

≡ ≡ ≡ 報 告 ≡ ≡ ≡

粒子シミュレーション法によるホース補強糸層の応力解析

北岡 克司 *

Stress Analysis Reinforcement Textile of Hose by the Particle Simulation Method

Katsushi Kitaoka *

要 旨

油圧ホースを開発する場合，ホース補強糸層の設計が重要である．また，有限要素法による応力解析では，糸層全体をモデル化した巨視的な解析に限られていた．今回，球状粒子を連結したモデルで解析することにより微視的な解析が可能となった．

ホース補強糸層の変形は，粒子シミュレーション法により計算される．この方法は，糸を球状粒子でモデル化し，さらに，その糸は7本の撚糸で撚り合わせたモデルとなっている．

糸層の変形計算は，各糸を構成する球体の動力学計算を行う．すなわち，各球について，並進・回転の運動方程式を解くことにより計算される．

計算によって得られた応力は，引張り・ねじりのそれぞれの変形において，実験による結果とよい一致を示した．

Abstract

The design of the hose reinforcement textile is important when we develop the oil pressure hose. It was limited to the macro-analysis that modeled the whole thread layer with the stress analysis of the Finite-Element Modeling. It was possible to the micro-analysis with the model that connected the spherical condition.

Deformation of the reinforcement textile of hose has been simulated by using a textile model of twisted threads and the Particle Simulation Method. Each thread is modeled with 7 filaments which are constructed with spring-connected spheres.

The motion of each sphere is calculated by solving the translation and rotational motion equations under the stretching and twisting deformation of the hose.

The total forces exerted in the reinforcement textile by stretching and twisting were in good agreement with experimental measurements.

* 機能部品事業部 技術部 ホース技術室

1. はじめに

油圧ホース(図-1)を開発する場合、ホース補強糸層の設計が重要であり、開発を効率的に実施するためには、机上による応力解析が必要となる。また、有限要素法による応力解析では、糸層全体をモデル化した巨視的な解析に限られる。

これに対して、今回開発した方法は、球状粒子を連結したモデルで糸を表すため、糸層の微視的な応力解析が可能となった。

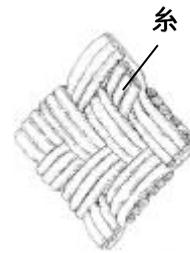


図-3 編込み状態



図-4 単糸断面



図-1 油圧ホース

2. 油圧ホースの概要

油圧ホースは、図-2のようにゴムと糸の5層構造となっている。また、糸層は編込み状態となっており、フレキシブルな動きに対応できる構造となっている。

各層の役割としては、外皮は上糸の保護・内管は媒体のシール・糸層は圧力の保持であり、糸層の役割が重要である。

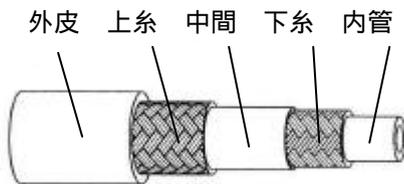


図-2 ホース構成

また、糸層の構造は周期性があり、その一部分を取り出すと図-3のようになる。さらに、糸一本は図-4のように200~300本のフィラメントから構成される。

3. 実施内容

3-1. 粒子シミュレーション法

粒子シミュレーション法では、図-5のように糸(繊維)を球状粒子でモデル化する。

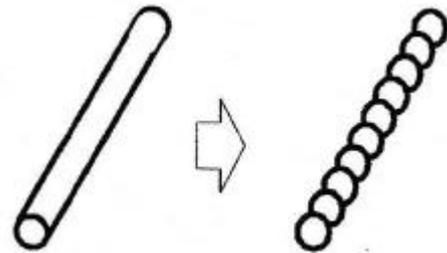


図-5 糸のモデル化

糸の引張り・曲げ・ねじりの各変形は、図-6に示すようになる。

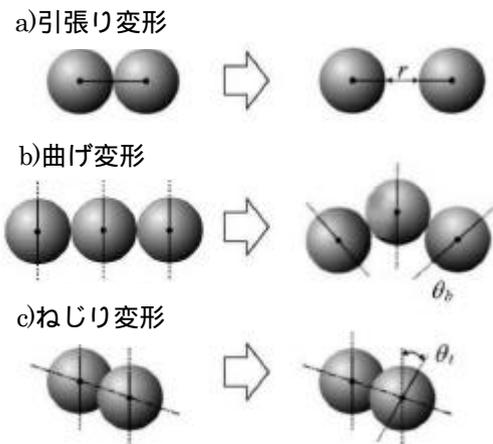


図-6 球状粒子間の変形

また，球状粒子間には，式 ~ に示すような力が働く．つまり，引張りに対しては復元力 F^s ，曲げに対しては復元トルク T^b ，ねじりに対しては復元トルク T^t が働く．

このとき，各々の変形に対する糸の剛性を表す定数 k_s ， k_b ， k_t は，糸の縦弾性係数 E あるいは横弾性係数 G を用いて表すことができる．また， r は結合長， θ_b は結合角， θ_t はねじれ角の変位を各々表すものとする．

引張り変形

$$F^s = -k_s \cdot r \quad , \quad k_s = \frac{a}{2} E$$

曲げ変形

$$T^b = -k_b \cdot \theta_b \quad , \quad k_b = \frac{a^3}{8} E$$

ねじり変形

$$T^t = -k_t \cdot \theta_t \quad , \quad k_t = \frac{a^3}{4} G$$

3 - 2 . 解析用モデルの作成方法

はじめに，編み方のパラメータを決定する．編み方のパラメータとしては，合系数・打込み数・ブレード径・ピッチ・肉厚・撚り数があり，解析するホース構成の数値を入力する．

[語句の説明]

- 合系数 : 撚り糸を束ねたときの数
- 打込み数 : 1ピッチあたりの糸本数
- ブレード径 : 糸層の外径
- ピッチ : 一本の糸がホースを一周する間隔
- 肉厚 : 糸層の厚み
- 撚り数 : 10cmあたりの糸のねじり量

(図 - 7・8 参照)

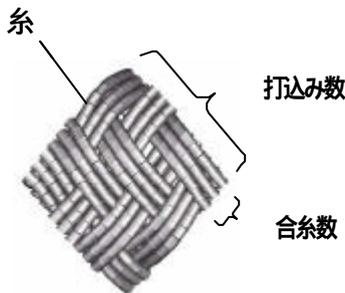


図 - 7 編込み状態

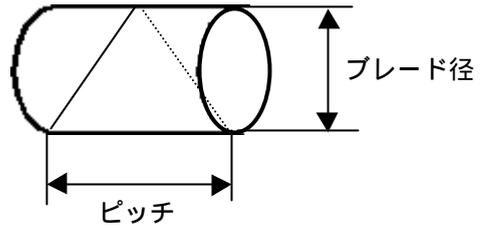


図 - 8 寸法

次に，ホース補強糸層の織布模様の周期性を考慮して菱形の領域を切り出し，球状を連結した糸を用いてモデル化する．(図 - 9)

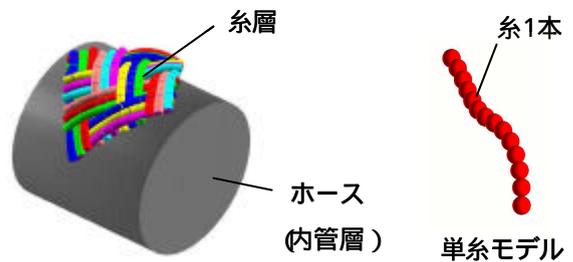


図 - 9 単糸編込みモデル

しかし，このモデルでは実際の糸が多本数のフィラメントで撚り合わさっている構造を表していない．そのため，実際のホース糸層の断面形状と一致しない．

そこで，1本の糸を7本の撚糸で撚り合わせたモデルを作成する．このモデルにすることにより，実際のホース糸層の断面形状と同等になる．

(図 - 10)

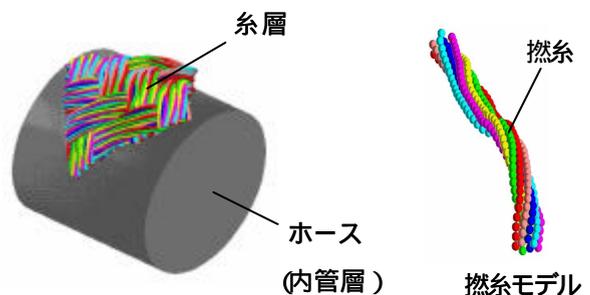


図 - 10 撚糸編込みモデル

3 - 3 . 解析方法

上記で作成したモデルに対して、実際のホースの変形条件を解析モデルに与える。

つまり、下糸層に対して、図 - 1 1 のように圧力・変位（引張りやねじり変形）を与える。

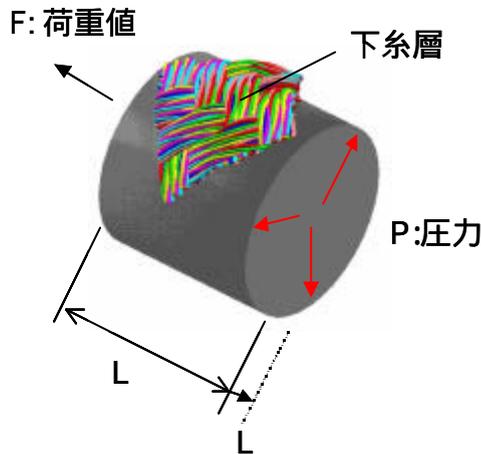


図 - 11 解析モデル

また、糸層の変形計算では、各糸を構成する球体の動力学計算を行う。すなわち、各球について並進運動・回転運動・結合球間で滑りが無い条件を解き、球体の運動を計算する。

(式 ~ を参照)

ただし、 m は球の質量・ v_i は球 i の速度・ ω_i は角速度、 F_i^h は減衰力・ T_i^h は減衰トルク、 F_{ij}^p は粒子間力・ f_{ij} は結合球間に働く摩擦力・ n_{ij} は結合した球の中心を結ぶ方向の単位ベクトルである。

並進運動

$$m \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^s + \sum_j f_{ij} + F_i^h + \sum_j F_{ij}^p$$

回転運動

$$\frac{2}{5} m a^2 \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j T_{ij}^b + \sum_j T_{ij}^t + (\sum_j f_{ij} \times a n_{ij}) + T_i^h$$

滑りが無い条件

$$v_i + \omega_i \times n_{ij} = v_j + \omega_j \times n_{ji}$$

3 - 4 . 解析結果

計算結果として、下糸層に働く応力と応力分布が出力される。

条件（圧力・歪）を変えたときの下糸層に働く応力（荷重値）の結果が、図 - 1 2 のよう出力される。

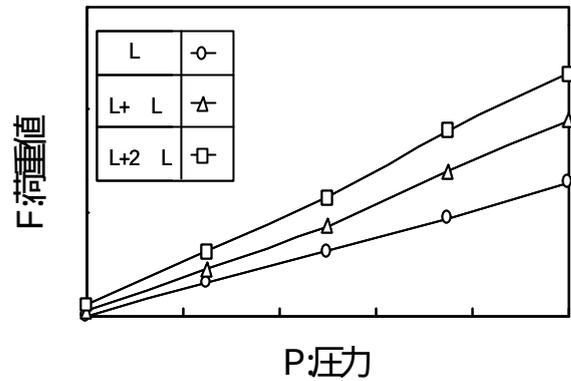


図 - 12 下糸層に働く応力（荷重値）

引張り変形の際の応力分布図は、図 - 1 3 のよう出力される。これによると、糸と糸の交差部に応力集中部が発生していることがわかる。

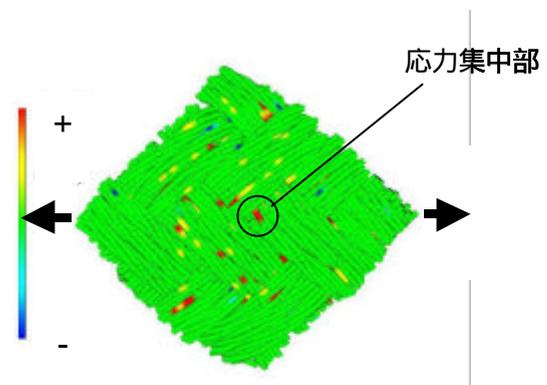


図 - 13 応力分布（引張り変形）

また、ねじり変形の際の応力分布図が、図 - 1 4 のよう出力される。これによると、ねじりを加えた方向と同一方向の糸に、最大応力が発生していることがわかる。

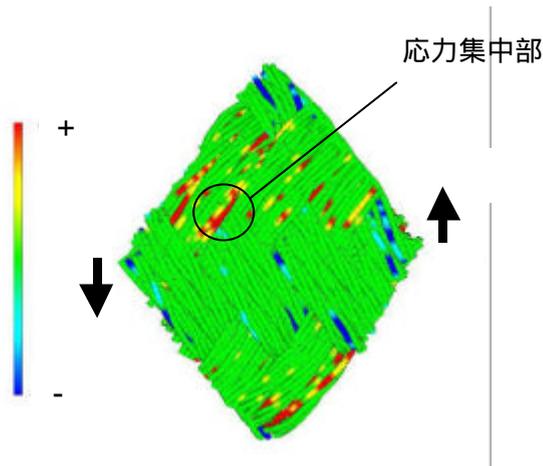


図 - 14 応力分布 (ねじり変形)

3 - 5 . 応力測定

糸層全体に働く応力 (荷重値) の測定方法を図 - 15 に示します .

測定方法は , 下糸編込み状態のホースを準備し , ホースを下図のように固定し , 歪と圧力を加える . このときの荷重値を測定する .

各々の条件 (歪・圧力) で測定した結果について , 図 - 16 に示す .

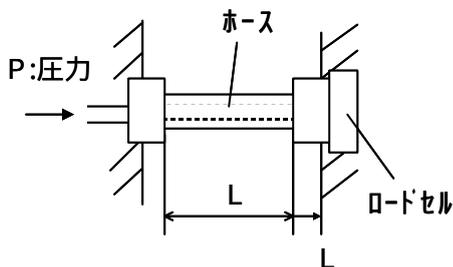


図 - 15 測定方法

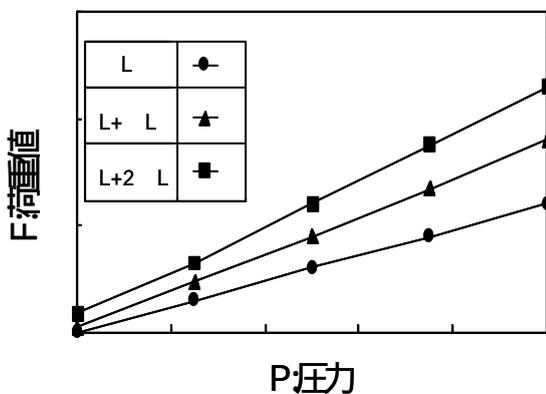


図 - 16 下糸層に働く応力 (荷重値)

4 . 結果

糸層全体に働く応力の計算値と測定値とを比較した結果について , 図 - 17 に示す .

この結果より , 実用使用領域での圧力では , 精度 $\pm 10\%$ 以内となり , 計算により応力 (荷重値) を予測することが可能であり , ホース構成の設計に活用できるものと思われる .

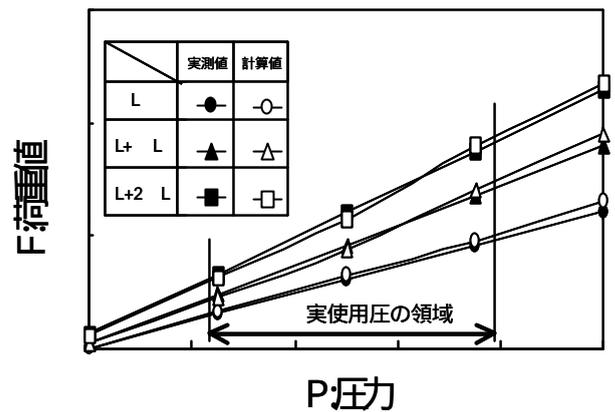


図 - 17 下糸層に働く応力 (荷重値) の比較

また , 糸層断面形状の結果を図 - 18 に示す . この計算結果をみると , 糸一本を7本の撚糸でモデル化した効果のために , 糸のつぶれを再現できている . さらに , 糸層の肉厚もほぼ一致する結果となった .

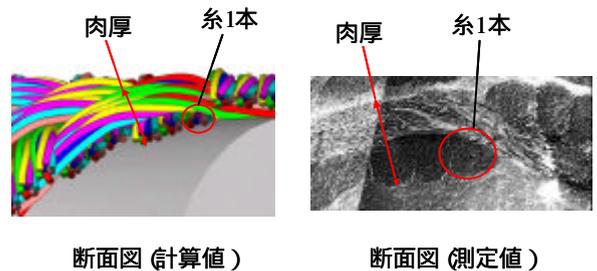


図 - 18 断面形状の比較

5 . まとめ

球体を連結したモデルで糸を表現する方法 (粒子シミュレーション法) を用いて , ホース補強糸層の応力解析を行う計算手法を開発した .

また , この手法の特徴は , 糸一本を7本の撚糸

レベルまでモデル化したので、糸の撚り状態と編込み時の糸層断面をうまく表現することができている。このため、今回の解析手法を用いることにより、ホース補強糸層のミクロ的な応力解析ができ、糸内部の応力分布まで予測することが可能となった。

さらに、今回の方法は、ホース構成のパラメータ（糸量・糸種・寸法）の変更が可能であるため、机上でのホース設計に活用できる。

謝辞

最後に、本テーマは（株）豊田中央研究所との共同開発により完成したものであり、開発に際しては、（株）豊田中央研究所材料モデリング研究室の協力をいただいた。関係者の皆様には深く感謝致します。

参考文献

- 1) 山本智, 井上良徳, 東智美, 松岡孝明: 粒子シミュレーションによる粒子分散樹脂射出成型品のミクロ構造予測, 日本機械学会論文集 (A編) (1999.3)
- 2) 山本智, 北岡克司: 粒子シミュレーション法によるホース補強糸層の応力解析, 第34回全豊田研究発表会 講演要旨(1999.3)
- 3) 山本智, 東智美, 松岡孝明, 安藤康司, 北岡克司: 粒子シミュレーション法によるホース補強糸層の応力解析, 繊維学会予稿集 (1999.5)
- 4) 山本智, 松岡孝明, 安藤康司, 北岡克司: 粒子シミュレーション法によるホース補強糸層の応力解析, 自動車技術会論文集 (2001.4)