

音響ホログラフィによる走行時タイヤ騒音の同定手法

環境研究領域 田中 丈晴 坂本 行 坂本 一朗

1. はじめに

自動車走行時におけるタイヤ騒音を実路面上で測定することは、騒音の発生メカニズムの解明及び騒音放射特性を把握するためには不可欠であるが、タイヤ騒音源の発生位置、周波数、相対強度の同定が可能な音源探査手法は、未だ十分明らかにされていない。このような音源探査法の一つとして、竹田らの提案した1次元マイクアレイを用いた移動音源に対する音響ホログラフィ法があるが、周波数が既知である単一周波数の音源探査に限られる等の問題があり、実用性が低いものであった。⁽¹⁾⁽²⁾

本報では、定速移動音源の音圧波形を2次元マイクアレイを用いて測定し、ドップラー効果の影響を補正することにより、平面ホログラムデータを得る音響ホログラフィ法(以下、本方法とする)を検討する。本方法により、帯域ノイズ性音源の探査も可能となることを示すとともに、実路面上での自動車走行実験結果から、音源の同定手法として「最大値探査法」や「再生面シフト法」を併用することで、タイヤ騒音源をより高精度かつ簡便に同定できることを示す。

2. 音響ホログラフィ法

竹田らの提案した移動音源に対する音響ホログラフィ法は、音源が定速で移動することと音源周波数が既知であることを前提に、1次元マイクアレイを用いてドップラー効果の影響を計測音圧から補正した上

で、ホログラムを構成し音源探査を行う方法で、マッハ数0.1以下の移動速度の範囲内において適用できる。

⁽¹⁾この方法を拡張し、2次元マイクアレイを用いて平面ホログラムデータを得る本方法を提案する。⁽³⁾⁽⁴⁾

図1に、1次元マイクアレイを用いる場合及び2次元マイクアレイを用いる場合の平面ホログラムと再生面との位置関係を示す。

本方法では、測定点 $m_{ij}(x, y, z_0)$ での計測音圧を竹田らの提案によるドップラー効果の補正法を用いて、音源が固定されている場合のホログラム面上の計測音圧に変換し、フーリエ変換を行い、測定点 $m_{ij}(x, y, z_0)$ における複素音圧振幅 $p(x, y, z_0)$ を求める。しかし、1次元マイクアレイの場合には、ホログラム面上の全測定点で計測音圧が得られないため、y方向に配列された1列のマイクアレイの計測音圧を基に、音源の移動がx軸方向に限られ、移動速度及び音源の周波数特性が一定であると仮定して、ホログラム面上の計測音圧に変換する。複素音圧振幅 $p(x, y, z_0)$ の算出には、高速フーリエ変換を用い、この場合、周波数分解能 Δf (Hz)は、一般に、次式で示される。

$$\Delta f = f_c / N \quad (1)$$

ここで、 f_c : サンプリングレート(Hz)、 N : 音源探査解析データ数である。

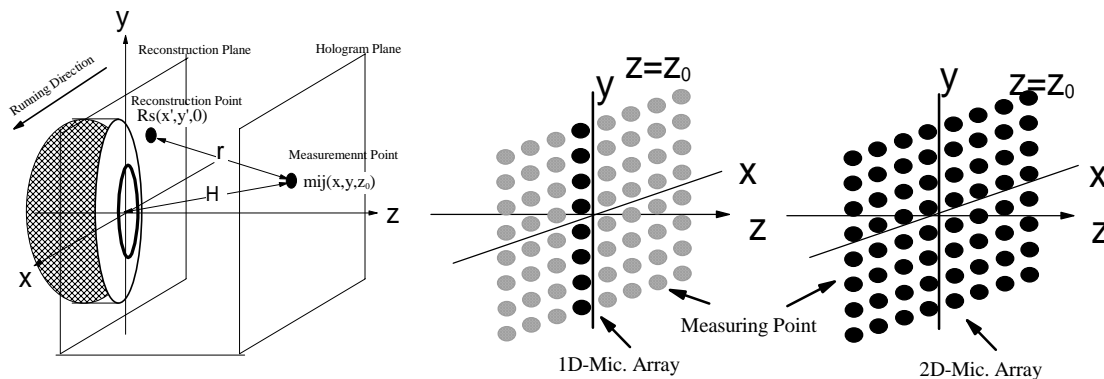


Figure 1: Measurement of planar hologram using a microphone array and reconstruction

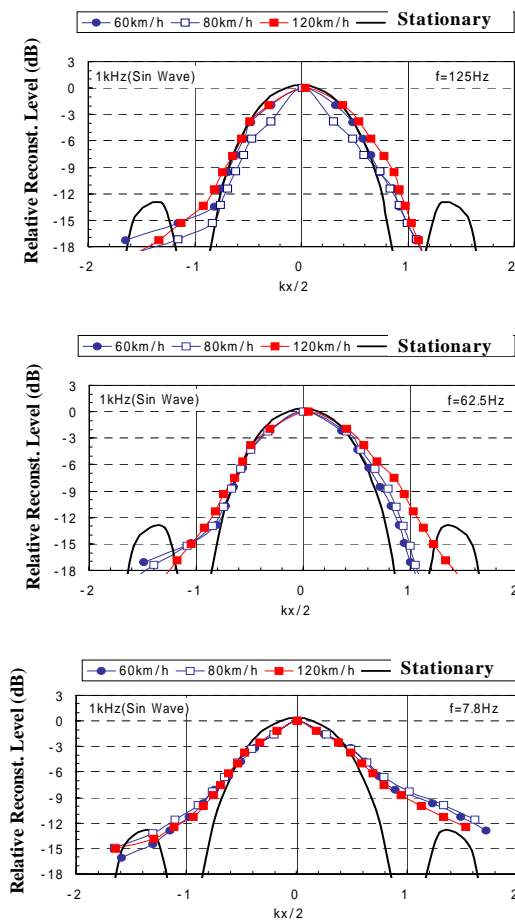
このようにして、ホログラム面上の各測定点での複素音圧振幅を求めた後、次式を用いて、再生点 R_s における複素体積速度振幅 \dot{U}_R を求める。

$$\dot{U}_R = -\frac{1}{i\rho Ck} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z_0) \times \frac{\exp(-ikr)}{r} \frac{z_0}{H} dx dy$$

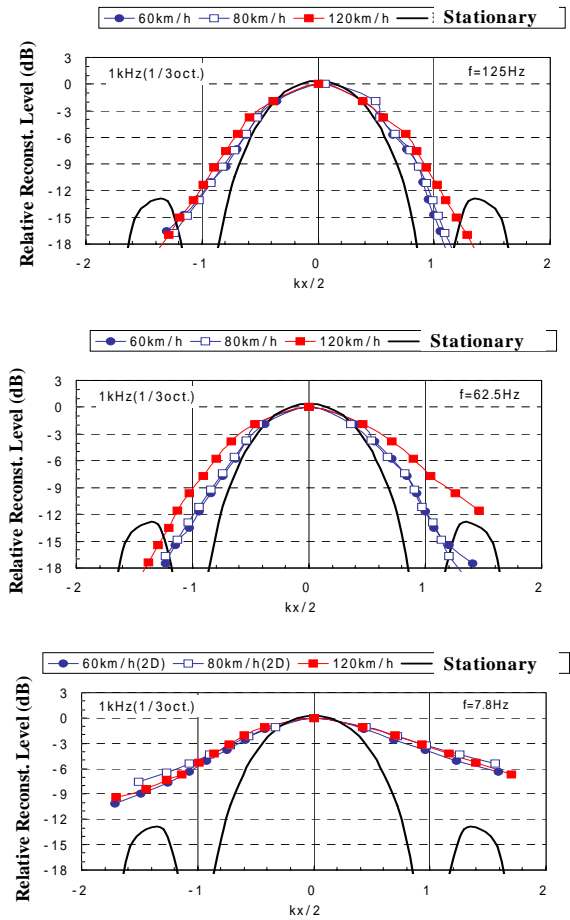
$$H = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z_0^2}$$
(2)

ここで、 k ; $(2\pi/\lambda)$ 、 ρ ; 空気密度、 C : 音速である。また、これらの計算を再生面上の各再生点について繰り返し行うことにより、再生面上での複素体積速度振幅の分布が得られる。なお、式(2)から求められる複素体積速度振幅の絶対値 $|\dot{U}_R|$ を、デシベル表示したものを再生速度振幅レベルとし、また、再生面上で最大値を示すものを再生レベルとする。

3 . 数値シミュレーションによる検証



(a) Periodic noise source(1kHz)



(b) Band noise source(1kHz:1/3Oct)

Figure 2: Directional Resolution by Acoustic Holography with 2-Dimensional Arrayed Microphones

Table 1: Calculation conditions of simulation

Sampling Rate (fc)	16kHz
Constant Speed	60,80,120km/h
Measuring Time	320ms
Source Frequency	1kHz(Sine Wave,1/3Oct.band)
Hologram Size	1.05m*1.05m
Tap Number of FFT/ Frequency Resolution	125/125Hz,256/62.5Hz,2048/7.8Hz
Mic. Pitch	x:0.15m,y:0.15m
Air Temp.	25 degree(C)

本方法が単一周波数音源だけでなく帯域ノイズ性音源への適用に有効であることを検討するため、これらについて方位分解能を求めるとともに、再生周波数と音源再生位置との関係を調べ、音源位置の同定方法を検討した。⁽⁵⁾

3 . 1 . 方位分解能

単一周波数及び帯域ノイズ性の音源を対象とした場合の本方法の方位分解能を求め固定音源の場合と比較した。方位分解能は、一般に、横軸が波数、縦軸

が相対的な再生速度振幅レベルとの関係で表される。

したがって、シミュレーションにより得られた再生結果から音源中心と交差する y 方向の直線上における 1 次元レベル分布に着目し、位置座標と再生速度振幅レベルとの関係を音源中心からの波数と相対レベル(最大値を 0dB とする)に換算して、方位分解能を求めた。シミュレーション結果から求められた方位分解能を固定音源の理論値の場合と比較した。

本方法においては、フーリエ変換の際の周波数分解能が方位分解能に及ぼす影響を検討するため、上記の比較にあたっては、移動速度は、60km/h、80km/h、120km/h の 3 条件、周波数分解能は、125Hz、62.5Hz、7.8Hz の 3 種類とし、これらが本方法による方位分解能に及ぼす影響を考察した。数値シミュレーションの計算条件を表 1 に示す。単一周波数音源の場合についての方位分解能の比較結果を図 2 (a)に、帯域ノイズ性音源の場合の結果を図 2 (b)に示す。単一周波数音源の場合、図から、方位分解能を半値幅で比較すると、いずれの速度条件でも周波数分解能に関係なく、ほぼ固定音源の場合に等しい。

しかし、帯域ノイズ性音源の場合には、周波数分解能が 62.5Hz 及び 125Hz の場合には、方位分解能は、概ね固定音源の場合に近いが、周波数分解能が 7.8Hz の場合には、方位分解能は、固定音源の場合の半分程度まで低下している。したがって、帯域ノイズ性音源の場合には、単一周波数音源の場合とは異なり、周波数分解能が方位分解能に影響を及ぼすため、ホログラフィ再生処理のフーリエ変換においてはデータ長を短くすることが必要であると考えられる。

3.2. 再生レベルのピーク値を用いた音源周波数の同定法

シミュレーションにより再生周波数を変化させた場合の本方法による音源再生位置及び再生レベルとの関係を移動速度 100km/h の場合について考察した。図 3 に、サンプリングレート 16kHz の場合のシミュレーション結果を示す。再生周波数 f (Hz) と再生周波数 f_r (Hz) における音源再生位置の偏位量 (d/f) (音源再生位置の真の音源位置からのずれ: d、音源周波数の波長: λ) との関係、並びに、再生周波数と音源の再生レベルとの関係を示す。

図 3 の横軸は、音源周波数 f_r (Hz) からの周波数偏位 $((f-f_r)/f_r * 100)\%$ で表し、本方法(2D)を 1

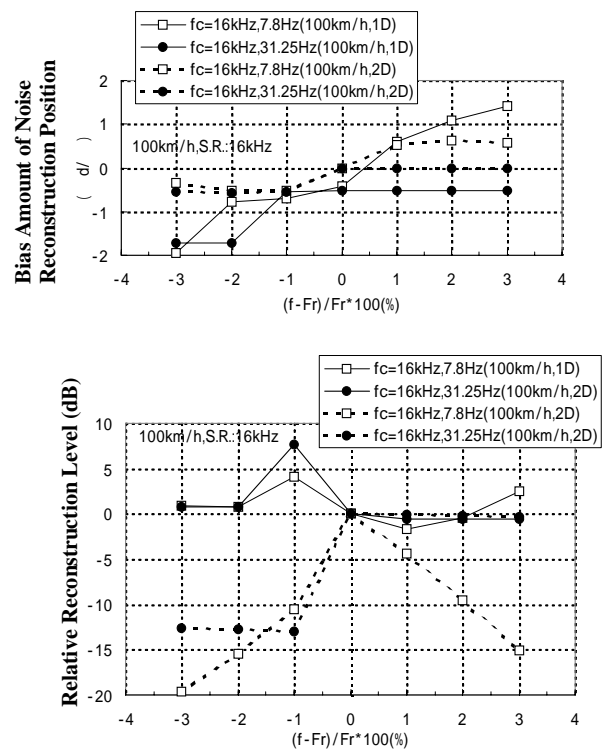


Figure 3: Simulation results calculated in the frequency resolution $\Delta f = 7.8\text{Hz}, 31.25\text{Hz}$

次元マイクアレイ(1D)の場合と比較した。また、縦軸の再生レベルは、周波数偏位が0の時の再生レベルを0dBとして、相対レベルで表示した。

サンプリングレート 16kHz の場合には、図から、2次元マイクアレイの場合、再生レベルは、周波数偏位が0において最大となっている。

このとき、音源再生位置の偏位量は、周波数分解能 7.8Hz と 31.5Hz とともに、1次元マイクアレイの場合よりも小さく、周波数偏位が0においては、音源再生位置は音源位置に一致している。

これらの点から、2次元マイクアレイを用いる場合、音源周波数 1kHz に対してサンプリングレートが 16kHz の場合は、1次元マイクアレイに比べて、周波数偏位に対する音源再生位置の偏位量は小さくなり、周波数偏位が0においては、再生レベルは最大となり、音源再生位置は音源位置に一致する。

したがって、2次元マイクアレイを用いた場合、再生周波数を音源の周波数が存在すると考えられる範囲で微小に変化させて、再生レベルが最大となる再生周波数を見出すことにより、移動速度及び周波数分解能によらず音源位置及び音源周波数の同定が可能であることを示しており、この方法を、「最大値探査法」とする。⁽⁵⁾

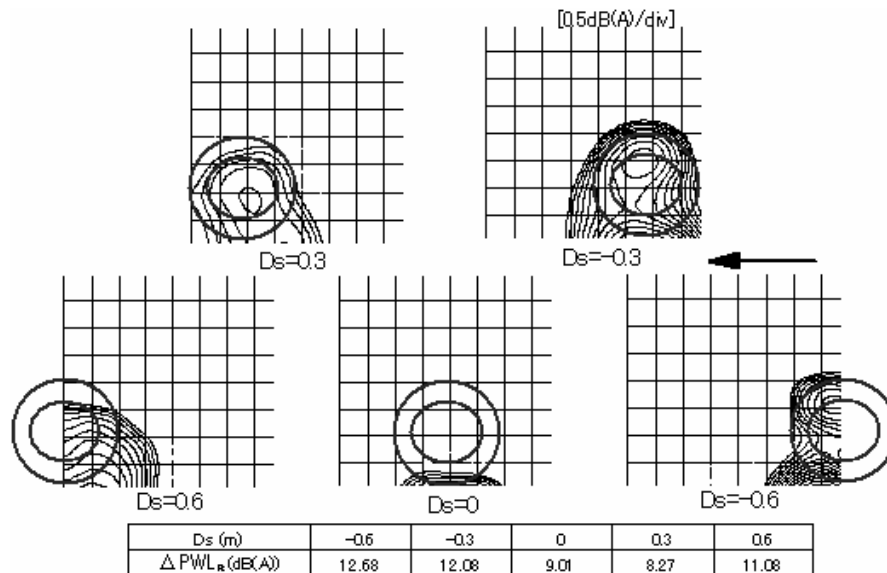


Figure 4: Reconstruction results at 800 Hz (1/3 oct.) of 3rib tire by the reconstruction plane shift method

4. 実験

本方法を実路面走行時におけるタイヤ騒音の音源探査に適用する場合の同定法として、「最大値探査法」の他、タイヤ騒音の放射特性を考慮した「再生面シフト法」を提案する。これらの同定法の有効性を、周波数同定の可能なモデルタイヤを装着した試験車両を用いた実路面走行実験と台上における音響インテンシティ測定実験によって検証する。また、最大値探査法によりタイヤトレッド部の主溝及び横溝が原因となって発生する騒音の同定結果を示す。⁽⁵⁾

4.1. モデルタイヤ装着時の走行中のタイヤ路面騒音の同定

(1) 再生面シフト法によるタイヤ騒音源の同定

走行時におけるタイヤ騒音は、一般にタイヤ接地部とその前後から騒音が放射されるが、その放射特性は多くの要因により変化する。これらを考慮し、再生計算は、タイヤの踏み込み側及び蹴り出し側における騒音放射特性についても把握するため、タイヤ中心と再生面中心との距離 (D_s) が $-0.6\text{m} \sim 0.6\text{m}$ となる範囲を 0.3m ずつシフトさせて行った。このように、音源の移動方向に音源と再生面との距離をずらして再生結果を求めることにより、タイヤがホログラム面の正面にあるときに放射される騒音だけでなく、タイヤの踏み込み側及び蹴り出し側から斜め方向に放射されるタイヤ騒音をより正確に同定することが可能になると考える。この同定方法を、以下、「再生面シフト法」とよぶこととする。

また、各位置での再生レベルを比較するため、スムーズ、1本溝、3リブタイヤの各位置における再生レ

ベルは、スムーズタイヤの $D_s=0$ の位置における再生レベルを基準に相対レベル (PWL_R) で表し、各再生コンターとともに表で示した。

スムーズ、1本溝、3リブの各モデルタイヤを装着して 80km/h での定常走行を行った場合について、前2者については、 1kHz の $1/3$ オクターブ帯域における再生結果を、3リブタイヤについては、 800Hz ($1/30\text{ct.}$) における再生結果を再生面シフト法により求めた。

3リブタイヤの外側に近い第1リブと内側の第3リブの1次ピッチノイズが含まれる周波数帯域 800Hz における再生結果を図6に示す。この場合は、 $D_s=-0.6$ 、 -0.3 及び 0.6 の位置における再生レベルが高く、タイヤ踏み込み側と蹴り出し側に音源があることが認められる。再生レベルは、前者の方がレベルが高く、踏み込み側からの騒音が大きいことが伺われ

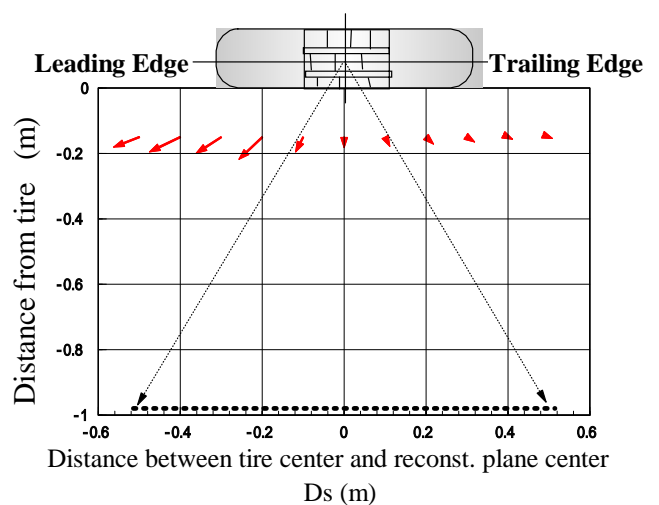


Figure 5: Energy-synthesized acoustic intensity of 772Hz and 855Hz concerning 3rib tire

る。さらに、この帯域ではエンジン及び駆動系の騒音も影響しており、タイヤ上部の位置に音源が再生されている。

(2) 台上における音響インテンシティ測定結果との比較

本方法による各位置における再生結果の妥当性を検証するため、室内ローラ上において、80km/hで惰行走行した場合のタイヤ単体の音響インテンシティの測定結果を示す。測定点は、タイヤ近傍で水平方向に0.1m間隔の11点とし、水平及び放線方向の音響インテンシティを測定し合成した。

測定には、プローブ：BK3545、分析器：BK2133Aを使用した。解析周波数帯域は、91.7Hz～5kHzとし、1/12オクターブ帯域毎に算出した。

3リブタイヤの800Hzの測定結果を図5に示す。図から、3リブタイヤの第1リブと第3リブの1次ピッチノイズは、踏み込み側でとくにインテンシレベルが大きく、タイヤ接地部付近では小さくなっている傾向が認められ、3リブタイヤの800Hzにおけるホログラフィ再生結果とよく一致している。

また、走行時のタイヤ騒音の本方法による音源探査に関しては、再生面シフト法により、Ds=0の位置におけるタイヤ正面での再生結果の比較だけではなく、その前後の再生結果も求めることにより、タイヤ騒音の音源位置及び放射特性に関してより正確な把握が可能となった。

(3) 最大値探査法による気柱共鳴音の周波数同定

車両速度80km/hで試験路において定常走行したときの試験車の左前輪に装着された1本溝タイヤの1次気柱共鳴周波数を計算により求めた結果、952Hz、

978Hz、1007Hzであった。周波数計算においては、タイヤの主溝と路面とで形成される管の開口端の補正量(δL)は台上におけるタイヤ単体実験より求め、管の長さ(L)は、モデルタイヤの平坦路接地時のトレッドパターンから各主溝の外側長さ、中央長さ、内側長さをそれぞれ実測した。1次の気柱共鳴周波数は、次式をもとに算出した。

$$f_{RES} = C(2(L + \delta L)) \quad (5)$$

図6に、最大値探査法により、1本溝タイヤの1次の気柱共鳴音の周波数同定を行った結果を示す。Ds=0の1本溝の再生結果について、周波数分解能62.5Hzとして、最大の再生レベルを示す帯域を見つけ、さらに、その帯域について周波数分解能を10Hzとして再生レベルが最大となる帯域を調べた。この結果を計算結果と比較すると、計算値952Hz及び978Hz付近で再生レベルのピークとほぼ一致することが認められる。後者のピークの方が再生レベルが高くなっている。

したがって、1本溝タイヤの場合には、947.5Hz～957.5Hzの帯域と967.5Hz～977.5Hzの帯域に1次の気柱共鳴周波数があり、後者の方が発生レベルが大きいと考えられる。

(4) 最大値探査法による1次ピッチノイズの周波数同定

最大値探査法を用いて、3リブタイヤの1次のピッチノイズの同定を行った結果について述べる。3リブタイヤは、ピッチノイズ周波数 $f^{(V)}$ (Hz)は次式で求めることができる。

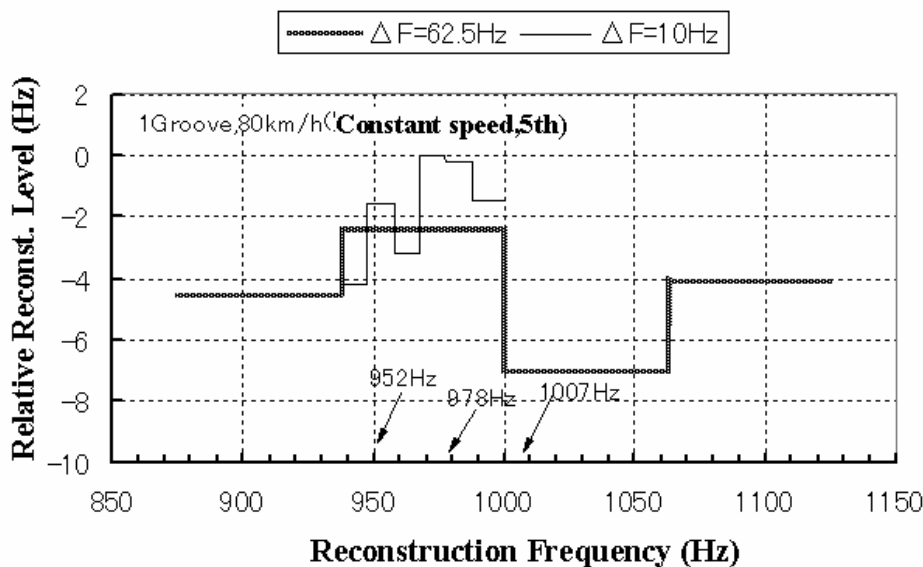


Figure 6: Frequency identification result of 1st columnar resonance concerning single-center groove tire by maximum value search method

$$f(V) = nVN_T / (3.6 \times 2\pi r_T)$$

, n: 次数 (6)

ここで、車両速度 V (km/h)、タイヤ周上のピッチ数 N_T 、タイヤの転がり半径 r_T (m) とする。

ここでは、80km/hの実車による台上走行におけるピッチノイズ周波数は、周波数分析結果から、第1リブでは750Hz(±5Hz)、第2リブでは655Hz(±5Hz)、第3リブでは837.5Hz(±5Hz)の付近にあることが認められる。これらのうち、第1リブと第3リブのピッチノイズは、800Hzの1/3オクターブ帯域に含まれるので、3リブタイヤの800Hzの再生結果について、最大値探査法を用いて1次ピッチノイズの周波数同定を行った。図4のDs=-0.3の位置における再生結果について、第1リブに関しては740.8Hzから803.2Hzまで、第3リブに関しては834.8Hzから897.2Hzまでの範囲を周波数分解能7.8Hzとして、7.8Hz毎に周波数をシフトさせて再生レベルを求めた結果を図7にしめす。第1リブ及び第3リブともに、再生レベルのピークは、台上測定値よりも5Hz程度、周波数が高い側に位置しているが概ね一致している。これは、試験路でのホログラフィ測定時における車両速度が80.5km/hであったため、3リブタイヤのピッチノイズ周波数が、0.63%程度、周波数で約5Hz程度高くなったものと考えられる。

したがって、3リブタイヤの場合、最大値探査法を用いて周波数同定を行った結果、1次のピッチノイズ周波数は、第1リブでは、756.4Hz~764.2Hzの帯域に、第3リブでは、842.6Hz~850.4Hzの帯域にあることが認められ、台上測定の結果とも一致した。

5. まとめ

1次元マイクアレイの方法では、単一周波数の音源探査に限られる等、適用範囲に制約があり、これらを改良するため2次元マイクアレイを用いたホログラム測定による新しい音源探査法を提案した。

本方法の利点は、音源からの音を面で捕らえるため音源の移動や音源特性に関する定常性の前提条件が1次元マイクアレイの場合よりも緩和され同定精度の大幅な向上が図られたこと、また、帯域ノイズ性音源の探査への適用が可能となったことである。さらに、「再生面シフト法」や「最大値探査法」を用いて、タイヤの騒音放射特性を考慮した音源位置の同定、並びに、音源周波数情報が十分得られない場合においても音源の周波数同定が可能であることを示し、本方法の音源探査法としての実用性が大幅に向上した。

参考文献

- [1] 竹田,岡,岩城,「音響ホログラフィによる移動音源探査に関する研究」,機講論, No.910-17(Vol. C), pp.324-326(1991)
- [2] I. Sakamoto, T. Tanaka, "Application of Acoustic Holography to Measurement of Noise on an Operating vehicle", *SAE Paper 930199*
- [3] H. Nakagawa, H. Tsuru, T. Tanaka, I. Sakamoto, "Detection and Visualization of Moving Sound Source through Acoustic Holography", in *Proceeding of Inter-noise 1998*
- [4] 田中,村上,中川,李,桂, "音響ホログラフィを用いた自動車加速走行時のタイヤ騒音の解析 (第1報)", *機械学会論文集*, No.680, Vol.69(C), pp.959-964, (2003)
- [5] T. Tanaka, "Identification Methods for Tire/Road Noise during Vehicle Operating Conditions with Acoustic Holography", in *Proceeding of Inter-noise 2004*

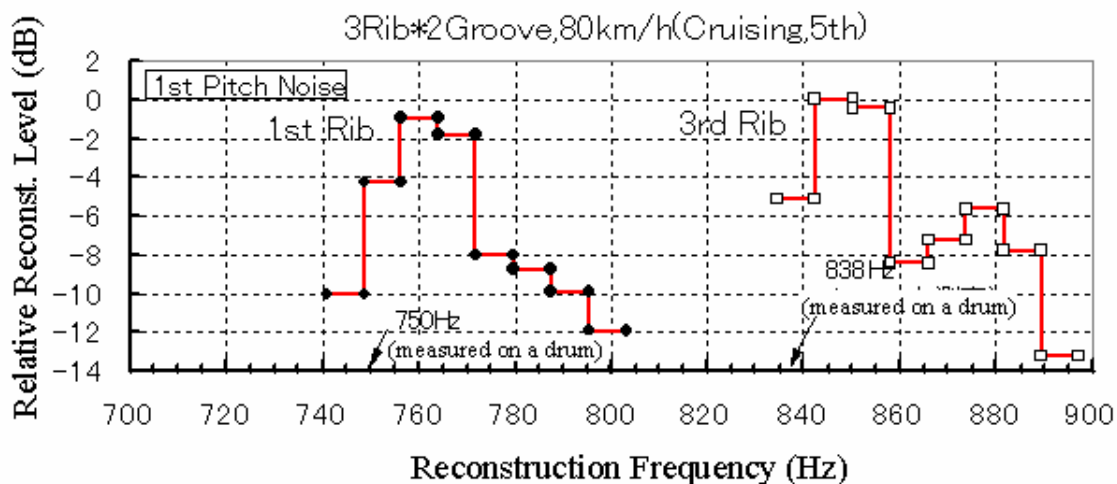


Figure7: Frequency identification result of 1st degree pitch noise concerning 1st and 3rd rib of 3rib tire by maximum value search method