

大気・地下連成 - 水・熱環境モデルを用いた 屋外散水実験の再現性の検討

Reproducibility of the Atmosphere-Subsurface-Coupled Hydrothermal Environment Model for the Field Experiment of Water Sprinkling

吉岡 真弓*¹ 登坂 博行*² 中川 康一*³
Mayumi YOSHIOKA Hiroyuki TOSAKA Koichi NAKAGAWA

*¹ 産業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, AIST

*² 東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

*³ 大阪市立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka City University

Corresponding author: Mayumi YOSHIOKA, mayumi-yoshioka@aist.go.jp

ABSTRACT

By applying the Atmosphere-Surface-Coupled, Hydrothermal Environment Model, the reproducibility of the field experiment of water sprinkling is examined.

Firstly, making a 2-D vertical model which includes atmosphere and subsurface regions, and inputting the meteorological data (atmosphere temperature, wind velocity, relative humidity and solar radiation) of the experimental site, the hydrothermal parameters of the model are identified by matching the calculated with the observed surface and subsurface temperatures at un-sprinkled condition. Then, giving water volume on the surface layer of the model at water sprinkling, the changes of environment near water sprinkled area are simulated. As the results, the atmosphere, surface and subsurface temperatures observed from daytime to the following morning are preferably reproduced by the model.

キーワード: 数値モデリング, 散水, ヒートアイランド現象緩和対策

Key Words : Numerical modeling, Water sprinkling, Countermeasure of Heat Island

1. はじめに

都市のヒートアイランド現象の緩和対策の1つとして、路面散水（以下、散水）が国・自治体・大学・民間の各所で検討され、様々な屋外実験・観測結果が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、現在の所、都市内で散水システムが本格的に稼働するまでには至っていない。これは、いつ、どこで、どの程度のスケールで散水を行えば、どのような範囲で涼感効果が得られるのか、逆効果はないのかなど散水自体の有効性が必ずしも客観的に明らかではないため、散水システムの費用対効果を十分定量的に論じられないことにある。今後の進展には、多数の実験結果を説明できる数理モデルの開発と確立、およびそれを利用した有効性の検討、実用散水システムの設計が不可欠となる。

著者らはこれまで散水の効果を定量的に評価することを目的に、3回の屋外実験を実施し⁽³⁾、さらに数値モデルの開発を行った⁽⁴⁾。

本報では、著者らが行った屋外散水実験の観測結果を対象に実スケールにおける数値モデルの再現性を検討する。また、散水効果を評価する上で気温や地表面温度以外の指標

である体感効果の1つとして黒球温度変化を求め、考察を行った結果を報告する。

2. 再現対象とする屋外散水実験の概要

著者らは、2004年から2006年の夏期に合計3回の実験を行っているが、本論では2006年に行った舗装面への散水実験をモデル化の対象とする。ここではその概要のみを述べる。詳細は文献⁽³⁾を参照いただきたい。

実験では、校庭の舗装面に、図1の様に水平方向約16m、

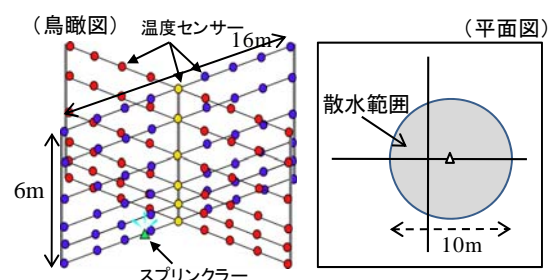


図1 実験装置の全体図。

鉛直方向約6mの範囲に温度センサーを計102個配置させ、その中央部でスプリンクラーによる散水を行った。測定は、2006年8月14日11:05から15日9:00まで行われ、散水は測定と同時に開始し、14日18:50に終了した。この実験では散水時間100秒、散水間隔10分、30分とした断続的な散水と連続散水による測定を行った。散水量(速度)は $2.9 \times 10^{-3} \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、散水範囲は直径約10mである。散水には地下水を用い、水温は約20°Cでほぼ一定であった。気温、地表面温度に加え、地中温度(散水範囲内で深さ7cm, 14cm, 非散水地点(スプリンクラーから約20m以遠)で深さ7cm, 13cm)の測定も行った。測定結果の一部を図2に示す。散水範囲内の地表面温度は、スプリンクラーからの距離によりばらつきはあるが、平均すると最大で15°C低下した。また、散水範囲内の気温(高さ1.5m)は、その風上側と比較して平均で最大0.8°C低下していることが認められた。散水範囲内の地中温度は、非散水地点と比較して、深さ13cm付近においても非散水地点より、最大約7°C(23:00時点)低下した。

3. 大気地下連成 - 水・熱環境モデルの概要

前報⁽⁴⁾した大気・地下連成 - 水・熱環境モデル (Atmosphere - Subsurface - Coupled HYdroThermal Environmental Model, 以降 ASCHYTEM と略記) は、地表付近の気象条件や路面散水など局地的な条件を物理的に考慮して環境中の大気・水・熱の状態変化を追跡する3次元数値シミュレータである。解析対象とする領域は、地表上10m オーダーから地下10m オーダー、水平方向に数100m オーダーとし、圧力(空気流動)、水飽和度(液体水の質量)、比湿(水蒸気量)、固相温度(土壌粒子、岩石など)、水相温度、気相温度の6つの状態量を未知数として解析する。接地境界層中での、水平風速が卓越した場における鉛直方向の水蒸気・熱の移流拡散輸送を考慮する。地表面では、放射収支および熱収支を扱い、地表付近および地下では固相(岩石、粒子)、気相(空気+水蒸気)、水相(液体水)

の温度を個別に追跡し、また地下間隙中の水・水蒸気・空気の流動も表現されている。本モデルでは、大気と地下の水・熱環境を完全連成させ、陰的に解析する点が特徴である。

4. 数値モデルによる再現計算の手順

4.1 再現計算の考え方

屋外実験には、制御された実験室実験とは異なり観測・測定できない様々な変動要因が含まれている。特に、実験場の局所的な風向・風速・日射は各地点で時々刻々と変化しているが、細かな変動まで観測することは容易ではない。また、場には多数の不確定な物性値・パラメータが存在するため、実験の場を忠実に物理モデル化することは事実上不可能である。モデリングによる定量評価の観点からは、ある程度平均化した場において、散水の有無による平均的な温度・比湿変化として検討することが有用であろう。幸い、実験の場に於ける卓越風向・風速、日射、気温などの平均的な変化は測定することが可能である。そのため、散水範囲を挟んだ風上から風下の領域を鉛直2次元的な場としてモデル化し、時間平均気象を境界入力することで、散水領域における平均的な微気象変化を表現する。

不確定パラメータ(ここでは特に地下の熱物理係数と熱伝達率を対象とする)については、散水を行っていない地点(非散水地点)における計算結果と実験結果を比較し、マッチングにより決定する。また、他に必要となるパラメータは文献値や実験時の挙動から推定することとする。これらの結果として得られたパラメータを用いて、散水現象をモデル計算に加え、気温・地表面・地中温度等を求め、実測値および非散水地点における変化と比較し、全体的な再現性の有無を検討する。

4.2 場の離散化と計算格子設定

ここでは実験場を卓越風向に沿う水平軸(x)と鉛直軸(z)による2次元断面モデルにより表現する。図3(a)に計算対象とする範囲を示す。再現対象となる領域は図中Aで示し

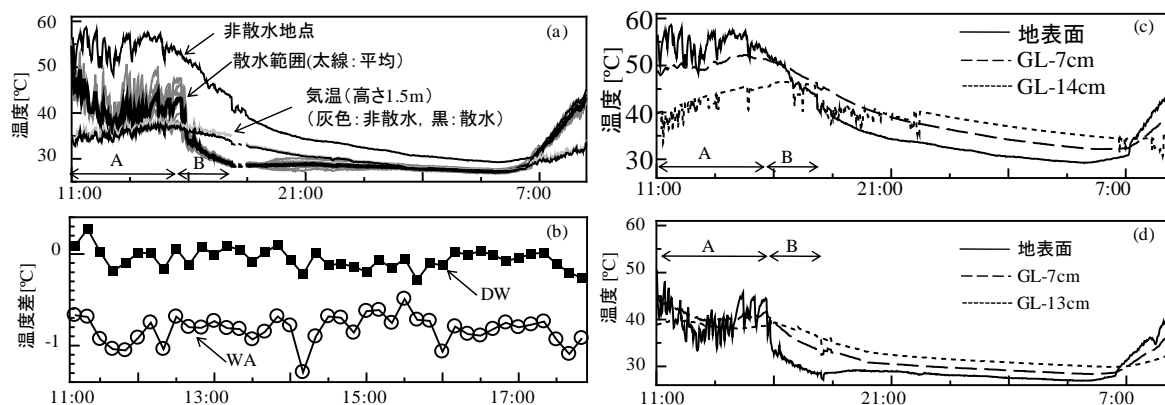


図2 測定結果の一部。A:断続散水期間, B:連続散水期間を示す。(a)散水範囲および非散水地点での地表面温度変化と非散水地点における気温(高さ1.5m地点,散水範囲については平均気温)の変化。(b)散水範囲風上側の気温と、散水範囲内(WA)および風下側(DW)の気温差の時間変化(10分間平均)。(c)非散水地点における地表面・地下温度の時間変化,(d)散水範囲内の地表面・地中温度の時間変化。

た範囲であり、境界条件による影響が再現対象領域まで及ばないように全計算領域を大きく設定している。格子数は x 方向 40×z 方向 32 個×y 方向 1 個の合計 1280 個である。数値計算は 2 次元であるため y 方向の格子幅は計算結果に直接的な影響を与えないが、散水量の入力や排水量の計算の際には xy 平面の面積を指定する方が分かりやすいため、ここでは、スプリンクラーによる散水範囲の直径である 10m として与えた。散水範囲のモデル化を示すため、図 3(b) として範囲 A (大気部分のみ) の鳥瞰図を示す。大気最上部・地下底部は閉境界とし、下部では最下層 (地下) の各要素 (圧力, 温度等) を一定値に、側方境界格子列には風速等の気象条件を与える。

本論文では、便宜上、大気の下層を A₁ 層とし、上方にいくにつれて A₂, …, A₁₅ 層 (大気全 15 層) とする。また、地下の第 1 層を G₁ 層とし、深度方向に G₂, …, G₁₇ 層 (地下全 17 層) とする (図 3)。地下の層厚は、G₁ 層が最も薄く (5.0×10⁻³m), 地下深部になるにつれて厚くなるように設定した。また、大気中では A₁ 層が最も薄く (0.1m), 高度が高くなるにつれて層厚が厚くなるように与えている。水平方向では、解析領域 A 内部の格子間隔を 1m として与えている。

4.3 初期状態の生成手法

測定値の再現計算を行うためには、実験開始直前の全格子 (大気, 地下) における 6 つの状態量分布が既知である必要がある。しかし、それらを全格子に厳密に数値設定することは不可能である。そこで、ここでは以下の手法を用いて実験直前の各状態量の推定を行った。

まず、実験サイトおよび実験時期の平均的な熱環境を得るため、実験日の前 1 週間 (2006 年 8 月 7~13 日) の平均

気温・相対湿度・風速・全天日射量 (実験場所から最も近い大阪管区気象台のデータを使用) の平均時間変化を算出した。ただし、13 日は一時的に急な雷雨により、温度や風速に急激な変化 (温度については 1 時間で約 10°C 低下し、風速は約 8m/s 増加した) が生じており、平均的とは言えないためこの日については除外して計算した。求められた平均気温・比湿・全天日射量を図 4 に示す。図 4 の各気象条件を繰り返し与え、地下温度の日平均値がほぼ一定となるまで計算を行った。なお、風速に関しては、全体の平均値である約 3.0ms⁻¹ を一定に与えた。

計算初期状態として、地下は水飽和度 0.4 (不飽和状態), 温度 20°C とし、大気については気温 30°C, 比湿 0.013kgkg⁻¹ (相対湿度 50%) とした。なお、地表面からの水分の蒸発は及ばないものとした。圧力は静水圧分布を与えた。次に、平均風速, 気温, 比湿を解析領域の風上側から流入させると共に、全天日射量を地表面層 (G₁ 層) に入力し、約 1 週間の連続計算を行った。実験直前の地下温度と同地点の計算値 (地表面, GL-7cm, -14cm の 3 点) が最もよく合った時間の状態分布を再現計算の初期状態として採用した。得られた各状態量分布を図 5 に示す。図 5 では、地表面を境に各状態量で変化が生じていることが分かる。地下の圧力増加は、地表面温度が上昇し、舗装により閉塞された気相の熱膨張による影響である。また、地表面からの蒸発が生じないため、大気中の比湿は入力条件に制限され鉛直方向に一定となった。地下の水飽和度に関しては、初期状態として残留飽和率を与えているため顕著な変化は生じていない。温度については、地表面温度の上昇に伴い、地下浅層, 大気層共に温度が上昇している様子が計算された。

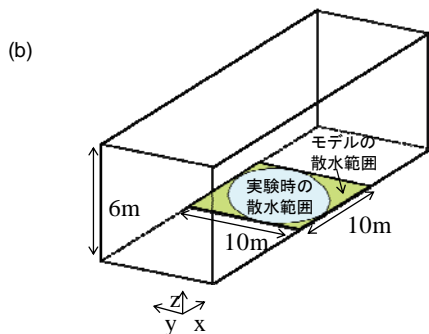
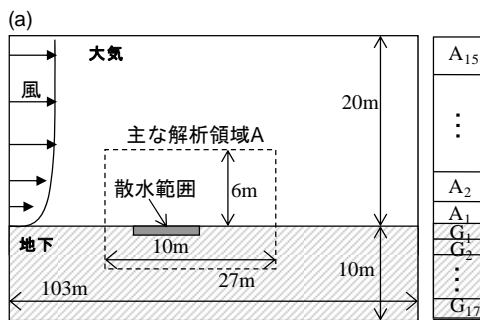


図 3 (a) 計算範囲と主な解析領域 (左) と層番号 (右), (b) 解析領域 A 内の散水範囲のモデル化の概念図。

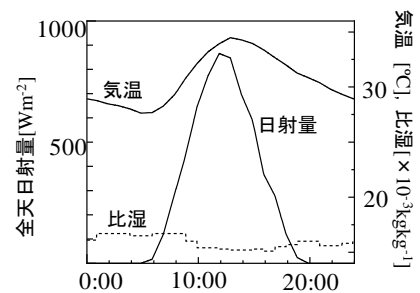


図 4 初期状態生成時の入力気象条件 (1 日分)。

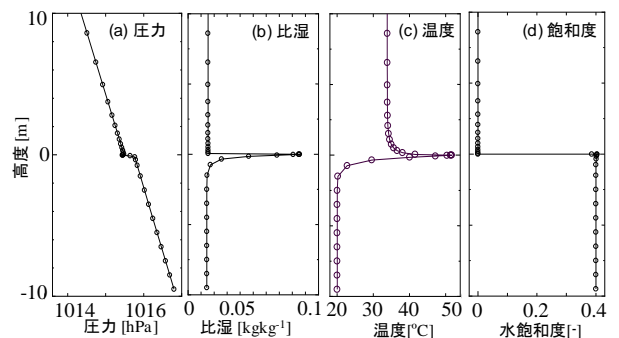


図 5 各状態量の初期状態。

4.4 散水実験時の計算に用いる入力気象条件

前述の初期化されたモデルに対し、実験時の再現計算を行う際に入力する気象状態は以下のように与えた。

全天日射量については、現地計測は行っていないため、大阪管区気象台で観測された全天日射量の1時間積算値を1時間平均値に換算し使用した。計算範囲に側方から流入する風速については、高さ1.5m地点で測定された日中(測定開始~18:50)の平均風速を基準に、高度による風速の対数則分布を仮定し、境界格子に与えた。気温、相対湿度に関しては、実際に実験場所で測定された散水範囲の風上側の値を風速に伴い入力する。比湿に関しては、高さ1.5m地点での相対湿度の測定値を比湿に換算し、高度に依らず与えた。気温に関しては実測した高さ(0.8m~6m)間を直線近似し各計算格子に与えた。

5. 非散水地点における測定結果を利用したモデル物性値の同定と感度解析

連成モデルに必要なパラメータは、①地下の物性(密度、比熱、熱伝導率など)、②大気に関するパラメータ(熱伝導率、乱流拡散のパラメータなど)、③散水時の蒸発に関するパラメータである。これらの値は必ずしも明確に決まらないものが多い。ここでは、①実験時の非散水地点における地表面温度・地中温度変化をマッチング対象として地下の熱物性を決定し、②散水範囲風上側の気温・大気中の相対湿度(比湿に換算)を用いて、大気に関するパラメータを決定する。なお、散水時の蒸発に関するパラメータについ

ては、次章で説明する。

5.1 地下熱物性に関する感度解析と同定

ここでは、特に固相密度、比熱、熱伝導率、および浸透率を変化させ、地表面・地下温度について実験結果とのマッチングを行い、パラメータの検討を行った。比較対象とする実測値は、非散水地点で測定された地表面温度、地下約7cm地点、地下約14cm地点の連続温度測定結果である。各物性について、密度 $1.0\sim 2.7\text{kgm}^{-3}$ 、比熱 $800\sim 840\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、熱伝導率 $1.0\sim 3.8\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、浸透率 $10^{-10}\sim 10^{-16}\text{m}^2$ の範囲で、様々に組み合わせで計算を行った。計算に用いたその他の入力パラメータを表1に示す。なお、毛管圧力や相対浸透率に関してはVanGenuchtenの式を用いた。

計算時間は、全てのケースにおいて実験日(8月14日)の11:00~翌日9:00までである。計算時間刻みは収束状況に応じて自動的に変化させ、最大で600秒とした。なお、非散水ケースの計算では、急激な温度変化は生じず、地下の固・液・気相温度はほぼ同一となる。

図6(a)(b)として、地下物性を変えた場合の地表面(G_1 層)・地中温度変化の一例を示す。図6より、地下物性の違いにより、地表面および地下温度の振幅や位相に変化が生じることが分かる。これらの物性に関して様々な組み合わせで計算を行い、最も実測値に適合する結果(Case 1)を得た組み合わせを表2に示す。求められた物性値は表3に示した既存の文献値⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾と比較しても妥当な値であると言える。

表2に示した物性を用いた計算ケースにおける高さ0.05m、1.5m地点の気温の時間変化と温度の鉛直分布を実験結

表1 計算に用いたパラメータ。

| | |
|--|-----------------------------|
| 熱伝達率 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] | 10 |
| 大気置換係数 [m^2] | 1.0×10^{-6} (at 1m) |
| 分散係数(縦横)[m] | 1.0×10^{-2} |
| 間隙率[-] | 地表面:0.1 地下:0.4 |
| 残留飽和率[-] | 0.4 |
| VanGenuchtenの係数 ⁽⁵⁾ | a: 4.37 n: 0.37 |

表2 感度解析により決定した地下熱・水理物性。

| | 地表面 | 地下 |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 層厚[m] | 0.1 | 0.99 |
| 浸透率[m^2] | 1.0×10^{-16} | 1.0×10^{-12} |
| 密度[kgm^{-3}] | 2000 | 2000 |
| 比熱[$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] | 840 | 840 |
| 熱伝導率[$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] | 1.0 | 1.0 |

表3 地下の熱物理係数の文献値。①⁽⁶⁾、②⁽⁷⁾、③⁽⁸⁾。

| | 出典 | 密度 [kgm^{-3}] | 比熱 [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$] | 熱伝導率 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] |
|--------|----|-----------------------------|---|---|
| コンクリート | ① | 2300~4020 | 540~1005 | 1.4~4.7 |
| | ② | — | ~800 | 1.1~1.5 |
| | ③ | 1900~2300 | 882 | 0.82~1.4 |
| アスファルト | ② | 1040~1400 | — | 1.1~1.5 |
| | ③ | 2120 | 924 | 0.75 |
| 土壌 | ② | 2000 | 1842 | 0.13~0.67 |
| | ③ | 約2000 | — | 0.14 |
| 花崗岩 | ② | 2600~2700 | 800~840 | — |
| | ③ | 2600~2900 | 840 | 3.85 |

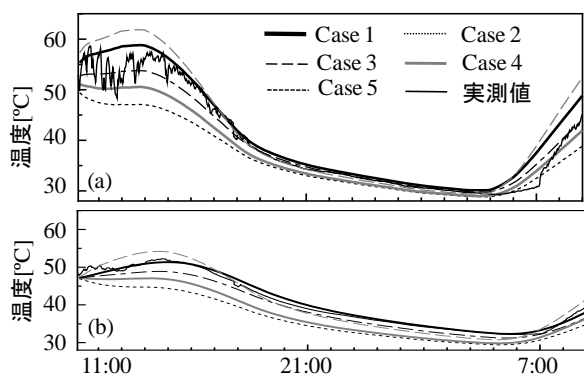


図6 (a)地下熱物性および水理物性を変化させた場合の(a)地表面温度変化、(b)地中温度(深さ7cm)の変化。

果と比較したグラフをそれぞれ図7, 図8に示す。ただし、高さ0.05mの気温については実測されていないが、参考として計算結果のみを示している。図7, 図8より、気温の時間変化および鉛直分布の計算結果は実験結果とよく一致することが示された。

5.2 地表面熱伝達率に関する感度解析

前節では、地表面熱伝達率を $10\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ と仮定して計算を行った。この熱伝達率の妥当性を検討するため、ここでは前節で得られた地下物性を用いて、熱伝達率の違いによる計算結果の違いについて考察を行う。ここでは、熱伝達率の推定にユルグスの式を用いることとする。一般に普通面におけるユルグスの式は以下のように表わされる。

$$U < 5\text{m/s} \quad D_H = 4.8 + 3.9U \quad (2)$$

$$U \geq 5\text{m/s} \quad D_H = 6.12U^{0.78} \quad (3)$$

ここで、 U は風速 [ms^{-1}] である。ここではユルグスの式により求めた熱伝達率 (約 $12\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) を基準に 8, 10, 12, $15\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ と変化させて計算を行い、気温分布の違いについて考察を行った。それぞれの計算ケースを Case 1~Case 4 とする。計算条件、格子設定、および地下の熱・水物性については前節の非散水ケースの計算と同条件とした。各ケースの計算結果を図9に示す。図9では、各ケースにおける地表面温度、高さ0.05m, 1.5mの気温変化を表している。ここでは、各ケースの温度差が比較的顕著であった測定開始時点 (11:00) から12時間後までを示す。図9より、地表面温度については各ケース間の温度差は小さく、地表面近傍では日中に比較的大きな温度差が見られたが、

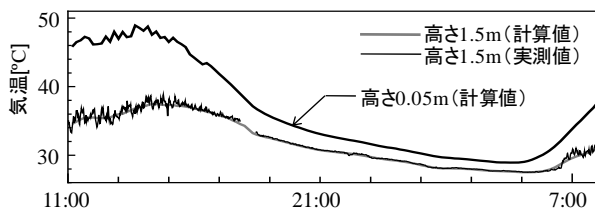


図7 表-2に示した熱物性を用いた場合の高さ1.5m, 0.05mの気温の計算結果。

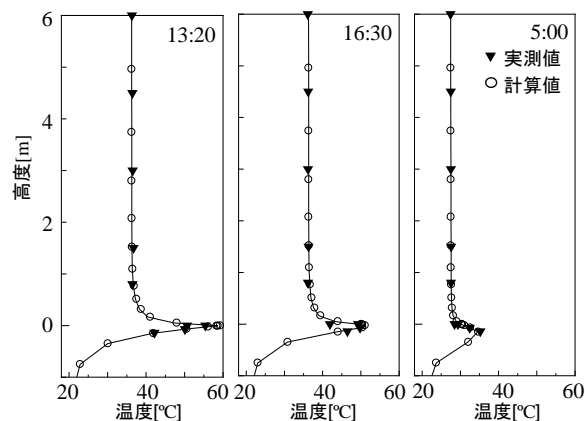


図8 実験結果および計算結果の鉛直温度分布の比較。各時間の前後30分間の平均値を示す。

上方にいくに従い、その差はほとんど見られなくなった。

ユルグスの式による熱伝達率は、バルク式において、裸地における交換係数⁽⁹⁾とも整合していることを確認しており、本論ではこれにより算出された熱伝達率を用いることとする。

6. 散水時における気温・地表面温度変化の再現性の検討

本章では、第5章で決定した物性値および地表面熱伝達率を用いて、散水時の地表面温度や気温変化の再現を試みる。なお、以降では特に断りのない限り、地下温度 ($G_1 \sim G_{17}$ 層) については気相温度を示す。これは、地表面がコンクリート舗装であり、間隙率が非常に小さく、散水時においても固・液・気相の温度がほぼ同一であったためである。

6.1 蒸発パラメータに関する考察

ASCHYTEM では、蒸発に関するパラメータとして、 A_1 層水面からの物質伝達率 D_w , G_1 層多孔質面からの物質伝達率 D_g , A_1 層の湛水層最大厚さ $Z_{w,ub}$ (以下、蒸発パラメータとする) を与える必要がある。そこで、ここではまず、蒸発パラメータの違いによる温度や比湿変化について考察を行うため、様々なパラメータの組み合わせで計算を行った。表4にその一例を示す。各パラメータの値は、表4の

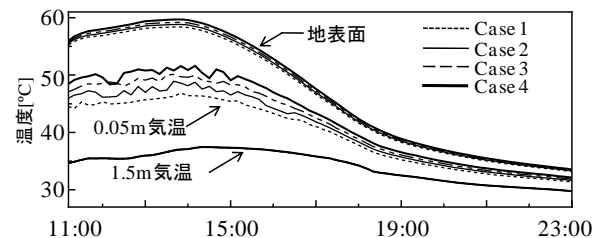


図9 熱伝達率の違いによる地表面温度、気温 (高さ0.1m, 1.5m) の変化。

表4 各ケースにおける蒸発パラメータ。

| | D_g [ms^{-1}] | D_w [ms^{-1}] | $Z_{w,ub}$ [mm] | S_r [-] | n [-] |
|--------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|------------|
| Case 1 | 1.0×10^{-2} | 1.0×10^{-2} | 1.0 | 1.0×10^{-2} | 0.9 |
| Case 2 | 1.0×10^{-2} | 1.0×10^{-3} | 1.0 | 1.0×10^{-2} | 0.2 |
| Case 3 | 1.0×10^{-2} | 1.0×10^{-3} | 0.5 | 1.0×10^{-2} | 0.9 |
| Case 4 | 2.9×10^{-2} | 7.0×10^{-3} | 1.0 | 1.0×10^{-2} | 0.9 |
| 上限 | 1.0×10^{-3} | 1.0×10^{-2} | 1.0 | 2.0×10^{-1} | 0.9 |
| 下限 | 7.0×10^{-2} | 1.0×10^{-3} | 0.5 | 1.0×10^{-2} | 0.2 |

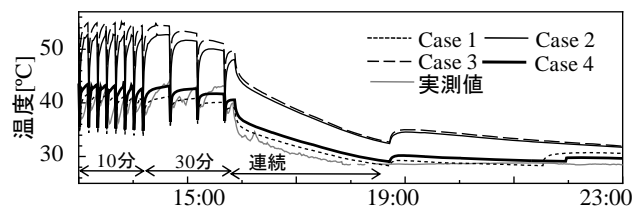


図10 異なる蒸発パラメータを用いた場合の地表面温度 (A_1 層水相温度) の計算結果。時間は散水間隔を示す。

下段に示した上限と下限の範囲内で、実測された地表面温度の平均値に近づくように調整し、数十ケースの計算を行った。なお、湛水面からの蒸発については、蒸発効率を線形的に減少させ、最終的に土壌からの蒸発となめらかに連続するように与えた。

散水のタイミングは実験時と同じとし、実験開始から14:15までは10分間隔、14:15から15:55までは30分間隔で 0.29 kgm^{-2} の散水量（実験時の1回の散水量と同量）を与え、15:55～18:50は連続的（ $2.9 \times 10^{-3} \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）に散水を与えた。

表4に示したケース例の計算結果を図10に示す。図10では測定開始2時間後から7時間後までの A_1 層の水相温度変化、および比較のため散水範囲内の地表面温度の実測値（平均）も示している。図10では、Case2とCase3は実測値よりも 10°C 以上高く計算されているが、これは D_w が他の2ケースよりも小さく、潜熱輸送が抑制されているためである。また、Case3はCase2よりも $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 高く計算されているが、これは最大水層厚さが小さいことにより蒸発量が抑制された結果の現れであろう。今回行った様々なケーススタディの結果、測定時間中を通して、Case1とCase4が実測値（平均値）と計算値のRMS（Root Mean Square：二乗平均平方根）が小さく、実験の再現性が良好であった（RMS=2.4程度）。ただし、Case1では、21時半頃における実測値との目立ったずれがあり、Case4ではほとんど見られなかった。このことより、今回はCase4のパラメータをもとに次項からの検討を行うこととする。

6.2 散水範囲における実験結果の再現状況

図11(a)(b)として、散水範囲内における地表面温度の実測値と前節で求められた計算結果の最適値（Case4）についてより詳細を示す。図11(a)は測定開始時刻（8月14日11:00）から翌朝（8:00）までの日温度変化を表している。また、図11(b)では、実験で散水を行っていた時間の内12:00から18:00までを拡大し、さらに実測された散水範囲内の地表

面温度全点を示している。図11(a)(b)には、計算結果として G_1 層の温度と A_1 層の水相温度（地表面上の湛水層の温度）の両方を示した。 G_1 層の温度（3相同一温度）と A_1 層の水相の温度に $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 程度の差が生じているのは、 G_1 層の格子に厚さ（5mm）があるため、層の温度が平均化されるためであろう。実験では、地表面に接触させた温度センサーに地表面温度を測定しているため、計算結果については A_1 層の水相温度と比較することとする。

断続的に散水を行った時間帯では、図11(b)より、実測された地表面温度変化の振幅や散水ごとの低下量は計算値と概ね同程度であると言える。ただし、実測値は場所によりばらつきがあること、また、15時頃以降の連続散水の時間帯については、計算値が $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度高く見積もられる結果となった。

図12として、地表面温度および地中温度の時間変化の計算結果および実測値と、 A_1 層の湛水層の厚さの時間変化および G_1 層の水飽和度の時間変化を示す。図11(a)でも見られたが、19:00頃に A_1 層水相温度の計算値が $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 上昇している。この昇温は、湛水層からの蒸発が進み、湛水層がほぼ全て蒸発し終えた時間に生じている。これは、地表面からの潜熱輸送量がなくなり、地下に蓄積された熱の供給によるものと考えられる。図12では、地表面温度と共に地中温度（深度14cm、計算結果は15cm）も示しているが、計算結果は実測値よりも $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 高く計算されている。計算結果が実測値よりも高く求められた原因として、実験日の数日前から行われていた予備実験・予備散水により、散水範囲の地中の浅層の温度が実験開始前から非散水地点よりも低下していた可能性が考えられる。また、実験日以前の気象状況（例えば13日の雷雨）が少なからず影響していた可能性もある。散水による地下温度の持続性やその低下量は、地下の熱環境を把握するためにも必要であり、今後は、散水の数日前からの長期的な計測も視野に入れ、検討を行う必要がある。

図12では、 A_1 層の水飽和度の時間変化も同時に示した。

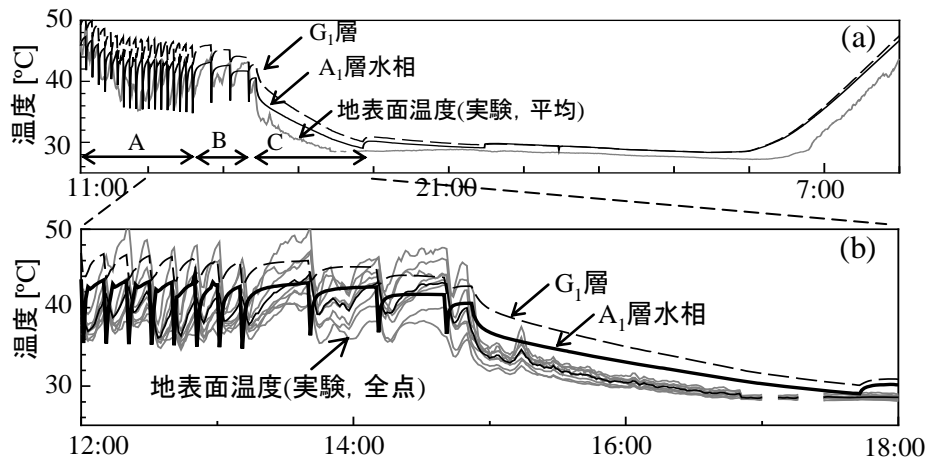


図11 散水範囲内における地表面温度の計算結果と実験結果。(a)11:00～翌日8:00、(b)11:00～19:00のグラフ。A：断続散水（間隔10分）、B：断続散水（間隔30分）、C：連続散水区間。

このグラフでは、散水間隔 10 分の断続的な散水の期間中は地表層の水飽和度は徐々に上昇するが、散水間隔が長くなると、水飽和度が低下し、また連続的に散水を開始すると、飽和度が上昇するという散水状況に応じた変化を表現できている。

図 13 は、散水範囲内の鉛直温度分布の計算結果と実測値を比較したグラフである。これらの図より、計算結果は温度分布に関しても実測値をよく再現できていることがわかる。16:30 の分布では、地表温度よりも地中温度が高くなっている様子が計算結果にも表れている。

以上の結果より、ASCHYTEM を用いた散水実験の再現計算では、断続的な散水の時間帯では、実測値自体に局所的なばらつきが見られるため厳密な再現精度の評価は困難であるが、地表温度変化の振幅や散水時の低下量は概ね再現できたものと考えられる。地表温度実測値の平均値に対する各測定地点の RMS を求めると 0.7~2.2℃であったのに対し、計算結果の RMS は 2.1℃であった（共に 11:00 ~ 翌朝 5:00 の間）。ただし、15 時頃以降の連続散水および散水終了後では、計算値が実測値よりも全体的に 1~2℃高く見積もられており、今後改善の必要性があるものの、散水終

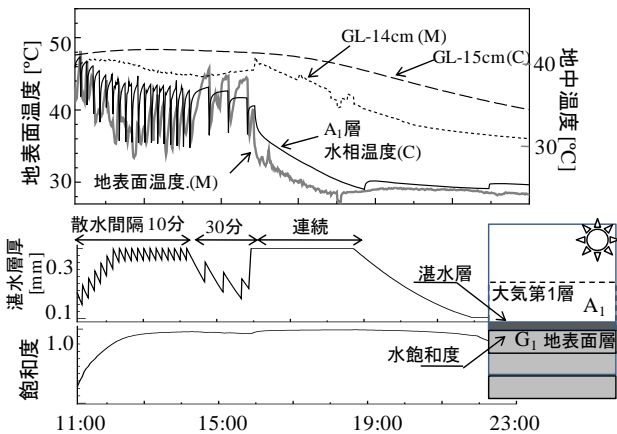


図 12 (上)地表および地中温度の計算結果 (C) と実測結果 (M), (中)散水による湛水層厚さの変化 (計算結果), (下)地表の水飽和度変化 (計算結果)。

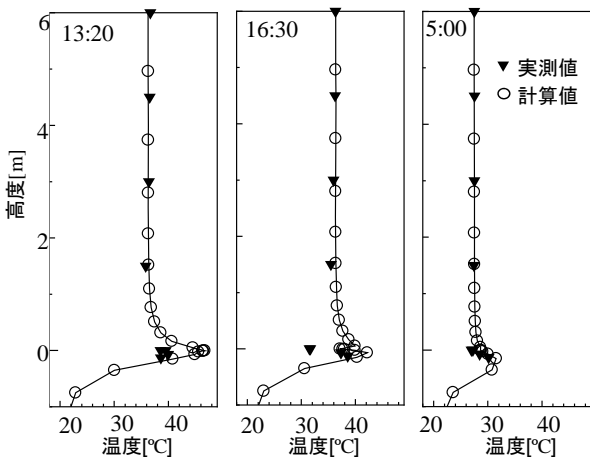


図 13 散水範囲における温度分布の実験結果および計算結果。各時間の前後 30 分の平均値を示す。

了後の緩やかな温度低下や夜間に温度変化の傾向は再現されているものと考えられる。

以降では、Case 4 での計算結果 (熱量フラックス等) について考察を行う。

6.3 地表面での熱量フラックス変化

図 14(a)(b)は、散水範囲における各種熱量フラックスの計算結果を示したものである。地表面に流入する熱流量をプラス値として、地表面から放出される熱流量をマイナス値として取り扱っている。図 14(a)より、散水時には短波長放射と同程度の熱量が潜熱輸送量として地表面から放出されていることが分かる。図 14(b)では(a)中の $\pm 200\text{Wm}^{-2}$ 付近の拡大図を示している。顕熱輸送量を見ると、散水開始後はプラス値 (地表面 G_1 層への流入を示す) となっており、大気への顕熱の輸送量が抑制されていることが分かる。

散水時に湛水される水以外は散水範囲外に排水される。本モデルでは、それによる排水量とそれに伴う排熱効果も計算しており、結果として累積排水量および排熱量変化を図 15 に示す。間欠散水では排水量は微小であるが、地表温度と散水水温との温度差が大きいため、排熱量は大きい。散水により地表温度が低下し散水水温に近づくと、連続的な散水により排水量は増加しても、それに伴う排熱量は徐々に低下する。

6.4 散水による気温・比湿の空間的变化

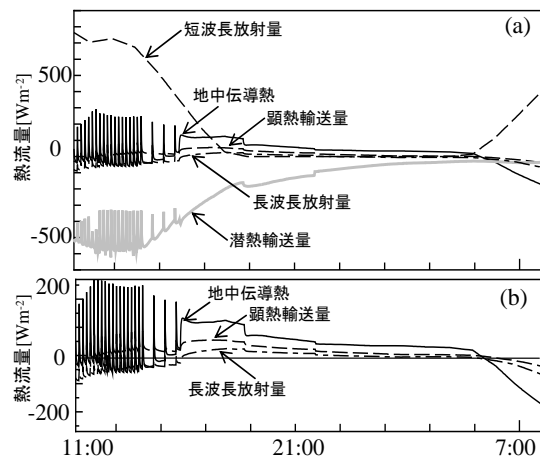


図 14 散水範囲内における各種熱量フラックスの計算結果。(b)は(a)中の熱量 $\pm 200\text{Wm}^{-2}$ の範囲を拡大の図。

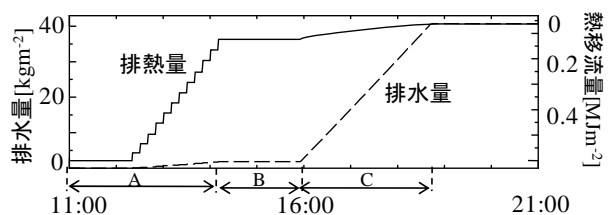


図 15 過剰散水時の排水量とそれに伴う熱移流量の累積変化。A: 散水間隔 10 分, B: 散水間隔 30 分, C: 連続散水, の期間を示す。

図 16 は、計算された非散水と散水の各ケースの気温差を等温度差図として表したグラフである。気温差は{(非散水地点の気温) - (散水地点の気温)}として算出している。図 16 より、散水範囲の最も風上側の地表付近より、風下側、上方へ、温度の低下領域が広がる様子が見られ、風下側では、より高い地点まで気温低下が生じている。その気温低下量は、散水開始 5 時間後に、地表付近(高さ 2~30 cm 程度)では 0.5~1.5°C 程度であり、高さ 0.5m 地点で最大 0.1°C 程度であった。

図 16(b)は、地中温度コンターを示している。散水範囲外であっても、風下側の温度が若干低下している様子が見られた。

図 17 は、図 16 の同時刻における比湿差{(散水範囲の比湿) - (非散水範囲の比湿)}を示す。比湿差についても、温度と同様に風下側に広がっていることが分かり、その拡散の形は温度とほぼ同一であると言える。

7. 散水効果に関する考察

7.1 黒球温度による散水効果の試算

ヒートアイランド対策としての散水システムの実用化の

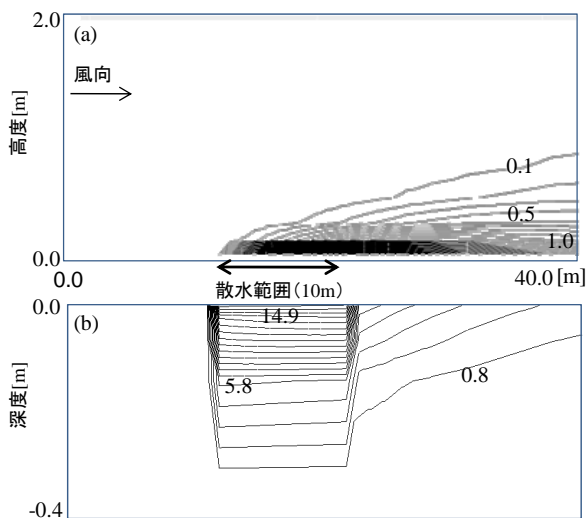


図 16 (a)大気、(b)地下における非散水ケースと散水ケースでの等温度差線図。散水開始後 5 時間後(16:00)の結果。等高線の目盛は温度低下量[°C]を示す。

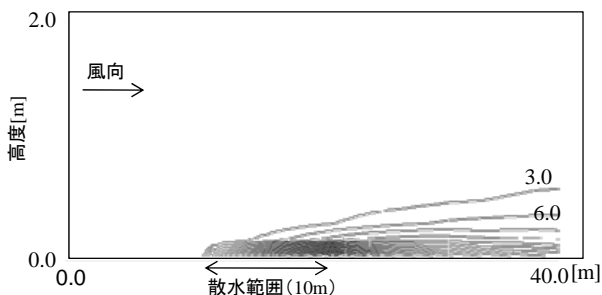


図 17 非散水ケースと散水ケースでの比湿差コンター。散水開始後 5 時間後(16:00)の結果。等高線の目盛は比湿増加量[$\times 10^{-4} \text{kgkg}^{-1}$]を示す。

ためには、気温や地表温度低下に加え、体感効果に関しても評価する必要がある。しかし、人間の感覚とは非常に複雑かつ繊細であり、体感を表す指数としては、例えば、気温や湿度のみから試算できるもの(不快指数)や、人体の代謝熱量等を含め詳細にモデル化したもの(SET*)などが挙げられる。ここでは、夏期の屋外環境において放射や周囲の気温や風速により受ける影響を考える 1 つの指標として、黒球温度差に関する散水効果を試算した。黒球温度とは、直径 15cm、平均放射率が 0.95、球殻の肉厚ができるだけ薄い、中空黒球の中心に位置する温度計の示す温度(JIS Z 8504)である。

ここでは、基本的な散水条件下での黒球温度への影響を考察するため、日中 1 時間(12:00~13:00)の連続散水を与えた場合のモデルスタディを行った。基本的な計算条件は 6 章で用いたものと同様の条件を用いて計算を行った。黒球温度の推定には、近藤による式⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を参考に推定した。

結果として、気温に対する黒球温度の温度上昇量の時間変化を図 18 に示す。図 18 より、散水を行うことで、非散水の場合と比較して散水時には約 4°C の黒球温度(高さ約 1.5m)の低下が見られた。これは、黒球温度では地表温度の低下に伴う地表からの放射の減少が大きく寄与しているためである。既存の実験と数値モデルによる計算の結果、散水時の気温(高さ数 10cm 以上)低下は 1°C 以下であったが、黒球温度に対しては、数°C の影響を及ぼすことが示唆された。今後は、このような散水時の温冷感や放射の影響等も考慮した“ヒートアイランド緩和のための散水効果”を定量的に評価することが不可欠である。

7.2 散水実用化に向けたケーススタディについて

散水システムの実用化のためには、対象となるサイトへの散水に対して、最小限の水量やコストで最大限の効果(気温や地表温度の低下、涼感など)を得る手法を定量的に評価する必要がある。散水効果は、対象とするサイトの周囲の環境や気象条件に影響を受けるため、厳密な温度低下量などはサイトに依存するが、様々なケーススタディを行うことで、各種散水条件や気象条件と散水効果との関係を推定することは可能であると考えられる。どの場所で、どの程度の気温低下や地表温度低下、相対湿度の増加が生じるのかと言った具体的な散水効果や、体感への定量的な効果について評価するためには、散水範囲、散水量、散水水温、散水継続時間、散水時刻等、気象条件(気温、日射量、風速、湿度)等の条件を組み合わせ、散水効果に関

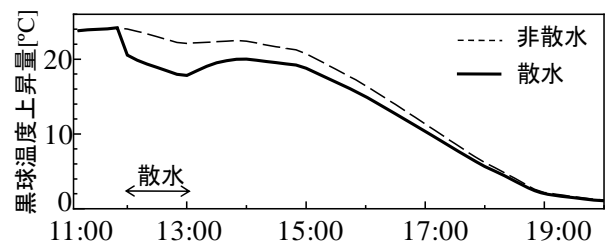


図 18 黒球温度の上昇量の時間変化(計算値)。

するケーススタディを行う必要がある。

8. 結論

本研究では、ヒートアイランド現象緩和に向けた都市散水効果の定量化を目的に開発した大気・地下連成系 - 水・熱環境モデル (ASCHYTEM) を用い、既存の屋外散水実験の再現計算及びその検討を行った。その結果は以下のようによまとめられる。

- 1) 実験サイトの2次元断面大気・地下モデルを作成し、平均気象条件のもと非散水時の観測データを用いて地下の熱物性等のパラメータを決定した。
- 2) 決定したパラメータセットを利用し、散水条件を加えて散水範囲のモデリングを行った。その結果、散水に関するパラメータセットを決定すると共に、実験時の地表面温度、地下温度、気温の変化を概ね再現できた。
- 3) その再現計算の結果を空間的に見ると、散水範囲の風下側の高さ 0.5m 地点で 0.1°C 程度気温が低下すると計算された。
- 4) 輻射の低減効果を考慮した体感効果の指標の 1 つとして黒球温度を取り上げ、日中の連続散水を想定したモデルスタディを行った。その結果、散水により、黒球温度が最大約 4°C 低下すると予想された。

散水システム実用化のためには、散水システム導入による効果や便益を定量的に評価する必要がある。そのためには、本モデルのような気象学的な評価 (気温や地表面温度変化など) に加え、温冷感に関する指標の導入、実街路での散水導入時における通行者への涼感に関するアンケート調査等により実際の評価調査を行うことで、より具体的に散水の有用性や経済的効果について明確にできるものと考えている。

今後は、他の屋内外の実験の再現性の検討や入力パラメータの設定や適用範囲についての数値実験により、さらに信頼性の高いモデルへ改良する予定である。将来的には、メソスケールモデル (大気モデル) と連結させることで、実際の街区のような複雑な場所への適用も視野に入れた汎用性の高いモデルへ発展させたい。

参考文献

- (1) 浅井重範, 打ち水大作戦 - 江戸の知恵を現代で、さらに世界へ -, 資源環境対策, 42-11(2006), pp.81-86.
- (2) 国土交通省, 東京都汐留地区における下水再生水の路面散水に関する実験結果について～ヒートアイランド対策としての路面の温度低減効果を確認～, 都市・地域整備関係報道発表資料, 2006,
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/04/040721_2_.html
(参照: 2009/8/20)
- (3) 吉岡真弓, 中川康一, 登坂博行, ヒートアイランド現

象緩和のための都市散水効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 G, 64-1(2008), pp. 68-77.

- (4) 吉岡真弓, 登坂博行, 都市散水定量化に向けた大気・地下連成 - 水・熱環境モデルの開発, 日本ヒートアイランド学会論文集, pp.11-23.
- (5) 平田健正, 檜山和男 (監訳), 小林健一郎 (訳) (ライナーヘルミック著), 地下環境での多相流と輸送現象現象の基礎から数値解析まで(2004), シュプリンガー・フェアラーク東京.
- (6) 岡田 清, 六車 熙編, コンクリート工学ハンドブック(1981), 朝倉書店.
- (7) 国立天文台編, 理科年表(2008), 丸善.
- (8) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(1975), 丸善.
- (9) 近藤純正, 地表面に近い大気の科学 理解と応用(2000), 東京大学出版会.
- (10) 近藤純正, 大気境界層の科学—大気と地球表面の対話—(1982), 東京堂出版.
- (11) 近藤純正, “暑熱環境と黒球温度”, 近藤純正ホームページ,
<http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke17.html> .
(参照: 2009/08/20).

(Received November 20, 2009, Accepted February 17, 2010)