

逆問題のコンピュータ解析手法と
その応用に関する研究

1994年3月
中村正行



逆問題のコンピュータ解析手法と その応用に関する研究

1994 年 3 月

中 村 正 行

論文要旨

計測値などの系の応答や既知情報に基づいて、未知な入力や物性値または構造等を推定する問題や、要求仕様を実現するような形状や境界条件を決定する問題は逆問題と呼ばれ、非破壊検査、システム同定、材料定数同定、設計問題など広い分野に関連した重要な課題である。近年、種々の問題を逆問題としてとらえ、計算力学的手法を援用して解決しようとするアプローチが数多くなされている。この背景には急速に発展し実用段階にある数値解析手法や、高精度で大量のデータ収集が可能となった計測技術への期待が挙げられる。

逆問題は未知量を規定するために適切な量の有効な情報が与えられていなかったり、与えられる情報に含まれる誤差により、得られる結果が大きく影響を受ける困難点を有する不適切な問題である。したがって、なんらかの適切化を行って解の安定性や信頼性を高めることが必須となる。各種の適切化を用いた逆解析手法が提案されているが、現時点では個々の問題に対して適用方法を検討し対処しているのが現状である。逆問題解析においては、対象を数理モデルとして扱い、未知量に関する連立方程式を測定値等を条件として解く手法や、境界要素法や有限要素法などにより解析した計算結果と測定値との差を最小にするように解を求める手法が採用されることが多く、数値解析手法の適用方法を検討する必要がある。また、逆解析手法の研究には実際のデータをを用いた検討も重要であるが、条件設定の困難さやコストの面から可能な項目には限界がある。このため、種々の検討はコンピュータ上の数値シミュレーションを用いることが効果的である。数値シミュレーションでは境界条件や物性値、領域形状などの実験条件が容易に設定可能である。さらに、不適切性に関連して重要となる各種の誤差に対する検討が行える。

本研究では、上述の背景を念頭に置き、逆問題解析の数値シミュレーション技術を確立することを目標とした。逆問題解析は対象とする分野が広大であるため、こ

応用分野が広く実用上重要なものに焦点を絞った。研究目標に対して以下の内容において研究を進めた。本論文では、まず研究の目的と背景について第1章で説明し、問題の定義と逆問題解析の特徴および現状について述べる。第2章では本研究で対とする動弾性問題と非定常熱伝導問題における逆問題について、問題の設定と実用の応用分野についてまとめる。

第3章では、共役勾配法と境界要素法を用いた逆解析手法と、拡張カルマンフィルアルゴリズムと境界要素法を用いた逆解析手法の二つについて説明する。逆問題において重要な適切化に関連して、本研究で採用した未知パラメータの関数近似法と、報の取扱い方法について述べる。複数実験により情報を補う手法や、感度を用いて効な情報を選択する手法および遺伝的アルゴリズムによる逆解析手法について述べそして、動弾性問題と非定常熱伝導問題の境界要素解析法について述べる。

第4章から第6章には、逆解析手法を例題に適用した数値シミュレーション結果を示

第4章では、欠陥同定逆問題の解析を行い、単一欠陥やき裂の同定結果、遺伝的レゴリズムを用いた逆解析による複数欠陥の同定結果を示す。また、情報の付加手であるマルチ加振法の適用結果と有効性、および感度を用いた情報選択手法の有効と示し、誤差による影響の検討結果も示す。第5章では、境界値同定逆問題として、単性問題における未知変位分布や表面力分布の同定結果と、非定常温度場において早上の未知温度分布や熱伝達率分布の同定を行った結果を示している。さらに、最設計問題への適用例として、非定常温度場における温度境界値設計の例題を解析し結果を述べる。第6章では、動弾性逆解析による弾性体の材料定数の同定や、熱伝と解析により温度場の熱物性値を同定する物性値同定逆問題の解析結果を示す。

第7章では、逆問題解析上の諸問題と留意点について論じる。第4章から第6章に示に逆解析の数値シミュレーション結果について考察し、逆解析上の問題点を指摘すとともに、有効な解析結果を得るうえでの留意事項を整理する。ここでは、逆解析における適切化の解釈を与え、未知量に対する情報の感度と情報選択の有効性、量との関係について考察を加える。さらに、測定誤差の影響に関して考察する。こ、モデリングの問題を整理し遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析手法の有効性とについて述べる。それに関連して、初期仮定値の問題と収束判定について考察す

情報の質や量などの検討に関連して、最適化手法による逆解析手法とフィルタ理による逆解析手法の二つを比較しそれらの特徴についてまとめる。最後に第8章において、研究の概要と得られた知見をまとめ、結論および今後の展望について述べる。本研究では、提案した逆解析手法と適用上の工夫を組み込んだ一連の逆解析プログラムを完成し、数多くの逆問題解析を行って得られた結果について考察した。その結果研究目標を達成することができたと考えられる。

謝 辞

本研究は、筆者が1988年3月信州大学工学部に赴任以来、教育研究業務の一環として行われたものである。ここに本論文を著すにあたり、まず、同大学の関係各位に深く感謝申し上げます。田中正隆教授には、研究の緒端から終始変わらぬ熱意をもって研究全般に関するご指導、ご鞭撻を賜わり心から謝意を表します。生産システム工学科教職員の方々には、本研究を遂行する機会を賜わると共に、温かいご指導と励ましの言葉をいただき感謝いたします。数値力学講座の松本敏郎助教授には、研究内容に対し貴重なご助言をいただき心から感謝いたします。同講座事務の中澤よし子さん、元事務の飯島みゆきさんには、研究遂行中の諸事に対し補助をしていただき感謝いたします。

田中正隆教授、松田安弘教授、小林光征教授、後藤克也教授には本論文の審査をしていただき、有益なご討論、ご助言を賜わりました。厚く御礼申し上げます。

さらに、久保司郎大阪大学教授をはじめとする日本機械学会調査研究分科会 P-SC220の委員諸氏には、本研究の遂行過程において貴重なコメントを賜わり、ここに記して謝意を表します。

長野県精密工業試験場および同工業試験場には、研究指針を得るうえでの測定機借用の便ならびに貴重なるご助言をいただき、心から感謝いたします。

最後に、信州大学大学院工学系研究科生産システム工学専攻博士前期課程修了生、中野隆志、青樹和彦、石川尚男、落合良、嘉数年倫の諸氏、同博士前期課程院生、塩崎明、安達治、宇佐美徹之、花岡誠之の諸氏には研究に直接御協力いただき、感謝申し上げます。

1994 年 3 月

中 村 正 行

目 次

論文要旨	iii
謝 辞	v
目 次	vii
1. 緒 言	1
1.1 研究の目的	1
1.2 逆問題について	2
1.3 研究内容および論文の構成	8
第1章の参考文献	10
2. 逆 問 題	19
2.1 はじめに	19
2.2 動弾性逆問題	19
2.3 非定常熱伝導逆問題	22
2.4 まとめ	25
第2章の参考文献	26
3. 逆問題解析手法	29
3.1 はじめに	29
3.2 最適化手法の適用	29
3.2.1 最適化手法による逆解析	29
3.2.2 未知量の近似	31
3.2.3 共役勾配法	40
3.2.4 1次元探索	43

3.2.5	収束判定	45
3.2.6	最適化手法を用いた逆解析の手順	46
3.3	カルマンフィルタ理論の適用	48
3.3.1	拡張カルマンフィルタの理論	48
3.3.2	拡張カルマンフィルタを用いた逆解析手法	53
3.3.3	フィルタ理論を適用した逆解析の手順	55
3.3.4	拡張カルマンフィルタアルゴリズムにおける収束判定	55
3.4	情報の付加と選択手法	57
3.4.1	複数実験による情報の付加	57
3.4.2	感度を利用した情報選択	59
3.5	遺伝的アルゴリズムの適用	61
3.5.1	遺伝的アルゴリズムについて	61
3.5.2	遺伝的アルゴリズムによるモデルパラメータの決定法	62
3.5.3	遺伝的アルゴリズムにおける処理手順	64
3.5.4	遺伝的アルゴリズムを適用した欠陥同定法	68
3.6	動弾性問題の境界要素解析法	70
3.6.1	動弾性問題の支配微分方程式	70
3.6.2	境界積分方程式の導出	73
3.6.3	境界積分方程式の離散化	76
3.6.4	領域分割法	78
3.7	非定常熱伝導問題の境界要素解析法	81
3.7.1	非定常熱伝導問題の支配微分方程式	81
3.7.2	境界積分方程式の導出	84
3.7.3	境界積分方程式の離散化	85
3.7.4	内点温度の計算	86
3.8	まとめ	86
	第3章の参考文献	88
4.	欠陥同定逆問題の解析	91
4.1	はじめに	91
4.2	単一欠陥の同定	92
4.2.1	2次元数値シミュレーションモデル	92
4.2.2	円形欠陥の同定結果	92
4.2.3	だ円形欠陥の同定結果	97

4.2.4	感度を用いてデータを選定した場合の欠陥同定結果	99
4.2.5	逆解析手法の比較	99
4.3	初期仮定値に関する検討	104
4.4	測定データ数による同定への影響	106
4.5	3次元問題における欠陥同定	107
4.5.1	3次元数値シミュレーションモデル	107
4.5.2	空洞欠陥の同定結果	109
4.6	複数欠陥の同定	116
4.6.1	初期仮定値を任意に設定した場合の同定結果	116
4.6.2	遺伝的アルゴリズムを適用した場合の同定結果	120
4.7	き裂の同定	129
4.7.1	2次元問題におけるき裂の同定結果	129
4.7.2	3次元問題における表面き裂の同定結果	136
4.8	温度データを用いた欠陥の同定結果	140
4.9	測定誤差の影響	146
4.9.1	測定値の誤差について	146
4.9.2	欠陥位置同定における誤差の影響	147
4.9.3	欠陥形状同定における誤差の影響	150
4.9.4	初期仮定に関する検討	153
4.9.5	同定精度の改善方法	154
4.9.6	3次元問題における検討	155
4.10	まとめ	158
	第4章の参考文献	159
5.	境界値同定逆問題の解析	161
5.1	はじめに	161
5.2	定常振動する弾性体の未知境界値同定	162
5.2.1	境界値同定問題のシミュレーションモデル	162
5.2.2	表面力分布の同定結果	164
5.2.3	変位分布の同定結果	166
5.2.4	表面力分布と変位分布の同時同定の結果	168
5.2.5	拡張カルマンフィルタ逆解析による変位分布の同定結果 ..	171
5.2.6	近似関数と同定結果の検討	172
5.3	未知欠陥と境界値の同時同定	175

5.4	非定常熱伝導場における未知境界値の推定	181
5.4.1	時間的に変化する未知温度境界値の推定結果	181
5.4.2	時間的空間的に変化する未知境界値の推定結果	192
5.4.3	未知境界値の推定における測定誤差の影響	200
5.5	対流境界値の推定	204
5.5.1	熱伝達率分布推定における誤差と測定位置に関する検討 ..	204
5.5.2	関数近似による熱伝達率分布の推定	211
5.5.3	熱伝達率分布推定における二つの逆解析手法の比較	214
5.5.4	熱伝達率分布と外部雰囲気温度分布の同時推定結果	217
5.5.5	誤差を含む測定データからの熱伝達率分布の推定	223
5.6	非定常熱伝導場における最適設計問題の解析	235
5.6.1	非定常温度場における最適設計問題	235
5.6.2	逆解析手法の最適設計問題への適用	235
5.6.3	逆解析手法を用いた最適設計問題の解析結果	237
5.6.4	逆解析による最適設計結果に関する考察	246
5.7	まとめ	248
	第5章の参考文献	249
6.	物性値同定逆問題の解析	253
6.1	はじめに	253
6.2	弾性体の物性値同定	254
6.2.1	材料定数の同定結果	254
6.2.2	調和加振力の振動数による同定結果への影響	257
6.2.3	二つの逆解析手法による材料定数同定結果の比較	258
6.3	熱物性値の同定	260
6.3.1	熱伝導率の同定結果	260
6.3.2	熱伝導率と比熱の同時同定結果	263
6.3.3	誤差による熱伝導率同定結果への影響	265
6.4	まとめ	267
	第6章の参考文献	268
7.	逆問題解析上の諸問題と留意点	271
7.1	はじめに	271
7.2	不適切性と適切化	272

7.2.1 適切化手法	272
7.2.2 情報量	273
7.2.3 情報の種類と質	273
7.2.4 情報の選択	274
7.2.5 未知量の関数近似	274
7.3 測定誤差の影響	275
7.3.1 逆解析手法と測定誤差	275
7.3.2 残差の無次元量について	276
7.4 モデリングの問題	280
7.5 初期仮定値および収束判定	281
7.6 2種類の逆解析手法の特徴	281
7.7 まとめ	284
第7章の参考文献	285
8. 結 言	289
8.1 研究の概要	289
8.2 結論	291
8.3 今後の展望	292
第8章の参考文献	294
付 録	299
付録A. 境界要素による離散化	299
A.1 2次アイソパラメトリック境界要素による離散化	299
A.2 3次元定常動弾性問題解析プログラムにおける離散化	302
付録B. 数値ラプラス逆変換	307
B.1 数値ラプラス逆変換法	307
B.2 Durbinの方法	307
B.3 細野の方法	308
B.4 Durbinの方法と細野の方法を組合わせた逆変換手法	309
付録の参考文献	310
発表論文	313

