

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20760577

研究課題名 (和文) 非線形超音波CTによる粒子充填層の内部構造診断及びその熱流動特性の大規模数値実験

研究課題名 (英文) Measurement of Internal Configuration of Pebble Bed by Using Nonlinear Ultrasound CT and Large-Scale Numerical Simulations for its Thermofluid Dynamics

研究代表者

江原 真司 (EBARA SHINJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30325485

研究成果の概要 (和文)：

本研究では粒子充填層内の詳細な熱流動現象の解明を目的とし、内部構造の詳細を取得可能な非線形超音波CTシステムの構築および、粒子充填層内を微視的に取り扱う、モデルを可能な限り排除した数値計算を行った。非線形超音波CTの評価試験から固体と周囲流体の音波の屈折率の違いに起因しCT像が劣化することが分かり、その他にもいくつかの問題点を抽出した。数値解析はLarge-eddy simulationを採用、計算コードの作成および並列化を行い、充填層中の流れ場を詳細に解析した。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, for the purpose of elucidating detailed thermofluid phenomena in pebble bed, a nonlinear ultrasound CT system, which could obtain the internal configuration of pebble bed in detail, was tried to construct and numerical simulation which would excluded possible numerical models was performed. From evaluation experiment of the nonlinear ultrasound CT, it was found that CT images were deteriorated by a difference of acoustic refraction between solid and fluid phases. In addition, several problems to resolve for the realization of the CT system were extracted. On the other hand, in the numerical simulation, large-eddy simulation was adopted as a turbulent model, a parallel numerical code was created and detailed simulation for fluid flow in the pebble bed was done.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：超音波、CT、非線形性、粒子充填層、LES

1. 研究開始当初の背景

革新的原子力システムとして種々のヘリウムガス冷却高速炉、高温ガス炉の概念が、固有の安全性を持ち水素製造等の多目的利用の魅力を有するシステムとして提案されている。これらガス冷却炉の炉心は被覆粒子燃料を充填したペブルベッド型などあるが、実現のための課題は多い。また現在建設が進められている ITER を筆頭に精力的に行われている核融合炉研究でも、粒子充填層をブランケットに用い熱変換、トリチウム生成に使用するテストブランケットモジュールが提案されている。これら粒子充填層型炉心の成立のための課題の中でも特に重要なものの一つとして、粒子充填層の熱流動及び熱機械特性の解明が挙げられる。炉心である燃料または熱変換・トリチウム生成粒子充填層の特性はプラントの性能や安全性を決定付けるものであり、その意味でプラントの成立性を左右する最重要課題であると言える。

炉心設計に際して必要な粒子層の特性には、層内の有効熱伝導率や圧力損失、機械的強さなどマクロな平均量による因子と、粒子間冷却流路の狭隘などによるヒートスポットの発生、粒子内マイクロクラックによる熱伝導率変化の影響や熱クリープによる流路閉塞、層内や構造壁上での応力集中などの局所的な現象に支配される因子が反映される。後者の局所的因子は粒子の配置に依存するため、粒子充填層毎にその特性は異なり、しかもこれらの局所的な現象が炉心の安全性に決定的に影響を与えると考えられる。そもそも充填量や充填密度、気孔率などの平均量が同じでも、充填層毎に粒子の配置が異なるため、厳密には同一の粒子充填層は存在しないといっても差し支えない。従って、粒子充填型ガス炉やテストモジュールの運転には、まず実際の充填層炉心に対してその内部構造を診断する必要がある。そして得られた粒子充填構造が実際の運転状況下でヒートスポットなどを発生し得るかどうかを事前に判断することが求められる。粒子充填層の特性解析には数値解析が有効であるが、従来の粒子充填層や多孔質体内の熱流動解析は、その内部の幾何形状が未知であることが殆どであるため、時間的空間的に平均作用を施し充填層を均質な媒体とみなしたモデル式を用いてきた。そのため局所的な流路閉塞、応力集中などの情報を得ることができない。

2. 研究の目的

本研究では音波の非線形相互作用を利用した超音波 CT 法を粒子充填層の内部構造診

断に適用する事を提案する。超音波 CT 法は医療用画像診断装置やコンクリート構造物の診断、地盤探査などで使用されており、X線 CT や MRI と違ってリアルタイムで画像を取得できるという特徴を持つ。超音波診断ではビーム径を細くできないことに起因する分解能の低さ、音波の多重反射による虚像やノイズの多さが問題となるが、本研究では音波の非線形パラメトリック作用の指向性の鋭さを応用し、高分解能の超音波 CT システムの構築を目指す。これまでに超音波 CT 法が粒子充填層の内部構造解析へ適用されたことはないが、本手法により充填層の内部構造が可視化されれば、空隙の空間分布等から上記の局所的な現象が発生する箇所を推測することが可能となる。

加えて本研究では、超音波 CT 法でその内部構造が得られた粒子充填層を計算空間内に再構築し、数値解析を行うことで流れの閉塞箇所などの予測を行う。充填層の数値計算には平均量を扱うモデル的手法などあるが、本研究では粒子の配置に依存する局所的な現象に着目するため、モデルの使用を極力排除した直接計算的手法を採用し、粒子充填層の熱流動および熱機械特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 粒子充填層の内部構造可視化を実現する非線形超音波 CT システムの開発

透過波を利用した超音波 CT 法は、画像を減衰係数分布、音速分布で定量化する目的で研究されてきた。超音波 CT において透過波の指向性を上げるには周波数を高くするかビーム径を大きくすればいいのだが、高周波数の超音波は減衰が大きくまたビーム径を大きくすると分解能が低くなるというパラドックスに陥る。従って、超音波 CT で分解能を向上させるためには小さな振動子で指向性の鋭い超音波を、周波数をあまり上げずに実現する必要がある。ある媒質中に、周波数の異なる2つの超音波(1次波)を照射したとき、媒質の非線形作用によりそれぞれの高調波のほかに和音、差音などの結合音が発生する。これらの中でも特に、差音はパラメトリックアレイと呼ばれ、指向性が鋭いという特徴を持つ。このパラメトリックアレイを超音波 CT の透過波として利用することで、指向性が高く分解能の高い超音波ビームを使うことが可能であると考えられる。パラメトリックアレイ(2次波)の欠点として1次波からの変換効率の低さがある。したがって本システムの実現にはいかに効率よ

く2次波を発生させるかが重要となるため、実験を行うにあたり適切な振動子を選定するために、振動子から2つ超音波を放射する時に2次波であるパラメトリックアレイへの変換効率の高い振動数の組み合わせを知る必要がある。そこでパラメトリックアレイの減衰の影響が小さく指向性の強い周波数の組み合わせを数値解析により検討した。入手可能な振動子の仕様および計算結果を考慮し、実験には1次波を10、15MHz、開口半径6mmの振動子を採用した。

実験装置の概略図を図1に示す。ファンクションジェネレータより2つの異なる周波数の信号を生成し、T字コネクタで結合、その信号をアンプによって増幅させ振動子から水槽内に超音波を発生させる。被検体に超音波を透過させ、被検体の反対側の受波器により透過波を観測する。音圧測定の際、発生した超音波の音圧はマイクロフォンを用いて検出し、デジタルオシロスコープによって測定を行なった。振動子とマイクロフォンの位置は一次元の自動ステージに固定されており、パソコンによる制御で2μm間隔で一次元方向に自由に操作できるようになっている。また、円柱形的水槽は回転ステージ上に固定されており、水槽内の被検体とともに1/400°間隔で回転させることができる。本実験では、被検体である直径15mmの亚克力円柱に超音波を透過させ、その投影データから鮮明な画像が得られるかどうかを確認した。具体的には、2つの1次波およびパラメトリックアレイの透過波を測定し、1次波に対する減衰係数分布を、通常のCTアルゴリズムである投影切断定理に基づくフィルタ補正逆投影法により求め、次いで非線形パラメータ分布を計算した。

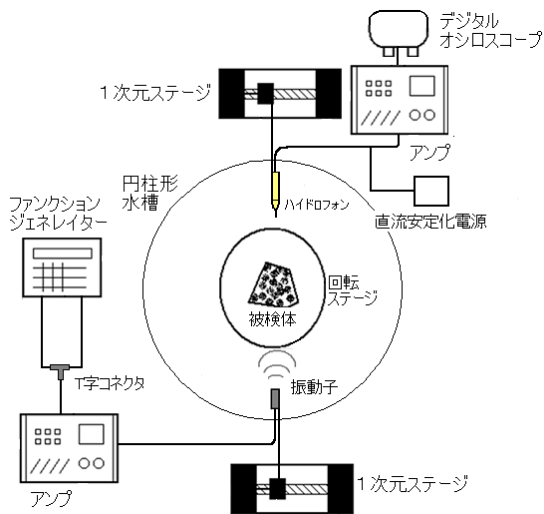


図1 実験装置概略

(2) 粒子充填層内流動の数値解析

本研究では乱流も考慮に入れた粒子充填層内流動の数値解析を考えており、乱流の直接計算(DNS)などの手法もあるが実用上の観点から乱流モデルの一つである Large-eddy simulation (LES) を採用した。これまでのLES計算では、計算コストやスキームの完成度などの観点から多くは差分法が用いられてきた。有限要素法は複雑な境界を容易に扱うことができるが、解析例は差分法ほどない。本計算では任意形状への適合性に優れた有限要素法を用い、粒子充填層における平均圧力勾配に駆動される非圧縮性流体の流れ場を計算した。粒子充填層は体心立方充填とし、計算体系としてその一部を抜き出し、全方向に周期界条件を課した。図2に計算体系を示す。

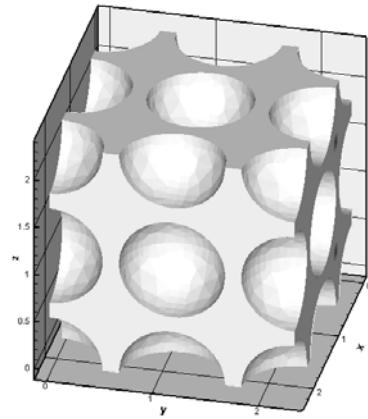


図2 粒子充填層の計算体系

支配方程式は以下の連続の式、N-S式、緩和輸送方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{2}{Re} \bar{S}_{ij} - \tau_{ij} \right) + f' \quad (2)$$

LESのモデルは種々提案されているが、今回は速度場でのサブグリッドスケール応力 τ_{ij} にはDynamic Mixedモデル(1)を採用し、Lagrangian平均(2)による安定化を施している。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} + L_{ij}^m - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk}^m \quad (3)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| = -\frac{1}{2} \frac{\langle (L_{ij}^d - K_{ij}^d) M_{ij} \rangle_s}{\langle M_{mn} M_{mn} \rangle_s} |\bar{S}| \quad (4)$$

ここで、 $L_{ij} = \overline{\overline{u_i u_j}} - \widehat{u_i} \widehat{u_j}$ 、

$M_{ij} = \alpha^2 \frac{|\bar{S}_{ij}|}{|\bar{S}|} - \frac{|\bar{S}_{ij}|}{|\bar{S}|} \bar{S}_{ij}$ 、 $K_{ij} = \frac{\bar{u}_i \bar{u}_j}{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \frac{\bar{u}_i \bar{u}_j}{\bar{u}_i \bar{u}_j}$ 、 $|\bar{S}| = \sqrt{2S_{ij}^2}$ で、 $\langle f \rangle_s = I_f$ は次の緩和輸送方程式から得る。

$$\frac{DI_f}{Dt} = \frac{\partial I_f}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial I_f}{\partial x_j} = \frac{1}{T_L} (f - I_f) \quad (5)$$

有限要素法による空間方向離散化には四面体一次要素を用い、流れ場に対しては SUPG/PSPG 法に基づく安定化手法を適用し、その数値解法には T1 formulation(3)を用いた。また本計算では、大規模計算に対して有効な領域分割法に基づく並列計算を採用した。METIS ライブラリを用いて計算体系を分割し、計算機の通信ライブラリには MPI を使用した。流れ方向への平均圧力勾配は、粒子充填層内の流動抵抗をよく表す Ergun の式(4)により与えた。

$$f' = \frac{150}{Re} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad (6)$$

ここで ε は多孔質の気孔率、 Re は速度および長さスケールをそれぞれ巨視的平均流速、粒子直径としたときのレイノルズ数である。

4. 研究成果

(1) 粒子充填層の内部構造可視化を実現する非線形超音波 CT システムの開発

図3、4に、アクリル円柱一本のみを被検体としたときの2つの1次波、10および15MHzにおける減衰係数の CT 像を示す。図中の点線が、予想されるアクリル円柱の位置である。図より、アクリル円柱の位置付近に減衰係数の高い領域が確認できるが、正確な形状の再現にまでは至っていないことが分かる。位置のずれは、実験で振動子-ハイドロフォンとアクリル円柱の相対位置がずれていたからと考えられる。内部構造が一様であるはずの円柱の減衰分布が、内側と外側で異なっているのは、アクリルと周囲の水で音波の屈折率が異なるために音波が界面で直進せず曲がってしまうからと考えられる。

図5は非線形パラメータ分布であるが、円柱の形状が全く再現できていない。図6に1次波(10、15MHz)とパラメトリックアレイ(5MHz)の透過波強度の測定例を示すが、パラメトリックアレイの強度が小さくかつその分布が水中でも一定となっていないことが分かる。強度が小さいためにノイズの影響を大きく受けたことが考えられる。

以上のように、非線形超音波 CT システムの構築に関しては当初見込んでいたような結果を得ることができず、問題点の抽出にとどまってしまった。問題になるのは屈折率の違いだけではなく、パラメトリックアレイ強

度の低さ、固体内での減衰の大きさに大きく影響し、加えて振動子径の大きさによる空間分解能の限界も関係していると考えられる。パラメトリックアレイの強度は今回用いたものよりも良好な周波数特性を持つ振動子の使用により改善されると考えられるが、その他の問題に対しては即答できる解決策はなく、依然として課題が多いと言える。

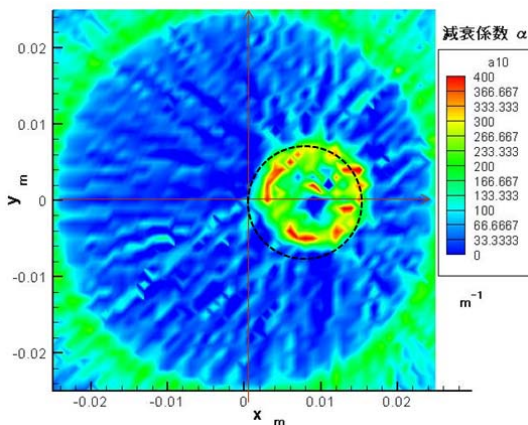


図3 10MHzの減衰係数分布

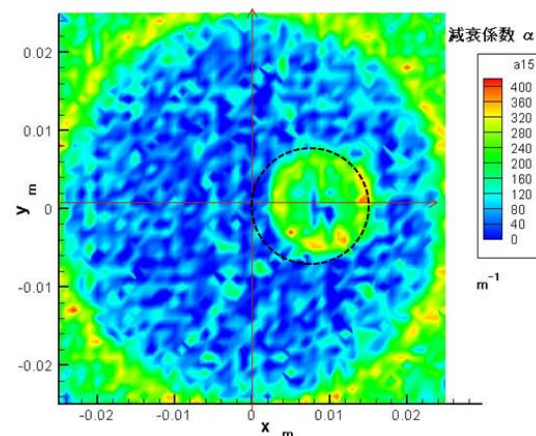


図4 15MHzの減衰係数分布

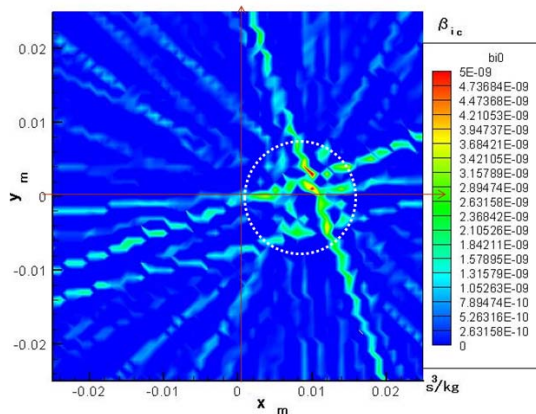


図5 非線形パラメータ分布

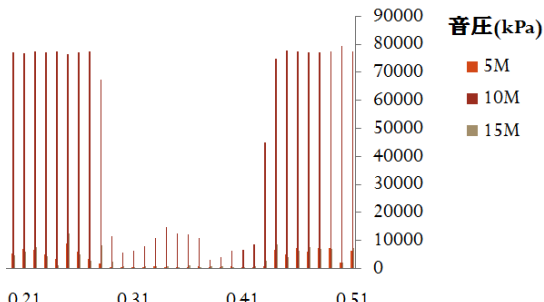


図6 各周波数の透過波強度

(2) 粒子充填層内流動の数値解析

まず始めに本研究で作成した計算コードのベンチマーク試験として、平行平板間発達乱流の計算を行った。図7、8に本計算コードの結果をDNSと比較して示す。図7中DMMは単純に空間平均を取ったものでLDMがLagrange平均モデルである。平均流速分布は全領域でDNSとよく一致していることが分かる。図8の乱流強度およびレイノルズ応力もDNSの結果とよい一致が見られるが、主流方向の乱流強度が壁近傍で大きくなっている。これはLESの結果に見られる典型的な分布であり、本計算コードにも見られた。これらの結果より、本計算コードの妥当性を確認した。

図9、10に、粒子充填層内流れの、主流方向に平行な断面での速度ベクトルおよび主流方向速度のコンターを示す。粒子充填層内の流体は、障害物である粒子を迂回しながら流れ、流路はいたるところで分岐、合流する。今回用いた計算体系、体心立方充填では、流体が入口から出口まで直線的に進める通路が基本セルの中に4つ存在する。図9は、この入り口から出口が直線的に“見える”断面になっており、流路は拡大、縮小を繰り返すが比較的抵抗は少なく、流体の抜け道となっていることが分かる。図10はこのような抜け道がない断面で、流速は部分的にしか早くなることを許されない。多孔質内では広い空隙であっても出口が“見えていない”場所では流体は速い速度で流れることはできず、流体で占められているが流れに寄与しない淀んだ領域が層内には多数存在することが分かる。

本数値計算では当初予定していた粒子充填層の大規模計算までは至らなかったが、計算コードの並列化により高速処理が可能となったため、大規模な計算機クラスターを用いることで計算体系の大規模化には目処が立ったと言える。しかし温度場の導入までには至らず、こちらも課題を残す結果となった。

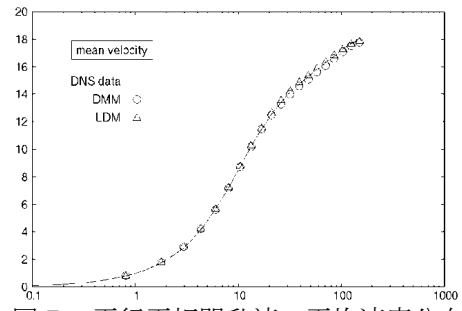


図7 平行平板間乱流の平均速度分布

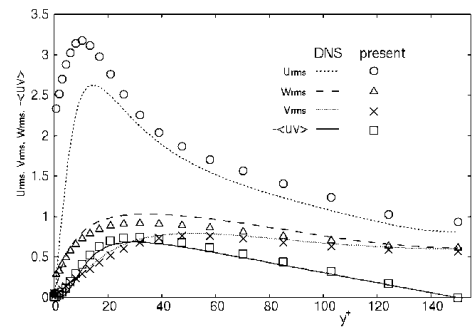


図8 平行平板間乱流の乱流強度分布

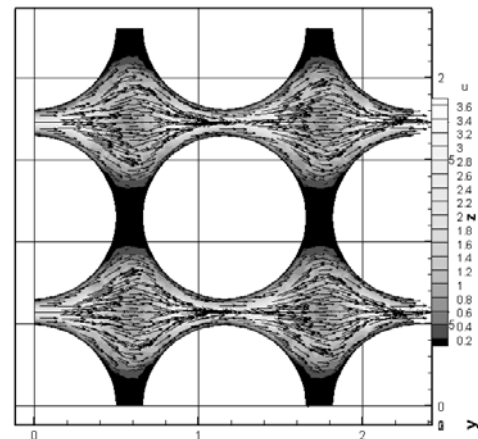


図9 粒子充填層内の抵抗の少ない流路を流れる流体

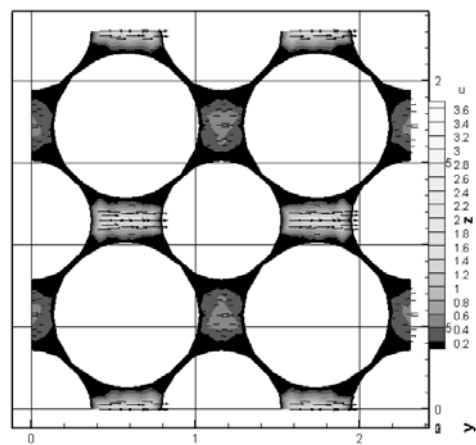


図10 粒子充填層内の分断された流路での流体速度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. S. Ebara, T. Yokomine, A. Shimizu and H. Hashizume, Numerical Simulation of Turbulent Flow in Microscopic Pore Scale of Pebble Bed by Large-eddy Simulation, Fusion Engineering and Design (2010), doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.04.065 (in press) 《査読あり》

[学会発表] (計2件)

1. S. Ebara, T. Yokomine, A. Shimizu and H. Hashizume, Numerical Simulation of Turbulent Flow in Microscopic Pore Scale of Pebble Bed by Large-eddy Simulation, The 9th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-9), 2009年10月11-16日, Dalian, China.

2. 江原 真司, 横峯 健彦, 清水 昭比古, LESによる多孔質内乱流の数値解析, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009年6月2-4日 京都

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江原 真司 (EBARA SHINJI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30325485

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: