが望ましい（Gardner, 2010）。森林管理そのものを一つの実験と捉え、指標を選定する必要があるだろう（Noss, 1990; Thompson, 2006）。しかしこれまで提出された指標は必ずしも施業を検証できるものではなかった。たとえばモントリオールプロセスの生物多様性保全の指標のうち生態系の多様性は施業と結びつけやすいが、種や遺伝的多様性の測定結果と施業は直接関連しない。これまでのモニタリング指標で検証ができない原因は、指標が適切でない場合と解析手法が十分に発達していない場合の2通りがあったと考えられる。

森林の生物多様性保全の検証モニタリングでは科学（保全生態学）と行政をつなぐ最も効果的な手段として、非生物的な指標（例 エコツーリズムへの支出など）よりも生物指標あるいは生態学的指標の利用が望ましい（Noss, 1999; Gardner, 2010）。これまではしばしば種（数）を測定するモニタリングが行われてきた（Spellerberg, 2005）。しかしすべての生物種を調べつくすことは不可能であり、節足動物のように未記載種が既記載種の何倍もあると予想されている現状では、生物多様性の評価を種数に大きく依存することは危険を伴う（Lawton et al., 1998）。そのため多様性を代替する指標（surrogate）として、指標種の探索が盛んに行われた。たとえばアンブレラ種（生息に必要な面積が比較的大きいので、保全によって同時にその面積内の多くの種を保全できると考えられる種）や、フラグシップ種（カリスマ種）のように地域的に重要な生物すなわち文化的機能の高い生物が指標として利用されることもあったが、そのいずれが維持されたとしても必ずしも生物多様性を保全できるとはいえないことがわかってきた（Simberloff, 1998; Ozaki et al., 2006; Sergio et al., 2008）。個体数が少なく比較的稀な種は特定の生態系でしか見られないので表徴種と呼ばれ、指標として好適と思われがちだが、多様な生物がいることの指標になるとは限らない（Pearman & Weber, 2007）。老齢林の表徴種と多様性との相関は低く、むしろ表徴種のみ保全と老齢林全体の生物多様性の保全には、トレードオフが生じる例もあった（Juutinen & Mönkkönen, 2004）。高い栄養段階に位置する捕食者など生態系の要となるキーストン種は比較的指標性が高いが、ある生態系においてキーストン種を解明すること自体が難しいという問題がある（Simberloff, 1998）。低い栄養段階（すなわち生産者）に位置する普通種と認識されているが森林の構造や動態を決定づけるいわゆるファンデーション種は、安定的な生態系の維持に寄与するという重要性からモニタリングの対象として適当とする研究成果もある（Ellison et al., 2005）。ファンデーション種である木本種は近年北米

で著しく減少し、生態系に大きなダメージを与えていることがわかった。ただしファンデーション種の利用においては、モニタリングに際して個体数を測定するのかあるいは胸高直径のような生長を測定するか、死亡率を見るのが適当なのかなど、今後検討の必要がある。指標種を使ったモニタリングは結果がシンプルでわかりやすいこと、1種だけを調べるのは一般に多種を調べるより楽であることなどの利点を持つ。しかし一方で、大気等の汚染の指標ほど適切なはたらきが期待できるものが少なく、生物多様性の変化を明示するものにはなりにくい(Lindenmayer et al., 2000)。単一の種ではなく複数の種を含むグループとして、餌や巣場所などの資源に対する要求、餌探索の仕方などが類似し、群集内で同じような地位にある生物群(ギルド)をグループとして指標に使うことも提案された(Johnson, 1981)。しかし同一ギルドに属する生物ならば生態系の非生物的变化に対する反応もすべて同じというわけではないことから、今のところ余り推奨されていない(Lindenmayer et al., 2000)。ほかには指標生物を使わず生物種のリストを作る(インベントリの作成)という方法も考えられたが、労力の割に示せるものが少なかったり、それぞれの種の重要性が不明であったり、リスト上の種の変化の要因が不明確であるなど問題点が多く、生物多様性のモニタリングとしては現在ほとんど実行されていない(Slobodkin, 1980; Lindenmayer et al., 2000; Failing & Gregory, 2003)。このように特定の種を指標種として生物多様性のモニタリングに利用する試みは、これまで余り成功しなかった。しかし鳥、蝶、維管束植物の長期的に蓄積されたデータを利用しモデル解析を行ったところ、これらの生物は一種ずつでは多様性を示すことができないが、指標生物群として利用できることがわかった(Mac Nally & Fleishman, 2002)。大量の既存の研究結果を利用したメタ解析によって代替指標を探す試みでも、植物、鳥、ほ乳類は調査がしやすく、種ではなくグループ(=分類群)として様々な生態系で生物多様性を表すことに有効であることがわかった(Lewandowski et al., 2010)。このほか稀な種を除き普通種を中心に解析した結果、普通種の種数の多さがほかの生物群の種数の多さとも関連することがわかった(Pearman & Weber, 2007)。すなわち個々の生物のいる・いないが意味するところはつかみにくい、普通いるはずの種が適度に発見されるかどうかは、多様性の指標になりうるのである。しかし複数箇所に散在する同じような生態系(たとえば複数の草地)で複数の生物群を調べてみると、必ずしもどの生物群も同じような挙動を示すわけではないことがわかった(Su et al., 2004)。つまり鳥の種数が多い草原で、必ずしも蝶の種数も多くなっているとは限らなかった。しかし鳥の種組成が似ている草原同士は蝶の種組成の類似度も高かったこと

から、この生態系で保全活動の評価をする際には、種数ではなく種組成の類似性を比較した方がよいと提案された。以上のことから稀な種や一種のみを指標とすることは生物多様性のモニタリングには必ずしも適さないことがわかる。また、種数にこだわるだけではなく、種組成の変化を評価することも重要なことが示唆された。

生物群を指標あるいは測定対象とする場合には通常、鳥、蝶、樹木などのように選出されるだが、どの生物群を用いるかは実施上の技術的な面からも、モニタリングの出資者への説明の面からも重要な問題である。Pearson (1994) はモニタリング対象生物として1) 経済的価値がある、2) 広域分布する、3) ほかの生物群の状態を反映する、4) 生態がよくわかっている、5) サンプルングしやすい、6) 同定しやすく分類学的に安定している(種名の変更などが少ない)、7) 生息地に特化しているなどの条件を挙げている。たとえば蝶は調べやすい(特に上記4, 5, 6に該当)という理由でデータが蓄積されてきたと推測されるが、群集構造が生態系の異質性や地形などに反応することが見いだされ(3, 7にも適応)、生物学的にも意味のある指標生物群であることがわかった(Kremen, 1992)。また土壌は森林の持続可能な管理にとって極めて重要であることから、土壌中の生物多様性のモニタリングが注目され(1, 5, 7などに相当)、手法開発も含めた試みが行われている(Parisi et al., 2005; Ritz et al., 2009)。ただし研究者はそれぞれが研究対象とする生物群の長所を強調する傾向があり、微生物、植物、無脊椎動物、脊椎動物いずれも指標としての利用が検討されている(Hill et al., 2005; Spellerberg, 2005; Table 2)。一般に指標生物に必要とされる要件をもとに、研究者によって生物指標として検討されたことがある100分類群の脊椎動物と32分類群の無脊椎動物について生態系の健全性の指標として評価した結果、ほとんどすべての生物群は生態情報が不足していて指標として期待されるほど十分な情報を示せないことがわかった(Hilty & Merenlender, 2000)。適当な生物群は地域によって異なるであろうことにも、留意しなければならない。生物多様性の変化要因や持続的管理に対して有用な情報を提供できる生物群を選出するのは、現在の我々の知識では困難が多いことを理解し、モニタリング手法開発の一方で生物・生態学研究を推進することが重要である。

生物種を指標として用いる場合、これまでの研究蓄積からそれぞれの生物によって適当な調査法が提唱されている(Table 2)のでこれを利用できる。一方で小型の生物では全く調査手法が確立していない生物群が多数存在する。DNA バーコーディング(DNAの標準的な領域を読み取ることで種レベルの同定を行おうとする手法)などによる生物情報が生態学に取り入れら

Table 2 森林の生物多様性モニタリングの指標として利用可能な生物群と調査法
Indicator taxa and survey methods for forest biodiversity monitoring

| 生物群 | 調査法 | 利用例 | 長所 ¹⁾ | 短所 ¹⁾ | 参考文献 |
|----------|-------------------------|---|-----------------------------------|---|---|
| ほ乳類 | 聞き取り調査 | 環境省自然環境保全基礎調査(種の多様性調査) | 広域情報を入手できる。 | データに対する精度や信頼度が不安定。 | Scholes and Biggs (2005) |
| | 自動撮影装置 | TEAMプログラム(ブラジル)、丹沢大山自然総合調査 | 100年以上の利用歴。人為影響の排除が可能。記録性。 | 高コスト。撮影環境・範囲が限定的。装置の紛失。 | Martins et al (2007), 及川・松井(2009), |
| 鳥 | ラインセンサス | European Bird Census Council | 広範囲を網羅できる。 | 調査ライン選択に差が出やすい。 | Noss (1990), Bibby et al. (2000) |
| | スポットセンサス | European Bird Census Council, モニタリングサイト 1000, | 鳴き声が聞こえる。調査範囲が一定。 | 調査範囲が限定的。 | Noss (1990), 生物多様性センターら (2009) |
| | 標識再捕獲法 | 環境省鳥類標識調査 | 広域調査が可能。移動範囲の特定。 | 再捕獲率に依存。 | Noss (1990), 山階鳥類研究所 (2011) |
| | ICレコーダ | 環境林モニタリング調査(石川県林業試験場) | 無作為。調査者が少ない。 | 高コスト。装置の紛失。性能に依存。 | Noss (1990), Bibby et al. (2000) |
| 飛翔性昆虫 | トラップ法(マレーズトラップ、衝突板トラップ) | 環境林モニタリング調査(石川県林業試験場) | 他種類の捕獲。長期的に放置できる。無作為。 | 対象種が必ずしも捕獲されない。設置場所による差が大きい。紛失。希少種や昆虫以外を捕獲。 | Kremen et al. (1993), 馬場・平嶋 (2000) |
| | 捕獲 | 自然環境保全基礎調査(愛媛県) | 短期的。捕獲種を限定できる。 | 調査者の技量による。 | Kremen et al. (1993), 馬場・平嶋 (2000) |
| (アリなど含む) | ルートセンサス(ライントランセクト) | 日本万国博覧会みどりの調査 | 調査種を限定できる。非捕獲が可能。 | 調査者の技量による。標本が残らない(非捕獲の場合)。 | Kremen et al. (1993), 馬場・平嶋 (2000) |
| 木材穿孔性昆虫 | 誘引トラップ | | 調査種を限定できる。調査時期を限定できる。 | 降雨の影響。紛失。昆虫捕食者を捕獲する可能性。 | Kremen et al. (1993), 馬場・平嶋 (2000) |
| 地上徘徊性昆虫 | ピットホールトラップ | 環境林モニタリング調査(石川県林業試験場)、モニタリングサイト 1000 | 短期・長期の調査が可能。無作為。比較データが多い。 | 降雨の影響を受ける。落下しない昆虫がある。希少種や昆虫以外を捕獲。 | Kremen et al. (1993), 馬場・平嶋 (2000) |
| 土壌動物 | コアサンプリング、ツルグレン装置等 | ヨーロッパイニシヤティブ ENVASSO | 土壌の状態を生物学的に調査可能。手法がほぼ確立している(比較可能) | ツルグレン装置が適さない種がある。微小な環境の差異を反映する。土壌動物同定の専門家が必要。 | Gradi et al. (2009) |
| 土壌性線虫 | コアサンプリング、ベールマン装置等 | | 手法が確立している(比較可能)。 | | Bongers and Ferris (1999), Römcke et al. (2006) |
| 菌類(きのこ) | ライントランセクト | | 広い地域をランダムに調査できる。 | 豊凶があるので数年の調査が必要。採集量が少ない。 | Hill et al. (2005) |
| | コドラート調査 | | 特定の場所の面的調査が可能。 | 豊凶があるので数年の調査が必要。 | Hill et al. (2005) |
| 維管束植物 | コドラート調査 | モニタリングサイト 1000 | 手法が確立している(比較可能)。 | 全種を網羅できないかもしれない。 | 沼田(1978) |

¹⁾ 長所及び短所は主に採集方法についてコメントした。参考文献は採集法だけでなく、なるべく生物群の長所、短所についてもコメントしているものを選んだ。

れることで、このようなジレンマの一部が解消されるかもしれない (Valentini et al, 2008)。生態系機能の研究が進むにつれ、微生物のように重要性の増大に伴って簡便なモニタリング手法の開発が期待される生物群もある (O' Donnell et al., 1994; Hawksworth, 1997; Bongers & Ferris, 1999)。一方でこれまでよく使われてきた分類群をモニタリングすることには、全球レベルの変化の抽出に利用したり、地域ごとの比較研究に利用したりできるという利点がある。また持続可能な森林管理を評価するには指標は変更しないことが望ま

しいので、生物調査法の開発の意義は大きい。保守的にならざるを得ない場合もある。生物群によっては調査時期の決定も慎重に行う必要がある。たとえば季節消長が明確な昆虫類や1年生草本、渡り鳥などは調査時期を逃すと発見できないが、このことにより生息しないとしてしまう可能性がある。小スケールのモニタリングでは多種類の生物群を多数回調査することが可能だが、国家レベルのような大スケールでは年1回以下の調査になりがちであるので、このような制約からモニタリングする生物群を決めざるを得ないことも

あるだろう。モニタリングのスケールが大きくなるとさらにコスト計算が重要となる。生物指標の抽出に際して生物学的な意義のみを追求しては、モニタリングと行政をつなぐことが困難になる (Gardner et al., 2008)。費用対効果の高い指標の選択はモニタリングの継続にとって非常に重要であり、生態学的な指標種や指標分類群の抽出に当たっては、サンプル採集や解析にかかる時間も含めたコスト計算を行うことも一つの現実的な対応である (例 井上ら, 2005)。リモートセンシングや国内の統計などから得られるデータは生物多様性の保全以外の目的にも共有されることが多く、モニタリングあたりのデータ収集コストを抑えることができるので、結果的にモニタリングコストを低下させることが可能になる。

非専門家にとっても生物の多様さが理解しやすい種の豊富さを調べるモニタリングは、目の細かいモニタリング (fine-filter monitoring) と呼ばれる。これに対して、林分構造の複雑さ、林分の連結性、ランドスケープレベルでの森林生態系の異質性などの生態系の特徴を調べる目の粗いモニタリング (coarse-filter monitoring) は、実行しやすさの面からも価値が高い (Noss, 1987)。目の粗いモニタリングでは、新たに測定する必要がなく既存の統計資料などで継続的に情報が入手可能なものもある (たとえば森林面積など)。しかし生態系の特徴や多様性と生物の種の多様性や遺伝的多様性の関連性は必ずしも正の相関があるとは限らないので、結果の解釈に注意が必要である (Redford, 1992; Failing & Gregory, 2003)。また森林生態系の特徴の変化が種や遺伝的多様性に対して、長期的にどのように影響しているのかが不明で、今後研究によって解明する必要がある (Lindenmayer et al., 2000)。近年、国レベル以上のモニタリングでリモートセンシング技術が利用されるようになってきた (Turner et al., 2003; Pereira & Cooper, 2006; Duro et al., 2007)。リモートセンシングは生態系の多様性をモニタリングするのに有効な手法で、たとえばマングローブ林のように分布情報の少ない生態系の面積を調査した際には、9割以上がリモートセンシングの情報に依存していた (FAO, 2007)。

森林管理ではあらかじめ管理単位というスケールが決まっているが、必ずしも管理スケールとモニタリングスケールは同じではない。たとえば生物多様性保全には複数の生態系が含まれるランドスケープレベルが適当とされるが (Lindenmayer & Franklin, 2002 など)、通常の森林管理は森林所有者や管理者単位で決定され、実施されている。従って目標や目的あるいは森林管理などそれぞれのスケールが解析結果を示すのに適当かどうかと、モニタリングしようとしているスケールからみて選択した指標が適切かどうかを検討しなければならない (Gardner, 2010)。林分レベルからラン

ドスケープレベルでは、森林構造を指標とするよりも生物群の利用が望ましい (Noss, 1990)。しかし平均樹高や平均胸高直径などの生態系の特徴を指標として利用することは、これらが管理によって比較的容易に変更可能なため、森林管理の視点からは種の数の大小よりも利用しやすいといえる。たとえば日本の森林生態系でも森林タイプや林齢によって森林に生息する生物の多様性には変化がみられたことから (Makino et al., 2006, 2007; Yoshimura, 2007; Taki et al., 2010c)、ランドスケープレベル内に異なるタイプの林分を配置することが生物多様性保全のために有効な管理方法であることがわかる。このように様々なタイプの森林が混在する状態を「ランドスケープ内における異質性 (heterogeneity) が高い」という。ランドスケープ内の生態系の異質性の保持は、生息場所が複雑化するとそれぞれの違いに応じて特異的な生物が生息できることからより種の多様性が高まるという従来の研究結果とも一致する (Tews et al., 2004; Gardner, 2010)。ただし異質性を高めることに固執すると各タイプの分断化や面積の縮小につながることもあり、多様性を維持するための最小面積などに十分な配慮が必要である (Debinski & Holt, 2000; Perault & Lomolino, 2000; Pardini et al., 2005)。また移動性の高い生物は人工林の間伐などの森林の改変に直ちに反応することから、林分単位の施業が生物多様性に大きな影響を与えたように見えることがある (Taki et al., 2010a)。間伐によってできた人工林内の空間には、周囲の生態系に生息する生物が移動しやすくなる。このため二次林を含む天然林が含まれる異質性が高いランドスケープでは、新たな生物群が侵入する可能性が高まり、施業の効果を実際よりも高く評価してしまう可能性があることに注意が必要である。

3-3. データの解析とモニタリング結果の利用

モニタリングデータは専門家によって科学的に解析されることが望ましい。解析の目的は持続的管理手法の開発および高度化と、モニタリング実施者あるいは出資者への報告などである。今日 DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) の解析という手法がしばしば用いられ、持続可能な開発のために有効であることが示されている (Pirrone et al., 2005; Harrington et al., 2010)。これは OECD が環境指標として開発した PSR (P 環境への負荷、S 環境の状況、R 社会の反応) モデルを更に発展させたものであるが、我が国の生物多様性総合評価などにも応用されている (環境省生物多様性総合評価検討委員会, 2010)。このようにあらかじめ解析を想定し、要因を明確にして対策が作れるようなモニタリングが実行されていれば、順応的管理への直接的な貢献が期待できる。

目的の一つである出資者あるいは納税者への報告は、

モニタリングの継続についてはモニタリングの目的の認識と共有のために重要である (Gardner et al., 2008)。これまで様々な指数が開発されてきた (Table 3)。過度に単純化された指数はしばしば人々の誤解や無理解を助長するという批判があるが (例: たとえば GNP にこだわる余り、経済と福利などとのトレードオフを隠蔽してしまうこと)、一方で理解しやすさという長所が大きいことから、利用を避けるべきではない (Failing & Gregory, 2003)。生態学では複数の生物多様性指数が開発され、利用されている。種数とそれぞれの種の個体数を用いた種の多様性を示す指数は、一般に種数の豊富さと複雑さ (= 種の数と同じでも、それぞれの個体数が変化すると多様性は複雑になる) から定量化するが (α 、 β 、 γ 多様度、シンプソンの多様度指数、シャノン-ウィナー関数など。参照 伊藤ら, 1980; 嶋田ら, 2005)、それぞれに特徴があるので目的に合わせて選択する必要がある (Magurran, 2004)。研究者以外にもわかりやすい指数として、生物多様性条約の Global Biodiversity Outlook (世界の生物多様性の現状を報告し将来の戦略について記述していることから条約において最も重要な出版物とされる) では、リビングプラネットインデックス (LPI) と呼ばれる指数が開発され、評価に用いられた (CBD, 2006)。この指数は生物多様性条約の 2010 年目標の達成を可視化する目的で開発された (Loh et al., 2005; Collen et al., 2008)。また生物多様性の指標として biodiversity intactness index (Scholes & Biggs, 2005) やレッドリストインデックス (Butchart et al., 2005) などがある。しかしこれらの指数には、種の絶滅が生態系の持続性にどれほどのインパクトを与えるかが不明であること、絶滅と生物多様性の劣化の関係は不明瞭であることなど、生物多様性の保全にとって適当かどうか疑問が残る。WWF の生きている地球レポートでは、人間活動によって消費される資源を現すエコロジカルフッ

トプリント (Wackernagel and Ress, 1996) という指数が用いられ、環境に対する負荷の定量化が試みられた (WWF et al., 2010)。指数を用いて生物多様性を説明する際には、その意味するところの限界 (たとえば LPI は変化要因を示していない) について理解しておくことが重要である (Failing & Gregory, 2003)。またスナップショットとしての生物多様性を示す指数 (前述の多様度指数など) と、連続的な変化を現すのに適した LPI を使い分けたりするなど、適切な利用が必要である。

順応的森林管理において施業は実験的意味合いを持ち、モニタリング結果に応じて管理手法を変更できる順応性を持たなければならない (Bunnell & Dunsworth, 2009)。モニタリングの結果を解析して森林管理や土地改変による生物多様性を予測するモデルを作成することで、生物多様性保全に適切な管理シナリオを選択することができる (Nelson & Daily, 2010; 岡部, 2010)。モデルの精度は生物多様性情報の精度に依存するので、モニタリングの際に事前に検討しておくことが必要である。またモニタリングによって、生態系変化に対する生物の回復力や安定性の限界を示す閾値が解明されることが望ましい。閾値の解明に関して生態学的には、1) 生態系の状態のシフトの解明 (生態学的回復の解明)、2) 限界負荷量 (許容可能な汚染物の量など) の解明、3) 生態系を変化させる主要な外因 (ドライバー) とその閾値の解明の 3つのアプローチを行う必要がある (Groffman et al., 2006)。生物個体群や生態系には回復力があり、主な自然生態系は攪乱に対して回復力や抵抗力があると考えられている (Thompson et al., 2009)。生態系がイベント以前の状態に戻る物理的な回復を工学的 (機械的) 回復力 (engineering resilience) と呼び、生態系の状態そのものがシフトし別の生態系として存続を続ける場合を生態学的回復力 (ecological resilience) と呼

Table 3 生物多様性評価に使われた指数の例
Examples of indices used for biodiversity assessment

| 指数 | 指標 (測定項目) | 評価対象 | データ収集 | 長所: 短所 | 参考文献 |
|---------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------|--|---|
| Living Planet Index (生きている地球指数) | 種数、個体数、個体群密度、バイオマス、巢の数、捕獲数 | 脊椎動物 | 1970 年以降 | 生態系ごとの世界的変動傾向の可視化。: 脊椎動物のみ。データの無い地域が多い。 | Loh et al. (2005), Collen et al. (2008) |
| Biodiversity Intactness Index | 種数、固有 (在来) 種、種組成 | 植物、ほ乳類、鳥、は虫類、両生類 | 2000 年の異なる植生における種類相 | 土地改変から過去や将来の変化を予測。: 検証できない。 | Scholes and Biggs (2005) |
| Red List Index | 種数、個体群サイズ、分布域 | 鳥、両生類 | 1980-2004 | 種の多様性変化の (一面を) 可視化。: 4 割が質的データ。調査可能な生物に限られる。 | Butchart et al. (2005) |
| City Biodiversity Index | 生態系の種類、種組成、個体群サイズ | 都市でモニタリングできる生物 | 2010 年以降 | 都市計画や保全に利用可能。: 未使用のため不明 | CBD (2010b) |

ぶが、それぞれのアウトプットは全く異なるので、何に対する閾値を解明すべきか整理しておく必要がある (Gunderson, 2000)。理論的には生態系の生産力が高い方が回復力が大きく、変動があっても速やかに回復するとされる (Stone et al., 1996)。この抵抗力や復元力に大きく貢献するのが冗長性で、機能群における重複した種群 (冗長性) が攪乱による種や個体群の消失を補うと考えられる (Naeem, 1998; Yachi & Loreau, 1999)。生態系変化のドライバー (要因) を研究する際は、一般的な生態系の変化は小スケールから大スケールへカスケード状の連鎖を前提とすることが多い。しかし実際には小スケールと大スケールでは、外的要因への反応は異なる可能性が高い (Peters et al., 2004; Peters et al., 2007)。たとえば降水量という外的要因の変化でマイクロハビタット (微小な生息場所) が変化し、微生物が増加すると仮定する。しかし、必ずしもこのマイクロハビタットを含むランドスケープ全体の生物の多様性が増加するとは限らないのである。また実際に野生動物では、動物個体群維持のための閾値として生息地面積などの数値が明らかになっているものの、このような閾値は生物の種類や同種の生物でも生息する生態系による違いが極めて大きいことがわかっている (Andren, 1994; Bissonette, 1997; Betts et al., 2010)。このように生物多様性の劣化に関する閾値はスケールや環境要因に大きく依存すると予想されることから、有効な森林管理のためにはローカルな閾値の探索が必要である。

単純な生態系変化の事例では閾値を知るための指標がわかってきたものがあり、施業や管理においては極めて有効なのだが、閾値がないかまたはあっても解明が極めて難しい生態系が圧倒的に多いのが現状である (Scheffer & Carpenter, 2003)。モニタリングや研究の蓄積から森林の回復力は遺伝的多様性、機能種の多様性、生態系の多様性などの関連が大きいことがわかってきた (Hooper et al., 2005; Müller-Starck et al., 2005; Thompson et al., 2009)。従ってこれらの多様性を指標として測定することは、持続可能な順応的森林管理のための閾値を解明するために有用である。閾値あるいは可塑性のなくなる転換点 (ティッピングポイント) を解明するには、これらの測定結果を用いた予測モデルの作成が有効な方法と考えられる (Groffman et al., 2006; Thompson et al., 2009)。

4. モニタリングの今後

2010年10月に行われた第10回生物多様性条約締約国会議 (CBD/COP10) では2020年および2050年に向けて新目標が発表された。持続可能な生物多様性と生態系サービスの利用を目指す愛知目標と呼ばれる行動計画の中でも、引き続きモニタリングの重要性が指摘されている (2010 Biodiversity Indicators

Partnership, 2010)。新たな目標の中には数値目標が設定されているが、生物多様性条約の目的は、持続可能な生態系サービスの利用である (CBD, 1992)。従って数値目標の達成だけでなく、数値目標の達成による生物多様性の保全状況と生態系サービスのモニタリングを行うべきである。2000年に国連ミレニアムアセスメントが発表されて以来、生態系サービスの重要性がより広く認識されるようになった。生態系サービスとは生態系が人社会に与える恩恵を指し、サービスを含む生態系が持つ機能全般を網羅する生態系機能よりも更に具体的な人社会へのメリットが示される (Daily, 1997)。今後は森林の生態系サービスのモニタリングが重要な課題となるだろう。そのためには生態系サービスの定量化が必要である。生物多様性と生態系サービスの関係は概念的には理解されているが (Dobson et al., 2006)、量的な関係性の解明も必要である。また森林生態系はその他の陸上生態系、特に農業生態系などへ送粉サービス (昆虫などによる結実のための受粉) や天敵供給サービスを提供している (Kagawa & Maeto, 2009; Taki et al., 2009, 2010b; Okabe, 2010; Tylianakis, 2010; Schellhorn & Bianchi, 2010)。栄養塩の流れを介して森林が沿岸水域の生物多様性に大きく影響することから、海洋生態系へのサービスも示唆されている (山下・田中, 2008; 山北, 2010)。生態系サービスのモニタリングには、このような生態系間を結ぶモニタリングが必要である (岡部, 2010)。生態系サービスのモニタリングに際しては、地域ごとに期待される、あるいは潜在的なサービスの質や量が異なることに注意しなければならない。たとえば農産物などの花粉媒介すなわち送粉サービスでは、地域によって産物も送粉者も主要種が異なるし、食物として利用されるきのこなどの林産物は地域によって対象種はさまざまである。従って生態系サービスの担い手を指標としてモニタリングする場合は、きめ細かな情報収集が必要である。

CBD/COP10では遺伝資源へのアクセスと利益配分 (ABS) に関する議論に長い時間が費やされ、名古屋議定書が提出された (CBD, 2011)。今後、森林における遺伝資源の重要性に関する国際的議論が行われるだろう。生物多様性における遺伝的多様性は生態系の持続性に関してその重要性が認識されているものの、遺伝資源の持続的利用や遺伝的多様性保全のための森林管理については、ほとんど研究が進んでいない。たとえば生物多様性条約の2010年目標のための指標として、17のheadline indicators (一般社会にとって容易に理解しやすいことを優先した指標) が抽出されたが (BIP; Biodiversity Indicators Partnership, 2010)、遺伝的多様性の指標として「自生地作物集団」や「陸域家畜の遺伝的多様性」が選択されるなど、研究の遅れによって適切な指標が選べないと推測される例があ

る。森林の分断化（または連続した面積）と遺伝的多様性は密接に関係していると考えられるが、交配様式、移動性、フェノロジーなど様々な要因によって種ごとにその反応は異なることが予想される（Leding, 1992; Hall et al., 1996）。どのように包括的な森林管理やそのモニタリングを行うかについては、今後研究の必要がある。

気候変動枠組条約において認識されているように、森林は炭素吸収源として重要な生態系サービスを提供している。森林の生物多様性と炭素貯留や気候変動との関係は熱帯林などでモデル化されつつあるが、いまだ科学的な解明と実証研究が不十分である（Ozanne et al., 2003; Bunker et al., 2005; Nelson et al., 2009）。森林の減少や劣化を低減させる（あるいは止める）ため REDD (Reduced Emission from Deforestation and forest Degradation) や REDD+ という経済的な仕組みが考案された (UN-REDD Programme, 2011)。これらのシステムへの科学的貢献が必要であり森林劣化のモニタリングと評価が不可欠だが、森林劣化を評価するためには生産力の低下や樹冠率の減少などだけでなく、生物多様性との関係を解明するためのモニタリングを組み込む必要がある (Swingland, 2004)。従って森林劣化を示すのに適当な、新たな生物多様性の指標を開発する必要があるだろう。森林減少の対策として現在大規模な植林が進められている国がある。このような植林地や日本の人工林のように単純化された森林の持続性と、これらの林分を含むランドスケープレベルの生態系の持続性を明らかにするための生物多様性モニタリングプログラムも必要である (Lindenmayer, 1999; Brokerhoff et al., 2008)。

生態学者は長期的な生態学研究の重要性に気づき、ネットワーク化を図ってきた。科学者による長期データの解析によって社会や政策への重要な提言が可能になったが、日本のみならず世界的にも、科学者と社会・行政担当者との間で環境保全に関して必ずしも有益な会話がなされているとは言えない (Simberloff, 1999; Likens, 2010; Thompson et al., in press)。行政が担当するモニタリングでも、問題に対応し解決するためのツールとして科学的な精度が不可欠である。森林管理の検証のモニタリング結果を解析した後、管理手法の高度化にどのように利用するかを、あらかじめ明らかにしておくことが望ましい (Stadt et al., 2006)。また前章で述べたとおり、生物多様性および森林の劣化が著しい今日では予測モデルを利用してモニタリング結果から閾値を解明することは急務といえる (Mac Nally & Fleshman, 2004; Naidoo et al., 2008; Thompson et al., 2009; 岡部, 2010; Schmolke et al., 2010)。ランドスケープレベル以上のスケールで、過去から現在に至る生物多様性の変化の解析によってトレンドや要因が明らかになってきたことから

(Lindenmayer & Franklin, 2002; Ewers et al., 2009; Koyanagi et al., 2009)、これらを用いて閾値を解明することを期待する。森林の生物多様性の持続可能な利用のために、科学と社会および行政の連携体制を確立することが重要である。

5. まとめ

生物の長期観測は比較的長い歴史を持つが、観測目的の明確化やモニタリングおよび結果の解析の科学的な手法開発は、1992年の地球サミット以降に急速に進んだ。しかしながら生物多様性のモニタリングも含めて、多様性の維持や生態系の持続性を脅かす閾値あるいは可塑性が失われる転換点は未だ明確になっていない。またモニタリング結果に基づきどのように森林管理を修正・変更してゆくかというフローが確立している管理主体も少ない。モニタリング手法の開発が進む中で、このような制度に関わる整備について、早急な取り組みが必要である。その際、森林管理を評価するための実験的なモニタリングもセットしておくことは、森林管理の高度化に有用である。森林管理を林分単位から国レベルまでの様々なスケールで評価することが必要であり、生態系等の指標を用いた大スケールのモニタリングには、少なくともケーススタディとして生物種を指標とした小スケールのモニタリングを組み込むことで、生物多様性の様々なレベル（生態系、種、遺伝的レベル）の検証を行えるだろう。

生物多様性保全には、生物多様性における生態系、種、遺伝子の多様性の維持という目的に、生物多様性がもたらす生態系サービスの持続的利用という目的が加わりつつある。しかし生態系サービスの定量化とモニタリング手法の開発は発展途上といわざるを得ない。気候変動や森林劣化による生物多様性の劣化、逆に生物多様性の保全が気候変動緩和や森林劣化の解消に及ぼす効果など、生物多様性の変化をもたらす新たな要因や生物多様性の重要性の解明が進みつつある。気候変動や森林劣化などに対応した森林管理に対しても、生物多様性が適切に保全できるかどうかのモニタリングを行う必要がある。

生物多様性は生態系の持続性の基盤となり、ひいては人間社会の持続性を保証するものである (Levin, 1992; Robinson, 1993; Daily, 1997)。この重要性に鑑み、適切な森林管理を行うとともにモニタリングを実施して管理にフィードバックし、両者を改善し続ける必要がある。

謝辞

本研究の一部は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト (課題番号 200802) および地球環境研究総合推進費 (D-1008) によって行われた。

引用文献

- Andren, H. (1994) Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat, *Oikos*, **71**, 355-366.
- 馬場金太郎・平嶋義宏 (2000) 新版昆虫採集学, 九州大学出版会, 812 pp.
- Betts, M. G., Hagar, J. C., Rivers, J. W., Alexander, J. D., McGarigal, K. and McComb, B. C. (2010) Thresholds in forest bird occurrence as a function of the amount of early-seral broadleaf forest at landscape scales, *Ecol. Appl.*, **20**, 2116-2130.
- Bibby, C. J., Burgess, N. D., Hill, N. D. and Mustoe, S. H. (2000) "*Bird Census Technique*", 2nd ed., Ecoscope, 302 pp.
- BIP (2010) 指標セット, <http://www.twentyten.net/indicators/>, (参照 2010-12-28).
- Bissonette, J. A. (ed.) (1997) "*Wildlife and Landscape Ecology*", Springer, 441 pp.
- Bongers, T. and Ferris, H. (1999) Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring, *Trend Ecol. Evol.*, **14**, 224-228.
- Brokerhoff, E. G., Jactel, H., Parrota, J. A., Quine, C. P. and Sayer, J. (2008) Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodivers. Conserv.*, **17**, 925-951.
- BTO (2011) Monitoring, <http://www.bto.org/science/monitoring/>, (参照 2011-03.24).
- Bunker, D. E., DeClerck, F., Bradford, J. C., Colwell, R. K., Perfect, I., Phillips, O. L., Sankaran, M. and Naeem, S. (2005) Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest, *Science*, **310**, 1029-1031.
- Bunnell, B. L. and Dunsworth, G. B. (2009) "*Forestry and Biodiversity*", UBC Press, 49 pp.
- Butchart, S. H. M., Stattersfield, A. J., Baillie, J., Bennun, L. A., Stuart, S. N., Akçakaya, H. R., Hilton-Taylor, C. and Mace, G. M. (2005) Using red list indices to measure progress towards the 2010 target and beyond, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **360**, 255-268.
- CBD (1992) "*Text of the Convention on Biological Diversity*", United Nation, 28 pp.
- CBD (2003) Proposed biodiversity indicators relevant to the 2010 target. UNEP/CBD/SBSTTA/9/INF/26.
- CBD (2006) "*Global Biodiversity Outlook 2*", Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 97 pp.
- CBD (2010a) COP10 outcomes, <http://www.cbd.int/nagoya/outcomes/>, (参照 2011-03-31).
- CBD (2010b) Singapore index on cities' biodiversity, CBD, <http://www.cbd.int/authorities/gettinginvolved/cbi.shtml>, (参照 2011-03-31).
- CBD (2011) The Nagoya protocol on access and benefit-sharing, <http://www.cbd.int/abs/>, (参照 2011-04-04).
- Collen, B., Loh, J., Whitmee, S., McRae, L., Amin, R. and Baillie, J. E. M. (2008) Monitoring changes in vertebrate abundance: the living planet index, *Conserv. Biol.*, **23**, 317-327.
- Costanza, R., d' Arge, R., de Groot R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O' Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. and van den Belt, M. (1997) The values of the world' s ecosystem services and natural capital, *Nature*, **387**, 253-261.
- Daily, G. C. (ed.) (1997) "*Nature' s services*", Island Press, 392 pp.
- Debinski, D. M. and Holt, R. D. (2000) A survey and overview of habitat fragmentation experiments, *Conserv. Biol.*, **14**, 342-355.
- Dobson, A., Lodge, D., Alder, J., Cumming, J. S., Keymer, J., McGlade, J., Mooney, H., Rusak, J. A., Sala, O., Wolters, V., Wall, D., Winfree, R. and Xenopoulos, M. A. (2006) Habitat loss, trophic collapse, and the decline of ecosystem services, *Ecology*, **87**, 1915-1924.
- Duro, D. C., Coops, N. C., Wulder, M. A. and Han, T. (2007) Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing, *Prog. Phys. Geog.*, **31**, 235-260.
- Ellison, A. M., Bank, M. S., Clinton, B. D., Colburn, E. A., Elliott, K., Ford, C. R., Foster, D. R., Kloeppel, B. D., Knoepp, J. D., Lovett, G. M., Mohan, J., Orwig, D. A., Rodenhouse, N. L., Sobczak, W. V., Stinson, K. A., Stone, J. K., Swan, C. M., Thompson, J., Von Holle, B. and Webster, J. R. (2005) Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems, *Front. Ecol. Evol.*, **3**, 479-486.
- Ewers, R. M., Kapos, V., Coomes, D. A., Laforteza, R. and Didham, R. K. (2009) Mapping community change in modified landscape, *Biol. Conserv.*, **142**, 2872-2880.
- Failing, L. and Gregory, R. (2003) Ten common mistakes in designing biodiversity indicators for forest policy, *J. Environ. Manage.*, **68**, 121-132.

- FAO (2005) "Global Forest Resources Assessment 2005", FAO Forestry Paper 147, FAO, 320 pp.
- FAO (2007) "The World's Mangroves 1980-2005", FAO Forestry Paper 153, FAO, 77 pp.
- FAO (2010) "Media Center", <http://www.fao.org/news/story/pt/item/40893/icode/en/>, (参照 2011-03-24).
- FAO (2011) "Criteria and indicators for sustainable forest management", <http://www.fao.org/forestry/ci/16609/en/>, (参照 2011-06-10).
- Fleishman E., Thomson, J. R., Nally, R. M., Murphy, D. D. and Fay, J. P. (2005) Using indicator species to predict species richness of multiple taxonomic groups, *Conserv. Biol.*, **19**, 1125-1137.
- FSC (2010) FSC の原則と基準, FSC ジャパン, http://www.forsta.or.jp/fsc-japan/6_rule/6-1.pdf.
- Gardner, T. (2010) "Monitoring Forest Biodiversity", Earthscan, 360 pp.
- Gardner, T. A., Barlow, J., Araujo, I. S., Avila-Pires, T. C., Bonaldo, A. B., Costa, J. E., Esposito, M. C., Ferreira, L. V., Joseph, H., Hernandez, M. I. M., Hppgmoed, M. S., Leite, L.-M.-H., Martins, M. B., Mestre, L. A. M., Miranda-Santos, R., Overal, W. L., Parry, L., Peters, S. L., Ribeiro-Junior, M. A., Motta, C. da S. and Peres, C. A. (2008) The cost-effectiveness of biodiversity surveys in tropical forests. *Ecol. Lett.*, **11**, 139-150.
- Gardi, C., Montanarella, L., Arrouays, D., Bispo, A., Lemanceau, P., Jolivet, C. and Mulder, C., Ranjard, L., Römbke, J., Rutgers, M. and Menta, C. (2009) Soil biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges, *Europ. J. Soil Biol.*, **60**, 807-819.
- Groffman, P. M., Baron, J. S., Blett, T., Gold, A. J., Goodman, I., Gunderson, L. H., Peterson, G. D., Poff, N. L., Pejleski, D. W., Reynolds, J. F., Turner, M. G., Weathers, K. C. and Wiens, J. (2006) Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application?, *Ecosystems*, **9**, 1-13.
- Gunderson, L. H. (2000) Biological resilience- in theory and application, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, **31**, 425-439.
- Hall, P., Walker, S. and Bawa, K. (1996) Effect of forest fragmentation on genetic diversity and mating system in a tropical tree, *Pithecellobium elegans*, *Conserv. Biol.*, **10**, 756-768.
- Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, D. and Woodward, R. (1995) "Environmental Indicators: a Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development", World Res. Inst., 50 pp.
- Harrington, R., Anton, C., Dawson, T. P., de Bello, F., Feld, C. K., Haslett, J. R., Kluvánková-Oravská, T., Kontogianni, A., Lavorel, S., Luck, G. W., Rounsevell, M. D. A., Samways, M. J., Settele, J., Skourtos, M., Spangenberg, J. H., Vandewalle, M., Zobel, M. and Harrison, P. A. (2010) Ecosystem services and biodiversity conservation: concepts and a glossary, *Biodivers. Conserv.*, **19**, 2773-2790.
- Hawksworth, D. L. (1997) Fungi and international biodiversity initiatives, *Biodivers. Conserv.*, **6**, 661-668.
- Hill, D., Fasham, M., Tucker, G., Shewry, M. and Shaw, P. (eds.) (2005) Handbook of biodiversity methods, Cambridge Univ. Press, 573 pp.
- Hilty, J. and Merenlender, A. (2000) Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health, *Biol. Conserv.*, **92**, 185-197.
- Hobbie, J. E., Carpenter, S. R., Grimm, N. B., Gosz, J. R. and Seastedt, T. R. (2003) The US long term ecological research program, *BioScience*, **53**, 21-32.
- Holmgren, P. and Marklund, L. G. (2007) National forest monitoring systems - purposes, options and status. In Freer-Smith, P. H., Broadmeadow, M. S. J. and Lynch, J.M. (eds.) "Forestry and Climate Change", CABI, Cambridge, 163-173.
- 本間航介・日浦勉 (2006) 日本型の JTER を目指して 種生物学会編 "森林の生態学", 文一総合出版, 279-290.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S. III, Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J. and Wardle, D. A. (2005) Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge, *Ecol. Monogr.*, **75**, 3-35.
- 家原敏郎 (1999) 日本の新しい森林資源モニタリング調査, 山林, No.1384, 54-61.
- 家原敏郎・高橋正義・斎藤和彦・宮本麻子・松本光朗・石橋聡・佐野真・田中邦宏・大石康彦・原光好・細田和男・松村直人・小谷英司・近藤洋史・野田巖・白石則彦 (1998) 森林総合研究所における収穫試験地の時系列データの収集の現状, 森林計画誌, **30**, 63-66.
- 井上大成・大河内勇・佐山勝彦 (2005) 森林昆虫のモ

- ニタリングに必要な経費—カミキリムシ類によるモデルケース—, 森林総研報, **4**, 211-216.
- 石原正恵・豊田鮎・中村誠宏 (2007) 野外研究サイトから (8) モニタリングサイト 1000 (森林調査), 日生誌, **57**, 438-442.
- 石原正恵・石田 健・井田秀行・伊東 明・榎木 勉・大久保達弘・金子隆之・金子信博・倉本恵生・酒井 武・齋藤 哲・崎尾 均・寄元道徳・芝野博文・杉田久志・鈴木三男・高木正博・高嶋敦史・武生雅明・田代直明・田中信行・徳地直子・並川寛司・新山 馨・西村尚之・野口麻穂子・野宮治人・日浦 勉・藤原章雄・星野大介・本間航介・蒔田明史・正木 隆・吉岡崇仁・吉田俊也 (2010) モニタリングサイト 1000 森林・草原調査コアサイト・準コアサイトの毎木調査データの概要, 日生誌, **60**, 111-123.
- 伊藤嘉昭・法橋信彦・藤崎憲治 (1980) 動物の個体群と群集, 東海大学出版会, 273 pp.
- ITTO (1993a) “*Criteria for the Measurement of Sustainable Tropical Forest Management*”, ITTP Policy Development Series 3. 5 pp.
- ITTO (1993b) “*ITTO Guidelines on the Conservation of Biological Diversity in Tropical Production Forests*”, ITTO Policy Development Series 5, 20 pp.
- ITTO (2009) “*ITTO/IUCN Guidelines for the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity in Tropical Timber Production Forests*”, ITTO Policy Development Series 17, 120 pp.
- Johnson, R. A. (1981) Application of the guild concept to environmental impact analysis of terrestrial vegetation, *J. Environ. Manage.*, **13**, 205-222.
- Juutinen, A. and Mönkkönen, M. (2004) Testing alternative indicators for biodiversity conservation in old-growth boreal forests: ecology and economics, *Ecol. Econ.*, **50**, 35-48.
- Kagawa, Y. and Maeto, K. (2009) Spatial population structure of the predatory ground beetle *Carabus yaconinus* (Coleoptera: Carabidae) in the mixed farmland-woodland satoyama landscape of Japan, *Eur. J. Entomol.*, **106**, 385-391.
- Koyanagi, T., Kusumoto, Y., Yamamoto, S., Okubo, S. and Takeuchi, K. (2009) Historical impacts on linear habitats: the present distribution of grassland species in forest-edge vegetation, *Biol. Conserv.*, **142**, 1674-1684.
- Kremen, C. (1992) Assessing the indicator properties of species assemblages for natural area monitoring, *Ecol. Appl.*, **2**, 203-217.
- Kremen, C., Colwell, R. K., Erwin, T. L., Murphy, D. D., Noss, R. F. and Sanjayan M. A. (1993) Terrestrial arthropod assemblages: their use in conservation planning, *Conserv. Biol.*, **7**, 796-808.
- Kumar, P. and Muradian, R. (eds.) (2009) “*Payment for Ecosystem Services*”, Oxford Univ. Press, 308 pp.
- Lawton, J. H., Bignell, D. E., Bolton, B., Bloemers, G. F., Eggleton, P., Hammond, P. M., Hoda, M., Holt, R. D., Larsen, T. B., Mawdsley, N. A., Stork, N. E., Srivastava, D. S. and Watt, A. D. (1998) Biodiversity inventories, indicator taxa and effects of habitat modification in tropical forest, *Nature*, **391**, 72-76.
- Leding, F. T. (1992) Human impacts on genetic diversity in forest ecosystems, *Oikos*, **63**, 87-108.
- Levin, S. A. (1992) Ecosystems and the biosphere as complex adaptive ecosystems, *Ecosystems*, **1**, 431-436.
- Lewandowski, A. S., Noss, R. F. and Parsons, D. R. (2010) The effectiveness of surrogate taxa for the representation of biodiversity, *Conserv. Biol.*, **24**, 1367-1377.
- Likens, G. E. (2010) The role of science in decision making: does evidence-based science drive environmental policy?, *Front. Ecol. Environ.*, **8**, e1-e9.
- Lindenmayer, D. B. (1999) Future directions for biodiversity conservation in managed forests: indicator species, impact studies and monitoring programs, *For. Ecol. Manag.*, **115**, 277-287.
- Lindenmayer, D. B. and Franklin, J. F. (2002) “*Conserving Forest Biodiversity*”, Island Press, 351pp.
- Lindenmayer, D. B., Margules, C. R., Botkin, D. B. (2000) Indicators of biodiversity for ecologically sustainable forest management, *Conserv. Biol.*, **14**, 941-950.
- Linser, S. (2004) The MCPFE’ s work on biodiversity, *EFI Proc. No 51*, 27-35.
- Loh, J., Green, R. E., Ricketts, T., Lamoreux, J., Jenkins, M., Kapos, V. and Randers, J. (2005) The living planet index: using species population time series to track trends in biodiversity, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **360**, 289-295.
- Luck, G. W., Daily, G. C. and Ehrlich, P. R. (2003) Population diversity and ecosystem services, *Trends Ecol. Evol.*, **18**, 331-336.
- Mac Nally, R. and Fleishman, E. (2002) Using “indicator” species to model species richness: model development and predictions, *Ecol. Appl.*, **12**, 79-92.

- Mac Nally, R. and Fleishman, E. (2004) A successful predictive model of species richness based on indicator species, *Conserv. Biol.*, **18**, 646-645.
- Magurran, A. E. (2004) "*Measuring Biological Diversity*", Blackwell Publishing, 256 pp.
- Makino, S., Goto, H., Hasegawa, M., Okabe, K., Tanaka, H., Inoue, T. and Okochi, I. (2007) Degradation of longicorn beetle (Coleoptera, Cerambycidae, Disteniidae) fauna caused by conversion from broad-leaved to man-made conifer stands of *Cryptomeria japonica* (Taxodiaceae) in central Japan, *Ecol. Res.*, **22**, 372-381.
- Makino, S., Goto, H., Inoue, T., Sueyoshi, M., Okabe, K., Hasegawa, M., Hamaguchi, K., Tanaka, H. and Okochi, I. (2006) The monitoring of insects to maintain biodiversity in Ogawa Forest Reserve, *Environ. Monit. Assess.*, **120**, 477-485.
- Martins, S. de S., Sanderson, J. G. and Silva-Júnior, J. de S. (2007) Monitoring mammals in the Caxiuanã National Forest, Brazil – first results from the tropical ecology, assessment and monitoring (TEAM) program, *Biodivers. Conserv.*, **16**, 857-870.
- Montreal Process (2010) "Montreal process", <http://www.rinya.maff.go.jp/mpci/>.
- Müller-Starck, G., Ziehe, M. and Schubert, R. (2005) Genetic diversity parameters associated with viability selection, reproductive efficiency, and growth in forest tree species. In Scherer-Lorenzen, M., Korner, C. and Schulze, E.-D. (eds.), "*Forest diversity and function: temperate boreal systems*", Springer, 87-108.
- Naeem, N. (1998) Species redundancy and ecosystem reliability, *Conserv. Biol.*, **12**, 39-45.
- 長岐昭彦 (2008) 緑の回廊におけるほ乳類・鳥類の利用を向上させる方法, *秋田県森林研報*, **18**, 41-50.
- Naidoo, R., Balmford, A., Costanza, R., Fisher, B., Green, R. E., Lehner, B., Malcolm, T. R. and Ricketts, T. H. (2008) Global mapping of ecosystem services and conservation priorities, *Pros. Nat. Acad. Sci. USA*, **105**, 9495-9500.
- Nelson, E. and Daily, G. C. (2010) Modeling ecosystem services in terrestrial systems, *F1000 Biol. Rep.*, **2**, 53.
- Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D. R., Chan, K. M. A., Daily, G. C., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Lonsdorf, E., Naidoo, R., Ricketts, T. H. and Shaw, M. R. (2009) Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales, *Front. Ecol. Environ.*, **7**, 4-11.
- Niemi, G.J. and McDonald, M. E. (2004) Application of ecological indicators, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **35**, 89-111.
- 新山馨・武生雅明・河原崎里子 (2007) データベース化の功罪—森林動態データベース (FDDB) を例に一, *日林誌*, **89**, 340-345.
- Noss, R. F. (1987) From plant communities to landscapes in conservation inventories: A look at the nature conservancy (USA), *Biol. Conserv.*, **41**, 11-37.
- Noss, R. F. (1990) Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach, *Conserv. Biol.*, **4**, 355-364.
- Noss, R. F. (1999) Assessing and monitoring forest biodiversity: a suggested framework and indicators, *For. Ecol. Manag.*, **115**, 135-146.
- 沼田真編 (1978) 植物生態の観察と研究, 東海大学出版会, 275 pp.
- O' Donnell, A. G., Goodfellow, M. and Hawksworth, D. L. (1994) Theoretical and practical aspects of the quantification of biodiversity among microorganisms, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **345**, 65-73.
- Ogawa, M., Yamaura, Y., Abe, S., Hoshino, D., Hoshizaki, K., Iida, S., Katsuki, T., Masaki, T., Niiyama, K., Saito, S., Sakai, T., Sugita, H., Tanouchi, H., Amano, T., Taki, H. and Okabe, K. (2011) Use of two population metrics clarifies biodiversity dynamics in large-scale monitoring: the case of trees in Japanese old-growth forests, *Environ. Monit. Assess.*, **178**, 85-94.
- 及川 希・松井理生 (2009) 北海道演習林におけるエゾナキウサギの生息状況, 平成 20 年度技術職員等試験研究・研修会議報告, 12-17.
- 岡部貴美子 (2010) 持続可能な生態系サービス利用のための森林の生物多様性保全, *農林水産技術研究ジャーナル*, **33**, 52-56.
- Okabe, K. (2010) Conserving forest biodiversity and ecosystem services to agriculture. In Koizumi T, Okabe K, Thompson I, Sugimura K, Toma T, and Fujita K (eds), "*The role of forest biodiversity in the sustainable use of ecosystem goods and services in agro-forestry, fisheries, and forestry*", *FFPRI*, 36-42.
- Ozaki, K., Isono, M., Kawahara, T., Iida, S., Kudo, T. and Fukuyama, K. (2006) A mechanistic approach

- to evaluation of umbrella species as conservation surrogates, *Conserv. Biol.*, **20**, 1507-1515.
- Ozanne, C. M. P., Anhuf, D., Boulter, S. L., Keller, M., Kitching, R. L., Koerner, C., Meinzer, F. C., Mitchell, A. W., Nakashizuka, T., Silva Dias, P. L., Stork, N. E., Wright, S. J. and Yoshimura, M. (2003) Biodiversity meets the atmosphere: a global view of forest canopies, *Science*, **301**, 183-186.
- Pardini, R., de Souza, M. S., Braga-Neto, R. and Metzger, J. P. (2005) The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammal abundance and diversity in an Atlantic forest landscape, *Biol. Conserv.*, **124**, 253-266.
- Parisi, V., Menta, C., Gardi, C., Jacomini, C. and Mozzanica, E. (2005) Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy, *Agr. Ecosyst. Environm.*, **105**, 323-333.
- Pearman, D. B. and Weber, D. (2007) Common species determine richness patterns in indicator taxa, *Biol. Conserv.*, **138**, 101-111.
- Pearson, D. L. (1994) Selecting indicator taxa for the quantitative assessment of biodiversity, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **345**, 75-59.
- Perault, D. R. and Lomolino, M. V. (2000) Corridors and mammal community structure across fragmented, old-growth forest landscape, *Ecol. Monogr.*, **70**, 401-422.
- Pereira, H. M. and Cooper, H. D. (2006) Towards the global monitoring of biodiversity change, *Trends Ecol. Evol.*, **21**, 123-129.
- Peters, D. P. C. (2010) Accessible ecology: synthesis of the long, deep, and broad, *Trends Ecol. Evol.*, **25**, 592-601.
- Peters, D. P. C., Bestelmeyer, B. T. and Turner, M. G. (2007) Cross-scale interactions and changing pattern-process relationships: consequences for system dynamic, *Ecosystems*, **10**, 790-796.
- Peters, D. P. C., Pielke, R. A. Sr., Bestelmeyer, B. T., Allen, C. D., Munson-McGee, S. and Havstad, K. M. (2004) Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events, *Pros. Nat. Acad. Sci. USA*, **101**, 15130-15135.
- Pirrone, N., Trombino, G., Cinnirella, S., Algieri, A., Bendoricchio, G. and Palmeri, L. (2005) The Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) approach for integrated catchment-coastal zone management: preliminary application to the PO catchment -Adriatic Sea coastal zone system, *Reg. Environ. Change.*, **5**, 111-137.
- Rametsteiner, E. and Simula, M. (2003) Forest certification -an instrument to promote sustainable forest management?, *J. Environ. Manage.*, **67**, 87-98.
- Redford, K. H. (1992) The empty forest, *Bioscience*, **42**, 412-422.
- 林野庁 (2003) 国有林野における緑の回廊のモニタリングマニュアル, 林野庁, 167 pp.
- 林野庁 (2007) 保護林モニタリング調査マニュアル別冊, 林野庁, 172 pp.
- 林野庁 (2011) 保護林, http://www.rinya.maff.go.jp/j/kokuyu_rinya/sizen_kankyo/hogorin.html (参照 2011-03-25).
- Ritz, K., Black, H. I. J., Campbell, C. D., Harris, J. A. and Wood, C. (2009) Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development, *Ecol. Indic.*, **9**, 1212-1221.
- Robinson, J. G. (1993) The limits to caring: sustainable living and the loss of biodiversity, *Conserv. Biol.*, **7**, 20-28.
- Römbke, J., Sousab, J.-P., Schoutenc, T. and Rieperdt, F. (2006) Monitoring of soil organisms: a set of standardized field methods proposed by ISO, *Europ. J. Soil Biol.*, **42**, 61-64.
- Scheffer, M. and Carpenter, S. R. (2003) Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation, *Trends Ecol. Evol.*, **18**, 648-656.
- Schellhorn, N. A. and Bianchi, F. J. J. A. (2010) The role of forests in capturing the ecosystem service of pest control: a pathway to integrate pest control and biodiversity conservation. In Koizumi T, Okabe K, Thompson I, Sugimura K, Toma T, and Fujita K (eds), "*The role of forest biodiversity in the sustainable use of ecosystem goods and services in agro-forestry, fisheries, and forestry*" , FFPRI, 43-49.
- Schmolke, A., Thorbek, P., DeAngelis, D. L. and Grimm, V. (2010) Ecological models supporting environmental decision making: a strategy for the future, *Trends Ecol. Evol.* **25**, 479-486.
- Scholes, R. J. and Biggs, R. (2005) Biodiversity intactness index, *Nature*, **434**, 45-49.
- Schulte, L. A., Mitchell, R. J., Hunter, Jr M. L., Franklin, L. A., McIntyre, R. K. and Palik, B. J. (2006) Evaluating the conceptual tools for forest biodiversity conservation and their implementation in the U.S., *For. Ecol. Manag.*, **232**, 1-11.

- 生物多様性センター・日本野鳥の会・バードリサーチ (2009) モニタリング・サイト1000 森林・草原の鳥類調査ガイドブック, 日本野鳥の会, 12 pp.
- 瀬能宏 (2009) 市民参加による魚類画像データベースの構築と学術研究への応用、そして課題, ワークショップ21世紀の生物多様性研究 生物分布情報から生物多様性 要旨集, 2-3.
- Sergio, F., Caro, T., Brown, D., Clucas, B., Hunter, J., Ketchum, J., McHugh, K. and Hiraldo, F. (2008) Top predators as conservation tools: ecological rationale, assumptions, and efficacy, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **39**, 1-19.
- 生物多様性総合評価検討委員会 (2010) 生物多様性総合評価報告書, 環境省, 277 pp.
- 嶋田正和・山村則男・粕谷英一・伊藤嘉昭 (2005) 動物生態学 新版, 海游舎, 614 pp.
- Simberloff, D. (1998) Flagships, umbrellas, and keystones: is single-species passé in the landscape era?, *Biol. Conserv.*, **83**, 247-257.
- Simberloff, D. (1999) The role of science in the preservation of forest biodiversity, *For. Ecol. Manag.*, **115**, 101-111.
- Slobodkin, L. B., Botkin, D. B., Maguire, Jr B., Moore, III B. and Morowitz, H. J. (1980) On the epistemology of ecosystem analysis. In Kennedy, V. S. (ed.), "*Estuarine Perspective*", Academic Press, 497-507.
- Sors, A. I., Wiersma, G. B. (1981) Editorial, *Environ. Monit. Assess.*, **1**, 3-5.
- Spellerberg, I. F. (2005) "*Monitoring Ecological Changes, 2nd ed.*", Cambridge Univ. Press, 391 pp.
- Stadt, J. H., Schieck, J. and Stelfox, H. A. (2006) Alberta biodiversity monitoring program-monitoring effectiveness of sustainable forest management planning, *Environ. Monit. Assess.*, **121**, 33-46.
- Stankey, G. H., Bormann, B. T., Clark, R. N. (2005) "*Adaptive Management of Natural Resources: Theory, Concepts, and Management Institutions*", USDA Forest Service, General technical report PNW-GTR-654, USDA, 73 pp.
- Stem, C., Margoluis, R., Salafsky, N. and Brown, M. (2005) Monitoring and evaluation in conservation: a review of trends and approaches, *Biol. Conserv.*, **19**, 295-309.
- Stone, L., Gabric, A. and Berman, T. (1996) Ecosystem resilience, stability, and productivity: seeking a relationship, *Amer. Nat.*, **148**, 892-903.
- Su, J. C., Debinski, D. M., Jakubauskas, M. E. and Kindscher, K. (2004) Beyond species richness: community similarity as a measure of cross-taxon congruence for coarse-filter conservation, *Conserv. Biol.*, **18**, 167-173.
- Swingland, I. R. (ed.) (2004) "*Capturing Carbon and Conserving Biodiversity*", Earthscan Pub Ltd, 368 pp.
- Takacs, D. (1996) "*The Idea of Biodiversity Philosophies of Paradise*", The Johns Hopkins University Press, 500 pp. (狩野秀之・新妻昭夫・牧野俊一・山下恵子訳 (2006) 生物多様性という名の革命, 日経BP, 433 pp.)
- Taki, H., Inoue, T., Tanaka, H., Makihara, H., Sueyoshi, M., Isono, M. and Okabe, K. (2010a) Responses of community structure, diversity, and abundance of understory plants and insect assemblages to thinning in plantations, *For. Ecol. Manag.*, **259**, 607-613.
- Taki, H., Okabe, K., Makino, S. and Yamaura, Y. (2009) Contribution of small insects to pollination of common buckwheat, a distylous crop, *Ann. Appl. Biol.*, **155**, 121-129
- Taki, H., Okabe, K., Yamaura, Y., Matsuura, T., Sueyoshi, M., Makino, S. and Maeto, K. (2010b) Effects of landscape metrics on *Apis* and non-*Apis* pollinators and seed set in a self-incompatible crop, *Basic Appl. Ecol.*, **11**, 594-602.
- Taki, H., Yamaura, Y., Okochi, I., Inoue, T., Okabe, K. and Makino, S. (2010c) Effects of reforestation age on moth assemblages in plantations and naturally regenerated forests, *Insect Conserv. Diver.*, **3**, 257-265.
- Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Wichmann, M. C., Schwager, M. and Jeltsch, F. (2004) Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/ diversity: the importance of keystone structures, *J. Biogeogr.*, **31**, 79-92.
- Thompson, I. (2006) Monitoring of biodiversity indicators in boreal forests: a need for improved focus, *Environ. Monit. Assess.*, **121**, 263-273.
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S. and Mosseler, A. (2009) "*Forest resilience, biodiversity, and climate change*", CBD Technical Series No.43, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 67 pp.
- Thompson, I. D., Okabe, K., Tylianakis, J. M., Kumar, P., Brockerhoff, E. G., Schellhorn, N., Parrotta, J. A. and Nasi, R. (2011) The role of forest biodiversity in delivery of ecosystem goods

- and services: translating science into policy, *BioScience*, (in press).
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E. and Steininger, M. (2003) Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends Ecol. Evol.*, **18**, 306-314.
- Tylianakis, M. J. (2010) Ensuring food production: native biodiversity provides pollination and biological control services. In Koizumi T, Okabe K, Thompson I, Sugimura K, Toma T, and Fujita K (eds), "*The role of forest biodiversity in the sustainable use of ecosystem goods and services in agro-forestry, fisheries, and forestry*", FFPRI, 20-28.
- 2010 Biodiversity Indicators Partnership (2010) "*Biodiversity indicators and the 2010 biodiversity target: Target: experiences and lessons learnt from the 2010 Biodiversity Indicators Partnership*", CBD Technical Series No. 53, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 196 pp.
- UNEP (2000) Development of indicators of biological diversity, UNEP/CBD/SBSTTA/5/12.
- UN-REDD Programme (2011) About REDD+, <http://www.un-redd.org/AboutREDD/tabid/582/Default.aspx>, (参照 2011-03-25)
- Valentini, A., Pompanon, F. and Taberlet, P. (2008) DNA barcoding for ecologists, *Trends Ecol. Evol.*, **24**, 110-117.
- Vanguelova, E., Barsoum, N., Benham, S., Broadmeadow, M., Moffat, A., Nisbet, T. and Pitman, R. (2007) "Ten years of intensive environmental monitoring in British forests", Forestry Commission August 2007, Information Note, 12p, [http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcin088.pdf/\\$FILE/fcin088.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcin088.pdf/$FILE/fcin088.pdf).
- Vaughan, H., Brydges, T., Fenech, A. and Lumb, A. (2001) Monitoring long-term ecological changes through the ecological monitoring and assessment network: science-based and policy relevant, *Environ. Monitor. Assess.*, **67**, 3-28.
- Vries, W. de, Vel, E., Reins, G. J., Deelstra, H., Klap, J. M., Leeters, E. E. J. M., Hendriks, C. M. A., Kerk, voordens M., Landmann, G., Herkendell, G., Haussmann, T. and Erisman, J. W. (2003) Intensive monitoring on forest ecosystem in Europe I. Objectives, set-up and evaluation strategy, *For. Ecol. Manag.*, **174**, 77-95.
- Wackernagel, M. and Riss, E. W. (1996) "*Our Ecological Footprint*", New Society Publishers, 160 pp. (和田喜彦監訳 (2004) エコロジカル・フットプリント, 合同出版, 293 pp.)
- Walker, B. H. (1992) Biodiversity and ecological redundancy, *Conserv. Biol.*, **6**, 18-23.
- WRI (2005) "*Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems & Human Well-being: Synthesis*", Island Press, 160 pp. (横浜国立大学 21 世紀 COE 翻訳委員会訳 (2005) 生態系サービスと人類の未来, Millennium Ecosystem Assessment 編, オーム社, 241 pp.)
- WRI, IUCN and UNEP (1992) "*Global Biodiversity Strategy*", World Resources Inst, 244 pp.
- WWF International, Zoological Society of London and Global Footprint Network (2010) "*Living Planet Report 2010*", WWF, 117 pp.
- Yachi, S. and Loreau, M. (1999) Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **96**, 1463-1468.
- 山北剛久 (2010) 森林と川や海とのつながり, *山林*, No. 1515, 17-24.
- 山階鳥類研究所 (2011) 渡り鳥と足輪, http://www.yamashina.or.jp/hp/ashiwa/ashiwa_index.html#03, (参照 2011-04-05).
- 山下洋・田中克編 (2008) 森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産, 恒星社厚生閣, 147 pp.
- 山浦悠一・天野達也 (2010) マクロ生態学: 生態的特性に注目して, *日生誌*, **60**, 261-276.
- Yamaura, Y., Amano, T., Koizumi, T., Mitsuda, Y., Taki, H. and Okabe, K. (2009) Does land-use change affect biodiversity dynamics at a macroecological scale? A case study of birds over the past 20 years in Japan, *Anim. Conserv.*, **12**, 110-119.
- 吉田茂二郎 (2008) 現行の全国森林資源モニタリング調査と戦後のわが国の森林資源調査について, *日林誌*, **90**, 293-290.
- Yoshimura, M. (2007) Comparison of stream benthic invertebrate assemblages among forest types in the temperate region of Japan, *Biodivers. Conserv.*, **16**, 2137-2148.