

空転制御によるけん引力向上と力行時間短縮効果

山下 道寛*

Improvement of Traction Force and Effect of Shortening Powering Time by Slip Control

Michihiro YAMASHITA*

Generally, the slip control performance of a railway vehicle is evaluated according to the average traction force or the average train acceleration under a wet condition of rails assuming bad weather. The purpose of this paper is to give a general understanding of the effect of improving traction on stable transportation. Accordingly, based on recent models of electric locomotive trains and EMUs, we conduct a survey by running simulation with different running conditions such as gradient and mileage. As a result, we find that the effect of shortening the powering time by improving the traction force is exhibited in steep gradient sections, and it is highly effective in locomotive trains having a large load capacity.

キーワード：空転制御，けん引力，引張力，力行時間，機関車列車，在来線電車，新幹線電車，勾配

1. はじめに

空転再粘着制御の目的は、悪天候時などにおいて車輪が空転した際、車輪とレールの損傷を防止しつつ、列車の運行上十分な加速力または加速度を得ることである。

従来から電気車の粘着力を有効利用する取り組みの一つとして空転制御の開発が継続的に行われており、例えば、著者が開発に携わった空転制御方法の開発では、シミュレーションおよび現車試験の結果から、従来方法よりもけん引力や列車加速度が5%~10%程度向上することを確認している¹⁾²⁾。また、けん引力に準じるその他の評価指標として、連結器に働く自連力や、主電動機電流値やトルクなどが挙げられる。しかしながら、けん引力向上がどのように安定輸送に寄与するかは効果が把握しにくい。

そこで本研究では、力行時間が走行時間に影響することに着目し、空転制御の改善によるけん引力向上が、走行時間短縮に及ぼす効果を概括的に把握することを目的とした。そこで、実際の走行距離や勾配に近い条件下で空転制御時のけん引力低下を模擬して力行時間を算出する、力行シミュレーションを実施した。

なお、対象とした列車種別は、最近の電気機関車、在来線電車、新幹線電車とした。

2. 計算モデル

本章では、力行時間を算出するために用いた列車抵抗と速度—引張力特性について説明する。

2.1 列車抵抗式の定義

列車抵抗には、出発抵抗、走行抵抗、勾配抵抗が含まれ、それぞれについて以下に説明する。

2.1.1 出発抵抗

出発抵抗は対象車種毎に下記に示す値とし、静止状態から速度3km/hの間で出発抵抗から走行抵抗へ直線へ移行する³⁾。この値は文献³⁾⁴⁾⁵⁾を参考に設定した。

- ・機関車の出発抵抗 49.0N/t
- ・貨車と電車の出発抵抗 39.2N/t
(新幹線電車は設定なし)

2.1.2 走行抵抗

本稿で用いた走行抵抗 R を式(1)~式(4)に示す。

$$\begin{aligned} \cdot \text{機関車}^{4)} & (1.72 + 0.084V)M_L \cdot g + 0.3616V^2 [\text{N/t}] \quad (1) \\ \cdot \text{ボギー貨車}^{5)} & (1.24 + 0.0069V + 0.000313V^2)M_W \cdot g [\text{N/t}] \quad (2) \end{aligned}$$

$$\cdot \text{在来線電車}^{4)} \{ (1.65 + 0.0247V)M_m + (0.78 + 0.0028V)M_T + [0.028 + 0.0078(n-1)]V^2 \} \cdot g [\text{N}] \quad (3)$$

$$\cdot \text{新幹線電車 (10両編成の特性から読み取り)}^{6)} \\ \text{トンネル区間} \quad V^2 - 10.0V + 2519 [\text{N}] \quad (4)$$

ここで、

V : 列車速度 [km/h], n : 列車の両数, g : 重力加速度 [m/s²]

M_L : 機関車質量 134.4 [t], M_W : 全貨車質量 1,020 [t]

M_m : 在来線電車のM車(満車)質量 262.5 [t]

M_T : 在来線電車のT車(満車)質量 250.1 [t]

2.1.3 勾配抵抗

勾配抵抗 R_s を式(5)に記す。

$$R_s = SM_R \cdot g [\text{N}] \quad (5)$$

ここで、 S : 勾配 [%], g : 重力加速度 [m/s²]

M_R : 対象車両の全質量 [t]

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

2.1.4 加速抵抗⁴⁾

駆動系の回転慣性質量による加速抵抗は、車両質量と慣性係数から求め、電気機関車は13%、貨車は5%、通勤・近郊電車は電動車10%、付随車5%とし、新幹線電車列車は5%とした。

2.2 速度—引張力特性

本稿で対象とした列車種別の速度—引張力特性⁶⁾⁷⁾⁸⁾を用いて力行時間短縮効果を検討するため、本検討で設定する引張力について説明する。

空転しないレール乾燥条件では、列車は「引張力100%」で走行する。一方、悪天候によるレール湿潤条件でのけん引力低下は、引張力低下にほぼ比例するため、引張力を設計値から低下させることで、湿潤条件のけん引力を模擬することとした。設定する引張力のイメージを図1に示す。

「引張力100%」は、粘着走行している状態を表し、「引張力〇〇%」は、空転制御が動作している時のけん引力から引張力へ換算した値と見做すこととする。

引張力100%（図1）に対し、空転発生時の引張力は約1.1で除した（設計引張力100%÷1.1÷1.1……）値で低下する（設計引張力100%⇒91%⇒83%⇒75%……）設定とした。このときの設定幅の上値と下値を比較すると約10%の差がある。これにより、下値を空転制御改善前の引張力（基準）とすることで、上値のけん引力（＝引張力）が約10%向上したと仮定でき、けん引力向上による力行時間短縮の効果が分かりやすくなると考えた。

ここで、本稿で使用する用語を整理する。

「引張力」は動輪周引張力であり、車輪・レール間に作用する力（粘着力）である。

「けん引力」は、主電動機トルク的作用により連結器や牽引装置に働く力であり、引張力から車両を加速させる力を減じた力となる。力行時において、引張力とけん引力には数パーセントの違いがある。

ここで μ を「設定した引張力÷全動力車質量」、動力車重量に対する引張力の割合と定義し、粘着係数とは

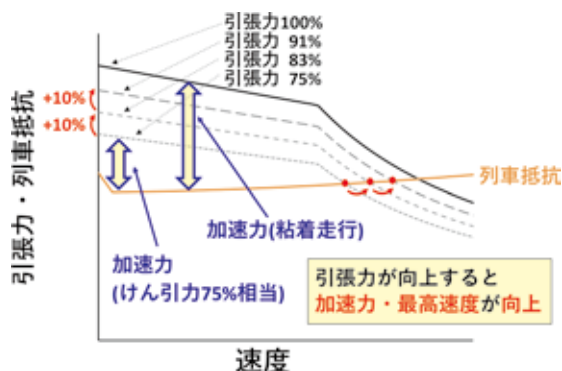


図1 設定する速度—引張力特性のイメージ

分けて考える。

ここで、引張力の設定に関するイメージを図2に示す。「改善前の引張力」は、最大値に相当する「粘着係数から換算した引張力」よりも小さい値で、制御によるけん引力向上に改善の余地がある状態であるものとする。空転制御改善後のけん引力に対応する引張力は「改善後の引張力」と表す。図1における「改善前の引張力」に対して、約10%向上した引張力が「改善後の引張力」に相当する。

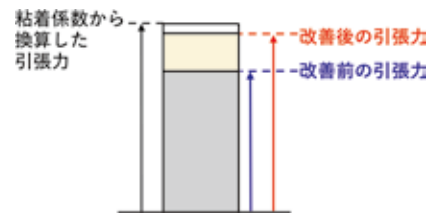


図2 空転制御の改善前と改善後の引張力

2.2.1 電気機関車の速度—引張力特性

電気機関車では、起動時の列車抵抗を下回らない範囲で引張力の割り付け設定（100%、91%、83%、75%）を行った（図3）。悪天候時には急こう配区間において運転遅延に至る場合があるため、現状の営業走行を考慮した引張力設定の範囲といえる。

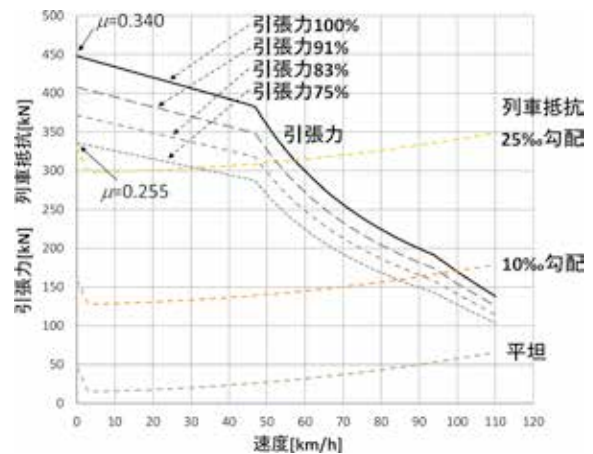


図3 速度—引張力特性（電気機関車）

2.2.2 在来線（通勤・近郊型）電車の速度—引張力特性

在来線電車では、レールに淡雪が付着した状態の粘着係数⁴⁾として0.10が紹介されていることを考慮し、この値を参考に設計引張力のほぼ半分（ $\mu = 0.093$ ）を下限值として、引張力の割り付け設定（100%、91%、…、51%）を行った（図4）。

また、一般的に、在来線電車の速度—引張力特性から求めた μ 値は、電気機関車の1/2～1/3程度と小さい

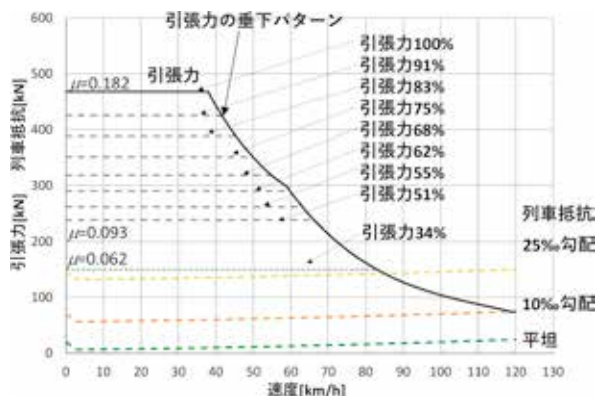


図4 速度—引張力特性（在来線電車）

め、中・高速度域で空転しにくい傾向がある。

そこで、全速度域で引張力を低下させるのではなく、引張力 100%の垂下パターンに一致する値まで低下させる設定とした。

2.2.3 新幹線電車の速度—引張力特性

新幹線電車の速度—引張力特性（引張力 100%， $\mu = 0.062$ ）（図 5）は、低速度域で空転しにくい特性となっている。新幹線計画式（ $13.6 / (V+85)$ ）から求めた引張力換算値（図中の☆）と速度—引張力特性は、速度 150km/h 付近で近接している。また、高速新幹線電車において散水条件でのブレーキ試験結果が報告⁹⁾されており、最低値として、速度 150km/h 以降で粘着係数は 0.03 を下回っていることが確認できる。

上記より、現状の引張力 100%では、空転は速度 150km/h 以上で発生しやすいと推測され、列車抵抗を下回らない引張力の割り振り設定（100%，91%，…，68%）を行った。

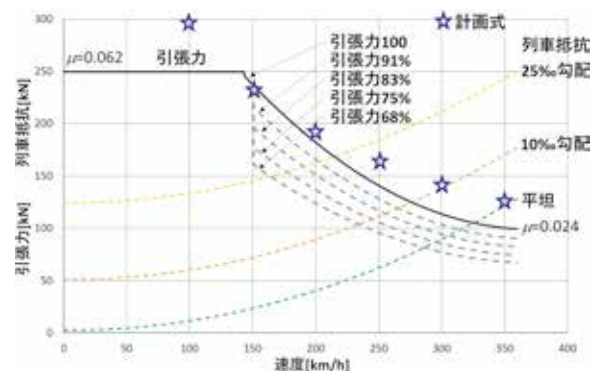


図5 速度—引張力特性（新幹線電車）

3. 力行時間の算出結果

3.1 力行時間の算出

力行時間算出に用いた列車の運動方程式を式 (6) に記す。これは、前章で設定した引張力と列車抵抗に基づい

て計算する。

$$F - (R_{t_{EL}} + R_{t_{FW}}) = (M_{EL} \times R_{a_{EL}} + M_{FW} \times R_{a_{FW}}) \cdot \alpha \quad (6)$$

ここで、

F : 列車のけん引力 [N], $R_{t_{EL}}$: 動力車の走行抵抗 [N], $R_{t_{FW}}$: 貨車全両分の走行抵抗 [N], M_{EL} : 動力車質量 [kg], M_{FW} : 貨車質量 [kg], $R_{a_{EL}}$: 動力車の慣性係数, $R_{a_{FW}}$: 付随車の慣性係数, α : 列車加速度 [m/s²]

機関車列車の力行シミュレーション結果の例を図 6 に示す。設定した走行距離に到達するまで力行するときの引張力と列車抵抗から計算される速度、および到達までの力行時間と最高速度（到達時の速度）が求められる。なお、速度が最高速度の条件に達した時には、その最高速度のまま定速で走行することとする。

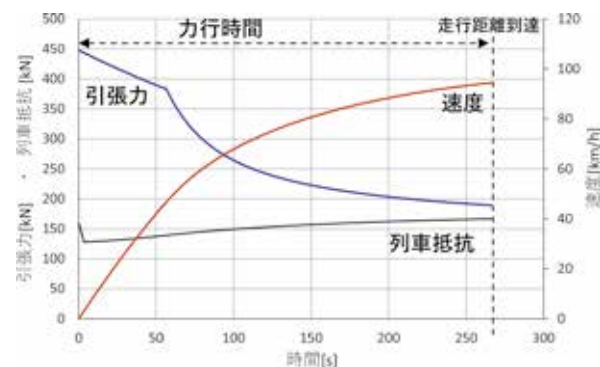


図6 力行シミュレーション結果の例

3.2 機関車列車

機関車列車の力行シミュレーションの条件を表 1 に、得られた力行時間と最高速度の結果の一覧を表 2 に示す。また、引張力 100%に対する他の引張力（91%，83%，……）との力行時間割合の比較結果を図 7 と図 8 に示す。

シミュレーション結果では、引張力が 75%から 83%（約+10%けん引力向上に相当）に改善する場合には、時間短縮割合が他の引張力条件よりも大きく、特に勾配 25%条件の時間短縮割合（ $(1 - \text{改善後の力行時間} \div \text{改善前の力行時間})$ ）

表 1 シミュレーション条件（機関車列車）

引張力	100%, 91%, 83%, 75%
勾配	平坦 (0‰), 上り 10‰, 上り 25‰
走行距離	1km, 5km, 10km
最高速度	110km/h
想定線区	中央本線, 東北本線など
列車質量	電気機関車 134.4ton, 貨車 1,020ton

表2 力行時間と最高速度の一覧（機関車列車）

引張力	勾配	力行時間[s]			最高速度[km/h]		
		走行距離 1km	走行距離 5km	走行距離 10km	走行距離 1km	走行距離 5km	走行距離 10km
引張力100%	平坦	82	223	387	78	110	110
引張力91%		85	230	394	75	110	110
引張力83%		89	238	401	72	110	110
引張力75%		93	247	411	69	109	110
引張力100%	10%	95	266	451	66	94	99
引張力91%		101	282	475	63	89	95
引張力83%		108	298	503	60	85	90
引張力75%		117	318	538	56	79	84
引張力100%	25%	142	404	718	46	57	57
引張力91%		168	458	801	39	52	53
引張力83%		209	555	929	31	48	48
引張力75%		326	861	1445	21	30	31

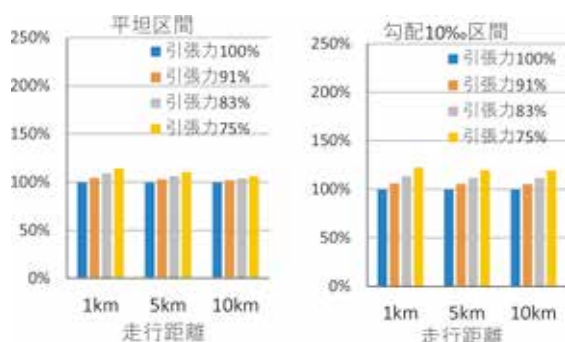


図7 力行時間割合の比較（左図：平坦，右図：勾配10%）



図8 力行時間割合の比較（勾配25%）

善前の力行時間) × 100%) が大きかった。加速力が制御改善前よりも大幅に向上するため、列車速度が向上し、力行時間の短縮割合が大きくなる。

そこで、最も効果のあった引張力75%を基準（改善前）として、比較結果を以下にまとめる。

○引張力75%⇒83%（約+10%けん引力の向上）

走行距離1kmの場合

- ・平坦：力行時間 93s ⇒ 89s, 4s (4%) 短縮
- ・勾配10%：力行時間 117s ⇒ 108s, 9s (8%) 短縮
- ・勾配25%：力行時間 326s ⇒ 209s, 117s (36%) 短縮

走行距離10kmの場合

- ・平坦：力行時間 411s ⇒ 401s, 10s (2%) 短縮

- ・勾配10%：力行時間 538s ⇒ 503s, 35s (7%) 短縮
- ・勾配25%：力行時間 1445s ⇒ 929s, 516s (36%) 短縮

急勾配が連続する走行区間において、最下限の引張力75%（速度40km/hまでの平均加速度は0.064km/hであった）まで低下した粘着状態（図3、起動直後 $\mu = 0.255$ 相当）では、空転制御の改善によりけん引力を10%向上できれば、安定輸送に大きく貢献できるといえる。

3.3 在来線電車（通勤・近郊型）

在来線電車（通勤・近郊型）の走行シミュレーションの条件を表3に、得られた力行時間と最高速度の結果の一覧を表4に示す。また、引張力100%に対する他の引張力（91%、83%、……）との力行時間割合の比較を図9と図10に示す。

シミュレーション結果では、引張力51%から56%（約+10%けん引力向上に相当）に改善する場合、時間短縮できる値が他の引張力条件からの改善よりも大きく、

表3 シミュレーション条件（通勤・近郊型電車）

引張力	100%,91%,83%,75%,68%,62%,56%,51%
勾配	平坦(0%)，上り10%，上り25%
走行距離	0.5km, 1.0km, 2.0km
最高速度	110km/h
想定線区	首都圏の通勤路線など
列車質量	5M5T編成, 512.6ton(満車)

表4 力行時間の一覧（通勤・近郊型電車）

引張力	勾配	力行時間[s]			最高速度[km/h]			
		走行距離 0.5m	走行距離 1.0km	走行距離 2.0km	走行距離 0.5m	走行距離 1.0km	走行距離 2.0km	
引張力100%	平坦	38	58	92	80	95	110	
引張力91%		39	59	94	79	95	110	
引張力83%		40	60	95	79	95	110	
引張力75%		41	62	96	78	95	110	
引張力68%		43	64	98	77	94	110	
引張力62%		45	66	100	76	94	110	
引張力56%		47	68	103	74	93	110	
引張力51%		49	71	106	72	92	110	
引張力100%		10%	40	62	100	75	88	100
引張力91%			41	63	101	75	88	100
引張力83%	42		64	103	74	87	100	
引張力75%	44		67	105	73	87	99	
引張力68%	47		69	107	72	86	99	
引張力62%	49		72	110	71	86	99	
引張力56%	52		75	114	68	85	98	
引張力51%	55		79	119	65	84	98	
引張力100%	25%		44	68	113	68	77	83
引張力91%			45	70	115	68	77	83
引張力83%		48	73	117	67	77	83	
引張力75%		51	76	121	66	76	82	
引張力68%		55	80	125	64	76	82	
引張力62%		59	86	131	60	75	82	
引張力56%		66	93	139	55	73	82	
引張力51%		73	103	150	49	69	81	

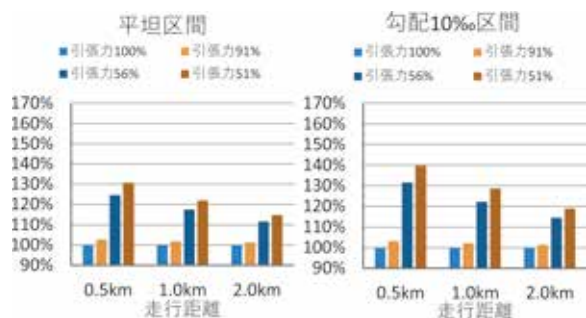


図9 力行時間割合の比較(左図:平坦, 右図:勾配10%)

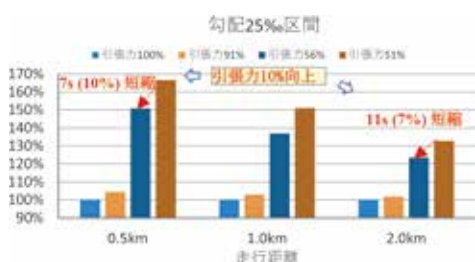


図10 力行時間割合の比較(勾配25%)

特に勾配25%の条件において最も時間短縮割合が大きかった(表4, 各引張力の力行時間を比較した結果)。これは、機関車列車の場合と同様に、加速力が制御改善前よりも大きく向上することによる。

そこで、最も効果が大きかった引張力51%を基準(改善前)として、比較結果を以下にまとめる。

○引張力51%⇒56%(約+10%けん引力の向上)

走行距離0.5km

- ・平坦：力行時間49s⇒47s, 2s(4%)短縮
- ・勾配10%：力行時間56s⇒52s, 4s(7%)短縮
- ・勾配25%：力行時間73s⇒66s, 7s(10%)短縮

走行距離2.0km

- ・平坦：力行時間106s⇒103s, 3s(3%)短縮
- ・勾配10%：力行時間119s⇒114s, 5s(4%)短縮
- ・勾配25%：力行時間150s⇒139s, 11s(7%)短縮

在来線電車でも機関車列車と同様に、勾配25%区間においては、制御改善による力行時間の短縮効果が大きいことが確認された。また、走行距離が長くなるほど時間短縮割合が小さくなる傾向にある。これは、走行距離(駅間距離)が短い方が、低速度域(0~40km/h程度)で走行する時間が長く、制御改善による加速力への向上効果が大きくなるためである。

計算結果では、走行距離1~2kmにおける、力行時間の短縮は数秒程度であったが、首都圏の通勤・近郊電車は、短距離で加速と減速を繰り返す運転パターンが一般的である。そこで、例として駅数が10の走行線区を仮定し、上記の走行距離2kmの結果に基づき、空転制御性能を改善することによる力行時間の短縮効果を下記に示す(ただし、駅停車時の時間調整は含まない)。

○走行区間で10駅に停車する場合の短縮時間

- ・平坦区間：10駅×3s=30s
- ・勾配10%区間：10駅×5s=50s
- ・勾配25%区間：10駅×11s=110s(参考値)

通勤・近郊電車の運転パターンを考慮すると、停車駅数が多いほど短縮時間が大きくなるため、ダイヤ遅延の抑制効果が大きくなるといえる。

首都圏を想定した場合、平均的な短縮効果は、平坦~勾配10%区間の結果(力行短縮時間30s~50s/10駅)に近いと想定される。

ここで、首都圏には勾配25%が連続する線区は存在しないと考えられるため参考値の扱いとした。また、地方線区では、極端に粘着係数が低下するケースとして、落ち葉などにより運行が困難になる場合がある¹⁰⁾。この場合には、引張力が列車抵抗と近接(図4, $\mu=0.058$)するため、機関車列車と同様の高い時間短縮効果が期待できる。

3.4 新幹線電車

新幹線電車の力行シミュレーションの条件を表5に、得られた力行時間と最高速度の結果の一覧を表6に示す。引張力100%に対する他の引張力(91%, 83%, ……)との力行時間割合の比較を図11と図12に示す。

シミュレーション結果では、引張力を68%から75%

表5 シミュレーション条件(新幹線電車)

引張力	100%, 91%, 83%, 75%, 68%
勾配	平坦(0%), 上り10%, 上り25%
走行距離	10km, 20km, 30km
最高速度	320km/h
想定線区	東北新幹線, 北陸新幹線など
列車質量	8M2T編成, 497.4ton(満車)

表6 力行時間の一覧(新幹線電車)

引張力	勾配	力行時間[s]			最高速度[km/h]		
		走行距離10km	走行距離20km	走行距離30km	走行距離10km	走行距離20km	走行距離30km
引張力100%	平坦	226	354	473	260	295	308
		229	361	484	253	286	299
		231	367	494	246	278	290
		235	375	505	239	269	281
引張力91%		238	382	517	232	261	272
引張力100%	10%	250	395	531	234	259	267
		254	403	545	226	250	257
		257	412	559	218	241	247
		261	422	576	210	231	237
引張力83%		264	433	593	203	221	227
引張力100%	25%	308	486	658	193	208	211
		312	500	681	184	197	199
		316	514	707	176	185	187
		320	531	739	166	173	174
引張力83%		325	551	774	158	161	161

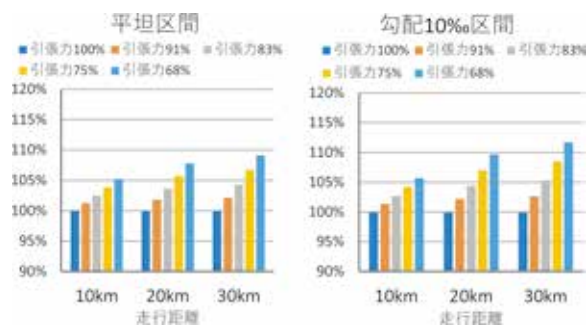


図 11 力行時間割合の比較(左図:平坦, 右図:勾配 10%)

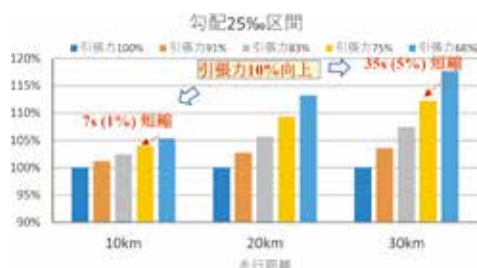


図 12 力行時間割合の比較(勾配)

(約+10%けん引力向上に相当)に改善する場合、時間短縮できる値が他の引張力条件からの改善よりも大きく、特に勾配 25%条件が最も時間短縮割合が大きかった。これは、機関車列車や在来線電車の場合と同様に、加速力が制御改善前よりも大きく向上することによる。

そこで、最も効果のあった条件である引張力 68%を基準(改善前)として、比較結果を以下にまとめる。

○引張力 68%⇒75% (約+10%けん引力の向上)

走行距離 10km

- ・平坦：力行時間 238s ⇒ 235s, 3s (1%) 短縮
- ・勾配 10%：力行時間 264s ⇒ 261s, 3s (1%) 短縮
- ・勾配 25%：力行時間 325s ⇒ 320s, 5s (2%) 短縮

走行距離 30km

- ・平坦：力行時間 517s ⇒ 505s, 12s (2%) 短縮
- ・勾配 10%：力行時間 593s ⇒ 576s, 17s (3%) 短縮
- ・勾配 25%：力行時間 774s ⇒ 739s, 35s (5%) 短縮

新幹線電車においても、急勾配(上り勾配 25%)区間ほど、制御改善による力行時間の短縮割合は大きくなる。

ここで、引張力 68%と引張力 75%の最高速度を比較すると、平坦～勾配 25%区間において最高速度が9～13km/h 高くなる(表6)。このことから、新幹線電車におけるけん引力向上は最高速度が高く、駅間距離が長い場合に力行時間の短縮に効果が大きいことが分かる。ただし、今回の調査からは、新幹線電車の場合には、機関車列車と在来線電車より力行時間短縮割合は小さいといえる。

4. まとめ

空転制御試験では、一般的に悪天候時を想定したレール湿潤状態において、引張力や平均列車加速度に基づいて評価している。本研究では、空転制御改善によるけん引力の向上が力行時間短縮に及ぼす効果を概括的に把握することを目的とした。そこで、最近の電気機関車列車と在来線(通勤・近郊)電車列車、さらに新幹線電車のモデルを用いて、勾配や走行距離(駅間距離)の異なる条件に基づき、力行シミュレーションを実施した。

この結果、力行時間短縮の効果は、加速力が小さくなる急勾配区間において大きくなることが確認できた。

特に、積載量の大きい貨物けん引の機関車列車では、空転制御改善によりけん引力を 10%向上できれば、けん引力が大きく低下する低粘着の状況(けん引力が引張力 75%相当)において、力行時間を大幅に短縮し、安定輸送への貢献が期待できることがわかった。

首都圏の走行区間を想定した在来線(通勤・近郊)電車において、中・高速度域で空転しにくい傾向があるため、全速度域ではなく、引張力 100%の垂下パターンに一致する値まで低下させた条件で力行時間を計算した結果、空転制御改善により、一回の力行で短縮できる時間は数秒程度であった。しかし、駅間距離が短く、停車駅数が多い線区ほど、走行区間全体における力行時間を短縮できることが分かった。

新幹線電車において、空転が発生しやすいと想定される、速度 150km/h 以上の引張力を低下させた条件で力行時間割合を計算した結果、上記の車種に比べて力行時間短縮の効果は小さいが、最高速度が高く、駅間距離が長い運転パターンほど、力行時間の短縮効果が期待できることが確認できた。

文 献

- 1) 山下道寛, 添田正: インバータ制御機関車の起動けん引力を向上する空転再粘着制御方法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.11, pp.17-22, 2016
- 2) 山下道寛, 三木真幸, 大江晋太郎, 島田直人, 山中章広, 北村琢也: 速度センサレス電車の主電動機電流情報を用いた空転抑制方法, 鉄道総研報告, No.31, No.6, pp.5-10, 2017
- 3) 日本鉄道車輛工業会: 鉄道車両一電車の車両性能算出方法, JRIS R 1060:2016, 2016年12月12日制定
- 4) 日本鉄道運転協会: 運転理論(再改定版)ー基礎知識と実務応用一, p.4, p.105, 2012年7月1日発行
- 5) 川添雄司: 交流電気車両要論, p.59, 1971年12月1日
- 6) 日本鉄道車両工業会: 車両技術 239号ーJR 東日本 E5 系新幹線電車(量産先行車)の概要, pp.3-21, 2010
- 7) 日本鉄道車両工業会: 車両技術 224号ーJR 貨物 EH200 形式直流電気機関車の概要, pp.3-11, 2002
- 8) 日本鉄道車両工業会: 車両技術 233号ー東日本旅客鉄道株式会社 E233 系一般形直流電車(中央快速線等用), pp.3-21, 2007
- 9) 新井浩, 菅野悟, 柳瀬直仁: 新幹線高速化のプレーキシテムについて, 図 8, JR EAST Technical Review, No.22, pp.11-14, 2008
- 10) H. Chen, T. Furuya, S. Fukagai, S. Saga, J. Ikoma, K. Kimura, J. Suzumura, "Wheel slip/Slide and low adhesion caused by fallen leaves," Wear, 203187, pp.446-447, (2020).