

シンポジウム

傾斜開畑地における熱・水配分構造と土壌の物理性

三野 徹*

Distribution of Heat Energy and Water, and Soil Physical Conditions
in a New Reclaimed Inclined Field

Tooru MITSUNO

Faculty of Agriculture, Kyoto University

I はじめに

現況の地形は長い年月をかけて形成され、自然のシステムと最もよくなじんだ状態にあると考えられる。なかでも、地形と水循環システムとは、互に相互作用を及ぼしながら、最も安定な系を形成しており、その系の中で独特の土壌物理性が形成されていると考えられる。

急傾斜の山林の開畑は、一応の安定を見ている自然のシステムに大きなインパクトを与える。とくに大規模な地形整形を伴う改良山成工法は、地形を一変させ、全く新しい水循環システムを作り上げる。その結果、自然システムは新しい平衡をめざして自己運動を始めるであろう。そうなれば、自然システムとの対応関係の下で形成されている土壌の物理性にも、自然システムのダイナミックスに伴って、新しい平衡をめざす動きが生じると考えられる。

本文では、このような自然システムの認識の下で、傾斜地の農地開発という自然システムへのインパクトが、水循環と土壌の物理性にどのような影響を与えるかについて、検討を加えてゆく。

II 傾斜地の水循環と農地開発

傾斜地の農地開発は、地形整形、表層土壌構造の破壊、植生の変化をもたらす。これに伴って、自然の水循環は大きく乱され、新しい水循環システムが形成される。まず、地表水と土中水の配分状況がどのように変化するかを中心に検討を加える。

1. 傾斜地水循環モデルと農地開発のインパクト

一般に雨水の流出機構は、表面流出、中間流出、地下水流出の三成分に分解して取扱われる。ここでもそれに準拠して三成分に分解し、さらに傾斜を考慮して、図-1に示すようなモ

デル設定を行う。各成分の生起する物理的空間を、地表、表層土、帯水層に対応させることとする。

水循環の駆動力には、太陽エネルギーを中心とする蒸発力、重力、そしてかんがい排水などの人工的強制力があり、それぞれ図-1に示す循環径路を形成している。雨水はこの径路に沿って各成分に特有の配分を受けつつ流出する。

傾斜地の農地開発は、次のような形で、この循環システムにインパクトを与える。

- a 傾斜の修正
- b 表面粗度の変化
- c インタークレートの変化
- d 土層構造の変化

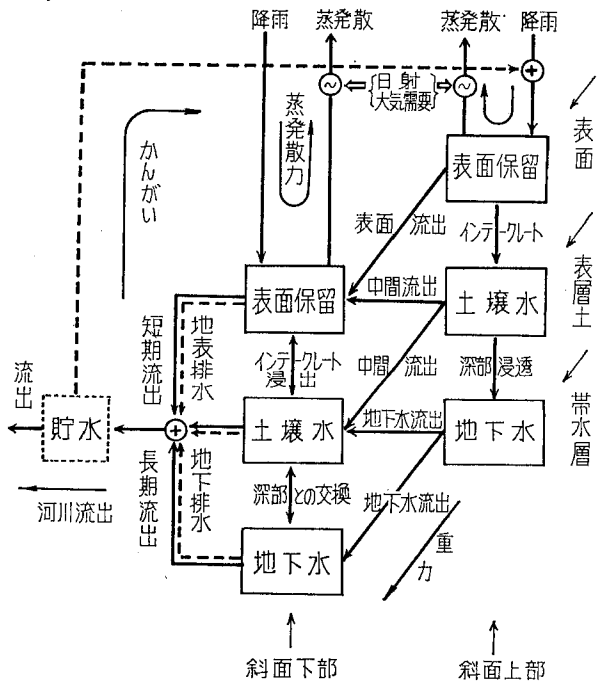


図-1 傾斜地水循環径路

* 京都大学農学部

- e 土壤保水性の変化
- f 植生の変化
- g かんがい排水による自然水循環の人為的補完

このようなインパクトを通じて、開畑地では新たな雨水の配分構造が形成される。

2. 土地利用とインタークレート

斜面に降った雨水は、地表面に沿って流下する表流水と、地中へ浸入し、土壤水あるいは地下水となる成分にまず分かれる。両者の配分は、インタークレートと表面での雨水滞留時間に支配されるが、いずれも地表面の状態によって大きく変化する。

農地造成する以前の林地、造成直後、さらに数年間耕作が行われている畑地（切土部と盛土部）について、シリンダーインタークレートを測定した結果が図-2である¹⁾。シリンダーインタークレートは、直接雨水浸入量を表わすものではないが、雨水浸入状況を表わすよいインデクスとはなるといえよう。

農地造成前の林地で最もインタークレートは大きく、造成直後では極端に小さい。耕作によっていくぶんかは

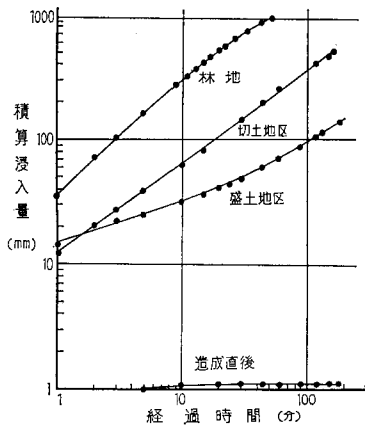


図-2 農地造成に伴うシリンダーインタークレートの変化

回復するが、完全に元へはもどらない。また切土地区と盛土地区とでは、回復状況は大きく異なる。インタークレートは、地表面近傍に発達する活性度の高い表土層の形成状況に支配されると考えられるが、とくに盛土地区では一次浸入域が顕著に見られ、土壤構造の発達の悪いことが推定される²⁾。このように活性層の形成はかなり長時間をかけて進行し、場所によって進行速度が異なると考えられる。

3. シミュレーションによる表面流出状況の推定

地表水と土中水との配分は、前述した雨水のインター

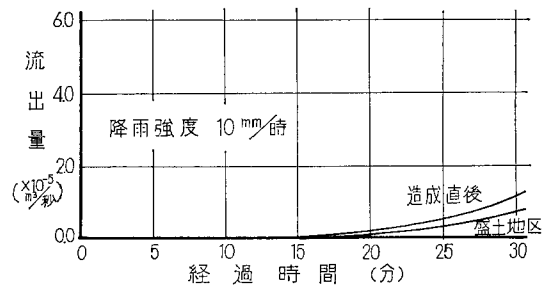
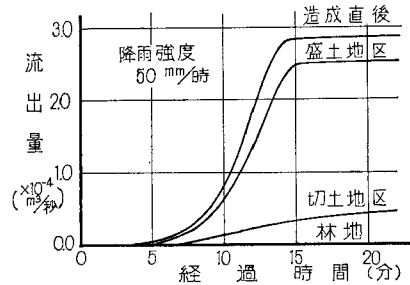
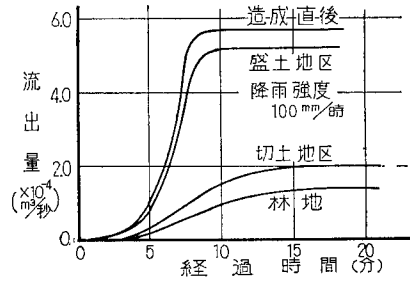


図-3 シミュレーションによる表面流出状況 (一定降雨強度)

クレートと、雨水滞留時間とに支配される。一方、地表面の雨水滞留時間には、地表の凹凸、粗度、傾斜、斜面長、インタークレートなどの要因が複雑にからみ、それらの効果は、非線形的に重ね合わさった形で現われる。

前述のインタークレートの変化が、雨水の斜面流下にどのような影響を与えるか、また非線形的特性はどの程度であるかの大略を知るために、数値シミュレーションを行った。その結果を図-3に示す。シミュレーションは Kinematic Wave 法を拡張したもので、重力と摩擦力との均合い条件、流量保存の条件、摩擦抵抗の非線形特性をもとに、基礎方程式を立て、その数値解を求める方法をとった。パラメータはなるべく実測結果に基づく値を用いた。

この結果から、表面流出は土地利用状況によって大きく変化する。とくに農地開発により、流出率は大きく、到達時間は早くなり、さらに降雨の強度によって、それらの特性は大きく変化することがわかる。インタークレ

ートの変化は、流出特性の非線形性によって、単なる加法的な効果ではなく、表面粗度の変化の効果を一層助長するように作用することがわかる。

以上のシミュレーションは、あくまでも現地でも部分的に実測したいいくつかのインデックスを、数値的に総合して検討したものにすぎない。表面流出量には、これらの複雑な要因が直接総合されて現われると考えられる。現在約10haの試験流域を二つ設定し、農地開発に伴う直接流出特性の変化を、詳細に観測しているところである。

III 傾斜開畑地の土壤保水性と

表層土壤中の水収支

地表面から浸入した雨水は、表土層に保留され、一部は蒸発により、一部はさらに深部へと浸透する。異なる斜面位置での、表層土壤の保水特性と水収支状況を対照しながら、農地開発との関連を検討する。

1. 斜面位置による土壤保水性の差³⁾

a. 粒度組成 開畑直後の土壤(原土)の粒度分布と、開畑後20年を経た傾斜畑の、斜面位置の異なる三地点の粒度分布の調査結果を図-4に示す。微粒子が斜面上部から下部へ移動している状況がわかる。

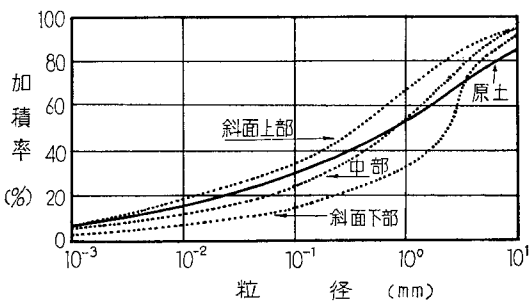


図-4 粒径分布状況

b. 土壤の親水性 土粒子の親水性を示すインデックスとして、液性限界、塑性指数、粒子の活性度の測定結果を示すと表-1のとおりである。既耕地では、開畑直後の原土に較べて、かなり親水性が大きくなっているといえる。

表-1 液性限界、塑性指数、活性度

部位	上	中	下	谷	原土
LL	36.5	48.2	36.2	40.1	30.6
IP	11.3	13.3	10.5	12.7	9.1
活性度	1.6	1.2	0.9	1.3	0.6

c. pF~含水率特性 土壤水分特性曲線を図-5に示す。表層土については、斜面位置による差は比較的小さい。しかし、下層土については、谷部では表層土とあまり差がないの比べて、斜面上の土壤では、低pFの含水量が小さくなる傾向にある。上部では表面保水が大部分を占め、いわゆる間ゲキ保水は著しく小さい。一方下部では、土壤構造が比較的発達していることがわかる。

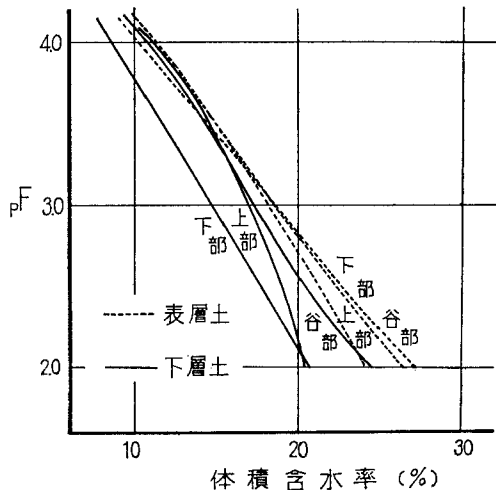


図-5 土壤水分特性曲線

2. 三相分布状況

a. 仮比重の鉛直分布 図-6に斜面位置および谷部での仮比重の分布状況を示す。表層は仮比重が小さく、土壤構造がよく発達している。また谷部では、かなり深くまで構造の発達している状況がうかがえる。

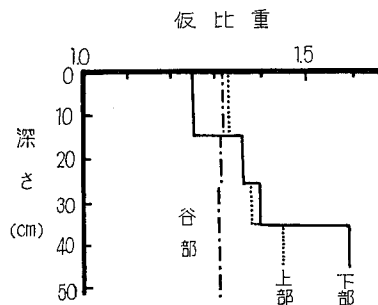


図-6 仮比重の変化

b. 鉛直土壤水分プロファイル 中性子水分計による散乱熱中性子の計数値の、深さによる変化状況を図-7に示す。計数値は、土壤の体積含水率に比例すると考えられる。ここで使用した水分計の水中の計数値は約18,000 cpmである。

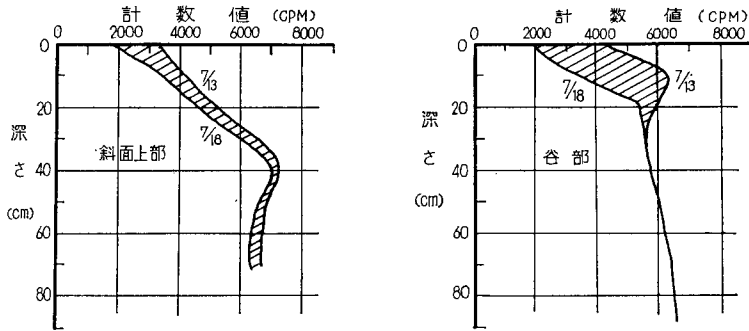


図-7 土壤水分プロファイルとその変化

3. 土壤水分変化

a. pF 値の経時変化 20cm深さでの pF の変化をテソノメータによって測定した結果が、図-8である。上部では変化幅が大きく、乾燥時には最高 pF 2.8まで上っている。それに対して、下部では pF は2.4程度までしか上昇していない。

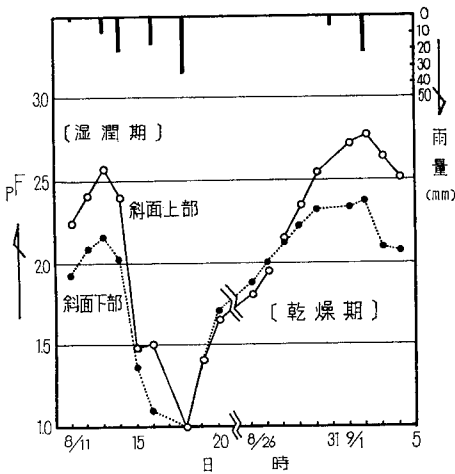


図-8 pF の経時変化⁴⁾

b. 土壤水分プロファイルの変化 図-7からわかるとおり、上部では水分消費は全層消費型となり、表層からさらに深部へ向う水分移動が見られる。これに対して、谷では表層消費型となり、下層から上層へ向う水分移動が予想される。

c. 傾斜地における表層土壌中の水収支 以上をまと

表-2 表層土壌中の水分状態の総括

条件	保水性	土層厚	水収支
斜面位置			
上部	小	小	支出過多
下部	大	大	収入過多

めると、表-2のようになる。傾斜地の表層土壌中の含水量は、いずれの要因から、斜面上部で小さく、下部で大きくなる傾向にあることがわかる。

IV 熱収支と蒸発散

傾斜地の表層土壌中の水収支について、収入、保水および支出の点から検討を加えてきた。その結果、傾斜地では重力が直接、間接に作用して、斜面位置により特徴的な水収支構造の形成されることがわかった。一方、支出を規定するもう一つの重要な要素として、蒸発散がある。蒸発散を駆動するエネルギー源は、太陽放射である。地表が吸収した太陽エネルギーの、蒸発エネルギーへの変換効率率は、斜面に形成される局地気候の構造に支配される。

傾斜地では、斜面部位や方向によって、地表面が受ける太陽放射エネルギーは、場所により大きく変化する。これによって特有の局地気候が形成され、蒸発散は斜面位置によって大きく変化すると考えられる。

1. 日射量の分布

蒸発散は、基本的には太陽放射によって生じる。しかし、傾斜地では場所によって日射量に差が生じ、それが傾斜地の局地気候の形成に作用して、日射エネルギーの蒸発潜熱への変換効率を規定する。

直達短波放射は、太陽高度、斜面方向、傾斜、日出、日没時刻をもとに、次式で計算することができる。

$$S = \frac{1440}{2\pi} I_0 \int_{t_1}^{t_2} \{ \sqrt{1 - (m \cos \theta + n \sin \theta)^2} \cos \delta \cos(t + \alpha) + (m \cos \theta + n \sin \theta) \sin \delta \} dt$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{n \cos \theta - m \sin \theta} \quad (1)$$

ここで、 I_0 : 日射フラックス、 t_1, t_2 : 日出、日没時刻、 θ, δ : 緯度、赤緯、 (l, m, n) : 斜面法線ベクトル

地形を多数の三角面で近似し、各斜面について t_1, t_2 を求めるとともに、実測値から割りもどした I_0 を用いて上の積分を行えば、 S を求めることができる。その一

例を図-9に示す。傾斜地では、このように場所によって、日射量に大きな差が生じる。

なお、季節によっても、午前と午後とでも日射量の分布は大きく異なることが、同じ計算を行うことによって明らかとなった⁵⁾。計算による値と、地温をはじめとするその他の気象要素の実測値とは、非常によい対応のあることを確認している⁶⁾。

2. 計器蒸発量と日射量

斜面位置の異なる5点において、前述の計算によって求めた日射量と実測計器蒸発量との関係を、表-3に示す。

日射量は場所により大きく異なり、最大値と最小値の比率は、約 1 : 1.7 程度となる。それに伴って計器蒸発

表-3 日射量と計器蒸発量の関係⁶⁾ (mm/day)

地 点 番 号	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 7	
斜 面 方 向	W S W	S	S E	S	—	
傾 斜 角	30°	30°	30°	35°	0°	
S 5210	計器蒸発量	2.63	3.39	3.34	2.98	2.05
	斜面日射量	6.68	8.79	8.89	8.89	5.24
	比	0.39	0.39	0.38	0.34	0.39
27	計器蒸発量	2.53	2.64	2.55	2.41	1.53
	斜面日射量	6.32	7.11	7.11	7.17	4.11
	比	0.40	0.37	0.36	0.34	0.37
10 28	計器蒸発量	2.02	2.80	2.85	2.79	1.83
	斜面日射量	5.63	7.58	7.77	7.69	4.57
	比	0.36	0.37	0.37	0.36	0.40



図-9 日射量分布の計算結果の一例 (1972. 10. 27)

量も大きく異なっているが、日射量と計器蒸発量の比率は、 0.37 ± 0.02 とほぼ一定している。このことは、日射量分布が傾斜地の気象環境を作る上での基本要素であり、それによって形成された環境にあうように、計器蒸発量が順応しているといえる⁶⁾。いいかえるならば、計器蒸発量は、そのような環境状況を表わす上で、非常によいインデクスになる⁷⁾。

3. 傾斜地における熱エネルギー配分構造⁸⁾

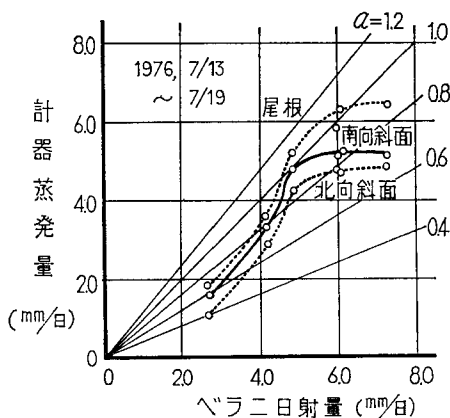
Penman の組合わせ式から、日射量と計器蒸発量との間には、次のような線形式の成立することが、類推できる。

$$E_0 = a \cdot S + b \cdot E_a + c$$

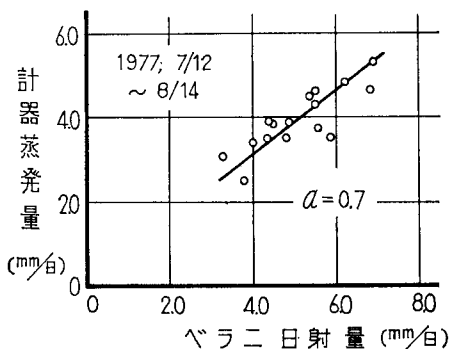
(2)

ここで、 E_0 : 計器蒸発量、 S : 日射量、 E_a : 大気需要、 a, b, c : 熱エネルギー配分構造から定まる定数

日射量をベラニ式日射計により測定し、同時に計器蒸発量を、斜面位置の異なる三地点で測定した。ベラニ式日射計は、アルコールの蒸発量から日射量を求め



図一10 傾斜地における日射量と蒸発量の関係



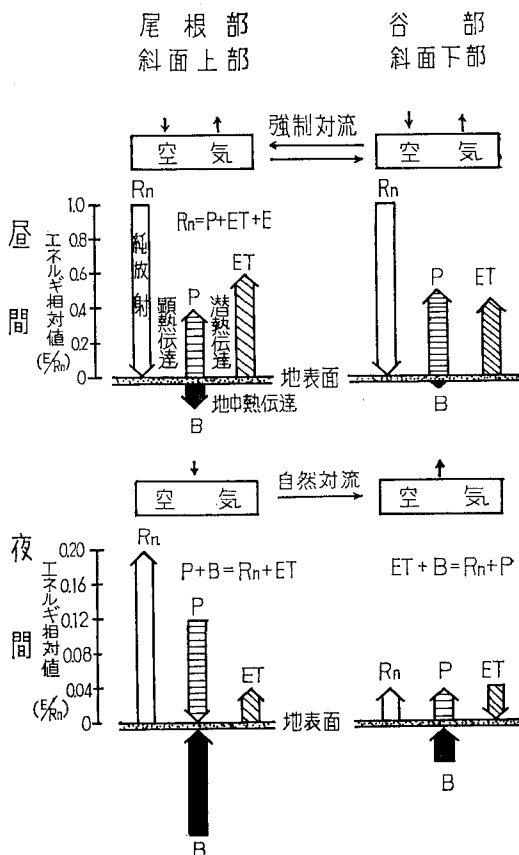
図一11 平坦地における日射量と蒸発量

るもので、ガラスにより大気から隔離されているために、上式の右辺第2項で示される大気需要の影響を受けない、一種の蒸発計とみなすことができる。

水平面日射量に換算し、計器蒸発量との間の関係を整理すると図一10のようになり、直線関係が成立しない。ちなみに、同じ方法で平坦地について測定した結果は図一11のとうりであり、直線関係が得られる。このことは、傾斜地には特有のエネルギー配分構造の存在することを示唆するものといえよう。この例では、ベラニ日射量にして約2 mm/dayと5 mm/dayに、エネルギー配分構造の転移点があるように思われる。傾斜地では平坦地とは異なり、このようなエネルギー配分に、複雑な構造が形成され、(2)式は成立しないように思われる。

傾斜地では、日射量の平面的アンバランスに伴う熱収支残差の調整現象が生じ、特有の局地気候が形成される。斜面の位置によって特徴的に異なる熱配分構造が形成され、それによって、前述の表層土壌中の水収支の斜面位置による分化を、一層促すものと推定される。結局、日射量の平面的アンバランスを駆動力として、空気を介した熱移流が、平坦地とは異った特徴的構造を形成する大きな要因として作用すると考えられる

4. 傾斜地の熱収支構造モデル



図一12 傾斜地における熱収支構造

以上をまとめ、さらに他の気象要素の実測をも総合して、大まかではあるが、傾斜地特有の熱収支構造を推定すると、図一12のようになる。斜面の位置、昼夜間で熱配分状況は大きく分化し、それぞれの間の調整役として、風と土壌の熱貯留が重要な役割を果たしているといえる。

V おわりに

以上に述べたように、傾斜地では平坦地とは異って、微妙なバランスの上に、自然システムが成立しているところに大きな特徴がある。傾斜地の開畑は、従前には一応の安定を見ている自然システムに対して、広範でかつ強力なインパクトを与える。それに対して、自然システムは次の安定平衡をめざして自己運動をする。このような動きに伴って、水収支や熱収支も大きく変化してゆくと予想される。このような動きは、斜面位置による水収支構造の分化を促し、谷部は過湿に、尾根部は過干になる。すなわち、地区全体の各流出成分の配分状況の変化に加えて、内部的な配分にも大きなアンバランスを生じる。その結果、谷部では排水により、一方の尾根部ではかんがいにより、人工的に水循環を補完する必要が生じ

る。

土地利用の変化によって、水循環システムは大きく攪乱される。傾斜開発地でのかんがい排水は、このような水循環を補完する意味において、重要な意義を持つ。したがって農地開発は、水循環、さらにはそれと密接な関係を持つ自然システムのダイナミクスに対する周到な配慮のもとに、計画されなければならない。

一步進めるならば、比較的制御の容易な土壌中の水分状態の管理（かんがい、排水）によって、微妙なバランスの上に成立している、傾斜地の自然システムの改造が可能となる。傾斜地では、このように比較的小さい力をトリガーとして、重力エネルギーのアンバランスや太陽エネルギーのアンバランスに基づく駆動力を背景に、大きな波及効果を期待することができるといえよう。

本文は、京大農学部かんがい排水学研究室で行われている一連の研究成果を、筆者が勝手にとりまとめたものである。全体的な流れの中で、個々の成果を位置づけようとしたために、一部データの乱用のきらいもなくはない。研究はまだ緒についたところで、現在、観測施設の整備が終り、データを蓄積している段階である。その意味で、本文は中間報告的なものであり、機会があれば追って詳しく報告してゆきたい。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金の交付を受けた「農地における水供給と水消費のダイナミックパラン

ス」（一般A、代表者、丸山利輔）の一部であることを付記する。

引用文献

- 1) 栗津, 丸山, 三野: 農地造成に伴う流出機構の変化, 昭52年農土学会大会講演(1977)
- 2) 加納, 小谷, 三野, 丸山: 浸入現象の転移について: 農土論集第63号, p. 15~22 (1976)
- 3) 赤江, 三野, 丸山: 傾斜地の水文環境による土壌物理性の変化, 昭52年農土学会大会講演(1977)
- 4) 奈良県五条吉野農地開発事務所: 五条吉野地区畑地かんがい営農基準圃調査報告書(1976)
- 5) 三浦, 三野, 丸山: 傾斜地の日射量分布を地形図データから求める方法と適用例, 昭52年農土学会京都支部講演(1977)
- 6) 三浦, 三野, 丸山: 傾斜地に形成される局地気候と農地開発(I)一日射量分布と地表面温度, 計器蒸発量一, 昭53年農土学会大会講演(1978)
- 7) 高瀬, 丸山, 三野: 小型蒸発計蒸発量についての一考察, 昭52年農土学会京都支部講演(1977)
- 8) 三野, 三浦, 高瀬, 丸山: 傾斜地に形成される局地気候と農地開発(II), 一傾斜地における日射量と計器蒸発量との関係一, 昭和53年農土学会大会講演(1978)