

博士論文（要約）

メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリング手法に関する研究

古家 直行

目 次

第一章 序	1
1-1 リモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの必要性和課題	2
1-1-1 REDD+制度におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリングへの期待	2
1-1-2 メコン中下流域における主な森林変動要因	3
1-2 リモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの高度化	8
1-2-1 高分解能衛星データの利用可能性の拡大	8
1-2-2 高分解能衛星データを用いた森林変動のモニタリング	8
1-3 本研究の目的と研究の特徴	9
1-4 本研究の対象地と全体の構成	10
第二章 樹冠計測に基づくカンボジア中部熱帯季節林におけるバイオマス推定	16
2-1 はじめに	17
2-2 資料と方法	18
2-2-1 研究対象地	18
2-2-2 カンボジア熱帯季節林における樹冠計測に基づくバイオマス推定手法	19
2-2-3 使用した航空機撮影空中写真およびLiDAR計測データ	19
2-2-4 地上プロットにおけるバイオマスデータの取得	20
2-3 樹冠計測に基づくカンボジア熱帯季節林におけるバイオマスの推定結果	20
2-3-1 単木樹冠の抽出結果および樹冠径からの樹冠高の推定式の導出	21
2-3-2 樹冠計測に基づく平均林冠高とLiDAR計測に基づく平均林冠高の関係	21
2-3-3 平均林冠高による炭素蓄積量の推定モデルの導出	22
2-3-4 樹冠計測に基づく平均林冠高からの平均林冠高および炭素蓄積量の推定精度	22
2-4 樹冠計測に基づくカンボジア熱帯季節林におけるバイオマス推定手法に関するまとめと考察	22
第三章 森林劣化の一形態としてのカンボジア中部熱帯季節林における違法伐採のモニタリング	34
3-1 はじめに	35
3-2 資料と方法	36
3-2-1 研究対象地	36
3-2-2 時系列高分解能衛星データを用いた違法伐採のモニタリング	37

3-2-3	使用した高分解能衛星データおよびその撮影諸元	38
3-2-4	地上調査および衛星画像目視判読による検証用の違法伐採木計測データの取得	39
3-3	高分解能衛星データを用いた違法伐採のモニタリング結果	40
3-3-1	高分解能衛星データを用いた違法伐採木の検知結果	40
3-3-2	高分解能衛星データを用いた違法伐採量の推定	41
3-4	高分解能衛星データを用いた違法伐採のモニタリングのまとめと考察	41
第四章	森林回復の一形態としてのタイ東北部におけるチーク人工林林分材積推定	54
4-1	はじめに	55
4-2	資料と方法	56
4-2-1	研究対象地	56
4-2-2	高分解能衛星データを用いたチーク人工林林分材積推定手法	57
4-2-3	使用した高分解能衛星データとその撮影諸元	58
4-2-4	地上プロットにおけるモデル作成および検証用チーク人工林林分材積データの取得	58
4-3	高分解能衛星データを用いたチーク人工林の林分材積の推定結果	59
4-3-1	地上計測に基づく樹冠径と胸高直径および単木材積の関係	59
4-3-2	目視判読に基づく樹冠径の計測結果	60
4-3-3	樹冠テンプレートマッチングによる樹冠抽出結果	60
4-3-4	高分解能衛星データを用いたチーク人工林林分材積の推定精度	61
4-4	高分解能衛星データを用いたチーク人工林の林分材積推定手法のまとめと考察	61
第五章	東南アジアにおける光学センサの雲なし画像取得確率	75
5-1	はじめに	76
5-2	資料と方法	77
5-2-1	ランドサット TM での雲なし画像取得確率の解析方法とデータセット	77
5-2-2	MODIS の雲マスクを用いた取得確率の解析方法とデータセット	78
5-3	東南アジアにおける光学センサの雲なし画像取得確率の解析結果	79
5-3-1	ランドサット TM での雲なし画像取得確率	79
5-3-2	MODIS の雲マスクを用いた晴天確率の地域性、季節性、年次変動の解析	80
5-4	東南アジアにおける光学センサの雲なし画像取得確率に関するまとめと考察	81
第六章	総論的総括	94

6-1	メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリング手法に関する考察	95
6-1-1	森林変動モニタリングにおける高分解能衛星データ活用による上層木樹冠情報利用の有効性	95
6-1-2	上層木検知におけるテンプレートマッチングの可能性、課題と今後の展望	96
6-1-3	メコン中下流域のデータ利用可能性からの森林変動モニタリングの考察	99
6-2	メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの総括	100
	謝辞	102
	図表リスト	105
	引用文献	110

第一章

序

1-1 リモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの必要性と課題

1-1-1 REDD+制度におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリングへの期待

地球温暖化への取り組みが急務となっている。温室効果ガス増加の多くは石油・石炭などの化石燃料の使用が占めるが、90年代における土地利用変化に伴う森林減少の排出量全体に占める割合も20%程度と推定されている (Denman et al., 2007)。さらに、森林には吸収源として緩和効果も期待される。森林の保全には新たな技術開発等を伴わないことなどから、有効かつ安価に取り組むことが可能な方策の一つとして取り上げられている (Stern, 2007)。途上国において現在も進行している土地利用の変化に伴う森林減少や森林劣化を政策的に抑止するために、森林減少や森林劣化に伴う排出量を削減することに対する取り組みに対して、削減量に応じて国際社会から資金を提供する仕組みが検討されている (Angelsen, 2008)。この仕組みは「途上国の森林減少・劣化に由来する排出の削減 (Reducing Emissions from Deforestation and forest degradation in Developing countries (REDD))」と呼ばれている (UNFCCC, 2007)。また、現在では、森林減少・劣化のみならず、森林資源を保全、持続的に管理・増強する取り組みまで含めて、REDDplusとして議論されるようになってきている (JICA/ITTO, 2012)。このREDDplusの枠組みを成り立たせるためには森林減少・劣化に伴う排出量を客観的に評価する必要がある。また、インセンティブの付与が想定されていることから、リーケージの回避などのために、国レベルあるいは準国レベルでの広大な面積のモニタリングが必要となる (IPCC, 2011)。広域のモニタリング、客観的データの利用、過去から現在、将来までの継続的なモニタリング、コスト効率の高さ、などが技術的な要件とされることから、リモートセンシング技術の応用が期待されている (GOF-C-GOLD, 2012)。

リモートセンシングを用いた熱帯諸国を対象とした土地利用・被覆変化のモニタリングや森林研究についてはこれまでも中南米アマゾン流域地域などを中心として、様々な研究が取り組まれてきている (例えば、Souza et al., 2003; Asner et al., 2005; DeFries et al., 2007; Achard et al., 2010)。しかしながら、森林減少・劣化といっても、その発生要因や発現の仕方、規模は、地域ごとに異なる。このことから、各地域でのリモートセンシング等を用いたモニタリングの取り組みを総合してモニタリングの手法を検討する必要がある (Kiyono et al., 2011; GOF-C-GOLD, 2012)。例として、抜き伐り的な違法伐採を挙げれば、伐採により樹冠率の変化が各国で定義されている「森林」のままである限り、土地利用は森林のままであるが、抜き伐りによる収穫に伴って炭素蓄積量は減少し、森林劣化と考えることができる。このような森林劣化に伴う炭素排出もその面積が広ければインパクトが大きいものと考えられる。このような森林劣化のモニタリングの可能性については、コストも含めた利用可能なリモートセンシングデータの種類や観測頻度などに依存する部分も大きく、特に森林劣化による炭素蓄積量の変化の技術的なモニタリングについては議論の余地が多く残されている (GOF-C-GOLD, 2012)。

1-1-2 メコン中下流域における主な森林変動要因

本研究で対象とするメコン中下流域に位置するカンボジア、タイの森林資源の推移状況やこれに関連する森林・林業政策、木材産業の推移とモニタリング手法とその課題について次に記述する。同じメコン川流域でも、地形・気候などの自然条件や、経済発展・人口増加、貧困などの社会・経済状況の違いによって、森林資源の変動状況は大きく異なっている。

1-1-2-1 カンボジアの森林事情

カンボジア中央部の平地と南西部の海岸沿いにはインドシナ半島地域でもかなりまとまった常緑の森林が残されている(Tani et al., 2007)。しかしながら、近年、経済発展に伴う外国資本による経済コンセッションへの投資による森林域へのプランテーションの拡大や、住民の移入等に伴うによる小規模な農地開墾が各地で発生しており、国際 NGO や国際機関などの森林保全への支援の高まりがみられるが、森林管理・ガバナンスは十分機能しているとは言えない (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010)。

FRA2005 (FAO, 2006)によれば、2000年から2005年間の森林減少率は2.0%とされ、高い減少率となっている。県ごとに年平均の森林減少率は大きく異なり、北西部の4県にて、最も減少率が高くなっている。土地利用の細分化や都市化などの影響と考えられている (Forestry Administration, 2008)。このような状況の中でカンボジア政府は国の森林資源の保全や持続的な管理を強化するために、森林の再編を進めることを決議している (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010)。この政策的支柱とは、1.国内消費や魚類保護区となる湿地と同様に、旱魃や洪水に対する保全のための十分な森林管理区 (forest reserve) を保証する森林収穫や森林管理の厳格なモニタリングによる持続的な森林管理、2.天然資源、生物多様性、絶滅危惧種の保護、3.健全で透明性のある地域に根付いたコミュニティフォレストの促進と発展、の3つである (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010)。また、2002年には森林法も制定されている。カンボジアのミレニアム開発目標7では、2015年までの森林資源に関する目標として、森林被覆を全国土の60%を目標に維持すること、330万haをカバーする保全地域を維持すること、燃材依存を52%に削減すること、などをベンチマークと掲げている (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010)。国家戦略開発計画 (2006-2010) はフェーズ2 (2009-2013) に入り、その下で森林分野においては、国家森林計画 (Forestry Administration, 2010) として、1.森林区分・境界の明確化、2.森林資源・生物多様性の保全、3.違法活動に対する監視・報告の強化を含む森林法の実効性の強化や、4.コミュニティフォレストの拡大、5.森林分野における人材育成や研究開発、6.REDD+制度を活用した持続的な森林財政の維持といった6つのプログラムに取り組むこととしている。

森林被覆に関する国家統計によると、1965年には国土面積の73%が森林に覆われていた

とされている (Forestry Administration, 2008)。森林の減少を把握するために、森林局では、1992/93、1996/97、2000 年、2002 年に一連の森林被覆アセスメントを実施している (Forestry Administration, 2008)。2002 年には 61.2%の森林被覆とされている。農地の拡大や違法伐採、建設ブーム、東南アジアからの外国直接投資の増加にともなる土地の需要の高まりなどが森林の減少や森林資源に依存するコミュニティの脆弱性の増加を生じさせている (Forestry Administration, 2008)。2006 年の森林被覆は 59.1%となっており、2002 年から 2006 年の間に全国土面積の 2%の森林が失われてしまったことになる。森林被覆の推移は図 1-1 の通りであり、1965 年の 73.0%から、1993 年 59.8%に、1997 年 58.6%、2002 年 61.2%、2006 年 59.1%となっている (Forestry Administration, 2008)。1965 年から 2006 年までの森林減少率は 13.95%であり、年平均減少率は 0.34%となる。また、地域・県ごとに人口増加や経済発展の状況などによって、森林率や減少率は大きく異なる様子がうかがえる (図 1-2)。

カンボジアでは森林面積の把握手法として、1993 年よりランドサット衛星やスポット衛星などのリモートセンシング技術を活用した森林被覆の目視判読による森林分布図の作成が採用され、数年に一回程度の頻度で森林分布図が更新されてきている (Forestry Administration, 2008)。森林減少のモニタリング手法の効率化として、現在目視判読にて実施している森林分布図更新の自動化による省力化や精度評価に基づき精度の向上が期待される部分である。また、技術的には、常緑林とともにカンボジアにおける主要な森林タイプのひとつである乾燥フタバガキ林がリモートセンシング画像上にて通年の変動が大きく、成否が利用可能な画像の取得時期に依存する部分が多いことから、この判読作業の効率化・安定化が期待されている。また、違法伐採が森林資源の減少をもたらす要因として指摘されているが (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010)、森林タイプの中での資源量減少として表れる森林劣化の評価・モニタリング手法については、これまでに十分な知見が得られていない。2002 年以降の森林分布図においては、森林のタイプ区分も大分類としての森林/非森林の区分が重視され、判読精度の劣る区分は単純化・統合されてきている (Cambodia, FAO, UNDP and UNEP, 2010) (表 1-1)。このため、「森林」の中での劣化はより顕在化しにくくなっていることが予想される。また、地域住民や土地なし農民の移住などに伴う小規模な農地開墾は、しばしば世帯レベルなどの小規模なコミュニティによって営まれているため、単位区画の面積は小さいものの総計としての森林減少面積は少なくないと考えられる。また、農地開発には至らなくても、前段階として森林地域からの抜き伐りによる違法伐採が盛んに行なわれており「森林」のままの炭素蓄積の減少として森林の劣化が多く見られる。このように、同じ森林でも、自然的な森林の立地・生育状況の違いに加えて、人為的な伐採や抜き伐りなどの影響の大小によって、空間的に森林のバイオマス量が大きな変異を持つことが予想されるが、これまでに十分把握されていない。以上のことから、カンボジアでは、様々な要因・スケールにて進行している森林減少の確実かつ安定的なモニタリングが期待されるとともに、森林内における違法伐採などに

伴う森林劣化の評価の手法開発が期待されている。このため、近年利用可能となった高分解能衛星データの活用によって森林を詳細に区分する技術の開発が期待されている。

1-1-2-2 タイの森林事情

タイは発展途上国から新興国として東南アジアの経済を牽引する存在となっている (Fogel, 2009)。コメやキャッサバ、メイズ、サトウキビなどの作物生産、近年ではゴム生産などの一次製品の生産・輸出は、相対的な比重は大きく縮小しているが、歴史的に国の経済の重要な一部を占めてきた (Alpha Research Co., Ltd., 2010)。タイはおよそ北緯 6 度から 20 度に位置しており、マレー半島の熱帯湿潤気候から、強く長い乾季を持つ熱帯モンスーン気候、北部から西部の山岳地域を中心とした比較的冷涼な気候が広がっている。これに伴い、熱帯林から熱帯季節林、亜熱帯林が広がっている (Blasco et al., 1996)。ミャンマーとの国境沿いの北部から西部地域ではチークの天然分布域となっており、チークの原木生産および木工品生産はこの地域およびタイの主要な生産物のひとつであった (Gyi and Tint, 1998)。80 年代から 90 年代にかけて農地への転用を中心として、森林が大幅に減少し、その後も継続的に減少した。これに対して、90 年代中頃から、保全や植林の取り組みが実施されてきている (Mahannop, 2004)。これによってタイは国全体としては、森林の減少段階から、回復段階にさしかかろうとしている段階と考えられる (Fisher and Hirsch, 2008; Southworth et al., 2012)。タイはミャンマーやマレーシアといった周辺国を中心とした国々と木材や木製品の輸出入を行っており、タイの森林資源・木材産業の動向はタイ国内のみならず周辺地域の国々に与える影響が大きい (Furuya, 2012)。

タイの森林率の推移 (1961-2009 年) は図 1-3 の通りである (RFD, 2008)。1998 年まで森林率は減少してきている。2000 年になって急に上昇に転じているが、この森林率の上昇は森林分布図作成における判読の最小単位の変更に伴う影響が大きいとされており注意が必要である (以前より小さな森林パッチがカウントされるようになったことによる (Ongsomwang, 2002))。タイ国内の地域区分では北部の森林率が最も高く、南部・中部で 30%前後、東北部は最も低く 20%を割る水準である。1980 年代から 1990 年代にかけての森林率の減少はいずれの地域でも鈍化してきているが、北部地域では減少率がやや高い傾向が見られる (1978-88 年 0.86%、1988-98 年 0.43%)。また、南部では継続的に森林減少が記録されている (同 0.42%、0.35%)。新たな判読基準が採用された 2000 年以降のみについて見ると、森林率ほぼ横ばいの状況となっており、2006 年以降はやや上昇傾向に転じているように見える。このように森林率の面から見ると森林減少は鈍化し、森林の保全の段階に入っているように見える。森林の違法伐採に関する統計においても、森林用地の違法転用面積は 2004 年にピークを迎え、近年は減少傾向にある (Furuya, 2012)。また、森林劣化をもたらす違法伐採についても、2001 年から 2007 年までに没収された木材の推移をみると、2002 年をピークに全体として減少傾向にある (Furuya, 2012)。このように統計上では森林の減少や劣化には一定の歯止めがかかっているものと考えられる。

次に、森林の保全に関する取り組みでは、タイでは国立公園局（DNP）において国立公園などの管理が実施されており、該当する森林地域の指定や保全が進むとともに、森林局が管理する森林として、森林保護区の指定も行われている(Sharp and Nakagoshi, 2006)。また、積極的に森林面積を増やす取り組みとして、植林の取り組みも見られる(Kijkar, 2001; Mahannop 2004)。1994年以降には造林補助金を利用した民間による植林活動が推進されている(RFD, 2002)。次に、2008年頃までの林業統計に見えるタイの木材産業に関する動向を概観すれば、1.アジア経済危機で冷え込んだ生産を脱却し2000年代には以前の水準を回復ないし大幅に増加するという状況にある、2.ゴムの製材が盛んで中国への製材輸出が大きく伸びている、3.ゴムの製材輸出が盛んになり、製材輸入に匹敵する水準となっている、4.繊維板や切削板などのボード類の東アジア地域への輸出が増加している、5.家具の輸出は日本やアメリカを中心に堅調である、6.伝統的なチークを利用した木材製品はミャンマーからの丸太輸入、ラオスなどからの挽材輸入に依存する側面がある、7.GDPの上昇に伴い紙類の生産が増加している、8.紙およびパルプの輸入を行うとともに、輸出も行っており、特に中国向けの木材パルプの輸出が大きい、などが分かる(Furuya, 2012)。全体的に輸入超過の状況から、ゴムの植え替えにより生じたゴムの製材品、木材製品の生産により輸出が増加しており、ユーカリのパルプ、紙の輸出など、郷土樹種の利用ではなく、ゴム採取後の木材利用や短伐期のユーカリといった農業的な短期型の林業生産の重要性が増している。古くから利用されているチークは国内天然林からの伐採が禁止され、隣国の資源および国内の人工林の資源に依存してきている。

タイにおいては、中分解能衛星データを用いて森林被覆マップが数年おきに作成されており、これに基づいて森林面積が計算されている(Ongsomwang, 2002)。また、地域別や県別に森林面積が算出され、これによって、時系列での森林の変化が記述されている(RFD, 2008)。ただし、報告されているのは、森林/非森林の時系列の推移であり、森林の蓄積や森林タイプ別の変化については把握することができない。先に述べたように、森林保全の強まりによって、過去における急激な森林減少が落ち着き、保全や再生に力を入れているタイでは、今後は人工林の資源量の動態把握が大きな課題となると考えられる。国内の天然林の伐採が禁止されており、また周辺国の森林資源の輸入に依存してきたが(Lakanavichian, 2001)、周辺国においても森林資源の枯渇が懸念される中で、林業公社(FIO)によって造成されてきた人工林資源や1994年の補助金造林の奨励によって時限的に拡大した国内人工林からの原料供給が期待されている(Koonkhunthod et al., 2007)。一方で、造成された人工林は造林不適地への植栽や管理不十分による不成績造林地も多く農地への再転用が生じているとされる(野田ら, 2011)。また、新規の植林も限られることから、人工林資源の安定的な供給体制が構築されているとは言えない。このように東北タイにおける郷土産有用樹人工林の林業経営安定化のためには、地域の資源量の把握に基づいた適切な資源管理・計画策定が不可欠である。しかしながら、現状ではタイ王室森林局(RFD)でも、補助金造林事業の古いデータベース(2002年の事業終了後更新できていない)や植

林地登記（伐採時は登記が必須だがそれまでは任意の登録）時点のデータベースに依存しており、系統的な把握ができていない(Furuya et al., 2012)。全国で県単位で設置されている現場に近い森林組合でも、上記の RFD の古いデータベースの利用や組合参加時点の古い情報に依存している場合が多く、間伐や主伐の実施状況などの情報が更新されているケースは非常に稀で、地域における人工林資源量の動態については、地方ごとに（郡などの行政単位で）選出されている個別の組合役員の知識などに頼っている状況である。RFD 民有林課でもこの状況を改善するため、汎用型 GPS を利用した造林地データベースの更新事業などの試行は行っているが、予算措置も十分とは言えず、作業が追いついていない状況である。

以上タイの森林資源・林業動向について総括すると、タイ王室森林局（RFD）は森林保全に大きく舵取りし、森林の減少には歯止めがかかったように見える。一方で、天然林からの木材伐採が禁止される中で、例えば、チーク材は林業公社（FIO）の人工林や民間造林からの資源供給が見られるものの、適切な資源の把握や管理がされている状況ではない。チークは周辺国からの丸太や製材品の輸入に依存する面が強く、今後周辺国においても天然林からの資源の枯渇が予想される中、資源供給の安定化にはこれまでに植林された資源の充実を図るとともに、国内人工林のさらなる造成を進める必要がある。このため、国内に造成された人工林資源の効率的な把握技術の開発が期待されている。

1-1-2-3 メコン中下流域における森林事情の総括

以上見てきたように、本研究にて対象とするメコン中下流域インドシナ半島に位置するカンボジア、タイはそれぞれ異なる森林の遷移推移段階に位置づけることができる（図1-4）。つまり、カンボジアは現在進行形で森林減少が大きく生じている地域であり（Stage2）、タイは1980年代から1990年代の大幅な森林の減少段階から、森林の保全へと力を入れたことによって国全体としては回復段階にさしかかろうとしている段階（Stage3）と考えられる（Fisher and Hirsch, 2008; Southworth et al., 2012）。以上の森林の遷移段階に従ってそれぞれの国における森林動態のモニタリングの重点課題は以下のようにまとめられる。カンボジアにおいては、定期的なモニタリングによる森林減少面積の把握と、顕在化しない形で進行していると考えられる違法伐採などによる森林劣化の影響の把握が急務である。タイでは経済発展とともに1980年代以降急激な森林減少が生じたが、1990年代までに森林減少は止まり、1990年代以降森林の保全に力を入れ、その効果が表れつつある。1990年代半ばに国を挙げての造林補助金を活用した人工林の植栽が推進されたが、国内での天然林資源の枯渇と同様に近隣諸国での森林資源の枯渇によって今後国内の林産加工業への木材の安定供給が危惧される中、造成された人工林資源の活用と持続的管理に向けて、人工林資源量動態の把握が急務となっている。本研究はメコン川流域に位置するこれらの国で重要とされている課題についてリモートセンシングを活用してモニタリングする手法を開発するものである。

1-2 リモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの高度化

1-2-1 高分解能データの利用可能性の拡大

IKONOS や QuickBird、Worldview-1、-2、GeoEye、Pleiades といった空間分解能が 1m を切る多数の高分解能衛星画像の利用が可能となり（表 1-2）、これまでの Landsat TM/ETM+ や SPOT といった十数 m から数十 m の解像度といった中分解能の画像を用いた間接的な林分構造の把握から、高分解能衛星データを用いた単木の直接観測・直接計測による林分構造把握までが視野に入ってきている（古家, 2002）。高分解能衛星データについては、第 2、第 3 世代の衛星センサも利用可能となり、衛星自体の数が増加するとともに、個々の衛星・センサにおける画像取得やデータ蓄積能力の向上等によって（GeoEye, 2009; 日立ソリューションズ, 2010; Astrium GEO-Information Services, 2012）、森林域においても高い空間分解能を持つ衛星データの入手が可能になりつつある。今後森林分野においても高分解能衛星データからの詳細な情報抽出に基づいた応用研究、実利用に向けた研究が精力的に行われていくことが期待される。また、LiDAR データの解析において、単木抽出を必要とせず、平均林冠高をパラメータとした材積推定手法が提案されているが（Lefsky et al., 1999; Asner et al., 2012）、高分解能衛星データでもステレオペア画像撮影による DSM 作成によって高さ情報を得ることまで可能となっており、この利用も期待される（田口ら, 2009）。

1-2-2 高分解能衛星データを用いた森林変動のモニタリング

高分解能データの利便性が向上するにつれて、これらのデータを利用した森林分野での資源量把握に関する研究が進められている（Culvenor, 2003）。ただし、この多くが画像解析のアルゴリズムが比較的容易で、コストをかけても管理する対象として重要な針葉樹人工林を対象としたものが多い。また、CASI や MEIS-1、-2 などの航空機搭載型センサの開発による撮影がいち早く実施された北米を中心として重要な研究が多数実施されてきている（例えば、Gougeon, 1995; Dralle and Rudemo, 1996; Franklin et al., 2001; Leckie et al., 2003; Wang et al., 2004）。また、オーストラリアの疎林においても、画像解析手法が適用しやすく、また、コストをかけず広域に単純作業を実施することができることから適用事例が見られる（例えば、Culvenor, 2002）。国内では、古家ら（2002）がこれまでに単木抽出手法として適用が簡易である Local maximum Filtering 手法（以下、LMF 手法（Wulder et al., 2000））に着目して、高分解能衛星画像に適用した際の、フィルタの大きさの違いや解像度の違いが与える影響などについて報告を行った。この中で LMF 手法を用いた直接観測によるスギ・ヒノキ人工林の単木抽出については、1m 程度の空間分解能では若齢の密な林分において抽出に限界があり、また一方、高齢の大きな樹冠を持つ疎な林分においては、適切なフィルタサイズを選択しなければ、ひとつの樹冠を複数の樹冠とカウントしてしまうことや、強い影が生じている箇所において推定値に問題が生じていることなどの問題点

について指摘した。一方で LMF 手法による推定値と空中写真判読値の関係から導き出される回帰直線を用いた立木本数密度の推定の可能性について示唆している（古家ら，2004）。また、Hirata ら(2008)は、スギ・ヒノキ人工林を対象として、Watershed 法（図 1-5）に基づく樹冠投影面積の計測によって、材積推定が行えることを示した。また、Takahashi ら(2010)は、LiDAR による樹高計測と QuickBird 衛星データによる樹冠計測を組み合わせることで単木材積を推定することが可能であり、これを広がりのあるプロット単位で集計することで ha 当たりの材積を推定できることを示している。このように、針葉樹人工林への適用事例は国内でも多く見られる。他方、国内においても、天然林の材積推定などへの高分解能衛星データの適用事例は限られている。このことは、天然林においては、天然林林木の単木樹冠の抽出手法や樹冠情報を用いた材積推定のアロメトリ式などの開発が進んでいないためと考えられる。また、高分解能画像の場合には、近赤外のバンドまでしか持たず、輝度値や反射率から林分材積などを直接的に推定する手法はこれまで一般的に見られない。広葉樹の天然林については、熱帯林を中心に林分が階層構造を持つことが多く、また、樹木の樹冠も不定形のものが多い傾向があることから、画像解析のアルゴリズムはより複雑となる。また、人工林に対しては適切な森林管理技術の適用のために、資源量動態を把握することが重要であるが、天然林においては、モニタリング結果が直接的に管理技術に反映される場面が少ないことも要因のひとつと考えられる。しかしながら、REDD+ 制度への注目などによって、中南米を中心として熱帯林の解析事例も見られるようになってきている（例えば、Asner et al., 2002; Asner et al., 2005; Broadbent et al., 2008; Palace et al., 2008）。一方、本研究で対象とする東南アジアに分布する熱帯林についての高分解能衛星データを用いた研究の事例は限られている。熱帯林には一般に単位面積当たりに大きな炭素蓄積が残されているが、Asner ら(2010)によって森林タイプごとの lidar を用いたバイオマス推定量の分布に示されているように、同じ森林タイプにおいても変動は大きく、森林タイプも含めて空間的な変異を捉えることは非常に重要なことである。また、これらの空間的な変異を十分に把握することは地上における固定試験地における調査結果のみからは十分に反映することは困難である。このように熱帯林のバイオマスの空間的な変異、時系列での変動をモニタリングする技術の開発は非常に重要な研究課題である。また、本研究で対象とするメコン中下流域に分布する熱帯季節林における解析の知見の蓄積も大変重要である。

1-3 本研究の目的と研究の特徴

本研究の目的は、メコン中下流域に位置するカンボジアとタイという森林の開発段階や立地環境が異なる国を対象として、適用可能なリモートセンシング技術を活用し、森林減少、劣化、人工林植栽による植生の回復を含めた森林変動を定量的にモニタリングする手法を開発することである（図 1-6）。

本研究の新規性は、これまで定量化が難しかった個別の森林変動事象に対するモニタリ

ング手法を提案していることにある。第二章で取り組んだ熱帯地域における樹冠情報を利用したバイオマス推定手法に関する研究では、林冠情報の判読結果を利用し、樹冠径と樹高の関係式を利用して林冠高を推定し、プロット単位での平均林冠高を計算した上でバイオマスを推定するという手法を提案しており、これまでに研究事例が見られない。Lidar によって取得される林冠高を用いたバイオマス推定の研究事例は見られるが、林冠情報については、今後さらに分解能が向上することによって、高分解能衛星データを用いて正確に計測することが可能となる可能性があり、コストが高い Lidar の詳細データ取得に対して、比較優位を持つ手法となる可能性がある。また、熱帯のみならず、その他の地域や人工林などの森林バイオマス推定にも有効な汎用性を持つ手法となり得る可能性がある。第三章では、違法伐採による持ち出し量の高分解能衛星データによる定量化に取り組んだ。森林劣化のひとつの形態として違法伐採の影響の評価は重要であるが、単木的な検知に基づいた報告はこれまでに見られない。第四章では、タイのチーク人工林の材積推定手法として、高分解能衛星データによる樹冠計測を用いた手法を提案した。チーク人工林の材積推定に関して、高分解能衛星データを活用した推定手法の提案はこれまでになされておらず新規性が高い。熱帯地域においては被雲によって光学センサの利用は困難と一般に言われているが、第五章において、東南アジア地域を対象に高頻度観測を実施している MODIS データの被雲情報を活用した地域ごとの被雲率の検討を行うことで、定量的に、光学センサの取得可能性の季節性や地域性、年次変動を明らかにした。以上をもとに、第六章において、本研究で利用した高分解能衛星データによる熱帯林森林変動モニタリング、特に本研究にて上層木から森林を捉える手法として活用したテンプレートマッチングによる単木抽出の有効性と課題、今後の展望について考察した。以上の本研究を通じて得られた知見は、これまで検討が十分でなかった森林劣化のモニタリングに関わる部分を多く含み、本研究により、メコン中下流域を対象として森林変動のモニタリング手法として抜けていた技術的な空白を埋めることに取り組んでいる。

1-4 本研究の対象地と全体の構成

本研究の対象地はカンボジア、タイというインドシナ半島に位置する2国である。カンボジアは森林減少が大きく発生している地域であり、この森林減少の把握が重要な課題である。また、同じ森林の中でも、違法伐採などに起因する森林劣化も生じているとされているが、この定量化が大きな課題である。本研究では、第二章において、リモートセンシングから抽出可能な森林情報について考察した上で、樹冠計測に基づくバイオマスの推定手法の開発を行う。また、第三章において、違法伐採を中心とした森林内での炭素蓄積量の変化として表わされる森林劣化の定量的な把握手法について検討する。第四章においては、タイにおいて重要な森林資源であるチーク人工林の資源量を把握する手法について検討する。それぞれの技術は先に挙げた各国の森林変動の重要な要因の影響の定量化に取り組むものである。また、第五章において、被雲率などの解析をもとに、この地域における

光学センサの利用可能性を検討する。最後に、第六章において以上をとりまとめ、解析手法適用の実効性について検討を行い、全体を総括する。

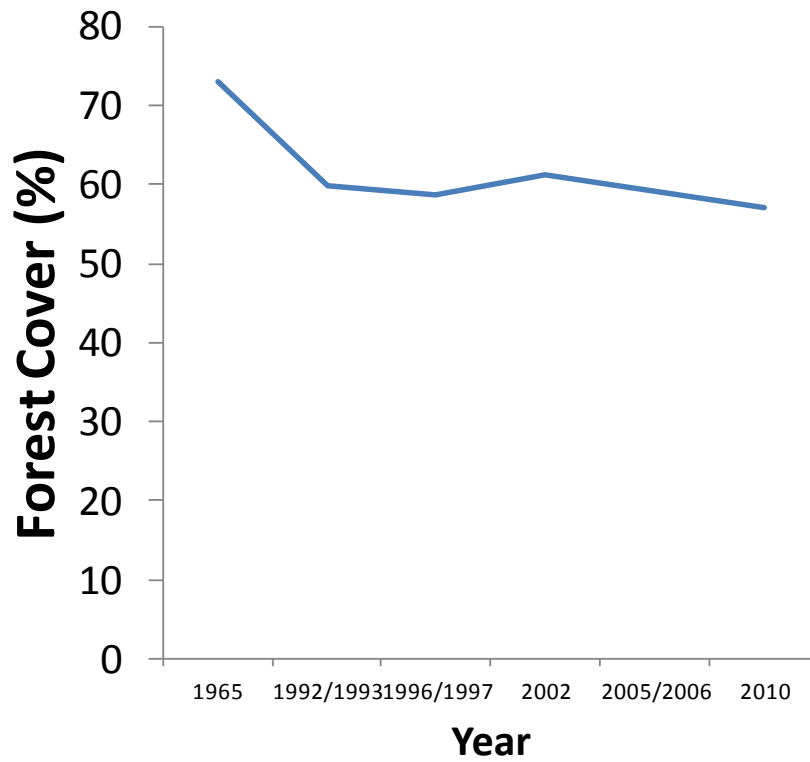


図1-1 カンボジアの森林率の推移

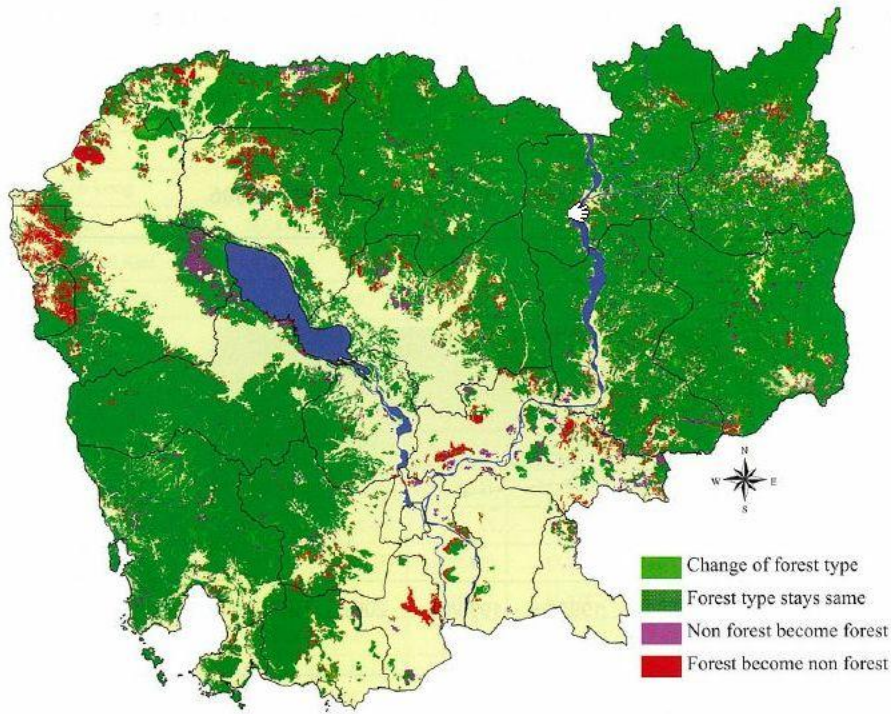


図1-2 2002-2006年のカンボジアの森林変化図
(出典：Forestry Administration(2008))

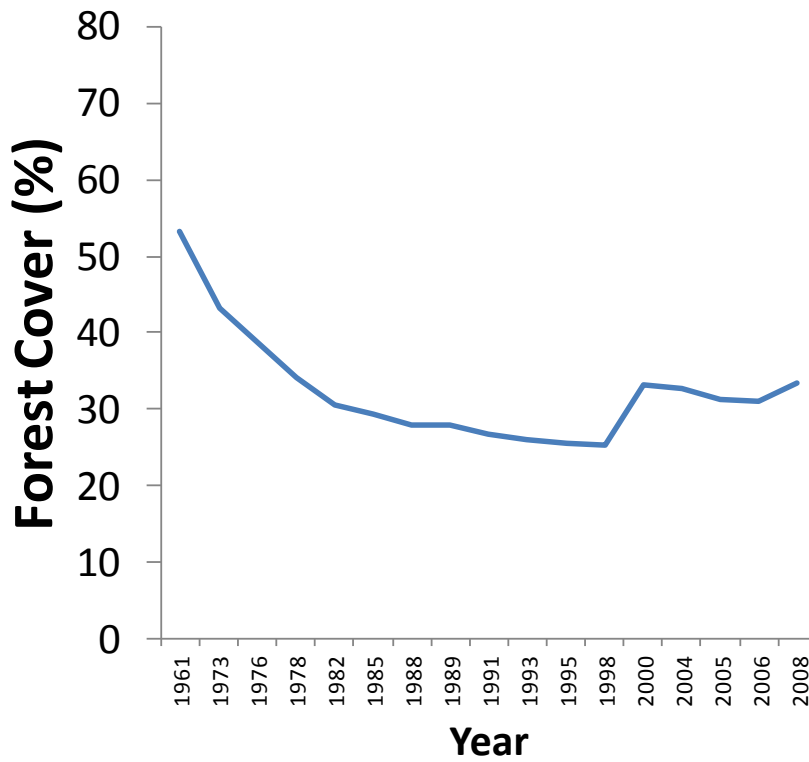


図 1-3 タイの森林率の推移

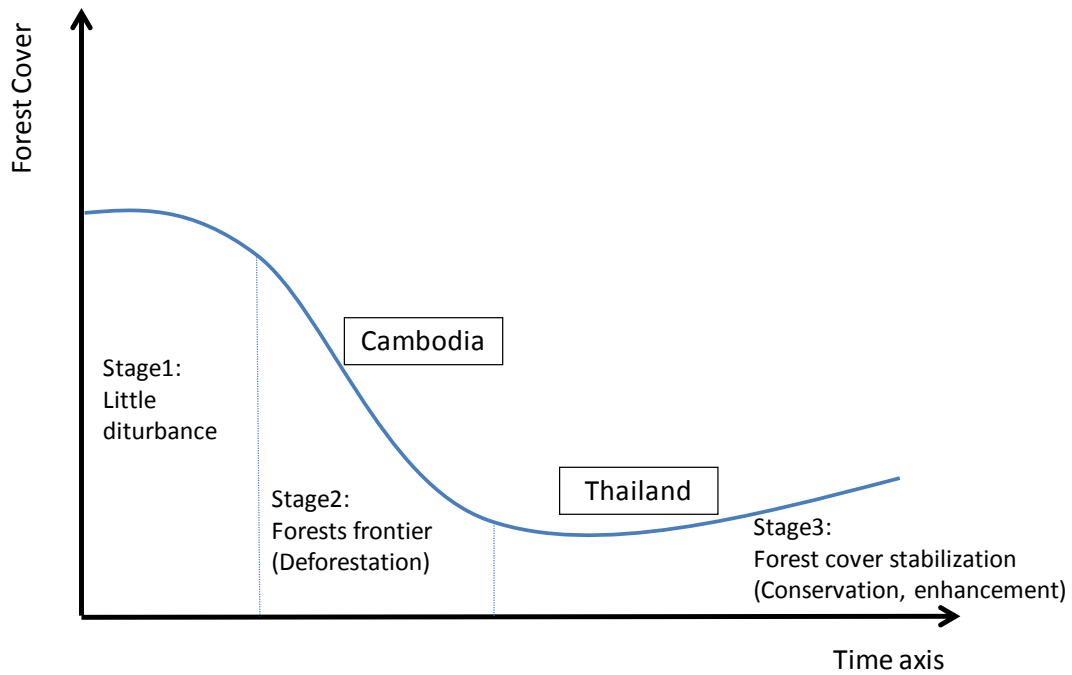


図 1-4 発展段階（横軸：時間）と森林被覆（縦軸）の変遷パターン
 (Angelsen (2008)を基に作図)

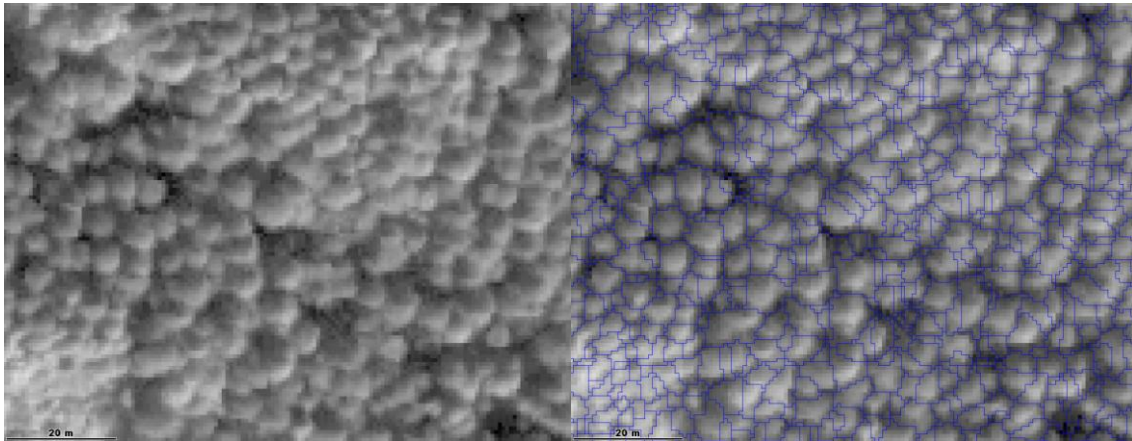


図1-5 高分解能衛星データによる単木樹冠抽出手法(Watershed法)の適用例

メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた 森林変動モニタリング手法に関する研究

タイ

- 天然の森林資源の枯渇(自国、周辺国)
- 人工林の造成(補助金による造林奨励)
- 資源量の変動の把握ができていない(特にチークが重要)

⇒チーク人工林資源の効率的な把握(第四章)




カンボジア

- 森林減少の進行
- 「森林」においても抜き伐りによる劣化が進行

⇒森林減少・劣化の広域での効率的かつ正確な把握手法

樹冠情報からのバイオマス推定(第二章)

違法伐採検知(第三章)

東南アジア地域の画像取得の空間的差異・季節性
光学画像取得可能性のゾーニング(第五章)



総括(第六章):
樹冠情報の活用による森林変動の把握



**メコン中下流域で必要とされる森林減少・劣化・再生の
モニタリング技術の開発(技術的空白の解消)**

図1-6 本研究で対象とする森林変動要因と全体の構成

表 1 - 1 カンボジア森林タイプ区分の単純化

Year	1996/1997	2002
Institution	MRC/GTZ	FRM
Forest Types	Evergreen Dense	Evergreen Forest
	Evergreen Disturbed	Semi Evergreen Forest
	Evergreen Mosaic	Deciduous Forest
	Mixed Dense	Other Forest
	Mixed Disturbed	
	Mixed Mosaic	
	Deciduous	
	Deciduous Mosaic	
	Forest Regrowth	
	Inundated Forest Regrowth	
	Inundated Forest	
	Mangrove Forest	
	Forest Plantation	
	Inundated Forest Mosaic	

表 1 - 2 利用可能な高分解能衛星センサの仕様

衛星 機関 国	PRISM JAXA Japan	QuickBird-2 Digital Globe Inc. USA	World View-2 Digital Globe Inc. USA	Pléiades CNES France
打ち上げ	2006.1.24	2001.10.18	2009.10.8	2011.12.17(Pleiades1A) 2012.12.2(Pleiades1B)
高度	691.65km(赤道上空)	450km	770km	694km
傾斜角	98.16°	98°	97.2°	98.2°
降交点時刻	10:30AM±15min	10:00 AM	10:30 AM	10:30 AM
軌道	太陽同期準回帰軌道	太陽同期軌道	太陽同期軌道	太陽同期準極軌道
地球周回時間	98.7分	93.6分	100分	98.79分
回帰日数	46日	20日		26日
同一地点再観測間隔	46日	1-3.5日	1.1(1m以下の解像度) 3.7日(52cm解像度)(オフナディア ア20° 内で)	毎日(2基体制で) (1機で47度のポイントング2 日、2機で43度で毎日)
観測幅(衛星直下)	35km(三方向視)/70km	16.5km(直下視)	16.4km(直下視)	20km(直下)
観測波長帯				
Panchromatic	520-770nm	450-900nm	450-800nm	470-830nm
Multispectral		450-520nm(blue) 520-600nm(green) 630-690nm(red) 760-900nm(NIR)	400-450nm(coastal) 450-510nm(blue) 510-580nm(green) 585-625nm(yellow) 630-690nm(red) 705-745nm(red edge) 770-895nm(NIR) 860-1040nm(NIR2)	430-550nm(blue) 500-620nm(green) 590-710nm(red) 740-940nm(NIR)
地上分解能				
Panchromatic	2.5m	0.61m(直下) 0.72m(25° オフナディア)	0.46m(直下視) 0.52m(オフナディア20°)	0.5m(Product) (0.7m(Ground sampling))
Multispectral		2.44m(直下) 2.88m(25° オフナディア)	1.84m(直下視) 2.07m(オフナディア20°)	2.0m(Product) (2.8m(Ground sampling))
量子化レベル	8bit	11bit	11bit	12bit
ストレージ		128Gb	2199Gb	600Gb
伝送	120Mbps(Direct) 240Mbps(DRTS) 320Mbps/telescope	320Mbps	800Mbps	465Mbps
撮影能力		200,000km ² /day	1 million km ² /day	450segments/day(up to 600)
ステレオ撮影 備考	可能(三方向) 運用停止2011年5月12日	可能	可能	可能(2方向/3方向)

第二章

樹冠計測に基づくカンボジア中部熱帯季節林 におけるバイオマス推定

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内
に出版予定である。

第三章

森林劣化の一形態としての カンボジア中部熱帯季節林における 違法伐採のモニタリング

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内
に出版予定である。

第四章

森林回復の一形態としての タイ東北部におけるチーク人工林林分材積推定

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内
に出版予定である。

第五章

東南アジアにおける 光学センサの雲なし画像取得確率

5-1 はじめに

リモートセンシングを用いた森林減少および森林劣化の抽出手法を検討してきたが、以前から言われるように、リモートセンシングの利用においては、解析に利用可能な画像が得られるかどうか第一に重要である。この画像の取得率は、光学センサ画像であれば、雲なし画像の取得可能性として理解することができる。

最も良く頻繁に利用されているランドサット衛星画像の被雲率については、これまでに様々な地域において研究されている(e.g., Kontoes and Stakenborg, 1990; Fuller et al. 1994; Asner, 2001; 秋山・川村, 2003; Sano et al., 2007; Ju and Roy, 2008)。しかしながら、本研究で対象としているメコン中下流域を含む東南アジア地域を対象とした事例は少ない。ランドサット衛星画像は現在では USGS (アメリカ地質調査所) よりアーカイブ画像をオルソ幾何補正処理されたプロダクツの利用が可能となっているが (Wulder et al., 2012)、地球全体の 1990 年や 2000 年前後の画像を揃えたデータセットとして、Landsat GeoCover がある (Global Land Cover Facility (GLCF) (2004))。表 5-1 に例としてカンボジアの 1990 年および 2000 年のデータセットの取得日を示した。いずれの地点においても、1990 年ないし 2000 年を中心とした時期で雲の少ない画像を検索して画像が揃えられた結果であるにも関わらず、1990 年のデータセットのみを見ても、1989 年に取得されたものやパス:ロウ=127:52 の画像のように 1994 年に取得されたものしか適切な画像が得られていない事例も見られる。2000 年についても、2000 年から 2002 年の取得時期に幅のある画像が選択されている。また、取得時期 (季節) も 1990 年のデータセットで見ても、11 月や 12 月の乾季初期のものから、1 月末の乾季中期のものまであり、また 2000 年はより取得時期の変異が大きく、11,12 月の乾季初期から、2,3 月の乾季后期、さらには雨季の最中である 7 月に取得されたものまでが含まれている。これらのデータセットを利用して 1990 年から 2000 年までの変化を見ようとすると、1990 年と 2000 年のデータセットで乾季の初期と後期がまちまちである場合や、乾季と雨季の組み合わせである場合があり、変化抽出などの画像解析を行う上では困難が大きい。このように、光学センサ画像の利用においては、データの取得可能性が解析可能な時期や解析可能な事象を規定する大きな要因である。

これまでの画像取得確率に関する研究の多くは先に示したようにランドサット TM の画像全体の広がりでの取得確率の地域特性を検討したものである。このため、ランドサット画像のシーン単位より詳細に空間的な違いを考慮することは出来ていない。他方、現在 MODIS がほぼ毎日観測を行っており (Savtchenko et al., 2004)、このデータの解析を行うことで、データ取得の年間の変動をより詳細に、かつ、地域性をより詳細に、明らかにすることが期待できる。光学センサの雲なし画像取得確率には、地域性や季節変動が見られることが経験的に知られている一方で、その定量的な検討は十分とは言えない。本研究では高頻度観測衛星センサのうち、一般に利用されている太陽準同期軌道を持つ中分解能衛星などの撮影時間に近い時期に撮影を実施している Terra に搭載されている MODIS の時

系列データを利用することで、東南アジア地域における森林モニタリングのための雲なし画像の取得率の地域性や季節性、経年変動を明らかにできる可能性がある。

以上のことから、本章では、まず、ランドサット TM レベルにおける雲なし画像の取得確率について、東南アジアを対象として解析した上で、次に、MODIS の雲マスク画像を用いて、より詳細に雲なし画像の取得確率の地域性や季節性、経年変動を明らかにすることを目的とした。これらの情報は、画像解析における観測頻度や解析手法、解析に使用すべき画像の選択に大きく関係しており、モニタリングしようとする森林変動の事象発生のタイミングと合わせて考慮すべき重要な事柄である。

5-2 資料と方法

5-2-1 ランドサット TM での雲なし画像取得確率の解析手法とデータセット

本研究において対象としているメコン中下流域のランドサット衛星画像については、タイの GISTDA (Geo-Infomatics and Space Technology Development Agency, Thailand) において画像の取得・保存が行われている。今回はこのうちランドサット 5 号の過去に取得されたアーカイブ画像のデータベースの一部を利用した (GISTDA, 2007)。このアーカイブ画像のデータベースには、取得された地域を示すパスロウ、取得された日付、画像の被雲率 (図 5-1) などの情報が含まれている。このうち入手可能であった 1997 年 7 月から 2001 年 8 月までと 2003 年 11 月から 2007 年 10 月までのデータベースを利用した。被雲率は GISTDA において被雲率の計算アルゴリズム (Automatic Cloud Cover Algorithm (ACCA)) に基づいて計算されたものである。画像によって、雲の出方は異なっているが多くの画像データセットを利用して全体的な傾向を知ることを目的とするため、ここでは被雲率の数値のみを利用して被雲状況を判断した。つまり、被雲率が高いと雲が多く出ていることを示しており、解析に利用できる地域が狭まることを示している。また、雲が多くかかれば、その分、その雲のつくる影の範囲も大きくなり、雲として検知されない場合でもうす雲などの実際上の画像解析には大きく支障を及ぼす要因の影響を受けた地域も大きくなる。そこで、ここでは、被雲率 20% までの画像を解析が可能な画像として考え、20-11%、10-1%、0% の 3 段階の被雲率にて、それぞれ、衛星画像の取得位置を示すパスロウごとに集計した。この被雲率 20% とは他のアマゾン地域や日本などでの同様の解析をした研究 (Asner, 2001; 秋山・川村, 2003; Sano et al., 2007) においても採用されている数値であり、妥当な数値と考えられる。より厳しい被雲の判断をするには、10% 以下などの集計結果のみを参考とすれば良い。集計はパスロウごとに、先に示した 2000 年前後のデータベースが利用可能な全期間における月ごとの取得率として計算した。あるパスロウにおける取得率の集計結果のサンプルを図 5-2 に示した。この例は、北半球に位置するメコン中下流域でよく見られるパターンであり、棒グラフが高い月・季節 (ここでは例えば、11 月から 4 月くらいまで) が雲なし画像の取得確率が高い時期と言える。このため、このような時期には解析に利用できるリモートセンシング画像の取得可能性が高いと言える。

一方、5月から10月には棒グラフが低くなっており、この時期には画像の取得率が低くなっていることが分かる。特に7月や8月にはこの地域では、被雲率の低い画像の取得の可能性が非常に低いことが分かる。

5-2-2 MODISの雲マスクを用いた取得確率の解析方法とデータセット

(本項の内容は、学術雑誌に掲載されており、出版社との契約条件によって公表できない。本項の内容は、Journal of Forest Planning, Vol.19, No.2, pp.43-51に掲載されている。)

5-3 東南アジアにおける光学センサの雲なし画像取得確率の解析結果

5-3-1 ランドサットTMでの雲なし画像取得確率

インドシナ半島周辺のランドサット被雲率の集計結果を図5-4に示す。想定された通り、この地域ではアジアモンスーンの影響を受けて、乾季である11月から4月頃に雲なし画像の取得確率が高く、雨季である5月から10月頃に全体的に取得確率が低い。他方、海岸沿いであるベトナムでは一年を通して取得率が低い地域が広く存在していることが分かる。また、例えば、パス:ロウ=126:52のように周辺地域に比べて雨季でも比較的取得確率が高い地域が見られる。このように、全体として、乾季と雨季で取得確率が上下するパターンが一律に見えながらも、隣り合う地域でも大きく取得確率やそのパターンが異なる地域があることが分かった。

次に、島嶼部における同様の集計結果は図5-5の通りであった。このように、赤道直下では雲なし画像の取得確率が非常に小さくなっていることが分かる。また、ボルネオ島においても、赤道から離れ緯度が高くなるにつれて、やや雲なし画像の取得率が季節性をもち若干高くなっていることが分かる。

5-3-2 MODISの雲マスクを用いた晴天確率の地域性、季節性、年次変動の解析

(本項の内容は、学術雑誌に掲載されており、出版社との契約条件によって公表できない。本項の内容は、Journal of Forest Planning, Vol.19, No.2, pp.43-51に掲載されている。)

5-4 東南アジアにおける光学センサの雲なし画像取得確率に関するまとめと考察

(本項の内容は、学術雑誌に掲載されており、出版社との契約条件によって公表できない。本項の内容は、Journal of Forest Planning, Vol.19, No.2, pp.43-51に掲載されている。)

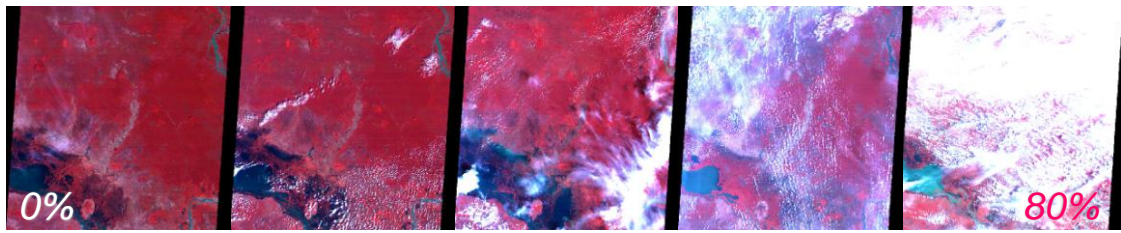


図5-1 ランドサット TM における 20%きざみの被雲率の例（左から 20%きざみで 0%から 80%に増加する）

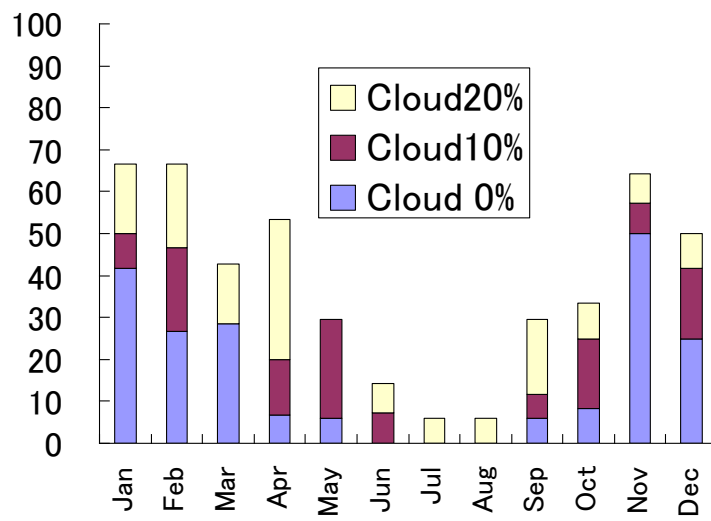


図5-2 ランドサット衛星データの画像取得確率の集計例

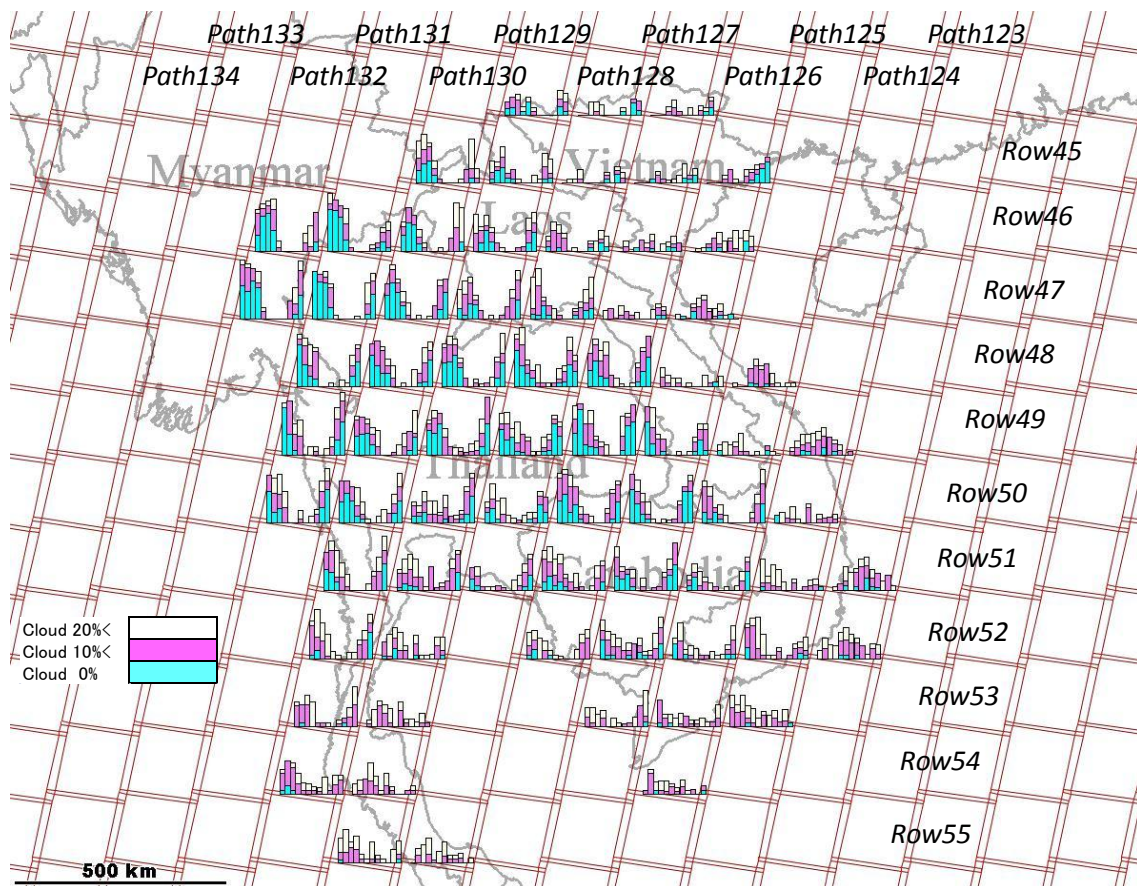


図5-4 インドシナ半島における雲なしランドサット TM 画像（被雲率 20%以下）の取得確率のパターンとその空間分布

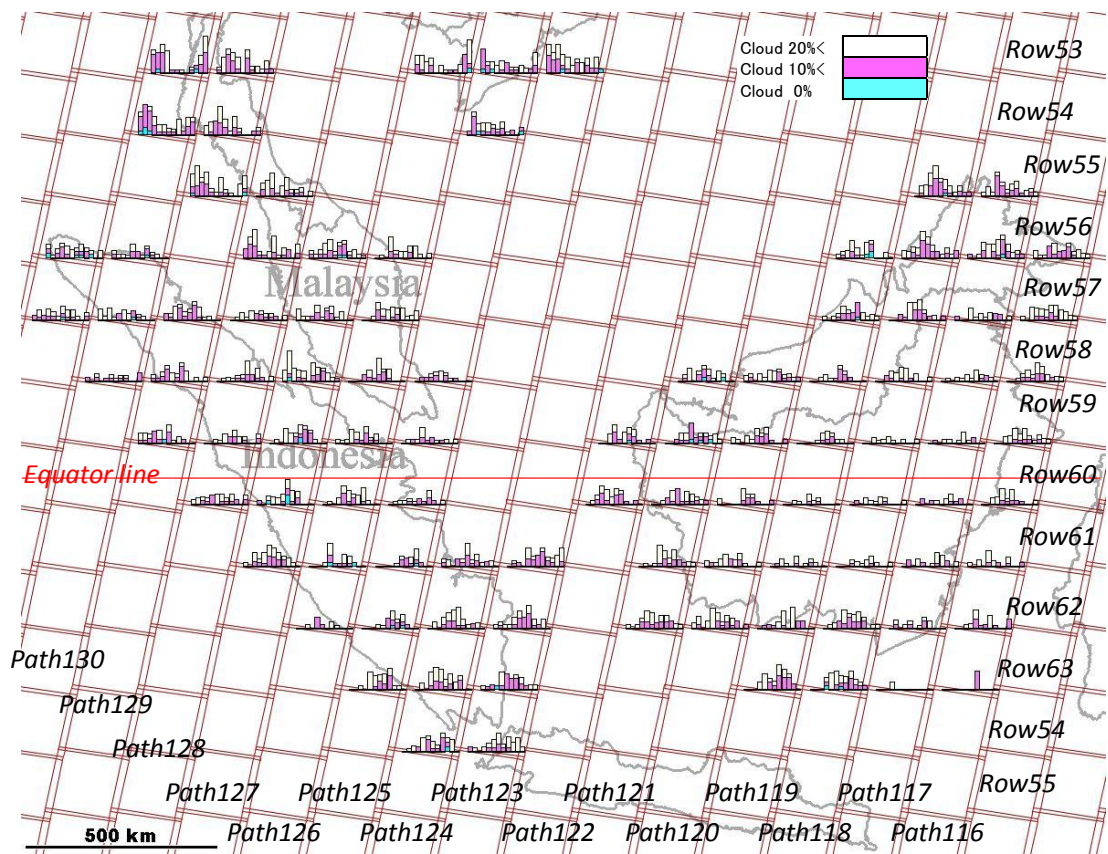


図5-5 島嶼部における雲なしランドサットTM画像（被雲率20%以下）の取得確率のパターンとその空間分布

表5-1 カンボジアにおける GeoCover データセット (1990 年および 2000 年) におけるランドサット衛星画像取得日の違い (パス : ppp, ロウ : rr, 年 : yyyy, 月 : mm, 日 : dd)

PathRow (pprr)	1990 (yyyymmdd)	2000 (yyyymmdd)
12451	19901230	20000304
12452	19901230	20010203
12550	19890108	20020213
12551	19901221	20020213
12552	19890116	20001106
12650	19891225	20001231
12651	19901228	20010711
12652	19891115	20010711
12653	19921201	20010116
12750	19901117	20001104
12751	19901117	20011123
12752	19940128	20020110
12850	19900108	20020218
12851	19900108	20011130

表5-2 MODIS のセンサ特性と雲マスク判定に使用されている観測波長帯

軌道	Orbit	sun-synchronous, near-polar nominal descending		
高度	Altitude	705km		
降交時間	Descending node	10:30am(Terra)		
	Ascending node	1:30pm(Aqua)		
観測幅	Swath	2330km		
量子化ビット数	Quantization	12bits		
		250m(bands 1-2)		
空間分解能	Spatial Resolution	500m(bands 3-7)		
		1000m(bands 8-36)		
観測波長帯	Band	Bands 1 to 19 are in nm; Bands 20 to 36 are in μ m	Cloud Mask	Role
		1 620-670	Y	250m and 1km cloud detection
		2 841-876	Y	250m and 1km cloud detection
		3 459-479	Y	Smoke, dust detection
		4 545-565	Y	Snow/ice detection(NDSI)
		5 1230-1250	Y	Smoke, dust detection
		6 1628-1652	Y	Terra snow/ice detection(NDSI)
		7 2105-2155	Y	Aqua snow/ice detection(NDSI)
		8 405-420	Y	Desert cloud detection
		9 438-448	Y	Sun-glint clear-sky restoral tests
		10 483-493		
		11 526-536		
		12 546-556		
		13 662-672		
		14 673-683		
		15 743-753		
		16 862-877		
		17 890-920	Y	Sun-glint clear-sky restoral tests
		18 931-941	Y	Sun-glint clear-sky restoral tests
		19 915-965		
		20 3.660-3.840	Y	Land, sun-glint clear-sky restoral tests Snow/ice, dust detection
		21 3.929-3.989	Y	Smoke detection
		22 3.929-3.989	Y	Cloud detection
		23 4.020-4.080		
		24 4.433-4.498		
		25 4.482-4.549		
		26 1.360-1.390	Y	Thin cirrus, high cloud detection
		27 6.535-6.895	Y	
		28 7.175-7.475	Y	
		29 8.400-8.700	Y	
		30 9.580-9.880	Y	
		31 10.780-11.280	Y	
		32 11.770-12.270	Y	
		33 13.185-13.485	Y	Inversion detection
		34 13.485-13.785		
		35 13.785-14.085	Y	High cloud detection
		36 14.085-14.385		

第六章

総論の総括

6-1 メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリング手法に関する考察

6-1-1 森林変動モニタリングにおける高分解能衛星データ活用による上層木樹冠情報利用の有効性

第二章や第三章で対象としたような熱帯季節林を対象とした場合には、上層木の空間的な分布を特定することが大変重要である。上層木の空間的な分布が地上部バイオマスの空間的な変異を表わす重要なキーとなり、地上部バイオマスとの相関が高いとされる林冠高の空間変異にも大きな影響を及ぼしている。このため、リモートセンシングの利用においても、これらの上層木を検知し計測することが非常に重要である。樹冠径あるいは樹冠面積については、胸高直径との相関が高いことが空中写真の解析の段階から知られている(渡辺, 1987)。人工林においては樹高と胸高直径の二変数を用いた材積あるいはバイオマスの推定が実施されているが(南雲・箕輪, 1990)、天然林においては、地上での計測においても、胸高直径のみに基づいて材積やバイオマスの推定が行われている (Brown et al., 1989; Chave et al., 2005)。このことから、樹冠情報を抽出し、樹冠径の計測からバイオマスを推定する方向性は重要と考えられる。樹冠径と胸高直径の関係は林内の中下層の樹木においては明瞭ではないが、上層に出た樹木ほど光を利用することが可能となり、同化器官としての樹冠部を形成することができるため、樹冠径と胸高直径の相関が高くなっていた。また、第三章における伐採木および枯死木の胸高直径と樹冠径の間には相関関係が得られた。上層木の大きな胸高直径を持つ樹木ほど、樹冠が大きくなり、空間的な占有面積が広いことを示している。このことから、上層木の樹冠径を計測する重要性が高いと言える。

第二章において、航空機搭載デジタルカメラを用いて撮影された空間分解能約 7cm という詳細な画像を用いて樹冠の抽出を実施した。しかしながら、多層構造を持つ森林においては、空から検知可能なのは上層に位置する樹冠に限られる。中下層に位置する樹木については、長い波長の SAR のレーダー観測のように樹冠の内部まで侵入する情報が得られるセンサを利用する場合や航空機搭載型 LiDAR におけるパルスの高密度照射や波形記録式 LiDAR によって中下層木からの反射を観測する場合を除いては、リモートセンシングから観測することはできない。このため、中下層木のバイオマスについては、上層木情報や立体構造からの推定や地上調査などによって補完する必要がある(清野ら, 2009)。樹冠情報は空からの観測を行うリモートセンシング技術において直接的に計測可能な最も重要なパラメータである。この計測精度はセンサの空間分解能が向上することによって向上する。森林は立体構造を持ち、ステレオペア画像の取得などで林冠モデル (DSM) を作成することが可能であるが、密な森林において地面を捉えることは困難であることが多く、地盤高 (DTM) の計測に課題がある。斜面位置によって人工林などでは樹高成長 (地位) に差が見られるが(Hirata, 2008)、第二章で見たように、光学センサで直接的に計測できる樹冠情報を抽出し、これから林冠高などの高さのパラメータを推定していく方向性も今後より積極的に検討されるべきであろう。とりわけ、森林は傾斜地に残されているケースが多いが、

傾斜地で地盤高の情報を得ることは容易ではなく、樹冠の抽出のみから、林冠高等のパラメータが取得できることが望ましい。

高分解能衛星データの活用においては、第2、第3世代の高分解能衛星センサが運用されるようになり、画像の取得能力が大幅に向上した (GeoEye, 2009; 日立ソリューションズ, 2010; Astrium GEO-Information Services, 2012)。もちろん、いずれの商用衛星の場合にも、取得要求に基づいた撮影が多くの場合実施されているため、需要は都市部で高く森林部における画像取得は劣っている。しかしながら、高分解能センサの運用開始当初に比べれば、利用可能なセンサの種類も多くなり、画像蓄積が増えてきたことによって、森林域のカバー率の改善が見られてきている。森林分野での高分解能衛星データの活用の有効性が証明され、森林部においてもアーカイブ画像が整備されることで、本研究で提案したような詳細な森林の劣化も含めたモニタリングが将来的に可能となる可能性が高まるものと期待される。定期的な観測によって情報の活用も進むものと考えられ、相乗効果が期待される。高分解能衛星データの活用においても、RPC 情報の提供によって、画像データ取得の際の衛星・センサの位置や姿勢情報が再現され、オルソ画像の作成などが容易になってきている。また、画像解析の面では、EADAS Imagine の AutoSync などの追加モジュールなどで高分解能衛星データにおいても多時期画像の精密な位置合わせに必要なタイポイントの取得がスムーズに行えるようになってきており (ERDAS, 2008)、単木的な対応付けのため高い位置精度が要求される場合でもユーザー側の負担は軽減されてきている。同一軌道上での撮影でないため、撮影条件が一定ではなく、また、B/H 比も考慮されていないため実体視には困難が伴う場合もあるが、同一箇所において多時期の画像が得られることで、異なる角度からの撮影画像を利用した実体視が可能となる。本研究にて対象としたカンボジアの熱帯季節林の場合でも、DDF の疎林の場合には実体視が可能となることで樹冠と背景との判別力は大幅に向上した (古家ら, 2012)。農地などと比較して、森林の特徴は立体構造を持つことであり、その立体構造によって、森林としての様々な機能 (炭素蓄積や生態系サービスなど) を発揮させている。高分解能衛星データのカバー率が向上し、広域での定期的な情報の更新が可能となることで、精緻な最新の情報に基づいた森林管理が通常業務のサイクルとして実現されることが期待される。

6-1-2 上層木検知におけるテンプレートマッチングの可能性、課題と今後の展望

本研究においては、熱帯季節林を対象として、重要な上層木樹冠の抽出を高分解能衛星データへのテンプレートマッチング手法 (Pollock, 1998) によって行った。単木樹冠情報の抽出手法は、Valley following 法 (Gougeon, 1995; Leckie et al., 2003) のように樹冠と樹冠の間に見える影やギャップなどの谷間をたどるボトムアップの手法や Watershed 法 (Walsworth and King, 1998; 児島利治, 2001) などの樹冠の上から情報を得るトップダウンのアプローチなどが提案されている (Culvenor, 2003)。他の単木樹冠情報抽出技術と比較したテンプレートマッチング手法の特徴は下記のような点が挙げられる。技術的な使い

やすさとしては、パンクロマチックバンドのみの単バンドのみに対しても適用が可能な手法であるということが言える。また、サイズの異なるテンプレートを準備することで、単バンドの画像から複数の情報を抽出することが可能になる。一方で、マルチスペクトルの画像が利用可能な場合には、複数画像に対して同様の方法を適用することで、複数画像を用いたチェックを実施することも可能となる。単バンドを用いて樹冠テンプレートとの類似度に変換することで、異なるセンサに対しても、同じような処理が可能となる可能性もある。この点についても、今後検証を進めていくべきである。近年では、QuickBird, Geo-Eye, Pléiades 衛星などの高分解能衛星センサではステレオ撮影が撮影オプションとして選択可能であり、また、ALOS/PRISM でも三方向視による定期的な観測が行われた (EORC, JAXA, 2007)。ステレオ撮影によって、実体視による三次元計測が可能となるのとは別に、これらの多方向からの画像に対して、それぞれテンプレートマッチング手法を適用してやることで、二重三重のチェックを行うことも同時に可能となる可能性もある。この方向での検討はこれまでに進められていないが、検討すべき方向だと考えられる。また、同様に高分解能衛星データによる観測の場合には、ポインティング撮影によって、まちまちな方向に樹冠は傾いてしまう (Wulder et al, 2008)。観測角が異なることによって、高分解能衛星データの活用の際に、異なる時期の画像を用いて変化抽出などの自動処理を行うことが困難となる場合がある。テンプレートマッチング手法は、これらの樹冠の傾きの違いを考慮したテンプレートを作成することで、観測角の影響を軽減できる可能性がある。もちろん、観測角が非常に大きい場合には、樹冠自体が大きく変化してしまうため、立体構造を持つ森林のモニタリングには不適と考えられるが、どのくらいの観測角まで利用可能かということについても、今後検討する必要がある。その他、テンプレートマッチング手法では、斜面にできる陰影や雲の出現で地上にできる影などの影響を軽減できる可能性がある。本研究においても、第四章のタイにおけるチークの樹冠抽出において、一部プロットは雲の影の中に完全に入ってしまったが、特別な扱いを必要とせず、精度よく樹冠が抽出されている。これは、高分解能衛星データにおいて量子化ビット数が向上するととも (Astrium GEO-Information Services, 2012)、今回利用した画像相関を利用した類似度 (ZNCC) の計算において、樹冠内での明るさの変化の度合をテンプレートとの類似度の計算に利用していることから、影の影響などの全体的な明暗や色の違いが正規化されていることによる (高木・下田, 2004)。このため、季節による展葉や紅葉などの時期における葉の色の違いなどの影響も軽減できる。一方で、他の SAD (Sum of Absolute Difference) や SSD (Sum of Squared Difference) といった明るさや色情報の直接の比較によって計算された類似度 (高木・下田, 2004; デジタル画像処理編集委員会, 2009) を利用する場合には、樹冠の色情報を含んだ類似度が計算される。今後、これまでに空中写真の樹冠判読キーとして利用されてきたような樹冠の形状や色の違いなどの樹種ごと、属ごとの違いなどがテンプレートに反映できるようになっていけば、上層木に表れている植物の多様性の評価や針広混交林の混交率などの情報を抽出することも可能となっていくと思われる。このように今後

は樹冠テンプレートのライブラリを整備していくことも重要と考えられる。テンプレートの考え方も、本研究で用いたような画像内から様々なサイズの樹冠テンプレートを作成し、主成分分析によって典型的なテンプレートを作成する簡便な方法の他に、センサと対象物、太陽の位置関係および対象物の幾何学的な形状をモデル化することでテンプレートを発生させることもできる (Pollock, 1998)。前者は、直接的にセンサや太陽、樹冠の立体形状などに基づいた対象からの反射を観測し得られた画像そのものをテンプレートとして抽出することで樹冠テンプレート作成における技術的な敷居が低い。また、空中写真では中心投影の影響が出て、撮影された画像内での位置によって、樹木の倒れ込みが一定とはならないが、衛星による観測の場合には、遠方からの撮影のため画像範囲内での倒れ込みはほぼ同じ傾向を示すと考えてよい (平田, 2009)。このことが、空中写真と比較した場合の高分解能衛星データにおける広域解析を可能とする優位性となると捉えることができる。また、樹冠のサンプルは画像内に無数に存在する。極端に言えばそれぞれの樹冠に対して画像全体の類似度を計算することができるので、単バンドの画像から無数の情報を取り出すことが可能となる。今回は、10 の樹冠サンプルを利用し、これらに主成分分析を行い、第 1 主成分を用いて、いわば、代表的なテンプレートを作成し類似度を計算した。しかしながら、実際の森林には、この代表的なテンプレートでは表現されない樹冠も多く存在している。今後は樹冠の変異を生かす方向での検討を進めることができれば、典型的でない樹冠の検知もれの発生を削減できる可能性がある。いずれにしても、様々なテンプレートから計算される類似度は、初期の樹冠テンプレートとして様々なサンプルを用意した場合でも非常に安定していた。まだまだテンプレートマッチングの手法自体については精度向上に向けた改善の余地が残されているが、単木的な情報をベースとした情報を得ることができ、今後の発展性が高い。計算アルゴリズムも単純であるため、広域の画像でも適用が非常に容易である。マッチング手法は監視カメラでの異常検知やセキュリティーの個人認証システム、デジタルカメラでの顔認識技術などに代表されるように工学の場面では大いに発展しており、これらの技術の森林分野への応用が可能であろう。第三章で違法伐採による森林劣化の検知および伐採量の広域での推定を行っているが、今回は、各時期での樹冠抽出精度が十分ではないと判断したため、テンプレートマッチングの過程で計算される類似度を活用した主成分分析によって伐採木を検知したが、精度が向上すれば、2 時期のそれぞれで行った樹冠抽出の結果を直接的に比較することで、伐採木を検知することが出来るようになる可能性もある。このようにこの手法は発展性が非常に高い。テンプレートマッチングでは、樹冠自体の広がりを持ったまとまりとして認識していることにも優位性があると考えられる。例えば、**Watershed** 法などの樹冠抽出手法も適用可能であるが、広葉樹などのように枝ばりが複雑な樹冠に対しては、**Watershed** 手法の適用結果を再構成して、単木の樹冠として認識する必要が生じる。針葉樹などの単峰の形状が明瞭な樹冠では有効であるが、広葉樹ではひとつの樹冠として再構成することは容易ではない。**LiDAR** のような垂直方向の高さを直接的に表わしている三次元データでは広葉樹に対しても、**Watershed** 法の

適用は可能かもしれないが、光学センサでは複数の枝ぶりごとの観測値の関係は一律ではない（垂直位置が低い枝ぶりが高い枝ぶりの輝度値よりも低くなるとは限らない）ため単一樹冠としての認識を数値処理として行うことは難しい。また、樹冠と樹冠の間を区切る Watershed 法は、突出木の検出の場合にも有効には働かない。これは、Valley-following 法においても同様のことが言える。本研究では、第三章の違法伐採の検知において、テンプレートマッチング法の適用により、上層木の抽出に成功している。また、Watershed 法や Valley-following 法においては、疎林を相手にする場合にも、樹冠と、土壌や草地などの背景を区別してやる必要があるが、高解像度のパンクロマティックバンドでの判別は容易ではなく、また、マルチスペクトル画像を用いる場合にも、解像度が落ちることや、そのような疎林に発達する森林タイプでは葉量が少ない場合も多く、背景と樹冠の判別が難しい。本研究では、第四章のチーク樹冠の抽出において、林冠の閉鎖していない若齢林においてもテンプレートマッチングの適用によって、樹冠抽出に成功している。

テンプレートマッチング手法には、以上挙げたような特長があると考えられるが、手法適用の限界を挙げれば、第四章のタイ人工林での若齢人工林の密な植栽林分において、樹冠の抽出割合が大きく減少したように、密な森林への適用の難しさが挙げられる。同様に、国内であれば、常緑の照葉樹林の樹冠の連なった林分や再生二次林などへの適用は難しいと考えられる。ただし、これらは、先に挙げたような単木樹冠抽出の方法のいずれにおいても単木樹冠認識が困難とされるもので、個別のテンプレートマッチング手法の限界というよりは、全体としての光学リモートセンシングの限界と考えたほうが良い。このような場合には、自動処理のサポートのもと、目視による判別・確認作業を実施すること、単木の樹冠ベースではなく LiDAR や空中写真による DSM から得られる林冠高のような林分をまとめるとして捉える手法が有効であろう。また、テンプレートマッチングにおける技術的な課題としては、検知における閾値の設定方法が挙げられる。この閾値設定によって、検出結果が大きく左右されてしまうため、この設定の方法は重要である。この閾値設定については、例えば、植生と非植生の判定により森林減少などを検知するために利用されてきた正規化植生指数 (NDVI) における閾値設定の方法（例えば、Lunetta et al., 2006; Phua et al., 2007）などが参考になるであろう。地上サンプルを取得して、それらの樹冠の検知度が最大、検知エラーが最小となるような閾値設定を行うことや、今回のような平均と分散を利用して機械的に閾値の判定を行うことなどが考えられる。樹冠サイズの異なるテンプレートで計算された類似度の統合・集計の方法についても検討の余地が残されている。以上のような課題も挙げられるが、本研究において示されているように、森林変動のモニタリングに際して、高分解能衛星データを用いた樹冠テンプレートマッチング手法の適用は有効な点も非常に多く、樹冠テンプレートの情報には樹木の立体構造や色情報も含むため、今後の森林分野における活用が期待される。

6-1-3 メコン中下流域のデータ利用可能性からの森林変動モニタリングの考察

第五章で見たように東南アジアのメコン中下流域においては、画像取得の可能性に大きな違いが見られた。本研究で使用したデータもすべてが乾季に取得されたリモートセンシングデータである。今後、例えば、利用可能な衛星やセンサの増加や取得能力の向上によって撮影機会が向上することで雨季画像の取得可能性が改善される可能性はあるが、基本的にはこの地域において雨季において光学センサを用いてリモートセンシングデータを取得することは難しく、また、この時期を狙って撮影を実施することは非効率でもある。また、取得された画像についても、多かれ少なかれ雲の影響を受けた箇所を含む場合が多くなる。以上のように、利用可能なリモートセンシングデータの取得の面からも定期的なモニタリングが可能となるのは光学センサを利用する場合には、乾季と言える。

乾季画像利用による森林変動モニタリングの注意点について述べる。まず第一に、乾季においては、落葉樹は葉を落としてしまい、その場合には、樹冠計測や被覆タイプ（樹種、土地被覆）の区別が困難となる。第二に、上記とも関連するが、変動モニタリングにおいて、変動が大きい活動期にモニタリングを実施せざるを得ないという点である。固定試験地における成長調査の際に樹木の成長を考慮して、生育期における計測を実施せず樹木の成長が停止した時期を選んで計測を行うが、森林変動も本来これと同様に、変動が活発に生じている時期に計測を行うことは望ましくない。つまり、乾季には、天水が望めないため一般に農閑期に当たるケースが多く、また、伐採作業や伐採後の製材・搬出作業が容易となるため、乾季には森林減少や劣化といった現象が生じやすい。このため、乾季の画像取得時期によって、大きな変動が生じることになる。このため、本来であれば、この時期は避けて、森林減少や劣化の頻度が低くなると考えられる雨季にモニタリングを行うことが望ましい。しかしながら、第五章で見たように観測するリモートセンシングデータ（光学センサ）の利用においては乾季しか高い画像取得率が望めないため、定期的なモニタリングには、取得時期の違いによる変動を考慮する必要がある。この意味では、同じ乾季に画像取得を狙うのであれば、伐採などの活動が活発化していない乾季初期の画像を利用することができれば、ある程度回避できるものと考えられる。

6-2 メコン中下流域におけるリモートセンシングを用いた森林変動モニタリングの総括

本研究をとりまとめ、今後の展望を含めて総括する。本研究では、メコン中下流域において生じている森林変動について、リモートセンシングを用いて効率的にモニタリングする手法を検討した。まず、第二章では、カンボジア中部熱帯季節林を対象として、樹冠径計測に基づく林冠高推定によるバイオマス推定手法を開発した。LiDARによる林冠高計測によるバイオマス推定に関する研究成果が得られている中で、本手法は、高分解能の光学センサを用いて計測可能な上層木樹冠の樹冠径計測に基づき林冠高を推定する手法で、本研究で使用した空中写真はもちろん、今後画像の蓄積や更なる解像度の向上やステレオ撮影などが進んでいくことが予想される高分解能の衛星データに適用可能な方法である。地

盤高の計測を必要としないところに特徴がある。樹冠径から樹冠高を推定するための、森林タイプ区分や地位区分の要否について、他の地域での適用に際して検討する必要がある。第三章では、カンボジア中部熱帯季節林において生じている違法伐採を単木的に検知する手法を開発した。高分解能衛星データを用いて、伐採の搬出路開設などの間接的な事象を捉えた事例はこれまでも見られたが、単木的に定量化を試みた手法として価値が高い。ALOS/PRISM という 2.5m の解像度のパナクロマチックデータの時系列画像を使用した方法で、センサに対する依存性が低く、より解像度の高いデータなどにも適用可能な手法である。また、今回は天然林における違法伐採の検知に使用したが、通常的人工林の間伐状況の把握や病虫害による枯死木の発生や風倒被害などの単木的な変化の把握にも応用が可能である。ALOS/PRISM については、直下観測を実施するなど、適用に適する点も多く見られたが、ブロックノイズの発生などの利用に際しての難しさも見られた。今後、この手法について、他の地域での適用や他の森林変動の事象への応用が期待される。最適な閾値の設定方法や異なるテンプレートを使用したサイズ推定の精度向上について、今後検討の必要がある。第四章では、タイの人工林造成による森林再生のモニタリングとして、落葉広葉樹であるチーク人工林の林分材積推定手法を開発した。様々な林分での地上計測によって、樹冠径から胸高直径や単木材積が推定可能なことを示した。チークについて、樹冠径について、これだけ詳細に調べられた例はない。また、この関係に基づき、高分解能衛星データによるテンプレートマッチング法によって、単木抽出に基づいた林分材積推定を行った。チークは国際的にも非常に貴重な有用樹種のひとつであるが、落葉広葉樹の人工林を対象として、単木抽出から林分材積を推定した例は少ない。広域に適用可能であり、非常に効率が低い方法である。第三章と同様に、樹冠抽出の最適な閾値設定の方法に課題があり、また、樹冠が連なる密な林分においては、樹冠抽出を精度よく行うことができず、過小推定となる傾向があった。これらが今後の課題である。第五章では、東南アジア地域における光学センサの雲なし画像の取得確率について検討した。東南アジアにおける被雲の傾向の空間的な違いが明らかになり、また、これまでに利用されていない MODIS の雲マスクを利用した解析を行うことで、晴天確率の季節変化や年次変動が明らかとなり、また、平均年次プロファイルを利用した分類によってゾーニングを行い、空間的な変異を明示することができた。さらに、森林域における年間の平均晴天確率が国ごとに大きく異なっていることを明らかにした。これらの知見はモニタリングの手法や使用する画像の選択、モニタリング可能頻度などの議論に活用できる。以上、本研究で得られた知見をまとめたが、本研究の成果は、今後予想される、高分解能データを利用した、より詳細、かつ、精度よく、効率的なモニタリングの確立に役立つものである。特に、森林劣化の把握については単木的に違法伐採を捉える手法はなく、今後本研究で開発した手法の他の地域での適用が大いに期待される。

謝辭

まず、なかなか進まない私の博士論文の執筆をきつといらいらしつつも長い目で見守ってくださった主査の露木聡准教授に感謝申し上げます。ゼミでは留学生の皆さんとともに、幅広く学ぶことが出来た。自分だけ置いていかれてしまった形だが、インドネシアからのメラさん、ジンティグさん、ルスタムさんのお三方、青柳さん、現森林経理学研究室の中島助教と研究室で楽しく過ごすことが出来た。箕輪光博元東大教授にも感謝申し上げたい。箕輪先生は私の修士課程までの恩師であり、今でも、先生の教えてくださった学問の形に私自身はこだわりを持っている。執筆に行き詰った時に箕輪先生の退官に際して出版された「森林経理から見た世界」幾度となく読み返した。この著書は、これから専門である森林と人間の関わりを考えていく際、研究を遂行していく際、社会を見る際の大事な切り口・アイデアを普遍性を持って与えてくれると考えている。

森林総合研究所の清野嘉之博士には、ご専門である造林の立場から、様々な助言を頂き、本研究の多くの発想を頂いたと感じている。また、本論文に関わる現地調査にも同行頂いた。ここに記し感謝申し上げます。伊藤江利子博士には、多くの励ましを頂いたとともに、熱帯地域での困難な現地調査から様々なデータの利用を許可頂いた。伊藤江利子博士のサポートがなければ、この論文は完成し得なかったものである。中北理博士、平田泰雅博士、齋藤英樹博士には、同じ遠隔探査という専門の立場から、様々な助言を頂き、最後まで何度も飽きることなく励ましの声を掛けて頂いた。メコン河流域の水循環変動に関する研究に参加させて頂いたことを通じて、カンボジアを知り研究を実施することができた。これらの研究プロジェクトを形成し、先方との関係を築いてこられた清水晃博士、荒木誠博士、東京大学の沢田治雄教授に感謝申し上げます。カンボジアでは、森林局のチャンソファール氏、プレップサム氏、ティットボラ氏、サムコール氏などに現地調査に同行頂き、様々な便宜を頂いた。感謝申し上げます。

国際農林水産業研究センターの野田巖博士には、特に第四章に関して現地調査の実施、データ利用等の便宜を図って頂いたとともに、繰り返し温かい言葉をかけて頂いた。感謝申し上げます。タイでの調査の遂行に当たっては、タイ王室森林局のワラパン博士に現地調査の実施や既存資料・データの収集まで多大なる支援を頂いた。同世代であることもあり、今後も互いに切磋琢磨していけたらと考えている。多くのタイ王室森林局の皆さんに大変お世話になったが、造林研究室長のトスポーン氏には研究遂行にあたって便宜を図っていただいた。ユットさんには現地調査において献身的にサポートいただき、非常に貴重なデータを集中的に収集することができた。調査時の生活面も含めサポートしていただき感謝申し上げます。また、後藤忠男博士には、国際農林水産業研究センターに勤務時代に、上司として様々な便宜を図って頂いた。後藤博士のように真摯な気持ちで研究を運営することが私の目標である。中村松三博士や佐野真琴博士にも、いつも温かい言葉をかけて頂いていた。大変遅くなり申し訳ない気持ちで一杯だが、今後の仕事で感謝を示していきたい。

大学時代に同じ時間を過ごし、その後もずっと心配頂いていた、マレーシアの Phua Mui How 博士、笹川裕史博士、韓国の李定洙博士には感謝申し上げます。今後ともいろいろな場

面で交流を続けさせて頂きたいと考えている。同様に疎遠となってしまったが中国の呉博士にも感謝を伝えたい気持ちである。

最後に、岐阜大学流域圏センターの栗屋善雄教授には、氏が森林総合研究所に勤務されていた際に、リモートセンシングの画像解析の基礎を主催頂いたゼミの中で教えて頂いた。与えられた知識を十分に吸収できているかいささか自信はないが、栗屋先生に教えて頂いたことは数え切れない。良い部下でなかったことを心からお詫びを申し上げつつ、感謝の気持ちを伝えたい。

なお、本研究の一部は、文部科学省研究開発局新世紀創生研究プラン「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの作成」(平成 14～18 年度)、環境省地球環境総合研究推進費「森林減少の回避による排出削減量推定の実行可能性に関する研究(B-072)」(平成 19～21 年度)および「PALSAR を用いた森林劣化の指標の検出と排出量評価手法の開発に関する研究(A-0802)」(平成 20～22 年度)、農林水産省技術会議プロジェクト「地球水循環変動が食料生産に及ぼす影響の評価と対策シナリオの策定」(平成 15～19 年度)および「高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化」(平成 23～26 年度)、国際農林水産業研究センター運営費交付金プロジェクト「熱帯モンスーン地域における有用郷土樹種育成技術と農林複合経営技術の開発」(平成 18～22 年度)および「東南アジアにおける持続的利用を通じた森林管理・保全技術開発」(平成 23～27 年度)、森林総合研究所一般研究費実行課題「多面的な森林の調査、モニタリングおよび評価技術の開発」(平成 18～22 年度)および「多様な森林機能の評価・配置手法の開発」(平成 23～25 年度)において実施したものである。

図表リスト

図リスト

第一章

- 図 1-1 カンボジアの森林率の推移
- 図 1-2 2002-2006 年のカンボジアの森林変化図
- 図 1-3 タイの森林率の推移
- 図 1-4 発展段階（横軸：時間）と森林被覆（縦軸）の変遷パターン
- 図 1-5 高分解能衛星データによる単木樹冠抽出手法(Watershed 法)の適用例
- 図 1-6 本研究で対象とする森林変動要因と全体の構成

第二章

- 図 2-1 研究対象地 (LiDAR 計測の林冠高データ上に地上計測プロット (黄色：常緑林, ピンク：乾燥フタバガキ林) を示す)
- 図 2-2 樹冠計測に基づくカンボジア熱帯季節林におけるバイオマスの推定フロー
- 図 2-3 樹冠計測に基づく林冠高推定の模式図
- 図 2-4 航空機デジタルカメラ撮影による空中写真オルソデータ (左) および航空機搭載型 LiDAR 計測による林冠高データ (右) (上：乾燥フタバガキ林(DDF)、下：常緑林(DEF))
- 図 2-5 デジタル空中写真実体視に基づくカンボジア熱帯季節林の判読結果
- 図 2-6 デジタル空中写真実体視判読による樹冠径 (cd) と航空機ライダー計測による樹冠高 (h) の関係
- 図 2-7 プロットごとの地上調査に基づく本数密度 (胸高直径>25cm) と樹冠判読による本数密度の関係
- 図 2-8 デジタル空中写真実体視による樹冠抽出より推定した平均林冠高 (MCH_{cd}) と航空機 LiDAR 計測から得られた平均林冠高 (MCH_{lidar}) の関係 (緑のラインは 1:1 のライン)
- 図 2-9 航空機 LiDAR 計測による平均林冠高 (MCH_{lidar}) と炭素蓄積量の関係
- 図 2-10 樹冠計測による平均林冠高 (MCH_{cd}) と炭素蓄積量の関係
- 図 2-11 地上調査プロットにおける樹冠径計測に基づく平均林冠高 (MCH_{cd}) より推定した MCH_{lidar} と実測の MCH_{lidar} の関係
- 図 2-12 推定された MCH_{lidar} を用いて推定した炭素蓄積量と地上調査に基づく炭素蓄積量の関係

第三章

- 図 3-1 研究対象地
- 図 3-2 二時期高分解能衛星データを用いた違法伐採の検知と伐採量推定のフロー
- 図 3-3 画像を用いた伐採木検知の流れの図示
- 図 3-4 樹冠サンプルより作成した樹冠サイズ別の樹冠テンプレート

- 図3-5 使用したALOS/PRISM画像データ（雲マスク適用後）
- 図3-6 地上調査による違法伐採木計測データの取得
- 図3-7 地上踏査範囲（左）および地上踏査により確認された伐採木（右）
- 図3-8 伐採木と枯死木および支障木の胸高直径サイズ分布の違い
- 図3-9 閾値設定および使用テンプレートサイズの違い（5,7,9,11 使用/7,9,11 使用）によるマッチングスコアの変化（閾値設定は、例えば Cor200PC250 は、類似度が $(\mu - 2.00\sigma)$ 、第2主成分が $(\mu - 2.50\sigma)$ であることを示している。）
- 図3-10 二時期高分解能衛星データを用いた違法伐採木の検知結果（全域）
（テンプレートサイズ、黄色：11x11；緑：9x9；青：7x7）（背景はPRISM2006/11/27画像）
- 図3-11 二時期高分解能衛星データを用いた違法伐採木の検知結果（拡大）
（テンプレートサイズ、黄色：11x11；緑：9x9；青：7x7）（背景はPRISM2006/11/27画像（期首画像、左）およびPRISM2008/3/1（期末画像、右））
- 図3-12 地上調査に基づく胸高直径と高分解能衛星データを用いて計測された樹冠径との関係
- 図3-13 各テンプレートサイズで検知された伐採木および非検知木の判読樹冠径（上段）、胸高直径（中段）、バイオマス（下段）
（異なる添え字(a,b,c)はTukey's HSD検定において有意差が見られたことを表わす。）

第四章

- 図4-1 研究対象地
- 図4-2 高分解能衛星データを用いたチーク林分材積の推定フロー
- 図4-3 テンプレートマッチング手法における樹冠抽出のプロセス
- 図4-4 作成した樹冠テンプレート（7種類）
- 図4-5 地上調査における樹冠径の計測方法
- 図4-6 地上調査に基づく樹冠径と胸高直径の関係
- 図4-7 地上調査に基づく樹冠径と単木材積の関係
- 図4-8 地上調査に基づく全体に占める階層別の本数割合（上）と材積割合（下）
- 図4-9 ステレオペア画像を利用した実体視による樹冠判読結果
- 図4-10 地上計測による樹冠径と高分解能衛星データの樹冠判読による樹冠径の関係
- 図4-11 テンプレートマッチング手法による樹冠抽出結果
- 図4-12 テンプレートマッチング手法による樹冠テンプレートサイズと地上調査における樹冠径の関係
- 図4-13 テンプレートで想定される樹冠サイズ(CDtemplate)と地上計測樹冠径の中央値の関係
- 図4-14 高分解能衛星データの樹冠抽出（判読、自動）に基づく本数密度（上）と林分材積（下）の推定結果の地上計測結果との比較

第五章

- 図5-1 ランドサット TM における 20%きざみの被雲率の例（左から 20%きざみで 0% から 80%に増加する）
- 図5-2 ランドサット衛星データの画像取得確率の集計例
- 図5-3 MODIS 雲マスクを用いた解析における研究対象地（1.インドシナ半島（左上 N29-E92～右下 N5-E110）と 2.島嶼部（N8-E95～S10-E120））
- 図5-4 インドシナ半島における雲なしランドサット TM 画像（被雲率 20%以下）の取得確率のパターンとその空間分布
- 図5-5 島嶼部における雲なしランドサット TM 画像（被雲率 20%以下）の取得確率のパターンとその空間分布
- 図5-6 東南アジアにおける雲なし画像の月別平均取得確率の空間分布（明色が取得確率の高いことを示し、暗色が取得確率の低いことを示す）
- 図5-7 平均月間取得確率の年間プロファイルを用いたクラスタリング結果（8クラス）
- 図5-8 各クラスのサンプル地点における 9 年間の平均取得確率プロファイルと各年の取得プロファイルの比較（各クラスのサンプル地点は図5-7に示されている。）
- 図5-9 月ごとの月間取得確率の標準偏差の分布図（明色が標準偏差の高いことを示し、暗色が標準偏差の低いことを示す）
- 図5-10 各国の森林域における 1km グリッドにおける年間平均取得確率の頻度分布の違い

表リスト

第一章

- 表 1-1 カンボジア森林タイプ区分の単純化
- 表 1-2 利用可能な高分解能衛星センサの仕様

第二章

- 表 2-1 航空機計測 LiDAR およびデジタル空中写真データの撮影諸元
- 表 2-2 調査林分の概要（中央値およびレンジ（括弧内））

第三章

- 表 3-1 二時期高分解能衛星データ（ALOS/PRISM）の撮影諸元
- 表 3-2 ALOS/PRISM のセンサ特性
- 表 3-3 二時期高分解能衛星データを用いた違法伐採木検知の閾値設定による正答/エラー割合の変化

第四章

- 表 4-1 高分解能衛星画像（Pléiades）撮影諸元
- 表 4-2 対象チーク林分の概要
- 表 4-3 テンプレートマッチング結果からの単木材積推定表

第五章

- 表 5-1 カンボジアにおける GeoCover データセット（1990 年および 2000 年）におけるランドサット衛星画像取得日の違い（パス：ppp, ロウ：rr, 年：yyyy, 月：mm, 日：dd）
- 表 5-2 MODIS のセンサ特性と雲マスク判定に使用されている観測波長帯

引用文献

- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. and Malingreau, J.P. (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297(5583): 999-1002
- Achard, F., Stibig, H.-J., Eva, H.D., Lindquist, E.J., Bouvet, A., Arino, O. and Mayaux, P. (2010) Estimating tropical deforestation from Earth observation data. *Carbon Management* 1: 271-287
- Ackerman, S.A., Strabala, K.I., Menzel, W.P., Frey, R.A., Moeller, C.C. and Gumley, L.E. (1998) Discriminating Clear sky from Clouds with MODIS. *J. Geophys. Res.* 103: 32141-32157
- Alpha Research Co., Ltd. (2010) *Pocket Thailand in Figures* 12th edition 2010, Nonthaburi, Thailand
- 秋山侃・川村健介 (2003) Landsat5 号の快晴データ取得率に関する農林業分野からの一考察. *写真測量とリモートセンシング* 42(3): 29-34
- Angelsen, A. (ed) (2008) *Moving ahead with REDD: Issues, Options and Implications*, CIFOR, Bogor, 156pp
- Asner, G.P. (2001) Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *Int. J. of Remote Sens.* 22: 3855-3862
- Asner, G.P. and Warner, A.S. (2003) Canopy shadow in IKONOS satellite observations of tropical forests and savannas. *Remote Sensing of Environment* 87(4): 521-533
- Asner, G.P., Keller, M., Pereira Jr, R. and Zweede, J.C. (2002b) Remote Sensing of selective logging in Amazonia Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment* 80:483-496
- Asner, G.P., Keller, M., Pereira, Jr, R., Zweede, J.C. and Silva, J.N. (2004) Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: field and satellite studies. *Ecological Applications* 14(sp4): 280-298
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J., Keller, M. and Silva, J.N. (2005) Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310(5747): 480-482
- Asner, G.P. and Mascaro, J. (2014) Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment* 140: 614-624
- Asner, G.P., Mascaro, J., Muller-Landau, H.C., Vieilledent, G., Vaudry, R., Rasamoelina, M., Hall, J.S. and van Breugel, M. (2012) A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia* 168(4): 1147-1160
- Asner, G.P., Palace, M., Keller, M., Pereira, R., Silva, J. N. and Zweede, J.C. (2002a) Estimating Canopy Structure in an Amazon Forest from Laser Range Finder and IKONOS Satellite Observations. *Biotropica* 34(4): 483-492

- Asner, G.P., Powell, G.V., Mascaro, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M. and Hughes, R.F. (2010) High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(38): 16738-16742
- Astrium GEO-Information Services (2012) Pléiades Imagery – User Guide, France, 118pp
- Austin, J.M., Mackey, B.G. and Van Niel, K.P. (2003) Estimating forest biomass using satellite radar: an exploratory study in a temperate Australian Eucalyptus forest. *Forest Ecology and Management* 176(1): 575-583
- 栗屋善雄・田中邦宏 (2003) ランドサット TM データを用いた森林変化モニタリング指標の検討：スギ林の伐採と成長のモニタリング. *写真測量とリモートセンシング* 42(5):60-70
- Bautista, B.D.L.B, López-Caloca, A.A., Couturier, S. and Silván-Cárdenas, J.L. (2011) Tropical Dry Forests in the Global Picture: The Challenge of Remote Sensing-Based Change Detection in Tropical Dry Environments. In: Carayannis E. (eds) *Planet Earth 2011 - Global Warming Challenges and Opportunities for Policy and Practice*, InTech, Available online at: <http://www.intechopen.com/books/planet-earth-2011-global-warming-challenges-and-opportunities-for-policy-and-practice/tropical-dry-forests-in-the-global-picture-the-challenge-of-remotesensing-based-change-detection-in> (Accessed on 11 July, 2013)
- Bechtold, W.A. (2004) Largest-crown-width prediction models for 53 species in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry* 19(4): 245-251
- Blasco, F., Bellan, M.F. and Aizpuru, M. (1996) A vegetation map of tropical continental Asia at scale 1: 5 million. *J. Veg Sci.* 7: 623-634
- Broadbent, E.N., Asner, G.P., Peña-Claros, M., Palace, M. and Soriano, M. (2008) Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements. *Forest Ecology and Management* 255(7): 2602-2616
- Brown, P. L. Doley, D. and Keenan, R.J. (2004) Stem and crown dimensions as predictors of thinning responses in a crowded tropical rainforest plantation of *Flindersia brayleyana* F. Muell. *Forest ecology and management* 196(2): 379-392
- Brown, S., Gillespie, A.J. and Lugo, A.E. (1989) Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest science* 35(4): 881-902
- Brown, S. (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer (FAO forestry paper 134). Food and Agriculture Organization, Rome, Italy
- Bruniquel-Pinel, V. and Gastellu-Etchegorry, J.P. (1998) Sensitivity of texture of high

- resolution images of forest to biophysical and acquisition parameters. *Remote Sensing of Environment* 65(1): 61-85
- Cambodia, Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], United Nations Development Programme [UNDP], and United Nations Environment Programme [UNEP]. (2010) UN Collaborative Programme On Reducing Emissions From Deforestation And Forest Degradation In Developing Countries National Programme Document.
http://www.unredd.net//index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3487
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. and Yamakura, T. (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1): 87-99
- Clark, D.B., Castro, C.S., Alvarado, L.D.A. and Read, J.M. (2004) Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high - spatial - resolution satellite data. *Ecology Letters* 7(1): 52-59
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. and Lambin, E. (2004) Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International journal of remote sensing* 25(9): 1565-1596
- Coppin, P.R. and Bauer, M.E. (1994) Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimise extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32: 918-927
- Coppin, P.R. and Bauer, M.E. (1996) Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sens. Rev.* 13: 207-234
- Culvenor, D.S. (2002) TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. *Computers and Geosciences* 28(1): 33-44
- Culvenor, D.S. (2003) Extracting individual tree information. In: *Remote Sensing of Forest Environments*. Springer US, 255-277
- de Wasseige, C., and Defourny, P. (2004) Remote sensing of selective logging impact for tropical forest management. *Forest Ecology and Management* 188(1): 161-173
- DeFries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyarso, D., Schlamadinger, B. and de Souza, C. (2007) Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental science and policy* 10(4): 385-394
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S,

- da Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C. and Zhang, X. (2007) Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: *Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, 499-587
- Desclée, B., Bogaert, P. and Defourny, P. (2006) Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment* 102(1): 1-11
- デジタル画像処理編集委員会 (2009) デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, 384pp
- Drake, J.B., Dubayah, R.O., Knox, R.G., Clark, D.B., and Blair, J.B. (2002) Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 81(2): 378-392
- Dralle, K. and Rudemo, M. (1996) Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research* 26(7): 1228-1236
- EORC, JAXA (2007) ALOS ユーザーハンドブック, 126pp
- ERDAS (2008) IMAGINE AutoSync™ User's Guide, 57pp
- FAO (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). FAO.
- FAO (2006) Global Forest Resources Assessment 2005, FAO Forestry paper 147. 320pp
Available online at: <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2005/en/> (accessed November 2, 2009)
- Fisher R and Hirsch P (2008) Poverty and Agrarian-Forest Interactions in Thailand. *Geographical Research* 46(1): 74-84
- Fogel R.W. (2009) The Impact of the Asian Miracle on the Theory of Economic Growth. In: *NBER Working Paper No. 14967*, Cambridge, MA
(<http://www.nber.org/papers/w14967>)
- Foli, E.G., Alder, D., Miller, H.G. and Swaine, M.D. (2003) Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management* 173(1): 79-88
- Foody, G.M., Boyd, D.S. and Cutler, M.E. (2003) Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85(4): 463-474
- Foody, G.M., Cutler, M.E., Mcmorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D.S. and Douglas, I. (2001) Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography* 10(4): 379-387
- Forestry Administration (2008) Cambodia Forest Cover – Forest cover map change 2002-2006. Phnom Penh, 9pp
- Forestry Administration (2010) Cambodia's National Forest Programme, Phnom Penh.

www.twgfe.org/nfp

- Franklin, S.E., Wulder, M.A. and Gerylo, G.R. (2001) Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International Journal of Remote Sensing* 22(13): 2627-2632
- Frey, R.A., Ackerman, S.A., Liu, Y., Strabala, K.I., Zhang, H., Key, J.R. and Wang, X. (2008) Cloud detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS cloud mask for collection 5. *J. Atmos. Ocean Tech.* 25: 1057-1072
- Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. and Schaaf, C. (2002) Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment* 83(1): 287-302
- Frolking, S., Palace, M.W., Clark, D.B., Chambers, J.Q., Shugart, H.H. and Hurtt, G. C. (2009) Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 114(G2)
- Fuller, R.M., Groom, G.B. and Wallis, S.M. (1994) The Availability of Landsat TM images of Great Britain. *Int. J. of Remote Sens.* 15: 1357-1362
- 古家直行 (2002) 超高解像度衛星画像の概要. *森林航測* 197:8-12
- Furuya, N. (2012) Trends of forestry and wood processing industry in Thailand: Analysis using historical forestry statistics from 1997 to 2008. *JIRCAS Working Report No. 74*, 53-63
- 古家直行・平田泰雅・鈴木誠・山本博一 (2002) 高分解能衛星画像を用いたスギ・ヒノキ人工林の単木抽出の精度と限界. *日林関東支論*54: 53-54
- 古家直行・平田泰雅・鈴木誠・山本博一 (2004) 高分解能衛星画像を用いた針葉樹人工林立木密度推定手法の検討. *日林関東支論*55: 93-94
- 古家直行・伊藤江利子・清野嘉之・粟屋善雄・門田有佳子・鳥山淳平・佐藤保・齋藤英樹・平田泰雅・鷹尾元・Bora Tith・Samkol Keth・Ly Chandararity・Sophal Chann (2012) 高分解能衛星データを用いたカンボジア熱帯季節林における樹冠情報の抽出、日本写真測量学会平成24年度年次学術講演会
- Furuya, N., Himmapan, W. and Noda, I. (2012) Current functions and expected roles of Private Forest Plantation Cooperatives in Thailand. *JIRCAS Working Report No. 74*, 46-52
- 外務省 (2008)G8 森林専門家違法伐採報告書
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyō/bassai/g8_hk_g.html
- Gajasen, J. and Jordan C.F. (1990) Decline of Teak Yield in Northern Thailand: Effects of Selective Logging on Forest Structure. *BIOTROPICA* 22(2):114-118

- GeoEye (2009) GeoEye-1 Instrument/Product Description, Colorado, USA
- Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J. O. and Foley, J.A. (2007) Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2(4): 045023
- GISTDA (2007) CUDOS catalog system. Available online at: <http://cudos.gistda.or.th:7700/> (accessed on December 30, 2007)
- GLCF (2004) Earth Science Data Interface (ESDI). Available online at: <http://glcfapp.glcfc.umd.edu:8080/esdi/>
- GOFC-GOLD (2012) A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation, GOFC-GOLD Report version COP18-1, GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands. Available online at: http://www.gofcgold.wur.nl/redd/sourcebook/GOFC-GOLD_Sourcebook.pdf (accessed on April 9, 2013)
- Gougeon, F. A. (1995) A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian journal of remote sensing* 21(3): 274-284
- Gougeon, F.A. and Leckie, D.G. (2006) The individual tree crown approach applied to Ikonos images of a coniferous plantation area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(11): 1287-1297
- Gyi, K.K. and Tint, K. (1998) Management of Natural Teak Forests. In: Kashio M, White K (eds) *Teak for the future*. RAP PUBLICATION 1998/05, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok
- Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S.K., and Papathanassiou, K.P. (2009) Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(2): 481-493
- Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J. and Case, B.S. (2006) Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management* 225(1): 378-390
- Hansen, M.C. and DeFries, R.S. (2004) Detecting long-term global forest change using continuous fields of tree-cover maps from 8-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data for the years 1982–99. *Ecosystems* 7(7): 695-716
- Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend, J.R. and Sohlberg, R. (2000) Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach.

- International Journal of Remote Sensing 21(6-7): 1331-1364
- 橋本良二・玉泉幸一郎 (1995) スギ林における林冠の発達過程と個体の器官成長様式. 日林誌 77(2): 153-162
- Healey, S.P., Cohen, W.B., Zhiqiang, Y. and Krankina, O.N. (2005) Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. Remote Sensing of Environment 97:301-310
- Hemery, G.E., Savill, P.S. and Pryor, S.N. (2005) Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. Forest ecology and management 215(1): 285-294
- 日立ソリューションズ (2010) Digital Globe 社製品 (衛星画像) プロダクトガイド
- Hirata Y (2008) Estimation of stand attributes in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands using QuickBird panchromatic data. J of Fore. Res. 13: 147-154
- 平田泰雅 (2008) 高分解能衛星データの森林モニタリングへの利用. 日本森林学会誌, 91(2): 136-146
- 平田泰雅 (2009) 高分解能衛星データの森林モニタリングへの利用. 日林誌 91: 136-146
- Hirata, Y., Takao, G., Sato, T. and Toriyama, J. (eds) (2012) REDD-plus Cookbook. REDD Research and Development Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Japan, 159pp
- Hollinger, D.Y. (1989) Canopy organization and foliage photosynthetic capacity in a broad-leaved evergreen montane forest. Funct. Ecol. 3:53-62
- Houghton, R.A., Lawrence, K.T., Hackler, J.L. and Brown, S. (2001) The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. Global Change Biology 7(7): 731-746
- Hozumi, K., Yoda, K., Kokawa, S. and Kira, T. (1969) Production ecology of tropical rain forests in southwestern Cambodia: I Plant biomass. Nature and Life in SE Asia 6, 1-56
- Huang, C., Homer, C. and Yang, L. (2003) Regional forest land cover characterisation using medium spatial resolution satellite data. In: Remote Sensing of Forest Environments, Springer US, 389-410
- Imaging, D. (2007) Definiens Developer (version 7) user manual. Definiens AG, Munich.
- IPCC (2011) The Cancun Agreements: Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention. <http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2> (accecced on Octorber 15, 2013)
- Irons, J.R., Dwyer, J.L. and Barsi, J.A. (2012) The next Landsat satellite: The Landsat

- Data Continuity Mission. Remote Sensing of Environment 122: 11-21
- Ishibashi, S., Ishida, H., Okabayashi, M., Wanussakul, R., Klaikaew, N., Intuman, C., Sirilak, S. and Cha-umpol, C. (2002) Yield Prediction Table on *Tectona grandis* (Teak) in Northeast Thailand. Study Report under REX project, JICA, 24pp
- 板垣恒夫 (1974) 天然林の空中写真判読. 造園雑誌 38(2):18-23
- 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): 2-12
- Ito, E., Furuya, N., Monda, Y., Toriyama, J., Ohnuki, Y., Kiyono, Y., Tith, B., Keth, S., Chandararity, L., OP P., Chann S., Thy S. and Kanzaki M. (2013) Impact of logging on stand carbon storage. Proceedings of "International Workshop on Forest Watershed Environment Research in Cambodia, 61-62
- Ito, E., Furuya, N., Tith, B., Keth, S., Chandararity, L., Chann, S., Kanzaki M., Awaya, Y., Niiyama, K., Ohnuki, Y., Araki M., Sato, T., Matsumoto, M. and Kiyono, Y. (2010) Estimating Diameter at Breast Height from Measurements of Illegally Logged Stumps in Cambodian Lowland Dry Evergreen Forest. JARQ 44(4): 435-446
- Ito, E., Lim, S., Pol, S., Tith, B., Pith, P., Khorn, S., Tani, A., Kanzaki, M., Kaneko, T., Okuda, Y. and Araki, M. (2007) Use of ASTER optical indices to estimate spatial variation in tropical seasonal forests on the West Bank of the Mekong River, Cambodia. In: Forest Environments in the Mekong River Basin. Springer Japan, 232-240
- Jennings, S.B., Brown, N.D. and Sheil, D. (1999) Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. Forestry 72(1): 59-74
- JICA/ITTO(2012) REDD-plus : 森林減少・劣化の抑制等による温室効果ガス排出量の削減—開発途上国における森林保全, 東京, 33pp
- JRC (2003) Global Land Cover 2000 database.
<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php> (accessed on April 15, 2013)
- Ju, J. and Roy, D.P. (2008) The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. Remote Sens. Environ. 112: 1196-1211
- Kabeya, N., Shimizu, A., Chann, S., Tsuboyama, Y., Nobuhiro, T., Keth, N. and Tamai, K. (2007) Stable isotope studies of rainfall and stream water in forest watersheds in Kampong Thom, Cambodia. In: Forest Environments in the Mekong River Basin (pp. 125-134). Springer Japan.
- 加治佐剛・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎(2005)九州大学北海道演習林における k-Nearest Neighbor 法を用いた林分材積の推定. 九州森林研究 58: 139-141

- Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Kitahara, F. and Yoshida, S. (2008) Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan. *Journal of forest research*, 13(4): 249-254
- Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Top, N. and Yoshida, S. (2009) Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thom Province, Cambodia. *Journal of forest research* 14(4): 203-211
- 梶原規弘・藤本幸司・山本武・梶原幹弘(1994) 樹冠の空間占有状態に基づく択伐林の直径分布モデル (I): スギ・ヒノキ択伐林における樹冠の空間占有状態のモデル化. *日本林學會誌* 76(5): 418-425
- 梶原則弘, 藤本幸司, 山本武, and 梶原幹弘. (1995) 樹冠の空間占有状態に基づく択伐林の直径分布モデル (II): スギ・ヒノキ択伐林における樹冠の空間占有モデルの妥当性の確認. *日本林學會誌* 77(2): 163-169
- Kayitakire, F., Hamel, C. and Defourny, P. (2006) Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment* 102(3): 390-401
- 川上貴久・村上拓彦・吉田茂二郎・今田盛生 (2003) 九州大学福岡演習林における林分構造因子と衛星リモートセンシングデータの関係. *九州森林研究* 56: 56-59
- Ke, Y. and Quackenbush, L.J. (2011) A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 32(17): 4725-4747
- Kijkar, S. (2001) Timber plantation development in Thailand. In: *Proceeding of the International Conference on Timber Plantation Development*. FAO, Manila, Philippines
- Kira, T. (1991) Forest ecosystems of East and Southeast Asia in a global perspective. *Ecol. Res.* 6: 185-200
- Kiyono, Y., Furuya, N., Sum, T., Umemiya, C., Itoh, E., Araki, M. and Matsumoto, M. (2010) Carbon stock estimation by forest measurement contributing to sustainable forest management in Cambodia. *JARQ* 44(1): 81-92
- Kiyono, Y., Prajadinata, S., Oo, M.Z. and Oosumi, Y. (2006) Development of the simplified methodologies for measuring and predicting biomass carbon stock. In: *Fiscal report of forestation basic data collection aiming at small scale environmental planting CDM project, 2005*, Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, 8-41 [in Japanese]
- Kiyono, Y., Saito, S., Takahashi, T., Toriyama, J., Awaya, Y., Asai, H., Furuya, N., Ochiai, Y., Inoue, Y., Sato, T., Sophal, C., Sam, P., Tith, B., Ito, E., Siregar, C.A., and MATSUMOTO, M. (2011) Practicalities of non-destructive methodologies in

- monitoring anthropogenic greenhouse gas emissions from tropical forests under the influence of human intervention. *JARQ* 45(2): 233-242
- 児島利治 (2001) 高解像度衛星画像を用いた立木本数抽出及び材積推定. 水文・水資源学会 2001 年研究発表会要旨集, 234-235
- Kontoos, C. and Stakenborg, J. (1990) Availability of cloud-free Landsat images for operational projects. The analysis of cloud-cover figures over the countries of the European Community. *Int. J. of Remote Sens.* 11: 1599-1608
- Koonkhunthod, N., Sakurai, K. and Tanaka, S. (2007) Composition and diversity of woody regeneration in a 37-year-old teak (*Tectona grandis* L.) plantation in Northern Thailand. *Forest ecology and management* 247(1): 246-254
- 國崎貴嗣・加賀英昭・今田盛生 (1996) 針葉樹人工林における林分構造のばらつき (II): 生育段階別の樹高曲線の特徴. 九州大学演習林報告 75: 77-87
- 倉島孝行・松浦俊也・宮元麻子・佐野真琴 (2013) カンボジア中部の森林地域をめぐる動態と現在: 土地利用と制度変化のプロセス. 海外の森林と林業 86: 21-26
- Lakanavichian, S. (2001) Impacts and effectiveness of logging bans in natural forests: Thailand. In: Durst PB, Waggener TR, Enters T, Cheng TL (eds) *Forests out of bounds: Impacts and effectiveness of logging bans in natural forests in Asia-Pacific*, RAP PUBLICATION 2001/08, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 167-184
- Larsen, M., Eriksson, M., Descombes, X., Perrin, G., Brandtberg, T., and Gougeon, F. A. (2011) Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions. *International Journal of Remote Sensing* 32(20): 5827-5852
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Tinis, S., Nelson, T., Burnett, C.N. and Paradine, D. (2005) Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment* 94(3): 311-326
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Walsworth, N. and Paradine, D. (2003) Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment* 85(3): 355-369
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G. and Shugart, H.H. (1999) Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment* 67(1): 83-98
- Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, D.O., Zhu, Z., Yang, L.W.M.J. and Merchant, J.W. (2000) Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21(6-7): 1303-1330
- Lu, D. (2005) Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian

- Amazon. *International Journal of Remote Sensing* 26(12): 2509-2525
- Lu, D. (2006) The potential and challenge of remote sensing - based biomass estimation. *International journal of remote sensing* 27(7): 1297-1328
- Lu, D., Batistella, M. and Moran, E. (2005) Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71(8): 967
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. and Moran, E. (2004) Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management* 198(1): 149-167
- Lucas, R.M., Honzak, M., Foody, G.M., Curran, P.J. and Corves, C. (1993) Characterizing tropical secondary forests using multi-temporal Landsat sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing* 14(16): 3061-3067
- Luckman, A., Baker, J., Honzák, M. and Lucas, R. (1998) Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: Seasonal variation, confidence limits, and application to image mosaics. *Remote Sensing of Environment* 63(2): 126-139
- Luckman, A., Baker, J., Kuplich, T.M., da Costa Freitas Yanasse, C. and Frery, A.C. (1997) A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. *Remote Sensing of Environment* 60(1): 1-13
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G. and Worthy, L.D. (2006) Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote sensing of environment* 105(2): 142-154
- Mahannop, N. (2004) The development of forest plantations in Thailand. In: Enters T and Durst PB (eds) *What does it take? The role of incentives in forest plantation development in Asia and the Pacific*. RAP PUBLICATION 2004/27. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok
- Mäkelä, H. and Pekkarinen, A. (2004) Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management* 196(2): 245-255
- Matricardi, E.A.T., Skole, D.L., Cochrane, M.A., Pedlowski, M. and Chomentowski, W. (2007) Multi-temporal assessment of selective logging in the Brazilian Amazon using Landsat data. *International Journal of Remote Sensing* 28(1):63-82
- 村上拓彦・吉田茂二郎・太田徹志・溝上展也・佐々木重行・桑野泰光・佐保公隆・清水正俊・宮崎潤二・福里和朗・小田三保・下園寿秋 (2011) 九州本島における再造林放棄地の発生率とその空間分布. *日林誌*, 93: 280-287
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 測樹学, 地球社, 243pp

- 中田博 (2012) カンボジア森林セクターの近況. 海外の森林と林業 85:32-37
- 中島巖 (1973) 空中写真利用による森林調査法に関する研究. 林誌研報 251:1-253
- 中島巖・樋渡幸男・長谷川訓子・大貫仁人 (1970) 天然林の調査法に関する研究-北海道トムラウシ天然林の調査-. 林業試験場研究報告 227:83-239
- Nobuhiro, T., Shimizu, A., Kabeya, N., Tsuboyama, Y., Kubota, T., Abe, T., Araki, M., Tamai, K., Chann, S. and Keth, N. (2007) Year-round observation of evapotranspiration in an evergreen broadleaf forest in Cambodia. In: Forest Environments in the Mekong River Basin. Springer Japan, 75-86
- 野田巖・古家直行・Himmapan W・Pusudsavang A・駒木貴彰 (2011) タイ国におけるチーク人工林の素材取引と価格形成の現状. 関東森林研究 62: 29-32
- Ongsomwang, S. (2002) Forest Assessment and Conservation in Thailand. presented paper at Workshop on Tropical Forest Assessment and Conservation Issues in Southeast Asia. 12-14 February 2002, Dehra Sun, India
- Palace, M., Keller, M., Asner, G. P., Hagen, S. and Braswell, B. (2008) Amazon forest structure from IKONOS satellite data and the automated characterization of forest canopy properties. Biotropica 40(2): 141-150
- Phua, M.H., Tsuyuki, S., Lee, J.S. and Sasakawa, H. (2007) Detection of burned peat swamp forest in a heterogeneous tropical landscape: A case study of the Klias Peninsula, Sabah, Malaysia. Landscape and urban planning 82(3): 103-116
- Pollock, R. (1998) Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model. In: Proc. of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria, British Columbia, Canada, 25-34
- Pollock, R. (1998). Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model. In Proc. of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, BC, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, 25-34
- Pouliot, D.A., King, D.J. and Pitt, D.G. (2005) Development and evaluation of an automated tree detection delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. Canadian Journal of Forest Research 35(10): 2332-2345
- Powell, S.L., Cohen, W.B., Healey, S.P., Kennedy, R.E., Moisen, G.G., Pierce, K.B. and Ohmann, J.L. (2010) Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. Remote Sensing of Environment 114(5): 1053-1068
- Rahman, M.M., Csaplovics, E. and Koch, B. (2005) An efficient regression strategy for extracting forest biomass information from satellite sensor data. International

- Journal of Remote Sensing 26(7): 1511-1519
- Rahman, M.M., Csaplovics, E. and Koch, B. (2008) Satellite estimation of forest carbon using regression models. *International Journal of Remote Sensing* 29(23): 6917-6936
- Read, J.M., Clark, D.B., Venticinque, E.M. and Moreira, M.P. (2003) Application of merged 1 - m and 4 - m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology* 40(3): 592-600
- Ripple, W.J., Wang, S., Isaacson, D.L. and Paine, D.P. (1991) A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing* 12(9): 1971-1977
- Royal Forest Department (RFD) (2002) Evaluation report of the Economic Tree Plantation Promotion Project 1994-2000 (in Thai). RFD, Bangkok
- Royal Forest Department (RFD) (2008) Forestry statistics of Thailand 2008 (in Thai). RFD, Bangkok
- Sader, S.A., Stone, T.A. and Joyce, A.T. (1990) Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using non-photographic sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56(10): 1343-1351
- Sader, S.A., Waide, R.B., Lawrence, W.T. and Joyce, A.T. (1989) Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 28: 143-198
- Sano, E.E., Ferreira, L.G., Asner, G.P. and Steike, E.T. (2007) Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *Int. J. of Remote Sens.* 28: 2739-2752
- Santos, J.R., Freitas, C.C., Araujo, L.S., Dutra, L.V., Mura, J.C., Gama, F.F., Soler, L.S., Sant'Anna, S.J.S. and Sant'Anna, S.J. (2003) Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 87(4): 482-493
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Kozianna, J. and Nickless, D. (2004) Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Adv. Space Res.* 34: 710-714
- 清野嘉之・齋藤哲・佐藤保・高橋與明・粟屋善雄 (2009) 上層高の変化から森林の炭素蓄積の変化を推定するときの課題. *関東森林研究* 60: 151-154
- Sharp, A. and Nakagoshi, N. (2006) Rehabilitation of degraded forests in Thailand: policy and practice. *Landscape and Ecological Engineering* 2(2): 139-146
- Shearman, P.L., Ash, J., Mackey, B., Bryan, J.E. and Lokes, B. (2009) Forest Conversion and Degradation in Papua New Guinea 1972-2002. *Biotropica* 41(3):379-390
- Southworth, J., Nagendra, H. and Cassidy, L. (2012) Forest transition pathways in

- Asia—studies from Nepal, India, Thailand, and Cambodia. *Journal of Land Use Science* 7(1): 51-65
- Souza Jr, C.M. and Roberts, D.A. (2005) Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. *International Journal of Remote Sensing* 26(3):425-429
- Souza Jr, C.M., Firestone, L., Silva, L.M. and Roberts, D. (2003) Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment* 87(4): 494-506
- Souza Jr, C.M., Roberts, D.A. and Cochrane, M.A. (2005) Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment* 98(2): 329-343
- Steininger, M.K. (1996) Tropical secondary forest regrowth in the Amazon: age, area and change estimation with Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 17(1): 9-27
- Steininger, M.K. (2000) Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21(6-7): 1139-1157
- Stern N (2007) Identifying the costs of mitigation. In: *Stern review on the economics of climate change*. Cambridge University Press, 211-238
- 田口仁・遠藤貴宏・沢田治雄・安岡善文 (2009) ALOS/PRISM による森林域における Digital Canopy Model の抽出. *写真測量とリモートセンシング*, 48(2): 78-81.
- 高木幹雄・下田陽久監修 (2004) 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991pp
- Takahashi, T., Awaya, Y., Hirata, Y., Furuya, N., Sakai, T. and Sakai, A. (2010). Stand volume estimation by combining low laser-sampling density LiDAR data with QuickBird panchromatic imagery in closed-canopy Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. *International Journal of Remote Sensing* 31(5): 1281-1301
- Tani, A., Ito, E., Kanzaki, M., Ohta, S., Khorn, S., Pith, P., Tith, B., Pol, S. and Lim, S. (2007). Principal forest types of three regions of Cambodia: Kampong Thom, Kratie, and Mondolkiri. In *Forest Environments in the Mekong River Basin*. Springer Japan, 201-213
- Thammapala, P. and Taweek, S. (2004) Identification of teak plantation area using remote sensing technique in Pasak watershed. *Journal of Remote Sensing and GIS Association of Thailand* 5(3): 22-32
- Top, N., Mizoue, N. and Kai, S. (2004) Estimating forest biomass increment based on permanent sample plots in relation to woodfuel consumption: a case study in Kampong Thom Province, Cambodia. *Journal of Forest Research* 9(2): 117-123
- Tottrup, C., Rasmussen, M.S., Samek, J. and Skole, D.L. (2007) Towards a generic

- approach for characterizing and mapping tropical secondary forests in the highlands of mainland Southeast Asia. *International Journal of Remote Sensing* 28(6): 1263-1284
- Toutin, T. (2009) Fine spatial resolution optical sensors. *Handbook of Remote Sensing*. Sage, London, 108-122
- Trotter, C.M., Dymond, J.R., and Goulding, C.J. (1997) Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing* 18(10): 2209-2223
- UNFCCC (2007) Reducing emissions from deforestation in developing countries: approaches to stimulate action. Decision 2/CP.13.
<http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/eng/06a01.pdf#page=8>
- 臼田裕一郎・田口仁・渡部展也・福井弘道・李雲慶 (2005) オブジェクト指向型土地被覆分類のための領域成長法による画像分割の最適化. *写真測量とリモートセンシング* 44(1): 36-43
- 和田幸生 (2007) 11-6 林相区分 (オブジェクト). 改訂森林リモートセンシング-基礎から応用まで-, 加藤正人編, 日本林業調査会, 東京, 174-177
- Walsworth, N.A. and King, D.J. (1998) Comparison of two tree apex delineation techniques. In *Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, 93-104
- Walter, V. (2004) Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(3): 225-238
- Wang, L., Gong, P. and Biging, G.S. (2004) Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70(3): 351-358
- 渡辺宏 (1987) 新 森林航測テキストブック 改訂版, 日本林業技術協会, 253pp
- Win, R. N., Suzuki, R. and Takeda, S. (2012). Remote sensing analysis of forest damage by selection logging in the Kabaung Reserved Forest, Bago Mountains, Myanmar. *Journal of forest research* 17(2): 121-128
- Wulder M.A., Masek J.G., Cohen, W.B., Loveland, T.R. and Woodcock, C.E. (2012) Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sens. Environ.* 122: 2-10
- Wulder, M., Niemann, K.O. and Goodenough, D.G. (2000) Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of environment* 73(1): 103-114

- Wulder, M.A., White, J.C., Coops, N.C. and Butson, C.R. (2008) Multi-temporal analysis of high spatial resolution imagery for disturbance monitoring. *Remote Sensing of Environment* 112(6): 2729-2740
- Yamakura, T., Hagihara, A., Sukardjo, S. and Ogawa, H. (1986) Tree size in a mature dipterocarp forest stand in Sebulu, East Kalimantan, Indonesia. *Southeast Asian Studies* 23(4): 452-478
- Yoshifuji, N., Kumagai, T., Tanaka, K., Tanaka, N., Komatsu, H., Suzuki, M. and Tantasirin, C. (2006) Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Forest ecology and management* 229(1): 333-339
- Zeide, B. (2010) Comparison of self-thinning models: an exercise in reasoning. *Trees* 24(6): 1117-1126