S8-4-1　輪軸が軌道回路を短絡する際に発生する共振現象（第５報）
－速度が共振周波数に与える影響－

○佐藤　祐(金沢工業大学院)、[機・電]平間　淳司(金沢工業大学)、
[機・電]永瀬　和彦(金沢工業大学)

Electric Resonance Phenomena on a Track Circuit Caused by Wheelsets (5th Report)
－Relationship between Wheel Running Speed and Resonance Frequency－

Yu Sato, (Kanazawa Institute of Technology　7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa)
Junji Hirama, (Kanazawa Institute of Technology)　Kazuhiko Nagase, (Kanazawa Institute of Technology)

To investigate in to adequate track circuit shunting phenomena, several experiments have been done by a model track circuit and a model truck. As the results of the experiments, a remarkable electric resonance current contained an AF band was observed in the axles of the running wheelsets when a track circuit was shunted by the pair of wheelsets. Relationship between the resonance frequency and axle speed was investigated under various speeds. As the results of the investigations, it was found that the resonance frequency has dependency on speed and a reverse-dependency on the wheel load.

キーワード：鉄道、鉄道信号、軌道回路、レール、車輪
Keyword: Railway, Railway signal, Track circuit, Rail, Wheel

1. はじめに

鉄道車両の在線検知に広く用いられている軌道回路では、極めて稀に短絡不良現象が発生する。これまでの研究で短絡不良現象には、レール踏面粗さや輪重、さらにはレール・車輪間の介在物が深く影響を及ぼしていることが分かった。

先の J-Rail'02[1)2)]で筆者らは、走行中の模型台車に対しどの地点でも一定の軌道電圧を印加できる新しい概念の軌道回路と、短絡状態などを簡便に測定できる方法を提案した。そして、複数の輪軸が軌道回路に進入した際の各軸の短絡電流の挙動を測定した。その結果、複数の輪軸が軌道回路を短絡し走行したときに限ってではあるが、輪軸とレールとで閉成される回路内に多様な周波数の電流が発生し、その現象が共振現象によるものであることを明らかにした[3)]。さらに共振現象は、輪重に依存する傾向が認められた。

そこで、昨年度は輪重依存性を評価する実験を行った。従前の実験に用いた模型台車の輪重が比較的軽量であったことに鑑み、これをレール・車輪間の面圧を実車に近い値となるよう、輪重を 1581.4N に設定可能なように模型台車を全面改良した。その結果、面圧は実車の 7 割程度得られるようになった。この模型台車を用いて走行実験を行い、短絡電流の挙動を測定したところ、共振現象の振幅は輪重に対し逆依存性を示すこと、そしてレール踏面が鋭利な状態で且つ輪重が大きいとき、その振幅はほぼ収束することが明らかとなった。

さらに短絡電流のスペクトル解析の結果、走行回数が少ないときは短絡電流に電気的共振現象は多くは観測されないが、走行回数を重ねると特定の周波数域で共振特性を示す傾向が顕著になることを確認した[4)]。

これらを踏まえ今年度は速度に着目し、従前の実験における台車走行速度が比較的低速の 2km/h 弱であったことに鑑み、これを最大で 15km/h 程度の走行実験が行えるようにした。そして低速域から高速域にかけて速度を多様に変化させ、共振周波数の速度依存性についての評価を行ったので結果を報告する。

2. 短絡電流の測定原理

測定原理[2)]についての詳細は、先のJ-Railで報告済みなので概要のみを述べる。本研究室の提案した方法では、軌道回路境界部分の片側のレールに送電端を設置し、他端境界部に受電端を設置することで、軌道回路内の台車の端部から軌道回路の境界部（送電端または受電端）までの距離を常に一定に保つことができる。実際の軌道回路とは異なるが、台車が軌道回路のど

の地点を走行中であっても輪軸への印加電圧を常に一定にできるので、短絡不良に伴う軌道電流の解析の単純化が図れる。各輪軸への分流のモニタは、自作の差動入力型生体電位アンプを両軸に取付けて使用した。アンプの入力インピーダンスが非常に高い(10MΩ以上)ので、輪軸に発生する極微弱な電位差を高精度で増幅(約1000倍)できる特徴を有する。なお、今回の軌道電源はDC約4Vに設定し、軌道電流を約25A一定とした。受電端から台車の1軸が軌道回路内に進入し、最終的に2軸共軌道回路外に進出するまでの区間において、両輪軸の分流電流が輪軸の抵抗(約 31μΩ:実測値)により微少な電圧降下を生ずるので、それをアンプで増幅した後、リアルタイムでモニタした。その電圧を遮断周波数f_c=1kHzのLPFを通過させ、量子化データ(サンプリング周波数f_s=2kHz)に変換後、アナライジングレコーダ(AR1100A:YEW製)で記録した[4]。

3. 実験用軌道の改善

今回の実験から速度を大幅に上昇させて実験を行うため、実験用軌道を改善する必要があった。従前の実験用軌道では減速区間を十分に設けることができなかったことに加え、台車を手押しで走行させていたことから、速度は最大でも2km/h程度しか出すことができなかった。そのため、2km/h以上の速度で走行させた場合でも、十分に減速し得るだけの減速区間を有した設備へ軌道回路を移設することにした。図1に新たな実験用軌道の全体図を示す。従前のものが全長8.5mであったのに対し、約3倍近い長さとなっている。さらに加減速区間には図示のように傾斜を設けて、位置エネルギーにより速度を付加することでこれまでより速い速度での走行実験を可能とした。また台車を発車させる高さと輪重でおおよその速度が決まるので、これまで不均一であった実験毎の速度の違いを極力抑えることができ、速度の定量評価が行えるという利点もある。

図1 新たな実験用軌道の全体図

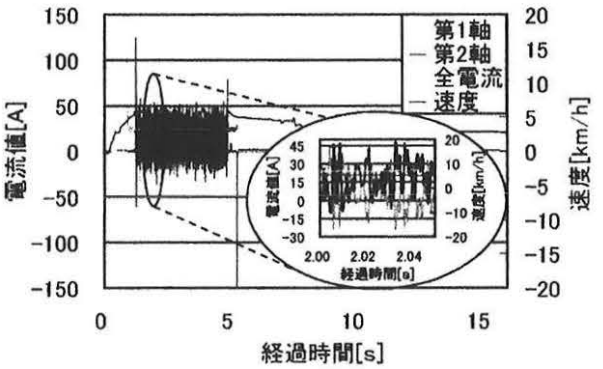

図2 速度5km/h、輪重846Nでの走行47回目の電流値

4. 実験方法

走行実験では車輪とレール踏面を実験開始前に60番の研磨布で磨き、アセトンで脱脂し清浄する。さらに、過去の実験結果より台車を30往復程度走行させると、その後の踏面状態に大きな変化がないことから、実験に先立ち実験軌道を35回走行させ、レール・車輪踏面の平滑化を行った。

そして取得したデータに対し、電流値グラフの算出、スペクトル解析を行った。なお、輪重・速度は走行回数によって多様に変化させることとする。表1に今回解析を行ったデータの台車走行回数と速度及び輪重の関係を示す。

5. 実験結果

5.1 電流値グラフ

5.1.1 輪重846Nでの走行47回目の電流値グラフ

図2の縦第1軸に輪軸に流れる短絡電流値及び回路に流れる全電流、第2軸に速度、横軸に経過時間を示す。両軸が軌道回路内に進入し、台車が走行するときに限って、両軸に流れる軌道電流が12.5Aを中心に上下に変動している。なお軌道回路内での速度は約5km/hである。図の○印で囲んだ箇所を拡大したものを図中に示す。図示のとおり第1軸と第2軸の間には共振現象が見られる。

5.1.2 輪重846Nでの走行36回目の電流値グラフ

図3における縦、横軸は従前と同じである。軌道回路内での速度は約14km/hである。図中の速度データの乱れはノイズの

表1 走行回数と速度及び輪重の関係

走行回数[回]	速度[km/h]	積載するオモリ[kg]	輪重[N]
1～35(平滑化のため)	—	300	846
36	14		
47	5		
119	14	50	233
124	5		

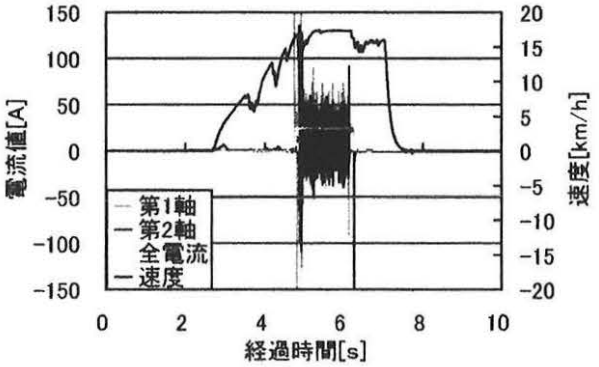

図3 速度14km/h、輪重846Nでの走行36回目の電流値

れ、2005年に提出後、各国の投票により可決され、現在に至っているものである。ただし、2003年の年次総会において、一次委員会原案(1st CD)は提出し、承認されており、それをベースとして、二次委員会原案(2nd CD)を作成し、その作成途中段階のものをPASとして提出した。従って、PASが承認されれば、引き続き2nd CDの完成の作業を継続して、早期(2006年中)の委員会投票原案(CDV)作成を目指している。

PASと国際規格との関係については、IEC文書CA/1831A/INF(2000年10月)で図1のように定められており、PASはpre standardと位置付けられており、PAS制定後のCDV案作成作業に支障はないものと判断している。

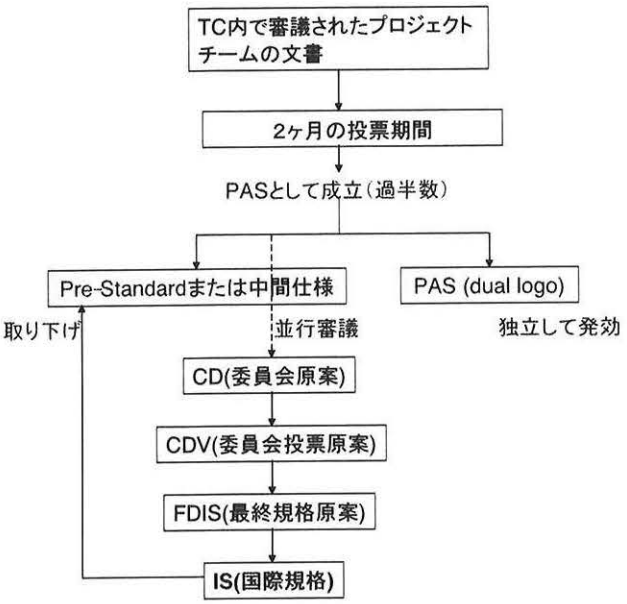

図1　PASとまたは国際規格の承認手順

3．2　AUGT規格の特徴

本規格の特徴は、まず、(1)自動運転の分類を示し、運転の機能から見た規格の適用範囲（表4参照）を示した上で、(2)自動運転の安全性に係る最上位のハザードを最小限整理して、(3)それらのハザードを軽減する可能解を示し、その上で、(4)それらの解に必要とされる安全性要件と機能を記述する形式となっている。また、付録として、(5)自動運転を実施している各国の経験に基づく、ハザード解析結果の例（自動運転を実現している技術）を示している、という点にある。

このうち、(2)と(3)はoverview tableとして、一覧で示している。この例を表5に示すが、運転士が不在であることを補償する機能を示し、それに伴うハザードを列挙して、そのハザードを軽減する対応策を示す形となっている。そして、その対応策に求められる安全性、要件、機能を後段の章で詳述することとなっている。

表4　列車運転の階層分け

列車運転の基本機能		目視運転	非自動運転	半自動運転	自動運転	無人運転
		TOS	NTO	STO	DTO	UTO
		GOA0	GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
列車安全運転の確保	安全な進路の確保	×	S	S	S	S
	安全な列車間隔の確保	×	S	S	S	S
	安全な速度の確保	×	×（一部システム）	S	S	S
運転	加減速の制御	×	×	S	S	S
軌道の監視	障害物との衝突防止	×	×	×	S	S
	軌道上の人との衝突防止	×	×	×	S	S
乗客の移動の監視	車両ドアの制御	×	×	×	×	S
	車両間、ホームと列車間の乗客の障害の防止	×	×	×	×	S
	安全な出発条件の確保	×	×	×	×	S
列車の運行	運行の設定／解除	×	×	×	×	S
	列車状況の監視	×	×	×	×	S
異常時における検知と管理の確保	列車診断、火災／煙検知、脱線検知、異常状況の監視、通報、避難	×	×	×	×	Sand/or staff in OCC

×：職員の責任範囲　S：技術によって実現

□：本規格の適用範囲

表5　Overview Tableの概要

運転士の責任をシステムに交換するための基本機能	ハザード状況	可能な対応策
軌道上の人との衝突を防ぐための　軌道監視	駅のホーム端にいる人	フルスクリーンドア
		腰高式ホームドア
		フェンス
		警戒線
		検知装置
		規則
		.....
	ホームの端(end)でホームから駅間の軌道に侵出する	ホーム端のドア検知
		フルスクリーンエンドドア
		規則
		壁
		ホーム端警戒線
		規則
		.....
	.....	.....
.....	.....	.....

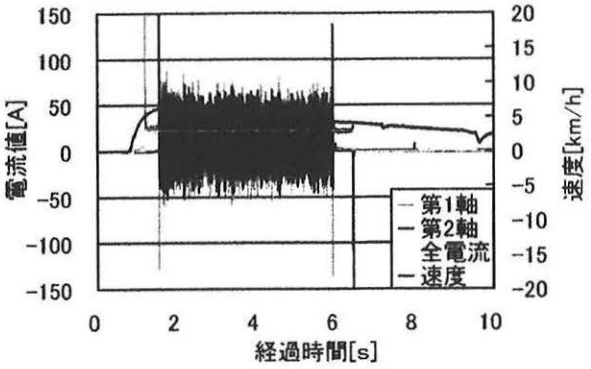

図 4 速度 5km/h、輪重 233N での走行 124 回目の電流値

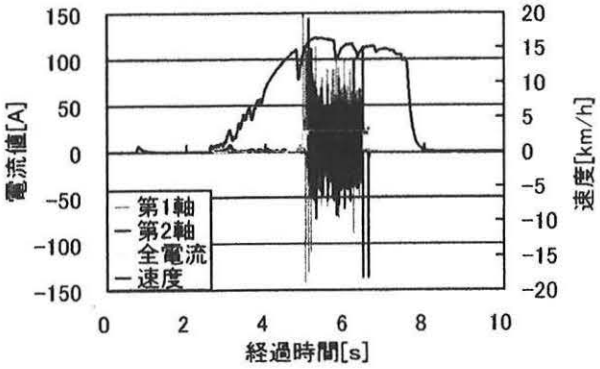

図 5 速度 14km/h、輪重 233N での走行 119 回目の電流値

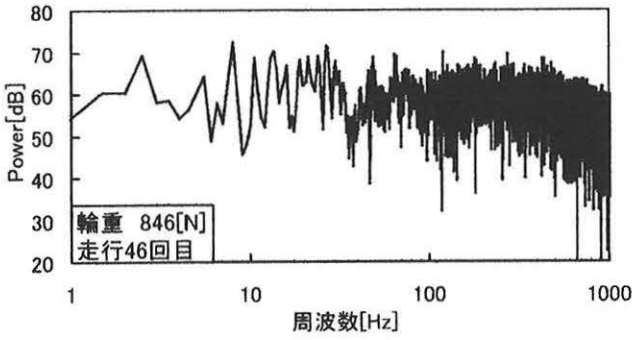

図 6 速度 5km/h、輪重 846N での走行 46 回目のスペクトル解析

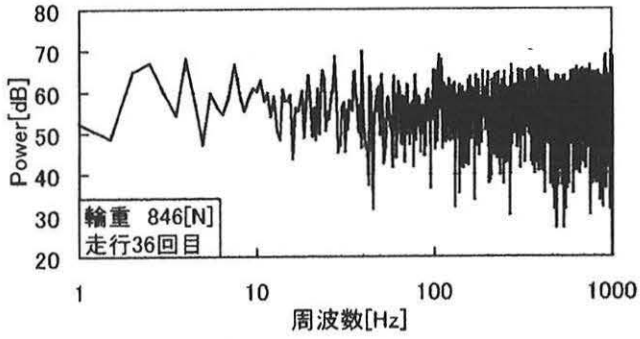

図 7 速度 14km/h、輪重 846N での走行 36 回目のスペクトル解析

影響と推測され、これを改善することは今後の課題である。図 2 と比較して、速度が高くなると電流値の振幅も大きくなっていることがわかる。なお、軌道回路への進入・進出時に電流値の振幅が突出している。これは図 2 についても言えることだが、速度が高い図 3 のほうが顕著に見られる。実験中、台車が軌道回路へ出入りする際に、レール・車輪間ではスパークが発生しており、これが原因であると推定される。

5.1.3　輪重 233N での走行 124 回目の電流値グラフ

図 4 における縦、横軸は従前と同じである。軌道回路内での速度は約 5km/h である。第 1 軸と第 2 軸が軌道回路内を走行しているとき、周期的に電流値の値が突出している。この周期は車輪回転数に一致しているので、輪軸の動的な影響によるものと推定される。

5.1.4　輪重 233N での走行 119 回目の電流値グラフ

図 5 における縦、横軸は従前と同じである。軌道回路内での速度は約 14km/h である。輪重が大きい 846N の場合と同様、速度が高くなると電流値の振幅も大きくなっていることがわかる。また輪重の違いでの比較を行うと、過去の研究成果同様、輪重が大きいほうが振幅は小さくなっている。

5.1.5　電流値グラフの比較

図 2 から図 5 を比較すると、速度が高くなると輪重の如何に関わらず電流値の振幅は大きくなる。また輪重の違いで比較すると、速度の如何に関わらず輪重が大きいほうが電流値の振幅は小さくなる。

5.2　スペクトル解析

共振現象の定量評価に際し、台車の走行回数毎に各輪軸に流れた短絡電流に対して、FFT 処理を用いてスペクトル解析を行った。この解析では、各図中に示した特定の分析区間長（2048 点）の量子化データを対象とした。なお、f_s=2kHz なので、スペクトルの上限周波数は 1kHz となる。

5.2.1　輪重 846N での走行 46 回目のスペクトル解析

図 6 の縦軸はパワー(dB)を示し、横軸は周波数(Hz)を示す。1～10Hz の低周波数域においてピーク周波数が見られるが、全体的に見ると 10～30Hz 付近に偏っている。

5.2.2　輪重 846N での走行 36 回目のスペクトル解析

図 7 における縦、横軸は従前と同様である。低速時に 10～30Hz 付近で見られたピーク周波数は、25～40Hz 付近に移行している。

5.2.3　輪重 233N での走行 124 回目のスペクトル解析

図 8 における縦、横軸は従前と同様である。図 6 の輪重 846N と比較すると、輪重が軽くなることで、ピーク周波数域が 1～10Hz の低周波数帯に移行することがわかる。また、1～5Hz 程度の極低周波は短絡電流の変動成分というよりは、台車の偏心などによる機械的な振動が主因と考えられる。また、40～500Hz では周波数が大きくなる毎にパワーも増加する周波数依存性が顕著に見られる。

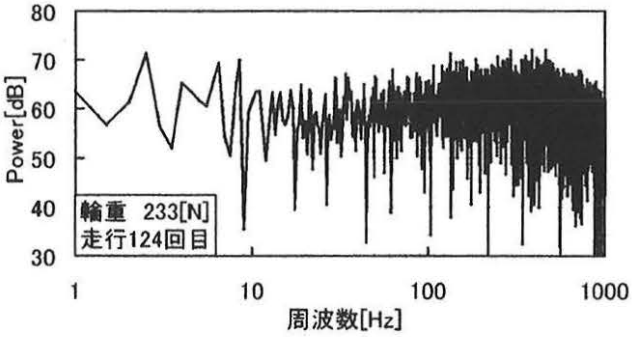

図 8 速度 5km/h、輪重 233N での走行 124 回目のスペクトル解析

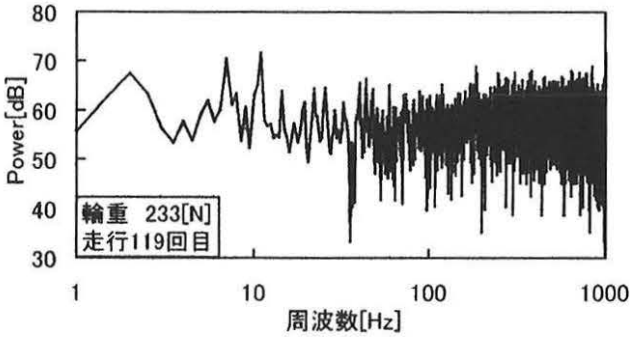

図 9 速度 14km/h、輪重 233N での走行 119 回目のスペクトル解析

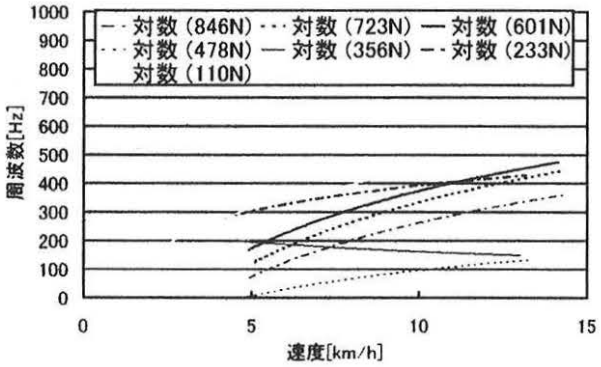

図 10 速度と周波数の関係

5.2.4　輪重 233N での走行 119 回目のスペクトル解析

図 9 における縦、横軸は従前と同様である。7Hz、11Hz 近傍で 70dB 近いピーク周波数が見られる。中周波数域ではスペクトルの傾斜特性はほぼフラットである。

5.2.5　スペクトル解析図の比較

図 6 から図 9 を比較すると、機械的振動の影響と見られる 1～5Hz の極低周波を除いても、速度が低くなるとピーク周波数域が低周波数帯に移行する傾向が見られる。また、各図とも 100～500Hz では周波数依存性も確認することができる。

5.3　速度と周波数の関係

図 10 は速度と周波数の関係について、輪重をパラメータとして表したものである。図の縦軸に周波数(Hz)、横軸に台車走行速度(km/h)を示す。スペクトル解析結果より、各輪重において顕著なピーク周波数を選び出し、近似曲線で結んだものである。輪重 356N の場合を除いては、速度が大きくなる毎に周波数が高くなる、周波数の速度依存性が認められる。また、輪重から軽くなるほど周波数は高くなる傾向が見られるが、輪重 478N の場合は全体的に低い値を示すなど必ずしも言い切れるものではない。

6. まとめ

従前の筆者らの実験での台車走行速度が比較的低速の 2km/h であったことに鑑み、実験用軌道を 15km/h 程度までの走行実験が可能なように改善し、当研究室が提案した新しい概念の模型の実験用軌道回路と、生体電位アンプを用いた 2 軸台車の各輪軸の短絡電流の測定原理に基づき、速度を多様に変化させ共振周波数の速度依存性についての評価を行った結果、以下のようなことがわかった。

(1)　レール及び車輪踏面の平滑化を行った上で走行実験を行ったところ、共振電流は速度が高い場合、輪重の違いによる大きな差異は見られないが、輪重が等しい場合、速度が高いほうが振幅は大きくなることがわかった。

(2)　短絡電流のスペクトル解析の結果、速度が高くなるとピーク周波数は低周波数域から高周波数域へ移行することがわかった。

(3)　速度と周波数の関係について、輪重をパラメータとして評価した結果、周波数は速度依存性があり、輪重に対しては逆依存性の傾向が認められた。

今後は、極低速域でのデータ取得を行い、共振周波数の速度依存性をより詳細に解明することが課題である。

本研究の実施に際しては、奥山美紀夫、常盤宗彬、堀弘茂君などの協力を得た。ここに関係者各位に感謝の意を表す。

参考文献

1)　平間淳司、若林雄介、田中伸治、永瀬和彦他：輪軸が軌道回を短絡する際に発生する共振現象、J-Rail2000、pp331-334、2000

2)　平間淳司、中川大輔、若林雄介、永瀬和彦：輪軸が軌道回を短絡する際に発生する共振現象(第 2 報)、J-Rail2001、pp355-358、2001

3)　若林雄介、中川大輔、北川友哉、平間淳司、永瀬和彦：レールと車輪の接触状態が軌道回路の短絡に及ぼす影響(第 3 報)、日本機械学会論文集、68 巻、674 号、C 編(2002-10)、pp183-188、2002

4)　平間淳司、牛若聡、佐藤祐、永瀬和彦：輪軸が軌道回路を短絡する際に発生する共振現象(第 4 報)、J-Rail2004、pp527-530、2004