

平成 21 年 12 月 1 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760168
 研究課題名（和文）水力学的骨格を利用した流体駆動式完全密閉型柔軟移動ロボットの開発
 研究課題名（英文）Hermetically sealed flexible mobile robot with hydrostatic skeleton
 研究代表者
 木村 仁（KIMURA HITOSHI）
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号：60376944

研究成果の概要：

従来にない構造を持った柔軟で密閉型の狭隘地形用移動ロボットの開発を行った。試作した柔軟ロボットについて、内部の部品配置や配線の改善などを行い、外部カバー部分の再設計によってロボットの直径（全幅）を約430mmから約330mmに低減した。困難さからこれまでほとんど行われていなかった駆動部の大変形解析を有限要素解析ソフトABAQUSで行った。0.02MPa程度までの圧力領域ならば解析が可能であることを確認し、実験値との比較によって解析の妥当性を示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	0	2,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,000,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機能システム

キーワード：ソフトメカニクス

1. 研究開始当初の背景

タイヤやクローラを用いた硬い部品で構成される従来機構は、機構のサイズより少しでも狭い地形は通過できなかった。現在フレキシブルロボットと呼ばれるものですら、駆動部にはやはり金属や樹脂が用いられており、従来機構には生物の様な柔軟性を持つものはほとんど存在しない。また、移動ロボットの防塵性も実用面で重要な問題であり、従来機構を防塵、防水処理するためには駆動部分に駆動抵抗の大きなシール部品を使用する必要がある。もし地形に対して柔軟に適応変

形可能な密閉型の自立走行型移動ロボットが実現できれば配管や瓦礫内などの狭隘な地形の探査に有用と考えられる。

さらに、本研究で提案するような柔軟な構造物や駆動機構を利用すれば、移動ロボットに限らず幅広い用途について柔軟な機械システムを構成できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では柔軟な駆動メカニズムとして生物に見られる水力学的骨格を利用した機構に注目し、対地適応変形が可能な移動ロボッ

トの実現を目的とした。具体的な構造としては筒状の幅広い柔軟クローラの両端を結合して二重のループ構造とすることで、全ての接地面が同一方向に駆動する機構を提案した。このような機構は従来にない全く新しいものである。本研究では提案機構の実現によって柔軟で対地適応変形可能な移動ロボットの開発を目的とする。提案機構は無限回転用の軸に相当する部品がないため完全密閉には有利であり、回転抵抗の大きいシール材も不要なうえに異物の噛み込みなどによるジャミングも生じにくいと考えられる。

3. 研究の方法

提案機構を実現するために、柔軟な駆動機構を実現する必要がある。水力学的骨格は袋状構造体の内圧を調整することで構造のコンプライアンスを変化させるものであるが、この袋状構造体をループをなす鎖のように連結し、クローラ状にすると柔軟なクローラが構成できる。このクローラの先端部の袋状構造体を加圧（減圧）し、後端部を減圧（加圧）すると、クローラは袋一個分の長さを前進（後退）する。次にこのクローラの接地面を柔軟な幅広のシートに固定するとシートは非常に幅広のクローラとなり、その左右端を結合すると全ての接地面が同一に駆動する移動体が構成できる。

本機構は密閉構造をとりやすく、摺動シール部品も必要ないため実用上の防水、防塵に有利と考えられる。また、全体が柔軟な構造であり、駆動機構も柔軟なため、移動しながら適宜地形に適応変形することが期待できる。接地面も全て同一方向に駆動されるため、地形に挟まれても通常のクローラのようなスタックは生じにくい。また、全体が柔軟な袋状構造体で構成されるため、外部からの衝撃による破損もしにくいと考えられる。

しかし、実際に提案機構の試作を行ったところ、外皮部分の密閉をするためにかなりのメンテナンスコストを要することや、マイクロポンプやコンプレッサーといった部品の配置などの問題が生じた。また、適切な外皮の硬さ、厚さといったものも解っていないため、これらは実物をいくつか試作して試験する必要がある。

また、本機構のような柔軟な構造体の最適設計のためには駆動力の見積もりや構造の強度計算といったものが不可欠である。しかし、水力学的骨格のような大変形を行う対象は解析的な計算が困難であることからこれまであまり行われていなかった。また、本研究で扱うような折れ曲がった状態から駆動力を発生する袋状構造は、解析がより不安定になるため過去に行われていない。しかし近年はコンピュータ技術の発達により、多少の大変形の解析は行えるようになってきている。そこで本研

究では水力学的骨格によって構成される構造部品および駆動部品の有限要素解析も行うこととした。以下主に構造物を構成する目的で使用する袋状構造体を構造骨格、駆動力を発生する目的で使用する袋状構造体を駆動骨格と呼ぶことにする。両者は本質的に同一の構造だが、使用目的によって体積や加減圧を頻繁に行うための配管などが異なってくる。両者の機能を兼用しているものは兼用骨格と呼ぶ。

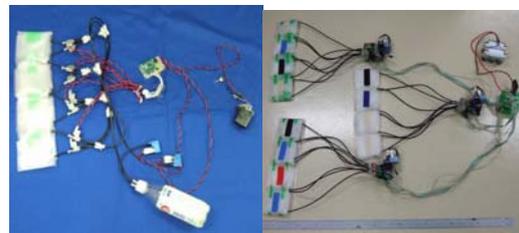
この解析で対象とする構造は、2枚のウレタンゴムシートを張り合わせることで形成される袋状構造とする。これは、製作の利便性などから提案する機械システムで最も使用頻度の高い構造である。解析にはウレタンゴムの材料特性が必要なため、引張り試験機によるウレタンゴムの単軸引張試験を行う。また、単軸引張試験の結果のみでは解析の安定性に欠けるため、単軸引張試験の結果を1.4倍することで二軸均等引張試験の近似を行い解析に用いる。この方法は解析の安定性を高めるためによく用いられる手法である。これらの引張試験結果を基に、3次のOgdenモデルを使用して決定した材料特性を解析に使用する。

構造骨格については各種形状による応力集中の様子を調べる。また、駆動骨格については曲げ角度、内圧、サイズといったものを変更して解析を行う。

4. 研究成果

(1) ロボットの安定した駆動のための改良

試作した柔軟ロボットについて、内部の部品配置や配線の改善などによってメンテナンス性の向上を図り、外部カバー部分の再設計によって小型化も行った。この結果ロボットの直径（全幅）を約430mmから約330mmに低減した。更にクローラへの空気圧の供給などを考慮した各種の改良により、安定して定期的な動作ができるロボットの内部構造や部品配置を検討した。



(a) 以前の配管方式 (b) 変更後の配管方式

Fig.1 配管の延長と集中制御化

Fig.1は配管関連の変更を示している。コンプレッサーの供給圧力変化が小さいため、アキュムレータを廃止し、枝分かれする配管を一箇所に集中することでクローラ動作時に部品同士がひっかかる問題の対策を施し

た。Fig. 2は小型化した外皮である。厚さを以前の0.3mmから0.2mmに変更し、変形に要する力を小さくしている。また、全体のサイズは以前の直径約430mmから約330mmに小型化した。今後は長時間の駆動および高所からの落下後の動作などを予定している。

(2) 構造骨格および駆動骨格の有限要素解析

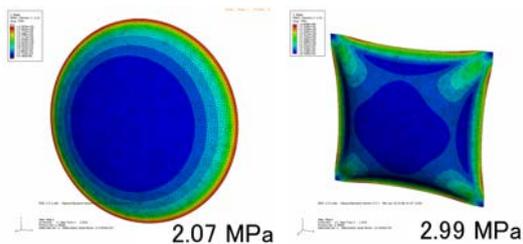
有限要素解析を利用したHSクローラの駆動力発生メカニズムの検討も行った。HSクローラのような大変形は計算が困難であることからこれまでほとんど行われていなかったが、近年の解析ソフトの進歩で多少の大変形は解析が可能になって来ている。有限要素解析ソフトABAQUSの陽解法と陰解法それぞれを利用した結果、0.02MPa程度までの圧力領域ならば解析が可能であることを確認し、実験値との比較によって解析の妥当性を示した。

(2-1) 凸形状での応力集中

構造骨格の細部形状の強度比較を行う前に、まず単純な形状を用いた応力解析を行う。ここでは、凸形状について解析し、形状と応力を比較する。

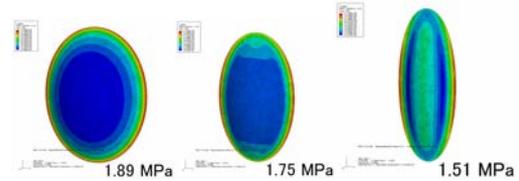
まず、直径100mmの円形と1辺が100mmの正方形について解析を行った。解析には曲げ剛性の計算も含まれるシェル要素を用い、陰解法によって計算する。これにより、曲げ応力まで考慮した解析を行うことができ、変形後の形状を考慮した応力比較を行うことができる。薄い材料に大きな圧力をかけた場合は解析の安定性がなくなるため、材料は1.1mmのウレタンゴムとし、内圧は0.005MPaとする。また、ウレタンゴムシートは外周同士を結合し、変形を阻害しないように空間に固定している。解析結果と最大応力の値をFig.1に示す。円形では外周に均一な応力が見られる。これは、感覚的にも容易に推測でき、解析結果に信頼性があることが確認できる。また、正方形では、辺の両端に応力集中が起こっていることが伺える。

次に、長半径を100mmとして短半径を変えた楕円形と、縦の長さを100mmとして横の長さを変えた長方形の解析を行った。解析の条件は円形や正方形の場合と同様である。結果をFig. 2, Fig. 3に示す。



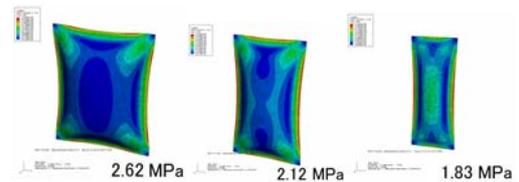
(a) 円形 (b) 正方形

Fig. 1 円形と正方形の解析結果



(a) 短半径 80mm (b) 60mm (c) 40mm

Fig. 2 楕円形の解析結果



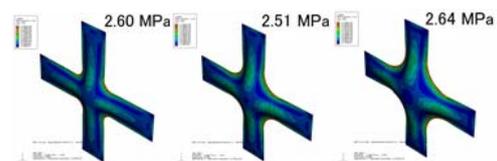
(a) 短辺 80mm (b) 60mm (c) 40mm

Fig. 3 長方形の解析結果

これらの結果から、単純形状では細いパイプ形状において最大応力が小さくなっていることが分かる。これは、金属など弾性素材のパイプでも同様の傾向があり、妥当な結果である。しかしながら、特に四角形の応力分布は、正方形に近い場合では辺の両端で応力集中が起き、細くなるにつれて辺の中央付近で応力集中が起きていることが分かる。長方形よりも楕円形で応力の最大値が小さかったことから、凸形状の構造骨格では楕円形状かつ細い形状とすることが望ましいと考えられる。

(2-2) 凹形状での応力集中

次に、凹部での強度評価を行うために、十字形状の構造骨格についてフィレットの有無での応力状態の比較を行う。解析には凸形状と同様に曲げ剛性の計算も含まれるシェル要素を用い、陰解法によって計算する。材料は1.1mmのウレタンゴムとし、内圧は0.005MPaである。また、ウレタンゴムシートは外周同士を結合し、変形を阻害しないように空間に固定している。十字形状は、全体が縦と横に150mmであり、突起は全て同様の形状としている。解析はフィレット径を変えて3回行うものとする。Lは突起の幅、Rはフィレット半径である。Fig. 4にL=30mmの場合の解析結果を示す。



(a) R=10mm (b) 20mm (c) 30mm

Fig. 4 凹部の解析結果 (L=30mm)

これらの結果から、R=20mmにおいて最大応力が最小となっており、最適なフィレット

ト径が存在することが伺える．そこで，突起の幅 L を変えながら解析を行い，突起の幅と最適なフィレット径の関係を求める．突起の幅それぞれについて，3つのフィレット径で解析を行い，それぞれの最大応力値を二次方程式に当てはめることで，最大応力が最小となるフィレット径を求める．結果を Fig.5 示す．

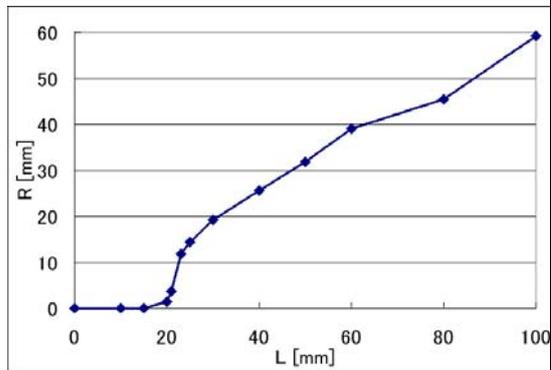


Fig. 5 突起の幅 L とフィレット径 R の関係

これらの値を用いて解析を行ったところ，それぞれ突起の幅において最大応力値が最小となっていることを確認している． Fig. 5 から，突起の幅が 20mm 以下ではフィレットは必要なく，また，30mm 以上では最適なフィレット径が突起の幅にほぼ比例していることが分かる．膨らんだ際の構造骨格の形状が最大応力に大きく影響すると考えられ，最適なフィレット径を持った場合には，断面形状が楕円形に近い形状となっていることが推測される．理論的な考察を行うことで最適なフィレット径を求めることが今後の課題である．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット(新型クローラの開発および試作ロボットの狭隘地形における動作実験)；
木村仁，丸山大輔，梶村文裕，小関道彦，伊能教夫：日本ロボット学会誌，Vol. 25, No. 7, pp. 1092-1099, 2007
査読有

[学会発表] (計 3 件)

①水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット (圧力モジュールの駆動力増大と耐圧性能向上)；
○丸山大輔，木村仁，小関道彦，伊能教夫：第 26 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集，(CD-ROM) 3A2-03, 2008
神戸大学 2008 年 9 月 11 日

②水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット MOLOOP のメンテナンス性向上と小型化；○丸山大輔，木村仁，小関道彦，伊能教夫：第 25 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集，(CD-ROM) 3M13, 2007
千葉工業大学 2007 年 9 月 15 日

③水力学的骨格を利用した移動ロボット MOLOOP の開発；○丸山大輔，木村仁，小関道彦，伊能教夫：日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷集(第 13 回)，pp. 73-76, 2007
東京工業大学 2007 年 7 月 12 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 仁 (KIMURA HITOSHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：60376944

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者