

気候変動と森林生態系の変化

Climate change and dynamics of forest ecosystems

原 登志彦*

1. はじめに

1.1 光合成

植物の葉は大気中の二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O から光合成により炭水化物 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ と酸素 O_2 を生成する。光合成の前半部分の太陽の光エネルギーを用いる光化学反応は明反応とも呼ばれる。後半部分の酵素反応であるカルビン回路により炭水化物が合成されるが、この反応はまた暗反応とも呼ばれる。明反応と暗反応からなる光合成全体の収支は、



となる。葉により吸収された太陽光エネルギー Q (W m^{-2}) と単位葉面積当たりの光合成速度 P ($\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) には一般的に最も簡単なモデルとして直角双曲線で表させる次のような関係がある。

$$P = bQ / (1 + aQ)$$

Q が無限大 (非常に明るい環境) になったときの最大光合成速度は b/a で与えられるが、樹木の上層で明るい環境に適応した葉 (陽葉) では b/a が大きく、下層で暗い環境に適応した葉 (陰葉) では b/a が小さくなる傾向がある。それに対し Q が小さい暗い環境では、陰葉は陽葉よりもより大きな b を持ち (b は $Q = 0$ での接線の傾きを表す)、そのような暗い環境下では陰葉のほうが大きな光合成速度を持つこと、すなわち光合成速度の面から暗い環境に適応していることが知られている。

次に解説する森林生態系の炭素収支は、上記のような光合成のプロセスが基礎になっており、単位面積の葉の光合成速度を単位土地面積当たりの森林生態系に拡張したものである。

1.2 森林生態系の炭素収支

森林生態系の総一次生産 (GPP, 英語の Gross Primary Productivity の頭文字から) とは、森林の単位土地面積当たり (ha^{-1} あるいは m^2 など) に生存している樹木すべての光合成速度 (day^{-1} あるいは yr^{-1} など) の合計である。森林生態系の純一次生産 (NPP, 英語の Net Primary Productivity の頭文字から) とは、GPP からそれら樹木すべての葉の総呼吸速度 R_{leaf} 、幹の総呼吸速度 R_{stem} 、根の総呼吸速度 R_{root} を差し引いた正味の光合成速度のことである。 $R_a = R_{\text{leaf}} + R_{\text{stem}} + R_{\text{root}}$ で与えられる R_a を林分呼吸ともいい、 $\text{NPP} = \text{GPP} - R_a$ である。純生態系生産 (NEP, 英語の Net Ecosystem Productivity の頭文字から) とは、NPP から森林の単位土地面積当たりの土壌微生物の総呼吸速度 R_{soil} を差し引いたものであり、森林生態系の正味の炭素収支を表す。 $\text{NEP} = \text{NPP} - R_{\text{soil}}$ である。すなわち、NEP が正であれば、その森林生態系は差し引き正味で炭素を吸収していることになり、NEP が負であれば、その森林生態系は差し引き正味で炭素を大気に放出していることになる。

1.3 森林の空間構造

図1は森林の断面図である。森林の上層部で成木の葉が生い茂っているところを林冠 (canopy) と呼ぶ。森林の下層部の地面近くで稚樹や草本が存在するところを林床 (forest floor) と呼ぶ。大木が寿命や台風などの攪乱により枯死して形成された林冠の空所 (林冠にぽっかりと空いた穴) のことを林冠ギャップ (あるいは簡単にギャップ (gap)) と呼ぶ。ギャップではない、葉に覆われた林冠の部分は特に閉鎖林冠と呼ばれる。閉鎖林冠下の暗い林床は、光合成にとって不利なので稚樹はあまり生長できず枯

* 北海道大学 名誉教授

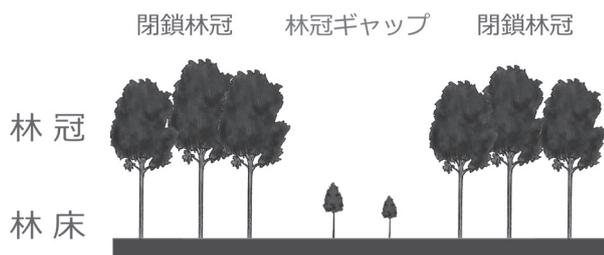


図1 断面から見た森林の空間構造。林冠ギャップとは、大木が枯死して林冠に形成された空所のことであり、本稿で解説するように生態学的に重要な役割を担っている。

死する確率が高くなる。一方、林冠ギャップの林床は明るいので、稚樹も十分に光合成を行うことが可能となり生存し成木へと生長できる可能性が高くなる。このように林冠ギャップの林床に稚樹が定着して成木へと生長し森林生態系が持続されていく過程は、森林のギャップ更新 (gap regeneration) と呼ばれ、多くの温帯や熱帯などの森林で見られる生態学的現象である。

1.4 気候と植生の相互作用

森林生態系の樹木は光合成により大気中の二酸化炭素を吸収している。日射量、気温、降水量などの気象要因はこの光合成速度に大きな影響を与えている (1.1 参照。さらに具体的には以下の各章で紹介)。つまり、気候は森林生態系の動態に影響を与えている。一方、森林生態系の樹木や土壤微生物は、呼吸により大気に二酸化炭素を放出している。また樹木は蒸散により大気に水も放出している。このように森林生態系は大気、すなわち気候にも影響を及ぼしている。したがって、気候 (大気) と森林生態系は相互に作用しあっているといえる。気候変動と森林生態系の変化を正しく理解し予測するためには、したがってこれらの相互作用の研究が必要である。

2. 気候・植生相互作用モデルによる北方 (亜寒帯) ダケカンバ林の炭素収支に関する研究例の紹介

これまでも様々な気候・植生相互作用モデルが開発されてきたが、ここでは Hara et al. (2001)¹⁾、Watanabe et al. (2004)²⁾ などが開発されてきたモデルによる林齢約 20 数年の北方 (亜寒帯) ダケカンバ (*Betula ermanii*) 林の炭素収支に関する Toda et al. (2011)³⁾ の研究を紹介する。北海道大学・雨竜研究林の標高 580 m, 44° 20' N, 142° 15' E に位置する落葉広葉樹のダケカンバ林において 1998 年より毎年、毎木調査 (樹木各個体の調査区内での位置を表す (x, y) 座標, 胸高幹直径 (地上 1.3 m で

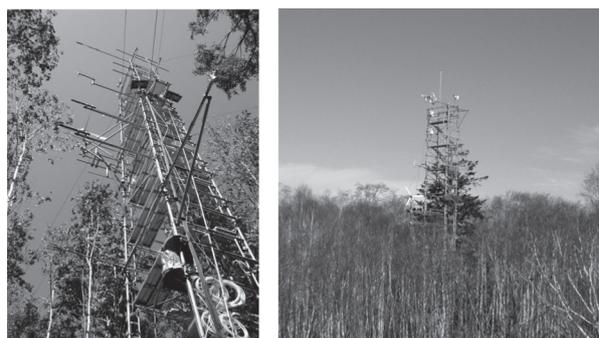


図2 北海道大学・雨竜研究林に設置されたフラックス・タワー。各高さ気象観測機器を取り付けて経時的に大気と植生間のエネルギー・物質 (特に炭素) 交換の観測を行う。

の幹の直径)、樹高などの測定) が行われてきた。同時に、高さ約 20 m のフラックス・タワー (図2) を設置して、大気と植生間のエネルギー・物質交換の測定も行われてきた。この気候・植生相互作用モデルによる植生動態 (ダケカンバ樹高のサイズ頻度分布の経年変化) と大気-植生間のエネルギー・物質交換のシミュレーション結果は、毎木調査による植生動態の実測値と同時にフラックス・タワーによる物理的環境因子の観測値をよく再現していた。樹高のサイズ頻度分布に関して、1999 ~ 2005 年各年で毎木調査による実測値とモデルによるシミュレーション結果は一致した (コルモゴロフ・スミルノフ (Kolmogorov-Smirnov) 検定により、有意な差はなかった)。エネルギー・物質 (特に炭素) 交換については、フラックス・タワーの観測値とモデルによるシミュレーション値の対応関係の R^2 が純放射、顕熱、潜熱、 CO_2 フラックスでそれぞれ 0.890, 0.647, 0.725, 0.674 と高い値を示した。このダケカンバ林は林齢 24 ~ 26 年と比較的若齢であるが、 $\text{NPP} = 372.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $\text{NEP} = 224.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定さ

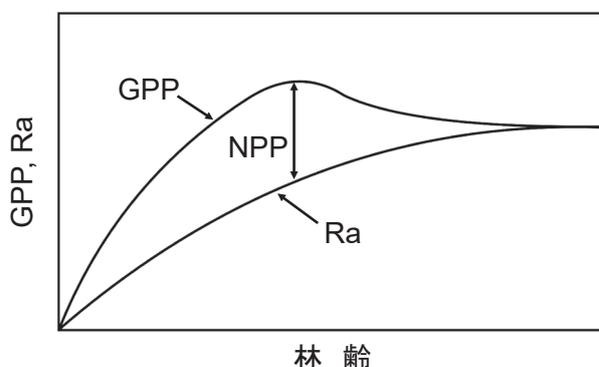


図3 有力な説としてこれまで考えられてきた林齢と総一次生産 GPP、林分呼吸 Ra、純一次生産 NPP の関係。NPP = GPP-Ra の基本的な関係がある (本稿 1.2 参照)。Kira and Shidei (1967)⁴⁾、Odum (1969)⁵⁾ などの説に基づき作成。

れた。

ところで、世間一般的には森林というものはどのような森林でも二酸化炭素 CO₂ を吸収する存在であると直感的に思われているようである。しかしながら、生態学における従来の有力な説では、森林は若齢林から成熟老齢林になると総一次生産 GPP と林分呼吸 Ra (1.2 参照) が釣り合っ森林樹木は正味の CO₂ を吸収しなくなる、つまり NPP = 0 となると考えられてきた (Kira and Shidei (1967)⁴, Odum (1969)⁵ など) (図 3)。これは、次のような理由による。すなわち、森林が生長し成熟老齢になるにつれて光合成を行わない幹や根のバイオマス (現存量) が増加し、これらの呼吸量が増加する一方、光合成を行う葉の総量には上限がある (森林下層の暗い環境では光合成が行えず葉が枯れ上がることによる) ので森林全体の GPP にも上限があり、時間が十分に経った最終的な成熟老齢林では GPP = Ra となると考えられてきた。したがって、NPP = GPP-Ra = 0 となると考えられてきた。この従来の説に従うと、成熟老齢な多くの原生林の樹木による CO₂ 吸収量はプラスマイナス・ゼロである、ということになる。さらにこれら成熟老齢な原生林はむしろ土壤呼吸により CO₂ の放出源となっている (NEP<0) 可能性も考えられてきた。ところが、近年の世界各地のフラックス・タワー (図 2) による炭素収支の多くの観測から、成熟老齢な原生林でもそれらの多くは CO₂ を吸収していることが判明してきた (Knohl et al. (2009)⁶, 戸田 (2014)⁷) (表 1)。Knohl et al. (2009)⁶ は様々な北方林および温帯林の林齢と NEP の結果をグラフで示しているが、成熟老齢林と考えられる林齢 200 年以上の森林についても 9 例中 8 例は NEP>0 になっており NEP<0 の場合は 1 例のみである (NEP>0 であれば必ず NPP>0 となる) (表 1)。このことは奇しくもこれまでの世間一般の直感と合致した結果である。成熟老齢林でも CO₂ を吸収し続けていること、すなわち成熟老齢林における NPP>0, NEP>0 のメカニズ

表 1. Knohl et al. (2009)⁶ の図から林齢 100 年以上について、NEP ≥ 0 または NEP < 0 になる森林を計数した結果。NEP は、北方林や温帯林の様々な調査地においてフラックス・タワー (図 2) により観測された結果である。使用されたデータベースなど詳細は Knohl et al. (2009)⁶ 参照。

林齢(年)	100-199	200-299	300-399	400-500
NEP ≥ 0	20	5	2	1
NEP < 0	2	0	1	0

ムはまだよくわかっていない。今後の解明が期待される。

3. 過去数世紀にわたる気候変動、台風による攪乱と北方林動態に関する研究例の紹介

次に、北海道大学・雨竜研究林の北方針広混交林 (亜寒帯の常緑針葉樹と落葉広葉樹が混交した森林) (標高 380 m, 44° 20'N, 142° 15'E) において、気候変動が北方林にどのような影響を及ぼすか、森林の毎木調査や樹木年輪解析にもとづく Altman et al. (2016)⁸ の研究例を紹介する。この調査地は林齢 350 年ほどで、常緑針葉樹のトドマツ、エゾマツや落葉広葉樹のミズナラ、ダケカンバなど計 20 樹種ほどが混交する森林である。

まず、生長のリリース (release) とは、それまでほとんど生長していなかった樹木個体がある時点から急激に生長を開始することをいう。つまり、生長抑制解除である。これは次のようなメカニズムで起きると考えられる (図 4)。小個体の生長は大個体によって抑制されている。これは、小個体の光合成にとって不利な個体間競争の結果である (小個体は森林下層の暗い環境下にあるが大個体は森林上層で多くの太陽光を吸収することができる)。ここに台

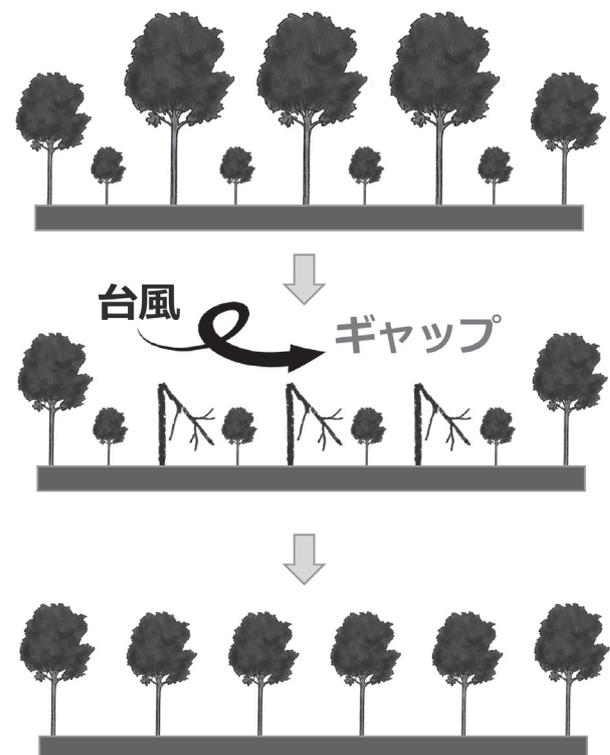


図 4 樹木の生長のリリース (release) を説明する模式図。生長のリリースとは、それまでほとんど生長していなかった樹木個体がある時点から急激に生長を始めることである (生長抑制解除)。詳細は本稿 1.3 と 3. 参照。

風などの攪乱により大個体が枯死する（大個体は台風の影響を直接受ける）と森林の林冠にギャップ（空所）が形成される。そして大個体によりこれまで生長が抑制されていた小個体は急激に生長を開始する。これが生長のリリースである。

各樹木個体の幹のコア・サンプルから年輪幅を測定し、生長のリリースの程度を表す GC (Growth Change の頭文字から) を計算し、以降の解析に用いる。

GC =
 {(次の 10 年間の年平均生長量) - (10 年間の年平均生長量)} / (10 年間の年平均生長量)

生長のリリースは、「大個体による小個体の生長の抑制」の解除を表しているので、大個体の枯死、つまり林冠ギャップの形成を示唆している。したがって、

GC \geq 0.5 は大きなリリース、つまり大きなギャップ（大攪乱）を

0.5 > GC \geq 0.25 は小さなリリース、つまり小さなギャップ（小攪乱）を

示唆していると考えることができる。

生長のリリースと新規個体（林床で種子から芽生えて生長し新たに森林の樹木集団に加わる個体）の定着の履歴に関する年輪解析の結果から過去の攪乱の履歴が推定された。全樹木個体の内、リリースを示す個体の割合がピークの年で 20 ~ 35% と突出している期間が過去約 220 年で 4 つあることが判明した。つまりこれら 4 つの期間で大きな攪乱がこの森林で起きたと推定することができる。これら推定される 4 つの大攪乱の期間は、期間 1 (1775-1784)、期間 2 (1815-1839)、期間 3 (1880-1909)、期間 4 (1950-1979) であった。

次に期間 3 (1880-1909) と期間 4 (1950-1979) の各樹木個体の位置情報（調査区 1ha 内での (x, y) 座標）を用いた空間統計解析を行った結果について紹介する。

そのために相互対相関関数 (cross pair correlation function), $g(r)_{X,Y}$, を計算する（以降の解析方法と結果の詳細は Altman et al. (2016)⁸⁾ とそこでの引用参考文献など参照）。これは、2 つのタイプ X と Y (X, Y としてはここでは生長のリリースが大の個体、小の個体、新規定着個体等が考えられる) の個体同士の空間分布パターンを表すものである。すなわち、

$g(r)_{X,Y} > 1$ であれば X と Y は同じような場所に集合 (aggregation) していること、

$g(r)_{X,Y} < 1$ であれば X と Y は異なった場所において分離 (segregation) していること、

$g(r)_{X,Y} = 1$ であれば X と Y の空間分布はランダムであり空間関係は無い（無関係 neutral）であることを表す。

まず全樹種込で計算した相互対相関関数の結果から、新規個体は、リリースが大きな個体とは離れた場所でそれらとは分離し ($g(r)_{X,Y} < 1$)、リリースが小さいか無い個体の近くに集合 ($g(r)_{X,Y} > 1$) して定着していることが判明した。つまり、小ギャップや閉鎖林冠で新規定着し、大ギャップでは新規定着しにくいことが示唆される。

次に樹種多様性の空間分布を解析した結果を紹介する。「リリースが無い（または、小さい）個体の周辺の樹種数」から「リリースが大きな個体の周辺の樹種数」を引き算した結果は、有意に 0 より大きかった（有意に正の値）。これらの結果からリリースが大きな個体の周りのほうが、リリースが無いか小さい個体の周りより樹種数が少なくなることがわかる。つまり、ギャップが大きくなれば樹種多様性が低くなり、小ギャップや閉鎖林冠下で樹種多様性が高くなることが示唆される。大ギャップで新規定着できるのはダケカンバのみであり、トドマツ、ハウチワカエデ、イタヤカエデ、コシアブラなどその他の樹種は閉鎖林冠か小ギャップでのみ新規定着し大ギャップでは新規定着が難しいことも解析の結果判明した。

以上の 2 つの結果「明るい大ギャップでは新規定着個体数が減少しかつ樹種多様性も低下する」ことの理由としては、明るい大ギャップでは、土壤の乾燥、光合成系に対する強光ストレス、林床の草本の繁茂（北海道では主にササ）などにより樹木の新規定着が阻害されることが考えられる。特に、北海道の明るい大ギャップではササがよく繁茂することが知られているので (Altman et al. (2016)⁸⁾、そのような大ギャップでは実生（種子からの芽生え）の定着と生長がササにより大きく阻害されて、新規定着個体数が減少し樹種多様性も低くなる（定着可能な樹種に限られる）可能性が大きい（図 5）。

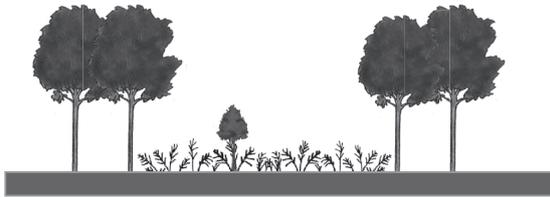
以上まとめて、本研究の結果から予測されることは、

今後の気候変動（温暖化）により台風の強度が増加（多くの気候変動モデルによる予測）

⇒ 大型台風による大攪乱で北方林に明るい大

明るい大ギャップ

ササが繁茂する
新規定着できる樹木個体と樹種は少ない



明るくない小ギャップ

ササは繁茂せずまばら
新規定着できる樹木個体と樹種は多い

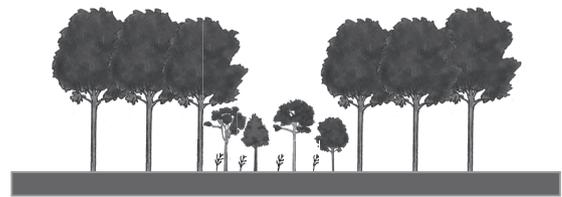


図5 北海道の北方林における林冠ギャップと樹木の新規定着の関係。明るい大ギャップでは林床で繁茂しているササに阻害されて新規定着個体数が減少したそこで定着可能な樹種も少なくなる(樹種多様性の低下)。詳細は本稿1.3と3.参照。

ギャップの形成

⇒ 新規定着個体数の減少による北方林の衰退と樹種多様性の低下

の可能性である。したがって今後は、台風などの攪乱過程を取り入れたモデルで植生変化の将来予測を行うことが重要となる。

4. ロシア・カムチャツカにおける樹木年輪から推定した過去数世紀の気候変動と氷河の動態に関する研究例の紹介

ロシアのカムチャツカは、寒冷域と温帯域の境界付近に位置し極東ユーラシアで氷河が存在する最南端の地である。したがってカムチャツカは地球温暖化の影響が現れやすいと考えられる。このようなカムチャツカで行った調査に基づく Dolezal et al. (2014)⁹⁾ の研究例を紹介する。ここでは以下のような調査と解析が行われた。

- (1) カムチャツカのカレイタ氷河 (54° 45' N, 161° 40' E) 周辺のダケカンバ (*Betula ermanii*) (標高 400-600 m) から樹木年輪コアを採取し、
- (2) 気温や降水量などの気象データは、カレイタ氷河から 40 km 北に位置するクロノツキ・気象ステーションの 1939-1997 のデータを用いて、
- (3) 樹木年輪と気象データの解析に基づき、カムチャツカの過去 2 世紀にわたる気候 (気温) 変化とカレイタ氷河の動態 (発達, 縮小) を推定した。

まず、ダケカンバの年輪指数 (標準化された年輪幅生長量で無次元の量; 実際の計算手順等については Dolezal et al. (2014)⁹⁾ 参照), 気象, 氷河の質量収支の相関関係について解析した結果, 年輪指数と 7 月の平均気温には有意な正の相関 ($r = 0.50$) が, 年輪指数と氷河の質量収支には有意な負の相関 (r

$= -0.30$) が見いだされた。ここで, 氷河の質量収支 (mass balance) (水相当の m で表される) = 降雪量 - 融解量 - 昇華量, であり, 気象データ (夏季気温, 短波放射, 冬季降雪量など) を用いた既存のモデルにより過去の氷河の質量収支が推定された (詳細は Dolezal et al. (2014)⁹⁾ 参照)。つまり, 年輪指数が大きく 7 月の気温が高ければ氷河は縮小するということが推定される。

これらの結果に基づき, 年輪指数から過去 230 年間 (1770 ~ 2000 年) の 7 月の平均気温が推定された。さらに, 寒冷期に発達した氷河により形成されたモレーン (moraine) (氷河の移動により削り取られ, 氷河に運ばれた岩石, 丸石, 砂利, 粘土などの土手状の地形) と近年の写真にも基づき過去の氷河の長さも推定された。その結果, ロシア・カムチャツカのカレイタ氷河は 1770 年から 2000 年までの 230 年間で 1km 後退したと推定された (7.6 km から 6.6 km へ)。そのうち 1770 ~ 1940 年代の約 170 年間に約 600 m の後退 (3.5 m/年) であり, 1940 年代 ~ 2000 年の近年約 60 年間では約 400 m の後退 (6.7 m/年) であった。このように, 近年のカレイタ氷河の後退速度の増加は顕著である。

最後にロシア・カムチャツカのカレイタ氷河周辺で推定される産業革命 (1760 年代 ~ 1830 年代) とそれ以降の気候変動 (1770 ~ 2000 年) について見てみよう (図 6)。具体的年数でいうと, 18 世紀後半 ~ 19 世紀では, 温かい時期 (氷河縮小, 年輪幅増大) は合計 21 年, 寒い時期 (氷河発達, 年輪幅縮小) は合計 64 年であった。それに対し, 20 世紀以降ではそれらはそれぞれ合計 49 年, 合計 19 年であった。ここにおいても 20 世紀以降の温暖化が顕著であり, 今後もカレイタ氷河のさらなる縮小の



図6 ロシア・カムチャツカのカレイタ氷河周辺域で推定される産業革命(1760年代～1830年代)とそれ以降の気候変動(1770～2000年). 樹木年輪幅が増大し氷河が縮小した「温かい時期」(上段)と樹木年輪幅が縮小し氷河が発達した「寒い時期」(下段)の年代を表す.

可能性が考えられる.

5. まとめ

以上、今回紹介した3つの研究例をまとめると、

- (1) 気候・植生相互作用モデルによるシミュレーションは、毎木調査による植生動態と同時にフラックス・タワーによる物理的環境因子の観測の結果をよく再現していた. 近年のフラックス・タワーによる世界各地の観測結果から成熟老齢な原生林でも、従来の生態学の説に反して、二酸化炭素を吸収し続けていることが判明した. しかしながら、そのメカニズムは未解明であり今後の解明が期待される.
- (2) 樹木年輪解析の結果、北方林（今回紹介したのは北海道）では、閉鎖林冠や明るくない小さな林冠ギャップに比べ明るい大きな林冠ギャップで新规定着する樹木個体数が減少し、また樹種多様性も低下することが判明した. したがって、今後の大型台風の増加により大きな林冠ギャップが形成されると、北方林（北海道）の衰退や樹種多様性の低下の可能性が考えられる.
- (3) 樹木年輪解析とカレイタ氷河の動態解析の結果、ロシア・カムチャツカにおいて20世紀以降の温暖化が顕著でありカレイタ氷河のさらなる縮小の可能性が考えられる.

謝辞

今回のセミナーにご招待いただき講演の機会をいただいた光田憲朗会長、池田祐一事務局長、大竹秀明博士をはじめとする日本太陽エネルギー学会のみなさまに感謝申し上げたい. 今回紹介した研究は国内外の多くの研究者のみなさんと共同で行ったものである. 参考文献のWatanabe et al. (2004)²⁾, Toda et al. (2011)³⁾, Dolezal et al. (2014)⁹⁾, Altman et al. (2016)⁸⁾の著者リストの研究者のみなさまに感謝申し上げます.

参考文献

- 1) T. Hara, T. Watanabe, M. Yokozawa, S. Emori, K. Takata and A. Sumida, A multi-layered integrated numerical model of surface physics - growing plants interaction, MINoSGI, In : Present and Future of Modeling Global Environmental Change : Toward Integrated Modeling (T. Matsuno and H. Kida (eds.)), 173-185 (2001), Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- 2) T. Watanabe, M. Yokozawa, S. Emori, K. Takata, A. Sumida and T. Hara, Developing the multilayered integrated numerical model of surface physics-growing plants interaction, MINoSGI, Global Change Biology, **10** (6), 963-982 (2004).
- 3) M. Toda, K. Takata, N. Nishimura, M. Yamada, N. Miki, T. Nakai, Y. Kodama, S. Uemura, T. Watanabe, A. Sumida and T. Hara, Simulating seasonal and inter-annual variations in energy and carbon exchanges and forest dynamics using a process-based atmosphere-vegetation dynamics model, Ecological Research, **26** (1), 105-121 (2011).
- 4) T. Kira, T. Shidei, Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western Pacific, Japanese Journal of Ecology, **17**, 70-87 (1967).
- 5) E.P. Odum, The strategy of ecosystem development - An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature, Science, **164**, 262-270 (1969).
- 6) A. Knohl, E.D. Schulze and C. Wirth, Biosphere-atmosphere exchange of old-growth forests : processes and pattern, In : Old-Growth Forests

(C. Wirth, G. Gleixner and M. Heimann (eds.)), 141-154 (2009), Springer, Berlin Heidelberg.

- 7) 戸田求, 第5章 地域スケールにおける大気と森林生態系の相互作用研究—森林動態を考慮した, 大気—森林間のエネルギー・炭素交換の理解に向けて—, In: シリーズ現代の生態学第2巻 地球環境変動の生態学 (原登志彦編), 80-104 (2014), 共立出版, 東京.
- 8) J. Altman, P. Fibich, J. Leps, S. Uemura, T. Hara and J. Dolezal, Linking spatiotemporal disturbance history with tree regeneration and diversity in an old-growth forest in northern Japan, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **21**, 1-13 (2016).
- 9) J. Dolezal, J. Altman, V.P. Vetrova and T. Hara, Linking two centuries of tree growth and glacier dynamics with climate changes in

Kamchatka, *Climate Change*, **124**, 207-220 (2014).

著者略歴



原 登志彦

1978年3月 京都大学・理学部 卒業

1980年3月 京都大学大学院・理学研究科 修士課程修了

1983年3月 京都大学大学院・理学研究科 博士課程修了 (理学博士)

1988年10月 東京都立大学・理学部 助手

1995年4月 東京大学大学院・総合文化研究科 助教授

1996年3月 北海道大学・低温科学研究所 教授

2021年4月 北海道大学 名誉教授