

J-1 人工衛星データ等を利用した陸域生態系の3次元構造の計測とその動態的評価に関する研究

(1) 生態系の構造計測手法に関する研究

② 多機能マイクロ波レーダによる植生環境の定量的評価

研究代表者 郵政省通信総合研究所・地球環境計測部・データ公用技術研究室 小林達治

郵政省通信総合研究所

地球環境計測部 データ応用技術研究室 小林達治・佐竹誠・梅原俊彦・浦塚清峰

地球環境計測部長 増子治信

宇宙開発事業団

地球観測研究センター 島田政信

平成9～11年度合計予算額 15,227千円

(平成9年度予算額 4,977千円)

(平成10年度予算額 4,957千円)

(平成11年度予算額 5,293千円)

[要旨]森林のバイオマスの評価に関しては、従来、現地調査に頼っており大きな労力を必要としてきた。環境問題に関心が持たれている現在広範囲な領域に対する森林環境、特に、バイオマスの測定が要求されている。この森林のバイオマス及び植生状態を監視する方法として航空機搭載多機能合成開口レーダが提供する高分解能・多周波・多偏波データを利用した評価方法に関する研究を実施する。

[キーワード] 合成開口レーダ, ポラリメトリ, 多周波, 航空機搭載, バイオマス

1. 序

人間活動による急速な環境の変化が大きな関心を集めるようになってきた。この環境変化を定量的に捉える方法の確立と因果関係の明確化が急務になっている。特に森林は広範囲かつ急速な森林破壊が進行しておりその把握手段が必要である。また、地球温暖化に関連して、地球上の二酸化炭素の量を推定する上でも正確な森林量（バイオマス）の推定が重要である。さらに、森林の保全という観点からも森林の構造を頻繁に観測する手段の開発は重要である。

このようなグローバルな変化を捉える手段として合成開口レーダ（SAR）は地表面の広い領域を天候や昼夜によらず高分解能で観測できるという利点を持っている。さらに、マイクロ波は波長により、森林の内部に透過する率が変わると同時に散乱する対象が変わるので、光学センサーと異なり樹木の上層部だけでなく、森林内部の情報を取り出すことが期待できる。また、偏波を変えて送受信することで異なる散乱機構のデータを取り出すことが期待できる。このマイクロ波の性質を利用した計測技術について研究を実施するために、航空機搭載の多周波多偏波 SAR を使用する。

衛星搭載の SAR は既に地球の観測を実施しており、グローバルな観測データを提供して多くの成果を上げているが、現在までに衛星に搭載されているものは単周波・単偏波で20m程度の分解能のものであ

る。このため多周波・多偏波といった機能を実現して、質的にも新しい情報を得ることが合成開口レーダの課題となってきた。また、衛星搭載の場合、観測条件も固定で同じ場所を観測するのに時間がかかるという問題もある。このため、機動力のある航空機搭載 SAR が研究用及び災害監視用に望まれていた。

通信総合研究所ではこのような要求にこたえる次世代の SAR ともいえる航空機搭載の多機能 SAR (PISAR) を宇宙開発事業団と共同で開発した。この SAR は L バンド (1.2GHz)、X バンド (9.5GHz) の 2 つの異なる周波数での同期観測が可能であり、周波数の違いによる散乱特性の違いから地表面のより詳細な分類や植生の詳細な観測が期待される。また、多偏波データや干渉 SAR 画像のような質的に新しいデータを提供する。さらに、X バンドに対しては水平分解能 1.5m、L バンドに対しては 3.0m の高分解能を実現しており、高分解能での森林計測が可能である。

これらのデータが陸域の植生、特に森林の特徴量を抽出することに有用であることを実証することが一つの目的である。さらに、PISAR は時速 900 km で 12000 m の上空から 15 km 程度の観測幅での観測が可能であり、様々な応用研究に対しても十分実用的な観測データを提供しうる。継続的な観測を行なうことで、日本における様々な植生状況の特徴を抽出することや季節変化・経年変化を調べることも可能である。

2. 研究目的

- (1) 森林構造の高分解能 SAR 画像による判読。
- (2) 多周波・多偏波の情報を利用した樹種の分類。
- (3) 森林の季節変化の特徴。
- (4) 森林特徴量 (樹高、胸高直径、胸高断面積、葉積指数、バイオマス) と SAR データの関係の抽出。

3. 研究方法

データ取得に使用する航空機 SAR (PISAR) の諸元を Table.1 に示す。また、テストサイトは北海道苫小牧の国有林及び北海道大学苫小牧演習林を利用する。テストサイトは苫小牧市街の西から支笏湖東に広がる平地林で、主にカラマツ、トドマツ、アカエゾマツが基本的に矩形に植林されている。自然林は広葉樹林を形成している。このテストサイトについて様々な観測パラメータで飛行観測を実施した。(Table.2 参照) さらに、森林特徴量と SAR データの比較を実施するために、24 点で樹高、胸高直径、胸高断面積 (レラスコープによるプロットレスサンプリング法使用)、葉積指数 (魚眼レンズを用いた全天写真から導出) 飛行観測と同期して取得した。調査点、飛行パスは地形 (傾斜) 効果や入射角が大きく変化しないように作成した。

平成 11 年度は 2 月、7 月、10 月に北海道苫小牧についての PISAR の飛行実験を実施した。また、7 月の飛行実験に同期して土壌水分量、地表面粗度、植生についての検証データを取得した。Figure.1 にこの 7 月観測時の X バンドと L バンドの偏波合成画像 SAR 画像 (R, G, B に HH, HV, VV 偏波が対応する。)を示す。その SAR 画像の諸元を Table.3 に示す。Figure.2 に他時期の HH 偏波合成画像 (R, G, B に 98 年 10 月、99 年 2 月、99 年 7 月が対応する。)を示す。それぞれの観測の諸元を Table.4 に示す。98 年 10 月は落葉のはじまったばかりであり、99 年 2 月は地面が雪で覆われていた。99 年 7 月は飛行当日激しい雨がふっていた。飛行観測時には位置合わせ用に三面のコナレフを設置した。

同時取得データに関しては電波照射方向が同じであるが、L と X の再生処理で使う参照軌道がずれるためアジマス方向に L と X で位置ずれをおこしている。このため、同時取得の L と X についても前処理と

して画像の位置合わせが必要となる。他時期の飛行パスの場合、飛行がGPSを基準に行われていること、また、飛行時に受ける偏流が異なることにより、飛行方向や入射角がずれをおこす。このため、SAR画像の位置合わせが前処理として必要不可欠となる。次に、調査点をSAR画像で同定する必要があるが、SAR画像に特有なフォアショートニングが起こっているため、標高が変わる場所では地図との対応をとるのが難しくなる。このため、画像上のローカルな目標点を基準にして、調査点の同定を実施した。同定したSARデータはその領域で平均をとってから、パワーのdB表示に変換して、校正係数としてTable.5の値を使用した。

樹種の同定については現地調査と北海道営林局発行事業図と北海道大学発行の北海道大学苫小牧地方演習林経営図を参照した。また、樹種、林齢、材積については営林署の林班表も参照した。

Table. 1. Sensor parameter

Band	L	X
Frequency (GHz)	1.27	9.55
Wavelength (cm)	23.6	3.14
Polarizations	full polarimetry	
Pulse bandwidth (MHz)	50	100
Pixel spacing (m)	2.5	1.25
Resolution Az/Rg (m)*	3.0/6.1	1.5/3.0

* The range resolution is at the incidence angle of 40 degree after ground projection.

Table.2

観測番号	観測名	観測日	高度	磁方位	観測時間	モード
1201	苫小牧 1	1998/2/24	12192	295	240	4ch
1206	苫小牧 2	1998/2/24	12192	30	150	6ch
2003	苫小牧 1	1998/10/26	12192	295	240	4ch
2004	苫小牧 2	1998/10/26	12192	30	210	6ch
2005	苫小牧 3	1998/10/26	12192	115	240	4ch
2006	苫小牧 4	1998/10/26	12192	210	150	6ch
2007	苫小牧 5	1998/10/26	12192	140	210	4ch
2305	苫小牧 5	1999/2/23	12192	140	210	4ch
2406	苫小牧	1999/2/24	12192	295	240	4ch
2407	苫小牧 2	1999/2/24	12192	30	210	6ch
2604	苫小牧 2	1999/7/14	12647	159.8	182	4ch
2605	苫小牧 J	1999/7/14	12604	10.4	248	6ch
2606	苫小牧 1	1999/7/14	12656.5	286.3	242	4ch
2607	苫小牧 SR	1999/7/14	12564	44.6	199	2ch
2608	苫小牧 4	1999/7/14	12594.2	285.8	243	2ch
3004	苫小牧	1999/10/14	1211.7	49.3	292	2ch
3005	苫小牧 1	1999/10/14	12280	286.5	254	4ch
3006	苫小牧	1999/10/14	12218.2	132.5	222	2ch
3007	苫小牧	1999/10/14	12194.8	285.5	360	2ch
3008	樽前	1999/10/14	12268.2	131.2	58	6ch
3009	苫小牧	1999/10/14	12202.3	310.4	228	6ch

Table.3

Image Parameters (4 looks, Ground range)		
Image center(Lat,Lon)	42deg.44'05"N,141deg.31'25"E	
Look angle(near-far)	34.6 – 42.8	
Image size (km)	9 (Az) x 3 (Rg)	
Pixel spacing (m)	2.5 (L)	1.25 (X)

Table.4

Date	Obs. no.	Drift ang.	Speed	Altitude	Weather	Phenology
98/10/26	2003	0.56 deg	170 m/s	11922 m	Fine	Leaf on
99/02/23	2406	4.21	173	11753	Fine	Leaf off
99/07/16	2606	5.06	221	12598	Rainy	Leaf on

Table.5

	HH	HV	VH	VV
L	4.44	0	0	5.02
X	-1.16	-3.2	-3.8	-5.2

4. 本研究によって得られた成果

(1) 森林判読

Figure.1 と Figure.2 の合成図からもわかるように、営林署で管理している矩形の林班単位を識別することができる。また、材木を切り出すための土場が森林のあちこちで円形の暗い領域として識別できる。さらに、左上部に縞状に列状間伐が識別できる。沢では傾斜のため入射角が変化するためレーダに近い側で暗い影でまた遠い側で強い散乱になって白っぽい線として識別できる。また、中心を左右に走る林道をはじめ、土場と土場を結ぶ小さな道の中にも暗い筋として判別できるものもある。ただし、車が通れる程度の道であっても識別できなかった道もある。Figure.1 の L バンド画像の中央右にある赤い領域は風害のため皆伐され再植林されたところである。

(2) 樹種識別

Figure.2 の X バンド画像で、カラマツ、アカエゾマツ、トドマツはそれぞれ、青、こげ茶、薄茶の領域にほぼ対応している。その領域の HH の散乱係数を Figure.3 に示す。L バンドでは樹種に対して散乱係数はあまり変化していない。それに対して X バンドでは 2 月は 4 dB、10 月、7 月は 3 dB とどの時期でも大きな変化をしている。また、カラマツ、トドマツ、アカエゾの順で小さくなっている。同様に 7 月の各偏波のその領域の散乱係数を Figure.4 に示す。最大と最小の差は XHH で 3 dB になる以外はどの偏波も変化が 1.5 dB 以下となり、かなり識別には厳しい状況になっている。ただし、Figure.2 では色合成する時、ヒストグラムを等価にして作成しているので、カラマツ、トドマツ、アカエゾマツは X バンドの偏波合成画像では緑、紫、暗い緑として、また、L バンド偏波合成画像でもアカエゾマツの領域は白っぽい領域として識別することができた。



Figure.1(a) Lバンドの偏波合成 SAR 画像 (R, G, B に HH, HV, VV 偏波が対応.)

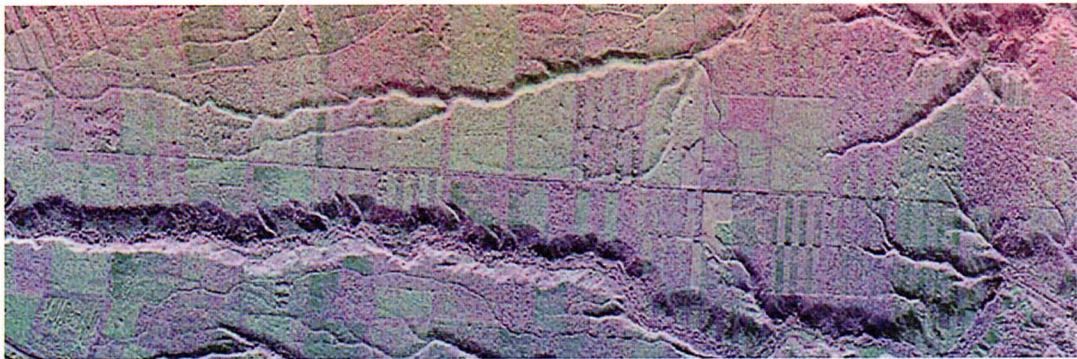


Figure.1(b) Xバンドの偏波合成 SAR 画像 (R, G, B に HH, HV, VV 偏波が対応.)

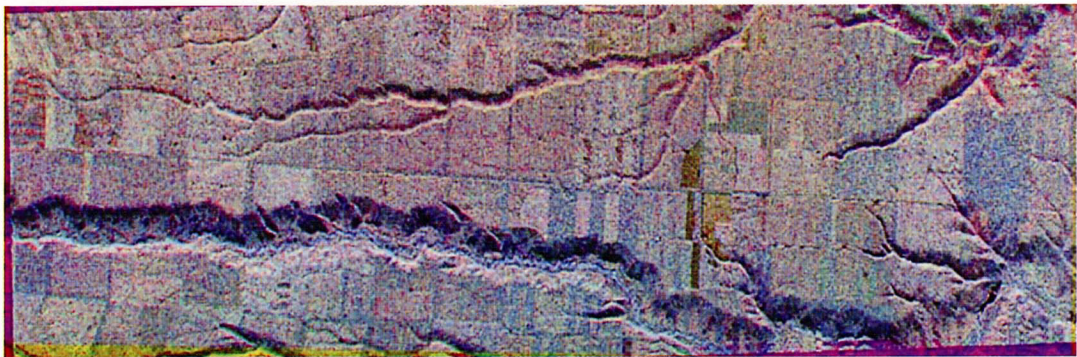


Figure.2(a) Lバンド HH 偏波他時期合成 SAR 画像 (R, G, B に 7 月, 10 月, 2 月が対応.)



Figure.2(b) Xバンド HH 偏波他時期合成 SAR 画像 (R, G, B に 7 月, 10 月, 2 月が対応.)

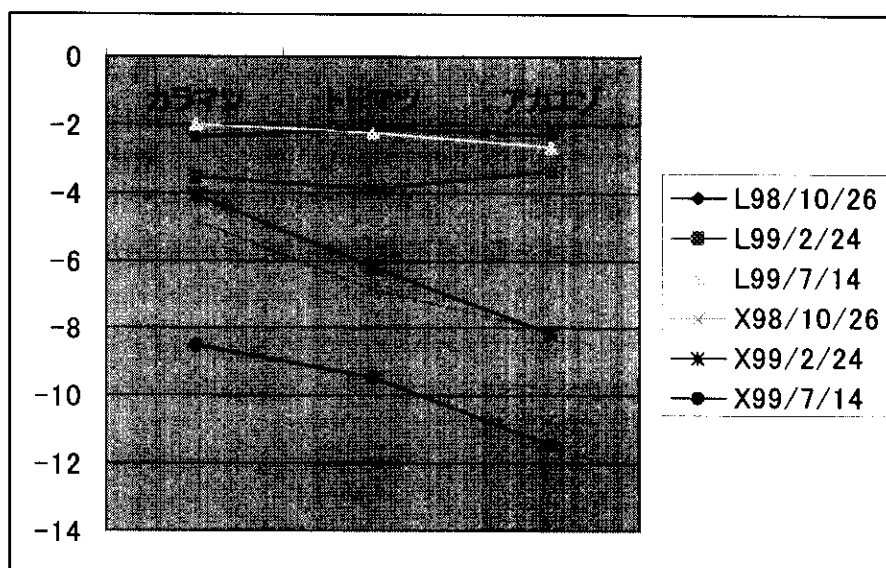


Figure.3 季節ごとの樹種による HH 偏波の散乱係数

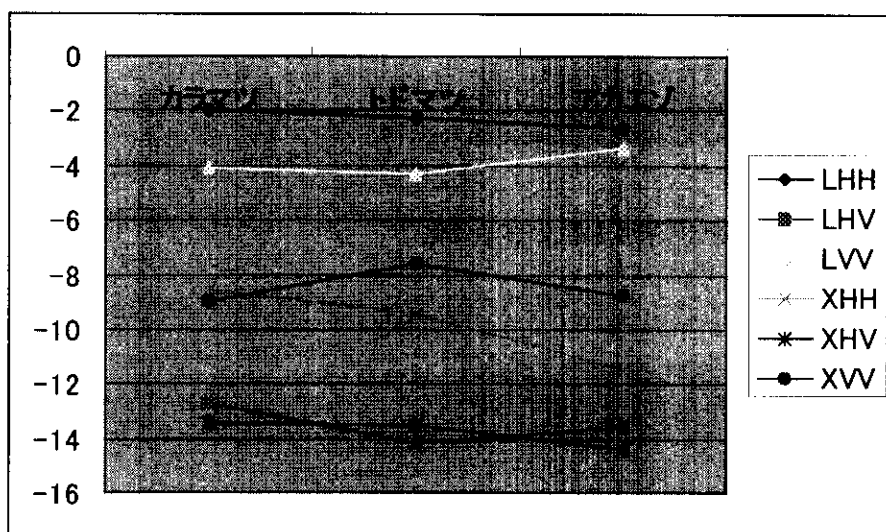


Figure.4 偏波ごとの樹種による 7 月観測時の散乱係数

(3) 季節変化

Figure.2 の画像上で、代表的な色として識別できる均一な領域を選び、7 x 7 ピクセルで平均を取った L バンド、X バンドそれぞれの HH 偏波の散乱係数を Figure.5, Figure.6 に与える。ここで領域 4, 5, 6 はカラマツ、アカエゾマツ、トドマツに対応する。L バンドでは領域 7 以外は 2 月の葉の落ちている時期で散乱係数が最小となり、10 月と 7 月ではほぼ同じ値になった。領域 7 は林班のなかをさらに細かい矩形単位で、カラマツ、アカエゾを含む数種類を植林している場所である。他方、X バンドでは領域 5 と 8 以

外で2月の散乱係数は他の月の散乱係数より大きくなった。領域5では10月と2月でほぼ同じ、領域8では10月がもっとも散乱係数が大きくなった。領域5と8はどちらも事業図ではアカエゾマツとして分類されている。散乱係数増加は葉が落ちることを考えれば、散乱体としてより吸収体として働いていた葉が減り、透過する電波量が増えるため枝、幹または地面で散乱する成分が増えたとして定性的に理解できる。ただし、常緑樹の場合は葉の量の変化は少ないので別の原因と考えられる。逆に2月に散乱係数が減少した原因としては地面が雪でカバーされたため、鏡面的になって地面からの散乱が減ったこと、また、観測時は気温が0度を超えたため、雪の表面が溶けて電波を吸収する量が増えたことが考えられる。

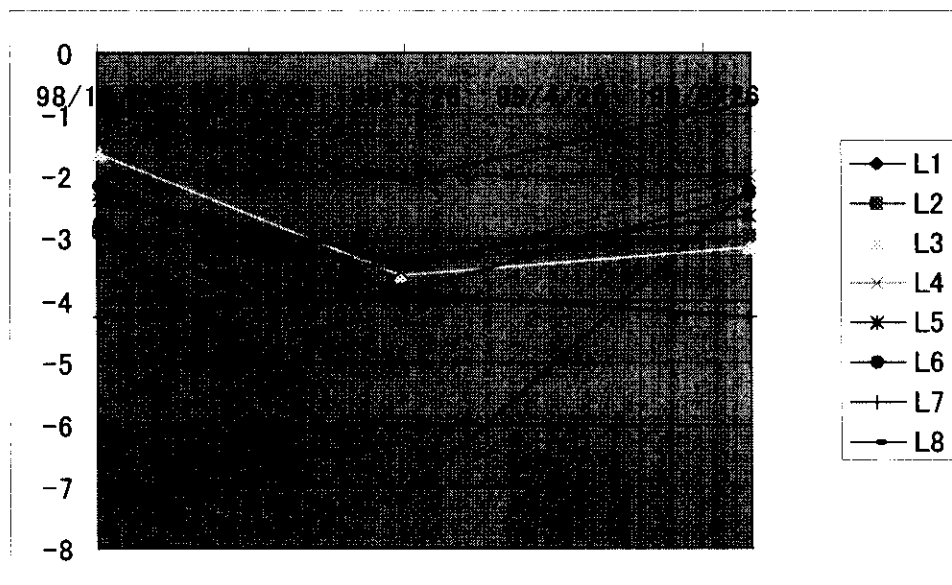


Figure.5 代表的領域でのLバンドHH偏波の散乱係数の季節変化

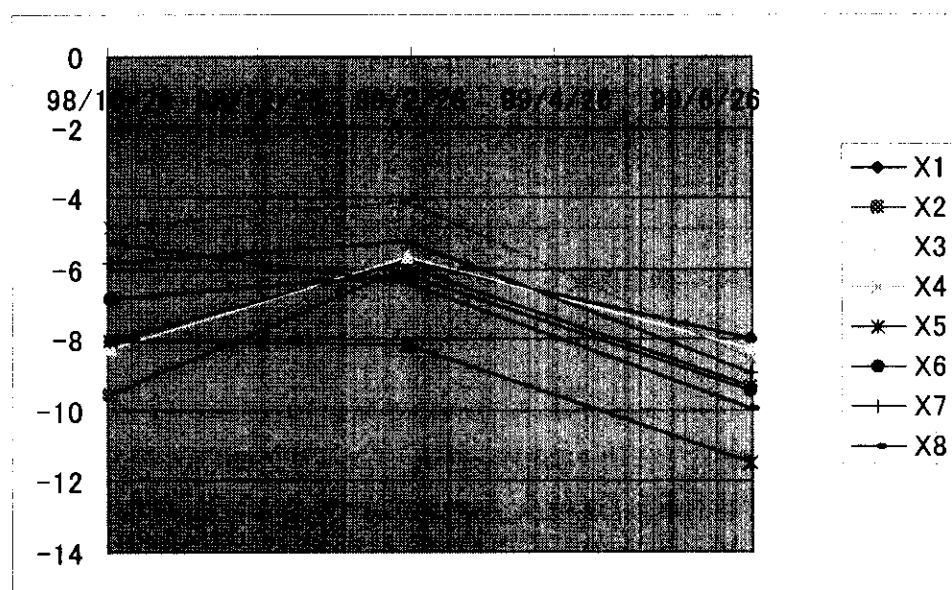


Figure. 6 代表的領域でのXバンドHH偏波の散乱係数の季節変化

(4) 植生量と散乱係数

調査点を中心に半径 (R) 15 m, 22.5 m, 30 m の領域内で散乱係数を真値で平均してから, dB 値に変換して, この dB 値と胸高直径 (DBH), 樹高, 葉面積指数 (LAI) 胸高断面積について回帰直線を求めた. X バンドの散乱係数については R=15 m, 22.5 m の時, HV 偏波で 0.6 程度の値をとる他は低い相関を与えた. 他方 L バンドの散乱係数については R=15 m で DBH と胸高断面積が VV 偏波で 0.7 を超えた. また, R=22.5 m では DBH のみ HV 及び VV 偏波で良い相関を与えた. R=30 m では HV と VV 偏波で DBH と樹高について高い相関を与えた. 回帰直線の相関を Table.6 に与える. 胸高断面積と樹高の積を体積と定義して, 体積と散乱係数の関係を調べた. アカエゾマツに対する場合の関係を Figure.7 に与える. R=15 では相関は低い R=30 では VV 偏波で 0.67, また, HV 偏波で 0.54 の相関を得た. 体積は 210.87 から 626.49 (m^2/ha) の間に分布しており, DBH は 10.8 から 23.3 cm の間で分布している. 乾燥重量に換算するためには樹種ごとの形状項と密度をかける必要がある. さらに, この乾燥重量は幹の体積と関係する量であるが, 枝の形状, 密度, また樹幹の密度も散乱係数には複雑に関わっており, 葉, 枝, 幹全体の乾燥重量の推定には樹種ごとの経験的な関係式の導出が必要である.

Table.6 Correlation coefficients between biophysical properties and backscattering coefficients
(for the radius of the average region of 15, 22.5 and 30 m)

R=15m	LHH	LHV	LVV	XHH	XHV	XVV
DBH	0.4748	0.6305	0.7861	-0.2995	-0.0856	-0.2975
Height	0.5227	0.3904	0.5953	-0.4033	-0.0665	-0.3744
LAI2000	-0.0707	0.2203	-0.0967	0.3276	0.5860	0.1227
Basal area	0.1435	0.2112	0.7202	0.2687	0.1198	0.1892

R=22.5m	LHH	LHV	LVV	XHH	XHV	XVV
DBH	0.4215	0.8079	0.7475	-0.3894	-0.1011	-0.3547
Height	0.5425	0.5719	0.6190	-0.3917	0.0608	-0.3523
LAI2000	-0.3517	0.2563	0.1730	-0.2818	0.6284	0.2054
Basal area	-0.2355	-0.0288	0.4205	-0.2602	0.1881	0.2216

R=30m	LHH	LHV	LVV	XHH	XHV	XVV
DBH	0.5715	0.9206	0.8277	-0.5369	-0.2293	-0.5458
Height	0.6194	0.7264	0.8347	-0.4330	0.0060	-0.4622
LAI2000	-0.1518	0.2696	0.2314	-0.0114	0.3064	-0.0274
Basal area	-0.1216	0.1484	0.3825	0.0233	0.0931	0.0537

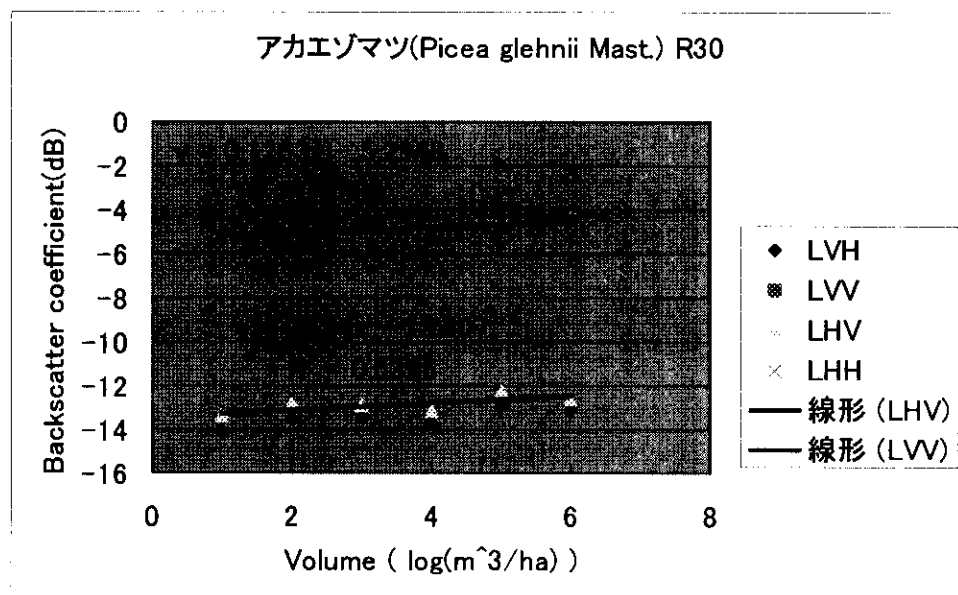
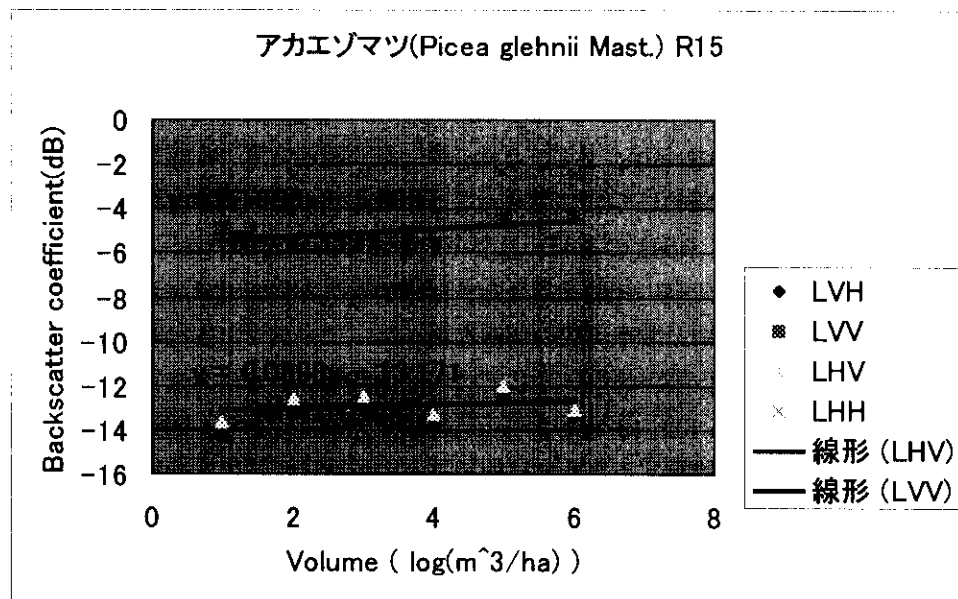


Figure.7 アカエゾマツの体積と散乱係数の関係

(5) シングルパス干渉 SAR

Figure.8 に苫小牧でのシングルパス干渉 SAR で99年7月に得られた位相差画像を示す。Figure.1の左下の領域を含む位置であり、沢に沿って位相差がきれいな形を捉えている。また、林班に対応する領域に明暗の格子縞がみられる。これは樹幹の高低差を捉えている。この画像は横方向右から左が飛行機の進行方向であり、アジマス方向であり、上下方向上から下に電波を照射している。上下方向は地上投影前のスラントレンジで表示されており、表示領域は5 km x 5 kmである。

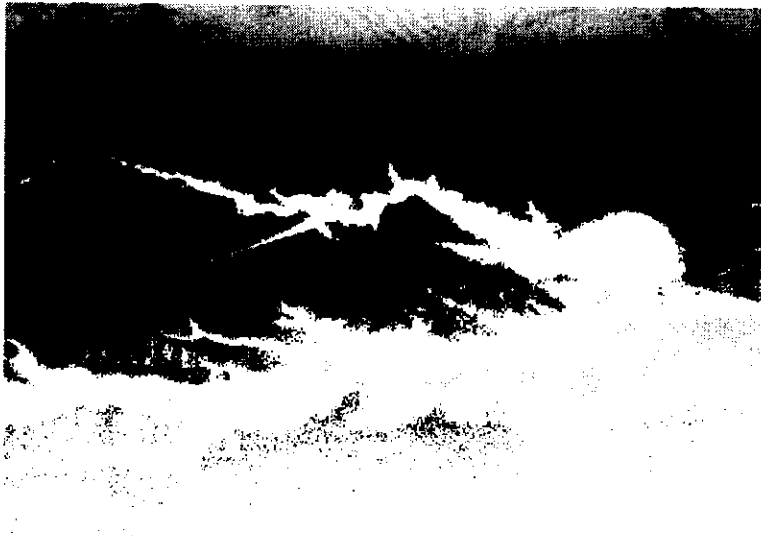


Figure.8 苫小牧の位相差画像

5. 参考文献

多周波多偏波合成開口レーダによる森林観測の海外での動向については以下の文献を挙げておく。

また、PISAR の最近の情報についてはhttp://www.crl.go.jp/ck/ck521/3d_sar/J/ を参照ください。

- [1] T. LeToan, A. Beaudoin, J. Riou and D. Guyon, "Relating forest biomass to SAR," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, pp403-411, Mar. 1992.
- [2] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, T. LeToan, A. Beaudoin, E. S. Kasischke and N. Christensen, "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, pp412-415, Mar. 1992.
- [3] K. J. Ranson and G. Sun, "Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp388-396, Mar. 1994.
- [4] E. Rignor, J. B. Way, C. Williams and L. Viereck, "Radar estimates of aboveground biomass in boreal forests of interior Alaska," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp1117-1124, Sept. 1994.
- [5] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, L. E. Pierce, T. L. Sharik, K. M. Berge, J. Kellndorfer et al, "Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 33, pp877-895, July 1995.

【研究成果の発表状況】

(1) 口頭発表

- ① 小林達治, 梅原俊彦, 灘井章嗣, 松岡建志, 浦塚清峰, 佐竹誠, 沢田治雄, 三塚直樹, 若林裕之, 田殿武雄, Muhtar Qong, 日浦勉: 日本リモートセンシング学会平成11年秋季学術講演会
「多機能航空機 SAR による森林観測」

- ② 三塚直樹, 沢田治雄, 鷹尾元, 石橋聡, 川端幸蔵, 武生雅明, 小林達治, 若林裕之:
日本リモートセンシング学会平成11年秋季学術講演会
「高分解能多偏波航空機 SAR と森林バイオマスの関係解析」

- ③ 小林達治, 浦塚清峰, 梅原俊彦, 灘井章嗣, 佐竹誠, 松岡建志, 沢田治雄,
三塚直樹, 若林裕之: ALOS/PALSAR CRL&NASDA/PI-SAR ワークショップ (平成11年11月4日) 「航空機搭載多周波多偏波合成開口レーダ (π -SAR) による森林観測」

- ④ T.Kobayashi, A.Nadai, T.Umehara, M.Satake, T.Matsuoka, S.Uratsuka, H.Sawada,
N.Mitsuzuka, H.Wakabayashi and T.Hiura:
International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA, July 2000
“Forest monitoring in northern Japan with an airborne high-resolution SAR”

(2) 論文発表

- ① 三塚直樹, 沢田治雄, 川端幸蔵, 穴沢道雄, 永谷泉, 中園悦子,
小林達治, 浦塚清峰, 梅原俊彦, 灘井章嗣, 若林裕之: 日本リモートセンシング学会誌
「高分解能多偏波航空機 SAR 森林観測データの特性」 (予定)