

# 共振によるトラブルを探る

## ——パッケージやハウジングの共振問題——

小暮裕明

オーケストラの交響楽は、それぞれの楽器が奏でる共鳴（共振）現象の競演ともいえます。一方、電磁気現象の共振は、われわれを和ませてくれるどころか、誤動作を引き起こす元凶としてしばしば問題になります。今回は、このありがたくない共振現象をじっくり解析し、さまざまなトラブルの要因を探ります。

(筆者)

電磁界解析ソフトウェアを使い込んでいくと、回路モデルを入力している段階で、周囲の電磁界分布が想像できてしまったという経験をする日がきっと訪れます。これはビジュアルな解析結果を見続けているおかげで、頭の中に知識ベースができあがりつつあるという証拠です。電磁気学の教科書に登場する微分・積分方程式と格闘しているときには、とてもこんな余裕はなかったような気がします。

頭に残っている知識とはいっていい何なのでしょう。それはある種のルールかもしれません、その一つに境界条件と呼ばれているものがあります。ここでいう境界とは、金属と空気といった異なる材質の境のことです。この境界付近の電磁界のようすが想像できれば、問題を解く大きなかぎになるかもしれません。

「身のまわりに存在している電気にはいくつかのルール（法則）があるのではないか」ということは、先人たちが長い間探究してきたテーマでした。その中のひとりであるイギリスの物理学者Maxwellは、1864年に「電磁場の力学論」を発表しました。彼の考えたルールの集大成がMaxwellの電磁界方程式というわけです（1864年は、日本では新撰組が尊皇攘夷の志士を襲った池田屋事件が起きた元治元年にあたる）。

今日の電磁界解析ソフトウェアは、彼の理論（ルール）をデジタル・コンピュータで解いていることにはかなりませんから、ビジュアルな解析結果にもそのルールが見て取れるのは、あたりまえのことです。とりわけ共振現象は、たいへん美しい電磁界のパターンを作り出してく

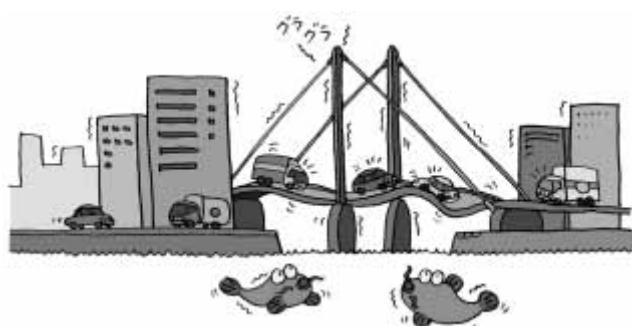
れますから、結果を眺めているだけでうっとりとします。

しかし仕事に戻ると、感動ばかりしてもいられず、事の本質を把握してその対策を講じなければなりません。

### 1 共振現象のメカニズムを探る

高校の物理の時間に学んだ共振現象による事故は衝撃的でした。建築物は地震によってゆさゆさと揺れます。建物にはそれぞれ固有の振動周期があって、外部からその周期にぴったり合った揺れが加わると、建物の揺れがより大きくなります。加えた周期と固有周期が一致したとき、お互いの力が助け合って増幅するので、橋のような強固な建物でも、強度の限界を超えて壊れてしまいます。そしてこのような事故が、実際にあったというのです（図1）。

筆者が実際に体験したのは、学生時代のことです。下宿していた木造家屋の四畳半の部屋で、レコードを聴いていました。自作したステレオ・アンプを調整する目的で、低音から高音まで連続して音を出すテスト・レコードを、スピーカの音量を上げて聴いていると、突然、部屋の窓ガラスがものすごい音をたてて振動しました。あわててボリュームを落とそうとした瞬間、高音に移った



〔図1〕橋のような強固な建物でも、共振によって壊れてしまったことがある

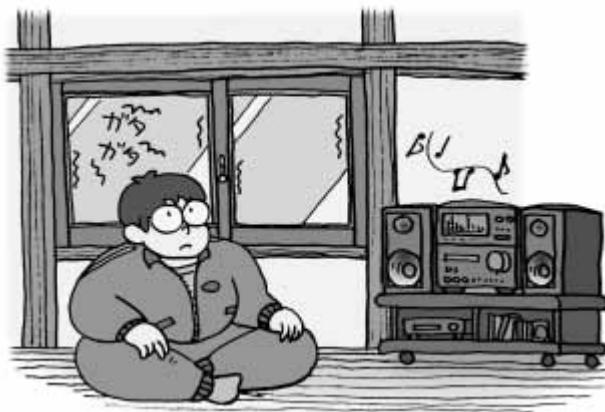
ので、嘘のように静寂が戻ったのを覚えています。おもしろいので何度も再現テストをして確かめました(図2)。頑強なコンクリートの部屋だったら体験できなかつかもしません。

### ●導波管内の電磁界のようす

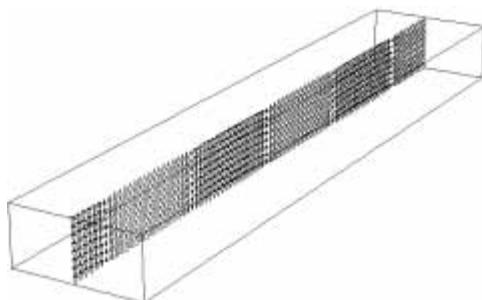
空洞共振器は、名前のとおり、空洞の金属箱に電磁エネルギーを加えて共振させる装置です。マイクロ波の伝送路として使われる導波管を用いて、そのしくみを調べてみましょう。

導波管は図3のような金属の筒で、その断面は長方形や円形などがあります。今、電磁波が図の手前から奥に向かって進んでいるものとします。このモデルでは、導波管の両端を特性インピーダンスに等しい表面抵抗値をもつ板でふさいで終端しているので、無限の導波管の一部を切り出して見ているのと同じことになります。

図3は中央の断面で表示した電界のようすを示しています。すべて上下の面に垂直な方向を向き、それらはある周期で向きが入れ替わっているのがわかります。電界の強さを表現しているカラー・バーによると、もっとも



[図2] 部屋も共鳴することがある



[図3] 導波管内を伝搬する電磁波(中央の断面で表示した電界のようす)

強い(白色)部分と弱い(黒色)部分が交互に現れていることがわかります。

図4はこのときの磁界のようすです。こちらはきれいな渦ができるでいて、その渦巻きの方向は、やはり右巻きと左巻きが交互に現れています。

これらの美しいパターンをじっくり眺めていると、あるルールが見えてきませんか?

### ●電磁波を閉じこめる空洞共振器

図5は、図3を側面から見た略図で、左から右へ電磁波が進んでいます。電界の向きを矢印の方向で表し、大きさは矢印の長さで表しています。

このとき、図6のように右端に金属板を置いて導波管をふさいでしまったどうなるでしょうか。電磁波は反射して左に戻ってしまいますが、入射波と反射波は合成されて、図のような定在波が立ちます。ここで電界の大きさを見ると、右端の終端から半波長あるいはその整数倍の位置では、つねに電界がゼロになっています(この半波長の距離は、自由空間での波長ではなく、導波管内の波長である、いわゆる管内波長の1/2)。

次に図7のように、さらに金属板を置いたらどうなるでしょうか。この位置はもともとつねに電界がゼロですから、閉じこめられた定在波には何の影響もありません。こうして右端の終端板で反射した電磁波は、この金属板で反射され、右に進んでこれらを繰り返し、金属が無損失であれば、無限にこれを続けると考えられます。これが空洞共振器で、cavity(キャビティ)などとも呼ばれています。

現実には、このようなタイミングでふたをして密閉するわけにはいきませんから、図7に示すような金属板に小さな結合孔をあけています。

また閉じこめられた定在波の山は、一つとは限らず、



[図4] 導波管内を伝搬する電磁波(中央の断面で表示した磁界のようす)