

## 湿潤地域におけるウオーター・ハーベスティング

三野 徹\*

### Water Harvesting in The Humid Region

Toru MITSUNO\*

\* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

#### Abstract

Water harvesting is the agriculture with the primitive irrigation which has been developed in arid region as middle East and north Africa. It is modified and arranged in Israel to the new modern arid agricultural thechnology which is called as runoff agriculture. It is expected to be the sustainable agricultural thechnology for developping contries due to low investment and unnecessary of high technoligy.

In this paper it is pointed out that the water harvesting is also very important in humid region as Japan. Effective rainfall which is caught in root zone is decreased irrigation water requirement, and the river discharge in drought period is released as groundwater from stored rain water in geological formation.

The former is the rainfall caught is soil and the latter is the rainfall caught in geological formation. Both of them are caught by storage capacity in the watershed. It is concluded that Water harvesting concept is very important in irrigation plannig and water resourced development in the humid regeion.

**Key words** : water harvesting, runoff agriculture, sustainable agriculture, tradisional agriculture, irrigation, water resource development

### 1. はじめに

#### —ウオーター・ハーベスティングと ランオフ・アグリカルチャー—

ウオーター・ハーベスティングは、中東から北アフリカ一帯に紀元前10世紀頃から行われていた原始的な灌漑農業で、紀元前3世紀頃から紀元7世紀頃までイスラエルのネゲブ砂漠で栄えた古代ナバティア文明を支えていた農業として有名である。100 mm/y から 200 mm/y の降雨量しかない乾燥地で農業が可能で、しかも、その人口規模からかなりの生産力を有してたと推定されている。イスラエル南部のネゲブ砂漠における古代遺跡の発掘時に発見され、その後復元した施設によって 100 mm/y というきわめて強い乾燥地でも十分農業が可能であるということが実証された。この実証試験に続いて、現代風にアレンジしたランオフ・アグリカルチャーという乾

燥地の農業技術体系がイスラエルにおいて組み立てられた。それほど大きな資本投下を必要とせず、また環境にも優しい伝統農法として、途上国の農業開発や砂漠の緑化で注目を集めている<sup>1)</sup>。

ウオーター・ハーベスティング (Water harvesting) はレインフォール・ハーベスティング (Rainfall harvesting) ともいわれが、後述する本論の主旨からすると、むしろ後者の呼び名の方が適切かと思われる。1989年の11月に発行された雑誌 Scientific American (日本語訳「サイエンス」: 日経新聞) の特集号「地球を守る」で、地球に優しい水資源の利用法として紹介されている<sup>2)</sup>。筆者は、1991年にこの研究で有名なイスラエルのベールシェバにあるベングリオン大学の砂漠研究所と、実証圃の一つであるアブダートキブツを訪問する機会を持った。現在でも細々と試験研究が続けられているが、すでに普及の段階を迎え、その役割を終えたという印象

\* 岡山大学環境理工学部 〒700 岡山市津島中 2-1-1

キーワード: ウオーター・ハーベスティング, ランオフ・アグリカルチャー, 持続農業, 伝統農業, 灌漑, 水資源開発

を受けたことを記憶している。

本文はウォーター・ハーベスティングの展開として、  
 湿潤地域の灌漑について考察することを目的としている。  
 わが国の灌漑計画理論体系は土壌水分環境を人工的  
 に制御するという視点に立ち、乾燥地の理論体系を基礎  
 に組み立てられている。わが国のような湿潤地域では、  
 むしろ土壌水分環境を作物生育場として適切に管理する  
 という視点が必要であり、自然降雨の利用を最大限に図  
 るという点でウォーター・ハーベスティングの考え方が  
 きわめて重要であることを指摘したい。

## 2. ウォーター・ハーベスティングの分類

ウォーター・ハーベスティングの現代版であるランオ  
 フ・アグリカルチャーでは、集水方法により次のような  
 5つのシステムに分類されている<sup>3)</sup>。

- a. 導水方式 (conduit conducting system)
- b. 分水方式 (diversion system)
- c. マイクロキャッチメント方式 (microcatchment system)
- d. ライマン方式 (Liman system)
- e. テラス方式 (terrace system)

いずれも蒸発散に対して降雨量が絶対的に不足する乾  
 燥地では、まず降雨を空間的に濃縮して利用することが  
 必要であり、そのための具体的な濃縮技術として上述し  
 た5つの方式が用いられる。とくに、砂漠の土壌は表層  
 近くに炭酸カルシュームが集積して不透水層を形成し  
 ており、降雨はほとんど土壌中に浸入せず表面流出す  
 るので、それをいかにうまく捕捉して土壌中へ導くかが基  
 本となっている。代表的な方式の一つであるマイクロ  
 キャッチメント方式を図-1に示す。

このような特徴に加えてウォーター・ハーベスティング  
 ではもう一つの重要な特徴がある。ウォーター・ハー  
 ベスティングの発祥地である中近東や北アフリカなどの  
 地域は、冬雨の地中海性気候として特徴づけられる。し  
 たがって、集めた降雨流出水を次の灌漑期まで貯留して  
 おかねばならない。つまりそのためにきわめて大きな貯

水容量が必要となり、それをどのような形で確保する  
 が問題となる。ウォーター・ハーベスティングでは、そ  
 のために土壌・土層間隙を利用するという特徴を持って  
 いる。

## 3. 土層における貯水の特徴とその貯留容量

上述のように、土層が持つ貯留容量を最大限に活用す  
 る点が、ウォーター・ハーベスティングのもう一つの特  
 徴である。土壌中に浸入した水は、重力ポテンシャルと  
 マトリックポテンシャルの作用を受けて複雑な動きをす  
 る。降雨浸入時には重力ポテンシャルとマトリックポテ  
 ンシャルの両方は降雨を地中へ引き込むように作用す  
 るが、地表面から蒸発散によって消費される期間には、重  
 力は下向きに、マトリックポテンシャルによる吸引圧は  
 上向きに作用する。また、透水係数は乾燥すると湿潤時  
 に比べて極端に小さくなるが、吸引圧は乾燥すると反対  
 に急激に発達する。このような土壌水分の動きによっ  
 て、より深い土層の間隙を水分の貯留に利用することが  
 可能となる。浸入過程と消費過程で土壌中でどのような  
 水の動きが生じるかをシミュレーションによって見たの  
 が、図-2である<sup>4)</sup>。

シミュレーションでは、蒸発散位が降雨量より多い乾  
 燥地と、降雨量が蒸発散位を上回る湿潤地域を想定し  
 て、2つの典型的なケースについて計算している。初期  
 条件として、前者では圃場含水量より乾燥側の状態、後  
 者は圃場含水量より湿潤側の状態を設定している。

蒸発による水分消費や重力による排水などの脱水過程  
 と、降雨や灌漑時の浸入時の吸水過程を比較すると、土  
 壌水分プロフィールに特徴的な差のあることに気づく。吸  
 水過程では明瞭な浸潤前線が形成され、いわばピストン  
 状に水が浸潤するのに対して、脱水過程では空気が深い  
 層まですばやく浸入して、含水率をほぼ一定に保った形  
 で水分減少が生じる(図-3)。水と空気から構成される二  
 層システムでは、吸引圧と含水率の間の関係(土壌水分  
 特性曲線)や、透水係数、通気係数と含水率の間の関係  
 に強い非線形性があり、水の浸入時(吸水過程)と空気

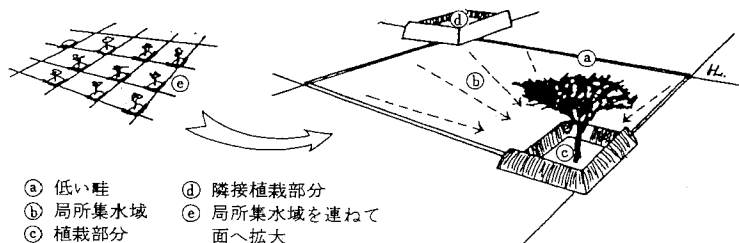


図-1 マイクロ・キャッチメント方式の例

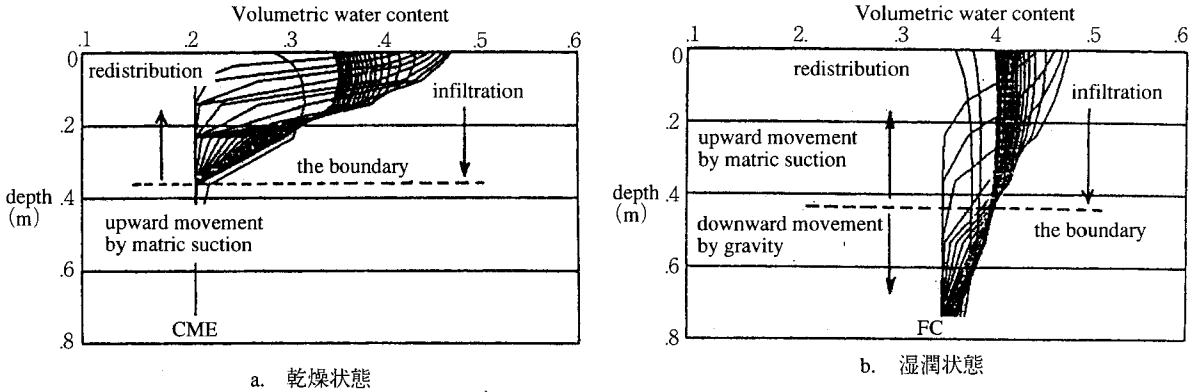


図-2 数値シミュレーションによる浸潤過程と脱水過程の土壤水分プロファイル

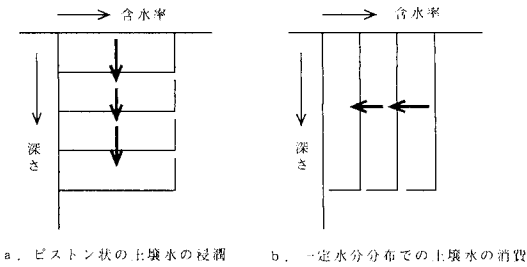


図-3 典型化した2つの土壤水分移動の状況

の浸入時（脱水過程）とで、全く異なった水分プロファイルを形成することになるためである。土壤水分動態における非線形特性によってこのような特徴的な水分プロファイルが生じることになる。

乾燥地域では、一定の深さに浸入した水は、消費時には全層に上向きのフラックスが生じ、一律に土壤水分の消費が進む。一方、湿潤地域では比較的深い土層では常に下向きのフラックスが生じるが、次第に上層部で上向きのフラックスに変わって行くことがわかる。このように、乾燥地域では降雨は土層内に一時貯留され、そのまま消費されるが、湿潤地域では、蒸発散に消費される成分と、さらに深部へ浸透して地下水涵養になる成分とに土層内部で振り分けられることがわかる。

この図-2の縦軸は相対的なもので、土壤の性質により決まる。湿潤状態の上層内で上向きと下向きのフラックスに振り分けられる境界面となるゼロフラックス面の位置は、土壤の性質、境界条件、表層部の許容サクシオン値、湿潤と乾燥のサイクルタイムにより影響を受けることになる。このゼロフラックス面が深く入れば入るほど有効貯留容量は大きくなる。火山灰土では数メートル以上になる場合があると報告されているが、砂丘ではきわめて小さい値となる。また、灌漑サイクルを小さくすると、この値は、極端に小さくなる。このように、土壤貯

留容量の値は土壤水分管理の状況によって大きく変化することになる。

以上からわかるように、ウォーター・ハーベスティングは降雨を集めて空間的に濃縮する技術だけではなく、垂直方向の土壤水分移動特性とも密接な関わりを持つことがわかる。さらに水分消費過程における許容サクシオンの範囲内でどの程度の深さの水分まで利用できるかに深い関わりを持つことになり、有効貯留容量は許容サクシオン、つまり導入作物の耐干性にも大きく影響されることになる。また、土壤水分の移動は根系システムによっても大きく変化するので、導入作物も貯留効率と深い関わりを持つことになる。結局、土層内の貯留容量を最大限に活用するウォーター・ハーベスティングは、気候条件、土壤条件、作物特性などを総合した乾燥地における農業技術体系と考えることができる。このような視点からは、ウォーター・ハーベスティングは雨を集めると言うより、雨を捕捉する技術と考える方がより適切であるといえよう。

#### 4. 湿潤地域における土壤水移動と土地利用<sup>5)</sup>

湿潤地域は、年間を通して見ると、蒸発散位より降雨量が多いために、乾燥地域のウォーター・ハーベスティングのように平面的に降雨の濃縮する必要はない。しかし、湿潤地域といえども降雨分布は均一ではなく、連続した無降雨期間や季節によっては不足する期間が発生する。例えば熱帯モンスーン地域に位置するインドネシア、ジャワ島を例にとってみる。図-4はジャワ島の水収支を月毎に整理したものある。雨季と乾季が明瞭に分かれているが、乾季の水収支不足期間をいかに乗り切るかがこの地域の自然生態系形成上の最大の制限因子となる。この不足量は先の中近東のような乾燥地域に比較すると小さい値であり、この期間を乗り切るのに必要な調整容量を求めると、大体 300~400 mm/y という値が得

られる。つまり土壌中の貯留容量としてこの程度の値が期待できると、年間を通じて水不足は生じないことになる。土壌の有効間隙率を30%から40%と仮定すると、ほぼ1メートルの有効土層があれば乾季を乗り切ることが可能となる。比較的背丈の高い樹木の有効根群深さを考えると、この値は十分確保できる。すなわち、根群の深い植物は水不足を生じることなしに乾季を乗り切ることができるが、逆に浅い植物は乾季を乗り切れず枯死することになる。

このようにジャワ島のような気候条件下では、背丈の高い樹木を利用すると、年間を通して蒸発散に必要な水量を十分捕捉できることになる。このような樹木の間根群層の比較的浅い作物を植えると、図-5に示すように背丈が高く根群の深い樹木が、豊富にある下層の土壌水分を利用して大気蒸発需要を満たすことになるので、蒸発経路のバイパスを形成することになる。それによって作物に対する大気蒸発負荷は比較的小さいものとなり、無灌漑農業が可能となる。つまり、大気環境と土壌水分環境に応じて、根群の深い樹木と浅い一年生草本類

の棲み分けが可能である。Mixed Cropping systemはこのような土壌水分利用の棲み分けを巧みに利用した農業体系の一つと考えることができる。これはアグロフォレストリーの基本的な考え方であり、混作は降雨を有効に捕捉、利用する手段の一つとみなすことができる。

### 5. 畑地用水計画体系とウォーター・ハーベスティング

わが国の畑地灌漑計画基準体系は、自然降雨により形成される土壌水分状態で不足する水分量を灌漑により補給する、という考え方を基本としてして組み立てられている。先に見たように、降雨のサイクルタイムが短い場合には、表層近傍の土壌のみで降雨が有効に捕捉されるにすぎないが、サイクルタイムが長くなると深い土層まで降雨の貯留に有効に機能することとなる。一方、有効土層中の土壌水分状態を作物の正常生育の範囲内に管理するためには、自然降雨のみでは十分ではなく、人工的に降雨を補完する必要が生じる。この補完に必要な水量をもとに畑地灌漑計画が立てられる。

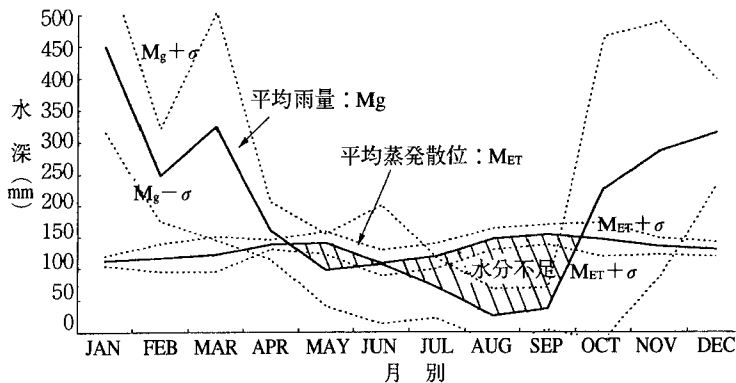


図-4 インドネシア、ジャワ島における月別水収支状況

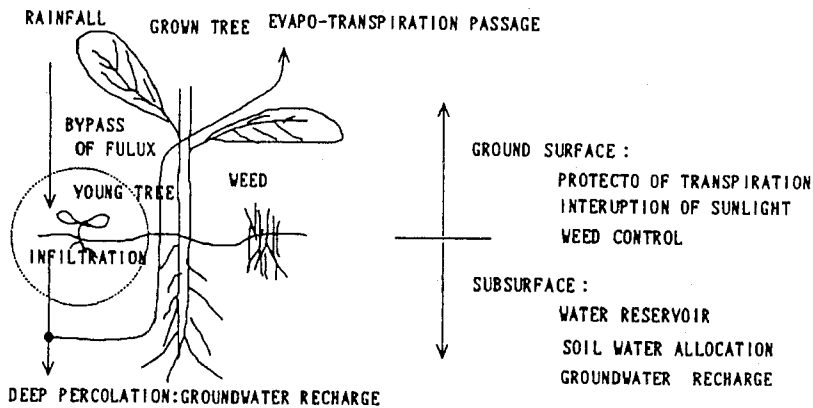


図-5 水分消費過程における地表面近傍の水の経路

補完に必要な灌漑サイクルタイムは一般に間断日数と呼ばれ、わが国の気象や土壌、作物条件を考慮すると7から10日程度である。このサイクルタイムに対応する土壌の貯留容量が総有効水分量 (TRAM) である。畑地灌漑における有効雨量は、この TRAM の下で、計画基準年の土壌水収支時系列から計算される。

自然降雨のサイクルタイムは様々なスペクトル成分から構成されている。最も長い周期は、雨季と乾季のサイクルであるから一年となる。このサイクルタイムに対応する土壌深さはきわめて深くなり、有効貯留容量もそれに対応してきわめて大きな値となる。灌漑を必要とする乾季では下層から上層へ向かう自然の土壌水分移動が、逆に雨季には下層へ向かう移動が生じており、有効土層の下部に自然降雨を貯留するきわめて大きな貯留容量が存在することになる。

このようなサイクルタイムの長い土壌水分移動は、その変化速度がきわめて緩慢であり、水分の日変動を測定する土壌水分減少法では計測できない。従来の土壌水分減少法をもとにする畑地用水計画体系では、安全側をとり、下層からの補給量を無視することによって成り立っている。しかしながら、近年の水資源の開発コスト上昇や省資源の観点から、下層からの供給量を用水量の計画

体系に組み込む必要が生じてきた<sup>6)</sup> (図-6)。

下層からの供給量を見込むことは、下層において捕捉された降雨の有効化であり、ウォーター・ハーベスティングの考え方そのものである。水分管理の対象となる有効土層と水収支上で対象となる降雨貯留土層を分離し、後者の特性を貯留容量ではなく、干ばつ期における上昇フラックスとして評価する点が、これまで説明してきたウォーター・ハーベスティングの説明とは異なっている。したがって、貯留容量と上向きフラックスの関係を整理する必要があるが、筆者は土壌の需要持続特性 (Demand Duration Characteristics, 略して DD 特性)\* を定義し、その適用によって両者を関係づけることができることを明らかにしている<sup>7)</sup>。

いずれにせよ、湿潤地域における畑地灌漑は、自然降雨を最大限に捕捉することを基本に、人工的灌漑により土壌水分を適切な状態に管理するという考え方が必要であり、ウォーター・ハーベスティングの考え方がきわめて重要であることがわかる。欧米の乾燥地域で体系づけられた畑地灌漑技術体系を下敷きにして展開してきたわが国の畑地灌漑理論は、「下層からの補給水量」と「地表面での蒸発散の気象学的評価」の導入により、湿潤地域の灌漑理論としての新しい展開段階を迎えたことにな

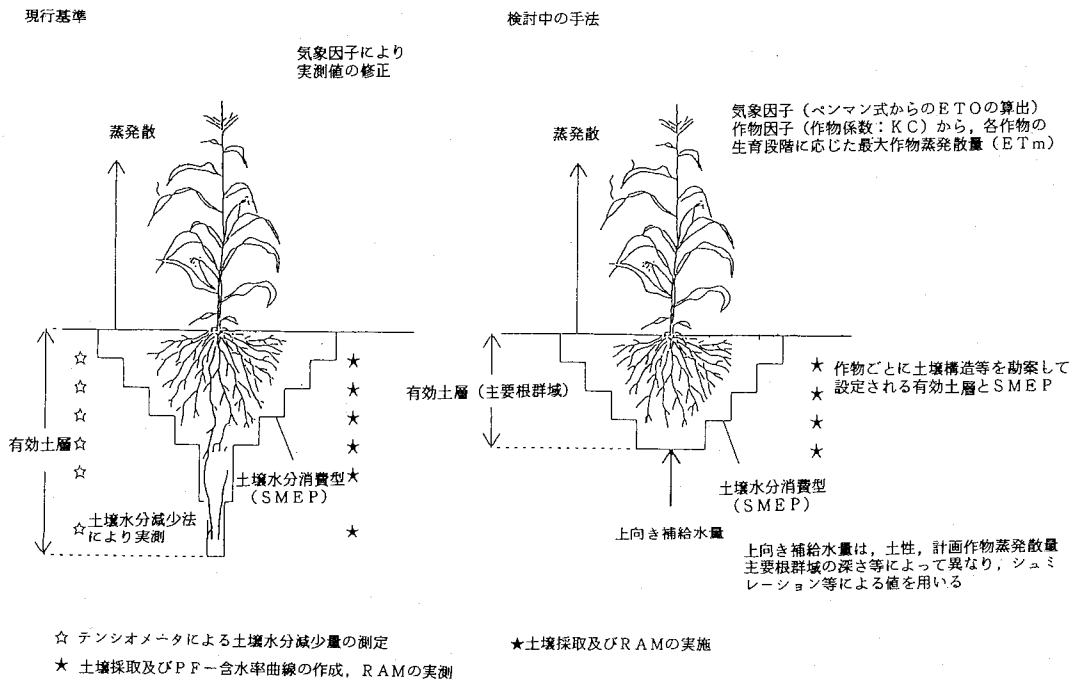


図-6 畑地かんがいの用水量計画における現行基準及び検討中の手法の比較 (山下原図, 引用文献6)

\*一定期間を想定して、降雨を蒸発散による土壌水収支を計算し、年間を通した最大の不足水量を求める。この値は、収支をとる期間に対して、一価の単調増加関数となる。この関数を需要持続曲線と定義する。詳しくは引用文献7)を参照のこと。

る。

## 6. 集水域における降雨捕捉

湿潤地帯のウオーター・ハーベスティングには、もう一つの特徴がある。一般に降雨量が蒸発散より大きいために土壌水分含有量は常に高い状態にある。とくに、表層では短期間の水収支調整しか生じないために、長期的には収入超過状態となり、重力による下層へ向かうフラックスが生じることになる。この表層での収支調整によって捕捉された降雨が有効雨量である。

先に述べたゼロフラックス面の位置は、水収支の状況や、作物根系、土壌水分管理の状況に応じて微妙に変化する。このゼロフラックス面の上部に生じる空き容量が降雨の捕捉容量となるために、捕捉される降雨そのものはこれらの条件によって微妙に変化することとなる。このように、様々な条件が密接に関連しながら降雨の捕捉率、すなわち有効降雨率が決まることになり、湿潤地域のウオーター・ハーベスティングは有効降雨問題と同一の問題であることになる。

一方、下層へ浸透した土壌水は地下水と合流する。地下水は水面勾配（あるいは水位の平面勾配）にしたがって水平方向に移動し、湧水あるいは河川水となって地表へ流出し、河川の低水時の流況を形成する。このような地下水流出によって一年中河川に水が流れているのが湿潤地域の河川の特徴である。インドネシアのジャワ島の火山山麓では谷間の湧水を水源として棚田が形成されているが、集水域となっている台地と水田面積の割合は1:8程度の比率となっている。かつて筆者は、近畿地方の水田用水量の調査で12倍以上の集水域を持っている場合には、水田はほとんどため池は不必要であるが、それを切るとため池による補給が必要であるとの結果を得たことがある。ため池は降雨捕捉のために自然の貯水容量を補完するウオーター・ハーベスティング施設といえる。

以上からわかるように、湿潤地域におけるウオーター・ハーベスティングは、単に土壌層での降雨捕捉にとどまらず、下流域への水資源供給機構としても重要な意味を持っている。流域全体としての降雨捕捉という視点から、湿潤地域における水資源の利用開発における基本的な視点を与えることになる。さらに、上流の森林地域と下流の農地との関係や、台地の畑と谷地の水田の関係など、農業的土地利用を規定する重要な要因となっていることがわかる。

## 7. 水資源の利用開発とウオーター・ハーベスティング

流域に拡張して考えるとき、ダムは自然の貯留容量による降雨の捕捉効率をさらに上げるために設けられる人工貯留容量として位置づけられ、上述の流域のウオーター・ハーベスティングのために設けられる施設と言える。ダムによる水資源開発量は、ダムの貯留水そのものではなく、ダムの貯留容量を背景にした河川流況の制御によって、生み出される渇水流量の増強分（開発流量）をもとに設定される新規水利権水量である。同じ貯水容量を持つダムでも、河川利水への参入順位によって貯留放流操作に制限を受けるために、水資源の開発量は大きく異なってくる。したがって、自然の貯留容量とダムの貯水容量を一体として考えることによって初めてダムの果たす役割が理解できる。さらに、水利権の設定にかかる社会的合意（社会的秩序）によって流域全体としての降雨の捕捉率が決まることになる。結局、水資源の利用・開発は、流域における自然的、社会的ウオーター・ハーベスティングということになる。「自然との共存」、「環境との調和」、さらに加えて「社会的秩序」という視点から、湿潤地域のウオーター・ハーベスティングは興味深い様々な今日的課題を含んでいることがわかる<sup>8)</sup>。

## 8. おわりに

### — 湿潤地域のウオーター・ハーベスティング —

乾燥地域では降雨量が絶対的に不足するために、降雨量の平面的濃縮が重要であり、水平方向の水の移動を中心にウオーター・ハーベスティングの理論が組み立てられている。それに対して湿潤地域では、土層内での上下方向の水分移動が降雨捕捉に重要な役割を果たし、そのような水の動きをもとに伝統的な農法や農業的土地利用が組み立てられていることを述べた。

自然の水の動きにより形成される水分状態をもとに、人工的にそれを補完して適切な状態に管理するするために、近代的な灌漑が行われる。有効土層の水分状態を人工的に制御することを基本理念として構成されてきたわが国の灌漑理論の体系は、「自然との共生」や「環境との調和」を考える際に、自然状態を基礎にそれを補完してより適切な状態に管理するという新しい理念構築が必要と思われる。このような方向の中で伝統農法に学ぶ点多いだが、ウオーター・ハーベスティングはそのひとつであると考えられる。

## 引用文献

- 1) 丸山利輔他 (1996): 地域環境工学, 45, 朝倉書店.

- 2) P.R. クロッソン, N.J. ロゼンバーグ(三野訳)  
(1989): 食糧増産の戦略, 82-91, サイエンス11月号.
- 3) Desert Runoff Farms Unit (1987): Runoff Agriculture, Dessert Runoff Farm Unit of The Hebrew Univ. and The Institute for Desert Research, Ben-Gurion Univ.,
- 4) Toru Mitsuno (1995): The Structure of Groundwater Hydrological Cycle And Soil Water Management in Humid Region, 311-317, Soil Moisture Control in Arid To Semiarid Region for Agroforestry, Tokyo Univ. of Agric. Press.
- 5) Toru Mitsuno and Katsuhiko Yabe (1995): Natural Soil Water Dynamics and Soil Water Management in Monsoon Asia, 13-24, Water Management and Crop Production in Semi-arid and Humid Region, Tokyuu Univ. of Agric. Press.
- 6) 山下 正 (1996): 計画の基本構想と基本計画, 1-33, 平成8年度畑地灌漑技士養成講習会テキスト畑地農業振興会.
- 7) 三野 徹 (1994): 水資源供給能と水需要ポテンシャルの評価について, 農土論集 (174), 57-63.
- 8) K. Sulasuli, T. Mitsuno and H. Torii: The Evaluation Method of Natural Storage Capacity and Its Application, 農土論集 (投稿中).

受稿年月日: 1997年1月8日

受理年月日: 1997年3月6日