

博士学位論文

高温タービン翼フィルム冷却の熱流体
特性及び流れ制御技術に関する研究

平成 26 年度

岩手大学大学院 工学研究科

機械・社会環境システム工学専攻

川端浩和

目次

第一章 序論	1
1.1 本章の概要.....	1
1.2 研究背景.....	1
1.3 タービン外部冷却.....	3
1.4 過去のフィルム冷却研究の動向.....	4
1.4.1 フィルム冷却流れ制御技術の歴史.....	4
1.4.2 フィルム冷却の熱流体特性把握と数値解析.....	15
1.5 本研究の意義と目的.....	18
1.6 本論文の構成と内容.....	19
参考文献 (第一章).....	20
第二章 平板モデルを用いた流れ制御デバイスの基礎研究	25
2.1 研究の背景と目的.....	25
2.1.1 フィルム冷却の平板モデルが果たす役割.....	25
2.1.2 本研究の平板フィルム冷却モデルの特徴.....	25
2.1.3 流れ制御デバイスのコンセプトと研究の目的.....	26
2.1.4 本章の概要.....	27
2.2 実験装置.....	27
2.2.1 概要.....	27
2.2.2 実験装置 I.....	27
2.2.2.1 主流.....	30
2.2.2.2 二次空気.....	30
(1) 二次空気用送風機.....	30

(2) 層流型空気流量計.....	31
(3) ヒーター.....	33
(4) 三方バルブ.....	33
(5) 二次空気系配管.....	37
2.2.2.3 トラバース装置.....	38
2.2.2.4 データロガー.....	39
2.2.2.5 圧力変換器.....	42
2.2.2.6 微差圧校正器.....	43
2.2.2.7 熱電対.....	44
2.2.2.8 熱線流速計.....	44
2.2.2.9 テストセクションダクト.....	45
2.2.2.10 大気圧計.....	46
2.2.2.11 断熱材.....	47
2.2.3 実験装置Ⅱ.....	48
2.2.3.1 主流.....	50
2.2.3.2 二次空気.....	50
2.2.3.3 レーザードップラー流速計.....	51
2.2.3.4 フォグおよびフォグジェネレータ.....	53
2.2.4 供試体.....	57
2.2.4.1 供試体Ⅰ.....	58
2.2.4.2 供試体Ⅱ.....	60
2.2.4.3 流れ制御 Device の製作方法.....	60
2.2.5 テストセクション入口流れ場.....	63
2.2.5.1 主流乱れ度.....	63
2.2.5.2 入口速度プロファイル.....	63
2.2.6 実験装置図面.....	65
2.3 計測手法.....	73
2.3.1 概要.....	73
2.3.2 伝熱特性試験.....	73
2.3.2.1 過渡応答法.....	73
(1) 熱伝達率, フィルム効率の算出方程式.....	73
(2) 計測時間の決定方法.....	77
2.3.2.2 定常法による壁面フィルム効率の算出.....	78
2.3.2.3 壁面温度測定法～赤外線カメラを利用した過渡応答法～.....	78
(1) 赤外線サーモグラフィ.....	78
(2) 赤外線透過ガラス.....	79

(3) 温度校正.....	83
(4) 計測環境.....	84
(5) 計測手順.....	86
(6) データ処理.....	87
2.3.2.4 楕形熱電対を利用した空間温度場計測.....	88
(1) 楕形熱電対.....	89
(2) 計測環境.....	90
(3) 計測手順.....	91
(4) データ処理.....	91
2.3.3 空力特性試験.....	92
2.3.3.1 熱線計測（主流乱れ度計測）.....	92
(1) 計測環境.....	93
(2) 熱線の校正.....	93
(3) データ処理.....	94
2.3.3.2 全圧損失計測.....	94
(1) 全圧損失計測プローブ.....	95
(2) 計測環境.....	96
(3) 全圧プローブの校正.....	97
(4) 計測手順.....	98
(5) データ処理.....	99
2.3.3.3 運動エネルギー損失.....	100
(1) 計測プローブ.....	101
(2) 計測方法.....	101
2.3.3.4 三次元定常流れ場計測（平板モデル試験）.....	101
(1) レーザードップラー流速計.....	102
(2) 計測環境.....	102
(3) 出力調整とアライメント.....	103
(4) 出力調整とアライメント.....	105
(5) データ処理.....	106
2.3.3.5 流れの可視化計測.....	106
(1) 高速度カメラ.....	107
(2) レーザー発振器(図 2.3. 22).....	108
(3) 計測環境.....	108
2.3.3.6 計測の不確かさ解析.....	110
(1) フィルム効率と熱伝達率の不確かさ（非定常法）.....	110
(2) フィルム効率の不確かさ（定常法）.....	111

(3) 損失計測の不確かさ	111
(4) LDV による三次元流れ場計測における不確かさ	112
4.4.3.1 評価点①での不確かさ	113
4.4.3.2 評価点②での不確かさ	113
参考文献 (2.2, 2.3 節).....	114
2.4 流れ制御デバイスの三次元化.....	116
2.4.1 概要.....	116
2.4.2 供試体・デバイス形状.....	116
2.4.2.1 平板モデル供試体.....	116
2.4.2.2 三次元デバイス形状.....	117
2.4.2.3 流れ制御のコンセプト.....	120
2.4.3 壁面・空間フィルム効率.....	121
2.4.4 全圧損失係数.....	125
2.4.5 三次元流れ場.....	129
2.4.5 可視化計測.....	143
2.4.5.1 計測条件	143
2.4.5.2 可視化計測結果.....	143
2.4.6 数値解析手法.....	146
2.4.6.1 計算領域	146
2.4.6.2 計算格子	146
2.4.6.3 境界条件	148
2.4.6.4 RANS 解析.....	148
2.4.6.5 DES・LES 解析.....	148
2.4.7 CFD 結果.....	150
2.4.7.1 RANS 解析結果.....	150
(1) フィルム効率.....	150
(2) 空間温度場.....	153
(3) 全圧損失係数.....	157
2.4.7.1 RANS と DES の比較	160
2.4.7.2 LES 結果	167
参考文献 (2.4 節).....	173
2.5 Single Flow Control Device を用いたフィルム冷却の流れ制御	174
2.5.1 はじめに.....	174
2.5.2 流れ制御デバイス	174
2.5.2.1 デバイス形状.....	174
2.5.2.3 流れ制御のコンセプト.....	175

2.5.3	数値解析手法.....	175
2.5.3.1	解析領域.....	175
2.5.3.2	数値解析条件・境界条件.....	176
(1)	境界条件.....	176
(2)	RANS 解析.....	177
(3)	LES 解析.....	177
2.5.4	フィルム効率・熱伝達率.....	178
2.5.5	空間温度場.....	192
2.5.6	全圧損失.....	195
2.5.7	LDV による流れ場計測結果.....	202
2.5.8	CFD 結果.....	204
2.5.8.1	RANS 解析結果 (フィルム効率分布)	204
2.5.8.2	RANS 解析結果 (スパン方向平均・局所フィルム効率)	207
2.5.8.3	RANS 解析結果 (空間温度場)	210
2.5.8.4	渦構造.....	213
2.5.8.5	LES 解析結果 (瞬時解)	217
2.5.9	可視化計測結果.....	219
	参考文献 (2.5 節).....	222
2.6	本章のまとめ.....	223
(1)	流れ制御デバイスの三次元化.....	223
(2)	Single Flow Control Device の効果.....	223
第三章 平板モデルを用いた Double Flow Control Device		
の基礎研究.....		
3.1	本章の目的/概要.....	225
3.2	実験装置/計測手法.....	226
3.2.1	熱伝達率.....	226
3.2.2	熱流束低減率 (Net Heat Flux Reduction : NHFR)	226
3.3	Double Flow Control Device ベースモデルの調査.....	227
3.3.1	調査方法.....	227
3.3.2	供試体.....	228
3.3.2.1	供試体形状.....	228
3.3.2.2	流れ制御デバイス形状.....	229
3.3.3	試験条件.....	231
3.3.4	実験結果.....	231

3.3.4.1	壁面フィルム効率.....	231
(1)	壁面フィルム効率.....	231
(2)	熱伝達率.....	241
(3)	熱流束低減率.....	247
(4)	1 個置きデバイスとの性能比較 ($p/d=3.0$ for $BR=0.5, 1.0$).....	253
3.3.4.2	空間温度場分布.....	253
(1)	3 次元無次元温度分布.....	253
(2)	YZ 平面無次元温度分布.....	256
(3)	YZ 平面：冷却孔付近の無次元温度分布.....	257
3.3.4.3	全圧損失係数計測.....	258
3.3.4.4	流れ場計測.....	262
(1)	渦度分布.....	262
(2)	速度変動 RMS.....	265
3.3.5	数値解析（吹き出しを伴わない場合）.....	271
3.3.5.1	解析要領.....	271
(1)	解析領域.....	271
(2)	計算格子.....	272
(3)	解析手法・境界条件.....	273
(4)	RANS 解析.....	274
(5)	LES 解析.....	274
3.3.5.2	解析結果.....	275
3.3.6	数値解析（吹き出しを伴う場合）.....	277
3.3.6.1	解析要領.....	277
(1)	解析領域.....	277
(2)	計算格子.....	278
(3)	解析手法・境界条件.....	279
(4)	RANS 解析.....	280
(5)	LES 解析.....	280
3.3.6.2	RANS 解析結果.....	281
(1)	壁面フィルム効率.....	281
(2)	空間温度場.....	293
(3)	速度場.....	301
(4)	熱伝達率の予測精度.....	311
3.3.6.3	LES 解析結果.....	316
参考文献 (3.3 節).....		320
3.4	流入角の効果.....	321

3.4.1	はじめに.....	321
3.4.2	供試体.....	321
3.4.2.1	供試体形状.....	321
3.4.2.2	流れ制御デバイス形状.....	322
3.4.3	流入角を変化させた試験・試験条件.....	322
3.4.4	流入角を変化させた試験・実験結果.....	323
3.4.4.1	壁面フィルム効率・熱伝達率.....	323
(1)	壁面フィルム効率分布.....	323
(2)	熱伝達率.....	334
(3)	熱流束低減率.....	343
3.4.4.2	全圧損失係数.....	352
3.4.4.3	流れ場計測.....	356
(1)	渦度分布.....	356
(2)	速度変動 RMS.....	359
3.5	デバイスに対する境界層厚さの効果.....	361
3.5.1	解析要領.....	361
(1)	解析方法の概要.....	361
(2)	解析領域.....	361
(3)	計算格子.....	362
(4)	境界条件.....	363
(5)	データ処理方法.....	365
3.5.2	解析結果（吹き出しを伴わない計算）.....	365
3.5.2	解析結果（吹き出しを伴う計算）.....	370
3.6	本章のまとめ.....	378
(1)	DFCD の効果.....	378
(2)	流入角の効果.....	380
(3)	境界層厚さの効果.....	380
第四章 平板モデルを用いた Double Flow Control Device		
の最適化.....		
381		
4.1	本章の概要.....	381
4.2	DFCD の最適化（タグチメソッドの静特性解析）.....	381
4.2.1	はじめに.....	381
4.2.1.1	実験計画法 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾	382
4.2.1.2	タグチメソッド.....	382

4.2.1.3 研究の目的	384
4.2.2 設計パラメータと直行表への割り付け	384
4.2.3 実験手法	387
4.2.3.1 デバイス形状	387
4.2.3.2 フィルム効率・熱伝達率計測	388
4.2.4 数値解析手法	388
4.2.4.1 数値解析領域	388
4.2.4.2 計算格子	389
4.2.4.3 境界条件	391
4.2.5 タグチメソッド解析手法	393
4.2.5.1 静特性のパラメータ設計	393
4.2.6 フィルム効率分布	393
4.2.6.1 実験結果	393
4.2.6.2 数値解析結果 (乱流モデル SST, Grid1)	397
4.2.6.3 数値解析結果 (乱流モデル RNG k- ϵ , Grid3)	397
4.2.7 最適形態の比較	403
4.2.8 冷却孔出口流れ場	405
4.2.8.1 渦度分布(EFD vs CFD)	405
4.2.8.2 流れ場計測結果 (渦度以外, 実験と CFD の比較)	409
4.2.8.3 空間温度場	422
4.2.9 LES 解析	425
4.2.9.1 数値解析領域・計算格子	425
4.2.9.2 数値解析手法	425
4.2.9.3 解析結果	426
参考文献 (4.2 節)	427
4.3 DFCD の最適化 (タグチメソッドの動特性解析)	428
4.3.1 はじめに	428
4.3.1.1 動特性の最適化の概念	428
4.3.1.2 動特性の最適化の手順	430
(1) システム・チャートによる入出力の検討	430
(2) 理想機能の検討	431
(3) 動特性のロバストネスの定量化	433
4.3.2 動特性解析の条件	435
4.3.2.1 最適化のターゲット	435
4.3.2.2 数値解析要領	436
(1) 解析領域	436

(2) 計算格子.....	436
(3) 解析条件.....	436
4.3.3 最適化結果.....	437
4.3.3.1 フィルム効率.....	437
4.3.3.2 要因効果図と最適化.....	451
4.3.3.3 最適形態の比較.....	454
4.3.3.4 最適化形態の性能とその流れ場.....	455
(1) フィルム効率.....	455
(2) 冷却孔下流領域の渦度.....	457
(3) 冷却孔下流領域の温度場.....	460
(4) DFCD での渦構造(Q 値).....	463
(5) 空力損失.....	465
(6) 実験による性能の確認.....	469
4.4 DFCD の最適化 (多目的解析)	471
4.4.1 はじめに.....	471
4.4.2 最適化条件.....	471
4.4.2.1 最適化手法	471
4.4.2.2 最適化のターゲット.....	472
4.4.2.3 データ評価方法.....	473
4.4.2.4 数値解析要領.....	474
(1)解析領域.....	474
(2)計算格子.....	474
(3)解析条件.....	474
(4)データ評価方法.....	474
4.4.3 最適化結果.....	475
4.4.3.1 空力損失	475
4.4.3.2 要因効果図	484
2.8.3.3 水準平均値と最適解の決定.....	485
4.4.3.4 タグチメソッドの再現性と確認実験.....	489
4.4.4 実験データを用いた最適形態の推定.....	500
4.4.5 熱伝達率解析と熱流束比.....	502
4.4.5.1 データ評価方法.....	502
4.4.5.2 解析要領	503
4.4.5.3 解析結果	503
参考文献 (4.4 節).....	510
4.5 本章のまとめ.....	511

(1) 静特性解析結果と最適化の信頼性.....	511
(2) 動特性解析と多目的解析.....	511
第五章 高圧タービン直線翼列における流れ制御デバイス	
の効果.....	513
5.1 本章の概要.....	513
5.1.1 翼面の熱伝達特性.....	513
5.1.2 翼面フィルム冷却への過去の研究アプローチ.....	514
参考文献 (5.1 節).....	514
5.2 実験装置.....	515
5.2.1 実験装置概要.....	515
5.2.2 送風機・コンプレッサー.....	517
(a) 主流用送風機.....	517
(b) コンプレッサー.....	517
5.2.3 風洞.....	519
5.2.4 テストセクション.....	523
5.2.4.1 テストセクション形状.....	523
5.2.4.2 冷却孔付き供試翼.....	530
(1) 翼面冷却翼.....	530
(2) 製作方法.....	536
(3) 翼の二次加工.....	537
5.2.4.3 静圧計測翼.....	538
5.2.5 座標の定義.....	545
5.3 計測手法.....	546
5.3.1 はじめに.....	546
5.3.2 伝熱計測.....	546
5.3.2.1 壁面温度計測方法.....	546
(1) 計測方法.....	546
(2) 翼面座標の写像.....	547
(3) 壁面温度計測の角度特性.....	550
5.3.2.2 二次空気温度計測.....	551
5.3.3 流れ場 / 圧力計測.....	551
5.3.3.1 流れ場計測.....	551
5.3.3.2 静圧計測.....	554
5.3.3.3 翼面及び翼エンドウォール部の静圧計測.....	555

5.3.3.4	流れ場計測用実験装置.....	556
(1)	5孔ピトー管及びトラバース装置.....	556
(2)	微差圧変換器.....	559
(3)	データロガー.....	559
5.3.3.5	全圧損失計測.....	561
5.4	数値解析手法.....	562
5.4.1	はじめに.....	562
5.4.2	解析要領.....	562
5.4.2.1	解析対象.....	562
5.4.2.2	解析領域.....	562
5.4.2.3	境界条件.....	563
5.4.2.4	計算格子.....	565
(1)	計算格子概観図.....	565
(2)	格子依存性調査用計算の概要.....	565
(2)	計算結果の比較.....	566
参考文献 (5.4 節)	568
5.5	翼面フィルム冷却における流れ制御 Device の効果(実験による Device 適用性の検証).....	568
5.5.1	はじめに.....	568
5.5.2	供試翼・デバイス形状.....	569
5.5.3	実験条件.....	569
5.5.4	伝熱試験結果.....	570
5.5.4.1	フィルム効率分布.....	570
5.5.4.2	スパン方向平均フィルム効率.....	571
5.5.4.3	全圧損失計測結果.....	581
5.6	数値解析結果.....	583
5.6.1	ベースデバイス翼の流れ場($BR=0.0$).....	583
5.6.2	吹き出しを伴う流れ場 (ベースデバイス翼とベース翼の比較).....	591
5.6.2.1	フィルム効率.....	591
5.6.2.2	空間温度場.....	596
5.6.2.3	渦度.....	605
5.6.2.4	エネルギー損失.....	614
5.6.3	Shaped hole の効果.....	615
5.6.3.1	フィルム効率.....	616
5.6.3.2	空間温度場.....	621
5.6.3.3	渦度.....	630

5.6.3.4 全圧損失	639
5.6.4 従来技術との比較	640
5.6.4.1 比較形状	640
(1) 供試翼形状	640
(2) 流れ制御技術条件	641
(3) 解析条件	643
5.6.4.2 結果と考察	643
5.6 本章のまとめ	656
第六章 結言	659
6.1 本研究のまとめ	659
6.1.1 流れ制御デバイスの三次元化	659
6.1.3 DFCDによる流れ制御	660
(1) DFCDの流れ制御能力	660
(2) 流入角の効果	661
(3) 境界層厚さの効果	662
6.1.4 フィルム冷却構造の最適化	662
(1) 静特性解析結果と最適化の信頼性	662
(2) 動特性解析と多目的解析	662
6.1.5 直線翼列への流れ制御デバイス適用	663
6.2 今後の課題	663
発表論文	665
付録	669
第一章 過渡応答方法の精度向上	669
1.1 はじめに	669
1.2 反復計算法	669
1.3 計算回数の検証	671
1.3.1 検証1	672
1.3.1.1 計算方法・条件	672
1.3.1.2 検証結果	672
1.3.2 検証2	675
1.3.2.1 計算方法・条件	675
1.3.2.2 検証結果	675

1.3.3 検証3	679
1.3.3.1 計算方法・条件.....	679
1.3.3.2 検証結果.....	679
第二章 7-7-7 Shaped hole	682
2.1 はじめに.....	682
2.2 777-Shaped hole 形状.....	682
2.3 777-Shaped hole の性能比較.....	683
第三章 最適化のデータサンプル精度向上	685
3.1 はじめに.....	685
3.2 数値解析手法.....	685
3.2.1 解析モデル/解析手法	685
3.2.2 タイムステップ.....	686
3.3 計算結果.....	686
第四章 新しい形状のデバイス.....	687
4.1 はじめに.....	687
4.2 デバイス形状.....	687
4.3 結果.....	688
謝辞.....	691

第一章

序論

1.1 本章の概要

本研究では、高温タービン翼フィルム冷却の熱流体特性及び流れ制御技術を主題としている。本論文では、フィルム冷却の平板モデルや、翼列モデルを用いて、流れ制御技術の特性調査を行っているが、本章では、まず研究の背景および論文の概要について述べる。

1.2 研究背景

地球温暖化の対策として、省エネルギー、炭酸ガスの排出量削減が我が国の大きな課題として掲げられており、電力分野の火力発電においては各種高温機器の高効率化、熱効率向上が求められている。

一般的に、発電機器であるガスタービンの比出力向上に有効な手段としては、サイクル最高温度の上昇（タービン入口温度：TIT）や、圧縮機での圧力比上昇が上げられる。従って、近年のガスタービンには高温化、高圧力化が求められている。本研究では、中でも“高温化のための冷却技術”に焦点を当てたものである。図 1.1 には TIT 上昇の変遷と翼材料の耐久温度を示す。産業用ガスタービンではタービン入り口温度（TIT）は 1100～1300℃級が主力であるが、最新の機種では 1600℃級に達し、コンバインド発電プラントでは熱効率 60%（LHV）以上に達している。TIT の上昇を可能とする技術は、いわゆる高温技術としての冷却技術、材料技術、遮熱コーティング技術が挙げられるが、翼材料耐用温度の年当たりの増加率は TIT の増加量に比べると、比較的小さく、材料技術の貢献はある程度限られたものであることが分かる。冷却技術は、材料耐用温度と TIT の間を埋める重要な技術となっており、TIT 上昇にとってキーテクノロジーになっていると言える。

図 1.2 にはタービンの代表的な冷却技術を示す。(a) の内部対流冷却方式は、翼断面内に丸孔や冷却通路を設け、フィン、突起などで翼内部の対流伝熱促進を図った構造である。(b) の衝突噴流冷却は、翼内部に設けた隔壁や挿入筒に多数の小孔を設け、そこから吹き出す高速の空気噴流を翼外被内面に衝突させて冷却を行うものである。(c) の膜冷却(フィルム冷却)は翼外面に小孔やスリットを設け、翼外に冷却空気を吹き出して、壁面を低温の空気で覆う技術である。このような、タービンの冷却に必要な冷却空気は、タービン内の圧縮機から抽気することになるが、近年の高温タービンではこの冷却空気の全質量流量は、圧縮機出口の流量の 20%以上に達するとされている。冷却空気量の増加は、冷却という観点に限ってはメリットがあるが、一方で燃焼空気量の低下を通じタービン比出力低下に直結する上、タービンにおける高温ガスと冷却空気の混合は作動ガス温度低下や、翼列空力性能の悪化により熱効率の低下を招く。従って、タービン冷却に使用する冷却空気量は、冷却構造の高性能化によって、最小とするのが好ましい。

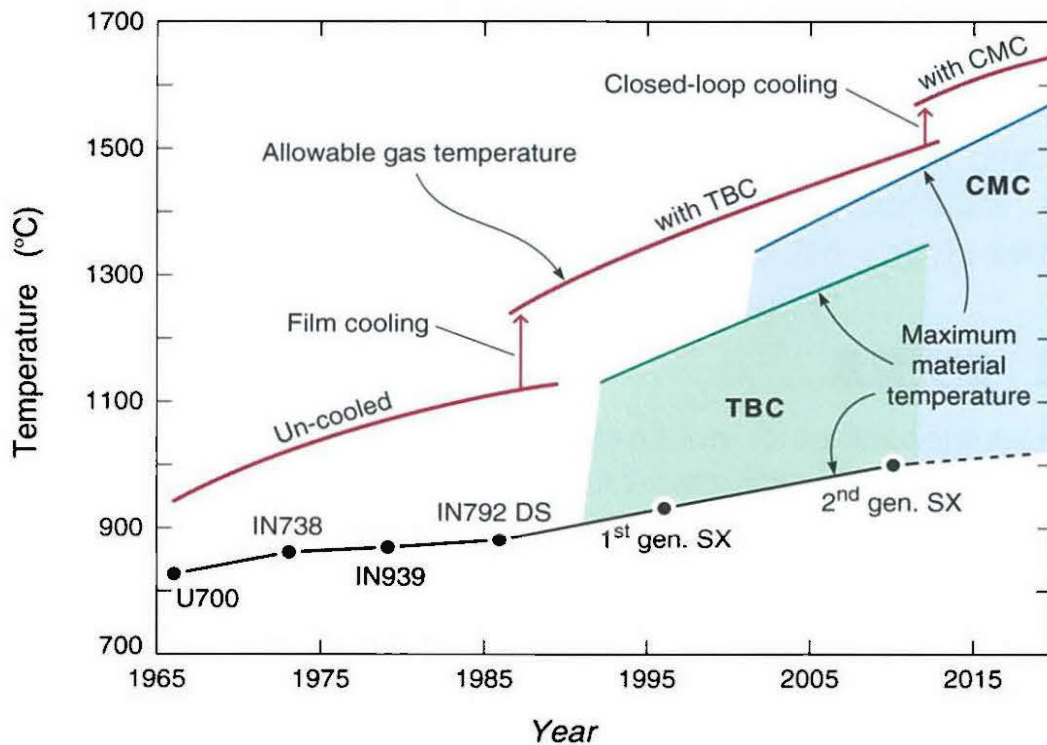


図 1.1 タービン入口温度の上昇と翼材料の耐久性向上の推移⁽¹⁾

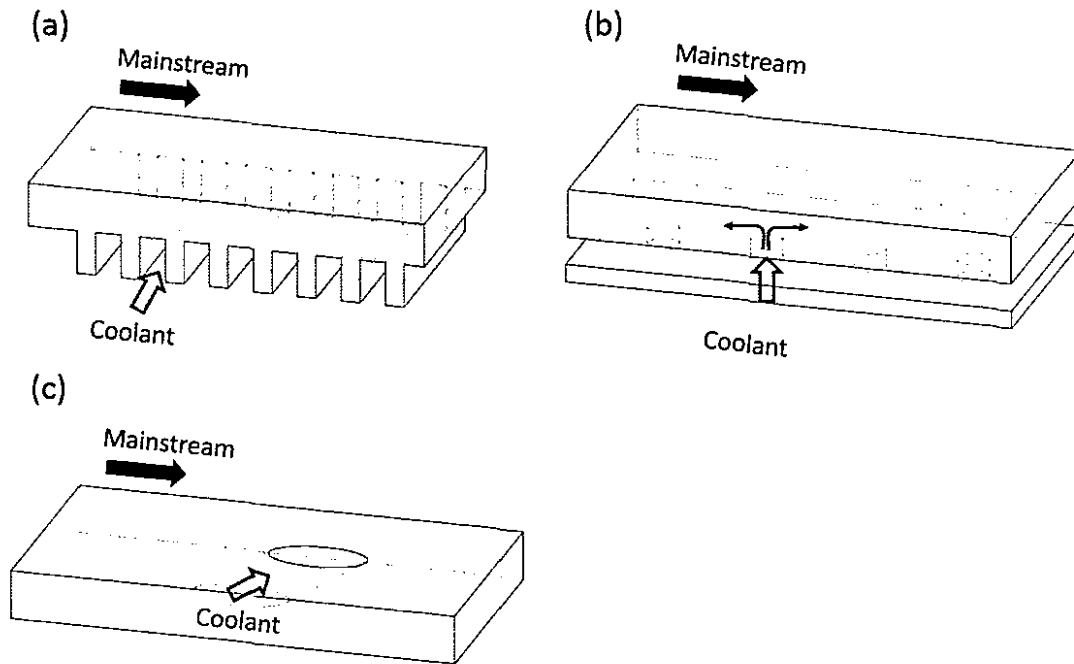


図 1.2 タービンの代表的冷却構造

1.3 タービン外部冷却

図 1.3 にフィルム冷却孔付タービン翼を示す。今日のガスタービンの高温化や高効率化、長寿命化を可能としている主要な冷却技術のひとつであるフィルム冷却は外部冷却に分類され、圧縮機直後より抽出した冷却用の空気を冷却孔から吹き出し、翼表面に薄い膜状に付着させることで翼表面を高温主流から保護することを目的とした手法であり、TIT の上昇に大きく貢献している。フィルム冷却における目標の1つは理想的な等分布の冷却膜を達成することにある。しかし、空気力学や熱応力、機械的応力、製造などの設計上の制約を随所に受けるため、冷却対象に応じたフィルム冷却構造が求められる。

初期のフィルム冷却においては、傾斜した円孔列が用いられてきた。しかし、フィルム冷却孔の加工技術の進歩によって、放電加工あるいは電解加工で円孔を加工する段階から、レーザー加工により、フィルム冷却の出口形状を任意に設計することができるようになり、いわゆる“Shaped hole (詳細は 1.4 節に記載)”が広く採用されるようになった。この Shaped hole の形状は種々あり、一般的には円孔の出口形状を流れ方向およびスパン方向に広げたものが多く用いられてきた。これにより出口面積が拡大されることで、出口での冷却空気運動量は低下し、主流への貫通が抑制される。

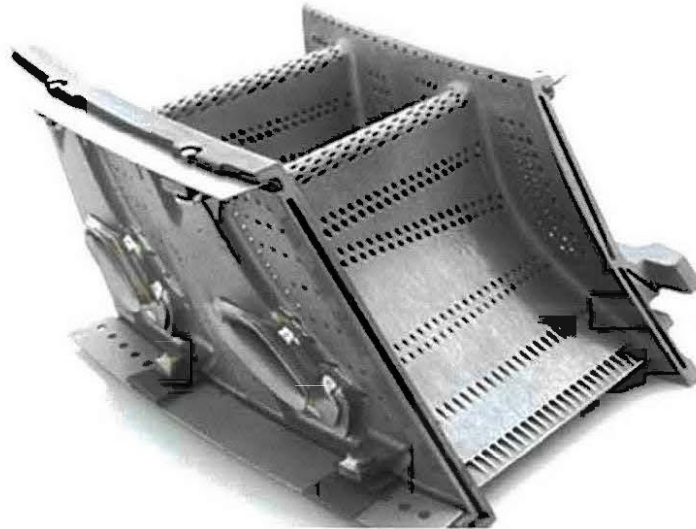


図 1.3 タービン翼外観図 (2)

1.4 過去のフィルム冷却研究の動向

1.4.1 フィルム冷却流れ制御技術の歴史

図 1.4 には単純円筒型冷却孔から吹き出した二次空気と、それに干渉した主流が形成する基本的な渦構造を示している。フィルム冷却の非定常な流れ場では、主流と二次空気のせん断による、せん断渦など様々な渦構造が形成されるが、時間平均流れ場では Counter rotating vortex pair (CRVP)が観察されることが知られており、この CRVP は反時計回りと、時計回りの渦対となる。CRVP は冷却孔のセンターラインで二次空気の lift-off を促進する方向に速度成分が形成されているため、この CRVP が、フィルム冷却性能を悪化させる主な原因となっている。また、単純円筒型の冷却孔で発生する CRVP は、ペアとなる渦の中心同士の距離が近いことが分かっている。これは、冷却空気が横方向に拡散しないことを意味しており、冷却空気のカバー面積が少なくなってしまう。従って、フィルム冷却の性能を高めるためには、CRVP を何らかの手法で制御する技術が必要不可欠であり、過去の研究において多数提案されてきたフィルム冷却の高効率化手法は、全てこのような CRVP を代表とする“フィルム冷却の流れ制御”の観点から整理することができる。

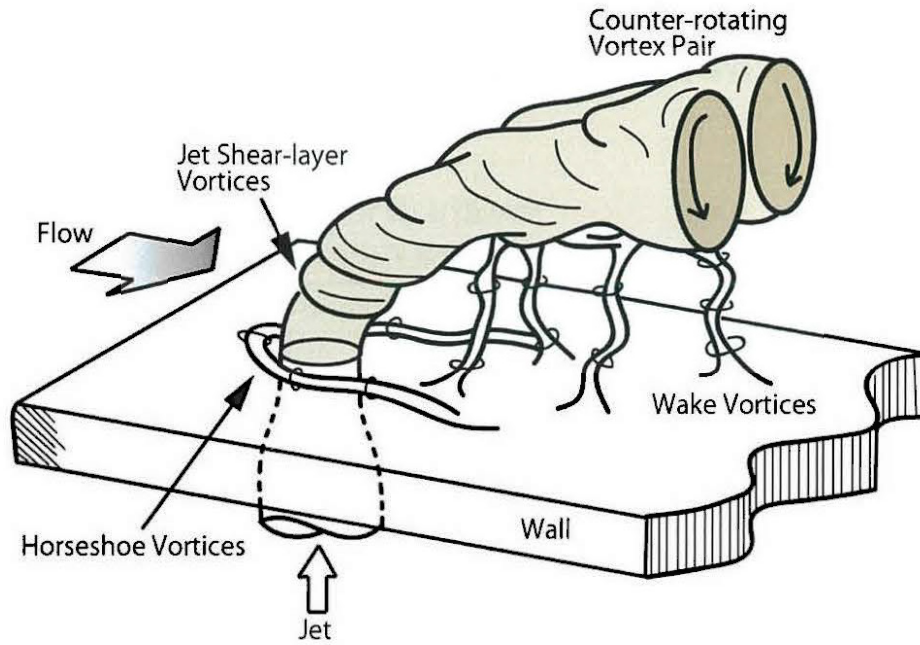


図 1.4 冷却孔下流側の渦構造⁽³⁾

フィルム冷却の流れ制御を行うためには、フィルム冷却の流れ影響する因子を把握する必要がある。表 1.1 には、フィルム冷却効率（即ちフィルム冷却の流れ）に影響を及ぼすと言われている因子一覧を示す。(a)は主流及び冷却空気の状態を示す因子である。これは、フィルム冷却の流れ制御手法そのものを示すわけではないが、研究上は、この因子を複数条件変化させることにより、流れ制御手法の有効性を検証する場合が多い。本研究においても代表的な因子に関して調査を行っている。質量流束比 BR や運動量比 IR は以下の式で示されるパラメータであり、吹き出しの強さを示すパラメータとして知られている。

$$BR = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_\infty U_\infty} \quad (1)$$

$$IR = \frac{\rho_2 U_2^2}{\rho_\infty U_\infty^2} \quad (2)$$

(b)はフィルム冷却孔形状および配置を示すパラメータである。これは、流れ制御手法の形状パラメータそのものを示している（詳細な流れ制御手法に関しては後述する）。(c)は翼面の表面形状等を示している。一列の単純円筒型冷却孔からの吹き出しにおけるフィルム冷却効率は、質量流束比 BR の増加に従って、 $BR=0.5$ 付近で極大値を取り、さらに BR が増加すると冷却媒体への主流への貫通が生じ、効率が低下する⁽⁴⁾。これは冷却孔から発生する CRVP が大規模化するためである。一般的に、フィルム冷却の流れ制御を行う際には、このような単純円筒型の冷却孔で見られる弱点への対策が必要と言える。フィルム冷却の流れ

制御手法には、過去にいくつかの手法が提案されているが、Bunker がまとめたフィルム冷却の歴史⁽⁵⁾を見ると、流れ制御技術を分かり易く理解することができる。また、過去に研究が行われてきた流れ制御技術は、後述するような 3 つのカテゴリーに大別することが可能である。

表 1.1 フィルム冷却流れに影響を及ぼす因子

(a)主流及び冷却空気の状態	(b)フィルム冷却孔形状及び配置	(c)表面形状/翼形状
1. 質量流束比 (BR)	1. 壁との成す角度 (傾斜角 α)	1. 表面粗さ
2. 運動量比 (IR)	2. コンパウンド角 (β)	2. 曲率
3. 主流乱れ (Tu)	3. 孔ピッチ (p/d)	3. 翼の部位
4. 主流マッハ数	4. 孔長さ (L)	背側/腹側
5. 境界層厚さ	5. シェイプトフィルム孔	前縁/後縁
6. 非定常流	6. クレーター	端壁面
7. 加速/減速	7. トレンチ	動翼ディップ
8. 密度比 (DR)	8. CONSOL 形状	
9. 旋回流	9. フィルム冷却孔表面粗さ	

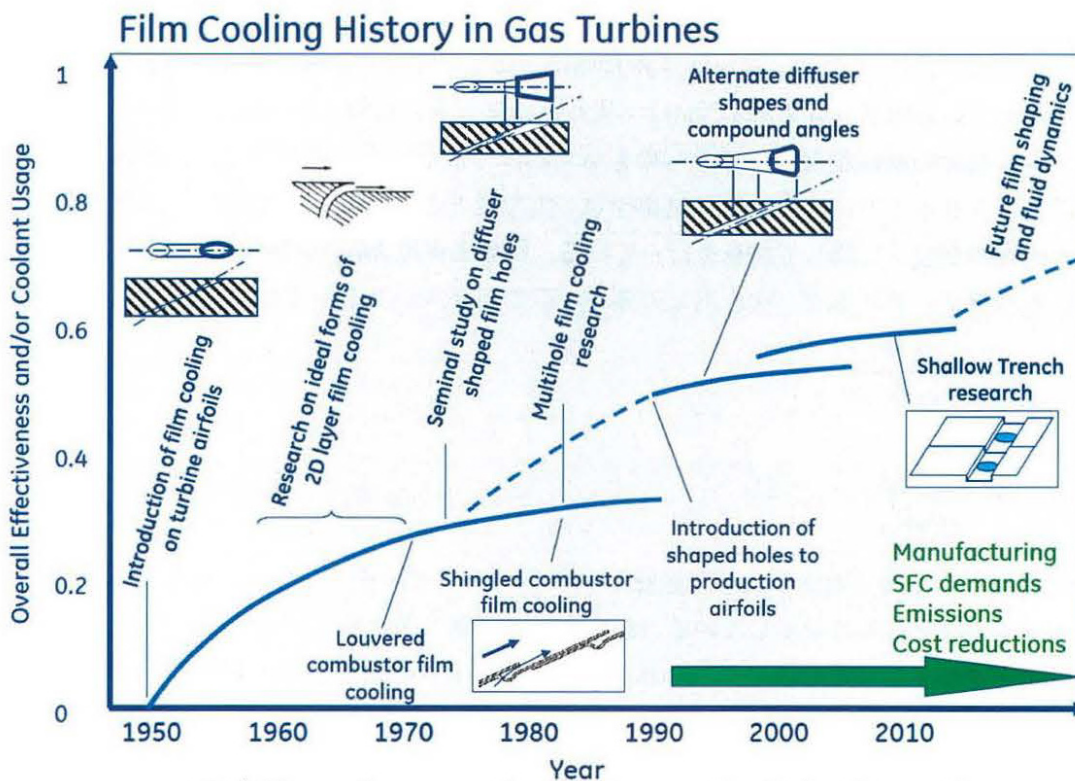
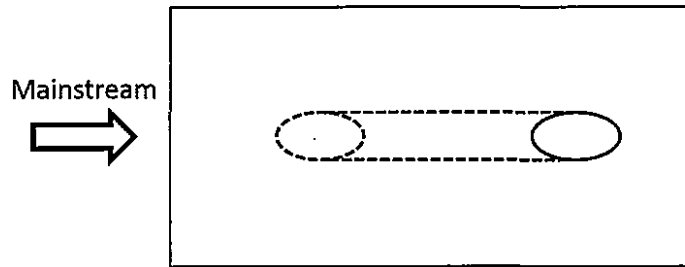


図 1.5 フィルム冷却の高性能化技術

1つ目のカテゴリーは、最も代表的であり、研究や実機のガスタービンへの適用が進んでいる流れ制御技術として、冷却孔形状を変化させる手法が挙げられる。以下には代表的な過去の研究例を示す。Lingrani ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾、Schmidt⁽⁸⁾ら、Jung ら⁽⁹⁾は冷却孔を流れ方向に対して角度を持たせる形で設置(Compound angle hole : 図 1. 6)することで、冷却効率の向上を図った。図 1. 7 には、Compound angle hole を取り付けたときのフィルム冷却効率分布を示している。結果より、 β が増加するに従って、横方向に均一な冷却が実現できていることが分かる。図 1. 8 には、冷却孔の下流領域で、空間温度場を計測した結果を示している。空間温度場の計測結果を見ると、 β の増加に従って、CRVP の渦構造が次第に崩れており、次第に付着性の高い空間温度場になっていることが分かる。これは、冷却孔に Compound angle を持たせることで、CRVP を非対称にし、冷却孔センターライン上で二次空気が lift-off する効果を低減できていることを示している。一方で、図 1. 9 には、Shaped hole⁽¹⁰⁾と呼ばれる、冷却孔出口が拡大した冷却孔形状を示す。Shaped hole は Goldstein ら⁽¹¹⁾が、最初に提案を行った流れ制御手法であり、フィルム冷却の流れ制御手法の中でも最も研究例が多い手法の一つである。Shaped hole は冷却孔出口付近の運動量が低減させることで、冷却空気が主流へ貫通する効果を低減すると共に、冷却孔がスパン方向に拡大していることにより、スパン方向に均一な冷却を実現することができる。また、冷却孔出口で発生する CRVP は Cylindrical hole と比較すると弱くなっている。Shaped hole の形状に関しては、現在も最適化研究が行われているため、決定的な形状が存在しているわけではないが、過去に研究が行われた形状に関しては Bunker⁽¹²⁾や Schroeder ら⁽¹³⁾が論文内でまとめている。一方、Shaped hole のデメリットとしては、加工コストの高さ挙げられる。Shaped hole は Cylindrical hole とは異なり、より複雑な形状を実現するためには比較的高い放電加工を行う必要があるのが現状である。Shaped hole の他には、1つの冷却孔を枝分かれさせる形にして冷却効率を上昇させる手法も提案されている。Dhungel ら⁽¹⁴⁾は、単純円筒型の冷却孔から、Antivortex hole と呼ばれる円孔を分岐させることで、冷却孔下流の熱伝達率とフィルム冷却効率の比較を試みている(図 1. 10(a))。Antivortex hole 周りの流れ場は、Yao ら⁽¹⁵⁾によって解析が行われているが、冷却孔のセンターライン上に発生する CRVP の両脇に、CRVP とは逆回転の渦を発生させることにより、冷却空気の付着性を向上させている(図 1. 10(b))。近年 LeBlanc ら⁽¹⁶⁾によって提案された、Tripod Anti-vortex Injection Holes もこれと同様の技術である。

(a) Simple angle hole



(b) Compound angle hole

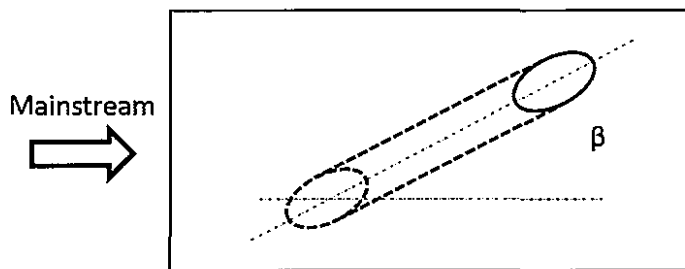


図 1.6 Compound angle hole

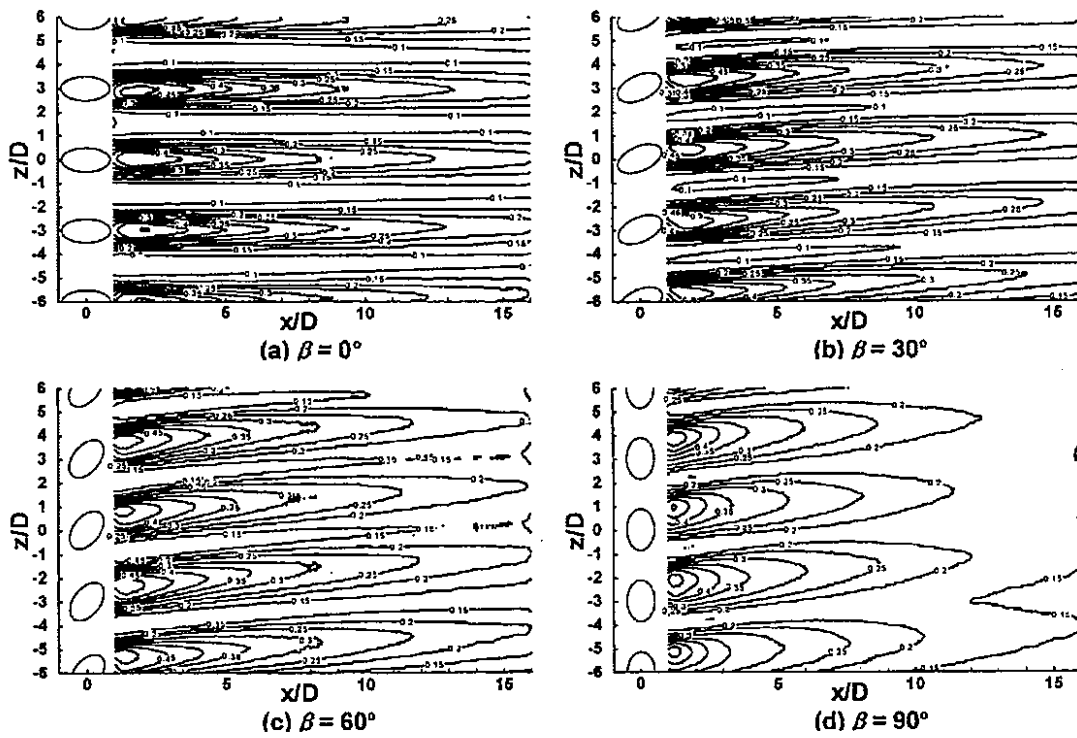


図 1.7 Compound angle hole によるフィルム冷却効率分布⁽⁹⁾

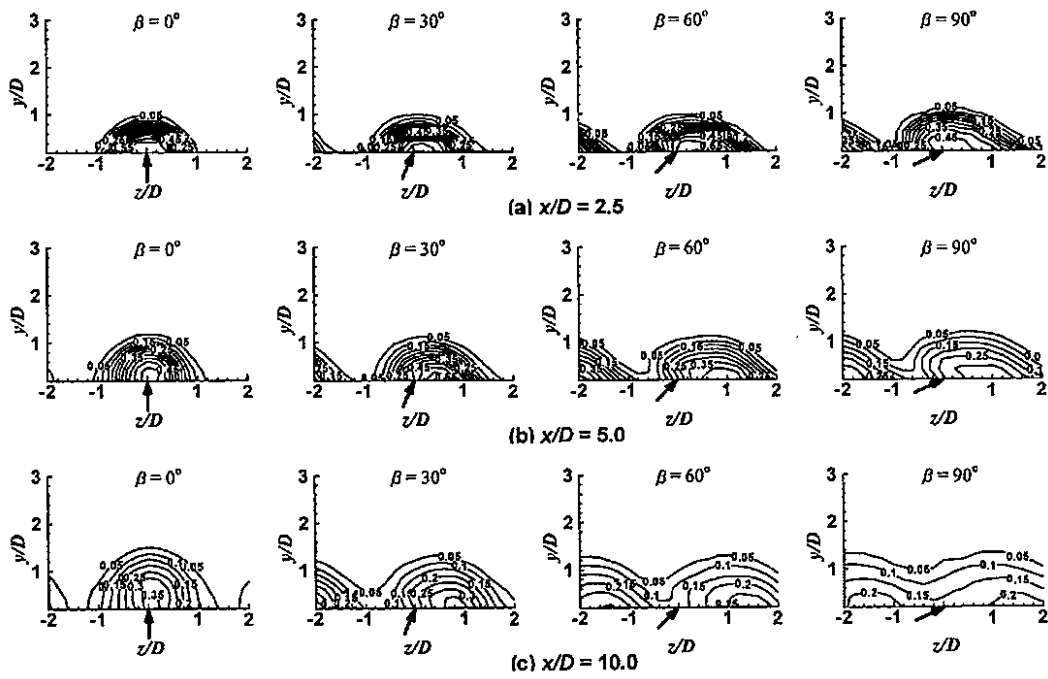


図 1.8 Compound angle hole による空間温度場⁽⁹⁾

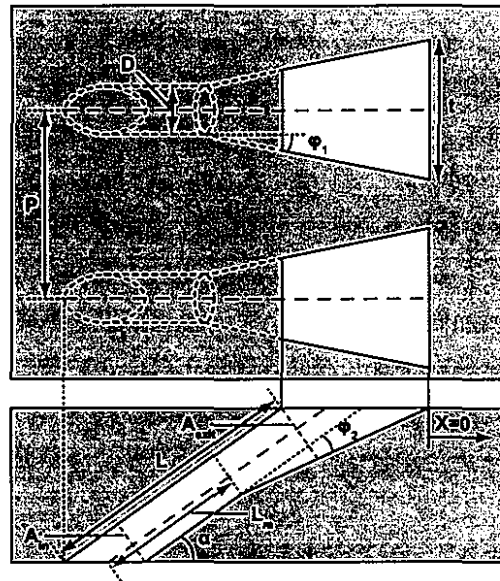


図 1.9 冷却孔形状

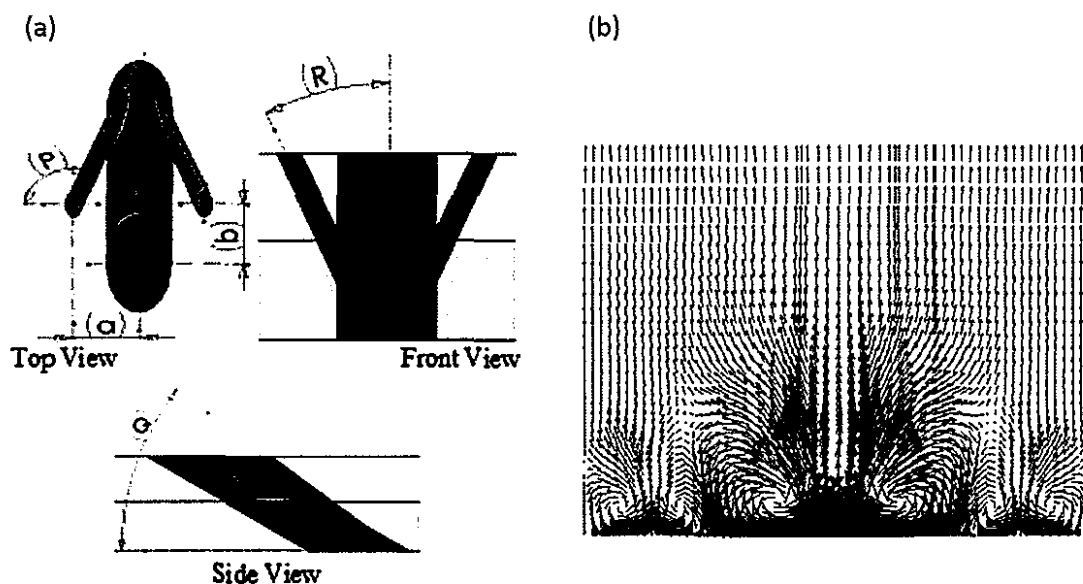


図 1.10 Antivortex hole

2つ目のカテゴリーは、冷却孔の配置を変化させ、冷却空気の干渉を利用してフィルム冷却の流れ制御を行う手法である。Ely ら⁽¹⁷⁾は、単純円筒型冷却孔の周辺に小さな冷却孔を配置し、互いに冷却空気を干渉させることで、より均一な冷却を実現することを試みた (Sister hole : 図 1.11)。また、Kusterer ら⁽¹⁸⁾や、Lee ら⁽¹⁹⁾は Compound angle hole を流れ方向に2列配置することで、冷却空気のジェットを干渉させて、流れの制御を試みた (Double jet film cooling : 図 1.12⁽¹⁸⁾)。図 1.13 には、前述の Kusterer が行った研究の中から、Double jet film cooling の流れ場を引用した図を示している。Double jet film cooling では、冷却孔の配置を工夫することにより、CRVP を発生させるのではなく、CRVP とは逆回転で、壁面に冷却空気を付着させる方向に回転する渦 (anti-kidney vortex pair) を形成させることに成功している。このように、冷却孔を複数配置することで、フィルム効率を高効率化する技術のデメリットは、複数の冷却孔を必然的に設置しなければならないということである。これは、冷却孔が互いに近いことによる構造上の問題、加工上の問題を引き起こすと考えられる。また、冷却孔の数が減らせないため、流量条件によっては、多くの冷却空気が必要になってしまう場合も考えられる。

近年、Shaped hole に対する次世代の流れ制御技術として着目されているのは、3つ目のカテゴリーである、冷却孔形冷却孔周辺の形状を変化させる手法が挙げられる。これは、冷却孔周辺の形状を変化させ、流れを制御することで、CRVP の抑制を行う技術で、上記の技術に比べると比較的最近研究が始められるようになった分野である。この技術で比較的研究がよく行われているのは、Trench と呼ばれる溝を冷却孔周辺に形成させる技術である (図 1.14)。これは、Firc ら⁽²⁰⁾が提案した円孔の出口に薄い垂直円形のカップを設けた Crater hole を拡張した技術であり、Bunker ら⁽²¹⁾によって提案が行われ、Lu ら⁽²²⁾によって、平板モデ

ルフィルム冷却を用いた詳細な研究が行われている。Trench を用いた場合、冷却空気は冷却孔出口の溝に衝突、溝内で対流する領域が発生することで、スパン方向に冷却面積を広げる効果も有している。また、Trench はこの種の技術としては比較の実用化へ向けた研究が進んでいるのが特徴であり、直線翼列へ Trench を適用した場合の調査も詳細に行われている⁽²³⁾⁽²⁴⁾。平板のみで研究が行われている例としては、Nasir ら⁽²⁵⁾が提案した Tab 付きのフィルム冷却が挙げられる。これは、冷却孔の上流に三角形の Tab (図 1.15) を取り付けることにより、フィルム冷却の流れ制御を行った研究である。また、他には例として図 1.16 に Barigozzi ら⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾が用いた Ramp 形状を示す。Ramp を用いた研究では、スパン方向にフィルム冷却効率分布が広がることや、冷却孔下流領域での空力損失が明らかになっている。Sakai ら⁽²⁸⁾らは、図 1.17 に示すように、冷却孔下流領域に三次元形状の Bump を取り付けることで、フィルム冷却性能への影響を調査している。この研究は、冷却孔の下流側の領域で CRVP の構造を制御することを試みており、冷却孔周辺の形状を三次元的に変化させた少ない研究例の一つとも言える。Frisinger⁽²⁹⁾は、タービン翼前縁モデルを用いて、冷却孔周辺に Dimple 形状 (図 1.18) を取り付けることで流れの制御を試みているが、突起形状に比べると流れ制御の効果は比較的弱く、わずかな性能の変化が Dimple によって生み出されることを示している。近年では、Shinn ら⁽³⁰⁾によって、冷却孔の下流領域に Micro-Ramp と呼ばれる三角形の構造体 (図 1.19) を設置することで、流れの制御を試みた研究例も存在する。この研究では、LES によって、流れの解析を行うことで、Micro-Ramp が CRVP の構造を変化させることを確認している。

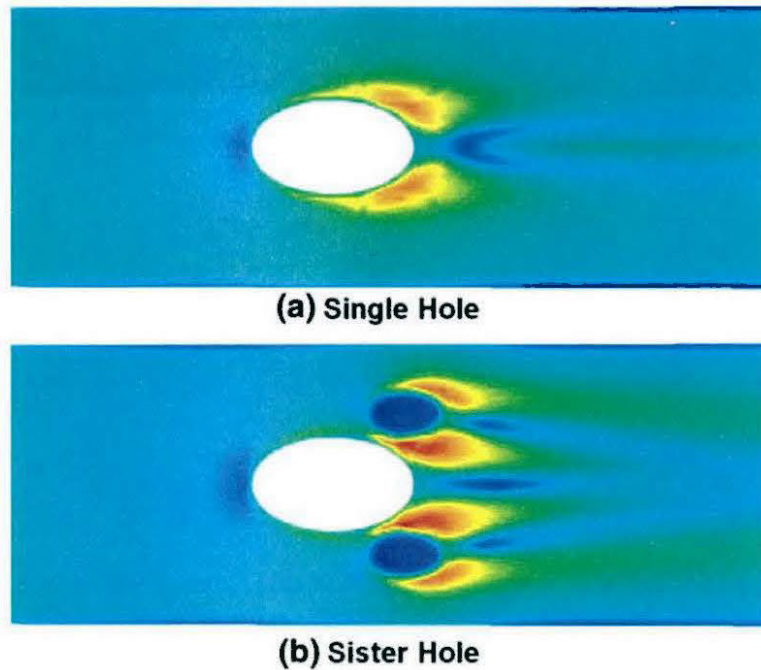


図 1.11 Sister hole film cooling

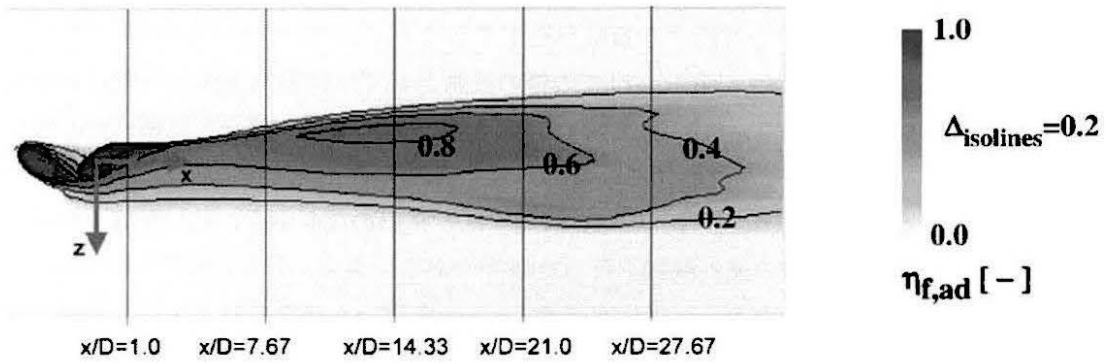


図 1.12 Double jet film cooling

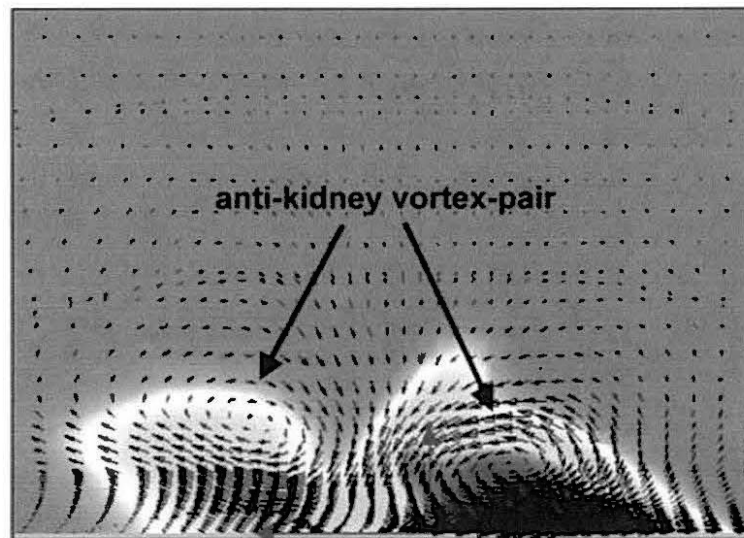


図 1.13 Double jet film cooling の流れ場

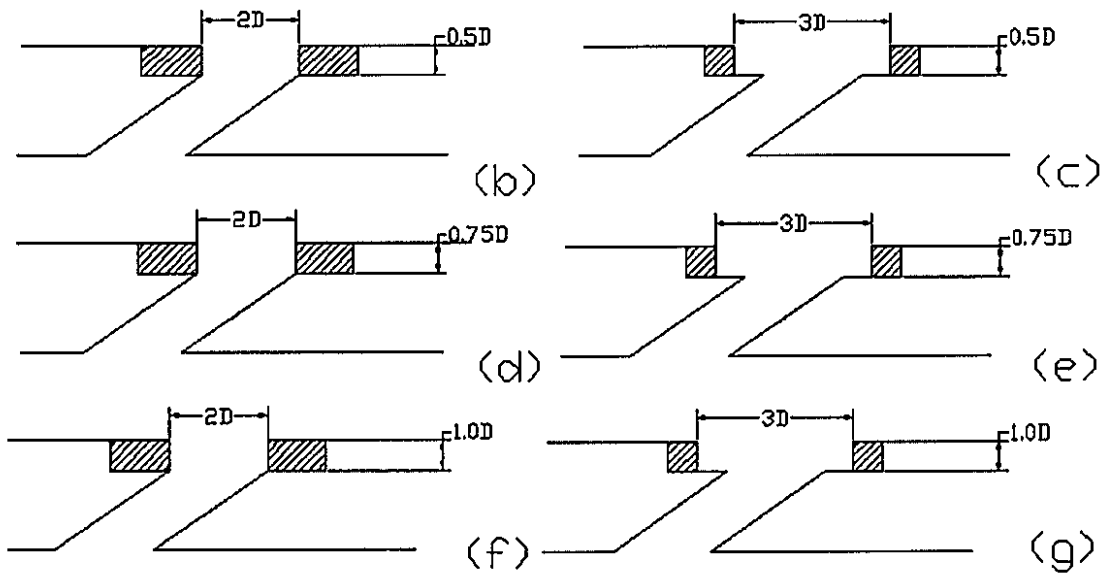


図 1.14 Trench film cooling⁽²²⁾

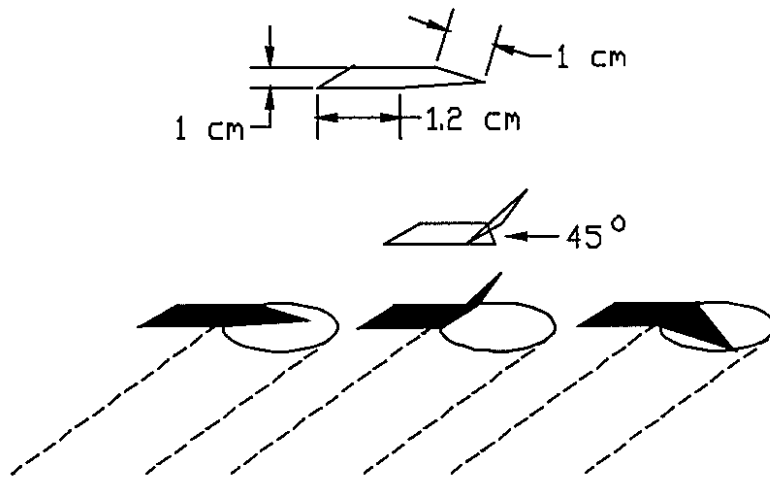


図 1.15 Tab を使用したフィルム冷却

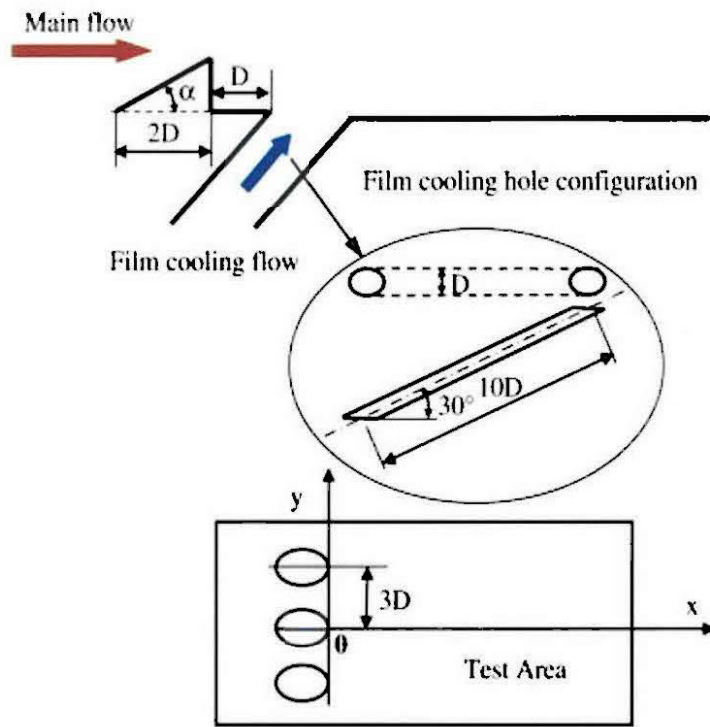


図 1.16 Upstream ramp

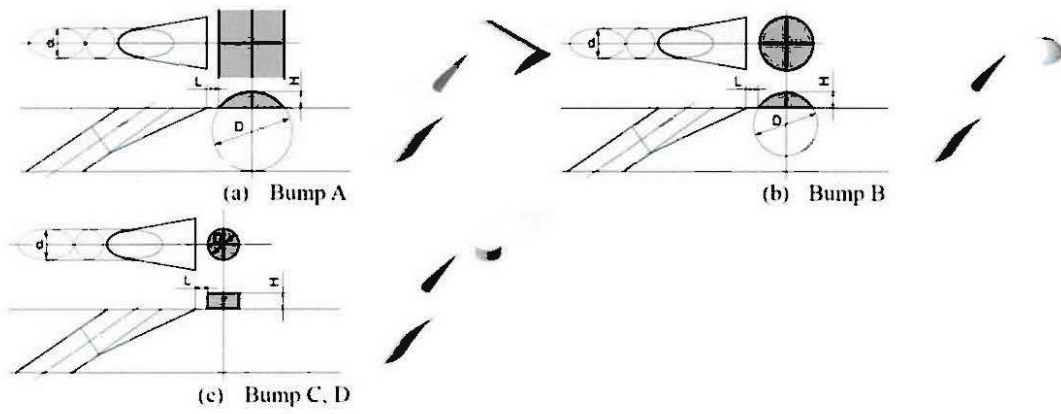


図 1.17 Downstream bump

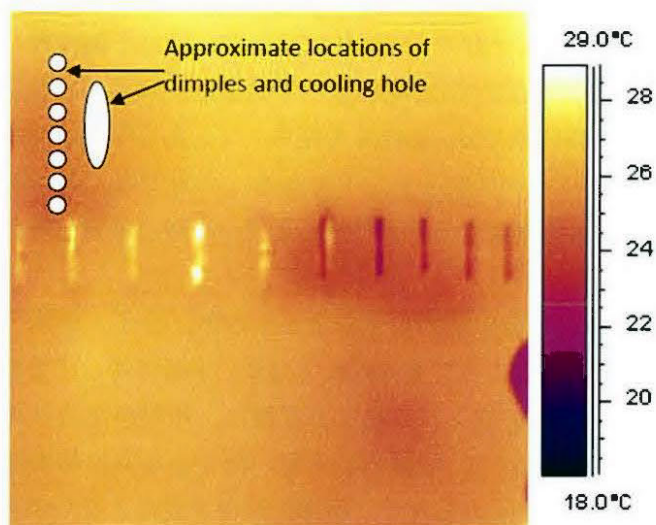


図 1.18 Dimple を用いた流れ制御

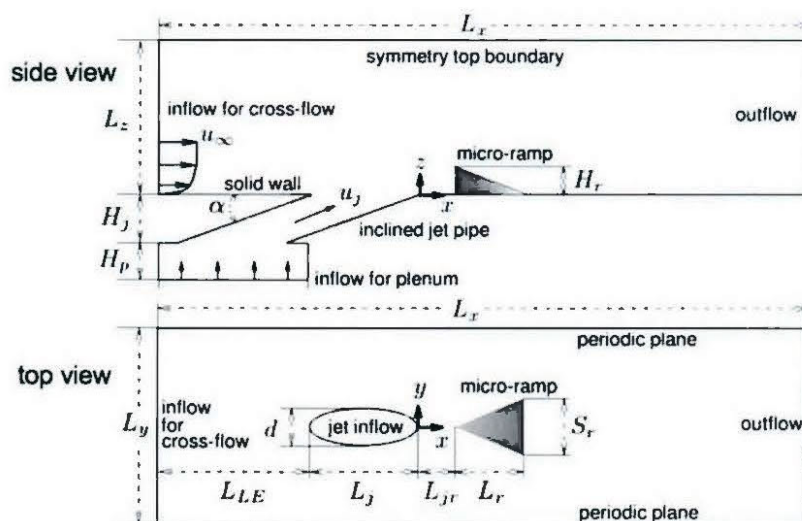


図 1.19 Micro-Ramp を用いたフィルム冷却

1.4.2 フィルム冷却の熱流体特性把握と数値解析

フィルム冷却の熱流体特性把握のために、近年数値解析が果たしている役割は大きい。以下には、フィルム冷却の数値解析に関して過去の研究動向をまとめる。フィルム冷却の数値解析の予測精度に関しては、Sakai ら⁽³¹⁾の論文にその予測精度がまとめられている。図 1.20 には、平板モデルフィルム冷却におけるフィルム冷却効率値を、(a)横方向平均、(b)センターライン上での定量値でまとめたグラフである。RANS の数値解析結果に関してみると、横方向平均値に関しては、実験値と近い値を示しているが、一方で、センターライン上のフィルム冷却効率に関しては実験値に比べると大幅に過大評価していることが分かる。こ

これは、RANS では噴流の剥離・再付着を伴う複雑な流れや、非等方性拡散への対処が難しいことが原因と考えられている。一方で、DES や LES に関しては予測精度の改善が見られる。近年のフィルム冷却の研究においては、RANS の予測精度に限界があることはよく知られた事実であるが、研究の初期段階では、RANS を使用して、ある程度定性的なフィルム冷却流れの現象解明を行うのが一つの研究トレンドである。一方では、興味深いフィルム冷却の流れに関して LES や DES を実施する⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾ことで、詳細な現象の解明を行うのもひとつの研究トレンドになっている。

数値解析の観点から流れ制御手法の研究をまとめると、まず、単純円筒型の冷却孔に関する LES 解析は、Peet ら⁽³⁵⁾によって実施されており、平面に対して垂直に空けられた円孔からの流れ場のほかに、実際のフィルム冷却と同様に、傾斜角を持った冷却孔の非定常流れに関して詳細に論じられている。単純円孔を用いたフィルム冷却の数値解析例は複数存在するのに対して、Shaped hole のような、冷却孔形状を変化させた手法に関して詳細な数値解析を行った例は、少ないのが現状であり、LES を用いた数値解析レベルの研究は 2000 年代になって行われたケースが多い。Konopka ら⁽³⁶⁾は、千鳥状に Shaped hole を配置した平板フィルム冷却の数値解析を LES を用いて詳細に行っており、圧力勾配の影響や、上流側冷却空気の干渉による流れ場を調査している。また、Shaped hole とは異なるが、Leedom⁽³⁷⁾は、Console hole に関して LES を用いた詳細な数値解析を行っている。冷却孔を枝分かれさせ、Anti-Kidney vortex を形成させる研究に関しては、Mohimen ら⁽³⁸⁾によって研究が行われた。冷却孔周辺の形状を変化させる技術に関しては、Trench hole に関しては、Renze ら⁽³⁹⁾によって LES 解析が行われており（論文内では Cavity と呼称されている）、溝形状が浅い形状に関して調査が行われている。この研究では、時間平均的に CRVP の構造が単純円筒型冷却孔と、Trench hole でどのように変化するのか示されており、Trench hole では、CRVP における渦度が低下していることが示されている（図 1.22）。

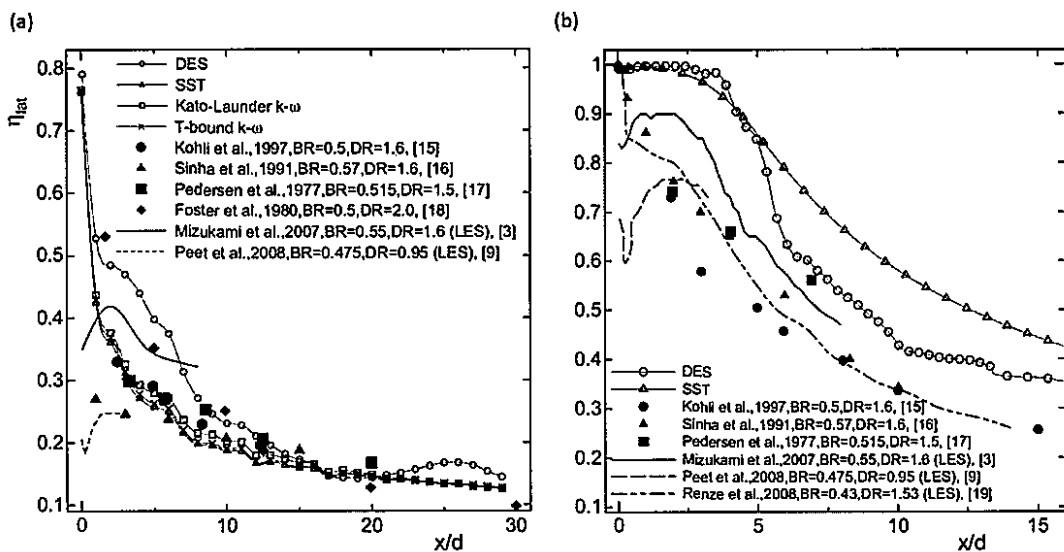


図 1.20 フィルム冷却効率の予測精度

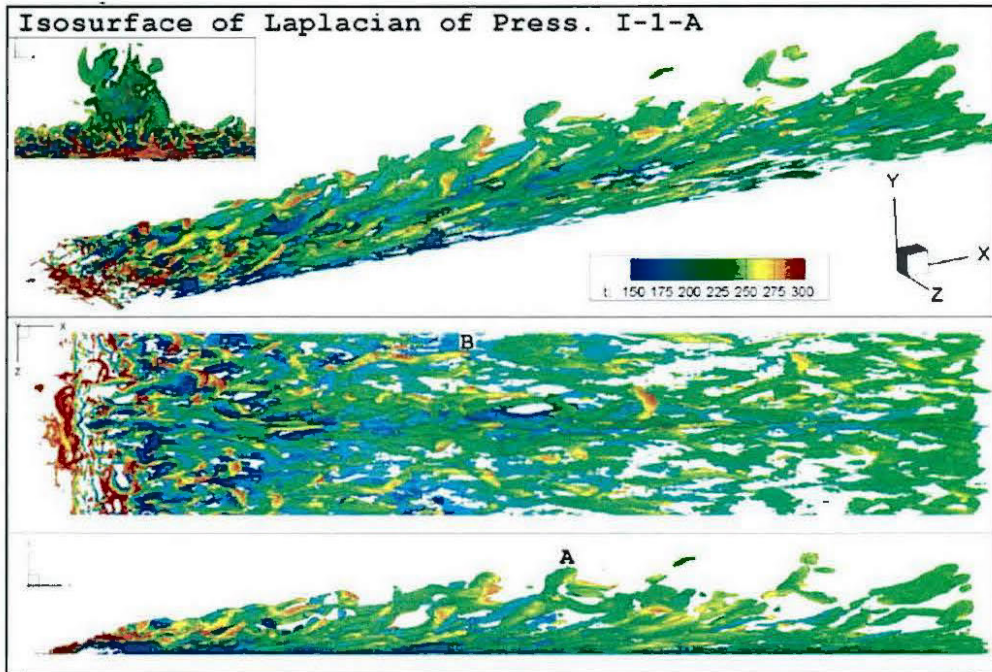


図 1.21 Console hole を用いた数値解析

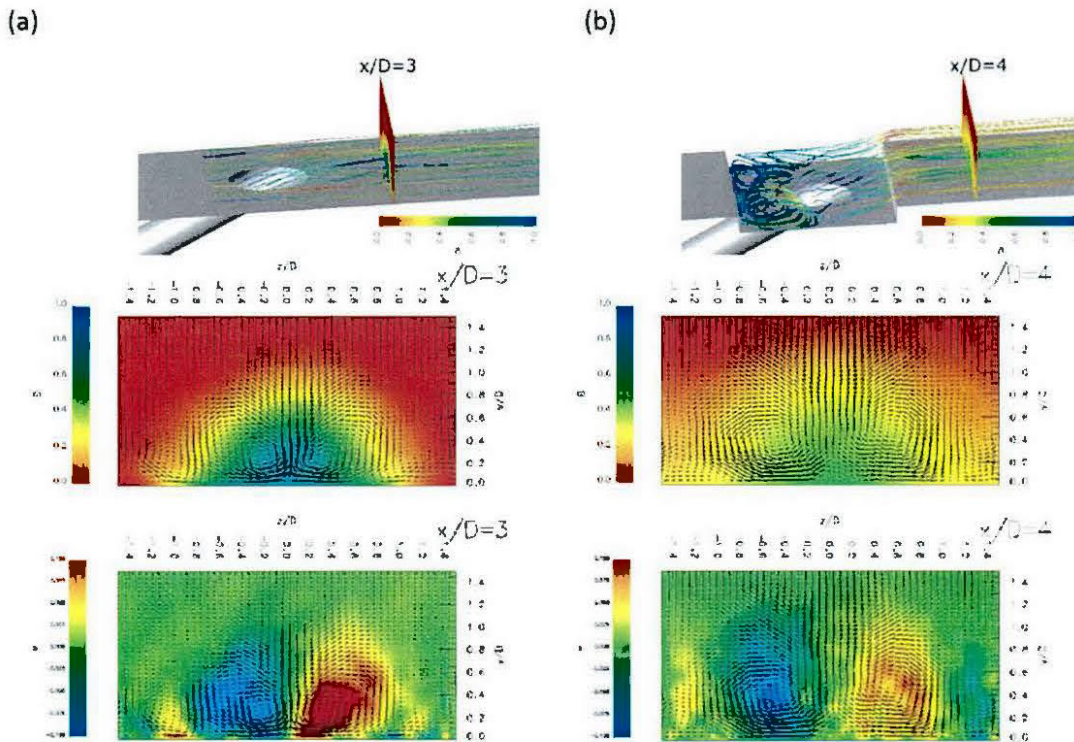


図 1.22 Trench hole 下流の時間平均流れ場

1.5 本研究の意義と目的

過去に研究が行われてきたフィルム冷却の流れ制御技術をまとめると、冷却孔の形状を変化させる技術や、冷却空気を互いに干渉させる技術は、過去の研究例が比較的多い状況である。それに伴い、流れ制御のメカニズムの解明や、三次元形状の最適化が行われている段階であり、研究は成熟期に入っている。特に、フィルム冷却の流れ制御技術として以前から研究が進められてきた Shaped hole 形状は、実用化もされていることから、今後の研究によって、着実に技術は進歩していくが、劇的なブレークスルーは望むことができないと考えられる。一方、冷却孔周辺の形状を変化させる技術に関しては、実験や数値解析による研究例が圧倒的に少なく、基本的な伝熱性能は明らかになっているものの、空力性能に与える影響や、流れ制御のメカニズムは、実験的にも、数値解析的（特に非定常計算の観点において）にも不明な点が多い。そのため、冷却孔周辺の形状は単純形態に変化させた研究しか存在しないのが現状であり、開発の余地は十分残されていると考えられる。この証拠に、Lim ら⁽⁴⁰⁾は、単純円筒型の冷却孔や、Shaped hole、Trench hole など代表的なフィルム冷却の流れ制御技術に関して、空力と伝熱性能を実験的に示している。図 1.23(a)には、各形態の熱流束低減率を示している。単純円筒型の冷却孔に比べると、流れ制御技術を適用した場合には、伝熱性能が向上しており、最大の性能を発揮するのは Shaped hole であることが分かる。一方、Trench hole は、Shaped hole と単純円筒型冷却孔の間であることが分かる。一方、図 1.23(b)には、冷却孔下流側の空力損失を示している。単純円筒型の冷却孔と比較すると、Shaped hole は形態によってロスが増加したり、減少したりする傾向が見て取れるが、Trench hole は常に単純円筒型の冷却孔の場合よりも上回っている。以上より、冷却孔周辺の形状を変化させる技術の代表格である、Trench hole でも現状では、Shaped hole を上回る空力、伝熱性能を発揮できていないことが分かる。

上記の内容を背景として、本研究の目的は、以下の通りである。

1. 冷却孔周辺の形状を変化させる流れ制御技術に関して、新しい流れ制御形状を提案する。本研究では、実験的手法と数値解析手法を用いて、“流れ制御デバイス”と呼ばれる、従来とは異なり、複雑な設計パラメータを持つ流れ制御機構を、冷却孔周辺に設置することで、フィルム冷却の高効率化を（空力・伝熱の観点から）実現する
2. フィルム冷却の伝熱性能を明らかにするだけでなく、空力性能や流れ制御のメカニズムの解明を行う
3. 流れ制御デバイスの最適化を行う
4. 流れ制御デバイスを直線翼列の翼面フィルム冷却へと応用する

1 に関しては、上記で述べたように、現状では冷却孔周辺の形状を変化させる流れ制御手法では単純円筒型の冷却孔の性能を上回ることにはできるが、Shaped hole の性能を上回ることができないため、Shaped hole よりも高い性能を発揮する流れ制御機構を開発することが主目的である。また、Shaped hole と比較するだけでなく、Shaped hole と流れ制御デバイ

スを組み合わせることで、更なる高性能化の可能性を探ることも目的である。

2に関しては、冷却孔周辺の形状を変化させた場合には、その流れ制御メカニズムが明らかになっていない場合が多いことから、実験的、数値解析的に流れ制御メカニズムを詳細に解明することを目的としたものである。本研究では、実験の特徴として、世界的に使用されているフィルム冷却の拡大モデルに比べると、さらに大きなスケールの拡大モデルを用いていることが特徴であり、冷却孔周辺の流れを高解像度で捉えることが可能である。数値解析においては、定常の計算だけでなく、非定常計算の議論を含めることで、より詳細な流れ場の解明を行うことを目的とした。

3に関しては、流れ制御デバイスの最適化を行うことで、流れ制御デバイスの性能を最大化することが最大の目標である。これに付随する目的として、本研究では、最適化自邸を実験的に検証することで最適化の予測精度を明らかにしている（詳細は後述する）。

4に関しては、応用研究として流れ制御デバイスを直線翼列の翼面フィルム冷却へ応用することを目的としている。過去の研究を見ると、冷却孔周辺の経常を変化させた技術に関しては、Trench hole のみが、平板モデル以外のフィルム冷却モデルに対して応用を行っているのが現状である。従って、冷却孔周辺の形状変化がより実機に近い流れ場に展開可能なかどうかは、議論された例がほとんど無いと言える。そこで本研究では、流れ制御デバイスを直線翼列へ応用することで、デバイスの有効性をより詳細に明らかにすると共に、同時にデバイスの弱点や課題を明らかにすることを目的としている。

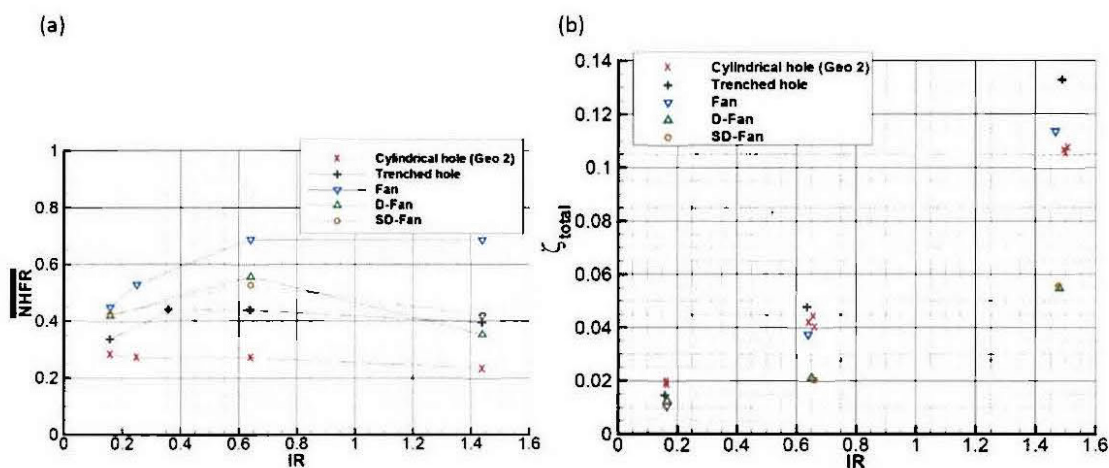


図 1.23 各冷却機構の空力伝熱性能

1.6 本論文の構成と内容

本論文の次章以降の内容は以下の通りである。

第二章では、平板モデルに流れ制御デバイスを取り付けたときの効果を実験と数値解析

によって明らかにする。本章で取り上げる流れ制御デバイスの形状は二次元的なものや、冷却孔 1 ピッチに対して 1 つの流れ制御デバイスを取り付けるなど、比較的単純形状のものについて論ずる。第二章ではこのような単純形状の流れ制御デバイスの効果を観察し、基本的な現象の把握や、三次元化した効果に関して示す。

第三章では、平板モデルに Double Flow Control Device (DFCD) と呼ばれる複雑形状の流れ制御デバイスを取り付けた時の効果を、実験と数値解析によって明らかにする。この DFCD は冷却孔に対して 2 つの流れ制御デバイスを取り付けたものであり、本論文の中でも高い性能を示す流れ制御デバイスの 1 つである。

第四章では、流れ制御デバイスの最適化に関して取り上げる。本研究では流れ制御デバイスの形状を最適化し、単に性能を調査するだけでなく、最適化手法そのものの信頼性評価を試みた。最適化手法にはタグチメソッドを用いている。

第五章では、第四章までは平板モデルに流れ制御デバイスを取り付けてきたが、より実機に近い条件を再現するために、翼面上に流れ制御デバイスを取り付けた時の効果を実験と数値解析によって明らかにする。

第 6 章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について述べる。

参考文献 (第一章)

- (1) <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/high-temp.html>
- (2) <http://geaviationservicesolutions.com/2011/02/>
- (3) Fric, T. F., Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in The Wake of a Transverse Jet". *Journal of Fluid Mech*, vol.279, pp.147.
- (4) Goldstein, R. J., 1971, "Advances in Heat Transfer", Vol.7, pp321-379, Elsevier Ltd.
- (5) Bunker, R., 2008, "Film Cooling Science and Technology for Gas Turbines", IGTI-VKI Film Cooling Workshop, ASME Turbo Expo 2009.
- (6) Lingrani, P. M., Wigle, J. M., Ciriello, S. and Jackson, S. W., 1994, "Film-Cooling From Holes With Compound Angle Orientations: Part 1—Results Downstream of Two Staggered Rows of Holes With 3d Spanwise Spacing", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.116, pp341-352.
- (7) Lingrani, P. M., Wigle, J. M., and Jackson, S. W., 1994, "Film-Cooling From Holes With Compound Angle Orientations: Part 2—Results Downstream of a Single Row of Holes With 6d Spanwise Spacing", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.116, pp353-362.
- (8) Schmidt, D. L., Sen, B. and Bogard, B. D., 1996, "Film Cooling With Compound Angle Holes: Adiabatic Effectiveness", *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.118.
- (9) Jung, I. S. and Lee, J. S., 2000, "Effects of Orientation Angle on Film Cooling Over a Flat Plate: Boundary Layer Temperature Distributions and Adiabatic Film Cooling Effectiveness", *ASME Journal of Turbo machinery*, Vol.122, pp153-160.
- (10) Colban, W. F., Thole, K. K. and Bogard, D., 2011, "A Film-Cooling Correlation for Shaped

- Holes on a Flat-Plate Surface”, ASME Journal of turbomachinery, 133(1), 011002.
- (11) Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G., and Burggraf, F., 1974, “Effects of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling,” Heat Mass Transfer, 17, pp. 595–607.
- (12) Bunker, R. S., 2005, “A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology”, ASME Journal of Heat Transfer, vol. 127, pp. 441-453.
- (13) Schroeder, R. P. and Thole, K. A., 2013, "Shaped Hole Literature Review Database," Penn State Experimental and Computational Convection Laboratory (ExCCL), <http://www.mne.psu.edu/psuturbine/>.
- (14) Dhungel, A., Lu, Y., Phillips, W., Ekkad, S. V. and Heidman, J., 2009, “Film Cooling From a Row of Holes Supplemented With Antivortex Holes”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.131.
- (15) Yao, Y., Zhang, J. and Yang, Y., 2013, “Numerical Study on Film Cooling Mechanism and Characteristics of Cylindrical Holes with Branched Jet Injections”, Propulsion and Power Research, Vol.2, pp30-37.
- (16) LeBlanc, C., Narzary, D., Ekkad, S.V., Alvin, M.A., 2012, “Performance of Tripod Anti-vortex Injection Holes on Vane Film Cooling”, ASME Summer Heat Transfer Conference 2012, Puerto Rico, July 7-12, HT2012-58135.
- (17) Ely, M. J. and Jubran, B. A., 2009, “A Numerical Evaluation on The Effect of Sister Holes on Film Cooling Effectiveness and The Surrounding Flow Field”, Heat and Mass Transfer, Vol.56, pp1435-1446.
- (18) Kusterer, K., Bohn, D., Sugimoto, T. and Tanaka, R., 2006, “Double-Jet Ejection of Cooling Air for Improved Film Cooling”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.129, pp809-815.
- (19) Lee, K. D., Choi, D. W. and Kim, K. W., 2013, Optimization of Ejection Angles of Double-Jet Film-Cooling Holes Using RBNN model, Journal of Thermal Sciences, Vol.73. pp69-78.
- (20) Fric, T.F. and Campbell, R.P., 2002, “Method for Improving the Cooling Effectiveness of a Gaseous Coolant Stream Which Flows Through a Substrate, and Related Articles of Manufacture”, US Patent No. 6,383,602.
- (21) Bunker, R.S., 2002, “Film Cooling Effectiveness Due to Discrete Holes Within a Transverse Surface Slot” Paper GT-2002-30178, IGTI Turbo Expo, Amsterdam, Netherlands.
- (22) Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, S. V. and Bunker, R., 2007, “Effect of Trench Width and Depth on Film Cooling from Cylindrical Holes Embedded in Trenches”, ASME Turbo Expo2007, GT2007-27388.
- (23) Davidson, F. T., Kistenmacher, D. A. and Bogard, D., 2013, “Film Cooling With a Thermal Barrier Coating: Round Holes, Craters, and Trenches”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.136, TURBO-13-1075.
- (24) Kistenmacher, D., Davidson, F. T. and Bogard, D., 2014, “Realistic Trench Film Cooling With a

- Thermal Barrier Coating and Deposition”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.136, TURBO-13-1166.
- (25) Nasir, H., Acharya, S. and Ekkad, S., 2002, “Improved Film Cooling from Cylindrical Angled Holes with Triangular Tabs: Effect of Tab Orientations”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.24, pp657-668.
- (26) Barigozzi, G., Franchini, G., and Perdichizzi, A., 2007, “The Effect of An Upstream Ramp on Cylindrical and Fan-Shaped Hole Film Cooling – Part1: Aerodynamic Results”, ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27077.
- (27) Barigozzi, G., Franchini, G., and Perdichizzi, A., 2007, “The Effect of an Upstream Ramp on Cylindrical and Fan-Shaped Hole Film Cooling – Part2: Adiabatic Effectiveness Result”, ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27077.
- (28) Sakai, E., Takahashi, T., Funazaki, K., Salleh, H.B. and Watanabe, K., 2009, “Numerical Study on Flat Plate and Leading Edge Film Cooling”, ASME Turbo Expo2009, GT2009-59517.
- (29) Frisinger, P. G., 2009, “An Experimental Investigation Studying the Influence of Dimples on a Film Cooled Turbine Blade Leading Edge”, Presented to the Faculty Department of Aeronautics and Astronautics Graduate School of Engineering and Management Air Force Institute of Technology.
- (30) Shinn, A. F. and Vanka, S. P., 2011, “Large Eddy Simulations of Film-Cooling Flows with A Micro-Ramp Vortex Generator”, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2011-65267.
- (31) Sakai, E., Takahashi, T., Funazaki, K., Salleh, H. B. and Watanabe, K., 2009, “Numerical Study on Flat Plate and Leading Edge Film Cooling”, ASME Turbo Expo2009, GT2009-59517.
- (32) Renza, P., Schroder, W. and Meinke, M., 2008, “Large-eddy Simulation of Film Cooling Flows with Variable Density Jets”, Flow Turbulence Combustv Vol.80, pp119-132.
- (33) Rozati, Ali. and Tafti, K., 2007, “Large Eddy Simulation of Leading Edge Film Cooling Part-1: Computational Domain and Effect of Coolant Pipe Inlet Condition”, ASME Turbo Expo2007, GT2007-27689.
- (34) Rozati, Ali. and Tafti, K., 2007, “Large Eddy Simulation of Leading Edge Film Cooling Part-1: Heat Transfer and Effect of Blowing Ratio”, ASME Turbo Expo2007, GT2007-27690.
- (35) Peet, Y. V., 2006, “Film Cooling From Inclined Cylindrical Holes Using Large Eddy Simulations”, Ph.D. dissertation, Stanford University.
- (36) Konopka, M., Jessen, W., Meinke, M. and Schroder, W., 2012, “Large-Eddy Simulation of Film Cooling in an Adverse Pressure Gradient Flow”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.135, 031031.
- (37) Leedom, D. H., 2009, “Numerical Investigation of Film Cooling Fluid Flow and Heat Transfer Using Large Eddy Simulations”, Master. dissertation, Louisiana State University.

- (38) Mohimen, A., 2013, "LES of Turbulent Mixing In Anti-Vortex Film Cooling Flows", International Journal of Multidisciplinary and Current Reserch, ISSN2321-3124.
- (39) Renze, P., Schroder, W. and Meinke, M., 2008, "Large-Eddy Simulation of Film Cooling Flow Ejected in a Shallow Cavity", ASME Turbo Expo2008, GT2008-50120.
- (40) Lim, C. H., Pullan, G. and Ireland, P., 2013, "Influence of Film Cooling Hole Angles and Geometries on Aerodynamic Loss and Net Heat Flux Reduction", ASME Turbo Expo2011, GT2011-45721.

