

実験Ⅴ 「ドップラー効果」を利用して、F-1カーのスピードを測定しよう

1 実験のねらい

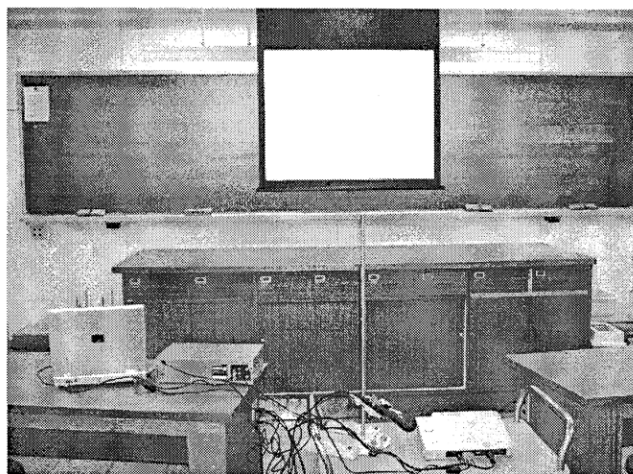
F-1レース中継の音声に含まれるエンジン音の振動数が、ドップラー効果によって変化することを利用して、F-1カーの速さを測定する。

2 準備

- (1) F-1レースが録画されているビデオ、またはDVD
- (2) ビデオ、またはDVDのプレーヤーとプロジェクター
- (3) ノートパソコン (FFTソフトがインストールされているもの)
- (4) マイク (ノートパソコンに接続できるもの)

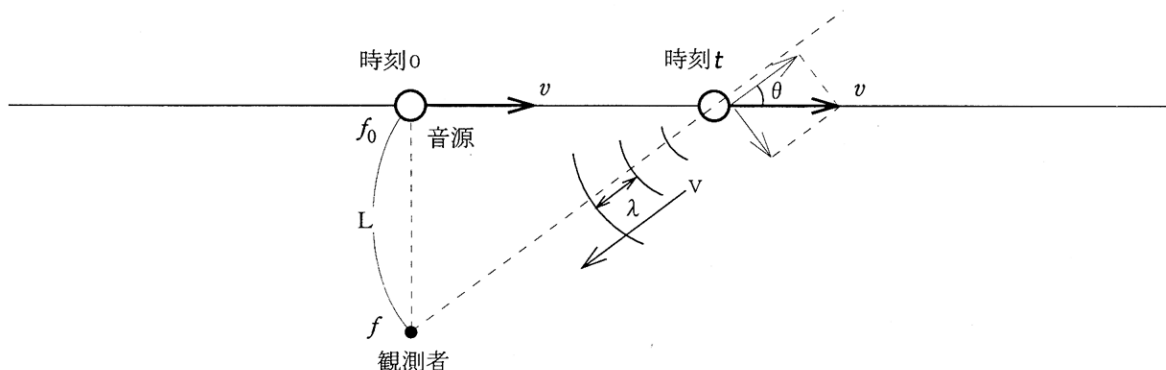
3 実験の手順

- (1) F-1レースのビデオ映像を視聴し、エンジン音の音程がドップラー効果によって変化していることを確認する。
- (2) 直線コースを最高速に近い速度で走行し、収録マイクの横を通り過ぎる場面の映像を再生し、F-1カーが近づいているときは音程が高くなり、遠ざかっているときは低くなっていることを再確認する。
- (3) パソコンに接続したマイクで、上記(2)のときの音を録音する。
- (4) FFTソフトで振動数ごとのスペクトル分析を行い、近づいているときの音の最大振動数と、遠ざかっているときの音の最低振動数を測定する。
- (5) レース時の気温から求めた音速を用いて、F-1カーの速さを計算する。使用したコースでの大体の最高速は調べると分かるので、それと比較してみる。



4 斜め方向のドップラー効果について（生徒への説明）

図のように、観測者から距離 L だけ離れた直線上を振動数 f_0 の音源が速さ v で運動しているとき、観測される音の振動数を f とする。音源は、無限左方から無限右方まで運動するものとし、時刻 0 に観測者の真横を通過するものとして、時刻 t と f の関係を求める。



時刻 t に音源を出発して観測者に向かう音の、音源に対する相対的な速さは $V + v \cos \theta$ であり、音源は周期 $\frac{1}{f_0}$ ごとに等しい位相の波面を放出するから、同位相の波面の間隔である波長 λ は、 $\lambda = (V + v \cos \theta) \times \frac{1}{f_0}$ ただし、 $\cos \theta = \frac{vt}{\sqrt{L^2 + (vt)^2}}$

である。また、観測者が観測する音の周期 $\frac{1}{f}$ は、ある波面が観測者の位置を通過してから、次に先ほどと同位相の波面が通過するまでの時間であるから、 $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{V}$ と表され、以上より時刻 t と f の関係は、

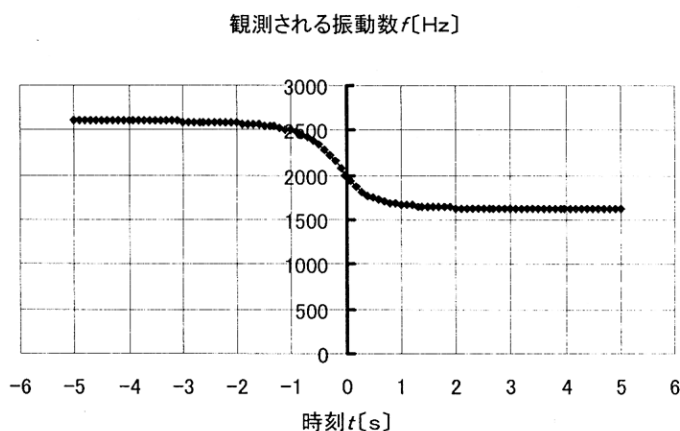
$$f = \frac{V}{V + v \cos \theta} \times f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta = \frac{vt}{\sqrt{L^2 + (vt)^2}}$$

と表される。ここで、 L に比べて v が十分大きいものとする、 $\cos \theta$ は時刻 0 付近で大きく変化するが、その前後では変化が少なく、音源が十分遠方であって近づきつつあるときは、 $\cos \theta = -1$ と見なせ、十分遠方であって遠ざかりつつあるときは $\cos \theta = 1$ と見なせる。

したがって、逆に言えば、観測される音の音程の変化があまり感じられない時間帯では、その音は十分遠方で音源から放出されたものと考えられ、その音の振動数を用いて v を求める際には、 $\cos \theta$ の値は -1 または 1 で近似することができる。つまり、音源が運動する直線上に観測者がいると見なして良いことになる。

以下に、 $f = 2000\text{Hz}$ 、 $v = 80\text{m/s}$ 、 $L = 50\text{m}$ と仮定し、上式を用いて計算した時刻 t と観測される振動数 f の関係を示す。

t [s]	f [Hz]
-5.0	2609
-4.0	2605
-3.0	2599
-1.0	2499
0.0	2000
1.0	1667
2.0	1633
3.0	1626
4.0	1623
5.0	1621



5 実験結果の例

(1) レースに関するデータ

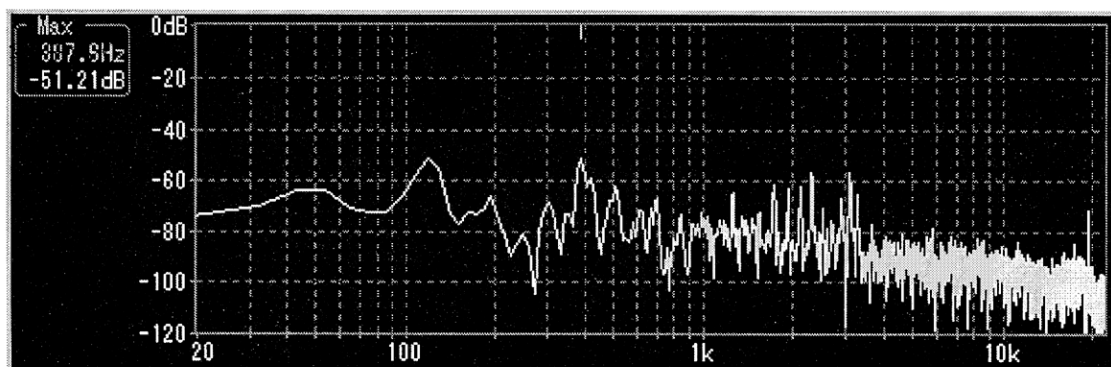
①2008年F-1世界選手権 第16戦 日本グランプリ 2008年10月12日(日)

②気象条件・・・・曇り、レース場の気温16度

レース場の温度から $V=331.5+0.6\times 16$
 $=341.1\text{ m/s}$ を音速とする。

③使用した場面・・・・レース開始から20周ほどした辺り。最終コーナーを曲がって直線コースに入って加速していく場面。

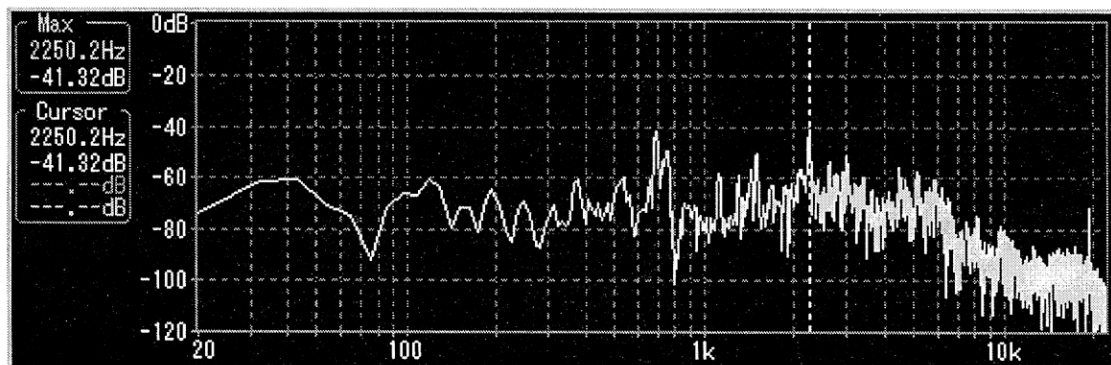
下の図はF-1カーが近づきつつあるときの音のスペクトルである。実況があると、F-1カーのエンジン音より実況の声が勝ってしまい、この図では一番大きな音の振動数は387.6Hzとなってしまう。これはアナウンサーの声の振動数である。この図にはドップラー効果によって音程が変化するF-1カーの音も含まれているが、分かりづらい。



(2) 測定に使用した場面

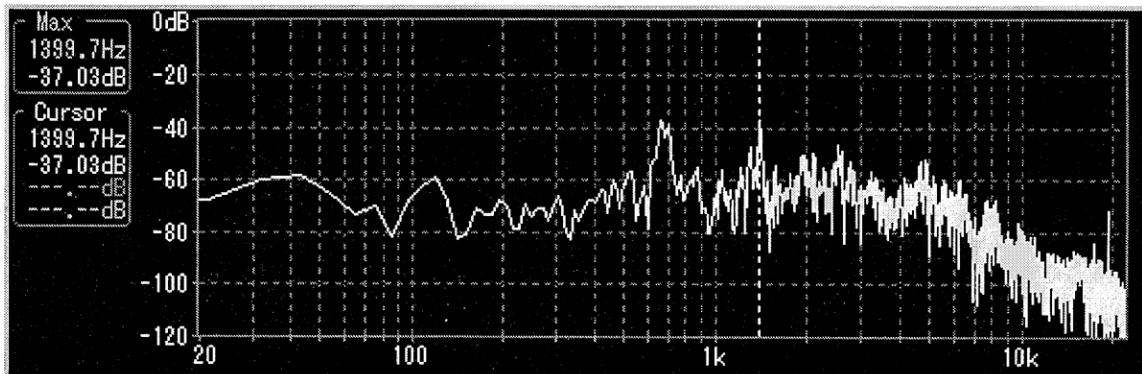
F-1レースの中継では、副音声でレース場の音だけを流している。主音声では、実況のアナウンサーの声が混じっていて分析しづらいので、副音声を録画して分析した。

【近づいているときの最高音】



なお、この実験で使ったソフトは実験4でも使っている、WaveSpectraである。これと同等またはそれ以上の機能をもつソフトは他にもあるが、生徒の目の前で解析するときの使い勝手を考えると、WaveSpectra が優れている。

【遠ざかっているときの最低音】



実況の声が無いと、一番大きい音はF-1カーの音になるので、最大になっているところがエンジン音の主成分で、その部分の振動数が、収録用マイクの横を通過する前後で大きく変化することが分かる。近づきつつあるとき及び遠ざかりつつあるときの観測される音の振動数について、いずれも音程の変化がほとんど感じられない区間での、最大振動数及び最低振動数をそれぞれ、 f_H 、 f_L とすると、

$$f_H = \frac{V}{V + v \cos \theta_1} f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta_1 \approx -1 \quad f_L = \frac{V}{V + v \cos \theta_2} f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta_2 \approx 1$$

これら2式より、 v 及び f_0 を求めると、

$$v \approx \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \cdot V \quad , \quad f_0 \approx \frac{2f_H \cdot f_L}{f_H + f_L}$$

となる。FFTソフトを用いた振動数の測定値は、

最大振動数 $f_H = 2250 \text{ Hz}$ 、最低振動数 $f_L = 1400 \text{ Hz}$

であったため、これらと、先に求めた $V = 341.1$ を上の2式に代入して、

F-1カーの速さ $v = 79.4 \text{ m/s}$ ($= 286 \text{ km/h}$)

音源の振動数 $f_0 = 1726 \text{ Hz}$

という結果が得られた。F-1カーが真横に来たときの振動数をFFTソフトで測定すると、1700Hz前後であり、計算結果とほぼ一致している。また、F-1カーの速さ v の計算結果も、解析に用いた場面が、最終コーナーを曲がり終わった後の直線コースあることから判断して、妥当な値と考えられる。

(3) 実験に最適なF-1のコース

直線コースで最高速を維持しながら、収録マイクの横を通り過ぎるときのドップラー効果を観測するためには、直線コースがある程度長くなければならない。本年(2009年)開催予定のF-1グランプリで、十分長い直線コースがあるところを挙げる。

開催国	サーキット名
オーストラリア	メルボルン
マレーシア	セパン
バーレーン	サヒール
スペイン	バルセロナ
イギリス	シルバーストーン
ハンガリー	ハンガロリンク
日本	鈴鹿
アブダビ	ヤスマリーナ
ブラジル	インタラゴス

ほとんどのサーキットでは直線コースにチェッカーフラッグがあり、そこでカメラが回っている。したがって、実験で使える映像を見つけるポイントとして、チェッカーフラッグと直線コースとの距離が、直線コースの長さに対して十分小さいものを探すとよい。なお、録画できない環境の時は、インターネット上に短いながらもレースの動画があるので、それを利用することが考えられる。