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, シミュレーションによる基礎的検討)田中 丈晴^{*1}, 村上 孝行^{*2}, 中川 博^{*3}
李克 強^{*4}, 桂 直之^{*5}Tire Noise Analysis during Vehicle Acceleration Running
with Acoustical HolographyTakeharu TANAKA^{*6}, Takayuki MURAKAMI, Hiroshi NAKAGAWA,
Kedang LI and Naoyuki KATSURA^{*6} National Traffic Safety and Environment Laboratory,
7-42-27 Jindaiji-higashimachi, Chohu-shi, Tokyo, 182-0012 Japan

In order to analyze the tire noise emission during vehicle acceleration running, noise source detecting method with acoustical holography was applied to vehicle acceleration running condition, which was developed to constant speed running. This paper describes the effectiveness of this method by simulated calculation and the analysis results of the tire noise sources during acceleration running for the electrical vehicle with the test tires.

Key Words: Noise, Measurement and Control, Automobile, Acoustical Holography, Tire Noise, Acceleration Running, Moving Noise Source

1. 緒 論

自動車騒音の改善方策の一つとして, タイヤ路面騒音の低減が求められており, 実車情行法を用いた評価試験法に基づくタイヤ単体騒音の規制が国際的な場で検討され, EUでは, 規制の実施が予定されている。しかし, 市街地走行における加速時のタイヤ騒音は, 駆動力が作用するため, タイヤ種類などにより差はあるものの情行騒音よりも大幅に増加することが指摘されている。⁽¹⁾ しかし, この加速時におけるタイヤ騒音の発生メカニズムは, 現在, なお, 十分な解明に至っていない状況にある。

このような加速走行条件下におけるタイヤ騒音を解析した研究例としては, M. Jennewein, M. Bergmann による研究や, 三上, 押野によるタイヤ近傍位置で音響インテンシティ法を用いて解析した研究がある。^{(2), (3)} 前者では, 試験タイヤの溝に振動加速度ピックアップや小型マイクロホンを埋め込むとともにタイヤ近傍にマイ

クロホンを車両側から固定し, 加速走行時のタイヤ騒音の解析を行っている。後者では, タイヤの踏み込み側, 接地点, 蹴り出し側の位置に, 音響インテンシティプローブを車両側から固定し, 情行走行条件と加速走行条件との比較を行っている。前者では, 加速走行時におけるタイヤ騒音の増加要因について考察をしており, 後者では, タイヤ種類, 測定部位別に騒音増加に関する定性的傾向を示している。

しかしながら, 前者の測定では, 検出器等を試験タイヤに直接固定しているため, 測定系や走行風等が及ぼす影響が無視できず, 測定時の速度条件の選定に制約がかけられない。また, 後者の測定では, 音響インテンシティの測定方向及び測定部位が限定される等の問題がある。

したがって, 筆者らは, このような加速走行時におけるタイヤ騒音を解析するための一方法として, 地上側での測定のみで, 車両やタイヤに検出器などの装着が不要な測定方法として, これまで定速走行を対象とした移動音源に対する音響ホログラフィ法を, 一定な加速走行に適用する方法について検討を試みた。⁽⁴⁾

本報では, 移動する点音源からの放射音圧をドップラー効果の影響を考慮してシミュレートする方法を提案し, この方法により作成された音圧波形を用いて, 音

* 原稿受付 2002年6月27日。

^{*1} 正員, (独)交通安全環境研究所(☎182-0012 調布市深大寺東町7-42-27)。^{*2} (独)交通安全環境研究所。^{*3} (株)日東紡音響エンジニアリング技術部。^{*4} 清華大学。^{*5} (株)横浜ゴム平塚製造所。

E-mail: tanaka@ntsel.go.jp

響ホログラフィ法を加速走行時におけるタイヤ騒音の解析に適用する場合の方法と問題点について考察した。

2. 移動音源に対する音響ホログラフィ法

移動音源に対する音響ホログラフィ法では, 地上に固定された音響ホログラム計測用のマイクロホンアレイで観測される計測音圧に含まれる, マイクロホンアレイと移動音源との間で生じるドップラー効果の影響を補正した後, 計測音圧から複素音圧振幅を求め, 再生式を適用し, 音源の再生を行う。本方法では, 竹田等によって提案された音響ホログラフィ法とドップラー効果の補正法を用いている。(5), (6), (7)

2.1 ドップラー効果の補正法 図1のように, 音源が音速より低い速度 V で等速度でX軸上を移動しているとき計測点 m_{ij} で観測される音圧 p は, Morseによれば, 式(1)及び式(2)で表される。(8)

$$p(t) = \frac{\rho}{4\pi R(1-M\cos\theta_e)} \frac{\ddot{U}_s[t-R/C]}{R^2(1-M\cos\theta_e)^3} + \frac{\rho\dot{U}_s[t-R/C]}{4\pi R^2(1-M\cos\theta_e)^3} (\cos\theta_e - M)V \quad (1)$$

$$R = \frac{M(x-Vt) + \sqrt{(x-Vt)^2 + (1-M^2)(y^2+z^2)}}{1-M^2} \quad (2)$$

ここで, ρ : 媒質の密度, $\ddot{U}_s$: 音源の体積加速度振幅, $\dot{U}_s$: 音源の体積速度振幅, t : 受音点で音波が計測された時刻, t_e : 時刻 t に計測された音波が音源から放射された時刻, R : 時刻 t_e における音源と受音点との距離, C : 音速, M : マッハ数, θ_e : 時刻 t_e において音源と受音点と結ぶ直線がX軸方向となす角度である。

竹田等は, 式(1)において, 右辺第1項と第2項の振幅を比較し, マッハ数が0.1程度以下の場合であれば, 第2項を第1項に比べ無視できるとして, 第1項のみによるドップラー効果の補正の方法を近似法として提案している。本補正法は, 式(1)及び(2)の前提条件から, 音源が定速状態で移動する場合を前提にしたものであるが, 移動速度が変化する場合でも, 少なくとも, 音源から音波が放射されて受音点に到達するまでに要する時間(R/C)において, 定速状態と見なせる場合には, 実用上, 本方法が適用できると考えられる。

ドップラー効果の影響を補正する手順は, 以下のとおりである。

Fig.1 Overview of Moving Sound Source and Measuring Point in Doppler Shift

はじめに, 地上に固定されたマイクロホンによって時刻 t_i において計測された音圧を p_i とする。時刻 t_i について式(2)から距離 R_i をもとめ, 音源から音波が放射された時刻($t_i - R_i/C$)を求める。また, 計測音圧 p_i は, 音源が等速度で移動しているため, 式(1)の第1項に基づく $1/\{R_i(1-M\cos\theta_e)^2\}$ の振幅変調の影響を受けている。したがって, 計測音圧を $R_i(1-M\cos\theta_e)^2$ 倍することにより, 音源近傍(1m離れた点)での音圧に変換することができる。この音圧を p_i' で表せば, 音源が固定されている場合に, 音源から距離 R_{sm} 離れた位置で計測される音圧は, この p_i' を基に, 距離減衰 $1/R_{sm}$ と時間遷移($t_i - R_{sm}/C$)の補正を行うことにより求められる。

これらの方法によって得られる, 音源が固定されている場合の計測音圧は, 時間間隔が不等間隔となるため, データ補間を行う必要がある。

2.2 音響ホログラフィ法による音源の再生 音響ホログラフィ法に基づく音源の再生は, 図2に示すように平面ホログラムによる方法を用いることとした。

図2に示す再生面上の再生点 Rs における複素体積速度振幅 $\dot{U}_R$ は, 以下で求められる。(5), (6), (7)

Fig.2 Reconstruction plane and hologram plane

測定点 m_{ij} での計測音圧を 2.1 での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での計測音圧に変換し、フーリエ変換を行い、計測点 $m_{ij}(x, y, z_0)$ における複素音圧振幅 $p(x, y, z_0)$ を求める。これらを、ホログラム面上の各計測点について繰り返し求めた後、式 (3) 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。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。

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

$$H = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z_0^2} \quad (3)$$

ここで、 k : 波数、 r : 計測面上の受音点 m_{ij} から再生面上の再生点 R_s までの距離、 H : 再生面の中心 (原点) と計測面上の計測点 m_{ij} との距離である。

なお、式 (3) から求められる複素体積速度振幅の絶対値 $|\dot{U}_R|$ を、式 (4) を用いて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最大再生速度振幅レベルとする。

$$\text{再生速度振幅レベル} = 10 \log_{10} \left\{ |\dot{U}_R| / |\dot{U}_0| \right\} \text{ (dB)} \quad (4)$$

なお、 $|\dot{U}_0|$: 基準値とする。

3. シミュレーションによる検討

3.1 自動車加速走行条件への適用と解析対象

自動車の市街地の交通において生じる可能性のあるような、中間変速段においてエンジンを全開出力としたときに発生する騒音レベルを再現することを意図して規格化されている試験方法として、国内規格では、JIS D 1024 (1999)、がある。本報では、これらの試験方法に準拠した加速走行騒音試験を実施した場合における試験車両の駆動輪から発生するタイヤ騒音を解析対象とすることとした。

定速走行を対象とした本音響ホログラフィ法を加速走行条件に適用するため、自動車の加速走行時におけるタイヤ・路面間に発生する騒音源が、点音源又は点音源の分布で表されるものと仮定し、以下の条件が成り立つ場合の音源を解析対象とした。

① 音源の移動は、図 2 の X 軸方向のみに限られ、受音点における計測時間内では、音源の周波数の変化が無視できること。

② 音源の移動速度が変化する場合、式 (2) に基づく距離 R を音速 C で除した時間 (R/C) において、

Fig.3 Data Length (T) of FFT analysis for Reproducing Sound Source under Acceleration Condition

定速状態とみなせること。

(1) 条件①についての考察 走行中におけるタイヤ騒音の主要な発生源は、タイヤ路面間の接地部及びその前後の近傍であり、トレッド溝内空気の気柱共鳴によるパターンエアポンピング音、トレッドパターンの不連続生に起因して発生するパターン加振音である。⁽⁹⁾ このうち、前者は、自動車の速度 (以下、車両速度) に依存しないが、後者のパターン加振音の周波数 $f(V)$ (Hz) は、車両速度 V (km/h) と、タイヤ周上のピッチ数 N_T 、タイヤの転がり半径 r_T (m) で定まり、次式で示される。

$$f(V) = nVN_T / (3.6 \times 2\pi r_T), \quad n: \text{次数} \quad (5)$$

したがって、図 3 に示すように、加速度 α (km/h/sec) で車両速度が増加する場合、音響ホログラフィ解析に必要な計測時間を T (sec) とすると、条件①が、少なくとも成り立つためには、加速走行に伴うパターン加振音の周波数変化を音響ホログラフィ再生計算に用いる FFT 解析の周波数分解能よりも小さくなるように計測時間を定めれば良いことがわかる。FFT 解析における周波数分解能を ΔF とすると、 T を時系列データ長として、これらは、次式で示される。

$$\Delta F = 1/T = 1/N(\Delta t) \quad (6)$$

$$f(V + \Delta V) - f(V) \leq \Delta F \quad (7)$$

一方、車両速度の増加量は、次式で表され、

$$\Delta V = \alpha \cdot T \quad (8)$$

条件①が成り立つためには、式 (5) ~ (8) から、次式の関係満足する必要がある。

$$\alpha \leq (1/T^2) (3.6 \times 2\pi r_T / nN_T) \quad (\text{km/h/sec}) \quad (9)$$

一例として、乗用車用タイヤの場合、 $r_T = 0.35$ (m)、 $N_T = 70$ と仮定すると n 次のパターン加振音を測定するためには、次式に基づき、車両の加速度に応じて計測時間を定める必要がある。

$$\alpha \leq 0.113 / (nT^2) \quad (\text{km/h/sec}) \quad (10)$$

なお、加速時には、タイヤ路面間において滑りが生じることが知られているが、パターン加振音に及ぼす影響は小さく無視できるとした。

(2) 条件②についての考察 音源から受音点までの音波の到達時間 (R/C) における車両速度の変化率は、式 (8) から、次式で示される。

$$(\Delta V/V) = (\alpha \cdot R)/(V \cdot C) \quad (11)$$

一般に、車両通過時における速度の計測精度は、測定方法にもよるが、50 (km/h) の場合で、高々、 $\pm 1\%$ と考えられるため、条件②が成り立つためには、式 (11) から、次式の関係が満たされる必要がある。

$$\alpha \leq 0.01 \cdot (V \cdot C/R) \quad (12)$$

したがって、本音響ホログラフィ法を自動車の加速走行時におけるタイヤ騒音の解析に適用するためには、タイヤ仕様、車両速度条件、測定条件が、式 (9) 及び式 (12) を満たす場合において適用できると考える。

一方、筆者等は、これまでに、一定速度で移動するモデル音源 (スピーカー) や試験タイヤを装着した自動車を用いて定速走行条件での試験路走行実験を行い、音源周波数が単一周波数のみでなく、帯域ノイズの場合でも、 8×8 の正方形のメッシュ状に配列されたマイクロホンアレイを用いて、その帯域における各周波数毎の再生結果をパワー合成することにより、本方法が帯域ノイズ性音源の発生位置の探査にも有効であることを実験的に確認している。⁽⁴⁰⁾ したがって、本報では、 8×8 の正方形のメッシュ状に配列されたマイクロホンアレイを用いて、加速走行時におけるタイヤ騒音源の探査ならびに音響出力の定量的な比較を行うことの有効性について、基礎的検討を行うこととした。

音響出力が変化しない移動する点音源モデルを用いて、それからの放射音圧をシミュレーションする方法を示し、本音響ホログラフィ法を前述の条件①及び②を満足する一定な加速走行状態で移動する点音源に適用する場合の計測時間並びに、路面による音響的反射が再生結果に及ぼす影響について考察した。

3.2 移動点音源モデルによる加速走行条件への適用のシミュレーション 加速走行中、音源出力が変化しない点音源が一定な加速度でマイクロホンア

Fig.4 Vehicle Speed Comparison in Test Area under Acceleration and Constant Speed Condition

Fig.5 Horizontal Distance between Moving Source Passing Line and Hologram Plane

レイ前を通過すると仮定して、音圧波形をシミュレートし、本方法を用いて、加速走行する点音源の再生を行い、定速走行の場合と比較した。

シミュレーション音圧波形を作成するため、本方法においてドップラー効果の補正に用いている式 (1) 及び (2) を用いた。^{(5), (6), (7)}

シミュレーションの各パラメータの設定値を表 1 に示す。音源周波数として、中心周波数が 1kHz である 1/3 オクターブ帯域ノイズを用い、加速走行及び定速走行における各速度条件は、図 4 に示すように、車両前端部が通過騒音測定用マイク前 (移動距離 = 0 m の位置) で、ともに車両速度が 55 km/h となるように設定した。点音源とホログラム面との水平距離は、図 5 に示すように 1 m とし、ここでは、路面による音響反射の影響は無視した。

前述の乗用車用タイヤ場合、2 次のパターン加振音を例にとると、式 (10) と表 1 の車両の加速度から計測時間 T は、64 (msec) 以下としなければならない。また、式 (2) の R は、概ね 1 m であるので、式 (12) を十分満足している。

したがって、再生計算における FFT 解析の時系列データ長を、表 1 から、16 (msec) (データ数: 256 点) 及び 128 (msec) (データ数: 2048 点) の 2 つの場合について、音響ホログラフィ解析を行い、得られた再生速度振幅の相対レベル分布を比較した。図 6 に示すよう

Table 1 Calculation Condition of Sound Pressure Wave Simulation

Sampling Rate	16 kHz
Acceleration(Start/End)	52.8/57.2 km/h
Constant Speed	55 km/h
Measuring Time	320 ms
Source Frequency	1 kHz(1/3oct.)
Hologram Size	0.8m*0.8m
Mic. Pitch	x: 0.1m, y: 0.1m
Air Temp.	25 degree (C)

Fig.6 Reconstructed results of moving point source by acoustic holography in simulation (891Hz~1114Hz)

に、データ長に関係なく、加速走行及び定速走行ともに、点音源が再生面の中心位置近傍に再生され、走行状態の違いによる再生結果への影響は小さい。これは、音源信号に帯域性雑音を用いているためドップラー効果による影響が現れにくいこと、また、速度条件が低いことなどによると考えられる。

しかし、データ数が2048点の場合では、相対レベル分布が移動方向に伸び歪んだ形となっているが、データ数が256点の場合では、同心円に近くなっている。このことから、今回の解析対象である加速走行条件の場合、計測時間、即ち、時系列データ長を比較的小くすることにより、より正確な音源の再生が可能であると考えられる。以上より、今回の加速走行の場合、音響ホログラフィ解析における時系列データ数を256点とすることとした。

3.3 路面反射を考慮した点音源モデル 本方法をタイヤ騒音に適用する場合、路面による反射が再生結果に及ぼす影響が無視できないと考えられる。この点については、これまで、殆ど検討された例がないため、移動する点音源からの音圧波形をシミュレートする方法を用いて、路面反射が再生結果に及ぼす影響を考察した。

図3に示すように、音源出力が変化しない点音源S1が、完全反射面と仮定できる路面上高さhにあり、一定な速度Vでマイクアレイ前を通過する場合、測定点 m_{ij} では、S1からの直接到達する音波とみかけ上、虚音源S2から到達する反射音波とが重ね合わされた音圧波形が観測される。移動する点音源S1、S2と測定点m

Fig.7 Moving Sound Source Model with Road Surface Reflection and Hologram Plane

ij との距離を R_1, R_2 とすれば、ドップラー効果の影響を考慮して、式(3)から、 R_1, R_2 は、次式で示される。

$$R_1 = \frac{M(x-Vt) + \sqrt{(x-Vt)^2 + (1-M^2)((y+D-h)^2 + z_0^2)}}{1-M^2} \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{M(x-Vt) + \sqrt{(x-Vt)^2 + (1-M^2)((y+D+h)^2 + z_0^2)}}{1-M^2} \quad (14)$$

したがって、点音源 S1, S2 から放射される音圧波形を p_1, p_2 で表し、計測音圧を p とすれば、式(2)から次式で示される。

$$\begin{aligned} p &= p_1 + p_2 \\ &= \frac{\rho}{4\pi} \frac{\dot{U}_s[t-R_1/C]}{R_1(1-M\cos\theta)^2} + \frac{\rho \dot{U}_s[t-R_1/C]}{4\pi} \frac{(\cos\theta-M)V}{R_1^2(1-M\cos\theta)^3} \\ &\quad + \frac{\rho}{4\pi} \frac{\dot{U}_s[t-R_2/C]}{R_2(1-M\cos\theta)^2} + \frac{\rho \dot{U}_s[t-R_2/C]}{4\pi} \frac{(\cos\theta-M)V}{R_2^2(1-M\cos\theta)^3} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)を用いて、路面反射を考慮した場合の移動する点音源の音圧波形をシミュレートした。本シミュレーションの計算条件を表2に示す。

点音源とホログラム面との水平距離は、1mとした。路面反射による干渉の影響は、帯域ノイズよりも単一音の場合の方が顕著であると考えられるので、解析帯域を考慮し、点音源の発生音を1kHzの正弦波とした。

Table. 2 Calculation Condition of Sound Pressure Wave Simulation with Road Surface Reflection

Moving Speed	55 km/h(Const.)
Measuring Time	80 ms
Source Frequency / Amplitude	1 kHz(Sin Wave) / A: Const.
Height of Hologram Center from Road Surface (D)	0.4m
Height of Moving Source from Road Surface / Wave Length : (h/λ)	0.10---1.76 (10 Cases)

また、波形サンプル時の計測時間を短くした場合には、加速走行でも、殆ど定速走行とみなすことができるので、定速走行条件で考察した。移動する点音源の反射面からの高さを、ホログラム中心と等しい高さとした場合 ($h=0.4\text{m}$) と、反射面近傍にある場合 ($h=0.05\text{m}$) の二つの条件について、路面反射がある場合と路面反射が無い場合の音圧波形シミュレーション結果を図8に示す。

図8から、路面反射がある場合には、音圧振幅は路面反射がない場合に比べて2倍近い振幅値を示しており、明らかに、点音源が路面近傍に位置する場合の方が、振幅の増幅度合いは、大きくなっている。また、点音源が測定点に近づく側と遠ざかる側とで振幅の増加率が変化しており、ドップラー効果の影響が模擬されていることが伺える。これらの再生結果を図9に示す。路面反射の有無に関係なく、音源位置が正確に再生されていることが認められる。

3.4 音源再生位置及び再生速度振幅レベルへの影

Fig.8 Simulation Results of Sound Pressure Wave

響 シミュレーションにより得られた移動する点音源の計測音圧に対して、本方法を適用し、路面からの音源高さ (h/λ) を変更した場合の音源再生位置の y 方向誤差 (δy) 及び再生速度振幅レベルに及ぼす影響を検討した。図10に、(h/λ) と ($\delta y/\lambda$) との関係を示す。

図10から、路面反射なしの場合には、 y 方向誤差は、波長の10%以内であるが、路面反射がある場合には、全体的に誤差が増加する傾向を示している。特に、(h/λ) が0.72では、誤差が30%程度となる。この場合、図7における音源 $S1, S2$ 間の距離が概ね1.5波長に近くなるため、反射音による干渉の影響が現れたものと考えられる。3.1で述べたように、走行中におけるタイヤ騒音の主要な発生源は、タイヤ路面間の接地部及びその前後の近傍であり、これらの部位に発生する騒音源が、本研究の解析対象であり、図10から路面反射の影響を考慮しても、音源再生位置の y 方向誤差は、波長の10%程度であると考えられる。

図11は、路面からの音源高さ (h/λ) と路面反射あり

Fig.9 The Comparisons of Reconstructed Sound Source Location concerning to Mirror Ground Reflection

の場合の再生速度振幅レベルとの関係を示す。後者は、路面反射なしの場合を基準とした相対レベルで示す。路面反射がある場合には、再生速度振幅レベルは、音源の路面からの高さによって変化する。また、概ね $(h/\lambda) < 0.5$ の範囲では、音源が路面に近づくにつれて再生速度振幅レベルは急激に増加し、増加量は6 dBに近づく傾向を示す。これらの結果から、本方法による複数の再生結果から再生速度振幅レベルを相互に比較する場合には、各再生結果における音源の再生位置が、路面からの高さにおいて同程度である場合に限り、定量的な比較が可能であると考えられる。

4. 結 論

移動音源に対する音響ホログラフィ法を、自動車の一定加速走行におけるタイヤ騒音の解析に適用する方法について基礎的検討を行った。定速走行を前提とした本方法を加速走行時におけるタイヤ騒音の解析に適用するために必要な車両の速度及び測定条件等について明らかにした。また、点音源モデルを用いた音圧波形のシミュレーションを行い、これらの音響ホログラフィ再生結果から、路面反射(完全反射面)が再生結果に及ぼす影響を把握した。この結果、タイヤ路面接地部における騒音源を解析する場合、路面反射の有無に関係なく、音源の再生位置のy方向誤差は、波長の10%程度であること。また、複数の再生結果から再生速度振幅レベルを相互に比較する場合は、音源の再生位置が、路面からの高さにおいて同程度である場合に限り、定量的な相対比較が可能であることが示された。

Fig.10 Relation between Noise Source Height and Vertical Location Error of Reconstructed Noise Source

Fig.11 Relation between Noise Source Height and Variation of Reconstructed Level by Road Surface Reflection

文 献

- (1) 三上他,自動車技術会講演前刷集,9634251(1996-5)
- (2) M. Jennewein, M. Bergmann, Investigations concerning tyre/road sources and possibilities of noise reduction, Proc. Instn Mech Engrs, Vol.199, No.D3,(1985)
- (3) 三上他,自動車技術会講演前刷集,9535873(1995-5)
- (4) 田中他,音響ホログラフィ法を用いた加速時タイヤ騒音の解析,H12年度交通研究発表会講演概要
- (5) 竹田他,機構論, No. 910-17(Vol.C),1991-3,4,324
- (6) 中川他,日本音響学会建築音響研究会資料,AA95-4
- (7) 田中,日本機械学会 No. 97-85 講習会資料
- (8) Morse, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill.
- (9) 自動車用タイヤの研究,山海堂
- (10) 田中他,H9 年度交通研究発表会講演概要,p123-