



東京農工大学大学院 農学府

令和7年度 修士論文

地下水水流存在下の地盤凍結過程の 水分・熱の同時解析手法の確立に向けて

Toward the Establishment of a Method for Simultaneous Analysis
of Water and Heat in Ground Freezing Processes in the Presence
of Groundwater Flow

指導教員 : 斎藤 広隆 教授

研究室 : 地水環境工学研究室

学籍番号 : 24517003

氏名 : 菊地 駿

要旨

近年、建設技術の高度化および都市空間の深部利用の進展に伴い、大深度高水圧下の帶水層や軟弱地盤における掘削工事、さらには汚染物質の封じ込めといった難条件への対応が必要となっている。そのため、地盤の強度増加と遮水性を同時に、かつ可逆的に確保可能な地盤改良技術が強く求められている。これらの要求に応え得る有効な工法の一つとして、人工地盤凍結工法が挙げられる。本工法は、地盤中に一定間隔で設置した凍結管内に、冷媒を循環させることで地盤から熱を奪い、隙水を凍結させる地盤改良技術である。土粒子を化学的に固結させる従来工法とは異なり、隙水の相変化という物理現象を利用する点が特徴である。これにより、均質で高強度な凍結地盤を形成できること、実質的な完全遮水性、ならびに地盤を原状回復できる可逆性といった利点を有する。一方で、地下水流れが速い地盤では流れによって凍土の造成が阻害され、その適用可能性には限りがある。既往の解析的な検討において、閉塞可能な上限流速である限界流速は、凍土壁の規模を示す代表長さによって支配される。しかし、凍土壁閉塞に影響するのは凍土周辺の局所的な範囲に限られるため、慣例的に凍土壁全長を代表長さとして用いた場合、実際の限界流速は過小評価される。そのため、実際には造成可能な地下水流速でも凍土が閉塞しないと判定され、凍土壁全長を代表長さとみなして限界流速式を適用し、工法の可否を判定する従来手法には課題が残る。そこで本研究では開発した凍結・融解を含む飽和二次元熱・水移動数値解析ソルバーを用いた数値解析によって、凍結管配置に基づく代表長さの算出式を構築した。

本研究で開発した数値解析ソルバーは、エネルギー保存則に基づく熱移動支配方程式と隙水質量保存則に基づく水分支配方程式を連成して構築した。液状水と氷の相平衡については一般化クラジウス・クラペイロン式を用い、算出された液状水の圧力を水分保持関数に代入することで、ある温度条件下での不凍水分量を計算した。なお、本解析では解析領域を凍結範囲に対して十分に大きく設定し、境界条件の影響を排除するとともに、相変化に伴う体積変化は無視した。

ここで、解析対象として、凍結管が配置されている空間内のある一定の深さにおける $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ の断面領域をとり、初期地下水流速を $0.0\text{ m d}^{-1} \sim 1.2\text{ m d}^{-1}$ の範囲で 19 通り設定した。表面温度が -30°C である凍結管を解析領域の左端から 10 m の地点に上下対称に 2, 4, 8, 12 本の管をそれぞれ $0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$ の一定間隔で設置し、得られた温度分

布の経時変化に基づき、凍土壁が閉塞するまでの所要時間を算出した。まず、それぞれの凍結管間隔・本数に対し、初期流速と凍土が閉塞するまでの時間について双曲線フィッティングを行った。凍結管本数が多い条件では、初期流速が閉塞成立の限界に近づくにつれて閉塞時間が急増する傾向があったが、双曲線フィッティングは全体的な挙動を概ね良好にとらえた。特に凍結管が2本の場合、フィッティングされた双曲線の漸近値は理論的な限界流速とよく一致した。これより、数値解析結果のフィッティングより得られる漸近値は、理論上の閉塞限界と等価であるとみなせる。したがって、限界流速式で算出される限界流速をこの数値的な漸近値に置き換えることで、経験的パラメータである代表長さを数値計算によって逆算することが可能となる。このようにして数値的に求めた代表長さと、慣例的に代表長さとして用いられてきた凍土壁全長との比較を行った。その結果を踏まえ、凍結管間隔、凍結管密度およびそれらの相互作用項を説明変数とする重回帰分析を行い、新たな代表長さの算定式を構築した。これにより、凍結管配置を考慮した代表長さを良好に整理でき、本手法の有効性を示した。本研究で構築した代表長さの算定式は、凍結管間隔や凍結管密度など、あらかじめ決定可能な幾何学的条件のみを説明変数としている。このため、従来設計者の判断に委ねられていた代表長さを、客観的かつ定量的に決定することが可能となる。本研究の成果は、解析的設計手法の信頼性および実用性を向上させ、地下水流动を伴う人工地盤凍結工事の設計において、過度に保守的な設計や不要な地盤改良の解消に寄与することが期待される。

目次

| | |
|-----------------------|-----------|
| 1 序論 | 1 |
| 2 手法 | 2 |
| 3 結果 | 3 |
| 3.1 実験に基づく数値モデルの妥当性検証 | 4 |
| 3.1.1 実験概要 | 4 |
| 3.1.2 数値解析条件 | 4 |
| 3.1.3 結果と考察 | 8 |
| 3.1.4 でいすかっしょん | 9 |
| 付録 | 10 |
| 引用文献 | 10 |

図目次

| | | |
|--------|--|---|
| Fig. 1 | 実験装置の模式図および対応する計算領域. (a) 実験装置の模式図, (b) 数値解析に用いた計算領域. (b) 中のアスタリスクでの熱移動境界条件として, 逆解析により推定したパラメータ (底面 (*1) および左右 (*2, *3) の凍結管表面における境界温度) を用いる. | 5 |
| Fig. 2 | 圧力水頭の空間分布. (a) 数値解, (b) 解析解, (c) 数値解と解析解の残差. | 6 |
| Fig. 3 | 同定されたパラメータに基づく鳥取砂丘砂の水分保持関数 | 7 |
| Fig. 4 | 実験時の外部環境温度変化 | 8 |

表目次

| | | |
|---------|-----------------------------------|---|
| Table 1 | 予備実験により同定された熱物性値および水理定数 | 7 |
| Table 2 | 実験期間中の外部環境温度に関する統計量 | 9 |

第1部

序論

第2部

手法

第3部

結果

3.1 実験に基づく数値モデルの妥当性検証

本節ではこれまでに検討した数値モデルに対して、実験装置を用いた実験を行い、その結果を比較・検証する。

3.1.1 実験概要

実験には、Fig. 1a に示す円筒形の凍結実験装置を用いた。装置は内径 0.2 m、外径 0.23 m、高さ 0.6 m のアクリル円筒と、円筒下端から 0.2 m の位置を貫通する外径 0.006 m の U 字型凍結管で構成される。供試体は鳥取砂丘砂を乾燥密度 1600 kg m^{-3} で水中充填法により作製し、底部給水・上部排水により飽和状態を維持した。凍結開始前に Darcy 流速 1.0 m d^{-1} で 36 時間以上給水した後、凍結管内にブライン（エチレングリコール水溶液、比重 1100 kg m^{-3} ）を循環させて内部から冷却した。

3.1.2 数値解析条件

3.1.2.1 計算領域および計算条件

実験結果との比較のため、Fig. 1a を基に作成した計算領域を Fig. 1b に示した。解析は、凍結管軸に垂直な水平断面を対象とした二次元モデルで実施した。

装置底面および凍結管表面の境界条件は、実験ごとの接触熱抵抗や流体挙動に依存するため、一意な決定が困難である。そこで本解析では、逆解析により境界温度を同定し、その結果を用いて検証を行った。なお、他の境界は断熱境界条件とした。また、流体の流入出境界には、実験と同様に Darcy 流速 1.0 m d^{-1} を与え、それ以外の境界は流体の出入りがないよう不透水境界条件とした。逆解析における境界条件の詳細は 3.1.2.3 小節で後述する。

初期条件として、温度は一様に 5°C 、圧力は Darcy 流速 1.0 m d^{-1} に対応する分布を与えた。飽和多孔質媒体中の初期圧力場は、凍結管群を過ぎる一様流とみなせる。速度ポテンシャルは、ラプラス方程式の線形性に基づき、一様流と各凍結管中心 z_j に配置された二重湧き出しの重ね合わせで表現できる（異、1982）。無限遠流速を U 、凍結管半径を a とすると、複素速度ポテンシャル $W(z)$ は次式となる。

$$W(z) = U \left(z + \sum_{j=1}^2 \frac{a^2}{z - z_j} \right) \quad (3.1.2.1)$$

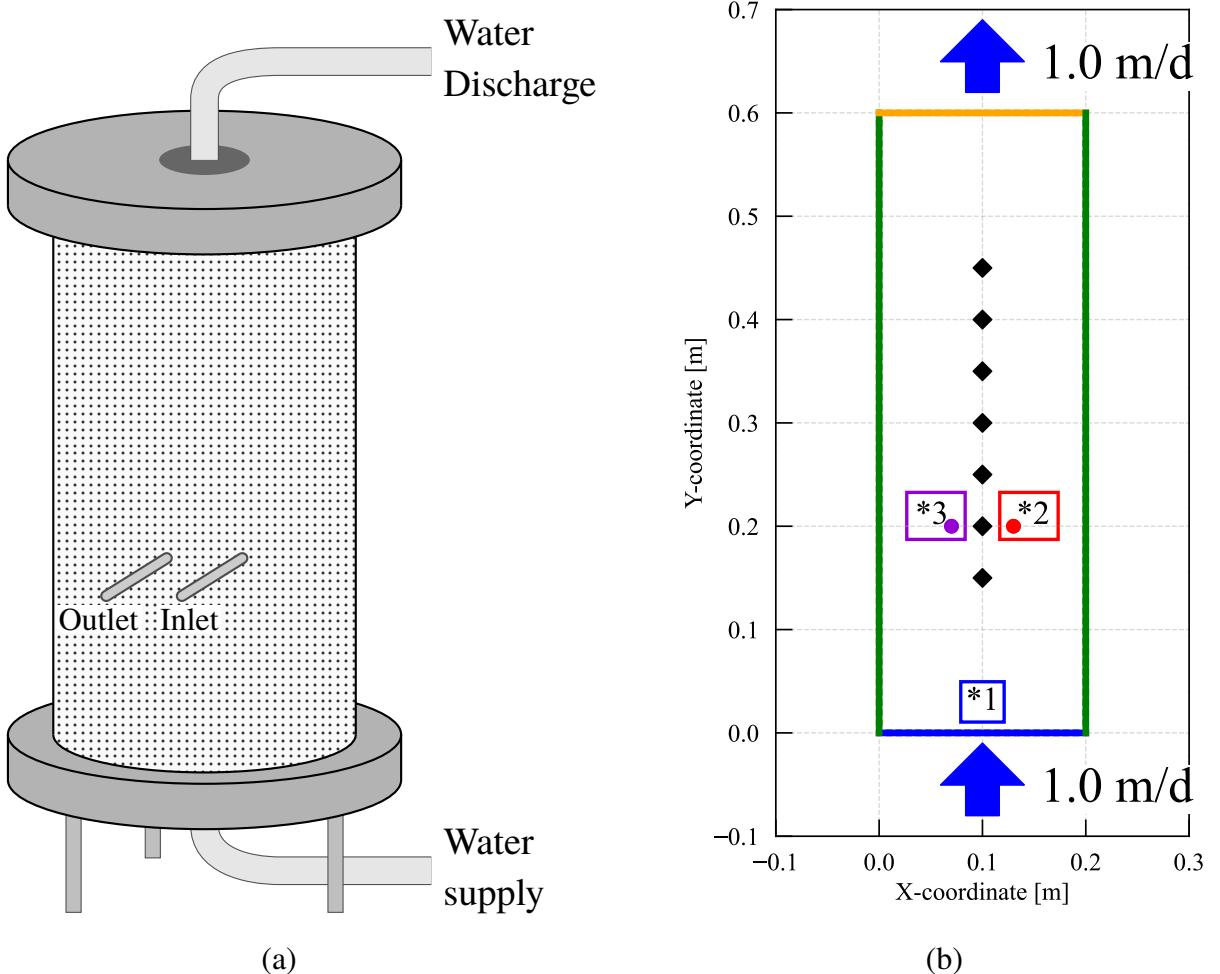


Fig. 1 実験装置の模式図および対応する計算領域. (a) 実験装置の模式図, (b) 数値解析に用いた計算領域. (b) 中のアスタリスクでの熱移動境界条件として, 逆解析により推定したパラメータ (底面 (*1) および左右 (*2, *3) の凍結管表面における境界温度) を用いる.

ここで, z は複素座標, z_j は j 番目の凍結管の中心座標である. このとき, 圧力水頭 h は飽和透水係数を用いて, 複素ポテンシャルの実部と以下の関係になる.

$$h = -\frac{1}{K_s} \Re[W(z)] \quad (3.1.2.2)$$

この解析解と数値的に得られた初期圧力分布を Fig. 2 に示した.

数値解と解析解を比較することにより, 初期圧力分布に対する数値モデルの妥当性を検証した. その結果, 凍結管周りの残差が少し大きいが, 残差の最大ノルム および二乗平均平方根誤差はそれぞれ 2.012×10^{-4} , 2.917×10^{-5} となり, 両者は良好に一致していることが確認され, 初期圧力分布の設定が妥当であることが示された.

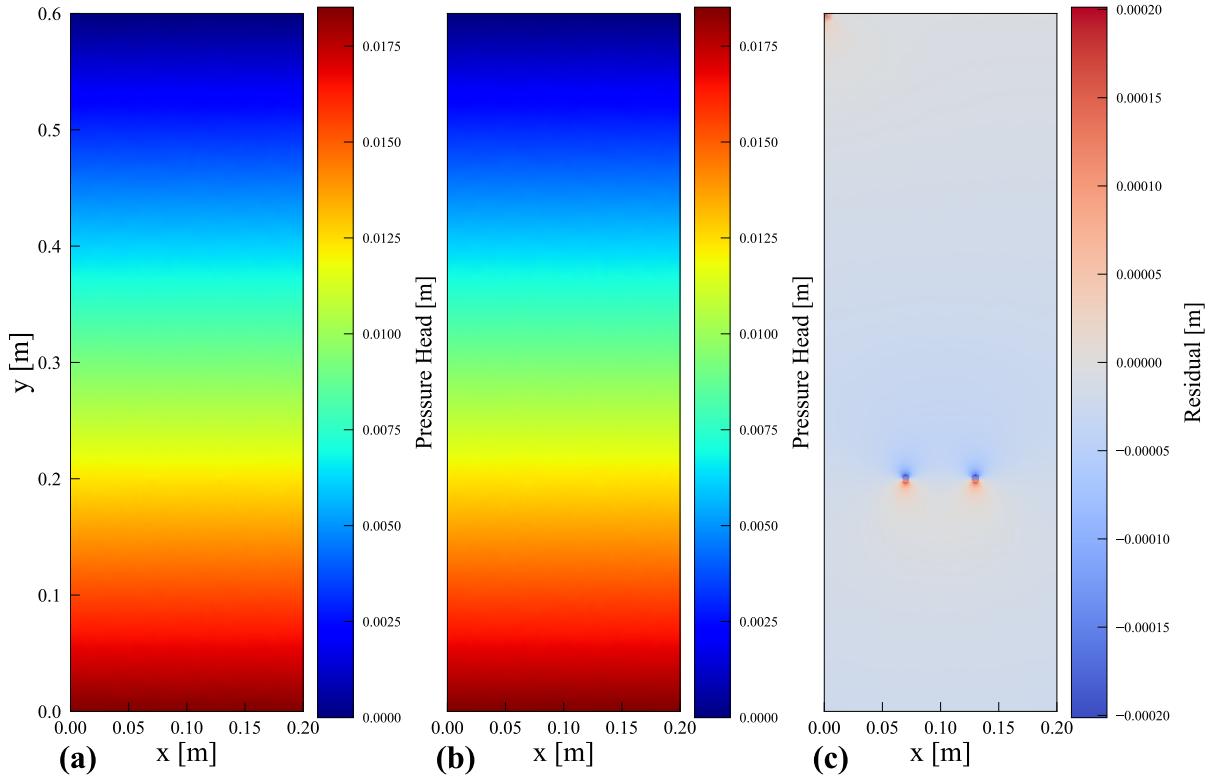


Fig. 2 壓力水頭の空間分布. (a) 数値解, (b) 解析解, (c) 数値解と解析解の残差.

3.1.2.2 使用した物性値

本検証解析においては、実験に用いた鳥取砂丘砂の物理的性質を忠実に再現するため、予備実験によって決定した物性値を Table 1 に示した。

3.1.2.3 逆解析による境界条件の同定

実験では管表面温度等が計測されているが、接触熱抵抗や流入条件の不確実性を考慮し、逆解析により有効な境界温度を同定した。逆解析には PEST (John, 2004) を用い、下端からの流入水温度および凍結管表面温度を推定パラメータとした。比較対象となる温度観測点は、流速の不均一性の影響を低減するため領域中央の鉛直線上（高さ 0.15 m から 0.45 m の 7 点）に選定した。ここで、相変化領域の再現性を最優先とするため、凍結管近傍（高さ 0.20 m および 0.25 m）の重み係数を他の点より大きく設定した。この重み付けにより、未凍結部全体のフィッティングに引きずられることなく、凍結フロント近傍の挙動を重点的に再現した。

Table 1 予備実験により同定された熱物性値および水理定数

| Parameter | Thermal Properties | | | Hydraulic Properties | | | |
|----------------------|---------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| | Component | Symbol | Value | Symbol | Unit | Value | |
| Porosity | – | ϕ | 0.4 | θ_s | [–] | 0.399 71 | |
| Density | Soil | ρ_s | 2684 | θ_r | [–] | 0.006 71 | |
| | [kg m ⁻³] | Water | ρ_w | 1000 | α_1 | [m ⁻¹] | 4.034 |
| | | Ice | ρ_{ice} | 917 | α_2 | [m ⁻¹] | 0.040 34 |
| Specific heat | Soil | c_s | 636.8 | n_1 | [–] | 8.461 52 | |
| | [J kg ⁻¹ K ⁻¹] | Water | c_w | 4186 | n_2 | [–] | 1.309 84 |
| | | Ice | c_{ice} | 2100 | w_1 | [–] | 0.723 52 |
| Thermal conductivity | Soil | λ_s | 2.44 | K_s | [m s ⁻¹] | 3.75×10^{-4} | |
| | [W m ⁻¹ K ⁻¹] | Water | λ_w | 0.6 | | | |
| | | Ice | λ_{ice} | 2.2 | | | |

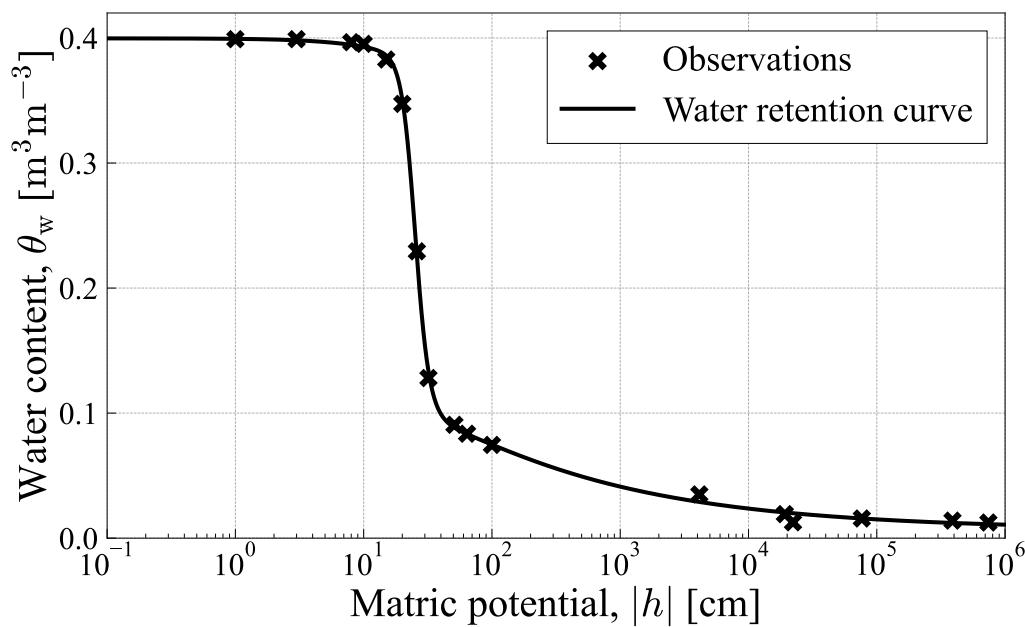


Fig. 3 同定されたパラメータに基づく鳥取砂丘砂の水分保持関数

3.1.3 結果と考察

3.1.3.1 逆解析を用いた境界条件推定

3.1.2.3 小節で述べた逆解析手法を用いて、境界条件の温度について推定を行った。実験期間中の外部環境温度の変化を Fig. 4 に示す。また、実験期間中の外部環境温度に関する統計量を Table 2 に示す。

まず、Fig. 4, Table 2 より、凍結管表面の熱電対の温度は、往き側・還り側はそれぞれ平均約 -1.44°C , -1.18°C であり、実験期間中においては比較的安定していたことが分かる。また、室温は平均約 5.05°C であり、初期温度場として 5.0°C を設定したことも妥当であり、実験装置周囲の放射熱交換も大きく変動しないと考えられるため、断熱境界条件の妥当性も支持される。つまり、実験期間中においては、外部環境温度は比較的一定であったため、逆解析における温度境界条件推定において、境界での温度を時間発展させなくても安定した結果が得られることが期待される。

逆解析によって推定された境界温度は、下端が 4.219°C 、往き側が約 -2.500°C 、還り側が約 -1.970°C となり、いずれも実験期間中に観測された外部環境温度の平均値より低

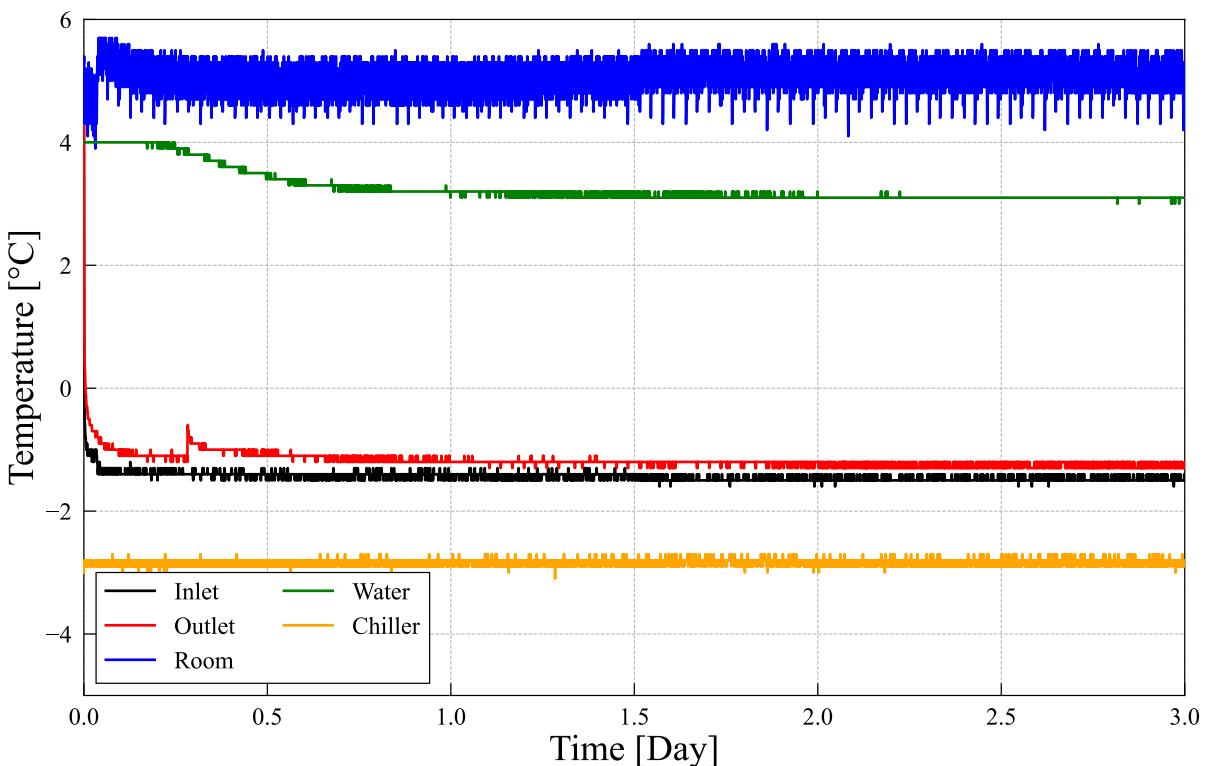


Fig. 4 実験時の外部環境温度変化

Table 2 実験期間中の外部環境温度に関する統計量

| Variable | Min | Median | Max | Mean | Std. Dev. |
|---------------|------|--------|------|-------|-----------|
| Inlet | -1.6 | -1.4 | 1.2 | -1.44 | 0.09 |
| Outlet | -1.3 | -1.2 | 2.0 | -1.18 | 0.13 |
| Room Temp. | 3.9 | 5.0 | 5.7 | 5.05 | 0.28 |
| Water Temp. | 3.0 | 3.1 | 4.0 | 3.26 | 0.27 |
| Chiller Temp. | -3.1 | -2.8 | -2.7 | -2.83 | 0.06 |

い値を示した。この結果は、実験装置の断熱性能が完全ではなく、周囲環境との放射および自然対流による熱交換により、外部環境温度よりも低い境界温度となっていたことが示唆される。ブラインの温度が低いほど、外気との温度差が大きくなり、放射および自然対流による熱損失が増加するため、境界温度の推定値が外部環境温度よりも低下幅が大きくなると考えられる。また、往き側の推定温度が還り側より低くなった点については、凍結管が往き側から還り側へと直列に接続されている実験装置の構造に起因すると考えられる。すなわち、往き側で温度が変化したブラインがそのまま還り側へ流入することで、還り側の温度が相対的に高く推定されたものと解釈できる。さらに、下端境界として流入する水の温度が、タンクにためられた循環用水の温度よりも高く推定された点については、実験装置の下端が室内に位置しているため、循環水がタンクから流入するまでの間に周囲環境との熱交換が生じ、また、ポンプの機械的発熱により流入時の温度が上昇したことが考えられる。両者を鑑みれば、推定された下端境界温度が循環水の温度よりも高くなることは妥当であると考えられる。

3.1.4 でいすかっしょん

引用文献

John, Doherty (2004). *Model-Independent Parameter Estimation User Manual* (5th). Watermark Numerical Computing.

巽 友正 (1982). 流体力学 培風館