

吸音の機構をめぐって

子 安 勝

A 先生 お邪魔いたします。

B やあ A君しばらくだね、相変わらず元気そうだけれど、今日はまた何か...

A 実は、今度会社で吸音関係の仕事を担当することになったんです。吸音材料については、今までにも講習会などに出席して、自分なりに一応の知識を持っているつもりではいたんですが、いざ自分の仕事ということになってみると、それがはなはだ不確実なものだだことがわかってきたのです。それで、今日は先生に基本からたたき込んでいただこうと思ってやってきたわけです。よろしくをお願いします。

B そうですか、たしかに、吸音材料が一般的に使われるようになった10年あまり前には、雑誌「音響材料」などに吸音材料の基本的な問題、例えば吸音機構などの解説記事がよく掲載されていたものです。

ところが、最近ではこうした問題はもう卒業したというわけか、雑誌の記事でも応用方面が中心になっているけれども、一方では、君のように新しくこの方面の仕事に入る人も、年ごろに多くあるわけですから、時々は繰返してみることも意味があると思いますね。

さて何から話を始めましょうか。

A いま先生のお話のなかに吸音の機構ということがありましたが、これは吸音材料の基礎的な研究の中心になることはよくわかります。ただ、僕達のような立場のもので、やはり大切なものでしょうか。

B もちろんですよ。例えば、吸音材料を生産する場合にも、製品の改良や品質管理あるいは新製品の開発などに対して、ある程度の吸音機構の知識は、無駄な労力や経費をはぶくのに役に立つはずだと思います。

また、吸音材料を使用する方面でも、材料の選定や施工について同じことがいえるでしょう。

だから、これは何も研究者だけの問題ではなく、生産者や需要者にとっても必要な知識の一つだと思ってもらいたいものです。

A なるほど、そう考えれば僕達も勉強しておく意味

がありますね。ただ、よく本などを見ると、式を一杯に使った説明が多いんですが、どうも数学は苦手なので、なるべくわかりやすいお話をお願いします。

吸音機構からみた吸音材料の分類

B なかなかむずかしい注文をつけますね。

ところで、吸音の機構といっても、一番根本に戻って考えてみると、音波のエネルギーが他の形のエネルギーに、普通には熱のエネルギーに変わるという点では、すべて共通しているわけです。

A ですが、吸音機構によって吸音材料をいくつかに分類するというをよく聞くんですが。

B 根本の機構は同じであっても、実際には、材料の種類によって、音から熱へのエネルギー変換に関係する材料要素はいろいろです。これがまた、材料の吸音率周

種類	例図	吸音特性の傾向
多孔質材料		
柔軟材料		
孔あき板材料		
穴あき繊維板		
板状材料		

図1 吸音機構による吸音材料の分類

グラスウールを和室天井に使用した例



波数特性にも関係してきます。

そのため普通には、例えばこの図1のように、吸音材料をいくつかの種類に分類しておく、吸音機構を考えるとときにも便利だということです。

A この図の種類を見ると、多孔質材料とか孔あき板というようになっていますが、これが吸音機構でわけたことになるのですか。

B そう、直接にはこれは材料の外観で分類したものです。うまいことに、大部分の場合外観上の特長が吸音機構にも結びついているので、こうした分類が普通に使われているのです。ただ、あとでもふれるつもりですが、なかには外観から簡単に判断すると間違う場合もあるので、よく注意するようにしないとイケませんよ。吸音材料の正解でも、“一見××風”というのがあることになりますね。

話が横道にそれそうですから、本題を進めることにしましょう。

多孔質材料の吸音機構

A 図の順番でゆくと、まず多孔質材料からですね。

B 何といっても吸音材料の主力の一つですし、歴史的に見た場合、意識的に吸音材料として使われたのも、やはりこの多孔質材料が最初でしょう。ただ、はじめのころは、フェルトや麻綿、パンヤなど有機質繊維だったのが、現在ではほとんどグラスウールやロックウールなどの無機繊維に代っているというだけです。

A いまの話に出てきた材料は、どれも繊維材料ですね。これを多孔質材料といっているんですか。

B たしかにちょっと変に聞こえるかも知れませんが吸音材料として意味があるのは、繊維と繊維の間にある小さな隙間での空気の運動なのです。つまり、さきあげたいろいろの材料で、繊維がからみあってできている小さな隙間が本質的な役割をしているので、この隙間を孔とみだてて、一般に多孔質材料と呼んでいるわけです。

では、どうしてこのような隙間が吸音に関係するかと

いうことになりますね。

音波が空気の圧力変動であり、空気が振動状態にあることは君もよくご存知でしょう。この音波が多孔質材料にあたると、いまいった孔の部分の空気も振動します。

ここで、おもに二つの機構による音波の減衰が考えられます。

第一は粘性によるものです。粘性という言葉は知っているでしょう。

A ええ、でも粘性というと頭に浮ぶのは、水あめや油のようなものなんですが、空気にも粘性があるのですか。

B もちろん、普通の状態では空気の粘性はほとんど考える必要がないでしょう。

それでは、多孔質材料のなかではどうして空気が粘性を示すことになるかということ、小さな孔や隙間の空気が運動しようとするとき、孔の壁あるいは繊維の表面にごく近い空気は、静止した壁の影響で動きにくくなる。これが粘性の原因というわけです。

この粘性は、直接に抵抗として音波のエネルギーを減衰させるとともに、とくに低周波数の音波に対しては、見掛け上空気の密度が増したような影響を示すことになります。

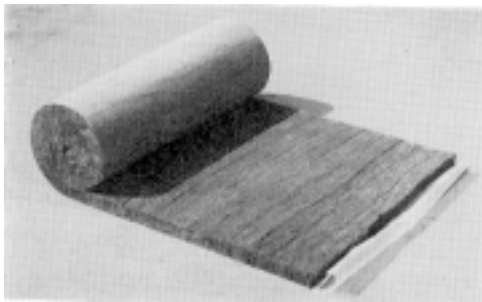
A 細い管のなかを水が流れるときの抵抗というのと同じに考えてよいわけですか。

B 簡単にはそう考えていいでしょう。実際に、低周波数域での抵抗係数は、毛細管中の定常流について流体力学で求められているポアズイユの値と同じように考えることができます。ただ、音波は定常流でなく振動している、とくに高周波数域になるとその影響も含めて考えなければなりません。

A それで、多孔質材料のもう一つの吸音機構というのは...

B 熱伝導による減衰とよばれるものです。これは少し基本的なところから説明しておいた方がいいでしょうね。

まず、一般的な話として、空気が圧縮あるいは膨張す



多孔質材料の一例

ると発熱あるいは吸熱現象をとまいません。ただ実際にその空気の温度が変化するかどうかは、圧縮膨張の速さと周囲との熱交換の状態によって異なります。音波によって空気が圧縮膨張をするときにも、その条件を考えなければならぬわけです。

A 自由な空気中で、可聴周波数の音波の場合には、圧縮膨張の繰り返し時間が十分に短いので断熱変化になっているという話ですね。

B その通りですよ。音波の基本式は普通この条件で導かれています。

ところが、多孔質材料の孔のなかの空気の場合には、孔の表面や繊維を通した熱伝導がおこり、音のエネルギーが減衰するわけです。

この熱伝導の影響は低周波数ほど大きく、ほとんど等音変化をするようになります。これはまた、一定の圧力変化に対して生ずる空気の体積変化にも影響を与えることとなります。

A なるほど。そうすると、粘性や熱伝導によっておこる音のエネルギーの減衰という場合には、なるべく小さい孔の集合の方が吸音効果が大きいわけですか。

B そう考えていいでしょうね。もう少しはっきりいえば、一定体積の多孔質材料について、運動する空気に接する孔の壁や繊維の表面の面積が大きいほど、吸音効果は大きいということですね。

これについては、以前に音響学会で興味ある発表がされているので、簡単に紹介しておきましょう。

これは多孔質材料の吸音に關係する要素を明確にするために行われた研究で、一定の直径をもった繊維がえやすい合成繊維を使い、何種類かの直径の繊維でいくつかのかさ比重をもった試料をつくり、その垂直入射吸音特性を測定しています。

発表された実験結果の一部が、この図2です。一定体積に含まれる繊維の本数あるいはかさ比重が同じでも、繊維径がちがっていると、吸音率はかなりちがっています。これに対して、一定体積内に含まれる繊維の総評面積を一定にすれば、とくに極端な場合をのぞいて繊維径

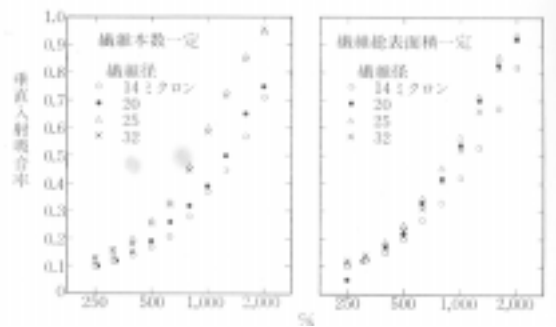


図2 多孔質材料の吸音機構を示す実験例
(浅生, 木下, 子安: 日本音響学会講演論文集 昭35.10)

には関係なく吸音率は一定になることを示しています。

A 繊維に接する空気の運動が吸音効果をきめていることがよくわかりますね。

ところで、一つおたずねしたいのですが、今までの説明では孔の壁や繊維は静止して、空気だけが運動しているということですが、実際の材料でもそう考えていいのですか。

B なかなかいいところに気がつきますね。実は話が複雑になるので、空気だけが動くものとして話を進めてきたのですが、現実の材料については繊維などもある程度動くものと考えた方がいいでしょう。

A というと、吸音の機構としても大分変わってくるのでしょうか。

B いや、それ程でもありませんよ。厳密には空気と繊維などとの間の相対運動のほかに、繊維や孔の壁の中を伝わる弾性波も考えなければならぬのですが、普通には、多孔質材料の吸音作用の主要部分としては、さっき話した粘性と熱伝導だけを考えておけばいいでしょうね。

A それで安心しました。これ以上複雑になったら逃げだして頭を冷やしたくなるどころでしたから。

ところで、文字通りの多孔質材料というのが現実にあるんですか。

B 最近の材料では、軟質ウレタンフォームなどがその一つでしょう。ただこの場合には、孔つまり気泡が連続して全体としてある程度以上の通気性をもっていることが条件ですね。

A そうすると、発泡スチロールのように独立気泡といわれるものは、多孔質材料には入らないのですね。

B そうです。よく間違っていて考えられているようですが、独立気泡の材料は音響的には多孔質材料とはいえないですね。はじめに話した“一見多孔質風”というわけです。

ただ、発泡スチロールなどは、使い方によっては板振動材料の範囲に入りますが、これについてはあとで

ふれることにしましょう。

A ほかにそんな注意をしなければならない材料がありますか。

B パーライトやひる石などがやはりそうですね。これらは、一つ一つの粒の中に空気をもっているのですが、普通には閉ざされた気泡であって、繊維の隙間や連続した孔のなかの空気のような働きはしないのです。

これらの材料は、吹付あるいは塗付材料としてよく使われるのですが、多孔質材料として有効なのは粒の中の空気ではなく、粒と粒との間の隙間ということです。

A すると、隙間ができるような施工が必要というわけですね。

B 多孔質材料として使いたいときにはそうですね。これなども、多孔質材料の吸音機構がしっかり頭に入っ

てさえいれば、絶対に間違えることのない問題ですよ。さて、大分長くなったので次に移りましょうか。

柔軟材料の吸音機構

A 図1で次の種類という、柔軟材料となっていますね。あまり聞きなれない言葉ですが、具体的にはどんな材料のことをさすのですか。

B 軟質ウレタンフォームなど、弾性の大きい発泡樹脂材料で、通気性が非常に小さい種類のものがその例ですね。それから、ある程度以上の弾性をもった多孔質材料の表面を膜でおおったり、塗装したりして通気性がほとんどなくなった材料などもここに入ります。

A 表面に通気性のない膜があつたりすれば、音波による空気の運動が直接内部の空気には伝わってゆかないので、さっきの多孔質材料のような吸音機構は考えられないのですね。

B 大分わかってきましたね。

A いや、まだまだです。発泡スチロールのような独立気泡材料とはとうちがうのですか。

B ここで、弾性の大きいという条件が関係してくるのです。

音波が空気の圧力変動だということは、はじめに話しましたね。これが弾性のある材料にあたると、圧力変動に応じて材料が振動を始めます。このとき、膜などの内部摩擦や繊維間の摩擦などに打ちかって振動を続けるためには、外からエネルギーを供給してやる必要があります。こうして音のエネルギーの減衰がおこるわけです。

A 第1図をみると、ずいぶん複雑な吸音特性になっていますね。どうして、こういうことになるのでしょうか。

B 図の特性は一つの例を示してあるだけで、必ずし



柔軟材料の一例

もこの種類の材料に共通したものはないのです。

さっき説明したように、この柔軟材料の場合の吸音は振動が原因になっているんですが、一般にこうした弾性をもった材料は、特定の周波数の音に対して共振し、そこでとくに大きな吸音を示します。

柔軟材料では、多くの場合この共振をきめる要素が複雑で、普通に吸音特性を問題にする周波数範囲のなかに二つ以上の共振があらわれたりして図のような特定になるのです。もちろん、ただ一つの共振だけで単純な吸音特性になることだってあるんですよ。

A そうすると、この種の材料の吸音特性を予想することは、なかなかむずかしいんですね。

B 一つだけ一般的な特長としていえることは、高音域で吸音率が低下することです。

周波数が高くなると、膜の質量が優勢になって振動しにくくなり、剛壁面に近くなるからだと考えておけばよいでしょう。ただし、これは膜などの質量が関係することで、非常に薄くて軽いときには、普通の周波数領域では吸音率の低下がおこらない場合もありますよ。

A よごれや繊維の飛散を防止するためということでロックウールやグラスウールの表面をポリエチレンなどのシートでおおったのを見たことがあるんですが、このときの吸音機構も今の話のように考えていいのでしょうか。

B その通りです。そういう使い方、高音域に対する吸音率が低下しないようにしたいときには、表面に使うフィルムの厚さに注意しなければならないのですが、その理由は今の吸音機構から考えれば、すぐわかるでしょう。

A 吸音機構をよく頭に入れておくことは、材料を使う上でも大切だということの意味が、だんだんわかってきました。

孔あき板構造体・レゾネーターの吸音機構

B では柔軟材料はこの位にして、つぎの孔あき板構造体に移りましょうか。

A 孔あき板構造体というのは、合板や石綿スレート、石膏ボードなどに裏まで通りぬけた孔をあけたものことです。

B そうです。これらの吸音機構については、君も本で読むか、話を聞いたことがあるでしょう。

A ええ、たしか孔あき板の背後に空気層をおいて使うと、孔の部分の空気と背後の空気層とでヘルムホルツのレゾネーターとよばれるものになるということでしたね。それで、特定の周波数の音があたると、孔の部分の空気の運動がはげしくなって摩擦損失が増大し、その周波数を中心にした山形の吸音特性になるということでしょう。

ただ同じ空気なのに、孔の部分の空気と背後の空気とは、どうして区別されるのかという点がよくわからないんですよ。

B そう、ちょっとわかりにくいところでしょうね。いまの君の話にあったように、孔あき板構造体は、この図3のような形でヘルムホルツレゾネーターと対応させて、その吸音機構を考えます。

まず、レゾネーターの名称でいって、くびの部分と胴



図3

の部分との空気を区別して考えることができるのは、その断面積がちがうためであって、その比が大きいほど明確に区別できることになります。

そして、くびの部分はその両端が自由なので一つの質量として取り扱います。これに対して、胴の部分の空気は、くびにつながるところをのぞけば、すべて動かない壁で囲まれており、ばねの働きをすることになります。そこで、レゾネーターの空気は質量とばねをもった一つの共振系と考えられ、その共鳴周波数の音があたると質量に相当するくびの部分の空気ははげしく振動し、さ



孔あき板材料の一例

き君がいったような吸音がおこるわけです。

ただここに一つの大切な条件があるんです。それは、くびと胴の空気をそれぞれ一つの質量とばねの働きをするものとみなすことができるのは、各部の寸法が音の波長にくらべてじゅうぶん小さい場合に限られるということです。

A その条件が成り立たないと、どんなことがおこるのですか。

B 孔あき板構造体でいうと、実際に上の条件が成り立たなくなるのは、背後空気層の厚さが非常に大きくなる場合でしょう。例えば、鉄筋のビルなどで梁をかくして天井をはると、空気層が1m程度になることがあるでしょう。

A 波長が1mというのは、大体300サイクルの音ということですね。

B そうです。だから、この場合には大部分の周波数領域で、さき程の条件が成り立たないんですよ。

ところで、君は孔あき板構造体の共鳴周波数を計算する式を知っていますか。

A ええ、おぼえているつもりですよ。ちょっと、ここに書いてみましょうか。たしか

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(l+0.8d)L}} \quad (c/s)$$

で、 c は音速、 P は開孔率、 l と d は板厚と孔径であり、 L は背後空気層の厚さということですね。

B その通りです。普通には、この式を使って計算していますが、実は、この式がやはりさっきの条件を考えて導かれた近似式なのです。

それで、背後空気層の厚さが大きくなってくると、実際の共鳴周波数は、この式で計算した値とはかなりちがってきます。

A この式で背後空気層の厚さ L が大きくなると、が小さくなり、吸音の山は低音域にできますね。このとき、中音域や高音域ではどうなるんでしょうか。

B いいところに気がつきましたね。孔あき板構造体

を質量とばねの系と考える条件が成り立たないとき、吸音特性の上で大切なのは、いま君が疑問に思った点なのです。

一般的にいえば、空気層の大小に関係なく共鳴周波数よりずっと高い周波数領域では、孔の部分と背後空気層とをそれぞれ一つの質量とばねと考えることはできなくなるのです。

このときにも、最終的には孔の部分での空気の振動によって、やはり吸音作用をもつことになるのですが、その振動をおこす機構は、いままでの説明とはちがったものなのです。

孔あき板構造体をこうした条件で使うことが多いので最近かなりまとまった研究が行われています。ただ、その内容をここでくわしく説明していると長くなりそうなので、必要なときには文献を読むことにして下さい。

A それでは、孔あき板構造体についてもう一つだけ確かめておきたいのですが。

よく孔あき板の背後に多孔質材料を入れて使いますが、これは孔の部分の空気の運動に対する抵抗を多くして、吸音効果を増すためなんですね。

B その通りです。ただ、ちょっとつけ加えておきたいのは、いままでの吸音機構の話がよく頭に入っていれば、多孔質材料を孔あき板にできるだけ接しておくのが有効だということの理由もすぐわかるでしょう。これはとくに薄い布などを裏打ちに使うときに大切なことですよ。

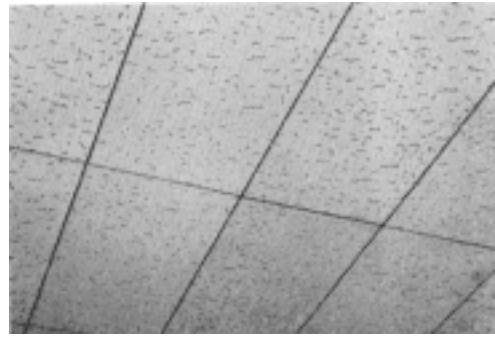
半貫通の穴あけ加工品では

A いままでの話にあった孔あき板とちがって、裏まで通りぬけない半貫通の穴あけ加工をしたものが、吸音板ということで製造されていますね。これの吸音機構はどう考えたらいいのでしょうか。

B 天井などに実際使われているときには、裏まで通りぬけているかどうか普通の人にはよくわからないので、間違っただけで考えられていることが多いのですが、少なくとも現在わが国で製造されているものの範囲では、これはちがった吸音機構によるものと考えてよいでしょう。

半貫通の穴あき板は、普通には今日始めにお話しした多孔質材料、といってもこの場合には板としてのある程度の強度をもったものですが、これを原板に使っているのです。

ただ、これらはそのまま仕上げ材料として使うために表面に塗装したり紙や合成樹脂フィルムなどを貼っているので、そのままでは多孔質材料としての吸音機構は期待できないのです。そのために、半貫通の穴をあけて内部の多孔質材料の性質をもった面に、直接に音があ



半貫通穴あけ加工品の一例

るようにしてあるのです。

A そうすると、この場合には原板の性質が非常に大切になるわけですね。

B 極端な場合ですけれども、多孔質材料の性質をほとんどもってない板に、何でも穴をあければ吸音板になるだろうということで、半貫通の穴をあけたものなどがありますが、これなど全くナンセンスということですね。

今でも、われわれのところなどに新製品を作ってみたからということで、こういう材料を持ってこられることがあるんですが、少しでも吸音機構のことがわかっていたら、こんな無駄な努力もはぶけるのにとおもいますね。

A 原板が多孔質材料としての吸音機構をもったものときには、穴のあけ方も関係するわけですね。

B そう。まえに話した孔あき板構造体のときと意味はちがいますが、やはり穴あけ加工の状態は大切です。この場合一般的には穴の部分が多いほど、吸音効果が大きくなると考えておいていいでしょう。

A 以前は穴あきの吸音板といえば、一定の穴径・ピッチのものがほとんどでしたが、最近では大小の穴を不規則にあけたものや、針でついたような穴のものの方がむしろ多いようですが。

B そうした穴あけの方法は、おもに意匠的名要求からきたものですね。そのほかにも、無機質の繊維を使ったもの場合には、フィシャーダスタイルとかトラバーチン模様などといって、ひびわれをつけたほうな加工品も多くなっていますよ。

これらは穴あけ加工の状態がちがうだけで、どれも同じ原理によるものですね。

それから、これらは板状に成形されているので、使い方によっては板状材料としての吸音機構を示すこともありますよ。

板状材料の吸音機構

A 板状材料というのは、図1の分類で最後のグループに入るものですね。



板状材料の一例

B 普通に板といわれているものは、一応すべてここに含まれるわけです。ただしこの場合にはいつも吸音材料ということではなく、使い方が非常に関係します。

A というと、具体的には。

B 普通の板ということになれば、今まで話してきた多孔質材料、孔あき板、柔軟材料などのどの吸音機構も考えられないことは、すぐわかるでしょう。

A 板振動による吸音ということを知ったことがあるのですが、これが板状材料の吸音機構ということになるのでしょうか。

B そうです。板の背後に空気層をおいて、板が振動しやすい状態になっていると、板振動による吸音がおこるわけです。ベニヤ板を貼った壁などをたたくと、ボンボンという音がすることがありますね。これは、その状態での系の共鳴周波数の音が聞こえるわけです。

こうした板振動をする面に音があたるとき、その音の周波数が共鳴周波数に一致していると、板ははげしく振動し、板の内部損失によって音のエネルギーが減衰することになります。またそのほかに、板の振動が下地などを通して他の部分へ伝わってゆく部分もあるんですが、これもはじめの音からいえば、やはり吸音されたことになるのですね。

A いま共鳴という言葉がありました、さっきの孔あき板構造体のときとどうちがうんでしょうか。

B もっとも簡単な共鳴系ということで、質量とばねの系という点では共通しています。ただ、さっきの孔あき板では、孔の部分と背後の空気層との空気が、それぞれ質量とばねを構成していたわけですね。

これに対して、板振動の場合には質量を構成するのが板自身であることはもちろんですが、ばねを構成するのは背後の空気層だけでなく、板自身の剛性も関係しています。

A 孔あき板構造体の場合には、いろいろ条件はあるにしても共鳴周波数を計算する式がありました、板振動の場合にも、同じような式はあるのですか。

B 一応は計算式があります。しかし、板振動に対して有効な板の質量や板自身のもっているばねの働きは、板の取り付け方法などに関係するので、現実の材料について計算することはそれ程簡単ではありませんね。

A 多孔質材料のときにちょっと話に出ました発泡スチロール板なども、この板状材料の範囲に入るわけですね。

B 吸音機構としては、ここに入るものです。ただ一般の板状材料にくらべて非常に軽いので、同じような使い方しても共鳴周波数がかかなりちがったところになり、吸音領域としては一見ちがったことになるのです。

この辺で、普通に使われている吸音材料の吸音の機構については、一わたりお話ししたことになるのですが、ただ今日は具体的なデータの話にふれないで、少し概念的な話になってしまったので、かえってわかりにくかったかもしれませんね。ハンドブックなどに出ているデータを見てもっとはっきりするでしょうから、機会があったら読んでおくといいと思いますよ。

A どうも長時間ありがとうございました。何だか吸音材料のことがすっかりわかってきたような気がしてきました。

B あるいは、まだわかったような気がただけかも知れませんね。生兵法は何とやらという言葉もあるようですから、あまり簡単にわかってしまわない方がいいのではないですか。

君が2,3年みっちり仕事をした後で今日の話思い出したら、なるほどとうなずくところがいくつかあると思いますよ。

A 相変わらずしんらつですね。わからないことがでてきた時には、またここにあらわれますから、その時はよろしくお願いします。