

空気圧によるナノメータポジショニング

＝電空レギュレータによる超高精度位置制御へのアプローチ＝

(株)アサヒエンタープライズ 飯塚 博道

1 はじめに： マイクロメータ精度の克服

空気圧による精密ポジショニングシリンダの製品化は未知の部分が多いスタートであった。

- ① 需要が開発コストに見合うのか。
- ② アクチュエータとメカニカルにリンクする部分の持つ多くの問題点（フリクション、バックラッシュ、センタリングなど）は解決できるのか。
- ③ そもそも、新しい原理に基づくナノメータポジショニングが受け入れられるのか。
- ④ 最適な分野は自動車産業か半導体産業かメデイカルかレーザーかあるいはそれ以外の分野だろうか。

わからないことばかりの段階で開発を始めなければならなかった。第一段階は、マイクロメータオーダーの精度が到達目標である。開発資金を捻出するために東京都の助成金を申請し当面の開発に必要な金額が認められ開発を開始した。クリーンであること、発熱のないこと（省エネ）、高推力であること、扱いやすいこと（ノイズレス、特別な制御アルゴリズムは不要）、マイクロメータオーダーのポジショニングが可能、などが助成金申請時の「特に優れた項目」であった。現在の製品化されている位置サーボシリンダ（写真1）の特徴も当然同様である。



写真1 サーボシリンダ

1-1 サーボバルブの構造

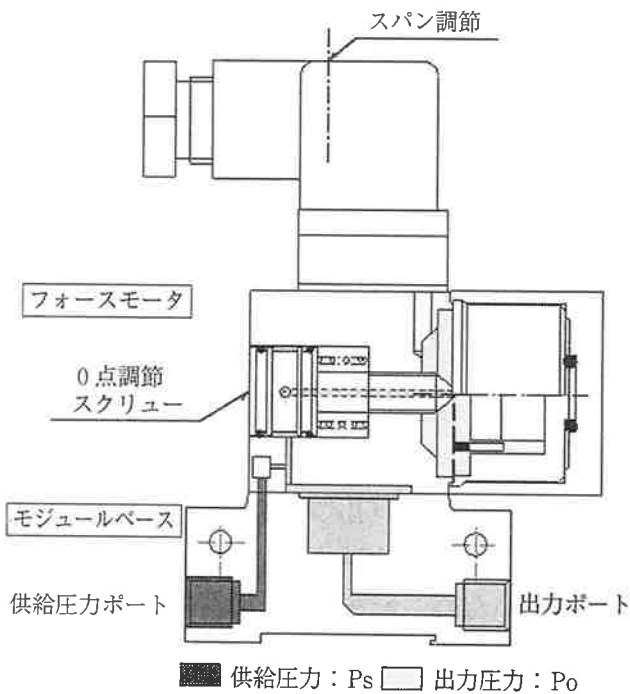
油圧制御の場合は媒体の圧縮性があまり問題にならないため、流量制御による位置サーボが一般的であるが、圧縮性流体の場合は流量とシリンダの位置はまったくと言ってよいほど相関性がない。空気圧シリンダの位置を決めるのはシリンダにかかる力のバランスであってシリンダを制御する媒体の流量ではない。従って、圧縮性流体を使用するポジショニングの場合、力平衡の原理（ $F_{in} = F_{out}$ 、 F_{in} は入力信号によって発生する力、 F_{out} は出力圧力によって発生する力）を利用した圧力制御型のサーボバルブ（電空レギュレータ）を使用するほうが流量制御型のサーボバルブよりメリットが大きいように考えられる。

そこで、以下のような2種類の圧力サーボバ

バルブを使用し位置サーボバルブとしての制御性の確認を行った。いずれのバルブも人工呼吸器の肺内圧制御用として開発された製品であり、その時点では位置制御への適合性は不明であった。概略の仕様は機種により異なるが以下のとおりである。

- メカニカル応答速度：0.1～10msec
- 出力ノイズ：1～20mmAq (0.01～0.2kPa、500kPaレンジ以下)
- 耐久性：1億サイクル以上
- 最小スパン：0～20kPa
- 最大スパン：0～3MPa

(1) フォースモータ型圧力サーボバルブ (第1図)

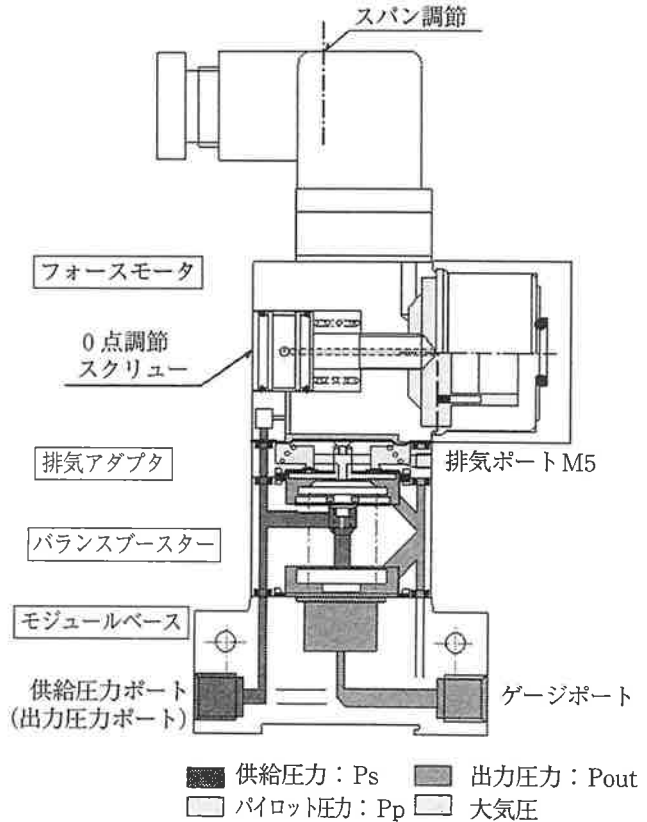


第1図 フォースモータ型圧力サーボバルブ

このサーボバルブは標準的なアナログ信号（0～5Vなど）のみによって駆動され、メカニカル応答速度が0.1msec以下、フルスパン動作時のヒステリシスが0.5kPa以下（5%スパン動作時のヒステリシスは0.01kPa以下）であり、フィードバックループを介さずに直接にリニアな圧力制御ができる。従って、圧力のフィードバック遅れによる発振対策を考える必要がなくなり、安定した、ヒステリシスのないポジショニングが

比較的容易に可能になる。このバルブは最大300kPaのスパンの圧力が制御でき、最大流量は15LPM（供給圧力：500kPa時、以後流量は注記のある場合を除き全て同じ条件で表記する）である。圧力スパンと出力流量は内部部品の変更により16通りの組合せができる。

(2) ブースタ付きフォースモータ型圧力サーボバルブ（電空レギュレータ）（第2図）



第2図 ブースタ付きフォースモータ型圧力サーボバルブ

このB型のサーボバルブは上記A型のバルブの出力をブースタ（流量圧力増幅器）へ接続し流量と圧力の増幅を行っている。ブースタを圧縮性流体（空気）によって操作するため大きな応答速度遅れ（10msec以下）が発生し、ヒステリシスも増加（0.3%FS以下、微小入力時のヒステリシスは0.05%FS以下）するが最大流量は500LPM（1/4口径）および3,000LPM（3/8口径）であり、最大3MPaのスパンの圧力が制御できる。シリンダの大型化高速化には不可欠なコンポーネントである。

以上、2種類のバルブの組合せにより、個々

のアプリケーションに適したサーボバルブを選択することができる。

1-2 シリンダの構造

特殊なシールを使用した標準型シリンダと、ギャップ管理とランド長さによりピッチング（縦揺れ：Z軸周りの回転）、ヨーイング（横揺れ：Y軸周りの回転）を極力抑えた精密シリンダの2種類のシリンダを製作している。いずれも40mmφシリンダで摩擦力は300～400gであり、静止摩擦力の増加も200g程度である。ローリングの防止機構はいずれのシリンダにも内蔵されていない。精密シリンダのピッチングとヨーイングはシリンダ前進時の先端部の変位量で10μm以下（ストローク20mm）である。

1-3 位置センサの構造

コストと応答速度を考慮し、非直線性±0.5%のリニアポテンションメータを位置センサとして採用した。従って、以下の位置に関する数値はこのセンサを基準とした数値である。

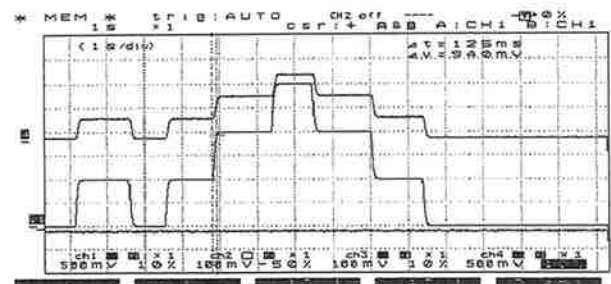
1-4 コントローラの機能と特徴

サンプリング速度1kHz、制御分解能14ビットのデジタル演算型（制御アルゴリズムはPID制御）コントローラを新しく製作した。出力はアナログ出力回路と搬送波1kHzのデューティ出力回路を用意し、アナログ出力とデューティ出力との特性の差を確認した。搬送波1kHzのデューティ出力の場合もアナログ出力と同様の制御特性（静特性、動特性とも）が確認された。コスト面からするとDAコンバータを使用しない分デューティ制御にメリットがあるが、1kHzの搬送波でバルブを動かすことを考えるとこれを採用する勇気はなかった（動作確認の目的のみで3ヶ月間連続テストを実施したが特に問題は発生しなかった）。

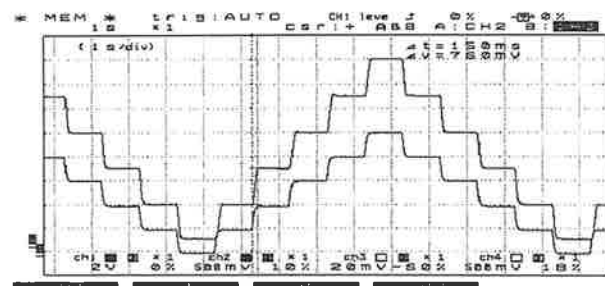
サンプリング速度1kHzと制御分解能14ビットはノズルフラップ型サーボバルブの分解能と速度からするといずれの数値も十分とはいえないが量産時のコストを考慮するとこれ以上にスペックを上げることはできなかった。

1-5 製品化された位置サーボシリンダと位置サーボバルブ

圧力制御型の電空レギュレータを使用した位置サーボシリンダのテスト結果は極めて良好であった。100mmストロークのシリンダを使用した開発当初のテストで80μm以下のヒステリシスで制御できることが確認できた。シリンダ速度はバルブA型を使用する場合160mm/sec（無負荷時（第3図））バルブB型を使用する場合260mm/sec（無負荷時（第4図））であった。現在では、パラメータの最適化により100mmシリンダをヒステリシス±20μm（0.05%FS、ただし数値は出力信号レベルであり絶対値レベルではない）以下で制御することができる。



第3図 位置サーボシリンダ動特性（バルブA：使用時のシリンダ速度160mm/sec）



第4図 位置サーボシリンダ動特性（バルブB：使用時のシリンダ速度160mm/sec）

汎用性を考慮した結果、第1表のコンポーネントを標準の組合せとし、手動バイアスや高速化のためのプッシュプル制御などいくつかのオプション仕様を追加している。

シリンダ径は40φと50φが用意されており最大ストロークは300mm（オプション1,000mm）である。また、マイクロメータオーダーの分解能で制御可能な高精度型シリンダをマイクロメータ

第1表 サーボ弁とサーボシリンダの標準組合せ

	低速用	高速型	高精度型 (マイクロメータシリンダ)
サーボ弁	ノズルフラップ型*2組	ブースター内蔵型*2組	ノズルフラップ型*2組
シリンダ	低摩擦シリンダ		高精度型低摩擦シリンダ
センサー	リニアポテンションメータ		
コントローラ	デジタル演算型		

シリンダ (ストロークは20mm以下) として分類している。

製品化された位置サーボシリンダには操作性をあげるためのいくつかの機能が追加されている。

- ① 0点とスパンの自動校正 (ティーチング方式) がローカルでもPC上でも簡単にできる。
- ② 制御特性 (応答速度、オーバーシュート、アンダーシュート、出力ノイズ) に関するパラメータを変化させながらその結果の過渡特性をPC上で3秒間確認できる。
- ③ 偏差アラームや絶対値アラームなどの標準アラームの他、寿命予測アラーム (オプション)、モレアラーム (オプション) などの特別な用途のためのアラーム信号が任意に設定できる。
- ④ 小型化によりコントローラはバルブ内蔵型とした。
- ⑤ その結果、オールインワンシリンダが可能になり、圧力源と信号源とを接続すればすぐに動作確認ができる。

写真1はオールインワンシリンダである。力平衡によるマイクロメータポジショニングの有効性が確認できたので次のステップはナノメータポジショニングである。

2 ナノメータ精度へのアプローチ

空気圧を利用する測定機器としてエアーマイクロメータはよく知られている。計測用ノズル径と減圧用オリフィス径とを適当に選択すればきわめて高い分解能で位置 (空隙) の計測が可能である。当社では、25年以上前にこの原理を利

用したギャップ計測器を量産化しギャップセンサとして販売している。安価なマイクロスイッチ、ダイアフラム、ノズルフラップなどの古典的部品の組合せにより0.1~5 μ mのヒステリシスで設定ギャップに対するON-OFF信号を出力することができる製品を開発することができた。圧力センサ、スイッチ、レギュレータ、フィルタなどのコンポーネントの進歩を考慮すれば出力信号レベルでのナノメータオーダーの管理も現在ならば条件付で容易である。これを、センサとして使用すればセンサの問題は解決したようなものだ。安価であり量産も可能である。しかも、これまでのギャップセンサのデータを利用してナノメータシリンダ (以下ではナノシリンダと呼称する) 用位置センサの静特性を予測することができる。

ナノメータ用アクチュエータの状況も同様であった。同じ時期に開発されたアナログ演算リレーの動作そのものが結果的にはナノメータオーダーでのポジショニングであり、しかも負荷変動に対する自動補正機構の可能性を示唆するものであった。通常のシリンダの場合、負荷の大きさが変化すればその力を補正するための何らかの力が働かない限りシリンダは動いてしまう。自動補正機構はフィードバックループを介さずに負荷の変化を自動的に修正し、位置の偏差 (オフセット) を最小にする機構である。

2-1 サーボバルブの構造

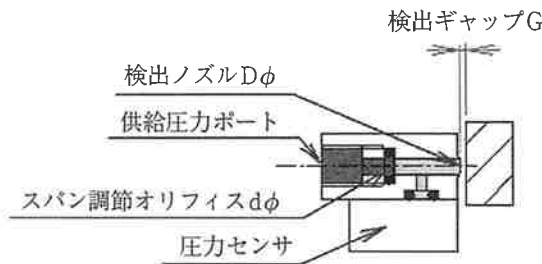
位置サーボシリンダと同様、圧力制御型のバルブを使用する。ただし、A型あるいはB型のバルブを単独で使用する。

2-2 コントローラの機能と特徴

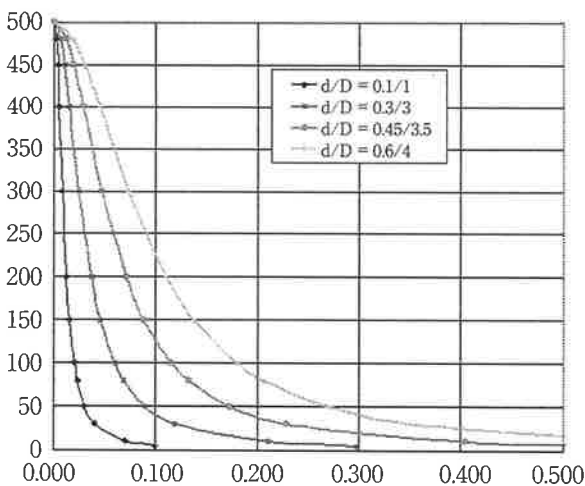
位置サーボシリンダ同様、デジタル演算型のコントローラを使用する。

2-3 位置センサの構造

一般的なエアーマイクロメータの構造を第5図に、出力信号特性を第6図に載せる。これにより、出力圧力信号がギャップG（センサと基準面との空隙）に極めてリニアであることが確認できる。このセンサ（エアーマイクロメータ）の空氣的な分解能は標準的な圧力センサよりはるかに高いようである。



第5図 エアーマイクロメータ



第6図 エアーマイクロメータの出力信号特性 (X軸=ギャップ [mm]、Y軸=出力 [kPa])

ナノシリンダの場合、この出力圧力信号が位置の補正を直接に行うと同時にコントローラへの位置信号ともなっている。

2-4 ナノシリンダの構造

ナノシリンダの概略の動きは以下のとおりである。

- ① コマンド信号（電圧または電流）を電空レギュレータにより空気圧信号へ変換する。
- ② 変換された空気圧信号によりシリンダが目標値方向へ移動する。
- ③ シリンダに入力された空気圧信号と内蔵

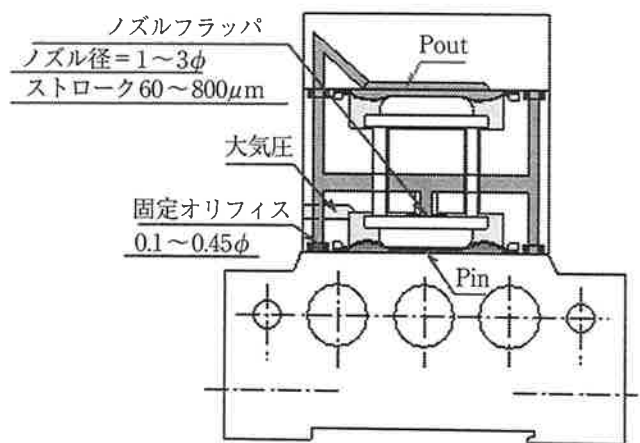
されている位置センサの空気圧信号との間の力平衡 ($F_{in} = F_{out}$) が成立つ位置でシリンダが停止する（この時点まではフィードバックを介さない）。

- ④ 停止位置が圧力センサによりコントローラへフィードバックされる。
- ⑤ コマンド信号とフィードバックされた位置信号に偏差がある場合コントローラにより偏差が補正される。
- ⑥ 偏差がなくなり、ナノシリンダが目標値に停止する。

上記ナノシリンダの自動補正を実現している空気圧アナログ演算リレーの静特性について以下に簡単に説明する。

空気圧アナログ演算リレーの基本形は1対1の圧力変換器（第7図）である。この基本形の入出力特性は P_{in} （入力圧）= $\alpha * P_{out}$ （出力圧、 α は比例定数）であり、この特性の基本になる式が空気圧機器に多用されている力平衡（フォースバランス、 $F_{in} = F_{out}$ ）の考え方である。力平衡は変位量バランスと異なり温度依存性がほとんどない。従って、摩擦力の発生しない構造を採用すれば極めて高い分解能と線形性で荷重計測や圧力変換ができる。 F_{in} は圧力でも慣性負荷（重量）でも基本形の静特性には影響を与えない。

自動補正を説明するため一定のバランス状態から荷重が増加する場合を考える。荷重（この場合は入力圧 P_{in} ）が増加するとノズルを閉じ



第7図 1対1圧力変換器

る方向にフラップが移動する。この移動に伴ってPoutが $F_{in} = F_{out}$ の状態になるまで上昇し再度バランス状態に到達する。このときのフラップの移動量が荷重変化に伴うナノシリンダの位置の偏差（オフセット）である。この偏差量はノズル径とオリフィス径によって決まる。Poutの分解能は1/10,000FS以上のレベルなのでPoutを決める位置の偏差量の分解能も1/10,000FS以上と考えられる。以上の基本形にコマンド信号用の加算用チャンバを付け加えたものがナノシリンダである。

空気圧によるナノメータポジショニングを検証するため推力=320N、ストローク=100 μ mのシリンダ（写真2）を試作し、2種類のセンサを使用して特性の確認を実施した。1つは、シリンダの内部圧力（エアーマイクロメータの出力圧（第8図））、もう1つは外部に設置したセンサの出力（静電容量型）である。

内部センサの計測数値では、分解能10nm

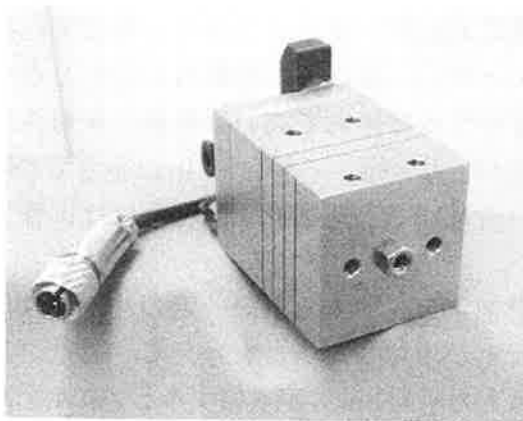
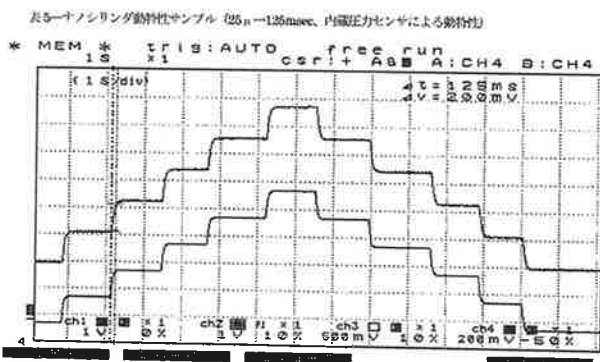


写真2 ナノシリンダ (100cmストローク)



第8図 ナノシリンダの動特性サンプル (25 μ →125msec、内蔵圧力センサによる動特性)

(無負荷時) 以下、ヒステリシス20nm (無負荷時) 以下の数値が確認された。外部に設置した静電容量型のセンサでは出力ノイズが大きすぎ、意味のある数値は確認できなかった。原因はセンサ自体にもあるが大きな要因はテスト環境と考えられる。

テスト用のテーブルは防振ゴムを併用したがビルの振動の影響やエアコンの振動、空気流、取り付け台の温度変化による線膨張など、テスト環境は外部センサにとってはノイズだらけと考えられる。

ナノシリンダはナノテク2005において実施されたビジネスプランコンテストで優秀技術賞を獲得し、2006年に米国特許も取得している。

3 おわりに

フォースモータ型圧力サーボバルブをパイロットとして使用することにより、多くの困難な課題が解決されてきた。それらは、上記ナノメータポジショニングに留まらず、マイクロリッターの液体流量コントローラ（写真3）や温度制御用サーボ弁（ヒステリシス0.0%、温度安定性5/1,000 $^{\circ}$ C、写真4）、フルスパン1kPa（最小設定値1Pa）の圧力コントローラとして実用化されている。

次の課題として、最低の価格で最高の機能を満足する基準圧力発生器の開発を考えている。当社の最初のシステム製品は戦闘機F104Jの地



写真3 液体流量コントローラ



写真4 温度制御用サーボ弁

上での飛行シュミレータであった。今でも、当社の製品群には圧力機器の校正を目的とした基準圧力発生器があるが、それらは極めて高価であり、製作にも多くの日数が必要である。

そろそろ、世代交代の時期がきており、従来型の基準圧力発生器では不満足なユーザーに新しいコンセプトの基準圧力発生器を提案したい。当社の提供する製品は基準圧力発生用として選択出荷する電空レギュレータ、コントローラ（電空レギュレータに内蔵されている）、PCとの通信ジグ、ソフトウェアの4点である。センサはオプション部品としており、ユーザーの手持ち品も使用可能だ。

圧力発生プログラムはEXCELのマクロにより誰にでも簡単に任意のパターンを作ることができ、被校正側の出力のスケールも任意に設定することができる。0点校正はPC画面上でワ

ンクリックで行うことができ、スパン校正も基準圧力確認後のワンクリックで終了である。

スケールリングの変更により真空から正圧まで、どのレンジでも最高14ビットで制御することができる。出力ノイズは制御ループ内のフィルタレーションを行わずに1/5,000FS以下（ただし、乱流や振動などの外乱ノイズのないことが条件ではあるが）まで可能である。

センサを任意の場所に取り付けられるので圧力損失もなく、流量もバルブの選択により最大3,000LPMを流すことができる。前記飛行シュミレータの価格は数百万円であったが新しいコンセプトの基準圧力発生器を使用すればより高機能的な内容の製品が数十万円で短期間に完成することができる。

いくつかの圧力発生プログラムと圧力センサごとのパラメータ設定ファイルを用意しておけば1台の基準圧力発生器で広い範囲の、用途の異なる応用ができる。2008年度中には完成予定である。

筆者紹介

飯塚博道

(株)アサヒエンタープライズ 技術部 専務取締役
〒101-0042 東京都千代田区神田東松下町17
ファーストビル

TEL : 03-3256-4041

FAX : 03-3254-2136

E-mail : iizuka@asahi-et.com

建築設備と配管 増刊号

定価：3,500円

設備技術者必携

保存版

建築設備系配管の設計・施工実用技術

設備配管の設計・施工について基礎から応用までを集大成。

日本工業出版（株）

フリーダイヤル 0120-974-250

netsale@nikko-pb.co.jp