

土器川流域の森林伐採に伴う流出変化

DEFORESTATION IN THE DOKI RIVER BASIN AND ITS RUNOFF CHANGE

牧野育代¹, 小川 進², 斎藤元也³

Ikuyo MAKINO, Susumu OGAWA and Genya SAITO

¹ 正会員 ロテック (〒253-0085 神奈川県茅ヶ崎市矢幡 1403-1)

² 正会員 工博, Ph.D. 農業環境技術研究所 (〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-1)

³ 非会員 農博 同上

Using multi-temporal satellite data, the change of land covers in the Doki River basin and its impact on hydrological data for the past 17 years were examined. The land cover classification maps in 1986, 90, and 95 were obtained using multi-temporal Landsat TM. From these results, its observation data were divided into three periods: the first period (1981-86) with the decrease of paddy fields, the second period (1987-92) with the increase of agricultural fields and little urbanization and the third period (1993-97) with golf course development. Through the three periods, deforestation had been carried out and the ratio of forest in the basin decreased from 83 to 76 %. During the observation period, evapotranspiration decreased by 16 % and runoff ratio increased by 1.3 times. Moreover, seasonal profiles in evapotranspiration showed different patterns each period, which seemed to be affected by different-typed development.

Keywords: *paddy fields, evapotranspiration, runoff, water balance*

1. はじめに

森林伐採に伴う流域の流出変化は水害のみならず, 環境にも影響を与える重要な問題である. 特に農業開発, 都市開発, リゾート開発といった開発形態の差がもたらす流出機構の変化は, いまだ不明な点が多い. そこで, 香川県琴南町を流れる土器川に対して, 多時期衛星データと 17 年間の水文データを解析して, 異なる開発に対する流出変化を調べた.

森林伐採に伴う農業開発は世界的に問題となってきたが, 日本では水田が主であり, 海に囲まれているため, 気候変動等の環境問題に発展してこなかった. しかし, 近年, 減反政策による休耕地の増加やリゾート開発に伴うゴルフ場の増加は, 流域の流出機構にも深刻な変化を与えつつある. また, 都市化も依然進行しつつあり, 開発は単に森林面積の減少だけでなく, そこに出現する人間活動そのものが問われる段階に来ている. 一方, 衛星データは土地被覆の変遷を見るのにきわめて有効な手段である. 特に多時期データを駆使すると, 経年的変化のみならず, 土地被覆の季節変動に対する評価も可能である. 短期水収支法は小流域に有効で, 蒸発散量の季節変動を細かくとらえられるので, 土地利用の変動の詳細を検証することが可能である. ところで, 衛星データによる土地被覆の変化とその水文量への影響を扱った研究

は少ない¹⁻⁹.

そこで, 本論では, 異なる流域開発に対して, 多時期衛星データによる土地被覆の経年変化及び季節変動, 17 年間の水文データから経年変化と蒸発散量の季節変動をみることから, 流域の流出変化を検証した.

Table 1. Landsat TM data used

Satellite	Date
Landsat TM	1985/10/2; 1986/9/3, 11/6; 1987/2/10, 6/18; 1989/1/30; 1990/3/22; 1995/7/26; 1996/5/26, 12/3

2. 方法

(1) 使用データ及び観測点

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, 主に, 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. 流域分割には国土地理院発行の数値地図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17年間の水文データ (建設省) を使用した¹⁰. 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.1参照). 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^{7,9)}.

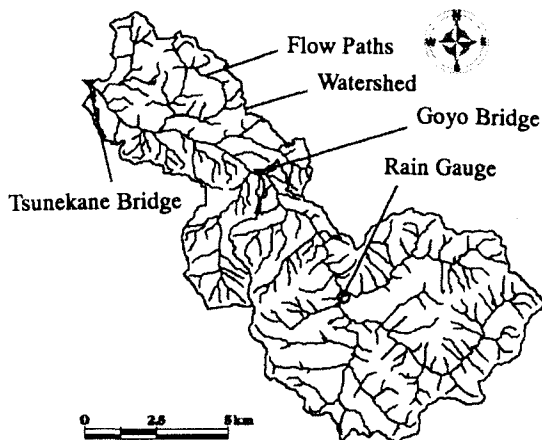


Fig.1 Doki River and its observation stations

(2) 土地被覆分類

土地被覆は, 多時期のLandsat TM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.

(3) 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TNT mips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.

(4) 水収支

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ない状態で, 農業用水が使用されているが, 長期水収支では影響がないと考えられる.

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法を試みた¹⁰⁾.

(5) 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¹¹⁾.

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

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

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

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

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

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

ここで, $\Delta = (de^*/dT)_T$, $\gamma = c_p P / \varepsilon l$, Q_n : 有効エ

ネルギー(mm/day), $f(u)$: 風関数(mm/day), u : 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_i : 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(5.67×10⁻⁸Wm²K⁻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¹²⁾.

(6) 検定

検定は, 森林が農地に転用されて, 水田の減反と増反が行われた1986年前後とゴルフ場開発が着工した1992年前後の2時期で水文パラメータの年変化に対して試みた. すなわち, 平均値に対して検定を, 分散に対してF検定を実行した.

3. 結果

(1) 土地被覆の変化

讃岐平野土器川流域の1986年, 1990年及び1995年の土地被覆分類から得られた各土地被覆クラス的面積率をTable 2に, その土地被覆分類図をFig. 2 (a), (b), (c)に示す. 1986年と比較して1990年までに, 森林の面積率は約2.8%減少し, 逆に農耕地は約2.3%増加した. 農耕地の内訳は, 水田が1.2%増加し, 畑地が1.3%増加した. なお, 1986年前は農地の開発と同時に減反が年率約2%の割合で進められていたと推定される.

1990年と1995年の比較では, 森林の面積率は約4.0%減少し, 農耕地は0.5%減少した. 農耕地の内訳は, 水田の1.1%減少と畑地の0.7%増加である. すなわち, 減反が行われた. また, 草地は約4.2%の増加が見られた. これはゴルフ場の造成である.

よって, 1986年, 1990年及び1995年の3シーンを通した土地被覆面積率の主な変化は, 森林の減少に対して

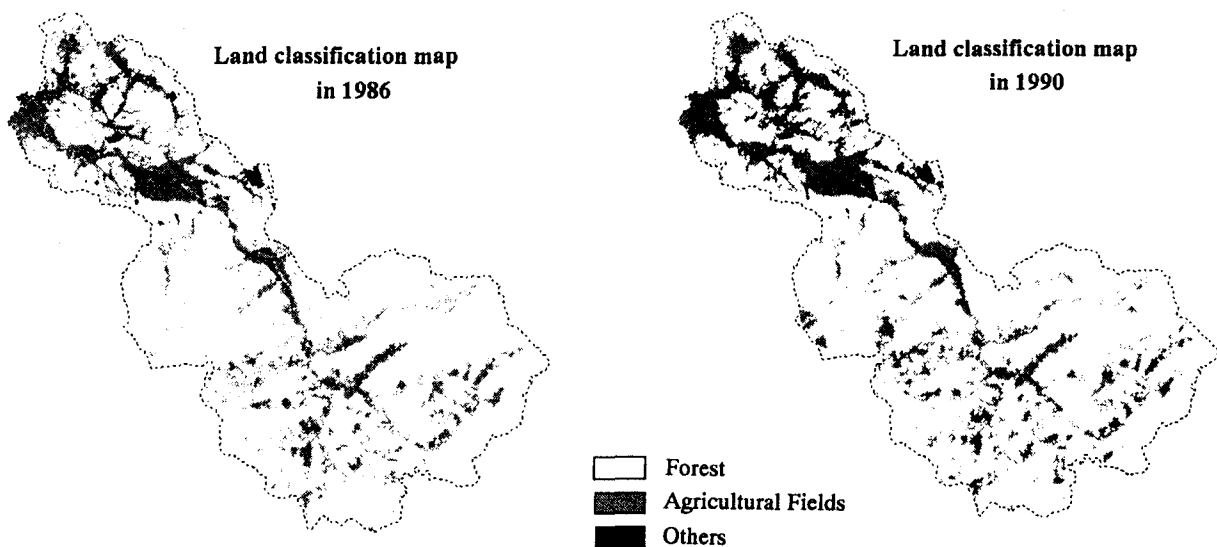


Fig. 2 (a), (b) Land cover change in the Doki River using Landsat TM in 1986 and 1990

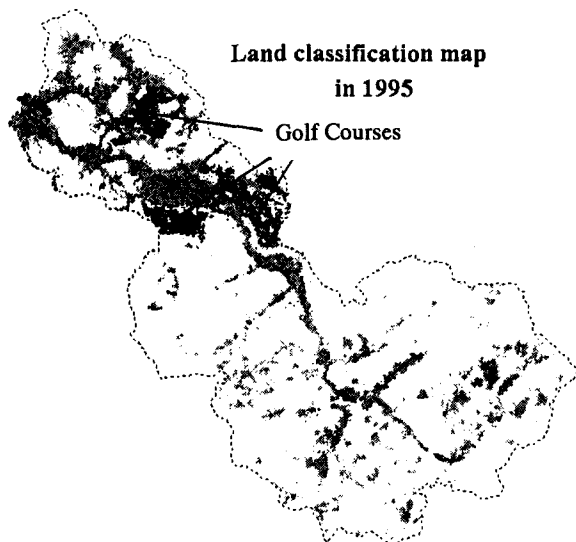


Fig. 2 (c) Land cover change in Doki River using Landsat TM in 1995

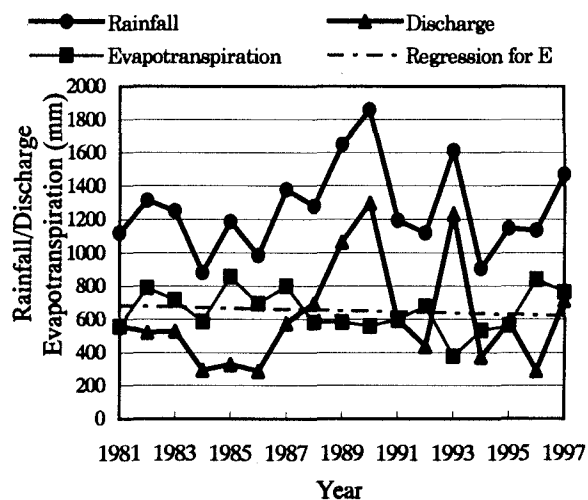


Fig. 3 Annual variation of hydrological data in the Doki River basin

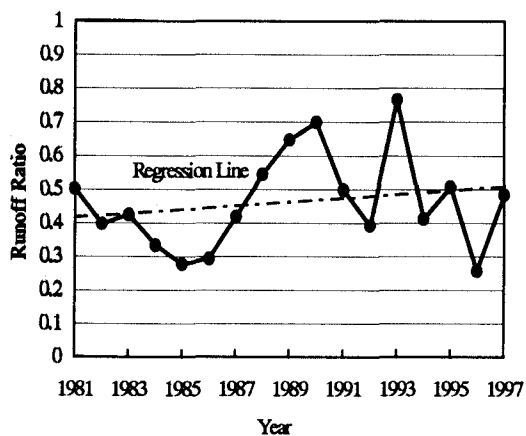


Fig. 4 Annual variation of runoff ratio in the Doki River basin

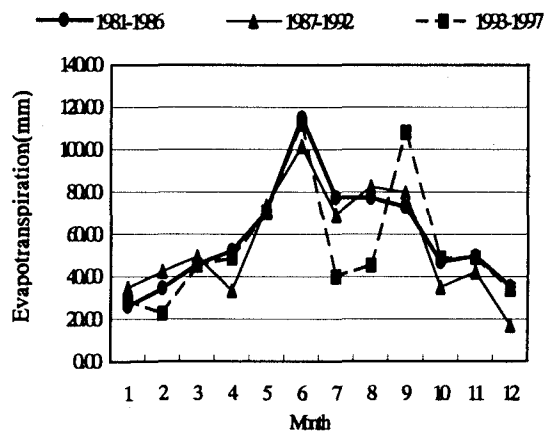


Fig. 5 Monthly variations in evapotranspiration each period

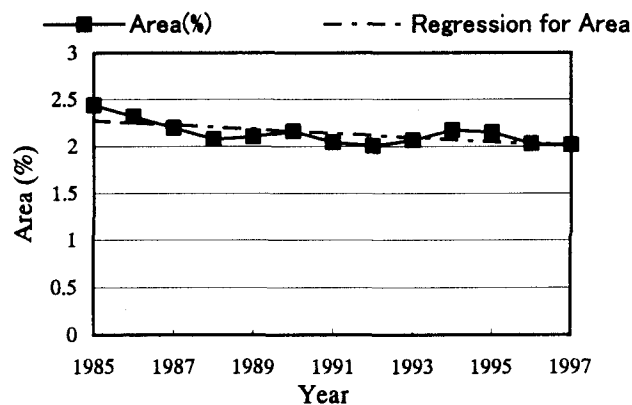
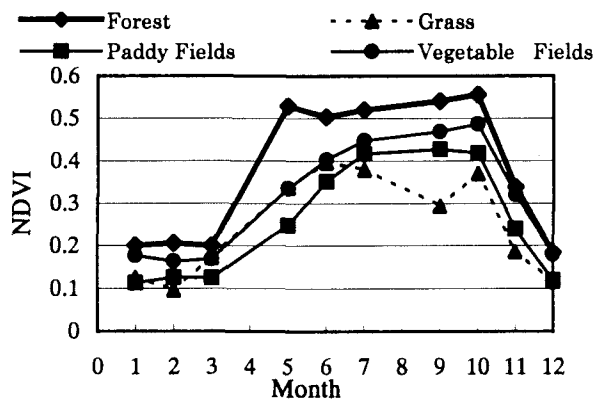


Fig. 6 Monthly variation in NDVI each land cover

Fig. 7 Annual variation of paddy field area ratio in Kotonami village

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

Year	Forest	Urban Area	Grass	Bare Soils	Paddy Field	Vegetable Field	Water
1986	82.7	0.8	0.2	0.5	4.9	10.7	0.2
1990	79.9	1.3	0.4	0.1	6.1	12.0	0.2
1995	75.9	1.4	4.6	0.2	5.0	12.7	0.2

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
1981-1986	1122±67	377±70	421±53	745±39	745±39	0.33±0.05	0.37±0.04
1987-1992	1412±116	632±121	778±135	780±51	634±37	0.43±0.05	0.53±0.05
1993-1997	1251±26	564±211	631±167	716±88	629±74	0.45±0.11	0.48±0.08

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

Table 4 Evapotranspiration using water balance method, 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
1993-1997	629±37	1107±61	890±59

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	0.01
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.

農耕地の増加、ついで減反とゴルフ場開発が行われた。便宜上、ここでは、1986年、1990年は森林、農耕地、その他のクラスで表し、1995年は森林、農耕地、ゴルフ場、その他のクラスで表示している。

(2) 長期水収支の変化

Table 3 に 1981 年から 1997 年までの水収支の結果を示し、Fig. 3 に水文変化のグラフを示す。1981 年から 1997 年までの年降雨、年流出量から年蒸発散量及び流出率を算定した。1986 年以前と 1987 年以降ゴルフ場開発前までを 2 時期に分けて解析を行ったところ、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がみられ、蒸発散量は、御用橋で増加、常包橋では減少している¹³⁾。1992 年以降では、流出と蒸発散量は開発後、御用橋、常包橋ともに減少している。流出率は御用橋では増加、常包橋では逆に減少している。Fig. 4 に示すように、1985 年と 1996 年で流出率は最小で 1990 年と 1993 年でピークに達している。後者は、ゴルフ場開発に伴うものであることがわかっている¹³⁾。すなわち、流出率は 1981 年から 1997 年の間で増加傾向となっている。さらに本論では示さないが、1981 年以前の 1970 年からの観測期間まで含めても増加が認められる。一方、降雨は 1970 年からの観測期間中、ほぼ一定であるので、流出率の増加は気象とは独立した要因が寄与したものと考えられる。つまり、流域の開発に伴い、流出率は増加した。

(3) 各種蒸発散量の算定

蒸発散量は、水収支法で求める方法、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気象因子により決まる。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 年前後とゴルフ場開発の 1992 年前後で平均し比較した。1986 年前後では、全ての蒸発散量で減少が認められた。1992 年前後では、水収支法では減少し、パン蒸発散量及び Penman 法では増加が認められた。ただし、この違いが農地開発とゴルフ場開発の違いによるものかは検討を要する。

(4) 短期水収支による蒸発散の季節変動

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及び気温の低下と推定される。ゴルフ場開発が始まった 1992 年以降では、開発前

と比べ、7 月と 8 月に蒸発散量の低下する異なったパターンが見られた。ゴルフ場開発によって、夏場の降雨の増加する時期に保水性の低下で流出が増加したものと考えられる。

次に、衛星データから NDVI の季節変動を Fig. 6 に示す。4 月から徐々に NDVI は成長曲線状に上昇し、10 月を境にして低下していく。NDVI の値は、森林で一番高く、畑地、水田、草地、都市と続く。NDVI は、植生のバイオマス量に対応するので蒸発散量にほぼ比例すると考えられる。したがって、森林から農耕地及びゴルフ場に変化することは、蒸発散の低下を意味する。ただし Fig. 5 と 6 を比べれば、蒸発散量は夏場に低下し、NDVI は植生の成長に対応して増加する点が大きく異なり、NDVI から蒸発散量を直接算定できない点に注意する必要がある。

(5) 長期水収支の t 検定と F 検定

水収支の開発前後の変動には、平均値の t 検定と分散の F 検定を採用した。農地開発とゴルフ場開発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に対して t 検定をし、分散に対して F 検定を試みた。

まず、1986 年前後では、農地の開発が行われ、水田と畑地がそれぞれ 1.2%、1.3% 増加した。この結果、流出率の顕著な増加が認められた。Table 5 に示すように t 検定では特に常包橋で有意水準 0.01 で流出率の増加となった。他方の F 検定では、Table 6 に示すように分散は有意水準 0.05 で増加は認められなかった。なお、この間、降雨の増加に伴う流量の増加が認められている。

次に 1992 年の前後では、ゴルフ場開発が行われ、流域の 4% にあたる森林域が減少した。t 検定では、Table 7 に示すように蒸発散量（常包橋）で有意な差（有意水準 0.10）で減少が見られた。また、F 検定では、Table 8 に示すように蒸発散量（常包橋）の分散が有意水準 0.10 で増加、流出率（御用橋）の分散が有意水準 0.05 で増加が認められた。

4. 考察

(1) 短期水収支に見る開発の違い

土器川流域では過去 17 年間、主として農業開発とゴルフ場開発が行われ、森林域が減少した。こうした開発の違いによる流出の変化は、短期水収支では月別蒸発散量の季節変動、つまり時系列パターンの違いとして現れた。すなわち、農地の増加では、4 月と 10 月に蒸発散量の低下、ゴルフ場開発では 7 月と 8 月の夏場に低下が見られた。こうした蒸発散量の季節変動のパターンから開発の違いが推定できるかもしれない。

(2) 長期水収支に見る開発の違い

水収支の長期水収支により、雨量、流量、蒸発散量、流出率のそれぞれに開発の前後に変化が認められた。雨量については、17 年間で越える長期にわたり変動の傾向は一定であった。蒸発散量は減少傾向、流出率は増加傾

Table 7 t-test for hydrological parameters change before and after 1992

Items	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Significance Level: α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Probability	0.14	0.22	0.24	0.19	0.10	0.50	0.17
Degree of Freedom: ϕ	6	6	6	6	6	6	6

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

Table 8 F-test for hydrological parameters change before and after 1992

Items	Rainfall	Discharge _G	Discharge _T	Evaporation _G	Evaporation _T	Runoff Ratio _G	Runoff Ratio _T
Significance Level: α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Probability	0.07	0.41	0.26	0.29	0.09	0.03	0.17
Degree of Freedom: ϕ	8	8	6	9	10	10	9

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

向が有意に認められた。また、ゴルフ場開発の場合、流出率の分散の増加傾向も有意に認められた。したがって、いずれの開発も蒸発散量は減少し、流出率は増加する。しかし、ゴルフ場の開発では流出率の分散も増加する。なお、流域の数%を占める水田域は、Fig. 7 に示すように長期にわたり減反政策が実行され、減少を続けている。こうした政策も蒸発散量の低下と流出率の増加に寄与しているのかもしれない。ここで、琴南町とは土器川の上流域に位置する町で、ちょうど御用橋と常包橋の間に行行政界をもつ。つまり、同町の行政界は本研究対象の流域界とほぼ同じである。

5. 結論

本研究は、土地被覆の変化が蒸発散量への影響について、土器川流域で検証し、以下の結論に達した。

- (1) 土器川流域は、1986 年から 95 年にかけて森林伐採が継続し、農地開発、減反そしてゴルフ場開発が行われた。この結果、蒸発散量の減少と流出率の増加が認められた。また、ゴルフ場開発の期間で流出率の分散が有意水準 0.05 で増加した。
- (2) 土器川流域の蒸発散量の季節変動で、農地開発では 4 月と 10 月に低下を示したのに対し、ゴルフ場開発では夏場に低下した。
- (3) 衛星データによる土地被覆別 NDVI の季節変動において、NDVI の値は森林が一番高く、それ以外の植生は低く、バイオマス量の違いに対応している。蒸発散量は NDVI にほぼ比例するので、森林伐採に伴う植生の変化は、蒸発散量の減少となると推定される。

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数を煩ったことにも感謝を表したい。

参考文献

- 1) 青山定敬, 西川肇, 村井宏: 衛星リモートセンシングデータによる林地水保全機能の判読と降雨流出解析への応用, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 539-551, 1990.
- 2) 風間聡, 多田毅, 沢本正樹: 衛星データを用いた東北地方の年水収支解析, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 81-86, 1996.
- 3) 佐渡公明, 魏永芬: ランドサット TM データのみを用いた重回帰式による流域月蒸発散量の推定, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 323-328, 1996.
- 4) 佐渡公明: ランドサット TM データを用いたメソスケールの流域実蒸発散量の推定—網走川・常呂川流域について—, 水文・水資源学会誌, 第 9 巻, 第 2 号, pp. 188-197, 1996.
- 5) 建設省河川局, 雨量年表, 日本河川協会, 1981-1995.
- 6) 建設省河川局, 流量年表, 日本河川協会, 1981-1995.
- 7) 気象庁, 気象月表, 気象庁, 1981-1992.
- 8) 農林水産省四国農業試験場, 研究資料第 1 号, 1988.
- 9) 農林水産省四国農業試験場, 研究資料第 9 号, 1992.
- 10) 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.
- 11) Brutsaert, W.H., Evaporation into the Atmosphere, Kluwer Academic Pub. Boston, 1982.
- 12) Kotoda, K., Estimation River Basin Evapotranspiration, Environmental Research Center, University of Tsukuba, 1986.
- 13) 牧野育代, 小川進, 齊藤元也, 土器川流域の土地被覆の変遷と流出の経年変化, 土木学会環境フォーラム, 36, 237-242, 1999.

(1999.9.30 受付)