

架線・パンタグラフ系ハイブリッドシミュレーション手法

山下 義隆* 小林 樹幸** 白田 隆之*

Hybrid Simulation Method for Catenary/Pantograph System

Yoshitaka YAMASHITA Shigeyuki KOBAYASHI Takayuki USUDA

There are several ways to evaluate dynamic performance of a pantograph. A rigorous evaluation can be accomplished by means of on-track tests, but they might have a lot of restrictions on the measurement and change in test parameters and can generally be costly. The test facilities which are the properties of Railway Technical Research Institute allow us to conduct various tests and have been contributing to R&D activities for the pantograph. Simulation tools for catenary/pantograph system can also be used for evaluating the pantograph performance. The test facilities and simulation tools are not accurate enough to evaluate the pantograph performance in some cases due to the operation limits of the facilities (maximum speed etc.) or modelling errors in the simulation. In order to develop a pantograph testing system by which various tests can be conducted in a low cost way and with satisfactory accuracy, we've been working on developing a hybrid simulation method which is the combination of an actual pantograph and a numerical catenary. We found out that the test system presented in the last report is applicable only to the catenary model with high damping. In this report, a stabilization method for the system is presented. This method enables the system to be operated stably even for the catenary model with low damping.

キーワード：パンタグラフ，ハイブリッドシミュレーション，係数励振モデル，動的相互作用

1. はじめに

パンタグラフの研究開発では，試験装置により現象を模擬した試験および現車により現象を把握するための試験が実施される。現車試験では，実設備を用いた実際の現象を把握することが可能である一方，計測上の制約が大きい場合や試験パラメータの変更が困難な場合がある上，一般的に大掛かりな試験となるため，必要とされるコストが大きい。鉄道総研が所有する集電試験装置は，パンタグラフを走行させ，実際の架線設備とのしゅう動を伴った試験が可能であるうえ，現車試験よりも容易にパラメータの変更が可能であり，今までに多くの研究開発に貢献している。しかしながら，最高走行速度が200km/hであることや一定速度で走行可能な区間が約70mと短いことなどの制約がある。また，鉄道総研が保有するパンタグラフの加振装置などでは，架線との相互作用によって生じる接触力変動の影響を表現することはできない。

また，パンタグラフの性能を評価する方法として，架線・パンタグラフ系シミュレーション¹⁾を挙げることができる。シミュレーション手法の多くは，パンタグラフは多質点系としてモデル化されており，目的によっては

十分な精度とはいえない場合もある。

そこで，筆者らは，定置試験において架線との相互作用を模擬することが可能なパンタグラフの試験手法の開発により試験効率の向上，ひいてはパンタグラフの開発効率の向上を目指している²⁾。この試験手法は，前述のパンタグラフの加振装置を用いて，実機のパンタグラフと数値モデルで表現された架線を連成させる手法である。この手法は，パンタグラフと加振装置の接触点に作用する接触力を測定し，架線運動シミュレータに接触力を入力して架線の運動をリアルタイムに解き，シミュレータ内における架線とパンタグラフの接触点における上下変位を加振装置が正確に再現することで実現される。本手法は，航空機や自動車などの産業分野で発展し，鉄道総研においても車両分野で応用されているHILS (Hardware In the Loop Simulation)³⁾の技術を架線・パンタグラフ系へ適用するものである。なお，本論文では，上記の試験手法をハイブリッドシミュレーション（以下HS）手法と呼ぶこととする。この手法では，従来のシミュレーション技術に含まれるパンタグラフのモデル化誤差を排除することができる。また，試験時の架線の条件変更に関わるコストを低減できるなどの利点もある。しかしながら，継続的な調査を行うなかで，既報²⁾で紹介した試験手法は，架線モデルとして大きな減衰を有するモデルあるいは遅れ（むだ時間要素）が小さい加振装置を

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室（現 ブリストル大学）

特集：鉄道力学

採用する場合には有効であるものの、架線モデルや加振装置によっては試験システムを安定的に可動させることができない場合があることがわかってきた。

そこで、本論文では、文献²⁾における HS 手法よりも安定的にシステムを稼働させることが可能な方法を提案し、これを適用した試験結果を示す。

2. ハイブリッドシミュレーションシステム

2.1 概要

HS システムの概略図を図 1 に示す。HS システムは、実機パンタグラフ、パンタグラフ加振装置および架線運動シミュレータから構成される。加振装置とパンタグラフとの間に作用する接触力をロードセルにより計測し、計測値を架線運動シミュレータに入力する。架線運動シミュレータは、架線の運動を表現するモデルを有している。入力された接触力に応じて架線モデルの上下運動を計算し、加振装置に架線モデルと同じ運動をするように指令を出力し、パンタグラフへ強制変位を与える。このようにシステムを構成することで、実機のパンタグラフに対して定置のまま、モデルで表現した架線下を走行している状態と等価な振動状態を与えることができる。

架線運動シミュレータは主に A/D 変換ボード、プロセッサボード、D/A 変換ボードから構成される。それぞれの構成機器の仕様等を表 1 に示す。

パンタグラフ加振装置は油圧駆動であり、サーボアンプに入力する電圧指令に応じてシリンダが上下に運動する。電圧指令に対する加振装置のシリンダ変位の周波数応答を図 2 に示す。この周波数応答特性は、1 次遅れ要素とむだ時間要素の組合せで近似できることを確認している。

また、本論文では、新幹線用実機パンタグラフを HS に供した。このパンタグラフを加振装置下に設置した様子を図 3 に示す。

2.2 架線モデル

本論文では、シミュレータ内の架線モデルとして文献²⁾でも紹介されている係数励振モデルを用いる。架線、加振装置および PT158 パンタグラフを共に数値モデルで表現すると、図 4 のように表すことができる。HS 手法により模擬したいシステムは、図 4 (a) の架線と図 4 (c) のパンタグラフが直接接触し、 $x_0=x_1$ となって運動しているシステムであり、これを図 4 (b) の加振装置を介して実現することが本 HS の目的である。架線モデルは、剛性 k_0 がパンタグラフの走行（架線とパンタグラフの接触位置）に応じて変化するモデルである。本論文では、トロリ線およびちょう架線がともに 14700N の張力で架設された架線の静的な等価剛性を電気抵抗法⁵⁾で

求め、その変動成分のうち径間周期成分およびその成分の 10 次までの高調波成分の重ね合わせた結果を k_0 として与えた（図 5）。11 次以降の成分を除いた理由は、加振試験において、急激な剛性変化により生じる急激な接触力変動の発生を抑制するためである。図 4 に示す各パラメータの公称値一覧を表 2 に示す。

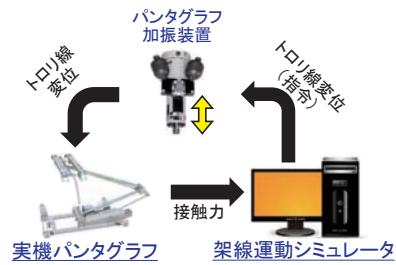


図 1 ハイブリッドシミュレーションシステム概略図

表 1 リアルタイムシミュレータの構成機器

名称	型番	仕様
プロセッサボード	DS1006 dSpace	CPU:AMD Optron 2.8GHz
A/D 変換ボード	DS2002 dSpace	サンプリング時間： 66.9 μ s (16bit 時)
D/A 変換ボード	DS2102 dSpace	サンプリング時間： 3.0 μ s (12bit 時)

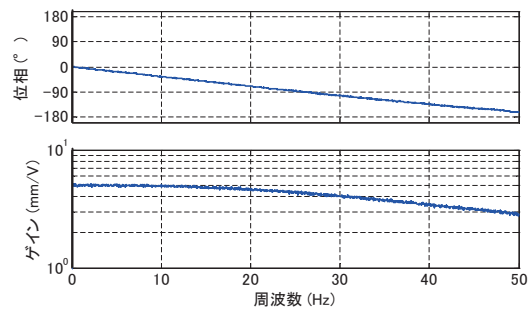


図 2 電圧指令に対する加振装置変位の周波数応答

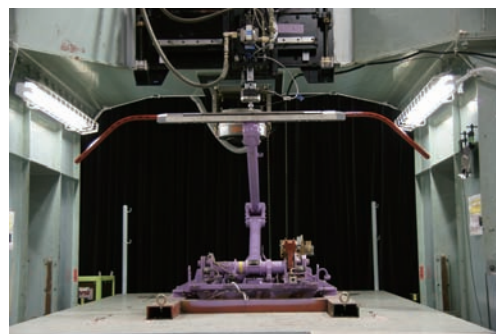


図 3 加振装置下の新幹線用パンタグラフ

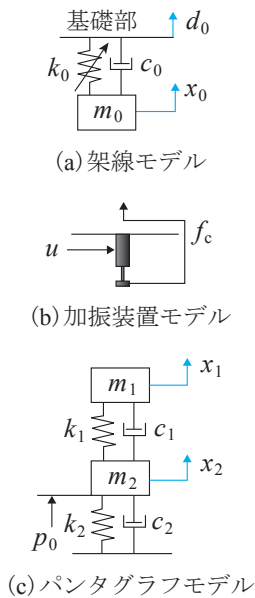


図4 架線・パンタグラフ系の数値モデル

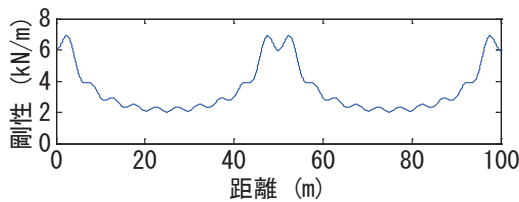


図5 架線モデルの剛性 k_0

表2 パラメーター一覧

記号	値 [単位]	記号	値 [単位]
m_0	10 [kg]	k_1	38000 [N/m]
c_0	50 [Ns/m]	m_2	15 [kg]
k_0	図5参照 [N/m]	c_2	100 [Ns/m]
m_1	3 [kg]	k_2	0 [N/m]
c_1	100 [Ns/m]	p_0	64 [N]

2.3 ハイブリッドシミュレーション手法

ここでは、HS手法として最も単純な手法（文献2で紹介される方法、以下簡易手法）、加振装置の遅れを補償するために加振装置の逆伝達関数を補償器として用いる手法（以下、逆伝達関数手法）、およびStotenが提案するDSS手法⁴⁾の3種類の手法の比較を行い、最も安定的にシステムを駆動することができる手法を調査する。

2.3.1 簡易手法

架線を Σ_N 、加振装置を Σ_A 、パンタグラフを Σ_P なる記号で記した場合の簡易手法のブロック線図を図6(a)に示す。架線モデルのシミュレーション結果を直接（あ

るいはある係数を乗じて）加振装置の指令として用いるため、加振装置の応答に遅れが生じる場合には、システムの不安定性に対する注意が必要である。また、減衰の小さい系は、加振装置の応答の遅れを含むシステム全体の遅れ要素の影響に対して敏感であるため、減衰が大きい系よりも不安定化しやすい傾向がある。

2.3.2 逆伝達関数手法

上記に加え、制御器 Σ_C' を用いて加振装置の応答の遅れ補償を行う場合のブロック図を図6(b)に示す。加振装置の逆伝達関数を制御器の特性として与えることができれば理想的であるが、加振装置が1次遅れ系とむだ時間 L で表現されるシステムであるため厳密な逆伝達関数を制御器の特性として与えることができない。本論文では、加振装置の1次遅れ要素分のみを補償することを目的として、ラプラス領域で記述する電圧指令に対する加振装置の変位応答の伝達関数を式(1)で表わし、これに対する制御器を式(2)で与える。

$$G_A = \frac{b}{as+1} e^{-Ls} \quad (1)$$

$$G_C' = \frac{as+1}{a's+1} \quad (2)$$

ここで、 s はラプラス演算子である。 a' は零であることが理想であるが、非プロパーな伝達関数を制御器として適用することができないため、ここでは a' を小さい値とする式(2)の形式とした。本論文では $a'=0.001$ を採用している。なお、加振装置の同定試験結果より、 $a=0.005$ 、 $b=6.5$ 、 $L=0.005$ であることを確認している。

2.3.3 DSS手法

DSS手法は、システムの遅れが大きい系や減衰の小さい系に対してより安定に制御を実現することを可能とする手法である⁴⁾。DSS手法では、制御を行うためのゲインの算出に用いる架線モデルおよびパンタグラフモデルの伝達関数が必要であり、これらの伝達関数を用いて、架線およびパンタグラフに作用する外乱の変動成分（変位外乱や力外乱）の影響を考慮して制御器を設計し、シミュレータによる架線モデルの応答（計算結果）と実機に加振装置の応答が一致するように加振装置を制御する。架線モデルと加振装置の応答に誤差がある場合は、その誤差成分をフィードバックして制御器に入力し、誤差の補正を行う。DSS手法のブロック図は、図6(c)の通りである。架線を係数励振モデルで表現する場合、架線の剛性の変動成分の影響を図6(c)に示す d_0 として与えることでDSS手法の適用が可能である⁶⁾。以下にDSS手法における制御器設計について記述する。

特集：鉄道力学

図4と図6(c)より、架線・加振装置・パンタグラフのモデルはそれぞれ式(3)の伝達特性で表現することができる。

$$\begin{aligned} \Sigma_N : X_0 &= G_{N1}D_0 + G_{N2}F_C \\ \Sigma_A : X_1 &= G_A U \\ \Sigma_P : F_C &= G_{P1}X_1 + G_{P2}P_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 X_0 , X_1 , D_0 , F_C , U および P_0 は、架線モデルの質点変位 x_0 、加振装置の変位 (=パンタグラフ最上質点の変位) x_1 、架線モデル基礎に作用する変位外乱 d_0 、パンタグラフと加振装置との間に作用する接触力 f_c 、加振装置への電圧指令 u および静押上力 p_0 のラプラス変換を表す。なお、架線モデル基礎部に作用する変位外乱 d_0 は、後述するDSS手法を適用する際に必要となるため、仮想的に導入している。また、一般的に静押上力は一定値としてモデル化されるが、ここでは便宜上変動力としてラプラス変換を実行している。 G_{N1} , G_{N2} , G_{P1} および G_{P2} はそれぞれ、 D_0 に対する X_0 、 F_C に対する X_0 , X_1 に対する F_C および P_0 に対する F_C の伝達関数であり、式(4)～式(7)で与えられる。

$$G_{N1} = \frac{c_0 s + k_0}{m_0 s^2 + c_0 s + k_0} \quad (4)$$

$$G_{N2} = \frac{1}{m_0 s^2 + c_0 s + k_0} \quad (5)$$

$$G_{P1} = -(m_1 s^2 + c_1 s + k_1) + \frac{(c_1 s + k_1)^2}{m_2 s^2 + (c_1 + c_2) s + k_1 + k_2} \quad (6)$$

$$G_{P2} = \frac{c_1 s + k_1}{m_2 s^2 + (c_1 + c_2) s + k_1 + k_2} \quad (7)$$

なお、 G_A は式(1)の通りであるが、ゲインの算出の際には、むだ時間 L を0としている。式(3)より、架線モデルの質点変位と加振装置の変位の誤差 e ($=x_0 - x_1$) のラプラス変換 E は式(8)のようになる。

$$E = G_{N1}D_0 + G_{N2}G_{P2}P_0 + (G_{N2}G_{P1} - 1)G_A U \quad (8)$$

ここで、加振装置への電圧指令 u を、架線への外乱入力 d_0 およびモデル上パンタグラフの静押上力 p_0 の誤差 e への影響を最小化するためのフィードフォワード制御項およびフィードバック制御項からなる式(9)のようにラプラス変換した形で表現する。

$$U = K_{FF1}D_0 + K_{FF2}P_0 + K_{FB}E \quad (9)$$

ただし、 K_{FF1} および K_{FF2} はフィードフォワードゲインであり、 K_{FB} はフィードバックゲインである。式(8)および式(9)より、

$$\begin{aligned} E &= \frac{G_{N1} + (G_{N2}G_{P1} - 1)G_A K_{FF1}}{1 - (G_{N2}G_{P1} - 1)G_A K_{FB}} D_0 \\ &+ \frac{G_{N2}G_{P2} + (G_{N2}G_{P1} - 1)G_A K_{FF2}}{1 - (G_{N2}G_{P1} - 1)G_A K_{FB}} P_0 \end{aligned} \quad (10)$$

を得る。したがって、 e を零とするための K_{FF1} および K_{FF2} は式(11)および式(12)のように求められる。

$$K_{FF1} = \frac{G_{N1}}{(1 - G_{N2}G_{P1})G_A} \quad (11)$$

$$K_{FF2} = \frac{G_{N2}G_{P2}}{(1 - G_{N2}G_{P1})G_A} \quad (12)$$

K_{FB} は、式(10)の右辺の両項の分母の特性方程式の根が左半平面上に配置されるように決定する。ただし、本論文では、誤差フィードバックは用いておらず、 $K_{FB}=0$ としている。

次に、架線の剛性 k_0 の変動成分を等価な外乱 d_0 に置き換える。剛性 k_0 を非変動成分 \bar{k}_0 および変動成分 \tilde{k}_0 で表現する。

$$k_0 = \bar{k}_0 + \tilde{k}_0 \quad (13)$$

$\tilde{k}_0 = 0$ の場合および $d_0 = 0$ の場合の架線モデルの運動方程式は、それぞれ式(14)および式(15)のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{m}_0 \ddot{x}_0(t) + \bar{c}_0 \dot{x}_0(t) + \bar{k}_0 x_0(t) \\ - \{ \bar{c}_0 \dot{d}_0(t) + \bar{k}_0 d_0(t) \} = f_c(t) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{m}_0 \ddot{x}_0(t) + \bar{c}_0 \dot{x}_0(t) + \bar{k}_0 x_0(t) + \tilde{k}_0(t) x_0(t) = f_c(t) \quad (15)$$

式(14)および式(15)を比較すると、

$$-\tilde{k}_0(t) x_0(t) = \bar{c}_0 \dot{d}_0(t) + \bar{k}_0 d_0(t) \quad (16)$$

を満足する外乱 d_0 を与えることによって、架線の剛性の変動と等価な運動を表現することができる。このように外乱 d_0 が作用する架線モデルにDSS手法を適用しHSシステムを安定的に駆動することができる。

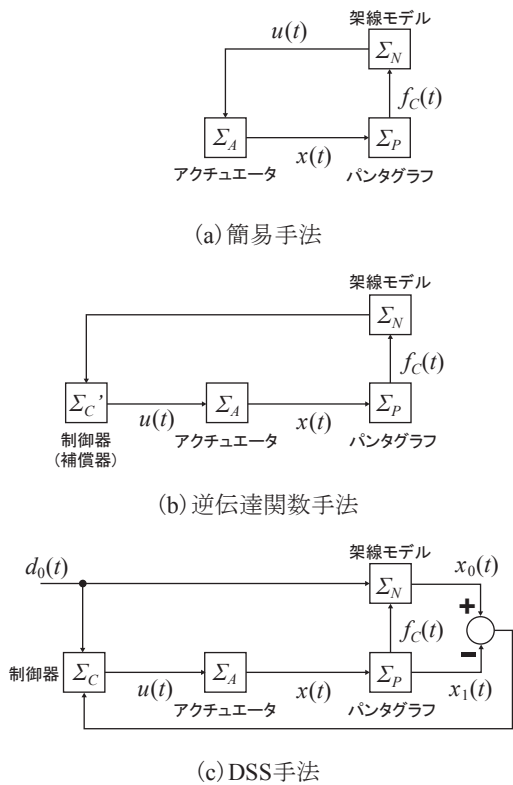


図6 ハイブリッドシミュレーションシステムのブロック図

3. シミュレーションによる検証

本章では、上述の3つのHS手法をシミュレーションにより比較する。ここで、シミュレーションとは、架線だけでなく、実機パンタグラフおよび加振装置も数値モデルで表現してシミュレータに組み込み、これらの運動を数値的に解くことをいい、HSとは異なることに注意されたい。

図7に200km/hに相当する架線剛性変化を与えた場合の3つの手法に対するHSシステムの応答のシミュレーション結果を示す。図7(b)は加振装置の遅れ特性として1次遅れ要素のみ、図7(c)は1次遅れ要素($a=0.005$)およびむだ時間要素($L=0.005$)を有する場合の結果を示している。架線モデルおよびパンタグラフモデルのパラメータは、表2に示す通りである。図中に示すRefは、加振装置に遅れ要素が全く存在しない理想的な条件でHSシステムを駆動した場合のシミュレーションで求めた応答を表している。表2に示すパラメータに対しては、図7(b)の場合には、全ての手法においてHSシステムを駆動することが可能である。ただし、逆伝達関数手法および簡易手法で得られた接触力波形は、Refの接触力波形に高周波数成分が重畳したような波形となっている。この条件に対して、架線モデルの減衰定数を減少させたり、加振装置の1次遅れ要素の時定

数を増加させた場合DSS手法は不安定化しないが、簡易手法および逆伝達関数手法は不安定化していくことを確認している。図7(c)の場合では、簡易手法で駆動したシステムは不安定化し、加振装置の応答が発散した。逆伝達関数手法では発散はしないものの、接触力変動の高周波数成分の振幅が図7(b)の場合よりも増大していることが分かる。図7(c)のむだ時間5msの状態からむだ時間が1ms増大する、あるいは架線モデルの減衰定数20Nm/sから約60%減少することで逆伝達関数手法は不安定化するがDSS手法は不安定化しないことを確認している。これらの結果から、DSS手法は、検討した3つの手法の中で最も安定的にHSシステムを駆動することができる手法であるといえる。

4. ハイブリッドシミュレーション結果

本章では、前章のパンタグラフモデルおよび加振装置モデルを実機に置き換え、HSを実施した結果について述べる。図8は、図7と同様に200km/hに相当する架線剛性変化を与えた場合のHS結果を示している。システムはDSS手法により駆動している。同図には、シミュレーション結果として図7のRefを重ねてプロットしている。HS結果とシミュレーション結果における加振装置の変位および加振装置とパンタグラフの接触点における接触力はよく一致しており、DSS手法により、係数励振モデルで表現された架線との接触走行を模擬することができているといえる。シミュレーション結果との差は、パンタグラフや加振装置のモデル化誤差などに起因しているものと考えられる。

本HSで用いた架線モデルのパラメータを既報²⁾で紹介したシステムで駆動させることはできないことはシミュレーションで確認している。DSS手法を適用することでより安定性が増大し、さまざまな架線モデルのパラメータを適用することができるようにシステムが改良された。

5. まとめ

本論文では、架線との相互作用を考慮した実機パンタグラフの定置試験にハイブリッドシミュレーション手法を適用した結果について述べた。係数励振モデルで表現された架線に対してDSS手法を用いることにより、既報²⁾で用いた手法よりも安定的にシステムを駆動させることができることをシミュレーションで確認した。また、DSS手法を用いたHSを実施し、HS結果がシミュレーション結果とよく一致していることからDSS手法を用いたHSの有効性を確認した。DSS手法を適用することでより安定性が増大し、さまざまな架線モデルのパ

特集：鉄道力学

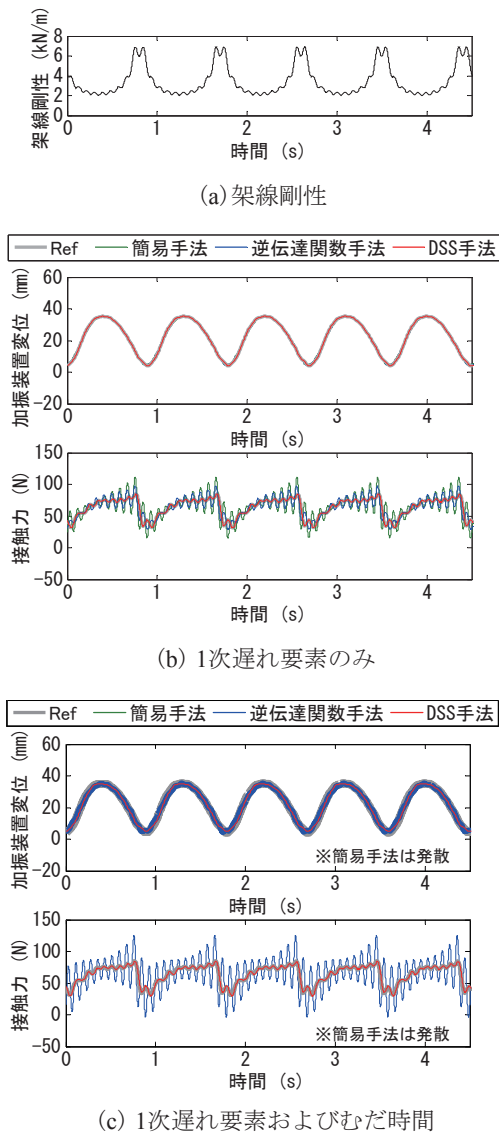


図7 200km/h 走行相当の架線剛性変化に対する架線・パンタグラフ系 HS システムの応答（シミュレーション結果，加振装置の遅れ特性による変化）

ラメータを適用することができるようにシステムが改良されたといえる。

今後は，DSS 手法を拡張し，架線の運動をより精度よく表現できる架線モデルへ適用する。

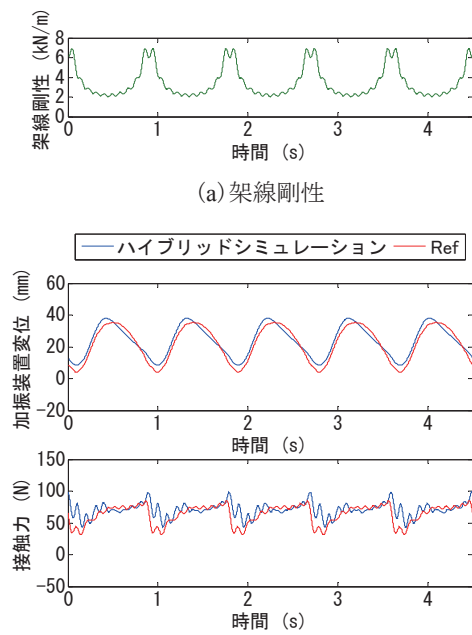


図8 200km/h 走行相当の架線剛性変化に対する DSS 手法による架線・パンタグラフ系ハイブリッドシミュレーション結果

文献

- 1) 池田充：有限要素法に基づく架線・パンタグラフ系の3次元運動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.26, No.8, pp.11-16, 2012
- 2) 小林樹幸，白田隆之，池田充：架線・パンタグラフ系へのHILS技術適用の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.28, No.12, pp.5-10, 2014
- 3) 真木康隆，渡辺信行，下村隆之，佐々木君章，遠竹隆之，森下隼人：編成走行を模擬するHILSシステムの開発，鉄道総研報告，Vol.24, No.6, pp.11-16, 2010
- 4) D.P.Stoten：A comparison of hybrid and DSS scheme for substructured system testing，「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集，3D11-1-3D11-12, 2014
- 5) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性，研友社，pp.9-11, 1993
- 6) 山下義隆，白田隆之，小林樹幸：架線・パンタグラフ系のHILS試験のためのDSS手法のパラメータ励振系への適用，J-Rail 講演論文集，2705-1-2705-4, 2015