

超高速鉄道における車内定常加速度

橋本 渉一*

Stable Acceleration of Rollingstock Inside in Ultra High-speed Railway

Shoichi HASHIMOTO*

ABSTRACT

In Tsuru City, Yamanashi Pref. Magnet levitation system has been carried running-tests. This Ultra high speed railway system is planed to construct between Tokyo and Nagoya in 2025. For Ultra high speed rollingstocks, riding quality is important at circular curve and transition curve section. Especially at overlap section, horizontal curve and vertical curve, the inside acceleration of rollingstock needs to estimated. In this report, acceleration parallel to rollingstock's floor , acceleration right angles to the floor, rolling angle velocity, rolling angle acceleration are calculated and compared with those of the present Shinkansen rollingstocks.

keywords: high-speed, railway, maglev, riding quality, guideway alignment,

1. はじめに

1872年に我が国における営業運転が開始された後、鉄道は旅客・貨物の陸上輸送の大部分を担い、国民生活、経済の発展を支える公共輸送機関として全国にその路線網が形成された。第二次世界大戦後の経済発展に伴う在来線の輸送需要の逼迫により新たに建設された東海道新幹線では世界初の200km/h運転が行われ、これを先駆けとして欧米の高速鉄道の時代が始まった。

次世代の超高速鉄道としての超電導磁気浮上式鉄道¹⁾は、永年の技術開発期間を経て実用化に向け山梨リニア実験線²⁾が建設され1997年より現在まで試験走行が行われている。(写真1)

本研究は、将来営業運転が計画されている超電導磁気浮上式鉄道において、乗客への乗り心地^{2) 3)}に関係する、平面および縦曲線が競合する場合の車内の定常加速度、緩和曲線区間を高速走行する際の車内床面平行加速度およびローリング角(床面回転角)の変化について在来新幹線における高速走行時の条件と比較し、評価することを目的とする。

2. 世界の高速鉄道の線形基準

世界の高速鉄道の設計最高速度と最小曲線半径³⁾

を図1に示す。近年の設計最高速度は300~350km/hで計画され、最小曲線半径は8,000m領域の規格が採用されている。乗客に作用する定常加速度を考慮し曲線半径には大きい値を採用することになるが、その反面ルート選定時の拘束は多くなる。

500km/h超の高速領域を計画している超電導磁気浮上式鉄道の場合には、この延長上で検討すると10,000m領域より大きい曲線半径を採用することも考えられるが、ルート選定上の自由度を大きくすることを念頭に、より小さい曲線半径を採用するため



写真1 浮上車とガイドウェイ
(鉄道総合技術研究所 提供)

* 都市工学科 教授

の検討が行われ、線路建設時の基準となる平面曲線、最大カント、緩和曲線長、縦曲線等の基本的諸元⁴⁾や乗り心地管理に関わる許容狂い等の基準値が定められた。⁵⁾

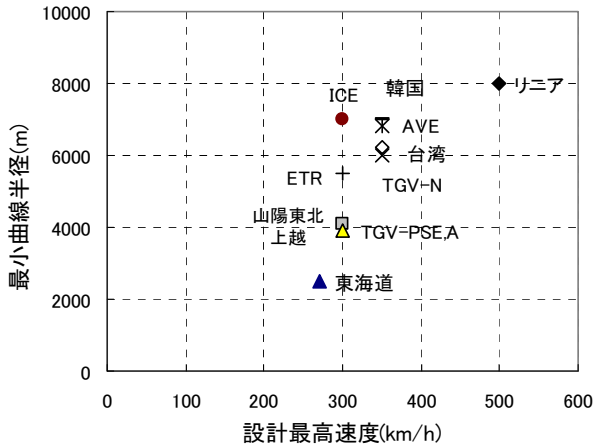


図1 設計最高速度と最小曲線半径³⁾

3. 曲線走行時の車内定常加速度

3.1 平面曲線走行時の加速度

平面曲線走行時の車内で乗客の受ける床面平行および直角加速度は、式(1)(2)で表される。⁴⁾

$$\alpha_{hu} = \frac{v^2}{gR_h} \cos(\theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \quad \dots (1)$$

$$\alpha_{hv} = \frac{v^2}{gR_h} \sin(\theta - \phi) + \cos(\theta - \phi) \quad \dots (2)$$

- ここに
- α_{hu} ・・・平面曲線時の床面平行加速度 (g)
 - α_{hv} ・・・平面曲線時の床面直角加速度 (g)
 - R_h ・・・平面曲線半径
 - v ・・・走行速度
 - g ・・・重力の加速度 (9.8m/s²)
 - θ ・・・ガイドウェイのカント角
 - ϕ ・・・ガイドウェイに対する車体回転角

3.2 縦曲線走行時の加速度

縦曲線走行時の走行速度、車内で乗客の受ける床面平行および直角加速度は、式(3)(4)で表される。

$$\alpha_{vu} = \frac{v^2}{gR_v} \cos(\theta - \phi) \quad \dots (3)$$

$$\alpha_{vv} = \frac{v^2}{gR_v} \sin(\theta - \phi) \quad \dots (4)$$

- ここに
- α_{vu} ・・・縦曲線時の床面平行加速度 (g)
 - α_{vv} ・・・縦曲線時の床面直角加速度 (g)
 - R_v ・・・縦曲線半径

3.3 曲線競合時の加速度

地形、地質、沿線地域の条件を考慮しルート選定を行う場合、一般的に平面曲線および縦曲線の競合が避けられない場合も多い。

このような場合に車内定常加速度を緩和させることを目的とし、両曲線が競合することを積極的に利用することも過去に提案⁶⁾されている。

両曲線が競合する場合の車内定常加速度は、平面あるいは縦曲線が単独で存在する場合の定常加速度の和で求められ、式(5)(6)で表される。

$$\alpha_u = \alpha_{hu} + \alpha_{vu} \quad \dots (5)$$

$$\alpha_v = \alpha_{hv} + \alpha_{vv} \quad \dots (6)$$

- ここに
- α_u ・・・曲線競合時の床面平行加速度 (g)
 - α_v ・・・曲線競合時の床面直角加速度 (g)

4. 曲線走行中定常加速度の算出

4.1 超高速鉄道および新幹線の線形

定常加速度を算出するための条件として、超電導磁気浮上式鉄道は山梨リニア実験線の諸元を用いる。また東海道新幹線では N700 系車両の 270 km/h 走行時の軌道面に対する車体姿勢制御+1° の場合、山陽新幹線では 500 系車両の 300 km/h 走行時の条件を用いる。これら線路諸元を表 1 に示す。

表 1 浮上式および在来新幹線の線路諸元

	速度(km/h)	平面(m)	縦(m)	カント
浮上式	500	8000	40000	10°
東海道	270	2500	10000	200 mm
山陽	300	4000	15000	155 mm

4.2 床面平行および直角加速度

車体の台車に対するロール変位がなく床面はガイドウェイ・軌道面と平行で走行すると仮定した場合の、凹形縦曲線と平面曲線が競合時の、車内乗客が受ける床面平行加速度を図 2 に、床面直角の定常加速度を図 3 に示す。これらから得られる合成ベクトルの加速度を図 4 に示す。

縦曲線 40000m、平面曲線 8000m の山梨リニア実験線の線路諸元条件では、床面平行加速度 0.06 g、床面直角加速度 0.076 g と単独の加速度値としては許容範囲内にあると考えられるが、合成した加速度値は 0.097 g となっており、小さくはない。

凸形縦曲線と平面曲線が競合時の、車内乗客が受ける床面平行加速度を図 5 に、床面直角の定常加速度を図 6 に示す。これらから得られる合成ベクトルの加速度を図 7 に示す。

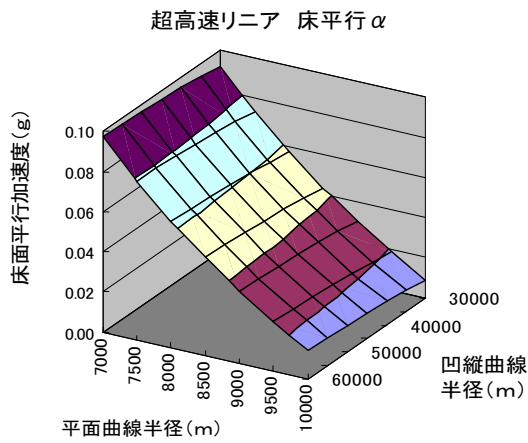


図2 凹縦・平面曲線競合：床面平行加速度

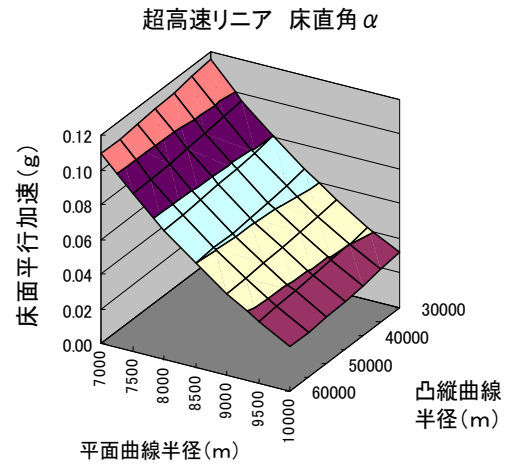


図5 凸縦・平面曲線競合：床面平行加速度

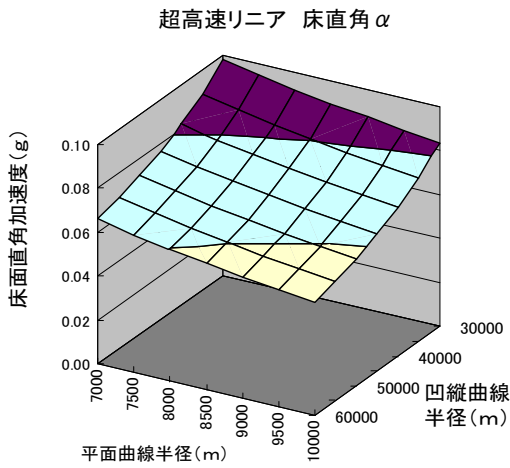


図3 凹縦・平面曲線競合：床面直角加速度

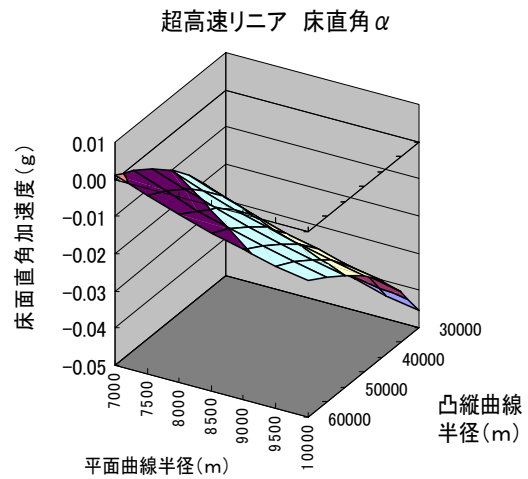


図6 凸縦・平面曲線競合：床面直角加速度

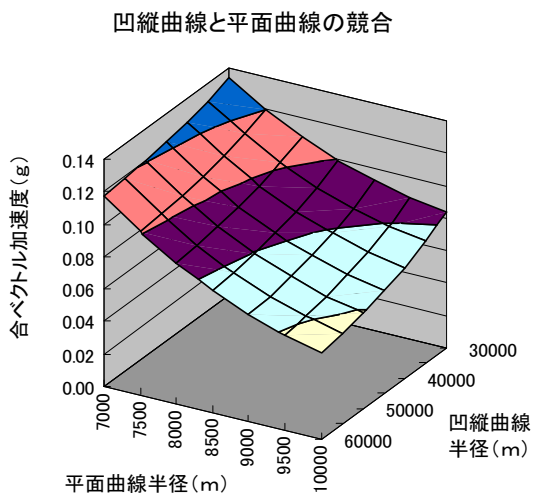


図4 凹縦・平面曲線競合：合ベクトル加速度

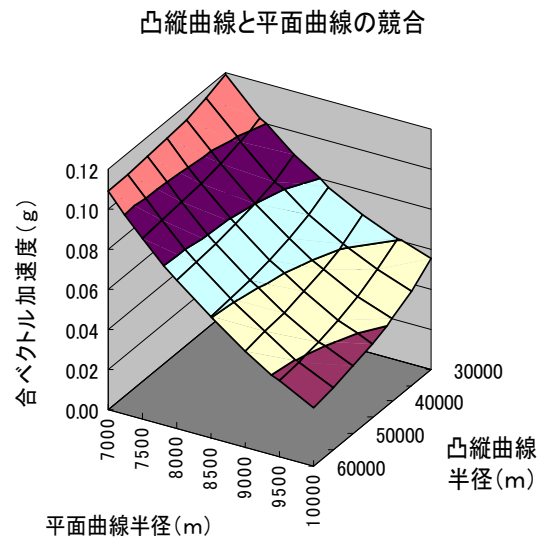


図7 凸縦・平面曲線競合：合ベクトル加速度

縦曲線 4000m, 平面曲線 8000mの山梨リニア実験線の線路諸元の条件では, 床面平行加速度 0.077 g となるが, 床面直角加速度は上向きに 0.021 g が作用する結果として, 合成した加速度値は緩和され 0.08 g に収まっている。

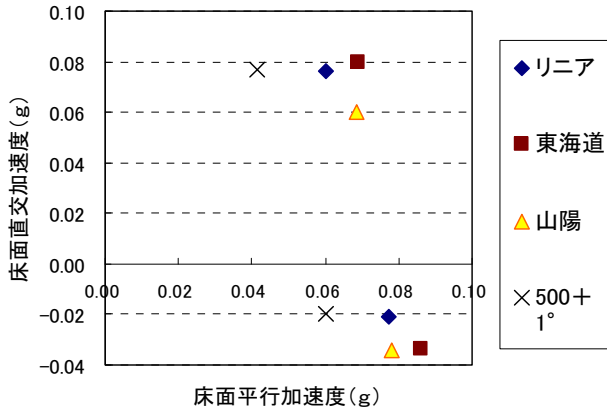


図8 曲線競合時の床面平行・直交加速度

前記の平面曲線および縦曲線が競合した場合の, 車内乗客が受ける床面平行および直角の定常加速度と, 500km/h 走行時にガイドウェイ面に対し +1° の姿勢制御を行った場合, 現行の東海道・山陽新幹線車両と比較した結果を図8に示す。正の加速度値は凹縦曲線走行時, 負の加速度値は凸縦曲線走行時を表している。

500km/h 走行時の姿勢制御なしでも, 現行の東海道・山陽新幹線車両内で受ける加速度より小さい値となり良好な状態を示しており, さらに +1° の姿勢制御を行った場合には, 床面平行加速度は縦凹曲線区間で30%以上, 縦凸曲線区間で20%以上の通減効果が見られる。

4.3 550 km/h 領域の検討⁷⁾

超電導磁気浮上式鉄道のシステム設計は 500 km/h 領域の超高速走行を基準としているが, +50km/h の速度向上時を想定し, その場合に +2° の姿勢制御を行った場合を追加し 4.2 節と同様の検討を行った結果を図9に示す。

550m/h 走行時のガイドウェイ面 +1° の制御時の車内加速度は, 凹縦曲線および凸縦曲線走行時ともに現行の東海道新幹線より +30%以上の値を示すが, +2° の制御を行った場合には東海道新幹線に近い値を示すことができる。

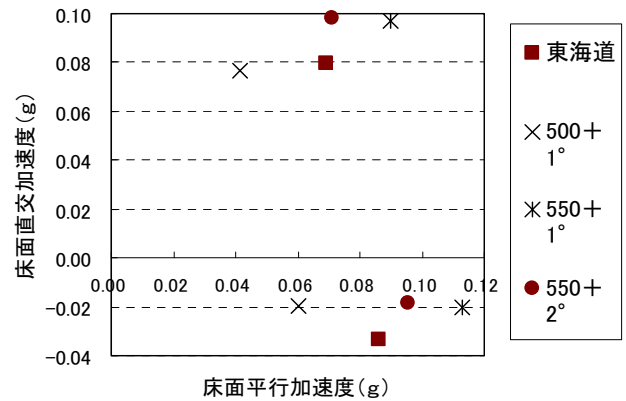


図9 曲線競合時の床面平行・直交加速度

5. 緩和曲線の加速度変化率・ローリング角速度

直線から曲線区間および曲線から直線区間へ進入する場合に, 新幹線および浮上式鉄道の緩和曲線において曲率およびカントはサイン半波長で逓減され, その平面線形は x-y 座標軸において式(5)で表される。

また加速度の変化率(Jerk)は式(6), ローリング角速度は式(7), ローリング角加速度は式(8)で表される。⁴⁾

$$y = \frac{x^2}{4R} + \frac{L^2}{2\pi^2 R} (-1 + \cos \frac{\pi}{L} x) \quad \dots (5)$$

$$\frac{d^3 y}{dt^3} = \frac{\pi v}{2L(t)} \alpha_u \sin(\pi v t / L) \quad \dots (6)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\pi v}{2L(t)} \Phi \sin(\pi v t / L) \quad \dots (7)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} = \frac{\pi^2 v^2}{2L^2(t)} \Phi \cos(\pi v t / L) \quad \dots (8)$$

- ここに
- y …… 平面曲線 (m)
 - x …… 進行方向距離 (m)
 - R …… 平面曲線半径 (m)
 - v …… 走行速度 (m/sec)
 - L …… 緩和曲線長 (m)
 - α_u …… 床面平行加速度 (m/s²)
 - Φ …… 車体回転角 (°)
 - ϕ …… ガイドウェイに対する車体回転角
 - t …… 走行時間 (sec)

進行方向の距離軸 (m) に対する加速度の変化率 (Jerk) は図10に示す通り Sin 曲線で表され, 最大値は緩和曲線中央で現れる。同様にローリング角加速度を図11に示す通り Cos 曲線で表され, 最大値は緩

和曲線の始点および終点に現れ、サイン半波長逓減の場合にはその前後区間とは不連続となる。

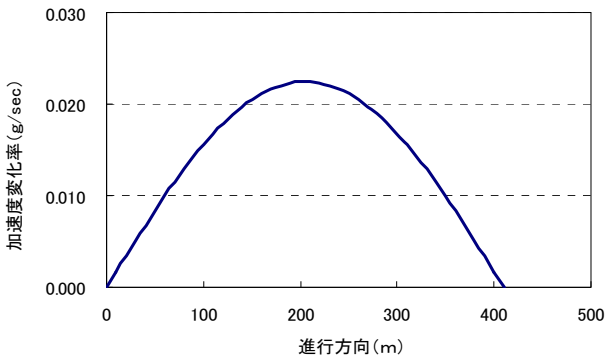


図 10 床面平行加速度の変化

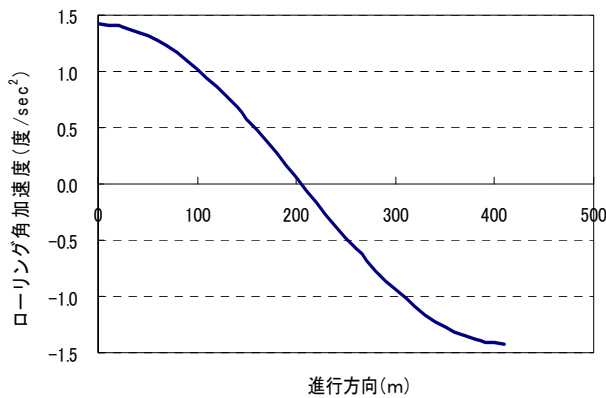


図 11 ローリング角加速度の変化

6.2 床面平行加速度と同変化率

表 2 に示す線路諸元の緩和曲線区間を高速走行した場合の、床面平行加速度および加速度変化率の最大値を図 12 に示す。

在来新幹線では床面平行加速度および加速度変化率とともに、東海道新幹線において N700 系車両で 1° の車体姿勢制御を行い 270km/h 走行した場合が大きく、続いて山陽・東北・上越新幹線、制御なし車両の東海道新幹線、整備新幹線の順に小さくなっていく。

超電導磁気浮上車両が 500km/h 走行した場合には、整備新幹線における値とほぼ同等で小さい収まっている。 1.5° の車体姿勢制御を行い 550km/h の速度向上を行った場合には、床面平行加速度は約 0.09 g まで増加し、同様に加速度変化率も増加する。

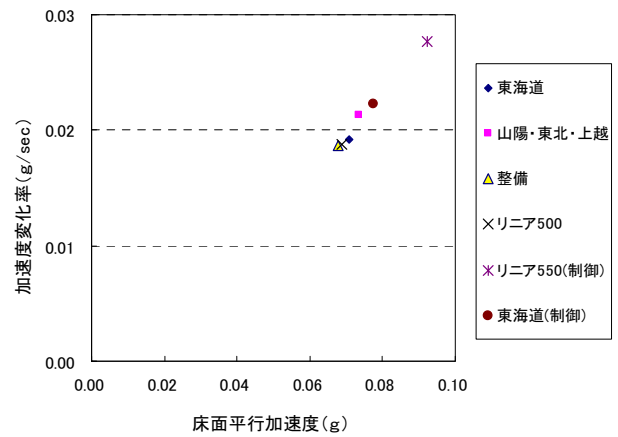


図 12 床面平行加速度の変化

6. 床面平行加速度・ローリング角速度および同変化率の算出

6.1 走行速度および曲線諸元

緩和曲線中の床面平行加速度の変化率・ローリング角速度を算出するための条件として、超電導磁気浮上式鉄道は山梨リニア実験線の諸元を用いる。東海道新幹線では N700 の軌道面に対する車体姿勢制御 $+1^\circ$ 時の 270 km/h 走行、山陽新幹線は 500 系車両の 300 km/h 走行時の条件を用いる。これら線路諸元を表 2 に示す。

表 2 浮上式および在来新幹線の線路諸元

	速度 (km/h)	R半径 (m)	カント mm 度	緩和曲線長 (m)
東海道	255	2500	200mm	410
東海道(制御)	270	2500	200mm+ 1°	410
山陽・東北・上越	300	4000	155mm	450
整備	320	4000	200mm	505
リニア500	500	8000	10°	800
リニア550(制御)	550	8000	$10^\circ + 1.5^\circ$	800

6.3 ローリング角速度と同変化率

表 2 に示す線路諸元の緩和曲線区間を高速走行した場合の、ローリング角速度およびローリング角加速度の最大値を図 13 に示す。

ローリング角速度およびローリング角加速度とともに、東海道新幹線において N700 系車両で 1° の車体姿勢制御を行い 270km/h 走行した場合が大きく、続いて整備新幹線、制御なし車両の東海道新幹線、山陽・東北・上越新幹線の順に小さくなっていく。

超電導磁気浮上車両が 500km/h 走行した場合には、東海道新幹線の制御付き車両より若干大きい値を示している。

1.5° の車体姿勢制御を行い 550km/h の速度向上を行った場合には、ローリング角速度は約 $3.5^\circ / \text{sec}$ まで増加し、同角加速度も $2.0^\circ / \text{sec}^2$ と増加している。

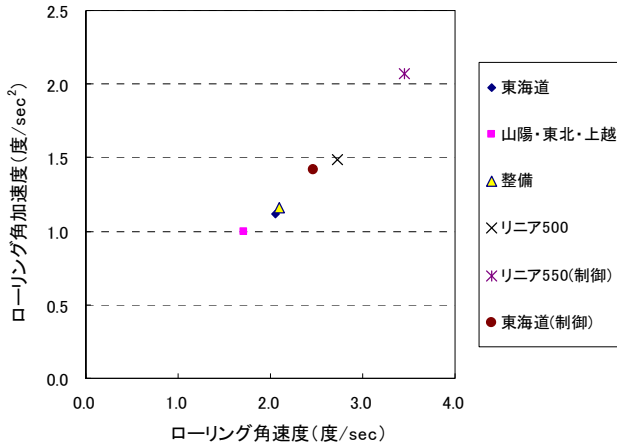


図 13 ローリング角速度の変化

- 3) 高井秀之：「高速鉄道の線形基準に関する調査」鉄道総研報告, Vol. 9, No. 12, pp. 61-66, 1995. 12
- 4) 橋本渉一：「超高速鉄道の線形基準」神戸高専研究紀要, No. 39, pp. 97-102, 2001. 3
- 5) 松浦章夫, 橋本渉一, 古川敦：「超電導浮上式鉄道ガイドウェイの施工精度と乗り心地レベル」, 土木学会論文集, No. 482/IV-22, pp. 67-76, 1994. 1
- 6) 八十島義之助「高速鉄道の曲線設計について」土木学会年次学術講演会概要集, IV-110, pp. 271-274, 1971. 10
- 7) 橋本渉一「超高速鉄道における平面・縦曲線競合区間走行時の車内加速度評価」土木学会関西支部年次学術講演会概要集, IV-27, 2009. 5
- 8) 橋本渉一「高速走行時の緩和曲線における車内加速度・ローリング角速度の変化」土木学会全国大会年次学術講演会概要集, IV-237, 2009. 9

7. まとめ

平面曲線および縦曲線が競合する区間において走行車両内の床面平行加速度および床面直角加速度, また緩和曲線区間の床面平行加速度と同変化率, 床面のローリング角速度と同角加速度に対し, 500km/hの超高速領域で走行する超電導磁気浮上式鉄道と在来新幹線の比較検討を行った結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 500km/h 走行時現行の東海道・山陽新幹線と比較するとより小さい値を示し, $+1^\circ$ の姿勢制御を行った場合には, より良好な状態となる。
- (2) 550km/h 走行 $+1^\circ$ 姿勢制御時の床面平行加速度および床面直角加速度は, 現行の東海道・山陽新幹線と比較して $+30\%$ 以上大きくなり $+2^\circ$ 姿勢制御を行った場合には, 現行新幹線とほぼ同等の値を示す。
- (3) 500km/h 走行時の浮上式鉄道の床面平行加速度およびその変化率は, 現行新幹線と同等の値を示す。550km/h 走行時には現行新幹線より $+20\%$ の値を示す。
- (4) 500km/h 走行時の浮上式鉄道の床面ローリング角速度および角加速度は現行各新幹線より僅かに大きい値を示す。550km/h 走行時には現行新幹線より約 $+30\%$ の値を示す。

【参考文献】

- 1) 宮田尚彦, 松浦章夫, 高木肇：「超電導磁気浮上式鉄道」土木学会論文集, No. 415/VI-12, pp. 17-25, 1990. 3
- 2) 橋本渉一：「浮上式鉄道ガイドウェイの研究と技術開発」, 土木学会論文集, No. 619/ I -47, pp. 1-12, 1999. 4