

# 手取川扇状地における水収支の分析

丸山 利輔<sup>1)</sup> 能登 史和<sup>1)</sup> 吉田 匡<sup>1)</sup> 中村 公人<sup>2)</sup>  
堀野 治彦<sup>3)</sup> 村島 和男<sup>1)</sup> 瀧本 裕士<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 石川県立大学

(〒921-8836 石川県石川郡野々市市末松1-308)

<sup>2)</sup> 京都大学農学部農学研究科

(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>3)</sup> 大阪府立大学大学院農学環境生命科学研究所

(〒599-8531 堺市中区学園町1-1)

本研究は、石川県手取川扇状地〈面積17,682 ha〉を対象に、定常的な水収支の分析を行ったものである。対象地区を水路・土壌層系、帯水層系に分け、これに手取川との交換水（涵養量と還元量の差）を加えたモデルを想定した。年間の水収支に関する新知見は次のようである。降水量6.64 mm/dに対し、直接流出量は2.53 mm/dであり、水路・土壌層系への土壌面浸入量は4.11 mm/dとなる。これに取水量9.12 mm/dが加わり、蒸発散量2.45 mm/dと帯水層系への浸透量3.21 mm/dとが支出される。残りの7.57 mm/dが直接または近傍の排水路を経て日本海に地表水として排出される。帯水層系へは水路・土壌層系から3.21 mm/dと手取川からの交換水量2.15 mm/dが加わり、井戸から1.73 mm/dが揚水利用されるので、残りの3.63 mm/dが地下水として日本海または近傍の排水路に排出される。灌漑期と非灌漑期の水収支の概要も年間の水収支と同様に分析した。このように、手取川扇状地の水収支要素は互いに深く関連しているので、個別の目的のみによって水資源の利用・管理を行ったのでは、持続可能な水利用を行うことはできないことを示した。

キーワード：手取川扇状地、水収支、涵養水、還元水、流出解析

## I. 研究の目的

手取川扇状地は、石川県の工業・農業・商業などの諸産業が立地し、県の中心的な産業基盤をなす地域である。この産業基盤は、手取川から供給される豊富で清らかな水資源に依存するところが大きい。このため、この水資源のあり方を常に把握・監視し、持続可能な正しい活用を考えることが極めて重要である。一方、科学的にも工学的にもある地域の水がどこから来て、どのように利用され、どこに行くかを解明しておくことは、その地域に住み、地域の水を利用する者にとってはまことに興味深い研究課題である。

これまで、手取川扇状地の水収支について総合的に研究した成果は認められないが、地下水については渡部・山崎（1974a, b；1994）、本対象地域の一部、

中村用水系統内の水収支を分析した北村・吉田（1990）、手取川からの涵養水や手取川への還元水についての森田ら（2008）、二俣ら（2005）の調査研究がある。その他、石川県・金沢市・七尾市による井戸の揚水量や地下水位の調査、七ヶ用水（手取川右岸地区）と宮竹用水（手取川左岸地区）土地改良区による水利権、用水利用実態の調査などがある。しかし、これらの調査は、水収支の要素ごとの調査研究にとどまっており、水収支全体を捉えたものではない。

本研究は、このような考えに基づき、これまでに得られた資料を活用し、手取川扇状地における水収支の概要を把握・整理しようと試みたもので、水収支全体の問題を大局的・俯瞰的に取り扱ったものである。例えば、本研究は地下水流動の詳細な分析の

前処理段階で活用するとか、境界条件の設定などに活用すると有効と考える。

なお、この問題に関連して本地域を対象に、これまで個別の課題について幾つかの論文が公表されている。例えば、施肥量と収穫量の差からみた農地からの窒素負荷の研究 (Maruyama *et al.*, 2009; 丸山ら, 2010a), 本流域下流部砂丘地域 (安原地区) における畑地灌漑の研究 (Maruyama *et al.*, 2010b), 農地からの窒素負荷ポテンシャルの研究 (Maruyama *et al.*, 2010c), 生活処理水の窒素負荷およびその長期変動に関する研究 (丸山ら, 2010d; Maruyama *et al.*, 2011b, 2011c), 農地からの窒素負荷の長期変動に関する研究 (Maruyama *et al.*, 2011a), タンクモデルを用いた積雪水資源量に関する研究 (能登ら, 2010), 積雪水資源量の長期変動と地球温暖化による影響予測 (能登ら, 2011) がある。

今後も手取川流域を対象としたプロジェクト研究「農業用水を核とした健全な水循環に関する研究」の報告として公表されると共に、研究論文として内外に逐次公表される予定である。

## II. 研究の方法

### 1. 水収支モデル

本地域の水収支を検討するにあたって図-1に示すようなモデルを考える。すなわち、対象地域全体を水路・土壌層系、帯水層系に大別し、これに手取

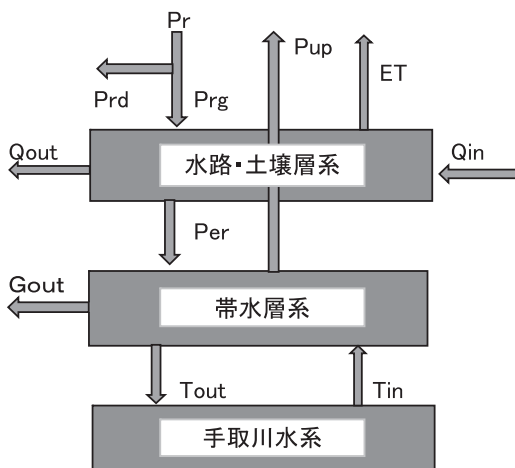


図-1 手取川扇状地 (対象地域) の水収支モデルと各要素の記号

Fig. 1 Water balance model in the Tedor river alluvial fan (study area) and input and output symbols.

川水系を加え、この諸系に対する定常的な水収支を考える。なお、ここに水路・土壌層系とは、手取川本川以外の帯水層より上に存在する土壌層と水路網からなる系全体をさすこととする。

まず、降雨 (Pr) が地表面において、直接流出と土壌面浸入 (地表面浸入) に分かれる。直接流出 (Prd) は排水路に集まって下流に流れ、残りの一部は地表面に到達し、土壌中に浸入する (Prg)。水路・土壌層系ではこの降水の一部 (Prg) と上流からの地表水 (Qin) を受け、蒸発散 (ET) と地表水排水量 (Qout) および浸透水 (Per) (帯水層への浸透) が排出される。帯水層系では、水路・土壌層系からの浸透水 (Per) と手取川からの涵養水 (Tin) を受け、井戸からの揚水 (Pup)、手取川への還元 (Tout) および地下水が排出 (Gout) される。このようなモデルに基づき、定常状態を想定して、年平均、灌漑期および非灌漑期の水収支を明らかにする。以上の水収支を数式で表現すると次のようになる。なお、本研究では、地表面あるいは土壌面からの水の浸潤を浸入、水路・土壌層から帯水層への浸潤を浸透と区別して呼ぶことにする。

$$\text{地表面: } Pr = Prd + Prg \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{水路・土壌層系: } Qout = Qin + Prg - ET - Per \dots\dots (2)$$

$$\text{帯水層系: } Gout = Per + Tin - Pup - Tout \dots\dots\dots (3)$$

以上の考え方に基づき、この地域における水収支各要素間の関係、すなわち (1)~(3) 式の関係を本地区の具体的な資料に基づいて検討する。このように、水収支全体を対象に分析することにより、たとえば、ポンプ揚水量を増加させれば水田からの浸透量を増加させなければならないとか、地球温暖化により手取川からの涵養量が変化すれば、これを他の方法で補給しなければ地下水位が低下するなど、水収支各要素間の関係が推定できる。

### 2. 研究対象地域

#### 1) 対象地域の概要

研究対象とした手取川扇状地は、図-2に示すように、南西部は手取川を挟んで能美市を境界に、北東は犀川を境界に日本海に囲まれた17,682 haの地域である。この地域には白山市を中心として、能美市・野々市町・川北町、および金沢市の一部 (犀川左岸) が含まれ、石川県の穀倉地帯の中心をなしている。ほとんどが水田として古くから利用され、畑

地・樹園地はわずかである。犀川左岸地域と国道8号線沿いには市街地が展開し、全域に地下水の利用を目的とした会社・工場などが立地している。また、この地域は手取川によって形成された典型的な扇状地で、扇頂部の標高が約80 m、扇頂部から扇端部までの距離が約13 km、平均勾配が約140分の1と北陸地方特有の急勾配地形である。

地層は図-3に示すように、表層の作土を除いて、砂礫質からなり、一部に粘土層を挟んでいるが、良好な帯水層を形成している。このような帯水層があるため、古くから地下水利用が盛んである。

地下水位は、扇頂部で海面上約60 m、扇端部で0 mであるが、直線の変化でなく、扇央部で低くなっている。勾配は約180分の1と地表面勾配より緩やかであるが、かなりの急勾配である。図-3の地下水位変動幅は、上の線が灌漑期、下の線が非灌漑期を示す。このように、灌漑期の地下水位は非灌漑期よりかなり高く、灌漑により地表より水が供給されていることが分かる。

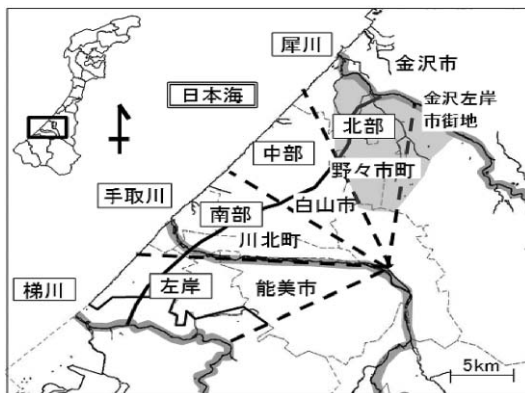


図-2 手取川扇状地（研究対象地域）平面図  
Fig. 2 Map of the Tedor river alluvial fan area (study area).

## 2) 研究対象流域の土地利用

研究対象流域の土地利用別面積は、国土交通省国土計画局から提供されている国土数値情報土地利用細分100 mメッシュデータ（国土交通省，1997）を用い、地目毎の土地利用面積を定めた。この資料ではメッシュごとの地目はメッシュ内で最も面積が大きい地目となるため、水田面積は過大に、道路・水路などの線的構造物は過小に評価される。従って、水田・畑面積は市町村毎の統計資料（北陸農政局統計部，2006）によって全体面積を求め、地域別（北部・中部・南部・左岸）面積は、水田・畑のメッシュデータにより求めた面積に、全体面積を比例配分して求めた。また、道路・水路の面積は、国土地理院（2010）から提供されている基盤地図情報等を利用し、GISによって求めた。ただし、基盤地図情報が提供されていない能美市（手取川左岸地域）には、土地利用状況が比較的類似している手取川右岸南西部（図-2に示す南部地域）の道路面積率及び水路面積率を用いて土地利用別面積を定めた。宅地等の面積は、全体面積から水田・畑・河川・水路および道路面積を差し引いて求めた（表-1）。

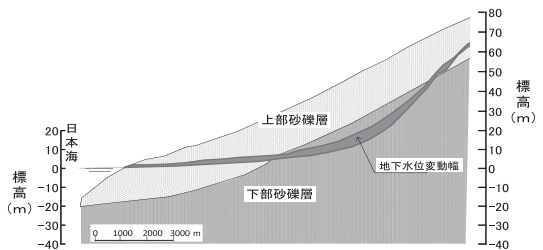


図-3 手取川扇状地の土層断面（渡部，1994を修正）  
Fig. 3 Soil horizon in the Tedor River Alluvial Fan area.

表-1 対象地域内土地利用別面積  
Table 1 Area of various land use in study area.

単位：ha						
分割地域	水田	畑	宅地等	河川・水路	道路	計
北部	796	151	2,904	163	923	4,937
中部	2,260	127	1,454	31	648	4,520
南部	2,618	113	1,041	338	606	4,716
左岸	1,865	111	650	406	477	3,509
合計	7,539	502	6,049	938	2,654	17,682
同割合 (%)	42.6 %	2.8 %	34.2 %	5.3 %	15.0 %	100.0 %

註：まず100 mメッシュデータにより全面積と水田、畑地、宅地等、河川・水路、道路の面積を概定。次に、統計資料により求めた水田・畑面積をGISにより算定したメッシュデータを基に各地域別に配分。河川・水路、道路の面積は、基盤地図情報により算定。残った面積を宅地等面積とした。

### 3. 水収支要素の評価

本研究では、長期間の平均的な水収支を知るために、出来る限り長期間の資料を活用することを考えた。この理由は、今後、地下水を中心とした窒素収支分析の資料として、本研究成果を活用することを予定していることによる。本地区での地下水の滞留時間は、100 mの深さの地下水の場合、数十年のオーダーであることが、トリチウム濃度によって確認されている（渡部，1994）。しかし、長期間の水収支を検討する場合にはその期間内のトレンドにも配慮しなければならない（付録参照）。

#### 1) 降水および蒸発散

降水量は1976～2010年までの35年間の金沢地方気象台の資料を用いた。気象台と調査地区中央付近までの距離は約10 kmである。年平均降水量は2,425 mm、4月13日から9月10日までの151日間の灌漑期降水量は877 mm、9月11日から4月12日までの214日間の非灌漑期降水量は1,548 mmである（表－2）。また、蒸発散量も同様に1976～2010年までの35年間の金沢地方気象台の資料を用いて、ペンマン法（アルヘド0.05）によって日蒸発散量を推定し、灌漑期・非灌漑期の平均値を求めた（表－3）。ただし、蒸発が期待できない約15 %相当の道路面積を除外し、ペンマン法によって推定した蒸発散量の85 %を全体の蒸発散量とした。これによると年平均蒸発散量は2.45 mm/d、灌漑期の平均蒸発散量は3.53 mm/d、非灌漑期の平均蒸発散量は1.68 mm/dとなった。

#### 2) 減水深と浸透量

村島（2009）は、七ヶ用水地区内の6用水、12地区に25筆の水田を、宮竹用水地区内に12筆の水田を選定し、2008年5月11日から8月10日の間に、毎週2～5回、朝夕2回12時間間隔で減水深を測定し、24時間に換算して表示した（表－4）。なお、減水深とは、湛水している水田において、単位時間（普通1日間）に消費される水深をさす。これによると、全灌漑期間の平均減水深は15.6 mm/dであり、中干し前は10.9 mm/d、中干し後は24.7 mm/dと大きくなっ

た。また、前者の標準偏差は3.4 mm/dと小さかったのに対し、後者は13.7 mm/dと大きくなり、中干し後の減水深は水田によって大きく変動した。

中干し前は常に湛水しているが、中干し後は間断灌漑している。農家に対するアンケートによると中干し後は3日間断で灌漑し、そのうち1日は非湛水の場合が多いという。このことを考慮すると、中干し後の減水深は2日分（49.4 mm/d）、蒸発散量は3日分（10.6 mm/d）となり1日平均の浸透量は、12.9 mm/dとなる。中干し前の浸透量（減水深－蒸発散量）とこの中干し後の浸透量にそれぞれの灌漑日数のウェイト（61日および90日合計151日）を付けて平均すると10.7 mm/dとなる。これらは灌漑期の水稲作水田（5,503 ha）の浸透量であるため、調査全面積（17,682 ha）の浸透量は3.33 mm/dとなった。

なお、この水量が帯水層へ供給されるとした理由は次のとおりである。本地区は典型的な扇状地で、地表と地下水面とは扇頂部では約20 m、扇央部で約40 m、扇端部でも約5 mと離れ、水田耕盤の下は砂礫層からなっている。このように透水係数の小さい層の下に透水係数の大きな層のある場合には、いわゆる開放浸透が発生し、この層には空気が侵入し浸透水は鉛直に流れ、動水勾配は一定となり、流速一定の流れが発生することが知られている（例えば丸山ほか，1986）。また、本地区の末端排水路は大部分コンクリート舗装となっており、畦畔浸透は期待できない。

表－3 金沢年平均蒸発散量  
Table 3 Annual mean evapotranspiration at Kanazawa.

項 目	年蒸発散量	灌漑期	非灌漑期
蒸発散量(mm)	894	533	360
平均蒸発散量(mm/d)	2.45	3.53	1.68
日 数	365	151	214

註：蒸発散量は1,052 mmであるが、道路からは蒸発がないと考え道路面積割合15 %を差し引き894 mmとした。

表－4 対象地域内の減水深  
Table 4 Water requirement at test paddies in study area.

単位：mm/d			
測定期間	全灌漑期間	中干し前	中干し後
減水深	15.60	10.90	24.70
浸透量	10.70	7.36	12.90
調査全面積当り	3.33	2.29	4.01
標準偏差	5.5	3.4	13.7
資料数	37	37	33

表－2 金沢年平均降水量  
Table 2 Annual mean precipitation at Kanazawa.

項 目	年降水量	灌漑期	非灌漑期
降水量(mm)	2,425	877	1,548
平均降水量(mm/d)	6.64	5.81	7.23
日数	365	151	214

註：灌漑期は4月13日～9月10日、非灌漑期は9月11日～4月12日



### 3) 手取川からの涵養，還元

手取川から地区内の地下水を涵養しているか，または地区内から手取川に還元しているかは，本地区内の地下水の量と質の問題を検討するために明らかにしなければならない．筆者らは灌漑期，非灌漑期それぞれ1回ずつ，河口からの距離に応じて8河川断面において，流量を実測（カレントメーターにより流速を測定し，これに流水断面を乗ずる方法）し，その流量差から涵養水量と還元水量を推定した．勿論，区間内の河川への直接流入は加味した．すなわち，上流からみて河川流量が減少している場合を河川から扇状地内への涵養，反対に増加している場合を扇状地内から河川への還元とみなした（石川県立大学，2010）．この結果を表一5に示す．

これによると，河口から16.4～11.8 kmの扇頂部では灌漑期ではわずかに，非灌漑期ではかなり河川流量が減少し，扇状地内の地下水を涵養していることが分かる．河口から11.8～2.2 kmでは明らかに流量が減少しており，河川から地区内地下水を涵養していることを示す．最下流の2.2～1.1 kmの間では逆に河川流量が増加しており，地区内地下水が河川に還元していることを示す．非灌漑期は，灌漑期よりも扇状地内地下水位が低下し，かつ手取川の流量が大きいため，灌漑期よりも多くの涵養がなされていると推論できる．年平均では，扇状地内への涵養量は，2.59 mm/d，扇状地内からの還元量は0.44 mm/dとなった．

一方，渡部・山崎（1974b）も天狗橋から手取川橋

（河口より4.5～16.4 km）までの流量差から，河川流量が20 m<sup>3</sup>/sのとき2.54 mm/d，15 m<sup>3</sup>/sのとき2.27 mm/d，10 m<sup>3</sup>/sのとき1.71 mm/dの扇状地内への涵養があると推定しており，筆者らの測定値，年平均2.59 mm/d（表一5）との間に大きな矛盾はない．したがって筆者らの調査結果はほぼ妥当であると判断した．

### 4) 井戸からの揚水量

石川県ほか（2007）は，手取川扇状地における井戸による揚水量を用途別・月別調査し公表している．その中で最近の2005年4月から2006年3月までの資料を，灌漑期・非灌漑期別に整理したのが表一6である．なお，揚水量は本研究の対象面積である17,682 ha当たりの水深（mm/d）で示した．この表から明らかなように，工業用が51.3%，水道用が31.6%と大部分を占め，その他は消雪用，農業用，建築物用に使われている．工業用，水道用は季節によって大きな差はないが，農業用は灌漑期に，消雪用は冬季に多く使用される．結果として揚水量は，灌漑期1.63 mm/dと非灌漑期1.81 mm/dと非灌漑期が若干多くなっている．

### 5) 取水量

この地区内に立地する七ヶ用水土地改良区と宮竹用水土地改良区では，表一7に示すように，目的に応じて灌漑期および非灌漑期の水利権水量を定めている．本研究では，実際の水収支状況を把握するため，水利権水量ではなく，実績取水量を基本に取水量を定めた．しかし，七ヶ用水土地改良区では取水量を実測（2007年1月1日から2008年10月31日）して

表一5 手取川からの地下水涵養と還元  
Table 5 Recharge and effluent from the Tedor river.

河口からの距離 (km)	灌漑期 (6月4日)			非灌漑期 (12月2日)			年平均
	m <sup>3</sup> /s	mm/d	小計	m <sup>3</sup> /s	mm/d	小計	mm/d
16.4～11.8	0.57	0.28		1.44	0.70		
11.8～2.2	3.84	1.88	2.15	4.48	2.19	2.89	2.59
2.2～1.1	-0.96	-0.47	-0.47	-0.87	-0.43	-0.43	-0.44

註：正の値は手取川から扇状地への涵養量，負の値は扇状地から手取川への還元量手取川と扇状地内地下水との交換水量は灌漑期1.68，非灌漑期2.46，年平均2.15である．

表一6 対象地域内用途別地下水揚水量（2006年）  
Table 6 Amount of pumping up groundwater from wells for various purposes.

単位：mm/d

期別	工業用	水道用	農業用	消雪用	建築物用	総計
灌漑期	0.88	0.55	0.15	0.00	0.05	1.63
非灌漑期	0.90	0.54	0.04	0.26	0.06	1.81
年平均	0.89	0.55	0.08	0.15	0.06	1.73
使用割合 (%)	51.3 %	31.6 %	4.9 %	8.9 %	3.3 %	100.0 %

表-7 対象地域内灌漑用水水利権および実績取水量  
Table 7 Amount of water right and actual irrigation water for paddy.

対象面積：17,682 ha

期 別	目 的	期 間	日 数	水利権水量		実績取水量	
				m <sup>3</sup> /s	mm/d	mm/d	mm/d
灌漑期	予備飽和	4/13~4/19	7	40.30	19.70	13.91	14.45
	代掻き期	4/20~5/3	14	64.20	31.40	14.97	
	普通期	5/4~9/10	130	41.50	20.30	14.45	
非灌漑期	水路維持	9/11~3/19	190	18.80	9.20	4.66	5.36
	事前通水	3/20~4/12	24	40.20	19.60	10.04	

註：実績取水量右欄は灌漑期3期間、非灌漑期2期間の日数重み付平均実績取水量の年平均は、灌漑および非灌漑日数の重み付きで9.12 mm/dとなる。

いるが、宮竹用水土地改良区では取水量を実測していない。そこで、前者の取水量を基本に両土地改良区の水利権水量の比率を用いて宮竹用水の取水量を推定し、両取水量の和をもって全地域の目的別取水量とした。次に、灌漑期と非灌漑期の平均取水量は目的別日数の重みを付けて求めた（表-7）。この結果、灌漑期の取水量は14.45 mm/d、非灌漑期の取水量は5.36 mm/d、年平均取水量は9.12 mm/dとなった。

#### 6) 流出率、浸透率および直接流出量・浸透量の推定

降雨（Pr）は図-1に示したように、直接流出（Prd）と土壌面浸入（Prg）に分かれる。そこで、最初に土壌面浸入量（流出解析では損失雨量）を求め、直接流出率  $r = (Pr - Prg) / Pr$  の形で整理し、降雨から直接流出量を求める。土壌面浸入量は、インタークレート（浸入能）と地表のくぼ地貯留（地表残留水量）からなる。直接流出となる降雨は、この土壌面浸入量を超える降雨である。

灌漑期の水田浸透量は、減水深から蒸発散量を差し引いて求めることができるが、非灌漑期の田面からの浸入能は別途推定しなければならない。また、水田以外の畑地、宅地、道路、水路等の浸入能も別途求めなければならない。土壌面浸入量は土壌水分を増加させ、後に蒸発散で消失される以外は地下に浸透して、帯水層に供給される。この様な考え方にに基づき、直接流出量を求めた研究がすでに濃尾平野で詳細に行われており（東海農政局計画部技術課，1976；三野ら，1978；丸山ら，2011d），この結果を活用した。

東海農政局は濃尾平野地域内10個所に調査地点を設け、灌漑期と非灌漑期に宅地、畑地、水田（非灌漑期のみ）の浸入能を実験的に定めた。すなわち、フィリップの浸入式  $I = st^{0.5} + a$ 、Iは土壌面浸入能、Dは積算浸入量、tは時間、aとsは実験定

数の定数aおよびsを求め、実際の浸入量を時間単位で求めた。また、くぼ地貯留は土地利用ごとに測定した地表の高低に応じてモンテカルロシミュレーションによって求めた（丸山・富田，1975；丸山，1975）。この両者の和を上回る降水量が直接流出になると考えた。

しかし、浸入能は時間単位で求めているので降雨量も時間単位のものと比較しないと妥当な直接流出量は求められない。そこで、平均的な値を得るために、日降雨量を10段階に分け、無作為に抽出した降雨パターン（時間単位）について土壌面浸入量と比較し、日雨量に対する平均的な直接流出量を求めた。なお、浸入量は、初期土壌水分によって異なるが、検討結果によると初期土壌水分への依存度は意外に少ないことが示された。そこで、初期土壌水分が飽和度50%の場合を採用し、東海農政局の研究成果を再整理して、土地利用ごとに日降水量と流出率の関係を求めた（図-4）。

この図において、宅地の流出率は、灌漑期よりも非灌漑期の方が大きい。その理由は、灌漑期（夏期）は地表面が比較的乾燥していて浸入能が大きいのに対し、非灌漑期（冬期）は湿潤で浸入能が小さい場

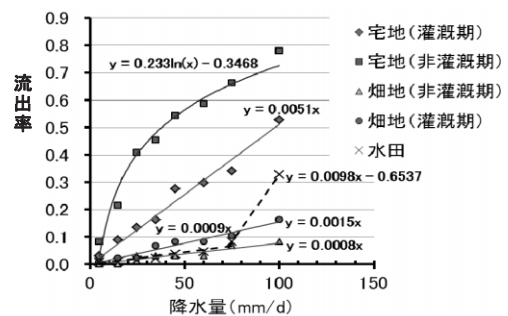


図-4 降水量と流出率の関係

Fig. 4 Relation between precipitation and runoff.

表－8a 対象地域内地目別年間（直接）流出率・浸透率  
Table 8a Annual runoff and percolation ratios for various land use in study area.

項 目	宅地等		畑 地		水 田		河川・水路		道 路	
	流出率	浸透率	流出率	浸透率	流出率	浸透率	流出率	浸透率	流出率	浸透率
灌漑期	0.20	0.08	0.06	0.23	0.06	—	1.00	0.00	1.00	0.00
非灌漑期	0.35	0.38	0.02	0.71	0.03	0.69	1.00	0.00	1.00	0.00
年平均	0.29	0.26	0.04	0.51	0.05	0.41	1.00	0.00	1.00	0.00

註：灌漑期の水田流出率は図－4を用いて算定したが、浸透量は別途算定しているので浸透率ゼロとした。宅地等の流出率は屋根部分を除外した場合の値。宅地等の中に占める屋根の面積率は33.7 %である。

表－8b 対象地域内地目別年間（直接）流出量・浸透量  
Table 8b Amount of annual runoff and percolation for various land use in study area.

項 目	項 目	宅地等 mm	畑 地 mm	水 田 mm	河川・水路 mm	道 路 mm	合 計 mm	mm/d
灌漑期	流出量	141	7	17	13	132	311	2.06
	浸透量	17	28	—	0	0	45	0.30
非灌漑期	流出量	300	1	22	60	232	614	2.87
	浸透量	134	31	458	0	0	622	2.91
年平均	流出量	234	4	20	40	191	489	2.53
	浸透量	85	30	268	0	0	383	1.83

註：灌漑期の水田流出率は図－4を用いて算定したが、浸透量は別途算定しているのでゼロとした。宅地等の中に占める屋根の面積率は33.7 %である。

合が多いことによる（東海農政局計画部技術課，1976）。また，水田の流出率が降水量80～100 mm間で不連続に大きくなっているのは，水田の湛水深が落水口の敷高を越えると急に流出率が大きくなることによる。なお，灌漑期の水田における直接流出率は，水田の欠口敷高を高くしていることもあり，非灌漑期とは若干変わると考えられるが，本研究では非灌漑期の流出率（図－4）を使用した。

なお，道路と河川・水路上の降水はすべて直接流出に配分されると考えて流出率100 %とした。また，水田の転作率は，2005～2006年の実績に基づき27 %とした。この結果，灌漑期の水稲作付面積は，表－1と異なり，5,503 ha，畑地面積は，2,538 haとなった。

また，図－4における宅地等の流出率は，浸入域の流出率を表しているのので，建物の屋根等は流出率100 %として別に扱わなければならない。屋根等の面積は，国土地理院（2010）から提供されている基盤地図情報等を利用しGISによって求めた。その結果，本地区内では2,036 haとなり，宅地等の面積6,049 ha（表－1）に対して33.7 %となった。なお，手取川左岸地域（能美市）の基盤地図情報は提供されていないので，土地利用状況が比較的類似している南部地域（図－2）の宅地等に占める屋根面積率を用いた。

以上の考え方にに基づき，図－4に示す土地利用別，

灌漑期・非灌漑期別の日降水量と流出率の関係をを用い，降水量を直接流出と土壌面浸入量に分離した。その上で，蒸発散量を差し引き，帯水層への浸透量を求めた。

具体的には，35年間（1976年1月1日から2010年12月31日まで）の日降水量と日蒸発散量を用いて，土地利用別の直接流出量と浸透量（＝降水量－蒸発散量－直接流出量）を日単位で求め，降雨に対する年平均及び灌漑期および非灌漑期別の平均直接流出率と浸透率（表－8a），および直接流出量と浸透量を求めた（表－8b）。灌漑期の水田浸透量は別途2）項で求めているので必要ないが，直接流出量は算定する必要がある。ここでは図－4の水田流出率を用いて直接流出量を算定し，浸透量のみゼロとした。

この結果，宅地の場合，年平均では流出率0.29，浸透率0.26となったが，畑地では，流出率0.04，浸透率0.51，水田では流出率0.05，浸透率0.69（非灌漑期のみ）と宅地と農地では大きく異なる結果となった。灌漑期，非灌漑期でもこの傾向は同じであった（表－8a，ただし，灌漑期水田を除く）。また，直接流出量，浸透量は年平均では，それぞれ，2.53 mm/d，1.83 mm/dとなった。この値は，灌漑期では2.06 mm/dと0.30 mm/dとなり，非灌漑期では2.87 mm/dと2.91 mm/dとなった（表－8b）。

また，非灌漑期の流出には，冬期間の積雪の影響

が考えられるが、この地方では、1990年ごろから急速に積雪量が減少していること（石川県・石川県立大学、2010）、最近は根雪が殆どなく、積雪があっても1週間程度で消失することから、本研究のように灌漑期・非灌漑期といった長期間の平均的な現象を問題にする場合には、積雪の影響を特別に取り扱う必要はないと考えた。

### Ⅲ. 水収支結果と考察

以上の方法によって求めた水収支の各項の具体的な値を水路・土壌層系と帯水層系の2層に分けて示すと、図-5のようになる。この図に示した地表水排水量は水路・土壌層系、地下水排水量は帯水層系の水収支残として求めている。なお、水収支要素毎に3つの数字が記載してあるが、同図の下部に示したように、それぞれ灌漑期、非灌漑期、年平均の値を示す。

#### 1. 年間の水収支

年間の降水量6.64 mm/dに対し、地表での直接流出量は2.53 mm/dであり、地表から水路・土壌層系への土壌面浸入量は4.11 mm/dとなる。水路・土壌層系では、これに取水量9.12 mm/dが加わり、蒸発散量2.45 mm/dと帯水層系への浸透量3.21 mm/dが支出となる。残りの7.57 mm/dが日本海へ直接または近傍の排水路を経て排出される。帯水層系へは水

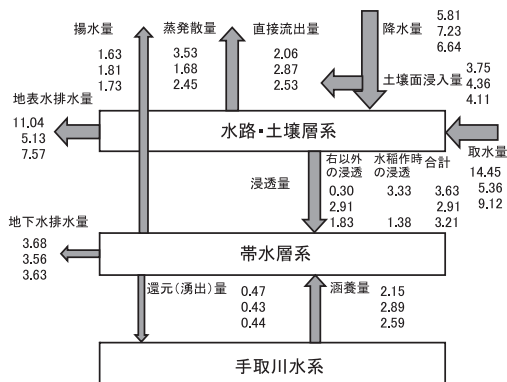
路・土壌層系から3.21 mm/dと手取川からの涵養量と還元量の差〈交換水量〉2.15 mm/d (=2.59-0.44 mm/d) が加わり、井戸から1.73 mm/dが揚水利用されるので、残りの3.63 mm/dが地下水として日本海または近傍の排水路に排出される。

#### 2. 灌漑期の水収支

灌漑期の降水量5.81 mm/dは、直接流出量2.06 mm/dと土壌面浸入量3.75 mm/dに分配される。水路・土壌層系ではこの土壌面浸入量と取水量14.45 mm/dを受けて蒸発散量3.53 mm/dと浸透量3.63 mm/dが支出となり、残りの11.04 mm/dが地表水として日本海等に排出される。帯水層系では手取川との交換水量1.68 mm/d (=2.15-0.47 mm/d) と水路・土壌層系からの浸透量3.63 mm/dが収入、井戸による揚水量1.63 mm/dが支出となり、残り3.68 mm/dが日本海等に排出される。手取川との交換水量と揚水量がほぼ同量となり、水稻作に伴う田面からの浸透量3.33 mm/dが豊富な帯水層を形成する主要な要因と推定できる。

#### 3. 非灌漑期の水収支

非灌漑期の降水量7.23 mm/dは直接流出量2.87 mm/dと土壌面浸入量4.36 mm/dに配分される。降水量7.23 mm/dが大きいために、土壌面浸入量は大きくなり、大量の水が地表から供給される。水路・土壌層系ではこの土壌面浸入量と取水量5.36 mm/dを受けて、蒸発散量1.68 mm/dと浸透量2.91 mm/dが支出となり、残りの5.13 mm/dが日本海等に排出される。また、浸透量は土壌面浸入量と蒸発散量の差として求めているために、取水量5.36 mm/dとほぼ同量が地表水として排水される。非灌漑期の水路維持用水等は、対象地域内で特に使用されることはないので、取水量がほぼそのまま排水されるのは当然である。帯水層系では手取川との交換水量2.46 mm/d (=2.89-0.43 mm/d) と水路・土壌層系からの浸透量2.91 mm/dによって、揚水量1.81 mm/dを賄い、残りの3.56 mm/dが地下水として日本海等に排出される。



※水深 (mm) 表示、上段は灌漑期、中段は非灌漑期、下段は年平均  
右以外の浸透：宅地等、畑地からの灌漑期、非灌漑期、通年の浸透、および非灌漑期の水田からの浸透本地区の場合、1.00 mm/dは約2.05 m<sup>3</sup>/sの流量に相当する。

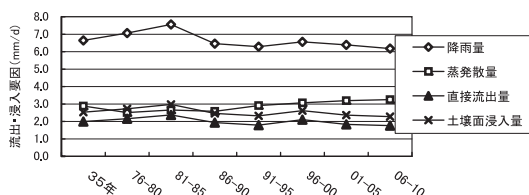
図-5 手取川扇状地（対象地域）水収支分析結果（屋根面積率33.7%の場合）(mm/d)

Fig. 5 Result of water balance analysis for the Tedor river alluvial fan area in case of roof area 33.7 %.

### Ⅳ. まとめ

手取川扇状地の水資源は、農業・工業・上下水道の水源をなし、石川県としてはかけがえのない貴重な地域資源である。この貴重な資源を大切に管理し、未来に引き継ぐことは、現代の我々に課せられた重要な使命といえる。





付図 5年間平均直接流出量と土壌面浸入量の変化

これまで、この水資源に関する調査研究は、水収支・水循環の各要素について部分的に行われてきたが全体を俯瞰した研究は見当たらなかった。しかし、この種の問題は、水循環の各要素が複雑に関連していて、全体の総合的視点に立たなければ正しい理解に到達することもできないし、適切な水利用・水管理を行うこともできない。

本研究は、このような視点から水収支全体を視野に入れた研究を行い、現在得られている資料と補足的調査を行って、水収支の分析を行ったものである。その結果、灌漑期と非灌漑期および年間について図一5に示す成果が得られた。この図に示すように、水収支の各項は互いに密接に関連していて、例えば、一つの要因が新たな水利用によって変更されるか、地球温暖化などによって手取川からの涵養量に変化すれば、必ず他の要因に影響を及ぼすことが推察できる。

本報告は、現状分析にとどまっており、新たに具体的な変化を検討したものではないが、今後の研究展開の作業仮説の意味もあって報告する次第である。とくに、降雨の直接流出と土壌面浸入量の配分には、東海農政局での研究成果を直接利用していることに若干問題が残されている。忌憚のないご意見ご批判を賜りたい。

## 付録

本研究では35年間の降雨・蒸発散資料を用いて平均的な直接流出量〈Prd〉および土壌面浸入量〈Prg〉を推定している。この期間内にこれらの諸量にどのようなトレンドがあるかを5年ごとに区切って検討した。その結果が次の図である。ただし、灌漑期の水田を除いている。

この図で35年とあるのは35年間の平均を示す。図から明らかなように、最近35年間の中で、降水量は若干減少、蒸発散量は若干増加、この影響を受けて直接流出量〈Prd〉と土壌面浸入量〈Prg〉はともに若干の減少傾向を示している。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、石川県の貴重な資料や渡部氏らの調査資料を活用させていただいた。また、プロジェクト研究「農業用水を核とした健全な水循環に関する研究」の共同研究者には種々の助言を頂いた。ここに記して深謝の意を表したい。

## 参考文献

- 二俣 秀・高橋 至・井上美嶺2005. 手取川扇状地における地下水・伏流水に与える河道の影響について。北陸地方整備局管内技術研究会論文集。2005年度：209-212。
- 北陸農政局統計部2006. 石川県農林水産統計年表〈農林編〉平成16-17年：12-13。
- 石川県・石川県立大学2010. 農業用水を核とした健全な水循環に関する研究(パンフレット)：8。
- 石川県・金沢市・七尾市2007. 石川県地下水保全対策調査報告書、手取川扇状地における地下水揚水量集計結果：50。
- 石川県立大学2010. 手取川扇状地における地下水流動の解析。農業用水を核とした健全な水循環に関する研究。平成21年度報告書：102-104。
- 北村邦彦・吉田 寛1990. 手取川右岸地区における農業用水構造野実態分析。農業土木学会誌58：391-398。
- 国土地理院2010. 基盤地図情報システム。http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html。(参照：2011/04/01)。
- 国土交通省1997. 国土数値情報土地利用細分100 mメッシュデータ。第1.1版  
http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html。(参照：2011/04/01)
- 丸山利輔1975. 水田の水収支、一とくに地表残留水について一。土壌の物理性 32：11-15。
- 丸山利輔・富田正彦1975. 転換畑の畦間残留水について。農業土木学会論文集59：9-14。
- 丸山利輔・五十崎 恒・四方田 穆・西出 勉・高橋 強・村上康蔵・三野 徹1986. 新編灌漑排水(上巻)。養賢堂：66-70。
- Maruyama T, Hashimoto I, Murashima K, Takimoto H, Denich N.2009. Assessment for nitrogen pollution loads from farmland, Japan, by objective yield and standard fertilizer usage. *Paddy and Water Environment* 7:151-159. DOI: 10.1007/s10333-009-0157-y.
- 丸山利輔・瀧本裕士・橋本岩夫・中出伝一・村島和男2010a. 農地からの窒素負荷ポテンシャルの評価、一作物別の目標収量、標準施肥量を活用して一。畑地農業 615：1-11。
- Maruyama T, Hashimoto I, Senge M, Ito K. 2010b. Irrigation practice and water usage characteristics in sand dune upland fields in Hokuriku Region, with much rainfall in Japan: case study of watermelon and Japanese radish. *Paddy and Water Environment* 8:283-291. DOI: 10.1007/s10333-010-0200-z.
- Maruyama T, Noto F, Murashima K, Hashimoto I, Kitada K. 2010c. Analysis of nitrogen pollution load potential from farmland in the Tetori River Alluvial Fan Areas in Japan. *Paddy and Water Environment* 8:293-300. DOI: 10.1007/s10333-010-0202-x.
- 丸山利輔・能登史和・高橋 強・土原健雄・田中 正2010d. 手取川扇状地における生活排水処理水の窒素負荷の分析。農業農村工学会論文集 269：113-119。
- Maruyama T, Noto F, Takimoto H, Nakamura K, Onishi T. 2011a. Assessment of the long-term variation in the nitrogen

- pollution load potential from farmland to groundwater in the Tedor River Basin. *Paddy and Water Environment* DOI: 10.1007/s10333-011-0254-6.
- Maruyama T, Noto F, Takahashi T, Onishi T. 2011b. Assessment of nitrogen pollution load potential from sewage treatment water in the Tedor River Alluvial Fan Areas, Japan. *Paddy and Water Environment* 9:267-274.DOI: 10.1007/s10333-010-0248-9.
- Maruyama T, Noto F, Takimoto H, Nakamura K, Yoshida M., Onishi T, Kawashima S. 2011c. Assessment of long-term changes of nitrogen pollution load potential from sewage treatment water in the Tedor River Alluvial Fan Area, Japan. *Paddy and Water Environment* DOI: 10.1007/s10333-011-0281-3.
- 丸山利輔・小林慎太郎・三野 徹 2011d. 降雨による地下水涵養機能とその評価. 畑地農業: 636: 2-10.
- 三野 徹・小林慎太郎・丸山利輔1978. 土地利用と広域地下水収支. 土と基礎26 (1): 83-90.
- 森田賢治・本田敏也・西村友之2008. 手取川の正常流量設定に向けてー白山と手取川の恵みをつたえるふるさとづくりー. 北陸地方整備局管内技術研究会論文集 [http://www.hrr.mlit.go.jp/library/kenkyukai/h20/kenkyuu\\_top.html](http://www.hrr.mlit.go.jp/library/kenkyukai/h20/kenkyuu_top.html). (参照: 2011/04/01)
- 村島和男2009. 農業用水利用実態と変化予測. 農業用水を核とした健全な水循環に関する研究. 2008年度報告書. 石川県立大学: 35-38.
- 能登史和・丸山利輔・早瀬吉雄・瀧本裕士・中村公人2010. 手取川山地流域におけるタンクモデルを用いた積雪水資源量の評価. 農業農村工学会論文集 268: 31-37.
- 能登史和・丸山利輔・早瀬吉雄・瀧本裕士・中村公人2011. 手取川山地流域における積雪水資源量の長期間分析と地球温暖化による影響予測. 農業農村工学会論文集 274: 1-7
- 東海農政局計画部技術課1976. 都市化に伴う濃尾用水地域の水循環の変化. 京都大学農学部灌漑排水研究室: 13-24.
- 渡部景隆・山崎良雄1974a. 扇状地の水利地質ー手取川扇状地を例として1ー. 水利科学18 (4): 1-25.
- 渡部景隆・山崎良雄1974b. 扇状地の水利地質ー手取川扇状地を例として2ー. 水利科学18 (5): 70-99.
- 渡部景隆1994. 石川県手取川扇状地の地下水 第6集. 石川県: 1-105.

(受付: 2011年5月19日, 受理: 2011年10月3日)

## Analysis of Water Balance at the Tedor River Alluvial Fan Areas in Japan

T. MARUYAMA <sup>1)</sup> F. NOTO <sup>1)</sup> T. YOSHIDA <sup>1)</sup> K. NAKAMURA <sup>2)</sup>  
H. HORINO <sup>3)</sup> K. MURASHIMA <sup>1)</sup> H. TAKIMOTO <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Ishikawa Prefectural University  
(1-308 Suematsu, Nonouchi-machi, Ishikawa 921-8836, Japan)

<sup>2)</sup> Agricultural Science, Kyoto University  
(Oiwake, Yoshida, Sakyou-ku, Kyoto 606-8502, Japan)

<sup>3)</sup> Agricultural Science, Osaka Prefectural University  
(1-1, Gakuen-machi, Sakai 599-8531, Japan)

Water balance in the Tedor River alluvial fan areas was analyzed for all components of the hydrological cycle based on the exchange of the channel-soil surface and aquifer horizon fractions with river water. The results were summarized on an annual basis, as well as for the irrigation and non-irrigation periods. The new findings of annual water balance are presented herein. The study area received 6.64 mm/day of precipitation annually and had an outflow of 2.53 mm/day as direct runoff, resulting in 4.11 mm/day of water being supplied to the soil surface. The canal-surface soil horizon fraction receives this 4.11 mm/day, as well as 9.12 mm/day intake water from the Head Works. Conversely, 2.45 mm/day is lost from evapotranspiration and another 3.21 mm/day is lost to percolation. Thus, surface runoff of 7.57 mm/day flows from the region to the Sea of Japan or drainage canals near the river mouth. In the aquifer horizon fraction, 3.21 mm/day of water is supplied from the canal-surface horizon fraction and 2.15 mm/day is supplied from the Tedor River, while 1.73 mm/day is obtained by groundwater extraction. Thus, 3.63 mm/day of groundwater flow out to the Sea of Japan or into downstream drainage canals. An outline of the water balance of the irrigation and non-irrigation period is also shown. Because various hydrological components are closely related to each other, planning and management of water resources for individual goals is not adequate, but requires the integrated aspect of water balance for sustainable water use.

**Key words :** Tedor river alluvial fan areas, water balance, effluent water, recharge water, runoff analysis