

追突事故リスク内在型の交通流のペトリネット・シミュレータの開発

Development Study on Petri Net Simulator of Traffic Flow with Car-crash Accident Risk.

木俣 昇*

By Noboru KIMATA

1. まえがき

自動車保有率は年々増大し、渋滞が常態となってきた。この対策として、①道路の処理能力の向上化と、②交通需要の発生の制約化の2つの方向で努力がなされてきている。交差点改良や信号制御の最適化、さらには料金所などの自動化を目指すITSは前者の流れであり、いわゆるTDM施策は後者の流れである。②には、需要という制御困難なものが、①には、安全性との両立という制約がある。

さて、われわれは、①の流れで種々の交通流のシミュレーション・システムを開発してきている。それらの開発に際して、開発者は、誰に指摘されるまでもなく安全な交通は自明な要件であるとし、各自のアルゴリズムを構成し、衝突回避が完全になされていることを十分に確認した上で提供している。しかし、確認されているのは、当然のことながら「シミュレータのアルゴリズム通りの運転が実現されれば」という条件の下では衝突は発生しないという安全性である。その条件が崩れれば、衝突に繋がる可能性があり、そのリスクは、当該アルゴリズムで想定している交通流の形態や道路条件と密接に関係している。アルゴリズムでの諸想定は、また、出力される代替案の処理能力の評価値を規定しており、当然その採択性にも影響を与える。

だが、安全性の確保は余りにも自明な原則であるために、われわれはアルゴリズム面での確認に力を注ぎ、上述の論点を看過し、議論可能な形態にすることも怠ってきた。著者らのペトリネット型の交通流のシミュレータ開発でも事情は同じである。即ち、complementなプレースを利用した自律型と、抑止アークを用いた強制型の安全確保機構による非衝突性の確認は、この

シミュレータの特徴である視覚的なネットと、手動による駆動性により利用者にも可能であるとの主張には熱心であったが、そこで生成される交通流でのドライバー・ミスが内包する衝突リスクを論じる手段は提供して来なかった。

事故解析はドライバー・ミスの発生はある意味では不可避であることを示唆している。そこで、本論文では、まず、追突事故に繋がるドライバー行動を検討し、それらのリスク発生の部分ペトリネットを作成し、車両走行ネットに結合化させた事故リスク内在型のプロットタイプの開発を試みる。そして、シミュレータの再現性検証との関連や、本シミュレータの適用領域での役割などについて考察する。

2. ドライバー系の部分ペトリネットの開発

(1) 事故要因の考察

自動車事故の要因の統計分析や事故研究の成果を整理すると、表-1のようになる。まず、ドライバー関連では、若者と高齢者の事故率が高く、性別では男性の方が高い。年平均走行距離も事故率との相関性の高い要因で、ある意味でドライバー・ミス発生の不可避性を示唆している。交通ルール遵守の態度も規定要因となるが、年齢要因が加わるとその寄与率は低下するとされる。このことも、逆の形で上述の不可避性仮説を支持するものと言える。

また、危険地点の存在、携帯電話、季節・天候などの指摘は、事故の誘因要因の多様性を示す。表-1の右欄に示すように、これらは、ドライバーの警戒心、判断力、反応力の低下を引き起こす要因として作用し、車両の運動性能の低下要因と相まって事故リスクを形成することになる。

(2) ドライバーの減速行為のペトリネットモデル

事故の形態は種々のものがあるが、ここでは追突事故リスクを問題にする。ドライバーは何らかの危険を

キーワード： 交通安全、 交通行動分析、 システム分析

*正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

(〒920-0942 金沢市小立野 2-40-20 Tel 076-234-4914)

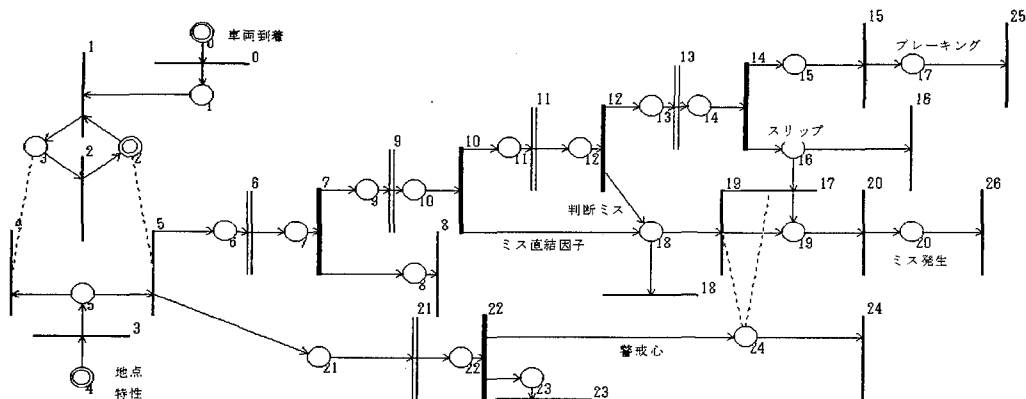


図-1 ドライバー系の部分ネット

感じると、ブレーキを踏んで減速あるいは停車する。追突事例を調べると減速あるいは停車理由は他にもさまざまなものがある。この後続車に前方認知ミスが発生するとき、追突の危険性が出てくる。そこで、ドライバーの追突関連の2つの行動に関して、

- ① 危険の強さに応じてブレーキ判断をする。
- ② 事故誘発因子の発生は前方認知ミスに直結する。
- ③ 判断ミスと技術不足（スリップ）の2つがある。
- ④ 警戒心がミスの顕在化を防ぐこともある。
- ⑤ ミスの形態と警戒心は年齢と関係する。

という仮定を設定し、図-1に示すドライバーの減速行為の確率ペトリネットモデルを作成した。

このネットは、車両がある閉塞区間に到着したとき (t_0) に起動し、危険を認知し減速判断をしたときには p_{17} に、ミスが発生したときは p_{20} にトークンをマーキングするネットである。概要を示すと、まず、発生プレース (p_4) からこの地点の危険度に対応した数のトークンが供給され、ブレーキ判断を行うルート (p_6) と、警戒心を生むルート (p_{21}) にトークンが移動する。 t_6 と t_9 は生成トランジションで、この地点が判断ミスに直結する事故誘発因子を発生させるほど危険か、ドライバー特性による判断がなされる程度かを区別するカラートークンを生成する。そのカラーに応じて直接ミスを誘発し p_{20} へのルートに進むケースと、ドライバーに応じた判断ルーチンで、 p_{17} のブレーキか p_{20} のミスのルートに進むケースが生まれる。

一方、 t_{21} は警戒因子の生成を担い、そのカラーが生成されれば、トークンは p_{24} に進む。そして、上述の判断ルーチンで、判断ミスとスリップ・ミスの生起

を意味する t_{19} と t_{17} を抑止する。この抑止時間の間に、 p_{18} や p_{16} のトークンが消滅すれば、ミスは顕在化しないという形で、警戒心が係わってくるドライバーネットとなっている。

(3) 車両進行ネットとの結合化ネット

交通流のペトリネットシミュレータでは、車両進行は、図-2の上部に示すように、各閉塞区間を、“車両の存在(-2)”と“空間の空き(-1)”という、通常はどちらか一方が成立する関係 (complement) にある2つのプレースで表現し、当該閉塞区間の“車両の存在”プレースと、前方閉塞区間の“空間の空き”プレースに共にトークンがあるときのみ発生し、発生後はまた complement を維持するトランジションとプレース関係によってモデル化されている。これが本シミュレータの安全確保機構の1つで、自律型と呼ばれている。この機構が崩れたとき、即ち、ある閉塞区間で両方のプレースにトークンがマーキングされたときに追突リスクが発生する。

自律型と呼ぶように、通常交通流のシミュレーションネットを使用する限り、このようなマーキング状態は発生しない。図-1のドライバー・ミスを内在化したネットの結合化に伴って、このような状態も発生することになる。

上述したように、図-1のネットでは p_{17} (図-2ではB) へのトークンのマーキングはブレーキを意味し、 p_{20} (同E) へのトークンのマーキングは前方認知ミスを意味する。自律型安全確保機構の破綻は、ミスが発生し、Eにトークンのマーキングされたときに起きる。このことを、図-2では、Eがトランジシ

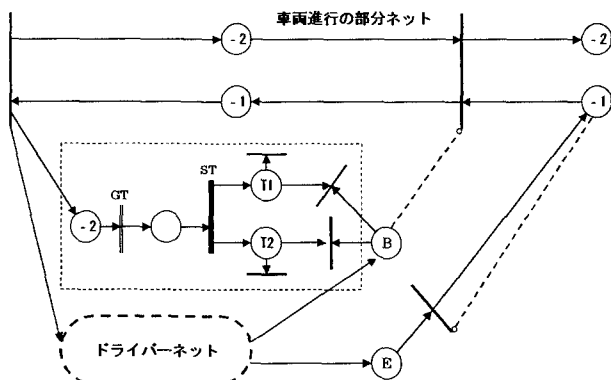


図-2 車両進行ネットへの結合化ネット

表-1 事故要因の整理

リスク要因	特記	作用関係
ドライバー 年齢 性別 平均走行距離 態度	若年 — 高齢 男性 長 非遵守	警戒心 判断力 反応力 運動性能
道路 危険地帯	有	
環境 季節・天候 時間帯	有 夜	
外部 携帯電話	有	

ョンを介して、前方閉塞区間の”空間の空き”のプレース（-1）にトークンをマーキングする形で実体化している。

次に、Bのブレーキングによる減速の図-2での記述法を説明する。減速速度は、当然、走行速度と道路条件によって異なるだろう。図-2のネットでは、車速を可変タイマとして持つ”車両の存在”を示すプレースと同種の-2のプレースと、生成トランジションGTと選択トランジションSTによって分岐する2つのプレース（T1, T2）を使用することで、この条件を実現している。いま当該車両が40km/hで走行中にブレーキングするとすれば、そのときのタイマが点線内のネットの-2のプレースにも設定され、その後にT1あるいはT2にトークンが移動し、それに設定したタイマ分が加算された後に、Bのトークンが消滅する。その結果、車両進行の抑止が外れて、当該車両はこの閉塞区間を加算タイマ分多くの時間を費やし、つまり減速して通過する。ちなみに、閉塞区間長を6.7mとし、T1とT2のタイマを、0.4秒と1.0秒に設定すれば、T1

表-2 ネットのマーキング状態と事故リスク形態

プレースE	◎	○
プレースB	前方認知ミス 急ブレーキ	前方認知 ブレーキング
◎	T1の時速突リスク T2の時速突リスク	T2の時速突リスク
○	前方認知ミス ブレーキング無し	前方認知 ブレーキング無し
	追突のリスク大	通常走行

表-3 リスクシミュレーションの設定パラメータ

シミュレータ本体
閉塞区間長（最小車間隔）
タイマ更新表 最高速度・加速性能・発進遅れ
交通量と発生パターン 平均発生率（台/分） ポアソン到着／群到着
ドライバー特性
ミス発生 判断ミス発生率、スリップミス発生率
警戒心 警戒因子発生率と持続タイマ
道路条件
危険認知度の発生率 ミス直結因子の発生率 制動性能 T1、T2のタイマ値と発生率

の場合には24km/hに、T2の場合には15km/hに減速させることになる。

3. 事故リスクのシミュレーションの利用構成

（1）シミュレーションネットの構成と実行性

まず、シミュレーションネットは、対象道路の車両走行ネットの各閉塞区間に、その特性に応じて、図-2の形式で、図-1のドライバー系のネットを結合させて構成する。このシステムネットは、既開発のシミュレータで駆動可能なもので、そのままシミュレーションを実施することが出来る。

図-1のドライバー系のネットは、その性質上、少なくとも当該車両が閉塞区間を通過するに要する時間内に処理される必要がある。ちなみに、閉塞区間長を6.7mとすれば、時速30kmのときには0.8秒以内の処理が必要となる。一方、事故では”瞬時”が問題であるとされる。ペトリネット・シミュレータでは、トランジションの発火そのものは”瞬時”に起きるが、その条件成立までの時間は、実現象に対応するプレー

スタイマで決まる。ドライバーの探知時間は0.5秒、認識には0.6秒が掛かるとされるが、上の制約よりこのネットでは0.2～0.3秒程度のより瞬時のタイマ値での実行が必要となる。

次に、追突事故の発生は、シミュレーション・ネットでは、“車両の存在”を表すプレースに2個のトークンがマーキングされる形で示される。リスクの評価には、繰り返し実験が必要となるため、この状態を自動計測するネットの付加が望ましい。このネットを作成し、付加した上で、本プロットタイプでの事故シミュレーションの実行性を確認した。

(2) 事故リスクシミュレーションの適用法

本シミュレータでの事故形態は、図-2のトークンのマーキング状態との関連で、表-2のようになる。まず、プレースBとEに共にマーキングがあるときは、前方認知ミスの下で、急ブレーキを掛けたケースとなり、制動が不十分(T1にマーキング)ならば追突リスクが、逆に十分(T2にマーキング)ならば被追突リスクが発生する。次に、Bのみのときは、危険を認知し、ブレーキングしたケースで、T2にマーキングがあれば、このときも被追突リスクが発生する。そして、Eのみのときは、全くの前方認知ミスが発生したケースで、追突リスクは高くなる。

これらが追突事故として顕在化するかどうかは、本シミュレータで生成される他の車両の走行状態による。それらを規定するパラメータを表-3に示す。まず、図-1と図-2のネット関連では、各閉塞区間での危険認知度とミス直結因子の発生率、路面状況とドライバー技能に係る制動性能とその発生率、および単路部全体で共通となるドライバー構成(例えば年齢)で定まる判断ミス、スリップミス、警戒心の発生率などである。ここで“など”とあるのは、上述したように、図-1のネットに必要な各種の処理時間が含まれるからである。一方、シミュレータ本体側には、交差点部手前を含む単路部を考えれば、閉塞区間長とタイマー更新表のパラメータ(最高速度、加速特性、発進遅れ)、および交通量と発生パターンがある。

さて、本シミュレータで生成される交通流の骨格は、最小車間々隔を定める閉塞区間長、実現車間々隔を決めるタイマー更新表のパラメータ、および交通量の発生率で定まる。現システムでは、閉塞区間長を6.7mとし、最高時速を40km、1閉塞区間当たり10km増の

加速性、発進遅れ0.3秒というタイマー更新表を基本的には使用している。これらのパラメータ値を使用した検証では、観測した実交差点流の最大処理数に近い値となる。

そこで、まず、他のパラメータは固定し、交通発生率と到着パターンのみを変えて、現システムで生成される交通流に内包されている追突事故リスクの評価シミュレーション実験を行う。そして、それらのリスク値を基準に骨格パラメータ値を変更し、そのときの対応事故リスクの相対評価を算定し、本シミュレータの内在リスクから見た“妥当な再現交通量”という概念の展開への利用である。もう1つは、本シミュレータの適用領域としている特殊交通流への適用で、例えばカーブ地点を含む交差点近辺のリスク評価と、そこでの速度制限やドライバーの注意喚起策の実施協議の支援システムとしての利用を提案したい。

4. あとがき

本論文では、事故リスク内在型の交通流のペトリネット・シミュレータを構成し、その実行性を確認した。そして、検証法として事故リスクを加味した“妥当な再現交通量”の議論や、その適用領域とする特殊交通流での計画案提言に際しての安全性協議支援への利用可能性を示した。また、事故は瞬時の問題とされるが、ドラスパー系のネットは、十分に瞬時に動くことを確認し、逆に、ドライバーと車両の諸処理時間のデータからの制約が、シミュレータの記述レベルを規定する閉塞区間長の設定に係わることも分かった。ドライバー系のネットには、まだまだ工夫や改善が必要であるし、交差点内の事故などのリスク評価の多様化も課題となる。それらの取扱いの出発点となる実事故のデータについては、運輸技術審議会の答申が示しているように、今後はより入手し易くなると期待している。

5. 参考文献

- 1) 木俣、他：ペトリネット型シミュレーションシステムの安全性確保機構の破綻化による事故モデルの基礎的研究、土木計画学研究・講演集、20(1)、1997。
- 2) M. G. Lay: Handbook of Road Technology, V-2, Godon and Breach Science Pub. 1998。