



の回転速度が上がるときは再生の速度を上げ、スロットル開度が大きくなるときは音量を大きくすることでエンジン音を模擬している。この方法では定常走行音や緩加速音はあまり問題ないが、空吹かしや急加速、急減速の音については現実の音との差異が生じてしまう (図 1)。

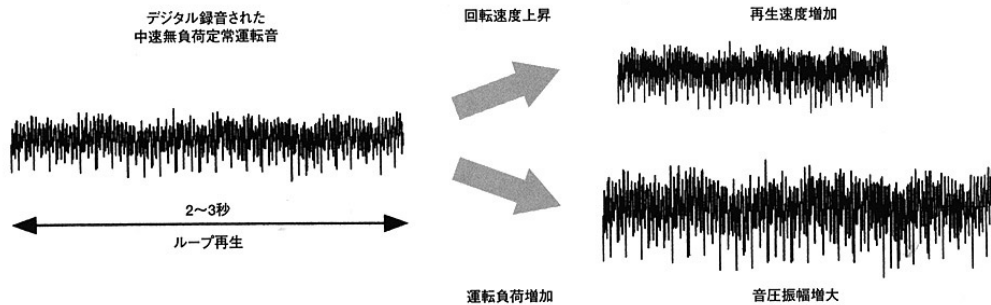


図 1 従来のエンジン音合成手法 (定常音ループ再生法)

一方、自動車メーカーなどで音の研究に用いられるドライビングシミュレータには、次数成分計算合成法がよく用いられている。これは周波数領域法の一つであり、エンジンの各次数成分に相当する純音を運転状態に応じて計算し合成する方法である。この方法では、多気筒エンジンの中高速回転域はかなり現実のエンジン音に近い音を合成できる。しかし、アイドリングの音や二輪車特有の単気筒エンジンの音などは合成が難しかった (図 2)。

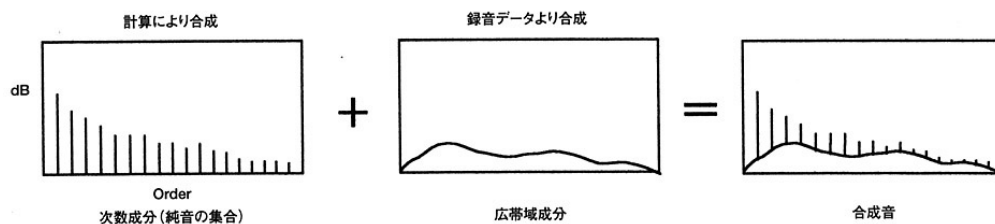


図 2 従来のエンジン音合成手法 (次数成分計算合成法)

### 3 新しい合成手法

#### 3.1 単発音制御再生法の原理

従来のエンジン音合成手法にはいろいろな欠点があったため、我々は単発音制御再生法と呼ぶ新しい合成手法を考案した。

その原理は、エンジンの発音メカニズムを模擬したものである。エンジンの音を簡単に説明すると、気筒内に空気と燃料が吸入され、それが圧縮されて点火爆発し、膨張後に大気中に排出されるというサイクルの中で発生する吸気音、燃焼音、機械音、排気音などがミックスされた音の繰り返しと言ってよい。

したがって、エンジンの音を模擬的に発生させるには、一サイクルの単発音をその発生間隔に合わせて繰り返し再生すればよい。単気筒エンジンの場合は一つのサイクルが終了した後に次のサイクルが始まるが、多気筒エンジンの場合はそのサイクルがある間隔で重なっているのが相違点である。

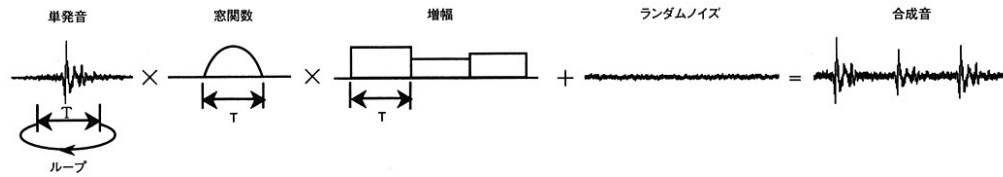


図3 単発音制御再生法の原理

ただし、単純に単発音を繰り返せばよいわけではない。普通は繰り返し接続部が不連続になりパチパチ音が発生するので、それを防ぐため両端が0になる窓関数を掛けている(図3の第1項と第2項)。

また、同じ単発音を繰り返し発生させると電子ブザーのような音に聞こえるため、実際のエンジン音のようにサイクル毎に音量を変化させる必要がある。

この現象は周波数領域で考えると理解しやすい。有限長の音波形が単調に繰り返される場合、そのスペクトルはその繰り返し周波数を基本成分とする線スペクトルになる。しかし、実際のエンジン音は決して線スペクトルにはならない。それはサイクル毎に音変動するからである。その変動をさらに分解すると、単発音の音量や波形の揺らぎと広帯域ノイズに分けられる(図4)。

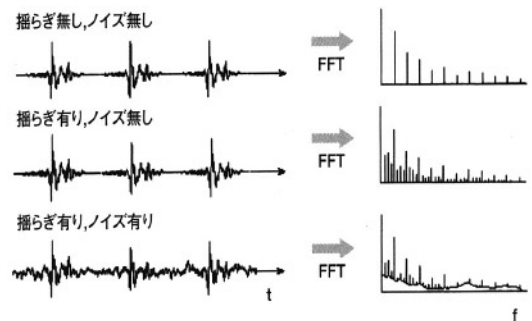


図4 音の揺らぎとノイズの効果

したがって、単発音制御再生法においては単発音の音量に揺らぎを与えることとランダムノイズを加えることが不可欠である(図3の第3項と第4項)。

単発音制御再生法によるエンジン音の合成を式で表すと、単気筒エンジンでは次のようになる。

$$P(t+nT)=S(t) \cdot W(t, \omega) \cdot G(n)+N(t+nT)$$

ここで  $P(t)$  は合成されたエンジン音の音圧、 $S(t)$  は単発音の音圧、 $W(t, \omega)$  は窓関数、 $G(n)$  はゲイン(確率変数)、 $N(t)$  はスペクトル調整されたランダムノイズの音圧、 $n$  は整数( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )、 $T$  は繰り返しの周期であり、4ストロークエンジンでは  $T=4\pi/\omega$ 、2ストロークエンジンでは  $T=2\pi/\omega$  となる。 $\omega$  はエンジンの回転角速度である。

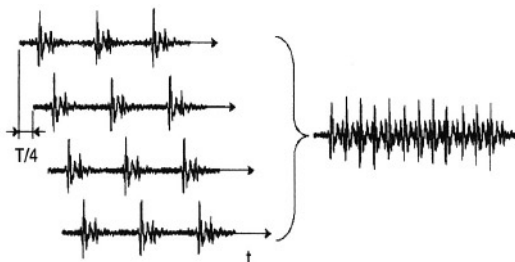


図5 多気筒エンジン音の合成方法

多気筒エンジンの場合は、各気筒の音が少しずつずれて発生するので、それらの音を足し合わせることで模擬できる。図5は4気筒エンジンの例を示す。

単発音の作成方法はいろいろ考えられるが、最も簡単なものは実験によって収録する方法である。最近ではエンジンの設計段階で音の波形まで計算予測できるようになってきており、単発音を計算で作成してエンジン音を合成することも可能であると考えられる。また、単発音は吸気、排気など音源別に用意するのがベストであるが、簡易的にはそれらがミックスされた音でもよい。

エンジンの負荷や回転速度が変化すれば、エンジンの音は当然変化する。負荷による音の変化は基本的に音量の変化である。ただし、吸気音や排気音の変化量が特に大きいので、ス

ベクトルでは低周波の次数成分が主に増減し、全体の音質も変わることになる。

回転速度の変化に伴う音の変化は、主に単発音の発生間隔の変化によるものであるが、吸気音や排気音の基になる圧力パルスの波形は回転速度によって変化し、燃焼音や機械音の基になる燃焼圧力波形も回転速度によって変わるため、単純に単発音の発生間隔を変えただけでは正確に模擬できない。もし、コンピュータが十分な計算能力をもっている場合は、いわゆる物理音源モデルを作り入力パルス波形と音響伝達系のインパルス応答波形を畳み込み積分すればよいが、これをリアルタイムで行うのは今のパソコンではまだ荷が重い。

そこで、負荷や回転速度の変化によるエンジン音の変化を表現する方法としては、あらかじめ実験または計算によって様々な運転状態での単発音を用意しておく方法が考えられる。具体的には、**図 6** のようにエンジン運転領域を負荷と回転速度をパラメータとして複数の領域に分け、それぞれの領域毎に音を取録すればよい。

### 3.2 単発音制御再生法の特徴

従来の代表的エンジン音合成手法と単発音制御再生法の比較を表 1 に示す。

定常音ループ再生法と比べて単発音制御再生法は、合成の自由度が非常に高いことが一番の特徴である。各気筒のサイクル毎の音を個別に制御できるため、音の揺らぎを調節したり、2 ストロークエンジン特有の不整燃焼音を表現することもできる。また、各気筒の発音間隔を自由に制御できるので、V 型エンジンのバンク角度を変えることなども簡単に行える。

定常音ループ再生法では数秒間の安定したエンジン音を必要とするが、これは録音するのが大変である上、大容量のメモリーが必要である。しかし、単発音制御再生法では一つのサイクルだけでよいいため、普通の走行音から単発音を抽出することが可能であり、メモリー容量も少なくて済む。

次数成分計算合成法と比べても、単発音制御再生法は優位性がある。次数成分計算合成法では周波数領域での制御は容易であるが、時間領域の制御が難しいという問題があった。したがって、多気筒エンジンの連続的な音は合成しやすいが、単気筒エンジンの間欠的な音や脈動的な音は合成しにくかった。それに対し、単発音制御再生法では単気筒エンジンや、V 型 2 気筒エンジンなどの音の合成が容易に行えるという利点がある。

一方、単発音制御再生法の短所はコンピュータの計算負荷が大きいこと、周波数領域での調整がしにくいこと、制御の自由度があまりに高いためプログラミングが難しいことなどがある。

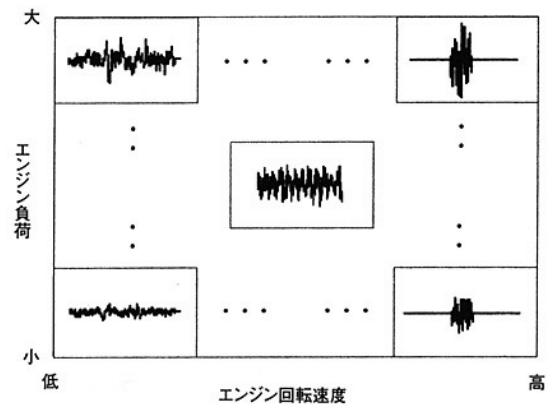


図 6 単発音のマップ制御

表 1 エンジン音リアルタイム合成手法の比較

手法	合成領域	音質	自由度	メモリー使用	CPU 使用
単発制御再生法	時間領域	○ (良)	○ (高い)	○ (少ない)	△ (多い)
定常音ループ再生音	時間領域	○ (まあまあ)	○ (低い)	○ (多い)	△ (少ない)
次数成分計算合成法	周波数	○ (まあまあ)	○ (中間)	○ (少ない)	△ (多い)

しかし、計算負荷については近年のパソコンの急速な性能向上によって殆ど問題とはならなくなっている。また、周波数領域での調整の問題は、次数成分計算合成法と組み合わせることによって解決できる。プログラミングの問題についても優れたプログラミングツールが市販されており、複雑なマルチメディアソフトも容易に作成できるようになってきているので、それほど重大ではなくなった。

上記のように単発音制御再生法は全体的に優れてはいるが、どの合成手法にも一長一短があるので実際にはそれらを組み合わせて使うのがよい。

## 4 エンジン音合成システム

### 4.1 ハードウェア

単発音制御再生法によりエンジン音をリアルタイムで合成するシステムに必要なハードウェアは、その使用目的によって異なるが、出力信号が2ch以下の場合には図7のようにパソコン1台だけで十分であり、DSPや特別なサウンドカードは必要ない。

ただし、シミュレータなどを作る時には運転操作の入力装置や音の再生装置などが必要になる。さらに、出力のch数を増やす時には特別な周辺機器が必要で



図7 最小限の合成システム

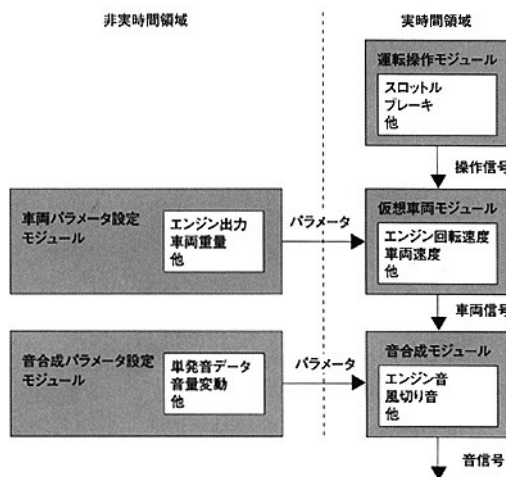


図8 ソフトウェアの構成

運転操作モジュールでは、パソコン画面上のGUIを使ってスロットル操作や変速操作などを行う。

仮想車両モジュールでは、スロットル操作信号を受けてエンジンの発生トルクや回転速度がサイクル毎に計算され、さらにクラッチ操作や変速操作に応じて車両走行速度がサイクル毎に計算される。

音合成モジュールでは、スロットル開度とエンジン回転速度を基にして、前述の手法によりエンジン音を合成する。また、必要に応じて風切り音やシフト操作音なども加えている。

なお、本研究でソフトウェア開発に使用したのは、音楽用プログラミングツールのMAX/MSPであり、出力ch数は現行バージョンでは16chまで拡張可能である。

あるが、音楽用の機材を使用すれば安価にシステムを構築できる。

### 4.2 ソフトウェア

本手法によりエンジン音を合成するシステムは図8に示すように、車両パラメータ設定、音パラメータ設定、運転操作、仮想車両、音合成の5つのソフトウェアモジュールから構成されている。

まず車両パラメータ設定モジュールでは、計算に必要なエンジンのトルクカーブ、エンジン内部の回転ロス、エンジンの回転慣性、車体の質量、変速機の減速比、車体の空気抵抗などのデータを入力する。また音パラメータ設定モジュールでは、単発音ファイル指定や音量カーブなどを入力する。

## 5 精度と限界

合成されたエンジン音がどこまで実車の音に近いかということは、合成手法を評価する上で重要なポイントとなる。図9では排気量 1.0L 並列 4 気筒二輪車のアイドル音を単発音制御再生法で合成した例を示す。上の図は実車の音圧波形であり、下の図は合成音の音圧波形である。

また、図10は同二輪車の加速走行音合成例をソナグラムで表示したものである。この場合は次数成分の微調整も必要なので、次数成分計算合成法を併用している。どちらの例もこれが限界ではなくさらに調整は可能であるが、この段階でも合成音は実車の音をかなり忠実に模擬していることが分かる。

リアルタイム合成では運転操作に対する応答性も評価ポイントとなるが、これは仮想エンジンモデルのイナーシャや発生トルクを正確に設定すれば実車と殆ど同じになる。勿論パラメータを調整すれば応答性は自由に変更できる。

ただし、ハードウェアやドライバソフトウェアによる音の遅れは若干存在する。例えば、音を出す命令を与えた後に実際に音が出るまでの遅れ時間は、現状システムで 6.5msec かかる。

本手法は基本的に気筒数の少ないエンジンの低速回転時の音の合成に適しているが、多気筒エンジンの高速回転音を合成できないわけではない。これまでのテストでは V10 エンジンが 16,000rpm で回転しているときの音も合成できることを確認している。

なお、音のデータは 16bit、44.1kHz のサンプリングレートであり、時間軸上での最小調整幅は 0.023msec である。

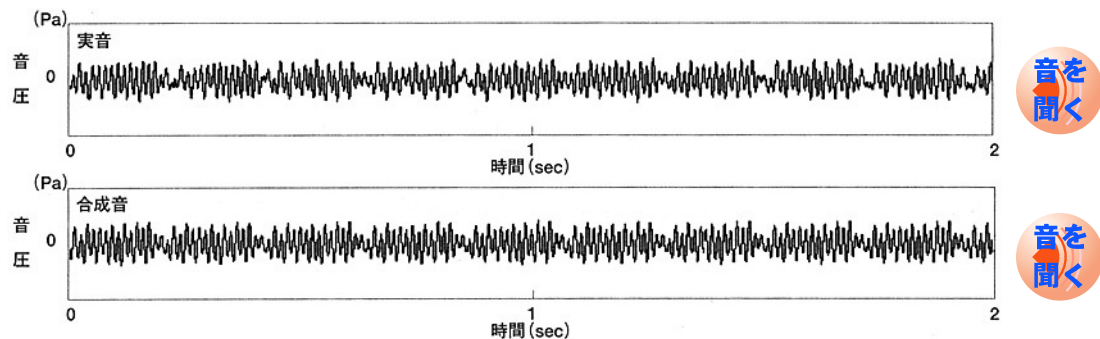


図9 実音と合成音の比較（アイドル音）

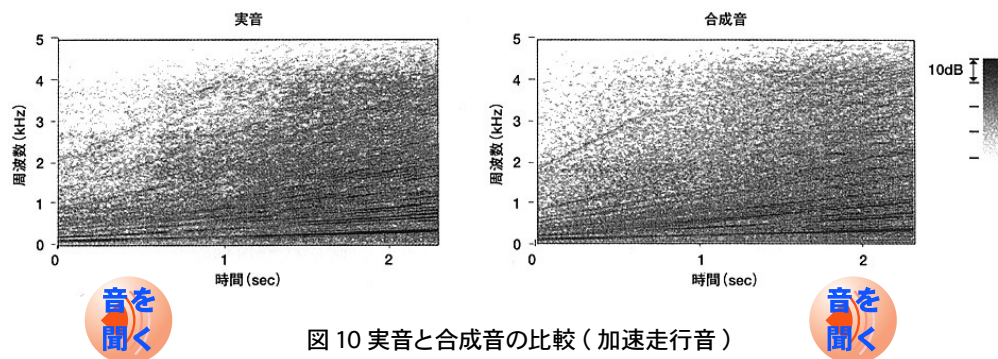


図10 実音と合成音の比較（加速走行音）

## 6 応用例

新しいエンジン音合成技術は音の研究用に開発されたものであり、そのための応用展開は当然進められているが、実際の応用第1号は広報宣伝用のものとなった。

図 11 は二輪車の簡易型サウンドシミュレータの構成を示す。これは 1999 年の東京モーターショーおよびその他各地モーターショーに出展されたものである。研究用シミュレータと比べるといろいろな制約があり、音や振動の再生装置は十分な性能とは言えなかったが、来場者には大変好評であった。なお、このサウンドシミュレータも単発音制御再生法と次数成分計算合成法を併用した。

## 7 おわりに

上記エンジン音合成システムの利用方法としてまず考えられるのは、エンジン音質の評価指標を研究するためのツールである。特に加速や減速などの非定常走行時の音の印象は運転者と非運転者では異なると考えられるので、それを調べるツールとして有効である。また時間領域や周波数領域での物理特性を変更したときの音質を調べたりすることも簡単にしかも自由にできる。もしエンジン音の特性や車体の音響特性を設計段階で予測できる技術があれば、バーチャルな音の走行実験ができることになる。さらに、この合成手法は音だけでなく振動にも応用できるので、体感振動の評価研究にも役立つと思われる。

近年では自動車の音質はデザインの対象にもなっているが、エンジン音の合成技術は音質評価研究の他に新車開発時のエンジン音のデザインにも使える。

その他に、ゲームマシンやドライビングシミュレータの効果音にも利用でき、将来的には電気自動車の人工的音付けにも使用できると思われる。

### ■参考文献

- (1) Y.Umemura, Y.Kozawa : A Method of Synthesizing Exhaust Noise, SAE Paper910619 (1991).
- (2) 柏木均, 宮丸幸夫: 二輪車安全運転教育用シミュレータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 924165(1992)
- (3) S. M. Hutchins et al. : Noise, Vibration, and Harshness from the Customer's Point of View. IMechE, 925181(1992)
- (4) B. J. Feng. N. C. Otto : Synthesis of Powertrain Sounds for Investigations in Roughness, SAE Paper 931333 (1993)
- (5) 若杉貴志, 佐藤健治, 平松金雄: ドライビングシミュレータにおける車内音の模擬とその音質評価, 自動車技術会学術講演会前刷集 9632442(1996)
- (6) 坂井雄紀, 石濱正男: 少数のパラメータによるエンジン騒音合成手法, 自動車技術会学術講演前刷集 20005084(2000)
- (7) P. V. Ponsele, M. Adams : Sound Quality Equivalent Sound Synthesis for Virtual Car Modelling, 自動車技術会学術講演前刷集 20005343 (2000)
- (8) M.Okoshi, H.Mukai, T.Sasaki, M.Ohashi, T.Ono : Sound Quality Analysis of Artificial Sounds Generated by the Automobile Interior's Sound Simulator, Inter-noise 99(P.293-296) (1999)
- (9) 前田修: エンジン音のリアルタイム合成法, 自動車技術会春季大会振動騒音フォーラムテキスト 20014336(2001)

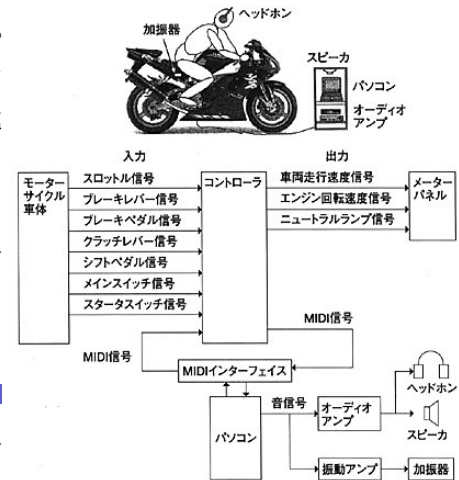


図 11 サウンドシミュレータの構成