JERS-1/SAR による熱帯雨林の伐採モニタリングのための コヒーレンスの有効性の検討

A Study on Effectiveness of Coherence for Monitoring Deforestation of Tropical Rain Forest Using JERS-1/SAR

竹内 章司*

Shoji TAKEUCHI

Abstract: We studied the effectiveness of coherence information for monitoring deforestation in tropical rain forests. First, the changing patterns of SAR backscattering intensity of JERS-1 SAR data in a tropical forest region in Sumatra island were investigated and it was found that the backscatter changes are rather complicated than those estimated from conventional studies. Then the coherence images by several JERS-1 SAR interferometric pairs were presented and the relationship between coherence and backscatter changing patterns was discussed. In addition, the accuracy for identifying deforested areas was assessed for the combined use of coherence with backscattering intensity. These results proved the effectiveness of the combined use of coherence for identifying deforested areas compared with the use of intensity only.

1. はじめに

近年, SAR データによる土地被覆の分類およびその変動の抽出に, 干渉 SAR 技術から得られるコヒーレンスを利用しようとする研究が盛んになってきている。著者も, これまで森林を対象として土地被覆状況の判別に SAR の強度とコヒーレンスの併用を試みてきた^{1),2)}。コヒーレンスは, 同一地域を 2 回観測した 2 つの複素 SAR データ間の相互相関係数として計算され, 2 時期の SAR 画像の局所的な類似度を非常に細かく表現することができる。そして, 対象物表面の波長オーダー以下の微細な変動にも反応し, SAR の強度だけでは検出不可能な土地被覆の時間変動を検出できる可能性を持っている。反面, ベースライン長, および降雨, 湿度, 風などの気象条件の影響を受けやすく, 特徴量としてはかなり不安定である。また, 基本的に可干渉ペアしか使用できないため, 使用できるデータが限定されるという問題もある。本報告は, 上記のよ

うな特徴を持つコヒーレンスが, JERS-1/SAR データを用いて熱帯雨林の森林伐採をモニタリングする際に, どの程度有効に利用できるかについて定性的および定量的な検討を行ったものである。

2. 熱帯雨林のモニタリングにおける SAR の利用

これまで, 熱帯雨林における SAR データの利用に関しては, SAR 後方散乱強度が森林のバイオマスと一定の相関関係があることが明らかにされており^{3),4)}, このことを利用すれば, 熱帯雨林の伐採状況を SAR でモニタリングすることは原理的には可能と考えられる。著者もインドネシアのスマトラ島を対象として, JERS-1/SAR データの後方散乱強度を用いて熱帯雨林の変化 (プランテーション開発による森林伐採地域の検出) を試みてきた⁵⁾。しかし, その結果, 森林伐採による後方散乱の強さは, 必ずしもバイオマスの減少を表す方向に (すなわち後方散乱が低下する方向) に変化せず, 少なくとも一時的にはむしろ上昇するという結果を得ている。このように, SAR 後方散乱強度と熱帯雨林の伐採との関係も必ずしも単純ではなく, 後方散乱強度だけで熱帯雨林の変動を抽出することが必ずしも容易でない可能性がある。したがって, 後方散

*広島工業大学環境学部環境情報学科
Dept. of Environmental Information Studies, Faculty
of Environmental Studies, Hiroshima Institute of Technology
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 39, NO. 6, 2000

乱強度と併用してコヒーレンスを利用することにより、森林伐採による熱帯雨林の変動をより確実に把握することが期待できる。

3. 研究対象地域および使用データ

研究対象地域を Fig. 1 に示す。スマトラ島南部の中央部に位置する50km 四方の地域を対象とした（図の四角で囲まれた地域）。スマトラ島は全島的に泥炭地が広く分布し、その上に生育する湿地林も広く分布する。このような湿地林は人間の生活には適さないため、これまではほとんど手付かずの自然の状態で維持されてきた。しかし、近年、油やし等の商品作物の需要の増大に伴って、対象地域においてもプランテーション開発が進み、それに伴って天然の湿地林もまた開発のターゲットになっている。その開発のテンポは最近になるほど加速されており、今回対象とした地域では、現在、天然湿地林はほとんど消滅状態にある。

使用した JERS-1/SAR データは、1992年の10月から1998年の9月までに観測された計15時期の時系列データである。また、今回の検討では現地調査を行っていないため、対象地域の森林の変化状況を確認するための衛星データとして、1990年から1998年までの3

時期の光学センサ画像を使用した。それらの光学センサ画像を Fig. 2(カラー頁)に示す。Fig. 2の画像では、対象地域の森林分布の様子およびそれらの森林の変遷が明瞭に示されている。Fig. 2の画像で、暗い赤で示されている部分が、上に述べた天然湿地林(Primary forest (Pf))を表している。一方、明るい赤で示されているのは、森林ではあるがすでに人手が入った択伐林(Logged forest (Lf))である。対象地域は、1990年当時はほとんどの地域がこの2つの森林で覆われていたが、1997年になると、天然林や択伐林の一部がプランテーション (Plantation (Pl))に変化し、さらに、天然林の一部に新たな森林伐採地 (Deforested area (Df-1, 2))が現れていることがわかる。さらに、わずか1年後の1998年には、残っていた天然林がほとんど伐採され(Df-3, 4, 5)、消滅してしまったことが明らかである。

4. 森林伐採に伴う SAR 後方散乱強度の時間変化

Fig. 3に、対象地域における1996年の9月から1998年の9月までの JERS-1/SAR の時系列画像を示す。なお、1996年以前の画像には、画像の変化としては大きな変化はほとんど見られなかった。また、Fig. 3では、Fig. 2の1997年と1998年のスポット画像に最も定期的に近い JERS-1/SAR 画像 (1997/07/6および1998/09/19)に、スポット画像から判別される主な伐採地 (Df-1~Df-5) とプランテーション (Pl) の位置を示している。このうち、Df-1とDf-2では、最初 SAR 画像が比較的明瞭に明るく変化し、その後、暗く変化していることがわかる。一方、Df-3からDf-5では、前者ほど明瞭ではないが、伐採地が全体的に明るく変化している。このような変化は1998/03/27の画像にすでに見られ、これら3箇所の伐採が1998年の3月までの間に行われたことを示唆している。一方、プランテーション (Pl) は、JERS-1/SAR 画像ではいずれも暗い部分として比較的容易に判別できることがわかる。

上記のような森林伐採に伴う SAR 後方散乱の変化を確認するため、Fig. 2の画像で1998年までに伐採されたことが確認された9箇所の天然林 (Pf-1~Pf-9)、および最後まで伐採されずに残った択伐林 (Lf-nd) を選び、それらの場所の後方散乱係数の時間変化を調べた。その結果を Fig. 4の上のグラフに示す。9箇所の

Fig. 1 Study area.

[Pl: Plantation, Df: Deforested area]

Fig. 3 Multi-temporal JERS-1/SAR intensity images from Sep., 1996 to Sep., 1998.
(JERS-1: MITI/NASDA retains ownership of data.)

天然林のうち、Pf-1から Pf-3は1997年6月のスポット画像で伐採が確認された場所、Pf-4から Pf-9はその後1998年8月までの間に伐採されたことが確認された場所である。ただし、上に述べたように、Pf-4から Pf-9は実際には1998年の3月にはすでに伐採されていた可能性が高い。Fig. 4 の上のグラフを見ると、森林伐採地はいずれも伐採直後には後方散乱が一旦上昇し、その後下降するという変化を示すことがわかる。一方、伐採されなかった択伐林の後方散乱の変化は、伐採林に比べるとかなり小さいことがわかる。

このように、JERS-1/SAR の後方散乱強度は、森林伐採に伴って非伐採林とは明らかに異なる変化をするが、その変化の仕方は、伐採直後には後方散乱が一旦上昇し、その後下降するという特徴的な変化をすることが明らかである。このような変化をする理由としては、伐採後直ちに整地が行われずに、倒木をしばらく放置しておき、最後に焼却処理を行うことが考えられる。アマゾンの熱帯雨林を対象とした既存の研究で

も伐採地がこのような変化をすることがすでに報告されている⁶⁾。この論文の中では、後方散乱が上昇する理由として、伐採後に地面に放置された倒木による直接散乱を挙げている。上記の特徴的な変化をした伐採地のうち、Df-2では、Fig. 2 の1997年のスポット画像に火災による煙があがっているのが見られる。このような事実も、上に述べた理由を裏付けるものと考えられる。

以上まとめると、JERS-1/SAR 画像では、森林伐採に伴い、後方散乱強度は非伐採林とは異なる何らかの変化をすることは確実である。しかし、その変化は上に述べたように単純なものではないため、後方散乱強度から森林伐採地を正しく判別するためには、その時間変化をかなり細かく調べる必要がある。逆に、たとえば Fig. 3 の1998/03/27の画像の後方散乱強度だけから伐採地を判別することは、異なる伐採地の間の後方散乱強度が大きく異なるため、かなり困難と考えられる。このように、JERS-1/SAR の後方散乱強度と伐採地との関係は、1対1の単純なものではないため、

Fig. 4 Temporal changes of backscattering intensity (upper) and coherence (lower) in deforested primary forest (Pf-1~Pf-9) and non-deforested logged forest (Lf-nd).

後方散乱強度だけを用いて森林伐採地を抽出することには一定の限界がある。

5. 森林伐採に伴うコヒーレンスの時間変化

Fig. 5 には、使用した時系列 SAR データの中で、比較的良好的な干渉を示した 3 つのペアによるコヒーレンス画像を示す。それらは、1996/10/15 と 1996/11/28 (ペアー 1)、1997/10/02 と 1997/11/15 (ペアー 2)、および 1998/03/27 と 1998/05/10 (ペアー 3) による結果である。各ペアのベースライン長 (基線方向に直角な成分) は、ペアー 1、2、および 3 に対し、それぞれ 679 m、1497 m、および 833 m であった。コヒーレンスの値自体はベースライン長により異なるため、ここでは、コヒーレンスの絶対値ではなく、コヒーレンスパタンにおける相対的な違いと土地被覆との関係に対して定性的な評価を行った。

まず、ペアー 1 と 2 の画像とともに、既存のプランテーション開発地ではコヒーレンスが高く、それ以外の森

林部分では低くなっている。また、1996 年の後半になってから出現した森林伐採地 (Df-1、Df-2) では、ペアー 1、2 の画像ともコヒーレンスが明瞭に高くなっていることがわかる。一方、ペアー 3 の画像では、ペアー 1 と 2 の画像で暗く現れていた森林部分 (Df-3~Df-5) のコヒーレンスがかなり上昇していることがわかる。この結果は、4. で述べたように、これらの地域が 1998 年の 3 月までに伐採されたことを強力に裏付けている。

Fig. 5 に見られるコヒーレンスの時間変化を確認するため、Fig. 4 の上のグラフと同じサンプルによるコヒーレンスの時間変化を Fig. 4 の下のグラフに示す。なお、このグラフには、Fig. 5 のペアに加えて、1998/02/11 と 1998/03/27 のペアによるコヒーレンスもプロットされている。このグラフを見ると、森林伐採地のコヒーレンスは、いずれも伐採後に非伐採の択伐林のコヒーレンスより高くなることが示されている。このように、JERS-1/SAR の干渉ペアによるコヒーレンスは、森林伐採地では非伐採林よりも高くなることが明らかである。したがって、後方散乱強度だけでは森

[Pl: Plantation, Df: Deforested area]

Fig. 5 Coherence images by JERS-1/SAR interferometric pairs.

林伐採地を抽出することが困難な場合に、コヒーレンスを併用することによって、伐採地の抽出をより確実に行えることが期待できる。

しかしながら、コヒーレンスにも問題がいくつかある。1つ目は、干渉することが前提になるため、すべてのデータで使用できるとは限らないことである。2つ目は、リピートパスによるデータペアを使用するため、コヒーレンスを求める期間が長いことである(JERS-1では44日)。このため、本来干渉性の良い伐採地やプランテーションであっても、土地被覆の時間変化により干渉性が低下する可能性が考えられる。たとえば、Fig. 5で、Df-1の一部のコヒーレンスが低下していることや、ペア2の画像ではプランテーションのパターンがややボケていることなどは、この影響によると考えられる。後者の問題を回避するには、ERS-1、2で行われていたようなタンデムペアによる観測を行うのが最善であるが、現時点ではLバンドSARを搭載したタンデム運用の計画が発表されていないため、その実現可能性は低い。

6. コヒーレンスと後方散乱強度の併用による伐採地判別精度の定量的検討

これまでの定性的な検討に加えて、ここでは、コヒーレンスと後方散乱強度を併用した場合について、どの程度まで伐採地の判別を行えるかを定量的に検討した。さらに、強度のみを使用した場合との比較を行った。Fig. 6(カラー頁)には、判別に使用したコヒーレンスと後方散乱強度のマージ画像を示す。強度画像と

しては、各干渉ペアのどちらか一方のデータを使用した。Fig. 6の各画像に対して、教師有りの最尤法分類を行って、その判別精度を評価した。分類クラスとしては、(1)天然林(Primary forest (Pf)), (2)択伐林(Logged forest (Lf)), (3)プランテーション (Plantation (Pl)), (4)伐採地—A (Deforested area—A (Df—A)), (5)伐採地—B (Deforested area—B (Df—B))の計5種類を設定した。伐採地—AとBは、前者が1996年後半から出現した伐採地(Df-1, Df-2)、後者は1998年になってから現れた伐採地(Df-3~Df-5)を表している。これらのクラスのトレーニングエリアとして、Fig. 2の光学センサ画像の判読により、各クラスごとに5箇所ずつ場所的に偏らないように選んだ。ただし、1996年の伐採地—Aや、1998年の天然林は、画像のほんの一部にしか存在しないため、その部分のみを選んだ。さらに、1996年の画像には、湛水した森林(後方散乱が一時的に高くなる森林)が見られたため、これも Flooded forest として分類クラスに加えている。

Fig. 7には、各時期のトレーニングデータの判別効率表(Confusion Matrix)から求めたクラス毎の正答率(TPR: True Production Rate)および誤り率(FPR: False Production Rate)を示す。ここで、TPRは、判別効率表のある行の対角成分とその行の総和との比率、FPRは、ある列の対角成分以外の総和とその列の総和との比率をそれぞれ表している。Table 1に判別効率表とそれから計算されたTPR, FPRの一例を示す。Fig. 7より、コヒーレンスを併用することによって、強度のみを用いるよりも全体的にTPRが上昇すると同時にFPRが低下する傾向が見られ、コ

[Pf : Primary forest, Lf : Logged forest, Pl : Plantation, Df-A/B: Deforested area - A/B]

Fig. 7 Result of classification accuracy by combined use of coherence with intensity and by use of intensity only (TPR : True production rate, FPR : False production rate).

Table 1 An example of TPR and FPR computed from a confusion matrix.
(The case for combined use of intensity and coherence by pair-2)

Classes to which training samples belong \ Classes after classification					TPR
	Pf	Lf	Pl	Df-A	
Primary forest (Pf)	87.1	12.9	0.0	0.0	87.1
Logged forest (Lf)	48.1	40.7	3.5	7.6	40.7
Plantation (Pl)	0.4	7.9	75.1	16.6	75.1
Deforsted area-A (Df-A)	3.7	11.4	18.8	66.2	66.2
FPR	37.5	44.2	22.9	26.8	

* The figures in the table represent percent classification scores.

* TPR : True Production Rate, FPR : False Production Rate.

ヒーレンスの併用により判別能力が高くなることを示している。

クラス別では、伐採地の判別能力が最も顕著に改善されており、TPR—FPR の値で見ると、平均で60%ほど改善されている。したがって、コヒーレンスの併用が伐採地の判別に最も大きな効果を挙げることが明らかである。なお、強度のみを用いた場合で、1998年のDf-Aでは、このクラスに分類されたトレーニングサンプルがなかったため評価不能であった。また、1996年のDf-AのTPRが極端に低いのは、湛水した森林との混同が影響している。次に、プランテーションでは、元々強度のみでもかなり良い判別結果が得られて

おり、コヒーレンスを併用しても、TPR—FPRは平均で6%ほどの改善にとどまっている。したがって、プランテーションに対しては、コヒーレンスの併用は伐採地ほど効果的ではないことがわかる。一方、天然林と択伐林では、コヒーレンスの併用により強度のみに比べれば改善はされるが、依然としてFPRが平均で43%とかなり高いままである。したがって、この両者はコヒーレンスを併用しても判別がそれほど容易ではなく、これは、JERS-1のような単一偏波のSARデータの限界と考えられる。

以上の検討結果からも、コヒーレンスの併用が森林伐採地の抽出に非常に有効であることが明らかであ

MOS-1/MESSR 1990/05/23

SPOT/HRV 1997/06/30

SPOT/HRV 1998/08/10

[Pf : Primary forest, Lf : Logged forest, Pl : Plantation, Df : Deforested area]

Fig. 2 Multi-temporal optical sensor images of the study area (from May, 1990 to Aug., 1998).
(MOS-1 : NASDA retains ownership of data. SPOT : © CNES 1997/1998)

1996/10/15—11/28 (Pair-1)

1997/10/02—11/15 (Pair-2)

1998/03/27—05/10 (Pair-3)

[Coherence : R & B, Intensity : G]

Fig. 6 Merged images of coherence and backscattering intensity of JERS-1/SAR.

1996/10/15—11/28 (Pair-1)

1997/10/02—11/15 (Pair-2)

1998/03/27—05/10 (Pair-3)

Dark-green : Primary forest,	Light-green : Logged forest,	Purple : Plantation
Orange : Deforested area-A,	Gray : Deforested area-B,	Blue : Flooded forest

Fig. 8 Result of supervised maximum likelihood classification by combined use of coherence and backscattering intensity of JERS-1/SAR data.

る。Fig. 8 (カラー頁) には、コヒーレンスと後方散乱強度を併用した場合の分類結果を示す。元々判別が容易でない天然林と択伐林以外は、多少の混同は見られるが、全体としては比較的良好な分類が行われているものと考えられる。

7. ま と め

熱帯雨林の伐採状況を JERS-1/SAR データを用いてモニタリングする場合のコヒーレンスの有効性について、定性的および定量的な検討を行った。その結果、コヒーレンスを併用することにより、後方散乱強度のみを用いる場合に比べて、森林伐採地の判別能力が大きく改善されることが明らかとなった。具体的な数値としては、正答率と誤り率の差で60%ほどの改善が得られた。本研究と同様の干渉 SAR 技術を利用した土地被覆分類に関しては、従来、Cバンドの ERS-1, 2/SAR を用いて多くの研究が行われており^{7)~12)}、それらの研究からも、ERS-1, 2/SAR のコヒーレンスが森林伐採地の抽出に効果的であることが明らかになっている。本検討結果は、Lバンド SAR においても同様の効果を示すことにより、森林伐採地の抽出に対するコヒーレンスの有効性を一層確実にする意義をもつと考えられる。さらに、本検討結果は、今後日本が打ち上げる予定の Lバンドの ALOS/PALSAR で熱帯雨林のモニタリングを行う際に、干渉性を保つような観測を行うことが非常に重要であることを示唆する点でも意義が大きい。このような観測を保証することにより、ALOS/PALSAR データの熱帯雨林モニタリングへの利用可能性が大きく広がることが期待される。

謝辞

本研究においては、宇宙開発事業団の提供による JERS-1/SAR データを使用した。また、対象地域の森林分布特性に関しては、森林総合研究所の沢田治雄氏、および、農業環境技術研究所の斉藤元也氏からそれぞれご教示いただいた。ここに感謝いたします。

(受付日2000.6.14, 受理日2000.11.8)

参考文献

- 1) 竹内, 米澤, インターフェロトリック SAR におけるコヒーレンシーと土地被覆との関係, 日本リモートセンシング学会 第21回学術講演会論文集, 1996・11。
- 2) 竹内, 米澤他, INSAR による熱帯地域の地形および土地被覆情報の抽出, 日本写真測量学会 平成9年度年次学術講演会論文集, 1997・5。
- 3) Luckman, A., J. Baker, T.M. Kuplich, C.C.F. Yanasse, and A.C. Frery, A Study of the Relationship between Radar Backscatter and Regenerating Tropical Forest Biomass for Spaceborne SAR Instruments, *REMOTE SENS. ENVIRON*, **60**, 1-13 (1997).
- 4) Rosenqvist, A., Evaluation of JERS-1, ERS-1 and Almaz SAR backscatter for rubber and oil palm stands in West Malaysia, *INT. J. REMOTE SENSING*, Vol. 17, No. 16, 3219-3231 (1996).
- 5) 竹内, 菅, 小西, 衛星リモートセンシングによるスマトラ島の熱帯雨林伐採のモニタリング, 日本写真測量学会 平成11年度年次学術講演会論文集, 1999・5。
- 6) Rignot, E., W.A. Salas, and D.L. Skole, Mapping Deforestation and Secondary Growth in Rondonia, Brazil, Using Imaging Radar and Thematic Mapper Data, *REMOTE SENS. ENVIRON*, **59**, 167-179 (1997).
- 7) Hagberg, J.O., L.M.H. Ulander, and J. Askne, Repeat-Pass SAR Interferometry Over Forested Terrain, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **33**, 331-340 (1995).
- 8) Wegmuller, U., and C.L. Werner, SAR Interferometric Signatures of Forest, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **33**, 1153-1161 (1995).
- 9) Wegmuller, U., and C.L. Werner, Retrieval of Vegetation Parameters with SAR Interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **35**, 18-24 (1997).
- 10) Floury, N., T. Le Toan, J.C. Souyris and J. Bruniquel, A Study of SAR Interferometry over Forest: Theory and Experiment, *Proceedings of IGARSS '97 Symposium*, Singapore, 1868-1870 (1997).
- 11) Strozzi, T., U. Wegmuller and A. Luckman et al, Mapping Deforestation in Amazon with ERS SAR Interferometry, *Proceeding of IGARSS '99 Symposium*, Hamburg, 767-769 (1999).
- 12) Strozzi, T., P.B.G. Dammert, and U. Wegmuller et al, Landuse Mapping with ERS SAR Interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **38**, 766-775 (2000).