

# 多径間単純げ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 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 Bouncing and Pitching Motions  
on a Multispan Simply Supported Girder System  
(2nd Report, Stability analysis and Simulation of Vehicle Behavior)

Tadayoshi AIDA and Toyokazu IKEGAMI

## Abstract

The dynamic behavior of parametrically excited vibration of a railway vehicle on a multispan simply supported girder and characteristics of girder to influence on the stability of railway vehicle were found in this paper, following previous study. A simplified mechanical model of the Shinkansen vehicle and an actual girder and some model girders of the railway bridge, which had the same flexural rigidity as the the girders of the old line in Japanese National Railways and the same distance between the main girders of bridge as the Shinkansen, were used in this investigation.

It was found from the analytical results of stability that lowering of the flexural rigidity of girder caused the unstable regions in the stability map to broaden, especially the flexural rigidity affected to the unstable vibration of the track, and use of the shorter span girders than 20m long was advisable for the Shinkansen vehicle. Moreover, It was found from the results of simulation that the amplitude of railway vehicle in the simple parametric resonance was smaller than the amplitude in the resonance due to the forced vibration.

## 1. まえがき

多径間単純げた上を鉄道車両が走行する場合、車両が係数励振不安定振動を起す可能性と、特に、単純パラメトリック共振領域の境界振動数方程式を本研究の第1報において、示唆し提示した。本報は、実橋上を実車（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及び、不安定振動に及ぼすパ

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。本報で用いる記号等はすべて本研究第1報<sup>1)</sup>のものと同一である。

調査に当たって、対象とする橋げたは、まず実際に使用されている橋梁として、東海道新幹線水門川橋梁（スパン長30.0m）の他に、国鉄在来線用KS-18及び、KS-15定規げたを新幹線用に修正したけた<sup>2)</sup>を対象とした。

実際に、単純げたが連続する構造は、本州四国連絡橋の児島・坂出ルートにおける、道路と鉄道の併用のつり橋に見られる。特に、新幹線車両に対して設計されている南・北備讃瀬戸大橋は、それぞれ1600m以上

\*建設工学科

\*\*宇部興産(株)

の長さを有し、縦げたは、スパン長12.8mの単純支持げたが100スパン以上続く構造となっている(現在の床組は、在来線に対して設計されている)。本文で対象とする橋げた、1スパン長12.9mのKS-18及び、KS-15修正定規げたがそれと類似し、本研究での調査結果が、南・北備讃瀬戸大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する。

以下、対象橋げたの特性、新幹線車両の動特性及び、対象げたに対する車両の安定性調査結果を示す。

### 2. 対象橋げたの特性

対象とした橋げたは、東海道新幹線の水門川橋梁、国鉄在来線用のKS-18及びKS-15定規げたを新幹線サイズに修正したスパン長12.9m, 16.0m, 19.2m, 22.3m, 25.4m及び31.5mの6種のけたである。これらの橋げたの諸特性をTable 1に示す。これらのけたのスパン長と、けたの単位長さ質量(m), 曲げ剛性( $I_{zz}$ )及び、曲げ固有振動数( $\omega_w$ )の関係をFig. 1に示す。図中の○印は水門川橋梁の値である。

Table 1 Characteristics of model girders

Model girders for KS-18						
L (m)	12.9	16.0	19.2	22.3	25.4	31.5
$I_{zz}(\text{m}^4 \times 10^{-2})$	2.64160	4.22225	6.42224	9.35329	12.9104	22.3074
$m(\text{ts}^2/\text{m}^2 \times 10^{-2})$	7.40712	8.86130	10.0760	12.7201	14.1874	18.1154
$\omega_w(\text{rad/sec})$	162.31	121.95	94.78	77.99	66.87	50.58

Model girders for KS-15						
L (m)	12.9	16.0	19.2	22.3	25.4	31.5
$I_{zz}(\text{m}^4 \times 10^{-2})$	2.19535	3.44614	5.19420	7.39659	10.3818	17.7273
$m(\text{ts}^2/\text{m}^2 \times 10^{-2})$	6.83964	8.19426	9.78159	11.6105	12.7729	16.4635
$\omega_w(\text{rad/sec})$	153.98	114.57	89.40	72.59	63.20	47.30

Suimongawa Br.	
L (m)	30.0
$I_{zz}(\text{m}^4 \times 10^{-2})$	10.7236
$m(\text{ts}^2/\text{m}^2 \times 10^{-2})$	13.5207
$\omega_w(\text{rad/sec})$	44.75

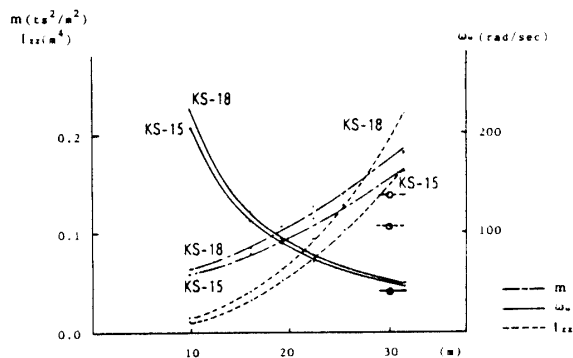


Fig. 1 Characteristics of model girders.

### 3. 車両の動特性

車両の運動方程式(第1報式(6))において、軌道の変位をゼロとし、減衰マトリックス $C_v=0$ とすると自由振動の運動方程式が得られる。固有値解析結果をFig. 2に示す。

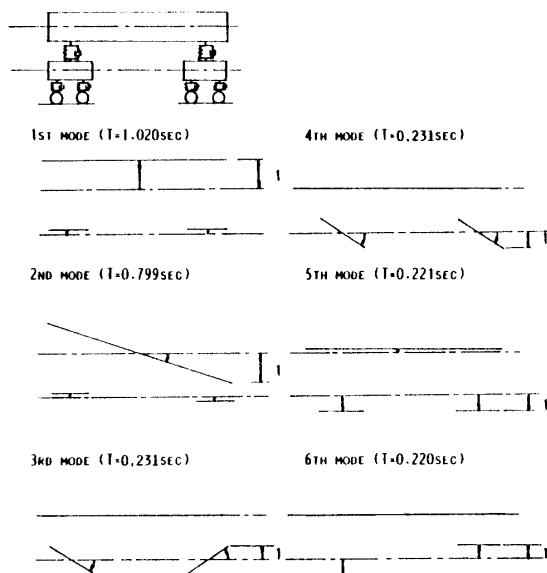


Fig. 2 Natural periods and modes of a mechanical model of the Sinkansen vehicle.

### 4. 走行安定性

解析に当たって、けたの振動解(第1報式(11))の座標関数は一次の固有関数のみを採用し、車両一けた系の攪乱方程式すなわち、Hill方程式(第1報, 式(39), (40))の周期解について周期 $2T$ をもつ解(第1報式(41), (43))は第3項の和( $P=1, 3, 5$ )まで用い、周期 $T$ をもつ解(第1報式(47), (48))は第3項の和( $P=2, 4, 6$ )まで用いた。

水門川橋梁についてけたの鉛直曲げ固有振動数 $\omega_w$ の変化に伴う安定図の挙動を調査し、KS-18及び、KS-15修正定規けたについてスパン長の変化に伴う安定図の挙動を求めた。

図中、斜線部分が不安定領域であり、それぞれ励振振動数( $\omega = 2\pi V/L_0$ )が次に示す値の近傍において生じる。(ここで、 $L_0$ は一周期軌道長(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 $L_0=3L$ ),  $V$ は車両速度)

$\frac{\Omega_1}{4}, \frac{\Omega_1}{3}, \frac{2\Omega_1}{5}, \frac{\Omega_1}{2}, \frac{\Omega_1}{3}, \Omega_1, 2\Omega_1$ : 車体の上下振動が卓越

$\frac{\Omega_2}{4}, \frac{\Omega_2}{3}, \frac{2\Omega_2}{5}, \frac{\Omega_2}{2}, \frac{\Omega_2}{3}, \Omega_2, 2\Omega_2$ : 車体のピッチング振動が卓越

$\frac{\Omega_3}{4}, \frac{\Omega_3}{3}, \frac{2\Omega_3}{5}, \frac{\Omega_3}{2}, \frac{\Omega_3}{3}, \Omega_3, 2\Omega_3$ : 台車のピッチング振動が卓越

$\frac{\Omega_4}{4}, \frac{\Omega_4}{3}, \frac{2\Omega_4}{5}, \frac{\Omega_4}{2}, \frac{\Omega_4}{3}, \Omega_4, 2\Omega_4$ : 台車の上下振動が卓越

このとき、励振振動数が  $\omega = 2\pi V/L_0$  で表されることより、相当速度は  $V = \omega L_0/2\pi$  となる。

4.1 けたの鉛直曲げ固有振動数  $\omega_w$  の変化に伴う安定図の挙動

対象とするけたはスパン長30mの水門川橋梁を用いた。その結果をFig. 3に示す。図中、縦軸は鉛直曲げ固有振動数  $\omega_w$  (rad/sec), 横軸は速度  $V$  (m/sec) をとつ

ている。水門川橋梁の鉛直曲げ固有振動数は、44.75 (rad/sec) であるから、固有振動数を50 (rad/sec) より30 (rad/sec) まで低下させ不安定領域を調査した。

ここで、けたの一次の鉛直曲げ固有振動数は、

$$\omega_w = \sqrt{\frac{EI_{zz}}{m}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2$$

で表され、けたの単位長さ質量 ( $m = \mu A$ ) を一定とすれば、固有振動数を低下させることは剛性 ( $EI_{zz}$ ) を低下させることと一致する。図より明らかなように、固有振動数の低下つまり、剛性の低下とともに、わずかながら不安定領域が広がる傾向がみられる。特に  $\Omega_4/4$  の領域に見られるように剛性の低下は台車の振動に影響を与え、剛性の低下に伴う不安定領域の広がりも明らかである。しかしながら、剛性の低下に伴う車体振動への影響は少なく、不安定領域は広がっていない。

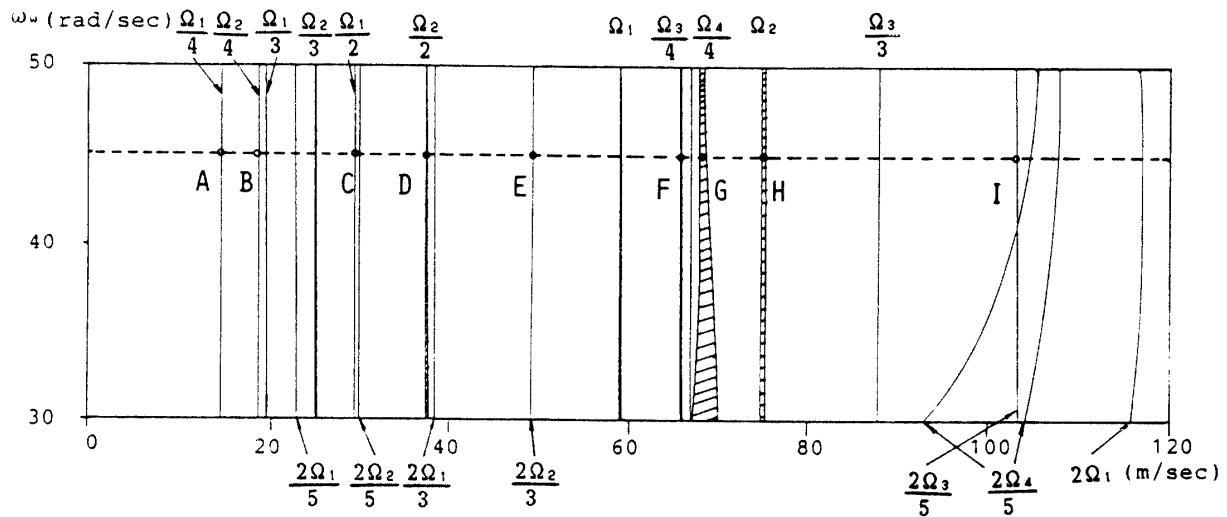


Fig. 3 Stability map of a mechanical model on a multispan simply supported girder with the characteristics of the Sinkansen

4.2 スパン長の変化に伴う安定図の挙動

前述のように、KS-15及びKS-18修正定規けたは、Fig. 1に示すようにスパン長の変化に伴い、単位長さ質量 ( $m = \mu A$ )、鉛直曲げ剛性 ( $EI_{zz}$ ) 及び鉛直曲げ固有振動数  $\omega_w$  が変化する。そこで、まず初めに、スパン長12.9m, 16.0m, 22.3m, 25.4m, 31.5mのKS-18修

正定規けたの不安定領域を調べ、スパン長と不安定領域の関係をFig. 4に示した。図中、縦軸はスパン長  $L$  を半車両長  $a+1$  で除した無次元量、横軸は無次元速度パラメータ ( $\pi V/\Omega_1 L_0$ ) で表す。ここで、 $\Omega_1$  は車両の第一固有振動数、 $L_0$  は一周軌道長である。このパラメータは、励振振動数 ( $\omega = 2\pi V/L_0$ ) を車両の第一固有振動数  $\Omega_1$  で除した無次元振動数を意味する。

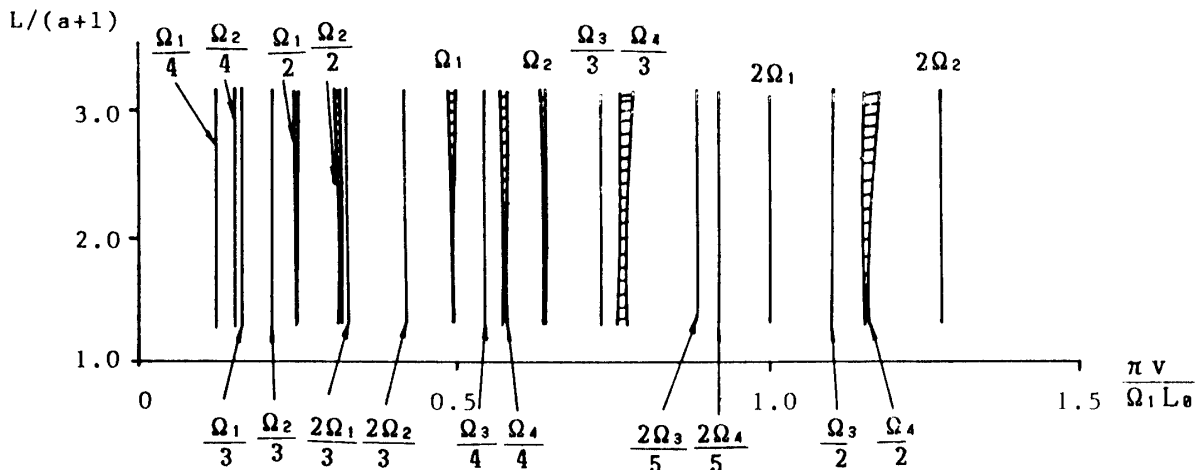


Fig. 4 Stability map of a mechanical model on a multispan simply supported modified standard girders for railway load KS-18.

さらに、この図より、スパン長Lの変化に伴う不安定領域幅の変動状況をFig. 5に示した。

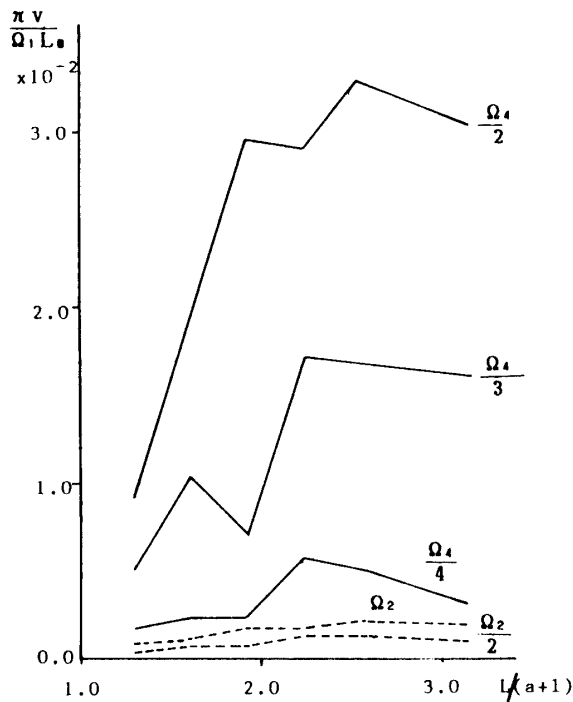


Fig. 5 Width of unstable regions of simple parametric resonance for modified standard girders for railway load KS-18.

図から明らかなようにスパン長さが長いほど不安定領域の幅が広がることがわかる。特に、台車はけたの影響を受け安いことがわかる。このことは、原因として、Fig. 1に示すように、スパン長が長くなるにつれ

て、けたの固有振動数が低下し台車の固有振動数に近づく事が考えられる。このようなことから、1スパン長を短くすることは車両の安定性にとって賢明である。特に、スパン長L/(a+1)を2.0以下にする、つまりスパン長を20.0m以下にすれば不安定領域は減少しており、車両の安定性にとって有効である。

つぎに、KS-15修正定規を対象に同様の調査を行った。その結果、KS-15修正定規けたのスパン長の変化にともなう不安定領域の挙動をFig. 6に示し、スパン長に伴う不安定領域幅の変動をFig. 7に示す。

KS-18修正定規けたに対する結果と同様にスパン長が長いほど不安定領域の幅が広がるが、KS-15けたの方が大きいことがわかる。これは、Fig. 1に示すように、スパン長が長くなるにしたがって、KS-18とKS-15けたの剛性の差が開くことが理由に考えられる。このことは、水門川橋梁を用いて剛性を低下させた時、不安定領域が広がったことに類似する。

最後に、備讃瀬戸大橋を走行したときの車両の安定性を考察すると、KS-18修正定規けたのスパン長12.9mのときの不安定領域をみると、車体振動が不安定となる領域の幅はFig. 6より無次元速度パラメータ(πV/Ω₁L₀)で、1.0×10⁻³以下となり、ほとんど問題にならない。そして、台車の振動が不安定となる領域の幅は、同様にFig. 6より無次元速度パラメータ(πV/Ω₁L₀)で、1.0×10⁻²以下となっており、これも速度幅で考えると2.7 (km/h) 以内となり、不安定となる領域はかなり狭い。又、実質的な運動速度160 (km/h) から考えるとスパン長12.9mの場合Fig. 5において、無次元速度パラメータ(πV/Ω₁L₀)=1.0は実質速度で

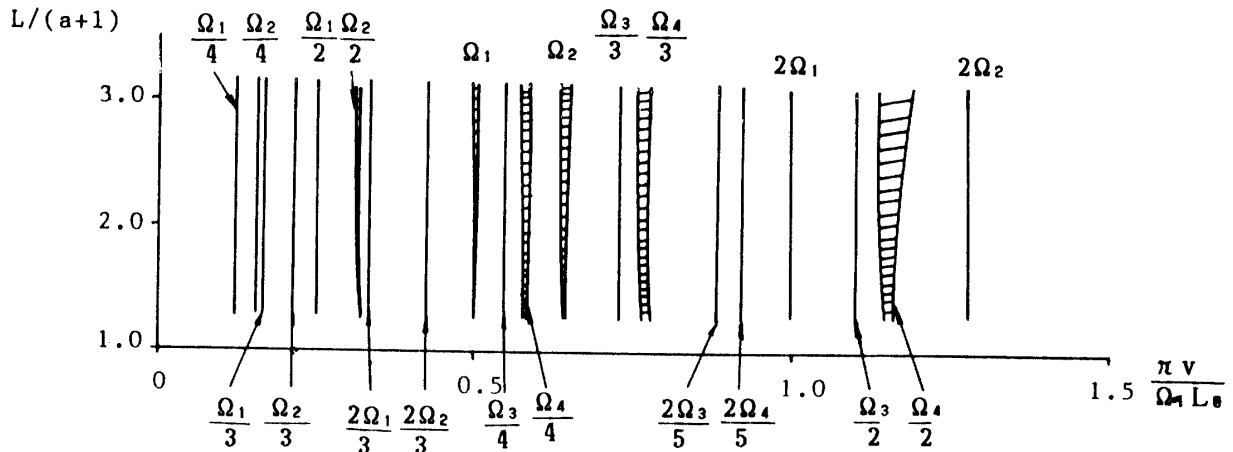


Fig. 6 Stability map of a mechanical model on a multispan simply supported modified standard girders for railway load KS-15.

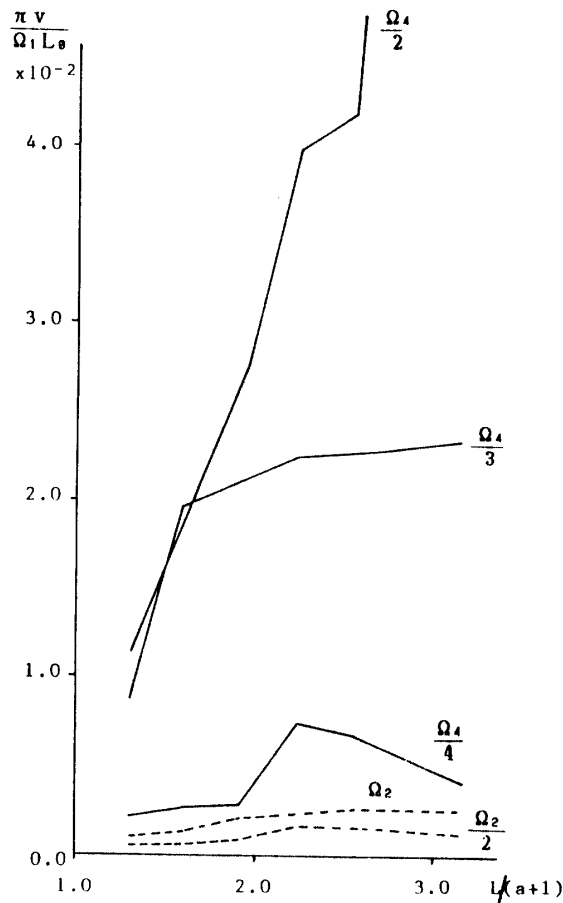


Fig. 7 Width of unstable regions of simple parametric resonance for modified standard girders for railway load KS-15.

273 (km/h) に相当し、 $\Omega_4/2$  の領域は運行速度以上であることがわかる。しかし、 $\Omega_4/3$ 、 $\Omega_4/4$ 、 $\Omega_2$  及び  $\Omega_2/2$  の不安定領域は、実用速度以内であり、これに相当する速度で走行すると、単純パラメトリック共振を起こすことになる。しかし、本研究は、非減衰系で行っているため、車両及び、けたに減衰を考慮する事によりさらに安定となり不安定な領域は減少する。さらに、KS-15修正定規げたのスパン長12.9mのものと比較すると、あまり領域の幅が変わらないことがわかる。このことより、KS-15相当でも問題にならないと考えられる。

### 5. 走行挙動のシミュレーションと乗り心地に対する検討

ここでは、第1報でもとめた上下・ピッチング系の車両と橋げたの連成振動の運動方程式（第1報式(28)及び式(29)）をRunge-Kutta-Gill法で数値積分する事により車両の動的挙動を調査し、次に、車両加速度を求めることによって乗り心地の面からの検討を加えた。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、けたともに非減衰系とした。

数値積分における時間きざみは、車両とけたの最小固有周期の4%以下である必要があることより0.001 (sec) とした。なお、運動方程式（第1報式(28)、(29)）の数値積分に当たっては、基準関数  $W_{s1n}$ 、 $W_{s2n}$  が周期  $2L/V$  の周期関数であり、 $W_{s1n}$  は時刻  $t = 2(n-1)L/V$  ( $n=1, 2, \dots$ ) のとき、 $W_{s2n}$  は  $t = L/V + 2(n-1)L/V$  ( $n=1, 2, \dots$ ) のときに初めの静止の状態にもどす操作を行なわなければならない。すなわち、2径間循環けたにおいては、第1スパンを車両が完全に

通過し、第2スパンに車両のすべてがあるときに、第1スパンは自由振動をしているので、再び第1スパンに車両が進入する直前に、第1スパンの変化及び、速度をゼロ（静止状態）とする必要があり、第2スパンについても同様である。すなわち、 $t=nL/V$  ( $n=0, 2, 4, 6, \dots$ ) のとき第1スパンを、( $n=1, 3, 5, \dots$ ) のとき、第2スパンの変化と速度をゼロとした。同様にして、3径間循環げたにおいては、 $t=nL/V$  ( $n=0, 3, 6, 9, \dots$ ) のとき第1スパンを、( $n=1, 4, 7, \dots$ ) のとき第2スパンを、( $n=2, 5, 8, \dots$ ) のとき第3スパンの変化と速度をゼロとした。

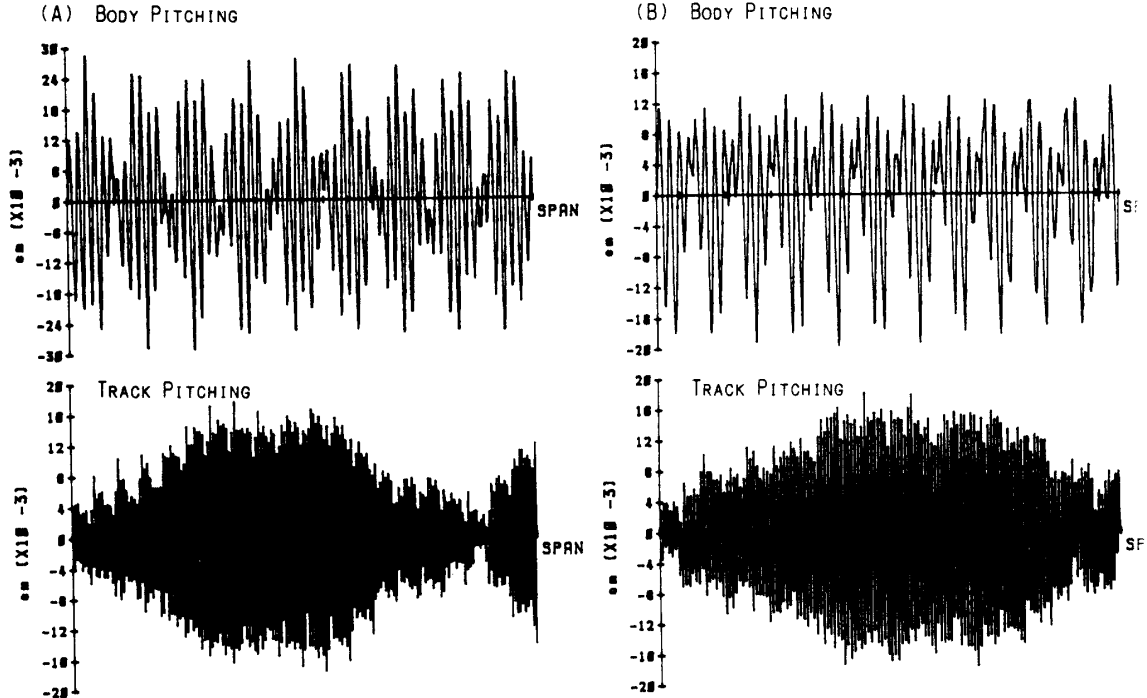
### 5.1 単純パラメトリック共振振動

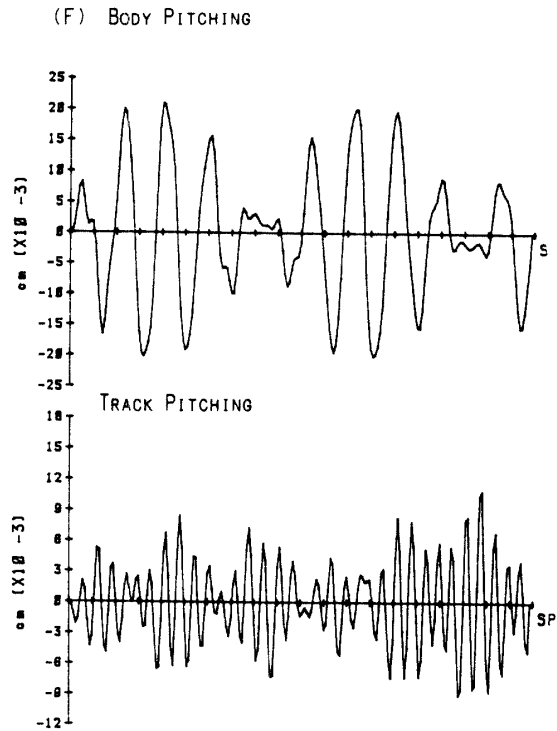
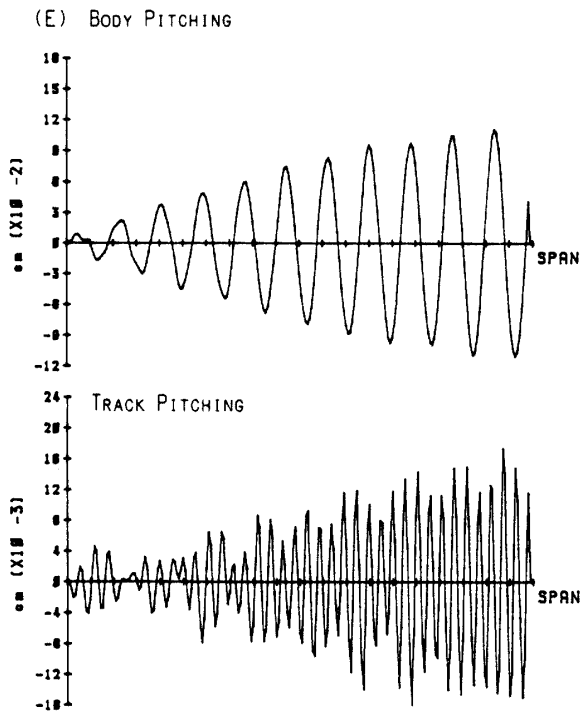
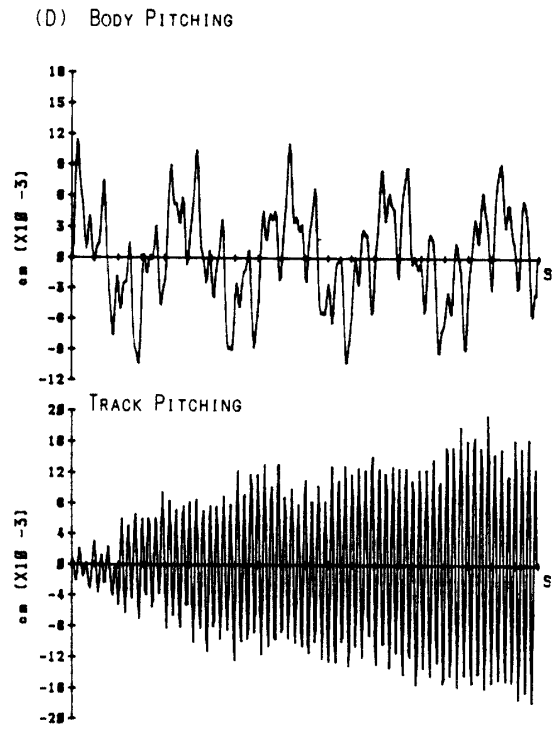
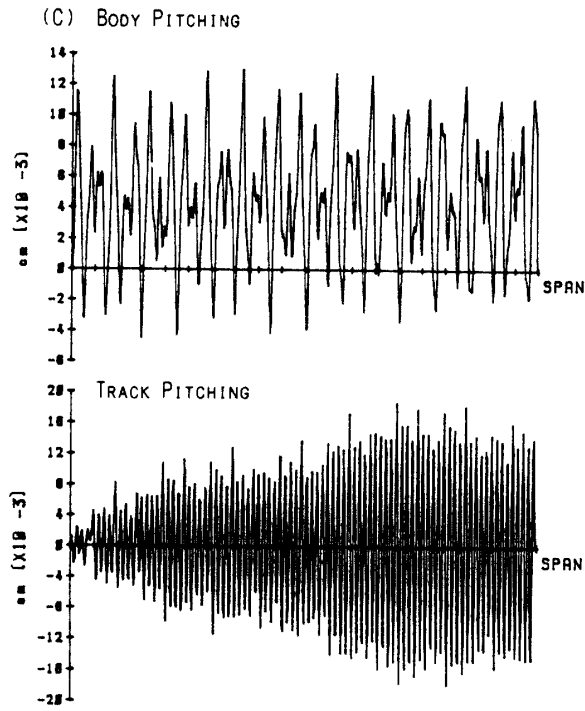
初めに、前章で求めた単純パラメトリック共振の領域図の確認のために、係数励振振動のみに注目して、シミュレートした。ここでは、攪乱方程式(第1報(39), (40))を数値積分することは、連成振動の運動方程式(第1報式(28), (29))において、荷重項 $P$ を除いて数値積分する事と等価である。そこで、運動方程式を、荷重項をゼロとして積分することにより不安定領域内に対応する速度で多径間橋梁を走行したときの係数励振振動の

動的挙動を調査した。対象としたけたは、スパン長30.0 mの水門川橋梁で、このけたの不安定領域は、前章のFig. 3に示した。この安定図より明らかなように、励振振動数 $\omega$ が $\Omega_1/4, \Omega_2/4, \Omega_1/2, \Omega_2/2, 2\Omega_2/3, \Omega_3/4, \Omega_4/4, \Omega_2, 2\Omega_3/5$ の近傍で不安定となることから、調査点はFig. 3に示すA点～I点とした。また、車両の初期条件は、単一車両の固有振動の1次モード（上下動が卓越）と類似モードで最大の上変位が1 cmで、変化走度はゼロの場合を想定した。

これらの点に対応する相当速度をもつ車両の振動挙動を調査した結果中、車体と台車のピッチング角の経時変化（20スパン）をFig. 8に示した。ただし、図中の縦軸は、車体のピッチング角には車両長を、台車のピッチング角には台車長を乗じた値を示している。

以上のシミュレーションより、比較的に不安定領域が広い点、 $\Omega_3/4, 2\Omega_2/3, \Omega_4/4, 2\Omega_3/5, \Omega_2$ に相当する速度において、発散型の自励振動が認められ、Fig. 3に示す単純パラメトリック共振の不安定領域の存在が確認された。しかし、車両の初期の上変位1 cmに比べて極めて小さい値であることがわかる。





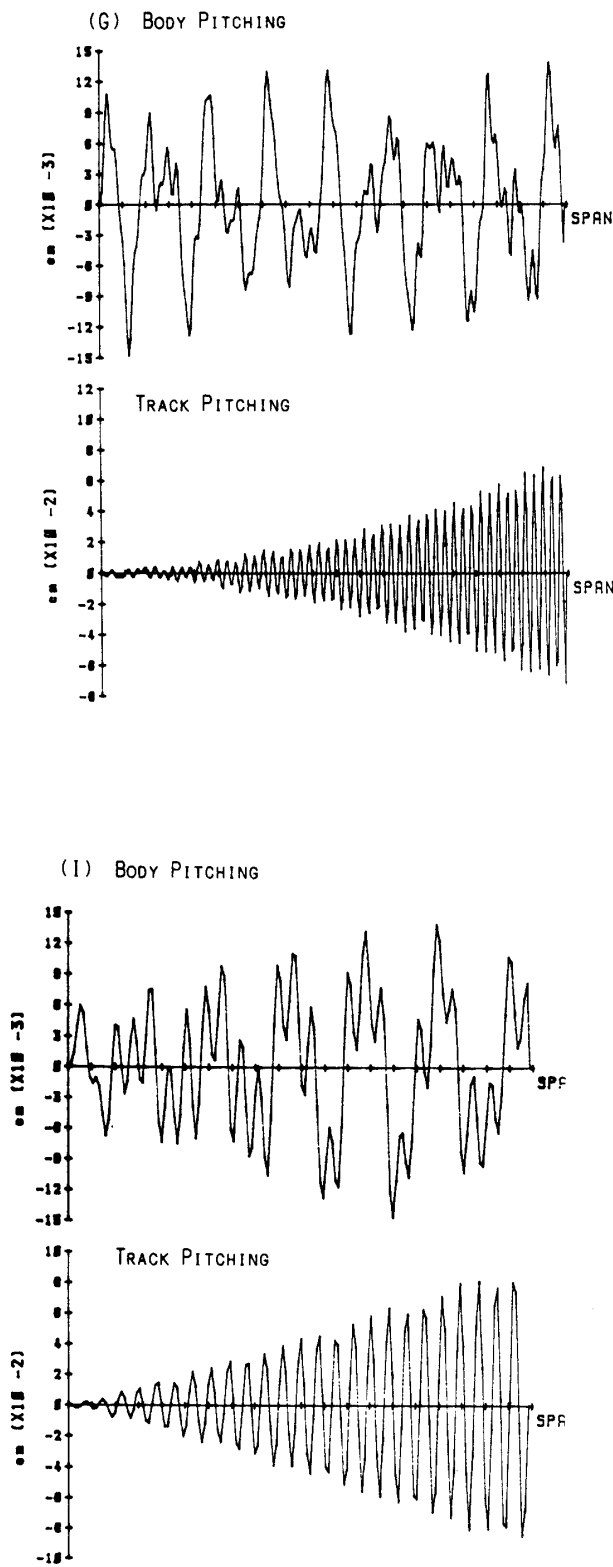
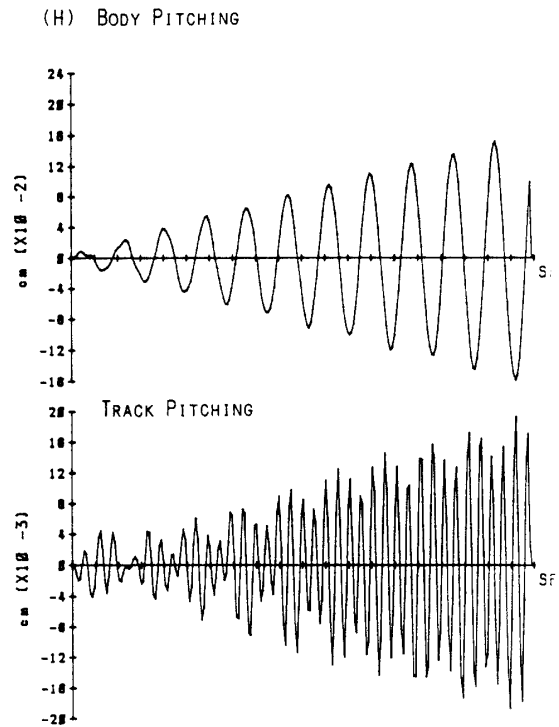


Fig. 8 Response of pitching motion of body and track of railway vehicle with speed corresponding to simple parametric resonance regions



### 5.2 強制振動の影響

上下・ピッチング系の振動において、荷重項Pの与える影響は大きく、振動性状はかなり変わってくると考えられる。そこで、運動方程式において荷重項を含めたときの振動挙動を調査した。数値積分に当たっての初期条件は、けたはスパン上に車両が静したわんだ状態を、車両はたわんだけた上に静止した状態を想定した。

対象とした橋梁は前項と同様、1スパン30.0mの水門川橋梁で10スパン走行した時の最大応答変位を求め Fig. 9に示した。横軸に速度V (m/sec)，縦軸は応答変

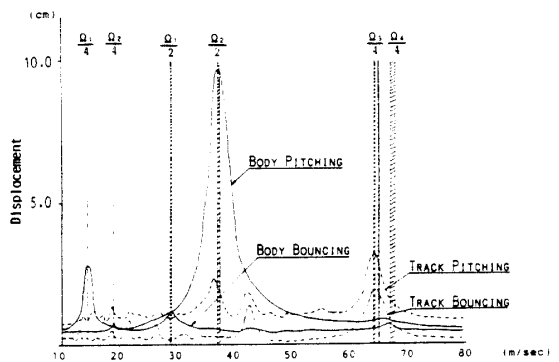


Fig. 9 Resonance curves of a model vehicle on a multispan simply supported girder with characteristics of Suimon-gawa bridge.



位を示す。ただし、ピッチング角は、車体長及び、台車長を乗することにより、上下変位に変換して変位として図示している。図中、斜線部分は前章より求めた水門川橋梁における、単純パラメトリック共振領域を示す。(ここで、単純パラメトリック共振領域は車両を無限スパン走行させたときの不安定領域であり、10スパン走行時の車両応答変位とそのまま当てはまるものでないことに注意すべきである。)

図より明らかに、単純パラメトリック領域より広い領域において、車両変位が増大しており、Fig. 8と比較すると、 $\Omega_1/2$ 、 $\Omega_2/2$ の領域及び、 $\Omega_1/4$ 、 $\Omega_3/4$ の領域が強制振動の影響を受けているものと考えられる。この共振時の応答は最大10cmにも達し、単純パラメトリック共振時の変位に比べて極めて大きいことがわかる。

5.3 乗り心地の面からの検討

国鉄では上下振動に対して、Janewayの乗り心地係数をもとに、Fig. 10に示すような振動数と加速度振幅

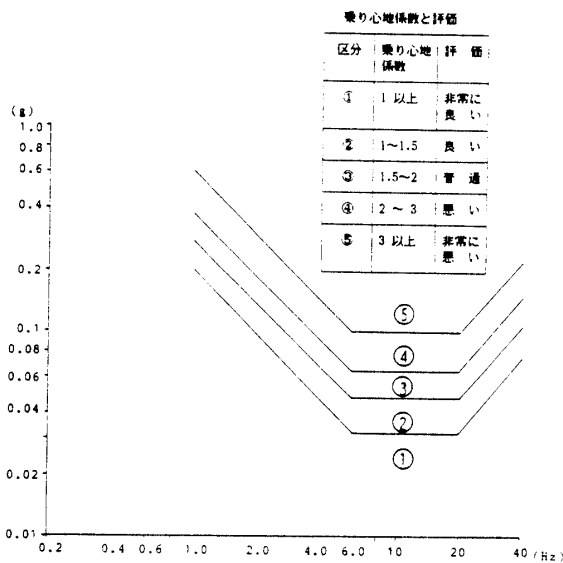


Fig. 10 Coefficient of human comfort on a train

の関係を出し、これによって加速度の限度を決めている<sup>3)</sup>。ここで、車体が不安定振動を起こしたとき、車体加速度も同様に時間とともに増加して行くと考えられる。また、単純パラメトリック共振を起こしたとき車両は、車両の固有円振動数 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ で振動することから、上下振動が卓越する場合は振動数(= $\Omega_1/2\pi$ )=0.98、ピッチング振動が卓越する場合は(= $\Omega_2/2\pi$ )=1.25における乗り心地評価が、Fig. 10によってできる。

2径間循環げた上を走行し、単純パラメトリック共

振を起こした励振振動数 $\Omega_1/4$ 、 $\Omega_1/2$ 、 $\Omega_2/2$ に対応する速度で30スパン(900m)走行させたとき、各スパン走行時の車両先端の最大加速度をFig. 11に示す。図中、①、②、③、④、⑤は乗り心地に対する評価区分を示す。

$\Omega_2/2$ は、車体のピッチング運動の発散であり、車両先端加速度は、10スパン走行中に、乗り心地非常に悪い評価⑤に達している。このことより、乗り心地に関して、ピッチングが卓越した場合、車両先端での加速度が増加し、乗り心地が非常に悪化すると考えられる。

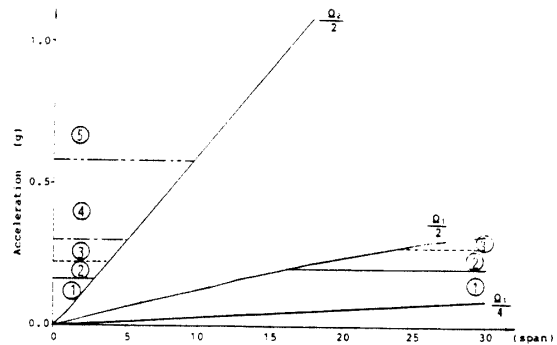


Fig. 11 Growth of maximum acceleration of a model vehicle on a multispan simply supported girder with characteristics of Suimongawa bridge.

6. 結 び

以上の解析結果によって、単純パラメトリック共振による不安定領域及び、その領域における係数励振振動の振動挙動が明らかになり、多径間単純げた上を走行する車両は、強制振動の他に係数励振振動も発生することが確かめられた。

不安定領域は、けたの剛性の低下に伴い広がる傾向がみられた。特に、けたの剛性の低下は、台車の振動に影響を与え、励振振動数が台車の固有振動数の整数分の一の近傍で現れる不安定領域を広げる。その領域における係数励振振動のシミュレーションの結果、台車の自励振動が発散振動するのに伴い、車体振動も発散振動となる場合があることが明らかとなった。しかし一般に、けたの剛性の低下は、車体が単純パラメトリック共振状態となる不安定領域には影響が少なく、領域はほとんど広がらない。

次に、スパン長の変化に伴う安定図の挙動は、スパン長が長いほど不安定領域の幅が広がることがわかった。これは、スパン長が長くなるにつれて、けたの固有振動数が低下し、台車の固有振動数に近づくためと

考えられる。このことより、1スパン長を短くする事は、車両の安定性にとって賢明である。さらに、スパン長を20.0m以下にすること、つまり車両長よりスパン長を短くすると不安定領域は減少しており、車両の安定性にとって有効である。

しかし、実際の速度に換算すると、どの不安定領域もかなりせまい。又、本研究は、けた及び車両ともに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なることが予想される。このことより、本研究で解析した新幹線車両においては、係数励振振動について安定であると考えてよい。

さらに、シミュレーション結果からも明らかなように、係数励振振動のみの挙動は、強制振動のものとは比べるとかなり小さく、事実上、橋げた上走行時の車両振動は、従来通り強制振動のみの影響を考慮に入れれば良いものと考えられる。しかし、本研究の結果は新幹線車両のみを対象としており、バネ定数等が異なる他の車両では、不安定となる領域も当然変わってくるであろう。そのため、車両の特性が異なる種類については、新たに調査は必要であろう。

又、強制振動の共振状態のときは、同時に係数励振振動の単純パラメトリック共振状態となる場合がありこの場合は、かなり大きな振動挙動となり、特に車体が共振状態となる場合は、乗り心地も悪化している。この現象が現れるのは、励振振動数 $\omega$ が車両の固有振動数 $\Omega_p$ と $\omega = \Omega_p/4$  or  $\omega = \Omega_p/2$ の関係となる近傍で発生

しており、これに相当する速度( $V = \omega L_0/2\pi$ :  $L_0$ は一周軌道長)での走行は、運行上避けなければならないと考える。

本研究において、さらに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、本研究の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。

本報の数値計算は山口大学情報処理センターACOS-850と九州大学大型計算機センターFACOM-M-380により行った。

また、本研究で用いた各種資料は東京都立大学、伊藤文人教授及び旧日本国有鉄道熊本鉄道管理局施設部長、速水昭正氏よりいただいた。ここに記し謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 會田忠義・池上豊和・楠窪剛：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, 山口大学工学部研究報告, 37巻, 2号, pp.47~57.
- 2) 橋梁研究会：鋼橋設計資料, 技報堂 (1967), p.108.
- 3) 杉山武史他：鉄道車両と設計技術, 大河出版 pp.21~24

(昭和62月4月13日受理)