

周波数領域と時間領域での音響解析

松原 聖* 尾川 慎介** 並木 武文*** 小瀬村 大亮**

Acoustics simulation in Frequency and Time Domain

Kiyoshi Matsubara*, Shin'suke Ogawa**, Takefumi Namiki***, Daisuke KOSEMURA**

周波数領域と時間領域はフーリエ変換を通してつながっており、時系列の現象をフーリエ変換して周波数領域のソルバーで計算し逆フーリエ変換すれば、時間領域の解と一致しているはずである。しかし、現状では、周波数領域と時間領域のお客さまは完全に区分されている状態である。われわれはこの2つのソルバー周波数領域と時間領域の相互の利点を生かした利用方法の可能性を探っている。今回の消音器の解析でその題材として考える。

Key word: 音響解析、有限要素法、時間領域、周波数領域、

1. はじめに

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は有限要素法に基づくソフトウェアである。2005年から周波数領域の基本部分の開発を開始し、お客さまの要望に基づき開発を継続して実施してきた。2016年には無限要素の機能も追加し、有限要素法の欠点であった外部問題に対しても、有限要素法のメリットが適用できるように改良を行った。一方、時間領域の機能については、2012年から開発を開始した。リリースから数年しか経過していないことから、時間領域の機能よりも、周波数領域が多機能となっている。いずれの機能も大規模並列計算を特徴としている。

マフラー壁は完全反射とする。マフラー出口は透過（完全吸収）条件とする。解析結果から出口の音圧を求め、条件として与えた入口の音圧との比を求める。

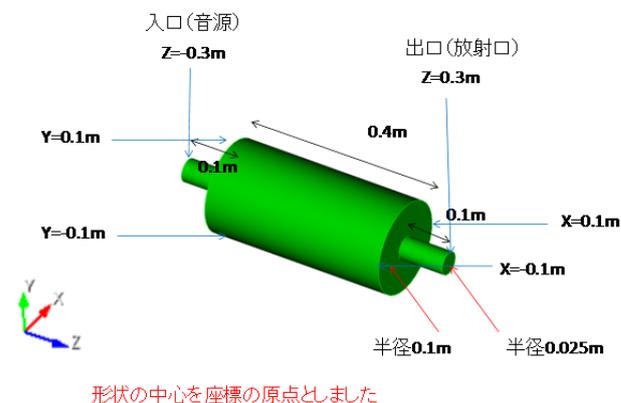


図 1 解析形状

2. 共通の解析条件

2.1. 解析形状

単純形状のマフラーの解析を行う。形状は下記の通りである。マフラーの入口に音源を与える。

*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長

President, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第1事業部

1st Computational Science and Engineering Group,

AdvanceSoft Corporation

***アドバンスソフト株式会社 事業開発室 室長

General Manager General Planning Division,

AdvanceSoft Corporation

2.2. 解析条件

作成する必要があるデータの一覧を示す。それぞれのファイルによって、拡張子が異なる。メッシュデータ*.inp および境界面の位置*.bcs は時間領域および周波数領域で共通である。いずれも、エディタ等で編集して作成する。データを作成後、バッチファイルを実行することで解析を行う。

表 1 時間領域と周波数領域の入力ファイル

項目	時間領域	周波数領域
メッシュデータ	○	
境界面の位置	○	
境界面の値	—	○
音源の位置	○	○
音源の値	—	○
音源の時系列値	○	—
観測点	○	—

表 2 メッシュ情報

項目	内容
節点数	5884
要素数	30241
境界面 1	完全反射の壁面 ; 3192 面
境界面 2	出口 ; 20 面
音源	入口 ; 5 点
備考	時間領域と周波数領域は同一のメッシュを利用可能

3. 理論解

入口の音圧 P_{in} と出口の位置の音圧 P_{out} の比 P_{out}/P_{in} を求める。この値は 1 次元の伝達関数を利用して、周波数毎に求めることができる。この計算では、入口の面に 1Pa を与えた場合の出口の音圧を求める。

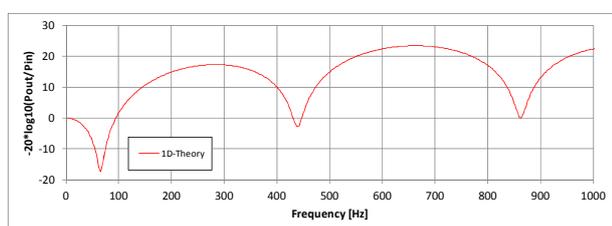


図 2 伝達関数法による音圧比の理論解

また、理論解から同様に透過損失を求めることができる。また、解析結果を利用して透過損失を求めることができる（例えば、実験でも利用される 2 マイクフォン法を利用する）。今回は計算結果から透過損失を求めることはしないが、参考までにこのケースの透過損失を示す。

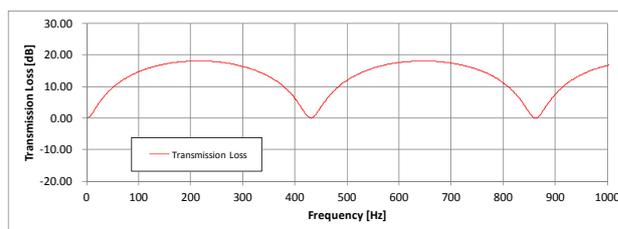


図 3 伝達関数法による透過損失の理論解

4. 周波数領域の解析

4.1. 解析条件

ここでは、20Hz 毎に 20Hz から 1000Hz までの周波数領域解析を行う。音源は、入口の節点において与える。その値は、周波数領域における点音源として

$$q_0 = 1.0[m^3/sec] \quad (1)$$

と設定する。つまり、全ての周波数に対して「1.0」の定数を与える。

周波数領域の基礎方程式では、

$$\Delta\phi + k^2\phi = q_0\delta(x_0) \quad (2)$$

となる。ここで、 $\delta(x_0)$ は 3 次元のデルタ関数である。 $q_0 = 1.0$ は、時間領域では、

$$q_0(x_0)e^{-i\omega t} \quad (3)$$

であるため、物理的には、体積 q_0 の量が点音源から湧き出し・吸い込みを周期的に繰り返す音源となっている。

ここで、音響解析は線形解析であるため、入口の音圧と出口の音圧の比に着目する限りは、音源にどのような値を与えても同じ解析結果となることに留意ください。この線形性は音の解析では頻りに利用される。

4.2. 解析結果

(1) 結果のプロット

実行の結果ファイルは、*.rs1 というファイル名でカレントディレクトリに出力される。ファイルの数は、解析を行った周波数の数だけ出力される。次に、バッチファイル getnval.bat を実行し、それらのファイルから観測点の結果を抽出する。バッチファイル getnval.bat を編集して、indata=muff01、コマンド getnvalbin の引数に観測点の 3 次元座標を記入し、実行する。なお、標準入力

結果ファイル名となる。標準出力には、結果ファイルに書き出されたファイルの内容のうち、観測点の結果のみが出力される。ここでは、入口 (0.0, 0.0, -0.3) および出口 (0.0, 0.0, 0.3) の節点の結果を抽出し、その結果の比を求める。

・ バッチファイル getnval.bat

```
set indata= muff01
set PATH="C:\FrontNoise-4.3.106-20170630\bin";%PATH%
dir /b *.rsl | getnvalbin.exe 0 0 0.3 %indata%.inp > o1.csv
dir /b *.rsl | getnvalbin.exe 0 0 -0.3 %indata%.inp > o2.csv
```

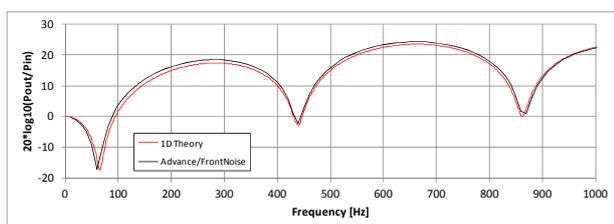


図 4 マフラー周波数領域解析結果と理論解

(2) コンター図の作成方法

周波数領域の解析結果ファイルを、コマンドにより可視化ファイルに変換する。時間領域は出力ファイルと可視化ファイルを兼用している。

バッチファイル rsl2inp.bat を実行し、周波数領域の解析結果ファイルを可視化ファイルに変換する。なお、時間領域解析では、出力ファイルは可視化ファイルを兼ねている。バッチファイル rsl2inp.bat を編集し、indata と rsl2inp コマンドの引数を下記のように記入して保存し、実行してください。これにより変換が行われる。

・ バッチファイル rsl2inp.bat

```
set indata=muff01
set PATH="C:\FrontNoise-4.3.106-20170630\bin";%PATH%
rsl2inp.exe %indata%.inp %indata%-r0049-01000.rsl 1000Hz.inp
```

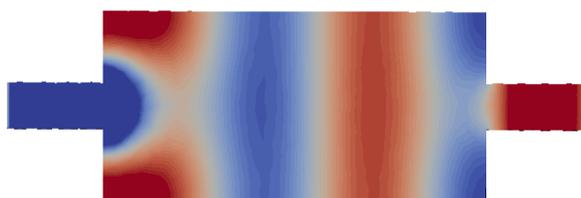


図 5 音響速度ポテンシャルの断面コンター図

5. 時間領域の解析

5.1. 解析条件

音源は、次の式により、20Hz から 1000Hz まで 20Hz 間隔での正弦波を足し合わせた波形とした。

$$p(t) = \sum_{f=20,1000,20} \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

この波形を利用し、解析結果をフーリエ変換することで、それぞれの周波数に対する応答をみることができる。このファイルは、excel で作成する。作成手順はスライドをご参照ください。

このファイルを、ここでは「sin-20to1000.txt」というファイル名で保存する。なお、このファイル名は任意である。

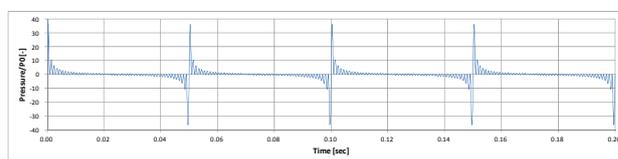


図 6 マフラー時間領域解析に対する音源

5.1.1. 入力データ

次に入力データを作成する。これらのファイルは、ユーザーがエディタで作成する。ひな形を用意しているので、それをもとに修正をしてください。

作成すべきデータは、

- ・ muff01.dat : 解析条件ファイル (計算に必要な解析パラメータ)
- ・ muff01.bcn : 音源ファイル (音源の位置と値を定義するパラメータ)
- ・ muff01.pnt : 観測点ファイル (時系列データを出力する観測点の座標)

の 3 つのファイルである。

最初のファイルは、解析時間等を指定する。次のファイルは、先ほど作成した音源の波形ファイルを設定する節点を指定する。最後のファイルでは、時系列データを出力する観測点の座標を入力する。

(1) 解析条件ファイル (muff01. dat)

muff01	→データ名
1.1966	rho →空気の密度
344.92	sound velocity → 空気中の音速
0.0e0	start time →解析開始時間
0.200	end time →解析終了時間
1.0e-5	delt t →解析タイムステップ
5000000	output interval →スナップショットファイルの出力間隔

解析タイムステップは、最小のメッシュ幅 Δx を音速 x で通過する時間の $1/10 \sim 1/100$ 程度を指定してください。このデータでは、 $\Delta X=0.015[m]$ であるので、その時間は $5e-5[sec]$ 程度である。ここでは、計算の安定性に留意して、解析タイムステップは $2e-5[sec]$ と設定した。

(2) 音源ファイル (muff01. bcn)

870	sin-20to1000. txt
2581	sin-20to1000. txt
868	sin-20to1000. txt
871	sin-20to1000. txt
2582	sin-20to1000. txt

最初の数字は節点である。export されたファイル muff00. INP 「NSET」の節点番号を記入してください。また、その直後に先ほど作成した音源ファイルを指定してください。

(3) 観測点ファイル (muff01. pnt)

1 行に 1 点の 3 次元の座標を記述する。255 点までの観測点の結果を出力することが可能である。この観測点が、計算結果として*. csv ファイルに出力される。

0	0	-0.30
0	0	-0.20
0	0	0.00
0	0	0.20
0	0	0.30

(4) 解析実行

バッチファイル go_fntime. bat を実行し、Advance/FrontNoise の時間領域解析を実行する。

バッチファイル go_fntime. bat を編集し、
 indata=muff01、FNTIME_RHOC=3193、
 FNTIME_SMOOTH=40、FNTIME_BCVEL=OFF、
 FNTIME_MONITOR=1 として保存し、実行してください。これにより解析が始まる。

・バッチファイル go_fntime. bat

```
set indata=muff01
set FNTIME_RHOC=3193 →メッシュファイルの境界 1
の面の数に 1 を加えた数字を指定
set FNTIME_SMOOTH=40
set FNTIME_BCVEL=OFF
set FNTIME_MONITOR=1
set
PATH="C:\¥FrontNoise-4.3.106-20170630¥bin";%PATH%
setlocal ENABLEDELAYEDEXPANSION
for /F "usebackq tokens=5" %i in
(`nfind %indata%. inp %indata%. pnt ^| find ^"E^"`) do
set FNTIME_MONITOR=!FNTIME_MONITOR!,%i
set | find "FNTIME"
meshpart -n 1 -ascii %indata%
fntime. exe %indata%. dat
```

5.2. 解析結果

これらのデータを excel でプロットした図を示す。

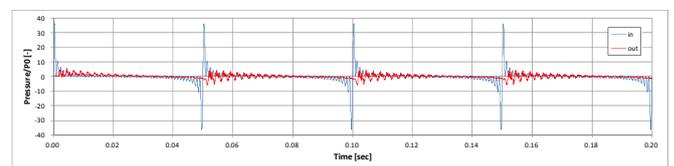


図 7 マフラー時間領域の入力と出口解析結果

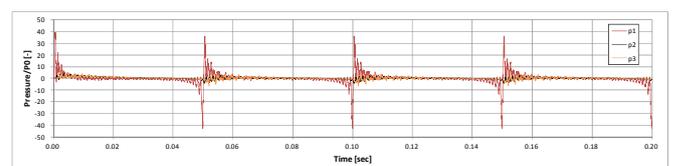


図 8 マフラー時間領域の解析結果 (胴体入口、中央、胴体出口)

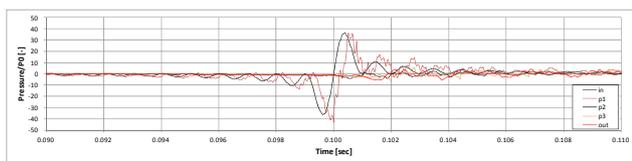


図 9 マフラー時間領域の解析結果拡大

(1) 時系列データのフーリエ変換

次に、時間領域の解析で得られた時系列データをフーリエ変換する。

バッチファイル fft.bat を編集し、

indata=muff01、maxfreq=1000、startstep=15000、endstep=20000 として保存し、実行してください。

・バッチファイル fft.bat

```
set indata=muff01
set maxfreq=1000
set startstep=15000
set endstep=20000
set
PATH="C:\FrontNoise-4.3.106-20170630\bin";%PATH%
fft.exe %indata%-pr.csv %maxfreq% %startstep% %endstep% > %indata%-fft.csv
```

ここで、

Indata：入力ファイル

Maxfreq：上限周波数 (Hz)

Startstep：開始ステップ

Endstep：終了ステップ

である。上限周波数は、このコマンドで出力される上限の周波数である。周波数の間隔は、開始ステップの時刻と終了ステップの時刻で決定される。ここでは、周波数間隔は、終了時間から開始時間を引いた時間の逆数となる。時系列データをフーリエ変換する場合には、必要な周波数間隔を決め、その周波数から必要な解析時間を求め、計算した解析時間のうち任意の区間をフーリエ変換に利用する。次に、出力された muff01-fft.csv のデータをプロットする。

時間領域解析では、0 秒から 0.2 秒までの解析を行っているため、フーリエ変換により 5Hz 間隔での周波数領域のデータを得ることができる。今回は、入力として、20Hz 毎の正弦波を足し合わせた波形を与えたので、ここでは、一番後ろの 0.05

秒の区間 (0.15 秒から 0.20 秒) のフーリエ変換を求めた。

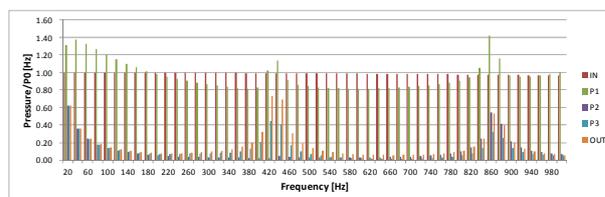


図 10 マフラー時間領域解析をフーリエ変換した結果

このフーリエ変換の結果に対して、入口と出口の値から、周波数領域と同等の透過損失を求めることができる。図 11 は、これを理論解と比較した結果である。

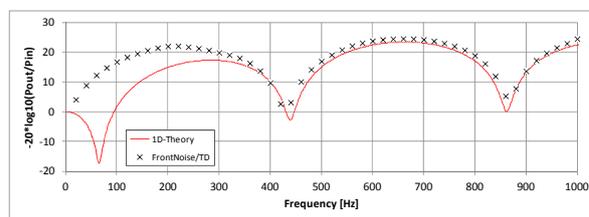


図 11 マフラー時間領域解析結果と理論解

5.3. 周波数領域と時間領域の結果比較

周波数領域の解析結果と理論解は完全に一致する。ただし、波長がマフラーの直径程度となる 1.5kHz あたりから、1 次元の理論解と本解析の 3 次元の結果は異なってくると考えられる。時間領域の解析結果の減衰のオーダーは理論解とほぼ一致している。また、420Hz と 860Hz 付近のピークは解析結果と理論解でほぼ一致している。

これらの結果から、理論解、周波数領域ソルバー、時間領域ソルバーを相互に利用しながら検討を進める土台はできたと考えられる。時間領域ソルバーで 100Hz 付近の一致しない理由は低周波では時間領域ソルバーが収束しにくいいためである。

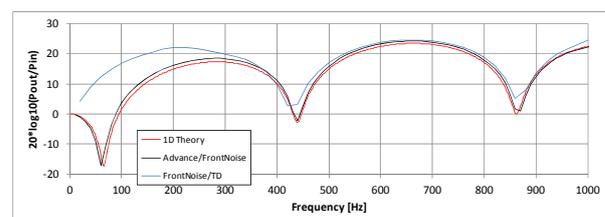


図 12 時間領域解析結果、周波数領域解析結果と理論解

5.4. エンジン音の解析

実際の音を利用した解析例を示す。ここでは、Web 上[1]でフリー素材として公開されている「車、バイクのエンジン始動」を利用する。この音を前節と同じマフラーの入口に与えて、その出口での音を解析する。最後に、その音を音声ファイルに変換して、入口と出口の音を比較する。その音の聞こえ方について、時系列の解析結果およびそれらを周波数分析した結果から考察を行う。

前節の解析条件で、変更したのは下記の条件のみである。

- ・ 音源を careenginestart1.wav から変換したファイルとした。
- ・ 解析時間を音源に合わせて 4.0 sec とした。解析タイムステップは、 $1.0e-5$ sec としたため、解析タイムステップ数は 40 万回である。この程度の計算の処理時間は、シングルコアのコンピュータで 12 分 30 秒程度を要する。また、膨大な時系列データのため、結果の表示および音声への変換は適切な範囲で間引いて処理を行っている。

ここでは、エンジン音の音源とマフラー出口の音（時系列データ）とその拡大、エンジン音の音源とマフラー出口の音（周波数データ）を示す。

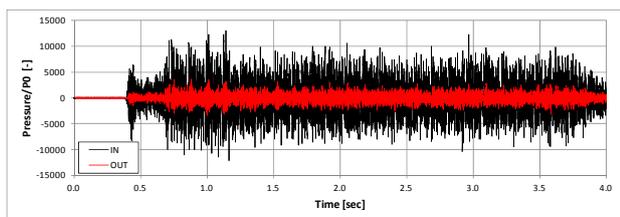


図 13 エンジン音の音源とマフラー出口の音（時系列データ）

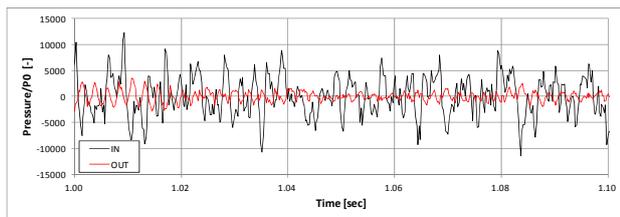


図 14 エンジン音の音源とマフラー出口の音（時系列データの一部分を拡大）

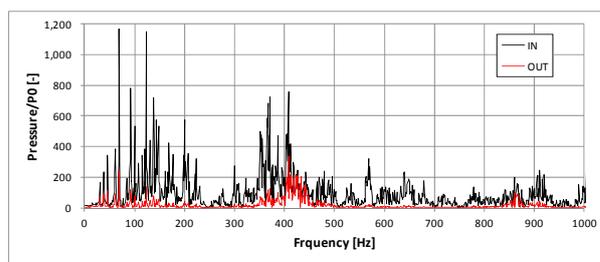


図 15 エンジン音の音源とマフラー出口の音（周波数データ）

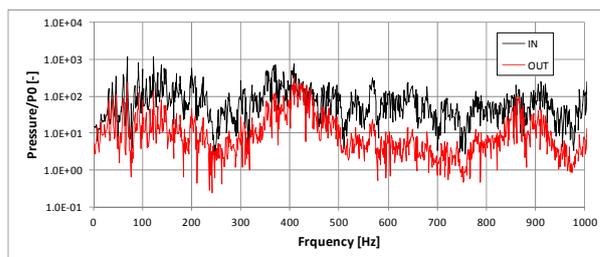


図 16 エンジン音の音源とマフラー出口の音（周波数データ、対数スケール）

さらに図 16 の結果に対して、音源と出口音の比を比較した。ここでは、5.3 節で得られた結果とほぼ同等の結果となることから、妥当な結果を得ていると考えられる。

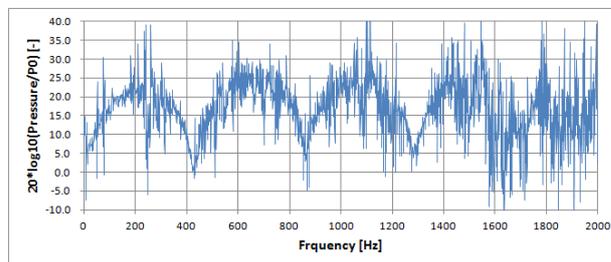


図 17 エンジン音の音源とマフラー出口音の比（周波数データ、対数スケール）

6. 新しい解析方法の提案

周波数領域の計算と時間領域の計算を組み合わせ、STFT を利用したひとつの新しい解析方法を提案する。本手法は音の伝搬時間を考慮できない点で現実とは異なる可能性があるが、大きなスケールでなければ適用できると考えている。この仮定が妥当であるかどうかを含め、この手法以外にも、多くの手法が考えられるが、そのひとつとして検討いただき、その妥当性につきコメント等をいただければありがたい。当社ではプロトタイプを作成し、テストを開始した段階にある。

ここで、青い点線内は時間領域ソルバーを利用

した解析手法であり、赤い点線内は周波数領域ソルバーを利用した解析手法である。また、図中で AFN/TD は時間領域ソルバー Advance/FrontNoise/TD であり、AFN/FQ は周波数領域ソルバー Advance/FrontNoise である。また、FFT はフーリエ変換であり、逆 FFT は逆フーリエ変換である。解析においてひとつのウィンドウの区間は 30~40msec の区間であり、窓関数処理を含む。最後に、AFN/FQ を何度も計算するのではなく、1 回だけ計算して、その結果を共通に利用することができる。これは、線形計算であることから可能である。今後実証していく必要があるが、青い点線内と赤い点線内の処理時間はおそらくほぼ同等である。メモリについては特に優越はない。

7. まとめ

時間領域ソルバーと周波数領域ソルバーの対応を示した。また、エンジン音の解析事例とその周波数ソルバーとの関係を示した。さらに、時間領域ソルバーと周波数領域ソルバーを利用した新しい方法を提案した。この手法については、今後、ユーザーの意見も取り入れながら整備・改良を進めていく予定である。

参考文献

- [1] <http://www.ne.jp/asahi/music/myuu/wave/carenginestart1.wav>
- [2] R.M.Munt, "Acoustic Transmission Properties of a JetPipe with Subsonic Jet Flow:I. The Cold Jet Refraction Coefficient," Journal of Sound and Vibration, 142(3), 413-436. 1990

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)

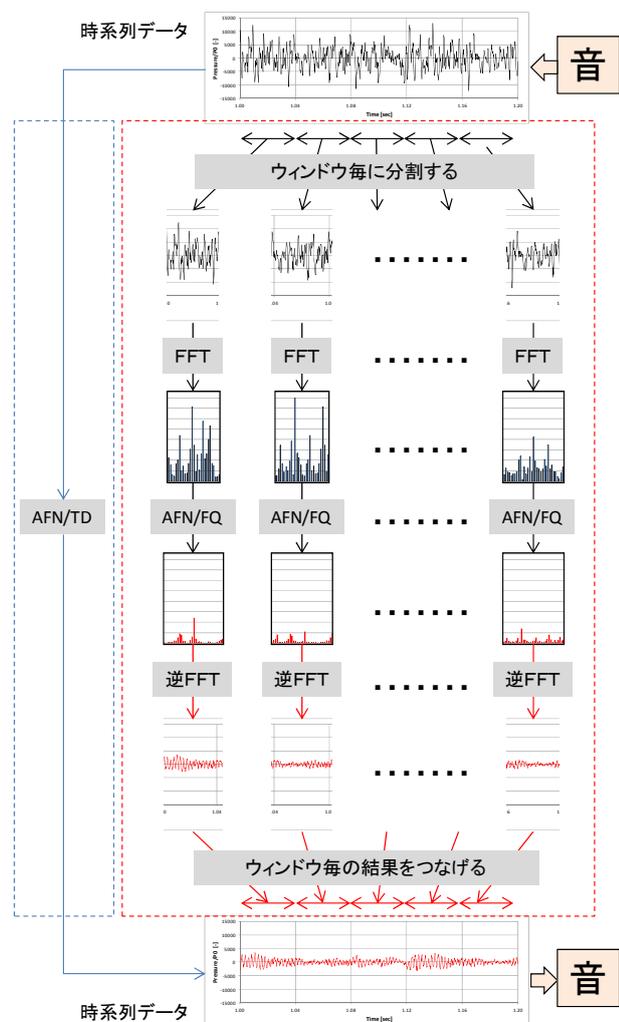


図 18 周波数領域と時間領域の関係