

灌漑管理実効評価モデル (IMPAM) の開発と河套灌区への適用

総合地球環境学研究所 星川圭介, 久米崇, 渡辺紹裕

1. はじめに

黄河からの取水量は1950年代から急速な増加を続け、1990年代には流域水資源量の80%前後が消費されるに至った。下流域での断流をはじめとする深刻な水不足が生じている状況下において、灌漑農業における水消費は流域消費水量の90%以上を占め、さらにその半分以上が施設やその管理の不備に因る「浪費」とされることから、現在、施設整備や節水灌漑手法の開発、管理の適正化等によって、灌漑取水量の削減を目指す動きが進んでいる。

しかしながら水利用の効率化に向けたこれらの取り組みは、現状の水収支構造についての十分な実態把握がないままに行われている状態であり、「浪費」が本当に無効な水利用であるのかについての裏付けや、水利用効率化がもたらす影響に対する事前評価を欠いている。用排水路流量の観測や蒸発散量の測定、還元水量の推定などは行われているが、そうした観測結果等をつなぎ合わせて、地域における水収支構造を定量的に再現できる数値計算モデルが求められている。

こうした背景を受け、筆者らは、灌漑用水が取水口から水路を通じて分配され、蒸発散し、あるいは水路を通じて還元されるまでの過程を再現することを目的としたモデル (IMPAM (灌漑実効評価モデル) : Irrigation Management Performance Assessment Model) を開発した。本報告では、このIMPAMの構造、機能、計算手法を示し、さらに黄河流域河套灌区への適用事例の紹介を通じて、「浪費」が多いとされている同灌区における現状水利用の実態を検証する。

2. 灌漑管理実効評価モデルの開発

2.1 モデルの構造と機能

灌漑が行われている地域の水収支構造を規定する主な因子には、用排水施設 (物理的構造・配置・ネットワーク構造)、土地利用 (の混在度)、土壌 (土性) 分布、地形等の地理的因子、輪番パタン、作付パタン、そのほか、地域に対する割り当て水量といった外部因子などがある。また、水収支を構成する主な要素には、降雨量や取水量などの他に、水路漏水による地下水涵養、排水路への地下水流出、地下水面と地表面間の水分動態、地下水流動、土壌面蒸発、蒸散などがある。水収支構造のモデル化に適した空間範囲は、外部因子を除く諸因子をモデルの中に取り込み、十分な代表性をもって各構成要素を計算できる程度の広がりを持ち、かつ、水収支的にある程度閉じた空間範囲である。具体的には1つの事業地区、あるいは幹線・支線水路の受益地程度がこれに該当すると考えられる。したがってIMPAMも、事業地区から幹線・支線水路の受益地程度 (以下、これを「灌漑地区」と定義し、用いることとする) への適用を念頭に開発した。

地理的因子を取り込んで水収支を計算するには分布型モデルが適しているが、水路や圃場区画の配置といった地理的因子に輪番パタンや作付けパタンといった管理因子がリンクするとい

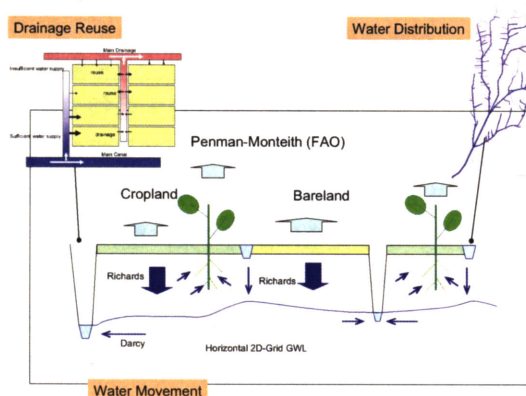


図1 モデルの概念

う灌漑地区の特徴上、単なるグリッドモデルではなく、いわゆる GIS でいう「ポリゴン」や「トポロジ」的な概念を採用することが不可欠である。そのため、IMPAM は、A) 配水計画モジュール、B) 排水再用モジュール、および、C) 土壌・地下水移動準3次元グリッドモデルの3つを組み合わせた構成となった(図1)。A, Bはポリゴン・トポロジ的な手法で灌漑管理を扱い、Cは分布型モデルとして物理的な水移動を計算すると共に、A, Bで計算した結果を載せる土台として機能する。

A. 配水モジュール

主に用水路のネットワーク構造や、各区間の送水容量・漏水量によって規定される、各農地区画への灌漑のタイミングや、用水路各区間の通水期間といった配水パターンを模擬発生させる。仮に作成した配水パターンが、容量を超える送水量を与えるものであれば、矛盾がなくなるまでパターンを変えつつ繰り返し計算する。

B. 排水再用モジュール

灌漑用水が不足する灌漑地区下流では、排水路に浸出した水がしばしば灌漑に用いられる。この反復利用を表現する。

C. 地区内水移動モジュール

地区内の土壌水分・地下水移動を表現。簡略化のため、不飽和領域の水平水移動を無視できるものと考え、飽和領域を水平2次元グリッドモデルで、不飽和領域を鉛直1次元モデルでそれぞれ別個に扱う。鉛直1次元計算および蒸発散の計算は、圃場水収支モデルとして広く使用されている SWAP (van Dan et. al., 1997) の理論に準拠している。

水平2次元水移動計算

水頭 (h) と時間(t), 水平座標 (x, y) の偏微分方程式 (式1) を解いて求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{S_s} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + S \quad \text{---(1)}$$

シンク・ソース項 S は、排水、用水路からの漏水、1次元鉛直計算部とのやり取り(下端ノードフラックス)の和である。

水平方向のグリッドの大きさは、必要とされる解像度、シミュレーションの目的に応じて数十mから1km程度の範囲で任意に設定可能である。

鉛直1次元水移動計算

Richards の偏微分方程式 (式2) を解いて求める。上部境界条件は、灌漑、降水、土壌面蒸発によって与えられる。また、植物根群による吸水は、各ノードのシンク項 (S(h)) として扱われる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S(h) \quad \text{---(2)}$$

蒸発散計算

Penman-Monteith 式により、各グリッドについて、グリッド内が完全に裸地である場合の可能土壌面蒸発量および完全に作物の葉に覆われている場合の可能蒸散量を求め、それらにそれぞれ各グリッドの裸地率、植被率を掛けることにより、可能蒸発量、可能蒸散量を求める。可能蒸散量の算定に必要なパラメータの内、作物高と植被率については入力データとして農地区画一日の時系列表によって与えられる。また群落抵抗については、各作物について固定のパラメータとして与えられる。

実際の蒸発量、蒸散量は土壌の乾燥によって抑制される。IMPAM では、土壌面蒸発抑制は乾燥に

伴う透水係数減少，蒸散抑制については，根群を鉛直方向に上述の鉛直1次元水移動計算と同じ区間に分割し，可能蒸散量を根群各区間に按分して区間可能吸水量とし（式3），それぞれの区間の土壤水分（水頭 h ）に応じた吸水減少係数 α （図2）を計算して区間ごとの実吸水量を求め（式4），その総和として実蒸散量を計算するという方法（Feddes *et al.*, 1978）を採用した。

$$S_p(z) = \frac{dz}{D_{root}} T_p \quad \text{---(3)}$$

$$S_a(z) = \alpha_z S_p(z) \quad \text{---(4)}$$

ここで， T_a ：実蒸散量， D_{root} ：根群深， S_p ： z における最大根吸水量， S_a ：同，実吸水量。

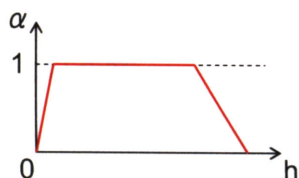


図2 Feddes の関数

3. IMPAM を用いた灌漑管理評価

3.1 目的

河套灌区における現状水収支構造の表現と管理を変更した場合に起こりうる変化についてのシミュレーションを通じて，現行水利用の問題点を検証する。

3.2 対象地区概要

河套灌区は黄河流域最大の灌区であり，地区総面積約110万ha，灌漑面積55万ha。河套灌区の水収支は，（1）塩害，（2）用水路からの大量の漏水，（3）秋季灌漑によって特徴付けられている。（1）は農地と混在する裸地（塩害地）を作り出し，土壤面からの無効な蒸発を増加させていると考えられているほか，土壤塩類洗脱用水需要ももたしている。（2）は幹線から末端まで総延長約8万kmに及ぶ用水系統（劉占強，掲載誌不詳）のほとんどがライニングされていないため，漏水量が取水量に占める割合は約60%にも及ぶ。また（3）は来春の作付時の水を確保するため，収穫後に灌漑を行い，凍結水として土中に水を貯留するものである。

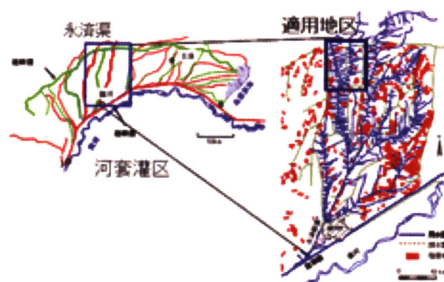


図3 対象地区

実際にIMPAMを適用したのは，河套灌区永濟幹渠下流端受益地約11,000haである（図3）。

3.3 入力データおよびパラメータ

土壤パラメータ

IMPAMはVan Genuchten（1980）の $\theta-h$ 関係式およびMualem（1976）の $K-\theta$ 関係式を用いる。これらの式のパラメータを，愛媛大学の犬上助教授が河套灌区沙壕渠試験場において行った蒸発散観測結果を用いて調整した。

河套灌区の土壤はシルトである（劉，2004）が，地表面に供給された水が速やかに浸透し，数mm

程度の降水の場合、1日～2日後には蒸発が抑制される程度に地表面が乾燥する（図4 E soil (obs) - E water (calc)）ことなどから、河套灌区の土層には比較的大きな間隙（亀裂）が存在し、降水や灌漑直後にDarcy式に則らない極めて早い下方浸透を生じせしめているものと推定された。今回は、こうした水分挙動をモデル中で擬似的に再現するため、シルトと砂質土両方の物理性を併せ持つ土壌を仮定しパラメータを設定した。図4に、その仮定土壌パラメータを用いてIMPAMで計算した結果（E soil (calc)）と観測値との比較を示す。降水後の蒸発量が過大に算出される傾向が見られるが、概ね妥当な値を得ている。更なるパラメータ調整によって降水直後の過大算出を修正することは、鉛直1次元計算の不安定化を招くため難しい。

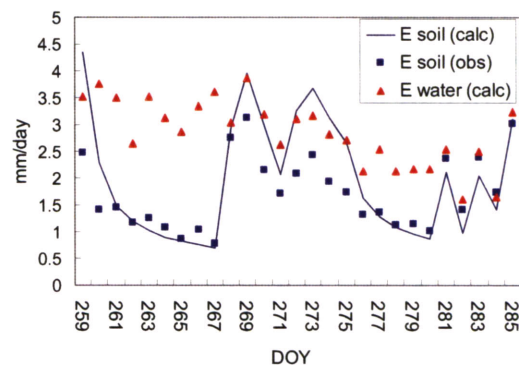


図4 IMPAM 計算値と観測値の比較
(裸地土壌面蒸発)

作物・土地利用

河套灌区における主な作物は小麦、ヒマワリ、トウモロコシであり、今回はこれらの作物がランダムに作付けられていると仮定し、地区内農地区画に割り振った。作付け・収穫時期、作物高、根群深などは、観察や聞き取りなどによった。

また、地区内の農地・裸地の分布は、衛星データの目視判読に基づく。

灌漑・気象

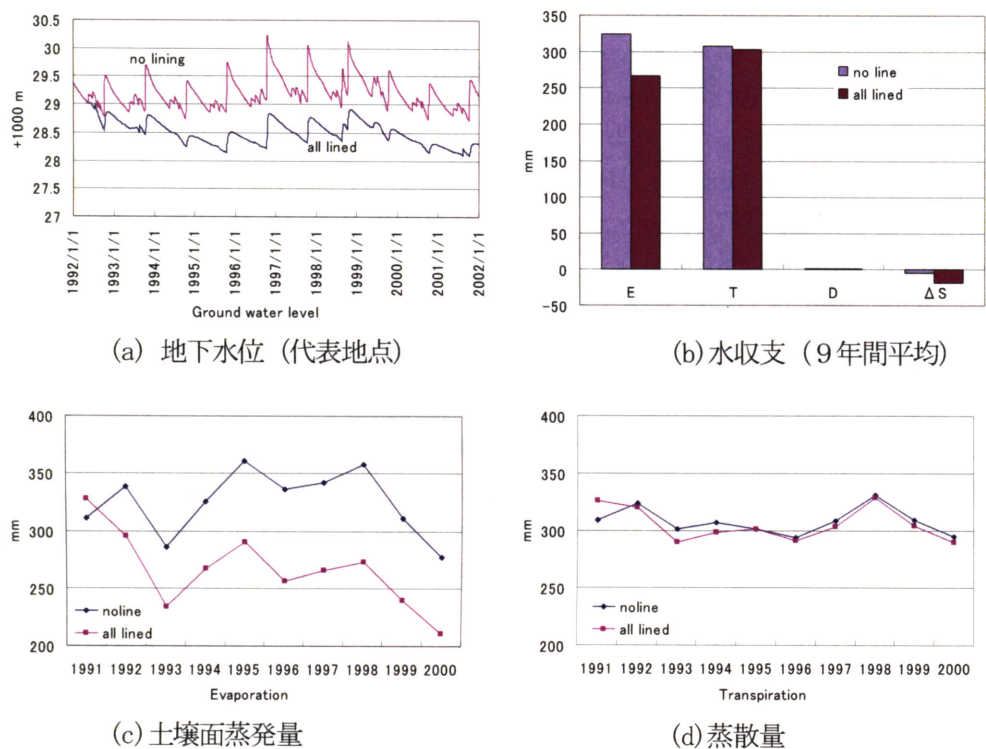
灌漑水量とタイミングは赤江ら（2004）の観測値、気象データは臨河市1991～2000年を用いた。

3.4 適用シナリオ

上述のとおり、河套灌区では取水量の約6割が水路から地下に浸透しているとされ、しばしばこれが水の無効利用の例として挙げられる。したがってここでは、現況の水収支をモデル再現するのに加え、用水路をライニングし、漏水をなくした場合の水収支を、シミュレーションにより予測することとした。対象地域の現状漏水量については、灌区全体よりも少ない値である3割とし、水路区間の漏水率を設定した。

3.5 結果

用水路からの漏水がなくなった場合、収支のバランスが崩れ、地下水位は年々低下（図5a。それに伴って毛管上昇が減少し、土壌面からの蒸発は大幅に減少（図5b, c）する。土壌面からの蒸発は無効な水消費と考えられるから、この点において、水路のライニングは水利用の効率化に効果があるといえる。しかし、量的に過大な灌漑を行って地下水を涵養し、その後、毛管上昇によって作物に水を供給する（大きなピークの間の小ピーク）形態をとる現行の灌漑パターンは、地下水位がある程度高くないと成り立たず、現にモデルでも、ライニングを行った場合蒸散量が現状よりやや少なくなることも示されている（図5b, d）。作物収量と正の相関関係にあるため、このまま地下水位の低下が続き、かつ、現行の灌漑パターンを変えない場合には、特に少雨年において作物の収量が大幅に減少する恐れがある。



(b) E: 土壌面蒸発量, T: 蒸散量, D: 排水量, ΔS : 貯留量 (不飽和+地下水) 変化

図5 現状およびライニング後 (IMPAM 適用結果)

4. まとめ

観測蒸発散量との比較により、土壌パラメータを実験室レベルの測定値ではなく、Richards 式に則らない土壌亀裂流等の速い下方浸透を擬似的に表現できる値に設定する必要があること、あるいは今後の課題として、こうした速い浸透を表現する仕組みを IMPAM の鉛直 1 次元土壌水分モデルに組み込む必要があることが示唆された。

用水路からの漏水は地下水を涵養し、一部、間接的に作物生育に寄与しており、単に「損失」とはいない。ライニングを行うならば、灌漑パターン (輪番パターン) も再設計する必要があり、ライニングにとどまらない大幅なシステムの改変を必要とする可能性がある。したがって、現状の経済・技術・社会等の制約下では、直ちにライニングを行って漏水をなくすべきであるとまでは言えないことが分かった。

引用・参考文献

- 赤江剛夫, 森本一幹, 史海濱, 李延林, 2004, 内蒙古, 河套灌区における塩害地改良法と圃場レベル水分・塩分動態, 寒冷乾燥気候アジアにおける砂漠化進行農地および草原の修復と貧困改善対策 2003 年度報告書
- 劉霞, 2003, 寒冷乾燥地における土壌の凍結・融解に伴う水分・塩分・熱の移動に関する研究, 岐阜大学大学院連合農業研究科博士論文

- 劉占強, 出版年不詳, 河套灌區農作物灌溉與水資源緊缺的矛盾和節水對策, 揭載誌不詳
- Feddes R. A., Kowalik P. J. and Zarandny H. 1978, Simulation of field water use and crop yield, Simulation Monographs, Pudoc. Wageningen. pp.189
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res., 12, 513-522
- Van Dan J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R. A., Kabat P., Van Walsum P.E. V., Groendijk P. and Van Diepen C. A., 1997, Theory of SWAP version 2.0, Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University
- Van Genuchten, M. Th, 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated-saturated flow and transport equations, Adv. Water Resour., 5, 47-55