

パンタグラフのアクティブ制御のための 制御パラメータ最適化手法

小林 樹幸* 山下 義隆* 池田 充**
増田 新*** 射場 大輔***

Optimization of Control Parameters for Active Control Pantograph

Shigeyuki KOBAYASHI Yoshitaka YAMASHITA Mitsuru IKEDA
Arata MASUDA Daisuke IBA

For the improvement in speed, many problems have to be solved for the current collection system. Not only aeroacoustic noise of a pantograph but also contact force fluctuation between a pantograph and the contact wire has to be reduced. Therefore, using the pantograph with active control techniques is effective approach to the reduction of contact force fluctuation. This study proposes feed-forward control technique for reducing contact force fluctuation, based on the information about support spans and train running speed. In order to control the pantograph efficiently, magnitude and phase lag of the control force acting on the pantograph frame have to be optimized. This study utilizes the steepest descent method to optimize the control parameters.

キーワード：パンタグラフ，接触力制御，最急降下法

1. 緒 言

電気鉄道的高速化を実現するためには克服すべき課題が多くある。パンタグラフ舟体とトロリ線との間に生じる接触力の変動もその一つである。接触力変動は走行速度の増加に伴い大きくなり¹⁾、著大な接触力変動はすり板とトロリ線の離線を引き起こすため車両への安定した電力供給を妨げるだけでなく、離線に伴うアーク放電によってすり板やトロリ線の損耗が促進される。このような接触力変動の増加に対しては、架線の高張力化などの対策が講じられており²⁾ 現在に至っている。また一方で、パンタグラフから生じる空力音の増加に関する対策も重要な課題の一つである。パンタグラフにおける形状平滑化は空力音の低減手法に対する有効な手段の一つであるが、形状平滑化を追求すると舟体を支持する復元ばねに十分なストロークを与えることが難しくなったり、場合によっては復元ばねを省略してすり板の微動ばねのみを設けたりすることが必要となるため、パンタグラフのトロリ線に対する追従性能を向上することが難しくなる。すなわち、更なる速度向上にむけて空力音低減と接触力変動の低減を両立するためには、パンタグラフの構造変更という受動的な対策だけでは限界が生じる。その

ため、パンタグラフへ制御技術を適用することで接触力変動を低減する手法が有用であると考えられる。

パンタグラフの制御手法として著者らは、PID 制御³⁾ やインピーダンス制御⁴⁾ の適用について検討を行ってきた。PID 制御においては、アクチュエータの遅れ特性により適用可能な周波数範囲が限定的であるという課題があり、インピーダンス制御では制御対象周波数以外における追従性能の悪化が課題である。そこで、鉄道は架線などの地上設備に関する情報が既知であることを利用し、地上設備に起因する接触力変動の卓越周波数を与えたフィードフォワード制御（以下、FF 制御）の適用を試みた。本研究では、架線を支持する電柱間隔（以下、支持点間隔）におけるトロリ線の剛性変化に起因した接触力変動を対象とする。従って、支持点間隔と走行速度とを照査することで制御対象とする接触力変動の周波数を既知とすることが可能となる。しかし一方で、制御ゲインや位相については舟体へ作用する接触力変動の振幅値や制御対象とする周波数に応じて適切な値を与える必要がある。Abdullah らによって FF 制御に基づいたパンタグラフの接触力制御手法は検討されているが⁵⁾、制御ゲインや位相といった制御パラメータは全点探索によって決定されており、詳細な決定方法については言及されていない。本研究では、これらの制御パラメータを最急降下法に基づいて最適化する手法を提案し、前述のアクチュエータの遅れを適応的に補償することを可能とす

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 鉄道力学研究部

*** 京都工芸繊維大学（大学院工芸科学研究科）

特集：鉄道力学

る。なお本研究は制御手法の基礎検討という位置づけのため、架線の動特性は考慮しないものとした。すなわち、支持点が到来する周波数と同じ周波数を有する正弦波が舟体に強制変位として与えられるものとした。

2. 最適化手法

架線やパンタグラフの力学モデルを高精度に構築することができれば、制御パラメータを事前に決定することが可能となる。しかし実際にはこれらが有する非線形性や不確実性によって事前の決定は困難である。そのため本研究では非線形最小二乗法の一つである最急降下法を用いて制御パラメータを適応的に決定する。本章では、最初にアクティブ制御機構を有するパンタグラフの試作機に関する概要と制御手法について述べる。次に最急降下法による制御パラメータの探索手法について述べる。

2.1 パンタグラフの制御機構

本研究で使用したアクティブ制御機構を有するパンタグラフ³⁾の概要を図1に示す。このパンタグラフは、電気絶縁が容易な空気圧アクチュエータを採用しており、主ばねと並列に設置された空気圧アクチュエータの軸力によって主軸へ回転トルクを作用させ、接触力を制御する構造になっている。この系の力学モデルは図2のように表される。ただし質点1と質点2における質量 m_1 、 m_2 はそれぞれパンタグラフ舟体と枠組の等価質量、 x_1 および x_2 はそれらの上下変位である。 k と c_1 はそれぞれ舟体内の復元ばねのばね定数とエネルギー散逸を表現するための減衰定数、 c_2 はパンタグラフダンパの減衰定数であり、 p_0 は主ばねによる静押上力を、 f_a はアクチュエータによる制御力を表している。前述のように本研究では、質点1に対して架線の支持点到来周波数を有する変位で強制加振した際の接触力変動を制御対象とする。

$$x_1 = X_1 \sin \omega t \tag{1}$$

$$\omega = 2\pi \frac{v}{L} \tag{2}$$

ただし X_1 は強制変位の振幅を表し、 ω は走行速度 v と支持点間隔 L によって式(2)のように表される支持点の到来周波数である。制御指令信号には次式で表される正弦波を使用する。

$$u = A \sin(\omega t + \phi) \tag{3}$$

ただし A は制御ゲイン、 ϕ は強制変位入力に対する位相差を表す。これらのうち A と ϕ が最適化の対象となる制御パラメータであり、次節でこれらの探索方法について記す。

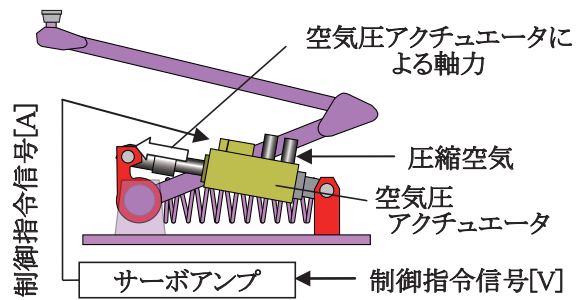


図1 アクティブ制御パンタグラフの概要

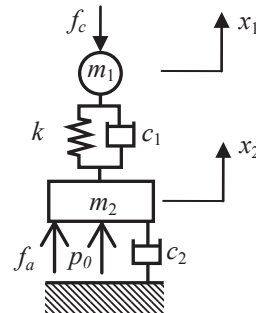


図2 アクティブ制御パンタグラフの力学モデル

2.2 最急降下法に基づく制御パラメータ探索手法

最急降下法のアルゴリズムは比較的簡単であるが、局所解に陥りやすいなどの欠点も存在する⁶⁾。しかし、2.3節で後述するようにパンタグラフを線形系、架線を剛体として扱う場合には接触力変動を最小化する制御力の与え方は一意に決まることから、最適化手法として最急降下法が有効であると考えた。また、本研究で扱うパンタグラフの接触力に関しては、制御パラメータの摂動に対する目的関数の変化量（以降、感度）は後述するように走行状態においても比較的容易に得ることが可能である。

最急降下法は各反復において目的関数の減少が最大となる方向へパラメータを修正する方法であり、反復 i から $i+1$ へのパラメータ更新は次式で行う。

$$\begin{Bmatrix} A \\ \phi \end{Bmatrix}^{(i+1)} = \begin{Bmatrix} A \\ \phi \end{Bmatrix}^{(i)} - \alpha \begin{Bmatrix} \frac{\partial |F_c(\omega)|^2}{\partial A} \\ \frac{\partial |F_c(\omega)|^2}{\partial \phi} \end{Bmatrix}^{(i)} \tag{4}$$

ただし $F_c(\omega)$ は接触力変動の複素振幅であり、最適化問題の目的関数を $|F_c(\omega)|^2$ とする。ただし、これ以降に記す大文字の変数は周波数領域の値であるものとし、 (ω) を省略する。また、 α はパラメータ更新時の倍率を決定する係数である。

最急降下法によるパラメータ探索のフローチャートを図3に示す。最急降下法では式(4)に示すように目的関数のテーラー展開における2次以上の項を無視するが、パラメータの変更量が大きすぎると2次以上の項を無視できなくなり、目的関数が増加する場合も考えられる。そのような場合には変更量を減少させて目的関数が減少するように修正を加える。

2.3 最急降下法の収束性

本節では図2に示すパンタグラフモデルの A と ϕ に対する $|F_c|^2$ の感度を解析的に求め、これを用いて最急降下法による反復計算を行ってパラメータを探索する。その結果を、解析的に得られる制御パラメータの最適解と比較することにより、最急降下法の収束性を検証する。

図2の質点1へ強制変位入力 x_1 を与えた時に生じる接触力変動の A および ϕ に対する感度は、それぞれ次式で解析的に与えられる。

$$\frac{\partial |F_c|^2}{\partial A} = (UV^*e^{-j\phi} + U^*Ve^{j\phi})X_1 + 2|V|^2 A \quad (5)$$

$$\frac{\partial |F_c|^2}{\partial \phi} = j(-UV^*e^{-j\phi} + U^*Ve^{j\phi})X_1 A \quad (6)$$

ただし $*$ は複素共役、 X_1 は x_1 の複素振幅を表す。また U と V は式(7)に示すように、図2のモデルの強制変位を入力として接触力変動 f_c を出力とした伝達関数、および制御力 f_a を入力として接触力変動 f_c を出力とする伝達関数をそれぞれ表している。

$$F_c = UX_1 + VF_a \quad (7)$$

ラプラス演算子 s を用いて U と V はそれぞれ式(8)と式(9)のように表される。

$$U = -(m_1s^2 + c_1s + k) + \frac{(c_1s + k)^2}{m_2s^2 + (c_1 + c_2)s + k} \quad (8)$$

$$V = \frac{c_1s + k}{m_2s^2 + (c_1 + c_2)s + k} \quad (9)$$

パンタグラフの各定数を $m_1=10.3\text{kg}$, $m_2=11.2\text{kg}$, $k=14700\text{N/m}$, $c_1=c_2=120\text{Ns/m}$, $p_0=54\text{N}$ とし、質点1へ与える強制変位入力の加振周波数を 2Hz 、加振振幅を 10mm 、 $\alpha = 0.05$ としてシミュレーションを行なった。 A と ϕ の初期値をそれぞれ 0 としたときの解の探索結果を図4に示す。図4のグラフは A と ϕ のそれぞれの組み合わせに対する接触力変動をコンターで示しており、各反復において得られた制御パラメータを○印で表している。式(5),(6)をそれぞれ 0 とおくことで制御パラメータの最適値を式(10),(11)のように解析的に得ることが可能である。グラフ中における×印はこのようにして得られた最適値を表しており、この制御パラメータで制御を行った場合に接触力変動は極小値を示す。

$$A_{opt} = -\frac{(UV^*e^{-j\phi_{opt}} + U^*Ve^{j\phi_{opt}})}{2|V|^2} X_1 \quad (10)$$

$$\phi_{opt} = \frac{\log \frac{UV^*}{U^*V}}{2j} \quad (11)$$

図4において、探索されたパラメータは理論的な最適

解へ向かっていることがわかる。このようにパンタグラフを線形系とし、舟体に強制変位が作用する場合には、式(10)と式(11)のように接触力変動のある周波数成分を最小にする制御パラメータは一意的に決定されるうえ、局所的な最適解も存在しないことから、最適化手法として最急降下法が有効である。

2.4 最適解の物理的解釈

接触力変動を最小化する制御パラメータ A_{opt} , ϕ_{opt} の解析的な求め方は式(10),(11)に示すとおりだが、これらの式をさらに変形すると次式のように書ける。

$$A_{opt} = \pm \frac{X_1}{|G_{12}|} \quad (12)$$

$$\phi_{opt} = -\arg(G_{12}) \quad (13)$$

ただし式(12)の正負は U, V の正負によって決定するものであり、 G_{mn} は次式で表される相互コンプライアンスである。

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_c \\ F_a \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ただし F_a と X_2 はそれぞれ、制御力 f_a と x_2 の複素振幅を

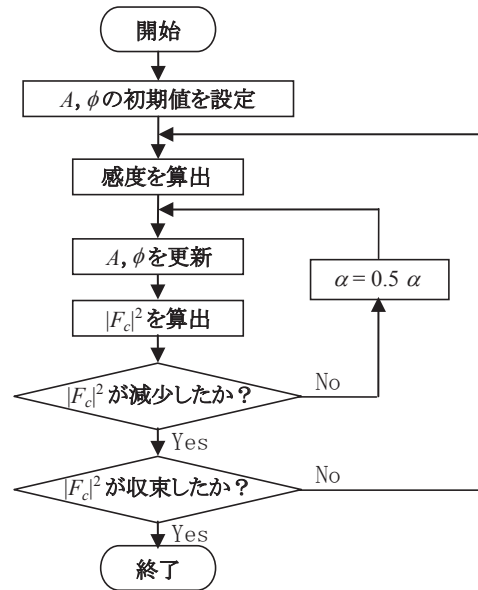


図3 最急降下法のフローチャート

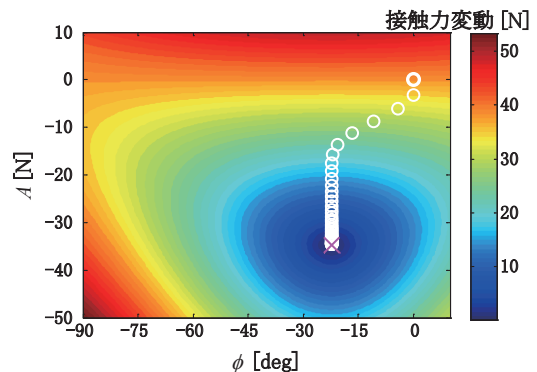


図4 パラメータ探索履歴

特集：鉄道力学

表す。これら最適値の物理的な意味は以下のように考えられる。強制変位入力を受ける図2の系において接触力 f_c を一定値 p_0 にするためには、制御力 f_a によって質点 m_1 に変位 x_1 を生じさせることができればよい。つまり A_{opt} は、質点2を入力点とし、質点1を出力点とする相互コンプライアンス G_{12} を用いて式(12)により得られる。一方、 ϕ_{opt} は強制変位入力と同じ位相をもつ変位を質点 m_1 に発生させればよいので、式(13)によって与えられる。

このように、架線が剛体として表される場合には最適な制御パラメータは式(12)、(13)に示すようにパンタグラフの伝達関数のみによって与えられる。しかし、実際には4章で述べるアクチュエータの摩擦や、アクチュエータの指令電圧依存性などの非線形性があるため、最急降下法を用いて適応的に制御パラメータを決定する方法が有用であると考えられる。

3. シミュレーションによる検証

2章では解析的に得られた感度を用いてパラメータ探索を行い、最急降下法の収束性について検証した。しかしパンタグラフ実機への適用を考える場合には解析的に感度を与えることは困難であるため、本研究では A と ϕ の値をそれぞれ交互に増加させ、その結果生じる接触力の差分を近似的に感度とする方法を適用する。本章では、シミュレーションに対してこの方法を適用することで、その妥当性について検討を行う。シミュレーションには Simulink を使用し、逐次積分の時間間隔は 1/1000sec とする。

3.1 シミュレーション方法

本シミュレーションでは図2に示す力学モデルを対象とし、第2章と同様に質点1に対して周波数 2Hz、振幅 10mm の強制変位入力を与えたときの接触力変動を最小化する制御パラメータを探索する。

前述のように、本シミュレーションでは実際に A と ϕ をある一定量変化させ、その結果生じる接触力の変化を用いて次式のように感度を算出する。

$$\frac{\partial |F_c|^2^{(i)}}{\partial A} = \frac{|F_c|^2 \Big|_{\phi^{(i)} + \delta A} - |F_c|^2 \Big|_{\phi^{(i)}}}{\delta A} \tag{15}$$

$$\frac{\partial |F_c|^2^{(i)}}{\partial \phi} = \frac{|F_c|^2 \Big|_{\phi^{(i)} + \delta \phi} - |F_c|^2 \Big|_{\phi^{(i)}}}{\delta \phi} \tag{16}$$

シミュレーションにおいては、 δA 、 $\delta \phi$ の値として極端に大きな値を用いない限りはパラメータが最適解に収束するものと思われるが、後述する加振試験の場合には δA 、 $\delta \phi$ の値が小さすぎると空気圧アクチュエータの摩擦の影響で接触力に変化が生じず、感度を求められないため適切な値の設定が必要であると考えられる。そこで、

本シミュレーションでは A と ϕ の初期値はそれぞれ 0 とし、 δA は 0.1N、 $\delta \phi$ は 1° とする。

最急降下法によるパラメータ探索を行うためには、接触力変動の複素振幅 F_c を適宜取得する必要がある。本研究では、バンドパスフィルタ（以下、BPF）を用いて制御対象周波数近傍で帯域制限を施した接触力波形の RMS 値を $|F_c|$ とした。 A と ϕ を一定量変化させる時間は 2 秒間ずつとし、この間における接触力変動の RMS 値を用いて感度を算出する。実際に δA 、 $\delta \phi$ の値を変化させている様子を図5に示す。 A を変化させる前の 2 秒間において、パラメータを変化させる前の状態における接触力を評価する。その後 A と ϕ をそれぞれ独立して変化させ、この結果から得られた感度を用いて 6 秒後の時点で同時に A と ϕ の更新を行い、再び上記の試行を繰り返す。

このように3回のステップにおいて接触力を評価するが、いずれにおいても制御パラメータの変化によって生じる過渡的な現象の影響は避けるべきである。そのため、図5の網線部で示すように、制御パラメータを変化させてから 1 秒経過後から 1 秒間の接触力波形を用いて $|F_c|$ を求めた。

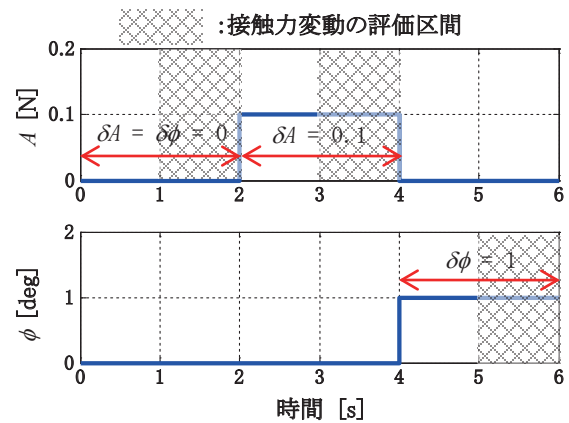


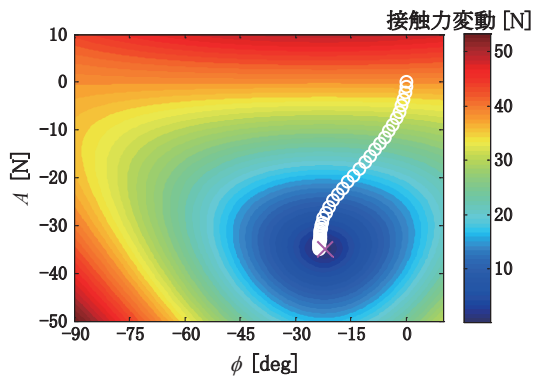
図5 パラメータの増加量

3.2 シミュレーション結果

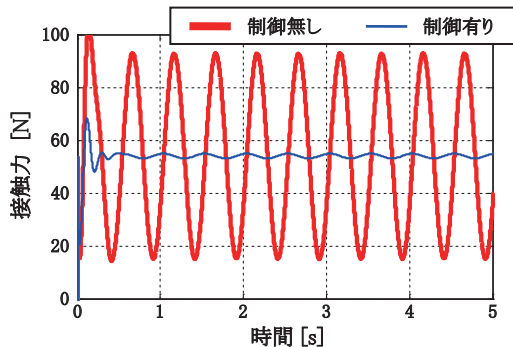
3.1節の試行を 50 回繰り返した結果を図6に示す。図6(a)は初期値から最適値近傍への収束状況を示している。計算終了時には $A = -34.9\text{N}$ 、 $\phi = -23.6^\circ$ というパラメータの探索結果が得られており、このパラメータを使用して得られる接触力と、制御無しの状態との比較を図6(b)に示す。制御無しの状態における接触力の p-p 値は約 61N であるのに対し、得られたパラメータを用いて制御を行うと p-p 値は 1.9N となり、約 97% の接触力変動低減効果が得られている。

4. パンタグラフ総合試験装置による検証

すり板と架線が実際にしゅう動している状態において、最急降下法による制御パラメータの探索と制御効果の確認を行うために、実機パンタグラフを用いた模擬走行試験を実施した。本章ではこの試験結果について述べる。



(a) パラメータ探索履歴



(b) 接触力の比較

図6 シミュレーション結果

4.1 試験方法

本試験には鉄道総研所有のパンタグラフ総合試験装置を用いた(図7)。この試験装置は回転する円盤の円周部底面に模擬トロリ線が取り付けられており、これとすり板をしゅう動させて走行状態を模擬している。また、架線の押上りを模擬するために、円盤が回転した状態で上下方向に正弦波状に加振することができる。さらに、架線のまくらぎ方向の偏位を表現するために、円盤全体をまくらぎ方向に対して両振幅365mmで揺動させることができる。本試験では表1に示すように円盤周速度を100km/h(試験条件1)、300km/h(試験条件2)の2通りとし、円盤の上下方向加振周波数をそれぞれ0.55Hzと1.7Hzとした。これらの加振周波数は、50mの支持点間隔における支持点到来周波数に相当する。

使用したパンタグラフは図1に示した空気圧アクチュエータを台枠に備えたシングルアームパンタグラフ(図7)であり、接触力を測定するために舟体内部に2個のロードセルを組み込んでいる(図8)。本試験では、これらのロードセルによる測定値の和を接触力として用いた。

本試験装置によって測定される接触力変動には、回転円盤自体が有する油圧系の振動などの高周波成分が重畳している。さらに、舟体の左右両端部付近を加振する場合には、前述の高周波成分によって舟体の曲げ振動モードやローリングなどが励起されるため、接触位置によっては接触力の高周波成分が顕著に大きくなる。そこで、

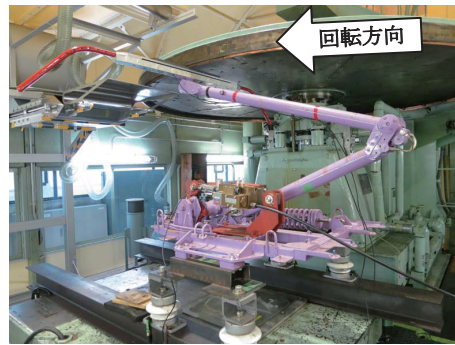


図7 試験概観図

表1 試験条件

試験条件	周速度	加振周波数	加振振幅
1	100km/h	0.55Hz	30mm
2	300km/h	1.7Hz	15mm

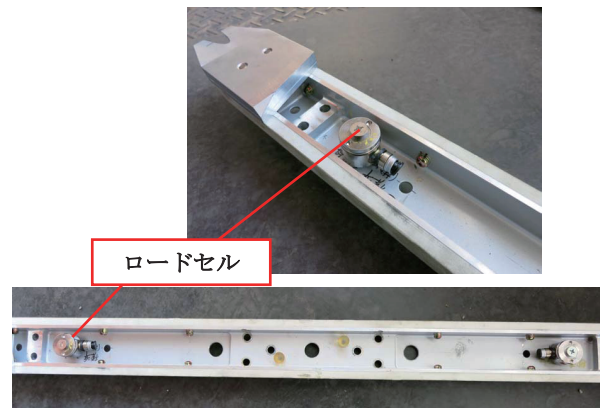


図8 舟体内部のロードセル

バンドパスフィルタで対象周波数近傍に帯域制限をかけて接触力変動を評価する。感度をより正確に求めるために、 A の変化量、すなわち式(15)における δA は、接触力変動のRMS値に比例して変化させた。具体的には、試験条件1、2それぞれにおける δA の値を図9に示すように定めた。ただし、直線の傾きは試行錯誤によって決定した。なお、本章ではこの図のように制御力の単位を指令電圧[V]として記す。これは、指令電圧と実際に生じる制御力との間には必ずしも線形性が成り立たないためである。なお $\delta\phi$ は接触力によらず一定で 5° とした。

4.2 試験結果

図10に最急降下法による制御パラメータの探索履歴を試験条件1と2についてそれぞれ示す。図中の棒グラフは、上から接触力生波のp-p値、加振周波数近傍で帯域制限を施した接触力変動のp-p値、 A 、および ϕ を示し、横軸は最急降下法における反復回数を表している。ただし、反復1回目は制御なしの状態である。1回の反復に要する時間は試験条件1の場合は約18秒、試験条件2の場合は約9秒である。

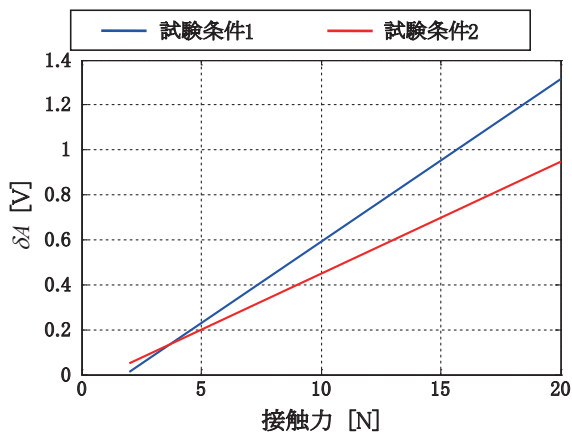
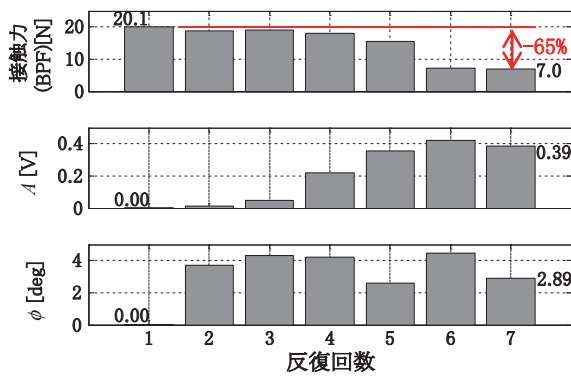
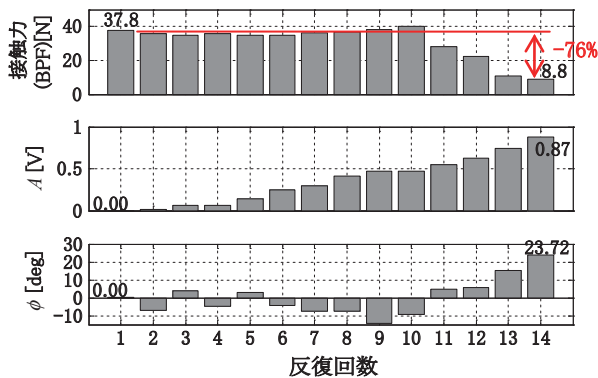


図9 δA の与え方



(a) 試験条件1：100km/h, 0.55Hz, 30mm



(b) 試験条件2：300km/h, 1.7Hz, 15mm

図10 試験結果

いずれの試験条件においても、最急降下法で最終的に得られた制御パラメータを用いることで、制御対象としている周波数成分の接触力変動を最大で約76%低減可能であることがわかる。

図10において、試験条件1では反復回数5回、試験条件2では反復回数10回程度までは、制御ゲインAが増加しても接触力変動の制御対象周波数成分はほとんど減少していないことがわかる。これは空気圧シリンダの摩擦に起因するものである。この摩擦力以上の制御力を発生させない限りは感度を求められないことから、初

期値近傍では比較的大きな δA が必要であるが、最適解近傍では感度を正確に評価するためには δA を小さく設定する必要がある。そのため、本研究では前述のように δA の値を可変とした。なお、いずれの試験条件においても2分程度の時間でパラメータは収束した。

5. 結 言

架線とパンタグラフ間に生じる接触力変動は、その卓越する周波数が支持点間隔と走行速度から決定されることに着目し、フィードフォワード制御による接触力変動低減手法を提案した。これに必要な制御ゲインAと制御位相 ϕ については、最急降下法によって適応的に決定する。最急降下法においては制御パラメータAと ϕ を交互に摂動させることで近似的に感度を求める。

提案する手法を実機パンタグラフを用いたパンタグラフ総合試験装置に適用することで妥当性を検証した。その結果、すり板と模擬トロリ線がしゅう動している状態であっても、最急降下法を用いることで接触力変動における制御対象周波数成分を最大で約76%低減可能であることを示した。今後はパラメータの更なる収束速度向上を目指し、感度を用いずに適応的に制御パラメータを決定する方法について検討を進める。

また、本研究ではシミュレーション・模擬走行試験とともに架線を剛体として扱った。今後はカテナリ架線のように動特性を有する構造への適用可能性についても検討を行う。

文 献

- 1) 網干光雄：弾性支床弦モデルによる架線・パンタグラフ系の径間周期運動解析，日本機械学会論文集（C編），Vol.75, No.755, pp.54-60, 2009
- 2) 網干光雄，常本瑞樹：新幹線の高速度運転に対応した電車線の架設指針，鉄道総研報告，Vol.25, No.4, pp.17-22, 2011
- 3) 池田充，菅原能生，小山達弥：高速用パンタグラフの接触力制御手法に関する基礎研究，鉄道総研報告，Vol.20, No.5, pp.41-46, 2006
- 4) 山下義隆，池田充，増田新，射場大輔，曾根彰：インピーダンス制御によるパンタグラフの接触力制御，鉄道総研報告，Vol.25, No.6, pp.5-10, 2011
- 5) M. A. Abdullah, Y. Michitsuji, M. Nagai, N. Miyajima, "Integrated Simulation between Flexible Body of Catenary and Active Control Pantograph for Contact Force Variation Control" *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, Vol.3, No.1, pp.166-177, 2010.
- 6) 中川徹，小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版，pp.95-96, 1987