

論文の内容の要旨

論文題目 床下チャンバー加圧型床吹出し空調システムにおける
熱・気流性状の解析と予測に関する研究

氏 名 藤 田 尚 志

事務室内にオフィスオートメーション(OA)機器が普及し、その配線敷設を容易にするために付加された二重床を空調給気の経路としても利用できるようになり、床吹出し空調システムが広く採用されるようになった。本研究対象の「床下チャンバー加圧型」の床吹出し空調システムは、二重床空間を給気用のチャンバー(床下チャンバー)として用い、床下チャンバー全体を加圧することで床吹出口から室内へ給気する方式で、我が国で採用の多い方式の一つである。この方式では他方式に比べ、床下チャンバー内にダクトやファンが不要、床吹出口の配置替えが容易といった利点がある。さらに床吹出しの他方式または天井吹出し方式に比べて次のような特徴があるが、それらを定量的に把握し設計に反映させるための研究が少なかった。

- 1) 床吹出し方式では冷房時、室内に上下温度差が生じ易い。上下温度差は快適性の観点からは好ましくないが、室内発熱の効率的な排出に有用である。すなわち、室内上下温度分布が予測できれば、快適性と省エネルギー性のバランスの最適化が図れる。
- 2) 床下チャンバー加圧による給気では、床吹出口ごとの風量が床下チャンバー形状等に影響され、チャンバー高さが低いほど不均一な風量分布になり易い。施工費低減等の理由から求められる低いチャンバー高さに対し、設定した吹出口風量を簡易に確保する手法が望まれる。
- 3) 床下チャンバー内で、その構成材と空気との間の熱交換が吹出し気流温に影響するが、

それは蓄熱・蓄冷運転の可能性も示唆する。吹出し気流温を許容範囲内に収めるため、また蓄熱・蓄冷効果の利用可能性を探るため、授受熱量の予測手法が求められる。

吹出口風量と吹出し気流温を介して、上記1)は室内側、2)と3)は床下チャンバー側の課題と分けられる。本研究はこれらの課題の解明を目的として実施された。

論文は、5章より構成される。この内、第2章、第3章、第4章が上記の課題1)、2)、3)に対応する。

第1章では、本研究で対象とする床下チャンバー加圧型床吹出し空調システムを定義し、本研究の目的を示した。

第2章では、室内上下温度プロファイル(床上高さとの関係)の簡易な予測モデルを提示した。予測には数値解析(CFD)による方法もあるが、複雑な床吹出口形状の取り扱いに代表される煩雑な入力と、長い計算時間のため日常の設計向きではないと考え、簡易な予測手法を開発対象とした。

床吹出し方式で空調される事務室を模擬した実験室において、実験条件(床吹出口種類、吹出口風量、室内熱負荷量)を系統的に変えて室内上下温度プロファイルを測定した結果を分類した。そこから推定される気流性状を基に、温度プロファイルの予測モデルを構築した。モデルでの計算に必要な各種係数等を測定結果から同定し、それらを組み込んで計算した温度プロファイルは、測定されたプロファイルを概ね良く表した。

床吹出し方式と室内一様拡散の場合を試算し比較した結果により、一様拡散の場合に比べて、床吹出し方式では居住域内で処理すべき熱量が少なく、かつ熱負荷量の増加に対しても居住域の温度上昇を抑制することを示した。

床パネルの合わせ目から室内への漏気を予測モデルに組み込んで計算した結果から、漏気比率(=漏気量/導入給気量)が同じ場合では0A熱負荷量が多いほど上下温度差は大きいこと、また0A熱負荷量が多い場合ほど漏気比率の変化量に対して上下温度差の変化量が多いことを示した。

第3章では、床下チャンバー高さが低い場合でも吹出口ごとの風量のばらつきを許容範囲内に収める手法を提示した。床下チャンバー内気流性状(風向風速・静圧)の予測を目的とした既往の研究は数少なく、特に実大の床下チャンバーの吹出口風量について、測定と予測が照合されたことはこれまでなかった。

床吹出し空調システムの二重床部分(床パネル、床下チャンバーおよびスラブ)を実大規模で再現した実大二重床模型(約7m×約6m×0.04または0.15m空間高さ)において等温条件下で測定した結果、チャンバー内、床吹出口まわりでの①渦の発生、②ほぼ一方向に流れる気流(一方向気流)、の2要因が吹出口風量を減少させることが分かった。これに対して床吹出口まわりに整流板を設置し、吹出口風量が回復することを確認した。

k-ε型2方程式乱流モデルによる3次元数値解析で風向風速の測定結果を再現するためには、メッシュ分割において床パネルの支柱を組み込む必要があることを示した。続いて吹出口風量を予測するためには、床吹出口特性の入力と静圧分布の調整が必要で、それを予測計算フローとしてまとめ、その精度が実用上十分であることを測定結果との照合で確かめた。

以上の結果から、チャンバー高さを低く設定した条件で吹出口風量分布のばらつきを減らすには、まず床吹出口に整流板を設置して渦や一方向気流の影響を抑制し、周囲静圧に対応した吹出口風量を確保すべきと考える。その上でさらにチャンバー内の静圧分布を緩やかにして吹出口風量分布の均一化を図る場合には、チャンバー内の風速を減じる等の方策が必要だが、上述の吹出口風量予測計算フローと数値解析により、その効果が予測できる。

第4章では、床下チャンバーの鉛直方向の熱移動を表現する「1次元モデル」を制作し、床下チャンバー全域を単体と見なしてこのモデルを適用する「単体適用」、床パネルごとの大きさで小割りにして各小割り域にこのモデルを適用する「小割り適用」といった2つの適用方法を提示した。既往の研究には床下チャンバー内の熱移動のモデル化を試みているものがあるが、モデルの精度の検証が十分ではなく、汎用化に難があった。

まず空気と面との間の熱移動に大きく影響する対流熱伝達率を測定した結果、風速が約2m/s以上でJurges(ユルゲス)の実験式と良く合った。低風速域においては、風速に加え、対象面の表面温度と気流温度との差を入力とする近似式を新たに作成し、その精度を測定値との照合で検証した。Jurgesの実験式に、低風速時の近似式を併せて、対流熱伝達率算出式とした。

この対流熱伝達率算出式を、上述の「1次元モデル」の「単体適用」や「小割り適用」に組み込んで計算した結果を床下チャンバー全体における実験測定結果と照合した。「1次元モデル小割り適用」によって算出した定常状態の温度・熱流量の水平分布は、位置によっては測定結果と差が大きいものも散見されたが、チャンバー部位(給気全体、床パネル全面、スラブ全面)ごとの熱流量については計算値は測定値と良く合った。「1次元モデル単体適用」による計算ではその構成上、対流熱伝達率を調整する必要がある。その調整比率(対流熱伝達率比率)を定常状態の測定結果から算出して与え、非定常状態の温度測定結果の再現を試みた。誤差は最大で約0.2Kで、大部分の計算結果は測定結果と良く一致した。

第5章では、各章で得られた知見をまとめ、総括的な結論を述べるとともに、今後の課題についても整理した。

以上のように、上記の課題1)、2)、3)のそれぞれについて予測モデル・手法を提示し、それらの精度が実用上十分であることを測定結果との照合で確認した。これらの成果は、床吹出し空調システムを省エネルギー的・経済的に設計・運用するのに有用なツールとなり得る。

ABSTRACT OF THESIS

Title **Analysis and Prediction of Heat Transfer and Airflow
in Underfloor Air-Distribution System with Pressurized
Floor Plenum**

Author **Hisashi FUJITA**

Automated electronic equipment is now widely used in offices, many of which have introduced raised floors to conceal the inherent cables. The raised floors provide floor plenums and help underfloor air-distribution systems to be realized. The underfloor air-distribution system "with a pressurized floor plenum", the subject of this thesis, is defined as an air-conditioning system in which conditioned air pressurizes the floor plenum to flow in the room through floor-mounted air outlets, and is one of the most popular types in Japan. This type of system has advantages because neither ducts nor fans are situated in the floor plenum and it allows easy relocation of air outlets. Compared with other types and conventional overhead systems with ceiling-mounted air outlets, this type additionally has the following advantages, which have not been well researched or evaluated so far for application to air-conditioning design.

- 1) Vertical air temperature stratification often occurs in rooms air-conditioned by the underfloor air-distribution system, and is not desirable from a comfort point of view, but useful to take heat out of the room efficiently. This means that prediction of the room air temperature profile helps to optimize the balance between comfort and energy saving.
- 2) The airflow rates through floor-mounted outlets from the pressurized floor plenum are affected by the floor plenum configuration, and usually differ from one another to a greater degree as the height of the floor plenum decreases. A low height of floor plenum is required to cut the building

construction cost, and an easy prediction method is needed which ensures that the airflow rate through each outlet meets the specified value.

- 3) Heat transfer between the air and the surrounding components of the floor plenum affects air temperatures at floor-mounted outlets, and may be utilized for storage of heat and cold. A prediction method of the heat transfer is necessary to keep the air temperature at each outlet within the allowable range and to study the feasibility of thermal storage operation.

The above 1) is an issue related to the room air, and on the other hand the above 2) and 3) are related to the floor plenum, which is connected to the room air with the airflow rates and air temperatures at the floor-mounted outlets. This thesis deals with these issues.

This thesis consists of 5 chapters, of which Chapter 2, Chapter 3 and Chapter 4 correspond to the above issues 1), 2) and 3) respectively.

Chapter 1 defines the underfloor air-distribution system with a pressurized floor plenum, the subject of this thesis, and shows the objectives of this research.

Chapter 2 explains a simple prediction model of the room air temperature profile, i.e. the relationship between the room air temperature and the height above the floor. Such prediction is also possible by computational fluid dynamics (CFD), which demands complicated input work, especially for intricate configurations of floor-mounted outlets, as well as a long computational time, and is therefore not suitable for everyday design work. This is why a simple prediction model is asked for.

Room air temperature profiles were measured in a full-scale test room under various conditions of air outlet types, air outlet flow rates and room heat loads, and classified in accordance with the estimated airflow patterns. Based on this classification, a model for the prediction of room air temperature profiles was developed. The values of the coefficients necessary for simulation were derived from experimental results. The model developed using these coefficients predicted well the measured profiles.

Comparison between the room air temperature stratification caused by the underfloor system and the uniform room air temperature showed that the former bears less heat load within the occupied height and raises the temperature within the occupied height less in the case of an increase in the room heat load.

Air leakage through gaps between floor panels into the room was incorporated into the prediction model. The simulation with this revised model showed that, with a constant ratio of the air leakage rate to the supply airflow rate, the room air temperature stratification grows as the equipment heat load increases, and that a change in the air leakage ratio affects the stratification more as the equipment heat load increases.

Chapter 3 presents a method of keeping the airflow rate from each outlet within the preset range even with a low height of the floor plenum. Little research has been carried out on how to predict the airflow in the floor plenum, and no verification of the prediction methods has been undertaken with full-scale floor plenums.

Isothermal measurements were made with a full-scale experimental floor plenum measuring approximately 7 m by 6 m by 0.04 or 0.15 m (void height), and consisting of floor panels, plenum void and a concrete slab. The measurement results indicated that a vortex or a unidirectional airflow around a floor-mounted outlet in the floor plenum reduces the air outlet flow rate, which can be recovered by setting straight vanes around the outlet.

3-dimensional CFD with the $k-\varepsilon$ turbulence model of the 2 equation type simulated well the measured airflows only in the case where floor panel support jacks were incorporated into the computational grid system. It was found that, in order to predict the air outlet flow rates, air outlet characteristic data should be input and the CFD results of the static pressure in the floor plenum should be adjusted. These findings were expressed in the form of a flow chart, which proved accurate enough for practical use by comparing the calculation and measurement results.

The following procedure is recommended to keep the air outlet flow rates within the preset range with a low height of the floor plenum. Firstly, set straight vanes around floor-mounted outlets to lessen the effects of vortices and unidirectional airflows, bringing the air outlet flow rates up to the values expected from nearby static pressures. An additional step for uniformity of the air outlet flow rates is to reduce the airflow velocity in the floor plenum for uniform static pressure. The effect of this step can be evaluated by a combination of the above-mentioned flow chart and CFD.

Chapter 4 deals with the heat transfer around the floor plenum, presenting a "1-dimensional (1D) model" and a "developed 1-dimensional (D1D) model". The former is for easy prediction of temperature changes and thermal storage in the building mass, while the latter is for simulation of horizontal temperature variations in a steady state. Some past investigations tried to model the heat transfer in the floor plenum, but those models were not verified well and not suitable for general use.

The convective heat transfer coefficient, an influential factor on heat transfer between air and surface, was measured, and was found to be in accordance with Jurges's equation for airflow velocities above approximately 2 m/s. For lower velocities, an approximate equation was derived from the measurement results, including the temperature difference between air and surface as a variable, and its accuracy was confirmed with the measured values. This approximate equation and Jurges's equation can give a convective heat transfer coefficient at any airflow velocity.

These two equations were incorporated into the above-mentioned "1D model" and "D1D model", and the calculation outputs of both models were compared with the measured results. The horizontal variations of temperature and heat flux in a steady state simulated by "D1D model"

showed some places where the calculated value differed significantly from the measured value. However, predictions of the overall heat flow through each component of the floor plenum, such as the whole supply air, all the floor panels and the whole concrete slab, differed little from the measured values. The convective heat transfer coefficient of "1D model" needs to be adjusted because of the simplifying assumptions made in the model. This was adjusted on the basis of the steady state measurement results. The temperature change simulated by "1D model" showed a maximum difference of approximately 0.2 K between the calculated and measured values, and little difference as a whole.

Chapter 5 summarizes the findings described in each chapter and gives a conclusion, referring to some issues to be studied.

The prediction models / method have been presented in relation to all the above-mentioned issues 1), 2) and 3), and it has been confirmed that these models / method can simulate the measurement results sufficiently well for practical design purposes. These models / method are expected to provide useful tools for designing and operating the underfloor air-distribution system in an energy-saving and economical manner.