

## リモートセンシング画像の空間分解能が NDVI と 月蒸発散推定量に及ぼす影響

児島利治\*・宝 馨・石黒鉄治\*\*・岡 太郎

\*京都大学大学院工学研究科

\*\*前田建設工業(株)

### 要 旨

本研究では、都市域・森林・耕作地が混在する地域に対して、空間分解能の異なる疑似画像を生成し、植生指標 (NDVI) とそれに基づく月蒸発散量の推定に分解能が及ぼす影響について検討を行った。分解能 6.25m から 2km 程度まで調べたところ、NDVI と月蒸発散量推定値の領域平均値は、分解能にあまり影響を受けなかった。また、700m 程度まで平滑化されると、NDVI と月蒸発散量の関係性は線形で仮定できることが示された。

キーワード：低分解能化、NDVI、蒸発散、SPOT、航空機 MSS

### 1. 本研究の背景と目的

近年、リモートセンシング画像は、10 m 以下という非常に高い解像度 (空間分解能) を持つに至っている。1996 年 8 月 17 日に宇宙開発事業団によって打ち上げられた地球観測プラットフォーム技術衛星 ADEOS の高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) は、パンクロマチックモードで 8m、マルチスペクトルモードで 16m という解像度を誇っている。これは Landsat/TM (30m) や SPOT/HRV (パンクロで 10m、マルチスペクトルで 20m) を凌ぐものである。さらに、民間商業衛星においては、ここ 1~2 年のうちにパンクロで 1m 程度、マルチスペクトルで 3~4m という極めて高い分解能の画像の提供が開始されようとしている。

こうしたリモートセンシング画像の高分解能化の動きの一方で、環境問題、水・熱収支の問題などを地球規模・大陸規模の観点 (すなわち、粗い解像度、低分解能) から考慮することの重要性が認識され、いくつもの国際共同研究が実行されつつある。地球規模・大陸規模でそのような問題を考える際、地点・地域といった比較的狭い範囲の空間情報を如何に広い

範囲に拡張するかということが一つの重要な課題となっている。

高分解能で得られる情報を空間的にスケールアップ (aggregate) していく際に、もとの情報がどの程度保存されたり、まるめられたり、あるいは欠落したりするか、ということを定量的に評価しておく必要がある。対象とする物理量やパラメタによっては、スケールアップによって重要な情報が損なわれ、その結果として、解析・予測結果に大きな誤りを招来するかも知れないからである。

こうした観点から、筆者らは、高分解能リモートセンシング画像を低分解能化していった場合に、土地被覆分類の精度がどのように影響を受けるかといった問題について検討してきた (児島・宝, 1996; Takara and Kojima, 1996)。本研究では、同じような観点から、植生指標及びそれに基づく蒸発散推定量に着目し、それらがどのように空間分解能の影響を受けるかについて検討する。

リモートセンシングデータを用いて蒸発散量を推定した近年の研究には、以下のようなものが挙げられる。古藤田ら (1984) は、Landsat/MSS データを用いて土地被覆分類を行い、土地被覆ごとの気温、ア



ここで、 $c$ : 真空中の光の速さ ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $h$ : Planck 定数 ( $J \cdot s$ ),  $k$ : Boltzmann 定数 ( $J \cdot K^{-1}$ ),  $\lambda$ : 波長 ( $m$ ) 及び  $T$ : 絶対温度 ( $K$ ) である。式 (3) を全波長について積分すると、黒体からの輝度  $L$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ) が求められる。

放射が方向性を持たないと仮定すると、 $L$  はあらゆる方向に対して一定となる。太陽からの輝度  $L_{Sun}$  を全球方向に積分すると、太陽からの放射束密度  $I_{Sun}$  が得られる。

$$I_{Sun} = 4\pi L_{Sun} \quad (4)$$

また、地表面からの輝度  $L_{Earth}$  を半球方向に積分すると、地表面からの放射束密度  $I_{Earth}$  が得られる。

$$I_{Earth} = \pi L_{Earth} \quad (5)$$

ところで、太陽と地球がその平均距離 (1 天文単位) のとき、大気上端に達する太陽放射の放射束密度  $I_{00}$  を太陽定数という (近藤純正, 1994)。種々の観測により  $I_{00} \approx 1.37 \times 10^3 W \cdot m^{-2}$  と得られている (会田, 1990; 国立天文台, 1997)。これは、太陽を中心とする地球断面の立体角  $\Omega_{Earth}$  に放射される太陽光の放射束密度である。 $I_{00}$  と  $I_{Sun}$  を用いて、 $\Omega_{Earth}$  は以下の式で表される。

$$\Omega_{Earth} = \frac{I_{00}}{I_{Sun}} \quad (6)$$

以上より、地球大気上端に到達する太陽光の分光放射束密度  $I_{\lambda Sun}$  は、太陽の分光輝度  $L_{\lambda Sun}$  と  $\Omega_{Earth}$  の積として求められる。

$$I_{\lambda Sun} = L_{\lambda Sun} \cdot \Omega_{Earth} \quad (7)$$

式 (7) で求められる  $I_{\lambda Sun}$  に、地球の公転軌道が楕円であることによる補正、太陽高度の変化による補正、レイリー散乱による大気補正 (会田, 1990; 近藤純正, 1994) を行い、入射分光放射束密度  $I_i$  を算定した。

次に、各リモートセンシング画像の DN から求められるバンド平均分光輝度  $L_{\lambda Sensor}$  に、入射と同様に大気補正を行い、地表面の輝度  $L_{Earth}$  を求め、半球方向に積分することによって反射分光放射束密度  $I_r$  を求めた。

航空機 MSS 画像の DN から分光輝度への換算は、次の換算式を用いる (石黒ほか, 1996)。

$$L_{\lambda AMSS} = \left( \frac{DN - E_0}{256} \times 20 - 10 \right) \cdot \frac{B}{10} \cdot K \quad (8)$$

ここで、 $L_{\lambda AMSS}$ : 航空機 MSS 画像のバンド平均分光輝度 ( $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ ),  $DN$ : DN (0~255),  $E_0$ : オフセットエラー (そのバンド、ゲイン、モードでの値),  $G$ : 測定時ゲイン (0~11),  $B$ : 測定時オフ

セット (0~99), 及び  $K$ : 輝度係数 (そのバンド及びモードでの値) である。

ただし、与えられた係数  $E_0$  および  $K$  は、1992 年の航空機 MSS 画像取得時ではなく、その 1 年後にキャリブレーションされた値であった。したがって、この  $E_0$ ,  $K$  を用いて求められる分光輝度の値を用いると、NDVI が過大評価されることが判った。このため以下のような処理を行った。

1992 年の矢田川航空機実験において、航空機 MSS 画像とほぼ同時期に取得された Landsat/TM 画像 (1992 年 10 月 23 日) を用意する。Landsat/TM 画像は、分光輝度への換算式が公表されており (高木・下田, 1991)、極めて容易に分光輝度が求まる。この Landsat/TM 画像から求められる分光輝度を真値とみなす。

航空機 MSS 画像、Landsat/TM 画像の両者から対応する部分領域をいくつか抽出し、最小 2 乗法を用いて航空機 MSS 画像の分光輝度と Landsat/TM 画像の分光輝度の関係を導き出す。航空機 MSS 画像の DN から分光輝度への換算式、Landsat/TM 画像の DN から分光輝度への換算式は、両者とも線形であることから、航空機 MSS 画像の分光輝度を Landsat/TM 画像に合わせて線形変換する。

SPOT/HRV 画像の DN から分光輝度への換算は、次の換算式を用いる ((財) リモートセンシング技術センター, 1986)。

$$L_{\lambda SPOT} = \frac{DN}{a} + b \quad (9)$$

ここで、 $L_{\lambda SPOT}$ : SPOT/HRV 画像のバンド平均分光輝度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ),  $DN$ : DN (0~255),  $a$ : 絶対補正ゲイン値,  $b$ : 絶対補正オフセット値, である。 $a$ ,  $b$  は画像ごとに異なり、各 SPOT 画像データセットのヘッダーに記録されている。

Table 1 種々の空間分布データの分解能

分解能	データ
6.25 m	航空機 MSS 画像
16 m	ADEOS/AVNIR 画像
20 m	SPOT/HRV(XS) 画像
30 m	Landsat/TM 画像
50 m	MOS-1/MESSR 画像, 50 m 数値地図
80 m	Landsat/MSS 画像
250 m	ADEOS-II/GLI 画像, 250 m 数値地図
700 m	ADEOS/OCTS 画像
1100 m	NOAA/AVHRR 画像
2000 m	2 km 土地利用データセット

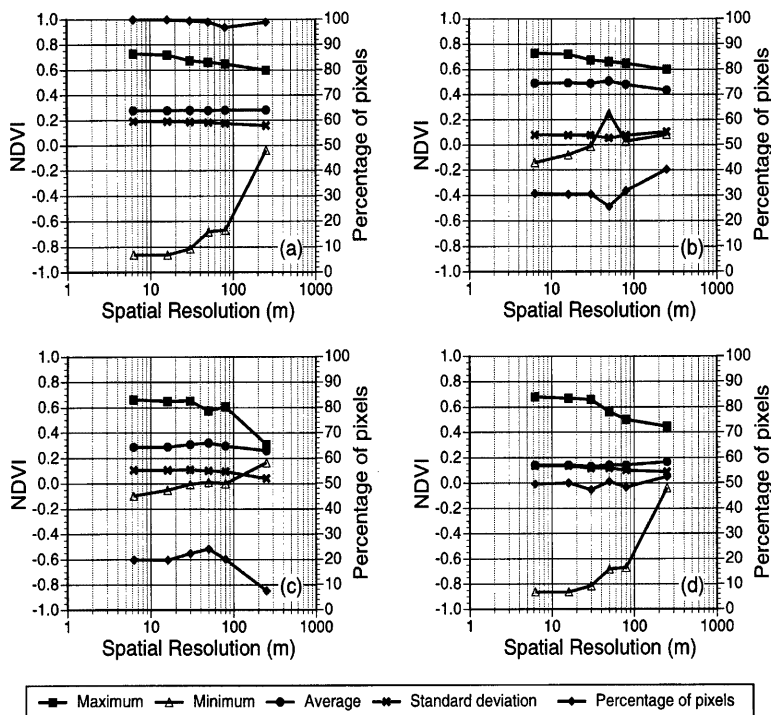


Fig. 2 Relationship between spatial resolution and NDVI in Site 1.

#### 4. 空間分解能がNDVIに及ぼす影響

画像の低分解能化には、MTF (Modulation Transfer Function) を応用した低分解能化アルゴリズム (Justice *et al.*, 1989; 児島・宝, 1996) を用いる。領域1では航空機MSS画像を基に、16m, 30m, 50m, 80m, 250mの分解能の疑似リモートセンシング画像を、領域2ではSPOT/HRV画像を基に、30m, 50m, 80m, 250m, 700m, 1100m, 2000mの分解能の疑似リモートセンシング画像を生成する。疑似リモートセンシング画像の分解能は、Table 1に示すデータにそれぞれ対応している。

##### 4.1 領域全体の統計量について

領域1, 2のそれぞれにおいて、各ピクセルの赤バンド、近赤外バンドの反射率からNDVIを算定し、その領域平均、標準偏差、最大値、最小値を求めた。Fig.2(a)に領域1の領域全体における、分解能ごとのそれらの値を示す。Fig.2(a)からは、領域1におけるNDVIの領域平均値は約0.28であり、分解能によ

てほとんど変化しないことが分かる。標準偏差、最大値は分解能が粗くなるにしたがい徐々に小さくなり、最小値は徐々に大きくなる傾向が見られる。

Fig.3(a)は領域2の領域全体における、分解能ごとのそれらの値を示している。領域2では、NDVIの領域平均値は約0.29であり、分解能によってほとんど変化しなかった。領域1と同様に、標準偏差、最大値は分解能が粗くなるにしたがい徐々に小さくなり、最小値は徐々に大きくなる傾向が見られる。分解能が同じ画像では、最大値、最小値は領域1と領域2でほぼ同等であった。

##### 4.2 土地被覆クラス毎の統計量について

航空機MSS画像の12バンド全てを用いて、マルチレベルスライス法と最尤法により、領域1を森林、耕作地、都市域、水域の4クラスに分類した。領域2では、SPOT/HRVの3バンド全てを用いて、領域1と同じ4クラス、およびそのクラスにも分類されないUnknown classに分類した。これらの分類結果

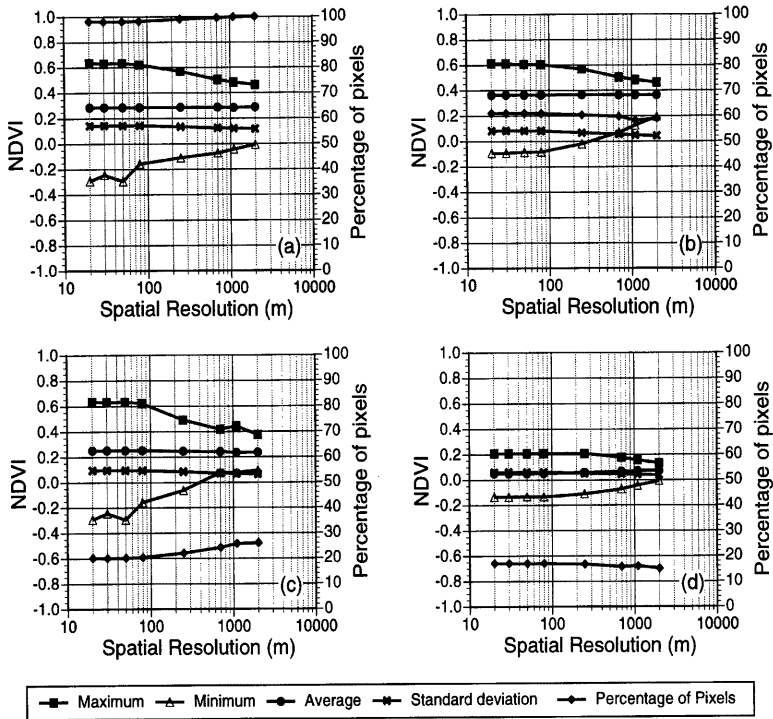


Fig. 3 Relationship between spatial resolution and NDVI in Site 2.

を用いて、領域1, 2における森林, 耕作地, 都市域の各クラス毎のNDVIの変化を見た。水域は領域1, 2のいずれにおいても、全領域の1%に満たないため解析対象から除いた。領域2のUnknown classも解析対象から除いた。

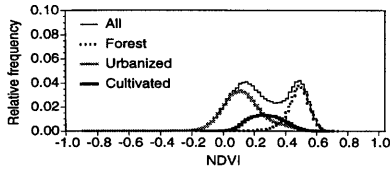
Fig.2(b), (c), (d)は、領域1において、それぞれ森林, 耕作地, 都市域に分類された各領域内のNDVIの分解能による変化を示している。各分類クラスのNDVIの領域平均値は、領域全体のNDVIと同様に、あまり分解能によって変化しないことが分かる。耕作地と都市域の標準偏差は分解能が粗くなるにつれて小さくなっている。しかし、森林の標準偏差は分解能250mで逆に大きくなっている。これは、80mまで森林と分類されていなかった領域が、森林と分類されたためである。全領域を森林が占める割合は、80mまで約30%程度であったが、250mでは約40%程度に増加している。また、森林域のNDVIの最小値は分解能50mで0.25と他と比べて極端に高い。これは、分解能50m以外の画像では森林と分類されてい

るNDVIの低い領域が、分解能50mの画像では森林以外に分類され、分解能50mの森林域のNDVIの最低値が高くなったことが原因である。

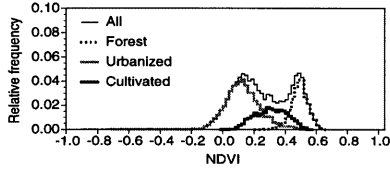
Fig.3(b), (c), (d)は、領域2において、それぞれ森林, 耕作地, 都市域に分類された各領域内のNDVIの分解能による変化を示している。領域1と同様に、各分類クラスのNDVIの領域平均値は、分解能によってあまり変化せず、標準偏差は分解能が粗くなるにつれて小さくなっている。

#### 4.3 ヒストグラムによる考察

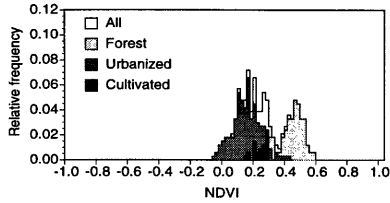
Fig. 4 に、領域1における、分解能6.25m, 50m, 250mの画像から算定されたNDVIのヒストグラムを、Fig. 5に、領域2における、分解能20m, 250m, 1100mの画像から算定されたNDVIのヒストグラムを示す。都市域, 森林, 耕作地の各土地被覆ごとに示すとともに、それらの和(領域全体)も併記している。各土地被覆のヒストグラムは重ねてあるため、森林の最小値の方の裾は見えなくなっている。Fig. 4(c),



(a) 6.25 m



(b) 50 m



(c) 250 m

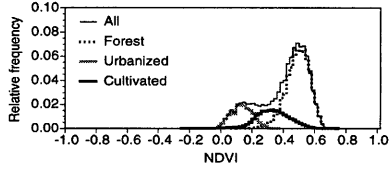
Fig. 4 Histograms of NDVI in Site 1.

Fig. 5(c)は、見やすくするためヒストグラムの中を塗りつぶしている。

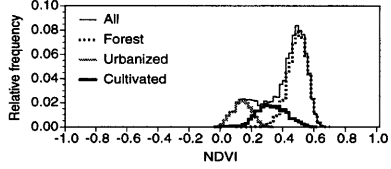
領域2では森林の割合が大きいため、Fig. 5の森林の相対頻度は、Fig. 4よりも高くなっている。Fig. 4, 5からは、分解能が粗くなるとヒストグラムの定義域 (NDVIの最小値と最大値の幅) が狭まり、相対頻度が高くなるのが分かる。都市域、森林、耕作地のそれぞれのヒストグラムは、分布形は左右対称の釣り鐘型で同じだが、定義域は異なることが確認できる。分解能6.25m(領域1)では、都市域のヒストグラムの裾がNDVIが負の値の方まで広がっているが、分解能250m(領域1および2)ではかなり少なくなり、分解能1100m(領域2)では、NDVIが正の値の範囲内に収まっているのが分かる。

## 5. NDVIを用いた月蒸発散量の推定

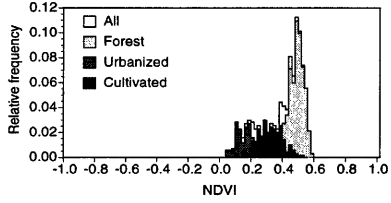
NDVIから月蒸発散量を算定するため、Shin and Sawamoto (1996)はNOAA/AVHRR画像を基に、朝鮮半島の漢江流域においてNDVIと月蒸発散量 $E_T$



(a) 20 m



(b) 250 m



(c) 1100 m

Fig. 5 Histograms of NDVI in Site 2.

の関係を導き出し、NDVIから実際の蒸発散量を10%以内の誤差で推定できるとしている。Shin and Sawamoto (1996)における落葉樹・常緑樹の式の平均を森林の式、7月~3月の水田の式を耕作地の関係式とすると、次式が得られる。

$$\text{森林: } E_T = 211.95 \cdot \text{NDVI} - 7.75 \quad (10)$$

$$\text{耕作地: } E_T = 265.96 \cdot \text{NDVI} - 17.89 \quad (11)$$

$$\text{都市域: } E_T = 150.59 \cdot \text{NDVI} + 5.19 \quad (12)$$

本研究では、以上のNDVIと月蒸発散量の関係式を用いることにする。

これらの関係式は韓国で得られたものであるため、これらの式を日本の中部地方において適用することの妥当性が懸念される。しかし、さまざまな気候区分でみると、例えばThornthwaiteの気候区分(福井, 1962)やTrollによる気候区分(福井, 1962)では、両地域は異なる気候区に分類されているが、Köppenの気候区分(福井, 1962)や大気大循環に基づく気候区分(中村ほか, 1986)では同じ気候区に分類されている。両地域の気候区の違いはそれほど明確でない。

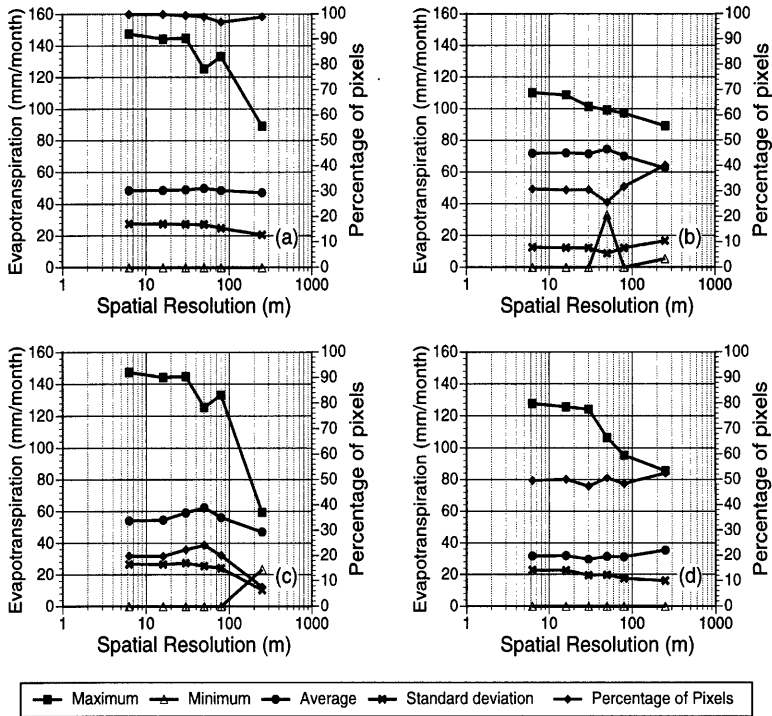


Fig. 6 Relationship between spatial resolution and estimated evapotranspiration in Site 1.

上式は NOAA/AVHRR から得られたものであるが、本研究では航空機MSS, SPOT/HRVを用いるためセンサーが異なる。しかし、波長帯はなるべく近いものを用い、DNから反射率に換算したのちNDVIを求めることにし、センサーの違いによる影響はなるべく出ないようにした。本研究で航空機MSS画像、SPOT/HRV画像から得られたNDVIの領域平均値は、申(1996)がNOAA/AVHRRから韓国で求めた10月のNDVIの値を上回っていた。これはNOAA/AVHRRの撮影時刻が早朝(7:00頃)であり、航空機MSSの撮影時刻は11:30頃、SPOT/HRVの撮影時刻は10:30頃と多少異なることに起因すると考えられる。式(10)~式(12)は、NOAA/AVHRRを基に得られた関係式である。これらの式に代入するNDVIの値は、なるべくNOAA/AVHRRに近い条件のものにしたい。このため次のような処理をした。NOAA/AVHRRからのNDVI(n)と、航空機MSS画像、SPOT/HRV画像からのNDVIの平均値(m)の比(r)を計算し( $n = r \cdot m$ ),

航空機MSS画像、SPOT/HRV画像の各ピクセルで計算されたNDVIの値にrを乗じてから、関係式に代入し月蒸発量を求める。このような工夫をして、式(10)~式(12)を適用することとした。

本研究では、月蒸発量の推定精度を詳細に議論することが目的ではなく、NDVIを用いた蒸発量推定に空間分解能が及ぼす影響に主眼をおいているため、分解能が推定月蒸発量へ与える影響を数値実験的に観察できればよい。

## 6. 空間分解能が推定月蒸発量に及ぼす影響

領域1と領域2において、式(10)、式(11)、式(12)を用いて森林、耕作地、都市域の月蒸発量を推定した結果がFig.6(b), (c), (d)、Fig.7(b), (c), (d)である。これらの結果を総合して、領域全体の蒸発量(Fig.6(a)とFig.7(a))を算定した。NDVIのときと同様に、水域は領域全体の1%に満たないため領域外とした。

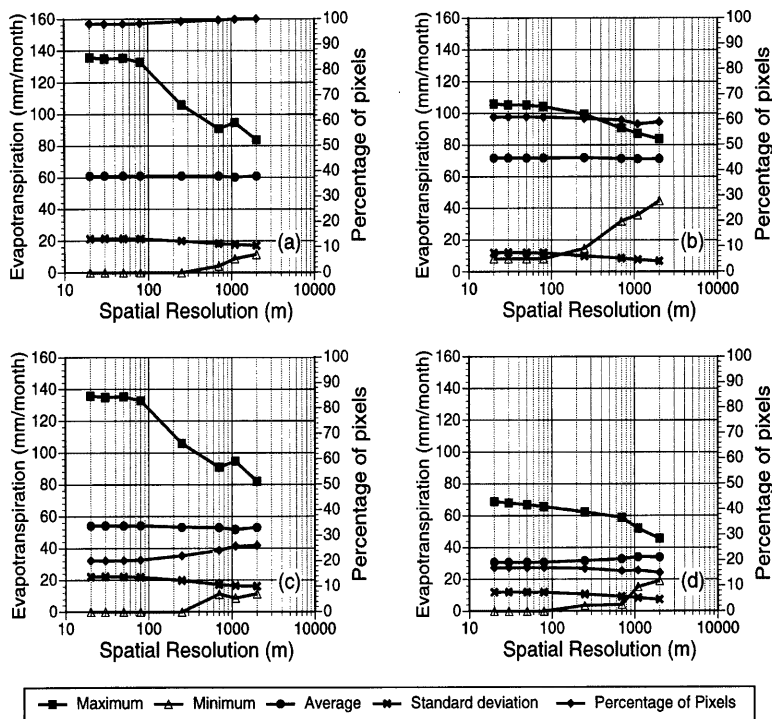


Fig. 7 Relationship between spatial resolution and estimated evapotranspiration in Site 2.

### 6.1 領域全体の統計量について

領域1における推定月蒸発散量の領域平均は、分解能 6.25 m で 48 mm/month、分解能 250 m で 47 mm/month であり、分解能によってほとんど変化しなかった。標準偏差は、分解能 50m まではほとんど変化しない(約 27mm/month)が、80m(24.8mm/month)、250m(20.6mm/month)となるにつれて平滑化の効果が出てきて徐々に小さくなった。最大値は徐々に小さくなり、最小値は常に 0mm/month であった。

次に、領域2における推定月蒸発散量の領域平均は、約 61mm/month であり、分解能によってほとんど変化しなかった。標準偏差は、分解能 80m まではほとんど変化しない(約 21mm/month)が、250m では 20.0mm/month、700m では 18.3mm/month、2000m では 17.1mm/month と、分解能が粗くなるにつれて平滑化の効果が出てきて徐々に小さくなった。最大値は徐々に小さくなり、最小値は分解能 250m までは常に 0mm/month であった。

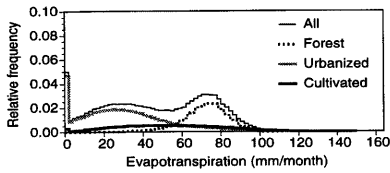
### 6.2 土地被覆クラス毎の統計量について

Fig.6(b), (c), (d)からは、領域1における、森林、耕作地、都市域の各分類クラスごとの領域平均値は、領域全体に比べて分解能による変化が多少大きくなっていることが分かる。その他、標準偏差、最小値、最大値の分解能による変化は、NDVI における変化に追従している。

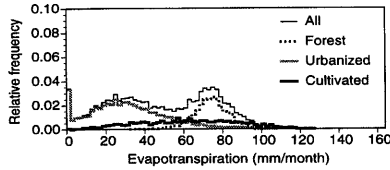
領域2においても、各分類クラスごとの領域平均値は、領域全体に比べて分解能による変化が多少大きくなっており、標準偏差、最小値、最大値の分解能による変化は、NDVI における変化に追従している (Fig.7(b), (c), (d))。

近藤純正ら(1992)は気象観測所の月平均気象データを用いてバルク式により日本の各地の森林の月蒸発散量を推定している。そこでは、対象領域に近い名古屋の10月の月蒸発散量を 71mm/month と推定している。本研究では、森林の平均値は領域1では約 70mm/month、領域2では約 72mm/month と推定

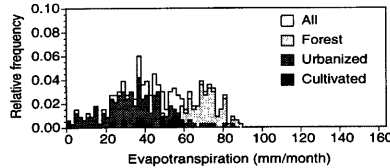




(a) 6.25 m



(b) 50 m



(c) 250 m

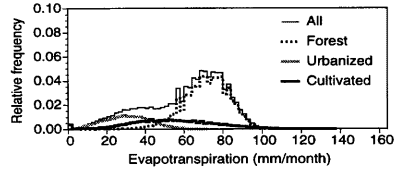
Fig. 8 Histograms of estimated evapotranspiration in Site 1.

されている。このことから、NDVIと月蒸発散量の関係式による蒸発散量推定と、物理式であるバルク式を用いた蒸発散量推定は、ほぼ同等の推定値となることが分かる。

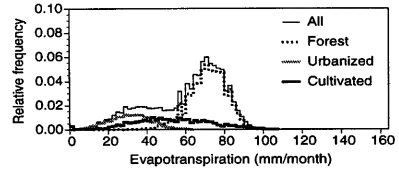
### 6.3 ヒストグラムによる考察

Fig. 8に、領域1の分解能6.25m, 50m, 250mの推定月蒸発散量のヒストグラムを、Fig. 8に、領域2の分解能20m, 250m, 1100mの推定月蒸発散量のヒストグラムを示す。NDVIと同様に分解能が粗くなるとヒストグラムの定義域が狭まり、相対頻度が高くなること分かる。また、都市域、森林、耕作地のヒストグラムの定義域はそれぞれ異なることが確認できる。

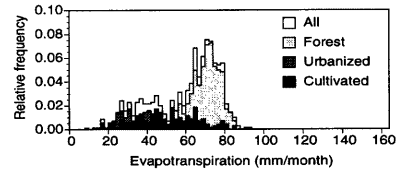
Shin and Sawamoto (1996) が導き出した式(10)～式(12)は線形であるため、NDVIが小さいとき月蒸発散量が0mm/monthになることがありうる。また逆に非常に月蒸発散量が高いピクセルも存在する。このことから、月蒸発散量はNDVIの上限および下



(a) 20 m



(b) 250 m



(c) 1100 m

Fig. 9 Histograms of estimated evapotranspiration in Site 2.

限において、それぞれある一定値に漸近していくNDVIに関する単調増加関数でモデル化できると考えられる。

また、分解能6.25m(領域1)では、0mm/monthとなるピクセルの相対頻度が非常に高いが、分解能250m(領域1および2)ではそれが目立たなくなり、分解能1100m(領域2)ではそのようなピクセルがなくなっていることがFig.8, Fig.9から分かる。これは分解能が粗くなることによる平滑化の効果である。

式(10)～(12)は、分解能1100mのNOAA/AVHRR画像から得られた式である。分解能1100m程度まで空間的な平滑化がされると、極端にNDVIが高いピクセル、低いピクセルはなくなり、式(10)～式(12)のような線形式を用いても、月蒸発散量が0mm/monthになるようなピクセルが現れなくなるものと考えられる。すなわち、分解能がある程度以上(Fig. 7によれば700m)粗ければ、平滑化によってNDVIと月蒸発散量の関係が線形とみなせる範囲にNDVIの値が収まるといえる。

## 7. 土地利用の割合による月蒸発散量の推定

ある領域  $A$  の月蒸発散量の領域平均値  $E_T$  は、以下の式で表現される。

$$E_T = A_F \int_0^{\infty} x \cdot f_F(x) dx + A_C \int_0^{\infty} x \cdot f_C(x) dx + A_U \int_0^{\infty} x \cdot f_U(x) dx \quad (13)$$

ここで、 $x$  は月蒸発散量、 $f_F(x)$ 、 $f_C(x)$ 、 $f_U(x)$  は、それぞれ 0 から  $\infty$  について積分すると 1 となる確率密度関数、 $A_F$ 、 $A_C$ 、 $A_U$  は、それぞれ領域  $A$  における森林、耕地、都市域の占める割合である。ただし、

$$A_F + A_C + A_U = 1 \quad (14)$$

である。

$f_F(x)$ 、 $f_C(x)$ 、 $f_U(x)$  を用いると、任意の  $A_F$ 、 $A_C$ 、 $A_U$  の組合せに対して月蒸発散量の推定ができる。それを図にすると Fig. 10 のようになる。これを、F-C-U ダイアグラムと呼ぶことにする。

航空機 MSS 画像が取得された 1992 年では、森林が対象領域全体の 30.7%、水田が 19.8%、都市域が 49.5% を占めている ( $A_F=0.307$ 、 $A_C=0.198$ 、 $A_U=0.495$ )。分解能 6.25m のヒストグラムから経験的に導き出した  $f_F(x)$ 、 $f_C(x)$ 、 $f_U(x)$  を用いると、推定月蒸発散量は約 48mm/month であった。これは、Fig. 10 の「1992」と示されている点である。森林の半分が市街化され、森林が領域全体の 15%、都市域が 65.2% に土地被覆が変化したとき ( $A_F=0.15$ 、 $A_C=0.198$ 、 $A_U=0.652$ ) の月蒸発散量は、42mm/month と推定された。これは、Fig. 10 の「More Urbanized」と示されている点である。このように、F-C-U ダイアグラムにより、土地利用の変化が蒸発散量に及ぼす影響を簡便に推定することができる。

同様に過去の土地被覆状態が分かれば、過去の蒸発散量を推定することも可能である。水見山幸夫教授が作成した 2km メッシュ日本全国土地利用データセット (GRID-つくば、1996) では、日本全国の土地利用を約 30 クラスで表現している。この 30 クラスを基に森林、耕地、都市域の 3 クラスに再分類し、領域 1、2 を含む名古屋周辺 (約 2630km<sup>2</sup>；領域 3) の土地利用の割合を求め、月蒸発散量を推定した。その結果、明治・大正期 (1900 年)、昭和中期 (1950 年)、現代 (1985 年) の名古屋周辺の月蒸発散量の領域平均値はそれぞれ、64.4mm/month、62.4mm/month、57.2mm/month と推定された。それぞれ Fig. 10 において、「1900」、「1950」、「1985」と示されている点である。F-C-U ダイアグラムでは、原点に近づくほど蒸発散量が減少

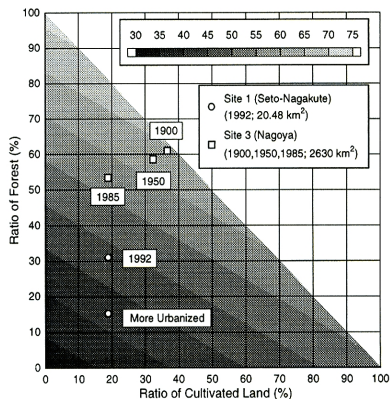


Fig. 10 F-C-U diagram for evapotranspiration in October.

する。Fig. 10からは、名古屋市周辺では、月蒸発散量が都市化に伴い徐々に減少していると推測される。

## 8. 結論

本研究では、都市域・森林・耕作地が混在する地域に対して、空間分解能の異なる疑似画像を生成し、NDVIの分解能による変化と、NDVIと月蒸発散量の関係式を用いた月蒸発散量の推定に分解能が及ぼす影響について検討を行った。

得られた成果をまとめると以下のようである。

- 1) NDVIの領域平均値は、領域1、領域2ともに分解能によってあまり変化しなかった (Fig. 2, Fig. 3)。推定月蒸発散量の領域平均値も、NDVIの場合と同様に、領域1、領域2ともに分解能によってあまり変化しなかった。このことから、数百 km<sup>2</sup>の領域 (領域2の広さ程度) の月蒸発散量を、リモートセンシング画像から得られるNDVIを基に推定する場合には、数 m から 2km 程度までのどの分解能で考えてもそれほど問題はないと思われる。
- 2) この時期 (10月) の森林域の月蒸発散量の平均値は、本研究の手法によって領域1 (瀬戸・長久手; 3.2×6.4 km) では約 70mm/month、領域2 (瀬戸市周辺; 20.5×41.0 km) では約 72mm/month とそれぞれ推定された。これは、近藤純正 (1992) がバルク式によって推定した名古屋の10月の月蒸発散量 (71mm/month) とほぼ同じ値である。
- 3) 線形のNDVIと月蒸発散量の関係式を用いた場合、高分解能リモートセンシング画像からは極

端に推定値が高すぎたり、0mm/monthとなる領域が発生する。高分解能リモートセンシング画像を用いた月蒸発散量の推定には、線形ではなく、ある上限値、下限値に漸近していくNDVIと月蒸発散量の関係式が必要である。しかし、低分解能の(700m程度より粗い)リモートセンシング画像を用いた場合は、平滑化の影響によって、関係式を線形で仮定しても良いと考えられる。

- 4) F-C-Uダイヤグラムを用いて、1992年時点よりもさらに都市化が進展したときの月蒸発散量を推定した。領域1の森林の半分が市街化され、森林が領域全体の15%、都市域が65%に変化したとすると、領域平均の月蒸発散量は現在の約48mm/monthから約42mm/monthに減少すると予測された。また、名古屋市周辺(約2630km<sup>2</sup>; 領域3)の蒸発散量は、明治・大正期から徐々に減少していると推測された。

以上の結果は、1992年10月の矢田川航空機実験のときに得られた航空機MSS画像、SPOT/HRV画像に基づくものである。場所的・時期的に普遍性のあるものにするためには、さらなる検証が必要である。しかしながら、河川流域において空間的に分布する物理量やパラメタとリモートセンシング画像の空間分解能との関係を把握しておくことは、水流出系の地域規模・地球規模での解析において基本的に重要である。土地被覆や植生指標、蒸発散のみならず、その他の物理量やパラメタについても本研究で行ったようなアプローチを適用していきたいと考えている。

### 謝 辞

本研究は、宇宙開発事業団ADEOS-JRA解析研究プロジェクト「河川流域における高分解能情報の抽出とその水文学的応用」(主任研究者:宝馨)の成果の一部である。また、「2kmメッシュ日本全国土地利用データセット」は、北海道教育大学の氷見山幸夫教授が作成されたもので、UNEP/GRIDを通じ、国立環境研究所、地球観測研究センター、GRID-つくばから提供されたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

### 参考文献

会田 勝(1990): 大気と放射過程—大気の熱源と放射収支を探る—, 気象学のプロムナード8, 東京堂出版。  
石黒鉄治・宝 馨・芝野博文・立川康人・岡 太郎・児島利治(1996): 航空機MSS画像による植生判別—R-IRプロット及び様々な植生指標を用いて—, 平

成7年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書, 05302077, 代表: 西尾邦彦, 東京農業大学, pp. 11-22。

国立天文台(編)(1997): 理科年表, 丸善。

児島利治・宝 馨(1996): リモートセンシング画像の空間分解能と土地被覆分類精度の関係—4種の画像の低分解能化アルゴリズムを用いて, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 16, No. 5, pp. 23-37。

古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治・吉野正敏・星 仰・武田 要・関 利孝(1984): ランドサットデータによる土地利用区分と広域蒸発散量算定手法の開発に関する研究, 筑波大学水理実験センター報告, No. 8, pp.57-66。

近藤昭彦(1995a): Global Vegetation Indexと気候学的推定法による蒸発散量計算値の対応関係, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 2, pp. 6-14。

近藤昭彦(1995b): モンスーンアジアにおける人為的土地被覆変化による蒸発散量変化の推定, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 4, pp. 13-21。

近藤純正(編)(1994): 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店。

近藤純正・中國 信・渡辺 カ・桑形恒男(1992): 日本の水文気象(3)—森林における蒸発散量—, 水文・水資源学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 8-18。

中村和郎・木村竜治・内嶋善兵衛(1986): 日本の気候, 日本の自然5, 岩波書店, pp. 213-221。

佐渡公明(1994): 衛星データを用いた広域蒸発散量の推定, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 4, pp.315-324。

佐渡公明・児島正洋(1996): ランドサットTMデータのみを用いた重回帰式による実蒸発散量の推定, 水工学論文集, Vol. 40, pp.323-328。

(財)リモートセンシング技術センター(1986): SPOTデータCCTフォーマット説明書, p. 62。

申 士澈(1996): 植生観測による水文学の分布特性の評価および水収支に関する研究, 東北大学大学院博士学位論文。

申 士澈・沢本正樹(1995): 漢江流域における水文学の広域空間特性の解析, 水文・水資源学会誌, Vol. 8, No. 6, pp.560-567。

多田 毅・風間 聡・沢本正樹(1994): NDVIを用いた広葉樹林帯の蒸発散分布推定, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 2, pp. 114-119。

高木幹雄・下田陽久 監修(1991): 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 445-447。

- 宝 馨・立川康人・近藤昭彦・西尾邦彦・芝野博文・  
 執印康裕・田中隆文・小池俊雄・北田勝紀・富井直  
 弥 (1993): 矢田川航空機実験及び同期地上観測実  
 験について, 水文・水資源学会誌, Vol. 6, No. 1,  
 pp. 71-75.
- GRID-つくば (1996): 全国土地利用図表示システム,  
 国立環境研究所 地球環境研究センターニュース,  
 Vol. 7, No. 3, p. 13.
- 福井栄一郎 (編) (1962): 気候学, 現代地理学体系 I, 自  
 然地理・応用地理 第2巻, 古今書院, pp. 200-220.
- Hoshi, T., S. Uchida, K. Kotoda (1989): Develop-  
 ment of a system to estimate evapotranspiration over  
 complex terrain using Landsat MSS, evaluation and  
 meteorological data, Hydrological Sciences Journal,  
 Vol. 34, No. 6, pp. 625-649.
- Justice, C. O., B. L. Markham, J. R. G. Townshend  
 and R. L. Kennard (1989): Spatial degradation of  
 satellite data, International Journal of Remote Sens-  
 ing, Vol. 10, No. 9, pp. 1539-1561.
- Kotoda, K. (1989): Estimation of river basin evap-  
 otranspiration from consideration of topographics  
 and land use conditions, Estimation of Aerial Evap-  
 otranspiration (*Proceedings of a workshop held at  
 Vancouver, B. C., Canada, August 1987*), IAHS  
 Pub. 177, pp. 271-281.
- Seevers, P. M. and R. W. Ottmann (1994): Evapotran-  
 spiration estimation using a normalized difference  
 vegetation index transformation of satellite data,  
 Hydrological Sciences Journal, Vol. 39, No. 4, pp.  
 333-345.
- Shin, S. and M. Sawamoto (1996): Evaluation of the  
 annual water balance through vegetation monitor-  
 ing, *International Conference on Water Resources  
 & Environment Research: Towards the 21st Cen-  
 tury* (Volume I), Water Resources Research Center  
 Kyoto University, Japan, pp. 635-641.
- Takara, K. and T. Kojima (1996): GIS-aided land  
 cover classification assessment based on remote sens-  
 ing images with different spatial resolutions, Appli-  
 cation of Geographic Information Systems in Hy-  
 drology and Water Resources Management (*Proced-  
 ings of the Vienna Conference, April 1996*), IAHS  
 Publ. 235, pp. 659-665.

### Effect of Spatial Resolution of Remote Sensing Image on NDVI and Monthly Evapotranspiration Estimation.

Toshiharu KOJIMA\*, Kaoru TAKARA, Tetsuji ISHIGURO\*\* and Taro OKA

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

\*\* Maeda Corporation

#### Synopsis

This paper describes how the normalized difference vegetation index (NDVI) evaluation changes and how the NDVI-based evapotranspiration (ET) estimation changes, as the spatial resolution of remote sensing images becomes coarser. Degrading the 6.25-m airborne MSS images and the 20-m SPOT/HRV images, the authors have simulated images with resolution of 16 m to 2000 m. The mean of NDVI and ET estimation does not change remarkably as the spatial resolution becomes coarser. The relationship between NDVI and monthly ET can be regarded as linear for images with resolution of 700 m or more.

**Keywords :** degradation, NDVI, evapotranspiration, SPOT, airborne MSS