

3512 五次逡減方式の緩和曲線について

Fifth Order Expression Diminishing in Transition Curve

正 [土] 宮垣 圭吾 (東海旅客鉄道株式会社)

Keigo MIYAGAKI, Central Japan Railway Co. 1545-33, Ooyama, Komaki City, Aichi Prefecture

In order to keep riding comfort, train speed is restricted on some curves which do not have enough transition curve length due to the existence of obstacles. As it is difficult to elongate transition curve length on such curves, it can be effective to alternate the shape of transition curve.

The author proposes a new transition curve using fifth order expression, which raises the speed on transition curve without elongating transition curve length by changing the steepest slope in cant, and its characteristics are analyzed by using rolling stock simulation soft "VAMPIRE".

Keyword: transition curve length, riding comfort, cant gradient, roll, roll angle velocity,

1. はじめに

現在、日本の鉄道で使用されている緩和曲線の方式は、直線逡減方式とサイン半波長逡減方式がある。特に、サイン半波長逡減方式は、緩和曲線の始末端部において、カント及び曲率の変化が連続的となり有利であることから、新幹線で採用されている。

しかし、サイン半波長逡減方式は、緩和曲線長が同じ場合、直線逡減方式に比べて、緩和曲線中央部の最大カント勾配が大きくなり乗心地が悪くなるため、直線逡減方式よりも緩和曲線長を長くする必要があり、分岐器等の支障物により緩和曲線長が確保できない箇所では、乗心地を確保するために速度が制限されている。すなわち、現行のサイン半波長逡減方式の緩和曲線で速度を向上するためには、緩和曲線長を延伸するしかない。

一方、平成 10 年に制定された鉄道技術基準省令では、従来から用いてきた乗心地に関するカント及びカント不足の時間的変化割合による緩和曲線長の算出式は削除されたことから、走行安全性が確保される範囲内で乗心地を考慮した緩和曲線長の短縮や、緩和曲線の通過速度向上が可能となる。

以上より、緩和曲線長を延伸せずに、乗心地を確保して緩和曲線の速度制限が緩和できるように、従来のサイン半波長逡減方式に代わる新たな逡減方式を検討する。

2. 緩和曲線の乗心地と緩和曲線長

曲線通過時の乗心地を評価する代表的なものにはロール角速度やロール角加速度があり、振子車両の試験からこれらの限度値が提案されている。カントと曲率に変化する緩和曲線上で生じるロール角速度は、主にカントに起因し、カント C (mm)、緩和曲線始点からの距離 x (m) ロール角 ϕ (rad)、軌間 G (mm)、速度 V (km/h) とすると、ロール角速度 $d\phi/dt$ は式(1)のようになり、乗心地、カント勾配は小さい方が有利である。

$$\frac{d\phi}{dt} \propto \frac{1}{G} \cdot \frac{dC}{dt} = \frac{V}{3.6G} \cdot \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

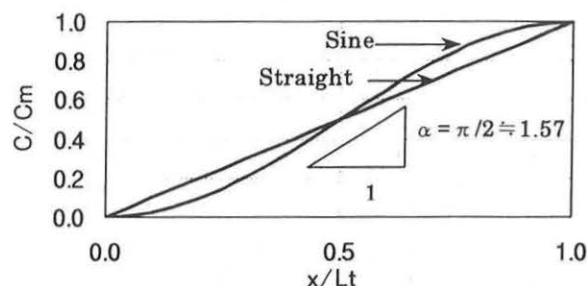


Fig1 Cant form and maximum cant gradient

サイン半波長逡減方式のカント C (mm) は、設定カント C_m (mm)、緩和曲線長 L_t (m) とすると、Fig1 のように、緩和曲線始末端部でカント及び曲率が連続的に変化することから、乗心地上有利である。しかし、緩和曲線中央部のカント勾配は直線逡減の $(\pi/2 \approx 1.57)$ 倍となり、式(1)のように、乗心地に影響する車体ロール角速度 $d\phi/dt$ はカント勾配が小さいほど有利であることから、カント勾配が小さい直線逡減は乗心地上有利な面もある。

一方、緩和曲線長の算出に用いられてきたカントの時間的変化割合 dC/dt の最大値は、式(2)で表される。ここで、直線逡減の勾配 C_m/L_t (mm/m) に対する最急カント勾配 $(dC/dx)_{\max}$ (mm/m) の比 (以後、最急カント勾配比という) を式(3)のように、 α とすれば、式(2)と式(3)から、緩和曲線長 L_t は、最急カント勾配比 α を用いて式(4)で表される。

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_{\max} = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{\max} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{V}{3.6} \cdot \left. \frac{dC}{dx} \right|_{\max} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(dC/dx)_{\max}}{C_m/L_t} \quad (3)$$

$$L_t = \alpha \cdot \frac{C_m V}{3.6(dC/dt)_{\max}} \quad (4)$$

以上のことから緩和曲線始末端ではサイン半波長逡減

のようにカント及び曲率が連続的に変化する、緩和曲線中央部では直線通減のように最急カント勾配が小さいカント形状にすれば、緩和曲線長不足による速度制限の緩和が可能になる。

3 新しい通減方式による緩和曲線

上述のことを鑑み、最急カント勾配比 α を用いたカント勾配に対する通減方式(5)を考案し、式(6)に示すカント通減方式と式(7)に示す緩和曲線形状を提案する。この提案した式を用いて、 α をサイン半波長通減の最急カント勾配比 $\pi/2$ (≈ 1.57)より小さくすれば、緩和曲線長は短くすることが可能になる。

尚、カントは式(7)のように五次式で通減するので、提案する緩和曲線を五次通減緩和曲線と呼ぶことにする。

$$\frac{d(C(x)/C_m)}{d(x/Lt)} = -40(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^4 + 80(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^3 - 6(25-16\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^2 + 2(15-8\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right) \quad (5)$$

$$\frac{C(x)}{C_m} = -8(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^5 + 20(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^4 - 2(25-16\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^3 + (15-8\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^2 \quad (6)$$

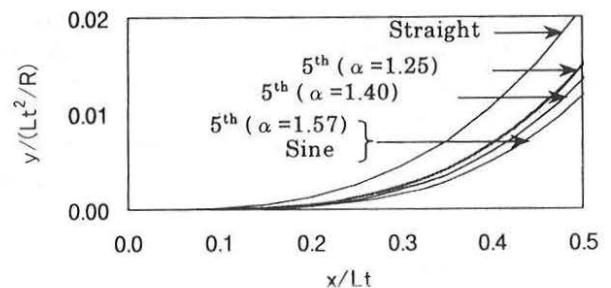
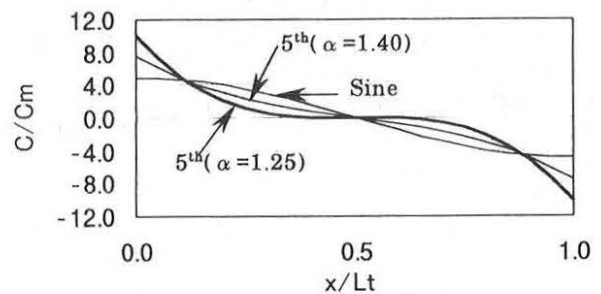
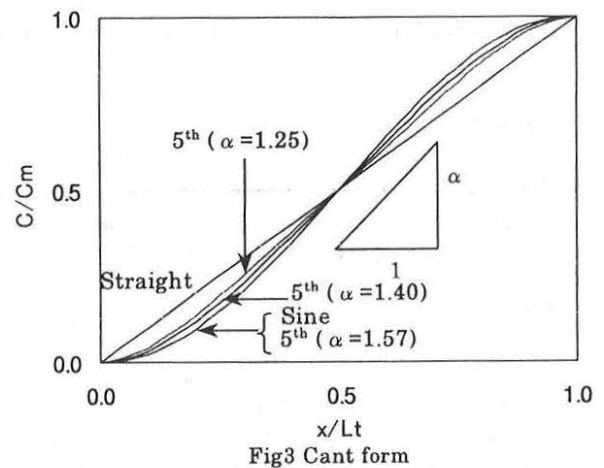
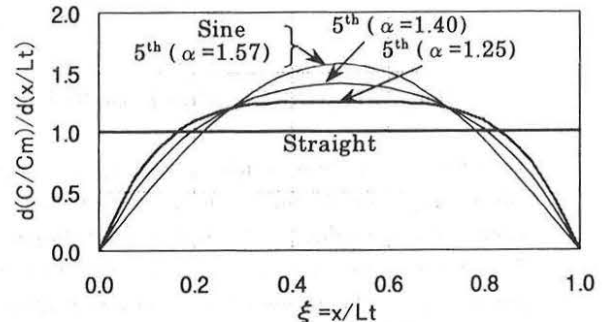
$$\frac{y(x)}{Lt^2/R} = -\frac{4}{21}(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^7 + \frac{2}{3}(3-2\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^6 - \frac{1}{10}(25-16\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^5 + \frac{1}{12}(15-8\alpha)\left(\frac{x}{Lt}\right)^4 \quad (7)$$

Fig 2は α を1.25、1.40、 $\pi/2$ (≈ 1.57)とした五次通減のカント勾配であり、サイン半波長通減と同じく緩和曲線始終端でゼロとなり、カントの変化は連続になる。また、 α が小さいと緩和曲線中央部の最急カント勾配は小さく、 α が1.25の場合、カント勾配は緩和曲線中央付近で直線通減のように一定となり、サイン半波長通減と直線通減の中間的な通減になる。Fig 3は、カント形状であり、 α が小さいと緩和曲線中央部の最急カント勾配は緩くなるが、緩和曲線始終端のカント勾配は大きくなる。Fig 4は、カント勾配の変化率であり、 α が小さいと緩和曲線中央部では小さくなるが、緩和曲線始終端部では大きくなる。特に α が1.25の場合にはカント勾配の変化率ゼロとなり、緩和曲線中央部では直線通減の性質を持っているが、緩和曲線始終端部ではサイン半波長通減の約2倍となっている。

Fig 5は平面緩和曲線形状であり、 α を小さくすると曲率の変化が大きくなり曲線が内方にくる。そのため、式(8)に示す五次通減の円曲線シフト量 w はサイン半波長通減に比べ大きくなり、地形的な理由等でシフト量や既設線からの移動量が曲線内方に対して制約される場合の最急カント勾配比 α は1.25より大きい値となるが、 α は任意に選択できるので制約条件を満たす最小の α を選択すればよい。また、緩和曲線長が同じ場合、円曲線半径 R を小さくすると緩和曲線始端及び円曲線始端が移動し

て曲線全体が外方へ移動するので、円曲線半径を小さくして既設線からの移動量を少なくすることも可能である。

$$w = \frac{75-8\alpha}{420} \cdot \frac{Lt^2}{R} - R \left[1 - \cos \left(\tan^{-1} \frac{Lt}{2R} \right) \right] \quad (8)$$



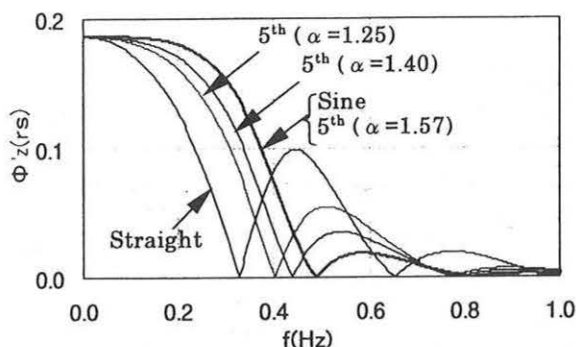


Fig6 Roll velocity of frequency response

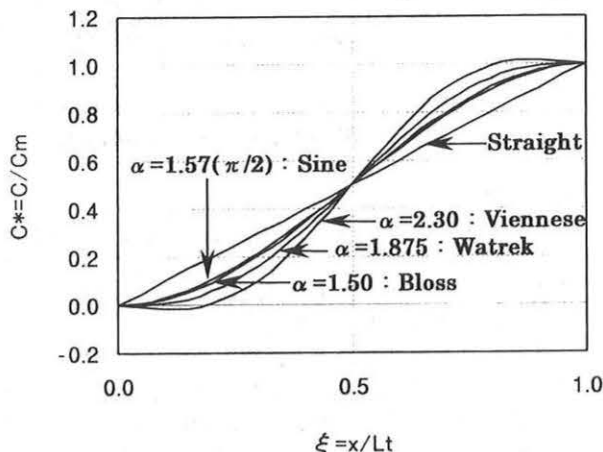


Fig7 Various cant form expressed by 5th order

Fig6は、簡易車両モデルを用いて、周波数領域でカントによる車体ロール角速度を求めた結果である。ただし、車両運動は主に枕ばねが支配的であると、モデルは上下運動、左右運動、回転運動の3自由度で、700系新幹線の車両緒元を用いて解析した。 α を小さくすると、0.4Hz以下ではサイン半波長逓減よりも小さくなり、それ以上では直線逓減より小さくなる。

尚、 α をサイン半波長逓減の最急カント勾配比 $\pi/2$ (≈ 1.57)とした場合、カント勾配、カント形状、平面緩和曲線形状、円曲線のシフト量、簡易車両モデルによるロール角速度はサイン半波長逓減と殆ど一致し、五次逓減の妥当性がわかる。

またFig7は、様々な既存カント形状の最急カント勾配比の値を五次逓減の α に代入した場合であり、五次逓減は既存のカント形状を表現できることが解る。

4 五次逓減緩和曲線の長さ

サイン半波長逓減の緩和曲線長 L_t は、カントの時間的変化割合の限度値45mm/sを用いて式(9)で計算されている。一方、五次逓減方式を用いてカント勾配を小さくすれば、五次逓減緩和曲線の長さは、式(10)のように最急カント勾配比 α がサイン半波長逓減の最急カント勾配比 $\pi/2$ (≈ 1.57)になる $\alpha/\pi/2$ 倍まで短縮可能である。

$$L_t = \frac{C_m}{dC/dt} \cdot \frac{V}{3.6} = \frac{C_m}{45} \cdot \frac{V}{3.6} = 0.0062 C_m V \quad (9)$$

$$L_t = \frac{\alpha}{\pi/2} \cdot \frac{C_m}{45} \cdot \frac{V}{3.6} = 0.00393 \alpha \cdot C_m V \quad (10)$$

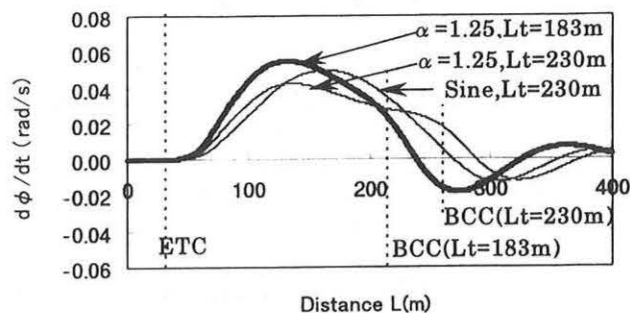


Fig8 Roll velocity by VAMPIRE

Fig8は、サイン半波長逓減と、式(10)を用いて緩和曲線長を短縮した五次逓減($\alpha=1.25$)について、車両応答シミュレーションVAMPIREによりロール角速度を求めた例である。式(10)はカ車体応答を考慮せずカント勾配のみを考慮しているので、カント勾配に比例して緩和曲線長を短縮すると、ロール角速度は現状のサイン半波長逓減よりもやや悪化する。よって、車両応答を考慮すれば、緩和曲線長は式(10)より長くする必要がある。

5 五次逓減緩和曲線による線形改良

緩和曲線長不足で速度制限を受けるサイン半波長逓減の曲線に五次逓減緩和曲線を適用し、線形改良する場合の移動量について検討する。ここではモデル曲線として、円曲線半径3000m、カント160m、緩和曲線長が230mを設定する。この曲線のカントを180mm、緩和曲線長を305mにすれば最高速度270km/hで通過できるが、緩和曲線長不足で230km/hに速度制限されている。

このモデル曲線に $\alpha=1.25$ の五次逓減を適用し線形改良する。その場合、同じ緩和曲線長で265km/hまで速度が向上できる。

Fig9は、五次逓減を適用した場合(改良曲線)の、サイン半波長逓減の平面曲線(現行曲線)からの縦方向移動量である。五次逓減を適用すると、改良曲線全体が曲線内方に移動するため、曲線内方に支障物がある場合は、 α を大きめに設定するか、曲線半径を小さくする必要がある。 α を小さくする場合は速度向上の効果は小さくなる。また半径を小さくするとカントが大きくなるため、緩和曲線長延伸やカント不足に起因して円曲線の速度自体が制限される場合がある。

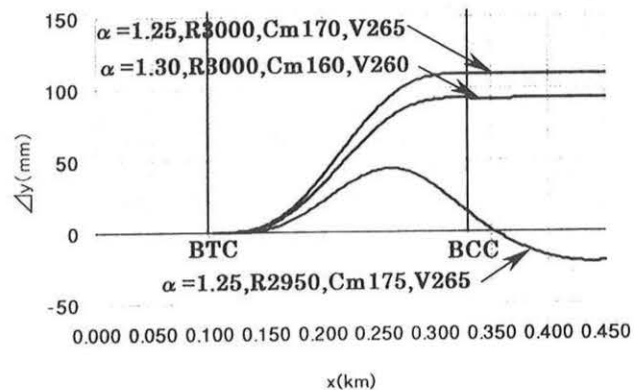


Fig9 Lateral displacement

6 五次通減緩和曲線による速度向上

五次通減によるカント及び緩和曲線形状、緩和曲線長の評価を行うには、乗心地に直接影響するロール角速度や曲率による遠心力を考慮して評価する必要がある。また、最急カント勾配比 α を小さくするとカント勾配の立ち上がり方や曲率の変化が大きくなり、それらによる影響も検討する必要がある。以上のことから、車両応答シミュレーション VAMPIRE を用いて、Table1 に示す3種類のケースで比較する。

ケース①は新幹線の最高速度 270km/h で走行可能な最小曲線 R3000m を 270km/h で走行した場合である。ケース②は緩和曲線長不足で速度制限を受ける曲線 R3000 を制限速度 230km/h で走行した場合である。

Table1 Details of curves

ケース	カント通減方式	半径 (m)	カント (mm)	緩和長 (m)	速度 (km/h)
①	サイン半波長	3000	180	305	270
②	サイン半波長	3000	160	230	230
③	五次	2950	175	230	265

ケース③は提案する五次通減緩和曲線 ($\alpha=1.25$) を用いてケース②の曲線を改良し、265km/h で走行した場合である。改良では、既設緩和曲線からの移動量を少なくするため曲線半径を 2950m とし、カントは 175mm、緩和曲線長を 230m とした。式(11)、式(12)にカント及び緩和曲線形状を示す。

$$C(x) = \left[-4 \left(\frac{x}{L_t} \right)^5 + 10 \left(\frac{x}{L_t} \right)^4 - 10 \left(\frac{x}{L_t} \right)^3 + 5 \left(\frac{x}{L_t} \right)^2 \right] C_m \quad (11)$$

$$y(x) = \left[-8 \left(\frac{x}{L_t} \right)^7 + 28 \left(\frac{x}{L_t} \right)^6 - 42 \left(\frac{x}{L_t} \right)^5 + 35 \left(\frac{x}{L_t} \right)^4 \right] \frac{L_t^2}{84R} \quad (12)$$

尚、サイン半波長通減を用いて同曲線を同速度で走行する場合の緩和曲線長は 290m 必要となり、五次通減緩和曲線を用いることで 60m 短縮されている。

Fig10 の (a) より、最急カント勾配比 α を小さくすることにより短い緩和曲線を採用しても、車体左右加速度の急激な変化はない。Fig10 の (c) より、乗心地に大きく影響するロール角速度の最大値は限度値 $5^\circ / s$ (0.087 rad/s) より小さく改良前のケース②とほぼ同じ値であり、カント勾配の立ち上がりが大きくなったことによる影響は認められない。

また、サイン半波長通減ではロール角速度の形状が左右対称なベル形なのに対し、五次通減緩和曲線では緩和部終点側で形状がやや歪んでいる。ロール角速度の形状はサイン波状のベル形が乗心地の面で望ましいとされているが、この程度の歪みによる乗心地への影響は少ないであろう。

Fig10 の (d) より、ロール角加速度は勾配の立ち上がりが大きくなったことにより緩和始点付近で急激に大きくなり、最大値はサイン半波長通減に比べて約 2 倍となったが、限度値 $15^\circ / s^2$ (0.261 rad/s^2) より小さい。

以上のシミュレーション結果から、五次通減のカント及び緩和曲線形状に問題のないことがわかる。

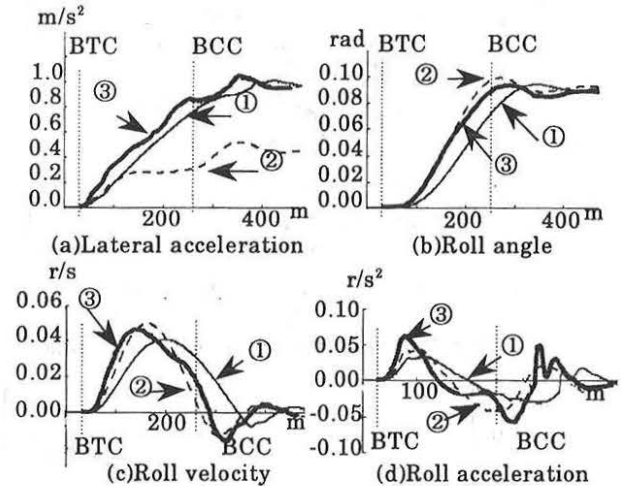


Fig10 Simulation by VAMPIRE

7 まとめ

現行のサイン半波長通減では緩和曲線長が不足し速度が制限される曲線において、乗心地を損ねることなく速度を向上するために、五次通減緩和曲線を提案する。その特徴は以下のとおりである。

サイン半波長通減のように緩和曲線始末端部でカント及び曲率が連続的に変化し、最急カント勾配比 α を自由に選ぶことで、緩和曲線中央部における最急カント勾配は小さくなる。特に α が 1.25 の時は、緩和曲線中央部付近では、直線通減の性質を持つ。

最急カント勾配比 α をサイン半波長通減の最急カント勾配比である $\pi/2$ (≈ 1.57) にすると、サイン半波長通減と殆ど一致し、従来のサイン半波長通減緩和曲線を表現できる。

最急カント勾配比 α を小さくすると、最急カント勾配が小さくなり乗心地を損ねることなく緩和曲線長を短くできる。すなわち、緩和曲線を延伸しなくても速度向上が可能となる。

最急カント勾配比 α を小さくすると、シフト量が大きくなり、曲線は内方に移動するので、シフト量が制限される場合は、半径を小さくすることにより対処が可能である。

五次通減を用いて線形を改良して速度を向上したモデル曲線を VAMPIRE でシミュレーションした結果、ロール角速度、ロール角加速度共に問題はなく、乗心地を損ねることなく緩和曲線長の短縮や速度向上が期待できる。

最急カント勾配比 α を選ぶことで、線路実情に沿った緩和曲線形状や緩和曲線長を柔軟に設定することができ、既設緩和曲線への適用が期待できる。

参考文献

- 1) 宮垣圭吾、足立昌仁、三輪昌弘、佐藤吉彦：鉄道力学論文集、シンポジウム発表論文、pp.43-48、2003
- 2) Loach, J.C. Maycock, M.G. : Recent Developments in Railway Curve Design proc. of ICE pp.503-573, 1952
- 3) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス、1994
- 4) 小柳志郎：振り子の乗り心地評価法、鉄道技術研究報告、1274、1984