

目 次

第 I 部 基礎編	1
第 1 章 流体力学とデータ同化	3
1.1 数値流体力学と実験流体力学	3
1.2 データ同化の可能性	4
1.3 計測データを用いた流れ場の再現	8
1.4 CFD モデルの改善	10
1.5 CFD に基づく計測の最適化	12
1.6 EFD/CFD 統合データベース	14
1.7 CFD におけるデータ同化の課題	15
1.8 おわりに	16
第 2 章 データ同化理論の導入	17
2.1 状態空間モデルの構成	18
2.2 ベイズの定理とそのいくつかの実装	19
2.2.1 スカラー変数のシステムモデル	21
2.2.2 逐次型ベイズ推定	23
2.2.3 変分型ベイズ推定	26
2.2.4 サンプリング型ベイズ推定	31
2.3 逐次型データ同化手法	33
2.3.1 アンサンブルカルマンフィルタ	33
2.3.2 粒子フィルタ	39

x 目 次

2.4	変分型データ同化手法	41
2.4.1	4次元変分法	41
2.4.2	3次元変分法	46
2.5	サンプリングに基づくベイズ推定	48
2.5.1	マルコフ連鎖モンテカルロ法	48
2.6	関連手法との比較	50
2.6.1	逆問題とデータ同化	50
2.6.2	制御とデータ同化	52
2.6.3	最適化とデータ同化	53
2.6.4	手法比較のまとめ	54
2.7	おわりに.	54

第3章 数値流体力学の導入 57

3.1	CFD の概要	57
3.2	CFD の具体例	59
3.2.1	2次元非圧縮性流体の支配方程式	59
3.2.2	ナビエ・ストークス方程式の離散化	61
3.2.3	計算領域と境界条件の設定	66
3.2.4	CFD 解析の流れと計算結果	67
3.3	データ同化から見た流体計測	72
3.4	数値シミュレーションと計測データの不確かさ	74
3.5	おわりに.	77

第4章 流体现象の逐次型データ同化 81

4.1	アンサンブルカルマンフィルタの準備	81
4.1.1	システムモデル	81
4.1.2	観測モデル	83
4.1.3	アンサンブルカルマンフィルタ	85
4.1.4	双子実験 (数値実験)	88
4.2	周期的な流れ場の推定	89

4.2.1	データ同化の問題設定	89
4.2.2	推定された流れ場の様子	91
4.2.3	データ同化パラメータの影響	94
4.2.4	アンサンブルの生成方法	95
4.3	過渡的な流れ場の推定	104
4.3.1	データ同化の問題設定	104
4.3.2	推定された流れ場の様子	107
4.3.3	アンサンブルカルマンフィルタの工夫	108
4.3.4	アンサンブルカルマンスムーザ	115
4.4	おわりに	117

第5章 流体现象の変分型データ同化 119

5.1	4次元変分法の準備	120
5.1.1	システムモデル	120
5.1.2	観測モデル	120
5.1.3	4次元変分法	121
5.2	アジョイントコードの実際	122
5.2.1	アジョイントコードとは	122
5.2.2	アジョイントコードの構築	125
5.2.3	線形コードおよびアジョイントコードの検証	137
5.2.4	評価関数の最小化手法	141
5.3	周期的な流れ場の推定	142
5.3.1	データ同化の問題設定	142
5.3.2	推定された流れ場の様子	143
5.3.3	データ同化サイクル	148
5.4	過渡的な流れ場の推定	149
5.4.1	データ同化の問題設定	149
5.4.2	推定された流れ場の様子	149
5.4.3	同化ウィンドウを長くするための工夫	154
5.4.4	背景誤差項の効果	156
5.5	おわりに	159

第6章	データ同化の高速化	161
6.1	次元縮約モデル	161
6.1.1	流れ場の固有直交分解	161
6.1.2	次元縮約モデルの構築	165
6.1.3	固有直交分解を用いたアンサンブル生成	169
6.2	代替モデル	170
6.2.1	応答曲面法	170
6.2.2	ガウス過程回帰	171
6.2.3	マルコフ連鎖モンテカルロ法による移流渦の推定	172
6.2.4	アンサンブルカルマンフィルタとガウス過程回帰	174
6.3	おわりに	178
第II部	応用編	181
第7章	計測システムの改善	183
7.1	システムモデル	184
7.2	データ同化の問題設定	185
7.3	4次元変分法を用いた計測点の追加	188
7.4	可観測性グラム行列を用いた計測点の追加	190
7.5	最適計測システムの例	192
7.6	おわりに	194
第8章	乱流モデルの高度化	197
8.1	はじめに	197
8.2	データ同化手法	202
8.2.1	拡大状態空間モデル	203
8.2.2	システムモデル	204
8.2.3	観測モデル	206
8.2.4	アンサンブル変換カルマンフィルタ	206

8.2.5	データ同化の流れ	209
8.3	データ同化結果とその検証	210
8.3.1	データ同化による a_1 の推定結果	210
8.3.2	推定した a_1 の妥当性確認	212
8.4	おわりに.	218
第9章	航空気象への応用	221
9.1	はじめに.	221
9.2	航空機の運航に関連する乱気流	222
9.3	研究背景と目的	225
9.4	使用するデータセット	226
9.5	解析の流れ	227
9.6	フライトデータを用いた解析	231
9.6.1	アンサンブル予報の精度評価	231
9.6.2	事例解析	232
9.6.3	データ同化結果の評価	233
9.7	おわりに.	236
付録	データ同化のプログラム	239
A.1	プログラム実行環境の整備	239
A.2	アンサンブルカルマンフィルタのプログラム	240
A.3	4次元変分法のプログラム	240
あとがき		243
参考文献		244
索引		252