

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月10日現在

機関番号：82723
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560436
 研究課題名（和文） 二酸化炭素削減に向けての高分解能偏波合成開口レーダによる森林情報計測手法の開発

研究課題名（英文） Development of forest information measurement algorithms toward CO2 reduction by high-resolution polarimetric and interferometric synthetic aperture radars

研究代表者

大内 和夫 (OUCHI KAZUO)
 防衛大学校・電気情報学群・教授
 研究者番号：10289259

研究成果の概要（和文）：二酸化炭素吸収源である森林の全球的かつ均一な情報収集が求められている背景のもと、本研究では北海道苫小牧国有林をテストサイトとして、航空機搭載合成開口レーダと衛星搭載高分解能光学系センサのデータ融合と、偏波・干渉合成開口レーダによる森林被害領域を抽出するアルゴリズムを開発した。さらに、レーダ画像強度の2次モーメントをベースとして従来の手法より高精度でロバストな新しいバイオマス計測アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要（英文）：Under the background that consistent and global information is required on the forests as being a source of CO2 absorption, algorithms were developed to extract areas of forest damage by fusing data acquired by airborne synthetic aperture radar (SAR) and spaceborne high-resolution optical sensor, and polarimetric and interferometric SAR over the test site of Tomakomai national forests in Hokkaido. Further, a new robust algorithm based on the second intensity moment of radar images was developed to measure forest biomass with accuracy higher than the conventional methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	0	1,200,000
2011年度	1,200,000	0	1,200,000
2012年度	900,000	0	900,000
総計	3,300,000	0	3,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム、森林情報、合成開口レーダ、統計解析、2酸化炭素削減

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化の危機が世界的な問題となっているなか、グローバルな温室効果ガスの削減が1997年の地球温暖化防止京都会議やその後のサミット等で議論されている。化石燃料消費による二酸化炭素排出のうち、森林減少による二酸化炭素の実質的な排出は全体の約

20%を占めており、京都議定書では二酸化炭素削減リストの中で最も高いウエイトを占めている。しかしながら、森林情報は現地での計測が非常に困難であることから、航空機および衛星リモートセンシングの活用が実施されている。リモートセンシングは、利用する電磁波の波長帯によって可視光と赤外線を含む

光学系リモートセンシングとマイクロ波リモートセンシングに大別される。前者の方法は、樹葉に含まれるクロロフィル（葉緑素）の計測から植生の活性度や樹種の分類に有効だがバイオマス計測は困難で、夜間や雲があると観測が出来ない。一方、後者のマイクロ波を使った合成開口レーダは、クロロフィルの計測はできないが、雲や霧の有無にかかわらず昼夜でも高分解能のデータ収集が可能であり、かつ森林バイオマスの計測に適しているため、現在と将来の森林情報収集と解析には重要なセンサとなっている。

(2) 従来のレーダ画像強度を使った森林バイオマス計測アルゴリズムの問題点は、計測上限値が限られていることと画像の厳密なラジオメトリック校正が必要であることである。これらの欠点を克服する方法として、研究代表者達は、合成開口レーダ画像に現れるテクスチャ（肌理）がバイオマスと強い相関関係があることに注目し、計測精度約85%の計測モデル（非ガウス確率密度関数モデル）を世界に先がけて開発した。このモデルの大きな特徴は、従来の手法による計測限界の約2倍のバイオマス計測が可能で、厳密な画像強度の校正を必要としないことである。

(3) 一方、この非ガウス確率密度関数モデルは、画像のテクスチャに最適な確率密度関数を算出する必要があり、計測の自動化には課題が残っていた。そこで、非ガウス確率密度関数モデルと同様の計測精度を持ったよりロバストなアルゴリズムの必要性が望まれていた。また、従来から、光学センサと合成開口レーダの分野での研究は別個になされており、両分野の特徴を活かした研究分野の発展が本研究開始以前から期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つである。

(1) 偏波合成開口レーダのデータから散乱モデルをベースとした4成分散乱パワー分解法を使って災害や伐採などによる森林被害領域を抽出するアルゴリズムを開発し、多時期干渉合成開口レーダによる樹高変化計測から倒木被害領域を抽出する手法を検討する。また、光学とマイクロ波の研究分野を統合して、マルチスペクトル光学画像と合成開口レーダ画像のデータ融合から、より高精度で森林被害領域を抽出するアルゴリズムを開発する。

(2) 本研究者の開発したモデルで課題となっていたバイオマス計測の簡便化に向けて、高分解能偏波合成開口レーダ画像強度が非ガウス分布に従うという特徴を活用し、確率密度関数に依存しない実利用に適したロバストな森林バイオマスを計測する新しいアルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

テストサイトは、以前からの現地調査でバイオマス等のデータがそろっている北海道苫小牧国有林に設定した。リモートセンシングデータは、航空機搭載のX-とL-バンド偏波合成開口レーダPi-SARデータとQuickBird衛星搭載マルチスペクトル光学データである。

(1) 苫小牧森林と現地データ

苫小牧国有林の樹種は、落葉カラマツとトドマツ、アカマツ、エゾマツで占められている。この森林は2004年9月の台風18号によって大きな被害を受けた。図1は、台風後に胆振森林局が作成したテストサイト（中心位置：E141° 30' :N42° 44'）での台風被害領域である。この被害図は調査員の目視による主観的な判断から作成されており絶対的なものではないことに留意されたい。実際、本研究グループが行った現地調査では50%以上の被害となっている林班が30%あるいはそれ以下であった例がいくつか見られた。

図2は、2002年11月7日に収集したPi-SAR L-バンド偏波カラー合成画像と現地計測林班で、表1はモーメントモデルの検証に用いた現地計測によるバイオマスである。

(2) 光学センサとPi-SAR

表2にQuickBird衛星搭載マルチスペクトル光学データとPi-SARデータ取得時期を示す。Pi-SARデータの括弧内はX-とL-バンド画像のシーン番号で、偏波解析による倒木被害領域

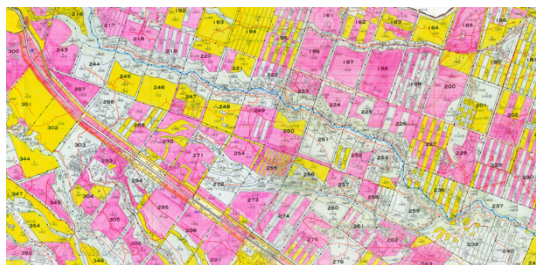


図1 胆振森林局による現地調査データ。赤は50%以上、黄は30%~50%の倒木林班を示す。

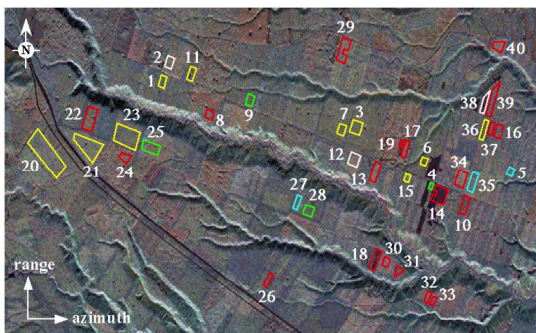


図2 バイオマス計測アルゴリズム開発に利用した林班を示すPi-SAR L-バンドカラー合成画像。現地計測林班（赤：アカマツ、緑：トドマツ、青：混交林、黄：カラマツ、白：エゾマツ）。

表1 図1にあるバイオマス計測アルゴリズム検証用現地計測バイオマスと樹種 (B: バイオマス[ton/ha], red pine: アカマツ, spruce: エゾマツ, トドマツ: Todo fir, カラマツ: larch, 混交針葉樹: conifer)。 (%) 内は主樹種の割合。

stands	tree species	B	stands	tree species	B
1	larch (75.4)	83.7	21	larch (74.7)	107.8
2	spruce (97.9)	64.2	22	red pine (93.7)	85.6
3	larch (86.0)	57.2	23	larch (75.2)	111.8
4	Todo fir (55.2)	40.5	24	red pine (81.8)	71.9
5	conifer	47.6	25	Todo fir (66.7)	43.8
6	larch (83.4)	65.2	26	red pine (52.0)	67.5
7	larch (95.9)	83.6	27	conifer	71.6
8	red pine (94.2)	84.4	28	Todo fir (48.1)	79.6
9	Todo fir (90.0)	83.5	29	red pine (86.8)	126.7
10	red pine (63.9)	34.0	30	red pine (83.5)	97.5
11	larch (94.0)	57.4	31	red pine (100.0)	36.5
12	spruce (98.0)	70.4	32	red pine (92.2)	79.3
13	red pine (73.3)	99.5	33	red pine (62.6)	97.2
14	red pine (100.0)	0.9	34	red pine (79.4)	97.4
15	larch (72.2)	40.1	35	conifer	52.4
16	red pine (89.9)	66.7	36	larch (46.8)	121.0
17	red pine (100.0)	30.5	37	red pine (59.0)	66.8
18	red pine (100.0)	5.1	38	spruce (100.0)	0.1
19	red pine (100.0)	13.4	39	red pine (89.9)	56.9
20	larch (64.7)	50.8	40	red pine (96.1)	125.3

表2 光学とレーダデータの取得時期。

Sensors	Data Acquisition Dates		
QuickBird	2002.04.06	2004.09.15	
Pi-SAR	2002.11.07 (X, L6407)	2003.08.20 (X, L6907)	2004.11.03 (X, L 8104)

の抽出にはL6407とL8104を使い、干渉合成開口レーダでは干渉機能を備えたX-バンドPi-SARのX6907とX8104を利用する。データ融合では2時期の光学データと両データ共に11月に収集されたL6407とL8104を用い、バイオマス計測モデル開発には観測対象への侵入深度の長いL-バンドPi-SARによる対風被害前のL6407を利用する。

(3) 解析手法

① 偏波合成開口レーダデータの散乱モデルをベースとした散乱パワー分解から森林被害領域を抽出するアルゴリズムには4成分散乱パワー分解手法を用いる。この手法では、4偏波レーダデータの共分散行列、あるいはコヒーレンス行列から散乱モデルに従って表面散乱(1回反射)と2回反射、体積散乱、およびヘリックス散乱成分の4種のパワー成分に分解するのだが、本研究の対象は森林でヘリックス散乱はほとんど無かったため、3成分のみの散乱パワーを利用した。

この手法を適用する理由は、台風被害前では樹木の幹は直立しており地表面と幹との2回反射成分があるが、倒木後ではこの反射成分が変化すると考えられることによる。さらに、被害前後では枝の状態も変化しており体積散乱の変化と、地表面の変化から表面散乱成分も変化していると考えられる。本研究では、これらの散乱パワー3成分の差から被害領域を算出し、胆振東部森林局による現地調査データと比較する。また、倒木被害前後の画像振幅の差からも倒木領域を算出し、計測精度

を比較する。

② 多時期干渉レーダによる倒木領域の抽出では、台風による倒木被害前後のPi-SAR データによる干渉画像から抽出した樹高変化を利用する。Pi-SAR X-バンドの各々のアンテナポッド内では2台の偏波用のアンテナが垂直方向に隣接して設置されている。従って、異なる偏波で受信した信号間に位相差が生じ、この位相差を利用して干渉処理を行いDEM (Digital Elevation Model) が算出できる。ただし、アンテナ間の距離が短いためDEMの精度は従来の長いアンテナ間隔を使う方法と比べて精度的には劣っている。

③ 光学データと合成開口レーダデータの融合による倒木領域の抽出では、両センサの特徴を活かした主成分分析 (PCA: Principal Component Analysis) を適用する。まず、台風前後での光学データとPi-SAR偏波データそれぞれに幾何補正を施し、赤と近赤外バンドからNDVIを求める。次に、光学データの赤と緑、青、近赤外バンド、NDVIと、HH、HV、およびVV偏波レーダデータの8変数を用いてPCAを行い、主成分スコアを算出する。最後に台風前後における主成分スコアの差分を用いて、最尤法による教師付き分類を行う。道路と平成以降に植林された林班は裸地として分類し、対象地域全域を倒木地域と非倒木地域に分類する。データ融合の抽出精度を検討するために、主成分スコアとレーダデータ、および光学データのみでの分類精度と比較する。

④ 合成開口レーダは、高分解能であれば樹々のある程度の形状を画像としてとらえることができる。このような森林画像のテクスチャは非ガウス統計に従い、バイオマスと強い相関があることが以前の研究で明確になった。一方、モデル適用には、画像強度の確率密度関数を算出することが前提となっている。データに最適な確率密度関数を特定することなくバイオマスを計測する方法として、画像強度のモーメントを利用する方法が考えられる。画像強度 I の2次モーメントは

$$\frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j^2 / \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j \right)^2 \quad (1)$$

と定義される。ここで、 N は林班画像のピクセル数である。2次モーメントの値は、画像強度が非ガウス統計に従うかぎり、非ガウス性の増加 (バイオマスが減少) とともに上昇する。本研究では、各林班における式(1)と現地計測のバイオマス値との散布図から相関度の高い回帰直線あるいは曲線を算出する。算出した回帰モデルを使って他の林班のバイ

オマス値を計測し、現地計測データと比較してモデルの計測精度を評価する。

4. 研究成果

(1) Pi-SAR データの散乱パワー分解による倒木領域の抽出では、倒木被害前 (L6408) と後 (L8104) の画像振幅の差から倒木領域を算出し、次に倒木被害前後の表面散乱と 2 回反射成分、体積散乱成分の差から被害領域を算出した。結果を図 1 の胆振東部森林局による現地調査データと比較した。

表 3 にある全体画像の強度の差は、0.94 dB (HH), -0.1 dB (HV), -1.28 dB (VV) と大きな変化は見られない。HH 偏波画像強度の減少と VV 偏波画像強度の増加は、垂直方向の幹が倒木によって水平方向に変化したためと考えられる。HV 偏波画像強度は殆ど変化がないのは体積散乱成分の変化が少ないことを示す。3 成分散乱パワー分解による結果に関しては、被害後に表面散乱成分 (P_s) が約 20 dB 減少し、2 回反射成分 (P_d) が約 28 dB 増加している。大きな差が見られた。前者の変化は、地表面が倒木で覆われたためであり、後者の変化は、増加した水平方向の倒木と地面との 2 回反射の増加によるものである。以上の結果をもとに画像強度と 3 成分散乱パワーの差を指標とした分類画像を図 3 に示す。現地調査データと比較した結果、画像強度と 3 成分散乱パワーをベースとした分類精度は、それぞれ 64.1% と 77.7% であった。

表 3 HH, HV, VV 偏波全体画像強度の差 (L6407-L8140) と 3 成分 (P_s : 表面散乱, P_d : 2 回反射散乱, P_v : 体積散乱) 散乱成分の差。単位は dB。

scene number	HH	HV	VV	P_s	P_d	P_v
L6407	-9.225	-14.645	-11.145	-79.965	-41.425	-5.195
L8104	-10.165	-14.545	-9.865	-59.685	-68.955	-4.995
L6407-L8140	0.94	-0.10	-1.28	-20.28	27.54	-0.20

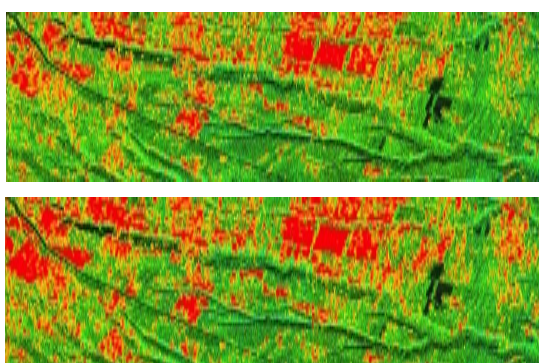


図 3 (上) 画像強度の差から分類した被害領域と (下) 3 成分散乱パワーの差から分類した被害領域。

(2) 多時期干渉レーダによる倒木領域の抽出では、X-バンド Pi-SAR による倒木被害前のデータ (X6907) と後のデータ (X8104) を使って位相を算出し、倒木前の DEM と後の DEM を生成した。これらの DEM の差分から倒木領

域の抽出を試みた。結果を図 4 に示す。この図で、赤は倒木によって樹高が低くなった被害領域に相当する。図からも分かるように、ある程度の倒木領域は抽出されてはいるが、ノイズが多く抽出精度 (現地調査データとの定量的な比較はしていない) は、図 3 の下図にある 3 成分散乱パワー分解による精度より低いのは明らかである。将来の改良点としては、アンテナ間隔を広げて DEM の精度を上昇させることと、ノイズ軽減があげられる。

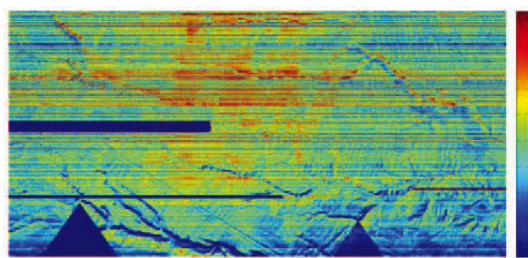


図 4 Pi-SAR X-バンドデータの干渉処理から生成した DEM の差分 (X6907-X8104) 画像 (赤の領域が倒木領域)。

(3) データの融合による倒木領域の抽出では、QuickBird 光学データと合成開口レーダデータ (L6407, L8104) に PCA を適用した結果、第 3 主成分までの累積寄与率が約 90% となっており、第 3 主成分までにはほぼ全ての情報が含まれていることが判明した。また、第 1 主成分の固有ベクトルが可視光の 3 変数 (赤、緑、青バンド) で最も大きく、第 1 主成分は可視光の情報を内包していると考えられる。同様に、第 2 主成分は固有ベクトルの最も大きい 3 偏波合成開口レーダデータの情報を反映しており、第 3 主成分は近赤外バンドと NDVI の情報を反映している。

倒木被害後の光学画像と 3 偏波 Pi-SAR 画像 (L8104) を RGB 表示した画像、および PCA の第 1 から第 3 主成分を RGB 表示した画像を図 5 に示す。図 5 の主成分画像では、各主成分間での相関がないため、定性的ではあるが、光学画像とレーダ画像と比べて倒木領域の判別が視覚的に容易であることが分かる。

次に、最尤法による光学データと Pi-SAR データ、および主成分スコアのカテゴリ分けを行った。最尤法のアルゴリズム等は良く知られているので、詳細は省略する。分類結果を図 6 に示す。現地調査データと比較すると、谷 (沢) の区域に裸地に相当するモザイク状の領域がみられるが、主成分スコアによる分類精度は 84.3% で、光学データのみによる分類精度 62.6% と Pi-SAR データのみによる分類精度 56.0% より高精度での分類が可能となっている。最後に、最尤法による計測被害面積と北海道森林管理局による林班ごとの被害面積を比較したところ、光学とレーダデータの決定係数は、それぞれ、 $R^2 = 0.87$ と 0.13 で、主成分スコアでの決定係数は $R^2 = 0.91$ と高い相関となっている。光学データでは、倒木領

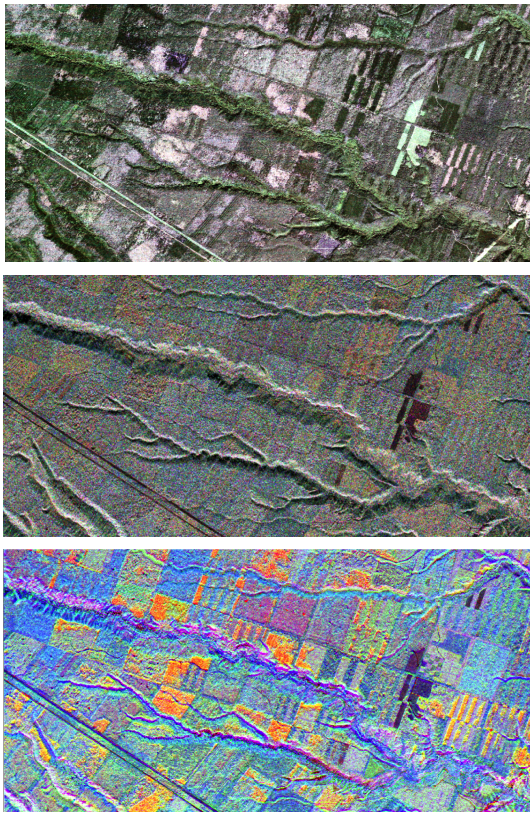


図5 (上) 倒木被害後のQuickBirdデータのRGB表示 (R: 赤, G: 緑, B: 青) と (中) Pi-SAR L-バンド画像のRGB表示 (R: HH, G: HV, B: VV)、(下) PCAの各成分のRGB表示 (R: 第1主成分, G: 第2主成分, B: 第3主成分)。

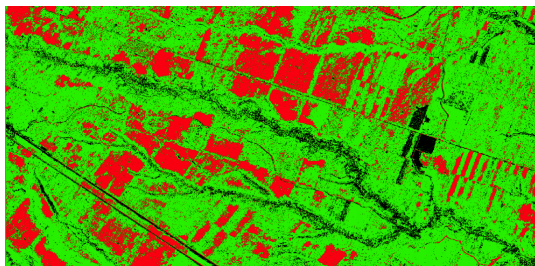


図6 最尤法による光学データとPi-SARデータ、および主成分スコアのカテゴリ結果 (赤が倒木領域)。

域でも葉が残っているため抽出困難な領域をレーダ偏波データが抽出したことが分類精度の向上の原因であると考えられる。このように、光学データと合成開口レーダデータの融合による主成分分析が単一種類のデータによる分類に優れていることが明確になった。

(4) モーメントモデルを適用した合成開口レーダによるバイオマス計測では、まず、図2と表1にある林班1～19のバイオマスと式(1)の画像強度2次モーメントとの相関性を示す散布図を算出した。相関係数は、 -0.692 (HH), -0.692 (VV), -0.929 (HV) で、図7の散布図にあるHV偏波画像が最も高い相関関係を示すことが判明した。HV偏波データと森林バイオマスとの高い相関関係は、非

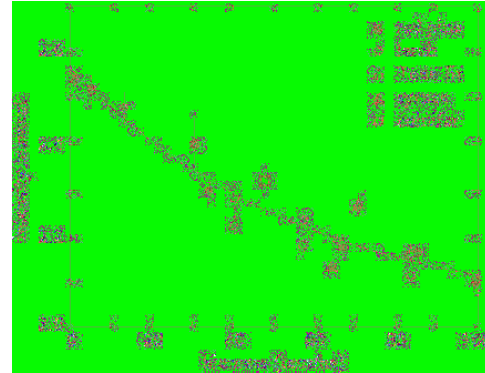


図7 林班1～19のバイオマスとHV偏波画像強度の2次モーメントの関係を示す散布図。

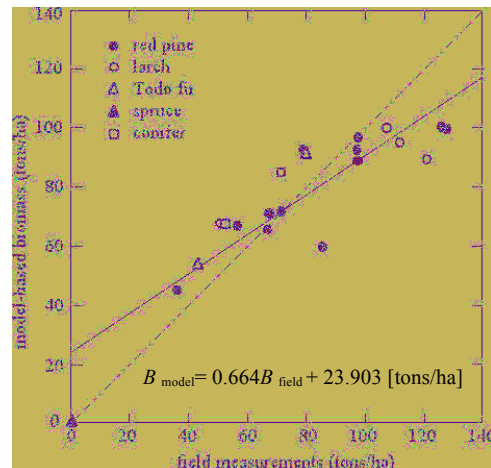


図8 モーメントモデルから算出した林班20～40のバイオマスと実測バイオマスの関係を示す散布図。

ガウス確率密度関数モデルとレーダ後方散乱モデルとも良く一致している。従って2次モーメントモデルにおいてもHV偏波データを利用した。図7の回帰曲線には3次多項式

$$\frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = a_0 + a_1 B_m + a_2 B_m^2 + a_3 B_m^3 \quad (2)$$

を適用し、図7の散布図の係数は、 $a_0 = 2.564$, $a_1 = -0.009$, $a_2 = 6.414 \times 10^{-5}$, $a_3 = -1.851 \times 10^{-7}$ で、この回帰式を使って、林班20～40の画像強度の2次モーメントからバイオマスを算出し、モデルの計測精度を評価した。図8は、表4にあるモーメントモデルから算出したバイオマスと実測バイオマスとの関係を示す散布図で、相関係数は0.891と強い相関が得られた。RMS (Root-Mean-Square) 誤差は19.4%で、バイオマス15.2ton/haに相当する。結果として、モーメントモデルの計測精度は85%と非ガウス確率密度関数モデルの計測精度(86%)とほぼ同じ高い精度となり、設定した目的は達成できた。

図9は、表1にある40林班全てのバイオマスデータと2次モーメントとの相関関係を示す更新した散布図で、式(2)の係数は、 $a_0 = 2.265$, $a_1 = -0.0126$, $a_2 = 1.097 \times 10^{-4}$,

表4 モーメントモデル (M-model) から算出した林班 (stands) 20~40 のバイオマスと実測バイオマス値。

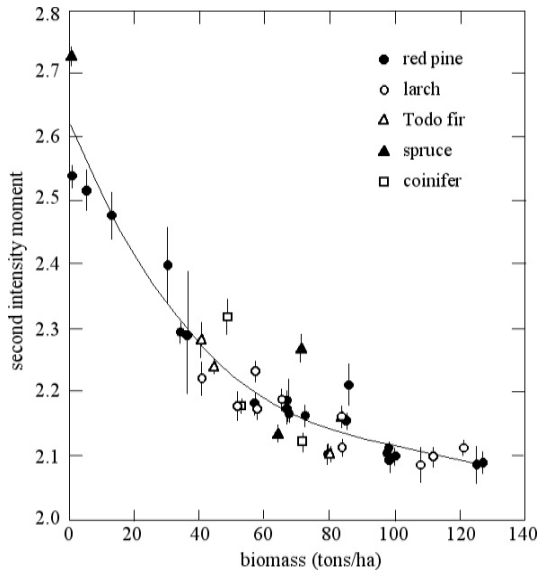
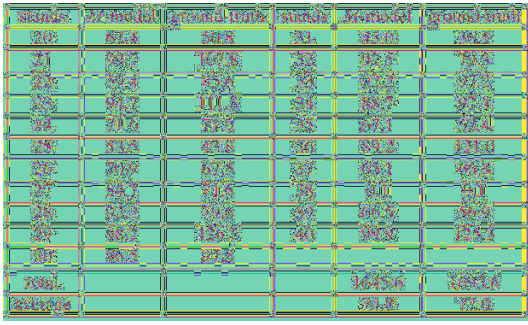


図9 画像強度の2次モーメントと表1にある全林班 1~40 のバイオマスの関係を示す散布図。

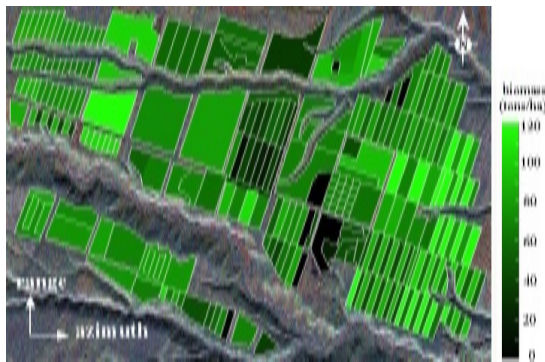


図10 図9の更新した2次モーメントモデルを使って算出したテストサイト全域のバイオマス地図。

$a_3 = -3.484 \times 10^{-7}$ で、相関係数は -0.863 であった。

図9からバイオマス値が約90~100 ton/haで飽和しており、このバイオマス値がモーメントモデルによる計測バイオマスの最大値と考えられる。なお、この計測最大バイオマス値は非ガウス確率密度関数モデルの値と

ほぼ同じである。図9の回帰曲線を使って苦小牧森林のテストサイト内にある全ての林班のバイオマスを算出したのが図10である。テストサイト内の全ての林班のバイオマスは実測していないが、計測精度は図8と同等の約85%程度と考えられる。

今後の課題として、このモデルを使った苦小牧森林全域のバイオマス図の作成と他の森林への適用性の検討があげられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① D. Nose, K. Ouchi, A study on detection of forest damage by SAR and optical data, 電子情報通信学会技報, 査読無, Vol. 112, No. 229, pp. 107-110, 2012.
- ② H. Wang, K. Ouchi, Assessment of typhoon-damaged forest by multi-temporal and multi-frequency PolSAR and InSAR dataset, Proceedings of Asia-Pacific International Conference on Synthetic Aperture Radar, 査読有, pp. 269-270, 2011.
- ③ H. Wang, K. Ouchi, Y.-Q. Jin, Extraction of typhoon-damaged forests from multi-temporal high-resolution polarimetric SAR images, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 査読有, pp. 3271-3274, 2010.
- ④ H. Wang, K. Ouchi, A simple moment method of forest biomass estimation from non-Gaussian texture information by high-resolution polarimetric SAR, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 査読有, Vol. 7, No. 4, pp. 811-815, 2010.

[学会発表] (計5件)

- ① 能勢大輔, 大内和夫, 合成開口レーダと光学センサによる森林情報の抽出に関する研究, 第53回(社)日本リモートセンシング学会学術講演会論, 2012. 11. 19-20, 広島
- ② H. Wang, K. Ouchi, Evaluation of typhoon-damaged forests by PolSAR and InSAR images, Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2011. 09. 12-16, Suzhou, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大内 和夫 (OUCHI KAZUO)

防衛大学校・電気情報学群・教授

研究者番号: 10289259