

14. ヒューマンエラーに伴う鉄道のハザードの定量的予測手法の検討

交通システム研究領域

※塚田 由紀、田代 維史、林田 守正、工藤 希

1. はじめに

近年、鉄道輸送の第一線では高度化が進み多くの作業のシステム化が進行している。新しいシステムの導入は、ヒューマンエラーに起因するリスクを低減させ、メンテナンス負荷削減にも多大な貢献をしている。しかし一方で、職員の判断力による業務が減少している、と言い換えることもできる。つまり、包括的なリスクマネジメントの観点からは、職員の技量を要する作業量の減少に伴い、新しいタイプのエラーを誘発し、あるいは、システムへの過信など、新たな検討すべき課題が発生する、と考えられる。

本研究では、鉄道運用に導入されているシステムを対象とし、ヒューマンエラーで誘発されるハザードの発生確率の定量的評価を検討した。これより、事故を回避するための対策に対して優先順位をつけることを可能とし、更に今後起こりうるヒューマンエラーを防ずるシステムを考案することを目的とする。なお、ここでは、リスクの定量的指標として、一般的に用いられている、「発生頻度」を使用することとした。

2. 対象システム

鉄道業務では運転士や車掌、保線作業員、運行指令員等、システムを扱う職種も大きく異なり、リスクが存在するヒューマンエラーの比重もシステム毎に大きく異なる。よって、システム毎にリスクを抽出し、

表1 評価対象としたリスク項目の例

	項目	職種	リスク内容
1	保守作業支援システムにおけるリスク	保線作業員	作業現場での注意力低下の影響
2	ATC（自動列車制御装置）等による列車速度制御に伴うリスク	運転士	運転士の注意力、運転技能への影響

定量的評価に必要な各動作、各事象が起こる確率を導入する必要がある。本研究では、包括的なリスクマネジメントを目的に多岐にわたるシステムを対象として定量的評価を行った。それら評価対象としたリスク項目の例を表1に示す。

3. 研究手法の概要

3. 1. 数値計算手法の概要

本研究において実施する、リスク評価のための計算の基本的手順を図1に示す。また、数値的にリスクを計算するための代表的手法である、マルコフ状態遷移図手法を適用した、ヒューマンエラー評価のためのマルコフ状態遷移図モデルを図2に示す。

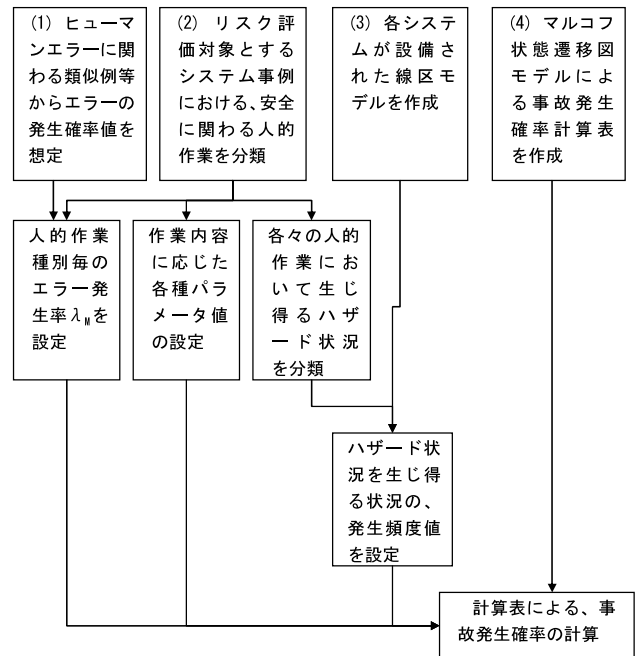
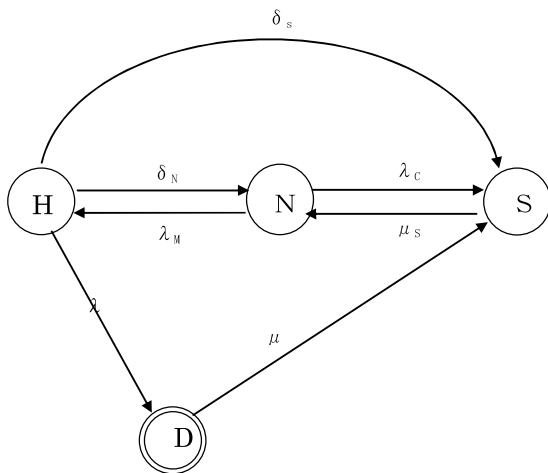


図1 計算の基本的手順



<状態量>

- N : 正常状態にある時間長(hr)
- H : 故障が潜在して動作中の時間長(hr)
- D : 事故状態(事故復旧前)の時間長(hr)
- S : 安全に作業停止中の状態の時間長(hr)

<パラメータ>

- μ_S : 作業開始率(/hr)
- λ_C : 正当な作業停止率(/hr)
- λ_M : ヒューマンエラーの発生率(/hr)
- δ_N : ヒューマンエラー検出率(/hr) (正常に作業続行)
- δ_S : ヒューマンエラー検出率(/hr) (安全に作業停止)
- λ : トリガー頻度(/hr)
- μ_D : 事故後の修復率(/hr)

図2 マルコフ状態遷移図モデル

3. 2. 仮想線区モデル

リスク評価の対象モデル線区として、大都市(A駅)と中核都市(E駅)を結ぶ全長約200kmの仮想的な

主要幹線を設定した。大都市圏内では都市内輸送及び近郊輸送の機能も有する、一つの路線の中に多様な形態(中間駅B~Dで区分)を包含するモデルとした。

3. 3. 参考とするヒューマンエラー事例

ヒューマンエラーの起こる確率について、(社)自動車技術会にて管理しているヒヤリハット事例データベースを基に算出することとした。このデータは、都内のタクシー業者に映像型ドライブレコーダを搭載するよう依頼し、収集されたもので、30,000件以上のヒヤリハットデータが収集されている。

このデータを基に、本調査のヒューマンエラーの確率に活用する利点は以下の3点である。

- ① タクシードライバーは、毎日運転しているプロであり、鉄道事業者の運転者と状況が近いこと。
- ② ハザード状態は、自動車交通における「ヒヤリハット」の状況と類似していること。
- ③ 専属オペレータによる統一されたデータ管理がなされており、データの信頼性が高いこと。

特に、ハザード状態は事故要因を内包した状況であり、事故には至っていない。この場合、単純な事故件数の解析データではハザード状態に該当しないことになる。よってタクシードライバーによるヒヤリハットのデータを用いることとした。

表2に活用するヒヤリハットデータを示す。ヒヤリハットの原因として「漫然運転」、同時に「信号無視」や「最高速度超過」と分類されたデータの数が示されている。また、道路形状によるヒヤリハットの件数の差も示した。自動車交通の場合、車線が2車線以上の場合もあり、自車の走行路に左右から他車が進入したためにヒヤリハットが起きた事例も多い。そこで、他

表2 ヒヤリハットデータ

		ヒヤリハット				事故	合計
		高	中	低	反応レベル		
総数		2244	7060	17669	3055	172	30200
原因							
漫然運転		1308	4475	1054	-	2	6839
漫然運転	AND 信号無視	353	1669	500	-	0	2522
漫然運転	AND 最高速度超過	241	719	235	-	0	1195
道路の慣れ		2	8	4	-	0	14
発生場所別							
道路形状	直線	1710	5036	1043	-		7789
	直線・単独	331	1449	324	-		2104
	カーブ(鈍)	118	349	87	-		554
	カーブ(鈍)・単独	35	113	26	-		174
	カーブ直角	48	268	93	-		409
	カーブ直角・単独	14	67	28	-		109

車とは関係なく、自転車単独でヒヤリハットが起きた件数も示した。

ここで、本調査で活用するために、これらのヒヤリハット件数が、1時間あたりに何回起きているか、という確率に変換する必要がある。そのためには、このヒヤリハットデータを収集した時間の総数を見積もる必要がある。ドライブレコーダが何時間動作していたか、という正確な時間は記録されていないため、以下の仮定の基に総時間を算出した。

データ取得:2006年1月~2008年10月 計34ヶ月
 うち35(台)×10(ヶ月)×10(時間・日)×30(日)
 =105,000時間
 105(台)×24(ヶ月)×10(時間・日)×30(日)
 =756,000時間

合計 861,000時間

ここで、自動車単独でヒヤリハットを起こした件数は、道路形状が直線、カーブにおいて、それぞれ全体の約3分の1であることが表2から分かる。そこで、本調査で用いるパラメータの値は、タクシードライバーのヒヤリハット事例の3分の1と推定して用いることとした。漫然運転かつ信号無視の件数を運転士の前方監視の注意力低下による信号見落としに、漫然運転かつ最高速度超過の件数を運転士の速度監視の注意力低下による速度超過の値として適用することとした。パラメータとして使用する値を表3に示す。

表3 パラメータとして使用する値

原因	$\lambda_M(\text{fit})$	備考
運転士の前方監視の注意力低下による信号見落とし	976384	漫然運転 AND 信号無視の3分の1
運転士の速度監視の注意力低下による速度超過	462640	漫然運転 AND 最高速度超過の3分の1
ATC区間と勘違い	5420	道路の慣れの3分の1

なお、表3では、 λ_M の単位としてfitという単位を用いた。これは部品故障率、システムの危険側故障率、システムのダウン率など、安全性工学や信頼性工学で多用されているもので、単位時間あたりにイベントが発生する回数として、1fit = 10⁻⁹/hr (毎時、10億分の1回)と定義されている。

4. シミュレーション結果

4. 1. ATC等の列車速度制御のパラメータ

本研究で評価したシステムのうち、本報告ではATC等の列車速度制御システムについて報告する。

列車速度制御システムにおいて使用したパラメータを表4に示す。列車操縦の場合、注意力低下状態(図2のH)で、例えば曲線へ接近しても、直前の減速手配で事故を回避できる場合が大部分であると想定する。これは、通常と考えられる注意力の周回周期を想定した個人気付き率だけではモデル化出来ないプロセスである。そこで、タクシーのドライブレコーダの統計において、ヒヤリハット件数に対して実際に事故へ結びついた率を、前方監視の注意力低下及び速度監視の注意力低下の場合の(図2のD)へのパラメータとした。

表4 パラメータの設定根拠

トリガー頻度 λ (/hr)	
1.2×10 ⁻⁴	ケース No. 1, No. 3: C 駅-D 駅間で ATC 区間専任運転士が連続下り勾配へ進入する頻度を前提とした。
1.7×10 ⁻⁴	ケース No. 2: C 駅-D 駅間で ATC 区間専任、ATC 区間兼任の両タイプの運転士が連続下り勾配へ進入する頻度を前提とした。
3.8×10 ⁻²	ケース No. 4, No. 5: 自動化以前につき、C 駅-D 駅-E 駅間のみ、速度超過が検討対象となり得る曲線が存在するものとして、想定した、曲線箇所数と、この区間における列車回数から、曲線通過頻度を計算した。また、自動化以後はこれらのケースに該当するものは無くなるものとし、頻度ゼロとした。
6.6×10 ⁻²	ケース No. 6: ATC 区間以外の全駅で、ATC 区間専任、ATC 区間兼任の両タイプの運転士について、構内直進進入のケースを評価するものとした。
2.0×10 ⁻²	ケース No. 7: ATC 区間以外の全駅で、ATC 区間兼任の運転士について、構内直進進入のケースを評価するものとした。
6.1×10 ⁻³	ケース No. 8, No. 9: 自動化以前につき、ATC 区間以外の全駅で、ATC 区間専任、ATC 区間兼任の両タイプの運転士について、分岐方向で構内進入のケースを評価するものとした。また、自動化以後はこれらのケースに該当するものは無いとし、頻度ゼロとした。

1.0× 10 ⁻²	ケース No.10 : ATC 区間以外で、ATS 区間専任、ATC 区間兼任の両タイプの運転士について、工臨区間進入のケースを評価するものとした。また ATC 区間は現示で防護されているものとした。
3.0× 10 ⁻³	ケース No.11 : ATC 区間以外で、ATC 区間兼任運転士について、工臨区間進入のケースを評価するものとした。
2.8× 10 ⁻⁷	ケース No.12 : 全区間を通じて、30 日に 1 回、減速手配を取るべき線路支障物（軌道短絡無し）が発生するものとして、遭遇頻度を設定した。
2.4× 10 ⁻³	ケース No.13 : ATC 区間を除く全駅で、場内信号の停止現示を受ける機外停車が発生する様な、ダイヤの大乱れが 30 日に 1 回発生するものとした。
個人気付き率(/hr) →δ _N	
60	前方注視能力や、速度監視能力が低下している状態を想定するため、注意力復帰までに 1 分程度かかると想定した。
個人気付き率(/hr) →δ _s	
0	気付いた後は正常運転 (N) に戻ること及び、直ちに乗務中断にはならないため、(S) へのパスは無いものとした。
正当な作業停止頻度(λ _c) (/hr)	
0.01	1 回の乗務時間を 4 時間として、100 時間 = 25 回乗務程度に 1 回は、予定変更による乗務取りやめが発生すると仮定した。
事故後の修復頻度(μ _D) (/hr)	
0.001	本研究で想定するのは重大事故であるから、発生後、同じ作業が再開されるまでの時間は相当程度に長いと考え、1 千時間 (約 40 日程度) を想定した。
作業開始頻度(μ _s) (/hr)	
0.25	1 回の乗務時間を 4 時間とした。

4. 2. 列車速度制御システムに関するシミュレーション結果

計算結果を表 5 に示す。ここでも計算結果及び、パラメータ変化の影響については、これまでの状況と比較すると、概ね妥当な傾向が得られたと思われる。

すなわち、ここに提示した表では、個人の気付き率を毎時 10 回 (6 分に 1 回) と、長目に見積もったが、これを毎時 100 回、すなわち 10 倍の頻度で気付くと設定すれば、線区全体の事故発生頻度はほぼこれに反比例して約 10 倍伸張する。つまり、事故に至る前に気付くことが事故の減少に大きな効果があることを示しており、規則教育、確認作業の徹底、体調管理等が、事故頻度低減に有効であるといえる。

表 5 導入前後比較

ケース No.	原因	状況	自動化以前 (高機能ATS)	自動化以後 (高機能ATS)	
			線区全体 事故 発生率 (/hr)	線区全体 事故 発生率 (/hr)	
1	速度監視の 注意力低下 (ATS専任)	直線での速度 超過で車 両動揺増大	1.47802E-09	1.47802E-09	
2	前方監視の 注意力低下		3.11341E-09	3.11341E-09	
3	ATC区間と 勘違い (ATC兼任)		4.06274E-11	4.06274E-11	
4	速度監視の 注意力低下	曲線進入速度 超過	1.47846E-09	0	
5	ATC区間と 勘違い		4.06545E-11	0	
6	速度監視の 注意力低下	構内進入速度 超過 (直進)	1.47846E-09	1.47846E-09	
7	ATC区間と 勘違い		4.06544E-11	4.06544E-11	
8	速度監視の 注意力低下	構内進入速度 超過 (分岐)	1.47845E-09	0	
9	ATC区間と 勘違い		4.06543E-11	0	
10	速度監視の 注意力低下	臨速区間へ の進入速度 超過	1.47846E-09	1.47846E-09	
11	ATC区間と 勘違い		4.0654E-11	4.0654E-11	
12	前方監視の 注意力低下	支障物(踏 切含む)検 知の遅れ	2.75285E-09	2.75285E-09	
13	前方監視の 注意力低下	地上信号見 落とし→駅 中間の信号 冒進	3.11404E-09	3.11404E-09	
			事故 発生率 合計 (/hr)	1.65754E-08	1.35372E-08
			事故発生 間隔 (年)	6887.0	8432.7

5. まとめ

本研究で得た事故発生頻度へ大きな影響をもつパラメータのリスクへの影響度合いは、直感的に考えられる傾向とよく一致した。つまり、リスクの元となるヒューマンエラーの発生頻度低減や、気付きの頻度の影響は直接的であり、本シミュレーションにより事故発生頻度の定量的傾向として表せたといえる。