

卒業論文

エレベータ用ワイヤロープの
ストランドにおける
径方向力学特性の解明

平成 29 年 1 月 26 日 提出

指導教員 泉 聡志 教授

150171 五十君 信治

目次

第1章	序論	7
1.1	研究背景	8
1.2	先行研究	9
1.2.1	エレベータ用ワイヤロープの疲労試験と解析	9
1.2.2	ブーミング解析	10
1.2.3	ストランドの圧縮実験	11
1.3	本研究の目的	12
1.4	本論文の構成	12
第2章	エレベータ用ワイヤロープのストランド圧縮実験	13
2.1	緒言	14
2.2	実験材料	14
2.3	実験装置・治具	16
2.4	圧縮実験	19
2.4.1	圧縮実験手順	19
2.4.2	圧縮実験結果	20
2.5	ストランドのヒステリシスを調べる実験	33
2.6	ストランドの伸びの計測実験	36
2.7	ストランド断面の観察	37
第3章	有限要素法解析	39
3.1	緒言	40
3.2	ストランド詳細モデル解析	40
3.2.1	解析条件	40
3.2.2	解析モデル	41
3.2.3	拘束条件	44
3.2.4	荷重条件	45
3.3	解析結果	47
3.3.1	S(19)ストランド	47
3.3.2	Fi(25)ストランド	48
3.3.3	径方向有効ヤング率の導出	50
第4章	結論	53
4.1	結論	54
4.2	今後の展望	54
参考文献		55
付録A	ストランド引張り試験	57

A.1 緒言.....	58
A.2 試験概要.....	58
A.2.1 試験体.....	58
A.2.2 試験方法.....	58
A.3 試験結果.....	59
謝辞.....	60

目次

図 1-1	ワイヤロープの構成	8
図 1-2	ワイヤロープ疲労試験 [7]	9
図 1-3	簡略化ストランドモデル	10
図 1-4	全体解析	10
図 1-5	詳細ストランドモデル	11
図 1-6	詳細部解析	11
図 1-7	実験値と解析値の比較	12
図 2-1	二種類のロープの構成	15
図 2-2	治具画像	16
図 2-3	試験模式図	17
図 2-4	実験の様子	17
図 2-5	変位の治具側面での計測様子	21
図 2-6	側面での変位計測結果	21
図 2-7	ストランドと曲がった治具	22
図 2-8	S(19)ストランドのそれぞれの引張り荷重に対する荷重・変位曲線	23
図 2-9	S(19)ストランドの 10kg 引張りに対する荷重・変位曲線	24
図 2-10	S(19)ストランドの 20kg 引張りに対する荷重・変位曲線	24
図 2-11	S(19)ストランドの 30kg 引張りに対する荷重・変位曲線	25
図 2-12	S(19)ストランドのそれぞれの 19 サイクル目の荷重・変位曲線	25
図 2-13	Fi(25)ストランドのそれぞれの引張り荷重に対する荷重・変位曲線	27
図 2-14	Fi(25)ストランドの 10kg 引張りに対する荷重・変位曲線	27
図 2-15	Fi(25)ストランドの 20kg 引張りに対する荷重・変位曲線	28
図 2-16	Fi(25)ストランドの 30kg 引張りに対する荷重・変位曲線	28
図 2-17	Fi(25)ストランドのそれぞれの 19 サイクル目の荷重・変位曲線	29
図 2-18	10kg 引張りに対する両ストランドの比較	31
図 2-19	20kg 引張りに対する両ストランドの比較	31
図 2-20	30kg 引張りに対する両ストランドの比較	32
図 2-21	両ストランド、それぞれの引張りでの比較	32
図 2-22	S(19)ストランドの可逆性実験結果	34
図 2-23	19 サイクル目の S(19)ストランドの可逆性実験結果	34
図 2-24	Fi(25)ストランドの可逆性実験結果	35
図 2-25	19 サイクル目の Fi(25)ストランドの可逆性実験結果	35
図 2-26	伸びの計測実験結果	36
図 2-27	ストランド断面図	37

図 2-28 0.5kN 加わったときのストランド断面図	38
図 3-1 S(19)ストランド詳細モデル.....	42
図 3-2 S(19)ストランド詳細モデル 2.....	42
図 3-3 Fi(25)ストランド詳細モデル	43
図 3-4 Fi(25)ストランド詳細モデル 2	43
図 3-5 解析モデルと xyz 軸の関係	44
図 3-6 解析での荷重条件①	45
図 3-7 解析での荷重条件②	46
図 3-8 S(19)ストランドの解析結果.....	47
図 3-9 S(19)ストランドの解析結果と実験結果の比較	48
図 3-10 Fi(25)ストランドの解析結果	49
図 3-11 Fi(25)ストランドの解析結果と実験結果の比較	49
図 3-12 丸棒モデル.....	51
図 3-13 丸棒モデル 2.....	51
図 3-14 丸棒の荷重/変位とヤング率の関係	52

表目次

表 2.1	ストランドの構成	15
表 2.2	使用した実験装置	18
表 3.1	解析条件	40
表 3.2	S(19)ストランド詳細モデル解析規模	42
表 3.3	Fi(25)ストランド詳細モデル解析規模	43
表 3.4	ストランド形状パラメータ	44
表 3.5	丸棒モデル解析規模	51
表 3.6	丸棒の荷重/変位とヤング率の関係	52

第1章 序論

1.1 研究背景

ワイヤロープを構成する最小単位である素線は、炭素含有量約 0.55~0.85%の硬鋼線材を熱処理、伸線（引抜き加工）、めっき加工することで作られる。その素線を数本より合わせることでストランドと呼ばれるものを作り、中心となる繊維ロープに数本（エレベータ用の場合は約 6~8 本）ストランドを一定のピッチで固く巻きつけプレテンションすることでワイヤロープは構成されている（図 1-1）。

このように構成されていることから、ワイヤロープは引っ張り強度が高く、耐衝撃性に優れており、長尺物が得られるため様々な場面で活用でき、柔軟性に富むといった長所がある。一方で弾性係数が低いため伸びやすく、自転性があり荷重が加わるとストランドが解ける方向に回転してしまう。また強度を上げると耐疲労性が下がり（ロープの充填率をあげ密にすると柔軟でなくなり疲労しやすくなる）、環境によっては錆びるといった短所も存在する[1]。しかしストランドのより方や加工の仕方である程度の対策は可能である。このような特性を持つことからワイヤロープはエレベータ、クレーン、橋梁、ケーブルカーなど林業から魚業にいたる様々な範囲・分野の機械部品に長年にわたり用いられてきた。

しかしワイヤロープには十分な設計基準、メンテナンス基準がないことが問題となっている。ワイヤロープは構造が複雑で内部を観察することができない。外部破断は把握できるが内部破断を把握することができず破断メカニズムの解明が困難である。ワイヤロープの破断が原因とされる事故も実際に起きている[2][3][4]。そのためエレベータ用ワイヤロープの安全率は静止荷重に対して 10 以上になるように定められている。実際には疲労試験が行われているが多大な時間・労力がかかる上に肝心の破断するときの内部状況が分からない。ワイヤロープが損傷する際の挙動を解明し定量的な評価を与える必要がある。

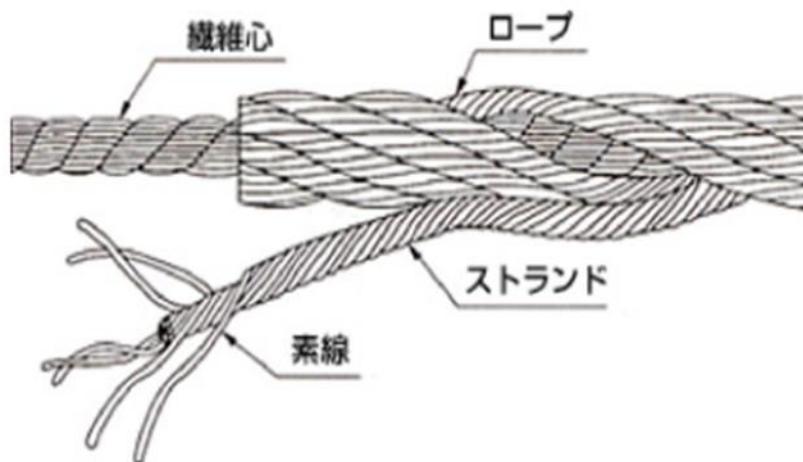


図 1-1 ワイヤロープの構成

1.2 先行研究

1.2.1 エレベータ用ワイヤロープの疲労試験と解析

ワイヤロープの機械的特性を調べるために今までに様々な理論やモデルの開発が行われ、それらはワイヤロープ設計時の目安として貢献してきた[5][6]。しかしモデルの構築においてロープが損傷する際重要となる内部の接触応力や摩擦などを考慮することは困難であった。また、ワイヤロープの疲労寿命や断線特性を調べるために実際には繰り返し曲げ疲労試験・引張り試験などの様々な試験が行われているが(図 1-2)[7~9]、これらの疲労試験においても先ほどの内部の接触応力や摩擦、また素線破断の発生位置やタイミングが観察できない。素線の断線メカニズムを解明するためにはモデルや疲労試験だけでは不十分である。

内部状況を把握する手段の一つとしてシミュレーションがあり、シミュレーションならば疲労試験とは異なり短時間かつ低コストで解析を行うことができる。また近年の有限要素法の技術発展と計算機性能の向上により、ワイヤロープの有限要素法解析による研究が行われるようになる。しかし計算機性能が向上したにもかかわらず、ワイヤロープは素線同士が複雑に接触しあい非線形性に支配されるために全ての素線を詳細にモデル化すると計算負荷が膨大となり事実上解析が困難となるため、解析の多くは簡略化されたモデルを対象としたものに限られ、実際の使用環境に合った詳細な解析についての研究は多くなされていなかった[10~14]。

そこでこの問題を解決するために、寺田によりズーミング解析を導入したエレベータ用ワイヤロープのシープに沿った引っ張り曲げの有限要素法解析が行われた[15]。

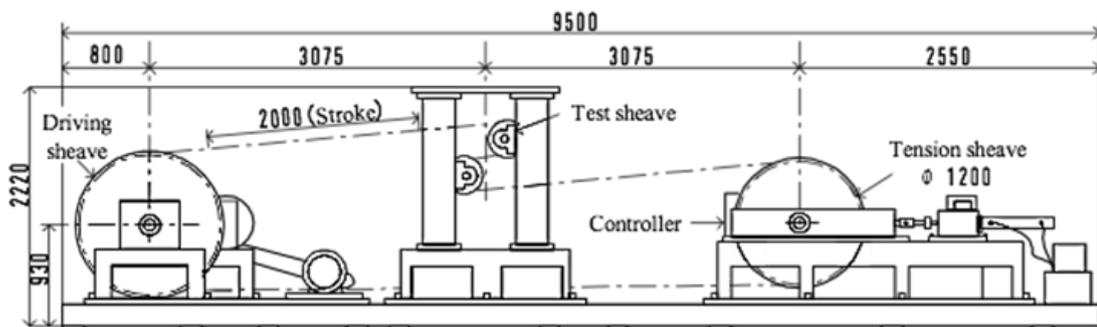


図 1-2 ワイヤロープ疲労試験 [7]

1.2.2 ズーミング解析

ズーミング解析とは、素線一本一本を詳細にモデル化すると計算負荷が膨大で解析できない問題を解決するために寺田によって用いられた手法で、素線をよったストランドを均質なモデルに簡略化してロープ全体の解析を行い、ストランドの一本を詳細モデルに置換して全体解析での変位を強制変位として与え応力状態などの詳細部を解析するという二段階解析のことである。これにより一定の精度が保障された解析を比較的短時間で行うことができる。実際の解析を行う際の手順は以下のとおりである。

- 1、 簡略化ストランドモデル(図 1-3)を作成し、この簡略化ストランドモデルを使ってワイヤロープをモデル化する。
- 2、 そのワイヤロープモデルを使ってワイヤロープ全体の解析を行う(図 1-4)。
- 3、 その後ワイヤロープモデルの一部のストランドを詳細なストランドモデル(図 1-5)に置換する。
- 4、 詳細モデルに置換したワイヤロープモデルに、前回の全体解析のときに得られた変位情報を強制変位として与え、詳細部の解析を行う(図 1-6)。

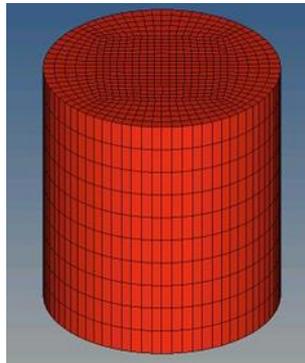


図 1-3 簡略化ストランドモデル

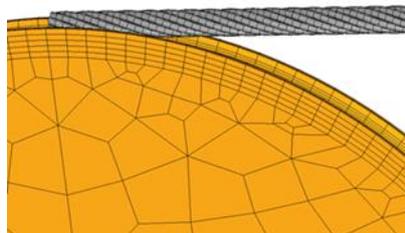


図 1-4 全体解析

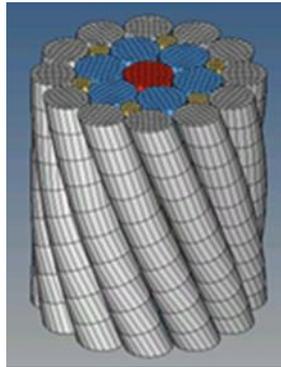


図 1-5 詳細ストランドモデル

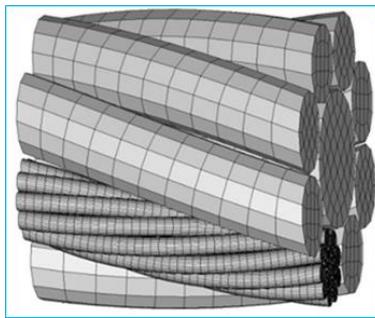


図 1-6 詳細部解析

1.2.3 ストランドの圧縮実験

ブーミング解析でストランドを一塊の物質としてモデル化した簡略化モデルを使う際、ストランドの材料特性値が必要となる。実際にはストランドは素線の集合体であるためヤング率が存在しないので、ストランドを一塊とみなしたときの見かけの材料特性値を有効ヤング率、有効ポアソン比と以降この論文で表現する。寺田は国内で広く使用されている二種類のエレベータ用ワイヤロープに対し、軸方向への引っ張りの強制変位を与え応力を解析することでストランドの有効ヤング率を求めた。しかしストランドは素線をより合わせた形状であるために実際には異方性が存在し、軸方向引っ張りに比べ径方向に圧縮されやすい。軸方向有効ヤング率を径方向にも適用し等方性材料とした簡略化ストランドモデルを解析に用いるのは現実的ではないため、ストランドの径方向の特性を実験で求め解析に適用する必要がある。

そこで佐野によってストランドの圧縮実験と有限要素法解析が行われた[16]。実験と解析で用いられたのは $8 \times S(19)$ 、 $8 \times Fi(25)$ を構成する 2 種類のストランドである。実験結果と解析結果の比較を図 1-7 に示す。試験結果は解析結果よりも同じ荷重に対しての変位が大きくなった。このことに対して、実物のストランドにはグリスが塗られているために素線間の摩擦が解析でのモデルより低くなり変位が大きくなった、治具が適切でなく求めたストランドの変位が実際にはストランド以外の変位も含めてしまっ

ていたという考察がされた。

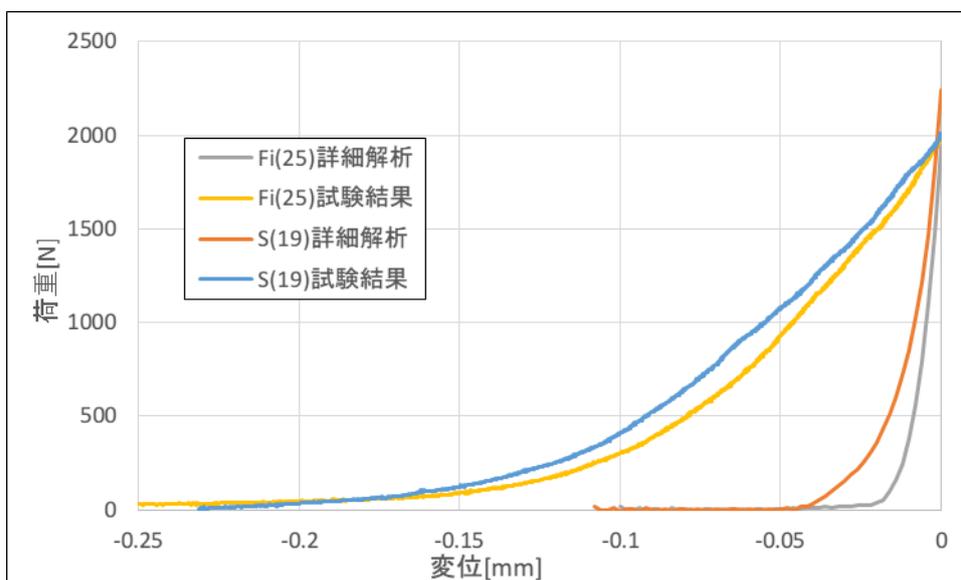


図 1-7 実験値と解析値の比較

1.3 本研究の目的

本研究では、寺田・佐野の論文で使用されたのと同じ二種類のワイヤロープに用いられているストランド S(19)と Fi(25)ストランドに対し、先行研究を踏まえ計測方法や荷重条件に注意した上で、引っ張り荷重を変化させストランドを径方向に圧縮する実験と、ストランドの詳細モデルを同様に圧縮する解析を行い両者を比較することで、ストランドの径方向に荷重が加わったときの力学的特性を解明する。そして、求めた特性をブリーディング解析で用いるストランド簡略化モデルに導入する。

1.4 本論文の構成

本論文は全4章から構成される。

第1章「序論」では、本研究の背景、先行研究で行われたブリーディング解析と圧縮実験の説明、目的について述べた。

第2章「エレベータ用ワイヤロープのストランド圧縮実験」では、実験で用いる二種類のストランドに触れ、引っ張りを加えた上での圧縮実験の概要と結果、ストランドの圧縮に対しての可逆性について説明する。

第3章「有限要素法解析」では、ストランド詳細モデルに対して実験と同様な条件で解析を行い実験結果と比較する。

第4章「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、今後の展望について述べる。

第2章 エレベータ用ワイヤロープのストランド圧縮実験

2.1 緒言

本章では、二種類のエレベータ用ワイヤロープ $8 \times S(19) \cdot 8 \times Fi(25)$ を構成するストランドを用いて行った圧縮実験の概要と結果を説明する。また並行して行われたストランドのヒステリシスを調べるための実験、伸びの計測実験、径方向荷重が加わったときのストランド断面の観察についても説明する。そして求めた実験結果を元に、第3章の3.3.3で解析結果と比較しストランドの径方向有効ヤング率を求める。

2.2 実験材料

今回実験で使用した二種類のストランドは、東京製綱の国内で広く使用されているエレベータ用ワイヤロープ $8 \times S(19) \cdot 8 \times Fi(25)$ を構成しているストランドである（以下 $S(19)$ ストランド・ $Fi(25)$ ストランドと呼ぶ）。それぞれのロープ断面図・ストランド断面図を図 2-1 に、ストランドを構成する素線の径・本数を表 2.1 に示す。 $8 \times S(19) \cdot 8 \times Fi(25)$ ロープともにロープ芯に対しストランドを八本より合わせることで構成している。ロープ公称径は 10mm でストランド公称径は 2.7mm、ロープピッチ（ストランドがロープ心周りに1周するのに要する軸方向の長さ）は 65mm でストランドピッチ（素線がストランド中心周りを1周するのに要する軸方向の長さ）は 18mm である。

ストランドのより方には交差よりと平行よりの二種類があり、交差よりは同径の素線を各層別により角がほぼ等しくなるようにより合わせたもので内側の素線と外側の素線のピッチが異なるために内外素線は交差するように点で接触する、一方で平行よりは下層素線の谷間に上層素線が正しく重なるように隙間なく配置し内側の素線と外側の素線でピッチが等しいために内外素線は平行に線で接触する。そのため、交差よりでは素線に作用する引っ張り応力が均等になるけれども点接触による曲げ応力が加わるので耐疲労性は期待できないという特性があり、一方で平行よりでは各層素線のより角及び素線の長さは等しくないが線接触であるために耐疲労性が優れるという特性がある。今回実験で用いる二種類のストランドはどちらも平行よりである。

$S(19)$ ストランドは、中心に1本、二層目に9本、三層目に9本の計19本の素線により構成されている。二層目と三層目の素線数が同数で内層素線の凹みに外層素線が完全に収まる形となっており、この形をシール形という。シール形ロープは他の平行よりのものと比べて外層素線が太く耐摩耗性に優れ、主にエレベータ用として用いられている。

$Fi(25)$ ストランドは、中心に1本、二層目に6本、三層目に6本、四層目に12本の計25本の素線により構成されている。四層目の素線数が二層目の素線数の二倍で三層目に二層目の素線数と同数の細い素線（フィラー線）が充填されているこの形をフィラー形という。フィラー形ロープは柔軟性・耐疲労性・耐摩耗性のバランスがよく平行

よりロープのうちでもっとも広範囲に使用されている。

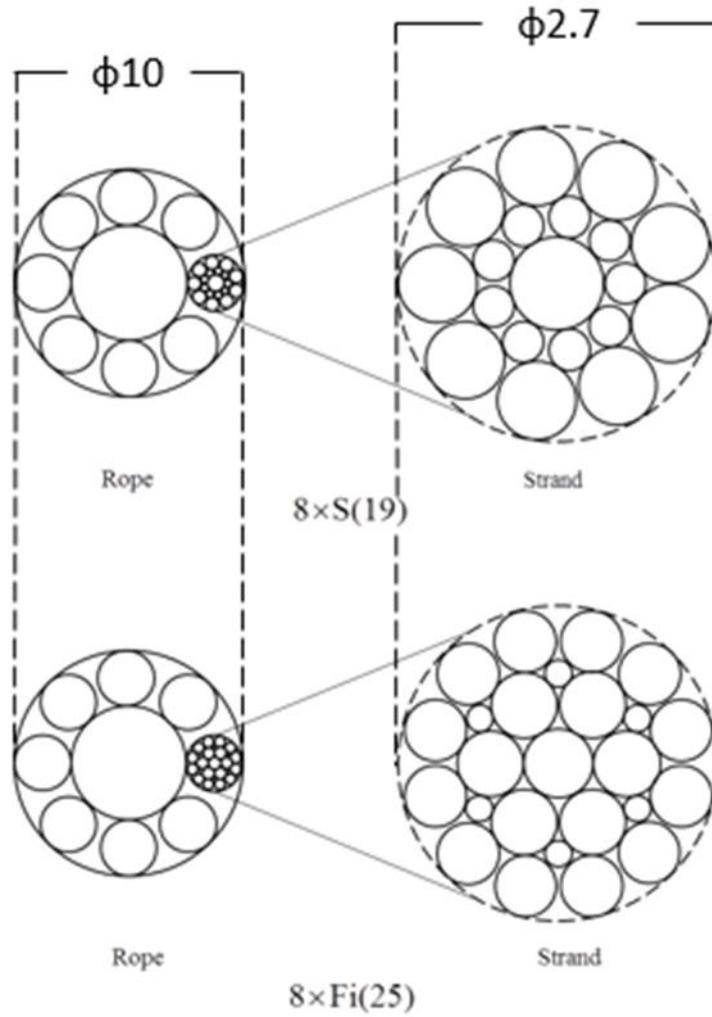


図 2-1 二種類のロープの構成

表 2.1 ストランドの構成

	Fi ストランド			S ストランド		
	本数	中心からの距離 [mm]	直径 [mm]	本数	中心からの距離 [mm]	直径 [mm]
一層目	1	0	0.58	1	0	0.773
二層目	6	0.58	0.57	9	0.575	0.363
三層目	6	0.792	0.24	9	1.02	0.66
四層目	12	1.09	0.52			

2.3 実験装置・治具

試験の模式図を図 2-3 に、実際の試験の様子を図 2-4 に示す。また試験に使用した実験器具を表 2.2 に示す。ストランドの変位計測は治具から出ている二本のボルト間を測定することで求めた。これはロードセルの位置情報から変位を求めようとするとき試験機や治具の変位が含まれてしまう可能性が考えられるためこのような方法をとった。

治具の構造を図 2-2 に示す。材質は SS400 を用いた。治具にあいている径 10mm の四つの穴は、実験中に少し小さな径を持つ丸棒（材質は SS400）を四本通すことで治具の回転を固定するためのものである。上下の治具についている溝はストランドを固定するためのものである。実験で用いるストランドは二種類とも径 2.7mm であるので、溝は R1.4mm の三分の一円である。

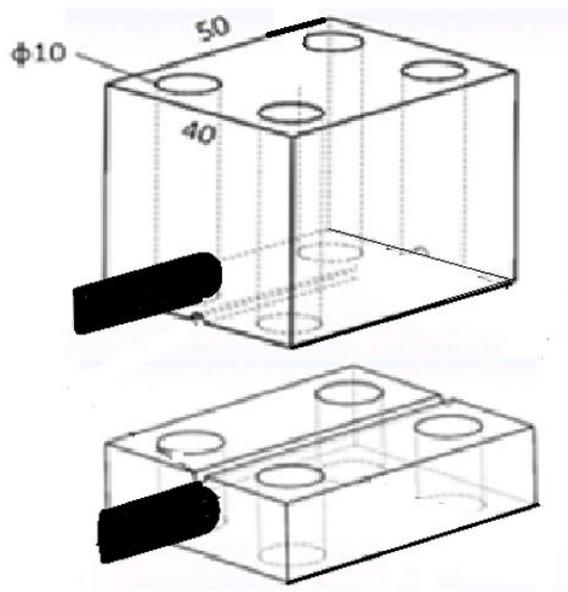


図 2-2 治具画像

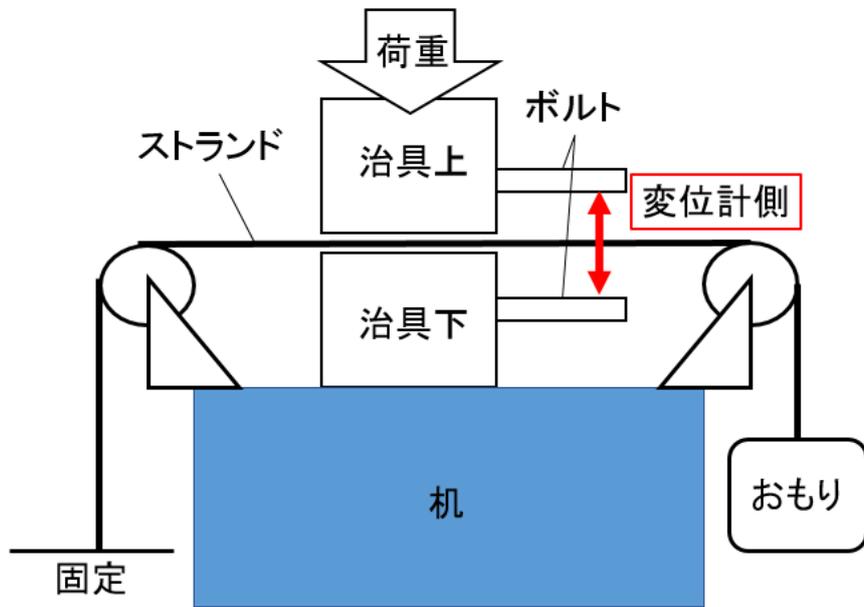


図 2-3 試験模式図

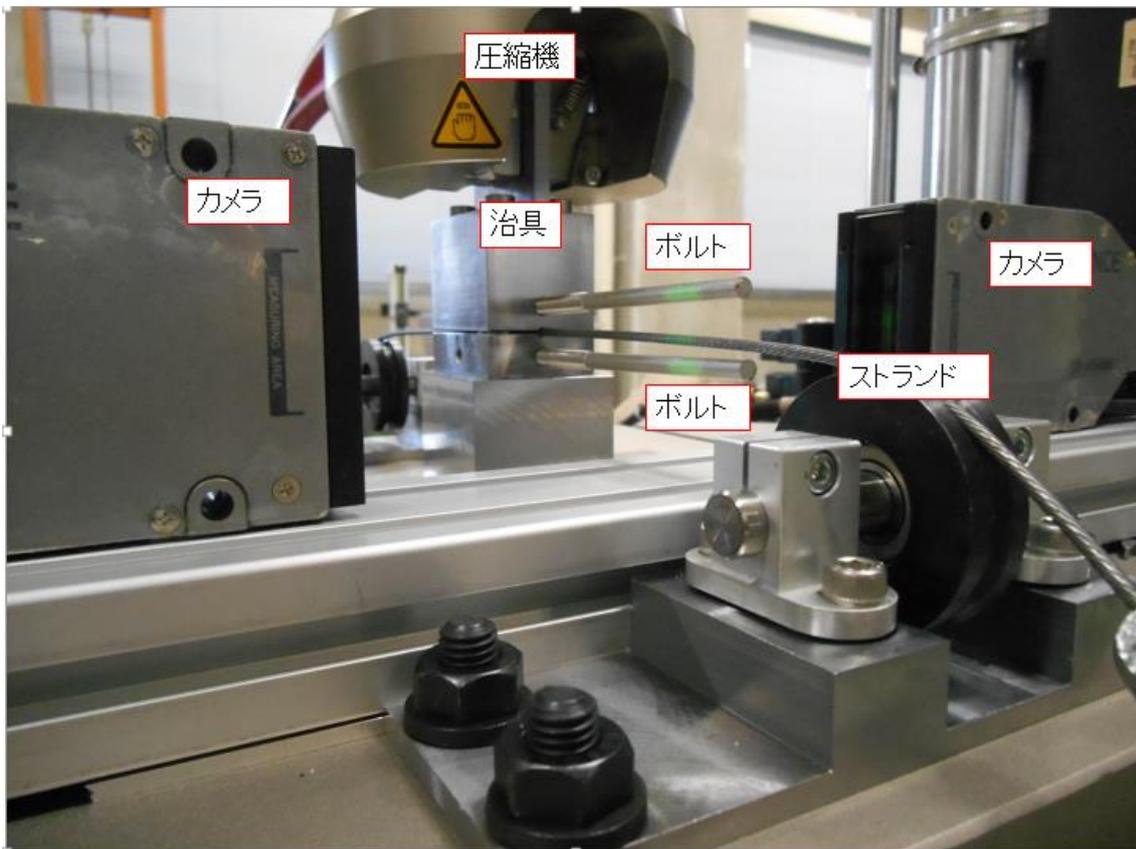


図 2-4 実験の様子

表 2.2 使用した実験装置

圧縮機	25kN 電気油圧サーボ疲労試験機
ロードセル	インストロン 8872 型試験機用ロードセル
カメラ	KEYENCE 社の LS-7030MR
SENSOR INTERFACE	KYOWA 社の PCD-320A と PCD-331B-F
HIGH-ACCURACY CCD MICROMETER	KEYENCE 社の LS-7600

2.4 圧縮実験

2.4.1 圧縮実験手順

実験前の準備として、はじめに治具を試験機に固定しストランドの片方の端もワイヤクリップを用いて床に固定する。次に残ったもう片方のストランドの端はジグを通して滑車にたらす。滑車にたらしたほうのストランドの先にワイヤクリップを用いて重りを床につかないようにつけ、揺れや回転が止まるまで待つ。公称径 10mm のエレベータ用ワイヤロープの最大許容荷重は 4000N であり、2.2 章の実験材料で述べたように二種類のワイヤロープはともに八本のストランドと一本のロープ芯から構成されているため一本のストランドに加わる引っ張り荷重は最大で 500N と考えられる。そのため当初重りは 10,20,30,40,50kg の 5 種類を予定していたが、実験環境の都合上 40,50kg の重りを使って実験できなかったため本実験では 10,20,30kg の三種類の重りを用いて実験を行った。

準備が整ったら試験機を用いてストランドに径方向の圧縮荷重を加え（荷重制御）、同時に治具から出ている二本のねじ間の距離をカメラを用いて測定する。圧縮荷重を 0.5kN 加えた時のねじ間の距離を変位の基準とし、荷重を増やしていったときのねじ間の距離と基準値との差を変位とする。圧縮荷重は一回の実験で最小 0.5kN、最大 9.5kN の sin 波（中心 5kN、振幅 4.5kN）で 1 サイクル 100 秒かけて計 20 サイクル連続で加える。このような荷重を加える理由としては、試験機のロードセルの都合上 10kN を越えないようにするため最大荷重は 9.5kN にする必要があり、またストランドはヒステリシスを持つことが予想されるため準静的に実験をする必要があったためである。10kN の 5%である 0.5kN を基準の最小荷重とした。また sin 波で 20 サイクル行う理由としては、ストランドは素線をより合わせた構造をしているために中に隙間が存在しており、また荷重が加わると断面が回転するといった特性を持つ。そのためサイクルを行うごとに得られる荷重・変位曲線の波形はずれるため、波形が収束するまで実験を行う必要があったためである。

2.4.2 圧縮実験結果

2.4.2.1 計測の注意点

実験で変位を計測する際、当初は図 2-5 のような治具の側面から出したねじ間の距離を計測していた。この計測方法で計測した、軸方向に 30kg 引張りを加えた Fi(25) ストランドの圧縮実験の 10 サイクル分の結果を図 2-6 に示す。図 2-6 によると、荷重を加えると変位が負の方向に増えていき（ねじ間が広がっていき）、2kN を境に変位が正の方向に戻る（ねじ間が狭まる）という予想とは異なる波形となった。これは物体に荷重を加えるとつぶれて変位が増えるという常識から外れており計測方法が間違っていると考えた。はじめ変位が負になった原因として、引っ張り荷重が加わったことでストランドが密になり剛性があがり、またストランドが素線をより合わせているためにねじれた形であることから治具が圧縮荷重によってそれに沿って曲がってしまったと考えられる（図 2-7）。次に 2kN を超えると変位が正に増えていくのは荷重がだんだん増えることで治具の傾きによる変位の増加よりも単純な荷重によるストランドの変位がまさったためと考えられる。

次に、これらのことを改善するために、治具の正面からねじを出しその距離を計測して圧縮実験を行った。二本のねじは、荷重を加える中心とストランドの断面の円の中心を結んだ直線上から出している。この時、波形は荷重が加わると変位が増えるという理想的な波形を描いた。今回の実験の変位計測では後者の計測方法を採用している。

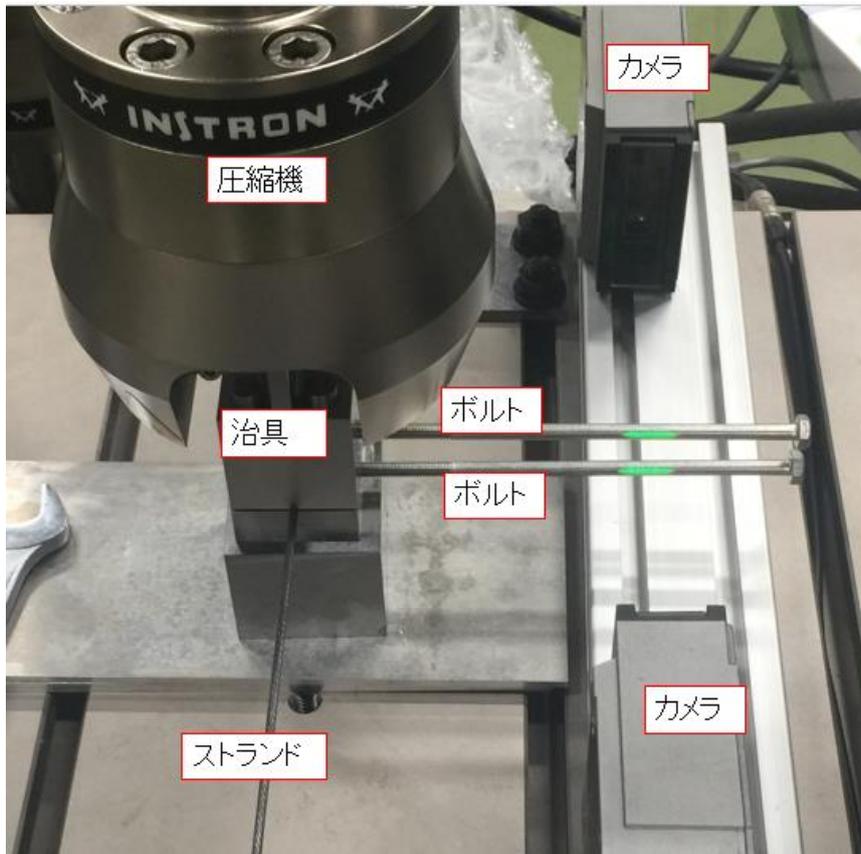


図 2-5 変位の治具側面での計測様子

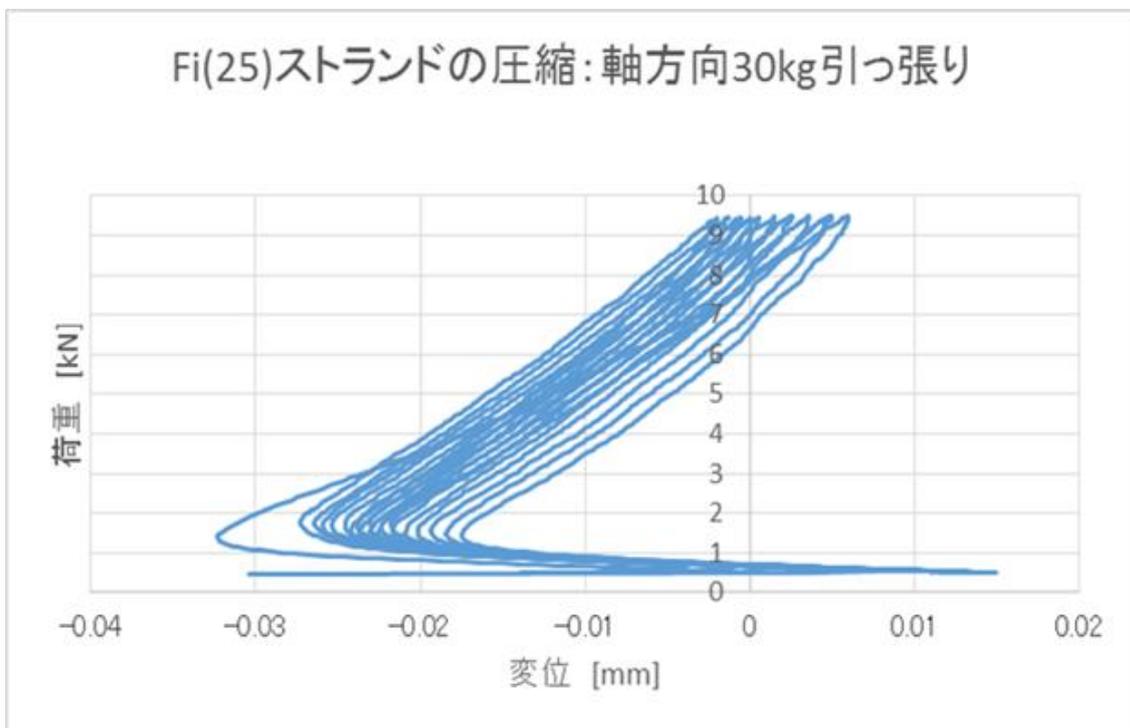


図 2-6 側面での変位計測結果

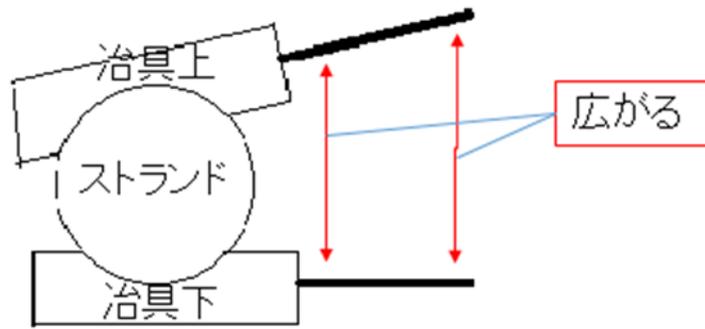


図 2-7 ストランドと曲がった治具

2.4.2.2 S(19)ストランドの荷重・変位曲線

S(19)ストランドの 10,20,30kg の引張り荷重に対する全 20 サイクルの実験結果の比較を図 2-8 に示す。

三種類のどの引張り荷重を加えた場合も、サイクルを重ねるごとに変位が右にずれている。これは、ストランドは素線をより合わせた構造をしているために内部に隙間が存在していることと、素線には油が塗られていることにより、サイクルが進み荷重を受けることで隙間が埋まり内部の油が押し出され変位が徐々に右にずれていったと考えられる。そしてサイクルが増えれば増えるほどサイクル間での変位のずれは小さくなり隙間がこれ以上縮まらない状態へと収束していく。S(19)ストランドの実験では、20 サイクル行うことで三種類の引張り荷重の波形全てがほぼ収束した。

引張り荷重が大きいほど、変位のずれが小さく幅の狭い波形となっている。これは引張り荷重が大きければ素線同士がしまり内部の隙間が埋まりやすくなるために変位のずれが小さくなったといえる。

隙間が埋まり波形が収束した 19 サイクル目のみを抜き出して比較したものを図 2-12 に示す。

収束した三種類の引張り荷重の波形はほぼ一致した。これは S(19)ストランドに関して、径方向に荷重が加わり隙間がうまった収束したストランドは、引張り荷重によらない径方向の有効ヤング率が存在するといえる。

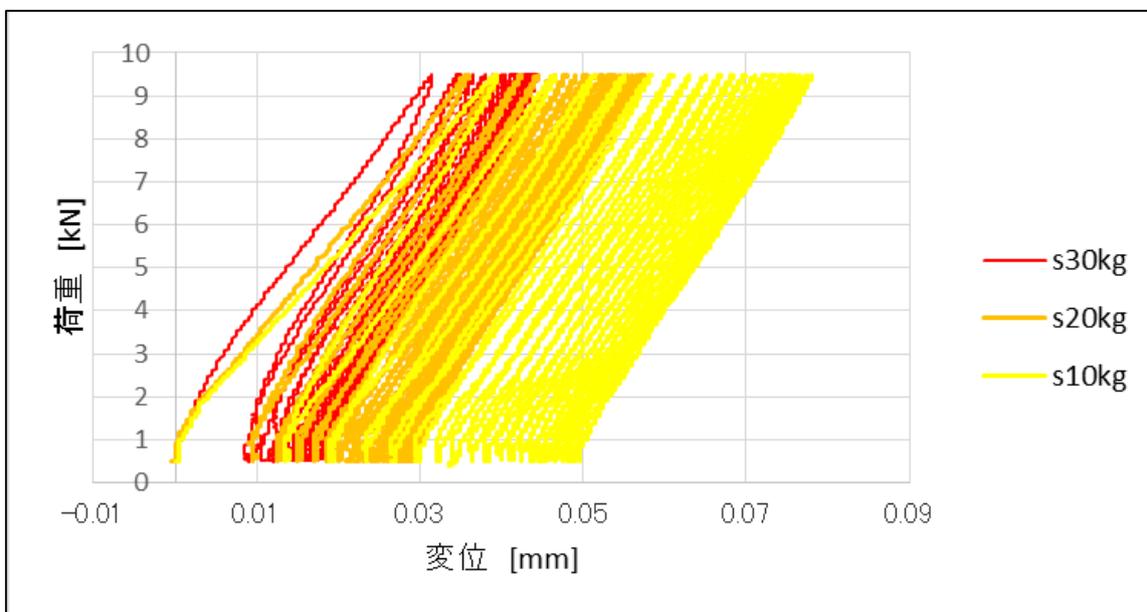


図 2-8 S(19)ストランドのそれぞれの引張り荷重に対する荷重・変位曲線

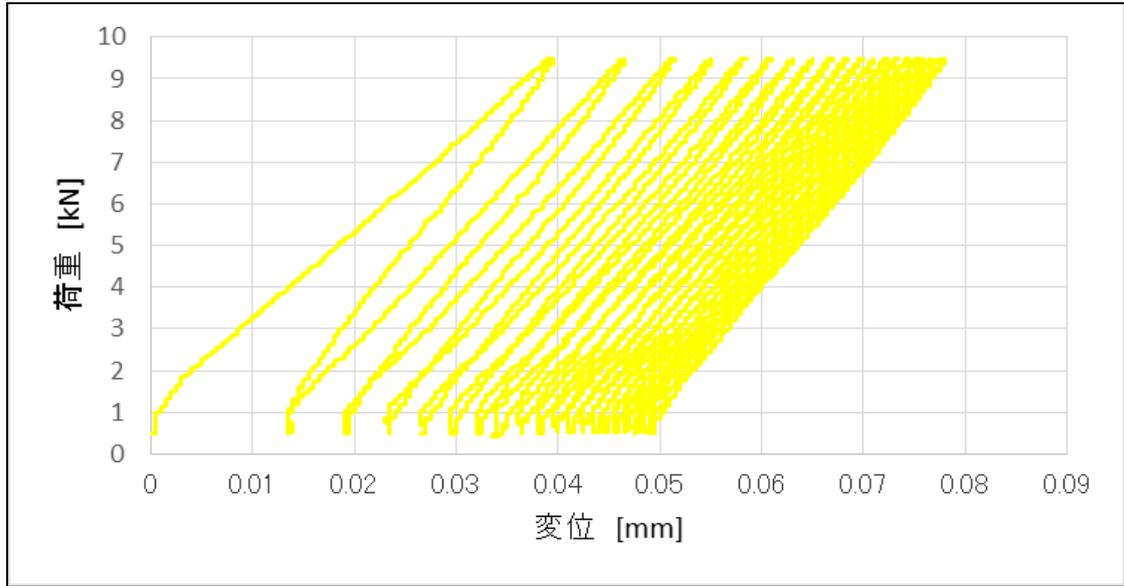


図 2-9 S(19)ストランドの 10kg 引張りに対する荷重・変位曲線

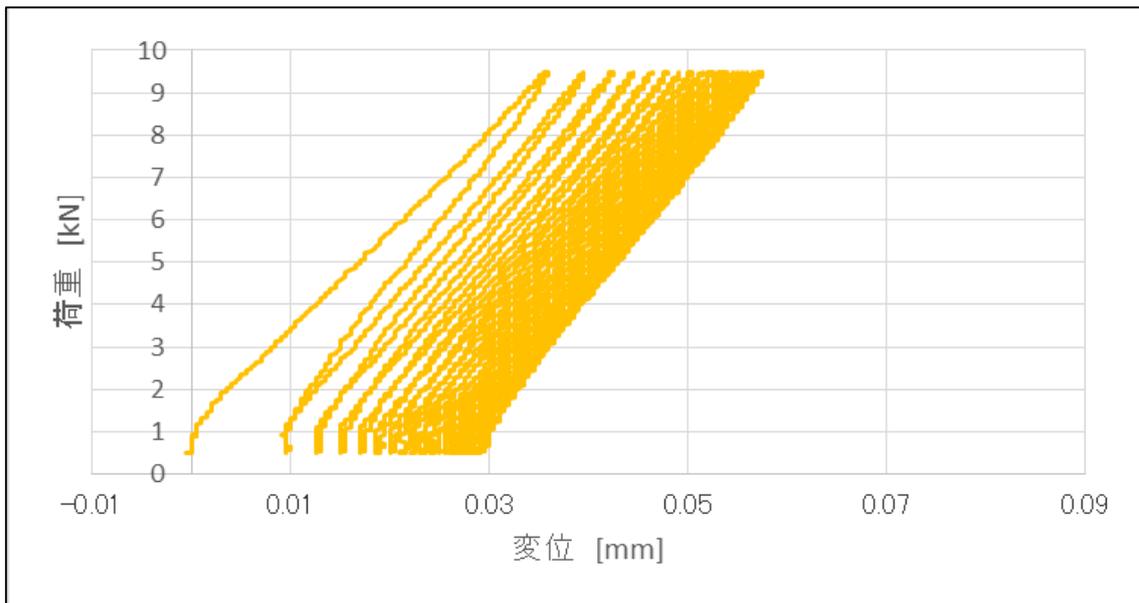


図 2-10 S(19)ストランドの 20kg 引張りに対する荷重・変位曲線

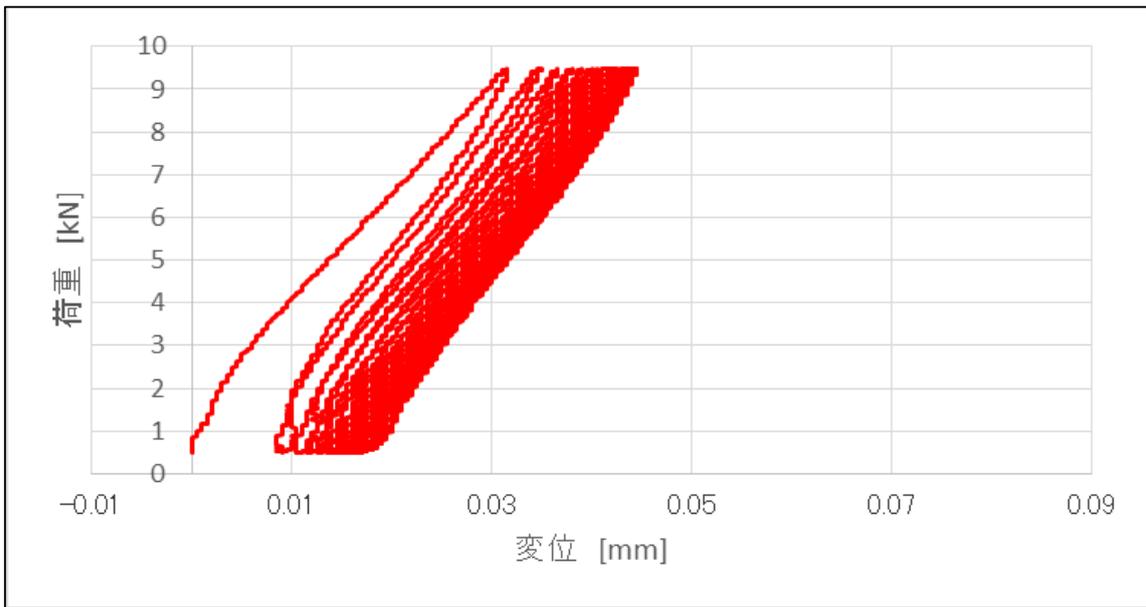


図 2-11 S(19)ストランドの 30kg 引張りに対する荷重・変位曲線

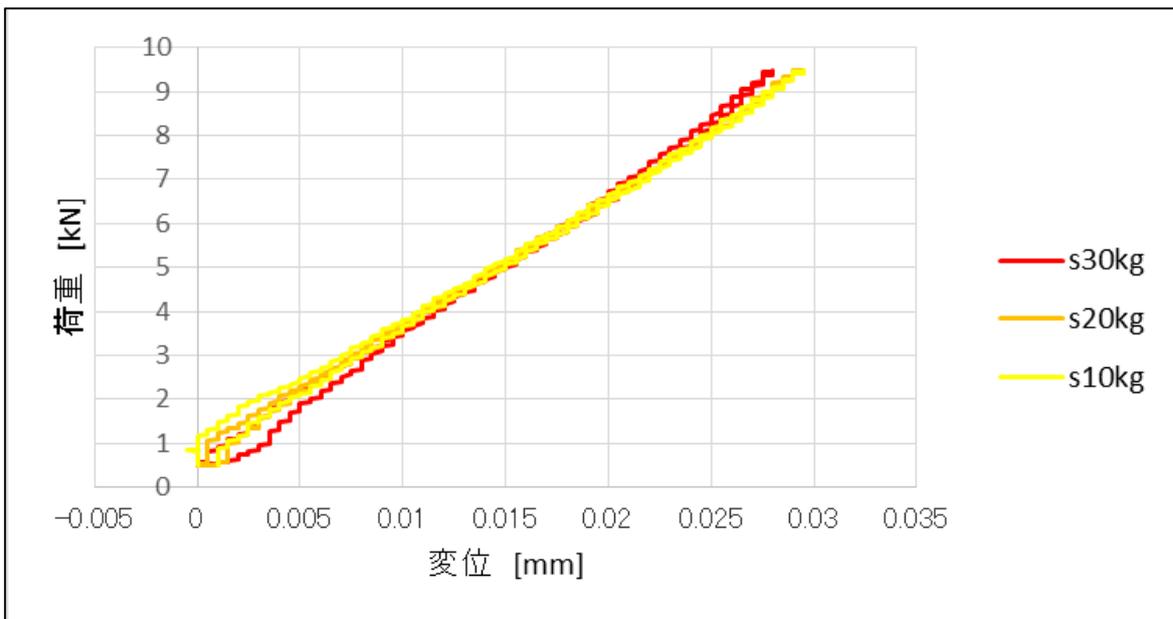


図 2-12 S(19)ストランドのそれぞれの 19 サイクル目の荷重・変位曲線

2.4.2.3 Fi (25) ストランドの荷重・変位曲線

Fi(25)ストランドの10,20,30kgの引っ張り荷重に対する全20サイクルの実験結果の比較を図2-13に示す。

10kgの引っ張り荷重の時はサイクルを重ねるごとに変位が右にずれている。これはS(19)ストランドと同様内部の隙間と油が関係していると考えられる。一方で20kgの引っ張り荷重の時は変位のずれは確認できるものの顕著ではなく、30kgの引張り荷重ではほとんど変位のずれが確認できない。変位のずれが確認できないということは、内部の隙間が径方向荷重のサイクルを加える前の引張り荷重によってすでに埋まっていたことになる。Fi(25)ストランドの内部状況は引張り荷重の影響を受けやすいと考えられる。

三種類それぞれの波形を見ると10kg引張りの時はほぼ線形なのに対して、20kg,30kg引張りの時は荷重約1kNを境に折れる折れ線グラフのような波形になっている。これはS(19)ストランドの時には見られなかった特性であり、Fi(25)ストランドの構造上の問題だと考えられる。Fi(25)ストランドの最外層素線の素線径は比較的小さいことからずれやすくなっており、小さい荷重の範囲ではそのズレが影響し変位が出やすくなっていた可能性が考えられる。

隙間が埋まり波形が収束した19サイクル目のみを抜き出して比較したものを図2-17に示す。

10,20kg引張りの最大変位は共に約0.035mmと等しくなったが、30kg引張りでは約0.045mmと0.01mm大きくなった。荷重1kN以降の20kg,30kg引張りの波形は直線で傾きはほぼ等しいことから、荷重が小さい範囲で最外層素線の影響を受け変位が出た、もしくは治具の回転を抑えるための四本の丸棒が引っかかってしまった、ストランドがうまく治具に設置できていなかった等不備があり、波形が平行移動してしまっただと考えられる。

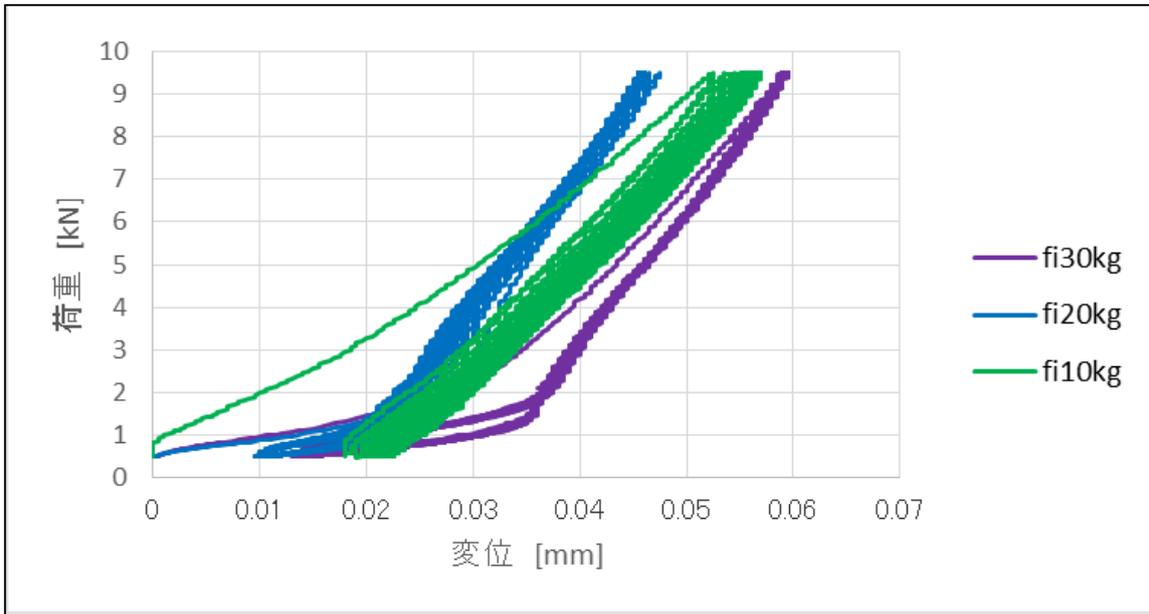


図 2-13 Fi(25)ストランドのそれぞれの引張り荷重に対する荷重・変位曲線

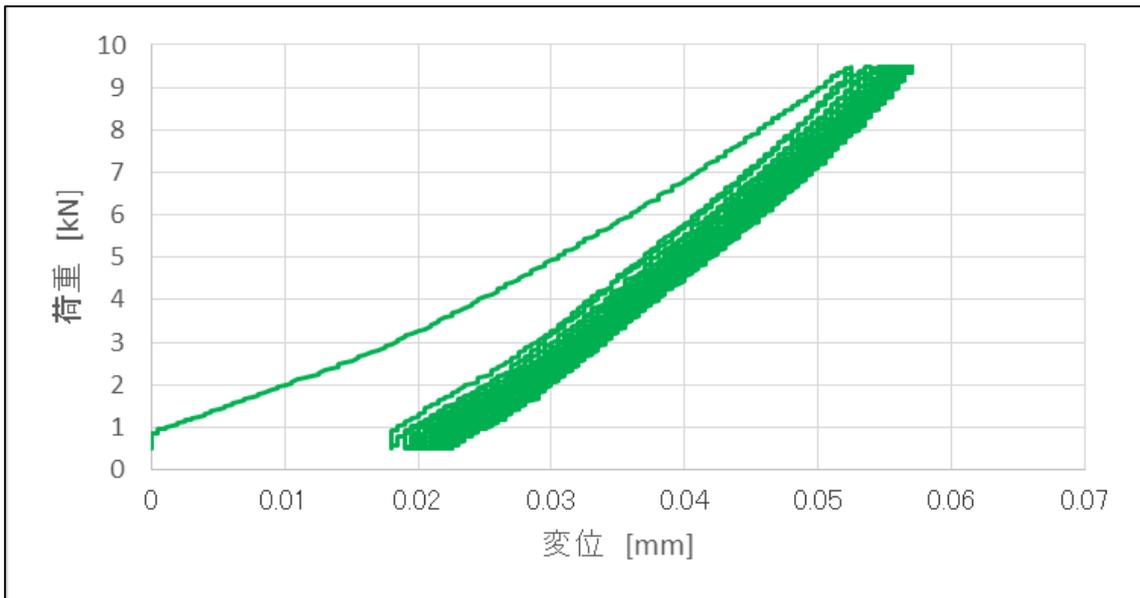


図 2-14 Fi(25)ストランドの 10kg 引張りに対する荷重・変位曲線

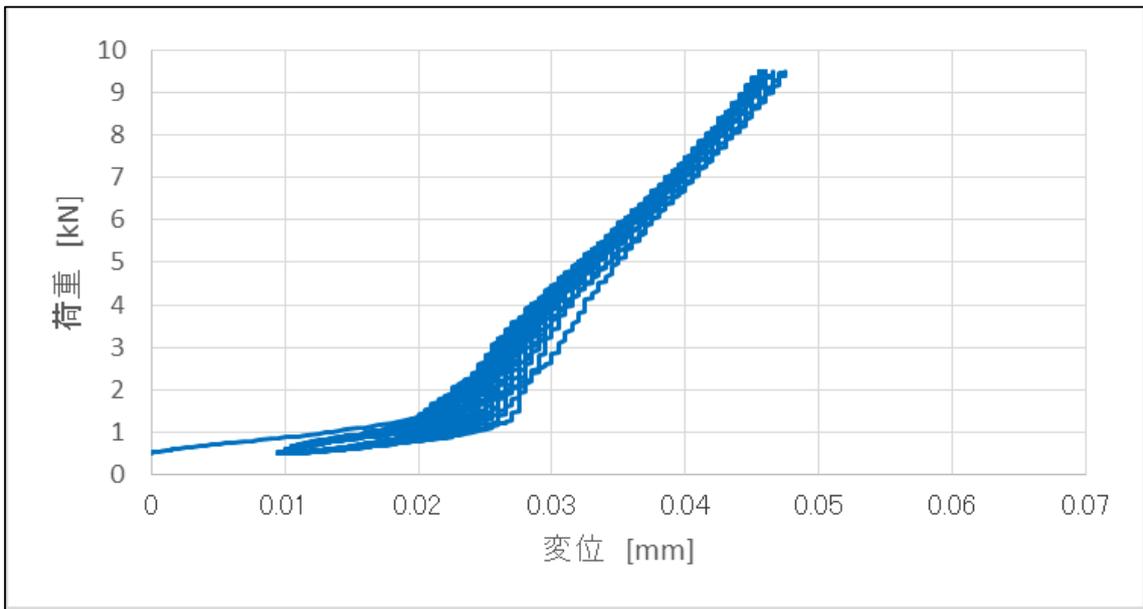


図 2-15 Fi(25)ストランドの 20kg 引張りに対する荷重・変位曲線

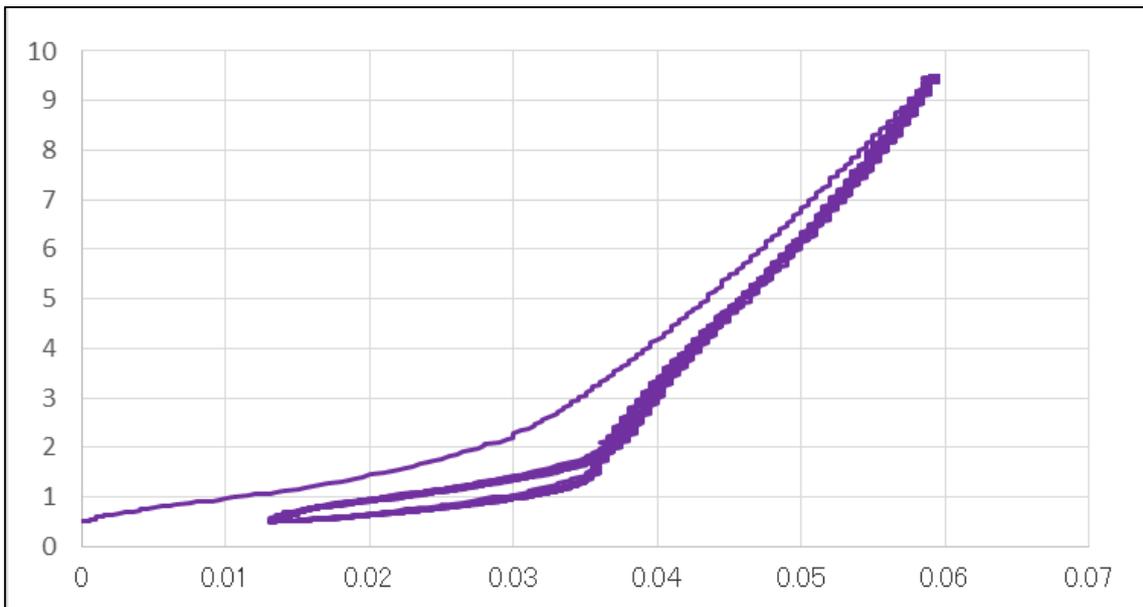


図 2-16 Fi(25)ストランドの 30kg 引張りに対する荷重・変位曲線

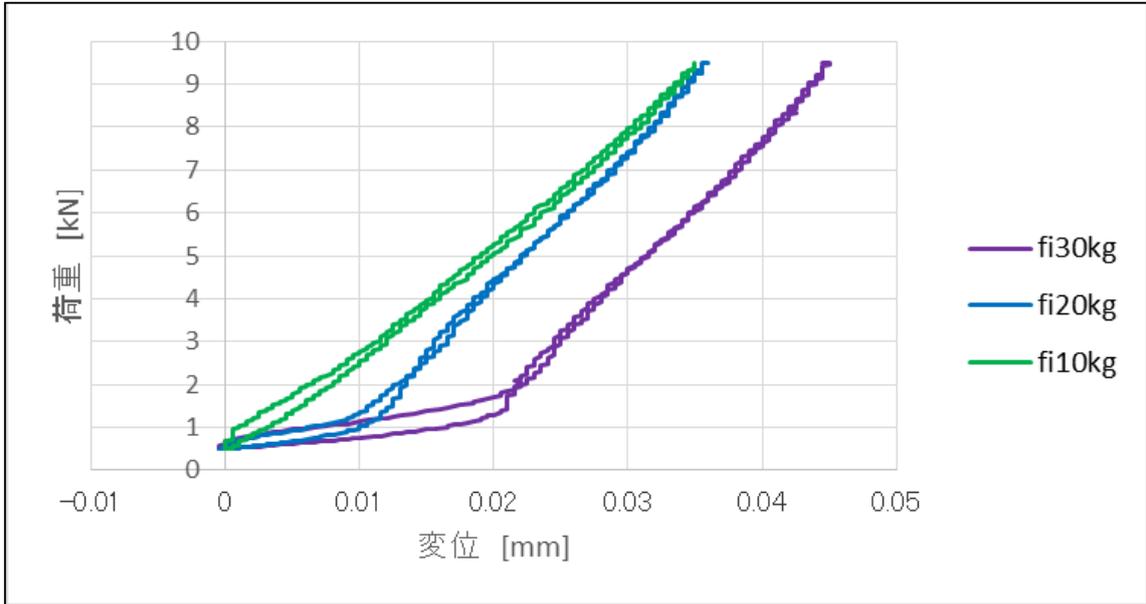


図 2-17 Fi(25)ストランドのそれぞれの 19 サイクル目の荷重・変位曲線

2.4.2.4 両ストランドの比較

Fi(25)ストランド、S(19)ストランドの 10,20,30kg のそれぞれの引張り荷重に対する全 20 サイクルの実験結果の比較を図 2-18、図 2-19、図 2-20 に示す。

三種類の引張り荷重において、総じて Fi(25)ストランドのほうが S(19)ストランドよりも変位のズレの幅が狭い。これはストランドの構造の違いによるものと思われる。Fi(25)ストランドはフィラー形と呼ばれる構造をしていて、第二層と第四層の素線間の隙間に細いフィラー線と呼ばれる素線を入れているために内部がより密になっている。そして Fi(25)ストランドの充填率は約 79.5%であり S(19)ストランドの充填率約 77.9%よりも大きいので内部の隙間が少なく変位のズレが生じにくかったと考えられる。

二種類のストランドに対し、三種類の引張り荷重を加えた計六種類の波形の 19 サイクル目のみを抜き出して比較したものを図 2-21 に示す。S(19)ストランドは三種類の引張り荷重に対して線形で同じ波形を描き最大変位は 0.028mm となっている。一方で Fi(25)ストランドでは、10kg 引張りの時は線形、20kg,30kg 引張りの時は折れ線となり波形が異なる。また 10kg,20kg 引張りの時の最大変位は 0.035mm で 30kg 引張りの最大変位は 0.045mm となった。Fi(25)ストランドのほうが S(19)ストランドよりも充填率が高いので変位が小さそうであるが実際は大きかった。これはストランドの構造の違いによるものだと考えられ、Fi(25)ストランドを構成する素線は S(19)ストランドの構成素線よりも比較的細いものが多く径方向荷重に対してつぶれやすかった、あるいは最外層素線の動きやすさなどが関係していると考えられる。径方向荷重を加えているときの素線の動きをカメラで直接確認する必要がある。

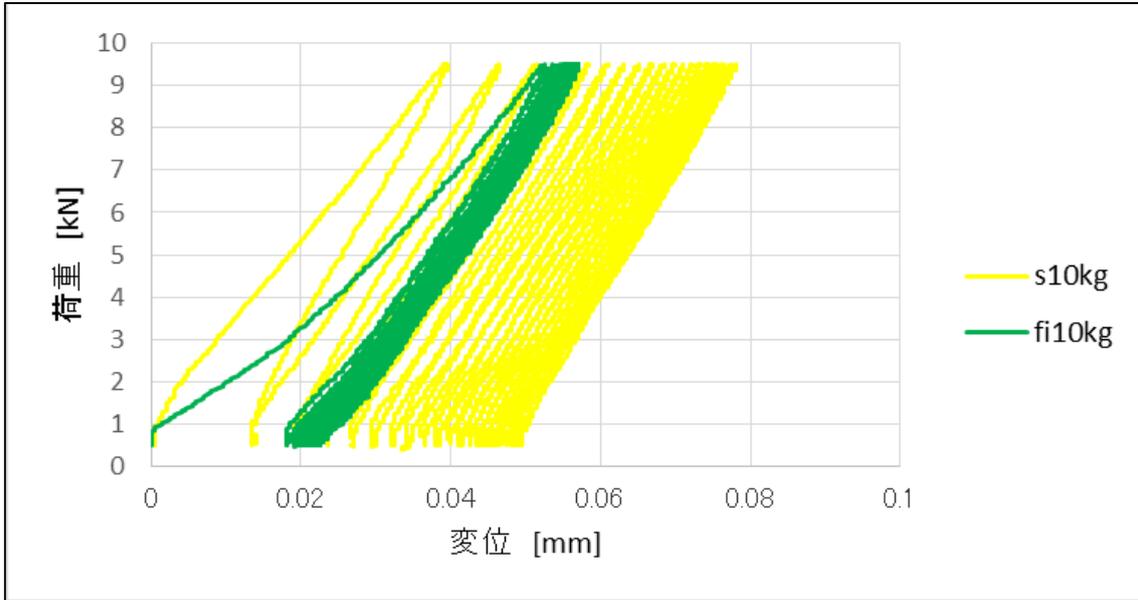


図 2-18 10kg 引張りに対する両ストランドの比較

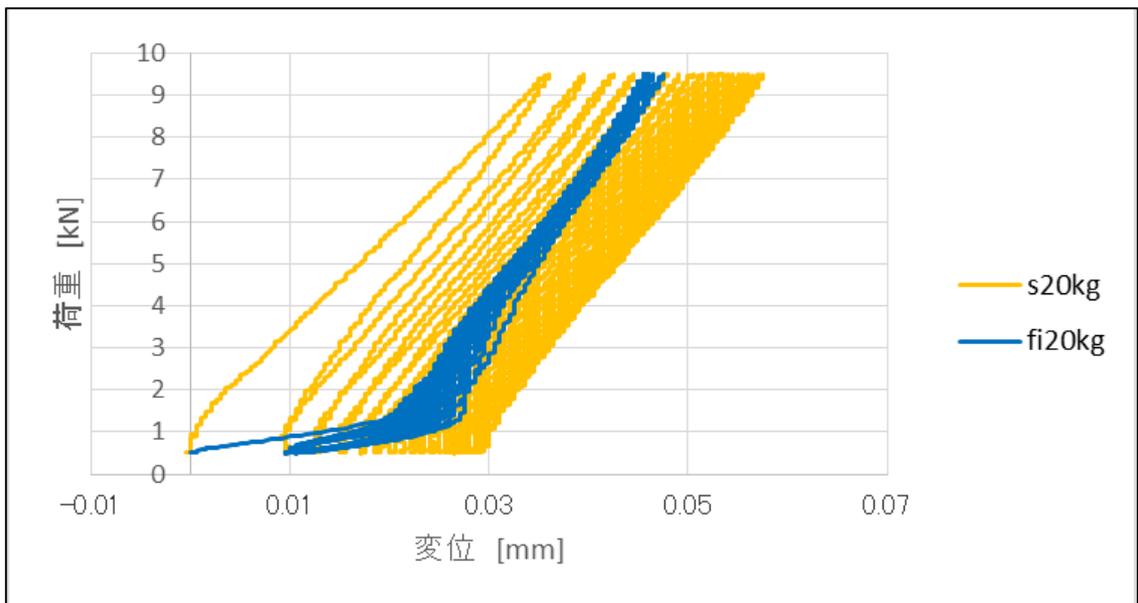


図 2-19 20kg 引張りに対する両ストランドの比較

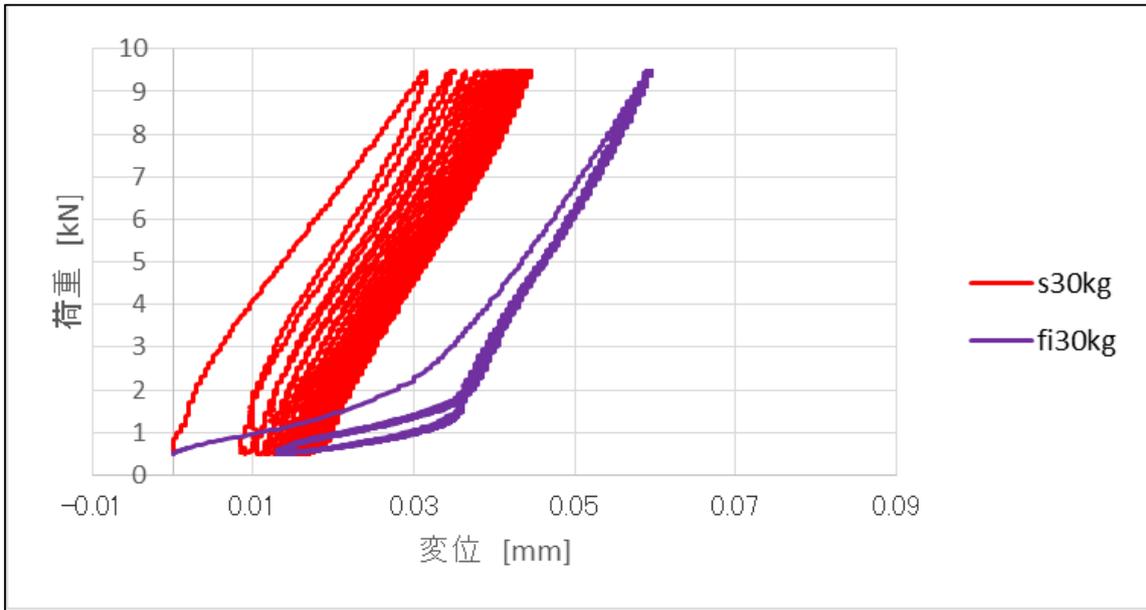


図 2-20 30kg 引張りに対する両ストランドの比較

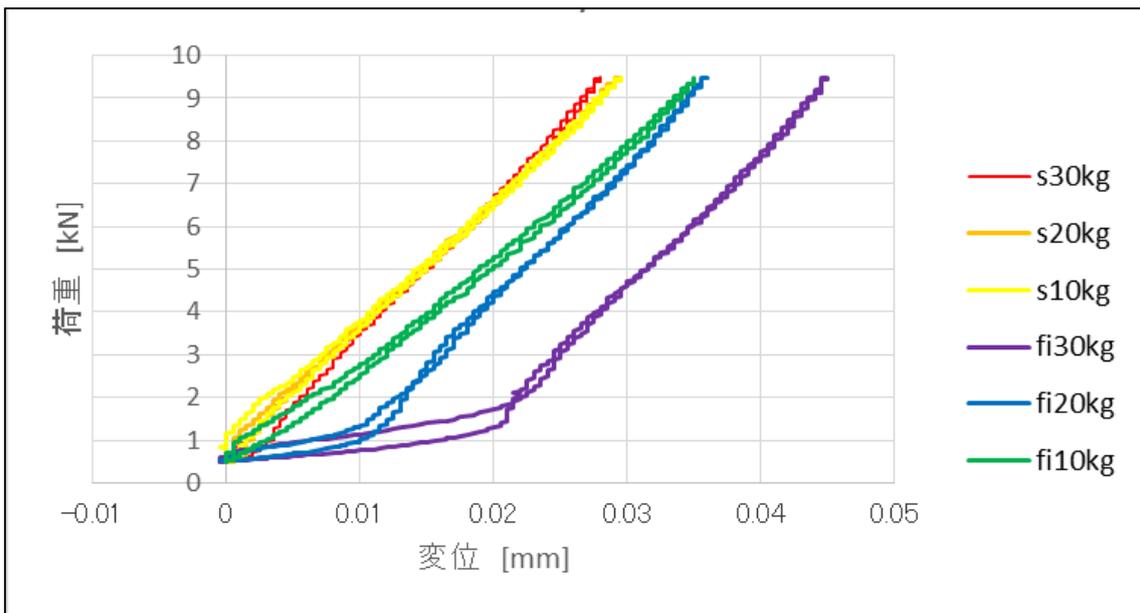


図 2-21 両ストランド、それぞれの引張りでの比較

2.5 ストランドのヒステリシスを調べる実験

ストランドは径方向荷重を受けると中の隙間が埋まっていく。その状態に可逆性があるのか調べるために、先ほどの 10kg 引張りを加えての圧縮実験で用いた二種類の S(19),Fi(25)ストランドに対し、同様の実験を日にちをあけて行った。それぞれ圧縮実験を行ってから一日後、さらにそこから二日あけての四日後の計二回測定を行った。S(19)ストランドの全 20 サイクルの実験結果を図 2-22 に、19 サイクル目を抜き出した実験結果を図 2-23 に示す。同様に Fi(25)ストランドの実験結果を図 2-24 と図 2-25 に示す。

S(19)ストランドは、圧縮実験を行ってから一日後だと変位のブレがほとんど生じていない。また三日後も 1 サイクル目を除いて変位のぶれはほぼ確認できなかった。このことから、S(19)ストランドは一度径方向荷重が加わり隙間が埋まった収束状態になると少なくとも二日間は収束状態を維持するといえる。今回の実験では時間の都合上元の隙間のある状態に戻るために必要な時間を確認することができなかった。

Fi(25)ストランドは、もともと S(19)ストランドと比べて変位のブレが少ないために前者ほど顕著ではないが、圧縮実験を行ってから一日後ではかすかに変位のブレが小さくなっている。しかし三日後は元のストランドと変位のぶれの幅はほぼ等しくなった。よって Fi(25)ストランドは一度径方向荷重が加わり収束状態になったとしても、三日後には元に近い状態に戻ることが分かる。

19 サイクル目を抜き出したグラフを見てみると、S(19)ストランドは日にちをあけて実験を重ねるごとに最大変位が少しずつ小さくなっている一方で、Fi(25)ストランドは最大変位にほとんど違いが見られなかった。これは S(19)ストランドは Fi(25)ストランドよりも充填率が小さくその分隙間に油が多く含まれていたが、実験を重ねるごとにその油が押し出されより密になっていき変位が出にくくなったと考えられる。

S(19)ストランドは三種類のグラフ共に線形であり波形はほぼ等しくなったが、Fi(25)ストランドは元と一日後のグラフが線形で波形がほぼ等しいのに対して四日後のグラフは荷重約 1.5kN 地点で折れた波形となった。Fi(25)ストランドは圧縮実験のときも波形が線形のときと折れ線のときがあり S(19)ストランドにはない特性であることからストランドの構造上によるものだと思われるが、こういった場合に折れ線になるのかは分からなかった。S(19)ストランドの構成素線の二層目三層目は 9 で奇数であり、Fi(25)ストランドの構成素線の二層目三層目四層目はそれぞれ 6,6,12 の偶数であることからこのことが力の伝え方に影響を及ぼしている可能性と、先の章で述べたように最外層素線の動きやすさが考えられる。

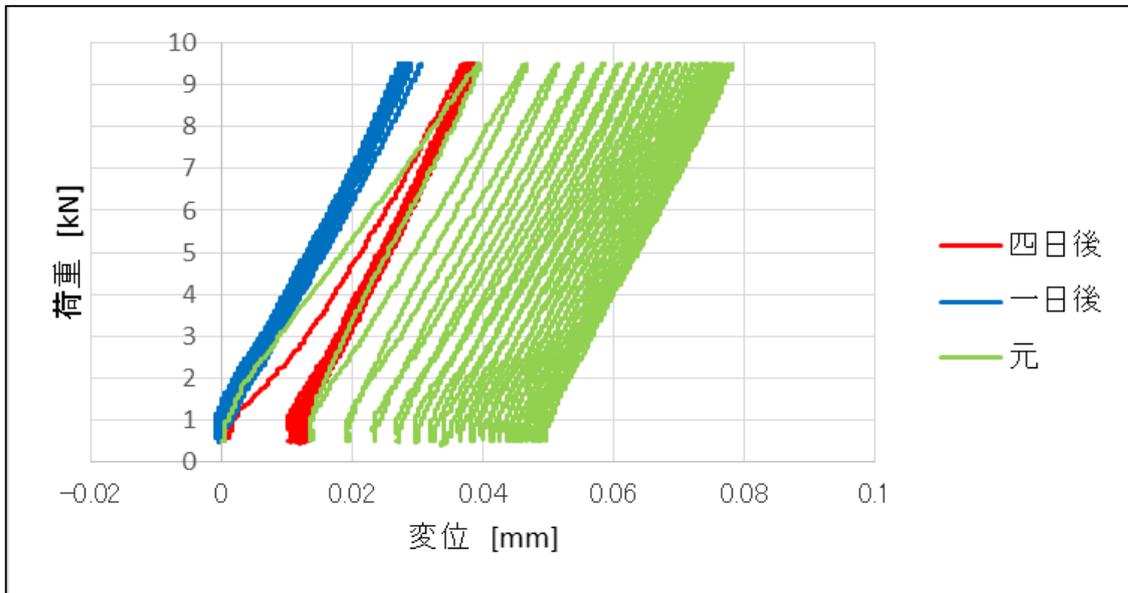


図 2-22 S(19)ストランドの可逆性実験結果

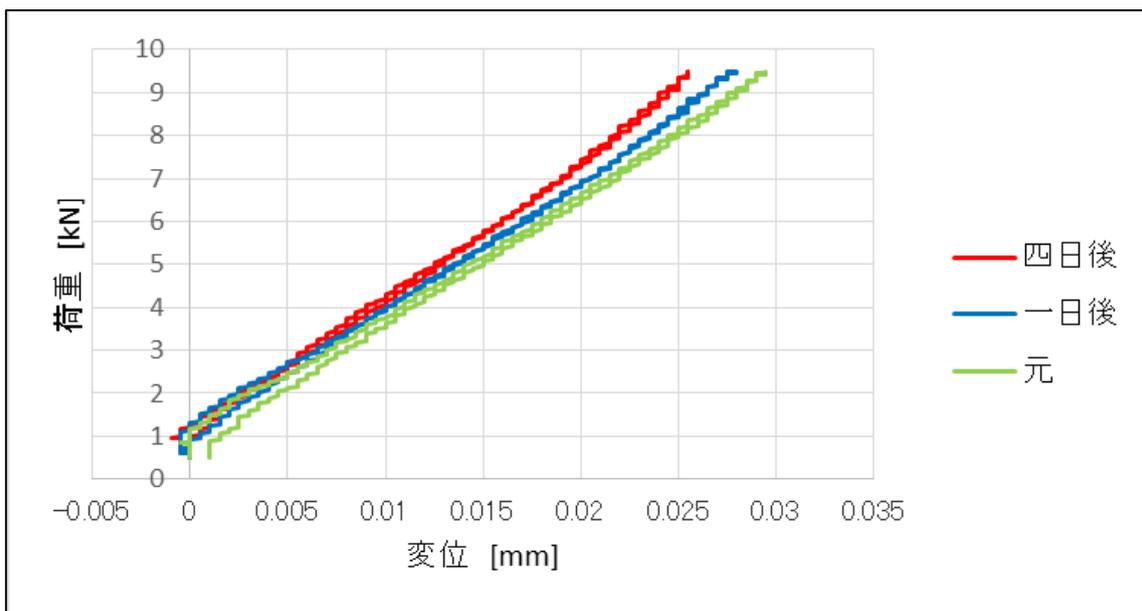


図 2-23 19 サイクル目の S(19)ストランドの可逆性実験結果

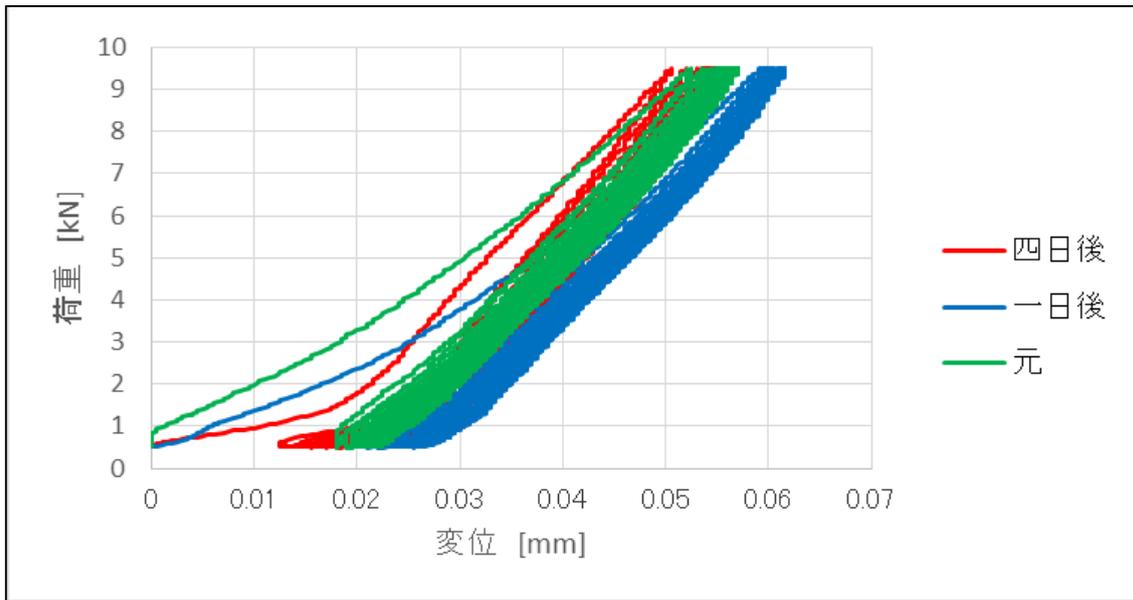


図 2-24 Fi(25)ストランドの可逆性実験結果

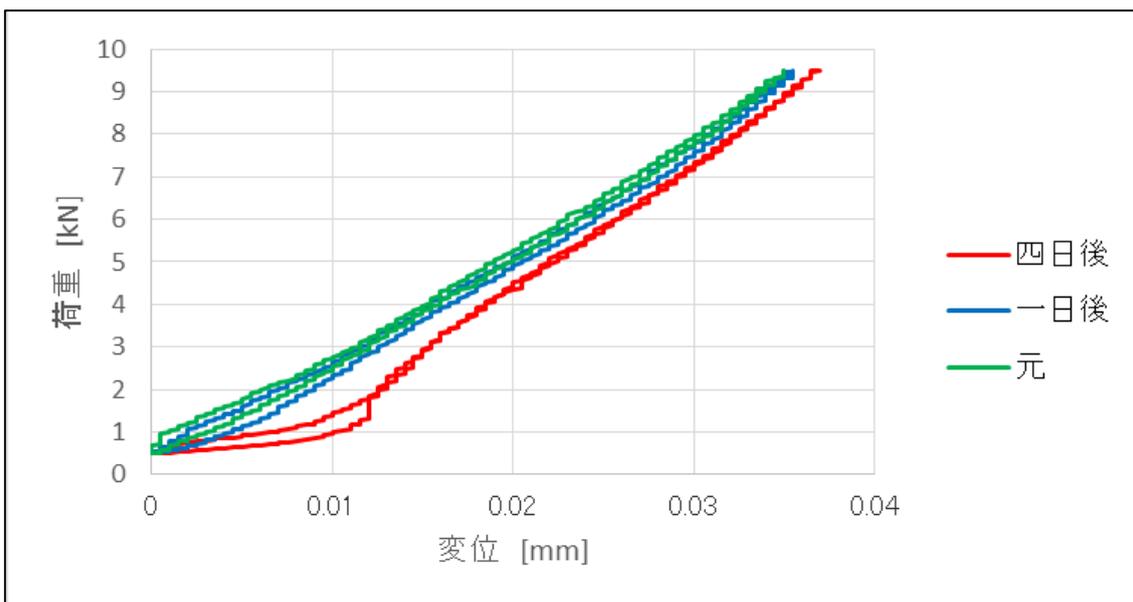


図 2-25 19 サイクル目の Fi(25)ストランドの可逆性実験結果

2.6 スtrandの伸びの計測実験

strandに径方向荷重が加わることでstrandが径方向につぶれ、それと同時に軸方向に伸びていることが予想される。その関係性を調べるために先の圧縮実験とは別に S(19)strandに 10kg 引張り荷重を加え圧縮実験を行いその時のstrandの軸方向の伸びを計測した。伸びの計測には共和電業の型式名 DTH-A-10 の 10mm 変位計を用いた。計測に用いたstrandの固定されている点から計測点までの距離は～m mである。その時の 19 サイクル目の実験結果を図 2-26 に示す。当初予測した荷重が加わると軸方向に伸びる特性を確認することはできず、波形は荷重に関係なく振動する形となった。これは測定したい変位量がとても小さいために今回用いた変位計の精度では十分でなかったためと考えられる。次回測定する場合は変位計をより精度の高いものに変えるかstrandの固定点から計測点までの距離を伸ばし変位を増やすなどといった工夫が必要である。

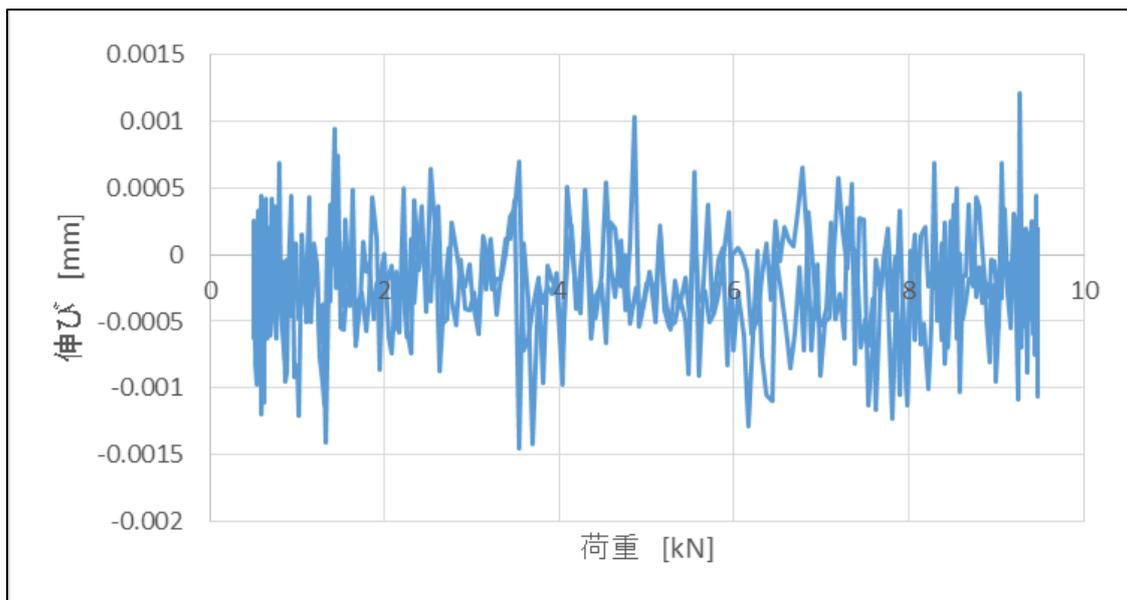


図 2-26 伸びの計測実験結果

2.7 スtrand断面の観察

径方向荷重を受けたときのstrandの挙動を確認するためにstrand断面をカメラで撮影しようとした。実験で使用したカメラは日本光器製作所の測定顕微鏡、型式N.O.W.-D2XZ-KSH/CAMを用いた。S(19)strandを治具に置いた写真を図 2-27に、荷重 0.5kN が加わったときの写真を図 2-28 に示す。図 2-27 を見ると、特に第二層で素線断面は素線間の力によって完全な円ではなくへこんでいる。荷重が加わったときのstrand断面上に現れる黒い液体はstrand内部の油が押し出されて出てきたものである。治具とstrandの境界付近に見える黒い影は、治具がかけてしまったためにできた溝である。これは先の引張り荷重を加えての圧縮実験のときに、二つの滑車の高さと同治具の高さを厳密にそろえることができずstrandがひっかかり削れてできたものと思われる。この溝が原因で撮影しているstrand断面に適切に径方向から荷重を加えることができず素線の動きを確認することができなかった。次回以降断面を観察するためには断面撮影用のもうひとつ同じ治具を用意する必要がある。また予想していたよりもはるかにstrand内部から油が出て素線を見えづらくするのでこのことに留意して実験をする必要がある。

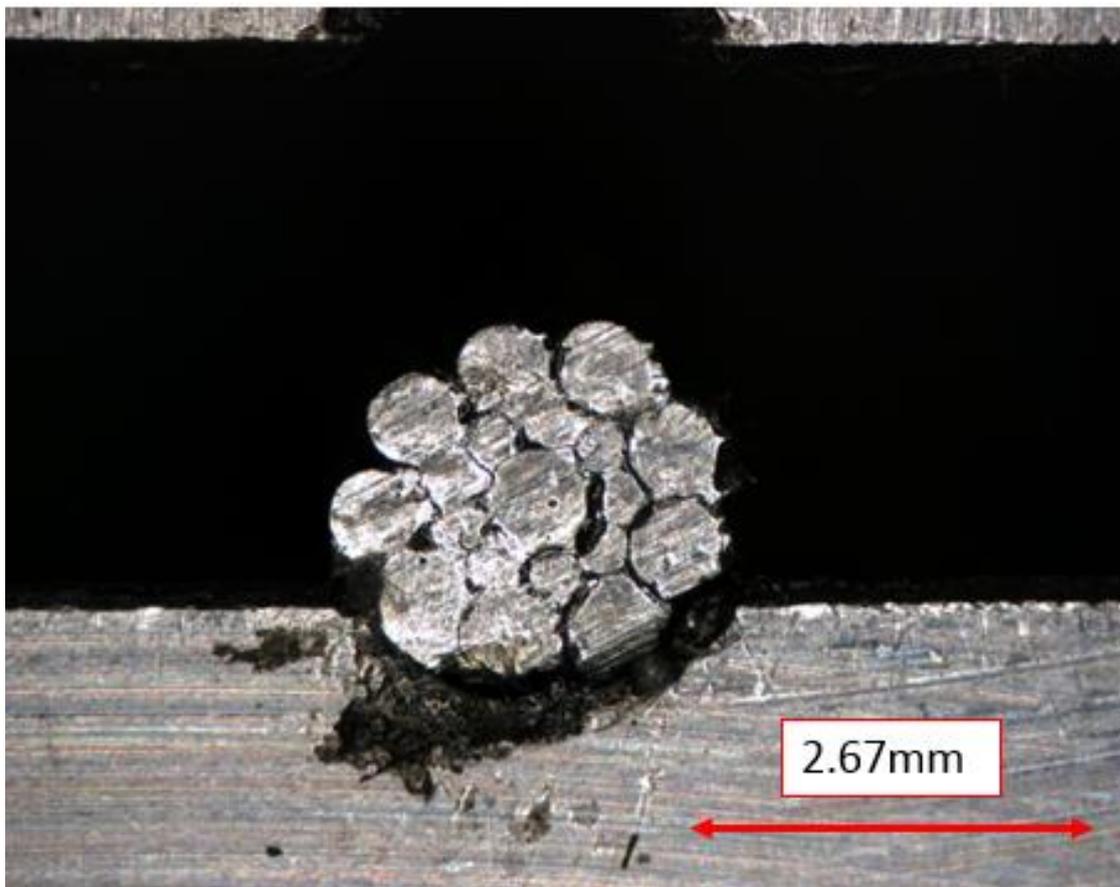


図 2-27 strand断面図

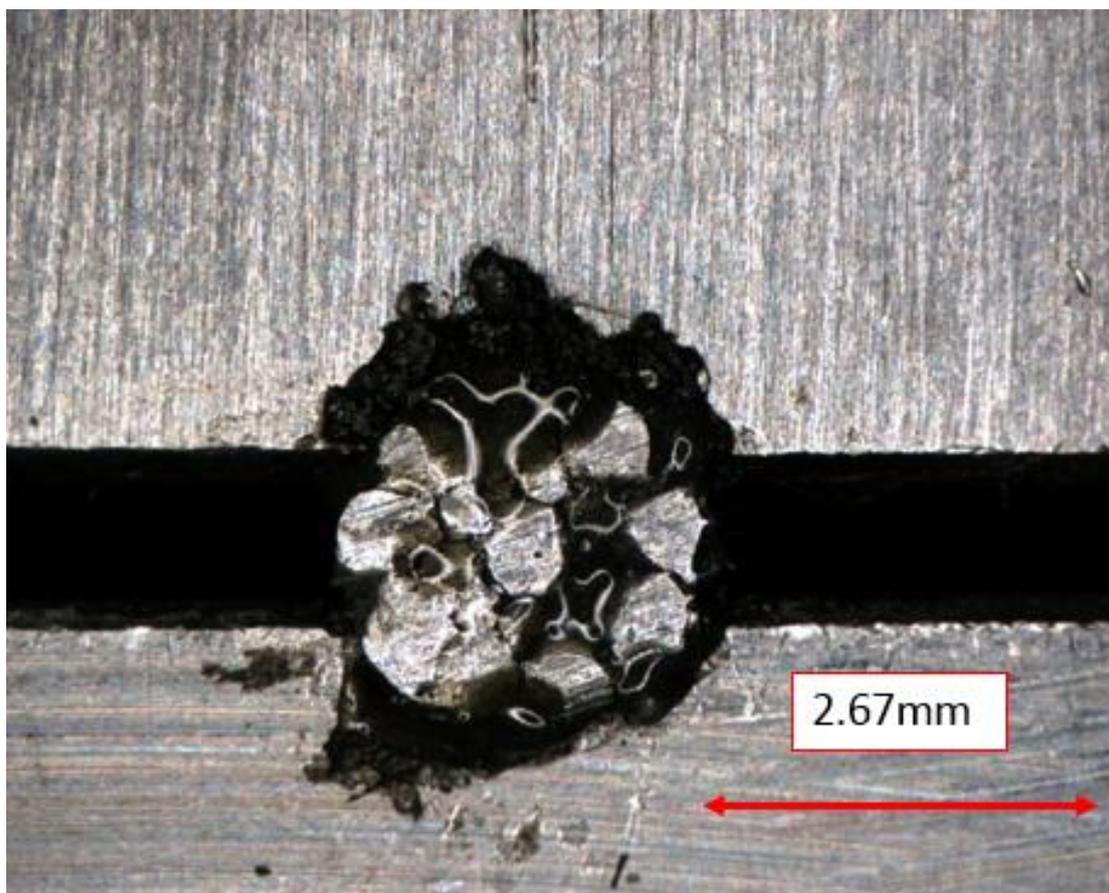


図 2-28 0.5kN 加わったときのストランド断面図

第3章 有限要素法解析

3.1 緒言

本章では、圧縮実験で用いた二種類のストランドの詳細モデルに対して行った径方向の圧縮解析の概要と結果を説明する。そして得られた解析結果と実験結果を比較する。そして簡略化ストランドモデルの材料特性値として妥当な値を算出する。

3.2 ストランド詳細モデル解析

3.2.1 解析条件

解析には、Altair Engineering 社の CAE ソフトウェアプラットフォーム、Hyperworks 内の有限要素法解析ソフトウェアである RADIOSS を用いた。ストランドは素線同士の接触が多く計算量が膨大になることが見込まれるため、本解析は準静的陽解法を用いた。接触アルゴリズムはペナルティ法を用いた。本解析は材料の質量が影響しない準静的であることから計算時間短縮のためマススケーリング法を用い、素線の密度は実際よりも 100 倍大きい値を入力した。その他解析条件の材料特性値などを表 3.1 に示す。素線のヤング率は東京製綱からいただいた引張り試験のデータを用いた。

本解析は前研究同様素線に塑性を導入している。パラメータは佐野のとき同様 $Y = 1500$ ，線形硬化塑性体と仮定して $n = 1$ ， $C = 200$ とした。

$$\sigma = Y + C(\varepsilon_p)^n$$

表 3.1 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
接触アルゴリズム	ペナルティ法
素線材料特性値	密度： $9.0 \times 10^{-7} [\text{g}/\text{mm}^3]$ ヤング率：196.0 [GPa] ポアソン比：0.3
素線の塑性域での応力—ひずみ関係	$\sigma = 1500 + 200\varepsilon_p [\text{MPa}]$
治具材料特性値	密度： $7.8 \times 10^{-7} [\text{g}/\text{mm}^3]$ ヤング率：206.0 [GPa] ポアソン比：0.3
摩擦係数	0.1
減衰係数	0.5
解析時間	荷重 0.5kN は 0.03 秒 四段階荷重の時は 0.004 秒

3.2.2 解析モデル

解析で用いた S(19)ストランド・Fi(25)ストランド詳細モデルと治具の図を図 3-1、図 3-2、図 3-3、図 3-4 に、解析規模を表 3.2、表 3.3 にそれぞれ示す。大きさは実験で用いた治具と極力同じにしてある。治具上部が下部よりも薄い構造をしているのは、荷重を加えたときにしなり振動するのを防ぐためである。ストランドの変位は、実際の治具でボルトが刺さっている二点と同様の場所に変位を出力し求めた。

ストランド詳細モデルは寺田の作成したワイヤロープ作成ソフトと Dassault Systèmes 社製の 3 次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks を用いて作成した。そのとき使用したストランドの形状パラメータは表 2.1 の値を用いた (表 3.4)。

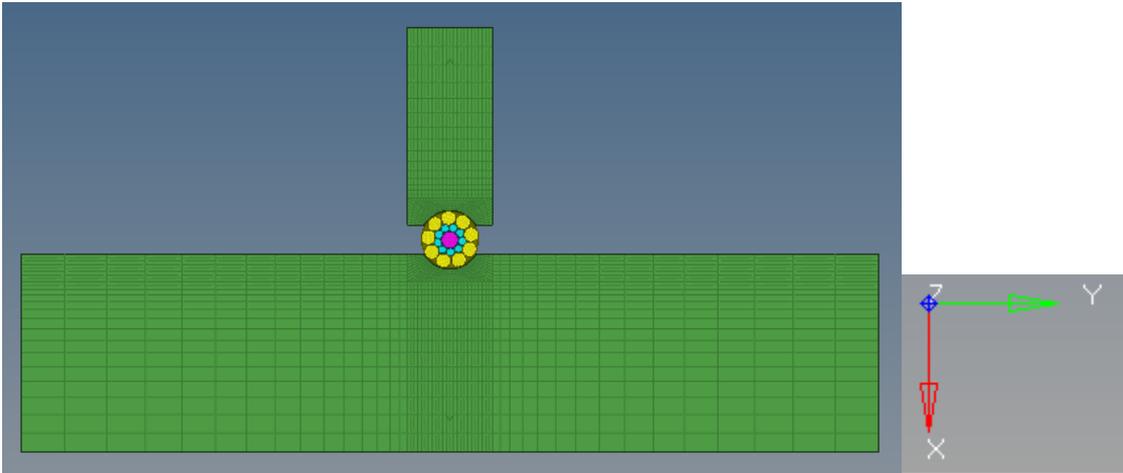


図 3-1 S(19)ストランド詳細モデル

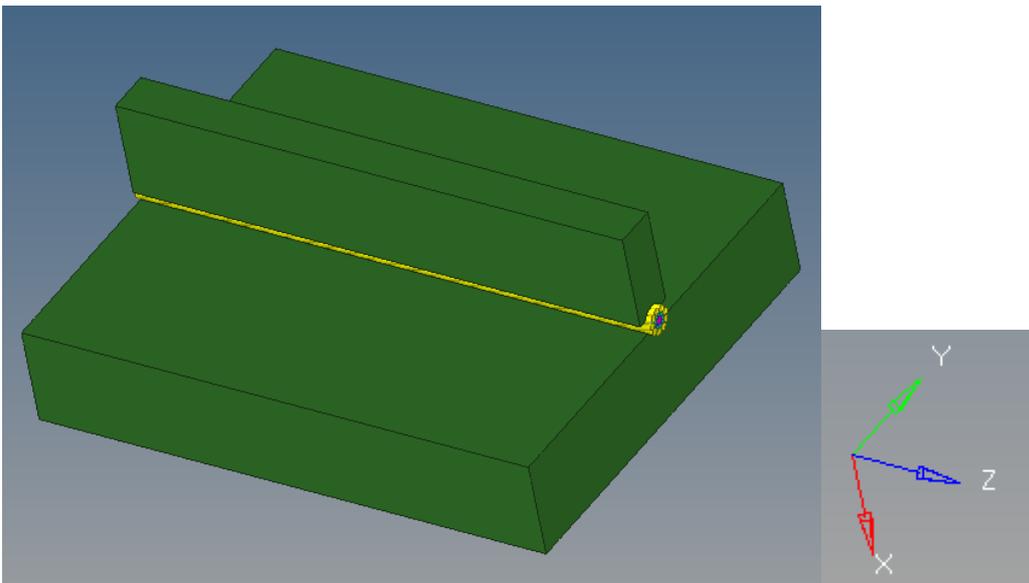


図 3-2 S(19)ストランド詳細モデル 2

表 3.2 S(19)ストランド詳細モデル解析規模

S(19)ストランドモデル	節点数	要素数
モデル全体	655102	582008
ストランド部	142052	109507

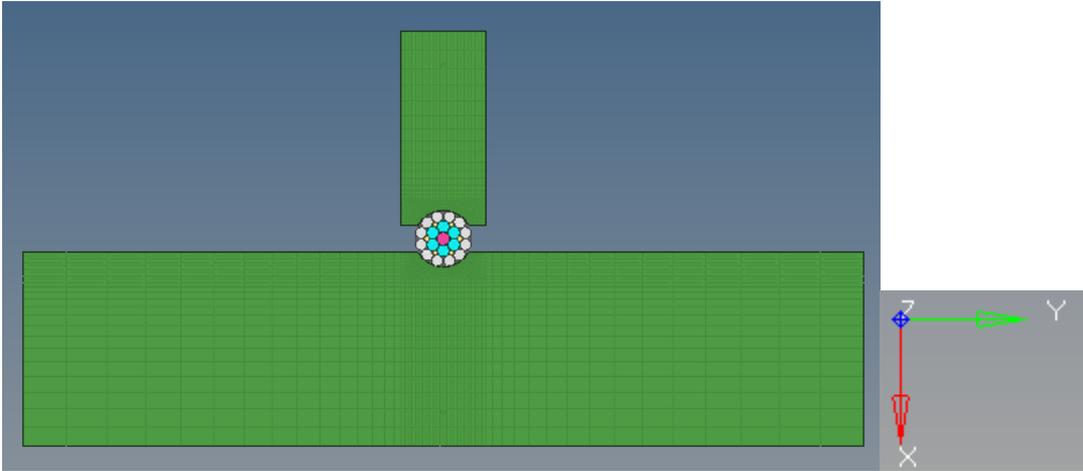


図 3-3 Fi(25)ストランド詳細モデル

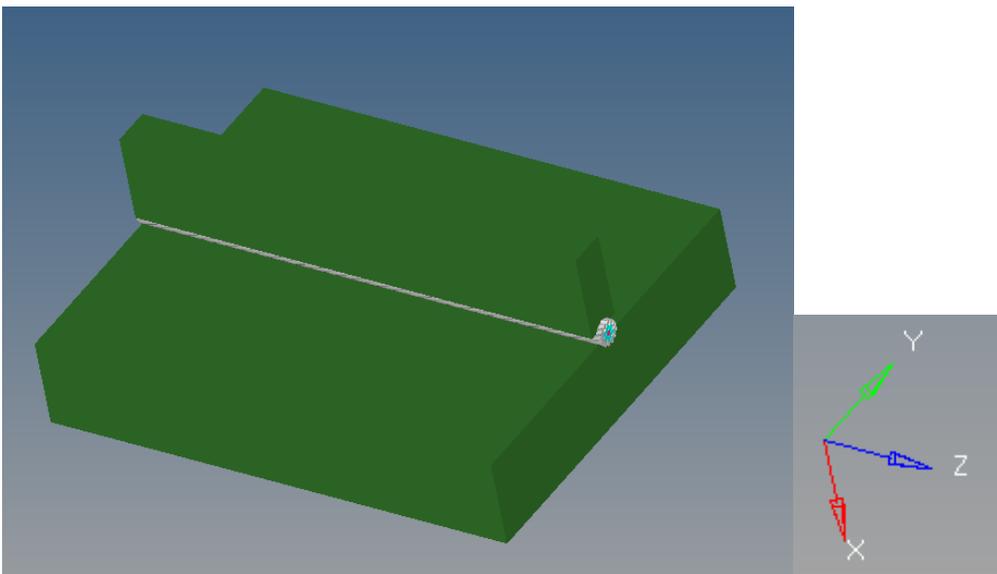


図 3-4 Fi(25)ストランド詳細モデル 2

表 3.3 Fi(25)ストランド詳細モデル解析規模

Fi(25)ストランドモデル	節点数	要素数
モデル全体	715512	638131
ストランド部	202465	159630

表 3.4 ストランド形状パラメータ

	Fi ストランド			S ストランド		
	本数	中心からの距離 [mm]	直径 [mm]	本数	中心からの距離 [mm]	直径 [mm]
一層目	1	0	0.58	1	0	0.773
二層目	6	0.58	0.57	9	0.575	0.363
三層目	6	0.792	0.24	9	1.02	0.66
四層目	12	1.09	0.52			

3.2.3 拘束条件

解析モデルと xyz 軸方向の関係を図 3-5 に示す。治具の拘束条件について、治具の上面は実験では圧縮機で固定されているので x 方向の移動のみを許すため y,z 方向の移動を拘束し x,y,z 方向の回転を拘束した。治具の下面は実験では試験台に置いているだけなので、中心の一点を並進・回転ともに完全に拘束し、その他の点は y,z 方向の変形を許すため x 方向のみの移動を拘束し、x,y,z 方向の回転を拘束した。

ストランドの拘束条件について、ストランドの片方の面は中心の一点を x,y,z 方向の移動を完全に拘束し x,y,z 方向の全回転を許した、そしてその他の点は実際には x,y 方向の移動が考えられるため z 方向のみの移動を拘束し、x,y,z 方向の全回転を許した。ストランドのもう片方の面は rigidbody で断面を固定し中心の点に対して引っ張り荷重を加えた。これは実際のストランドと比べると断面が固定されているのは奇妙であるが、引っ張り荷重を加えるために今回の解析ではこのような拘束を用いた。

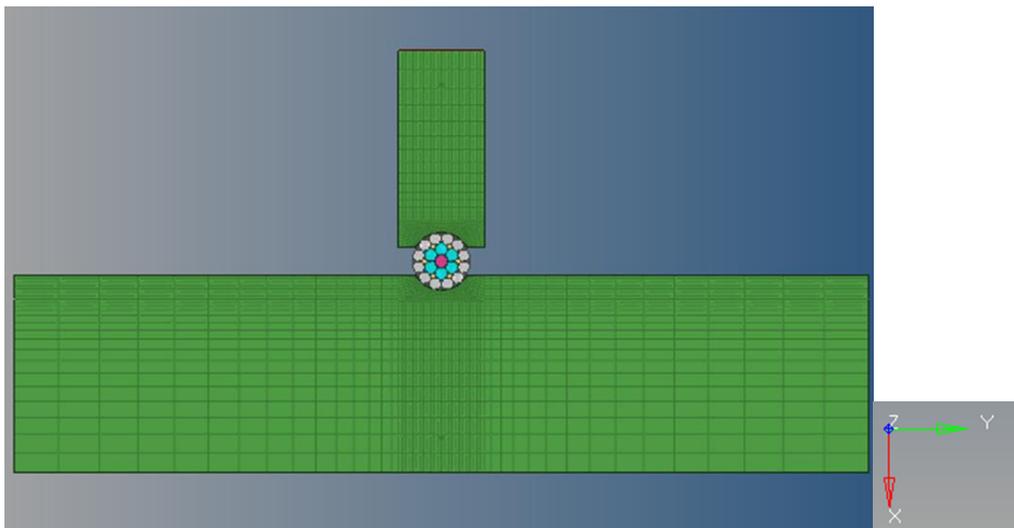


図 3-5 解析モデルと xyz 軸の関係

3.2.4 荷重条件

今回の解析では、荷重の合計が 0.5、3.5、6.5、9.5kN になるように治具の上面に分布荷重を二回に分けてかけた。その時の時間と荷重の関係を図 3-6、図 3-7 に示す。二回に分けて解析を行った理由としては、図 3-6 のような荷重を加えると S(19)ストランドでは荷重 0.5kN と 3.5kN で、Fi(25)ストランドでは荷重 0.5kN のときに時間内に収束しなかったため別に荷重 0.5kN のときの収束した状況を求める必要があったためである。実験では圧縮荷重は sin 波で加えているので解析でも sin 波で圧縮荷重を加えるべきであるが、実際に sin 波で圧縮荷重を加えるとストランドが振動して上手くいかなかった。これは今回の解析は陽解法で行っていて、実験では 1 サイクル 100 秒かけて準静的になるように荷重を加えているのに対し、失敗した解析では一周期 0.01 秒と実験と比べると 10000 万倍の速さで荷重を加えているためにストランドが振動してしまっただと考えられる。全ての荷重に対してストランドの振動が止まった定常な静的平衡状態を求めるのは解析では現実的に不可能であることから、今回の解析では図 3-6 のように段階的に一定の荷重を加えることで四点での静的平衡状態を求めストランドの荷重・変位曲線を予測した。

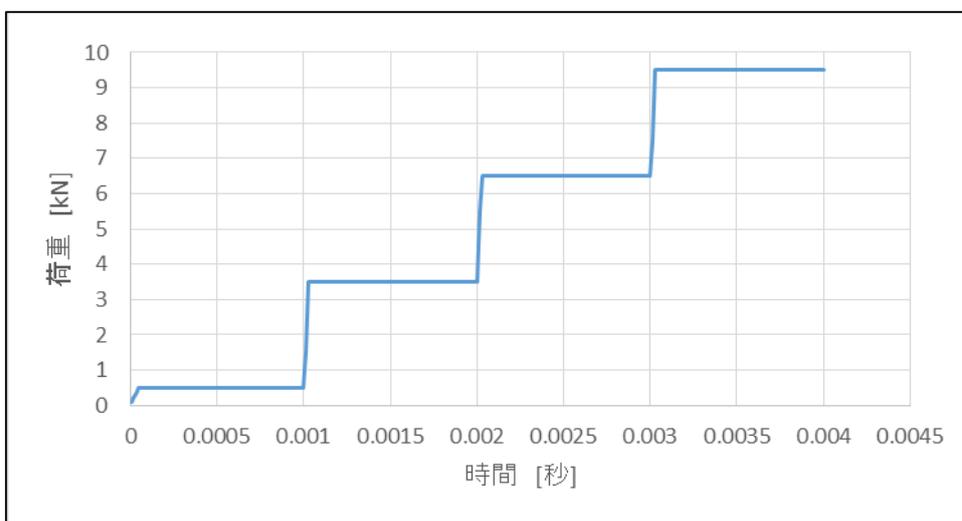


図 3-6 解析での荷重条件①

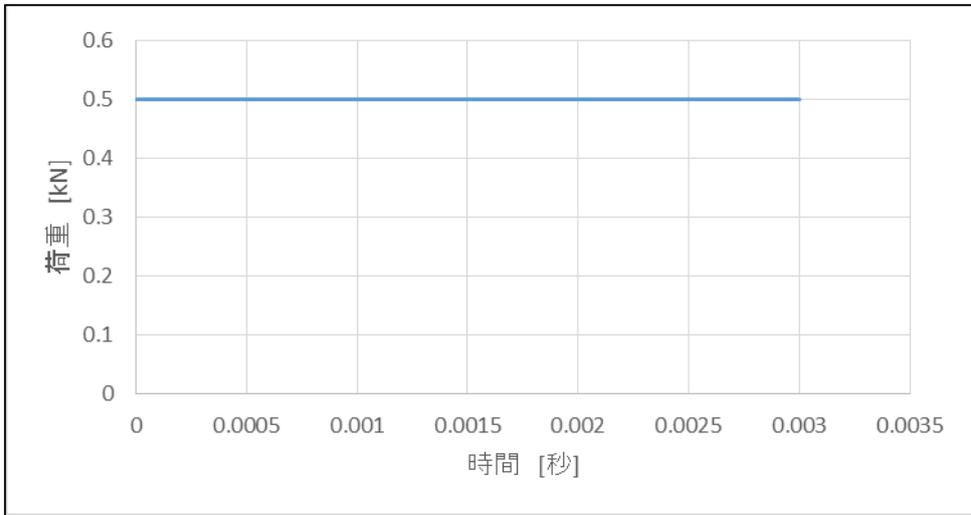


図 3-7 解析での荷重条件②

3.3 解析結果

3.3.1 S(19)ストランド

S(19)ストランドの、解析結果を図 3-8 に、実験結果（19 サイクル目）と解析結果の比較を図 3-9 に示す。解析結果のグラフは先の荷重条件から求めた三点から類推したものである。荷重 3.5kN の変位を求めることができなかつたために波形は奇妙なものとなったが、後の Fi(25)ストランドの波形が下に凸の曲線であることから S(19)ストランドもそのような波形になると考えられる。一方で実験結果の波形は線形となった。解析では実験結果同様 10,20,30kg の引張り荷重に対してストランドの径方向の荷重・変位曲線はほぼ等しい波形となった。最大変位において解析結果は実験結果よりも 0.007mm 大きくなった。

これらの理由として、実際のストランドには素線間にグリスが塗られているため、摩擦係数と減衰係数は解析で用いたものよりも小さかったと考えられる。また解析で用いたストランドモデルには素線間のしまり具合が考慮されておらず、実際のストランドよりもゆるく素線が動きやすくなっていた可能性がある。

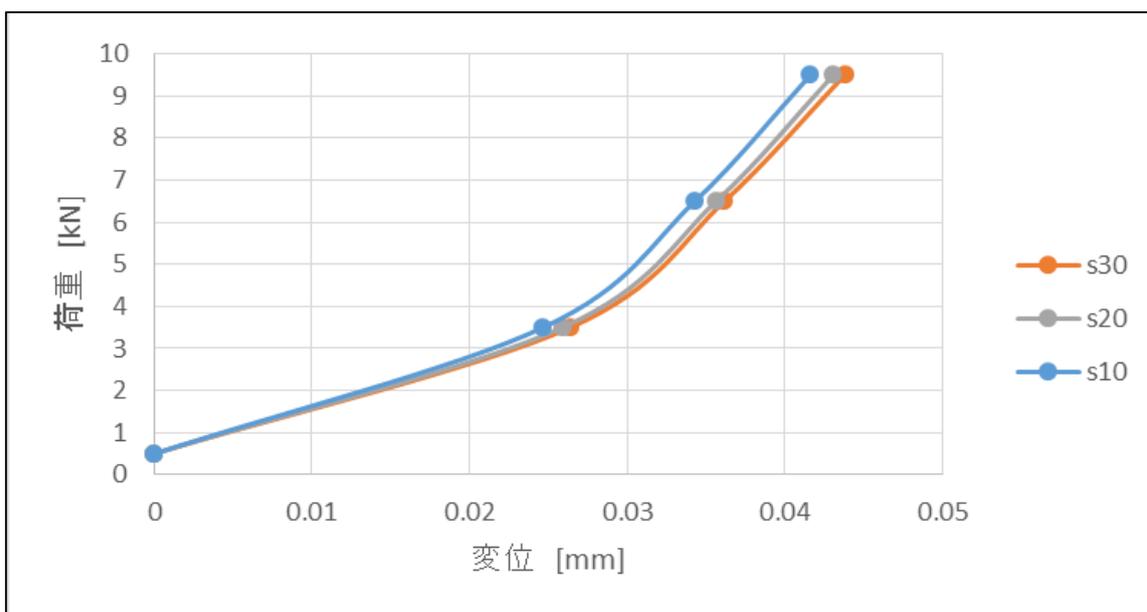


図 3-8 S(19)ストランドの解析結果

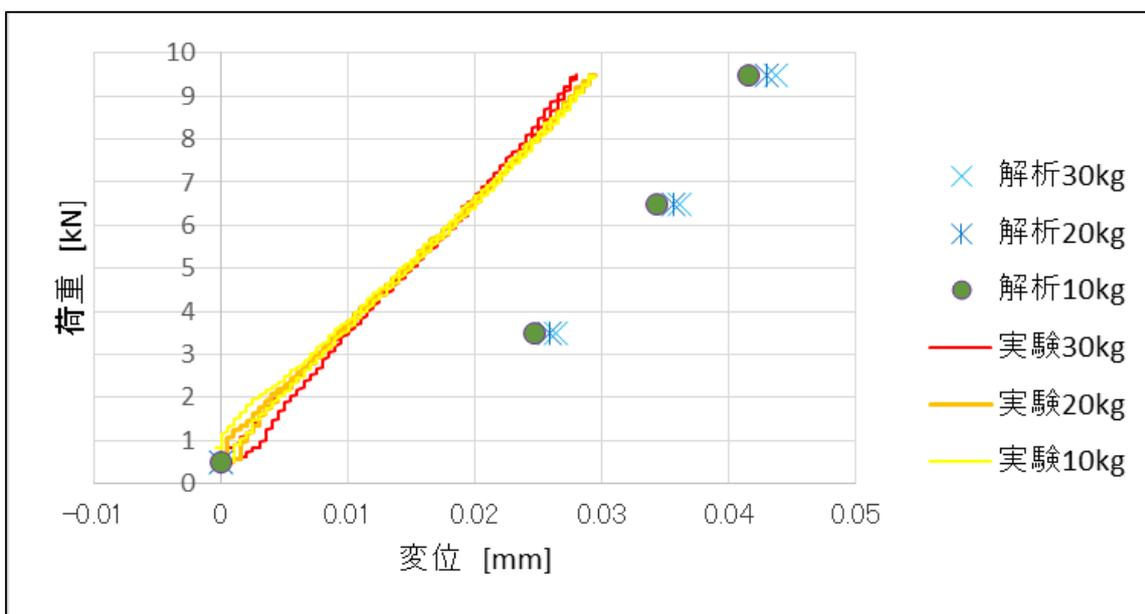


図 3-9 S(19)ストランドの解析結果と実験結果の比較

3.3.2 Fi(25)ストランド

Fi(25)ストランドの解析結果を図 3-10 に、実験結果と解析結果の比較を図 3-11 に示す。解析結果のグラフは先の荷重条件から求めた四点から類推したものである。解析では 10,20,30kg の引張り荷重に対してストランドの径方向の荷重・変位曲線はほぼ等しい波形となり、実験結果のような折れた波形にはならなかった。グラフの波形は解析結果では荷重が増えるにつれて変位が出にくくなる下に凸の曲線となったが、実験結果は基本的に線形となった。解析結果の最大変位は、実験結果の 10,20kg 引っ張りのときの最大変位とほぼ等しい 0.035mm となった。30kg 引っ張りのときの実験値のみ 0.01mm 大きい値をとっている。このことが Fi(25)ストランドの特性なのか、それとも重りが引っかかっていたなどして実験が正しく行われていなかった影響なのかを調べるために追実験をして確かめる必要がある。

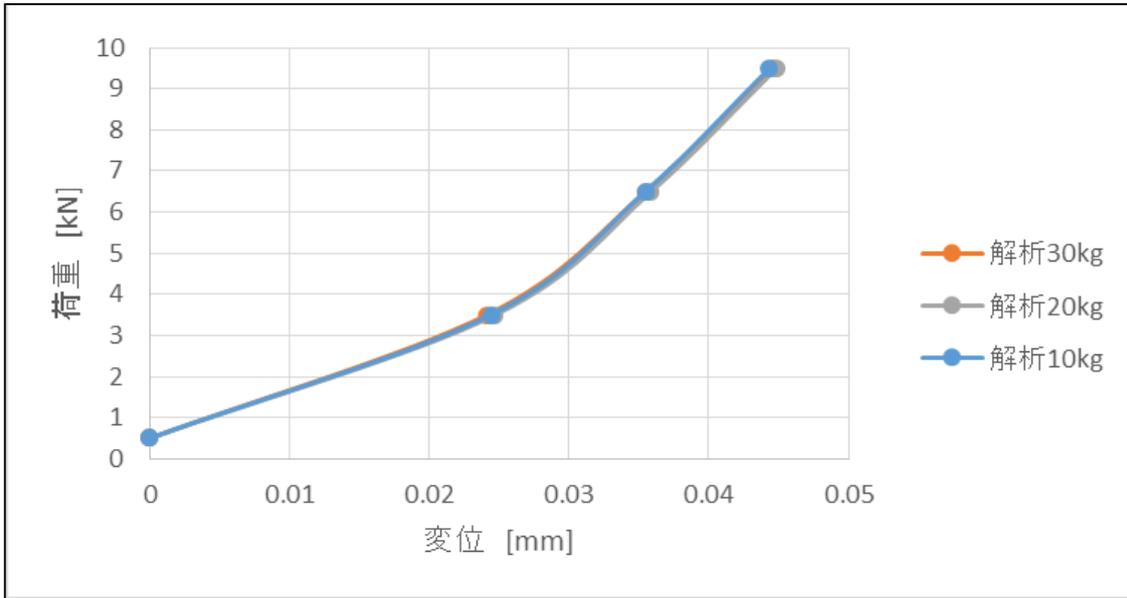


図 3-10 Fi(25)ストランドの解析結果

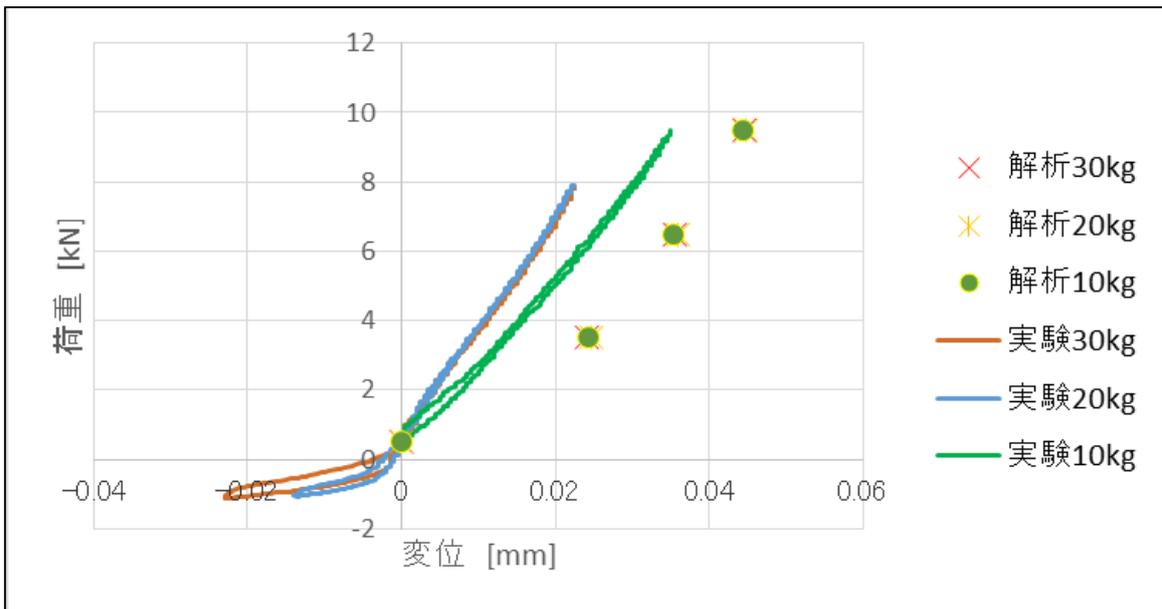


図 3-11 Fi(25)ストランドの解析結果と実験結果の比較

3.3.3 径方向有効ヤング率の導出

ストランドの径方向有効ヤング率を求めるために、ストランド詳細モデルと同等の径を持つ丸棒をモデル化しヤング率を変えて圧縮解析を行い、その結果と実験結果を比較した。治具モデルは先の解析で用いたものと同様のものを使用した。解析モデルを図 3-12 と図 3-13 に、解析規模を表 3.5 に示す。解析はヤング率 1,10,50,100,200,300GPa の計六回行った。その時の丸棒の荷重/変位とヤング率との関係を図 3-14 と表 3.6 に示す。実験結果の荷重・変位曲線は Fi(25)ストランド、S(19)ストランドともに線形であり、その傾きである荷重/変位は Fi(25)ストランドが $9/0.035=257.14[\text{kN/mm}]$ 、S(19)ストランドが $9/0.028=321.43[\text{kN/mm}]$ となった。この値を図 3-14 と比較してみると Fi(25)ストランドの径方向有効ヤング率は約 18GPa、S(19)ストランドの径方向有効ヤング率は 18GPa となる。

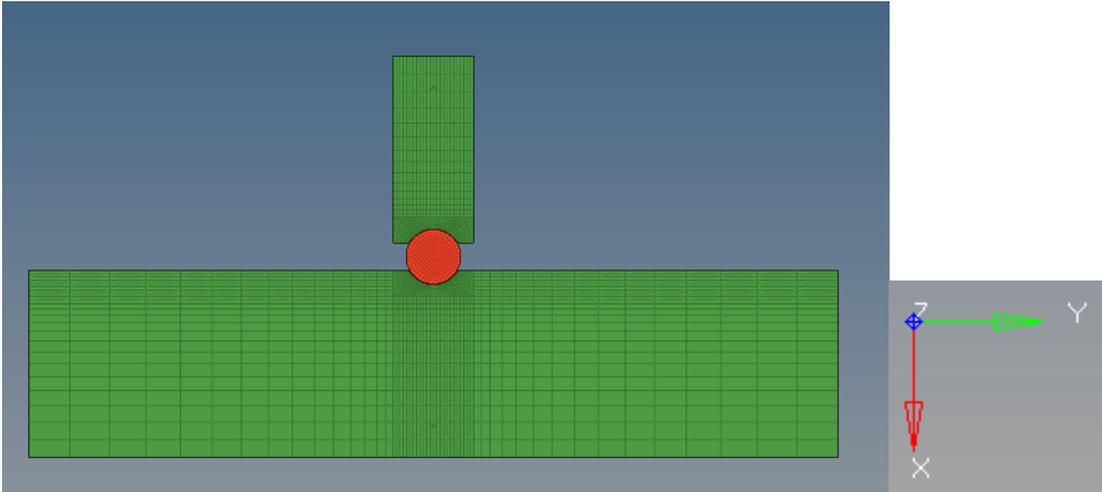


図 3-12 丸棒モデル

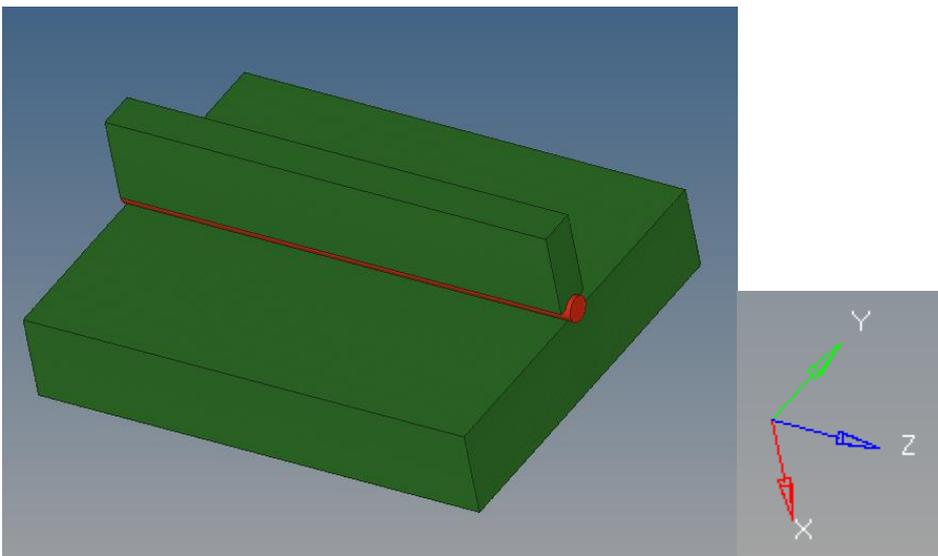


図 3-13 丸棒モデル 2

表 3.5 丸棒モデル解析規模

丸棒モデル	節点数	要素数
モデル全体	537874	494941
丸棒	24824	22440

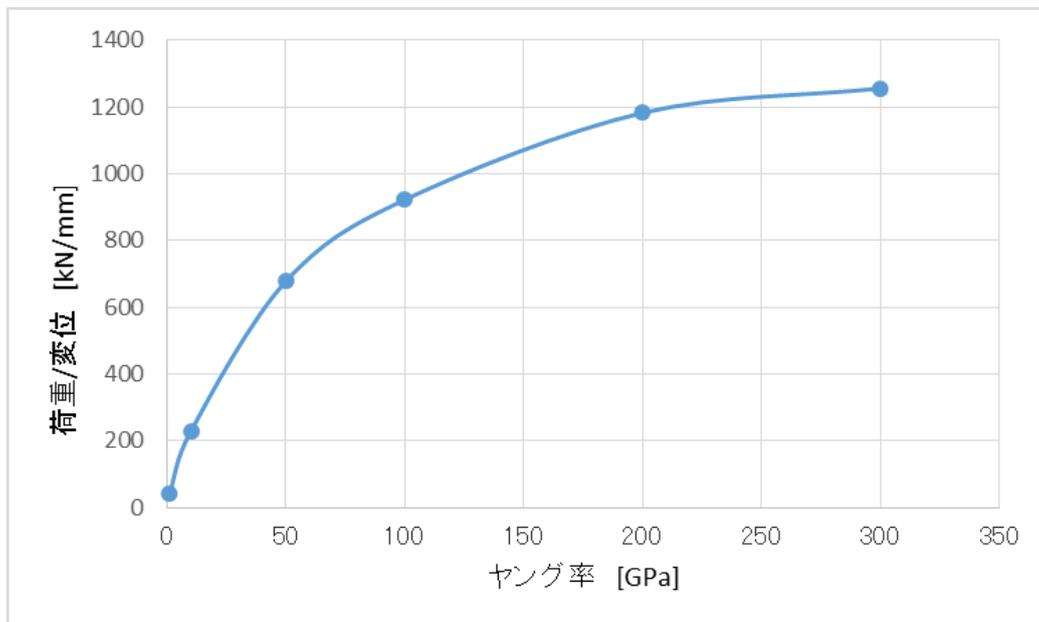


図 3-14 丸棒の荷重/変位とヤング率の関係

表 3.6 丸棒の荷重/変位とヤング率の関係

ヤング率 [GPa]	荷重/変位 [kN/mm]
1	41.07222
10	229.1823
50	678.4383
100	922.7928
200	1183.108
300	1256.085

第4章 結論

4.1 結論

本研究では、エレベータ用ワイヤロープとして広く使用されているワイヤロープ $8 \times S(19)$ と $8 \times Fi(25)$ を構成する二種類のストランドを対象として引っ張り荷重を加えた径方向の圧縮実験を行い、同様に二種類のストランド詳細モデルを用いた径方向に圧縮する有限要素法解析も行い両者を比較した。 $S(19)$ ストランドでは、解析値のほうが実験値よりも最大変位が 0.007mm 大きくなった。一方で $Fi(25)$ ストランドは解析値と実験値で最大変位が一致した。グラフの波形は解析結果では下に凸の曲線となり、実験結果は線形のものとなった。これは実際のストランドには素線間にグリスが塗られているため、摩擦係数と減衰係数は解析で用いたものよりも小さかった、また解析で用いたストランドモデルには素線間のしまり具合が考慮されておらず、実際のストランドよりもゆるく素線が動きやすくなっていた可能性がある。実験では $Fi(25)$ ストランドの荷重・変位曲線が折れ線となったが、解析ではそのような特性は見られなかった。これは荷重が小さい範囲で最外層素線の動きやすさの影響、もしくは治具が引っかかるなど実験で不備があり波形が平行移動してしまったと考えられる。

実験結果と丸棒の解析結果を比較してストランドの径方向有効ヤング率を求めた。またストランドの可逆性を確かめる実験、径方向荷重と軸方向伸びの関係を求める実験、断面を確認する実験を行い、考察を行った。

4.2 今後の展望

今回解析で用いたストランド詳細モデルは、グリスや素線間の締め付けが考慮されておらず実際のストランドとは異なった挙動を示した。素線間に働く力を計測しモデルに適用することで、より現実に近い詳細モデルを作ることができる。またストランド断面を見ると、素線間に働く力によって素線の断面は完全な円ではなくなっていたので、このことを考慮してモデルを作る必要がある。

ストランドの伸びの計測は上手くいかなかったため、次回より精度の高い計測器を用い軸方向の伸びと径方向荷重の関係を測定し、簡略化ストランドモデルにいかしていく。 $Fi(25)$ ストランドのみ波形が折れ線になることがあったため、断面の動きを観察し最外層素線の影響を確認する必要がある。

参考文献

- [1] “ワイヤロープ No.20”, 東京製綱, 2013.
- [2] 昇降機等事故調査部会, 平和台駅エレベーター主索破断事故調査報告書, <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ー事故調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/001058725.pdf>, 2014.
- [4] 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: IWRC 6 Fi (29) の場合. 材料, Vol. 44, No. 503, pp. 1086-1091, 1995.
- [5] G.A. Costello, “Theory of Wire Rope”, Mechanical Engineering Series, Springer NewYork, 1997.
- [6] Mohammed Raouf and Ivana Kraincanic. Analysis of large diameter steel ropes. Journal of engineering mechanics, Vol.121, No.6, pp.667-675, 1995.
- [7] 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSHI-SRR-NO.44(2014), <https://www.jniosh.go.jp/publication/doc/srr/SRR-No44-1-1.pdf#search=%27%E3%83%AF%E3%82%A4%E3%83%A4%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%97+%E7%96%B2%E5%8A%B4%E8%A9%A6%E9%A8%93%27>
- [8] 栗田 基, 久保山 武, 岡田 章, 斉藤 公夫, 宮里 直也, “構造用ケーブルの降伏後の材料特性の把握と評価について”, 日本建築学会 学術講演梗概集 C-1 分冊, pp.667-670, 2011.
- [9] 鈴木 恵太, 中村 俊一, Roger Q. HAIGHT, “77 年間併用された吊橋ハンガーロープの引張強度および腐食調査”, 土木学会論文集, No.728, pp.67-77, 2003.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 寺田 偉紀, “エレベーター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”, 東京大学工学部機械工学科, 修士論文, 2015.
- [16] 佐野良輔, “エレベーター用ワイヤロープのブリーチング開発手法の開発”, 東京大学工学部機械工学科, 卒業論文, 2016.

付録 A ストランド引張り試験

A.1 緒言

この付録では、東京製綱からいただいて実験で使用した二種類のストランドの引張り試験の結果を載せる。この試験は東京製綱で行われたものである。

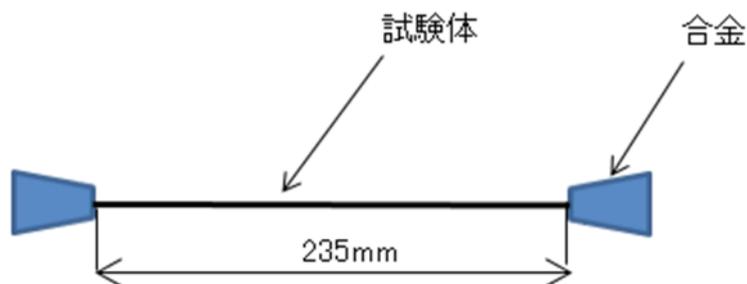
A.2 試験概要

A.2.1 試験体

本論文の二章で行った圧縮実験と同じ二種類のストランド、EVR 8×Fi(25) SP/O 10φ A種、ストランドサンプル(ストランド径 2.68mm)と EVR 8×S(19) ST/O 10φ A種、ストランドサンプル(ストランド径 2.67mm)である。

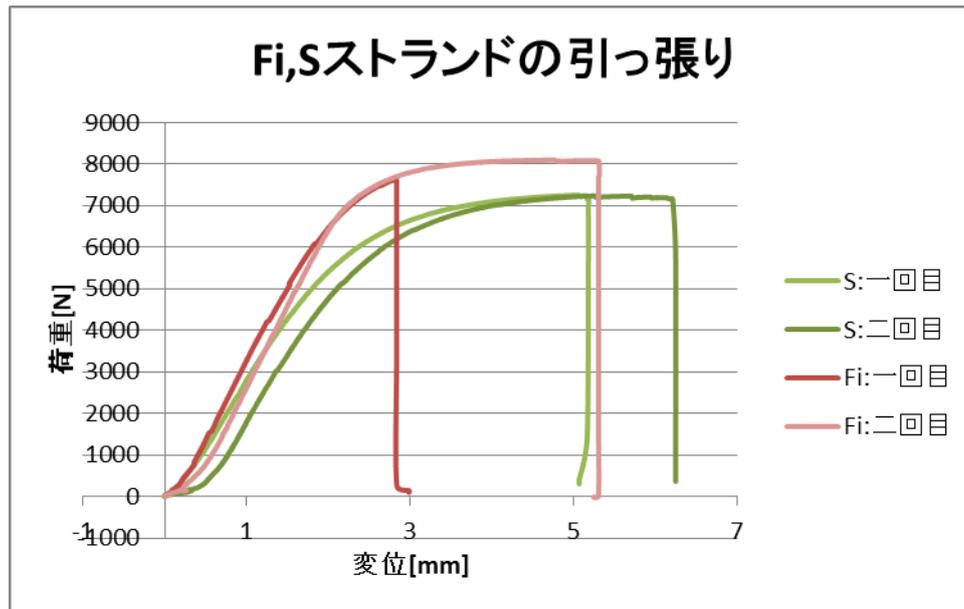
A.2.2 試験方法

ストランドを下図のように合金で両端止めをする。その後試験機 100kN オートグラフを使用し両端に引っ張り荷重をストランドが破断するまで加える。伸びの測定は非接触変位計で行い、試験体にクリップ式標点を 100mm 間隔で 2 か所に取り付け、カメラでその間隔変化を追った。ゲージ長さは 100mm で試験速度は 10mm/min、試験数はで行った



A.3 試験結果

S(19)ストランドの破断したときの荷重は一回目で 7.237kN、二回目では 7.255kN でそれぞれ破断位置は中切れであった。Fi(25)ストランドの破断したときの荷重は一回目で 8.098kN、二回目では 7.635kN でそれぞれ破断位置は外切れであった。



謝辞

本研究は、著者が酒井・泉研究室在籍中に泉聡志教授にご指導いただいていたものです。泉教授には学部時代から材料力学を教えていただき、研究室では研究のことや進路相談などで大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

酒井教授には発表練習や研究会の場で貴重な意見をいただき、研究や実験の方針を決める上で大変参考になりました。ありがとうございました。

波田野助教には発表練習などで沢山の助言をいただきました。自分の考え方をまとめるのに大変参考になりました。ありがとうございました。

労働安全衛生総合研究所の山際様には実験するにあたり治具の設計や装置の使い方、方針などほとんどの場面でご指導・ご協力いただき大変お世話になりました。また実験が上手くいかないときその原因を探るための様々な考え方やアプローチはとても勉強になりました。心よりお礼申し上げます。

三菱電機株式会社の中川様、角谷様には打ち合わせのたびに沢山の助言をいただき研究の進め方の参考になりました。また研究所見学の機会をいただき実際のエレベータを見ることで研究のヒントとなりました。ありがとうございました。

東京製綱株式会社の竹内様は、急な連絡にもかかわらずストランドとロープサンプルを快く譲ってくださり、ストランドの実験値などの資料もいただきました。工場見学では実際のストランドのより方やめっき加工、疲労試験など文献だけでは分からないことを沢山学ぶことができました。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の柴田様、依知川様、阿部様には解析を行うにあたり様々な助言をいただきました。また実験のアドバイスもいただき大変参考になりました。心よりお礼申し上げます。

研究室の OB である佐野さんと寺田さんの研究を引き継ぐ形で今回の研究をやらせていただきました。お二人には直接お会いしたことはありませんでしたが、お二人の研究は著者が研究を進めるに当たりとても参考になりました。感謝しています。

研究室の先輩である島本さんと松下さんには解析をするにあたり多大なるご支援をいただきました。何も分からない自分に一から沢山のことを教えていただき本当にありがとうございました。また他の先輩方、同期の仲間たちからも沢山の助言をいただきました。一年間充実した生活を送ることができました。

このほか、本研究活動を支えてくださったすべての皆様に深く感謝いたします。