

9 7 2 3 塩類集積地帯における灌漑方法と塩分濃度管理に関する研究

助成研究者：藍 房和 (東京農業大学 農学部)
 共同研究者：穴瀬 眞 (東京農業大学 総合研究所)
 福村 一成 (東京農工大学 大学院)
 東城 清秀 (東京農工大学 農学部)
 三原 真智人 (東京農業大学 農学部)
 原 道宏 (岩手大学 農学部)
 斎藤 高弘 (宇都宮大学 農学部)

乾燥地、半乾燥地における土壌の塩類化防止は持続的な農業生産にとって不可欠である。東京農業大学ではタイ国東北部に位置するコンケン市を中心として「ポルダー灌漑」プロジェクトにより、塩類化対策の研究を進めてきた。この地域は半乾燥地気候で且つ岩塩層が地下に広く分布する自然条件に加えて、急激な人口増加による食料増産圧力が森林伐採による農地増大に向かい、深刻な塩類化と環境破壊に直面している。このような状況をあらため、同時に食料増産を実現するためには適切な灌漑農業の導入が必要であり、塩類化を発生させない営農計画・圃場管理の確立が重要となる。

そこで本研究では上記地域を研究対象として、塩類集積地帯における適切な灌漑方法と土壌中の塩分管理技術の確立を行なおうとするものである。具体的には、1)土壌中の塩分動態を把握するためにコンピュータシミュレーションを利用する、2)太陽電池で駆動するポンプ灌漑システムの適用可能面積を求め、それに基づきシステム全体のフィージビリティスタディを実施する。3)作土層への塩類集積を防止あるいは除去する土壌塩分の管理方法の一つとして、セラミック灌漑の効果的な適用法を検討する、という3つの目標設定を行って研究を進めた。

コンピュータシミュレーションでは米国塩類研究所で開発された有限要素法による土壌中の水分・溶質移動のシミュレーションシステムを利用して、平成8年度助成研究「塩類土壌地域の農業生産環境の改良に関する研究」において実験的に明らかとなった毛管遮断層の効果、特に遮断層が排水能をもつ場合とたない場合のリーチング効果への影響についてシミュレーションを行ない、その効果の検証を行なった。このシミュレーションでは遮断層の特性を強調するために、粘土質ローム層内に砂でできた遮断層を想定し、1次元で計算を行なった。また遮断層の有効性のシミュレーションでは、灌漑や降雨に相当する下方浸透、蒸発散による上方への水分移動、それぞれの条件下において遮断層排水能の有無による塩分移動の状況から有効性を確認した。さらに、地下灌漑のシミュレーションでは、根群域内の塩分濃度のコントロールに地下灌漑は有効であると判断されたが、この点については、現地試験による検証が今後必要であると考えられた。また、シミュレーションに用いた土壌・遮断層の水分特性に関するデータは、アメリカ合衆国西部に見られる土壌のデータによったので、この点については、今後の東北タイにおける土壌水分特性に関する実際のデータを蓄積し解析を進めたい。

9 7 2 3 塩類集積地帯における灌漑方法と塩分濃度管理に関する研究

助成研究者：藍 房和（東京農業大学 農学部）
 共同研究者：穴瀬 眞（東京農業大学 総合研究所）
 福村 一成（東京農工大学 大学院）
 東城 清秀（東京農工大学 農学部）
 三原 真智人（東京農業大学 農学部）
 原 道宏（岩手大学 農学部）
 斎藤 高弘（宇都宮大学 農学部）

乾燥地、半乾燥地における土壌の塩類化防止は持続的な農業生産にとり不可欠である。東京農業大学ではタイ国東北部に位置するコンケン市を中心として「ポルダー灌漑」プロジェクトにより、塩類化対策の研究を進めてきた。この地域は半乾燥地気候で且つ岩塩層が地下に広く分布する自然条件に加えて、急激な人口増加による食料増産圧力が森林伐採による農地増大に向かい、深刻な塩類化と環境破壊に直面している。このような状況をあらため、同時に食料増産を実現するためには適切な灌漑農業の導入が必要であり、塩類化を発生させない営農計画・圃場管理の確立が重要である。

本研究は、塩類集積地帯における適切な灌漑方法と土壌中の塩分管理技術の確立をめざすもので、具体的には、1) 土壌中の塩分動態を把握するためにコンピュータシミュレーションを利用する、2) 太陽電池で駆動するポンプによる揚水・灌漑システムの適用可能面積からシステム全体のフィージビリティスタディを実施する、3) 作土層への塩類集積を防止あるいは除去する土壌塩分の管理方法の一つとしてセラミック灌漑の効果的な適用法の検討など、3つの目標設定を行ない研究を進めた。

1. 土壌中の塩分動態に関するシミュレーション

1. 1 目的

平成8年度助成研究『塩類土壌地域の農業生産環境の改良に関する研究』で土壌中に設けた毛管遮断層が塩類土壌中の塩分除去(リーチング)に対して有効である事が示された。さらに室内土壌カラム実験から、毛管遮断層が排水能を持つ場合に塩分除去効果が促進される可能性が示唆されていた。

そこで、ここでは計算機シミュレーションによって毛管遮断層の排水能の有無による差を確認することとした。

1. 2 研究方法

(1) モデルの構築

シミュレーションでは鉛直一次元のモデルとして境界条件によって毛管遮断層の排水能の有無による塩分移動の差をみることにした。

(2) 使用プログラムとその特徴

カリフォルニア州リバーサイドにある合衆国塩類研究所(US Salinity Lab.)で開発された飽和-不飽和、水分-塩分移動シミュレーションプログラム、「HYDRUS」を利用した。このプログラムの大きな特徴は以下の3点である。

- a) コードの信頼性：もともとなったSWMS2Dは10年以上にわたって利用されてきた実績があり、その計算部分を核として作成された市販プログラムである。
- b) 離散化法の柔軟性：このプログラムでは空間の離散化ではガラーキン型有限要素法、風上法などが、時間の離散化では陰解法、クランクニコルソン法、陰解法などが選択できる。Fig.1.に入力画面の一部を示す。
- c) ユーザーフレンドリー：入力インターフェースがすべてウインドウ上で操作でき扱いやすい。また、プレ・ポストプロセスでは有限要素分割もメッシュジェネレーターや、境界、初期条件設定用プログラム、計算結果の視覚化プログラムが内蔵されている。

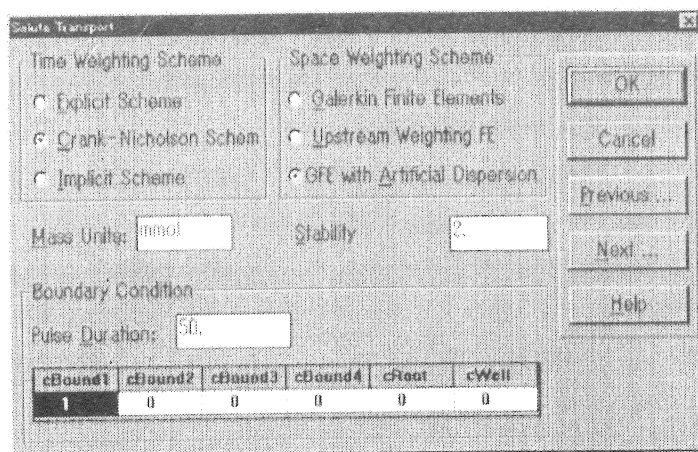


Fig.1 Calculation Scheme Input Screen

(3) 計算条件

計算ドメインは幅1cm長さ60cmの粘土質ロームからなる鉛直一次元とした。また、遮断層は深さ20cmから35cmの砂層であるとした。また、各土層の土壌水分特性はプログラムに添付して与えられているvan Genuchtenモデルの値を利用した。

また、土壌塩分が雨水によって下方へ移動する下方浸透と、土壌表面からの水分蒸発によって上方移動する再分布過程にわけて計算をおこなった。

1. 3 研究結果

(1) 下方浸透過程の塩分濃度

下方浸透開始から12時間までの毛管遮断層が排水能を持たない場合の計算結果をFig.2に、排水能を持つ場合の塩分濃度変化をFig.3に示した。

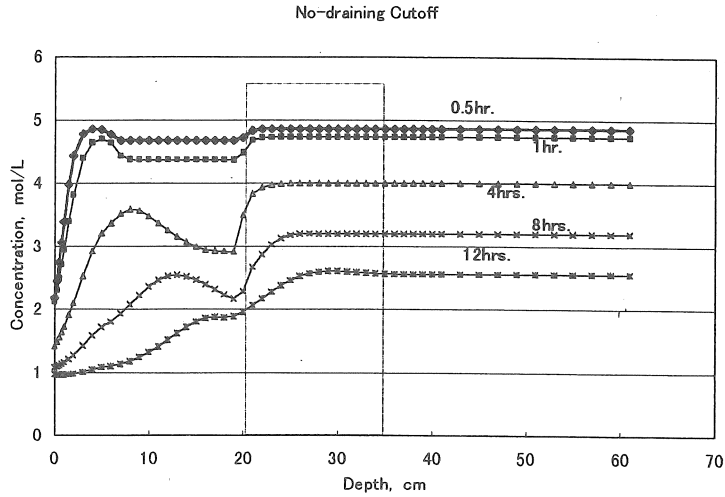


Fig.2 No-draining cut-off, salinity profile change with time

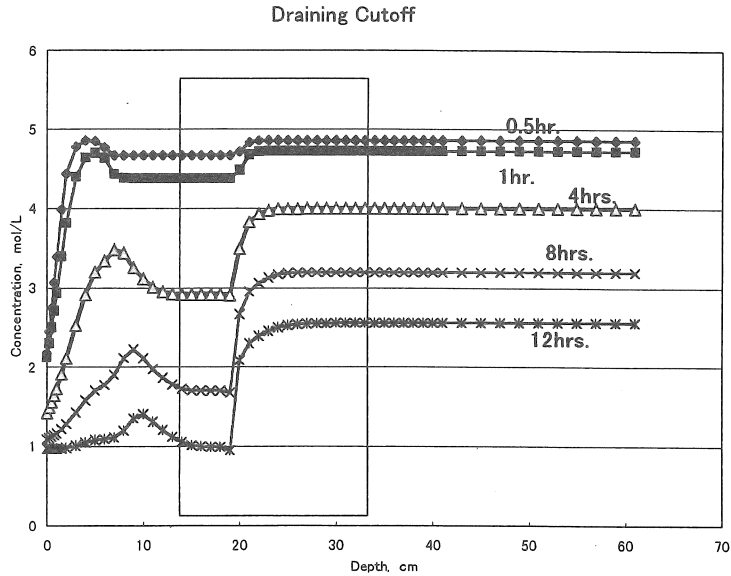


Fig.3 Draining cut-off, salinity profile change with time

図の x 軸は深さ、y 軸は土壌中の塩分濃度を示し、図中の長方形は深さ 20~35 cm に設定した毛管遮断層の位置をあらわしている。各グラフから下方浸透とともに土層全体の塩分濃度が低下している事がわかる(Fig.2 および Fig.3)。また、同一経過時間で両グラフを比較すると、遮断層上端より上層では排水能有りの方が無しの場合に比較して塩分濃度が低下している。遮断層内では排水能なしの場合に濃度低下が大きい。

これらは、遮断層が排水能を持つことにより、それより上層の塩分の系外への排除がよ

り速やかに行なわれること、また側方に排水されることから遮断層内全体を浸透する水量が少なくなるために遮断層内の塩分濃度低下が少なかった。各時間毎の両者の濃度差を計算しプロットしたものが Fig.4 である。

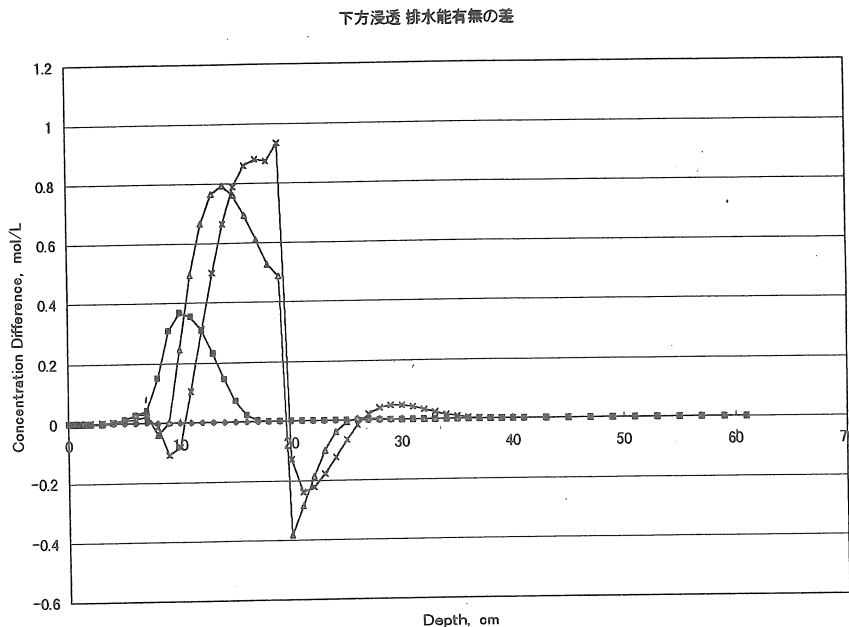


Fig.4 Concentration differential between draining and non draining cut-off

Fig.4 で y 軸の濃度差が正の値を取る時は排水能有りの方が塩分濃度が低く、負の値では排水能なしの方が低いことを示している。この図から時間の経過とともに遮断層の排水能の有無による差が大きくなっていることがわかる。また、遮断層上面 (20 cm) より上層では排水能有りで塩分濃度が低く、それより下層では排水能なしで濃度が低い。また、深部ほど両者の差が小さくなっているのは、下方境界条件 (自由排水) が支配的となっていることを示している。

(2) 再分布過程の塩分濃度分布

時間0で飽和した全土層が 5 mol/L の塩分濃度を持つとして、土壌表面から 24 ミリ / 日の速度で蒸発する時の再分布による塩分濃度分布の時間変化を Fig.5 と Fig.6 に示す。下方境界は下方浸透の時と同じ自由排水としている。また、Fig.5 は遮断層排水能なしの場合、Fig.6 は排水能有りの結果を表している。図の x 軸は深さ、y 軸は土壌中の塩分濃度を示し、図中の長方形は深さ 20~35 cm に設定した毛管遮断層の位置をあらわしている。

Fig.5 および Fig.6 共に時間の経過とともに土壌表面近傍で塩分濃度が上昇している

ことを示している。この濃度上昇は直下からの水分上昇に伴い上方に運搬された塩分が集積して行ったものである。また、下方浸透と蒸発による上向きフラックスの境界深さ（塩分濃度が際立って低くなっているところ、8hrs 参照）が時間とともにより深部へ移動している。

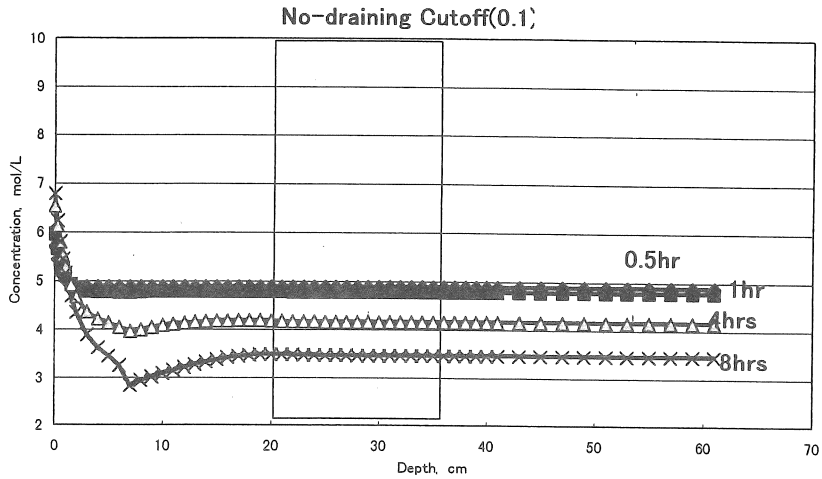


Fig.5 Non-draining cut-off, concentration profile change with time during redistribution

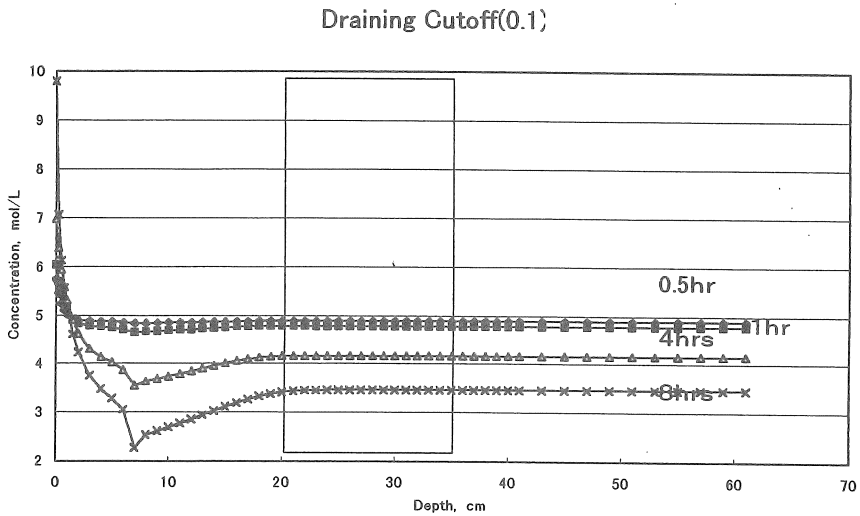


Fig.6 Draining cut-off, concentration profile change with time during redistribution

Fig.5 と Fig.6 を比較すると、上向き・下向きフラックスの境界深さの深部への移動は遮断層排水能ありの場合に大きい。また、表層近くから遮断層上面までの塩分濃度低下は(土壌表面では濃度上昇) 遮断層排水能ありで大きい。この濃度低下に対応するように、土壌表面での塩分濃度は排水能ありの場合に高い。この結果は土壌カラムによる実験結果と矛盾しているが、これは初期条件として $t = 0$ で遮断層まで含めて飽和していたが、土壌カラム実験では不飽和であったと考えられるので遮断層より上層でシミュレーションよりも下方浸透が大きかったものと推定される。

1. 4 まとめ

シミュレーションに利用した HYDRUS プログラムの汎用性、簡便さは特筆すべきもので、今後の飽和・不飽和の水分・塩分移動を扱う場合に利用価値の高いものであった。

今回のシミュレーション結果をまとめると次のとおりである。下方浸透時には遮断層の排水能はそれより上層の塩分除去促進した。上方再分布時は上向フラックス部でごく表層を除き塩分除去促進した。また下向きフラックス部では塩分濃度分布に排水性の有無は大きな影響を及ぼさなかった。以上の結果は昨年度の土壌カラム実験結果と同傾向であった。しかし、土壌表面では排水能ありで高濃度となり、カラム実験結果とは異なっていた。これは、シミュレーションの初期条件がカラム実験の条件と異なっていたためであると考えられた。

2. 太陽電池ポンプによる揚水・灌漑システムに関する実験

2. 1 実験目的

商用電源が確保できない農地においても太陽電池を用いることにより、電気モータ駆動ポンプによる揚水・灌漑システムを構築することが可能である。太陽電池ポンプは豊富な日射量がえられるタイ国北部では有効な灌漑手段であり、今回の実験ではその性能の確認とシステム設計に必要な設備諸元を決定するための基礎データ収集を目的とした。

2. 2 太陽電池パネルの選定

実験地の地理的条件および気象データから設置する太陽電池の寸法を決定するために、次のような条件でシミュレーションによる検討を行った。

実験地はタイ国北部ピサヌロック市に位置するナレスワン大学で、北緯 $16^{\circ} 44'$ 、東経 $100^{\circ} 11'$ である。ピサヌロック市の気象データは入手できなかったため、次のような方法で、日射量を推定した。また、太陽電池を傾斜させて設置することを想定して、傾斜面の日射量を算出した。

直達日射の計算では、Bouguer の式(1)、天空日射では Berlage の式(2)を用いた。

$$I = I_0 A^{\csc h} \quad (1)$$

$$H_d = \frac{1}{2} I_0 \sinh \frac{1-A^{\csc h}}{1-1.4 \log A} \quad (2)$$

太陽電池を傾斜させると反射日射も考慮すべきであるが、日射量としては微量であることから、今回のシミュレーションでは反射日射を入れない式(3)により計算した。

$$H_T = I \cos \theta + H_d \phi_s \quad (3)$$

ここで、 I_0 : 大気外日射強度、 A : 大気透過率、 h : 太陽高度、 H_T : 傾斜面日射量、 H_d : 天空日射、 θ : 太陽の入射角、 ϕ_s : 傾斜面の形態係数である。シミュレーションで得られた晴天日の推定傾斜面日射量を Fig. 7 に、また最近 10 ヶ年の平均年降雨量のデータを Fig. 8 に示した。

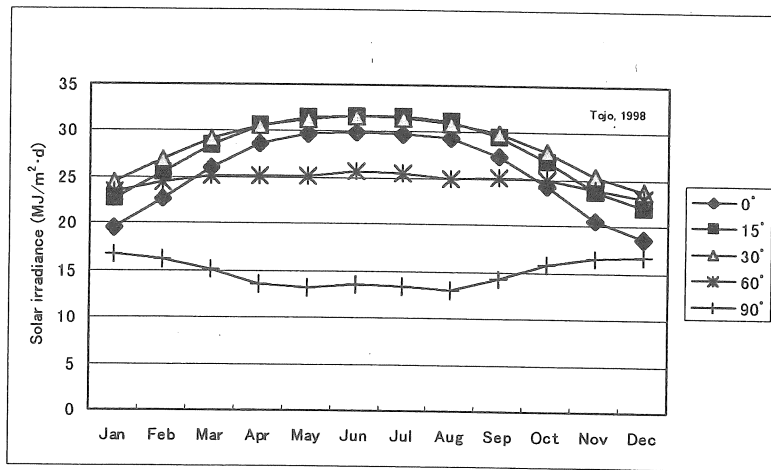


Fig. 7 Solar irradiation into tilted plane in fine day

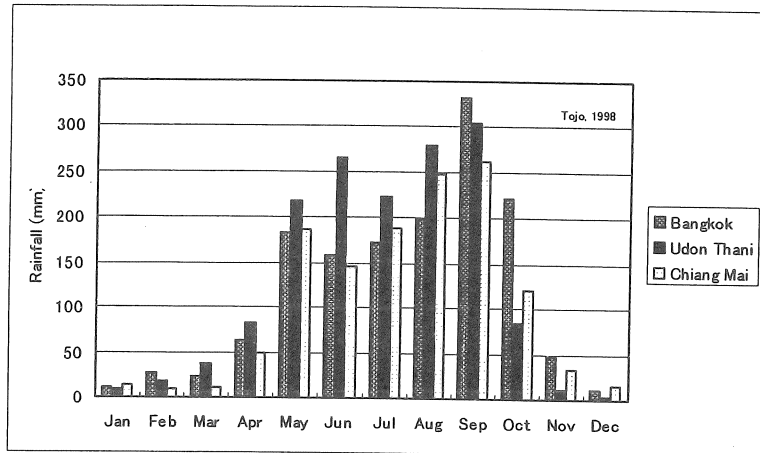


Fig. 8 Rainfall at three cities in Thailand

晴天日の日射量でみると、1月では東京の1.6倍、7月では1.1倍程度であったが、降雨量の少ない11月から3月の日射量を基準にして、太陽電池の大きさを選択することとした。

2.3 太陽電池式揚水ポンプの性能実験

2.3.1 実験方法

ナレスワン大学の構内に設けた試験圃場に太陽電池と揚水ポンプを設置して、入射日射量と太陽電池出力の関係、揚水量の日変化などに関して実験を行った。試験圃場は周囲を掘削して貯水池とし、掘削した土を盛り上げて斜面とした傾斜圃場で、周囲には大きな建物はなく終日十分な日射が得られる環境となっている。

使用した太陽電池モジュール（昭和シェル石油，GL130）はシリコン単結晶セルを用いたEVA充填のストレートタイプであり、形状は縦0.33m、横1.08m、面積0.356m²で、質量は約5kgである。実験では2枚のパネルを方位角0°、傾斜角17°で設置し、2枚を直列に接続した。供試した揚水ポンプ（SHURFLO，9300）は24V直流モータによる駆動で、ダイヤフラム式である。ポンプの排水口に長さ20m、口径1/2インチ（13mm）のホースを接続し、ホース先端をポンプ取水池面から3.84mの高さに固定した。ポンプの排出口とホースの間に水量調節用のバルブ、流量計（カロリック，ND10）、水圧計（共和電業，PVD-A5）を設け、計量データは電圧値に変換して、データロガーに収録した。日射量についてはフォトダイオード式日射計（英弘精機，ML-020V）を用いて水平面全天日射量の測定を行い、測定データは30秒間隔で記録した。

実験の測定は雨季の8月と乾季の3月に行った。3月の実験では8月と同様の位置にホースを設定できなかったため、ホース中央部を取水池面から高さ1.68mに取り付け、先端を取水池面上に固定した。

2.3.2 実験結果

8月および3月の実験とも、太陽電池とポンプは良好に作動し、選択された寸法の太陽電池パネルはポンプの駆動に十分な電力を供給できることが確認された。ポンプの揚水高さを十分大きくできなかったが、ポンプ排出口に設けたバルブの調節によってポンプの揚水圧力と流量の関係を測定したところ、Fig.9に示すような結果が得られた。0.8kW/m²の日射強度に対して、0.3MPa程度は得られることから、このシステムでは約30メートルの揚程が可能と確認された。

8月の実験における日射強度と太陽電池出力の日変化の測定例をFig.10に、ポンプの揚水流量の日変化をFig.11に示した。8月は雨季のため、日射も不連続であり、太陽電池出力も不安定なものとなった。日射量の変化に応じて、電池出力が低下し、ポンプの作動が中断する場合があった。図示した8月14日の最大日射強度は1.1kW/m²、水平面全

天日射量は $11.2 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ に対して、太陽電池の最大出力は 82 W 、1日の発電量は 2.03 MJ/d 、揚水量は 3.19 m^3 であった。ただし、最大出力は瞬間値であり、午前6時から午後7時までの平均出力は 43.3 W となった。

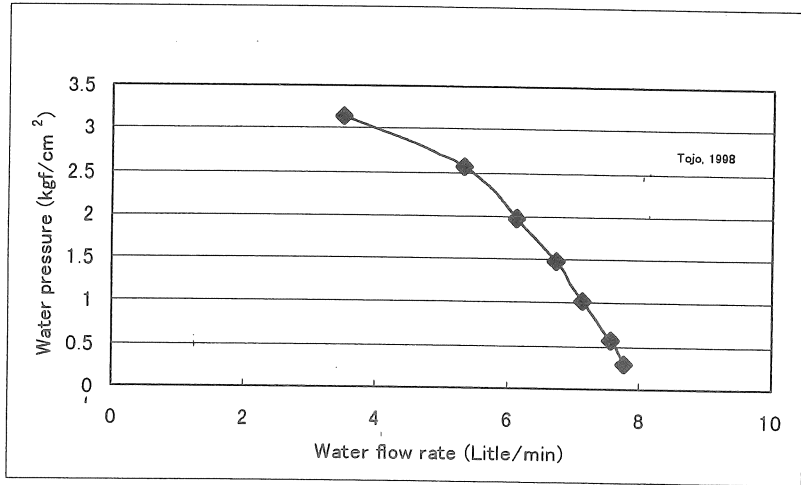


Fig.9 Relation between water flow rate and water pressure of water pump at solar radiation of 0.8 kW/m^2

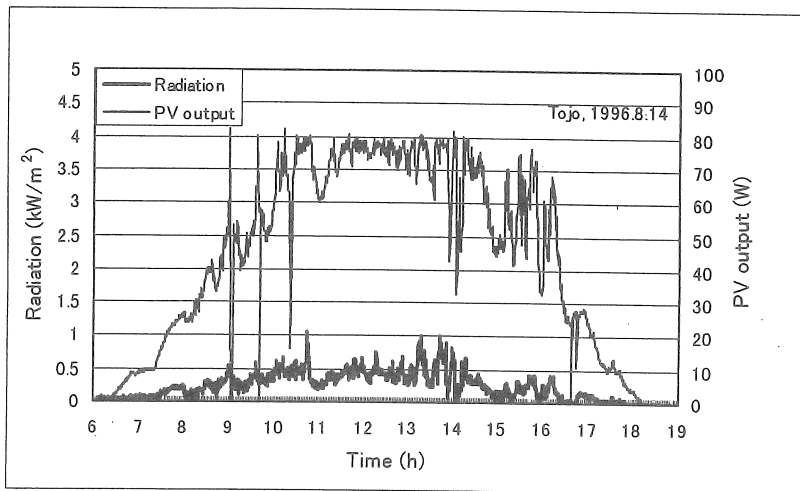


Fig.10 Hourly change of solar radiation and output of photovoltaic panel in August.

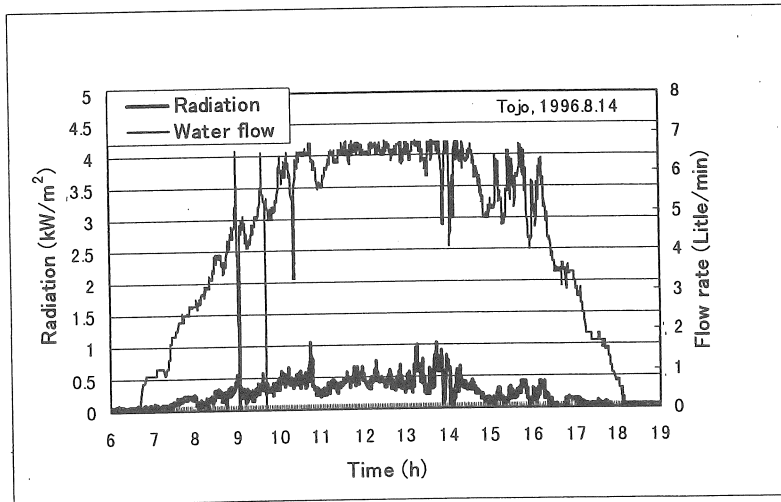


Fig.11 Hourly change of solar radiation and water flow rate of water pump in August

3月の実験における日射強度と太陽電池出力の日変化の測定例を Fig.12 に、ポンプの揚水流量の日変化を Fig.13 に示した。3月の実験では終日快晴で、連続した日射が得られ、太陽電池の出力も安定したものとなった。この日の最大日射強度は 0.9 kW/m^2 、水平面全天日射量は $22.6 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ 、太陽電池最大出力は 55 W 、1日の発電量は 1.74 MJ/d 、揚水量は 2.56 m^3 であった。揚水量が8月の例より少ないのは、ホース中央部の折れ曲がりにより圧力損が生じたためである。

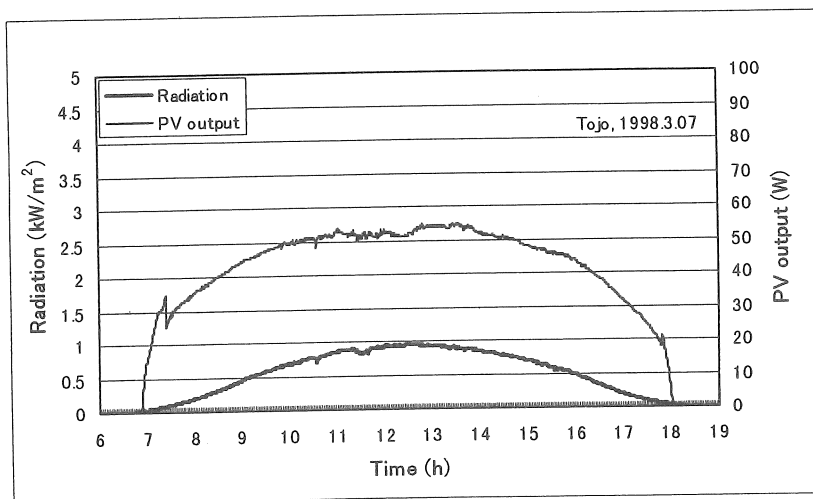


Fig.12 Hourly change of solar radiation and output of photovoltaic panel in March

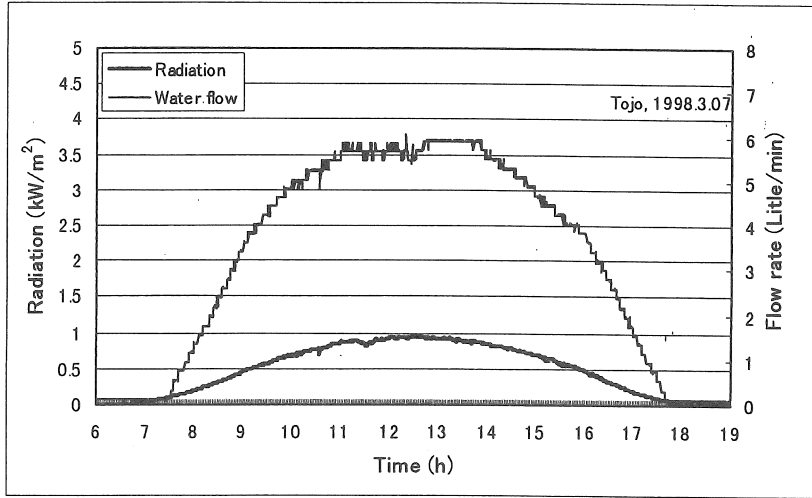


Fig.13 Hourly change of solar radiation and water flow rate of water pump in March

太陽電池の平均発電効率は 12.5 %であり、 0.36 m^2 の太陽電池パネルを使い、3 m 程度の揚程であれば 1 日当たり 2.5 m^3 の揚水が可能であることがわかった。

2. 4 考察およびまとめ

選択したシステム構成によって、所期の揚水量を確保できることが確認された。特に、乾季は日射が安定しており、経時的な変動が少ないので、今回のような太陽電池とポンプを直結したシステムで問題はないが、雨季では雲の動きによって電池出力が大きく左右されることから、安定したシステムの作動を確保するためには太陽電池とポンプの間に蓄電池などを入れたシステム構成にすることが望まれる。

現場での利用を考えると、揚程が不足することも予測されるが、高揚程の場合にはこのようなシステムを何段かつなぎ合わせることによって解決できるものと考えられる。また、取水池の用水は混濁しやすく土砂を含有する水を揚水することになるが、このような濁水の揚水では負荷が大きくなるので、今回程度の余裕ある太陽電池パネル面積の選択が必要である。

計測手法に関して、今回使用した日射計はフォトダイオード式のものであるが、日射強度と太陽電池出力が対応していない時間帯もあることから、日射計の感応波長域と太陽電池の波長域がずれていることが考えられる。したがって、太陽電池の波長域に対応する日射計を用いて日射量を測定する必要があり、従来得られている日射量データの見直しも今後の課題である。

今回は太陽電池パネルの傾斜角を変えて実験できなかったため、角度による発電量の変化についてデータを得ることはできなかった。シミュレーションによると乾季は傾斜角による影響が大きくなると予測されるので、これに関する実験が必要である。

必要リーチング水量および灌漑水量と本揚水システムとの関連については、さらに基礎条件を集積して検討を進める必要がある。

3. セラミック利用による塩分濃度管理

熱帯地方での塩類土壌地帯において、農業を行うに当たっては、まずは塩類土壌中の塩分を除去あるいは希釈しなければならない。この際に重要な要因は、土性と土壌構造に対して、土壌水分の塩分濃度の差が問題となる。土壌中を移動する水分は、上層から下層への移動では重力と液濃度により、逆に上昇の原動力は土壌の毛管力と地表面からの蒸発力にある。そこで、セラミックを利用して、雨水あるいは灌漑水の淡水を常時下方に向け、下部に存在する比重の高い塩分水の上昇を規制しようとする節水を考慮したリーチング灌漑方法が考えられる。

本年度はセラミックの試作と土性との関連などについて検討を行ったので、今後この方向に沿った研究を進めたい。

参考文献

- 1) 穴瀬眞，藍房和，杉修一，中村友紀，福村一成．1997．塩類土壌地域の農業生産環境の改良に関する研究，（財）ソルトサイエンス研究財団平成8年度助成研究報告書
- 2) ゲイロン，S.キャンベル（中野政詩，東山勇 監訳）．1987．パソコンで学ぶ土の物理－自然環境管理の基礎－．鹿島出版会
- 3) 日本太陽エネルギー学会．1980．太陽エネルギーの基礎と応用．オーム社
- 4) Simunek, J.. 1994. Hydrus2D Users Manual. U.S. Salinity Laboratory, USDA
- 5) 戸川隼人．1981．マイコンによる有限要素法解析．培風館
- 6) van Genuchten, P.J.Wirenga. 1974. Simulation of one-dimensional solute transfer in porous media. New Mexico Agricultural Experiment Station Bulletin #628, Las Cruces.
- 7) 保原充，大宮司久明．1992．数値流体力学－基礎と応用．東京大学出版会

STUDIES ON IRRIGATION METHODS AND SALINIZATION CONTROL IN ZONES WITH SALT ACCUMULATION SOILS

Fusakazu Ai*, Makoto Anase**, Kazunari Fukumura***, Seishu Tojo***,
Machito Mihara*, Michihiro Hara****, Takahiro Saito*****

* Tokyo University of Agriculture
** The Research Institute at Tokyo University of Agriculture
*** Tokyo University of Agriculture and Technology,
**** Iwate University
***** Utsunomiya University

Summary

Prevention of soil salinization in the arid and semi-arid zones is an indispensable measure for successive farm production. Basically, suitable irrigation methods and salinization control techniques in zones with salt accumulation soils were assessed through the following three ways: a) using computer simulation for understanding of salt concentration changes in soil; b) conducting a feasibility study on the utilization of irrigation system with solar battery-powered pumps through appraising its applicable area; c) estimation of efficiency and applicability of ceramic irrigation as a method for control of soil salinity through prevention or removal of salt accumulation in soil layers.

In order to assess salt concentration changes in soil, salt transport simulation system, HYDRUS, developed in U.S. Salinity Laboratory was employed to investigate the improvement of farm production conditions in zones with soil salinization. Simulation of soil moisture and solute variation was used to successfully conduct experiments in support of simulation results that illustrated the effect of soil layers with disturbed capillarity, especially the effect of layers with and without drainage faculty, on soil leaching. One factor analysis on the simulation results, which in order to emphasize on the effect of soil layers on salinity of soil used loam with the assumption of sand presence in its layers, was conducted. Further, validation of soil layers' simulation results was conducted. It illustrated that salt content in soil changed depending of availability or absence of drainage faculty of soil layers as moisture moved downwards after irrigation or rainfalls and upwards with evaporation. Albeit, the simulation results of subsoil irrigation showed that this type of irrigation could be effectively employed for salt content control in the plant root zone, yet field experiments are necessary for validation of the results.

It was confirmed through experiments with the irrigation system with solar battery powered pumps that water content can be preserved depending on the structure of the system. Due to stable sun light with small variation during the dry season the solar battery powered pump operated without difficulty. During the rainy season, however, depending on the situation of clouds the batteries' output varied widely, suggesting that for maintaining a high reliability of the system it is necessary to install storage batteries between the solar batteries and pumps. For field application of the system where high elevation of water is required—the insufficiency of pumping capacity is taken into consideration—a step-by-step system would be a solution to the problem. Further, it often comes to pump water from ponds where the water is easily getting muddy mixed with sand and clay—a burden for pumping requiring proper selection of solar batteries panel area assuring enough reserve capacity.