

(26) 土器川流域の土地被覆の変遷と流出の経年変化

LAND COVER CHANGE AND DISCHARGE FLUCTUATION IN THE DOKI RIVER

牧野育代*, 小川進**, 斎藤元也**

Ikuyo MAKINO*, Susumu OGAWA **and Genya SAITO**

Abstract: Land cover change and discharge fluctuation for the past 12 years in the Doki River catchment were examined using multi-temporal satellite data. This catchment is composed of mainly forest and some agricultural fields along the streams, the ratio of which is more than 10 % of the total area. Using the multi-temporal satellite data, Landsat TM, in 1986 and 1990, approximately 3 % of the total area had changed from forest to the agricultural fields during this period. From the water budget from 1981 to 1992 in the catchment, evapotranspiration decreased and runoff ratio increased. Short-term water budget led to monthly evapotranspiration before and after 1986, which showed the evapotranspiration in April and October decreased. Such change means agricultural activities, seeding and harvest. Moreover, statistical tests for hydrological data before and after 1986 showed that runoff ratio increased significantly with its significant level of 0.05. Therefore, one of the factors that caused the increase of runoff ratio in the catchment should be the land cover change from forest to agricultural fields.

Keywords: agricultural fields, deforestation, evapotranspiration, Landsat TM, runoff ratio

1. はじめに

流域の土地被覆の変化は、河川流出に影響を及ぼし、水害のみならず、農業用水、都市用水の確保にも困難な状況が起こりうる。特に森林伐採により、農地への転用あるいはゴルフ場建設といった土地利用の変化は、都市化とともに近年、重要な環境変化として注目されている(Jordan & Heuvel, 1981)。そこで、本研究では、四国讃岐平野土器川流域の土地被覆と長期水収支の変化について、衛星データと水文データから実証的に調べた。本研究では、流域のわずかな土地被覆の変化による流出に及ぼす影響を長期的な変動傾向と短期水収支から評価した。

2. 方法

対象領域は、四国讃岐平野の土器川流域である。土地被覆の計算には多時期のLandsat TM (Table 1)の衛星データを使用し、土地被覆分類と面積率の算定及び植生指標の導出に用いた。流域分割には国土院発行の数値地図25,000及び数値地図50mメッシュ(日本Ⅲ)を用いた。水文計算には、讃岐平野土器川の12年間の水文データ(建設省)を使用した。流量観測点は、土器川中流の御用橋(流域面積: 72.1km²)及び常包橋(流域面積: 90.0km²)であり、雨量観測点は、土器川上流の美合である (Fig. 1)。

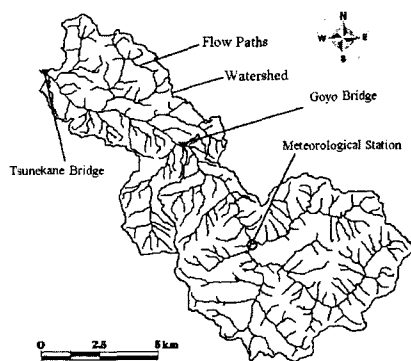


Fig.1 Doki River and its observation stations

*ロテック (Rotech Co. Ltd.), **農業環境技術研究所 (National Institute of Agro-Environmental Sciences)

(1) 使用データ及び観測点

蒸発散量の算定には気象データも用いた。気象観測点は多度津地方気象台及び農林水産省四国農業試験場（善通寺市）である。

Table 1. Satellite data used

Satellite	Date
LandsatTM	1986/4/12, 9/3, 11/6 ; 1990/3/22, 5/9

(2) 流域分割

流域は国土地理院の数値地図(50mメッシュ)よりGISソフトTNTmipsを用いて半自動的に求めた。流量観測点を切る流域界に対しては流域分割ができないので、小流域及び地図画像をもとにして、流域界を決定した。

(3) 水収支法

土器川の水文データから長期観測における年降雨、流量を流域単位で求め、その差から年蒸発散量を求めた。すなわち、次式より求める。

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - E \quad (1)$$

ここで、 S ：流域貯留量、 t ：時間、 P ：降雨量、 Q ：流量、 E ：蒸発散量である。上式は、長期水収支では、左辺が0とみなせるので、年蒸発散量は実際には年降雨量と年流出量との差として表すことができる。対象流域は山間部で地下水の使用もなく、他流域からの流入も流出もない状態で、わずかに農業用水が使用されているが、長期水収支では影響はないと考えられる。

ここでは、さらにこの考え方を発展させ、1雨ごとに雨量と流量の差を取り、月別の蒸発散量を求める短期水収支を試みた（鈴木,1985）。

(4) Penman法

気象データより蒸発散量は、土地被覆ごとに日値がペンマン法で計算できる。すなわち、次式より求める（Brutsaert, W., 1982）。

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_a^* - e_a) \quad (2)$$

$$Q_n = \frac{R_n}{L_l} \quad (3)$$

$$R_n = R_s(1 - \alpha_s) + \varepsilon_s R_{ld} - R_{lu} \quad (4)$$

$$R_{ld} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7} \quad (6)$$

$$R_{lu} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (7)$$

ここで、 $\Delta = (de^*/dT)_T$ 、 $\gamma \equiv c_p P / \varepsilon l$ 、 Q_n :有効エネルギー(mm/day)、 $f(u)$:風関数(mm/day)、 u :平均風速(m/s)、 e_a^* :飽和水蒸気圧(hPa)、 e_a :水蒸気圧(hPa)、 R_n :正味放射量(W/m²)、 L_l :蒸発潜熱(=2.454×10⁶J/kg)、 R_s :短波長放射量(W/m²)、 α_s :アルベド、 R_{ld} :下向き長波長放射量(W/m²)、 R_{lu} :上向き長波長放射量(W/m²)、 ε_s :表面消散係数(=0.97)、 ε_a :大気消散係数、 σ :ステファン-ボルツマン係数(5.67×10⁻⁸Wm⁻²K⁻⁴)、 T_a :気温(K)、 T_s :地温(K)である。なお、アルベドについては、経験的な数値を土地被覆ごとに用いた(Kotoda, 1986)。

(5) 土地被覆分類

土地被覆は、多時期Landsat T Mから教師付き分類法を用いて森林、水田、畑地、草地、裸地、市街地、水

域の7つの土地被覆に分類し、それらの面積率を求めた。現地踏査は、土地利用の確認に1998年6月、1999年2月及び6月に行なった。

Table 2. Land cover change in Doki River using Landsat TM (Unit: %)

Year	Forest	Paddy Field	Vegetable Field	Bare Soils	Grass	Urban Area	Water
1986	88.4	6.1	4.2	0.0	0.0	0.7	0.6
1990	85.5	5.6	6.2	1.1	0.2	0.9	0.5

Table 3. Change of rainfall, discharge, evapotranspiration, and runoff ratio in Doki River (Unit: mm)

Period	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
1981-86	1122±67	377±70	422±53	745±39	701±47	0.33±0.05	0.37±0.04
1987-92	1412±116	632±121	778±135	780±51	634±37	0.43±0.05	0.53±0.05

Note: The subscripts G and T represent Goyo Bridge and Tsunekane Bridge observatory stations. Runoff ratios are dimensionless.

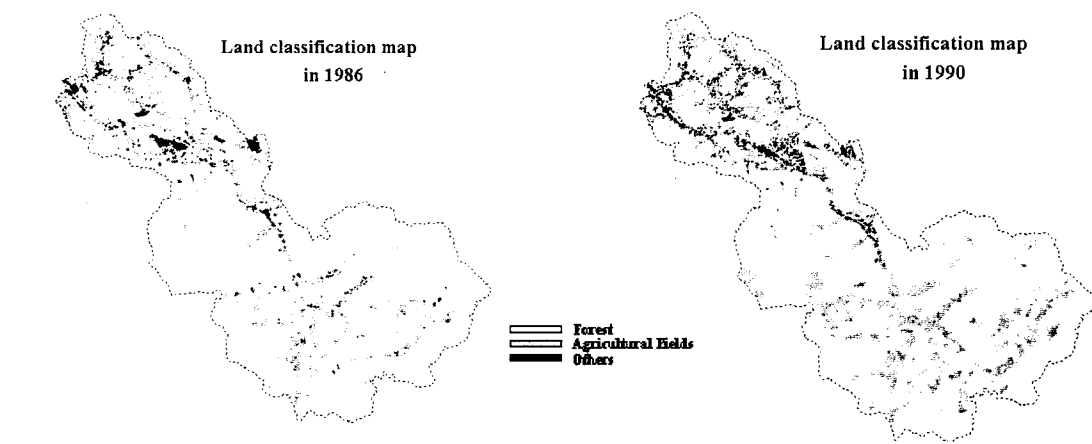


Fig. 2. Land cover change in Doki River using Landsat TM in 1986 and 1990

3. 結果

(1) 土地被覆の変化

讃岐平野土器川流域の1986年及び1990年の土地被覆分類から得られた各土地被覆クラスの面積率をTable 2に示す。1986年と比較して1990年には、森林の面積率は約3%減少し、逆に農耕地は約3%増加した。ここでは、現地の土地利用を考慮して、水田、畑地、裸地、草地を農耕地として解釈した。すなわち、農耕地は時期により水田、畑地、裸地、草地に変化するためで、1つの土地被覆として考えられる。Fig. 2に1986年と1990年の土地被覆分類図を示す。便宜上、ここでは、森林、農耕地、その他のクラスのみを表示している。

1986年の流域の森林の一部が1990年には農耕地に変化していることがわかる。この部分は、流域の約3%に相当する。

(2) 長期水収支の変化

Table 3に1981年から1992年までの水収支の結果を示す。1981年から1992年までの年降雨、年流出量から年蒸発散量及び流出

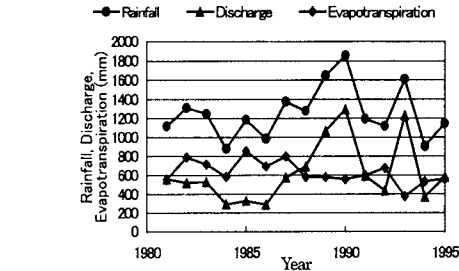


Fig. 3. Time series of rainfall, discharge and evapotranspiration in Doki River(1986-1995)

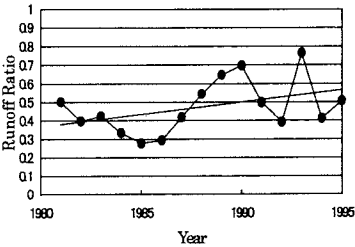


Fig. 4. Runoff ratio in Doki River (1986-1995)

率を算定した。この間、雨量は1986年を挟んで、増加しているが、流量はそれ以上に増加している(Fig. 3. 参照)。

(3) 各種蒸発散量の算定

蒸発散量は、水収支で求める方法、パン蒸発計で直接観測する方法、気象データよりPenman法等で算定する方法とがある。水収支法は年単位あるいは月単位で計算されるが、地下水等の利用により影響を受ける。パン蒸発量は、水面からの蒸発量で、最も過大で可能蒸発量を示し、土地被覆によらず気象により決まる。Penman法は、土地被覆別に蒸発散量を算定するが、やはり過大評価する。Table 4に、これら3つの方法で求めた結果を1986年の前後で平均し、

比較した。全てに共通して、1986年を境に減少を示している。その割合はほぼ85-90%で、同様と見て良いだろう。したがって、蒸発散量の変化は主として気象の要因でもたらされ、流域の土地利用変化の寄与は小さいと考えられる。

(4) 短期水収支

短期水収支の結果をFig. 5に示す。月別蒸発散量は、1986年の前後でわずかに変化している。すなわち、4月と10月で減少している。言うまでもなく、この時期の農耕地は播種準備と収穫で裸地になる。当然、蒸発散量は低下する。したがって、4月と10月の蒸発散量の低下は農業活動によるものと解釈できる。すなわち、森林から農耕地への土地被覆の変化に対応している。なお、12月の蒸発散量の低下は稲と雑草の枯死と推定される。

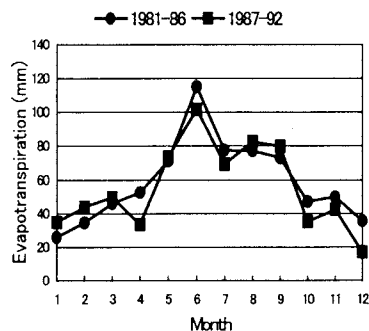


Fig. 5 Monthly change of evapotranspiration in the Doki River.

4. 統計解析

(1) t検定とF検定

1986年の前後で水文パラメータの変化があったかどうかの検定を平均値に対してはt検定、分散に対してはF検定を試みた。Table 5には、t検定の結果を示す。有意な差は、降雨、流量（常包橋）、流出率（常包橋）で認められた。すなわち、有意水準0.05で、それぞれ有意に増加した。長期的には、降雨はほぼ一定であるが、この時期に限り増加した。それに伴い、流量も増加したと考えられる。それに対して、流出率は土地被覆に影響を受けるので、御用橋と常包橋の間の流域でそうした影響を受けたと考えられるかもしれない。

また、Table 6には、同様に分散について検定した結果だが、流量（常包橋）について有意な増加が認められた。その他のパラメータの分散は有意な変化をしていないことから、これも同様に御用橋と常包橋の間の流域で、主に土地被覆変化の影響を受けたと考えられるかもしれない。

(2) 相関

Table 7, 8に水収支のパラメータ間の相関を示す。いずれの期間も降雨と流出、流出と流出率の間に強い正の相関が認められる。ここで注目すべきは、年（時期）とその他のパラメータとの相関である。1986以前では、年に対して、流量及び流出率の負の相関があった（常包橋で相関係数0.90, 0.92）。つまり、経年的に減少した。1986年以後では、年に対して、蒸発散量が負の相関があった（御用橋で相関係数0.91）。前者は、土地被覆変化よりも降雨量の一時的低下に伴うものと解釈できるだろう。後者は降雨量が増加している時期であるから、気象の要因ではなく、土地被覆の変化が考えられる。すなわち、森林が農地に変化したか、水田が畑地に変化したか、あるいは市街化が進んだことも一因かもしれない。土地被覆の衛星デ

Table 4 Evapotranspiration change using water balance, pan evaporation and Penman's method. (Unit: mm)

Period	Water Balance	Pan Evaporation	Penman's Method
1981-1986	701 ± 47	1208 ± 63	902 ± 24
1987-1992	634 ± 37	1029 ± 50	784 ± 25

Note: All the mean values are added by the standard errors.

Table 5 The t-test for hydrological parameters change before and after 1986

Items	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Significance Level	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Probability	0.03	0.053	0.03	0.30	0.15	0.07	0.01
Degree of Freedom	8	8	6	9	10	10	9

Note: The subscripts G and T represent Goyo Bridge and Tsunekane Bridge observatory stations.

Table 6 The F-test for hydrological parameters change before and after 1986

Items	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Significance Level	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Probability	0.12	0.13	0.03	0.28	0.31	0.48	0.23
Degree of Freedom	5	5	5	5	5	5	5

Note: The subscripts G and T represent Goyo Bridge and Tsunekane Bridge observatory stations.

Table 7 Correlation between hydrological data in Doki River during 1981 and 1986.

1981-86	Year	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Year	1							
Rainfall	-0.46585	1						
Discharge _G	-0.7752	0.838371	1					
Discharge _T	-0.8992	0.714307	0.883652	1				
Evaporation _G	0.595527	0.204412	-0.36222	-0.36542	1			
Evaporation _T	0.351693	0.615039	0.194751	-0.11249	0.701954	1		
Runoff Ratio _G	-0.82936	0.733203	0.98087	0.900279	-0.5077	0.026696	1	
Runoff Ratio _T	-0.92985	0.358682	0.67483	0.908205	-0.59852	-0.514	0.761551	1

Note: The subscripts G and T represent Goyo Bridge and Tsunekane Bridge observatory stations.

Table 8 Correlation between hydrological data in Doki River during 1987 and 1992.

1987-92	Year	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Year	1							
Rainfall	-0.38477	1						
Discharge _G	-0.05426	0.933809	1					
Discharge _T	-0.44072	0.995929	0.917756	1				
Evaporation _G	-0.9146	0.210948	-0.15273	0.243563	1			
Evaporation _T	0.718403	-0.72504	-0.58344	-0.78417	-0.40868	1		
Runoff Ratio _G	0.25021	0.76739	0.941891	0.743499	-0.45367	-0.39773	1	
Runoff Ratio _T	-0.58972	0.952273	0.82946	0.975074	0.364213	-0.89425	0.633463	1

Note: The subscripts G and T represent Goyo Bridge and Tsunekane Bridge observatory stations.

ータの結果からは、いずれの可能性も否定できない。

5. 結論

本研究は、流域の数%の土地被覆が流出に影響を与えるかという課題について、土器川流域で検証したものであり、以下の結論に達した。

- (1) 1986 年と 1990 年の衛星データより、土地被覆について、森林域が農耕地に約 3%の割合で変化した。
- (2) 1986 年の前後 12 年間で、流域において流出率の有意な増加（有意水準 0.05）が認められた。
- (3) 短期水収支の結果、1986 年の前後 12 年間で、4 月と 10 月に月蒸発散量の低下が認められ、農耕地の増加が示唆された。
- (4) 土器川流域における流出率の増加の可能性として、土地被覆について、森林域が農耕地に変化したことが考えられる。

謝辞

本研究は、宇宙開発事業団との共同研究の一部であり、同事業団より衛星データの提供を受けた。また、科学技術振興財団の重点研究支援協力員事業の下で行われた。なお、水文データについては東京大学生産技術研究所の虫明功臣教授より、気象データは農林水産省四国農業試験場より提供を受けたことを記し、心より謝意を表したい。衛星データの解析には、摂南大学の熊谷樹一郎氏、農業環境技術研究所の村上拓彦、石塚直樹の両氏のお手を煩ったことにも感謝を表したい。

参考文献

- (1) Jordan, C.F. & Heuveland, The water budget of an Amazonian rainforest, *Acta Amazonica*, 11, 87-92, 1981.
- (2) 建設省河川局, 雨量年表, 日本河川協会, 1981-1995.
- (3) 建設省河川局, 流量年表, 日本河川協会, 1981-1995.
- (4) 気象庁, 気象月表, 気象庁, 1981-1992.
- (5) 農林水産省四国農業試験場, 四国農業試験場研究資料第 1 号, 1988.
- (6) 農林水産省四国農業試験場, 四国農業試験場研究資料第 9 号, 1992.
- (7) 鈴木雅一, 短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定, *日本林学会誌*, 67, 4, 115-125, 1985.
- (8) Brutsaert, W.H., *Evaporation into the Atmosphere*, Kluwer Academic Pub., Boston, 1982.
- (9) Kotoda, K, *Estimation of River Basin Evapotranspiration*, Environmental Research Center, university of Tsukuba, 1986.
- (10) 牧野育代, 小川進, 熊谷樹一郎, 斎藤元也, 土器川流域におけるゴルフ場開発に伴う流出変化, *日本リモートセンシング学会第 26 回学術講演会論文集*, 113-116, 1999.