

土地被覆, 空間分解能と蒸発散 の関係に関する研究 -衛星データと 2km メッシュ土地利用データを用いて-

児島利治¹・宝 馨²

¹正会員 工博 京都大学防災研究所助手 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

本研究では, 都市域・森林・耕作地が混在する地域に対して, 植生指標 (NDVI) に基づく月蒸発散量の推定に分解能が及ぼす影響, 土地利用データを用いた蒸発散量の推定に関する検討を行っている。空間分解能の異なる疑似画像を生成し, 分解能20m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いことが示された。土地利用データを用いて蒸発散量を推定するF-C-Uダイアグラムを提案し, 土地利用の変化に伴う蒸発散量の推定を行った。また, 明治・大正期～現在までの土地利用の変化を示す2kmメッシュ土地利用データを用いて明治・大正期～現在までの蒸発散量の変化を推定した。

Key Words: NDVI, evapotranspiration, digital land use data set, LUIS.

1. 序論

流域の水・熱環境は, 土壌水分や蒸発散量に影響を及ぼし, ひいては長期流出, 水資源の利用可能性にも影響を与える。水循環過程を把握する上で水・熱環境は重要な要素であり, これを広域にわたって観測するのに人工衛星リモートセンシングは有用な方法である。

衛星リモートセンシングにより得られるデータは, 近年高分解能化が進み, マルチスペクトルで観測可能な衛星としては, IKONOS(分解能 4m), QuickBird (2.5m) 等の商用衛星や, Terra/ASTER (15m), 2004 年度打ち上げ予定の ALOS/AVNIR2 (10m) 等のように 10m を超える高分解能データが次々と提供され始めている。こうしたデータを流域環境の把握にどのように用いるかということも近年の重要な課題となってきた。

衛星データを用いて蒸発散量を推定しようとする方法には大きく分けて二通りある。一つは蒸発散量を推定するモデル式の各項に衛星データから得られる地表面温度等の物理量や土地被覆等の情報を入力する方法であり, 二つめは, 衛星データと蒸発散量間の経験的な関係を予め求めておいて, 衛星データから蒸発散量を求めようと

する方法である。

前者の方法では, 例えば古藤田ら¹⁾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, アルベード, 地中熱流係数を与え, 平衡蒸発量型の可能蒸発式を用いて蒸発散量を推定する手法を提案している。Kotoda²⁾ や Hoshi ら³⁾は, この方法をさらに発展させ, DEM による地形をも考慮した改良型 Penman 式による蒸発散量推定手法を提案している。

後者の方法としては, 東北大学のグループは, NOAA/AVHRR のデータから求めた植生指標 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を基に月蒸発散量を推定している^{4), 5), 6)}。

また, 近藤⁷⁾は衛星が上空を通過した日に地上で実際に計測された実蒸発散量と衛星データを比較し, 1 画素内が均質な被覆である場合の衛星データ-蒸発散量関係の基礎データを得ようとしている。

衛星データは広範囲の面的な情報を取得することが可能であり, 衛星データを用いた蒸発散量推定では広範囲の蒸発散量の分布を推定できる可能性がある。この時, 得られた蒸発散量分布図を, 土地利用・土地被覆分布と重ね合わせることににより, 土地利用・土地被覆毎の蒸発

散量の代表値を求めることが可能である。

本研究では、まず NDVI を用いた蒸発散量の推定値が空間分解能の違いによってどのような影響を受けるかについて検討を行う。次に、土地利用ごとの蒸発散量の代表値を求め、過去の土地利用データから過去の蒸発散量分布の推定、将来土地利用が変化した場合の蒸発散量の変化を推定することを試みる。

2. 研究の流れ

本研究では、SPOT/HRV (20m) のデータから NDVI を算出し、NDVI と蒸発散量との関係式⁹⁾を用いて推定蒸発散量分布図を作成し、リモートセンシングデータの空間分解能を変化させた際の NDVI 値、推定蒸発散量の変化について検討を行った。土地利用毎の領域平均蒸発散量を算出し、明治・大正期(1900 年)、昭和中期(1950 年)、現代(1985 年)の 2km メッシュの全国土地利用データ⁸⁾を用いてそれらの時点での蒸発散量分布図を作成し、蒸発散量の経年的な変化について検討を行った。

3. 対象地域と使用空間情報

愛知県の瀬戸市を含む 20×41km(領域 1)の森林、耕作地、市街地等の土地利用が複雑に入り組んだ領域を対象とし、リモートセンシングデータを用いた蒸発散量の推定、リモートセンシングデータの空間分解能が推定蒸発散量に与える影響の評価及び土地利用毎の蒸発散量の代表値の算出を行った。対象領域 2(名古屋市周辺; 約 2630km²)では、2km メッシュ土地利用データを用いて月蒸発散量の推定を試みた。

リモートセンシングデータには、1992 年 10 月に撮影された分解能 20m の SPOT/HRV(XS)画像(領域 1)を使用した。本研究では、NDVI を算定するために、R バンド(赤)、NIR バンド(近赤外)として SPOT 画像の Band 2(0.61～0.68 μm)と Band 3(0.79～0.89 μm)を用いた。

4. 空間分解能が推定蒸発散量に及ぼす影響

(1) NDVI から蒸発散量を求める手法

領域 1 (SPOT データ) において NDVI を算出した。NDVI は、赤と近赤外域のバンドの反射輝度に対するデジタル値 (Digital Number; DN) の正規化された比であり、以下の式で表される。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

ここで、NIR: 近赤外バンドの DN、R: 赤バンドの反射輝度に対する DN である⁹⁾。

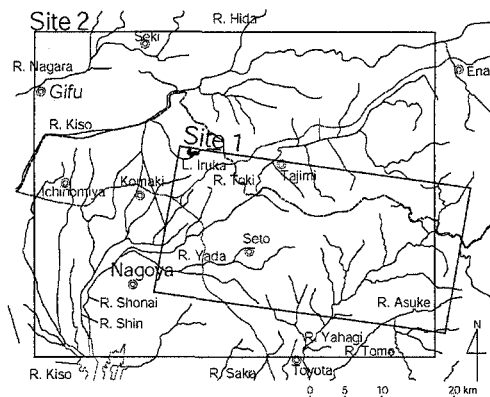


図-1 対象地域

植生の活性度を表す NDVI と蒸発散量の間に強い関係があることは従来から指摘されている^{4), 7)}。Shin and Sawamoto⁹⁾は NOAA/AVHRR 画像を基に、NDVI から月蒸発散量を算定するため、朝鮮半島の漢江流域において NDVI と月蒸発散量 E_p の関係式を導き出し、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 Sawamoto⁹⁾ 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。

$$\text{森林: } E_p = 11.95 \times NDVI - 7.75 \quad (2)$$

$$\text{耕作地: } E_p = 265.96 \times NDVI - 17.89 \quad (3)$$

$$\text{都市域: } E_p = 150.59 \times NDVI + 5.19 \quad (4)$$

本研究では、上記の 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こと、NOAA/AVHRR から得られたものであるため、日本の中部地方において SPOT 画像に適用する際の妥当性が懸念される。しかし、本研究では、月蒸発散量の推定精度を詳細に議論することが目的ではなく、NDVI を用いた蒸発散量推定に空間分解能が及ぼす影響に主眼を置いているため、分解能が推定月蒸発散量へ与える影響を数値実験的に観察できればよいと考える⁹⁾。

(2) 画像の低分解能化と月蒸発散量の算出

筆者らはこれまで、リモートセンシング画像の低分解能化と、それによる様々な影響について検討を行ってきた^{9), 10)}。本研究では、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して、それぞれに対し NDVI 値を算出した。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を用いた¹⁰⁾。疑似リモートセンシング画像の分解能は

表-1 種々の空間分布データの分解能

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

表-1 に示すデータにそれぞれ対応している。これらの異なる分解能を持つ疑似リモートセンシング画像から蒸発散量を推定し、空間分解能が蒸発散量に与える影響を調査する。

SPOT 画像の3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クラス及びどのクラスにも分類されないその他のクラスに分類した。

土地利用分類結果と赤、近赤外バンドから算出されたNDVI 画像から、式(2)~(4)を用いて森林、耕作地、都市域の月蒸発散量を推定した。図-2に領域1における月蒸発散量の分布を示す。図-2の(a)は分解能20m、(b)は250m、(c)は1100mでの結果である。

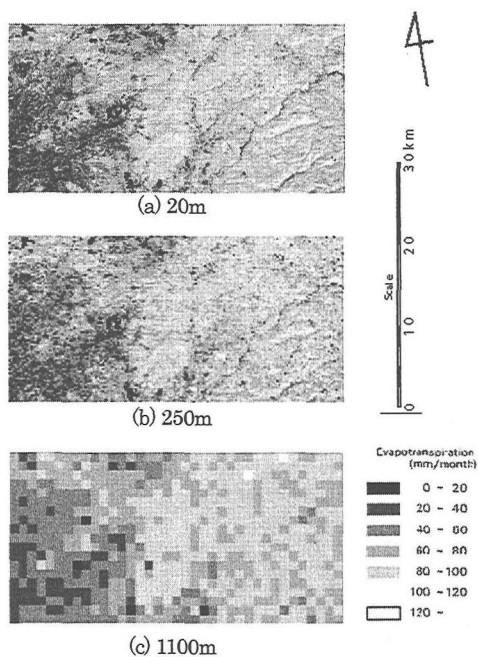


図-2 月蒸発散量の分布 (領域1)

作成された月蒸発散量分布から、その領域平均値、標準偏差、最大値、最小値を求めた結果が図-3(b), (c), (d)

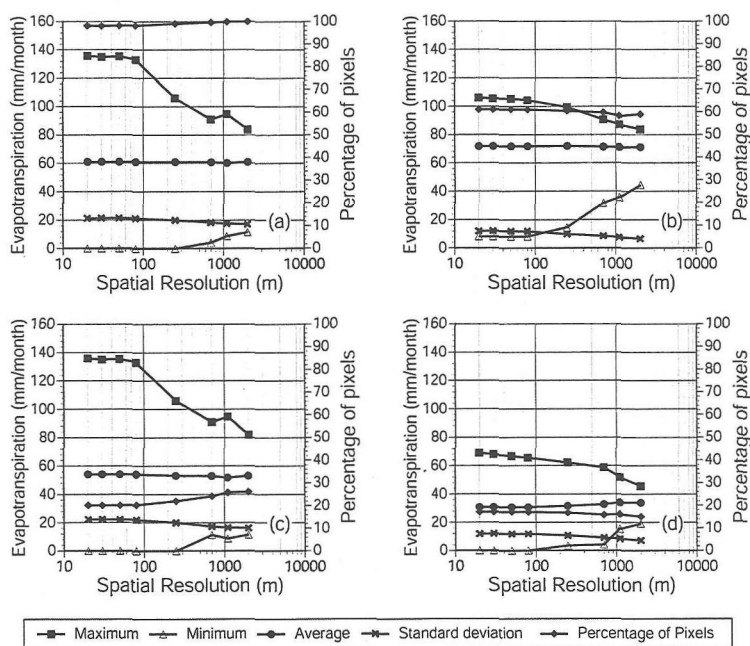


図-3 月蒸発散量と空間分解能の関係 ((a):全体, (b):森林, (c):耕作地, (d):都市域)

である。これらの結果を総合して、領域全体の蒸発散量(図-3(a))を算定した。水域は領域全体の1%に満たないため領域外とした

(3) 領域全体の統計量について

図-3(a)を見ると、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。

(4) 土地被覆クラス毎の統計量について

図-3(b),(c),(d)からは、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。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。近藤ら¹¹⁾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、森林の平均値は約72mm/monthと推定されている。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。

5. 土地利用の割合による月蒸発散量の推定

本節では前節までの検討結果を基に、土地利用データを用いて任意の時点での月蒸発散量を推定することを考える。

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。

$$\begin{aligned} E_T = & A_F \int_0^{\infty} x \cdot f_F(x) dx \\ & + A_C \int_0^{\infty} x \cdot f_C(x) dx \\ & + A_U \int_0^{\infty} x \cdot f_U(x) dx \end{aligned} \quad (5)$$

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 ∞ 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、 $A_F + A_C + A_U = 1$ とする。

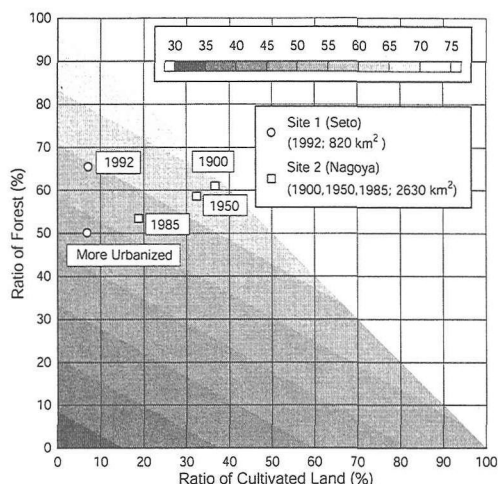


図-4 F-C-U ダイアグラム

$f_F(x)$ 、 $f_C(x)$ 、 $f_U(x)$ 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。これを図にすると図-4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。

領域1においてSPOT画像が撮影された1992年では、森林が対象領域全体の66%、水田が8%、都市域が26%を占めている($A_F = 0.66$ 、 $A_C = 0.08$ 、 $A_U = 0.26$)。分解能20mの蒸発散分布図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60mm/monthであった。これは、図-4の「1992」と示されている点である。

森林の都市化され、森林が領域全体の50%、都市域が42%に土地被覆が変化したとき($A_F = 0.50$ 、 $A_C = 0.08$ 、 $A_U = 0.42$)の月蒸発散量は、54mm/monthと推定された。これは、図-4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。

6. 2km メッシュ土地利用データを用いた月蒸発散量の推定

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。氷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⁸⁾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(領域3)の土地利用の割合を求めた。2kmメッシュ土地利用データによる名古屋周辺における土地利用の変化を図-5に示す。都市域が経年的に拡大する様子が図-5から分かる。

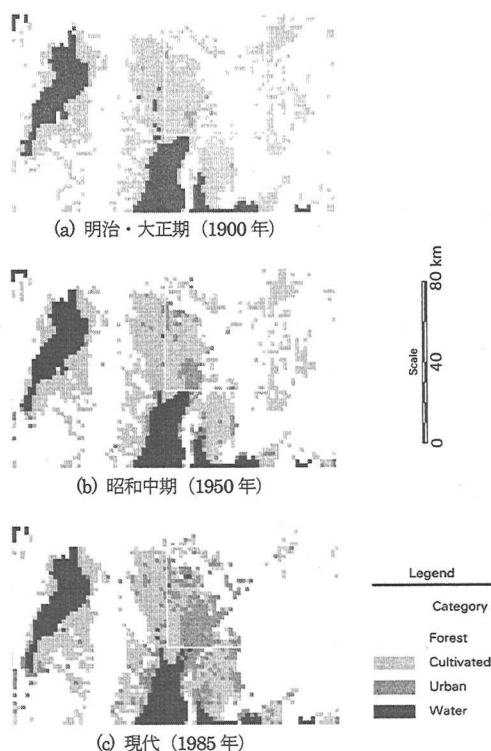


図-5 名古屋周辺の土地利用の変化

結果として、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。それぞれ図-4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する。図-4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。

7. 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、土地利用データを用いた月蒸発散量の推定及び土地利用の変遷による蒸発散量の経年変化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。

- 推定月蒸発散量の領域平均値は、領域1において分解能によってあまり変化しなかった。このことから、数100km²の領域(領域1の広さ程度)の月蒸発散量の代

表値(平均値)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、20m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。

- 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では約72mm/monthと推定された。これは、近藤ら¹⁾がパ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。
- F-C-Uダイアグラムを用いて、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。森林が領域全体の66%から50%、都市域が26%から42%と、領域1において都市化が進展した場合、領域平均月蒸発散量は現在の約60mm/monthから約54mm/monthに減少すると予測された。
- 土地利用データとF-C-Uダイアグラムを用いて過去の土地利用から領域平均蒸発散量を簡便に推定する手法を提案した。2kmメッシュ土地利用データを用いた蒸発散量の推定結果より、名古屋市周辺(約2630km²；領域2)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月に撮影された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ー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、流域の水・熱環境、ひいては水資源の地域規模・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ー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(LUIS)」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

- 1) 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：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, 1984.
- 2) Kotoda, K. : Estimation of river basin evapo-

- transpiration from consideration of topographics and land use conditions, Estimation of Arial Evapotranspiration (*Proceedings of a workshop held at Vancouver, B. C., Canada, August 1987*), IAHS Pub. 177, pp. 271-281, 1989.
- 3) Hoshi, T., S. Uchida, K. Kotoda: Development 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, 1989.
 - 4) 多田 毅・風間 聡・沢本正樹: 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, 1994.
 - 5) 申 士徹・沢本正樹: 漢江流域における水文量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, 1995.
 - 7) 近藤昭彦: 植生の分光反射輝度と蒸発散量の関係, *水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ*, pp. 111-115, 1997.
 - 8) GRID-つくば: 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, 1996.
 - 9) 児島利治・宝 馨・石黒鉄治: リモートセンシング画像の空間分解能が植生指標と蒸発散推定量に及ぼす影響, *水文・水資源学会誌*, Vol. 10, No. 4, pp. 349-359, 1997.
 - 10) 児島利治・宝 馨: 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, 1996.
 - 11) 近藤純正・中園 信・渡辺 力・桑形恒男: 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, 1992.

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN LAND USE, SPATIAL RESOLUTION AND EVAPOTRANSPIRATION -USING REMOTE SENSING IMAGE AND 2-KM GRID LAND USE DATA SET-

Toshiharu KOJIMA and Kaoru TAKARA

This paper describes how the NDVI-based evapotranspiration estimation changes as the spatial resolution of the remote sensing image becomes coarser, and estimates the past or future evapotranspiration using land use data. With the 20-m SPOT/HRV image, the simulated images are produced using the degradation algorithm on the MTF. The images have resolutions of 30, 50, 80, 250, 700, 1100 and 2000m. The authors investigate the effect of the spatial resolution on the estimated evapotranspiration using these images, and show that the mean of estimated evapotranspiration does not change remarkably as the spatial resolution become coarser. This paper also proposes the F-C-U diagram to estimate regional evapotranspiration using the land use data. The F-C-U diagram can estimate easily the future or past evapotranspiration using the future or past land use data. The authors estimate the evapotranspiration change from the 1900s to the 1985s using the F-C-U diagram and LUIS (Land Use Information System), which is the 2-km grid digital land use data set.