

リスクを考慮した軌道変位保守計画モデルの構築

三和 雅史* 水野 真敏*

Modeling an Optimal Track Maintenance Schedule in Consideration of Train Derailment Accident Risk

Masashi MIWA Masatoshi MIZUNO

Through appropriate maintenance work, railway track irregularities must be kept at a satisfactory level in terms of train derailment accident risk. Therefore, we have developed an optimal decision making model for tamping work schedules in accordance with the magnitude of the risk. In order to determine the schedule, the model was developed based on the result of statistical model analyses in consideration of the influence of the accident and the probability of the accidents caused by track irregularities. Using the model, we can obtain an optimal track maintenance schedule in consideration of the risk.

キーワード：列車脱線事故，軌道変位保守計画，リスクベースメンテナンス

1. はじめに

これまで、軌道変位（狂い）の推移履歴データから保守が必要な箇所を適切に選定し、効率的な軌道変位保守計画を作成するモデルやシステムを開発し、一部の鉄道事業者では計画策定の支援ツールとして活用されている¹⁾。本モデル等では軌道状態の最良化を目的関数としていたが、軌道変位の悪化に伴って高まる列車脱線事故の発生リスクも考慮して、保守箇所や時期を選択、検討する必要がある。

以上より、リスクを考慮した軌道変位保守計画モデルを構築し、その有効性を検証した。

2. 列車脱線事故に関するリスクの推計モデル

2.1 モデルの考え方

脱線事故のうち、軌間内脱線は木まくらぎを主体とする閑散線区（主に単線）において低速での発生事例が多いことや軌道から逸脱する可能性が低いことから、リスクとしては小さいと考え、乗り上がり脱線を対象としたリスク推計モデルを図1に示す考え方により構築する。

乗り上がり脱線のリスクは、脱線の発生確率と発生時のコストの積により算出する。この発生確率は、軌道変位と線形諸元、車両・運転条件を考慮して算出する。また、脱線事故発生時のコストについては、車両・運転条件、軌道敷設条件、列車条件、事故発生時のイベントの発生確率とから算出する。ここでのイベントとは、脱線事故に付随して発生する様々な事象である。被害者数について

では、各イベントを考慮して推計し、合わせて発生する車両被害等についても推計する。そして、事故発生時の被害単価を考慮して各イベント（発生確率考慮済）に対応したコストを算定し、それを合算して脱線事故発生時のコストを推計する。

最後に、以上のように得られたコストと脱線発生確率の積により、脱線事故リスクを推計する。

2.2 乗り上がり脱線事故の発生モデル

乗り上がり脱線の発生確率については、列車走行時に発生すると考えられる推定脱線係数が限界脱線係数を上回る確率を用いる²⁾。推定脱線係数が限界脱線係数を上回ると必ず脱線するものではないが、各箇所のリスクを相対的に比較、評価することが目的である場合には、この確率を脱線発生確率として用いることは適切と考えられる。各脱線係数の算定には、低速時の乗り上がり脱線に関する安全性の評価式を用いる。本式では、通り変位と平面性変位が入力データとなることから、これらの軌道変位に着目して乗り上がり脱線の発生モデルを検討する。

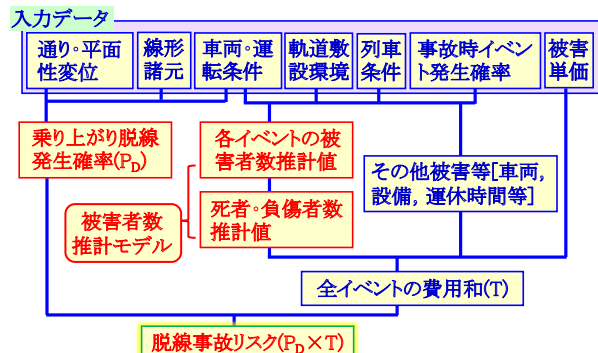


図1 リスク推計モデル

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

特集：軌道技術

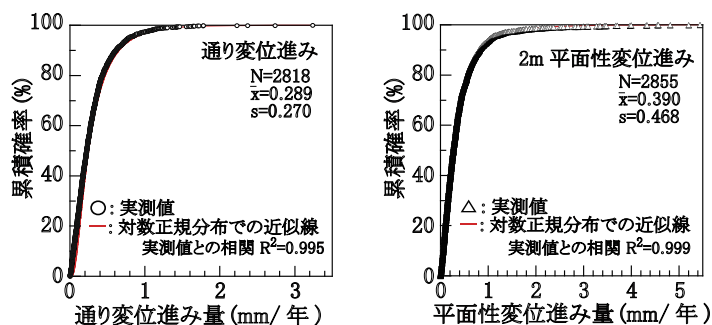


図2 通り，平面性変位進みの分布

2.2.1 通り，平面性変位進みの分析

在来線（曲線部）での外軌側通り変位（10m 弦正矢）進みと平面性（2m）変位進みの実測データを分析する。25m ロットにおける各軌道変位の最大値の進み量の分布を各々図2に示す。本分布に対して，正規分布，指数分布，対数正規分布，ロジスティック分布，対数ロジスティック分布への適合度を調べた結果，両進み量とも対数正規分布への適合度が高かった。よって，各軌道変位進み量を確率変数と考え，対数正規分布によりモデル化する。また，この軌道変位進み間の相関は小さかったことから，両軌道変位の増加を考慮して脱線の発生確率を推計する場合，各軌道変位進みを独立な変数として扱うこととする。

2.2.2 脱線事故の発生確率の推計

表1に示す計算条件下において，通り変位と平面性変位の初期値を3通りに設定し，図2に示した対数正規分布に従う乱数を10,000個発生させて各軌道変位の初期値と合算し，1年間保守を行わない場合を想定して脱線係数を算出する確率シミュレーションを行った。得られた推定脱線係数の分布と限界脱線係数の超過確率を図3に示す。推定脱線係数が限界脱線係数を超える確率は，いずれの計算条件でも低いが，軌道変位が増加すると大きくなる。

以上のように，軌道変位の大きさを考慮して脱線の発生確率を推計できる。

2.3 被害者数の推計

2.3.1 列車脱線事故における被害者数の推計モデル

我が国の鉄道事故に関する情報をまとめた代表的なものとして，運輸安全委員会の鉄道事故調査報告書が挙げられる。そこで，この報告書（2001.10～2011.5に公表分の116件）のうち，列車脱線事故に関するデータを分析し，列車脱線事故における被害者数の推計モデルを構築する³⁾。

2.3.2 被害者数の発生状況

列車脱線事故の被害者数（乗客，乗務員）の分布を降順で図4に示す。分析したデータにおける最大被害者数の事故は，通勤列車が高速で脱線して建築物に衝突した

表1 計算条件

車両重量	32tf
速度	30km/h
曲線半径	400m
カント	105mm
カント減倍率	400倍
通り変位	5,7,10mm
2m平面性変位	3,5,7mm
台車間平面性変位	5mm
限界脱線係数	1.6

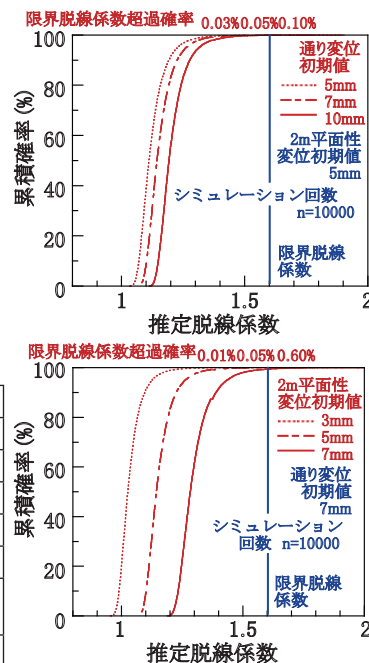


図3 シミュレーション結果

ものであることから，脱線後の車両の挙動や速度，乗客数等が被害規模に影響すると考えられる。そこで，本図では「車両の転覆や転落の有無（貨車を除く）」，「重量物（鉄道車両，建築物，大型自動車，普通貨物自動車，1m以上の岩，車止め，多くの土砂や雪崩，丸太や大木）との衝突の有無」，「シートタイプの差異（サバイバルファクターの1つ）」を区別した。

70%以上の事故においては被害者数が0人であるが，転覆等を伴う事故では全事故で被害者が発生した。また，転覆等や重量物への衝突を伴う事故では被害者数が多い傾向にある。一方，シートタイプが被害者数に与える影響は明確ではないように見えるが，被害者数の多い事故の多くは転覆等や重量物への衝突を伴っており，これらの方が被害拡大要因として大きかったと考えられる。そこで，転覆等や重量物への衝突を伴った事故を除くと，被害者が発生した事故の2/3はロングシート車でのものであり，平均被害者数も若干多い。

以上より，転覆等や重量物との衝突の有無，シートタイプの差異が被害者率（乗車人数に占める被害者の割合：被害者数/乗車人数），死者率（被害者数に占める死者の割合：死者数/被害者数）に与える影響を分析する。車両の転覆等の有無を考慮して算定した被害者率，死者率の平均値を表2に示し，この平均値の差をt-検定により分析した結果を表3に示す。

(1) 車両の転覆等の有無と被害者数

被害者率は，転覆等した車両では約92%と高いのに対し，転覆等しなかった車両では約6.7%に留まり，死者率も転覆等した車両の方が大きい。また，t-検定の結

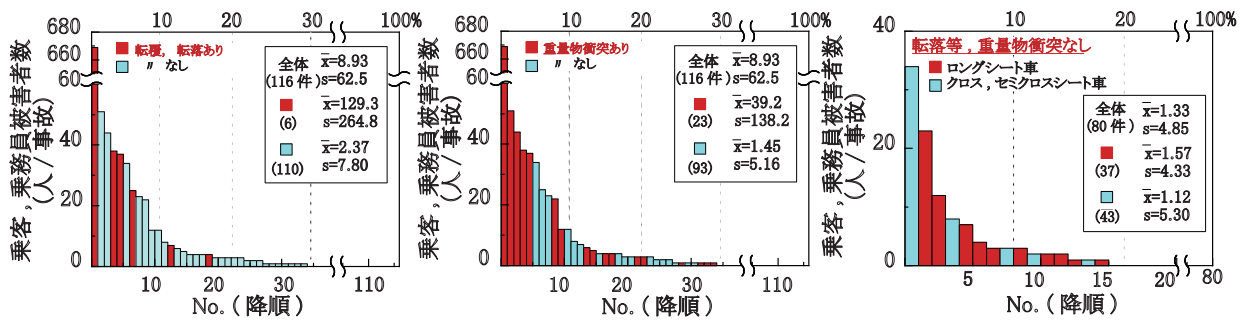


図4 列車脱線事故被害者数分布

果、被害者率、死者率とも転覆等の有無による差は有意である。よって、転覆等の有無は被害者率や死者率に影響すると考えられる。

(2) 重量物等への衝突の有無と被害者数

(1)の結果に基づいて、車両の転覆等の有無を分類した上で、列車の脱線前後における重量物への衝突の有無を考慮して被害者率、死者率の平均値を算定した。

被害者率は、転覆等した車両では衝突の有無に関わらず90～93%程度である。一方、転覆等しなかった車両では、衝突ありの場合に約24%、なしの場合に約1.6%と差が大きい。t-検定の結果でも、転覆等しなかった車両では衝突の有無に有意な差がみられた。

死者率については、転覆等した車両、しなかった車両とも重量物との衝突の有無は有意な差として認められなかった。

以上のことから、転覆等しなかった車両においては、重量物への衝突の有無は被害者率に大きく影響すると考えられる。

(3) シートタイプの差異と被害者数

(2)の結果に基づいて、車両の転覆等や重量物との衝突の有無を分類した上で、シートタイプの差異を考慮して被害者率、死者率の平均値を算定した。

被害者率については、転覆等した車両に関するデータを重量物への衝突の有無で分類するとデータ数は少ないため、シートタイプの影響は不明である。転覆等しなかった車両では、重量物への衝突があった場合の被害者率は約21%（ロングシート）、26%（クロスシート）と差が小さいが、重量物への衝突がなかった場合には2.7%（ロングシート）、0.65%（クロスシート）と差が若干大きい。t-検定の結果では、「転覆等を伴わなかった車両」で、かつ「重量物への衝突を伴わなかった車両」の場合にシートタイプ間の差異が認められた。一方、死者率には、シートタイプが与える有意な差はなかった。

以上のことから、転覆等及び重量物への衝突を伴わなかった車両においては、シートタイプの差異は被害者率に影響すると考えられる。

以上までの分析結果をまとめると、「転覆等の有無」、「転覆等しなかった車両における重量物への衝突の有

表2 列車脱線事故における平均被害者率、死者率

車両分類	被害者率		死者率	
	転覆等車両	非転覆等車両	転覆等車両	非転覆等車両
該当事件数	n=6	n=103	n=6	n=103
分類なし	91.64%	6.65%	9.98%	0.28%
重量物衝突あり	92.90%	24.28%	19.97%	0.53%
ロングシート	100%	21.04%	45.61%	0.14%
クロスシート	89.35%	25.70%	7.14%	0.69%
重量物衝突なし	90.38%	1.58%	0.00%	0.00%
ロングシート	-	2.72%	-	0.00%
クロスシート	90.38%	0.65%	0.00%	0.00%
ロングシート	100%	5.70%	45.61%	0.05%
クロスシート	89.97%	7.33%	2.86%	0.46%

表3 被害者率、死者率の平均値の差に関する検定結果

比較する条件		被害者率		死者率	
		t値	有意確率	t値	有意確率
転覆等あり	同なし	11.27	0.002	3.12	0.002
転覆等あり	重量物衝突あり	0.26	0.404	1.48	0.106
同なし	同なし	6.13	0.000	1.02	0.159
転覆等あり					
同なし	ロングシート	-0.45	0.328	-0.78	0.220
重量物衝突あり	クロスシート	-0.32	0.376		
同なし		1.47	0.073		

無」、「転覆等及び重量物への衝突がなかった車両におけるシートタイプの差異」は被害者率に影響し、「転覆等の有無」は死者率に影響すると考えられる。

(4) 列車速度と被害者数

既往の研究成果において、被害者数は列車速度の増加に応じて増える傾向にあることが示されている^{4) 5)}。そこで、列車速度が明確な事故について、列車速度と被害者数の関係を図5に示す。

多くの事故では、速度に関係なく被害者数は10人未満であるが、速度と共に被害者数が増加する傾向が強いグループがある。転覆等を伴った事故は、全てこのグループに含まれ、また重量物との衝突を伴った事故については、乗車人数が少ない、或いは衝突した貨物自動車の荷台が空だった事故を除くと、このグループに含まれる。よって、特にこれらを伴う事故では速度が高いと被害者

特集：軌道技術

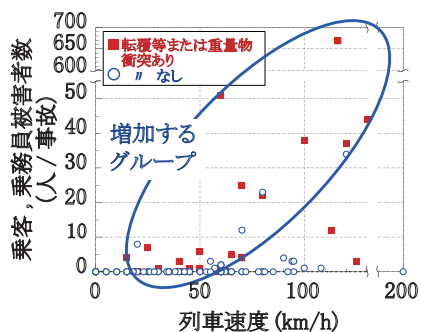


図5 列車速度と被害者数

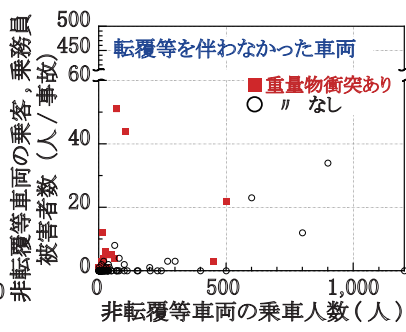
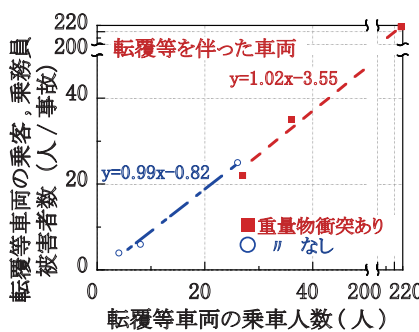


図6 各車両の乗車人数と被害者数

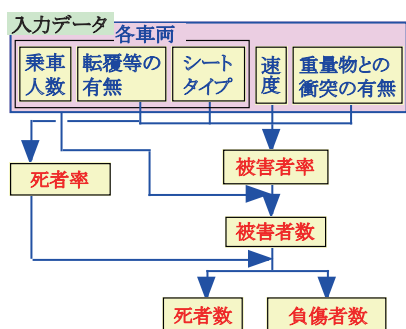


図7 被害者数の推計モデルの構造

表4 被害者率推計モデルの係数

転覆等	重量物衝突	a	b	c
あり		0.00115		0.8269
なし	あり	0.00348		
なし	なし	0.00024	0.01474	

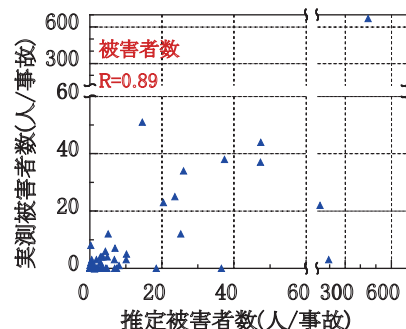


図8 被害者数の推計結果

数が増加する可能性が高いと考えられる。

一方、図には示していないが、速度と死者数の関係については明確ではない。これは、死者が発生する事故件数が少ないため、傾向が現れるまでには至らなかったためと考えられる。

(5) 乗車人数と被害者数

被害者数には列車の乗車人数が影響すると考えられる。一方、先述のように各車両における被害者率には車両の転覆等が大きな影響を与えるが、長編成の列車においては、転覆等は編成中の一部の車両だけで発生することが多い。そこで、転覆等の有無を分類した車両における、乗車人数と被害者数の関係を図6に示す。

転覆等した車両では、乗車人数と被害者数との間に強い相関がある。また、回帰直線の傾きは重量物等との衝突の有無に関係なく1に近い。よって、転覆等した車両の乗客等は、死傷する可能性が極めて高い。一方、転覆等しなかった車両では、乗車人数と被害者数との関係は明確ではないが、重量物と衝突した際には死傷する可能性が高い。

(6) その他に考慮すべき要因

以上の他、被害者数に影響すると考えられる事象としては、脱線した車両が隣接線を支障し、他の列車と衝突する事故の発生が想定される。こうした事故は今回分析したデータには含まれなかったが、列車脱線事故リスクの推計の際には考慮しておくべき事象と考える。

2.3.3 被害者数、死者数推計モデル

以上の結果に基づいて、図7に示す被害者数推計モデルを構築した。本モデルでは、検討対象とする列車編成

中の各車両の乗車人数に被害者率を乗じて被害者数を算出し、全車両での被害者数の総和を脱線事故における被害者数として推計する。また、この被害者数に死者率を乗じて死者数と負傷者数を各々得る。

被害者率 r については、2.3.2 に示した分析結果に基づいて、車両の転覆等や重量物との衝突の有無、シートタイプ、速度を考慮した次式により推計する。式の係数を表4に示す。

$$r = a \cdot V + b \cdot L + c \tag{1}$$

V : 列車速度 [km/h]

L : ロングシートを表すダミー変数

死者率については、表2の結果に基づいて設定する。ここでは、車両の転覆等の有無の影響は認められたことから、これを考慮する。

本モデルにより得られた被害者数と実測値との比較を図8に示す。被害者数の推定値は実測値に概ね近い。一方、死者数については、死者が特に多い事故では精度が低かった。

2.3.4 事故時の被害推計

脱線事故発生時の被害の進展及び推計は、ETA (Event Tree Analysis) によりモデル化する。ここでは、脱線後の車両の挙動として5つのイベントを想定する。具体的には、被害の拡大に対する影響を考慮して「①走行軌道外走行、停止」、「②盛土等からの転落」、「③車両の転覆」、「④隣接線の支障」、「⑤隣接線走行車両との衝突」を想定し、図9に示すイベントツリーを設定する。なお、ここでは、重量物との衝突については隣接線車両との衝突で代表させる。

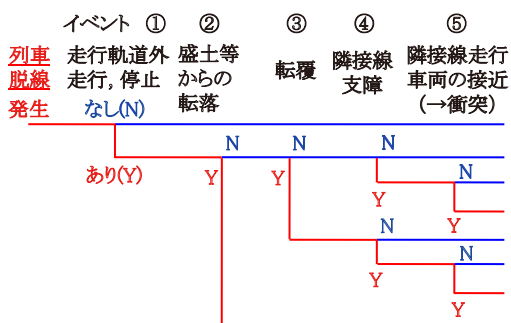


図9 想定するイベントツリー

各イベントの発生確率については、2.3.1 で用いたデータに基づいて表5のように設定する。このうち、イベント②～④の確率は、直前のイベントが発生した条件下における条件付確率である。ここで、隣接線を支障する確率を34.5%としたが、実際にその箇所に隣接線を走行する列車が接近して衝突する確率は更に小さくなる。この確率（イベント⑤の発生確率）は隣接線の列車運転密度に影響を受けると考え、以下のように推定する。

$$S = \frac{n \times L}{(5/18)V} + \frac{V}{\alpha}, \quad P = \frac{S \times m}{3600} \quad (2)$$

S: 任意の箇所における列車1本の通過時間（通常通過時間 [対向列車] + 非常制動時通過時間 [当該列車]） [秒]

n: 列車を編成する車両数 [両], L: 車両長 [m]

V: 速度 [km/h], α: 減速度 [km/h / 秒]

P: 隣接線列車遭遇確率

m: 列車運転密度 [本 / 時間]

ところで、表5や(2)式に示した各確率は図10に示すような軌道の敷設条件によって変動する。よって、リスクの推定精度を向上するためには、箇所別に敷設条件を考慮して、これらの確率を設定する必要がある。

2.4 リスクの推計

構築したモデルにより、表6に示す条件下でリスクを推計した結果を表7に示す。ここで、車両被害、運転被害については、事故の内容に応じて変化させたが、リスクとしては条件1や条件2が大きい。また、軌道変位初期値の増加と共にリスクが増加し、平面性変位については初期値を7mmから5mmとすることでリスクは大きく減少する。通り変位についても初期値を小さくするとリスクは減少するが、平面性変位ほど大きくない。

表5 イベント①～④の発生確率

イベント	①		②		③		④	
	走行軌道外走行, 停止	100%	盛土等からの転落	100%	転覆	100%	隣接線支障	100%
全件数	116	100%	40	100%	40	100%	58	100%
発生	40	34.5%	2	5.0%	5	12.5%	20	34.5%
非発生	76	65.5%	38	95.0%	35	87.5%	38	65.5%

表6 推計条件

列車条件		隣接線列車遭遇率に関する条件	
乗車人数	300 人 / 列車	ピーク時運転本数	10 本 / 時間
編成両数	6 両 / 列車	対向列車想定速度	130 km/h
車両長	20 m	最大減速度	4 (km/h) / s

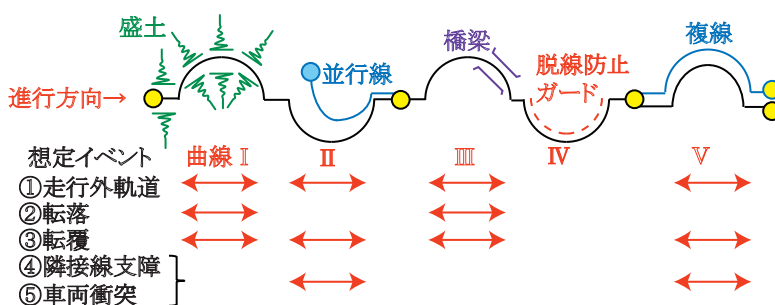


図10 軌道敷設条件と想定するイベント

3. リスクを考慮した軌道変位保守計画法

従来の軌道変位保守計画モデル¹⁾では、高低変位と通り変位の各状態を考慮して保守計画を作成していたが、前章に示したモデルを用いることで、列車脱線事故のリスクを考慮して保守計画を作成することができる。つまり、安全性をより考慮した保守を実現できる。

以下では、軌道変位保守計画モデルにおいてリスクを考慮して計画を作成する方法を検討する。

3.1 リスクの考慮方法

3.1.1 従来の軌道変位保守計画モデル

本モデルでは、線区、保守基地レイアウトと各ロットの軌道変位推移履歴、計画作成上の制約条件を入力データとし、MTT 配備計画（各期 [週や旬等の任意の期間長さ] に MTT を配備する保守基地）と保守実施計画（各期の保守箇所）を出力する。計画モデルの構造を図11に示す。

本モデルでは計画対象線区をロット（軌道変位推移の予測単位 [100m 区間]）。予測指標は軌道変位標準偏差、ブロック（連続するロット。ブロック長が1回の MTT 保守延長に等しくなるように設定）という単位に分割して計画を検討する。

本モデルの目的関数は、軌道変位標準偏差の平均値（計画期間中）の最小化である。最初に、ブロック選択モデルにより軌道変位が大きなロットをできるだけ多く含む

表7 推計結果

条件	1	2	3	4	5	6		
走行軌道外停止	—	●	●	●	●	●		
転落	—	—	●	—	—	—		
転覆	—	—	—	●	●	—		
隣接線衝突	—	—	—	—	●	●		
死者数	0.01	0.01	1.45	1.45	8.12	0.47		
負傷者数	2.17	2.17	14.9	14.9	208	167		
通り	平面性	リスク (万円)					計	
5mm	5mm	1.36	0.72	0.18	0.34	0.09	0.33	3.02
7	3	0.27	0.14	0.04	0.07	0.02	0.07	0.60
7	5	2.26	1.19	0.30	0.57	0.15	0.55	5.03
7	7	27.2	14.3	3.60	6.89	1.81	6.54	60.3
10	5	4.53	2.38	0.60	1.15	0.30	1.09	10.1

ブロック群を作成した後、保守スケジュール作成モデルによりブロックに保守時期を割り当てる。

3.1.2 リスクを考慮した軌道保守計画モデル

以上に示した保守計画モデルにおいてリスクを考慮するためには、以下の方法が考えられる。

①制約条件での考慮

計画期間中に保守を行わない場合に推定されるリスクが上限値を超えると想定される箇所については、必ず保守する制約を設定して保守計画を作成する。この上限値の設定法については、絶対値として設定する他、全ロットの内リスクが高い（例えば上位p%）箇所を指定する方法がある。

②目的関数での考慮

従来の目的関数にリスクの項を追加することが考えられる。この追加にあたっては、軌道変位とリスクという次元が異なる指標を合算することになるため、両指標を目標値で除して無次元化する必要がある。軌道変位については整備目標値を準用すればよいが、リスクについては全ロットの平均値や四分位値等の統計量を用いることが考えられる。

3.2 リスクを考慮した軌道変位保守計画の作成例

提案した保守計画モデルの妥当性を検証するために、実線区を模擬した軌道データ（延長132km、保守基地7、年間48日稼働）を用いて試算を行う。ここでは、上記の「②目的関数によりリスクを考慮する方法」を用いて年度保守計画を作成し、高低変位のみを考慮して作成した計画と比較する。

リスクは殆どのロットではほぼ0として算出された。一方、比較的大きかった箇所に対する保守計画の有無を表8に示す。高低変位のみを考慮した計画においては、リスクが比較的大きくても保守が行われない箇所があるが、リスクも合わせて考慮した計画においては、リスクの高い箇所への保守も計画されていることが分かる。このように、推計したリスクを考慮して保守計画を作成することができる。

入力データ

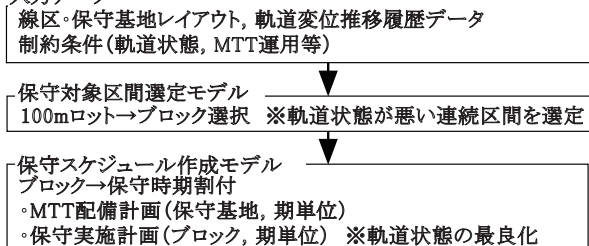


図11 計画モデルの構造

表8 試算結果

モデル適用結果の比較			計画条件	
ロット	高低変位標準偏差	リスク	高低変位のみ	高低変位とリスク
A	3.82mm	3.38E-07		●
B	3.54	2.56E-04		●
C	4.96	3.59E-09		●
D	7.63	6.49E-01	●	●
E	8.11	3.03E-03	●	●
F	5.12	2.35E+02		●

4. まとめ

列車脱線事故に関するリスクを推計するモデルを構築し、推計した各箇所のリスクを考慮して軌道変位保守計画を策定する方法を提案した。そして、本モデルを用いて試算し、その妥当性を確認した。本モデルの適切な活用方法について、更に検証を進める予定である。

文献

- 1) 三和, 河西: マルタイ作業計画作成システム, JREA, Vol.46, No.7, pp.8-10, 2003
- 2) 内田, 高井, 村松, 石田: 輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価, 鉄道総研報告, Vol.15, No.4, pp.15-20, 2001
- 3) 三和, 大山: 列車脱線事故のリスク推計のための死傷者数推計モデルの構築, 2012年日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.156-157, 2012
- 4) 三和, 大山: 鉄道重大事故統計データ解析に基づく事故防止策の提案と評価, 土木学会論文集D, Vol.66, No.2, pp.89-105, 2010
- 5) 例えば, Evans, A. W.: A Statistical Analysis of Fatal Collisions and Derailments of Passenger Trains on British Railways: 1967-1996 Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Vol.211, No.F2, 1997.