

農用トラクタ用本体支持フレームの位相最適化

長谷川英夫^{1,2*}・ジュケクウォン ポンティパー²・
小池正之²・瀧川具弘^{1,2}

¹筑波大学農林技術センター,
305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

²筑波大学大学院生命環境科学研究科,
305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

要 旨

本研究の目的は有限要素法を用いて乗用トラクタの本体支持フレームを新たに開発し、その構造特性を明らかにすることである。農用トラクタの本体支持フレームを設計するために位相最適化手法を用い、市販有限要素解析ソフトウェア ANSYS10.0によって考案モデルの応力分布を解析した。供試トラクタの本体支持フレームモデル、位相最適化のための初期形状モデル及びプロトタイプモデルの3種類の有限要素モデルを作成した。冷却装置、機関及び動力伝達装置の質量に相当する荷重を上記3種類のモデルの荷重条件とした。さらに、前車軸に相当する箇所鉛直方向変位を拘束するとともに後車軸に相当する箇所の全自由度を拘束した。考案したプロトタイプモデルは、位相最適化を目的として作成した初期形状モデルに対して45%の軽量が図られたばかりでなく、応力分布状況においても供試トラクタの本体支持フレームに比べて応力集中が小さくなることが判明した。

キーワード：乗用トラクタ、本体支持フレーム、有限要素法、位相最適化

緒 言

農業を取り巻く社会的経済的環境が年々厳しさを増すなかで、農業従事者の減少に起因する女性の増加及び高齢化が顕在化し、それらの対応策として農作業の効率化を目的とした種々の見直しが図られている。このような趨勢にあって、基幹動力源である農用トラクタに期待される性能特性にも変化が現れ始め、その研究開発に当たっては人間工学的観点からより良い機能性、快適性、安全性を付与するための総合的設計開発環境の確立が重要視されるに至っている。しかし、従来の農用トラクタに採用されているモノコック型フレームは、機関、動力伝達部、差動装置といった構成要素が支持フレームの役割を果たす一体構造を有するために以下の問題点が存在する。1) 構成要素の安全率を高く見積もり、破壊例の根絶を目指す設計思想で

* Corresponding Author: hsgw@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

対処しているので質量増は避けられない。2) 構造上, フレーム自体への防振対策が困難なため運転者への振動伝達が著しく, 健康の阻害及び作業性などの低下を招く。3) 質量過大のため, 燃料消費率が增大するうえに世界の畑作地帯で顕在化している圃場の締固め問題を昂進する。こうした現状に対して, 軽量化及び振動伝達特性の改善を目的とした研究がこれまで行われてきた(長谷川ら 1994, 長谷川ら 1997, 辻内 2004)。一方, モノコック型のフレームに比べて大幅に軽量化を図ったシャシー型フレームが考案され, わが国では小型機種を中心に普及が図られた(Landtechnik 2003, Renius 1994)。当該フレームに対しては, 耐久性の向上などを目的とした数値シミュレーションに係る研究が行われた(猪野奥ら 1991, 元林ら 1993, Muhaemin 1999a, 1999b)。しかし, 昨今の市販トラクタを概観すると, そのフレーム形式がモノコック型に回帰しているように思われる。その理由としては, 軽量化を追及するあまり路面からの入力によるフレームの疲労破壊や機関の振動伝達によるオペレータの不快感がモノコック型に比べて著しいことによるのではないかと推察した。そこで, 本研究では次世代の革新的な乗用トラクタの構造形態を探索することを目的として本体支持フレーム側面形状の構造最適設計を行った。特に本報では, 耐久性を維持しながら軽量化を図ることを目的として位相最適化手法に基づく設計を行い, 幾つかの知見を得たので報告する。

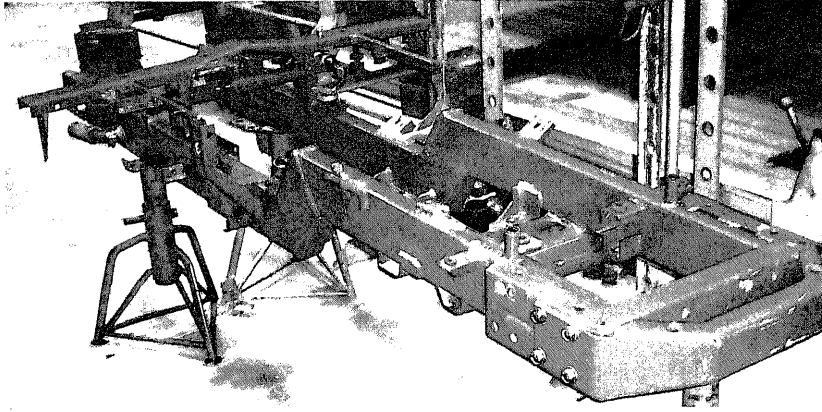
材料及び方法

1. 供試トラクタの本体支持フレーム

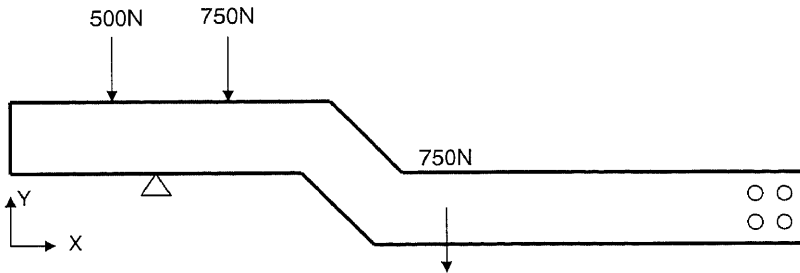
供試トラクタは, 筑波大学農林技術センター所有の乗用トラクタ((株)クボタ, 型式: GT-8, 出力: 14.7kW)である。図1(a)にその本体支持フレームを示す。本体支持フレームの二次元モデルと同有限要素モデル作成及び数値シミュレーションはパーソナルコンピュータ(CPU: Xeon 2.4GHz x2, Memory: 2GB, OS: Windows XP)上で市販有限要素解析ソフトウェアANSYS10.0(University Intermediate License)を使用して行った。当該ソフトを使用する利点としては, 位相最適化解析機能に加えて, 線形・非線形構造, 定常・非定常伝熱, 熱流体, 電磁場, 圧電, 音響, 接触及び衝撃などの各種ソルバー機能とプリ・ポストプロセッサを有しているためにさまざまな解析ニーズに柔軟に対応できることが挙げられる。有限要素モデルの作成にあたっては, 一般構造用圧延鋼の物性値としてヤング率205GPa, ポアソン比0.30の材料特性値を仮定して有限要素に分割した。なお, 作成した有限要素モデルの規模は, 総要素数1860, 総節点数6003であった。供試トラクタの境界条件を図1(b)に示す。さらに, 前車軸取付け部のY方向の自由度を拘束するとともに後車軸取付け部に相当する部位を完全に拘束する拘束条件を設定した。以上の条件のもとで本体支持フレームの静的弾性解析を行い, 後述する位相最適化解析に使用する許容応力の上限値を求めた。

2. 位相最適化

位相最適化とは, 質量の低減を目的として与えられた荷重・境界条件に対して材料のどこを削除できるのかを提案する手法である(ANSYS 2005)。本研究で使用した市販有限要素ソフトウェアでは, 有限要素に分割した各要素に対して擬似密度を割り当て, それを0(材料削除)から1(材料維持)まで変化させて最適形状の探索を行う。すべての要素に対して擬似密



(a) 本体支持フレーム



(b) 境界条件

図1 供試トラクタの本体支持フレームと境界条件.

度を1（材料削除部位なし）と設定すれば、最大剛性を得ることができる。しかし、それでは設計最適化の意味がないため、望ましい体積縮小率を設計者が明示的に指定することで設計条件を拘束している。実際には、概念設計を包含する1つのブロックのような単純形状から開始して与えられた荷重条件に対する形状がどうあるべきかについて探索を行っている。

位相最適化は、換言すれば大域的構造剛性の最大化と等価な構造コンプライアンスを最小化しながら、目的関数である構造コンプライアンスのエネルギーを最小化することである（Bendsoe 1993）。ここで、目的関数として構造コンプライアンスエネルギー（ U_c ）の最小化を考えると、以下のように定式化される。ただし、 $0 < \eta_i < 1$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) である。

$$\text{Objective function: minimize } (U_c) \tag{1}$$

$$V \leq V_0 - V^* \tag{2}$$

$$V = \sum_i \eta_i V_i \tag{3}$$

$$E_i = E(\eta_i) \tag{4}$$

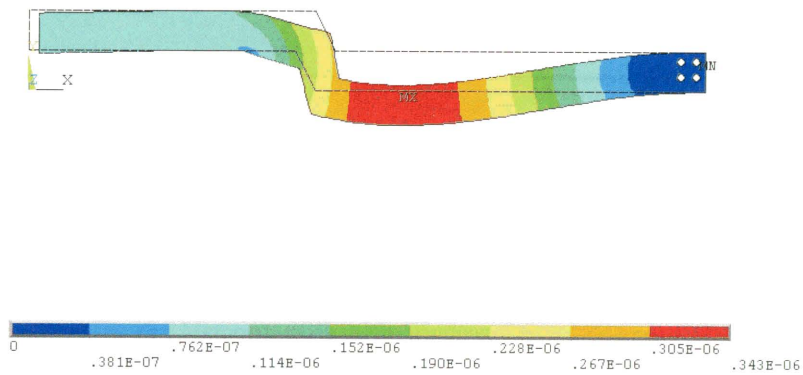
$$\{\sigma_i\} = [E_i]\{\varepsilon_i\} \tag{5}$$

ここで、 (U_c) は構造コンプライアンスエネルギー、 η_i は各有限要素 (i) の擬似密度、 V は計算された体積、 V_0 は初期体積、 V^* は材料から削除される体積、 V_i は要素 i の体積、 E_i は各要素の弾性テンソル、 E は弾性テンソル、 σ_i は要素 i の応力ベクトル、 ε_i は要素 i のひずみベクトルである。

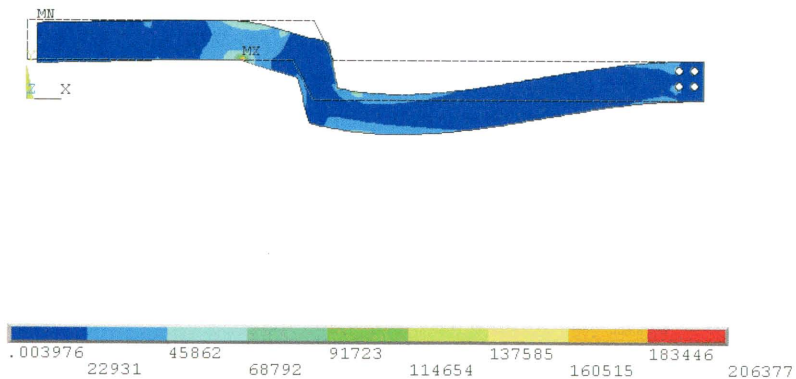
結果及び考察

1. 供試トラクタの静的弾性解析

本体支持フレームの側面形状の構造最適設計に先立って、供試トラクタの二次元有限要素モデルを作成し、数値シミュレーションを行って構造強度特性について調べた。その結果、供試トラクタの変形形状と応力分布はそれぞれ図 2 (a), (b) に示すように得られた。最大変位はフレーム中心部分で発生しており、その値は約 $3.43 \times 10^{-7} \text{m}$ であった。von Mises 相当応力の最大値は Y 方向の変位を拘束した箇所付近で発生し、約 0.20MPa であった。



(a) 変形形状



(b) von Mises 相当応力分布

図 2 供試トラクタの線形静的解析結果.

2. 位相最適化の初期形状

供試トラクタの静的線形解析の結果に基づいて、供試トラクタの二次元側面形状の最適化を目的とした当該フレームの設計領域を包含する初期形状を作成した（図3(a)）。また、側面形状の最適化にあたっては、機関部、動力伝達部及び後車軸の配置と機能性を保持するため、図3(b)のハッチング箇所を最適化の対象から除外した。そして、この初期形状に対して位相最適化を適用することで側面形状の最適化を探索した。作成した有限要素モデルの規模は、総要素数3324、総節点数10367であった。

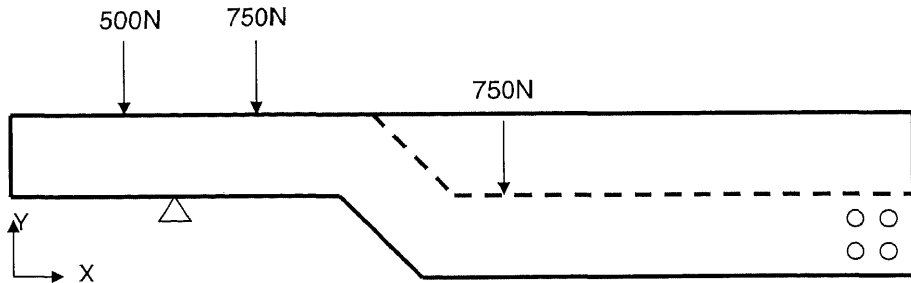
3. 供試モデルの位相最適化

位相最適化解析では、先に行った供試トラクタの二次元有限要素モデルの数値シミュレーションから得られた von Mises 相当応力を発生応力の上限值に設定した。さらに、初期形状からの軽量化の割合を30%、40%、50%、60%の4水準に設定して最適形状の探索を行った。

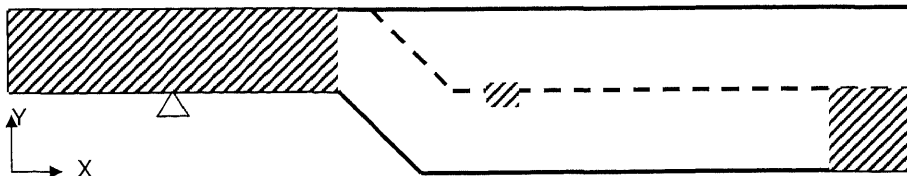
図4(a)～(d)から明らかなように、軽量化の割合が増すにつれて初期形状の内部と周辺部に空隙が拡大していく様子が分かる。

4. プロトタイプモデルの静的弾性解析

位相最適化解析から得られた最適形状は、内部及び周縁部が複雑な形状をしており、設計現場への適用は困難である。そこで、本研究では計算結果の最適形状を維持しつつ周縁部及び内部を円滑化したプロトタイプモデルを作成し、再び同モデルの構造強度特性を検証した。その際、荷重条件及び拘束条件は上述した供試トラクタの本体支持フレームの場合と同一とした。なお、有限要素モデルの規模は、総要素数1764、総節点数6011となった（図5(a)）。また、プロトタイプモデルは、位相最適化の初期形状に対して約45%の軽量化が図られた。線形静的解析の結果、プ



(a) 初期条件と境界条件



(b) 最適化から除外する箇所

図3 位相最適化の初期形状と各種条件.

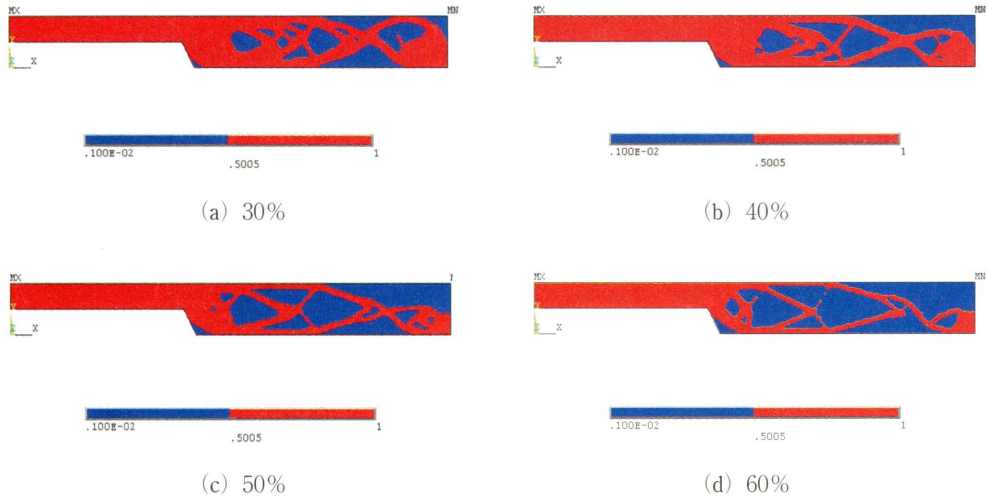


図4 位相最適化の結果.

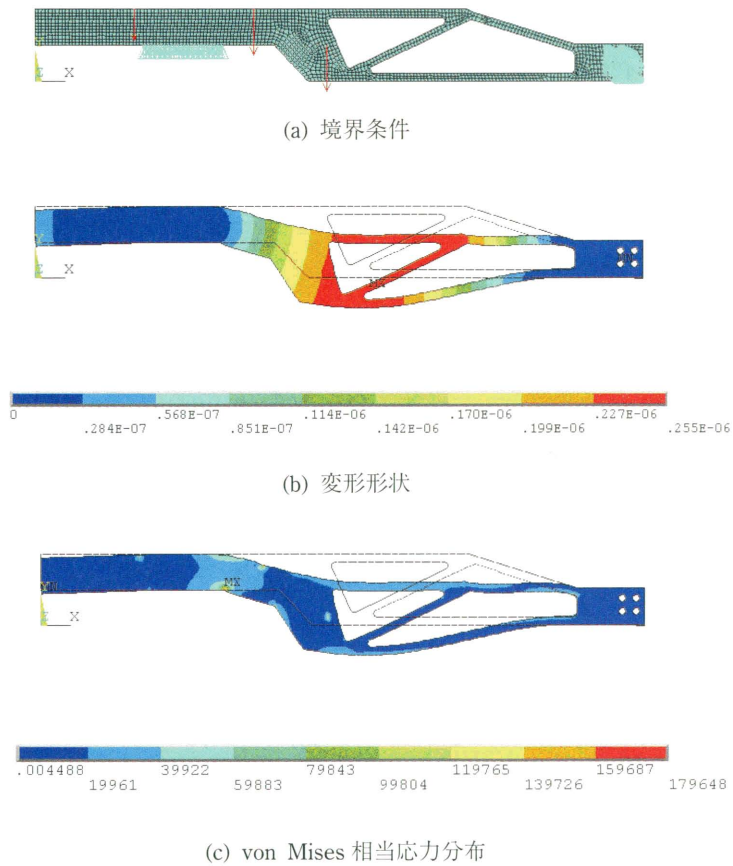


図5 プロトタイプモデルの境界条件と線形静的解析結果.

ロトタイプの変形形状は図5 (b) のようになり、その最大値は、 $0.26 \times 10^{-7} \text{m}$ となった。さらに、von Mises 相当応力の分布状況は、図5 (c) のように求められ、 0.18MPa となり、供試トラクタの本体支持フレームの線形静的解析から得られた von Mises 相当応力の最大値を下回ることが確認された。

今後の課題としては、プロトタイプモデルの実物大モデルを作成し、実働時の繰返し荷重を考慮した耐久性試験を行うことが挙げられる。また、複雑なパラメータ設定条件下での計算を効率よく反復できる数値シミュレーションの利点を生かして、次世代の斬新な農用車両の車体構造を提案したいと考えている。

謝 辞

本研究を遂行するに際して、筑波大学農林技術センター技術専門職員 本間 毅氏にご尽力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- ANSYS Inc. 2005. ANSYS 10.0 Release Notes, Online help 20: 2005.
- Bendsoe, M. 1993. Topology Design of Structure. Kluwer Academic Pub.
- 長谷川英夫・小池正之・小中俊雄・瀧川具弘 1994. 農用トラクタ用モノコック型フレームのモード解析. 農業機械学会誌 56(5): 3-11.
- 長谷川英夫・小池正之・小中俊雄 1997. 農用トラクタ用モノコック型フレームの静的弾塑性解析. 農業機械学会誌 59(1): 11-20.
- 猪之奥康治・西崎邦夫 1991. トラクタの耐久性に関する研究. 農業機械学会第50回年次大会講演要旨. 17-18.
- Landtechnik 2003. Einsatz von Simulationen bei der Produktentwicklung von Traktoren. 3: 156-157.
- 元林浩太・小池正之・小中俊雄 1993. 有限要素法によるトラクタ部材の最適設計 (第2報). 農業機械学会誌 55 (4): 3-11.
- Muhaemin, M., Koike, M., Takigawa T. and Yoda, A. 1999a. Studies on Aluminium-made Chassis-type Frame Model of a Tractor (Part 1). Transactions of ASAE, 42 (5): 1229-1237.
- Muhaemin, M., Koike, M.; Takigawa, T; Yoda, A. 1999b. Studies on Aluminium-made Chassis-type Frame Model of a Tractor (Part 2). Transactions of ASAE, 42 (5): 1239-1248.
- Renius, K. 1994. Trends in Tractor Design with Particular Reference to Europe. Journal of Agricultural Engineering Research, 57: 3-22.
- 辻内伸好 2004. 有限要素法とモード解析. 機械の研究, 56 (6): 637-645.

Topology Optimization for Supporting Frame of an Agricultural Tractor

Hideo HASEGAWA^{1,2*}, Phorntipha JUNKWON^{*2},
Masayuki KOIKE² and Tomohiro TAKIGAWA^{1,2}

¹ Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1 Tsukuba, Ibaraki 305-8577

² Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1 Tsukuba, Ibaraki 305-8572

Abstract

The purpose of this study was to develop a new supporting frame of an agricultural tractor and clarify its structural characteristics using a finite element method (FEM). This study employed topology optimization to design a new supporting frame of an agricultural tractor and analysed stress distribution of prototype model by using the commercial finite element software ANSYS 10.0. A total number of three finite element models, namely the conventional supporting frame model, the initial shape model for topology optimization and the proposed prototype model were established. The loading conditions were that 500N, 750N and 500N for the mass of radiator, engine and transmission, respectively, were imposed on the models. Vertical direction of the nodes which located front axle was constrained and the nodes of rear axle were constrained completely. The FEM estimated that the prototype not only could be reduced to about 45% of the mass compared to the initial shape model for topology optimization but also had lower stress concentration than the conventional supporting frame model.

Key words: Tractor, Supporting frame, Finite element method, Topology optimization

* Corresponding Author: hsgw@sakura.cc.tsukuba.ac.jp