

生研公開講演

固体伝搬音と機器の加振力

Structureborne Sound and Exciting Forces of Machinery

大野 進 一*

Shinichi OHNO

おはようございます。これから「固体伝搬音と機器の加振力」ということでお話をすることになりますが、この題名は半分だけ正確です。最初は、もう一つ下に振動エネルギーというのを付けて、題名を「加振力と振動エネルギー」としたほうが正確だと思ったのですが、神戸地震との関連で考えますと、誤解を招くのではないかと思いました。この研究所には地震関係の研究をしている先生が何人も居て、テレビ等でもよく顔を出しています。誤解があるといけなないので、敢えて「固体伝搬音と機器の加振力」と、半分だけにしておきました。聞いていただければ分かるように、後半のほうは振動エネルギーの話しようと思っています。

今日ここにお見えの方に固体伝搬音とは何かということをお話しする必要はないわけですが、話の順序として申しますと、何か構造物、例えば建物とか、船とか、自動車であるとか、鉄道車両、そういう構造物に何か機器を設置する。この機器として、いまいったような構造物ですと設備機器とか原動機というものがあるわけですが、そういうものを設置すると、その加振力によって振動が生じます。例えばこの会場が実験室だとして、適当なところにコンプレッサーとか何かを置いたとすると、それで振動が生じて、それが弾性波として伝搬して行く。伝搬して行って、その結果として機器から離れたところで床や壁の振動が生じる。振動が生じると、その表面の空気に圧力の変動が生じて、それで音が出る。そういうことで、固体伝搬音は原理的には簡単なものです。

私はここで、機器と構造物だけに限りましたが、実は固体伝搬音の原因としてはほかにも、例えば建築関係のほうでは、地下鉄等から伝わって来る振動で建物の中に音が出るという、こういうものが問題です。それから鉄道だけではなくて、自動車が走行するときに出す加振力で高架橋が振動して音が出るとか、そういうものもあります。私自身も自動車が突起を乗り越えるときどういような力が路面に

作用するかということ計算したり実験したりしたことがあります。話が分散するといけませんので、今日はいわゆる機器、設備機器とか原動機、そういうものが建物とか船体とか車体、そういうものに力を与えて振動が生じ、音が出る、そういう話に限ることにさせていただきたいと思っています。

私は字だけで済まそうと思ったのですが、研究室の者が絵をかいてくれましたので、いまいったことを敷衍するためにこういう絵をお見せします。要するにこういう建物があるとして、ここに機械がある。そうすると振動が生じて、それがあちこちへ伝わって音が出る。これが「固体伝搬音」です。英語でいえば Structureborne Sound、縮めて「固体音」という場合もあります。

固体伝搬音に関して何が問題かということですが、要するにそれがどのくらいの音になるのか、そういうことを予測するということが一つ重要です。それから、当然のことながら低減するということが重要になります。

予測する場合にも、すでに建物というものが、あるいは車体なり船体なりというものがある状態で存在していて、そこに新たに何か機器を設置すると、どれだけ音が発生するか、そういうことを予測する。これが一つです。

もう一つは、これから構造物を作るとして、例えばこれから船を作るとして、機関室にある大きさのエンジンを据え付けるときに、ある方法で設置をしたら、どれだけの大きさの音がどこに発生するか、それを予測する。これが重要な問題です。

低減はいうまでもありませんから、これは説明を省略します。

予測については、すでに構造物がある場合には実験によって予測することがあります。それから、計算によって予測することもあります。計算によって予測できると大変都合が良いということで、例えば自動車の設計段階で振動騒音が予測できると良いと、昔から言われているのですが、なかなかそれができないということで、計算によ

*東京大学生産技術研究所 第2部

る予測というのはかなり難しいのですが、場合によってはせざるを得ない場合もあるわけです。

これから構造物を作る場合、これが量産品であれば、例えば自動車であるとか、そういうものであれば、試作品を作って、それに搭載予定のエンジンを付けて運転して、音がどのくらいになるか、これは予測ではなく実測ですが、そういうことをして、これではまずい、このへんを手入れをしよう、そういうことをするわけです。

ところが単品のもの、例えば数千トンの船あるいは数万トンの船では、試作品を作って、まずいから作り直すなどということは絶対できないわけですし、こういう場合にはどうしても、何らかの方法で予測をしなければならない。それには設計図に基づいて予測をするしか当然のことながらないわけです。あるいは、同じようなものを作るのであれば、類似品、過去の経験から予測をするということになります。

実験による予測ということですが、これは大変簡単な話でして、構造物に既知の力を与えて、そのときの騒音の大きさを測定する。例えばこの部屋にある装置を設置したときに、果たして隣の部屋でどのくらいの音になるか。隣の部屋だと近すぎて遮音の問題も関係しますから、それはやめて、もう少し離れたところにしましょう。いずれにしても、この部屋にあるものを設置したときに、離れたところでどのくらいの音が出るかというときには、まずこの部屋の床を既知の力で叩くわけです。そのとき離れたところでどのくらいの音が出るかということを知る。その次に、機械の加振力が分かっているならば、比例関係でそういう機械を設置したときに、どれだけの音が出るかを予測できる。話は大変簡単ですが、そういうことのために機械の加振力というのはどうしても知る必要が生じるわけです。

次に、計算による予測ですが、それは二つありまして、一つは実際にはほとんど実行できないものですが、例えばこの部屋の床にある力がかかったとします。そのとき、この建物全体を有限要素法か何かでモデル化して、そこに力がかかったときの、どこかの部屋の振動応答を計算します。その計算値を使って発生する音を求める。この方法を使うためにも、この部屋の床に作用する力を知る必要があるわけですが、この方法は音響が問題になるような周波数領域ではまず実行不可能です。というのは、そういう周波数領域、数百 Hz とか数 kHz とかいう周波数領域では、この部屋の床にしても、非常にたくさんの固有振動数を持っています。そういうものの応答を、固有振動数の一つ一つに分解して求めて、それを合成して応答を計算するというようなことは実行不可能です。私も 16, 7 年前にエンジンブロックの振動から出る音を、有限要素法を使って計算したことがあります。特定のモードについての音の大きさとか、音圧の分布とかを計算することは可能でしたが、それ

は、有限要素法計算は、どのくらいこういう問題に使えるかということを試したぐらいのところ、実際には役に立たない方法だったと思います。

計算による予測の二つ目として、統計的エネルギー法というものがあります。これは結合された振動系の間のエネルギーのやりとりの観点から計算を行うものです。統計的エネルギー法では、結合というのは非常に弱い結合であって、お互いに影響を及ぼさないとか、いろいろな仮定が入ります。また振動系というのは何も建物の床とか天井とか、そういうものだけではなくて、われわれ音を問題にしているわけですから、空気も振動系にして、そういうものの中のエネルギーのやりとりという観点から計算を行うわけです。いま私が話をしていると、隣の部屋で壁を通して聞けるかもしれないが、それは私の声が空中を音のエネルギーとして伝わって壁に入射して、そのエネルギーによって壁が振動して隣の部屋に音が放出されるというわけですが、そういうふうはこの部屋の空気そのものも振動系として扱う。実際の計算では、はじめは両方扱わないで、建物の振動だけを計算し、あとで両方を扱ったりしますが、とにかくそういうふうには固体と空気が振動系になります。

そうすると、この方法を使うためには、設備機器から建物なり船体なり車体なりに入って行くエネルギーの大きさを知る必要がある。いろいろな制約はありますが、たぶん現在、音響周波数領域の振動と騒音の問題を解析する方法としてはこの統計的エネルギー法が実用的に唯一のものでらうと思います。現にいろいろなところからソフトも売り出されております。私自身は持っておりませんが、広告等でいろいろご覧になっていると思います。

入力エネルギーのほかに、実をいうと統計的エネルギー法を使うためには他にもいろいろ問題になる点があります。

この図は多分ご覧になった方もあると思いますが、いまは MIT の Lyon 教授が、こういう方面の研究で最初に出した論文の図面です。コピーではいけないと思ったので自分で書いたのですが、同じような図です。こちらに M_1 と書いてあるほうが一つの 1 自由度減衰振動系、 M_2 と書いてあるほうがもう一つの 1 自由度減衰振動系で、両方とも大変簡単な振動系ですが、それが弱いバネ K_c と、ジャイロ・スタティック・カップリング G で結ばれている。もう一つ、何かで結ぶとすれば、それには質量がありますから、カップリングのところの質量が M_c というわけです。こちら側には、上のほうには F_1 と書いてありますが、こういう力が作用する。向こうのほうには F_2 という力が作用します。

私は最初この論文を読んだときに、なぜ G などというカップリングを入れたのかと思いました。二つの振動系をこういうふうにはバネ K_c で結合しますと、系 1 についての運動方程式に系 2 のほうから作用するものと、系 2 の運動

方程式に系1のほうから作用するものが、符号が同じになります。ところがジャイロの運動方程式を立てますと、一方から他方へプラス、他方から一方にマイナスになります。RayleighのTheory of Soundを読みますと、最初のほうにそういうジャイロ・スタティック・カップリングも入れた方程式があるので、多分Rayleighに敬意を表して、それも入れたのかと思いますが、実際の機械振動系でジャイロ・カップリングなどというものがあるとはちょっと思えません。ともかく、そういうものを入れて運動方程式を立てます。そうすると、ここではエネルギーの観点からこの振動系を理解しようというわけですが、系1に E_1 というエネルギーがある。これは振動していますから、質量の運動エネルギーと、このバネに蓄えられた弾性エネルギー、その和が E_1 になる。こちらの系2についていえば、運動エネルギーと弾性エネルギーの和が E_2 になります。

この P_1 、 P_2 というのはパワーで、 P_1 というのは F_1 がダンピングのある系1を運動させるために供給するパワーです。それから、 P_{1d} と書いてあります。dはディシペーション、消散という意味で書いたものですが、このダンパーで失われるエネルギーです。

系1と系2はつながっているから、こちらからこちらへパワーが流れるというわけですが、そのパワーというのが、二つの系の持っているエネルギーの差に比例する。これが統計的エネルギー法の要点です。

これで1自由度系同士については分かりました。ところが例えばこの建物について考えるとしたときに、例えばこの床は非常にたくさんの固有振動数を持っているし、天井も持っている、壁も持っている。そういうような系について、この考えをどうやって適用するかということになります。

今度は、こちらが系1で、これが系2ですが、例えばこれがこの部屋の床、これが例えば前のほうの壁とします。壁はほかにもありますが、いまこの床とこの壁の関係だけを考えるとします。そうするとこの床は、例えばある考えている範囲に n_1 個の固有振動数を持っているとします。線形の振動系の応答は、 n_1 の固有振動数があれば、 n_1 の固有振動の応答の和として表されます。その一つ一つの固有振動を1, 2, 3から n_1 まで、同じように壁についても、1, 2, 3, n_2 とします。その一つ一つ、たとえば床の n_1 個の固有振動の一つ一つが、それぞれ先程いった系1の振動系、それから壁のほうの一つ一つが系2の振動系、そういうふうに拡張して解釈する。そうすると、床のほうの第1の固有振動から壁のほうの第1の固有振動へエネルギーが流れる、第2へも流れる。系2のほうからも系1へ流れる。そういうふうに固有振動ごとの間でエネルギーのやりとりがあると考えるわけです。そうすると、系1についてのパワーの釣り合いを考えると、入って来るパワーは、系1の内

部で消費されるパワーと系1から系2へ行くパワーの和である。これは当然です。収支バランスしなくてははいけませんから、そういう式が出るわけです。

それでは壁は、この部屋についても四つあるわけですから、床が系1とすると、系1に系3、系4、系5という壁がつながりますし、また天井もつながるわけです。隣の部屋もありますから、どんどん系が大きくなるし、つながり方も複雑になります。ですから非常に変数のたくさんある連立方程式ができるわけですが、その中でどこかに機器からエネルギーが入って来るというわけです。私自身はソフトを使って実際に計算はしていませんが、非常に変数の多い連立方程式になります。

ということで、さっきもいいましたように、加振力が必要な場合と、振動エネルギーが必要な場合と二つあるわけで、例えばこの部屋に何か機械を設置したときに、どこにどれだけの音が生じるか、そういうことを予測するためには機器の加振力を知る必要があるわけで、それについては、いろいろグループを作って研究されています。ISO/TC43/SC1/WG22というところで大いに議論しております。日本からも何人かの方が参加しています。日本では騒音制御工学会で私が主査になりまして加振力分科会を作って、数年前にレポートを作りました。もう解散しましたけれども、そういうことをやっております。

加振力を測定するのに、一番簡単なのは、機械を力の測定装置の上に載せることです。機械を載せて運転して、下に置いた力の検出器の出力を測れば良いわけで、大変簡単な話ですが、これは実験室的には可能であっても、普通はちょっと不可能です。そのために普通に行われるのは置き換えること、つまりある既知の力を出す装置を使って振動を起こし、あるところの音を測る。次にその機械を運転して、そのところの音を測る。両方の音の大きさの比例関係から機械の加振力を知るというわけです。比較による加振力の推定です。それから、特殊なものとしては、例えば自動車のエンジンのように、ピストン・クランク機構が回転と往復運動するようなものでは、系の運動は完全に記述できますから、それから慣性力を計算するということができます。そういう特殊なものもあります。

これは、1987年の「Noise Control Engineering」という雑誌に出ている先程のISO/TC43/SC1/WG22の活動報告で、日本では千葉工大の子安先生のお名前が出ていますが、機器が固体伝搬音の原因となる能力を測定する方法を提案しています。7種類提案していますが、必ずしも全部が使えるとは限らないと書いてありますし、実際上使えそうなのは二つか三つだと思います。この記事はどういうわけなのか、校正が悪くて、提案している7種類の方法について図面と説明が一つずつ食い違っているのので、読むとき大変頭が混乱します。お読みになるときは気を付けて下さい。

ついでですから紹介しますが、これは騒音制御工学会で出したレポートの表紙で、私が先程、高速道路の床版から出る音を考えるためには、自動車がどんな力を路面に与えるか知る必要があるといましたが、そういうことも少し紹介してあります。

先程、機器の加振力を測定するには、既知の力と、それに対する応答、それから機械を置いたときの応答、この比例関係から機械の出す力を推定するのが一番やり易い方法で、実際に行われているだろうと申しましたが、それを説明します。

上と下は機械がある場合と無い場合で(図1)、この点々を付けた部分が床であるとか、あるいは適当に支持されたベッドであるとか、そういうものになるわけですが、そこに力を与えます。ここには既知の力と書きましたが、例えばハンマーの先に力検出器を付けて叩けば加振力 F が分かります。そのときの応答 V を測定する。つまり力 F に対する応答 V を測る。その次に機械を置いて運転したときの応答 V' を測りますと、比例関係から加振力は、 $F' = F \cdot V' / V$ というものになります。

ここで、こういう関係を使って測定するとして、次に何を考えるかということになります。まず標準的な架台あるいは基礎というものがあるかどうか。もしそういうものがあれば、そこへ測定したい機械を載せれば良いわけですから簡単なことになります。

もし標準的な架台がないとすれば、測定できないかという、そういうことはありません。この F/V がその都度測定できれば良いわけで、例えば機械が置いてあるとき、その近くを既知の力で、あるいは力を測りながら、叩いたときの応答を求めると、すぐに F/V が近似的に求まりますから、特に標準的な架台というものはいらないということになります。

機械についての加振力については、建設会社が関心があるようでして、いろいろ研究されているようです。標準的な架台としてどういうものがあるかという研究もありますし、機械の仕様から、大体の推定ができないかというよう

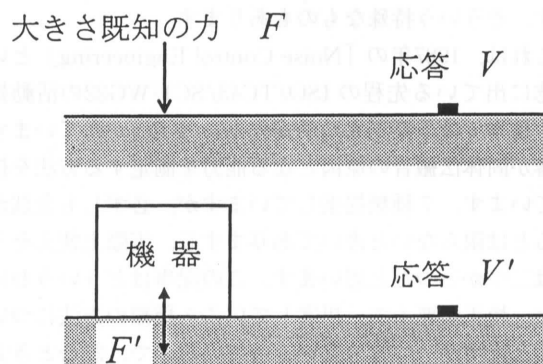


図 1

な研究もあります。あるいは機械だけではなくて人間が歩いたらどんな音が出るか、いまマンションなんかでは大変問題になっているようですが、人間の歩行はどのくらいの加振力をもっているか、そういう研究もあって、そういうための設備もいろいろお持ちのようです。

二つ、三つ、よその方の研究を紹介させていただきますが、これは大成建設の方の研究で(図2)、置換法の標準的な架台としてどんなものがあるかということ調べたもので、この上のほうはコンクリートの普通のスラブをバネで支えたもの、下はだいぶ大きなコンクリートのブロックの上に、さらにスラブを置いて、ブロックの下にグラスウールを敷いてあります。こういうものについて、機械の設置位置を変えたりとか、運転状況を変えたりとか、いろいろ変えて加振力を測っています。その上で、そういうふうにして測ったものが本当に正しいかどうかを確認しているわけですが、確認するとするとこれがまた、実験室的と先程いいましたけれども、直接測らざるを得ないわけで、機械を力検出器の上に載せて加振力を測定して。そういう直接測ったものと比較してみると、こういうスラブをバネで支持したものは、スラブが十分重ければ標準的な架台として使える。つまりそういうものについて一度応答を測ってしまえば、あとは問題になる機械や測定したい機械が出るたびに、それを載せて測れば良いということになります。このスラブは、一番軽いものでも重さが2.5トン程ありますから、普通の機械を載せても影響を受けることは多分ないのだろうと思います。

これは小林理学研究所の方が発表したものをお許しを得て書き直したのですが(図3)、これも置換法です。どういうことかこの研究を行ったかといいますと、高速道路の高架部分に集塵機を載せなければならないが、集塵機が高架橋を振動させて音を出すに違いない。そうするとどの位の防振支持をしたら問題にならないか、そういう調査を

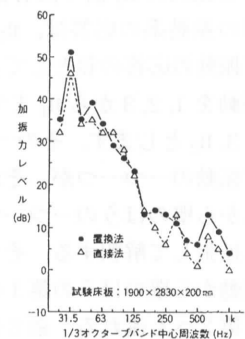
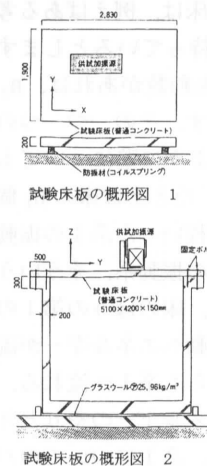


図 2

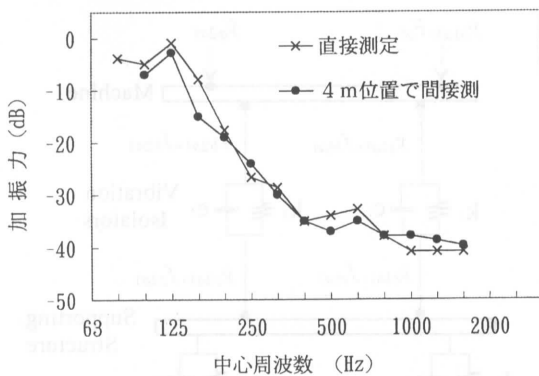


図 3

する必要があって行った研究です。力検出器を付けたハンマーで高架橋を叩いて、付近の音を測った。そうすると、高架橋について加振力と音の関係が分かります。そこで、次は設置予定の集塵機はどれだけの加振力を出すのかということになります。

実験室に集塵機を置いて、その近くを力検出器を付けたハンマーで叩いて、4 m 程離れたところで応答を測った。ハンマーの加振力と応答の関係を知ったうえで機械を運転して応答を測ったら、結局その機械をそのまま設置したのでは将来的に問題が起きそうだとということで、防振装置を入れて10dB 程の加振力の低減を図って設置したところ問題がなかった。そういうものですが、加振力と音の比例関係を2回使って、こういうことができるというわけです。

次に、エンジン関係のものをご紹介しますと、これはピストン・クランクの簡単なものですが、これはクランクの回転による遠心力とピストンの往復による慣性力が働きます。こういう力はこういう式で書けるのですが、要するに、こういう力とモーメントは、クランクがどこにあるかということ測定できれば、簡単に式の上から求められるということなんです。

この方法は非常に良い結果を出しているということですが、時間がありませんので、説明はこの位にします。

次に、加振力ではなくて振動エネルギーをどうやって測定するかという話をしたいと思います。これは考えられる方法としていくつかあるわけですが、機械と床の間に何か力を測る装置を入れて、その速度を測定する。そうすると、速度と力が分かれば、その積の時間平均としてパワーが出ます。原理的にはそれで可能なんです、機械の下に力検出器が置けるというのは実際にはありそうもないので、これはまず実行不可能な方法です。

もう一つは、例えば設置するところの床のインピーダンスがあらかじめ分かっているとすれば、その速度を測れば、速度とインピーダンスの実部の積としてパワーが測れるというわけです。

パワーとエネルギーは違うということにご注意いただか

なければいけないのですが、パワーというのはエネルギーの時間率のことです。以前、永久運動に関する本で、パワーとエネルギーを混同したためにアメリカで騒ぎが起こったということを読んだことがあります。ちょうど第一次大戦の頃ですが、ある人が20分の1馬力のモーターでフライホイールを回して、そのフライホイールを止めようとしたところ動力計が10馬力を示した。要するに嘗々と貯めたエネルギーを一時に放出したから大きなパワーが出たのですが、これは大変だということで、大統領命令の調査委員会までできたという話です。そのくらい混同し易い。

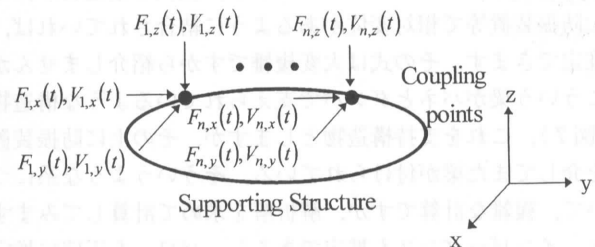
問題は、インピーダンスを測定するというのですが、これは機械と構造物が分離できれば簡単にできる話です。

パワーの推定で普通に行われているのは、機器周辺の振動を測って、それを基にいろいろな経験等を使ってパワーを推定するという方法で、これが実用的にはよく使われている方法だろうと思います。

それから、これは実用にはまだ程遠いですが、あとで紹介しますが、振動インテンシティから推定するということがあり得ると思います。

これは、いまいったことですが、機械が構造物に支持されているときに、結合点の力と速度が分かれば、供給エネルギーが分かるというわけですが、結合点の力と速度の間には、速度分の力がインピーダンスという関係がありますから、インピーダンスと速度が分かればパワーが計算できるということになります。

いまは1点の話をしました、これは例えば楕円形のところが下の構造物だとして(図4)、いくつかの点で上の機械を支えているとしたときに、結合点のインピーダンスが分かっていると、そのうえ速度が分かれば、こういう関係式でパワーが推定できるということです。それを研究室で実験的にやってみました。われわれはあまり大きな機械が扱えませんから模型的なものですが(図5)、これは普通の動電形加振機ですが、これを傾けたりするいろいろな方向の力が出ます。ここまでの機器、この下のほうが支持構造物、このところの何点かで、防振装置が入っていてもなくても良いのですが、結合されている。問題は、ここ



$$P(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re} [Z_{xx} V_x V_x^* + Z_{yy} V_y V_y^* + Z_{zz} V_z V_z^*]$$

図 4

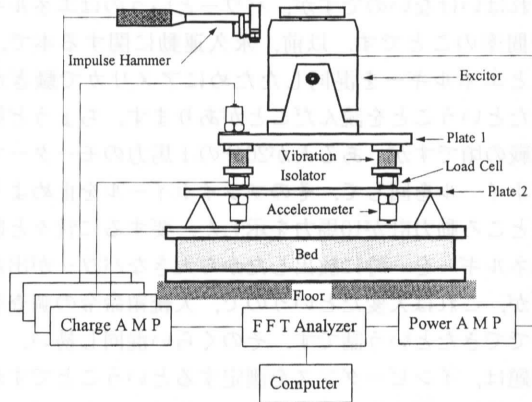


図 5

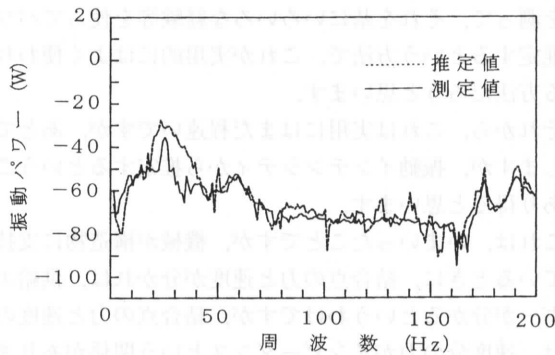


図 6 振動パワーの測定値と推定値

の結合点から下を見たときの支持構造物のインピーダンスで、これが分かれば、あとはこの点の速度を測るだけでパワーは推定できるだろうというわけです。このインピーダンスは、上の機器を取り外してしまえば、結合点を叩くだけで簡単に測定できるし、あるいは結合点が直接叩けなくても、周囲の点を叩くことによって、推定できます。そういう実験をやってみますと、例えばこういう実験結果で(図6)、一部推定精度が悪いのですが、パワーは推定できるというわけです。

その次に、それでは機械は設置されてしまっていて、いままさら取り外すことができないというときにインピーダンスが推定できるかというわけですが、機械と構造物が、もし防振装置等で相対変位があるように結合されていれば、推定できます。その式は大変複雑ですから紹介しませんが、こういう梁がバネとダンパで支えられているような構造物(図7)、これを支持構造物としますが、その上に防振装置を介してまた梁が付けられている、そういうような系について、複雑な計算ですが、解析解を求めて計算してみますと、インピーダンスも推定できるし、パワーも正確に推定できるということです(図8)。

その次に、ほかに何かパワーを推定する方法はないかということで振動インテンシティの話をしたと思います。

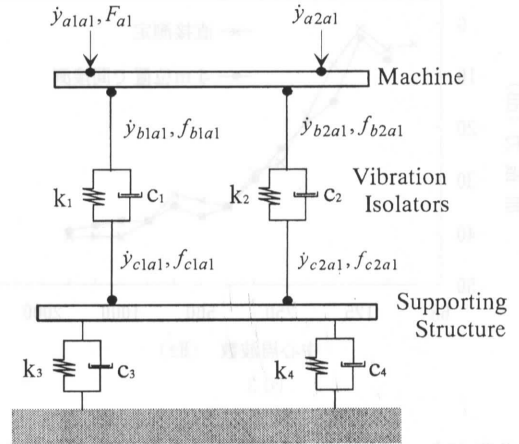


図 7 Amodel of the machine and the supporting structure

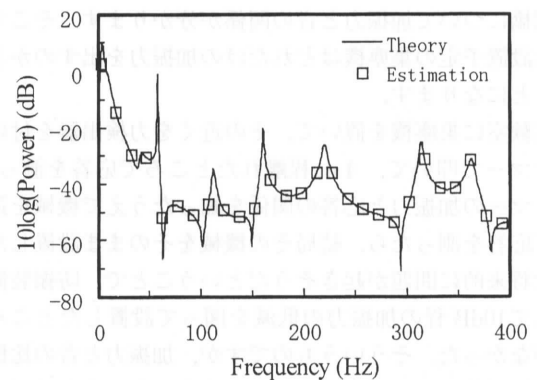
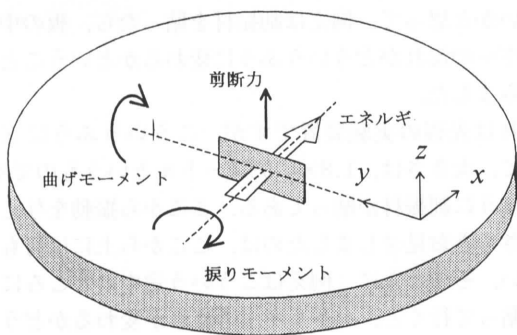


図 8 Theoretical and estimated values of vibrational power

振動インテンシティというのは、構造物のある面を通過するパワーのことです。はりや板の場合には単位幅あたりのパワーでいいますが、一般には単位面積当たり、単位時間に流れるエネルギーといえいいかと思います。もしこの床のあるところに機械を設置して運転すると、振動によってエネルギーが伝わって行きますから、その機械を取り囲むある閉曲線の上で、外向きに流れるパワーを測定することができれば、その機械が、床に与えているパワーが分かります。ですから、もし振動インテンシティの測定法が実用化できれば大変役に立つと思います。

ここに書きました楕円形のは(図9)、平板の一部を切り取ったものと考えていただきたいのですが、その平板のある断面、仮定の断面ですが、それをこちらへ流れて行くエネルギーというのは、この断面に作用するねじりモーメントとねじり角速度の積、それとここに作用する曲げモーメントと曲げ角速度の積、それとここに作用する剪断力と面外方向の変位速度の積、その三つの和として表される。こここのところに入っているマイナスは書き間違いではなくて、モーメントの正方向と傾きの正方向が反対だということです。板の曲げについては、教科書によって座標系の取り方やモーメントの正方向の取り方がまちまちで、



面外変位: w , 曲げモーメント: M_x

剪断力: Q_x , 振りモーメント: M_{xy}

振動インテンシティ: I_x

$$I_x = \left\langle Q_x \frac{\partial w}{\partial t} - M_x \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + M_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right\rangle_t$$

図9

読者は大変混乱するのですが、どれかに合わせて書き換えてみれば、結果はどれも一致します。

また式が出て恐縮ですが、剪断力、曲げモーメント、ねじりモーメントというのは、面外変位とこういう微分の関係式で結び付けられています。これを差分近似することは可能です。差分近似して剪断力などを全部出そうとすると、この面がいま平板だと考えて、測定する点の回りで、これだけの点で変位を測らなければいけないわけですが、それはとても実行不可能です。面倒ですし誤差が多いわけです。最低限曲げだけを考えたとすれば、この辺だけ測れば、近似的なインテンシティを得ることが出来ます。私どもではそういうことをやってみました。

私どもの実験室で、これとは少し違っていますが、公開していますから、ご覧になっていただきたいと思います。板を立てて、このへんを加振して、下のほうに制振材を貼って、入ったエネルギーは全部下のほうへ流れる、そういう実験装置を作っています。裏側から見たところをお見せしますと、裏側からこういうふうに加振しています。

これは実験装置の計測器の配置を書いたものですが(図10)、これは先程の板を横から見たところになります。後ろ側から加振機で加振しています。表側でインテンシティをたくさんの点で測っています。このパーソナルコンピュータで全部制御して、なるべく自動化して測定するというわけですが、大変手間のかかる実験です。

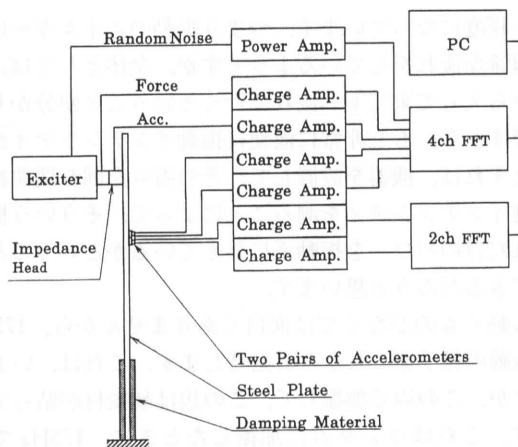


図10 振動インテンシティ計測実験

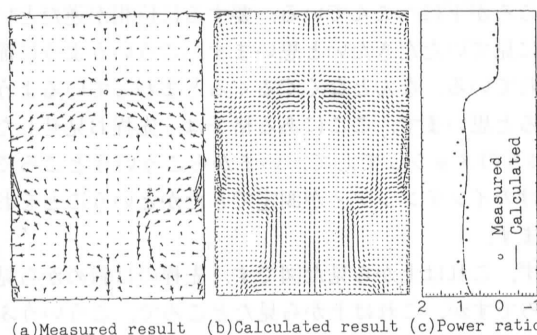


図11 実験結果と計算結果の比較 (A, 325Hz)

ここに格子が書いてありますが、これは5cm間隔で格子が切ってありまして、その格子点上に加速度計を1ヶ所1ヶ所動かしながら振動を測って行く。これが振動インテンシティ法の実用を妨げているところとして、もし非接触で振動が測定できれば、伸びて行く方法だろうとは思っています。もちろん非接触の振動計はありますけれども、いろいろ問題があります。

板全体はこの辺までであるのですが、この辺は制振材が貼ってありますから測定できません。この加振点で板に加振力が作用すると、振動のエネルギーが全体としては下のほうに流れます。加振点より上のほうには流れない。下のほうへ全体として流れます。

これが測定結果で、これは有限法を使って計算した結果です(図11)。例えば325Hzについてはこのような結果が出て大変良く合っています。加振点から入ったパワーが本当に全部下へ行っているかということを確認するには、例えばこの断面で切って、下向きのパワーを全部足してみた上で、入力パワーと比較すれば良いわけです。そういうことをやってみますと、ここに書いてありますように、加振点から入って来るパワーと、各断面を下向きに流れるパワーの比を取ってありまして、例えばここですと、ちよ

うど1程度になっています。つまり振動のエネルギーは非常に複雑な流れをしているようですが、全体としては、加振点から入って来て下へ流れて行くということが分かります。ですから、もし非常に簡単に振動インテンシティが測れるとすれば、機器を設置して、その周りを囲む閉曲線上の振動インテンシティを測ることによって、そういう機器がどれだけのパワーを振動系に与えているかということは推定できるだろうと思います。

何も動くものがなくては面白くありませんから、175Hzでの振動の様子をこれからお見せします。これは、いまの板ですが、この辺で加振して、この辺は制振材が貼ってあります。これはランダムに加振したときに、175Hzではどういう振動が起こっているかということを示しているものです。この赤いところが盛り上がっているところで、白いところが下にへこんでいる。要するに位相が逆だということに感じていただきたいと思います。こういうように節線が流れている。なんとなくぐるぐるとまわっているように見えると思います。ここにある格子は、先程お見せした5cmおきのメッシュでして、いまからこういうところでどれだけのインテンシティが測定できたかということをお見せします。

まず、これは上から見た図です。先程のは斜めから見たところですが、これは上から見たところで、こういうふうにくるぐると節線が動いているのが分かると思います。

今度はインテンシティだけの結果をお見せしますと、ここから入ってきたエネルギーがこういうふうに、この辺でぐるぐる回ったりしていますが、全体としてはこっちへ流れて来るというのが分かります。

これで、節線がぐるぐる回っているところで、エネルギーがそれに従って流れているということが分かるかと思いますが、あるいは、これだけでは分かりにくいかと思うので、別の図をお見せします。

これは図で、動かないのですが、ここからパワーが入って来ます。こういうところは動かない点でして、ここに色を変えて書いてあるのは、節線が動いている様子を見せています。位相で30°おきの節線を見せていますが、こういうふうには節線がぐるぐる回っているところで、エネルギーが渦を巻いているということが分かると思います。

このインテンシティの測定法を制振材の性能の評価に使

えないかと思って、例えば制振材を貼ったら、板の中のエネルギーの流れがどういうふうに変わるかということ調べてみました。

これは先程の実験装置ですが、こういうふうにしてあって、大きさは、1.8×0.92メートルというのですが、下のほうに制振材が貼ってある。ここから振動を与える。いまさっきお見せしたのは、ここから上には何も貼っていない。そのときに、例えばこういう途中のところに制振材を貼って行くと、エネルギーの流れが変わるかどうかということですが、これは実験装置の事情で変わりませんでした。この板は自立するために結構厚くて、3.2mmの板です。そこに厚さ3mmの制振材を貼っても、銅板と制振材では剛性がまるっきり違いますから、振動の様子はほとんど違いが生じません。ですからエネルギーの流れの様子は違いはなかったわけです。しかし制振材があるからには、どこかでエネルギーが吸収されているはずですよ。

それを調べてみますと、こういう具合になりました。これが板の上端で、ここから下にさらに板が少しあるわけですが、このへんに制振材が貼ってあって、ここで床に固定してある。ここで加振して、先程と同じようにある断面を下へ流れるエネルギーというものを、測定値を全部足し合わせ、それに加振点から入るとエネルギーと比較します。ここから下のほうでは、入って来るエネルギーと下へ流れるエネルギーが同じです。上のほうには当然のことながらエネルギーが流れていない。

次に、一部分貼ってみると、エネルギーの流れとか振動の様子はほとんど影響を受けないけれども、下に流れるエネルギーが次第に減ってきていることが分かる。たくさん制振材を貼った場合には、下へ流れるエネルギーの減り方が大きい。要するに途中で吸収されているということが分かるわけです。ですから将来的には有効な方法で、いろいろな方面に使える方法ではないかと思います。

用意したフィルムはこれだけで、あまり結論らしいことはありませんが、機器の加振力や振動エネルギー、これらをなぜ測定したり推定したりする必要があるのか、またそれを推定したり測定したりする方法にどのようなものがあるかということをお話しました。(1995年6月9日講演分)

(講演時に使用したOHPフィルムの一部を図面として掲載しました)