

自動車の発進挙動モデル

A MAN-MACHINE SYSTEM MODEL OF STARTING CARS

坂口裕司*, 壇 和喜**, 角 知憲***, 渡辺義則****

By Yuji SAKAGUCHI, Kazuki DAN, Tomonori SUMI,
and Yoshinori WATANABE

This paper describes an attempt to find a model of departing cars from signalized intersections in order to predict acoustic power level. The model expresses driver characteristics as transmission elements of an automatic control system, which consists of the driver and the car. The model provides reasonable predictions of acceleration behavior of starting cars.

1. はじめに

自動車交通騒音の予測のために、従来、いろいろなモデルが提案されてきたが、そのほとんどは自動車の定常的走行を前提としており^{1), 2), 3)}、交差点で停止・発進を繰り返す交通流に適用するには無理がある。交差点を通る交通流から発生する騒音に関して、第一に問題になるのは、音響出力の予測である。この場合の音響出力を定常走行の場合と比較すると、次のような相違があると考えられる。

1) 比較的低速、かつエンジン負荷が大きい状態であ

*) 学生会員, 九州大学工学部土木工学科

(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**) 正会員, 九州大学技官, 工学部土木工学科

(同上)

***) 正会員, 工博, 九州大学助教授, 工学部土木工学科

(同上)

****) 正会員, 工博, 九州工業大学助教授, 工学部設計生産工学科(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

って、エンジン騒音が支配的である。

2) エンジン負荷の大部分を占める加速抵抗が車両重量で決まるために、大型車の騒音が乗用車のそれよりはるかに大きい。この事情は定常走行の場合よりも著しい。また、それは停止時に自動車占める車列中の位置(車列中、前から何番目か)で異なる。

3) 大型貨物車では、運転性能上の余裕が小さいため、積載重量の大小による運転操作(エンジン負荷・加速度とそれらの時間的変化、変速操作のタイミング)が著しく変化する。

このように複雑な音響出力の時間的、場所的な変化を考慮して的確な騒音予測を行なうためには、エンジンの運用条件の変化に応じた音響出力の予測方式を開発する一方¹⁾、車両の重量・積載量、車群中の停止位置、道路勾配などを初期条件としてエンジンの運用状態自体を予測するモデルを作成する必要*) 比較的详细に自動車の運転条件と騒音の関係を分析した研究に文献4)があり、当面、これを基礎として音響出力を算出することができる⁵⁾。

がある。この時、エンジンやその他の装置の機械的性能を数値的に把握することは比較的容易であって、問題は運転者の特性を知ることである。そこで本論文では、まず停止車列の先頭の乗用車に搭乗した運転者を対象に、自動車の機械的性能を知って、運転者の行動特性を定量的に求めることを試みる。乗用車を対象とするのは、音響出力の点で興味を中心となるのは大型車ではあるが、大型車では機械的な性能が十分でないため、運転者の特性がストレートに現れないからである。

2. 自動制御モデル

運転者が自動車の速度を制御する行動は、自動車と運転者を合わせた目標値制御型の自動制御システムとしてモデル化することができる⁶⁾。自動車交通流理論としてポピュラーな追従理論も、実は比較的単純な自動制御モデルで表わすことができる。基本的な追従理論では、時刻 t における第 k 番目自動車の位置を $x_k(t)$ 、速度を $\dot{x}_k(t)$ 、運転者の反応遅れ時間を L として、第 $k+1$ 番目の自動車の加速度 $\ddot{x}_{k+1}(t)$ を次のように表わす⁷⁾。

$$\ddot{x}_{k+1}(t) = \lambda [\dot{x}_k(t-L) - \dot{x}_{k+1}(t-L)] \quad \dots(1)$$

ここに、 λ はある定数である。(1)式は第 k 番目自動車の速度を目標速度とする第 $k+1$ 番目自動車についての次の自動制御モデルと等値である。

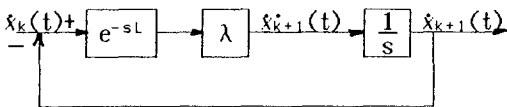


図-1 追従理論の自動制御モデル表示

図-1で、目標速度 $\dot{x}_k(t)$ のかわりに青信号の現示 ($t=0$) とともに立ち上がるステップ関数、

$$v_t(t) = v_0 u(t) \quad \dots(2)$$

$$u(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

を与えれば、自動制御モデルは車列中の先頭車の発進挙動を表現するてがかりとすることができる。こ

こに、 v_0 は発進後の最終走行速度、 $u(t)$ は単位ステップ関数である。もちろん、この場合は運転性能の範囲で速度変化が微小であるとはいえず、比例要素 λ のみを用いることは不十分である。

3. 自動車の機械的性質

発進挙動を取り扱う場合に考慮すべき主な運転操作は、アクセル・ペダルの踏み込みと変速操作であるが、変速操作はいましばらくおく。人がアクセル・ペダルを踏み込んでエンジンにある燃料流量 g を与えた時にエンジンが発生するトルク T と g の関係を模式的に示したのが、図-2である。図中のパラメータ N はエンジン回転速度である。

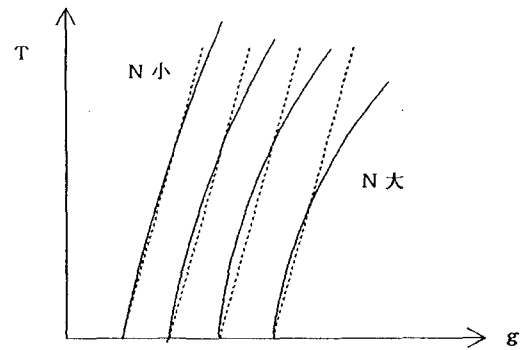


図-2 燃料流量とトルク

図の曲線群は N とともに僅かに勾配を変えながら g 軸の右方にシフトしていく。そこで、簡単のために、これら曲線群のうち、運転範囲内で平均的なものを選んで直線で近似し、他の曲線も同じ勾配の直線に置き換え、 g 軸上のシフト量が N に比例するものとみなせば、図中に示した破線群が得られる。この直線群は、

$$T = ag - bN \quad \dots(3)$$

と表わされる。ここに、 a は直線群の勾配、 b は N によるシフト量をあたえる定数である。

ところで、駆動力を $F(\text{kg})$ と $T(\text{kg} \cdot \text{m})$ には

$$F = \eta \gamma T / r \quad \dots(4)$$

の関係があり、速度 $v(\text{m/s})$ は $N(\text{rpm})$ と

$$v = 2\pi r N / (60 \gamma) \quad \dots(5)$$

の関係にある．ここに， γ は最終減速比で変速比と差動ギア減速比の積， r はタイヤの有効半径， η は動力伝達効率である．したがって，変速機の段位を与えれば，(3)式は次のように F と g および v の関係に書き直すことができる．

$$F = Ag - Bv = A(g - K_v v) \quad \dots(6)$$

ここに， $A = \eta \gamma a/r$ ， $B = 60 \eta \gamma^2 b/(2\pi r^2)$ ， $K_v = B/A$ とおいた．

速度が大きくない場合，駆動力 F に対する自動車の運動方程式は，自動車の質量を M ，加速度を α ，走行抵抗係数を R とすると，次式で与えられる．

$$F = M\alpha + Rv \quad \dots(7)$$

(6)式と(7)式を合わせると，図-3のようなブロック図が得られる．

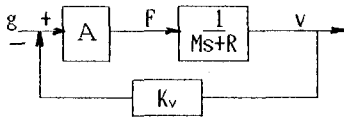


図-3 自動車系のブロック図

自動車の発進時の加速度の時間的変化を実測すると，ピークの丸くなったのこぎり波状になることが知られている．図-3に示したモデルは g_0 をある定数として $g(t) = g_0 u(t)$ とおくと，のこぎり波に近い加速度変化を出力するので，発進挙動のモデルの基礎とすることができると考えられる．

4. ヒューマン・ファクターの導入

マン・マシン・システムの中で果たす人の機能の一つは，与えられた目標速度を均衡速度とする燃料流量を決定することである．しかし，人間は決定した流量をステップ的にエンジンに流すことはせず，

緩やかな操作を行なう．人が緩やかな応答を行なうときの行動様式として，一次遅れと二次遅れが知られている⁹⁾．このうち，アクセル操作に適合するものとして二次遅れを考えてみる．二次遅れは図-4に示す破線のようなステップ的な行動に代わり，実線のような滑らかな行動をとるものである．二次遅れを表わす伝達関数 $G_2(s)$ は次式で表わされる．

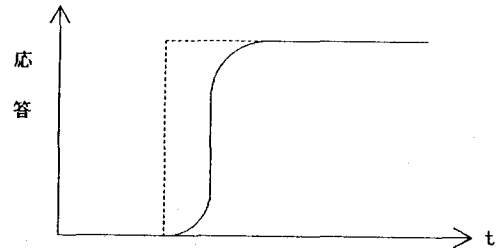


図-4 二次遅れ

$$G_2(s) = \frac{1}{(1 + P_2 s)^2} \quad \dots(8)$$

ここに， P_2 は時定数であり，人の行動様式にあわせて推定する．そこで，図-3のモデルに人の応答の時間遅れ e^{-sL} ，目標速度を燃料流量に換算するゲイン H_g ，および二次遅れを追加すると図-5のシーケンス・モデルとでもよぶべきものが得られる．このモデルは観測される加速度変化に近い波形を与える．しかし，このままでは，積載量や勾配によって十分な速度・加速度がえられなかった場合に，アクセル・ペダルの踏み込み量を増加し，速度・加速度が大きくなったとしてもほとんどすなどの行動が再現できない．そこで，図-6に示すように，速度と加速度に関するフィード・バック・ルーチンを追加する．図中， H_v および H_a はそれぞれ速度および加速度に関する人の応答特性を表わすゲインである．同図で，入力を枝別れさせて速度のフィード・バック・ルーチンにつないだのは，速度が最終的に目標速度と一

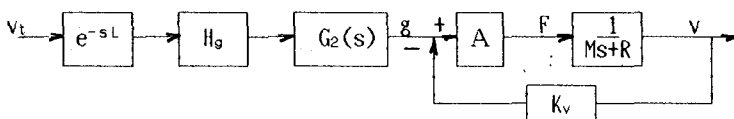


図-5 発進挙動のシーケンス・モデル

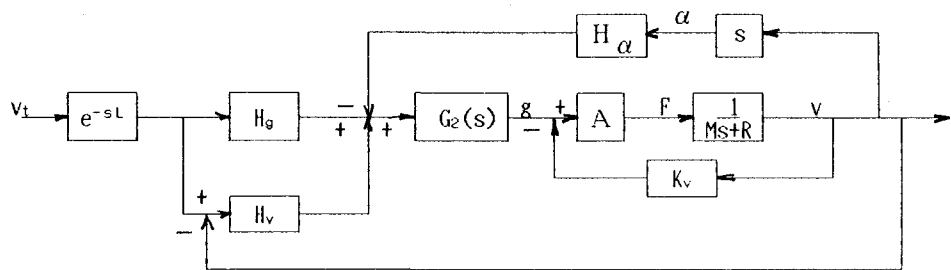


図-6 発進挙動の自動制御モデル

致した状態では速度フィード・バックの効果が消滅し、かつ燃料流量が所定の値となるという現実的な挙動を再現するためである。同図の R_0 は勾配抵抗であるが、当面取り扱わない。本論文の目的は図中のパラメータ H_g, A, M, R および R_0 を与えた上、 L, P_2, H_v および H_{α} を推定することである。

5. 走行実験

国産乗用車に発進加速度を測定するための地震計、地震計のデータを補正するためのエンジン回転数計、および信号を撮影して青現示とスタートとの時間遅れを知るためのビデオカメラを搭載し、交通量が少なく、発進後十分な加速時間がとれる平坦区間の交差点を選んで発進させ、データレコーダに記録した後、再生・分析した。図-7はこうして得られたデータの一例である。加速度データは数値積分して速度に変換し、エンジン回転数データ（半クラッチ期間を除き、速度に相当する。）と照合して誤差を修

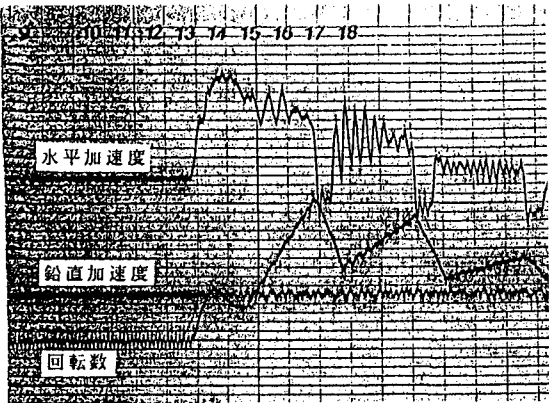


図-9 測定データの一例

表-1 供試車諸元

エンジン排気量 1400cc
最高出力 80PS/6000rpm
最高トルク 11.5kg・m/3600rpm
車両空重重量 850kg 全重量 1125kg
タイヤ サイズ 155/13 HR
有効半径 0.267m

トランスミッション

変速段位	変速比	動力伝達率
1	3.513	0.81
2	2.170	0.86
3	1.387	0.89
4	1.000	0.91

差動ギア減速比 3.889

正したうえ、再び数値微分によって加速度にもどした。地震計は効果的な加速度計であるが、0.1 Hz以下の周波数の加速度を的確に測定できないので、このような方法をとった。表-1には、この乗用車の諸元の一部を示す。

6. パラメータの推定

図-6のモデルはラプラス変換を用いて、全体の伝達関数が陽に求められる。入力をステップ関数として、そのラプラス変換に全体の伝達関数をかけたうえ、これをラプラス逆変換すれば信号青現示後の発進挙動が陽に記述される。そこで、測定された発進挙動に最も近い挙動が計算されるように、ヒューマンファクターとして与えたパラメータを決定すればよい。具体的には、0.1秒ごとに読み取った加速度

る加速度との自乗誤差の総和を最小とするように逐次探索法によってパラメータの値を求めた。図-10は、求められたパラメータで計算される加速度変化を測定結果と合わせて示したものである。

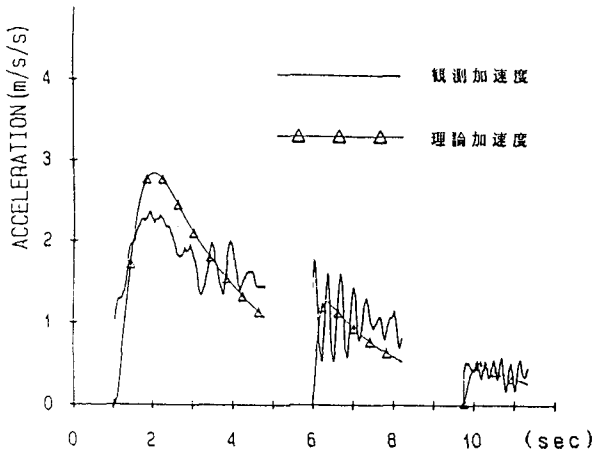


図-10 加速度変化の計算結果

7. 考察

本論文で提案した自動車と運転者の自動制御モデルは、自動車の機械工学的性質を考慮し、運転者の性質をいくつかの比例要素で表わした基本的なものであるが、従来の追従モデルに比べれば、格段に複雑なものとなった。しかし、交差点での発進挙動が、速度ゼロから最終走行速度までの広範な速度領域に及び、追従理論の想定した微小な速度変化とは異なることを考えれば、やむをえないと考えられる。図-10に示されたように、このモデルは今のところ発進挙動をよく再現しているように見える。しかし、このモデルの目的は、自動車の機械工学的条件が変化したときの運転者・自動車システムの性質の変化を知ることであるので、自動車の搭載量を変え、大型車を対象とし、あるいは道路勾配の異なる交差点を選んでモデルの適用性を検討する必要がある。また、人による発進挙動の相違をヒューマンファクターのパラメータで把握することにも興味がある。このような検討のなかで、今後考慮していくべきものとして、発進直後の半クラッチの期間の取り扱い、および変速のタイミングの取り扱いが挙げられる。さらに、このモデルは停止車列の先頭車を対象としているが、モデルへの入力を先行車の速度とし、あわせて先行車との車間距離も制御目標とするなどの

拡張を行なうことにより、2番車以降の自動車にも適用できるモデルを作成することが可能であろう。

8. 結論

本論文は信号交差点で停止した車列が発進するときの騒音の音響出力レベルの予測を行なうことの目的として、発進後の自動車のエンジン運転状態と走行状態とを関連させて説明するモデルを作成しようとしたものである。提案したモデルは基本的な性格のものであるが、停止車列の先頭の乗用車の発進挙動を比較的良好に再現することができた。今後は、このモデルを基礎に、半クラッチや変速タイミングの表現する要素を導入する一方、大型車を含む機械工学的な条件の異なる自動車に適用し、あるいは多数の運転者に適用するなどして、このモデルの適用性を確かめることが必要である。

参考文献

- 1) 石井聖光：道路交通騒音予測計算方法に関する研究（その1）—実用的な計算式について—，日本音響学会誌，31-8，pp507-517，1975。
- 2) 池谷和夫：道路交通騒音予測計算方法に関する研究（その2）—数学的モデルと評価量について—，日本音響学会誌，31-9，pp559-565，1975。
- 3) Nelson, P.M.: A Computer Model for Determining the Temporal Distribution of Noise from Road Traffic, TRRL Report LR 611, 1973.
- 4) 安東武夫，大塚保，村上孝行，森茂：実走行状態と等価な単純走行モデルによる自動車騒音の測定法に関する研究，環境保全研究成果集(Ⅱ)昭和57年度，pp.102-1～102-8，1980。
- 5) 渡辺義則，坂口裕司：発進加速車からの騒音の音響パワーレベルについて（第2報），土木学会西部支部研究発表会概要集，pp.530～531，1988。
- 6) 日本機械学会：機械工学便覧，第21編 自動制御，p21-1，1980。
- 7) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック，p152，技報堂，1973。
- 8) 稲葉正太郎：交通事故と人間工学，p101，コロナ社，1988。