メタヒューリスティクス最適化を用いた
マスコンクリート温度応力解析入力パラメータの同定

Parameter Identification for Thermal Stress Analysis of Mass Concrete Using Metaheuristic Optimization

2026 年 9 月

松 浦　好 宏

山口大学 大学院 創成科学研究科

学位論文の要旨

マスコンクリート構造物において、温度ひび割れの発生は耐久性の低下や維持管理費の増大を招く重要な問題であり、設計・施工段階における適切な予測と対策が求められている。温度ひび割れの予測には、温度解析、湿気移動解析および応力解析を組み合わせた温度応力解析が広く用いられているが、解析結果は断熱温度上昇特性や湿気移動特性値、外部拘束係数などの入力パラメータに強く依存する。しかしながら、これらの入力値は現状では文献値や経験則に基づいて設定されることが多く、実測データとの整合性が十分に確保されているとは言い難い。そのため、解析結果の信頼性や実務への適用性に課題が残されている。

このような背景のもと、本研究では、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータの不確実性に着目し、温度解析、湿気移動解析および応力解析に必要な入力値を対象として、計測データとの整合性に基づき合理的に同定する手法の構築を目的とした。特に、複数の物理場にまたがる入力パラメータを統一的に扱うため、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づく同定フレームワークを提案した。また、複数のメタヒューリスティクス最適化手法について探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討した。その結果に基づいて粒子群最適化（PSO）を基本手法として採用し、これを用いて同定フレームワークの有効性を検証した。

本論文は全 7 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景および目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第 2 章「マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系」では、マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生メカニズムやその影響について整理するとともに、温度解析、湿気移動解析および応力解析からなる温度ひび割れ解析の体系を整理した。さらに、解析に用いられる入力パラメータの種類と役割を整理し、その設定における課題を明確にした。

第 3 章「メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用」では、逆解析の基本概念および最適化問題としての定式化について整理したうえで、5 種類のメタヒューリスティクス手法（GA、PSO、ABC、DE および SA）について、代表的なベンチマーク関数を用いて探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討した。その結果に基づき、本研究の FEM 逆解析に用いる基本手法として PSO を採用し、入力パラメータ同定問題への適用方法を示した。

第 4 章「温度解析のための入力値の同定」では、断熱温度上昇特性および熱伝達係数を対象として、温度履歴の再現性に基づく逆解析を実施した。解析次元、観測点数、同定対象パラメータおよび最適化手法の違いが同定結果に及ぼす影響を検討し、実測温度との整

合性を有する入力値を同定できることを示した。

第 5 章「湿気移動解析のための入力値の同定」では、透湿率、湿気容量および蒸発率を対象として、相対湿度依存性を考慮した関数形による逆解析を実施した。その結果、パラメータ間の相関に起因して、単一の計測事例のみでは湿気移動特性値の同定に非一意性が生じることを明らかにするとともに、異なる湿度履歴を有する複数の計測事例を用いることで、その影響を低減する同定方法を示した。

第 6 章「温度応力解析のための入力値の同定」では、3 次元 FEM 解析結果を基準として、逆解析により外部拘束係数を同定した。さらに、同定された外部拘束係数を L/H および E_c/E_r に基づく関数として表現し、CP 法に適用可能な入力値設定方法を提示するとともに、3 次元 FEM 解析結果との比較によりその有効性を確認した。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題について整理した。本研究により、温度場、湿度場および応力場の入力パラメータ同定を「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づいて段階的かつ統一的に取り扱う逆解析フレームワークを構築し、解析入力値設定の合理化および解析結果の再現性向上に寄与することを示した。また、今後の課題として、温湿度連成解析の高度化、観測データに基づく計測計画の最適化、計算効率の向上および適用範囲の拡大などを示した。

Abstract

In mass concrete structures, thermal cracking is a critical issue that can reduce durability and increase maintenance costs. Therefore, accurate prediction and appropriate countermeasures during the design and construction stages are required. Thermal stress analysis, which combines thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis, is widely used for predicting thermal cracking. However, the results of such analyses strongly depend on input parameters, such as adiabatic temperature rise characteristics, moisture transfer properties, and external restraint coefficients. In practice, these parameters are often determined based on empirical values or standard references, and their consistency with measured data is not always ensured. As a result, issues remain regarding the reliability and practical applicability of the analysis results.

Against this background, this study focuses on the uncertainty of input parameters in thermal cracking analysis of mass concrete and aims to develop a method for rationally identifying the input parameters required for thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis based on their consistency with measured data. In particular, to handle input parameters across multiple physical fields in a unified manner, an identification framework based on the physical causal structure of “temperature → moisture → stress” was proposed. In addition, the search performance and convergence characteristics of several metaheuristic optimization methods were compared, and their applicability to FEM-based inverse analysis was examined. Based on these results, Particle Swarm Optimization (PSO) was adopted as the primary optimization method and was used to verify the effectiveness of the proposed identification framework.

This thesis consists of seven chapters, and the contents of each chapter are as follows:

Chapter 1: Introduction
This chapter presents the background and objectives of this study and outlines the structure of the thesis.

Chapter 2: Theory and Framework of Thermal Cracking and Thermal Stress Analysis of Mass Concrete
This chapter reviews the mechanisms of thermal cracking in mass concrete and its effects on structural performance. It also summarizes the framework of thermal cracking analysis consisting of thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis. In addition, the types and roles of input parameters used in these analyses are organized, and the issues in their determination are clarified.

Chapter 3: Metaheuristic Optimization Methods and Their Application to Inverse Analysis

This chapter first outlines the fundamental concepts of inverse analysis and its formulation as an optimization problem. Five metaheuristic optimization methods—Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Differential Evolution (DE), and Simulated Annealing (SA)—are then compared in terms of search performance and convergence characteristics using representative benchmark functions, and their applicability to FEM-based inverse analysis is examined. Based on these results, PSO is adopted as the primary optimization method for FEM-based inverse analysis in this study, and its application to input parameter identification problems is presented.

Chapter 4: Identification of Input Parameters for Thermal Analysis

This chapter focuses on the identification of adiabatic temperature rise characteristics and heat transfer coefficients through inverse analysis based on the reproducibility of temperature histories. The effects of differences in analysis dimensionality, number of observation points, parameters to be identified, and optimization methods on the identification results are investigated. The results demonstrate that input parameters consistent with measured temperature data can be identified.

Chapter 5: Identification of Input Parameters for Moisture Transfer Analysis

This chapter focuses on the identification of moisture permeability, moisture capacity, and evaporation rate through inverse analysis using functional forms that account for their dependence on relative humidity. The results reveal that correlations among the parameters lead to non-uniqueness in the identification of moisture transfer properties when only a single measurement case is used. An identification method is also presented to reduce the influence of this non-uniqueness by using multiple measurement cases with different humidity histories.

Chapter 6: Identification of Input Parameters for Thermal Stress Analysis

This chapter identifies external restraint coefficients through inverse analysis using three-dimensional FEM analysis results as reference solutions. Furthermore, the identified external restraint coefficients are expressed as functions of L/H and Ec/Er, and a method for determining input parameters applicable to the CP(Compensation Plane) method is presented. The effectiveness of the proposed method is confirmed through comparison with three-dimensional FEM analysis results.

Chapter 7: Conclusions

This chapter summarizes the findings of this study and discusses future research challenges. An inverse analysis framework is established to identify input parameters for the thermal, moisture, and stress fields in a stepwise and unified manner based on the physical causal structure of “temperature → moisture → stress.” The results demonstrate that the proposed framework contributes to more

rational determination of analysis input parameters and improved reproducibility of analysis results. Future research challenges include the advancement of coupled thermal–moisture analysis, optimization of measurement planning based on observed data, improvement of computational efficiency, and expansion of the range of applications.

目　　次

第 1 章　序論　1

1.1 研究の背景　1

1.2 既往研究　3

1.2.1　温度ひび割れ解析における入力パラメータ　3

1.2.2　温度解析のパラメータ同定　3

1.2.3　湿度場および応力場のパラメータ同定　3

1.2.4　既往研究の課題と本研究の位置づけ　4

1.3 研究の目的と内容　5

1.4 本論文の構成　7

【参考文献】　9

第 2 章　マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系　11

2.1　マスコンクリートと温度ひび割れの基礎　11

2.1.1　マスコンクリートの特徴　11

2.1.2　温度ひび割れ発生のメカニズム　12

2.1.3　温度ひび割れが構造性能に及ぼす影響　13

2.1.4　温度ひび割れ対策の基本的考え方　15

2.2　温度ひび割れ解析の体系　16

2.2.1　体積変化要因　17

2.2.2　温度場の解析　18

2.2.3　湿度場の解析　20

2.2.4　応力場の解析　22

2.2.5　ひび割れ判定および評価指標　24

2.3　温度ひび割れ解析の入力パラメータ　26

2.3.1　温度解析入力値　26

2.3.2　湿気移動解析入力値　27

2.3.3　応力解析入力値　27

2.3.4　境界条件および施工条件　27

2.4　パラメータ同定の意義と現状の課題　28
2.4.1　入力パラメータ設定における課題　28
2.4.2　パラメータ同定の意義　28
2.4.3　パラメータ同定の現状における課題　28
2.5　第 2 章のまとめ　29
【参考文献】　30

第 3 章　メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用　31
3.1　本章の目的と位置づけ　31
3.2　逆解析問題と最適化の考え方　32
3.2.1　逆解析問題の定義と特徴　32
3.2.2　従来手法の課題と限界　32
3.2.3　最適化アルゴリズム導入の意義　32
3.3　メタヒューリスティクスの概要と分類　33
3.3.1　メタヒューリスティクスとは　33
3.3.2　代表的なアルゴリズム　33
3.3.3　評価関数の概要　43
3.4　各手法の特性比較　47
3.4.1　探索性能・収束性およびパラメータ依存性　48
3.4.2　評価関数特性との対応関係　56
3.4.3　実装の容易性・適用性と応用性　58
3.4.4　問題特性との対応と適用性の整理　73
3.5　パラメータ同定問題への適用と PSO 採用の合理性　73
3.5.1　FEM 解析を伴う最適化問題の特性　73
3.5.2　各手法の適合性評価　74
3.5.3　PSO 採用の合理性と位置づけ　75
3.6　第 3 章のまとめ　76
【参考文献】　78

第 4 章　温度解析のための入力値の同定　81
4.1　本章の目的と位置づけ　81
4.1.1　解析入力値の課題（温度）　81

4.1.2　逆解析による同定の考え方　82
4.2　温度場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク　82
4.2.1　逆解析問題の一般的定式化　82
4.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要　82
4.2.3　逆解析システムの実装方法　83
4.3　温度解析入力値の同定　85
4.3.1　同定対象とする温度解析入力値　85
4.3.2　断熱温度上昇特性の逆解析手法の定式化　85
4.3.3　解析対象および供試体　87
4.3.4　解析結果および考察　91
4.4　第4章のまとめ　98
【参考文献】　101

第5章　湿気移動解析のための入力値の同定　103
5.1　本章の目的と位置づけ　103
5.1.1　解析入力値の課題（湿度）　103
5.1.2　逆解析による同定の考え方　103
5.2　湿度場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク　103
5.2.1　逆解析問題の一般的定式化　104
5.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要　104
5.2.3　逆解析システムの実装方法　104
5.3　コンクリート中の水分量の移動　105
5.4　湿気移動解析　106
5.4.1　湿気移動解析の支配方程式　106
5.4.2　湿気移動解析における材料物性値　107
5.4.3　これまでの湿気移動特性値同定の問題点　113
5.5　粒子群最適化による湿気移動特性値の同定　114
5.5.1　同定の概要　114
5.5.2　同定に用いた湿度計測事例　115
5.5.3　湿気移動特性値の同定　118
5.6　第5章のまとめ　123
【参考文献】　125

第 6 章　温度応力解析のための入力値の同定　127
6.1　本章の目的と位置づけ　127
6.1.1　解析入力値の課題（応力）　127
6.1.2　逆解析による同定の考え方　127
6.2　応力場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク　128
6.2.1　逆解析問題の一般的定式化　128
6.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要　128
6.2.3　逆解析システムの実装方法　128
6.3　マスコンクリートの温度応力解析と CP 法　130
6.3.1　マスコンクリートの温度応力解析　130
6.3.2　CP 法と外部拘束係数　130
6.3.3　CP 法適用の課題　130
6.4　従来の外部拘束係数の同定方法　132
6.4.1　従来の外部拘束係数の算定方法　132
6.4.2　従来の外部拘束係数の算定方法の問題点　135
6.5　粒子群最適化（PSO）を用いた新たな外部拘束係数の同定　136
6.5.1　同定方法の概要　136
6.5.2　同定に用いた解析モデル　138
6.5.3　温度および応力の解析条件　138
6.5.4　解析の組合せ　139
6.5.5　同定された外部拘束係数　141
6.6　外部拘束係数の表現　145
6.6.1　表現の概要　145
6.6.2　関数形による表現　145
6.7　3 次元 FEM と新たな外部拘束係数を用いた CP 法計算結果の比較　150
6.8　第 6 章のまとめ　153
【参考文献】　155

第 7 章　結論　157
7.1　本研究のまとめ　157
7.2　今後の課題　161

謝辞 163

本論文に関する発表論文 165

第 1 章

序　　論

第１章　序　　論

1.1　研究の背景

コンクリート構造物は、我が国の社会基盤を支える重要な構造物であり、ダム、橋梁、トンネル、基礎構造物など、多様な分野において広く用いられている。これらの構造物の中でも、大断面部材や基礎構造物などに適用されるマスコンクリートは、セメントの水和反応に伴う発熱により部材内部の温度が上昇し、その後の冷却過程において温度応力が発生するという特有の挙動を示す。この温度応力がコンクリートの引張強度を超過した場合には、温度ひび割れが発生することが知られている。

マスコンクリートにおける温度ひび割れは、構造安全性に直接影響を及ぼす場合は必ずしも多くないものの、ひび割れを起点とした鋼材腐食や劣化の進行を促進し、長期的な耐久性の低下を招く要因となる。また、ひび割れ補修や再施工の必要性が生じることにより、維持管理費の増大やライフサイクルコストの増加を引き起こす。さらに、施工段階においてもひび割れの発生は品質上の問題として扱われることが多く、施工者に対する品質要求の高度化とも相まって、温度ひび割れの抑制は重要な技術課題となっている。

このような背景のもと、マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生を事前に予測し、適切な対策を講じるための手法として、温度解析および温度応力解析が広く用いられている。これらの解析は、施工前の事前照査においてひび割れ発生のリスクを評価し、必要に応じて打込み温度の制御、養生条件の改善、配合の変更などの対策を検討するための基礎となるものである。このように、温度応力解析は、設計および施工計画における意思決定を支援し、ひび割れ発生リスクの低減を図るうえで重要な役割を果たしている。

一方で、これらの解析結果は、入力される材料特性値や境界条件に強く依存することが知られている。具体的には、コンクリートの発熱特性、熱伝導率、比熱、密度、外気温、熱伝達係数などの温度解析に関するパラメータに加え、ヤング係数、クリープ特性、引張強度、外部拘束条件などの応力解析に関するパラメータが、解析結果に大きな影響を与える。これらの入力値には不確実性が含まれており、その設定誤差が解析結果に直接反映されるという問題がある。換言すれば、入力パラメータの不確実性が解析結果の不確実性に

直結するという構造的課題が存在する。

しかしながら、実務におけるこれらのパラメータの設定は、必ずしも合理的に行われているとは言い難い。一般には、既往の文献値や設計基準に示される代表値が用いられるか、あるいは経験則に基づき安全側に設定されることが多い。このような方法は、簡便である一方で、対象とする構造物や施工条件の個別性を十分に反映できないという問題がある。その結果、解析結果が過度に安全側となり、必要以上に保守的な対策が採用される場合や、逆に実現象との乖離が生じる場合も指摘されている。

近年では、計算機性能の向上に伴い、マスコンクリートの解析手法は高度化しており、3 次元有限要素法（3 次元 FEM）による詳細な温度解析や温度応力解析が可能となっている。さらに、温度場と応力場の連成解析に加え、コンクリート内部の水分移動を考慮した湿気移動解析を組み合わせることにより、乾燥収縮や自己収縮の影響を含めたより高度な評価が試みられている。これにより、従来に比べて実現象に近い解析が可能となりつつある。

しかしながら、解析手法の高度化にもかかわらず、入力パラメータの設定に関する合理的な方法が十分に確立されていないという課題は依然として残されている。つまり、解析モデルの精緻化が進む一方で、入力値の不確実性が解析精度を制約する要因となっており、解析の信頼性向上のためには、入力パラメータを適切に設定・同定する手法の確立が重要である。

このような状況を踏まえると、実測データを活用して解析モデルの入力パラメータを同定し、解析結果と実現象との整合性を高める逆解析的アプローチが有効であると考えられる。特に、複数のパラメータが相互に影響を及ぼすマスコンクリートの問題においては、これらを同時に効率よく同定可能な手法の導入が求められている。

以上のように、マスコンクリートにおける温度ひび割れ問題は、耐久性、維持管理、施工品質の観点から重要性が高く、温度応力解析はその予測および対策検討において不可欠な役割を担っている。一方で、解析結果が入力パラメータに強く依存するという根本的課題が存在し、その合理的な設定手法の確立が重要な研究課題となっている。

1.2　既往研究

1.2.1　温度ひび割れ解析における入力パラメータ

マスコンクリートの温度ひび割れ解析では、温度解析、湿気移動解析および応力解析を組み合わせた連成的な評価が行われる[1)-4)]。温度解析では、断熱温度上昇特性、熱伝導率、比熱、密度および熱伝達係数などが重要な入力パラメータとなる[5)-7)]。一方、湿気移動解析では、透湿率、湿気容量および蒸発率などが内部湿度分布の評価に大きな影響を及ぼす[3),8)]。さらに応力解析では、ヤング係数、クリープ特性、引張強度および拘束条件などが温度応力やひび割れ指数の算定結果を支配する[1),2),9)]。

これらのパラメータは材料配合、部材寸法、施工条件および環境条件によって変化するため、設計基準や文献値をそのまま適用した場合には実構造物との間に乖離が生じる可能性がある[5),6)]。そのため、入力パラメータを合理的に設定することは、温度ひび割れ予測精度の向上において極めて重要である[1),2)]。

1.2.2　温度解析のパラメータ同定

入力パラメータの不確実性を低減するため、実測データを利用した逆解析手法が数多く提案されている[10)-14)]。中村ら[10)]は、Particle Swarm Optimization（PSO）と有限要素解析を組み合わせ、マスコンクリートの温度計測結果から熱伝導率などの熱特性値を推定する手法を提案した。この研究は、メタヒューリスティクス最適化を用いたマスコンクリート熱特性同定の代表的研究として位置付けられる。

その後、熱パラメータ同定に関する研究は発展し、ニューラルネットワークを用いた逆解析[11)]や、Sparrow Search Algorithm（SSA）[12)]、Walrus Optimization Algorithm（WaOA）[13)]などの新しい群知能アルゴリズムを用いた手法が提案されている。これらの研究では、ニューラルネットワークやメタヒューリスティクス最適化を用いることにより、温度解析パラメータの同定が可能であることが示されている。

しかしながら、これらの研究の多くは断熱温度上昇特性や熱伝導率などの温度解析パラメータを対象としており、解析対象は主として温度場に限定されている[10)-13)]。

1.2.3　湿度場および応力場のパラメータ同定

近年では、温度場のみならず、湿気移動や力学挙動を考慮した連成解析モデルの研究も進められている[3),8),15)]。Bocciarelli ら[8),15)]は、コンクリートの Hygro-Thermo-Chemical モデルおよび Hygro-Thermo-Chemical-Mechanical モデルを対象として逆解析を実施し、複数の物理現象に関わるパラメータ同定の可能性を示した。また、コンクリートダムを対象とした研究では、動的応答に基づく構造パラメータの逆解析が行われている[14)]。

一方で、これらの研究の多くは特定の物理場や特定の材料モデルを対象としており、温度ひび割れ解析に必要な温度場、湿度場および応力場の入力パラメータを統一的な枠組みで同定した事例は少ない[15)]。また、物理場ごとに異なる同定手法や解析体系が採用

されることが多く、解析条件の統一性や実務への適用性という観点では課題が残されている。

1.2.4　既往研究の課題と本研究の位置づけ

以上のように、マスコンクリートを対象とした逆解析に関する研究は数多く報告されており、近年ではPSO、Jayaアルゴリズム、Sparrow Search Algorithm、Walrus Optimization Algorithmなどのメタヒューリスティクス最適化手法に加え、ニューラルネットワークを用いた入力パラメータ同定も行われている[10)-14)]。

しかしながら、既往研究の多くは断熱温度上昇特性や熱伝導率などの温度解析パラメータの同定を対象としており、温度場、湿度場および応力場を対象とした入力パラメータを統一的な枠組みのもとで同定した研究は少ない。また、物理場ごとに異なる同定手法や解析体系が用いられることが多く、温度ひび割れ解析に必要な一連の解析パラメータを同一の方法論により合理的に決定する仕組みは十分に整備されていない。

マスコンクリートの温度ひび割れ予測では、温度解析、湿気移動解析および応力解析が相互に関連しており、いずれか一つの物理場のみを高精度化しても、最終的なひび割れ予測精度の向上には限界がある。そのため、各物理場における入力パラメータを統一的に同定可能な枠組みを構築することが重要である。

国内においては、コンクリート標準示方書[1)]やマスコンクリートのひび割れ制御指針2016[2)]等に断熱温度上昇特性や各種入力パラメータの代表値が整理されており、実務においてはそれらを利用することが可能である。しかしながら、これらの代表値は一般的な材料や施工条件を前提としているため、対象構造物固有の材料特性や施工条件を十分に反映できない場合がある。また、海外プロジェクトでは、使用材料、配合条件および施工環境が国内とは異なる場合があり、国内の設計基準等に示される代表値をそのまま適用することが必ずしも適切でない場合がある。さらに、プロジェクトの条件によっては、入力値設定に必要な材料試験を十分に実施することが困難な場合も想定される。

このような背景から、実構造物で計測された温度データや湿度データを活用し、対象構造物固有の入力パラメータを逆解析により同定する手法は、国内における入力値設定の合理化に加え、海外プロジェクトにおいても有効な活用が期待される。

以上のことから、本研究は海外プロジェクトへの適用を主目的とするものではないが、本研究で提案する逆解析プラットフォームが国内外を問わず適用可能な手法となることを研究の意義の一つとして位置付ける。

そこで本研究では、メタヒューリスティクス最適化を用いた逆解析手法を基盤として、温度場、湿度場および応力場に関する入力パラメータを同一のプラットフォーム上で同定可能な手法を構築し、その有効性を検証することを目的とする。

1.3　研究の目的と内容

マスコンクリートにおける温度ひび割れ予測の精度向上を図るためには、温度解析、湿気移動解析および応力解析を組み合わせた総合的な評価が必要である。これらの解析では、入力される材料特性値および境界条件が解析結果に大きな影響を及ぼすため、適切な入力パラメータの設定が不可欠である。しかしながら、これらのパラメータは施工条件や材料特性に依存するため、事前に正確に把握することは困難であり、解析精度の向上を阻害する要因となっている。

本研究では、このような課題に対して、解析結果と実測データとの整合性に基づいて入力パラメータを合理的に決定する「同定（逆解析）」に着目する。すなわち、温度計測結果や各種観測データを活用し、解析値と計測値との誤差を最小化することにより、解析に必要な入力パラメータを推定する枠組みを構築することを目的とする。

本研究が対象とする入力パラメータは、温度場、湿度場および応力場に関わる複数の物理量にまたがるものであり、具体的には以下のように整理される。

まず、温度解析に関しては、コンクリートの断熱温度上昇特性、熱伝導率、比熱などの材料特性値に加え、外気温や熱伝達係数などの境界条件が重要な入力パラメータとなる。これらは、温度履歴の再現性に直接影響を及ぼすため、適切な設定・同定が求められる。

次に、湿気移動解析に関しては、コンクリート内部の水分移動を支配する透湿率、湿気容量、蒸発率などの材料特性値が挙げられる。これらのパラメータは、乾燥収縮や内部湿度分布の評価に大きく関与し、結果として応力発生挙動にも影響を及ぼす。

さらに、応力解析に関しては、ヤング係数やクリープ特性、引張強度といった材料特性値に加え、外部拘束条件が重要な役割を果たす。特に、外部拘束係数は温度応力の発生量を支配する重要なパラメータであり、その設定はひび割れ発生予測の精度に大きく影響する。

このように、本研究で対象とする入力パラメータは、温度場、湿度場、応力場にまたがる多変数問題であり、これらが相互に影響を及ぼす非線形な関係を有している。したがって、これらのパラメータを個別に設定するのではなく、統一的な枠組みのもとで同定することが重要である。

このような多変数かつ非線形な問題に対して、本研究ではメタヒューリスティクス最適化手法を適用する。メタヒューリスティクスは、勾配情報を必要とせず、大域的な最適解の探索が可能な手法であり、多峰性を有する最適化問題や解析モデルをブラックボックスとして扱う問題に対して有効である。特に、本研究で対象とする逆解析問題では、有限要

素解析などを内包するため、評価関数の勾配を明示的に求めることが困難であり、また局所解に陥る可能性も高い。このため、メタヒューリスティクスの適用が有効であると考えられる。

本研究では、複数のメタヒューリスティクス最適化手法について探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討する。その結果に基づいて、本研究の FEM 逆解析に用いる基本手法を選定し、温度場、湿度場および応力場における入力パラメータ同定へ適用する。

本研究の学術的な目的は、温度場、湿度場および応力場にまたがる入力パラメータを統一的に同定する手法を体系化し、マスコンクリートにおけるひび割れ解析の高度化に資する知見を得ることである。具体的には、従来は個別に扱われることの多かった各種パラメータを統合的に扱うことにより、解析の信頼性向上および理論的整合性の確保を目指すものである。

一方で、本研究は実務的な観点も重視している。すなわち、現場において取得可能な温度計測データなどを活用することにより、材料試験や詳細な物性試験のみに依存することなく、対象構造物の計測結果を反映した合理的な入力パラメータ設定を可能とすることを目指す。これにより、解析の適用性および実用性を向上させ、設計・施工段階における意思決定支援への活用を図るものである。

以上のように、本研究は、逆解析およびメタヒューリスティクス最適化を用いた入力パラメータ同定手法の構築を通じて、マスコンクリートの温度ひび割れ予測の精度向上および実務適用に向けた有効性を明らかにすることを目的とする。

1.4　本論文の構成

本論文は、以下に示す 7 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景および目的について述べ、マスコンクリートにおける温度ひび割れ問題の重要性と、温度応力解析における入力パラメータの不確実性に起因する課題を整理するとともに、本研究の位置づけを明確にする。

第 2 章では、マスコンクリートの温度ひび割れに関する理論および解析体系について述べる。具体的には、温度解析、湿気移動解析および温度応力解析の基礎理論を整理し、これらが相互に関連しながらひび割れ発生に至る過程を体系的に示す。また、ひび割れ評価手法についても整理し、従来の解析における前提条件および課題を明確にする。本章は、本研究の理論的基盤を与えるとともに、後続章における解析および同定手法の位置づけを明確にする役割を担うものである。

第 3 章では、メタヒューリスティクス最適化手法および逆解析手法について述べる。まず、最適化問題の一般的な枠組みを整理し、逆解析問題としての定式化を行う。次に、本研究で比較対象とした各種メタヒューリスティクス最適化手法について、その原理および特徴を整理する。さらに、ベンチマーク関数を用いて各手法の探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討する。その結果に基づき、本研究の FEM 逆解析に用いる基本手法として粒子群最適化（PSO：Particle Swarm Optimization）を採用する。本章は、第 4 章、第 5 章および第 6 章における入力パラメータ同定の基盤となる理論および方法論を整理するものである。

第 4 章では、温度場を対象とした入力パラメータ同定について述べる。具体的には、断熱温度上昇特性および熱伝達係数などを対象とし、温度履歴の再現性に基づく逆解析を実施する。また、メタヒューリスティクス最適化手法を用いたパラメータ同定の有効性を検証するとともに、同定結果が温度解析精度に与える影響について考察する。

第 5 章では、湿度場を対象とした入力パラメータ同定について述べる。具体的には、透湿率や湿気容量などの湿気移動特性値を対象とし、相対湿度分布の再現性に基づく逆解析を実施する。また、複数の計測事例を用いた同定手法の有効性について検討するとともに、湿気移動解析における入力パラメータ同定の課題と適用性について考察する。

第 6 章では、応力場を対象とした入力パラメータ同定について述べる。具体的には、3 次元 FEM 解析結果を基準として、逆解析により外部拘束係数を同定する。さらに、同定された外部拘束係数を L/H および E_c/E_r に基づく関数として整理し、CP 法に適用可能な入力値設定方法を提示するとともに、その有効性について検証する。

これら第 4 章から第 6 章では、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づき、各物理場における入力パラメータを段階的に同定する統一的な逆解析プラットフォーム

を構築し、その有効性を検証する。本研究の主要な提案内容および検証結果は主として第 4 章から第 6 章に示している。そのため、第 2 章および第 3 章では理論的背景およびメタヒューリスティクス最適化手法の比較検討に重点を置き、本研究独自の提案内容については第 4 章から第 6 章において詳細に述べる構成としている。

第 7 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータ同定手法の有効性および適用性について整理する。また、本研究の限界および今後の課題について述べ、解析手法のさらなる高度化や実務への展開に向けた方向性を示す。

以上のように、本論文は、理論の整理（第 2 章）、手法の定式化（第 3 章）、および同定手法の適用と検証（第 4 章、第 5 章、第 6 章）を体系的に構成し、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータの合理的決定手法を提示するものである。これにより、入力値設定の合理化を図るとともに、解析精度および実務適用性の向上に向けた有効性を検証する。

【参考文献】

1) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書［施工編］，2023.
2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016，2016.
3) 丸山一平，野口貴文，佐藤良一：水熱連成移動解析にもとづく高強度マスコンクリート中の温度及び湿度分布の予測，日本建築学会構造系論文集， No.609，pp.1-8，2006.
4) Zhu, B.：Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, Elsevier, 2014.
5) 手島則夫，中村成春，桝田佳寛：高粉末度フライアッシュを使用した高強度マスコンクリートの発熱特性，日本建築学会構造系論文集，No.508，pp.9-15，1998.
6) 緒方英彦，服部九二雄：コンクリートの熱伝達係数の評価方法に関する研究，農業土木学会論文集，No.206，pp.109-116，2000.4.
7) Knor, M. et al.: Numerical Identification of the Thermal Properties of Early Age Concrete Using Inverse Heat Transfer Problem, Heat and Mass Transfer, Vol.55, pp.1215-1227, 2019.
8) Bocciarelli, M., Ranzi, G.：An Inverse Analysis Approach for Identification of Hygro-Thermo-Chemical Model Parameters of Concrete, International Journal of Mechanical Sciences , Vol.138-139, pp.368-382, 2018.
9) 萩原伸治，桝田佳寛，中村成春：高強度コンクリートの若材齢における変動荷重下のクリープ挙動，日本建築学会構造系論文集，No.574，pp.1-8，2003.
10) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.107-118，2006.
11) Zhang, Y., Ma, C., Li, C. and Gao, S.：Inverse Analysis on Thermal Parameters of Mass Concrete Based on Uniform Design and BP Neural Network, Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol.43, No.2, pp.148-157, 2021.
12) Wang, Y. et al.：Inverse Analysis for Thermal Parameters of Mass Concrete Based on the Sparrow Search Algorithm Improved by Mixed Strategies, Buildings, Vol.14, 3273, 2024.
13) Wang, Y. et al.: Inverse Analysis of Thermal Parameters of Arch Dam Concrete Based on Walrus Optimization Algorithm, Applied Sciences, Vol.15, No.4, 2155, 2025.
14) Kang, F., Wu, Y., Li, J. and Li, H.：Dynamic Parameter Inverse Analysis of Concrete Dams Based on Jaya Algorithm with Gaussian Processes Surrogate Model, Advanced Engineering Informatics , Vol.49, 101348, 2021.
15) Bocciarelli, M. and Ranzi, G.：Identification of the Hygro-Thermo-Chemical-Mechanical Model Parameters of Concrete Through Inverse Analysis, Construction and Building Materials, Vol.162, pp.202-214, 2018.

第 2 章

マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系

第 2 章　マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系

2.1　マスコンクリートと温度ひび割れの基礎

2.1.1　マスコンクリートの特徴

マスコンクリートとは、断面寸法が大きいために、施工後のセメントの水和反応に伴って発生する熱が容易には外部へ放散されず、内部に顕著な温度上昇を生じるコンクリートを指す。代表的な構造物としては、重力式ダム、橋脚、大規模基礎構造物、原子力発電施設の建屋などが挙げられる。

この種のコンクリートでは、外表面は外気や型枠を介した熱伝達により比較的速やかに冷却される一方、断面中心部は断熱条件に近いため熱の散逸が著しく遅れ、内部温度は長期間にわたり高温状態を維持する。結果として、外部と内部の間に大きな温度差が形成され、構造体内部に急峻な温度勾配が生じる。さらに、断面寸法が大きいほど熱の放散に要する時間が増大するため、構造物完成後も内部温度の上昇や冷却遅延が継続する傾向が顕著となる。

このような温度履歴は、初期材齢におけるコンクリートの強度発現挙動と相互作用し、膨張・収縮の不均衡や拘束条件に起因する内部応力を発生させる。特に、中心部と表面部との温度差に伴う体積変化の不一致は、引張応力を顕著に増大させる要因となり、コンクリートの引張強度を超過した場合には温度ひび割れを誘発する。したがって、マスコンクリートは通常部材に比して、初期材齢における温度上昇および温度差の管理が構造性能ならびに耐久性に直結する点において特異な性質を有する。

土木学会「コンクリート標準示方書［設計編］」[1)]では、マスコンクリートとして取り扱う目安として、広がりのあるスラブで厚さ80～100cm以上、下端が拘束された壁では厚さ50cm以上と示されている。また、日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」[2)]では、部材寸法だけでなく配合条件や拘束条件によっては、より薄い部材でもマスコンクリートとして扱うべき場合があるとされている。このように、マスコンクリートは「大断面であること」に加え、「水和熱の蓄積によって有害な温度ひび割れを生じるおそれがあること」によって特徴づけられる。

2.1.2　温度ひび割れ発生のメカニズム

マスコンクリートにおける温度ひび割れは、セメントの水和反応に伴う発熱と、その後の冷却過程により生じる温度応力が主因である。特に、温度変化に伴う体積変化が自由に発現できず、部材内部で相互に拘束し合う場合（内部拘束）や、周辺構造物や地盤により外的に拘束される場合（外部拘束）にひび割れが発生する。

打込み直後から数日にかけて、セメントの水和反応によって大量の熱が発生し、断面中心部の温度は大きく上昇する。一方、表面部は外気との熱交換によって冷却されるため、中心部と表面部の間に顕著な温度差が生じる。コンクリートは温度上昇で膨張し、冷却で収縮するが、この変形が均一に生じない場合、部材内部には部位ごとに異なる膨張・収縮挙動が生じ、結果として温度応力が発生する。

①内部拘束による温度ひび割れ

内部拘束は、コンクリート部材内部の温度分布が不均一であることにより生じる。中心部は高温のため膨張しようとするが、既に冷却している表面部に拘束されるため、中心部では圧縮応力が、表面部では引張応力が発生する。特に冷却過程に入ると、表面部が先に収縮し、内部の高温部分に引きずられることで表面に引張応力が集中する。

この応力がコンクリートの引張強度を超えると、表面近傍に浅く不規則なひび割れが生じる。内部拘束ひび割れは、主として材齢初期に発生し、ひび割れ幅は比較的小さいが、表面に網目状に分布するため、耐久性や美観に影響を及ぼす可能性がある。

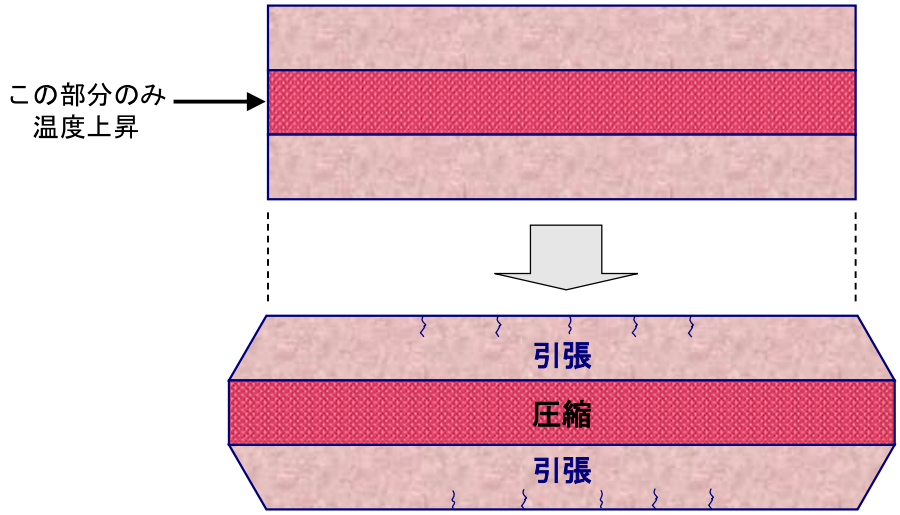


図-2.1　内部拘束に起因するひび割れ発生の模式図

②外部拘束による温度ひび割れ

外部拘束は、コンクリート部材全体の体積変化が基礎地盤や既設構造物などの外的要因によって妨げられることで発生する。打込み後、部材全体が高温となり膨張した後、冷却に伴い収縮が始まる。このとき、基礎や隣接部材に拘束されて自由に収縮できない場合、

部材全体に引張応力が生じる。

外部拘束ひび割れは、冷却期（打設後1～3週間程度）に発生しやすく、部材を貫通するひび割れとなる。外部拘束による貫通ひび割れは、内部拘束による表層ひび割れに比べ、耐久性や水密性を大きく低下させるため、構造性能上のリスクが高い。

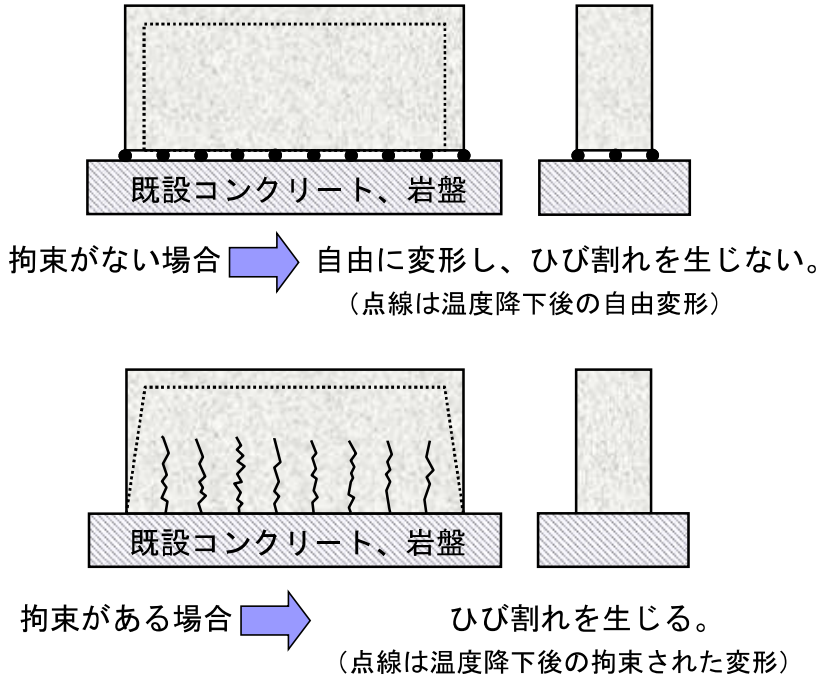


図-2.2　外部拘束に起因するひび割れ発生の模式図

2.1.3　温度ひび割れが構造性能に及ぼす影響

マスコンクリートに生じる温度ひび割れは、構造物の外観上の問題にとどまらず、長期的な耐久性や構造性能、さらには維持管理コストに大きな影響を及ぼす。

まずは、耐久性の低下が挙げられる。ひび割れはコンクリート内部への物質移動経路を形成し、水分や酸素、二酸化炭素、塩化物イオンなどの侵入を容易にする。その結果、鉄筋の受動皮膜が早期に破壊され、腐食が進行しやすくなる。腐食生成物の膨張はかぶりコンクリートを押し割り、さらなるひび割れやはく離を誘発し、劣化が加速する。また、寒冷地では凍結融解作用を受けやすくなり、スケーリングや剥落の要因となるほか、水利構造物では溶脱や硫酸塩劣化など化学的侵食が局所的に進行する。水密性や気密性の低下により、貯水槽や函渠、ボックスカルバートなどでは漏水・滲水が発生し、機能上の障害にもつながる。

次に、構造安全性への影響がある。温度ひび割れは荷重に起因するものではないため、発生直後に耐力を大幅に損なうことは少ない。しかし、長期的には鋼材腐食に伴う断面欠損、付着性能の低下、剛性の減少を通じて、耐荷性能や使用性を徐々に損なう。特に貫通性の大きなひび割れはせん断抵抗や水圧・土圧に対する抵抗を低下させる可能性がある。さらに、既存ひび割れの存在は有効剛性を低下させ、地震時には応答の増大や塑性変形の

集中を招きやすく、疲労損傷や剥落リスクを高める要因となる。

最後に、補修・維持管理コストの増大が避けられない。ひび割れが発生すれば、調査・記録・モニタリングに加え、シーリング、ひび割れ注入、表面含浸処理、断面修復などの補修工法が必要となる。これらは繰返し施工を要する場合も多く、ライフサイクル全体でのコスト増加につながる。特に水密性や耐久性が要求される構造物では、止水板設置や防水膜施工、電気防食など高コストの対策が必要となる場合もある。したがって、施工段階での温度制御や配合設計、誘発目地の導入など予防的な対策を適切に講じることが、長期的な維持管理コストの抑制に直結する。

以上、温度ひび割れは一見すると局所的な現象であるが、長期にわたり構造物の耐久性、性能、安全性に波及し、結果的にライフサイクルコストを押し上げる重大な要因である。そのため、設計・施工段階から発生メカニズムを十分に考慮し、適切な抑制策を講じることが不可欠である。



図-2.3　マスコンクリートに生じた温度ひび割れの例

2.1.4　温度ひび割れ対策の基本的考え方

マスコンクリートにおける温度ひび割れは、水和熱に伴う温度上昇とその後の冷却過程により生じる温度応力が主因であり、その抑制には材料・施工・解析の三面から総合的な対応が必要である。

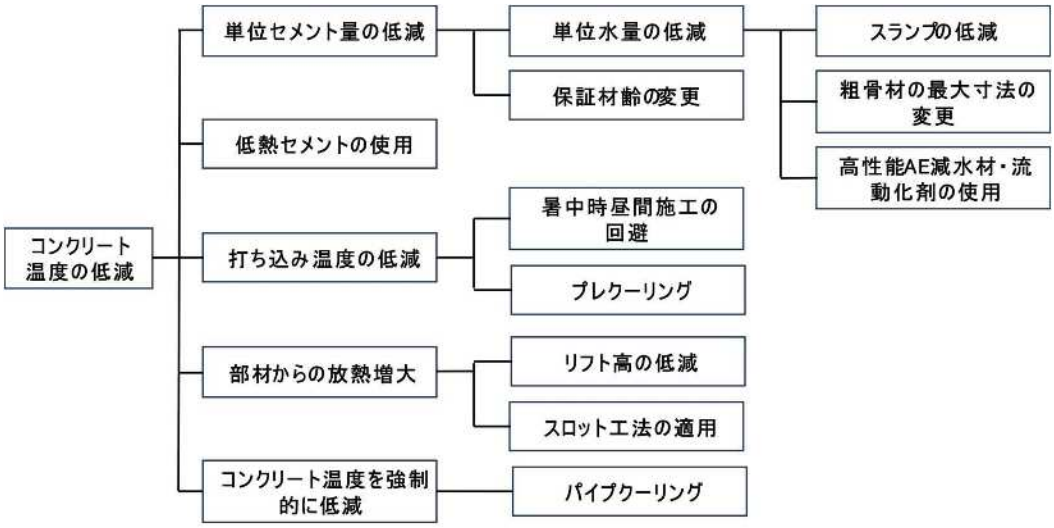


図-2.4　コンクリート温度の低減方法

まず、材料面では水和熱そのものを低減することが基本となる。低発熱型セメントやフライアッシュ, 高炉スラグなどの混和材を適切に使用することで、発熱ピークを遅延させ、総発熱量を抑えることができる。また、単位セメント量の削減や骨材の適切な選定により、発熱源となるペースト量を減らすことが有効である。さらに、練混ぜ時の材料温度を下げるプレクーリングも初期温度上昇の抑制に寄与する。

次に、施工面では温度履歴を制御することが重要である。打設時期を外気温の低い時期や時間帯に設定すること、リフト厚や打設間隔を調整して累積発熱を分散させること、誘発目地を設けて応力集中を回避することなどが代表的な手法である。養生においては、表層を急激に冷却せず断熱材で保温する一方で、散水や湿潤養生により乾燥収縮を抑制する工夫が必要となる。さらに、部材が大規模な場合にはパイプクーリングを用いた内部冷却が有効であるが、冷却の過剰は逆効果となるため、緩やかで均一な制御が求められる。外部拘束を低減するためには、基礎や既設構造物との取り合いに配慮し、施工継目やアンカーの配置を工夫することも重要である。

最後に、解析面では事前の温度応力解析による予測と評価が不可欠である。断熱温度上昇試験により材料の発熱特性を同定し、外気条件や断熱・冷却方法を境界条件として解析に組み込むことで、部材内の温度分布と応力分布を定量的に把握できる。応力評価には材齢依存性を考慮したヤング係数や引張強度、線膨張係数、クリープ・収縮特性を反映させる必要がある。そのうえで、ひび割れ指数（I_{cr}）を用いたリスク評価を行い、発生確率やひび割れ幅が許容範囲内に収まるかどうかを判定する。解析結果をもとに材料・施工条件

を最適化することが、合理的かつ経済的な対策につながる。さらに、施工中の温度計測によって解析モデルを逐次校正し、現場条件に応じて養生や冷却を微調整する「閉ループ管理」を行うことで、対策の実効性を高めることができる。

温度ひび割れの抑制は単一の手法では不十分であり、材料面での発熱抑制、施工面での温度履歴・拘束条件の制御、解析面での事前予測とフィードバックを組み合わせることで、構造物の耐久性と信頼性を確保することが可能となる。

2.2　温度ひび割れ解析の体系[3)]

マスコンクリートにおける温度ひび割れ解析は、施工直後から硬化初期にかけて生じるセメント水和反応に起因する発熱現象と、その後の冷却過程を力学的に捉え、部材内部で発生する体積変化および応力状態を定量的に評価することを目的とする。この解析は、単に温度履歴を予測するだけでなく、温度変化に伴う膨張・収縮挙動と、それが拘束条件下で引き起こす応力発生を体系的に追跡することで、最終的にひび割れ発生のリスクを予測・制御する枠組みを提供するものである。

温度ひび割れは、①水和熱により部材内部温度が上昇する過程、②部材寸法や外部環境の影響による内部と表面の温度差の形成、③温度降下に伴う体積収縮の発現、④外部拘束や内部拘束による変形制限、という複合的な過程を経て発生する。したがって、解析にあたっては、熱的特性・力学的特性・境界条件を網羅的に考慮する必要がある。また、近年では温度変化だけでなく、自己収縮や乾燥収縮といった湿気移動に関連する収縮現象も初期ひび割れ挙動に大きく寄与することが明らかとなっており、温度場と湿気場の連成的評価の重要性が高まっている。

このような背景を踏まえると、温度ひび割れ解析の体系は、(1)体積変化要因の整理、(2)温度場の解析、(3)湿度場の解析、(4)応力場の解析、(5)ひび割れ判定、(6)数値解析体系の実装、という段階的プロセスとして位置づけられる。それぞれの段階は相互に密接に関連しており、入力パラメータの設定や解析モデル化の精度が、最終的なひび割れ予測の信頼性に直結する。以下に、その概要を整理する。



図-2.5　温度ひび割れ解析プロセス

2.2.1　体積変化要因

マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生は、コンクリート内部で生じる各種の体積変化が、内部あるいは外部の拘束条件の下で相互に作用することによって誘発される。これらの体積変化はそれぞれ異なる発生機構を有し、材齢や環境条件に依存して支配的な影響度が変化する。代表的な要因を以下に整理する。

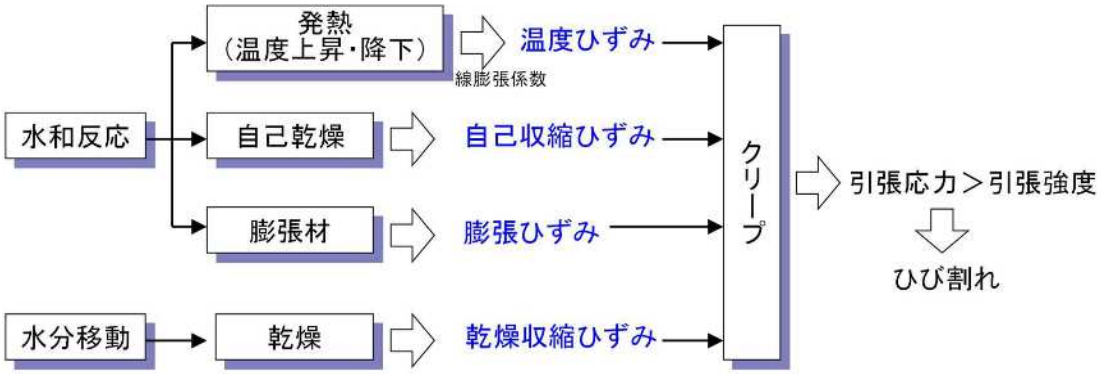


図-2.6　コンクリート構造物の体積変化に伴う収縮ひび割れ要因図

①温度ひずみ

セメントの水和反応によりコンクリート内部で大量の熱が発生し、打込み直後から数日間にわたり部材温度が上昇する。その後、外気との熱交換や放熱により温度が降下する過程で、コンクリートは膨張から収縮へと移行する。これらの体積変化は、熱膨張係数（通常 8～12×10^{-6}/℃程度）と温度変化量の積で表され、温度差が大きいほど内部応力が増大する。マスコンクリートでは断面寸法が大きいため内部と表面で顕著な温度差が生じ、温度ひび割れの主因となる。

②自己収縮ひずみ

低水セメント比や高性能コンクリートで顕著に観察される現象であり、セメントの水和反応に伴う化学収縮と毛細管張力に起因する。打込み直後から初期材齢にかけて急速に進行し、温度ひずみとは異なり外部環境に依存せず、内部現象として生じる点に特徴がある。高強度コンクリートや高性能 AE 減水剤を用いた配合では無視できない要因であり、初期ひび割れ挙動を支配する場合がある。

③乾燥収縮ひずみ

部材表面から外部環境へ水分が散逸することによって生じる収縮であり、相対湿度の低下に伴い内部に負圧が発生し、体積減少が引き起こされる。乾燥収縮は材齢が進むにつれて長期的に進行し、初期材齢に支配的な温度ひずみや自己収縮ひずみと異なり、耐久性や長期ひび割れ発生の主要因となる。解析においては湿気移動支配方程式に基づき、透湿率や湿気容量といった特性値を入力する必要がある。

④膨張ひずみ

膨張材（エトリンガイト形成型膨張材や石灰系膨張材など）の使用や、高炉スラグ微粉末の反応により発現する逆方向の変形要素である。膨張ひずみは設計上「収縮補償」として利用され、温度ひずみや乾燥収縮の効果を緩和する目的で導入される。ただし膨張挙動は材料特性や養生条件に大きく依存するため、その制御と予測は容易ではない。

⑤クリープ

コンクリートは長期的に応力を受けると時間依存的に変形を増加させる。このクリープは温度応力に対して緩和作用を持ち、ひび割れ抑制の一因となる。しかし、クリープの緩和効果は材齢や温度履歴に強く依存し、特に初期材齢においてはヤング係数の発現と相互に影響し合うため、精緻なモデル化が不可欠である。実務では B3 モデルや CEB-FIP モデルなどが代表的に用いられる。

2.2.2　温度場の解析 [3)]

マスコンクリートの温度ひび割れ挙動を予測するうえで、最も基礎となるのは部材内部の温度分布とその時間的変化、すなわち「温度場」の解析である。温度場は、セメント水和反応により発生する発熱と、外部環境への放熱過程とのバランスによって支配される。特に断面寸法の大きな部材では、内部に熱が滞留しやすく、中心部と表面部との温度差が大きくなるため、温度場の正確な評価は温度応力解析の前提条件となる。

(1) 支配方程式と解析の基本枠組み

温度場は、非定常熱伝導方程式によって支配される。一般に以下の式で表される：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + \dot{Q}(t) \tag{2.1}$$

ここに、ρ：密度、c：比熱、T：温度、t：時間、κ：熱伝導率、$\dot{Q}(t)$：コンクリートの単位体積、単位時間あたりの内部発熱量を表す。式(2.1)は、エネルギー保存則であり、この式は単位時間あたりの熱収支を表している。つまり式(2.1)は、

（内部エネルギー）＝（熱伝導）＋（発熱）　　(2.2)

という熱収支を表している。この方程式を、初期条件（打込み温度）および境界条件（外気温や熱伝達係数）とともに数値的に解くことにより、部材内部の温度履歴を算定する。

(2) 入力パラメータ

温度場の解析には、以下の熱的パラメータが必要となる。

- **断熱温度上昇特性**：セメントの種類や水結合材比、混和材置換率に依存し、断熱養生試験によって実験的に得られる。解析では、発熱速度関数 $Q(t)$として用いられる。

- **熱伝導率**：コンクリート内部での熱の伝わりやすさを規定し、骨材種類や含水状態によって変化する。
- **比熱および密度**：温度変化に対する熱容量を規定し、発熱と放熱のバランスに影響する。
- **外部との熱伝達係数**：外気、型枠、地盤との境界条件を決定するパラメータであり、施工条件（断熱材の有無、散水養生など）によって大きく変動する。
- **外気温**：外気の温度

(3) 解析手法

実務・研究の両面で広く用いられるのは有限要素法（FEM）である。

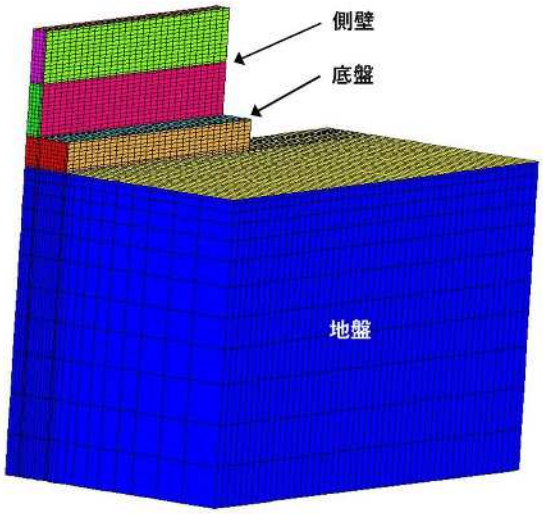


図-2.7　3 次元有限要素法モデル例

- **有限要素法（FEM）**：部材を有限要素に分割し、要素ごとに熱伝導方程式を離散化することで、時間的・空間的に温度分布を算定する。非定常問題であるため時間積分法（例：逐次積分法）が用いられる。
- **簡易解析法**：実務設計では、断面寸法や形状を簡略化した一次元伝熱モデルや、設計指針に基づく近似式も用いられる。ただし、精度は限定的であり、大規模部材では FEM の適用が推奨される。

(4) 温度場に影響を及ぼす要因

温度場の形成には以下の因子が支配的に作用する。

- **部材厚さ**：厚さが大きいほど内部での放熱が遅延し、中心部温度が高くなる。
- **打込み温度**：初期条件として部材全体の温度上昇を規定し、夏季高温時や冷却水利用時に特に重要となる。
- **外気温および気象条件**：外気温の日較差や風速、日射条件は境界条件として温度変動を強く規定する。

・　**型枠や地盤の熱特性**：木製型枠や断熱型枠は熱伝達を抑制し、逆に鋼製型枠は放熱を促進する。地盤接触面では接触熱抵抗が影響する。

(5) 温度場解析の課題

温度場の数値解析は確立された方法論を持つが、実構造物への適用に際しては次の課題が残されている。

・　実験値に基づく断熱温度上昇曲線が、実際の大規模部材の発熱挙動を十分に反映しない場合がある。
・　熱伝導率や熱伝達係数は環境条件に依存して大きく変動し、標準値の一律適用では精度が低下する。
・　型枠や施工方法の影響が解析に十分反映されないケースがある。

2.2.3　湿度場の解析 [3)]

温度ひび割れの発生挙動は、水和熱による温度変化に起因する膨張・収縮のみならず、コンクリート内部の水分移動に伴う体積変化によっても大きく影響を受ける。特に乾燥収縮や自己収縮は、材齢初期から長期にわたり継続的に進行し、温度応力と相互に作用してひび割れ挙動を規定する。したがって、温度場解析と並行して湿度場を解析することは、温度ひび割れ解析体系において不可欠な要素である。

(1) 湿度場の支配方程式

湿度場の変化は、一般に拡散現象としてモデル化され、非定常拡散方程式により表現される。コンクリートのように常に温度変化が生じる固体を対象とする場合は、相対湿度 RH ではなく、蒸気圧 P で定義した方が合理的である。蒸気圧を状態量とすると、次式が支配方程式となる。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_P \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_P \nabla^2 P - \frac{dq_h}{dt} \tag{2.3}$$

ここに、$(dq/dP)_P$：湿気容量 (g/m³･mmHg)、λ_P：透湿率 (g/m･h･mmHg)、P：蒸気圧 (mmHg)、dq_h/dt：水和による湿気密度変化 (g/hr･m³)である。

方程式の形は基本的には式(2.1)と同様で、この式も保存則を表している。つまりこの式は、

（内部湿気量）＝（湿気移動）－（湿気損失）　　(2.4)

という湿気収支を表現している。

湿気移動解析は、主にコンクリート表面から水分が逸散することによる乾燥を解析するもので、自己乾燥は右辺第２項として考慮される。

(2) 入力パラメータ

湿度場解析に必要な主要パラメータは以下の通りである。

- **湿気容量（Moisture Capacity）**：蒸気圧の変化に対するコンクリート中の含水量の変化率を表す特性値であり、含水状態や細孔構造に依存する。
- **透湿率（Permeability）**：水蒸気の移動のしやすさを表し、骨材やセメントペーストの微細構造に大きく影響される。
- **蒸発率（Evaporation Coefficient）**：表面からの水分逸散を規定し、外部環境の温度・湿度・風速条件に依存する。
- **初期含水比**：練り混ぜ時の水分量や養生条件によって決まり、自己収縮や乾燥収縮挙動を初期から左右する。
- **外部環境条件**：外気湿度、気温、風速など。施工時の気象条件が境界条件として強く影響する。

(3) 解析方法

湿度場解析には、有限要素法（FEM）を用いた数値解析が一般的である。部材を要素分割し、時間積分を逐次行うことで、内部の湿度分布および時間変化を得ることができる。設計実務では、簡易的に「乾燥収縮予測式」を用いる場合もあるが、精度は限定的であるため、大規模部材や長期耐久性の評価には FEM による解析が推奨される。

(4) 湿度場に影響を与える因子

湿度場の形成と変化には以下の因子が大きく寄与する。

- **部材厚さおよび表面積／体積比**：断面が厚大であるほど、内部の湿度低下は遅延し、表面との湿度差が大きくなる。
- **養生条件**：散水養生やシート養生は表面の蒸発を抑制し、内部湿度低下を緩和する。
- **環境条件**：相対湿度、気温、風速は蒸発速度に直接影響を与える。
- **材齢依存性**：自己収縮は初期材齢で支配的であり、乾燥収縮は長期にわたり進行するため、両者を適切に区別して扱う必要がある。

(5) 湿度場解析の役割

湿度場解析の結果は、以下の解析ステップに直接利用される。

- **乾燥収縮ひずみの算定**：湿度低下量と収縮係数を用いて推定。
- **自己収縮ひずみの推定**：初期材齢における内部水分消費を考慮。
- **温度場との連成効果の評価**：温度上昇は水分移動を加速し、逆に含水状態の変化は熱的物性値に影響する。

(6) 課題

湿度場解析は温度ひび割れ解析の精度向上に不可欠である一方、以下の課題を有する。

- 湿気容量や透湿率などの特性値は実験的に取得が難しく、環境条件や配合によって大きく変動する。
- 外気湿度や風速といった境界条件は施工時に大きく変化するため、事前設定の不確実性が高い。
- 温度場との連成解析が十分に普及しておらず、現状では温度と湿度を分離的に扱う手法が多い。

2.2.4　応力場の解析

温度場および湿度場の変化によって生じる体積ひずみは、部材が完全に自由に変形できる場合には応力として顕在化しない。しかし実際のマスコンクリート構造物は、内部の温度勾配や外部環境・基盤との相互作用により多様な拘束を受けるため、体積変化が制限され、引張応力や圧縮応力として顕在化する。これがひび割れ発生の直接的な力学的要因である。

(1) 内部拘束応力

内部拘束は、部材断面内で温度や湿度分布に差があることにより生じる自己拘束である。

- **温度差による内部拘束**：中心部は水和熱によって高温となり膨張しようとするが、外部表面は冷却により収縮しやすい。このため、中心部には圧縮応力が、表面部には引張応力が発生する。特に部材厚が大きいほど温度差は顕著になり、表面ひび割れの主要因となる。
- **湿度差による内部拘束**：表面部は乾燥により収縮が進行する一方、内部は湿度が保持され収縮が小さいため、表面に引張応力が生じる。この現象は乾燥収縮ひび割れの起点となる。

(2) 外部拘束応力

外部拘束は、部材全体の変形が外部条件によって制約されることに起因する。

- **基盤拘束**：基礎コンクリートや地盤に剛性が高い場合、上部構造物の収縮が阻害されることで、収縮に伴う引張応力が発生する。
- **既設構造物との一体化**：打継ぎ部や隣接構造物との相互作用により、自由な変形が妨げられる。
- **外部拘束係数**：CP 法において外部拘束の程度を表現するために導入される係数であり、その設定は温度応力解析結果に大きな影響を及ぼす。

(3) 入力パラメータ

応力解析に必要な代表的パラメータは以下の通りである。

- **ヤング係数**：材齢依存的に増加し、応力発生の大きさを規定する。
- **熱膨張係数**：温度変化に伴う膨張・収縮量を決定する基礎パラメータ。
- **引張強度**：発生応力との比較によりひび割れ発生を判定する基準値。

- **クリープ特性**：時間依存的な応力緩和に寄与し、長期的な応力挙動に影響する。
- **外部拘束係数**：外部条件による変形制約の度合いを数値化。

(4) 解析手法

応力場の解析には、部材条件や解析目的に応じて複数の手法が適用される。

①有限要素法（FEM）

- 温度場・湿度場解析の結果を入力し、部材を要素分割して力学的釣合式を解くことで応力分布を算定する。
- 空間的・時間的に詳細な解析が可能であり、応力集中や局所的なひび割れリスクも捉えられる。
- ただし、計算コストや入力パラメータ設定の難易度が高いという課題もある。

②CP 法（Composite Plane 法）[4)]

- 外部拘束を「外部拘束係数」として簡便にモデル化し、平均的な応力レベルを算定する設計指向の手法。
- 実務では適用が容易である一方、外部拘束係数の設定に経験的要素が多く、解析精度はその妥当性に強く依存する。
- 特に複雑な境界条件や部分拘束の評価には限界がある。

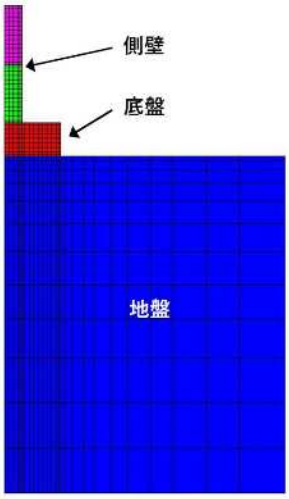


図-2.8　2 次元有限要素法モデル例

(5) 応力場解析の意義と課題

応力場解析は、温度場や湿度場の解析結果を力学的に転換し、ひび割れ判定に直接結びつける重要なステップである。しかしながら、以下の課題が残されている。

- **パラメータ不確実性**：ヤング係数や引張強度の材齢依存特性、クリープの緩和効果などを正確に取得することが困難。

- **外部拘束のモデル化限界**：単一の拘束係数で実構造物の複雑な拘束条件を表すことには限界がある。
- **連成効果の不足**：温度・湿度変化とクリープ挙動を統合的に扱うモデル化は未だ発展途上である。

2.2.5　ひび割れ判定および評価指標

ひび割れ判定は、温度場および湿度場の解析結果に基づいて算定された体積ひずみと拘束条件から求められる応力履歴を用いて、コンクリートの引張強度との関係からひび割れ発生の可能性を評価する過程である。すなわち、温度変化、自己収縮、乾燥収縮などによって生じる体積ひずみが、内部拘束および外部拘束の作用下で引張応力として顕在化し、その応力が材齢依存の引張強度を超過するかどうかによって、ひび割れ発生の有無が判断される。

温度ひび割れ解析では、一般に次のような手順で判定が行われる。

1) 温度場解析および湿度場解析により、各時刻における温度分布および湿度分布を求める。
2) これらの結果から温度ひずみ、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみを算定する。
3) 内部拘束および外部拘束条件を考慮した応力解析を行い、引張応力の時刻歴を求める。
4) 算定された引張応力を材齢依存の引張強度と比較し、ひび割れ発生の可能性を評価する。

ひび割れ判定の方法は大きく以下の方法に分類される。

(1) 応力度法（応力-強度直接比較）

最も基本的な方法は、発生した最大主引張応力をコンクリートの引張強度と直接比較する方法である。すなわち、

$$\sigma_t(t) > f_t(t) \tag{2.5}$$

となる時刻が存在する場合、その時点でひび割れが発生すると判定する。

ここで

$\sigma(t)$：時刻 t における引張応力

$f_t(t)$：時刻 t におけるコンクリートの引張強度

である。

この方法は物理的意味が明確であり、有限要素解析などの数値解析結果を直接用いることができるため、研究および実務の双方で広く用いられている。一方で、この方法はひび割れの発生の有無を判定することはできるものの、ひび割れ幅や進展挙動を直接評価することはできない。

(2) ひび割れ指数（Crack Index）法

実務設計では、引張応力と引張強度の比を指標化した「ひび割れ指数（Crack Index)」が広く用いられている。ひび割れ指数 $I_{cr}(t)$は一般に次式で定義される。

$$I_{cr}(t)=\frac{f_{tk}(t)}{\sigma_t(t)} \tag{2.6}$$

ここで

$\sigma(t)$：時刻 t における引張応力

$f_{tk}(t)$：時刻 t におけるコンクリートの引張強度特性値

である。

解析期間中の最小値

$$I_{cr,min}=\min I_{cr}(t) \tag{2.7}$$

を求め、その値に基づいてひび割れ発生の危険度を評価する。一般に、ひび割れ指数が小さいほどひび割れ発生の可能性が高くなる。設計指針では、ひび割れ指数の値に応じて以下のような区分が示されている。

- $I_{cr} \geq 1.5$ ：ひび割れ発生の可能性は小さい
- $1.2 \leq I_{cr} < 1.5$ ：ひび割れ発生の可能性がある
- $I_{cr} < 1.2$ ：ひび割れ発生の可能性が高い

この方法は、対策の比較検討や設計判断に利用しやすく、温度応力解析結果の評価指標として広く採用されている。

(3) ひび割れ幅評価

ひび割れ発生が予想される場合には、構造物の耐久性や水密性の観点から、ひび割れ幅の評価が必要となる。ひび割れ幅の算定には、以下の方法が用いられる。

1)　設計式による推定

2)　破壊力学的解析による評価

設計式による方法では、鉄筋量、拘束度、応力状態などを考慮した経験式によりひび割れ幅を算定する。一方、破壊力学的手法では、コンクリートの破壊エネルギーや応力－開口関係を考慮した数値解析により、ひび割れの進展および幅の発展過程を評価することが可能である。

(4) 実務における判定の考え方

実務においては、まず応力度法またはひび割れ指数法によりひび割れ発生の可能性を評価し、必要に応じて配合設計の変更、養生方法の改善、断熱対策、冷却対策、誘発目地の設置などの対策を検討する。その後、耐久性や水密性が特に重要な部位については、ひび割れ幅の評価を行い、要求性能を満足するかを確認する。

また、施工時には温度計測やひび割れ観測を実施し、解析結果との比較により解析モデルの妥当性を確認することが望ましい。これにより、解析モデルの精度を向上させるとともに、次工程や類似構造物への適用における信頼性を高めることができる。

(5) 本研究との関係

温度ひび割れ判定の精度は、温度履歴、湿度履歴、拘束条件および材料特性などの入力パラメータの設定に大きく依存する。特に、断熱温度上昇特性、湿気移動特性、外部拘束係数などの入力値の不確実性は、応力算定結果およびひび割れ指数に直接影響を与える。

したがって、温度ひび割れ解析の信頼性を向上させるためには、これらの解析入力値を合理的に同定することが重要である。本研究では、温度解析、湿気移動解析および温度応力解析に必要となる入力パラメータのうち、断熱温度上昇特性および熱伝達係数、湿気移動特性値、ならびに外部拘束係数を対象として、メタヒューリスティクス最適化を用いた逆解析による同定方法を検討する。

2.3　温度ひび割れ解析の入力パラメータ

マスコンクリートにおける温度ひび割れ解析は、施工後の水和熱発生から温度上昇・冷却過程を経て、応力発生およびひび割れ進展に至る一連のプロセスを数値的に再現するものである。そのためには、熱的挙動・力学的挙動・境界条件の3側面にわたる多様な入力パラメータを適切に設定する必要がある。これらのパラメータは実験的に同定される場合が多いが、同定精度が解析結果に直結するため、設定における不確実性は工学的に極めて重要な課題である。以下では、温度ひび割れ解析に一般的に必要となる主要な入力パラメータを整理する。

2.3.1　温度解析入力値

①断熱温度上昇特性

セメントの水和反応による発熱量を表す最も基礎的なデータであり、材料ごとに実施される「断熱温度上昇試験」に基づいてモデル化される。断熱温度上昇特性は、一般に「最大温度上昇量（Q_∞）」と「発熱速度を規定するパラメータ（反応速度定数 k）」で表現される。フライアッシュや高炉スラグなど混和材の使用により、水和反応の進行速度は大きく変動するため、実配合ごとの特性値が必要となる。

②比熱容量（c）および密度（ρ）

コンクリートの温度応答を規定する基本量であり、骨材種類や含水状態によって差異が生じる。とくに水分の相変化を伴う場合には、実効比熱の扱いに留意する必要がある。

③熱伝導率（k）

部材内部での熱移動を支配するパラメータであり、骨材の種類に依存する。花崗岩・石灰石など骨材の熱伝導率は大きく異なるため、設計段階での代表値設定には注意が必要である。

④熱伝達係数

コンクリート表面と外気との熱交換を規定する。風速・日射条件・型枠材の熱特性に左右され、施工条件依存性が高い。

2.3.2　湿気移動解析入力値

①透湿率

材料中の湿気（水蒸気）が、蒸気圧の勾配に比例して移動するとするモデルに基づき、この比例係数として定義される。

②湿気容量

湿気容量は、コンクリート中の含水量と蒸気圧との関係を表す特性値であり、含水量を蒸気圧で微分した値として定義される。本特性値は湿度状態に依存して非線形に変化する。

③蒸発率

蒸発率は、水分が気化して空気中に移動する速度を示す。風の有無による影響を受ける。

2.3.3　応力解析入力値

①ヤング係数の発現特性 $E(t)$

材齢依存性を有し、初期材齢では低く時間とともに増大する。温度履歴依存性も強いため、温度関数を組み込んだモデル化が必要となる。

②引張強度特性 $f_t(t)$

温度ひび割れ発生の直接的指標であり、圧縮強度に比べ著しく小さい。材齢初期での測定は困難であるが、適切な推定が不可欠である。

③線膨張係数 α

温度変化に伴う自由膨張・収縮量を規定する基本量。骨材種類に依存し、$0.8\sim1.2\times10^{-5}$/℃程度の範囲に分布する。

④クリープ特性および応力緩和能

コンクリートは材齢初期において顕著な粘弾性的挙動を示し、発生応力を時間とともに緩和する。これを考慮するために、一般化ケルビンモデルやB3モデルなどを用いた構成則が実務で広く採用されている。

⑤乾燥収縮・自己収縮ひずみ

温度変化と複合的に作用し、ひび割れ感受性を高める要因となる。とくに低水結合材比の高性能コンクリートでは自己収縮の影響が無視できない。

2.3.4　境界条件および施工条件

①外気温・風速・日射条件

表面温度の冷却速度や温度勾配形成に直接的に作用するため、解析においては気象データの適切な入力が求められる。

②断面寸法・施工手順

打込みリフト厚、打設間隔、打継ぎ条件などは、温度分布や外部拘束条件を大きく左右する。

③拘束条件

外部拘束（既設構造物・基礎地盤による拘束）と内部拘束（部材内の温度差による拘束）があり、境界条件として正しくモデル化する必要がある。

2.4　パラメータ同定の意義と現状の課題

2.4.1　入力パラメータ設定における課題

2.3節の入力パラメータは、いずれも温度ひび割れ解析の精度を大きく左右するが、実務上はいくつかの課題が存在する。

- 材料パラメータは配合条件や原材料産地に強く依存するため、設計値を一律に適用すると誤差が大きくなる。
- 初期材齢の力学特性は試験値の取得が困難であり、推定式や既往データに依存せざるを得ない。
- クリープや自己収縮などの時間依存特性は環境条件に敏感であり、モデルパラメータの同定が難しい。
- 境界条件は現場の施工条件・気象条件によって大きく変動するため、解析では実測データを取り入れたキャリブレーションが不可欠である。

2.4.2　パラメータ同定の意義

マスコンクリートの温度ひび割れ解析は、入力パラメータの適切な設定に強く依存する。すなわち、熱的パラメータ・力学的パラメータ・境界条件のいずれかに誤差が含まれると、温度履歴の予測精度や発生応力の評価に直接的な影響を及ぼし、解析結果の信頼性が著しく低下する。したがって、入力パラメータを高精度に同定することは、温度ひび割れのリスク評価と抑制対策の合理的立案に不可欠である。

具体的には、以下のような意義を有する。

①設計合理化

精度の高いパラメータを用いることで、過剰な安全側設計を避け、材料選定や冷却配管計画などの対策を最適化できる。

②解析精度の向上

材齢依存性や環境依存性を反映したパラメータを適切に導入することで、温度上昇量・温度差・応力履歴の時系列挙動を実構造物に近い形で再現可能となる。

③劣化予測への展開

温度ひび割れは耐久性低下の起点となるため、長期的な鋼材腐食や断面欠損の予測に資する基礎情報となる。パラメータ同定はライフサイクルマネジメントの基盤を提供する。

2.4.3　パラメータ同定の現状における課題

実務や研究におけるパラメータ同定には多くの課題が残されている。代表的なものを以下に整理する。

①熱的パラメータの不確実性

断熱温度上昇試験は小規模供試体を用いるため、実構造物における養生条件や配合スケールの影響を十分に反映できない場合がある。また、混和材の反応特性は産地・種類・置換率によって大きく変動し、既往データの単純な適用では誤差が大きい。

②湿度パラメータの不確実性

湿度パラメータは、コンクリート内部の相対湿度の計測が容易ではないことに加え、透湿率や湿気容量などの湿気移動特性が相対湿度に依存して変化するため、その特性を適切に把握することが難しく、研究例も限られている。

③力学的パラメータの測定困難性

初期材齢の引張強度やヤング係数は取得が難しく、推定式に依存せざるを得ない。また、クリープや自己収縮特性は試験に長期間を要し、かつ環境条件（温湿度）に敏感であるため、設計で用いる代表値の設定に大きな不確実性が伴う。

④境界条件の変動性

外気温や風速、日射条件などの環境要因は施工時に大きく変動するため、事前解析での設定が難しい。また、型枠の断熱特性や施工手順（打設リフト厚・打継ぎ間隔）は現場条件に左右され、標準的数値での一律設定では不十分となる。

⑤時間依存特性のモデル化限界

コンクリートの温度依存性・材齢依存性を統合的に評価する構成則は提案されているが、実務で汎用的に適用可能なモデルは限定的である。特に高性能コンクリートや新材料を対象とする場合、既往モデルでは適用範囲外となる場合がある。

⑥実構造物での検証不足

多くの研究は室内試験や限定的な実測に基づいており、大規模構造物における長期挙動との対応関係は十分に確立されていない。そのため、施工時の実測データと解析結果を突き合わせた体系的な検証が不足している。

2.5　第2章のまとめ

以上、本章では、マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生機構を整理するとともに、温度場、湿度場および応力場から構成される温度ひび割れ解析の体系について示した。

また、各解析に必要となる主要な入力パラメータを整理し、これらの設定が解析結果およびひび割れ評価に大きな影響を及ぼすことを示した。これらの入力値には、材料特性、施工条件および環境条件等に起因する不確実性が含まれるため、対象構造物の実測データを活用して合理的に設定することが重要である。

次章以降では、この課題に対し、メタヒューリスティクス最適化とFEM解析を組み合わせた逆解析による入力パラメータ同定手法について検討する。

【参考文献】

1)　土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2023.
2)　日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.
3)　中村秀明：コンクリートの収縮ひび割れ対策　①ひび割れ（温度応力）解析の基礎，コンクリート工学，Vol.50, No.2, pp.207-212, 2012.2.
4)　日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書　～外部拘束係数の見直しと CP 法の適用範囲拡大～，1998.

第 3 章

メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用

第 3 章　メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用

3.1　本章の目的と位置づけ

前章では、マスコンクリートの温度ひび割れ現象および温度応力解析の理論体系について整理し、温度、湿度および応力の各解析段階において、多数の解析入力パラメータが解析結果を支配していることを示した。特に、断熱温度上昇特性、湿気移動特性値、および外部拘束係数といった入力値は、温度ひび割れ解析の精度に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、実務においては経験的あるいは代表値に基づいて設定される場合が多く、解析対象ごとの合理的な決定が困難であるという課題があることを指摘した。

これらの解析入力パラメータは、直接的な計測や試験による把握が困難なものが多く、解析モデルの高度化のみでは解析精度の向上には限界がある。このため、計測結果や参照解との整合性に基づいて入力値を推定する逆解析によるアプローチが有効であると考えられる。しかし、温度ひび割れ解析に関連する逆解析問題は、一般に非線形性が強く、多数のパラメータが相互に影響し合う多変数問題であり、評価関数が多峰性を有する場合も少なくない。このような問題に対して、勾配情報を前提とした従来の最適化手法を適用することには多くの困難が伴う。

そこで本章では、温度ひび割れ解析における解析入力パラメータ同定問題を、数値解析を伴う逆解析問題および最適化問題として位置づけ、その解法としてメタヒューリスティクス最適化手法を適用する意義と妥当性について検討することを目的とする。具体的には、逆解析問題の基本的な考え方と特徴を整理したうえで、代表的なメタヒューリスティクス最適化手法の概要と特性を俯瞰的に比較し、本研究で対象とする問題特性との適合性を明らかにする。

また、本章では、個々のアルゴリズムの数理的詳細や更新式を網羅的に論じることを目的とはせず、あくまで「温度ひび割れ解析入力パラメータの同定」という本研究の課題に対して、どのような最適化手法が適しているかという観点から整理を行う。その結果として、本研究においてPSOを基本手法として採用する合理性を示す。

本章で得られた整理および手法選定の結果は、第4章から第6章において温度、湿度および応力の各解析入力パラメータを同定する際の共通的な理論的基盤となる。すなわち、第3章は、第2章で整理した解析体系と、第4章から第6章で構築する統一的な同定フレームワークとを結び付ける橋渡しの章として位置づけられる。

3.2　逆解析問題と最適化の考え方

3.2.1　逆解析問題の定義と特徴

逆解析（inverse analysis）とは、観測データと数値解析結果との整合性に基づき、未知パラメータを推定する手法である[1)]。構造解析分野においては、材料定数、境界条件、拘束係数などを同定する目的で広く利用されている。

一方、評価関数が非線形かつ多峰性を示す場合や、数値解析の計算コストが高い場合には、勾配ベースの最適化手法では局所最小に陥る可能性が高く、安定した探索が困難となる。このような問題に対しては、導関数を必要とせず、確率的探索により大域的最適解（global optimum）を探索するメタヒューリスティクス最適化手法の活用が有効となる。

3.2.2　従来手法の課題と限界

勾配情報を用いる最適化手法は、目的関数の勾配に基づいて探索方向を決定することで解を逐次的に探索する手法である。一方、非凸な評価関数では初期値に依存して局所最適解に収束する可能性があり、多峰性を有する最適化問題では大域的最適解の探索が困難となる場合がある[2),3)]。また、有限要素解析（FEM）を伴う最適化問題では、1回の評価コストが大きいため、多数の反復計算を必要とする手法では、計算負荷が大きくなり、実用上の制約となる。

これに対し、メタヒューリスティクスは勾配情報を必要とせず、確率的探索によって探索空間内の複数の候補解を探索できるため、非凸・非線形問題への適用が可能である。また、個体群を用いる手法では各候補解の評価を独立に実行できるため、並列計算との親和性が高く、FEM解析を伴う高コストな最適化問題への適用が期待できる。

3.2.3　最適化アルゴリズム導入の意義

本研究が対象とする温度応力解析および湿気移動解析における逆解析問題では、非線形性・制約条件・高評価コストといった課題が複合的に存在する。このような問題に対しては、探索性能、収束安定性、計算効率および並列化適性を考慮した最適化手法の選定が重要となる。そこで本研究では、複数のメタヒューリスティクス最適化手法について比較検討し、FEM 解析を伴うパラメータ同定問題への適用性を評価する。

3.3　メタヒューリスティクスの概要と分類

3.3.1　メタヒューリスティクスとは

メタヒューリスティクスは、確率的な探索規則などを利用して探索空間を広く探索し、厳密な大域的最適性を保証することよりも、実用的な計算量で良好な解を得ることを目的とする最適化手法の総称である [4),5)]。厳密最適解の保証を目的とせず、探索の多様性（diversification）と解の洗練（intensification）のバランスをとる点に特徴がある。

メタヒューリスティクスでは、候補解の生成・更新、評価、探索の多様性と集中化の制御、および停止判定などを組み合わせて探索が行われる。ただし、その具体的な探索機構はアルゴリズムごとに異なる。

3.3.2　代表的なアルゴリズム

(1) 遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）

1) 概要と背景

遺伝的アルゴリズムは、1975 年に Holland により提案された進化的最適化手法であり [6),7)]、生物進化の過程（選択・交叉・突然変異）を模倣した確率的最適化アルゴリズムである [8)]。評価関数がブラックボックスであっても適用でき、非凸・多峰性・ノイズを含む問題にも有効とされる。複数の候補解（個体）からなる集団（population）を扱い、優れた個体の特徴を遺伝的操作により次世代へ継承することで、探索の多様性（exploration）と解の洗練（exploitation）を両立させながら最適解探索を行う。

2) アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）

GA は以下の手順で構成される。処理手順を**図-3.1** に示す [6),7)]。

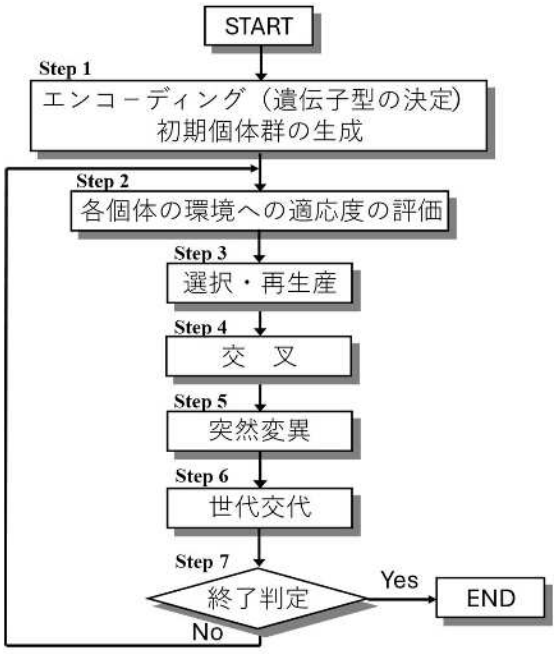


図-3.1　GA の処理手順（文献 6),7) を参考）

Step 1：表現と初期個体群の生成（Encoding & Initialization）

個体を問題に応じた遺伝子表現により表現し、探索空間内に N 個の個体からなる初期個体群を生成する。本研究では連続値パラメータを扱うため、個体を実数ベクトル $x=\left(x_1,x_2,\ldots,x_D\right)$ として表現し、探索空間の定義域内で乱数により生成する。

Step 2：目的関数と適応度の評価（Fitness Evaluation）

各個体について目的関数値を計算し、必要に応じて選択方法に応じた適応度に変換する。最小化問題において目的関数値が非負の場合には、例えば目的関数値が小さいほど適応度が大きくなるように、次式により変換する。

$$F\left(x_i\right)=\frac{1}{1+f\left(x_i\right)} \tag{3.1}$$

Step 3：選択・再生産（Selection & Reproduction）

適応度に基づいて次世代の生成に用いる親個体を選択する。適応度の高い個体ほど選択される確率を高くすることで、優良個体の情報を次世代へ継承する。ルーレット選択の場合、個体 x_i が選択される確率は次式で計算される。

$$p\left(x_i\right)=\frac{F\left(x_i\right)}{\sum_{j=1}^{N}F\left(x_j\right)} \tag{3.2}$$

選択された個体は交叉に用いる親個体となる。

Step 4：交叉（Crossover）

選択された親個体間で遺伝情報の一部を交換し、新たな子個体を生成する。交叉方法には、一点交叉、二点交叉、算術交叉などがあり、個体の表現形式に応じて適切な方法を用いる。本研究では実数値を扱うため算術交叉を用い、親個体 $x^{(1)},x^{(2)}$ から子個体 x' を次式により生成する。

$$\begin{aligned} &x'_k=\alpha x_k^{(1)}+\left(1-\alpha\right)x_k^{(2)} \\ &0\le\alpha\le1 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Step 5：突然変異（Mutation）

個体の遺伝子を一定の確率で変化させることにより、集団の多様性を維持し、探索の停滞を防止する。突然変異方法は個体の表現形式によって異なり、二進表現ではビット反転、実数値表現ではランダム摂動などが用いられる。本研究では実数値表現を用い、突然変異確率 p_m で各成分にランダム摂動を加える。

$$x'_k=x'_k+\delta,\quad \delta\sim U\left(-\epsilon,\epsilon\right) \tag{3.4}$$

Step 6：世代交代（Replacement）

生成された子個体により次世代の集団を構成する。なお、世代交代には、現世代の最良個体を次世代に保存するエリート戦略を併用する場合もある。

Step 7：終了判定（Termination）

最大世代数$G_{\max}$に到達した場合、または最良値の改善が十分小さくなった場合に探索を終了し、得られた最良個体x_{best}を解とする。終了条件を満たさない場合は Step 2 に戻り、探索を継続する。

3）GA の特徴（長所・短所）

長所

・導関数を必要とせず、ブラックボックス最適化問題に適用可能である
・非凸性、多峰性、およびノイズを含む問題に対して適用実績が多い
・個体群を用いた探索により、単点探索法と比較して局所解に陥りにくい
・各個体の評価が独立であり、並列計算に適している

短所

・最適解への理論的保証が弱い
・アルゴリズムパラメータ（個体数、交叉率、突然変異率等）に対する感度が高く、設計が難しい
・個体群の多様性が失われた場合、初期段階で局所解に早期収束（premature convergence）しやすい
・高次元問題では探索効率が低下しやすい

(2) 粒子群最適化（PSO: Particle Swarm Optimization）

1）概要と背景

粒子群最適化は、1995 年に Kennedy と Eberhart により提案された、鳥の群れや魚群などの社会的行動に着想を得た確率的最適化手法である。複数の候補解（粒子）が空間内を移動しつつ、自己の経験（個体ベスト）と仲間の経験（全体ベスト）を共有しながら最適解を探索する。連続最適化に広く用いられ、導関数情報が不要であり、多峰性・非凸性・ノイズを含む問題にも適用可能である[9),10)]。

2）アルゴリズム（PSO: Particle Swarm Optimization）

PSO は以下の手順で構成される。処理手順を**図-3.2** に示す[9),10)]。

Step 1：初期化（Initialization）

探索空間内に粒子の初期位置$x_i^{(0)}$と初期速度$v_i^{(0)}$を乱数により設定する。
各粒子の自己最良位置 $pbest_i$は初期位置に設定し、全体最良位置 $gbest$は全粒子の中で最良の初期位置として定める。

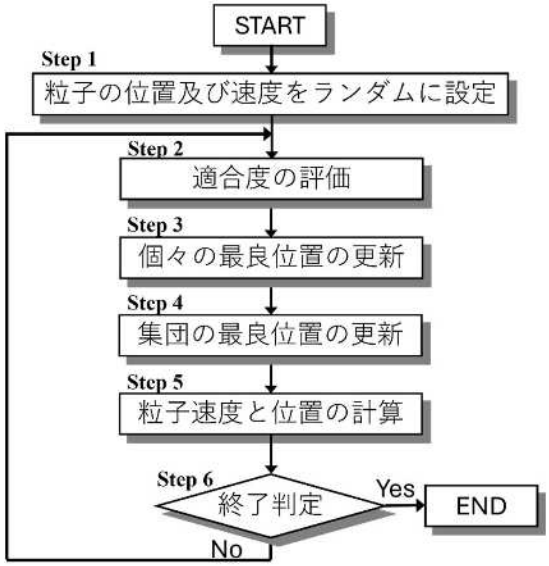


図-3.2　PSO の処理手順（文献 9),10)を参考）

Step 2：評価（Evaluation）

各粒子の位置 $x_i^{(t)}$ について目的関数 $f\left(x_i^{(t)}\right)$ を評価する。

Step 3：個々の最良位置 *pbest* の更新（Update pbest）

各粒子について、現在位置の評価値がこれまでの自己最良値より優れている場合は

$$pbest_i \leftarrow x_i^{(t)}$$

と更新する。

Step 4：集団の最良位置 *gbest* の更新（Update gbest）

すべての粒子の $pbest_i$ の中から最良のものを選び、

$$gbest = \arg\min_i f\left(pbest_i\right) \tag{3.5}$$

とする。

Step 5：速度および位置の更新（Update velocity and position）

各粒子の速度を次式により更新する。

$$v_i^{(t+1)} = wv_i^{(t)} + c_1 r_1 \left(pbest_i - x_i^{(t)}\right) + c_2 r_2 \left(gbest - x_i^{(t)}\right) \tag{3.6}$$

更新後の速度を用いて粒子の位置を次式により計算する。

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \tag{3.7}$$

となる。

ここで、w は慣性重み、c_1, c_2 は認知・社会的学習係数、r_1, r_2 は一様乱数である。慣性項は粒子の運動を継続させ、認知項は自己経験への回帰、社会項は群全体の知識への追従を表す。これらのバランスにより、局所探索と大域探索が両立する。移動する粒子の模式図を**図-3.3** に示す。

Step 6：終了判定（Termination）

所定の評価回数に達した場合、または *gbest* の改善が閾値以下となった場合に終了する。満たさない場合は Step2 に戻り、探索を継続する。

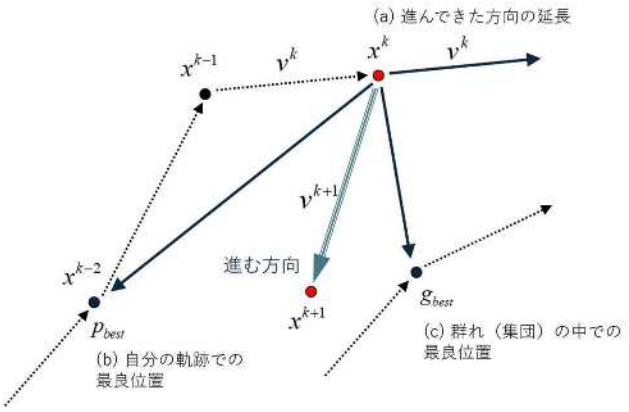


図-3.3　移動する粒子の模式図（文献 1)より引用）

3) PSO の特徴（長所・短所）

長所

- 導関数を必要とせず、ブラックボックス最適化問題に適用可能である
- 個体最良解および群全体の最良解の情報を活用し、局所探索と大域探索を行うことができる
- アルゴリズム構造が簡潔であり、調整すべきパラメータ数が少ない
- 各粒子の評価が独立であるため、並列計算に適している

短所

- 探索の多様性が失われた場合、局所解に収束する恐れがある [11)]
- パラメータ設定$\left(w, c_1, c_2\right)$に対する感度が比較的高く問題特性に応じた調整が必要となる
- 高次元問題では探索効率が低下しやすい

(3) 人工蜂群アルゴリズム（ABC: Artificial Bee Colony）

1) 概要と背景

人工蜂群アルゴリズムは、2005 年に Karaboga により提案された [12)]、蜜蜂の採餌行動を模倣した群知能型手法である。食物源（解候補）を探索する「働き蜂」、情報を共有して良

好な食物源を選ぶ「追従蜂」、改善が見られない食物源を放棄し新規探索を行う「偵察蜂」が役割分担して探索を進める [12), 13)]。働き蜂および追従蜂による既知の食物源周辺の探索と、偵察蜂による新たな食物源の探索を組み合わせることで、局所的な活用と大域的な探索を行う [12), 13)]。

2) アルゴリズム（ABC: Artificial Bee Colony）

ABC は以下の手順で構成される。処理手順を**図-3.4** に示す。

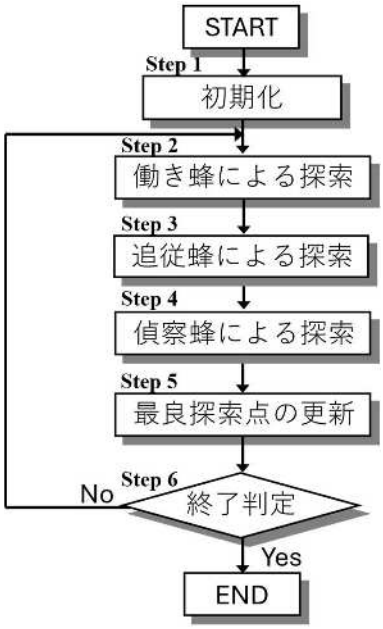


図-3.4　ABC の処理手順（文献 12),13) を参考）

Step 1：初期化（Initialization）

探索空間内に食物源 x_i（解候補）を N 個ランダムに生成する。

各食物源に対応して働き蜂を割り当てる。

Step 2：働き蜂フェーズ（Employed Bee Phase）

各働き蜂は、担当する食物源 x_i から次式により近傍解 v_i を生成する [13)]。

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}\left(x_{ij} - x_{kj}\right) \tag{3.8}$$

ここで、$k \neq i,\quad \phi_{ij} \sim U(-1,1)$ は一様乱数である。

新しい解 v_i の適用度が良い場合、x_i を更新する。

Step 3：追従蜂フェーズ（Onlooker Bee Phase）

各食物源の適応度$F\left(x_i\right)$に基づき追従蜂がその食物源を選択する確率p_iを計算する。

食物源の適応度は次式で計算される。

$$F\left(x_i\right)=\frac{1}{1+f\left(x_i\right)} \tag{3.9}$$

選択確率は次式で計算される[12),13)]。

$$p_i=\frac{F\left(x_i\right)}{\sum_{j=1}^{N}F\left(x_j\right)} \tag{3.10}$$

追従蜂は選択確率p_iに従って食物源を選択し、選択した食物源の近傍探索を行う。

Step 4：偵察蜂フェーズ（Scout Bee Phase）

一定回数“limit”更新されなかった場合、該当食物源を放棄し、新たなランダム解に置換する。

$$x_{ij}=x_j^{\min}+rand\left(0,1\right)\left(x_j^{\max}-x_j^{\min}\right) \tag{3.11}$$

Step 5：最良解の更新（Memorize Best Solution）

これまでに得られた最良解を記録する。

Step 6：終了判定（Termination）

あらかじめ設定した終了条件を満たした場合は終了し、満たさない場合は Step 2 に戻り探索を継続する。

3）特徴（長所・短所）

長所

・探索多様性が比較的高く、単点探索法と比較して局所解に陥りにくい

・働き蜂、追従蜂、偵察蜂といった役割分担により、局所探索と大域探索のバランスがとりやすい

・アルゴリズム構造が比較的簡潔であり、主要な制御パラメータが少ない

・各候補解の評価が独立であるため、並列計算に適している

短所

・探索の進行が緩やかとなり、問題によっては収束速度が遅くなる場合がある

・limit パラメータの設定に対する感度が高く、問題特性に依存した調整が必要となる

(4) 差分進化法（DE: Differential Evolution）

1) 概要と背景

差分進化法は、1995 年に Storn と Price により提案された実数値進化計算手法である[14]。GA と同じ進化計算系に属するが、個体間の差分ベクトルを利用して新たな候補解を生成する点に特徴があり、連続最適化問題に広く適用されている[14),15)]。

2) アルゴリズム（DE: Differential Evolution）

DE は以下の手順で構成される。処理手順を図-3.5 に示す。

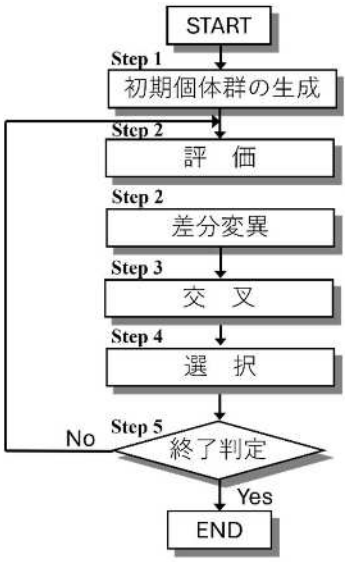


図-3.5　DE の処理手順（文献 14),15)を参考）

Step 1：初期個体群の生成（Initialization）

探索空間の定義域内に N 個の個体 x_i をランダムに生成する。各個体は D 次元の設計変数ベクトルとして次式で表される。

$$x_i = \left(x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{iD}\right), \quad i = 1, 2, \ldots, N$$

Step 2：目的関数値の評価（Objective Function Evaluation）

各個体に対して目的関数 $f\left(x_i\right)$ を評価する。

Step 3：変異（Mutation）

個体 x_i に対し、無作為に選択した 3 個体 x_{r1}, x_{r2}, x_{r3} を用いて、次式により変異ベクトル v_i を生成する[14)]。

$$v_i = x_{r1} + F \cdot \left(x_{r2} - x_{r3} \right) \tag{3.12}$$

ここで、F は差分ベクトルのスケーリング係数であり、通常 0.4～1.0 程度に設定される [15]。

Step 4：交叉（Crossover）

変異ベクトル v_{ij} と個体ベクトル x_{ij} に対して、交叉率 に基づく二項交叉を行い、次式により試行ベクトル u_{ij} を生成する。

$$u_{ij} = \begin{cases} v_{ij,} & if\ rand_j \le CR\ or\ j = j_{raud} \\ x_{ij}, & otherwise \end{cases} \tag{3.13}$$

ここで、CR は交叉率であり、$0 \le CR \le 1$ で設定される。

j_{rand} ：試行ベクトルが少なくとも一つの成分を変異ベクトルから継承することを保証するために無作為に選択されるインデックス

Step 5：選択（Selection）

試行ベクトル u_i の目的関数値が個体ベクトル x_i の目的関数値以下の場合は、個体ベクトル x_i を試行ベクトル u_i に置き換え、そうでない場合は x_i を保持する。

$$x_i^{(t+1)} = \begin{cases} u_i, & if\ f\left(u_i\right) \le f\left(x_i\right) \\ x_i, & otherwise \end{cases} \tag{3.14}$$

この選択操作により、集団の目的関数値は改善または維持され、悪化する個体は次世代に採用されない。

Step 6：終了判定（Termination）

あらかじめ設定した最大反復回数への到達、目的関数値の改善量、または所定の目的関数値への到達などの終了条件を満たした場合に探索を終了する。

3）特徴（長所・短所）

DE の長所・短所は文献 14)に基づき整理すると以下のとおりである。

長所

・実数値の連続最適化問題に適用できる

・アルゴリズム構造が比較的単純であり、実装が容易である

・制御パラメータが比較的少ない

短所

・スケーリング係数F、交叉率CRおよび個体数Nなどの制御パラメータの設定が探索性能に影響する
・問題によって適切な制御パラメータが異なる
・高次元問題では探索性能が低下する場合がある

(5) 焼きなまし法（SA: Simulated Annealing）

1) 概要と背景

焼きなまし法は、1983 年に S. Kirkpatrick、C. D. Gelatt、M. P. Vecchi らによって提案された単一点型確率的探索手法である[16]。金属の焼きなまし過程に倣い、探索初期は高温で自由に移動し、温度を徐々に下げて解を固定していく。確率的に悪化解も受理することで局所解からの脱出を可能とする[16),17)]。

2)アルゴリズム（SA: Simulated Annealing）

SA は以下の手順で構成される[16),17)]。処理手順を図-3.6 に示す。

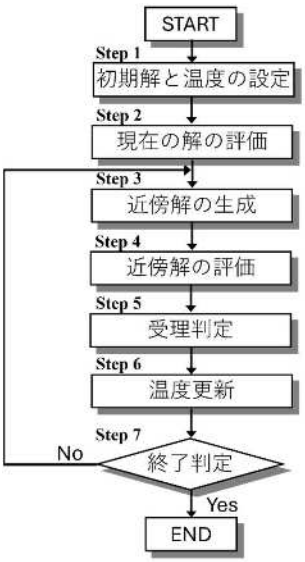


図-3.6　SA の処理手順（文献 16),17)を参考）

Step 1：初期解と初期温度の設定（Initialization）

初期解xを探索空間内でランダムに生成し、初期温度Tを設定する。

Step 2：現在の解の評価（Evaluation）

現在の解xに対して目的関数$f(x)$を計算する。

Step 3：近傍解の生成（Neighbor Generation）

現在の解xの近傍から新たな解x'を生成する。

Step 4：近傍解の評価（Neighbor Evaluation）

近傍の解x'に対して目的関数$f\left(x'\right)$を計算する。

Step 5：受理判定（Metropolis Criterion）

$\Delta f = f\left(x'\right) - f\left(x\right)$とする。

$\Delta f \le 0$の場合は、$x \leftarrow x'$とする。

$\Delta f > 0$の場合は、次式の確率で$x \leftarrow x'$を受理する。

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) \tag{3.15}$$

Step 6：温度更新（Cooling）

温度は、あらかじめ設定した冷却スケジュールに従って徐々に低下させる。本研究では、一般的な幾何冷却として次式を用いる。

$$T \leftarrow \alpha T, \quad 0 < \alpha < 1 \tag{3.16}$$

ここで、αは冷却率である。

Step 7：終了判定（Termination）

あらかじめ設定した終了条件を満たした場合に探索を終了する。満たさない場合は Step 3 に戻り、探索を継続する。

3）特徴（長所・短所）

SA の長所・短所は文献 17)に基づき整理すると以下のとおりである。

長所

・アルゴリズム構造が単純であり、実装が容易である

・評価関数の勾配情報を必要とせず、ブラックボックス最適化問題に適用可能である

・確率的受理規則により、局所解から脱出することが可能である

短所

・単一点探索であるため並列化が困難であり、大規模問題では計算効率が低下しやすい

・温度スケジュール（初期温度、冷却率、終了条件）の設計に対する感度が高く、問題依存性が大きい

・高次元問題では探索空間が急激に拡大し、収束に長時間を要する場合がある

3.3.3　評価関数の概要

本研究では代表的なベンチマーク関数である Parabola、Rastrigin、Griewank、Rosenbrock's saddle、および Shubert を用いて各手法の性能を比較した。これらの関数は、最適化アルゴリズムの探索性能や収束性能を評価するための代表的なベンチマーク関数として広く用いられている[18)-20)]。以下に各関数について説明する。

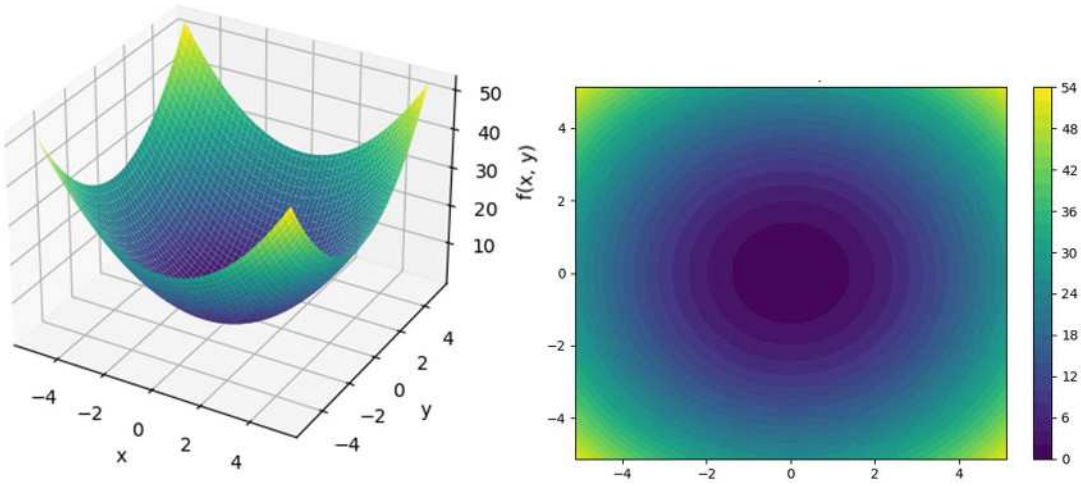
・Parabola 関数

関数式を以下に示す。

$$f(x)=\sum_{i=1}^{n}x_i^2 \tag{3.17}$$

ここで、$x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$は、n 次元の実数ベクトルである。

図-3.7 に Parabola 関数の 3 次元形状および Z 方向から見た等高線図を示す。



Parabola 関数の 3 次元形状図　　Z 方向からの等高線図

図-3.7　Parabola 関数の 3 次元形状図と Z 方向からの等高線図

Parabola 関数は単峰性関数であり、原点 $x=(0,\cdots,0)$ において唯一の最小値を持つ。探索空間全体が滑らかな凸形状を有するため、局所解が存在せず、大域的最適解への収束が比較的容易である。このため、本関数は最適化アルゴリズムの基本的な収束特性や最終精度を評価するための基準関数として広く用いられている。

探索範囲：$-5.12\le x_i\le 5.12$

最小値　：$f(x)=0.0\quad x=(0,\cdots,0)$

・Rastrigin 関数

関数式を以下に示す。

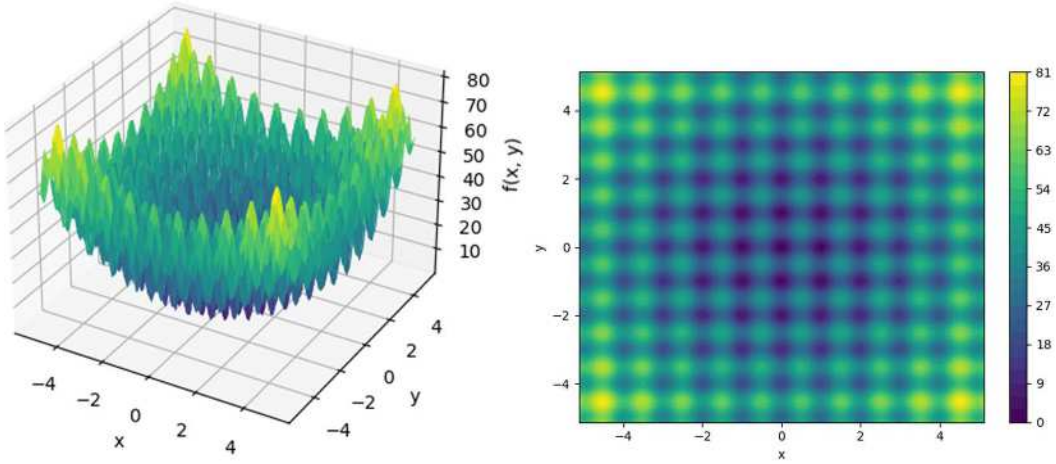
$$f(x)=10n+\sum_{i=1}^{n}\left(x_i^2-10\cos(2\pi x_i)\right) \tag{3.18}$$

ここで、$x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$は、n 次元の実数ベクトルである。

図-3.8 に Rastrigin 関数の 3 次元形状および Z 方向から見た等高線図を示す。

本関数は強い多峰性を有する関数であり、探索空間内に多数の局所最小値が周期的に分布している。一方で、大域最小値は原点に存在する。局所解への収束が生じやすいため、

アルゴリズムの大域探索能力および局所解回避性能を評価するために広く用いられる。



Rastrigin 関数の 3 次元形状図　　Z 方向からの等高線図

図-3.8　Rastrigin 関数の 3 次元形状図と Z 方向からの等高線図

探索範囲：$-5.12 \le x_i \le 5.12$

最小値　：$f(x) = 0.0 \quad x = (0, \cdots, 0)$

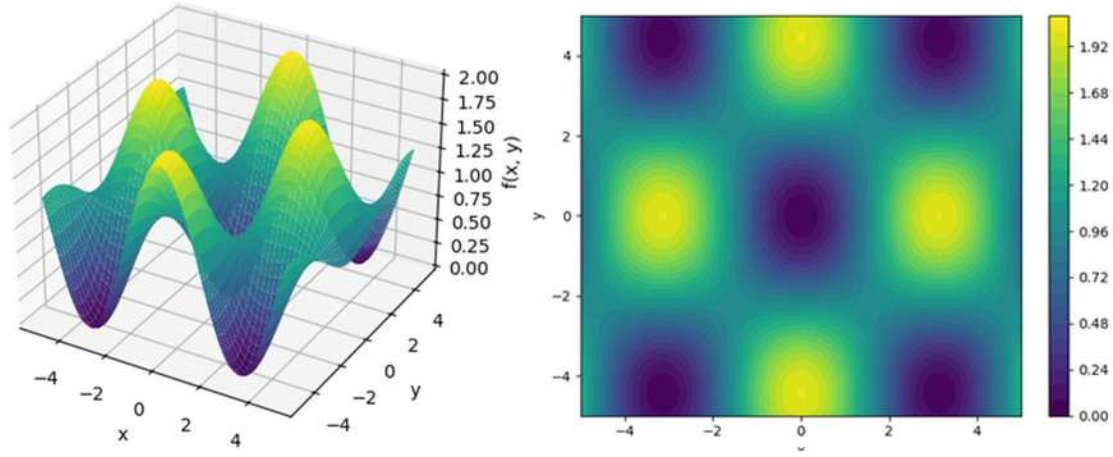
・Griewank 関数

関数式を以下に示す。

$$f(x) = 1 + \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \prod_{i=1}^{n} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) \tag{3.19}$$

ここで、$x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ は、n 次元の実数ベクトルである。

図-3.9 に Griewank 関数の 3 次元形状および Z 方向から見た等高線図を示す。



Griewank 関数の 3 次元形状図　　Z 方向からの等高線図

図-3.9　Griewank 関数の形状図と等高線図

本関数は多峰性を有するが、Rastrigin 関数と比較して局所解の分布は緩やかであり、大域的な構造も比較的滑らかである。広域探索と局所探索のバランス性能を評価するのに適しており、探索アルゴリズムの収束挙動の違いが現れやすい特徴を持つ。

探索範囲：$-512 \le x_i \le 512$

最小値　：$f(x) = 0.0 \quad x = (0, \cdots, 0)$

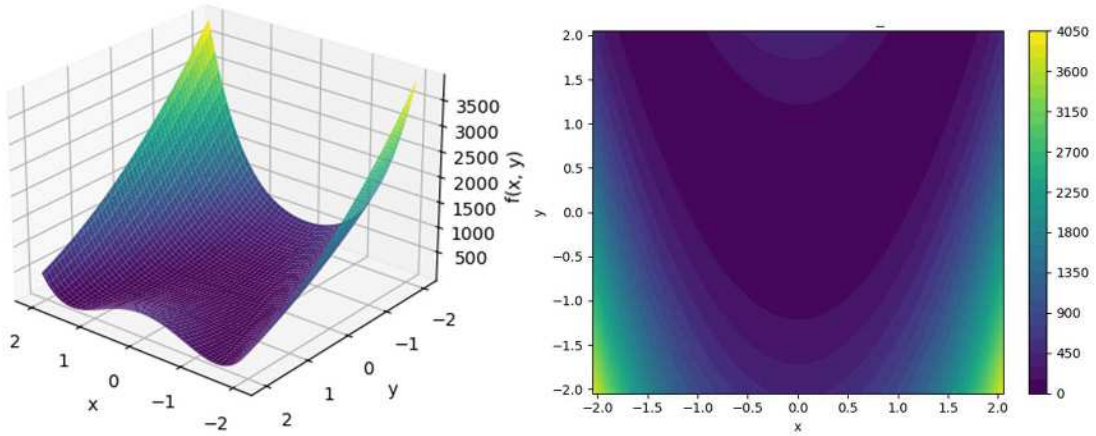
・Rosenbrock 関数（Rosenbrock’s saddle）

関数式を以下に示す。

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left[100\left(x_{i+1} - x_i^2\right)^2 + \left(1 - x_i\right)^2 \right] \tag{3.20}$$

ここで、$x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ は、n 次元の実数ベクトルである。

図-3.10 に Rosenbrock 関数の 3 次元形状および Z 方向から見た等高線図を示す。



Rosenbrock 関数の 3 次元形状図　　Z 方向からの等高線図

図-3.10　Rosenbrock 関数の三次元形状図と Z 方向からの等高線図

本関数は単峰性であるが、最小値に至るまでに細長い谷状の領域（バナナ型構造）を持つことが特徴である。このため、最適解への経路探索が困難であり、アルゴリズムの収束安定性や探索経路の効率性を評価するのに適している。

探索範囲：$-2.048 \le x_i \le 2.048$

最小値　：$f(x) = 0.0 \quad x = (1, \cdots, 1)$

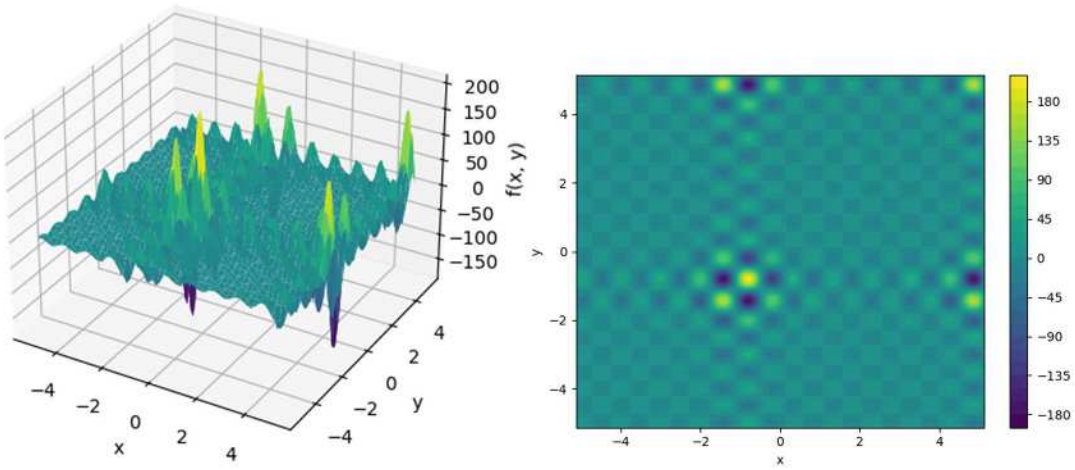
・Shubert 関数

関数式を以下に示す。

$$f(x) = \prod_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{5} j \cos\left[(j+1) x_i + j \right] \right) \tag{3.21}$$

ここで、本研究では 2 次元問題 $x=\left(x_1,x_2\right)$ として扱う。

図-3.11 に Shubert 関数の 3 次元形状および Z 方向から見た等高線図を示す。
本関数は極めて強い多峰性を有し、多数の局所最小値が存在することが知られている。



Shubert 関数の 3 次元形状図　　Z 方向からの等高線図

図-3.11　Shubert 関数の 3 次元形状図と Z 方向からの等高線図

大域最小値も複数存在し、探索空間全体にわたって複雑な振動構造を持つため、アルゴリズムの大域探索能力および局所解回避性能を厳しく評価するベンチマーク関数として用いられる。

探索範囲：$-5.12 \le x_i \le 5.12$

最小値　：$f\left(x\right)=-186.7309$

3.4　各手法の特性比較

本節では、前節までに示した 5 つのメタヒューリスティクス最適化手法（GA, PSO, ABC, DE, SA）の特性について比較検討を行う。

本研究で扱う最適化問題では、目的関数の評価に有限要素法（Finite Element Method: FEM）解析を用いるため、1 回の評価に多大な計算コストを要する。そのため、計算時間ではなく目的関数の評価回数を共通の基準とし、各手法の性能を比較することとした。

探索性能の評価は、最終評価値の精度（理論最小値との差）およびその値に到達するまでの評価回数に基づいて行う。また、各手法におけるパラメータ設定の影響を明らかにするため、個体数や粒子数などの主要パラメータを変化させた場合の最終評価値の変動についても併せて評価した。

比較は、評価回数を概ね 3000 回に統一した条件下で実施し、評価関数として Parabola、Rastrigin、Griewank、Rosenbrock、Shubert の 5 種類を用いた。

なお、本研究では、FEM 逆解析における評価コストを考慮しつつ、予備検討において各手法の収束傾向を比較可能であった範囲として、評価回数を概ね 3000 回に統一した。

3.4.1　探索性能・収束性およびパラメータ依存性

(1) 評価回数に基づく性能比較

探索性能の比較は、最終評価値の精度（理論最小値との差）およびその値に到達するまでの評価回数に基づいて行った。**表-3.1**に示す通り、各アルゴリズムについては、評価回数が概ね3000回となるよう、探索空間における個体数や粒子数などの要素数と反復回数を調整し、統一条件下で比較を実施した。

各アルゴリズムの主要パラメータは、原著論文および代表的な先行研究で広く採用されている標準的設定を参考に決定した[6),7),9),12)-17),21),22)]。具体的には、GA、PSO、ABC、DE、SAにおける代表的パラメータ範囲に基づき、**表-3.2**の通り設定した。

評価関数は先に示したParabola, Rastrigin, Griewank, Rosenbrock, Shubert の5種類を用いた。各評価関数での理論最小値を**表-3.3**に示す。

以降では、各アルゴリズムについて、評価関数ごとの最終評価値、理論最小値との差、および最終評価値に到達するまでの評価回数を整理し、探索性能および収束特性の比較を行う。

まず最終評価値の精度については、各評価関数に対して、探索空間内で設定した複数の個体数（集団サイズ）条件における理論最小値との差を比較した。その結果、誤差が安定して小さくなる個体数条件を各アルゴリズムの代表条件として選定した。以降の性能比較は、この代表条件に基づいて行う。

表-3.1　各手法での評価回数一覧

PSO			ABC			DE			SA		
粒子数	反復回数	評価回数	食物源数	反復回数	評価回数	個体数	反復回数	評価回数	温度減衰率	減衰ステップ数	評価回数
10	300	3010	10	300	3016	10	300	3010	0.93	19	3022
30	100	3030	30	100	3026	30	100	3030	0.95	14	3151
50	60	3050	50	60	3037	50	60	3050	0.97	8	3025

表-3.2　比較検討に用いた各アルゴリズムの固定パラメータ

GA		PSO		ABC		DE		SA	
交叉率	1	慣性重み	0.9	偵察蜂発動条件	50	変異係数	0.5	近傍解の平均移動量	0
突然変異率	0.2	認知係数	2			交叉率	0.9	近傍解の標準偏差	0.5
		社会係数	2					初期温度	100
								最終温度	0.001

表-3.3　各評価関数での理論最小値

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
理論最小値	0.0	0.0	0.0	0.0	-186.7309

表-3.4　各評価関数での最終評価回数の最適化結果

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
P10	3.1968E-06	1.4806E-06	0.0067945	0.033037	-179.5760
P30	1.7015E-05	2.3969E-05	0.015344	0.040929	-186.7302
P50	2.1096E-05	2.7663E-05	0.015365	0.068456	-179.5716

表-3.5　各評価関数での最適化結果と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
P10	3.1968E-06	1.4806E-06	6.7945E-03	3.3037E-02	7.1549
P30	1.7015E-05	2.3969E-05	1.5344E-02	4.0929E-02	0.0007
P50	2.1096E-05	2.7663E-05	1.5365E-02	6.8456E-02	7.1593

表-3.6　各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
P10	2889	2999	2999	2999	2919
P30	2726	2969	2999	2999	2999
P50	2948	2999	2948	2999	2948

(a) 遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）の結果

GAの結果については**表-3.4**に各アルゴリズムで評価関数での最終評価値、**表-3.5**に各評価関数での理論最小値と最終評価値の差を、**表-3.6**に最終評価値に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.5 より Parabola や Rastrigin における最終評価値と理論最小値との差は概ね 10^{-5}～10^{-6} オーダーであり、Griewank では10^{-2}~10^{-3} オーダー、Rosenbrock's saddle では 10^{-2} オーダーとなり、いずれの評価関数においても個体数の違いによる顕著な差は確認されなかった。一方、Shubert 関数では個体数 10 で10^{0} 程度、個体数 30 で10^{-4} 程度、個体数 50 で10^{0} 程度とばらつきが大きく、個体数 30 が最も良好な精度を示した。また、個体数により最終評価値が大きく変動していることから、GA は Shubert 関数に対して探索の安定性が低下しやすいことが確認された。

以上を踏まえ、本研究では Shubert 関数において最も良好な精度を示した個体数 30 を GA の代表条件として採用することとした。

表-3.7　各評価関数での最終評価回数の最適化結果

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
S10	2.6937E-05	0.0045943	0.036262	9.0373E-05	-183.1145
S30	7.6541E-05	0.023563	0.044411	3.4961E-04	-186.5509
S50	9.7120E-05	0.053885	0.044274	4.4790E-04	-186.4236

表-3.8　各評価関数での最適化結果と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
S10	2.6937E-05	4.5943E-03	3.6262E-02	9.0373E-05	3.6164
S30	7.6541E-05	2.3563E-02	4.4411E-02	3.4961E-04	0.18
S50	9.7120E-05	5.3885E-02	4.4274E-02	4.4790E-04	0.3073

表-3.9　各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
S10	2999	2999	2999	2999	2999
S30	2999	2999	2999	2999	2999
S50	2999	2999	2999	2999	2999

(b) 粒子群最適化（PSO: Particle Swarm Optimization）の結果

PSOの結果については、表-3.7に各アルゴリズムで評価関数での最終評価値、表-3.8に各評価関数での理論最小値と最終評価値の差、表-3.9に最終評価に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.8 より Parabola における最終評価値と理論最小値との差は概ね10^{-5}オーダーであり、Rastrigin では10^{-2}～10^{-3}オーダー、Griewank では10^{-2}オーダー、Rosenbrock では10^{-4}～10^{-5}オーダーとなり、いずれの関数においても粒子数の違いによる顕著な差は確認されなかった。一方、Shubert 関数では、最終評価値と理論最小値との差が10^{0}～10^{-1}程度となり、粒子数に応じて若干の差が生じていることが確認された。以上の結果より、Shubert 関数において誤差が最も小さく、かつ他の評価関数でも十分に良好な結果が得られた粒子数 30 を、本研究における代表条件として採用することとした。

表-3.10　各評価関数での最終評価回数の最適化結果

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
F10	0.0	1.3214	0.049229	0.00090437	-183.1535
F30	0.0	0.033179	0.010126	0.00039403	-186.7309
F50	0.0	0.03319	0.0057718	0.0021638	-186.7282

表-3.11　各評価関数での最適化結果と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
F10	0.0	1.3214	4.9229E-02	9.0437E-04	3.5774
F30	0.0	3.3179E-02	1.0126E-02	3.9403E-04	0.0
F50	0.0	3.319E-02	5.7718E-03	2.1638E-04	0.0027

表-3.12　各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
F10	612	2999	2086	2999	1876
F30	1515	2969	2999	2999	1878
F50	2694	2999	2999	2999	2999

(c) 人工蜂群アルゴリズム（ABC: Artificial Bee Colony）の結果

ABCの結果については**表-3.10**に各アルゴリズムにおける各評価関数の最終評価値、**表-3.11**に各評価関数での理論最小値と最終評価値の差、**表-3.12**に最終評価に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.11 より Parabola における最終評価値と理論最小値との差は0であり、Rastrigin では10^{0}～10^{-2}オーダー、Griewank では10^{-2}～10^{-3}オーダー、Rosenbrock では10^{-4}オーダー、Shubert では0～10^{0}オーダーとなった。また、Rastrigin と Shubert の両関数においては、食物源数の違いに伴う差が比較的顕著に現れていることが確認された。

以上の結果から、Shubert 関数において最終評価値と理論最小値との差が 0 となり、さらに他の評価関数でも大きなばらつきが見られない食物源数 30 の条件が最も安定していると判断され、本研究ではこの条件を代表値として採用することとした。

表-3.13　各評価関数での最終評価回数の最適化結果

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
N10	8.0683E-02	2.0018	0.3365	5.4170E-01	-133.4173
N30	0.0	0.39798	0.0026296	1.3137E-10	-168.8442
N50	0.0	0.033165	0.0018903	0.0	-183.1536

表-3.14　各評価関数での最適化結果と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
N10	8.0683E-02	2.0018	3.3650E-01	5.4170E-01	55.3136
N30	0.0	3.9798E-01	2.6296E-03	1.3137E-10	17.8867
N50	0.0	3.3165E-02	1.8903E-03	0.0	3.5773

表-3.15　各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
N10	461	401	542	451	572
N30	606	697	1151	2908	636
N50	1017	1118	1830	2135	1017

(d) 差分進化法（DE: Differential Evolution）の結果

DEの結果については、**表-3.13**に各アルゴリズムで評価関数での最終評価値、**表-3.14**に各評価関数での理論最小値と最終評価値の差、**表-3.15**に最終評価に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.14より、Parabolaにおける最終評価値と理論最小値との差は、個体数10では10^{-2}オーダーの差が残るものの、個体数30および50では差が0となり、個体数の増加に伴い十分な精度で最適値に到達していることが確認できる。Rastriginでは個体数10において10^{0}オーダーの差が見られ、やや誤差が大きいものの、個体数の増加に伴い差は減少し改善傾向を示した。GriewankおよびRosenbrockではそれぞれ10^{-1}～10^{-3}オーダー、$0 \sim 10^{-1}$の差となり、個体数の増加に応じて最適解に十分近い結果が得られている。一方、Shubert関数では10^{0}～10^{1}オーダーの差が残り、他の関数と比較して誤差が大きいことが確認された。

以上を踏まえると、全体として 個体数50の条件が最も安定かつ高精度であり、本研究ではこの条件を代表値として採用することとした。

表-3.16　各評価関数での最終評価回数の最適化結果

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
A0.93	0.00038528	0.1845	0.09491	0.0050699	-182.2497
A0.95	0.00052787	0.12031	0.089895	0.0055638	-186.2393
A0.97	0.00045929	0.1069	0.086885	0.0037326	-184.7531

表-3.17　各評価関数での最適化結果と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
A0.93	3.8528E-04	1.845E-01	9.4910E-02	5.0699E-03	4.4812
A0.95	5.2787E-04	1.2031E-01	8.9895E-02	5.5638E-03	0.4916
A0.97	4.5929E-04	1.069E-01	8.6885E-02	3.7326E-03	1.9778

表-3.18　各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
A0.93	2899	2927	2872	2922	2918
A0.95	2992	2874	2969	2890	2982
A0.97	2983	2955	2990	2969	2842

(e) 焼きなまし法（SA: Simulated Annealing）の結果

SAの結果については**表-3.16**に各アルゴリズムで評価関数での最終評価値、**表-3.17**に各評価関数での理論最小値と最終評価値の差、**表-3.18**に最終評価に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.17 より Parabola における最終評価値と理論最小値との差は概ね10^{-4}オーダーであり、Rastrigin では10^{-1}オーダー、Griewank では10^{-2}オーダー、Rosenbrock では10^{-3}オーダー、Shubert10^{0}～10^{-1}オーダーとなった。温度減衰率（α=0.93,0.95,0.97）による顕著な差は確認されなかったものの、Shubert 関数においてはα=0.95 が最も小さい値をしめした。以上より、本研究では温度減衰率α=0.95 を SA の代表値として採用することとした。

表-3.19　アルゴリズム別評価関数での最終評価値と理論最小値との差

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
GA	1.7015E-05	2.3969E-05	1.5344E-02	4.0929E-02	7.0000E-04
PSO	7.6541E-05	2.3563E-02	4.4411E-02	3.4961E-04	1.8000E-01
ABC	0.0	3.3179E-02	1.0126E-02	3.9403E-04	0.0
DE	0.0	3.3165E-02	1.8903E-03	0.0	3.5773E-00
SA	5.2787E-04	1.2031E-01	8.9895E-02	5.5638E-03	4.9160E-01

表-3.20　アルゴリズム別各評価関数で最終評価値に到達するまでの評価回数

	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
GA	2726	2969	2999	2999	2999
PSO	2999	2999	2999	2999	2999
ABC	1515	2969	2999	2999	1878
DE	1017	1118	1830	2135	1017
SA	2992	2874	2969	2890	2982

(2) 最終評価値の精度に基づく比較

表-3.19 に各アルゴリズムの代表要素での評価関数毎の最終評価値と理論最小値との差を、表-3.20 に各アルゴリズムの代表要素での最終評価値に到達するまでの評価回数を示す。

表-3.19 の結果より、DE は Parabola および Rosenbrock において極めて高い精度オーダーを示し、最終評価値と理論最小値との差は 0 であった。一方、Shubert に対しては10^{0}オーダーの差を残し、他のアルゴリズムと比較して最も大きな誤差を示した。

ABC も Parabola および Shubert において差が 0 となり、高い探索精度を有することが確認された。

これに対し、PSO および GA は多くの評価関数で10^{-1}～10^{-5}オーダーの差を残しており、中程度の精度にとどまった。特に Griewank や Shubert では局所解へ収束する傾向が見られ、理論最小値との差が相対的に大きくなる結果となった。

SA は全般的に誤差が大きく、評価関数によっては10^{-1}オーダーの差を残しており、他手法と比較して精度の面で劣ることが分かる。

Shubert 関数に着目すると、ABC が唯一理論最小値との差 0 を達成したのに対し、DE、PSO、GA、SA はいずれも有意な差を残し、中でも DE は 3.5773 と最も大きな誤差を示した。

これらの傾向は図-3.12～図-3.16 に示す収束曲線からも確認でき、Shubert においては探索が局所的に停滞する様子が明瞭に見られた。

Shubert 関数が多数の局所解を有するという特性に起因するものであり、局所解回避機構を備える手法（ABC など）が相対的に有利であることを示している。

以上より、最終評価値の精度の観点からは、ABC が最も安定して高精度な探索性能を示し、DE は Shubert を除く関数に対して高い精度を有していた。一方、GA および PSO は中程度の性能にとどまり、特に Parabola や Rosenbrock のような平滑な関数では安定した精度を示すものの、多峰性の強い関数では精度が低下する傾向が確認された。SA は、本研究で設定した評価条件のもとでは全関数を通じて相対的に精度が低く、大域的最適解への到達が困難となる傾向を示した。

(3) 収束性に基づく比較

収束性については、各手法が最終評価値（**表-3.19** と同値）に到達した時点の評価回数を指標として比較した。

表-3.20 に示すように、GA および PSO は多くの関数で上限回数である 3000 回付近まで改善を継続し、特に PSO はすべての関数において上限回数まで探索を行った。この傾向は PSO が初期から急速に改善する一方、最終的な高精度解に到達するためには一定の反復を必要とする特性を反映している。

DE は Parabola, Rastrigin, Griewank および Shubert において 1000～2000 回程度で最終評価値に到達しており、一見すると収束が速い結果となった。しかし、Shubert においては最終評価値そのものが他手法より大きく、低精度解に早期に停滞した結果として評価回数が小さくなっていることが確認された。このため、DE の収束速度は「高速であるが、高精度解への到達が保証されるわけではない」という特徴を持つといえる。

ABC は Shubert において 1878 回で最終評価値に到達しており、関数によっては比較的早い収束性を示すとともに、個体間のばらつきも小さく、安定した収束挙動が確認された。

SA はいずれの関数においても 2900 回前後で収束しており、PSO よりは少ない評価回数で最終評価値に到達している。一方で、最終誤差は PSO よりも 10^{-1} 程度大きく、精度面ではやや劣る結果となった。ただし、その誤差は極端に大きいものではなく、中程度の精度は確保されている。

図-3.17～図-3.41 に示す収束曲線においても、DE は早期に平坦化する一方で Shubert の誤差が大きく、“高速だが局所解停滞”の傾向が視覚的に確認できる。これに対し ABC は改善を継続しつつ安定した収束を示しており、GA および PSO は緩やかな改善を続けながら最終解に到達している様子が観察された。

以上より、収束性の観点では DE が最も早期に最終解に到達する傾向を示すが、その高速性は必ずしも高精度解への到達を保証するものではない。ABC は関数によっては効率的かつ高い安定性を示し、GA および PSO は安定性は高いものの収束速度は遅い。SA は PSO よりは速いが、最終誤差がやや大きく、総合的には「収束速度は中程度・精度も中程度」の性能であると位置づけられる。

(4) パラメータ依存性に基づく比較

次に、各手法におけるパラメータ設定の影響について評価する。本評価では、GA の集団サイズ、PSO の粒子数、ABC の食物源数、DE の個体数 N、SA の温度減衰率といった

主要パラメータを変化させた場合の最終評価値の変動に基づき、パラメータ依存性を比較した。

表-3. 5 より、GA では Parabola および Rastrigin において、個体数を変化させても誤差は 10^{-5}～10^{-6} オーダーで推移し、変動は小さい。Griewank および Rosenbrock においても誤差は 10^{-2}～10^{-3} オーダーに収まり、個体数の変更による影響は限定的であった。

一方、Shubert では、個体数 30 において誤差が 10^{-4} オーダーと最も小さくなったのに対し、個体数 10 および 50 では 10^{0} オーダーの誤差が残り、個体数の設定によって結果が大きく変動する傾向が見られた。

表-3. 8 より、PSO では Parabola および Rosenbrock において粒子数を変化させても誤差の変動は 10^{-4}～10^{-5} オーダーと小さく、粒子数の影響は限定的であった。Rastrigin および Griewank では誤差は 10^{-2}～10^{-3} オーダーとやや大きくなるものの、粒子数による変動幅は比較的小さい。一方、Shubert では粒子数 10 で誤差が 10^{0} オーダーと大きく、30 および 50 で誤差は 10^{-1} 程度と低減しており、多峰性関数において粒子数の設定が結果に影響することが示された。

表-3. 11 より、ABC では Parabola および Rosenbrock において食物源数の変化による誤差のオーダー差は見られず、安定した結果を示した。Griewank においても誤差は 10^{-2}～10^{-3} オーダーと変動は小さい。一方、Rastrigin および Shubert では食物源数によって誤差が 10^{0}～10^{-3} オーダーと大きく変動し、特に Shubert では食物源数 30 で最小誤差が得られており、パラメータ設定の影響が大きい

表-3. 14 より、DE では Parabola および Rosenbrock において個体数の増加に伴い誤差が低減し、個体数が 30 および 50 では誤差が 0 となる高精度解が得られた。Rastrigin および Griewank でも同様に、個体数の増加により誤差が改善する傾向が見られる。一方、Shubert では個体数を増加させても誤差が大きく残っており、パラメータ変更による改善は限定的であった。

表-3. 17 より、SA では Shubert を除く関数において温度減衰率を変化させても誤差の変動は小さく、同一オーダーに収まった。一方、Shubert では温度減衰率によって誤差が変動し、特に 0.95 において最も小さい誤差が得られた。

以上より、単峰性および比較的滑らかな関数では、多くの手法においてパラメータ変更による影響は小さい。一方、多峰性の強い関数（特に Shubert）では、いずれの手法においてもパラメータ設定が最終結果に与える影響が大きくなる。

この結果は、探索空間の複雑性が増すほど、各手法のパラメータに対する感度が高まり、適切なパラメータ設定の重要性が増すことを示唆している。

3.4.2　評価関数特性との対応関係

本節では、3.4.1 で示した各手法の探索性能、収束性およびパラメータ依存性の結果を踏まえ、評価関数の特性と各メタヒューリスティクス最適化手法の挙動との対応関係について考察する。

Parabola 関数のような単峰性かつ滑らかな関数においては、いずれの手法も理論最小値

近傍の解を得ており、手法間の精度差は小さい。特に、ABC および DE では理論最小値と一致する結果が得られ、高い精度を示した。一方、PSO、SA、GA においても誤差はそれぞれ10^{-5}、10^{-4}、10^{-5}オーダーに収まっており、いずれも十分に小さい値である。また、収束性の観点では、ABC および DE が他手法と比較して少ない評価回数で収束しており、探索効率の高さが示されている。これらの結果は、局所解を持たない単純な探索空間においては手法間の精度差が現れにくく、探索効率の違いが主に収束性に現れることを示している。

Rastrigin 関数のような多峰性関数においては、手法間で最終精度およびパラメータ依存性に明確な差が見られる。代表条件における誤差は、GA が最も小さく、PSO、ABC および DE がそれに続き、SA は相対的に大きな誤差を示した。一方、パラメータ依存性の観点では、ABC および DE において誤差のばらつきが大きく、設定条件による影響が顕著である。また、収束性については、DE が他手法と比較して少ない評価回数で収束しており、探索初期における急速な改善が特徴的である。この傾向は、差分ベクトルを用いた更新機構により探索空間の広域探索が促進されるためと考えられる。

Griewank 関数においては、代表条件での誤差は DE が比較的小さく、その他の手法は同程度の誤差範囲に分布している。一方で、DE では個体数の違いにより誤差にオーダー差が生じており、パラメータ依存性が比較的大きいことが分かる。また、収束性においても DE が他手法より少ない評価回数で収束しており、効率的な探索が行われている。これらの結果から、多峰性を有しつつ比較的滑らかな構造を持つ関数に対しては、差分情報を利用する DE が有効に機能すると考えられる。

Rosenbrock 関数は単峰性であるものの、狭く湾曲した谷構造を有するため、解の探索には高い追従性が求められる。この関数においては、DE および PSO が比較的高い精度を示した。特に DE は理論最小値に到達し、PSO および ABC も小さい誤差範囲に収まっている。一方、GA および SA では相対的に大きな誤差が残った。また、DE および PSO ではパラメータ設定により精度の変動が見られ、谷構造に沿った探索挙動がパラメータに依存する傾向があると考えられる。

Shubert 関数は強い多峰性を有し、多数の局所最適解を持つため、本研究で用いた評価関数の中でも大域的最適解の探索が困難な問題である。この関数に対しては、ABC が最も高い探索性能を示し、理論最小値に到達した。GA は10^{-4}オーダーに収まった。一方、DE、PSO、SA では局所解に停滞する傾向が見られ、最終評価値に大きな誤差が残った。また、いずれの手法においてもパラメータ設定による結果の変動が大きく、探索性能が条件に強く依存する。

以上の結果から、評価関数の特性と各手法の挙動には明確な対応関係が存在する。すなわち、単峰性かつ滑らかな関数では手法間の精度差は小さく、主に収束速度の違いとして現れる。一方、多峰性関数では局所解の影響により手法間の精度差およびパラメータ依存性が顕著となる。また、谷構造を有する関数では、連続的な解更新が可能な手法が有利となる傾向がある。

このように、最適化手法の選択においては、対象問題の構造（単峰性、多峰性、谷構造

など）を考慮することが重要であり、問題特性に応じた手法選択が求められる。

各評価関数に対する各アルゴリズムの適合性を、最終精度、収束性およびパラメータ依存性を総合的に整理した結果を**表-3.21** に示す。

表-3.21　評価関数特性と各アルゴリズムの適合性

手法	Parabola	Rastrigin	Griewank	Rosenbrock	Shubert
GA	○	◎	○	△	○
PSO	○	○	○	◎	△
ABC	◎	○	○	○	◎
DE	◎	○	◎	◎	×
SA	○	△	△	△	△

注）◎：最終精度、収束性およびパラメータ依存性を総合的に評価した結果、当該問題に対して特に高い適用性を示した。○：適用性は高く、安定した探索性能を示した。△：適用可能であるが、精度、収束性またはパラメータ依存性のいずれかに課題が見られた。×：適用性が低く、十分な探索性能が得られなかった。

本表より、問題特性に応じて各手法の適合性が大きく異なることが分かる。

3.4.3　実装の容易性・適用性と応用性

前節では、評価関数の特性に応じた各手法の探索性能および適合性について整理した。その結果、単峰性、多峰性、谷構造といった問題特性により、各アルゴリズムの性能や挙動が大きく異なることが明らかとなった。

しかしながら、実際の工学的問題においては、探索性能のみならず、アルゴリズムの実装の容易さや応用範囲、さらには計算資源との適合性といった観点も重要となる。そこで本節では、これらの観点から各メタヒューリスティクス最適化手法を比較し、実問題への適用性について考察する。

実装容易性の観点では、最適化アルゴリズムを既存ソフトウェアへ組み込む必要性を考慮して、更新式の単純さ、処理分岐の複雑さ、および探索構造の理解容易性に着目し、実装容易性の比較を行った。

GA は選択、交叉および突然変異といった複数の遺伝的操作によって構成されており [6),7)]、探索機構は明確であるものの、各操作を個別に実装する必要があるため、アルゴリズム構造は比較的複雑である。

PSO は粒子の位置および速度を更新する単純な更新式によって構成されており [9),10),21)]、アルゴリズム全体の流れが直感的であることから、理解および実装が容易な手法である。

ABC は働き蜂、追従蜂および偵察蜂による複数の探索フェーズによって構成されており [12)]、各役割に応じた処理分岐を必要とするため、PSO や SA と比較するとアルゴリズム構造はやや複雑である。

DE は差分ベクトルを用いた突然変異操作、交叉操作および選択操作によって構成されており [14]、更新則自体は比較的単純であるものの、複数個体間の演算処理を必要とするため、実装には一定の注意を要する [15]。

SA は単一解に対する近傍探索と温度更新によって構成されており [16]、アルゴリズム自体の理解および基本実装は容易であることから、学術研究や教育目的における入門的手法として利用されている。

実装適用性の観点では、制御パラメータ数およびその調整容易性が重要となる。

GA は交叉率、突然変異率、個体数および選択方法など複数の制御パラメータを有しており、探索性能に対する依存性も大きいことから、パラメータ調整負荷は比較的大きい。

PSO は慣性重みおよび加速係数など少数のパラメータによって構成されており、パラメータ調整が比較的容易である。また、実数値パラメータを直接扱えることから、連続値最適化問題への適用性に優れる。

ABC は探索回数制限や食物源数などの制御パラメータを有しており、探索蜂の発動条件などが探索性能に影響を与えるため、適切な調整を必要とする。

DE は差分重みおよび交叉率といった比較的少数の制御パラメータによって構成されており、連続値最適化問題に対する適用性が高い。一方で、差分ベクトル生成方法や境界条件処理が探索性能に影響するため、安定した適用には一定の調整を要する。

SA は主に初期温度および冷却スケジュールによって制御されるため、パラメータ数は比較的少ない。しかし、探索性能が温度低下条件や近傍生成幅に大きく依存するため、適切なパラメータ設定には経験的調整を要する。

次に、応用性の観点から見ると、それぞれの手法には得意とする問題領域が存在する。

GA は個体群に対する遺伝的操作によって広域探索を行う特徴を有しており、離散的な設計空間や組合せ最適化問題に適している。このため、生産スケジューリング、ネットワーク設計、経路最適化などの分野で広く利用されている [4),7)]。

PSO は粒子の位置および速度更新によって連続空間を効率的に探索する特徴を有しており、連続最適化問題への適用性が高い。そのため、機械学習におけるハイパーパラメータ探索、PID 制御パラメータ設計、構造最適化などの分野で活用されている [9),21)]。

ABC は探索多様性を維持しながら探索と収束のバランスを取る特徴を有しており、多峰性関数の最適化問題に適している。このため、クラスタリング、特徴選択、多峰性関数最適化などへの応用が報告されている [12)]。

DE は差分ベクトルを利用した探索機構により、高次元かつ非線形な連続最適化問題に対して高い探索性能を示す。このため、工学設計、信号処理、画像再構成、逆解析などへの適用が進められている [14),15)]。

SA は単一解に対する近傍探索を基本とした単純なアルゴリズム構造を有しており、大規模な組合せ最適化問題にも適用可能である。そのため、スケジューリング問題や巡回セールスマン問題などの離散最適化問題に広く用いられている [16)]。

以上の結果を総合すると、実装容易性の観点では SA および PSO が優れている。一方、応用性の観点では、GA は離散的な組合せ最適化問題、PSO および DE は連続値最適化問

題、ABC は多峰性問題に対して高い適用性を有しており、それぞれ異なる特徴を有することが確認された。ただし、本研究で対象とする FEM 解析のような高計算コストを伴う連続最適化問題においては、単に実装の簡便さのみならず、探索性能、収束安定性、および計算効率のバランスが重要となる。

したがって、各手法の特性を十分に理解し、対象問題の性質（連続／離散、凸／非凸、評価コストなど）に応じて適切なアルゴリズムを選択することが、実問題への効果的な適用と安定した最適化結果の獲得につながる。

評価関数毎のアルゴリズム別収束曲線

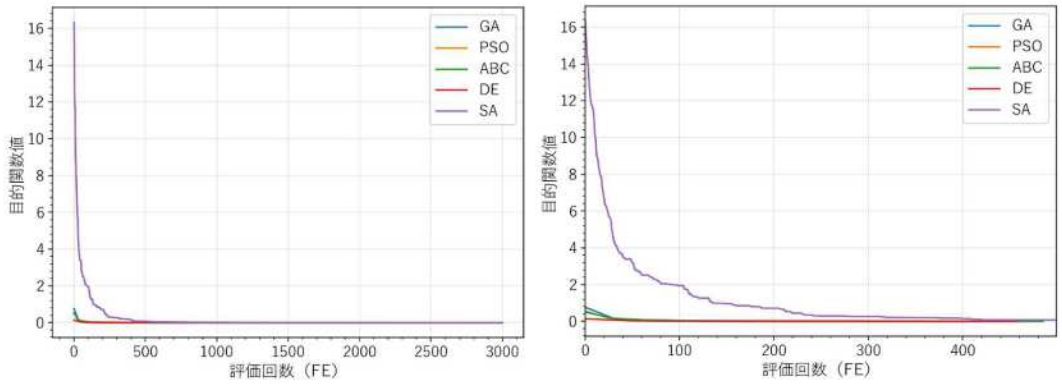


図-3.12　Parabola 関数における収束曲線

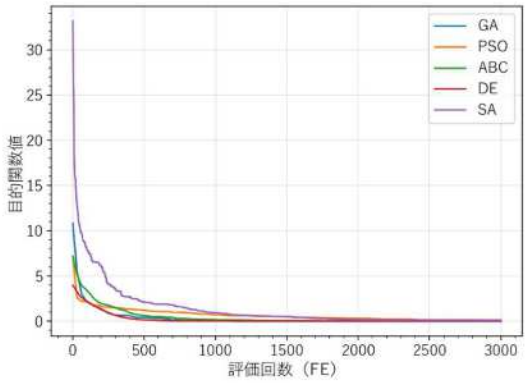


図-3.13　Rastrigin 関数における収束曲線

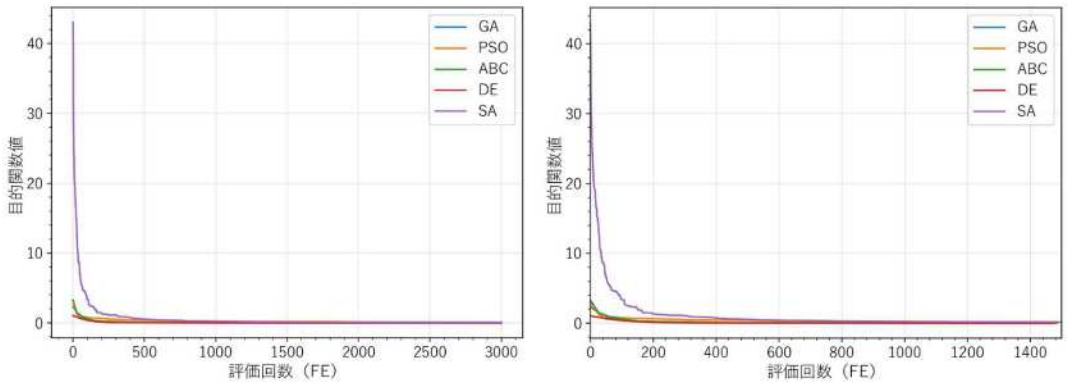


図-3.14　Griewank 関数における収束曲線

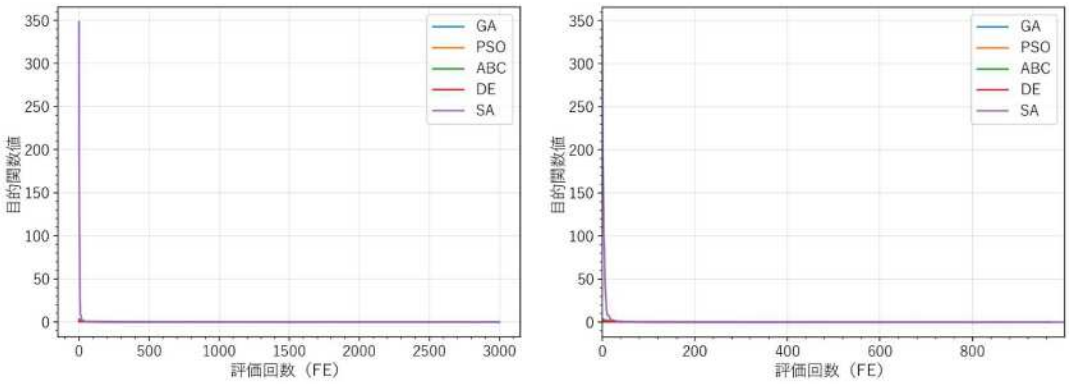


図-3.15　Rosenbrock 関数における収束曲線

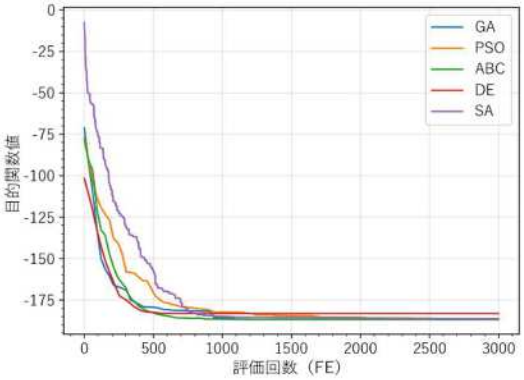


図-3.16　Shubert 関数における収束曲線

GA での個体数別収束曲線

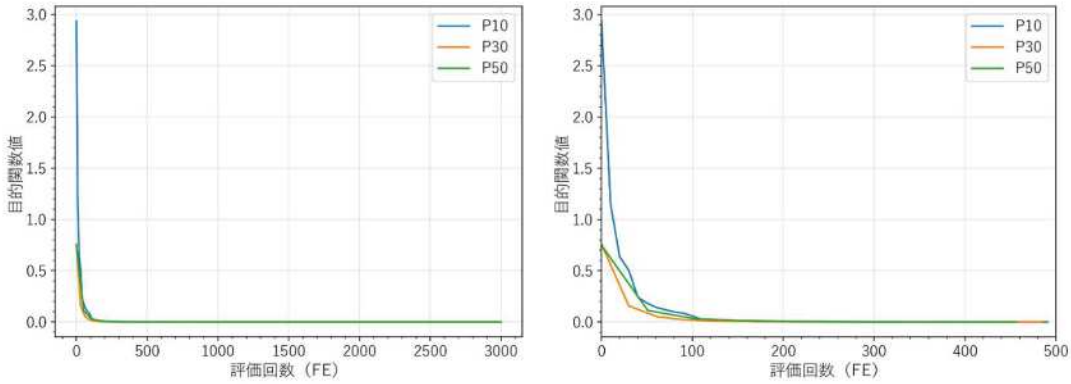


図-3.17　Parabola 関数における収束曲線

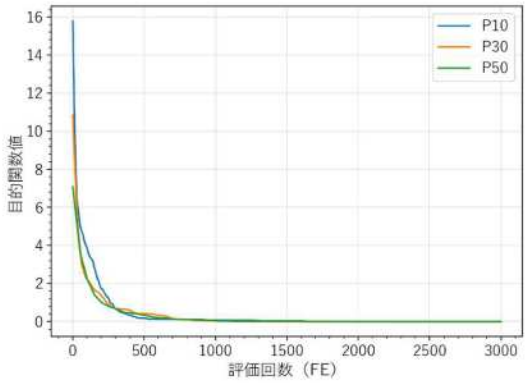


図-3.18　Rastrigin 関数における収束曲線

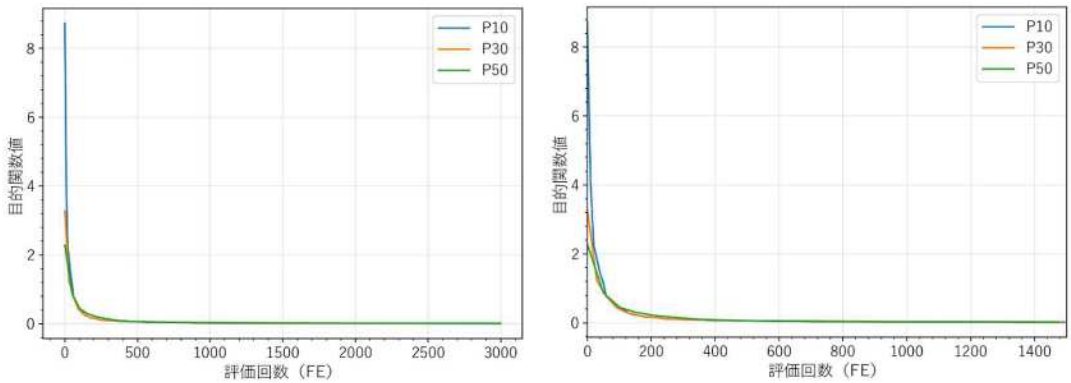


図-3.19　Griewank 関数における収束曲線

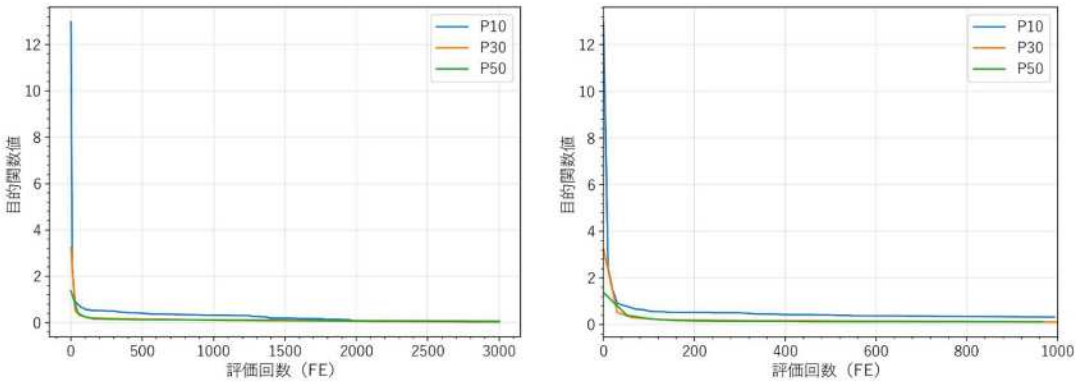


図-3.20　Rosenbrock 関数における収束曲線

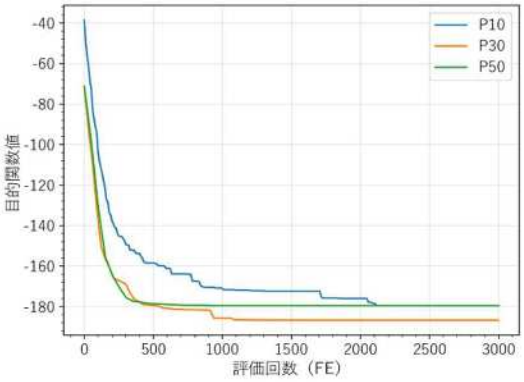


図-3.21　Shubert 関数における収束曲線

PSO での粒子数別収束曲線

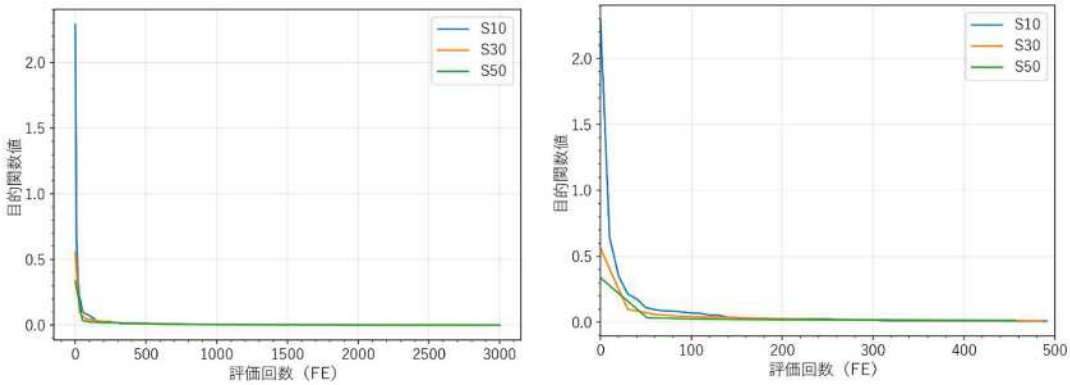


図-3. 22　Parabola 関数における収束曲線

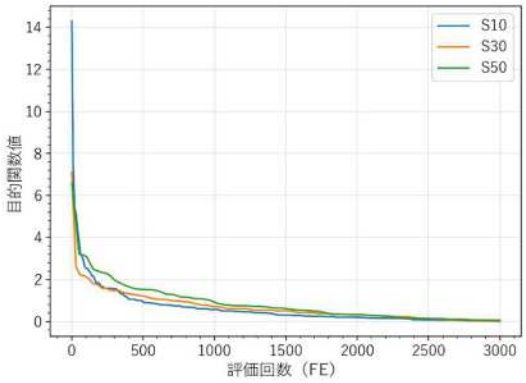


図-3. 23　Rastrigin 関数における収束曲線

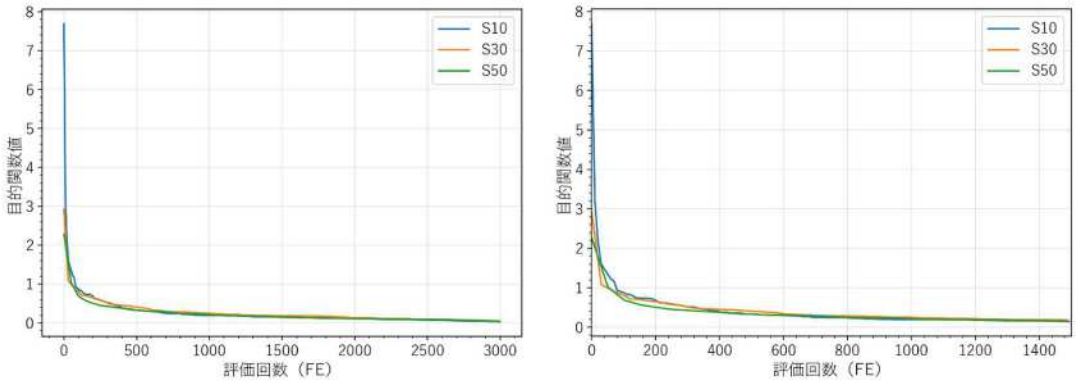


図-3. 24　Griewank 関数における収束曲線

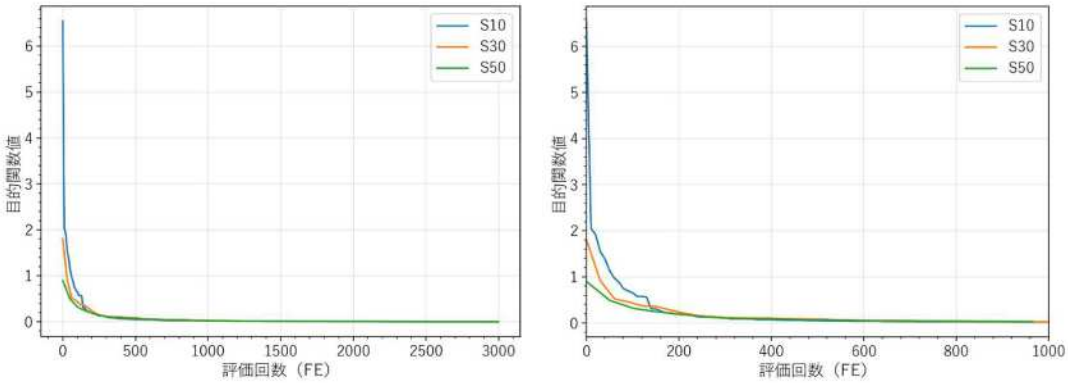


図-3. 25　Rosenbrock 関数における収束曲線

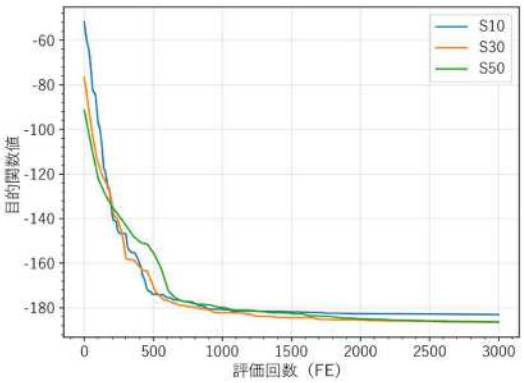


図-3. 26　Shubert 関数における収束曲線

ABC での食物源数別収束曲線

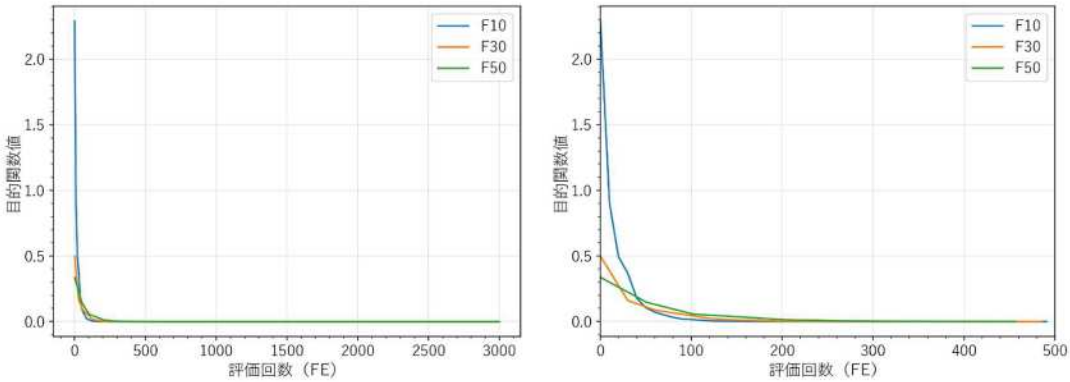


図-3.27　Parabola 関数における収束曲線

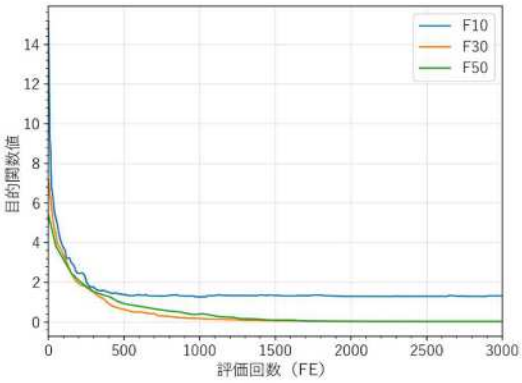


図-3.28　Rastrigin 関数における収束曲線

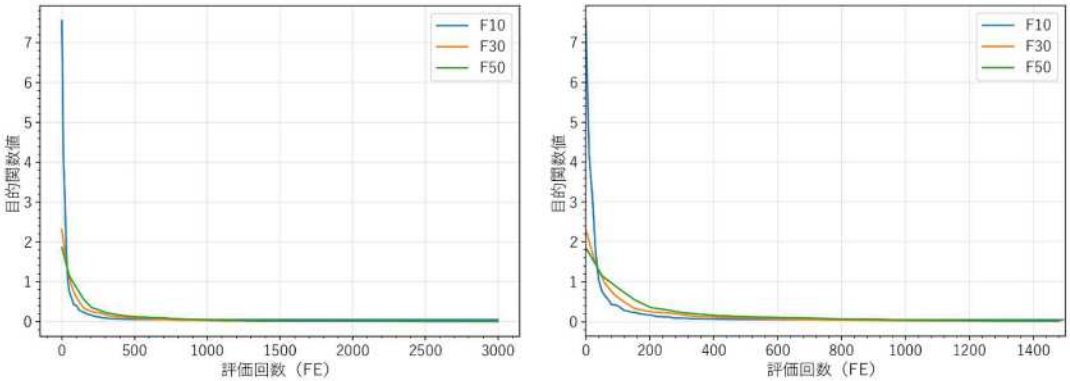


図-3.29　Griewank 関数における収束曲線

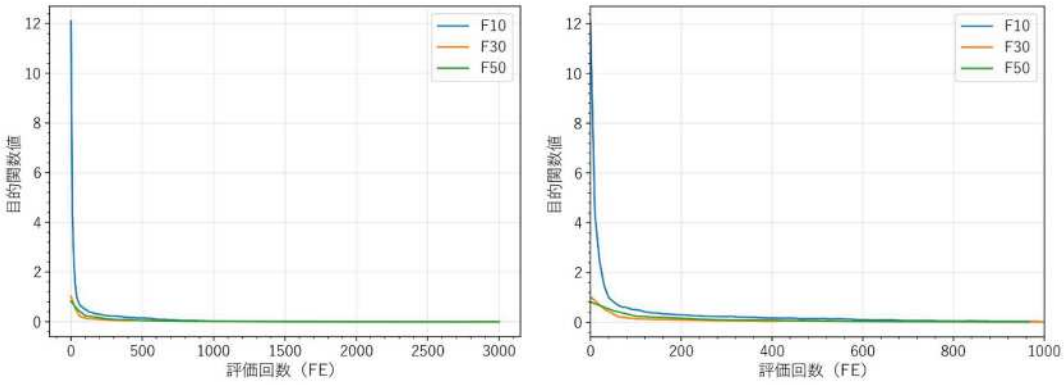


図-3.30　Rosenbrock 関数における収束曲線

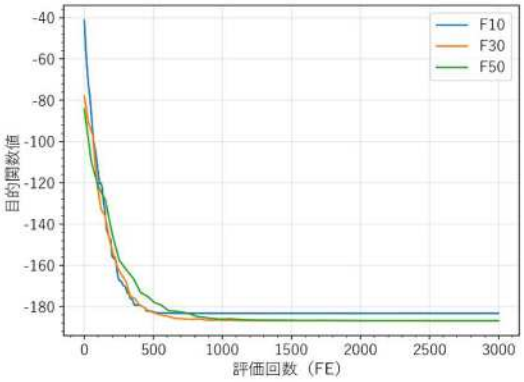


図-3.31　Shubert 関数における収束曲線

DE での個体数別収束性評価

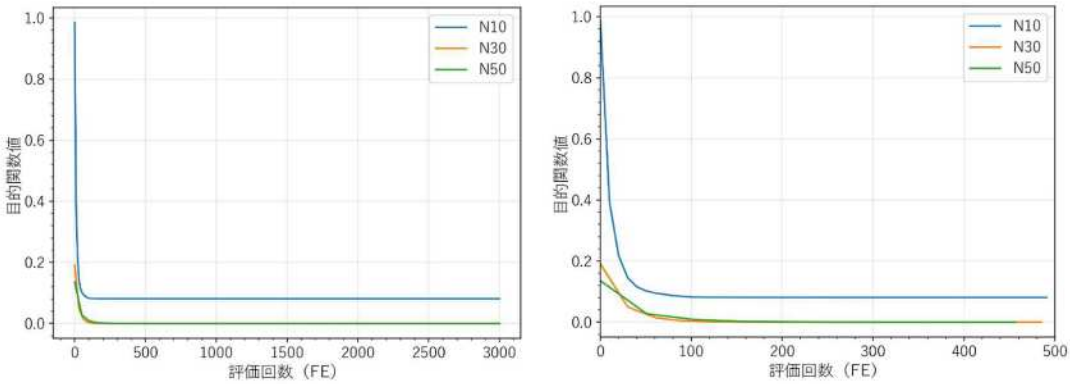


図-3.32　Parabola 関数における収束曲線

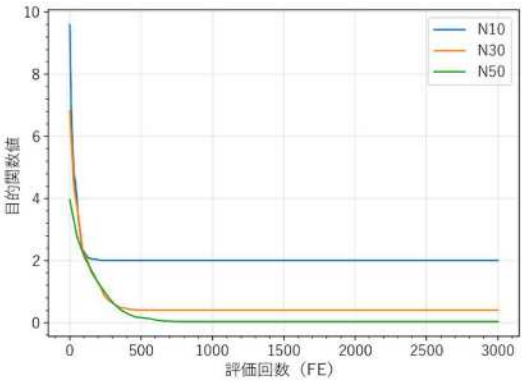


図-3.33　Rastrigin 関数における収束曲線

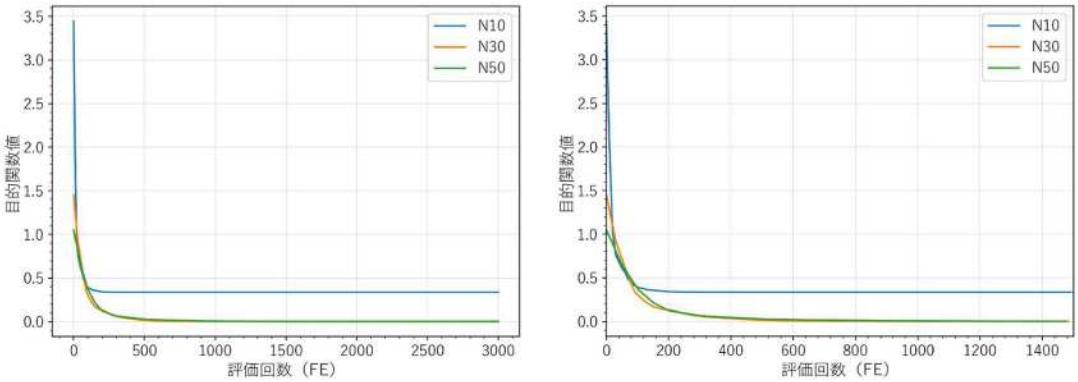


図-3.34　Griewank 関数における収束曲線

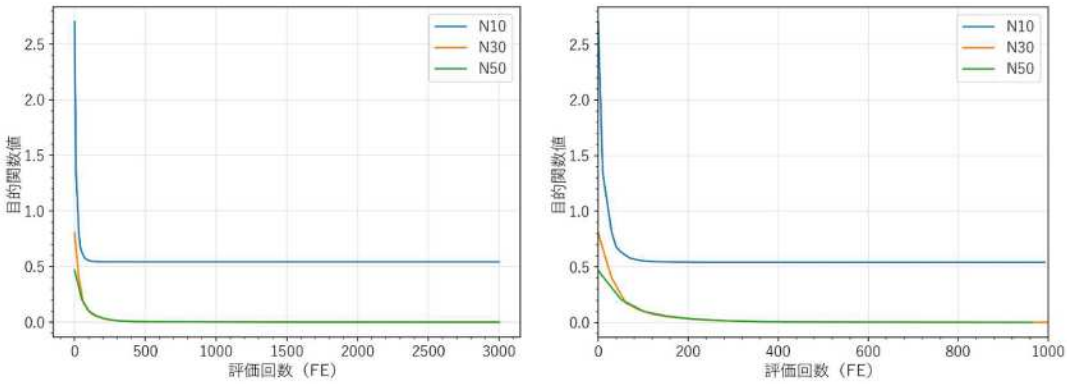


図-3.35　Rosenbrock 関数における収束曲線

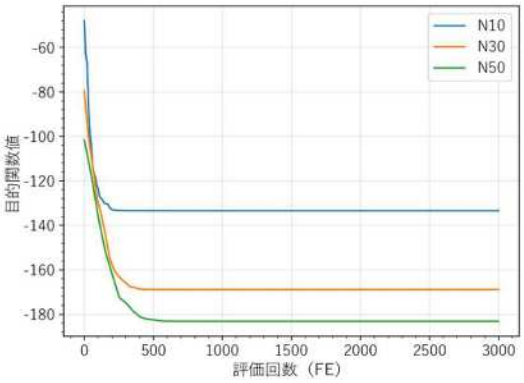


図-3.36　Shubert 関数における収束曲線

SA での個体数別収束性評価

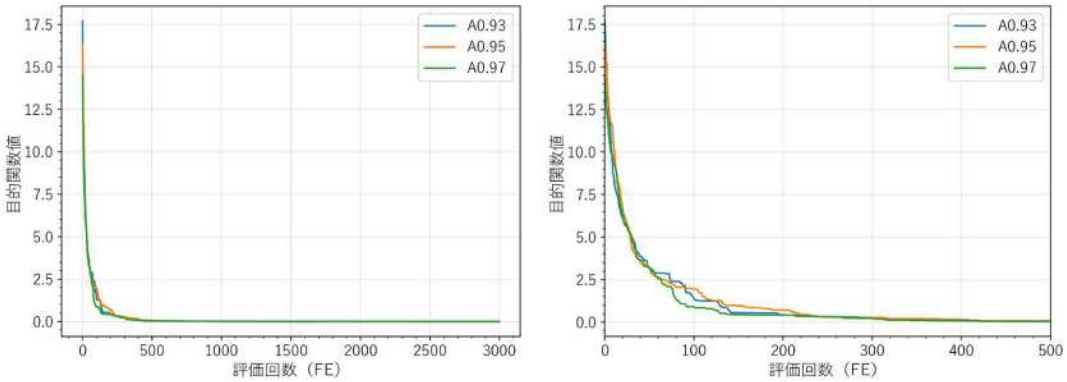


図-3.37　Parabola 関数における収束曲線

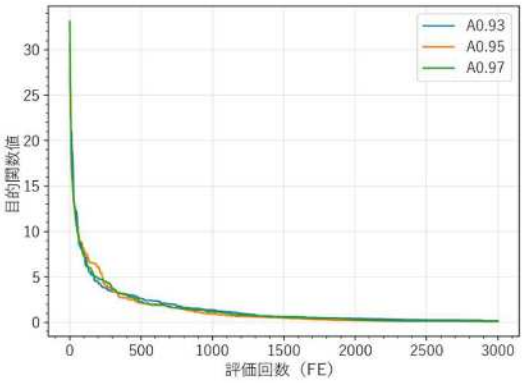


図-3.38　Rastrigin 関数における収束曲線

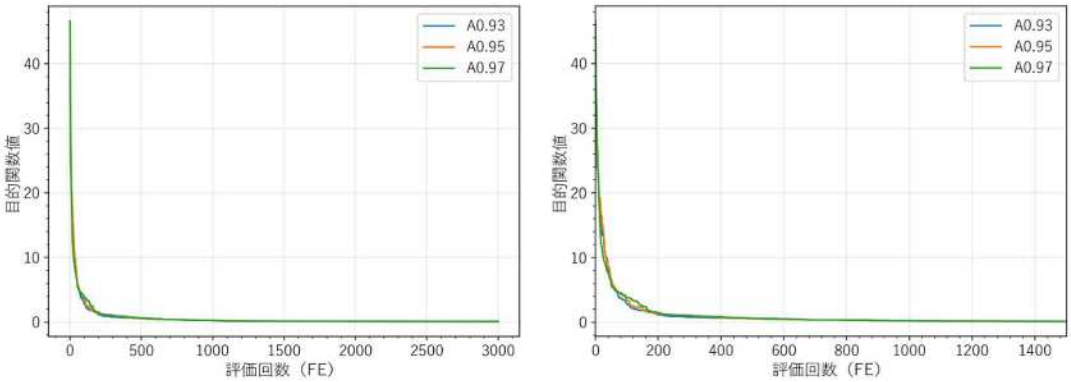


図-3.39　Griewank 関数における収束曲線

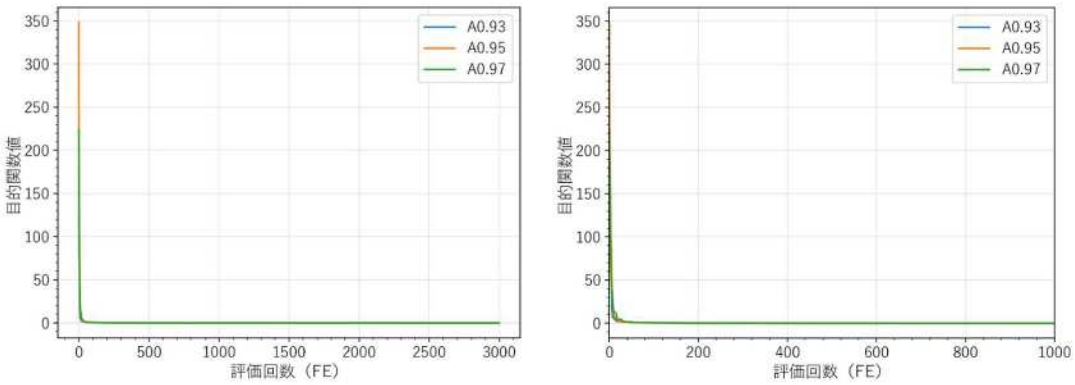


図-3.40　Rosenbrock 関数における収束曲線

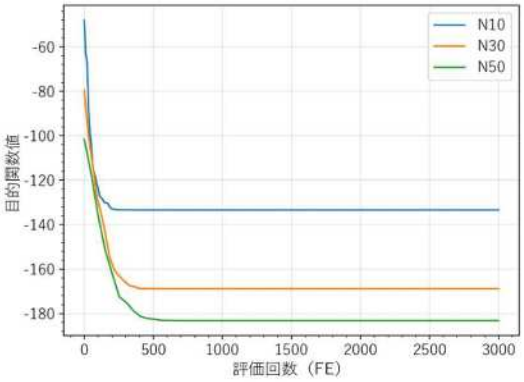


図-3.41　Shubert 関数における収束曲線

3.4.4　問題特性との対応と適用性の整理

本節では、3.4.1〜3.4.3 で示した各手法の収束特性、収束の安定性およびパラメータ依存性の結果に基づき、問題特性との対応関係を横断的に整理する。これにより、各メタヒューリスティクス最適化手法がどのような最適化問題に適するかを総括的に明確化する。

まず、高次元かつ連続値の最適化問題に対しては、PSO および DE が適した特性を有する。両手法はパラメータ構造が比較的単純であり、勾配情報を必要とせず連続空間の探索を効率的に行えるため、FEM 解析のような非線形かつ滑らかな評価関数との親和性が高い。一方、多峰性の強い関数においては、PSO は粒子数設定に応じて精度が変動し、DE は局所解への早期停滞を生じやすい傾向を示す。ただし、いずれもパラメータ設定を適切に行うことで性能の改善が可能である。

離散的・組合せ的要素を含む問題に対しては、GA および ABC が有利である。GA は交叉および突然変異による多様性維持により、多峰性問題に対しても安定した解の改善が可能である。また、ABC は偵察蜂によるランダム探索を通じて局所解からの脱出性能に優れる。ただし、ABC は食物源数に対する感度が高く、適切なパラメータ設定が性能に大きく影響する。

評価コストの高い問題においては、「少ない評価回数での探索効率」よりも、「評価コストを無駄にしない安定した改善挙動」が重要となる。PSO は初期段階における急速な収束は必ずしも顕著ではないものの、探索挙動のばらつきが小さく、評価値が一貫して減少する安定した収束特性を示す。一方、SA は確率受理に基づく探索により大域的探索を維持できるが、冷却スケジュールに強く依存し、パラメータ設定が探索性能に大きく影響する。

以上の結果から、各手法の適用性は問題構造に大きく依存する。特に、本研究で対象とする FEM 解析を伴う連続値の逆解析問題においては、探索性能、収束の安定性、並列化適性に加え、実装の容易性および既存解析コードとの統合性が重要な要件となる。

これらの観点を総合すると、PSO および DE が有力な候補となるが、PSO は少数のパラメータで安定した探索が可能であり、既存解析コードとの統合が容易である点において、工学的応用により適した手法であると位置づけられる。

3.5　パラメータ同定問題への適用とPSO採用の合理性

本節では、3.4節において整理した各メタヒューリスティクス最適化手法の特性比較結果に基づき、有限要素法（FEM）を用いたパラメータ同定問題に適した最適化手法を選定し、本研究で採用する手法を位置づける。

3.5.1　FEM解析を伴う最適化問題の特性

本研究で対象とする逆解析は、FEM 解析を評価関数として内包し、観測データと FEM 解析により得られる応答値との誤差を最小化する最適化問題である。FEM 解析は 1 回あたりの計算負荷が高く、評価回数の増加が計算時間に直接影響するため、限られた評価回数の中で安定した収束を実現できる手法が求められる。

また、各解候補（個体や粒子）の評価は互いに独立に実行可能であるため、並列計算と

の親和性が高い。一方で、対象とする物性パラメータ（熱伝導率や透湿率など）は相互に影響を及ぼすため、一般に独立ではなく、各物理場において複数の相関するパラメータを同定する必要がある。このため、連続空間において複数の相関パラメータを効率的に探索できる能力が重要となる。

加えて、本研究のように既存の FEM 解析コードを評価関数として組み込む場合には、アルゴリズムの構造が簡潔であることに加え、制御パラメータ数が少なく、かつ設定指針が明確であることも重要な要件となる。制御パラメータの数が多い、あるいは設定感度が高い手法では、パラメータ調整に要する負荷が増大し、解析コードとの統合や実務適用時の運用効率が低下する可能性がある。そのため、本研究では制御パラメータ数だけでなく、調整容易性も考慮して最適化手法の適用性を評価する。

以上より、本研究における最適化手法の選定にあたっては、以下の要件を満たすことが重要となる。

(1) 高コスト評価に対する効率性（無駄な評価を抑制する安定した収束挙動）
(2) 収束の安定性（探索過程におけるばらつきの小ささ）
(3) 並列計算への適合性
(4) 実装の容易性、制御パラメータの調整容易性および既存解析コードとの統合性

3.5.2　各手法の適合性評価

3.4 節における比較結果を踏まえ、前節で整理した要件（高コスト評価への適合性、収束の安定性、並列化適性、実装・統合性）に基づき、各手法の適合性を総合的に整理した。

その結果、GA、PSO、ABC、DE はいずれも解候補ごとの評価が独立に実行可能であり、並列化が容易であることから、高コスト評価問題への適用が可能であることが確認された。一方で、収束の安定性およびパラメータ依存性の観点では手法間に明確な差が見られた。

PSO は、探索過程における評価値のばらつきが小さく、極端な性能低下が生じにくいという点で、安定した探索挙動を示した。精度および収束速度の点では他手法と同程度であるものの、パラメータ設定の変化に対して連続的に性能が変化する傾向が確認され、一貫した探索特性を有する。

ABC は多峰性問題に対する探索能力に優れるものの、食物源数の設定に対する依存性が大きく、適切なパラメータ選定が性能に大きく影響する傾向が見られた。DE は収束速度に優れる一方で、多峰性問題において局所解への停滞が確認され、問題特性への依存性が比較的大きい。

GA は探索過程において大きな発散は見られず安定した挙動を示すが、複雑な関数における精度および収束速度の点で優位性は限定的であり、またパラメータ設定により性能が大きく変動する場合がある。SA は逐次探索型であり並列化に不向きであるため、評価回数に制約のある高コスト問題への適用には制約がある。

表-3.22 に示すように、GA、ABC および DE はいずれも並列化に適しているものの、制御パラメータの設定や探索挙動に問題依存性が認められた。また、SA は実装が容易である一方、並列計算への適用が困難であり、高コストな FEM 逆解析との親和性は限定的

である。

これに対して PSO は、並列計算への適合性、安定した収束挙動、少数の制御パラメータによる調整容易性、および既存解析コードへの統合の容易性を併せ持つことが確認された。さらに、3.4 節で示したベンチマーク関数による比較においても極端な性能低下は見られず、多様な問題に対して安定した探索性能を示した。

以上より、本研究で対象とする FEM 解析を伴う逆解析問題に対しては、PSO が最もバランスの取れた特性を有すると判断し、以降の検討では PSO を中心的な最適化手法として採用することとした。

表-3.22　FEM逆解析問題に対する各手法の適合性評価

手法	高コスト評価への適合性	収束安定性	パラメータ調整容易性	実装・統合性
GA	個体評価の並列化が可能	比較的安定	パラメータ数が多く調整負荷が大きい	遺伝的操作が必要でやや複雑
PSO	粒子評価の並列化が可能	安定した収束挙動を示す	少数パラメータで設定指針が明確	更新式が単純で統合が容易
ABC	食物源評価の並列化が可能	多峰性問題で安定	発動条件等の調整を必要とする	複数探索フェーズを有する
DE	個体評価の並列化が可能	問題によって局所停滞あり	少数パラメータだが調整を要する	更新則は比較的単純
SA	並列化が困難	問題依存性が大きい	パラメータ数は少ないが経験的調整を要する	実装は容易

3.5.3　PSO採用の合理性と位置づけ

以上の検討結果に基づき、本研究では PSO（Particle Swarm Optimization）を FEM 逆解析の基幹アルゴリズムとして採用する。

3.5.1 で示した通り、本研究の対象である FEM 逆解析問題においては、高コスト評価に対する効率性、収束の安定性、並列計算への適合性、ならびに実装の容易性および既存解析コードとの統合性が重要な要件となる。

これに対し PSO は、粒子ごとの評価が独立であることから並列計算との親和性が高く、高コスト評価問題に適している。また、探索過程における評価値のばらつきが小さく、極端な性能低下が生じにくいことから、安定した探索挙動を示す。さらに、慣性重みおよび学習係数（認知係数および社会係数）といった少数のパラメータで構成されており、パラメータ調整の負荷が小さい点も実用上の利点である。加えて、アルゴリズム構造が簡潔であるため、既存の FEM 解析コードを評価関数として容易に組み込むことが可能である。

一方で、ABC や DE は多峰性問題に対する探索能力や収束速度に優れる場合があるものの、パラメータ設定に対する依存性が大きく、安定した運用のためには調整が必要である。GA は安定した探索が可能であるが、収束速度および複雑な問題に対する精度の点で優位性は限定的である。また、SA は逐次探索型であり並列化に不向きであるため、高コスト問題への適用には制約がある。

本研究で設定した評価条件のもとでは、PSO は探索性能、収束安定性、並列化適性および実装容易性を総合的に考慮した場合、本研究の FEM 逆解析問題に適した手法であると判断した。

したがって、本研究では PSO を基本手法として採用し、次章においてその具体的な適用方法および有効性について検討する。

なお、PSO は安定した探索特性を有する一方で、最終収束までに比較的多くの評価回数を要する傾向がある。この点については、探索の進行状況に応じて粒子数を動的に調整することにより計算効率の向上が可能であると考えられる。本研究ではこの観点に基づき、第 4 章において改良手法を導入し、評価回数の削減と探索性能の両立について検討する。

3.6　第3章のまとめ

本章では、メタヒューリスティクス最適化手法（GA、PSO、ABC、DE、SA）の基本原理および探索特性を整理し、5 種類の代表的評価関数を用いた比較検討を行った。その結果、各手法の特性は明確に異なり、問題の特性や解析条件に応じた手法選択が重要であることを示した。

まず、探索性能と精度の観点では、ABC が高い最終精度を示し、特に強い多峰性を有する Shubert 関数において局所解回避能力の高さが顕著であった。DE も単峰性関数に対しては高精度な解を与えたが、多峰性問題では局所停滞が生じる傾向を示した。PSO および GA は関数特性に応じて精度が変化するものの、全体として中程度の精度を維持し、特に平滑な関数に対しては安定した探索挙動を示した。SA は全体として精度が低く、大域的最適解への到達が困難となる場合があった。

次に、収束性および計算効率の観点では、DE が比較的速い収束傾向を示し、ABC も条件によっては少ない評価回数で安定解に到達した。一方、PSO および GA は探索過程の安定性に優れるものの、最終評価値に到達するまでに比較的多くの評価回数を要する傾向が見られた。SA は逐次探索型であるため収束に時間を要し、評価回数に制約がある条件下では十分な探索が困難となる。

パラメータ依存性の観点では、GA および PSO はパラメータ変化に対する性能の変動が比較的小さく、一定の安定性を示した。一方、ABC および DE はパラメータ設定に対する感度が高く、適切な設定が性能に大きく影響する傾向を示した。また、SA は冷却スケジュールに強く依存し、パラメータ設定が探索挙動を大きく左右する手法である。

さらに、実装容易性および応用性の観点では、PSO は少数のパラメータで構成される簡潔なアルゴリズムであり、既存解析コードとの統合が容易であるとともに、並列計算との親和性にも優れている。GA も比較的実装は容易であるが、個体数などの数値パラメータに対する感度は小さい一方で、交叉や突然変異といった演算子設計により探索性能が変化するため、設計選択の影響を受けやすい。DE および ABC は高い探索能力を有するものの、更新機構が比較的複雑であり、実装および調整には一定の配慮が必要である。SA は構造自体は単純であるが、冷却スケジュールの設計が性能に大きく影響する。

以上の結果を総合すると、有限要素解析（FEM）を内包する逆解析のように 1 回あたり

の評価コストが高い問題においては、並列化が容易であり、探索挙動が安定しており、かつパラメータ調整の負荷が小さい手法が有効である。この観点から、PSO は精度および収束速度の点では他手法と同程度であるものの、探索の安定性と実装容易性のバランスに優れ、FEM 逆解析との親和性が高い手法であると位置づけられる。

したがって、本研究で対象とする温度・湿度・応力の逆解析問題に対しては、PSO を基本手法として採用することが合理的であると結論づけられる。

一方で、PSO は安定した探索特性を有する反面、最終収束までに比較的多くの評価回数を要する傾向がある。この課題に対して、本研究では PSO を基盤としつつ、計算効率の向上を目的とした改良を行う。具体的には、探索の進行状況に応じて粒子数を動的に調整する手法を導入し、評価回数の削減と探索性能の両立を図る。これらの手法については、第 4 章においてその詳細と有効性を検討する。

【参考文献】

1) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.107-118，2006.2.
2) 寒野善博 著，駒木文保 編：最適化手法入門，講談社，2019.
3) 金谷健一: これなら分かる最適化数学—基礎原理から計算手法まで—, 共立出版, 2005.
4) Deb, K.：Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Wiley, 2001.
5) 久保幹雄，J. P. Pedroso：メタヒューリスティクスの数理，共立出版，2009.
6) Holland, J. H.：Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975.
7) Goldberg, D. E.：Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
8) 伊庭斉志：進化論的計算手法，オーム社，2005.
9) Kennedy, J. and Eberhart, R.：Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
10) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.：Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11) Clerc, M.：The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization, Proc. The 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC 1999), Vol. III, pp.1951-1957, 1999.
12) Karaboga, D.：An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report-TR06, Erciyes University, 2005.
13) Karaboga, D. and Basturk, B.：A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, Journal of Global Optimization, Vol. 39, No. 3, pp.459-471, 2007.
14) Storn, R. and Price, K.：Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, Journal of Global Optimization, Vol. 11, pp.341-359, 1997.
15) Das, S. and Suganthan, P. N.：Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 15, No. 1, pp.4-31, 2011.
16) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P.：Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol. 220, pp.671-680, 1983.
17) van Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H. L.：Simulated Annealing: Theory and Applications, Mathematics and Its Applications, Vol. 37, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1987.
18) Molga, M. and Smutnicki, C.：Test Functions for Optimization Needs, 2005.
19) Jamil, M. and Yang, X.-S.：A Literature Survey of Benchmark Functions for Global Optimization Problems, International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, Vol. 4, No. 2, pp.150-194, 2013.
20) Surjanovic, S. and Bingham, D.：Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets, 2013.

21) Clerc, M. and Kennedy, J.：The Particle Swarm—Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 1, pp.58-73, 2002.
22) 小澤優太，甲野佑，高橋達二：探索と知識利用を自律調整する人工蜂コロニーアルゴリズム，2014 年度人工知能学会全国大会（第 28 回）論文集，2D3-1，pp.1-4，2014.

第 4 章

温度解析のための入力値の同定

第 4 章　温度解析のための入力値の同定

4.1　本章の目的と位置づけ

本章では、マスコンクリート温度応力解析において重要となる温度解析入力値を対象とし、メタヒューリスティクス最適化を用いた逆解析により合理的に同定する枠組みを示す。解析入力パラメータの同定においては、推定誤差の原因が、(i) 同定アルゴリズム（最適化手法や評価関数設定）の問題、(ii) 計測データの誤差・不確かさ、(iii) 解析モデルの簡略化やモデル化の限界に起因する誤差、のいずれに支配されているかを切り分けて議論することが重要である。しかし、実測データを用いた同定では、これらの誤差要因が複合して現れるため、同定結果の妥当性を評価する際には、解析結果と計測結果との整合性だけでなく、同定された入力パラメータの物理的妥当性についても確認する必要がある。

温度解析においては、断熱温度上昇特性や熱伝達係数などの入力値が解析結果に大きな影響を及ぼす。一方、これらの入力値は、使用材料、配合条件、施工条件および境界条件などによって変化するため、対象構造物に応じて適切に設定することが重要である。特に、断熱温度上昇特性は、本来、断熱温度上昇試験によって求めることが望ましいが、実構造物ごとに試験を実施することは必ずしも容易ではない。

そこで、モックアップ供試体で計測された温度履歴を観測データとして逆解析を行い、断熱温度上昇特性を同定する。さらに、熱伝達係数を同定対象に含めた場合についても検討し、解析次元、観測点数、同定対象パラメータおよび最適化手法の違いが同定結果に及ぼす影響を明らかにする。

また、逆解析によって同定された断熱温度上昇特性値を用いて断熱温度上昇履歴を算定し、同一のコンクリートについて別途実施された断熱温度上昇試験結果と比較することにより、逆解析によって得られた断熱温度上昇特性の妥当性を検証する。

以上の検討を通じて、実測温度履歴を活用した温度解析入力値の同定可能性を明らかにするとともに、温度履歴の再現性だけでなく、同定された入力パラメータの物理的妥当性を評価することの重要性を示す。さらに、逆解析フレームワーク、探索範囲の設定方法およびFEM解析コードとの連携方法を整理し、提案手法の実装方法を明確にする。

4.1.1　解析入力値の課題（温度）

温度解析においては、断熱温度上昇特性および外気温や熱伝達係数などの境界条件が温

度履歴を支配する主要因であるが、これらは材料特性や施工条件に依存して変動するため、適切な設定が容易ではない。特に断熱温度上昇特性は温度解析結果に大きな影響を及ぼす重要な入力値であるが、実構造物ごとに断熱温度上昇試験を実施することは必ずしも容易ではない。そのため、実測温度データを活用して対象構造物固有の入力パラメータを合理的に同定する手法の確立が求められている。

4.1.2　逆解析による同定の考え方

本研究では、これらの課題に対して、計測値と解析結果との誤差を最小化することにより入力パラメータを推定する逆解析の考え方を適用する。すなわち、観測データに対して解析モデルの応答を適合させることで、未知の入力パラメータを同定する枠組みである。

このような逆解析問題は一般に非線形性および多峰性を有するため、従来の勾配法では局所解に陥る可能性がある。そこで本研究では、大域的な探索を行うことが可能なメタヒューリスティクス最適化手法を適用し、安定した同定を図る。

また、本章では温度場パラメータ同定に用いる逆解析フレームワークを示し、設計変数、評価関数および探索範囲の設定方法を整理する。さらに、逆解析システムの構成および同定手順を示し、提案手法の実装方法を明確化する。

4.2　温度場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク

本章では、温度場パラメータ同定に用いる逆解析フレームワークについて述べる。本研究では、温度解析入力値を構成する断熱温度上昇特性および熱伝達係数に関するパラメータを設計変数として定義し、解析温度と計測温度との誤差を最小化することにより、対象構造物固有の入力パラメータを同定する。

4.2.1　逆解析問題の一般的定式化

逆解析問題は、解析モデルに入力される設計変数ベクトルを適切に設定し、計測値との誤差を最小化する最適化問題として定式化される。本研究では、温度場に関わる入力パラメータを設計変数ベクトルとして定義する。

評価関数は、計測値と解析結果との差を表す偏差平方和や平均二乗誤差（*RMSE*）などを用いて定義し、これを最小化する入力パラメータを求める。

また、物理的妥当性および計算の安定性を確保するため、各設計変数に対して適切な制約条件および探索範囲を設定する。さらに、最適化計算の終了条件として、最大反復回数、評価関数の閾値、あるいは収束判定基準を設定し、計算の効率化と安定化を図る。

4.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要

本研究では、第 3 章の比較検討結果に基づき、粒子群最適化（PSO）を主たる最適化手法として採用する。

また、探索の多様性を確保する観点から、人工蜂コロニー法（ABC）を比較手法として位置づけ、その特性を踏まえた検討を行う。

さらに、計算効率の向上および実務適用を意識し、収束性を重視した縮退型 PSO を導入することで、計算コストの低減と安定した解探索の両立を図る。

これらの最適化手法は、それぞれの同定問題の特性に応じて適用方針を設定し、効率的かつ信頼性の高いパラメータ同定を実現する。

4.2.3　逆解析システムの実装方法

本研究では、有限要素法（FEM）解析コードとメタヒューリスティクス最適化アルゴリズムを連携させた逆解析システムを構築した。

逆解析では、まず最適化アルゴリズムにより入力パラメータ候補を生成する。次に、その候補値を解析入力ファイルへ自動的に反映し、FEM 解析を実行する。解析終了後、観測点における解析結果を抽出し、計測値との誤差を評価関数として算出する。さらに、その評価結果を最適化アルゴリズムへ返し、次の探索点を生成する。この処理を繰り返すことで、評価関数を最小化する入力パラメータを探索する。

本研究では既存の FEM 解析コードを大幅に変更することなく利用できるよう、最適化プログラム側から解析入力ファイルの生成、解析実行および結果読込みを自動的に行う構成とした。これにより、温度場、湿度場および応力場の各解析に対して共通の逆解析フレームワークを適用することが可能となった。

逆解析システムの構成を図-4.1 に示す。図-4.1 は温度場パラメータ同定を対象とした逆解析システムの構成を示したものであり、設計変数として断熱温度上昇特性値および熱伝達係数を設定している。

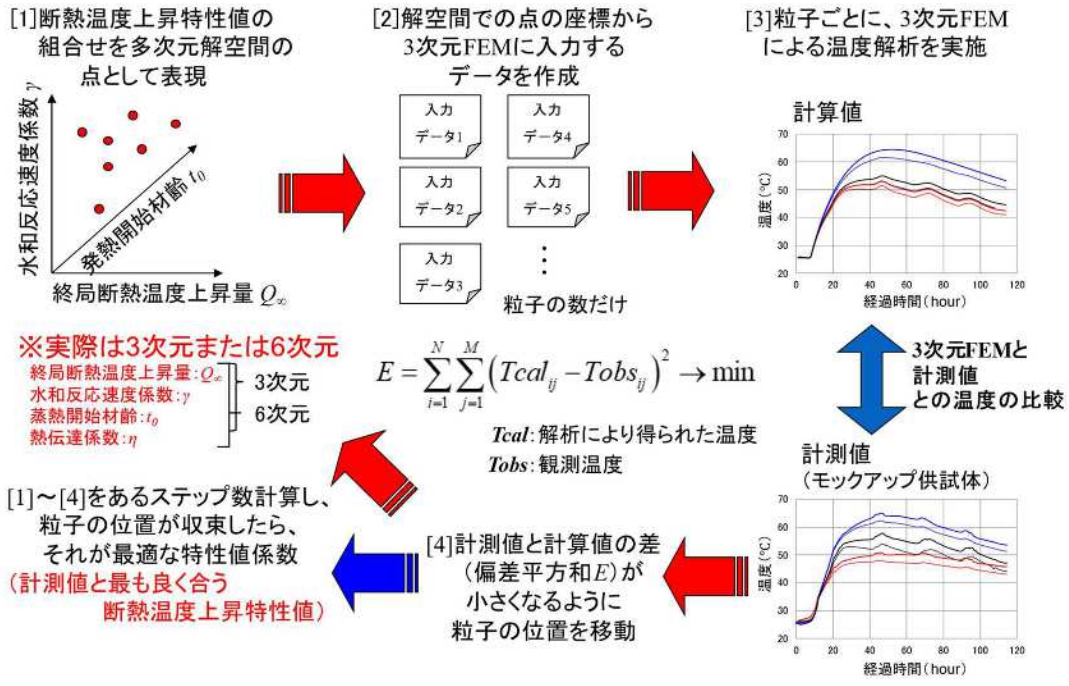


図-4.1　温度場パラメータ同定のための逆解析システムの構成

図-4.2 に、本研究で用いた PSO による温度場パラメータ同定手順を示す。まず、探索範囲はコンクリート標準示方書[1]、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025[2]、既往研究および事前解析結果を参考として設定した。初期段階では広い探索範囲を設定し、得られた結果に応じて探索範囲を段階的に絞り込むことで、計算効率と探索精度の両立を図った。次に、PSO により生成された粒子位置から解析入力データを作成し、3 次元 FEM 温度解析を実行する。解析結果と計測値との誤差を評価関数として算出し、その結果に基づいて粒子位置および速度を更新する。この処理を繰り返すことにより、評価関数を最小化する断熱温度上昇特性値および熱伝達係数を探索する。

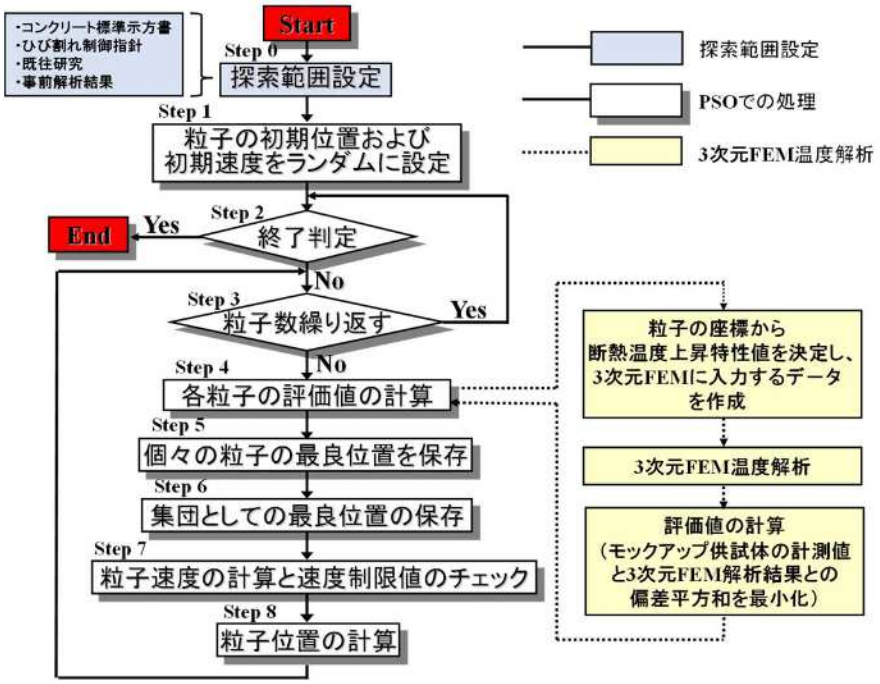


図-4.2　PSOを用いた温度場パラメータ同定手順

4.3　温度解析入力値の同定

4.3.1　同定対象とする温度解析入力値

マスコンクリートの温度応力解析を実施するにあたっては、入力項目として断熱温度上昇特性を適切に設定することが重要であり、その設定の妥当性は温度ひび割れ予測結果に大きな影響を及ぼす。断熱温度上昇特性は、本来、断熱温度上昇試験によって求めることが望ましい。

国内においては、コンクリート標準示方書[1)]やマスコンクリートのひび割れ制御指針2025[2)]に代表的な断熱温度上昇特性が示されており、実務ではこれらの値を参考に設定されることが多い。一般的な材料および配合条件で施工される構造物については、これらの代表値を用いることで一定の妥当性が確保される場合も多い。

しかしながら、実際の構造物では、セメントの種類や混和材の使用状況、配合条件、施工条件などの違いにより、断熱温度上昇特性が変化する。そのため、指針等に示された代表値と実際のコンクリートの発熱特性が必ずしも一致するとは限らず、解析精度に影響を及ぼす可能性がある。

特に海外において施工されるマスコンクリート構造物では、使用材料や配合条件が国内と大きく異なる場合が多く、国内基準に基づく断熱温度上昇特性をそのまま適用することが適切でない場合がある。さらに、現地では断熱温度上昇試験設備を保有していない場合や、試験の実施がコスト面・期間面から困難な場合も少なくない。

このような背景から、実構造物において計測された温度履歴を用いて、断熱温度上昇特性を逆解析により同定する手法は有効な方法の一つであると考えられる。近年、粒子群最適化[3)-5)]（Particle Swarm Optimization、PSO）や人工蜂コロニーアルゴリズム[6)]（Artificial Bee Colony、ABC）などのメタヒューリスティクス最適化手法が、非線形性の強い逆解析問題に適用されつつあるが、計算負荷の大きさが課題として指摘されており、実務的な解析への適用に際して制約となる場合がある。

そこで本研究では、マスコンクリートの断熱温度上昇特性を対象として、PSOおよびABCを用いた逆解析を行うとともに、粒子数を繰り返し計算の進行に応じて線形に減少させる縮退PSOを適用し、その有効性について検討する。さらに、観測点数や同定パラメータ構成の違いが逆解析結果に及ぼす影響について比較検討を行うことを目的とする。特に、本研究で提案する縮退PSOについては、計算効率の観点からその有効性を重点的に検討する。

4.3.2　断熱温度上昇特性の逆解析手法の定式化

断熱条件下におけるコンクリートの温度上昇は、水和反応の進行に伴い時間とともに増加し、最終的に一定値に収束する挙動を示す。本研究では、断熱温度上昇特性を一般的に用いられている次式の指数関数モデルにより表現する[1),2)]。

$$Q(t) = Q_{\infty}\left(1 - \mathrm{e}^{-\gamma(t-t_0)^{s}}\right) \tag{4.1}$$

ここに、

$Q(t)$：材齢tにおける断熱温度上昇量（℃）

Q_∞：終局断熱温度上昇量（℃）

γ ：水和反応速度係数

t_0：発熱開始材齢（日）

S：形状係数

である。

一般的なコンクリートではS=1.0とされることが多いため、本研究ではSを既知定数として扱い、以下のパラメータを同定対象とした。

・終局断熱温度上昇量Q_∞

・反応速度係数γ

・発熱開始材齢t_0

また、実構造物の温度履歴は内部発熱特性だけでなく外部境界条件にも大きく影響される。このため、本研究では必要に応じて以下の境界条件パラメータも同定対象に含めた。

・上面の熱伝達係数

・側面の熱伝達係数

・下面の熱伝達係数

一方、熱伝導率、比熱、密度などの基本熱物性については、文献値および標準値を用いて固定値として扱った。温度観測は供試体内部の温度分布を代表する位置に複数点配置された温度センサにより行い、逆解析ではこれらの観測点温度履歴を観測量として用いた。外気温については別途計測された値を境界条件として与えた。

逆解析では、有限要素法による温度解析を用い、観測点における解析温度と実測温度との差に基づいて評価関数を定義する。本研究では、評価関数Eを次式で定義した。

$$E=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left(Tcal_{ij}-Tobs_{ij}\right)^2 \tag{4.2}$$

ここに、

$Tcal_{ij}$：解析により得られた温度（℃）

$Tobs_{ij}$：観測温度（℃）

N：観測点数

M：時間ステップ数

である。

なお、本研究では評価関数 E を観測点数および時間ステップ数で平均化し、その平方根を取った値を正規化誤差（$RMSE$）として用いる。$RMSE$ の定義式を式(4.3）に示す。

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{NM}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left(Tcal_{ij}-Tobs_{ij}\right)^2} \tag{4.3}$$

逆解析問題は一般に非線形かつ多峰性を有するため、勾配情報を必要とする従来の最適

化手法では安定した解探索が困難となる場合が多い。そこで本研究では、以下のメタヒューリスティクス最適化手法を用いて逆解析を実施した。

(1)粒子群最適化（PSO）
(2)人工蜂コロニーアルゴリズム（ABC）
(3)縮退PSO

(1) 粒子群最適化（PSO）[3)-5)]

PSOは、群れを成して行動する生物の知能に着想を得た最適化手法であり、粒子と呼ばれる複数の探索点が解空間内を移動しながら最適解を探索する。各粒子は、自身の最良解および集団全体の最良解の情報を用いて速度と位置を更新する。

本研究では、粒子の位置が解空間の境界を超えた場合には反射条件を適用し、探索の安定化を図った。また、繰り返し回数の進行に応じて最大速度を低減させることで、探索初期では探索性を重視し、後半では収束性を高める一般的に用いられる設定を採用した。

(2) 人工蜂コロニーアルゴリズム（ABC）[6)]

ABCは、ミツバチの採餌行動を模擬した最適化手法であり、働き蜂、追従蜂、偵察蜂の3種類の役割を持つ個体群によって構成される。働き蜂は近傍探索を行い、追従蜂は良好な解の周辺を重点的に探索する。一方、一定期間改善されない解は放棄され、偵察蜂によって新たな探索点が生成される。

本研究では、ABCを用いて断熱温度上昇特性の逆解析を行い、PSOおよび縮退PSOとの性能比較を行った。

(3) 縮退PSO

縮退PSOは、PSOの探索能力を維持しつつ計算コストを低減することを目的として、粒子数を繰り返し計算の進行に応じて線形に削減する手法である。本研究では、初期粒子数を30とし、繰り返し回数の約90%まで粒子数を線形に減少させ、最終的に最小粒子数5を維持する設定とした。

各繰り返しにおいて、評価値に基づいて粒子を並べ替え、上位の粒子のみを次の繰り返しに残すエリート保存型の縮退方式を採用した。これにより、縮退過程における解の劣化を防ぎつつ、有望解への収束を促進することを意図している。

なお、各最適化手法における具体的な制御パラメータの設定値については、次項の解析条件においてまとめて示す。

4.3.3　解析対象および供試体

(1) 対象としたモックアップ供試体

対象とした構造物は**図-4.3**に示す縦横幅1.5ｍのマスコンクリートのモックアップ供試体であり、供試体はパレット上に打設されており、地面とは直接接していない。温度観測点は、供試体内部の温度分布を代表する位置として、中心部および側部の上下方向に9点配置した。**図-4.4**に観測点の配置を示す。なお、TC10は外気温である。温度センサの具体的な配置位置を**表-4.1**に示す。9点の計測温度および外気温の履歴を**図-4.5**に示す。なお、

本供試体に用いたコンクリートでは、別途断熱温度上昇試験が行われており、その断熱温度上昇曲線と断熱温度上昇特性を図-4.6に示す。本研究ではこの断熱温度上昇試験結果を、逆解析結果の妥当性を検証するための参照値として用いた。



図-4.3　モックアップ供試体

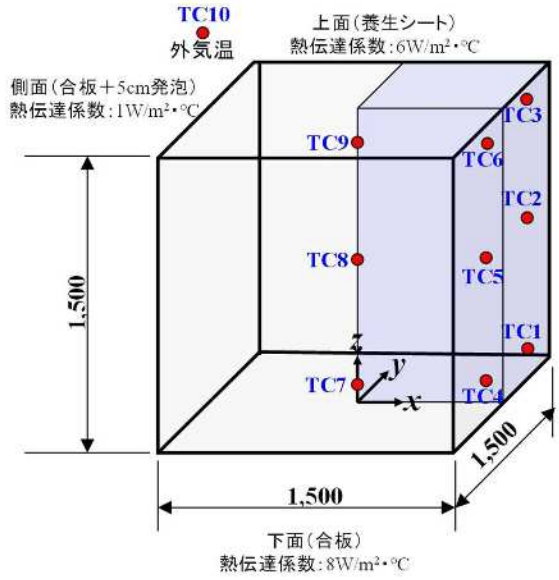


図-4.4　温度センサ配置位置および境界条件

表-4.1　温度センサ配置位置

センサ No	*x* 座標	*y* 座標	*z* 座標
TC1	700	700	100
TC2	700	700	750
TC3	700	700	1400
TC4	700	0	100
TC5	700	0	750
TC6	700	0	1400
TC7	0	0	100
TC8	0	0	750
TC9	0	0	1400

※原点は供試体下面中央、単位(mm)

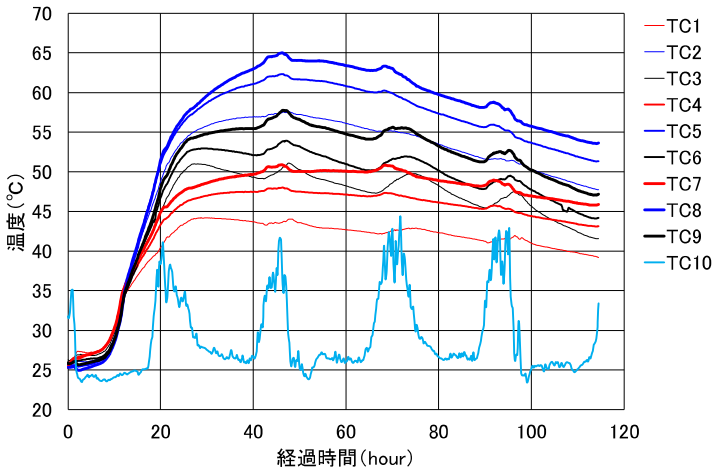


図-4.5　計測温度

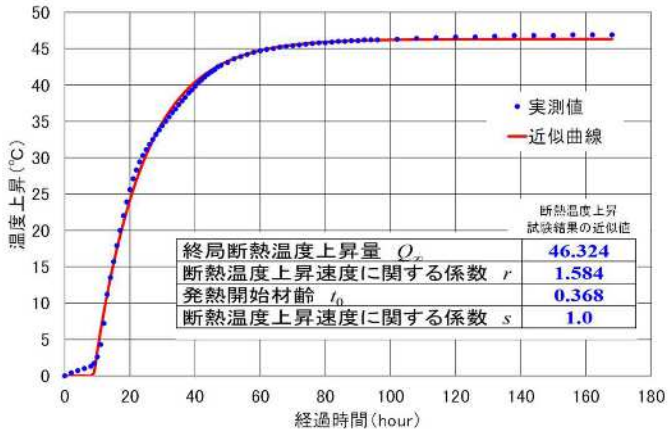


図-4.6　断熱温度上昇試験結果

(2) 解析モデル

本研究では、3 次元有限要素モデルを基本モデルとして用い、計算負荷低減の可能性を検討するため、計算条件を簡略化した 2 次元有限要素モデルについても比較検討を行った。**図-4.7** に 3 次元の有限要素メッシュを示す（2 次元は網掛け部分）。このモデルは対称性を考慮した 1/4 モデルであり、3 次元モデルは、2 次元と同じメッシュ分割がそのまま奥行き方向に同一のメッシュ分割を持つ押し出しモデルである。

解析に際しては標準的な熱特性値として**表-4.2** のような値を設定している。なお、熱伝導率、密度および比熱については、一般的なマスコンクリートを想定し、それぞれ 2.7W/(m℃)、2500kg/m^3、1.2kJ/(kg℃)の代表値を用いた。また、熱伝達係数についてはマスコンクリートのひび割れ制御指針 2025[2)]での参考値や事前検討した同定値をもとに設定しており、下面（合板）、側面（合板＋5cm 発泡スチロール）、上面（養生シート）を 8.0, 1.0, 6.0 W/(m^2℃)と設定している。

表-4.2　設定した熱特性値

項目	単位	設定値
熱伝導率	W/m℃	2.7
密度	kg/m^3	2500
比熱	kJ/kg℃	1.2
熱伝達係数（下面）	W/m^2℃	8.0 or 同定
熱伝達係数（側面）	W/m^2℃	1.0 or 同定
熱伝達係数（上面）	W/m^2℃	6.0 or 同定
終局断熱温度上昇 Q_∞	℃	同定
速度に関する係数 γ	―	同定
発熱開始材齢 t_0	日	同定

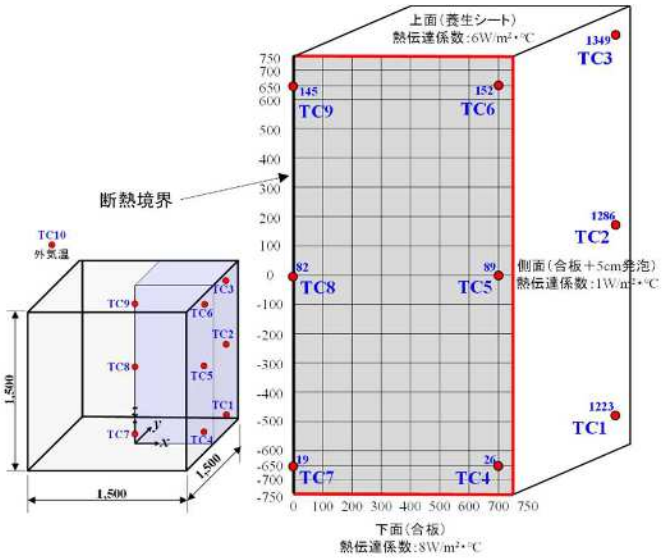


図-4.7　有限要素メッシュ

(3) 検討ケース

逆解析による断熱温度上昇特性の同定では、解析次元、最適化手法、観測点数、同定対象パラメータの構成の組合せにより**表-4.3**に示すように複数ケースを設定した。まず、最適化手法および観測点数の違い、ならびに熱伝達係数を同定対象に含めることが同定結果に及ぼす影響を検討するため、ケース1～12の解析を行った。その後、解析次元（2次元・3次元）の影響、観測点数を中心部および上下方向の代表点など、主要観測点のみに限定した場合の影響を調べるために、追加でケース13～17の解析を行った。熱伝達係数を同定に含める場合は、下面、側面、上面の3箇所の熱伝達係数も同定している。なお、観測点が9点の場合は**図-4.7**に示すTC1～TC9の全観測点を用い、6点の場合はTC4～TC9、3点の場合はTC7～TC9、2点の場合はTC8およびTC9の観測点を用いて解析を行った。

表-4.3　検討ケース

case	最適化手法	観測点数	追加同定対象
case 1	3 次元 PSO	6	－
case 2		9	－
case 3		6	熱伝達係数
case 4		9	熱伝達係数
case 5	3 次元 ABC	6	－
case 6		9	－
case 7		6	熱伝達係数
case 8		9	熱伝達係数
case 9	3 次元 縮退 PSO	6	－
case 10		9	－
case 11		6	熱伝達係数
case 12		9	熱伝達係数
case 13	3 次元 縮退 PSO	2	－
case 14		3	－
case 15	2 次元 PSO	2	－
case 16		3	－
case 17		6	－

(4) 最適化手法の設定条件

本研究では、断熱温度上昇特性の逆解析において、粒子群最適化（PSO）、人工蜂コロニー法（ABC）、および縮退PSOの3種類のメタヒューリスティクス最適化手法を用いた。各手法の比較を公平に行うため、探索範囲、評価関数および停止条件は共通とし、手法固有の制御パラメータのみを個別に設定した。

PSOでは粒子数を30とし、粒子の位置が解空間の境界を超えた場合には反射条件を適用した。また、繰り返し回数の進行に応じて最大速度を段階的に低減させることで、探索初期の広域探索と後半の収束性の両立を図った。ABCでは食物源数を30とし（PSOの粒子数と同一）、働き蜂、追従蜂および偵察蜂の役割分担により探索を行った。改善が見られない解は放棄し、新たな探索点を生成することで探索の停滞を回避した。なお、本研究ではPSOとの比較において探索規模を揃えるため、食物源数を粒子数と一致させている。一方で、ABCでは働き蜂および追従蜂の処理により1反復あたりの評価関数計算回数がPSOより多くなる傾向があるが、本研究では探索点数を統一することで、各手法の探索性能の比較に主眼を置いた。縮退PSOでは、PSOの基本構造を維持したまま、初期粒子数30から繰り返し回数の約90%まで粒子数を線形に削減し、最終的に最小粒子数5を維持する純エリート型の縮退方式を採用した。

なお、各手法とも停止条件は最大反復回数により統一し、本研究では100回とした。また、メタヒューリスティクス最適化手法は確率的探索に基づくため、同一条件であっても試行ごとに得られる解が異なることから、各解析ケースについて10回の独立試行を行い、評価関数値が最小となった結果を代表値として採用した。

4.3.4　解析結果および考察

(1) 正規化誤差による解析精度の比較

表-4.4に、各解析ケースにおける最良同定値および正規化誤差を示す。本研究で用いる

正規化誤差は、計測温度と解析温度の差の二乗和を観測点数および時間ステップ数で平均化し、その平方根を取った値（Root Mean Square Error:*RMSE*）であり、1観測点・1ステップあたりの平均的な誤差を表している。最良同定値は、各解析ケースについて10回の独立した試行を行い、正規化誤差が最小となった試行の結果を採用している。

表-4.4　最良同定値

									熱伝達係数			
順位	解析Case	手法	次元	観測点	同定対象	Q∞	γ	t0	下面	側面	上面	正規化誤差
1	Case 3	PSO	3次元	6	熱伝達含む	44.522	1.558	0.354	8.8	0.8	4.4	0.077341
2	Case 11	縮退PSO	3次元	6	熱伝達含む	46.163	1.421	0.333	9.4	1.0	4.7	0.077518
3	Case 7	ABC	3次元	6	熱伝達含む	47.242	1.397	0.338	9.8	1.1	4.9	0.078227
4	Case 4	PSO	3次元	9	熱伝達含む	51.684	1.199	0.320	13.5	1.5	5.6	0.082634
5	Case 8	ABC	3次元	9	熱伝達含む	51.065	1.204	0.311	12.3	1.5	5.4	0.082742
6	Case 12	縮退PSO	3次元	9	熱伝達含む	53.009	1.146	0.308	12.65	1.69	5.69	0.083041
7	Case 6	ABC	3次元	9	–	46.147	1.365	0.322	–	–	–	0.084767
8	Case 2	PSO	3次元	9	–	45.976	1.384	0.321	–	–	–	0.084768
9	Case 10	縮退PSO	3次元	9	–	46.069	1.371	0.324	–	–	–	0.084771
10	Case 5	ABC	3次元	6	–	47.188	1.358	0.327	–	–	–	0.090587
11	Case 1	PSO	3次元	6	–	47.160	1.363	0.329	–	–	–	0.090591
12	Case 9	縮退PSO	3次元	6	–	47.095	1.359	0.327	–	–	–	0.090592
13	Case 17	PSO	2次元	6	–	45.707	1.503	0.344	–	–	–	0.091133
14	Case 16	PSO	2次元	3	–	46.039	1.482	0.346	–	–	–	0.129877
15	Case 14	縮退PSO	3次元	3	–	47.447	1.376	0.341	–	–	–	0.131015
16	Case 13	縮退PSO	3次元	2	–	47.330	1.527	0.365	–	–	–	0.131632
17	Case 15	PSO	2次元	2	–	45.899	1.647	0.370	–	–	–	0.136785
	断熱温度上昇試験結果					46.324	1.584	0.368				

正規化誤差の小さい順に解析結果を整理すると、いずれの最適化手法においても、熱伝達係数を同定対象に含めた3次元解析ケースが上位を占めた。特に、観測点数6点で熱伝達係数を同定に含めたケース（Case 3、7、11）は、最も小さい正規化誤差を示しており、境界条件を同時に同定する逆解析が温度履歴の再現性向上に有効であることが確認された。

また、内部発熱特性と境界条件を同時に同定することで温度履歴の再現性は向上する一方、パラメータ間の相関により同定値の非一意性が生じる可能性があることが示された。

一方、熱伝達係数を同定対象に含めないケースでは、境界条件が固定されるため、温度履歴の再現性が低下し、正規化誤差はやや大きくなる傾向が認められた。

熱伝達係数を同定対象に含めることで評価関数は改善されたが、同定された熱伝達係数は、**表-4.2**に示す解析条件として設定した値と必ずしも一致しなかった。これは、断熱温度上昇特性と熱伝達係数との間に相関があり、異なるパラメータの組合せによっても同程度の温度履歴を再現できるためと考えられる。

また、2次元モデルを用いたケースでは、解析結果のばらつきは比較的小さいものの、正規化誤差が大きく、3次元モデルに比べて温度履歴の再現性がやや低い結果となった。さらに、3次元モデルにおいても、観測点数を2点または3点に限定したケースでは、正規化誤差が大きくなり、6点以上の場合に比べて解析精度が低下する傾向が確認された。

これは、解析次元の簡略化や観測点数の減少により、温度場の空間的な情報量が不足し、内部発熱特性および境界条件を十分に拘束できなくなるためと考えられる。

以上より、逆解析結果が安定して得られる場合であっても、解析次元の簡略化や観測点の配置・点数が適切でない場合には、観測温度を十分に再現できない可能性があることに留意する必要がある。

(2) 同定結果を用いた順解析の結果

同定結果を用いた解析結果が観測温度とどの程度一致しているかを**図-4.8**および**図-4.9**に示す。**図-4.8**は正規化誤差が最も小さかったCase 3（PSO、3次元、6観測点、熱伝達係数の同定を含む）の結果であり、**図-4.9**は正規化誤差が12番目であったCase 9（縮退PSO、3次元、6観測点）の結果である。

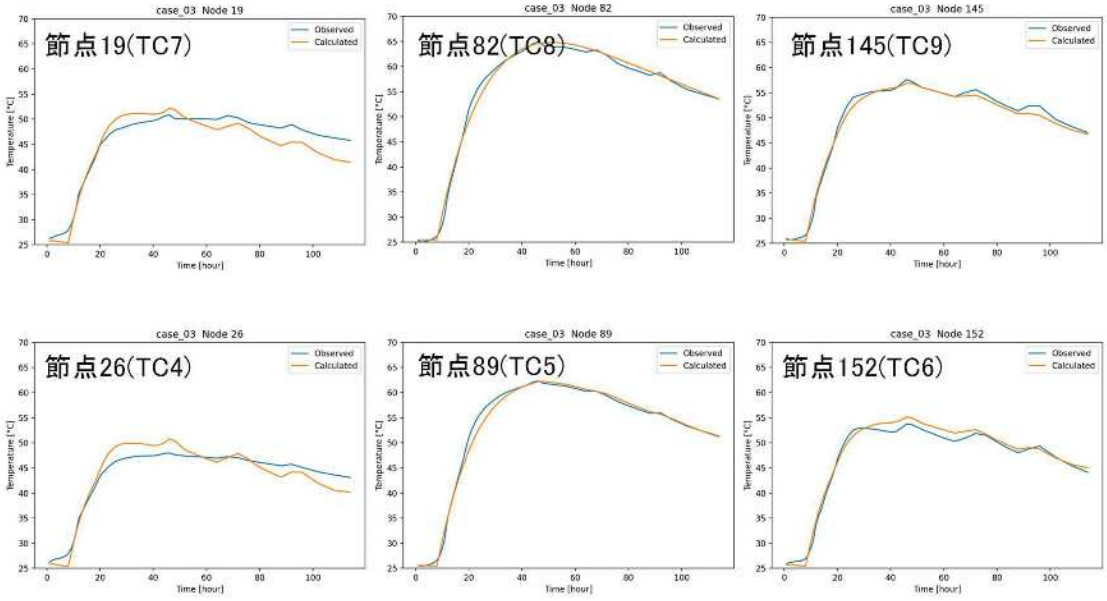


図-4.8　計測温度と同定値を用いた温度（Case 3）

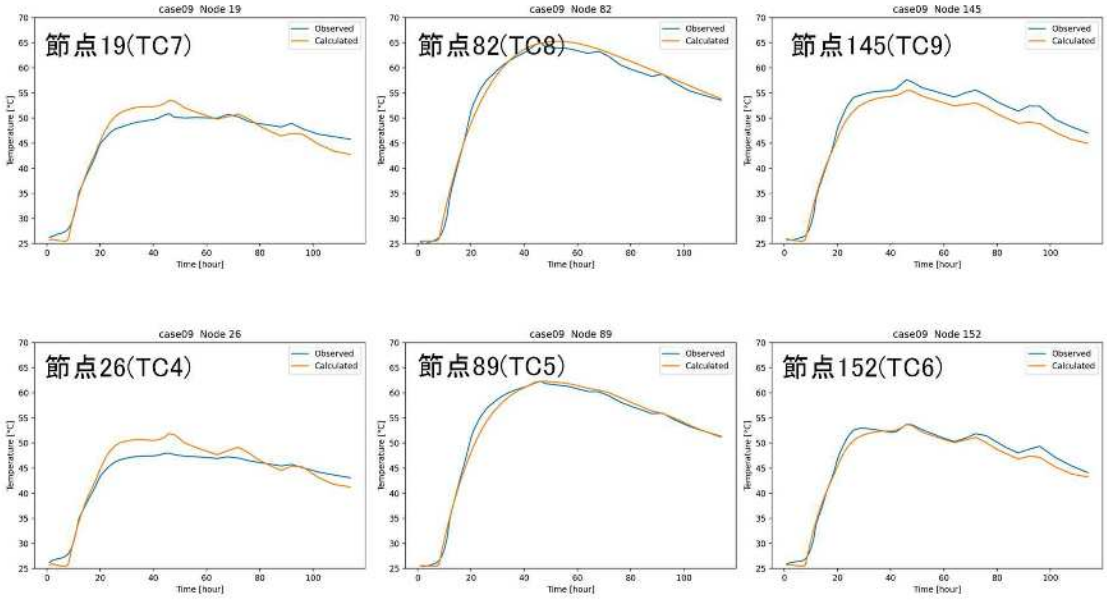


図-4.9　計測温度と同定値を用いた温度（Case 9）

いずれのケースにおいても、計測温度と同定値を用いた解析温度は比較的良く一致している。しかしながら、節点19（TC7）や節点26（TC4）では、温度上昇から下降へ移行する履歴に若干のずれが見られる。

次に、同定値を用いた断熱温度上昇履歴を断熱温度上昇試験結果と比較する。ここでCase 0の黒線は断熱温度上昇試験の結果である。まず、すべてのCaseについて断熱温度上昇試験結果との比較を行った（**図-4.10**）。

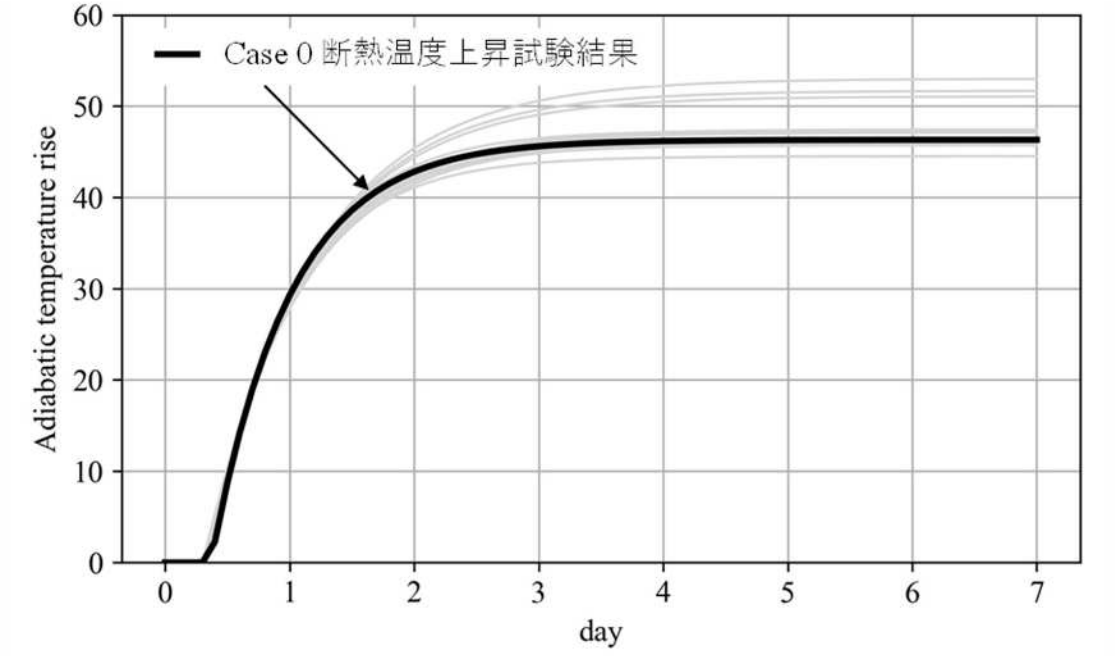


図-4.10　同定結果を用いた断熱温度上昇量と断熱温度上昇試験との比較

断熱温度上昇量は比較的良く一致しているものもあるが、実際の断熱温度上昇試験結果より終局温度が高くなるケースも見られた。終局温度が高くなるケースは、熱伝達係数を同定対象に含めた場合である。

次に、それぞれの最適化手法ごとに同定値を用いた断熱温度上昇履歴を断熱温度上昇試験結果と比較する。**図-4.11**は3次元PSOの結果であり、**図-4.12**は3次元ABC、**図-4.13**は縮退PSO、**図-4.14**は2次元PSOの結果である。

いずれの結果においても、6観測点と9観測点を比較すると6観測点の方が良く一致しており、熱伝達係数を同定対象に含めた場合と含めない場合を比較すると、含めない場合の方が断熱温度上昇試験結果と良く一致している。

観測点数を増やしたからといって必ずしも一致度が向上するとは限らず、また熱伝達係数を同定対象に含めた場合でも必ずしも一致度が向上するとは限らない。また、2次元解析の結果も比較的良く一致しており、本研究で対象としたモックアップ供試体のように比較的小規模な構造物では、2次元解析と3次元解析の差異は比較的小さいことが確認された。

すなわち、温度履歴の再現性が高い場合でも、必ずしも断熱温度上昇特性が正しく同定

されているとは限らないことが示唆された。

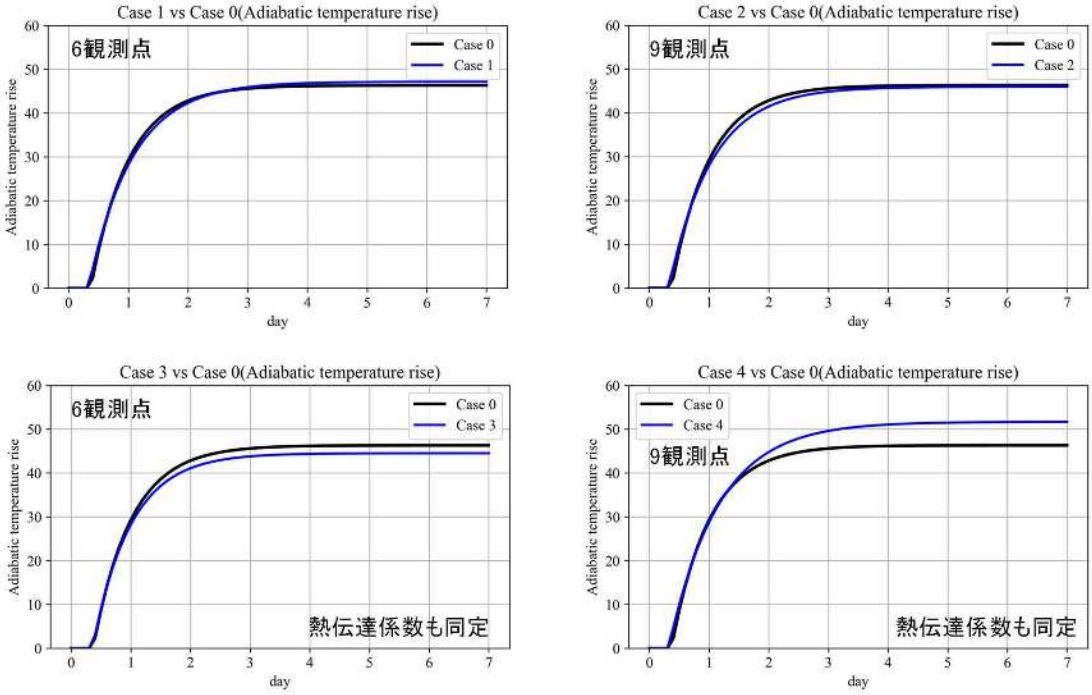


図-4.11　同定結果を用いた断熱温度上昇量と断熱温度上昇試験との比較
（3次元PSO）

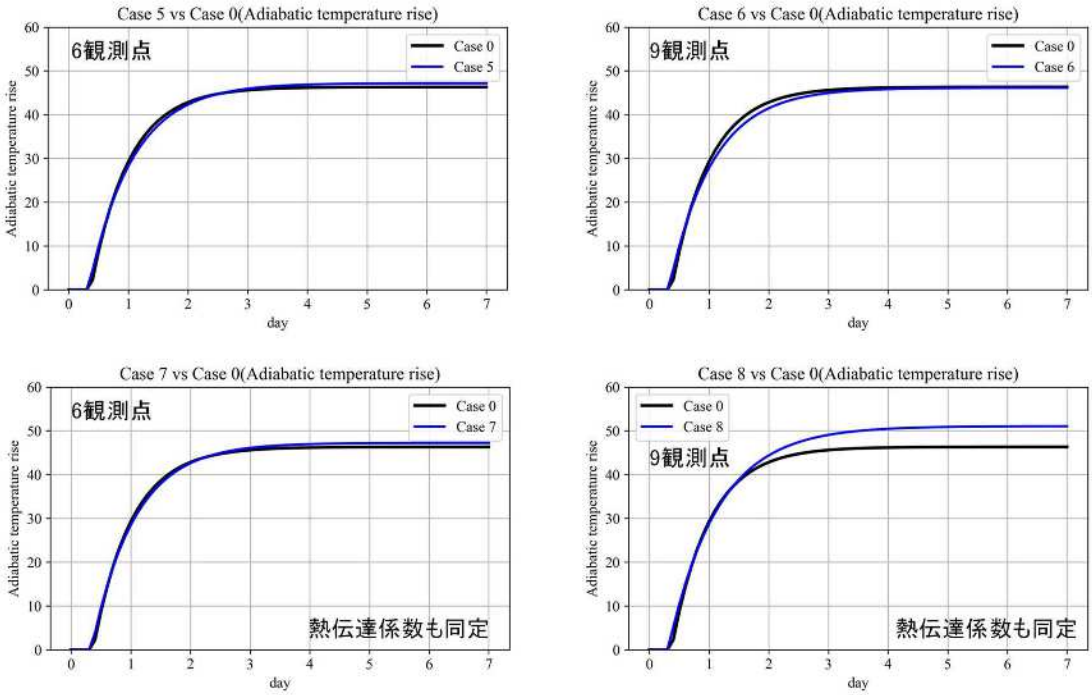


図-4.12　同定結果を用いた断熱温度上昇量と断熱温度上昇試験との比較
（3次元ABC）

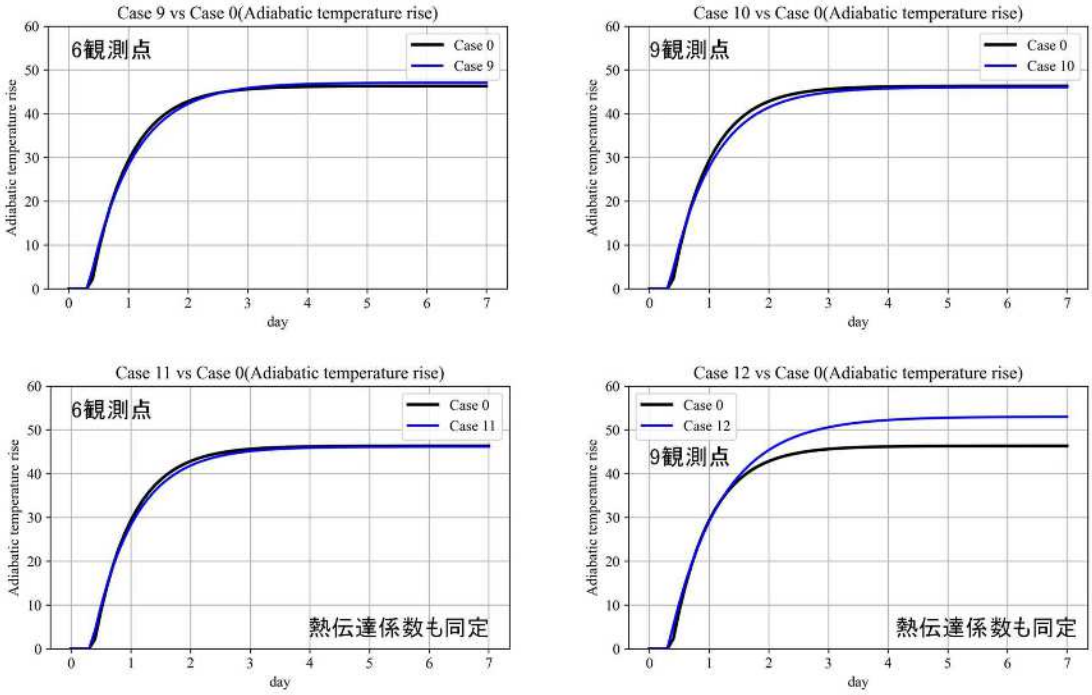


図-4.13　同定結果を用いた断熱温度上昇量と断熱温度上昇試験との比較
（3次元縮退PSO）

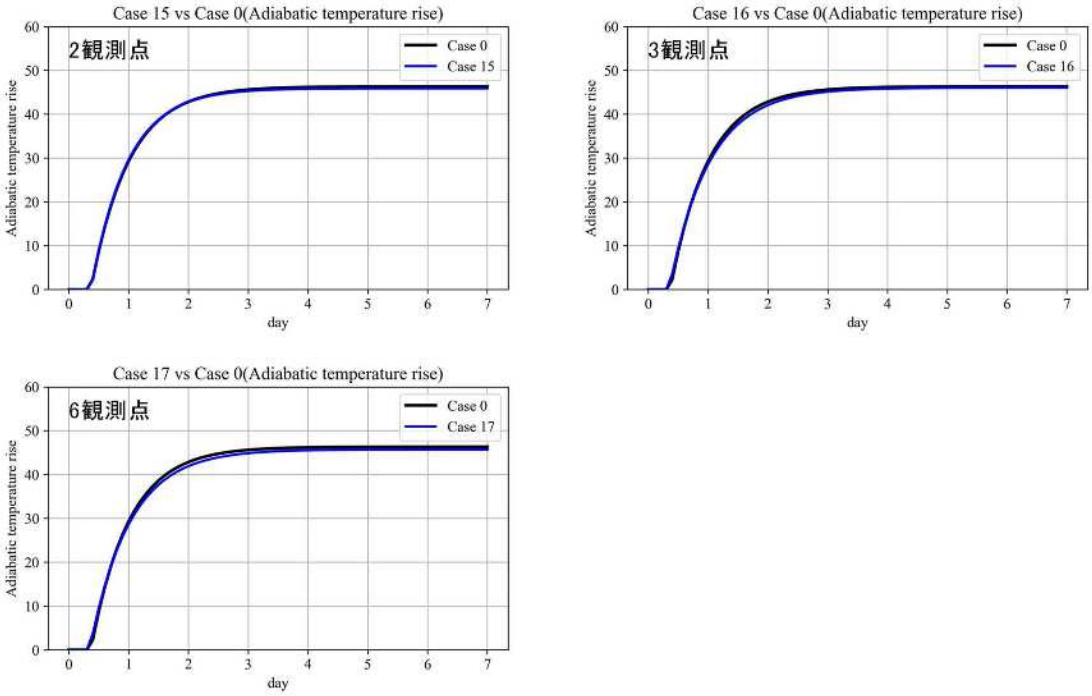


図-4.14　同定結果を用いた断熱温度上昇量と断熱温度上昇試験との比較
（2次元PSO）

(3) 最適化手法の違いによる影響

PSO、ABCおよび縮退PSOによる解析結果を比較すると、同一の解析条件（解析次元、観測点数、同定対象パラメータ）が与えられた場合、正規化誤差および最良同定値に大きな差は認められなかった。例えば、3次元・6点観測・熱伝達係数を含むケース（Case 3、7、11）では、いずれの手法においても正規化誤差はほぼ同程度であり、同定された断熱温度上昇特性にも大きな違いは見られない。

この結果から、本研究で対象とした逆解析問題においては、最適化手法の違いよりも、解析次元、観測点数、同定対象の設定が解析精度に与える影響の方が支配的であることが示された。また、縮退PSOは通常のPSOと同等の精度を確保しつつ、粒子数を削減することで計算効率の向上が期待できる手法である。本研究の設定では、反復回数の約90%まで粒子数を30から5へ線形に削減し、その後は5粒子を維持するため、全反復を通じた平均粒子数は概ね16.25となる。したがって、30粒子を一定とする通常のPSOと比較して、評価関数の計算回数は概ね54%となり、理論上約46%の削減が見込まれる。このことから、縮退PSOは実務的な観点から有効な選択肢であり、本研究のような計算負荷の大きい逆解析問題に対して、精度と計算効率の両立を図る実用的な手法であると評価できる。

同定結果を用いた順解析結果においても、各手法による温度履歴の再現性に顕著な差は認められず、最適化手法の違いが解析結果に与える影響は限定的であることが確認された。したがって、本研究の対象とした逆解析問題では、最適化アルゴリズムの選択よりも、解析次元や観測点配置などの解析条件の設定が同定精度を支配する主要因であると考えられる。

(4) 統計量から見た逆解析結果の安定性

表-4.5に、各解析ケースについて10回の試行結果から算出した統計量（平均値、標準偏差および変動係数）を示す。なお、変動係数は標準偏差を平均値で除した値を百分率で表したものである。

熱伝達係数を同定対象に含めないケースでは、断熱温度上昇特性（Q_∞、γ、t_0）の変動係数はいずれも概ね1%以下と小さく、逆解析結果は安定していることが確認された。一方、熱伝達係数を同定対象に含めたケースでは、断熱温度上昇特性および熱伝達係数のいずれにおいても標準偏差および変動係数が増大する傾向が見られた。特に側面の熱伝達係数では変動係数が10%を超える場合もあり、熱伝達係数と内部発熱特性の独立性が十分でないため、両者が相互に補償し合う形で同定され、結果として同定値のばらつきが増大したものと考えられる。これは、逆解析問題におけるパラメータ識別性の低下に起因する逆解析問題でしばしば見られる現象である。このような場合には、複数のパラメータ組合せが同程度の誤差を与えるため、逆解析結果のばらつきが増大すると考えられる。

なお、縮退PSOにおいても、統計量の傾向はPSOおよびABCと同様であり、粒子数の縮退によって解の安定性が顕著に低下することは認められなかった。

表-4.5　同定値の統計量

					Q∞			γ			t0			熱伝達係数								
														下面			側面			上面		
解析Case	手法	次元	観測点	同定対象	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数
Case 1	PSO	3次元	6		47.118	0.040	0.086	1.366	0.006	0.473	0.329	0.001	0.390	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 2			9		46.122	0.062	0.135	1.366	0.005	0.402	0.323	0.002	0.504	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 3			6	熱伝達含む	46.263	0.615	1.330	1.419	0.046	3.244	0.334	0.006	1.748	9.5	0.218	2.303	0.9	0.072	7.738	4.8	0.147	3.089
Case 4			9	熱伝達含む	50.303	2.818	5.601	1.222	0.087	7.131	0.313	0.004	1.221	12.2	0.638	5.215	1.4	0.240	16.753	5.2	0.301	5.769
Case 5	ABC		6		47.088	0.103	0.219	1.366	0.015	1.090	0.329	0.004	1.131	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 6			9		46.080	0.124	0.269	1.371	0.011	0.803	0.324	0.002	0.683	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 7			6	熱伝達含む	46.583	1.585	3.403	1.402	0.114	8.109	0.332	0.016	4.781	9.3	0.471	5.082	1.1	0.212	20.071	4.6	0.388	8.347
Case 8			9	熱伝達含む	53.086	2.374	4.471	1.134	0.070	6.193	0.309	0.011	3.603	13.1	1.028	7.877	1.6	0.223	13.517	5.5	0.342	6.229
Case 9	縮退PSO		6		47.031	0.120	0.256	1.371	0.014	1.022	0.329	0.004	1.255	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 10			9		46.114	0.160	0.347	1.367	0.017	1.239	0.322	0.003	1.018	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 11			6	熱伝達含む	46.285	0.921	1.989	1.418	0.061	4.324	0.334	0.009	2.842	9.5	0.742	7.845	0.9	0.099	10.571	4.7	0.387	8.181
Case 12			9	熱伝達含む	50.741	1.825	3.597	1.205	0.067	5.527	0.311	0.006	1.781	12.70	1.081	8.512	1.4	0.182	12.691	5.5	0.303	5.466
Case 13	縮退PSO	3次元	2		47.243	0.141	0.298	1.523	0.018	1.210	0.362	0.003	0.897	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 14			3		47.502	0.165	0.348	1.362	0.020	1.486	0.335	0.005	1.549	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 15	PSO	2次元	2		45.902	0.059	0.129	1.649	0.006	0.344	0.369	0.001	0.384	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 16			3		46.083	0.052	0.113	1.483	0.006	0.436	0.346	0.001	0.383	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Case 17			6		45.738	0.055	0.120	1.499	0.007	0.461	0.344	0.001	0.378	–	–	–	–	–	–	–	–	–

(5) 観測点数および解析次元の影響

観測点数の影響について見ると、観測点数が2点または3点と少ない場合には、供試体内部の温度分布を十分に表現できず、逆解析に必要な情報量が不足するため、正規化誤差が大きくなる傾向が認められた。一方、6点観測と9点観測を比較した場合、9点観測では正規化誤差が必ずしも小さくならず、同定結果のばらつきが増大する傾向が見られた。これは、観測点数の増加により境界付近の温度挙動が評価関数に強く反映され、熱伝達係数と内部発熱特性が相互に補償し合う形で同定されやすくなったためと考えられる。

以上より、本検討では、9点観測としても6点観測より正規化誤差が小さくなるとは限らず、観測点数の増加が必ずしも同定精度の向上につながらないことが確認された。したがって、単に観測点数を増加させるのではなく、温度場を適切に代表する観測点配置を選定することが重要である。

また、解析次元の影響について見ると、2次元モデルは3次元モデルに比べて計算負荷が小さく、逆解析結果のばらつきも小さい傾向が見られたが、正規化誤差は大きく、温度分布の再現性は低い結果となった。さらに、同定結果を用いた順解析においても、2次元モデルでは温度履歴の再現性が3次元モデルに比べて低い傾向が確認されており、解析次元の簡略化が温度場の再現性に影響を及ぼすことが示された。このことから、逆解析結果の安定性が高いことと、物理的妥当性が高いことは必ずしも一致するとは限らないことが分かる。

以上の結果を踏まえると、マスコンクリートの断熱温度上昇特性の逆解析においては、3次元解析を基本とし、観測点数は供試体内部の代表点に絞った上で、目的に応じて熱伝達係数の同定を検討することが実務的に妥当であると考えられる。

4.4　第4章のまとめ

本章では、マスコンクリートの温度解析に必要となる入力値を対象として、メタヒューリスティクス最適化と FEM 解析を組み合わせた逆解析による同定手法を構築し、その適用性について検討した。特に、断熱温度上昇特性および熱伝達係数を同定対象として、解

析次元、観測点数、同定対象パラメータおよび最適化手法の違いが同定結果に及ぼす影響について検討した。本章で得られた成果および知見を以下にまとめる。

① 温度解析入力値を同定するための逆解析フレームワークを構築した。
FEM解析コードとメタヒューリスティクス最適化アルゴリズムを連携させ、最適化アルゴリズムによる入力パラメータの生成、解析入力データへの反映、FEM温度解析、計測温度との誤差評価およびパラメータ更新を自動的に繰り返す逆解析システムを構築した。また、断熱温度上昇特性および熱伝達係数を設計変数として設定し、計測された温度履歴から温度解析入力値を同定する一連の手順を示した。

② 実測温度履歴を用いた逆解析により、断熱温度上昇特性を同定できることを示した。
モックアップ供試体で計測された温度履歴を用いて逆解析を実施した結果、同定された断熱温度上昇特性を用いた解析温度は計測温度を概ね良好に再現した。また、別途実施された断熱温度上昇試験結果との比較から、逆解析によって得られた断熱温度上昇特性の妥当性を確認した。これにより、断熱温度上昇試験の実施が困難な場合においても、計測温度を活用して対象構造物の温度解析入力値を推定できる可能性を示した。

③ 温度解析入力値の同定精度には、解析次元、観測点数および同定対象パラメータの設定が大きく影響することを明らかにした。
3次元解析では、観測点数を6点とし、熱伝達係数を同時に同定したケースにおいて計測温度に対する正規化誤差が最も小さくなった。一方、観測点数を2点または3点に減少させた場合には、温度場を表現するための情報量が不足し、解析精度が低下した。また、観測点数を増加させれば必ずしも同定精度が向上するものではなく、温度場を適切に把握できる観測点の配置と点数を設定することが重要であることを示した。

④ 温度履歴の再現性だけでなく、同定されたパラメータの物理的妥当性を併せて評価する必要があることを示した。
熱伝達係数を同定対象に含めることで計測温度に対する誤差は低減したものの、断熱温度上昇特性と熱伝達係数との相関により、複数のパラメータの組合せが同程度の温度履歴を再現する場合が確認された。このことから、評価関数の大小のみで同定結果の妥当性を判断するのではなく、断熱温度上昇試験結果などの独立した情報との比較を通じて、同定されたパラメータの物理的妥当性を確認することが重要である。

⑤ 最適化手法の違いよりも解析条件の設定が同定結果に大きく影響し、縮退PSOによって計算効率を改善できることを示した。
PSO、ABCおよび縮退PSOを比較した結果、同一の解析条件では同定精度に大きな差は認められず、最適化手法の違いよりも解析次元、観測点数および同定対象パラメータの設定が同定精度に与える影響が大きいことを確認した。また、縮退PSOは通常のPSOと同程度の同定精度を維持しながら評価関数の計算回数を削減できることから、FEM解析を繰り返し実行する逆解析の計算負荷低減に有効であることを示した。

なお、本研究における温度場の逆解析は、1 体のモックアップ供試体から得られた温度計測結果を対象として検討したものである。一般に、マスコンクリートの温度履歴は、供試体または構造物の形状・寸法、使用材料、配合条件、施工条件および外気温や養生条件などの境界条件の影響を受けるため、本検討で得られた同定値が、異なる条件の構造物にそのまま適用できることを示すものではない。一方、本研究の目的は、本供試体から得られた同定値そのものを一般化することではなく、計測された温度履歴を用いて対象ごとの温度解析入力値を構成するパラメータを逆解析により同定する手法を構築し、その有効性を検証することにある。本研究で構築した逆解析フレームワークは、対象構造物の形状、材料、配合、施工条件および境界条件に応じた解析モデルと計測データを用いることで、他の対象にも適用可能な枠組みとして構成している。ただし、その適用性および汎用性については、今後、異なる条件を有する複数の供試体や実構造物の計測データを用いて検証する必要がある。

以上より、本章では、計測温度を利用してマスコンクリートの温度解析入力値を合理的に同定するための逆解析フレームワークを構築するとともに、その適用にあたっては、解析次元、観測点の配置・点数および同定対象パラメータを適切に設定し、温度履歴の再現性と同定値の物理的妥当性の両面から評価することが重要であることを示した。これらの結果は、対象構造物の計測データを活用して温度解析入力値を設定するための基礎的な枠組みを与えるものである。

【参考文献】

1) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2023.
2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025，2025.
3) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.：Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
4) Kennedy, J. and Eberhart, R.：Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
5) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.107-118，2006.2.
6) Karaboga, D. and Basturk, B.：A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, Journal of Global Optimization, Vol. 39, No. 3, pp.459-471, 2007.

第 5 章

湿気移動解析のための入力値の同定

第 5 章　湿気移動解析のための入力値の同定

5.1　本章の目的と位置づけ

第4章では、温度場に関わる入力値として断熱温度上昇特性値および熱伝達係数の同定を行った。

一方、マスコンクリート構造物では、温度履歴だけでなく内部湿度分布もひび割れ発生挙動に大きな影響を及ぼす。そのため、温度解析に続いて湿気移動解析に必要となる入力値を適切に設定することが重要である。

本章では、湿度場に関わる入力値を対象として、メタヒューリスティクス最適化を用いた逆解析により合理的な同定を行う。特に、透湿率、湿気容量および蒸発率などの湿気移動特性値を対象とし、相対湿度履歴の再現性に基づく入力値の同定手法について検討する。

5.1.1　解析入力値の課題（湿度）

湿気移動解析においては、湿気移動特性値（透湿率、湿気容量および蒸発率）などの入力値が解析結果に大きな影響を及ぼす。

しかしながら、これらのパラメータは相互に依存関係を有しており、単独の試験結果のみから一意に決定することは容易ではない。また、複数のパラメータの組合せによって類似した湿度分布が得られる場合もあり、パラメータの識別性が問題となる。

このため、実測湿度データを活用しながら複数の湿気移動特性値を統合的に同定する手法の確立が求められている。

5.1.2　逆解析による同定の考え方

本章では、計測された相対湿度履歴を基準データとし、湿気移動解析による相対湿度履歴との誤差を最小化することにより、湿気移動特性値を同定する。第4章で構築した逆解析フレームワークを湿度場へ適用し、設計変数および評価関数を湿気移動解析に対応させることで、透湿率、湿気容量および蒸発率の同定を行う。具体的な定式化、設計変数、評価関数および実装方法については次節で示す。

5.2　湿度場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク

本章では、湿度場パラメータ同定に用いる逆解析フレームワークについて述べる。本研

究では、湿気移動解析の入力値である透湿率、湿気容量および蒸発率を相対湿度の関数として表現し、これらの関数を規定するパラメータを設計変数として定義する。解析で求めた相対湿度と計測した相対湿度との誤差を最小化することにより、湿気移動特性値を同定する。

5.2.1　逆解析問題の一般的定式化

逆解析問題は、解析モデルに入力される設計変数ベクトルを適切に設定し、計測値との誤差を最小化する最適化問題として定式化される。本研究では、湿度場に関わる入力パラメータを設計変数ベクトルとして定義する。

評価関数は、計測値と解析結果との差を表す偏差平方和を用いて定義し、これを最小化することにより最適なパラメータを求める。

また、物理的妥当性および計算の安定性を確保するため、各設計変数に対して適切な制約条件および探索範囲を設定する。さらに、最適化計算の終了条件として、最大反復回数、評価関数の閾値、あるいは収束判定基準を設定し、計算の効率化と安定化を図る。

5.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要

本研究では、第3章の比較検討結果に基づき、粒子群最適化（PSO）を主たる最適化手法として採用する。

5.2.3　逆解析システムの実装方法

本研究では、有限要素法（FEM）解析コードとメタヒューリスティクス最適化アルゴリズムを連携させた逆解析システムを構築した。

逆解析では、まず最適化アルゴリズムにより入力パラメータ候補を生成する。次に、その候補値を解析入力ファイルへ自動的に反映し、FEM解析を実行する。解析終了後、観測点における解析結果を抽出し、計測値との誤差を評価関数として算出する。さらに、その評価結果を最適化アルゴリズムへ返し、次の探索点を生成する。この処理を繰り返すことにより、評価関数を最小化する入力パラメータを探索する。

本研究では、既存のFEM解析コードを大幅に変更することなく利用できるよう、最適化プログラム側から解析入力ファイルの生成、解析実行および解析結果の読込みを自動的に行う構成とした。これにより、温度場、湿度場および応力場の各解析に対して共通の逆解析フレームワークを適用することが可能となった。

また、探索範囲はコンクリート標準示方書[1)]、マスコンクリートのひび割れ制御指針2025[2)]、既往研究および事前解析結果を参考として設定した。初期段階では広い探索範囲を設定し、その結果に基づいて探索範囲を段階的に絞り込むことにより、探索効率と同定精度の両立を図った。

本章で対象とする湿気移動特性値の同定においても、逆解析システムの基本構成およびPSOによる探索手順は第4章で示した温度場パラメータ同定の場合と同一である。ただし、設計変数を断熱温度上昇特性値から湿気移動特性値へ変更し、評価対象を温度履歴から相

対湿度履歴へ変更している点が異なる。これにより、温度場パラメータ同定と共通の逆解析フレームワークを用いて、湿度場パラメータの同定を実施する。

なお、湿気移動特性値の同定に適用した具体的な逆解析手順については、**図-5.13**を用いて後述する。

5.3　コンクリート中の水分量の移動

コンクリート構造物に発生するひび割れを正確に予測するためには、温度だけでなく、乾燥収縮、自己収縮、クリープといった影響を考慮する必要がある。とりわけ乾燥収縮を有限要素法などの数値解析で予測する際には、コンクリート部材内の湿度分布を把握することが不可欠であり、そのため湿気移動解析が必要となる。

コンクリート中の水分移動は、湿度勾配と温度勾配によって生じ、温度と水分を連成して解析する必要がある。このような多孔質体中の水・熱連成移動に関する研究は、土壌分野では研究が蓄積されており[3),4)]、コンクリート分野においても、水分の移動に温度勾配の影響をモデル化した石田ら[5)]の研究がある。しかし、石田らの研究では、水分移動が温度場に与える影響が考慮されていない。丸山ら[6)]は、潜熱をモデル化し、水と熱の移動の相互依存性を考慮した水・熱連成移動解析手法を提案している。一方、森本ら[7),8)]は両者を連成して解くことの煩雑さを避けるため、温度解析結果をもとに、蒸気圧勾配のみから水分移動を簡易的に求める手法を提案している。この手法では、コンクリート中の水分移動を計算する際、温度解析における熱伝導率に相当する透湿率、熱容量に相当する湿気容量、熱伝達係数に相当する蒸発率が必要となる。

これらの水分移動に関する特性値（湿気移動特性値）は、湿度状態に依存する非線形特性を有するため、研究例は限られている。透湿率および湿気容量に関しては、西岡ら[9)]の研究結果が、蒸発率に関しては森本[8)]らの研究結果があり、いずれも相対湿度の関数として示されている。また、実際のコンクリート中の相対湿度測定結果から逆解析により求められた研究としては、溝渕ら[10)]の成果がある。従来の逆解析では、湿気移動特性値が相互に関連しているため、特定のパラメータを固定して湿気移動特性値の同定を行っていた。この方法では、相対湿度の測定結果は再現できるものの、実際の湿気移動特性値と相対湿度との関係すなわち「相対湿度が大きくなるほど特性値も大きくなる」という傾向とは一致しない結果となっていた。

そこで、本研究では、湿気移動特性値と相対湿度との実際の関係を考慮して改めて同定を行い、新たな提案値を示した。さらに、この提案値を用いて湿気移動解析を実施し、計測値との整合性を確認した。

5.4　湿気移動解析

5.4.1　湿気移動解析の支配方程式

コンクリート中の湿気移動の 3 次元非線形支配方程式は、以下で表される。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_P \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_P \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right) - \frac{dq_h}{dt} \tag{5.1}$$

ここに、$(dq/dP)_P$：湿気容量 [g/(m³･mmHg)]、λ_P：透湿率 [g/(m･h･mmHg)]、P：蒸気圧 [mmHg]、dq_h/dt：水和による湿気密度変化 [g/(h･m³)]である。

式(5.1)の左辺は湿気容量項であり、内部湿気量の時間的変化を表す。右辺第 1 項は湿気移動項であり、湿気移動により外部から流入する湿気量を表している。第 2 項は湿気消費項であり、水和による湿気消費を表す。すなわち、この式は、以下に示す湿気収支を表す。

（内部湿気量）＝（湿気移動）－（湿気消費）

式(5.1)は、解析領域内の任意の点および任意の時刻において成立する偏微分方程式である。これを具体的に解くためには、境界条件が必要である。一般的に考慮される境界条件としては、湿気固定境界と湿気伝達境界がある。

これらのうち、湿気固定境界は、応力解析における変位固定境界や温度解析における温度固定境界と同様に扱うことができる。一方、湿気伝達境界にはいくつかの形式が提案されているが、一般的に用いられている形式としては次式がある。

$$-\lambda_P \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha \left(P - P_0\right) \tag{5.2}$$

ここに、α：蒸発率 [g/(m²･h･mmHg)]、P_0：周囲の蒸気圧 [mmHg]である。

湿気移動解析では、支配方程式である式(5.1)を境界条件として与えられる式(5.2)のもとで解くことになる。

なお、この湿気移動の支配式は、式(5.1)に示すように相対湿度 RH [%]ではなく、蒸気圧 P [mmHg]で定義されている。そのため、コンクリートのように常に温度変化が生じる材料に対しても、温度上昇による湿気移動の促進現象を評価できる。相対湿度への変換は、式(5.3)に示すように、温度ごとの飽和蒸気圧を Tetens 式で求め、その蒸気圧から相対湿度 RH [%]を算出する。

$$RH = \frac{e}{e^*} \times 100 \tag{5.3}$$

$$e^* = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_C}{237.3+T_C}} \tag{5.4}$$

ここに、e は蒸気圧 [hPa]、e^*は飽和蒸気圧 [hPa]、T_C は摂氏温度 [℃]である。

さらに、1013.25hPa＝760mmHg の関係を用いると温度 T_C [℃]、蒸気圧 x [mmHg]のときの相対湿度 RH [%]は、次式で計算できる。

$$RH = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_C}{237.3+T_C}} \times \frac{760}{1013.25} \times x \times 100 \tag{5.5}$$

5.4.2　湿気移動解析における材料物性値

湿気移動解析を実施するためには、湿気移動に関わる特性値を適切に設定する必要がある。主な特性値としては、透湿率[g/(m･h･mmHg)]、湿気容量[g/(m^3･mmHg)]、および境界面における蒸発率[g/(m^2･h･mmHg)]が挙げられる。

透湿率は、材料中の湿気（水蒸気）が、蒸気圧の勾配に比例して移動するとするモデルに基づき、この比例係数として定義される。湿気容量は、蒸気圧の変化に対する材料中の含水量の変化率を表し、蒸発率は、水分が気化して空気中に移動する速度を示す。これらの特性値はいずれも、相対湿度の関数になる。

透湿率と湿気容量については、西岡らの研究[9]により相対湿度との関係が示されている。一方、蒸発率に関してのデータは乏しいが、岐阜大学で行われた実験データ[8]が存在する。また、実供試体の実測値から同定した研究としては、溝渕ら[10]の成果がある。

1）従来の湿気移動特性値

①透湿率

材料中の湿気（水蒸気）は、蒸気圧勾配に比例して移動し、その比例定数を「透湿率（湿気伝導率）」という。西岡ら[9]は、相対湿度と透湿率との関係を**図-5.1** のように示している。

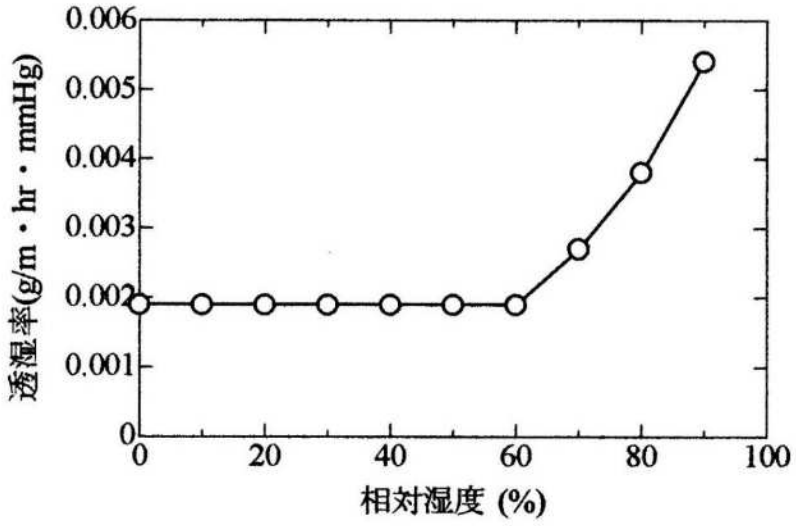


図-5.1　相対湿度と透湿率の関係

本研究の初期検討では、**図-5.2** に示す回帰曲線を用いて、相対湿度と透湿率との関係を近似した。

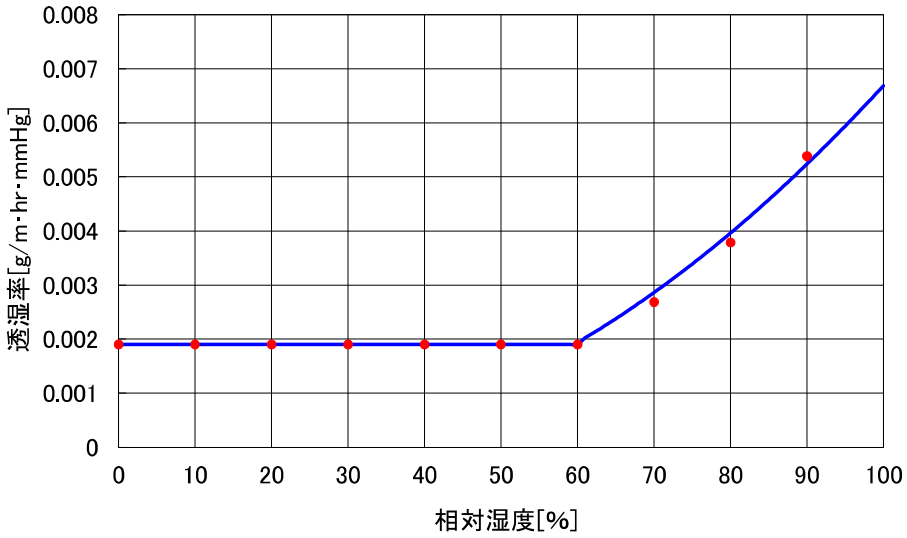


図-5.2　相対湿度と透湿率の関係（近似曲線）

$0 \leqq RH \leqq 60\%$のとき

$$\lambda = 0.0019 \tag{5.6}$$

$RH \geqq 60\%$のとき

$$\lambda = 0.0088RH^2 - 0.0022RH + 0.00009 \tag{5.7}$$

※式中での RH は百分率ではなく小数である。

②湿気容量

湿気容量は、材料中の含水量を蒸気圧で微分した値であり、蒸気圧の変化に対する含水量の変化率を表す。一般に、湿気容量は湿度状態に応じて非線形に変化する。西岡ら[9]は、相対湿度と湿気容量との関係を図-5.3 のように示している。

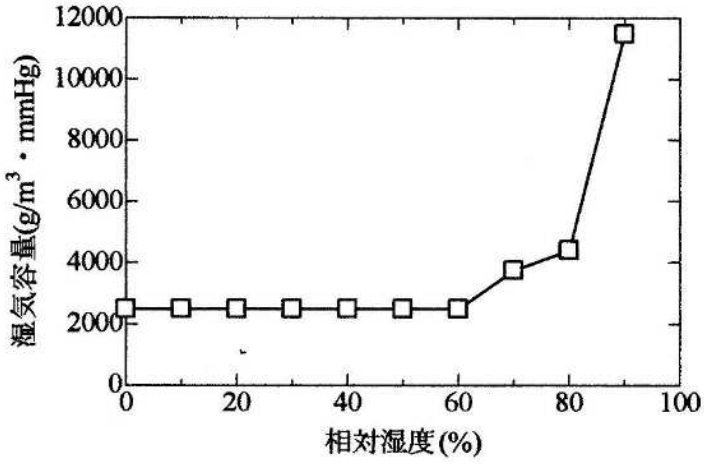


図-5.3　相対湿度と湿気容量の関係

初期の解析では、**図-5.4** に示す回帰直線を用いて、相対湿度と湿気容量の関係を近似した。

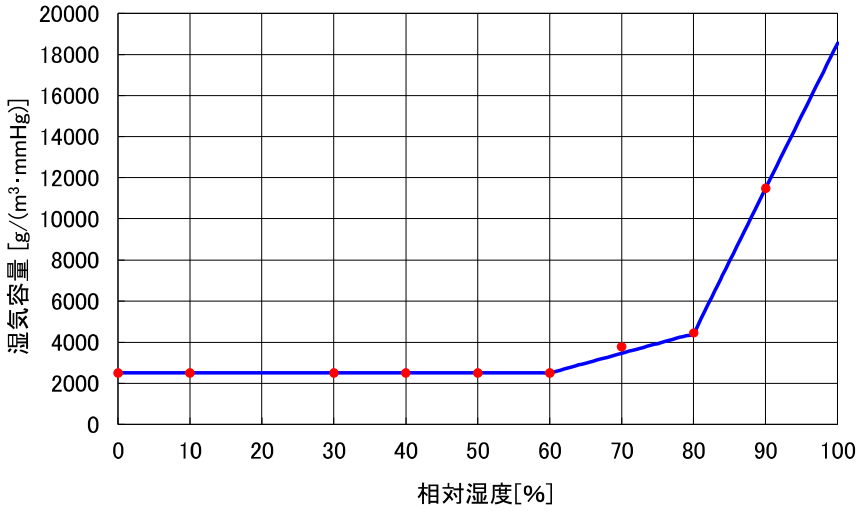


図-5.4　相対湿度と湿気容量の関係（近似線）

$0 \leqq RH \leqq 60\%$ のとき

$$\frac{dq}{dP} = 2500 \tag{5.8}$$

$60 \leqq RH \leqq 80\%$ のとき

$$\frac{dq}{dP} = 9590RH - 3254 \tag{5.9}$$

$RH \geqq 80\%$ のとき

$$\frac{dq}{dP} = 70710RH - 52150 \tag{5.10}$$

※式中での RH は百分率ではなく小数である。

③蒸発率

蒸発率は、岐阜大学で行われた水分蒸発量および蒸気圧の計測結果から、**図-5.5** および **図-5.6** のように算出されている [8]。**図-5.5** は、水セメント比 (W/C) の違いを、**図-5.6** は、風の有無による影響を示している。

水セメント比が小さい場合、蒸発率はやや大きい傾向にあるが、その差は限定的である。また、蒸発面に風を与えた場合、無風時と比較して蒸発率はやや増加する傾向がある。

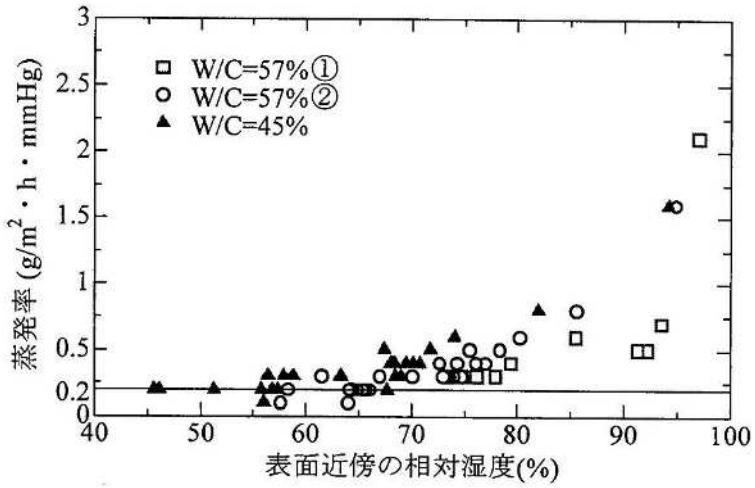


図-5.5　蒸発率（W/C による比較）

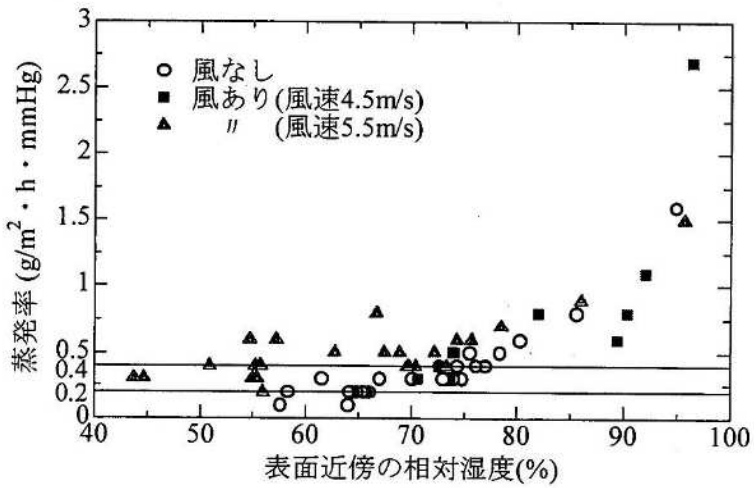


図-5.6　蒸発率（風の影響）W/C=57%

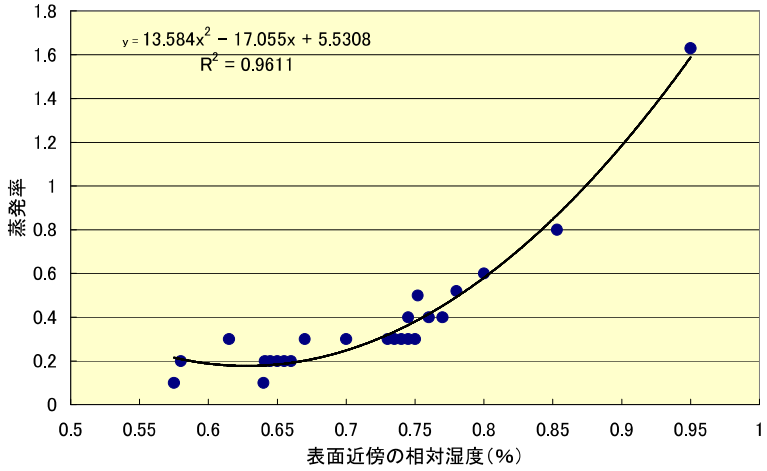


図-5.7　蒸発率（W/C=57%、風がない場合）

W/C=57%で無風条件の場合、蒸発率と相対湿度の関係を二次曲線で近似すると、y=13.584x^2-17.055x+5.5308 となる。そこで、本研究では、相対湿度と蒸発率との関係を式(5.11)および式(5.12)で定義する。

$0 \leqq RH \leqq 70\%$のとき

$$\alpha = 0.194 \tag{5.11}$$

$70 \leqq RH \leqq 100\%$のとき

$$\alpha = 13.6RH^2 - 17.1RH + 5.5 \tag{5.12}$$

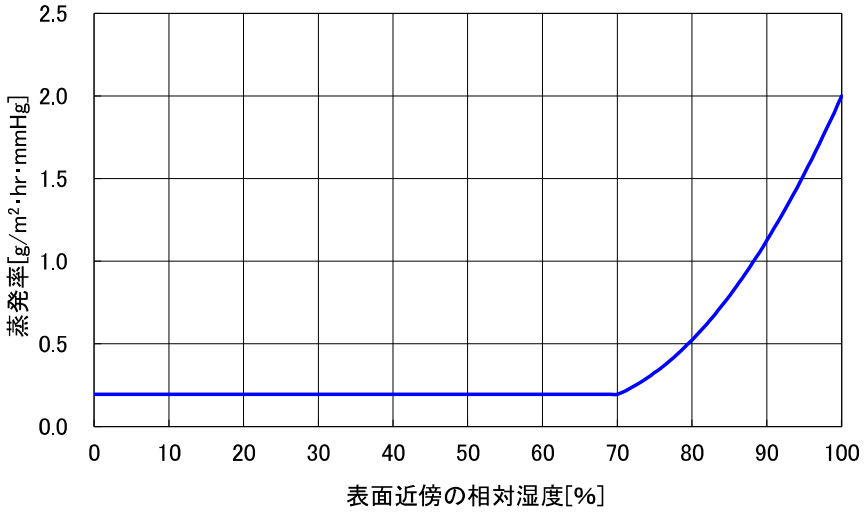


図-5.8　相対湿度と蒸発率（近似曲線）

2）溝渕らの同定値

溝渕ら[10]は、コンクリートの乾燥収縮を精度よく予測するために必要な湿気移動解析用の諸係数（湿気容量、透湿率、蒸発率）の見直しを目的として「コンクリートの湿気移動解析に用いる各特性値に関する検討」を行った。直径 450mm・高さ 450mm の大型供試体を作製し、深さ 20～200mm の 6 か所に湿度センサおよびひずみ計を設置して乾燥収縮ひずみを計測した。その測定データに基づき湿気移動解析の支配方程式を構築するとともに、複数パラメータを同時に最適化可能な粒子群最適化[13)-15)]（PSO: Particle Swarm Optimization）を用いて湿気容量・透湿率・蒸発率の同定を行った。

なお、同定に際しては、透湿率、湿気容量、蒸発率は相互に関連するため、多数の最適解が得られて同定不能となる。これは、湿気移動特性値間の相関が高いためである。そこで、透湿率を固定している。

①透湿率

透湿率は一定値として、以下のように設定した。図-5.9 に相対湿度と透湿率の関係を示す。

$0 \leqq RH \leqq 100\%$のとき

$$\lambda = 0.0025 \tag{5.13}$$

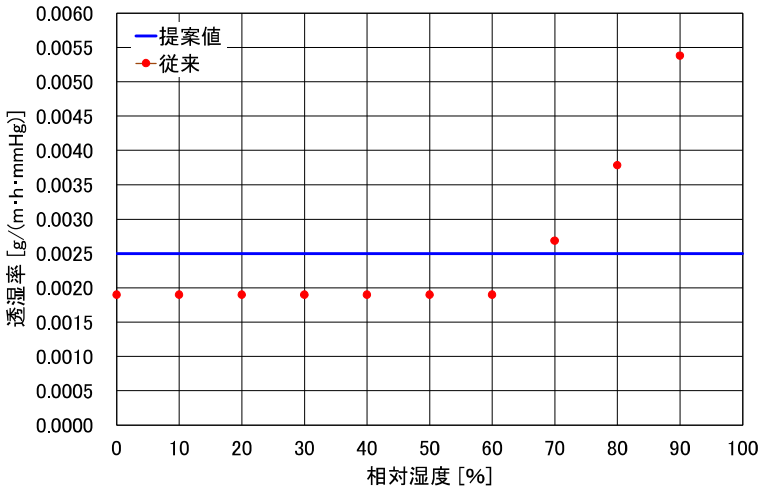


図-5.9　相対湿度と透湿率の関係

②湿気容量

湿気容量の同定値は、以下の式のとおりである。図-5.10 に相対湿度と湿気容量の関係を示す。

$0 \leqq RH \leqq 60\%$のとき

$$\frac{dq}{dP} = 10389 \tag{5.14}$$

$60 \leqq RH \leqq 100\%$のとき

$$\frac{dq}{dP} = -19968\left(RH - 0.6\right) + 10289 \tag{5.15}$$

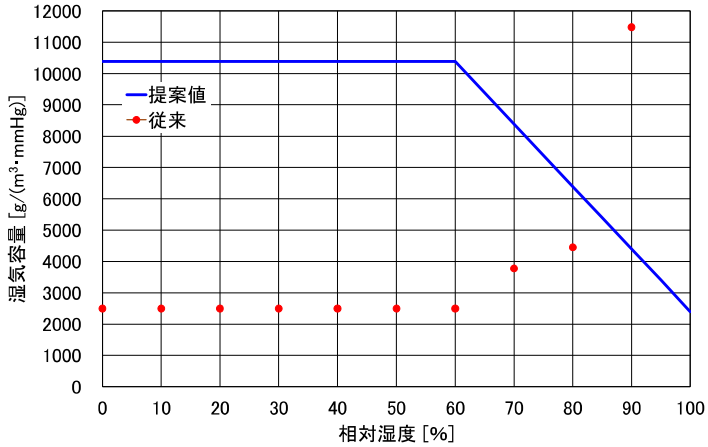


図-5.10　相対湿度と湿気容量の関係

③蒸発率

蒸発率の同定値は、以下の式のとおりである。**図-5.11** に相対湿度と蒸発率の関係を示す。

$0 \leqq RH \leqq 60\%$のとき

$$\alpha = 0.3448 \tag{5.16}$$

$60 \leqq RH \leqq 100\%$のとき

$$\alpha = 0.6102\left(RH - 0.6\right)^2 + 0.3448 \tag{5.17}$$

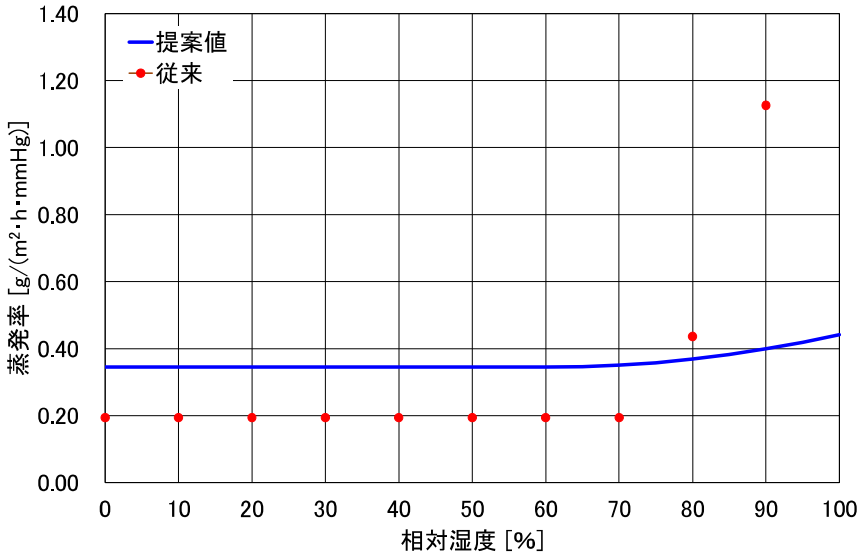


図-5.11　相対湿度と蒸発率の関係

5.4.3　これまでの湿気移動特性値同定の問題点

従来の湿気移動特性値の同定では、透湿率・湿気容量・蒸発率を同時に変化させると多数の最適解が存在するため、いずれかの値を固定して同定が行われてきた。その結果、相対湿度の測定値は再現できても、湿気移動特性値と相対湿度の関係を十分に表現できていなかった。すなわち、相対湿度の増加に伴い湿気容量・透湿率・蒸発率のいずれもが増加するという実際の傾向を再現することができなかった。

5.5　粒子群最適化による湿気移動特性値の同定

5.5.1　同定の概要

透湿率は、材料中の湿気（水蒸気）が、蒸気圧勾配に比例して移動するというモデルに基づき、その比例定数として定義される。また、湿気容量は蒸気圧の変化に対する材料中の含水量の変化率を表し、蒸発率は水分が気化して空気中に移動する速度を示す。これらはいずれも、相対湿度の関数である。

本研究では、**図-5.12** に示すように、各湿気移動特性値を 2 次関数で表現した。セメントペーストの吸着等温線は湿度に対して非線形に変化し、低・中・高湿度域で異なる挙動を示すため、全湿度域を 2 次関数で表現することは難しい。しかし、通常環境下のコンクリートでは、低湿度域（0～30%RH）に至ることは少ない[9]。したがって、中高湿度域（50～100%RH）に限定すれば 2 次関数での近似が可能と考えられる。ただし、極端に乾燥した環境では低湿度域に達する可能性があるため、適用には注意が必要である。

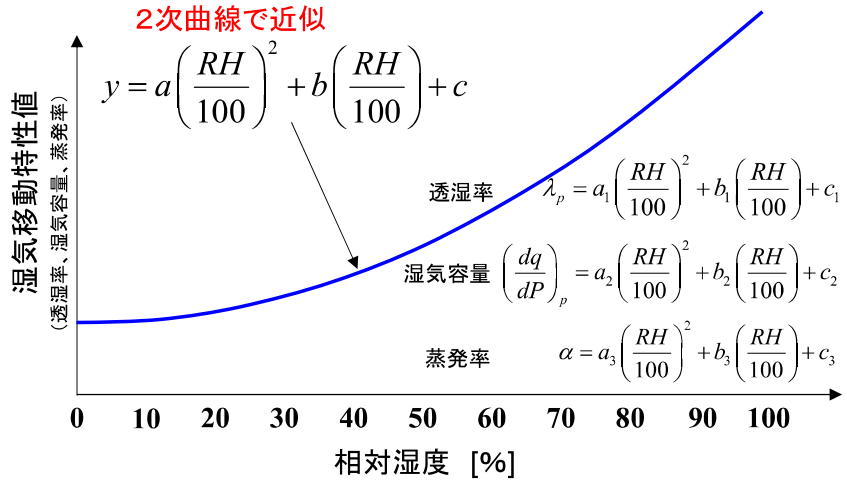


図-5.12　湿気移動特性値の 2 次関数による表現

粒子群最適化[13)-15)]（Particle Swarm Optimization: PSO）は、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用した手法である。粒子群最適化は連続量の最適化に適しており、微分などの複雑な計算を必要とせず、評価値が得られる問題であれば幅広く適用可能な汎用性の高い最適化手法である。

本研究では、事例は限られるものの、既往のコンクリート内部の相対湿度計測結果を用いて、粒子群最適化による逆解析を実施し、湿気移動特性値の同定を行った。湿気移動特性値の同定には、第 4 章で示した逆解析フレームワークを適用し、評価関数には計測相対湿度と解析相対湿度との誤差を用いた。また、探索範囲は、既往研究、湿気移動解析に関する文献および事前解析結果を参考として設定した。透湿率、湿気容量および蒸発率はそれぞれ相対湿度に依存する 2 次関数で表現し、これらの関数を規定する合計 9 個の係数（$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$）を設計変数とした。これらのパラメータは相互に強い相関を

有するため、探索範囲および関数形に制約を設けることで、パラメータ識別性の向上を図った。図-5.13 に湿度場パラメータ同定のための逆解析システム構成を示す。

[1] それぞれの湿気移動特性値係数を 9 次元空間の点として表現し、湿気移動特性値ごとの関数形を決定する。

[2] 粒子ごとに異なる関数形が決定されるので、その特性値を用いて湿気移動解析を行う。

[3] 計測値と計算値を比較し、以下の式に示す偏差平方和 S を評価関数として計算する。

[4] 評価関数が小さくなるように粒子の位置を移動させる。移動先は、粒子群最適化のアルゴリズムにより決定される。

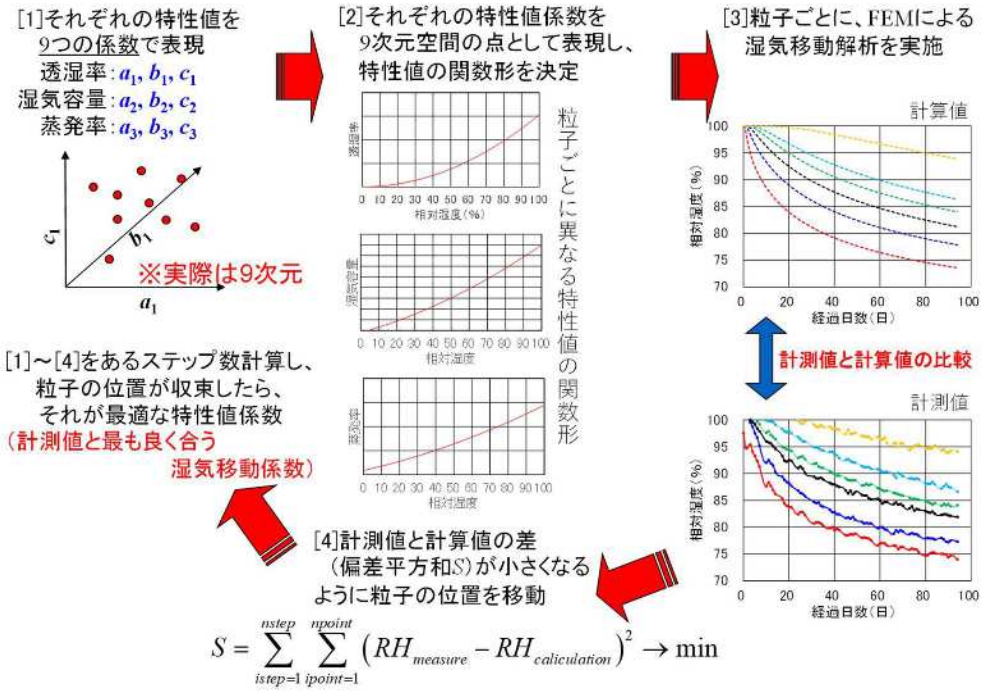


図-5.13　湿度場パラメータ同定のための逆解析システムの構成

$$S = \sum_{istep=1}^{nstep} \sum_{ipoint=1}^{npoint} \left(RH_{measure} - RH_{calculation} \right)^2 \tag{5.18}$$

ここに、$RH_{measure}$ は相対湿度の計測値、$RH_{calculation}$ は相対湿度の計算値である。また、$nstep$ は有限要素解析における計算ステップ数で、$npoint$ は湿度が計測されている観測点数である。

以上の手順[1]から[4]を粒子群最適化の最大イタレーション数（本研究では 100 回）まで繰り返し、粒子の位置が収束した場合、その粒子の座標が最適な湿気移動特性値の係数となる。

5.5.2　同定に用いた湿度計測事例

コンクリート内部の相対湿度を正確に測定することは比較的困難である[11]。特に相対湿度 95%以上の場合、精度が低下する可能性がある。本研究では、比較的大型の供試体を用

いてコンクリート内部の相対湿度を測定した計測事例をもとに粒子群最適化による逆解析を行い、湿気移動特性値を同定した。

1）計測事例 1：鍵本らによる計測

鍵本ら[12]は、図-5.14 に示すような直径 450mm、高さ 900mm の大型円柱供試体を作製し、側面のみから乾燥する条件下で計測を行った。供試体側面から深さ 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm、100mm、200mm の位置における相対湿度を、温湿度計（高分子温湿度センサ、直径：6mm、温度測定範囲：-10～+80℃、湿度測定範囲：20%～95%RH）により測定した。測定時の試験室内温度は 34.5℃、湿度は 60%であった。その測定結果を図-5.15 に示す。なお、深さ 200mm の計測データは中心部に近いにもかかわらず、深さ 100mm よりも乾燥しており、一般的な湿度分布とは異なる挙動を示した。また、湿度センサの湿度測定範囲が 20%～95%RH であることを踏まえ、このデータの信頼性が低いと判断し、同定には用いなかった。

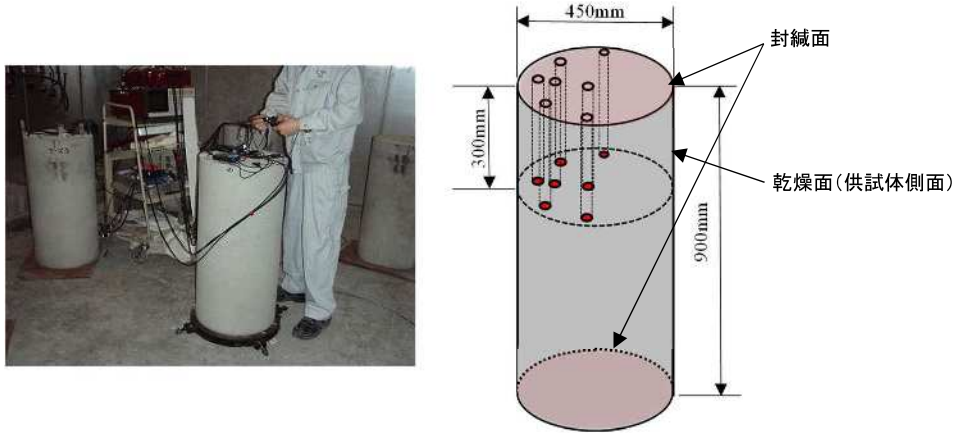


図-5.14　鍵本らによる湿度計測

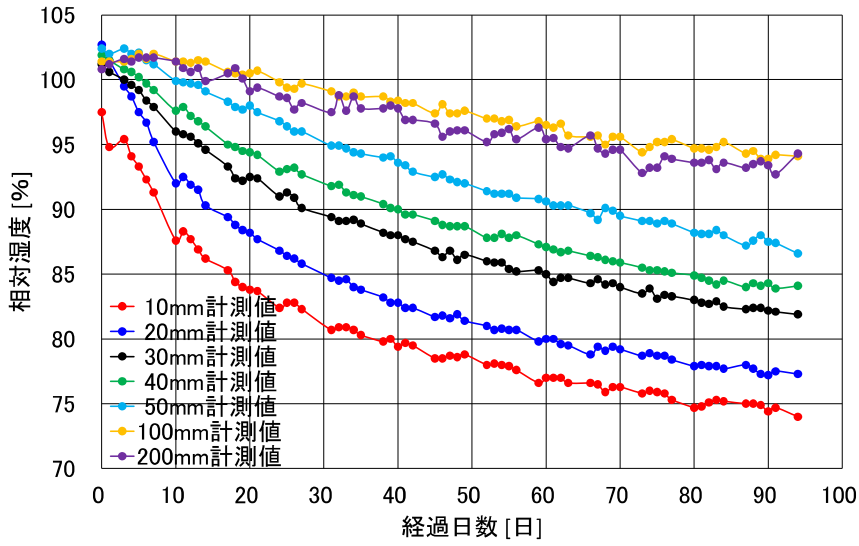


図-5.15　鍵本らによる湿度計測結果

2）計測事例 2：溝渕らによる計測

溝渕ら[10]は、鍵本らの計測と同様の方法により、図-5.16 に示す直径 450mm、高さ 450mm の大型円柱供試体を作製し、側面のみから乾燥させる条件下で試験を行った。供試体側面から深さ 20mm、30mm、40mm、50mm、100mm および 200mm の位置における相対湿度を温湿度計（高分子温湿度センサ、直径：6mm、温度測定範囲：-10～+80℃、湿度測定範囲 20%～95%RH）により測定した。供試体は打込み後 6 日で脱型し、材齢 7 日から計測を開始した。測定時の試験室内温度は 20℃、湿度は 60%であった。その測定結果を図-5.17 に示す。なお、使用した温湿度計の湿度計測の湿度測定範囲は 20%～95%RH であり、深さ 100mm および 200mm の計測データは乾燥が進行しておらず、境界条件の影響を十分に受けていないと判断し、同定には用いなかった。

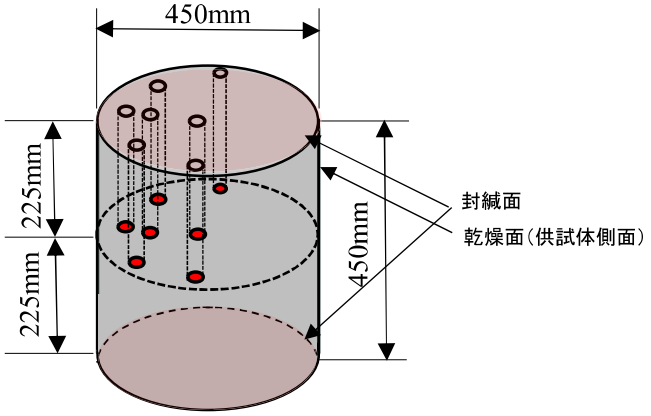


図-5.16　溝渕らによる湿度計測

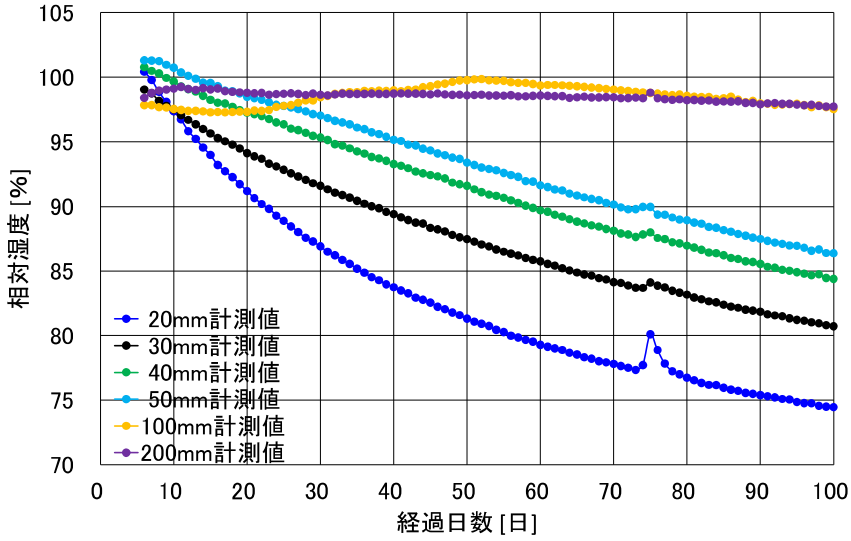


図-5.17　溝渕らによる湿度計測結果

5.5.3　湿気移動特性値の同定

粒子群最適化においては、粒子の 9 次元座標がそれぞれの湿気移動特性値の係数（$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$）を表し、これに基づいて 2 次関数として透湿率、湿気容量、蒸発率の各湿気移動特性値が定義される。その後、有限要素法による湿気移動解析を実施した。湿度計測では、供試体円柱の側面のみから乾燥させる条件であったため、解析モデルは 2 次元の 1/4 断面を用いて作成した。**図-5.18** に解析で用いた有限要素メッシュを示す。粒子群最適化では、1 回の試行において、「解析ステップ数×粒子数」回の有限要素解析が必要となり、本研究では 100 ステップ・50 粒子で実行した。

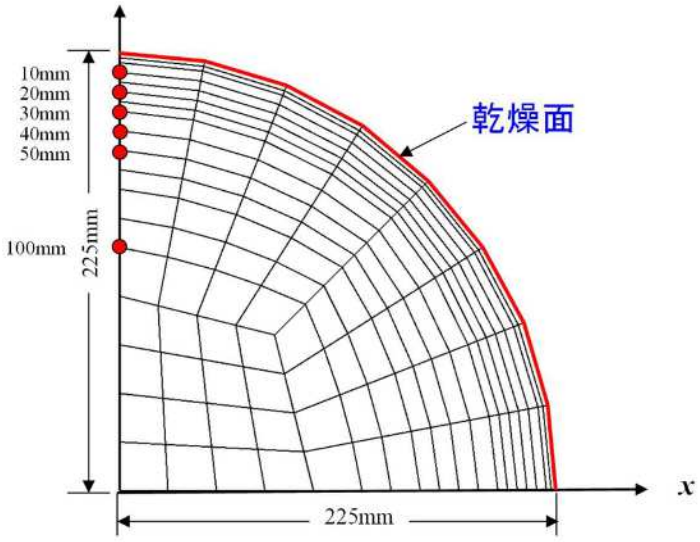


図-5.18　湿気移動解析に用いる有限要素メッシュ

湿気移動特性値は、透湿率、湿気容量、蒸発率が相互に関連するため、その最適な組合せが無数に存在する。**図-5.19～図-5.21**は、計測事例1に対して50回の試行を行った結果を示しており、透湿率、湿気容量、蒸発率の異なる組合せによって計測値に適合する湿気移動特性値が数多く得られることが確認された。これらの組合せは、いずれを用いても計測事例1の結果は再現可能であるが、他の計測事例に対しては再現性が低下する可能性があり、すなわち汎化性能が十分でないと考えられる。

そこで本研究では、計測事例1および計測事例2に対してそれぞれ50回の試行を行い、両事例の試行結果から、最も類似度の高い湿気移動特性値の組合せを選定し、複数の計測条件に対して共通して成立するパラメータは汎化性能が高いと考えられることから、これを同定値とした。この探索においては、透湿率、湿気容量、蒸発率のスケールの差異を補正するため、各特性値について、試行結果における最大値と最小値の差（レンジ）で除することにより正規化を行い、比較可能な値に統一した。正規化後の値を基に、透湿率、湿気容量、蒸発率それぞれの二乗誤差を算出し、その合計（偏差平方和）が最小となる組合せを選定することで、最も類似度の高い湿気移動特性値を同定した。

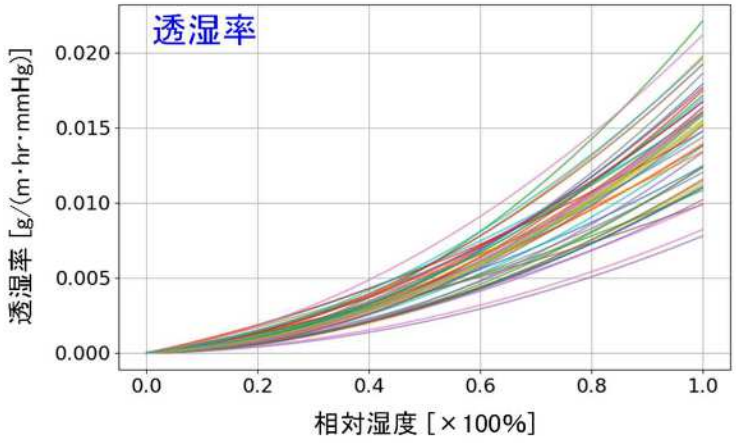


図-5.19　計測事例1の50回の試行での透湿率の同定結果

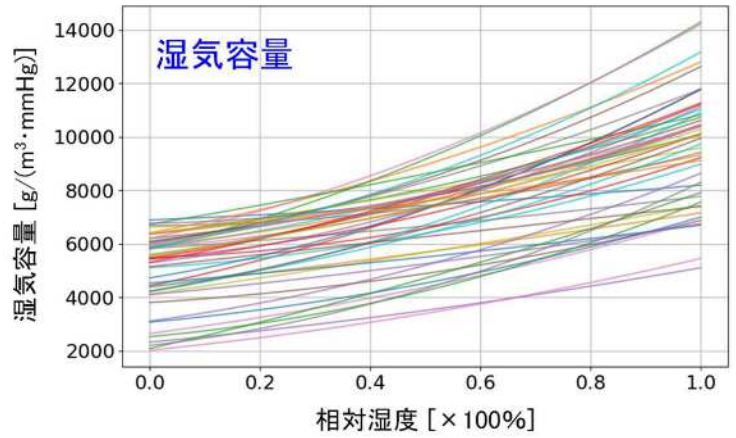


図-5.20　計測事例1の50回の試行での湿気容量の同定結果

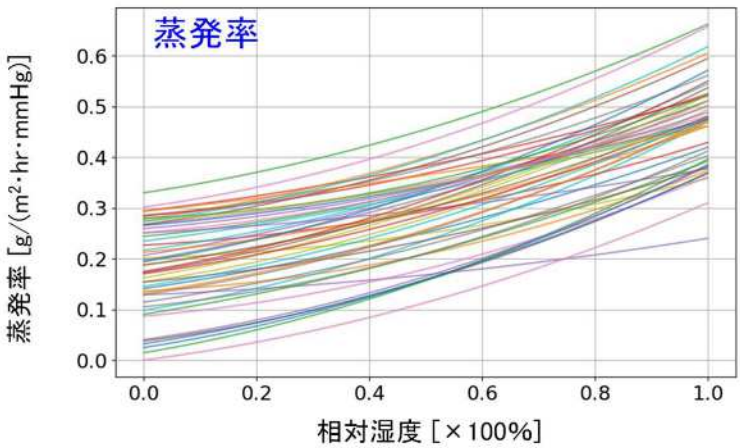


図-5.21　計測事例1の50回の試行での蒸発率の同定結果

採用した同定結果を**表-5.1** に示し、それに基づく関数形を**図-5.22～図-5.24** に示す。図中の赤線は計測事例 1 の同定値による関数形、青線は計測事例 2 の同定値による関数形である。関数値そのものには若干の差異が認められるものの、その形状は非常に類似している。また、黒点線は両者のほぼ中央に位置する関数形であり、**表-5.2** に示す本研究での提案値に基づく関数形である。なお、計測事例 1 および計測事例 2 は雰囲気温度が異なるが、本研究で用いた湿気移動則は、式(5.1)に示すように相対湿度 RH[%]ではなく、蒸気圧 P [mmHg]で定義されている。そのため、コンクリートのように温度変化が常に生じる材料に対しても、温度上昇による湿気移動の促進現象や雰囲気温度の違いを考慮することが可能である。したがって、本研究では異なる雰囲気温度の影響を適切に考慮した上で、計測事例 1 と計測事例 2 の湿気移動特性値を同列に比較できると判断した。

表-5.1　粒子群最適化による同定値

		2 次関数の係数		
		係数 a	係数 b	係数 c
事例 1	透湿率	0.0162	0.0017	0.0
	湿気容量	3703.7	3351.8	4730.8
	蒸発率	0.1995	0.1773	0.1942
事例 2	透湿率	0.0106	0.0002	0.0
	湿気容量	2630.8	2850.2	5822.3
	蒸発率	0.3749	0.3530	0.3838

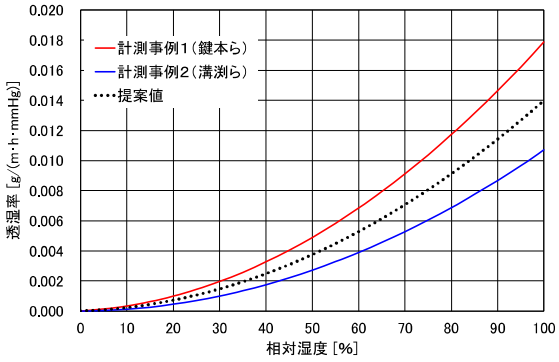


図-5.22　透湿率の関数形

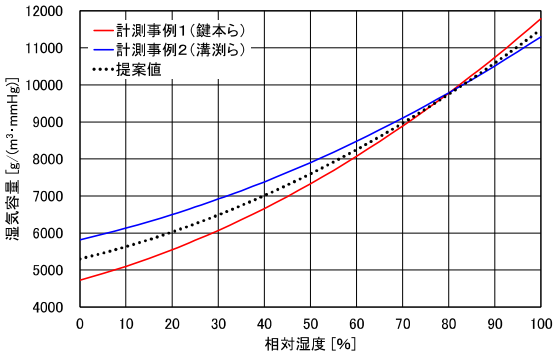


図-5.23　湿気容量の関数形

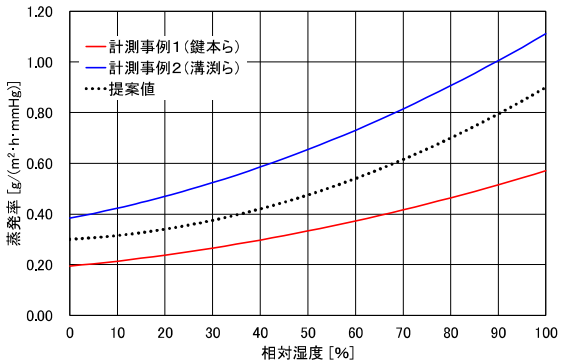


図-5.24　蒸発率の関数形

表-5.2　湿気移動特性の提案値

	2 次関数の係数		
	係数 *a*	係数 *b*	係数 *c*
透湿率	0.013	0.001	0.0
湿気容量	3200	3000	5300
蒸発率	0.5	0.1	0.3

図-5.25 および**図-5.26** には、同定値および提案値を用いた場合の計測事例ごとの相対湿度の計算結果を示す。図中の丸印は計測値、実線は同定値を用いた計算結果、点線は提案値を用いた計算結果である。

同定値を用いた計算結果は、当然ながら計測値に非常に近い値を示している。一方、提案値を用いた計算結果では、計測事例 1 の 10mm の位置の相対湿度が計測値よりやや大きく算出されているものの、その差は 3%程度であり、全体として計測値の傾向を概ね再現している。

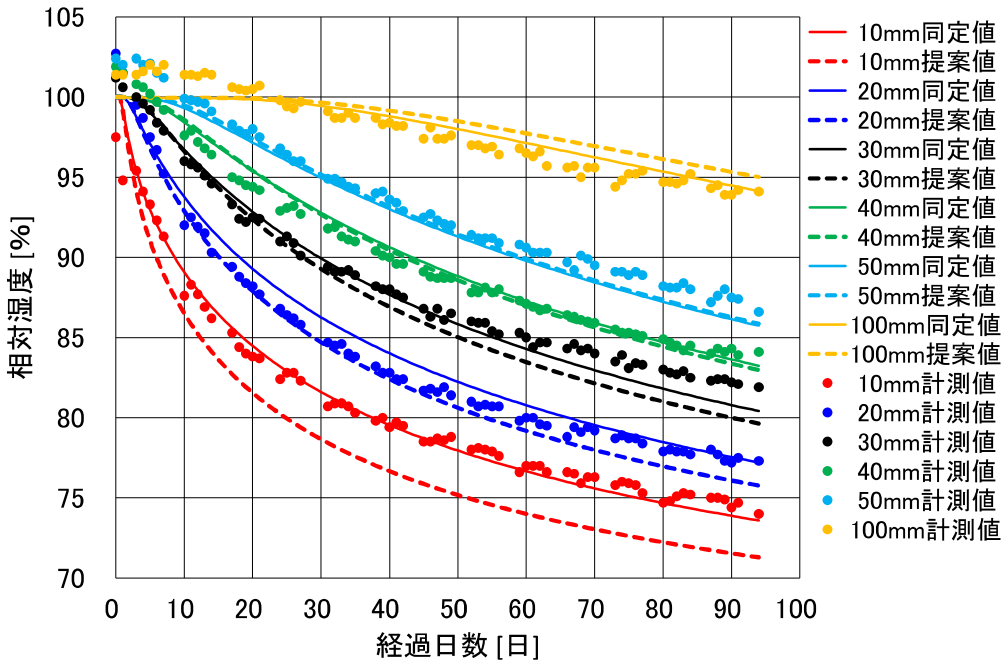


図-5.25　計測事例1の同定値と提案値による相対湿度

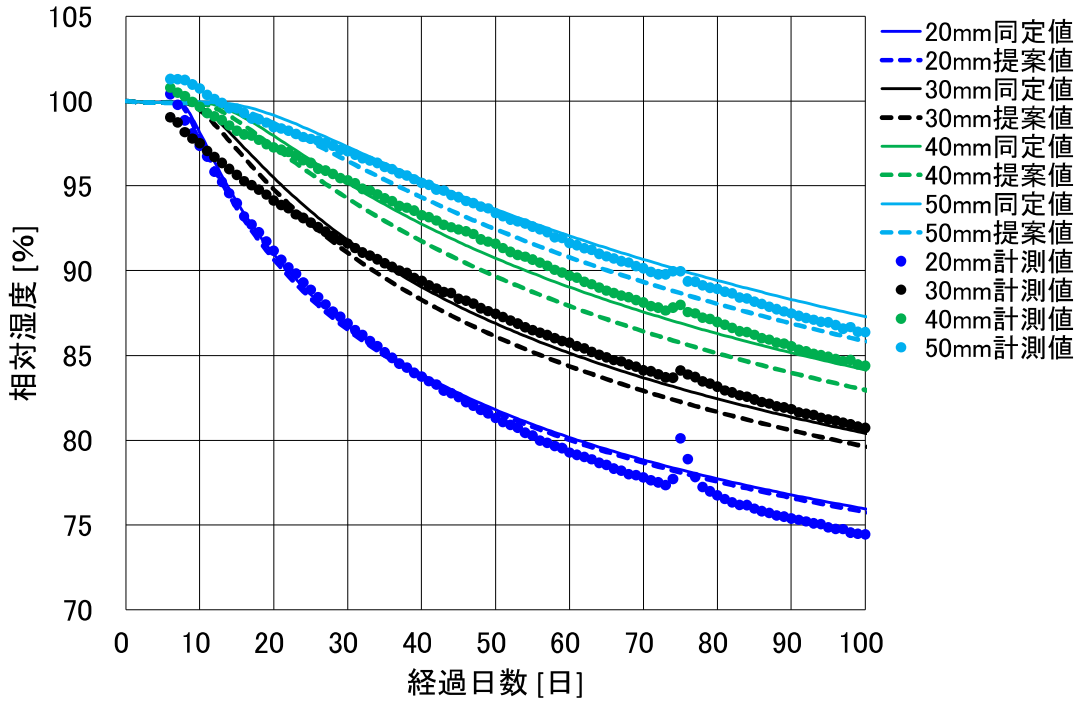


図-5.26　計測事例2の同定値と提案値による相対湿度

5.6　第5章のまとめ

本章では、マスコンクリートの湿気移動解析に必要となる入力値を対象として、メタヒューリスティクス最適化と FEM 解析を組み合わせた逆解析による同定手法を構築し、その適用性について検討した。特に、湿気移動を支配する透湿率、湿気容量および蒸発率を対象として、相対湿度依存性を考慮した関数形による同定を行うとともに、湿気移動特性値間の相関に起因する非一意性について検討し、複数の計測事例を用いた同定方法を示した。本章で得られた成果および知見を以下にまとめる。

① 湿気移動解析入力値を同定するための逆解析フレームワークを構築した。
第4章で構築したFEM解析とメタヒューリスティクス最適化を組み合わせた逆解析フレームワークを湿度場へ適用し、透湿率、湿気容量および蒸発率を相対湿度の関数として表現し、これらの関数を規定する係数を設計変数、相対湿度履歴を評価対象とすることで、計測相対湿度と解析相対湿度との誤差を最小化する湿気移動特性値の同定手法を構築した。また、既往研究および事前解析結果をもとに探索範囲を設定し、解析入力データの生成、FEM解析、誤差評価およびパラメータ更新を繰り返す一連の同定手順を示した。

② 相対湿度依存性を考慮した湿気移動特性値の同定方法を示した。
透湿率、湿気容量および蒸発率はいずれも相対湿度に依存する非線形特性を有することから、本研究では中高湿度域である50～100%RHを対象として、それぞれを2次関数で表現し、合計9個の係数を設計変数としてPSOによる逆解析を実施した。その結果、従来のように一部の特性値を固定することなく、相対湿度に対する湿気移動特性値の変化を考慮した同定が可能であることを示した。

③ 単一の計測事例のみでは湿気移動特性値を一意に同定できないことを明らかにした。
透湿率、湿気容量および蒸発率は相互に強い相関を有するため、異なるパラメータの組合せによって同程度の相対湿度履歴を再現できることが確認された。すなわち、単一の計測事例に対しては計測値を良好に再現する多数の解が存在し、相対湿度履歴の一致度のみから各湿気移動特性値を一意に決定することは困難であることを示した。

④ 異なる湿度履歴を有する複数の計測事例を用いることにより、非一意性を低減する同定方法を示した。
計測事例1および計測事例2についてそれぞれ逆解析を実施し、両事例から得られた湿気移動特性値の関数形を比較した。その結果、関数値には差異が認められるものの、各特性値の相対湿度に対する変化傾向は類似していることを確認した。そこで、複数の計測条件に共通して成立する関数形を抽出し、その中央的な値を湿気移動特性値の提案値として設定することで、単一事例に依存した同定結果を避ける方法を示した。

⑤ 提案した湿気移動特性値により、複数の計測事例の相対湿度履歴を再現できること

を確認した。
提案した透湿率、湿気容量および蒸発率を用いて湿気移動解析を行った結果、計測事例1および計測事例2の相対湿度履歴を概ね良好に再現した。また、提案した湿気移動特性値は相対湿度の増加に伴って増加する傾向を示し、既往研究で示されている湿気移動特性の定性的傾向とも整合する結果となった。これにより、複数の計測条件を利用することで、再現性と物理的妥当性を両立した湿気移動解析入力値を設定できる可能性を示した。

以上より、本章では、相対湿度計測データを用いて湿気移動解析に必要な透湿率、湿気容量および蒸発率を合理的に同定する逆解析手法を構築した。また、湿気移動特性値の同定ではパラメータ間の相関に起因する非一意性が重要な課題となることを明らかにし、異なる湿度履歴を有する複数の計測事例を用いることで、この影響を低減し、複数の計測事例に対して適用可能な湿気移動特性値を導出する方法を示した。

【参考文献】

1) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2023.
2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025，2025.
3) 尾崎明仁：熱力学エネルギーに基づく多孔質材の熱・水分複合移動モデル、人間ー生活環境系シンポジウム報告集 25，pp.35-38, 2001.12.
4) 渡辺晋生，取出伸夫，坂井 勝，Simunek Jiri：凍結をともなう土中の水分･熱･溶質移動モデル、土壌の物理性，106 巻，pp.21-32, 2007.
5) 石田哲也，前川宏一，岸利治，磐田吾郎，楠原千佳子：温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化，土木学会論文集，No.795/V-68，pp.39-54，2005.8.
6) 丸山一平，野口貴文，佐藤良一：水熱連成解析にもとづく高強度マスコンクリート中の温度及び湿度分布の予測，日本建築学会構造系論文集，第 609 号，pp.1-8, 2006.
7) 篭橋忍，小澤満津雄，森本博昭：コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.655-660，2000.6.
8) 堀部謙，森川友博，中村恭香，森本博昭：コンクリート中の水分移動解析手法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.603-608，2004.6.
9) 西岡栄香，原田有：多孔質物質中の透湿率および湿気拡散について，セメント技術年報，XV，pp.274-278，1961.
10) 溝渕利明，掛 来実，中村秀明，長田直之：コンクリートの湿気移動解析に用いる各特性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.299-304，2020.6.
11) 谷口 円，桂 修：湿度センサを利用したコンクリート含水状態の視覚化，コンクリート工学，53 巻 5 号，pp.406-410，2015.
12) 鍵本広之，川村満紀：大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひび割れ発生過程の解明, コンクリート年次論文報告集, Vol.31, No.1，pp.1225-1230，2009.
13) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.：Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
14) Kennedy, J. and Eberhart, R.：Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
15) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.107-118，2006.2.

第 6 章

温度応力解析のための入力値の同定

第 6 章　温度応力解析のための入力値の同定

6.1　本章の目的と位置づけ

第4章では温度場に関わる入力値として断熱温度上昇特性値および熱伝達係数の同定を行い、第5章では湿度場に関わる入力値として透湿率、湿気容量および蒸発率の同定を行った。

これらの入力値が適切に設定されたとしても、マスコンクリート構造物の温度応力および温度ひび割れを簡易解析手法により精度良く評価するためには、拘束条件を適切に表現することが重要である。

CP法では、地盤や既設コンクリートによる拘束効果を外部拘束係数として表現するが、従来の外部拘束係数は過去の解析条件に基づいて設定されたものであり、現行の設計条件に対する適用性について再検討が必要である。

そこで本章では、3次元FEM解析結果を基準解として用い、メタヒューリスティクス最適化による逆解析を適用することで、CP法に用いる外部拘束係数を合理的に同定する手法を提案する。

また、同定された外部拘束係数を用いたCP法の解析結果と3次元FEM解析結果を比較することで、提案手法の有効性および適用性について検討する。

6.1.1　解析入力値の課題（応力）

CP法において外部拘束係数は、拘束体が被拘束体の変形をどの程度拘束するかを表す重要なパラメータであり、温度応力解析結果に大きな影響を及ぼす。

しかしながら、従来の外部拘束係数は限定された解析条件のもとで算出されたものであり、現行の示方書に基づく材料モデルや自己収縮を考慮した条件との整合性が十分に確認されていない。また、外部拘束係数はL/HやE_c/E_rなど複数の要因の影響を受けるため、適切な設定が容易ではない。

このため、最新の解析条件に基づく3次元FEM解析結果を活用し、客観的かつ再現性の高い外部拘束係数を同定する手法の確立が求められている。

6.1.2　逆解析による同定の考え方

第4章および第5章では、計測された温度履歴および相対湿度履歴を基準データとして解

析入力値を同定した。一方、本章では、3次元FEM解析による応力履歴を基準データとし、CP法による応力履歴との誤差を最小化することにより、CP法の入力値である外部拘束係数を同定する。

このように、本研究で構築した逆解析フレームワークは、設計変数および評価関数を各物理場に応じて変更することで、温度場、湿度場および応力場の入力値同定に共通して適用するものである。具体的な逆解析問題の定式化、設計変数、評価関数および実装方法については、次節で示す。

6.2　応力場パラメータ同定のための逆解析フレームワーク

本章では、外部拘束係数同定に用いる逆解析フレームワークについて述べる。本研究では、CP法における外部拘束係数を設計変数として定義し、CP法による温度応力解析結果と3次元FEM解析結果との誤差を最小化することにより、外部拘束係数を同定する。

6.2.1　逆解析問題の一般的定式化

逆解析問題は、解析モデルに入力される設計変数ベクトルを適切に設定し、基準データとの誤差を最小化する最適化問題として定式化される。

本章では、CP法における外部拘束係数を設計変数として定義する。評価関数には、3次元FEM解析による応力履歴とCP法による応力履歴との差の二乗和を用い、その値を最小化することで外部拘束係数を同定する。

また、探索範囲については、従来の外部拘束係数の分布形状および事前探索結果を参考として設定した。

6.2.2　本研究で用いた最適化手法の概要

本研究では、第3章の比較検討結果に基づき、粒子群最適化（PSO）を主たる最適化手法として採用する。

6.2.3　逆解析システムの実装方法

本研究では、有限要素法（FEM）解析コードとメタヒューリスティクス最適化アルゴリズムを連携させた逆解析システムを構築した。

逆解析では、まず最適化アルゴリズムにより入力パラメータ候補を生成する。次に、その候補値を解析入力ファイルへ自動的に反映し、CP法による温度応力解析を実行する。解析終了後、評価対象位置における解析結果を抽出し、あらかじめ算出した3次元FEM解析結果との誤差を評価関数として算出する。さらに、その評価結果を最適化アルゴリズムへ返し、次の探索点を生成する。この処理を繰り返すことにより、評価関数を最小化する入力パラメータを探索する。

本研究では、既存のFEM解析コードを大幅に変更することなく利用できるよう、最適化プログラム側から解析入力ファイルの生成、解析実行および解析結果の読み込みを自動的に行う構成とした。これにより、温度場、湿度場および応力場に関する各種パラメータ同

定問題に対して、設計変数および評価関数を変更するのみで共通の逆解析フレームワークを適用することが可能となった。

また、探索範囲はコンクリート標準示方書[1)]、マスコンクリートのひび割れ制御指針2025[2)]、既往研究および事前解析結果を参考として設定した。外部拘束係数については、理論上は0以上の値をとり、実務で用いられている値や既往の解析事例を考慮して、0.0～2.0の範囲を初期探索領域として設定した。

本章における外部拘束係数の同定においても、逆解析システムの基本構成およびPSOによる探索手順は第4章で示した温度場パラメータ同定の場合と同一である。ただし、設計変数を断熱温度上昇特性値から外部拘束係数へ変更し、評価対象を計測値との誤差から3次元FEM解析結果とCP法解析結果との誤差へ変更している点が異なる。なお、外部拘束係数の同定に適用した具体的な逆解析手順については**図-6.3**を用いて後述する。

6.3　マスコンクリートの温度応力解析とCP法

6.3.1　マスコンクリートの温度応力解析

耐久性のある構造物を造ることは、建設技術者の責務であり、コンクリート構造物のひび割れ制御は非常に重要である。コンクリートの施工段階では、セメントの水和熱が原因で温度ひび割れが発生することが懸念される。温度ひび割れの発生が予測されるマスコンクリート構造物については、事前に温度応力解析が実施されることが多い。現在、マスコンクリートの温度応力解析では、計算容量、計算速度などのコンピュータ性能が飛躍的に向上したこと、使い勝手の良い計算ソフトウェアが充実したことなどから、3次元FEMが広く使用されている。3次元FEMは、複雑な構造物に対しても、形状や境界条件を詳細にモデル化することで、温度応力を詳細に評価することができる。

一方、3次元FEMにより温度応力解析を行うためには、有限要素法に関するある程度の知識や経験が必要であり、使い勝手の良いメッシュジェネレータが開発されているものの、メッシュ作成には多大な労力と時間を要する。そのため、経験の浅い技術者にとって、3次元FEMは難易度が高い。

6.3.2　CP法と外部拘束係数

CP（Compensation Plane）法[3]は、1985年に日本コンクリート工学協会のマスコンクリート温度応力研究委員会によって開発された温度応力の簡易的な解析手法であり、構造物を限定すれば3次元FEMと同等の解析精度で計算できる。土木構造物に限れば、橋台や壁高欄、ボックスカルバートなど、必ずしも3次元FEMで解析する必要のない構造物も多く存在し、これらは、CP法でも実用上問題なく温度応力解析を行うことが可能であり、設計実務においては、計算効率および簡便性の観点からCP法の有用性は依然として高い。

CP法は、地盤や既設コンクリートなどの拘束体の上に打ち込まれた部材に対して、平面保持を仮定し、内部拘束と外部拘束を明確に分離することにより、温度応力を求めている。外部拘束による応力を計算するためには、拘束体（地盤や既設コンクリート）が被拘束体（新設コンクリート）の変形をどの程度拘束するかを表す外部拘束係数が必要となる。また、CP法には、その発展手法として貫通ひび割れのひび割れ幅が計算できるCPひび割れ幅法[4]や、表面のひび割れ深さの進展を予測するCP表面ひび割れ幅法[5),6)]が存在する。CPひび割れ幅法は、CP法の考え方をひび割れ発生後まで拡張したもので、ひび割れ断面の鉄筋ひずみやコンクリートひずみに平面保持の仮定を適用し、力の釣り合いおよびひずみの適合条件から、ひび割れ幅を計算するものである。CP表面ひび割れ幅法は、CPひび割れ幅法をさらに発展させたもので、応力解放領域を収束計算により適宜変化させることで、ひび割れの深さ方向の進展を計算することができる。これらの手法を使う際にも、外部拘束係数が必要である。

6.3.3　CP法適用の課題

外部拘束係数の設定値については、2007 年度制定のコンクリート標準示方書 [7]に図とし

て示されている。示方書に示されている外部拘束係数の値は、日本コンクリート工学協会のマスコンクリート温度応力研究委員会（当時）によって、1998 年 4 月に見直しが行われたもので、壁状構造物を対象とした 3 次元 FEM 解析結果から導かれたものである [8]。しかしながら、当時の規準は自己収縮等が考慮されておらず、強度発現についても材齢のみの関数で示されていたなど、現行の規準に比べ、物性値等が異なっている。したがって、現行の設計条件に対して適用した場合の妥当性について再検討が必要である。

そこで、本研究では、CP 法の解析精度向上を目的として、最新の示方書 [1]に準拠した材料モデルを用いるとともに、自己収縮を考慮した条件のもとで、3 次元 FEM 解析結果に基づき外部拘束係数の再評価を行う。

6.4　従来の外部拘束係数の同定方法

6.4.1　従来の外部拘束係数の算定方法

1998 年にマスコンクリートの温度応力研究委員会により見直しが行われた外部拘束係数は、図-6.1 に示す壁状構造物を用いて算出されている。適用規準は、平成 8 年制定コン

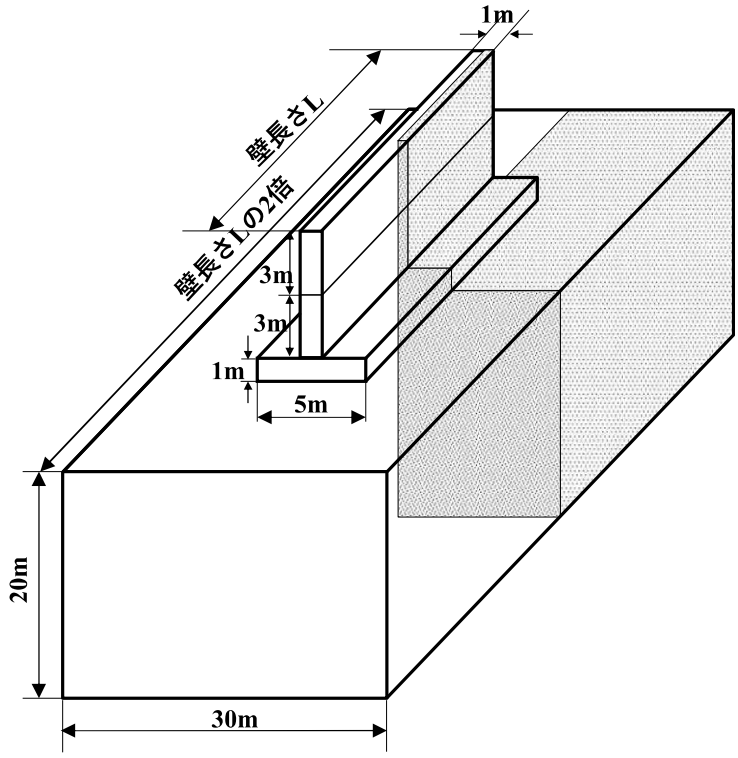


図-6.1　同定に用いた壁状構造物

表-6.1　同定に使用した材料特性値

項目	単位	コンクリート	地盤
熱伝導率	W/m℃	2.67	3.49
比熱	kJ/kg℃	1.151	0.795
密度	kg/m^3	2350	2650
熱伝達係数	W/m^2℃	14	
初期温度	℃	20	20
外気温	℃	20	
ヤング係数	N/mm^2	$4.7\times10^3\sqrt{f_c'(t)}$	4903
クリープ係数		0.73 or 1.0	-----
圧縮強度	N/mm^2	$30.3t/(4.5+0.95t)$	-----
引張強度	N/mm^2	$0.35\sqrt{f_c'(t)}$	-----
ポアソン比		0.2	0.2
線膨張係数	1/℃	10×10^{-6}	10×10^{-6}

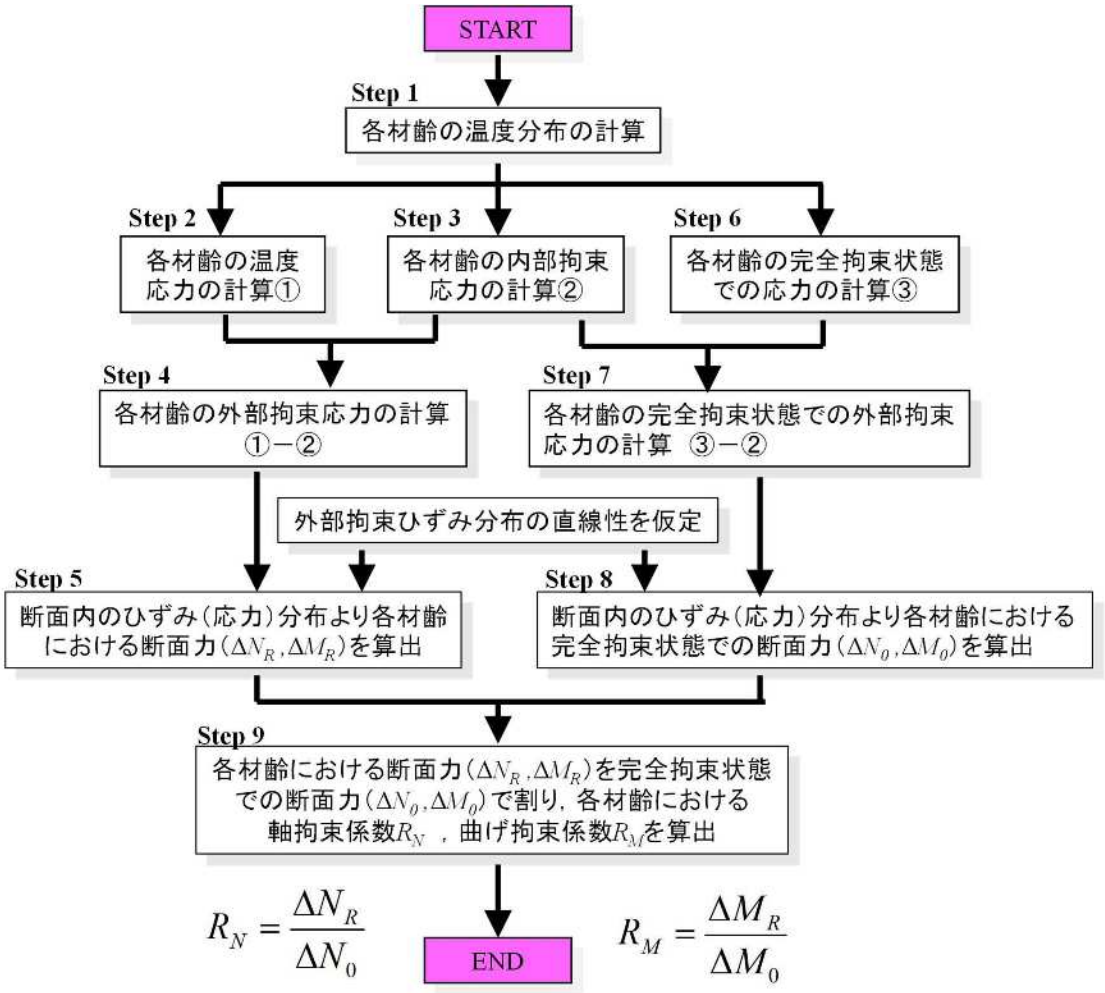


図-6.2　従来の外部拘束係数の算定フロー

クリート標準示方書・施工編である。**表-6.1** に同定に使用した材料特性値を示す。

外部拘束係数は、L（壁長）／H（地盤表面からの高さ）や E_c（コンクリートのヤング係数）／E_r（拘束体のヤング係数）を変化させて 3 次元 FEM 解析を行い、その結果をもとに算出している。外部拘束係数は、**図-6.2** に示すフローに従い、**表-6.2** および**表-6.3** に示す組合せで算出を行っている。算出フローの概要を以下に示す。

Step.1：温度解析により打設されたコンクリートの各材齢における温度分布を算出する。

Step.2：温度分布に基づき、各材齢における温度応力を算出する。

Step.3：外部拘束の影響を排除するため、拘束体のヤング係数を極めて小さな値に設定した条件で解析を行い、内部拘束応力を算出する。

Step.4：上記の **Step.2** で算出された温度応力から、**Step.3** で算出された内部拘束応力を差し引くことにより、外部拘束に起因する応力成分を算出する。

Step.5：外部拘束ひずみの直線性を利用して、断面内のひずみ（応力）分布から、各材齢における断面力（外部拘束軸力 ΔN_R と外部拘束曲げモーメント ΔM_R）を算出する。

Step.6：各材齢における完全拘束状態（3 次元 FEM で壁長さ方向の水平方向変位を拘束）

表-6.2　ヤング係数比（E_c/E_r）による組合せ

No.	ヤング係数比 E_c/E_r	拘束体ヤング係数 (N/mm^2)
1	1	25000
2	5	5000
3	10	2500
4	15	1670
5	20	1250
6	25	1000
7	30	833
8	35	714
9	40	625
10	45	556
11	50	500
12	∞	0.0000001

表-6.3　L/Hによる組合せ

No.	壁長さ L (m)	L/H		
		スラブ	スラブ＋ 壁 1 層	スラブ＋ 壁 2 層
1	6	6.0	1.50	0.86
2	9	9.0	2.25	1.29
3	12	12.0	3.00	1.71
4	15	15.0	3.75	2.14
5	18	18.0	4.50	2.57
6	21	21.0	5.25	3.00
7	27	27.0	6.75	3.86
8	33	33.0	8.25	4.71
9	39	39.0	9.75	5.57
10	45	45.0	11.25	6.43
11	51	51.0	12.75	7.29
12	57	57.0	14.25	8.14
13	63	63.0	15.75	9.00
14	72	72.0	18.00	10.23
15	84	84.0	21.00	12.00
16	96	96.0	24.00	13.71
17	105	105.0	26.25	15.00

での応力を算出する。

Step.7：**Step.6** の結果から **Step.3** で計算される内部拘束応力を除き、完全拘束状態での外部拘束応力を計算する。

Step.8：完全拘束状態での外部拘束ひずみの直線性を利用して、断面のひずみ（応力）分布から、各材齢における断面力（完全拘束状態での外部拘束軸力 ΔN_0 と外部拘束曲げモーメント ΔM_0）を算出する。

Step.9：次式より R_N および R_M を算出する。なお、R_M については、温度上昇時（符号反転前）と温度降下時（符号反転後）について求める。

$$R_N = \frac{\Delta N_R}{\Delta N_0} \tag{6.1}$$

$$R_M = \frac{\Delta M_R}{\Delta M_0} \tag{6.2}$$

6.4.2　従来の外部拘束係数の算定方法の問題点

現行の示方書に照らし合わせて、従来の外部拘束係数同定の問題点を以下に示す。

- 従来の外部拘束係数の同定では、断面内の強度発現は、材齢のみを変数とした関数で表現されていた。強度発現については、2008 年発刊のマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008[9]以降は、材齢のみの関数ではなく、温度履歴を考慮した有効材齢の関数となっている。
- 現行の示方書では、自己収縮の影響を考慮するようになっているが、当時の示方書では、自己収縮の影響が考慮されていなかった。
- 前述の方法で算出された外部拘束係数は、算出値が材齢とともに変化する。しかしながら、時間とともに変化する値を一定値として設定する際に、評価者の判断が介在するため曖昧さが残っている。

以上のように、従来の外部拘束係数は、適用している材料物性や解析条件が現行の示方書とは異なるとともに、係数設定の客観性にも課題がある。

6.5　粒子群最適化（PSO）を用いた新たな外部拘束係数の同定

6.5.1　同定方法の概要

粒子群最適化[10)-12)]は、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用したものである。粒子群最適化は、連続量の最適化に適しており、微分などの複雑な計算が不必要で、評価値が得られるものであれば、幅広く最適化できる汎用性の高い最適化手法である。本研究では、3 次元 FEM による応力解析結果を基準解とし、CP 法による応力解析結果との誤差が最小となるように外部拘束係数を同定する逆解析問題として定式化した。同定では、スラブ、壁 1 層目、壁 2 層目それぞれについて、軸拘束係数 R_N および曲げ拘束係数 R_{M1}（符号反転前）R_{M2}（符号反転後）を求め、合計で 9 つのパラメータを同定した。なお、パラメータ数が増加すると、パラメータ間の相関により識別性が低下し、安定した同定が困難となる可能性がある。そこで、曲げ拘束係数を温度上昇時（符号反転前）と温度降下時（符号反転後）で区別しないケース（6 パラメータ）についても同定を行った。

粒子群最適化を用いた逆解析システムの構成を図-6.3 に示す。図-6.3 は応力場パラメータ同定を対象とした逆解析システムの構成を示したものであり、設計変数として外部拘束係数を設定している。一方、PSO による応力場パラメータ同定手順を図-6.4 に示す。

① 部材（スラブ、壁 1 層目、壁 2 層目）ごとに異なる、軸拘束係数と曲げ拘束係数の組み合わせを多次元空間（6 次元または 9 次元）の点として表現する。粒子群最適化で

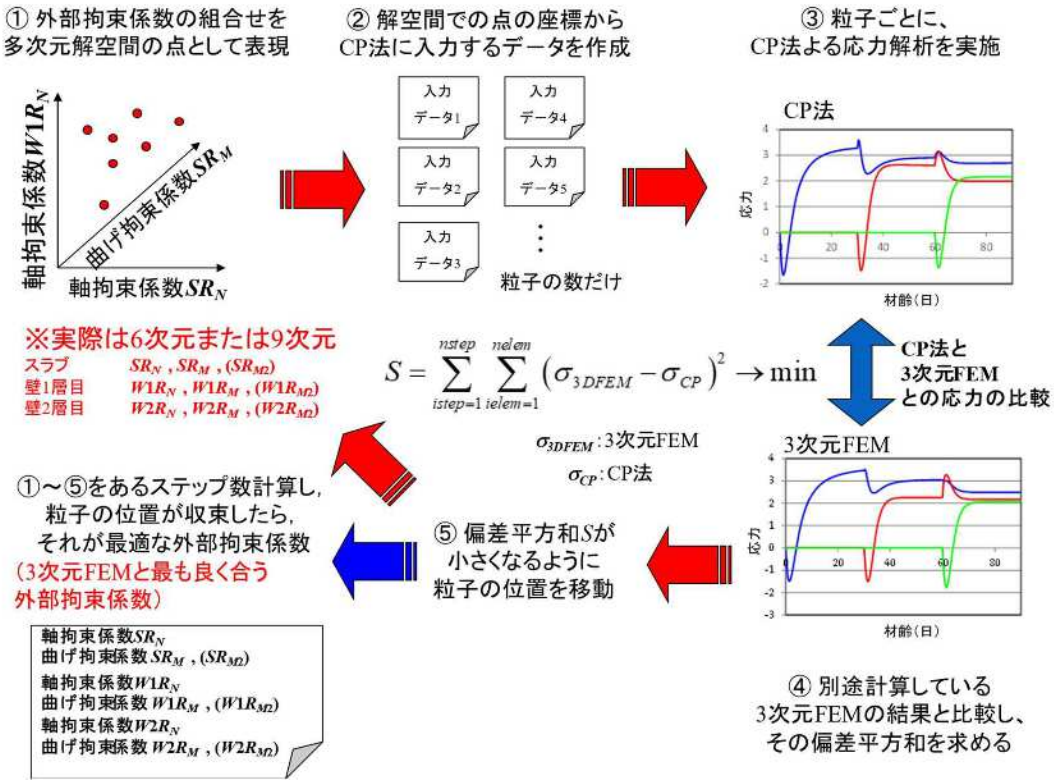


図-6.3　応力場パラメータ同定のための逆解析システムの構成

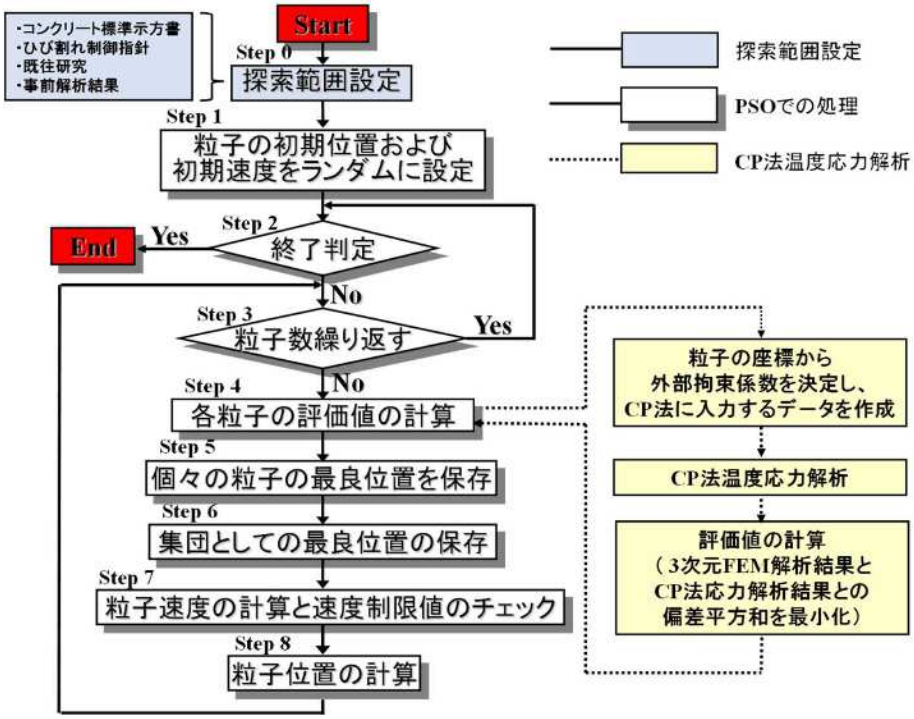


図-6.4　PSO（粒子群最適化）を用いた応力場パラメータ同定手順

は、粒子の座標が同定値を表すため、乱数を用いて解空間上に粒子を配置する。

② ①で配置された粒子の座標が外部拘束係数の値になることから、これらの座標値を用いて、CP 法に入力する外部拘束係数を決定する。外部拘束係数は、解空間が 6 次元または 9 次元であるため、一つの粒子で 6 または 9 つのパラメータが決定される。

③ 粒子ごとに定義された外部拘束係数の値をもとに、CP 法による応力解析を実施する。

④ 指定された要素（**図-6.3** の青と赤で示した要素）について、別途計算している 3 次元 FEM での応力解析結果と、③で計算された CP 法での応力解析結果の全期間での 3 次元 FEM と CP 法の要素応力の差の二乗和（偏差平方和）S を式(6.3)で計算する。

$$S = \sum_{istep=1}^{nstep} \sum_{ielem=1}^{nelem} \left(\sigma_{3DFEM} - \sigma_{CP} \right)^2 \rightarrow \min \qquad (6.3)$$

ここに、*nstep* は、全計算ステップ数、*nelem* は、評価対象とする要素数、σ_{3DFEM} は、3 次元 FEM による要素応力（N/mm^2）であり、σ_{CP} は、CP 法による要素応力（N/mm^2）である。これにより、CP 法による応力評価が 3 次元 FEM の結果を最も良く再現する外部拘束係数を導出する。

⑤ ④で計算された偏差平方和が小さくなるように、粒子を移動させる。移動先は、粒子群最適化のアルゴリズムにより決定される。

⑥ 新たな位置が決まったら、粒子が一箇所に収束するまで、②～⑤を繰り返す。最終的に一箇所に収束した粒子の位置が外部拘束係数の同定値となる。

6.5.2　同定に用いた解析モデル

外部拘束係数の同定に用いた解析モデルの有限要素メッシュを**図-6.5** に示す。なお、地盤および奥行き方向のメッシュは表示していない。モデルは以下のとおりである。(a)従来の同定で用いられたモデル、(b)従来のモデルの壁厚を少し厚くしたもの、(c)橋台を想定したモデルである。拘束体である地盤の領域は、コンクリート部分の温度変化に伴う挙動の影響を受けない範囲を考慮し、深さ 15m、幅 25m としている。同定では、**図-6.5** の青と赤で示された要素応力を用いている。

6.5.3　温度および応力の解析条件

a) 物性値

使用セメントは、土木工事で一般的に用いられる高炉セメントB種とし、2022年制定コンクリート標準示方書［設計編］[1]に準拠して、温度および応力解析に使用する物性値を設定した。それぞれの物性値を**表-6.4**および**表-6.5**に示す。地盤の初期温度は、地表を20℃として、地盤下端を15℃として、線形補間した。

b) 境界条件

温度解析の境界条件は、地盤下面が温度固定境界、地盤の側面および対称面が断熱温度境界である。また、スラブおよび壁の周囲は熱伝達境界であり、型枠は打込み後1週間で撤去している。

応力解析の境界条件は、地盤下面で鉛直方向固定、地盤側面で側面に垂直な方向を固定、対称面で対称面に垂直な方向を固定している。

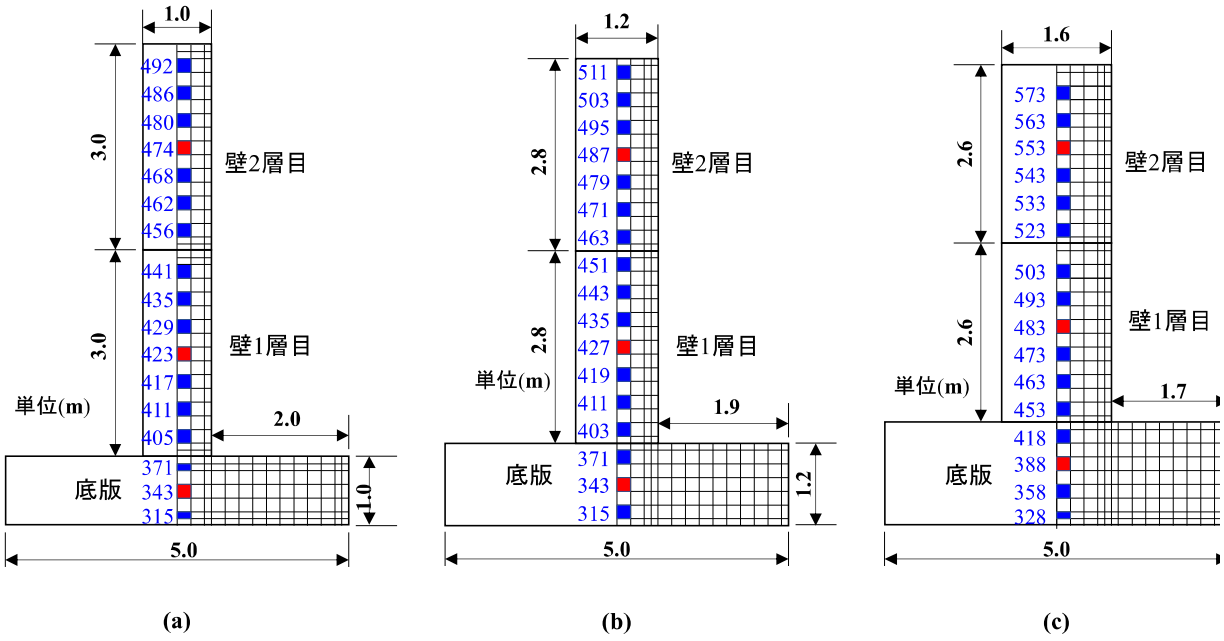


図-6.5　解析モデルの有限要素メッシュ（地盤部分を除く）

表-6.4　温度解析に用いた物性値

項目	単位	コンクリート	地盤
セメントの種類		高炉セメント B 種	------
単位セメント量	kg/m^3	300	------
熱伝導率	W/m℃	2.7	3.5
比熱	kJ/kg℃	1.15	0.8
密度	kg/m^3	2350	2650
熱伝達係数	W/m^2℃	8(型枠)、16(露出)	
初期温度	℃	20	地盤下端を 15℃とした線形補間
外気温	℃	20	

表-6.5　応力解析に用いた物性値

項目	単位	コンクリート	地盤
水セメント比		0.54（管理材齢 28 日）	-----
圧縮強度	N/mm^2	$\frac{t'-0.42}{7.252+0.736t'} f'_c(28)$ $f'_c(28)=34.8$	-----
引張強度	N/mm^2	$\frac{0.27\times f'_c(t')^{2/3}}{\gamma_c}$	-----
ヤング係数	N/mm^2	$\varphi(t')\times 6.3\times 10^3 f'_c(t')^{0.45}$	E_c/E_r により変化
ヤング係数低減係数		0.42 or 0.65	-----
ポアソン比		0.2	0.2
線膨張係数	1/℃	12×10^{-6}	10×10^{-6}

6.5.4　解析の組合せ

解析の組み合わせを**表-6.6**および**表-6.7**に示す。解析は、打込み間隔が14日で壁厚（1.0m、1.2m、1.6m）をそれぞれ変えた3ケース、壁厚1.2mで打込み間隔（7日、14日、21日）をそれぞれ変えた合計5ケースで、解析モデルごとに、L/H、E_c/E_rの組合せで合計1,760ケース（＝352×5ケース）の解析を行い、それぞれについて、外部拘束係数を同定した。

表-6.6　ヤング係数比（E_c/E_r）による組合せ

No.	ヤング係数比 E_c / E_r	拘束体ヤング係数 (N/mm^2)
1	1	20235
2	5	4047
3	10	2024
4	15	1349
5	20	1012
6	25	809
7	30	675
8	35	578
9	40	506
10	45	450
11	50	405
12	75	270
13	100	202
14	150	135
15	200	101
16	300	67

表-6.7　L/Hによる組合せ

No.	壁長さ L (m)	L / H								
		スラブ			スラブ＋ 壁 1 層			スラブ＋ 壁 1、 2 層		
		(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
1	3	3.00	2.50	2.00	0.75	0.75	0.73	0.43	0.44	0.45
2	6	6.00	5.00	4.00	1.50	1.50	1.46	0.86	0.88	0.90
3	9	9.00	7.50	6.00	2.25	2.25	2.20	1.29	1.32	1.34
4	12	12.00	10.00	8.00	3.00	3.00	2.93	1.71	1.76	1.79
5	15	15.00	12.50	10.00	3.75	3.75	3.66	2.14	2.21	2.24
6	18	18.00	15.00	12.00	4.50	4.50	4.39	2.57	2.65	2.69
7	21	21.00	17.50	14.00	5.25	5.25	5.12	3.00	3.09	3.13
8	27	27.00	22.50	18.00	6.75	6.75	6.59	3.86	3.97	4.03
9	33	33.00	27.50	22.00	8.25	8.25	8.05	4.71	4.85	4.93
10	39	39.00	32.50	26.00	9.75	9.75	9.51	5.57	5.74	5.82
11	45	45.00	37.50	30.00	11.25	11.25	10.98	6.43	6.62	6.72
12	51	51.00	42.50	34.00	12.75	12.75	12.44	7.29	7.50	7.61
13	57	57.00	47.50	38.00	14.25	14.25	13.90	8.14	8.38	8.51
14	63	63.00	52.50	42.00	15.75	15.75	15.37	9.00	9.26	9.40
15	72	72.00	60.00	48.00	18.00	18.00	17.56	10.29	10.59	10.75
16	84	84.00	70.00	56.00	21.00	21.00	20.49	12.00	12.35	12.54
17	96	96.00	80.00	64.00	24.00	24.00	23.41	13.71	14.12	14.33
18	105	105.00	87.50	70.00	26.25	26.25	25.61	15.00	15.44	15.67
19	126	126.00	105.00	84.00	31.50	31.50	30.73	18.00	18.53	18.81
20	147	147.00	122.50	98.00	36.75	36.75	35.85	21.00	21.62	21.94
21	168	168.00	140.00	112.00	42.00	42.00	40.98	24.00	24.71	25.07
22	200	200.00	166.67	133.33	50.00	50.00	48.78	28.57	29.41	29.85

6.5.5　同定された外部拘束係数

同定された外部拘束係数を用いてCP法で計算した応力と3次元FEMで計算した応力の比較の一例を**図-6.6**に示す。この例は、打込み間隔が14日で、壁長さ（L）が39mであり、E_c / E_rが25、壁厚さが1.2mであり、有限要素メッシュは、**図-6.5**の(b)に相当する。**図-6.6**に示す応力履歴は、それぞれの部位の中央（**図-6.5**での赤い要素）の応力履歴を示しており、赤線が3次元FEMの結果、青線が曲げ拘束係数の符号反転前と反転後を区別しない6パラメータCP法の結果、黒線が符号反転前と反転後を区別する9パラメータCP法の結果である。

図-6.6によると、同定された外部拘束係数を用いたCP法による応力履歴は、3次元FEMの応力履歴と良く一致している。スラブ、壁ともに定常状態になっていない区間では若干のずれが生じているものの、定常状態になった区間では良く一致している。同定パラメータが6つのものと9つのものは応力履歴に大きな差は認められなかった。ここで示したのは一例であるが、平面保持の仮定が適用できる範囲においては、他の解析ケースにおいても同様の傾向が確認された。

なお、従来の曲げ拘束係数は、温度上昇時（符号反転前）と温度降下時（符号反転後）に分けて設定されていたが、本研究では両者を区別せず、一つの曲げ拘束係数として扱うこととした。その理由は以下のとおりである。

まず、両者を区別して同定した場合、パラメータ間の相関により複数の組合せが同程度の評価値を示し、同定値が一意に定まらない場合がある。また、従来の曲げ拘束係数についても、温度上昇時と温度降下時で同定値に大きな差は認められない。さらに、**図-6.6**に示すように、温度上昇時と温度降下時を区別した9パラメータの場合と、両者を共通化した6パラメータの場合で、CP法による応力履歴に大きな差は認められなかった。以上より、本研究では、同定の安定性およびパラメータ数の削減を考慮し、曲げ拘束係数を温度上昇時と温度降下時で共通化することとした。

次に、同定された外部拘束係数の傾向について整理する。打込み間隔が14日で壁厚が1.0m、1.2mおよび1.6mの場合の結果を**図-6.7**に、壁厚が1.2mで打込み間隔が7日、14日および21日の場合の結果を**図-6.8**に示す。軸拘束係数（R_N）および曲げ拘束係数（R_M）は、壁厚および打込み間隔によって値に若干の差が認められるものの、各部位における分布形状は概ね共通した傾向を示している。なお、スラブの曲げ拘束係数にはややばらつきが認められるが、それ以外の外部拘束係数は比較的滑らかな曲面状の分布を示している。

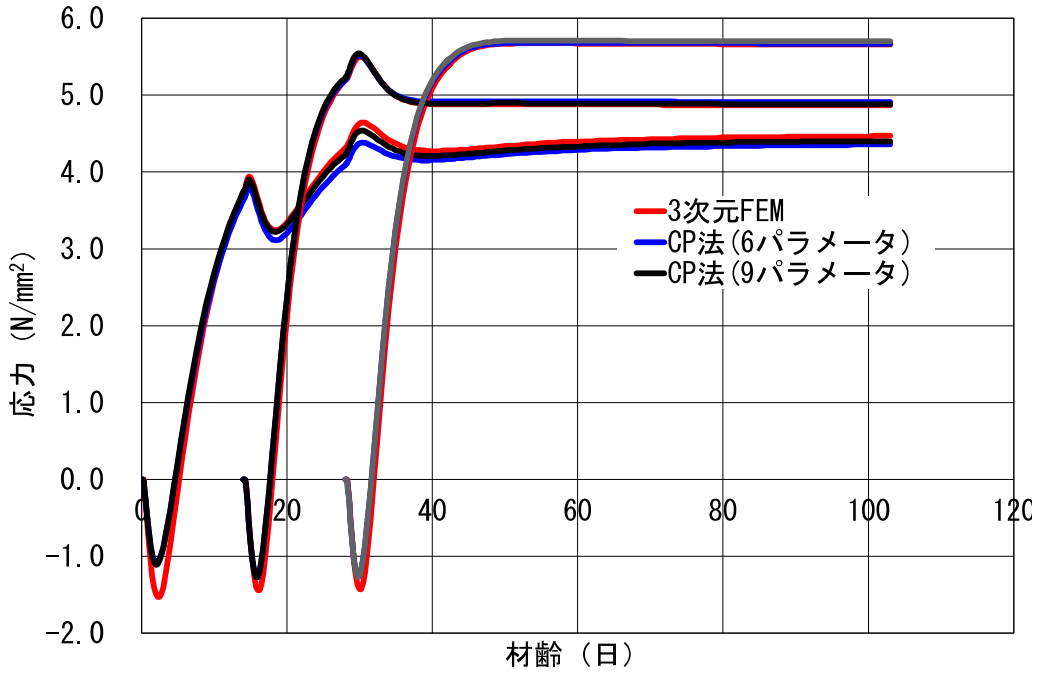


図-6.6　同定された外部拘束係数を用いた CP 法と FEM との比較

図-6.9には、打込み間隔14日、壁厚1.2mの場合のコンタ図を示す。軸拘束係数はスラブ、壁1層目、壁2層目といった部位によらず放射状になっており、曲げ拘束係数は、E_c/E_rに関わらずL/Hが小さい範囲で急に立ち上がる形状となっている。スラブの曲げ拘束係数は、ばらついているため、コンタ図は複雑な形になっている。

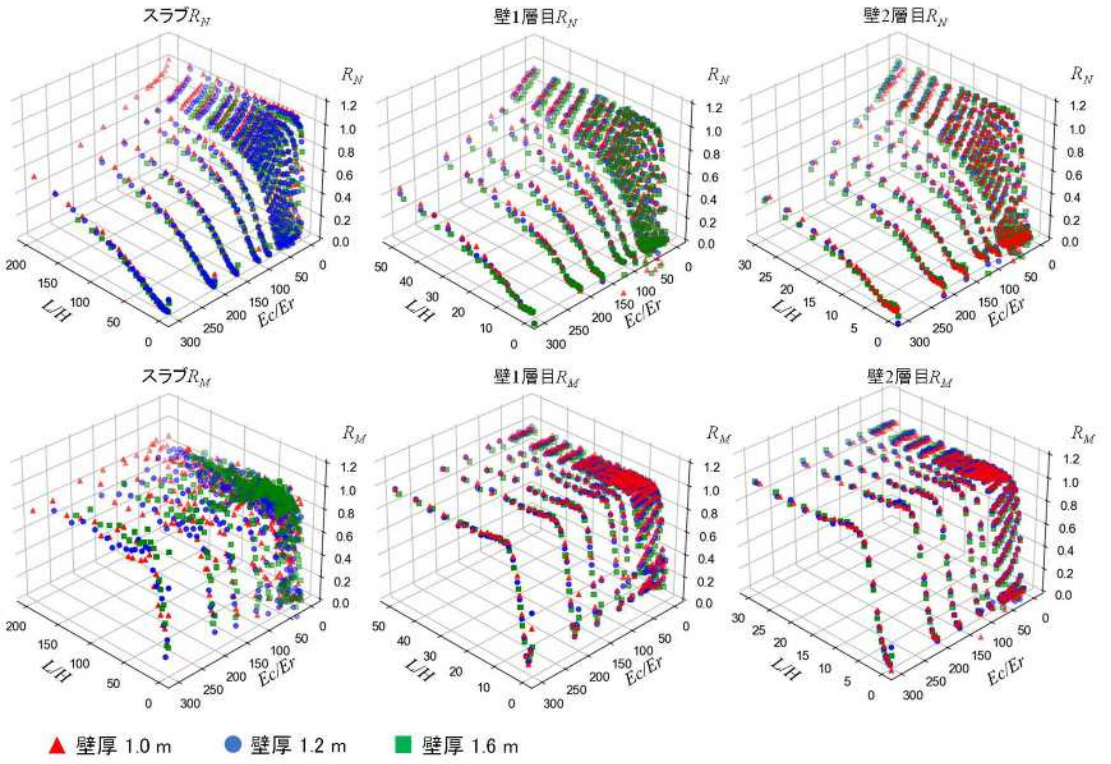


図-6.7　同定された外部拘束係数の一例（打込み間隔 14 日）

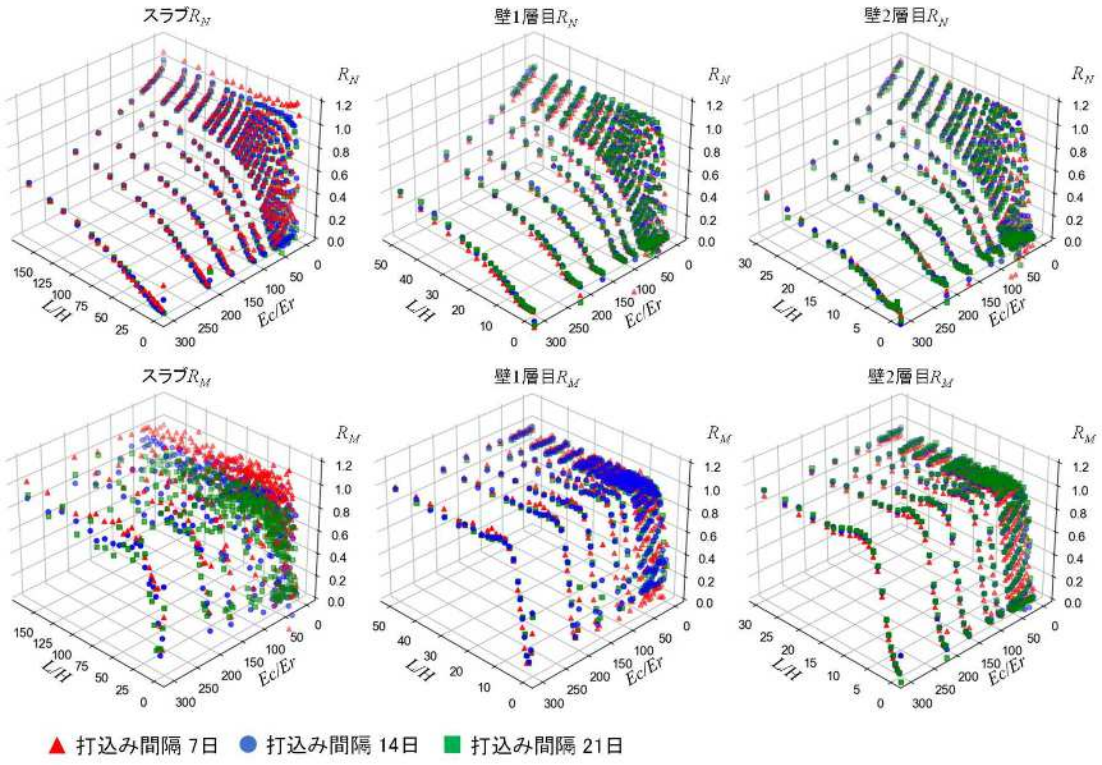


図-6.8　同定された外部拘束係数の一例（壁厚 1.2m）

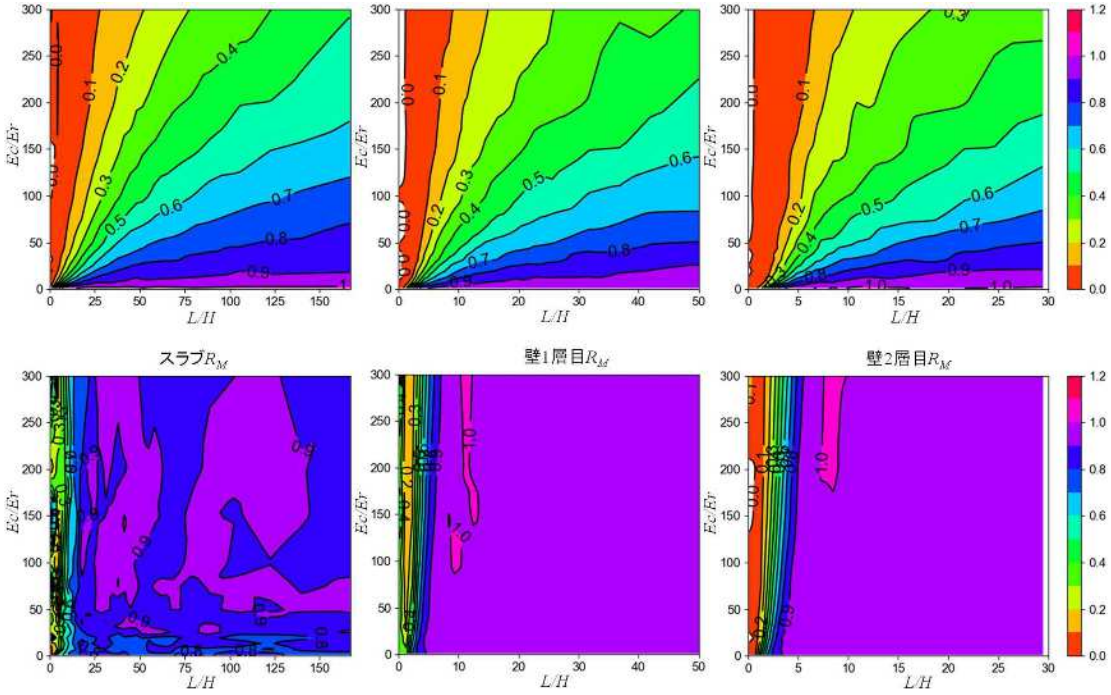


図-6.9　同定された外部拘束係数のコンタ図の一例（打込み間隔 14 日、壁厚 1.2m）

6.6　外部拘束係数の表現

6.6.1　表現の概要

2007年度制定の示方書では、外部拘束係数はL/Hを横軸とし、E_c/E_rを縦軸としたコンタ図の形で与えられていた。しかしながら、実務においてコンタ図からL/HとE_c/E_rに応じた外部拘束係数を逐次読み取る方法は、設定作業が煩雑となる。そのため、実際の使用では、L/HとE_c/E_rを入力とし、外部拘束係数を出力とする入出力関係で表現するのが望ましい。ここでは、外部拘束係数の算出方法について検討を行う。

6.6.2　関数形による表現

本研究では関数形での表現として、指数関数を用いる。**図-6.10**によるとE_c/E_r方向に輪切りにし、横軸にL/H、縦軸に外部拘束係数をとると**図-6.11**のようになる。**図-6.11**は、打込み間隔14日で、壁厚が1.2mでの場合であるが、軸拘束係数については、E_c/E_rが大きくなるほど下にさがる形状になり、曲げ拘束係数については、スラブでは下にさがる形状になるものの、壁1層目および壁2層目については、E_c/E_rによる形状の変化は小さい。いずれの形も指数関数で表現可能なため、本研究では、式(6.4)のような指数関数で近似を行う。

$$R = \alpha\left(1 - e^{-\beta(L/H-\delta)^{\gamma}}\right) \tag{6.4}$$

ここで、R は外部拘束係数、α、β、γ、δ は近似係数である。近似係数、α、β、γ、δ は、E_c/E_r によって異なるため、E_c/E_r の関数となる。すなわち、以下のような関数形となる。

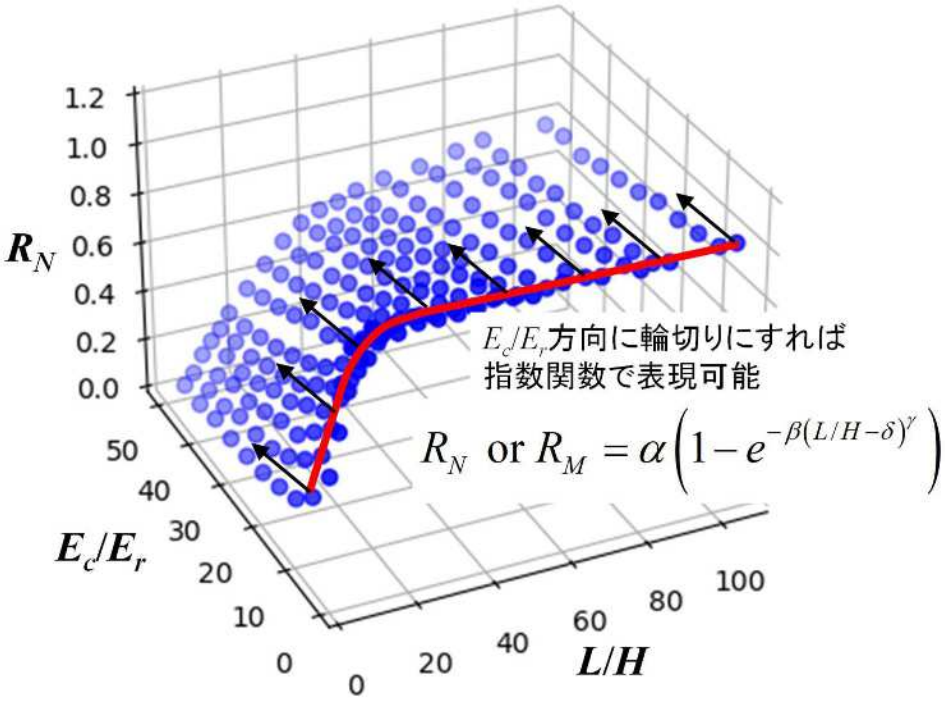


図-6.10　外部拘束係数の指数関数による表現

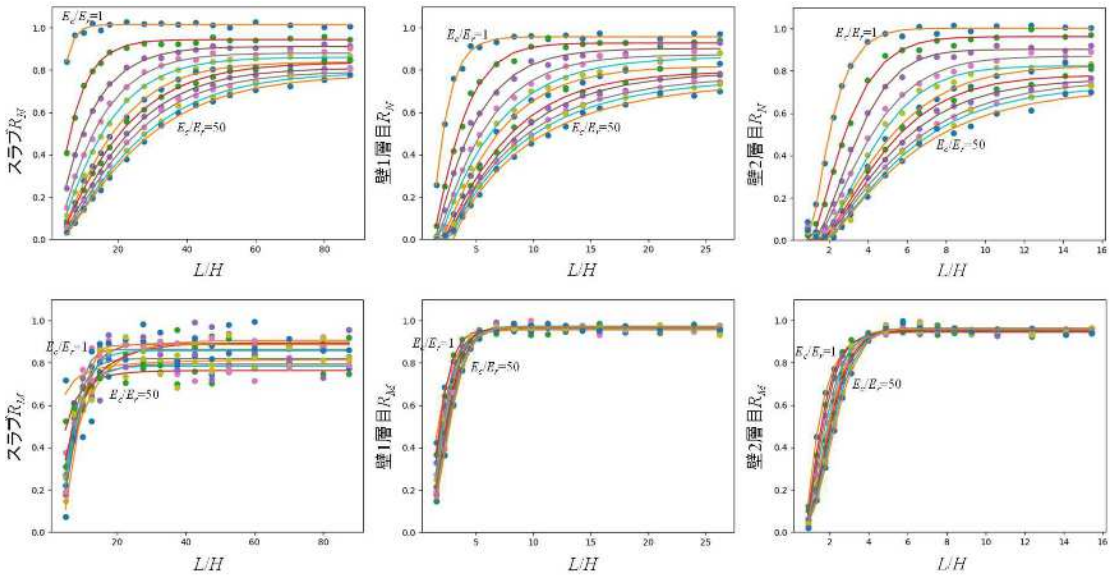


図-6.11　*L/H*が変化した場合の外部拘束係数（壁厚 1.2m、打込み間隔 14 日）

$$\alpha = f\left(E_c/E_r\right) \tag{6.5}$$

$$\beta = f\left(E_c/E_r\right) \tag{6.6}$$

$$\gamma = f\left(E_c/E_r\right) \tag{6.7}$$

$$\delta = f\left(E_c/E_r\right) \tag{6.8}$$

α、β、γ、δは、E_c/E_rの関数になるが、対象とする外部拘束係数により、その関数形は異なることから、対象とする外部拘束係数ごとに関数形を求める必要がある。関数形については、事前にそれぞれのα、β、γ、δをE_c/E_rに対してプロットし、一次関数、二次関数およびべき乗関数等を候補として近似を行い、近似精度を比較した上でそれぞれの関数形を決定した。

表-6.8 には、外部拘束係数ごとに決定した α、β、γ、δ の関数形を示す。基本的には 2 次あるいは 1 次関数となるが、軸拘束係数の β については、べき乗関数となった。さらに、この関数形の係数 a、b、c を PSO により求めた。なお、δ については、式(6.4)からわかるように関数形の L/H の立ち上がり位置であり、E_c/E_r が大きくなるにつれて右側へ移動する傾向があるため、1 次関数としている。

求められた関数形の係数を**表-6.9** に示し、関数により求められた外部拘束係数のコンタ図を**図-6.12** に示す。また、参考のため従来の外部拘束係数のコンタ図を**図-6.13** に示す。従来の外部拘束係数のコンタ図は、滑らかでない部分や途中で切れている（値のない白色の部分）が見られるが、これは図化の過程で示方書の図から値を読み取って作図したためであり、実際のものは滑らかになっている。また、曲げ拘束係数については、温度降下時における符号反転後のもの（R_{M2}）のみを掲載しており、1.2 を越える値があるため、コンタ図の範囲も 1.6 までとしている。

表-6.8　外部拘束係数の関数形

	外部拘束係数	α 式(6.5)の 関数形	β 式(6.6)の 関数形	γ 式(6.7)の 関数形	δ 式(6.8)の 関数形
スラブ	R_N	ax^2+bx+c	ax^b	ax^2+bx+c	$ax+b$
	R_M		ax^2+bx+c		
壁 1 層目	R_N		ax^b		
	R_M		ax^2+bx+c		
壁 2 層目	R_N		ax^b		
	R_M		ax^2+bx+c		

※ x は E_c/E_r に相当する

表-6.9　それぞれの関数における係数

		A			β			γ			δ	
		a	B	c	a	b	c	a	b	c	A	b
スラブ	R_N	0.000044	-0.006085	0.991637	0.657900	-0.799655		-0.000050	0.005833	0.919794	0.064634	1.268006
	R_M		0.002290	0.783509	0.000096	-0.007094	0.274698	-0.000161	0.008434	1.027375	0.025354	1.644254
壁1層目	R_N	0.000025	-0.005490	0.949483	0.756037	-0.500169		-0.000001	0.000382	1.064249	0.027572	1.089072
	R_M		0.000270	0.959660	0.000106	-0.011588	0.649107	-0.000174	0.014925	1.169077	0.007599	0.598670
壁2層目	R_N	0.000062	-0.009823	1.019127	0.677626	-0.423213		-0.000004	0.001076	1.252327	0.019329	0.966629
	R_M		0.000381	0.955900	0.000089	-0.013706	1.029897	-0.000071	0.012350	0.903226	0.004624	0.789220

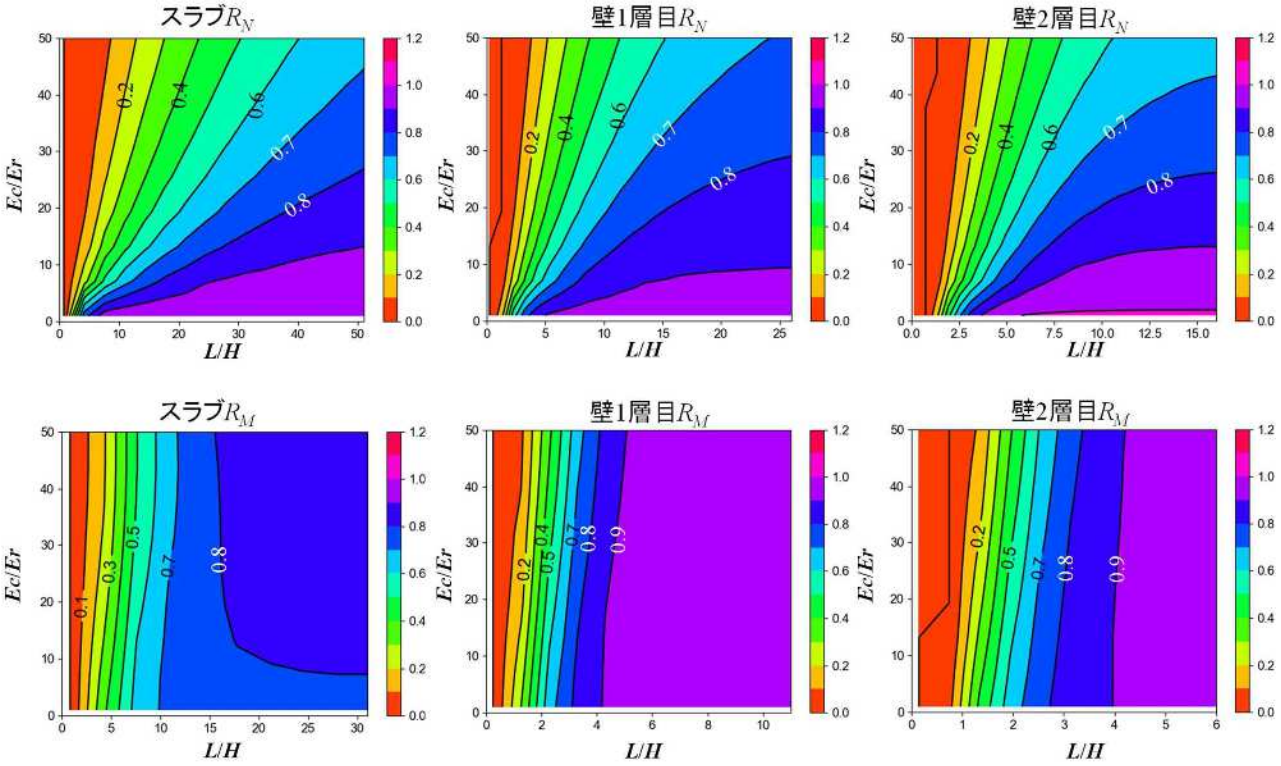


図-6.12　関数により計算された外部拘束係数のコンタ図

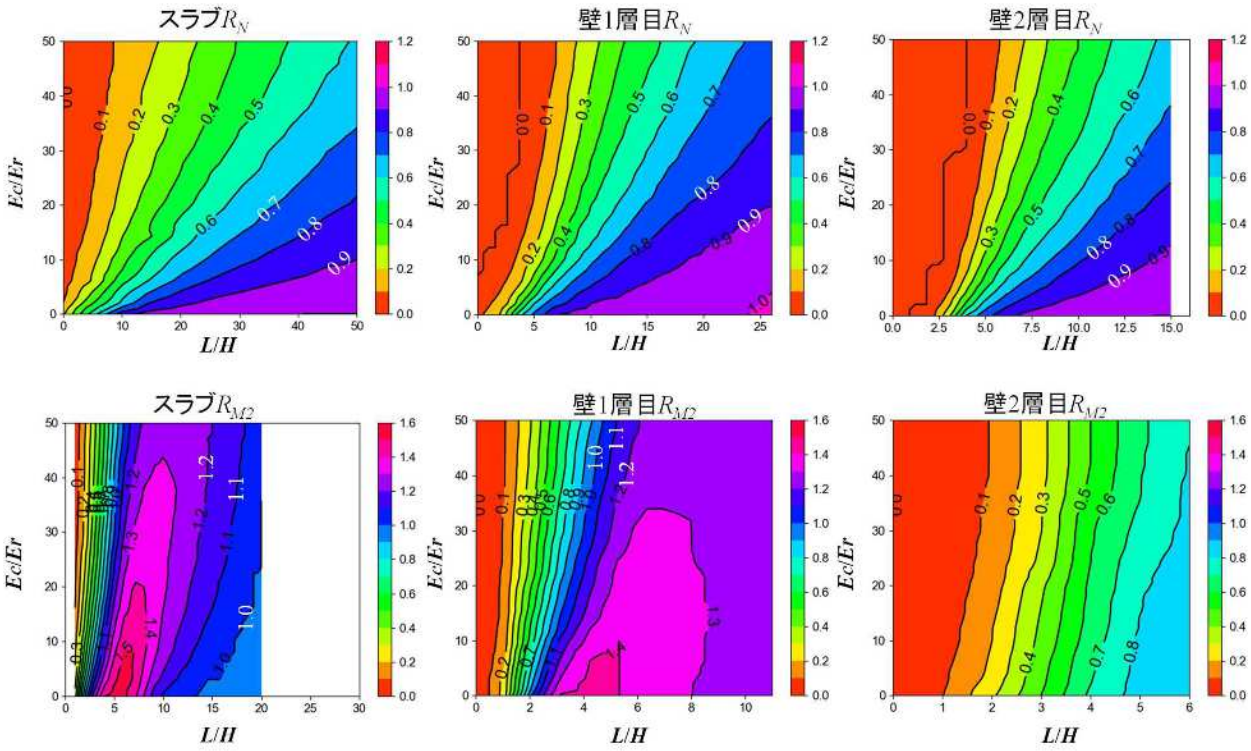


図-6.13　従来の外部拘束係数のコンタ図

適用する示方書が異なることや、曲げ拘束係数については、温度上昇時（符号反転前）と温度降下時（符号反転後）を分けていないため厳密な比較は困難である。しかし、あえて両者の外部拘束係数を比較すると、形状には顕著な違いは見られないものの、数値には若干の差異が認められる。

次に、打込み間隔が14日で壁厚が1.2mの場合について、同定された外部拘束係数と式(6.4)による関数によって表現された外部拘束係数の比較を図-6.14に示す。図中の青丸は、PSOにより同定された外部拘束係数であり、赤三角は、式(6.4)の関数によって表現された外部拘束係数である。関数によって比較的良く近似されている。スラブのR_Mでは、同定されたものはバラツキから凸凹が生じているが、関数近似したものは、比較的きれいな曲面となっている。

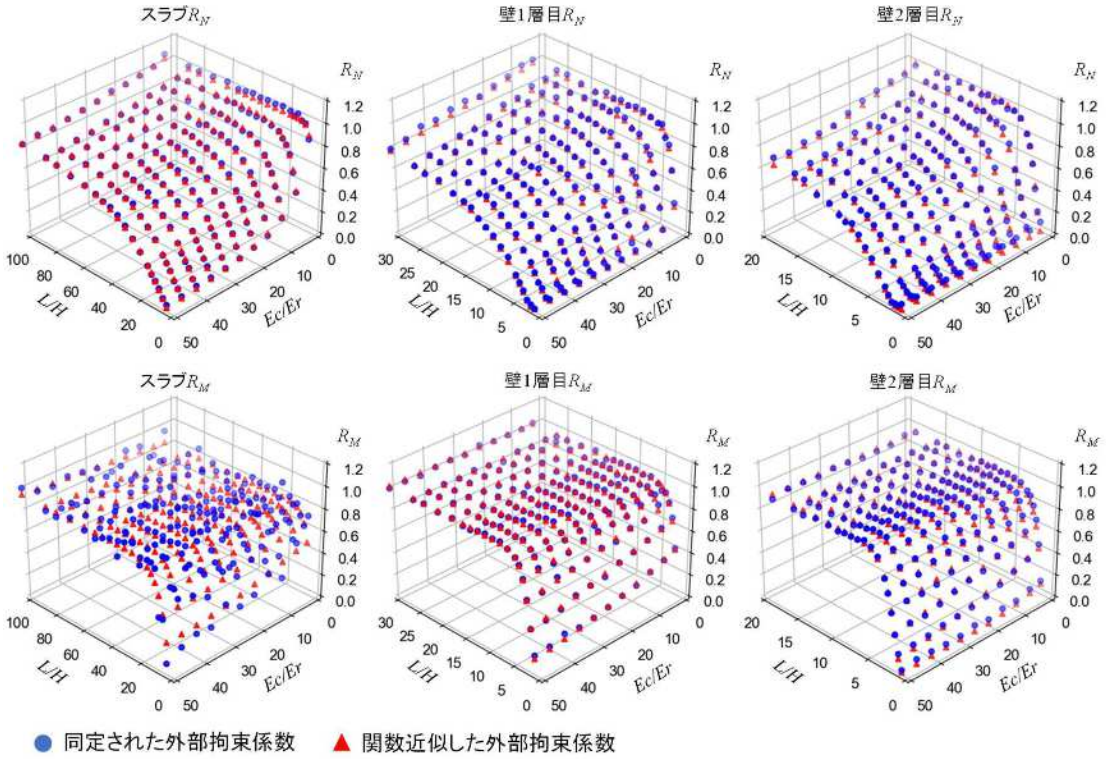


図-6.14　同定された外部拘束係数と関数近似された外部拘束係数の比較
（壁厚 1.2m, 打込み間隔 14 日）

6.7　3次元FEMと新たな外部拘束係数を用いたCP法計算結果の比較

応力および温度ひび割れ指数の履歴について、関数近似された外部拘束係数を用いた CP 法（以降、単に CP 法と表記する）の計算結果と 3 次元 FEM の計算結果の比較を行う。なお、スラブ、壁 1 層目、壁 2 層目の履歴算定位置はそれぞれの部位の中央部であり、**図-6.5** に示す赤い要素の箇所である。

壁厚が 1.2m、打込み間隔が 14 日の場合で、壁長さ L が 6m の場合の応力履歴を**図-6.15** に、壁長さ L が 12m の場合の応力履歴を**図-6.16** に示す。さらに、壁長さ L が 12m の場合の温度ひび割れ指数の履歴を**図-6.17** に示す。図中の赤線は 3 次元 FEM の結果、青線は関数近似した外部拘束係数を用いた CP 法の結果、黒線は従来の外部拘束係数を用いた CP 法の結果を表している。

図-6.15 および**図-6.16** によると 3 次元 FEM の結果と関数近似した CP 法の結果は、圧縮側（マイナスの応力）のピークは、スラブ、壁 1 層目、壁 2 層目ともに、3 次元 FEM の結果の方が絶対値が大きくなっており、圧縮側では 3 次元 FEM 解析結果に比べてピーク応力の絶対値をやや過小評価する傾向が認められる。一方、温度ひび割れ評価において重要となる引張側（プラスの応力）では、比較的良好な一致が得られている。特に、壁 1 層目、壁 2 層目の応力履歴はほぼ重なっている。従来の外部拘束係数を用いた CP 法の結果は、3 次元 FEM の結果に比べ、応力が小さくなる傾向があり、特に壁長さ L=12m の壁 2 層目ではその傾向が大きい。**図-6.17** に壁長さ L が 12m の場合の温度ひび割れ指数の履歴を示しているが、3 次元 FEM の結果と関数近似した CP 法の結果は良く一致しており、スラブを除いてはほぼ重なっている。従来の外部拘束係数を用いた CP 法の結果は、3 次元 FEM の結果と比べ、温度ひび割れ指数を大きく見積もっており危険側の評価となっている。

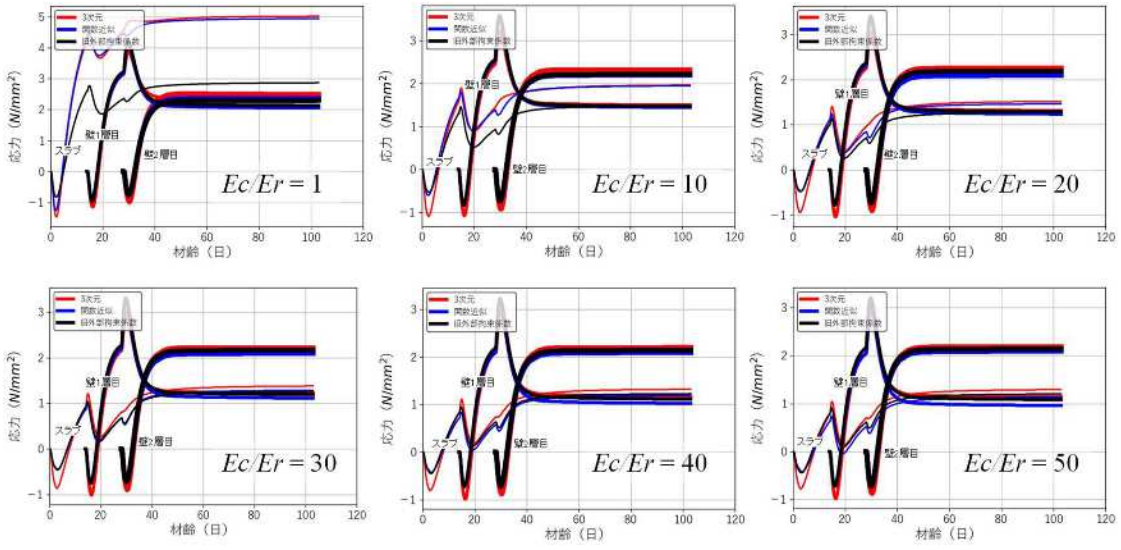


図-6.15　3 次元 FEM，従来の外部拘束係数と関数近似した外部拘束係数を用いた CP 法の解析結果の比較（壁厚 1.2m，壁長さ L=6m，打込み間隔 14 日）

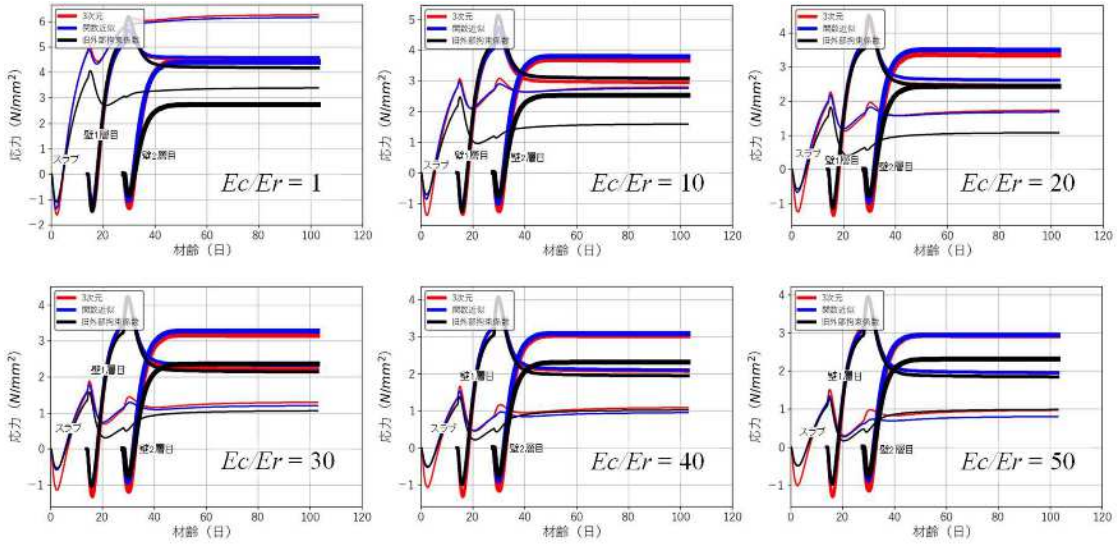


図-6.16　3 次元 FEM，従来の外部拘束係数と関数近似した外部拘束係数を用いた CP 法の計算結果の比較（壁厚 1.2m，壁長さ L=12m，打込み間隔 14 日）

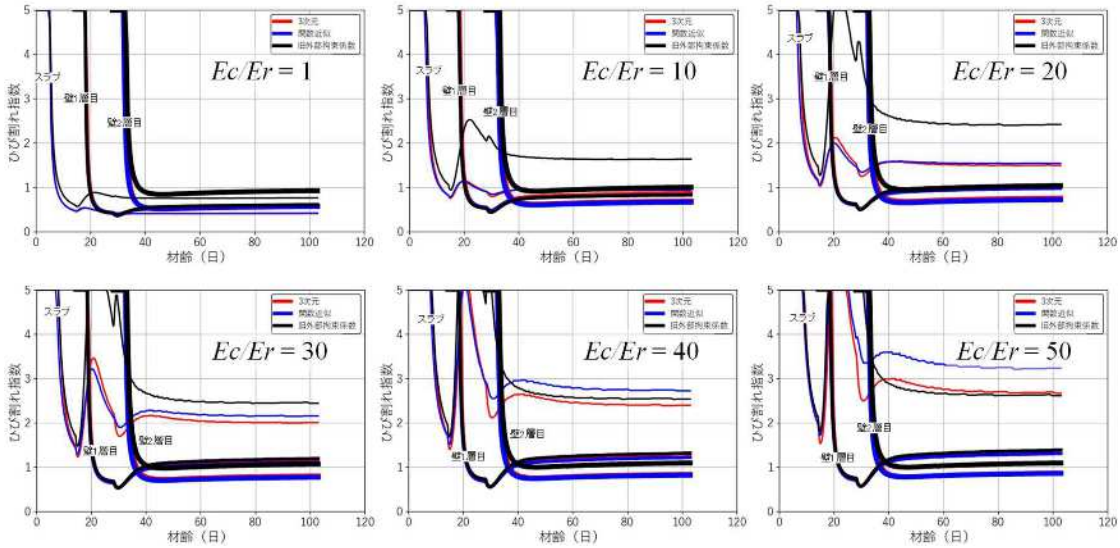


図-6.17　3 次元 FEM，従来の外部拘束係数と関数近似した外部拘束係数を用いた温度ひび割れ指数の比較（壁厚 1.2m，壁長さ L=12m，打込み間隔 14 日）

図-6.18 に壁厚が 1.2m で、打込み間隔が 14 日、壁長さがそれぞれ 6m、12m、21m、 39m の場合の 3 次元 FEM と関数近似した CP 法の引張応力の差の最大値を示す。この差は、関数近似した CP 法の結果から 3 次元 FEM の結果を引いたもの（マイナスの値が危険側を示す）で、時刻ごとに変わる引張応力の差の最大値を取り、E_c/E_r で整理したものである。この図からも、E_c/E_r が 50 前後までは、その差が±0.2N/mm^2 程度に抑えられている。また、スラブについては、3 次元 FEM の結果より関数近似した CP 法の結果が小さくなる傾向があり、壁については関数近似した CP 法の結果が大きくなる傾向がある。

同様に、**図-6.19** に壁厚が 1.2m で、打込み間隔が 14 日、壁長さがそれぞれ 6m、12m、21m、39m の場合の 3 次元 FEM と関数近似した CP 法の最小温度ひび割れ指数の差を示

す。この差は、関数近似した CP 法の結果から 3 次元 FEM の結果を引いたもの（プラスの値が危険側を示す）で、最小温度ひび割れ指数の差を、E_c/E_r で整理したものである。本検討範囲では、スラブを除き、その差は概ね 0.1 以内であった。このため、温度ひび割れ指数から 0.1 を減ずることで、3 次元 FEM 解析結果に対して概ね安全側の評価とすることが可能である。

一部で、スラブの温度ひび割れ指数が危険側になるのは、**図-6.15**および**図-6.16**からわかるように、打継時のピーク応力をCP法では追えないためと考えられる。

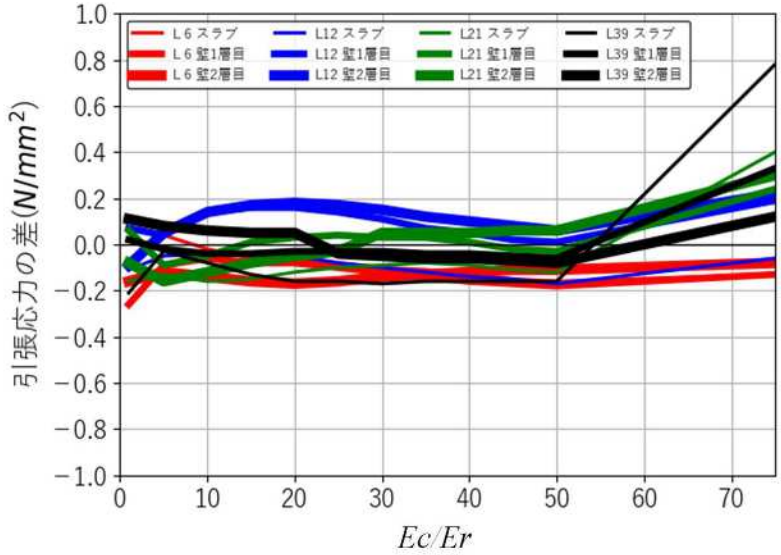


図-6.18　3次元FEMと関数近似したCP法との引張応力の差
（壁厚1.2m，打込み間隔14日）

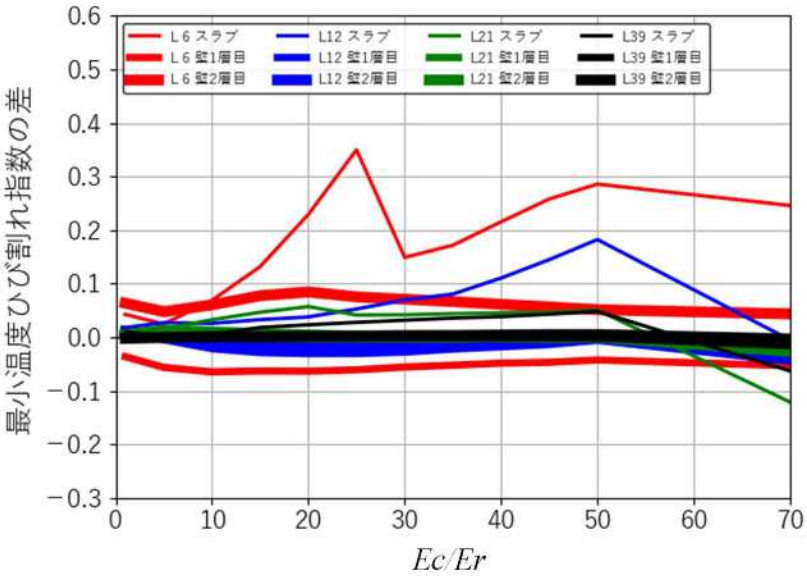


図-6.19　3次元FEMと関数近似したCP法とのひび割れ指数の差
（壁厚1.2m，打込み間隔14日）

6.8　第6章のまとめ

本章では、マスコンクリートの温度応力解析に用いる外部拘束係数を対象として、3 次元 FEM 解析結果を基準解とし、メタヒューリスティクス最適化を用いた逆解析によって外部拘束係数を合理的に同定する手法を構築した。さらに、同定された外部拘束係数について、構造条件および剛性条件との関係を整理し、CP 法で利用可能な関数形として表現するとともに、3 次元 FEM 解析結果との比較によりその適用性を検証した。

本章で得られた成果および知見を以下にまとめる。

① 温度応力解析に用いる外部拘束係数を同定するための逆解析フレームワークを構築した。

第4章および第5章で構築した共通逆解析フレームワークを応力場へ展開し、CP法の外部拘束係数を設計変数、3次元FEM解析による応力履歴を基準データとして、両者の誤差を最小化する逆解析問題として定式化した。これにより、従来の断面力や完全拘束状態を用いた算定手順によらず、3次元FEM解析結果から直接、外部拘束係数を同定する手法を構築した。

② 現行の設計条件に対応した外部拘束係数の同定方法を示した。

従来の外部拘束係数は、過去の材料モデルおよび解析条件に基づいて設定されており、自己収縮や温度履歴を考慮した強度発現など、現行の設計条件との整合性に課題があった。また、材齢とともに変化する拘束係数を一定値として設定する際に主観が介在するという課題も存在した。本研究では、現行示方書に準拠した材料モデルおよび自己収縮を考慮した3次元FEM解析結果を基準とすることにより、客観性および再現性を有する外部拘束係数の同定を可能とした。

③ 外部拘束係数のパラメータ数を9から6へ削減しても、応力履歴の再現性を維持できることを示した。

従来の考え方では、曲げ拘束係数を温度上昇時と温度下降時に分け、軸拘束係数と合わせて9パラメータとして扱っていた。これに対して、本研究では温度上昇時と温度下降時の曲げ拘束係数を共通化した6パラメータの場合についても逆解析を実施した。その結果、6パラメータと9パラメータによるCP法の応力履歴には大きな差が認められず、パラメータ数を削減しても3次元FEM解析結果に対する再現性を維持できることを確認した。

④ 外部拘束係数とL/HおよびE_c/E_rの関係を整理し、実務利用可能な関数形として表現した。

同定された外部拘束係数を整理した結果、軸拘束係数と曲げ拘束係数では分布形状が異なるものの、各部位における基本的な分布傾向には共通性が認められた。そこで、外部拘束係数をL/H に対する4パラメータの指数関数として表現し、その各パラメータをE_c/E_rの関数として定式化することで、従来のコンタ図を用いることなく、L/H およびE_c/E_rから外部拘束係数を直接算定できる近似式を提案した。

⑤ 提案した外部拘束係数を用いることで、CP法により3次元FEMに近い温度応力およ

び温度ひび割れ指数を再現できることを確認した。
提案した近似式から算定した外部拘束係数を用いてCP法による温度応力解析を行い、3次元FEM解析結果と比較した。その結果、特に温度ひび割れ評価に重要となる引張応力について良好な一致が得られ、E_c/E_rが50程度までの範囲では、引張応力の差は概ね±0.2 N/mm²以内、温度ひび割れ指数の差は概ね±0.1以内となった。また、従来の外部拘束係数を用いた場合と比較して、3次元FEM解析結果に対する再現性が改善されることを確認した。

以上より、本章では、現行の解析条件に基づく 3 次元 FEM 解析結果を利用して、CP 法に必要な外部拘束係数を客観的かつ再現性よく同定する逆解析手法を構築した。さらに、同定された外部拘束係数を L/H および E_c/E_r に基づく近似式として整理することで、3 次元 FEM 解析を毎回実施することなく、CP 法によって温度応力および温度ひび割れを簡便に評価するための外部拘束係数設定方法を示した。

【参考文献】

1) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］, 2023.
2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025，2025.
3) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書　～外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案～，1985.
4) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書　～温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案～,1992.
5) 石川靖晃，木全博聖，石川雅美，田邊忠顕：表面ひび割れ深さの進展を予測する CP ひび割れ幅法の開発，コンクリート工学年次論文集コンクリート，Vol.24，No.1，2002.
6) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートソフト作成委員会報告書　～コンクリートの初期ひび割れ及びひび割れ進展の解析方法～，2003.
7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書［設計編］, 2008.
8) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書　～外部拘束係数の見直しと CP 法の適用範囲拡大～，1998.
9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.
10) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.：Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11) Kennedy, J. and Eberhart, R.：Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
12) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.107-118，2006.2.

第 7 章

結　　論

第 7 章　結　　論

7.1　本研究のまとめ

本研究では、マスコンクリートにおける温度ひび割れ解析において課題となっている入力パラメータの不確実性に着目し、温度解析、湿気移動解析および応力解析に必要な入力値を対象として、逆解析により合理的に同定する手法の構築を目的とした。特に、複数の物理場にまたがる入力パラメータを統一的に扱うため、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づく同定フレームワークを提案した。また、複数のメタヒューリスティクス最適化手法について探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討した。その結果に基づいて粒子群最適化（PSO）を基本手法として採用し、これを用いて同定フレームワークの有効性を検証した。

本研究では、第 1 章で示した研究目的に対応して、以下の 4 項目を主要な成果として得た。

(1) 温度場・湿度場・応力場を対象とした統一的な入力パラメータ同定フレームワークの構築

既往研究では、温度解析パラメータや湿気移動パラメータなどを個別に同定する研究が多く、複数の物理場にまたがる入力パラメータを統一的に扱う枠組みは十分に確立されていなかった。本研究では、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づき、各物理場の入力パラメータを同一のプラットフォーム上で段階的に同定するフレームワークを構築した。

(2) メタヒューリスティクスを用いた逆解析手法の構築

ベンチマーク関数を用いて複数のメタヒューリスティクス最適化手法の探索性能および収束特性を比較するとともに、FEM 逆解析への適用性を検討した。その結果に基づいて PSO を基本手法として採用し、PSO と FEM 解析を組み合わせた逆解析システムを構築した。

(3) 解析精度向上への有効性の検証

温度場、湿度場および応力場を対象として、逆解析により同定された入力パラメータを適用した結果、計測値または基準とした解析結果に対する再現性が向上することを確認した。これにより、提案する入力パラメータ同定手法が解析結果の再現性向上に有効であり、

解析精度の向上に寄与することを示した。

(4) 実務適用を考慮した入力値設定手法の提案

現場で取得可能な温度計測データや湿度計測データを活用することにより、文献値や経験的な入力値設定のみに依存せず、対象構造物の条件を反映した入力値を合理的に設定する方法を示した。これにより、解析入力値設定の合理化および実務への適用性向上に寄与する可能性を示した。

これらの成果を温度場、湿度場および応力場の各検討結果に基づいて具体的に示す。

まず、温度場に関する検討では、断熱温度上昇特性および熱伝達係数を対象として、計測温度履歴の再現性に基づく逆解析を実施した。解析次元、観測点数、同定対象パラメータおよび最適化手法の違いが同定結果に及ぼす影響を検討するとともに、逆解析によって同定された断熱温度上昇特性を別途実施された断熱温度上昇試験結果と比較し、その妥当性を確認した。また、PSO を用いた逆解析により、断熱温度上昇特性と熱伝達係数を同時に同定できることを示した。一方、これらの入力パラメータ間には相関が存在し、異なるパラメータの組合せによっても同程度の温度履歴を再現できる場合があることから、同定結果の評価においては、温度履歴の再現性だけでなく、同定された入力パラメータの物理的妥当性を確認することが重要であることを示した。

次に、湿度場に関する検討では、計測された相対湿度の経時変化を再現するように、透湿率、湿気容量および蒸発率を逆解析により同定した。これらの湿気移動特性値を相対湿度に依存する関数として同定するとともに、パラメータ間の相関に起因して、単一の計測事例のみでは異なるパラメータの組合せによって同程度の相対湿度履歴を再現できる非一意性が存在することを明らかにした。さらに、異なる湿度履歴を有する複数の計測事例を用いることで、この非一意性の影響を低減し、複数条件に対して適用可能な湿気移動特性値を導出する方法を示した。

続いて、応力場に関する検討では、外部拘束係数を主な対象として同定を行い、温度応力およびひび割れ指数の再現性に基づいて評価した。外部拘束係数は温度応力の発生量に大きな影響を与える重要なパラメータであり、その設定方法の合理化が課題となっている。本研究により、3 次元 FEM 解析結果に基づいて外部拘束係数を同定することが可能であることを示し、温度応力およびひび割れ指数の再現性向上に有効であることを示した。

また、同定された外部拘束係数を用いて拘束条件を再構築することにより、壁状構造物においては CP 法を用いた簡易解析への適用を可能とし、実務における温度ひび割れ照査の効率化に寄与できることを示した。

なお、梁理論を前提とする CP 法の適用が困難な複雑形状構造物については、従来どおり 3 次元 FEM による検討が必要である。

以上の検討を通じて、本研究では、温度場、湿度場および応力場における入力パラメータを対象として、メタヒューリスティクス最適化と FEM 解析を組み合わせた共通の逆解析フレームワークを構築した。

本研究の新規性は、マスコンクリートの温度ひび割れ解析において、従来個別に扱われることが多かった温度場、湿度場および応力場の入力パラメータ同定を、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づき、共通の逆解析フレームワーク上で段階的に扱う体系として構築した点にある。従来研究では、各物理場における入力パラメータの設定や同定は個別に検討されることが多く、複数の物理場にまたがる入力パラメータを共通の枠組みで取り扱う方法は十分に確立されていなかった。本研究では、設計変数および評価対象を各物理場に応じて変更することで、同一の逆解析フレームワークを温度場、湿度場および応力場に適用し、各物理場の特性に応じた入力パラメータの同定を可能とした。

また、この共通フレームワークを各物理場へ適用する過程において、温度場では実測温度履歴から断熱温度上昇特性等を同定し、解析条件および観測条件が同定結果に及ぼす影響を明らかにした。湿度場では、透湿率、湿気容量および蒸発率を相対湿度に依存する関数として同定するとともに、パラメータ間の相関に起因する非一意性を明らかにし、異なる湿度履歴を有する複数の計測事例を用いる同定方法を示した。さらに、応力場では、3 次元 FEM 解析結果を基準として外部拘束係数を逆解析により直接同定し、同定された外部拘束係数を L/H および E_c/E_r に基づく関数として表現することで、CP 法に適用可能な入力値設定方法を提示した。

さらに、本研究で構築した逆解析フレームワークは、勾配情報を必要としない PSO を用いることにより、多変数かつ非線形な入力パラメータ同定問題に適用可能であり、FEM 解析を内包する各物理場の同定問題を共通の枠組みで取り扱うことを可能とした。

以上より、本研究は、温度場、湿度場および応力場の入力パラメータ同定を個別の問題として扱うのではなく、それらを物理的因果関係に基づいて段階的かつ統一的に取り扱う逆解析体系を構築した点に特徴がある。

また、本研究の成果は実務的な観点からも有用である。実測データを活用して対象構造物の条件を反映した解析入力パラメータを同定することにより、文献値や経験的な設定のみに依存しない合理的な入力値設定が可能となる。さらに、応力場では、3 次元 FEM 解析結果に基づいて同定した外部拘束係数を関数化して CP 法に適用することで、簡易な解析による温度ひび割れ照査への展開を可能とした。これらにより、解析入力値設定の合理化、解析結果の再現性向上および実務における温度ひび割れ解析の効率化に寄与するものと考えられる。

以上のように、本研究では、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータ設定の課題に対して、温度場、湿度場および応力場を対象とした統一的な逆解析の枠組みを提示した。

一方、本研究における各物理場の検証は、限られた供試体および計測事例を対象として実施したものであり、得られた同定値やその適用性が、異なる材料、配合、構造形式、施工条件および境界条件に対してそのまま適用できることを示したものではない。しかし、本研究で構築した逆解析フレームワークは、特定の同定値そのものではなく、実測データ等を基準として対象ごとの解析入力パラメータを同定するための共通の枠組みとして構築したものである。

したがって、今後、異なる材料、配合、構造条件および施工条件を対象とした計測データを蓄積し、本フレームワークを適用することにより、その適用範囲を検証するとともに、入力パラメータ同定に関する知見を蓄積していくことが重要である。これにより、本研究で構築した逆解析フレームワークの適用範囲の拡大および汎用性の向上が期待される。

7.2　今後の課題

本研究により、逆解析に基づく入力パラメータ同定手法の有効性が示されたが、さらなる精度向上および実務適用の拡大に向けて、以下の課題が挙げられる。

まず、モデルの高度化に関する課題である。本研究では、温度解析、湿気移動解析および応力解析を段階的に扱うことにより、物理的因果関係に基づく同定を行ったが、温度と湿度の相互作用をより厳密に考慮した連成解析の導入が今後の課題である。また、クリープ特性や収縮特性などの材料モデルについても、より詳細なモデルを導入することにより、応力解析の精度向上が期待される。

次に、計測計画に関する課題である。逆解析の精度は、入力として用いる観測データの質および量に大きく依存する。したがって、どの位置にどの程度の観測点を配置すれば効率的かつ高精度な同定が可能となるかについて、観測点配置および必要点数の最適化に関する検討が必要である。

さらに、計算効率の向上も重要な課題である。本研究で用いた手法は、有限要素解析を繰り返し実行する必要があるため、計算コストが大きくなる傾向にある。今後は、並列計算の導入や、機械学習を用いた代替モデル（サロゲートモデル）の構築などにより、計算時間の短縮を図ることが求められる。

また、本研究で提案した手法の汎用化も重要な課題である。本研究は主としてマスコンクリートを対象としたものであるが、他の構造形式や材料に対しても適用可能な手法へと拡張することが期待される。さらに、実務において適用するためには、解析手順や入力データの整備方法を含めた標準的な適用フローの構築が必要である。

以上の課題に取り組むことにより、本研究で提案した入力パラメータ同定手法のさらなる高度化および実用化が期待される。

謝　　辞

本研究をまとめるにあたり、多くの皆様より多大なるご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

まず、本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導を賜りました山口大学大学院創成科学研究科　中村秀明教授に、心より深く感謝申し上げます。

私は、大学院修士課程修了後、技術経営分野における研究を継続するため博士課程へ進学しましたが、仕事との両立や転勤などの影響により研究を十分に進めることができず、単位取得退学となりました。その後、中村先生と出会う機会に恵まれ、博士号取得への意欲があるのであれば、もう一度研究に取り組もうと温かくお声を掛けていただきました。このお言葉が、再び博士号取得を目指す大きな原動力となりました。

中村先生との出会いを契機として、それまでの技術経営分野から新たにコンクリート工学分野の研究に取り組むこととなりました。私は機械工学を専門とし、業務において有限要素法（FEM）を用いた解析に携わってきましたが、コンクリート工学については十分な知識を有しておりませんでした。そのような私に対し、中村先生には、コンクリート工学の基礎から、これまで培ってきたFEM解析の経験を生かした研究の進め方、解析方法、学術論文の執筆に至るまで、懇切丁寧にご指導いただきました。

2021年末からは、毎週夜遅くまで個別にご指導いただき、研究の方向性や解析方法について幾度となく議論と検討を重ねました。その積み重ねによって研究の見通しを得ることができ、2023年4月に博士後期課程へ再入学し、その後、土木学会ならびに日本コンクリート工学会への論文投稿を重ねながら、本研究を博士論文としてまとめることができました。一度は博士課程を離れた私が再び研究に取り組み、本論文を完成させることができたのは、中村先生の長年にわたる熱心なご指導と温かい励ましがあったからにほかなりません。先生から学ばせていただいた研究に対する姿勢や、最後まで諦めることなく挑戦し続けることの大切さは、私にとってかけがえのない財産です。ここに改めて深甚なる感謝の意を表します。

また、副査をお引き受けいただきました山口大学大学院創成科学研究科　吉武 勇教授、麻生稔彦教授、河村 圭教授、ならびに山田悠二講師には、本論文の審査を通じて、研究内容および論文構成について貴重なご助言とご指摘を賜りました。さらに、博士論文の構成や内容をはじめ、発表資料の構成や表現方法に至るまで、多くの有益なご意見をいただきました。先生方からいただいたご指摘やご助言を通じて、本研究を改めて見つめ直し、研究成果をより明確かつ論理的に整理することができました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、株式会社宇部情報システムの皆様からも多大なるご理解とご支援をいただきました。特に、新規ビジネス推進部 部長 町田圭吾氏には、博士号取得に向けた研究活動に深いご理解をいただき、研究時間の確保や学会活動への参加など、多くの面でご配慮を賜りました。仕事と研究を両立しながら研究活動を継続できる環境を整えていただきましたことに、深く感謝申し上げます。

さらに、新規ビジネス推進部 久保田伸治氏には、論文の校閲をはじめ、研究内容についても貴重なご助言をいただきました。ここに心より御礼申し上げます。また、研究活動にご理解をいただき、日頃より励ましと温かいご支援をいただきました職場の皆様に、心より感謝申し上げます。

最後に、長年にわたる学業と研究生活を支え続けてくれた家族に、心から感謝します。社会人となり家庭を持った後に大学へ編入学して以来、大学院への進学、一度目の博士課程、そして今回の博士号取得への再挑戦に至る長い道のりを歩み続けることができたのは、家族の深い理解と惜しみない支えがあったからです。仕事と研究を両立する中で、研究や学会活動のために多くの時間を費やすことを理解し、さまざまな面で支え続けてくれた家族の存在なくして、本論文の完成、そして博士号取得に至ることはできませんでした。長い年月にわたり私の挑戦を支え続けてくれたことに、改めて心から感謝します。

これまで私の研究活動と博士号取得への挑戦を支えてくださったすべての皆様に、心より深く感謝申し上げます。

本論文に関する発表論文

(1) 著作者名：松浦　好宏，中村　秀明
論文題目：粒子群最適化による温度応力解析のための外部拘束係数の同定
学術雑誌名：土木学会論文集
巻，号，頁：81 巻, 1 号, 24-00218, 2025.
発行年月：2025 年 1 月発行
（本文との関連：第 6 章）

(2) 著作者名：松浦　好宏，中村　秀明
論文題目：粒子群最適化による湿気移動解析のための特性値の同定
学術雑誌名：コンクリート工学年次論文集
巻，号，頁：47 巻, 1 号, 1122-1127
発行年月：2025 年 6 月発行
（本文との関連：第 5 章）

(3) 著作者名：中村　秀明，松浦　好宏，三谷　裕二，宮澤　伸吾
論文題目：メタヒューリスティックス最適化手法を用いたマスコンクリートの
断熱温度上昇特性の逆解析
学術雑誌名：コンクリート工学年次論文集
巻，号，頁：48 巻, 1 号, 810-815
発行年月：2026 年 6 月発行
（本文との関連：第 4 章）