

近赤外分光法による非接触伝達率計測のための基礎的検討

山中, 亮太郎
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4372235>

出版情報：九州大学, 2020, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 2 年 度

修 士 論 文

近赤外分光法による非接触伝達率計測のための
基礎的検討

九州大学大学院総合理工学府
環境エネルギー工学専攻
都市建築環境工学研究室

山中 亮太郎

指導教員 萩島 理

池谷 直樹

提出年月日 令和 3 年 2 月 9 日

目次

第 1 章 序論	3
1.1 研究背景	4
1.2 既往研究	4
1.3 研究目的	5
第 2 章 実験装置	6
2.1 風洞装置	7
2.2 測定機器及び測定方法	9
2.2.1 近赤外光の反射強度測定	9
2.2.2 ろ紙の蒸発量測定	11
2.2.3 温度及び露点温度測定	13
2.2.4 水蒸気濃度の算出方法	15
2.2.5 風速測定	16
第 3 章 理論と新計測法	20
3.1 近赤外分光法	21
3.2.1 水の吸収波長帯	21
3.2.2 拡散反射法	21
3.2 熱伝達と物質伝達の相似性	22
3.3 バルク係数（対流物質伝達係数）の推定	24
第 4 章 輸送効率の評価	25
4.1 溝ありプレート	26
4.1.1 較正実験	26
4.1.2 輸送効率実験	31
4.2 溝なしプレート	40
4.2.1 較正実験	40
4.2.2 輸送効率実験	42
第 5 章 計測システム内の速度計測	50

5.1 実験概要	51
5.2 溝ありプレート	52
5.2.1 滑面	52
5.1.2 角柱ブロック(1H, 2H)	53
5.1.3 立方体ブロック	54
5.3 溝なしプレート	55
5.3.1 滑面	55
5.2.2 角柱ブロック(1H, 2H)	55
5.2.3 立方体ブロック	56
第 6 章 バルク係数と風速の関係	58
6.1 溝ありプレート	59
6.1.1 滑面	59
6.1.2 角柱ブロック(1H, 2H)	59
6.1.3 立方体ブロック	61
6.2 溝なしプレート	61
6.2.1 滑面	61
6.2.2 角柱ブロック(1H, 2H)	62
6.2.3 立方体ブロック	63
第 7 章 総括	65
7.1 まとめ	66
7.2 今後の展望	67
参考文献	68
謝辞	70
付録	71

第 1 章 序論

1.1 研究背景

人類は、昔から新たな技術を生み出し、自分たちの生活をより豊かにする「イノベーション」を起こしてきた。移動手段を例に挙げると、徒歩から乗馬での移動、自転車、自動車などへと「より早く、より遠くへ」移動する手段が続々と開発されてきた。しかし、経済的な豊かさを優先させた結果として、様々な環境問題が発生した。例として自動車や航空機による騒音問題、有害物質による公害や大気汚染、生活排水やごみなどによる水質汚染などが挙げられる。

近年、世界中で人々が生活の質の向上の機会を求め、都市化が盛んに進行している。結果として、高層ビルや都市的土地利用が急増した。それに伴い、大気汚染やヒートアイランド現象が発生し、世界中で問題視されている。特にヒートアイランド現象は、アスファルトなどによる地表面の被覆化、緑地や水辺の減少、人工排熱の増加などによって引き起こされる。このような都市表面から排出される熱や水蒸気などをスカラー輸送と呼ぶ。

都市表面からの熱や物質などのスカラー輸送が大気に及ぼす影響は **forcings** と呼ばれる。この **forcings** と都市の建物形状、配列などの関係を究明することで、ひいては都市内の速度場、濃度場の評価につながる。**forcings** の定量化においては、運動量輸送量である抗力計測^{[1-1] [1-2] [1-3] [1-4]}に比べて、熱や物質などのスカラー輸送量の計測が行われている。表面近傍のスカラー輸送量の計測のために、数値解析(CFD; Computational Fluid Dynamics)を用いる方法は、計算コストがかかるため、現実的な解決法ではない。そこで、風洞内に都市モデルを設置し、モデル表面でのスカラー輸送現象を明らかにする試みがこれまで行われてきた。本研究では、風洞内計測実験における、近赤外分光法を利用した計測システムの開発を行った。

1.2 既往研究

伝熱実験を風洞内で行う際には、流体の温度制御が困難であり、伝熱量を直接計測することが難しい。そのため、伝熱現象と物質拡散現象の相似性を利用し、物質拡散現象から熱伝達現象を推定する方法が、これまでにナフタレン昇華法、塩分法、ろ紙法などが報告されている。以下に各手法の原理を説明する。

ナフタレン昇華法とは、対象面をナフタレンで覆い一定時間曝露させ、曝露前後での試験体の昇華量から、物質伝達率を算出する方法である。同手法の利点としては、対象面のナフタレンの濃度が自明であり、また、ガスクロマトグラフィーを利用することで、空気

中の濃度分布を計測できるため、大気内の拡散現象も観察することができることが挙げられる。しかし、ナフタレンは人体に有害であり、実験環境が安全でないことが問題である。Frauke Pascheke et al.^[1-5]は、キャニオン内にあるブロック高さのばらつきが与える、スカラー輸送量への影響を調べた。高さにばらつきのある条件では、高いブロックまわりで起こる、強い上昇・下降気流・蛇行流の影響で、高さのばらつきがある場合の方が、スカラー輸送量が増加することを明らかにした。

塩分法とは、風洞内に貯水部を設置し、貯水部を塩水で満たし、一定時間の曝露前後での塩分濃度の変化から蒸発量を計測することで、水面の物質伝達率を推定する方法である。同手法は、水面の温度を測定面の表面温度として採用するため、温度分布が生じにくいという利点がある。しかし、塩水面を対象とするため鉛直面の測定が不可能であるなど、幾何形状の制約がある。これまで、塩分法による床面でのスカラー輸送現象が観察されている^{[1-6] [1-7] [1-8] [1-9]}。

濾紙法とは、対象面に湿潤濾紙を貼付後一定時間曝露させ、曝露前後での湿潤濾紙の重量変化から物質伝達率を算出する方法である。測定ろ紙の大きさを変更することで、様々な対象面での伝達率計測が可能である。一方で、濾紙表面の温度を計測する必要がある。成田^[1-10]は、濾紙法を用いて、アスペクト比の異なるキャニオン内で、対流物質伝達速度を測定し、風下で伝達速度が減少することを示した。その他に、縮小模型を用いた対流熱伝達率に関する実験が行われてきた。計測面内の平均伝達率に関する既往研究はあるものの、空間分布や時間変化に関する詳細な計測が行われた例はない。対して、近赤外分光法を利用すると、熱伝達率の空間分布と時間変化を計測できることが知られている。浅輪ら^[1-11]によって、この近赤外分光法を用いた屋外建造物表面の熱伝達率が計測されている。このように、屋外計測に近赤外分光法が応用された例はあるが、風洞内の縮小型模型実験に応用された例はない。

1.3 研究目的

近赤外分光法を用いた対流物質伝達率の分布計測は容易である一方、事前に較正実験が必要である。また、風洞内実験では、計測時間内の物質拡散量(水分蒸発量)が少なく、より高精度な計測システムの開発が求められる。そこで本研究は、近赤外分光法による非接触伝達量計測システムを利用し、風洞内都市モデル表面の熱伝達率分布計測を行うことを目的とする。また、モデル表面近傍の風速を測定し、両者の関係性について考察する。

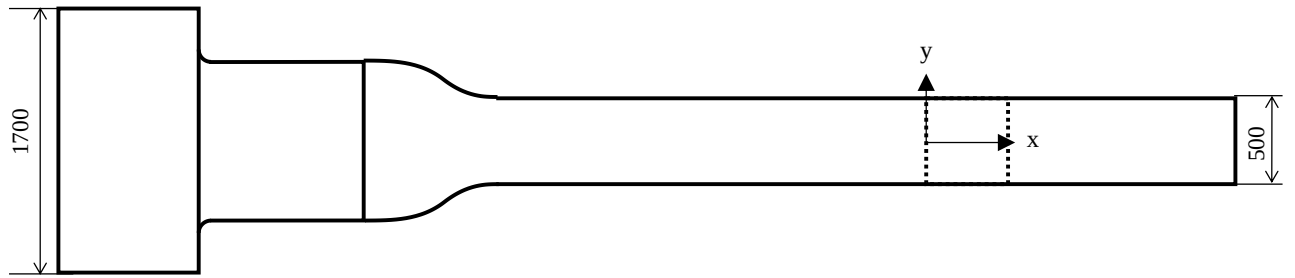
第 2 章 実験装置

2.1 風洞装置

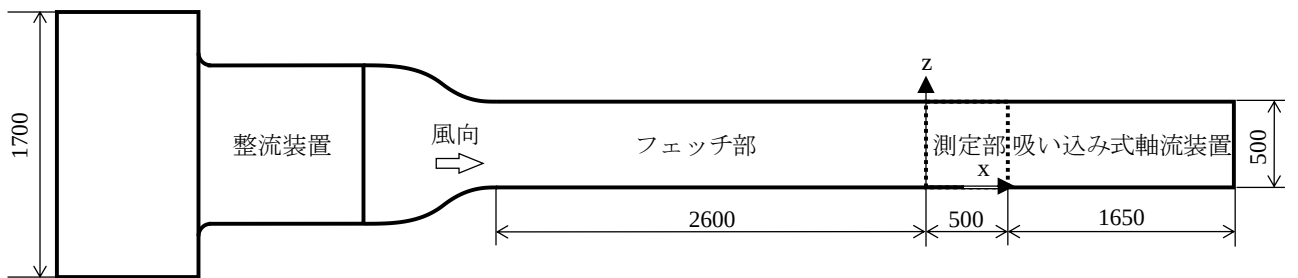
本研究は九州大学総合理工学府 F 棟に設置された吸い込み式風洞装置を用いて実験を行った。

水分蒸発量の計測実験を行う際に、蒸発現象の駆動力である、大気と蒸発面の湿度差を一定に保たなければならない。そこで、蒸発した水分を含んだ空気を再循環させないために、開放型の風洞を使用した。また、実験室内には冷暖房設備と除湿機を設置しており、室内の温度制御と除湿が可能である。実験中の室内気温は約 26℃、湿度は約 30%である。

風洞装置の平面図および正面図を図 2.1(a),(b)に、図 2.2 に風洞の写真をそれぞれ示す。図 2.2 は、右側が風上側、左側が風下側である。風洞装置は、風上側から順に整流装置、アクリル胴、吸い込み式軸流装置で構成されている。整流装置内部にはハニカムメッシュが内蔵されており、流入する外気の乱れを低減させることができる。アクリル胴の寸法は、長さ 3100 mm、幅 500 mm、高さ 500 mm であり、測定部はアクリル胴の風下側（長さ 500 mm）に位置している。測定部の風下側に吸い込み式軸流装置(空研機工株式会社)が設置されている。軸流装置はインバータ(三菱電機株式会社, A024)と接続されており、インバータの周波数を変化させることで、最大 10 m/s を送風することができる。本研究では流れ方向を x 軸、スパン方向を y 軸、鉛直方向を z 軸としており、x 軸の原点を測定点の風上端、y 軸の原点を風洞中心、z 軸の原点を風洞底面とした。



(a) 平面図



(b) 正面図

図 2.1 風洞図面



図 2.2 風洞写真

2.2 測定機器及び測定方法

2.2.1 近赤外光の反射強度測定

2.2.1.1 近赤外ビデオスペクトルカメラ

ろ紙表面の反射強度を測定するために、近赤外ビデオスペクトルカメラ（エバ・ジャパン株式会社，SIR-KI，図 2.3）を使用した．本カメラは 128×128 pixel で撮影範囲の反射強度を測定することができる．また，カメラのフレーム数は 30～180 fps で変更可能であり，本実験では 60 fps で撮影を行った．本カメラは，表 2.1 に示した 6 つの波長帯の反射強度をチャンネル 1 から順に取得している．測定波長とチャンネル番号の対応を表 2.1 に，カメラの仕様を表 2.2 にそれぞれ示す．

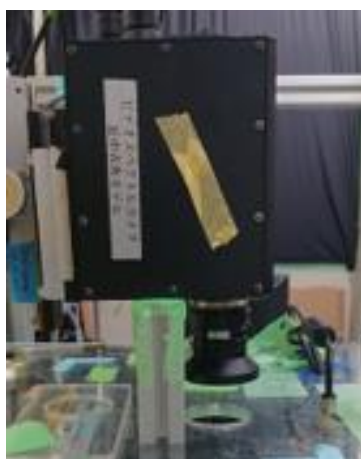


図 2.3 近赤外スペクトルカメラ

表 2.1 カメラの計測波長帯

Channel	Wave length [nm]
CH1	1100
CH2	1300
CH3	1420
CH4	1450
CH5	1500
CH6	1650

表 2.2 カメラの仕様

分光法式	内蔵ホイールによるフィルター回転方式
波長分解能	10 nm
解像度	128×128 pixel
レンズマウント	C マウント
画像素子	IngaAs センサー
重量	1.7 kg
消費電力	最大 20 W
撮影フレームレート	30～180 fps
取得波長数	6
データビット数	14bit
インターフェース	USB2.0
サイズ	110(W)×122(H)×145(D) *突起部を含まず
動作温度範囲	0～40 °C
供給電力	AC アダプタにより供給
入力電圧	DC12 V

2.2.1.2 LED 光源

ろ紙面に近赤外光を照射するために、LED 光源（株式会社レイマック，IDBA-C100，図 2.4(a)）を使用した．本光源は，電源装置（株式会社レイマック，IDGB-30M2-TP/PI，図 2.4(b)）に接続されており，つまみを回すことで光量を調整可能である．LED 光源の光量を一定に保つため，電源装置と安定化電源（株式会社エヌエフ回路設計ブロック，プログラマブル直流・交流電源 EC1000SA，図 2.5）を接続し，電源を供給した．



(a) LED 光源

(b) 電源装置

図 2.4 LED ライトと電源装置



図 2.5 安定化電源

2.2.2 ろ紙の蒸発量測定

2.2.2.1 電子天秤

ろ紙に含まれる水分量を電子天秤（株式会社エー・アンド・デイ，FZ-500i，図 2.6）で測定した。電子天秤の分解能は 0.001 g であり，水分量の時間変化を精度よく測定可能である。この電子天秤を風洞の外側に図 2.7 のように設置し，ろ紙含水量を実験の直前後に測定可能な状態にした。また，実験室内の気流によって，電子天秤の表示が不安定になることを防ぐために，図 2.8 に示すように風防を設置した。なお，本研究では，ろ紙の濡れ度合いを質量含水率（gravimetric water content，以下 GWC）として評価した。GWC の定義を式(2-2-1)

に示す．GWC はろ紙の総重量に占める水分量の割合である．ここで， M_w :含水量[g]， M_p :乾燥ろ紙の質量[g]である．

$$GWC = \frac{M_w}{M_w + M_p} \quad (2-2-1)$$



図 2.6 電子天秤



図 2.7 電子天秤の設置場所

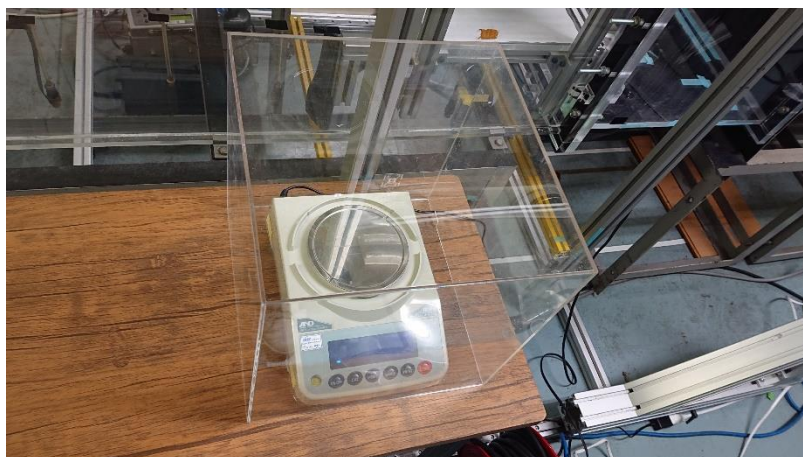


図 2.8 風防

2.2.3 温度及び露点温度測定

2.2.3.1 サーミスタ

ろ紙表面および大気の温度を計測するために、デジタル温度センサ（株式会社テクノ・セブン，DS103，図 2.9）を使用した．デジタル温度センサは，サーミスタ，温度デジタル変換器で構成されている．ろ紙表面の温度測定の際には，計測ろ紙（約 200×200 mm）とは別にサーミスタ挿入用の厚いろ紙（50×200mm）を図 2.10 のように設置し，そのろ紙側面に 3 つの穴をあけ，そこへサーミスタ 3 本を挿入し温度を測定した．



図 2.9 サーミスタと温度デジタル変換器

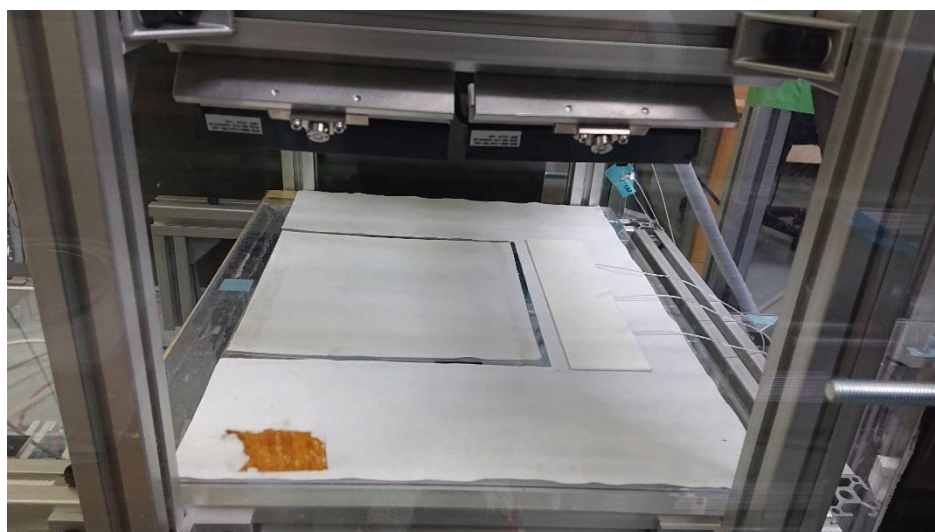


図 2.10 サーミスタ挿入用のろ紙

2.2.3.2 サーモカメラ

ろ紙表面の温度測定のために、サーモカメラ（株式会社アルゴ，Xi400，図 2.11）を使用した。ろ紙面内の温度分布とともに、ろ紙に挿入されたサーミスタの測定点を測定した。サーミスタの測定結果を参照値として、サーモカメラの出力分布を補正し、ろ紙の温度分布とした。

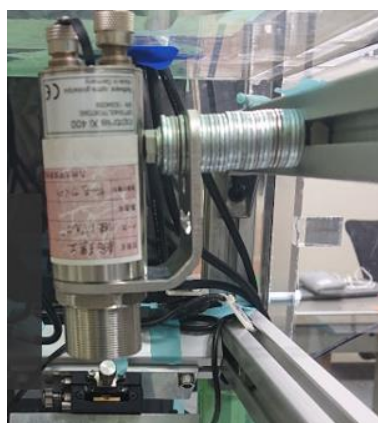


図 2.11 サーモカメラ

2.2.3.3 露点温度計

大気の露点温度を測定するために、鏡面式露点温度計（神栄テクノロジー株式会社，Dew Srar S-1，図 2.12）を使用した。

鏡面冷却式露点温度計の原理を以下に説明する。はじめに、露点温度計内に、計測対象の

気体をサンプリングし取り込む．機器内部にある鏡面上を気体が通過する際，一定温度以下になると結露が生じる．この時の温度を露点温度という．鏡面には LED 光が照射されており，その反射光量の変化を検知することで最適な露点温度を出力する．



図 2.12 鏡面式露点温度計

2.2.4 水蒸気濃度の算出方法

前節に記した機器を用いて，大気温度，ろ紙表面温度，大気露点温度を測定できる．本節では大気およびろ紙表面の水蒸気濃度の算出方法について記す．

水蒸気濃度は，温度と水蒸気圧の関係から算出される．大気の水蒸気濃度の算出過程については，温度 T [K]における飽和水蒸気圧 $P_{sat}(T)$ [Pa]は，Goff-gratch の式(式(2-2-6)～(2-2-9))を使って算出される．また，ろ紙表面の水蒸気濃度の算出過程については，ろ紙表面の飽和水蒸気圧は，「ろ紙表面温度で飽和状態にある」と仮定し，Goff-gratch の式(式(2-2-6)～(2-2-9))を使って算出される．大気およびろ紙表面の水蒸気濃度は，得られた飽和水蒸気圧を用いて，気体の状態方程式（式(2-2-10)～(2-2-13)）を使って算出される．ここで， P_{air} ：大気圧[Pa]， V ：体積[m³]， m ：質量[kg]， $\tilde{R}$ ：水蒸気のガス定数[-]， T_{dew} ：露点温度[K]
 C_{air} ：大気の水蒸気濃度[kg/kg']， C_{sur} ：ろ紙表面の水蒸気濃度[kg/kg']である．

$$\log_{10} f = -7.90295 \times \left(\frac{373.15}{T} - 1 \right) + 5.028081 \times \log_{10} \left(\frac{373.15}{T} \right) \quad (2-2-2)$$

$$-1.3816 \times 10^{a-7} + 8.1328 \times (10^{b-3} - 1)$$

$$a = 11.344 \times \left(1 - \frac{T}{373.15} \right) \quad (2-2-3)$$

$$b = -3.49149 \times \left(\frac{373.15}{T} - 1 \right) \quad (2-2-4)$$

$$P_{sat}(T) = P_{air} \times f \quad (2-2-5)$$

$$P_{sat}(T_{dew})V = m\tilde{R}T_{dew} \quad (2-2-6)$$

$$C_{air} = \frac{m}{V} = \frac{P_{sat}(T_{dew})}{\tilde{R}T_{dew}} \quad (2-2-7)$$

$$P_{sat}(T_{sur})V = m\tilde{R}T_{sur} \quad (2-2-8)$$

$$C_{sur} = \frac{m}{V} = \frac{P_{sat}(T_{sur})}{\tilde{R}T_{sur}} \quad (2-2-9)$$

2.2.5 風速測定

2.2.5.1 熱線流速計

ろ紙表面近傍の風速を測定するため、I型プローブ（日本カノマックス株式会社，0251R-T5，図 2.13）定温度型を使用した．熱線流速計の原理を以下に説明する．流体中に加熱された抵抗線（熱線）をおくと熱エネルギーが失われ，流速が大きければ抵抗線の冷却は早められる．この時の流速と放射熱量との関係は「KING の法則」と呼ばれ，式(2-2-10)のように表される．ここで， I :電流[A]， R :抵抗[Ω]， V :プローブ電圧[V]， U :流速 $\left[\frac{m}{s}\right]$ ， T :プローブ温度[K]， T_a :流体温度[A]， a, b :定数[-]である．

$$IR^2 = V^2/R = (a + bU^{1/2})(T - T_a) \quad (2-2-10)$$

このように，加熱センサの熱放射を利用して流速を計測することができる．

定温度型は，図 2.14 に示すように熱線を一边にもつブリッジを組み，その不平衡出力電圧をアンプで増幅してブリッジに戻すことにより，熱線の温度を流速に関係なく一定に保つことができる．この状態で流れが熱線に当たると，回路に熱線を初期設定温度に保つように電流が流れる．熱線の抵抗値も一定になるため，ブリッジ電圧 E [V]を測定することにより流速および変動分を検出することができる．式(2-2-11)を変形すると流速を求める式(2-2-

12)が得られる．

$$U = AE^4 + BE^2 + C \quad (2-2-11)$$

熱線流速計の較正は，ピトー管によって得られた風速とブリッジ電圧の出力値を図 2-5 のようにプロットし，最小二乗法を用いて定数 A,B,C を決定した．プローブからの出力は，定温度型熱線風速計（日本カノマックス株式会社）の CTA ユニット（Model 1010，図 2.16）を介してデータロガー（グラフテック株式会社，GL900，図 2.17）に取り込まれる．

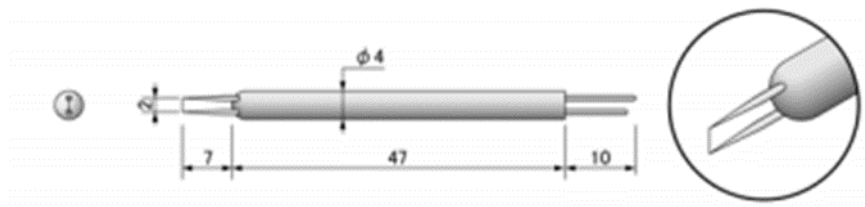


図 2.13 I 型プローブ^[2-1]

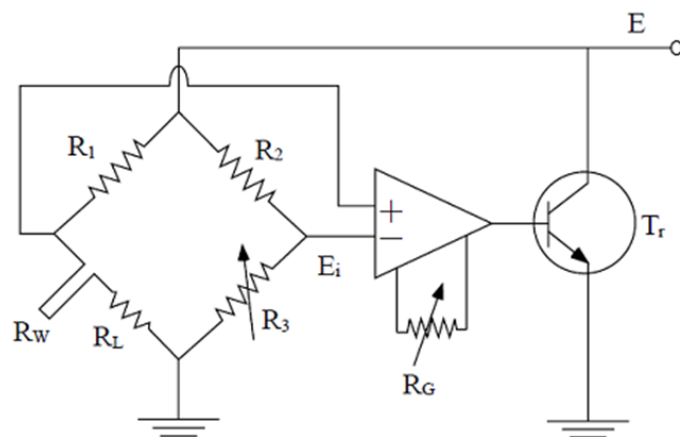


図 2.14 定温度ブリッジ回路^[2-2]

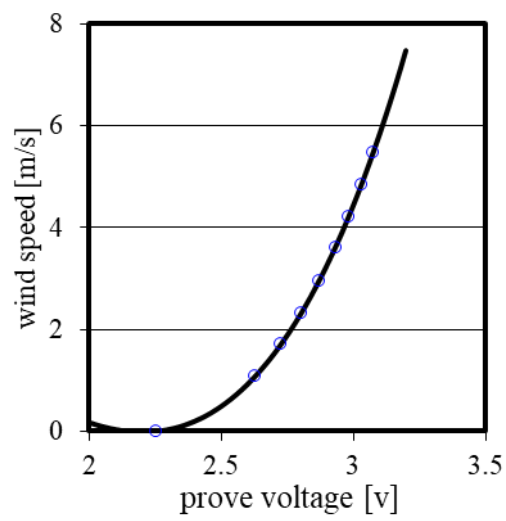


図 2.15 風速とプローブ電圧の関係の例



図 2.16 CTA ユニット (アンプ)



図 2.17 データロガー

2.2.5.2 ピトー管及びマノメータ

水分蒸発量計測時の参照風速計測のため, L 字型ピトー管 (株式会社岡野製作所, LK-1S, 図 2.18) を使用した. ピトー管はマノメータ (図 2.19) に接続されており, 測定した全圧 P_T [V] と静圧 P_S [V] の差より, 動圧値を出力する. 風速 U [m/s] は, 動圧 P_V [Pa] と空気密度 ρ_{air} [kg/s³] によって式(2-2-12)～(2-2-14)を用いて算出される.

$$P_V = P_T - P_S \quad (2-2-12)$$

$$P_V = \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 \quad (2-2-13)$$

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho_{air}} \times P_V} \quad (2-2-14)$$

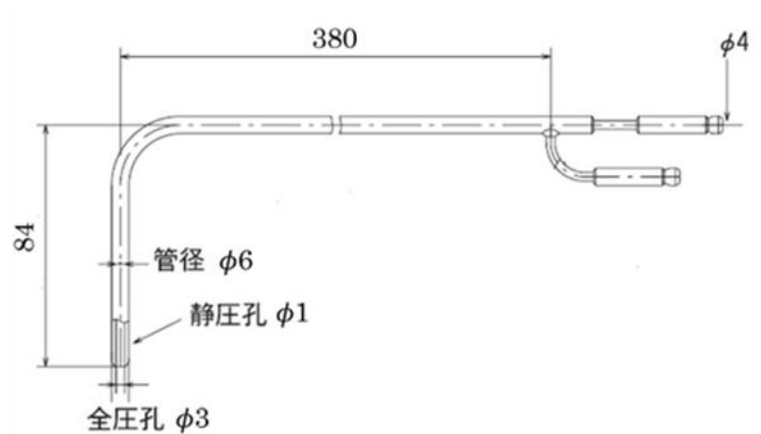


図 2.18 L 字型ピトー管



図 2.19 マノメータ

第 3 章 理論と新計測法

3.1 近赤外分光法

近赤外分光法とは，近赤外域（波長 800～2500 nm）における光の吸収，発光，反射，拡散反射に基づく分光法である．近赤外分光法は，検査対象に対し近赤外光を照射することで測定が可能な「非破壊検査」であるため，農学や食品分野にとどまらず化学，医学分野へと応用されている．本研究では湿潤ろ紙に対して近赤外光を照射し，ろ紙で反射された拡散反射光を近赤外カメラでとらえ，ろ紙内の反射強度分布を取得した．

3.2.1 水の吸収波長帯

水は赤外域（700 nm）より長い波長の光を吸収する特性がある．図 3.1 に水の吸収波長帯を示す．図のように，水は 1450 nm と 1940 nm の位置に大きな吸収域を持っている．また，1940 nm 付近の波長は他の物質の吸収波長帯と重複するため，1450 nm の付近の波長を水の吸収波長帯として利用されることが多い．

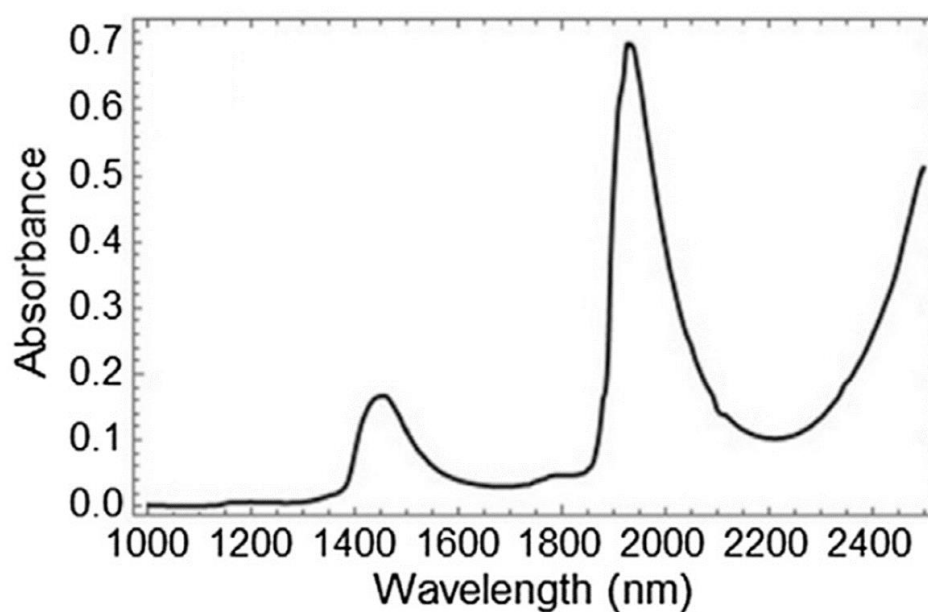


図 3.1 水の吸収波長帯 (Watanabe et al^[3-11]より)

3.2.2 拡散反射法

本研究では，近赤外分光法の中でも拡散反射法を利用し，ろ紙含水率を推定した．拡散反射法の原理を以下に説明する．はじめに，光源 (Light source) から試料 (Sample) 表面に近赤外光 (Near Infrared light, 以下 NIR) の入射光 (Incident light) を照射する．この光は試料内で

透過と反射を繰り返し，表面から正反射光と拡散反射光（Diffuse reflection）がでてくる．このうち，拡散反射光の反射強度（Reflection intensity）を近赤外ビデオカメラ（NIR Camera）で取得する．このように，拡散反射光を用いて試料の反射強度を得る方法が拡散反射法である．

試料内の含水率が高い場合は，近赤外光は試料表面で吸収され，測定される反射強度は小さくなる．このように，測定される反射強度と含水率の間には負の相関がある．拡散反射光の強度はクベルカームンクの式に従う．クベルカームンクの式は付録 2 に記した．なお，この校正実験には実験環境に起因する定数が含まれるため，反射強度から含水率を推定するためには事前に校正実験を行う必要がある．

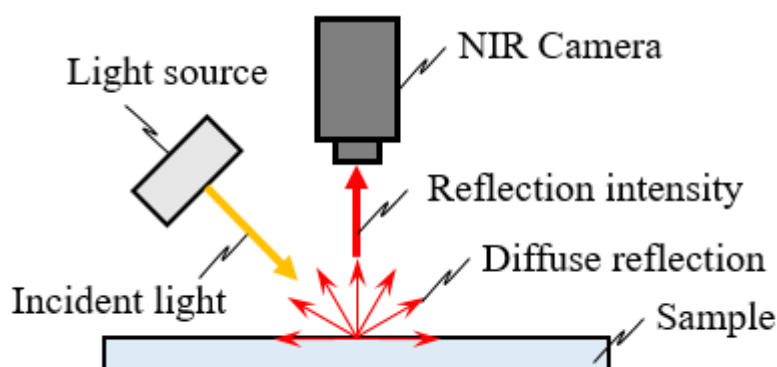


図 3.2 拡散反射法の原理

3.2 熱伝達と物質伝達の相似性

1.2 節で述べたように，風洞実験において対流伝熱量を直接かつ高精度に測定することは技術的に困難である．そこで，対流物質伝達量を測定し，熱伝達と物質伝達の相似性を利用し，対流物質伝達率から対流熱伝達率を推定する方法が採用されている．

固体表面から流体への間の対流による熱フラックス $q[\text{W}/\text{m}^2]$ および蒸発フラックス $E[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ は，式(3-1-1), (3-1-2)で表される．ここで， h : 対流熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ， T_{sur} : 表面の温度 $[\text{K}]$ ， T_{air} : 大気の水蒸気濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ， k : 対流物質伝達率 $[\text{m}/\text{s}]$ ， C_{sur} : 表面の水蒸気濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ， C_{air} : 大気の水蒸気濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ である．

$$q = h(T_{sur} - T_{air}) \quad (3-1-1)$$

$$E = k(C_{sur} - C_{air}) \quad (3-1-2)$$

このような 2 つの対流伝達現象に相似則が成り立つと仮定すると、ヌッセルト数 Nu およびシャーウッド数 Sh は、レイノルズ数 Re 、プラントル数 Pr 、シュミット数 Sc を用いて式(3-1-3), (3-3-4)で表される (C, m, n は定数である.)。また、式(3-1-3), (3-3-4)の両辺をそれぞれ除して式(3-1-5)が得られる。

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (3-1-3)$$

$$Sh = C \cdot Re^m \cdot Sc^n \quad (3-1-4)$$

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (3-1-5)$$

プラントル数とシュミット数の比、すなわち熱拡散率 α と物質拡散係数 D の比は式(3-1-6)で表され、ルイス数 Le として知られている。

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha}{D} \quad (3-1-6)$$

式(3-1-6)の左辺を Le^{n-1} に変形すると、式(3-1-7)のように表され、対流熱伝達率は物質伝達率とルイス数で表現される。

$$Le^{n-1} = \frac{Sh}{Nu} \cdot \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{-1} = \frac{k}{h} \rho C_p \quad (3-1-7)$$

本研究では物質拡散として水蒸気を用いており、水蒸気のシュミット数およびプラントル数は $Sc = 0.69$, $Pr = 0.70$ である。従って、 $Le \cong 1$ となるため、式(3-1-7)は式(3-1-8)のように変形できる。

$$h = k \cdot \rho C_p \quad (3-1-8)$$

このように熱伝達現象と物質拡散現象の相似則より、物質伝達係数から熱伝達係数を算出することができる。なお、本節の無次元数（ルイス数を除く）の定義を式(3-1-9)～(3-1-13)

に示す．ここで L :代表長さ[m], α :熱拡散率[m²/s], c_p :空気の定圧比熱[J/kg], D :拡散係数[m²/s], μ :粘性係数[Pa s], ν :動粘性係数[m²/s]である．

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\alpha \cdot \rho c_p} \quad (3-1-9)$$

$$Sh = \frac{k \cdot L}{D} \quad (3-1-10)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (3-1-11)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3-1-12)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (3-1-13)$$

3.3 バルク係数（対流物質伝達係数）の推定

近赤外分光法の拡散反射法を用いて，ろ紙の含水率を推定した．バルク係数の定義を式(3-3-14)に示す．風洞内に設置したピトー管で参照風速 U_{ref} を測定し，大気温度と大気露点温度から大気水蒸気濃度 C_{air} を算出，ろ紙表面温度からろ紙表面水蒸気濃度 C_{sur} を算出し，濾紙の反射強度から蒸発率 E を算出した．

$$E = C_E U_{ref} (C_{sur} - C_{air}) \quad (3-3-14)$$

本研究では，無次元対流物質伝達係数(Normalized Convective Mass Transfer Coefficient(C_E [-]))以降 Normalized CMTC)を用いて，輸送効率を評価する．

第 4 章 輸送効率の評価

本研究では，ろ紙を乗せる台に 2 種類のプレート（溝ありプレート，溝なしプレート）を使用した．以降の章では，それぞれのプレートごとに詳細を記す．

4.1 溝ありプレート

図 4.1 に示す溝ありプレートを使用して，輸送効率を評価した．

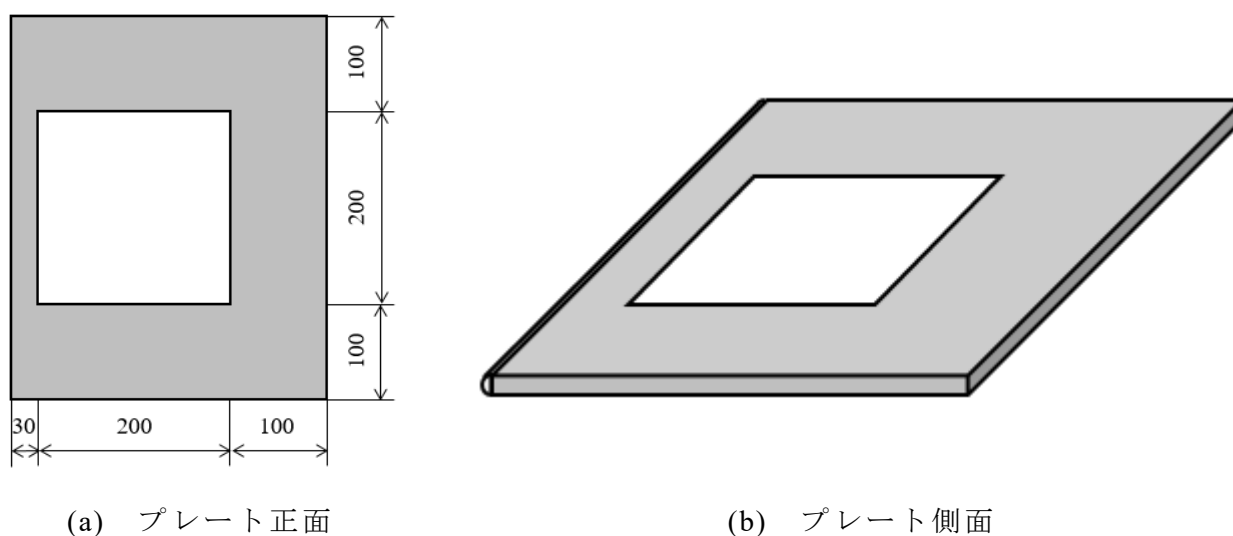


図 4.1 溝ありプレート

4.1.1 較正実験

4.1.1.1 較正実験の概要

近赤外光分光法では，近赤外光と含水率の関係を明らかにするために，事前に較正実験を行う必要がある．ここで較正実験の手順を説明する．図 4.2 に較正実験システムの概要図を示す．アクリルプレートに湿潤ろ紙(Wet filter paper)を貼付したものを電子天秤(Balance)上に設置し，約 1 時間自然乾燥させ，電子天秤でろ紙重量を 1 秒ごとに測定する．この間，湿潤ろ紙表面に光源(Light source)から近赤外光(NIR light)を照射する．湿潤ろ紙表面からの拡散反射光の反射強度を近赤外ビデオカメラ(NIR Camera)で計測する．このようにろ紙の含水率と反射強度を同時計測することで両者の関係を明らかにすることができる．また，ろ紙内の含水量変化を一定に保つため，計測ろ紙(Measurement area)の周囲に湿潤ろ紙を設置する．

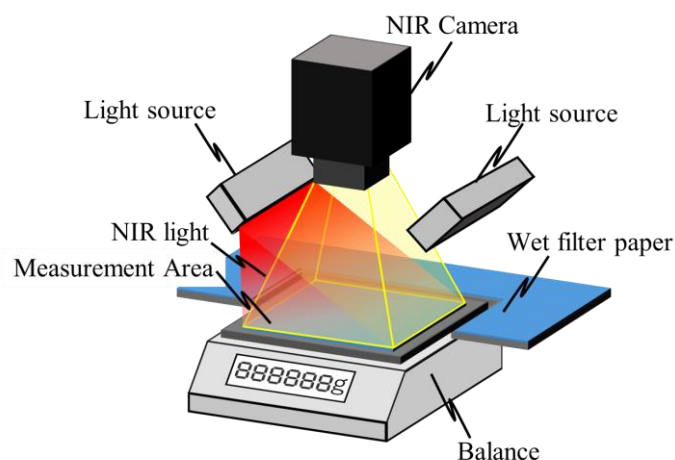
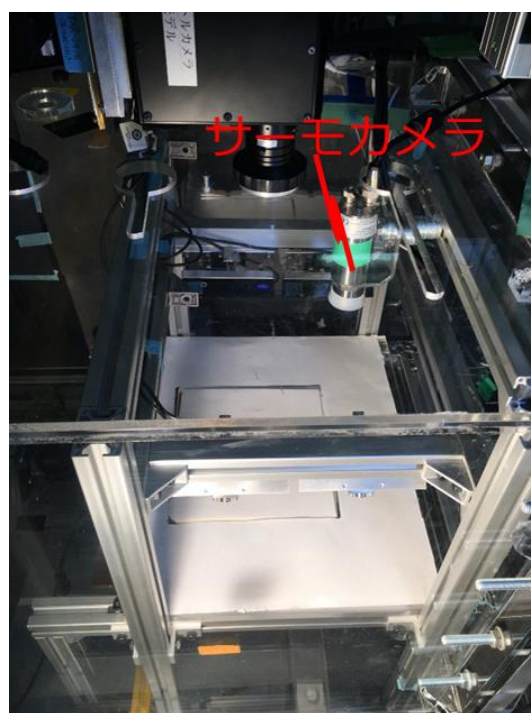


図 4.2 較正実験の概略図

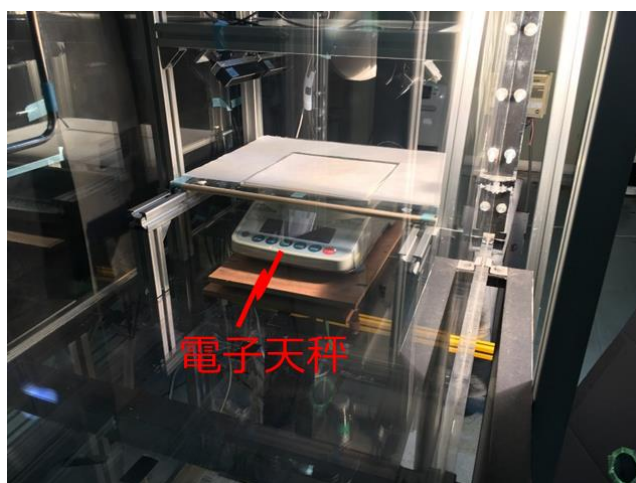
図 4.3 に輸送効率の計測システムを示す．図 4.3(a)は風洞上面から撮影した写真である．ろ紙表面の反射強度を計測するために，風洞上面にカメラのレンズと同じサイズの穴を開けた．図 4.3(b)は風洞上面を側面から撮影した写真である．計測ろ紙(200×200 mm)の周囲に湿潤ろ紙を設置していることが確認できる．図 4.3(c)は風上側から撮影した写真である．計測ろ紙の下に電子天秤が設置されており，濾紙重量を電子天秤で測定していることが確認できる．図 4.3(d)は風下側から風洞内を撮影した写真である．ろ紙表面に影が生じることを防ぐために，2 方向から近赤外光を照射している．



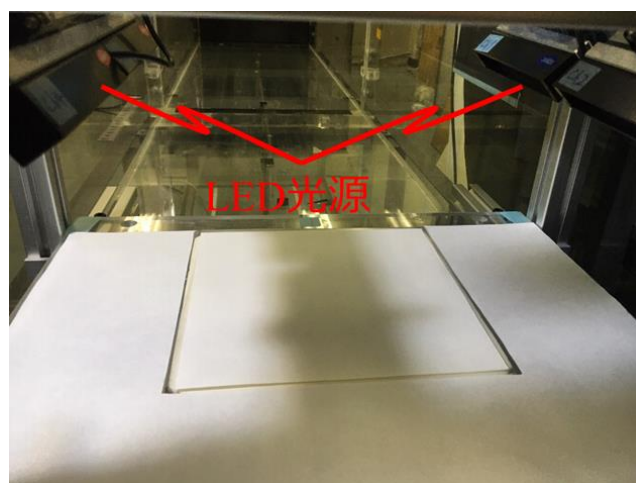
(a) 近赤外ビデオカメラの配置



(b) サーモカメラの配置



(c) 電子天秤の配置



(d) LED 光源の配置

図 4.3 実験環境

4.1.1.2 較正方法

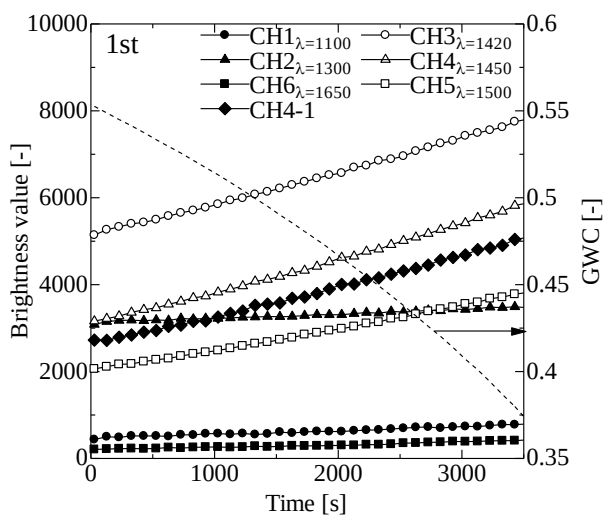
較正実験の方法について記す．実験室内の温度（約 25℃），湿度（約 30%）を一定に保つためエアコンと除湿器を稼働させる．実験条件を表 4.1 に示す．電子天秤上に計測ろ紙(約 200×200 mm)を設置し，その内中心部分(120×120 mm)の反射強度を近赤外カメラで取得する．計測ろ紙の含水量変化一定に保つため，図 4.3 に示すように湿潤ろ紙をプレート上に設置した．約 1 時間ろ紙を自然乾燥させ，計測ろ紙の含水率と反射強度を同時計測する．

表 4.1 実験条件

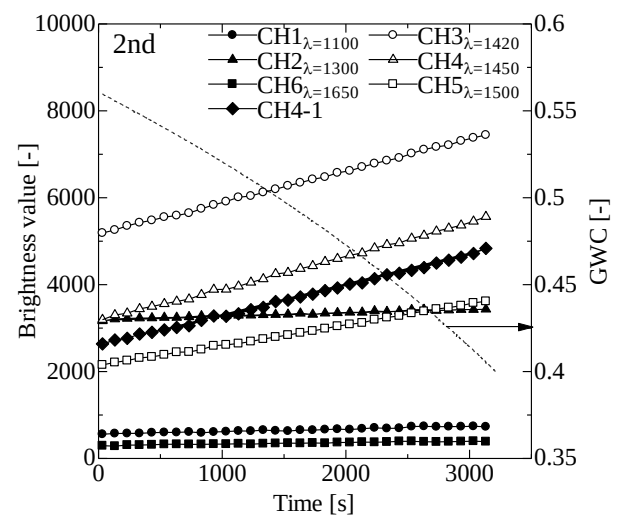
測定時間[s]	約3000
試行回数[-]	3
サンプリング周波数[Hz]	近赤外ビデオカメラ:1 電子天秤:1

4.1.1.3 較正結果

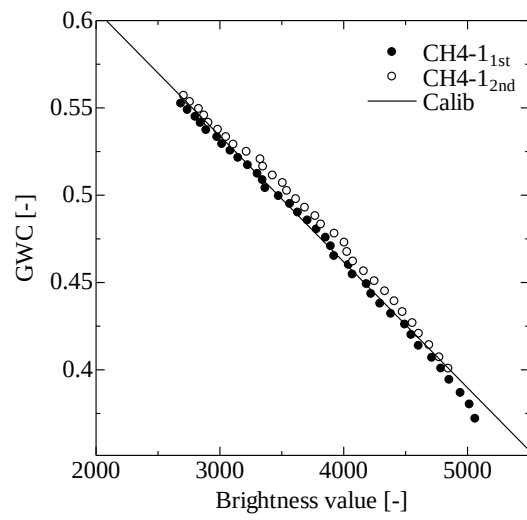
近赤外カメラで取得した各波長の反射強度と GWC の時間変化を図 4.4 に示す．縦軸は反射強度[-]および GWC[-]，横軸は時間[s]である．図 4.4(a)は試行回数 1 回目，(b)は試行回数 2 回目を示す．非吸収波長帯の反射強度はほぼ一定であるのに対し，吸収波長帯の反射強度は時間とともに増加していることが分かる．以上より，含水率と吸収波長帯の反射強度には負の相関があることが分かる．また，非吸収波長帯の反射強度が時間とともに微小変化していることが確認できる．そこで，吸収波長帯 CH4($\lambda=1450\text{nm}$)と非吸収波長帯 CH1($\lambda=1100\text{nm}$)の差を正味の反射強度 CH4-1 として図 4.3(c)にプロットした．GWC の減少とともに，CH4-1 の反射強度が増加している様子が分かる．



(a) 較正実験の結果(実験 1 回目)



(b) 較正実験の結果(実験 2 回目)



(c) 較正実験の結果と較正式

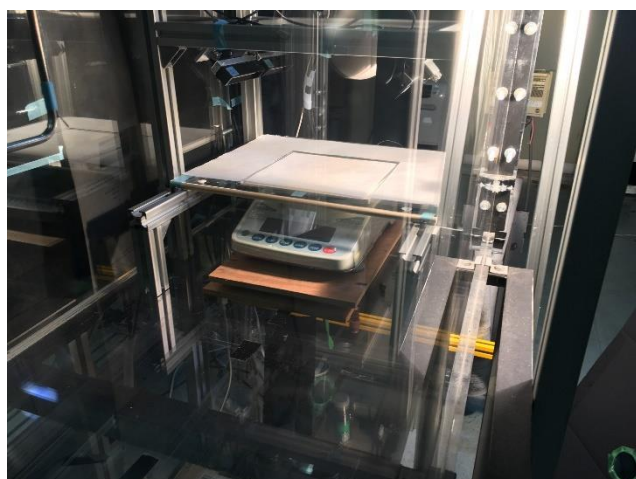
図 4.4 較正実験結果

4.1.2 輸送効率実験

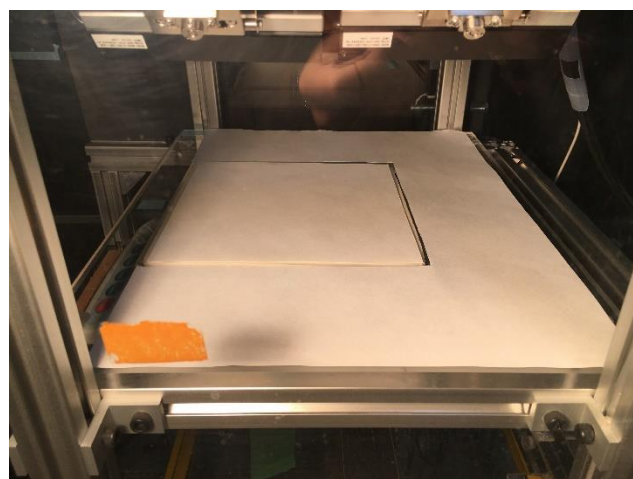
4.1.2.1 滑面

近赤外分光法を用いて、溝ありプレート上における平板境界層上の輸送効率を計測した。滑面での実験環境の写真を図 4.5 に示す。図 4.5(a)は風上側、図 4.5(b)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である。

実験の概略図を図 4.6 に示す。また、実験条件を表 4.2 に示す。図 4.6(a)の赤枠内に関して $GWC=0.55$ を目安に参照反射強度を測定する。その後風洞を 1 分程度稼働させ、定常状態になったタイミングで 3 分間計測を行う。その間、ピトー管で参照風速を、露点温度計で露点温度を、サーミスタで大気温度とろ紙表面温度を、近赤外カメラで反射強度を測定する。

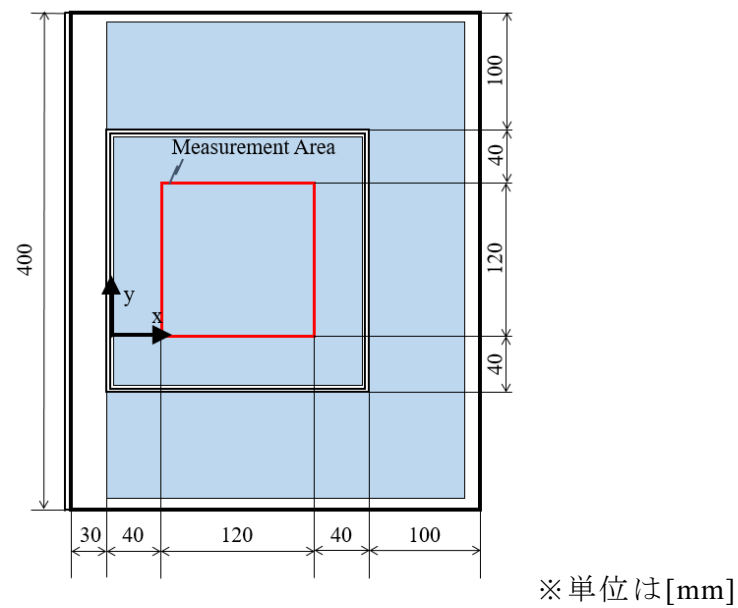


(a) 実験対象(風上側)

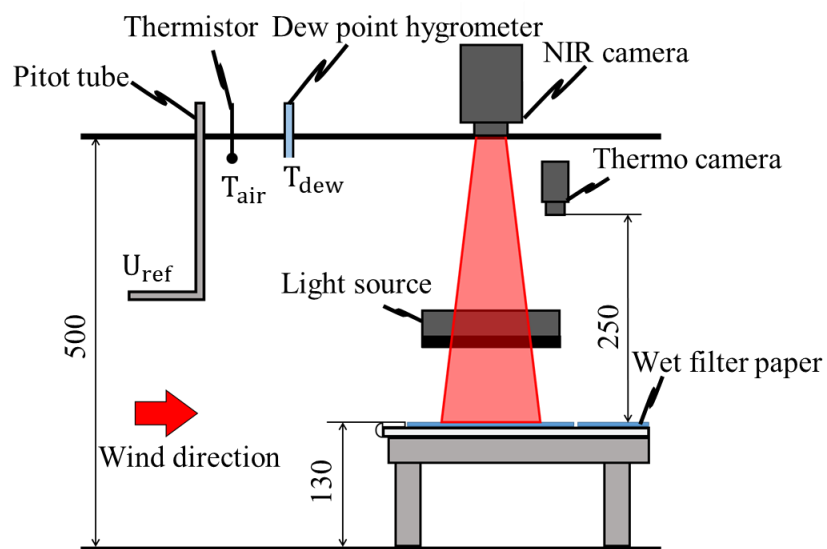


(b) 実験対象(側面)

図 4.5 実験環境（滑面）



(a) プレート上面図



(b) 実験装置の配置図

図 4.6 実験環境の概略図

表 4.2 実験条件

測定時間 [s]	180
参照風速 [m/s]	2
試行回数 [-]	2
サンプリング周波数 [Hz]	近赤外ビデオカメラ : 1 サーミスタ : 1 サーモカメラ : 1 ピトー管 : 1 露点温度計 : 1

滑面における無次元 CMTC 分布を図 4.7 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.7 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.7 を見ると計測範囲全体にまだら模様が観察される．これはろ紙表面の凹凸による影響が考えられる．また， $x=40$ mm, $y=0$ mm 付近に較正式作成の失敗により無次元 CMTC の過大な値がみられる．風上側($x=40\sim 70$ mm)で無次元 CMTC の値が大きくなっており，プレートのエッジ部分で発生した剥離によって輸送現象が促進されていることが分かる．

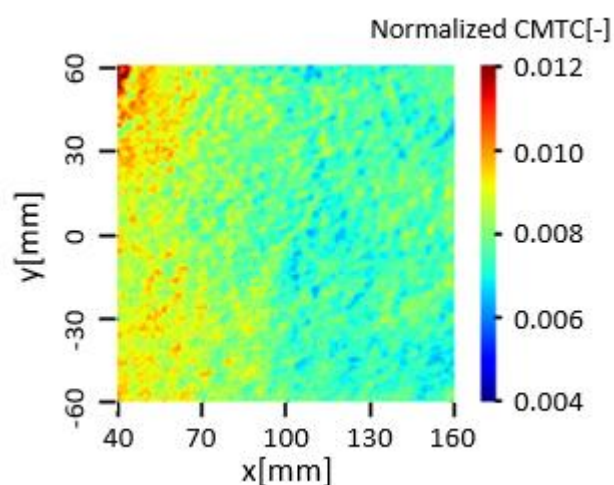
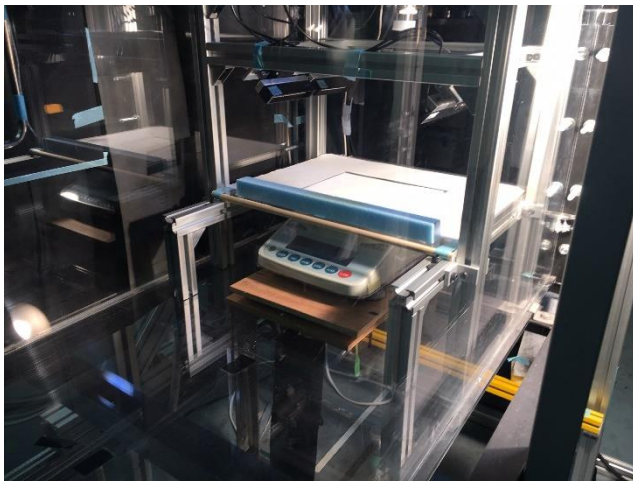


図 4.11 無次元 CMTC 空間分布 (滑面)

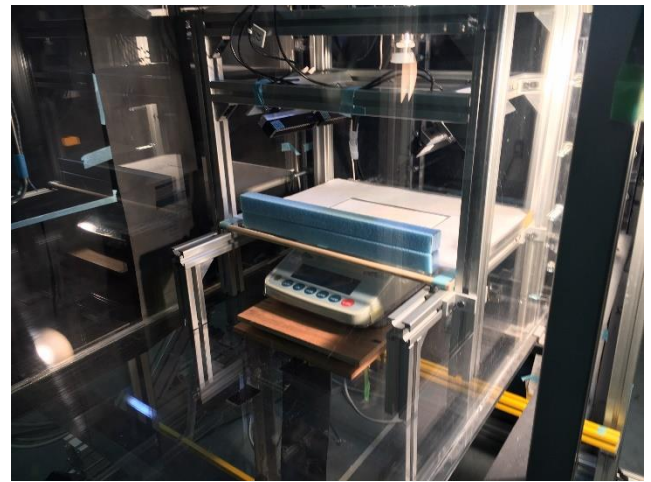
4.1.2.2 角柱ブロック(1H, 2H)

角柱ブロック(25×25×325 mm)を設置し、角柱ブロック後流の輸送効率を計測した。角柱ブロックを1つ設置(1H, 高さ 25 mm), 2つ設置(2H, 高さ 50 mm)の2パターンで計測を行った。

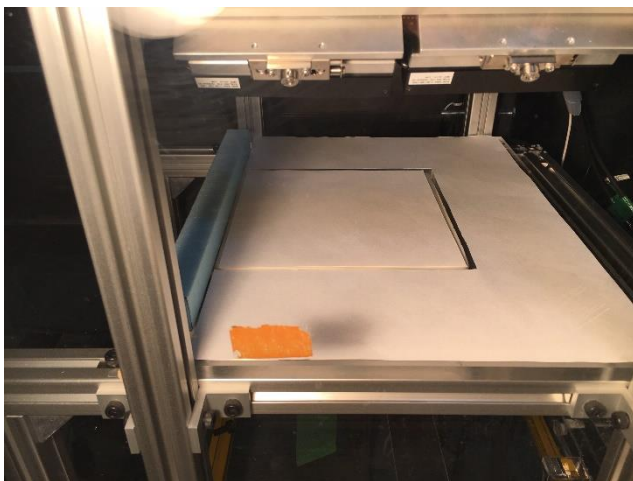
実験環境の写真を図 4.8 に示す。図 4.8(a), (b)は風上側、図 4.8(c), (d)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である。また、角柱ブロックは図 4.9 のように設置した。実験条件を表 4.3 に示す。



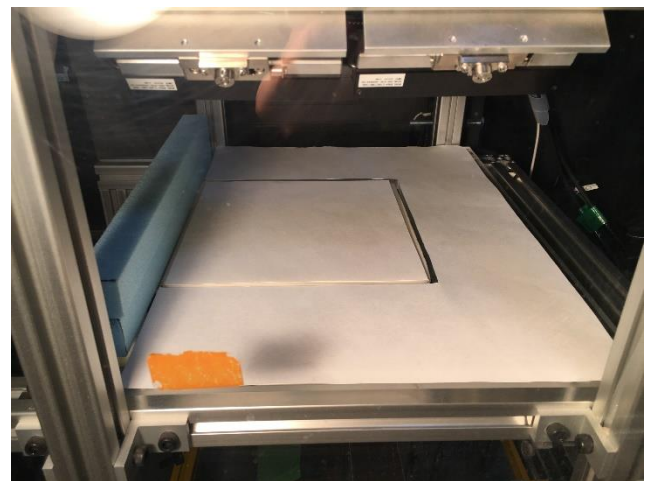
(a) ブロック配置(1H)



(b) ブロック配置(2H)



(c) ブロック配置(1H, 側面)



(d) ブロック配置(2H, 側面)

図 4.8 角柱ブロック

角柱ブロックを用いた条件の無次元 CMTC 分布を図 4.10 および図 4.11 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.10 および図 4.11 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.10 および図 4.11 を見ると風上側($x=40\sim100$ mm)で無次元 CMTC が小さく，風下側($x=100\sim160$ mm)に進むにつれて大きくなっている．風上側は，角柱ブロックより主流方向からの流入風が妨げられるため，無次元 CMTC が小さくなったと考えられる．

1H と 2H のパターンを比較すると，1H では $x=70\sim130$ mm でスパン方向に分布がみられ，2H ではスパン方向分布は一様である．1H で分布が見られた理由としては角柱ブロック側面の蛇行流によるものが考えられ，計測範囲内の気流性状の把握が必要である．

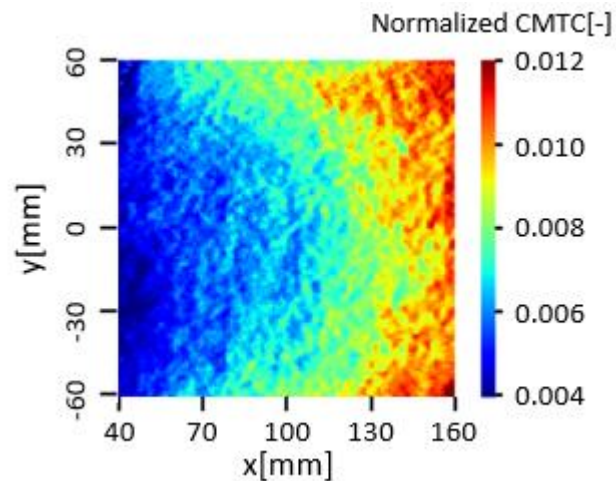


図 4.10 無次元 CMTC 空間分布 (1H)

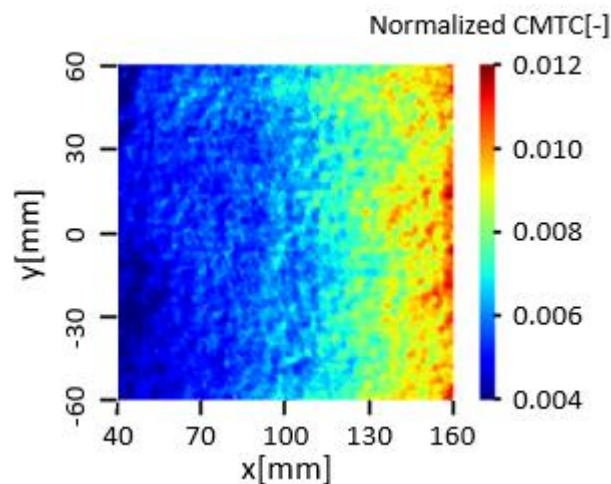
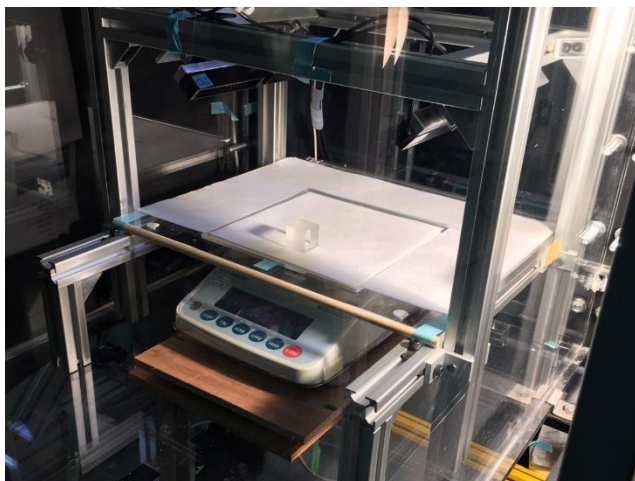


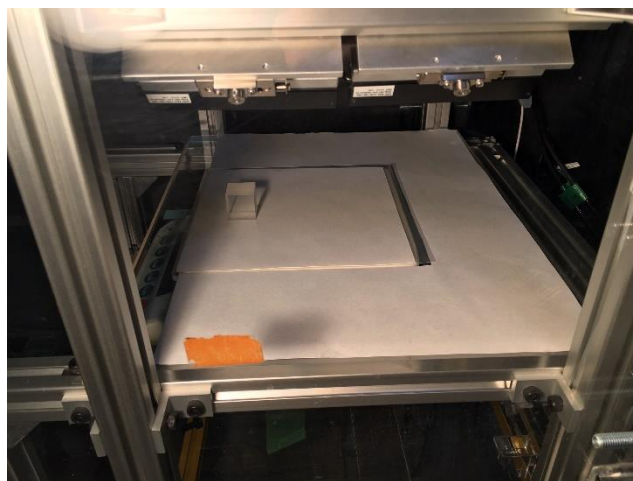
図 4.11 無次元 CMTC 空間分布 (2H)

4.1.2.3 立方体ブロック

立方体ブロック(25×25×25 mm)を設置し，立方体ブロック後流の輸送効率を計測した．実験環境の写真を図 4.12 に示す．図 4.12(a)は風上側，図 4.12(b)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である．また，立方体ブロックは図 4.13 のように設置した．実験条件を表 4.4 に示す．滑面や角柱ブロックの計測時には参照風速を 2 m/s に設定していたが，立方体ブロック後方の無次元 CMTC 分布をスパン方向にはっきりするために，本条件では参照風速を 3 m/s に設定した．また，立方体ブロック背後の無次元 CMTC 分布を計測するため，角柱ブロックとは異なる流れ方向位置に立方体ブロックを設置した．



(a) ブロック配置



(b) ブロック配置(側面)

図 4.12 実験環境（立方体ブロック）

立方体ブロックを用いた条件の無次元 CMTC 分布を図 4.14 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.14 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.14 を見ると立方体ブロックの背後（黒枠内）で無次元 CMTC が小さくなっている．ブロック背後は，主流方向からの流入風が妨げられるため，無次元 CMTC が小さくなったと考えられる．

対してブロック側面（赤枠内）で無次元 CMTC が大きくなっている．これらの現象を以下に考察する．Castro et al^[4-2]によって，立方体まわりの流れとブロック面の抗力係数に関する研究が行われている．また，Hosker et al^[4-3]によって，立方体まわりの流れがまとめられている．この図を図 6.9 に示す．ブロック上流側で発生した馬蹄渦が発生する．この渦管は，ブロック側面に沿って発達している．このブロック側面の馬蹄渦による，床面の熱伝達率に与える影響が，Shen et al^[4-4]が行った数値解析によって観察されている．従って，赤枠部分の無次元 CMTC の上昇も同様の現象であると考察できる．

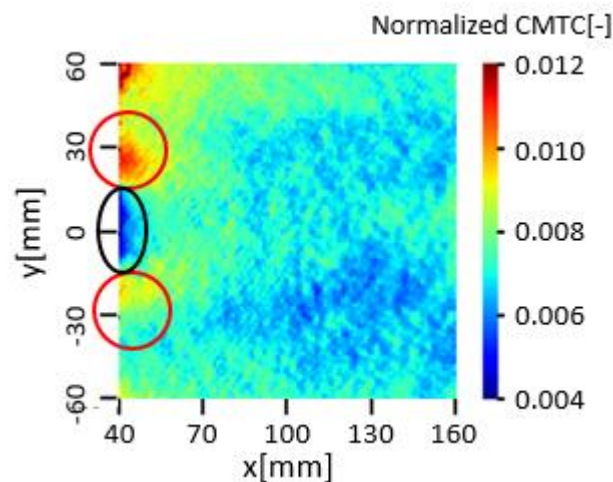


図 4.14 無次元 CMTC 空間分布（立方体ブロック）

4.2 溝なしプレート

図 4.15 に示す溝なしプレートを使用して，輸送効率を評価した．4.1 節に示した溝ありプレートの上面に，厚さ 1 mm のアクリル（ポリ塩化ビニル）を貼付し，溝のないプレートを作成した．

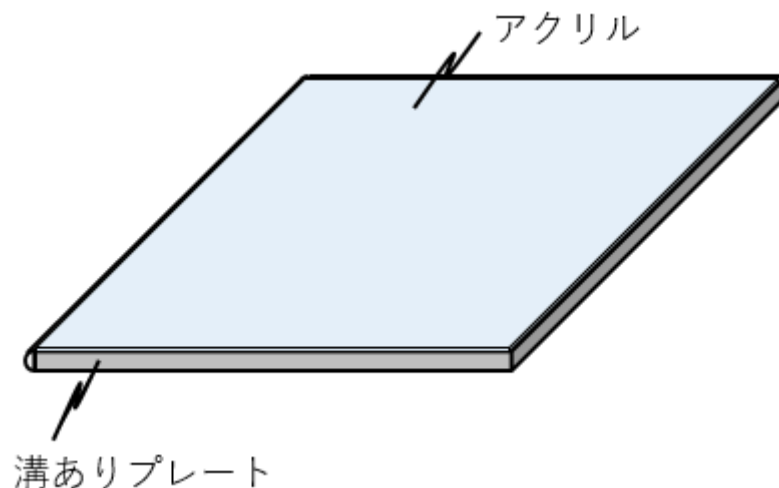


図 4.15 溝なしプレート

4.2.1 較正実験

4.2.1.1 較正実験の概要

4.1.1.1 と同様であり，省略する．

4.2.1.2 較正方法

較正前のろ紙含水率 w_1 と較正後のろ紙含水率 w_2 を測定し， w_1 の時の反射強度 r_1 と w_2 の時の反射強度 r_2 を取得する．較正前後の変化を線形補完することで較正式を作成した．較正式の作成以外は 4.1.1.2 と同様であり，省略する．実験条件を表 4.5 に示す．

表 4.5 実験条件

測定時間[s]	約3000
試行回数[-]	3
サンプリング周波数[Hz]	近赤外ビデオカメラ:1 電子天秤:1

4.2.1.3 較正結果

図 4.16 に試行回数 2 回分の計測ろ紙中心部分の較正結果を示す．プロットの範囲は $GWC=0.525\sim0.425$ である．try1 と try2 は概ねプロットが一致していることが確認できる．完全に一致しなかった理由としては $GWC=0.425$ の位置での反射強度の値が若干異なったためであると考えられる．

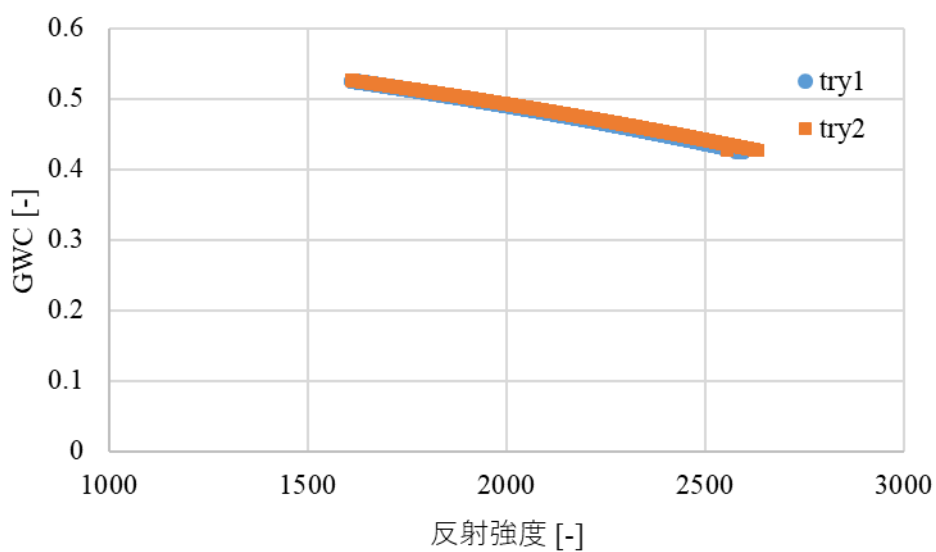


図 4.16 較正結果

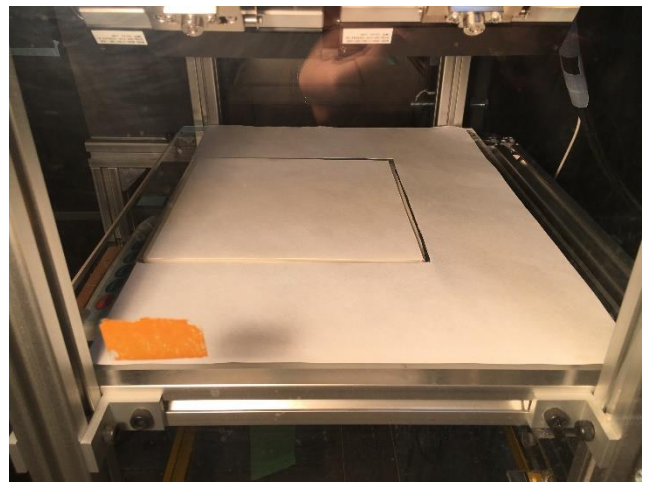
4.2.2 輸送効率実験

4.2.2.1 滑面

近赤外分光法を用いて、溝なしプレート上における平板境界層上の輸送効率を計測した。滑面での実験環境の写真を図 4.17 に示す。図 4.17(a)は風上側、図 4.17(b)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である。また、図 4.18 にプレート正面図を、表 4.6 に実験条件を示す。



(a) 実験対象(風上側)



(b) 実験対象(側面)

図 4.17 実験環境 (滑面)

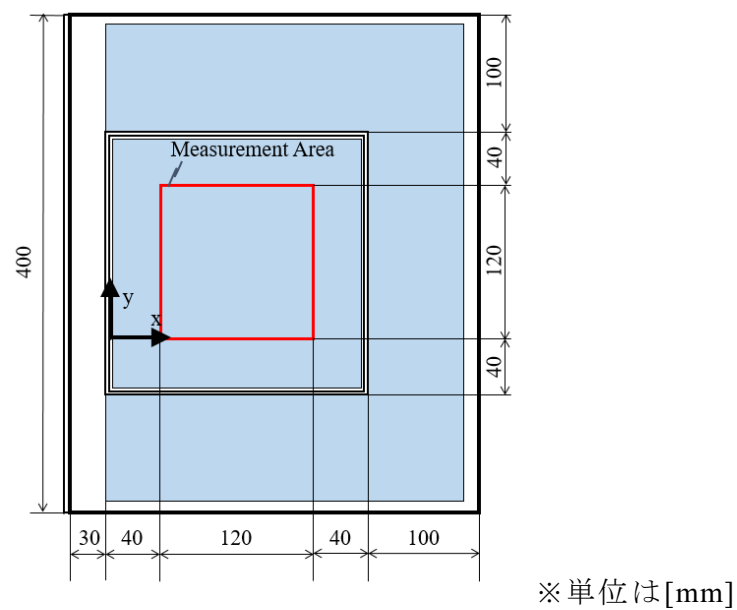


図 4.18 プレート正面図

表 4.6 実験条件

測定時間 [s]	180
参照風速 [m/s]	2
試行回数 [-]	2
サンプリング周波数 [Hz]	近赤外ビデオカメラ : 1 サーミスタ : 1 サーモカメラ : 1 ピトー管 : 1 露点温度計 : 1

滑面における無次元 CMTC 分布を図 4.19 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.19 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.19 を見ると溝ありプレートの結果と比べて全体的に無次元 CMTC の大きな値が観察された．また，風上側($x=40\sim 70$ mm)で無次元 CMTC の値が大きく，溝ありプレート場合と同様の結果が得られた．

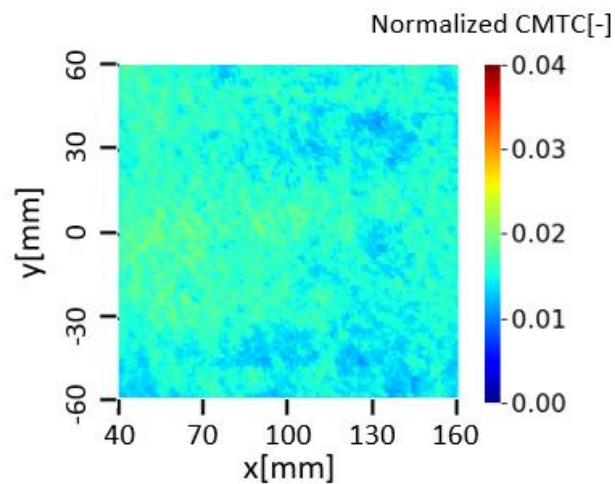
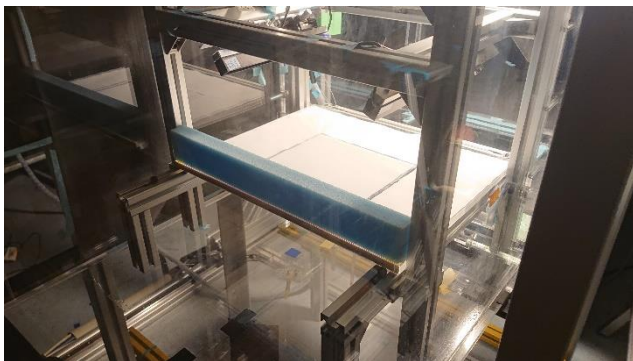


図 4.19 無次元 CMTC 空間分布 (滑面)

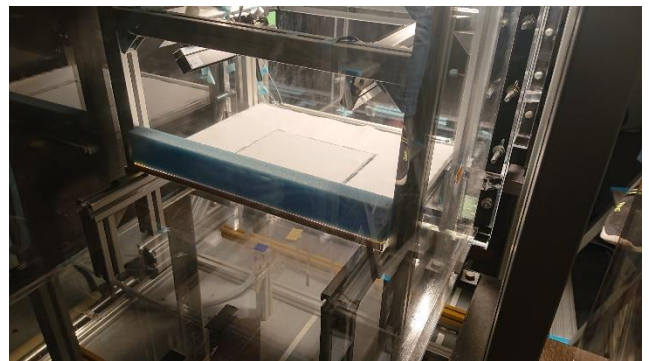
4.2.2.2 角柱ブロック(1H, 2H)

角柱ブロック(25×25×400 mm)を設置し、角柱ブロック後流の輸送効率を計測した。角柱ブロックを1つ設置(1H, 高さ 25 mm)、2つ設置(2H, 高さ 50 mm)の2パターンで計測を行った。

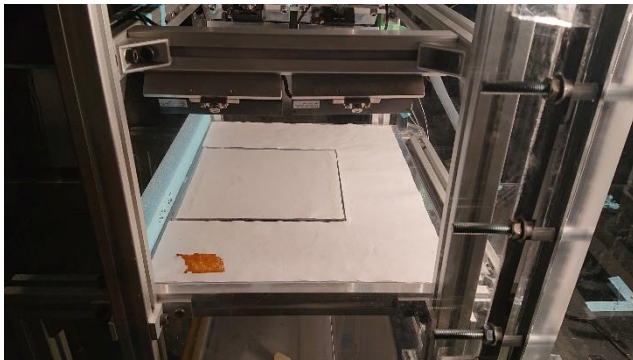
実験環境の写真を図 4.20 に示す。図 4.20(a), (b)は風上側、図 4.20(c), (d)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である。また、角柱ブロックは図 4.9 のように設置した。実験条件を表 4.7 に示す。



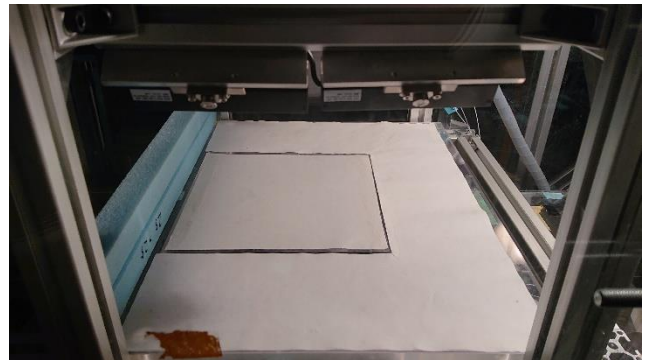
(a) ブロック配置(1H)



(b) ブロック配置(2H)

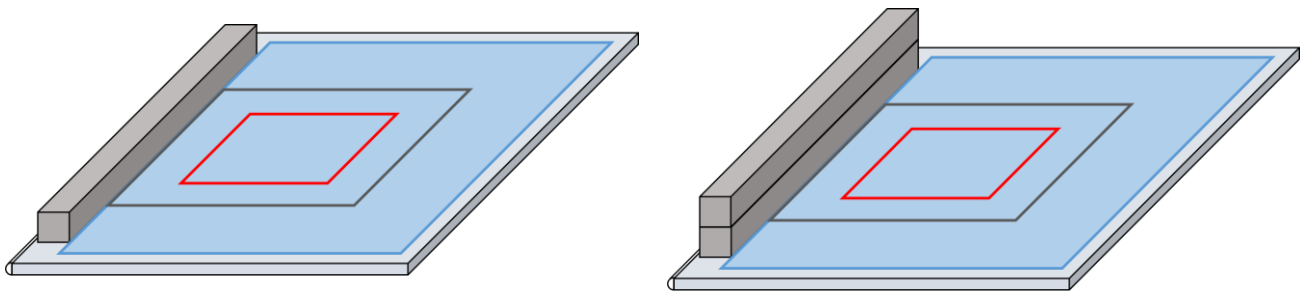


(e) ブロック配置(1H, 側面)



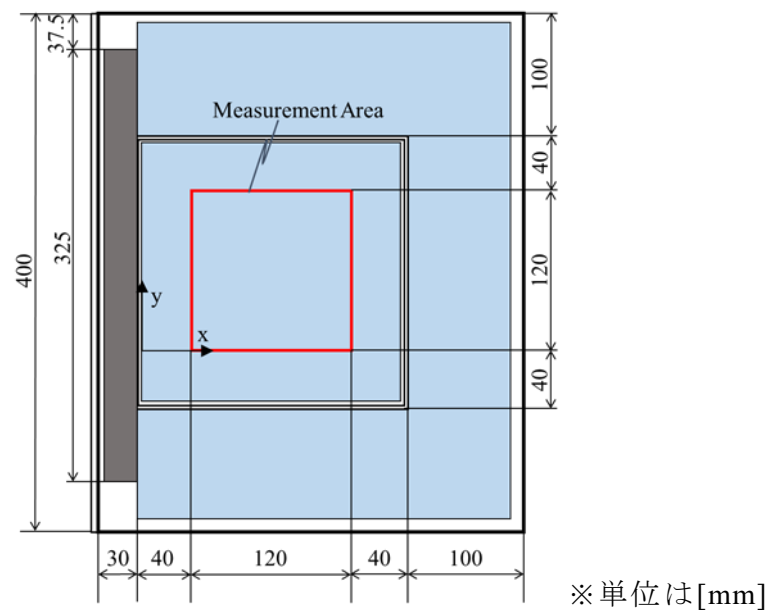
(f) ブロック配置(2H, 側面)

図 4.20 角柱ブロック



(a) ブロック配置概略図(1H)

(b) ブロック配置概略図(1H)



(c) プレート上面図

図 4.21 角柱ブロック配置概略図

表 4.7 実験条件

測定時間 [s]	180
参照風速 [m/s]	2
試行回数 [-]	2
サンプリング周波数 [Hz]	近赤外ビデオカメラ : 1 サーミスタ : 1 サーモカメラ : 1 ピトー管 : 1 露点温度計 : 1

角柱ブロックを用いた条件の無次元 CMTC 分布を図 4.21 および図 4.22 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.21 および図 4.22 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.10 および図 4.11 を見ると溝ありプレートの結果と比べて全体的に無次元 CMTC が小さくなっている．これは角柱ブロックの幅を 400 mm に変更し，流れ方向からのろ紙への流入風が完全に妨げられたためであると考えられる．風上側($x=40\sim100$ mm)で無次元 CMTC が小さく，風下側($x=100\sim160$ mm)に進むにつれて大きくなっている結果が見られ，これは溝ありプレートの結果と同様である．

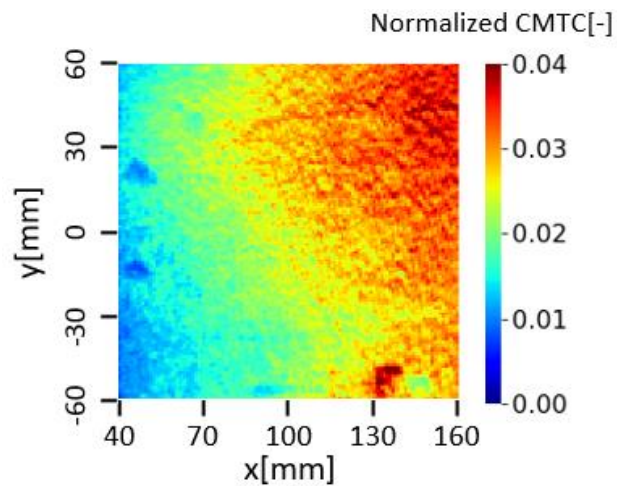


図 4.21 無次元 CMTC 空間分布 (1H)

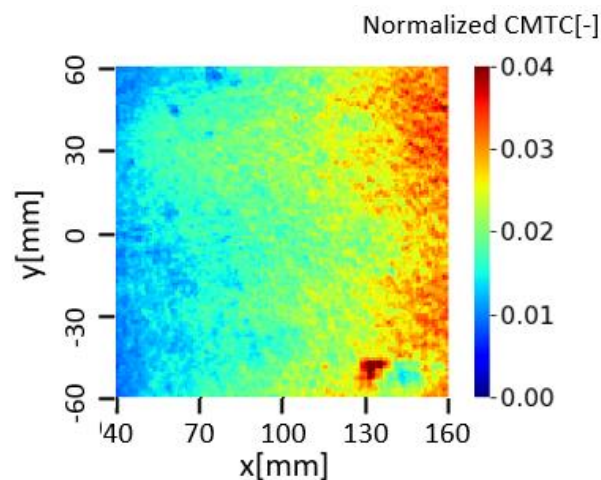
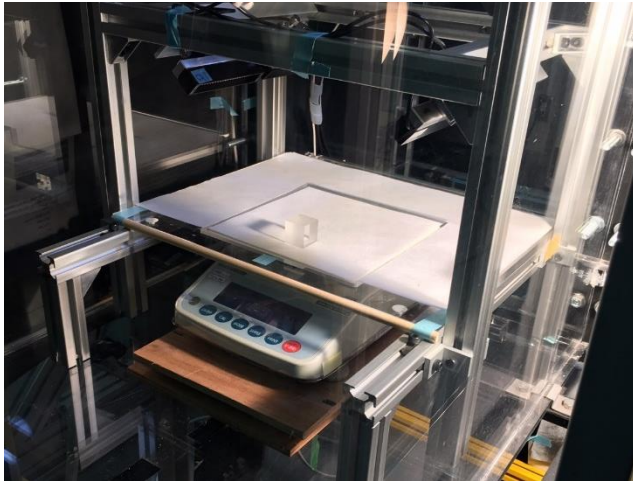


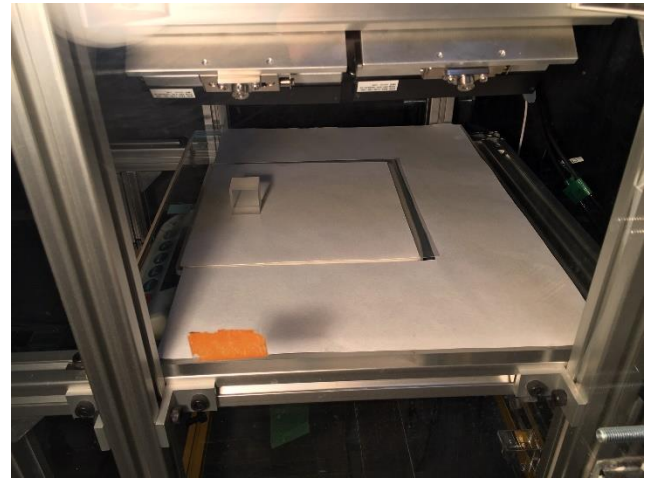
図 4.22 無次元 CMTC 空間分布 (2H)

4.2.2.3 立方体ブロック

立方体ブロック(25×25×25 mm)を設置し，立方体ブロック後流の輸送効率を計測した．実験環境の写真を図 4.23 に示す．図 4.23(a)は風上側，図 4.23(b)は風洞側面からそれぞれ撮影した写真である．また，立方体ブロックは図 4.24 のように設置した．実験条件を表 4.8 に示す．

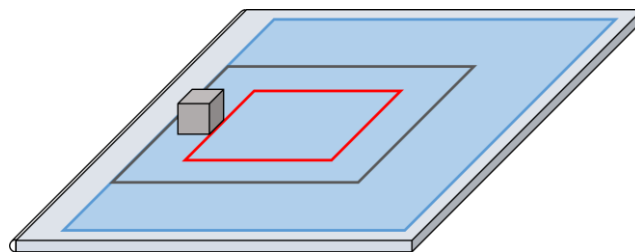


(a) ブロック配置

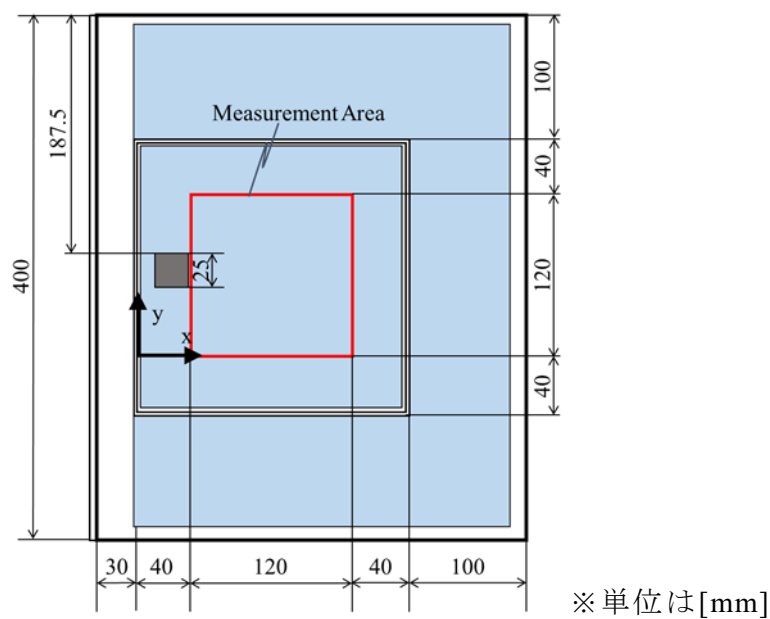


(b) ブロック配置(側面)

図 4.23 実験環境（立方体ブロック）



(a) ブロック配置概略図



(b) プレート上面図

図 4.24 三次元ブロック配置概略図

表 4.8 実験条件

測定時間 [s]	180
参照風速 [m/s]	3
試行回数 [-]	2
サンプリング周波数 [Hz]	近赤外ビデオカメラ : 1 サーミスタ : 1 サーモカメラ : 1 ピトー管 : 1 露点温度計 : 1

立方体ブロックを用いた条件の無次元 CMTC 分布を図 4.25 に示す．無次元 CMTC は試行回数 2 回の平均値である．図 4.25 の横軸，縦軸は流れ方向およびスパン方向の距離を示している．

図 4.25 を見ると立方体ブロックの背後（黒枠内）で無次元 CMTC が小さくなっており、対してブロック側面（赤枠内）で無次元 CMTC が大きくなって様子が観察され、溝ありプ

レートの結果と同様であった．また，風下側の無次元 CMTC の値を見ると溝ありプレートの場合と比べて大きな結果が得られた．以上の結果については 6 章で考察する．

ブロック背後では流入風が妨げられるため，無次元 CMTC が小さくなるはずであるが，無次元 CMTC が大きくなっている．原因として，計測前にブロックの設置位置がずれてしまい図 4.25 のような結果が得られたのではないかと考えられる．

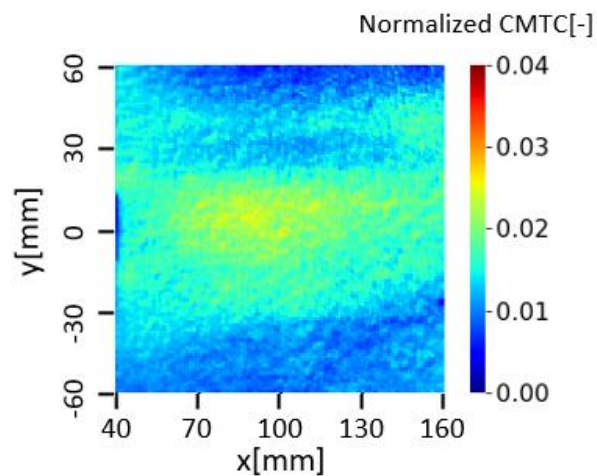


図 4.25 無次元 CMTC 空間分布 (立方体ブロック)

第 5 章 計測システム内の速度計測

5.1 実験概要

前章に記した無次元 CMTC の分布との相関を調べるために、ろ紙近傍の速度を計測した。滑面、角柱ブロックの計測条件を表 5.1 に、立方体ブロックの計測条件を表 5.2 に示す。また、計測面の正面概略図を図 5.1 に示す。無次元 CMTC の計測範囲 120×120 mm を計測幅 10 mm ごとにスパン方向に 13 点、それを流れ方向に 13 点の合計 169 点で計測を行った。計測を連続的に行うため、湿潤濾紙ではなく乾燥ろ紙を使用した。参照風速は無次元 CMTC 計測時と同じ風速を採用している。

表 5.1 実験条件

熱線	I型熱線
参照速度[m/s]	2
測定時間[s]	30
サンプリング周波数[Hz]	1000
測定軸	x-y
測定高さ[mm]	3
測定幅[mm]	10
合計測定点	169

表 5.2 実験条件

熱線	I型熱線
参照速度[m/s]	3
測定時間[s]	30
サンプリング周波数[Hz]	1000
測定軸	x-y
測定高さ[mm]	3
測定幅[mm]	10
合計測定点	169

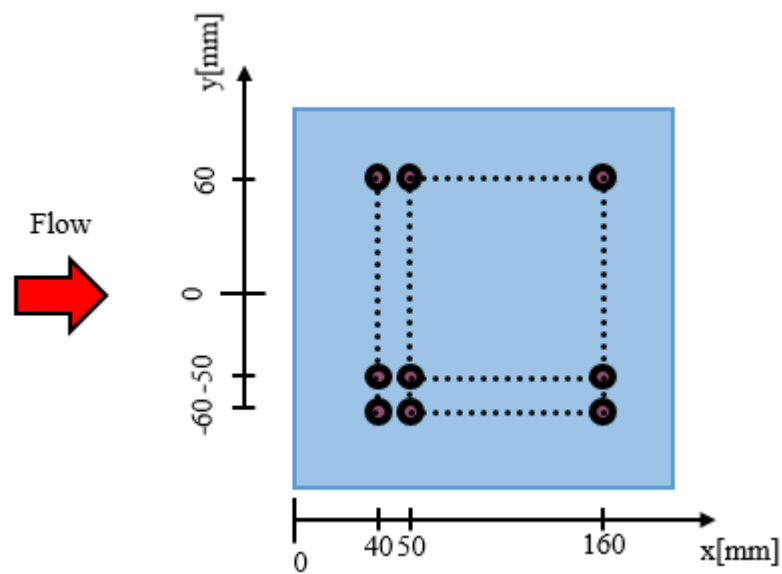


図 5.1 実験の概略図

5.2 溝ありプレート

5.2.1 滑面

滑面条件での、参照風速で正規化された無次元速度分布を図 5.2 に示す．ろ紙全体にスパン方向に分布が見られる．この理由として、ろ紙と溝との間の隙間が原因であると考えられる．溝ありプレートの実験では、ろ紙の含水率を正確に計測するために、溝の寸法(200×200 mm)とろ紙の寸法(約 195×195 mm)に差が生じている．計測時には、溝各辺に約 2 mm の隙間が生じており、プレート上の気流が隙間へ流れた過程で、ろ紙外側の風速が大きくなり、スパン方向に分布が発生したと考えられる．

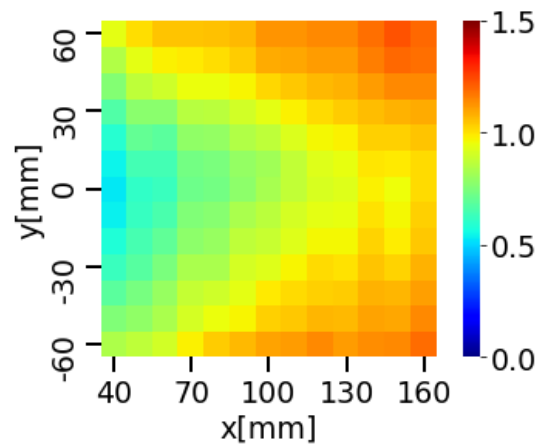


図 5.2 滑面の無次元速度分布

5.2.2 角柱ブロック (1H, 2H)

角柱ブロック条件での、参照速度で正規化された無次元速度分布を図 5.3 および図 5.4 に示す。全体的に一様な速度分布が見られるが、一部でスパン方向に若干の分布が見られる。これは、ろ紙表面の凹凸による影響でスパン方向に分布が発生したと考えられる。また、無次元速度がろ紙全体で 1.0 を下回っており、風上側に設置された角柱ブロックによって、流れ方向の流入風が妨げられていることが確認できる。

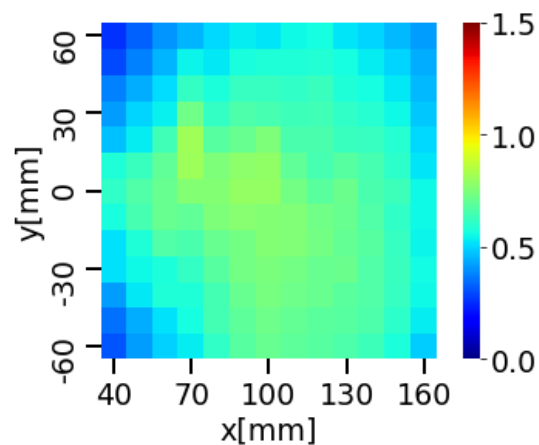


図 5.3 角柱ブロック (1H) の無次元速度分布

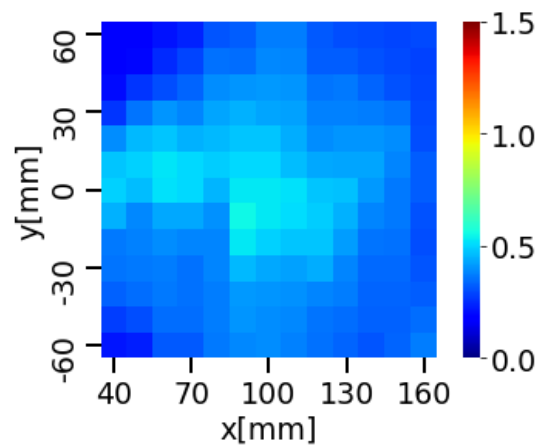


図 5.4 角柱ブロック (2H) の無次元速度分布

5.2.3 立方体ブロック

立方体ブロック条件での、参照速度で正規化された無次元速度分布を図 5.5 に示す。滑面の条件と同様に、ろ紙と溝との間の隙間による影響で全体的にスパン方向に分布が見られる。風上側($x=40\sim100$ mm)に立方体ブロックによる低速領域が見られる。また、 $x=40$ mm, $y=\pm 20$ mm の位置に周辺と比べて大きな速度が確認できる。無次元 CMTC の結果にも同様の位置に高い値が見られており、両者に相関があるのではないかと考えられる。

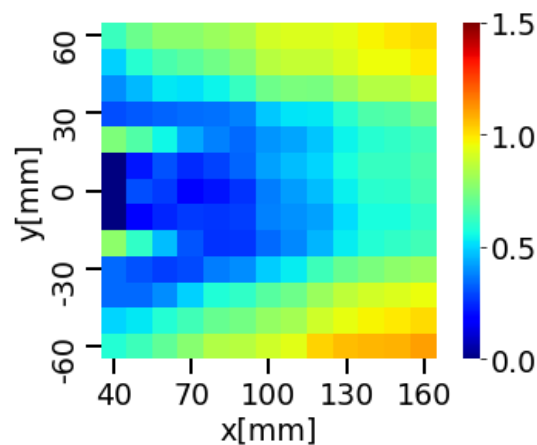


図 5.5 立方体ブロックの無次元速度分布

5.3 溝なしプレート

5.3.1 滑面

滑面条件での，参照風速で正規化された無次元速度分布を図 5.6 に示す．溝とろ紙との隙間がなくなり，全体的に一様な速度分布が見られた．また，溝ありプレートと比べ比較的大きな速度分布が得られた．溝なしプレートでは，ろ紙含水率計測のための溝がなくなり，溝とろ紙間の隙間がなくなっている．プレート上が理想的な平板になったことで，参照風速より大きな値が得られたのではないかと考えられる．

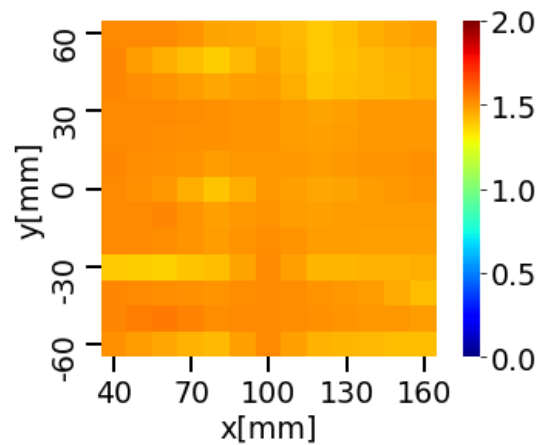


図 5.6 滑面の無次元速度分布

5.3.2 角柱ブロック (1H, 2H)

角柱ブロック条件での，参照速度で正規化された無次元速度分布を図 5.7 および図 5.8 に示す．滑面の条件と同様に，スパン方向に概ね一様な分布が得られた．また，図 5.3 および図 5.4 の結果と比較すると，本結果の方がやや大きな値の速度分布が得られた．

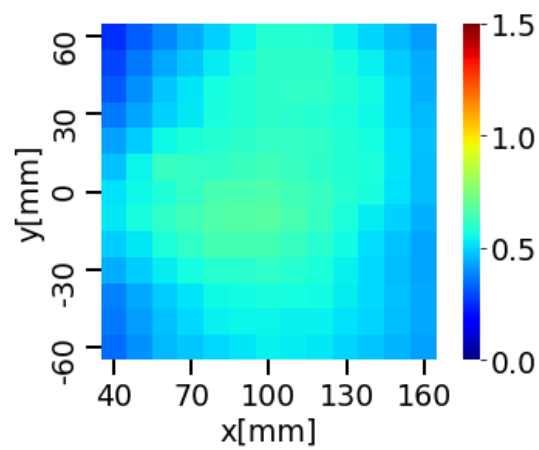


図 5.7 角柱ブロック (1H) の無次元速度分布

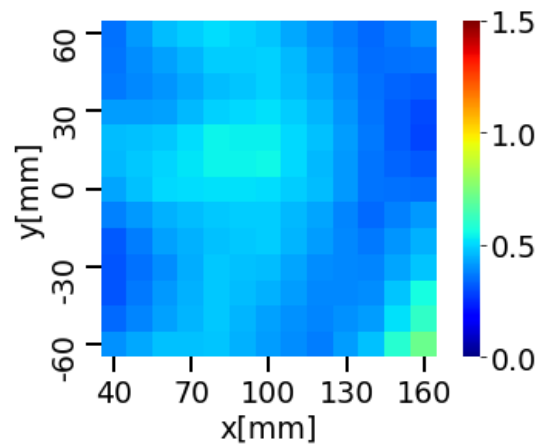


図 5.8 角柱ブロック (2H) の無次元速度分布

5.3.3 立方体ブロック

立方体ブロック条件での、参照速度で正規化された無次元速度分布を図 5.9 に示す．立方体ブロック背後では速度の低下がみられ、ブロックにぶつかった気流の流れが側面に明確にみられる．また、図 5.5 に比べて、ブロック周辺の気流分布がはっきりとみられた．

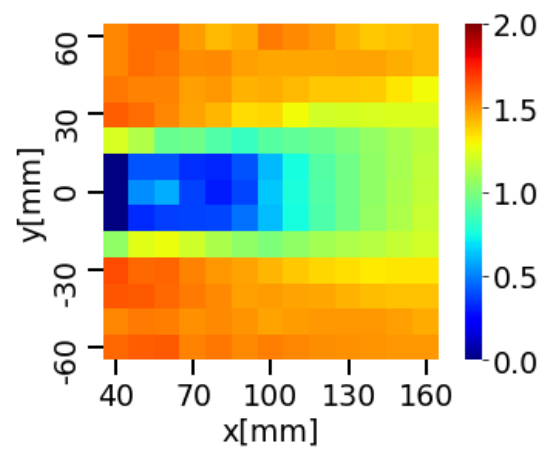


図 5.9 立方体ブロックの無次元速度分布

第 6 章 バルク係数と風速の関係

6.1 溝ありプレート

6.1.1 滑面

滑面条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.1 に示す．各プロットはろ紙の幅 10 mm ごとにスパン方向にプロットした．各スパン方向位置で，無次元速度の増加とともにバルク係数が減少しており，両者に負の相関がみられる．Jurges の実験式によると，対流熱伝達率と風速との間には，一次関数または指数関数の関係があり，正の相関があると述べられている．本実験結果で負の相関がみられた原因として，濃度境界層の影響が考えられる．濃度境界層が速度境界層より低い位置にあり，ろ紙表面近傍に水蒸気濃度が急激に変化する領域があったため，両者に負の相関がみられたと考えられる．

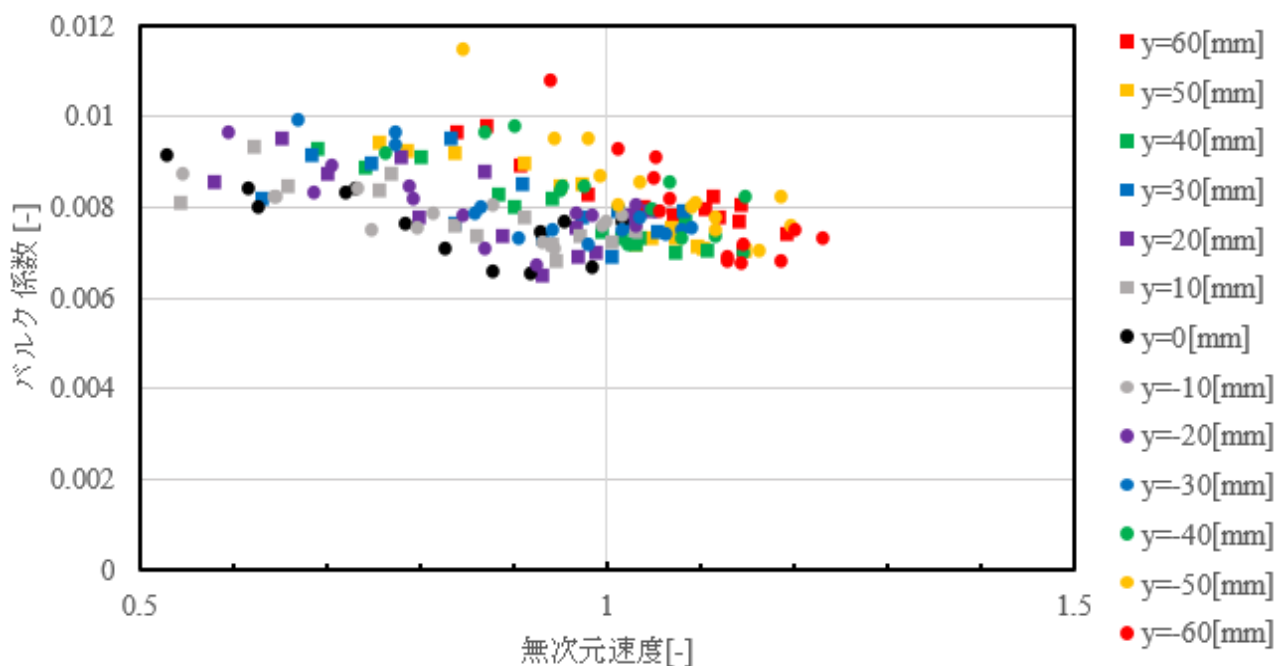


図 6.1 滑面の無次元速度とバルク係数の関係

6.1.2 角柱ブロック(1H, 2H)

角柱ブロック条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.2 および図 6.3 に示す．バルク係数が 0.006 より小さい領域では両者には正の相関がみられ，0.006 より大きい領域では負の相関がみられており，バルク係数が 0.006 付近を境に真逆の相関がみられる．図 4 では $x=100$ mm を境に C_E が大きくなっているが，図 5 では $x=100$ mm で対称的な分布となっている．角柱ブロック側面からの蛇行流が $x=100$ mm 付近でろ紙表面に流入したためである

と考えられる。また，バルク係数の計測結果では風上側($x=40\sim100$ mm)と風下側($x=100\sim160$ mm)で値に大きな差が見られたが，風速の計測結果ではあまり差が見られなかったため，両者に全体的な傾向が見られなかったのではないかと考えられる。

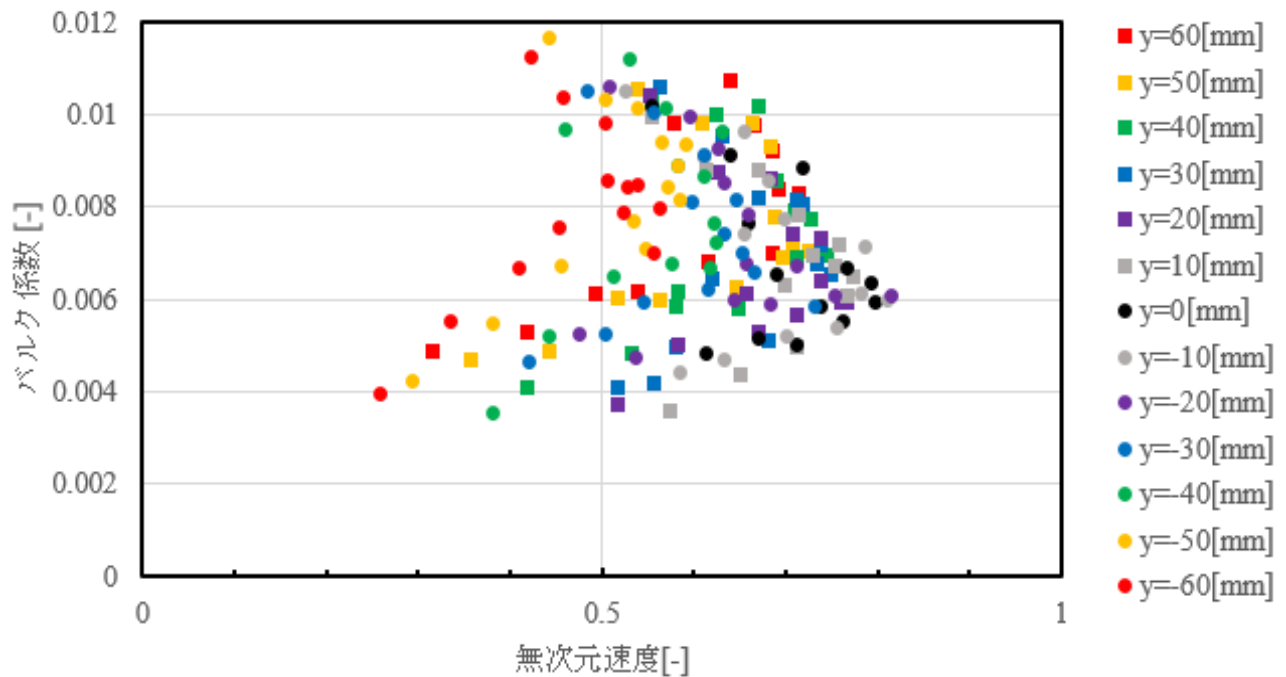


図 6.2 角柱ブロック(1H)の無次元速度とバルク係数の関係

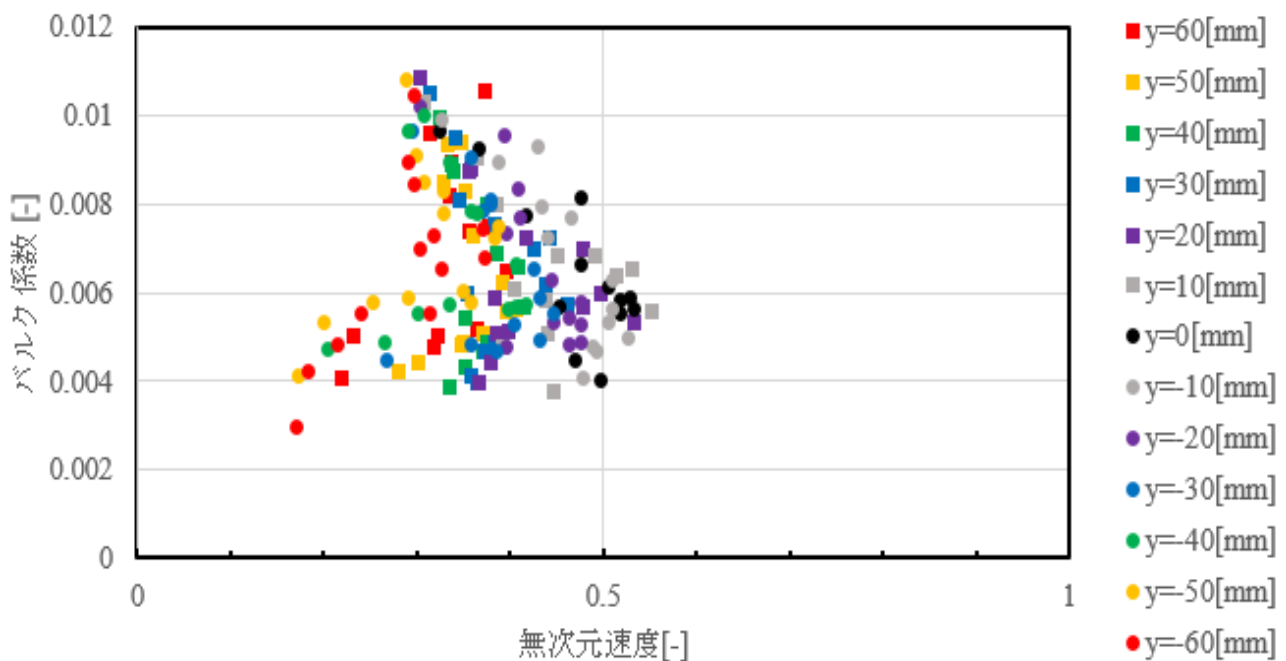


図 6.3 角柱ブロック(2H)の無次元速度とバルク係数の関係

6.1.3 立方体ブロック

立方体ブロック条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.4 に示す．図 6.1 と同様に，各スパン方向位置で，無次元速度の増加とともにバルク係数が減少しており，両者に濃度境界層による影響と推測される，負の相関がみられる．また，立方体ブロック付近のプロット($y=0$ mm, ± 10 mm, ± 20 mm)に注目すると，全体的に負の相関がみられるが，無次元速度が 0.7 付近で局所的に正の相関がみられ，ブロックに影響される弱風速によるものであると考えられる．

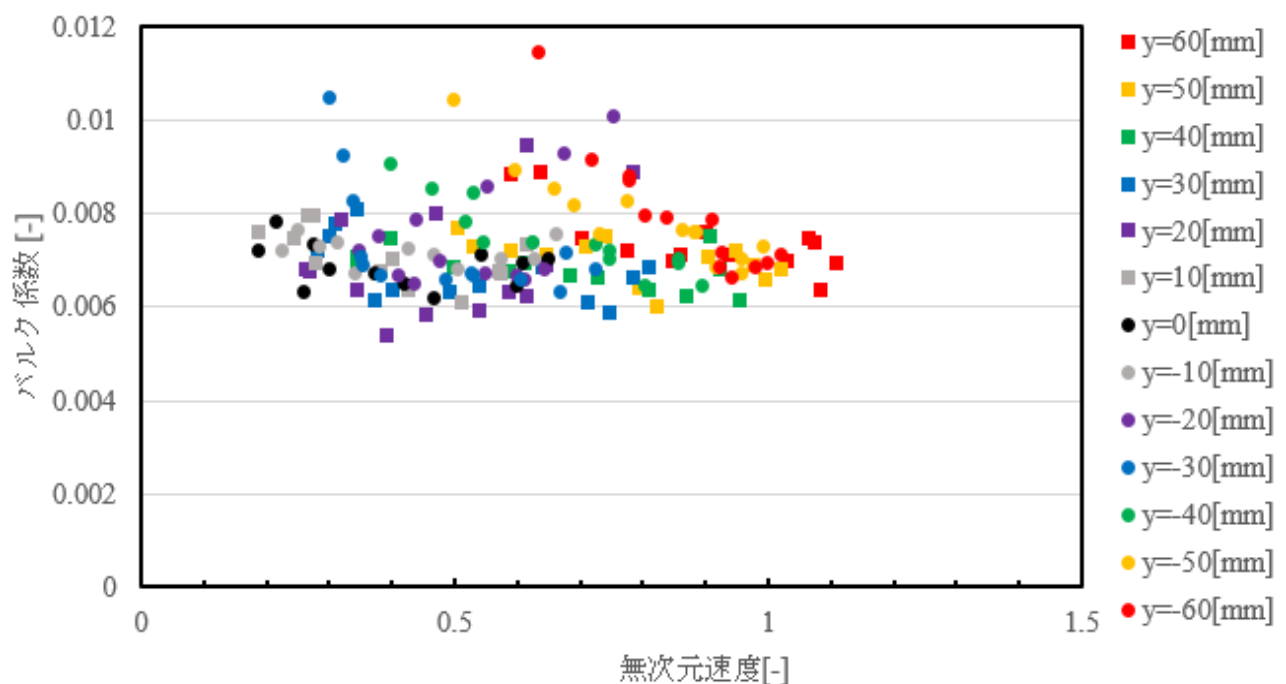


図 6.4 立方体ブロックの無次元速度とバルク係数の関係

6.2 溝なしプレート

6.2.1 滑面

滑面条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.5 に示す．全体的に，無次元速度の増加とともにバルク係数が増加しており，両者に正の相関がみられる．しかし， $y=0$ mm と $y=30$ mm には，負の相関がみられており，風速およびバルク係数の計測精度向上が必要であると考えられる．また，図 6.1 と比較して風速の増加とともにバルク係数の値が多くなっていることが分かる．

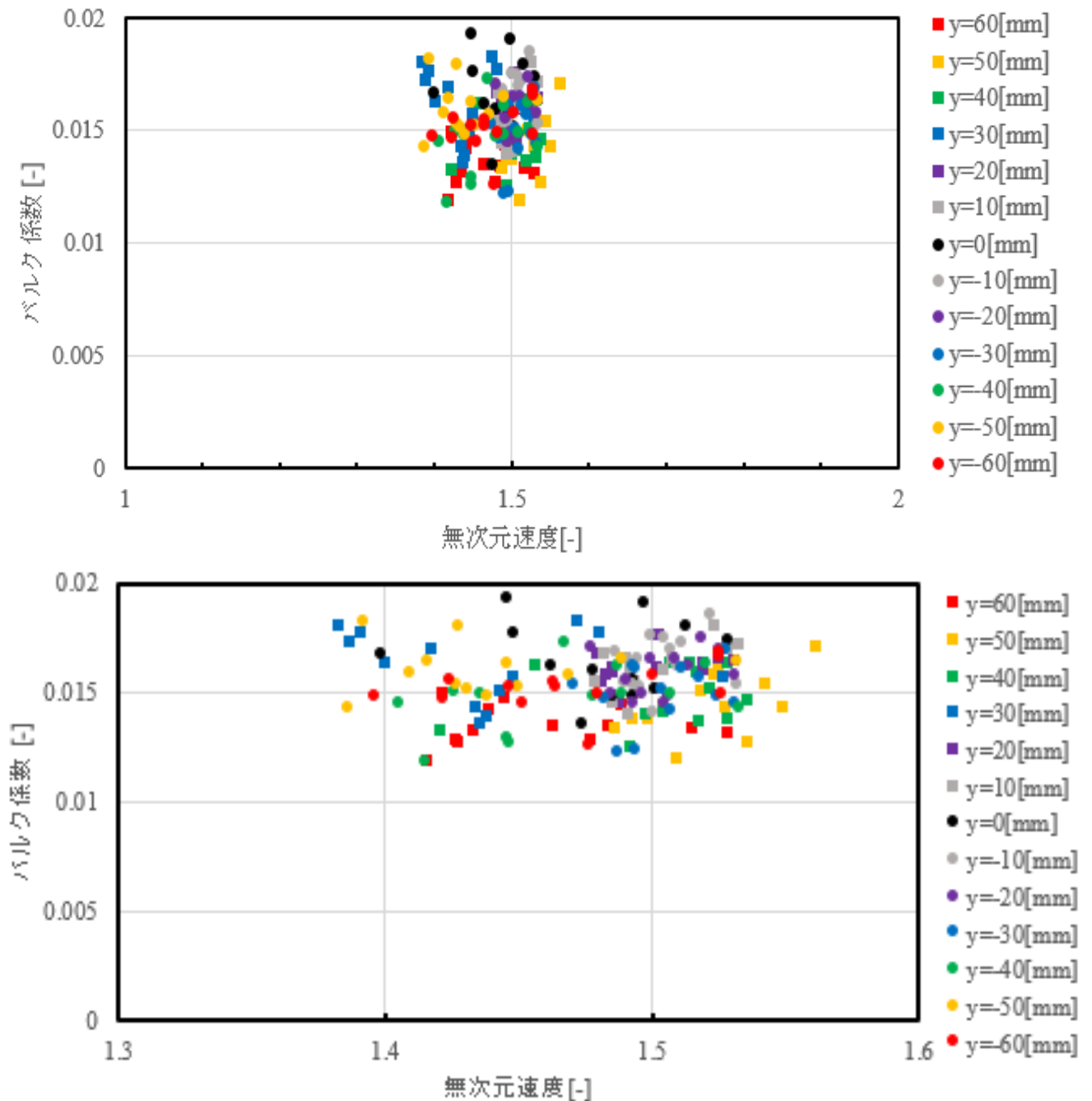


図 6.5 滑面の無次元速度とバルク係数の関係

6.2.2 角柱ブロック(1H, 2H)

角柱ブロック条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.6 および図 6.7 に示す. バルク係数が 0.02 付近を境に逆の相関がみられ, 図 6.2 および図 6.3 と同様の傾向となった. 以上の結果に対する原因究明のために, 計測システム内の気流場の詳細な分析が必要であると考えられる.

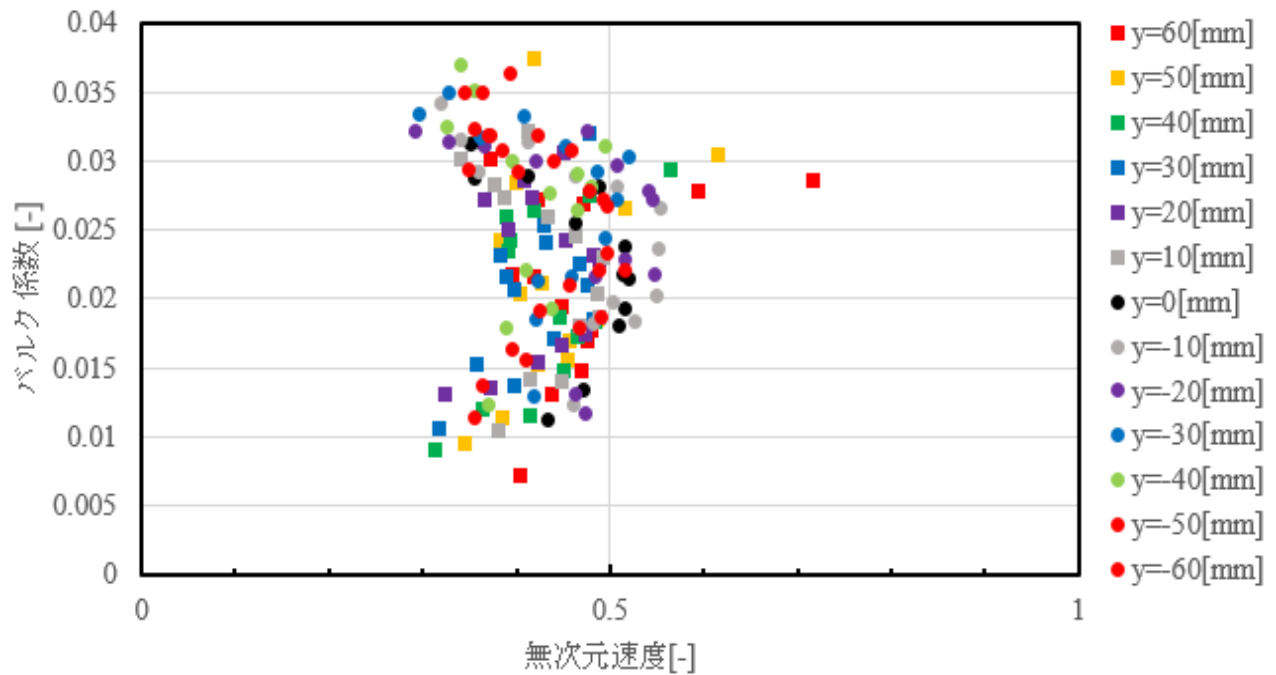


図 6.6 角柱ブロック (1H) の無次元速度とバルク係数の関係

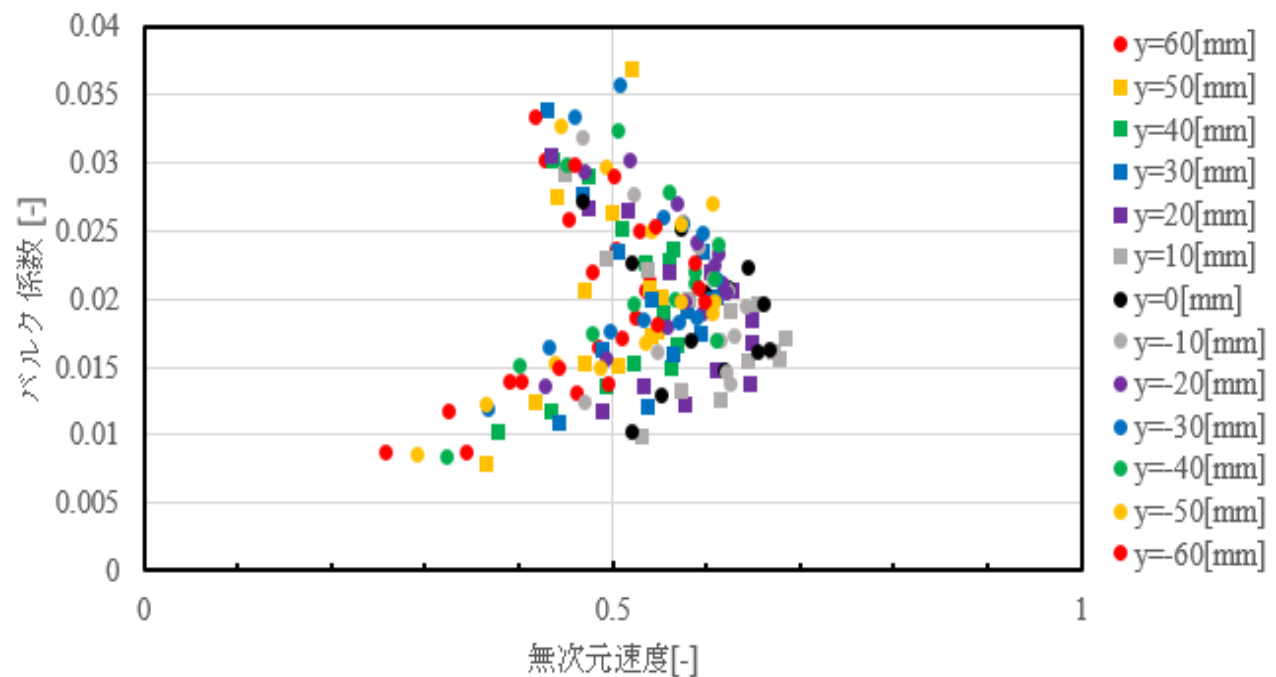


図 6.7 角柱ブロック (2H) の無次元速度とバルク係数の関係

6.2.3 立方体ブロック

立方体ブロック条件での無次元速度とバルク係数の関係を図 6.8 に示す．立方体ブロック付近のプロット ($y=0$ mm, ± 10 mm) に注目すると，無次元速度は増加する一方，バルク係数はおよそ一定値であることがわかる．立方体ブロック付近は気流場が特に複雑である

ため、ブロック上部など詳細な速度計測が必要であると考えられる．また，ろ紙の外側($y = \pm 40 \sim \pm 60 \text{ mm}$)は，図 6.5 と同様に，無次元速度とバルク係数の両者に，正の相関がみられる．

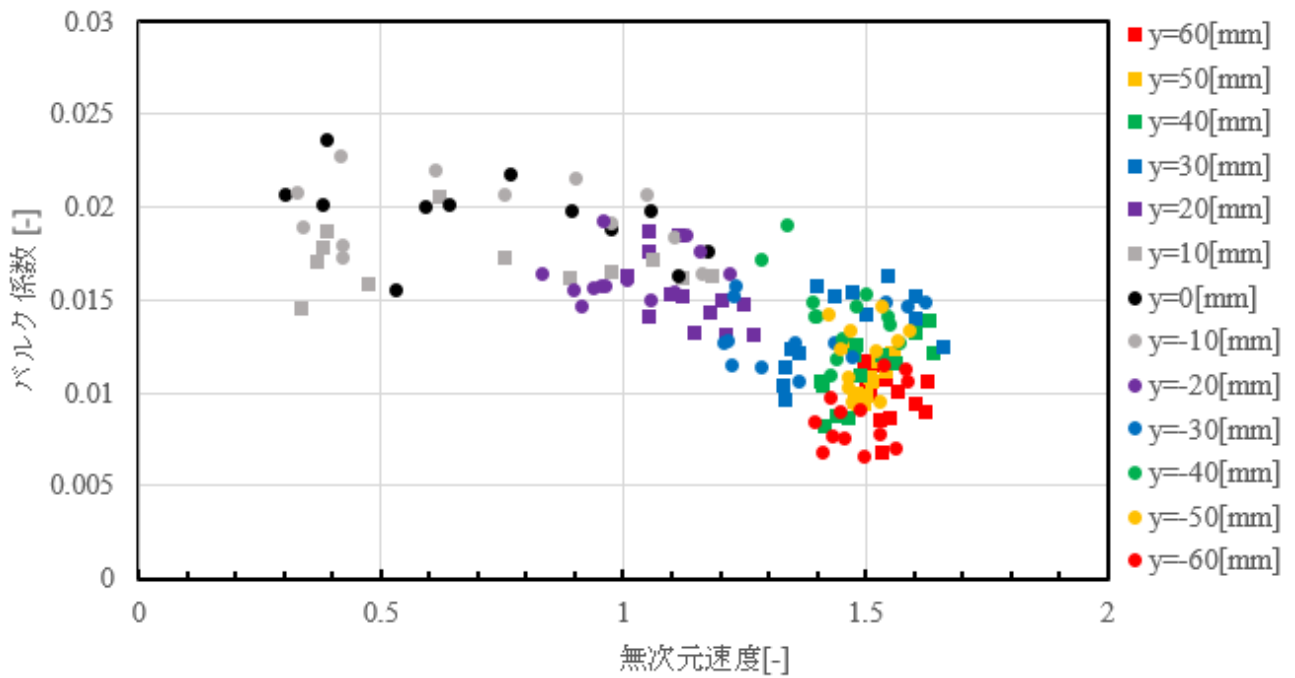


図 6.8 滑面の無次元速度とバルク係数の関係

第 7 章 総括

7.1 まとめ

【第 1 章】

研究背景と既往研究をまとめ，研究目的を述べた．

【第 2 章】

本研究で使用した実験装置について述べた．

【第 3 章】

物質伝達と熱伝達現象の相似則を用いて，対流物質伝達量から対流熱伝達量を推定する方法をまとめた．また，近赤外分光法を利用した，ろ紙含水率の計測原理について述べた．

【第 4 章】

2 種類のプレートを用いて，滑面，角柱ブロック，立方体ブロック後流域での輸送効率の分布を計測した．プレート別でバルク係数の値が異なり，各計測条件で似た輸送効率分布を確認できた．

【第 5 章】

2 種類のプレートを用いて，ろ紙上の風速を計測した．溝ありプレートでは，全体的にスパン方向に速度分布がみられ，溝なしプレートでは，スパン方向に分布があまり見られなかった．また，溝なしプレートの方が風速値が大きいことがわかった．

【第 6 章】

バルク係数と風速の関係を調査した．各計測条件で，大まかな傾向はみられたが，定量的な分析には至らなかった．濃度境界層の影響によって，ろ紙表面近傍に水蒸気濃度が急激に変化する領域の存在が推測される．

7.2 今後の展望

本研究では，プレート位置周辺に，計測システム構成のためのアルミサッシが設置されており，気流場に影響を与えている．計測システム内の構成を簡略化することが必要である．また，風速の測定に I 型の熱線を使用しており，流れ方向の風速のみ計測している．しかし，計測システム内の気流場は複雑であり，I 型熱線での計測は高精度であるとは言えない．今後は PIV などを用いた風速測定を行うと，バルク係数と風速の定量的な評価が期待できる．

参考文献

【第1章】

- [1-1] 萩島理, 谷本潤, 末永啓, 池谷直樹, 前田一行, 成田健一: 直方体粗度群の床面バルクスカラー係数に関する風洞模型実験, 日本建築学会環境系論文集, vol.73, No.632, pp.1225 - 1231, 2008.10
- [1-2] 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩: 高さ分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集, No.619, pp.39-45, 2007.9
- [1-3] Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K.: Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries, *Boundary-Layer Meteorology*, 132, pp. 315-337, 2009
- [1-4] Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Tanaka, Y., Narita, K., Zaki, S.A.: Geometric dependence of the scalar transfer efficiency over rough surfaces, *Boundary-Layer Meteorology*, 143, pp.357-377, 2012
- [1-5] Pascheke, F., Barlow, J. F. & Robins, A. Wind-tunnel modelling of dispersion from a scalar area source in urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorol.* 126, 103–124 (2008).
- [1-6] Ikegaya, N. et al. Geometric Dependence of the Scalar Transfer Efficiency over Rough Surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.* 143, 357–377 (2012).
- [1-7] Chung, J., Hagishima, A., Ikegaya, N. & Tanimoto, J. Wind-Tunnel Study of Scalar Transfer Phenomena for Surfaces of Block Arrays and Smooth Walls with Dry Patches. *Boundary-Layer Meteorol.* 157, 219–236 (2015).
- [1-8] Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Suenaga, S., Maeda, K., Narita, K.: Measurement of Mass Transfer Coefficients Using Salinity Method, *The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan*, No.147, 2009
- [1-9] Hagishima, A. et al. Wind tunnel experiment on bulk scalar coefficient of urban-like roughness. *J. Environ. Eng.* 73, 1225–1231 (2008).
- [1-10] Narita, Keichi. Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method. *Boundary-Layer Meteorol.* 122, 293–320 (2007).
- [1-11] Asawa, T., Kiyono, T. Visualization of convective heat transfer coefficient on building external surfaces using a 3D laser scanner and the filter paper evaporation method Part 4: Improving accuracy and precision in spatio-temporal distributions, *Architectural Institute of Japan, Summaries of technical papers of annual meeting*, D-1, p.869(2018)

【第 2 章】

- [2-1] 日本カノマックス株式会社：熱線流速計プローブ 取り扱い説明書
- [2-2] 飯田明由，熱線流速計による乱流計測，噴流工学 Vol.19, No.3, 2002

【第 4 章】

- [4-1] 江嶋 紘志：近赤外分光法を用いた蒸発量計測システムの開発, 修士論文, 2020.
- [4-2] Castro, I. P. & Robins, A. G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.* 79, 307–335 (1977).
- [4-3] Hosker, R.P., 1984. Flow and diffusion near obstacles. In: Randerson D. (Ed.), *Atmospheric Science and Power Production*, Office of Scientific and Technical Information, United States Department of Energy.
- [4-4] Shen, Z., Cui, G. & Zhang, Z. Turbulent dispersion of pollutants in urban-type canopies under stable stratification conditions. *Atmos. Environ.* 156, 1–14 (2017).

謝辞

本研究を遂行するにあたって、多くの方々にお世話になりました。御礼申し上げます。

谷本潤教授には研究に関して、ご指導やご提案をして頂きました。また、研究分野以外でも、貴重なお話を拝聴でき、かけがえのない経験となりました。心から感謝申し上げます。

萩島理教授には研究を進める中で、多角的な視点からご指摘をしていただき、研究の道筋を示してくださいました。深く感謝いたします。

池谷直樹准教授には研究に関して、懇切丁寧にご指導していただきました。計測システムに関する諸検討事項に関して、多くの有益なご助言を賜いました。感謝の意を表します。

秘書の神田さんには、研究を快適に行える環境を整えていただきました。日々お力添えをいただき、感謝いたします。

同期からは、様々な刺激を受けながら、充実した2年間を過ごすことができました。

共同研究者の鈴木君には、実験の際に御世話になりました。計測システムの更なる発展と今後の健闘を祈っております。

最後に、私事ではありますが、大学院で学ぶ機会を与えていただき、あらゆる面で私を支えてくれました両親に深く感謝いたします。

令和3年2月9日 山中亮太郎

付録

付録 1 較正係数の導出法

最小二乗法を使い，式(8-1-1)の定数 a, b を各計測点(128×128)で計算した．この時，濾紙全体の含水率分布は一定と仮定する．そのため，較正実験の結果から，各点の輝度値(r_i)と含水率(w_i)を取得できる．これらの結果をもとに，式(8-1-2)～(8-1-6)から定数 a, b を計算できる．また，決定係数 R^2 は，式(8-1-7)から計算できる．

$$w_i = a \times r_i + b \quad (8-1-1)$$

$$e_i = w_i - w(r_i) \quad (8-1-2)$$

$$E = \sum e_i^2 = \sum \{w_i - (ar_i + b)\}^2 \quad (8-1-3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (8-1-4)$$

$$a = \frac{n \sum r_i w_i - \sum r_i \sum w_i}{n \sum r_i^2 - (\sum r_i)^2} \quad (8-1-5)$$

$$b = \frac{\sum r_i^2 \sum w_i - \sum r_i w_i \sum r_i}{n \sum r_i^2 - (\sum r_i)^2} \quad (8-1-6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (w_i - w(r_i))^2}{\sum (w_i - \bar{w})^2} \quad (8-1-7)$$

w : GWC[－]	r : 反射強度[－]	e : 誤差[－]	E : 誤差二乗和[－]
n : データ数[K]	R^2 : 決定係数[－]	a, b : 定数[－]	

付録 2 クベルカームシクの式

拡散反射法の反射強度は一般に式(8-1-7)に示すクベルカームシクの式に従う。通常、よく用いられるのはクベルカームシクの式から導かれる式(8-1-8)である。

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \equiv f(R_{\infty}) \quad (8-1-7)$$

$$\frac{K}{S} = \cosh \left[\log \frac{1}{R} \right] - 1 \quad (8-1-8)$$

K : 吸収係数[-]	S : 散乱係数[-]	R_{∞} : 絶対拡散反射率[-]
$f(R_{\infty})$: クベルカームシク関数[-]	R : 相対拡散反射率[-]	