

多径間単純げた上を走行する鉄道車両—左右・ローリング・ヨーイング系—の走行安定性に関する研究 (第2報, 車両の走行安定性と挙動シミュレーション)

會 田 忠 義*・池 上 豊 和**

Stability of a Railway Vehicle with Side Swaying, Rolling and Yawing Motions on a Multispan Simply Supported Girder System (2nd Report, Stability Analysis and Simulation of Vehicle)

Tadayoshi AIDA and Toyokazu Ikegami

Abstract

The dynamic behavior of parametrically excited vibration of a railway vehicle with side swaying, rolling and yawing motions on a multispan simply supported girder system was investigated in this paper.

It was found from analytical results of stability that lowering of the flexural rigidity of girder caused the unstable regions in the stability map to broaden and use of the shorter span than 20m long was advisable for the Shinkansen vehicle. However, it was found the results of simulation that the amplitude of vibration of a vehicle on the parametric resonance was small and, in practice, dynamic behavior of a railway vehicle on a multispan simply supported girder system was stable.

1. まえがき

本研究の第1報¹⁾において、多径間単純げた上を鉄道車両が走行する場合、車両の左右動・ローリング動及びヨーイング動が係数励振不安定振動となる可能性を、これらの運動方程式が Hill 方程式となることより示し、単純パラメトリック共振の境界振動数方程式を提示した。本報は実橋及びモデルげた上を実車(新幹線車両)が走行する場合について、単純パラメトリック共振の発生とこれに及ぼすパラメータについて調査し、その結果を明らかにするものである。本報で用いる記号はすべて第1報と同じである。

調査に当たって、対象とする橋げたは、実橋として東

海道新幹線水門川橋(スパン=30m)、モデルげたとして、旧国鉄在来線用 KS-18及び KS-15定規げたを、主げた間隔を新幹線サイズに修正したけたである。

単純げたが連続する構造は、長径間鉄道橋の床組構造に見られ、その代表例として瀬戸大橋が掲げられる。周知の通り、備讃瀬戸を渡る吊橋はそれぞれ橋長1600mを有し、縦げたはスパン12.38mの単純支持されたけたが100スパン以上続く構造となっている。本研究では対象とする橋げたの中で、スパン12.9mの KS-18及び KS-15定規げたの修正けたが、それと類似しており、ここでの調査結果が上記吊橋上を走行する新幹線車両の走行安定性の検討の資料となるものと考えられる。

以下、対象橋げたの特性、新幹線車両の動特性及び走行安定性の調査結果を示す。

* 建設工学科

** 宇部興産(株)

2. 対象橋げたの特性

対象げたは、水門川橋梁、旧国鉄在来線 KS-18及び KS-15用定規げた²⁾を、新幹線用に主げた間隔を修正したモデルげたである。それぞれの修正モデルげたはスパン12.9m, 16.0m, 19.2m, 22.3m, 25.4m 及び31.5 m の6種類からなっている。これらの対象橋げたの水平、鉛直及びねじりの動特性を Table 1 に示す。表中、 ω_v 、 ω_w 及び ω_ϕ は、水平、鉛直及びねじり振動が連成しないと考えた場合の固有円振動数で、それぞれ、次式で表わされる。

$$\omega_v = \sqrt{\frac{EI_{yy}}{m}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \dots\dots \text{水平曲げ固有円振動数}$$

$$\omega_w = \sqrt{\frac{EI_{zz}}{m}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \dots\dots \text{鉛直曲げ固有円振動数}$$

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{EI_\omega}{\mu I_{ps}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 + \frac{GK}{\mu I_{ps}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} \dots\dots \text{ねじり固有円振動数}$$

3. 車両の動特性

車両の運動方程式（第1報、式(17)）において、軌道の変位ベクトル g_H 及び車両の減衰マトリックス C_H をゼロとした自由振動の運動方程式より固有値解析した結

果を Fig. 1 と Table 2 に示す。

4. 走行安定性

解析に当って、げたの振動解（第1報、式(4)）の座

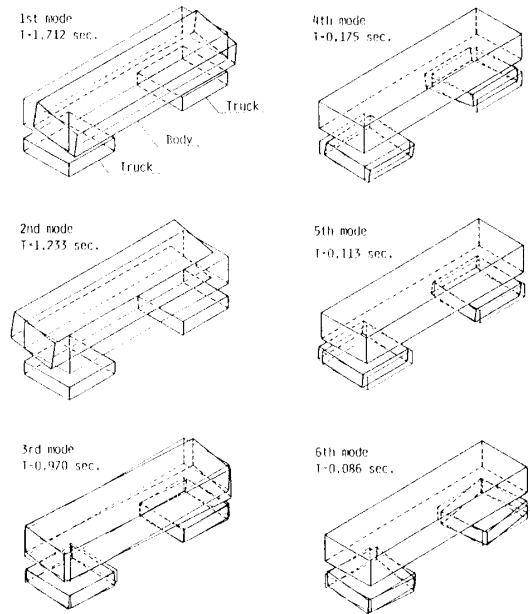


Fig. 1 Natural modes of mechanical model of a railway vehicle

Table 1 Dynamic characteristics of girders

Model girders for KS-18						
L(m)	12.9	16.0	19.2	22.3	25.4	31.5
ω_v (rad/sec)	254.61	166.95	122.56	90.83	71.06	46.17
ω_w (rad/sec)	162.31	121.95	94.78	77.99	66.87	50.58
ω_ϕ (rad/sec)	309.74	234.24	183.95	150.93	129.21	96.80

Model girders for KS-15							Suimongawa Br.
L(m)	12.9	16.0	19.2	22.3	25.4	31.5	30.0
ω_v (rad/sec)	254.03	165.71	118.18	90.29	70.76	46.05	52.30
ω_w (rad/sec)	153.98	114.57	98.40	72.59	63.20	47.30	44.75
ω_ϕ (rad/sec)	287.59	216.01	170.55	138.78	119.29	88.41	85.50

Table 2 Dynamic characteristics of vehicle

Mode No.	Natural periods(sec)	Natural modes
1	1.712	車体の下心ローリング
2	1.233	車体の上心ローリング
3	0.970	車体のヨーイング
4	0.175	台車の下心ローリング
5	0.113	台車の上心ローリング
6	0.086	台車のヨーイング

標関数は1次の固有関数のみを採用し、車両及びけたの連成振動の運動方程式、すなわち、Hill方程式(第1報、式(26)及び(27))の周期解について、周期 $2T(=4L/V)$ をもつ解(第1報、式(33)及び(35))には第3項までの和($p=1, 3, 5$)を用い、周期 $T(=2L/V)$ をもつ解(第1報、式(40)及び(41))には第3項までの和($p=1, 2, 3$)を用いた。

スパン30mの水門川橋を基準にして、けたの水平曲げ固有円振動数 ω_ϕ の変化に伴う不安定領域の挙動を調査し、次に、KS-18及びKS-15の修正定規けたを用いてスパンの変化にともなう不安定領域の挙動を求めた。

以下に示す安定図中、斜線部分が不安定領域であり $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ 及び Ω_4 はそれぞれ車体の下心ローリング、車体の上心ローリング、車体のヨーイング及び台車の下心ローリングの固有円振動数である。励振振動数 $\omega(2\pi V/L_0, L_0$:一周期軌道長(2スパン循環けたの場合は $L_0=2L$, 3スパン循環けたの場合は $L_0=3L$), V :車両速度)が次に示す値の近傍において、狭小ではあるが、不安定領域が算出されている。

$$\frac{\Omega_1}{4}, \frac{\Omega_1}{3}, \frac{2\Omega_1}{5}, \frac{\Omega_1}{2}, \frac{2\Omega_1}{3}, \Omega_1, 2\Omega_1:$$

車体の下心ローリング振動が卓越,

$$\frac{\Omega_2}{4}, \frac{\Omega_2}{3}, \frac{2\Omega_2}{5}, \frac{\Omega_2}{2}, \frac{2\Omega_2}{3}, \Omega_2, 2\Omega_2:$$

車体の上心ローリング振動が卓越,

$$\frac{\Omega_3}{4}, \frac{\Omega_3}{3}, \frac{2\Omega_3}{5}, \frac{\Omega_3}{2}, \frac{2\Omega_3}{3}, \Omega_3, 2\Omega_3:$$

車体のヨーイング振動が卓越,

$$\frac{\Omega_4}{4}, \frac{\Omega_4}{3}, \frac{2\Omega_4}{5}, \frac{\Omega_4}{2}, \frac{2\Omega_4}{3}, \Omega_4, 2\Omega_4:$$

台車の下心ローリング振動が卓越,

車両の5次以上に対する不安定領域は励振振動数が上記の振動数よりさらに高い振動数近傍にあり、相当速

度 $V(=\omega L_0/2\pi)$ が実用速度を越えているため、一部を除いて図示していない。

4.1 けたの水平曲げ固有円振動数 ω_ϕ 及びねじり固有円振動数 ω_ψ の変化に伴う不安定領域の変動挙動

水門川橋梁の水平曲げ固有円振動数 $\omega_\psi=52.3\text{rad/sec}$ とねじり固有円振動数 $\omega_\phi=85.5\text{rad/sec}$ の和 $\omega_0(=52.3+85.5)$ を基準に、けたの固有円振動数 $\omega(=\omega_\psi+\omega_\phi)$ が $0.75\omega_0$ から $1.25\omega_0$ と変化する場合の不安定領域の変動挙動をFig. 2に示した。図より固有円振動数が低下、すなわち、けたの剛性の低下に伴う不安定領域の広がりや顕著でないこと及びすべての不安定領域が狭小であることがわかる。

次に、けたの水平曲げ固有円振動数 ω_ψ とねじり固有円振動数 ω_ϕ との比 $\beta(=\omega_\phi/\omega_\psi)$ の変化に伴う不安定領域の挙動をFig. 3に示した。ここでは、けたのねじり剛性が車体のローリング運動に及ぼす影響が大きいと考えられるので、水門川橋梁は $\beta=1.63$ であるが、 $\beta=1.7\sim 0.8$ の範囲について不安定領域の変動を図示した。図より、 ω_ϕ の減少によって、わずかであるが、不安定領域の拡大が見られる。

4.2 スパンの変化に伴う不安定領域の変動挙動

KS-18及びKS-15用修正定規けたはスパン長の変化に伴い、水平曲げ固有円振動数 ω_ψ 及びねじり固有円振動数 ω_ϕ はTable 1に示すように変化する。以下に、それぞれの修正けたについて不安定領域を求め、スパンの変化に伴う不安定領域の変動挙動を示す。

KS-18修正定規けた上を走行するときの安定図をFig. 4に示す。図中、縦軸はスパン L を半車両長 $(a+l)$ で除した無次元スパンを、横軸は無次元速度パラメータ $(\pi V/\Omega_1 L_0)$ を表わす。さらに、図中の不安定領域の幅の変動をFig. 5に示す。図から明らかなように、スパンが長いほど不安定領域は広がり、特に、台車はけたの影響を受け易いことがわかる。これは、スパンが長くなるにつれて、けたの固有円振動数が低下し、車体及び台車の固有振動と近くなることが考えられる。このことより、1スパンを短くすることは、車両の走行安定性上望しい。特に、無次元スパン $L/(a+l)$ を2.0以下、すなわち、スパンを20m以下にすることが有効である。

KS-15修正定規けた上を走行するときの安定図をFig. 6に示し、不安定領域幅の変動をFig. 7に示す。これらから、KS-18と同様の傾向を有することがわかる。

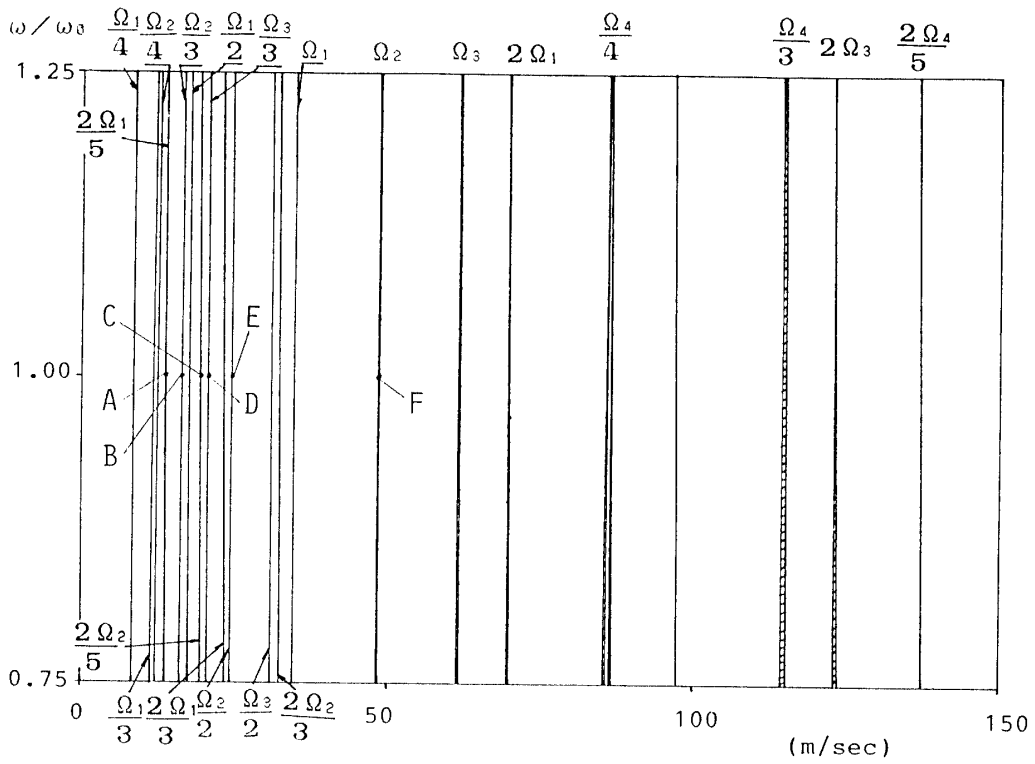


Fig. 2 Change of unstable regions of side swaying, rolling and yawing motions when dynamic characteristics $(\omega_v + \omega_\phi)$ of Suimongawa birdge varies

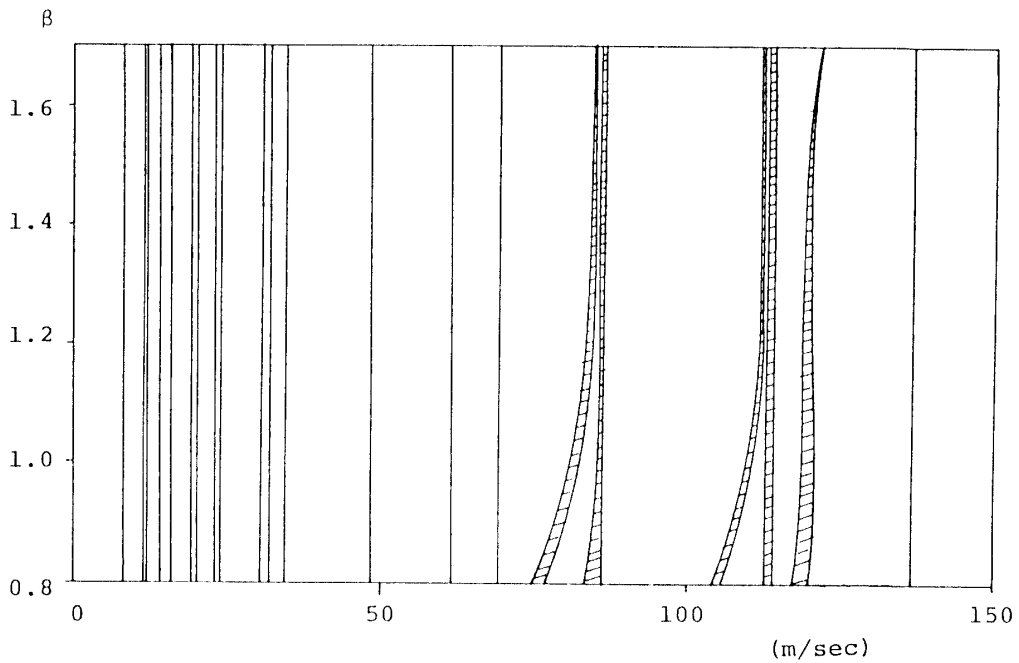


Fig. 3 Change of unstable regions of side swaying, rolling and yawing motions when dynamic characteristics (ω_ϕ/ω_v) of Suimongawa birdge varies

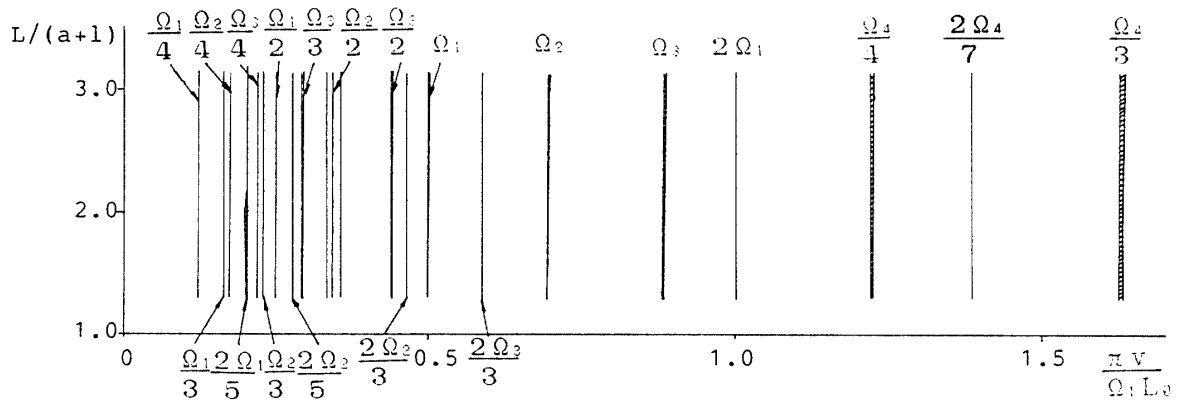


Fig. 4 Change of unstable regions of side swaying, rolling and yawing motions when span of midified standard girders for railway load KS-18 varies

最後に、備讃瀬戸大橋の床組(縦げたスパン12.38m)上を走行するときの車両の走行安定性を考察するに当り、KS-18及びKS-15修正定規げたのスパン12.9mの場合の不安定領域に注目する。Fig. 5および7において、車体が不安定となる領域幅は無次元速度パラメータで 0.5×10^{-3} 以下(時速0.13km/h)でありほとんど問題とならない。また、台車が不安定となる領域も $3.0 \times$

10^{-3} (時速0.8km/h相当)程度であり、上下・ピッチング系³⁾と比較してさらに狭い。一方、Fig. 4及び6において、無次元速度パラメータ $(\pi V/\Omega_1 L_0) = 1.0$ は走行速度273km/hに相当し、 $\Omega_4/3$ 及び $\Omega_4/4$ の領域は実用速度以上であり、問題外であるが、 Ω_3 、 $\Omega_3/2$ 、 Ω_2 及び Ω_1 などの領域は実用速度内であるので、単純パラメトリック共振を起す可能性がある。しかし、本研究に減衰の影響を考慮することにより、以上で求めた不安定領域は狭小化あるいは消滅すると考えられる。したがって備讃瀬戸大橋上を単一車両が走行する場合、係数励振振動面から安全であるといえる。

5. 走行挙動のシミュレーションと乗心地に対する検討

左右・ローリング・ヨーイング系の車両は上下・ピッチング系と異なり、橋梁進入時あるいは橋梁走行時に何らかの外乱がないかぎり、車両は振動しない。したがって、ここでは、車両の一次の固有モード(車体の下心ローリングモード)に相当する初期モードをもって橋梁に進入するものとして、車両と橋げたの連成振動の運動方程式(第1報、式(22)及び(23))をRunge-Kutta-Gill法により数値積分することにより車両の動的挙動を調査した。車両の挙動を安定図より得られた結果と比較するため、ここでも、車両及びけたともに非減衰系とした。ここでは、スパン30mの水門川橋梁、2連からなる循環げたを対象とした。

5.1 単純パラメット共振

水門川橋の橋げたからなる循環げた上を走行するときの車両の安定図はFig. 2の通りである。図より明らかなように、狭小な領域であるが、 $2\Omega_1/5$ 、 $\Omega_2/3$ 、 $2\Omega_2/5$ 、 $\Omega_3/3$ 、 $\Omega_2/2$ 及び Ω_2 の領域の近傍に、A、B、C、D、

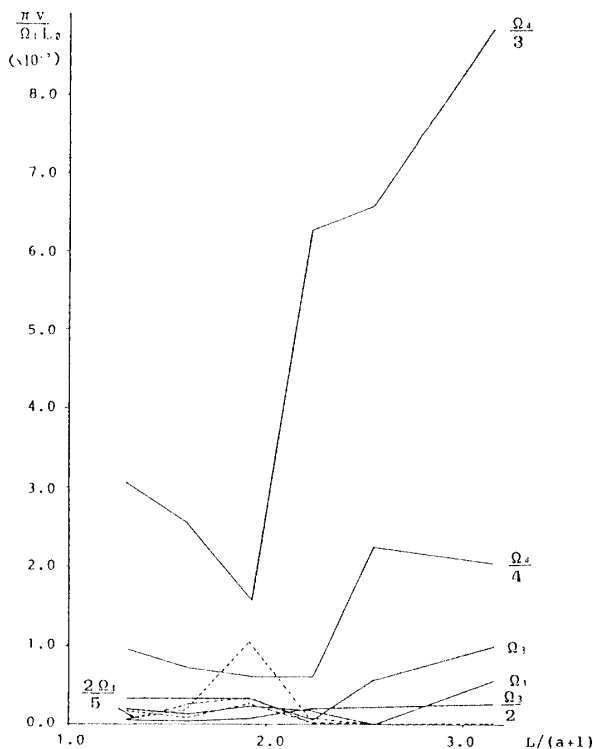


Fig. 5 Width of unstable regions of simple parametric resonance for modified standard girders for railway load KS-18

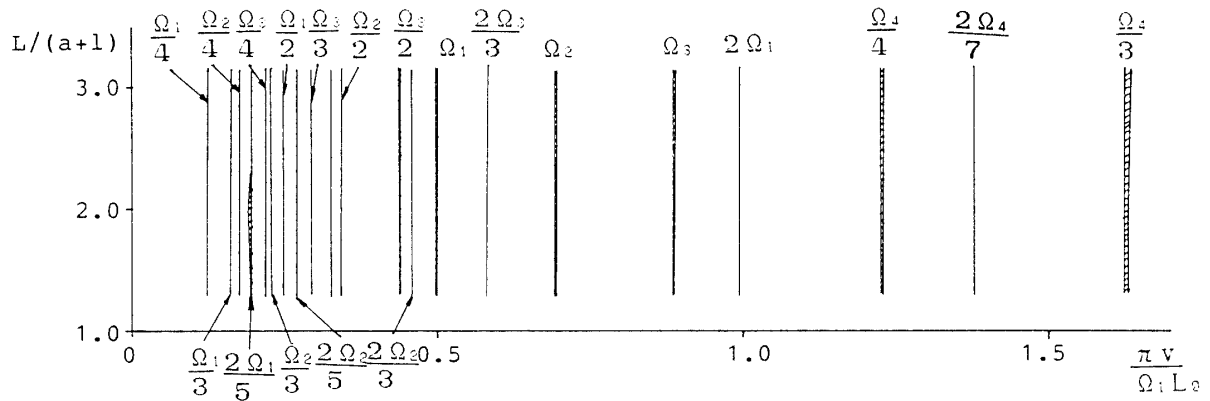


Fig. 6 Change of unstable regions of side swaying, rolling and yawing motions when span of midified standard girders for rail way load KS-15 varies

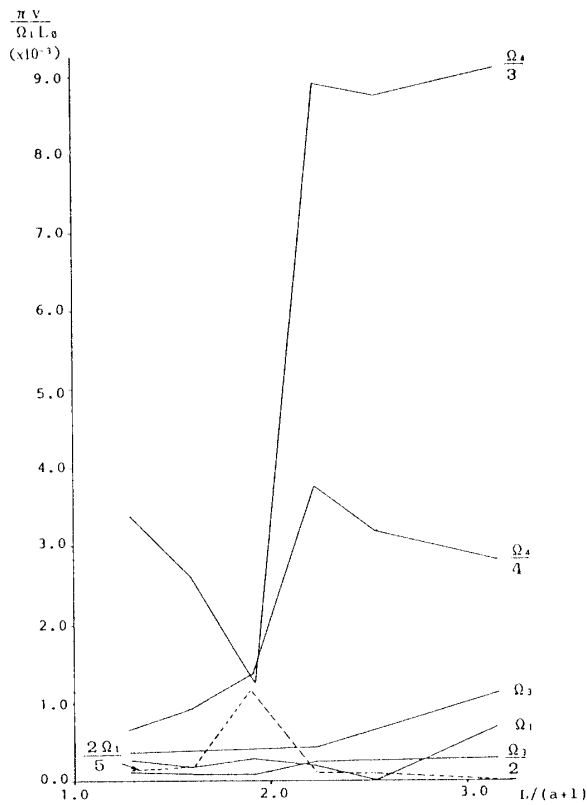


Fig. 7 Width of unstable regions of simple parametric resonance for modified standard girders for railway load KS-15

E 及び F 点を取り、これらの点の相当速度をもつ車両の振動挙動を Fig. 8 に示した。ここでは、車体及び台車の左右動及びローリング動はヨーイング動に比べて小さく、ほとんど定常振動に近い運動であったので、ヨーイング振動のみを図示している。以下の調査に当たって、車体及び台車の左右動及びローリング動は省略し、

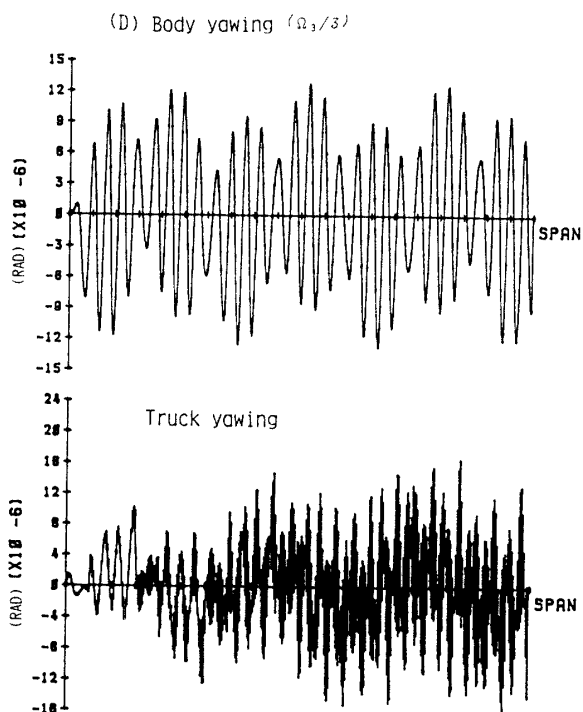
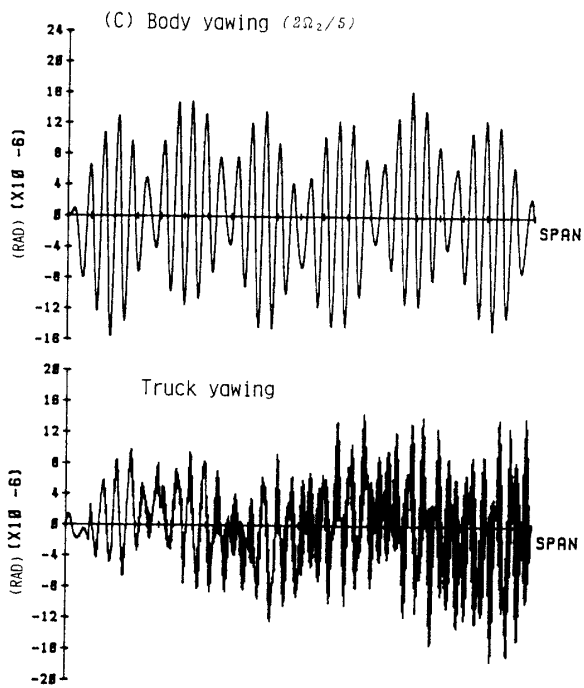
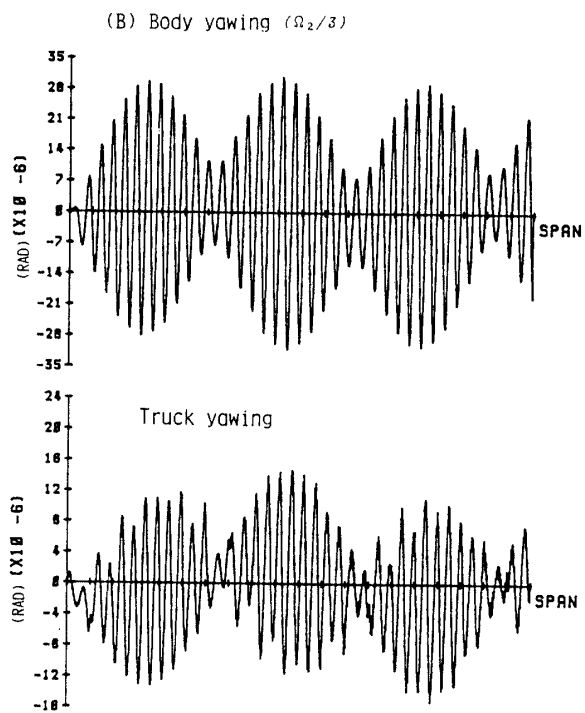
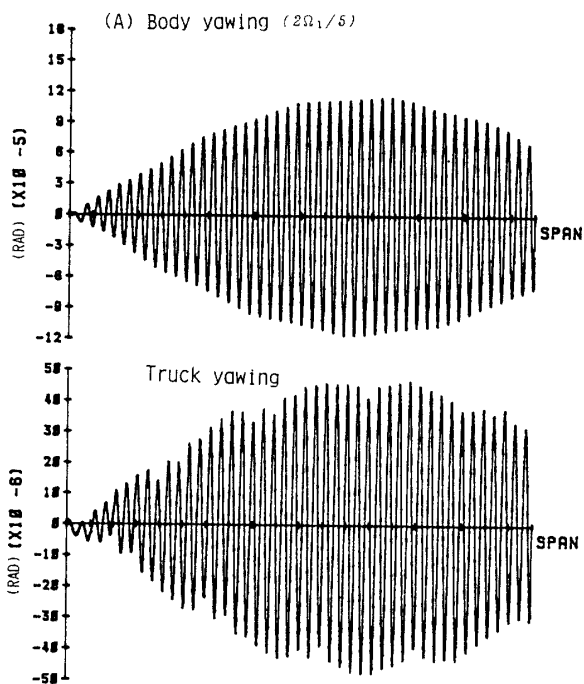
ヨーイング動のみに注目した。これらの図から A 点 ($2\Omega_1/5$ 近傍)、E 点 ($2\Omega_2/2$ 近傍) 及び F 点 (Ω_2 近傍) における相当速度で自励振動を起しているのがわかる。

次に、10スパン走行時の車両のヨーイングの運動の応答図を Fig. 9 に示す。横軸は走行速度 V (m/sec)、縦軸は車体先端及び台車先端の水平変位を示す。図中の斜線部分は安定図より求めた単純パラメトリック共振領域を示す。車体の応答変位は低速側で大きく、高速になるにつれて減少する。これは車体の不安定領域が低速側に現われていることを符合し、特に、 $2\Omega_1/5$ 、 Ω_2 の近傍で大きい応答を示している。しかし、台車の不安定領域は高速側に現われることが予想されたが、大きな応答は現われなかった。ここで、 $2\Omega_1/5$ 近傍で現われた車体の応答は 0.12cm 以下であり、微小変位である。しかし、100スパン上連続するとこれが成長することも考えられる。

5.2 乗心地の面からの検討

旧国鉄では上下振動と同様、左右・ローリング・ヨーイング系に対しても、Janeway の乗心地係数をもとに Fig. 10 に示す振動数と加速度振幅の関係より加速度の限度を定めている⁴⁾。

車体が不安定振動を起したとき、車体の加速度も大きくなると考えられる。また、単純パラメトリック共振を起したとき、車両は自己の固有円振動をもって振動することから、車体のローリング動が卓越する場合は振動数 $\nu_1 (= \Omega_1/2\pi) = 0.58$ 及び $\nu_2 (= \Omega_2/2\pi) = 0.81$ 、ヨーイング動が卓越する場合は $\nu_3 (= \Omega_3/2\pi) = 1.03$ における振動加速度が与えられたとき、乗心地評価が Fig. 10 から可能となる。本研究では、 $2\Omega_1/5$ 、 $\Omega_2/2$ 及び Ω_2 の領域に対応した速度で30スパン (900m) 走行したとき、車両先端の最大加速度の変化状態を求



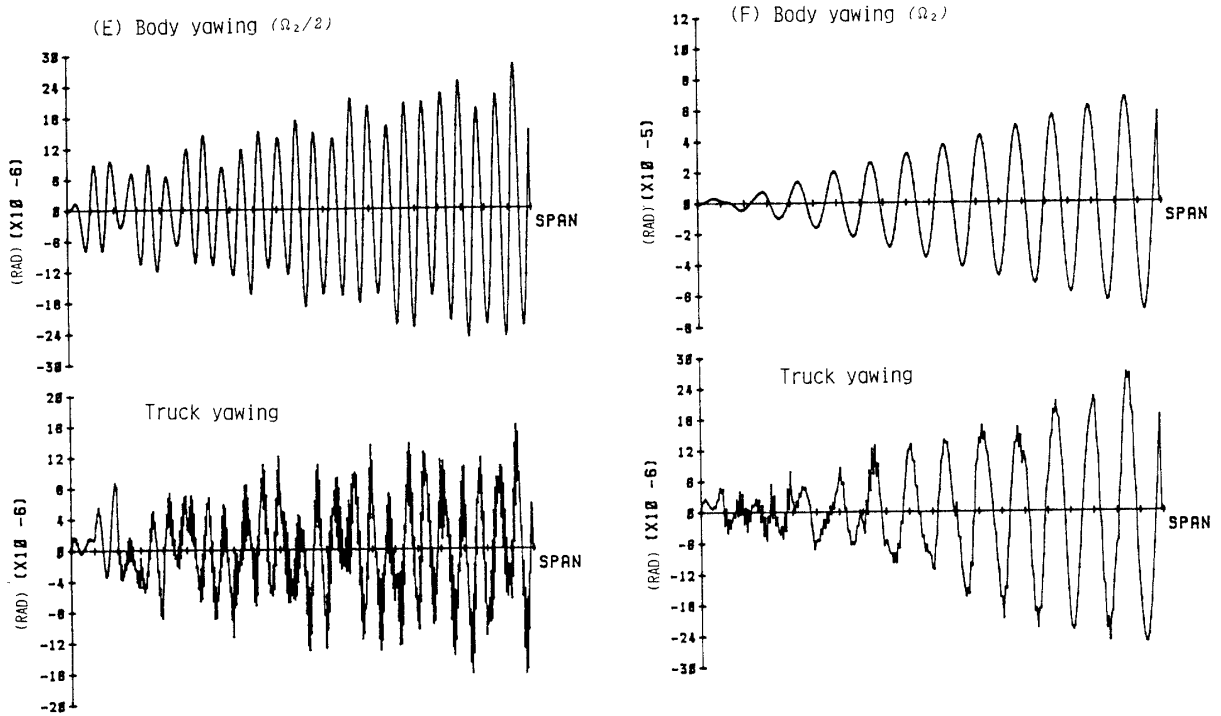


Fig. 8 Responses of yawing motion of body and truck of a vehicle with speed corresponding to simple parametric resonance regions

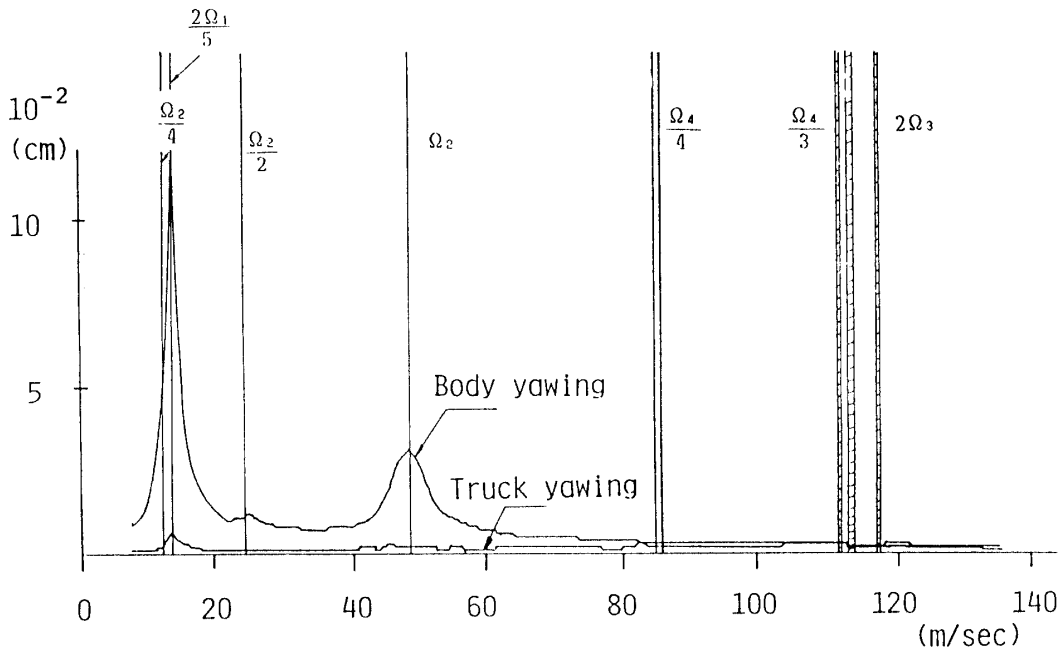


Fig. 9 Response curves of a model vehicle on a multispan simply supported girder with dynamic characteristics of Suimongawa birdge.

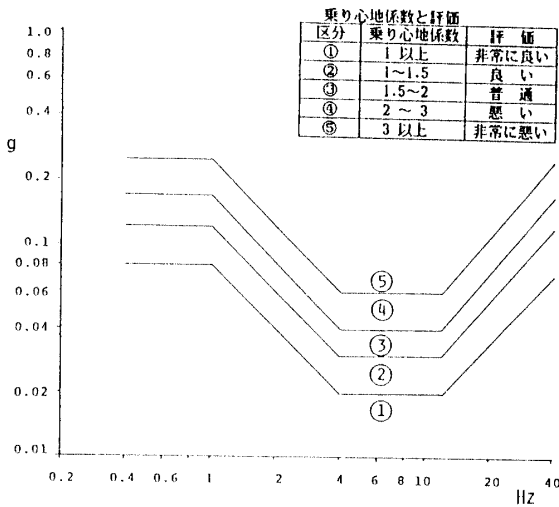


Fig.10 Coefficient of human comfort on a train with side swaying motion

め Fig.11に示した、 Ω_2 に相当する速度で走行するとき、加速度は発散し30スパン程度であれば、乗心地評価①となり十分である。しかし100スパン以上連続走行する場合、評価②あるいは③になる可能性がある。

6. 結 び

以上の解析結果から単純パラメトリック共振による不安定領域とその領域における係数励振振動の挙動が明らかになった。

不安定領域は、けたの剛性の低下に伴う不安定領域の顕著な広がりは見られなかった。しかし、スパンが長くなるほど不安定領域は広がり、スパンを短くすることが車両の走行安定性上、賢明であるといえる。しかし、実際の走行速度に換算すると、いずれの不安定領域もかなり狭く、振動変位もかなり小さい。また本研究では車両、けたとも非減衰として解析しており、減衰を考慮することにより、さらに、領域は狭く、振動変位は小さくなることが予想される。また、車体加速度についても同様である。したがって、本研究で解析した新幹線車両は、実在する多径間単純けた走行に対して、係数励振振動面から安定であるといえる。現実の問題として、車両振動を考慮したけたの設計に対しては、従来通り、上下・ピッチング系のみを考慮すれば良いといえる。

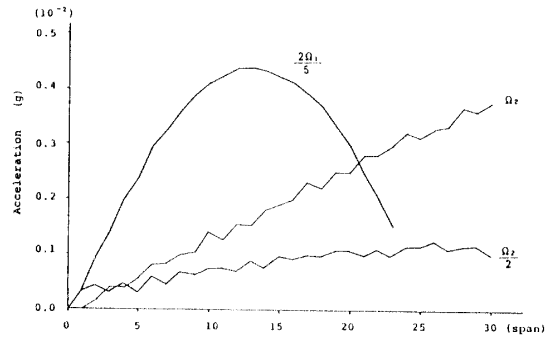


Fig.11 Growth of maximum horizontal acceleration of a model vehicle on a multispan simply supported girder with dynamic characteristics of Suimongawa bridge

本研究の結果は、新幹線車両モデルを対象としたものであり、バネ定数などの異なる他種の両車に対しては新たな調査が必要となろう。

本研究において、より詳細に検討しなければならない点が多々あることは著者らの認めるところであるが、本調査結果が高速鉄道システムの検討の一手助けとなれば幸いである。

本研究の数値計算は山口大学情報処理センター及び九州大学大型計算機センターの計算機を用いて行った。

また、本研究を遂行に当って、各種資料を提供いただいた東京都立大学・故伊藤文人教授及び旧国鉄（現九州旅客鉄道(株)施設部）速水昭正氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 會田忠義・池上豊和：多径間単純けた上を走行する鉄道車両—左右・ローリング・ヨーイング系—の走行安定性に関する研究(第1報)，山口大学工学部研究報告，第38巻，2号，pp.103~110.
- 2) 橋梁研究会：鋼橋設計資料，技報堂（1967），p.108.
- 3) 會田忠義・池上豊和：多径間単純けた上を走行する鉄道車両—上下・ピッチング系—の走行安定性に関する研究(第2報)，山口大学工学部研究報告，第38巻，1号，pp.65~74.
- 4) 杉山武史他：鉄道車両の設計技術，大河出版，pp.21~24.

(昭和63年10月15日受理)