

助成番号 9903

塩類を含んだ水を利用するための太陽熱利用栽培方式に関する研究

助成研究者：玉木 浩二（東京農業大学 地域環境科学部）
共同研究者：穴瀬 真（東京農業大学 地球資源環境研究センター）
藍 房和（東京農業大学 地域環境科学部）
杉 修一（タイ国 Naresuan大学 農学部）
川上 昭太郎（東京農業大学 地域環境科学部）
樹野 淳也（東京農業大学 地域環境科学部）
大石 常夫（東京農業大学大学院 農学研究科）

本研究では、タイ東北部のような塩類土壌地域において、太陽エネルギーによる農業用水を取得する方法として、太陽熱蒸留システムに着目し研究を行った。太陽熱蒸留システムでは、蒸発効率を向上させるためには、蒸発部と凝縮部を分離し温度差を大きくすることが有効であると推測し、蒸発部と凝縮部を分離させたシステムを開発した。このシステムでは、蒸発部で発生した湿り空気を有効に利用するため、凝縮部である土壌に直接送気し凝縮させる。この凝縮方法を水蒸気灌漑と呼ぶこととした。

現地調査、及びプロトタイプによる基礎実験を行い、次のような結論を得た。

(1)凝縮装置の実験より、凝縮量は湿り空気と凝縮槽との温度差に関係し指数関数的に増加することが認められた。

(2)湿り空気と凝縮部の温度差を大きく保つことが重要であり、そのためには、湿り空気の温度を上げることや、凝縮部の温度を下げる事が考えられる。湿り空気の温度を上げるためには、熱損失を極力少なくする工夫や集熱器などと組み合わせることが有効と思われる。また、凝縮部の温度を下げるためには太陽電池駆動のペルチェ素子による冷却や、土壌深部の低熱源の利用が有効と思われる。

(3)以上のような問題点を解決し得れば、塩類を多量に含んだ溜池水の脱塩が効率よく行うことができ、農業への有効利用が図れるであろう。さらに、地下水位を制御する太陽電池駆動の排水ポンプなどと組み合わせ、さらに塩に強い植生による地上被覆を行うことによりタイ東北部のような塩類土壌の修復に役立つことが期待される。

助成番号 9903

塩類を含んだ水を利用するための太陽熱利用栽培方式に関する研究

助成研究者：玉木 浩二 (東京農業大学 地域環境科学部)
 共同研究者：穴瀬 真 (東京農業大学 地球資源環境研究センター)
 藍 房和 (東京農業大学 地域環境科学部)
 杉 修一 (タイ国 Naresuan大学 農学部)
 川上 昭太郎 (東京農業大学 地域環境科学部)
 樹野 淳也 (東京農業大学 地域環境科学部)
 大石 常夫 (東京農業大学大学院農学研究科)

1 はじめに

タイ国東北部は、深刻な塩害に悩まされている。この地方の森林面積は、約30年前には面積の約42%近くが森林であったが、現在その面積は約12%程度にまで減少してきている¹⁾。そのため、水収支のバランスが崩壊し塩性土壌問題を引き起こした。

一方、タイ国東北部の地形はそのほとんどが丘陵と平原であり、さらに、近年の森林伐採により水資源の涵養機能が失われつつある。また、気候は熱帯サバンナ気候帯に属し雨季・乾期が明確に分かれている。このように、タイ東北部は地形的・構造的に水資源は極めて乏しい状況である。そこで、水源としての溜池の有用性が議論されているが、土壌と地下水の塩分が溜池内に混入するため、水質の問題から十分にその水資源を利用することができない。そこで、本研究の目的は、塩類集積の進んだ溜池の水や地下水を有効な水資源へ変換するための手法を探ることである。特に、自然エネルギー利用の観点から、太陽エネルギーを利用した脱塩に着目し研究を行った。

2 分離型太陽熱蒸留器

2.1 脱塩技術の検討

塩分を含んだ水からの脱塩技術、特に淡水化技術は海水の淡水化に始まり、工業分野で用いる純水の生成や廃水の処理技術として発展してきた。

本研究では、農村地域での農業での水利用を想定しており、低コストであること、メンテナンスが簡単であること、電気エネルギーが十分に得られない場所であること、耐久性が求められることといった条件から太陽熱蒸発法について検討を進めることにした。

最も一般的な太陽熱蒸留法は、図1に示すような水盤型太陽熱蒸留法である。原理は次のように非常に簡単なものである。装置の側部及び底部は断熱材で囲み、上部を透明のガラスまたはプラスチック部材で覆う。装置内部に塩水を入れ、太陽熱により蒸発が起こり、装置内部と外部との温度差によりガラス面で凝縮させ集水する方式である。この手法には次のような問題点がある。

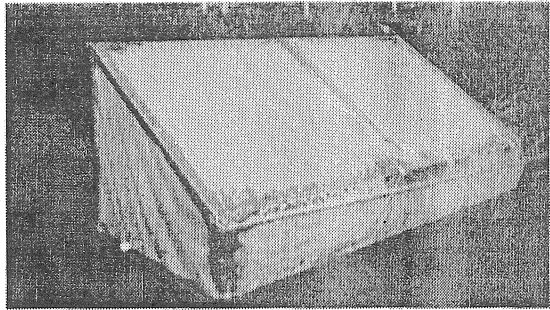


図1：水盤型太陽熱蒸留法

1. 上部ガラス面で凝縮した水滴による太陽光の透過の遮断
2. 凝縮した水の再蒸発

これらは、エネルギー密度の低い太陽エネルギーを利用するためには、解決しなければならない問題である。そこで、ガラス面の水滴による太陽光の遮断の問題に対しては受光部分をワイパーにより凝縮水を除去し続けた結果、その蒸留性能が著しく向上したという報告がある²⁾。凝縮水の再蒸発については、装置内が飽和状態に陥ると、凝縮には適した状態であるが、蒸発の促進が損なわれる状態のことを指している。簡単にいえば温度を高く保ちたい蒸発部と、温度を低くしたい凝縮部とが混在している。水盤型太陽熱蒸留器の性能を向上させるためには、この相反する条件を同時に達成しなければならない。そこで、この問題を解決するために、本研究では、蒸発部と凝縮部を分離する方法の検討を行った。

2.2 分離型太陽熱蒸留器の提案

本研究の最終目的は、太陽熱蒸留の農業への利用である。これまでにも、太陽熱蒸留器を農業に利用した例が幾つかある。代表的なものとして、蒸留装置とポンプを組み合わせ灌漑に利用したケースや、温室と蒸留装置を組み合わせた例がある。これらの貯水設備や給水設備、灌漑設備などは大規模になり、システムが大型化かつ複雑になる。他方で、開発途上国の塩害地における簡易灌漑方法の一つに川の上部に苗床を設置する手法がある³⁾。これは、植物の水分供給に川から蒸発した水蒸気を利用しており、太陽熱蒸留器の一種とみなすことができる。この手法のように水蒸気の形で扱えば、その移動のための取り扱い

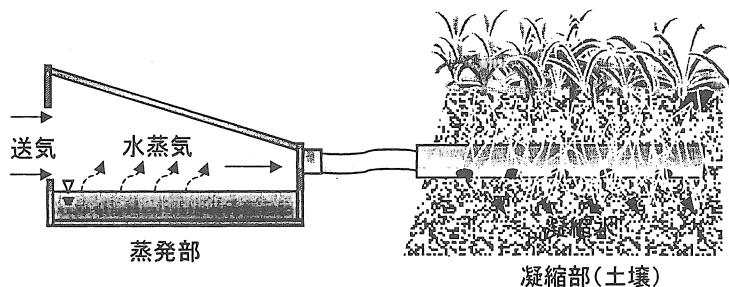


図2：分離型太陽熱蒸留装置のモデル

が容易であることが分かる。この場合は垂直方向の移動であるが、何らかの手法で送気することにより水平方向への移動も十分可能である。そこで、図2に示すような分離型太陽熱蒸留装置のモデルを考案した。蒸発部において発生した水蒸気を、凝縮部である土壤に送気し、土壤中で水蒸気の凝縮を行い、植物への水分供給を行うものである。この手法の利点として、特別な凝縮装置や給水・灌漑装置が必要なくシステムを簡素化できること、直接土壤中で凝縮するための効率が向上しうる可能性があることが挙げられる。ここで、提案した水蒸気を土壤に送気させ灌漑を行う手法を水蒸気灌漑法と呼ぶこととした。

3 実験

3.1 実験装置

水蒸気灌漑システムのモデルを基に実験装置を製作した。製作した実験装置は室内実験用であり、恒温槽を利用して水温を一定に保ち蒸発を行う。実験装置の概略を図3に、製作した実験装置を図4に示す。実験装置は、蒸発部、凝縮部、連結ダクトで構成される。蒸発部はスチロールで製作し、水蒸気を凝縮部に送気できるようにファンが取り付けられている。このファンは電圧を調整することにより回転数が調整できる。蒸発部内の水の温度が一定になるように恒温槽を接続した。凝縮部はスチロールで土壤槽を製作し標準砂を敷き詰めた。使用した標準砂は豊浦標準砂で、真比重2.66、三相分析結果は、固相、液相、気相の割合が、51.9%：0.6%：47.5%であった。なお、研究対象地としているタイ東北部の大部分の土壤が砂質の層を母体とした砂質ロームであり、その主な成分は砂：72.5%、シルト：14.5%、粘土：13.0%となっていた。このうち、標準砂と同じ粒形である0.10～0.30mmの砂は全体の約40%と最も多い。凝縮槽内での水の凝縮量を計測するために、凝縮槽を電子天秤の上に据え置いた。蒸発部と凝縮部はポリエチレン製の連結ダクトで接続した。

このシステムの稼働を考えた場合、様々な要因

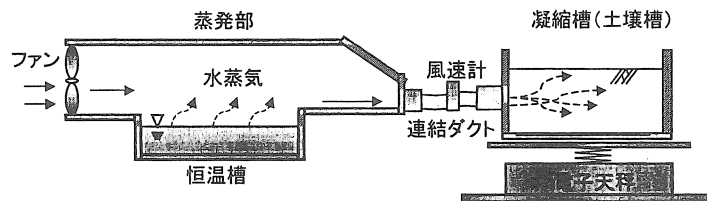


図3：実験装置の概略図

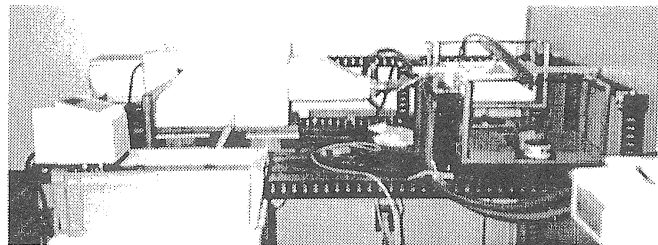


図4：実験装置

が土壤中の凝縮に影響を及ぼすと考えられる。そこで、研究の第一段階として水蒸気送気量が土壤中の凝縮量に及ぼす影響を知るために、製作した実験装置を用いて実験を行った。

3.2 実験方法

実験の流れを次に示す。

蒸発器に取り付けられているファンにより一定の風速を発生させ、蒸発器内で加湿された空気を土壤槽に送気した。送気量を段階的に設定し、その際の凝縮量の変化について調査を行った。本実験では、送気量を3段階に変えてその傾向を調べた。設定した風速は0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/sである。風速の計測は、連結ダクトに熱線風速計を取り付けを行った。ここで、土壤槽の体積とダクトの断面積は、それぞれ0.002m³, 約0.001m²であるので、各風速における風量は0.2m/sの時0.10m³/s, 0.4m/sの時0.20m³/s, 0.6m/sの時0.31m³/sと算出できる。蒸発器の水は恒温槽の水を循環させているため、蒸発器内の水温は恒温槽の設定温度とみなし、その設定を40℃とした。加湿空気温度および土壤温度の計測を行った。実験条件は室内温・湿度20±1℃, 40±2%であった。

4 実験結果

4.1 実験結果

各風速における凝縮量の推移を図5に示す。この図より、送気量が多い場合は、凝縮量が多いことが分かる。送気量が多くなるにともない、土壤槽に送気される加湿空気に含まれる水蒸気量が多くなるためだと考えられる。そこで、以下の式で加湿された水蒸気量Gwを算出する。

$$G_w = G_{w2} - G_{w1} \\ = x_2 \times G_{a2} - x_1 \times G_{a1}$$

ここで、x₁: 吸入空気絶対湿度, G_{w1}: 吸入空気中の水蒸気質量, x₂: 加湿空気絶対湿度, G_{w2}: 排出空気中の水蒸気質量である。各風速における水蒸気量は、0.2m/sの時73.4g, 0.4m/sの時124.1g, 0.6m/sの197.2gと算出できる。

また、実験開始から90分までは、凝縮量の急激な増加が見られるが、それ以降は凝縮が進んでいないことが分

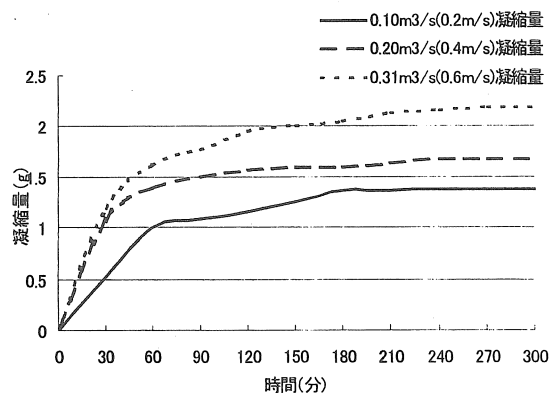


図5：各風速における凝縮量

かる。このことは、送気量に関わらず同じ結果である。図5, 6, 7は各送気量における加湿空気と土壌槽の温度の推移を示したグラフである。

これらのグラフより、時間の経過に伴い、加湿空気が土壌槽に送気され、土壌の温度が上がり、温度差が小さくなっていることがわかる。従って、この温度差の減少が、凝縮に影響を及ぼしたと推測される。

次に、加湿空気と土壌の温度差と凝縮量の相関について議論を行う。凝縮量、温度差に着目し送気量別に表した結果が図8, 9, 10である。図から解るように指数関数に近似すると、高い相関関係があることがわかる。このことから、温度差をいかに高く保つかが重要であるといえる。

4.2 考察

今回の実験で得られた大きな成果の一つとして、加湿空気と土壌の温度差と土壌凝縮量の相関関係の存在である。本実験は室内実験であり、実際の現地圃場の土壌成分、土壌中の温・湿度と条件が実験条件と異なる点も多い。しかし、温度差と土壌関係の相関関係は、現地における水蒸気灌漑システムの稼働する場合の指針と成りうる。

加湿空気と土壌の温度差が低い場合は、風量の違いの影響は少ない。しかし、温度差が大きくなると、風量の違いは凝縮量に大きく影響している。このことから、このシステムの稼働には、風量を大きくするよりも、できるだけ

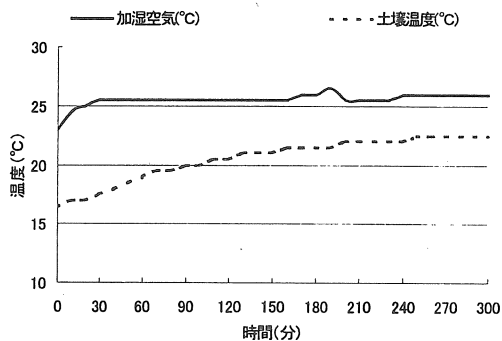


図5：加湿空気・土壌温度変化 0.10m³/s (0.2m/s)

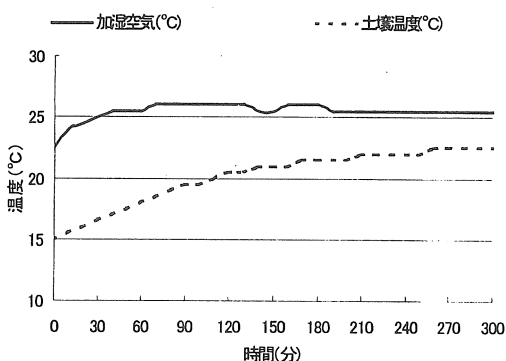


図6：加湿空気・土壌温度 0.20m³/s (0.4m/s)

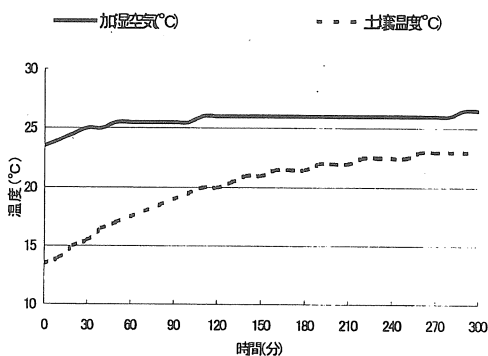


図7：加湿空気・土壌温度変化 0.31m³/s(0.6m/s)

温度差を保つことが有効である。ここで、温度差を大きくするには2つの考え方があ。まず加湿空気の温度を外気より如何に高くするかということと、凝縮部の温度を如何に低くするかということである。

湿り空気の温度を高くする方法は、装置の断熱を良くして熱効率を上げることがある。それ以外に集熱器と組み合わせることにより、装置への受熱量を多くする方法も考えられる。集熱器は平板型などの構造の簡単なものであれば、コストもそれ程高くないと思われる。

凝縮部の温度を下げる方法については、外気温より低い低熱源として考えられるのが土壌の深部の熱である。図11は1999年12月27日14時に研究対象区であるタイ東部コンケン郊外で測定した土壌の深さと温度との関係を示したものである。外気温が26℃前後であるのに対し、地表面より30cmの深さでは外気より6℃程度低くなっている。この地温を利用した場合を仮定すると、加湿空気は気温以下にならないことから、最低でも5℃の温度差は確保できる。

この値を温度差の変化がない場合を想定して今回の実験結果に当てはめてみる。実験結果は最も凝縮量が多かった0.31m³/s(0.6m/s)を用いる。実験結果で求められた相関式から5時間送気した場合を想定すると約1.5gの凝縮量が得られることと

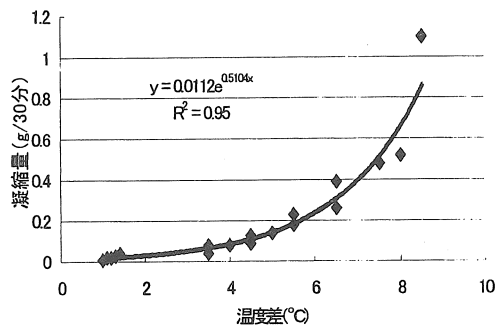


図8：温度差による凝縮量変化 0.10m³/s(0.2m/s)

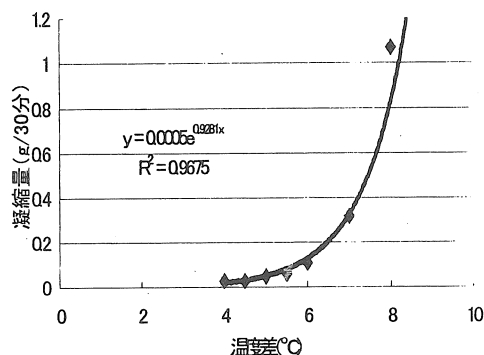


図9：温度差による凝縮量変化 0.20m³/s(0.4m/s)

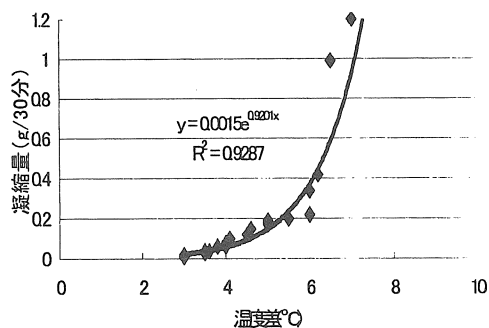


図10：温度差による凝縮量変化 0.31m³/s(0.6m/s)

なる。これを、実験装置の蒸発器の底面積を基準にして、単位面積当たりに変換すると、約30.4gの凝縮量が得られるという予想ができる。

以上のように、水蒸気の凝縮部を低温度帯にすることにより、高温水蒸気との温度差をさらに大きくすることが期待できる。しかし、この場合は、凝縮部の土壤は周り

の土壤の毛管水と遮断されている必要がある。遮断されていない場合には、凝縮水を供給しても下部からの塩類上昇の影響を受け、降雨によるリーチング効果も期待できなくなるであろう。

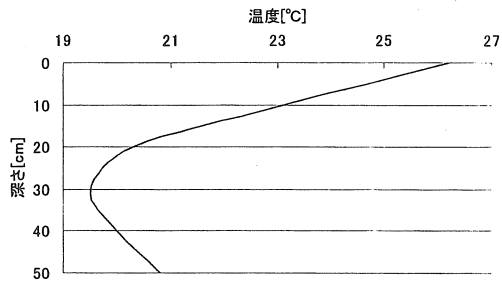


図1 1 : 現地の土壤温度分布

4. 3 脱塩システムの提案

以上の点を踏まえて、太陽熱蒸発法と水蒸気による灌漑のシステムをイメージしたものが図1 2である。このシステムは単に太陽熱を用いた塩水の脱塩にとどまらず、蒸留水による植物の栽培、および地下水制御を組み合わせた、塩類土壤における自然エネルギー利用による脱塩栽培システムである。

タイ東北部の塩類集積発生要因の一つに地下水位の高さがある。高い地下水位を下げるために、日中太陽が出ている間のみ稼動する太陽電池駆動の排水ポンプを設置して地下水を汲み上げる。地下水が汲み上げられることにより、地下水位は次第に低下し、毛管水の断ち切りや、リーチング効果が期待できると思われる。また、汲み上げられた地下水は塩分を多く含んでいるので、周りの土壤に悪影響を及ぼさないために一ヶ所の潮遊池に貯められる。池は周りの土壤と隔離し、地下水の侵入などを防ぐ構造とする。

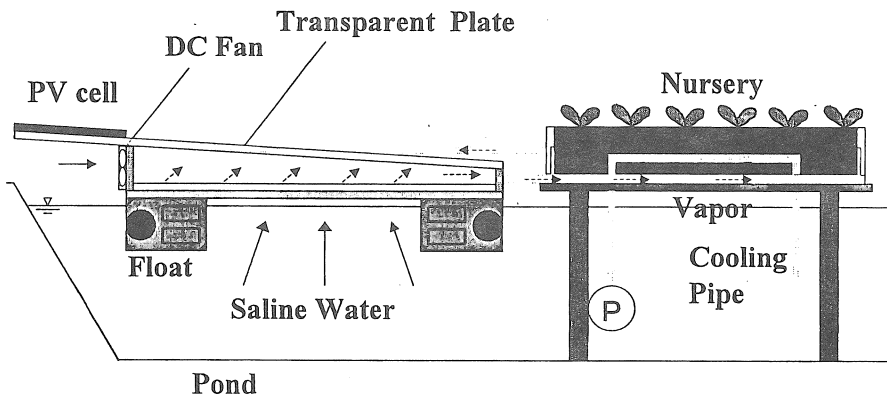


図1 2 : 地下水制御と太陽熱脱塩・灌漑システム

潮遊池の水は水面からの水分蒸発などにより、次第に塩分濃度が高くなっていくことが予想され、そのままの状態では塩分濃度が高くなりすぎ、農業用水としての利用が不可能となってしまい、そこで本研究考案の太陽熱脱塩装置により、池の塩水を脱塩し、利用可能な水資源へと変換することを考える。

この脱塩装置は蒸発部と凝縮部とが分離している。太陽熱脱塩装置で蒸発した水蒸気は凝縮部へと送られるが、凝縮部とは植物を栽培する土壌のことである。水蒸気を直接土壌中で凝縮させることにより凝縮器は必要なく、凝縮した水分は毛管力で移動・供給されるので特別な灌漑システムも必要なくなる。

装置の構造や性能などに多少の課題は残っているものの、改良を重ねていくことにより、タイの塩害地において、図のようなシステムの応用が期待できると考える。

4 結論

太陽熱蒸発法と水蒸気灌漑法を検討し、以下の結論を得た。

(1)実験により、凝縮量は湿り空気と凝縮槽との温度差に関係し、指数関数的に増加することが認められた。

(2)温度差を大きくするには、湿り空気の温度を上げることや、凝縮槽の温度を下げる事が考えられ、湿り空気の温度を上げるためには、熱損失を極力少なくする工夫や、集熱器などと組み合わせることが有効と思われる。また、凝縮槽の温度を下げるためには土壌深部の低熱源の利用が有効と思われる。

(3)今後、湿り空気と凝縮部との温度差を更に大きくする方法や、湿り空気と凝縮部とが十分に接触するための工夫などの改善により、塩類を多量に含んだ溜池水が脱塩され、農業へ有効利用されることが期待できる。さらに、地下水位を制御する太陽電池駆動の排水ポンプと組み合わせたシステムが、将来タイ東北部の塩類土壌の修復に役立つことが期待される。

参考文献

- 1) 岡三徳:タイ東北部における持続的農業技術の確立のための開発研究, 国際農業研究情報, No.5, pp.7, (1997)
- 2) Menguy, G., Benoit, M., Louat, R., Makki, A. and Shwartz, A., Group: d'Etudes Thermique et Solaires: Université Claude Bernard, 43 Bd (1981)
- 3) 山田伴次郎: 草の根農業技術ハンドブック, (社)国際農林業協力協会, pp107

Study on Cultivation Way with Desalination of the Brackish Water

Koji TAMAKI*, Makoto ANASE**, Fusakazu AI*, Shuichi SUGI***,
Shotaro KAWAKAMI*, Junya TATSUNO* and Tsuneo OISHI****

*Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

**Nodai Research Institute, Tokyo University of Agriculture

***Faculty of Agriculture, Natural Resource and Environment, Naresuan University, Thailand

****Graduate school, Tokyo University of Agriculture

Summary

Because of deforestation, ecosystem has been devastated in Northeast of Thailand. More than 1.5million ha of area is now affected by salt accumulation. In such area, water in ponds and groundwater are also including much salt, and there are many difficulties to use such water for agriculture.

In this study, methods for effective utilization of the water in ponds and groundwater on saline land such as Northeast of Thailand were discussed.

For desalination of the brackish water, a lot of ways as solar distillation methods were introduced. In this research, a new type of solar still was proposed. The system is separated into two parts, one is evaporator and another is condenser, which forced to make vapor air condensed directly into the soil. This forced condensing process is called as the "Vapor irrigation".

Some experiments of evaporation and condensation were carried out to evaluate the performance of the new type of solar still. In forced condensing process, it is important to increase the difference of temperature between water vapor and condensing surface. For that purpose, it might be effective to decrease heat losses of devices, to use heat collectors for increasing temperature of water vapor and to use the cooling devices like peltier element for decreasing temperature of condensing surface.

With combining with PV drainage pump for groundwater control, this study will be useful for recovering vegetation on the saline land as Northeast of Thailand.