

原著論文

NOAA/NDVI 10日間コンポジット画像による 積雪および消雪時期の評価

Estimation of Snow Cover Using NDVI 10 days Composite Imagery

池亀泰央、沖 一雄、大政謙次
Yasuhisa Ikegame, Kazuo Oki and Kenji Omasa

東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻 〒113-8657 文京区弥生 1-1-1
The University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

ABSTRACT

Snow affects positively to water resources by adding itself when melted. On the other hand, it has negative effects to agriculture and forestry, and causes disasters such as the avalanche. Whatsoever, it is an important factor of the ecosystem and climate. Especially, when it comes to the alpine vegetation in Japan, which is a smaller but important percentage of natural vegetation, snow is deeply related to the ecosystem of the same. Therefore, it becomes necessary to monitor the snow condition accurately.

The remote sensing technique is an effective tool in order to estimate the snow cover at synoptic scale. In this paper, a method for estimating the snow cover in Japan is proposed using 10 days NDVI composite images and AMeDAS data set. It is found that the proposed method could effectively estimate snow cover in Japan. The estimation by the proposed method is based on the consideration of existing land cover types. Furthermore, map of areas where snow has completely melted is also developed from the proposed method.

Key words : AMeDAS, Land cover classification, NDVI, Remote sensing, Snow cover

1. はじめに

降積雪には水資源・冷資源になるといったプラス面と、農林業への影響や雪崩などの災害といったマイナス面がある。また生態系や気候への影響も大きく、特に日本に残された数少ない自然植生である高山帯植生の分布には、積雪が深く関わっている (Shimizu et al., 2002)。

近年、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は温室効果ガスとエアロゾルの排出を予測し、将来の温暖化を予測している。2001年の報告では、21世紀中に全球平均表面気温が1.4～5.8℃上昇すると予測されている (IPCC, 2001)。この予測は、これまで考えられてきた以上に、温

暖化現象が進む可能性を示している。同時に、この変化によって、中緯度付近の積雪環境は大きな変化が予想される。したがって、人間活動や動植物の生息分布に影響を及ぼす積雪環境の温暖化時における変化を評価することは重要な課題と位置付けられる。

現在までに、積雪を定期的に評価する手法は水資源管理などの観点からさかんに研究されており、特に広範囲の積雪を評価するためにリモートセンシング技術が利用されている。リモートセンシング技術を利用することにより山岳地域などの実測が困難な箇所に関する積雪データを得ることができる。例えば、一地域を対象としてリモートセンシングによる積雪のモニタリングを行なった研究として、

Saito et al. (1999) による SAR を用いた研究があげられる。これは積雪面においてマイクロ波の後方散乱係数との相互関係を利用している。しかしながら、後方散乱係数は地表面の傾斜による影響が強いため、直接後方散乱係数により積雪域を抽出することは難しいという問題がある。

一方、可視近赤外域を利用したリモートセンシングとしては、Saito et al. (1999) が LANDSAT TM のバンド 3 およびバンド 4 を用いて NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) という指標から積雪域の抽出を試みている。また、Hall et al. (1995) や Winther and Hall (1999) は TM のバンド 2 およびバンド 5 を用いて NDSI (Normalized Difference Snow Index) という指標から積雪評価を試みている。これらの研究のように、可視近赤外域によるリモートセンシングデータを使った積雪評価には LANDSAT が多く使われるが、より広範囲での計測には LANDSAT は地上分解能が高くデータ量が膨大になってしまうため適していない。また LANDSAT の観測周期は 16 日であるため、毎日の積雪観測ができないという問題がある。さらに、16 日ごとの観測も気象条件によりデータが不足するといった問題が生じる。

毎日観測可能で広域の地表面をカバーし、積雪域の抽出をターゲットとするセンサとして MODIS が期待されて研究が進められている (Hall et al., 1995, Hall et al., 2001)。しかしながら、MODIS センサを搭載した衛星は打ち上げが、1999 年 12 月のため日が浅く、過去における積雪評価が行えないという問題がある。また、1981 年から継続的に観測を行っており、広域観測が毎日可能である NOAA AVHRR センサを利用した積雪のモニタリングに関しては、いくつかの研究が報告されている (Kawamura et al., 1992, Kazama et al., 1996, Matikainen and Vepsäläinen, 2002, Metsämäki et al., 2002, Slater et al., 1999)。特に日本を対象とした場合は、Kawamura et al. (1992) や Kazama et al. (1996) の研究があるが、これらは積雪の多い日本の東北地方を主に対象としているため、地球温暖化により影響を受けやすい積雪の少ないエリアが考慮されていなかった。

本研究では、継続的に観測を行っており、広域観測が可能である NOAA AVHRR 画像を用いて、積雪の少ないエリアを含めた日本全域の積雪モニタリングの評価法を提案し、さらに提案手法により消雪時期マップの作成を試みた。具体的には、日本全域における土地被覆状態を考慮し、NOAA AVHRR センサのバンド 1 およびバンド 2 を使って計算される NDVI の 10 日間コンポジット画像とアメダス積雪深データを用いて日本全域の積雪域および消雪時期を推定した。

2. 使用データ

2.1 10 日間 NDVI コンポジット画像データ

本研究では、日本全域の積雪域および消雪時期を評価するためにアメリカ海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) によって運用されている極軌道気象衛星 NOAA に搭載された AVHRR 画像データから計算された植生指標を使用した。本研究で使用した植生指標は、AVHRR のバンド 1 (580 ~ 680 nm) およびバンド 2 (725 ~ 1100 nm) を用いて以下のように算出される NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指数) である。

$$NDVI = (B2 - B1) / (B2 + B1)$$

ここで、B1 は AVHRR のバンド 1 (580 ~ 680 nm)、B2 は AVHRR のバンド 2 (725 ~ 1100 nm) を示している。NDVI 値は、-1 から +1 の範囲に分布し、植生の活性や密度が高い場合に大きな値を示す (Tucker, 1979, Tucker et al., 1991)。また、植生域における積雪域の NDVI は無積雪よりも相対的に小さな値を示すことが報告されている (Saito et al., 1999)。本研究では観測される画像中の雲エリアを除去するために、NDVI 画像を 10 日間重ね合わせ、各画素において最適である NDVI 値を抽出して作成された 10 日間 NDVI コンポジットデータを用い (Yokoyama et al., 2000)、日本全域の積雪域および消雪時期の評価をおこなった。この際、NDVI 値が示す -1 から +1 を 0 から 255 に線形変換して解析をおこなう。なお、本研究では 1998 年のデータを解析に使用した。

2.2 アメダス積雪深データ

本研究では、10 日間 NDVI コンポジットデータから日本全域の積雪域および消雪時期を評価するために、実際の



Fig. 1 Locations of the AMeDAS data used for analysis

積雪深データとして1998年に観測されたアメダス積雪深データを用いた。日本全域において積雪深データが存在するアメダス観測地点のうち、衛星データの画素上に存在していない離島や海岸線などの観測点は除外し、639地点の観測点を解析対象とした。Fig.1に本研究で使用したアメダス観測点を示す。なお、本研究では衛星画像を10日間重ね合わせた画像を使用しているため、アメダス積雪深データも10日ごとに平均をとって使用した。

3. NDVI 値による積雪域の評価

ここでは、NOAA AVHRR から算出される NDVI とアメダス観測点における積雪深データとの関係から NDVI による積雪評価の可能性を検討した。

3.1 NDVI 値と積雪深との関係

Fig.2には、日本全域におけるアメダス観測点における NDVI 値と積雪深との相関図を示した。Fig.2より、NDVI 値と積雪深との関係は相関が低いといえる。しかしながら、NDVI 値が150以上の場合は、積雪が少なくなるにつれて NDVI 値が大きくなる観測点が増えていることが分かる。これは、積雪が少なくなるにつれて地表面が露出

しはじめ、積雪時よりも NDVI が高い値を示す植生、土壌、コンクリートなどによる影響が生じたためである。

Fig.3に、日本全域のアメダス観測地点において、それぞれ積雪が無いエリア、最深積雪が0 cm ~ 5 cm、5 cm ~ 10 cm、25 cm ~ 50 cm、50 cm 以上のエリアごとに分けた10日間ごとの NDVI および積雪深の平均値と標準偏差をあらわした経時変化を示す。Fig.3より、積雪が相対的に多い地点では積雪の減少に従って NDVI 値がより大きくなる事が分かる。しかしながら、Fig.3の最深積雪が5 cm 以下では、NDVI 値の変化がほとんどみられない。これらよ

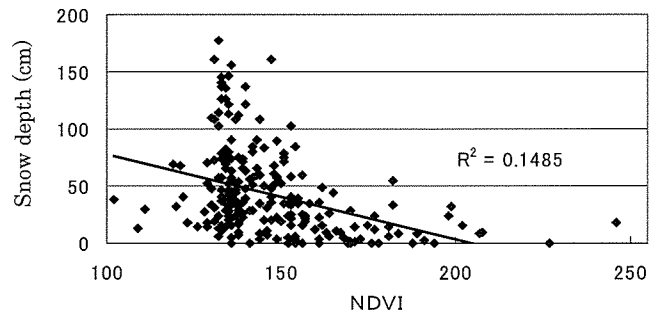


Fig. 2 Relationship between NDVI and snow depth

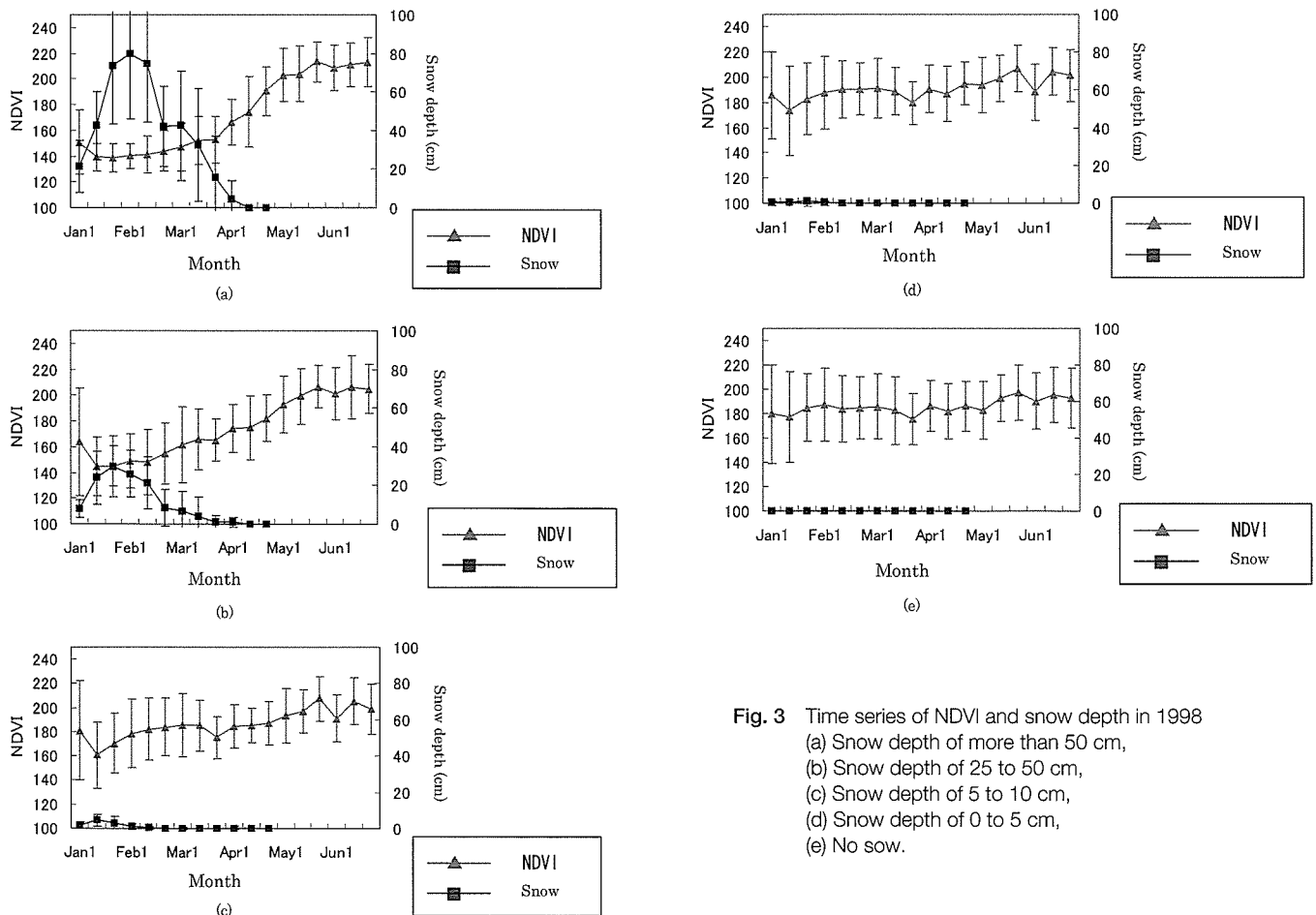


Fig. 3 Time series of NDVI and snow depth in 1998
 (a) Snow depth of more than 50 cm,
 (b) Snow depth of 25 to 50 cm,
 (c) Snow depth of 5 to 10 cm,
 (d) Snow depth of 0 to 5 cm,
 (e) No snow.

り NDVI 値による積雪の抽出は、積雪が 5 cm 以下になるとむずかしくなると考えられる。したがって、本研究では積雪が 5 cm 以上の場合を「積雪」とし、5 cm 未満の積雪は「無積雪」として扱った。

3.2 NDVI 閾値の決定と積雪評価

本研究では、NDVI 値に閾値を設定し、その値を用いて積雪の有無について評価することを試みる。具体的には、実際のアメダスデータから得られる積雪深のデータを用いて最も精度よく積雪の有無を判別している NDVI の閾値を決定し、積雪評価をおこなった。最も精度よく判別されている NDVI の閾値を決定するために、解析期間内の積雪判別率および積雪期間の判別率を算出した (Table 1)。ここで積雪判別率とは、実際に積雪がある時に NDVI 値により積雪有りとして判別された場合およびその逆で積雪がない時に NDVI 値からも無積雪と判別された場合の割合である (Table 1 の D1 式)。一方、積雪期間の判別率とは、解析期間から実際に積雪がある時期のみを取り出して、NDVI 値より積雪が有りとして判別される場合の割合である (Table 1 の D2 式)。なお、Table 1 の D1 式および D2 式の a, b, c, d は、それぞれ積雪、無積雪評価の判定数を示している。また、本研究では、NDVI の閾値を決定する際に、NDVI の値を 5 きざみに区切って評価した。解析対象期間は 1998 年 1 月から 4 月としている。したがって、10 日間 NDVI コンポジットデータから日本全域の積雪域および消雪時期を評価するために、1 月から 4 月の解析期間の各月を上、中、下旬と分けて解析をおこなった。しかしながら、2 月下旬の衛星データについては欠測があったため解析に用いなかった。

Fig.4 には、日本全域の積雪評価のために NDVI の閾値を日本全域において一律に用いた場合の積雪判別率と積雪期間の判別率を示した。

Fig.4 より、積雪判別率は NDVI の閾値を小さくするほど高くなることが分かる。一方、積雪期間の判別率は NDVI の閾値を小さくするほど低くなっている。したがっ

て、積雪判別率および積雪期間の判別率の両方を考慮すると最適な閾値はおおよそ 160 であると考えられる。

Fig.5 には、NDVI による閾値を日本全域において一律に 160 に設定して、1998 年の 1 月から 4 月における日本全域の積雪域を推定した結果を示した。なお、2 月下旬においては、衛星データが欠測であったため解析をおこなわなかった。Fig.5 より、東京および日本全域の都市部が無積雪時においても積雪域と誤判別されている。このように都市域において積雪の誤判別が生じるのは、積雪の少ない都市域などの土地被覆状態を考慮せずに日本全域で一律の NDVI 値を使用して積雪の有無を評価しているためであると考えられる。また、NDVI 閾値を 160 に設定して消雪時期を推定した結果とアメダス積雪深データから実際の消雪時期を比較すると、日本全域において平均 14.4 日の誤差が生じた。これは、NDVI 値が積雪が少なくなる消雪時期において積雪が覆っている土地被覆状態に大きく依存しているためであると思われる。

以上のことから、NDVI 閾値により積雪の有無を高精度に評価するためには、日本全域で一律の NDVI 値を用いるのではなく、積雪が覆っている土地被覆状態を考慮した NDVI 値による積雪域の評価が必要であると考えられる。

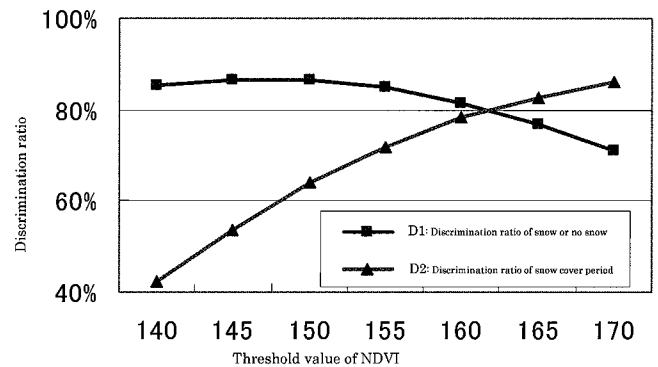


Fig. 4 Discrimination ratio of snow or no snow and snow cover period

Table 1 Discrimination ratio of snow or no snow and snow cover period

Snow condition estimated from NDVI \ Snow condition observed by AMeDAS	Snow	No snow
	Snow	a: True
No snow	c: Fault	d: True

Discrimination ratio of snow or no snow (D1): $(a + d)/(a + b + c + d) \times 100$

Discrimination ratio of snow cover period (D2): $a/(a + b) \times 100$

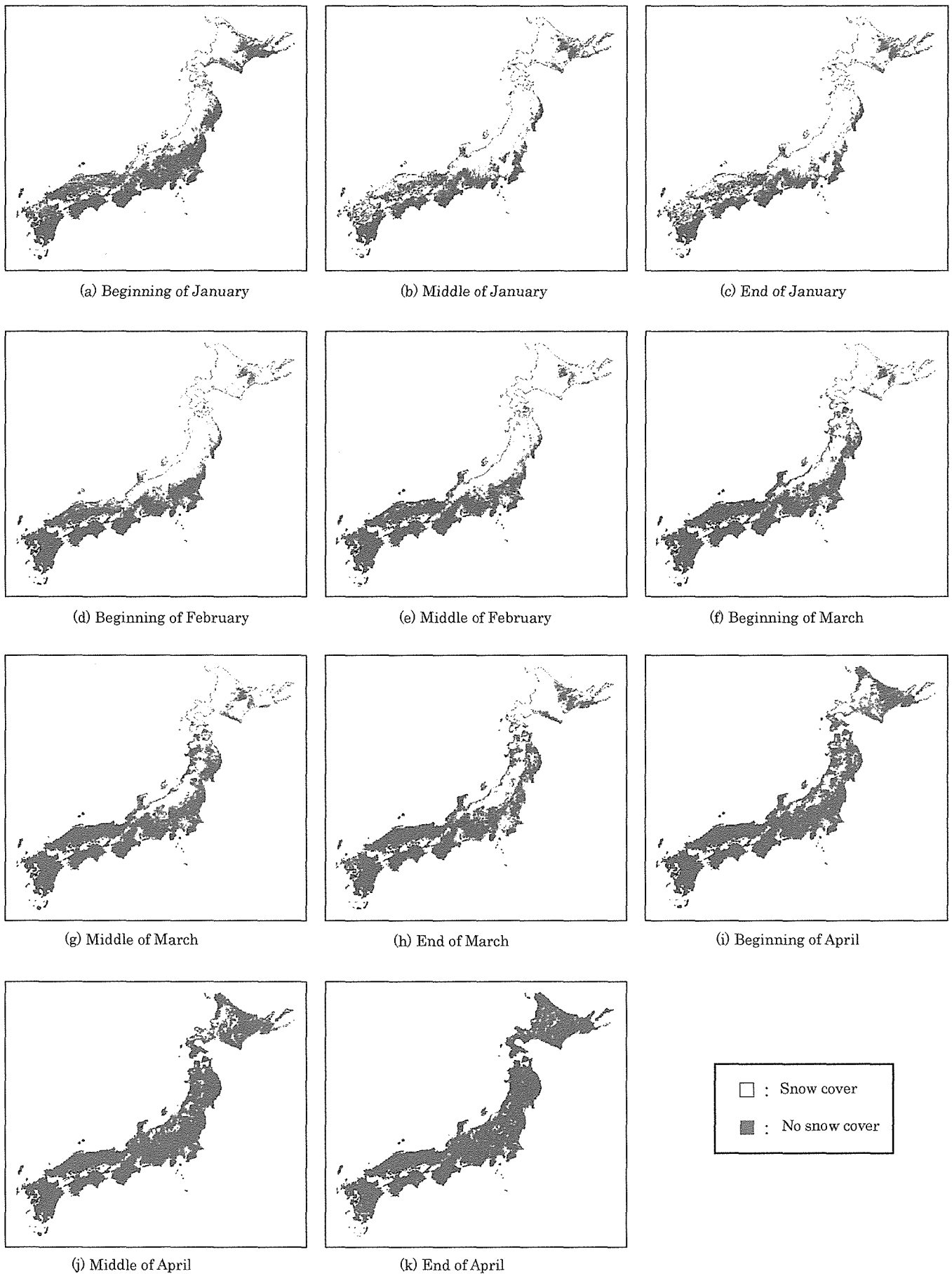


Fig. 5 Snow cover maps made by threshold value of NDVI
The used threshold value is 160.

4. 土地被覆を考慮した NDVI 値による積雪域の評価

本研究では、10日間NDVIコンポジット画像データによる日本全域における積雪域を推定する際に、積雪が覆っている土地被覆の違いを考慮する。ここでは、日本全域における土地被覆状態を教師無し分類法であるISODATA法により10カテゴリに分類し、土地被覆の違いを考慮してNDVI値による積雪域の評価を試みる。なお、ISODATA法によって得られる分類には、1998年における1年間の10日間NDVIコンポジット画像を使用した。NDVI値の経時変化が類似している地域は、同一カテゴリとして分類される。

4.1 土地被覆分類

Fig.6に10日間NDVIコンポジット画像データからISODATA法により日本全域を10カテゴリに分類した土地被覆画像を示す。

Fig.6の10分類画像において各カテゴリの特徴を以下に示す。

カテゴリ1およびカテゴリ4は都市部を中心とするエリアで、NDVI値の変動は小さい。カテゴリ1に含まれるアメダスポイントでは、59地点中24地点で5cm以上の積雪が観測されるが、積雪の無い観測点と比較してNDVI値変動に大きな差はなく、データのばらつきも大きいためNDVI値による積雪評価は難しいと考えられるエリアである。一方カテゴリ4ではアメダスポイント165ポイント中

82ポイントで5cm以上の積雪が観測され、積雪のある観測点においては積雪の無い観測点と比較して積雪時期にNDVI値が下がる傾向が強く見られ、さらにデータのばらつきも小さいためカテゴリ1よりもNDVI値による積雪評価がしやすいと考えられるエリアである。

カテゴリ2は北海道・東北地方の山間部を中心とするエリアで、消雪時期においてNDVI値の急激な上昇が顕著に見られる。カテゴリ2に含まれるアメダスポイントでは24地点のすべての観測点で5cm以上の積雪が観測され、10カテゴリ中最もNDVI値による積雪評価がしやすいエリアであるといえる。

カテゴリ3は太平洋側山間部を中心とするエリアである。カテゴリ3に含まれるアメダスポイントでは21地点中10地点で5cm以上の積雪が観測され、積雪のある観測点においては積雪の無い観測点と比較して積雪時期にNDVI値が小さくなる傾向が強く見られる。

カテゴリ5およびカテゴリ6は東北・中部地方の山間部を中心とするエリアで、消雪時期においてNDVI値の急激な上昇が顕著に見られる。カテゴリ5およびカテゴリ6のどちらにおいても、アメダスポイントのほぼ全観測点で5cm以上の積雪が観測される。しかしながら、カテゴリ5の方がカテゴリ6よりも積雪期におけるNDVI値が低いのが特徴である。

カテゴリ7は都市部と山間部の間に広がるエリアで、NDVI値は比較的高い値で推移している。カテゴリ7に含

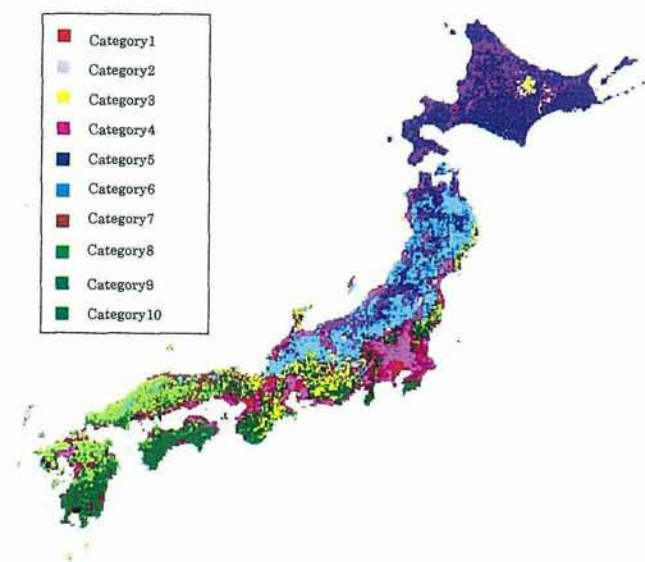


Fig. 6 Classification map in Japan (10 categories)

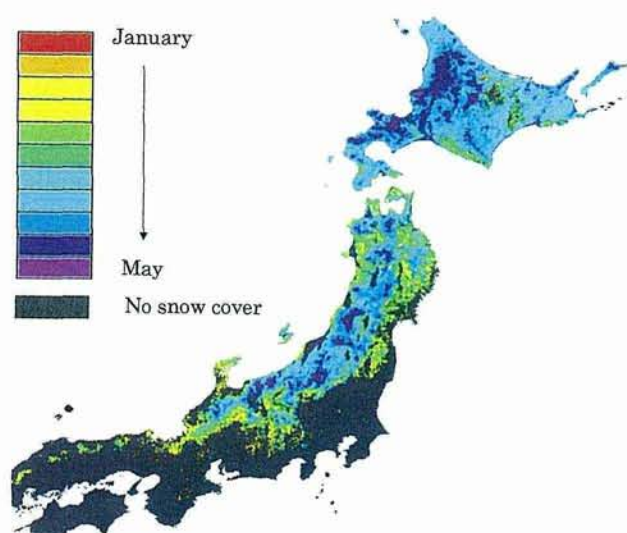


Fig. 8 Map of areas where snow has completely melted

まれるアメダスポイントでは112地点中31地点で5 cm以上の積雪が観測されるが、積雪の無い観測点と比較してNDVI値に大きな差は見られないエリアである。

カテゴリ8～10は西日本の山間部を中心とするエリアで、NDVI値の年間経時変化は高い値で推移している。カテゴリ8～10においてアメダスポイントにおける5 cm以上の積雪が観測される観測点は少なく、5 cm以上の積雪が観測される地点においても積雪期のNDVI値はほとんど低下しないエリアである。

以上から10カテゴリに分類された土地被覆画像は、NDVI値の経時変化が類似している地域に分類され、各カテゴリの特徴を明確に示せたことにより妥当な分類結果であるといえる。

4.2 各カテゴリにおけるNDVI閾値の決定と積雪評価

日本全域において土地被覆分類された10カテゴリをそれぞれ考慮して積雪評価をおこなうために、Table 1に示した方法と同様に積雪判別率および積雪期間の判別率を算出し、最も精度よく積雪の有無を判別していると考えられる各カテゴリのNDVIの閾値を下記に示す判断により決定した。Table 2とTable 3には10カテゴリにおける各NDVI値の積雪判別率および積雪期間の判別率をそれぞれ示した。

Table 2のカテゴリ1において、NDVIの閾値が小さくなると積雪判別率が良くなっていることが分かる。また、Table 3においては、NDVIの閾値の全てに対して積雪期間の判別率が高い値を示している。カテゴリ1の特徴は、都市部を中心とするエリアであるため、年間のNDVI値が低い

い値で推移する地域である。したがって、NDVIの閾値を高くすると実際には無積雪の期間なのに積雪期間と誤判別されるケースが増してくる。また、Table 2とTable 3には示していないが、NDVIの閾値を135にした場合、積雪判別率は81.0%となるが、積雪期間の判別率では、53.2%となり良い結果ではなかった。以上のことを考慮して、本研究でのカテゴリ1におけるNDVIの閾値は140が適当であると判断した。

カテゴリ2において、NDVIの閾値が165の時に積雪判別率が84.7%とピークを示し、積雪期間の判別率は、NDVIの閾値が160～165より小さくなるとわるくなった。したがって、カテゴリ2の最適な閾値は165に決定した。

カテゴリ3における積雪判別率は、各NDVIの閾値とも高いが、Table 3より積雪期間の判別率は各NDVIの閾値とも低く、特に165より閾値が小さくなると判別率がわるくなるのが分かる。したがって、カテゴリ3の最適な閾値は165であると決定した。

カテゴリ4における積雪判別率は、NDVIの閾値が145のときに91.0%とピークを示すが、積雪期間の判別率はNDVIの閾値が150～155よりも小さくなるとわるくなる。カテゴリ4の特徴は、カテゴリ1と同様に都市部を中心とするエリアであるため、年間のNDVI値が低い値で推移する地域である。したがって、NDVIの閾値を高くすると実際には無積雪の期間なのに積雪期間と誤判別されるケースが増してくる。このことを考慮して、本研究でのカテゴリ4におけるNDVIの閾値は145が適当であると判断した。

Table 2 Discrimination ratio of snow or no snow (10 categories)

NDVI	Category1	Category2	Category3	Category4	Category5	Category6	Category7	Category8	Category9	Category10
140	79.3%	66.3%	86.5%	90.5%	70.3%	56.5%	93.6%	93.7%	95.2%	99.2%
145	75.5%	71.1%	85.7%	91.0%	76.5%	64.8%	92.8%	93.1%	95.2%	98.9%
150	65.5%	78.8%	85.3%	90.2%	82.9%	72.0%	92.2%	92.1%	95.1%	98.6%
155	52.1%	82.6%	83.3%	87.4%	82.7%	79.2%	91.4%	91.0%	94.8%	98.6%
160	37.7%	83.3%	83.7%	79.3%	82.3%	81.6%	90.9%	89.5%	94.7%	98.1%
165	32.0%	84.7%	84.1%	65.3%	77.7%	81.9%	89.0%	88.6%	94.7%	97.9%
170	27.9%	79.8%	78.9%	50.3%	72.8%	81.6%	84.0%	87.7%	94.0%	97.4%

Table 3 Discrimination ratio of snow cover period (10 categories)

NDVI	Category1	Category2	Category3	Category4	Category5	Category6	Category7	Category8	Category9	Category10
140	70.6%	50.0%	10.7%	53.8%	59.8%	25.9%	2.5%	—	—	—
145	77.9%	61.4%	17.8%	63.1%	72.7%	41.0%	5.1%	—	—	—
150	79.8%	73.9%	25.0%	72.1%	84.3%	55.1%	7.6%	—	—	—
155	79.8%	82.0%	25.0%	79.1%	88.7%	69.9%	11.5%	—	—	—
160	79.8%	89.1%	35.7%	83.0%	93.4%	79.2%	21.7%	—	—	—
165	81.6%	93.4%	50.0%	85.5%	95.9%	85.8%	28.2%	—	—	—
170	83.4%	94.5%	53.5%	90.0%	97.1%	91.1%	35.8%	—	—	—

カテゴリ5における積雪判別率は、NDVIの閾値が150～160のときに82%程度でピークとなる。一方、積雪期間の判別率は、NDVIの閾値が150よりも小さくなるとわるくなる。したがって、カテゴリ5におけるNDVIの閾値は150～160の範囲に最適な値があると考えられる。

カテゴリ6における積雪判別率は、NDVIの閾値が160～170のときに81%程度でピークとなる。一方、積雪期間の判別率は、NDVIの閾値が160よりも小さくなるとわるくなる。したがって、カテゴリ6におけるNDVIの閾値は160～170の範囲に最適な値があると考えられる。

カテゴリ7における積雪判別率は、NDVIの閾値が170のときに最も良かったが、積雪期間の判別率は、年間のNDVI値が比較的高い値で推移しているため各閾値において良い結果が得られなかった。本研究では、カテゴリ7のNDVIの閾値を170として決定することにした。

カテゴリ8～10は年間のNDVI値が常に高く推移し、消雪時期におけるNDVIの変化がないため、本研究で提案しているNDVIの閾値によって積雪の有無を評価するのに難しいエリアである。しかしながら、カテゴリ8～10に分類されたエリアはほとんど積雪が無いことから、本研究ではカテゴリ8～10を無積雪域として設定し解析をおこなった。

Table 4には、Table 2とTable 3から決定した10分類土地被覆画像における各カテゴリのNDVIの閾値を示し、さらに、各カテゴリ内のアメダス積雪深データから求めた実際の消雪時期とNDVIの閾値により推定した消雪時期とを比較した平均誤差を示した。平均誤差は、10日間NDVIコンポジット画像の1シーン分の誤差を10日に換算した値としている。また、比較のために土地被覆を考慮せずに日本全域のNDVIの閾値を一律に160とし、各カテゴリの消雪時期を推定した場合の平均誤差も示した。

Table 4において、10分類画像における各カテゴリのNDVIの閾値により消雪時期を推定した結果と土地被覆を

考慮せずに日本全域のNDVIの閾値を160として各カテゴリの消雪時期を推定した結果を比較すると、土地被覆を考慮して各カテゴリのNDVIの閾値により消雪時期を推定した方が、ほとんどのカテゴリにおいて推定結果が良くなっていることが分かる。このことは、本手法が有効であることを示している。特に、カテゴリ1, 3, 4における都市域と太平洋側山間部を中心とするエリアでの推定結果が良くなっている。なお、Table 4において、カテゴリ5およびカテゴリ6に対して選択されたNDVIの閾値は複数あったが、ここでは、消雪時期の推定結果が最も良かった閾値を選択した。

また、土地被覆を考慮して10カテゴリのNDVIの閾値を用いて日本全域の推定消雪時期の平均誤差を算出すると7.2日となった。10カテゴリのNDVIの閾値を用いた場合、土地被覆を考慮しないで日本全域のNDVIの閾値を一律に160とした場合の平均誤差14.4日よりよい結果が得られた。本研究で提案している土地被覆を考慮した消雪時期の推定手法は、推定消雪時期の平均誤差が10日を下まわった。このことは、10日間のNDVIコンポジット画像から消雪時期を推定していることを考えると、本手法の有効性を示せているといえる。

Fig.7に10カテゴリにおけるNDVIの閾値を用いて、1998年の1月から4月における日本全域の積雪域を推定した結果を示した。なお、2月下旬においては、衛星データが欠測であったため解析をおこなわなかった。Fig.7とFig.5を比較すると、本手法による都市域での積雪評価がすぐれていることが分かる。

また、Fig.8には、10カテゴリのNDVIの閾値を用いて日本全域の消雪時期を推定した結果を示した。Fig.8に示した消雪時期マップを継続的に作成することにより地球温暖化による積雪域の変化や高山植生と積雪との関連などをより詳細に調べることが可能になるとと思われる。

Table 4 Deviance of complete snow melt period using each threshold value of NDVI (10 categories)

	Threshold value of NDVI	Deviance of complete snow melt period using each threshold value of NDVI (days)	Deviance of complete snow melt period using NDVI (=160) (days)
Category1	140	11.4	47.1
Category2	165	8.5	8.5
Category3	165	0.0	16.6
Category4	155	9.0	17.0
Category5	160	4.2	4.2
Category6	160	7.5	7.5
Category7	170	8.0	10.0
Category8～10	—	—	—

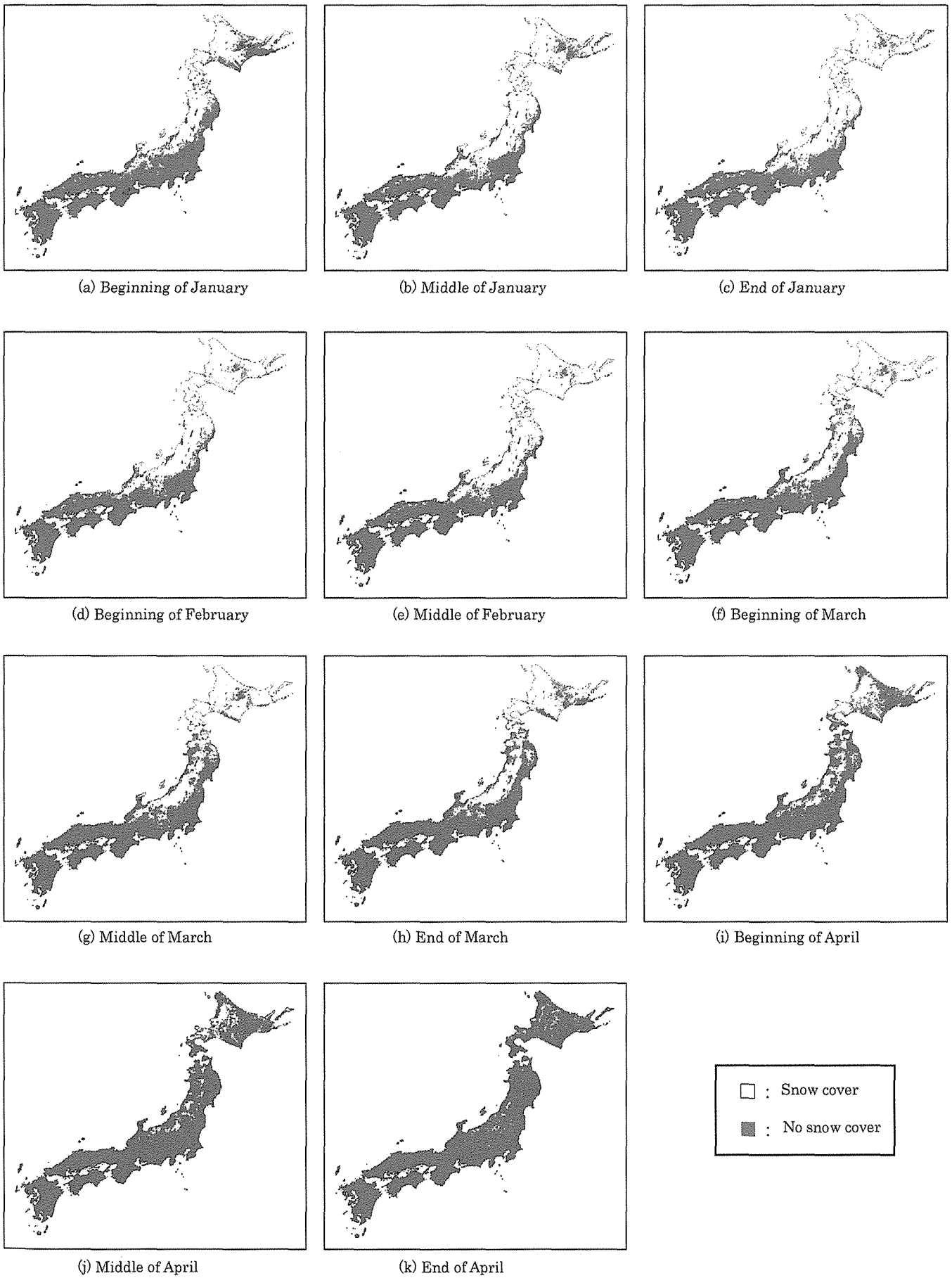


Fig. 7 Snow cover maps made by each threshold value of NDVI, which was determined in classified categories

5. まとめ

本論文では、10日間NDVIコンポジット画像を用いて土地被覆分類をおこない、各カテゴリのNDVIの閾値を決定し、日本全域における積雪および消雪時期の評価手法を提案し、その有効性を示した。特に本手法は、積雪の比較的少ない地域に有効であることが分かった。

今後は、本手法によって決定されたNDVIの閾値が1998年以外のNOAA AVHRRデータに対しても適用し、積雪および消雪時期の経時変動を調べることが可能であるか検討する予定である。さらに、今後データが蓄積されるMODISと連携するための積雪環境変化のモニタリングについても検討する予定である。

謝 辞

本NDVIデータセットは、科学技術振興事業団による計算科学技術活用型研究開発推進事業「ネットワークによる地球環境衛星データベースの構築と高度利用に関する総合的研究（研究代表者：高木幹雄東京理科大学教授）」により作成されたものである。

引用文献

- Hall, D. K., Riggs, G. A., and Salomonson, V. V., 1995: Development of method for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sens. Environ.*, **54**, 127-140.
- Hall, D. K., Foster, J.L., and Salomonson, V. V., 2001: Development of a technique to assess snow-cover mapping errors from space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **39**, 432-438.
- IPCC, 2001: Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability (eds. by McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. and White, K. S.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 1-18.
- Kawamura, H., Kazama, S., Edamatsu, Y., and Sawamoto, M., 1992: Study on the snow area detection using AVHRR/NOAA- Case study for the Tohoku area on 15 February, 1989-. *J. Remote Sensing of Japan*, **12**, 31-41.
- Kazama, S., Kawamura, H., Matsuzawa, S., Oikawa, H., and Sawamoto, M., 1996: Synthesis of snow area distribution and analysis of snow covered area variation in the Tohokudistrict based on N-LAND database system. *J. Remote Sensing of Japan*, **16**, 258-266.
- Matikainen, L. and Vepsäläinen, J., 2002: Estimating drainage area-based snow-cover percentages from NOAA AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, 2971-2988.
- Metsämäki, S., Vepsäläinen, J., Pulliainen, J., and Sucksdorff, Y., 2002: Improved linear interpolation method for the estimation of snow-covered area from optical data. *Remote Sens. Environ.*, **82**, 64-78.
- Saito, K., Hayashi, M., Numata, Y., Maya, M., and Takatsuki, Y., 1999: Snow cover monitoring by using remote sensing data. *J. Remote Sensing of Japan*, **19**, 279-284.
- Shimizu, Y., Ikegame, Y., Natori, T., and Omasa, K., 2002: Statistical analysis of relationships between alpine and subalpine vegetation and climate conditions. *Japanese Journal of Ecology*, **52**, 25-34.
- Slater, T. M., Sloggett, R. D., and Rees, G. W., and Steel, A., 1999: Potential operational multi-satellite sensor mapping of snow cover in maritime sub-polar regions. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 3019-3030.
- Tucker, C. J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, **8**, 127-150.
- Tucker, C. J., Newcomb, W. W., Los, S. O., and Prince, S. D., 1991: Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1113-1115.
- Winther, J-G. and Hall, D. K., 1999: Satellite-derived snow coverage related to hydropower production in Norway: present and future. *INT. J. Remote Sensing*, **20**, 2991-3008.
- Yokoyama, R., Lei, L., Purevdorj, T., and Tanba, S., 2000: AVHRR 10-day mosaic composite image data set for Asian region. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, **39**, 33-38.