

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560519

研究課題名（和文）西オーストラリア半乾燥地域での水・塩分収支に関する研究

研究課題名（英文）Study on water and salt balance in a semi-arid area, Western Australia.

研究代表者

下島 栄一（SHIMOJIMA EIICHI）

大同工業大学・工学部・教授

研究者番号：80027276

研究成果の概要：西オーストラリア半乾燥地域にある裸地での水収支や塩分収支の構造解明とそれに関わる蒸発、流出などの諸要素の数量評価を、当該地で、かつて実施した気象・水文観測のデータ解析などを通して行った。特に雨季（6月～9月）では、降雨の流出率は70%、蒸発量は降雨量の10-20%程度となり、その間の塩類（主にNaCl）の年流出量は概略 1kg/m^2 のオーダーと見積もられた。また夏季（乾季）での塩クラストを有する地面直下の乾燥土壌層での蒸発—凝結—土湿の日変化特性などの興味ある知見も得られた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：水文学

1. 研究開始当初の背景

当該研究者は、乾燥・半乾燥地域での蒸発の仕組みや蒸発と塩類集積との相互作用について、実験的、現地観測的また数値計算的に研究を進めてきている。本研究と直接関係する現地観測は、2000年度～2002年度の3年間、科研費の援助の下、西オーストラリア半乾燥地域にあるYalanbee試験地(科学産業研究機構(CSIRO))の小裸地を対象に実施した降雨・蒸発—塩類集積の関係の解明を目指した水文・気象観測である。そこで得られた種々

の観測データの解析が、種々の側面から、例えば、特定日の土壌水分量・塩濃度分布や地中水蒸気密度分布の状況や、日射の地面アルベドの季節変化特性など、実態の把握に努めてきた。

これまでに、年間を通じた収支的観点からの考究、即ち、水収支（降雨—蒸発—浸透—流出）や塩分収支（塩類集積・溶脱（消長）—塩分流出）に着目した課題は殆ど手を付けておらず、未解明のままとなっていた。また蒸発に関与し、熱収支構造に重要な影響を与

える地面での日射反射率の季節変化の特異性の出現を指摘してはいるが、この生起の解明は行われていないなど、十分に観測データが解析されていないのが研究開始当初の状況であった。

2. 研究の目的

水・塩分の収支を考究する上で、一つのキ要素となる蒸発については、当該の地表面には、乾季、塩クラストが形成されており、また当該研究者らが過去に実施した「中国北西部黒河流域における地空相互作用の日中共同観測計画 (HEIFE:1989-1993)」においても丘間地に塩クラストが確認されており、このクラスト構造の複雑さやクラストへの地表風の進入のメカニズムの複雑さなどにより、地中水蒸気の大気への輸送の仕組みは十分には明確にされておらず、従ってこの蒸発過程を解明することも水収支問題を解明する上での基本となるっている。

本研究では、西オーストラリア半乾燥地域の裸地を対象に水文・気象観測されたフィールドを対象に、そこでの年間を通じた水分と塩分の収支とそれに関わる諸現象の解明を、現地データの解析、蒸発実験や数値シミュレーションを通して行おうとするものである。なお、ここで対象とするような、年時間スケールでの水や塩の収支に関する考究は乾燥地水文学にとっても重要な課題であり、また得られた成果は、半乾燥地域で、水資源問題、土地利用の問題を考える上で基本となる情報を与えることになる。

3. 研究の方法

(1) 現地観測データの解析

①水・塩分収支の研究では、上記した現地観測データで、特に雨季を対象に、降雨事象による地下水位の変動量に着目し、対象域外への流出(排水)量を見積もると共に、気象観測データより蒸発量を推定するなどして、水収支の構造を検討する。また、地下水の導電率の観測データと排水量によって、塩分排出量を月単位で評価する。

②夏季を対象に、地中で計測された水蒸気密度データを解析して、地面直下の乾燥土壌層での水蒸気の移動と蒸発・凝結との関係を、塩クラスト層を含めた水蒸気移動モデルを介して検討すると共に、ドーム式蒸発計による実測蒸発強度とモデル計算との比較・検討を行う。

③蒸発の熱源となる日射の関わる地面反射率(アルベド)の季節変化特性の出現の様子を、日射を直達光と散乱光に分類して、

詳細に検討する。

(2) 数値計算的検討

水・熱・塩分移動の大気・土地系の鉛直一次元モデルを構築して、大気での測定値を境界条件に与え、年間を通じたシミュレーションを行い、地中観測値との比較を通して、現地での土壌水や塩分の実態の把握を行う。

(3) 蒸発実験

現地の土壌を用いた土柱に制御した気象条件を与えて蒸発実験を行い、特に土柱表面に形成される塩クラストによる蒸発強度に及ぼす影響などを検討する。

4. 研究成果

(1) 現地観測データの解析

対象とした半乾燥地は西オーストラリアパース市より東に約80kmのBakers HillにあるCSIROのYalanbee試験地であり、そこでの裸地の40m×40mの部分である(図1)。この対象域はE-W方向に3.3%で傾斜している。また表層30-40cmは中央粒径0.55mm、air entry valueが約10cm、field capacityが体積含水率で0.07、透水係数が0.023cm/sの砂質土壌で構成され、その下方はシルトや粘土成分がかなり含まれた透水性の低い地層となっている。

この対象域内の地下では地下水位、導電率、地温などが連続観測され、地下水位は対象域中央部及び域外のNW角部で(それぞれWL1、WL2)、また導電率は対象域中央のEW方向に上・中・下流部(それぞれEC2、EC1、EC3)の深さ30cmの位置で測定した。また地上では、気温、湿度、風速、日射などを2台の自動気象観測タワー(MAWS 101, 201: Vaisala)で連続観測している[下島ら, 2003a]。

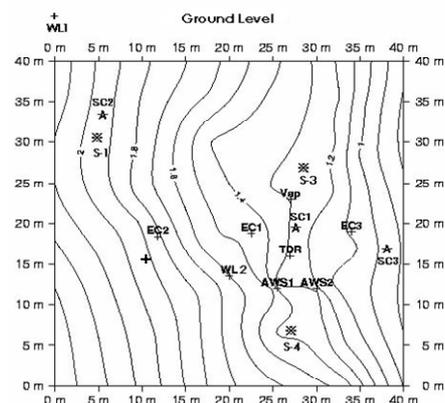


図1 観測地の地形と測点(Nは上方) WL:地下水位、EC:導電率、AWS:気象観測、Vap:地中湿度・温度、S:dome蒸発計、SC:土壌 sampling

①水収支の構造と各種のフラックス

雨季（6月～9月）では、降雨事象により地下水面上昇し、次の同事象まで水面の降下を続ける。そこで、ある降雨事象（ R_j : 降雨量）に関わる水面降下期間(j)において、この降下高に比し地面蒸発や下方の低透水性地層への浸透による損失量は小さいと考え、また対象域への上流境界面を通過する流入が少ないとの仮定を設定すると、対象流域外への排水量(ΔQ_j)は、最大地下水面の降下高(ΔWT_j)に可能排水体積含水率 $\Delta\theta_d$ ($= 0.15$) を乗じたもの、($\Delta Q_j = (\Delta WT_j) \times \Delta\theta_d$) で近似的に表せる。このようにして計算した月排水量 $\sum_j(\Delta Q_j)$ ($= Q$)や、月降水量 R_t ($= \sum R_j$)と月蒸発量 E が図2に示されている。ここに、 E 値は熱収支式を介し気象データよりの計算値である。

また、これらの諸要素を2001年、2002年について、全期間積算すると、流出率($\sum Q / \sum R_t$)は0.71-0.73となり、年に関係なくほぼ同じ数値を示し、また蒸発量は全降雨量の10-20%に対応する結果となった。

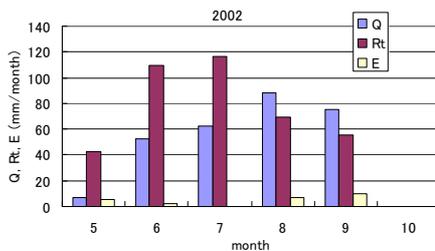


図2 水収支(2002)

R_t : 降雨量、 Q : 流出量、 E : 蒸発量

②塩分の排出量

土壌水の卓越陰イオンは Cl^- であり、また現地での多くの土壌採取より抽出した土壌水の導電率 EC ($\mu S/cm$)と Cl^- 濃度 C (mg/L) とには次式の関係が成立する。

$$C = 2.946 \times EC / 10 - 6.37$$

表土層中の地下水の EC 測定値を上式より C 値に変換して $Q \times C$ を月単位で計算した結果が図3である。2001年の場合、6月より排出量は増加して9月で最大に達し、その後減少するという傾向を与えているが、2002年の場合、6月～9月の間、明確な変化がないことが分かる。また、これらの全月の積算値、即ち年排出量を計算すると、2001年で 1.93 kg/m^2 、2002年で 2.34 kg/m^2 となり、これより、 $NaCl$ として毎年、大略 1 kg/m^2 のオーダが側方流で、対象域より排出されていると考えられる。その際、地下水の下方への浸透損失は無視されている。

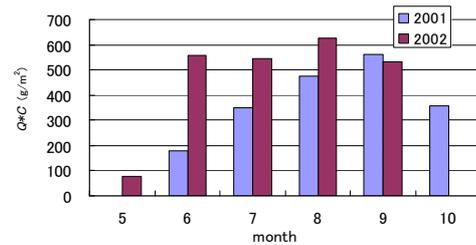


図3 塩分排出量

③土湿の日周期変化

夏季について、表層の深さ 5 cm までの部分（乾燥域）で測定された相対湿度 RH と地温 T のデータを Kelvin 式に適用した結果、そこでの matric potential (Ψ) は早朝～夕方 (6:00 - 17:00) の間で減少傾向を示すが、それ以外の期間では、逆の傾向を示した。即ち、日中に土壌は乾燥過程、夜間に湿潤過程を経という日周期的の変化をすることが確認された。次いで、この乾燥域より下方に位置する土壌層での Ψ はポラスカップによる計測の結果、凡そ 11:00 ~ 19:00 の間で減少傾向を、残りの夜間から翌日の正午付近までは、逆に増加傾向を示した。従って、乾燥域と比べ、乾燥過程は 4-6h 遅れて始まり、2-3h 遅れて終了するという位相の遅れを示すことが分かる。

④乾燥域とクラスト層での水蒸気の挙動

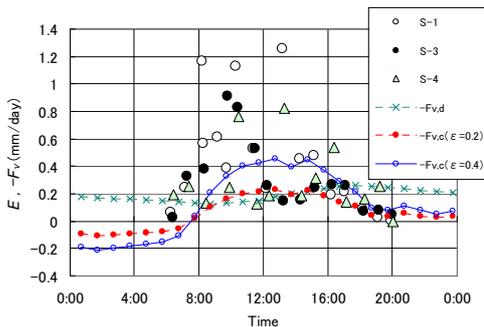
夏季、水蒸気密度 ρ_v は深さ $z = 1 \text{ cm} - 5 \text{ cm}$ の間で、正の勾配で直線的に分布するが、この直線の $z = 0$ での交点の値 ($\rho_v = \rho_v^{(cal)}$) は地面直上での測定値 ($\rho_v = \rho_v^{(obs)}$) と一致せず、昼間では常に $\rho_v^{(cal)} > \rho_v^{(obs)}$ であるが、夜間では $\rho_v^{(cal)} \leq \rho_v^{(obs)}$ となる傾向も認められている。そこで、この乾燥域とその上部のクラスト域で、水蒸気移動は、各々異なる拡散係数と駆動力（密度勾配）を持つというモデル化を行い、特に地面及び乾燥域での水蒸気フラックス、 F_{vc} 、 F_{vd} を計算した。その際、クラストの水蒸気移動抵抗は乾燥域の約 20% と蒸発実験の結果（下記(2)）を参照し設定した。初夏の F_{vc} の挙動は、水蒸気が大気側に放出される（強度は日周期するが）傾向を与え、土層の乾燥過程が進行するが、晩夏では夜間に大気水蒸気の地中への侵入を示し、また極めて乾燥した土層の湿潤過程が見られた。

⑤ドーム式蒸発計の測定結果の検討

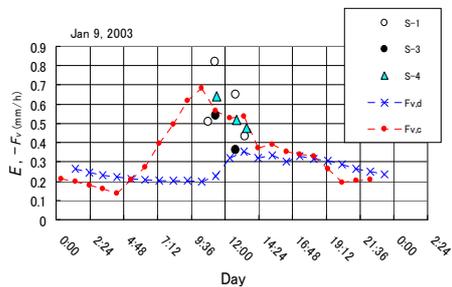
2002年3月初旬（晩夏）、日の出より日没まで、一時間毎に同蒸発計で、地面での水蒸気フラックスが測定された（図4a参照）。また図4bは2003年1月初旬での正午付近の同様な結果である。④での水蒸気移動モデルによる F_{vc} の計算値は図4bの場合、実測値とよ

く合致している。しかし図 4a の場合、同じパラメータを用いた計算値 $F_{v,c}(\epsilon = 0.2)$ との対応は 14:00 以前では良くない。ここに、 ϵ はクラストと下部に隣接する乾燥域での水蒸気移動の有効拡散係数の比を意味する。

両者の気象条件、特に風速（地上 2.5m）は図 b では 1-2m/s 程度であるが、図 a では 4-5m/s と数倍高く観測された。従って、クラスト部分での有効拡散係数拡散を元来のものより 2 倍高くして計算した結果が $F_{v,c}(\epsilon = 0.4)$ であるが、早朝から正午付近での合致度の改良がみられる。この結果は風速の強さが表面直下での水蒸気輸送に影響を及ぼすことを示唆する。



(a)2002.3 (晩夏) の場合



(b) 2003.1 (初夏) の場合

図 4 実測と計算による水蒸気フラックスの比較 (S-1~S-4: 実測蒸発値、 $F_{v,d}$ 、 $F_{v,c}$: 計算値)

⑥ 地表面アルベドの解析

2001 年、2002 年に現地で取得された観測データを元に、地表面熱収支および水収支に大きな影響を及ぼす地表面アルベドの変化を調べた。図 5 は日平均アルベドの変化と他の土壌水分量などとの関係を示す。ここに、散乱光割合は Spitters et. al. (1986) を利用して、日射量から求めた。

図で、現地ではアルベドの変化が大きく、降水による一時的な減少を考慮しなくても 30% から 40% を超える値まで大きく変化していることが分かる。

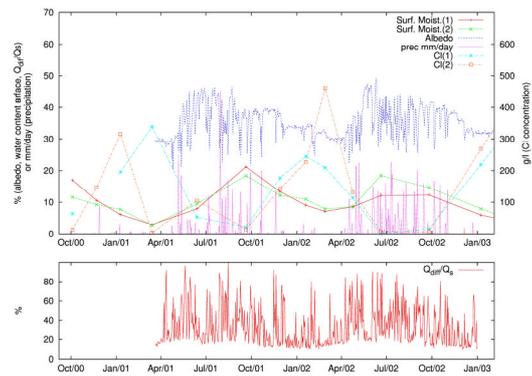


図 5 表層土壌水分量および表層土壌水中塩化物イオン濃度、日降水量、日平均アルベドの年変化 (上図)。日射量に占める散乱日射量の割合 (下図)

この変化により日射の 10% 以上に相当する大きな量のエネルギーの変化が起こっており、熱収支水収支に重大な影響を与えていることが分かる。アルベドは、乾季に低下し、雨季には上昇しており表層の土壌水分量とは少し位相のずれた変化を示し、塩分濃度とは逆に近い関係を示していること、および、散乱日射の割合とも関係があるように見える。これらのものの内、連続的にデータのある散乱光の割合をアルベドと直接比較したのが、図 6 である。

降水などの影響でかなりの変動幅があるものの、平均的には、アルベドは $0.2 \times$ (散乱光割合) 程度の依存性を持っているようである。このような関係は、裸地に関してはよく知られておらず今後数値モデルなどに取り入れていく必要があるのではないかと考えられる。

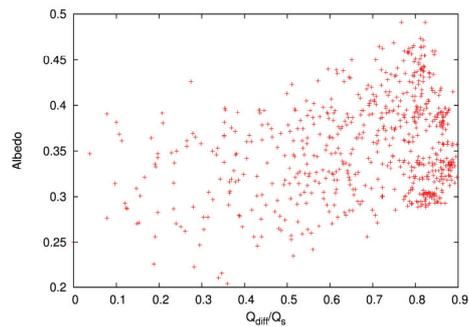


図 6 散乱光割合とアルベドの比較 (日平均値)

(2) 蒸発実験

当該の試験地の乾燥させた土壌を、底板を取り付けた PVC パイプ (直径 10cm、20cm) に充填して供試体を作り、重量計上に設置した。地下水面を土層表面下 30cm に常に設定

されるようマリOTTビンで制御した。土層を初期条件として脱水平衡に設置し、その表面を一定の気象条件(温度 25°C、湿度 20%)の大気に開放して蒸発実験を行った。土層上部には温度・湿度センサーを挿入している。

実験開始と共に土層表面には塩クラストが形成されたが、経過時間 600-1000h 後に表面のクラストを削除して 24h 実験を続けた。この削除後の蒸発強度は同前より 20-30%増大した。蒸発域よりクラスト下面までの領域 (Ω_d) とクラスト部分(Ω_c)での水蒸気フラックスを拡散的に扱った結果、 Ω_c での有効拡散係数は Ω_d でのものより 10-20%小さく評価できた。このクラストの水蒸気移動の抵抗は、同試験地内の異なる土壌を用いた類似の実験結果[下島ら、2003b]とほぼ同じ結果となった。

(3) 数値モデルによる再現計算

1次元の熱・水・塩分の連立多層土壌モデルを開発し、現地の気象データ(放射収支量、気温、湿度、風速)を用いて駆動し再現計算を試みた。数値モデルは、鉛直 50 層で表層 3mm、深さ 1m のものであり、Kelvin 式による熱力学的平衡条件を利用して、水蒸気量を求め、各層での蒸発を考えたものであり、熱拡散には液水による移流も考慮されている。また、塩分としては、塩化ナトリウムを考慮して移動集積などの過程を計算した。土壌のマトリックポテンシャルや透水係数などは、実験によって得られたものを使用した。

その結果得られた土壌水分量の変化は図 7 のようなものである。夏季(10~3月)には表層の土壌水分は 0 となり、その下の層でも数%になってしまうなど、図 5 の観測値と比べるとやや乾きすぎの傾向を示し、さらに調整を行う必要がある。

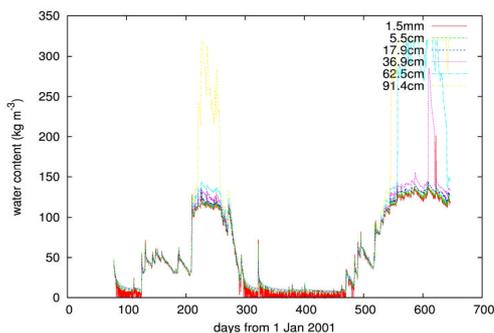


図 7 シミュレーションされた土壌水分量の時系列

また、土壌水中の塩分濃度は図 8 のような挙動を示し、図 5 に見られる観測値によく似た傾向を示した。

今後数値モデルの調整を進めれば、現地の

再現計算、およびそれを利用したアルベド変化などの熱収支水収支への影響の解析などが可能になると思われる。

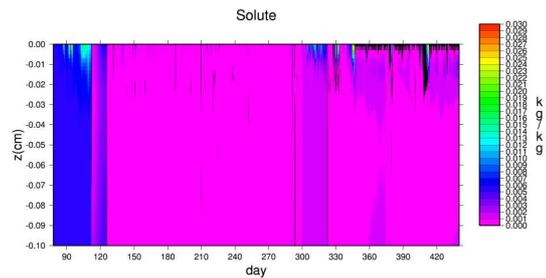


図 8 土壌水中の塩分濃度の計算結果

参考文献:

下島榮一・玉川一郎・堀内将人(2003a): 西オーストラリア半乾燥地域での蒸発・降雨—塩類集積に関する観測的研究(研究課題番号 12574004)、H12-H14 年度科研費補助金(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書。

下島榮一・玉川一郎・堀内将人(2003b): 半乾燥地域での地面蒸発・降雨と塩類集積の消長の関係(研究課題番号 13650574)、H13-H14 年度科研費補助金(基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書、3-18。

Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M. and Goudrian, J. (1986): Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis, part I. components of incoming radiation, *Agricultural and forest meteorology*, 38, 217-229.

5. 主な発表論文等

[その他]

http://tama.green.gifu-u.ac.jp/~tama/Yalanbee_Obs/Data/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下島 榮一 (SHIMOJIMA EIICHI)
大同工業大学・工学部・教授
研究者番号: 80027276

(2) 研究分担者

玉川 一郎 (TAMAGAWA ICHIRO)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授
研究者番号: 40273198
堀内 将人 (HORIUCHI MASATO)
大同工業大学・工学部・教授
研究者番号: 00157059