

第六章

結言

6.1 本研究のまとめ

フィルム冷却技術の高効率のためには、フィルム冷却における流れ場を制御するための革新的アイデアが求められている。本研究では、過去の研究の中でも研究例が少なく、未開拓のフィルム冷却の流れ制御アプローチとして、“フィルム冷却孔周辺の形状変化”に着目し、実験と数値解析を用いて同流れ制御技術のポテンシャルを評価することを試みた。フィルム冷却の流れ制御技術を実機のタービンへと適用するためには、流れ制御のメカニズムを詳細に理解するための体系的な研究が必要不可欠である。そこで、本研究では、平板モデルや、直線翼列モデルを用いて流れ制御の性能調査や流れの解明を行った他、フィルム冷却の最適化問題にも多角的に取り組むことで、革新的な“流れ制御デバイス”の提案を行うことを目的とした。以下には、研究によって得られた主な結果をまとめる。

6.1.1 流れ制御デバイスの三次元化

本研究では第二章において、突起形状の流れ制御デバイスを作成するというアプローチで研究を行った。突起形状の流れ制御デバイスでは、二次元型と三次元型の流れ制御デバイスを比較すると、二次元型の流れ制御デバイスの方が広い冷却面積を形成できることを確認した。これは、突起下流側の剥離領域が大規模化するために冷却空気がスパン方向に拡散するためである。しかし、二次元形状の突起形状は従来提案されてきた Trench 形状と同様に空気損失の増大を招くことになる。一方で、三次元形状の突起では、突起の上流側で発生する馬蹄形渦や、突起状で主流が剥離することによる剥離渦が時間平均的には CRVP の制御能力を持っている。ただし、突起形状の下流側エッジ部分では流れの剥離により、剥離せん断層内で非定常な渦構造を形成する。これは、二次空気と干渉することで、不安

定性の増大を招き、下流領域でのフィルム冷却効率の早期減衰を招いてしまうデメリットも存在するので注意が必要である。

本研究では、突起形状 1 個の場合の詳細な流れ場に関して調査を行ったが、突起形状が 1 つだけでも非定常な剥離渦が生成されており、CRVP との干渉位置が変化することでフィルム効率が変化することを確認した。特に、突起形状を冷却孔のセンターライン上に設置する場合には、冷却空気の lift-off は時間平均的に促進化されてしまう。これは、デバイスから発生した剥離渦が、冷却孔から発生する渦構造と干渉することで、時間平均的に CRVP を強化してしまうためである。突起形状を 1 つだけ設置する場合には、冷却孔のセンターラインに対して非対称に設置すると、CRVP の片方の渦構造を制御することが可能であり、二次空気の壁面付着性を増加させることができる。これは、時間平均的に、CRVP の脇に CRVP とは逆回転の渦を発生させることが可能になるためであり、比較的 CRVP の制御能力が高いことが分かった。

6.1.3 DFCD による流れ制御

(1) DFCD の流れ制御能力

本研究では第三章において冷却孔の上流側に 2 つの突起形状を斜めに配置する Double Flow Control Device (DFCD) を提案している。図 6.1 には DFCD のフローモデルを示している。DFCD を設けた形態では、時間平均的な流れ場においては、DFCD から発生した縦渦が CRVP と逆回転であることが流れ場計測の結果から明らかになった。この縦渦は CRVP による二次空気 lift-off を抑制し、二次空気の壁面付着性、拡散性向上に寄与している。DFCD の下流側で発生している縦渦の起源は、①主にデバイスの外側の領域を通過し、デバイスの下流側エッジで巻き上がる馬蹄形渦と、②デバイスの上部を通過し主流が剥離することで生じる剥離渦である。最終的には、この 2 つの渦構造が下流側で絡み合うことで、縦渦を大規模化させ、CRVP の制御能力を高めていることが本研究では明らかになっている。

本研究では単純円筒型の冷却孔や Shaped hole にデバイスを取り付けることでその効果を観察したが、いずれの冷却孔においても DFCD は効力を発揮しており、スパン方向の冷却面積を増大させる効果があることが分かった。フィルム効率だけで見ると、単純円筒型の冷却孔でも、Shaped hole 単体の場合を上回ることが可能であった。しかし、単純円筒型の冷却孔に、DFCD を取り付ける場合には、熱伝達率の上昇分にも留意する必要がある。特に、吹き出し比が高い場合には、DFCD を単純円筒型の冷却孔に取り付けた際には、熱伝達移率の増加量が大きく、最終的には熱流束低減率を低下させてしまうことが明らかになった。一方で、Shaped hole に DFCD を設置した場合には、Shaped hole による吹き出しで上昇する熱伝達率が少ないため、DFCD による熱伝達率の増加が、単純円筒型冷却孔の場合ほど弱点にはならず、熱流束低減率も増加させることが可能であった。また、Shaped hole では、冷却孔の開口面積に制限を受ける場合があるため、Shaped hole 単体では、冷却面積を増加させる能力には限界が生じる。これに対して、Shaped hole に DFCD を取り付けた場合には、

冷却孔の出口の開口面積を拡大しなくても、スパン方向に冷却面積を増加させることが可能になるため、冷却孔ピッチを削減し、最終的には冷却空気を削減することができる可能性があることが本研究では明らかになった。

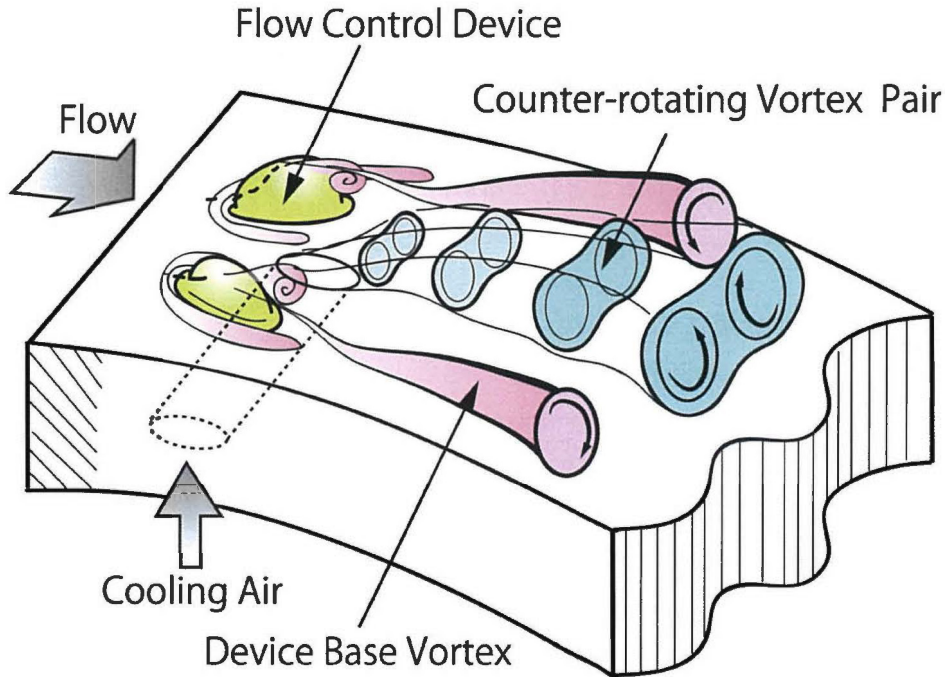


図 6.1 流れ制御デバイスのフローモデル

(2) 流入角の効果

デバイスを斜めに設置している関係上、DFCD は主流の流入角の影響を受けることになる。流入角が変化した場合の、伝熱性能に関しては、熱流束低減率で整理すると、単純円筒型冷却孔と、Shaped hole で性能に差が現れる。単純円筒型冷却孔の流れ場で流入角を変化させた場合には、吹き出し比が低い条件を除いて、熱流束低減率が増加する結果を招いた。一方で、Shaped hole は、単純円筒型冷却孔に比べると流入角の変化に対して強く、性能の悪化を比較的招かないことが明らかになった。圧力損失に関しては、流入角増加に伴い、損失分布領域が拡大し、全体的に損失は増加する傾向にあった。また、DFCD 有りの条件での、全圧損失の変化量は-6.9%~+13%程度である。流入角増加により、流れ場が変化するメカニズムは、CRVP の渦構造が非対称になることにある。特に、今回の研究においては正の渦度が大規模化することにより、二次空気のスパン方向拡散性が一部の条件で向上する結果となった。しかし、同時に速度変動 RMS も増加する結果を招いており、ミキシングロス の増加や、冷却孔センターライン上での局所のフィルム効率が低下する現象も同時に観察されている。

(3) 境界層厚さの効果

DFCD を実機のガスタービンに設置する場合には、設置箇所によって境界層厚さの効果を受けることになる。境界層厚さは、デバイス上での圧力勾配に影響を与えており、境界層厚さが薄くなるのに従って、デバイス上の圧力勾配は強くなる。特に、デバイスの下流領域では、逆圧力勾配が生じており、境界層が薄くなると、逆圧力勾配が強くなることで剥離が大規模化する。境界層厚さの変化は CRVP の制御能力にわずかに影響を与えているが、デバイスから発生する基本的な渦構造が変化することは無く、CRVP の制御能力は、いずれの境界層厚さでも発揮されることが明らかになった。CRVP の制御能力に関しては、高ければ冷却空気の付着性を増加させることになるが、一方で、下流領域でのフィルム効率の減衰を招くことになるため、バランスのよい設計が必要になると考えられる。

6.1.4 フィルム冷却構造の最適化

(1) 静特性解析結果と最適化の信頼性

本研究では、第四章において、フィルム冷却の最適化プロセスにおける数値解析の予測精度を評価することを目的とし、実験と数値解析を用いて形状最適化を行った結果、数値解析で乱流モデルに SST モデルを用いた場合は、最適形態が実験と数値解析一致する結果を得ることができた。ただし、数値解析による最適化の予測精度には、格子依存性、乱流モデルの選択が影響を及ぼしており、“定性的に実験値と同じ傾向が捉えられる場合”に限って、最適解の予測精度が高くなる。特にデバイスを用いた最適化を行う場合は、デバイスの剥離の予測精度が解の信頼性に影響を与えるため、乱流モデルの選択を適切に行い、ある程度剥離の予測精度を高くしておく必要がある。今回は統計的な手法を用いてフィルム効率を最大化することができたが、フィルム冷却効率の定量値に関しては、一部で実験値と CFD 結果では異なっているため、最適解の予測にはある程度のサンプル数が必要であると言える。

(2) 動特性解析と多目的解析

本研究では、タグチメソッドの動特性解析を行うことで、複数の流量条件で高いフィルム効率を発揮するデバイスの解を得ることができた。ただし、今回の最適化では流入角を入力とした最適化を実施することで、各流入角におけるフィルム効率を高めることはできたが、流入角に対するロバスト性は低下した。これは、感度を優先した最適化を実施したためであり、ロバスト性が犠牲になったためである。実際の設計においては、流入角などの入力条件に対するロバスト性を向上させるためには、最適化の段階で設計パラメータの再調整や、再選択を施す必要性もあり、何度か繰り返し計算を行うことで、最終的な最適解を探索する必要があると考えられる。

本研究では多目的の最適化も試みているが、多目的の最適化を行う場合、フィルム効率よりも空力性能の予測精度の方が悪く、解の再現性を低下させた。これは、多目的解析を

行う場合には、フィルム効率を最大化する問題とは異なり、フィルム効率に影響を与えるパラメータを定性的に把握するだけでなく、最適化の過程で、定量値の精度が求められるためである。したがって、多目的の最適化を RANS で実施するためには、高い数値解析の予測精度が必要となる。

6.1.5 直線翼列への流れ制御デバイス適用

本研究では、第五章において流れ制御デバイスを翼面フィルム冷却に適用することで、より実機に近い流れ場においてデバイスの有効性を調査した。今回の研究では、実験と数値解析で得た知見から、翼の正圧面、負圧面ともに平板モデルと同様なデバイス起因の渦を発生させることが可能であることがわかり、DFCD を用いることにより、壁面のフィルム効率が増加することを確認している。ただし、吹き出し比が低い条件では、DFCD 設置条件下では主流と二次空気のミキシングが強くなる影響を受けるため、下流側のフィルム効率の減衰の影響でフィルム効率はデバイス設置前よりも低下する傾向が見られた。負圧面前縁領域では、二次空気が最も lift-off し易い傾向がある。前縁領域にデバイスを設置すると、デバイスから渦が発生するものの、lift-off の影響を受け易くなるため、その効果は低い吹き出し比に限定されるようである。この傾向は今回の実験でも捉えられており、前縁領域ではフィルム効率の改善が観察された。負圧面後縁領域では比較的フラットな領域であるため、二次空気の付着性が高い。この領域でも、デバイスからの渦は強く発生しており CRVP の制御能力が高い。正圧面側では、デバイスから発生する渦構造が比較的弱いことが数値解析より明らかになった。実験の結果においては正圧面にデバイスを設置した場合には、流れ方向のフィルム効率の伸びが小さい。これは、CRVP の制御能力が正圧面では低く、二次空気の付着性が十分に確保できなかったためであると考えられる。後縁領域はデバイスから発生する渦構造が強く、二次空気も比較的付着し易い。したがって、デバイスの効果が得られ易く、いずれの吹き出し比でも高いフィルム効率分布となっていた。本研究では、翼面フィルム冷却の冷却孔形状を Shaped hole にした場合のケースに関しても、数値解析を用いて調査を行っている。調査の結果、Shape hole を取り付けた場合でも、流れ制御の効果は得られることが分かったが、前縁領域に関しては lift-off の傾向が強く、CRVP の制御能力は限界がある。

6.2 今後の課題

本研究では、流れ制御デバイスの適用性に関して最終的には翼面フィルム冷却の流れ場で調査を行っているが、調査の結果、CRVP の制御能力には翼の各所で差異が生じていることが明らかになった。今後は、CRVP の制御能力が低かった前縁領域や、正圧面領域に関して、DFCD を改良する必要があると考えられる。ただし、翼の前縁領域に関しては、熱負荷が高いために、DFCD の適用には不向きである可能性がある。したがって、現状では翼の

正圧面における DFCD の形状最適化が急務であると言える。今回の研究では、計算格子の品質を確保することが難しいことから、実験と数値解析の直接的な比較を翼面フィルム冷却では実現できなかった。将来的には、数値解析のクオリティを上げることで、実験との比較を可能にし、数値解析を用いた最適化を行うことが有効であると考えられる。

また、流れ制御デバイスの実用化へ向けたアプローチに関しては今後の研究の余地を残している。特に、高温タービンでは TBC を翼面上に形成させるために、流れ制御デバイスの設置方法や、流れ制御機構を含めたタービン翼の製造方法が課題になると考えられる。今後は、流れ制御デバイスの適用箇所をタービンエンドウォールや、三次元翼を用いて拡張しつつも、実際のタービン翼への適用性も考慮した、流れ制御デバイスの形状決定法や、実機における運用方法の検討が求められる。

発表論文

(1) 審査制度のある学術雑誌等に掲載のもの

【原著論文】

[1]

題 目 : Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow
Control Devices upon Flat Plate Film Cooling Performance

著者名 (全員) : Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata
and Daichi Takahashi

学術雑誌等名 : ASME Journal of Turbomachinery(vol.136, 2013, 061021)

発行年月 2013年 12月

[2]

題 目 : Free-Stream Turbulence Effects on Leading Edge Film Cooling

著者名 (全員) : Ken-ichi Funazaki , Hirokazu Kawabata and Yoji Okita

学術雑誌等名 : International Journal of Gas Turbine, Propulsion and
Power Systems, Vol.4, No.1, 2012, pp43-50

発行年月 2012年 2月

[3]

題 目 : タグチメソッドを用いたフィルム冷却用流れ制御デバイスの最適化手法に関する研究

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 中田諒大, 田川久人, 堀内康広

学術雑誌等名 : 日本ガスタービン学会誌, Vol.42, No.5, pp.449-455

発行年月 2014年

[4]

題 目 : 高温タービン用フィルム冷却の制御技術に関する研究

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 加藤大雅, 高橋大地

学術雑誌等名 : 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No.6

pp.323-330, 2012

発行年月 2012年

【Proceedings】

[1]

題 目 : Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices: Part II – Optimization of Device Shape and Arrangement by Experiment- and CFD-Based Taguchi Method

著者名 (全員) : Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata

Hisato Tagawa and Horiuchi Yasuhiro

学術雑誌等名 : Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26070

発行年月 2014年

[2]

題 目 : Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow Control Devices upon Flat Plate Film Cooling Performance

著者名 (全員) : Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata

and Daichi Takahashi

学術雑誌等名 : Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95197

発行年月 2013年

[3]

題 目 : Experimental and Numerical Studies on Leading Edge Film Cooling Performance: Effects of Hole Exit Shape and Freestream Turbulences

著者名 (全員) : Ken-ichi Funazaki, Hirokazu Kawabata, Daichi Takahashi and Yoji Okita

a

学術雑誌等名 : Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68217

発行年月 2012年

(2) 審査制度のない学術雑誌等に掲載のもの

【国内学会発表 (Abstract 査読)】

[1]

題 目 : ガスタービン翼面フィルム冷却における流れ制御デバイスの効果

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 田川久人, 堀内康弘

学術雑誌等名 : 第42回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集

発行年月 : 2014年

[2]

題 目 : 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却構造の最適化に関する研究

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 中田諒大

学術雑誌等名 : 日本機械学会東北支部第49期総会・講演会論文集

発行年月 : 2014年

[3]

題 目 : タグチメソッドを用いたフィルム冷却用流れ制御デバイスの最適化手法に関する研究

著者名 (全員) : 船崎健一, 中田諒大, 田川久人, 堀内康広

学術雑誌等名 : 第41回日本ガスタービン学会定期講演会論文集

発行年月 : 2013年

[4]

題 目 : 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の熱流体特性に関する研究 (冷却孔形状の効果)

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 中田諒大

学術雑誌等名 : 日本機械学会東北支部第48期総会・講演会論文集

発行年月 : 2013年

[5]

題 目 : ガスタービン前縁フィルム冷却におけるインシデンスの効果

著者名 (全員) : 川端浩和, 船崎健一, 高橋大地, 中田諒大

学術雑誌等名 : 第40回日本ガスタービン学会定期講演会論文集

発行年月 : 2012年

[6]

題 目 : ガスタービン用フィルム冷却の流れ制御技術に関する研究 (流れ制御デバイスの効果)

著 者 名 (全 員) : 川端浩和, 船崎健一, 高橋大地, 中田諒大

学 術 雑 誌 等 名 : 機械学会 2012 年度年次大会講演論文集

発 行 年 月 : 2012 年

[7]

題 目 : 高圧タービン用フィルム冷却の制御技術に関する研究

著 者 名 (全 員) : 川端浩和, 船崎健一, 加藤大雅, 高橋大地

学 術 雑 誌 等 名 : 第 39 回日本ガスタービン学会定期講演会論文集

発 行 年 月 : 2011 年

【国際学会発表 (Abstract 査読)】

[1]

題 目 : Free-Stream Turbulence Effects on Leading Edge Film Cooling

著 者 名 (全 員) : Ken-ichi Funazaki, Hirokazu Kawabata (Iwate University) and Yoji Okita

学 術 雑 誌 等 名 : Proceedings of International Gas Turbine Congress 2011 Osaka

発 行 年 月 : 2011 年

付録

第一章 過渡応答方法の精度向上

1.1 はじめに

本研究ではフィルム効率と熱伝達率を同時に求めるために過渡応答法を用いている。過渡応答法は短い計測時間でフィルム効率と熱伝達率を同時に算出できるメリットを持っているが、過渡応答法中で解く熱伝導方程式は非線形方程式であり、数値解法を用いて解くこととなる。熱伝導方程式には実験中に得られた計測誤差を含む壁面温度や時間のデータを用いるが、これを用いて熱伝導方程式を数値解析的に解く場合には数値誤差、エラーが発生する。フィルム冷却の研究においてフィルム効率や、熱伝達率のような伝熱性能は最も重要なファクターであり、計測誤差が存在する環境下においても可能な限り真の値を算出することが必要になってくる。そこで本研究では反復計算法を適用し、過渡応答法で発生する数値誤差、エラーの低減方法を検証し、この内容を 1.1～1.3 へ記載した。また、1.4 では過渡応答法や、その他の空力特性試験等について不確かさ解析を行った結果を示す。

1.2 反復計算法

過渡応答法では温度をステップ上に上昇させ、供試体壁面の温度が上昇した際の供試体初期温度との温度差を式(1.1)として表していた。

$$T_{aw}(t) - T_i = \eta \sum_{j=1}^N U(t - \tau_j) (T_{2,j} - T_{2,j-1}) \quad (1.1)$$

$$U(t - \tau_j) = 1 - \exp(\beta) \operatorname{erfc}(\beta) \quad (1.2)$$

$$\beta = \frac{h\sqrt{t-\tau_j}}{\sqrt{\rho c \lambda}} \quad (1.3)$$

上記のように式(1.1)には式(1.2), (1.3)で示されるようにフィルム効率と熱伝達率の項が含まれている。過渡応答法は式(1.1)に壁面温度の変化($T_{aw}(t)-T_i$), 時間を与え方程式を解くことによりフィルム効率 η と熱伝達率 h を得る方法であるが, 逆に考えると, フィルム効率と熱伝達率を式(1.1)に与えれば壁面温度の変化($T_{aw}(t)-T_i$)が導き出せることになる。図 1.1 には過渡応答法で得られた供試体壁面温度の時間的な変化を表したものである。real は実験で得られた供試体壁面温度のデータを示しており, 系列 2 は方程式を解いた際に得られた熱伝達率とフィルム効率を用いて $T_{aw}(t)-T_i$ を逆算したデータである。図 1.1 の通り, 解析的に得られた供試体壁面の温度変化は実験値とは大きくかけ離れており, 熱伝達率とフィルム効率の推定精度が低かったと考えられる。そこで今回は以下の手順で熱伝達率とフィルム効率の推定を反復させる。

- [1] 式(1.1)より熱伝達率をフィルム効率の解を得る
- [2] [1]で得たフィルム効率を式(1.1)へ代入することで, 熱伝達率を変数とする非線形方程式を作り, この方程式を解析的に解くことにより熱伝達率を得る
- [3] [2]得られた熱伝達率を式(1.1)へ再び代入し, フィルム効率を変数とする方程式を作り, この方程式を解くことでフィルム効率を得る
- [4] [2], [3]を繰り返し行う

反復計算法では比較的誤差の少ないフィルム効率を用いて, 方程式を解き直すことで熱伝達率の推定誤差を少なくする狙いがある。

図 1.2 には反復計算によって得られた供試体壁面の温度変化の時間履歴を示す。real と“一回目”はそれぞれ図 1.1 の real と“系列 2”に相当している。“二回目”とは反復計算を 1 回繰り返して得られた供試体壁面の温度変化である。繰り返し計算を行った場合は, 一回目の逆算値よりも実験データを再現していることから, 熱伝達率とフィルム効率の推定が比較的精度よく行われたと考えられる。

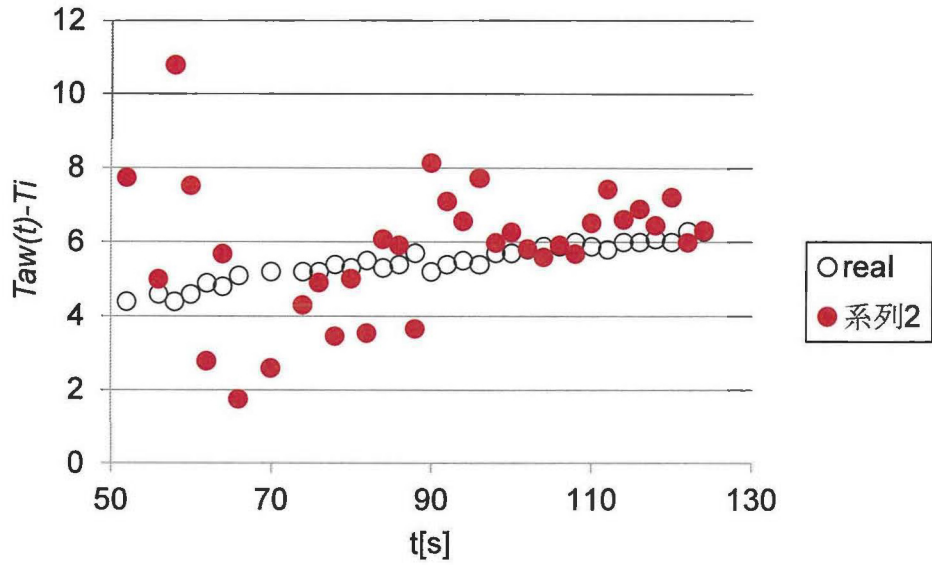


図 1.1 供試体壁面温度の変化（実験値 vs 解析値）

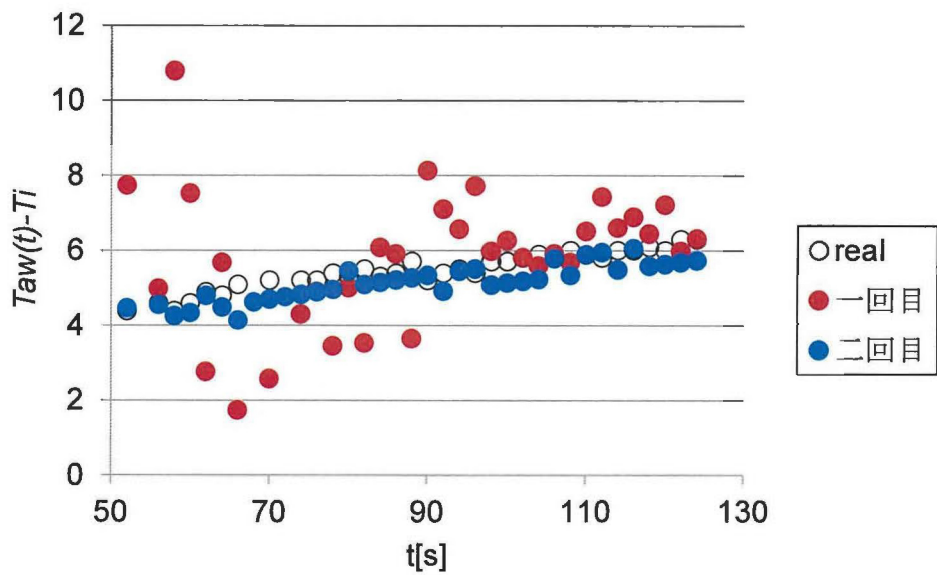


図 1.2 供試体壁面温度の変化（実験値 vs 解析値（反復計算を含む））

1.3 計算回数の検証

1.2 では反復計算を用いることにより壁面温度の再現性が高くなることを示したが、反復計算の回数などを変更することによりさらに高い再現性が得られる可能性がある。そこで、熱伝導方程式を解く際に必要な計算回数に関して検証を行った。

1.3.1 検証 1

1.3.1.1 計算方法・条件

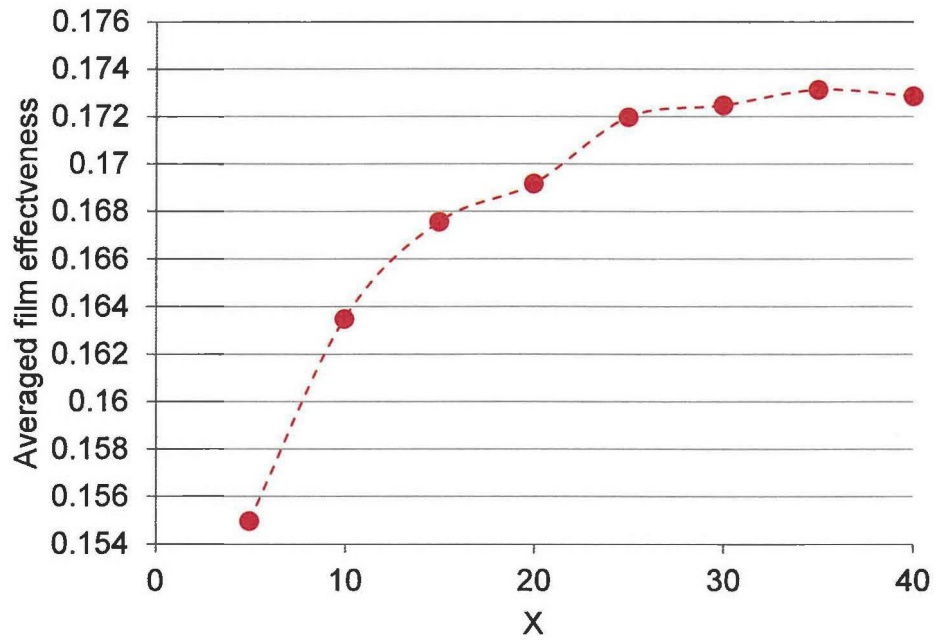
方程式を解く際には、式(1.4)にある 2 つの時間 $t=t_a$, $t=t_b$ における温度を代入するが、 t_a と t_b の組み合わせを X 回変更した。 X は $X=5\sim 40$ まで、5 回ずつ変化させた。

$$\frac{T_{aw}(t_a) - T_i}{T_{aw}(t_b) - T_i} = \frac{\sum_{j=1}^N U(t_a - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1})}{\sum_{j=1}^N U(t_b - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1})} \quad (1.4)$$

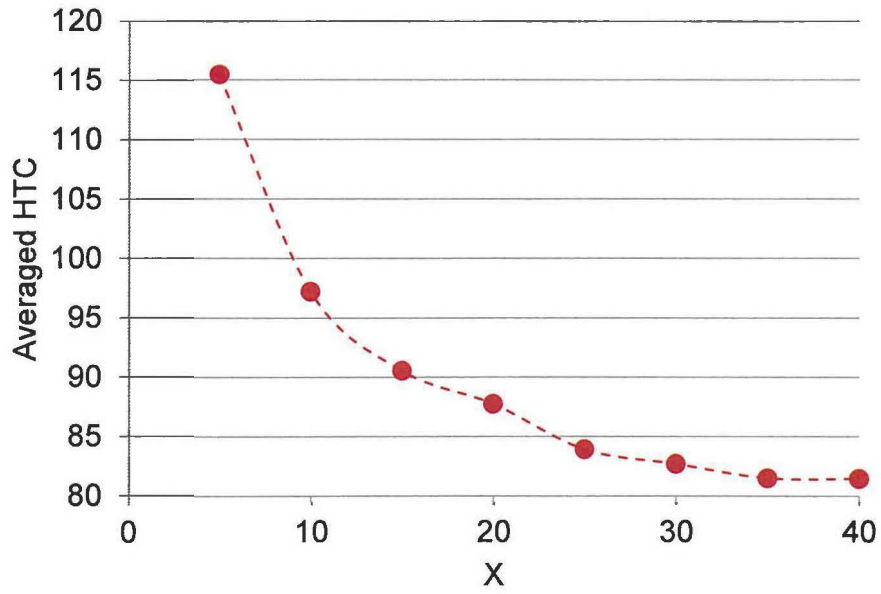
この検証で用いるデータは新規に実験を行って取得したものではなく、過去に岩手大学で行った前縁モデルフィルム冷却の伝熱計測で得た実験データである。

1.3.1.2 検証結果

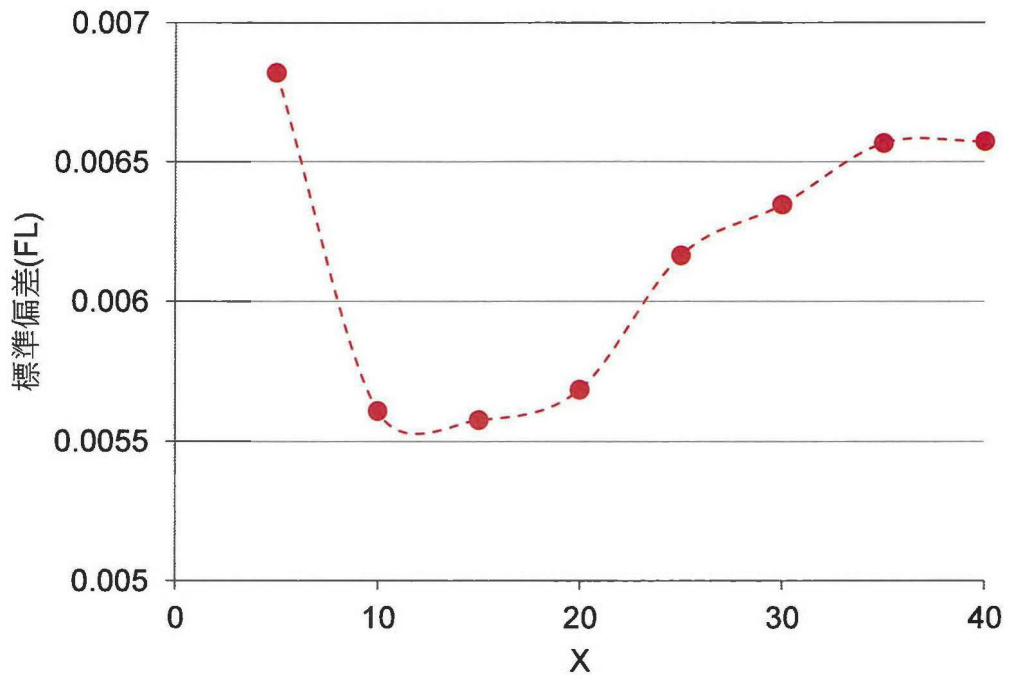
図 1.3 には検証 1 によって得られた結果を(a)~(d)に示す。(a)~(d)ではいずれも面平均のフィルム効率もしくは熱伝達率を得ているが、これは計測を行った全領域で得た算出値である。(a), (b)を見るとフィルム効率と熱伝達率の面平均値は両者ともに $N=30$ 以降に収束している様子が分かる。(c), (d)の標準偏差を見ると、フィルム効率の標準偏差に関しては熱伝達率と比べると比較的大きな X を要するが、 $N=30$ 以降は(a), (b)と同様に収束を見せており、この場合 $X \geq 30$ を取るのが妥当であると考えられる。図 1.4 には計算によって得られたフィルム効率と熱伝達率のコンター図を示す。 $X=5, 40$ を比較すると $X=40$ の方がフィルム効率と熱伝達率が全体的にスムージングされており、解のばらつきの影響が少なくなっていることが分かる。これは特に熱伝達率のコンターで顕著に見られる傾向であった。以上より、本研究では $X=40$ を採用することとした。



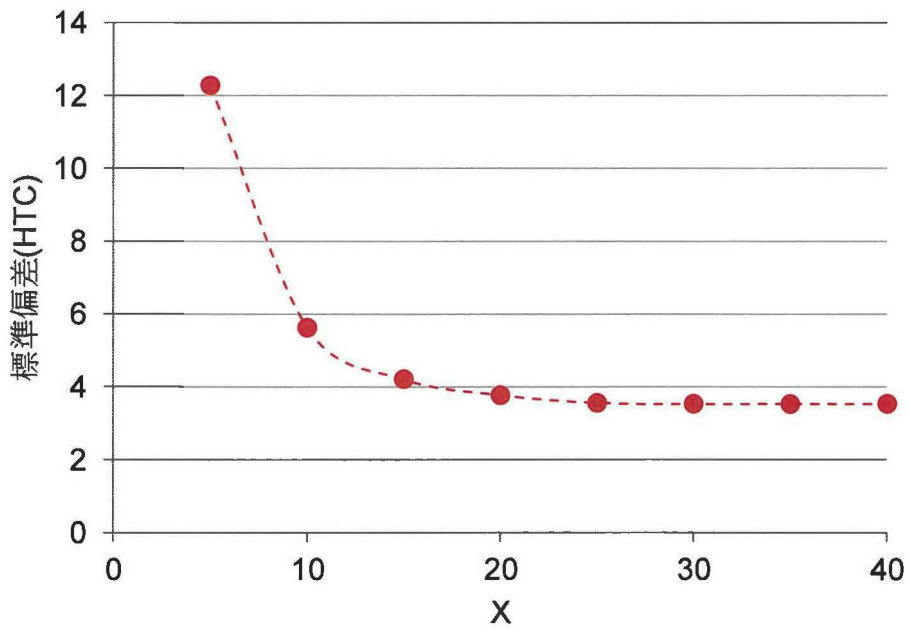
(a) 検証結果：面平均フィルム効率



(b) 検証結果：面平均熱伝達率



(c)検証結果：面平均フィルム効率の標準偏差



(d)検証結果：面平均熱伝達率の標準偏差

図 1.3 検証 1 における結果

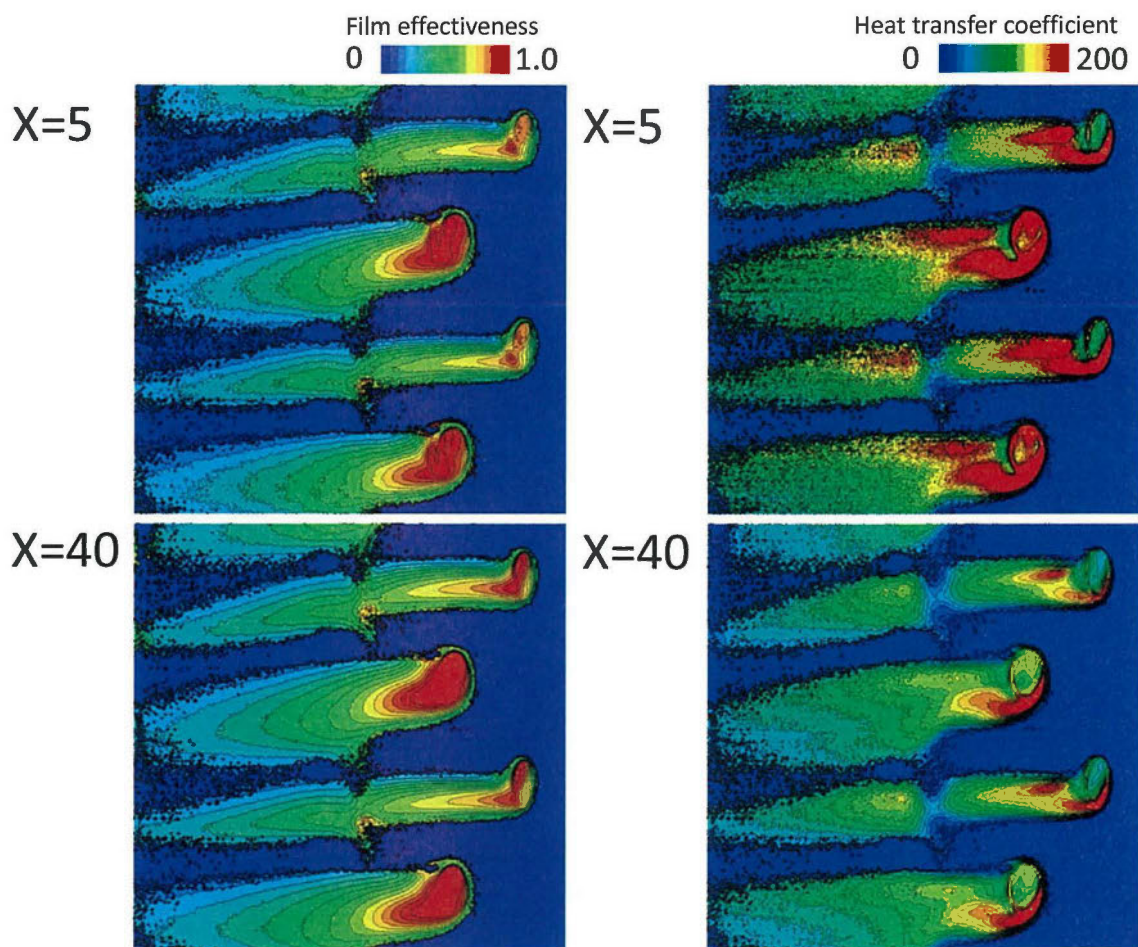


図 1.4 検証結果 1：フィルム効率・熱伝達率コンター

1.3.2 検証 2

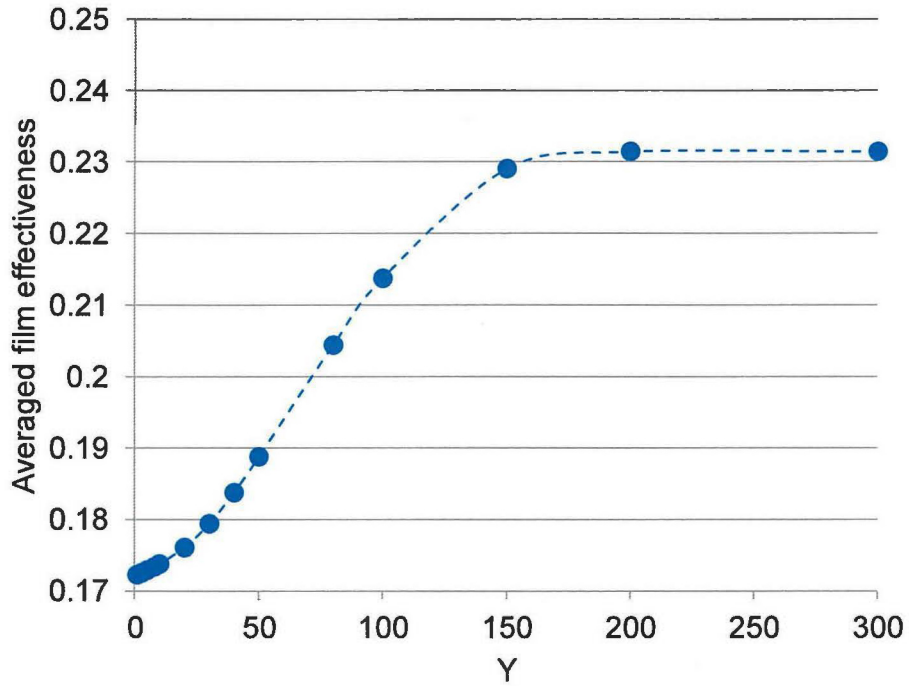
1.3.2.1 計算方法・条件

1.2 で示したように、本研究では反復計算を行うことにより熱伝達率とフィルム効率の解析精度を高めている。検証 2 では反復計算を Y 回行う影響が算出値にどのように及ぶのか調査を行った。ここで Y は 4.2 で示した反復計算の手順における [2], [3] を両方とも行った場合に 1 回と数えることとする。Y の値は Y=1, 3, 5, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 150, 200, 300 に変化させることとした。

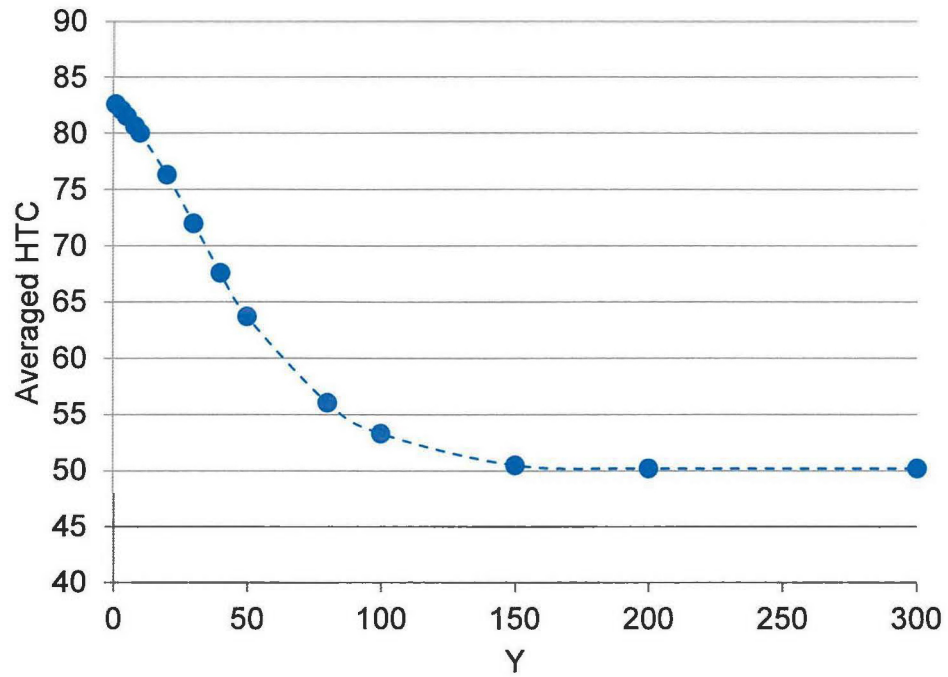
1.3.2.2 検証結果

図 1.5 には検証によって得られた結果を検証 1 と同様に図で示す。面平均フィルム効率や熱伝達率の平均値の収束状況を観察すると Y=150 以降に平均値が漸近し、収束している様子が見える。標準偏差に関しては、サンプル数が増えるために値自体は次第に高くなっているが平均値と同様に Y=150 以降で収束している様子が観察される。図 1.6 には検証に

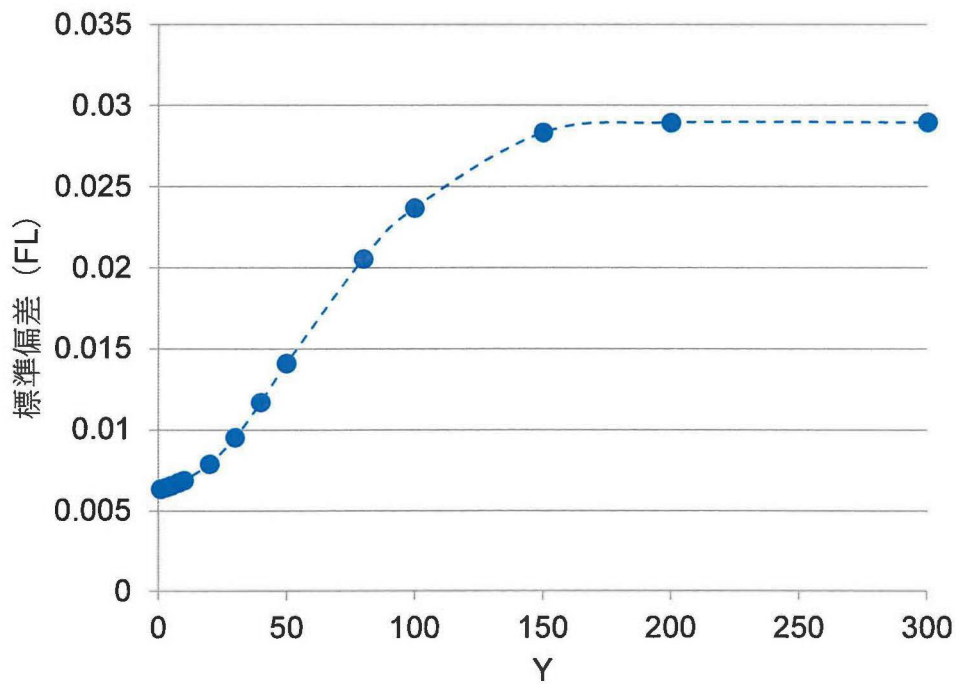
よって得られたフィルム効率と熱伝達率分布を示す。Y=5 の場合は比較的滑らかな分布が観察されるが、Yが増加するにしたがって分布は次第にまばらになっていく。反復計算を行う場合は、フィルム効率と熱伝達率を互いに挿入することにより計算を行うが、反復計算の回数は少なくとも温度の再現性は取れるために Y の回数を増やし過ぎるとエラーを内包しやすくなると考えられる。そこで本研究では Y=5 として解析を行うこととした。



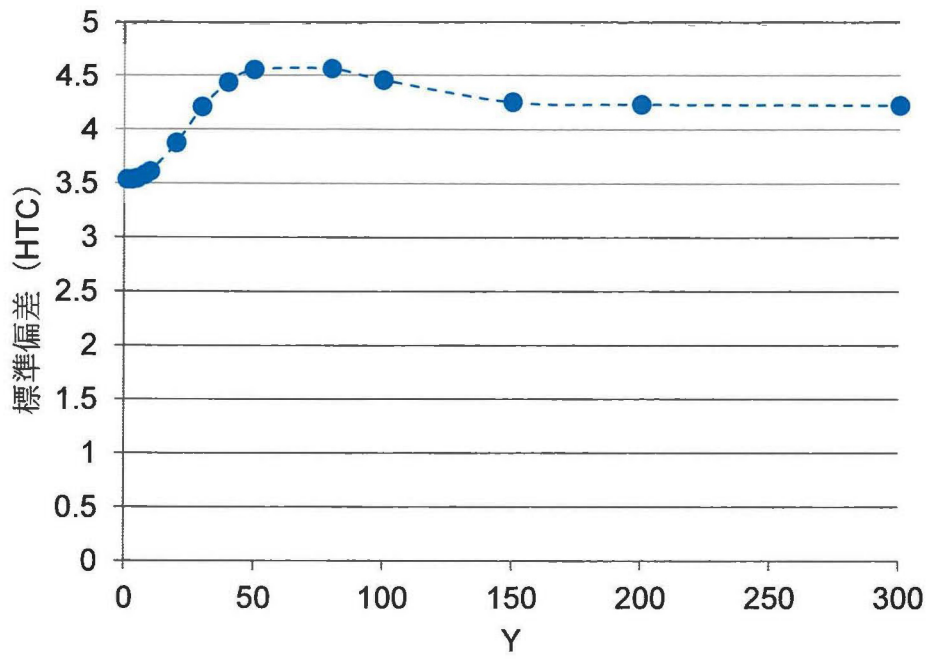
(a)検証結果：面平均フィルム効率



(b) 検証結果：面平均熱伝達率



(c) 検証結果：面平均フィルム効率の標準偏差



(d)検証結果：面平均熱伝達率の標準偏差

図 1.5 検証 2 における結果

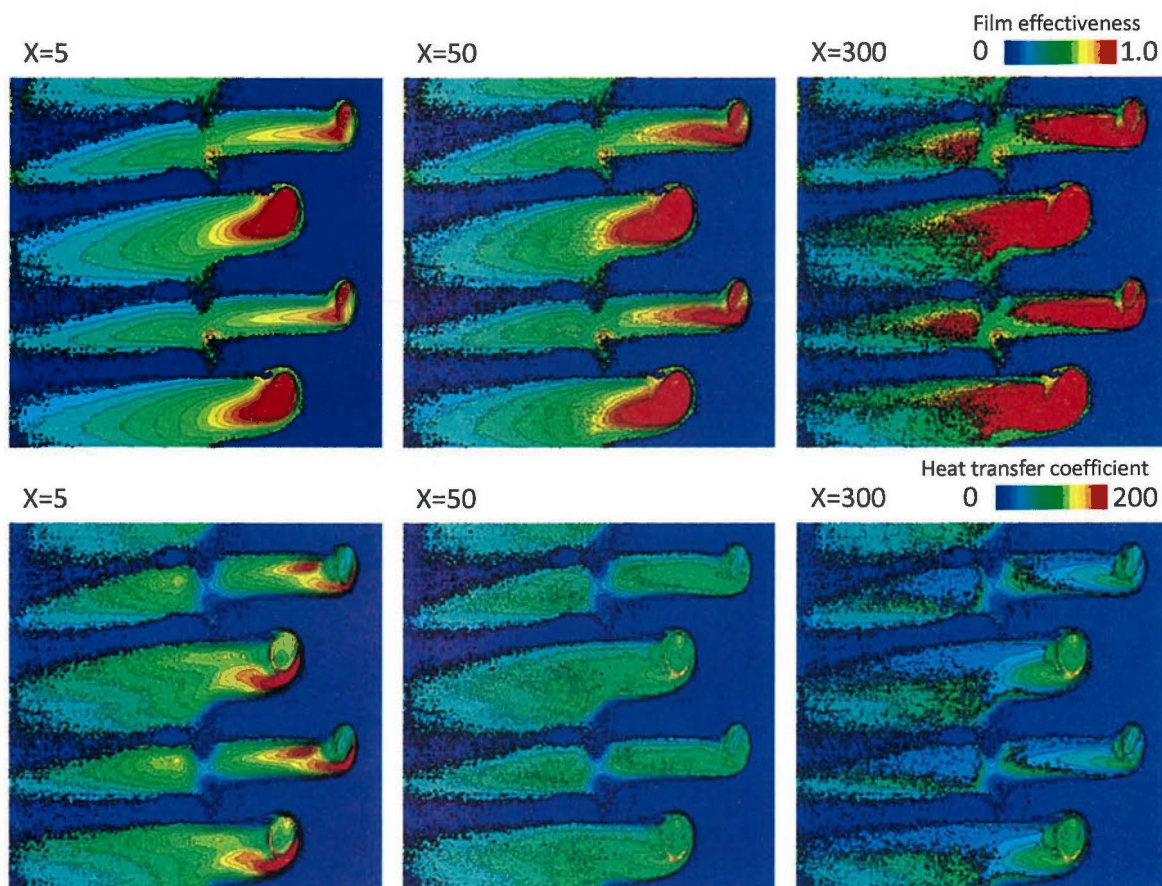


図 1.6 検証結果 1：フィルム効率・熱伝達率コンター

1.3.3 検証 3

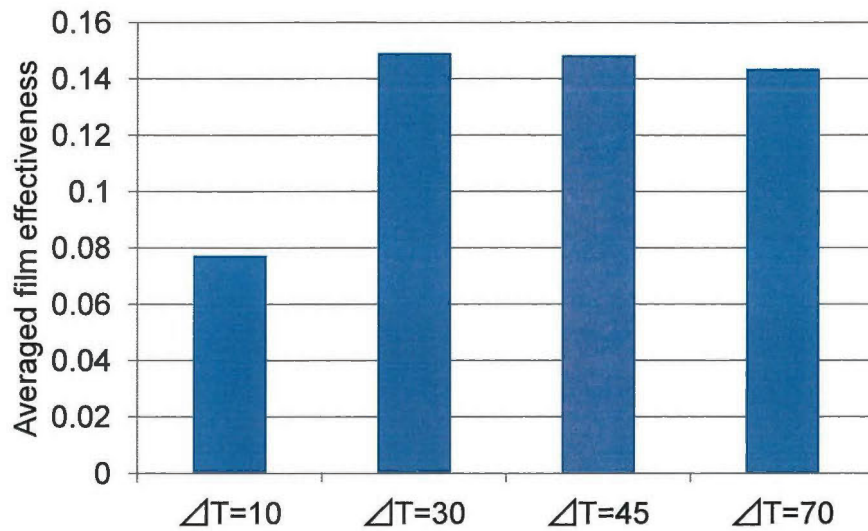
1.3.3.1 計算方法・条件

過渡応答法では異なる時間 t_a と t_b での供試体壁面温度を与えることにより方程式を解くことになるが、同じ t_a と t_b を用いた場合でも二次空気の加熱状況によっては壁面温度の温度差が大きくなる場合がある。たとえば二次空気温度が高い場合、供試体初期温度と壁面の温度差は大きくなる現象が起こる。熱伝導方程式を数値的に解く場合には、供試体初期温度と壁面の温度差が小さい場合には方程式を解くのが困難になり、数値解析上のエラーが発生しやすい状況となる。そこで検証 3 では主流と二次空気の温度差をどの程度に設定すれば、解析上のエラーが少なくなるのか検証する。主流と二次空気の温度差 $\Delta T=10, 30, 45, 70[\text{K}]$ とした。70[K]以上の温度差を生み出す場合には、二次空気を供給する配管の耐熱温度を超えてしまうために $\Delta T=70[\text{K}]$ を今回は最大値としている。

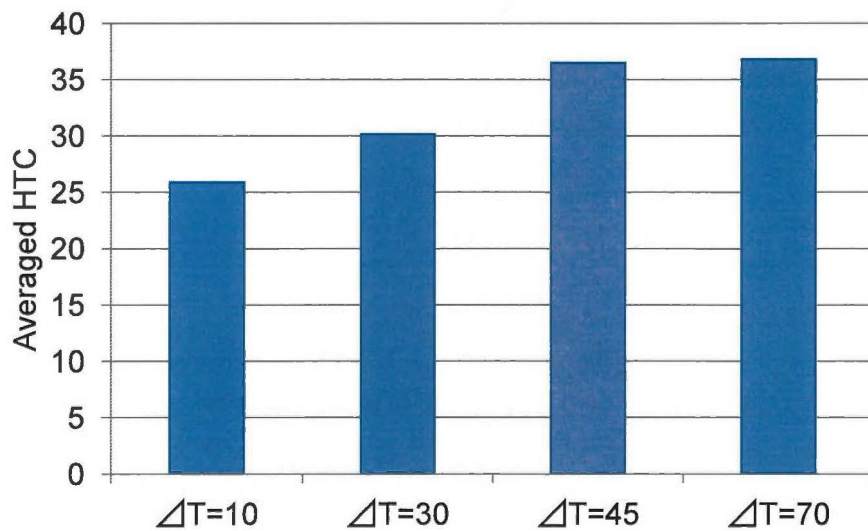
1.3.3.2 検証結果

図 1.7 には検証によって得られた結果を示す。 ΔT が上昇するにつれて、面平均フィルム

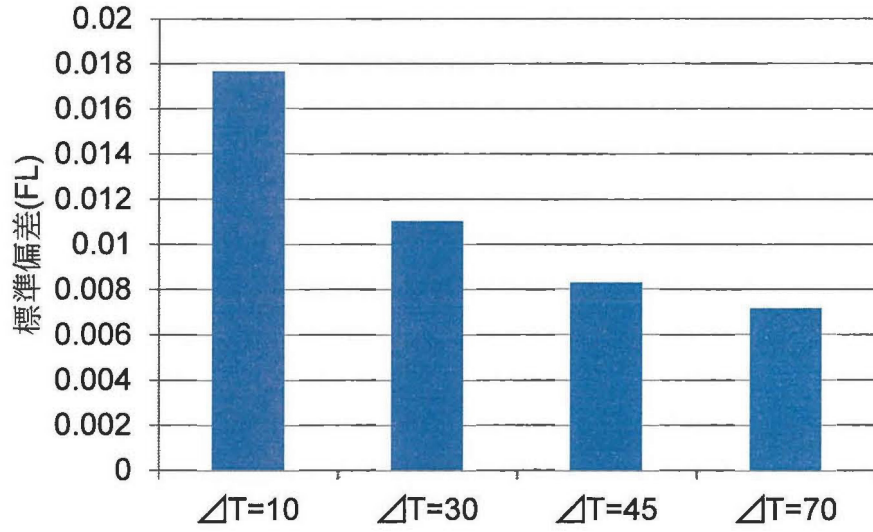
効率と熱伝達率は収束していく状況が見え、標準偏差に関しては次第に小さな値を取るようになっていく。主流温度は夏場で $T_m=30^{\circ}\text{C}$ 、それに対して $\Delta T=70$ となり二次空気供給配管の耐熱温度に非常に近くなることから、今回は $\Delta T=50$ 程度を目安に実験を行うこととした。



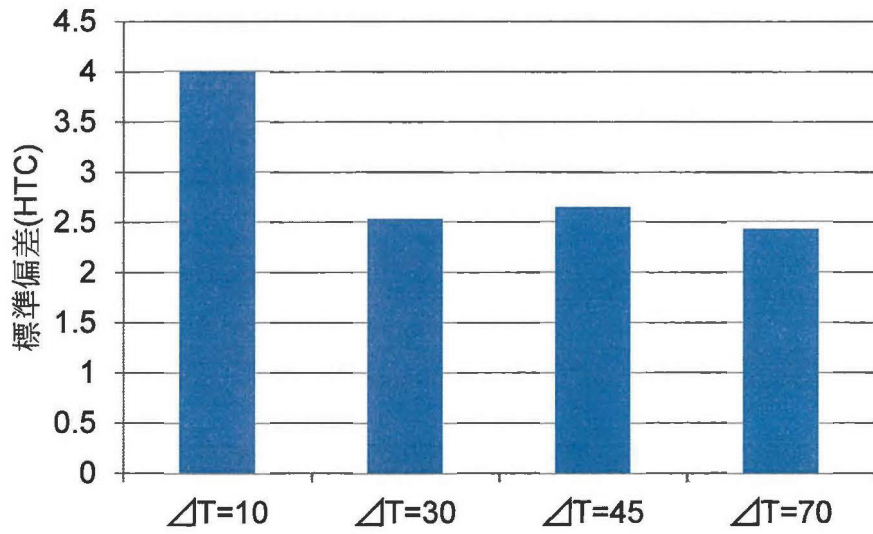
(a) 検証結果：面平均フィルム効率



(b) 検証結果：面平均熱伝達率



(c) 検証結果：面平均フィルム効率の標準偏差



(d) 検証結果：面平均熱伝達率の標準偏差

図 1.7 検証 3 における結果

第二章 7-7-7 Shaped hole

2.1 はじめに

本編第三章において使用した供試体は Shaped hole の出口形状に Round hole の形状が含まれており，Shaped hole の中ではフィルム冷却性能が低いと考えられる．そこで，良く面フィルム冷却の節では 777-Shaped hole を取り上げた．本節では，777-Shaped hole の形状などについて，その概要を示す．

2.2 777-Shaped hole 形状

777-Shaped hole は，ペンシルベニア州立大学が公開している形状データであり，これはフィルム冷却の Shaped hole 形状は，Cylindrical hole に比べると基準となる形状が定まっていないことから，基準となる Shaped hole の形状として提案されたものである．冷却孔の毛状は，120 もの Shaped hole 形状のデータベースを参照して作成されており，インターネット上から形状データと，性能データを参照することが可能である．主な形状のデータに関しては，以下の表 2. 1，各代表寸法の意味は図 2. 1 に示した．この形状データは <https://www2.mne.psu.edu/psuexcc/ShapedHole/>においても公開されている．

表 2.1 一般的な Shaped hole 形状と 777-Shaped hole 形状

	Range Common in Literature	7-7-7 Shaped hole
Injection Angle, α	30 to 55°	30°
L_m/D	1 to 4	2.5
$L_{lat}/D, L_{fwd}/D$	1.6 to 9.5	3.5
L/D	2.8 to 11.5	6
Laidback Angle, β_{fwd}	2 to 25°	7°
Lateral Angle, β_{lat}	2 to 18°	7°
P/D	2.8 to 8	6
Coverage Ratio, t/P	0.3 to 0.8	0.35
Area Ratio, A_{exit}/A_{inlet}	2.5 to 4.7	2.5
Sharpness of Inlet and Breakout Edges	Usually Sharp	Sharp
Rpimdomg pf Fpir Edges	0 to 0.5	0.5
Omsode Doffiser, R/D		

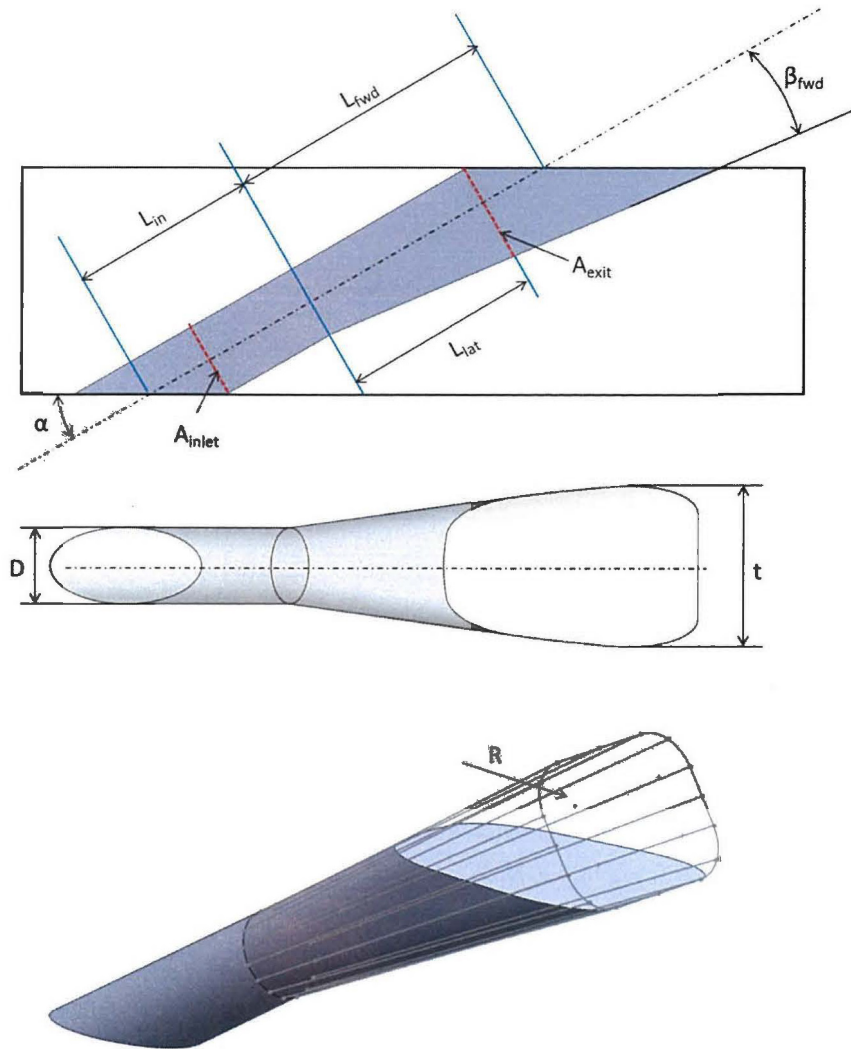


図 2.1 Shaped hole の代表寸法

2.3 777-Shaped hole の性能比較

図 2.2 には, 777-Shaped hole のスパン方向平均フィルム効率を示す. この実験は $DR=1.1$, 主流乱れ度 0.5% で実施されたものである. 実験データは, ペンシルベニア州立大学が公開しているデータをグラフに描き直したものである. 実験データを見ると, 最もフィルム効率のスパン方向平均値が高いのは $BR=0.99$ の時であり, 吹き出し比がある程度高い条件でも二次空気の lift-off を抑制している Shaped hole 形状であると言える. 最終的には, $BR=3.03$ の試験データも公開されているが, これも $BR=0.5$ よりも高いフィルム効率の平均値を示していた.

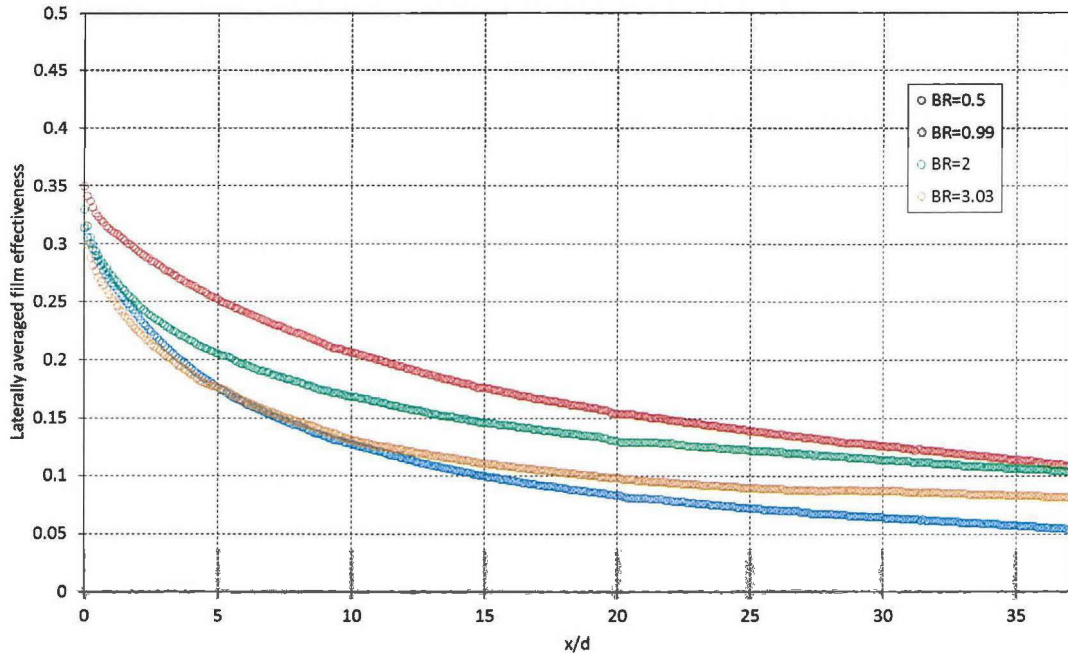


図 2.2 スパン方向平均フィルム効率 (777-Shaped)

次に上記のデータを元にして、今年度実施した DFCD 形態の実験結果を 777-Shaped hole の実験結果と比較する。比較対象は、前節で取り上げた DFCD 形状であり、777-Shaped hole と同じ冷却孔ピッチである $p/d=6.0$ の結果と比較した。図 2.3 には、777-Shaped hole のスパン方向平均フィルム効率と、DFCD を取り付けたフィルム冷却構造のスパン方向平均フィルム効率を比較した結果を示す。R.H. DFCD は Round hole に DFCD を取り付けた形態であり、 $BR=0.5$ の結果を示す。S.H. DFCD は 2.4 節で用いた Shaped hole 形状に DFCD を設けた形態であり、これも $BR=1.0$ の結果を示している。両条件の実験結果を、777-Shaped hole の結果と比較すると、R.H. DFCD は冷却孔付近で 777-Shaped hole よりも低いフィルム効率となっていたが、その下流の限られた領域に関しては 777-Shaped hole と同等か、それ以上のスパン方向平均フィルム効率を示した。S.H. DFCD に関しても、777-Shaped の最高性能よりはフィルム効率の平均値は下回ったが、同じ吹き出し比条件の 777-Shaped hole のスパン方向平均フィルム効率を上回っている。ここで、本研究での実験結果は $DR=0.85$ であり、777-Shaped hole の実験結果とは、実験条件が異なっているが、一般的に DR 条件での実験では、運動量比が高いために、 $DR>1$ の実験よりもフィルム効率は低く算出される傾向にある。従って、今後 DFCD を取り付けた形態で、 $DR>1$ の試験を行う場合は、今回示した効率よりも高いフィルム効率になると考えられるため、DFCD を取り付けた冷却機構でも、十分に Shaped hole の性能に対抗できる可能性があることが分かる。今年度の研究では、 $x/d<10$ の領域しか実験データを取得していないため、今後は $x/d>10$ の領域での実験データを取得することが必要であると考えられる。

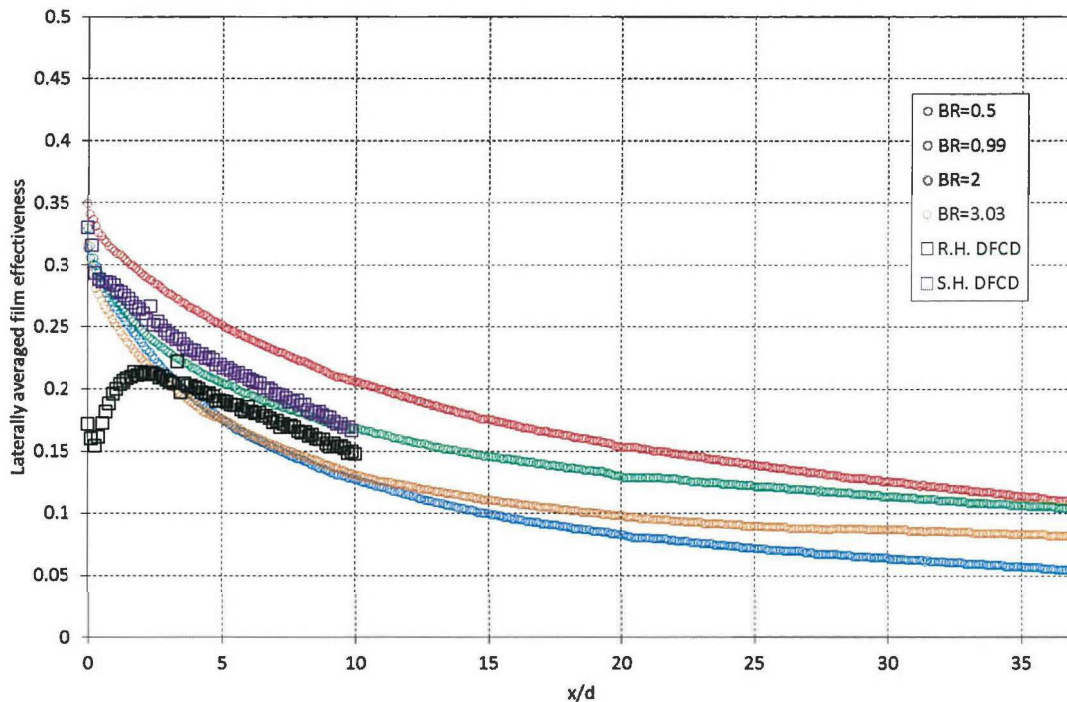


図 2.3 スパン方向平均フィルム効率 (777-Shaped hole vs DFCD)

第三章 最適化のデータサンプル精度向上

3.1 はじめに

第四章では、RANS 解析によるフィルム冷却の最適化問題について取り上げた。しかし、RANS 解析では、フィルム効率の最大化に成功したものの、実験値との定量的なデータ一致は見られなかった。したがって、フィルム冷却の最適化予測精度を向上させるためには、よりデータサンプルの精度を高める必要がある。本節では、非定常計算を導入した場合にデータサンプルの精度がどの程度に変化するのか議論している。

3.2 数値解析手法

3.2.1 解析モデル/解析手法

本章では、本編 4.1 節で取り上げた、最適デバイスに関して計算手法を変更した場合の数値解析予測精度を示す。本節で、比較を行った計算手法は以下の通りである。

[1] Detached eddy simulation (DES)

[2] Scale-Adaptive Simulation モデル (SAS)

[3] Large eddy simulation (LES)

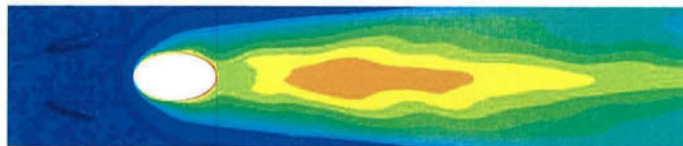
3.2.2 タイムステップ

LES に関しては、本編 4.1 節で取り上げたタイムステップで計算を実行した。[1], [2]に関しては、 $t=0.05d/U_\infty$ で計算を行った。時間間隔を大きくしたのは、解を得るための時間を短縮することを意図したためである。

3.3 計算結果

図 3.1 には、DES と SAS で計算を行った場合の瞬時のフィルム冷却孔率分布を示している。DES と SAS を比較すると、よりフィルム冷却の非定常性が観察されるのは SAS の計算を行った場合である。したがって、LES よりも計算コストを低減しつつ、フィルム冷却の非定常効果を観察するためには、SAS の方が適していると考えられる。

DES



SAS

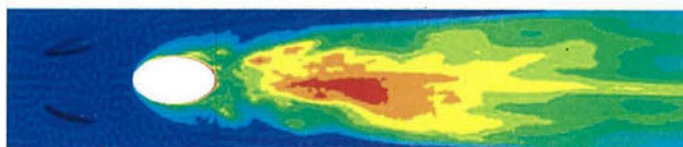


図 3.1 フィルム冷却孔率分布

図 3.2 には、スパン方向平均フィルム効率を示している。LES 解析結果は実験値に最も近い値を示しており、予測精度が最も高い。SAS と RANS を比較すると、SAS は LES の予測精度には及ばないものの、RANS よりも予測精度の改善が見られている。今回の計算では、SAS の時間平均解を取得するまでに、6~10 日の時間を必要とすることがわかった。同じ計算機のスペックで計算を行う場合、LES の時間平均解を取得するためには 2 ヶ月程度必要とすることから、SAS は RANS に代わる計算手法として比較的有効であることが確かめられた。しかし、依然として計算時間は RANS よりも多くかかるため、非定常計算を利用した最適化の可能性は示されたが、今後はタイムステップなどの検討が必要である。

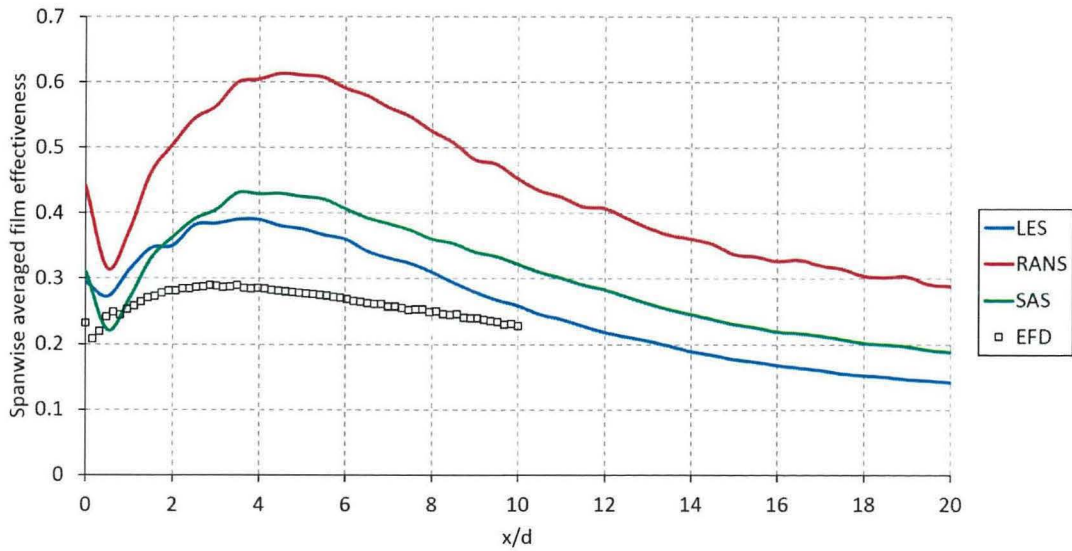


図 3.2 スパン方向平均フィルム効率

第四章 新しい形状のデバイス

4.1 はじめに

本章では、本編とは異なり、新しいコンセプトの流れ制御デバイスに関して取り上げる。本章では、冷却孔と重なる形状のデバイスや、V字型のデバイスに関して実験と数値解析によってその性能を明らかにする。

4.2 デバイス形状

図 4.1 には、本章で検証を行ったデバイス形状を示している。Concept01, 03 は高さが $0.5d$ のデバイス形状であり、V字型のデバイスとなっている。この形態はV字型の効果を調査するためと、デバイスを冷却孔に接近させることでデバイス自体の冷却効果を狙ったものである。Concept05, 14 は高さ $0.25d$ のデバイスであり、細い形状のデバイスになっている。

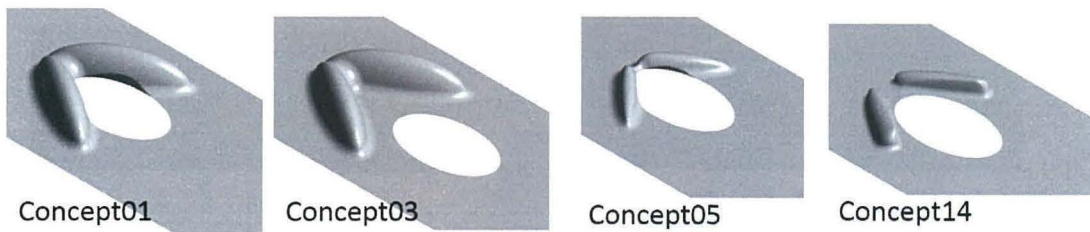


図 4.1 デバイス形状

4.3 結果

図 4.2 には、数値解析によって得られたフィルム効率分布を示している。数値解析による検証ではどの形態に関してもフィルム効率分布はスパン方向に拡散しており、デバイスの効果自体があることがわかる。しかし、図 4.3 に示したフィルム効率分布を見ると、高さ $0.5d$ の場合は横方向に分布が拡散しているが、 $0.25d$ 高さのデバイスにはあまり効果が表れていないことがわかる。今回は、分布の傾向を定性的に予測するのが難しかった。

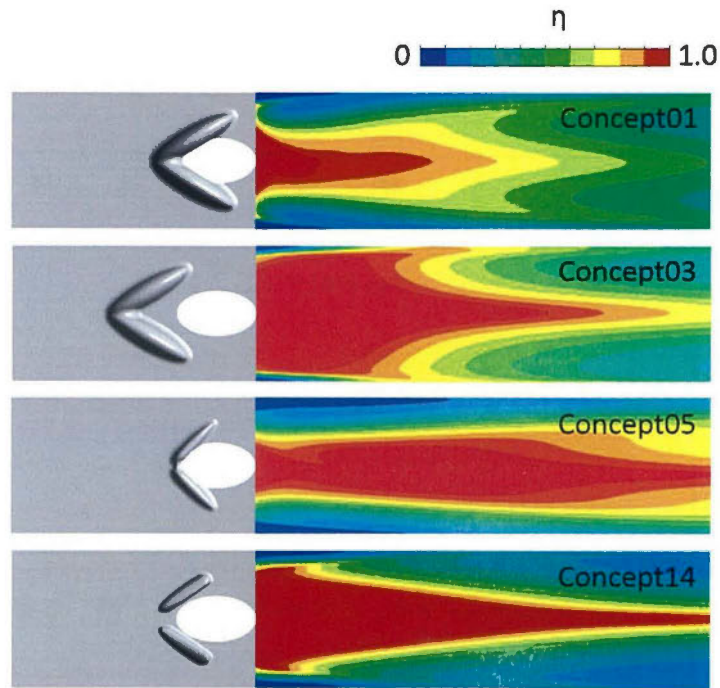


図 4.2 フィルム効率分布(CFD)

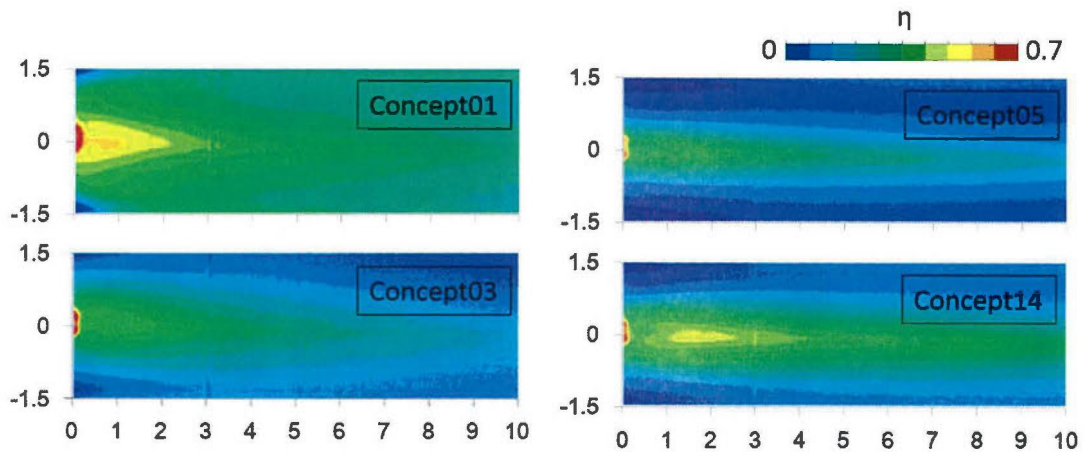


図 4.3 フィルム効率分布(EFD)

図 4.4 には、実験によって得られたスパン方向平均フィルム効率を示している。今回、比較的効果が見られたのは Concept01 であり、ベースタイプのデバイス(RH DFCD)に比べると冷却孔付近でのフィルム効率に改善が見られる。

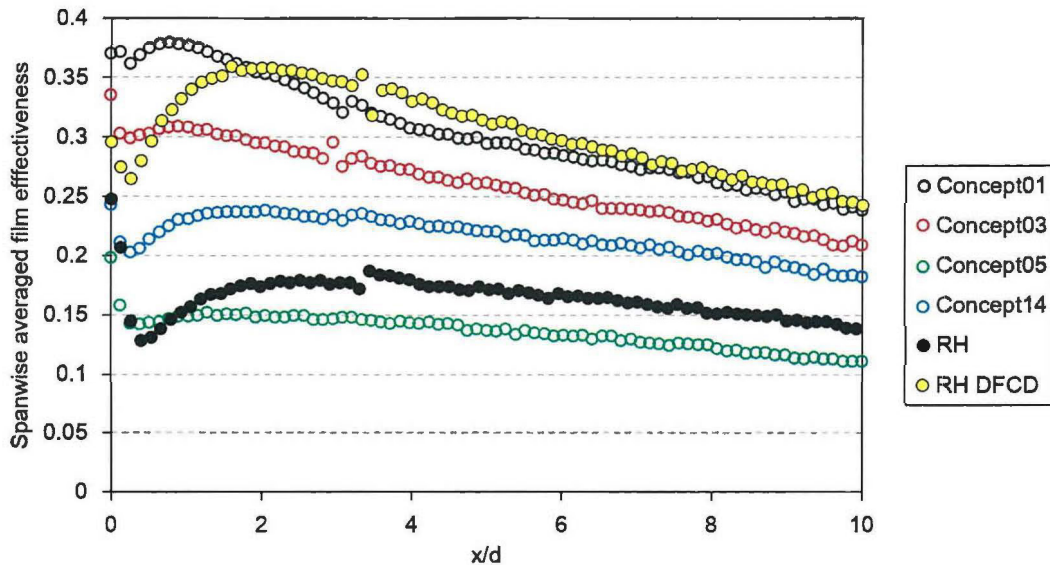


図 4.4 スパン方向平均フィルム効率 (EFD)

図 4.5 には、数値解析によって得られた渦コアを示している。図 4.6 には、 $x/d=3.0$ における渦度分布を示している。最も効果の高かった Concept01 に関してはデバイスから発生した渦構造 A が CRVP の上側を乗り越えるように下流へ流れている様子が観察でき、冷却孔付近のフィルム効率が高くなったと考えられる。Concept03 に関しては、ベースタイプのデバイスと同様に CRVP の両脇にデバイスから発生した渦構造が存在しており、スパン方向にフィルム効率分布が拡散している。しかし、V 字型の形態では、デバイスから発生する渦構造が強すぎるのか、実験では主流と二次空気のみキシングが促進されている様子が観察されたと考えられる。Concept05 や 14 に関しては、数値解析結果では CRVP の両脇にデバイスから発生する渦構造が観察されるが、実験ではほとんどデバイスの効果が見られなかったことから、デバイスから発生する渦構造の予測が数値解析では難しかったと考えられる。

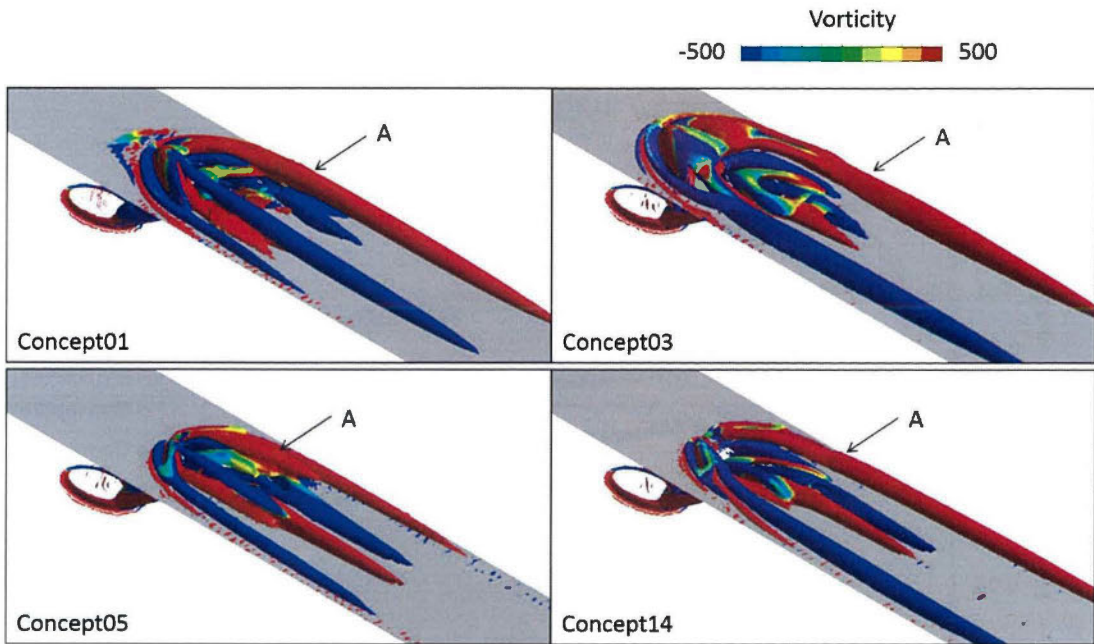


図 4.5 渦コア

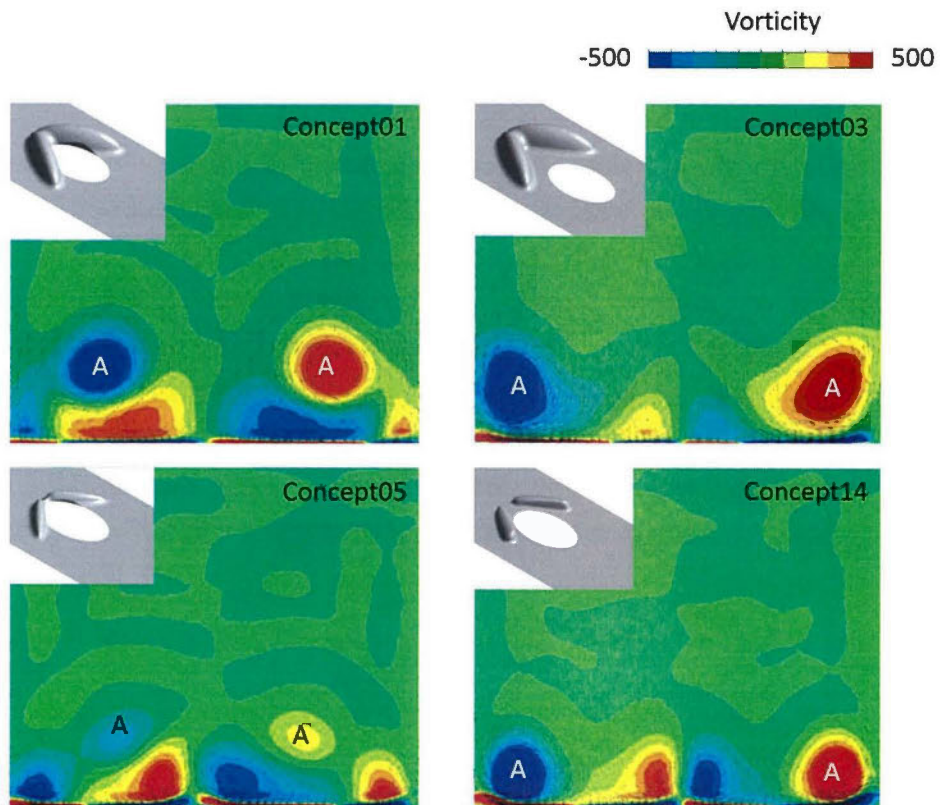


図 4.6 渦度分布($x/d=3.0$, CFD)

謝辞

本論分をまとめるに当り，研究内容や論文校正について懇切丁寧なご指導，ご鞭撻を賜りました岩手大学工学部船崎健一教授に心よりお礼を申し上げます。船崎教授には，研究指導だけでなく，研究プロジェクトでの責任も多く与えていただき，私自身の成長の後押しをして頂きました。また，同研究室谷口英夫助教，加藤大雅助教にも，それぞれ実験と数値解析に関するアドバイスを賜り，大変お世話になりました。本論分の審査に当たりましては，数々の有益なご指導，ご助言をいただきました東北大学の山本悟教授，岩手大学の上野和之教授，廣瀬宏一教授，柳岡英樹教授に，深く感謝いたします。

本研究は三菱日立パワーシステムズ株式会社との共同研究であり，数多くの実践的なアドバイスとご支援の機会を頂きました。ターボ機械研究部の田川久人様を代表とする数多くの関係者の皆様には，私の研究室所属当初から，長きに渡ってご指導と励ましを頂いており，大変感謝しております。また，本研究は，経済産業省資源エネルギー庁から，エネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（高効率ガスタービン技術実証事業）の支援を受けており，ご支援に対しても感謝いたします。

平成 21～24 年度に関しましては，株式会社 IHI の大北洋治様には共同研究でお世話になりました。共同研究期間中には，伝熱研究の礎を築くことができたと感じており，貴重な研究の機会の提供と，ご指導に感謝いたします。また，同プロジェクトで本研究を御支援いただいた（社）日本航空宇宙工業会(SJAC)にも感謝いたします。