

空中写真に基づいた冷温帯・暖温帯境界域の自然林
における常緑広葉樹の分布変化の検出

Detection of changes in the distribution of
evergreen broad-leaved trees in old-growth forests
on the transitional zone of cool-temperate and
warm-temperate zones based on aerial
photographs

2016 年

中園 悦子

要旨	1
1章. はじめに.....	5
1. 1 研究の背景.....	5
1. 1. 1 温暖化をはじめとする環境変動とその影響検出.....	5
1. 1. 2 影響検出に於ける空中写真の利点と問題点.....	8
1. 2 研究の目的.....	11
2章. 筑波山南斜面の常緑広葉樹冠の変化検出.....	13
2. 1 はじめに.....	13
2. 2 対象地と使用データ.....	13
2. 2. 1 対象地.....	13
2. 2. 2 使用データ.....	14
2. 3 方法.....	16
2. 3. 1 複数の空中写真を用いた 2000 年代の樹冠判読と検証.....	16
2. 3. 2 異なる時期の画像による樹冠判読.....	16
2. 3. 3 樹冠数の集計法.....	18
2. 3. 4 樹冠総面積の誤差の定義.....	18
2. 3. 5 常緑広葉樹の分布変動の検出の確認.....	19
2. 4 結果.....	20
2. 4. 1 樹冠の判読基準.....	20
2. 4. 2 樹冠判読の毎木調査による検証.....	21
2. 4. 3 樹冠数の集計結果.....	22
2. 4. 4 樹冠総面積の誤差の検討.....	22
2. 4. 5 樹冠数と樹冠総面積の経年変化.....	26
2. 5 考察.....	28
2. 5. 1 樹冠の判読精度.....	28
2. 5. 2 樹冠数の集計と特性.....	29
2. 5. 3 樹冠総面積の特性.....	30
2. 6 まとめ.....	31
3章. 函南原生林の林冠の変化検出.....	32
3. 1 はじめに.....	32
3. 2 対象地と使用データ.....	32
3. 3 方法.....	35
3. 3. 1 現在の空中写真による樹冠判読と検証.....	35
3. 3. 2 過去の空中写真による樹冠ポリゴン図の作成.....	35
3. 3. 3 面積誤差の検討と経年変化の検出.....	37
3. 4 結果.....	37

3. 4. 1	現在の樹冠の判読と精度.....	37
3. 4. 2	樹冠総面積の誤差と経年変化.....	38
3. 5	考察.....	40
3. 5. 1	現在の空中写真判読の検証結果について.....	40
3. 5. 2	過去画像の判読精度の向上について.....	41
3. 5. 3	面積誤差と経年変化.....	41
3. 6	まとめ.....	42
4 章	紫尾山山頂の常緑広葉樹冠の変化検出.....	43
4. 1.	はじめに.....	43
4. 2	調査地と使用データ.....	43
4. 3	方法.....	43
4. 3. 1.	樹冠判読とその精度.....	43
4. 3. 2.	過去の樹冠総面積との比較.....	46
4. 4	結果.....	48
4. 5	考察.....	48
4. 6	まとめ.....	49
5 章	考察.....	51
5. 1	樹冠分布変化を検出する条件.....	51
5. 2	樹冠数と樹冠総面積.....	53
5. 3	新しいデータと技術.....	56
6 章	おわりに.....	58
	謝辞.....	60
	参考文献.....	61

図表

図 2-1 筑波山老齢天然林に設定した検証用プロット(1.0ha)と写真判読プロット(20.4ha)	14
図 2-2 樹冠数の判読法	16
図 2-3 複数年度のオルソ画像を用いた常緑広葉樹の判読プロセス	17
図 2-4 季節ごとの常緑広葉樹, 針葉樹, 落葉広葉樹の判読基準	21
図 2-5 検証プロットの常緑広葉樹の樹冠判読と毎木調査データの比較	22
図 2-6 写真判読プロットの常緑広葉樹樹冠分布図(白線)	23
図 2-7 標高階の中央値と, 各標高階の樹冠面積和に占める誤差割合	25
図 2-8 1961年から2008年までの(a)樹冠密度と(b)樹冠総面積割合の変化.....	27
図 2-9 標高階別 ha あたりの(a) 樹冠密度と(b) 樹冠総面積割合の変化.....	28
図 3-1 函南原生林内の3箇所の調査地	34
図 3-2 (a)2005年画像上での樹冠分割. (b)対応する2012年画像. (c) a と b から行った2005年画像の判読結果.....	36
図 3-3: 各プロット・年代での落葉広葉樹, 常緑広葉樹, 林冠ギャップの面積(%).....	40
図 4-1 紫尾山山頂の判読プロット(A: 900-950m, B: 950-1000m, 2.26ha)	44
図 4-2 プロットAにおける1975年(上)と2008年(下)の常緑広葉樹樹冠ポリゴン.....	47
表 2-1 解析に使用した空中写真データ	15
表 2-2 検証プロットにおける樹冠判読データと毎木調査データとの比較	15
表 2-3 判読プロット全体の常緑樹樹冠総面積, 面積誤差, 3時期平均に対する誤差割合	24
表 2-4 全期間に共通して出現する211個の樹冠サンプルの平均面積と2000年代3時期の平均値との差.....	24
表 2-5 判読プロット内標高階ごとの, 各年代での常緑樹樹冠面積, 2000年代平均値, 3時期平均に対する面積差の割合	25
表 3-1 判読に使用した空中写真の情報とオルソ画像作成方法	33
表 3-2 空中写真判読結果と現地調査の比較	38
表 3-3 各標高・年度・撮影方向(1(斜め), 2(できるだけ真上))ごとの落葉広葉樹, 常緑広葉樹, 林冠ギャップの面積, 差, 平均, 経年変化(単位: m ²)	39
表 4-1 判読に使用した空中写真の情報とオルソ画像作成方法	45
表 4-2 空中写真判読結果と現地調査の比較	48
表 4-3 各プロットにおける2時期の常緑広葉樹樹冠面積/解析対象面積/常緑広葉樹樹冠面積率.....	48

要旨

地球温暖化は既に顕在化し、気温はここ 100 年の間に全球平均で約 1℃上昇したと報告されている。したがって、その影響は既に自然界にも現われていると推測される。では過去から現在にかけて、本当に植生の分布変化が起こっているのだろうか？過去から現在への植生の面的な分布変動を検出したとする研究は複数あるが、いずれも高山での森林限界線の移動、もしくは森林帯間の境界線の移動に注目しており、森林帯境界域での面的変動を十分な精度で検出した研究例はない。そこで日本の主要な植生帯である冷温帯落葉広葉樹林-暖温帯常緑広葉樹林の境界域に分布する老齢自然林を対象とし、数十年というタイムスケールでの植生の微少な面的変化の検出方法を確立することを目的とした。

1ha~20ha の森林を対象として微少な分布変化を捉える為の手法として、日本に於いては最も古いリモートセンシングデータであり、かつ解像度が高く上層木の樹冠ごとの判読が可能な空中写真を利用する方法を選んだ。空中写真を用いると常緑広葉樹の樹冠と落葉広葉樹の樹冠とを識別することが可能となる。そこで空中写真の目視判読による常緑広葉樹の樹冠の抽出を行い、その分布の変化を検出することとした。空中写真を GIS データとして使用する場合、画像の歪みを正射投影にて修正したオルソ画像を作成する必要がある。しかしオルソ化の際に面積の誤差が生じるが、誤差を推定することは難しい。また樹冠の面積の真値を地上から求めることも非常に難しい。従って、常緑広葉樹の分布変化を検出する指標として、まず面積誤差の影響しない指標を定義すること、また面積誤差について妥当な定義を行うことで面積に関連する指標を使うことを考えた。

具体的な研究目的を述べる。

対象地としては、森林帯の移行域に分布する人為的影響も遷移の影響も少ない老齢な自然林である茨城県の筑波山南斜面、静岡県函南原生林、そして鹿児島県の紫尾山山頂付近の三箇所を選んだ。また、解析対象樹種としては、年間を通じて葉が残っており樹冠の面積や個数を比較し易く、また過去から現在にかけて増加する傾向にあると考えられる常緑広葉樹を選んだ。

筑波山南斜面は、常緑広葉樹を判読するのに適した空中写真の過去のデータが複数存在しており、かつ現在の空中写真についても複数の入手が可能であった。そこでまずこの場所を研究対象地とし、二つの指標についての検討を行った。その上でそれぞれの指標の経年変化から常緑広葉樹の分布変化の検出が可能であるかどうかを確認した。

空中写真として、1961, 1975, 1986, 2003, 2005, 2008 年の 6 時期の秋~早春に撮影されたものを使用した。はじめに 2000 年代の 3 時期の画像を使用して、現在の常緑広葉樹樹冠の判読を行った。空中写真判読結果の検証を行う 1.0ha のプロットを選定し、2005 年データを中心に 2003, 2008 年データを補助として常緑広葉樹の樹冠を判読し、それを 2007 年の毎木調査データと比較した。その結果、中下層木は判読されず、上層木 17 本のうち 14 本 (82%) が判読された。次に、写真判読プロット (20.4ha) について、まず検証プロットと同様の基準で判読を行い、3 時期の樹冠分布図を、その結果を元に過去 3 時期の

樹冠分布図をそれぞれ作成した。

筑波山での研究では、指標として、樹冠数と樹冠総面積を求めることとした。常緑広葉樹が隣接すると樹冠が連続して明白な境界がわからなくなるため、樹冠を区切る場所によって樹冠数が変化する。区切る場所による樹冠数の誤差を防ぐ為に、2000年代3時期の画像については、全てのポリゴンで樹冠の区切る場所を共通にしてそのポリゴンの数を樹冠数としたが、この方法では作業量が増大した。そこで1961～1986年については2005年の樹冠分布図を用いて各時期の画像上での各樹冠を特定、その在・不在情報を収集し、そこから樹冠数を算出した。

また、面積誤差については、以下のように定義した。

同一の対象を n 枚の空中写真に撮影し、オルソ化した結果得られた樹冠面積がそれぞれ $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ である時に、

真値 A を $A = (\sum_{k=1}^n A_k) / n$, $k=1$ to n で近似し

$$\text{Max}(|A_k - A|),$$

をこの場合の面積誤差と定義した。また、時期の異なる画像の樹冠面積と A との差を経年変化とし、

$$\text{経年変化} > \text{樹冠面積}$$

の場合、経年変化が検出されると判断した。そこで2000年代の3時期の間の面積差は画像処理による面積の誤差であると仮定し、以上の定義を用いて樹冠の面積の真値と面積誤差を求めた。結果、個々の樹冠の面積については誤差が大きすぎるために経年変化を追うことは難しいこと、しかし複数の樹冠をまとめた場合、経年変化に比べて誤差が小さくなること、誤差の原因としては空中写真の撮影の際の中心からの距離による歪みが考えられることが判った。

以上の点に留意した上でこれら二つの指標を適用したところ、常緑広葉樹の樹冠数は0.18本/年/haの割合で、樹冠総面積は調査プロットに対して0.21%/年の割合でそれぞれ直線的に増加していることがわかった。

次に、静岡県函南原生林を対象とし、過去の空中写真単独では常緑広葉樹・落葉広葉樹の判読が不可能である場合について、常緑広葉樹樹冠の分布変化を検出することが可能かどうかを検証した。解析対象として1976年、2005年のそれぞれ紅葉途中の空中写真、また2005年の判読補助として2012年の冬の空中写真を使用し、それぞれの空中写真を単画像オルソ化した。また標高600m、700m、800m付近にそれぞれ150m×150mの写真判読プロット(2.25ha)を設定し、判読プロット内の樹冠ポリゴンを作成した。2005年の空中写真では落葉広葉樹林についても樹冠ポリゴンを作成することが可能だった。そこで2005年の判読プロット内の樹冠を常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプに目視判読で分類した。この判読結果について確認する為に原生林内の遊歩道周辺の樹冠を判読、分類し、その結果を現地調査と比較した。結果、常緑広葉樹は90%、落葉広葉樹は100%の判読精度となった。

また、1976年の樹冠は、2005年の樹冠とそれぞれ対応が可能であった。そこで現在の分類結果を補助として、単独では常緑広葉樹と落葉広葉樹の分類が困難な1976年データを2005年と同様に常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプに分類した。また、単画像オルソの面積誤差について検討するために、同一判読プロットに対し、同一コース内のオーバーラップする空中写真から2枚のオルソ画像を作成し、それぞれのプロットを3タイプに分類した面積を算出した。この面積の差をオルソによる面積誤差と定義し、経年変化と比較した結果、標高600m判読プロットの落葉広葉樹以外、全ての判読プロットの全てのタイプに対して経年変化>面積誤差が成立した。以上の結果を踏まえて3つのプロットの3タイプの面積割合の経年変化を調べたところ、林冠ギャップは全ての判読プロットで減少し、常緑広葉樹はどの判読プロットでも増加していること、また600mプロットでは落葉広葉樹がこの期間に増加することはなく、常緑広葉樹だけが増加していると判断された。

以上2つの対象地で検討した手法を、空中写真の撮影頻度が少なく、常緑広葉樹の増加の幅が小さい紫尾山頂上付近の森林に適用し、このような条件下で常緑広葉樹の分布変化の検出がどこまで可能であるかの検証を行った。解析対象とした空中写真は1975年、2008年の二時期のみである。それぞれの空中写真を単画像オルソ化し、標高900~950mに判読プロットA(2.26ha)、標高950~1000mに判読プロットB(2.26ha)を設定し、判読プロット内の常緑広葉樹の樹冠ポリゴンを作成した。また、現地調査として山頂まで続く道路沿いの樹冠を判読し、その結果を立木調査の結果と比較した。その結果、常緑広葉樹の判読精度は98%となった。2008年と1975年データ上で、樹冠の対応を行うことは一部困難であり、結果指標として樹冠数が使えないこと、また現在の判読結果を過去の判読結果に適用することができないことがわかった。但し、落葉広葉樹の完全に落葉した2月に撮影されていることから1975年データ単独で樹冠総面積を目視判読することは十分に可能であると判断した。結果、常緑広葉樹の樹冠面積の増加が検出され、判読プロットに占める割合は33年間に判読プロットAで1.23倍、判読プロットBでは1.79倍になることがわかった。

以上から、1970年代のカラー空中写真と現在撮影される空中写真とを判読し、その結果を適切な指標を用いて比較することで、老齢自然林内の常緑広葉樹樹冠の分布変化を検出することが可能であることがわかった。但し、空中写真の撮影時期や撮影された枚数、過去と現在のデータ上で樹冠の対応が可能であるかどうかによって検出可能な情報には差が生じるため、注意が必要である。また、樹冠数と樹冠総面積の二つの指標についても検討を行うことが出来た。樹冠数は面積による誤差とは関係ないため、誤差を考慮する必要が無い。従って特に落葉広葉樹林内に進出した常緑広葉樹の小さい樹冠を検出するには適している。しかし、常緑広葉樹が連続している場合、現在と過去との間で樹冠が対応できない場合は使用できない。一方、樹冠総面積については、常緑広葉樹の判読が可能であれば樹冠の対応ができない場合でも使用可能である。但し必ず面積の誤差があるため、検出

するためにはある程度の観測期間が必要になる。今回の筑波山での結果から、観測期間が5年程度では経年変化が検出されないが、10～15年程度の観測期間では経年変化が検出される可能性があることがわかった。従って、日本全体が撮影された70年代のカラー空中写真については、現在までの観測期間が40年間程度なので、植生分布に変化がある場合は、どちらの指標からも変化が検出されることがわかった。

日本の場合、カラーに限っても空中写真は1970年代から存在している。また国土地理院撮影の白黒空中写真の場合、1950年代後半から全国的に撮影が始まっている。このような空中写真を用いることで数十年間の樹冠の分布変化を検出可能であることが今回わかった。温暖化の検出の一番の問題が過去のデータであることを考えると、日本全土に渡って数十年間蓄積された空中写真は、数十年の植生変動を広域で捉える為の、非常に有効なデータであると考えられる。また、現在から未来にかけて、日本の森林の地上調査に対応できる詳細な情報を得る為のリモートセンシングデータと解析技術が揃いつつある現在、空中写真から得られる過去40年の森林の詳細な情報とそれらを組み合わせることで、長期に渡る単木ごとの森林の変化について観測が可能になりつつある。

1 章. はじめに

1. 1. 研究の背景

1. 1. 1 温暖化をはじめとする環境変動とその影響検出

地球温暖化問題はいよいよ確定的となり、先の COP21 で全世界的な政策の枠組みが合意されるまでに至ってきた。しかし温暖化問題がまともに議論され始めたのは近年のことで、地球温暖化に関する初めての世界会議であるフィラハ会議が開催されたのは1985年、気候変動に関する政府間パネル(IPCC) が設立されたのは1988年である。この時点で既に温暖化は進行していると考えられており、IPCC 第5次評価報告書によると、世界では1880~2012年に気温が0.85°C上昇し(IPCC 2013)、日本でもこの100年に1.14°Cの割合で気温が上昇しているとの報告がある(気象庁 2013)。また、温暖化は将来的にも続く予想されており、社会経済シナリオをベースとした温室効果ガスの排出シナリオ(SRESシナリオ)に基づく複数の未来の気候モデルが提言されている。

このような気候変動の影響は自然植生にも影響を及ぼすことが予測される。未来の気候モデルに基づいた植生や植物分布の変動予測については、既に多くの論文が報告されている(Iverson *et al.* 1999, Harrison 2001, Berry *et al.* 2003 等)。日本に於いてもブナ(松井ら 2009)、主要10種針葉樹(田中ら 2009)、常緑カシ類(中尾ら 2009)、チシマザサ・スズタケ(津山ら 2008, 2011)などについて分布の変化予測が行われており、今後100年の間の気候変動に伴い、様々な植生について、その植生の分布に適した環境条件を備えた地域(分布適域)に大きな変化があることが示唆されている。

植生の分布適域の変動予測では、植生の現在の分布域から分布に適した気候条件を求め、将来の予測されている気候条件下でその植生の分布適域がどのように変化するかを予測している。しかし、実際に気候が変化したとしても、植生がその範囲に即時移動するわけではない。特に対象が樹木である場合、現在の生育地が気象条件としては適域から外れたとしても、消失するまでにはかなりの時間がかかると考えられる。また、森林が市街地などによって分断されている場合、将来の適域までその植生が移動することが困難である場合も考えられる。したがって、実際におこる植生分布の変化は、これらの予測よりも遅いと考えられている(田中ら 2006, Nakao *et al.* 2011)。

では気候変化に伴う植生の移動はどのように進むのか?このことを知るには、実際の植生の変化を調べる必要がある。温暖化については既に過去から現在にも起きており、その影響は既に植生にも現れていると考えられる。過去から現在への気候変化に伴う植生移動についても、既に複数の論文によって報告がなされている。

植生に対する気候変動の影響を検出する手法として、大別すると二つの手段、フェノロジーの研究と、植生の分布域の変化の検出が挙げられる。前者には開葉・開花・結実・紅葉の時期について、過去と現在のデータを比較し時期の変化を検出した多くの例がある

(Menzel and Fabian 1999, Menzel *et al.* 2006, Schwartz and Reiter 2000, Peñuelas *et al.* 2002 等)。このような研究の特徴として、過去のデータが必須であること、しかしこのような特徴的な出来事は観察が容易であって、日記や文学作品などにも記載がある場合もあるため比較的古くからのデータが利用可能であることが挙げられる。過去に遡った例としては 1736 年から 1947 年にかけてのデータを元にした 20 種以上の異なる植物・動物のフェノロジーについての研究 (Sparks and Carey 1995) や、日本の桜の開花時期について 801 年からのデータを元に、フェノロジーの解析を行った例がある (Aono and Kazui 2007)。また最近では、1980 年代以降の衛星データから植生指数の変動を求め、植生が緑化・茶色化する時期の変動を全球レベルで検出した論文も報告されている (Pettorelli *et al.* 2005, de Jong *et al.* 2013)。

一方、植生の分布域の移動を検出する方法としては、まず、過去のデータの無い地域について、森林限界での樹木の調査から森林限界の変動を検出する方法がある。森林限界での樹木の変動と温暖化などの環境変化との間には関連があるとされている (Grace *et al.* 2002, Holtmeier and Broll 2005)。そこで、森林限界での樹齢や樹木のサイズと標高との関連を調べることにより、その樹種が森林限界よりも高標高側に拡大したのかどうかを推定する手法が複数の地域で試みられている (Camarero and Gutierrez 2004, Vittoz *et al.* 2008, Smith *et al.* 2009 等)。この場合、森林限界の樹齢は年輪による年代測定や放射能による測定によって推定されるが、このような推定からは分布変化の正確な期間については求めることが難しい。

過去の調査データがある場合、植生の変化の検出はより正確なものとなる。調査データの例として、異なる標高の場所に設置された複数のプロットの過去のデータを利用する方法がある。この例としては温暖化検出例として最も早く発表された Grabherr *et al.* (1994) や Pauli *et al.* (1996) の論文がまず挙げられる。対象地とされたアルプスでは、過去の植生についてのデータが 1800 年代から存在している。そのうち現在でも位置が特定可能であったのが 132 点、そのうち 1992, 1993 年で再調査された箇所では過去のデータと比較した結果、1~4m/10 年の割合で、植生種が移動していることが報告されている。同様の手法を用いた例としては、高山植物については、中部ノルウェーの 23 の山に於ける植生の 1930 年~1998 年間の変化 (Klanderud and Birks 2003)、スイスアルプス南東部の 10 の山頂における植生の 80 年/17 年間の変化 (Walther *et al.* 2005, Jurasinski and Kreyling 2009)、オーストリア、チロル地方の標高 2900~3450m の山頂の植生について 1994~2004 年間の変化 (Pauli *et al.* 2007)、スコットランドの高山での 20~40 年間の変化 (Britton *et al.* 2009) などが報告されている。また、より広域から収集した情報を元に植生変化を調べたものとしては、全球のツンドラ地帯の 46 箇所に於ける 1980~2010 年間の変化 (Sarah *et al.* 2012) や、主要なヨーロッパの高山の、森林限界より高標高側の 60 箇所に於ける 2001~2008 年間の変化 (Gottfried *et al.* 2012) などがある。特に Gottfried *et al.* によると、それぞれの山で種の変化を見た場合には傾向が見出しにくい、全体で見ると、比較

的寒冷な地域に分布する種が減少する傾向にあるとの報告がなされている。これらの論文から、高山植生の場合、10～20年の間隔でもその移動を検出することが可能な場合があることがわかる。但しこれらの対象地は殆どが森林限界よりも高標高であり、それぞれの植生の移動速度は樹木と比較するとかなり早いことが予測される。また高山植物だけでなく、草本、木本、両方を含む森林植生について、高山植物と同様、複数の調査プロットデータ(西ヨーロッパの標高0～2600mに分布する171の森林植生)の変化を求め、標高方向の変動を検出した例が報告されている(Lenoir *et al.* 2008)。この方法では種の標高方向の変動については検出できるが、面的な分布の変動については検出ができない。

広範囲に散らばる複数のプロットを用いる代わりに、等高線を横切る形で設定されたトランセクト調査の結果を比較することで、標高方向の変動を検出する例も報告されている。スカンジナビアの山脈について、1975年と2003年の同じトランセクトでの調査を元に、森林限界が10m/10年の割合で上昇しているとの報告がなされている(Kullman 2004)。また、南カリフォルニアのサンタ・ロサ山脈では、標高244mから2560mまで16kmのトランセクトを設置し、その場所を1977年と2006～2007年の二回調査した結果を比較することで、優占種の平均標高が約65m上昇したことが検出されている(Kelly and Goulden 2008)。この場合、地域的には連続した場所の変動を検出することが出来るが、その調査はやはり標高方向の植生の変動を捉えることが目的であり、面的な変動の検出は難しい。

検出対象が樹木の場合、写真を代表とするリモートセンシングデータを使用する過去の現在との比較が可能である。データの使用法は様々であり、1948～50年に撮影された写真と1999～2000年に撮影された写真、66組(400km×150kmの範囲)のうち36組で灌木が増加し、30組では変化こそないものの減少もない、とのアラスカの極地帯での灌木の変化を目視で捉えた Sturm *et al.*(2001)の研究がある。また、異なる気候帯に属する森林の境界部分についてはこのようなリモートセンシングデータが使用されることが多い。アメリカ、ヴァーモントで、1962年と1995年の写真と2005年の衛星データを使用し、北部広葉樹林の推移帯が1962年から2005年の間に91～115m上昇していることを求めた Beckage *et al.* (2008)の研究がある。また、スペインのモンセニー山脈の1945年の植生図や1950年代の空中写真、1940年代から撮影された写真を、現在の空中写真や地上調査と比較することで、ブナ林(*Fagus sylvatica*)が1945年から上方に70m移動しており、分布の下限側ではブナと荒地がトキワガシに置き換わっていることを示した Peñuelas and Boada (2003)の研究がある。どちらも過去と現在のリモートセンシングデータの比較を元に、異なるタイプの森林の境界の変動を検出しているが、どちらも境界を線としているため、境界付近の異なる気候帯に属する植生が混交している地域の詳細までには触れられていない。このような空中写真を主体とする検出方法として、他には山地湿原植生を対象にした安田らの研究(2007)、オオシラビソを対象とした Shimazaki *et al.* (2011)の研究が挙げられる。どちらも空中写真のオルソ画像を使用しており、面的な変動を高い精度で追った研究であるが、どちらも高山帯など寒冷な地域を対象としており、異なる森林帯の境界

域については示されていない。

以上の植生変動に関する研究の特徴として、まず、その多くが草本植生であり、樹木は少ないことが挙げられる。また、異なる標高に設置されたプロット間の植生の種の変化と標高との関係を用いて、標高方向の移動速度を求める例は多いが、面的な植生の変化についてまで言及されたものは少ない (Shimazaki *et al.* 2011, 安井ら 2007, Peñuelas and Boada 2003)。また、対象地として特に影響が顕著であるとされる寒冷な地域を対象とする場合が多い。より温暖な地域において植生の移動を検出する場合、異なる植生帯に属する森林の境界を調べることになるが、その場合は既に森林が成立している場所に新しく分布適域となった種が進入することになるため、変化の検出がより困難である。その為実際に異なる森林帯の境界で分布変化を検出した報告例は少なく (Beckage *et al.* 2008, Peñuelas and Boada 2003), 熱帯域での検出例は殆どない (Colwell *et al.* 2008)。検出例が寒冷な地域に限られる原因としては、検出が困難であることに加えて、人間の生活圏と重なる温暖な地域の植生には人為の影響が大きいことが考えられる。対象地が攪乱後の二次植生であった場合、気候変動に伴う植生変化と二次遷移に伴う植生変化とを識別することは難しい (Gehrig-Fasel *et al.* 2007) ため、たとえ変動が検出出来たとしても、それを温暖化の結果であると証明することが難しい。結果として人間の生活圏に重なる気候帯での植生の分布変動の検出も少ないと考えられる。しかし冷温帯-暖温帯は日本に於いての主要な気候帯であり、そこに属する樹木の分布予測についての研究も既に複数存在している。従ってこのような森林で実際にどのような変動がここ数十年の間に起こったかを知ることには、過去から現在のみならず、現在から未来にかけての気候変動の影響をより正確に知る上でも必要だと考えられる。但し、人的影響を極力減らすために、調査地として人為の影響を受けていない場所、伐採等の影響の少ない老齢の自然林を探す必要がある。

そこで、これまでの先行研究に於いて未だ十分な精度で面的な分布変化が検出されていない、冷温帯-暖温帯に属する落葉広葉樹林-常緑広葉樹林の境界に分布する老齢な自然林内での微少な植生の変動について、十分な精度で検出を行う方法について検討する必要がある。

1. 1. 2 影響検出に於ける空中写真の利点と問題点

ある植生の分布変化を検出する際に、人為的な攪乱の影響の少ない地域を対象とし、複数の場所で同様な変化傾向が検出された場合、その変化の原因として気候変動の影響を考えることが可能となる。従って、過去から現在までの植生変動を検出するために使用する情報の条件としては、数十年前から現在に至る植生分布について複数の場所で同精度の情報が得られること、過去と現在との植生を比較するために過去から現在まで同精度で対象地の位置を特定することが可能であること、対象となる植生を判読できること、できるだけ広域の分布情報を面的に得られること、が挙げられる。

このような広域の植生情報を一律に得られる可能性のあるデータのの一つとしてリモート

センシングデータが挙げられる。特に日本では、以上の条件を満たすリモートセンシングデータとしてまず空中写真が挙げられる。

日本の空中写真は、限られた範囲ではあるが 1930 年代から日本陸軍により撮影されている。その後、米国の占領下にあった 1940 年代には米軍によって、またその後 50 年代後半からは国土地理院によって撮影が継続している。従って空中写真は、日本では期間的に最も古いデータが存在するリモートセンシングデータである。また 1970 年代中間に、日本全体のカラー写真が撮影されているため、樹種判読が白黒写真では困難な場合でも、約 40 年の間の変化について検討することができる。

また、国土地理院の撮影が始まった 1950 年代には既に森林の様相を判断する情報として空中写真は利用されており(大友ら(1956)), まだカラー写真が撮影される以前から『図説空中写真測量と森林判読』(日本林業技術協会, 1964)が出版されている。特にスギをはじめとする針葉樹は樹冠や樹形から樹冠数を判読し易く、樹冠数と立木数、樹冠面積と胸高断面積との間に関連をつけ易い。また各地で植林されており、木材として多用されている。その結果、森林の構造などについての論文(今永・永用 1986, 上杉ら 1996, 等)やその材積推定法について(長 1974, シトメアン 1985, 小木 1987, 飯塚・松平 1989, 等), また森林キャノピーのモニタリング(田口ら 2009)など多くの論文が報告されている。

しかし、今研究では常緑広葉樹林と落葉広葉樹林の境界域が対象である。なお今回、判読対象としては常緑広葉樹を選んだ。落葉広葉樹の場合、常緑広葉樹との識別に最も適した時期は落葉期であり、この場合樹冠を判読することは可能であっても、その個数や面積を求めることは困難であると判断したためである。

広葉樹については樹冠数と樹木の立木数、また樹冠面積と胸高直径の間に明確な関連が無い場合、空中写真からの地上量の推定が困難である。また植林される例は少なく、植林されたスギ林では雑木としてまとめて分類されることが多い。論文も、材積などの地上量の推定を行った例(中島ら 1962, 飯島・松平 1989, 1993)の他に樹冠の色調や形状を元に樹種の判定を行った例が多い(板垣ら 1968, 板垣 1976, 高橋 1979, 小木 1986, 等)。また、落葉広葉樹や常緑広葉樹は、それぞれ季節により色調が変化する(丸山 1988)。このような変化を利用して、一年のうちの複数の時期の空中写真を組み合わせ、それぞれの樹種についてより詳細な判読を行った研究も報告されている(加藤 1990, 長澤ら 2004, 瀬戸島ら 2001a,b, 2002, 等)。この場合、短期間に複数の空中写真を撮影する必要があるが、その為に無人航空機(ラジコンヘリコプター)を利用した研究もある(小林 1982, 加藤 1989, 1990, 長澤ら 2004 等)。今回は対象が落葉広葉樹と常緑広葉樹の目視判読による識別なので、落葉樹が落葉後の空中写真が入手可能であるならば、同じ落葉広葉樹、常緑広葉樹内での樹種判読よりは容易であることは予想できる。しかし過去と現在の判読結果を比較する必要がある場合、現在の広葉樹の判読についてはそのような時期の選定が可能であるが、過去の空中写真については時期を選ぶことが出来ないため、過去の空中写真単独で判読が困難である場合、何らかの方法で判読の補助となる情報が必要になると考えられる。

常緑広葉樹と落葉広葉樹の混交した地域内で常緑広葉樹林を判読した例は少ない。暖温帯域内の比較的広域な二次林における常緑広葉樹の数十年に渡る分布変化については、既に朝廣ら(1999)、奥田ら(2007)の研究がある。どちらも空中写真による目視判読を行っており、前者は、伐採後から約40年間の樹冠幅と樹高を空中写真から判読し、その結果を地上観測結果と比較することで、樹冠幅の経年的な変化から樹木の成長と林分構造の発達の変遷が判断できると示している。また後者は人為的な擾乱の減少によりアカマツや落葉広葉樹を主とした二次林から常緑広葉樹であるシイ林への急速に遷移する過程を、オルソ化空中写真から判読した樹冠数・樹冠面積に基づいて面的に示している。但し、これらの判読には目視に拠るものである。

2つの論文は、目視判読を行う場合、40～50年間の常緑広葉樹の変化をオルソ化した空中写真から追うことが可能であることを示している。しかし対象とした森林は暖温帯の常緑広葉樹林の潜在分布域に分布しており、二次林が常緑広葉樹林に遷移する森林であるため、分布や優占度の変化の速度は大きいと考えられる。一方、温暖化した際の分布変化は、もともと落葉広葉樹に適していた場所に常緑広葉樹が分布拡大する過程であるため、その速度はより遅いと予想される。

このような微小な変化を空中写真から追う場合、幾つかの問題点が生じる。まず撮影された空中写真、特に過去の空中写真の撮影時期が判読の問題となる。国土地理院の空中写真の撮影頻度は数年～10年に1回程度であり、決して多くない。特に都市域の撮影回数に比べて山間部の撮影回数は少ないため、過去のデータについては適当な時期を選ぶことが困難であり、現存している画像から可能な限り情報を入手する必要がある。1970年代中旬の全国カラー空中写真は場所によって異なる季節に撮影されており、判読に適した時期の撮影とは一概には言えない。常緑広葉樹と落葉広葉樹を分離する場合、樹冠の形状やテクスチャが比較的類似している為、両者の色調に大きな差の無い夏のデータ、また落葉広葉樹が紅葉途中の時期のデータからの判読は非常に困難であることが予想される。従って、画像は存在するが色調からの判読が困難である場合、補助となるデータを使用して、過去と現在の分布変化をできるだけ検出することを考える必要がある。

また、判読が可能であった場合であっても、面的な変化を追う場合、どのような指標を使用するかが問題となる。空中写真から判読が可能なのは上層の樹冠である為、指標は樹冠に関連する値となる。しかし、樹冠面積に関連する指標を使用する場合、オルソ画像作成の際の誤差が問題となる。空中写真は中心投影であるため、標高の影響や写真の中心からの距離などによってひずみが生じており、そのままではGISデータとして使用できない。そのため正射投影によって歪みを補正したオルソ画像を作成する必要がある。オルソ化の方法としては、国土地理院で作成されたDEM(数値標高モデル)と25000分の1の地図を元に、空中写真一枚ごとにオルソ画像を作成する単画像オルソ法と、オーバーラップした二枚の空中写真からステレオ処理によるDSM(数値表層モデル)を発生させ、それを基にオルソ化を行うステレオマッチング法があるが、後者はマッチングがうまく行かなかった場

合に、画像に歪みが生じる場合がある。一方前者については、DSMではなくDEMを使用するため、特に樹木の場合、樹高によるDSMとDEMの差が誤差の要因となる。また25000分の1の地図は最大10m以上の誤差を持つため、これに基づいて位置情報を取得した場合、やはり誤差が生じる。従ってオルソ化を行った画像について重ね合わせを行った場合、個々の樹冠を重ね合わせるほどの精度でオルソ化を行うことは非常に困難である。

このようにオルソ化の結果、樹冠の面積を求めた場合誤差が生じることは予測できるが、その誤差がどの程度なのかを知るには樹冠面積の真値を知る必要がある。しかし空中写真から撮影された樹冠面積の真値をどのようにすれば知ることが出来るのか。

元々、森林リモートセンシングで観測する対象は樹冠である。例えば衛星データから針葉樹の材積を推定する場合、衛星データから直接材積に関連する値が得られるわけではなく、材積と胸高断面積、胸高断面積と樹冠面積がそれぞれ関連しているとの仮定の上で、衛星データから得られる樹冠面積と地上調査による材積の関係から推定式を求めるという方法をとることが多い(中園ら2000)。つまり樹冠面積はリモートセンシングデータで観測されるものである。単独の樹木の樹冠がどこまで広がっているかを地上から測定することは可能であるかもしれないが、互いに重なり合った樹冠を上空から見た場合の面積を地上から測定することは非常に困難である。

つまり、落葉広葉樹林-常緑広葉樹林の境界域で人為に依らない常緑広葉樹の分布変化を検出する場合、オルソ化による面積誤差が環境変化による植生の分布変化の幅よりも大きいことも考えられる。この場合は空中写真のオルソ画像から面積に関連する指標を用いて変化を検出することは不可能になる。しかし要因ごとの誤差を推定することは難しく、真値からのずれを求めることも困難である。そこで、面積の誤差が前提としてある場合、どのように分布変化を検出するかを考える必要がある。

誤差問題に対応する方法の一つとしては、この問題を回避する方法である。ここでは面積に関連しないが樹冠には関連する指標を考える。今回、このような指標として樹冠数を考えた。

また、もう一つの方法として、樹冠面積に関連する値を指標として使った場合、

面積誤差 < 経年変化

である場合には、経年変化が検出された、と考えることは可能である。しかしこの場合は妥当な方法で、面積誤差と経年変化を定義する必要がある。

1. 2 研究の目的

本研究の目的は、気候変動を検出するデータとして空中写真を選び、対象種を冷温帯落葉広葉樹林と暖温帯常緑広葉樹林の境界域の常緑広葉樹とした場合に、過去と現在のデータから対象となる植生を判読し、その微小な変化を検出することが可能であるかどうかを検証することである。

このことを検証するために、次のような段階を踏んだ。

- 1) 常緑広葉樹と落葉広葉樹を分離するに適した時期の解析可能な空中写真が複数存在している場合について、常緑広葉樹樹冠の判読を行い、経年変化の検出が可能であるかどうかを確認する。その際、二つの樹冠に関連する指標である樹冠数と樹冠総面積について定義を行い、それぞれの指標を求める際の方法、利点、問題点について検討を行う。
- 2) 過去の空中写真が落葉期のものではなく、単独では常緑広葉樹の判読が不可能である場合に対してどのような条件下であれば常緑広葉樹の樹冠の分布変化を検出可能であるかについて検証する。また同時に、落葉広葉樹と林冠ギャップの面積の変動についても検出を行う。
- 3) 1), 2)で使用した手法を、空中写真の撮影頻度が低く、使用可能なデータが少ない場所、かつ、既に常緑広葉樹がかなりの面積を占めており、変化の幅が小さいと考えられる場所に対して同じ手法を適用した場合、樹冠の分布変化はどの程度まで検出可能であるかの検証を行う。

2 章 筑波山南斜面の常緑広葉樹冠の変化検出

2. 1 はじめに

空中写真を目視判読することによって植生分布の詳細な変化を追う場合、まず問題になるのは、対象とする植生を空中写真からある程度の精度をもって判読可能であるかどうか、また異なる時期の解析を行った場合、その差が検出可能であるかどうか、である。

今回の対象は、落葉広葉樹と混交している常緑広葉樹の判読である。どちらも樹冠の形状は似ているため、それぞれの色調ができるだけ異なる時期の画像を使用する必要がある。その為、どの時期の画像が判読に適しているか、また目視でどの程度の精度で判読可能かをを確認する必要がある。

分布変化の検出を行う場合、空中写真から判読できるのはあくまでその樹木の樹冠であることを考慮する必要がある。そこで、変化を検出する際の指標を考える必要がある。指標が面積に関連するものである場合、樹冠の判読エラーによる誤差の他に面積の誤差も問題となる。誤差の原因としては、作成されたオルソ画像の誤差、目視で樹冠範囲を判断し、境界線を描く際の誤差など複数の要因が挙げられる。30～40年間の植生分布の変化がこれらの誤差の総計よりも小さい場合は、面積による変化指標を使用することが出来なくなる。従って、実際にオルソによる誤差と経年変化を比較し、この手法による検出が可能であるかどうかを確認する必要がある。

ここでは複数の空中写真が撮影されている筑波山を対象とし、比較的広範囲を対象地とした上で、以上の問題について検討することを目的とした。

2. 2 対象地と使用データ

2. 2. 1 対象地

本研究の目的に適する調査地として、筑波山神社の社寺林として長年保護されてきた筑波山の南斜面の老齢林を選んだ。筑波山神社は弘仁 14 年（西暦 823 年）に官社として指定されているとの記述がある（豊崎 1966）。筑波山の南斜面には、中腹にアカガシが優占する常緑広葉樹林が、700m から山頂（877m）にかけてはブナが優占する落葉広葉樹林が広がる。この自然林は、気候条件に対応して十分に発達した老齢な森林と考えられる。ただし、この内部には植栽由来と考えられる大きなスギ、ヒノキが混在している。また、少数ながら野生のモミと植栽由来のアカマツも分布する。

空中写真判読結果を検証するために、ブナ林にアカガシが混生する場所に 100×100m の検証プロットを設定し、2007 年に現地で毎木調査を実施した（図 2-1）。毎木調査では、胸高周囲長 15cm 以上の全樹幹について樹種、胸高周囲長、水平位置、樹冠先端の高さの入る階層（上層：12m 以上、中層：5m～12m、下層：5m 以下）を記録した。

また、標高による常緑広葉樹の分布変化を評価するために、ロープウェーやケーブルカ

一などの人工構造物がなく、植栽由来のスギ・ヒノキなどが少ない男体山頂 (871m) から標高 500mにかけての斜面に、写真判読プロット (20.4ha) を設定した (図 2-1)。

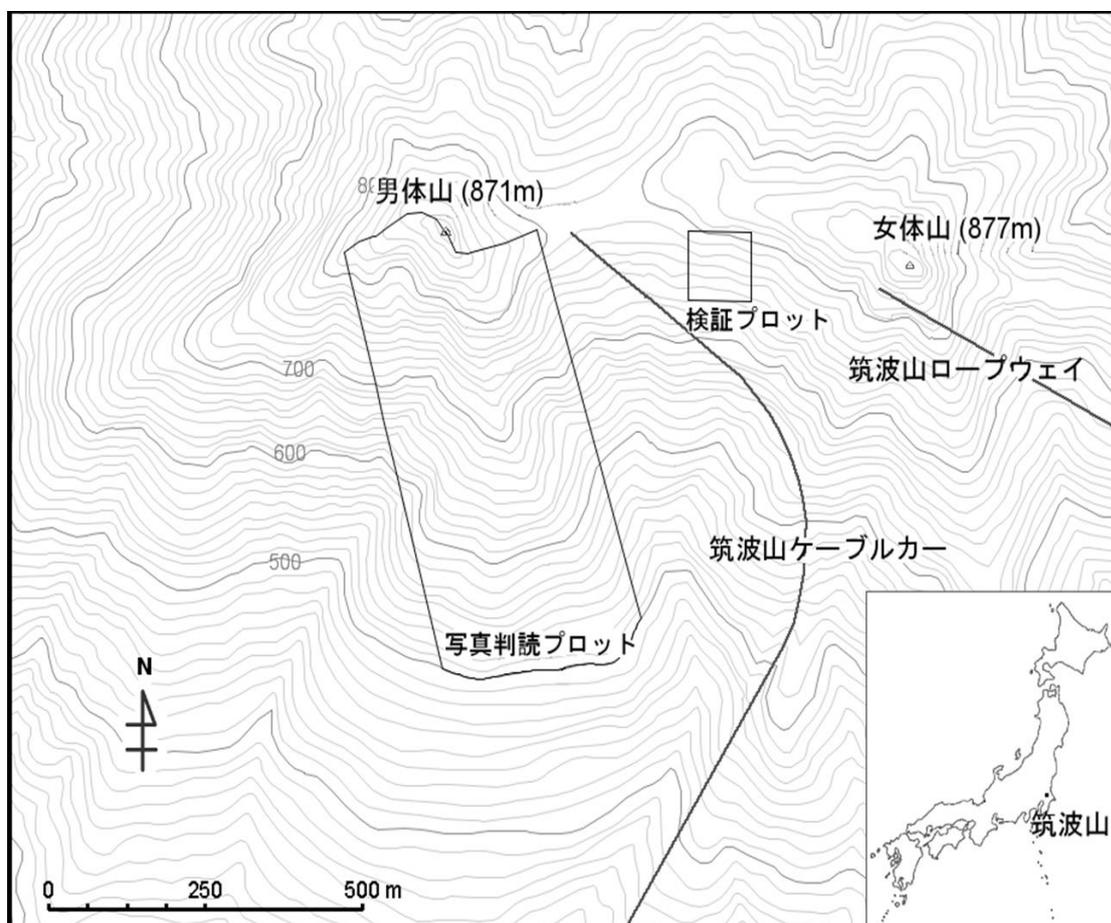


図 2-1 筑波山老齢天然林に設定した検証用プロット(1.0ha)と写真判読プロット(20.4ha)

2. 2. 2 使用データ

常緑広葉樹の判読に使用したのは、1961, 1975, 1986 年の空中写真と 2003, 2005, 2008 年の既成のオルソ画像で、それぞれ常緑広葉樹の樹冠識別の可能な春, 秋, 冬に撮影されたものである。1961, 1975, 1986 年の空中写真についてもオルソ化を行い、それらの画像を用いて判読を行った。空中写真の詳細 (カラーと白黒, 撮影高度など) とオルソ化の方法, 空間解像度について表 2-1 に示した。

オルソ画像の誤差が最も小さいと考えられるのが 2005 年の画像である。また, 2003 年と 2005 年の 3 枚の画像については, 筑波山山頂の上空から撮影された一枚画像をオルソ化している。その為, 低標高側で特にスギなどの針葉樹の樹冠に大きな形状の歪みが生じていた。

これらの年代別空中写真を用いて, 樹冠総面積と樹冠数の変化を復元した。

表 2-1 解析に使用した空中写真データ

撮影日時	カラー/白黒	撮影元	焦点距離(mm)	撮影高度(m)	画素サイズ(μm)	オルソ化使用ソフト	単画像/ステレオ	標高データ	解像度(m)	誤差(m)
2008年5月21日	カラー	SKYMAP	152.90	2429	20.0	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10mメッシュデータ	0.340	>1.75
2008年5月7日	カラー	SKYMAP	152.90	2429	20.0	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10mメッシュデータ	0.340	>1.75
2005年11月18~28日	カラー	PASCO	100.00		9.0	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	空中写真撮影時に同時計測されたDEMデータ使用	0.080	0.083
2003年11月17日	カラー	SKYMAP	151.61	2416	20.0	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10mメッシュデータ	0.200	>1.75
1986年11月6日	カラー	国土地理院	151.43	1640	20.0	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10mメッシュデータ	0.200	>1.75
1975年1月21日	カラー	国土地理院	152.69	1580	21.2	アジア航測 計測名人	ステレオマッチング	マッチングによるDEM自動生成	0.097	~1.0
1961年2月1日	白黒	林野庁	210.36	5300	20.0	IMPHO社 MATCH-AI	ステレオマッチング	マッチングによるDEM自動生成	0.436	0.4

表 2-2 検証プロットにおける樹冠判読データと毎木調査データとの比較

	上層(12m以上)	中層(5~12m以上)	下層(5m以下)
調査区内の常緑広葉樹(毎木調査)	17	47	23
2005年オルソ画像による判読数	14	0	0

2. 3 方法

2. 3. 1 複数の空中写真を用いた 2000 年代の樹冠判読と検証

検証プロットにおいて、比較的新しい 2003 年、2005 年、2008 年の空中写真のオルソ画像から常緑広葉樹の樹冠判読を行い、その結果を毎木調査データと比較し、判読の精度を評価した。

3 時期の画像は全てカラーで鮮明であった。その中でも最も解像度が高く、樹冠判読を行いやすい 2005 年画像を中心に画像間の比較を行いながら形・テクスチャ・色調に基づき樹冠の判読を行い、個々の常緑広葉樹の樹冠の輪郭をポリゴン化した。その際、それぞれの画像の赤・緑・青の成分について、コントラストを調整して常緑広葉樹の樹冠を判読しやすくした。個々の樹冠の位置は異なる年のオルソ画像では多少ずれるので、樹冠の位置関係から同一の樹冠であることを判断し、比較、判読した。2005 年データで判読が困難であっても、2003 年、2008 年の両方の画像から常緑広葉樹と判読できた場合には常緑広葉樹と推定した。また 2005 年の画像で常緑広葉樹と判読した場合には基本的に常緑広葉樹と判断したが、その場合も 2003、2008 年の画像で確認を行い、両方の画像で明らかに常緑広葉樹ではないと判断した場合はその樹冠を常緑広葉樹から除いた。

一方、毎木調査データから常緑広葉樹の位置と上層、中層、下層の情報を抽出し、これを元に検証プロット内の常緑広葉樹の位置図を作成した。この位置図と空中写真の判読結果を比較し、判読の精度について調べた(表 2-2)。

2. 3. 2 異なる時期の画像による樹冠分布図の作成

写真判読プロットでは、複数のオルソ画像を用いて各年の常緑広葉樹の樹冠を判読し、樹冠分布図を作成した。まず検証プロットと同様の基準によって 2005 年の常緑広葉樹の樹冠分布図を作成し、樹冠の総面積とポリゴンの個数を求めた。

作業中、常緑広葉樹の樹冠が密集して樹冠同士が接する場所で、個々の樹冠の境界が不明瞭な箇所が複数あった。そこで 2000 年代の 3 時期の全ての画像でその場所に樹冠が存

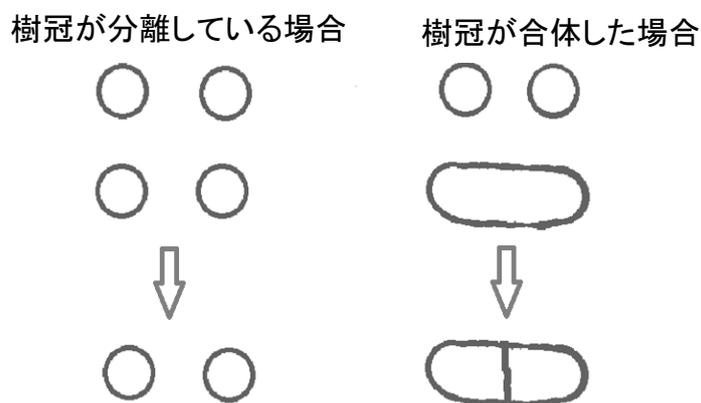


図 2-2 樹冠数の判読法

在することを確認した上で、3 時期の画像のうち一つでも樹冠の境界が判別できる場合は別の樹冠とみなした (図 2-2)。

次に、2005 年の樹冠分布図を参考にしながら 2003 年、2008 年の樹冠分布図を作成した。このうち、2008 年の写真は落葉広葉樹開葉期の 5 月 7 日と 5 月 21 日の 2 時期に撮影されているが、開葉が始まった段階の 5 月 7 日の画像を判読に用い、開葉が進んだ 5 月 21 日の画像は判読の参考にした。この時、連続した樹冠の境界については、3 時期全てで共通になるように調整を行った。結果、この 3 時期の画像から判読した樹冠のポリゴン数は全て等しくなった。

2000 年代の 3 時期の樹冠分布図を作成した後、1986、1975、1961 年の空中写真のオルソ画像を用いて個々の樹冠ポリゴンを作成し、各年における樹冠分布図を得た。ただし樹冠が連続している場合、2000 年代の樹冠と分割する箇所をすり合わせる作業については行わなかった。その代わりに、各年代の画像の個々の樹冠について、2005 年の樹冠分布図上で常緑広葉樹として記された樹冠との対応を調べ、2005 年の分布図に存在している樹冠がそ

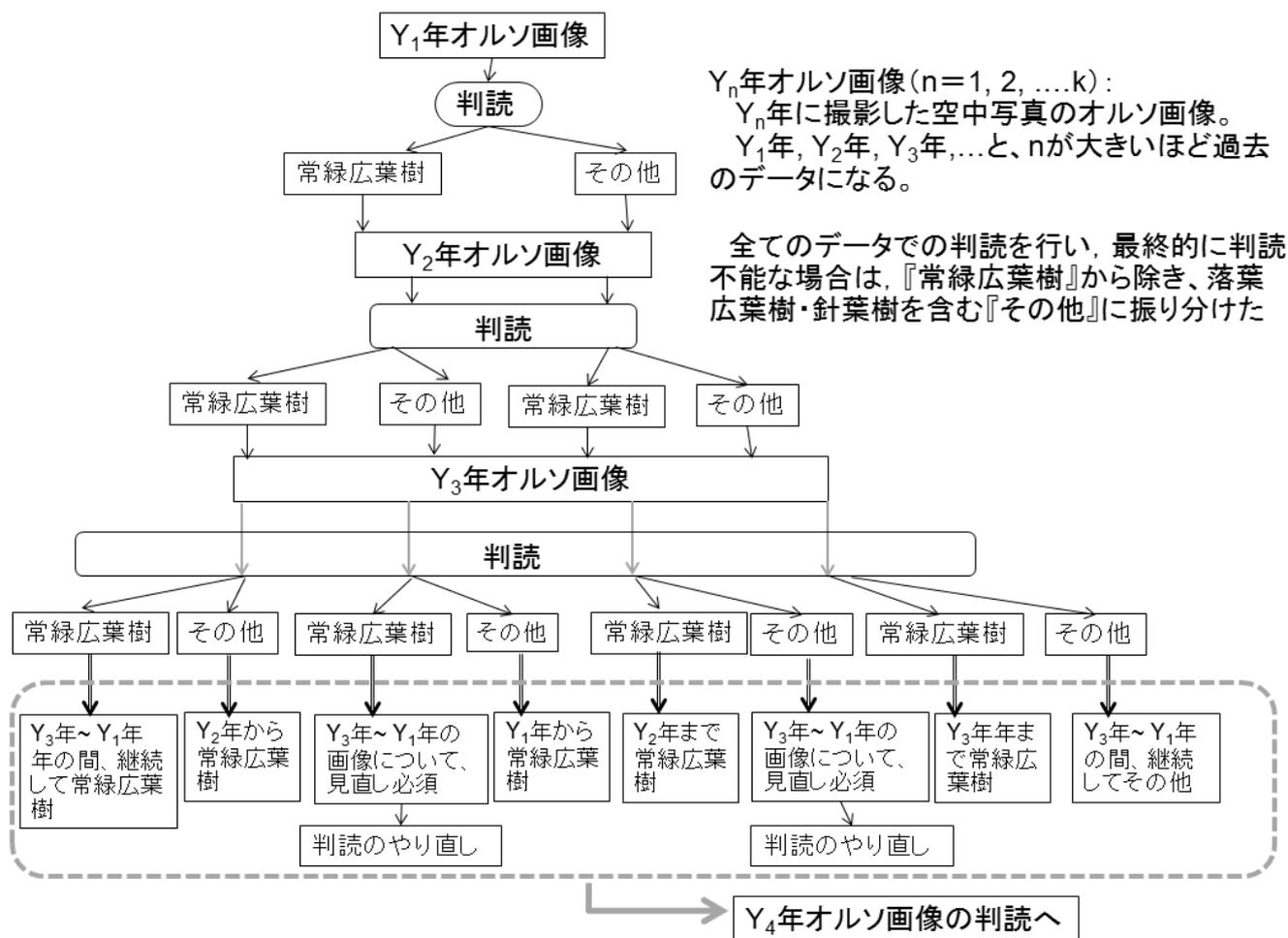


図 2-3 複数年度のオルソ画像を用いた常緑広葉樹の判読プロセス

の年代の画像上にあるか無いかの情報を 2005 年の各樹冠ポリゴンに記した。また、2005 年の樹冠分布図上では常緑広葉樹が判読されていなかった箇所では過去の空中写真判読から常緑広葉樹と判読したものについては、まず 2000 年代のオルソ画像を確認し、誤判読、見落としでないことを確認した上で 2005 年の樹冠分布図上にポリゴンを新たに作成し、各年代の空中写真上でその常緑広葉樹の樹冠が存在しているかどうかの情報を与えた。このようにして常緑広葉樹と判読された樹冠がいつから存在しているか、またいつまで存在していたかについての情報をまとめて得られるようにした。各年代での判読を行う際にこの情報も共に使用し、判読結果に矛盾があった場合は、それまでの画像をもう一度見直した上で判読し直した(図 2-3)。全ての画像で判読を行い、最終的に樹種の判読ができない場合、今回は常緑広葉樹からは除いた。

1961~1985 年の空中写真は、2000 年代と異なり近い年に比較できる写真がないこと、1961 年は白黒写真であること、などから、オルソ画像のみで常緑広葉樹を判読することは困難であった。そこで立体視を行い、特に樹冠の形状について注目し、判読の補助とした。

2. 3. 3 樹冠数の集計法

面積に関連しない指標として、今回は樹冠数を選んだ。

樹冠数は言葉のとおり、樹冠の数である。常緑針葉樹の場合、その樹形から樹冠の区切りが明瞭であり、樹冠数を数えることは容易であるし、作業者によるばらつきも少ないことが予想できる。しかし常緑広葉樹の場合、孤立した樹冠については問題が無いが、隣接した樹冠については樹冠の数の定義は難しい。境目で分割すると考えても、その境目の判読が非常に困難である。このように定義してしまうと、同じ樹冠が並んでいる場所でも、区切り方を変えるだけで樹冠数は変化することになってしまう。特に今回、検出したいのは樹冠の絶対数ではなくその差である。そこで何らかの形で連続した樹冠を区切る基準が必要となる。2000 年代の 3 時期の画像については、既に述べたように『3 画像のうち一つでも区切る場所があるならばそこにポリゴンの境界線を引く』という方法で区切る場所を全て共通になるように調整し、結果として作成された樹冠ポリゴン数を樹冠数とした。しかしこの方法では対象とするオルソ画像が増える度に境界線を引きなす必要があり、その作業量は増加する。そこで、1961、1975、1986 年の 3 時期については、樹冠ポリゴンの調整については行わず、2005 年の樹冠分布図の各ポリゴンごとに収集した各年代での樹冠の在・不在の情報から、あるオルソ画像上で在と判定された樹冠の数を求め、それを樹冠数とした。

2. 3. 4 樹冠総面積の誤差の定義

2. 3. 2 で作成された樹冠分布図のポリゴンの総面積を樹冠総面積と定義する。この面積誤差について、次のように定義した。

1) 同一の対象(森林)を対象として n 枚の空中写真を撮影し、それらをオルソ化して判

読を行い、樹冠総面積を算出したものとする。従ってこの時、 n 枚の樹冠分布図に於ける樹冠数は全て等しくなる。

この時の樹冠総面積をそれぞれ $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ とする。

2) 樹冠総面積の真値 A を

$$A = (\sum_{k=1}^n A_k) / n, \quad k=1 \text{ to } n$$

で近似する。また

$$D = \text{Max}(|A_k - A|)$$

を、この場合の面積誤差、と定義した。

この誤差は撮影年度ではなく、撮影方向、オルソ化の方法、等に依存すると考えられる。従って、過去の空中写真についても、この誤差の程度はあまり大きく変化はしないと考えた。

3) これに対し、過去の樹冠総面積を樹冠分布図から算出し、 A との差を求める。これを経年変化と定義し、

経年変化 > 面積誤差

である場合、樹冠の経年変化が検出されている、と考えた。

そこで、この定義から面積誤差と経年変化を求め、対象地で樹冠総面積による変化の検出が可能であるかどうかを検討した。

今回、2003～2008 年の 3 画像の樹冠数は同じである。また、撮影期間も 3 枚で 5 年と比較的短期間である。従って、3 時期の樹冠総面積の経年変化については無視することが可能であると仮定した。その結果、3 時期の画像上での面積の差は、誤差によるもの、と仮定することができる。

従って、2000 年代の 3 時期の画像から抽出した面積の平均値を A (真値)、 A と 3 時期との面積差の最大値を面積誤差、と定義した。また、1961～1986 年の画像から抽出した面積との差をそれぞれの時期に対する経年変化と定義した。

以上の定義を用いて、面積の真値、面積誤差、経年変化を算出した。まず、判読プロット全体の樹冠総面積を用いて面積誤差と経年変化を算出した。次に、個々の樹冠についての経年変化が検出可能かどうかを検討するために、写真判読プロットの常緑広葉樹の樹冠のうち 1961～2008 年の 6 画像全てで共通して確認可能な 211 個を選び、個々の樹冠についての面積誤差と経年変化についての検討を行った。また、誤差の要因を調べるために、判読プロット全体と同様の計算を 50m 標高階ごとに行い、面積誤差と経年変化を算出した。以上から、経年変化を検出する際の条件について検討を行った。

2. 3. 5 常緑広葉樹の分布変動の検出の確認

以上から求められた樹冠数と樹冠面積について、判読プロット全体、また 50m 標高階ごとに集計し、樹冠数、樹冠総面積の年代ごとの変化を追い、分布の変動を検出しているかどうかについての確認を行った。

2. 4 結果

2. 4. 1 樹冠の判読基準

1961, 1975, 1986, 2003, 2005, 2008年のオルソ画像を用いて常緑広葉樹の樹冠を目視により判読した。常緑広葉樹, 針葉樹, 落葉広葉樹の判読基準, またそれぞれの画像で落葉広葉樹と常緑広葉樹との差が明瞭になるように色調補正を行った常緑広葉樹の樹冠の例を写真撮影の季節ごとにまとめたものが図 2-4 である。

今回, 使用したデータの全ての撮影季節が, 紅葉が終了したか落葉しているか, のどちらかとなった。しかしスギ, ヒノキ, モミなど老齢な常緑針葉樹が対象地に複数入っていた為, 2000年代については3時期の画像を使って判読を行うことで判読の精度を上げた。

1975年以降のカラー画像のうち, 最も判読が容易であった画像は, 落葉広葉樹に葉がなく, 常緑広葉樹とスギの色調に違いが出る冬の画像であった。しかし最も判読しやすい冬の画像でも常緑の広葉樹と針葉樹を判読する必要があり, 樹冠の形状, テクスチャのわかりにくい小さな樹冠については判読が難しかった。

1961年2月の画像については, 白黒写真であり, 立体視を行っても単独での判読は困難だった。基準としては, 針葉樹は濃い灰色, 落葉樹は白っぽい色, 常緑広葉樹は両者の中間ではあったが, 同じ灰色でも針葉樹の隣と落葉樹の隣では見え方が異なるため, 色調による判断が困難であった。また, 他のカラー写真の解像度は最も低い2008年データでも0.340mであるのに対し, 白黒写真のほうは0.436mと, より解像度が低かった。その結果樹冠の形状で判読するには輪郭が不明瞭であったこと, 落葉の時期ではあったが落葉した枝までは見えなかったこと, などが判読が困難であった原因として挙げられる。

1961~1986年の過去の画像については立体視を行って樹形を読み取り, 判読の補助とした。これにより, 特に針葉樹の樹冠については, 判読・分別がより容易になったが, 単独の画像では判読困難な樹冠が複数あった。そこで各樹冠の履歴情報を2005年の樹冠分布図に記した樹冠ポリゴン図を判読の補助として使用した。写真撮影の間隔は11~22年であるため, ある画像で常緑広葉樹と判断した樹冠が, 樹冠の位置, 大きさ, 周囲の林相に大きな変化が無いまま次の画像で落葉広葉樹に変化することはないと考えられる。従ってこの情報も過去の判読の補助として用い, 矛盾がある場合は再判読を行った。その結果, 判読の精度は向上した。

2. 4. 2 樹冠判読の毎木調査による検証

検証プロットについて, 2005年の判読結果を2007年の毎木調査による常緑広葉樹の個体データと比較したところ(図 2-5), 以下のことが明らかになった(表 2-2)。判読された常緑広葉樹の樹冠は全てアカガシであった。上層の常緑広葉樹のみが判読可能であり, 17個体のうち14個体(82%)が判読できた。

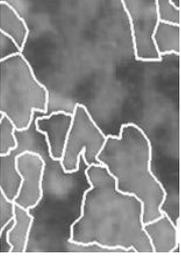
	常緑広葉樹の特徴	針葉樹の特徴	落葉樹の特徴	常緑広葉樹の判読例(白枠内)	
カラー	共通	樹冠の形状は、上部が平らで不定形に広がる。テクスチャは針葉樹と比べると荒い。	広葉樹と比べて全体の色は濃い。樹冠の形状は頂部が丸みを帯びており、個々の樹冠の輪郭を判別しやすい。	落葉時の枝の色は白に近い発色を示す。全体に常緑広葉樹よりも色が明るいただし形状。テクスチャは常緑広葉樹によく似ている。	
	春(2008)	そのままでは判読が困難だったため、RGBそれぞれに強調をかけて色調の補正。色は落葉樹よりも暗く針葉樹よりも明るい。	常緑広葉樹よりもかなり色が濃い。樹冠の形状から比較的判読はしやすい。	常緑広葉樹よりも明るい色合い。樹冠、テクスチャともに常緑広葉樹によく似ている。	
	秋(1986)	針葉樹に比べて明るい緑で平面的に広がる。	濃緑色で個々の凹凸がはっきりと判読される。	殆どが赤～赤褐色。ただし一部紅葉前の樹冠が残っており、色調、テクスチャ共に常緑広葉樹によく似ている。	
	冬(1975、2003、2005)	針葉樹に比べて白っぽい緑である。解像度が高い画像では葉による濃緑の砂状のテクスチャが見える。	スギは褐緑色、その他の針葉樹は濃緑色で、全体に常緑広葉樹の色調をより濃くした色に見える。	落葉後の枝が白に近いため、色調としては白茶色である。解像度が高い場合は枝まで見える場合もある。	
白黒	針葉樹よりも明るく、落葉樹よりも濃い灰色である。樹冠の形状は不定形、上部が平たい。	最も濃い灰色で表現される。樹冠による影が比較的ばっきりしており、輪郭が比較的把握しやすい。	白に近い色調である。ただし解像度が低いため、枝の判読はできない。		

図 2-4 季節ごとの常緑広葉樹、針葉樹、落葉広葉樹の判読基準

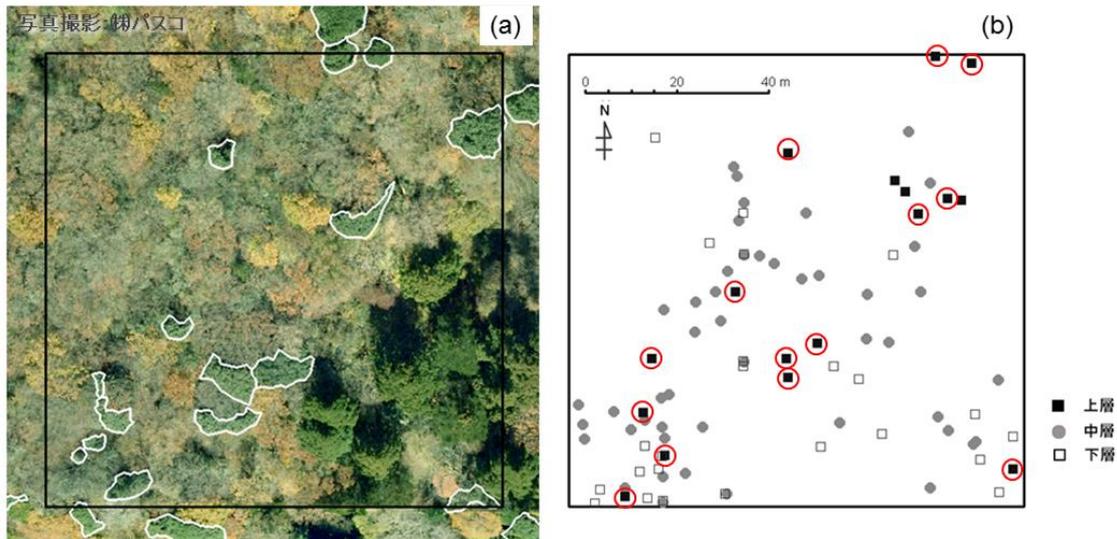


図 2-5 検証プロットの常緑広葉樹の樹冠判読と毎木調査データの比較

(a) 2005 年空中写真オルソ画像で判読された樹冠

(b) 毎木調査による階層別の常緑広葉樹の個体位置。赤丸は樹冠が判読された個体

2. 4. 3 樹冠数の集計結果

2000 年代の 3 時期について、判読プロットの樹冠分布図を作成した(図 2-6)。まず 2000 年代の 3 時期については、樹冠ポリゴンを作成、その境目が全て共通になるように調整した。また、過去の樹冠の存在状況については樹冠ポリゴンの境目を調整することはしなかったが、それぞれの樹冠についての在・不在の情報を 2005 年の樹冠ポリゴンに収集した。結果として収集された樹冠数は、2003 年、2005 年、2008 年で同数の 618 個となった。また、1961 年は 518 個、1975 年は 568 個、1986 年が 621 個判読されており、過去から現在にかけて樹冠数が一律に増加していることがわかった。

2. 4. 4 樹冠総面積の誤差の検討

樹冠総面積の真値、面積誤差、経年変化に対して定義をし、その結果の面積誤差と経年変化との関係を調べた。

まず、判読プロット全体の樹冠総面積について、2. 3. 4 で定義した真値、面積誤差、経年変化を算出した(表 2-3)。結果、誤差の真値に対する割合は 4.2%、判読プロット面積に対しては 0.92%となった。一方 1961~1986 年の総面積と 2000 年代の総面積の真値との差はこの誤差よりも十分に大きい為、この範囲では経年変化 > 面積誤差が成り立っており、結果として経年変化が検出されていると判断した。

次に、個々の樹冠について経年変化を求めることが可能かどうかを検討した。6 画像全てで確認された 211 個の樹冠について、それぞれ 2000 年代の真値 (3 時期の平均値) を算出し、その平均値を求めた。また 211 個それぞれの真値と 3 時期の面積との差を算出し、



図 2-6 写真判読プロットの常緑広葉樹樹冠分布図(白線) オルソ画像は 2005 年を使用

それぞれの平均と標準偏差を求めた。また、211 個それぞれの真値と 1961 年、1976 年、1986 年それぞれの面積の差を算出し、平均と標準偏差を求めた(表 2-4)。結果、3 時期の差の平均の最大値は 4.4 m²、標準偏差は 12.5~15.9 m²となった。一方 2000 年代の真値と過去の樹冠面積の差の平均値は 16.8~38.3 m²となる。つまり個々の樹冠面積の誤差にはばらつきがあり、その値は過去の樹冠面積との差に匹敵する場合も多い。しかし平均値を取った場合には、その差は充分小さく、経年変化を検出することが可能であることがわかった。

また、誤差の傾向を見る為に、判読プロット全体と同様に 50m 標高階ごとの 2000 年代の真値、面積誤差、経年変化を算出した(表 2-5)。また、誤差の 2000 年代の真値に占める割合を求め、この値と標高階の中央値とのグラフを作成した(図 2-7)。結果、600m 標高階の誤差を除くと、標高が上がるにつれて誤差の割合が減少していることがわかった。ただし、どの標高階に置いても

経年変化 > 面積誤差

表 2-3 判読プロット全体の常緑樹樹冠総面積, 面積誤差, 3 時期平均に対する誤差割合

年	樹冠総面積 (m ²)	A-各年樹冠総面積 (D)	
		(m ²)	D/A (%)
2000年代の平均値 (A)	44605		
2008	43959	646	1.45
2005	46480	-1876	4.20
2003	43376	1229	2.76
1986	35201	9403	21.08
1975	30430	14175	31.78
1961	26663	17942	40.22

表 2-4 全期間に共通して出現する 211 個の樹冠サンプルの平均面積と 2000 年代 3 時期の平均値との差

年	平均樹冠面積 (m ²)	2000年代の3時期の樹冠面積との差 (m ²)	面積差の標本標準偏差
2000年代の平均値	105.4		
2008	105.8	-0.4	15.1
2005	109.4	-4.0	15.9
2003	100.9	4.4	12.5
1986	88.6	16.8	32.4
1975	80.9	24.4	31.9
1961	67.1	38.3	43.7

表 2-5 判読プロット内標高階ごとの, 各年代での常緑樹樹冠面積, 2000 年代平均値, 3 時期平均
に対する面積差の割合

年代\標高階	500～	550～	600～	650～	700～	750～	800～	総計
2008 (㎡)	4881	7306	14862	9412	5109	1622	766	43959
2005 (㎡)	5635	8254	15107	10264	4866	1563	790	46480
2003 (㎡)	4553	7303	15135	9254	4797	1536	798	43376
1986 (㎡)	3381	5425	12870	8345	3747	1017	416	35201
1975 (㎡)	3286	4547	10829	7219	3392	818	340	30430
1961 (㎡)	2893	4003	9176	6944	2619	782	245	26663
2000年代平均(A) (㎡)	5023	7621	15035	9643	4924	1574	785	44605
(A-2008年)/A(%)	2.82	4.13	1.15	2.40	3.75	3.07	2.40	1.45
(A-2005年)/A(%)	12.19	8.31	0.48	6.44	1.17	0.67	0.69	4.20
(A-2003年)/A(%)	9.36	4.17	0.67	4.04	2.57	2.40	1.71	2.76
(A-1986年)/A(%)	32.70	28.81	14.40	13.46	23.90	35.38	46.98	21.08
(A-1975年)/A(%)	34.58	40.34	27.98	25.14	31.12	48.02	56.73	31.78
(A-1961年)/A(%)	42.40	47.47	38.97	27.99	46.81	50.31	68.81	40.22

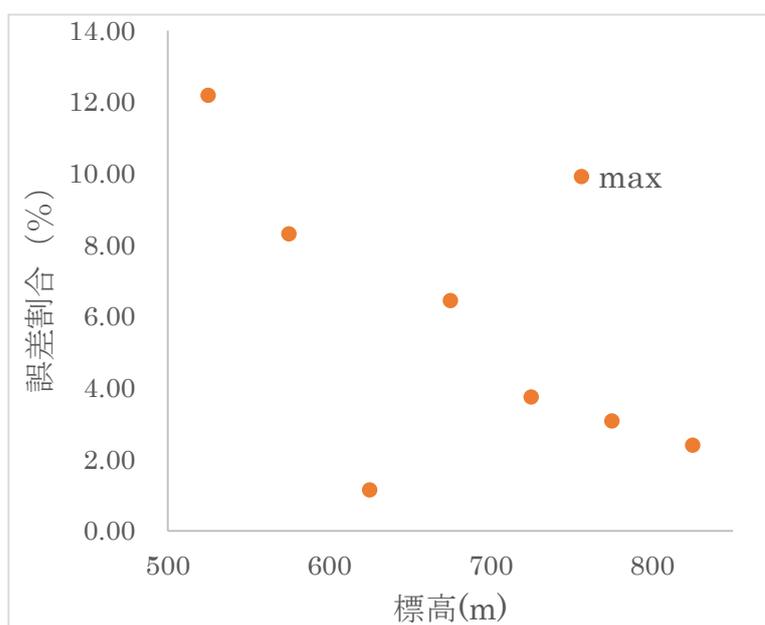


図 2-7 標高階の中央値と, 各標高階の樹冠面積和に占める誤差割合

が成立しているので、どの標高階に於いても経年変化は検出可能であると判断した。

2. 4. 5 樹冠数と樹冠総面積の経年変化

写真判読プロットの判読を行い、樹冠数と樹冠総面積を求め、判読プロット全体と 50m 標高階ごとの経年変化の様子を求めた (図 2-8)。全体の樹冠数は 1961 年～2008 年にかけてはほぼ直線的に増加した (図 2-8a)。一定速度の増加を仮定した場合、その変化速度は 0.18 本/ha/年 ($R^2=0.99$) であった。標高ごとの樹冠数の変化は、標高 550m～750m の間では、1961 年から 1975 年間の増加数が 0.18～0.26 本/ha/年となり、他の時期と比較して最も多かった。また、標高 750m 以上では 1975 年までの増加数が 0.08～0.14 本/ha/年であるのに対し、1975 年以降では 0.29～0.37 本/ha/年となり、75 年以降に高標高側で樹冠数が増加していることがわかった (図 2-9a)。

一方樹冠総面積についても同様に、経年変化を求めた (図 2-8b)。1961 年から 2008 年間の、判読プロットに対する面積割合は 13.08%から 22.79%まで増加しており、その変化速度は 0.21%/年 ($R^2=0.97$) となった。従って、1961～1975 年で 2.94%、1975～1986 年で 2.31%、1986～2003 年で 3.57%となり、それぞれの期間中の変化は今回の面積誤差の割合である 0.92%よりも大きかった。但し、2003～2008 年間の経年変化は 1.05%となり、誤差とほぼ同程度の大きさになることがわかった。また 1961 年の樹冠面積を 1 とすると、2000 年代 3 時期の樹冠面積の平均値は 1.67 となった。次に、標高ごとに年別の樹冠面積を見ると、2005 年まではどの標高階においても、年ごとに面積が増加した。特に標高 750m 以下の、元々常緑広葉樹の面積割合が高かった地域で、面積が大きく増加した (図 2-9b)。

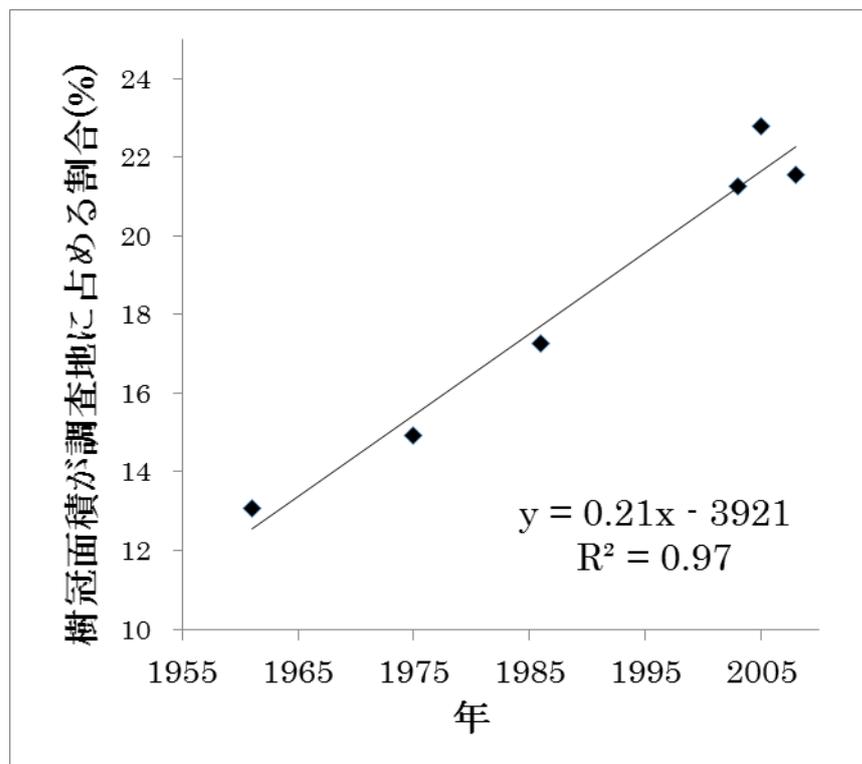
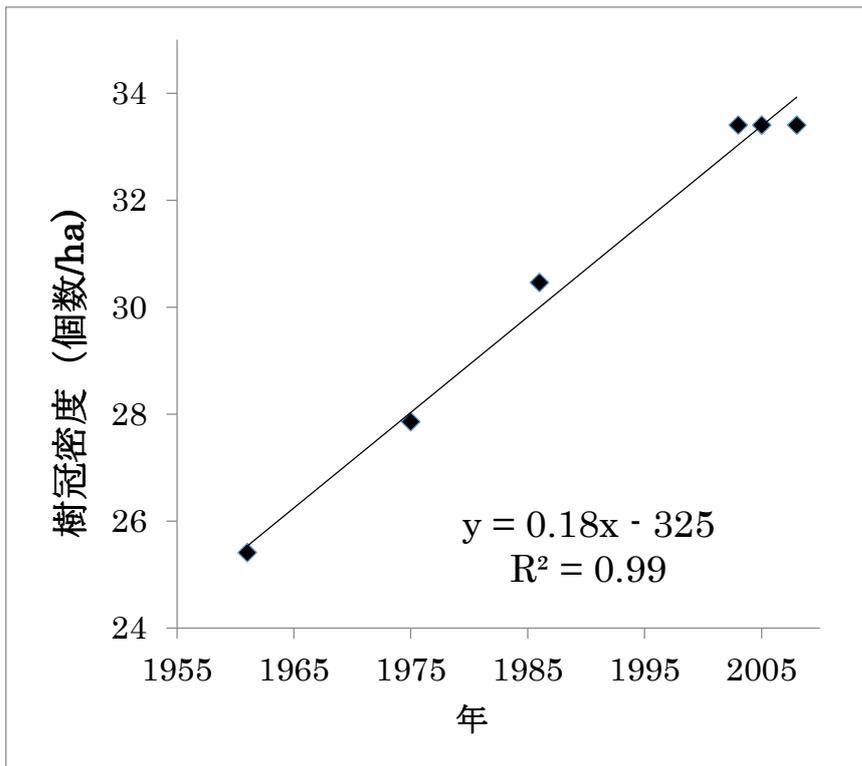


図 2-8 1961 年から 2008 年までの(a)樹冠密度と(b)樹冠総面積割合の変化

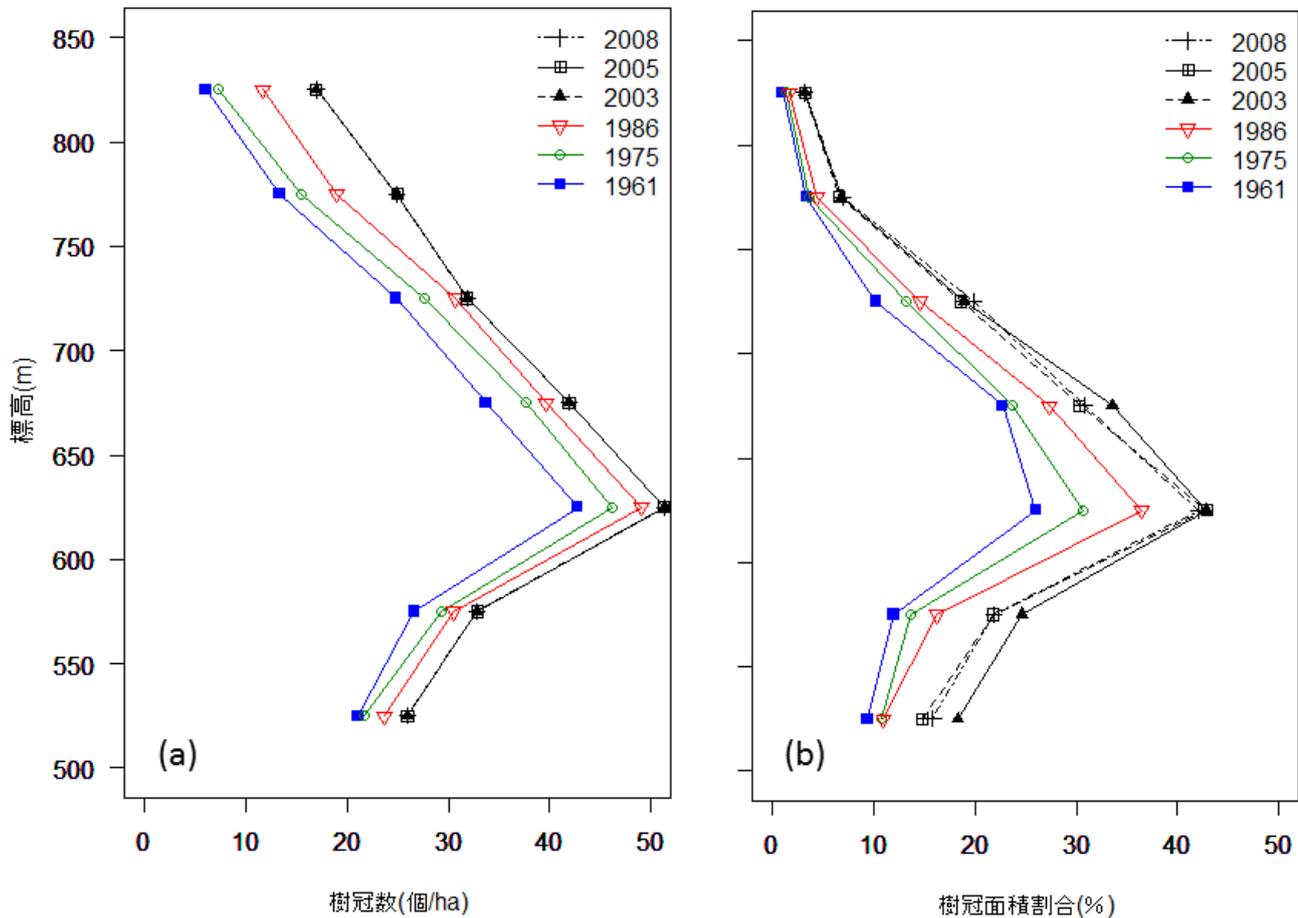


図 2-9 標高階別 ha あたりの(a) 樹冠密度と(b) 樹冠総面積割合の変化

2. 5 考察

2. 5. 1 樹冠の判読精度

検証プロット (1ha) の毎木調査データと 2005 年 11 月の空中写真の判読結果の比較から、中下層木はまったく判読されなかったが、上層木については 17 本のうち 14 本 (82%) が判読された (表 2-2)。判読されなかった 3 本の常緑広葉樹上層木について確認したところ、他の樹種と誤判読したのではなく、より上層にある落葉広葉樹の枝のため、樹冠の一部が遮られて見えなかったことがわかった。

過去の空中写真は 2005 年の画像より解像度が低い (表 2-1) ため、判読精度は低下する可能性があるが、過去の毎木データが得られていないので検証は困難である。しかし、今回のように樹冠数が経時的に増加する場合、最も情報が多く、また現状を現地で確認するこ

とも可能である 2000 年代の画像から判読を開始し、その結果を元に過去に遡って判読を行い、それぞれの樹冠がいつから出現したのかに注意しながら植生の変化を復元することで、結果としては過去の樹冠の判読精度をも高めることが可能であると考えられる。一方、経年的に減少する樹種の判読では、過去から現在に向かって判読を進めるほうが樹冠の見落としは減少するが、過去にあって現在無い樹冠については現在の地上調査からでは検証ができない。また、過去の画像については時期を選ぶことが出来ない。また、判読に適した画像であっても同時期に撮られた画像が一枚である場合見落としが起こる可能性があるが、複数の情報を今から得ることも不可能である。従って過去から現在にかけて減少する樹種の場合、判読精度は増加する樹種の判読精度よりも落ちる可能性が高いと考えられる。

また今回、白黒画像である 1961 年画像を使用した。時期的には判読に適していた画像を立体視も含めて判読したが、色による判読が困難であることに加えて、解像度が他のカラー画像よりも低かったため、単独では常緑広葉樹を判読することは非常に困難であった。従って白黒の空中写真については、他に補助となる情報が無い場合、判読は困難であると考えられる。

検証プロットの毎木調査によると、上層木 17 本、中層木 47 本、下層木 23 本となり、上層木より中下層木に多くの個体があった。これは、空中写真判読から導かれた常緑広葉樹の経年的な増加傾向と調和的な結果である。すなわち、落葉広葉樹上層木の下に常緑広葉樹の中下層木が生育しており、落葉広葉樹上層木が枯死すれば、常緑広葉樹が上層木に成長することによって上層の常緑広葉樹の増加が起こってきたと考えられる。

2. 5. 2 樹冠数の集計と特性

面積とは関連の無い指標として樹冠数を選び、筑波山の 6 時期の画像に対して適用し、利点と問題点について検討を行った。

利点は既に述べたように、面積誤差を考慮する必要が無い点である。また、この指標は樹冠が孤立しているか、樹冠の分割が容易である場合には有効であった。

しかし問題点は、樹冠が連続している箇所の処理である。樹冠の形状から樹冠数と個体数がほぼ対応しており、数を判読するのが容易である針葉樹とは異なり、常緑広葉樹の樹冠は隣接していると境目の判読が非常に困難である。そのため樹冠が連続している場所では判読者によって樹冠数の絶対値は異なる可能性がある。従って、特に常緑広葉樹の連続している地域では、樹冠数の絶対値には大きな意味が無く、あくまでその差に意味があることになる。ただしこの場合、樹冠を区切る線の引き方で樹冠数が増減するような誤差を防止する為には、対象とする全ての画像で樹冠の対応を行う必要がある。その結果、樹冠の区切り方を調整する方法もあるが、これはかなりの作業量となる。従って、最も樹冠数が多い時点の樹冠分布図（常緑広葉樹の場合、これは現在に一番近い時期の画像になる）の樹冠ポリゴンに対し、各年代の樹冠の在不在情報を判読、収集してゆくほうが作業効率が高かった。またこの作業から作成した樹冠ごとの履歴については、特に過去の判読の補

助として使用することができ、それによって判読の精度を向上することが可能だった。

以上の作業の結果判読された樹冠数については、写真の撮影年との相関係数は 0.99 と非常に高く、過去から現在にかけて樹冠が直線的に増加していることが読み取れることがわかった。また 750m 標高階以上で 1975 年以降に樹冠の増加する割合が大きくなる傾向についても読み取ることが出来た。

2. 5. 3 樹冠総面積の特性

樹冠総面積の真値、面積誤差、経年変化について定義を行った。結果として、個々の樹冠の面積誤差は大きいですが、ある程度集合した場合は経年変化 > 面積誤差が成り立つことがわかった。また、誤差の要因を調べる為に標高階毎に面積誤差と、それが樹冠総面積の真値に占める割合を算出した。この割合と標高階の中央値の間には、明らかに、標高が上昇するにつれて誤差が減少する関係が見られた。

この原因としては、標高そのものではなく、空中写真の持つ歪みの偏りが考えられる。

2000 年の 3 時期のオルソ画像のうち、2005 年データは元々誤差が非常に小さく、最も高解像度の画像である。一方、2003 年と 2008 年のオルソ画像は、筑波山山頂を中心として撮影された一枚画像を単画像オルソ法でオルソ化したものである。従ってもともと標高の低い部分ほど樹冠が倒れこんだ状態で撮影されており、画像に歪みがあることが予測される。従って、特に樹高の影響から面積誤差を生じやすい単画像オルソ法の処理の結果、標高の低い部分で面積の誤差が大きいことが考えられる。

ただし、最も誤差の大きな範囲でも、面積誤差よりも経年変化のほうが大きいため、経年変化は検出可能であると判断し、空中写真の撮影年度と樹冠総面積の関係を求めた。

結果、樹冠総面積は時系列に伴って直線的に増加しており、単調増加を仮定すると対象地に対する常緑広葉樹の面積割合の増加率は 0.21%/年となった (図 2-8b)。1961 年から 2003 年までの写真撮影間隔は 11~17 年であるので、この間の面積変化の割合は 2.3~3.6% となり、誤差の目安である 0.92% よりも大きい。さらに、標高ごとの樹冠総面積の経年変化についても、2000 年代の 3 画像の間に全体の時と同じ傾向の変動があるものの、1961 年から 2000 年代に向かうに従って一方向的な増加が認められた (図 2-9b)。したがって、樹冠総面積は、1961 年~2008 年にかけて、時間と共に増加していると考えられる。また、今回 2003~2008 年の樹冠の増加を面積誤差に等しいとしたが、実際、推定された 5 年間の増加率とここで定義した面積誤差の割合はほぼ同程度となった。従って、今回の面積誤差の定義は妥当であったのではないかと考えられる。

なお、同様に樹冠数、樹冠総面積を用いてアカマツ・コナラ林における常緑広葉樹の増加を示した奥田ら (2007) によると、対象面積 113.7ha 内のシイの樹冠面積が、1961 年から 2004 年の 43 年間に 6.9ha から 32.1ha に拡大したとある。つまり 1961 年を 1 とすると樹冠面積は 4.65 倍に増加している。一方、変化の遅い冷温帯・暖温帯の境界域の老齢林を対象とする本研究の場合、樹冠面積は 1961 年を 1 とすると全体では 1.67、サンプル樹冠

では 1.57 と、拡大の幅はかなり小さかったが、空中写真により増加を検出することが可能であることがわかった。

2. 6 まとめ

暖温帯と冷温帯の境界域の老齢な自然林において、過去 47 年間の常緑広葉樹の樹冠の分布変化を複数の空中写真から追った。この時樹冠数と樹冠総面積という二つの指標を使用した。どちらの指標からも経年変化を検出することが可能であった。

ただし、それぞれの指標には長所と短所、また変動の抽出を得意とする場所の傾向などの違いがある。樹冠数という指標を用いて分布の変化を求める場合、全ての画像に対して同一の樹冠を対応させた上で、数の変化を抽出する必要がある。また、今回のように過去から現在にかけての樹冠の対応が可能である場合は、樹冠の履歴を収集することが可能になる。このデータを補助データとして用いることで、単独での判読が難しいデータ（今回は 1961 年の白黒写真）についても判読が可能になることがわかった。

また、オルソ画像の面積誤差について定義を行い、この面積誤差よりも経年変化が大きい場合は変化の検出が可能であると仮定した。その上で経年変化と面積誤差を比較したところ、47 年間の経年変化は十分検出されていると推定された。今回は 5 年の差のあるオルソ画像の面積の差を誤差として以上の推定を行ったが、結果としてこの面積誤差の定義はある程度妥当であったと考えられる。

3 章 函南原生林の林冠の変化検出

3. 1 はじめに

2 章では、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林の境界域での常緑広葉樹樹冠の分布変化の検出を、落葉期に撮影された複数の空中写真を用いて行った。結果、樹冠数と樹冠総面積の二つの指標の両方で、常緑広葉樹の樹冠の分布の変化を捉えることが可能であった。

しかし空中写真の撮影時期が落葉広葉樹の紅葉が完了していない時期である場合、その画像単独では常緑広葉樹の判読は不可能である。過去の撮影時期については時期を選ぶことができないため、常緑広葉樹の樹冠の変化を検出する場合、何らかの補助となる情報が必要である。

一方、落葉広葉樹が落葉していない時期の写真であれば、常緑広葉樹だけではなく落葉広葉樹の樹冠についてもポリゴンを作成することが可能である。これまで常緑広葉樹の増加については検出を行ってきたが、落葉広葉樹についての変化の検出は出来ていない。そこで落葉広葉樹の樹冠面積と林冠のギャップについても判読を行い、その変化を検出する方法について考えた。林冠ギャップも含めての変化検出なので、指標として樹冠総面積を使用した。また、2 章では撮影時期の近接したオルソ画像の撮影対象を、同一の森林と仮定したが、実際には 2003 年～2008 年の間に、樹冠面積も変化していることは予測できる。また、単画像オルソで処理した場合、空中写真の中央からの距離や撮影方向による歪みが誤差を大きくする要因である可能性が示された。そこで今回、誤差についても検討を行った。

3. 2 対象地と使用データ

対象地は静岡県田方郡函南町の箱根外輪山の山腹斜面に位置する函南原生林である。標高 550～840m の広範囲に渡って自然林が残存している。箱根地域では、この標高は暖温帯常緑広葉樹林と冷温帯落葉広葉樹林との移行部に当たり、下部でのアカガシ優占林から上部ではブナ優占林へと変化していく。標高間で常緑広葉樹と落葉広葉樹のそれぞれの樹冠面積の経年変化を比較するため、標高約 600m, 700m, 800m にそれぞれ 150×150m の写真判読プロットを設定した (図 3-1)。

対象地域の空中写真は 1947/10/02, 1976/11/03, 1979/06/03, 1983/11/08, 1994/11/09, 1999/12/07, 2005/11/08, 2012/12/05 の 8 時期画像が存在する。このうち 1947 年と 1979 年は白黒写真である。落葉広葉樹が落葉する前の空中写真では、常緑広葉樹と落葉広葉樹の樹冠の形状に大きな差異がないため、カラー空中写真を使用する必要があり、白黒写真については今回対象から省いた。残りの画像のうち、1970～1980 年代の画像は全て秋のデータであった。そこで、最も古い画像である 1976/11/03 を選んだ。また、この画像の樹冠との対応が容易であるのは同じ時期の画像であると判断し、同じ時期に撮影された空中

表 3-1 判読に使用した空中写真の情報とオルソ画像作成方法

撮影日時	カラー/白黒	撮影元	焦点距離 (mm)	撮影高度 (m)	画素サイズ (μ m)	オルソ化使用ソフト	単画像/ステレオ	標高データ	解像度(m)	誤差(m)
1976/11/3	color	国土地理院	152.69	1900	21.2	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10m メッシュDEM	0.158	>1.75
2005/11/8	color	国土地理院	153.41	3100	21.2	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10m メッシュDEM	0.3	>1.75
2012/12/3	color	国土地理院	152.74	1534	21.2	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10m メッシュDEM	0.1	>1.75

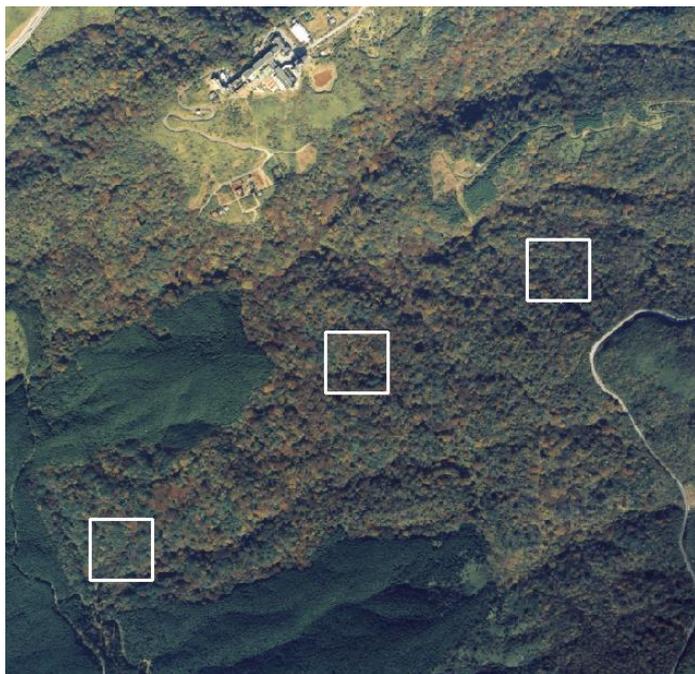
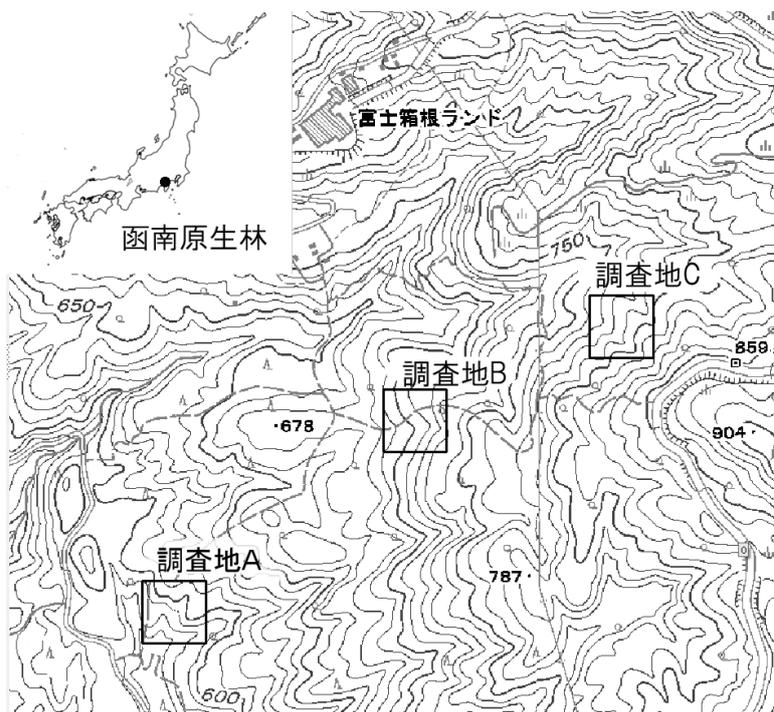


図 3-1 函南原生林内の3箇所の調査地
 調査地 A: 標高 600m
 調査地 B: 標高 700m
 調査地 C: 標高 800m
 下: 2005 年オルソ画像

写真のうち最も新しい 2005/11/08 の画像を選んだ。ただし秋の画像だけでは常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別が難しかったため、2012 年の冬の画像を 2005 年の判読補助を行う為に選んだ。

これらの空中写真をオルソ化した。過去の樹冠を判読する為に現在の樹冠と過去の樹冠を同定する必要があったので、樹高の影響による誤差は生じるが樹冠の形状が判読しやすい

い単画像オルソ画像を、国土地理院発行の10m解像度のDEMと25000分の1地図を使用して作成した。単画像オルソ作成に使用したソフトウェアはERDAS Imagine 13である。検出に使用したデータのその他の情報については表3-1のとおりである。

3. 3 方法

3. 3. 1 現在の空中写真による樹冠判読と検証

2005年の空中写真から作成したオルソ画像を基に、2012年画像を参考として現在の樹冠の判読を行った。まず2005年、2012年のオルソ画像のコントラストを調整し、判読しやすい色調にした。その後、判読プロットごとに、2005年オルソ画像上の判読可能な全ての樹冠についてポリゴンを作成した。この時連続する同一コースの空中写真を用いて立体視を行い、個々の樹冠の境目を判読した。ただし落葉広葉樹のみ、常緑広葉樹のみの樹冠がまとまっている場所については、複数の樹冠をまとめてポリゴンにした。判読プロットを設定した線上に樹冠があった場合、その樹冠全ての面積を解析対象とした(図3-2a)。また樹冠ポリゴンの間の隙間については林冠ギャップに分類し、それぞれをポリゴン化した。

作成した各ポリゴンに対しては、常緑および落葉の判定を行ったが、紅葉が完了していない時期の2005年の写真だけでは判定が困難であった。そこでまず、2005年と2012年の画像を比較し、同じ位置にある類似した形状の樹冠を同一個体と判定した(図3-2a,b)。次に2012年12月の画像上で緑色の樹冠を常緑広葉樹と推定し、これと同一個体と判定された2005年の樹冠もまた常緑広葉樹であると判定した。一方、2012年に常緑広葉樹と推定された樹冠と対応しなかった樹冠は落葉広葉樹と判定した。この場合、2005年の色調については、明らかに紅葉が起こっている場合は落葉広葉樹の可能性が高いと判定し、その結果を2012年の画像の色調と比較、確認した上で落葉広葉樹と判断した(図3-2c)。しかし2005年に緑色であるという情報については、常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別には基本的に反映していない。今回、判読プロット内で2005年に存在しているが2012年に確認ができなかった樹冠は存在しなかったため、2012年の画像から2005年の画像の常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読を全て行うことが可能であった。以上の方法で2005年の3か所の判読プロットで、常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読を行なった。

2012年の写真を参照した上で行った2005年現在の判読結果を検証するために、地上調査を行った。筑波山のように高精度で個々の樹木の位置を特定できる地上調査データは存在しなかった。そこで同じ函南原生林内で、比較的容易に樹冠を確認できる場所である学習の道を選び、その周囲の樹冠を判読プロットと同じ基準でポリゴンを作成し、それぞれ常緑広葉樹、落葉広葉樹の判読を行った。その上で1976年、2005年の空中写真を撮影したのとほぼ同じ時期である2013年11月1日に現地調査を行い、空中写真と対応が可能だった樹冠について、現地で樹種の確認を行い、空中写真の判読精度を検証した。

3. 3. 2 過去の空中写真による樹冠ポリゴン図の作成



図 3-2 (a)2005 年画像上での樹冠分割. (b)対応する 2012 年画像. (c) a と b から行った 2005 年画像の判読結果. 白:落葉広葉, 緑:常緑広葉樹, 黒:林冠ギャップ

1976 年画像での樹冠を常緑広葉樹, 落葉広葉樹, 林冠ギャップの 3 タイプに分類した。ただし 1976 年画像は紅葉の途中の時期に撮影されており, 単独では常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別ができない。そこで 2005 年の判読結果を参考にした。

まず, 2005 年と同様に 1976 年の樹冠を区分けしてポリゴン化した。この時 2005 年の

ポリゴンと比較して、相対的な位置、色調、テクスチャが類似する樹冠を 2005 年の樹冠と同一個体と判定した。2005 年と同一と判定された樹冠については、色調の確認を行った。1976 年の画像では緑色ではない樹冠は落葉広葉樹と判定できるので、まずその判定を行い、その上で 2005 年の判定結果と矛盾がないかどうかを確認した。緑色の樹冠については常緑広葉樹の可能性があると判断し、その上で 30 年の間、位置が変わらず、かつ極端な面積減少が起こっていない場合、2005 年と 1976 年の樹冠は同じ樹冠であると考え、2005 年の判定結果をそのまま当てはめた。

しかし撮影時期は約 30 年の間隔が空いているため、全ての樹冠を 2005 年の樹冠に対応させることはできなかった。そこで、対応できなかった樹冠については、はじめに 1976 年の写真の色調に基づいて、落葉広葉樹か常緑広葉樹かを判定した。常緑広葉樹と判定した場合、その色調と、2005 年との対応から常緑広葉樹と判断された樹冠の 1976 年の画像上での色調とを比較し、色調が近似している場合は常緑広葉樹、その他は落葉広葉樹と結論づけた。この時、2005 年と同様に対象区線上の樹冠についてはその全ての面積を解析対象に含めた。1976 年と 2005 年の 2 時期の画像上では、対応できない樹冠も複数存在したが、対応できない樹冠のほとんどが 1976 年にはないが 2005 年にあったもので、その逆は少なかった。また、2005 年の判定と比較する際に 2012 年の空中写真の立体視を行い、1976 年の樹冠と比較し、2005 年の画像だけでは同じ樹冠か判断できない場合の判断の参考とした。

3. 3. 3 面積誤差の検討と経年変化の検出

既に述べたように、既存の DEM データを使用して行う単画像オルソ法で作成されたオルソ画像による面積は正確とは言えない。特に林冠ギャップの面積は空中写真の撮影方向でかなり異なる可能性がある。そこで今回の対象地についても面積誤差の推定を行った。

まず、同一判読プロットを連続して撮影した写真のうち、出来るだけ斜めから撮影されたもの(1)と真上から撮影されたもの(2)の両方を単画像オルソ化し、それぞれの画像における判読プロット内の樹冠を既に述べた方法で常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの 3 タイプに分類、それぞれの面積を算出した。その上で(1)と(2)の間の面積差をそれぞれのタイプごとに算出し、この面積差を単画像オルソの処理による面積誤差であると定義した。また、(1)と(2)の面積の平均値を 3 タイプごとに求め、1976 年と 2005 年の間の面積差をそれぞれ算出し、これを経年変化であると考えた。そして、経年変化 > 面積誤差である時に、経年変化を検出したと考えた。また、この平均値を用いて標高別の判読プロット内で常緑広葉樹、落葉広葉樹、および林冠ギャップの面積割合を算出し、その値がどのように変化したか、その傾向を示した。ポリゴン作成・面積の計算に使用したソフトウェアは TNTmips ver. 2009 である。

3. 4 結果

3. 4. 1 現在の樹冠の判読と精度

判読プロットと同一林内の学習の道周辺における、2012年の画像を参照した上で行った2005年の判読結果と現地の調査結果とを比較し、判読の精度を求めた(表 3-2)。判読を行

表 3-2 空中写真判読結果と現地調査の比較

		2005年と2012年の組み合わせによる判読	
		常緑樹冠	落葉樹冠
現地調査	常緑樹冠	27	0
	落葉樹冠	3	33

った樹冠のうち、現地で確認ができたのは 63 樹冠だった。結果、常緑広葉樹については 90%、落葉広葉樹については 100%の判読精度となった。このうち誤判読を行っていた 3 つの樹冠について原因を調べたところ、2012年の画像では上層の落葉広葉樹の葉が落ちており、より下層の常緑広葉樹が透けて見えていたことがわかった。

3. 4. 2 樹冠総面積の誤差と経年変化

落葉広葉樹、常緑広葉樹、林冠ギャップのそれぞれの面積に対して 2 方向からのオルソ画像面積、その差、平均値を算出した(表 3-3)。連続して撮影された空中写真からのオルソ画像による面積差の絶対値の最大値は落葉広葉樹で 662m²、常緑広葉樹で 242m²、林冠ギャップ 774m²となった。一方経年変化の最小値は、落葉広葉樹では 42 m²、常緑広葉樹では 634 m²、林冠ギャップでは 2277 m²となった。経年変化<面積誤差、となったのは標高 600m プロットの落葉広葉樹面積であり、それ以外の場所では全てのプロットの全てのタイプで、経年変化>面積誤差であることがわかった。

次に 2 方向から撮影されたオルソ画像による各タイプの樹冠面積平均を用いて、判読プロット内での常緑広葉樹、落葉広葉樹、および林冠ギャップの面積割合を算出し、標高ごとにその変化を比較した(図 3-3)。どの判読プロットに於いても減少したのは林冠ギャップ面積のみであった。標高 600m プロットでは落葉広葉樹の割合は 54%から 53%とほとんど変化しなかったが、常緑広葉樹の割合は 31%から 42%に増加していた。標高 700m プロットと 800m プロットでは、常緑広葉樹と落葉広葉樹は共に増加している。ただし、1976 年では常緑広葉樹と落葉広葉樹の樹冠面積の比が 700m と 800m で異なっているのに対し、2005 年ではその差は殆ど無いことがわかった。

表 3-3 各標高・年度・撮影方向 1(斜め), 2(できるだけ真上)の落葉広葉樹, 常緑広葉樹, 林冠ギャップの面積, 差, 平均, 経年変化 (単位:m²)

標高	年度	撮影方向	落葉広葉樹	常緑広葉樹	林冠ギャップ	
800m	1976	1	15466	649	7489	
	1976	2	16040	673	6941	
	1976	差	574	24	548	
	1976	平均	15753	661	7215	
	2005	1	19606	1818	3215	
	2005	2	20123	1915	2773	
	2005	差	517	97	441	
	2005	平均	19865	1867	2994	
	経年変化			4111	1206	4221
	700m	1976	1	17014	998	6315
		1976	2	17618	1156	5546
		1976	差	604	158	769
1976		平均	17316	1077	5931	
2005		1	19557	1742	3614	
2005		2	19749	1680	3409	
2005		差	192	62	206	
2005		平均	19653	1711	3511	
経年変化			2337	634	2419	
600m		1976	1	13010	7569	3836
		1976	2	13038	7570	3062
		1976	差	28	1	774
	1976	平均	13024	7570	3449	
	2005	1	12651	10290	1179	
	2005	2	13313	10048	1166	
	2005	差	662	242	13	
	2005	平均	12982	10169	1172	
	経年変化			42	2599	2277

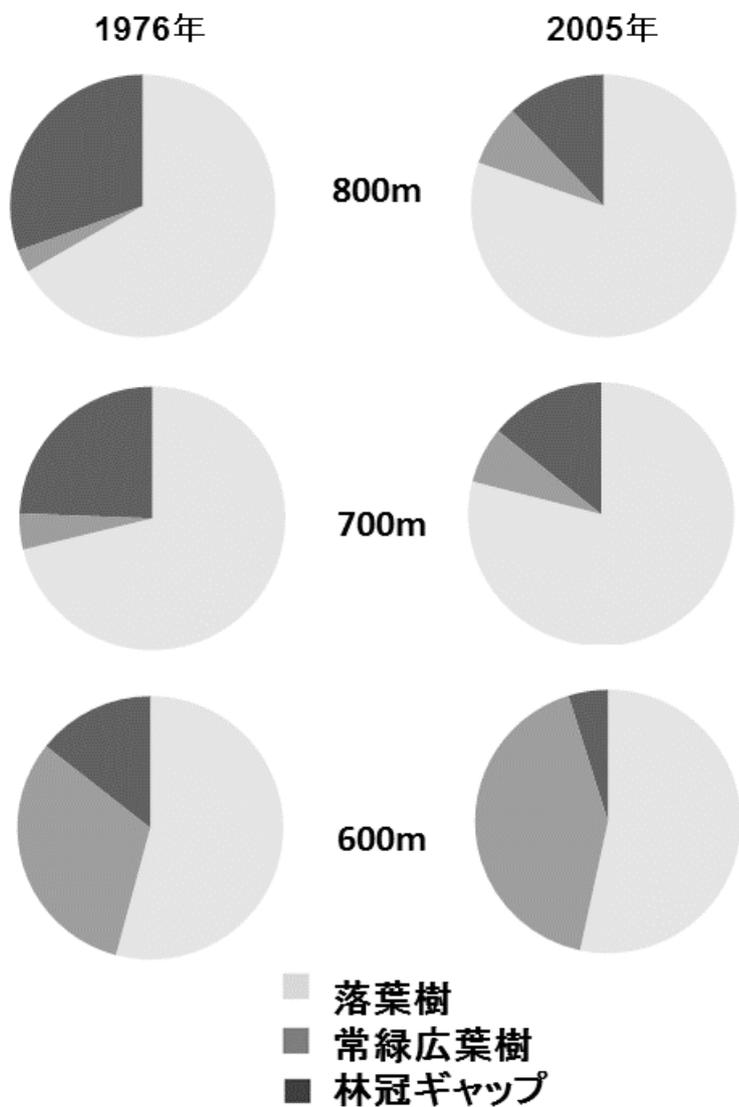


図 3-3: 各プロット・年代での落葉広葉樹, 常緑広葉樹, 林冠ギャップの面積 (%)

3. 5 考察

3. 5. 1 現在の空中写真判読の検証結果について

2005 年の樹冠について, 2012 年の空中写真を判読の参考として用い, 常緑広葉樹と落葉広葉樹を分類した。結果, 常緑広葉樹, 落葉広葉樹ともに 9 割を越える正答率となった。

今研究では, 常緑広葉樹と落葉広葉樹の双方の樹冠にまだ葉が残っている時期の画像 (今研究では 2005 年) を基準とし, 出来るだけ近い年代の冬の画像 (今研究では 2012 年) を参考として, 樹種の判定を行った。結果として常緑広葉樹, 落葉広葉樹, 林冠ギャップの

3つのタイプを含む樹冠分布図を作成することができた。複数の落葉広葉樹の判読を空中写真で行う場合については、秋季の紅葉から落葉直前までの間に短い時間間隔で空中写真を撮影し、その色調変化から樹種の特徴を抽出する研究が報告されている（瀬戸島ら(2001a,b), 長澤ら(2004)）。常緑広葉樹と落葉広葉樹を分別する場合についても、最低でも2時期の空中写真を使用することが判読精度の向上に有効であることが示された。この場合、参考画像としては常緑広葉樹を判定するための落葉の完了した冬の画像が必要である。また基準となる画像については、紅葉などによってそれぞれの樹冠の色調が異なる秋のほうが、個々の樹冠の境目を判定しやすいため、個々の樹冠ポリゴンを作成するのに適していた。

3. 5. 2 過去画像の判読精度の向上について

過去から現在にかけての植生分布の変化を追う場合、現在のみではなく過去の画像からも対象となる種の分布範囲を判読する必要がある。しかし今回使用した1976年画像のように、過去の画像では撮影時期を選ぶことが出来ず、単独では正確な常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読ができないことも考えられる。

そこで、近年の画像を元にした判読結果を参考とし、過去の画像の判読を行った。その為には現在の樹冠の分類情報を補助として過去の樹冠を判読し、各樹冠のポリゴンを作成し、樹冠面積の変化を追った。常緑広葉樹の判読という点から考えると、現在の樹冠の判読については2012年単独で問題はない。しかし1976年の画像との樹冠の対応が容易であるのは同じ時期の2005年画像のほうであった。特に今回のように対象とする森林が保護林であり、伐採などの大規模な樹冠の変化が無い場合、新しい樹冠は林冠ギャップから生じる傾向がある。従って元々存在する樹冠の相対的な位置の変化は起こりにくく、樹冠の対応が比較的つけやすかった。このような場合、過去のデータ単独では常緑、落葉の判読が難しい場合でも、現在の画像と対応が可能な樹冠に現在の精度の高い判読結果を適用することができる。

常緑広葉樹、落葉広葉樹ともに、全体的に対象地の樹冠数は増加する傾向にあり、過去と現在で対応できなかった樹冠のほとんどが現在の画像のみに存在する樹冠だった。特に常緑広葉樹のうち、現在には無いが過去にあったと推定されたのは全ての判読プロットを合わせて1本だけであり、これが誤判読であったとしても、全体としての面積の変化には大きな影響はないと考えられる。従って、過去の画像だけでは判読ができない場合、現在の精度の高い判読結果を参考にすることで、過去の樹種の推定判読を行う方法は有効であると考えられる。

3. 5. 3 面積誤差と経年変化

各判読プロットの常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップそれぞれについて、連続して撮影された空中写真をオルソ化した場合の面積を求め、その差を求めた。これは、ほぼ同

時刻に撮影された空中写真を基にしている為、この差は完全に単画像オルソによる誤差と考えられる。この値は過去と現在の2枚のオルソ画像上で大きな差が無かった。

面積誤差を経年変化と比較したところ、600mプロットの落葉広葉樹樹冠面積のみで経年変化<面積誤差となった。その他では経年変化>面積誤差となっている。従って600mプロットの落葉広葉樹のみ経年変化が検出不可能であり、後の全てで経年変化を検出可能であるとの結果になった。実際に2方向のオルソ画像から求めた面積を元に、各プロットの面積割合の経年変化を求めたところ、600mプロットでは落葉広葉樹の増加が見られず、代わりに常緑広葉樹だけが増加していることがわかった。

これは、過去から現在への温暖化の影響を考えた場合、特に低標高側で常緑広葉樹の専有面積が拡大すると予測されることに合致している。実際、2004~2006年の調査によると、函南の標高600~800m間では、常緑樹の発芽数および定着数は低標高で多い一方、落葉樹の定着数と定着率は低標高側で低いとの報告があり(澤田ら2008)、空中写真判読の結果はこれに矛盾しない。空中写真で判読可能なのは上層木のみである。温暖化に伴う常緑広葉樹の分布拡大は、まず下層木から起こることが予測される。そのため、空中写真での温暖化による分布変化の検出は、上層変化に先行する下層の常緑広葉樹の増加は把握できないと考えられる。またこのことは、現地調査と判読結果を比較した際、誤判読された樹冠が落葉広葉樹のものであり、その原因が下層の常緑広葉樹であることと一致する。つまり現在上層木が落葉広葉樹であっても、その下層に常緑広葉樹が入っている可能性があり、下層木では常緑広葉樹の分布拡大が上層よりも先に起こっている可能性がある。

3. 6 まとめ

過去と現在の両方に於いて、落葉広葉樹の紅葉が完了していない時期の空中写真を用いて常緑広葉樹の変動の検証を行った。過去と現在の画像で樹冠が対応可能である場合、現在の画像での判読結果を過去の画像に対して適用することが可能であった。従って、まず現在の樹冠について複数の画像から精度の高い判読ができており、また樹冠そのものの相対的な位置に大きな変動が無い場合には、過去の画像と撮影された季節に近い現在の画像を間に挟むことで、過去から現在の樹冠の変動を検出することが可能であることがわかった。

また、撮影方向による単画像オルソでの面積誤差の検討を行い、経年変化>面積誤差、で経年変化が検出可能、と判断した。その判断の元、3タイプの面積割合の変動を調べたところ、600m付近では落葉広葉樹に変動がない一方常緑広葉樹が増加する傾向にあるという結果となり、地上調査との間に矛盾が起こっていないことがわかった。

4 章 紫尾山山頂の常緑広葉樹冠の変化検出

4. 1 はじめに

2 章, 3 章に於いて, 空中写真に基づいた目視判読によるここ 30~40 年の常緑広葉樹冠の分布変化の検出を行った。この時樹冠数, 樹冠総面積の二つの指標が共に有効であることがわかった。そこで, この手法を特に変化の検出が困難な地域, つまり 1) 空中写真の撮影頻度が低く, 使用可能なデータが限られており 2) ブナの南限に位置しており, 1970 年代には既に常緑広葉樹の割合が高く, 変化の幅も小さいと考えられる地域に適用し, どの程度の変化検出が可能であるかを検討した。

4. 2 調査地と使用データ

調査地は鹿児島県出水市と薩摩郡さつま町の境にある紫尾山山頂(標高 1067m) 付近の老齢自然林である。紫尾山は, 日本のブナの南限に近く, 山頂部分にはブナが優占する落葉広葉樹林が広がっており, その下方に常緑広葉樹林が広がっている。今回は老齢自然林の広がる範囲から, 写真判読プロットとして標高 900~950m にプロット A (2.26ha), 標高 950~1000m にプロット B (2.26ha) を設定した(図 4-1)。

常緑広葉樹と落葉広葉樹を分けるにはカラー空中写真が適していることが 2 章の結果判明している。そこで今回, 1975 年 2 月 13 日と 2008 年 3 月 18 日の, どちらも落葉期のカラー空中写真を使用した(表 4-1)。これらの空中写真からオルソ画像を作成した。3 章で, 単画像オルソを用いて分布の変動を検出したところ, 分布変動は十分に検出が可能であったので, 今回もまた樹冠の形状が保たれるため判読が容易である単画像オルソ画像を, 国土地理院発行の 10m 解像度の DEM データを用いて作成した。使用ソフトは ERDAS Imagine13 である。

4. 3 方法

4. 3. 1. 樹冠判読とその精度

常緑広葉樹の分布変化を追う指標として, 2 章では樹冠数と樹冠総面積を挙げられたが, 今回の判読を行った際に樹冠数の抽出が困難であることがわかった。樹冠数は, 現在の画像からまず樹冠ポリゴンを作成し, その樹冠に対応する樹冠が過去の画像に存在している場合は在の情報を, またそれが存在していない場合は不在の情報をそのポリゴンに付与し, その情報を元に算出している。しかし今回, 特に常緑広葉樹の占有率の高かった判読プロット A で 1975 年と 2008 年の空中写真上での樹冠の相対的な位置が大きくずれており, 現在と過去の画像で対応する樹冠を見つけることが非常に困難であった。また, 2008 年の画像上の一部でかなり小さな樹冠が連続しており, 個々の樹冠の区切りを判読することがか

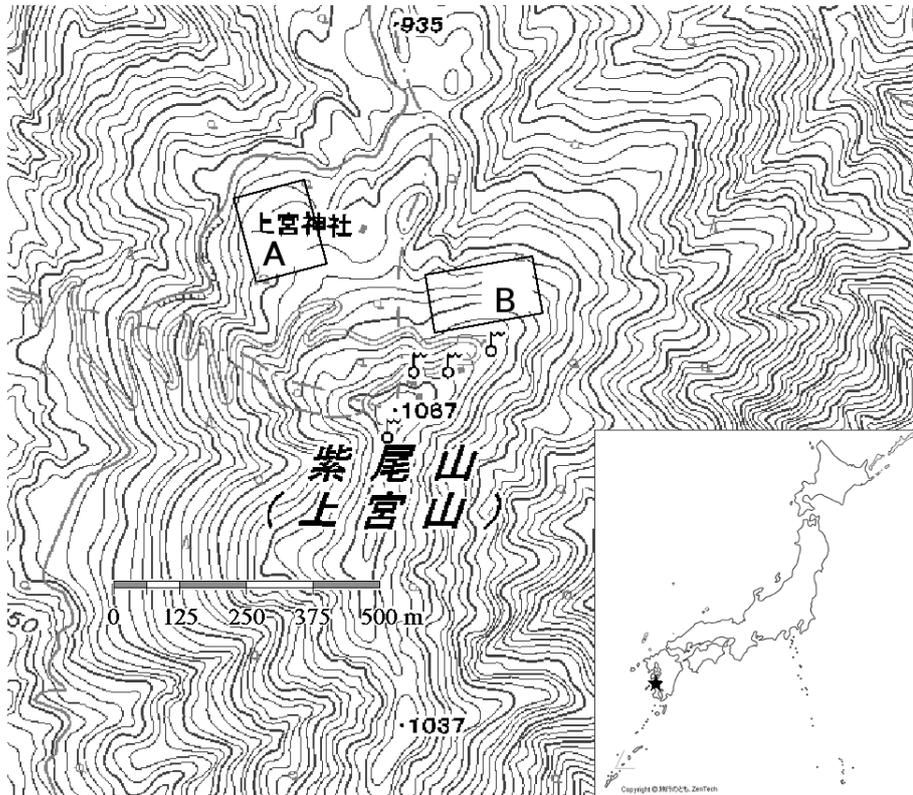


図 4-1 紫尾山山頂の判読プロット(A: 900-950m, B: 950-1000m, 2.26ha)

表 4-1 判読に使用した空中写真の情報とオルソ画像作成方法

撮影日時	カラー/白黒	撮影元	焦点距離 (mm)	撮影高度(m)	画素サイズ (μ m)	オルソ化使用ソフト	単画像/ステレオ	標高データ	解像度 (m)	誤差(m)
1975/02/13	color	国土地理院	151.73	1900	21.2	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10m \times 10m シュDEM	0.18	>1.75
2008/03/18	color	SKYMAP	153.66	2530	21.2	ERDAS IMAGINE LPS	単画像オルソ	国土地理院10m \times 10m シュDEM	0.28	>1.75

なり困難であった。そこで今回は指標として樹冠総面積のみを使用することとした。

まず 2008 年のオルソ画像について判読を行いやすいように色調を調整し、この画像を基にして常緑広葉樹と判読した樹冠について判読を行った。使用したのが冬季末期の 3 月の画像なので、葉が残っている樹冠は常緑樹であると考えられる。しかし、色調を調整する以前から茶～濃緑のグラデーションの樹冠がかなりの数存在しており、明らかに常緑広葉樹と考えられる濃緑色の樹冠とは色がかなり異なっていることがわかった。そのため空中写真の判読だけではこの茶色系の色調の樹冠が常緑広葉樹であるという判断ができなかった。そこで、濃緑色の常緑広葉樹の樹冠とは別に、このような色調の樹冠を不明樹種としてポリゴンを作成した。

判読の精度を検証する為、また不明種の樹種を確認する為、2014 年 11 月に現地にて地上調査を行った。空中写真と対応が可能な常緑広葉樹の地上調査の情報は得ることができなかった。そこで、3 章と同様、現地での確認を行いやすい紫尾山山頂に至る道路沿いの樹冠のうち、常緑広葉樹を 200 個、落葉広葉樹を 100 個、不明樹種を 100 個、それぞれ 2008 年画像を用いて事前に判読した。そのうち現地で確認が可能だった樹冠について、判読結果と調査結果を比較することで空中写真の判読精度を求めた。なお、常緑針葉樹も数本存在したが、樹形が特徴的で常緑広葉樹とは判読時に区別できたため、今回の検証の対象には入れなかった。

その結果を元に、判読プロット A、B それぞれの常緑広葉樹の樹冠ポリゴンを作成した。この時立体視を行い、それぞれの樹冠の区切りごとにポリゴンを作成するようにした。ただし、小さな樹冠が集まっており分割が難しい箇所については、まとめてポリゴン化を行った。

4. 3. 2. 過去の樹冠総面積との比較

次に、過去 33 年間の樹冠面積の変化を評価するため、1975 年画像についても常緑広葉樹の判読を行った。筑波山の判読の際には、個々の樹冠に対してその樹冠の履歴を収集し、判読の補助データとして使用したが、今回は 2 時期しかデータが無かった上に、それぞれの樹冠の対応が困難であったため、現在の判読結果を補助として使用することができなかった。しかし、1975 年画像の解像度は 0.18m であり 2008 年画像の解像度 0.28m と比べて解像度が高く、落葉広葉樹の枝や幹まで判読が可能であったため、葉が残っている樹冠は全て常緑広葉樹との判読が可能であった。また 2008 年画像のような樹冠の色調が緑色以外の不明樹種もなかった。そこで、2008 年の判読結果を参考としなくとも 1975 年画像単独で精度の高い判読が可能であると判断し、常緑広葉樹の樹冠ポリゴンを作成した(図 4-2)。このような手順で 2 時期の樹冠ポリゴン図を作成し、常緑広葉樹樹冠のポリゴン面積と面積割合、そしてその経年差をそれぞれ算出した。

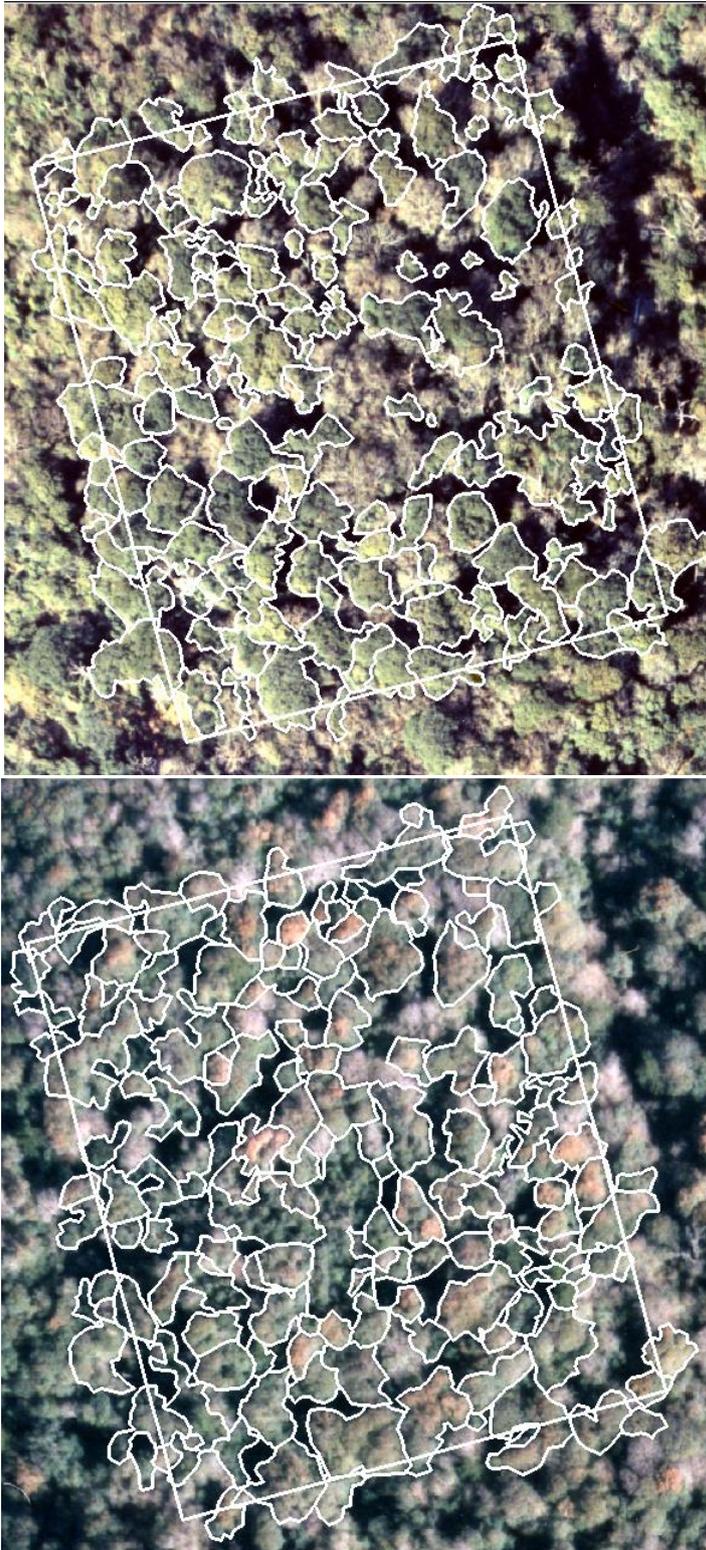


図 4-2 プロット A における 1975 年 (上) と 2008 年 (下) の常緑広葉樹樹冠ポリゴン

4. 4 結果

2008年画像を用いて道路沿いの樹冠を判読した。そのうち、常緑広葉樹から120、落葉広葉樹から68、不明樹種から67の樹冠について、現地で確認することができた。確認できた樹冠について、判読結果と地上調査結果を比較した結果は表4-2のとおりである。不明樹種と判読された67個の樹冠のうち63個までがアカガシ(常緑広葉樹)だった。そこで不明樹種と判読したものを常緑広葉樹の判読に加えた。その結果常緑広葉樹冠を187個判読したことになり、うち183個が正しく判読された。従って常緑広葉樹の判読精度は98%となった。

表 4-2 空中写真判読結果と現地調査の比較

調査結果	空中写真判読		
	常緑	落葉	不明
常緑	120	1	63
落葉		67	4

常緑広葉樹樹冠の面積割合は、斜面中腹の判読プロットAのほうが山頂に近い判読プロットBより高かった(表4-3)。1975年と2008年の常緑広葉樹樹冠の面積割合は、判読プロットAで1.23倍(57.1%から70.1%へ)、判読プロットBで1.79倍(25.8%から46.3%へ)とそれぞれ増加した。面積算出の際、プロットの境界線上にある常緑広葉樹の樹冠については1975年と2008年の両方で確認を行い、境界と重なっている樹冠については対象に含めた。そこで、各画像について常緑広葉樹樹冠面積+落葉広葉樹と林冠ギャップを合わせた面積を解析対象面積として算出し、この面積に対する常緑広葉樹の樹冠面積割合を算出した。各画像の各プロットの解析対象面積は異なり、各判読プロットの解析対象面積はプロットAで1.6%、プロットBで4.4%、それぞれ増加したが、常緑広葉樹の樹冠面積の増加はこの差以上に大きかった(表4-3)。

表 4-3 各プロットにおける2時期の常緑広葉樹樹冠面積/解析対象面積/常緑広葉樹樹冠面積率

	調査区	1975年	2008年
	常緑広葉樹樹冠 面積 (m ²)	A	14,342
	B	6,023	11,298
解析対象面積 (m ²)	A	25,102	25,502
	B	23,367	24,397
常緑広葉樹樹冠 面積率 (%)	A	57.1	70.1
	B	25.8	46.3

4. 5 考察

1975年と2008年、それぞれ一枚ずつの空中写真の判読結果から、過去33年間に常緑広

葉樹の樹冠面積割合が 1.23~1.79 倍に増加したことがわかった。この値は解析対象面積に対して 13%~20.5%となっている。3 章での単画像オルソの誤差の最大値は 774 m²であり、落葉広葉樹+常緑広葉樹+林冠ギャップの面積に対して 3.2%程度の値となった。この値は今回算出した常緑広葉樹樹冠面積の変化よりも明らかに小さい値である。従って、常緑広葉樹の判読が可能な時期の画像を使用し、樹冠総面積という指標を使用することで、この 2 時期のオルソ画像の比較により、樹冠面積割合の経年変化を捉えることが可能であったと考えられる。

しかし今回、2008 年の画像判読で、常緑広葉樹か落葉広葉樹か判断の難しい樹冠が複数見つかった。地上調査の比較から、2008 年画像判読で不明樹種に分類された 67 個の樹冠中 63 個がアカガシであることがわかった。従って茶と濃緑の樹冠は両方とも常緑広葉樹に分類されたが、茶色と濃緑の樹冠が存在する理由については不明である。紫尾山では現在(2000 年代)についても空中写真が 2008 年以外に撮影されておらず、地上調査で確認をする必要があった。つまり常緑広葉樹の判読に最も適していると考えられる落葉期のデータを使用している場合、それが一時期だけであり、他の画像と比較ができない場合、このような不明樹種が現われることが考えられる。今回、このような樹冠は 1975 年データでは現れなかったが、過去の空中写真でこのような色調の樹冠が判読された場合、樹冠の対応が可能な場所で現在の地上調査とつき合わせるなどの方法によって、その樹種を確認する必要がある。

判読プロット A では 2008 年画像と 1975 年画像の間で樹冠の相対位置に大きな違いがあり、それぞれの画像上の同一の樹冠を特定することが困難な場合が多かった。そこで特に樹冠の特定が困難であった箇所について立体視を行ったところ、1975 年では落葉広葉樹の高木が占めていた場所が 2008 年には常緑広葉樹の低木に置き換わっていることがわかった。地上調査により、紫尾山頂付近の落葉広葉樹林で上層の落葉広葉樹の下層に常緑広葉樹が成育していることが確認された。従って判読プロット A では、33 年の間に一部の上層木が消失し、それに伴って下層の常緑広葉樹が上層木へと入れ替わり、その際に周囲の樹冠の相対位置や形状の変化が起こったと考えられる。

一方、判読プロット B では 33 年の間に常緑広葉樹の新しい樹冠が増加しているが、それによって他の樹冠の相対的な位置に大きな変化が起こることはなかった。また目立った落葉広葉樹の消失もなかった。新しい常緑広葉樹の樹冠が現れた場所は 1975 年時点では林冠のギャップの場所に対応している。従って、判読プロット B では、林冠ギャップが減少し、常緑広葉樹樹冠が増加したと推定される。

4. 6 まとめ

筑波山で用いた手法を、空中写真の撮影頻度が少なく、常緑広葉樹の面積割合が高い紫尾山に適用した。この地域は既に一部で上層木の入れ替えが起こっているため、過去の樹冠を現在の樹冠に対応させることが困難な箇所があった。その結果現在の樹冠の判読結果

を過去の樹冠の判読の補助に使うことができなかった。また同様の理由から、樹冠数を指標として使うことも出来なかった。そこで使用可能である指標として樹冠総面積のみを使用することになったが、一時期の空中写真だけでは判読が難しい樹冠が複数あり、この確認には現地調査が必須であった。しかし結果として、樹冠総面積から面積誤差以上の変動を検出することができた。従って、元の樹冠面積の割合が 50%を越えている場合でも、なおその変動を検出することが可能であることがわかった。結果、この 33 年間で常緑広葉樹の面積は 1.23~1.79 倍に拡大していることがわかった。

5章 考察

5.1 樹冠分布変化を検出する条件

今研究では常緑広葉樹林と落葉広葉樹林の境界に分布する人為影響の少ない老齢自然林から三箇所を選び、空中写真を用いて常緑広葉樹を判読し、30～47年間の分布変化を検出することを試みた。結果、全ての箇所について、30～47年間の常緑広葉樹の分布変化を検出することが可能であった。但し、その為にはまず使用する空中写真を適切に選ぶ必要があることがわかった。

現在の樹冠分布については空中写真を複数撮影することが可能であるし、その結果を地上調査で確認することも可能である。常緑広葉樹と落葉広葉樹は樹冠の形状だけで判読することは非常に困難である。従って判読を行う場合、落葉広葉樹が落葉しているか紅葉が完了している時期のカラー画像が最低でも1時期は必要となるが、このような写真について、現在のデータについては入手が可能であると考えられる。

以上を前提とした上で、使用可能な画像が1時期しかない場合、その撮影時期は上記のような条件下に絞られるため、分布変化の検出対象は常緑広葉樹樹冠に絞られる。また、落葉広葉樹と常緑広葉樹の判定がしやすい時期の画像を選んだとしても、樹種の判定が困難な樹冠が複数出現する場合がある。今回、2000年代の画像が一枚しか入手できなかった紫尾山では、落葉期のため、落葉広葉樹と常緑広葉樹の間での判読ミスは少なかったが、空中写真のみでは常緑か落葉かの判読が出来ない色調の樹冠が複数存在していた。この場合、最終的にその樹種の判定には地上調査が必要であったし、また必要ならば空中写真の追加の撮影が必要になる可能性もあると考えられる。

一方、筑波山と函南原生林については2000年代に入ってから複数の季節の空中写真が入手可能であったため、空中写真の判読はより正確に行うことが出来、紫尾山のような不明な樹種の樹冠も出てこなかった。しかし日本での場合、常緑広葉樹と落葉広葉樹の境界域に於いて、常緑針葉樹が含まれることがあるため、結果として常緑広葉樹、落葉広葉樹、常緑針葉樹を分類する必要がある。特に今回、筑波山の対象地域には、老齢な針葉樹が複数存在した。これらは既に樹冠の先端が丸くなっており、特に常緑広葉樹の中に混交している場合、その形状から針葉樹と判断することは困難であった。このような場合、2000年代の複数の空中写真を用いて判読を行うことは、判読の精度を上げることに有効であった。また函南原生林については、このような常緑針葉樹の影響が殆ど無かったため、常緑広葉樹と落葉広葉樹を判定できる時期+判定は出来ないが樹冠の区別は可能な紅葉の途中の時期の2枚の画像を使うことによって、常緑広葉樹のみならず落葉広葉樹と林冠ギャップの面積変動についても検出が可能であった。従って、現在の樹冠の検出を行う場合にも、先に述べた常緑広葉樹と落葉広葉樹を判定できる時期の画像に加えて、比較的近い時期の異なる時期に撮影された空中写真を判読の補助として使用することが判読精度の面

からも、また常緑広葉樹以外の分布変動を検出する為にも望ましいと考えられる。ただしこの場合、樹冠の対応が可能であることが条件となる。従ってこのような補助の空中写真としては、紅葉により個々の樹冠の色調が異なり、樹冠ごとの分割が比較的容易な時期のものが望ましい。

なお、現在の空中写真判読の精度については地上データとの比較が必須である。しかし単木ごとの樹冠の判読精度を求めるためには、単木ごとの位置まで詳細に得られる地上調査結果が必要となる。今回、筑波山についてはそのような地上データを得ることが可能であり、その結果と判読の結果を比較することが可能であった。しかしこの場合についても、各樹木の上層・中層・下層を樹高のみで判断したため、同じ上層木でも『より上方にある樹冠』で遮られている場合、判読が不可能である場合が存在した。しかしこのようなデータは決して多くない。そこで、函南と紫尾山ではどちらも同じ方法で精度の比較を行った。すなわち、地上から樹種の確認が行い易い道路周辺の樹冠に対して先に判読を行い、判読された樹木を現地にて特定、その樹種の判定を行うという方法である。判読を行った樹冠全てを地上で特定することは困難であるため、出来るだけ多くの樹冠を先に判読する必要があるが、詳細な位置情報のある地上調査が無い場合にはこの方法が有効であった。

一方、過去の空中写真については、撮影頻度が限られている為、近い時期に対して複数の空中写真を得ることはまず不可能である。従って、使用可能な画像は基本的に1時期に1枚でしかない。そのため過去の空中写真に関しては現在の樹冠との対応が可能かどうか判読の精度を決める条件となる。過去の画像について現在の樹冠との対応が可能の場合、単独では判読ができない画像からも分布変化を検出することが可能になってくる。例えば筑波山では1961年の白黒写真に於いて、単独では常緑広葉樹の判読はできないことがわかった。しかし樹冠の履歴情報と、相対的な樹冠の位置が比較的類似していた1975年の画像の両方を補助として使用することで、この画像についても樹冠の判読を行うことが可能であった。また函南原生林についても、2005年、2012年を用いた判読結果と1975年画像の樹冠の対応を行った結果、単独では常緑広葉樹の判読が困難であった1975年データを判読し、分布変動を検出することが可能であった。ただしこの為には、過去と現在の樹冠の対応が可能な空中写真であることに加えて、樹冠の相対的な位置について大きな変動が無いことが条件となる。このような条件が満たされず、それぞれの樹冠の対応が困難であった紫尾山の場合、過去の空中写真のみでの判読を行う必要があった。従ってこのような場合、使用可能な空中写真は、単独で常緑広葉樹の判読が可能な時期のものに絞られることになる。

過去のデータについては、現在のデータとは違い現地調査による精度の確認は不可能である。従って、樹冠が過去から現在にかけて減少する樹種については、過去にあって現在にない樹木についての情報を得ることが不可能であるため、過去の判読の精度についての確証が得られない分判読対象には向かないし、現在のデータを過去の判読の補助として使うことは難しい。一方、過去から現在にかけて増加傾向にある樹種については、少なくとも

も現在と過去、共通の樹冠については判読結果を比較することは可能である。また現在のデータを判読の補助に使うことで判読精度があがる。従って、変動を検出する樹種としては過去から現在にかけて増加する傾向にある樹種が適していると考えられる。

今回、対象としたのは落葉広葉樹と隣接する常緑広葉樹である。このような境界域に於ける常緑広葉樹の代表樹種がアカガシであり、落葉広葉樹の代表樹種がブナであるが、ブナについては温暖化に伴いその生育適域が減少する傾向にあるとされる (Matsui et al.(2004), 田中ら(2006)等)。実際今回調査地に選ばれた3箇所のうち、筑波山と紫尾山については既にブナ林が衰退する傾向にあると判断されており、現存するブナの保護・現状調査の為、全木について調査・GPSで位置の特定がされている(小幡ら(2012), 北薩森林管理署(2009))。その分増加すると推定されたアカガシを代表とする常緑広葉樹を分布変動の検出対象とすることは、変動を精度良く検出するために適していたと考えられる。

5. 2 樹冠数と樹冠総面積

今回、常緑広葉樹の分布変化の検出のために二つの指標を使用した。この二つの指標にはそれぞれの利点と問題点があることがわかった。

まず、樹冠数について考える。

この指標の利点として、オルソ化や樹冠の境界線を手動で作成する際の面積の誤差を考える必要が無いことが挙げられる。また、ポリゴンを作成する際に、各樹木の樹冠の境界が明らかに分割されている場合にはこの指標を作成することは容易である。常緑広葉樹の場合、個々の樹冠が孤立している箇所では樹冠の分割が容易であり、従って樹冠数を判読することは容易であった。

しかし一方、この指標を使用する際の問題点として樹冠が連続している箇所の処理が挙げられる。針葉樹についてはその樹冠の形状から個々の樹冠が判読し易く、樹冠の数を数えることは比較的容易である。しかし常緑広葉樹の樹冠は比較平らで、隣接した樹冠との境目の切れ目を判読することが困難である。従って複数の樹冠が連続している場合、どこで区切るかは判読者の主観に依ることになる。広葉樹林の樹冠の抽出については、枝葉の影の影響を局所フラクタル次元の導入によって軽減し、近似色円を算出する手法を小村ら(2003)が、樹木毎の樹冠色の際に着目し、輝度値の許容幅を判定基準とした同質領域判定による樹冠抽出法を朝廣ら(2003)がそれぞれ示しているが、上記のような経年変化を検出するにはそれぞれ精度に問題があると判断した。自動判読の精度を上げる方法として多重オルソ画像を使用する手法を井上ら(2006)が提言しているが、これも複数のオルソ画像が必要であり、過去の画像で樹冠の判読を行う場合には実行が困難である。一方目視判読で樹冠を抽出する場合、異なる時期の画像上で、樹冠が分布する位置には変化が無いが樹冠の境界として判断可能な場所が異なっているケースが複数存在した。このような場合、境界線を引く場所によって樹冠数は変化してしまう。このような、境界線の場所で生じる樹冠数の誤差を防いで経年変化を検出するためには、全ての画像上で対応する樹冠を特定す

る必要があった。この方法としてはまず、全ての画像上で樹冠ポリゴンの区切りを調整する方法が挙げられるが、これは解析対象となるオルソ画像が一枚増える毎に、それまで作業を行った全ての画像に対して修正が必要ということになり、解析に使用する画像が多ければ多いほど作業の効率は悪くなる。そこでもう一つの方法として、現在の樹冠分布図を基本とし、過去に遡りながら、個々の樹冠の履歴を樹冠分布図上の樹冠ポリゴンに収集する方法を使用した。結果として各年代の樹冠の在・不在の情報が各樹冠ポリゴンに対して集まる為、そのデータをもとにして樹冠数を算出することが可能である。このほうが作業効率が高かった。

しかし、どちらの作業を行うにしても、それぞれの樹冠を特定することが必要となる。樹冠の形状は撮影方向により多少変動するため、形状や大きさや色調だけではなく、相対的な位置の情報によってそれぞれの樹冠特定を行う必要がある。従って樹冠の相対的な位置情報が変動する場合、この作業は非常に困難になる。例えば紫尾山の場合、落葉広葉樹の高木が消失し、代わりに下層の常緑広葉樹の低木が複数表れた際、直接変化したこれらの樹冠だけではなく、その周囲の樹冠の位置も変動し、結果としてかなり広範囲の樹冠について、過去と現在の画像上での対応が困難になった。従って、この指標については使用できる場合とできない場合があることがわかった。ただし、以上の作業が可能な場合、この指標によって樹冠の分布の変動を捉えることが可能であった。特に筑波山では小さな樹冠の増加を顕著に捉えることができたため、落葉広葉樹の優占林での変化を捉えることが容易であった。

一方樹冠総面積についての最大の利点は、常緑広葉樹の判読が可能であれば、どのような画像に対しても使用可能な指標であるという点である。この場合、過去と現在の樹冠の対応が必要なく、それぞれの樹冠を分割する必要がない為、作業効率は樹冠数よりも高かった。

しかし問題点としては、オルソ化に伴う面積の誤差、また目視判読によるポリゴンの境界線引きの際の誤差、等、複数の要因による面積誤差がそれぞれのオルソ画像に含まれていることが挙げられる。元々オルソ化は空中写真の歪みを修正する為の手法であり、この方法によって面積の誤差は当然減少している。しかし老齢自然林に於ける植生の分布変動を考える場合、その変動の幅が小さいため、修正後に残る誤差面積を無視することは難しいと考えられた。しかし地形や樹冠の形状、また樹木密度など、面積誤差の要因は多く、この面積誤差をそれぞれの要因から予測することは相当に困難である。また樹冠総面積の真値についても、地上調査から計測することは非常に困難である。従って今回、樹冠総面積の誤差について妥当と考えられる定義を行い、この誤差よりも経年変化が大きい場合は経年変化の検出が可能であると考えた。結果として、個々の樹冠については面積誤差が大きすぎる為、それぞれの経年変化を捉えることは難しいことがわかった。一方、樹冠の総和を取ることで全体に対する誤差割合は減少することがわかった。しかし単純に複数の樹冠面積を足し合わせることで誤差の割合が減少するわけではない。筑波山の標高階ごとの

面積誤差割合の値から考えて、面積誤差の原因としては、空中写真撮影時の歪みが十分に修正されていないことがまず挙げられる。同じ画像上でも撮影時の中心点では誤差が少なく、画面の端にゆくにつれて歪みが拡大するため、同じ画像上でも歪みの割合に違いがある。そこで複数の樹冠面積の和を取ることで、歪みの大きい箇所と小さい箇所が均された結果、全体としての面積誤差の割合は小さいものになると考えられる。どの程度の樹冠の面積和を取ることで面積誤差の割合が十分小さいといえるのかどうかについては今回の研究では求めることができなかった。ただし今回の対象とした3地域で、判読プロット面積は2~20haの幅があるが、その全てのプロットで経年変化>面積誤差の結果が出ており、分布の変化を検出可能であった。従って、判読範囲が上記程度の場合には、樹冠総面積の面積誤差は30~40年の経年変化よりも小さいと考えられる。

ただし、十分な数の樹冠の面積和を取ったとしても、経年変化>面積誤差となる為の期間が必要である。二次林が常緑広葉樹林に遷移する場合、樹冠総面積は43年間で4.65倍になったが(奥田ら2007)今回の調査地で、割合的に最も増加した紫尾山でも樹冠総面積は1.79倍にしかならず、短期間で分布面積の差を求めた場合、面積誤差よりも変化幅が小さいことは考えられる。筑波山の場合、観測の期間が5年程度の場合、経年変化と面積誤差が同程度となってしまう、経年変化の検出はできなかった。しかし一方複数の樹冠をまとめた場合、3箇所全てで経年変化>面積変化となり、変動は検出可能であった。また筑波山の1961~2003年までで最も観測期間の幅が短かった1975~1986年の間でも経年変化>面積誤差となった。従って、経年変化を検出するには、最低でも10年以上の期間が必要であると考えられる。

樹木の分布移動についての論文(Kullman 2004, Kelly et al. 2008, Beckage et al. 2008, Peñuelas and Boada 2003)では、30年~40年程度の期間を置いての地上調査によって分布の移動が検出されている。上記のような特性に十分留意した上で、この二つの指標を空中写真に適用した場合、どちらを用いても地上調査と同程度の期間に於ける常緑広葉樹の樹冠の分布変化を面的に捉えることが可能であると考えられる。

反対に言うと、これらの二つの指標を用いた場合、空中写真によるオルソ画像から、異なる森林帯の境界域での微少な変動を検出することが可能であることがわかった。過去から現在にかけての植生の変動と気候の変動を関連付ける論文は既に複数発表されているが、その論文数は決して多くはない。その原因の一つとして、現在のデータと比較可能な過去の植生データの不足が挙げられる。現在と過去を比較する場合、場所の特定が必須となるため、特に過去のデータの位置の特定が困難である場合が多いが、空中写真についてはオルソ化を行うことでGISデータとして使用することが可能である。従って現在のデータとの比較が単木レベルで可能な過去データとして使用することが可能である。

このようなデータが全国規模で存在し、かつ閲覧が自由であるケースは希少である。特に日本はConservation Internationalによって生物多様性に於ける35のhotspots(2013年現在)の1つとして認定されている。このような場所全域に対して、上層木に限られる

とはいえ、客観的な過去の状況を捉えることの可能な空中写真は、広域の数十年の植生の分布変動を知る上で、貴重なデータと成り得ることは確かである。

5. 3 新しいデータと技術

今回、変化を検出するデータとして空中写真を使用した。

現段階で空中写真から常緑広葉樹と落葉広葉樹を高い精度で判読する場合、どうしても目視判読が必須である。目視判読を精度良く行うには熟練が必要であり、一律に広域を処理するにはかなりの時間がかかる。撮影頻度は数年に一度であり、特に過去のデータについてはかなり限られている。また、空中写真をGISデータとして使用する場合、まずデジタル化を行う必要があるが、まず現像する際の条件の違いや紙媒体からデジタル化を行う際のデバイスなどの違いにより、色調が容易に変動する。その結果同じ画像でもデジタル化の際に各画素に割り振られる値が異なる可能性があり、これまで一般的であったピクセルごとの反射値を基にしたピクセルベースの解析から自動分類を行うことは難しい。従ってこれまでのところ、最も解像度が高く、かつ古くからあるデータであるにも関わらず、空中写真は森林リモートセンシングにとって主流のデータではない。

しかし最近、これらの作業の一部を高精度で自動化し、作業効率を上げる技術が開発されている。例えばピクセルベースではなく、隣接画素との均質性を元にグループ化するオブジェクト単位での分類を行うことで、特に常緑広葉樹、落葉広葉樹の分類精度が上がるとの報告がある(鎌形ら(2006)等)。このような処理を自動で行うことで、作業の効率や精度、また判読の客観性を上げることも可能であると考えられる。

また、これまでの空中写真は国土地理院や航測会社によって航空機から撮影されていたため、撮影費用や頻度に問題があった。また航空機の飛行高度からの撮影であるため、雲の影響や解像度の違いなどから判読が困難である場合もあった。しかし近年、対象地域を撮影した複数の写真から3D画像を容易に作成することが可能なソフトが複数開発されている。この場合、従来の空中写真のように高度やカメラの焦点距離の情報は必要ない。従ってわざわざ専用の航空機を飛ばすのではなく、UAV(Unmanned aerial vehicle, 無人航空機)を使用することで、必要な時期に必要な箇所の高解像度の空中写真を得ることが可能であり、短期間の間の複数時期のオルソ画像を作成することが可能になりつつある。

その他にも空中写真と同等の解像度を持つデータとして、LIDAR(light detection and ranging)が挙げられる。これはレーザー光線を地表に高密度で発射し、その反射光を検出し、戻るまでの時間や反射位置についての情報から地表面や地上の物体を3次元的に捉える技術であり、森林構造、バイオマス、胸高断面積や樹冠面積などの推定についての多くの研究が成されている(Lefsky et al. (1999), Harding et al. (2001), 西上・千葉(2006)等)。何よりも、LIDARではレーザー光をパルス状に発射し、その散乱光を測定することで、対象物までの距離やその反射特性などを分析する。この時、反射したポイントの位置情報が求められるので、樹冠によって光が反射した点の位置情報を収集することができれば、撮

影時の樹冠面積の真値に限りなく近い値が直接求められる可能性がある。ただこのデータはカラー画像ではないので、LIDAR データ単独での樹種判読は困難であるが、同時期に撮影された空中写真などと組み合わせれば、個々の樹冠の形状と色調を判読することで樹種の判読の精度を向上させることが可能であると考えられる。

このように、現在、空中写真と同等に精度の高い情報が収集されつつあり、それら进行处理するソフトやプログラムについても複数が開発されつつある。従って、既存の空中写真による過去から現在までの森林の分布変動を整備し、現在から将来にかけての情報と組み合わせることを可能にするならば、過去から現在、また未来にかけて、気候変動に伴う長期間の植生分布の変動を単木レベルで検出することが可能になりつつあると考えられる。

6章 おわりに

森林に対する空中写真判読の手法自体は、1950年代、空中写真が国土地理院によって撮影されて以降、開発され、現場でも使用されてきた。但し、空中写真をGISデータとして使用するためには、既に述べてきたような問題点が複数ある。また、現在のところ、常緑広葉樹と落葉広葉樹を高精度で判読する為には目視判読に頼る必要がある。従って、森林リモートセンシングに対する空中写真の利用は、現時点では主流ではない。

しかし一方、日本に於いて、森林リモートセンシングは森林の地上調査を主とする研究者によって多用されているとは言えない。その理由の一つとして、リモートセンシングで得られる情報が、地上調査に比較して精度が低いことがあると思われる。例えば今回の3つの調査地のうち、筑波山と紫尾山については、既にブナの毎木調査が行われており、どちらも全てのブナについて位置情報まで調べられている。この場合、リモートセンシングから得られる情報が地上調査による情報よりも精度が格段に低い場合、そのデータが使用される可能性は低い。

森林リモートセンシングとは、空中から森林を観測し、森林についての情報を得る手段である。しかし得られたデータが使用出来ない、もしくは使用したいものとは異なる場合、それらの情報は得られただけで終わる。ではどのようにすれば森林リモートセンシングによって得られたデータが使用されるか。リモートセンシングによって得られるデータが地上調査と同等の精度であり、かつ地上調査から得られない情報を含んでいるとすれば、そのデータは使用される可能性がある。その為には空中写真と同等、最低でも解像度1m以下の高解像度のデータを用いた上で、目視判読と同程度の精度の作業を行なう必要がある。但しこのような作業は現在のところ自動化は難しく、結局は目視判読に頼るしかない為『作業』と見なされ、リモートセンシングの研究としては評価され辛い。

しかし、今回の研究により、過去約40年間蓄積されたカラー空中写真により、過去から現在にかけて、異なる森林の境界域での特定樹種の変動を追うことが可能であることが証明された。実際にはこれほどの面積を解像度の高い空中写真で一律に撮影された場所は日本以外にはごく少ないし、現在と客観的に比較可能な過去の情報がこれだけ広範囲に対して存在している場所も少ない。そのような限られた場所の一つであるスイスは、現在のところ温暖化の検出について最も多くの論文の対象地となっている。現在、日本で報告された温暖化の検出例は決して多くないが、これらの蓄積された空中写真から、複数の対象樹種、人為の影響の少ない森林の範囲を選び、温暖化を原因とする可能性のある植生の分布変動を判読してゆくことは可能ではないかと考えられる。また、5.3で述べたように、これらの作業の一部については自動化が可能になりつつあるし、高解像度で取得可能であり、かつ分類等の自動化がより容易である高解像度データも取得が可能になりつつある。このようなデータの増加、高精度での解析が可能で整いつつある現在、過去から現

在，またこれ以降の森林に対し，長期的な観測を地上調査との比較が可能な単木レベルで行うことが可能になりつつある。

気候変動に対する植生，特に樹木の応答についての研究には長期間の観測が必要となるが，これらの過去の空中写真が森林の経年変化の検出に有効であることがわかった。これ以降，より多岐に渡る高解像度のデータから森林の経年変化を収集，整理してゆくことで，長期に渡る実際の森林の気候変動に対する変化についての情報を得ることが可能となる環境が，現在整いつつあると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

論文博士取得に際し、多くの御支援と御指導を賜りました、東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科の武雅明教授に多大なる謝意を表します。博士取得まで投げ出すことなく、曲がりなりにも論文をまとめることが出来たのは、先生のお陰であります。

また、この論文の研究遂行の為に、森林総合研究所、田中信行先生には本当に多くのことを教えて頂きました。修士までと全く異なる分野でこのような論文が書けるまでに、先生には甚大な教えを頂きました。有難うございます。

貴重な御指導を頂きました、東京農業大学、中村幸人教授、島田沢彦教授に、心より感謝を申し上げます。お忙しい中、丁寧な助言を頂きました。本当に有難うございます。

空中写真による判読について、森林総合研究所、水土保持研究領域長の大丸裕武先生、また日本森林技術協会の安田正次博士には多くの御指導と御指摘を受けましたこと、本当に感謝致します。また、気候変動影響担当チーム長の松井哲哉先生、また同チームの津山幾太郎博士、中尾勝洋博士、大橋春香博士、高知大学の比嘉基紀助教には、多くの御指導と御協力を頂きました。本当に有難うございます。

東京大学生産研究所、竹内渉准教授には貴重な御指導を頂きました。本当に有難うございます。

全く異なる分野から森林リモートセンシングという分野に移動した切欠を与えて頂き、また御指導して下さいました、森林総合研究所、沢田治雄理事長、また同グループの川端幸蔵先生、穴澤道雄氏、三塚直樹氏、永谷泉氏に深い感謝の意を表します。

最後に、博士取得までの長い期間を辛抱強く応援してくれた両親に感謝の意を表して謝辞と致します。

参考文献

- Aono Y. and Kazui K. (2007) Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International Journal of Climatology* 28, pp905-914.
- 朝廣和夫・重松敏則・瀬戸島政博・牧田史子 (1999) 空中写真を用いた植生環境動態解析に関する基礎的研究. *ランドスケープ研究* 62(5), pp657-660.
- 朝廣 和夫・井上 光平・上原 三知・重松 敏則・瀬戸島 政博 (2003) 空撮画像の同質領域判定による九州北部里山林の樹冠抽出に関する研究 *日本造園学会誌* 66(5), pp499-502.
- Beckage B., Osborne B., Gavin D.G., Pucko C. & Perkins T. (2008) A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the GreenMountains of Vermont. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*105, pp4197-4202.
- Berry, P.M., Dawson T.P., Harrison P.A., Pearson R. and Butt N. (2003) The sensitivity and vulnerability of terrestrial habitats and species in Britain and Ireland to climate change. *Journal for Nature Conservation* 11(1), pp15-23.
- Britton A.J., Beale C.M., Towers W. & Hewison R.L. (2009) Biodiversity gains and losses: Evidence for homogenisation of Scottish alpine vegetation. *Biological Conservation* 142(8), pp1728-1739.
- Camarero, J. J. & Gutierrez, E. (2004) Pace and Pattern of Recent Treeline Dynamics: Response of Ecotones to Climatic Variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change* 63(1-2), pp181-200.
- Colwell R.K., Brehm G., Cardelús C.L., Gilman A.C., Longino J.T. (2008) Global Warming, Elevational Range Shifts, and Lowland Biotic Attrition in the Wet Tropics. *Science* 322 (5899), pp.258-261.
- 長 正道 (1974) 空中写真濃度計測による森林蓄積の推定に関する研究. *九州大学農学部演習林報告* 48, pp113-292.
- de Jong R., Verbesselt J., Zeileis A. & Schaepman M.E. (2013) Shifts in Global Vegetation Activity Trends. *Remote Sensing* 5(3), pp1117-1133.
- Elmendorf S.C., Henry G.H.R., Hollister R.D., et al. (2012) *Nature Climate Change* 2, pp453-457.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., & Zimmermann N.E. (2007) Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18, pp571-582.
- Gottfried, M., Pauli H., Futschik A. et al. (2012) Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change* 2, pp111-115.
- Grabherr, G., Gottfried, M. & Pauli, H. (1994) Climate effects on mountain plants. *Nature* 369, pp448.

- Grace J., Berninger F., & Nagy L. (2002) Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany* 90, pp537-544.
- Harding, D.J., Lefsky M.A., & Parker G.G. (2001) Lidar altimeter measurements of canopy structure: methods and validation for closed-canopy broadleaf forest. *Remote Sensing of the Environment* 76, pp283-297.
- Harrison, P.A., Berry P.M. & Dawson T.P. (eds.) (2001) *Climate Change and Nature Conservation in Britain and Ireland: Modelling natural resource responses to climate change (the MONARCH project)*. UKCIP Technical Report, Oxford.
- 北薩森林管理署 (2009) 地域連携による紫尾山のブナ林保全・保護対策の現状について. 北薩森林管理署. 13p.
- Holtmeier F.K. & Broll G. (2005) Sensitivity and response of Northern Hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography* 14, pp395-410.
- 飯塚 修・松平 昇 (1989) 針・広葉樹別空中写真材積表による天然林の材積推定. 日本林学会北海道支部論文集 37, pp223-225. 飯塚 修, 松平 昇(1993) 針・広葉樹別空中写真材積表による天然林の材積推定: 道内 4 地域の算出結果. 日本林学会北海道支部論文集 (41), 6-8.
- 今永 正明・永用 幸司 (1986) 2.屋久島の森林施業に関する研究: II 航空写真によるスギ人工林の林分構造評価. 鹿児島大学農学部演習林報告 14, pp13-17.
- 井上 光平・瀬戸島 政博・朝廣 和夫・重松 敏則 (2006) 多重オルソフォト画像からの樹冠円抽出について. *写真測量とリモートセンシング* 45(3), pp31-36.
- IPCC (2013) *Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, New York, pp5.
- 板垣恒夫 (1976) 空中写真判読による天然林の類型化とその応用に関する研究. *造園雑誌* 40(2), pp2-12.
- 板垣恒夫, 合沢義孝, 谷口 信一 (1968) 航空写真による樹種の判読について, 日本林学会北海道支部講演集 17, pp40-43.
- Iverson, L.R., Prasad A.M., Hale B.J. & Sutherland E.K. (1999) *An atlas of current and potential future distributions of common trees of the Eastern United States*. Gen. Tech. Rep. NE-265. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 245p.
- Jurasinski G., and Kreyling J. (2007) Upward shift of alpine plants increases floristic similarity of mountain summits. *Journal of Vegetation Science* 18(5), pp711-718.
- 鎌形 哲稔・原 慶太郎・森 大・赤松 幸生・李 雲慶・星野 義延 (2006) 高分解能衛星データのオブジェクト指向分類による植生図作成手法の提案. *写真測量とリモートセンシング*

45(1), pp43-49.

加藤正人 (1987) ランドサット TM データによる樹種分類 (1) -TM データの有効性-. 北方林業 39(3), pp11-16.

加藤正人 (1987) ランドサット TM データによる樹種分類 (2) -利用と問題点を探る-. 北方林業 39(5), pp22-26.

加藤正人 (1989) ラジコンヘリコプターを使用した効果的な空中写真撮影方法 日本林學會誌 71(1), pp23-25.

加藤正人 (1990) ラジコンヘリコプターを使用した紅葉期における広葉樹林の樹種判読 日林北支論 38, pp171-173.

Kelly, A.E. & Goulden, M.L. (2008) Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, pp11823-11826.

気象庁 (2013) 気候変動監視レポート 2013. 気象庁, 東京, pp20.

Klanderud K. & Birks H. J. B. (2003) Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *Holocene* 13, pp1-6.

小林正吾 (1982) 気球写真による林分構成要素の判読. 森林航測 139, pp9-12.

小木和彦 (1986) 空中写真による広葉樹の樹種判読. 日本林学会北海道支部論文集 34, pp16-18.

小木和彦 (1987) 空中写真による針葉樹天然林の材積推定 日本林学会北海道支部論文集 35, pp17-19.

小村 良太郎・久保 守・村本 健一郎 (2003) 空撮画像を用いた局所フラクタル次元による樹冠解析. 写真測量とリモートセンシング 42(4), pp27-37.

Kullman L., (2004) Tree-limit landscape evolution at the southern fringe of the Swedish Scandes (Dalarna province) -Holocene and 20th century perspectives. *Fennia - International Journal of Geography* 182(2), pp73-94.

Lefsky, M.A., Harding D., Cohen W.B. & Parker G.G. (1999) Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of the Environment* 67, pp83-98.

Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., de Ruffray P., Brisse H. (2008) A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science* 320(5884), pp1768-1771.

丸山 宏 (1988) 樹木葉の色彩学的特性に関する研究-1-葉色の季節変化のパターン. 京都大学農学部演習林報告 60, pp239-249.

Matsui T., Yagihashi T., Nakaya T., Taoda H., Yoshinaga S., Daimaru H. & Tanaka N. (2004) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *Journal of Vegetation Science* 15, pp605-

614.

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) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境 14, pp165-174.

Menzel and Fabian (1999) Growing season extended in Europe. *Nature* 397, pp659

Menzel A., Sparks T.H., Estrella N. et al. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, pp1969-1976.

Murakami T. (2006) How is short-wave infrared (SWIR) useful to discrimination and classification of forest type in warm temperate region? *Journal of Forest Planning* 12, pp81-85.

長澤 良太・鈴木 茂之・佐野 淳之 (2004) ラジコン空中写真を用いた落葉広葉樹林の樹種判読. 森林計画学会誌 38(1), pp11-21.

Nakao K., Matsui T., Horikawa M., Tsuyama I., 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(2), pp 229-243.

中島 巖, 栗屋仁志, 樋渡幸男, 長谷川訓子 (1962) 航空写真による林相区分図の作成と材積調査法の研究-1-. 林業試験場研究報告(146)

中園悦子・沢田治雄・川端幸蔵・穴沢道雄・永谷泉・三塚直樹 (2000) 青森天然ヒバの蓄積と利用可能量の推定. 日本リモートセンシング学会誌 20(3), pp34-46.

日本林業技術協会 (1964) 図説空中写真測量と森林判読. 日本林業技術協会. 68p.

西上 愛・千葉幸弘 (2006) 航空機レーザースキャナを用いたブナ林の林冠構造の解析. 森林資源管理と数理モデル 6, pp11-18.

小幡和男, 津山幾太郎, 田中信行 (2012) 筑波山におけるブナとイヌブナの全個体調査に基づく個体群構造とその成因 第 15 回自然系調査研究機関連絡会議 調査研究・活動事例発表会 P-12.

奥田 賢・美濃羽靖・高原 光・小椋純一 (2007) 京都市東山における過去 70 年間のシイ林の拡大過程. 森林立地 49(1), pp19-26.

大友 栄松・中島 巖 (1956) 航空写真による森林蓄積調査法の研究. 日本林學會誌 38(10), pp379-388.

Pauli H., Gottfried M. & Grabherr G. (1996) Effects of climate change on mountain ecosystems - Upward shifting of alpine plants. *World Resource Review* 8, pp382-390

Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., & Grabherr G. (2007) Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: Observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology*. 13, pp147-156.

Peñuelas J., Filella I., Comas P. (2002) Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8, pp531-544.

- Peñuelas J., & Boada M. (2003) A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9, pp131-140.
- Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J-M., Tucker C.J., Stenseth N.C. (2005) Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *TRENDS in Ecology and Evolution* 20(9), pp503-510.
- 齋藤英樹・鹿又秀聡・山田茂樹 (2010) LANDSAT ETM と MODIS データを利用した常緑・落葉広葉樹林の分類 九州森林研究 63, pp57-59.
- 澤田佳美・中村幸人・武生雅明・吉田圭一郎・磯谷達宏 (2008) 函南原生林における常緑広葉樹林から落葉広葉樹林への林冠優占種実生の発芽・定着数の変化. 第 55 回日本生態学会要旨集 C1-09.
- Schwartz M.D. and Reiter B.E. (2000) Changes in North American spring. *International Journal of Climatology* 20(8), pp929-932.
- 瀬戸島政博・赤松幸夫・福井裕子・重松敏則・朝廣和夫・児玉滋彦 (2001) 春季の時系列カラー航空写真データからみた里山林の代表的な常緑広葉樹の色調変化. 日本造園学会誌ランドスケープ研究 64(5), pp801-804.
- 瀬戸島政博・赤松幸夫・今井靖晃・重松敏則・朝廣和夫・児玉滋彦 (2002) カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究. 日本造園学会誌ランドスケープ研究 65(5), pp679-684.
- 瀬戸島政博・赤松幸生・福井裕子・今井靖晃・朝廣和夫・重松敏則 (2001) 年間にわたる時系列なカラー航空写真データからみた里山林の代表的な常緑広葉樹の色調変化. 環境情報科学学術研究論文集 15, pp31-36.
- Shimazaki M., Sasaki T., Hikosaka K. & Nakashizuka T. (2011) Environmental dependence of population dynamics and height growth of a subalpine conifer across its vertical distribution: an approach using high-resolution aerial photographs. *Global Change Biology* 17(11), pp3431-3438.
- シトメアン リスマン (1985) 航空写真による森林蓄積の推定に関する研究. 北海道大學農学部 演習林研究報告 42(1), pp1-46.
- Smith W.K., Germino M.J., Hancock T.E., Johnson D.M. & Reinhardt K. (2009) The Altitude of Alpine Treeline: A Bellwether of Climate Change Effects. *The Botanical Review* 75(2), pp163-190.
- Sparks T.H. and Carey P.D. (1995) The response of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology* 83, pp321-329.
- Sturm M., Racine C. & Tape K. (2001) Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411, pp546-547.
- 田口仁・古川邦明・遠藤貴宏・沢田治雄・安岡善文 (2009) 多時期の空中写真から作成した

- Digital Canopy Model による森林キャノピーのモニタリング. 写真測量とリモートセンシング 48(1), pp4-14.
- 高橋教夫 (1979) 航空写真による樹種の識別に関する研究. 北海道大学農学部 演習林研究報告 36(1), pp79-145.
- 田中信行・松井哲哉・八木橋 勉・埜田 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, pp11-20.
- 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予測. 地球環境 14, pp153-164.
- 豊崎 卓 (1966) 筑波山をめぐる史跡. 筑波自然公園学術調査報告 日本自然保護協会, pp67-80.
- 津山幾太郎・松井哲哉・堀川真弘・小南裕志・田中信行 (2008) 日本におけるチマキザサ節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, pp99-113.
- Tsuyama, I., Nakao, K., Matsui, T., Higa, M., Horikawa, M., Kominami, Y. and Tanaka, N. (2011) Climatic controls of a keystone understory species, *Sasamorpha borealis*, and an impact assessment of climate change in Japan. *Annals of Forest Science* 68, pp689-699.
- 上杉基・吉田茂二郎・長 正道・今永正明 (1996) 空中写真による林分構造の推定に関する研究: 森林調査簿と現地調査データを組み合わせた推定方法の検討. 鹿児島大学農学部 演習林研究報告 24, pp59-64.
- Vittoz P., Rulence B., Largey T. & Frelechoux F. (2008) Effects of Climate and Land-Use Change on the Establishment and Growth of Cembra Pine (*Pinus cembra* L.) over the Altitudinal Treeline Ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40(1), pp225-232.
- Walther, G-R., Beißner, S. & Burga, C.A. (2005) Trends in the Upward Shift of Alpine Plants. *Journal of Vegetation Science* 16(5), pp541-548.
- 安田正次・大丸裕武・沖津 進 (2007) オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出. 地理学評論 80, pp842-856.