

# DE 10 形ディーゼル機関車用自動操縦装置

## Automatic Train Control Equipment for DE10 Type Diesel Locomotive

池 谷 孝\* 高 岡 征\*\*  
Takashi Iketani Tadashi Takaoka

### 要 旨

操車場作業近代化の一環として、DE10 形ディーゼル機関車用自動操縦装置を製作し、現車確認試験を完了した。

本装置は入換機関車に要求される全機能の自動化を目的としたもので、定速運転、定点停止、貨車の突放し制御およびそのほかの特殊制御機能を有している。またこれらの各機能は取捨選択が自由であり、適用対象に応じた自動操縦装置とすることが可能で、大規模な自動化計画のない場合にも実用できる特長を持っている。

昭和42年12月に実施された現車試験において良好な結果を得たが昭和43年2月には5 km/h 以下での定速運転方式を一部改良した現車試験を終了しており、改良された自動操縦装置の試験結果および量産形装置については別に述べる。

### 1. 緒 言

日本国有鉄道では、貨物輸送管理および操車場作業の自動化が重要な技術開発題目の一つとしてあげられている。また一般民間産業では入換運転作業に従事している入換機関車に対してより直接的な自動化および無人化の要求が強い。

いずれの用途においても究極の目的は輸送効率の向上、もしくは人員の合理化にあり、無線を利用して機関車を遠隔操縦することを必要とする場合が多い。

よって本自動操縦装置の開発にあたっては、特に下記3項目を配慮した。

- (1) 入換機関車に要求される全機能の自動化
- (2) 無線機による遠隔操作がただちに可能
- (3) 大規模な自動化計画のない場合にも容易に適用が可能

特に第3項については本自動操縦装置の最も特長とするところで、適用例に応じて自動化機能の組合せおよび取捨選択が自由であり、無線機についても情報量が少なくても良いため、たとえば微弱電界方式の採用も可能である。

以下本装置の概要、シミュレーション結果、第一次現車試験について述べる。

### 2. 装置の概要

#### 2.1 概 要

##### 2.1.1 構 成

本装置を構成する機器は下記である。

- (1) 自動操縦装置本体
  - (a) 比例制御部(速度計回路、比例制御器、補償回路、低位優先回路を含む)
  - (b) 関数発生部
  - (c) 荷重検知部
  - (d) 残走行距離表示部
  - (e) 連結検知部
  - (f) 空転滑走検知部
  - (g) 車両制御論理部(時限進段回路、A-D変換回路を含む)
- (2) 操 作 盤
- (3) 電 源 回 路 部
- (4) 速 度 発 電 機

図1は操作盤、図2は自動操縦装置本体であるが、操作盤は従

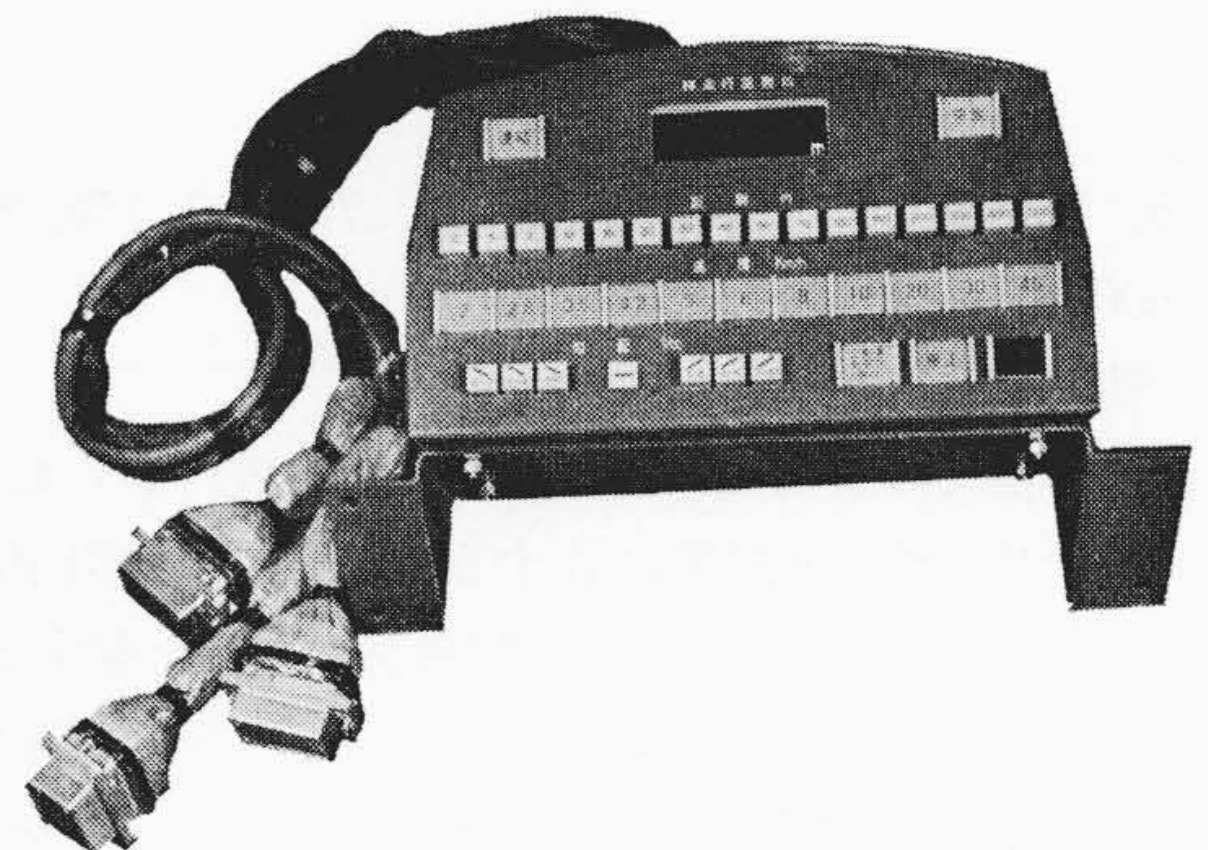


図1 操 作 盤

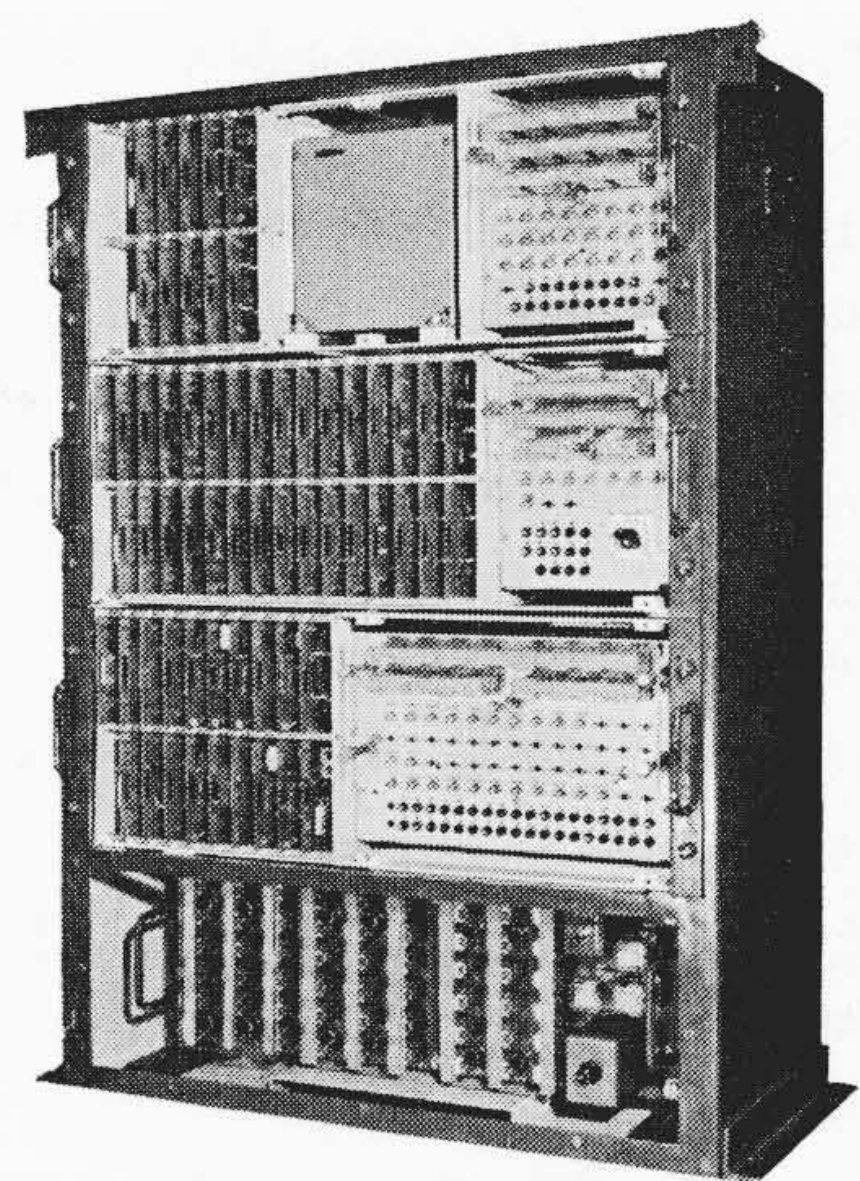


図2 自動操縦装置本体

来の運転台に相当し運転台上部に取り付けられる。また自動操縦装置および電源は機関室に設置されるため防塵(じん)と耐外来雑音、周囲温度上昇について考慮されている。

##### 2.1.2 性 能

装置は次の機能を備えている。

- (1) 定速運転制御(本線での定速運転およびハンプでの貨車の押上げ)

次に示す11種類の速度での定速運転が可能である。

2, 2.8, 3.5, 4.2, 5, 6, 8, 10, 20, 30, 45(km/h)

- (2) 定点停止制御(操車場内での移動)

現在の地点より起算し次の16種類の距離の移動が可能である。

\* 日本国有鉄道車両設計事務所

\*\* 日立製作所水戸工場

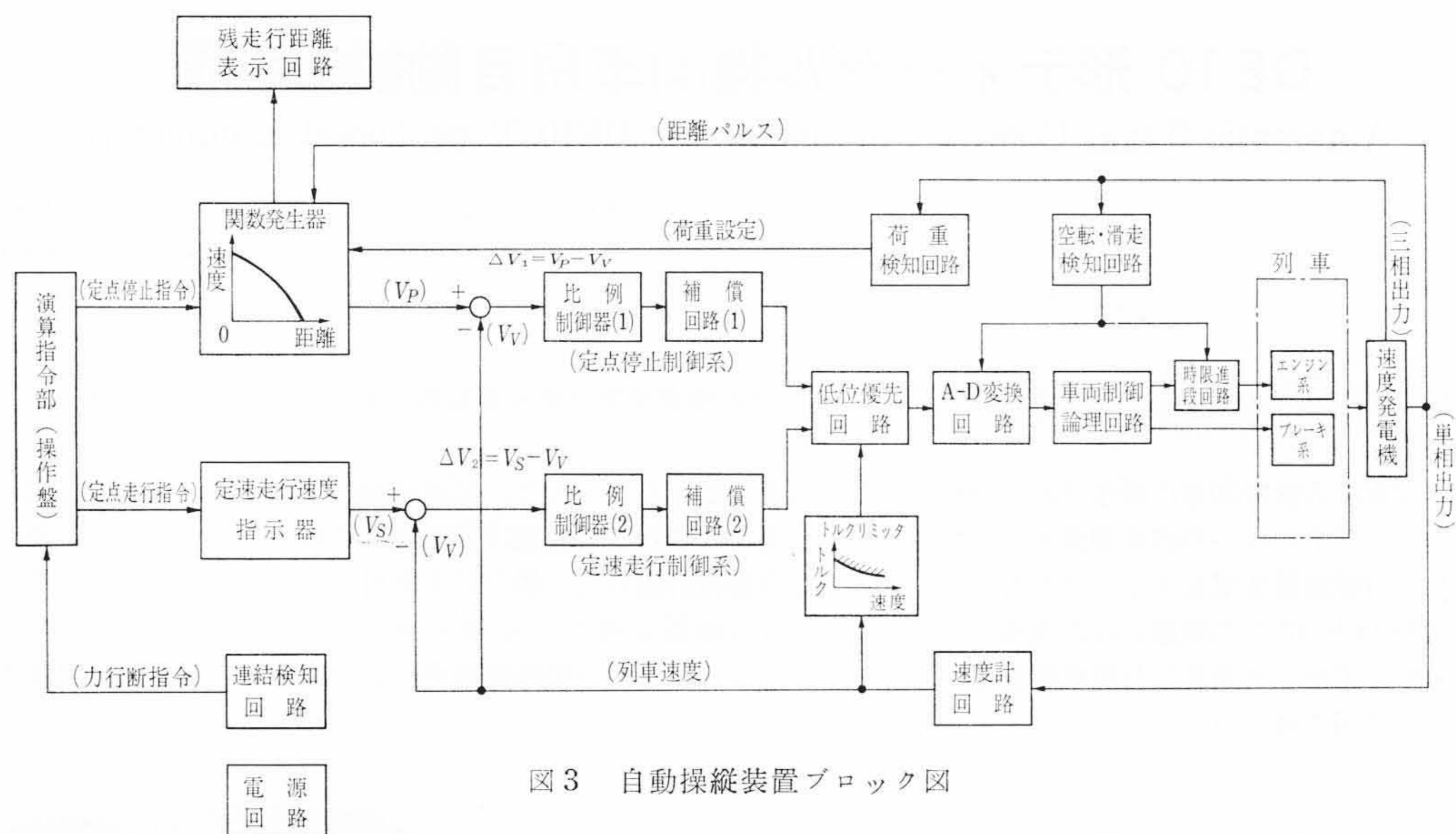


図3 自動操縦装置ブロック図

3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 500(m)

### (3) 突放し制御

平面操車場での貨物列車の分解および組成作業のため、列車速度が設定された一定速度に達すると自動的に機関車にブレーキをかけ、貨車を突き放しする速度突放し機能を有する。また、一つの試みとして貨車の転走曲線を想定した距離対速度関数を発生し、この関数は列車が当たると同様にブレーキをかけ突放しを行なう距離突放し機能をも有する。

突放し設定値として速度突放しは定速運転制御に示す11種類の速度を、距離突放しは定点停止制御に示す16種の距離を扱うものである。

指令方法は突放し押ボタンを押したのち、指令したい速度または距離押ボタンを押せばよい。

### (4) 空転滑走検知制御

±5 km/h/s 以上の加減速度を空転あるいは滑走と判断し、砂まきし再粘着を図る。

### (5) 連結検知制御

機関車と貨物列車との連結を検知し、力行指令を断つ。

### (6) 荷重検知制御

列車速度と力行ノッチおよび列車加速度より荷重を検知し停止制御時の加減速度を制御する。

### (7) 特殊制御

非常ブレーキ指令、常用ブレーキ指令、自動運転解放指令、こう配設定などの特殊制御機能を有する。

## 2.2 各部の動作

図3は本装置の全体ブロック図を示したものであるが以下各ブロックの機能の概要を説明する。

### (1) 演算指令部(操作盤)

定速運転指令、定点停止指令、突放し指令、連結指令、停止指令およびそのほか特殊制御指令を行なう。

本部分は運転台と同一機能を有し、指令はすべて押ボタンによるため熟練は不要であり、無線機と結合するには、この押ボタン指令を無線機出力と置きかえればよい。

### (2) 関数発生部

演算指令部から定点停止指令を受けると指令距離に対応した距離長を有する放物線関数を発生し、列車をこの放物線関数に追従させ円滑に停止させることを目的とする。

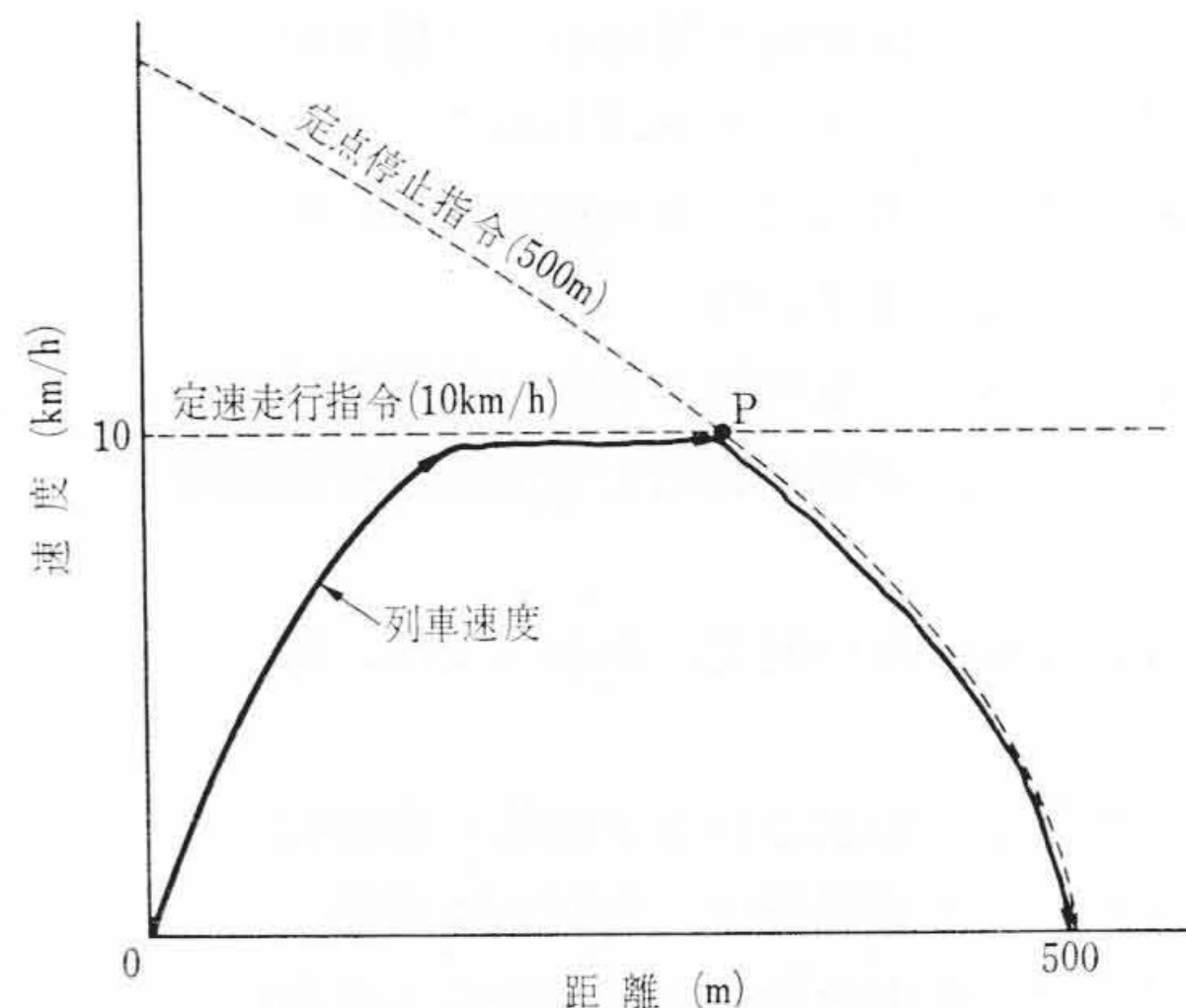


図4 低位優先回路の動作

このとき指令地点から起算し、停止目標点までの残走行距離を1 mごとにデジタル表示する。また、けん引する荷重に応じ減速度を変化し、輸送効率の向上と安全を図っている。

### (3) 定速走行速度指示器

演算指令部より定速走行指令を受けると指令速度に対応した一定速度指令を発し、列車を指令速度に追従し走行させることを目的とする。

### (4) 比例制御器および補償回路

関数発生器指令速度 ( $V_p$ ) または定速走行速度指示器指令速度 ( $V_s$ ) と列車速度 ( $V_v$ ) との速度偏差 ( $\Delta V$ ) を算出し、これに列車の慣性やむだ時間による遅れを補償するため補償回路をそう入し、ノッチの高ひん度動作の防止と円滑な制御を実現している。

これらの回路は定速走行系と定点停止系のおのおのにあるが、その理由は走行は主としてエンジンを制御するのに対し、停止はブレーキを対象とし応答や感度が異なるためである。

### (5) 低位優先回路

停止系および走行系の指令に応じ通常2種類のトルク指令が補償回路出力として発生しており、いずれを採り車両を制御するかは重要な問題である。

特に図4に示すように定速走行指令と定点停止指令が同時に指令され、両指令が交錯するP点において問題となる。

本回路においてはすべての判断基準としてブレーキ側優先とし、双方力行の場合は力行トルクの低いほうを優先し、同様双方ブレーキ指令のときはブレーキトルクの大きいほうを優先する。

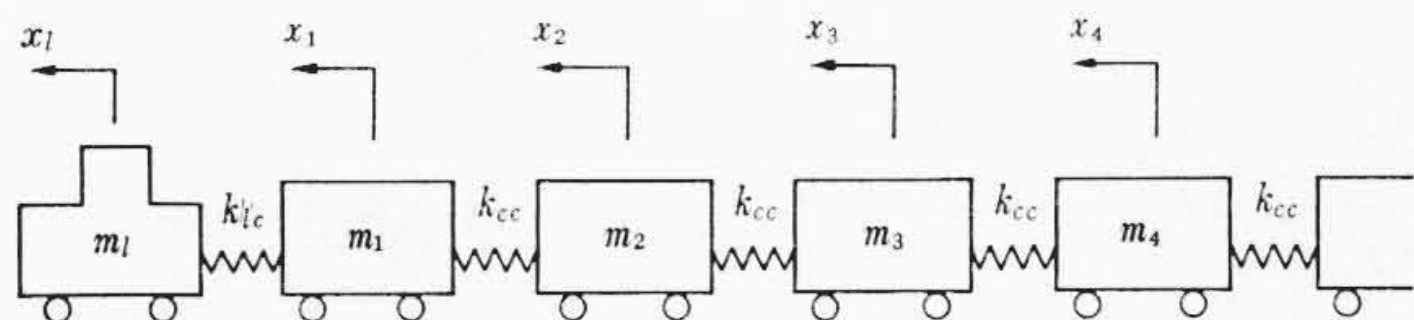


図5 貨物列車

## (6) A-D変換回路, 車両制御論理回路

低位優先回路出力まではアナログ量であり, これを力行15ノッチまたはブレーキ7ノッチに変換する。

また車両制御論理回路では車両の制御回路との受渡し, インターロックを主とし, いかなる場合でも運転台での手動ブレーキ指令優先を原則としている。

## (7) 連結検知回路

貨車の入換を行なう際, 貨車を連結し移動後切り放し, 再びほかの貨車を連結するなどの作業は通常見受けられる。この際貨車を連結したことをなんらかの手段で検知し力行回路断とし次の動作に自動的に切り換えることが望ましい。このため連結器の振動加速度により連結を検知する。

## (8) トルクリミッタ

車両の粘着性能を考慮し, 過大なトルク指令をしないよう制限するためのものである。すなわち, 粘着係数は列車速度に応じて変化するもので, 速度に応じて出力トルクを制限している。

## (9) 空転滑走検知回路

列車の加減速度に応じ空転または滑走と判断するもので, 現在では同一機能装置がDE10形車両にすべて取り付けられている。

## 3. 制御特性の解析

## 3.1 列車の運動方程式

機関車の自動操縦において, ノッチアップやブレーキをかけたとき列車が過渡現象を起こすが, この場合の機関車の速度応答が問題になる。

このような加減速時の列車過渡現象は機関車と列車, および列車同士の連結器遊間や緩衝器特性の非線形要素が含まれているうえ連結車両数も多いので, その運動方程式は多元の形となり解析は非常に複雑となる。したがってデジタル計算機によってシミュレートし貨物列車の伝達関数を求め, これを用い系全体をアナログ計算機でシステム解析を行なった。

図5に示すように機関車が多数の貨車を連結している場合の運動方程式は(1)式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} m_l \ddot{x}_l &= -R_l - k_{lc}(x_l - x_1) + F_l \\ m_1 \ddot{x}_1 &= -R_{c1} - k_{cc}(x_1 - x_2) + k_{lc}(x_l - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -R_{c2} - k_{cc}(x_2 - x_3) + k_{cc}(x_1 - x_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= -R_{c3} - k_{cc}(x_3 - x_4) + k_{cc}(x_2 - x_3) \\ &\vdots \\ m_{n-1} \ddot{x}_{n-1} &= -R_{cn-1} - k_{cc}(x_{n-1} - x_n) + k_{cc}(x_{n-2} - x_{n-1}) \\ m_n \ddot{x}_n &= -R_{cn} + k_{cc}(x_{n-1} - x_n) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここで各記号は,

- $m_l$ : 機関車の全質量
- $m_i$ : 貨車それぞれの質量 ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )
- $x_l$ : 機関車の変位
- $x_i$ : 貨車それぞれの変位 ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )
- $k_{lc}$ : 機関車と貨車間の緩衝器の総合特性
- $k_{cc}$ : 貨車同士の緩衝器の総合特性
- $F_l$ : 機関車の引張力またはブレーキ力
- $R_{c,i}$ : 貨車それぞれの走行抵抗

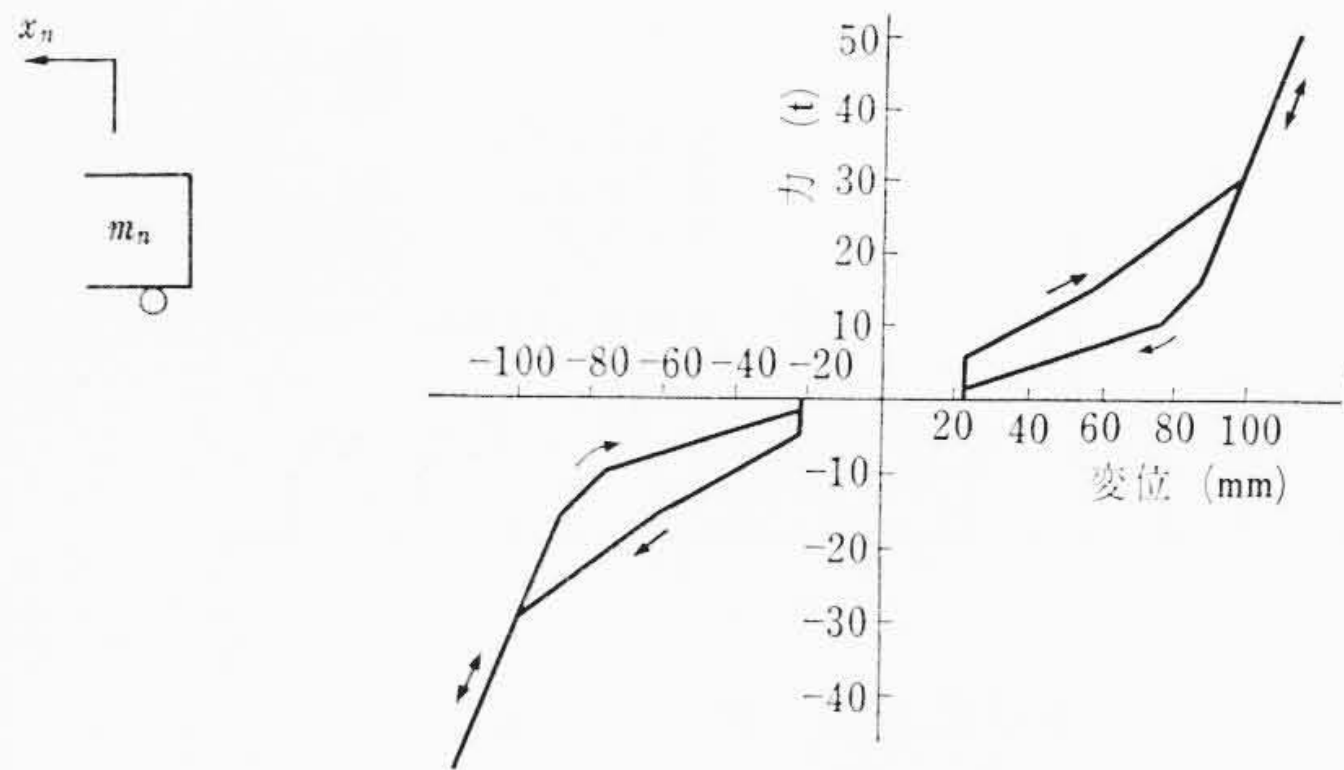
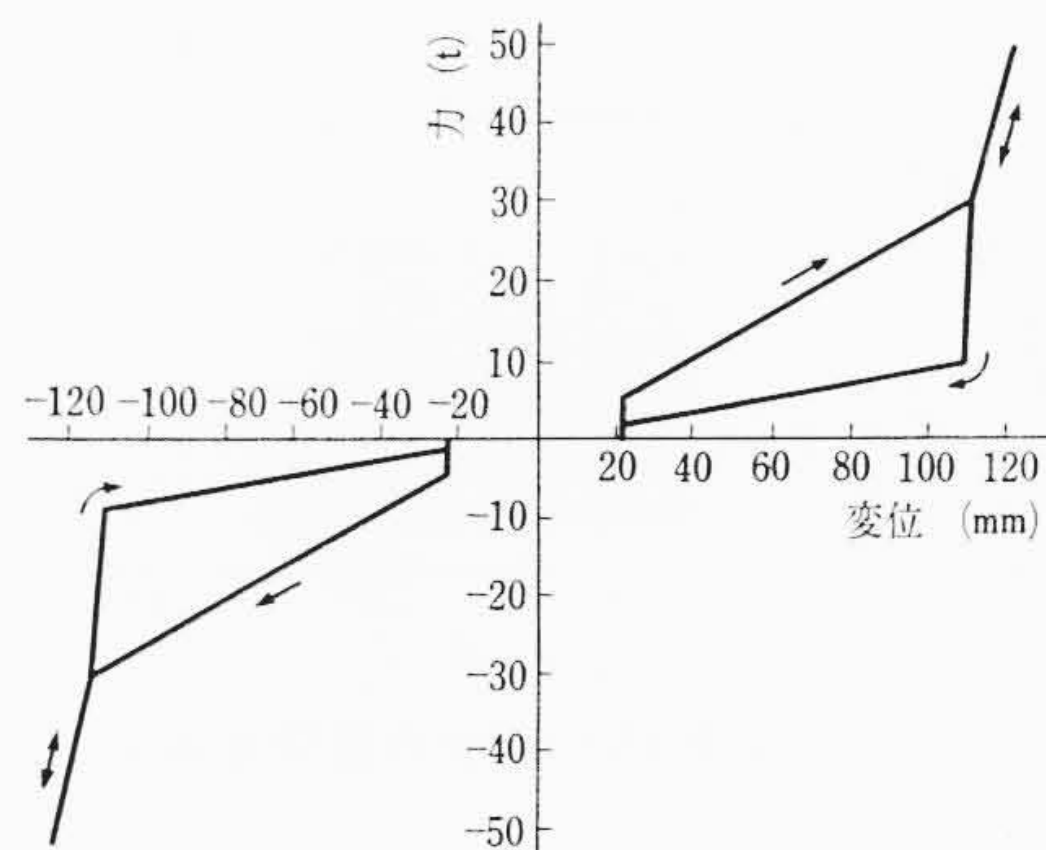
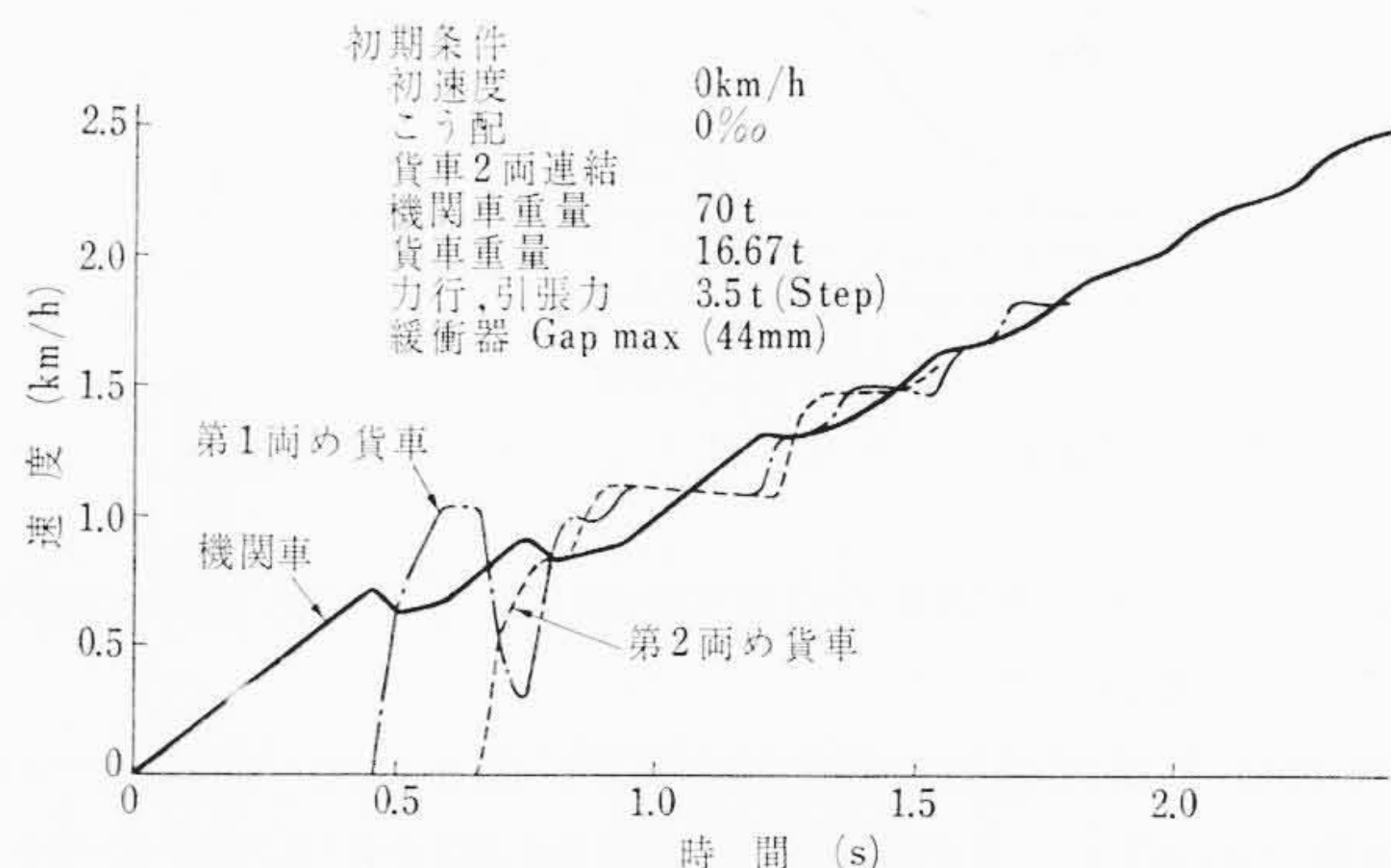
図6 機関車と貨車間緩衝器特性 ( $k_{lc}$ )図7 貨車同士間緩衝器特性 ( $k_{cc}$ )

図8 貨車2両連結の機関車および貨車速度

$R_l$ : 機関車の走行抵抗

## 3.2 過渡現象のシミュレーション

(1)式をHITAC5020を使用して計算した。なお緩衝器総合特性として図6に機関車と貨車特性, 図7に貨車同士の特性を示した。

また列車抵抗は連速3 km/h以下では(2)式, 3 km/h以上では(3)式によった。

$$\left. \begin{aligned} R_l &= (-1.518 V + 7.0 + R_g) \cdot W_l \times 10^{-3} (t) \\ R_{ci} &= (-1.131 V + 5.0 + R_g) \cdot W_{ci} \times 10^{-3} (t) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} R_l &= \{ (2.39 + 0.0165 V + R_g) \cdot W_l \\ &\quad + 0.0445 V^2 \} \times 10^{-3} (t) \\ R_{ci} &= (1.60 + 0.00077 V^2 + R_g) W_{ci} \times 10^{-3} (t) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで,  $V$ : 列車速度 (km/h)

$W_l$ : 機関車重量 (t)

$W_{ci}$ : 貨車それぞれの重量 (t)

$R_g$ : こう配抵抗 (kg/t)

図8はシミュレーション結果である。貨車2両連結の場合の機関車および貨車速度を示したものである。これは列車の初速度が0 km/hから出発し, 緩衝器遊間が最大44 mmある場合の現象で, 最初機関車のみ直線的に加速し, 緩衝器遊間がなくなってからは振動しながら速度を増していく。

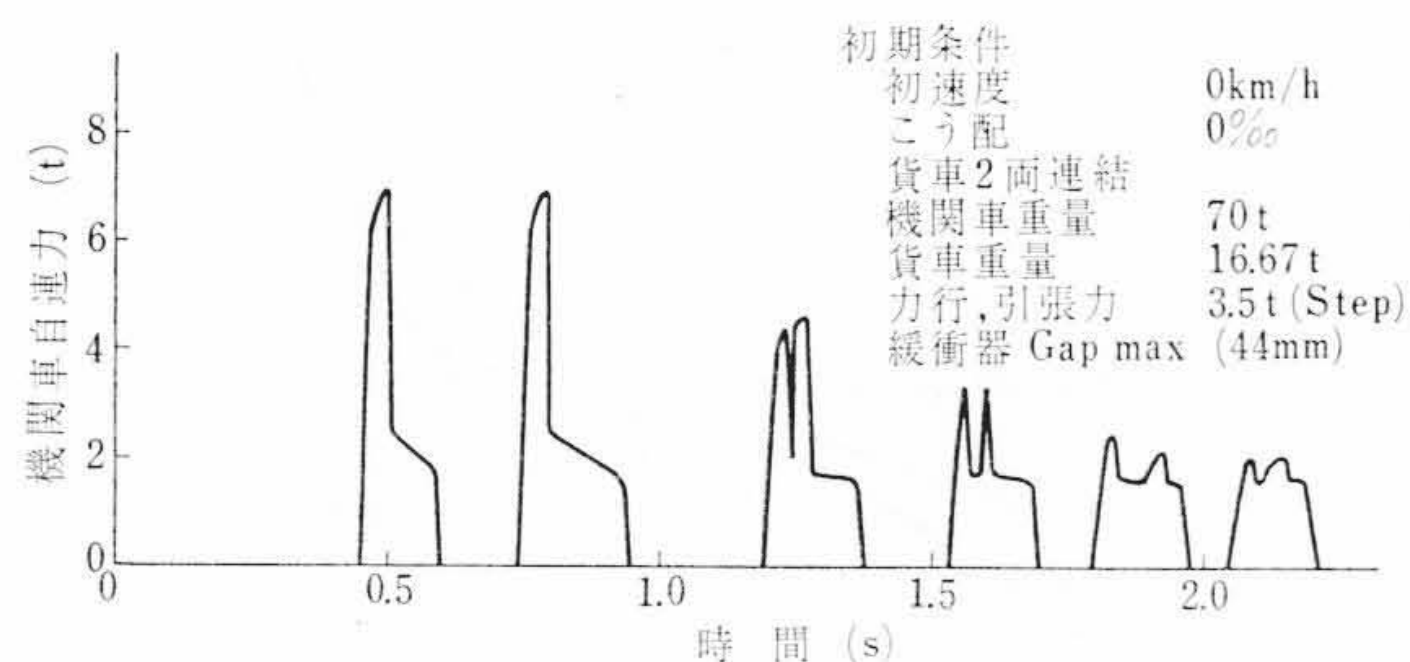


図9 貨車2両連結の機関車自連力

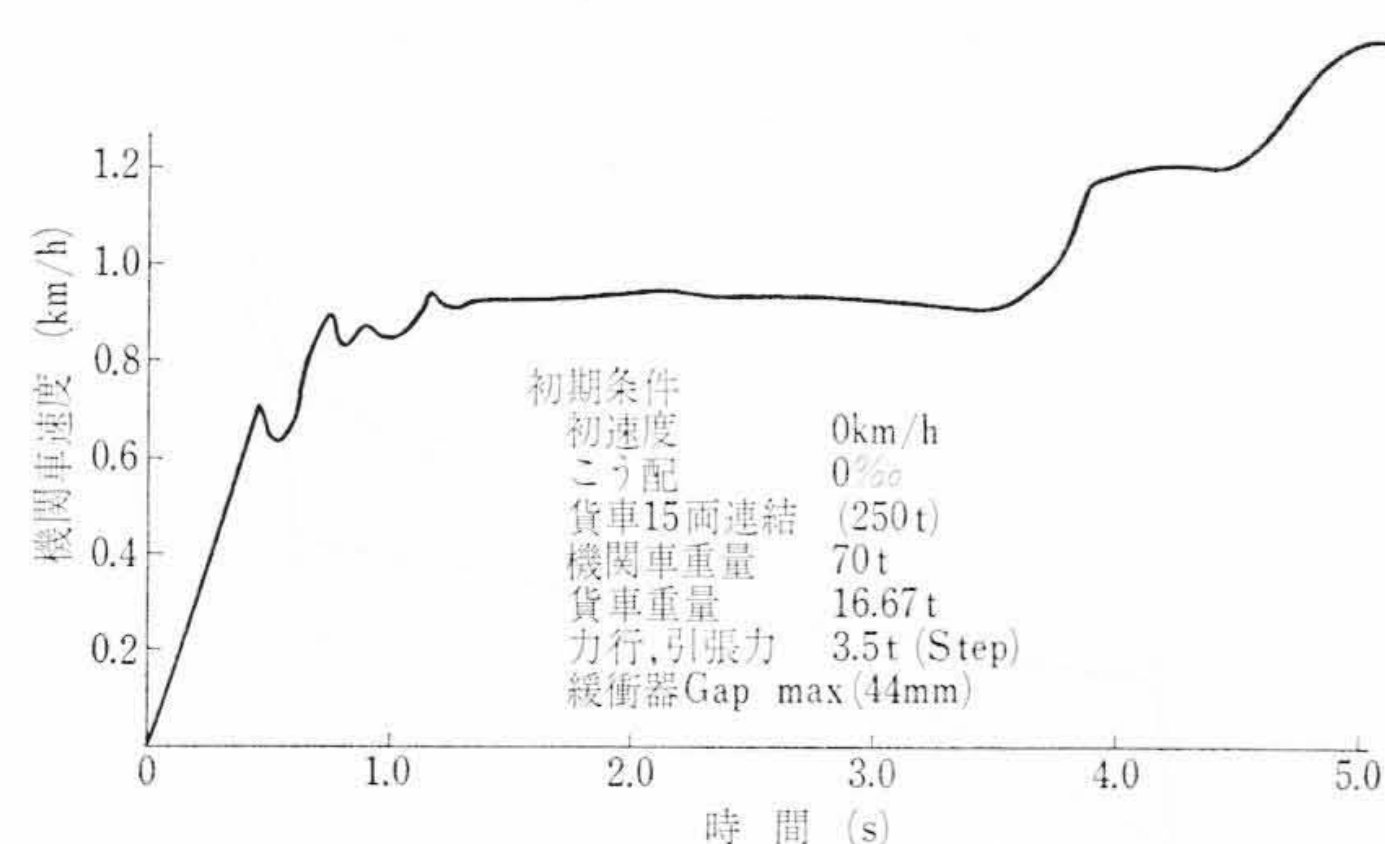


図10 貨車15両連結の機関車速度

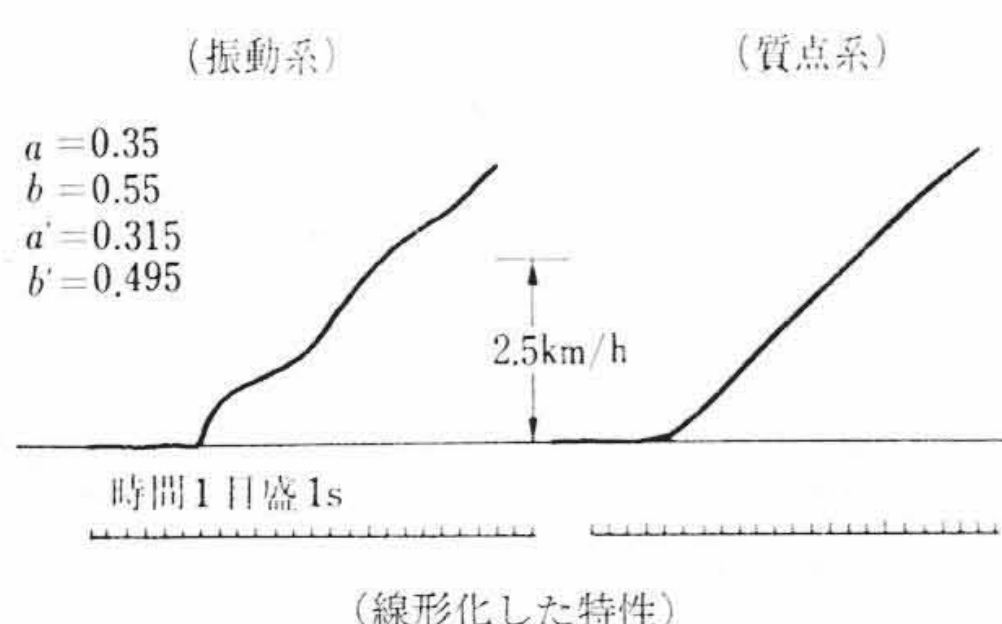


図11 3.5tのステップ入力を与えたときの応答

図9はこのときの機関車の自連力を示したものであるが、時間の経過に従って減衰している。

図10は貨車15両連結の場合であるが、図8に比べ同時刻での機関車速度は小さい。また連結貨車全部(15両)を引き出すまでは機関車速度は上昇せずむしろ減少の傾向で、全貨車が引出し終わると(約3.5秒付近から)再び機関車速度が増している。

このような計算を荷重、列車速度、緩衝器遊間などのパラメータを変化し十数例につき行なった。

計算結果の詳細については省略するが、現車の測定結果とよく合っていることが確認されている。これらの計算結果を要約し貨物列車を含む系全体のシミュレーションにおける列車特性とした。

### 3.3 アナログ計算機による系の解析

図3に示した全システムを低速度アナログ計算機によりシミュレートした。シミュレーションに当たり最も注意したのは、機関車も含めた貨物列車の伝達関数であり、主要特性については現車の実測値か、または前項に示すようなシミュレーションによった。

さきに述べた過渡特性解析結果を線形化し伝達関数で表わし、これを列車特性とした。すなわち列車を振動系とみなし(4)式とした。

$$G(s) = \frac{s^2 + a's + b's}{Ws(s^2 + as + b)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式によれば、たとえば列車にステップ状の外力が加わった場合の速度の応答は図11に示すようになり、過渡現象解析結果とほぼ同等の特性が実現できる。なお(4)式において $W$ は列車の総重量であり、 $a$ 、 $a'$ 、 $b$ 、 $b'$ は連結器遊間により生ずる非線形性の影響を示す係数である。

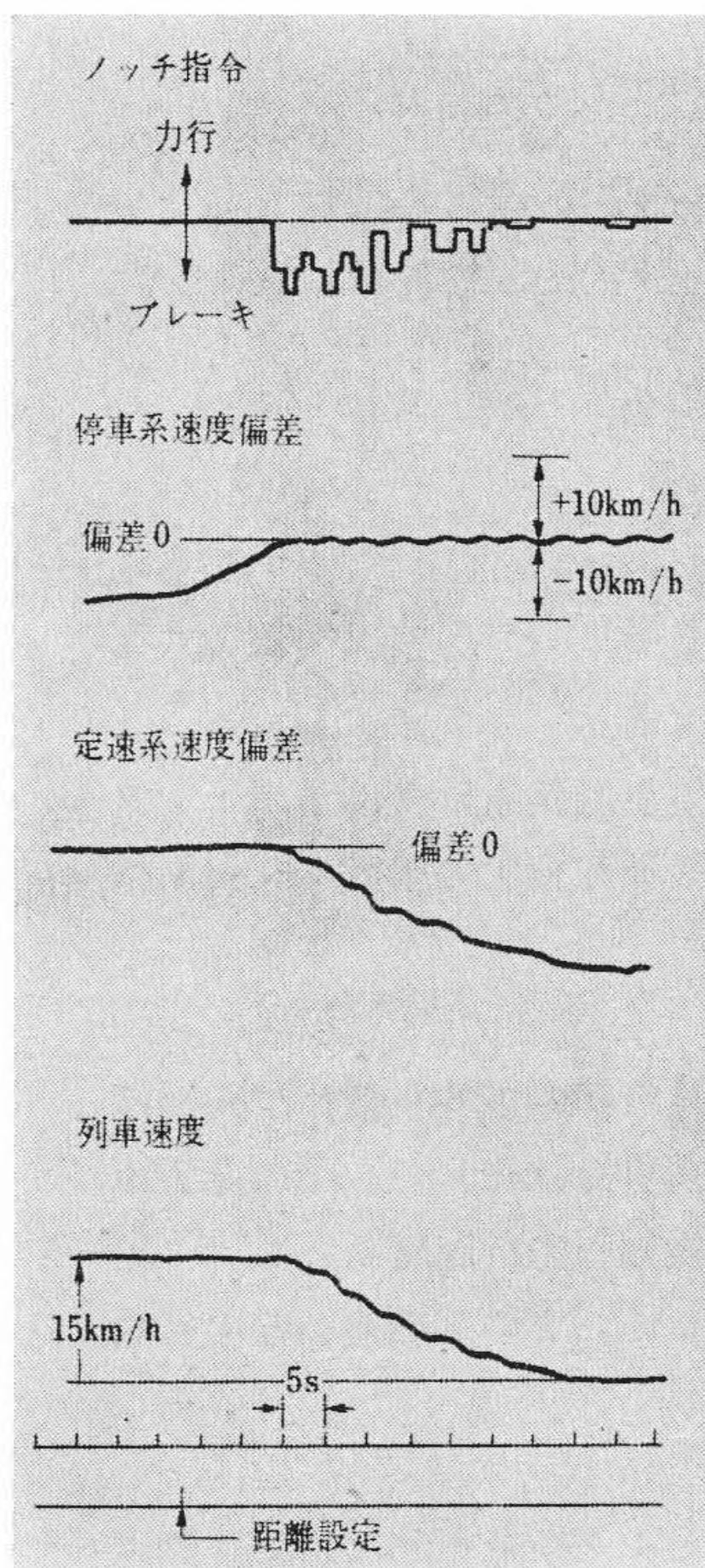


図12 補償回路を使用しない場合の応答

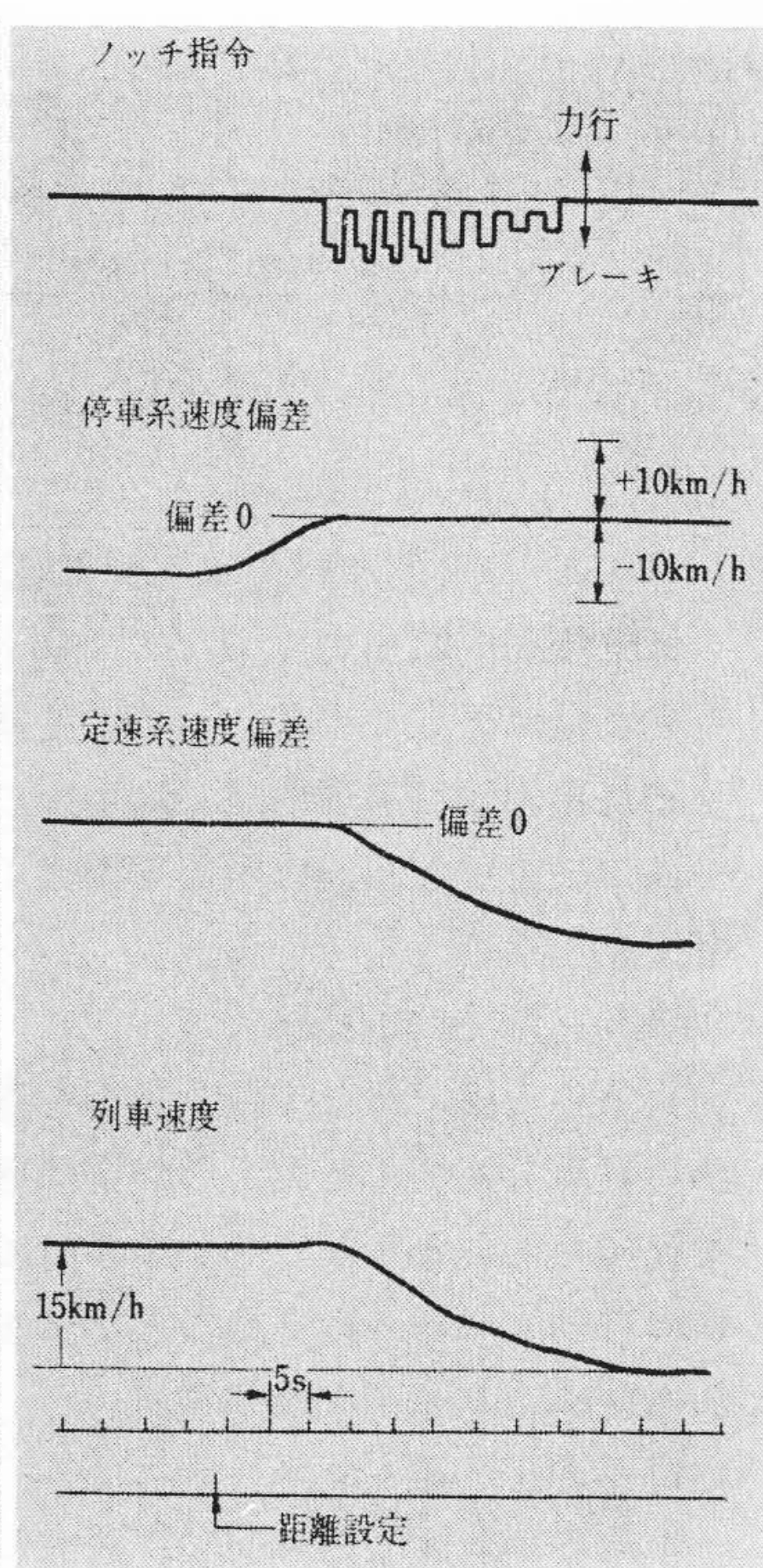


図13 補償回路を使用した場合の応答

図12と図13はシミュレーション結果の一例であるが、図12は補償回路なしの場合の定点停止制御応答であり、図13はこれに(5)式で示す。

$$\frac{1+S}{1+0.5S} \quad \dots\dots\dots (5)$$

補償回路をそう入した場合である。両図の列車速度をみてもわかるように補償要素によって円滑な制御となっている。

## 4. 現車試験結果

現車試験は昭和42年12月11日から12月22日までの間、日本国有鉄道鷹取工場試運転線にて行なわれ良好な結果を得た。使用した機関車はDE10901である。

### 4.1 定速走行試験

すでに述べたように、定速走行指令には2~45 km/hの間に11種類あるが、試験では2、5、10、20 km/hにつき重点的にデータを採取した。

図14は供試機関車に測定車として客車(スハフ)1両を連結したときの特性で、おおむね動作は良好であるが、指令が変化するときの過渡特性としてオーバーシュート、アンダーシュートが比較的大である。図15は貨車5両を連結した場合であり、図16は貨車15両とした場合であるが全体として良好な追従を示している。しかしスハフ1両または貨車5両負荷での2 km/h走行(図14、図15)は追従性能が劣り、その原因の一つは機関車の力行ノッチが低速にて比較的あらいためであり、軽荷重での低速制御は再考の余地がある。また図14におけるオーバーシュートに代表されるように軽荷重においてはループゲインが高い傾向を示しており、荷重によってある程度ゲインを切り換えることが望ましいことを示している。

### 4.2 定速および定点停止の組合せ制御

定点停止単独の試験を実施したがこれを省略し、定速と定点停止の組合せ制御について述べる。本制御は図4に示す制御で、“10 km/hで500 m前方に停止する”ように走行速度と走行距離を同時に指令することにより行なわれる。

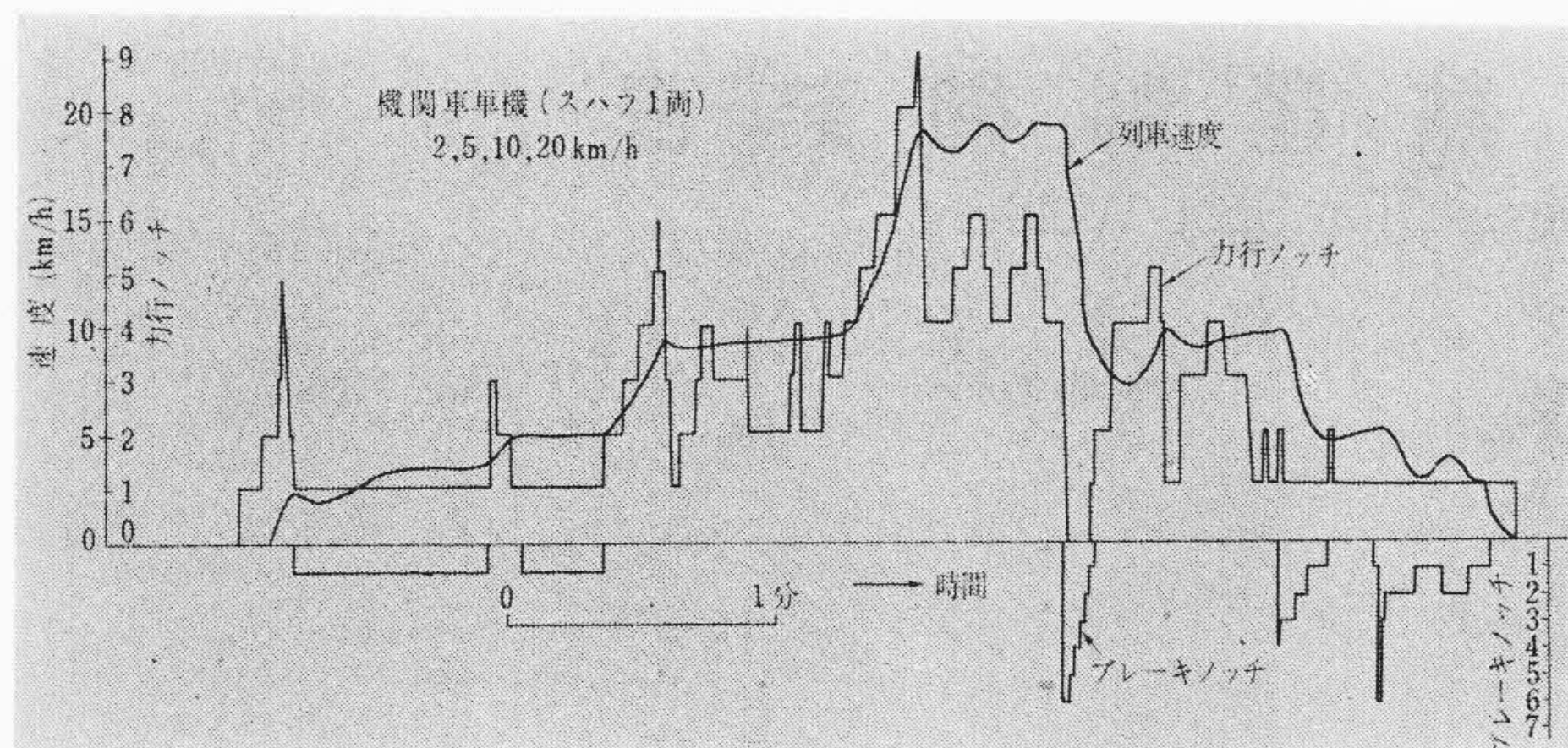


図 14 定速走行特性 (機関車単機)

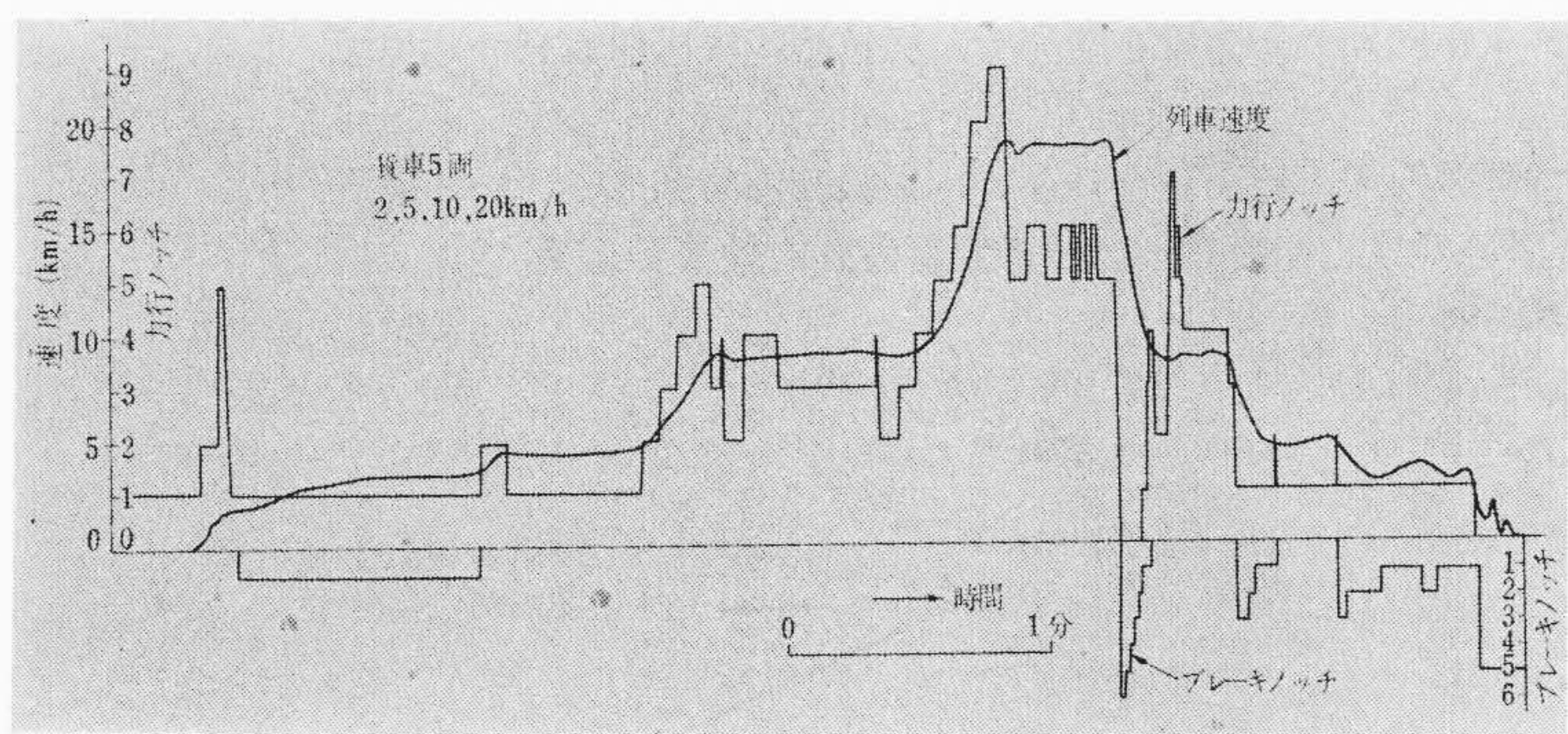


図 15 定速走行特性 (貨車5両負荷)

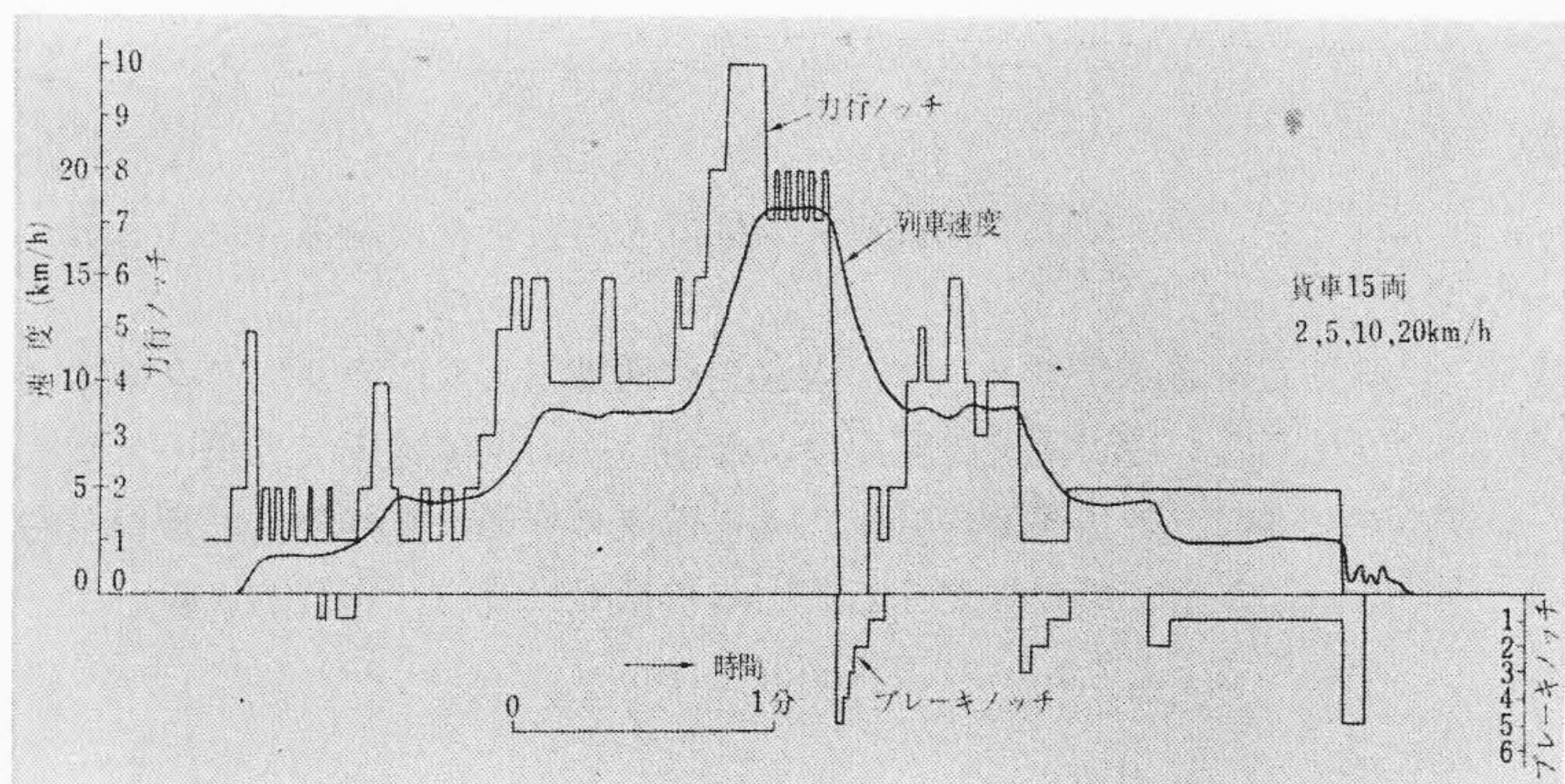


図 16 定速走行特性 (貨車15両負荷)

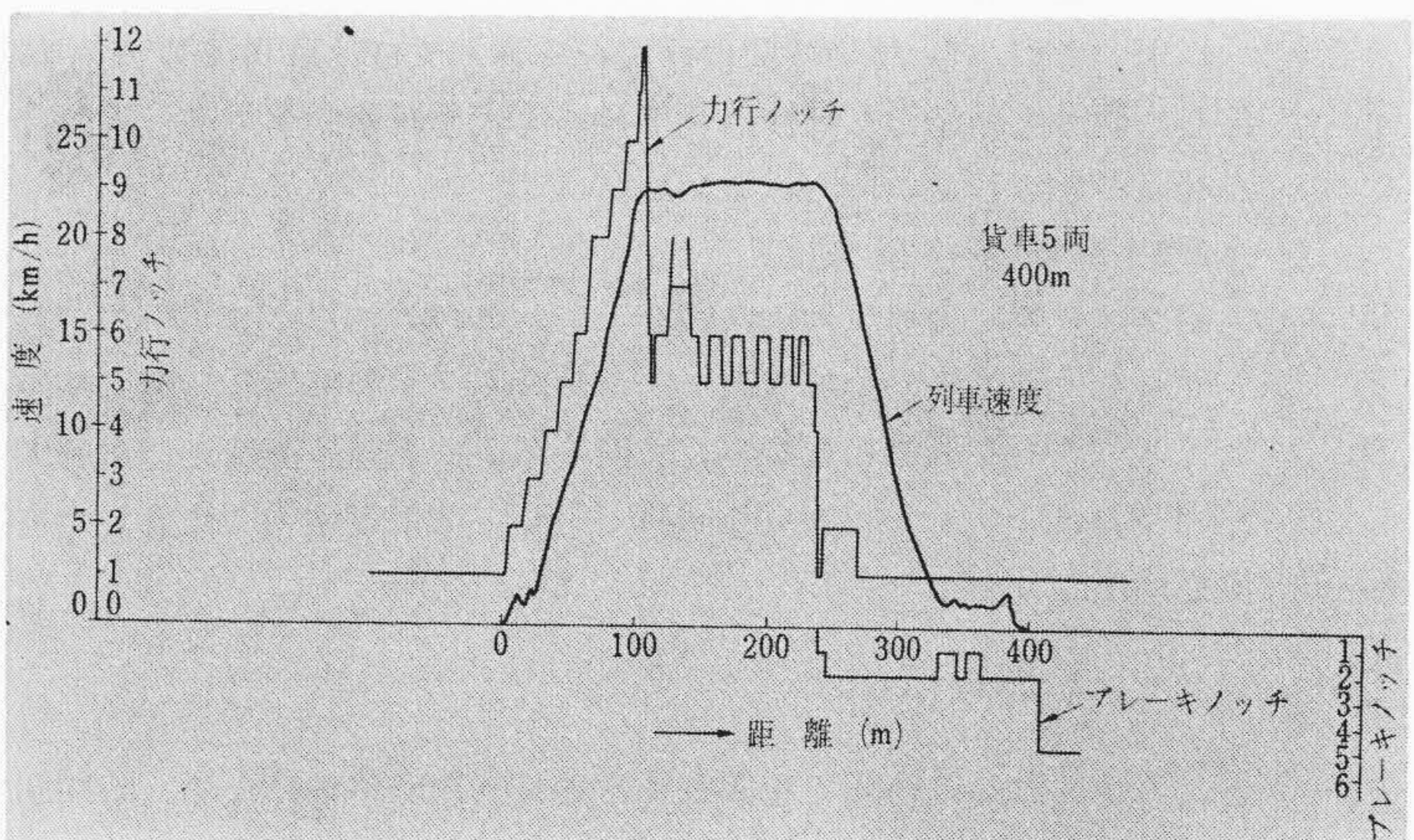


図 17 定速および定点停止の組合せ制御特性

図 17 は貨車 5 両を負荷とし 22 km/h (定速走行) 指令と 400 m (定点停止) 指令を行なった場合であり、指令に忠実に追従している。

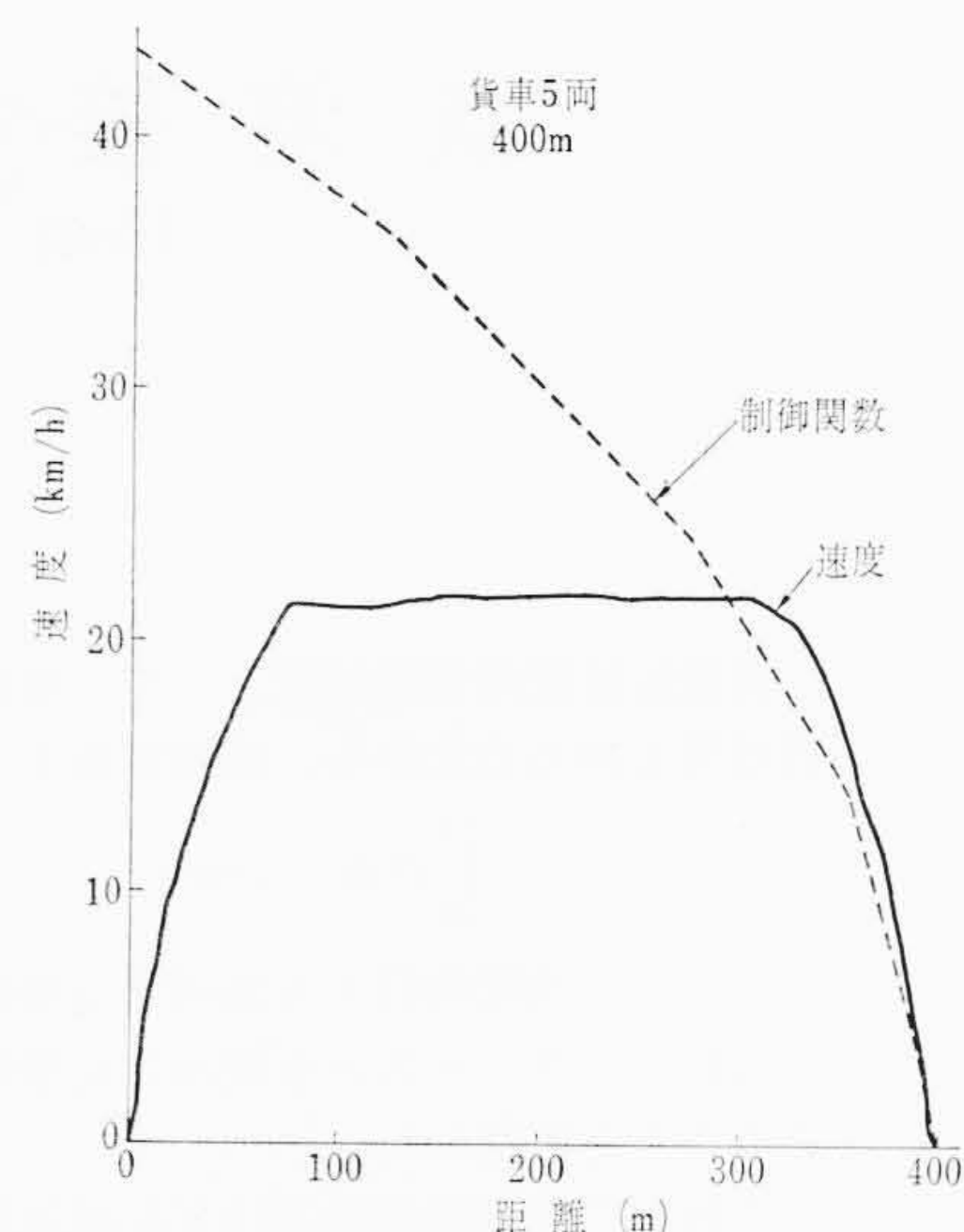


図 18 定速および定点停止の組合せ制御特性

一方図 18 は同一条件にて定点停止制御につき関数への追従特性を見たものであるが、関数進入時にオーバーシュートが比較的大である。これは定点停止制御系の設定ゲインが低いことを示している。

上述定速走行制御、定点停止制御以外の制御機能についても結果は、おおむね良好であった。なお昭和 43 年 2 月に実施された第 2 次現車試験においては上述の問題点がすべて解決され、良好な制御特性が得られている。

## 5. 結 言

本装置は操車場における入換業務はもとより、本線にも使用可能な性能を有する一方、大規模な自動化計画のない所にも実用できる特長を有している。大規模な自動化計画のない場合の適用対象としては、最近一般産業用の入換機関車において、無線による遠隔操縦を採用し、実利に直結した自動化が強く推進されており、その要求に合致させ得るものである。

今回の装置は可能な範囲の全機能の自動化を目的としており、適用対象により機能の取捨選択あるいは組合せの変更の必要はあるが、これによってすべての DHL の自動制御が可能であることを実証したものと考える。

なお今後の課題として次の二項があげられる。

- (1) 量産を考慮し、各機能の再検討と洗練
- (2) 小形化および信頼度の向上

特に一項については追従性能をさらに向上させるなどの一部改良を実施し 43 年 2 月に実使用を模擬した再試験を行ない良好な結果を得た。

終わりに本装置の開発にあたりご指導、ご協力をいただいた日本国有鉄道車両課、設計事務所、鉄道技術研究所、および日立製作所日立研究所水戸分室の関係各位に厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) 葛生、高岡ほか：鉄道におけるサイバネティクス利用シンポジウム第 4 回予稿集  
(昭和 42 年、日本サイバネティクス協議会)
- (2) 池谷、高岡ほか：鉄道におけるサイバネティクス利用シンポジウム第 5 回予稿集  
(昭和 43 年、日本サイバネティクス協議会)