

## 遊戯施設の設計規則とローラーコースターの 安全・快適性評価に関する一つの試み

山本督典\*

東京ディズニーランドやユニバーサルスタジオジャパンに代表されるように、我が国には数多くの遊園地やテーマパークがある。これらの遊園地やテーマパークにはいろいろな遊戯施設が配備され、訪れる人々にスピード感、スリルなどの非日常的な楽しみを提供している。他方、遊戯施設は人間を直接搭載するため、絶対的に安全であらねばならない。このため、設計、製作、運転、メンテナンスなどあらゆる面で万全を期することが要求される。ここでは、遊戯施設の安全・強度面での設計規則の概要と代表的な遊戯施設であるローラーコースターについて、設計面で配慮すべき事項と遠心加速度の側面から、乗客の安全性と乗心地の評価に関する一つの試みについて述べる。

### Design Rules of Amusement Rides and a Trial into Evaluation on Safety and Comfort Riding on a Roller Casters

Yoshinori YAMAMOTO\*

There are so many amusement parks and theme parks in Japan, like Tokyo Disneyland or Universal Studios Japan. Those parks are offering guests as much joy, excitement and thrilling experiences on amusement rides available in different models, which cannot be experienced in daily life. On the other hand, amusement rides, due to property of their nature that human rides on them, are consequently required to provide much more safety and comfort, and being almost risk free than anyothers. Writer would like in this issue to have a review on general rules of safety and structural fatigue applied for amusement rides and, taking a roller coaster as an example, have an insight into safety and comfort riding taken into account from design and centrifugal force point of view.

#### 1. 遊戯施設の概要

##### 1 - 1 遊戯施設の種類(分類)

遊戯施設は、その動きによって人々に楽しみを提供するものであるから三次元空間の中でいろいろな動きをするものが設置されており、厳密に分類することはなかなか難しい。しかし、その運動形態の面から大略、Fig.1のように大別することができる。

##### 1 - 2 遊戯施設の設計規則(構造強度)

[建設省告示第1419号]では、「遊戯施設は、建築基準法における工作物と位置づけられ、基準法、施行令、告示などに規定されている諸規則に準拠する」ことが求められている。これらの規則のうち、遊戯施設の特徴(頻繁な加速・減速、遠心力、衝撃など)を考慮して構造強度を確保しようとするためのものとして、建設省告示第1419号の規定がある。この告示に規定されている諸規則のうち、構造計算に深く係わるものとして、次の三つがある。

- ・積載荷重(乗客)
- ・材料の許容応力度

\* ㈱サノヤス・ヒシノ明昌レジャー事業本部設計部部長  
General Manager ,Design Division ,Leisure Business Group ,  
Sanoyas Hishino Meisho Corporation  
原稿受理 2002年4月25日

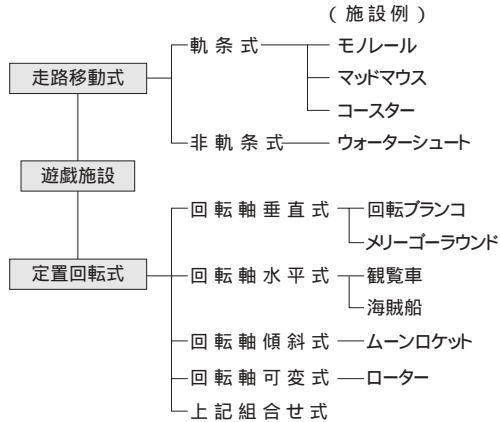


Fig. 1 遊戯施設の分類

・(荷重)割増係数

### 1) 積載荷重(乗客)

座席を有する客席部分にあっては、乗客による積載荷重は1座席につき640ニュートン(小児専用のものにあつては1/2まで低減)とする。

### 2) 材料の許容応力度

使用材料の許容応力度は、当該材料の破壊強度をTable 1に記載の数値で除した値とする。

例えば一般構造用鋼材SS400の場合、許容応力度は長期で客席部683 kg/cm<sup>2</sup>、動荷重支持部分1025となり、建築一般の許容応力度1600kg/cm<sup>2</sup>に比して各々43%、64%とかなり小さい値となっている。

### 3) (荷重)割増係数

遊戯施設の構造計算をする場合においては、固定荷重の可動部分および積載荷重にたいし、別表第一および別表第二に掲げる割増係数を乗じる。別表第一および第二についての詳細は記述しないが、遊戯施設の種類、定常速度(走行/円周) 角度(勾配/傾斜)によって採用すべき割増係数を規定している。

一例を挙げると、(a)最高速度100km/h以下、最大勾配5~50度のコースターの場合、割増係数は2.0(ゴムタイヤの使用等振動を減少させる構造とした場合は1.5)、(b)円周速度40m/min以下の観覧車の割増係数は1.3、などとなる。

その他、遊戯施設に深く関わるものとして、遊戯施設の客席部分の構造方法を定める[建設省告示第1426号]、遊戯施設の非常止め装置の構造方法を定

Table 1 材料の許容応力度

部 分		長 期	短 期
客席部分		6.0	2.0
動荷重を直接支持する柱またははり	木材の部分	4.0	2.0
	鋼材の部分	4.0	2.0
	コンクリートの部分	7.0	2.0
	繊維強化プラスチック、その他これに類するもの部分	5.0	3.0
ブランジャ、シリンダその他の可動部分、機械部分および圧力配管		4.0 (脆性金属は10)	2.0 (脆性金属は3.3)
油圧ゴムホース		6.0	4.0

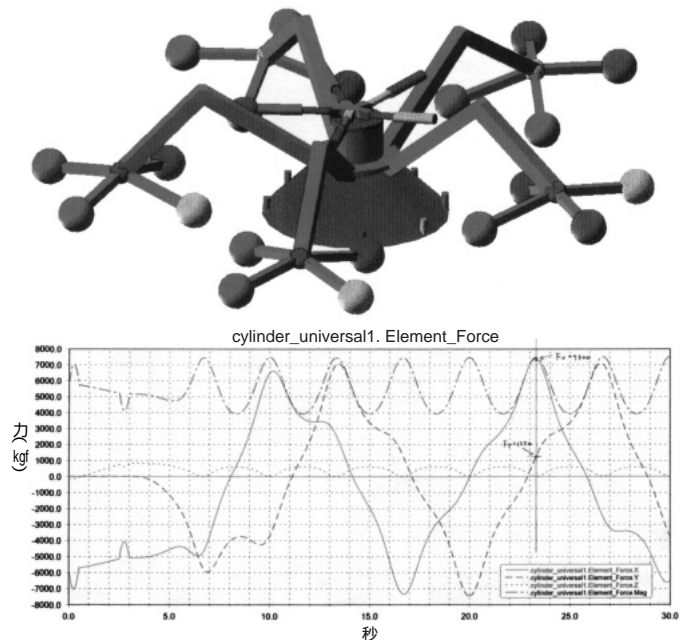


Fig. 2 動解析事例

める[建設省告示第1427号]などがある。

### 1-3 計算方法(動特性、構造強度)

遊技施設に関する構造計算は手計算(静的計算)による場合が多いようである。しかし、一般的に遊戯施設は複雑な動きをするものも多く、客席(乗物)の位置が三次元空間内で時々刻々変化し、かつ客席への乗客の配置(利用状況)も一定ではなく不規則である。このため計算に際しての荷重条件が非常に多くなり、かつ運動に伴って生じる遠心力も併せ考えると、手計算では十分対応できない場合も多い。

このような事例では、機構解析ソフトによる動解析などによって乗客が暴される加速度環境や、構造各部に発生する力などを評価する必要がある。

ADAMS<sup>\*</sup>によるの動解析事例をFig.2に示す。

2. ローラーコースターについて

ローラーコースターを計画するとき、まず企画段階で念頭に置かねばならない事項としてはつぎのようなことが挙げられる。

[コンセプト] スリルライド、ファミリーライドなど

[特徴] スピード、スリル、景色とのマッチングなど

[立地] 敷地、障害物など

[プラットフォームの位置]

[能力] 人/時間

[運動性能] 速度、加速度、走行時間など

しかし、これらの中には設計面からアプローチするのは難しいものも多く、かなりの部分が企画者に委ねられる場合が多い。

従って、ここでは設計技術的なことに限定する。

2-1 速度および加速度

1) 走行速度の計算

一般に、ローラーコースターの走路は形状変化が非常に激しく、最も基本的な運動指標であるにもかかわらず、その速度を正確に計算することは容易ではない。しかし曲線路における遠心力の算出、カントの設定などは全て走行速度に基づいているので、正確に算出しなければ、車輪部、走路部などの設計に支障をきたすことになる。

速度計算の方法としては、運動方程式による方法とエネルギー保存式による方法がある。運動方程式による方法は設計的には事実上不可能であるため、エネルギー保存式による方法を用いる。

[速度計算式]

ここではDIN4112 (Deutsche Norm: 独規格)の式を説明する。

$$V_2^2 = V_1^2 + 2gh - CA \frac{V_m^2}{m} \cdot \left[ \mu_1 + \mu_2 \frac{d_1^2}{D_1} \right] \frac{1}{m} (V + H \tan \alpha) - \frac{H}{\cos \alpha} \left[ \mu_1 + \mu_2 \frac{d_2^2}{D_2} \right] \frac{2l}{m}$$

この式は力学的には厳密であるが、空力抵抗係数C<sub>k</sub>、摩擦係数μ、車輪径D、軸径dなど詳細をすべ

\* 1 米国Mechanical Dynamics, Inc.によって開発された、汎用の三次元機構解析ソフトウェア。

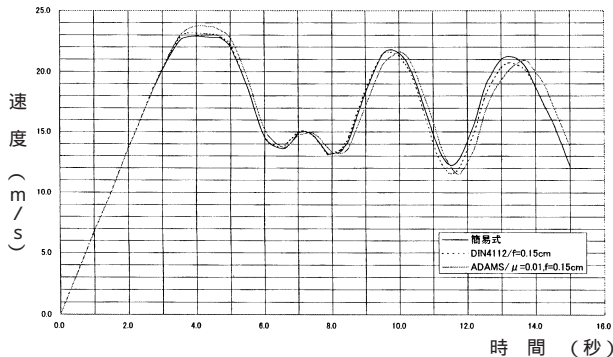
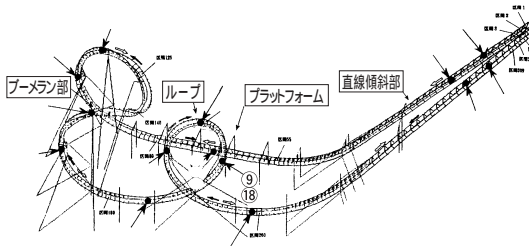


Fig.3 速度計算の比較例

て与えなければ計算できない。このため、設計においては使い勝手が悪いので、初期計画段階では使わず、最終の検証に用いる。

また、簡易式(実用式)では、上記DIN4112の式の右辺第3項と第4項の和、すなわち走行中の損失エネルギーを車両重量をベースとして、簡略にumglと置いてつぎのようにする。

$$V_2^2 = V_1^2 + 2gh - ugl \quad V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2g(h - ul)}$$

V<sub>1</sub>: 位置1における速度 (m/s)

V<sub>2</sub>: 位置2における速度 (m/s)

g: 重力加速度

h: 位置1と2間の高低差 (m) (下り/正、上り/負)

u: 走路抵抗係数

l: 位置1と2間の走路実長 (m)

この簡易式においては、走路抵抗係数uの値を与えれば比較的簡単に速度を計算することができる。

しかしこの場合は、走路抵抗係数uの値に不都合が生じる。この解決法として、走行車輪の種類(鉄、ナイロン、ウレタン)、走路形状(直線、曲線、ねじれ度)、運動形態(上昇、下降)などの条件から、抵抗係数uの値を経験的に与える。

ここで、運動方程式、DIN4112、簡易式の三方法別の計算結果が、どのような関係にあるかを調べた一例をFig.3に示す。

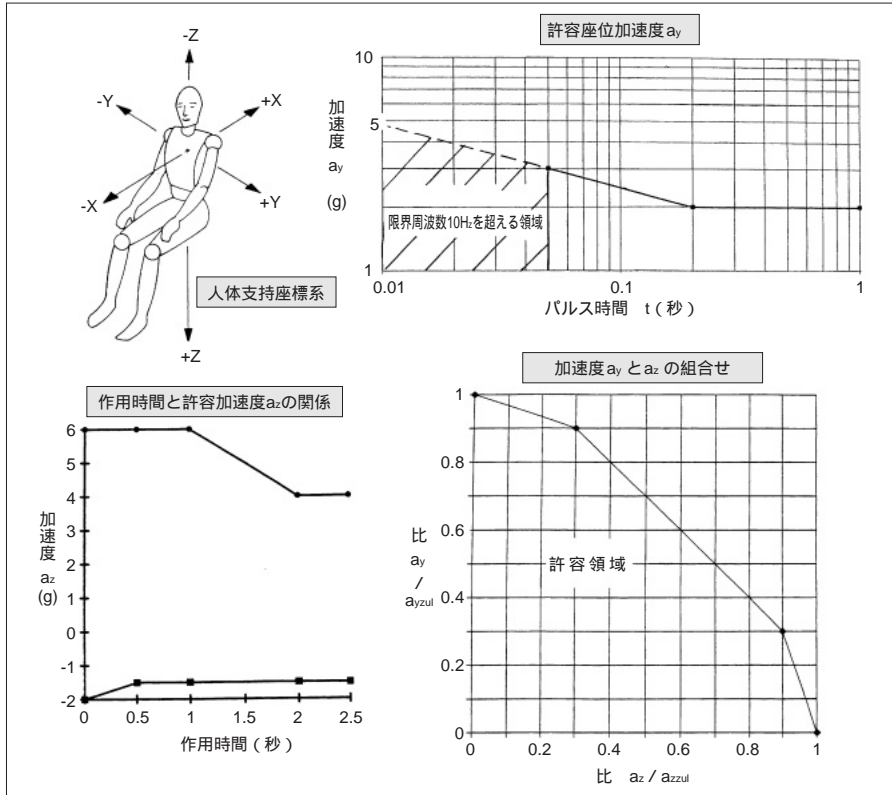


Fig. 4 加速度の許容量 (ローラーコースター)

2) 加速度

上下方向 ( $G_z$ ) および左右方向の加速度 ( $G_y$ ) は、各々通過速度 ( $V$ ) と走路曲率半径 ( $R_v, R_h$ ) から計算される。

$$G = \frac{V^2}{gR} (G)$$

乗客に作用する加速度は、乗客の健康に対して無害な程度ということで、建設省告示等においても明確な指針は示されていない。人体に対する上下方向加速度の許容限界については、米空軍や船舶における Life Boatなどに判定基準があるようである。これらはいくまで人体が耐え得る限界値を示したものであり、一般の不定多数の乗客を対象として設定されたものではない。

ローラーコースターを対象とした、乗客に働く加速度の許容値を規定するために、現時点での有効な方法として DIN4112 に対する動議・提案があるので、その概要を紹介する (Fig.4 参照)。これは「DIN4112、5.5 Roller coasters with railtrack vehicles」に対する動議・提案の形でローラーコースターにおいて、乗客に作用する加速度の許容範囲を規定している。

Fig.4に示されるように、この規定は作用する加速度を上下 ( $a_z$ )、左右 ( $a_y$ ) および両者の組合せの観点からその許容範囲を規定しており、その概略はつぎのとおりとなっている。

- ・左右加速度 ( $a_y$ ): 時間0.2秒以上で  $2(G)$  以下
- ・上下方向 ( $a_z$ ):
  - 時間1秒以下「+6以下 & -1.7以下」
  - 時間2秒以上「+4以下 & -1.7以下」
- ・両者の組合せ:
  - 左右、上下各々の許容値に対する比で許容領域を規定しており、略45°直線状で規定されている。

2 - 2 走路および車両

1) 走路断面

レール材としては、一般に丸鋼管が多く使用されており、車両に配備されている車輪が上、下、横の三方向からレールを挟込む形式となっている。

2) 緩和曲線

直線路から曲線路に移る点は、幾何的に接していても、直線路は曲率半径  $R$  であり、曲線路の曲率半径は有限、例えば40mである。このため、この接続

点は力学的に不連続点であり、この点で遠心力が不連続に変化する。車両がこの位置を通過する時には、衝撃が働き、乗心地が悪くなる。これを解消するには曲率半径が から所定の半径、例えば40mまで連続的に変化するクロソイド曲線を挿入するのが最良であろう。しかし、製作上から、ローラーコースターにおいては半径の異なる何個かの円弧を組み合わせた曲線を使うのが一般的である(疑似クロソイド曲線)。ただし、クロソイド、疑似クロソイドの場合は円弧と比べてかなり拡幅するので注意を要する。円弧、疑似クロソイド、クロソイドの三つを比較した例をFig.5に示す。

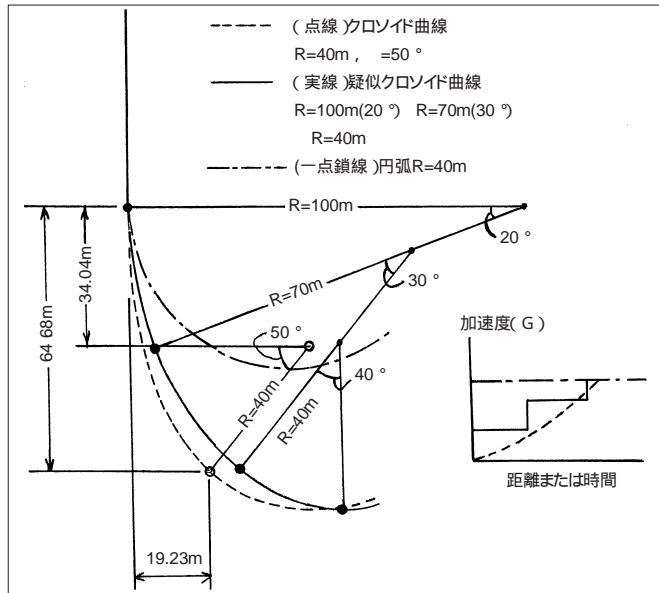


Fig. 5 円弧、クロソイド、疑似クロソイドの比較

3) カント

車両が平面曲線路を通過するとき、重力による鉛直力 ( $W$ ) と遠心力による水平力 ( $H$ ) が働く。両方の力 ( $W$  と  $H$ ) の合力の方向と直角となるように走路を傾けると、乗客には上下 (頭 尻) のみの力が働き、左右の力は働かない。

乗心地とカントとの関係は、一概にはいえないが、理想カントをある程度なぞったカントを実施しなければ乗客に左右方向の衝撃が加わり、乗心地が悪くなる。

しかし、(1)通過速度の不確かさ(計算式の誤差、雨天など周囲条件による変動等)、(2)疑似クロソイドによる遠心力の不連続的变化、(3)製作上の問題(角度変化と距離の関係等)などのため、理想カントの実現は不可能である。カントの実施例をFig.6に示す。

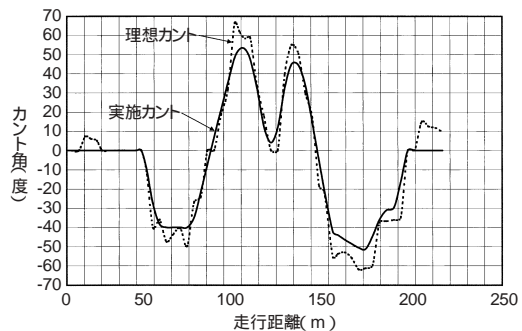


Fig. 6 カントの実施例

4) 車輪

主車輪(上)、飛上車輪(下)および側車輪(横)で車両が走路から飛び出すのを防止しているローラーコースターにとって、車輪は安全上最重要部品の一つである。車輪の材質としては、(a)鉄、(b)ナイロン、(c)ウレタンゴムの三つが代表的なものである。

鉄輪は機械的、熱的特性が他の二つに比して優れているが、衝撃や振動・騒音の面から最近では、ほとんど使われていない。現在では振動・騒音および衝撃緩和の面からウレタン車輪が多く使われている。しかし多用されているウレタン車輪であるが、ローラーコースターに適用する場合に重要となる(走行)抵抗、摩耗、耐熱などの特性については、十分解明されているとはいえない。特に高速や長距離のロー

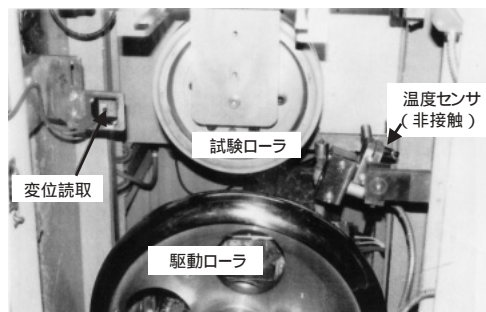


Fig. 7 実験装置

ラーコースターの場合、ウレタンの熱的特性に基づくバースト現象が問題となっている。これは、車輪に繰り返し作用する外力により内部温度が上昇し、内部の溶融ウレタンゴムが表面から噴出する現象である。



ここで、ウレタン車輪のバースト現象と車輪の直径およびゴム厚の関係を調べた実験の一部をFig. 7とTable 2に紹介する。なお、実験は実際のローラーコースターを模擬して荷重と速度を変化させる条件としている。

Table 2から車輪外径が大きい程、またゴム厚が薄い程バーストが生じ難いこと、およびバーストが生じる場合の表面温度は約70 程度であることがわかる。

5) サスペンション機構

ローラーコースターの車両には、車輪部と座席部の間にサスペンション機構を組み込んだものとそうでないものがある。サスペンション機構の実例をFig. 8に示す。

ローラーコースターにおけるサスペンション機構はほとんどがFig.8の構造であるが、使うスプリンタ/ダンパーの種類やタイプが異なる。Fig.8は皿ばねを使った例であるが、ウレタンゴムスプリングなどを使ったものもある。使うスプリング/ダンパーの特性によって座席部の挙動(変位や速度)が異なり、乗心地に相当影響すると思われるが、この分野についての研究成果が待たれる。筆者が試みに行った解析結果をFig.9に示す。Fig.9の解析では、座席部に働く力 $F$ を周期1秒の正弦荷重(最大値0 ~ -300 kg)としている。

6) 編成車両

ローラーコースターは車両数の多少はあるが、数基の車両を連結した編成車両で運行される。連結車両数が少ない場合は問題も少ないが、例えば7~10基連結などのように多い場合は、走路形状に注意をしなければ問題が生じる。

ローラーコースターの走路は一般に起伏が激しく、その走路を全長の長い編成車両が走行する場合、先頭車、中間車および後尾車はそれぞれ形状の異なる走路を走行することになる。一方、各車両は連結されているので同一速度で走行する。このため、各車両に予期せぬ加速度(衝撃)が生じたりする。例えば、山の頂部から谷部に落下する場合、先頭車は既に直線路を走行しているにもかかわらず、後尾車はまだ曲線路を走行しているような場合である。

したがって、全長の長い編成車両の場合、先頭車、

Table 2 バースト実験結果(ウレタンゴム)

保持時間	車輪外径 305 (mm)			120		
	ゴム肉厚 (mm)					
	12.5	10	7.5	12.5	10	7.5
1秒	(65)	(63)	(61)	x(78)	(78)	x(79)
2	(66)	(65)	(63)	-	-	-
3	(67)	(66)	(64)	-	-	-
4	(68)	(66)	(65)	-	-	-
5	x(75)	(67)	(65)	-	-	-
6	-	x(75)	(67)	-	-	-
7	-	-	x(71)	-	-	-

注) x : バースト有、( )内 : 表面温度( )。

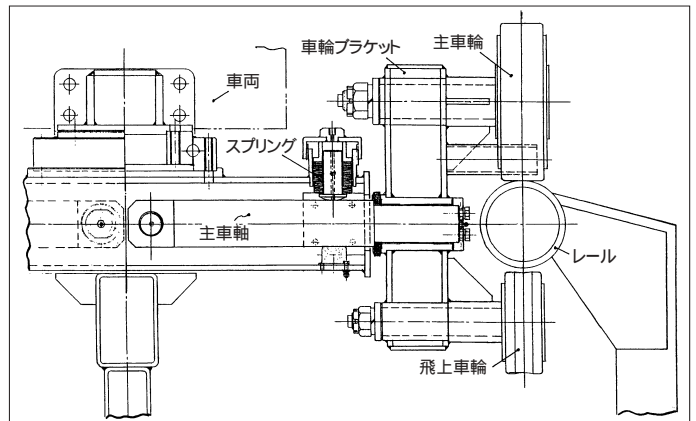


Fig. 8 サスペンション機構

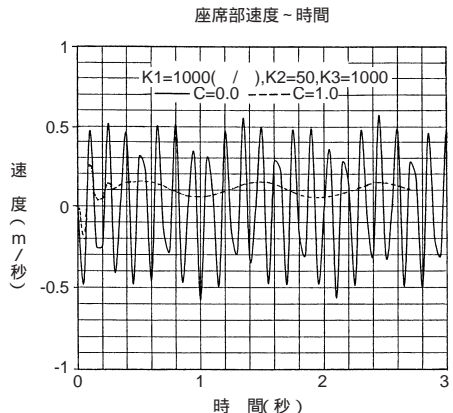
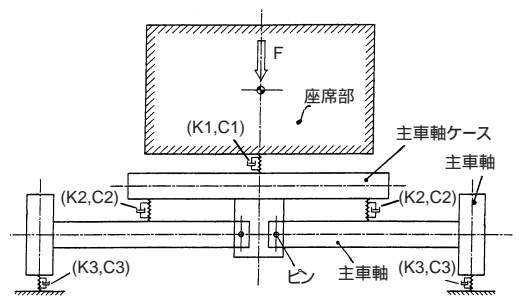


Fig. 9 サスペンション解析例

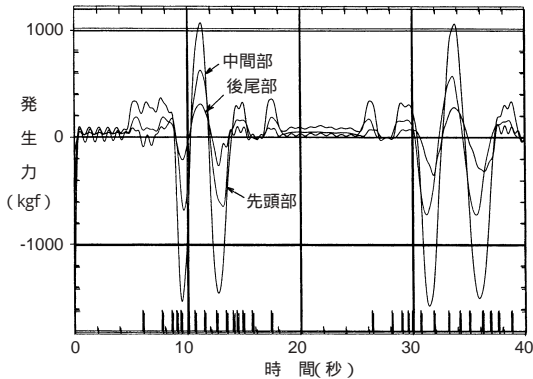


Fig. 10 連結部発生力の計算例

中間車、後尾車につき時々刻々の加速度などを計算して問題がないことを確認する必要がある。

### 7) 連結器

編成車両は、数基の車両を連結器で連結して運行される。起伏の激しい走路を走行するローラーコースターの連結器は、各車両が3方向に運動(ロール、ピッチ、ヨー)できる構造となっている。そして安全のため各車両間を補助のワイヤロープで連結している。走行運動中、各連結器には3方向(前後、左右、上下)の荷重が作用し、かつその変化は激しい。また各連結器によって作用する荷重は異なる。このため、各連結器に作用する荷重を計算することは容易ではなく、運動解析などに頼ることも多い。Fig. 10に運動解析で求めた前後(走行)方向の荷重例を示す。

連結器に作用する前後(走行)方向の荷重は、先頭部、中間部、後尾部で様相が異なり、中間部の荷重が最大である。かつ、引張りと圧縮を繰返す両振荷重となっている。これは編成車両が、頂上部を通過するとき、中間部は前後から引張られ、谷部を通過するとき、前後から押されるためである。

### 2-3 ローラーコースターの高速化

100マイルコースターという言葉でいわれるように、ここ数年非常に高速なローラーコースターが出現している。日本の遊園地(一部海外も含む)に設置されたローラーコースターの最高速度の変遷をFig. 11に示す。1995年頃から時速120kmを超えるローラーコースターが現れ、最近では170kmに達している。ローラーコースターの高速化に伴う技術課題としては、つぎのようなことが挙げられる。

加速度の大きさが速度の2乗に比例するため、高速化するにつれ、前述のこと(緩和、カント、編成車など)の影響が顕著となってくる。このため、設計に細心の注意を払わなければ走路、車両、乗客な

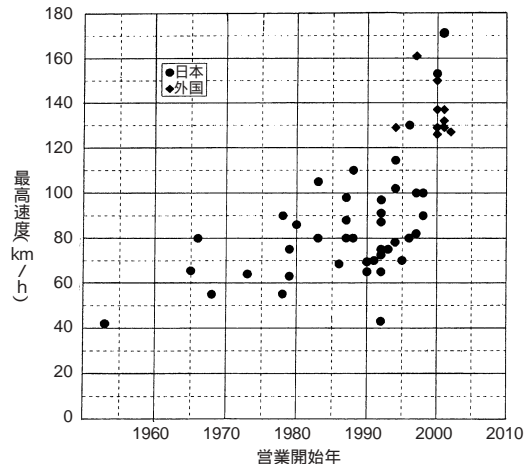


Fig. 11 ローラーコースター高速化の推移

どに、機械的強度、振動・共振、身体的ダメージなどのいろいろな問題が生じる。

車両の走行性能に対する風圧抵抗の影響が、顕著になる。このため、速度計算において風圧抵抗をどのように加味するかが大きな課題であり、この判断を誤ると、いわゆる「ブランコ現象」となり、運行上の大問題となる。「ブランコ現象」とは、ローラーコースターが山(頂上部)を越えることができなくて、谷部を挟んでブランコ運動をする現象である。

車輪の寿命、強度も大きな課題となる。

高速で走行するローラーコースターを、スムーズに停止させるためのブレーキ装置も非常に重要な技術課題となる。乗客に強い衝撃を与えない減速度を確保するための制動距離が必要である。

### 2-4 乗心地評価の一試み

「快適で、乗心地の良いローラーコースターとはどのようなものか」という素朴な質問に答えることは容易ではない。乗心地と云えば、まず自動車、バス、鉄道などの社会的な輸送手段としての乗物が頭に浮かぶ。しかし、ローラーコースターは社会的な輸送手段ではなく遊ぶためのものであり、スピード感、爽快感、スリル感、衝撃の程度などいろいろな言葉で表現される感覚の総合が「乗心地がよい、今一步、悪い」という結果になっているように思える。

ローラーコースターの乗心地は、このように掴み難い概念ではあるが、ここでは第一義的にローラーコースターの左右振動特性が不快感の大きな要因と考え、この観点からローラーコースターについての乗心地の評価を試みる。

#### 1) 評価の目安

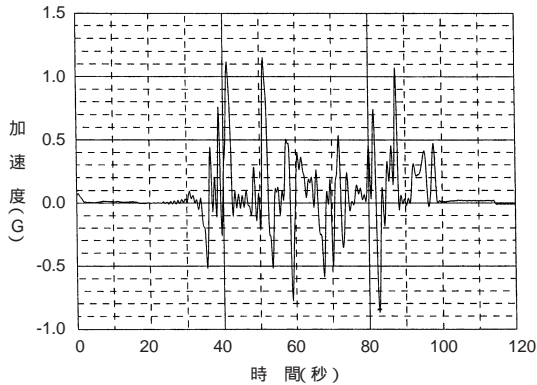


Fig. 12 加速度の測定例

ローラーコースターの乗心地についての評価式は、どこにも提唱されていない。そのため、ここでは多少荒っぽいのが鉄道車両の乗心地に関する「UIC515、Sperlingの乗心地係数」の概念を、ローラーコースターに適用して評価を試みる<sup>1)</sup>。

Sperlingの乗心地係数は、つぎの式で計算される。

$$W_z = 0.896 \left\{ \frac{a^2}{f} F(f) \right\}^{0.1} \dots \dots \dots (1)$$

$W_z$  : 乗心地係数

$a$  : 加速度の振幅 (cm / s<sup>2</sup>)

$f$  : 振動数 (Hz)

$$F(f) = 0.8f^2$$

さらに、加速度  $a = 98\alpha$  (G)、周期  $T = 1/f$  (s) において、つぎの式を得る。

$$W_z = 6.92 \left\{ \frac{a^2}{T} \right\}^{0.1} \dots \dots \dots (2)$$

## 2) 振動データの処理方法

### (a) 加速度振動の測定例

ローラーコースターにおける加速度振動(左右)の測定例をFig.12に示す。これはローラーコースターの座席部に3方向の加速度センサーを取付けて測定したデータにローパスフィルタ処理をしたものの一例である。横軸は時間(秒)、縦軸は加速度(G)で表示されている。

### (b) 振動データの処理方法

Fig.12からわかるように、ローラーコースターにおける加速度振動は非常に不規則である。この不規則振動につ

き、その各波形の1/2を規則的な振動の一部と考える。そして、各波形について振幅と周期 $T$ を求め、( $a$ ,  $T$ )の値から前記(2)式により乗心地係数 $W_z$ を計算する(Fig.13参照)。

### (c) 乗心地係数の計算

上記の処理方法によって、5機のローラーコースターにつき、乗心地係数( $W_z$ )を計算した。その結果をFig.14に示す。

図から見るに、ローラーコースターの左右方向の加速度振動周期は0.5~1.5秒位が支配的である。ローラーコースターA、Bはファミリーライド、ローラーコースターC、D、Eはスリルライドといわれるもので、ファミリーライドA、Bについての乗心地係数は、ほとんど4以下である。一方、スリルライドC、D、Eについては、約1/2位が4以上となっており、その大部分は4~6の範囲にある。このことから判断して、この評価式での計算値で乗心地係数4位がスリルライドとファミリーライドの境目ではないかと思われる。6以上のような大きな係数値が多いローラーコースターは、いわゆる「乗心地が悪い」といえるのかもしれない。

他方で、この評価法はローラーコースター走路の問題箇所を特定する手法としても使い得る。すなわち、ローラーコースターについての加速度データから乗心地係数を計算して、特に値の大きい箇所注目すればよい。

なお、ここで記載した例は、加速度の実測データから計算したものであるが、設計段階における計算

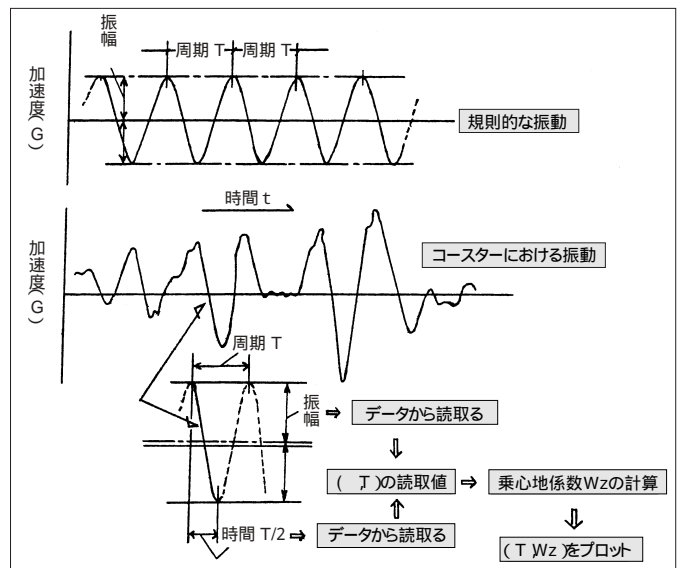


Fig. 13 振動データの処理方法



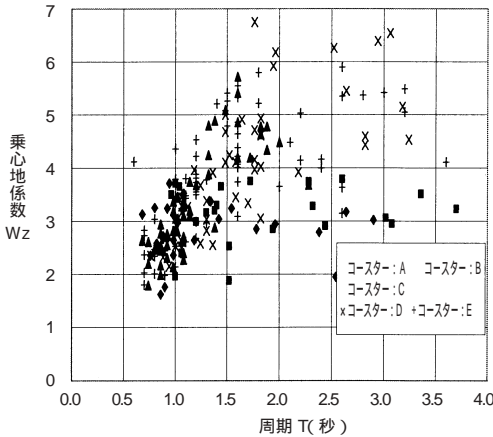


Fig. 14 乗心地係数の計算例

値からも同様の計算が可能である。

### 2 - 5 安全性評価の一試み

ローラーコースターの乗客は、走行中にいろんな形および大きさの前後、左右、上下方向の加速度に曝される。

これらのうち、衝撃という外的な要因ではなく、上下加速度による体内の血液移動という内的要因で視覚の異常などが生じないかという疑念もある。

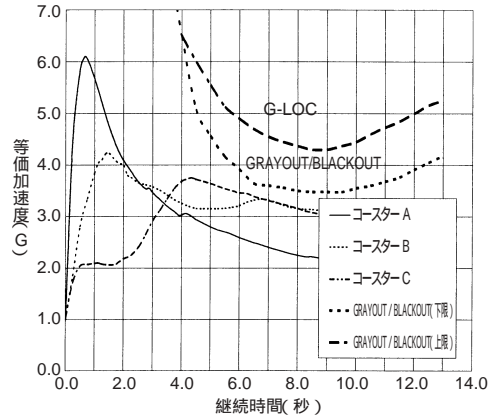
ローラーコースターの場合、乗客が曝される加速度は、非常に短い時間周期で振動的に変化することになる。

このように、大きさが短時間周期で振動的に変化する場合に、瞬間瞬間を捉まえて加速度の大きさのみで評価すると、相当大きな加速度、前述のDIN 4112では許容値 6 G に何回曝されても異常は起こらないという評価になる。しかし、たとえ非常に短時間であっても、それが繰り返し繰り返し働くと蓄積されるのではなからうか。そして、結果として「ある一定時間刺激が働くのと同等になるのではなからうか。

そこで、ここでは平均二乗法を用いて、振動的に変化する加速度データ（上下方向）から等価加速度（ $G_e$ ）継続時間（ $T$ ）、一定加速度  $G_e$  が時間  $T$  の間働くことと同等と考える、この関係を数例のローラーコースターについて試算した。

#### 1) 計算式

相当過激だと思われる数例のローラーコースターにつき、実測データからつぎの式で計算した。



注) GRAYOUT / BLACKOUT: 視機能の消失や低下、視野狭窄、G-LOC: 知覚の変調、意識の失調。

Fig. 15 等価加速度の計算例

$$G_e = \frac{\sqrt{(G_i \cdot t_i)^2}}{T}$$

$G_e$ : 等価加速度 ( G )

$T$ : 継続時間 ( s )

$$= \sum t_i$$

#### 2) 計算結果

上式にて計算した結果をFig.15に示す。等価加速度が最大になるのは概ね  $T = 1 \sim 2$  ( s ) の領域である。一方、G LOC 曲線<sup>2)</sup>は  $0.6 \sim 1$  ( s ) の領域が最小であり、両者は継続時間においてずれている。この結果から判断して、ローラーコースターの場合、この観点からの配慮は特に必要なさそうである。

### 3. おわりに

遊戯施設の設計規則概要（設計強度面）およびローラーコースターについて、各種の計算例などを紹介した。ローラーコースターの乗心地について、筆者の一つの試みを紹介したが、「乗心地」は全遊戯施設に共通の概念であろうと思われる。

従って、乗心地をどのような物理量と関連付けるかが今後の技術課題であり、研究が進むことを期待する。

#### 参考文献

- 1) 『鉄道車両のダイナミクス』(株)電気車研究会
- 2) 『人間の許容限界ハンドブック』朝倉書店