

着衣マネキンの伝熱特性予測手法に関する研究

川中子 貴紀¹⁾, 小林 裕児¹⁾, 永野 秀明¹⁾, 郡 逸平¹⁾, 松永 和彦²⁾

¹⁾ 東京都市大学, ²⁾ いすゞ自動車株式会社

Study on Prediction of Heat Transfer Characteristics in Clothing Mannequin

Takanori Kawanago¹⁾, Yuji Kobayashi¹⁾, Hideaki Nagno¹⁾, Itsuhei Kohri¹⁾, Kazuhiko Matsunaga²⁾

¹⁾ Tokyo City University, ²⁾ ISUZU MOTORS LIMITED

Abstract: For numerical simulation of vehicle cabin environment, naked thermal manikin has been used. In recent years, clothed manikin has been employed for the more accurate prediction. In the present study, the appropriate method of the prediction of heat transfer characteristics has been investigated. As the first step of the study, the wrinkle of clothing surface is focused. An index has been proposed in order to validate the effect of the wrinkle on the surrounding flow by its conflict and separation condition using the wrinkle height and thickness of the boundary layer with simplified wrinkle model. The results indicated that the grid width and the height of wrinkle gave heat transfer characteristics with the flow separation point and the convective heat transfer coefficient.

Key words: Thermal manikin, CFD, Clothing

要旨: 車室内温熱環境予測には裸体状態のサーマルマネキン (以後, 裸体マネキン) が用いられてきたが, 近年, 着衣状態でのサーマルマネキン (以後, 着衣マネキン) の予測が試行されている. 本研究は着衣マネキンの伝熱特性を予測する手法の開発を目的としており, 本報では第一ステップとして, 着衣の皺形状に着目し, 皺が伝熱特性に与える影響を調査した. 着衣の皺によって表面が凸凹になることから, 表面近傍の流速が平面時より上昇することで対流熱伝達が上昇すると考えられる. そこで, 境界層流れにおける皺の影響度を皺の高さと境界層厚さで表す指標を提案し, 伝熱特性への影響を考察した. また, 皺部の格子解像度は剥離点の予測精度に影響を及ぼし, それに伴って伝熱特性の予測精度にも影響を与えられ. そこで, 皺部の格子幅を変え, 皺部の格子解像度が伝熱特性に与える影響を調査し, 対流熱伝達率や剥離点位置への感度を考察した.

キーワード: サーマルマネキン, CFD, 着衣

1. はじめに

CFD を用いた車室内温熱環境予測には, 裸体マネキンが広く用いられていたが, 近年の計算規模の拡大に伴い, 実際の搭乗者に近い着衣マネキンの検討が行われている. 着衣マネキンの検討を行うにあたり, 着衣の熱抵抗・通気抵抗・衣服と皮膚間に生成される空気層や透湿性等のパラメータは人体への熱授受に関わるため, その影響は無視できない. そのため, 本研究では着衣が伝熱特性へ及ぼす影響をモデリングし, 着衣マネキンの伝熱特性を予測する手法の開発を目的とする.

本報では第一ステップとして, 着衣の形状が伝熱特性に与える影響調査として, 皺に着目して検討を行った. 着衣マネキンにおける皺形状は, 裸体マネキンの単純表面に比べ表面近傍の流速を増加させることから対流熱伝達へ影響を及ぼす. そこで, 皺の高さと境界層厚さを用いて, 皺近傍の流速が伝熱特性へ及ぼす影

響を調査し, 境界層厚さや流速を変えたときの対流熱伝達率と流れ場の変化から, 皺部の剥離と対流熱伝達との関係を考察した.

また, 皺部の伝熱特性の調査を行うにあたっては, 皺部の格子解像度は剥離点の予測精度にも繋がる. 今後, 着衣マネキンの解析を行うにあたり, 皺部の格子解像度が伝熱特性に与える影響を明らかにする必要がある. そこで, 皺部における格子幅を変えたときの対流熱伝達への影響を調査した.

2. 評価方法

2.1 対流熱伝達率の算出式

対流熱伝達率 h_c の算出には, 式(1)を用いる.

$$h_c = \frac{Q}{T_{wall} - T_{air}} \quad (1)$$

Q : 放熱量 [W/m²] T_{wall} : 壁面温度 [K]

T_{air} : 環境温度 [K]

放熱量は、壁面から法線方向の第一格子点までの温度勾配から算出した。壁面温度は一定、環境温度は流入条件に与えた温度と同等とした。

2.2 皺への衝突具合の算出式

本検討では、皺近傍の流速による対流熱伝達率の変化を評価するために、皺の高さ h と境界層厚さ δ を用いる評価指標を提案する。この皺に対する境界層流れの影響度を α として、式(2)で表す。

$$\alpha = \frac{h}{\delta} \tag{2}$$

また、境界層厚さの算出の際は、平板の乱流境界層を仮定する。平板の乱流境界層厚さの算出式を式(3)に示す。代表流速 U は、流入流速とした。代表長さ L は流入境界から皺までの距離としている。動粘性係数 ν は、空気温度 25°C の物性値を用いた。

$$\delta = 0.37 \left(\frac{\nu}{UL} \right)^{\frac{1}{5}} L \tag{3}$$

2.3 格子幅の無次元化

格子幅の違いによる対流熱伝達率の評価を行う際、格子幅 Δs を皺の幅 l で除することで無次元化した。皺の幅 l が広いほど剥離が起きる可能性が小さくなり、無次元値も小さくなる。また、皺の幅 l が狭くなれば、皺部での剥離が起きる可能性が大きくなり、無次元値は大きくなることから、正の相関となる。

3. 計算方法

3.1 計算モデル

図 1 に計算モデルを示す。皺の高さ及び皺の幅は 15mm とした。本検討では、着衣表面の形状のみによる伝熱特性を評価するために、衣服の通気抵抗を考慮しない。

空間の格子には、非構造格子の四面体を採用した。皺部表面にはプリズムを 6 層、格子高さ 0.2mm とした。

3.2 計算条件及び境界条件

支配方程式には、非圧縮性 RANS 方程式、連続の式、平均伝熱方程式を用いた。乱流モデルには、壁面付近の流れ場の計算精度が高いと言われている SST $k-\omega$ モデルを使用した。アルゴリズムには SIMPLE 法を用いた。差分スキームは二次精度風上差分を用いた。また、浮力、放射、湿気輸送は考慮しない。皺近傍の流速が伝熱特性に与える影響の調査には表 1 に示す格子幅と流入条件の 3Case を検討した。また、格子幅を変化させた対流熱伝達率の調査には表 2 に示す格子幅と流入条件で検討を行った。各 Case で流出口条件は圧力 0Pa とし、皺部は温度固定 31°C と仮定した。

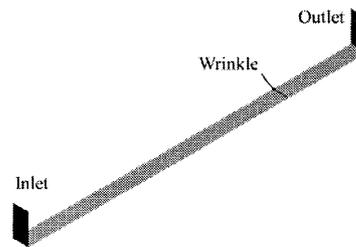


図 1 計算モデル

表 2 α による対流熱伝達率の検討ケース

	格子幅 [mm]	流速 [m/s]
Case1-1	0.5	0.5
Case1-2		1.5
Case1-3		3.0

表 3 格子幅による対流熱伝達率の検討ケース

	格子幅 [mm]	流速 [m/s]
Case2-1	0.5	3.0
Case2-2	2.0	
Case2-3	3.0	
Case2-4	4.0	
Case2-5	5.0	

4. 結果

4.1 α による対流熱伝達率

図 2 に α と対流熱伝達率の関係を示す。対流熱伝達率は皺部のみにおける値を示している。縦軸に対流熱伝達率、横軸に α を示した。 α が上昇することは、皺に対する境界層厚さが小さくなることを表しており、皺が主流に曝される面積が相対的に大きくなることを意味しているため、 α が大きいほど対流熱伝達率は上昇すると言える。図 2 を見ると、各流速で α が上昇することで対流熱伝達率は上昇していることが分かる。

4.2 格子幅による対流熱伝達率

図 3 に格子幅を変化させたときの対流熱伝達率の分布を示す。縦軸に対流熱伝達率、横軸に格子幅 Δs を皺の幅 l で無次元化した値を示した。図 3 より、 $\Delta s/l$ が小さくなると、対流熱伝達率は小さくなり、一定の値に漸近している。

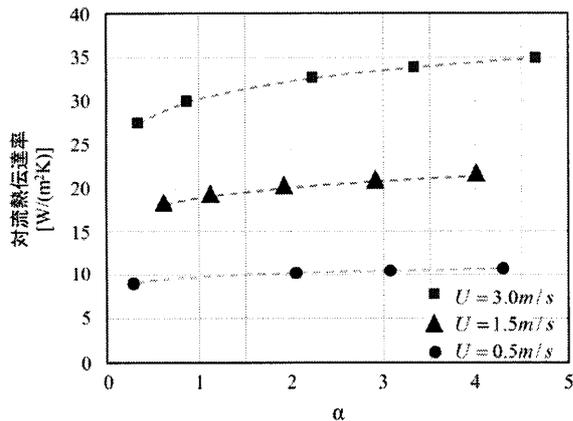


図2 各流速の対流熱伝達率

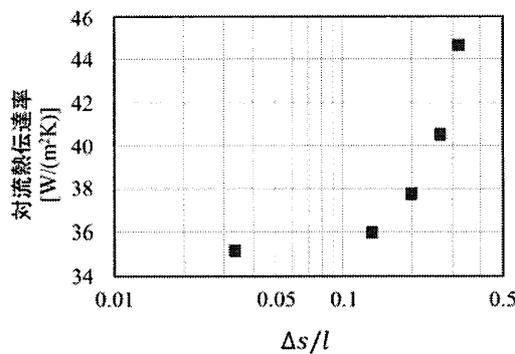


図3 格子幅の違いによる対流熱伝達率の分布

5. 考察

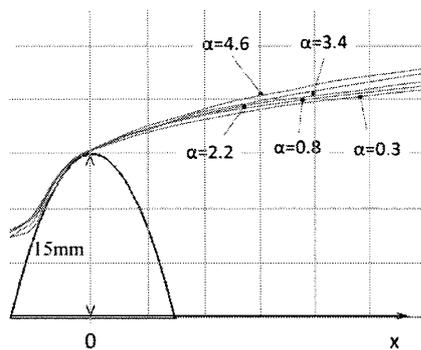
5.1 alphaによる対流熱伝達率

皺における対流熱伝達率の上昇のメカニズムを探るべく、まず、剥離点の違いを調査した。各流速における α ごとの剥離点位置を表4にまとめた。剥離点位置は皺頂点を基準点とし、頂点から主流方向を正とした距離で表す。また、各流速での皺部の剥離流を図4にまとめた。表4及び図4より、 α が小さくなると、剥離点位置は正の方向すなわち下流に移動する傾向にある。これは、 α が小さい(すなわち皺の高さが境界層厚さに比して小さい)ために、皺近傍の流速が低くなり、剥離しにくくなるためと考えられる。一方、 α が大きいほど皺高さが境界層厚さに比して大きくなり、主流にさらされる部分が増えるために皺周りの流速が高くなり、剥離しやすくなると考えられる。

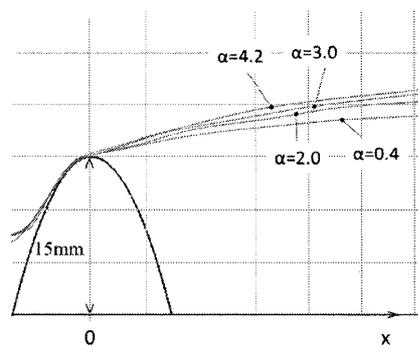
また、図2の対流熱伝達率と合わせて考察を行うと、 α が大きいほど剥離点位置が上流になり、同時に対流熱伝達率が大きくなっていることが分かる。一般に、気流が壁面を沿うことによって熱伝達が促進されるため、剥離点が上流になるほど、対流熱伝達率は低くなると考えられる。ここで、今回の結果では剥離が上流であるほど対流熱伝達率が大きくなる原因を考察する。図5に皺部の対流熱伝達率の分布を各流速でまとめた。

表4 流速ごとの皺部剥離点位置

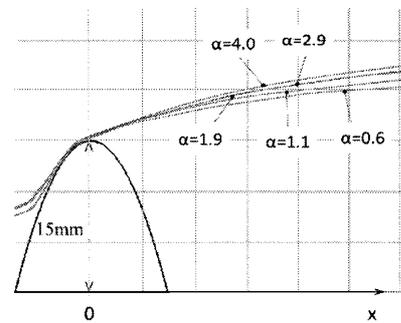
$U=3.0\text{m/s}$					
α	0.3	0.8	2.2	3.4	4.6
剥離点位置[mm]	-0.01	-0.04	-0.06	-0.08	-0.13
$U=1.5\text{m/s}$					
α	0.6	1.1	1.9	2.9	4.0
剥離点位置[mm]	0.20	0.18	0.14	0.06	0.01
$U=0.5\text{m/s}$					
α	0.4		2.0	3.0	4.2
剥離点位置[mm]	0.68		0.60	0.53	0.34



(i) $U=3.0\text{m/s}$



(ii) $U=1.5\text{m/s}$



(iii) $U=0.5\text{m/s}$

図4 流速ごとの皺部の剥離流

図5を見ると、 α の増加に伴い、皺上部での対流熱伝達率が増加していることがわかる。したがって、剥離点位置による対流伝熱への影響よりも皺近傍流れの流速の大きさによる影響のほうが卓越しており、剥離点が上流へ移動したとしても流速が高くなることにより対流熱伝達が大きくなったと考えられる。従って着衣マネキンの解析を強制対流で行う際には、流速が伝熱特性に及ぼす影響が大きいため、境界層を精度良く解像することが必要となると考えられる。

5.2 格子幅による対流熱伝達率

図6に格子幅のみを変化させた場合の皺部の剥離流を示した。図6を見ると、皺部格子幅により剥離点位置が変化している。したがって、皺部の解像度が伝熱特性にも影響を与えると考えられる。前節表4における検討においても非常に小さいオーダーで剥離点が変わっており、かつ、図3から、格子幅の違いによって対流熱伝達率も大きく変化しているため、皺部の格子解像度は慎重に吟味する必要がある。

着衣マネキンの解析の際には、皺は単独ではなく複数存在するため、皺後流の流れが下流の皺における伝熱特性に与える影響も考える必要がある。

6. まとめ

着衣マネキンの解析を行うにあたり、着衣による皺に着目し、皺が伝熱特性に与える影響を調査した。

6.1 α による対流熱伝達率

境界層厚さと皺の高さを用いて皺近傍の流速の影響度を示す指標を提案し、対流熱伝達率へ及ぼす影響を調査した。

- 1) α の増加に伴い、皺における剥離点位置が上流へ移動するが、対流熱伝達率は上昇した。
- 2) 剥離点位置よりも皺近傍流速による対流熱伝達率の上昇が支配的である。
- 3) 着衣マネキンの解析を強制対流で検討する場合、境界層を精度良く解析する必要がある。

6.2 格子幅による対流熱伝達率

格子幅のみを変化させ、皺の格子解像度が伝熱特性に与える影響を調査した。

- 1) 皺部解像度は対流熱伝達の予測に大きく影響するため、慎重な吟味が必要となる。
- 2) 着衣マネキンの解析では、皺での剥離流は皺後流への流れ場解析の予測精度にも影響するため、今後の検討が必要である。

7. 文献

社団法人 空気調和・衛生工学会, 2006, 新版 快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして
日野 幹雄, 2007, 流体力学

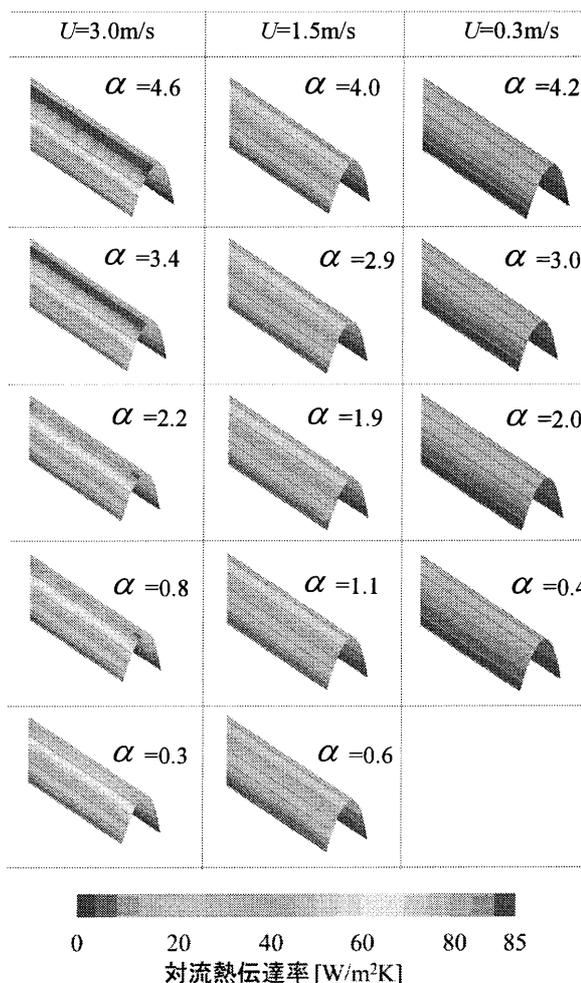


図5 各ケースの皺部対流熱伝達率分布

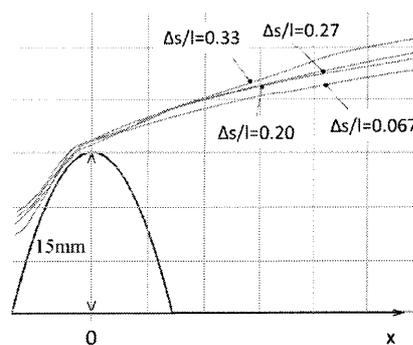


図6 格子幅を変えたときの皺部剥離流

<連絡先>

連絡先氏名 川中子 貴紀
住所 東京都世田谷区玉堤 1-28-1
所属 東京都市大学 機械システム工学科
E-mail アドレス g1112025@tcu.ac.jp