道路交通と連携した踏切制御の評価シミュレーション

正 員 福田 久治 (財) 鉄道総合技術研究所

Simulation for Effect of Crossing Gate Control Considering the Road Traffic

Hisaji Fukuda, Member (Railway Technical Research Institute)

Thanks to various countermeasures taken railway crossing accidents have decreased generally. Recently, however, many accidents are happening caused by cars violating the gate, posing a serious problem. Various proposals for improvement of the situation include, "fixed time control" and "crossing-mechanization with traffic signals", in addition to better visibility, but to be effective and efficient they must be submitted to preliminary assessment of their effect. We aim to realize a system which increases safety and harmonizes rail-road traffic by crossing gate control considering not only rail-side but also road-side.

The paper suggests several methods for quantitatively evaluating the effects of "fixed time control" and "crossing-mechanization with traffic signals" by a simulation considering the road traffic. "Fixed time control" is highly useful with a capacity of calculating different variations for the effect. In the simulation of "crossing control with signal linked to the road traffic", the result is generally consistent with reported record at an actual crossing. Moreover, conditions for crossing signal are selectively based on simulation taking combined rail-road traffic conditions as parameters.

キーワード: 安全性評価、鉄道事故、道路交通の円滑化、踏切定時間制御、踏切交通信号機化、評価シミュレーション

1. まえがき

踏切事故は一旦発生すると多数の死傷者を生じる恐れがあり、その対策は鉄道の安全運行にとって極めて重要である。様々な安全対策の実施により踏切事故は全体としては減少してきたが、最近の事故分析⁽¹⁾によれば、踏切事故の約6割は列車が接近しているのを無視した自動車の直前横断によるものである、又遮断時間と事故発生率には高い相関があることが分かる。そこで、従来の鉄道側だけの対策だけでなく道路等周囲環境も含めたより総合的な対策が必要であり、踏切視認性の向上に加えて、「踏切定時間制御」「踏切の交通信号機化」等が検討されている。しかし、これら対策が効果的効率的に行われるためには、事前の効果評価を行い、各踏切条件に適した方式、あるいは各方式に適した踏切の選定が検討されるべきである。

本論文では、安全性の一層の向上と道路交通との調和を実現するシステムの可能性を検討するという観点から、シミュレーションによる「踏切定時間制御」「踏切交通信号機化」の効果の評価方法を提案する。筆者らは先に、鉄道、道路、踏切構造（制御方式、交差点との関係等）により発生する複雑な交通流をパソコン上でビジュアルかつリアルタイム（動的）に発生させ、渋滞度や事故危険性、設備改善効果を定量的に評価することができる踏切シミュレータの開発について報告した⁽²⁾。ここでは、さらに発展させ、定時間制御、および交通信号機化の詳細なシミュレーション機能を実現したので報告する。以下2章で踏切制御の現状

について考察を行い、3章で道路交通と連携した踏切制御シミュレーションの考え方、4章、5章および6章でシミュレーションの実施結果と考察等について述べる。

2. 踏切制御の現状^{(3) (4) (5) (6)}

これまで鉄道では、踏切における安全確保のために多くの対策がとられてきた。それらは主に鉄道側からの対策であり、踏切制御に関しては、踏切制御装置の改良・開発、踏切警報・遮断時間の適正化、列車制御系と踏切のリンクがその中心になっている。

踏切制御装置の改良・開発としては、列車接近・通過検知を確実にするための踏切制御装置の電子化、踏切障害物検知装置（踏切内で立ち往生した自動車等支障物をセンサーにより検知し、列車に報知する装置）の導入（赤外線式やレーザ式）や開発（超音波、画像処理方式など）も行われている。これら方策は、踏切内の障害物を早期に検出して運転士に警報を与えることができるなど、鉄道交通の安全性向上において、一定の効果を上げている。また、踏切警報・遮断時間の適正化は踏切通行者が安全に通行できる踏切警報・遮断時間を保証するためのものであるが、遮断時間の短縮による道路交通の円滑化を目的とした場合も多い。

「踏切定時間制御」は、さらに一層の道路交通の円滑化を目的としたもので、列車速度（高速・低速列車等）による踏切警報時間のバラツキを均一化し、併せて遮断時間を

短縮する。列車速度検知（速度センサー）により、低速度列車でも踏切警報・遮断時間を長大にならないように抑えるなどの効果をあげている。また、列車種別選別装置などにより駅停車列車等の条件を踏切制御に反映できれば、より大きな効果が期待できるが、複雑な線区条件等により導入が困難な場合も多い。

最近では、さらに、踏切警報灯のオーバハング化などの人間工学の面からのアプローチも多く見られるようになった。また、より高度な踏切警報・遮断時間の適正化のための方策がとられているほか、踏切障害物検知装置と防護無線（緊急時に列車停止情報を出力する無線）やATS（自動列車停止装置）との結合などいくつかのより適当な対策例も見られる。

鉄道と道路が、踏切は共通の平面交差であるという視点に立って協調をとった踏切制御の代表的なものとして、「踏切交通信号機化」がある。これまでの踏切の安全対策は、鉄道側では踏切制御方式を、道路側では交通流を中心として検討というように、鉄道側と道路側の検討が個別に行われており、踏切の交通信号機化についての検討とその効果の評価は重要な意味を持つと考えられる。

踏切の交通信号機化は、自動車の踏切での一旦停止が必要なくなることによって、交通流がスムーズになるという利点がある。ところが、すでに国内において踏切の交通信号機化の実施例があるが、それらの多くは列車本数が数本／時までの鉄道側輸送量が少ない線区に限られている。これは踏切の一旦停止義務がなくなることによって、渋滞の発生時、踏切機器の故障時の安全面での対応力の低下が懸念されるためと考えられる。さらに、踏切に隣接して交差点がある場合には、一般に事故危険性が増加することが考えられるが、交差点の信号機を連動させた踏切の交通信号機化では、安全水準を同程度以上に保ちながら渋滞を減らすことができる可能性がある。

3. 道路交通と連携した踏切制御シミュレーションの基本的な考え方

踏切シミュレータは、踏切付近の交通状態をリアルタイムにビジュアルにパソコン上につくりだし、これによって渋滞等交通流や安全性を評価したり、また、設備改善効果の予測や警報制御の最適化、標識デザインの改良効果を調べることを目指したものである。

鉄道・列車部、道路・自動車部、踏切制御部（遮断制御方式、道路交差点との関係等）により主に構成されており、パラメータの設定により実際の状態をつくりだし渋滞等と対策との関係を把握したり、事故危険性を確率等により定量的に評価することができる⁽¹⁾。

ここでは、さらに発展させ、道路交通と連携した踏切制御方式として「定時間制御」、「交通信号機化」の効果を定量的に分析するために、詳細なシミュレーション機能を実現したものについて述べる。図1にこのシミュレーションのための交通流・事故発生のモデル概要、図2にシス

テムの動作画面例を示す。

道路交通と連携した踏切制御では、従来型のように鉄道側の条件（警報開始センサー（図2中の▲印）による列車接近検知）だけで踏切制御を行なうのではなく、道路交通・鉄道の様々な状況に対応した複雑な踏切制御が必要であり、個別に対応するのは困難である（図1、図2）。

そこで本シミュレーションでは、道路交通、鉄道交通、踏切制御の個別基本条件をパラメータ設定するとともに、相互間の制御条件をシーケンス制御として記述することにより、実際の複雑な制御方式が簡単に表現でき、様々な制御条件の下でオルタナティブ（代替案）が定量的に比較できるものとした。また、交通条件のキメ細かな組合せによる大規模シミュレーションをパラメータの組合せで実施

図1 道路交通と連携した踏切制御シミュレーションのモデル概要
Fig.1 Outlined simulation model of crossing gate control considering road traffic

図2 踏切シミュレータの動作画面例
Fig.2 Display example of crossing simulator

できるので、最適案の選択に役立つ等の特徴を持つ。以下「定時間制御」「交通信号機化」のそれぞれについて概要を述べる。

踏切制御は、一般に道路交通制御とは独立であり、

①列車接近時、警報開始センサによる列車検知、②踏切警報機の鳴動開始・遮断開始、③列車通過後、鳴動終了・遮断終了という一定のサイクルで実施される。このとき警報開始時間は列車到達時間をもとに設定されるが、安全上から最高速度列車の到達時間をもとに設定されるので、低速列車の場合警報・遮断時間が増加する。そこで、列車情報（列車速度、列車種別等）を利用し、列車速度や列車種別に合わせた制御を行えば遮断時間のバラツキの均一化・短縮化ができ、道路交通の渋滞軽減に役立つと期待される。図3に定時間制御シミュレーションのための実行手順を示す。

ここで警報開始点から踏切までの到達時間 T は次式で与えられる。

通過列車の場合

$$T = (x_0 + x) / v_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

駅停止列車の場合

$$T = t_0 + t_1 + T_0 + t_2 + t_3$$

$$= (x_0 - s_1) / v_0 + v_0 / \beta + T_0 + v_1 / \alpha + (x - s_2) / v_1$$

$$, S_1 = v_0^2 / 2 \beta, S_2 = v_1^2 / 2 \alpha \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに v_0, v_1 : 定速度（駅前後の定速走行時）

図3 定時間制御シミュレーションの動作フロー概要
(上) 動作フロー (下) 列車速度曲線(ランカーブ)

Fig. 3 Simulation procedure of fixed time control
(above: flow below: train run curve)

x_0 : 警報開始位置 x : 踏切位置

α : 加速度 β : 減速度

t_0, t_3 : 定速時間（駅前後）

t_1, t_2 : 減速・加速時間

T_0 : 駅停止時間

鉄道・道路間でより緊密な連携を行うためには踏切に交通信号機を設置し、さらに隣接交差点等の道路交通信号と連動制御させることが考えられる。連動制御には①踏切遮断情報（赤現示）を道路交通信号に与え踏切方向への車両進入を押さえるだけでなく、②列車接近情報をあらかじめ道路交通信号に通知し、早めに踏切に進入する車両を抑制したり、逆に既に踏切進入中の車両の通過を促進し、交通状況に合わせて制御することができる。このために各信号制御タイミングを系統的に設定できるシーケンス制御機能を用意した。図4に交通信号機化シミュレーションのための実行手順を示す。

図4 交通信号機化(シーク制御)シミュレーションの動作フロー概要
Fig. 4 Execution procedure of crossing-mechanism with traffic signal simulation

このシミュレーション機能により、定時間制御や交通信号機化の効果を評価できる。また、交通規制（踏切前後の速度等）、列車ダイヤ、踏切遮断方式（2組全遮断、定時間制御、交通信号機化等）、障害物検知装置等の実際的な条件を与えることによって交通流や安全性がどう変化するか詳細に評価することができる。

以下にこの踏切シミュレータの利用手順を簡単に示す。

(1) シミュレーション条件設定

- ①鉄道・列車（列車パターン、列車種別・列車ダイヤ、加減速度等）
- ②道路・自動車（道路交通量、自動車加減速度、交通規制、行違い、交差点設定・制御）
- ③踏切構造（踏切長、踏切幅員、勾配、駅近接条件設定）
- ④踏切制御方式（1・2組全遮断、警報時間、遮断時間、

定時間制御、交通信号機化)

⑤安全装置等 (非常ボタン、障害物検知装置)

⑥事故要因 (警報無視、一旦停止無視)

等に関するパラメータを設定する。

(2) シミュレーションの実行

上記のパラメータの設置に基づき、シミュレーションを実施する。

(3) シミュレーション結果の出力

シミュレーションのあらかじめ指定された時点で、あるいは終了後、結果ファイルの内容を分析し、様々な評価指標を計算し、帳票出力やグラフ表示をする。出力例は次の通りである。

①発生鉄道・道路交通量

②遮断回数・遮断時間

③踏切渋滞度評価、踏切事故危険性評価

④鉄道・道路交通状況タイミングチャート (時系列変動)

動作環境: PC9821 Xa (CPU Pentium 90MHZ, メモリ

7.6MB+16MB(EMS), HDD 1GB)

4. 踏切定時間制御シミュレーションの実施と考察

定時間制御シミュレーションでは、まず実際の列車・鉄道 (ダイヤ、列車性能等)、踏切構造条件等を与えてシミュレーションを実施し、次いで以下に示す定時間制御パラメータを設定後実施し、その出力結果を比較すれば、効果の評価ができる (表 1)。

表 1 定時間制御パラメータ

パラメータ値	内 容
(1) なし	定時間制御機能なし。
(2) 手動	列車が駅停止後、一旦踏切を開扉し、発車一定時間前に閉扉する。
(3) 自動	速度選別機能により、低速列車に対しても高速列車と同じ到達時間となるよう踏切制御を行う。
(4) 完全自動	(3)に加えて、列車種別選別機能により駅停止時間を考慮し、停車列車に対しても通過列車と同じ遮断時間となるよう踏切制御を行う。

シミュレーション実施結果として、タイミングチャート (構成要素の状況の時系列変動)、統計情報 {発生交通量、遮断回数・時間、旅行時間 (踏切を含む指定前後区間の通行時間)、事故発生状況等) を出力できる。タイミングチャートでは、渋滞状況の時間変動をグラフィックに表示し、詳細に検討することができる。また、統計情報により、シミュレーション実行時間中の平均旅行時間、事故発生状況を比較検討することにより、渋滞度や安全性の改善効果を定量的に評価できる。

図 5、図 6 にこの定時間制御シミュレーションの実施結果の出力例を示す。

定時間制御の効果の評価は一般的には① 遮断時間、②

遮断回数で行われるが、遮断時間の標準偏差によりバラツキの改善効果を確認することができる。さらに、ここでは①②を同時に評価するものとして次の期待待ち時間 T を提案する。

$$T(\text{秒}) = \{t/n \times 1/2\} \times t/3600 = t^2/7200n \dots\dots\dots (3)$$

$$= \{\text{1 回当たりの期待待ち時間}\} \times \text{遮断遭遇確率}$$

ここに、

T : 道路通行者が踏切を通行しようとした場合の待ち時間の期待値

t : 遮断時間 (秒) (1 時間当たり)

図 5 踏切シミュレータ出力例 (定時間制御の効果)

(ラッシュ時の遮断時間・回数ともに改善されている)

Fig.5 Output example of crossing simulator (effect of fixed time control: both suspended traffic time and num. at rush hour are improved)

図 6 定時間制御方式ごとの効果 (上: 駅中間踏切、下: 駅構内踏切)
(自動方式 (速度選別) は駅中間踏切では効果があるが、駅構内踏切では効果がありません)

Fig. 6 Effect of each fixed time control (above: in-station below: out-of-station)

5. 踏切交通信号機化シミュレーションの実施と考察

交通信号機化は、踏切に交通信号機を設置し、青信号時には一旦停止無しに踏切通行を可能にし渋滞軽減を図るものであるが、トリコ（前後の遮断機に閉じ込められ、踏切内で立ち往生すること）等による事故危険性の増加も同時に考えられ、問題を複雑にしている。

また、効果的、効率的な対策のためには事前の効果評価が重要であるが、「交通信号機化」の場合、道路交通と鉄道交通が複雑に絡むので効果の把握は一般に困難である。

踏切シミュレータでは、「交通信号機化」の効果、事故危険性が心配される交差点近接の踏切で実施した場合、さらに交差点と連動制御し安全措置を行った場合を、渋滞解消効果だけでなく事故危険性を含めて評価する（表2、図7）。

表2 交通信号機化パラメータ

Table 2 Parameters for crossing-mechanization with traffic

パラメータ値	内 容
(1)なし	交通信号機能なし。
(2)交通信号機	踏切に交通信号機設置。踏切青信号時は一旦停止なしに踏切進入できる。
(3)連動制御	(2)でさらに、列車接近（踏切赤信号）時は隣接交差点も赤信号にし踏切への車両進入を抑止する。
(4)シーケンス制御	各信号を系統制御する。(3)でさらに、踏切青信号（交差点→踏切）を長めに設定し踏切内に車両が停滞するのを抑止する。

図7（上）は、踏切シミュレータの動作画面である。踏切に交通信号機が設定、画面左下に連動制御のための制御シーケンスが表示されており、シミュレータがシーケンス制御で動作していることを示している。図7（下）はシーケンス制御による連動制御条件を設定するための詳細画面である。

〈5・1〉シーケンス制御シミュレーション

実際にシーケンス制御が導入された踏切（表3、図8、図9、図10）に適用し、発表された成果報告⁽⁷⁾（渋滞解消、トリコ減少効果）とほぼ同様の結果が得られたことを確認した。シミュレーション条件と結果の概要を表4に示す。
〔注〕改善後の旅行速度に程度の違いがあるが、これはシミュレーションでは最高速度が交通規則に従って設定されているのに対して、実際ではかなりの車両が最高速度の規制を無視して走る等によると考えられる。また、改善前のトリコの程度の違いは、シミュレーションでは前方渋滞で車両が踏切内に存在した場合、すべてトリコ状態としてカウントするのに対して、実測では危険性を感じたものだけをカウントする等によると考えられる。これらを考慮しほぼ同様の結果が得られたとした。〕

実施されたシーケンス制御は、隣接する実施例踏切および交差点の信号を系統制御化することによって、踏切への

図7 踏切シミュレータの踏切交通信号機化設定画面例

（上：交差点と連動制御 下：連動制御条件（シーケンス制御）

の詳細設定画面例）

Fig.7 Display example of crossing-mechanization with traffic signals set in crossing simulator

(above: coordinated control with road intersection signal)

(below: setting sequence control by detail parameters)

列車接近と信号制御を連動させ、踏切道交通と歩行者の安全や交通の円滑化の確保を図るものである。

通常時は、図9（上）のシーケンスに従い定周期動作する。踏切交通信号③（踏切→交差点）は、交差点信号①より先に赤表示とし、踏切から交差点に向かう車両が踏切内で渋滞しないよう、踏切の手前で停止させる。踏切交通信号④（交差点→踏切）は常時青とし、交差点からやってきた車両をできるだけ早く踏切外に出す。

列車接近時は、図9（下）のシーケンスに従い動作する。列車接近検知条件により、交差点①、踏切交通信号③（踏切→交差点）は、途中ステップをスキップして、赤現示を早め、安全確保を図る。踏切交通信号④（交差点→踏切）については、交差点信号赤現示の後、少し遅らせ（黄→赤）にし、車両を踏切外に出しやすくし、踏切内の渋滞解消を図っている。

発表された報告によれば、

- ・走行テスト（車両を運転して時間等を測定）：設備設置前後、それぞれ午後1時間に3回。

・全数調査：設備設置前後、それぞれ2時間（午前午後1時間）

で次の結果が得られた。

①平均旅行時間は、1.3km 区間で上下平均3分6秒が2分7秒に改善された。

（平均旅行速度に換算するとそれぞれ25.2km/h、36.9km/h。約1.46倍の渋滞改善効果があると考えられる。）

②安全性向上は、設備設置前はトリコ（ここでは近接交差点で信号待ちした際踏切内に車両の一部又は全部が入ったままで停止している状態）が918台中4台（0.4%）観測されたが、設置後は観測されなかった。

③上記①②より、渋滞解消、トリコ減少とも効果があったと考えられる。

表3 実施例の踏切諸元

Table 3 Attributes of an example crossing

跨線数等	横断線数：1本、踏切長：14.0m、踏切幅：11.3m
踏切種別等	踏切種別：1種半自動、遮断方式：2組全遮断
列車交通量	単線1回/時、列車種別：貨物、列車速度：最高40km/h
道路交通量	下り1100台、上り1045台（2時間の実態調査結果） 夏期は2～3倍（踏切実態調査表：14,915台/日）

図8 実施例踏切の交差点付近の略図
Fig.8 Rough sketch near an example crossing

表4 改善効果のシミュレーション結果

Table 4 Simulation results of improved effect

条件	評価項目	①旅行速度 (1.3km)	②トリコ発生
シミュレーション1（改善前）		26.39km/h (12km/h)	発生(76台)
交差点信号制御 青:12秒 黄:3秒 赤:21秒一旦停止2秒			
シミュレーション2（改善後）		29.23km/h (15km/h)	無し(0台)
シーケンス制御：列車検知による 先回り制御			

注1）旅行速度は、踏切前後区間(287.2m)の速度(表中()内の数値)を基に換算したもの。

注2）トリコは、前方渋滞で車両が踏切内に存在した場合をすべてカウントしたもの。

注3）自動車台数は、シミュレーション1、2ともに1,100台/時

図9 連動制御シーケンス（上：通常時、下：列車接近検知時）
Fig.9 Coordinated control sequence (above: normal, below: train approach)

図10 列車接近検知のタイミング
Fig.10 Train approach timing chart

シミュレーションにおける各構成要素のシーケンス制御動作はトレース機能により、既に確認済みであり、上記の結果と併せて、本シミュレータの妥当性の検証がなされたと考える。

＜5・2＞ 交通条件パラメータの組み合わせによる「交通信号機化」条件の選定

踏切シミュレータにおいて、交通条件パラメータ（鉄道交通量、道路交通量）を変化させ、その組み合わせと渋滞解消度（平均旅行速度（踏切を含む指定区間の平均通行速度）の比、安全度（トリコ発生）の関係を分析した。表5によればシーケンス制御を導入することにより、自動車交通量が500台/時以上で、列車本数が3本/時（片側）以下においては、トリコ発生がほとんどなくかつ渋滞解消効果がかなりあること等が分かる（ただし、自動車交通量1000台/時、列車本数3本/時を除く）。

表5 交差点近接踏切におけるシーケンス制御の効果のシミュレーション結果

Table 5 Simulation results of sequence control effect at a crossing near the intersection

鉄道交通量 (列車本数/時)	自動車交通量 (台/時)				
	10	100	300	500	1000
1	1.12	1.13	1.28△	2.26◎	1.54◎
2	1.11	1.16△	1.21△	2.30◎	1.79◎
3	1.04	1.15△	1.31○	2.22◎	1.76
6	1.18△	1.17△	1.31	2.26	1.76
12	1.17△	1.24△	1.36	2.63	2.15

注1) 表中の数値は渋滞解消度を示す。

注2) 交通信号機化によってトリコの発生数は減少している。

注3) 表中の記号はトリコ発生がほとんどなく、かつ渋滞解消結果が高いものを示す。

△は渋滞解消効果が2割以上、○は3割以上、◎は5割以上を表す。

6. むすび

本報告では、道路交通と連携した踏切制御のあり方の検討に役立てるため、シミュレーションによる「定時間制御」および「踏切交通信号機化」の効果の定量的評価手法について提案を行った。定時間制御については、実際の列車ダイヤに基づいた24時間走行で遮断動作、遮断時間が妥当なことを既に確認済みであり⁽²⁾、その上で各種定時間制御方式の効果が算出できる機能とした。交通信号機化については、データが公表された実施踏切例を想定したシミュレーションでは、交通渋滞の減少などその結果は同踏切での実測値とほぼ一致し、これによりシミュレーションの妥当性を確認した。さらに交通条件をパラメータとしたシミュレーションを行い、交通信号機化の条件を選定した。

本研究の成果は実際の全国レベルの施策の検討にも役立てられた。今後の課題としては、実測データとの付き合い合わせによるモデルの精度向上は当然のことであるが、さらに個別具体的な踏切への適用、設備改善に当たってのより詳細なガイドライン作成に役立てること等が挙げられる。

最後に、この報告をまとめるに当たり実態調査等で多大なるご協力を頂いた関係各位に心からの謝意を表します。

(平成9年5月12日受付、平成9年10月27日再受付)

文 献

- (1) 総務庁編：交通安全白書，平成2年度～7年度
- (2) 福田久治：多面的交通流解析のための踏切シミュレータの開発、電気学会論文誌D，Vol. 116-D，No. 10 (1996)
- (3) 日本鉄道電気技術協会編：踏切保安装置 (1992)
- (4) 宮地正和：踏切対策特集号，JREA，Vol. 35，No. 11 (1992)
- (5) 広瀬雄造：トランスポンダを用いた踏切警報制御，鉄道と電気技術，Vol. 3，No. 2 (1992)
- (6) 酒井次得郎：A T S連動の踏切障害物検知，JREA，

Vol. 21，No. 8 (1978)

- (7) 広浜昭一：踏切信号機の設置とその運用効果、電気学会電気鉄道研究会資料，TER-91-5 RTA-91-5 (1991)

福田 久治

(正員) 1948年1月8日生まれ。89年3

月日本大学大学院理工学研究科博士前期課程数学専攻卒業。82年鉄道技術研究所、組織変更により、87年(財)鉄道総合技術研究所。主として、情報処理、数理解析、システム安全性・信頼性解析の研究開発に従事。現在、同研究所主任研究員。理学博士。