

これからの鉄道車両への提言 — 高速曲線通過と操舵性台車 —

谷 藤 克 也

傾斜可能な車体と輪軸操舵性のよい台車で曲線をより高速で通過したい。これは小曲線の介在が多い在来線で、到達時間短縮のために期待される一般的な取組みです。曲線乗り心地の観点からは、カント量の増加や車体傾斜車両により速度向上が進められています。合わせて、曲線通過時に生じる車輪フランジの摩耗と軌道への負荷を減少させるため、輪軸の操舵性を備えた台車も採用されています。そこでは、自己操舵や強制操舵の方式が実用化され、アクティブな操舵方式も提案されるなど、各所で様々な検討が行われています。

本稿では、筆者らがこれまでに手がけた検討のなかから、鉄道車両の高速曲線通過と操舵性台車に関する知見を紹介し、今後の車両開発上の提言にしたいと考えます。

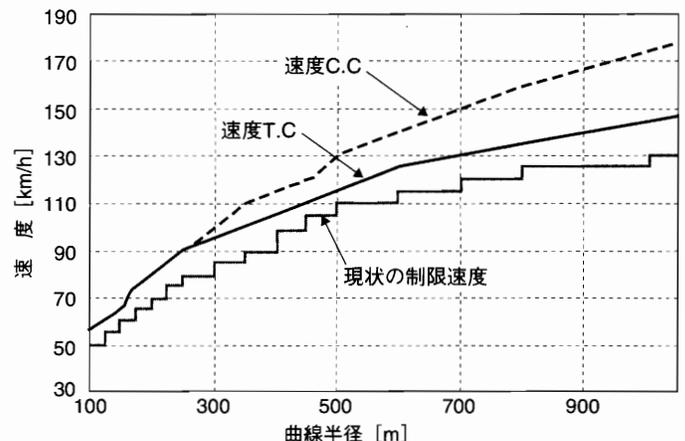
1. 車体傾斜のフルアクティブ制御

現在、地点情報を利用した「制御付き」の振り子車両が多く採用されています。図-1は、さらなる速度向上をめざし、フルアクティブで車体の傾斜を制御することにより通過可能な曲線速度の計算した一例⁽¹⁾です。カントは基本速度の均衡カント量の70%、緩和曲線長は L_1 に基づいて設定されています。ここでは、地点情報を用いずに車上観測データのフィードバックだけで、目標傾斜角への遅れを少なくするとともに、ロール角速度を基準値以内に抑えるような制御が行われています。図中には、車内の左右定常加速度を0.08 G以下とする二つの速度がプロットされています。円曲線中の左右加

速度だけを考慮した速度 (C.C.) と緩和曲線中の左右加速度も考慮した速度 (T.C.) です。緩和曲線中の不釣り合い加速度を定常加速度の基準値で判断することに議論の余地はありますが、低い周波数帯域で変動することから、定常加速度の基準値をそのまま適用したものです。

最高速度の制限がないものとするれば、円曲線中の速度 (C.C.) は、曲線半径が大きくなるほど現状の制限速度から向上可能な幅が増大します。一方、緩和曲線中の速度 (T.C.) では、向上可能な余裕が減少しています。すなわち、緩和曲線中の不釣り合い加速度を評価に入れると、フルアクティブで車体

図-1
車体傾斜のフィードバック制御による速度向上



傾斜を制御しても、フィードバック制御では速度向上の幅が小さなものとなります。この傾向は曲線半径が大きいほど顕著です。なお、最高速度が現状120～130 km/h程度であれば、地点情報が不要だけにフィードバック制御による向上幅でも有用な方策と考えられます。

緩和曲線中の不釣り合い加速度を評価に加えた場合、フィードバック制御で速度向上の幅が減少する理由は緩和曲線長の不足にあります。速度C.C.まで向上させるには、「制御付き」振り子車両と同様に緩和曲線の手前から車体を傾斜させなければなりません。現在、地点検知のためにGPSを応用した研究が報告されており、正確な地点情報に基づいた車体傾斜の予見制御を実現することが期待されます。

また、今後は新幹線でも車体傾斜による曲線速度の向上が求められるものと予想されます。予見制御によるフルアクティブな車体傾斜の具体化は、地点検知装置が設備される新幹線により容易であり、実現の可能性も大きいと思われる。

2. 操舵性台車による横圧低減

曲線速度向上による車輪・レール間の横圧増加対策としても、操舵性台車の採用が期待されます。図-2は、各種操舵方式による横圧低減効果を計算した一例⁽²⁾です。非操舵の従来台車、自己操舵台車、リンク式強制操舵台車、アクティブ操舵台車の4方式について、基本速度+20～25km/hの走行条件で比較しています。ここでは、在来円弧踏面車輪を使用するとともに、同じ限界速度となるように各台車の輪軸支持剛性が選択されています。また、

アクティブ操舵台車の操舵ゲインは、先頭軸横圧が曲線半径400mでリンク式強制操舵台車と等しくなるように調整しています。

先頭軸横圧の傾向は従来台車に対し、自己操舵、リンク式強制操舵、アクティブ操舵の順で低減しており、操舵性台車の導入が横圧低減に有効なことを示しています。また、半径200 m以下の急曲線になると前二者の操舵効果が急減し、アクティブ操舵方式のみが横圧低減効果を維持することも示されます。以下では、急曲線中の操舵効果に着目し、操舵性台車の特徴について述べます。

- ①リンク式強制操舵台車について、先頭軸の車輪横圧を非操舵の条件と比較⁽³⁾して図-3に示します。走行速度は曲線半径により基本速

度+20～25km/hの範囲です。図示されるように、円曲線中で生ずる横圧は半径300m以上の曲線では操舵により横圧が低減されています。

一方、半径200m以下の急曲線では、強制操舵機構の付加がむしろ横圧を増大させています。この理由は、操舵機構に車体と輪軸から作用するばね力が、輪軸を外軌レールに押し付ける旋回モーメントを台車枠に与えるためです。これに対しては、輪軸の自己操舵性が横圧増大を抑制する効果を有しています。すなわち、車輪形状として有効こう配が大きい円弧踏面を採用することが、リンク式強制操舵の場合にも有利と言えます。

- ②アクティブ操舵台車の構成例⁽⁴⁾

図-2 操舵方式による横圧低減効果の一例

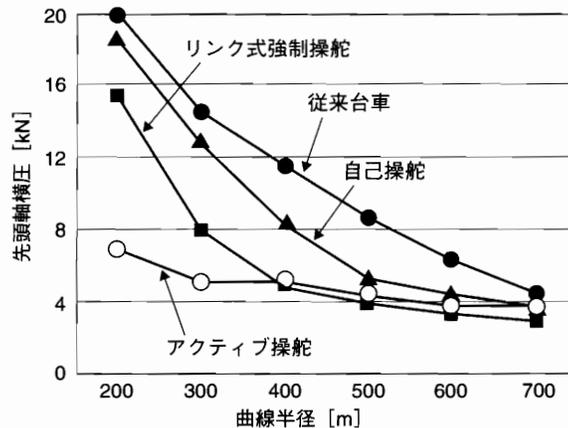
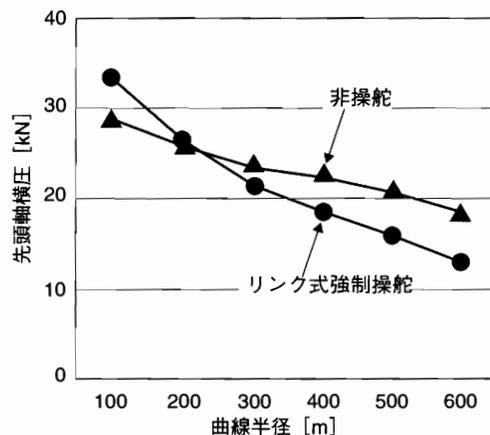


図-3 リンク式強制操舵による急曲線における横圧増大



を図-4に示します。この輪軸支持機構では、補助ばねと直列のアクチュエータに対して主ばねが並列に配置されています。アクチュエータをダンパで置き換えると、曲線通過性と走行安定性の両立させる自己操舵機構⁽⁵⁾にもなります。

ここでの制御則は、操舵のための観測量をボギー角、安定化のためのそれをアクチュエータのピストン速度としてフィードバックしています。安定化のゲインを自己操舵機構のダンパ減衰係数と等価にすれば、自己操舵と同じ走行安定性を維持しつつ、曲線通過性能の向上が可能になります。ここでは、操舵のための制御力を各台車の前軸だけに加えています。アタック角と横圧の計算例を図-5に示します。自己操舵の状態と比較すると、アクティブ操舵が急曲線でのアタック角急増を抑制し、半径100～300 mの曲線でも横圧を低減することが示されます。このように、アクティブ操舵は急曲線の介入率が高い線区に向けた方式と言えます。

3. 関連して

急曲線に付設されるスラックは、本来、三軸台車を前提とするものですが、

図-5
アクティブ操舵による性能改善

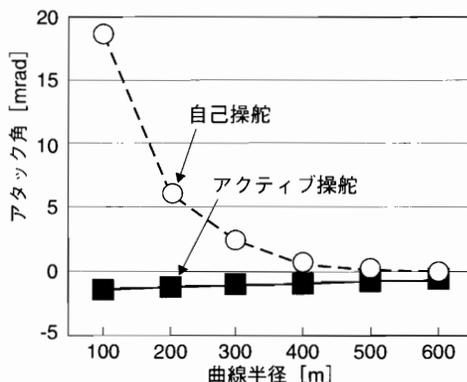
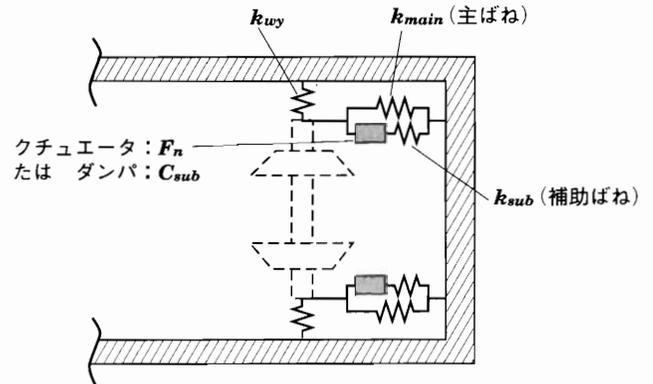


図-4
アクティブ操舵機構の構成例



二軸台車であっても操舵性を備えていれば、スラックによる横圧低減が期待できます⁽⁶⁾。円弧踏面車輪の場合、スラック付設下で転がり半径差が拡大する踏面形状への修正により、さらなる横圧低減の可能性もあります。

また、新在直通をめざす軌間可変電車の開発が報じられています。動力軸の軌間可変のもと、新幹線の高速走行と在来線の(車体傾斜による高速)曲線通過を両立させる技術が注目されます。DDMによる左右車輪間のトルク差(速度差)を利用した操舵方式なども適用性の可否に関心が持たれるところです。

なお、操舵のように走り装置を直接制御する技術に対しては、信頼性とフェールセーフ性がより強く要求されます。それらを克服し、さらなる高速曲線通過が実現されることを期待いたします。

<参考文献>

- (1) 小菅・谷藤・相馬；車体傾斜制御による鉄道車両の曲線通過速度向上（一車両モデルを用いたフィードバック制御の検討），機講論，No.037-1（2003.3）。
- (2) 森山；鉄道車両の曲線通過性能向上に関する研究，博士学位論文（2002），新潟大学。
- (3) 石坂・谷藤；SIMPACKを用いたリンク式強制操舵台車のシミュレーション（急曲線における挙動），機講論，No.027-1（2002.3）。
- (4) 石坂・谷藤・相馬；マルチボディソフトを用いたアクティブ操舵車両の曲線通過シミュレーション，機講論，D & D2002（2002.9）。
- (5) 谷藤・森山；操舵性と走行安定性を両立させる輪軸支持機構のパラメータ決定，機論C，67-662（2001）。
- (6) 森山・谷藤；スラックが二軸ボギー車の曲線通過に及ぼす運動学的影響，機論C，66-652（2000）。