

卒業論文

エレベータ用ワイヤロープの
摩耗量予測手法の開発

平成 30 年 2 月 5 日提出

指導教員 泉 聡志 教授

160220 辻 孝仁

目次

第1章	序論.....	7
1.1	研究背景.....	7
1.1.1	ワイヤロープの概要.....	7
1.1.2	エレベータ用ワイヤロープ.....	7
1.2	先行研究.....	8
1.3	ワイヤロープの簡略化モデルを用いた解析.....	10
1.4	本研究の新規性と研究目的.....	11
1.5	本論文の構成.....	11
第2章	研究手法.....	12
2.1	諸言.....	12
2.2	ワイヤロープのモデル化.....	12
2.3	心綱の形状変化.....	14
2.4	摩耗量の予測手法.....	15
2.4.1	ホルムの式.....	15
2.4.2	ロープ全体の摩耗傾向の予測手法.....	15
2.4.3	ブロック内の特定の節点の PV 積分値.....	19
第3章	有限要素法.....	22
3.1	諸言.....	22
3.2	材料特性.....	22
3.2.1	簡略化ストランドの材料特性.....	22
3.2.2	心綱の材料特性.....	22
3.2.3	シーブの材料特性.....	23
3.3	マススケーリング.....	23
3.4	接触の定義.....	23
3.5	心綱の形状変化の再現解析.....	24

3.5.1	解析モデル	24
3.5.2	境界条件	25
3.5.3	温度条件	25
3.5.4	その他の解析条件	25
3.5.5	形状変化後の心綱形状	26
3.6	引張曲げ解析	27
3.6.1	解析モデル	27
3.6.2	境界条件	29
3.6.3	荷重条件	31
3.6.4	その他の解析条件	32
第 4 章	解析結果	33
4.1	諸言	33
4.2	モデルの挙動	33
4.3	解析モデルの変更による接触状態の変化	34
4.3.1	心綱形状の変更による接触状態の変化	34
4.3.2	接触方法の変更による接触状態の変化	36
4.4	ブロックごとの PV 積分値	37
4.4.1	ストランドと心綱の接触による PV 積分値	39
4.4.2	ストランドとシーブの接触による PV 積分値	41
4.4.3	ストランドとストランドの接触における PV 積分値	43
4.5	最大接触力が生じる点での PV 積分値	44
4.5.1	シーブとの接触による PV 積分値	44
第 5 章	結論	48
5.1	結論	48
5.2	今後の課題	48
5.2.1	詳細モデルを用いた摩耗の検討	48
5.2.2	解析モデルの改良	48
参考文献	50	
謝辞	53	

目次

図 1-1	ワイヤロープの構成	7
図 1-2	エレベータ駆動の仕組み	8
図 1-3	詳細モデルと簡略化モデル	10
図 2-1	解析対象ワイヤロープの断面図[1].....	12
図 2-2	S(19)ロープの CAD 形状	13
図 2-3	向井[25]の解析で用いられた心綱モデル	14
図 2-4	1 ブロックの考え方	16
図 2-5	隣接ストランドとの接触	17
図 2-6	心綱との接触	17
図 2-7	各ブロックの代表節点の取り方	18
図 2-8	シーブの代表節点	18
図 2-9	任意曲面の接触	20
図 2-10	接触面圧の分布	21
図 3-1	熱解析の解析モデル	24
図 3-2	引張曲げ解析で用いる部分	25
図 3-3	形状変化後の心綱モデル	26
図 3-4	形状変化後の心綱モデルの断面図	27
図 3-5	解析モデル全体図	28
図 3-6	シーブの溝形状	28
図 3-7	ロープの曲げ角度	29
図 3-8	シーブの境界条件	30
図 3-9	ロープの境界条件	30
図 3-10	心綱中心軸上の節点の拘束条件	31
図 3-11	z=120 端面の局所座標系	32
図 4-1	引張曲げ解析におけるワイヤロープの挙動	33
図 4-2	向井の再現モデルから心綱形状のみを変更したモデル.....	35
図 4-3	昨年度の向井の再現モデル	35
図 4-4	本研究で用いたシーブを上昇させたモデル	36
図 4-5	ロープに強制変位を与えたモデル	37
図 4-6	ストランドの名前の付け方	38
図 4-7	ブロックの番号の付け方	38
図 4-8	ロープの曲げ状態	39
図 4-9	心綱との接触による PV 積分値	40

図 4-10	ブロック番号 2 のブロックの接触圧力	40
図 4-11	ブロック番号 2 のブロックの相対速度.....	41
図 4-12	シーブとの接触による PV 積分値	42
図 4-13	ブロック番号 2 と 3 のブロックのシーブとの接触圧力時刻歴変化.....	42
図 4-14	ブロック番号 2 と 3 のブロックのシーブとの相対速度.....	43
図 4-15	ストランド同士の接触による PV 積分値の時刻歴変化.....	44
図 4-16	ブロック番号 2-5 内の最大接触力を記録した節点の接触圧力時刻歴変化	46
図 4-17	ブロック番号 2-5 内の最大接触圧力を記録した節点の相対速度時刻歴変化 ..	46
図 4-18	ブロック番号 2-5 内の最大接触力を記録した節点の PV 積分値時刻歴変化 ...	47
図 5-1	シーブの変位量の考え方	49

表目次

表 2-1	ロープの形状パラメータ	13
表 3-1	簡略化ストランドの材料物性値	22
表 3-2	各部材の密度の設定値	23
表 3-3	心綱の形状変化解析の解析規模	25
表 3-4	その他の解析条件	26
表 3-5	引張曲げ解析の解析規模	29
表 3-6	ロープの曲げ角度の時刻歴変化	31
表 4-1	各パラメータの値	45

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 ワイヤロープの概要

ワイヤロープは素線を数十本捩り合わせたストランドをさらに心綱の周りに 6 から 8 本程より合わせて作られており，優れた柔軟性と高い引張り強度を併せ持つ。この特性により，ワイヤロープはクレーン，エレベータ，橋梁などといった様々な用途で使用されている。それぞれ重要視される特性が異なることから，用途に応じた多種多様なロープが存在している。ワイヤロープの構成は素線の本数や捩り方，心綱の性質などにより異なるが一般的なロープの構成は図 1-1 に示す通りである。

1.1.2 エレベータ用ワイヤロープ

本研究の対象はエレベータを駆動する際に用いられるワイヤロープである。エレベータは一般的に図 1-2 に示すトラクション式と呼ばれる方法で駆動している。釣合おもりでかごと重量のバランスをとり，巻上機でワイヤロープを動かすことで駆動しており，システム構成が簡単であるので低層ビルから高層ビルまで幅広く使用されている。

エレベータ用ワイヤロープは建築基準法により安全率を 10 以上確保することが定められている。これはワイヤロープの強度低下を予測することが困難であり，定量的な破断メカニズムが未だに解明されていないためである。エレベータ運用時にワイヤロープは巻上機やそらせ車のシーブに沿って繰り返し曲げ受け，そのときに素線間の微小すべりが生じることによる表面損傷によって素線が断線し，最終的にロープ破断にいたることが知られている。

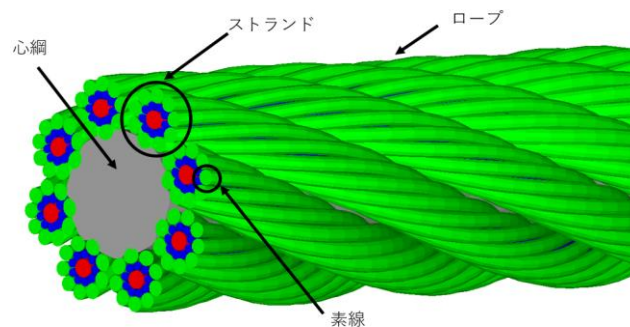


図 1-1 ワイヤロープの構成

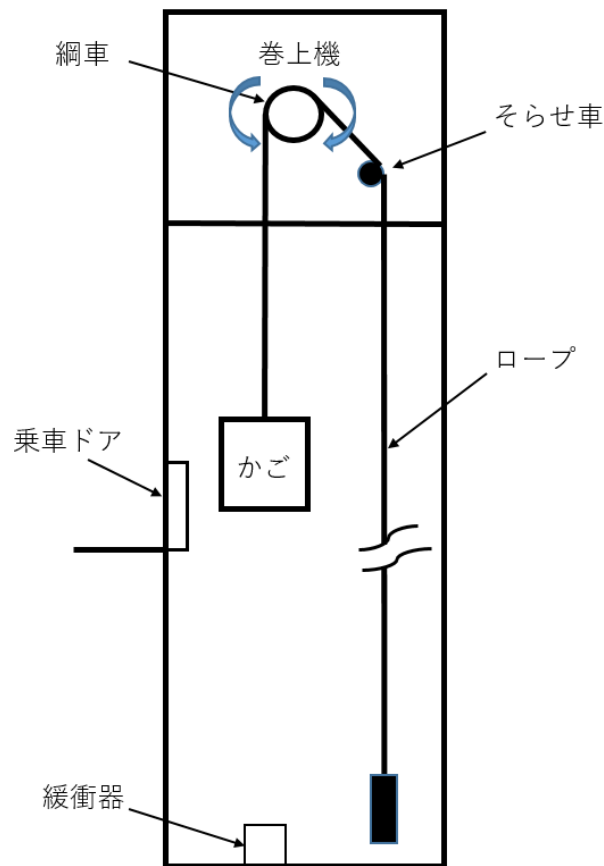


図 1-2 エレベータ駆動の仕組み

ワイヤロープの使用限度については「ワイヤロープ No.20」(東京製綱株式会社)[1]に記載されている。ワイヤロープの損傷や劣化の状態を把握するために定期的に点検が行われているが、この検査基準は経験に基づいて定められているため十分な根拠が無く、より定量的な評価が必要とされている。検査は目視で行われるため、ワイヤロープの構造上、内部の損傷を把握するのが困難であるという問題点もある。そのため、内部損傷が進んでいても検査では確認することが出来ず、ロープを取り替えないまま運用し破断にいたる恐れがある。実際に高い安全率のもとで運用されているにも関わらず、ワイヤロープの破断による事故が発生しており、ワイヤロープの強度低下が定量的に予測できないことを示している[2][3]。事故を防ぎエレベータの信頼性を向上させるために、ワイヤロープの破断メカニズムを詳細に把握することが求められている。

1.2 先行研究

ワイヤロープの力学的特性を把握するための研究は古くからなされてきた。初期の研究

では、素線の引張りのみ考慮したワイヤロープ解析モデル、続いてロープのねじりと曲げも考慮できるモデルが発表された[4][5][6][7]。その後 Costello らが従来のモデルに加えてポアソン比の影響に拠る素線の変化や、変形による螺旋角の変化などの影響を取り入れ、「Theory of Wire Rope」を出版した[8]。これらの解析モデルは現実のロープの特性とよく一致するため、ワイヤロープを設計する際に目安として用いられている。しかし、ロープの破断の原因とされる接触や摩耗、塑性などを考慮することが困難であるという欠点もある。

一方、ワイヤロープの疲労寿命の推定や断線特性の調査のために実際のワイヤロープを対象とした繰り返し曲げ疲労試験が数多く行われてきた[9][10][11][12]。これらの試験により、断線数の遷移、断線総数と可視断線数の関係、断線数と繰り返し曲げ回数との関係などが明らかになっている。しかし、疲労試験ではロープ内部の接触状態や断線が発生するまでの過渡的な観察が困難であることや、素線にかかる応力の測定方法が確立されていないといった問題点が存在する。そのため、疲労試験の結果のみではロープの破断メカニズムを解明することはできない。

ワイヤロープの破断メカニズムを解明するためには、疲労試験では観察できない過渡的なロープ内部の現象を把握することが不可欠である。そこでロープ内部の現象を把握するためのシミュレーションによる研究がなされている。シミュレーションではロープ内部の観察が可能であるだけでなく、多大なコストと時間がかかる疲労試験に比べて低コスト、短時間で行うことが可能である。また、塑性変形や素線の接触を考慮することも可能であり、ワイヤロープの破断メカニズムの解明に対して大きな役割を果たすことが期待されている。

ワイヤロープは構造が複雑であるため、数値的に解析することは困難であるとされていた。しかし、近年の有限要素法の発達や計算機の性能の向上により有限要素法を用いたワイヤロープの研究が行われるようになった[13]-[22]。これらの研究の多くはストランド 1 本を対象としていたり、荷重条件が単軸引張のものであったりと、簡略化されたモデルに関する解析にとどまっている。実際に使用されているワイヤロープを対象とした詳細な解析や、実際の使用環境に即した解析は多くはなされていない。

そこで当研究室の寺田[23]により、素線まで考慮した有限要素法解析が行われた。この研究では、すべてのストランドを詳細にモデリングすると計算負荷が大きくなるため、部分的に詳細なモデルを用いた解析を行い、ロープの内部状態の可視化を試みた。

その後、当研究室の舘[24]によりストランドの締め付け状態を考慮した解析が行われた。実際ロープの製造過程において、ストランドがあらかじめ螺旋状に成形されてから心綱に巻きつけられるため、ロープ中心への締め付け力が働く。この締め付け力を考慮したモデルについて引張曲げ解析を行い、素線の応力状態や接触状態について考察を行った。

さらに当研究室の向井[25]により、すべてのストランドを素線まで詳細にモデリングした解析を行い、ロープ内部の素線間の接触状態の考察を行った。

当研究室で行われた上記 3 つの研究では、いずれもロープの接触状態と応力状態についての考察は行われているが、エレベータ用ワイヤロープの破断の主因である摩耗について

の考察は行われていない。摩耗は接触箇所が擦れることによって生じる。よって接触状態を考察だけでなく、接触箇所のすべり量についての考察も必要である。しかし、ロープが引張曲げを受ける際、接触箇所が刻々と変化することから摩耗についての考察は容易ではなく、有効な考察の手法の開発がなされていない。よって、ロープの摩耗量を予測する解析手法の開発が必要である。

1.3 ワイヤロープの簡略化モデルを用いた解析

昨年の向井[25]の研究では、素線間の接触圧力は最外層の素線で最大となっている。よって、本研究の解析では本来、複数の素線からなるストランドを1つの連続体とみなす簡略化モデルを用い、ストランドと心綱、ストランドとシーブ、隣接ストランド同士の3種類の摩耗について考えることとする。

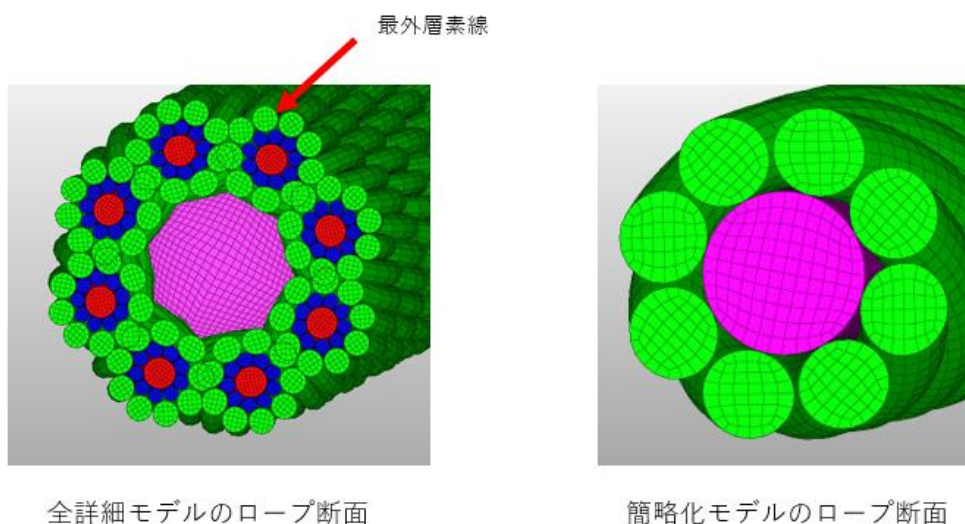


図 1-3 詳細モデルと簡略化モデル

1.4 本研究の新規性と研究目的

1.2 において説明したワイヤロープに関する先行研究に対して、本研究において新しく行ったことを以下にあげる。

1. 当研究室における先行研究では、ワイヤロープの接触状態と応力状態についての考察が行われてきたが、ワイヤロープの破断の主因である摩耗についての考察がなされておらず、摩耗を定量的に評価する方法についても触れられていない。そこで本研究ではワイヤロープの摩耗量を予測するための手法を提案する。
2. 当研究室の舘[24]、向井[25]による研究では引張曲げ解析を行う前に、心綱に対してストランドを締め付ける、プレフォームを行うことによって心綱の形状変化とロープの締め付け状態の再現を試みた。しかし、心綱の形状変化は小さく、現実の心綱の形状を再現できていない。そこで本研究では、引張曲げ解析を行う前に心綱を熱膨張させることによってストランドに食い込ませ、心綱の形状変化を再現し、ロープと心綱の位置を固定した。
3. 当研究室における先行研究では、引張曲げ解析において、ロープに強制変位を与えることによってロープがシーブに沿う挙動を再現していた。しかし、この方法ではロープがシーブに対してバウンドし、ロープ内部の接触状態とシーブとの接触状態が均一となっていなかった。そこで、当研究では単軸引張をうけるロープに対してシーブを上昇させ、接触させることでエレベータ用のワイヤロープの引張曲げの挙動を再現した。

1.5 本論文の構成

本論文は全 5 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では、解析の対象となるワイヤロープのモデル化方法や、心綱を熱膨張させる手法、摩耗量を予測する手法について述べる。

第 3 章では、本研究で行った有限要素法の解析手法や解析条件について述べる。

第 4 章では、本研究で行った有限要素法の結果を述べる。また、得られた結果について考察を行う。

第 5 章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について述べる。

第2章 研究手法

2.1 諸言

本章では，本研究の手法について述べる．ワイヤロープのモデル化，心綱を熱膨張させる手法，摩耗量を予測する手法について説明する．

2.2 ワイヤロープのモデル化

本研究で解析対象とするワイヤロープは，エレベータ用ワイヤロープとして普及している $8 \times S(19)$ と呼ばれる種類のワイヤロープである．このワイヤロープのストランド断面図を示す．

$S(19)$ ストランドはシール形と呼ばれており，各層の素線は $1+n+n$ のように表される．内層と外層の素線数は同じであり，内層の素線間のくぼみに外層の素線が収まるように充填されている．本研究ではこのストランドを1本の連続体としてモデリングする．

このワイヤロープは心綱のまわりにストランドが8本捩り合わされて構成されている．ロープの公称径は 10mm ，ロープピッチ(ストランドが心綱の周りを1周するのに要するロープの軸方向長さ)は 65mm ，ストランドピッチ(素線がストランドの中心素線の周りを1周するのに要するストランドの軸方向長さ)は 18mm である．

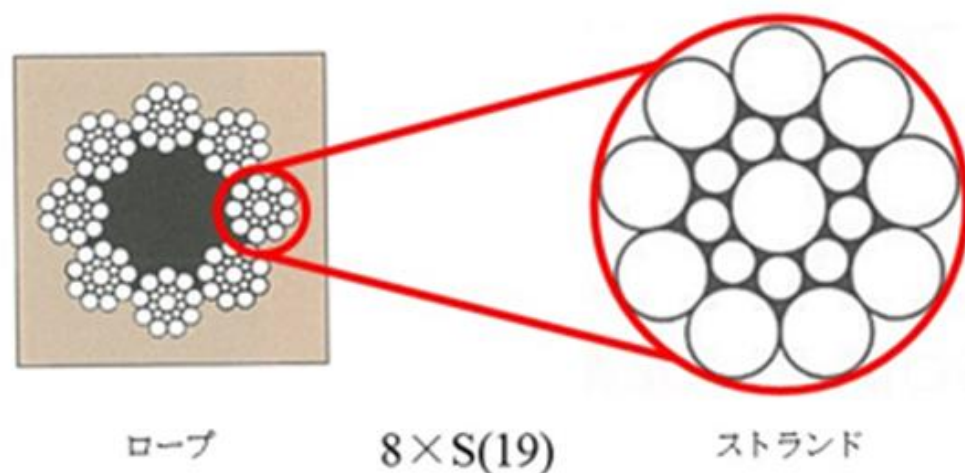


図 2-1 解析対象ワイヤロープの断面図[1]

ワイヤロープの形状は, 螺旋に関する解析的な計算に, ロープピッチ, ストランドピッチ, 素線径といったパラメータを導入することで作成が可能である. 本研究では当研究室の寺田[23]による手法を用いて 3 次元 CAD 形状を作成した. この手法については小野[26], Stanova[27], Elata[28], Hardy[29]らの論文で詳細に述べられている. また小野により出版された「工学の数学—ワイヤロープの微分幾何学—」[30]にもワイヤロープの形状に関する数学的なアプローチの手法が述べられている. 操作は Dassault Systèmes 社の 3 次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks によって行った. 作成したロープの CAD 形状を図 2-2 に示す. また, ロープ形状を作成するために用いたパラメータを表 2-1 に示す.

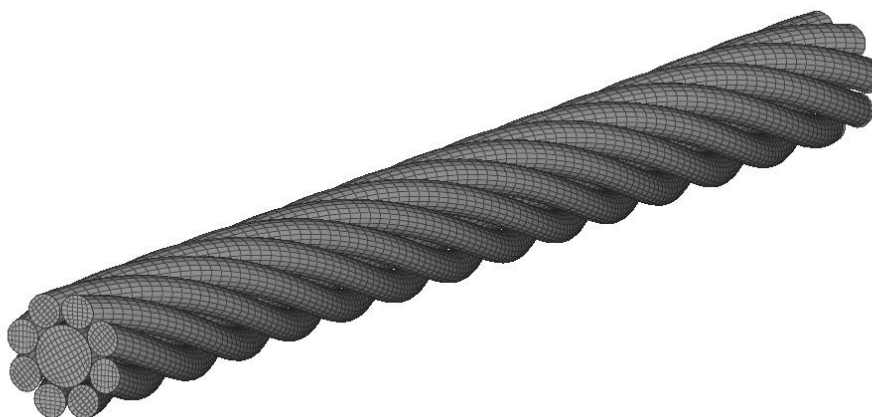


図 2-2 S(19)ロープの CAD 形状

表 2-1 ロープの形状パラメータ

ストランド数	8
ストランドの直径[mm]	2.6
心綱の直径[mm]	4.8
ロープの長さ[mm]	120

2.3 心綱の形状変化

実際に使用されているワイヤロープでは、ストランドを心綱に巻きつける際、ストランドの形状に合わせて心綱の形状も変化している。図 2-1 のロープ断面から分かるように、ストランドが心綱に食い込み、心綱の形状が星型に変化している。この形状変化によってストランドと心綱の接触面積が大きくなるだけでなく、ストランドと心綱が離れにくくなり、ロープの形状が崩れにくくなる効果がある。舘[24]、向井[25]の研究では引張曲げ解析を行う前にストランドを心綱に締め付ける、プレフォームによってこの形状の再現を試みたが図 2-3 に示すように形状変化が十分でなく、実際の心綱形状を再現しているとは言い難い。そこで本研究では心綱に熱を加えることで膨張させ、ストランドに食い込ませることによって実際の心綱の形状の再現を試みる。

エレベータ用ワイヤロープの心綱には、一般的に繊維心が用いられている。繊維心は柔軟性が大きいだけでなく、荷重が加えられると形状が変化しやすく、その後除荷されても元の形状に戻ろうとする力の働かないような特徴を持った材料である。しかし、解析モデルにこのような材料特性を与えるのは困難であり、1 度の解析で心綱の形状変化とロープの引張負荷解析を行うのは困難である。そこで本研究では 2 段階に分けて解析を行う。まず 1 段階目の解析では心綱に形状変化しやすい材料特性を与える。この心綱に対して熱を加え、熱膨張させることによってストランドが食い込んだ形状の心綱モデルを作成する。続いて 2 段階目の解析では 1 段階目の解析で得られた心綱の形状のみを取り出し、実際の心綱の材料特性を与えたうえで引張曲げ解析を行う。



図 2-3 向井[25]の解析で用いられた心綱モデル

2.4 摩耗量の予測手法

1.2 で述べた通り，ワイヤロープの摩耗は破断の主因であるにも関わらず，摩耗に注目した解析は多くは行われていない．共同研究先である三菱電機株式会社では，実験によって部位ごとの摩耗量の調査が行われており，解析においては接触箇所が多いことから，接触力が大きい特定の節点に注目し，その節点での摩耗量の考察が行われている．特定の箇所についての考察はなされているがロープ全体の摩耗の解析による考察は行われていない．

そこで本研究では簡略化ストランドモデルを用いて 2 段階に分けて，摩耗量の考察を行う．まずロープ全体をいくつかのブロックに分け，ブロックごとの摩耗量を調べる．これにより摩耗の発生しやすい箇所が分かり，ロープ全体の摩耗の発生傾向が分かる．その後，相対的に摩耗量が大きかったブロックについて，そのブロック内の最大接触力をもつ節点に注目し，その節点での摩耗量を予測する．この方法により，ワイヤロープ全体に対して摩耗が生じやすい部分が予測でき，その箇所での摩耗量を予測することができる．

2.4.1 ホルムの式

当研究室の島本[31]はホルムの式を数式 2-1 に示すように定式化した．

$$W = C \cdot K \cdot \int_0^{t_i} PV \cdot dt \quad \text{数式 2-1}$$

ここで W は摩耗量， C はサイクル数， K は比摩耗量， t_i は 1 サイクルに必要な時間， P は接触圧力， V はすべり速度である．

数式 2-1 はすべり軸受けの摩耗量のみではなく，一般に摩耗量を求める際にも可能である．よって，今回の解析では 1 度の引張曲げ解析を 1 サイクルとし， t_i を解析時間としてこの式を用い，摩耗量を考えることとする．

今回の解析は簡略化モデルを用いており，またロープ間の摩耗を減らすための潤滑剤であるグリスの影響を考慮していないので，正確な摩耗量を知ることはできない．よって数式 2-1 において PV 積分値を求めることで摩耗の考察を行う．

2.4.2 ロープ全体の摩耗傾向の予測手法

ロープ全体の摩耗傾向の予測手法を説明する．本来であればロープのすべての節点について，各々摩耗量を考えるべきである．しかし，ロープの構造は複雑であり節点数も多く，接触箇所が時々刻々と変化するため，1 つ 1 つの節点から摩耗量を考えるのは困難である．そこでロープ全体を一定の要素数ごとにまとめて 1 つのブロックとして考え，そのブロックに含まれる全要素の PV 積分値を比較することによって相対的な摩耗量を考え，摩耗傾向を調べる．

図 2-4 に示すようにストランドと心綱のメッシュを長手方向に 10 要素ずつ分け，1 ブロ

ックとする.

隣接するストランドとの接触については, 図 2-5 に示すように注目するストランドのブロック(①)について, すぐ隣にある隣接ストランドのブロック(②)と, ②の両隣のブロック(③)との接触を考え, ①内の全要素とそれぞれのブロックとの接触力を時刻歴ファイルとして出力する.

心綱との接触については, 図 2-6 に示すように注目するストランドのブロック(①)について, すぐ隣にある心綱のブロック(④)と, ④の両隣のブロックとの接触を考え, ①内の全要素とそれぞれのブロックとの接触力を時刻歴ファイルとして出力する.

シーブとの接触については, シーブはブロックごとに分けずに考えるので, 注目するブロック内の全要素とシーブの接触力を時刻歴ファイルとして出力する.

それぞれの接触について本来であれば接触している要素と接触していない要素があり, 接触力を接触している要素の表面積で割り, 接触圧力としなければならない. しかし, 接触要素数は時々刻々と変化し, ある時間での接触要素数を考えることは困難である. そこで本研究では, ストランドのブロックを円柱形と近似して, 出力した接触力を円柱側面の表面積で割ることにより, 模式的に接触圧力として扱うこととする.

また, 図 2-7 に示すように, それぞれの心綱のブロック, ストランドのブロックの長手方向の中心かつ中心軸上にある節点を代表節点として速度を出力する. シーブに関しては図 2-8 に示すように, $z=0$ のシーブ頂点の節点を代表節点として, 速度を出力する.

以上の方法で求めた接触圧力と速度を用いて数式 2-1 の PV 積分値を考える. それぞれのブロックについて, ストランドとの接触による PV 積分値, 心綱との接触による PV 積分値, シーブとの PV 積分値をそれぞれ計算し, 相対的な摩耗量を考察しワイヤロープの摩耗傾向を求める.

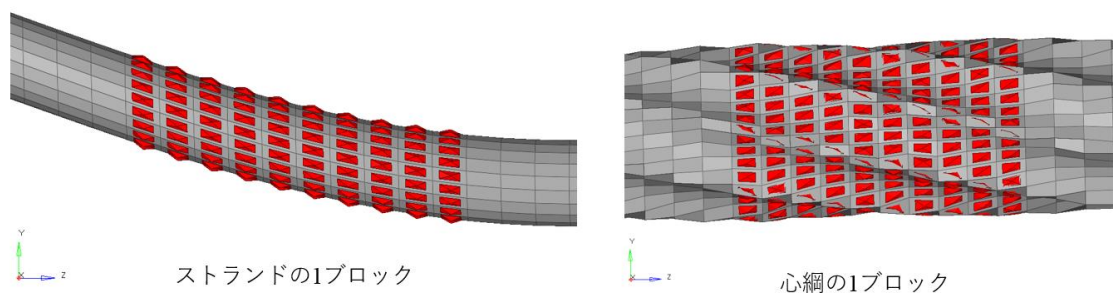


図 2-4 1ブロックの考え方

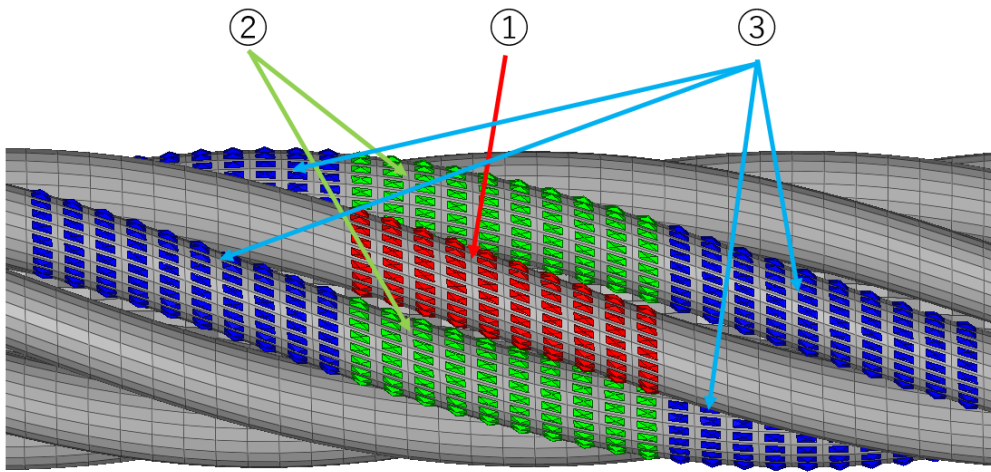


図 2-5 隣接ストランドとの接触

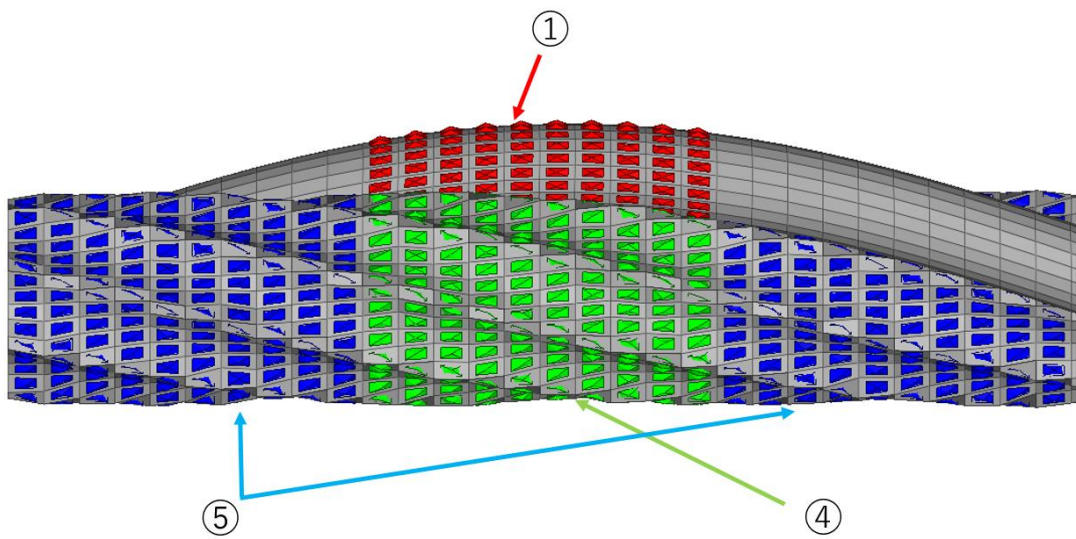


図 2-6 心綱との接触

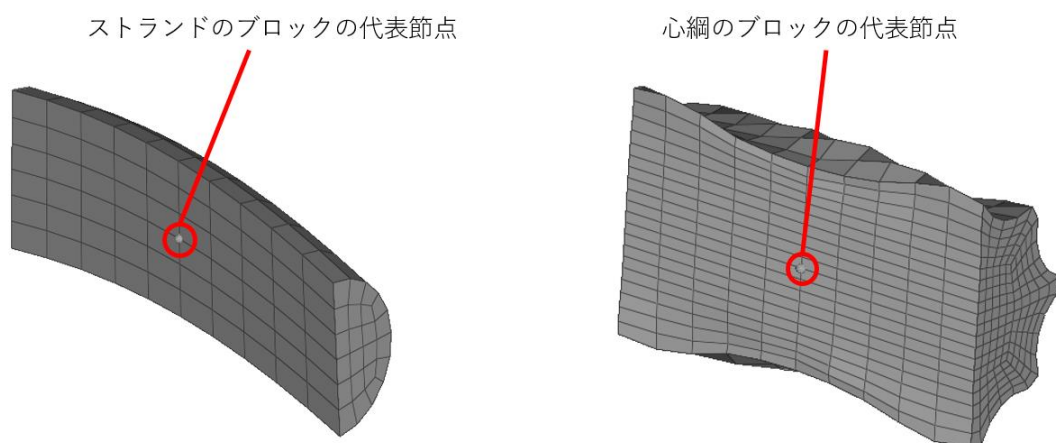


図 2-7 各ブロックの代表節点の取り方



図 2-8 シープの代表節点

2.4.3 ブロック内の特定の節点の PV 積分値

2.4.2 の方法でロープ全体の摩耗傾向を調べた後、相対的に摩耗量が大きいストランドのブロックについて、そのブロック内の接触力が最大となっている節点に関して、数式 2-1 の PV 積分値を計算し摩耗量を予測する方法を説明する。

実際に摩耗が生じる際には、摩耗により接触箇所の形状が変化し、接触面積が変化する。しかし、有限要素法解析では摩耗による要素の体積の減少は表現できないため、解析ソフトから出力される接触圧力は正確な値ではないと考えられる。そこで本研究では、ヘルツの接触理論を用いて、ストランドの節点の接触力から接触圧力を求め PV 積分値を考える。

心綱とストランドの摩耗については本研究では考えないこととする。1つ目の理由としては、心綱の形状が複雑でありヘルツの接触理論を用いるのが困難であること。2つ目の理由としては、心綱のヤング率は小さく、実際の心綱とストランドの摩耗は単純に接触によるものではなく、他の箇所の摩耗により生じた摩耗粉が心綱とストランドの間に入り込むことによって起こるものであり、他の箇所が十分摩耗した後に起こるものであるからである。

実際のストランドの接触領域は楕円形となっている。そこで本研究では任意曲面体との接触におけるヘルツの接触理論式を用いる[32][33]。図 2-9 のようにそれぞれ主曲率半径 R_1 , R_1' および R_2 , R_2' を有する 2 個の任意曲面体が、主曲率 $1/R_1$, $1/R_2$ を含む面の角度が φ で、接触力 F で接触するときを考える。接触面圧 $p(x, y)$ は図 2-10 のような半楕円体状分布で、楕円形接触面の長軸半径 a , 短軸半径 b は数式 2-2, 数式 2-3 のように表される。

$$a = \alpha \left(\frac{3F}{4AE^*} \right)^{1/3} \quad \text{数式 2-2}$$

$$b = \beta \left(\frac{3F}{4AE^*} \right)^{1/3} \quad \text{数式 2-3}$$

ただし E^* は 2 つの曲面体のヤング率 E_1 , E_2 とポアソン比 ν_1 , ν_2 を用いて数式 2-4 のように表される。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad \text{数式 2-4}$$

また α , β は $\cos\theta = B/A$ に対して求まるパラメータである。ここに

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad \text{数式 2-5}$$

$$B = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\varphi \right\}^{1/2} \quad \text{数式 2-6}$$

である。

これらを用いて $p(x,y)$ は

$$p(x,y) = p_o \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{1/2} \quad \text{数式 2-7}$$

$$p_o = \frac{3F}{2\pi ab} \quad \text{数式 2-8}$$

と表される．よって，PV 積分値を計算する際には最大接触力である数式 2-8 の値を用いることとする．

節点間の相対速度の考え方を説明する．注目するストランドのブロック内の節点と接触するシーブ，心綱，隣り合うストランドの節点はそれぞれ時々刻々と変化するので，すべての時刻において接触している節点を正確に把握するのは困難である．よって，相対速度を求める際には最大接触力を記録した瞬間に，最も接近している節点との相対速度を考えるとする．

以上の方法で求めた接触圧力と相対速度を用いて，相対的な摩耗量の大きいストランドのブロック内において，接触力が最大となっている節点の PV 積分値を求め，摩耗量を考察する．

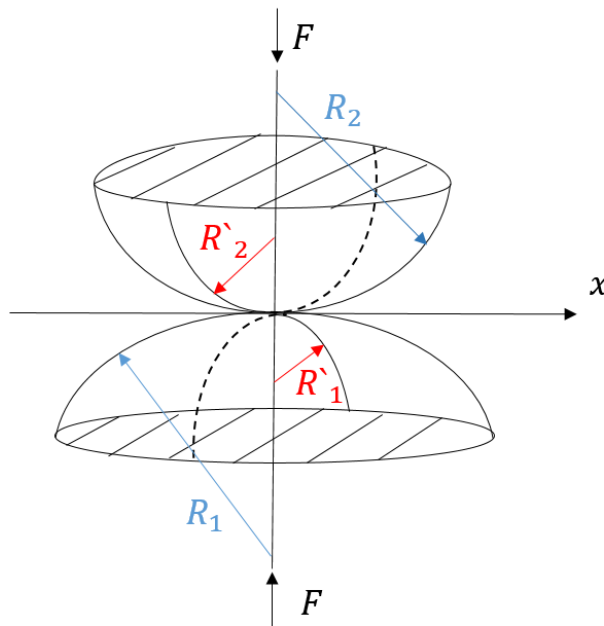


図 2-9 任意曲面の接触

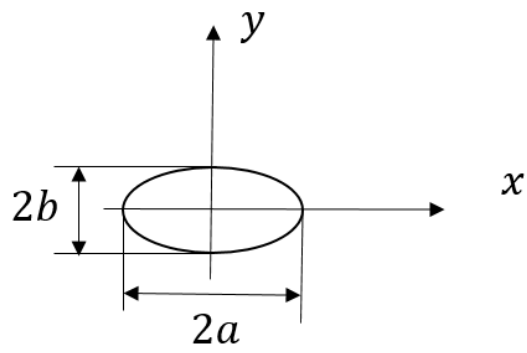


図 2-10 接触面圧の分布

第3章 有限要素法

3.1 諸言

本章では，本研究で行った有限要素法解析の解析条件を説明する．最初にストランドの位置を固定した上で心綱に熱を加え熱膨張させ，心綱をストランドに食い込ませることによって心綱の形状変化を再現する．その後，形状変化した心綱モデルを用いたワイヤロープモデルに対して引張荷重を加えながらシーブを接触させる引張曲げ解析を行う．

3.2 材料特性

3.2.1 簡略化ストランドの材料特性

本研究では簡略化ストランドを弾塑性体としてモデリングした．その物性値を表 3-1 に示す．実際のストランドは複数の素線から構成されており，連続体として均質化された簡略化ストランドは実在する物体ではないため，ここでは簡略化ストランドの材料特性の名称を有効ヤング率，有効ポアソン比と呼ぶことにする．ストランドの有効ヤング率は，館の研究[24]で用いられたものを用いる．有効ヤング率は東京製綱株式会社で行われたストランドの単軸引張試験から得られたデータより館が推定したものである．有効ポアソン比は素線のポアソン比である，0.3 を用いる．

表 3-1 簡略化ストランドの材料物性値

有効ヤング率[GPa]	有効ポアソン比
128	0.3

3.2.2 心綱の材料特性

解析対象であるエレベータ用ワイヤロープで用いられている心綱は麻製の繊維心である．繊維心の特徴については 2.3 で述べた．1 段階目の心綱を熱膨張させる解析では心綱の材料を超弾性ゴムとし，ポアソン比を 0.495 とした．また，温度上昇により膨張するように線膨張係数を 1.0/K とした．2 段階目の引張曲げ解析では 1 段階目の解析後の形状を保持させ，弾塑性体としてモデリングしている．ヤング率は 200MPa とした．これは共同研究先である三菱電機株式会社の実験データより得られたものである．ポアソン比は一般的な繊維の材料特性として 0.4 とした．

3.2.3 シーブの材料特性

シーブの材料特性は一般的な炭素鋼であると想定し、ヤング率を 200GPa、ポアソン比を 0.3 と定義した。

3.3 マススケーリング

エレベータ用ワイヤロープの構造は複雑であり、各部材同士の接触箇所が非常に多く、陰解法では計算が収束しない。よって、本研究の解析では陽解法を用いた。陽解法において、計算時間を短縮する手法にマススケーリングがある。本研究で用いたマススケーリングについて説明する。

ロープを動かす過程において、ロープに加わる力は応力波として部材中を伝わる。このとき、応力波の伝播を正しく再現するために、解析時間刻みは応力波が隣り合う要素に伝わる時間よりも小さくなければならないこの条件はクーラン条件と呼ばれる。応力波の伝播速度 C は数式 3-1 で表される。

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

数式 3-1

ここで E はヤング率、 ρ は部材の密度である。(数式)より、部材の密度を大きくすれば応力波の伝播が速くなり、解析時間刻みを大きくすることができる。本研究の解析では、各部材の密度を実際の値の 100 倍に設定することで計算時間を短縮している。各部材に使用した密度の値を表 3-2 に示す。

表 3-2 各部材の密度の設定値

	密度[ton/mm ³]
ストランド	8×10^{-7}
心綱	2×10^{-8}
シーブ	8×10^{-7}

3.4 接触の定義

各要素間の接触を定義する。本研究で用いるモデルはソリッド要素を用いており、ソリッド要素間の接触計算はペナルティ法を用いる。

ペナルティ法は接触要素の食い込み量に比例した反力を発生させる手法である。ペナルティ法による接触の導入にはマスター、スレーブ、ギャップという概念を用いる。接触する 2 要素について一方の要素に含まれるスレーブ節点が、もう一方の要素のマスター面要素と

接触しているかの判定のために、ギャップ距離を定義する。スレーブである節点がマスターである面要素に接近して、ギャップ距離内に貫入すると、マスターとスレーブの間に仮想的な弾性バネが生じる。これによって節点を面要素から遠ざけようとする、食い込み量に比例した力が生じる。再度節点がギャップ距離外に出るとこのバネは削除される。

3.5 心綱の形状変化の再現解析

材料を超弾性ゴムに設定した心綱に対して、熱を加えることにより膨張させ、実際の心綱の形状を再現する解析について説明する。この解析により得られた心綱の形状のみを取り出し、引張曲げ解析に用いる。

3.5.1 解析モデル

本解析で用いた心綱のメッシュ形状を図 3-1 に示す。引張曲げ解析と同じ大きさのモデルでは異常変形が起きてしまったので、このモデルは z 方向の長さを、引張曲げ解析で用いるモデルの約 3 倍としている。このモデルについて解析後に図 3-2 にあるように $z=0$ から $z=120$ のメッシュ形状のみを取り出し、引張曲げ解析で用いる。この解析モデルの節点数および要素数を表 3-3 に示す。

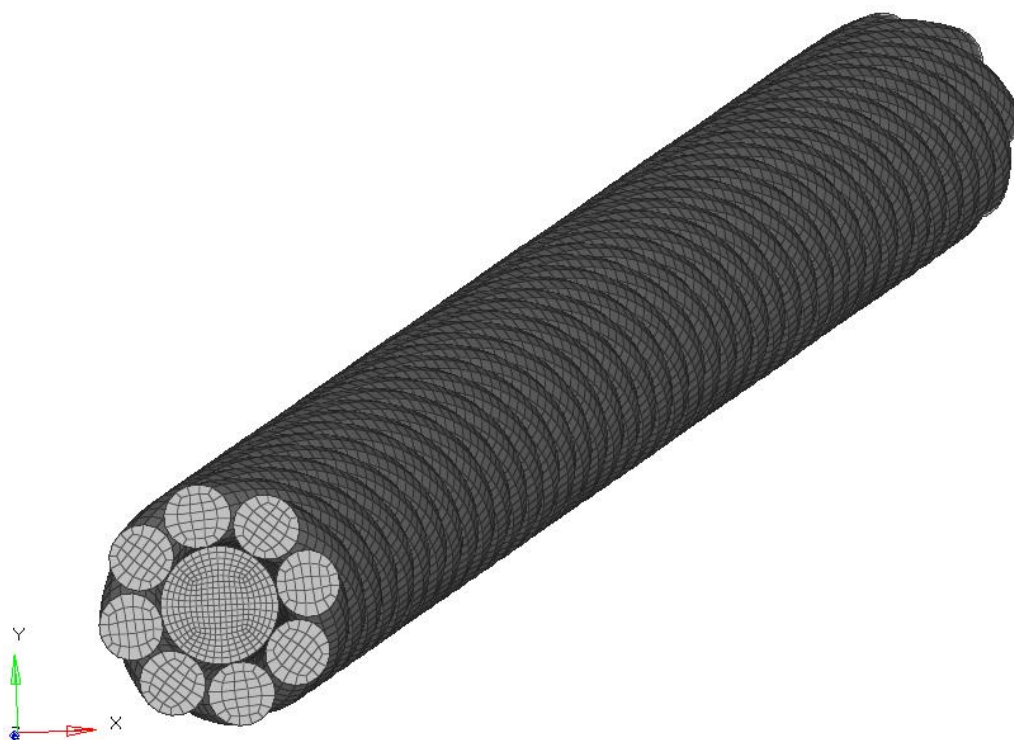


図 3-1 熱解析の解析モデル

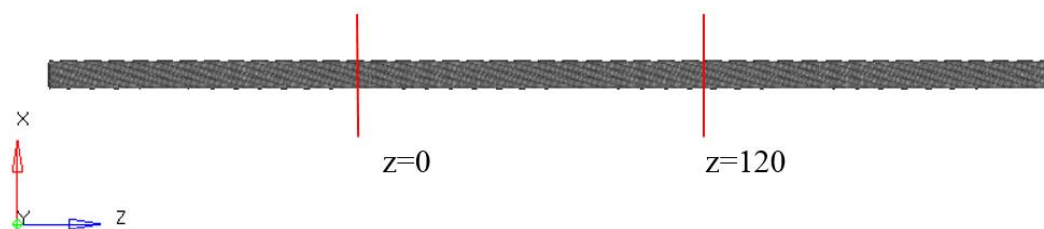


図 3-2 引張曲げ解析で用いる部分

表 3-3 心綱の形状変化解析の解析規模

節点数	224991
要素数	191800

3.5.2 境界条件

心綱中心軸上の節点については x , y , z 方向の変位を拘束し完全固定とし, 他の節点は z 方向のみ拘束し径方向にのみ変位するようにした. 簡略化ストランドについては全節点を x , y , z 方向について拘束し, 剛体とした.

3.5.3 温度条件

心綱の全節点に対して初期温度 300K を与え, 0.03s の解析時間において線形に温度上昇させ, 最終的に 302K となるように強制温度を与えた.

3.5.4 その他の解析条件

その他の解析条件を表 3-4 に示す. マススケーリングを行うことにより, 慣性力が大きくなりすぎてしまうことや, 接触により高周波振動が発生する. これらを抑制するために動的緩和法を用いている.

表 3-4 その他の解析条件

解析ソフト	HyperWorks RADIOSS(準静的陽解法)
要素	ソリッド要素
解析時間[s]	0.03
タイムステップ[s]	4.0×10^{-8}
接触アルゴリズム	ペナルティ法
摩擦係数	0.1
その他	動的緩和法

3.5.5 形状変化後の心綱形状

形状変化させた後の心綱のモデルの $z=0$ から $z=120$ の部分を図 3-3, 図 3-4 に示す. 心綱が熱膨張することで心綱がストランドの隙間に食い込むように形状が変化している. 断面図を見ると 2.2 で示した実際の心綱の断面のように, 星型に形状が変化していることがわかる. この心綱モデルについて応力状態等は初期化し, 形状データのみを出力して, 引張曲げ解析に用いる.

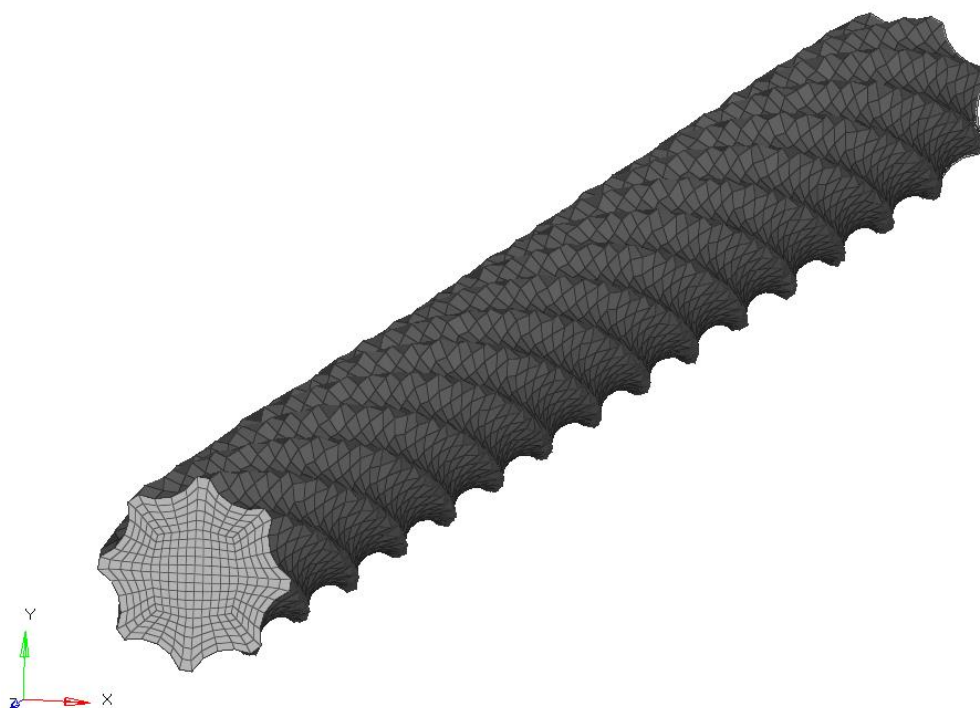


図 3-3 形状変化後の心綱モデル

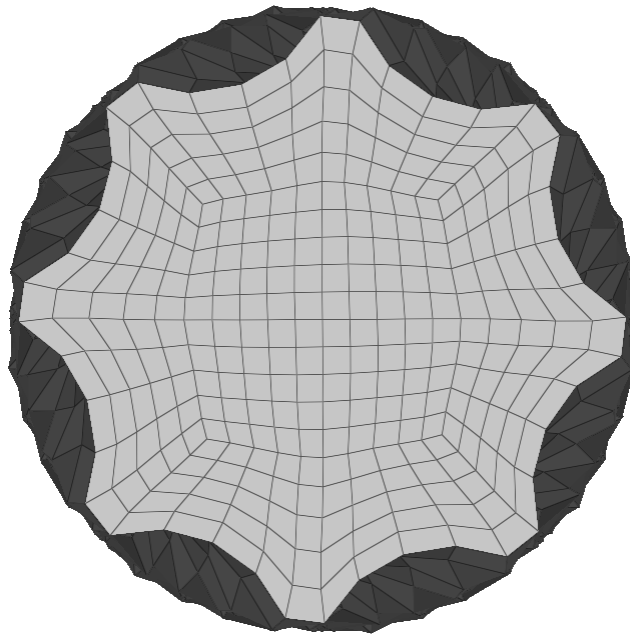


図 3-4 形状変化後の心綱モデルの断面図

3.6 引張曲げ解析

熱膨張させた心綱モデルを用いてワイヤロープをモデリングし，シーブを接触させることでエレベータ用ワイヤロープの引張曲げを再現し，ワイヤロープの摩耗量の予測を行う．

3.6.1 解析モデル

ワイヤロープとエレベータ用のシーブの上半部をモデリングした．モデルの全体図を図 3-5 に示す．初期状態のロープの長手方向を z 軸とし，シーブの側面に垂直となる方向を x 軸とした．座標軸の原点はシーブ頂点におけるロープ断面の中心点とした．

D をシーブ径， d をロープ径とすると， D/d の値が小さいほどロープに働く曲げ応力は大きくなる．エレベータ用ワイヤロープにおいては D/d の値が 40 以上とするように定められている．よって本研究の解析では最も厳しい曲げ条件である， D/d の値が 40 となるようにシーブの径を 400mm とした．シーブの溝形状としては，図 3-6 に示すように溝径 10.8mm，溝角度 30° の U 型溝を用いた．

本研究の解析では図 3-7 に示すようにロープの曲げ角度を 34.5° としている．この値はワイヤロープに 4,000N の単軸引張解析を行い，解析後のロープの長さを求めこの長さでロープがシーブに巻きつくと仮定した際になす角度である．

本解析に用いたモデルの節点数および要素数を表 3-5 に示す．

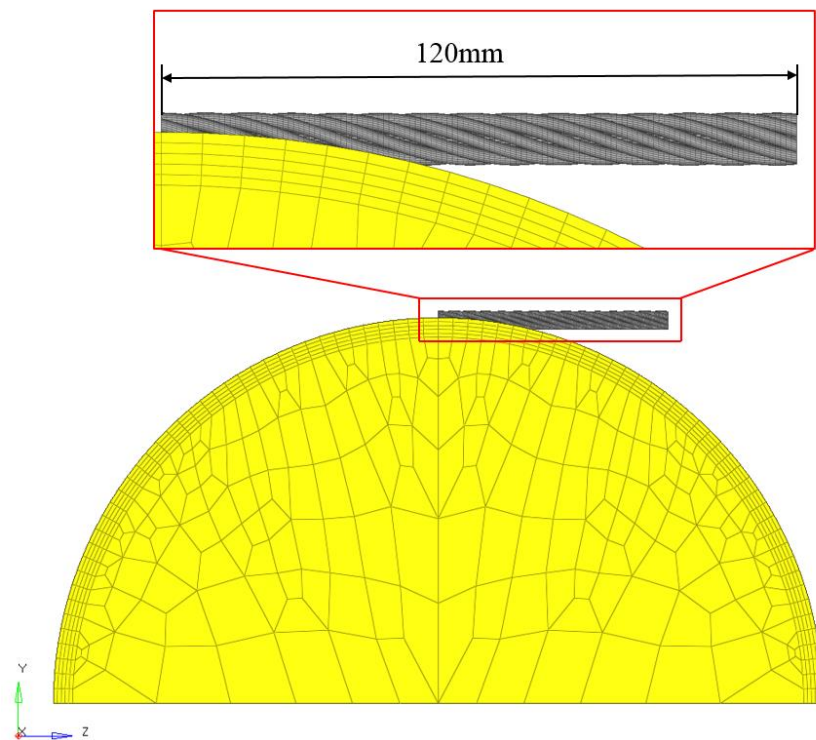


図 3-5 解析モデル全体図

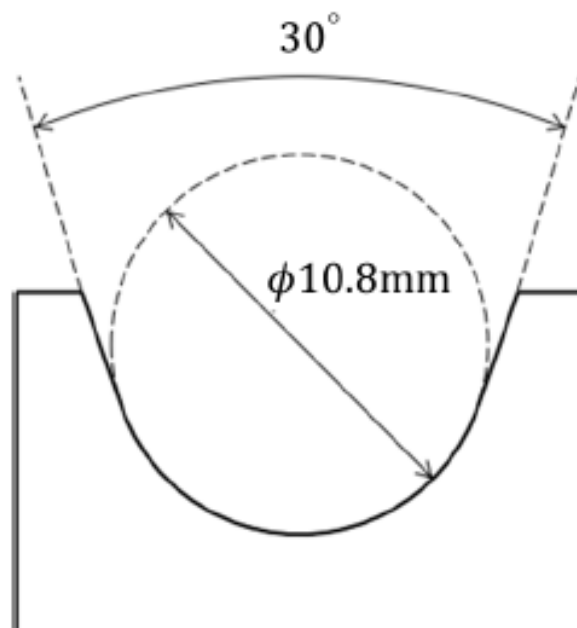


図 3-6 シーブの溝形状

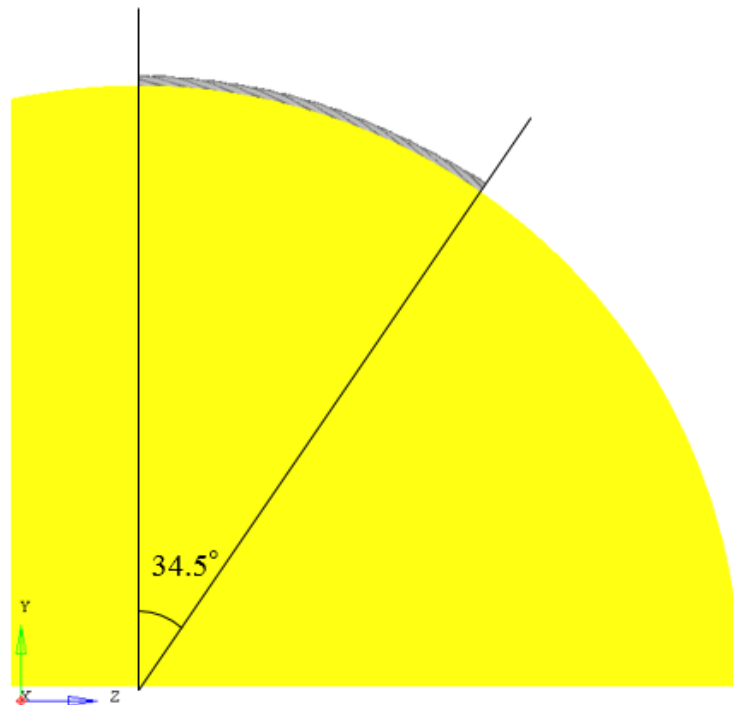


図 3-7 ロープの曲げ角度

表 3-5 引張曲げ解析の解析規模

節点数	98595
要素数	83074

3.6.2 境界条件

シーブの境界条件について説明する．シーブの $z=0$ の断面の節点について z 方向の変位を拘束する．シーブ底面の $x=z=0$ の節点について x 方向の変位を拘束する．また，シーブの底面の節点について y 方向変位を与える(図 3-8)．変位を与える式として，向井[25]の研究で使用されたインボリュート曲線の y 方向の式を用いた．その式を数式 3-2 に示す．

$$y = -R + R\cos\theta - (L - R\theta)\sin\theta \quad \text{数式 3-2}$$

ここで R はシーブ中心からロープ中心までの距離， L はシーブ頂点からロープ端面までの長さ， θ は曲げ角度である．曲げ角度の時刻歴変化を表 3-6 に示す．

ロープの境界条件について説明する．心綱の $z=0$ の端面について，中心節点の x ， z 方向の変位と x ， y ， z 軸周りの回転を拘束した．心綱の $z=120$ の端面については，全節点を z 軸周りの回転を拘束し，中心節点については x ， y 方向の変位を拘束しロープがシーブに巻きつく挙動を再現した(図 3-9)．心綱の中心軸上の節点については x 方向の変位を拘束した(図

3-10).

ロープ端面の心綱とストランドの拘束については、心綱の中心節点に心綱，ストランドのすべての節点を剛体接続した。

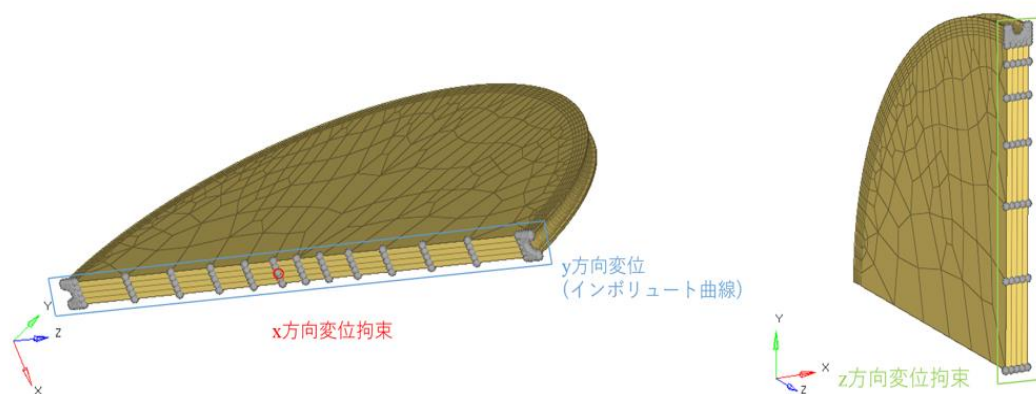


図 3-8 シーブの境界条件

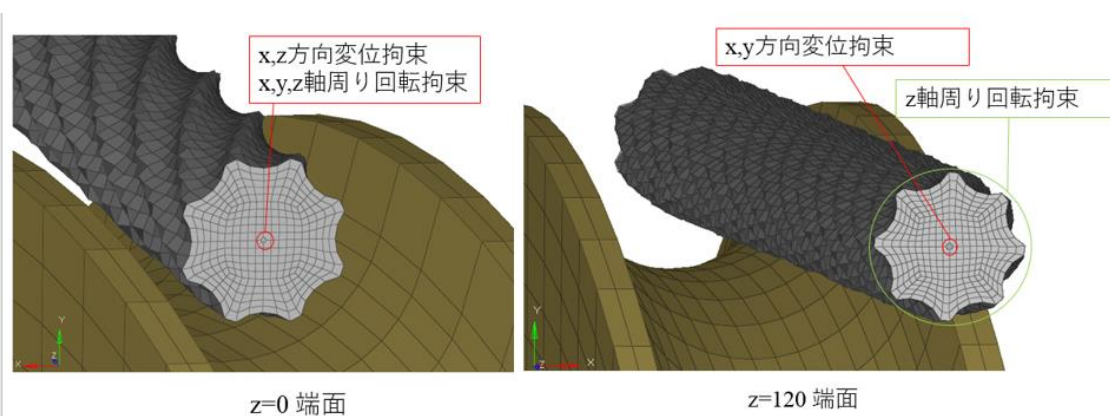


図 3-9 ロープの境界条件

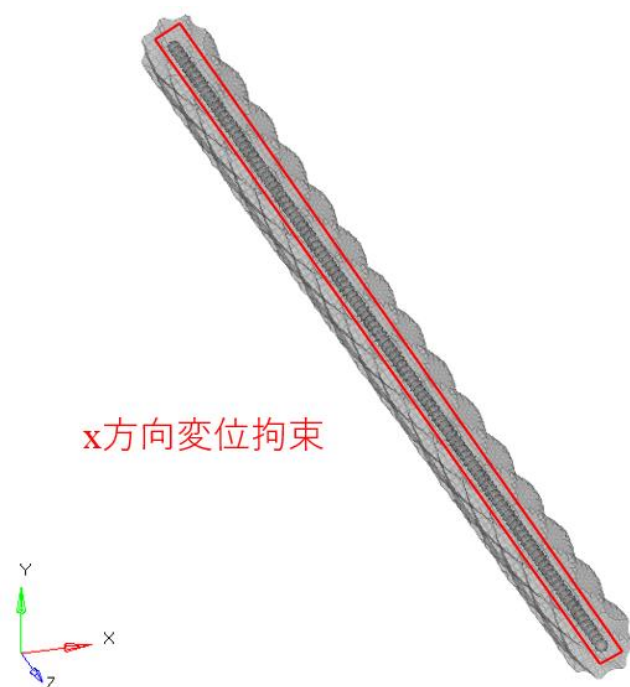


図 3-10 心綱中心軸上の節点の拘束条件

表 3-6 ロープの曲げ角度の時刻歴変化

解析時間[s]	角度 θ [°]
0—0.025	0—34.5
0.025—0.03	34.5

3.6.3 荷重条件

引張荷重として 500N を 8 本の簡略化ストランドのそれぞれの $z=120$ 端面の中心節点に与え、ロープ全体として計 4000N の引張荷重を加えることになる。これは公称径 10mm のエレベータ用ワイヤロープの最大許容荷重である。常に引張荷重がロープの $z=120$ 端面に垂直に加わるように、図 3-11 に示すように $z=120$ のロープ端面とともに動く局所座標系を定義し、この局所座標系の z 方向に荷重を与えた。

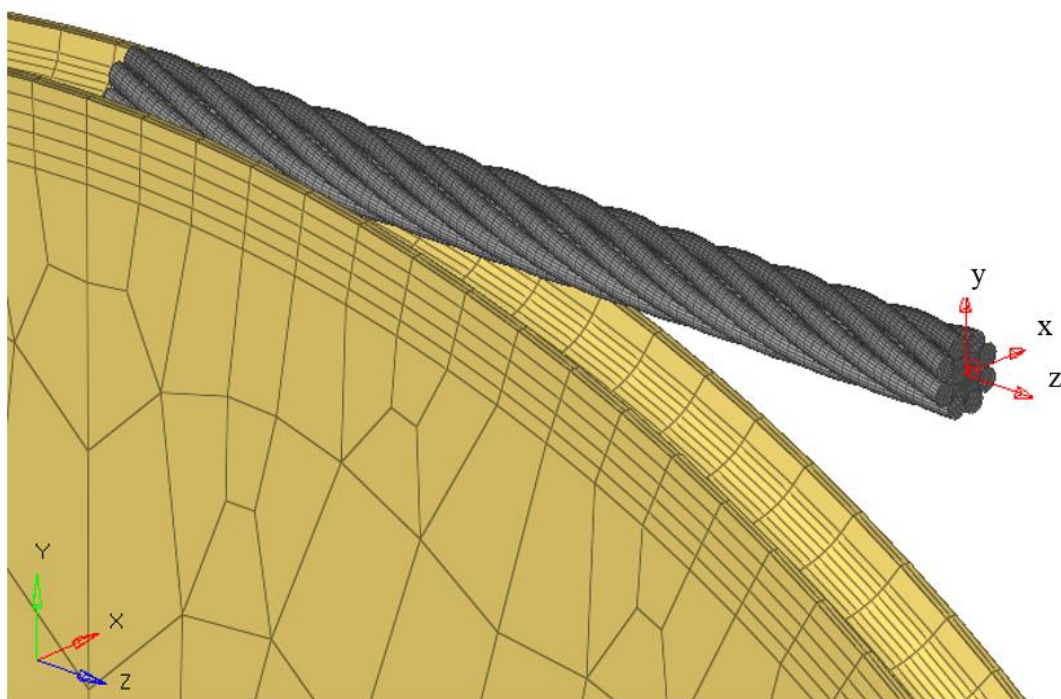


図 3-11 $z=120$ 端面の局所座標系

3.6.4 その他の解析条件

その他の解析条件は 3.5.4 に示したものと同様である.

第4章 解析結果

4.1 諸言

本章では 3.6 において説明したワイヤロープの引張曲げ解析の結果から，2.4 において説明した摩耗量予測手法を用いてワイヤロープの摩耗量についての考察を行う．

4.2 モデルの挙動

引張曲げ解析によって得られたワイヤロープの挙動を図 4-1 に示す．ただし 0.025[s]から 0.03[s]間ではシーブは静止しているので省略した．本研究では，シーブを上昇させることでロープとの接触の再現を試みたが，当研究室の舘[24]，向井[25]による強制変位を与える解析に比べ，ロープの曲げの挙動が滑らかになり，曲げ後のロープの振動も少なくなっておりより現実の引張曲げの挙動に近くなったと考えられる．

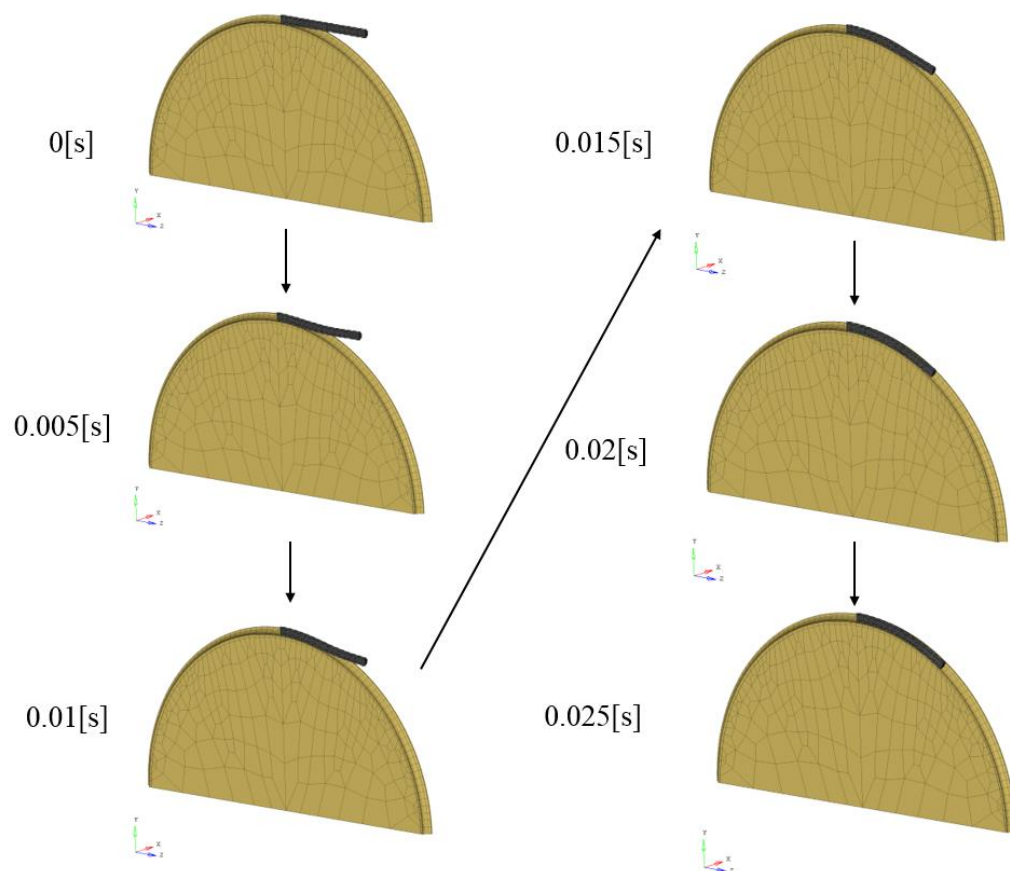


図 4-1 引張曲げ解析におけるワイヤロープの挙動

4.3 解析モデルの変更による接触状態の変化

1.4 において説明したように当研究室にて行われた先行研究[23][24][25]からの変更点として、本研究で用いたモデルでは

1. 心綱形状の再現方法
2. ワイヤロープとシーブの接触方法

があげられる。昨年までのモデルと、最終的なワイヤロープの接触状態の比較を行うことにより本研究で用いた解析手法について考察する。

4.3.1 心綱形状の変更による接触状態の変化

心綱の形状変化を 2.3 に説明した方法で再現したことによるワイヤロープの接触状態の変化について考察する。ここでは昨年度向井[25]によって行われた解析を簡略化ストランドで再現したモデルと、そのモデルの心綱を熱膨張により形状変化させたモデルについて比較を行う。図 4-2 は向井の再現モデルから心綱を熱膨張によって形状を変化させたモデルであり、図 4-3 は昨年度の向井の再現モデルある。比較すると分かるように図 4-2 は図 4-3 に比べて接触力の分布が広くなっており、接触面積が広がっている。昨年度の向井のモデルでは心綱とストランドとの接触箇所が少なく、ワイヤロープの曲げ状態において心綱とストランドが離れてしまうという問題点があったが、心綱の形状の再現方法を変更したことにより接触箇所が増え、曲げ状態でも心綱とストランドが接触しており、実際のワイヤロープの挙動に近づいたと言える。

さらに曲げ状態の再現のために、向井の解析で用いられた方法である、ロープの $z=120$ 端面にインボリュート曲線による強制変位を 2 つのモデルについて同様に与えている。強制変位の与え方は同じであるのに、心綱形状の変化によってワイヤロープとシーブの接触についても、接触箇所が増えていることが分かる。これより心綱形状はロープ内部の接触状態だけでなく、ロープ全体の挙動に対しても大きな影響があることが分かり、今回の心綱モデルはワイヤロープがシーブに巻きつく挙動をより正確に再現していると考えられる。

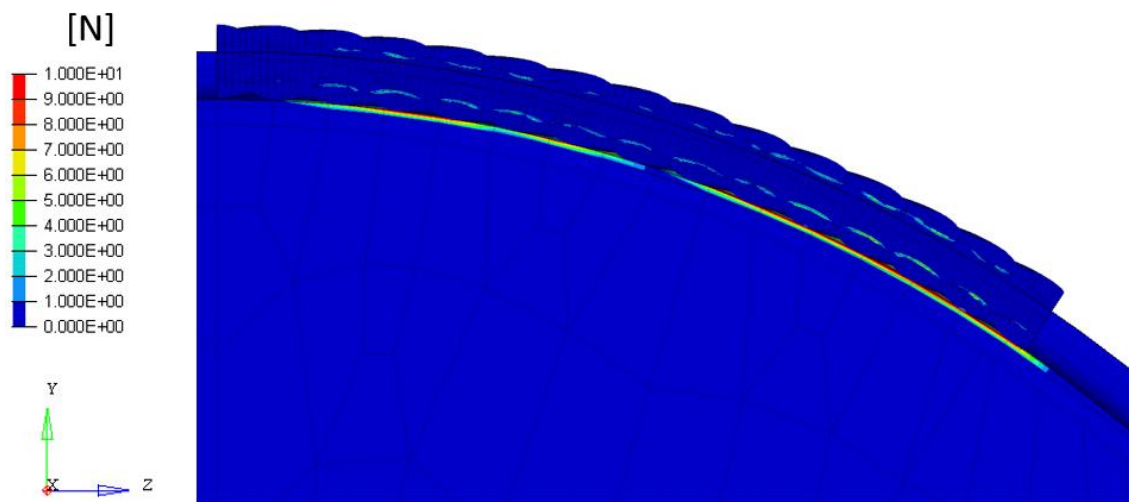


図 4-2 向井の再現モデルから心網形状のみを変更したモデル

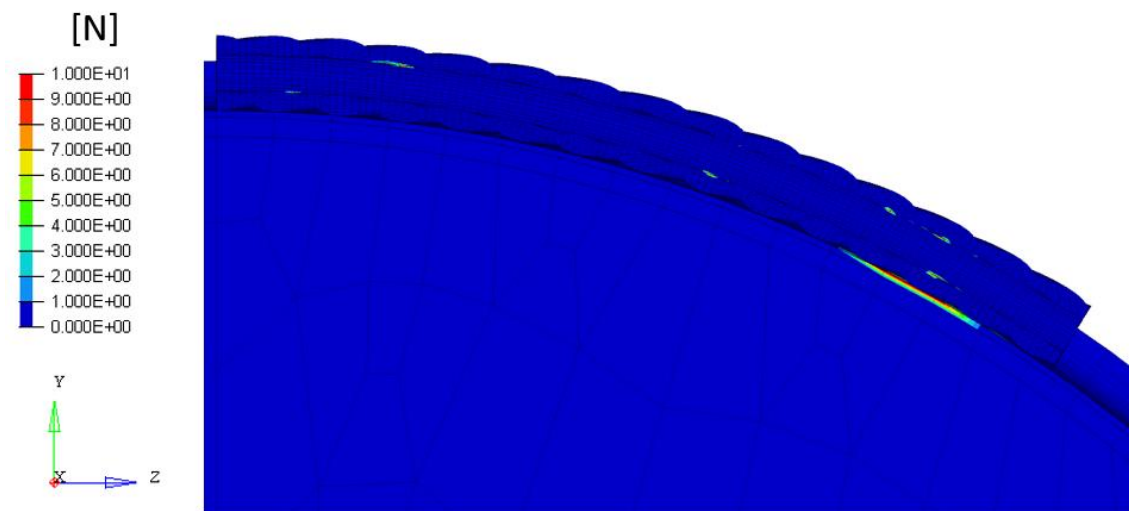


図 4-3 昨年度の向井の再現モデル

4.3.2 接触方法の変更による接触状態の変化

続いて 4.3.1 で示した向井の再現モデルの心綱の形状のみを変化させ、ロープへの強制変位によって曲げを再現したモデルと、3.6 で説明したようにシーブを上昇させることで曲げを再現した本研究のモデルの接触状態の変化について考察する。図 4-4 は図 4-5 に比べ、心綱とストランドの接触力が大きくなっており現実のワイヤロープ内部の締めりをより再現していると考えられる。シーブとの接触についても図 4-5 ではロープの長手方向中心付近において接触力が小さくなってしまっているのに対し、図 4-4 ではロープ長手方向の接触力の分布がより均一になっている。

以上のように昨年度の向井のモデルに比べてロープ内部の接触，シーブとの接触ともに接触状態が現実の挙動により近づいたと考えられる

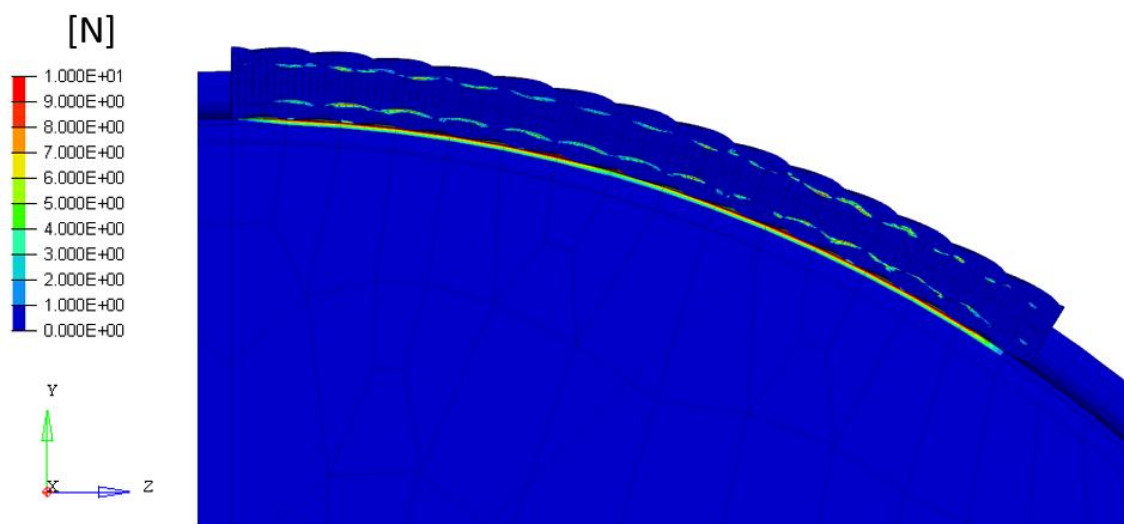


図 4-4 本研究で用いたシーブを上昇させたモデル

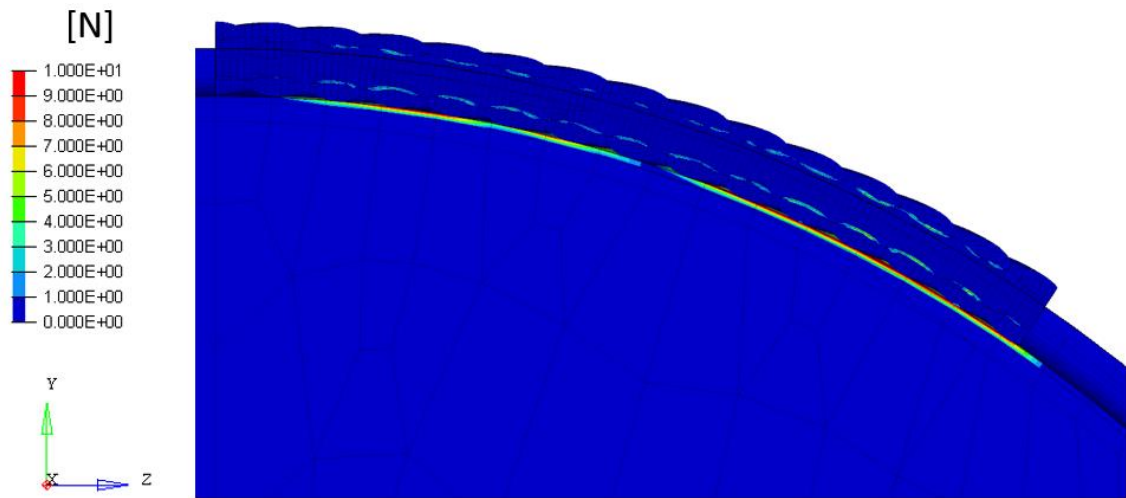


図 4-5 ロープに強制変位を与えたモデル

4.4 ブロックごとの PV 積分値

この節では 2.4.2 で説明した，ロープ全体の摩耗傾向を把握するためのブロックごとの摩耗量についての結果を説明し，考察を行う．4.3 で確認したように接触状態が改善された，心綱形状を熱膨張によって再現し，シーブを上昇させることによってワイヤロープの引張曲げの挙動を再現したモデルを用いて得られた解析結果を用いて PV 積分値計算を行う．

ブロックごとの考察をするにあたり，それぞれのブロックに名前を付ける．まず図 4-6 に示すようにストランドに番号を割り振る．さらに図 4-7 のように $z=0$ から 10 要素ずつで区切りブロックに番号を 1 から順に 12 まで割り振る．また，図 4-8 に示す曲げ状態におけるシーブ側に近い側を内側，シーブから遠い側を外側と呼称することとする．

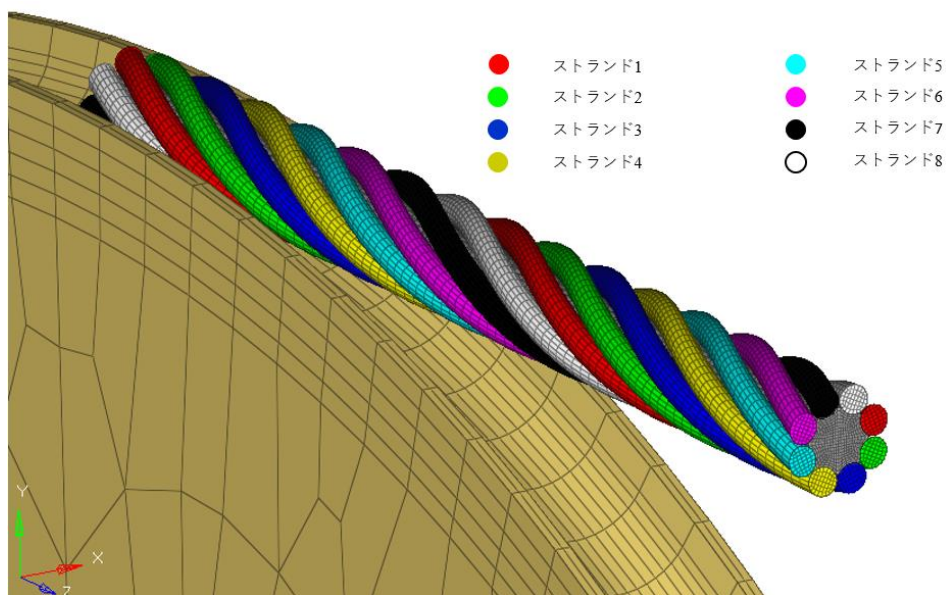


図 4-6 ストランドの名前の付け方

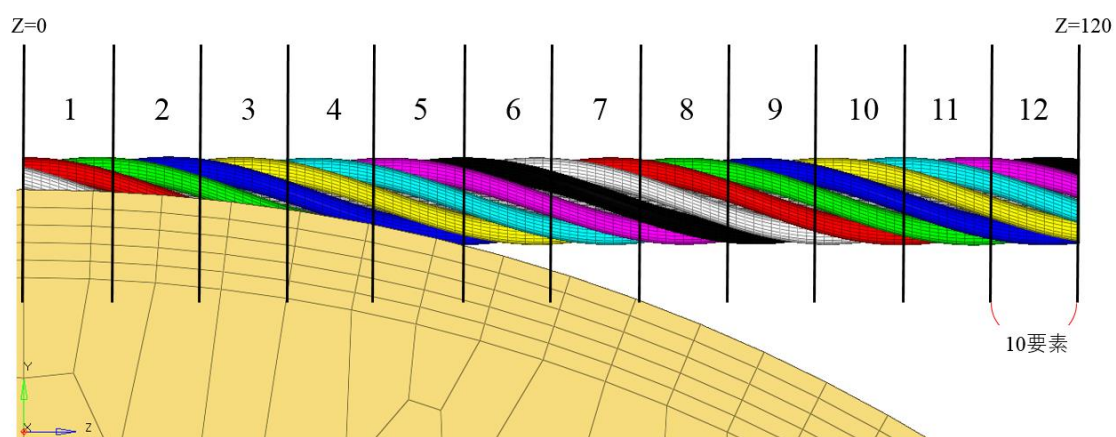


図 4-7 ブロックの番号の付け方

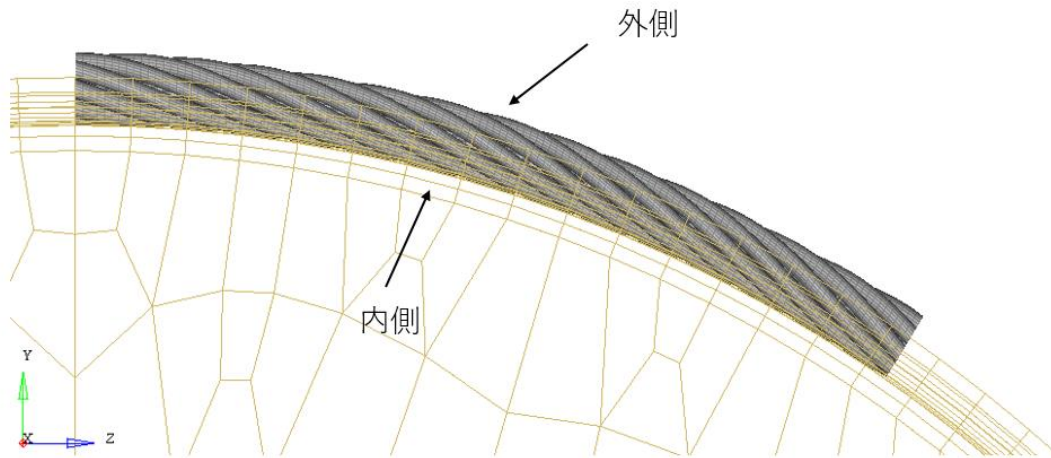


図 4-8 ロープの曲げ状態

4.4.1 スtrandと心綱の接触による PV 積分値

ストランドのブロックごとの心綱との接触における PV 積分値を示し、考察する。それぞれのブロック番号ごとに位置を内側、外側、x 軸正側、x 軸負側に分類し PV 積分値をまとめたものが図 4-9 である。ただし同一の位置に 2 つ以上のブロックがある場合には、該当するブロックの PV 積分値の平均を考えた。図 4-9 を見るとブロック番号 2 の位置で内側のブロックの PV 積分値が他の位置に比べて、相対的に大きくなっているのが分かる。しかし、その他のブロック番号については内側の PV 積分値が大きくなっているブロック番号が多いが PV 積分値の大きさとしては大きな差異はない。これはブロック番号 1 のブロックが振動したことによってブロック番号 2 のブロックがシーブに強く押し付けられたためと考えられ、実際のロープの挙動とは異なる可能性がある。

ブロック番号 2 のブロックについて内側、外側それぞれのブロックの心綱との接触圧力、相対速度の時刻歴変化を図 4-10、図 4-11 に示す。図 4-10、図 4-11 から分かるように心綱との相対速度の値に大きな差異は無い。しかし、接触圧力についてはブロック番号 2 の部分がシーブと接触する 0.003s 以降において、内側の値が外側の値よりも大きくなっている。これはワイヤロープがシーブと接触することによって、ロープの内側部分がシーブに押し付けられることによるものだと考えられる。

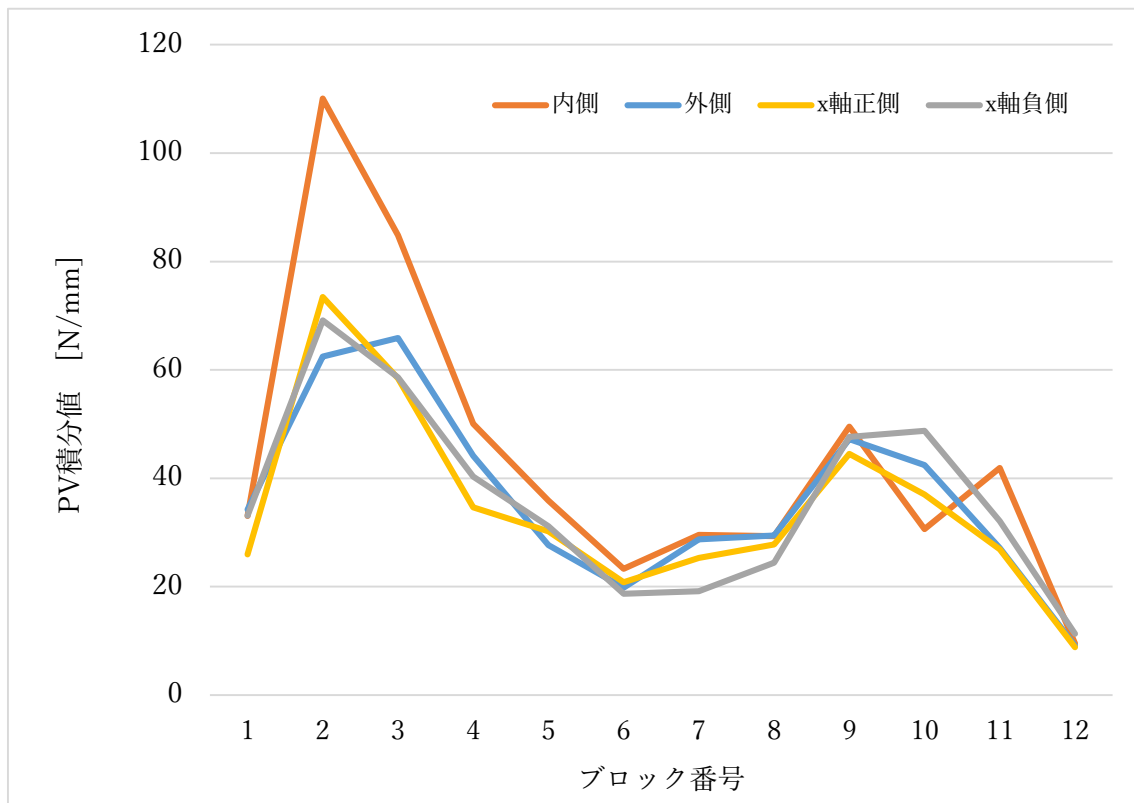


図 4-9 心網との接触による PV 積分値

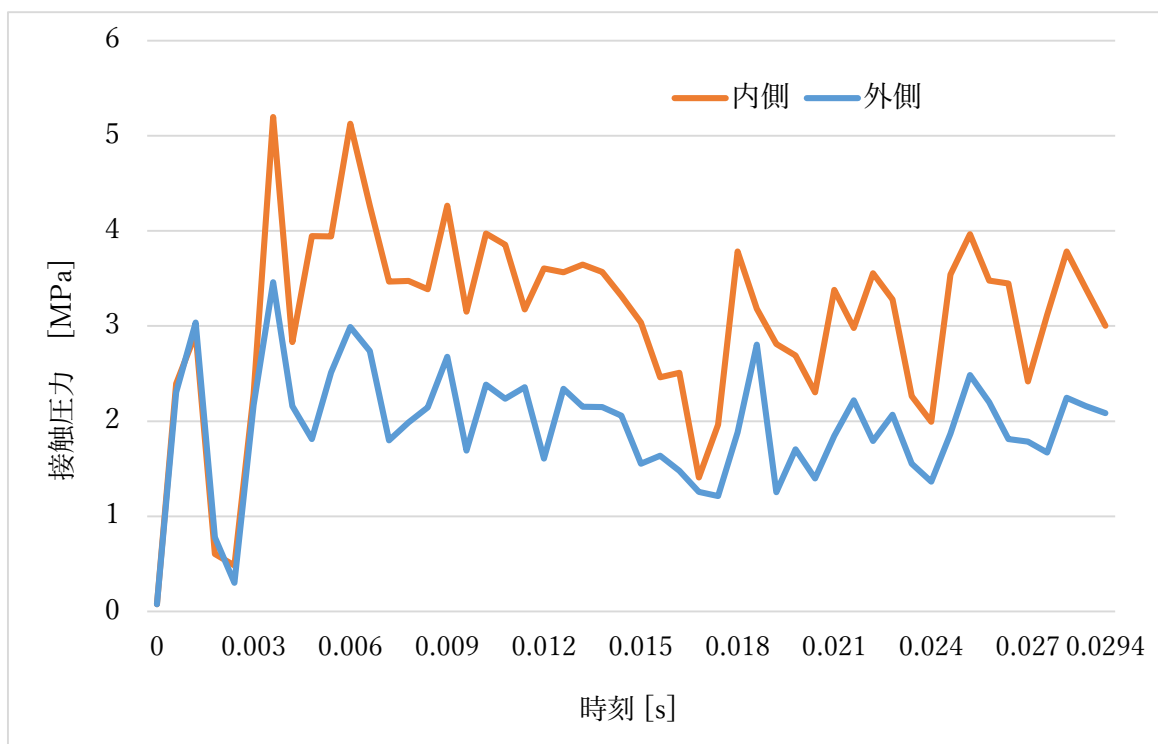


図 4-10 ブロック番号 2 のブロックの接触圧力

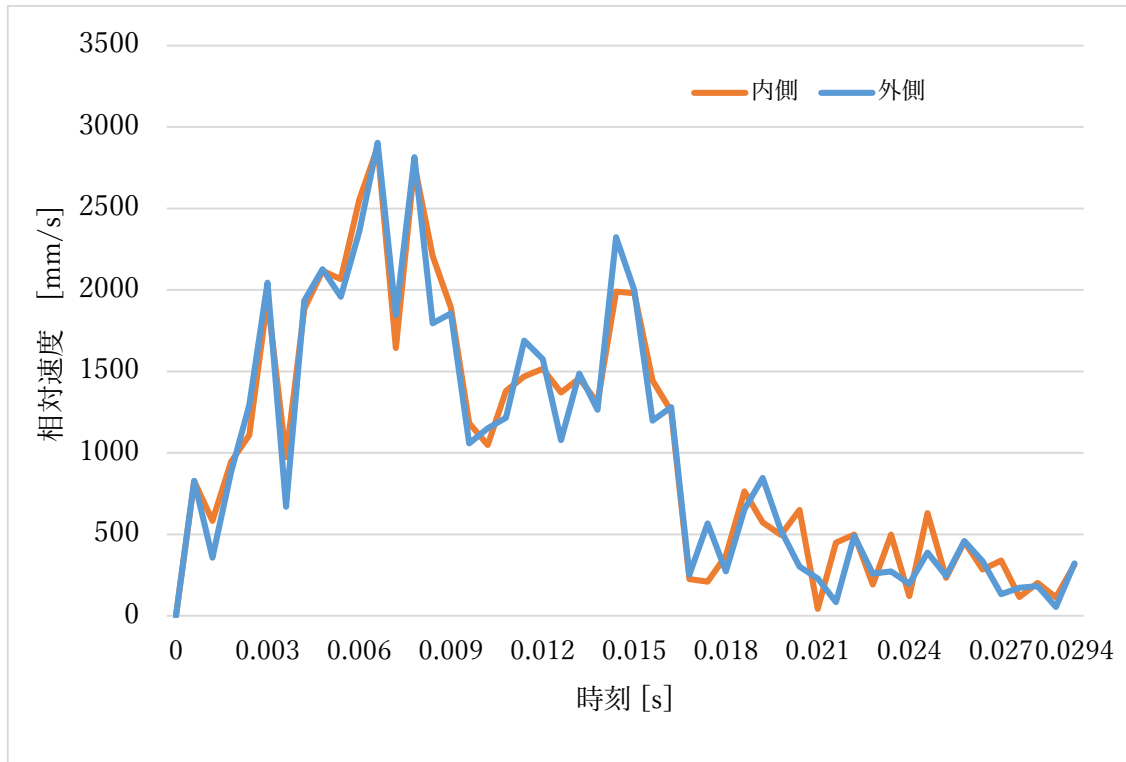


図 4-11 ブロック番号 2 のブロックの相対速度

4.4.2 スtrandとシーブの接触による PV 積分値

同様にストランドとシーブとの接触における PV 積分値を示し、考察する。ストランドとシーブとの接触は内側のブロックでしか起こらないので、内側のブロックについてブロック番号ごとに PV 積分値を比較する。結果を図 4-12 に示す。図 4-12 から分かるようにブロック番号が小さい、つまりシーブの頂点に近いほど PV 積分値の値が大きくなっていることが分かる。理由としては、シーブの頂点に近いほどシーブとの接触が早く起こるので、接触している時間が長いことが考えられる。

ブロック番号 1 のブロックは端面を含んでおり境界条件の影響を大きく受けてしまうので、ブロック番号 2 と 3 のブロックについて考える。ブロック番号が 2 と 3 であるブロックについてシーブとの接触圧力、相対速度の時刻歴変化を図 4-13、図 4-14 に示す。図 4-13 を見ると、どちらのブロックでも内側のブロックが接触を始めた直後に接触圧力が大きくなっており、その後は振動していることが分かる。図 4-14 の相対速度を見るとシーブの上昇が終了する 0.025s 以降でも相対速度が 0mm/s となっていない。これはワイヤロープが振動してしまっていることが原因であり、今回の解析では動的緩和法を用いて振動の抑制を図ったが、静止状態を再現できておらず不十分であったと考えられる。

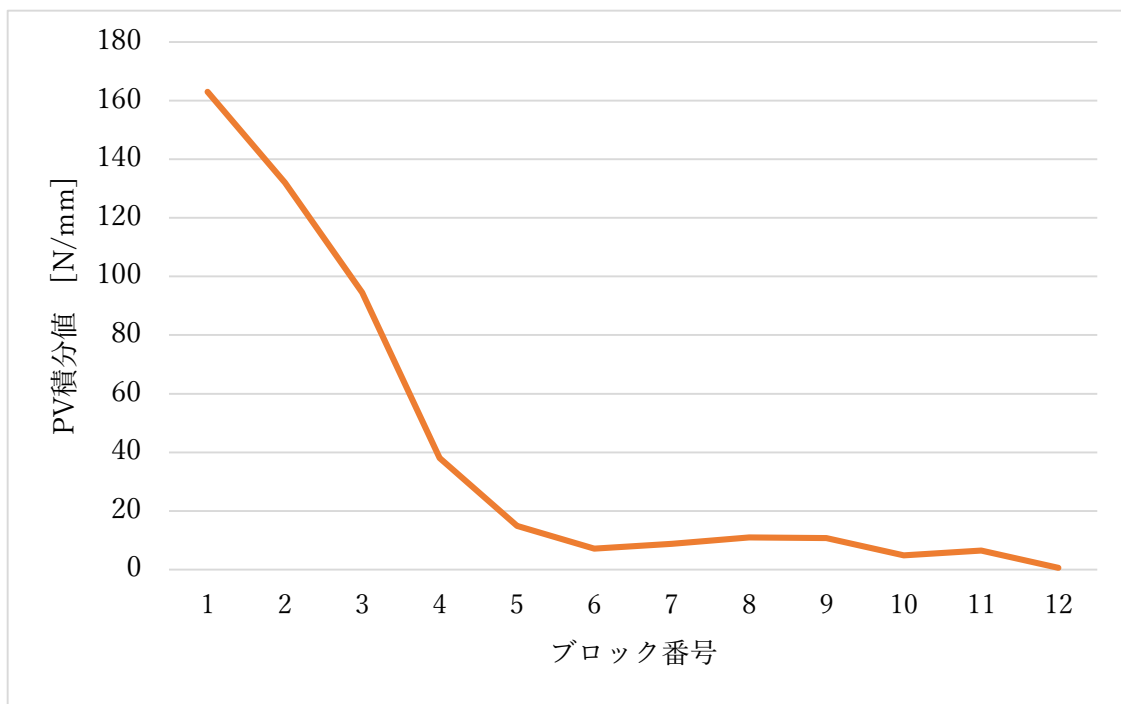


図 4-12 シーブとの接触による PV 積分値

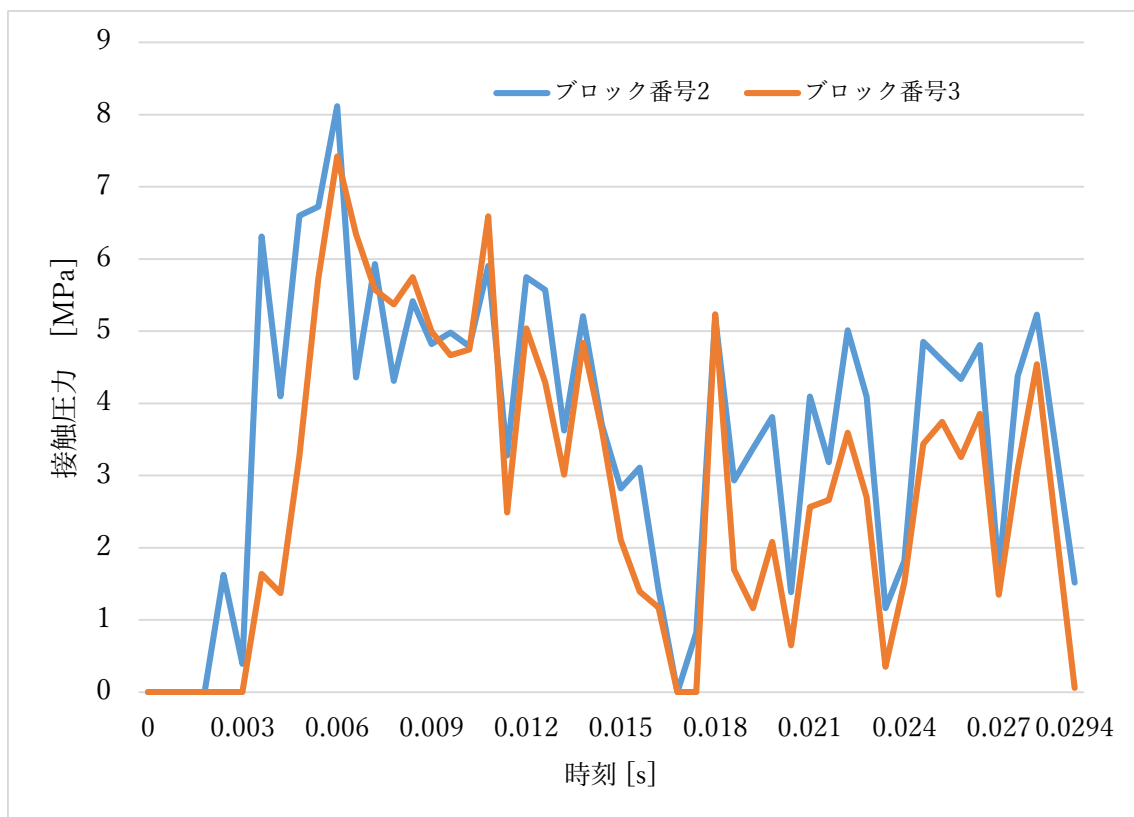


図 4-13 ブロック番号 2 と 3 のブロックのシーブとの接触圧力時刻歴変化

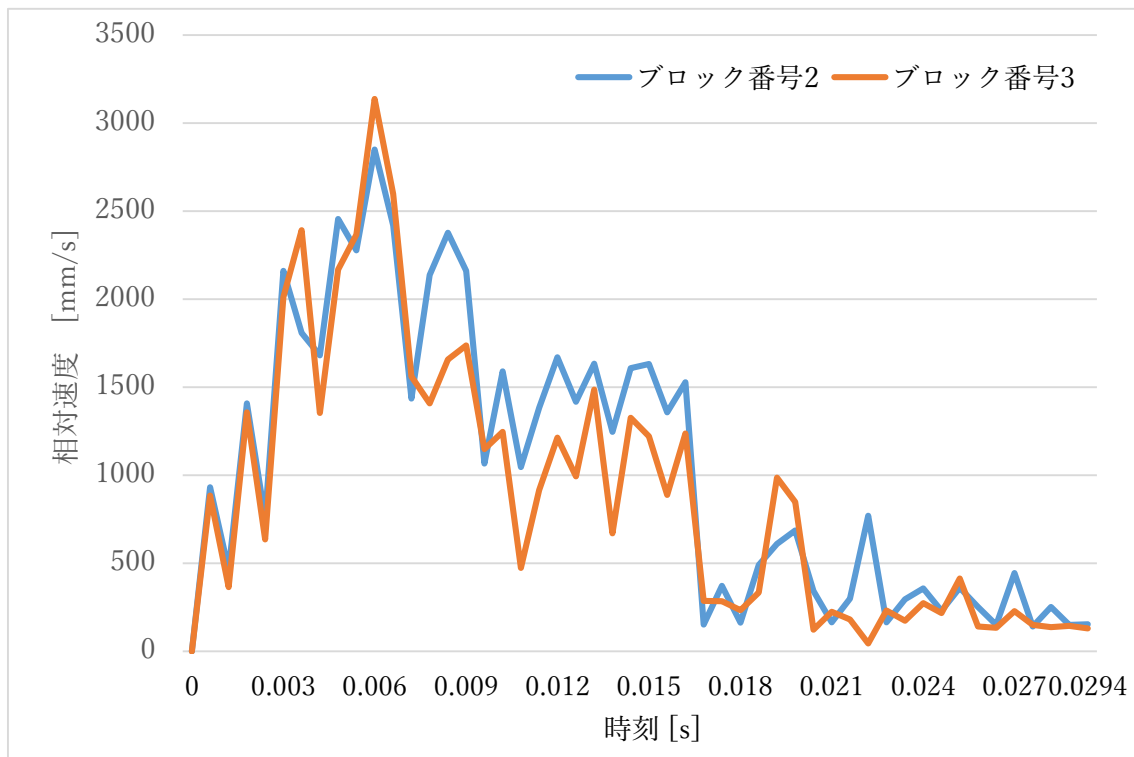


図 4-14 ブロック番号 2 と 3 のブロックのシーブとの相対速度

4.4.3 スtrandとストランドの接触における PV 積分値

同様にストランドとストランドの接触における PV 積分値を図 4-15 に示す。図 4-15 から分かるように PV 積分値の値が心綱，シーブとの接触に比べて小さくなっており，ほとんどのストランドのブロックにおいて，0N/mm となってしまう。本研究ではストランドを 1 本の連続体とみなす，簡略化ストランドモデルを用いて解析を行った。簡略化ストランドモデルを用いたことによってワイヤロープが引張曲げを受ける際のストランド内で生じる，素線の動きによるストランドの断面形状の変化を再現することが出来ず，ストランド同士が接触しなかったためだと考えられる。また，実際のロープはストランドを心綱に対して強く締め付けながら抛ることで製造されているが，本解析モデルでは解析前の心綱，ストランドの位置が独立した状態となってしまうことも一因であると考えられる。

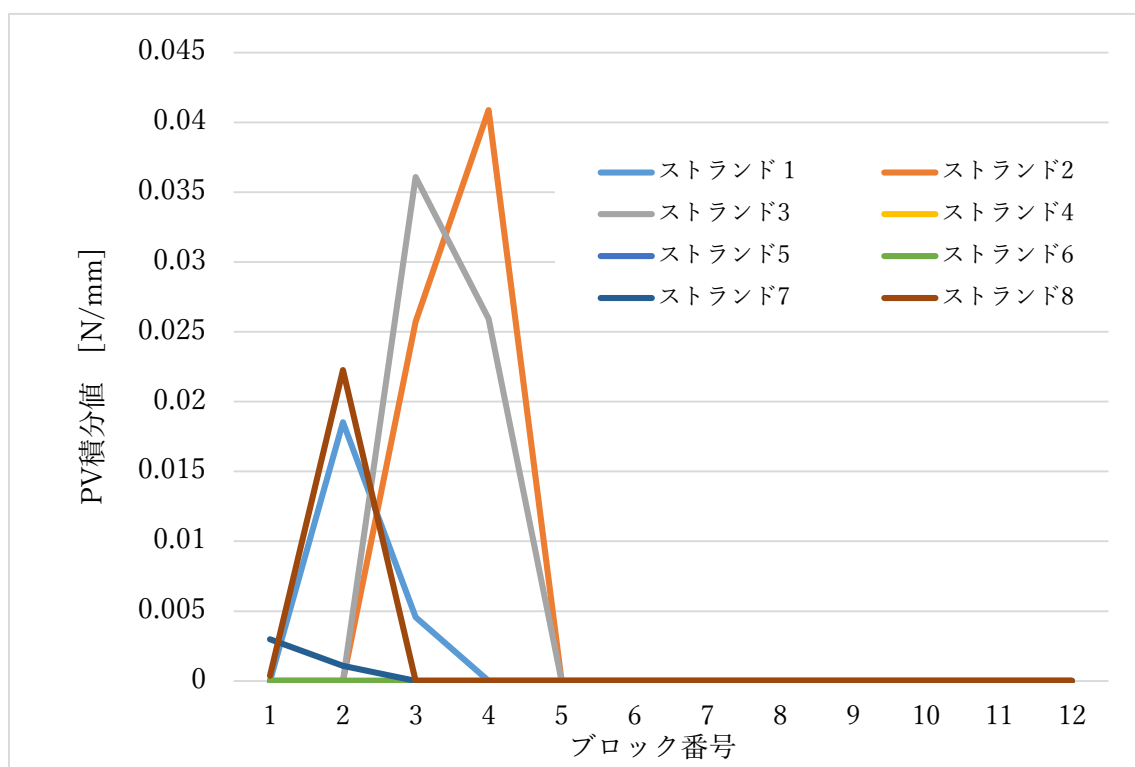


図 4-15 ストランド同士の接触による PV 積分値の時刻歴変化

4.5 最大接触力が生じる点での PV 積分値

2.4.3 において説明した方法を用いて、シーブとの接触による PV 積分値が相対的に大きいブロック内の最大接触力が生じる点における PV 積分値を考え、局所的な摩耗を考察する。ストランド同士の接触については 4.4.3 で説明したように本研究の簡略化ストランドモデルでは接触状態が再現できなかったため考えないこととする。

4.5.1 シーブとの接触による PV 積分値

4.4.2 の結果より PV 積分値が大きいので相対的に摩耗量が大きいと予測される、ブロック番号が小さいブロック内の節点で、最大接触力を記録した節点について PV 積分値を計算する。ブロック番号 1 については最大接触力を記録した節点が端面上にあり、境界条件の影響を強く受けてしまうので、本研究ではブロック番号 2-5 内の最大接触力を記録した節点について局所的な PV 積分値の計算を行う。

2.4.3 において説明した局所的な PV 積分値を求めるにあたり、接触圧力を計算する際に用いた値を表 4-1 に示す。この値を用いて「軸受」(岩波全書)[33]に記載の表よりパラメータ α , β を求め、接触圧力を求めた。さらに最大接触力を記録する時刻において、最も接近し

ているシーブの節点との相対速度を考えた。

4 つの節点について接触力時刻歴変化と相対速度の時刻歴変化をそれぞれ図 4-16 と図 4-17 に示す。これらより求めた PV 積分値の時刻歴変化を図 4-18 に示す。図 4-16 を見ると接触圧力はブロック番号 3 内の節点が 1 番大きくなっていることが分かる。これは 4.4.2 においてブロック番号 2 の接触圧力が大きかったことと逆の結果である。図 4-17 より相対速度に注目するとそれぞれの節点で時刻が 0.006s までに大きい値となっている部分があるがそれぞれ接触前であるので PV 積分値には影響がない。接触圧力と相対速度は時刻によって最大となっているブロックが異なるが、図 4-18 より PV 積分値については解析終了時にはブロック番号が小さいほど PV 積分値が大きい。これはブロックごとに考えたときの PV 積分値が、ブロック番号が小さいほど大きいことと一致している。よって、すべての節点について PV 積分値を考えるのではなく、今回のブロックごとに PV 積分値を考える手法を用いてブロックごとの PV 積分値を比較し、PV 積分値が大きいブロック内の節点について調べれば、摩耗が生じやすい箇所を限定して考えることが可能である。本研究ではワイヤロープのモデリングの問題により、ストランドとシーブの接触のみしか考えられなかったが、今後、ストランド同士の接触についても、ブロックごとの PV 積分値と最大接触力が生じる節点における PV 積分値の関係性を調べ、この手法の妥当性を検討する必要がある。

表 4-1 各パラメータの値

	ストランド	シーブ
主曲率半径(R_1, R_2)[mm]	17.3	194.4
主曲率半径(R_1', R_1'')[mm]	1.3	5.4
ポアソン比(ν_1, ν_2)	0.3	0.3
ヤング率(E_1, E_2)[MPa]	128000	200000
主曲率 $1/R_1, 1/R_2$ を含む 面の角度(φ)[°]	19.9 (ブロック番号 2) / 20.0 (ブロック番号 3) / 19.7 (ブロック番号 4) / 19.4 (ブロック番号 5)	

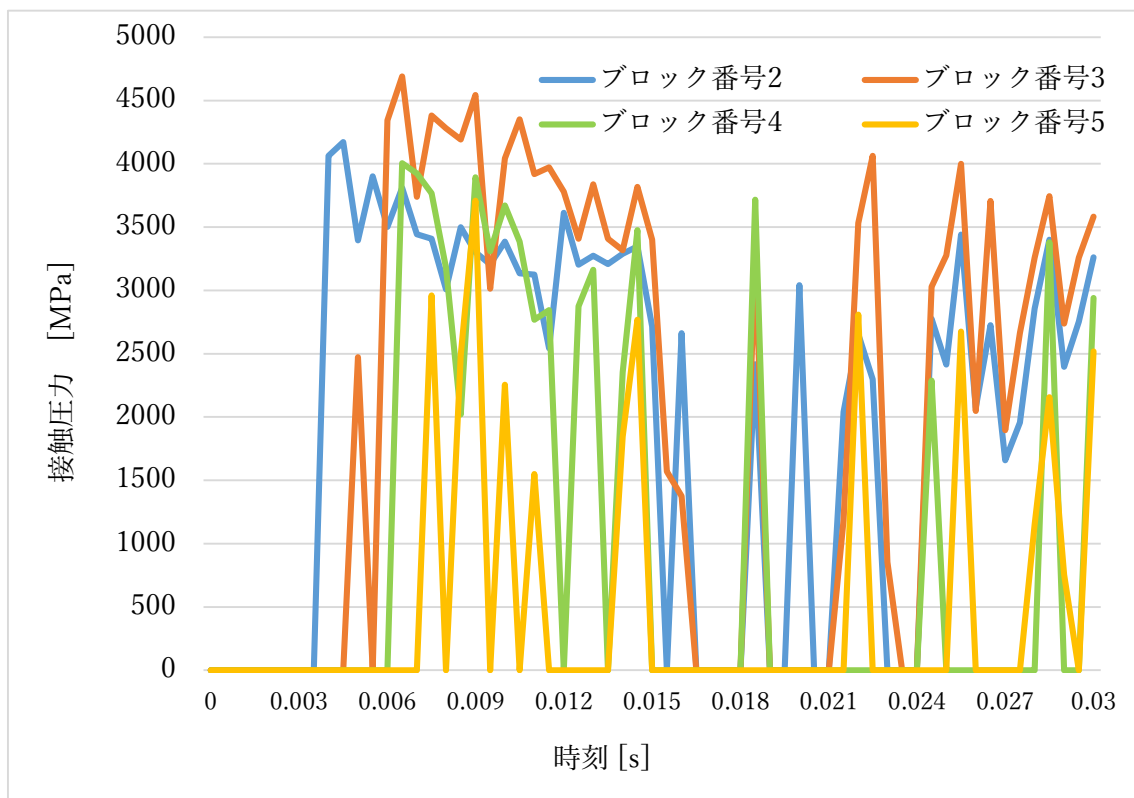


図 4-16 ブロック番号 2-5 内の最大接触力を記録した節点の接触圧力時刻歴変化

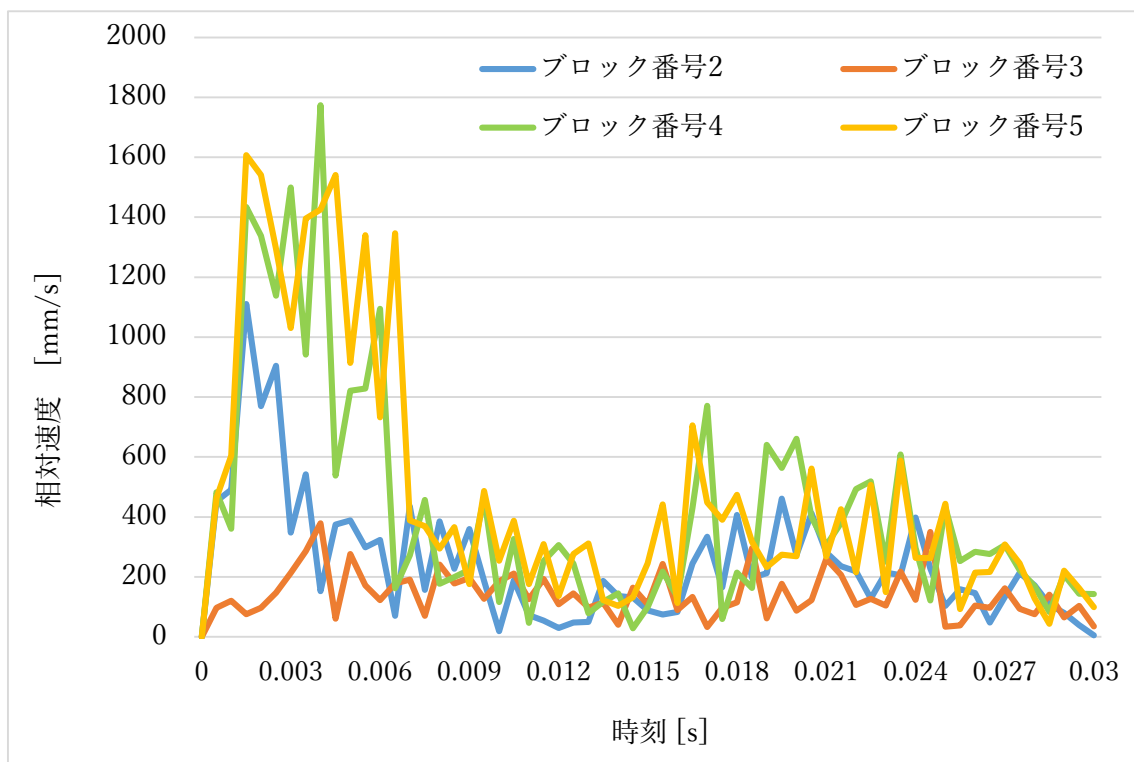


図 4-17 ブロック番号 2-5 内の最大接触圧力を記録した節点の相対速度時刻歴変化

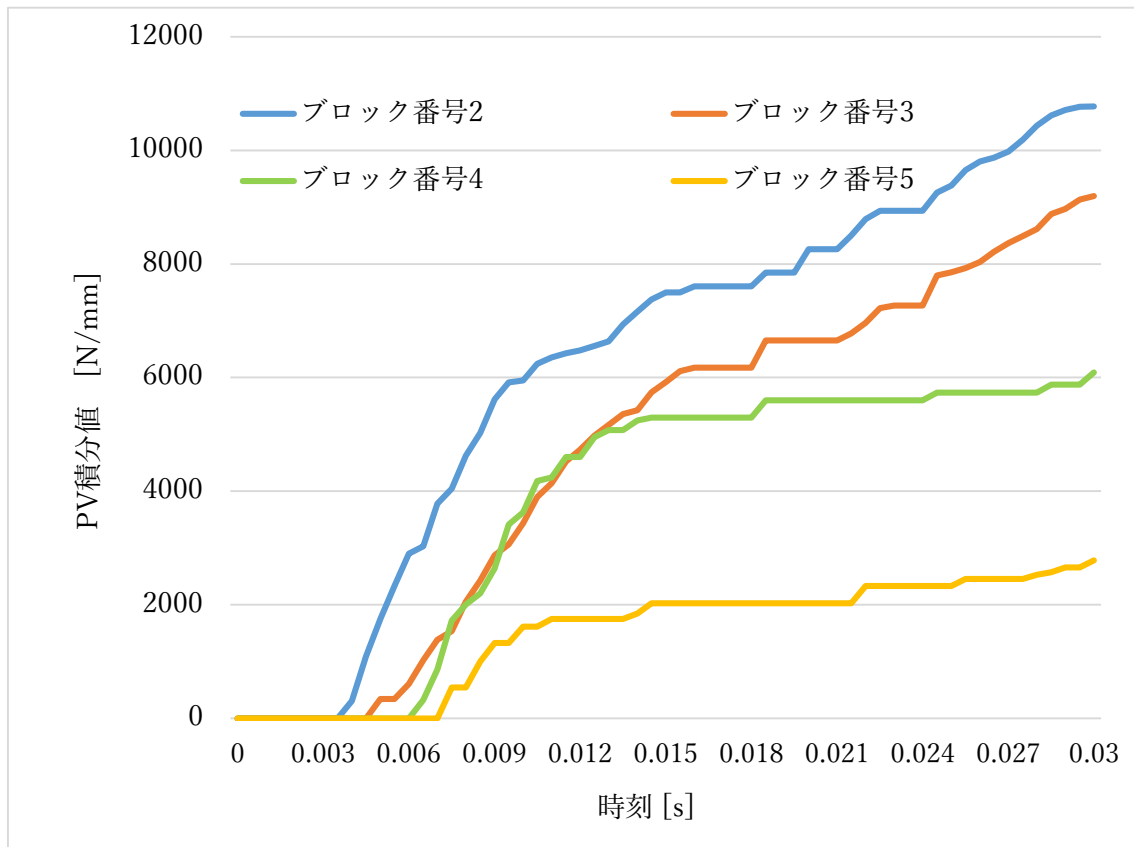


図 4-18 ブロック番号 2-5 内の最大接触力を記録した節点の PV 積分値時刻歴変化

第5章 結論

5.1 結論

本研究ではエレベータ用ワイヤロープとして一般に使用されている $8 \times S(19)$ ロープについて、有限要素法を用いて引張曲げを受ける際のロープの挙動を再現し、得られた結果から先行研究では考慮されていなかった摩耗についての予測をする手法を考案し、実際に摩耗についての考察を行った。また向井[25]による先行研究の課題点でもあった心綱モデルの形状について改善を行い、ロープの引張曲げ挙動の再現方法も変更し、より現実のロープの接触状態に近い状態を再現した。

5.2 今後の課題

5.2.1 詳細モデルを用いた摩耗の検討

本研究では計算時間と解析モデルの作成時間の短縮のためにストランドを 1 本の連続体と見なす、簡略化ストランドモデルを用いて解析を行い摩耗についての考慮を行った。しかし、現実のワイヤロープのストランドの断面形状の変化を再現できなかったために、ストランド同士の接触が起こらなかった。さらに、現実のロープではストランド内の最外層にある素線だけではなく、ストランド内部にある素線も摩耗、破断しロープ全体の破断につながる場合がある。よって素線を 1 本 1 本まで詳細にモデル化した全詳細モデルを用いて、ストランド同士の接触を再現した上で、すべての素線について摩耗を考慮する必要がある。ブロックの分け方をストランドではなく素線ごととし、本研究で用いた摩耗予測手法を用いてロープ全体の摩耗傾向を調べ、その後ブロック内の節点について局所的な PV 積分値を考えることで、この手法の妥当性を確認するとともに、共同研究先である三菱電機株式会社や労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所で行われている解析、実験データと比較する必要がある。

5.2.2 解析モデルの改良

4.3 で述べたように心綱形状の改善とシーブとロープの接触方法の変更より向井[25]のモデルに比べ、ロープ内部の接触状態とシーブとの接触状態は接触箇所が増え、より均一に接触したことで挙動の改善が見られた。しかし 4.4, 4.5 で述べたようにロープの振動が起きてしまっており、静的な状態を再現できていない。本研究の解析においてはロープの端面の y 方向変位を拘束した上でシーブを上昇させているので、ロープがシーブにどのように沿う

かはシーブの変位量により定まる．引張を受けながら曲げられるので引張によるロープの伸びを考慮するために，3.6.1 において説明したように単軸引張解析を事前解析として行い，得られたロープの長さ L' とシーブの半径 R からシーブに巻きつく角度 θ を求め，数式 3-2 に代入することでシーブの変位量を決定した(図 5-1)．しかし，実際には引張を受けながら曲げられるのでロープの伸びは，単軸引張を受ける際の伸びとは異なると考えられ，このずれによってシーブの変位量にもずれが生じ，ロープがシーブに静的に接触せず振動してしまったと考えられる．よってシーブの変位量を正確に計算する手法を考える必要がある．

また 4.4 と 4.5 において境界条件の影響を大きく受けてしまうことを考慮してシーブ頂点に最も近いブロック番号 1 のブロックについての考察は行わなかったが，シーブ頂点における接触力は大きく，摩耗も起こることが予想されるので三菱電機株式会社で行われている解析のようにシーブ両側にロープモデルを作って解析を行うべきである．

L' : 単軸引張解析より求めたロープの長さ

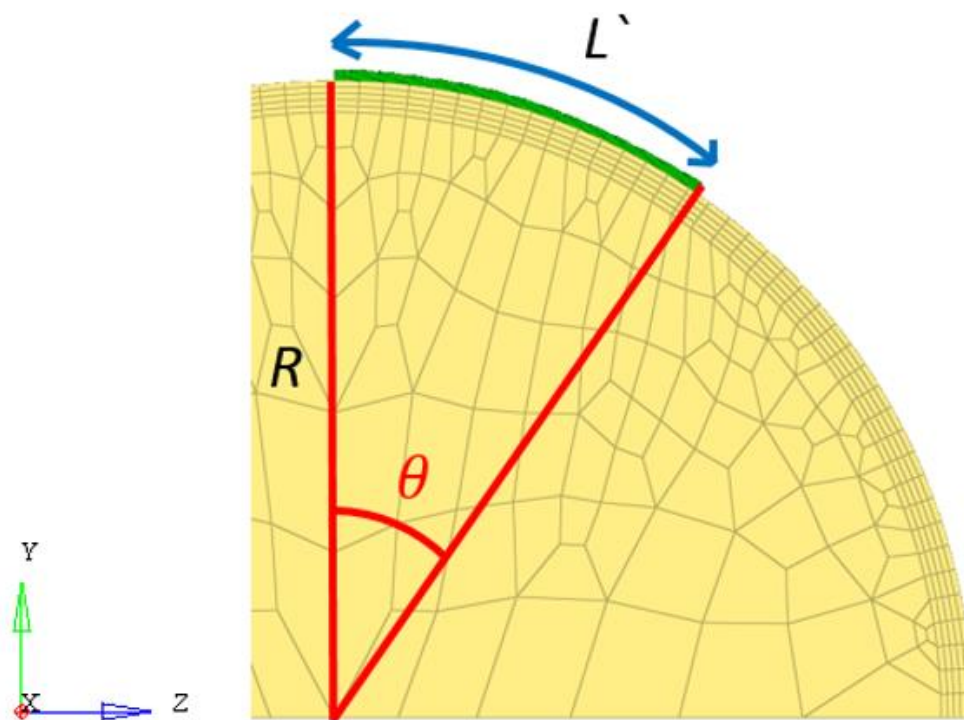


図 5-1 シーブの変位量の考え方

参考文献

- [1] 東京製綱株式会社. ワイヤロープ No.20. 三省社. 1949.
- [2] 昇降機等事故調査部会. 平和台駅エレベータ主索破談事故調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/000188107.pdf>, 2012.
- [3] 昇降機等事故調査部会. 東京都内エレベータ事故調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/001058725.pdf>, 2014.
- [4] Federico H Hruska. Radial forces in wire ropes. Wire and wire products, Vol.27, No.5, pp.459–463, 1952.
- [5] FH Hruska. Tangential forces in wire ropes. Wire and wire products, Vol.28, No.5, pp.455–460, 1953.
- [6] A.E.H.Love. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Dover Publications Inc., 1944.
- [7] RH Knapp. Derivation of a new stiffness matrix for helically armoured cables considering tension and torsion. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.14, No.4, pp.515–529, 1979.
- [8] G.A.Costello. Theory of Wire Rope. Mechanical Engineering Series. Springer New York, 1997.
- [9] S Nabijou and RE Hobbs. Fatigue of wire ropes bent over small sheaves. International Journal of Fatigue, Vol.16, No.7, pp.453–460, 1994.
- [10] 田中正清, 鴻巣真二. S 曲げ疲労を受けるワイヤロープの損傷挙動の定量評価 : IWRC6 Fi(29)の場合. 材料, Vol.44, No.503, pp.1086–1091, 1995.
- [11] Marco Giglio and Andrea Manes. Bending fatigue tests on a metallic wire rope for aircraft rescue hoists. Engineering Failure Analysis, Vol.10, No.2, pp.223–235, 2003.
- [12] M Giglio and A Manes. Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads. Engineering Failure Analysis, Vol.12, No.4, pp.549–568, 2005.
- [13] M Roshan Fekr, G McClure, and M Farzaneh. Application of adina to stress analysis of an optical ground wire. Computers & structures, Vol.72, No.1, pp.301–316, 1999.
- [14] WG Jiang, MS Yao, and JM Walton. A concise finite element model for simple straight wire rope strand. International Journal of Mechanical Sciences, Vol.41, No.2, pp.143–161, 1999.
- [15] WG Jiang, JL Henshall, and JM Walton. A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand. International Journal of Mechanical Sciences, Vol.42, No.1, pp.63–86, 2000.
- [16] Wen-Guang Jiang. A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand. International Journal of Mechanical Sciences, Vol.54, No.1, pp.69–73, 2012.
- [17] 佐々木康二, 岩倉昭太, 高橋龍彦, 守谷敏之, 古川一平. 統計的手法に基づくワイヤロ

- ープの曲げ疲労寿命予測. 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.707, pp.1003–1008, 2005.
- [18] Gordana M Kastratović and Nenad D Vidanović. Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core. FME transactions, Vol.39, No.1, pp.37–40, 2011.
- [19] E Stanova, G Fedorko, M Fabian, and S Kmet. Computer modelling of wire strands and ropes part II: Finite element-based applications. Advances in Engineering Software, Vol.42, No.6, pp.322–331, 2011.
- [20] Cengiz Erdonmez and C Erdem Imrak. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads. Sadhana, Vol.36, No.6, pp.995–1008, 2011.
- [21] Dangang Wang, Dekun Zhang, Songquan Wang, and Shirong Ge. Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires. Engineering Failure Analysis, Vol.27, pp.173–193, 2013.
- [22] V Fontanari, M Benedetti, and BD Monelli. Elasto-plastic behavior of a warrington-seale rope: Experimental analysis and finite element modeling. Engineering Structures, Vol.82, pp.113–120, 2015.
- [23] 寺田偉紀. エレベータ用ワイヤロープ疲労損傷メカニズム解明に向けた有限要素法解析. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2015.
- [24] 館祐樹. エレベータ用ワイヤロープの自己接触および損傷メカニズムを評価する有限要素法解析. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2016.
- [25] 向井協. エレベータ用ワイヤロープの内部接触状態を考慮した有限要素法. 東京大学工学部機械工学科卒業論文. 2017.
- [26] 小野進. ワイヤロープの微分幾何学的考察. 日本応用数理学会論文誌, Vol.3, No.4, pp.387–424, 1993.
- [27] E Stanova, G Fedorko, M Fabian, and S Kmet. Computer modelling of wire strands and ropes part I: Theory and computer implementation. Advances in engineering software, Vol.42, No.6, pp.305–315, 2011.
- [28] D Elata, R Eshkenazy, and MP Weiss. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. International Journal of Solids and Structures, Vol.41, No.5, pp.1157–1172, 2004.
- [29] Manuel Munoz Hardy. Geometric transformation for double helical wire rods. PhD thesis, University of Hawaii, 2004.
- [30] 小野進. 工学の数学—ワイヤロープの微分幾何学—. アグネ技術センター. 2005.
- [31] 島本琢磨. 列車通過時振動による特殊分岐器付属装置摩耗予測のための有限要素法と実機試験による検証. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2017.
- [32] 鯉渕興二, 小久保邦雄. 製品開発のための材料力学と強度設計ノウハウ. 日刊工業

新聞社. 2002.

[33] 曾田範宗. 軸受. 岩波全書. 1964

謝辞

本研究は、酒井教授、泉教授のご指導の下に行われたものです。1年間大変お世話になりました。お忙しい中ご指導してくださり、深く感謝申し上げます。泉教授には有限要素法の基本的な考え方から本研究の詳細な指針に至るまで、本当に多くのご指導をいただきました。ありがとうございました。酒井教授、波田野助教授には研究室内の発表の際に、貴重なご意見をいただきました。ありがとうございました。

当研究室のOBである寺田さん、舘さんの研究をとて参考にさせていただきました。直接お会いする機会はありませんでしたが、この場を借りてお礼の言葉を述べさせていただきます。ありがとうございました。同じく当研究室のOBである向井さんにはソフトウェアの使い方から研究の手法について、直接ご指導いただきました。ありがとうございました。

共同研究先である三菱電機株式会社の角谷様には打ち合わせの際だけでなく、普段からメールでも貴重なご意見をいただきました。同社で行われている実験の詳細から解析における注意点まで幅広いご意見をいただきました。僕の無知からご迷惑をおかけしてしまったこともありましたが、とても親切に対応していただきましてありがとうございました。

労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の山際様には、研究施設の見学やワイヤロープに対して行われている実験など、実際のロープの使用状況に即したアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

アルテアエンジニアリング株式会社からは、本研究で使用した有限要素法解析ソフトウェア HyperWorks を提供していただきました。同社の柴田様、依知川様、阿部様には研究における課題を解決するための解析上のアドバイスをいただきました。特に依知川様にはソフトウェアについて質問をした際に、迅速に丁寧にお答えいただきました。ありがとうございました。

研究室の先輩方にはソフトウェアの使い方、研究手法さらには論文の書き方まですべての点において多くのアドバイスをいただきました。ありがとうございました。また、同期の皆さんとは互いに高め合いながら、楽しく研究を進めることが出来ました。ありがとうございました。

最後に、本研究に関わってくださったすべての方に深く感謝申し上げ、以上を謝辞とさせていただきます。