

令和 4 年 4 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06633

研究課題名（和文）最適設計の加速原理：大規模な建築構造物のための最適化法の開発

研究課題名（英文）Acceleration of the numerical solutions of structural optimization: Development of optimization methods for large-scale structures

研究代表者

寒野 善博（Kanno, Yoshihiro）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：10378812

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年、理工学のさまざまな分野で、データ駆動型の手法が急速に展開されている。これに伴い、大規模な最適化問題を解く種々の新しい手法が開発されている。この研究課題では、そのような手法を手がかりに、構造物のさまざまな非線形解析や最適設計問題を効率的に解く一連の手法を開発することを目的とした。その結果、弾塑性問題や接触問題に対する従来よりも高速な解法や、ロバスト最適化などの難しい最適設計問題に対する新しい定式化、組合せ的な性質をもつ最適設計問題に対する高速な発見的解法などを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最適設計法は、構造物の設計過程の合理化にとどまらず、高度な性能が要求される構造物を設計するには欠かせない方法論である。最適設計のさらなる実用化に向けた課題の1つとして、この研究課題では、大規模な非線形解析や最適設計問題を高速に解く一連の手法を開発することを目指した。また、実装の容易な手法とすることで、より実用化を促進することを目指した。このように、この研究課題の成果は、先進的な構造物の設計に欠くことのできない最適設計法のさらなる実用化に向けた基礎技術の集積であるとみなせる。

研究成果の概要（英文）：Recently, in diverse areas of science and engineering, various data-driven methods and methodologies have been studied. Accordingly, many novel methods for solving large-scale optimization problems have been developed extensively. The aim of this research project is to develop a series of numerical methods solving various nonlinear problems and design optimization problems of structures, where the emerging large-scale optimization methods are considered to be guidance of the developments. The outcomes include fast numerical methods for elastoplastic problems and contact problems, novel formulations for robust design optimization, efficient heuristics for design optimization problems with combinatorial constraints.

研究分野：応用力学，数理工学

キーワード：最適設計 構造最適化 凸最適化 双対性 加速勾配法 信頼性最適設計 ロバスト最適化

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 建築構造物の数値シミュレーション手法では、実世界における構造物の詳細までを反映した大規模なシミュレーションモデルを扱うことが現実になってきている。これに比べると、構造物の最適設計法が扱える問題の規模は非常に小さいというのが、研究開始当初の状況であった。

最適設計の解法の多くは、暫定的な設計解の更新と、現在の設計解の応答に対する数値シミュレーションとを、交互に繰り返す形をもつ。これは、現在の設計解における目的関数と制約関数の値を評価したり、設計解の更新のためにこれらの関数の勾配を用いたりするためである。つまり、最適設計では構造物の応答解析を繰り返し行う必要があり、このことが大規模問題に対する最適設計の計算コストが非常に大きくなる原因の一つである。

(2) 近年、データ科学の分野では、さまざまな最適化手法に対する加速法が急速に開発されている。これは、データ科学では、従来にはない非常に大規模な問題を扱う必要があったためである。そして、最適化手法の加速法の研究が進むにつれて、極めて大規模な最適化問題であっても、問題の性質によっては、現実には解くことができるようになってきている。

### 2. 研究の目的

(1) 前述のような背景を受けて、この研究課題では、構造物の最適設計問題を高速に解くための基盤技術を開発することを目的とした。特に、データ科学の分野で現れる最適化問題を高速に解くために研究が進んだ諸手法を参考にしつつ、最適設計に固有の問題構造を活かした解法を開発することを目指した。

(2) この目的を達成する方法として、この研究課題では、大別して二つの方法論を採用した。一つ目は、最適設計法の中で行われる応答解析（数値シミュレーション）の高速化である。もう一つは、比較的難しい性質をもつがために大きな計算コストを必要とする最適設計問題を取りあげ、その問題に対する新しいタイプの解法を開発することである。

(3) 一つ目の方法論は、以下のように詳述できる。構造物のモデルとして線形なものを用いる場合、応答解析は連立1次方程式の求解に対応する。また、非線形モデルの応答解析は、多くの場合、何らかの連立1次方程式を繰り返し解くことで行われることが多い。構造物のモデルが大規模になると応答解析の計算コストが非常に大きくなる理由は、この連立1次方程式の求解に要する計算コストが大きくなるからである。

一方で、さまざまな応答解析の問題は、最適化問題として再定式化することが可能である。こうして得られる最適化問題に対して、1次の最適化手法の加速法をうまく開発することができれば、連立1次方程式を解くことなく求解が可能な手法を構築できる可能性がある。これにより大規模問題の計算コストに対して支配的な連立1次方程式の求解を回避できるのであるから、したがってそのような解法は大規模問題に対して有効であることが期待できる。

(4) 二つ目の方法論については、次のように整理できる。難しい性質をもつ最適設計問題は、小規模から中規模の問題でも既往の手法では計算コストが大きい。これは、応答解析の計算コストによるわけではなく、最適化問題の取り扱い自体からくる計算コストである。近年、組合せ的な性質や非凸性という性質をもつ最適化問題に対して、比較的質の良い解を小さい計算コストで得る種々の解法が提案されている。この研究課題では、それらの解法を指導原理とし、最適設計問題に固有の性質を考慮しながら高速な発見的解法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 上記の「研究の目的」では、この研究課題は大別して二つの方法論を採ることを述べた。研究方法の方針としては、この二つの方法論を有機的に行き来しながら目的を達成することを目指す。その際に、データ科学をはじめとする分野で注目を集めている種々の最適化手法を指導原理とし、それに加えて最適設計問題に固有の問題構造を考慮することで、より高速な解法とすることを目指す。

(2) 研究代表者は、この研究課題の開始前に、トラスの弾塑性問題とよばれる構造力学上の問題を数値的に解く手法として、加速近接勾配法とよばれる最適化手法を開発した。そして、計算機実験の結果、提案手法では、既往の最適化手法と比べて、特に大規模な問題に対して小さい計算時間でより精度の高い解を得られることが明らかになっていった。トラスは最も単純な構造モデルであるが、この研究で得られた知見を種々の弾塑性モデルへ展開していくことは自然な計画である。

(3) 最適設計問題の多くは、凸性という（最適化として）扱い易い性質をもたない。また、組合せ的な性質をもつものも、少なくない。さらには、ロバスト最適化など、不確かさを扱う最適設計問題も、実用上、重要である。この研究課題では、DC アルゴリズムや交互方向乗数法など、発見的解法として近年あらためて注目を集めている最適化手法を指導原理とすることで、これらの最適設計問題に対して質の良い解を小さい計算コストで得る手法を開発する。

#### 4. 研究成果

(1) 弾塑性構造物に対する準静的な増分問題は、ある種の最適化問題として定式化することが可能である。この研究課題では、von Mises および Tresca の降伏条件をとりあげ、この問題を解く加速付き近接勾配法を開発した。提案手法を用いると、主双対内点法などの既存の最適化手法に比べて、より小さい計算時間でより精度の高い解が得られることを、数値実験により明らかにした。また、これらの個々の降伏条件に対して個別に開発した近接勾配法を、統一的な枠組みとして理解できることを明らかにした。

(2) Coulomb 摩擦付き接触問題に対する準静的な増分問題は、相補性問題として定式化できるが、最適化問題としては定式化できない。その意味で、(1) で扱った問題よりも取り扱いが難しい問題と言うこともできる。この研究課題では、この問題に対して、主双対アルゴリズムに基づく新しい解法を開発した。

(3) 組合せ的な性質をもつトラスの最適設計問題に対して、交互方向乗数法に基づく発見的な解法を開発した。さらに、この方法を、混合整数非線形計画問題とよばれる厳密に解くことが非常に難しい最適化問題へと拡張した。提案手法により、質の良い解が小さい計算コストで得られることを、数値実験により確認した。

(4) トラスのトポロジー最適化問題について不確かな節点外力に対するロバスト性を考慮するには、新たな定式化が必要であることを明らかにした。また、この定式化は組合せ的な性質をもつが、DC アルゴリズムに基づく発見的な解法を開発した。提案手法は、厳密解法が事実上適用できないような規模の問題でも、容易に適用可能であることを検証した。

(5) 接触を伴う構造物の最適設計問題は、従来、相補性制約付き数理計画問題 (MPCC) とよばれる問題の形式で定式化されてきた。相補性制約は取り扱いが難しい制約であるから、MPCC は比較的難しい最適化問題である。これに対してこの研究課題では、双対性を利用することで、相補性制約を含まない形に定式化可能であることを明らかにした。さらに、この定式化を、不確かな初期ギャップに対するロバスト性を考慮した問題へと拡張した。この研究は、最適設計問題の定式化そのものをより取り扱い易いものへと変換することにより、計算コストの削減へつなげているものである。

(6) 圧縮時と引張時で材料定数（ヤング率およびポアソン比）が異なる弾性材料のモデルとして、bi-modulus material が知られている。このようなモデルは、コンクリートや膜などの数値シミュレーションで広く用いられている。Bi-modulus material から成る弾性体の静的な釣合い解析問題は、ある種の最適化問題として定式化できることが知られている。この研究課題では、この最適化問題に対する加速付き射影勾配法を開発した。数値実験により、提案手法は、既存の主双対内点法と比べ、小さい計算時間で精度の良い解を得ることができることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 62
2. 論文標題 On three concepts in robust design optimization: absolute robustness, relative robustness, and less variance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural and Multidisciplinary Optimization	6. 最初と最後の頁 979-1000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00158-020-02503-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wataru Shimizu, Yoshihiro Kanno	4. 巻 63
2. 論文標題 A note on accelerated proximal gradient method for elastoplastic analysis with Tresca yield criterion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Operations Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 78-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15807/jorsj.63.78	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 14
2. 論文標題 An accelerated Uzawa method for application to frictionless contact problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optimization Letters	6. 最初と最後の頁 1845-1854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11590-019-01481-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 10
2. 論文標題 A note on a family of proximal gradient methods for quasi-static incremental problems in elastoplastic analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 315-320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.taml.2020.01.044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 6
2. 論文標題 Robust optimization of structures subjected to frictionless unilateral contact with uncertain initial gaps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 20-00224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mel.20-00224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 37
2. 論文標題 Exploiting Lagrange duality for topology optimization with frictionless unilateral contact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 25-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-019-00375-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno, Shinnosuke Fujita	4. 巻 19
2. 論文標題 Alternating direction method of multipliers for truss topology optimization with limited number of nodes: a cardinality-constrained second-order cone programming approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optimization and Engineering	6. 最初と最後の頁 327 ~ 358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11081-017-9372-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno, Satoshi Kitayama	4. 巻 58
2. 論文標題 Alternating direction method of multipliers as a simple effective heuristic for mixed-integer nonlinear optimization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Structural and Multidisciplinary Optimization	6. 最初と最後の頁 1291 ~ 1295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00158-018-1946-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 141
2. 論文標題 Alternating Direction Method of Multipliers as Simple Heuristic for Topology Optimization of a Truss With Uniformed Member Cross Sections	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical Design	6. 最初と最後の頁 011403 ~ 011403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4041174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Kanno	4. 巻 71
2. 論文標題 Robust truss topology optimization via semidefinite programming with complementarity constraints: a difference-of-convex programming approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Optimization and Applications	6. 最初と最後の頁 403 ~ 433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10589-018-0013-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wataru Shimizu, Yoshihiro Kanno	4. 巻 35
2. 論文標題 Accelerated proximal gradient method for elastoplastic analysis with von Mises yield criterion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-017-0280-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Yoshihiro Kanno
2. 発表標題 Topology optimization of structures under frictionless unilateral contact: a formulation without complementarity constraints
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshihiro Kanno
2. 発表標題 Reliability- and robustness-based design
3. 学会等名 State-Of-The-Art (SOTA) Panel Session, the 13th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO13) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wataru Shimizu, Yoshihiro Kanno
2. 発表標題 Accelerated proximal gradient methods for quasistatic analysis of elastoplastic continua
3. 学会等名 The 30th European Conference on Operational Research (EURO 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Kanno
2. 発表標題 Accelerated proximal gradient methods for incremental problems in plasticity
3. 学会等名 The 8th Symposium of the European Network for Nonsmooth Dynamics (ENNSD8) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寒野 善博
2. 発表標題 摩擦なし接触を伴う構造物のトポロジー最適化
3. 学会等名 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寒野 善博
2. 発表標題 摩擦のない接触下のトポロジー最適化におけるLagrange双対性について
3. 学会等名 第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Kanno, Satoshi Kitayama
2. 発表標題 A simple heuristic based on alternating direction method of multipliers for solving mixed-integer nonlinear optimization
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2018 (ACSMO 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Kanno
2. 発表標題 An accelerated Uzawa method for frictionless contact problems
3. 学会等名 The 10th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寒野 善博, 北山 哲士
2. 発表標題 交互方向乗数法による混合整数非線形計画の発見的解法
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 寒野 善博
2. 発表標題 交互方向乗数法による一様断面を有するトラスの位相最適化
3. 学会等名 第12回最適化シンポジウム (OPTIS 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寒野 善博
2. 発表標題 摩擦なし接触問題に対するUzawa法の加速法
3. 学会等名 第31回計算力学講演会 (CMD2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kanno, S. Fujita
2. 発表標題 A heuristic for truss topology optimization under constraint on number of nodes
3. 学会等名 IASS Annual Symposium---Interfaces: Architecture, Engineering, Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 W. Shimizu, Y. Kanno
2. 発表標題 A fast first-order optimization approach to quasistatic elastoplastic analysis with von Mises yield criterion
3. 学会等名 XIV International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 寒野 善博, 藤田 慎之輔
2. 発表標題 交互方向乗数法によるトラスの節点数制約つき位相最適化
3. 学会等名 日本機械学会第27回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本 発, 寒野 善博, 藤田 慎之輔
2. 発表標題 加速勾配法による大規模骨組構造の弾性解析
3. 学会等名 2017年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関