

第3章 合流制御アルゴリズム

3.1 はじめに

高速道路における自動車走行の安全と効率を両立させるためには、単路における定常的な車両の走行制御だけでなく、合流時や車線変更における車両の走行制御が必要である [20]. 1990 年前後から ITS の枠組みの中で自動運転システムに関する研究が盛んに行われてきている。ここでは、単独車両や車両群の自動運転システムが取り上げられているが、複数車線にまたがる柔軟な協調走行や車両群への割り込み、合流に対する車両群の過渡状態における運転支援や制御に関する研究は、自動車交通の効率の観点から重要であるにも関わらず、まだ十分に行われていない。

これまでに自動車交通流における合流を理論的に扱った研究は、いくつか行われている [6]. Shladover [8] は、軌道での合流におけるロンジチューディナル制御を提案した。この研究では、合流制御にロンジチューディナル制御を使用すると、交通流の効率を上げることが可能であることをシミュレーションにより示している。しかし、この研究は軌道を前提としているため、そのままでは自動運転システムに応用することができない。Posch [7] は合流に関するアプローチを行った。ここでは路車間通信を用い、合流地点付近において合流車両間で合流順序を決定し、ロンジチューディナル制御を行うことで合流を実現している。彼らはコンピュータシミュレーションによりその有効性を示した。Varaiya [21] はプラトーンを基本とし、多車線におけるプラトーンの合流や分裂、車線変更などといった車両群の動作を実現している。ここでは、各車両間で通信が行われ、各車両の状態毎に振る舞いを決めている。ここで扱われる状態は非常に多くかなり複雑なものになっている。

ランプや車線変更時の車両制御に関する研究はまだほとんど行われていない。本研究では、仮想車両という新しい概念を用いた車両の合流制御アルゴリズムを提案する。この合流制御アルゴリズムは車両間通信を前提にしており、仮想車両に対してロンジチューディナル制御を行なうことで合流を実現している。

3.2 仮想車両による合流制御

複数台の車両で構成される車両群が安全かつ円滑に合流するためには、合流前に合流後の車間距離を十分に確保しておく必要がある。しかし、合流しようとする車両はそれぞれ異なる車線上に存在するため、そのままでは合流に必要な車間距離を確保することは難しい。この問題を解決するために、本研究では合流時に車間距離制御の対象となる車両を自車の前方に仮想的に生成し、その生成した車両に対して車間距離制御を行うことを提案する。自車線上に存在を仮定したこの車両のことを、ここでは仮想車両と呼ぶことにする。図 3.1 に仮想車両の生成の一例を示す。この図では、支線上の車両 B が、本線上を走行する車両 A を支線上に投影して仮想車両 A' を生成している。車両 B は、この仮想車両 A' に対して車間距離制御を行い合流を実現する。この時、車両 B が仮想車両 A' を生成するために必要な情報 (車両 A の位置情報など) を得るためには、車両 A との車両間通信が必要となる。

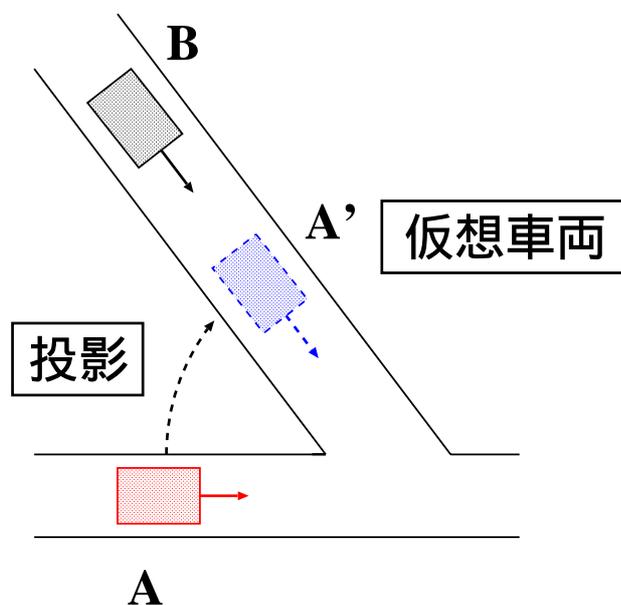


図 3.1: 仮想車両の生成方法

単独車両が、複数台の車両により構成される車両群に合流する場合を考える。この場合、合流を合流路における合流と車線変更による合流の 2 つに分けて考える。

3.2.1 合流路における合流

簡単のため，1レーンの支線上の車両が1レーンの本線に合流する場合を仮定する．この場合，合流パターンは次の3パターンに分類することができる．

- パターン 1：支線上の車両が本線上の車両群の後方に合流する場合．
- パターン 2：支線上の車両が本線上の車両群の前方に合流する場合．
- パターン 3：支線上の車両が本線上の車両群の間に合流する場合．

車両が他の車両と衝突する事無く円滑に合流するためには，合流までに十分な車間距離を確保する必要がある．各合流パターンにおける合流方法を以下に示す．

(1) 合流パターン 1

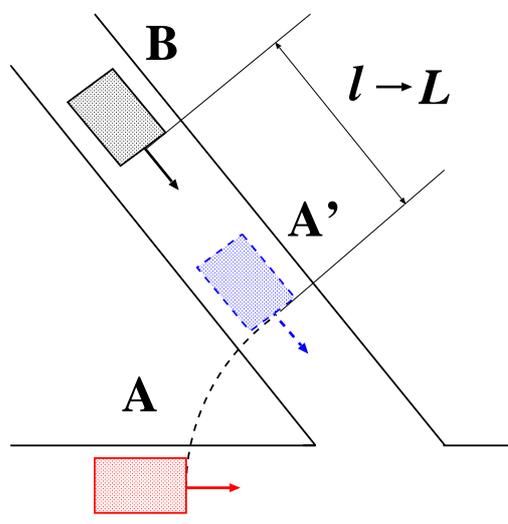


図 3.2: 合流パターン 1

合流地点を通過後，支線上の車両 B は本線上の車両 A の後方に位置し追従走行を行うことになる．後続の車両 B は自車線上に仮想車両 A' を生成し，仮想車両 A' に対して車間距離制御を行い，車間距離 l を設定車間距離 L に調整する．このとき，後続の車両 B は先行する車両 A の情報を必要とする．

(2) 合流パターン 2

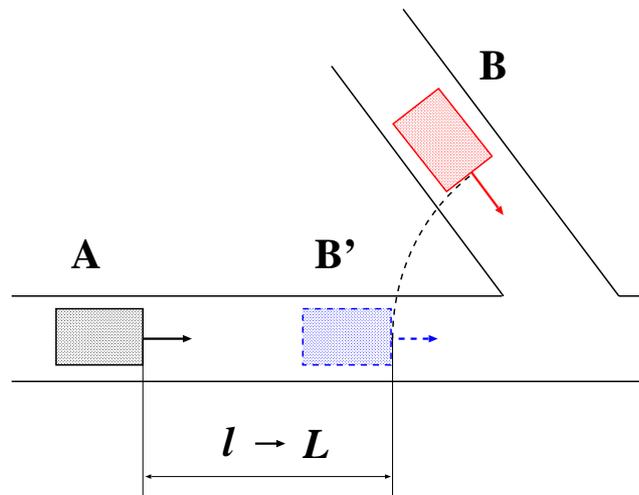


図 3.3: 合流パターン 2

合流地点を通過後，車両 A が車両 B の後方に位置し追従走行を行うことになる．この場合は合流パターン 1 の場合と逆に，後続の車両 A は自車線上に仮想車両 B' を生成し車間距離を確保する．

(3) 合流パターン 3

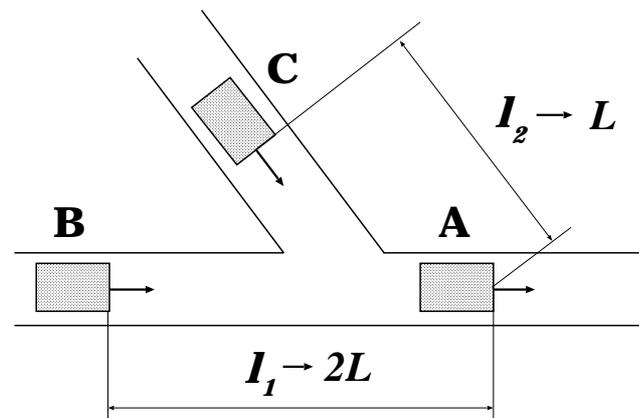


図 3.4: 合流パターン 3

支線を走行する車両 C が合流地点を通過後，本線を走行する車両群に割り込む形になる．車両 A と車両 C の位置関係は合流パターン 1 の場合と同じで，車両 C は仮想車両 A' を生成し，車間距離 l_2 の調整を行う．また，車両 C は車両 B の前方に割り込む形になる．

これは合流パターン 2 の場合と同じであるが，先行車両 A との車間距離 l_1 が合流前の L から合流後 $2L$ に変化するだけなので，車両 B は仮想車両を生成する必要は無い．この場合，車両 B は車両 A の位置情報を必要とする．

いずれの合流パターンにおいても，車両間通信で得た対象車両のデータから仮想車両を生成し，仮想車両に対して車間距離制御を行うことによって合流が実現されている．

3.2.2 車線変更による合流

簡単のため，車線変更は隣接した車線間でのみ行われるものと仮定する．車線変更による合流の場合も，合流路における合流の場合と同じように合流パターンを以下の 3 パターンに分類することができる．

- パターン 1：自車が目標車線上の車両群の後方に合流する場合．
- パターン 2：自車が目標車線上の車両群の前方に合流する場合．
- パターン 3：自車が目標車線上の車両群の間に合流する場合．

各合流パターンにおける仮想車両の生成方法を図 3.5 に示す．図 3.5 から解るように，各合流パターンは基本的に合流路における合流パターンと同じ方法で取り扱うことが可能である．

合流路における合流の場合，構造的制約から合流点に達するまでに合流準備を完了させる必要があるが，車線変更による合流の場合には，合流準備が完了次第合流を行うことが出来る．そのため，合流する車両群間において合流準備が完了したことを知らせる必要がある．この情報は車両間通信を使用して伝えることになる．

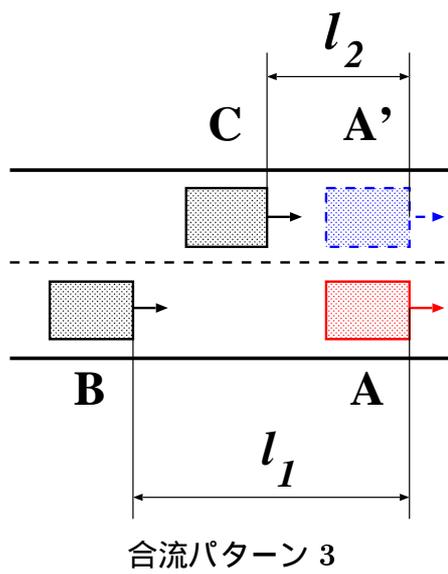
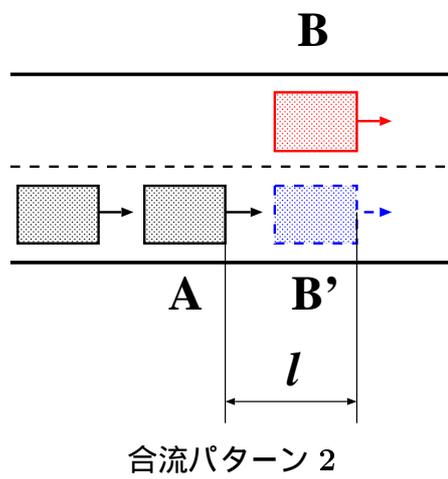
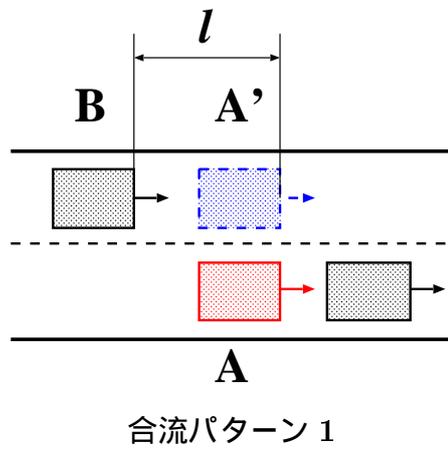


図 3.5: 車線変更による合流

3.2.3 合流パターンの組合せ

実際の合流は、前述した各合流パターンを組み合わせることで実現される。ここでは各合流パターンを車両の走行状態で表し、その状態の遷移で合流アルゴリズムを構成する。

前述の3つの合流パターンのうち、合流パターン1と合流パターン2は自車線以外の車線上の車両を仮想車両として自車線上に投影し、その仮想車両に対して追従走行を行うという点が同じなので同一の状態として扱う。また、合流パターン3については、割り込む車両と前方を他車に割り込まれる車両の二つの場合それぞれについて別に扱う。この場合、割り込む車両は仮想車両を生成して合流を行うので、合流パターン1と同じ状態として扱う。一方、割り込まれる車両は車間距離を $2L$ とする追従走行として扱う。これら以外の状態に、フリー走行、追従走行(実車両に対して車間距離を L とした追従)の二つの状態を追加する。これらをまとめると以下ようになる。

- 状態0：フリー走行 — 単独走行。他から制約を受けない走行。
- 状態1：追従走行その1 — 車間距離を L とした実車両に対する追従走行。
- 状態2：追従走行その2 — 車間距離を L とした仮想両に対する追従走行。
- 状態3：追従走行その3 — 車間距離を $2L$ とした実車両に対する追従走行。

これらの状態遷移図を図 3.6 に示す。

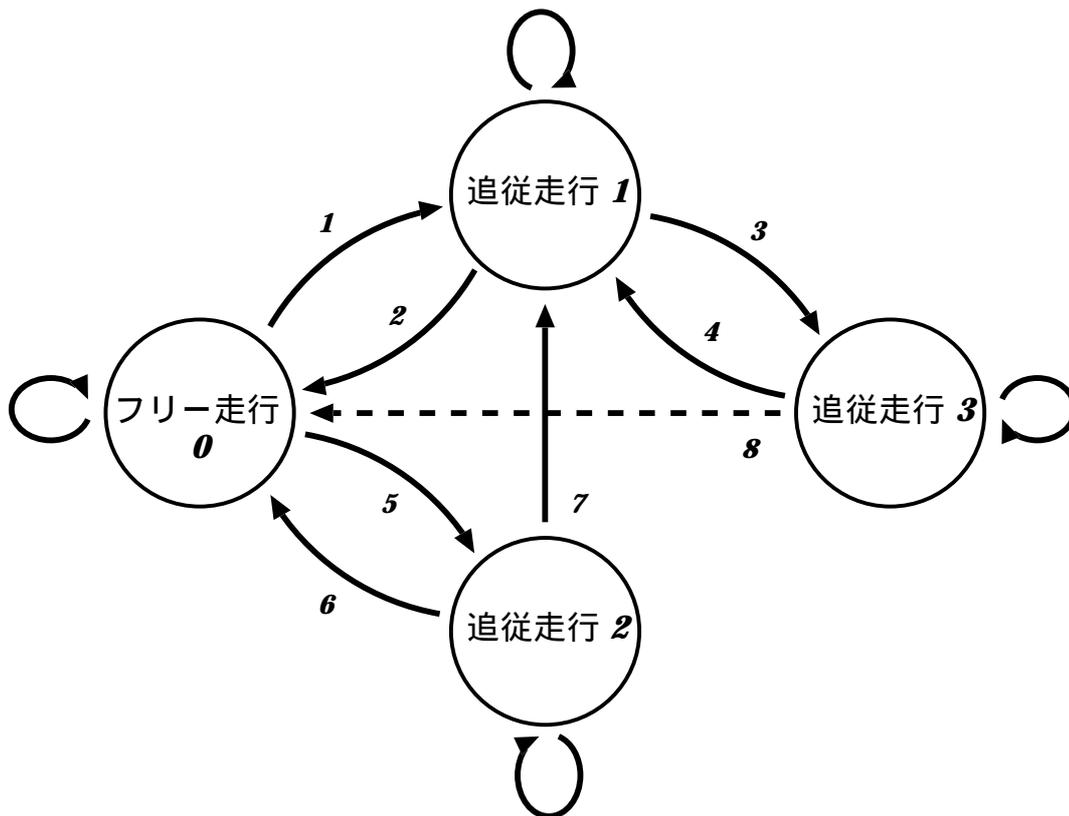


図 3.6: 合流時の状態遷移図

図 3.6 中の遷移条件

1. 追従車両が存在
2. 追従車両が存在
3. 前方に割り込み車両が存在
4. 割り込み車両が存在 または 割り込み終了
5. 前方に割り込み車両が存在
6. 追従車両が存在
7. 割り込み終了
8. 追従車両が存在

3.3 車両群同士の合流

車両群同士の合流は単独車両の合流に分解して考えることができる。しかし、 m 台で構成される車両群と n 台で構成される車両群同士が合流する場合、仮想車両を用いた合流アルゴリズムをそのまま用いると、合流に関係する車両間で個別に車両間通信を行わなければならない。これはリングネットワークの合流時の問題と同様で、車両間通信に最大で $2m \times n$ チャンネルが必要になるという問題をはらんでいる。そこで、仮想車両を用いた合流アルゴリズムを車両間通信アルゴリズムと同様に、車両群間の通信を車両群の先頭車両間に限定した合流アルゴリズムに拡張する。この場合、リングネットワークの合流と同様に車両群間通信は 2 チャンネルあればよい。

拡張したアルゴリズムでは、車両群の先頭車両は仮想車両を用いた合流アルゴリズムに基づいた合流を行う。車両群の先頭車両が合流を予測した場合、後続車両にその時の追従対象を保持したまま合流に必要な車間距離を確保するように指示を出すことで車両群の合流を行う。その結果、本アルゴリズムでは、車両群間通信を各車両群の先頭車両間に限定することができ、車両群内の後続車両が行う通信は車両群内通信と他車両群の先頭車両からの通信の受信に限定することができる。

グループ分けによる解

各車両は、他車両の走行状態や車両間通信により得られた情報から自車の行動を決定する必要がある。そこで、車両群内の各車両の走行状態 (“ポテンシャル” と呼ぶ) に基づいて自車の走行状態を決定する。

本アルゴリズムでは、車両群内通信から見た車両群を “グループ” として以下のように定義する。

1. 各車両は必ず何らかのポテンシャルを持ち、そのポテンシャルには必ず優先順位が存在する。一つの車両群は必ずしも一つのグループに対応するわけではなく、必要に応じて一つの車両群が二つ以上のグループになることもある。
2. グループは最低一台の車両から構成される (グループの最小単位)。
3. グループの先頭に位置する車両のポテンシャルが、その時点におけるグループ全体のポテンシャルとなる (“グループポテンシャル” と呼ぶ)。
4. ポテンシャルによってはグループの構成台数に制限を設ける。制限を越えた車両が存在する場合には、それ以降の車両で新たにグループを構成する。

また，グループは以下のような場合に再構成を行う．

1. グループ内でグループポテンシャルよりも優先順位の高いポテンシャルを持つ車両が現れた場合，その車両を先頭にした新たなグループを構成し，新旧2つのグループに分裂する．
2. グループの先頭車両のポテンシャルが変化した場合，グループ内の各車両のポテンシャルにしたがってグループを再構成する．

今回の合流アルゴリズムでは，以下の3種類のポテンシャルを定義する．

- ポテンシャル0：フリー走行
- ポテンシャル1：追従走行
- ポテンシャル2：合流

各ポテンシャルの優先順位はポテンシャル0が最も低く，ポテンシャル2が最も高い．ポテンシャル0(フリー走行)とは，仮想車両を用いた合流アルゴリズムが使用される状態のことである．なお，ポテンシャル2の最大構成台数は合流してくる車両群の構成台数により決定される(ここでは他のポテンシャルについて制限を設けない)．

グループの定義に従って，車両群をグループ分けした結果を図3.7，図3.8に示す．

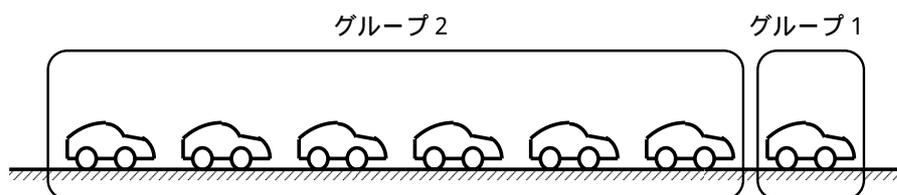


図3.7: グループ分け その1

図3.7は，7台で構成される車両群のグループ分けの例である．グループ1はフリー走行を行うグループで，先頭車両1台で構成される．そして，グループ2は追従走行を行うグループとなる．

図3.8はある車両群に対して，他の車両群が合流しようとしている場合のグループ分けの例である．グループ1はフリー走行を行うグループで，グループ2は追従走行を行うグループである．グループ3，グループ4の構成車両は，合流が始まるまではグループ2の構成車両であったが，車両が合流してくることによりポテンシャルが変化し(ポテンシャル1からポテンシャル2へ)新しいグループ(グループ3)を構成する．ここでは3台の車両が合流してくるので，グループ3(ポテンシャル2)の最大構成台数は3台となる．グルー

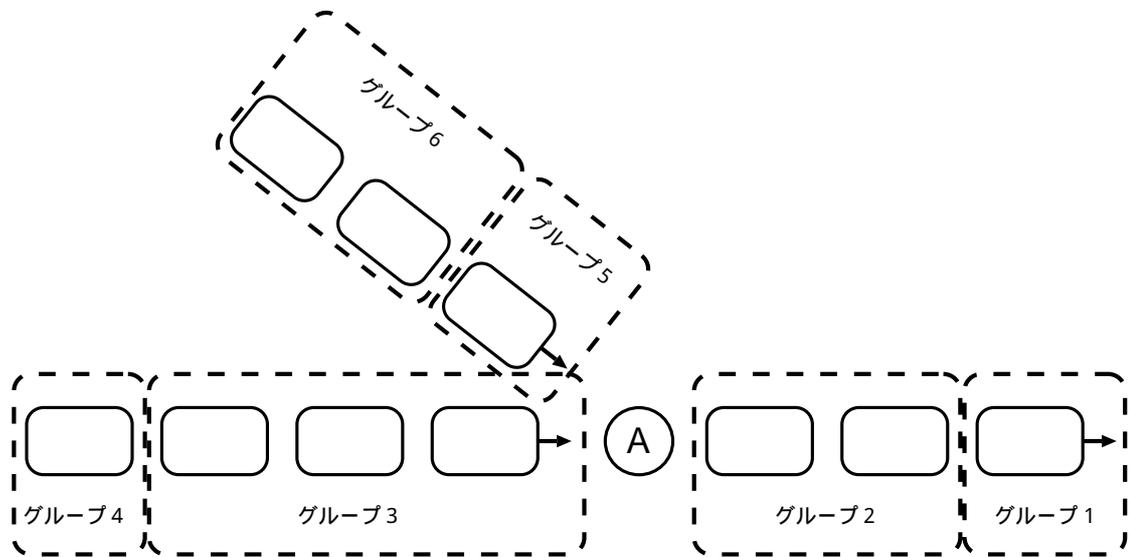


図 3.8: グループ分け その 2 (上から見た図)

プ 3 より後方の車両は合流とは直接関係なく，合流前と同じように前方の車両に対して追従走行を行えばよいので，ポテンシャル 1 を持ったグループ 4 の構成車両となる．一方，合流してくる車両群は合流が始まるまでは図 3.7 と同じグループ構成だったが，合流が始まると車両群の先頭車両 (グループ 5) はポテンシャル 0 のまま合流のための仮想車両に対する追従走行を行い，後続車両 (グループ 6) は合流準備をするためポテンシャル 1 からポテンシャル 2 へと変化する．

各車両群の先頭車両は車両群間通信を行い，他の車両は車両群内通信と車両群間通信の受信を行うことになる．なお，合流時にポテンシャル 2 の構成台数を制限するため各グループの先頭車両は，自分の受け持つグループの構成台数を予め知っておく必要があり，それには車両群内通信を使用する．

合流が終了した車両のポテンシャルは順次，ポテンシャル 2 からポテンシャル 1 へ変化するし，引き続き追従走行を行うことになる．

3.4 シミュレーション実験

3.4.1 ロンジチューディナル制御アルゴリズム

まず、シミュレーションで使ったロンジチューディナル(速度)制御アルゴリズム[22]について説明する。ここで使用するロンジチューディナル制御は、設定車間距離(設定車頭間距離)における偏差の動特性を用いて各車両の制御入力を求めている。

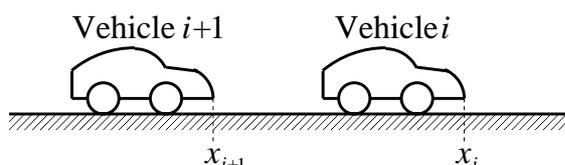


図 3.9: 車両の追従走行

図 3.9 に示すように、一列に走行している車両群の先頭を 1 番とし、以下 2, 3, 4, ..., i , ... と番号をつける。この時、車両 i の動特性を最も簡単な形式で次のように表す。

$$\ddot{x}_i = u_i \quad (3.1)$$

ここで、 x_i と u_i は車両 i の位置と制御入力を表している。車両 i と $i+1$ との設定車間距離を L とした時の各車両の位置偏差を e_i で表すと、偏差 e_i は次のようになる。

$$e_i = (x_i - x_{i+1}) - L \quad (3.2)$$

(3.1), (3.2) 式より、位置偏差 e_i に関する次の方程式が導き出される。

$$\ddot{e}_i = u_i - u_{i+1} \quad (3.3)$$

この位置偏差システムに対し、図 3.10 に示すような PD 制御によるフィードバック制御系を構成する。制御系の設定値は 0 である。ここで、 k_1 と k_2 は決定すべきフィードバックゲインである。

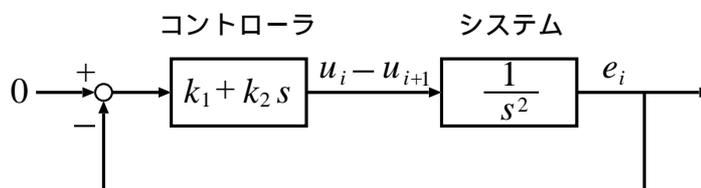


図 3.10: スペースヘッドウェイ偏差の PD 制御系

極配置法 22 から , 車両 $i + 1$ への制御入力 u_{i+1} は ,

$$u_{i+1} = u_i + k_1 e_i + k_2 \dot{e}_i \quad (3.4)$$

となる .

今回のシミュレーション実験では $k_1 = 0.3$, $k_2 = 3.1$ を用いた .

3.4.2 シミュレーション条件

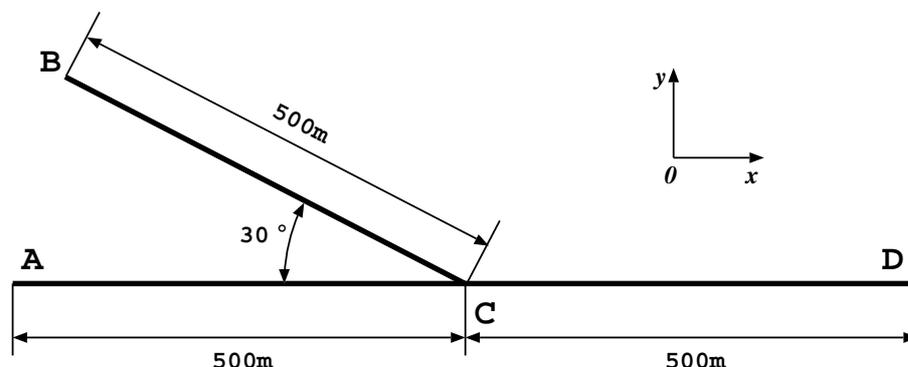


図 3.11: シミュレーションコース

シミュレーションには図 3.11 に示すようなコースを想定し，合流地点 (C) から 300m の範囲において車両群間通信 (ただし，車両群間通信を行わない場合は車両群間における車両間通信) が行われることとした．制御周期と通信周期は同期している．その他の条件を表 3.1 に示す．加速度の制限は，実車両では急激な加速度に対応できないために設けている．また，図 3.11 に示すシミュレーションコースでは，合流地点での合流角度を 30° に設定しているが，本合流制御アルゴリズムは合流角度に依存するものではないので，その角度は何度でもよいことを付け加えておく．

表 3.1: シミュレーションに用いた各パラメータ値

初速度	22.2m/s (80km/h)
加速度	最高 0.1G，最低 -0.1G
設定車間距離	20m
車両群間通信範囲	合流地点 (C) から 300m の範囲
制御周期	0.01s
通信周期	0.01s
通信による遅れ	無し

シミュレーションは 3 通りの合流パターン (図 3.2，図 3.3，図 3.4) と車両群同士のランプにおける合流それぞれについて行った．なお，3 台以上の車両が合流する場合は，車両群間通信を使う場合と使わない場合の 2 通りについてシミュレーションを行っている．

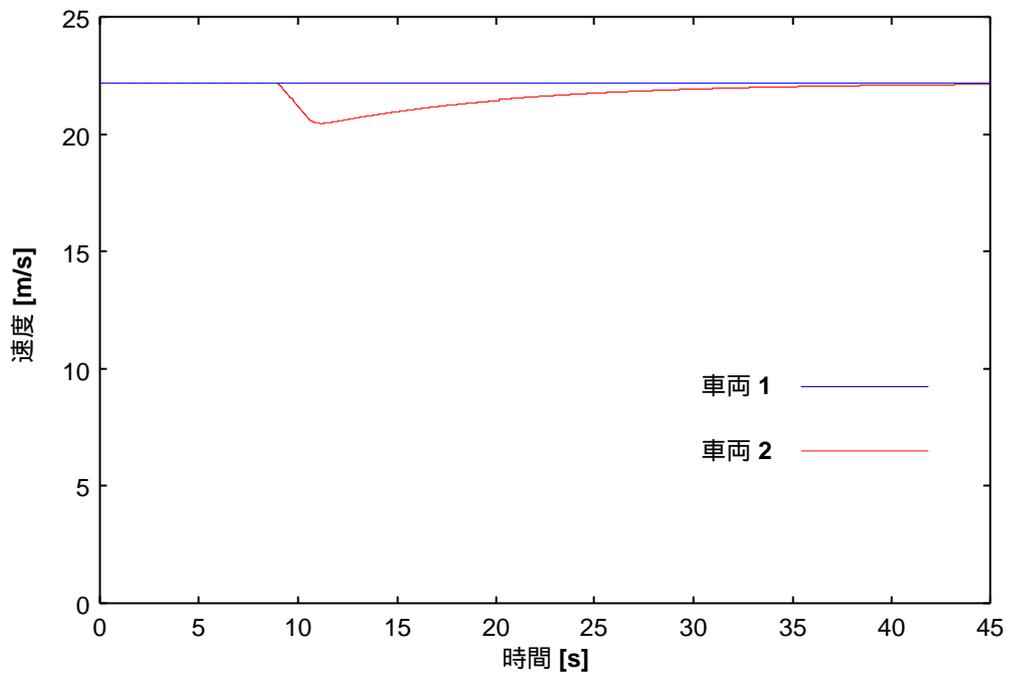
3.4.3 合流パターン 1

各車両の初期位置は表 3.2 に示すように設定した。

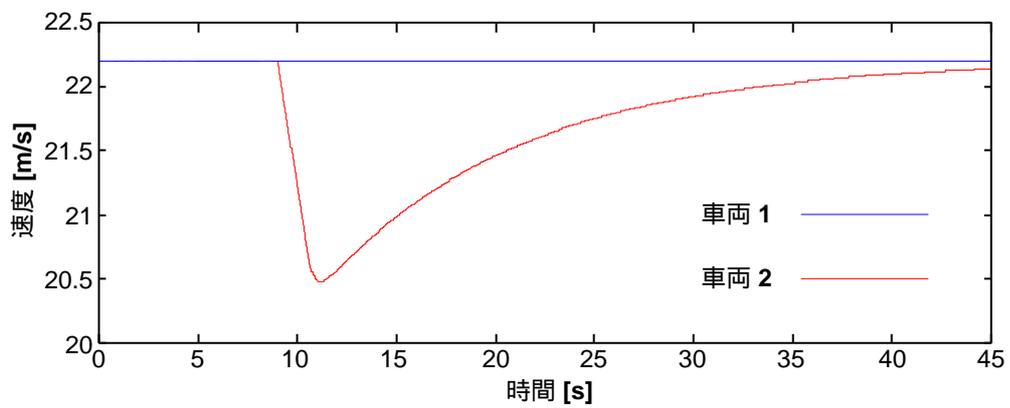
表 3.2: 合流パターン 1 の場合の初期位置

車両番号	初期位置	走行コース
1	C から 500m の位置	本線 (A - C - D)
2	C から 500m の位置	支線 (B - C - D)

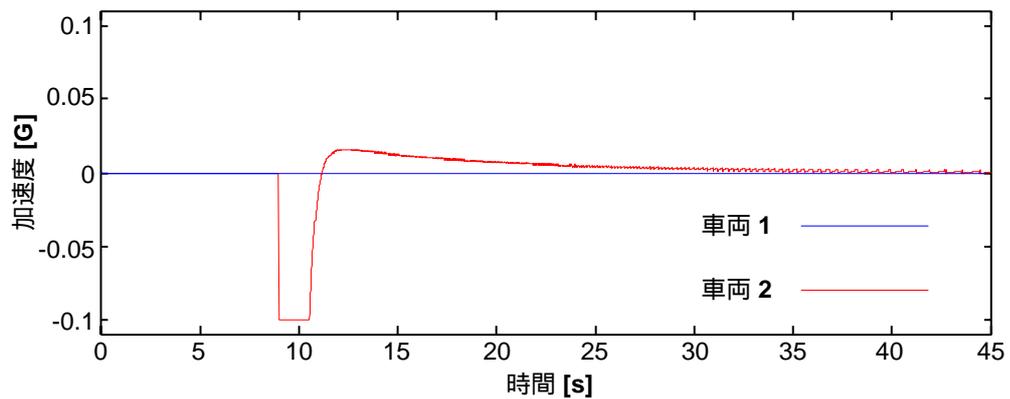
車両 1 は常に 状態 0(フリー走行) なので、速度、加速度共に変化は無く一定とした。図 3.12 に各車両の速度と加速度のグラフを示す。車両 2 は 9 秒付近から減速が始まっている。これは、車両 2 が車両群間通信範囲に到達し、情報交換の結果車両の走行状態が状態 0(フリー走行) から 状態 2(仮想車両に対する追従) へ変化したためである。合流地点を通過する際に 車両 2 の走行状態が 状態 2(仮想車両に対する追従) から 状態 1(実車両に対する追従) に変化しているが、走行状態が変化しても追従対象が変わらないために 車両 2 の走行に対してなんら影響を及ぼしていない。図 3.13 より、合流地点を通過するまでに十分な車間距離を確保し、衝突することなく合流ができていることがわかる。



(a) 車両の速度

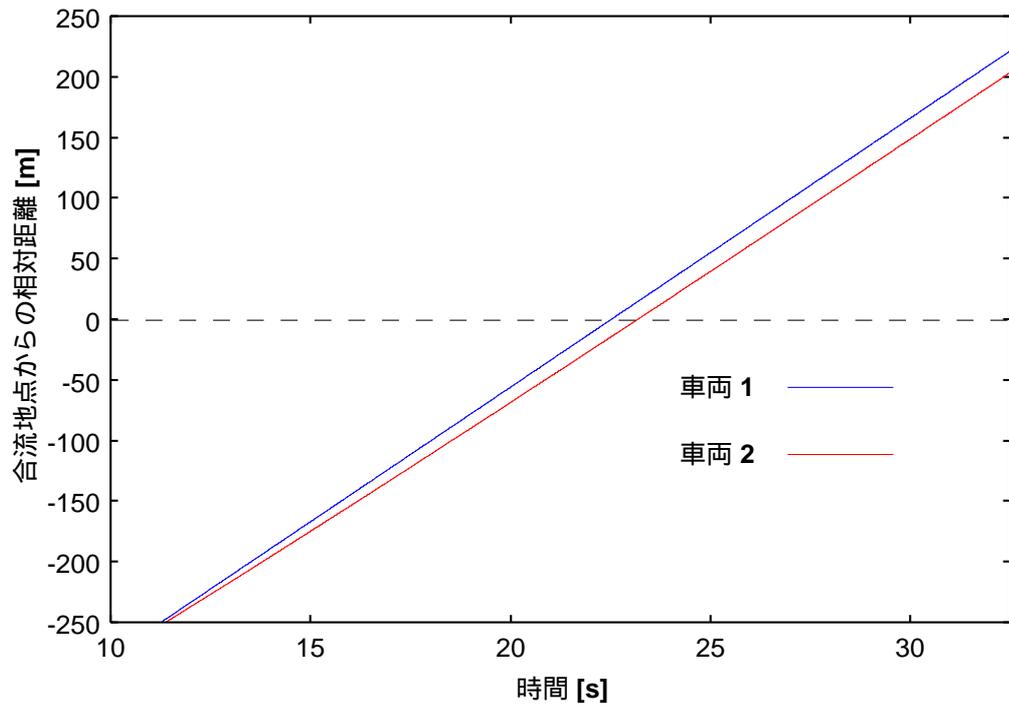
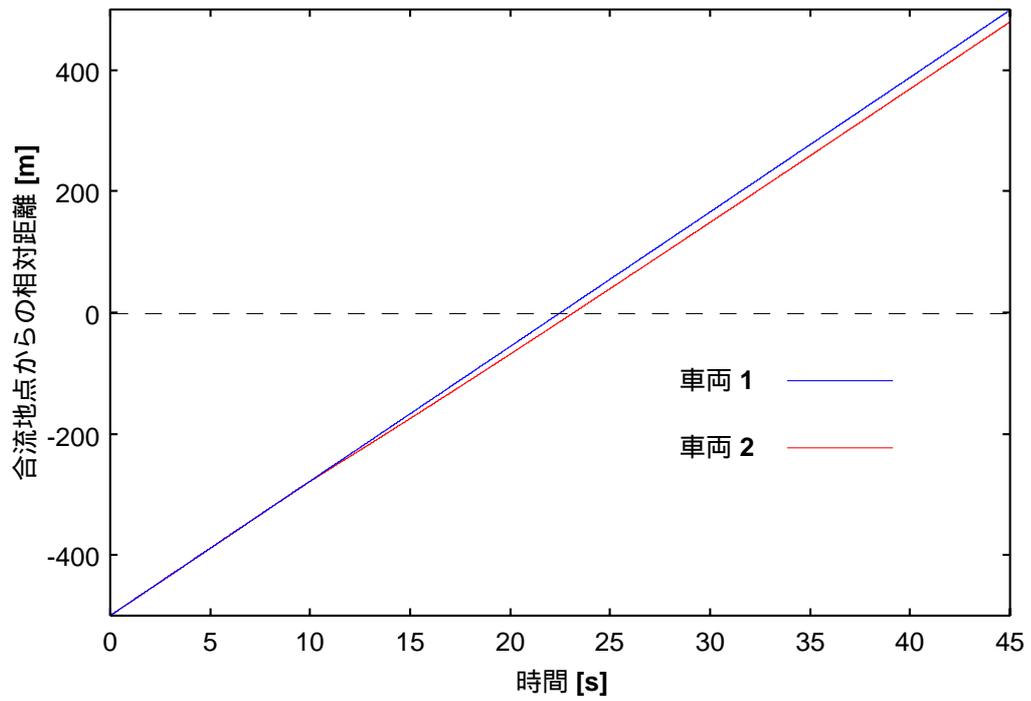


(b) 車両の速度 (拡大図)



(c) 車両の加速度

図 3.12: 車両の速度と加速度



(合流地点付近の拡大図)

図 3.13: 車両の走行軌跡

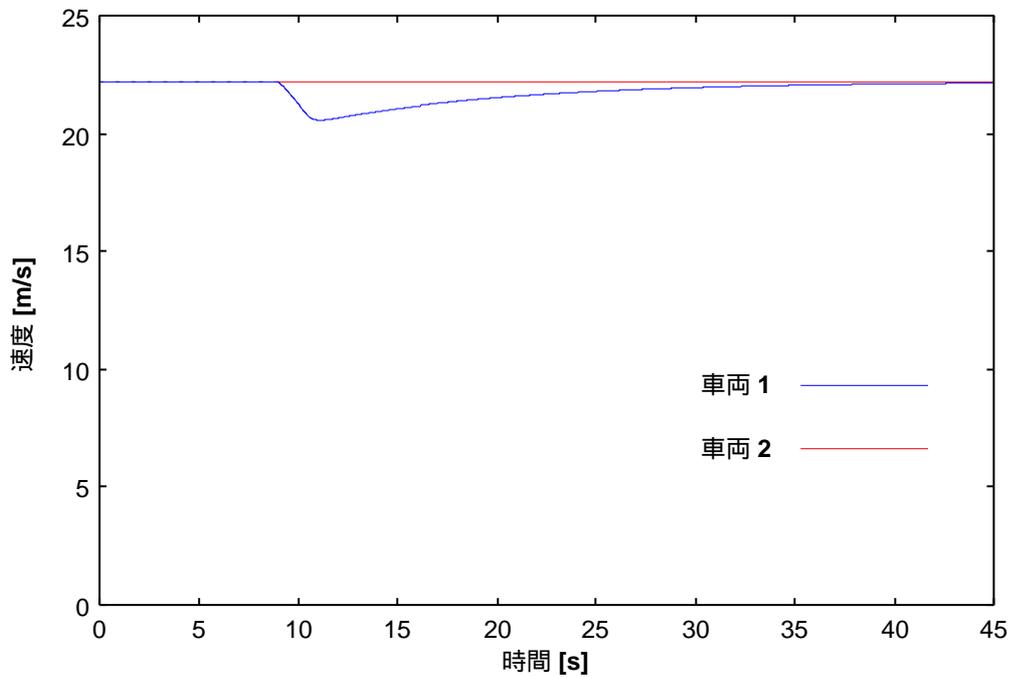
3.4.4 合流パターン 2

各車両の初期位置は表 3.3 に示すように設定した。車両 2 の初期位置が車両 1 よりも合流地点に対して 1m 近く設定しているのは、本線上の車両と支線上の車両が全く同じ条件で合流地点に進入した場合には本線上の車両が優先されるため、合流パターン 1 の場合と同じ条件になってしまうからである。

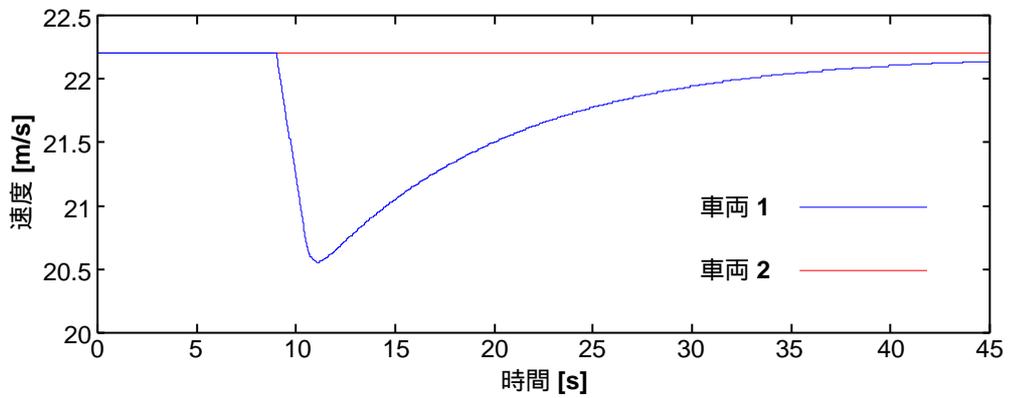
表 3.3: 合流パターン 2 の場合の初期位置

車両番号	初期位置	走行コース
1	C から 500m の位置	本線 (A - C - D)
2	C から 499m の位置	支線 (B - C - D)

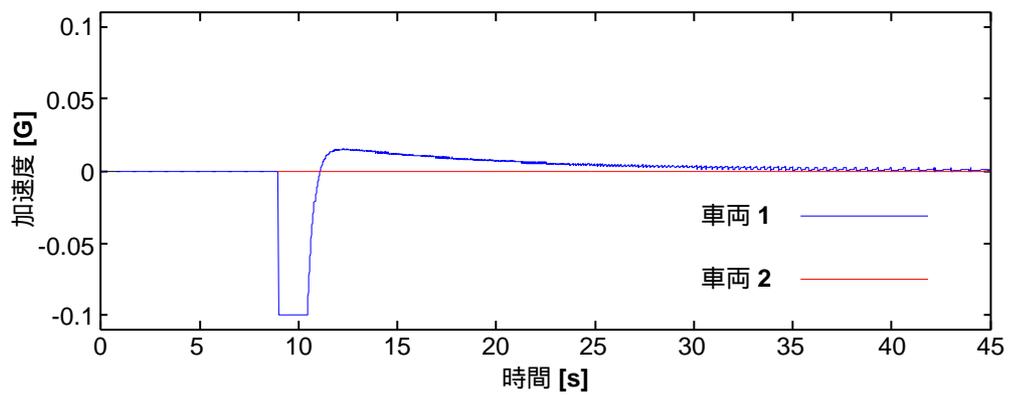
図 3.14 に各車両の速度と加速度のグラフを、図 3.15 に各車両の走行軌跡を示す。車両 2 は常に 状態 0(フリー走行) なので、速度、加速度共に変化は無く一定である。車両 1 は 9 秒付近から減速が始まっている。これは、状態 0(フリー走行) から 状態 2(仮想車両に対する追従) へ変化したためである。合流パターン 1 の場合と同じく、合流地点を通過する際に 車両 1 の走行状態が 状態 2(仮想車両に対する追従) から 状態 1(実車両に対する追従) に変化している。これらの振る舞いは合流パターン 1 と同じである。



(a) 車両の速度

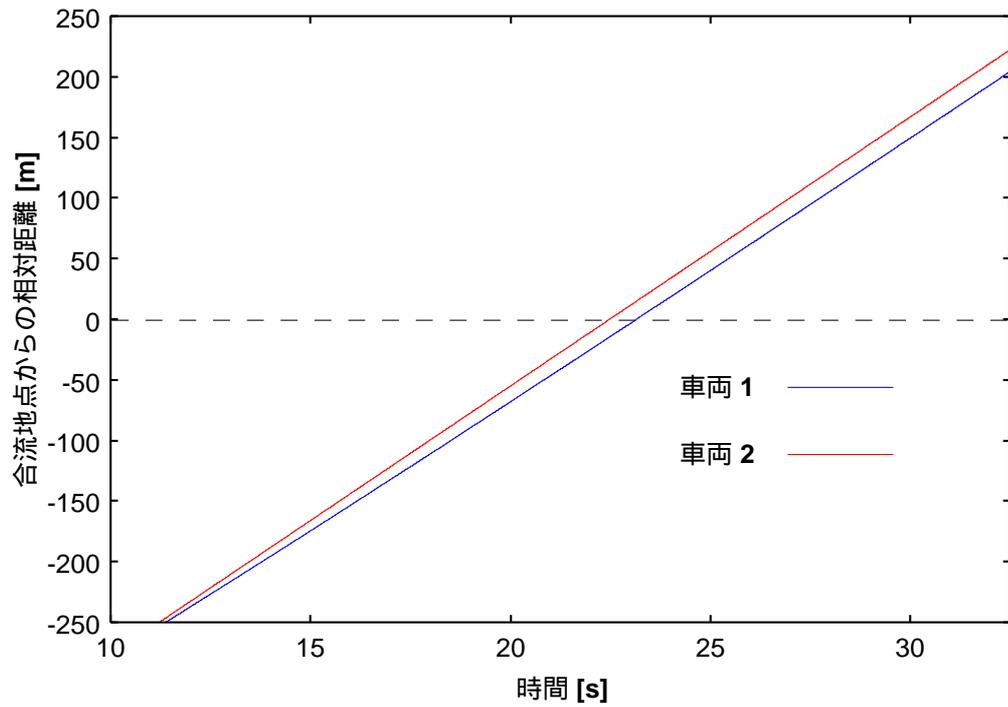
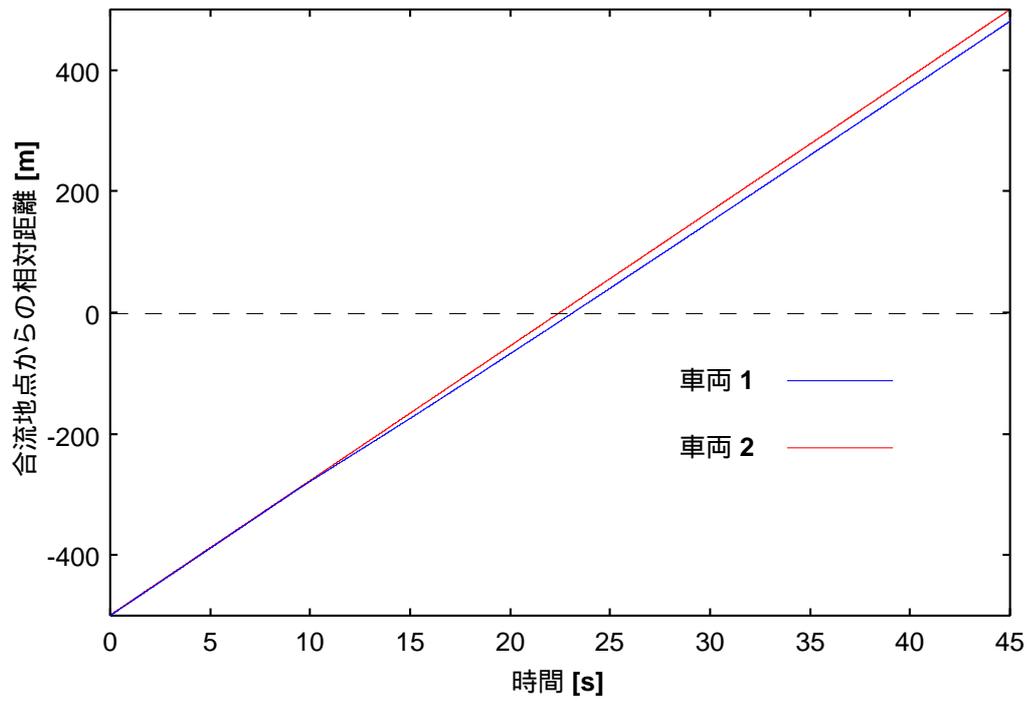


(b) 車両の速度 (拡大図)



(c) 車両の加速度

図 3.14: 車両の速度と加速度



(合流地点付近の拡大図)

図 3.15: 車両の走行軌跡

3.4.5 合流パターン 3

各車両の初期位置は表 3.4 に示すように設定した。初期状態において 車両 1 と 車両 2 は車両群を形成している。

表 3.4: 合流パターン 3 の場合の初期位置

車両番号	初期位置	走行コース
1	C から 500m の位置	本線 (A - C - D)
2	C から 520m の位置	本線 (A - C - D)
3	C から 500m の位置	支線 (B - C - D)

車両間通信のみを使用した場合

通信システムとして車両間通信のみを使用した場合の各車両の速度と加速度のグラフを図 3.16 に、各車両の走行軌跡を図 3.17 に示す。

車両 1 は常に 状態 0 (フリー走行) なので、速度、加速度共に変化は無く一定である。車両 3 は 8 秒付近から減速が始まっている。これは車両 1 との車両間通信から合流を予測し、車両 3 の走行状態が 状態 0 (フリー走行) から 状態 2 (仮想車両に対する追従) へ変化したためである。

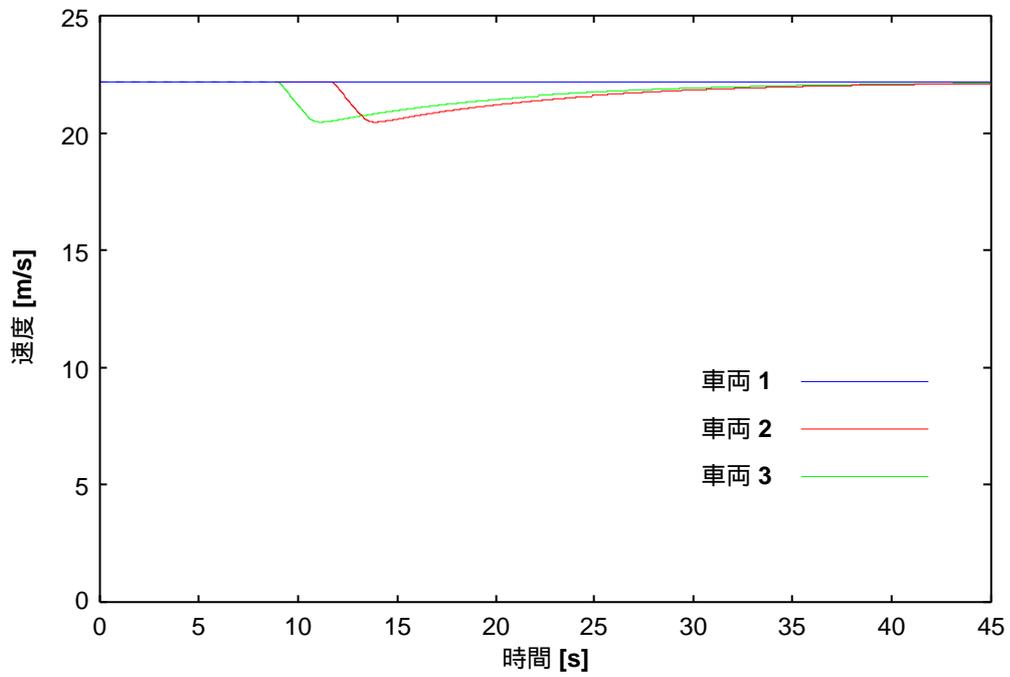
一方、車両 2 は 12 秒付近から減速を開始している。これは 12 秒付近で行なわれた 車両 3 との車両間通信から 車両 3 が前方に割り込んで来ることがわかったため、走行状態が 状態 0 (フリー走行) から 状態 3 (車間距離を $2L$ にした追従) へ変化したためである。また、24 秒付近で 車両 2 の加速度が大きく変化しているが、これは走行状態が 状態 3 (車間距離を $2L$ にした追従) から 状態 1 (実車両に対する追従) に変化したためである。この時、追従対象が 車両 1 から 車両 3 に変わり、車両 2 のロンジチューディナル制御の入力値が一時的に不連続になるために加速度に変化が現れている。

車両群間通信と車両群内通信を使用した場合

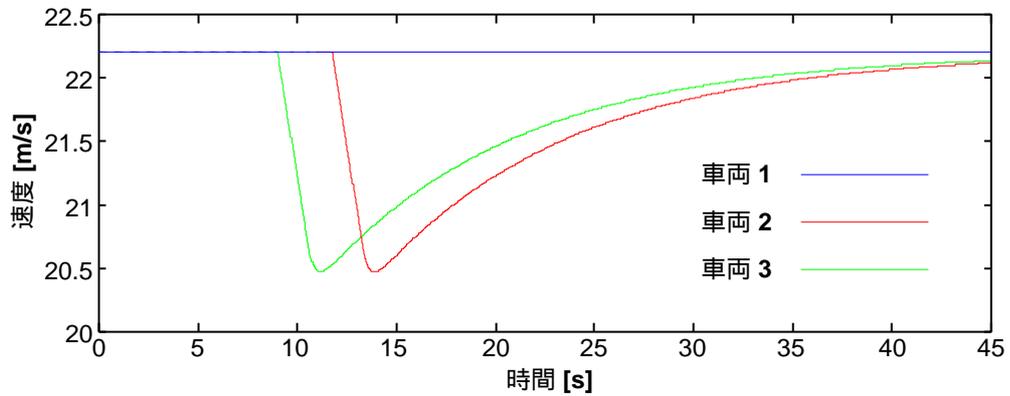
通信システムとして車両群間通信と車両群内通信の両方を使用した場合の各車両の速度と加速度のグラフを図 3.18 に、各車両の走行軌跡を図 3.19 に示す。

基本的には車両間通信のみを使用した場合と同じ結果であるが、車両 2 の減速の開始時間が 車両 3 と同じになっている点が異なる。これは 車両 1 と 車両 3 が車両群間通信

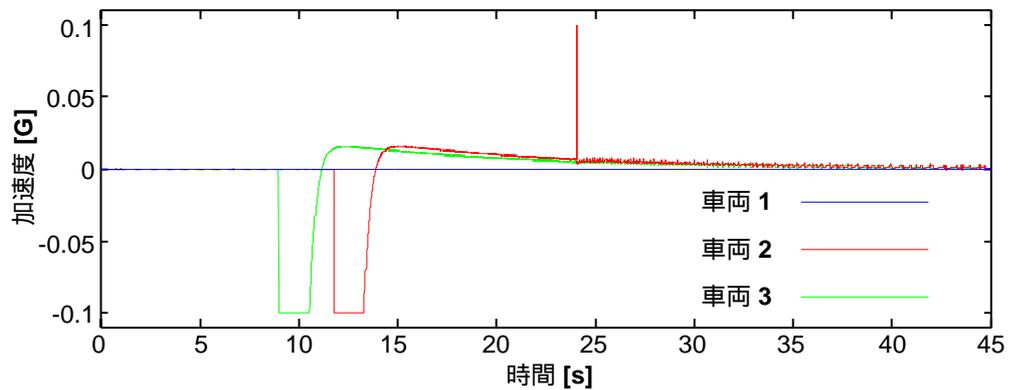
で行なった情報交換の結果が、車両群内通信で車両 2 に伝わったからである。車両間通信のみを使用した場合には車両 2 と車両 3 が直接通信を行う(通信を行なう車両が共に通信可能ゾーン内に存在する)必要があるために合流準備が遅くなることがあるが、車両群内通信を使用することによりその遅れを無くすることができる。



(a) 車両の速度

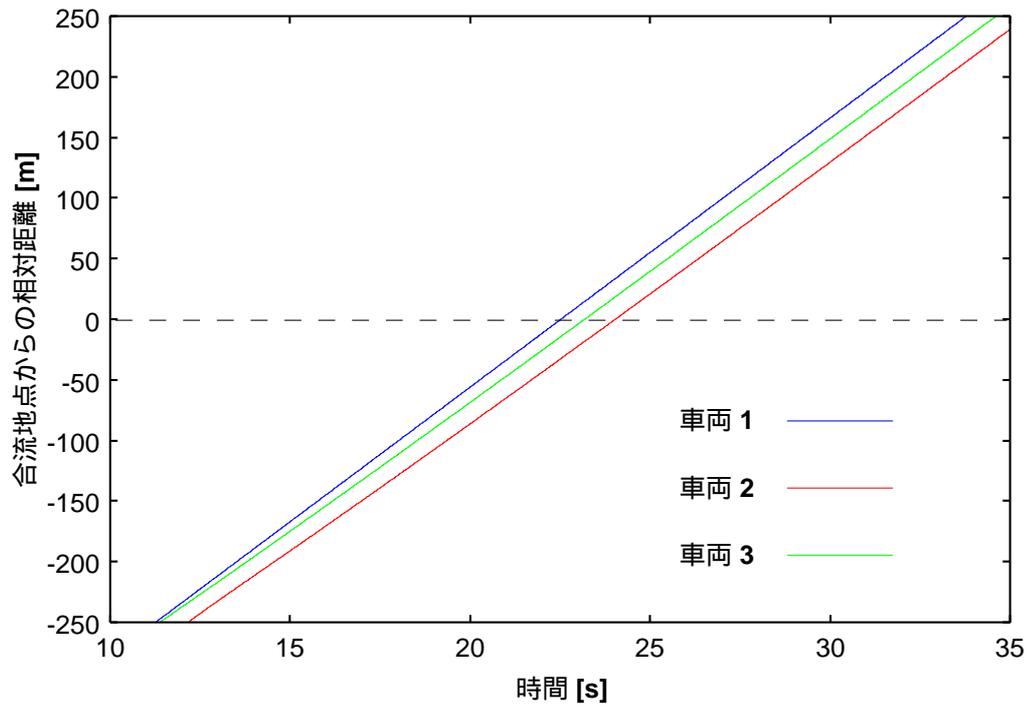
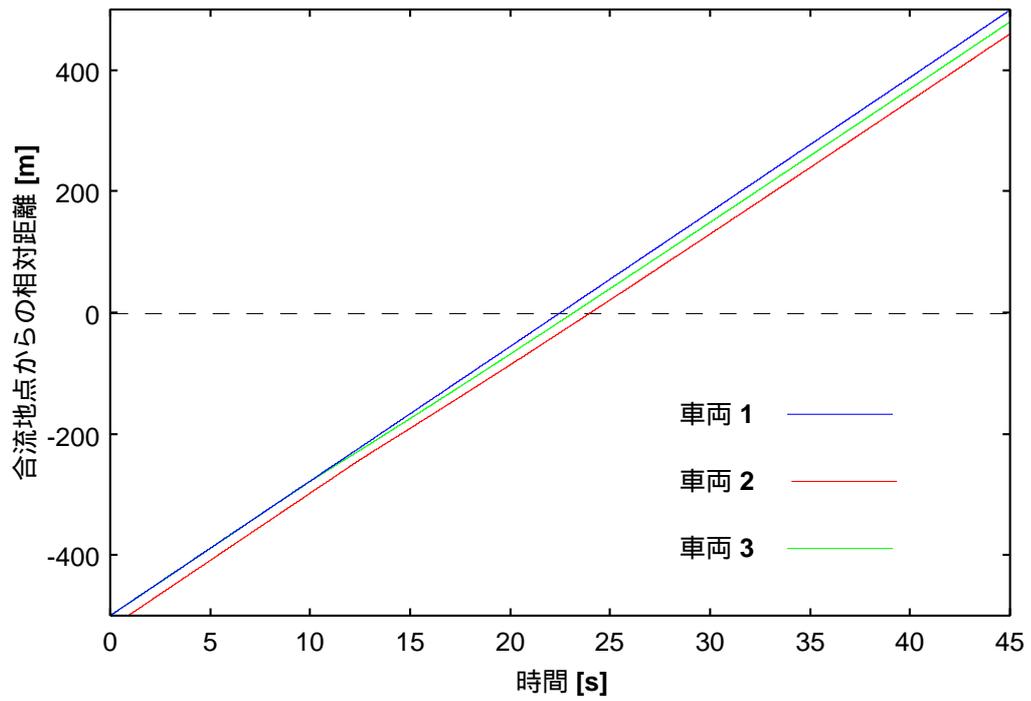


(b) 車両の速度 (拡大図)



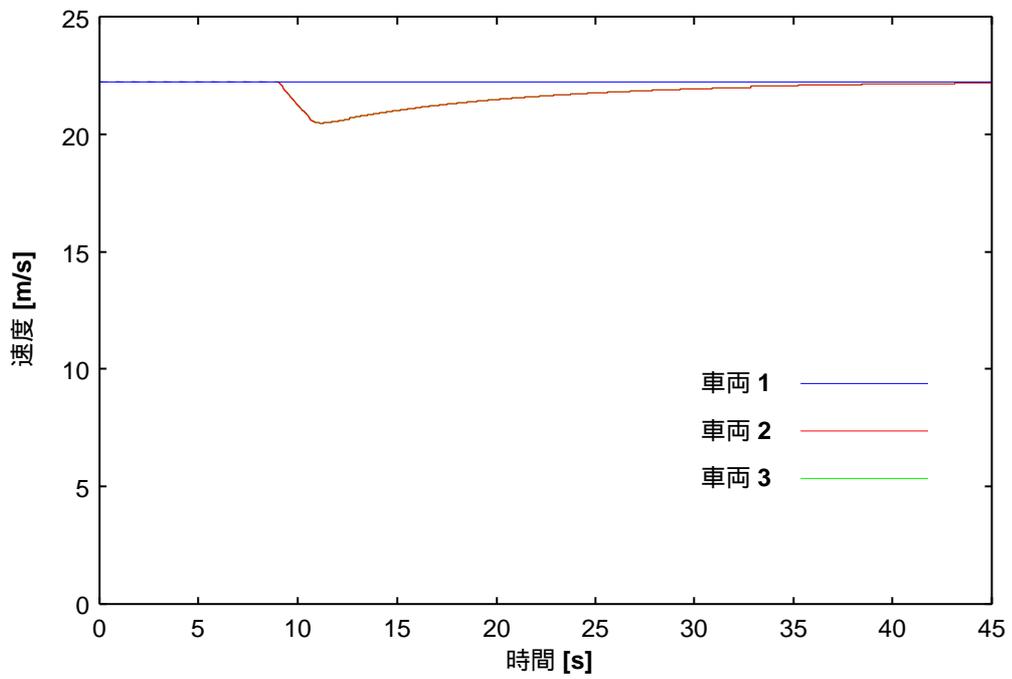
(c) 車両の加速度

図 3.16: 車両間通信のみの場合の車両の速度と加速度

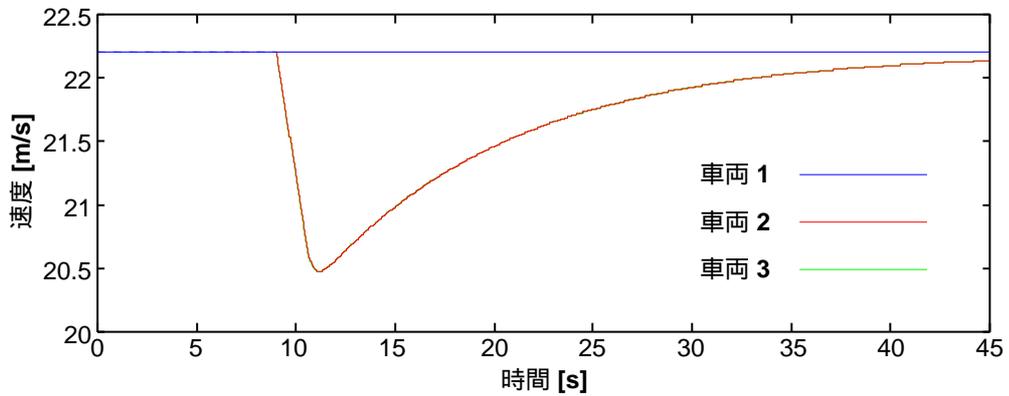


(合流地点付近の拡大図)

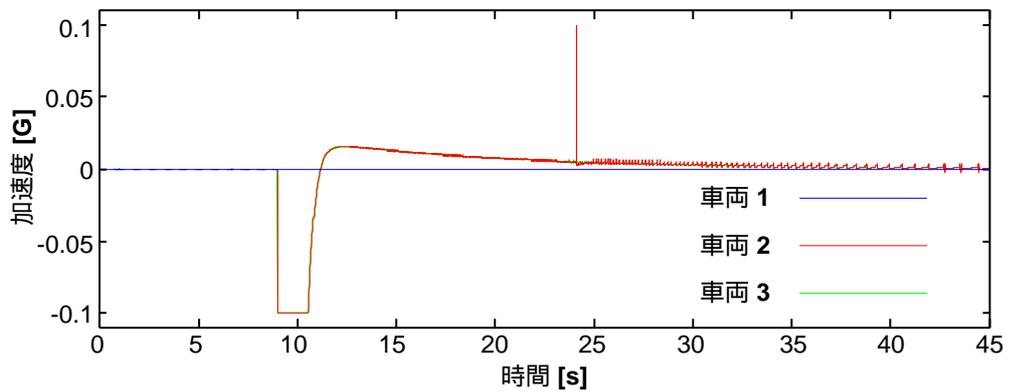
図 3.17: 車両間通信のみの場合の車両の走行軌跡



(a) 車両の速度

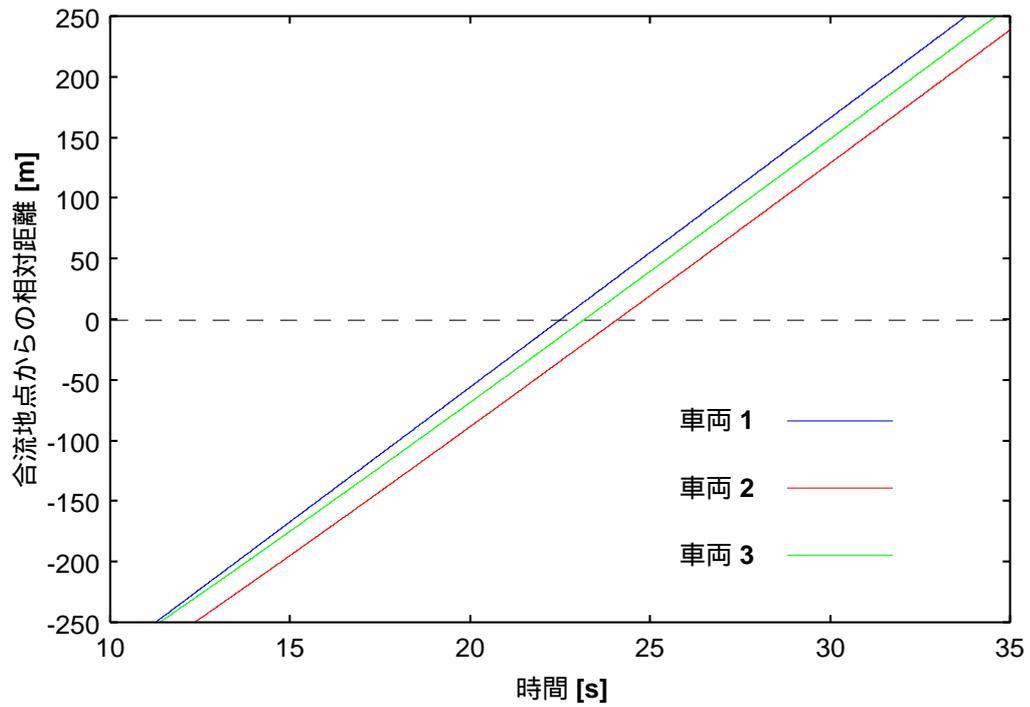
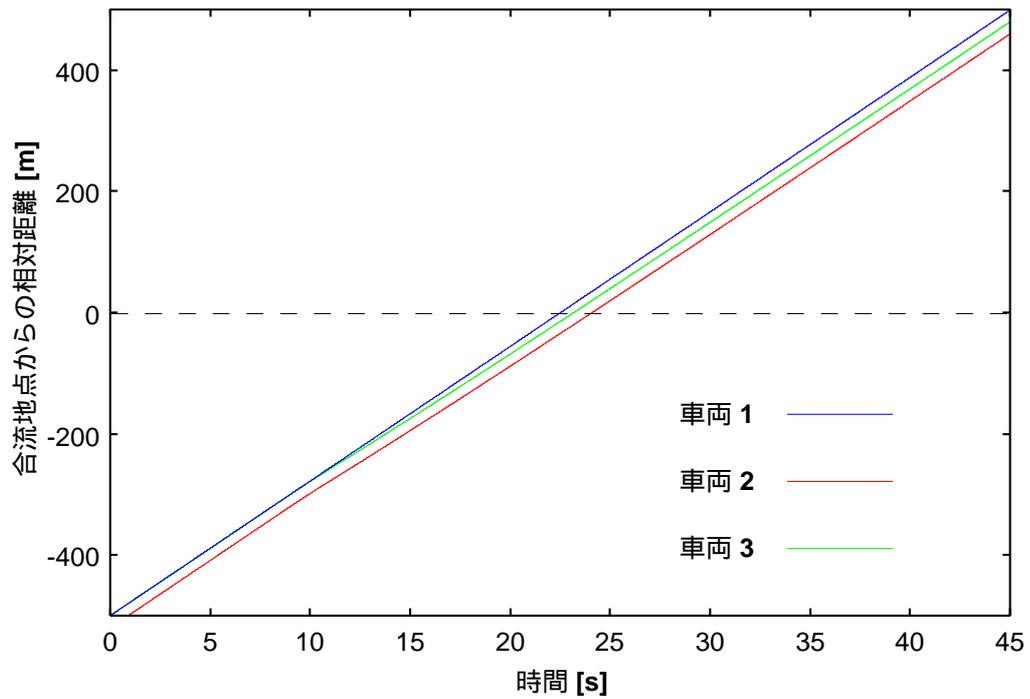


(b) 車両の速度 (拡大図)



(c) 車両の加速度

図 3.18: 車両群間通信と車両群内通信を使用した場合の車両の速度と加速度



(合流地点付近の拡大図)

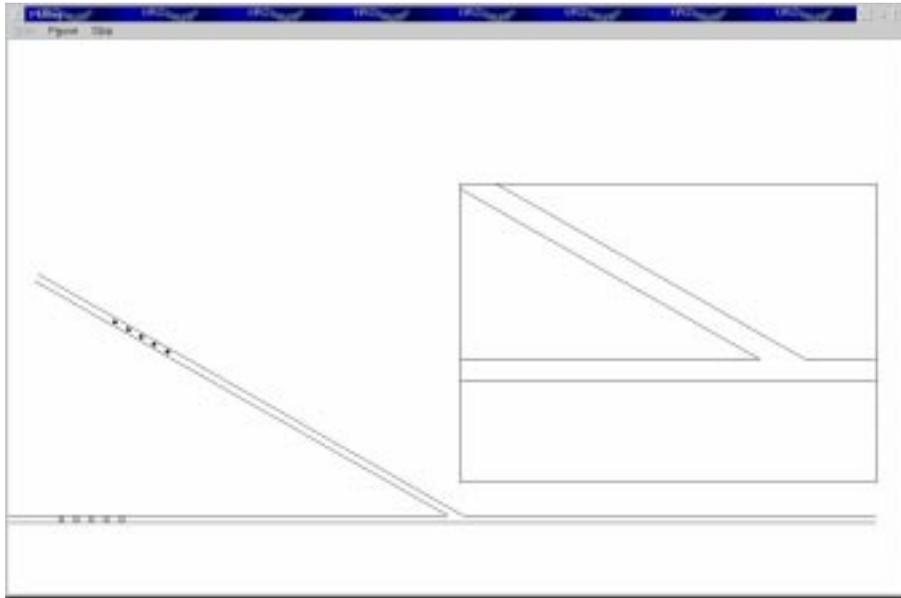
図 3.19: 車両群間通信と車両群間通信を使用した場合の車両の走行軌跡

3.4.6 車両群同士の合流

ここでは、5台ずつで構成される車両群同士の合流シミュレーションを行った。各車両群の先頭車両の初期値は合流地点 (C) から 500m の地点で、後続車は 20m の車間距離を保ちつつ追従走行を行うものとした。合流シミュレーションの様子を図 3.20 に示す。車両間通信のみを使用した場合の本線上の車両群の速度と加速度を図 3.21 に、支線上の車両群の速度と加速度を図 3.22 に、車両群の走行軌跡を図 3.23 に示す。また、車両群間通信と車両群内通信を使用した場合のシミュレーション結果を図 3.24 ~ 図 3.26 に示す。これらから、合流パターン 3 の場合と同じように車両群間通信と車両群内通信を使用することにより、車両間通信のみの場合よりも合流準備を早く行うことができていることがわかる。

図 3.24 において、9 秒付近から合流準備のための減速が始まっている。24 ~ 30 秒にかけて加速度が大きく変化しているが、これは各車両の走行状態が 状態 3(車間距離を $2L$ にした追従) から 状態 1(実車両に対する追従) に変化したためである。この時、各車両の追従対象は先行車両から合流により新たに割り込んで来た車両に変わっている。

また、シミュレーションでを使用した車間距離制御アルゴリズムの特性から先行車両での入力そのまま自車の入りに影響を及ぼすため、車両が車両群の後方に位置するほど加速度の変化の回数が多くなっている(車両群の最後尾の車両の場合には加速度は 4 回変化している)。



合流シミュレーター

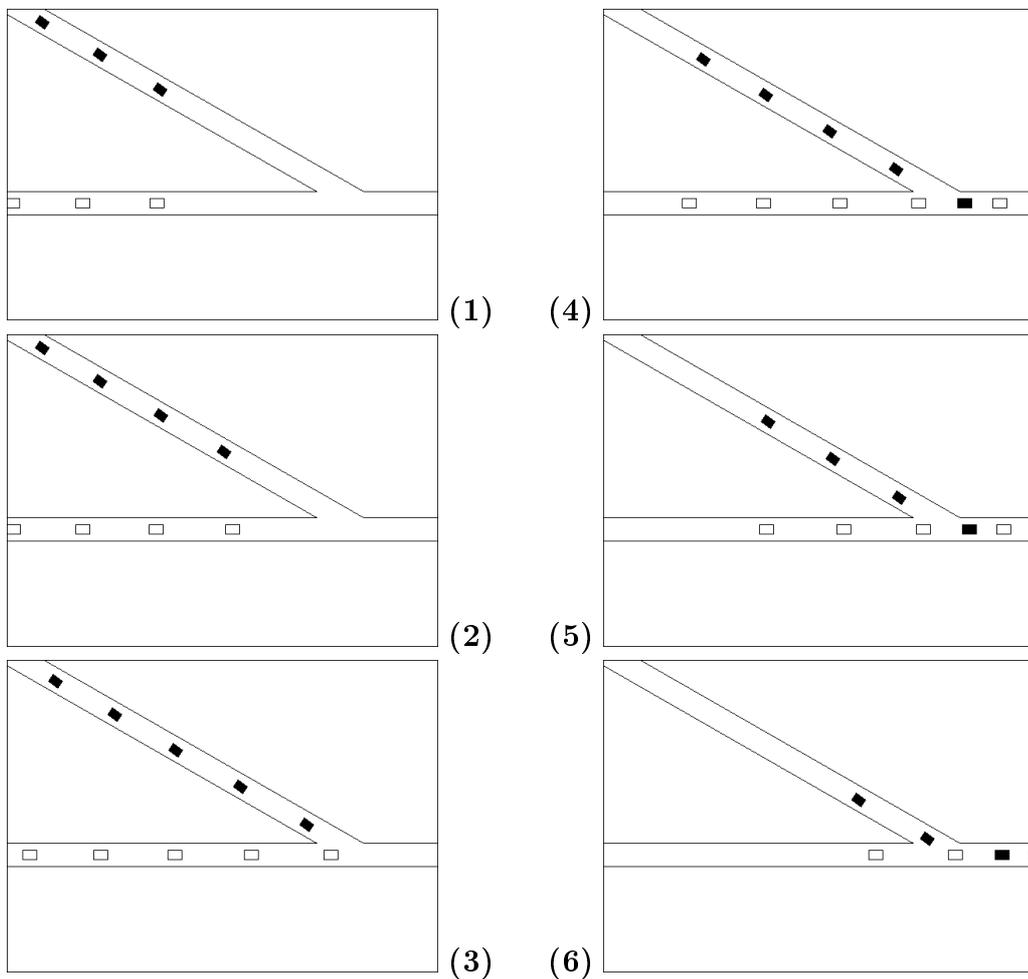
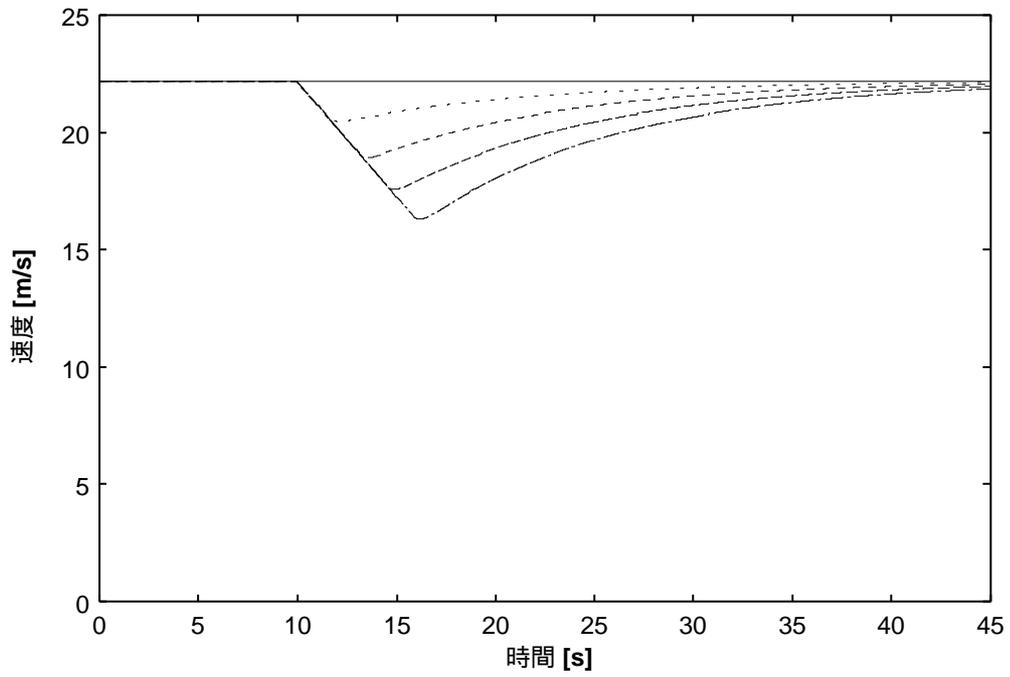
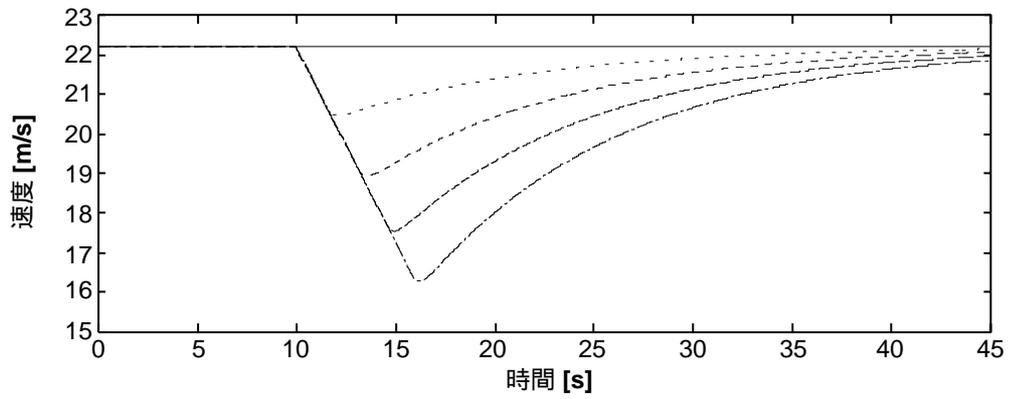


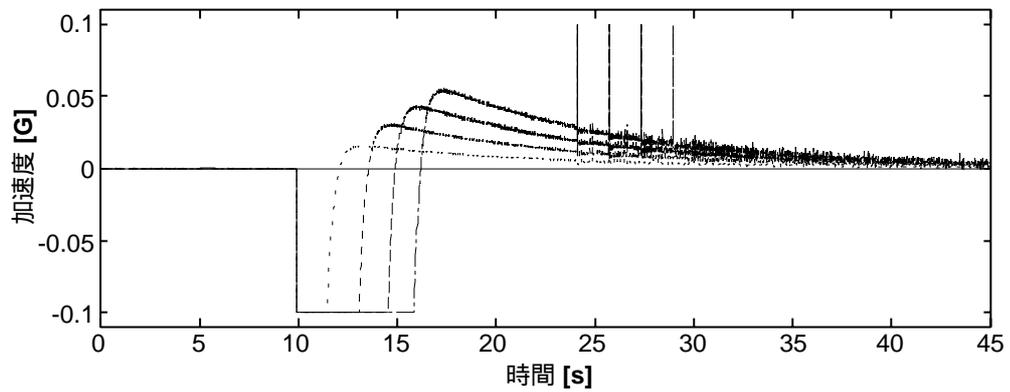
図 3.20: 合流シミュレーションの様子



(a) 車両の速度

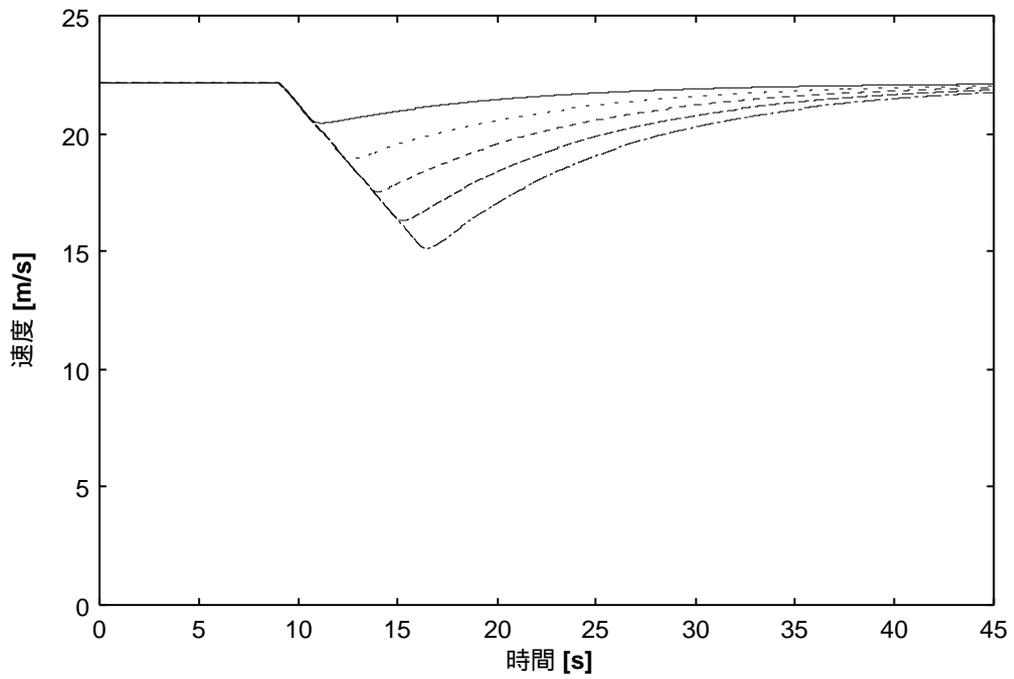


(b) 車両の加速度 (拡大図)

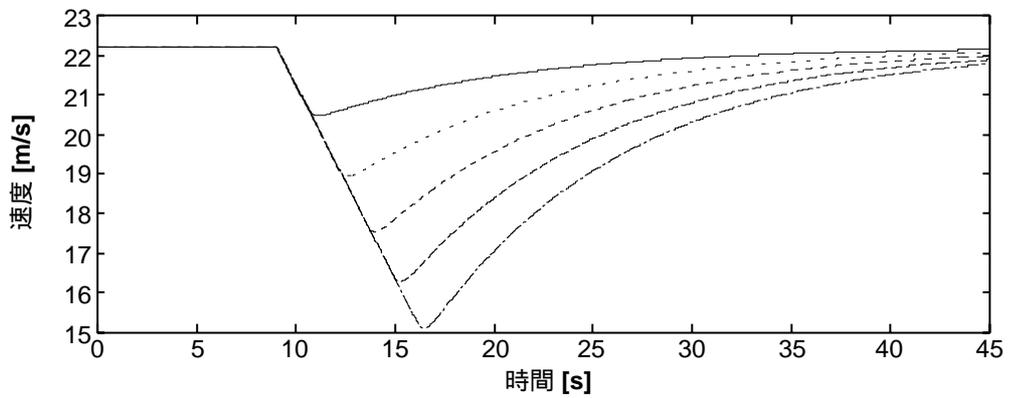


(c) 車両の加速度

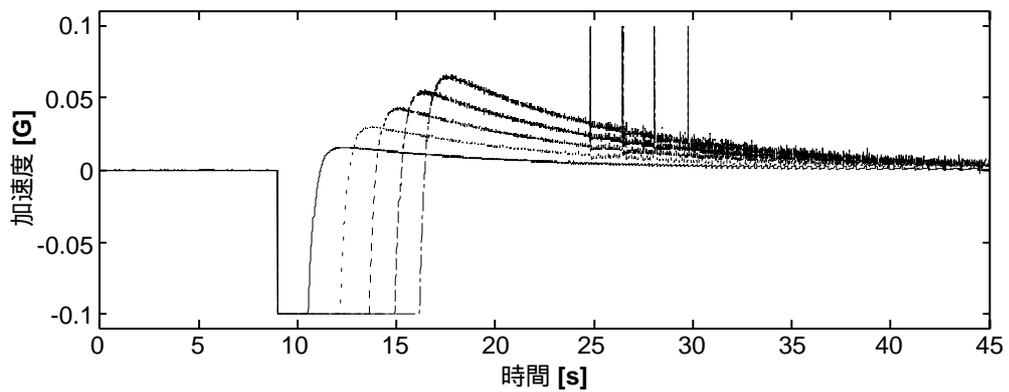
図 3.21: 車両間通信のみを使用した場合の本線上の車両群の速度と加速度



(a) 車両の速度

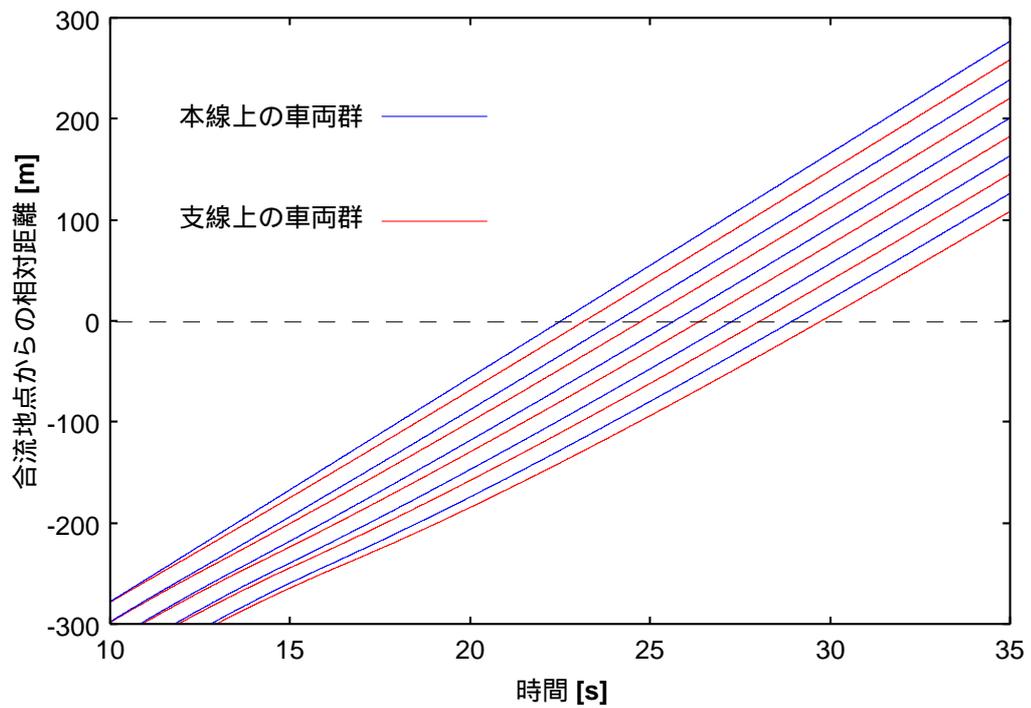
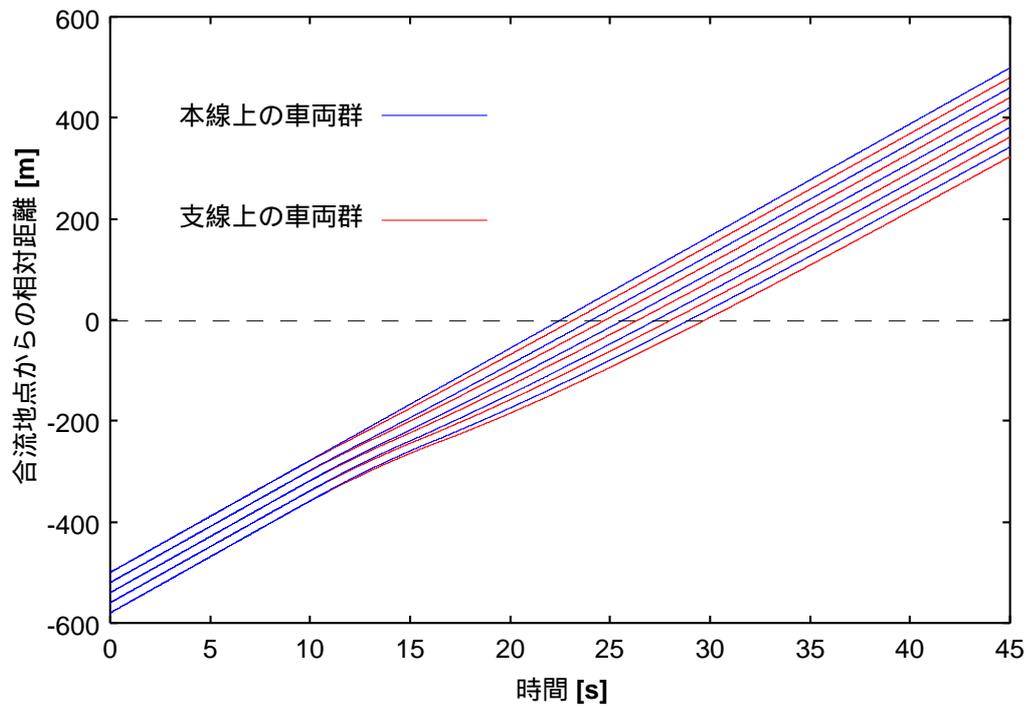


(b) 車両の速度 (拡大図)



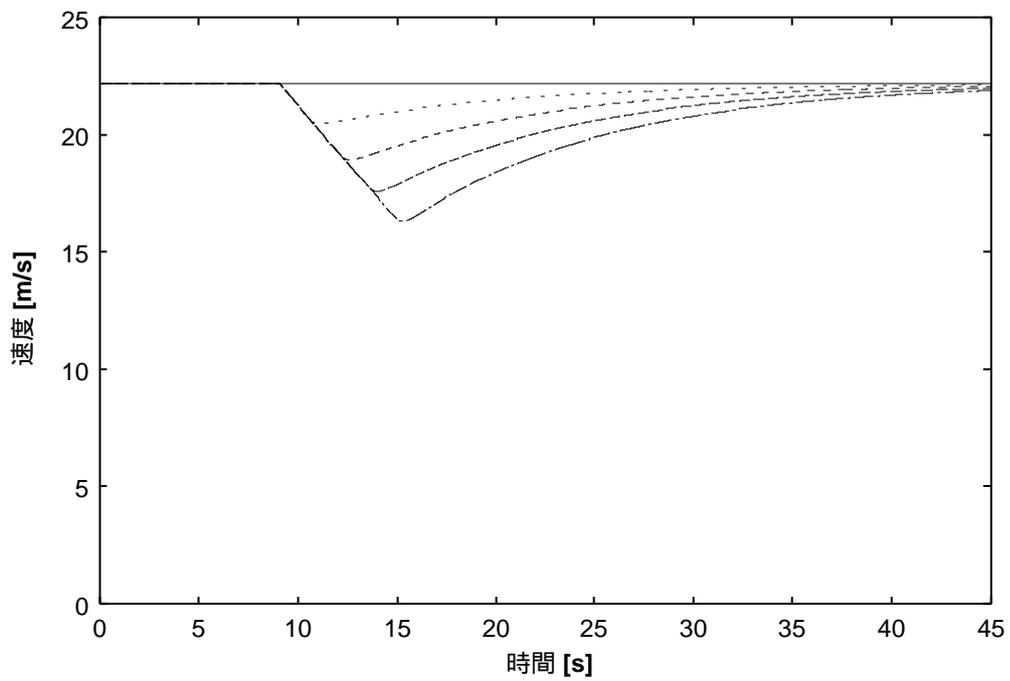
(c) 車両の加速度

図 3.22: 車両間通信のみを使用した場合の支線上の車両群の速度と加速度

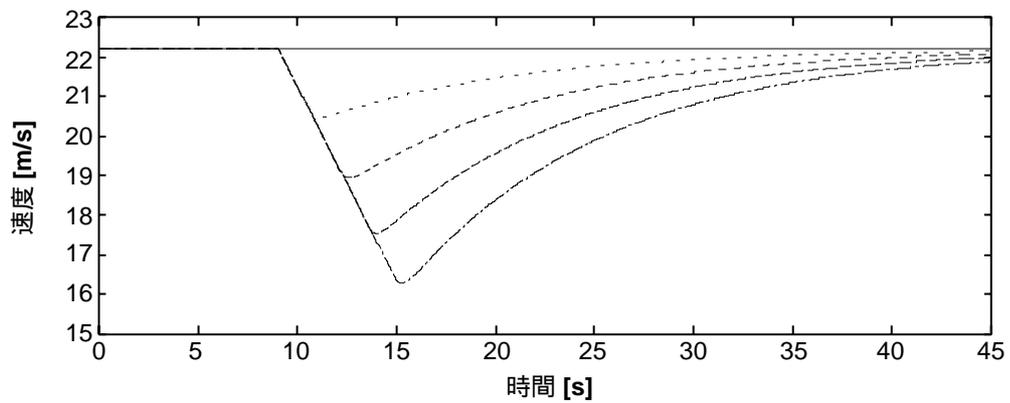


(合流地点付近の拡大図)

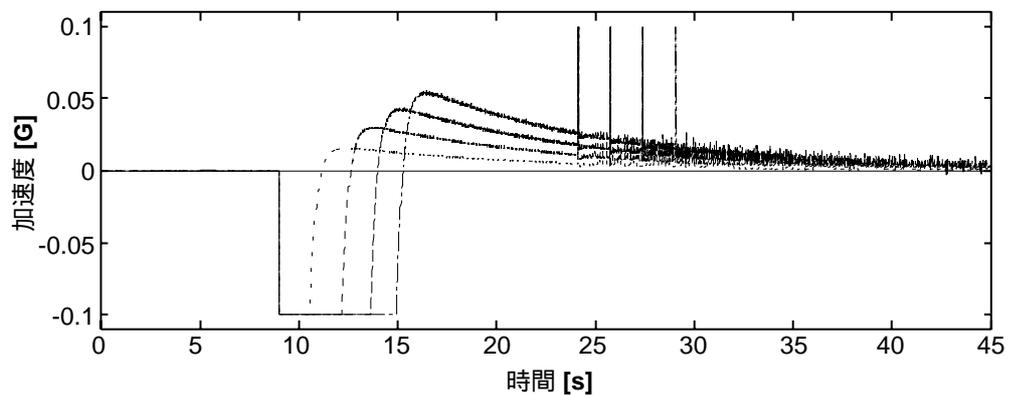
図 3.23: 車両間通信のみを使用した場合の車両群の走行軌跡



(a) 車両の速度

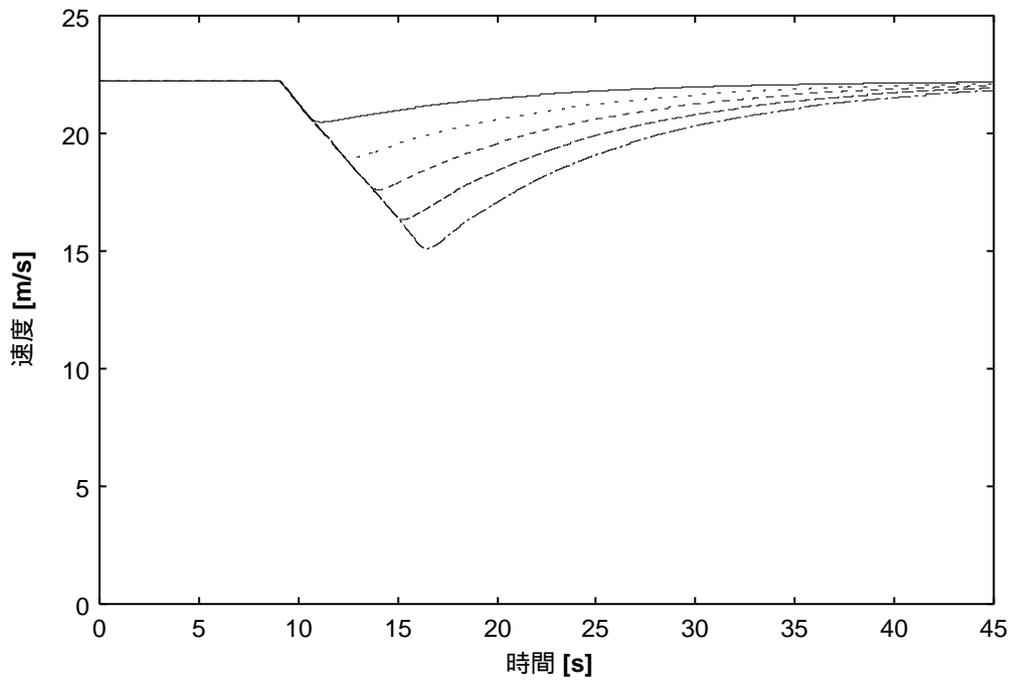


(b) 車両の速度 (拡大図)

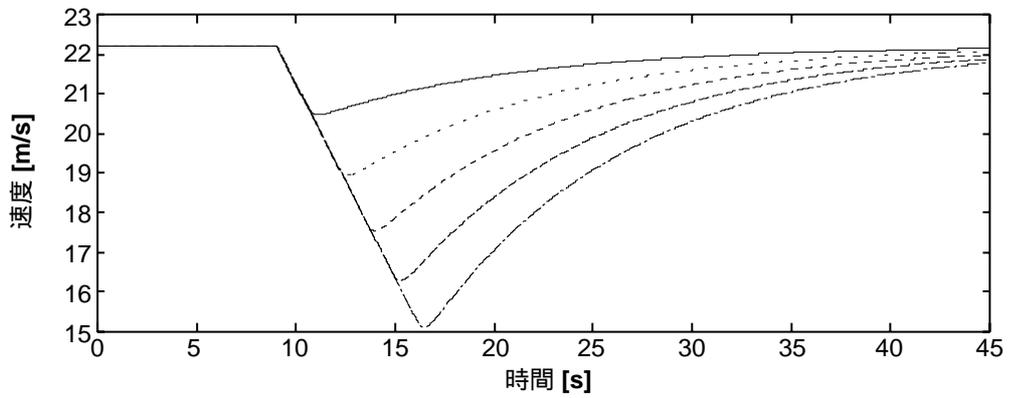


(c) 車両の加速度

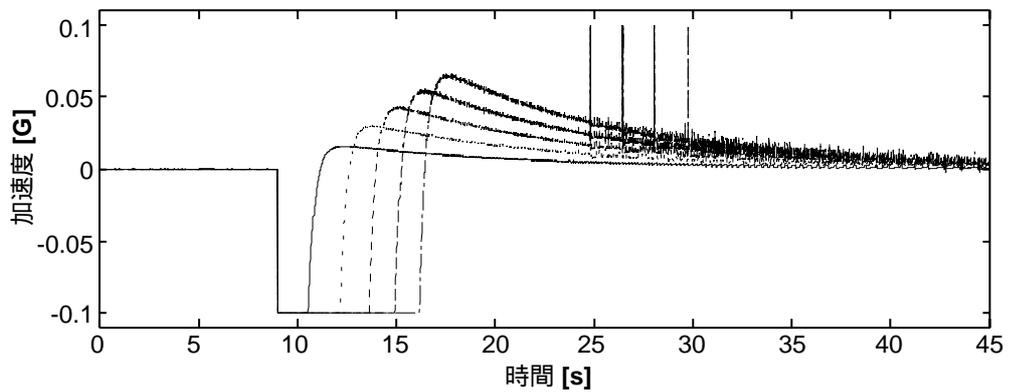
図 3.24: 車両群間通信と車両群内通信を使用した場合の本線上の車両群の速度と加速度



(a) 車両の速度

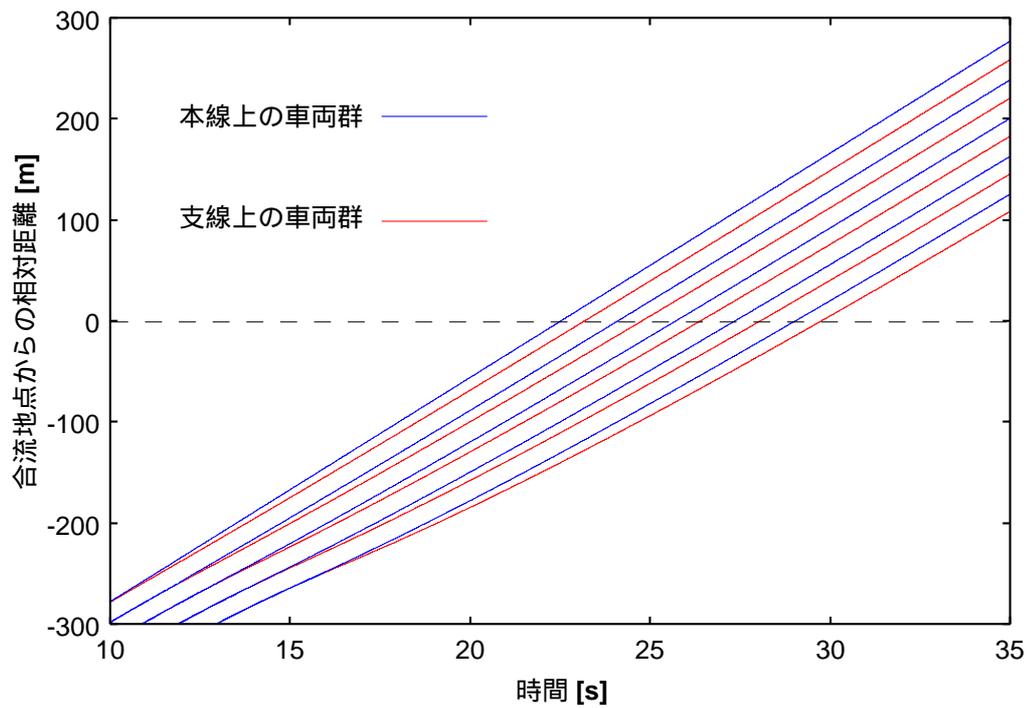
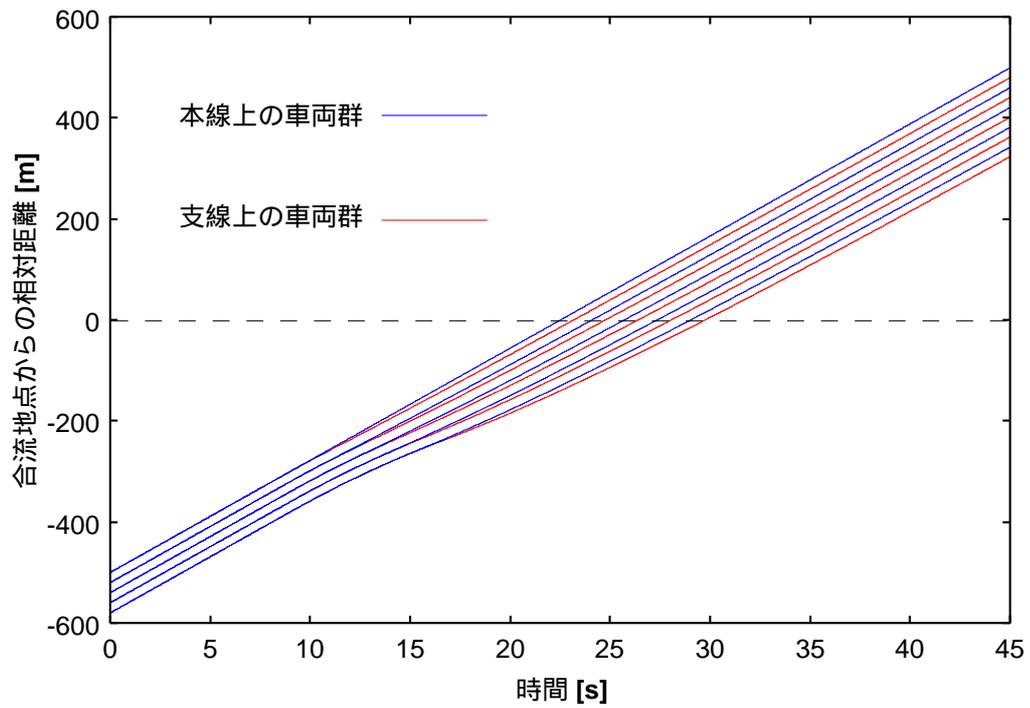


(b) 車両の速度 (拡大図)



(c) 車両の加速度

図 3.25: 車両群間通信と車両群内通信を使用した場合の支線上の車両群の速度と加速度



(合流地点付近の拡大図)

図 3.26: 車両群間通信と車両群内通信を使用した場合の車両群の走行軌跡

3.4.7 合流の評価

車両群が合流する場合，本研究のように交互に合流するだけでなく，ある車両群に他方の車両群が後ろにくっつく形で合流する場合も考えられる．どちらの合流方式が良いのか，合流の可能性と燃料消費量および乗り心地の3面についてシミュレーションを行った．

ここで，燃料消費量は図 3.27 に示すような単位時間あたりの燃料消費のルックアップテーブル [23] に基づいて算出した．合流に関わった全ての車両の燃料消費を計算し，その総量で比較を行った．ここでは簡単のため，全ての車両に同一のルックアップテーブルを適用している．また，乗り心地については合流に関わった全ての車両の縦方向の加速度の二乗積分値を算出し，その総計で評価を行った．

5台で構成される車両群の合流について，初期位置が0台から4台分ずれた状態それぞれについてシミュレーションを行った．図 3.28～図 3.32 は各条件下における車両群の走行軌跡，図 3.33 は燃料消費量，図 3.34 は加速度の二乗積分値である．

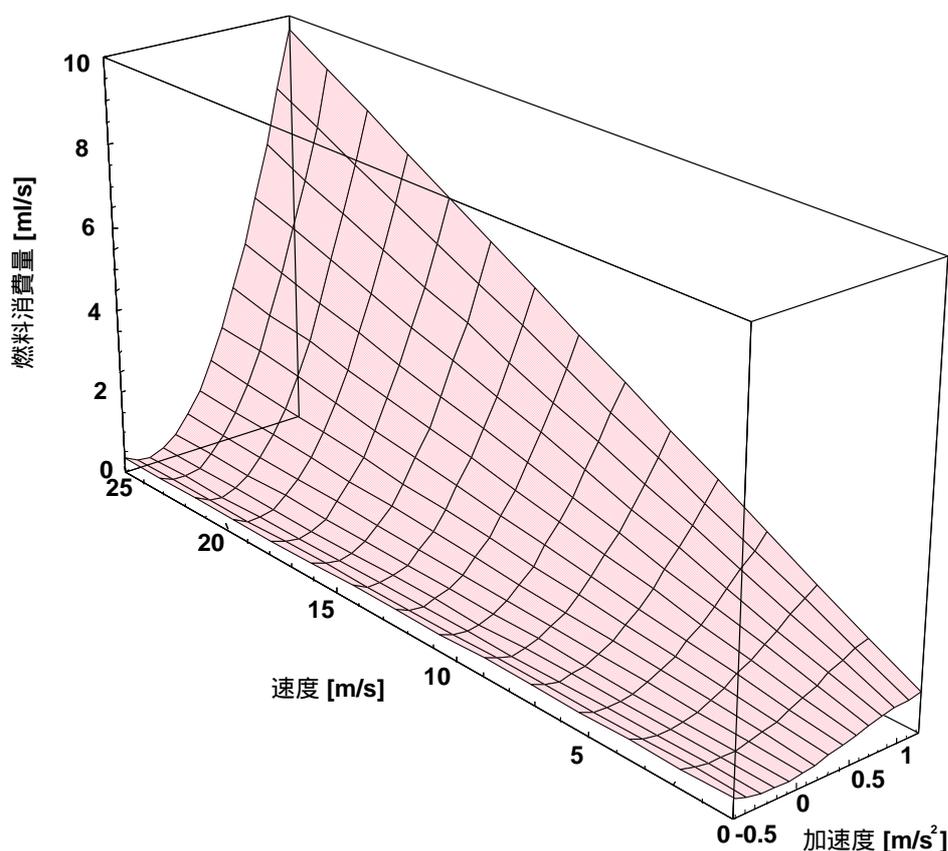
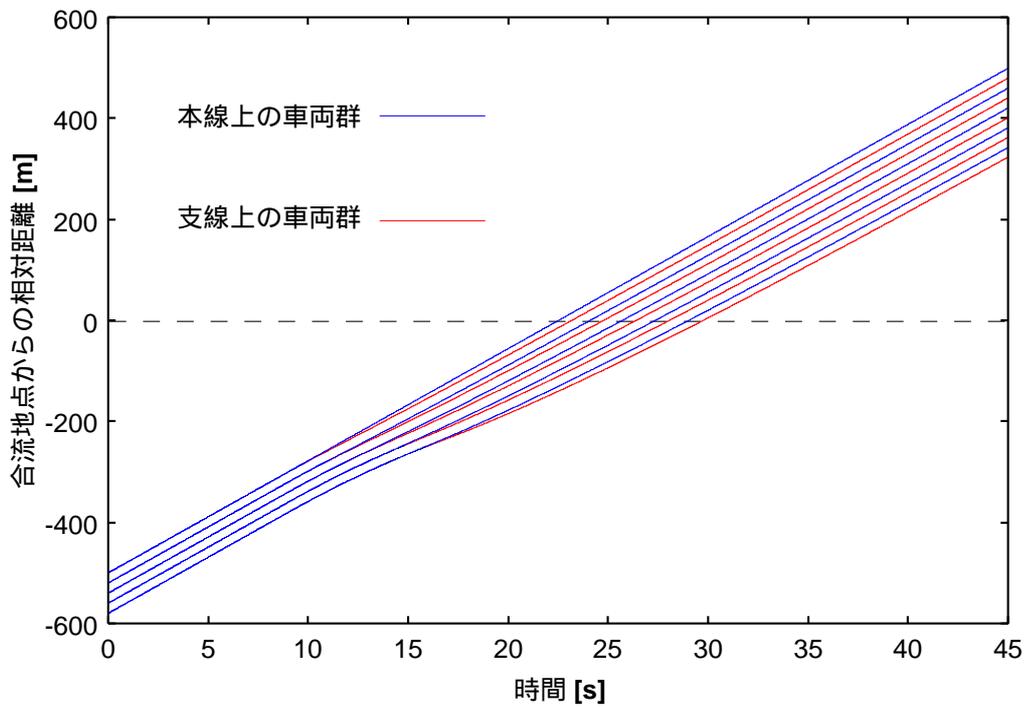
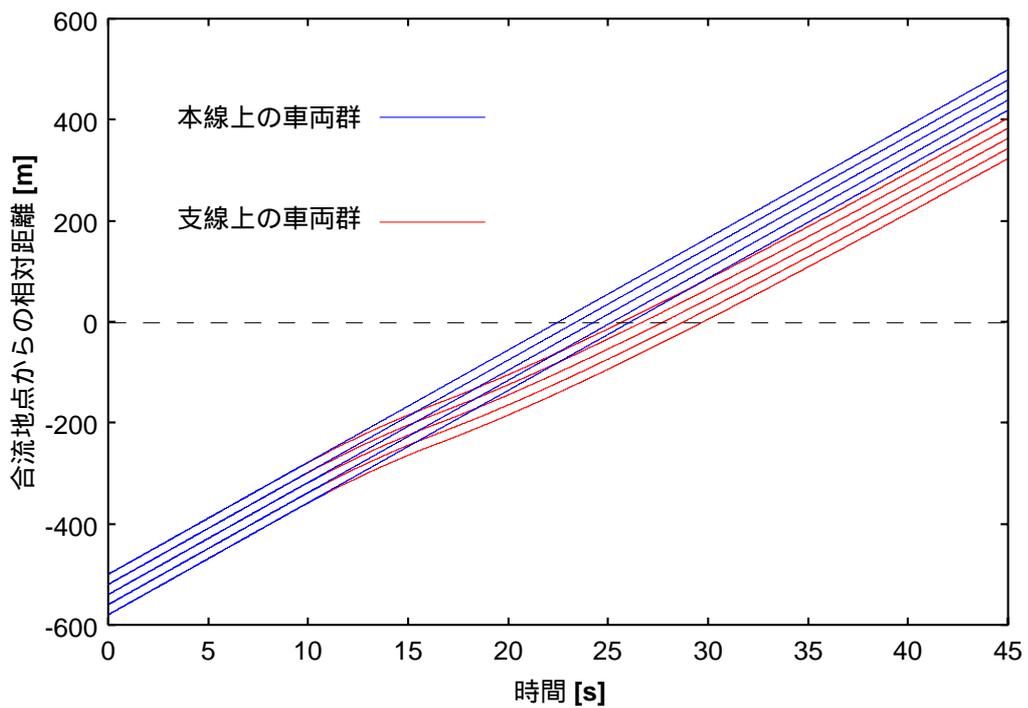


図 3.27: 燃料消費のルックアップテーブル

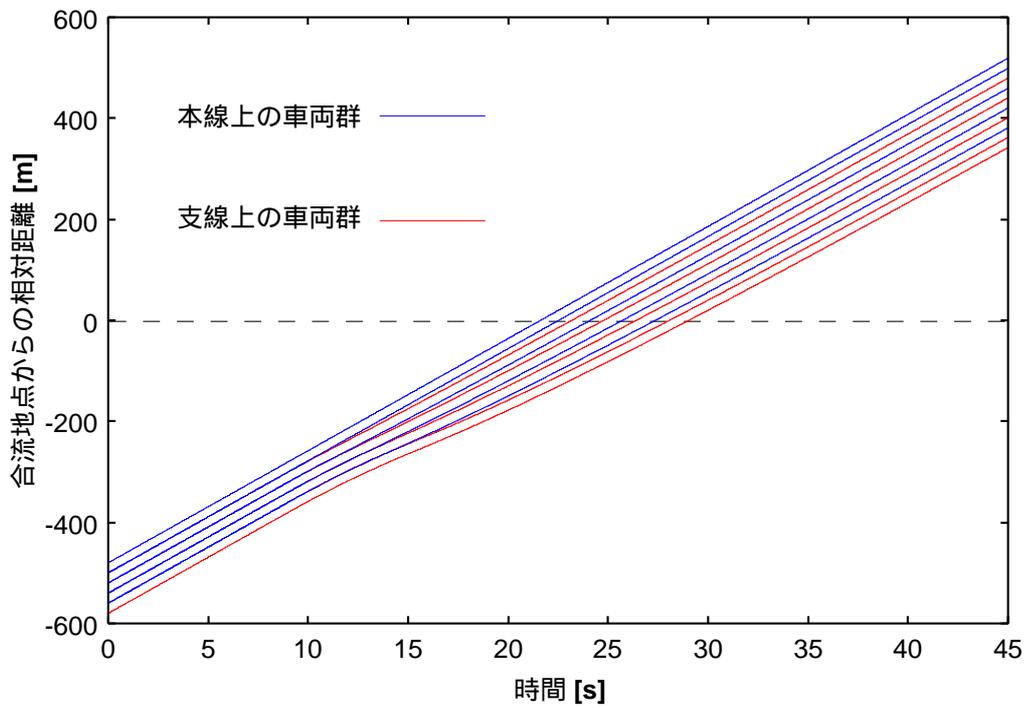


(a) 合流制御アルゴリズムを用いた場合

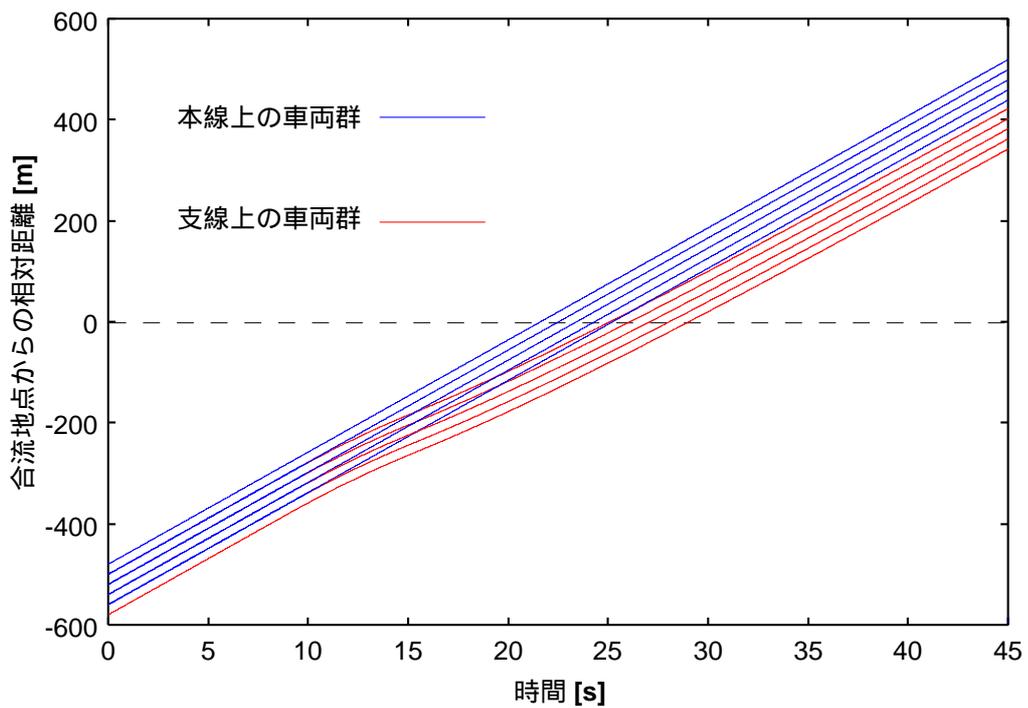


(b) 車両群の最後尾に合流した場合

図 3.28: 初期位置が同じ場合の車両群の走行軌跡

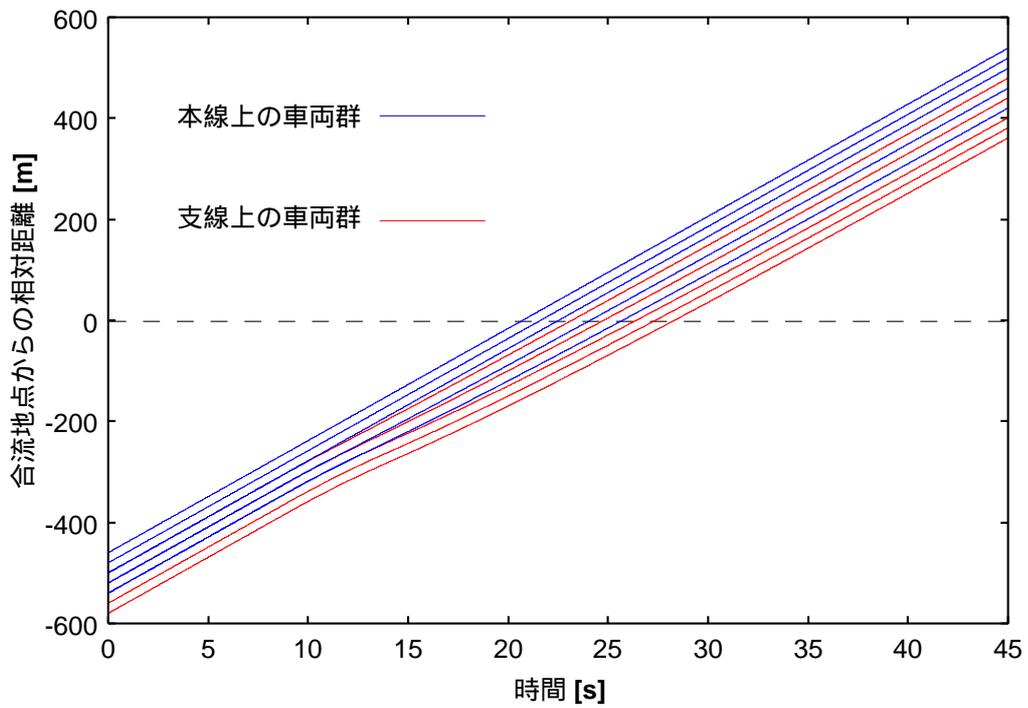


(a) 合流制御アルゴリズムを用いた場合

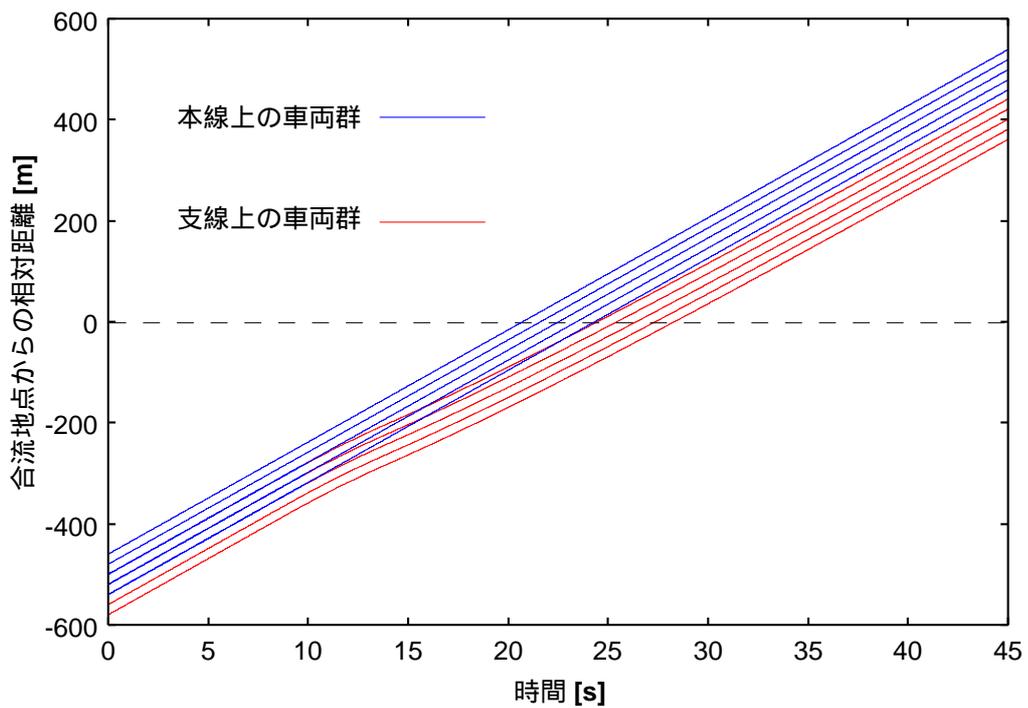


(b) 車両群の最後尾に合流した場合

図 3.29: 初期位置が 1 台分ずれた場合の車両群の走行軌跡

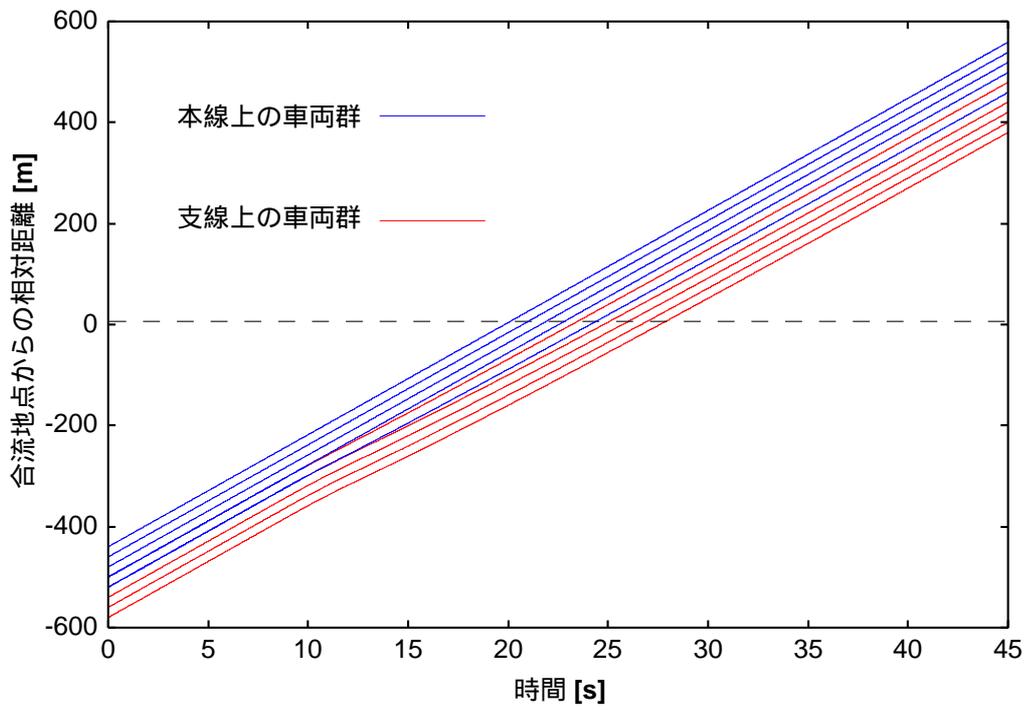


(a) 合流制御アルゴリズムを用いた場合

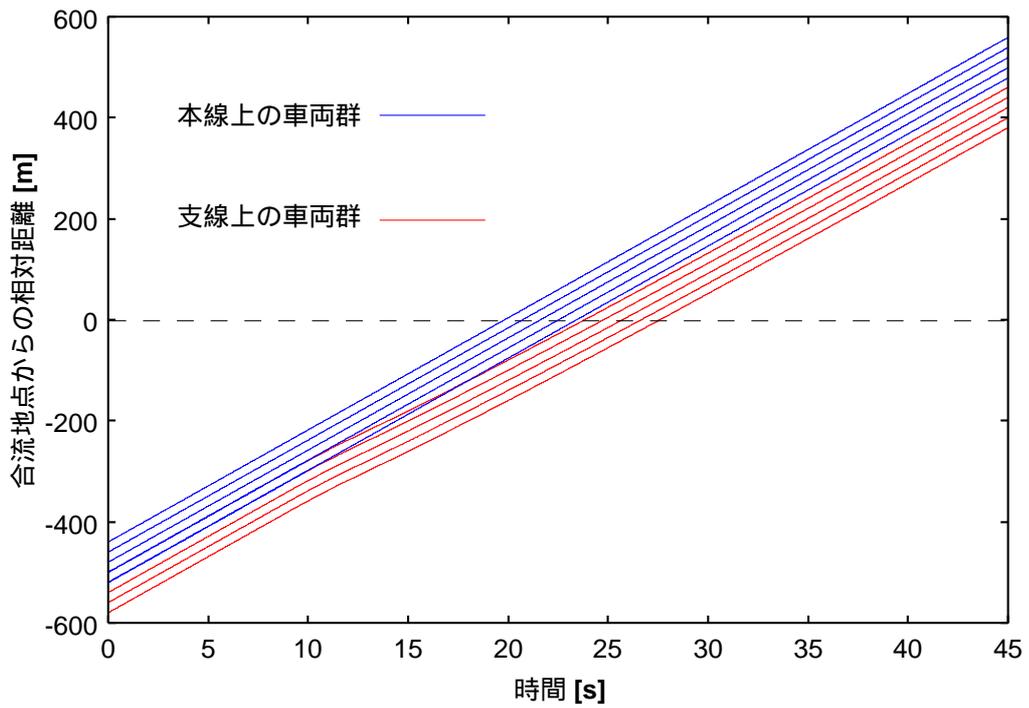


(b) 車両群の最後尾に合流した場合

図 3.30: 初期位置が 2 台分ずれた場合の車両群の走行軌跡

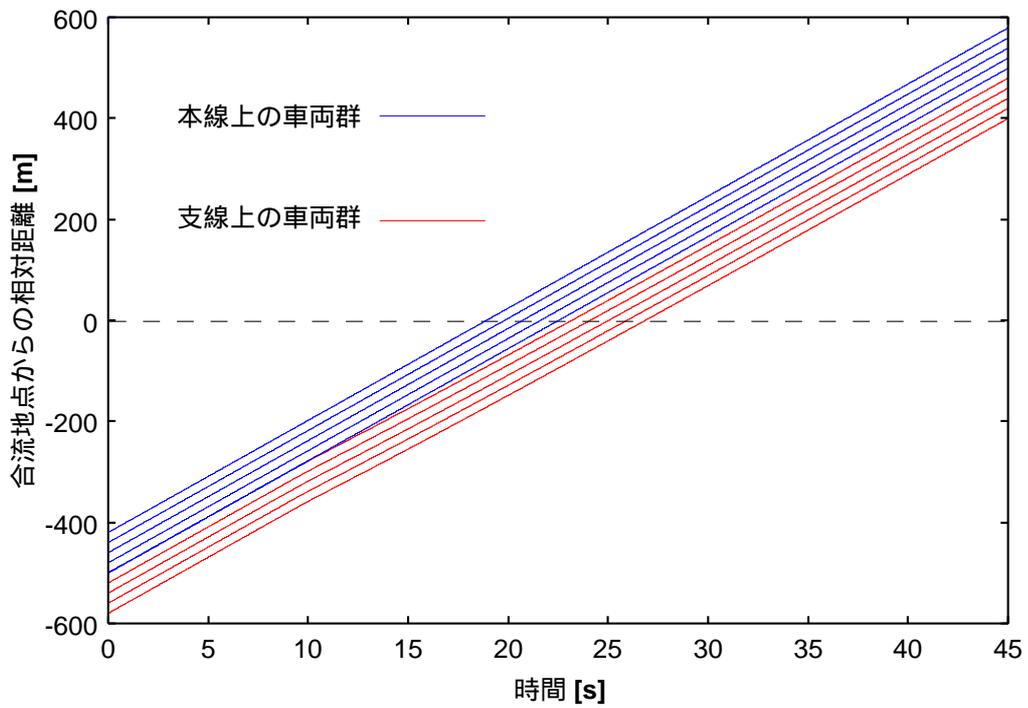


(a) 合流制御アルゴリズムを用いた場合

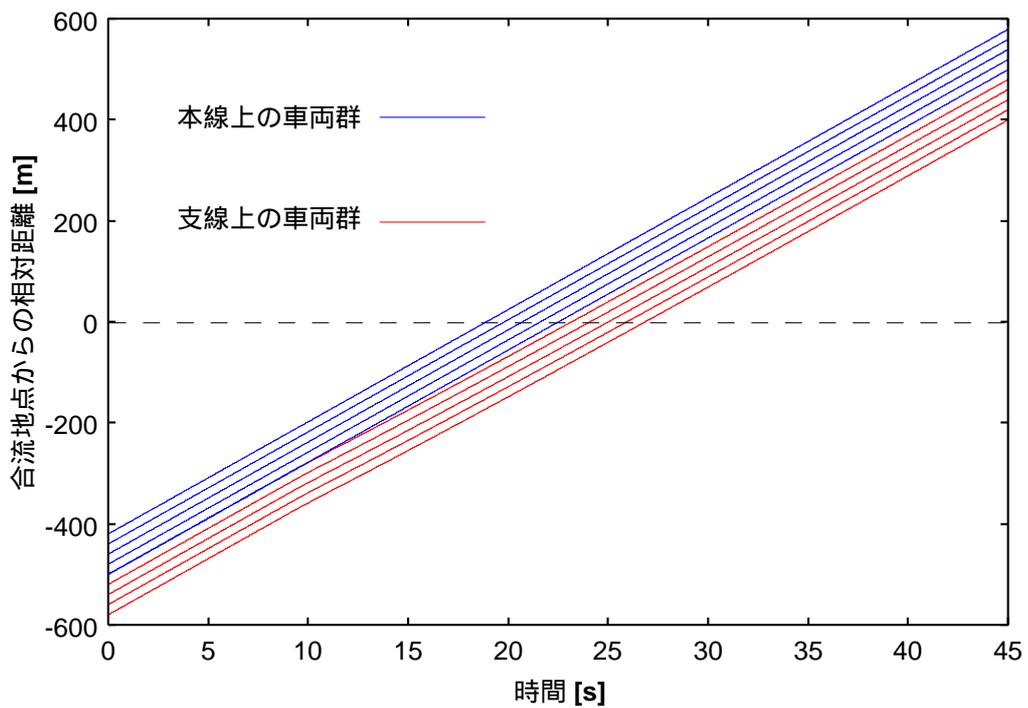


(b) 車両群の最後尾に合流した場合

図 3.31: 初期位置が 3 台分ずれた場合の車両群の走行軌跡



(a) 合流制御アルゴリズムを用いた場合



(b) 車両群の最後尾に合流した場合

図 3.32: 初期位置が 4 台分ずれた場合の車両群の走行軌跡

合流制御アルゴリズムを使用した場合： ■ 本線上の車両群 ■ 支線上の車両群
 車両群の最後尾に合流した場合： ■ 本線上の車両群 ■ 支線上の車両群

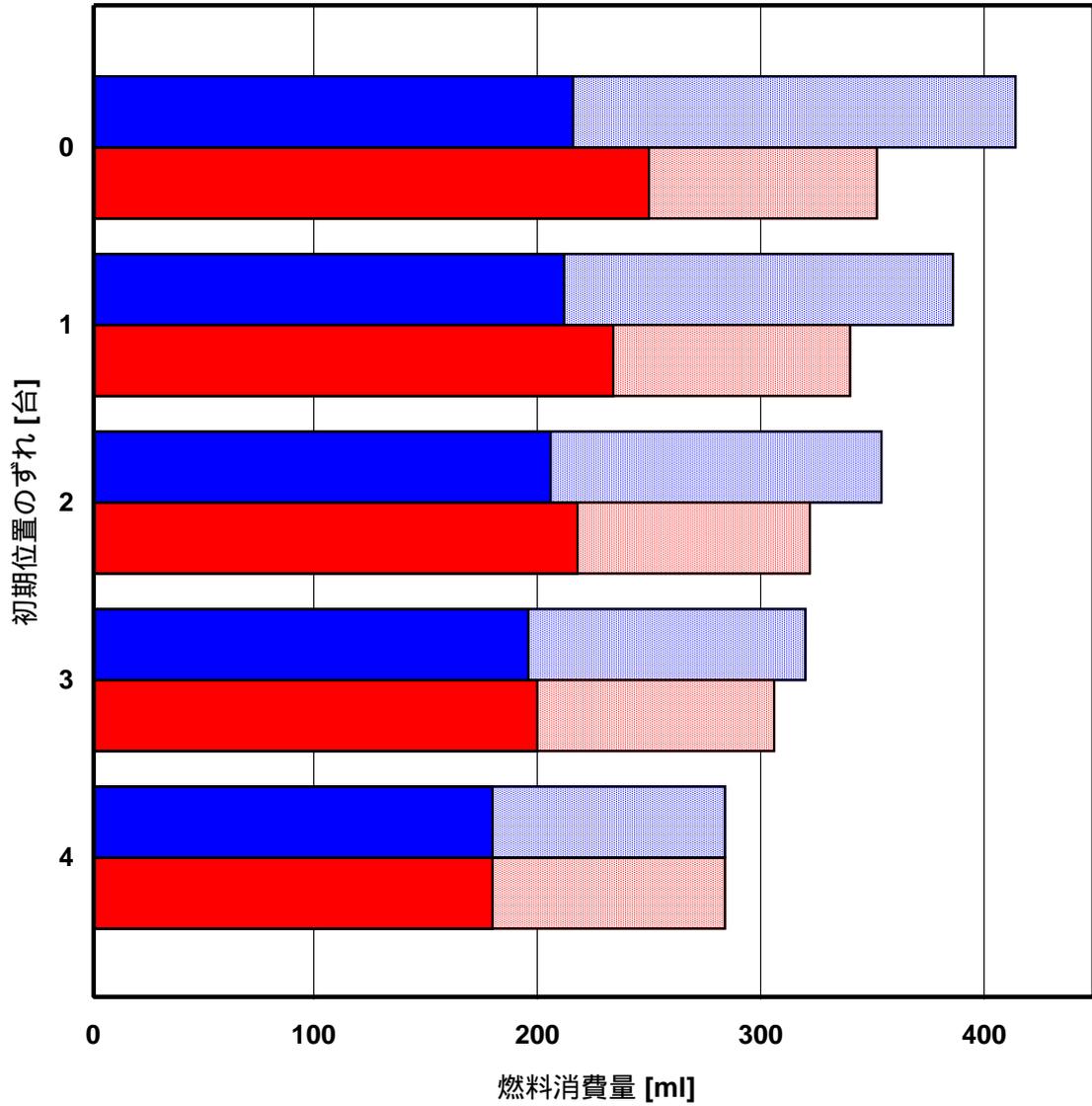


図 3.33: 燃料消費量

合流制御アルゴリズムを使用した場合： 本線上の車両群 支線上の車両群

車両群の最後尾に合流した場合： 本線上の車両群 支線上の車両群

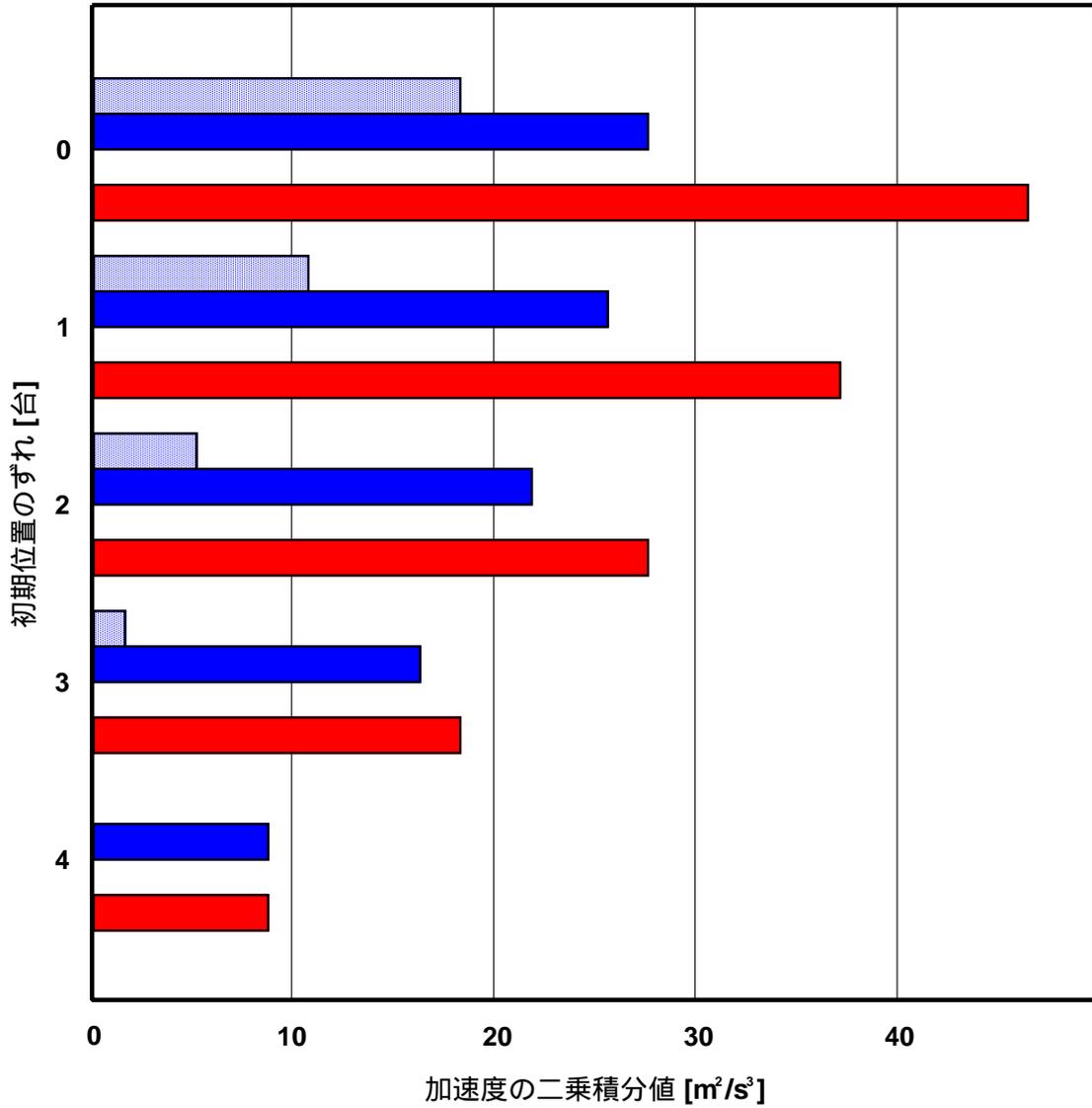


図 3.34: 加速度の二乗積分値

(1) 合流の可能性について

本線上を走行する車両群の最後尾に支線上を走行する車両群が合流する場合、今回のシミュレーション条件下では初期位置が0~2台分ずれている場合には図 3.28~図 3.30の(b) からわかるように、十分に車間距離を確保して合流することができなかった。加速度の条件を変えることにより、合流地点を通過するまでに十分な車間距離を確保することは可能ではあるが、急加速による消費燃料の増加と乗り心地の悪化は避けられない。

(2) 燃料消費量について

初期位置に関係なく、本線上を走行する車両群の最後尾に支線上を走行する車両群が合流する場合の方がよい結果が得られた。これは、合流制御アルゴリズムを使用した場合には合流時に速度を変化させる車両台数が多くなり、車両群全体の燃料消費量が増加するためである。

(3) 乗り心地について

一切加減速を行わない、単純に車両群の最後尾に合流する場合の本線上の車両群を除外すると、車両群単位で見た場合、初期位置に関係なく合流制御アルゴリズムを使用した場合の方がよい結果が得られた。合流制御アルゴリズムを使用した場合、合流時に各車両は減速を行う。そのため、本線上を走行する車両群の最後尾に支線上を走行する車両群が合流する場合のように一方の車両群のみ大幅に減速(乗り心地が悪化)するということが起こっていない。

本研究で提案する合流制御アルゴリズムを用いた場合、燃料消費量については単純に車両群の最後尾に合流する場合に比べて悪い結果となった。しかし、単純に車両群の最後尾に合流するためには長い合流区間が必要になり、時間的または構造的な制限が合流区間にあるため適用することが一般には困難である。実際の合流区間には時間的または構造的な制限があり、燃費の面では単純に最後尾に合流する場合には劣るが、本合流制御アルゴリズムは制限された合流区間内において合流制御を行うことを可能にする。本合流制御アルゴリズムは単純に車両群の最後尾に合流する場合に比べて乗り心地の面でも優れた結果を生じる。本合流制御アルゴリズムは、運転支援システムにも適用可能である。

3.5 まとめ

本章では，仮想車両という新しい概念を用いた合流制御アルゴリズムを提案した．本合流制御アルゴリズムは車両間通信を前提としており，仮想車両に対するロングチューディナル制御を行うことで合流を実現している．

コンピュータシミュレーションでは，5台で構成される二つの車両群（車間距離 20m）が 22.2m/s（時速約 80km）で合流する場合には最大 0.98m/s^2 の減速度（約 7m/s の減速）で合流することができた．また，支線上の車両群が単純に本線上の車両群の最後尾に合流する場合と比べた場合，本合流制御アルゴリズムは燃料消費量の点では劣っていたが，合流区間を短くすることが可能であり，乗り心地の面でも優れた結果を得た．