Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

航空機の客室内空調の熱流体シミュレーション

平澤，茂樹
川南，剛
松田，紀憲
新，隆之

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,3:61-67

(Issue Date)
2011

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003763

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第３号　61～67 頁　2011 年
doi:10.5047/gseku.j.2011.006

航空機の客室内空調の熱流体シミュレーション

平澤 茂樹 [1*]・川南 剛 [1]・松田 紀憲 [1]・新 隆之 [1]

[1] 工学研究科機械工学専攻

（受付:September 27, 2011　受理:January 26, 2012　公開:February 1, 2012）

キーワード：　航空機，空調，快適性，速度・温度分布，熱流体数値解析

航空機の客室内の流れ温度分布を 3 次元熱流体数値シミュレーションにより計算し，空調の吹出口や排気口の位置などの空調条件と乗客の快適性との関係を検討した．計算対象は，客室内の長手方向に 1 列 0.8 m，半幅 1.25 m，2 人掛けの座席とした．快適性の評価方法は，乗客近傍の 8 ヶ所の評価位置の温度差が 2℃以下，平均温度が 23～26℃の範囲内，最大速度が 0.2 m/s 以下の場合を快適と判定した．7 ケースの計算条件について，客室内の速度・温度分布，乗客の表面の熱伝達率，熱流束分布を求めた．その結果，以下の結論を得た．快適性のためには，乗客の頭部の風速を増やさずに頭部を冷却する空調の流れ温度パターンを形成することが大切である．空調の吹出口を人の前面の円穴(2 m/s，20℃)と側面上部の円穴(10 m/s，15℃)の 2 ヶ所，排気口を通路天井の長穴にした場合がもっとも快適である（評価位置の温度差 1.6℃，平均温度 24.4℃，最大速度 0.2 m/s）．

緒　　言

航空機の機内環境は一般的な室内環境とは異なり，客室内に乗客が密集しており，乗客の移動も少ない．また，航空機は上空飛行中には外気温が氷点下55℃まで低下し，夏季の駐機時には外気温が40℃まで上昇する．さらに，航空機の空調システムは一般的な室内空調のように冷媒を循環させる蒸気サイクルではなく，エンジン抽気の高圧空気を用いたエアサイクル[1)]を用いている．このように航空機の空調システムは，一般的な室内空調とは大きく異なる．

航空機の空調について，これまでにもいくつか研究がなされている．Mizuno and Warfield[2)]は3次元熱流体数値解析（CFD）を行い，航空機の通路天井に吹出口，側壁の上部と下部に排気口がある場合に，乗客が居ない客室内の流速分布は天井から床下方向の流れ分布であるという計算結果を報告した．Singh et al.[3)]は3次元乱流CFD解析を行い，航空機の通路天井に吹出口，側壁の下部に排気口がある場合について，人間を円筒形状にモデル化し，乗客が居る場合と居ない場合の流速・温度分布を計算し，客室内は通路天井から下方向に流れ，壁に沿って上方向に循環する流れ分布であるという計算結果を報告した．Lin et al.[4, 5)]はLESを用いた3次元CFD解析により，Boeing767を対象に通路天井に吹出口，側壁の下部に排気口がある場合について，簡易人間モデルを用いた客室内の乱流流速分布や，空気中に発生した病原菌の拡散状況を計算した．Mo et al.[6)]はCFD解析結果検証を目的としてBoeing767を対象にサーマルマネキンを使いPIV法で客室内の乱流流速分布を測定した．Sun et al.[7, 8)]はBoeing767を対象に乗客の配置条件を9ケース変えて客室内の乱流流速分布を粒子軌跡法で測定した．以上のように従来の研究では限られた吹出口の位置条件での客室内流れ温度分布が報告されているのみであり，吹出口の位置を変えた場合における乗客周囲の流れ温度分布の検討や，さらに乗客の快適性との関係の検討が見当たらない．

本研究では，航空機の客室内の流れ温度分布を3次元CFD解析し，吹出口や排気口の位置などの空調条件を変えて乗客の快適性との関係を検討することを目的とするものである．

1.　解析方法

Figure 1に計算対象の上面，正面および側面図を示す．高さ2 m，長手方向に1列0.8 m，半幅1.25 m，2人掛けの座席とし，通路中央断面境界を対称条件とした．この条件は構造がWEB公開されているBOMBARDIER 社CRJ200型機[9)]とEMBRAER 社EMBRAER170 型機[10)]の平均値に近い条件である．人は直方体の組み合わせによる簡易モデル形状とし，人の頭部の皮膚表面温度37℃で固定条件，胴体部の衣服表面温度32℃で固定条件，機内壁面は断熱条件とした．本研究で検討する空調の吹出口や排気口の位置をFigure 1に赤で示す（A:通路天井の長穴，B:側面上部の長穴，C:側面上部の円穴，D:側面下部の長穴，E:頭上天井の円穴，F: 乗客の前方の座席背面の円穴）．長穴の幅は50 mm，円穴の直径は30 mmとした．吹出口の位置は考えられる主な条件のすべてを検討した．A:通路天井，B，C:側面上部，E:頭上天井は既存の航空機に用いられている．F:前方の座席背面（真正面は雑誌置き場等があ

るので少し横にずらした位置）は新たに提案するものである．他にも，各乗客の座席の下部や客室前方などの吹出口も検討したが，客室前方に吹出口を設けて長手方向に流した場合には座席上部を流れるだけで各乗客の座席の部分にほとんど流れ込まないなど，快適性の評価結果が悪く詳細は省略する．条件設定上の制約条件は特に与えなかったが，実用を考えて吹出口での圧力損失が10 kPaを超えるような小さな穴は考えず，また吹出し温度の設定値の数は2以下とした．吹出口からの吹出し速度や温度は後述の快適性の評価位置8ヶ所の平均温度が快適条件範囲内に入るもので，温度差と最大速度が快適条件に最も近づくように変化させて検討した．吹出し速度が大きすぎれば評価位置での最大速度も大きくなり，また吹出し速度が小さすぎれば評価位置での温度差が大きくなる．本報では快適条件に最も近くなる吹出し速度や温度条件での結果のみを示す．

流速・温度計算は3次元熱流体解析ソフト「STAR-CCM＋」を用いる[11]．離散化は有限体積法を用いている．解析条件は，非圧縮性流体，k-ε乱流モデル，非定常計算，物性値一定（空気の密度 1.18 kg/m^3，比熱 1000 J/(kg K)，粘性係数 1.86×10^{-5} (Pa s)，熱伝導率 0.0260 W/(m K)），Boussineski近似の自然対流計算あり，多面体メッシュ分割とする（メッシュ数45000）．ふく射伝熱は無視した．非定常計算は時間ステップ 10 s，時間ステップごとに反復計算回数100回とし，流れや温度分布が1%以上変化しなくなる定常状態（1200 s 以上）の結果を求めた．

快適性の評価基準はいくつか提案されており，季節や着衣量，運動量条件などによって詳細な評価基準があるが，ほぼ平均温度が23～26℃の範囲内で，湿度が30～70%で，温度差が2℃以下，気流速度が0.2 m/s以下であると報告されている[12]．そこで本研究での快適性の評価方法は次のようにした．Figure 2に示すように，人の表面から0.05～0.15 m離れた8ヶ所の空間（乗客2人の頭上，顔前，胸前，足前の4領域の8ヶ所）の定常状態の温度と速度を用いる．これは人の表面に形成される自然対流の境界層厚さより離れた位置とし，顔前，胸前，足前の評価位置の高さは1.0～1.2 m，0.7～1.0 m，0.2～0.6 mである．各評価範囲内には計算節点数が30～150あり，その平均値を用いる．その評価位置8ヶ所の温度差が2℃以下，平均温度が23～26℃の範囲内，速度が0.2 m/s以下の場合を快適と判定し，8ヶ所の温度差が最小となる条件を検討する．湿度については，湿度計算式と温度計算式の相似則を利用して別に行った検討（詳細説明を省略）で，空調の吹出し空気温度を調整して温度の快適条件を満足させられれば，空調の吹出し空気湿度を調整して湿度の快適条件も満足できることがわかり，本研究では湿度の検討を行なわなかった．

2.　空調の吹出口が1つの場合の計算結果

空調の吹出口をFigure 1のA, B, Cのどれか1つ，排気口をA, B, Dの長穴のどれか1つとして，評価位置8ヶ所が快適条件に最も近づくものを計算した．計算結果はFigure 3に示す3か所の断面図①, ②, ③における速度ベクトル，速度分布，温度分布，前方からみた乗客の表面の熱伝達率分布と熱流束分布（放熱が負）を示す．Figure 4は，計算条件No. 1（空調

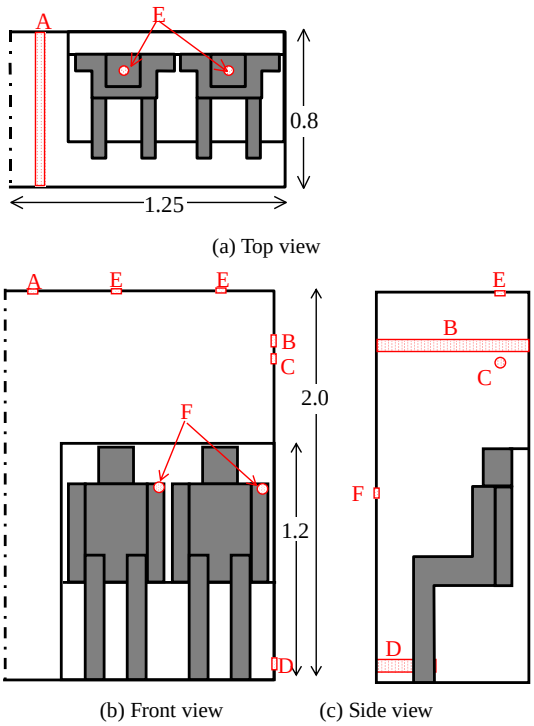


Fig. 1　Top, front and side views of calculation model

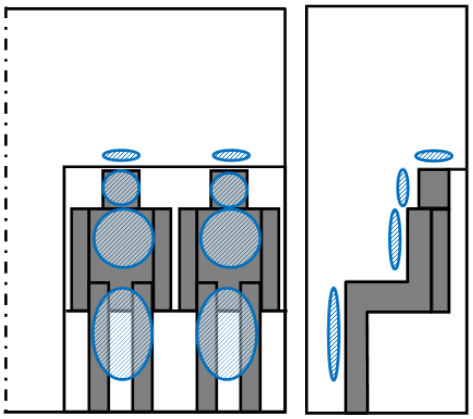


Fig. 2　Evaluation points

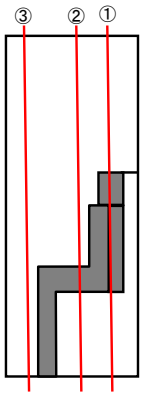


Fig. 3　Cross sections

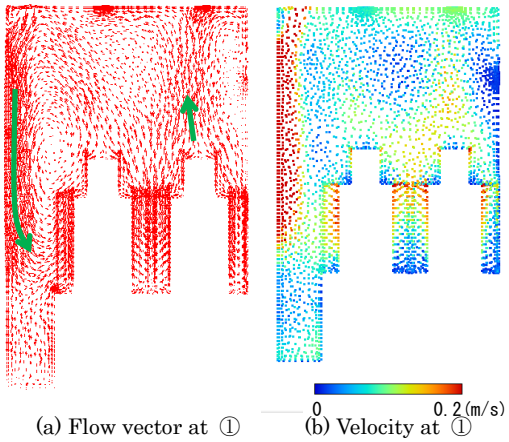
の吹出口をA:通路天井の長穴(0.35 m/s, 20℃)，排気口をD:側面下部の長穴とした場合）の計算結果を示す．Figure 4 (c)(e)(f)でわかるように通路天井から下方向に流れ，壁に沿って上方向に循環する流れ分布であり，Singh et al.[3]の計算結果と同じである．人の近傍は上昇流である．(b)(g) のように乗客の頭上の流速が小さく頭上の温度が高くなる．(i)(j) のように乗客の表面の熱伝達率や熱流束(放熱が負)は足の部分が大きい．評価位置8ヶ所の温度差3.8℃，最大速度0.18 m/sであり，速度は快適条件になるが，温度差が大きく不快である．

Figure 5は，計算条件No.2（空調の吹出口をB:側面上部の長穴(0.35 m/s, 20℃)，排気口をD:側面下部の長穴とした場合）の計算結果を示す．(c)(d)のように吹き込んだ空気が乗客の前でそのまま下方に流れ，人の近傍は自然対流による上昇流となり，乗客の頭上の流速が小さく頭上の温度が高くなる．温度差3.3℃，最大速度0.2 m/sであり，温度差が大きく不快である．

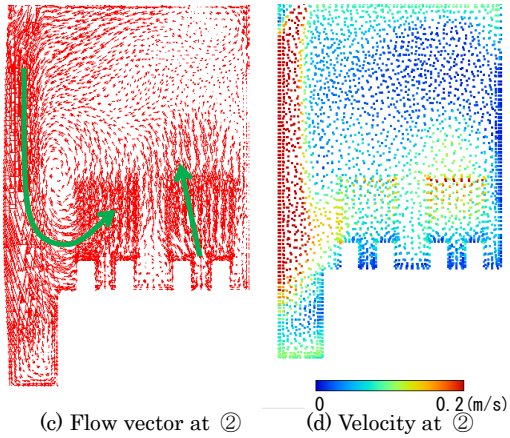
Figure 6は，計算条件No. 3（空調の吹出口をC:側面上部の円穴(10 m/s, 15℃)，排気口をA:通路天井の長穴とした場合）の計算結果を示す．(a)(b)のように吹き込んだ空気が乗客の頭上を流れて頭上を冷却する．人の近傍は上昇流である．(g)のように乗客の表面の熱伝達率の分布が小さくなる．温度差1.8℃，最大速度0.19 m/sであり，温度差と最大速度とも快適条件になる．

以上の計算条件No.1～No.3とも人の近傍は最大速度を0.2 m/s 以下に小さくする条件のために自然対流の影響が大きく作用して上昇流となり，その流れの結果として人の顔や頭の温度が高くなっている．乗客の快適性のためには，頭部の風速を増やさずに頭部を冷却する空調の流れ温度パターンを形成することが大切であることがわかる．

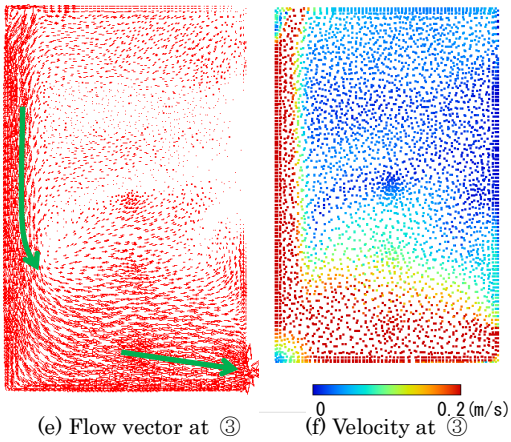
Table 1のNo.1～No.5にその他の条件も含めて吹出口が1つの場合の計算結果を示す．その結果，計算条件No. 3（空調の吹出口をC:側面上部の円穴(10 m/s, 15℃)，排気口をA:通路天井の長穴とした場合）がこの中ではもっとも快適である．さらに，計算条件No.1，No.2のように吹出口が長穴の場合には吹出し速度が小さいために，評価位置8ヶ所での速度は快適条件にできるが，温度差が大きくなる．計算条件No.3～No.5のように吹出口が小さな円穴の場合には吹出し速度が大きく，温度差を小さくできるが，流れパターンによっては最大速度が大きくなることがわかる．



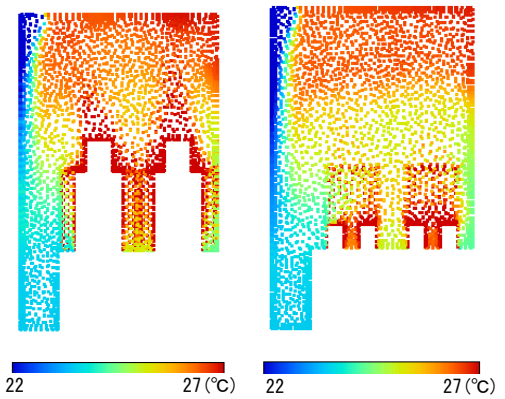
(a) Flow vector at ①　(b) Velocity at ①



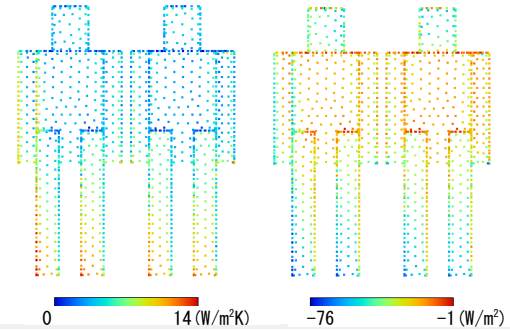
(c) Flow vector at ②　(d) Velocity at ②



(e) Flow vector at ③　(f) Velocity at ③

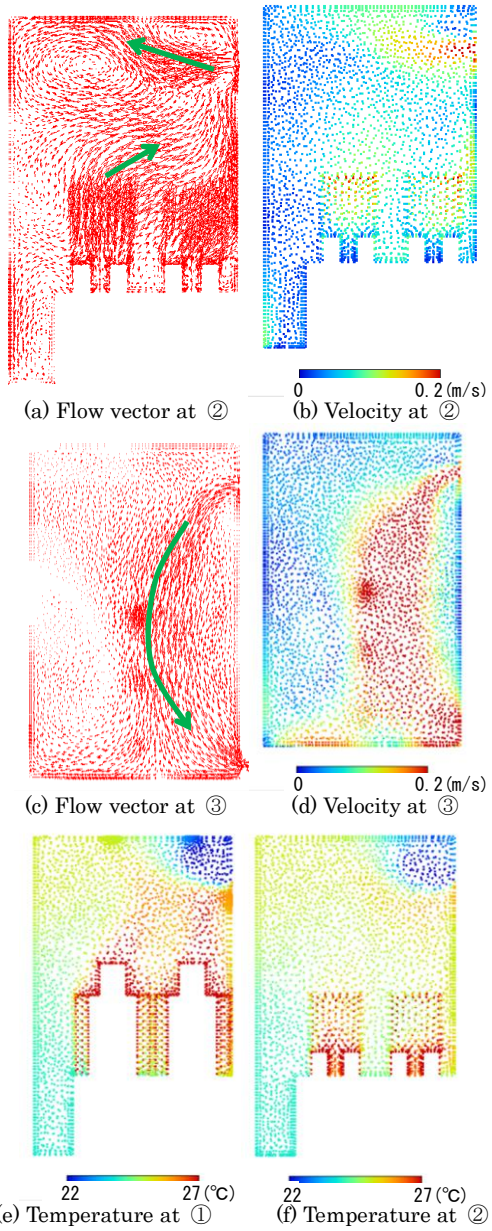


(g) Temperature at ①　(h) Temperature at ②



(i) Heat transfer coefficient　(j) Heat flux

Fig. 4　Calculation results of case No.1
[inlet: A(0.35 m/s, 20℃), outlet: D]

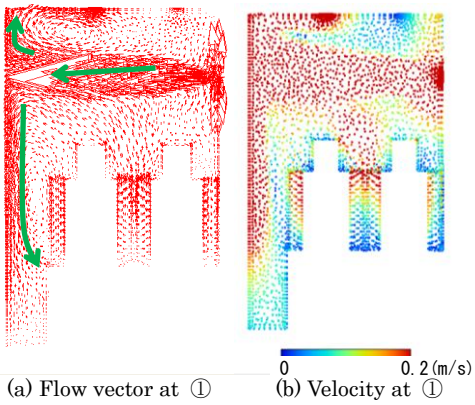


(a) Flow vector at ②　(b) Velocity at ②

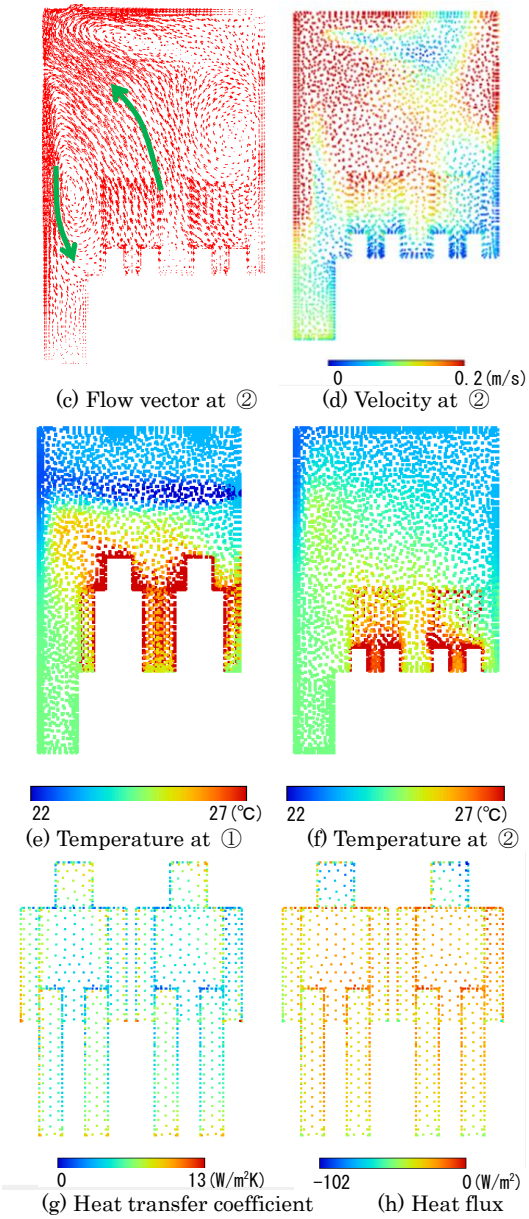
(c) Flow vector at ③　(d) Velocity at ③

(e) Temperature at ①　(f) Temperature at ②

Fig. 5　Calculation results of case No.2
[inlet: B(0.35 m/s, 20℃), outlet: D]



(a) Flow vector at ①　(b) Velocity at ①



(c) Flow vector at ②　(d) Velocity at ②

(e) Temperature at ①　(f) Temperature at ②

(g) Heat transfer coefficient　(h) Heat flux

Fig. 6　Calculation results of case No.3
[inlet: C(10 m/s, 15℃), outlet: A]

Table 1　Calculation results

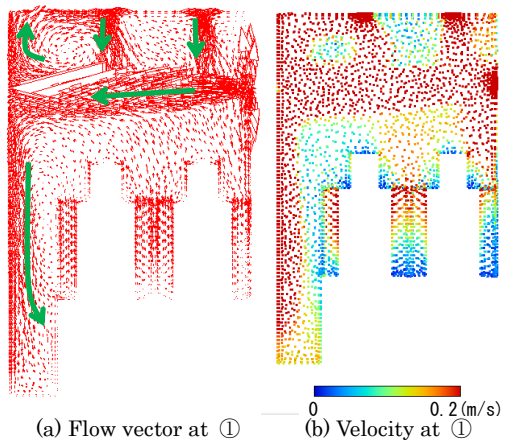
No.	Inlet	Outlet	Temp. difference (℃)	Average temp. (℃)	Max. velocity (m/s)
1	A (0.35 m/s,20℃)	D	3.8	25.7	0.18
2	B (0.35 m/s,20℃)	D	3.3	25.3	0.20
3	C (10 m/s, 15℃)	A	1.8	24.9	0.19
4	C (10 m/s, 15℃)	B	1.8	24.6	0.23
5	C (10 m/s, 15℃)	D	1.8	24.2	0.22
6	E(3 m/s, 20℃)+ C (10 m/s, 15℃)	A	2.6	25.0	0.19
7	F(2 m/s, 20℃)+ C (10 m/s, 15℃)	A	1.6	24.2	0.20

3.　空調の吹出口が複数の場合の計算結果

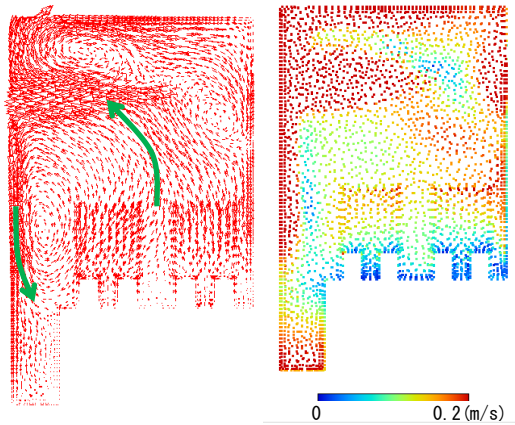
空調の吹出口が1ヶ所だと流れパターンの調整が容易でないので，空調の吹出口が複数の場合を検討した．

Figure 7は，計算条件No.6（空調の吹出口をE:頭上天井の円穴（3 m/s，20℃）とC:側面上部の円穴（10 m/s，15℃），排気口がA:通路天井の長穴とした場合）の計算結果を示す．(a)(b)のように側面と頭上から吹き込んだ流れが衝突し，頭上の冷却効果が小さく，温度差2.6℃，最大速度0.19 m/sであり，温度差が大きい．

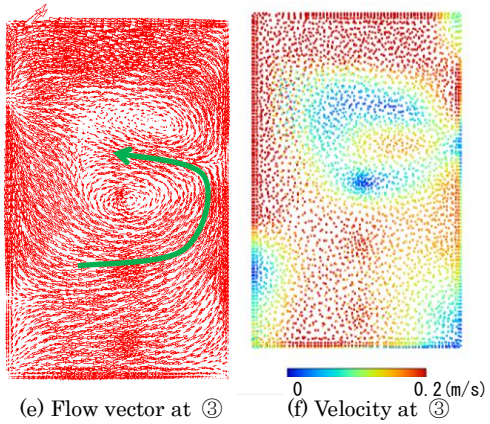
Figure 8は，計算条件No.7（空調の吹出口をF: 乗客の前面の円穴（2 m/s，20℃）とC:側面上部の円穴（10 m/s，15℃），排気口がA:通路天井の長穴とした場合）の計算結果を示す．(a)(b)のように，乗客の前面の円穴（F）からの空気流によって乗客の頭部を冷却するので，温度差1.6℃，最大速度0.2 m/sであり，温度差と最大速度とも本計算条件に中で最も快適条件になる．Table 1のNo.6，No.7に他の条件と比較して計算結果を示す．



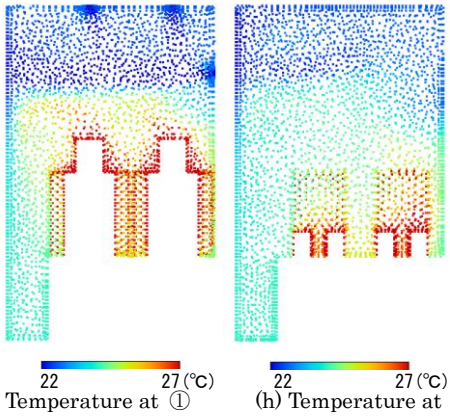
(a) Flow vector at ①　(b) Velocity at ①



(c) Flow vector at ②　(d) Velocity at ②

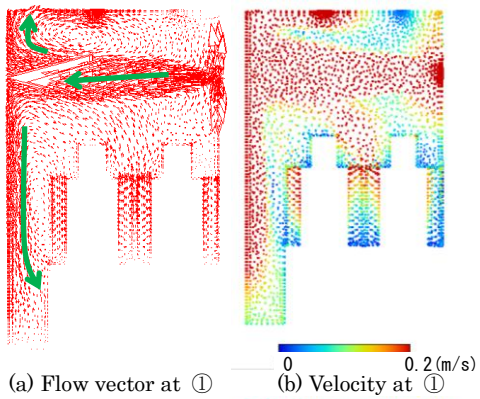


(e) Flow vector at ③　(f) Velocity at ③

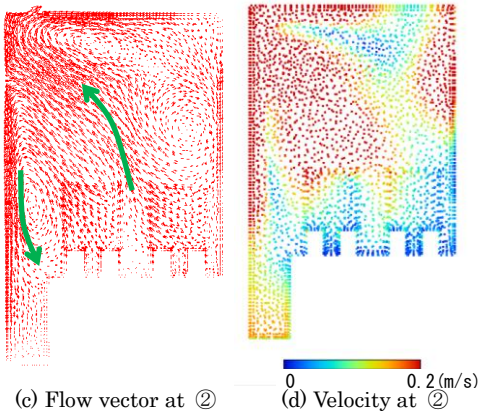


(g) Temperature at ①　(h) Temperature at ②

Fig. 7　Calculation results of case No.6
[inlet: E(3 m/s, 20℃) +C(10 m/s, 15℃), outlet: A]



(a) Flow vector at ①　(b) Velocity at ①



(c) Flow vector at ②　(d) Velocity at ②

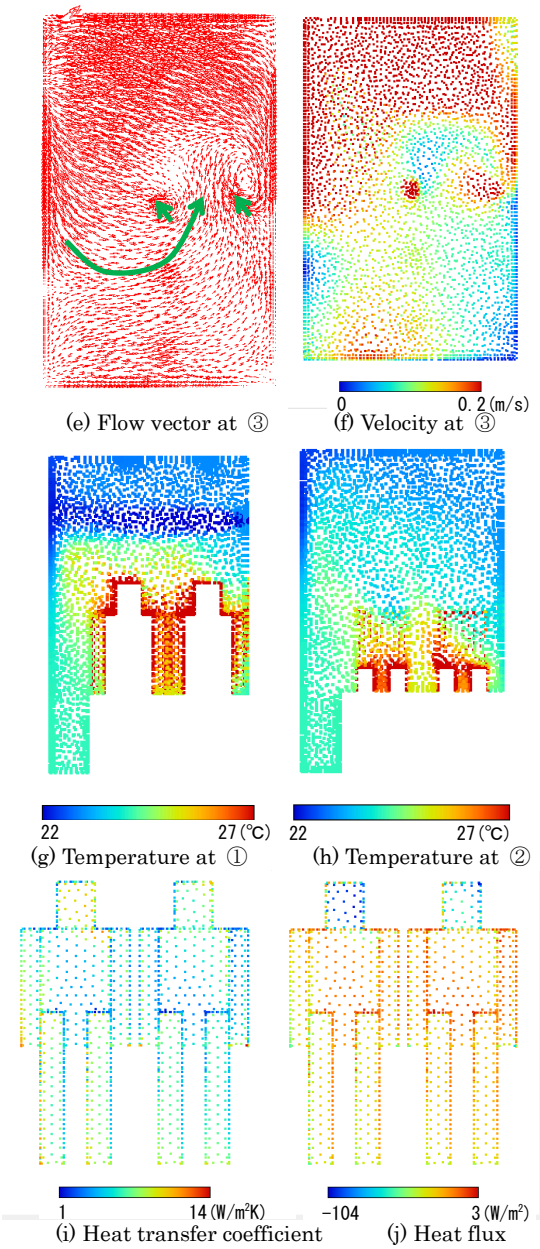


Fig. 8　Calculation results of case No.7
[inlet: F(2 m/s, 20℃) +C(10 m/s, 15℃), outlet: A]

結　　言

航空機の客室内の流れ温度分布について，吹出口や排気口の位置などの空調条件を変えて乗客の快適性との関係を熱流体数値シミュレーションにより検討し，以下の結論を得た．

(1)　乗客の快適性のためには，乗客の頭部の風速を増やさずに頭部を冷却する空調の流れ温度パターンを形成することが大切である．

(2)　空調の吹出口が長穴の場合には吹出し速度が小さく速度は快適条件にできるが，温度差が大きくなる．吹出口が小さな円穴の場合には吹出し速度が大きく，温度差を小さくできるが，流れパターンによっては最大速度が大きくなる．

(3)　空調の吹出口を，本研究で新たに提案した乗客の前面の円穴（F : 2 m/s, 20℃）と側面上部の円穴（C : 10 m/s, 15℃）の2ヶ所，排気口を通路天井の長穴（A）にした場合がもっとも快適である（評価位置の温度差1.6℃，平均温度24.4℃，最大速度0.2 m/s）．

Literature Cited

1) Sato, O., Ando, M., Uryu, S. and Ohara, K.; "Performance Analysys of Air Conditioning System for Aircraft" (in Japanese), Shimazu Hyoron, 57-1･2, 33-39 (2000)

2) Mizuno, T. and Warfield, M.J.; "Development of Three-Dimensional Thermal Airflow Analysis Computer Proguram and Verification Test, "ASHRAE Transactions, 88(2), 329-338 (1992)

3) Singh, A., Hosni, M. and Horstman, R.; "Numerical Simulation of Airflow in a Aircraft cabin Section," ASHRAE Transactions, 98(2), 1005-1013 (2002)

4) Lin, C.H., Horstman, R.H., Ahlers, M.F., Sedgwick, L.M., Dunn, K.H., Topmiller, J.L., Bennett, J.S. and Wirogo, S.; Numerical Simulation of Airflow and Airborne Pathogen Transport in Air Cabins - Part I," ASHRAE Transactions, 111(2), 755-763 (2005)

5) Lin, C.H., Horstman, R.H., Ahlers, M.F., Sedgwick, L.M., Dunn, K.H., Topmiller, J.L., Bennett, J.S. and Wirogo, S.; Numerical Simulation of Airflow and Airborne Pathogen Transport in Air Cabins - Part II," ASHRAE Transactions, 111(2), 764-768 (2005)

6) Mo, H., Hoshi, M.H. and Jones, B.W.; "Application of Particle Image Velocimetry for the Measurement of the Airflow Characteristics in an Aircraft Cabin," ASHRAE Transactions, 109(2), 101-110 (2003)

7) Sun, Y., Zhang, Y., Wang, A., Topmiller, J.L. and Bennett, J.; "Experimental Characterization of Airflows in Aircraft Cabins, Part I," ASHRAE Transactions, 111(2), 45-52 (2005)

8) Zhang, Y., Sun, Y., Wang, A., Topmiller, J.L. and Bennett, J.; "Experimental Characterization of Airflows in Aircraft Cabins, Part II," ASHRAE Transactions, 111(2), 53-59 (2005)

9) Bombardier, CRJ200, <http://www2.bombardier.com/Used_Aircraft/pdf/CRJ200_EN.pdf> (2008).

10) Embraer, Embraer170, <http://www.embraercommercialjets.com/#/en/downloads> (2008).

11) STAR-CCM+ product information, CD-adapco, co., <http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCM_plus/index.html> (2008)

12) Ohara, S., Furusawa, T., Sugawara, I., Andou, S. and Fujita, S.; "How to Make Confortable Room Environment" (in Japanese), Ohmusha, 12-15 (1994)

Thermo-Fluid Numerical Simulation of Air-condition in Aircraft Cabin

Shigeki HIRASAWA[1], Tsuyoshi KAWANAMI[1], Noriaki MATSUDA[1], and Takayuki ATARASHI[1]

[1]*Graduate School of Engineering, Department of Mechanical Engineering*

Key words: Aircraft, Air Conditioning, Comfort, Temperature, Velocity Distribution, Numerical Analysis

Air velocity and temperature distributions in an aircraft cabin are calculated using 3-dimensional computation fluid dynamics code (STAR-CCM+). Calculation model is one row of sheets in an aircraft cabin (2 m in height, 1.25 m in half width, 0.8 m in length, and two passengers). Relations between air-conditioning conditions (air-inlet position, outlet position, inlet temperature, and velocity) and thermal comfort of passengers are examined. Air-inlet positions and outlet positions are examined at the ceiling, the upper sidewall, the lower sidewall, and the front sheet-wall. Calculation results show that the best condition is that two air-inlet positions at the front sheet-wall (2 m/s, 20℃) and the upper sidewall (10 m/s, 15℃).