

# 地下水面の位置が及ぼす地表面蒸発への影響に関する研究

長岡技術科学大学 早津諒介

## 1 背景

水は地球の表面付近に最も豊富に存在する物質であり、また地球上のあらゆる生命に欠かすことのできない物質である。

近年では地球温暖化の影響からか、平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨といった局地的豪雨や、令和元年台風 19 号といった大型台風など気候も変化してきている。地域ごとの特性として、土壌の粒径や種類、組成等が数日で変化することは、地震や洪水、土砂崩れといった自然災害の他、土木工事といった人為的な大きい外的要因がない限り考えづらいことに対し、水は降水や蒸発により数時間単位で移動し続けている。

この水循環の諸過程を理解することで、時代の環境に対応した災害対策を行うことができると考えられる。水循環の流れとして、降水が地表に到達したのち、一部は蒸発散して再び空に戻り、一部は浸透して地下へと流れる。いったん地下へと浸透した流れも、土層境界面から再び地表に出る中間流、さらには地下水流の一部も徐々に地表へと流出し、河道で集められ下流へと流れていき再び蒸発し雲ができ降水が起こる。

ここで水循環に必要な蒸発について考えてみる。蒸発の要因は様々であるが、考えられるものとして気温や湿度、日照時間等がある。日本において気温は、多くの観測所によって記録されており、蒸発式に組み込みやすいため、研究が盛んである。

しかし気温や湿度、日照時間等の他の要因を考えた場合に、砂漠のような乾燥している土壌と、大きな降雨があった直後のような湿った土壌では、同じ気象条件であったとしても蒸発量が違うことが予想される。

以上を考え、本研究では土壌の地下水面の深さが土壌面蒸発量へ、どの程度影響するのかを実験を行い検証した。

## 2 蒸発に関する理論

湿った裸地表面からの蒸発速度は、風速、相対湿度、地表への放射エネルギーフラックスといった外部の気象条件によって決まる。湿った裸地表面からの蒸発速度に対し、表層が乾燥している土壌からの水分損失は主に、蒸発が生じる表面へ向かって水分が上向きに動く速度を制限する土中の水分抵抗によって決定する。

土の乾燥期間において、蒸発速度の支配的要因は、気象的な要因から土中抵抗へと移る。土の表面が湿っている初期段階では、土表面において利用できるエネルギー量によって決まる可能蒸発速度が生じる。蒸発速度が大きい場合、下方から地表への水分の供給速度は蒸発による損失速度とつりあうことができなくなる。そのため、表面の水分量は次第に減少していく。この蒸発が最大速度で進行する期間を、乾燥の第 1 段階と呼ぶ。

最終的には表層の水分量は低下して、その水蒸気圧が境界面における大気の水蒸気圧とほぼ等しくなるまで乾燥する。この段階では、表層では貯留分から水分を供給し続けられなくなる。そのため、蒸発速度は、地表面への水分の移動量によって制限され始める。この蒸発速度が連続的に減少する段階が、乾燥の第 2 段階と呼ばれる。

### 2.1 比蒸発速度

本研究では、水の減少量を電子天秤を用いて、重量測定し、土壌面蒸発量を計算する方法と、水の減少量をメスシリンダーを用いて、体積測定し、土壌面蒸発量を計算する方法の 2 通りの実験を行った。この 2 通りの実験で実際に得られる測定結果は、単位時間あたりの水の重量変化と単位時間あたりの水の体積変化である。この 2 つは水の重量と水の体積であり、単位が異なるため、土壌面蒸発量としてそのまま比較することができない。そのため得られた実験結果を水文学で蒸発量を表す場合に一般的なものである、蒸発速度に単

位換算をすることで、重量測定結果と体積測定結果を比較できるようにした。

減少量を重量変化と体積変化の二通りの方法で測定を行った。

### 3 重量測定法

#### 3.1 重量測定法A

土壌面蒸発量の重量測定方法を以下に示す。

1. 実験装置の可動部を動かし地下水面の深さが土壌再現部の地表面と同じ位置になるよう調節する。この地表面と地下水面の深さが同じ位置にある場合を、地下水面の深さ 0mm とする。
2. 地下水位を動かした事による土中水の動きがなくなるのを待つ。可動部を動かすことで抵抗の少ない水位計測部の水位は、可動部の水位まで急速に変動し釣り合うことができる。しかし、水位計測部とは異なり土壌再現部の地下水面の水位は、ガラスビーズの粒径ごとに異なる透水速度によって粒径が細かいものほど、可動部の水位と釣り合うまで時間が必要になる。これを考慮すると、地下水面の位置を変化させ計測をすぐに行った場合、目的とした地下水面の深さに到達していない場合があるため、1日程度、実験装置を稼働させた後に計測を行った。
3. 土壌面蒸発で失う水の量を十分に給水できるだけの水を容器に注水し、注水した容器は電子天秤を用いて重量の測定を行った後に、実験装置に取り付け循環を開始する。
4. 一定時間(1day)放置した後、実験装置の水循環を停止し、数十秒程度の時間をおき、給水部の容器を取り外して水の入った容器の重量を測定する。ここで数十秒程度の時間を置いたのは、実験装置の循環する透明ホースからしっかり水が抜けるのを待つためである。
5. 3.4.を一定回数、繰り返し行う。
6. 同じ地下水面の深さで繰り返し重量測定を行った後、可動部を動かして地下水面の深さを変更し、2へ戻る。

#### 3.2 重量測定法Aの実験結果

実験結果より、一回の実験ごとの土壌面蒸発量の値が大きく変動していることが分かる。

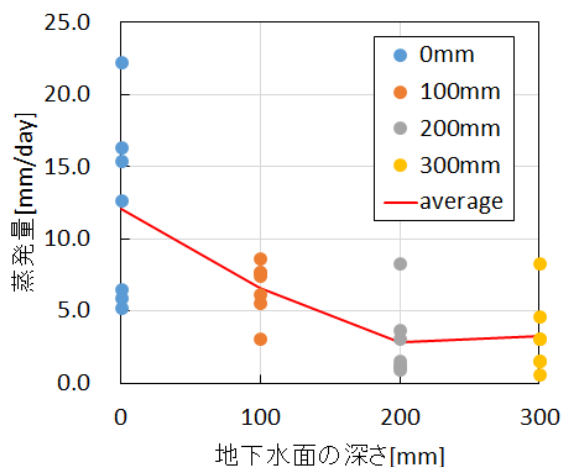


図 1 重量測定法Aの実験結果

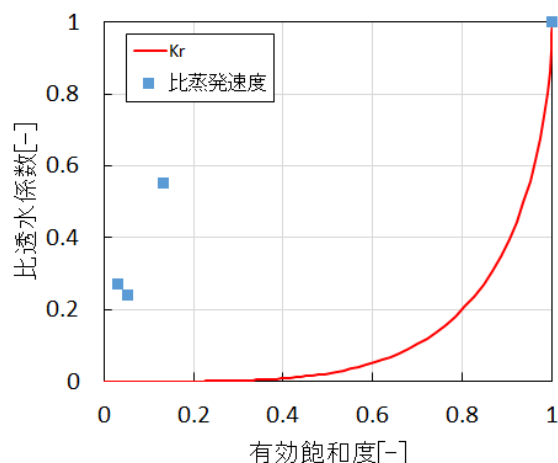


図 2 重量測定法 A の比蒸発速度と比透水係数との比較

#### 3.3 重量測定法Aの考察

重量測定法による地下水面の深さが土壌面蒸発に及ぼす影響だが、土壌面蒸発速度の平均値から、地下水面の深さが低下すると、土壌面蒸発速度も低下傾向にあることがわかった。比蒸発速度と比透水係数との比較では、この 2 つに関係性があるようには見えない。しかし、これは平均値からの考察であって、各地下水面の深さに対する土壌面蒸発量が実験ごとに大きく変動していることを考慮していない。

そこで、各重量測定による土壌面蒸発量の結果が、なぜここまで変動してしまったのかについてだが、実験方法の観点から考えてみる。重量測定方法では、実験装置に取り付けられている給水部の重量を測定している。一回の重量測定ごとに給水ポンプの循環を止めて、給水部の容器を実験装置から取り外し、水の入った容器の重量を電子天秤で計測し、土壌面蒸発によって失われた分の水を容器に入れた後、水の入った容器を再び実験装置に取り付け給水用ポンプを作動させる。つまり、一回の重量測定のたびに、水の入った容器を実験装置から取り外すため、土壌面蒸発以外で重量測定する容器から、水が抜けている可能性がある。

そのため、本来の土壌面蒸発量以上の値が、実験結果として測定している可能性がある。ここで 1g の水が測定方法によって容器から失われた場合、どの程度の影響があるか検証する。1[g]=1[cm<sup>3</sup>]=10<sup>3</sup>[mm<sup>3</sup>]であり、土壌面蒸発面は直径 20mm とすると、1g の水の土壌面蒸発量は以下のように計算ができる。

$$\frac{10^3}{10 \times 10 \times \pi} = 3.18$$

7 回の平均蒸発速度が一番小さい地下水面の深さ 200mm の実験結果が 2.9[mm/day]であることから、1g の水が本実験において、非常に大きな値になってしまうことが分かる。さらに、測定結果の変動の原因を考えると循環部のホースから水が抜けていないことが挙げられる。実験手順では水が抜け終えるまで時間を置いているが、もし水が残っている場合、次の重量測定時にホースの水が全て抜けた場合のことを考えると、ホース内部に残っていた水の重量分測定結果が増加するため、更に誤差が生まれることが推測できる。

よって、重量測定の際に水の入った容器を実験装置から取り外さないように実験装置を変更した。また、地下水面に影響を考慮しない簡易的な土壌面蒸発量測定を行うことで、実験誤差の影響を定量的に評価できるような実験装置を作製した。

### 3.4 恒温室内の蒸発量

重量測定法による土壌面蒸発量の実験結果蒸発量の測定結果が妥当か調べるため、恒温室内で以下の実験を行った。

1. 実験装置の土壌再現部で使用している透明 VP パイプと同じ蒸発面積のものを 3 本用意する。
2. 3 本の透明 VP パイプに注水を行う。ここで入れる水の量は、粒径ごとの飽和体積含水率にしたがった。
3. 粒径の異なる 3 種類ガラスビーズを、水の入った 3 本の透明パイプ VP20 にそれぞれ入れる。
4. ガラスビーズの入った透明パイプ VP20 の重量を、恒温室外の電子天秤を用いて測定する。
5. 蒸発面の高さが実験装置の蒸発面と同じ位置になるように設置する。
6. 数時間放置した後、恒温室外の電子天秤を用いて重量測定を行う。
7. 4.~6.を繰り返し行う。

### 3.5 恒温室内の蒸発量の結果

各粒径ごとの土壌面蒸発量の散布図に対し、原点 0 を通る 1 次近似直線を作成することで、近似式を 1 日当たりの土壌面蒸発量とした。

各粒径ごとの恒温室内における土壌面からの蒸ものである。この恒温室内での土壌面蒸発量は、粗砂 3.647[mm/day]、細砂 6.743[mm/day]、シルト 6.480[mm/day]に近い値となることがこの実験より分かる。

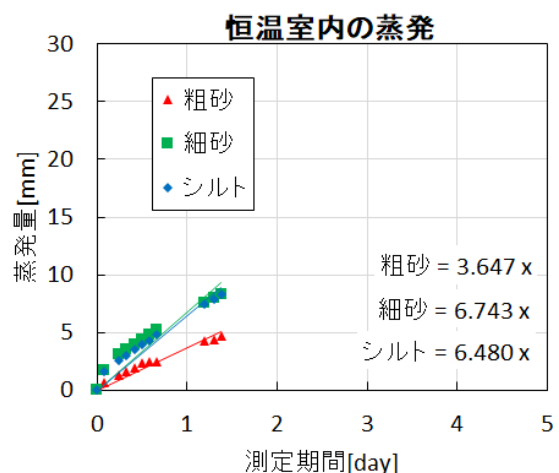


図 3 恒温室内の蒸発量の実験結果

### 3.6 恒温室内の蒸発量の考察

この実験では水の循環機構がないため、給水が行われず地下水面が一定に保たれることがない。そのため、土壌面蒸発によって地下水面の深さが低下していき、時間経過ごとに蒸発量が低下していることが結果から考えられる。

実験結果を原点を通る 1 次近似直線で表したが、実際の土壌面蒸発量はもう少し大きい値を示すことが考えられる。

よって地下水面の深さが保たれている実験装置の土壌面蒸発量が、粗砂 3.647[mm/day]、細砂 6.743[mm/day]、シルト 6.480[mm/day]に近い値か、それを上回る程度の蒸発速度であることが実験結果として妥当である。

### 3.7 重量測定法B

重量測定の 1 サイクルごとに実験装置の水の循環を止めてポリ容器を外し、重量測定を行っていたことが重量測定での誤差として挙げられたため、容器を外さずに測定を行えるようにした。しかし、土壌面蒸発量の測定結果の変動が解消されることがなかったため、次の原因をつきとめるため、測定間隔を 1 日から 5 分に変更した。その結果周期的に重量が変動していることが分かった。

そこで、恒温室内の温度調節は送風することで一定温度を維持しているため、風の影響があることが考えられる。よって、送風口の前にベニヤ板を配置することで、風が流れる方向を変えて重量測定を行う電子天秤に影響が出ないようにした。

### 3.8 重量測定法Bの結果

風の方角を変える前後の重量測定での実験結果を示す。5 分でインターバル撮影しているため、測定間隔は 5 分である。恒温室内の送風口の前にベニヤ板を置いた後では変動量が小さくなっていることが読み取れる。

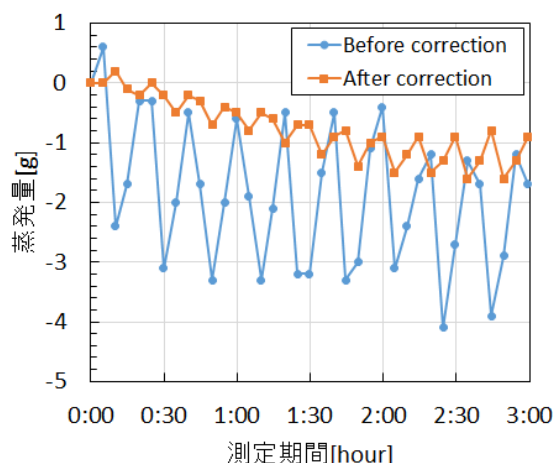


図 4 風の影響を考慮した実験結果

### 3.9 重量測定法Bの考察

容器の重量変動量は小さくなっているが、土壌面蒸発量が周期的に変動する問題は解決されていない。

これは 5 分間隔での測定結果であるため、実験結果を平均化して考察することを考えたが、本研究では、1g の水が土壌面蒸発に及ぼす影響が非常に大きいため、重量測定方法ではなく体積測定法で土壌面蒸発量を測定することを考えた。

## 4 体積測定法

重量測定法から体積測定法へ測定方法を変更したことで、実験装置の給水部を変更した。給水部の容器をメスシリンダーに変更し、給水用ポンプで水循環を行い、土壌面蒸発で失われる水分を給水し続けることで、地下水面の深さを一定に保っている。しかし、メスシリンダーの水面を読む際に、循環しメスシリンダーに戻ってくる水の衝撃によってメスシリンダーの水面が泡立ち、水面の位置がはっきりと分からない場合があった。

そこで、メスシリンダー上部の蓋に透明パイプ VP30 を接着材で固定し、循環でメスシリンダー内に戻ってくる水が一度透明パイプに当たることで、メスシリンダーの水面に与える衝撃を和らげることで、メスシリンダーの水面が泡立つことを防いだ。さらに透明 VP パイプを入れることで、

メスシリンダー内のかさが増えて蒸発量が少ない場合においても、透明 VP パイプを入れない場合に比べ、読み値の精度が向上することが考えられる。例として 10g の水をメスシリンダーに入れた場合、目盛りの読み値は 10ml になるが、メスシリンダーの縦半分が物が詰まっている場合、10g の水をメスシリンダーに入れた場合、目盛りの読み値が 20ml になることが考えられる。

この場合、目盛りの精度が倍になっている。本実験で使用したメスシリンダーはすべて容量が 1000ml である。土壌面蒸発量は少ないため、目盛りの細かい 500ml や 100ml のメスシリンダーを使用することが、体積測定方法における土壌面蒸発量の精度を向上させるで非常に簡単ではあるが、本実験では、地下水面の深さを保つために給水用ポンプで給水する必要がある。そのため、揚水できる小型ポンプが入る程度のメスシリンダーを使用する必要があったため、1000ml のメスシリンダーを使用した。

土壌面蒸発量の体積測定方法を以下に示す。

1. 実験装置の可動部を動かし地下水面の深さが土壌再現部の地表面と同じ位置になるよう調節する。この地表面と地下水面の深さが同じ位置にある場合を、地下水面の深さ 0mm とする。
2. 地下水面の深さを動かした事による土中水の動きがなくなるのを待つ。
3. 水平器を用いて、メスシリンダーを置く台とデジタルカメラの水平をとる。
4. 3台のメスシリンダーの水面が同じになるようメスシリンダー内の水を調節する。これはメスシリンダーの水面をデジタルカメラ 1 台で定点撮影するため、できるだけ目盛りを読む際の誤差が出ないようにメスシリンダーの水面を揃える。
5. デジタルカメラのインターバル撮影で 1 時間ごとに撮影を行う。

#### 4.1 実験結果の処理

土壌面蒸発量の重量測定法では、水の入った容器を電子天秤におき、重量の変化をデジタルカメラで撮影することで、土壌面蒸発量の結果として

いた。しかし、土壌面蒸発量の体積測定法では、インターバル撮影によって撮影された画像を見て、メスシリンダー内の水の体積変化を確認していく。その際に、ビットマップ画像編集・加工ソフトウェアである GIMP(version 2.10.12)を使用した。メスシリンダーの体積変化を、撮影した画像の処理から、土壌面蒸発量への計算までの手順を以下に記載する。

1. GIMP(version 2.10.12)を起動し左上のファイルタブから、開く/インポートから実験開始時の写真を GIMP に取り込む。
2. 実験開始時の画像が一枚取り込めたら、同じくファイルタブからレイヤーとして開くで残りの写真もレイヤーとして GIMP に取り込んでいく。
3. 実験結果の写真が必要な枚数 GIMP に取り込んだ後、実験開始時の写真を選択して、パスのアイコンをクリックし、メスシリンダーの水面と思われる位置にパスを作成した後、パスを 1pt で描画する。
4. 定規アイコンをクリックし、基準点を設け、基準点から描画したメスシリンダーの水面までの長さ[pixel]を測定する。
5. メスシリンダーの 1 目盛り 10ml であることから、撮影した写真より、定規アイコンをクリックし 10ml のピクセル数ををはかり、1 ピクセル当たりの体積 [ml]を計算する。

#### 4.2 実験結果の処理

メスシリンダー内には循環用の給水ポンプ、シリコンチューブ、透明パイプ VP30 といった不純物が入っているため、メスシリンダーの目盛りの減少量をそのまま読み取ってしまうと、正確な土壌面蒸発量の値にならない。そのため以下に示す手順で、メスシリンダー内の不純物を考慮した補正係数を作成した。

1. メスシリンダー内に入っている水の体積をデジタルカメラで撮影する。
2. 電子天秤で 10g の水を測定し、メスシリンダーに注水する。ここで水 10g=10ml とする。

3. 注水後のメスシリンダーをデジタルカメラで撮影する。

4. 2.3.を数回繰り返す。

得られた測定結果から横軸に入れた水の量[g], 縦軸にメスシリンダーの目盛りをプロットし、キャリブレーションカーブを作成した。

#### 4.3 補正係数測定実験の結果

補正係数を作成するために行った実験の結果を以下に示す。

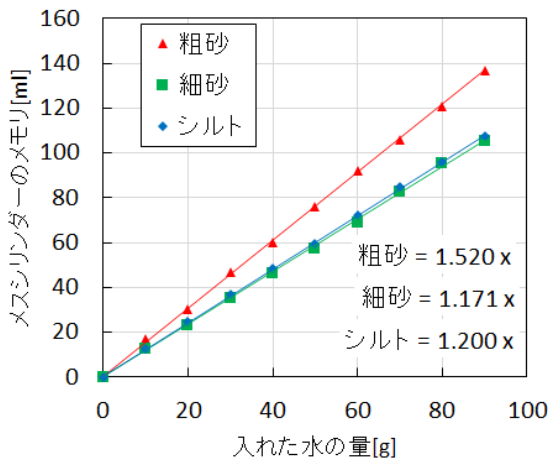


図 5 補正係数作成のための実験結果

#### 4.4 体積測定法の結果

ここで、縦軸は累積の土壌面蒸発量[mm]であり、横軸は時間[day]である。各粒径の実験結果に対し原点 0 を通る 1 次近似直線を作成し、各地下水面の深さによる蒸発速度[mm/day]とした。

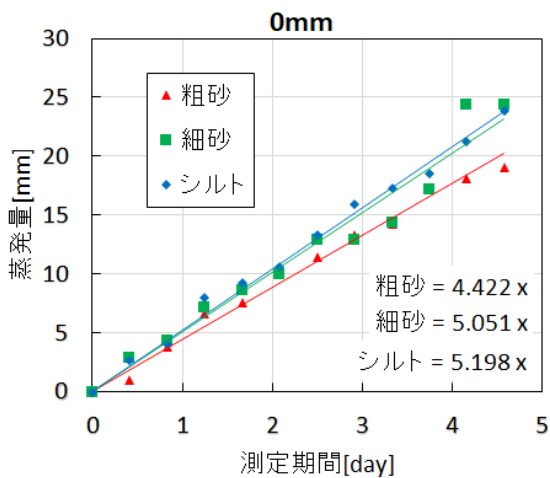


図 6 体積測定法の地下水面 0mm 結果

#### 4.5 比蒸発速度と比透水係数の比較

プロットされている点は体積測定法により得られた実測値であり、実線は各粒径ごとの van Genuchten モデルの比透水係数を表す理論曲線である。

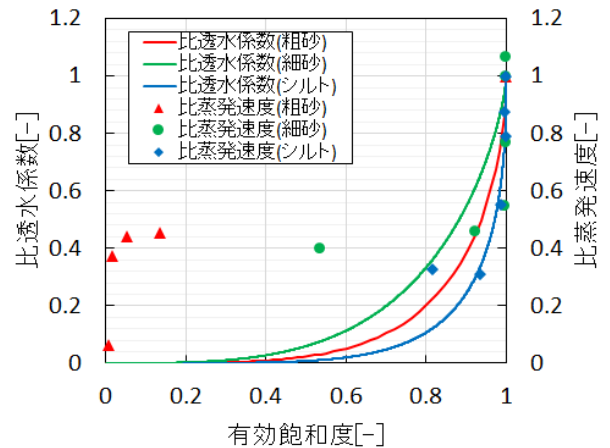


図 7 比蒸発速度と比透水係数の比較

#### 4.6 比蒸発速度と比透水係数の考察

結果より、粗砂、細砂については関連性が見られないが、シルトに関しては van Genuchten モデルの比透水係数と実験で得られた比蒸発速度に関連性があるように見える。

RMSE の評価結果を表に示す。

表 1 比蒸発速度と比透水係数の比較 RMSE

h	粗砂	細砂	シルト
[mm]	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
0	0	0	0
50	0.674	0.005	0.007
100	0.207	0.050	0.009
200	0.195	0.166	0.006
500	0.139	0.022	0.001
1000	0.004	0.104	0.041
RSME	0.451	0.240	0.103

粗砂、細砂に比べシルトは誤差範囲が狭いことが分かる。粒径が大きいと van Genuchten モデルの比透水係数  $K_r$  は地下水面の深さ 0~50mm の間で急激に低下し、毛管力が小さい分土壌表面への水の供給量が少なくなることが考えられ、それ

に伴い蒸発量も小さくなると考えられる。逆に粒径が小さいほど比透水係数は低下しづらい。しかし、表の比蒸発速度をみると、どの粒径に関しても地下水位の低下につれ比蒸発速度は低下する傾向がみられるが、地下水位 0~50mm 間で急激な比蒸発速度の変化はみられない。よって、地下水面が浅く土壌粒径が大きい場合においては、毛管力とは別の特性が蒸発に影響していることが考えられる。

#### 4.7 比蒸発速度と蒸発効率の比較結果

粗砂は Barton 式に近いふるまいをしており、そのほか細砂、シルトに関しては関係性があるとはいいがたい。

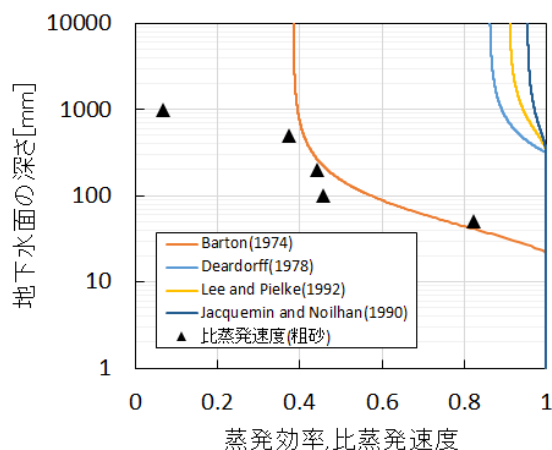


図 8 比蒸発速度と蒸発効率との比較

#### 4.8 比蒸発速度と蒸発効率の考察

粗砂が Barton 式の理論曲線と近いことが分かった。RMSE による誤差の評価結果は表に示す。

表 2 比蒸発速度と蒸発効率の比較 RMSE

h	粗砂	細砂	シルト
[mm]	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
0	0	0	0
50	0.004	0.005	0.044
100	0.014	0.053	0.015
200	0.001	0.204	0.202
500	0.001	0.293	0.475
1000	0.108	0.278	0.455
RSME	0.146	0.373	0.446

Barton 式は経験式であり、土壌の水分含有量が 0.375 をしきい値として式が変わるものである。式の性質上、地下水面の深さが 1000mm のような深い場所については、関係性が低下していくことが考えられる。

#### 5 まとめ

地下水面の深さに対する比蒸発速度と比較した van Genuchten モデルの比透水係数と 5 種類の蒸発効率の理論式の関係がすべての粒径に対し、当てはまるものはないが、van Genuchten モデルの比透水係数については、シルト(粒径 0.063~0.075mm) の比蒸発速度と近いふるまいをし、蒸発効率式については Barton 式が粗砂(粒径 1.7~2.4mm) の地下水面の深さ 0~500mm 間の比蒸発速度と近いふるまいを示した。

よってシルトに関しては van Genuchten の比透水係数を計算し、粗砂に対しては土壌面湿潤度の 1 つである Barton 式を計算することで、各地下水面の深さに対する蒸発速度の比率が算出できることを示した。