

地球温暖化は森林にどう影響するか？

(独) 森林総合研究所¹⁾、(国) 岐阜大学²⁾

田中 信行¹⁾、栗屋 善雄²⁾

1. はじめに

IPCC の第 4 次報告書 (IPCC, 2007a, b) によると、人間活動により排出された温室効果ガスにより今後 100 年間で地球の温度は 1.8~4.0℃ 上昇し、自然や人間社会にさまざまな影響を与えると予測されている。森林生態系は、CO₂ の吸収・蓄積・放出、水源涵養、土砂流出防止などの機能とともに、多様な生物の生息地として生物多様性を維持する機能を有している。森林生態系への影響としては、気候変化が毎年の開葉・落葉・開花・成長などを変化させ、それが長期に及ぶと動植物の生存や生物間相互作用にまで影響し、その結果として動植物の分布を変化させる。地球温暖化は、森林に生育するほとんどの種の生育地・生息地(habitat)を移動させるので、一部の種については絶滅につながる可能性がある。温暖化は、温度の上昇にとどまらず、降雨、降雪、日射量、台風などの他の気候変化も伴い、生態系や生物の生息域などに大きな影響を及ぼすと予想される。本講演では、地球温暖化の自然林への影響を、短期的な影響と長期的な影響に分けて最近の研究成果を説明する。短期的影響では、自然林の季節性の 11 年間の変化の広域的検出に関する成果を紹介する。長期的影響では、常緑広葉樹の 100 年後の分布変化に関する成果、および過去 30 年の分布変化の検出に関する成果を紹介する。

2. 自然林の短期的影響の検出

1) 目的

落葉性の植物で明らかのように、植物には春先の気温の上昇によって葉を開葉し、秋の気温の低下とともに、葉を紅葉して落葉するなどの季節変化がある。例えばブナの場合、旬平均気温が 5~6℃ を越えると開葉が始まることが知られている (丸山, 1979)。開葉や紅葉および開花は生物季節 (フェノロジー) の要素であるが、気温の上昇はフェノロジーに影響を及ぼすことが知られている。たとえば、サクラの開花期が早まったり (Chmielewski et al., 2004)、生育期間が長くなるだけでなく、果樹などの結実に影響する (Primack et al., 2009)。

落葉広葉樹の場合、生育期間は緑葉の有無によって判断でき、人工衛星に搭載されているセンサ (カメラ) が観測したデータで、開葉から落葉までの期間を判定できる。地上での観測によれば、ブナの場合、3 週間程度で葉がほぼ開ききり、この間に緑よりも近赤外域の反射 (明るさ) が急激に大きくなる (図 1a) (Kodani et al., 2002)。赤と近赤外の波長の反射係数を利用して計算される正規化植生指数 (NDVI) (Rouse et al., 1977) は、葉量 (葉面積指数) に同調して季節変化するので、落葉期と着葉期を明確に区別することができる (図 1b) (Kodani et al., 2002)。このため、地表面を毎日観測している Terra 衛星 MODIS や SPOT 衛星 VEGETATION などのセンサのデータを利用して、開葉などのフェノロジーが解析されている (Ahl et al., 2006; Guyonnet et al., 2011)。衛星データは晴天や曇

天の天候に関わりなく毎日観測されるため、地表ではなく雲が写っている日も多く、フェノロジーの解析にはノイズとなる。このため、平滑化処理などによってデータからノイズを除き、関数で NDVI の季節変化を近似してフェノロジーを判定する方法が一般的である。ただし、平滑化と関数近似によって、フェノロジー（例えば開葉日）の解析精度が損なわれる恐れがある（Atkinson et al. 2012）。

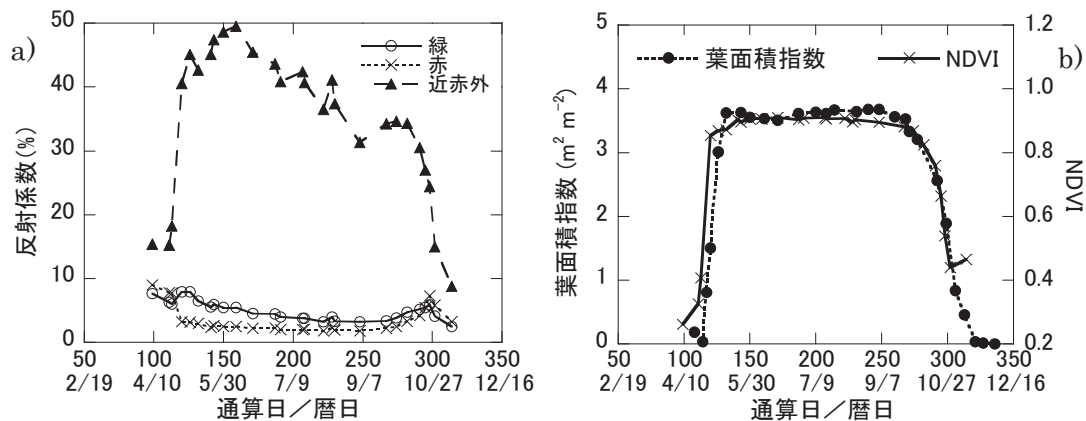


図 1 a) 反射係数の季節変化、b) NDVI と葉面積指数の季節変化（ブナ、盛岡）

このため、オリジナルの NDVI の情報を生かして、森林植生の開葉日を精度良く判定すること、および年々変動の大きい気候下での開葉日の経年変化を明らかにすることを目的として、岐阜県を対象に開葉日をマッピングした。

2) 方法

①対象地とデータ

岐阜県全域を解析対象地とした。2000～2010 年までの 11 年間に、Terra 衛星 MODIS で観測された 250m メッシュの赤と近赤外のデータを解析に用いた。解析に先立ち、毎日のデータから NDVI を算出して、1km 四方（16 画素）について最大の NDVI を示す画素を選択し、1km メッシュに編集した。NDVI は次式で示される。

$$NDVI = (ch2 - ch1) / (ch2 + ch1) \quad (1)$$

ここで ch1 は赤のチャンネルの反射係数、ch2 は近赤外のチャンネルの反射係数である。

②開葉基準線の設定（栗屋ら，2012）

森林、とくに落葉樹林では開葉後に NDVI が経過日に対して直線的に増加する(図 1b)。この変化を表す基準となる直線(開葉基準線)を回帰分析により定めた。開葉基準線は 2000～2002 年のデータを利用して画素単位で設定した。毎日のデータではノイズが多いため、画素単位に 3 年分の 3 日間のデータの移動最大値を求め、その結果について 7 日間の移動中央値を計算し、回帰分析に利用した。

開葉基準線の推定手順は以下通りである。a) 移動中央値について、春先に NDVI が上昇を始める直近の期間の最大値を求め、冬期の NDVI 値を定めた(STDwin)。b) NDVI が最大値に達する直後の期間の最大値を求め、夏期の NDVI とした(STDsum)。STDsum と STDwin に基づいて、回帰分析に利用するデータを探索的に選択した。c) 選択された NDVI を従属変数、通算日を独立変数として、各画素について回帰分析を行い、開葉基準線とした。d) 回帰分析の精度が不十分と考えられた画素は以後の解析から除外した。

③開葉日の判定

NDVI の値がある基準値を超えたときに葉が開いたと判定できるので、画素単位で NDVI の基準値を定めた。図 1b を例にとると基準値は約 0.2 である。晴天日の植生を観測した画素では NDVI 値は他の土地被覆より大きい、画素内に雲があると NDVI の値は小さくなる。以上のことを踏まえて、毎年、開葉期間中に晴天日が必ず 1 日は現れることを前提に、以下の手順で解析した。開葉基準線を通算日に沿って 100 日付近から 180 日付近まで平行移動し、いずれかの日で日々の NDVI 値が開葉基準線を越える時、開葉基準線が開葉の過程を示していると考えた。この時、開葉基準線が NDVI の基準値と交差する日を開葉日とした。この方法を用いて 2000～2010 年での開葉日をマッピングし、経年変化の状況について検討した。

3) 結果と考察

①開葉基準線の適合

回帰分析によって求めた開葉基準線の例を示す。

$$\text{NDVI}=150\times\text{DOY}-12470 \quad (2)$$

$$\text{NDVI}=9.38\times\text{DOY}+7217.8 \quad (3)$$

ここで、NDVI は元データの 10000 倍値、DOY は通算日を示し、(2)式は落葉樹林 ($R^2=0.960$)、(3)式は常緑樹林 ($R^2=0.797$) についての結果である。落葉樹林については回帰分析の結果は非常に良好で、開葉とともに NDVI が直線的に増加していることが裏付けられた。この研究で開発した方法では、開葉日の判定にオリジナルの NDVI を用いるので、平滑化処理をした NDVI を利用する場合よりも、開葉日判定の感度が高いと考えられる。常緑樹林は落葉した状態がないため NDVI の季節変化が小さく、回帰分析の決定係数が小さくなったものの、開葉日の判定が可能なケース（画素）が多いと期待された。農地では二毛作のために、春から夏にかけて NDVI が不連続となって回帰分析の決定係数が低くなる画素が多い。このような場合を含めて、決定係数が低い画素は解析から除外した。

②開葉の傾向

開葉日をマッピングしたところ、岐阜県北部の標高 1000m 付近の落葉広葉樹林の開葉は 5 月 10 日～5 月 20 日頃となり、この地域の実際の開葉日に概ね一致していた。開葉日は温暖な南部の山地では 4 月上旬から下旬で早く、北部の山地帯で 5 月上旬から 5 月下旬であり、北部の標高が 2000m を越える寒冷な山岳地では開葉日は 6 月初旬以降と遅いことが示され、落葉樹林の開葉の傾向を示していることが分かった（図 2）。

開葉日の経年変化について検討すると、開葉日は年ごとの変化が大きくて、2000 年、2005 年、2006 年は開葉が遅く、2004 年は開葉が早いことが明らかになった。その他の年の開葉の状況は中庸と判断された（図 2）。岐阜県北部の北緯 36 度 10 分付近で東西に約 60km 離れた落葉広葉樹林について比較すると、いずれの地点でも 11 年間で開葉日に約 20 日の変動があることと、開葉日が同期して変化していることが明らかになった。

解析した期間が 11 年間と短いため、温暖化の影響よりは毎年の気象の違いを反映する結果となった。この研究で開発した開葉日の解析法が有効と考えられることから、改良を加えて常緑樹林の開葉日判定の精度を向上させるとともに、気温と開葉日の関係について解析を進めていく予定である。

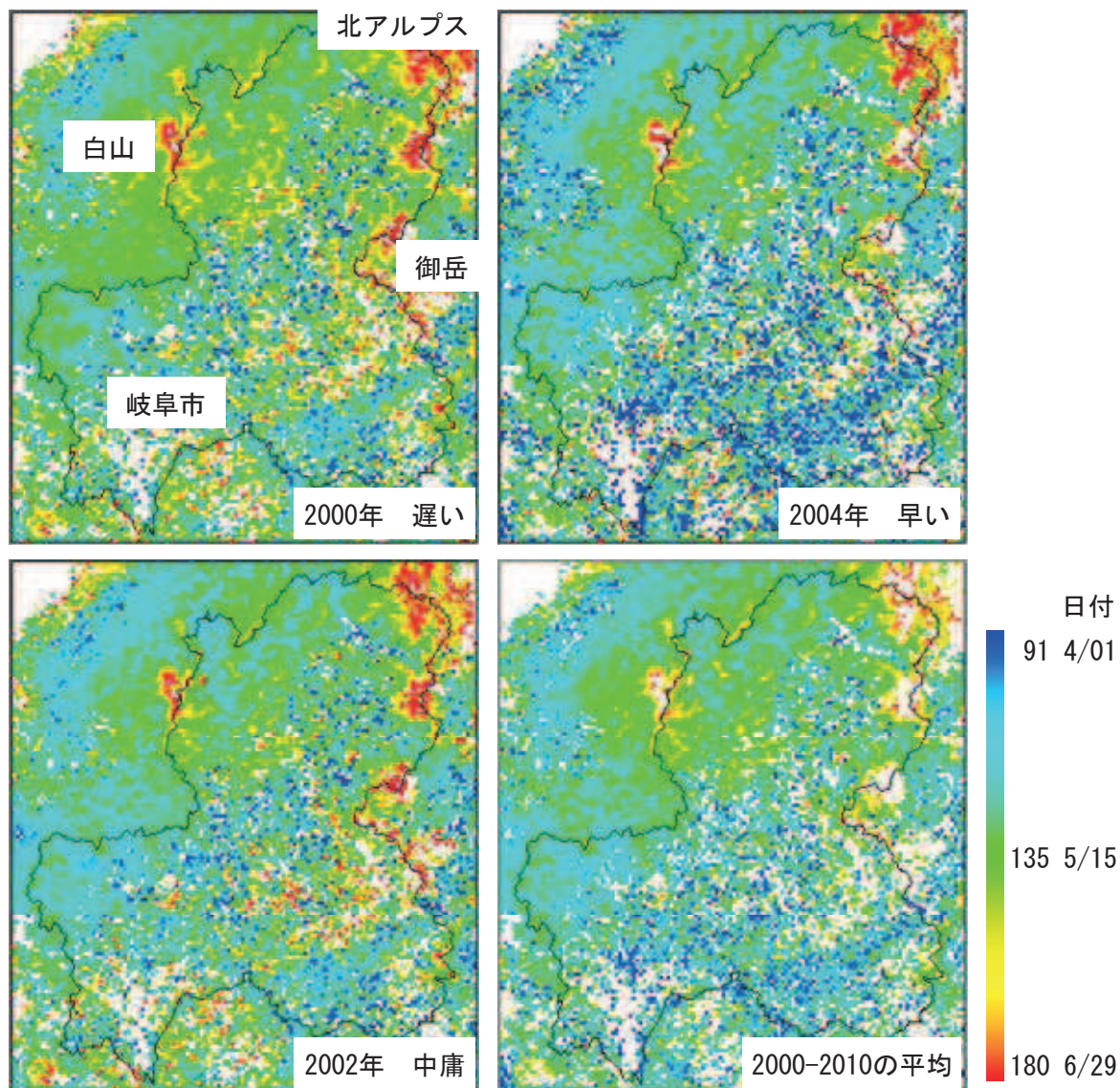


図2 開葉日の推定結果. 11年間で開葉が遅い年(2000年)、中庸の年(2002年)と早い年(2004年)、および11年間の平均開葉日を示した。

3. 常緑広葉樹アカガシへの100年後の影響予測

1) 目的

将来の温暖化に伴う植物の分布の変化予測は、日本でも近年多数行われている(Matsui et al. 2004a, 2004b, 2009; 津山ら, 2008a, 2008b; Horikawa et al., 2009; 田中ら, 2003, 2006, 2009)。しかし、常緑広葉樹を対象とした研究はほとんどなかった。アカガシは、常緑広葉樹林の分布北限や上限で優占してブナ林など落葉広葉樹林に接し、温暖化に伴い落葉広葉樹と置き換わる樹種である(写真1)。そこで、アカガシを対象に分布予測モデルを用いて温暖化の生育地への影響予測を行い、温暖化に対して感受性の高い地域を特定した(Nakao et al., 2011)。

2) 方法

① 植物分布データと気候データ



写真1 アカガシの葉(左)と常緑広葉樹林(右)

対象地域は、常緑広葉樹林が分布する九州、四国、本州である。分布予測モデルの応答変数にはアカガシの存在の分布データを、説明変数には4つの気候指数を用いた。この分布データ(以下、PADD)は、植物社会学データベース (PRDB, Tanaka et al. 2005) の2006年7月版から抽出した(図3a)。データの総数は11,070、アカガシの在地点数は651である。モデルの検証用データとして、Horikawa (1972)のアカガシの分布図をデジタル化し、幾何補正した空間解像度が2次メッシュ(約10km×10km)の分布データを用いた(以下、HODD, 図3b)。4つの気候指数は、植物の成長と生存に密接に関係する指数である暖かさの指数(WI; 吉良, 1948)、最寒月最低気温(TMC)、夏期降水量(PRS)、冬期降水量(PRW)で、3次メッシュ気候値(気象庁, 1996)より算出した。温暖化の気候変化シナリオには、日本から発表された2つのシナリオ、RCM20とMIROCの2081年～2100年の平均値を用いた。

人為影響を考慮するために、潜在生育域と土地利用図を重ね合わせた。土地利用データには、第3回自然環境保全基礎調査(環境庁自然保護局, 1999)の植生図に基づき、各3次メッシュセル内の自然植生域とそれ以外(人工林、農地、都市など)の割合を用いた。

② モデルの構築と精度検証および潜在生育域の予測

分布予測モデルにはRandom Forest (Breiman, 2001)を用いた。構築したモデルより、現在および2081～2100年の2つの気候変化シナリオ(RCM20, MIROC)における潜在生育域を予測した。予測精度評価は、ROC解析より得られるAUCで行った。同様にROC解析から、分布データとの整合性が最も高くなる出現確率を求め、閾値以上の地域を適域(suitable habitat)とした。さらに、出現確率が0.01以上から閾値未満を辺縁域(marginal habitat)、これらを合わせた地域を潜在生育域(以下、PH: potential habitat)とした。

③ 土地利用を考慮した潜在生育域の推定と温暖化予測

HODDのアカガシ北限(北緯38°30')に基づき、北限以北の潜在生育域はアカガシが分布しないので、潜在非生育域(potential non-habitat)と同等に扱った。さらに土地利用データをもとに、北限以北を除いたPHから任意(0.1から0.9まで0.1刻み)の土地改変率以上の地域を逐次除いていき、PADDとの適中度が最も高くなる土地改変率を推定した。求めた土地改変率未満の地域を土地改変の影響を考慮した潜在生育域(以下、LU-PH: Land use-potential habitat)とした。気候シナリオごとにLU-PHをベースとして、生育域が移

動しない、現在の生育域からの移動距離 1km、移動距離 10km、生育地に合わせて完全に移動、の 4 つの移動条件における移動と土地利用を考慮した潜在生育域を予測した。

3) 結果と考察

① 気候的な潜在生育域 (PH) の予測と温暖化の影響予測

PH を推定したモデルの AUC は 0.98 ± 0.03 、LU-PH と HODD との感度も 0.96 と高く、いずれもモデルの予測精度は良好であると判断した。気候要因の貢献度は、WI(222.01)、TMC(165.49)、PRS(153.44)、PRW(103.98)の順で高かった。

PH の面積は、現在が 150,542 km² であるが(図 3c)、温暖後は RCM20 シナリオで 180,411 km²、MIROC シナリオで 175,635 km² となり、どちらのシナリオにおいても増加した(図 4 の PH)。PH は、制限要因である最寒月平均気温 -1℃ 以下の条件の北上もしくは上昇により、水平分布では東北地方の北端である下北半島、垂直分布では九州、中国、四国地方の高標高域、北陸や中部地方の山地部に拡大した(図 4 の PH)。一方、中国地方西部の平地部、瀬戸内沿岸域、房総半島の低標高域では、両シナリオ下で PH が潜在非生育域に移行すると予測された。潜在非生育域になると予測された地域は、両シナリオ下で PRS は大きく変化せず、温度(WI, TMC)のみが上昇すると予測される地域であり、温度の上昇が出現確率低下の主要因と考えられる。

② 土地利用を考慮した潜在生育域 (LU-PH) への影響予測

土地利用を考慮した潜在生育域 (LU-PH) は 74,567 km² で、PH(約 150,542 km²)の 49.5% であった(図 3c, d)。2081~2100 年の LU-PH の面積は、RCM20 の移動距離 10km、移動制限なし、MIROC の移動制限なしの 3 つ場合が増加した(図 4)。一方、移動制限あり (RCM20, MIROC)、移動距離 1km (RCM20, MIROC)、移動距離 10km (MIROC)では、潜在生育域の拡大面積は小さく潜在非生育域の増加も影響したため 2081~2100 年の LU-PH の面積は減少した(図 4)。最終氷期 (約 20,000 年前)における常緑広葉樹林の逃避地 (レフュージア) と現在の分布北限との距離から(松下, 1992)、移動速度は最大約 2.6km/100 年と推定される。これは、今後 100 年間の移動距離 1.0km の場合に近い。この場合、PH に占める LU-PH の割合は RCM20 で 39.5%、MIROC で 34.6%のみで、新たに潜在生育域となる地域は九州、四国、中国地方の高標高域や北陸、中部地方の山地部で

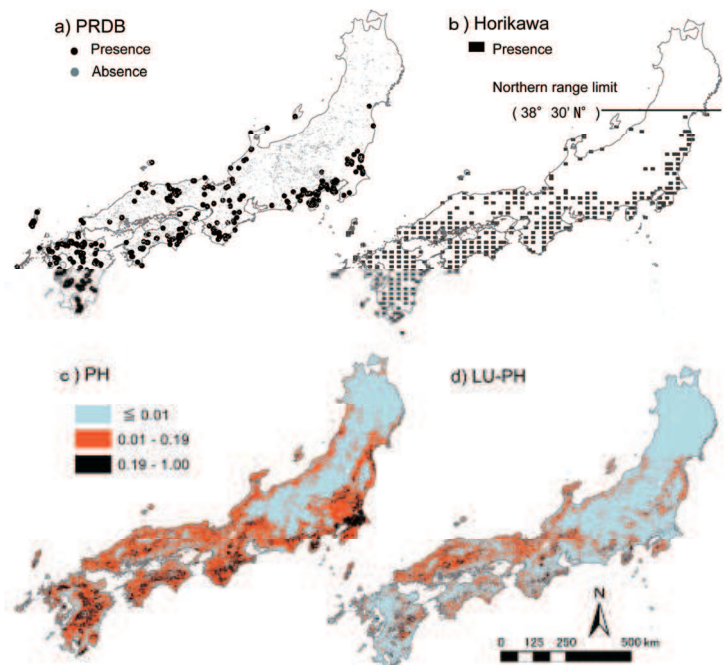


図 3 a) PRDB での分布データ、b) Horikawa (1972) での分布データ、c) 気候的な潜在生育域 (PH)、d) 土地利用を考慮した潜在生育域 (LU-PH)

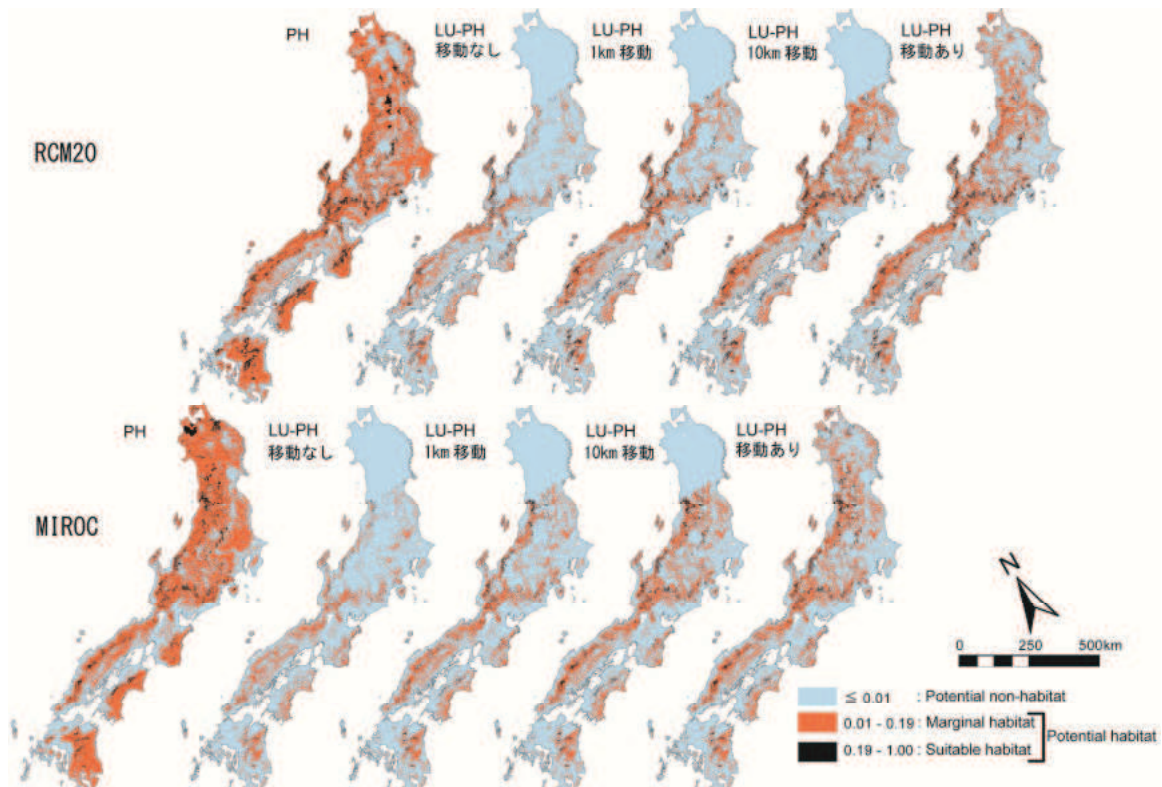


図 4 現在と温暖化後(2080～2100 年)のアカガシの潜在生育域。

気候変化シナリオ RCM20 (上段) と MIROC (下段)。PH：潜在自然植生、PH-LU：自然植生の PH、移動：100 年間の分布移動条件。

ある。現在、これら地域の中生な立地にはブナ林が分布しているが、温暖化によりその潜在生育域が大幅に縮小すると予測されている(Matsui et al., 2004a, b)。ブナ分布下限は常緑広葉樹との競争によって決まると考えられる。温暖化に伴う常緑広葉樹の増加は林内光環境を変化させ、ブナなど落葉広葉樹は更新が難しくなり衰退すると推定される。このような地域では、落葉広葉樹の枯死に伴い、アカガシなどの常緑広葉樹に置き換わると推測される。したがって、発達した落葉広葉樹林における常緑広葉樹の侵入や増加が、温暖化影響の 1 つの指標として有効と考えられる。

4. 常緑広葉樹の過去 30 年間の分布変化の検出

1) 目的

地球規模の平均気温は、過去 100 年間に 0.7°C 上昇した (IPCC, 2007a)。日本では過去 100 年に $1.06 \pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 上昇した (気象庁, 2005)。将来の温暖化に伴う植物の潜在生育域の予測は、海外や日本でも多数行われている。しかし、過去の温暖化に伴う植物の分布変化を検出した研究は少ない。八甲田山の亜高山帯林では、優占種のオオシラビソが過去 36 年間 (1967～2003 年) に、高標高域で分布拡大し低標高域で減少したことが報告されている (Shimazaki et al., 2011)。低標高の減少は、気候要因以外による説明が難しいことから、温暖化の影響と結論された。高標高域の分布拡大は、最終氷期以降の分布拡大の過程と温暖化影響と 2 つの理由が考えられた。

過去 100 年間の温暖化に伴い常緑広葉樹が落葉広葉樹林帯に分布拡大をした可能性があ

るが、これまで実証的研究はなかった。発達した常緑広葉樹林と落葉広葉樹林が垂直的に接する山地において、過去と現在の空中写真の比較により常緑樹の分布変化を検出すれば、温暖化の影響を検討できる。本研究では、老齢な天然林が残る筑波山南斜面を対象に異なる時期の空中写真の比較から常緑広葉樹の分布の変化を検出することを目的とする。

2) 方法

調査区は筑波山南斜面の老齢な天然林125haである。この森林は、筑波山神社所有林で過去に伐採をほとんど受けていない。標高700m以上にはブナが優占する落葉広葉樹林が広がり、標高が下がるとアカガシを中心とする常緑広葉樹が増加する。一部に老齢なスギ・ヒノキが混生する。2005年11月と1975年1月のカラー



図5 筑波山南斜面125ha調査区と常緑広葉樹冠(緑)

空中写真のオルソ画像を利用して、色調・テクスチャによって常緑広葉樹の樹冠を判読し、樹冠分布図を作成した。樹種と樹冠の判読の際、オルソ画像だけでは困難な樹冠では、立体視の手法も活用した。判読された樹冠から、樹冠数を標高クラスごとに集計した。

3) 結果と考察

1975年と2005年のカラー空中写真オルソ画像の常緑広葉樹冠判読結果(図5)から、常緑広葉樹冠を3つのグループに分けた。すなわち、①存続(1975年と2005年共に存在する樹冠)、②新規(1975年に存在せず2005年に存在する樹冠)、③枯死(1975年に存在するが2005年に存在しない樹冠)である。この30年間に、125haの調査区全体で常緑広葉樹の樹冠が130個が増加し、枯死は13個であった(表1)。新規の常緑広葉樹は、すべ

表1 標高ごとに示された1975年から2005年の30年間の常緑広葉樹冠数の変化

標高	500m～	550m～	600m～	650m～	700m～	750m～	800m～	総計
対象地域面積(ha)	31.00	23.97	21.81	18.69	13.57	10.61	5.70	125.35
存続(本)	363	437	401	365	232	81	15	1974
新規(本)	25	18	22	19	16	15	3	130
枯死(本)	0	2	5	5	1	0	0	13
存続+新規(本)	388	455	423	385	248	96	18	2104
.....								
存続(本/ha)	11.71	18.23	18.39	19.58	17.10	7.03	2.03	15.75
新規(本/ha)	0.81	0.75	1.01	1.02	1.18	1.41	0.53	1.04
枯死(本/ha)	0.00	0.08	0.23	0.27	0.07	0.00	0.00	0.10
存続+新規(本/ha)	12.51	18.98	19.40	20.60	18.28	9.04	3.16	16.79

ての標高クラスで認められ、標高 600～800m で 1 個/ha 以上、800m 以上でも 0.5 個/ha であった。

この結果は、過去 30 年間に常緑広葉樹が増加し、落葉広葉樹に置き換わったことを示している。落葉樹から常緑広葉樹への交替は、関東地方では二次林の発達過程で起こる変化、すなわち遷移でもある。しかし、筑波山の場合は気候条件によって規定される極相林と考えられるので、この変化は遷移ではなく、気候変化に伴う森林変化の可能性が高い。筑波山以外にも、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林が接する老齢な天然林でも同じ現象が確認できれば温暖化影響の可能性が高まる。

引用文献

- Ahl, D. E., Gower, S. T., Burrows, S. N., Shabanov, N. V., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y. (2006) Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 88-95.
- Atkinson, P.M., Jeganathan, C., Dash, J., Atzberger, C. (2012) Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400-417.
- 栗屋善雄・永谷泉・河合洋人・張鵬飛 (2012) MODIS データを利用した森林の開葉日の推定アルゴリズムの開発. *中部森林研究*, 60, 89-90.
- Breiman, L. (2001) Random forest. *Machine Learning* 45(1), 5-32.
- Chmielewski, F., Müller, A., Bruns, E. (2004) Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 69-78.
- Guyon, D., Guillot, M., Vitasse, Y., Cardot, H., Hagolle, O., Delzon, S., Wigneron, J.P. (2011) Monitoring elevation variations in leaf phenology of deciduous broadleaf forests from SPOT/VEGETATION time-series. *Remote Sensing of Environment* 115, 615-627.
- Horikawa, M., Tsuyama, I., Matsui, T., Kominami, Y., Tanaka, N. (2009) Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*). *Landscape Ecology*, 24, 115-128.
- Horikawa, Y. (1972) Atlas of the Japanese flora 1. Gakken, Tokyo.
- IPCC (2007a) Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (2007b) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- 環境庁自然保護局 (1999) 第 3 回自然環境保全基礎調査 (自然環境情報 GIS 第二版).
- 気象庁 (1996) 気象庁観測平年値(CD-ROM). (財)気象業務支援センター.
- 気象庁 (2005) 異常気象レポート 2005: 近年における世界の異常気象と気候変動, その実態と見通し(VII).

- Kodani, E., Awaya, Y., Tanaka, K., Matsumura, N. (2002) Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus crenata* canopy. *Forest Ecology and Management*, 167, 233-249.
- 丸山幸平 (1979) 高木層の主要樹種間および階層間のフェノロジーの比較—ブナ林の生態学的研究(33)—. 新潟大学演習林報告, 12, 19-41.
- Matsui, T., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N. (2004a) Climatic controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan. *Journal of Vegetation Science*, 15, 57-66.
- Matsui, T., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H., Yoshinaga, S., Daimaru, H. and Tanaka, N. (2004b) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *Journal of Vegetation Science*, 15, 605-614.
- 松井哲哉・田中信行・八木橋勉 (2007) 世界遺産白神山地ブナ林の気候温暖化に伴う分布適域の変化予測. 日本森林学会誌, 89(1), 7-13.
- 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化に伴うブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境, 14(2), 165-174.
- 松下まり子 (1992) 日本列島太平洋側における完新世の照葉樹林の発達, 第四紀研究, 31(5), 357-387.
- Nakao, K., Matsui, T., Horikawa, M., Tsuyama, I. and Tanaka, N. (2011) Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecology*, 212, 229-243.
- Primack, R.B., Higuchi, H., Miller-Rushing, A.J. (2009) The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. *Biological Conservation*, 142, 1943-1949.
- Rouse, J.W. Jr., Haas, R.H., Schell, J.A., Peering, D.W. (1977) Monitoring Vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 309-317.
- Tanaka, N., Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T. and Taoda, H. (2005) Constructing vegetation databases useful for assessing impact of climate changes in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 60, 433-438.
- 田中信行・八木橋勉・杉田久志・藤田和幸・林哲・埤田宏 (2003) 温暖化の影響と対策：森林生態系への影響と森林管理. 生命の科学遺伝別冊, 17, 109-118.
- 田中信行, 松井哲哉, 八木橋勉, 埤田宏 (2006) 天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について. 地球環境, 11, 11-20.
- 田中信行・中園悦子・津山幾太郎・松井哲哉 (2009) 温暖化の日本産針葉樹 10 種の潜在生育域への影響の予測. 地球環境, 14(2), 153-164.
- 津山幾太郎・松井哲哉・小川みふゆ・小南裕志・田中信行 (2008a) 本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価. GIS-理論と応用, 16(1), 11-25.
- 津山幾太郎・松井哲哉・堀川真弘・小南裕志・田中信行 (2008b) 日本におけるチマキザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価. GIS-理論と応用, 16(2), 99-113.