

最近の当社のCAE技術について

Recent CAE Technology in Nissin Electric

藤 田 秀 樹*
H. Fujita
清 滝 和 雄*
K. Kiyotaki

近 藤 俊 成*
T. Kondo
松 原 克 夫**
Y. Matsubara

Synopsis

In recent years, because of the progress of computer technology, the analysis on the more difficult engineering subjects became possible sufficiently even by the ordinary personal computer. Also, the complicated problems becomes solved by the progress of the software. The recent analysis examples are introduced.

1. ま え が き

近年のコンピュータの飛躍的な発達に伴いCAE (Computer-Aided Engineering) 技術も急速に発展し、以前は大型コンピュータやエンジニアリングワークステーション(EWS)でも困難だった工学上の各種シミュレーションが通常のパソコンレベルでも十分行えるようになり、従来から活用されてきた構造解析や電磁界解析は無論のこと、より複雑な熱流体解析も実用的な設計技術として利用できるレベルに達して来た。また、以前ではとても扱えなかった複雑なプラズマ化学反応を考慮したプラズマCVD解析など、より高度な連成問題が手軽にシミュレーションできるようになってきており、従来試行錯誤の繰り返しが必要であったものや、測定が困難な現象の解明にCAE技術を適用するニーズが急速に高まっている。

当社では、このようなCAE技術の導入を積極的に進めており、製品設計の最適化、試作検証回数の削減、また、測定困難な現象の解明などにシミュレーションを活用し、製品開発の短期化、製品の品質、信頼性の向上を図っている。

本稿では、当社の最近のCAE技術として、従来から各種製品設計に活用している構造解析(静応力、振動、熱

応力)や電磁界解析(電場、静磁場、渦電流、静電容量)の事例を除いて、近年、実用的な設計ツールのレベルに達している熱流体解析技術、及び、電気系と機械系を連成した圧電解析やプラズマ解析などの高度な連成解析の事例について紹介する。

2. 熱流体解析

電力機器の冷却設計では、冷却特性に直接関連する冷媒の流れを把握することが機器設計上極めて重要である。特にSF₆や空気などの気体を冷媒とするものでは気流の淀みによって局部過熱などを生じる恐れがあるので十分な注意を必要とする。近年の解析技術の発展は計算機能力向上とあいまって著しく、かなり実用的な熱流体解析が可能となっている。しかしながら、実際の機器をそのまま厳密な3次元モデルで解析することは時間的な制約から実用的でない。そこで、3次元構造の複雑な放熱器を実験データから2次元化した簡易モデル化技術の確立や、粗分割で全体の流れを解析した後に必要に応じ局部モデルを解析するなど、熱流体解析を実際の機器設計に適用するためのモデル化技術の開発を行っている⁽¹⁾、⁽²⁾。以下では、送ガス式ガス絶縁変圧器のコイル内流速分布およびコイル温度上昇の2次元解析例とキュービクル内の簡易3次元気流解析例について紹介する。

* 技術開発研究所 解析技術センターCAEグループ

** 技術開発研究所 解析技術センター

図1に送ガス風冷式ガス絶縁変圧器の冷却構造を示す。これは大容量器でよく採用される冷却方式で、ガスフロアにより強制的に主要発熱部であるコイルや鉄心にガスを送り、これらから熱を受けて高温となったガスを冷却器で冷却する構造となっている。

図2にガス絶縁変圧器でよく採用されているディスク巻コイルの冷却構造を示す。図に示すようにコイル内には、適当な間隔でガスバリアが挿入され、放熱面積の大きい水平ダクトにガスを流しコイルを冷却する構造となっている。このような構造では、ガスバリアの挿入位置

が重要であり、ガスバリアで囲まれた一つのブロック内のコイルセクション数が多くなると、各水平ダクトの流速に不均一を生じコイルセクション間の温度ばらつきが大きくなる。逆にブロック内のコイルセクション数を減らしガスバリア数を多くするとコイルの圧力損失が大きく不経済な設計となる。そこで、当社では、熱流体解析を適用してコイル内のガス流分布を考慮した温度分布計算を行い、ガスバリア数やダクト寸法の最適化を図っている。

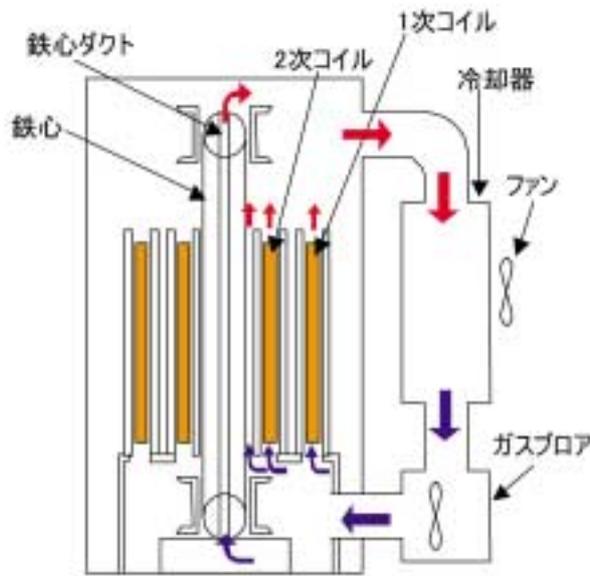


図1 送ガス風冷式ガス絶縁変圧器の冷却構造

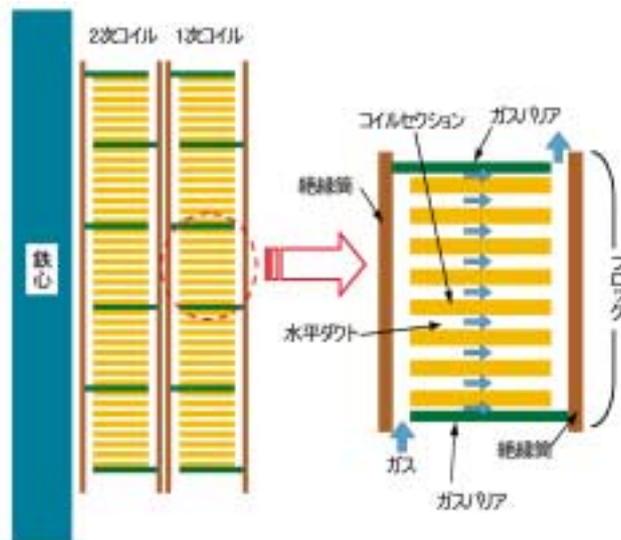


図2 ディスク巻コイル冷却構造

以下に、モデル器による解析例を示す。送ガス式の場合、コイルに流入するガス流量はプロアの定格からほぼ一義的に決まるので、コイルを部分的に取り出して解析することが可能である。図3、4は、1ブロックあたりのセクション数およびダクト寸法を温度ばらつきが小さくなるように適当に調整し、水平ダクトガス流速の均一化を図った場合の解析例である。図5に、コイルセクション温度の解析結果と実測結果の比較を示す。縦軸はコイルセクション温度の最大値を1に規格化して示しているが、解析結果と実測値は良く一致していることが判る。

次に複雑な3次元形状を簡素化してモデル化した事例として、キュービクル内の気流解析例を図6に示す。キュービクル内には熱源と成る変圧器、リアクトルや制御基板など複数の機器が収納され、複雑な構造となってお

り、厳密に3次元モデルで解析すると膨大な計算時間を要し実用的でない。そこで、先に冷却設計で最も重要なキュービクル内部の気流を解析し、求めた周囲温度を境界条件として機器内部温度を解析するようにしている。図6の例は、各機器の周囲温度が仕様温度以下となるように熱源や吸・排気口の位置をシミュレーションから決定したものである。図に示すようにキュービクル内の気流解析を行う場合は、変圧器やリアクトルなどの熱源を簡単な形状でモデル化することにより、大幅な計算時間の短縮を図っている。

以上のように、熱流体解析は実用的な設計技術として定着しつつあり、これらの技術を駆使して冷却構造の最適化を図り、機器の一層の小型化に取り組んでいる。

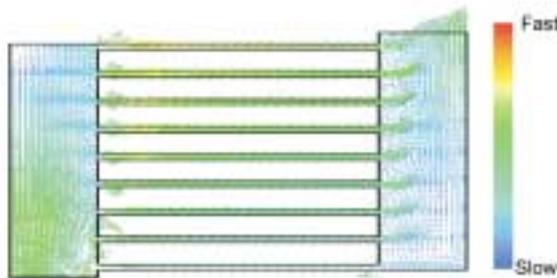


図3 コイル内流速分布

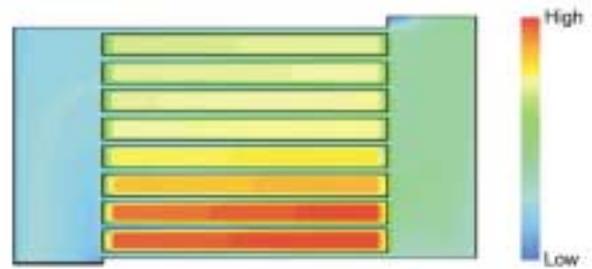


図4 コイル内温度分布

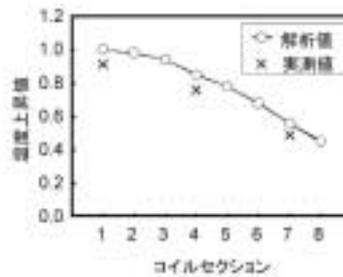


図5 各セクションの温度上昇の解析結果と実測結果の比較

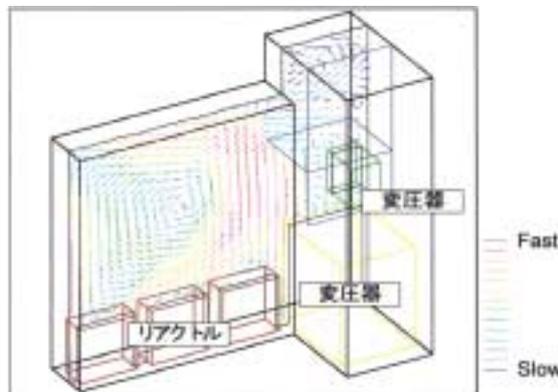


図6 キュービクル内気流解析例

3. 圧電解析

圧電素子の一例として圧電トランスを紹介する。圧電トランスは、圧電セラミックスに入力電極と出力電極を設け、機械的振動を介して変圧を行うもので、巻線型トランスに比べ外形寸法を小さくでき、特に薄形化が可能であることから、液晶用バックライトのインバータ電源用昇圧トランスとして使用されている。

圧電トランスは等価回路でシミュレーションされることが多いが⁽³⁾、電気 機械 電気のエネルギー交換作用を厳密に解析するのは難しい。そこで、当社では、電気系と機械系を連成させた圧電方程式を直接計算する解析ソフトを導入し解析を行っている。以下に解析例を示す。

図7に良く用いられるローゼン型の圧電トランスを示す。入力電極に交流電圧を印荷して長さ方向の機械的な縦振動を発生させ、出力電極に電圧を誘起する構造となっている。図8に / 2モード、2次側無負荷時の解析結果を示す。図8(a)に長さ方向の変位分布を示すが、素子中央が変位最小(振動の節)、素子両端部が変位最大

(振動の腹)となる長さ方向縦振動をしている様子が良く示されている。図8(b)にそのときの電位分布を示す。振動エネルギーが再び電気エネルギーとなり、出力電極に高電圧が発生している。図9に2次側に負荷を接続した場合の昇圧比(2次誘起電圧/1次入力電圧)の解析結果と実測結果の比較を示す。図では、同一外形寸法の圧電トランスで、入力電極の長さのみを変化させ、電極面積比を通常のローゼン型(50%)から60%、70%とした場合の昇圧比を比較しており、縦軸は50%時の実測値を1に規格化して示している。図に示すように解析結果と実測結果は良く一致しており、シミュレーションによって圧電トランスの最適寸法の設計が可能なが判る。また、図9の入力電極寸法と昇圧比の関係は2次負荷によっても変化するなど、圧電トランスの特性は各種のパラメータの影響を受け、最適形状を実験的に決定することはかなり煩雑である。そこで、当社では、シミュレーションから圧電トランス駆動時の電氣的及び機械的特性の評価を行い、要求仕様に適した素子形状及び電極配置等を決定している。

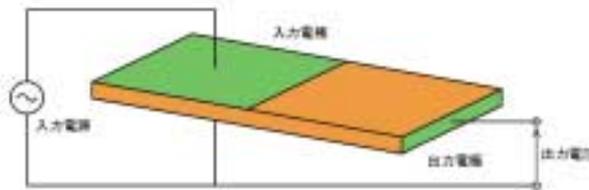


図7 圧電トランス解析モデル

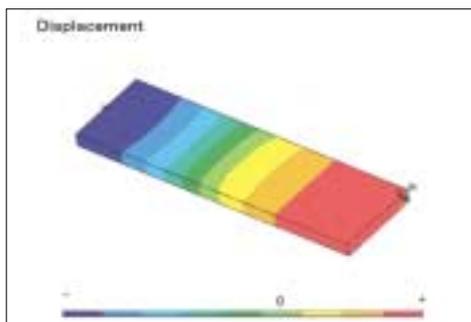


図8(a) 変位分布

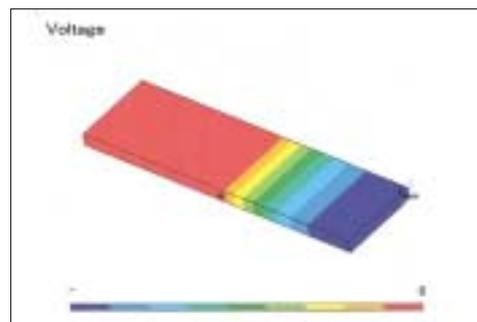


図8(b) 電位分布

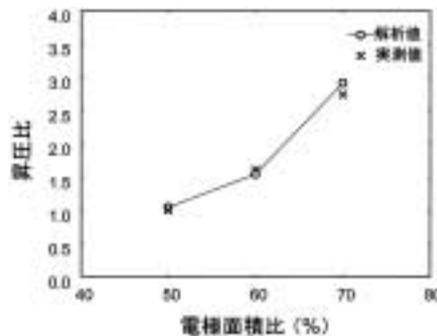


図9 昇圧比の解析結果と実測結果の比較

4. 電子 - イオン軌道解析

イオンビーム応用装置における解析事例として、イオンビーム引出し解析と、空間電荷効果を考慮した電子軌道解析について以下に紹介する。

4.1 イオンビーム引出し解析

イオンビーム応用装置においては、要求されるイオン種やビーム電流、イオンエネルギーなどの特性が用途に応じてかなり異なり、これらの条件に適したイオンビームを得るため、イオンビーム引出し解析が重要である。図10に解析の一例を示す。プラズマ(図の左側部分)より第1電極(電位 V_{ac})に設けられた電極孔を通して出てきたイオンが第1電極と第2電極(電位 V_d)との間の電位差により加速されて引出される。イオンビーム軌道はプラズマ条件やイオンの空間電荷に大きく左右されるため、これらを同時に考慮した解析が必要になる。図10の例はプラズマ密度と各電極電圧や電極間隔を調整してイオンの発散角を最小とした最適条件での計算例である。

このようにイオンビーム応用装置では、種々の仕様に対しシミュレーションを駆使してイオンビーム引出し系の最適化を図っている。

4.2 帯電防止用電子シャワー装置の電子軌道解析

イオン注入装置では、ウェーハが帯電すると素子が絶縁破壊してしまうため、イオン注入時のウェーハの帯電防止が極めて重要である。そのひとつの方法として、電子シャワーをウェーハに当ててイオンの正電荷を中和する方法がある。しかしながら、電子シャワーのエネルギーが大き過ぎるとこれによっても負の帯電が生じ素子が絶縁破壊してしまうため、電子エネルギーを数電子ボルト程度に押さえることが必要となる。このような極低エネルギーの電子シャワー装置では、空間電荷効果が非常に大きく、電子とイオンの空間電荷を同時に考慮する必要がある。これに対し通常の解析ソフトでは空間電荷を含まない1粒子軌道しか計算できないことから、当社では、新たに電子とイオンの2粒子について空間電荷効果を考慮した軌道計算ソフトを開発している。

開発した解析ソフトは、最初に電子とイオンの軌道から空間電荷分布を求め、それを用いて有限要素法により、空間電荷を考慮して新しい電位を求め、再度の軌道を計算するといったと の繰返し計算を各ビーム軌道が安定するまで行うものである。図11に開発したソフトによる電子軌道の解析事例を示す。図11(a)は条件設定が悪く電子軌道が発散した場合の計算例である。電子は V_1 の電位からメッシュ電極 V_2 を通して引出されるが、 V_2 が小さいと空間電荷効果によ

って急激に発散する様子が良く表れている。図11(b)は、 V_2 を変えて最適な電子引出し条件に設定した場合の計算例であるが、この場合は上方に電子が巧く引出されている。

このような極低エネルギー装置の開発においては、電子やイオンの軌道が予測し難く、実験的な検討も困難である。このような場合、シミュレーションによる軌道解析を行うことで、精密な軌道を推定することが可能となり、装置の設計・開発に大きく貢献している。

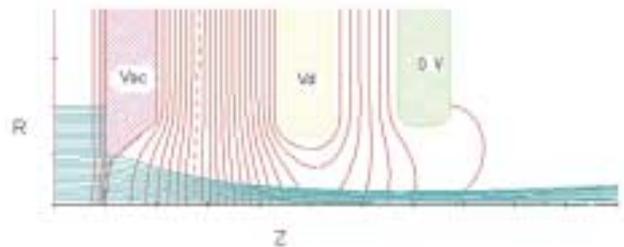


図10 イオンビーム引出系の軌道解析

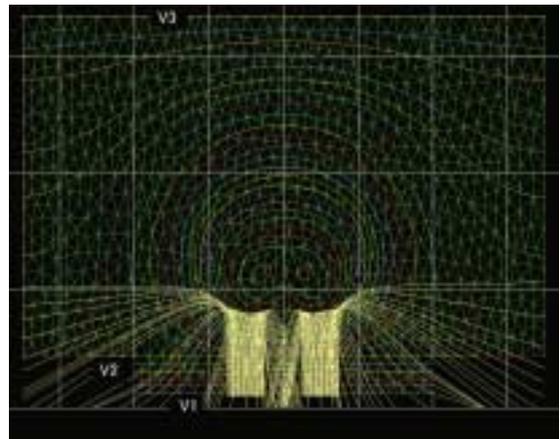


図11(a) 帯電防止用電子シャワー装置の電子軌道解析例(発散条件の場合)

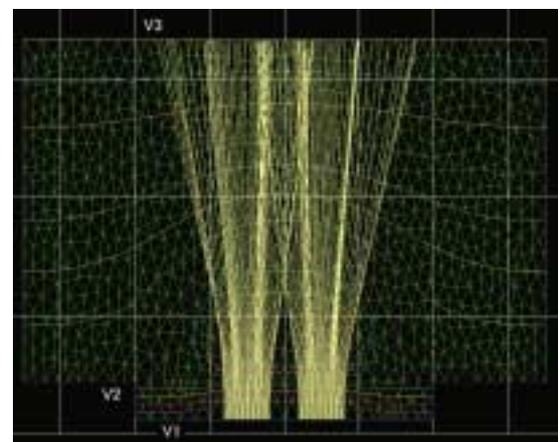


図11(b) 帯電防止用電子シャワー装置の電子軌道解析例(最適条件の場合)

4・3 プラズマCVD解析

プラズマCVDは、プラズマの活性反応を用いることで、化学反応を促進し通常の熱CVDに比べて低温で良質の膜を作ることができ、種々の薄膜形成に適用されている。しかしながら、プラズマ現象は複雑で、装置内の成膜現象を実験から把握することは極めて困難である。そこで、シミュレーションによって現象を把握することが重要である。

解析に使用したソフトでは、電極に高周波電圧を印荷した場合のプラズマ解析だけではなく、プラズマ化学反応や表面反応を連成させて解くことができ、プラズマ密度、ラジカル(活性種)分布等が得られる。3次元モデルで解析するのが望ましいが計算時間が非常にかかるため、実用的解析として2次元軸対称で行っている。図12、13に平行平板軸対称2次元モデルの解析事例を示す。図12はメッシュ分割を示し、中心軸から片側だけを解析領域としており、上部位置に高周

波電極、対向面に基板を設置している。解析メッシュ数は通常1000から1500程度を用いている。図13に計算結果を示す。図13(a)はプラズマ密度の計算結果であり、電極に沿って均一なプラズマ分布が得られていることが判る。図13(b)はこのときのプラズマ電位であり、電極付近では自己バイアスにより負の電位が形成されている。また、図13(c)は電子温度であり、電極付近ではエネルギーが高いが、プラズマ全体で見るとほぼ一様であることが判る。これらの傾向は実験結果とも良く一致している。

このようにプラズマ解析はかなり実用的なレベルに達しつつあり、今後、ラジカル反応の解析を加味し実験結果との詳細な検討を進め、従来実験的な検討が困難であったプラズマCVDの成膜現象をシミュレーションから把握することによって装置開発に大きく貢献できるものと期待される。

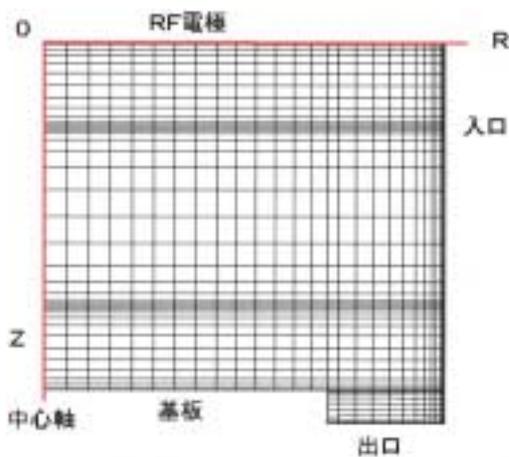


図12 平行平板軸対称2次元モデルの解析メッシュ

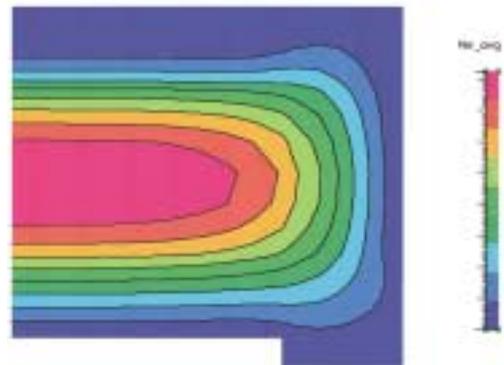


図13(a) プラズマ密度分布



図13(b) プラズマ電位

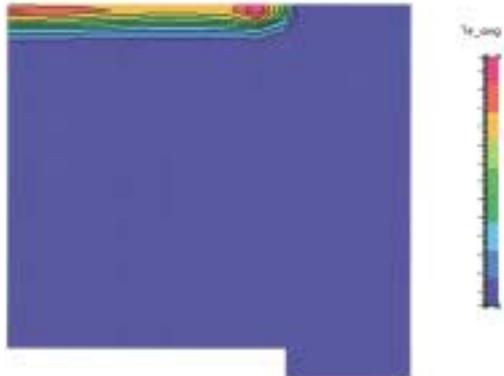


図13(c) 電子温度

5. あとがき

本稿では、当社の最近のCAE技術として、
実用的な冷却設計ツールとして定着しつつある熱流体解析技術

近年のコンピュータの急速な発展によって可能となってきた種々の現象が絡みあった連成解析の事例：
電気系と機械系を連成させた圧電素子の解析、電子・イオンビーム軌道解析、プラズマCVD解析

について紹介した。

近年、各種機器に対する高性能、高品質、高信頼性の要求はますます強まると同時に製品開発期間のさらなる短縮が望まれており、シミュレーションによる効率的な装置開発への期待は強い。当社では、今後もCAE技術の導入を積極的に進め、製品設計の最適化、試作検証回数の削減、また、測定困難な現象の解明にシミュレーションを活用し、これらの要求に対応していく所存である。

参考文献

- (1) 野川修一、野村博 他：「SF₆ガス絶縁分路リアクトルに対する熱流体シミュレーション」
日新電機技報 Vol. 39, No.2, PP14-18, 1994
- (2) 清滝和雄、松原克夫、野川修一：「ガス絶縁変圧器の巻線温度上昇解析」
電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-96-108, 1996
- (3) 井上武志、広瀬精二：「圧電トランス」
日本音響学会誌, Vol.55, No.7, PP. 504-511, 1999

執筆者紹介

藤 田 秀 樹	技術開発研究所解析技術センター CAEグループ 主任
近 藤 俊 成	技術開発研究所解析技術センター CAEグループ
清 滝 和 雄	技術開発研究所解析技術センター CAEグループ
松 原 克 夫	技術開発研究所解析技術センター 部長
