

室内空気温熱環境の解析精度検証 - 供試体温度の時間変化の実測結果と解析結果との比較 -

徳永 和美* 長井 大祐*
関根 秀弥*

要 旨

事前に建物の室内空気環境が要求スペックを満足しているかどうかを予測することは、リスク管理上重要であり、その予測手法として数値シミュレーションが多く用いられている。しかし、冷凍倉庫の積荷がどれくらいの時間で何まで冷却できるかというような、物の温度の時間変化に対する解析については複雑な要因が多く、精度にばらつきが多い。そこで、解析技術の向上を図ることを目的とし、実測結果と解析結果との比較により温度の時間変化に対する解析精度の検証を行った。

その結果、解析領域全体をほぼ等間隔メッシュにしたモデルでは実測値と解析値とでは温度の時間変化に差異が見られた。また、供試体周りのメッシュ分割を細かくすれば、実測に近似するというものでないこともわかった。

したがって、温度の時間変化を対象とする非定常解析では、定常になるまでの過程の時間および温度分布を言及するのはまだ技術的に難しく、今後も引き続き、解析精度の検証を必要とする。

1. まえがき

事前に建物の室内空気環境が要求スペックを満足しているかどうかを予測することは、設計・施工等でのリスク管理上重要である。その予測手法として数値シミュレーションが多く用いられており、クリーンルーム等の気流解析に利用してきた。風速・風向の解析精度については、前年度までに数値シミュレーション、実測および模型実験により解析精度を高めるための境界条件等の入力値を得ることができた。次のステップとして、『冷凍倉庫内の積荷がどれくらいの時間で何まで冷却できるか』というような物の温度の時間変化に対する解析精度について、解析技術の向上を図ることを目的に、温度の時間変化に対する解析精度の検証を行った。

本報では、温めた普通コンクリートおよびスタイロフォームに冷却空気を流して温度の時間変化を計測した実測結果と解析結果を比較した結果を報告する。

2. 小型風洞を用いた実測

2.1 測定環境

測定は、当社技術研究所内環境空間デザインルームに小型風洞装置を設置し、普通コンクリート製供試体とスタイロフォーム製供試体とを対象に行った。

写真-1、図-1、2に測定に用いた小型風洞装置を示す。

小型風洞装置は、図-2に示すように、供試体冷却時は環境空間デザインルームの空気調和機の給気系統を直

接用いた。また、供試体の加熱時には冷却時とは別系統のダクト内電気ヒータにより行った。

2.2 風洞内風速測定とその結果

風洞内の風速特性を知り、かつ、数値シミュレーションの入力値として利用するため、風洞内風速を微風速計（日本科学工業(株)製：MODEL 6521）を用いて測定した。測定点位置は、供試体より35cm風上の断面にて全100点とした。風速測定断面位置を図-1に示す。

その結果、風洞の中心に比べ、壁面に近い測定点ほど風速が速くなる特性があるものの、冷却時設定において、供試体前面に流れる冷風の風速が一様（ 0.25 ± 0.02 m/s）となることが確認できた。



写真-1 小型風洞装置外観および供試体（右下）

*技術研究所

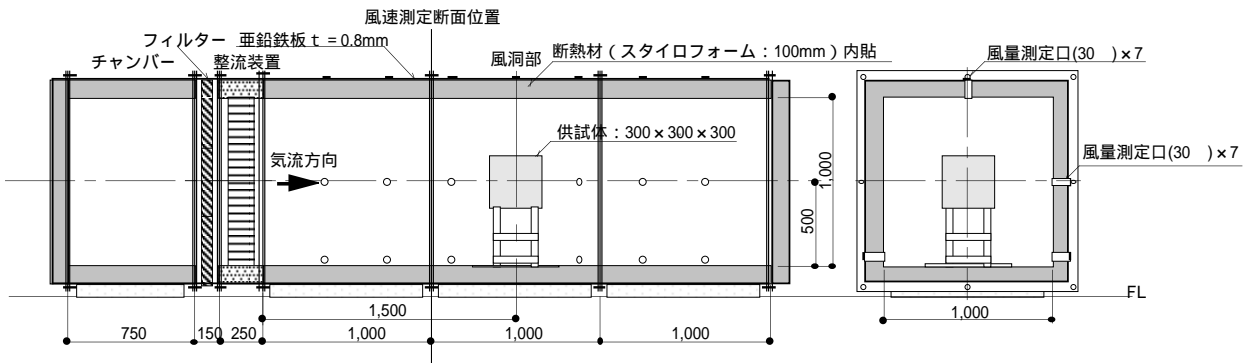


図 - 1 小型風洞装置断面図

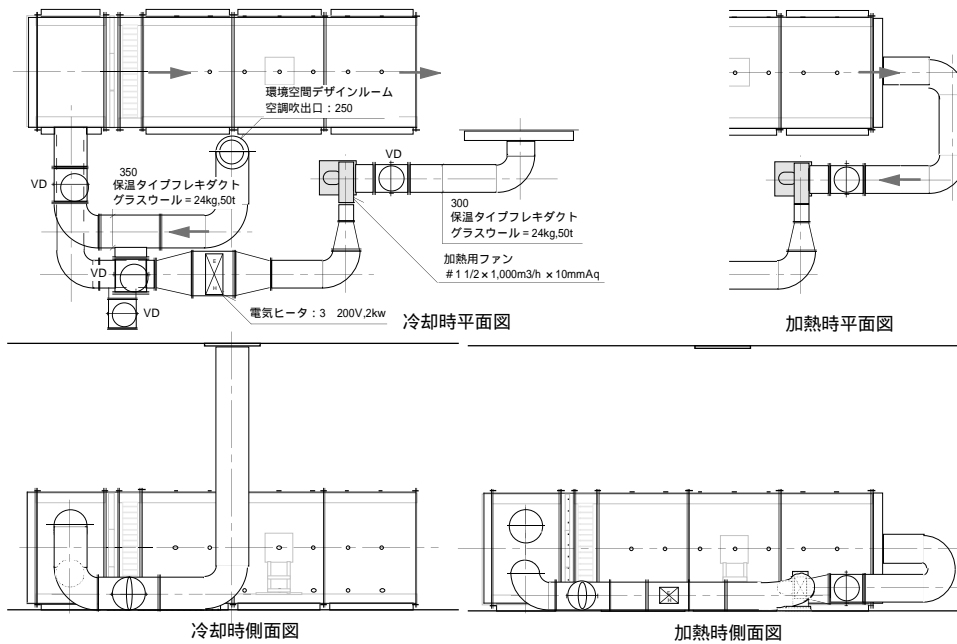


図 - 2 小型風洞装置外観図

2.3 温度測定

以下に、温度測定の測定手順を示す。なお、温度は全てT型（Cu-Co）熱電対により測定した。

- 1) 供試体を風洞内の図 - 1 に示す位置に設置する。
- 2) 風洞をヒータを利用した加熱時設定とし、温風（供試体が普通コンクリートの場合：50、スタイロフォームの場合：45）を循環させる。
- 3) 供試体内部温度が全測定点で所定の温度（供試体が普通コンクリートの場合：43 ± 1、スタイロフォームの場合：39 ± 1）となるまで加熱する。
- 4) 所定の温度になったら、風洞を冷却時設定とし、冷風（供試体が普通コンクリートの場合：6、スタイロフォームの場合：7、風量 = 1,800m³/h）を送り、冷却する。このとき同時に、供試体の温度を1分間隔でデータロガー（江藤電気（株）製：サーモダック6）に記録する。同時に風洞内外温度も記録する。

なお、環境空間デザインルームの室内設定温度は加熱時も冷却時設定と同じにした。

供試体測定点位置を図 - 3 に示す。

3. 数値シミュレーション入力

供試体温度測定に並行して、解析モデルの計算メッシュを2モデル設定して解析を行った。解析領域全体をほぼ等間隔メッシュにしたものを解析モデル1、供試体周りのメッシュ分割を細かくしたものを解析モデル2とした。解析モデルのメッシュ分割図を図 - 4、5に、計算条件を表 - 1 に示す。

普通コンクリートおよびスタイロフォームの2種類についてそれぞれ解析を行った。入力値とした供試体の仕様（物性値）¹⁾を表 - 2 に示す。

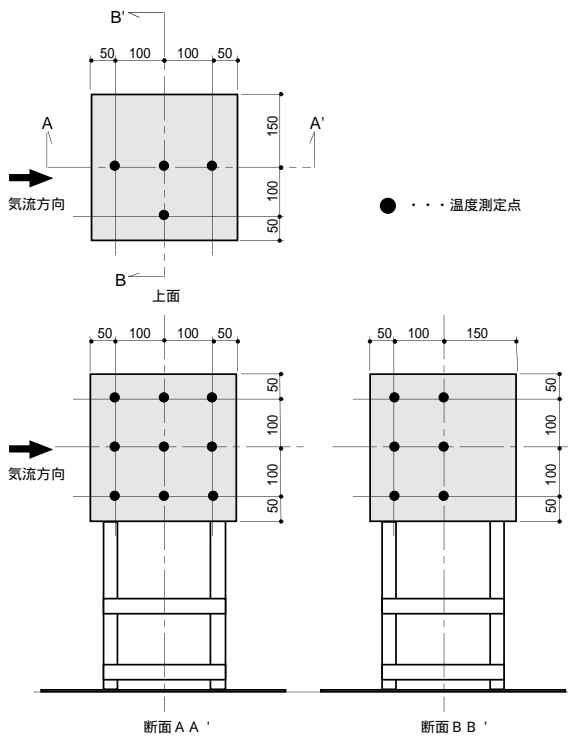


図 - 3 供試体測定点位置図

表 - 1 計算条件

乱流モデル	k - モデル
差分スキーム	全ての移流項を一次風上
時間ステップ	解析モデル 1 1 ~ 10,000 サイクルまで 0.1sec、10,001 サイクルからは 0.5sec 解析モデル 2 1 ~ 6,000 サイクルまで 0.01sec、6,001 サイクルからは 0.5sec
吹出	風速測定結果の数値を利用 (100mm x 100mm の格子 1 に対して 1 測定結果) $k = U^2 / 100$ $= 0.09^{3/4} \cdot k^{3/2} / 0.07D$ ここで k : 乱流エネルギー (m^2/s^2)、 : 乱流消失率 (m^2/s^3)、 U : 吹出風速 (m/s)、 D : 吹出口長 (m)
吸込壁面	自然流入流出 (速度) 対数則 (温度) 乱流熱伝達条件 (対数則) 風洞壁面は断熱条件

表 - 2 供試体の仕様 (物性値)

	普通コンクリート	スタイロフォーム
密度 (kg/m^3)	2,300	28
比熱 ($J/kg \cdot ^\circ C$)	880	1,130
熱伝導率 ($J/m \cdot s \cdot ^\circ C$)	1.4	0.037

$80(x) \times 40(y) \times 40(z) = 128,000$

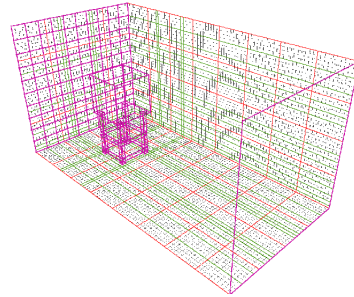


図 - 4 解析モデル 1 のメッシュ分割図

$88(x) \times 48(y) \times 48(z) = 202,752$

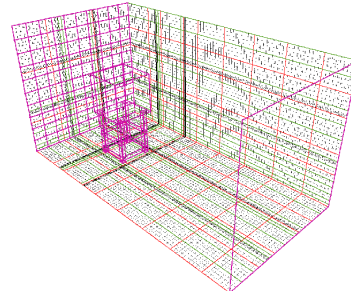


図 - 5 解析モデル 2 のメッシュ分割図

4. 結果

4.1 実測値と解析値の結果比較

実測結果、解析モデル 1、2 の解析結果それぞれについて各測定点の測定結果を比較した。その結果の特徴を最も顕著に表している供試体中心の測定点の結果を以下に述べる。

普通コンクリート製供試体の場合の供試体中心の測定点の温度の時間変化の比較を図 - 6 に示す。実測値に比べて解析値の方が遅く温度が降下している。

スタイロフォーム製供試体の場合の供試体中心の測定点の温度の時間変化の比較を図 - 7 に示す。実測値に比べて解析値の方が速く温度が降下している。

4.2 供試体の物性の違いによる影響

図 - 6、7 により、普通コンクリートとスタイロフォームとを比較すると、実測値、解析値いずれも、普通コンクリートの温度の時間変化の方がスタイロフォーム温度の時間変化よりも遅いのがわかる。

4.3 解析モデルの計算メッシュの違いによる影響

図 - 6、7 に共通して、解析モデル 2 の方が解析モデル 1 に比べて測定点の温度が速く降下している。つまり、メッシュを細分割することにより温度の時間変化は速くなるのがわかる。特に普通コンクリートの場合が顕著である。ただし、普通コンクリートでは解析モデル 2 が、スタイロフォームでは解析モデル 1 が、実測温度の時間変化に近似している傾向にあり、物の温度の時間

変化を問題とする場合には、メッシュを細分割して解析時間をかけても、必ずしも実際の温度の時間変化に近似するとはいえないことがわかる。

なお、コンクリートの解析モデル1および2の結果から得られた、冷却開始から1時間後の温度コンター・風速ベクトル図を図-8に示す。解析モデル1と解析モデル2の結果を比較すると、供試体周りの温度分布にも明らかな違いが現れている。メッシュを細分割することにより、熱伝達が促進され、供試体が冷えやすく、周囲の空気が温まりやすくなったためと考えられる。

5. 考察

今回の比較実験から、現状の数値シミュレーションの温度の時間変化に対する解析精度は高いとはいえないことがわかった。また、いたずらにメッシュ分割を細かくしても解析時間を多く消費するだけで必ずしも精度の向上につながらないことも把握できた。その原因は、現在の標準k-モデルのように壁近傍の低レイノルズ数領域が精度よく解析できず、熱伝達に対数則という『熱の伝わり方のモデル化』を用いているからと考えられる。供試体周りのメッシュの分割を細かくすることにより対数則が正しく働き、熱伝達は促進されるが(本実験の場合、供試体の温度降下時間が速くなる)、それが必ずしも実際に近似するわけではないということである。ただし、流れ(風速・風向)に対する解析精度を向上させるためにメッシュ分割を細かくすることは必要である。

以上のことから数値シミュレーションを用いる場合の2つの注意事項を挙げることができた。

- 1) 温度の時間変化を対象とする非定常解析では、定常になるまでの過程の時間および温度分布を言及するのは無理がある。
- 2) 温度の時間変化の傾向をみるために、数値シミュレーションの解析結果どうしの比較を利用するのは有効といえる。

6. 今後の展開

数値シミュレーションは今後も発展していくと考えられ、本実験のデータを、温度の時間変化に対する解析精度の検証用データベースとして活用できるものと期待している。今後も解析精度の検証を実施していくことが必要である。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会：第12版空気調和・衛生工学便覧、1 基礎編、pp.19~20、1995

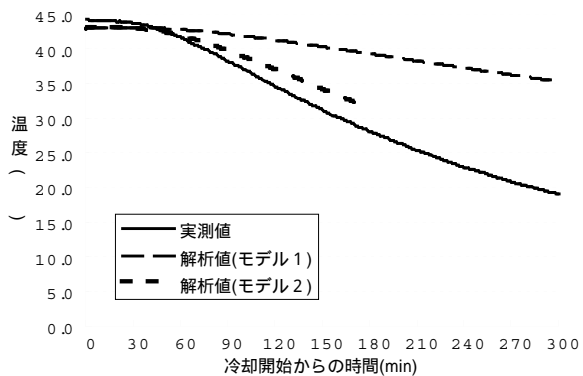


図-6 普通コンクリートの温度の時間変化比較

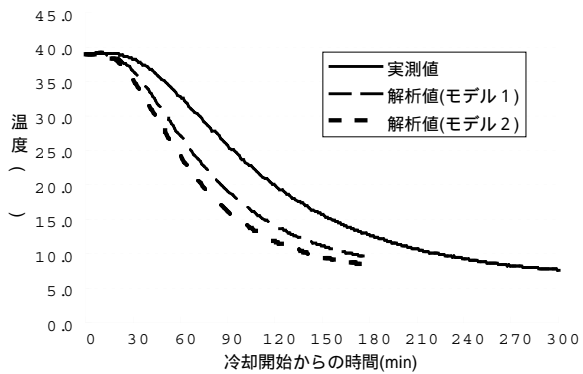


図-7 スタイロフォームの温度の時間変化比較

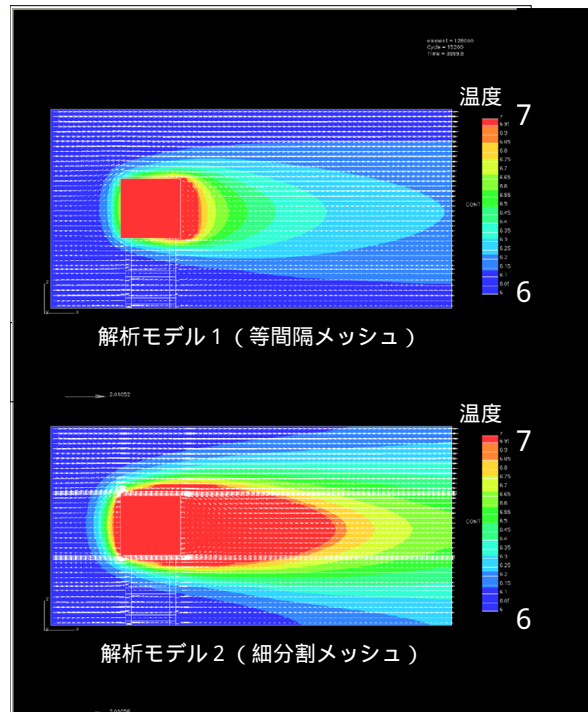


図-8 解析結果温度コンター・風速ベクトル図 (普通コンクリート製供試体、中心断面立面、冷却開始1時間後)