パンタグラフの接触力変動に与える トロリ線波動の影響に関する研究*

(第2報, 実用の架線・パンタグラフ系における走行試験)

網 干 光 雄^{*1}

Influence of Wave Motion of Contact Wire on Contact Force Fluctuation (2nd Report, Experiments in practical catenary-pantograph system)

Mitsuo ABOSHI

For high-speed operation of an electric railway, the contact loss of the pantograph is one of the important subjects. In 1st report on this research, through theoretical analyses and fundamental experiments, it is confirmed that the magnitude of the contact force fluctuation is proportional to the vertical velocity amplitude of the incident wave to the pantograph. In order to investigate the influence of the wave motion in a practical catenary-pantograph system, running experiments in the laboratory and field tests on Shinkansen line are carried out. From the results thereof, it is found that the backward wave incident to the pantograph is much more influential than the forward wave, and that the influence of the wave motion on the contact force fluctuation is large comparatively. A hanger developed to have spring and damping mechanism is found effective for reducing the wave motion of the contact wire incident to the pantograph and decreasing the contact loss ratio. It is expected that damping catenary vibration will contribute to speed-up in electric railway.

Key Words: Vibration of Moving Body, Vibration of Continuous System, Railway, Current Collection, Contact Wire, Pantograph, Wave Motion, Contact Force

1. まえがき

電気鉄道的高速化に対応するため、架線・パンタグラフ系では、高速走行時において離線の発生を少なくすることが重要な技術的課題の一つである。このためには、パンタグラフとトロリ線間に作用する接触力の変動要因を明らかにするとともに、これを低減するための改善方法の実用化が必要である。

本研究の第1報¹⁾においては、トロリ線波動がパンタグラフの接触力変動に与える影響について、理論解析及びトロリ線のみを用いた基礎的実験結果を報告した。この中で、

- (1)トロリ線を弦とみなせる周波数範囲においては、パンタグラフの接触力変動は、パンタグラフに入射するトロリ線波動の上下速度に比例する
- (2)トロリ線波動が支持点で反射しパンタグラフに入射

することにより、接触力変動が生じる

等の現象を明らかにし、パンタグラフに入射するトロリ線波動の少ない架線構造への改善が、高速走行時の接触力変動の低減に有効と考えられた。

実用の架線では、支持点のほかハンガやドロップ取付箇所における反射のため波動の伝播がより複雑となる。また接触力変動要因としては、トロリ線凹凸や摩擦振動等のトロリ線波動以外の要因も含まれていると考えられる。そこで第1報で得られた結論に基づいて、新幹線用の架線・パンタグラフを用いた走行実験²⁾や営業線での現車走行試験³⁾を実施してきた。

本論文では、実用の架線・パンタグラフ系においてトロリ線波動の影響及び架線の振動減衰による接触力変動低減効果を確認した結果を報告し、高速用架線への改善方法を提案する。

2. 集電試験装置における走行実験

実用の架線・パンタグラフ系において、トロリ線波

* 原稿受付 1997年8月20日。

^{*1} 正員, (財)鉄道総合技術研究所(☎185-8540 国分寺市光町2-8-38)。

動と接触力変動との関係を詳細に観察するため、集電試験装置 (第1報¹⁾第3.1節参照) において走行実験を実施した。

2.1 実験条件 架線構造は、現在新幹線で一般的に使用されているヘビーコンパウンド架線を用いた。支持点間隔は50m、ハンガ間隔は5mである。図1は、架線構造の概要を表す。また表1は、架線を構成する各電線の諸元を表す。パンタグラフは、新幹線用のPS200A型を使用し、走行速度は100, 120, 140, 160km/hの4速とした。

今回の走行実験においては、トロリ線の波動及びパンタグラフの接触力変動を、一般ハンガ使用時とばね・ダンパ機構を付加した防振型ハンガ使用時とで比較した。ハンガ取替区間は測定箇所を中心に5支持点間(200m)とした。

Fig.1. Construction of heavy-compound catenary system

Table 1. Parameters of heavy-compound catenary system.

	Type of wire (Cross-sectional area)	Linear density (kg/m)	Tension (kN)
Messenger wire	Galvanized steel wire strand (ST180mm ²)	1.450	24.5
Auxiliary messenger wire	Hard-drawn copper stranded conductor (PH150mm ²)	1.375	14.7
Contact wire	Hard-drawn copper grooved trolley wire (GT170mm ²)	1.511	14.7

2.2 防振型ハンガの特性と構造 防振型ハンガを使用した場合の波動伝播特性を解析するため、図2に示すように2本の無限長弦が1箇所のみでばね・ダンパ系によって結合されているモデルを考える。

ハンガのばね定数、減衰係数、質量をそれぞれ k, D, m_T, m_M またトロリ線及びちょう架線の線密度、張力を ρ_T, ρ_M, T_T, T_M とし、トロリ線の左側から波動が入射した場合のトロリ線及びちょう架線各部の変位 $y_{T1}, y_{T2}, y_{M1}, y_{M2}$ をそれぞれ、

Fig.2. Model of contact wire and hanger.

$$\left. \begin{aligned} y_{T1} &= A_{T1} \exp i\omega(t+x/c_T) + B_{T1} \exp i\omega(t-x/c_T) \\ y_{T2} &= B_{T2} \exp i\omega(t-x/c_T) \\ y_{M1} &= A_{M1} \exp i\omega(t+x/c_M) \\ y_{M2} &= B_{M2} \exp i\omega(t-x/c_M) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

とする。ただし、 c_T, c_M はトロリ線及びちょう架線の波動伝播速度で、 $c_T = \sqrt{T_T/\rho_T}, c_M = \sqrt{T_M/\rho_M}$ である。また $A_{T1}, A_{M1}, B_{T1}, B_{T2}, B_{M2}$ は波動の複素振幅を、 ω は波動の振動角周波数を表し、 i は虚数単位である。

$x=0$ における変位一致及び力のつりあいの境界条件から、ハンガ点に入射するトロリ線波動振幅 B_{T1} に対する反射波の振幅 A_{T1} の比、すなわちトロリ線波動の複素反射係数 R は式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} R = \frac{A_{T1}}{B_{T1}} &= -\frac{\delta}{Z_T + \delta} \\ \delta &= i\omega m_T + \frac{1}{\frac{1}{Z_M + i\omega m_M} + \frac{1}{D + k/i\omega}} \\ Z_T &= 2\sqrt{\rho_T T_T}, Z_M = 2\sqrt{\rho_M T_M} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 Z_T, Z_M はトロリ線及びちょう架線の加振点インピーダンスである。一方、入射波の単位長さあたりの振動エネルギーの時間平均 E_i は、

$$E_i = \frac{1}{2} \rho_T \omega^2 |B_{T1}|^2 \dots \dots \dots (3)$$

で表され、同様にして透過波、反射波、ちょう架線への伝達波のエネルギー総和 E_o を求めることができる。これらから、ハンガにおけるエネルギー減衰比率 μ は、式(4)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu = \frac{E_i - E_o}{E_i} &= \frac{s_1 D}{s_2 D^2 + s_3 D + s_4} \\ s_1 &= 2Z_T(Z_M^2 + m_M^2 \omega^2) \\ s_2 &= (Z_T + Z_M)^2 + (m_T + m_M)^2 \omega^2 \\ s_3 &= 2(Z_T + Z_M)Z_T Z_M + 2(Z_T m_M^2 + Z_M m_T^2) \omega^2 \\ s_4 &= \{Z_T Z_M + k(m_T + m_M) - m_T m_M \omega^2\}^2 \\ &\quad + \{Z_T(m_M \omega - k/\omega) + Z_M(m_T \omega - k/\omega)\}^2 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

今回の走行実験では、図3に示す2種類の防振型ハ

Fig.3. Composition of damping type hanger.

Table 2. Parameters of damping type hanger.

	Spring constant (kN/m)	Damping factor (Ns/m)	Mass (kg)	Mass (kg)
	k	D	m_M	m_T
Ordinary hanger	∞	0	0	0.2
Rubber damping hanger	55	50	0	0.2
Friction damping hanger	2.7	100	0.5	0.3

ングを用いた。ダンパハンガ(Friction damping hanger)はコイルばねを用いており、ばね定数を比較的小さくすることが可能である。減衰機構は、円筒内径とピストンリング間のしゅう動摩擦力を利用している。一方、防振ハンガ(Rubber damping hanger)は、特に経済的で簡素な設備を目指して開発したもので、ハンガ天頂部に防振ゴム(CR)を加硫接着した構造である。表2は、今回の実験で使用した防振型ハンガのばね定数、減衰係数等を表す。これらの値は、ハンガイヤー部に5kgの重りを下げて自由振動させた場合の振動波形から求めたものである。

パンタグラフに入射するトロリ線波動を軽減するためには、ハンガ点における複素反射係数の絶対値（以後、単に「反射係数」と言う）が小さくかつエネルギー減衰比率が大きいことが望ましいと考えられる。これらの防振型ハンガは、周波数によって特性が異なるが、一般ハンガに比べてトロリ線波動の反射が少なくかつ減衰させる機能を有する。

2.3 測定方法 図4は、加速度計取付位置等の測定条件を表す。測定区間は支持点間のほぼ中央付近とし、ハンガ間の起点側及び終点側のトロリ線にそれぞれ2個1組の上下加速度計を取り付ける。これらから、パンタグラフに入射するトロリ線波動を測定する

Fig.4. Condition of measurement

とともに、パンタグラフの接触力を同時に測定しこれらを比較する。なおV12_F, V56_Fは、それぞれA12点, A56点を通るトロリ線の進行波（パンタグラフ進行方向に伝播する波動）を、またV34_G, V78_Gは、それぞれA34点, A78点を通る後退波（パンタグラフ進行方向と逆方向に伝播する波動）を表す。

式(5)に示すように、パンタグラフに入射するトロリ線波動 y の振幅を B_1 、振動角周波数を ω_b とすると、トロリ線が弦とみなせる周波数範囲においては、トロリ線波動による接触力変動の大きさ F_P は式(6)で表され、パンタグラフ（移動座標系）から見たトロリ線波動の上下速度 $(1 \pm \beta)\omega_b B_1$ に比例することを第1報¹⁾で明らかにした。

$$y = B_1 \exp\{i\omega_b(t \pm x/c_T)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F_P = -i(1 \pm \beta)\omega_b B_1 Z \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Z = \frac{1}{1/Z_T + 1/Z_P}$$

なお、 β はパンタグラフ走行速度 v のトロリ線波動伝播速度 c_T に対する比($\beta = v/c_T$)であり、 Z_P はパンタグラフの機械インピーダンスである。+符号はパンタグラフ進行方向前方から後退波が入射する場合を、また-符号は後方から進行波が入射する場合についてそれぞれの場合を表す。

トロリ線波動を伝播方向別に分離する方法、トロリ線波動の上下加速度を上下速度に変換して接触力を推定する方法、またパンタグラフの接触力を測定する方法は、第1報で用いた方法と同じである（第1報¹⁾第3.2～3.3節参照）。なお接触力の周波数範囲は40～

Fig.5. Result of experiment (100km/h, Friction damping hanger)

Fig.6. Relation between contact force and contact force(wave).

60Hzとし、一方、パンタグラフに入射するトロリ線波動については、これと同じ周波数範囲とするためにドップラー効果を考慮して限定した。この周波数範囲の上限はトロリ線を弦とみなせる範囲に限定するためであり、下限はパンタグラフ近傍のトロリ線曲げ剛性の影響を防ぐためである。

2.4 実験結果及び考察 図5は、時間軸に対する各測定波形例を表す。V_{FP}, V_{GP} は、パンタグラフから見たトロリ線波動の上下速度で、それぞれ進行方向前方から入射する後退波、進行方向後方から入射する進行波を表し、V_Pはこれらの総和である。なおこれらは、V_{78_G}, V_{34_G}, V_{56_F}またはV_{12_F}が減衰せずに伝播してパンタグラフ点に入射するものと仮定している。ここでは、「接触力」はパンタグラフ舟体に取り付けたロードセル及び加速度計を用いて計測した接触力を、また「接触力(波動)」はトロリ線波動V_Pから式(6)で推定した接触力を表す。ただし、パンタグラフに入射する波動が測定できるのは、加速度計取付位置のA56～A78間及びA12～A34間をパンタグラフが走

Fig.7. Comparison of wave motion incident to the pantograph.

Fig.8. Reflection factors of wave motion.

行する間のみに限られる。なお、走行実験の速度は100～160km/hで、 $\beta=0.28\sim0.44$ である。

第1報¹⁾で示した基礎の実験では、接触力波形と接触力(波動)波形に強い相関が見られたことから、ここではそれぞれの標準偏差を用いて評価する。図6は、全走行試番の接触力標準偏差に対する接触力(波動)の標準偏差を表す。この値は2ハンガ間で測定された結果の平均値を示しており、速度が高いほど接触力の標準偏差が大きい。トロリ線波動から推定した接触力(波動)の標準偏差と直接測定した接触力標準偏差には強い相関関係が見られ、相関係数は0.84である。また接触力(波動)の標準偏差は、接触力標準偏差の約8割程度を占めており、接触力変動全体に占めるトロリ線波動の影響が大きいことが分かる。

図7は、各ハンガ種別に対するパンタグラフに入射するトロリ線波動の上下速度及び接触力の標準偏差を表す。これらの値は100～160km/h走行時の平均値を示しており、入射波動については進行波と後退波の内訳

を示している。これらから、パンタグラフに入射するトロリ線波動は進行方向前方から入射する後退波の影響が大きいことが分かる。また防振型ハンガを用いることにより、パンタグラフに入射する波動、特に後退波が低減し、その結果、接触力変動が低減する効果が認められる。

図8は、各ハンガ使用時の周波数に対する反射係数及びエネルギー減衰比率を表す。これらは、ヘビーコンパウンド架線のトロリ線と補助ちょう架線の間に式(2)、(4)を適用した場合の計算結果である。また同図には、反射係数の実測値をあわせて示す。なおこの実測値は、第5ハンガに入射するトロリ線波動V78_FとV78_G、V12_GとV12_Fの相互相関係数の平均値を求めたものである。ただし、入射波V78_FとV12_Gとの相関係数は考慮したが、これらと補助ちょう架線からの入射波との関係は考慮していない。反射係数の計算値と実測値は、40～60Hzの限られた周波数範囲ではあるが概ね計算値と合致している。

防振型ハンガ使用時のパンタグラフに入射するトロリ線波動が一般ハンガ使用時に比べて低減したのは、防振型ハンガの波動反射抑制並びにエネルギー減衰機能によるものと考えられる。しかしこの周波数範囲でダンパハンガを使用した場合の低減効果が大きい理由を説明するためには、反射係数とエネルギー減衰比率の総合的な評価方法の確立や防振型ハンガの減衰係数に関する最適値を検討する必要がある。周期的に結合された複数本の弦に走行力が作用した際の波動伝播と減衰に関する検討が今後の課題と考えている。

3. 山陽新幹線における現車走行試験

実際の新幹線では走行速度が200km/h以上と高く、また1列車あたりのパンタグラフも複数個が一般的である。これらの条件でのトロリ線波動の影響を確認するとともに、架線の振動減衰による離線低減効果を確認するため、1996年5月山陽新幹線徳山～小郡間上り線で現車走行試験を実施した。

3.1 試験条件 架線構造は、ヘビーコンパウンド架線（ただし、トロリ線の張力は19.6kNに増加）、パンタグラフはPS201型(0系, 100系), PS203型(300系)で1列車あたり2～8個である。走行速度は200～270km/h程度であり、 $\beta=0.48\sim0.65$ である。

ハンガ種別は、一般ハンガと防振ハンガの2条件とし、これらを比較した。ハンガ取付区間は測定箇所を中心に約1k250mの区間であり、ハンガ取替前後に同一箇所での測定を行い比較した。

Fig. 9. Condition of measurement (Sanyo Shinkansen)

Fig. 10. Field test in Sanyo Shinkansen line.

Fig. 11. Example of measured wave of contact wire.

3.2 測定及び評価方法 図9は、加速度計取付位置等の測定条件を表す。加速度計は、ハンガ間の中央付近にそれぞれ2個1組の上下加速度計を取り付け、

テレメータにより地上に送信して測定した。図10は、現車走行試験実施状況を表す。

トロリ線波動の測定方法及び処理方法については、第2章と同様であるが、波動の分離方法については時間差法⁴⁾を用いている。図11は、時間軸に対するトロリ線波動の上下速度の測定波形例を表す。

パンタグラフに入射するトロリ線波動の評価として、各パンタグラフ通過直前の後退波V12_G, V34_Gの上下速度を用いる。これらは通過前25m間走行中の標準偏差を2箇所の平均値で表す。トロリ線波動のうち後退波のみで評価するのは、式(6)で示したように、走行速度が高くなるほど接触力変動に与える後退波の影響が大きいと考えられるからである。

パンタグラフの接触力を直接測定することができないため、今回の試験ではパンタグラフの離線率を測定した。離線率は、地上に設置したカメラで離線時のアーク光を検出する光量式離線測定方法⁵⁾を用いて夜間に測定した。測定範囲は、第1～6ハンガ間の25m間とした。なお測定は、パンタグラフ間に高圧母線の無い0

系電車（惰行を除く）に限った。

3.3 試験結果及び考察 図12は、先頭パンタグラフからの距離に対する各パンタグラフ通過前の後退波上下速度の標準偏差を表す。これらは、各列車種別毎に一般ハンガ使用時における平均値であり、凡例中()内は平均速度を示す。パンタグラフ通過前の後退波は後続パンタグラフほど大きく、またパンタグラフ間隔が短いほど大きい傾向が見られる。これはこれまで各地で観測された離線率の一般的傾向⁶⁾に合致する。

図13は、0系電車各パンタグラフの離線率に対する当該パンタグラフ通過前の後退波上下速度標準偏差を表す。これらの中には比較的強い相関関係が見られ、相関係数は0.68である。また、防振ハンガを用いることにより後退波が低減し、離線率が低減する効果が見られる。接触力の標準偏差と離線率に強い相関関係がある⁶⁾ことから、今回の試験結果は、高速走行時において主にトロリ線波動がパンタグラフの接触力変動や離線に強い影響を与えていることを示すものと考えられる。

Fig.12. Relation between backward wave and pantograph order.

Fig.14. Effect of reducing backward wave motion.

Fig.13. Relation of contact loss and backward wave motion.

Fig.15. Effect of reducing contact loss ratio (0 series).

図14は、列車速度に対するパンタグラフ通過前の後退波上下速度標準偏差を表す。これらは、0系、100系、300系電車の1列車各パンタグラフの平均値を示す。防振ハンガを用いることにより、後退波上下速度の標準偏差は平均で40%程度の低減効果が見られる。

図15は、0系電車のパンタグラフ順位に対する離線率を表す。これらの値は0系各列車の測定値を平均したもので、平均速度はいずれの場合も216km/hで同じである。パンタグラフの離線率は0系電車の場合で約1/4に低減し、各列車の平均離線率は概ね1%程度に改善される。架線の振動減衰がパンタグラフの離線低減に効果的であることを示している。

4. 高速用架線への改善方法

これまで述べた実用の架線・パンタグラフ系における走行試験結果から、高速走行時のトロリ線波動が接触力変動に大きな影響を与えていることが示された。しかしトロリ線波動以外にもトロリ線凹凸等の接触力変動要因も考えられるため、本章では、トロリ線凹凸やトロリ線波動と接触力との関係をモデルを用いて解析し、上述の試験結果を検証するとともに高速用架線への改良方法を提案する。

4.1 高速走行時の接触力変動 列車速度がトロリ線の波動伝播速度の0.7~0.8倍程度を超えると、パンタグラフの離線率が急激に増加する傾向があることが知られている⁷⁾。このため新幹線営業列車の最高速度はこの速度以下で運行されており、これが事実上の架線の上限速度となっている。

図16に示すように、トロリ線を無限長の弦とし、波長 λ 、片振幅 a の凹凸のあるトロリ線下をパンタグラフが速度 v で接触して走行する場合を考える。トロリ線凹凸による接触力変動 F_1 は式(7)で、またこれにより励起されたトロリ線波動が進行方向前方で反射して当該

Fig.16. Model of pantograph and contact wire.

パンタグラフに入射した場合（反射係数 γ_R とする）の接触力変動 F_2 は式(8)で表される⁸⁾。

$$|F_1| = |\mu| |Z_T| a \omega_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$|F_2| = \frac{1+\beta}{1-\beta} |\mu|^2 |\gamma_R| |Z_T| a \omega_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ただし, } \mu = \frac{Z_p}{Z_T + Z_p}, \omega_0 = \frac{2\pi v}{\lambda}$$

図17は、無次元化速度 β に対する接触力変動の大きさ $|F_1|$ 及び $|F_2|$ の計算例を表す。 $|F_1|$ は走行速度とともに単調に増加するのに対して、 $|F_2|$ は、 $\beta=0.7\sim0.8$ 程度を超えると急激に増加する傾向を示す。これはドップラー効果によりトロリ線波動の波長が相対的に短くなり上下速度が大きくなるためである。このことから、高速走行時には、トロリ線波動による接触力変動が比較的大きな要因を占め、トロリ線の波動伝播速度に近づくと急激に増加する傾向を示すと考えられる。

このことは、上述の現車走行における β に対する離線発生傾向とも合致する。また今回の走行試験においても接触力変動全体に占めるトロリ線波動の影響が大きいという結果を裏付けるものと考えられる。

Fig.17. Speed dependency of contact force fluctuation
($\mu=1$, $Z_T=300\text{Ns/m}$, $\gamma_R=0.5$, $a=0.001\text{m}$, $c=100\text{m/s}$)

4.2 高速用架線への改善方法の提案 式(8)から、

高速集電性能の良好な架線構造として、

- (1)トロリ線の波動伝播速度が高い
 - (2)トロリ線の機械インピーダンスが小さい
 - (3)トロリ線の凹凸が小さい
 - (4)トロリ線波動の反射が少なく減衰が大きい
- 等の条件を挙げることができる。

現在の新幹線300km/h運転用架線は、トロリ線の波動伝播速度を高めるため、TAトロリ線やCSトロリ線を用いた軽量・高張力架線が採用されている⁹⁾。またト

ロリ線凹凸を小さくするため、トロリ線波状摩耗対策も進められてきた¹⁰⁾。本研究では、パンタグラフに入射するトロリ線波動を低減することによりさらに高速性能を向上させることが可能であることを明らかにした。したがって高速用架線構造として、防振型ハンガを使用するなどしてトロリ線波動の反射が少なくかつ減衰の大きい構造へ改良することが望ましいと考えられる。架線の振動減衰技術を適用することにより、電気鉄道的高速化のほか、離線低減によるパンタグラフすり板等の摩耗軽減、架線部材の長寿命化等への寄与が期待される。

なお上記 γ_R については、架線構造の波動伝播特性を示す係数と考えられるが、これらの詳細な検討は第2.4節で述べたように今後の課題である。またその他の架線振動減衰方法についても、今後検討を重ね実用化を進めたいと考えている。

5. 結 論

トロリ線波動がパンタグラフの接触力変動に与える影響について、実用の架線・パンタグラフを用いた高速走行試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) パンタグラフに入射するトロリ線波動と接触力変動には強い相関関係が見られる。また接触力変動全体に占めるトロリ線波動の影響が大きく、特に後退波によるものが大きい。
- (2) パンタグラフに入射するトロリ線波動の上下速度は、後続パンタグラフほどまたパンタグラフ間隔が短

いほど大きく、これまで観測されている離線発生傾向と合致する。

(3) 防振型ハンガを用いることにより、パンタグラフに入射するトロリ線波動が軽減し、その結果パンタグラフの接触力変動及び離線率が低減する。

(4) 高速架線への改善方法として、トロリ線波動伝播速度の向上に加えて、防振型ハンガを使用するなどしてトロリ線波動の軽減が有効である。

最後に、現車走行試験でご協力いただいた西日本旅客鉄道(株)の関係者の方々並びに本研究を進めるにあたってご指導いただいた慶応義塾大学理工学部吉田和夫教授に謝意を表す。

文 献

- (1) 網干, 機論, 63-614, C(1997), 90-96.
- (2) 網干, 機講論, No.97-10(1997), B625-626.
- (3) 網干・西野, 機講論, No.97-12(1997), 59-60.
- (4) 網干, 機講論, No.96-51(1996), 105-106.
- (5) 仲間・ほか2名, 鉄研報告, No.1251(1983).
- (6) 大浦・ほか3名, 電気学会論文, 107-3, D(1987), 328-335.
- (7) 真鍋, 機論, 55-512, C(1989), 950-958.
- (8) 網干, 電気学会研究会, TER-97-12(1997), 19-24.
- (9) 保科・ほか3名, 電気学会研究会, TER-97-5(1997), 25-28.
- (10) 藤井・ほか3名, 鉄道総研報告, 6-9(1992), 5-12.