蒸発効率の算定結果に対する植生の存在の影響に関する一考察

A STUDY ON THE INFLUENCE OF THE PRESENCE OF VEGETATION ON EVAPORATION EFFICIENCY

青木 壮真[1]・昌本 拓也[2]・村上 哲[3]・軸屋 雄太[4]
Soma AOKI, Takuya MASAMOTO, Satoshi MURAKAMI and Yuta JIKUYA

[1]福岡大学大学院工学研究科（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: td264001@cis.fukuoka-u.ac.jp
[2]福岡大学工学部（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: t.masamoto@fukuoka-u.ac.jp
[3]福岡大学工学部（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: sato4murakami@fukuoka-u.ac.jp
[4]山口大学大学院（〒755-8611　宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words: *bulk method, evaporation efficiency, vegetation, vegetational cover*

1. はじめに

近年，日本各地で台風襲来期や梅雨時期の局所的な豪雨に起因する土砂災害が多数発生している．このような降雨に対する斜面災害へのソフト対策として土砂災害警戒情報がある．土砂災害警戒情報の発表基準は雨量に関する数値をもとに判断されるが，解除基準[1]は曖昧であり，その判断が困難とされている．降雨後の警報解除に関しては斜面の安定性を定量的・経時的に評価する必要があり[2]，斜面表層からの蒸発量の把握[3]とともに，植生の蒸散の影響[4]を考慮する必要がある．

斜面表層からの蒸発量を推定する手法の一つにバルク法における β 法（以下，β 法）がある．β 法で用いられる蒸発効率 β は，土の水分状態に影響されるため，これまでにその関係を得るための実験手法が提案されてきた[2)5)6)7)]．一方で，従来の実験手法では裸地供試体が用いられており，植生の存在の影響は考慮されていない．そこで本研究では，植生の影響を考慮した β 法の実験手法の拡張性を検討することとした．

植生の蒸散は主に葉の気孔を通じて行われる[8]．そのため本研究では，植生量の評価指標として，地表面に対する植生の水平投影面積の百分率を示す植被率[9]を用いることとした．植被率を用いることで，既往の実験手法で得られる体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係が植生量によって変化するかを検討する．

本研究の目的は，植生の有無，および植被率の違いが既往の実験手法[6)7)]で得られる θ と β の関係に与える影響を明らかにすることとした．

2. 実験概要

(1) β 法の概要

β 法は，単位時間・単位面積当たりの蒸発量 E を，1 高度の気象観測データと地表面温度を用いて推定できる方法である．β 法による蒸発量 E [kg/(m^2・s)] の推定式（バルク式）は式(1)で表される．式(1)で示される E は水蒸気の鉛直輸送量であり，鉛直上向きの蒸発が発生する条件のみを考慮する必要がある．

$$E = \rho_a g_a \beta \left[q_{sat}\left(T_s\right) - q \right] \tag{1}$$

表-1 の通り，式(1)のうち，空気密度 ρ_a [kg/m^3]，飽和比湿 $q_{sat}(T_s)$ [kg/kg]，比湿 q [kg/kg]は観測データから得ることができる．しかし，交換速度 g_a と蒸発

表-1 バルク法（β 法）の変数と観測データの関係

変数			観測データ			変数			観測データ		
ρ_a	:	空気密度 [kg/m^3]	P	:	気圧 [hPa]	q	:	比湿 [kg/kg]	P	:	気圧 [hPa]
			T_a	:	気温 [℃]				T_a	:	気温 [℃]
			T_s	:	地表面温度 [℃]				h_r	:	相対湿度 [%]
			h_r	:	相対湿度 [%]						
$q_{sat}(T_s)$	:	飽和比湿 [kg/kg]	P	:	気圧 [hPa]	g_a	:	交換速度 [m/s]	観測データから直接算定ができない		
			T_s	:	地表面温度 [℃]	β	:	蒸発効率 [-]			

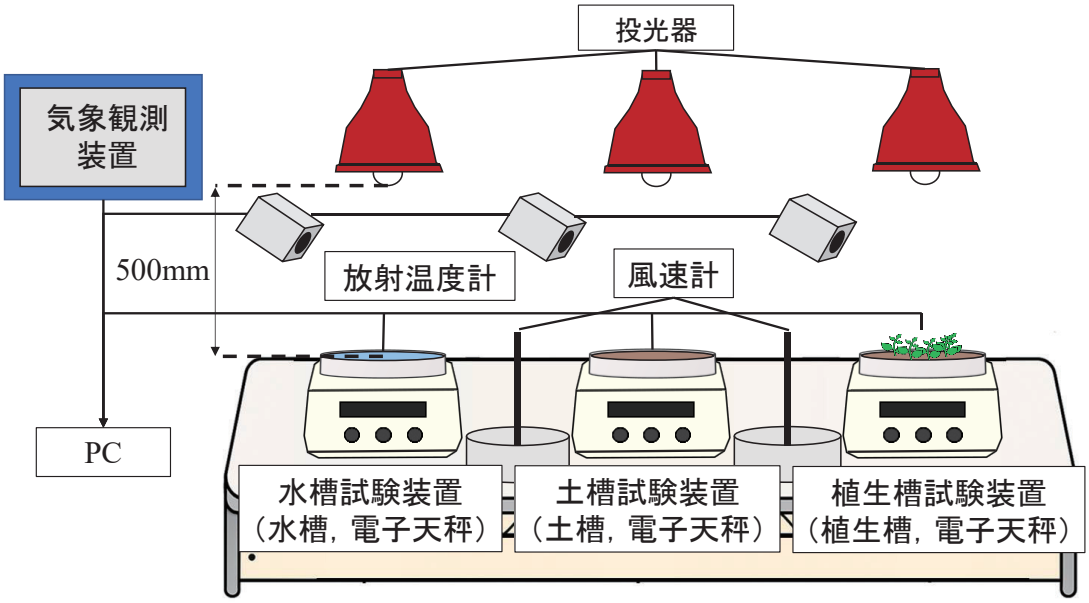


図-1 試験装置概要図

効率 β は観測データから直接得ることができず，別途実験により求める必要がある．本研究では，この内の β に着目する．β は，地表面からの蒸発のしやすさを表すパラメータであり，0～1 の値を取る（乾燥状態であれば β=0，飽和状態であれば β=1）．

図-1 に試験装置の概要図を示す．試験装置は，気象観測装置，風速計（本研究では平面直行 2 方向の計測），水槽試験装置，土槽試験装置 [2]，投光器 [6]，放射温度計 [7]，それらに加えて植生槽試験装置で構成される．放射温度計の計測対象は水槽，土槽，植生槽それぞれの表面温度 T_w，$T_{s(s)}$，$T_{s(v)}$である．植生槽では，植生を避け地表面のみの温度を計測できるように位置を調整した．**図-2** に，土の水分状態を示す体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を得るための算定フローを示す．算定フローは森岩-酒匂の手法 [6]を主とし，植生槽では土槽と同様の算定方法で g_a と θ を算出するものとした．まず，気象観測，水槽試験，土槽試験，植生槽試験を同時に行い，蒸発量を計測する．この時，自然対流条件を満たしているか確認する（風速 U≦0.3 m/s, T_w-T_a≧0.5℃, $T_{s(s)}$-T_a≧0.5℃, $T_{s(v)}$-T_a≧0.5℃）[6)10)]．次に，気象観測と水槽試験から得られた結果より，水面からの交換速度 $g_{a,water}$ を算出する（この時，β=1 とする）．そして，土槽，植生槽試験の結果に加え，土槽表層からの交換速度 $g_{a,soil(s)}$, 植生槽表層からの交換速度 $g_{a,soil(v)}$がそれぞれ $g_{a,water}$ と等しいと仮定する．これらの仮定した交換速度をもとに，土槽，植生槽での β を算出することで，θ と β の関係を得る．なお，θ の算出は以下の手順で行う．まず，実験開始前に供試体の全質量を計測し，その値から供試体容器および土試料の質量を引くことで，初期の供試体中の水の質量を求める．次に，水の密度を 1.0 Mg/m^3 と仮定し，算出した水の質量を用いて体積へと変換する．そして，供試体容積で除することで初期の θ を算出する．実験期間中は，初期の水の質量から各測定時間における累積蒸発量を順次引くことで水の質量を算出し，同様の手順を

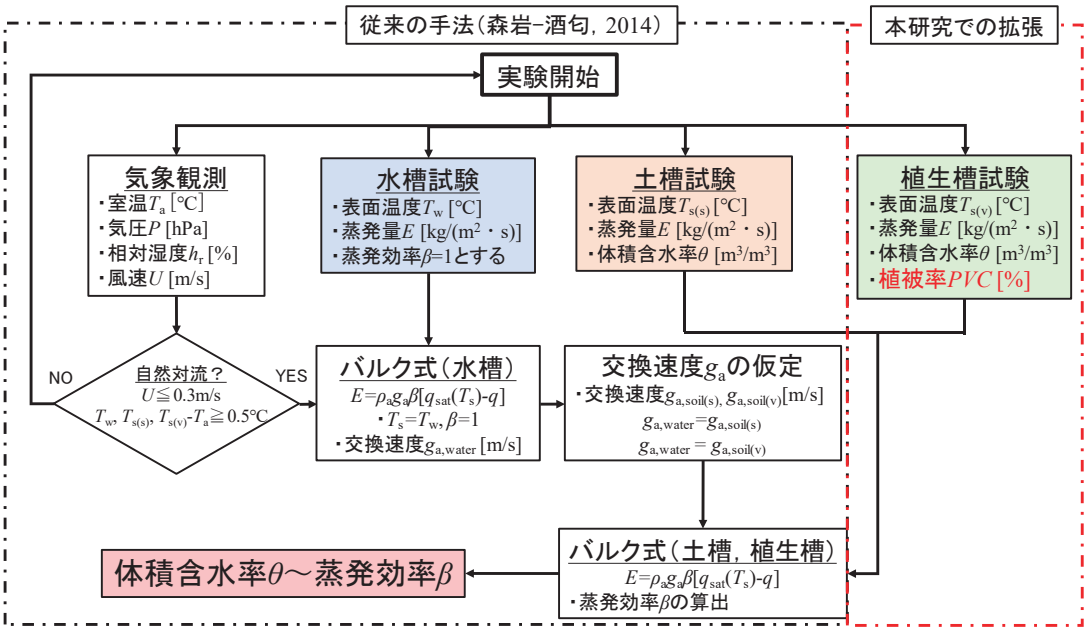


図-2 交換速度と蒸発効率の算定フロー

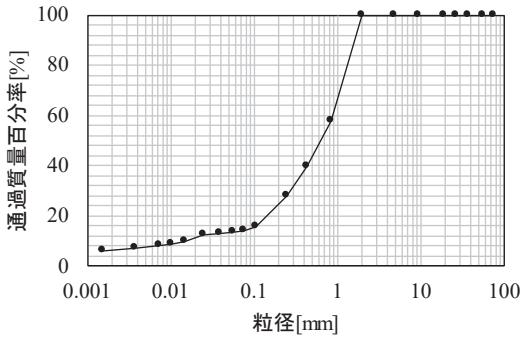


図-3 粒径加積曲線

表-2 供試体作製条件

締固め度	87 %
初期間隙比	0.597
初期飽和度	80 %
養生・育成期間	28 日

適用して各測定時間における θ を算出する．なお，植生槽では実験終了後に植生の乾燥質量を計測し，質量を減ずることで θ の補正を行う．

(2) 実験条件

土槽，植生槽の供試体は，土試料に福岡市内で採取された建設発生土（土粒子の密度 ρ_s=2.64 Mg/m³，細粒分混じり礫質砂）の 2 mm ふるい通過分を用いた．**図-3** に実験に用いた土試料の粒径加積曲線を示す．供試体は，**表-2** に示すように，土試料を内径 125 mm，高さ 20 mm，底面を有孔板とした塩化ビニール製円筒容器に突き固めることで作製した．植生槽に

表-3 植生槽での種子播種数と植被率

Case	植生種子播種数	植被率
12-a	12 粒	1.88%
12-b	12 粒	3.28%
24-a	24 粒	8.34%
24-b	24 粒	5.38%

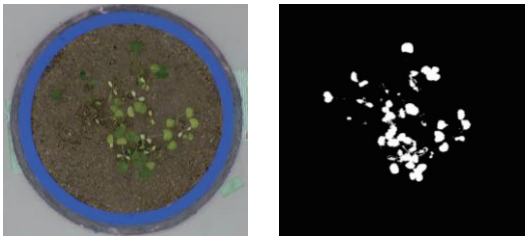
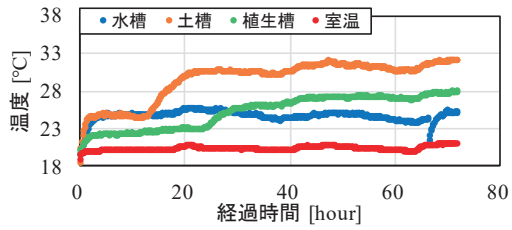
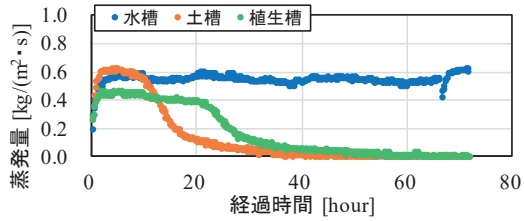


図-4 可視光画像解析による植被率計測結果の例
Case24-a 植被率：8.34 %

播種する植生として，実際に法面緑化工でも用いられているホワイトクローバーを用いた．本研究では，植生の量による違いを比較するため，播種する種子数を 2 種類とした．具体的には，ホワイトクローバー[11]の種子を表層から 10 mm の深さに 15 mm 間隔で，1 粒ずつ，もしくは 2 粒ずつ播種した供試体を作製した．そして，植生を育成するため，底面を水浸した状態で 28 日間静置した．また，対照実験とするために同様の条件で土槽も養生を行った．実験開始時には，供試体底部の有孔板に止水テープを貼ることで非排水条件とし，供試体表面からのみ熱が伝わるよう各試験槽の底面と側面に断熱シートを貼り付けた．蒸発量 E（植生槽では，植生の蒸散も含むため，「蒸発散量」の意）の計測は電子天秤（最小表

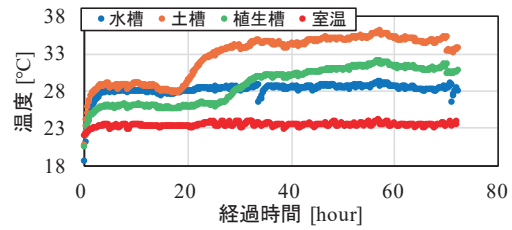


(a) 温度

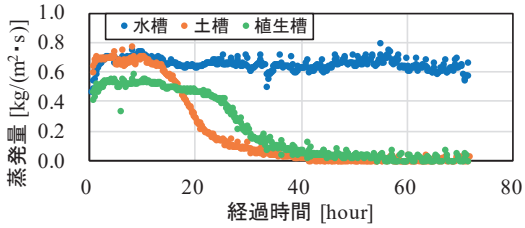


(b) 蒸発量

図-5 Case12-a 観測データの時系列変化

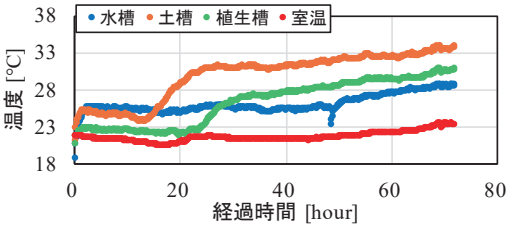


(a) 温度

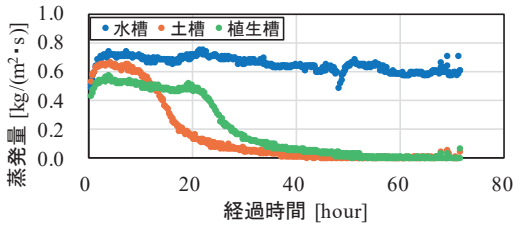


(b) 蒸発量

図-6 Case12-b 観測データの時系列変化

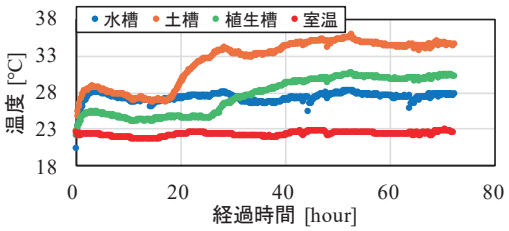


(a) 温度

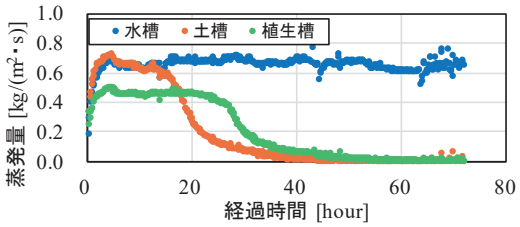


(b) 蒸発量

図-7 Case24-a 観測データの時系列変化



(a) 温度



(b) 蒸発量

図-8 Case24-b 観測データの時系列変化

示：0.01 g；標準偏差：0.01 g）で行い，計測間隔を10 分，計測時間を 72 時間とした．実験は空調を 20℃に設定した室内で行い，室温の変動を抑えた．このとき，相対湿度は調節していない．**表-3** に植生槽での種子播種数と植被率を，**図-4** に可視光画像解析による植被率計測結果の例を示す．植被率は，実験開始前に植生槽供試体を上方から撮影し，昌本ら [12]の手法により算出した．本研究で得られた植被率は最大で 8.34 %であった．一般に，法面緑化工（草地型播種工）では，施工 3 か月後の植被率 70～80 %で成績が可となる [13]．本研究では，育成期間が 28 日であり，成績が可となる法面に比べて植被率は小さく，植生は成長段階にあると考える．

本研究では，12 粒，24 粒のそれぞれの播種条件で 2 回ずつ実験を行った．以下では 12 粒播種での実験を Case12-a，12-b，24 粒播種での実験を Case24-a，24-b とする．

3. 結果・考察

図-5~図-8 にそれぞれの実験における各槽の温度，蒸発量の時系列変化を示す．Case12-a に着目すると，**図-5 (a)** より土槽の表面温度は実験開始から 3 時間ほどまで急激に上昇し，3~13 時間ではほぼ一定値で

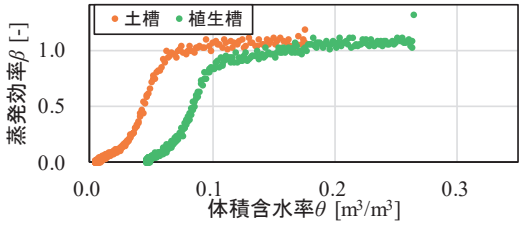


図-9 Case12-a における体積含水率と蒸発効率の関係

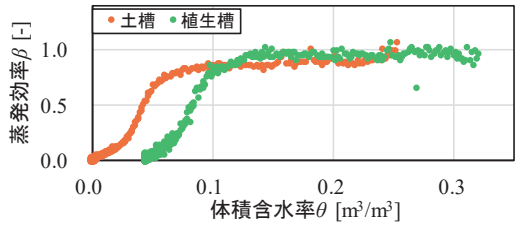


図-10 Case12-b における体積含水率と蒸発効率の関係

推移した．その後，さらに温度が上昇し 23 時間以降は一定の温度で安定する傾向を示した．また，図-5(b)より，表面温度の急激な上昇が起きたとき，蒸発量が急激に減少することも確認された．植生槽の温度変化の挙動は土槽と同様であったが，全体として土槽より 2℃~5℃低い温度で推移し，温度上昇の開始時刻も土槽より遅れる傾向が確認された．これらの傾向は Case12-b（図-6），Case24-a（図-7），Case24-b（図-8）でも同様であった．

図-9~図-12 に各実験での体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係について示す．Case12-a に着目すると，土槽では θ=0.1~0.18 の範囲で蒸発効率 β が 1.0 程度を示し，θ が 0.1 を下回ると β は急激に低下する傾向が確認された．このように，一定程度の θ までは β が 1.0 付近で安定し，θ がある条件を下回ると β が急激に低下するような結果は既往研究 [6]と同様の傾向であり，本研究における土槽は植生槽の比較対象として，良好であると判断した．一方，植生槽においても同様に，ある θ=0.14~0.3 付近の範囲において β=0.9~1.0 付近の安定した値を示したが，β の低下が開始する θ は土槽よりもやや大きい値となることが確認された．さらに，実験終了時においても，植生槽では θ が 0 にならず，供試体内に水分が保持される結果が得られた．これらの傾向は Case12-b（図-10），Case24-a（図-11），Case24-b（図-12）でも同様であった．

図-9～図-12 において β>1 となるデータが見られる．これは，水槽と土槽および植生槽で交換速度が等しいと仮定しており，表面温度や蒸発量の違いが考慮されていない．その結果，交換速度が過小評価されることが影響していると考えられる [3]．

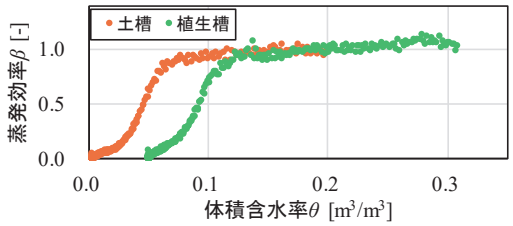


図-11 Case24-a における体積含水率と蒸発効率の関係

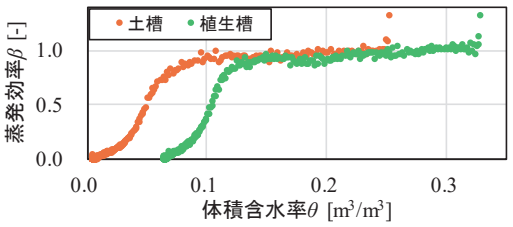


図-12 Case24-b における体積含水率と蒸発効率の関係

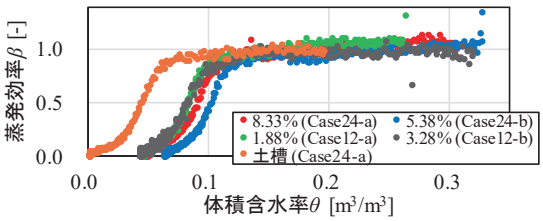


図-13 植被率ごとの体積含水率と蒸発効率の関係

ここで，θ が 0.1 以上の範囲において土槽と植生槽の β の算定結果が概ね同様となった理由を考察する．式(1)および β の算定フロー（図-2）より，β は蒸発量 E および地表面温度 T_s に依存する．本研究では，植生槽は土槽に比べ，T_s が低く，その結果，$q_{sat}(T_s)$-q は小さく算定されるため，β は大きくなる．一方で，植生槽は土槽に比べ E のピークが小さく，β は小さくなる．従って，T_s の低下による β の増加方向への影響と，E の減少による β の減少方向への影響が重なったことで，植生槽と土槽で β に大きな差異が現れなかった可能性が考えられる．植生槽において T_s が低い値を示した理由として，植生によって植生槽表面が投光器から遮られ，地表面に到達する熱エネルギーの入射量が土槽より低くなったことが考えられる．また，植生槽の E が低くなった理由として，植生の存在が $g_{a,soil(v)}$に影響を与えた可能性が考えられる．図-9～図-12 の植生槽において土槽より高い θ で β が低下し始める要因として，天秤による質量計測値に土中水分だけでなく植生が保持する水分も含まれるため，θ が実際の土中水分量より大きく算定されたことが考えられる．

図-13 に各 Case における植生槽の θ と β の関係を示す．併せて比較のために，Case24-a の土槽の結果

を示す．植生槽での θ と β の関係は，概ね同程度であり明確な違いは確認されなかった．よって，本研究での植被率の条件では大きな違いはないと考えられる．一方，成績が可となった法面の植被率は70~80 %以上であると考えられる[13]．近藤[14]によれば，葉面積指数が増えるほど蒸発散量も増加することが示されている．さらに植被率が増えると葉面積指数も増加することが示されている[15]．よって，植被率が増加することで蒸発散量も増加し，β も増加することが期待される．

4. まとめ

本研究では，植生の影響を考慮した β 法の実験手法の拡張として，植被率の違いが既往の実験手法で得られる体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係に与える影響を検討した．以下，本研究で得られた知見を述べる．

(1) 植生槽は土槽と比較して，地表面温度が低く，蒸発量も少ない結果が得られた．その理由として，植生によって地表面が覆われ熱が伝わりにくくなったことや，植生によって空気の密度条件が変化したことが考えられた．

(2) θ と β の関係において，β が安定する範囲では，土槽，植生槽ともにある θ に対する β は同程度の値となる結果が得られた．その理由として，地表面温度 T_s，蒸発量 E の低下によって土槽と植生槽の β の算定結果に差異が現れなかった可能性が考えられた．

(3) 植生槽の θ と β の関係は概ね同程度であり，明確な違いは確認できない結果となった．よって，本研究での植被率の条件では大きな違いはないと考えられた．

以上の知見をもとに今後の課題と展望を示す．

(1) 土槽と植生槽における地表面温度差を考慮し，より温度差がない状態での実験を行う．

(2) 本研究における植生量から，さらに増やした植生槽供試体，植生の育成期間を延ばした供試体での実験を行う．

(3) 実験中の植生による蒸散量を把握する．

(4) 植生槽における交換速度 $g_{a,soil(v)}$ の評価方法を検討する．

謝辞：本研究の一部は，令和 7 年度九州地域づくり協会調査研究助成事業の支援を受けた．ここに謝意を表する．

参考文献

1) 福岡県防災会議 : 福岡県地域防災計画　基本編・風水害対策編，pp. 174-176，2024.
2) 里見知昭，酒匂一成，吉留花江，深川良一 : 最表層土の水分変動を考慮したバルク法による蒸発量推定手法の改良，応用力学論文集，13 巻，pp. 525-534，2010.
3) 軸屋雄太，酒匂一成，伊藤真一 : 土と水の熱容量の違いを考慮したバルク法における蒸発効率の算定方法に関する検討，土木学会論文集，80 巻，15 号，23-15040，2024.
4) Bordoloi, S. and Ng, C. W. W.: The effects of vegetation traits and their stability function in bio-engineered slopes: A perspective review, Engineering Geology, Vol.275, 105742, 2020.
5) 近藤純正 : 水環境の気象学，朝倉書店，pp. 108-109，1994.
6) 森岩寛稀，酒匂一成 : バルク法における蒸発効率 β の水分依存性に関する室内試験，第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 223-228，2014.
7) 軸屋雄太，酒匂一成，伊藤真一，大山エンリッケ誠慈 : 蒸発効率に関する室内試験における温度計測方法の改良，Kansai Geo-Symposium 2022-地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム-論文集，pp. 225-230，2022.
8) 日本緑化工学会 : 緑化技術用語事典，山海堂，p. 36，1990.
9) 日本緑化工学会 : 緑化技術用語事典，山海堂，p. 101，1990.
10) 上田政文 : 湿度と蒸発－基礎から計測技術までー，pp. 135-136，コロナ社，2000.
11) 公益社団法人日本道路協会 : 道路土工―切土工・斜面安定工指針，丸善出版，pp. 234-235，2009.
12) 昌本拓也，酒匂一成，伊藤真一 : 草地型播種工の客観的な成績判定に向けた可視光画像解析技術の適用可能性の検討，地盤工学ジャーナル，18 巻，1 号，pp. 81-95，2023.
13) 公益社団法人日本道路協会 : 道路土工―切土工・斜面安定工指針，丸善出版，pp. 256-259，2009.
14) 近藤純正 : 種々の植生地における蒸発散量の降水量および葉面積指数への依存性，水文・水資源学会誌，11 巻，7 号，1998.
15) 佐々木良治，大平陽一，竹田博之 : 植被率と葉面積指数および稲体窒素含有量との関係における品種間差，日本作物学会中国支部研究集録，47 巻，pp. 10-11，2006.

（2026.5.29　受付）