

編成長を考慮した流線形車両の 明かり区間通過時圧力変動解析

宮地 徳蔵* 菊地 勝浩**

Analysis of Pressure Variation Caused at Nose and Tail Passage of Short Trains

Tokuzo MIYACHI Katsuhiko KIKUCHI

The pressure variation caused by a high-speed train passage affects structures on the ground and causes some environmental problems. Past studies assume that the effect of the train nose passage is independent from that of the tail passage for long trains (composed of 16 cars), and analyze only the effect of the nose passage. However, the superposition of the effect of the nose and tail is not negligible for short trains (composed of less than 10 cars). In this study, a model experiment and theoretical analysis on the pressure variation at the nose and tail passage are performed for short trains. The results show that, because of the superposition, the negative peak amplitude is greater than the positive peak amplitude for observation points located at over 1/10 of the train length away from the train, and the distance between two zero-points of the pressure variation is not the same as the train length. The proposed line source model based on the typical potential theory takes the effect of both of nose and tail configurations into account. The prediction results of the model are in good agreement in the waveforms and peak amplitude of the pressure variation with those of the model experiment.

キーワード：通過時圧力変動，ポテンシャル理論，後尾部

1. はじめに

高速で走行する列車のまわりには、圧力場が形成される。地上の条件の変化が少ない明かり区間を列車が走行する場合には、この圧力場は列車上の観測者からみてほぼ定常となる。一方、地上の観測者からみると、高速列車の通過は、急な圧力変動をもたらす。これを列車通過時圧力変動とよぶ。列車通過時圧力変動は、沿線環境や対向列車、地上構造物などに影響する。したがって、その影響を明らかにし、また低減するための研究が実施されている^{例えは1)～8)}。

このような圧力場を解析する手法として、ポテンシャル理論を用いた解析手法^{6) 7)}が報告されている。

ところが、列車の通過時圧力変動の全体の波形あるいは後尾部通過時の圧力変動の波形と、何らかの理論解析から得られた波形を比較した例はあまりみられない。従来の研究では、列車の編成が十分長く先頭部・後尾部の影響が重畳しないことを仮定している。しかし、編成が短い場合には、先頭部と後尾部の相互干渉は無視できない可能性がある。近年は、短編成や併結編成の高速運用もあり、問題はさらに複雑である。

本研究では、模型実験によって比較的短い編成の列車

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

の通過時圧力変動の圧力波形を計測した。得られた圧力波形とポテンシャル理論による波形予測結果を比較した。

2. ポテンシャル理論

2.1 理論モデル

ここでは線音源を用いた解析モデル⁶⁾を用いる。解析の概念図を図1に示す。剥離、車間部、パンタグラフなどの影響を無視した理想的な流線形車両では、線音源は列車先頭部と後尾部にのみあり、中間車ではその強さは0である。このとき、列車の通過時圧力変動には通常

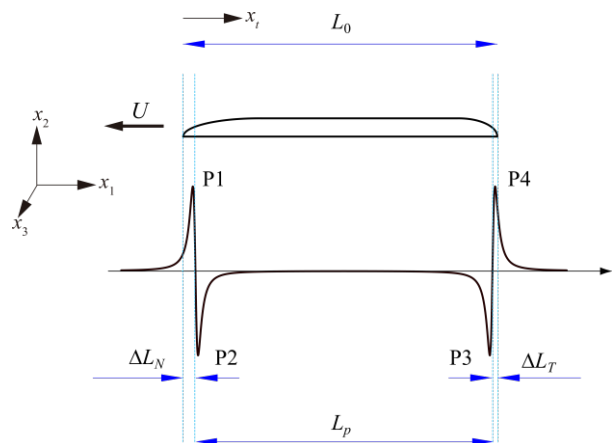


図1 通過時圧力変動 概念図

4つのピークが表れる。すなわち、先頭部通過の正のピーク（図1：P1）、先頭部通過の負のピーク（図1：P2）、後尾部通過の負のピーク（図1：P3）、後尾部通過の正のピーク（図1：P4）である。この通過時圧力変動を解析するために以下のように問題を設定する。座標系の原点を地表面上におき、時刻 $t=0$ に列車先頭部は座標原点にあるとする。列車は一定速度 U で x 軸の負の方向に $(x_2, x_3) = (0, 0)$ の位置を $x_1 = \infty$ から $x_1 = -\infty$ まで走行する。流れは非粘性とし、列車の通過時圧力変動の音圧 p は大気圧 p_0 に対して小さい、また、列車速度 U は大気の音速 c に対して小さいとする。このとき、列車の通過時圧力変動の音圧 p は次のポアソン方程式によって表わすことができる。

$$\nabla^2 p = \rho \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 ρ は大気の密度、 q はわきだし強さであり、列車の影響を表わす。

列車の影響を線音源で近似するとき、そのわきだし強さ q は次式で与えられる^{例えは9)}。

$$q(\mathbf{x}, t) = U \frac{dA}{dx_1}(x_1 + Ut) \delta(x_2) \delta(x_3) \quad (2)$$

ここで、 A は列車全体の断面積分布、 δ はデルタ関数である。列車の走行位置付近の地形を平面で近似し、列車先頭部・後尾部以外の断面積変化を無視すると、通過時圧力変動は、列車固定座標系 $x_i = x_1 + Ut$, $y_i = y_1 + Ut$ において次式ようになる。

$$p(x_i, r_m) = p_N(x_i, r_m) + p_T(x_i, r_m) \quad (3)$$

$$p_N(x_i, r_m) = -\frac{\rho_0 U^2}{2\pi} \int_0^{L_N} \frac{x_i - y_i}{((x_i - y_i)^2 + r_m^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial A}{\partial y_i}(y_i) dy_i \quad (4)$$

$$p_T(x_i, r_m) = \frac{\rho_0 U^2}{2\pi} \int_{L_0 - L_T}^{L_0} \frac{x_i - y_i}{((x_i - y_i)^2 + r_m^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial A}{\partial y_i}(y_i) dy_i \quad (5)$$

ここで、 $r_m^2 = x_2^2 + x_3^2$ は線路中心から観測点の離れ、 $x_i = 0$ は列車先頭部先端、 L_0 は列車編成長さ、 L_N は先頭部長さ、 L_T は後尾部長さを表す。本モデルにおいては、境界層や剥離の影響、パンタグラフや車間部、床下機器の影響は考慮されておらず、流線形の先頭部・後尾部を仮定している。

例えば先頭部の圧力変動は次式のように無次元化できる。

$$X_N = \frac{p_N(x_i^*)}{\frac{\rho_0 U^2}{2} \frac{\sigma}{2}} = - \int_0^{L_N/r_m} \frac{x_i^* - y_i^*}{((x_i^* - y_i^*)^2 + 1)^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial A^*}{\partial y_i^*}(y_i^*) dy_i^* \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{A}{\pi r_m^2 / 2} \quad (7)$$

ここで、 X は正規化圧力、 $x_i^* = x_i / r_m$, $y_i^* = y_i / r_m$, $A^* = A(x_i) / A(L_N) = A(x_i) / A(L_T)$, σ は観測点距離 r_m が半径の仮定の半円型トンネルと列車のブロック比である。

先頭部の影響について、先頭部長さを0として $\partial A^* / \partial y_i^* \sim \delta(y_i^*)$ と近似すると

$$X_N = \frac{p_N(x_i^*)}{\frac{\rho_0 U^2}{2} \frac{\sigma}{2}} = - \frac{x_i^*}{(x_i^{*2} + 1)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

であり、その最大値は $x_i^* = \pm 1 / \sqrt{2}$ において $X_N = 2 / 3\sqrt{3} = 0.385$ で一定となる。これは後尾部についても同様である。つまり、先頭部・後尾部の相互干渉が無視できれば、通過時圧力変動の正規化圧力ピーク値は観測点距離 r_m によらない。逆に、正規化しない実際の圧力は $1/r_m^2$ の程度で減衰していき、 $r_m > 50(\text{m})$ の範囲の圧力は非常に小さい。

2.2 計算例

列車通過時圧力変動の点音源モデルによる計算例を図2に示す。ここで、 $L_0 = 150\text{m}$ (6両編成相当) である。 r_m / L_0 が小さいときには、通過時圧力変動のピーク値は2.1節で述べた先頭部あるいは後尾部のみを点音源で分離評価したピーク値 (± 0.385) と等しい。つまり、列車通過時圧力変動全体波形の正負のピークの振幅は等しい ($P_1 = P_4 = |P_2| = |P_3|$)。 r_m / L_0 が大きい場合には、正のピークと負のピークの振幅は異なり、負のピークの振幅のほうが大きい ($P_1 = P_4 < |P_2| = |P_3|$)。これは、先頭部・後尾部の影響が重畳しているからである。

列車通過時圧力変動の線音源モデルによる計算例を図3、図4に示す。ここで、 $L_N = L_T = 15.7\text{m}$, $L_0 = 150\text{m}$ (6両編成相当) および $L_0 = 400\text{m}$ (16両編成相当) であり、次章の模型実験および実際の新幹線車両を想定した設定である。先頭部と後尾部が同じであれば、通過時圧力変動の波形は左右対称である。しかし、 r_m / L_0 が小さい場

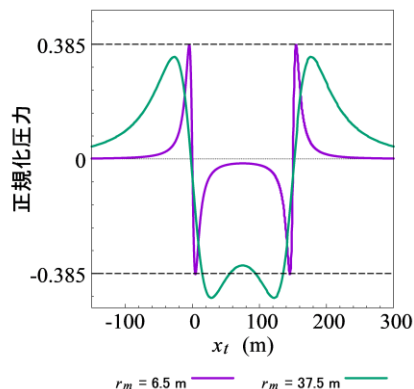


図2 点音源モデル計算例 $L_0 = 150\text{m}$

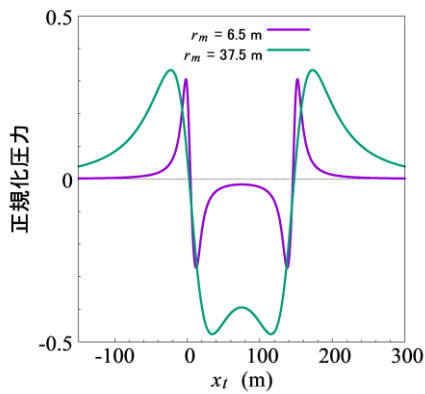


図3 線音源モデル計算例 $L_0 = 150\text{m}$

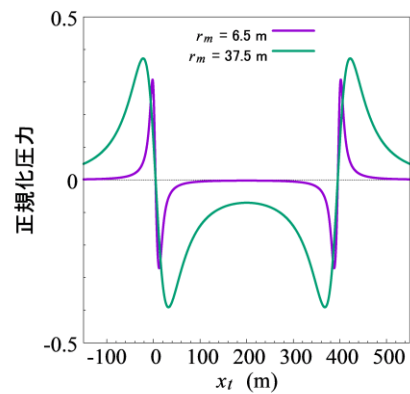


図4 線音源モデル計算例 $L_0 = 400\text{m}$

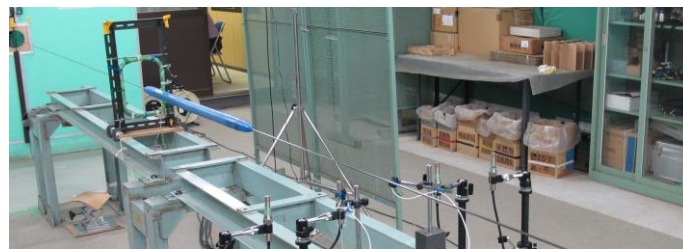
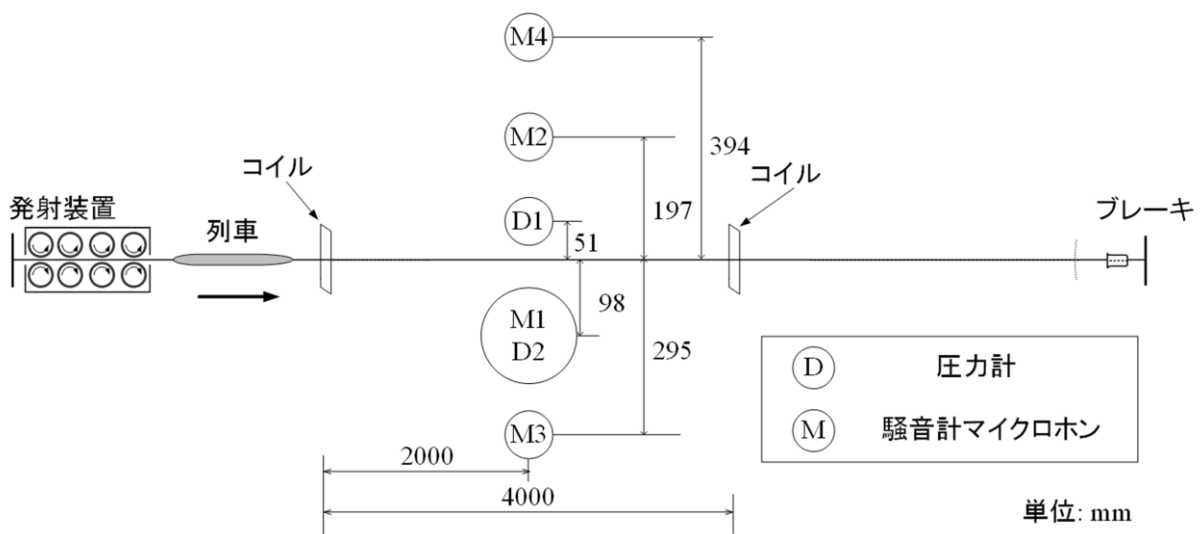


図5 模型実験概要

合であっても、正負のピークの振幅は、点音源の場合ほど一致しない。

式(3)–(5)より、先頭部、後尾部のそれぞれの影響を分離して評価(分離評価)できるのは $r_m / L_0 \ll 1$ の場合である。したがって、相対的に近傍場であれば、分離評価が可能である。従来よく使用されている先頭部の影響のみを点音源で評価する点音源・分離評価モデル^{6) 7)}が適用できるのは、 $L_N \ll r_m \ll L_0$ であり、 $L_0 = 400\text{m}$ 、 $L_N \sim 6\text{m}$ の16両編成・短先頭部の新幹線車両の場合に成り立つ。しかし、 $L_0 = 150\text{m}$ 、 $L_N = 15\text{m}$ の短編成・長先頭部の新幹線車両の場合には、この条件は十分に満た

されていないとはいえず、線音源モデルにおいて先頭・後尾部を同時に評価する必要がある(単に線音源モデルとよぶ)。

3. 模型実験と理論の比較

3.1 模型実験概要

短い編成の列車の圧力変動を計測するため、超高速模型発射装置^{10) 11)}を用いた模型実験を行った。模型実験概要を図5に示す。 $r_m = 51, 98, 197, 295, 394\text{mm}$ の位置に圧力センサを設置した。これらの観測点距離は、実ス

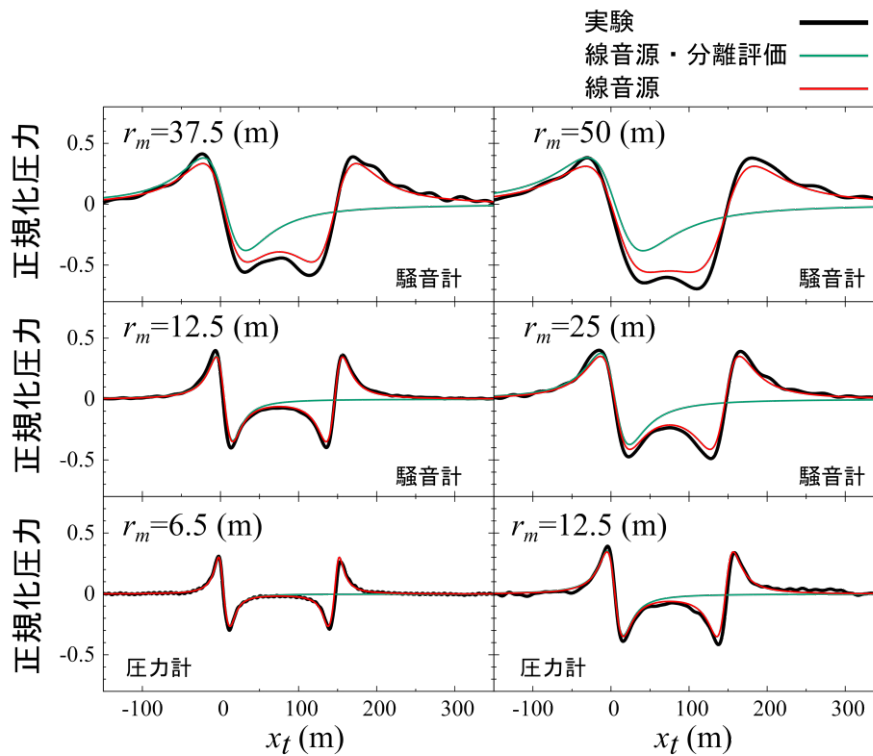


図6 通過時圧力変動圧力波形の比較
(現地スケール $L_N = 15.7\text{m}$, $L_0 = 150\text{m}$)

ケールでそれぞれ、6.5, 12.5, 25, 37.5, 50m に相当する。速度検知用コイルは、4000mm 間隔で設置した。

本実験では、 $r_m = 51, 98\text{mm}$ の位置に圧力計 (Kulite, XCS-190-5G) を設置した。また、 $r_m = 98, 197, 295, 394\text{mm}$ の位置に精密騒音計 (Rion, NL-32) のマイクロホンを設置した。

本研究では、圧力計と精密騒音計の2種類の圧力センサを用いた。このうち、圧力計は測定レンジが大きいいため、通過時圧力変動が小さくなる遠方の測定点では使用できない。一方、精密騒音計は非常に小さい圧力変動を測定するためのもので、近傍の測定点ではレンジオーバーになるため使用できない。このため、近傍測定点では圧力計、遠方測定点では精密騒音計を使用した。さらに、精密騒音計には大気圧の変動をカットするハイパスフィルタが内蔵されているため、低周波成分の多い通過時圧力変動の正しい時間波形やピーク値を得ることができないという問題がある。本研究では、菊地ら⁵⁾の手法を参考に、同一点で測定した圧力計と精密騒音計の波形を用いて、逆デジタルフィルタ (三次バターワース型ローパスフィルタ) を設計し、これを用いて測定結果を補償してデータ整理を行った。

本実験で使用した 1/127 スケール車両模型の諸元を表1に示す。模型の全長は 1.19m (実スケール約 150m 相当, 6両編成相当) である。先頭・後尾部形状は回転

表1 車両模型諸元

スケール	1 / 127
全長 (m)	1.19
直径 (mm)	41.2
先頭・後尾部長さ (mm)	123.7
先頭・後尾部形状	回転楕円
速度 (km/h)	340

楕円であり、長さ 123.7mm (実スケール約 15.7m 相当) である。列車速度は 340km/h とした。

3.2 圧力波形と圧力ピーク

通過時圧力変動の測定波形とポテンシャル理論の比較を図6に示す。ここで、測定で得られた時間波形は、時間に列車速度を乗じて空間波形に変換している。また、精密騒音計のデータは、内部のハイパスフィルタを補正する逆ハイパスフィルタ適用している (補足参照)。圧力ピーク値の実験結果と理論の比較を図7に示す。ここで、実験では、様々な要因により、必ずしも $P1 = P4$, あるいは $P2 = P3$ が成立しないので、図7の実験結果には $P1 \sim P4$ のすべてを示している。

図6の実験波形より、 $r_m \geq 12.5\text{m}$ においては、先頭部と後尾部の影響が重畳していることが確認される。こ

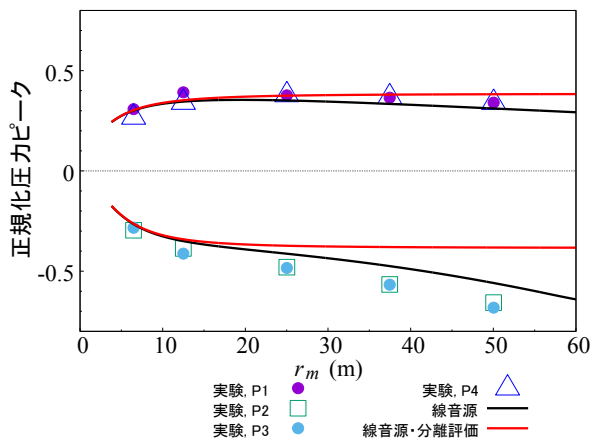


図7 圧力ピーク値の模型実験結果

のため観測点が遠くなるほど、図7の負の正規化圧力ピークの振幅は大きくなる。一方、正の圧力ピーク値の変化の程度は小さく $12.5\text{m} \leq r_m \leq 50\text{m}$ ではほぼ一定である。

図6、図7の線音源・分離評価モデル（先頭部のみを評価）では、波形の概形は一致するが、 $r_m \geq 12.5\text{m}$ の負のピークに対する予測誤差が大きい。これは、先頭・後尾の相互干渉が無視できないためである。したがって、通過時圧力変動において、線音源・分離評価モデルを適用できるのは、 $r_m / L_0 < 0.1$ の範囲である。一方、線音源モデルでは、広い範囲で測定波形やピーク値を精度よく予測することができる。

3.3 0点間距離 L_p

図6で確認できるように、通過時圧力変動には、先頭部通過時の正と負のピークの間（P1とP2の間）と後尾部通過時の負と正のピークの間（P3とP4の間）の2か所に圧力が0となる点（0点）が存在する。通常、この0点間距離は列車の編成長とほぼ等しいとみなされる。ここでは、図1に示すように、この0点間距離を L_p とし、編成長 L_0 との差 ΔL を次式のように定義する。

$$\Delta L = L_0 - L_p \tag{9}$$

これを時間領域に変換すると

$$\Delta t = t_0 - t_p, L_0 = Ut_0, L_p = Ut_p \tag{10}$$

となる。

$\Delta t / t_0$ の測定結果と計算結果の比較を図8に示す。観測点距離によって、 $\Delta t / t_0$ は変化する。 $0 < r_m < 50\text{m}$ の範囲で、 $|\Delta t / t_0|$ は最大5%程度となる。

新幹線沿線における現地試験では、様々な制約から、図6の通過時圧力変動の時間波形から列車速度を算出して速報とすることがある。ここでは、これをM法（Microphone法）とよぶ。M法では、 t_p / L_0 を列車速度とす

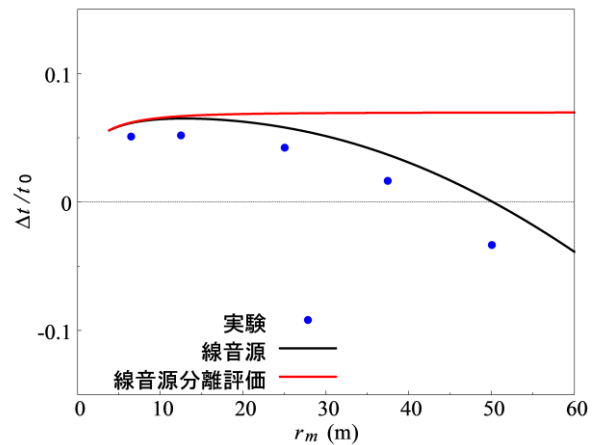


図8 $|\Delta t / t_0|$ の測定結果
(現地スケール $L_N = 15.7\text{m}$, $L_0 = 150\text{m}$)

ることが多いが、正しい速度は t_p / L_p であるから、この手法は $|\Delta L / L_0| = |\Delta t / t_0|$ だけ誤差を生じる。図8の場合には速度測定誤差は5%程度となり無視できるほど小さいものではない。これを補正するためには、ポテンシャル理論を用いた式(3)–(5)より観測点距離に応じて L_p を求めて速度を算出する必要がある。

列車速度を250、300、340km/hとした模型実験におけるM法による列車速度の測定結果を図9に示す。ここでM法には、 $r_m = 12.5\text{m}$ 、精密騒音計の測定結果を用いた。補正を行わない場合は列車速度をおよそ5%程度過大評価しているが、線音源モデルによって得られる L_p を用いて補正した場合には、ほぼ正しい測定結果が得られている。補正したM法であれば、少なくとも速報や簡易測定として実用に耐えうると考えられる。

16両編成列車の Δt の計算例を図10に示す。この場合、 $0 < r_m < 50\text{m}$ の範囲において、 $|\Delta t / t_0| \sim 0.03$ である。すなわち、300km/hで走行する16両編成（併結なし）の新幹線列車について、通常のM法では10km/h程度の速度測定誤差が生じる。16両編成列車の場合には、先

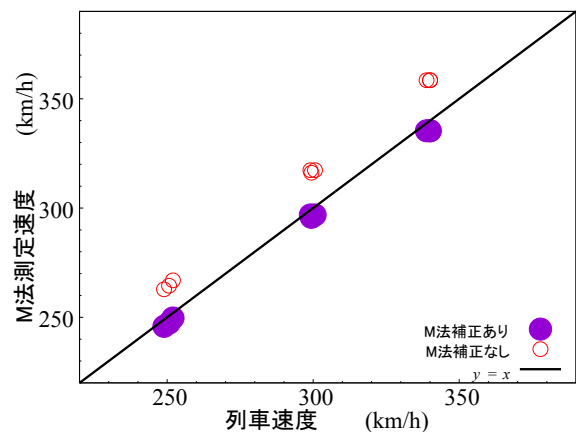


図9 M法による速度測定結果
(現地スケール $r_m = 12.5\text{m}$, $L_N = 15.7\text{m}$, $L_0 = 150\text{m}$)

頭・後尾部の相互干渉はほぼ無視でき、線音源モデルと線音源・分離評価モデルのいずれのモデルにおいても、M法の補正が可能である。

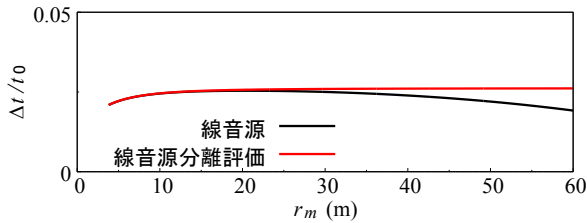


図 10 $|\Delta t/t_0|$ の計算結果
(現地スケール $L_N = 15.7\text{m}$, $L_0 = 400\text{m}$)

4. まとめ

短編成列車の通過時圧力変動に関して、模型実験と理論解析を行った。得られた圧力波形とポテンシャル理論による波形予測結果を比較し、次の知見を得た。

- ・ $r_m > 0.1L_0$ の範囲では、先頭部と後尾部の影響が重畳するため、正のピーク幅よりも負のピーク幅のほうが大きい。
- ・ 線音源モデルによる解析結果は実験結果とよく一致する。 $r_m > 0.1L_0$ においては、線音源分離評価モデルも適用可能となる。
- ・ 通過時圧力変動の 0 点距離は列車の編成長と一致しない。簡易速度測定で用いられる M 法では、列車の編成長のかわりに、ポテンシャル理論で得られる 0 点距離を用いることで、算出精度が向上する。

文献

- 1) 菊地勝浩ほか 5 名, 三次元境界要素法による列車通過時の圧力変動解析, 鉄道総研報告, Vol.10, No.2, pp.47-52, 1996
- 2) K. Kikuchi, et. al., Numerical analysis of pressure variation due to train passage using the boundary element method, Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 37 (1996), pp. 231-237.
- 3) 菊地勝浩ほか 3 名, 列車通過時圧力変動低減のための先頭部形状の空力的最適化, 日本機械学会論文集, B 編, 65 (1999), pp. 1355-1361
- 4) 菊地勝浩ほか 6 名, 明かり区間沿線における列車通過時圧力変動の低減法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.31-36, 2000
- 5) 菊地勝浩ほか 3 名, 列車通過時圧力変動の音圧波形を得るための計測法に関する研究, 日本機械学会論文集, C 編, 69 (2003), pp. 2271-2279
- 6) 菊地勝浩, 飯田雅宣, 列車通過時圧力変動の簡易な数値計算法, 日本機械学会論文集, B 編, 71 (2005), pp. 2022-2029
- 7) 土肥哲也, 小川隆申, 列車まわりの近傍圧力場に関する理論的考察, 日本機械学会論文集, B 編, 70 (2004), pp. 3082-3089
- 8) 小沢智, トンネル外列車すれちがい圧力, 浮上式鉄道 SE (その 1) 一超電導磁気支持案内 LSM 推進方式の場合: 昭和 52 年度一, 鉄道技術研究所速報, No. 80-76 付録 32 (1980), pp. 126-128
- 9) Howe, M. S., Hydrodynamics and Sound, (2007), Cambridge University Press.
- 10) S. Saito, et. al., Pressure changes generated inside and outside a tunnel with a shaft in high-speed railway, Proceedings of the 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, (2006).
- 11) T. Miyachi, et. al., Model experiment and analysis of pressure waves emitted from portals of a tunnel with a branch, Journal of Sound and Vibration, 333 (2014), pp. 6156-6169.