

卒業論文

転てつ機の信頼性設計法に基づく
最適保全手法の開発

p.1～p.73 完

平成 24 年 2 月 3 日提出

指導教員 酒井信介教授

03100172 池田和寛

目次

第1章	序論	8
1.1	研究背景	8
1.1.1	転てつ機の保全	8
1.2	研究目的	10
1.3	本論文の構成	10
第2章	基礎事項	11
2.1	緒言	11
2.2	分岐器の動作原理	12
2.2.1	分岐器 [1]	12
2.2.2	進路切り替えの仕組み [1]	13
2.2.3	分岐器の種類	13
2.2.3.1	普通分岐器	13
2.2.3.2	特殊分岐器	14
2.2.4	構造上の違い	16
2.2.4.1	関節方式	16
2.2.4.2	弾性方式	16
2.2.5	JR 東日本における分岐器の設置状況 [4]	17
2.2.6	フロントロッド	17
2.2.7	分岐器の故障原因 [4]	18
2.2.8	考察(分岐器)	19
2.3	限界状態関数 [2][5]	20
2.3.1	概念	20
2.3.2	定義	21
2.3.3	故障率の算出	23
2.3.4	考察(限界状態関数)	24
第3章	摩耗進行のモデル化	25
3.1	緒言	25
3.2	摩耗進行の原因	26
3.3	列車通過時の振動	26
3.4	列車通過トン数と振動の関係	27

3.5	摩耗進行のモデル化.....	28
3.5.1	モデル①.....	28
3.5.2	モデル②.....	29
3.5.3	モデル③.....	30
3.5.3.1	振動実験.....	30
3.5.3.2	振動実験結果.....	33
3.5.3.3	摩耗モデル③の作成.....	34
3.5.3.4	モデル③における α の決定.....	35
3.6	考察.....	36
第4章	実験データ解析.....	37
4.1	緒言.....	37
4.2	実機における摩耗測定.....	38
4.3	年間通過トン数.....	39
4.4	諸仮定.....	40
4.5	考察.....	40
第5章	交換周期の算出.....	41
5.1	緒言.....	41
5.2	基本式.....	42
5.3	平均摩耗半径.....	43
5.4	故障確率.....	46
5.4.1	<摩耗標準偏差=平均摩耗半径 \times 1/3>.....	46
5.4.2	<摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差>.....	48
5.5	交換日数.....	51
5.5.1	式.....	51
5.5.1.1	モデル①.....	51
5.5.1.2	モデル②.....	51
5.5.1.3	モデル③.....	52
5.5.2	交換日数<摩耗標準偏差=平均摩耗半径 \times 1/3>.....	52
5.5.3	交換日数<摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差>.....	53
5.6	考察.....	54
第6章	全分岐器における交換周期.....	55
6.1	緒言.....	55
6.2	算出方法.....	56
6.3	普通分岐器関節方式.....	57

6.3.1	<摩耗標準偏差 = 平均摩耗半径 × 1/3>.....	57
6.3.2	<摩耗標準偏差 = 通過トン数の標準偏差>.....	58
6.4	普通分岐器弾性方式.....	59
6.4.1	<摩耗標準偏差 = 平均摩耗半径 × 1/3>.....	59
6.4.2	<摩耗標準偏差 = 通過トン数の標準偏差>.....	60
6.5	特殊分岐器弾性方式.....	61
6.5.1	<摩耗標準偏差 = 平均摩耗半径 × 1/3>.....	61
6.5.2	<摩耗標準偏差 = 通過トン数の標準偏差>.....	62
6.6	交換周期決定手順	63
6.7	考察	64
第7章	結論	65
7.1	結論	65
7.2	課題	65
7.3	今後必要なデータ	65
付録	65
参考文献	70
謝辞	71

図目次

図 2.1	分岐器モデル図	12
図 2.2	分岐器図	13
図 2.3	普通分岐器例 [3]	14
図 2.4	特殊分岐器例 [3]	15
図 2.5	関節方式の継ぎ目	16
図 2.6	ロックピース図	17
図 2.7	ロックロッド位置	17
図 2.8	軸受部拡大図 [1]	18
図 2.9	軸受部位置	18
図 2.10	構造物 [2]P59	20
図 2.11	グレーゾーンの無い考え方 [2]P52	20
図 2.12	設定条件 [2]P51	22
図 2.13	故障率の視覚化 [2]P53	22
図 2.14	β の視覚化 [5]P62	23
図 2.15	標準正規確率分布における故障確率 Pf	24
図 3.1	加速度センサ設置位置	26
図 3.2	S 駅(車両重量+定員)と振動比較	27
図 3.3	S 駅(車両重量+定員)二乗和積分値と振動比較	27
図 3.4	摩耗モデル① [1]P23 改	28
図 3.5	フロントロッド軸受モデル図 [1]P24	29
図 3.6	振動試験装置図 [4]	30
図 3.7	フロントロッド固定状況	31
図 3.8	特殊分岐器型フロントロッド図面 [4]	32
図 3.9	529EA 列車通過時の加速度データ (N 駅)	32
図 3.10	摩耗モデル③の一例($\alpha=2$, $V=1E \times -07$)	34
図 3.11	対向左側実験結果とモデル③近似線	35
図 3.12	対向右側実験結果とモデル③近似線	35
図 5.1	平均摩耗半径変化 (S 駅 12 号分岐器)	43
図 5.2	平均摩耗半径変化 (S 駅 14 号分岐器)	44
図 5.3	平均摩耗半径変化 (N 駅 852 号分岐器)	44
図 5.4	平均摩耗半径変化拡大図 (S 駅 12 号分岐器)	45
図 5.5	平均摩耗半径変化拡大図 (S 駅 14 号分岐器)	45
図 5.6	平均摩耗半径変化拡大図 (N 駅 852 号分岐器)	45

図 5.7	故障確率の変化 (S 駅 12 号分岐器).....	46
図 5.8	故障率の変化 (S 駅 14 号分岐器).....	47
図 5.9	故障率の変化 (N 駅 852 号分岐器).....	47
図 5.10	故障確率の変化 (S 駅 12 号分岐器).....	48
図 5.11	故障率の変化 (S 駅 14 号分岐器).....	49
図 5.12	故障率の変化 (N 駅 852 号分岐器).....	49
図 6.1	交換周期フローチャート	63

表目次

表 3.1	振動試験装置仕様 [4]	31
表 3.2	対向左側軸受部の実験結果	33
表 3.3	対向右側軸受部の実験結果	33
表 4.1	測定結果(摩耗量は直径差)	38
表 4.2	S 駅および N 駅における年間通過トン数	38
表 4.3	年間通過トン数データ例	39
表 5.1	モデル①～③における基準量計算結果	43
表 5.2	現在の交換周期における故障確率	48
表 5.3	現在の交換周期における故障確率	50
表 5.4	許容確率別の交換周期表 (単位: 日数)	52
表 5.5	許容確率別の交換周期表 (単位: 日数)	53
表 6.1	普通分岐器関節方式交換周期(摩耗標準偏差=平均摩耗半径×1/3)	57
表 6.2	普通分岐器関節方式交換周期(摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差)	58
表 6.3	普通分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差=平均摩耗半径×1/3)	59
表 6.4	普通分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差)	60
表 6.5	特殊分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差=平均摩耗半径×1/3)	61
表 6.6	特殊分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差)	62

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 転てつ機の保全

鉄道分野では列車の進行方向を変えるために、分岐器によってレールの切り替えを行っている。分岐器とは、転てつ機と呼ばれる電動装置によってトングレールという可動レールを動かし、列車の進行方向を定める機構である。1つのレールから2つのレールへと分岐させるものを普通分岐器、複数のレールから複数のレールへと分岐させるものを特殊分岐器という。転てつ機が故障すると、設置されている路線のみならず、他社への乗り入れ線などを走行する列車が、大きな遅延や運行中止を引き起こす可能性がある。そのため JR 東日本では、転てつ機の改善や研究開発に取り組んできた。最近ではコンピュータによる 24 時間監視や、分岐器の改良といった安全開発が行われている。

しかしながら JR 東日本において、転てつ機部品の交換・点検周期については合理的な手法が定まっていない。例を挙げると、転てつ機付属部品であるフロントロッドと呼ばれる部品は、経年により軸受が摩耗していき、ある一定量を超えた際に故障が発生する仕組みになっている。現在フロントロッドの交換周期は設置状況に関係なく、普通分岐器で 7 年・特殊分岐器で 1 年となっているが、これは過去の故障データに基づいて決定されたものではなく、経験によって定められた交換周期である。本来ならば、一日に分岐器上を通過する列車本数や切り替え回数といった設置条件によって、それぞれの転てつ機について最適な交換・点検周期が存在するはずである。しかし、JR 東日本において分岐器ごとの設置環境データは、分岐器上の年間通過トン数データしかない。このことも、現在の一律交換を行っている原因になっている。

このように最適な交換周期で保守点検が行われていないと、まだ交換基準に達していない部品までも交換してしまい、無駄が生じている可能性が高い。JR 東日本ではこのような無駄を削減するために、分岐器の各々の環境条件における適切な交換周期の設定が必要となっている。

1.1.2 先行研究 [1]

2010 年度における村中氏の先行研究では、フロントロッドの摩耗量に着目し、フロントロッドの最適な交換・点検周期を提案できないかを検討した。以下にその研究内容を示す。

- ・実際に使用されている分岐器において、フロントロッド軸受部の摩耗進行を測定した。
- ・実測された摩耗データから摩耗の進行を、摩耗量一定モデル(モデル①)と摩耗体積一定モデル(モデル②)の二種類にモデル化した。どちらのモデルにおいても摩耗が正規分布に従うと仮定した。
- ・摩耗原因のパラメータとして、列車振動・列車通過トン数・日数の 3 つのパラメータを考えた。
- ・許容摩耗量を超える確率を故障確率と定義し、基準年における故障確率を設定した上で故障確率の変化と各故障確率に達したときのパラメータの値を調べた。
- ・普通分岐器，特殊分岐器それぞれについて各パラメータでの交換基準を定めた。
- ・許容できる故障確率(許容確率)を設定した場合，実際の現場で使える手段として，年間通過トン数から交換周期を割り出す手法を提案した。

しかし、課題として以下が挙げられた

- ・摩耗進行が分かる実験データがなく，作成したモデルの妥当性が分らない。
- ・摩耗進行にばらつきを持たせていたが，許容値にはばらつきを持たせていない。
- ・基準年における故障率を仮定したうえで計算しているため，基準年においては故障率が一定になってしまう。
- ・データ数が少なく，様々な部分で仮定を置かざるを得なかった。

1.2 研究目的

前節で述べた背景を踏まえ、本研究では JR 東日本の協力の下、転てつ機の最適な交換周期を提言することを最終的な目標とする。なお、故障率を計算するための手法として、信頼性設計法を導入する。また、先行研究と同じく転てつ機付属部品であるフロントロッド軸受摩耗に着目する。

また、先行研究の課題を解決するために以下の方法を用いる。

- ・実験によって摩耗進行を計測し、合致する新しい摩耗モデルを作成する。
- ・信頼性工学の分野で多く用いられている限界状態関数を用いて、摩耗量と許容摩耗量にばらつきを持たせた故障率を計算する。

1.3 本論文の構成

第 1 章では本研究の背景を解説し、本研究における目的を述べる。

第 2 章では分岐器の仕組みおよび限界状態関数について述べる。

第 3 章では摩耗進行モデルと実験データについて述べる。

第 4 章では本研究に用いたデータの解析結果を述べる。

第 5 章では測定分岐器における故障率および交換周期を算出する。

第 6 章では第 5 章の結果を実機に用いる。

第 7 章では本研究のまとめを行う。

第2章 基礎事項

2.1 緒言

フロントロッドの摩耗進行には，列車通過時の振動や切り替え回数などが関わってきていると考えられる．そのため摩耗進行を理解するためには，分岐器の仕組みや部品の役割を知ることが必要である．

また，機械設計の分野において設計段階において安全を担保するために，規定上の数値を満足した上でなんらかの判定式による検証が行われる．材料力学の分野では，強度や荷重に対して係数をかけて裕度を持たせた「安全率」という概念が広く普及している．

しかしながら安全率にはあいまいな部分が多く含まれているため，欧米では早くから設計の合理化のために，限界状態関数と呼ばれる設計法を導入している．

本章では本研究における基礎事項として，分岐機の動作原理および本研究に用いる限界状態関数について述べる．

2.2 分岐器の動作原理

2.2.1 分岐器 [1]

一般的に線路を分岐させて列車の進行方向を定める機構を分岐器と呼ぶ。分岐器はポイント部、リード部、クロッシング部の三つの部分から構成される。分岐器の概要を図 2.1 に示す。

トングレールと呼ばれるレールが動くことで、進行方向が決定される。分岐器の左側に位置するポイント部とは、トングレールを含み、そのトングレールが基本レールに接する場所までを表す。

右側のクロッシング部とはレールが交差する部分を表す。そしてリード部とはポイント部とクロッシング部をつなぐ部分である。

分岐器の構造上、クロッシング部にレールの切り欠きができてしまうため、クロッシングの反対側に車輪が異線進入しないためにガードレールが設置されている。

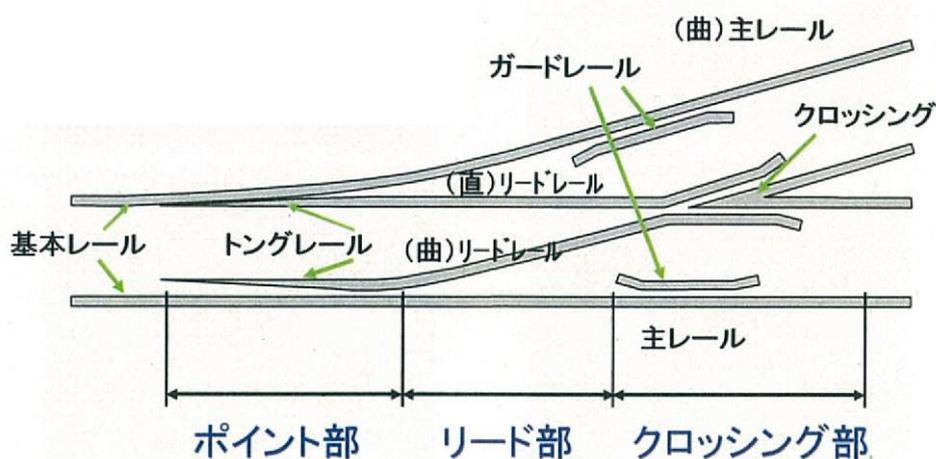


図 2.1 分岐器モデル図

分岐器は、通常はある一定方向に列車を進入させるようになっており、これを定位という。定位以外の方向へ列車が進入するようになっている状態を反位という。

転てつ機はトングレールを動かす装置であり、電気によって動作するものが一般的である。本研究においては、転てつ機付属部品であるフロントロッドの交換周期について研究を行った。

2.2.2 進路切り替えの仕組み [1]

列車が複数の進行方向から1つを選択するためには、トングレールを動かして進行方向を定めなければならない。このトングレールを動かす役割を果たすが転てつ機である。転てつ機は図 2.2 のように、第一スイッチアジャスタを介してトングレールと繋がっており、転てつ機が動作することによって、トングレールが動く。

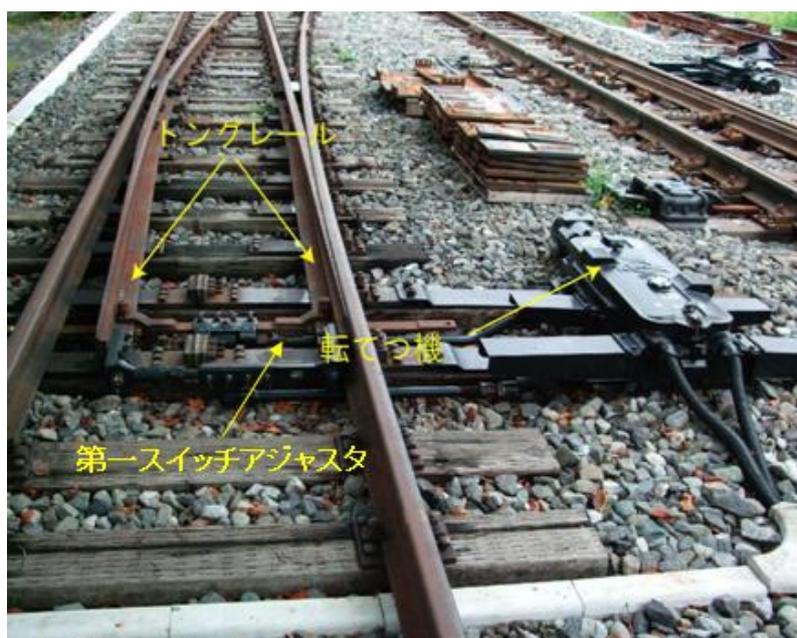


図 2.2 分岐器図

2.2.3 分岐器の種類

分岐器はその種類によって、普通分岐器と特殊分岐器の2つに分けられる。

2.2.3.1 普通分岐器

普通分岐器は鉄道において最も多く使われている分岐器である。1本のレールから、2本のレールへと分岐させる機構である。普通分岐器の中でも、定位が直線で反位が曲線のものを片開き分岐器、定位も反位も同じ角度で曲線分岐するものを両開き分岐器というように、さらに細分化される。また、定位と反位の開き具合を番数で表わし、規格化している。例えば、本線が分岐点より38m進んだ位置において本線と分岐線が1m離れていたとすると、その分岐器は38番分岐器呼ぶ。番数が大きいほど分岐角度が小さくなるため、新幹線等の高速度路線においては番数が大きいものが使用される。

普通分岐器のメリットとしては、寸法が規格化されているので部品交換が容易であることが挙げられる。また、規格が決まっているため大量生産可能であり、特殊分岐器よりもコストが抑えられる。

一方デメリットは、用地に合わせた複雑な構造がとりにくいことである。普通分岐器は構造が決まっているので、その構造を満たすのに十分なスペースが必要である

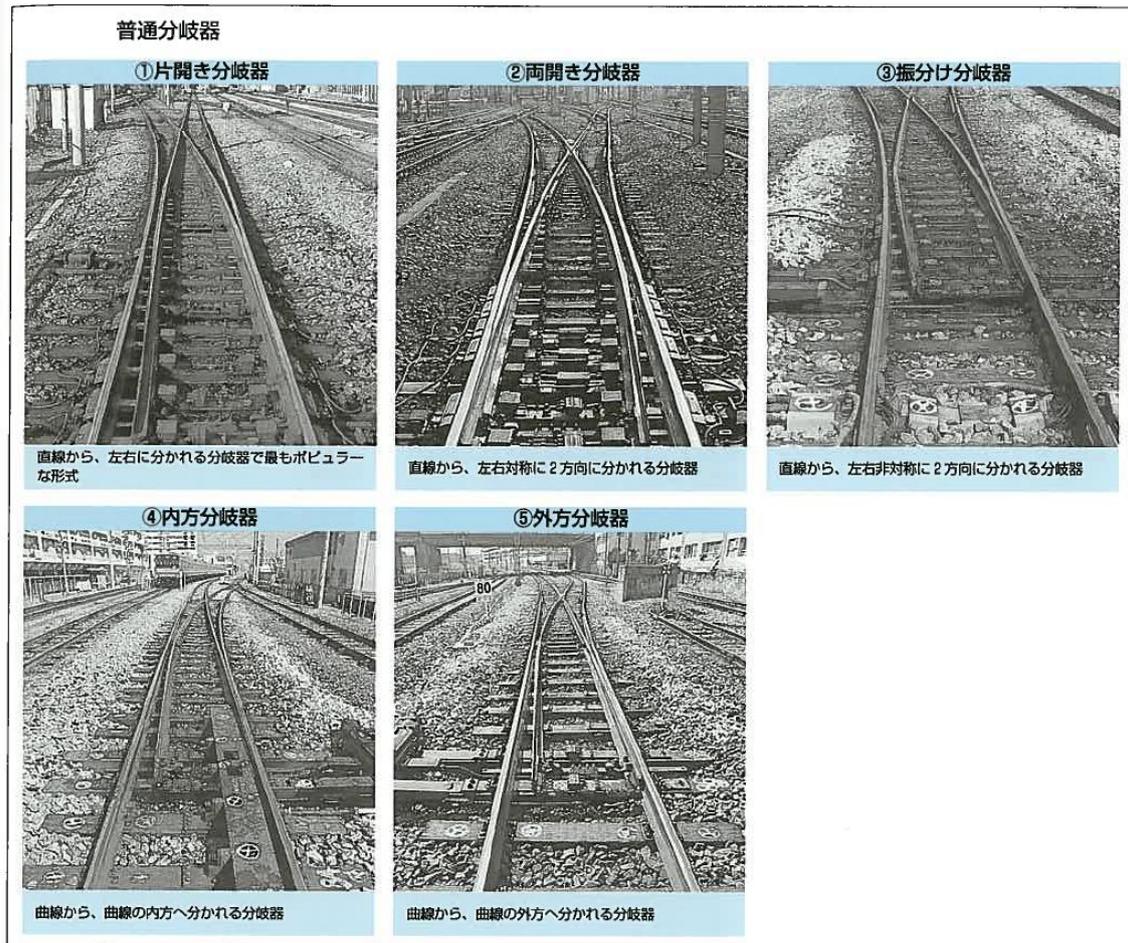


図 2.3 普通分岐器例 [3]

2.2.3.2 特殊分岐器

特殊分岐器は普通分岐器と異なり、多くの進路を設定できる分岐器である。設置場所によって形状が異なるため、それぞれ寸法などが異なり規格が存在しない。

特殊分岐器のメリットの一つは用地に合わせた構造をとれるので、用地を有効利用できることである。普通分岐器が設置できないような線路構造の部分にも設置が可能である。一方デメリットは、可動部分が多いため継ぎ目箇所が多いことがまず挙げられる。継ぎ目

が多いと当然剛性が落ち、耐久性が下がる。そのため、保守や交換が多くなってしまい、コスト面でも不利である。さらに、狭い部分に設置されるため、普通分岐器に比べて低速で通過しなければならないことが多い。

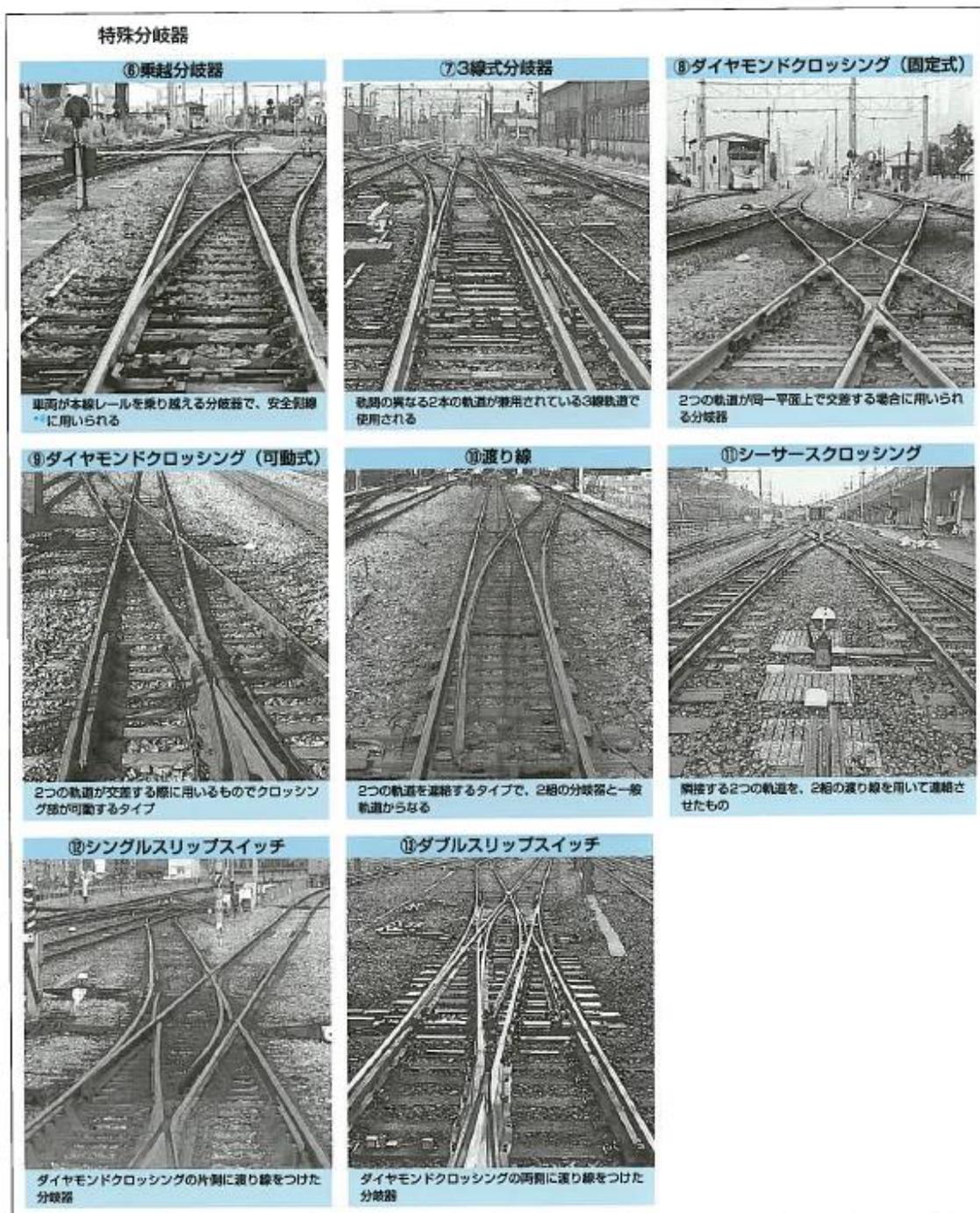


図 2.4 特殊分岐器例 [3]

2.2.4 構造上の違い

分岐器は構造上の違いから，大きく分けて関節方式と弾性方式の2つに分けられる．

2.2.4.1 関節方式

関節方式とは，リードレールとトングレールの間に継ぎ目(図 2.5)が存在し，転換する際にトングレールが継ぎ目を中心として回転する機構のことである．

昔は一般的な方式であったが，継ぎ目の損傷が大きくメンテナンスに労力がかかることや，列車が継ぎ目を通過する際に振動や騒音が発生してしまうことから，現在では後述する弾性方式の分岐器が一般的である．

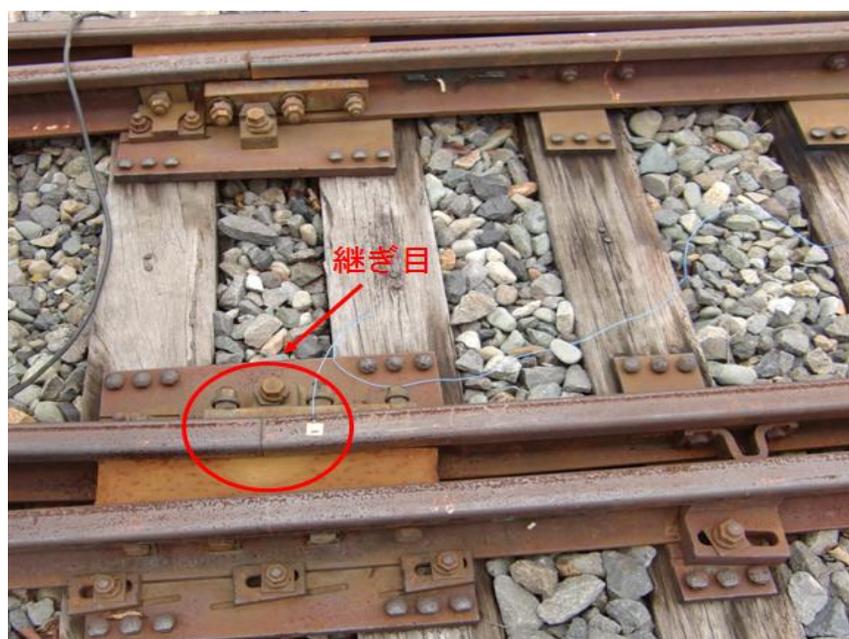


図 2.5 関節方式の継ぎ目

2.2.4.2 弾性方式

弾性方式とは，関節方式と異なりリードレールとトングレールが一体化しており，転換する際にはトングレールをたわませて回転させる．

継ぎ目が存在しないため，関節方式に比べて列車の振動や騒音が抑えられるため，列車の高速化が可能である．しかしながら，トングレールをたわませるために転換の際に負荷がかかり，関節方式に比べて高価である．

2.2.5 JR 東日本における分岐器の設置状況 [4]

分岐器は JR 東日本の管轄内で 1 万台ほどであり，そのうち特殊分岐器は 100～200 台である．しかし 2 章 4 節 で述べたように，特殊分岐器はデメリットが多いため，最近では特殊分岐器から普通分岐器への置き換えが進んでいる．

2.2.6 フロントロッド

フロントロッドとは，トングレールの力をロックロッドに伝えるために，トングレールを先端部に設置され，ロックロッドと繋がっている機器のことである．

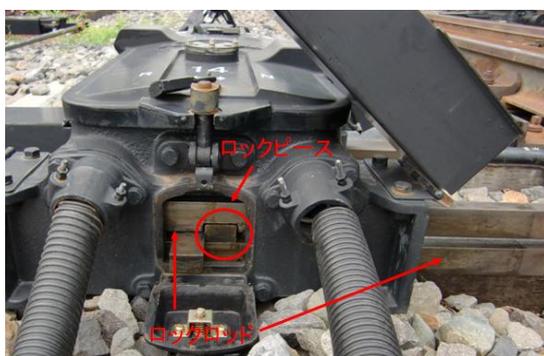


図 2.6 ロックピース図

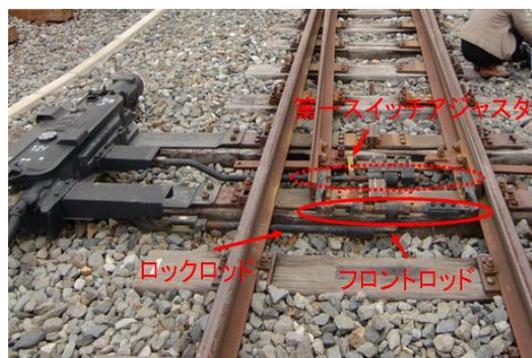


図 2.7 ロックロッド位置

フロントロッド後方に位置する第 1 スwitchアジャスタは，転てつ機を転換するため転てつ機とトングレールを結び，トングレールの密着力を調整する機器である．フロントロッドも電気転てつ機とは繋がっているが，可動部とは繋がっていないためレールの切り替えには直接作用しない．

ロックピースは転換終了後に転てつ機から出てきて，ロックロッドの切欠き部にはまる．なお，転換によってロックロッドが動いて切欠きの位置が変わるが，切欠きは 2 つ設けられており，定位でも反位でもロックピースは定位に設定されている切欠きもしくは反位の切欠きにはまることになる．ロックロッドがはまることによってコンピュータは転換が終了したと判断する．

何らかの影響により転換後のロックロッドの位置がずれてしまい，ロックピースがはまらなかった場合，コンピュータが転換終了と判断できなくなり，信号が赤のまま切り変わらないなどの影響が出て故障となる．

JR 東日本では，フロントロッド軸受部が大きく摩耗した際，このような故障が発生すると考えている．それを防ぐため，設置場所に関わらず普通分岐器 7 年，特殊分岐器 1 年という周期でフロントロッドの交換を行っている．そのため，先行研究および本研究ではフ

フロントロッド軸受部(図 2.8, 図 2.9 において赤い円で囲まれた部分)に着目して, 摩耗測定の対象とした.

なお, JR 東日本のデータより摩耗量の交換基準となるのは, 軸受部の摩耗半径が 1.5mm 以上になる時とした.



図 2.8 軸受部拡大図 [1]



図 2.9 軸受部位置

2.2.7 分岐器の故障原因 [4]

分岐器の主な故障原因は, トングレールの転換不能と軌道回路故障の二つに分けられる. 転換不能は転換負荷の増大やロック不能により引き起こされる.

なお, 通常レールの上を列車が通過した時に, 列車を介して左右のレールに電流が流れることを利用して, その位置に列車がいることをコンピュータが判断している. しかし何らかの原因で左右のレール間で電流が流れた場合, コンピュータがそこに列車がいると誤って判断してしまい, 故障になる. これを軌道回路故障と呼ぶ.

転換不能の主な原因は

- ・ 熱膨張等による分岐器内レールのふく進や軌道変位
- ・ 潤滑油切れ等による電気転てつ機のロック不良
- ・ 異物の介在

がある. 一方, 軌道回路故障の原因は

- ・ まくらぎ, レールの移動による部品の接触
- ・ 絶縁部材料の損傷, 脱落
- ・ 絶縁部での金属の接触

が挙げられる.

ちなみに JR 東日本において、本研究の考察対象であるフロントロッド軸受部の摩耗によって故障が発生したというデータは無かった。これは現在 JR 東日本が行っている一律の交換周期(普通分岐器 7 年・特殊分岐器 1 年)という交換周期がかなり安全側に設定されており、コストの面で不利になっている可能性が高い。

また、この交換周期は故障データに基づいて設定されたものではなく、過去の経験から決定されたものである。

2.2.8 考察(分岐器)

フロントロッド軸受部の摩耗が、故障を引き起こすことが分かった。しかし現在の一律の交換周期では、コストがかかりすぎている可能性があることや、設置状況にかかわらず一律であるため、列車がほとんど走っておらずほとんど摩耗していないようなフロントロッドでさえも交換していると思われる。

よって、次に示す限界状態関数を用いて、フロントロッド軸受部の摩耗と交換周期の関係について考える。

2.3 限界状態関数 [2][5]

2.3.1 概念

機械構造物の分野において、日本と欧米では安全概念が異なる。日本では、安全と危険の境界は明確な許容値で示され、ある値以下であれば安全であるが、その値を一步でも超えるととたんに危険な領域に突入するという考え方をしている。対して欧米では、安全と危険領域の間にはグレーゾーンが存在し、この領域では安全か危険かを判断しない。日本の考え方では、ある値を超えると構造物が破壊されると判断してしまうのである。ここでの構造物の破壊とは、対象とする構造物が一定期間内において、設計において意図された機能を果たさなくなることを指す。

グレーゾーンの考え方を示すために、図 2.10 のような耐力 $R=40\text{MPa}$ (公称値)の構造物を荷重 $L=25\text{MPa}$ で引っ張った場合の例を示す。

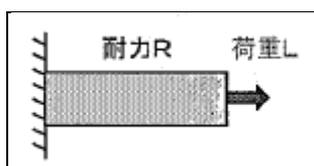


図 2.10 構造物 [2]P59

まず通常であると、耐力 R が荷重 L よりも大きいため、破壊は起こらないと考える。(実際の設計法においては、安全率をかけて耐力を小さめに、荷重を大きめに見積もるという設計法が広く普及している)

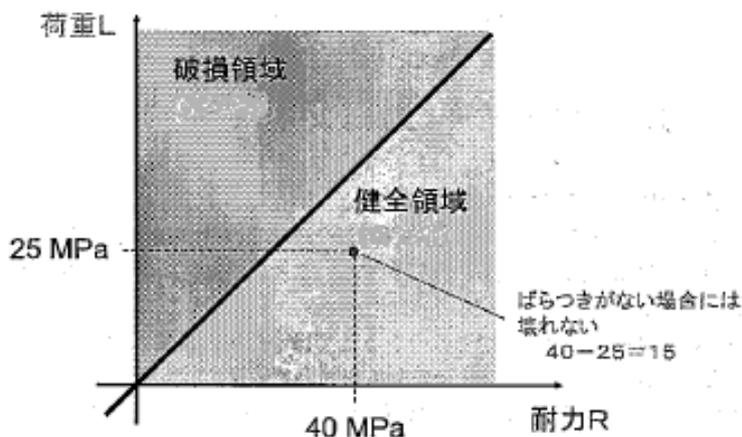


図 2.11 グレーゾーンの無い考え方 [2]P52

しかしながらグレーゾーンの考え方では、耐力や荷重にあらかじめばらつきを持たせて考える。これは構造物の設計段階でヒューマンエラーや製作機械の誤差などにより、耐力が公称値よりずれて作られ、また加える荷重にもずれが出るのが予想されるからである。このため、今回の例でははっきり安全であるとは言えず、耐力よりも荷重が大きくなるかもしれない、故障する可能性があるという結果になる。本研究においては、このようなばらつきの概念を導入し、故障率を算出できる限界状態関数を用いることにする。

2.3.2 定義

構造物を設計し、施行し、さらに使用するのは人間であるために、構造物の設計・施行・使用のすべての段階においてヒューマンエラーが発生する可能性がある。このヒューマンエラーが構造物の安全性を低下させ、故障に至らしめる重大な原因のひとつである。そこで、構造物が危険となるようなヒューマンエラーを考慮して、構造物の安全性を評価する必要がある。

ここで、限界状態関数 Z を以下のように定義する。

$$Z = R - S \quad (R \text{ は強度 } S \text{ は荷重}) \quad (2.1)$$

$Z > 0$: 安全領域

$Z = 0$: 限界状態

$Z < 0$: 破壊領域

ただし、 Z 、 R および S は確率変数である。

限界状態関数を導入することより、故障率を視覚的に見ることができる。図 2.12 における構造物例だと、図 2.13 の結果になる。なお変動係数 COV とは、標準偏差を平均値で割ったものである。

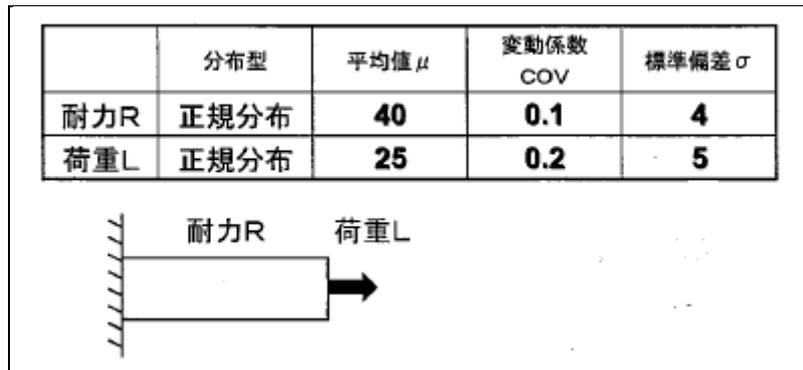


図 2.12 設定条件 [2]P51

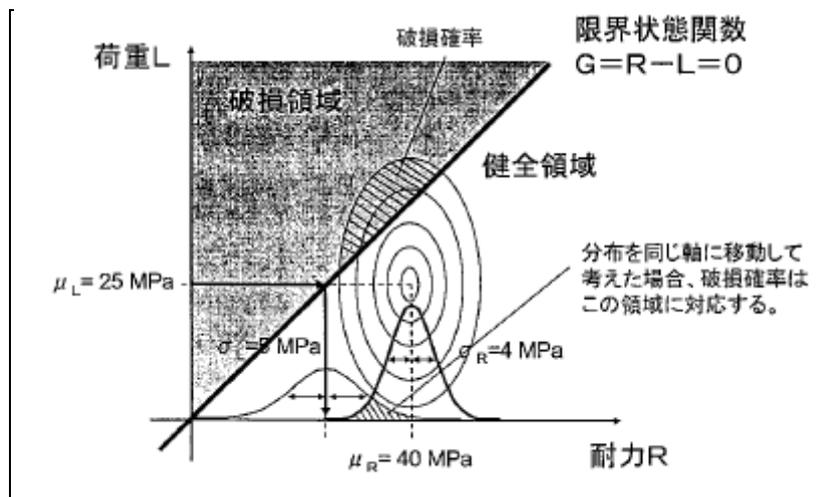


図 2.13 故障率の視覚化 [2]P53

図 2.13 の図で分かるように、故障率はグラフとグラフの重なっている部分であることが分かる。

本研究においては、 R を許容摩耗量、 S を摩耗量として設定する。 $Z < 0$ 、つまり摩耗量が許容摩耗量より大きくなったときに破壊が起こるものとする。

2.3.3 故障率の算出

限界状態関数 Z を用いて、故障率の算出を行う。ここで、限界状態関数 Z の平均値 \bar{Z} および標準偏差 σ_Z は、 R および S の平均値および標準偏差を用いて、

$$\bar{Z} = \bar{R} - \bar{S} \quad (2.2)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2.3)$$

で求められる。

ここで、(2.4) で表わされる信頼性指標 β を導入すると、故障率 P_f は(2.5) で計算することができる。なお、 $\Phi(x)$ は平均値 0、標準偏差 1 の標準正規確率分布において、 x 以下となる確率である。

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.4)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.5)$$

限界状態関数 Z のグラフにおいて、信頼性指標 β を視覚的に見ると図 2.14 になる。

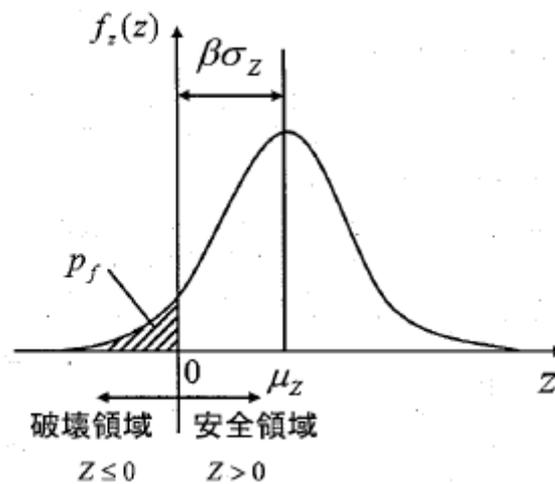


図 2.14 β の視覚化 [5]P62

なお故障確率 P_f は、 $Z \leq 0$ となる左下の斜線部である。

$\Phi(\beta)$ は平均 0、標準偏差 1 の標準正規確率分布において、 β 以下となる確率である。

$\beta=2$ の時を例にとると，図 2.15 において塗りつぶされていない部分が $\Phi(\beta)$ ，右側の塗りつぶされていない部分が故障確率 P_f となる。

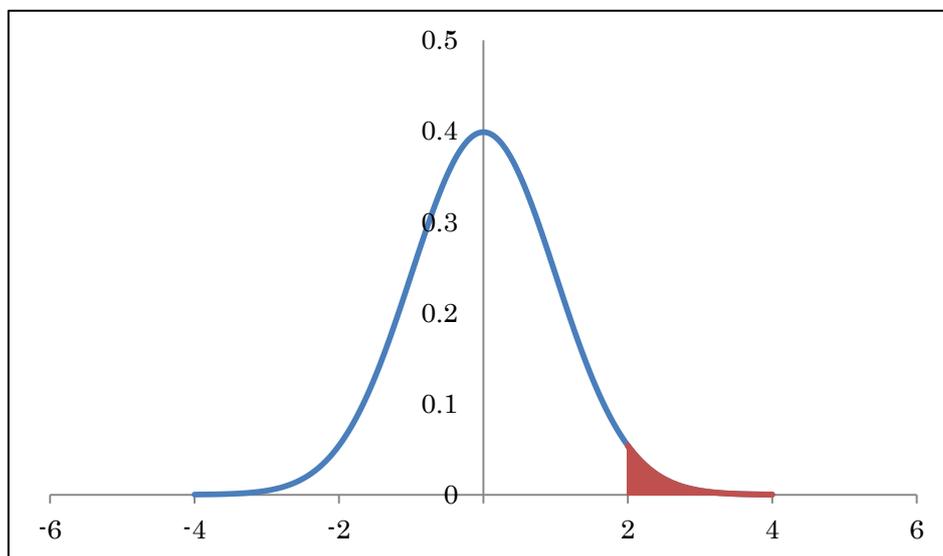


図 2.15 標準正規確率分布における故障確率 P_f

2.3.4 考察(限界状態関数)

限界状態関数を用いることで，故障確率が計算できることが分かった．本研究では，この限界状態関数を使い， R を許容摩耗量， S を摩耗量として設定することでフロントロッド軸受部摩耗と故障率との評価を行っていく．

第3章 摩耗進行のモデル化

3.1 緒言

フロントロッドの交換周期を提言するために、フロントロッド軸受部がどのように摩耗していくのかを考察する必要がある。そのために本章では、実験データを元に摩耗の進行に関してモデル化を行った。

3.2 摩耗進行の原因

フロントロッド軸受部の摩耗に関する要因として様々なものが挙げられるが、主な要因として列車通過トン数、列車通過時の振動、分岐器切り替え回数などが影響すると考えられる。

分岐器上を通過する列車のトン数が多いほど、フロントロッドにかかる負荷は大きくなる。列車通過時の振動数が大きい場合も同様に負荷がかかり、摩耗が進行すると考えられる。また、分岐器を切り替えることによって軸受部にトルクがかかり、摩耗の原因となっている可能性がある。

3.3 列車通過時の振動

先行研究において、列車通過時にフロントロッドに作用する加速度を測定した。実際に使用されている転てつ機のフロントロッドの、図 3.1 で赤く示されている部分に加速度センサを取り付けた。なお、使用した加速度センサは歪みゲージ式加速度計であり、加速度計は一つの分岐器につき 3 つとりつけ、それぞれ軌間内外 x 方向、鉛直 y 方向、レール平行 z 方向の三方向の加速度を計測した。また、S 駅(普通分岐器)、N 駅(特殊分岐器)について計測を行った。



図 3.1 加速度センサ設置位置

振動に関するパラメータとして先行研究では、各方向の加速度を時間で積分した値(A_x , A_y , A_z , 単位は m/s)と各方向の二乗和を積分した値($A^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2$, 単位は m^2/s^2)を考えた。

3.4 列車通過トン数と振動の関係

先行研究において、S 駅にて計測された加速度積分値と列車重量の関係調べた。得られた列車重量と振動の関係を図 3.2 と図 3.3 に示す。

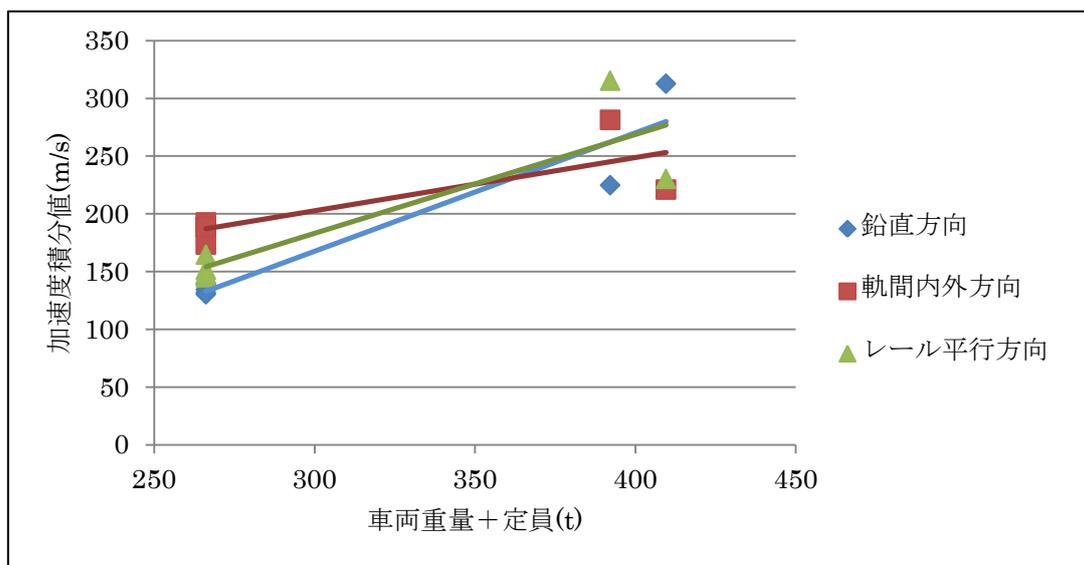


図 3.2 S 駅(車両重量+定員)と振動比較

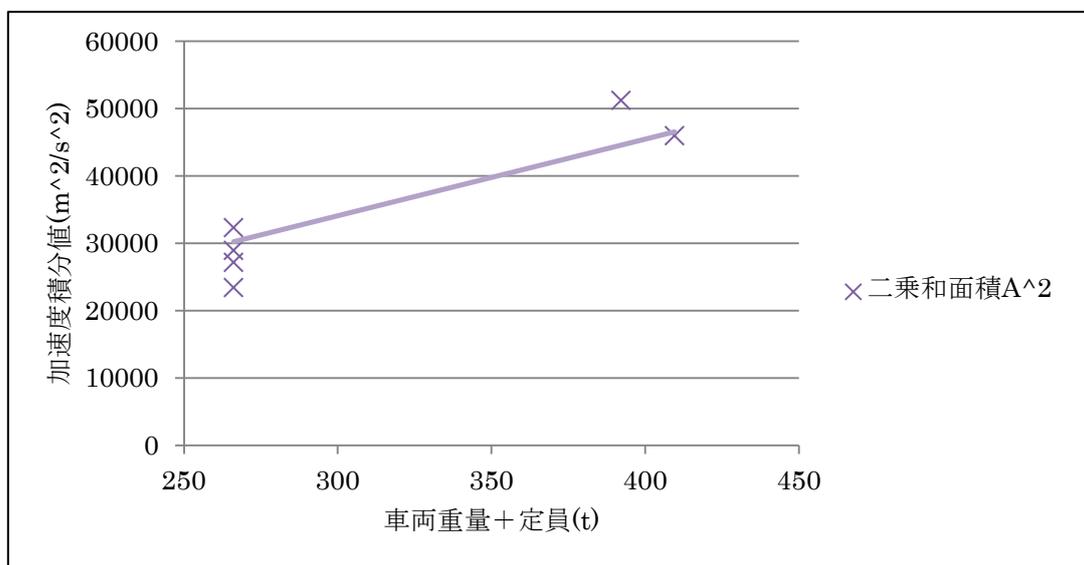


図 3.3 S 駅(車両重量+定員)二乗和積分値と振動比較

図 3.2, 図 3.3 より、いずれの方向の加速度積分値においても、通過重量と一定の関係があるということが分かった。

3.5 摩耗進行のモデル化

3.5.1 モデル①

先行研究では、実際に使用されている転てつ機の摩耗データを用いることでフロントロッド軸受部の摩耗のモデル化を行った。

以下に先行研究におけるモデル化の手法について説明する。

まず、単純化を図るため摩耗は線形的に進行すると仮定した。次に、ある時点での摩耗量は正規分布に従うと仮定した。その場合、摩耗量平均値 μ は原点と実験によって実測された摩耗量を結んだ直線上の点とした。

以下は本研究における設定である。

許容摩耗量はJR 東日本のデータより、平均が1.5mm、標準偏差が0.1mmの正規分布関数であるとする。その上で、摩耗量が許容摩耗量を超える確率を故障確率と定義する。

摩耗量の標準偏差は、摩耗量平均の1/3もしくは0.487013816倍の2通りについて考える。なお0.487013816という数値は、JR 東日本の分岐器通過トン数データを正規分布と近似した上で、通過トン数のばらつきを摩耗のばらつきが等しいと仮定し、算出した値である。

以上の条件で作成したのがモデル①である。図3.4にてモデル①の摩耗進行を図示した。

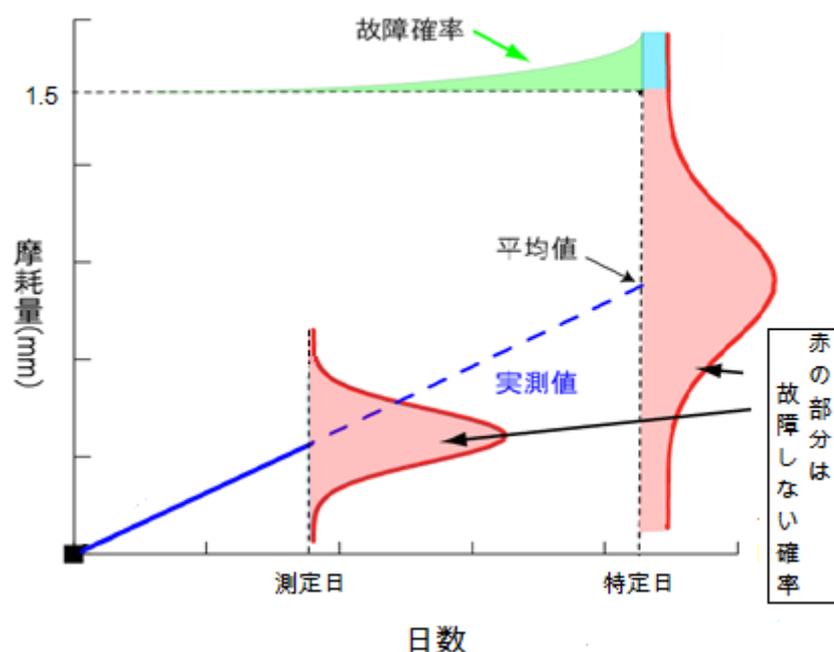


図 3.4 摩耗モデル① [1]P23 改

3.5.2 モデル②

モデル①では摩耗進行において一日あたりの摩耗量が一定だと仮定しモデル化を行った。モデル①に加えて、先行研究では摩耗により失われる体積が一日あたり一定であると考え、モデル②を作成した。

先行研究で得られた実測データは、実際に使用されたフロントロッドの使用前後の軸受の径であった。図 4.5 の R_0 を使用前の軸受の半径、 N 日使用した後の軸受半径を R_N で表す。先行研究および本研究では、使用前中後において軸受断面は円を保つと考えた。

先行研究のモデル化では、奥行きは単位長さを考えた。 N 日使用するまでに失われた体積を日数 N でわり、一日あたりの摩耗量と考えた。つまり一日あたりの摩耗量体積は

$$C = \frac{\pi(R_N^2 - R_0^2)}{N} \quad (3.1)$$

で表された。この C の値を用いて、一日当たりの摩耗進行量 Δr_n を求める事ができた。

なお JR 東日本のデータより、使用前軸受半径 R_0 は 11mm であるとする。

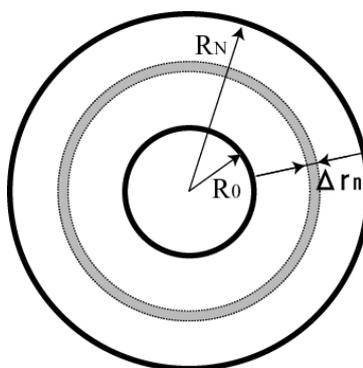


図 3.5 フロントロッド軸受モデル図 [1]P24

モデル①と異なる点は、摩耗量でなく摩耗体積を一定にとった点である。

本研究においては、モデル②もモデル①と同様、

- ・許容摩耗量は平均が 1.5mm、標準偏差が 0.1mm の正規分布関数であるとする。
- ・摩耗量が許容摩耗量を超える確率を故障確率と定義する。
- ・摩耗量の標準偏差は、摩耗量平均の 1/3 もしくは 0.487013816 倍の 2 通りを考える。

以上の仮定を満たすとする。

3.5.3 モデル③

3.5.3.1 振動実験

先行研究では、ある測定日における摩耗は計測していたものの、同じ分岐器で日を変えて何回か測定することを行っていなかった。これは、計測を列車が通らない深夜に行う必要があり、JR 東日本側が作業時間や作業人数の面で制約があったためである。このため、先行研究では摩耗がどのように進行していくかを把握できず、モデル①と②の妥当性を検証することが出来なかった。

車両搭載機器や線路内、線路近傍に設置される信号保安装置は、列車走行による振動を受けるために、それに対する耐久性が求められている。そのため JR 東日本では、JR 東日本テクニカルセンターの振動試験装置を用いて、これらの機器の振動特性試験や耐久試験を行っている。本研究では、摩耗がどのように進行するかを把握するため、この振動試験装置を用いてフロントロッドの振動実験を行った。なお、加振と測定を行ったのは JR 東日本である。

振動試験装置の概要について図 3.6、表 3.1 に示す。

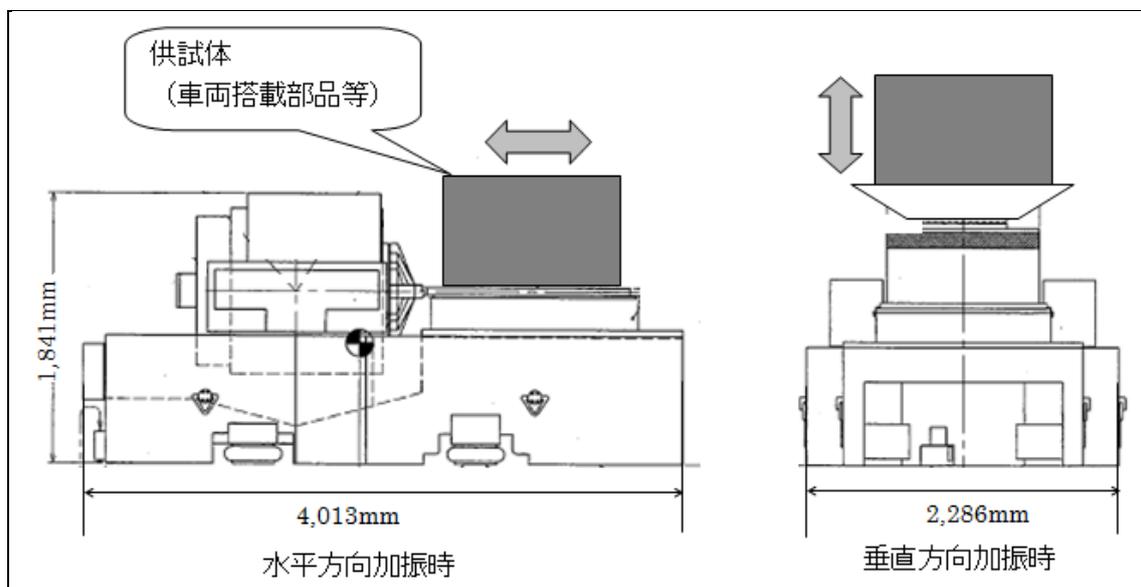


図 3.6 振動試験装置図 [4]

・加振方式	動電型
・最大加振力	サイン波：178kN ランダム波：178kNrms ショック波：334kN _{0-p}
・最大変位	51mm _{p-p}
・最大速度	サイン波／ランダム波 ： 2.1m/s ショック波： 3.5m/s
・周波数範囲	2～2,000Hz（垂直方向は1,000Hz）
・最大積載質量	1,800kg
・加振方向	水平／垂直【切換】

表 3.1 振動試験装置仕様 [4]

振動試験は、特殊分岐器型フロントロッドの両端を加振台に固定し、3章3節にて説明した加速度計測実験にて得られた振動データを入力として、軌間内外 x 方向，鉛直 y 方向，レール平行 z 方向を別々に加振する方法で行った。

フロントロッドの固定状況を図 3.7 に、特殊分岐器型フロントロッド図面を図 3.8 に、加速度計測実験にて得られた振動データの一例を図 3.9 で示す。



図 3.7 フロントロッド固定状況

番号	部 品 名	材 質	数 量	番号	部 品 名	材 質	数 量
①	肘 金	SCM435	2	⑲	ギザ付皿ばね座金	SWRH	4
②	皿 金	SS400	2	⑳	六角ナット	SS400	4
③	スペースロックナット	S45C	8	㉑	六角ナット	SS400	2
④	皿ばね座金	SWRH	4	㉒	調整金具	FCD400	1
⑤	六角ボルト	10.9	4	㉓	滑り軸受500 SP6 SL403	炭力炭鋼	2
⑥	リーマボルト	S45C	2	㉔	接続かん	S45C	1
⑦	リーマ用座金	S45C	4	㉕	特殊ボルト	SCM435	2
⑧	軌間絶縁	TPEE	2	㉖	球 面 軸 受	SUJ2	2
⑨	接続板(上)	SS400	1	㉗	内輪プッシュ	SCM435	2
⑩	接続板(下)	SS400	1	㉘	球面軸受蓋(A)	S25C	2
⑪	六角ボルト	8.8	3	㉙	球面軸受蓋(B)	S25C	2
⑫	Uナット	SS400	3	㉚	六角穴付皿小ねじ	10.9	8
⑬	皿ばね座金	S60C	3	㉛	軸絶かん継手	FCD400	1
⑭	滑りピン	SUS304	3	㉜	六角ボルト	SS400	2
⑮	ロッド	S25C	1	㉝	段付きボルト	SS400	1
⑯	アジャストジョー	S45C	2	㉞	ばね座金	SWRH	3
⑰	六角ナット	SS400	2	㉟	六角ナット	SS400	3
⑱	調整ねじ	SS400	2				

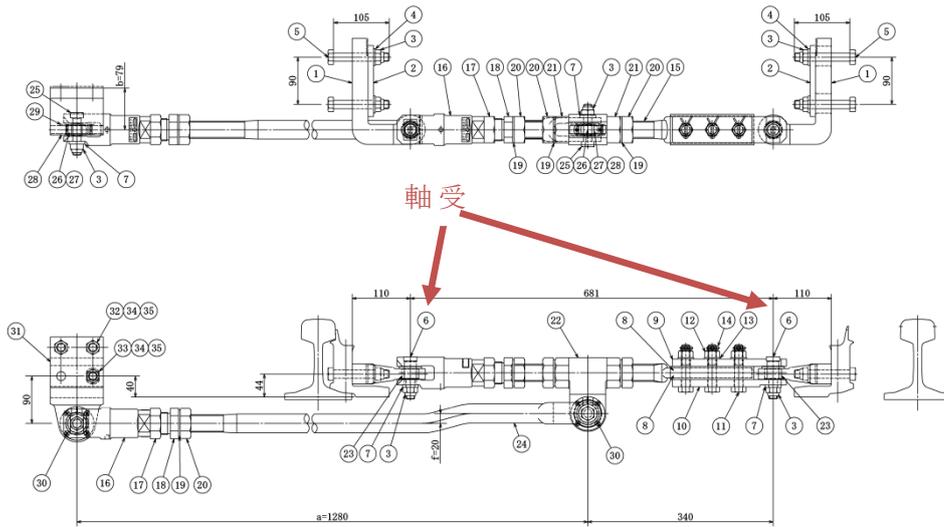


図 3.8 特殊分岐器型フロントロッド図面 [4]

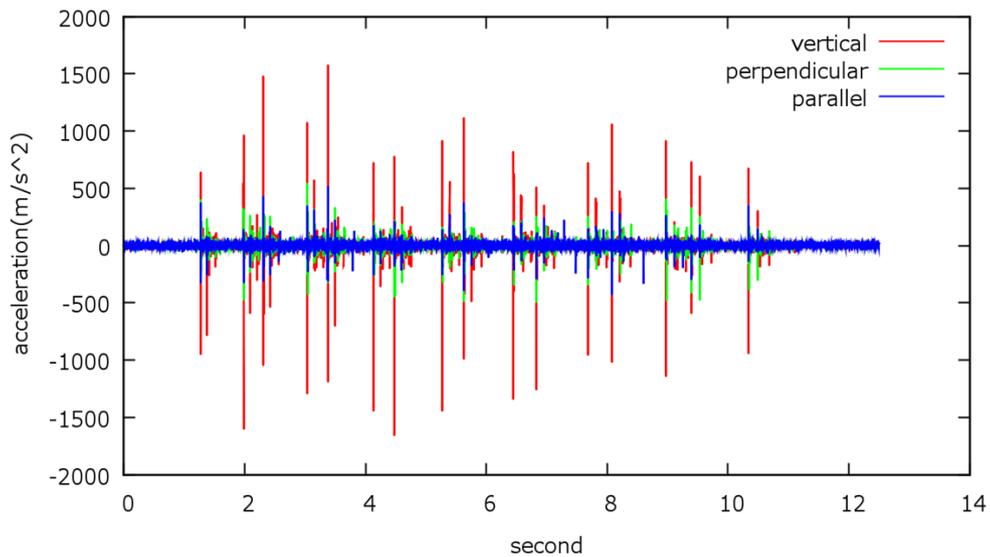


図 3.9 529EA 列車通過時の加速度データ (N 駅)

先行研究において、図 3.9 で示した加速度データの他にも特急列車や貨物列車の加速度データを計測している。本研究では 1 日当りに N 駅特殊分岐器上を通過する列車本数分の振動を 1 日分の振動とし、100 日分、194 日分、365 日分の振動をかけ終わったのち、それぞれの段階で摩耗を計測した。

3.5.3.2 振動実験結果

JR 東日本側の日程事情により、予定の 3 方向 365 日分の加振は間に合わず、鉛直 y 方向は 365 日分の加振はできたものの、軌間内外 x 方向、レール平行 z 方向は 194 日分の加振しか出来なかった。また、フロントロッドを振動台の治具に取り付ける際、固定条件が実際の分岐器における固定条件と異なっている可能性がある等の問題が見つかった。しかしながら本実験においては、数値的な部分にとらわれず、おおまかな進行モデルを把握するために利用する目的であったため、あまり問題にならないと考える。

故障に影響するのは軸受部 x 方向の摩耗であるので、振動実験による軸受部 x 方向の摩耗結果を表 3.2、表 3.3 に示す。なお、～方向のみ○日経過とあるのは、～方向に○日分の加振を行った時点での摩耗という意味である。

測定箇所 (上面からの位置)	X方向寸法								
	試験前 4/21	Y方向のみ 100日経過 6/9		YXZの3方向 100日経過 7/22		ZXYの3方向 194日経過		Y365日 経過	XZ194日 経過 11/7
	実測値	実測値	変化量	実測値	変化量	実測値	変化量	実測値	変化量
軸受上(6mm)	22.010	22.030	0.020	22.030	0.020	22.140	0.130	22.375	0.365
軸受中(12mm)	22.010	22.011	0.001	22.020	0.010	22.140	0.130	22.360	0.350
軸受下(19mm)	22.010	22.012	0.002	22.020	0.010	22.180	0.170	22.360	0.350

表 3.2 対向左側軸受部の実験結果

測定箇所 (上面からの位置)	X方向寸法								
	試験前 4/21	Y方向のみ 100日経過 6/9		YXZの3方向 100日経過 7/22		ZXYの3方向 194日経過		Y365日 経過	XZ194日 経過 11/7
	実測値	実測値	変化量	実測値	変化量	実測値	変化量	実測値	変化量
軸受上(6mm)	22.010	22.060	0.050	22.090	0.080	22.170	0.160	22.240	0.230
軸受中(12mm)	22.010	22.060	0.050	22.080	0.070	22.180	0.170	22.240	0.230
軸受下(19mm)	22.010	22.080	0.070	22.110	0.100	22.170	0.160	22.200	0.190

表 3.3 対向右側軸受部の実験結果

振動実験結果より、日数が経つにつれて摩耗進行がより進む傾向が見られるため、モデル①、モデル②とは摩耗進行モデルが異なる可能性が出てきた。そのため、新しい摩耗モデル③を作成する。

3.5.3.3 摩耗モデル③の作成

振動実験の結果より，本研究では累積摩耗半径 S が日数 N の α 乗に比例して摩耗が進行していく摩耗モデル③を作成する．式で表わすと(3.1)になる．

$$S = V \times N^\alpha \quad (V \text{ は摩耗進行速度}) \quad (3.2)$$

また，累積摩耗半径 S について

$$S = R_N - R_0 \quad (R_N \text{ は } N \text{ 日後の半径, } R_0 \text{ は使用前半径}) \quad (3.3)$$

が成り立つ．

モデル③を用いた場合の摩耗進行例として，図 3.10 を示す．

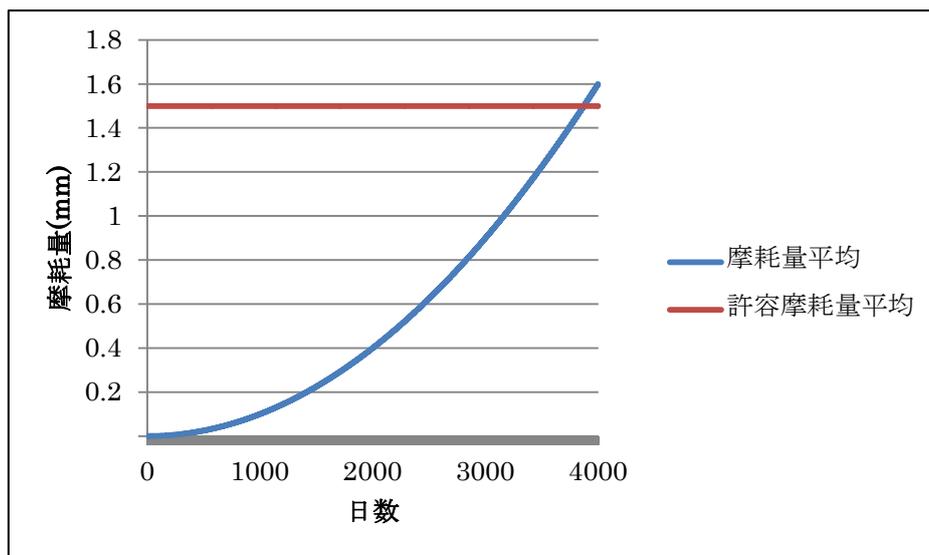


図 3.10 摩耗モデル③の一例($\alpha=2$, $V=1E \times -07$)

その他の仮定については，モデル①，モデル②と同様，

- ・許容摩耗量は平均が 1.5mm，標準偏差が 0.1mm の正規分布関数であるとする．
- ・摩耗量が許容摩耗量を超える確率を故障確率と定義する．
- ・摩耗量の標準偏差は，摩耗量平均の 1/3 もしくは 0.487013816 倍の 2 通りを考える．

以上の仮定を満たすとする

3.5.3.4 モデル③における α の決定

モデル③を用いて交換周期の例示を行うために、係数 α の決定を行う。実験結果にモデル③を近似させた図が、以下の図 3.11, 図 3.12 である。

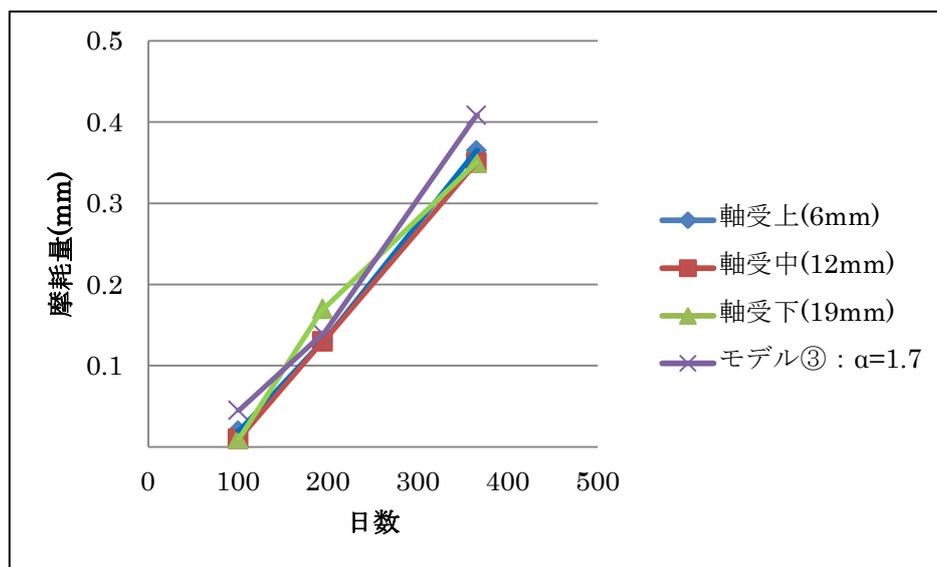


図 3.11 対向左側実験結果とモデル③近似線

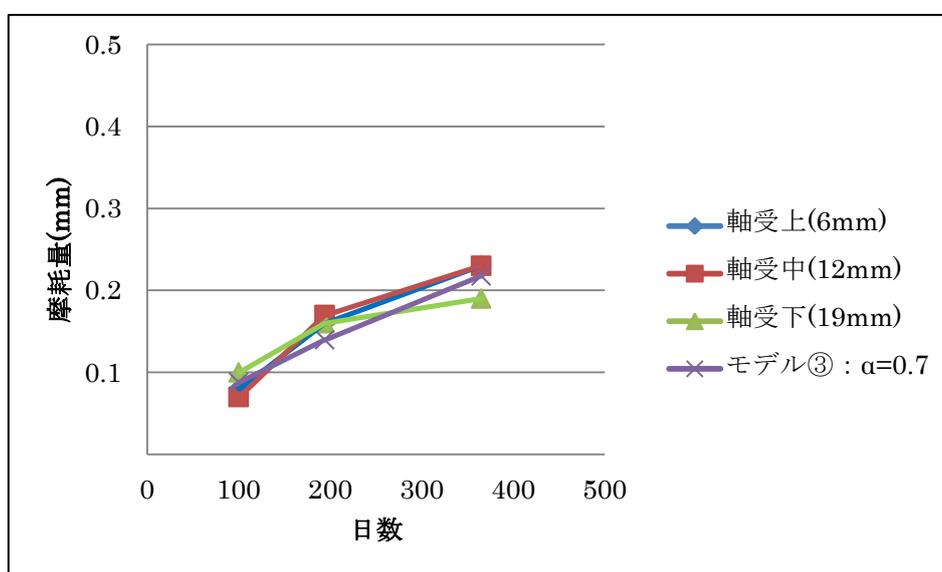


図 3.12 対向右側実験結果とモデル③近似線

今回はデータ点数が少ないため、左右の近似線の平均をとって $\alpha = 1.2$ として以後の計算を行う。

3.6 考察

先行研究において作成し，本研究にて仮定を改めたモデル①，モデル②と，振動実験の結果を用いて新しく本研究において作成したモデル③がある。本研究ではこの3つのモデルのそれぞれについて故障率と交換周期を計算していく。

第4章 実験データ解析

4.1 緒言

本章では主に分岐器別の年間通過トン数データおよび、先行研究にて計測された実機の摩耗データについての解析を行う。また、前章にて作成したモデルを使って計算を行うための仮定条件について述べる、

4.2 実機における摩耗測定

先行研究において、S 駅および N 駅に設置された転てつ機の、付属部品であるフロントロッド軸受部について、摩耗量の測定を行った。測定を行ったのは共同研究先の JR 東日本テクニカルセンターである。

S 駅は普通分岐器の関節方式と弾性方式, N 駅は特殊分岐器の弾性方式について測定を行った。測定した分岐器は上下線で 1 つずつ, また各フロントロッドについて左右の 2 箇所を測定した。

摩耗量を測定した期間や摩耗量を表 4.1 に示す。また、測定を行った分岐器における通過トン数データを表 4.2 に示す。

番号	箇所	試験前 (mm)	試験後 (mm)	摩耗量 (mm)	測定日数
12 号 直径差	対向左	0.005	0.013	0.008	73
	対向右	0.004	0.011	0.007	
14 号 直径差	対向左	0.004	0.017	0.013	70
	対向右	0.005	0.016	0.011	
852 ハ号 直径差	対向左	0.119	0.126	0.007	195
	対向右	0.112	0.119	0.007	
852 口号 直径差	対向左	0.108	0.135	0.027	195
	対向右	0.105	0.118	0.013	

表 4.1 測定結果(摩耗量は直径差)

通称線区名	駅・駅間	番号	年間通過トン数 (百万トン)	分岐器種別	
				普通／特殊	関節／弾性
中央本線	S 駅	12 号	12.1	普通	関節
中央本線	S 駅	14 号	14.2	普通	弾性
武蔵野線	N 駅	852 号	41.2	特殊	弾性

表 4.2 S 駅および N 駅における年間通過トン数

4.3 年間通過トン数

JR東日本が持っているそれぞれの分岐器についてのデータは、年間に分岐器上を通過する列車の合計トン数についてのデータのみであった。そのため、本研究においては通過トン数データを用いた分岐器ごとの交換周期提言を目指す。表 4.3 に得られた通過トン数データの一例を示す。

通称線区名	駅・駅間	年間通過トン数 (百万トン)	分岐器種別	
			普通／特殊	関節／弾性
横須賀線	A	9.1	普通	関節
横浜線	B	15.4	普通	関節
根岸線	C	32.3	普通	関節
常磐(緩行)線	D	18.6	普通	関節
青梅線	E	3.7	普通	関節
横須賀線	F	19.5	普通	弾性
高崎線	G	30.6	普通	弾性
埼京線	H	19.2	普通	弾性
山手線(貨物)	I	38.3	普通	弾性
山手線(貨物)	J	37.6	普通	弾性
東海道本線(客)	K	32.3	特殊	弾性
東海道線(横須賀)	L	18.3	特殊	弾性
東海道線(横須賀)	M	21.3	特殊	弾性
中央(緩行)線	O	25.9	特殊	弾性
横須賀線	P	33.8	特殊	弾性

表 4.3 年間通過トン数データ例

表 4.3 を見ると、通過トン数にかなりのばらつきがあり、首都圏に近づくほど値が大きくなる傾向がある。

4.4 諸仮定

・本研究においては、フロントロッド軸受部の摩耗が列車通過時の振動等によって進行していくと考える。そのため、設置条件によって列車通過数や重量が違っているため、摩耗の進行具合は異なるものになるとする。

・関節方式と弾性方式ではトンダレールにかかる負荷が異なるので、先行研究における実地データ(表 4.1)の種類より「普通分岐器・関節方式」、「普通分岐器・弾性方式」、「特殊分岐器・弾性方式」の 3 種に分けて考える。

・現在摩耗の原因のパラメータとして考えられているのは、列車通過時の振動、列車通過時による負荷(通過トン数)、分岐器の転換回数である。しかしながら 3 章 4 節で述べたように、先行研究において列車通過時の振動と通過トン数には一定の関係があることが分かった。

また、列車通過本数が多いほど、分岐器の転換回数も増えると考えられる。

以上より、列車通過トン数と摩耗の進行具合は比例すると仮定する。

・なお実地データの結果から、それぞれのモデルにおける摩耗速度や標準偏差を求め、その後他の分岐器の摩耗速度をトン数によって比例させて計算する方法をとる。

・許容摩耗量 R について、JR 東日本のデータより

$$\sigma_R = 0.1\text{mm} \quad (4.1)$$

$$\bar{R} = 1.5\text{mm} \quad (4.2)$$

と仮定する。

・許容摩耗量 R および摩耗量 S は各日数において正規分布関数に従うとする。

4.5 考察

データ点数が少ないため、本章において多くの仮定を行った。次章以降ではこれらの仮定を用いて、モデル①～③それぞれの場合について計算を行う。

第5章 交換周期の算出

5.1 緒言

本章では3章で解説した限界状態関数を用いて、4章のモデル①～③それぞれの場合について交換周期の算出を行う。なお摩耗進行の標準偏差については、摩耗平均値の1/3倍である場合と、通過トン数データの標準偏差に等しい場合の2通りを仮定している。そのため本研究においては、3通りのモデル×2通りの標準偏差の6通りの場合について計算を行う。

5.2 基本式

表 4.1 の実地測定試験結果を基に、測定を行った分岐器において、それぞれのモデルの摩耗進行速度等を計算する。

測定日数を N ，試験前摩耗量を $R_A(\text{mm})$ ，試験後摩耗量を $R_B(\text{mm})$ ，使用前の軸受半径をフロントロッド軸受部の寸法表より 11mm とする。

モデル①の一日当たり摩耗半径($\text{mm}/\text{日}$)，モデル②の一日当たり摩耗体積($\text{mm}^3/\text{日}$)は(5.1)および(5.2)で計算される。

$$\frac{R_B - R_A}{2} \times \frac{1}{N} \quad (5.1)$$

$$\left\{ \left(11 + \frac{R_B}{2} \right)^2 - \left(11 + \frac{R_A}{2} \right)^2 \right\} \times \frac{1}{N} \quad (5.2)$$

なおモデル③に関しては、使用前から試験前まで何日たったかを計算する必要がある。経過日数 T は $\alpha=1.2$ とすると、(5.3)で表わされる。

$$T = \left\{ \frac{\left(\frac{R_A}{R_B} \right)^{\frac{1}{1.2}}}{\left(1 - \frac{R_A}{R_B} \right)} \right\} \quad (5.3)$$

経過日数 T を用いて、モデル③における摩耗半径速度 $V(\text{mm}/\text{日})$ を、(5.4)式を使用して計算を行う。

$$V = \frac{R_A}{(T)^{1.2}} \times \frac{1}{2} \quad (5.4)$$

5.3 平均摩耗半径

以上(5.1)～(5.4)を用いて, 表 4.1 の測定実験結果をあてはめたものを表 5.1 で示す. なお, 試験前摩耗量を R_A (mm) および試験後摩耗量を R_B (mm)は, 普通分岐器 2 種については左右の平均値を, 特殊分岐器については測定 2 点×左右の計 4 点の平均値を使用する.

番号	分岐器種類	モデル① 摩耗半径(mm/日)	モデル② 摩耗体積(mm ² /日)	モデル③ 摩耗半径速度 V(mm/日)
12 号	普・関節	5.14E-05	3.55.E-03	1.73E-05
14 号	普・弾性	8.57E-05	5.93.E-03	3.07E-05
852 号	特・弾性	3.46E-05	2.41.E-03	6.53E-06

表 5.1 モデル①～③における基準量計算結果

表 5.1 の結果を用いて, 測定分岐器における平均摩耗半径を決定する.

測定分岐器において, 摩耗モデル①～③における平均摩耗半径の進行具合は図 5.1～図 5.3 のようになる.

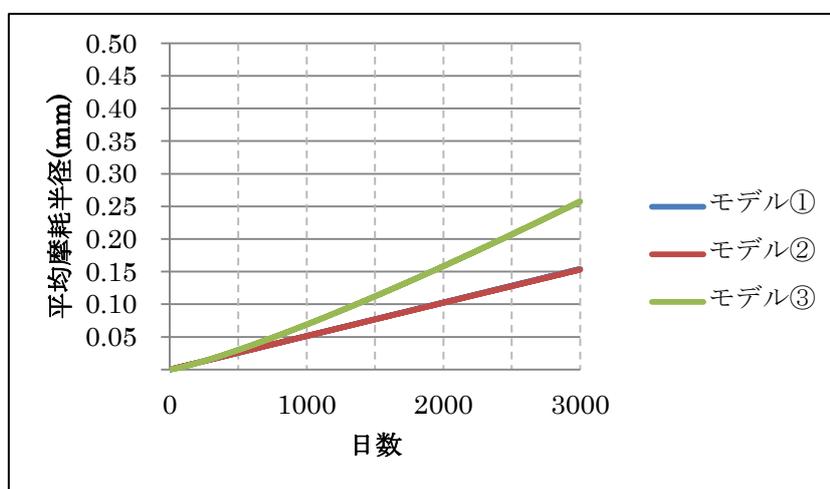


図 5.1 平均摩耗半径変化 (S 駅 12 号分岐器)

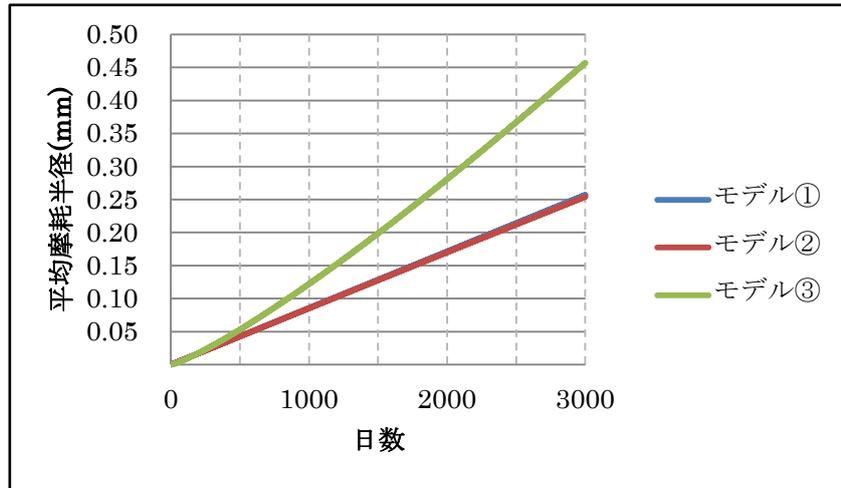


図 5.2 平均摩耗半径変化 (S 駅 14 号分岐器)

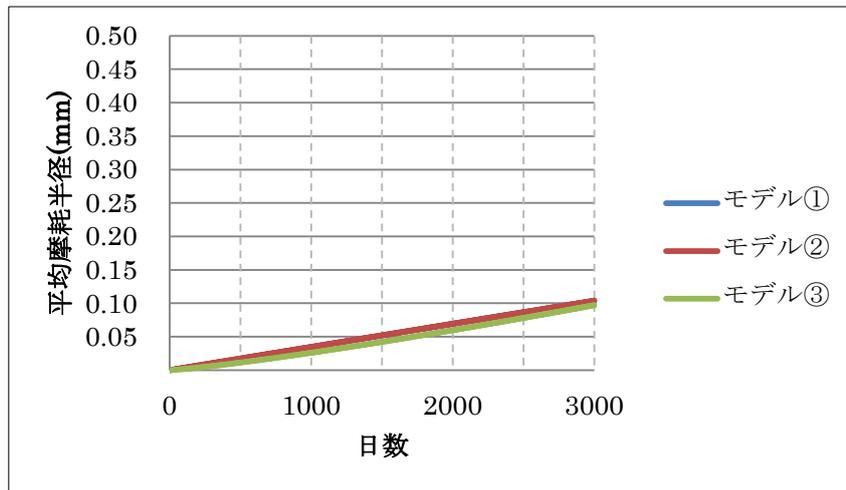


図 5.3 平均摩耗半径変化 (N 駅 852 号分岐器)

3つの分岐器全てにおいて、モデル①とモデル②の摩耗変化曲線がほとんど一致する結果になった。これは、摩耗量に対して使用前の軸受半径がかなり大きいため、摩耗体積一定の場合でも摩耗半径一定と近似できるからだと考えられる。両者の違いを示すため、経過日数 2950 日から 3000 日におけるモデル①とモデル②の摩耗進行グラフを図 5.4～図 5.6 に示す。

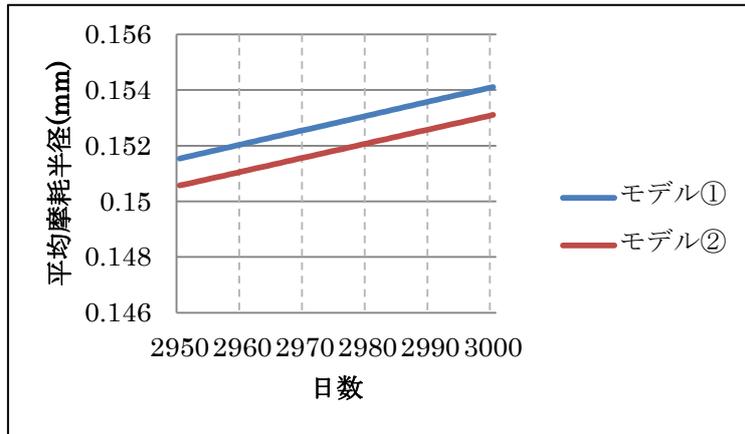


図 5.4 平均摩耗半径変化拡大図 (S 駅 12 号分岐器)

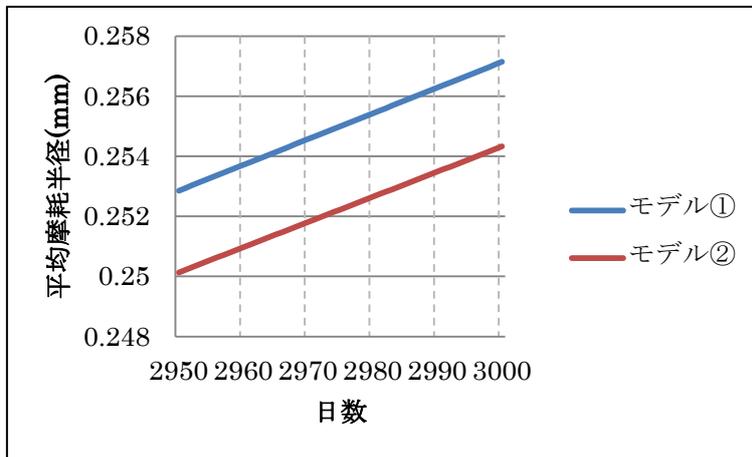


図 5.5 平均摩耗半径変化拡大図 (S 駅 14 号分岐器)

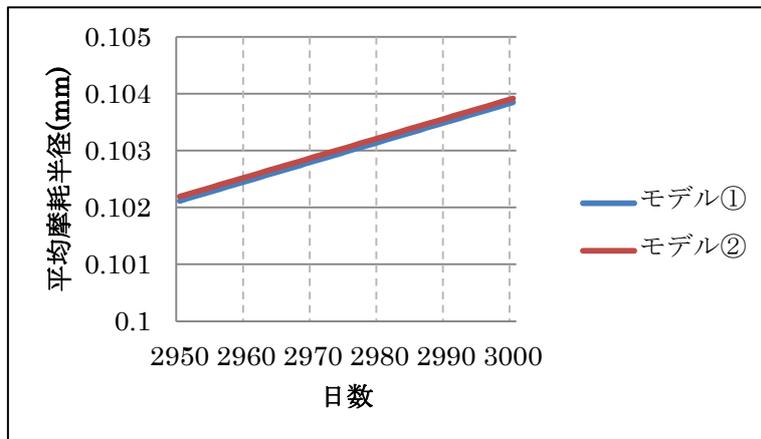


図 5.6 平均摩耗半径変化拡大図 (N 駅 852 号分岐器)

5.4 故障確率

(2.4)及び(2.5)を用いて，測定分岐器における故障確率を計算する．なお摩耗の標準偏差は，平均摩耗半径の 1/3 又は通過トン数データのばらつきに等しい場合の 2 通りとした．本考察においては，それぞれ場合分けして計算を行う．

また許容摩耗半径については，4 章 4 節で述べた仮定より半径 1.5mm，標準偏差 0.1mm とする．

5.4.1 <摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3>

摩耗標準偏差を平均摩耗半径の 1/3 とした場合の，日数による故障確率の変化を以下に示す．なお，縦軸には故障確率を対数表示し，横軸には日数をとった．

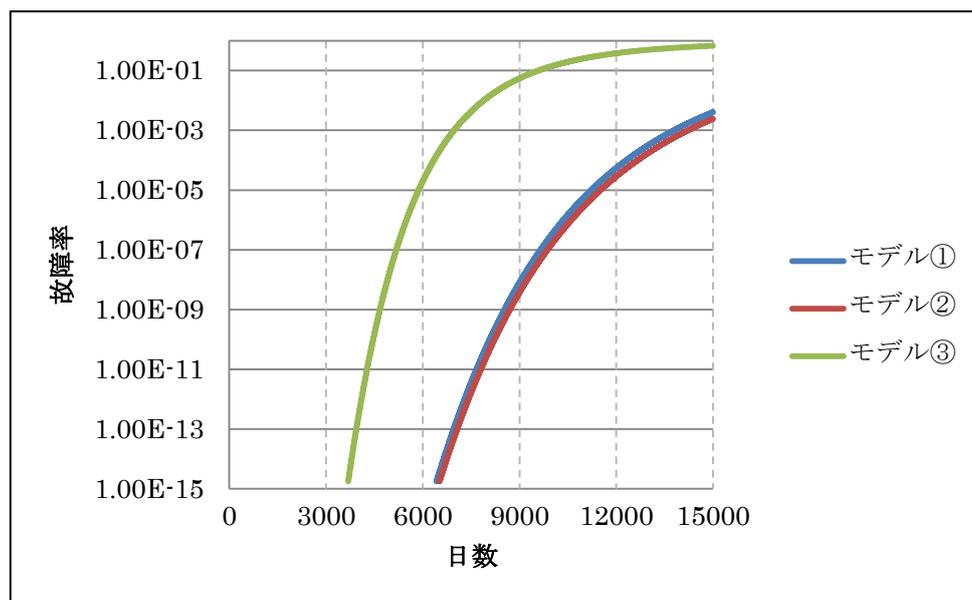


図 5.7 故障確率の変化 (S 駅 12 号分岐器)

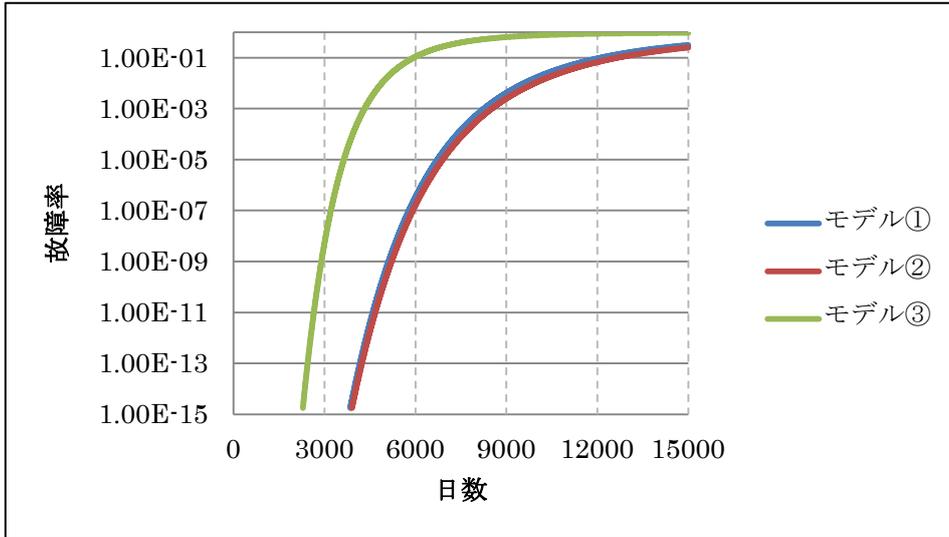


図 5.8 故障率の変化 (S 駅 14 号分岐器)

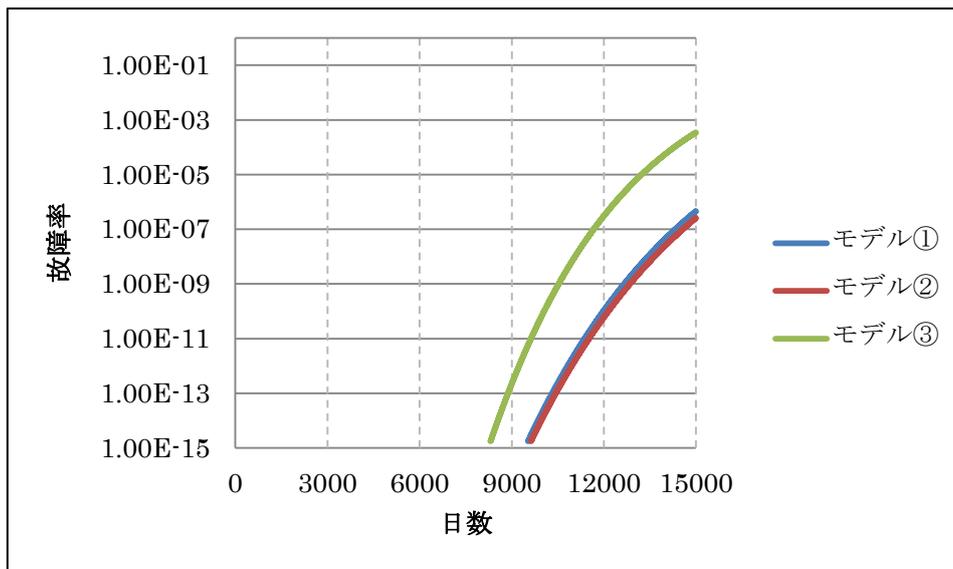


図 5.9 故障率の変化 (N 駅 852 号分岐器)

また、現在の交換周期における故障確率は表 5.2 のようになった。

駅・駅間	番号	分岐器種類	交換周期	モデル①	モデル②	モデル③
S 駅	12 号	普・関節	2555 日	0	0	0
S 駅	14 号	普・弾性	2555 日	0	0	1.34E-12
N 駅	852 号	特・弾性	365 日	0	0	0

表 5.2 現在の交換周期における故障確率

(ただし表の 0 は故障確率が $1.00E-15$ 以下であることを表わす)

5.4.2 <摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差>

次に、摩耗標準偏差が JR 東日本管内における通過トン数のばらつきに等しい場合の、日数による故障確率の変化を以下に示す。通過トン数のばらつきに等しいとは、通過トン数の分布を正規分布と近似し、標準偏差を平均値で割った係数が摩耗の正規分布における同様の係数と等しいという意味である。なお先ほどと同様に、縦軸には故障確率を対数表示し、横軸には日数をとった。

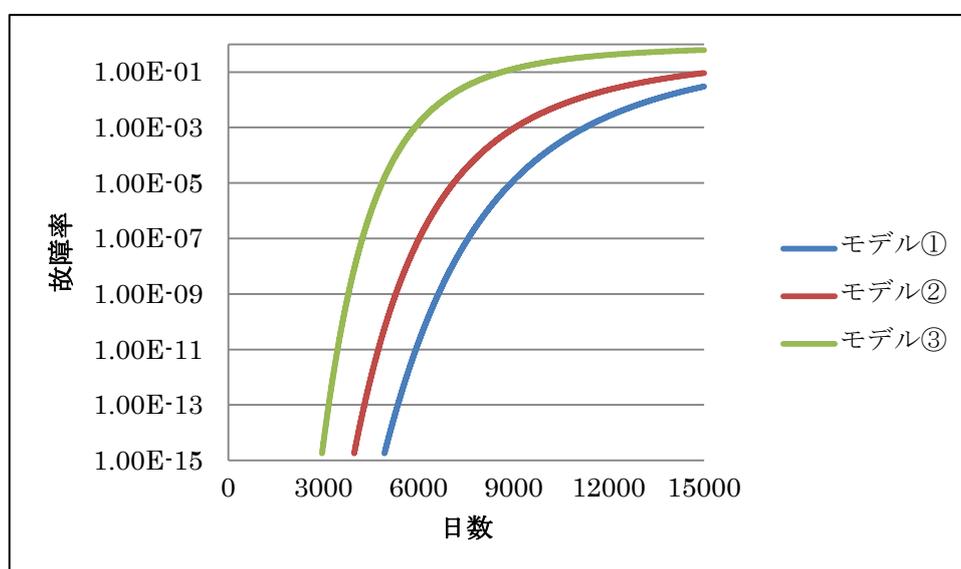


図 5.10 故障確率の変化 (S 駅 12 号分岐器)

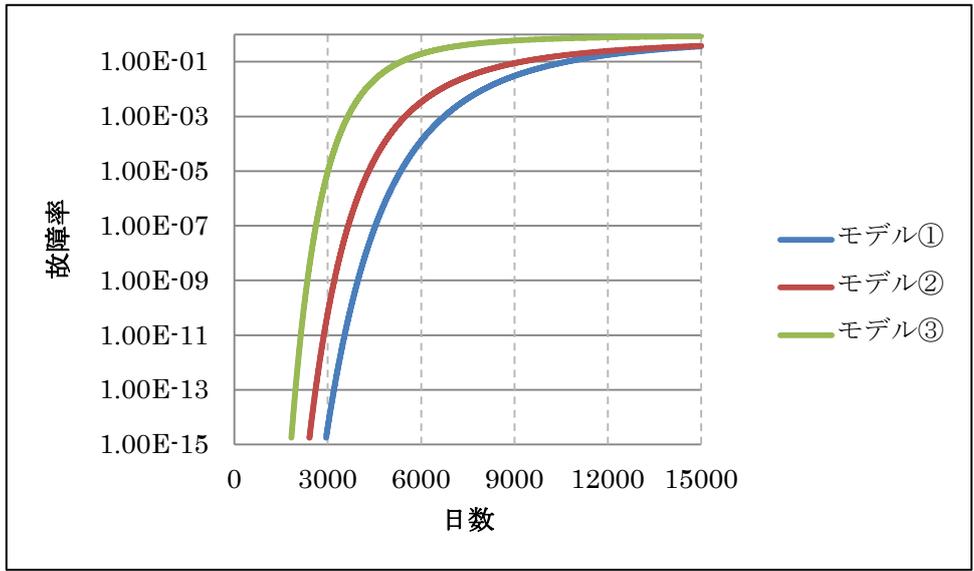


図 5.11 故障率の変化 (S 駅 14 号分岐器)

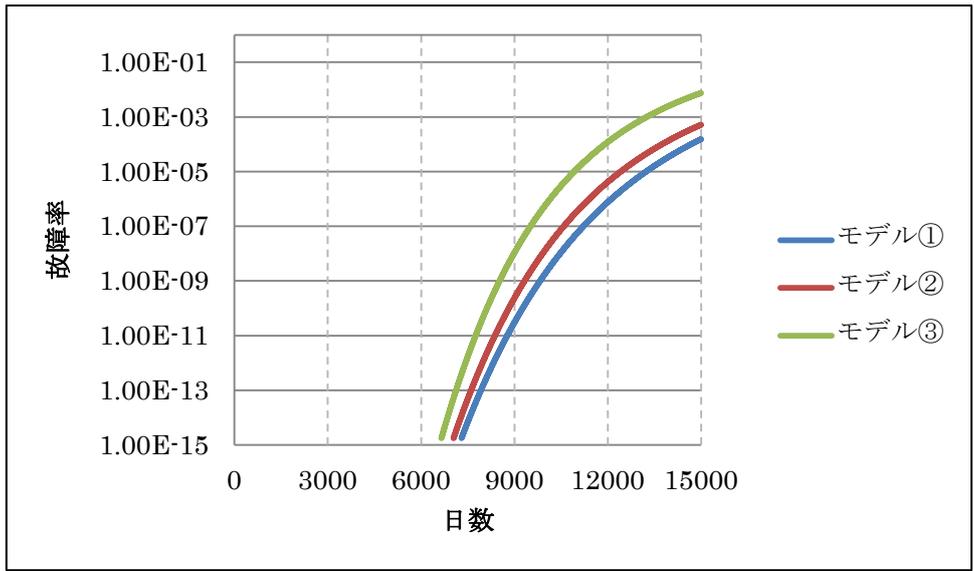


図 5.12 故障率の変化 (N 駅 852 号分岐器)

また、現在の交換周期における故障確率は表 5.3 のようになった。

駅・駅間	番号	分岐器 種類	交換周期	モデル①	モデル②	モデル③
S 駅	12 号	普・関節	2555 日	0	0	0
S 駅	14 号	普・弾性	2555 日	0	0	3.89E-08
N 駅	852 号	特・弾性	365 日	0	0	0

表 5.3 現在の交換周期における故障確率

(ただし表の 0 は故障確率が 1.00E-15 以下であることを表わす)

表 5.2 及び表 5.3 より、どのモデルや標準偏差を用いても、現在の交換周期ではかなり安全側に傾いた交換を行なっているという結果になった。

5.5 交換日数

先行研究において、故障確率をある値まで許容できる場合、その故障確率を許容確率と呼ぶことにした。許容確率を小さくとると故障を起こす台数は減るが、交換する周期は短くなり、コスト面で不利になる。しかし許容確率を大きくとると、交換周期は長くなるが故障を起こす台数が増える。本研究においても許容確率を設定し、許容確率に達した時点での日数を交換周期とする。

5.5.1 式

以下では、指標 β を用いて交換周期を算出する式を求める。

5.5.1.1 モデル①

一日当たり摩耗半径を R 、標準偏差を σ とすると、交換日数 t は(5.1)で求められる。

$$t = \frac{3R - \sqrt{9R^2 - 4(R^2 - \sigma^2\beta^2)(2.25 - 0.01\beta^2)}}{2R^2 - 2\sigma^2\beta^2} \quad (5.1)$$

5.5.1.2 モデル②

一日あたり摩耗体積を D 、標準偏差を σ とすると、交換日数 t は(5.2)および(5.3)で求められる。

$$S = \frac{25 - 22\sigma^2\beta^2 - \sqrt{(25 - 22\sigma^2\beta^2)^2 - 4(1 - \sigma^2\beta^2)\{156.25 - (121\sigma^2 + 0.01)\beta^2\}}}{2(1 - \sigma^2\beta^2)} \quad (5.2)$$

$$t = \frac{D}{\pi}(S^2 - 121) \quad (5.3)$$

5.5.1.3 モデル③

摩耗進行速度を V ，標準偏差を σ とすると，交換日数 t は(5.4)および(5.5)で求められる。

$$x = \frac{3 - \sqrt{9 - 4(1 - \sigma^2\beta^2)(2.25 - 0.01\beta^2)}}{2V(1 - \sigma^2\beta^2)} \quad (5.4)$$

$$t = x\alpha \quad (5.5)$$

これらの式(5.1)～(5.5)を用いて，測定分岐器における交換周期を求める。

5.5.2 交換日数<摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3>

表 5.4 に，摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差の場合において，許容確率を 1%，5%，10%とした時の交換日数の目安を示す。なお，モデル①～③において場合分けを行う。

			S 駅 12 号	S 駅 14 号	N 駅 852 号
許容確率	モデル①	1%	15995	9586	23738
		5%	18542	11112	27516
		10%	20212	12114	29996
	モデル②	1%	16587	9940	24492
		5%	19337	11588	28554
		10%	21158	12679	31243
	モデル③	1%	7885	4891	17774
		5%	8918	5532	20103
		10%	9583	5944	21601

表 5.4 許容確率別の交換周期表 (単位：日数)

5.5.3 交換日数<摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差>

次に摩耗標準偏差=通過トン数の標準偏差の場合において、許容確率を 1%、5%、10% とした時の交換日数の目安を表 5.5 に示す。表 5.4 と同様に、モデル①～③において場合分けを行う。

			S 駅 12 号	S 駅 14 号	N 駅 852 号
許容確率	モデル①	1%	13379	8019	19855
		5%	15994	9585	23735
		10%	17809	10673	26428
	モデル②	1%	13792	8265	20366
		5%	16585	9939	24490
		10%	18542	11111	27380
	モデル③	1%	6795	4215	15317
		5%	7884	4891	17773
		10%	8623	5349	19438

表 5.5 許容確率別の交換周期表 (単位：日数)

表 5.4 および表 5.5 より、任意の許容確率にけるモデル別の交換周期が導き出せることが分かった。摩耗標準偏差を通過トン数の標準偏差とした場合、摩耗平均値の 1/3 とした場合に比べて摩耗のばらつきが大きくなり故障率が大きく計算されるため、交換日数が早くなる結果となった。

5.6 考察

本章において、測定分岐器における交換周期の提言を行なった。その際、モデルや標準偏差の違いによって、交換周期に幅が出ることが分かった。次章では、本章の結果を用いて測定分岐器のみならず、全分岐器の交換周期を提言できるよう手法の拡大を行う。

第6章 全分岐器における交換周期

6.1 緒言

前章までにおいて、測定分岐器におけるフロントロッドの摩耗及び交換周期の算出を行ってきた。しかしこのままでは、交換周期を求めたい分岐器に対して摩耗測定実験を行い、摩耗平均などを算出しなくてはならない。ただ、鉄道においては膨大な数の分岐器が使われており、そのひとつひとつに摩耗測定実験を行うのは不可能である。

そのため、前章の交換周期決定法を用いて、個々に測定実験を行うことなく全分岐器の交換周期を求める手法を作成する。

JR 東日本において、全分岐器の設置条件に関するパラメータは年間通過トン数のみであるため、年間通過トン数を用いた摩耗予測及び交換周期の算出を行う。

6.2 算出方法

表 5.4 と表 5.5 の比較から分かるように、モデルのおよび摩耗標準偏差 σ が違うと交換周期がかなり変わることが分かった。交換周期を決定するためには、モデルと摩耗標準偏差の決定が重要となる。統計学において、これらの精度を上げるになるべく多くのサンプル(分岐器)において摩耗測定を行うことが重要である。

しかし、今回は計測された分岐器点数が統計学上十分でないため、仮定を用いて計算を行う。本研究においては軸受部の摩耗は通過トン数に比例すると仮定している(4章4節)。

測定された分岐器 A における摩耗半径を R_A , 列車通過トン数を K_A とすると、交換日数を計算したい分岐器 B (列車通過トン数 K_B) の摩耗半径 R_B は式(6.1)のようになる。

$$R_B = \frac{K_B}{K_A} \times R_A \quad (6.1)$$

また、本研究では先行研究と異なり、関節分岐器と弾性分岐器ではトングレールにかかる応力が異なるため、軸受部の摩耗進行も異なると仮定する。そのため前章と同様に、測定結果を普通分岐器関節方式、普通分岐器弾性方式、特殊分岐器弾性方式の 3 種に分けて考える。

測定実験摩耗半径 R_A に関しては、普通分岐器 2 種については左右の平均値を、特殊分岐器については測定 2 点×左右の計 4 点の平均値を使用する。

以上の条件の下、それぞれの分岐器方式で場合分けを行い、モデル①～③における交換周期を計算する。

6.3 普通分岐器関節方式

普通分岐器関節方式について，S 駅 12 号分岐器における測定結果を用いて計算を行う．代表的な通過トン数として，5，10，15，20，25，30，35，40，45，50(単位：百万トン/年)における表を作成する．

6.3.1 <摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3>

まず摩耗標準偏差が平均摩耗半径の 1/3 と仮定した場合における計算結果を表 6.1 に示す．縦軸は年間通過トン数(百万トン/年)をとり，横軸には許容確率 1%，5%，10%の 3 つの場合をとった．各通過トン数と許容確率との交点が交換周期である．交換周期の単位は年数とした．

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン 数 (百 万 ト ン / 年)	5	106.05	122.93	134.01	109.97	128.21	140.28	45.12	51.03	54.83
	10	53.03	61.47	67.01	54.99	64.10	70.14	25.32	28.64	30.77
	15	35.35	40.98	44.67	36.66	42.74	46.76	18.06	20.43	21.95
	20	26.51	30.73	33.50	27.49	32.05	35.07	14.21	16.07	17.27
	25	21.21	24.59	26.80	21.99	25.64	28.06	11.80	13.35	14.34
	30	17.68	20.49	22.34	18.33	21.37	23.38	10.14	11.46	12.32
	35	15.15	17.56	19.14	15.71	18.32	20.04	8.91	10.08	10.83
	40	13.26	15.37	16.75	13.75	16.03	17.54	7.98	9.02	9.69
	45	11.78	13.66	14.89	12.22	14.25	15.59	7.23	8.18	8.79
	50	10.61	12.29	13.40	11.00	12.82	14.03	6.62	7.49	8.05

単位：年

表 6.1 普通分岐器関節方式交換周期(摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3)

6.3.2 <摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差>

次に，摩耗標準偏差が通過トン数の標準偏差に等しい時の交換周期を表 6.2 に示す．

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン 数 (百万 トン / 年)	5	88.71	106.04	118.07	91.44	109.96	122.94	38.88	45.11	49.34
	10	44.35	53.02	59.04	45.72	54.98	61.47	21.82	25.32	27.69
	15	29.57	35.35	39.36	30.48	36.65	40.98	15.56	18.06	19.75
	20	22.18	26.51	29.52	22.86	27.49	30.73	12.25	14.21	15.54
	25	17.74	21.21	23.61	18.29	21.99	24.59	10.17	11.80	12.90
	30	14.78	17.67	19.68	15.24	18.33	20.49	8.74	10.14	11.09
	35	12.67	15.15	16.87	13.06	15.71	17.56	7.68	8.91	9.75
	40	11.09	13.26	14.76	11.43	13.74	15.37	6.87	7.98	8.72
	45	9.86	11.78	13.12	10.16	12.22	13.66	6.23	7.23	7.91
	50	8.87	10.60	11.81	9.14	11.00	12.29	5.71	6.62	7.24

単位：年

表 6.2 普通分岐器関節方式交換周期(摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差)

6.4 普通分岐器弾性方式

普通分岐器弾性方式の交換周期に関して，S 駅 14 号分岐器の測定結果を用いて計算を行う。6 章 3 節と同様に，代表的な通過トン数として 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50(単位：百万トン/年)における表を作成する。

6.4.1 <摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3>

摩耗標準偏差が平均摩耗半径の 1/3 と仮定した場合における計算結果を表 6.3 に示す。縦軸は年間通過トン数(百万トン/年)をとり，横軸には許容確率 1%，5%，10%の 3 つの場合をとった。交換周期の単位は年数とした。

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン 数 (百万 トン / 年)	5	74.59	86.46	94.25	77.34	90.16	98.66	31.98	36.17	38.87
	10	37.29	43.23	47.13	38.67	45.08	49.33	17.95	20.30	21.81
	15	24.86	28.82	31.42	25.78	30.05	32.89	12.80	14.48	15.56
	20	18.65	21.62	23.56	19.33	22.54	24.66	10.07	11.39	12.24
	25	14.92	17.29	18.85	15.47	18.03	19.73	8.36	9.46	10.16
	30	12.43	14.41	15.71	12.89	15.03	16.44	7.19	8.13	8.73
	35	10.66	12.35	13.46	11.05	12.88	14.09	6.32	7.15	7.68
	40	9.32	10.81	11.78	9.67	11.27	12.33	5.65	6.39	6.87
	45	8.29	9.61	10.47	8.59	10.02	10.96	5.12	5.80	6.23
	50	7.46	8.65	9.43	7.73	9.02	9.87	4.69	5.31	5.70

単位：年

表 6.3 普通分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3)

6.4.2 <摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差>

次に、摩耗標準偏差が通過トン数の標準偏差に等しい時の交換周期を表 6.4 に示す。

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン 数 (百 万 ト ン / 年)	5	62.39	74.58	83.04	64.31	77.33	86.46	27.56	31.98	34.97
	10	31.20	37.29	41.52	32.15	38.67	43.23	15.47	17.95	19.63
	15	20.80	24.86	27.68	21.44	25.78	28.82	11.03	12.80	14.00
	20	15.60	18.65	20.76	16.08	19.33	21.61	8.68	10.07	11.02
	25	12.48	14.92	16.61	12.86	15.47	17.29	7.21	8.36	9.15
	30	10.40	12.43	13.84	10.72	12.89	14.41	6.19	7.18	7.86
	35	8.91	10.65	11.86	9.19	11.05	12.35	5.45	6.32	6.91
	40	7.80	9.32	10.38	8.04	9.67	10.81	4.87	5.65	6.18
	45	6.93	8.29	9.23	7.15	8.59	9.61	4.42	5.12	5.60
	50	6.24	7.46	8.30	6.43	7.73	8.65	4.05	4.69	5.13

単位：年

表 6.4 普通分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差)

6.5 特殊分岐器弾性方式

特殊分岐器弾性方式の交換周期に関して、N 駅 852 号分岐器の測定結果を用いて計算を行う。6 章 3 節と同様に、代表的な通過トン数として 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50(単位：百万トン/年)における表を作成する。

6.5.1 <摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3>

摩耗標準偏差が平均摩耗半径の 1/3 と仮定した場合における計算結果を表 6.5 に示す。縦軸は年間通過トン数(百万トン/年)をとり、横軸には許容確率 1%, 5%, 10%の 3 つの場合をとった。交換周期の単位は年数とした。

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン 数 (百万 トン / 年)	5	535.88	621.18	677.16	552.92	644.61	705.32	282.34	319.33	343.13
	10	267.94	310.59	338.58	276.46	322.30	352.66	158.46	179.22	192.58
	15	178.63	207.06	225.72	184.31	214.87	235.11	113.03	127.83	137.36
	20	133.97	155.30	169.29	138.23	161.15	176.33	88.93	100.58	108.08
	25	107.18	124.24	135.43	110.58	128.92	141.06	73.84	83.51	89.74
	30	89.31	103.53	112.86	92.15	107.43	117.55	63.43	71.74	77.09
	35	76.55	88.74	96.74	78.99	92.09	100.76	55.79	63.09	67.80
	40	66.99	77.65	84.65	69.12	80.58	88.17	49.91	56.45	60.66
	45	59.54	69.02	75.24	61.44	71.62	78.37	45.25	51.17	54.99
	50	53.59	62.12	67.72	55.29	64.46	70.53	41.44	46.87	50.36

単位：年

表 6.5 特殊分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差＝平均摩耗半径×1/3)

6.5.2 <摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差>

次に、摩耗標準偏差が通過トン数の標準偏差に等しい時の交換周期を表 6.6 に示す。

		許容確率								
		モデル①			モデル②			モデル③		
		1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
通過 トン数 (百万 トン/ 年)	5	448.24	535.83	596.63	459.77	552.86	618.11	243.30	282.32	308.77
	10	224.12	267.91	298.31	229.89	276.43	309.05	136.55	158.45	173.29
	15	149.41	178.61	198.88	153.26	184.29	206.04	97.40	113.02	123.60
	20	112.06	133.96	149.16	114.94	138.22	154.53	76.64	88.92	97.26
	25	89.65	107.17	119.33	91.95	110.57	123.62	63.63	73.84	80.75
	30	74.71	89.30	99.44	76.63	92.14	103.02	54.66	63.43	69.37
	35	64.03	76.55	85.23	65.68	78.98	88.30	48.07	55.78	61.01
	40	56.03	66.98	74.58	57.47	69.11	77.26	43.01	49.91	54.58
	45	49.80	59.54	66.29	51.09	61.43	68.68	38.99	45.24	49.48
	50	44.82	53.58	59.66	45.98	55.29	61.81	35.71	41.44	45.32

単位：年

表 6.6 特殊分岐器弾性方式交換周期(摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差)

6.6 交換周期決定手順

通過トン数を用いて交換周期を決定する手順は以下の通りである。

1. 実機測定結果を元に、摩耗モデルを決定する。
2. 実機測定結果を元に、摩耗平均値と摩耗標準偏差の関係を決定する。
3. 振動実験結果を元に、係数 α を決定する。(摩耗モデル③の場合のみ)
4. 許容確率を決定する。
5. 表 6.1～表 6.6 より交換周期を読み取る。
6. 交換周期を決定したい分岐器の種類および年間通過トン数を調べる。

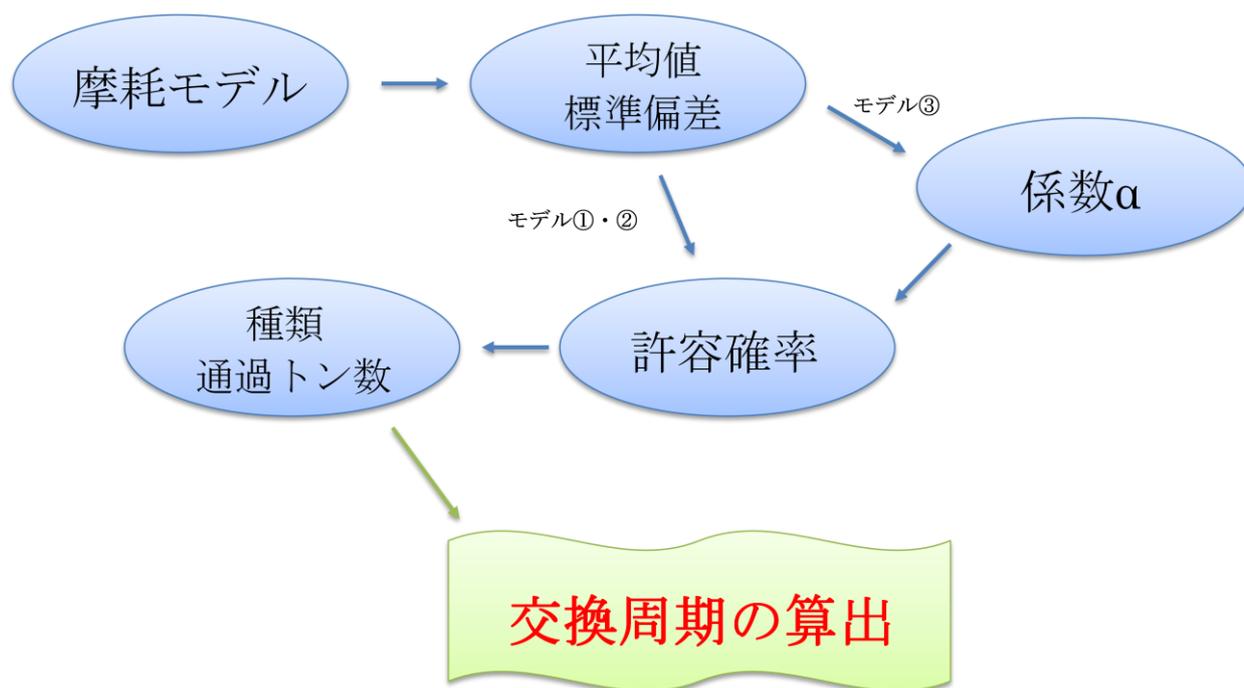


図 6.1 交換周期フローチャート

6.7 考察

摩耗のモデル化および標準偏差の仮定により，分岐器の種類と通過トン数を把握できれば交換周期が決定できる。

全分岐器において，モデル①・②に比べてモデル③の交換周期のほうが短く計算された。これは，モデル①・②では摩耗がほぼ線形的に進行するが，モデル③では対数的に進行するからであると考えられる。

第7章 結論

7.1 結論

本研究においては、転てつ機付属部品であるフロントロッドの軸受部摩耗についての研究を行った。実験によって摩耗の進行状況を把握し、摩耗のモデル化を行うことで、フロントロッドの交換周期を決定することができる。

7.2 課題

本研究においては、先行研究におけるモデルに加え、振動実験結果を用いて新しい摩耗モデルを作成した。しかし、データ点数が少ないために、どのモデルが実際の摩耗進行に近いかという判断が出来ず、また多くの部分で仮定を置かざるを得なかった。そのため、なるべく多くの実地測定試験や振動試験を行い、モデルの精度を上げ、仮定を決定する必要がある。

さらに、共同研究先の JR 東日本テクニカルセンターによる振動試験において、フロントロッドの固定方法が実際に設置されている状況と違っている可能性があり、また振動のかけ方にも問題が見られた。本研究において振動試験の目的は、摩耗量を知るのではなく摩耗の進行スタイルを知ることであったため、これらの問題は影響を及ぼさないと判断して実験結果を採用した。しかし、方法を再検討して正しい方法で振動実験を行うことによって、摩耗量も知ることができ、現場では何日もかかるような摩耗の観測を、かなり早い期間で行うことが可能となる。そのため、固定方法などを検討し、今後の研究に採用していきたい。

7.3 今後必要なデータ

今後も研究を進めていくにあたり、以下のデータが必要であると考えられる。

- ・実地測定による摩耗データ(摩耗平均値および摩耗標準偏差決定のため)
- ・振動試験による摩耗の途中測定データ(摩耗モデルを把握するため)

付録

第6章で導いたフローチャートを使って、JR 東日本管内において実際に使用されている分岐器における交換周期を示す。

なお、この付録においては許容確率を1%に設定した。

<摩耗標準偏差=平均摩耗半径×1/3> の場合

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通/特殊	関節/弾性				モデル①	モデル②	モデル③
普通	関節	横須賀線	AA	9.1	58.27	60.42	27.39
普通	関節	横須賀線	AB	10.1	52.50	54.44	25.11
普通	関節	横浜線	AC	15.4	34.43	35.71	17.67
普通	関節	根岸線	AD	32.3	16.42	17.02	9.53
普通	関節	常磐(緩行)線	AE	18.6	28.51	29.56	15.10
普通	関節	青梅線	AF	3.7	143.31	148.61	57.99
普通	関節	青梅線	AG	5	106.05	109.97	45.12
普通	関節	青梅線	AH	4.5	117.84	122.19	49.26
普通	関節	青梅線	AI	16.6	31.94	33.12	16.60
普通	関節	青梅線	AJ	3.4	155.96	161.72	62.22
普通	関節	相模線	AK	8.3	63.89	66.25	29.58
普通	関節	相模線	AL	7.8	67.98	70.49	31.15
普通	関節	総武本線	AM	17.1	31.01	32.16	16.19
普通	関節	中央本線	AN	7.6	69.77	72.35	31.83
普通	関節	中央本線	AO	7.8	67.98	70.49	31.15
普通	関節	鶴見線	AP	2.1	252.51	261.84	92.96
普通	関節	東海道線(貨物)	AQ	22.7	23.36	24.22	12.79
普通	関節	東北本線	AR	36.1	14.69	15.23	8.69
普通	関節	東北本線	AS	37.2	14.25	14.78	8.47
普通	関節	東北本線	AT	22.4	23.67	24.55	12.93
普通	関節	日光線	AU	2.7	196.39	203.65	75.40
普通	関節	日光線	AV	2.9	182.85	189.61	71.04
普通	関節	八高線	AW	4.3	123.32	127.87	51.16
普通	関節	武蔵野線	AX	15.7	33.77	35.02	17.39
普通	関節	武蔵野線	AY	20.6	25.74	26.69	13.87

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通／特殊	関節／弾性				モデル①	モデル②	モデル③
普通	弾性	横須賀線	BA	19.5	19.13	19.83	10.29
普通	弾性	高崎線	BB	30.6	12.19	12.64	7.07
普通	弾性	埼京線	BC	19.2	19.42	20.14	10.42
普通	弾性	山手線(貨物)	BD	38.3	9.74	10.10	5.86
普通	弾性	山手線(貨物)	BE	37.6	9.92	10.28	5.95
普通	弾性	山手線(貨物)	BF	38.3	9.74	10.10	5.86
普通	弾性	山手線(電車)	BG	38.6	9.66	10.02	5.82
普通	弾性	山手線(電車)	BH	25.2	14.80	15.34	8.31
普通	弾性	常磐(快速)線	BI	18.6	20.05	20.79	10.70
普通	弾性	常磐(快速)線	BJ	8.9	41.90	43.45	19.78
普通	弾性	常磐(快速)線	BK	37.3	10.00	10.37	5.99
普通	弾性	常磐線	BL	13.5	27.63	28.64	13.98
普通	弾性	常磐線	BM	19.8	18.84	19.53	10.16
普通	弾性	常磐線(貨物)	BN	9	41.44	42.97	19.60
普通	弾性	青梅線	BO	16.3	22.88	23.72	11.95
普通	弾性	川越線	BP	19.1	19.53	20.25	10.47
普通	弾性	総武快速線	BQ	30.5	12.23	12.68	7.09
普通	弾性	総武快速線	BR	30.5	12.23	12.68	7.09
普通	弾性	総武快速線	BS	29.7	12.56	13.02	7.25
普通	弾性	中央(緩行)線	BT	40.7	9.16	9.50	5.57
普通	弾性	中央線	BU	41.3	9.03	9.36	5.50
普通	弾性	中央本線	BV	25.2	14.80	15.34	8.31
普通	弾性	中央本線	BW	28.4	13.13	13.62	7.52
普通	弾性	中央本線	BX	28.8	12.95	13.43	7.43
普通	弾性	中央本線	BY	30.3	12.31	12.76	7.13
普通	弾性	中央本線	BZ	29	12.86	13.33	7.39
普通	弾性	中央本線	B1	44.1	8.46	8.77	5.21
普通	弾性	中央本線	B2	14.2	26.26	27.23	13.40
普通	弾性	中央本線	B3	25.9	14.40	14.93	8.12
普通	弾性	中央本線	B4	11.9	31.34	32.50	15.53
普通	弾性	中央本線	B5	12.2	30.57	31.70	15.21
普通	弾性	中央本線	B6	25.9	14.40	14.93	8.12
普通	弾性	中央本線	B7	38.6	9.66	10.02	5.82
普通	弾性	中央本線	B8	7.5	49.73	51.56	22.81
普通	弾性	中央本線	B9	37	10.08	10.45	6.03
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B10	18.7	19.94	20.68	10.65
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B11	18.3	20.38	21.13	10.85
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B12	34	10.97	11.37	6.47
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B13	21.3	17.51	18.15	9.56
普通	弾性	東海道線(貨物)	B14	22.7	16.43	17.03	9.06
普通	弾性	東海道線(貨物)	B15	30.3	12.31	12.76	7.13
普通	弾性	東海道線(電車)	B16	27.9	13.37	13.86	7.63
普通	弾性	東海道本線	B17	34.3	10.87	11.27	6.43
普通	弾性	東海道本線(客)	B18	30.3	12.31	12.76	7.13
普通	弾性	東海道本線(客)	B19	24.8	15.04	15.59	8.42
普通	弾性	東海道本線(客)	B20	35.1	10.63	11.02	6.30
普通	弾性	東北線(常磐)	B21	31.7	11.76	12.20	6.86

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通／特殊	関節／弾性				モデル①	モデル②	モデル③
特殊	弾性	東海道本線(客)	CA	28.8	93.04	95.99	65.63
特殊	弾性	東海道本線(客)	CB	33.6	79.74	82.28	57.72
特殊	弾性	東海道本線(客)	CC	32.3	82.95	85.59	59.65
特殊	弾性	東海道線(横須賀)	CD	18.3	146.42	151.07	95.77
特殊	弾性	東海道線(横須賀)	CE	21.3	125.79	129.79	84.39
特殊	弾性	中央(緩行)線	CF	25.9	103.45	106.74	71.70
特殊	弾性	横須賀線	CG	33.8	79.27	81.79	57.43

<摩耗標準偏差＝通過トン数の標準偏差>の場合

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通／特殊	関節／弾性				モデル①	モデル②	モデル③
普通	関節	横須賀線	AA	9.1	48.74	50.24	23.60
普通	関節	横須賀線	AB	10.1	43.91	45.27	21.64
普通	関節	横浜線	AC	15.4	28.80	29.69	15.23
普通	関節	根岸線	AD	32.3	13.73	14.16	8.21
普通	関節	常磐(緩行)線	AE	18.6	23.85	24.58	13.01
普通	関節	青梅線	AF	3.7	119.88	123.57	49.97
普通	関節	青梅線	AG	5	88.71	91.44	38.88
普通	関節	青梅線	AH	4.5	98.56	101.61	42.45
普通	関節	青梅線	AI	16.6	26.72	27.54	14.30
普通	関節	青梅線	AJ	3.4	130.45	134.48	53.62
普通	関節	相模線	AK	8.3	53.44	55.09	25.49
普通	関節	相模線	AL	7.8	56.86	58.62	26.84
普通	関節	総武本線	AM	17.1	25.94	26.74	13.95
普通	関節	中央本線	AN	7.6	58.36	60.16	27.43
普通	関節	中央本線	AO	7.8	56.86	58.62	26.84
普通	関節	鶴見線	AP	2.1	211.21	217.73	80.11
普通	関節	東海道線(貨物)	AQ	22.7	19.54	20.14	11.02
普通	関節	東北本線	AR	36.1	12.29	12.67	7.49
普通	関節	東北本線	AS	37.2	11.92	12.29	7.30
普通	関節	東北本線	AT	22.4	19.80	20.41	11.14
普通	関節	日光線	AU	2.7	164.27	169.34	64.97
普通	関節	日光線	AV	2.9	152.94	157.66	61.22
普通	関節	八高線	AW	4.3	103.15	106.33	44.09
普通	関節	武蔵野線	AX	15.7	28.25	29.12	14.98
普通	関節	武蔵野線	AY	20.6	21.53	22.20	11.95

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通／特殊	関節／弾性				モデル①	モデル②	モデル③
普通	弾性	横須賀線	BA	19.5	16.00	16.49	8.87
普通	弾性	高崎線	BB	30.6	10.19	10.51	6.09
普通	弾性	埼京線	BC	19.2	16.25	16.75	8.98
普通	弾性	山手線(貨物)	BD	38.3	8.15	8.40	5.05
普通	弾性	山手線(貨物)	BE	37.6	8.30	8.55	5.13
普通	弾性	山手線(貨物)	BF	38.3	8.15	8.40	5.05
普通	弾性	山手線(電車)	BG	38.6	8.08	8.33	5.02
普通	弾性	山手線(電車)	BH	25.2	12.38	12.76	7.16
普通	弾性	常磐(快速)線	BI	18.6	16.77	17.29	9.22
普通	弾性	常磐(快速)線	BJ	8.9	35.05	36.13	17.04
普通	弾性	常磐(快速)線	BK	37.3	8.36	8.62	5.16
普通	弾性	常磐線	BL	13.5	23.11	23.82	12.04
普通	弾性	常磐線	BM	19.8	15.76	16.24	8.75
普通	弾性	常磐線(貨物)	BN	9	34.66	35.73	16.89
普通	弾性	青梅線	BO	16.3	19.14	19.73	10.29
普通	弾性	川越線	BP	19.1	16.33	16.83	9.02
普通	弾性	総武快速線	BQ	30.5	10.23	10.54	6.11
普通	弾性	総武快速線	BR	30.5	10.23	10.54	6.11
普通	弾性	総武快速線	BS	29.7	10.50	10.83	6.24
普通	弾性	中央(緩行)線	BT	40.7	7.66	7.90	4.80
普通	弾性	中央線	BU	41.3	7.55	7.79	4.74
普通	弾性	中央本線	BV	25.2	12.38	12.76	7.16
普通	弾性	中央本線	BW	28.4	10.98	11.32	6.48
普通	弾性	中央本線	BX	28.8	10.83	11.16	6.41
普通	弾性	中央本線	BY	30.3	10.30	10.61	6.14
普通	弾性	中央本線	BZ	29	10.76	11.09	6.37
普通	弾性	中央本線	B1	44.1	7.07	7.29	4.49
普通	弾性	中央本線	B2	14.2	21.97	22.64	11.55
普通	弾性	中央本線	B3	25.9	12.04	12.41	7.00
普通	弾性	中央本線	B4	11.9	26.21	27.02	13.38
普通	弾性	中央本線	B5	12.2	25.57	26.36	13.11
普通	弾性	中央本線	B6	25.9	12.04	12.41	7.00
普通	弾性	中央本線	B7	38.6	8.08	8.33	5.02
普通	弾性	中央本線	B8	7.5	41.59	42.87	19.66
普通	弾性	中央本線	B9	37	8.43	8.69	5.20
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B10	18.7	16.68	17.19	9.18
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B11	18.3	17.05	17.57	9.35
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B12	34	9.18	9.46	5.58
普通	弾性	東海道線(横須賀)	B13	21.3	14.65	15.10	8.24
普通	弾性	東海道線(貨物)	B14	22.7	13.74	14.17	7.81
普通	弾性	東海道線(貨物)	B15	30.3	10.30	10.61	6.14
普通	弾性	東海道線(電車)	B16	27.9	11.18	11.52	6.58
普通	弾性	東海道本線	B17	34.3	9.09	9.37	5.54
普通	弾性	東海道本線(客)	B18	30.3	10.30	10.61	6.14
普通	弾性	東海道本線(客)	B19	24.8	12.58	12.97	7.26
普通	弾性	東海道本線(客)	B20	35.1	8.89	9.16	5.43
普通	弾性	東北線(常磐)	B21	31.7	9.84	10.14	5.91

分岐器種別		通称線区名	駅・駅間	通過トン数 (百万トン)	交換周期(年)		
普通／特殊	関節／弾性				モデル①	モデル②	モデル③
特殊	弾性	東海道本線(客)	CA	28.8	77.82	79.82	56.55
特殊	弾性	東海道本線(客)	CB	33.6	66.70	68.42	49.74
特殊	弾性	東海道本線(客)	CC	32.3	69.39	71.17	51.40
特殊	弾性	東海道線(横須賀)	CD	18.3	122.47	125.62	82.52
特殊	弾性	東海道線(横須賀)	CE	21.3	105.22	107.93	72.72
特殊	弾性	中央(緩行)線	CF	25.9	86.53	88.76	61.78
特殊	弾性	横須賀線	CG	33.8	66.31	68.01	49.49

参考文献

- [1] 村中亮太 「転てつ装置の耐用寿命に関する提言」 2011
- [2] 日本機械学会 「荷重・耐力係数法による信頼性評価」 2011/12/07
- [3] JR 東日本社内講座教本 「施設技術入門」
- [4] JR 東日本社内説明用資料
- [5] 星谷勝 石井清 著 「構造物の信頼性設計法」 鹿島出版会 1986/05

謝辞

本論文の作成にあたり，ご多忙でありながらご指導して下さった酒井教授・泉准教授に深く感謝いたします。また，盛り上げ係として研究室の雰囲気をもくして下さった田中展助教に心から感謝します。さらに先行研究を担当し，私に助言を下された村中先輩，ありがとうございました。

打ち合わせの際に，的確な指摘やアドバイスを下さった群馬大学岩崎准教授，実験の妥当性を検証するためにモード解析実験を行って頂いた NV Solutions の菅原様，本当にありがとうございました。

また写真や情報を論文用に提供していただき，実際の技術者の目線からアドバイスを下さった東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センターの本間様・市倉様・鈴木様，研究に協力していただいた東日本旅客鉄道株式会社様に深く感謝いたします。

さらに寮生活においてリラックスできる環境を作ってくれた後輩諸君や同輩の皆さま，石光寮長および食堂のおばちゃん，佐藤寮母，ありがとうございました。

研究の息抜きに読んでいた美味しんぼの作者である原作者の雁屋哲様及び作画の花咲アキラ様，これからもシリーズを続けて下さい。

以上，研究に関わった全ての人に感謝の意を表します。

以上

p.1～p.73 完

平成 24 年 2 月 3 日提出

指導教員 酒井信介教授

03100172 池田和寛