第３章

水圧の世界

「新・水圧技術：ADS（Aqua-Drive-System）」で機械を動かす

1. まえがき …… 90
2. 水圧の始まりはイギリス産業革命 …… 92
3. そして、今どうして
「水圧？」：新たなる装いで …… 94
4. 「ADSとは？」の前に
知っておきたい単純な疑問 …… 95
4.1 水圧による動力の伝達 …… 95
4.2 水で機械は錆びないか …… 96
4.3 機械の潤滑は？ …… 96
5. ADS が要求されるのはこんな理由 …… 97
6. ADS はこんな仕組みで動く …… 98
6.1 ポンプとモータの構造 …… 98
6.2 制御弁の構造 …… 99
6.3 ADS 機器の組合せ …… 100
6.4 インテリジェントな ADS …… 101
7. ADS の応用分野を眺めてみよう
—ADS 市場マップ …… 102
7.1 市場マップ …… 102
7.2 ADS ならではの応用 …… 102
8. ADS はこんなところで使われる
—ADS 応用事例 …… 103
8.1 食品機械分野の ADS …… 103
8.2 生産機械分野の ADS …… 106
8.3 家庭・介護分野の ADS …… 108
8.4 医療・福祉分野の ADS …… 110
8.5 防災・レスキュー分野の ADS …… 112
8.6 対放射性環境分野の ADS …… 114
8.7 その他の分野の ADS …… 115
9. ADS の未来 …… 116
9.1 ADS とコジェネレーションとの融合
—環境調和、省エネ、省資源、
水の有効利用への貢献 …… 116
9.2 ADS の未来イメージ図 …… 117
10. ADS 要素技術の要（かなめ）
—シール技術 …… 118
10.1 シリンダの構造とシール …… 118
10.2 ADS 機器のシール …… 118
11. さらなる情報・知識の習得に向けて …… 119
11.1 JFPA 出版物・報告書・Web Site
などから参考資料 …… 119
11.2 その他の出版物から参考資料 …… 119

1. まえがき

地球温暖化、その影響は気候や生態系そして人間社会のあらゆる面で不安と恐怖を与えています。夏の集中豪雨と猛暑、そして突然日本近海で発生する台風、冬には突然の豪雪と暖冬というように気候や季節に極端な現象として経験することがしばしばです。「環境と省エネルギー」が地球温暖化対策にとって、従来以上に重要な社会的、技術的課題となっています。さらに、資源の供給安定性が低い化石燃料の消費は極めて不安定な状況に陥っています。化石燃料の過度の使い方によっては地球温暖化をもたらします。また石油の産油地域が極めて局所的であり、時には地域の政情、宗教上などの不安定な要因によって、燃料のコストが日常生活に直接影響を及ぼしています。そして、地球温暖化がもたらす豪雨と干ばつは人間が生きるための飲料の確保に大きな不安を与えています。生活用水、特に飲料水の不足は人間の生きる道を閉ざしてしまう深刻さをはらんでいます。

近年、「水サミット」[1)] が日本において開催され、飲料水の確保と偏在の均衡化が課題となり、「水の確保と有効利用」もエネルギーの安定供給化と並んで重要となっています。これに先立ち、国際会議「世界水フォーラム」が数回開催され、水の重要性が長時間にわたって議論されています。有名な海外誌「フォーチュン」は「21世紀の水は20世紀の石油のような存在になるに違いない。水が各国の豊かさを決める物資となるであろう」と語っています[2)]。

このような環境下で、これからお話をする「水を作動流体として水の有効利用を可能ならしめるADS」は、省エネルギー、環境対策に貢献する新・技術です。それは今、どんなところで活躍し始めているのでしょうか、まずはその触りを紹介するために、ADSの原理についての説明から始めましょう。

1) アジア・太平洋水サミット：第1回は2007年に大分県別府市で開催された。
2) フォーチュン誌2000年5月号：「20世紀に石油が約束してくれたものを、21世紀には水が約束してくれる国家の繁栄を左右する貴重な商品」

ADSの原理は『水鉄砲』

図1.1は子供の時に遊んだ竹筒で作った水鉄砲です。**図1.2**は内部の様子を示したものです。

左端の握りを押すと右先端の穴から水が勢いよく出てきます。**図1.1**の竹製のものは民芸品の工作キットとして売られています。プラスチック製では、本格的なガンの形をしたものが数多くありますが、**図1.1**の形状のものも知育玩具として販売されているようです。

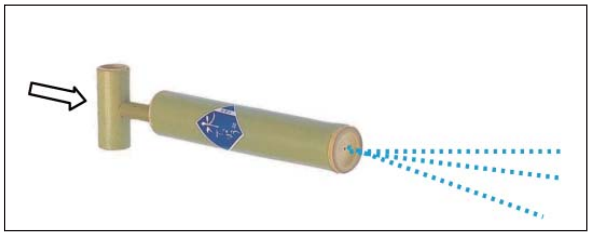


図1.1　水鉄砲（手作り民芸工芸品、駿河屋）

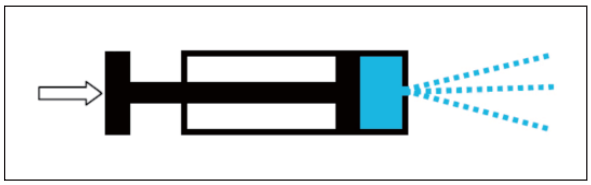


図1.2　水鉄砲の内部の様子

図1.2において、竹筒内の右半分の水は、左の棒を強く押せば押すほど右端の穴から勢いよく飛び出て、遠くまで届きます。

これは**図1.3**に示される「パスカルの原理」の応用です。一定の容器に閉じ込められた流体にWの力を掛けると、容器内の圧力pは四方に均等に伝達されます。右図において、ピストン①とピストン②にかかる圧力pが同じであることから$W=F\cdot B/A$となりますので、ピストンの面積比を変えることに

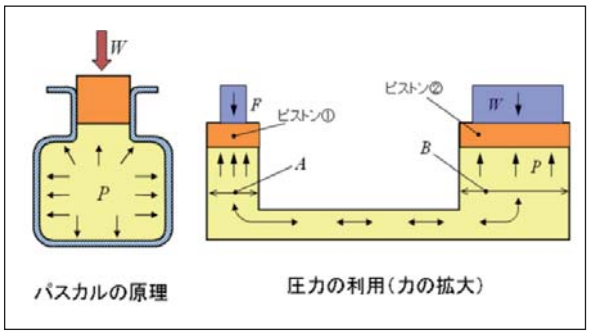


図1.3　パスカルの原理と増圧機構

よって、圧力を利用して、小さな力で大きな力を発生させることができます。いうなれば「ジャッキ」です。車を修理したり、タイヤを交換したりする時、車体を持ち上げる機械です。

液体であれば作用は同じです。最近は、ジャッキは油圧駆動となっています。

さて、この原理を仕事に使うことを考えてみましょう。**図1.4**に示す絵がそれです。ホースでつなげば、どこでも自由にエネルギーが伝達され、機械などを動かすことができる便利な道具となります。

「閉じ込めた容器（竹筒）の中の水に水鉄砲のような力を与えて、その力をホースによって必要な所へ、必要なだけ流体のエネルギーを伝達して機械を動かす」のが液圧技術です。流体に「油」を使えば「油圧」、「水」を使えば「水圧」と呼びます。これから説明する技術は後者の「水圧」です。水を利用する機械技術です。

今では、機械といえば「油」が付き物です。ここで説明する水圧技術には、作動流体に「水道水」を使います。このため「油成分」は一切存在しません。だから機械自身を「清潔丸洗い」ができます。「清潔水洗い、丸洗い」はヒゲそりの宣伝文句だけではないのです。これまでの電気駆動では、防水構造や漏電対策をしても機械自身を清潔に洗浄するために機械を分解し、濡れては具合の悪い電気部品は取りはずさなくてはならないのです。

水圧駆動を採用した機械はそのような手間は省けるし、洗浄のためにわざわざ機械自身を分解・組立てを行うために生産ラインを停止させることもありません。生産が終わり次第そのまま洗浄できるので効率の良い生産活動が可能なのです。水に強い機械技術です。

水圧技術と新・水圧駆動技術

水圧技術の歴史は、後で詳しく触れますが、イギリス産業革命の頃（18世紀末）すでに水圧技術が発明され、その後100年の長い年月の間、産業に利用された時期がありました。当時は機械を動かすのに、石炭を燃やしてボイラーの蒸気の力を利用していました。しかし、蒸気では大きな力を出すのが大変でした。そこで蒸気の力でポンプを駆動して水圧を発生させました。しかし、ステンレスはなく、鉄では水と接触すると機械の材料が錆びたり、油のような「べとつき（粘性という）」がないので、こすれる所がすぐに痛んだり、隙間から水が漏れたりしました。このように鉄を材料とする機械に「水」は不向きだったのです。この頃の水圧技術を「旧・水圧技術」と呼びます。その後、鉱物油が発見され油が水にとって代わり、油圧技術が誕生し、著しい進歩を遂げ現在に至っています。さて、ここで説明する「水圧技術」は、当時の水圧技術が抱えていた多くの課題（錆、漏れ、摩擦・摩耗など）に対し、材料など現在のハイテク技術（ステンレス、セラミックス、特殊高度表面処理）を駆使し、「旧・水圧技術」と一線を画した全く新しい水圧技術です。これを「新・水圧駆動技術：ADS（Aqua-Drive- System）」と呼ぶことにしましょう。

新・水圧駆動技術 を理解するために！

新・水圧駆動技術（以降、ADSと表す）は、作動流体に「水道水」を用いると述べました。流体が漏れても環境を汚すことはありません。きれいな製品を作る時、クリーンで、衛生的で環境性の優れた製造ラインを構築することができます。例えば、食品、医療・医薬、化粧品、半導体などでは重要な、

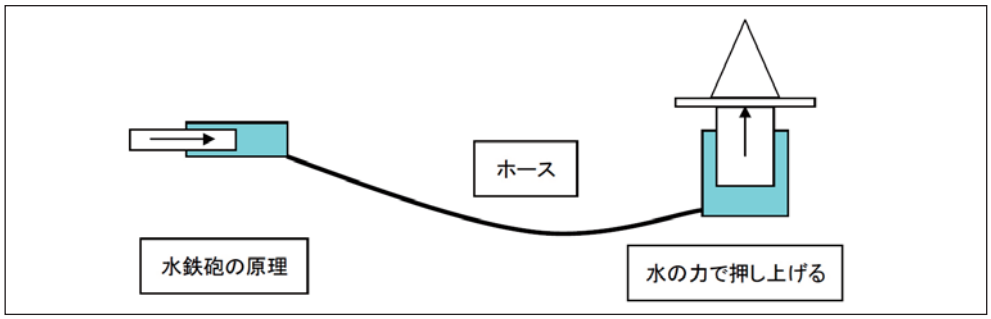


図1.4　力をホースで伝達する

安全・衛生的でクリーンな雰囲気を作ることができます。

ADSとはどのような技術か、同じ液体でも流体が「水（ADS）と油（油圧）でここが違う」を説明する前に、こんな所で使われているということを知って欲しいと思います。なぜなら日本においてADSの研究開発や技術開発が始まってからまだ20年弱[3]、その実用化は、この数年[4]の間に始まったところだからです。ADSは全く新しい技術であり、世に十分知られていないのです。

まずは、第8節にジャンプしてみましょう。そこでまとめて紹介しているADSの応用事例の図や写真画像を見て、「なるほど」と感じてください。そのうえで、次の第2節に順次詳しく述べる、「水圧の歴史」「今、どうして水圧なのか」「その疑問事項」「ADSが要求される理由」「水圧の動く仕組み」などを読んでいくことにより、ADSに対する理解は一層深まると思います。

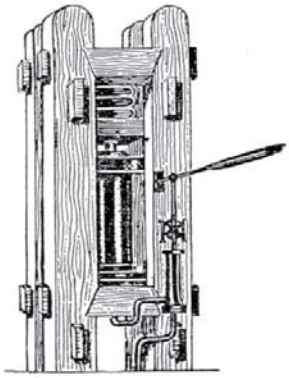
それでは、「なぜ、また水圧なのか？」の問いについて、皆さんと一緒に考えていくことにしましょう。

3) 1997年、日本油空圧学会に水圧システム研究委員会を設置。翌年、日本油空圧工業会に水圧研究委員会が発足。
4) 2010年の半導体成形水圧プレス、鶏胸肉自動脱骨機など。

2. 水圧の始まりは イギリス産業革命

水圧を機械の手段として初めて考案したのはBramah（英国：1795年）の水圧プレスです。**図2.1**は、当時考案した水圧プレスで、左図は木製です。右図の引用注釈に示すように、特許として申請されています。右の握りを駆動すると、下の小シリンダに圧力が発生し、その圧力は本体中央部の大シリンダに伝達されます。シリンダ面積の拡大分だけ力は増幅され、大きな力が発生します。これが、**図1.4**に示した原理図の応用、第1号ということになります。

液圧、といえば現在では通常油圧技術を指すようになりましたが、その歴史は水圧技術から始まったのです。驚くことに、当時は現在の「電気会社」ならぬ「水圧供給会社」が存在していました。ロンドン、グラスゴー、マンチェスター、ハルなどの都市には、現在の水道管のように5インチ管が地下に埋設され、市内中に張り巡らされていました。圧力はおよそ5MPaです。各市内の特定の場所にポンプステーションが設けられ、高圧水を供給していました。当時、大きな動力を出せる手段は水圧をおいて他になかったのです。



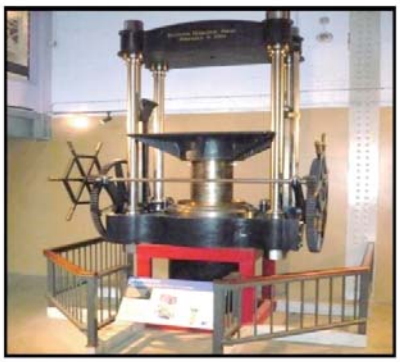


図2.1　Bramahの水圧プレス

（右図は 1795 Hydraulic Press, Patent No.2045 - on display at Kelham Island Industrial Museum, Shefield by http://www.priorycampus.co.uk/rlhg/roggins.php?p=bramah）

石炭でボイラーを炊き、蒸気を作って動力にします。蒸気機関は、当時の有力な動力源でした。**図2.2**は、イギリスのブリストル市に現存する当時の水圧ポンプです。現在でもメンテナンスが行き届いていて、駆動します。そのポンプで、**図2.3**にあるように今でも水門を駆動しています。水門の他、川の中心を軸として橋が架けられ、その軸を回転させて、船舶の通行を可能にする旋回橋にも使用されています。これらはすべてが当時のまま、今も作動しています。筆者は切換弁を作動させて水門を動かしてみました。当時にタイムスリップし、感動したことを覚えています。

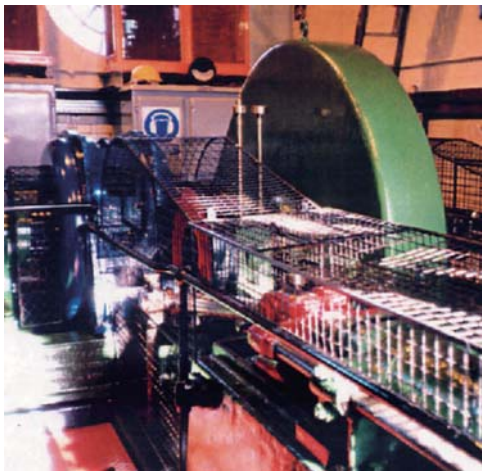


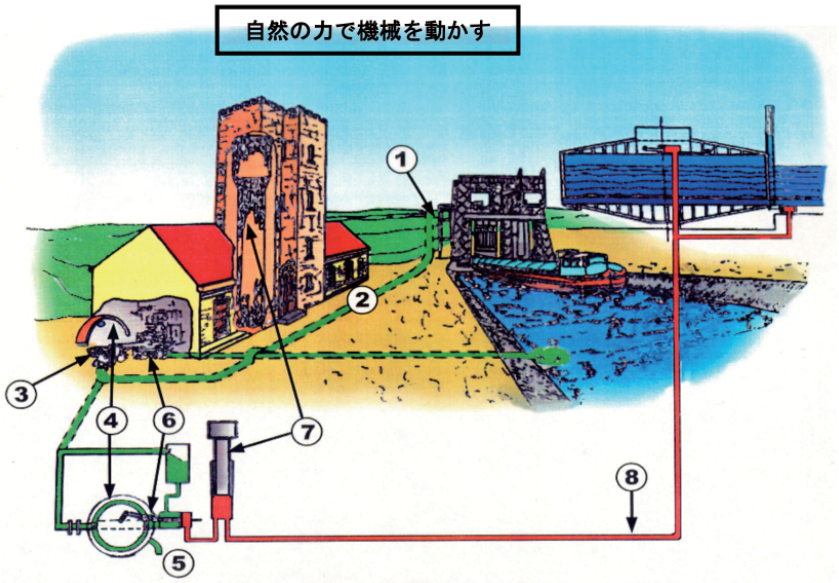
図2.2　当時の一本ピストン型水圧ポンプ

図2.3　水圧シリンダにより駆動される水門（図 2.2 の水圧ポンプから圧力水を受ける）

こうしてイギリスに端を発した水圧技術は、ヨーロッパ大陸に広がっていきました。**図2.4**は、ベルギーのフランス国境近くにあり、歴史的に重要な建築遺産や文化遺産の数多く残るMons市に現存するリフト式傭船ロック設備です。1888～1919年に設置されましたが、18世紀のイギリスの技術が色濃く残っています。機能性のみならずその優雅さゆえに高く評価され、世界遺産にも登録されて日本でもテレビ放映されました。それを見た筆者は、テレビ会社に問い合わせ、当地を訪問しました。写真は筆者が撮影したものです。およそ千トンの船を50メートルの高さに上げて、山を越え、隣の運河へと船を積み荷と共に移動させていました。

図2.5はシステム全体を模式的に示しました。河川の落差を利用してタービンを回転させ、ポンプを駆動します。発生圧力水で運河と傭船箱を密着させ、仕切り扉をシールで密着させて水漏れを防止します。船を昇降する二本のシリンダは連通管で接続、わずかな水位差により質量差を作り、上り、下りの昇降動作を作り出しています。全てが自然の力です。日本の水循環は落差の世界です。太陽電池や風力発電もクリーンなエネルギーですが、日本の地の利を利用し、水資源で地域活性化にもADSは貢献できる技術なのです。

図2.4　リフト式傭船（ようせん）ロック設備



①水頭、②配管、③、④水圧タービン
⑥水圧ポンプ、⑦アキュムレータ、⑧高圧配管

図2.5　リフト式傭船ロック設備

3．そして、今どうして「水圧？」：新たなる装いで

今、地球環境保護の最重要課題は二酸化炭素の削減であり、その達成に世界中が躍起になっています。2005年の226億トンを2050年にはおよそ半分の130億トンに削減すること約束しています。石炭や鉱物油による発電、産業や輸送、一般民生からの二酸化炭素排出を含め、グローバルにその削減の解決に当たっています。

全体の二酸化炭素の発生の現状を**図3.1**に示します。産業分野で36％、運輸・交通で20％そして業務関連で18％、家庭関連が13％と続いています。CO_2削減を推進していくためには社会システム、つまり約束事や規制を作り、地球規模的に努力しない限り実現は不可能です。環境に対する関心は、国内では1953年頃から発生した熊本県の水俣湾周辺のメチル水銀中毒事件や、少し遅れて1956年頃をピークに富山県、神通川流域に発生した公害病に端を発しています。環境問題は、今や単に環境汚染だけにとどまらず、もっと大きな地球温暖化問題へと拡大してきました。このようなプロセスを経て、人類の環境に対する意識は著しく高まりました。将来に向け、環境調和だけでなく省資源、省エネルギー、将来の起こるとされている水不足から水の有効利用等を考えたとき、安全・快適な生活実現のためには社会システムの変革とそれを支える技術革新が極めて重要となります。近年そ

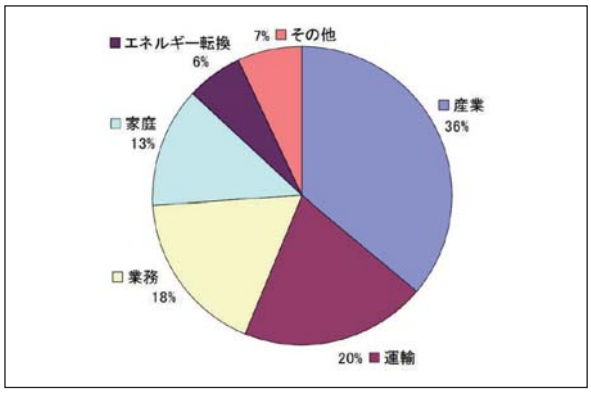


図3.1　産業別CO_2の排出

れを理解し、実現するための「キーワード」がそこここ到る所で見受けられ、民間・国家総規模で実行に移されています。**図3.2**にキーワードと社会システムの構築や規制、それに係る技術などをまとめました。「ものづくり立国日本」にとってはどのキーワードも見逃すことはできません。

さて、**図3.2**をもう少し詳しく見てみましょう。中心部に「環境と共生した製品開発」があり、その周りに、多面的に環境に係るキーワードを記述しました。大気・空気の汚染、土壌の汚染、水の汚染などがあります。省資源の視点から廃棄物を有効に利用しようとする3R（リデュース、リユース、リサイクル）、循環型社会を推進しようとする法律や規制、LCA（Life-Cycle-Assessment）は製品が製造されてから廃棄されるまで、外部の環境にどのような影響を与えるか、あるパラメータの基に評価する方法です。具体的には投入されるエネルギー、各種資源使用量、排出する窒素酸化物、二酸化炭素など10項目程度が数値として採用されています。国際標準規格（ISO）のISO 9000（品質保証）、ISO 14000（環境マネジメントシステム）、ISO 22000（作業環境）などそれぞれの目的に対応する規格が制定されています。これらのキーワードは「環境負荷の低減」、「環境配慮の独創的技術」の重要なテーマとなっており、具体的には風力発電、燃料電池、太陽光発電などがあります。そしてここで提案説明するADSの技術が必要となってきます。これらの実現には、図の右上部と下部に示した「社会システム（決まりや規制等の仕組みの構築）」と、それを支える「技術システム」の二つの要素を同時に進めて行かなくてはなりません。技術ばかり進んでしまうと、前述したように生み出された製品、製造プロセスにより公害が発生してしまいます。

以上の社会的背景から、「CO_2排出削減・省エネルギー」は今後の重要なキーワードとなっています。

4.「ADSとは？」の前に知っておきたい単純な疑問

4.1 水圧による動力の伝達

動力を伝える最もよく知られているやり方としては電気方式が一般的です。電動は電圧と電流を調節します。ADSは、流量と圧力を使った流体動力の伝達です。基本原理は「パスカルの原理」です。現在、液体を使った動力の伝達では油圧技術がよ

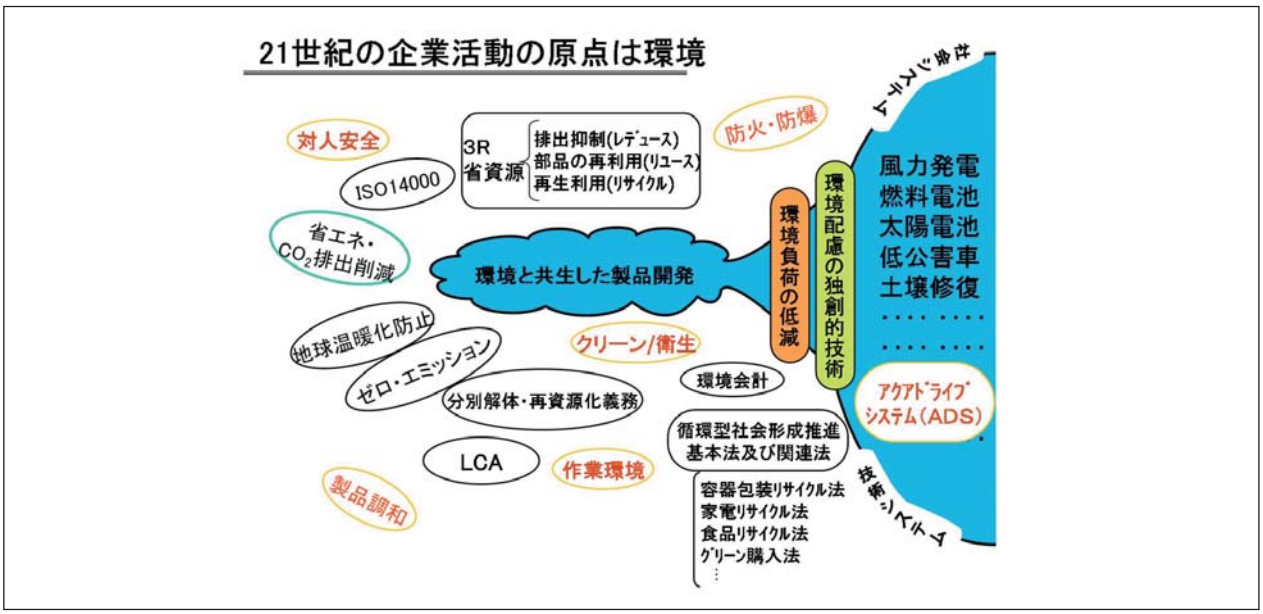


図3.2　環境を支える「社会及び技術システム」

く知られています(第1章 油圧の世界を参照)。水も油も液体であるので多くの類似点があります。しかし、油と水ではご存じのとおり、よくいわれる「水と油は混ざらない」が常識で、いかに物性が異なるか、を実感できます。

ここでは、ADSと油圧技術とがいかに異なるか、この点に注目して説明します。

作動流体「水」の物理的性質は理科年表などの資料などで公表されていますが、ここで要約しておきます：

① 粘性(水は鉱物油のおよそ1/30)
② 蒸気圧(50℃で鉱物油のおよそ10^7倍)
③ 空気含有率(飽和含有率で鉱物油の1/5)
④ 体積弾性係数(鉱物油のおよそ2倍)
⑤ 熱伝導率と比熱（熱伝導率は鉱物油のおよそ4～5倍、比熱は1.5倍）

それに水の場合、鉄系金属であれば錆びてしまいます。これだけ油と水の物性値が異なると「ADS特有の構造と材料」が必要になります。

4.2 水で機械は錆びないか

錆は水と空気が存在すると発生することが一般的に知られています。錆を進行させるものを「電解質」と呼んでいます。電解質はイオンを含んでいて、直流電流をイオンの動きによって運び、電流を流す性質を持っています。つまり錆は電気と深い関係にあります。錆の発生には水や空気、酸などの電解質が電気化学的に金属と反応することによって起こります。この電気分解が行われるときの液体が電解質です。電解質が金属に触れると、金属の電子が電解質に奪われて金属が溶けます。これが錆の原因です。原理的模式図を**図4.1**に示します。

このような錆が発生しないように、酸化物の薄い皮膜を作って表面を保護します。これは不動態皮膜と呼ばれ、ステンレス鋼が錆び難いといわれるのはこの現象を利用しているからです。鋼にクロム（Cr）を添加すると、鋼の表面にクロム・鉄合金の不動態皮膜ができ、耐食性が大幅に向上します。この不動態皮膜を利用して、耐食性に優れたステンレス鋼が使用されます。

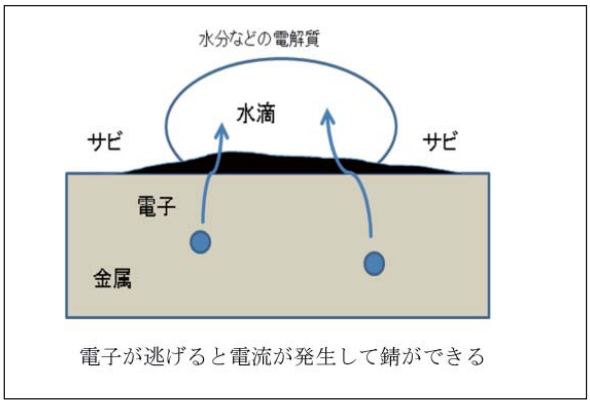


図4.1 錆の生成模式図

ステンレス鋼には、さまざまな鋼種があります。よく使われる通称18-8ステンレスは、18質量％のCrと8質量％のニッケル（Ni）を添加したもので、JIS（日本工業規格）ではSUS304と表記されます。

ADS機器は、主体となる構造金属にステンレス鋼を用いています。ステンレス鋼は、鉄と比べて錆び難く、見た目も綺麗で清浄感、清潔感があります。食品、医薬、医療、半導体産業で広く採用されているので、このような分野へADS機器が採用されても違和感は少ないですが、幾分は高価となります。現在開発されているADS機器では、ステンレス鋼のほか、セラミックス、工業用プラスチックを使用したり、金属の表面に特殊な処理をしたりすることによって、金属をコーティングし錆が発生しないように工夫しています。

4.3 機械の潤滑は？

「ミシン」の油差しはADSではどのように

防錆技術のほかに、もう一つの重要な知識として「潤滑」があります。水は、油のような粘性がないため、ADS機器の中で互いに向き合って動く部分があると、その部分が擦れあってどちらかに傷が付き、次第に摩耗して動きに滑らかさがなくなってしまいます。

家庭で裁縫の時に使う「ミシン」ですが、このミシンを購入すると必ず付属として「油差し」が付いてきます。時間が経つにつれて油が切れ、やはり動きに渋さが出てきて上手に裁縫ができなくなります。これは動く部分と固定部分の狭い隙間にあっ

た油の膜が切れ、互いに接触するためです。「油差し」で油をさすとミシンは再びスムーズに動きます。自転車でも、時々回転部分などに油をさすのはこのような目的からです。

それでは油の代わりに「水」を使った場合はどうなるでしょうか。狭い隙間での水の膜は油の膜より薄く、切れ易く、機械はすぐに摩擦で動かなくなります。水は油に比べて粘性が小さいため、狭い隙間部に留まりにくく、蒸発して条件をさらに悪くします。そのためADS機器では、特別な構造や材料の組合せに工夫が必要になります。

第一に、相対的に動く部分や二面間で互いに接触しないような構造が必要です。それが「静圧軸受」と呼ばれる構造です。原理図を**図4.2**に示します。相対する二面の一方に小さい孔（絞り）を設け、ここから圧力水を供給します。するとその圧力によって二面間に力が発生し、上部の荷重を支えます。この仕組みはADSのような粘性の非常に小さい精密機器には有効な基本技術です。

第二の方法として、互いにすべり易い材料の組合せが考えられます。同じ金属同士の組合せは、直ぐに摩擦・摩耗が発生してしまい、摺動部材として適さないことが長年の経験から常識となっています。互いに異なる材料の組合せが必要です。水圧機器には相当の力が作用するため、併せて強度と剛性も考慮しなくてはなりません。セラミックスは、圧縮には強いものの引張には弱いことから、ほとんど使用されません。現状での構造材料はステンレス鋼が基本です。ステンレス鋼の表面に特殊処理をしたり、樹脂を金属と一体成型したりする方法が採られています。樹脂の中ではPEEK（ポリ・エーテル・エーテル・ケトン）と呼ばれている材料が最も多く使用されています。

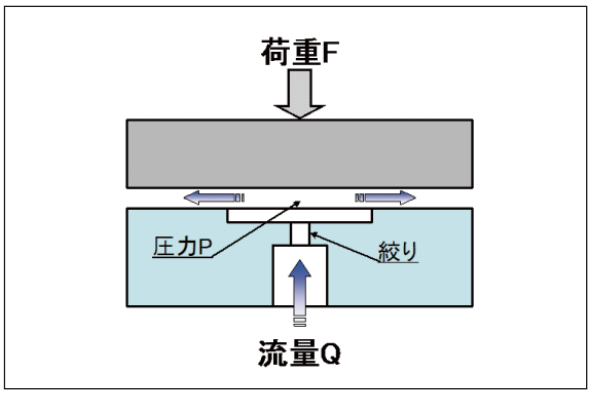


図4.2　静圧軸受の基本原理

5．ADS が要求されるのは こんな理由

産業機械の動力源としては電動、油圧、空気圧が一般的です。

① 電動は一番よく知られた機械の駆動方式です。コンピュータとの接続も容易で、取扱いが便利です。

② 油圧は小さくても大きな力を出せます。飛行機や建設機械、産業車両などに搭載されています。

③ 空気圧は工場内の空気源を利用できるので、簡単な機械の駆動を簡便に、低コストで利用できます。

ここで再び、第8節にジャンプして、食品加工機械と半導体関連機械へのADSの応用について見てみましょう。なぜ、それらの分野でADSが適するのでしょうか。

表5.1は、食品、半導体それぞれの分野で、電動、油圧、空気圧を使用した場合のそれぞれの課題を整理したものです。すなわち、水圧（ADS）を採用する主な理由を意味しています。

食品では、衛生が絶対条件です。滅菌、殺菌、消毒などの作業が重要です。つまり洗浄の容易な機械であることが望ましいのです。空気圧は、一般的に力が弱く、エネルギーの消費効率が比較的良くないため、省エネルギーの点で課題があります。

半導体関連では、電動では力が弱く、直線運動の必要な時には、回転を直線運動にするための他の機械要素が必要となり、機械の大形化を招きます。油圧では油漏れによる周囲の汚れが発生しやすく、温度変化によって油の粘性が変化して、製品の完成度の繰返し精度に影響を及ぼします。こんな時、ADSが課題を解決してくれます。

表5.1　食品と半導体関連機械に対する各駆動方式の課題（水圧（ADS）採用の主たる理由）

分野／計画／それぞれの課題	食品加工機械（2MPa）	半導体関連機械（14MPa）
	電動・油圧・空圧の３種混合	油圧・電動のどちらか
電　動	●衛生上、洗浄の際、分解などの作業にコストが発生 ●洗浄等による電動モータの漏電、損傷 ●小型化の限界、駆動源の統一 ●駆動源を装置の上部に設置（洗浄の際に水を避ける） ●防水・防滴・防塵（電気規格の規制：IP 規格…）	●大型化（コンパクト性に欠ける） ●直圧式に不向き（ボールねじなどを採用、寿命） ●ボールねじ、リンク機構の組合せで制御精度が低下
油　圧	●油漏れ対策 ●洗浄のため、加工作業と分離設計（電動と同様） ●衛生上適さない（製品イメージの低下） ●消防法、安全管理者、保険の規制	●クリーン性に欠ける（クリーンルームに設置） ●漏れに対するリスク（対策にプロセスを停止できない） ●油温変変化が再現性、制御精度に影響（水の粘性温度依存性が極めて小さい）
空気圧	●大型化 ●低いエネルギー効率 ●オイルミスト・消音対策	

6．ADS はこんな仕組みで動く

水圧機器の、錆びやすい、粘性が小さいので漏れやすい、そして擦れ合う部分が傷みやすいなど、油圧機器と異なる点に注目してその仕組みを説明します。

6.1　ポンプとモータの構造

ポンプとは高圧水を作り出す機器であり、モータはその高圧水の流体エネルギーを受けて回転機能を生み出す機器です。

図6.1と**図6.2**は、それぞれ水圧ポンプの構造、水圧モータの構造を模式的に表した動作原理図です。水圧機器の基本構造は油圧機器と同様ですが、動作を理解するためにここに示します。

図6.1において、ポンプは軸を原動機（ここでは電動機）に接続（左側）して回転させると、図の右側の吸込み口から水を吸い込んで高圧水を出します。②のシリンダブロック内には数本の穴が軸と平行に設けられています。

穴には、それぞれピストン①が挿入されています。ピストンはある角度をもった斜板③の上で、

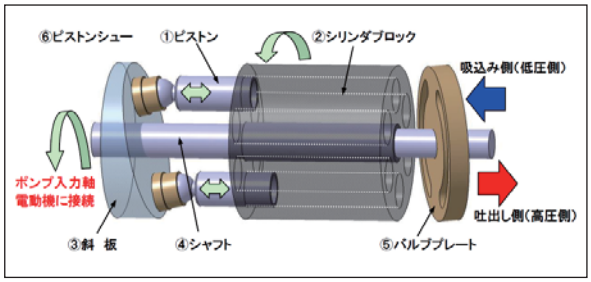


図6.1　水圧ポンプの動作原理図

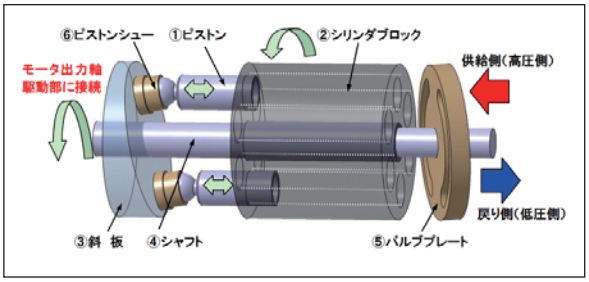


図6.2　水圧モータの動作原理図

シリンダブロックの回転とともに先端部が斜板の上で滑りながら回転します。ピストンが斜板に沿って、図の下から上へ回転する時に水を吸い込み、上から下へ回転する時に水が高圧となって、吐出し口から供給されます。**図6.2**のモータはポンプの作用と全く逆の動作を行います。ポンプによって吐き出された高圧水は、モータの図中のピストンに作用します。その力はピストンの反対側にあるピストンシュー⑥に伝達されます。その力によってピストンシューは斜板上で回転力を発生し、駆動軸(モータ出力軸)を回転させます。

このような一連の動作を、「水」と「油」とを比較して粘性の著しく異なる場合にどのような仕組みとなっているか簡単に触れます。**図6.3**にポンプとモータの共通する構造断面を示します。図中、4か所に摺動部が記述されています。①スリッパ(ピストンシュー)－斜板　静圧軸受、②ピストン－シリンダブロック摺動部、③シリンダブロック－ケーシング摺動部、④ポートプレート－シリンダブロック摺動部。これらの摺動部は互いに金属とプラスチックの組合せとなっており、薄い水膜の基で摩耗を最小限に留めています。**図4.2**に示した「静圧軸受」と「単純なすべり軸受」のいずれも面接触で構成されています。

6.2 制御弁の構造

図6.4に、ADSにおいて「水」の流れ方向を制御する、方向切換弁の構造断面を模式的に示します。高圧供給側Pに、先に説明した水圧ポンプから高圧水が供給されます。記号A,Bのポートは駆動される機械装置内のADS機器に接続されます。直線運動の場合は水圧シリンダ、回転運動の場合には水圧モータに接続されます。仕事を終えた水は排水口Tから貯水タンクへ戻ります。高圧水の流れは、糸巻き状の「スプール」と呼ばれる部品が左右に動くことによって、スプールの溝と弁本体の円筒状の孔にある溝とで形成される開口部を通過して、AやBに流れて機械を動かします。

a)図はスプールが左右どちらにも動いていないので、高圧水はブロックされて、水圧シリンダや水圧モータは動きません。しかし、b)図のようにスプールが左に動くと、高圧水はPからAに流れ、例えば、シリンダに流れ込むとシリンダは直進します。反対にスプールが右に動くとPはBに接続され、シリンダは逆方向に動きます。このようにスプールが左右に動くことによって、機械の運転は前進、後進、正転、逆転等の動作を高圧水の力で行います。

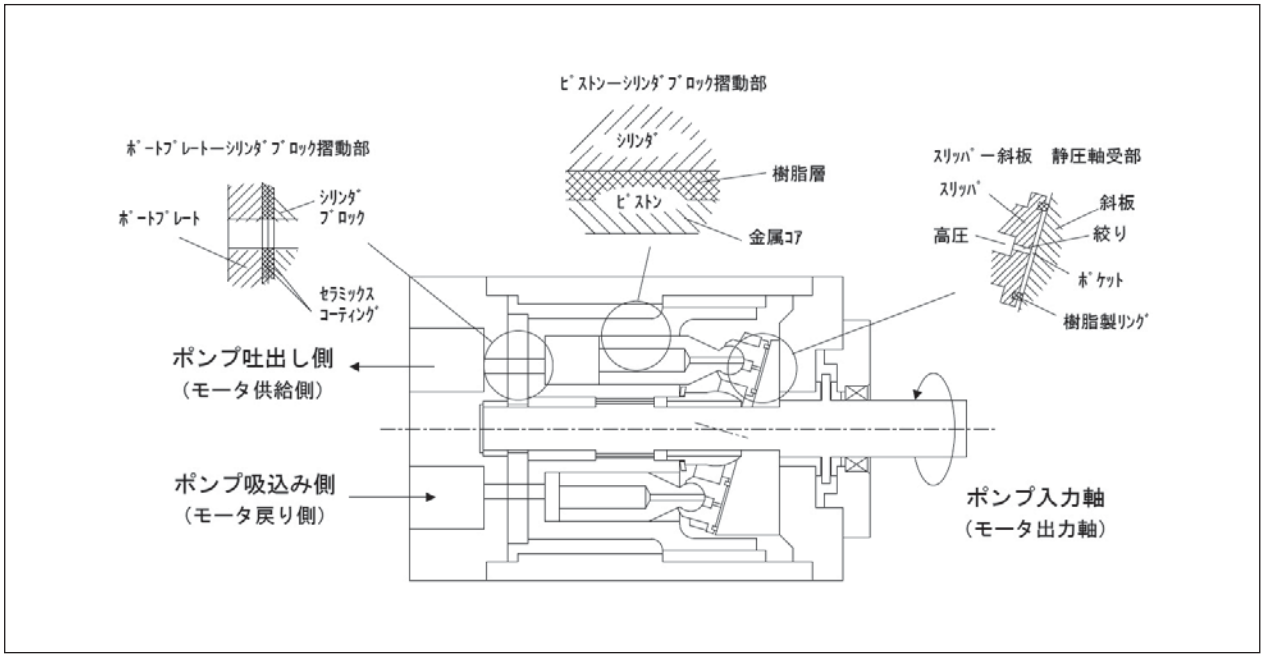


図6.3　水圧ポンプ、モータの共通構造模式図

このスプールと呼ばれる部品を「いかにしてスムーズに動かすことができるか」によって、この方向切換弁機能の善し悪しが決まります。

重要な部品である「スプール」は、油圧の場合には数ミクロンメートルという狭い隙間の中を油の粘性を生かして、非常に滑らかに動きます。しかし、「水」では、粘性が小さいので油圧機器よりもさらに隙間を狭くしないと、水の漏れる量が大きくなって、シリンダやモータに流れて行く量が減って効率が低下します。ADSの場合は、その隙間をもっと狭くしなければなりませんが、狭くすると今度はスプールが周囲の壁と接触して、滑らかに動きません。そこで弁の場合もポンプやモータと同様、スプールを静圧軸受作用で流体により支えて、周囲の壁と接触しにくいように工夫されています。図中スプールの両端に静圧軸受が設けられています。しかし、これには非常に高度な工作技術が必要です。

以上、ポンプ、モータ、弁などのADS機器には水の特質を配慮した構造や材料の選定、高度の表面処理技術や工作加工技術を駆使しているのです。

6.3 ADS 機器の組合せ

先に、ポンプ、シリンダ、切換弁の基本構造を説明しました。

機器の組合せによって機械を動かす方法は、油圧や空気圧と同様なので詳しい記述はしませんが、**図6.5**に全体を理解するための最も基本的な回路を示します。

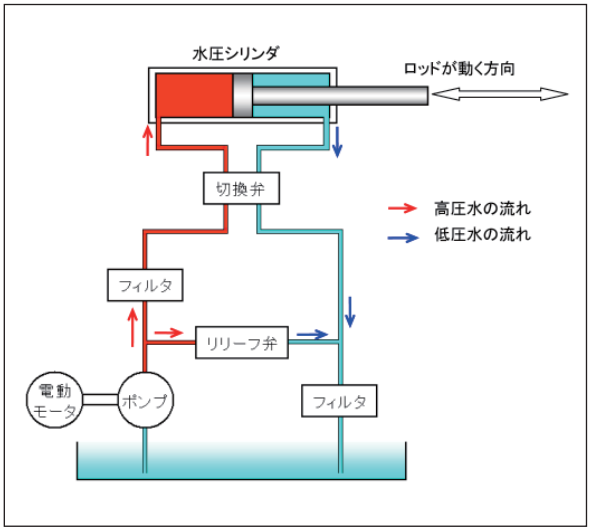


図6.5　ADS回路図

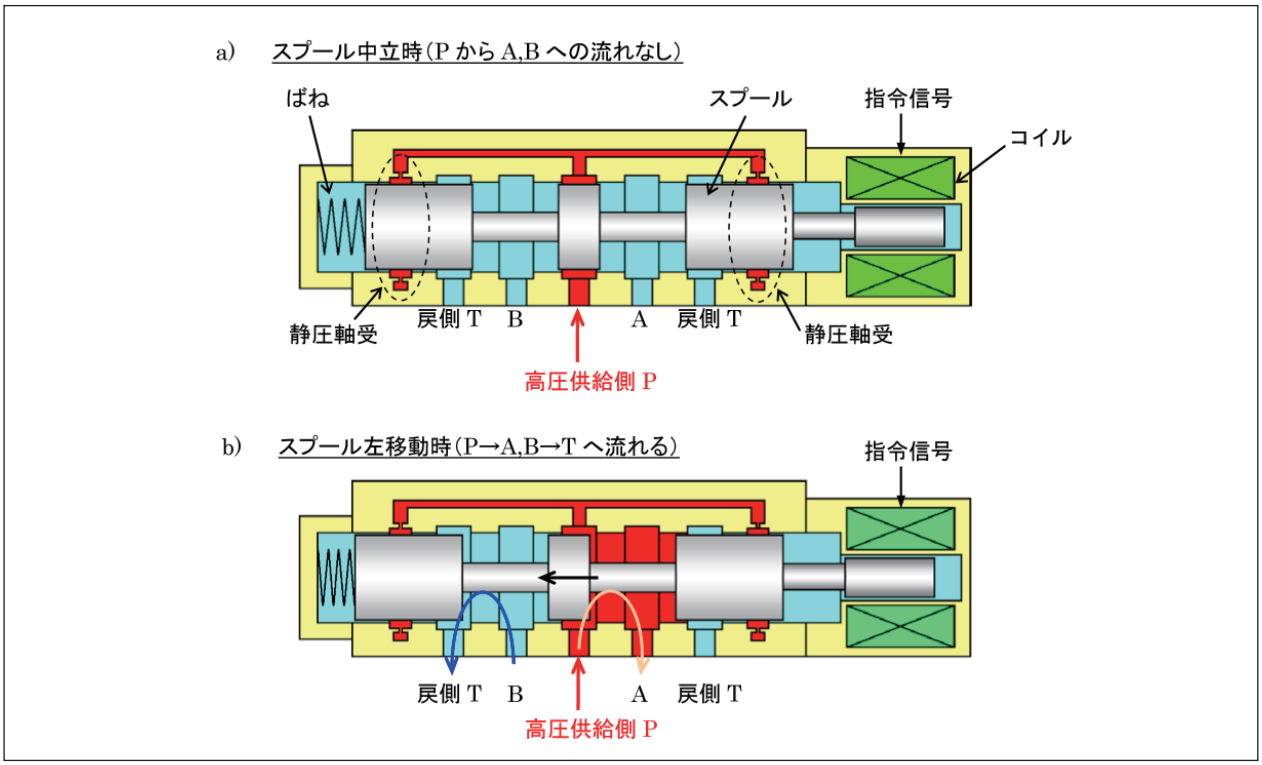


図6.4　ソレノイド比例制御切換弁の構造

図6.5の左下のポンプを、電動機などの原動機によって駆動して高圧水を供給します。流体のごみを除去するためにフィルタを通して、先に説明した切換弁に供給されます。高圧水がシリンダの左の部屋に流入するとロッドは右へ作動します。左へ作動させるためには、先に説明した切換弁のスプールを反対へ移動させることによって、流体をシリンダの右の部屋に供給すればよいのです。ポンプからの流体圧力はリリーフ弁と呼ばれる弁で一定に調整されます。回転運動が必要な場合には、シリンダの代わりに水圧モータを設置します。直線運動、回転運動を目的によって組み合わせ、多くの機械の自動化に貢献しています。さらに、一歩進んでIT技術を使い、インテリジェントなロボティクスの構築が可能となります。

6.4 インテリジェントな ADS

図6.6に、これまで記述したADS機器を組み合わせ、さらにIT技術を使うことによって構成した一例を模式的に示します。基本的な回路構成は**図6.5**と同様ですが、ここでは水圧シリンダ2本と水圧モータ1個を組み合わせたロボティクスを構成しました。切換弁は、**図6.4**のような簡単な構造ではなく「水圧サーボ弁」を使用します。サーボ弁は、高度な機能と「水」の特質を配慮した構造を有しています。

サーボ弁の基本断面構造を**図6.7**に示します。この弁は、次の三つの重要な機能の集合体です。

① トルクモータと呼ばれ、ソレノイドと永久磁石を持ち、入力電気信号でフラッパを駆動する部分

② ノズルとフラッパとからなり、スプール両端面と連通しているノズル内圧力はフラッパに応じて変位することから、スプールの動きを制御する部分

③ スプールの動きによって高圧水の流れ方向と流量を微妙に制御する部分

スプールは、**図6.4**に示した切換弁と同様、静圧軸受構造となっており、スムーズに動くことができます。サーボ弁は、切換弁と比べ重要な点で異なっています。サーボ弁では、静圧軸受で利用された「水」は単純に排出されることはありません。スプールを本体から浮上させた後、さらにノズル部に流れます。この流体は、ノズル部ではスプールの動作に重要な圧力を制御するために再利用されます。PCからの制御出力信号は、制御弁の入力

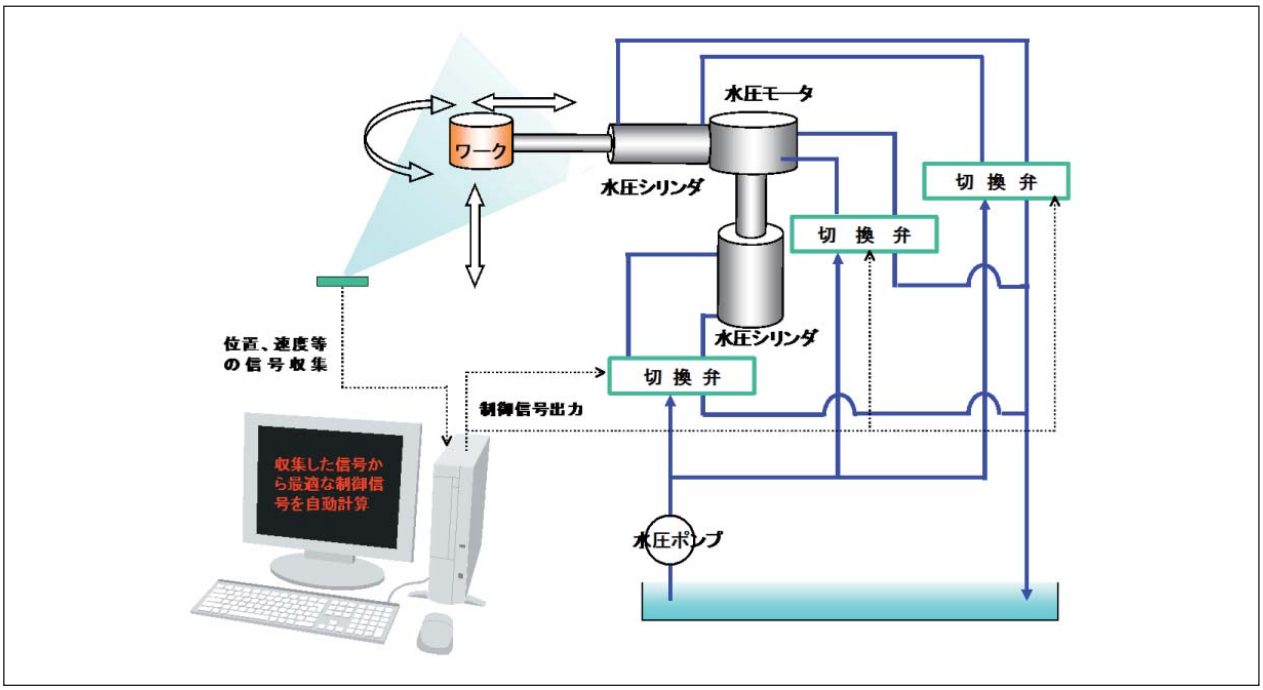


図6.6 ADSロボティクスの概念構築概要

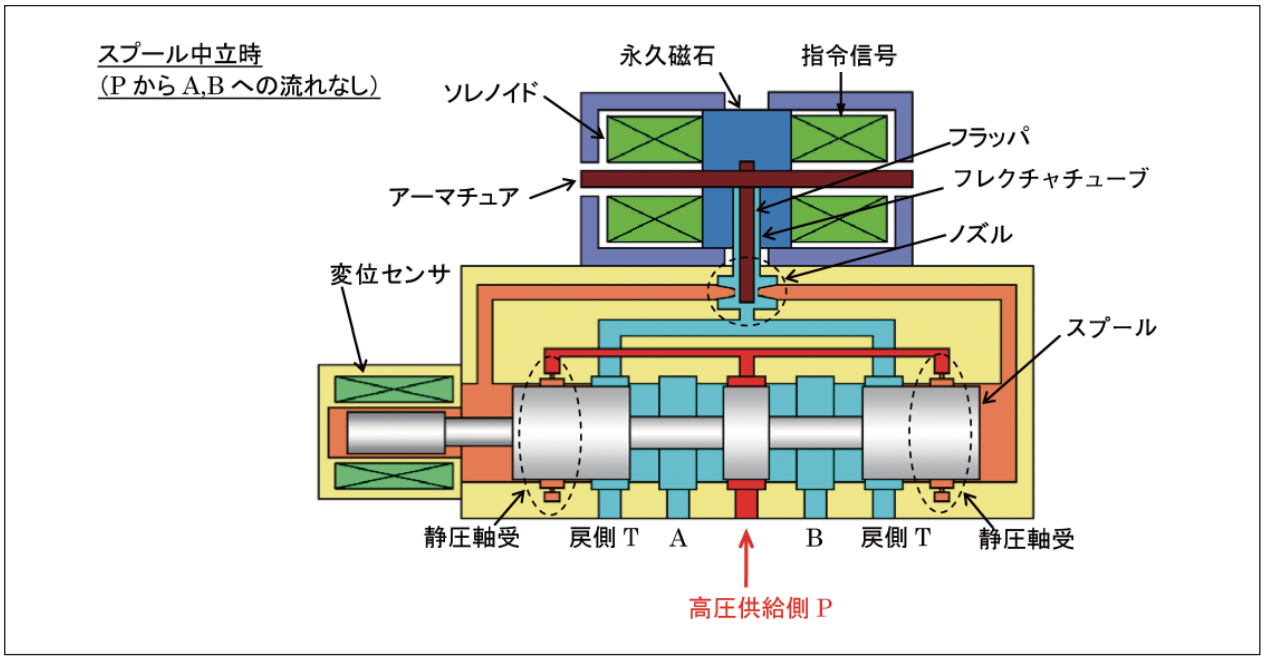


図6.7　水圧サーボ弁の構造

信号としてトルクモータに入力され、ソレノイドの磁力と永久磁石の磁力によってアーマチュアの傾きが調整され、フラッパを左右に駆動します。制御弁の入力信号は、実際の動きの指令値と目標とする理想の値をPCによって算出し、その差を指令値としてトルクモータに入力します。

この水圧サーボ弁の構造は、油圧サーボ弁と基本的に類似していますが、「水」の物性値を配慮した構造となっているところが異なる点です。

応用例の節で半導体精密成型プレスを説明していますが、このプレスの制御には「ADSサーボ弁」が採用されています。この種の高度制御に利用され、実機に搭載されて現在も現場で動いた例は、世界でこの機械が初めてです。

7．ADS の応用分野を眺めてみよう—ADS 市場マップ

液圧による機械や装置の駆動システムは、1800年代に水圧から始まり、1900年代になって油圧が生まれました。そして今、高度化した設計技術、材料･表面処理技術、加工技術、シール技術を付加して新・水圧駆動技術（ADS）が新しい応用分野を拡大しています。それでは、市場はどこまで拡がって行くのでしょうか。

7.1　市場マップ

ADSの大きな特長の一つは、クリーンな環境での使用に適しているということです。クリーンに対する市場の要求度を横軸に、システムの圧力水準を縦軸にとって、**図7.1**のような市場マップを作りました。ここでは既に駆動方式として普及している油圧、電動、空気圧との比較をしています。ADSすなわち水圧駆動の領域は、超低圧の水道配管網圧力駆動市場や低圧から中圧に至るSt-ADS、Uni-ADS及びADS-Robo.市場などに分類できます。

7.2　ADS ならではの応用

St（スチームタービン）-ADSは、工場内で排気される熱や余剰蒸気を利用してタービンを回転させ、タービンに直結した水圧ポンプによって高圧水を発生させて駆動源とします。本格的に圧力エネルギーを利用する領域では、産業用ロボット装

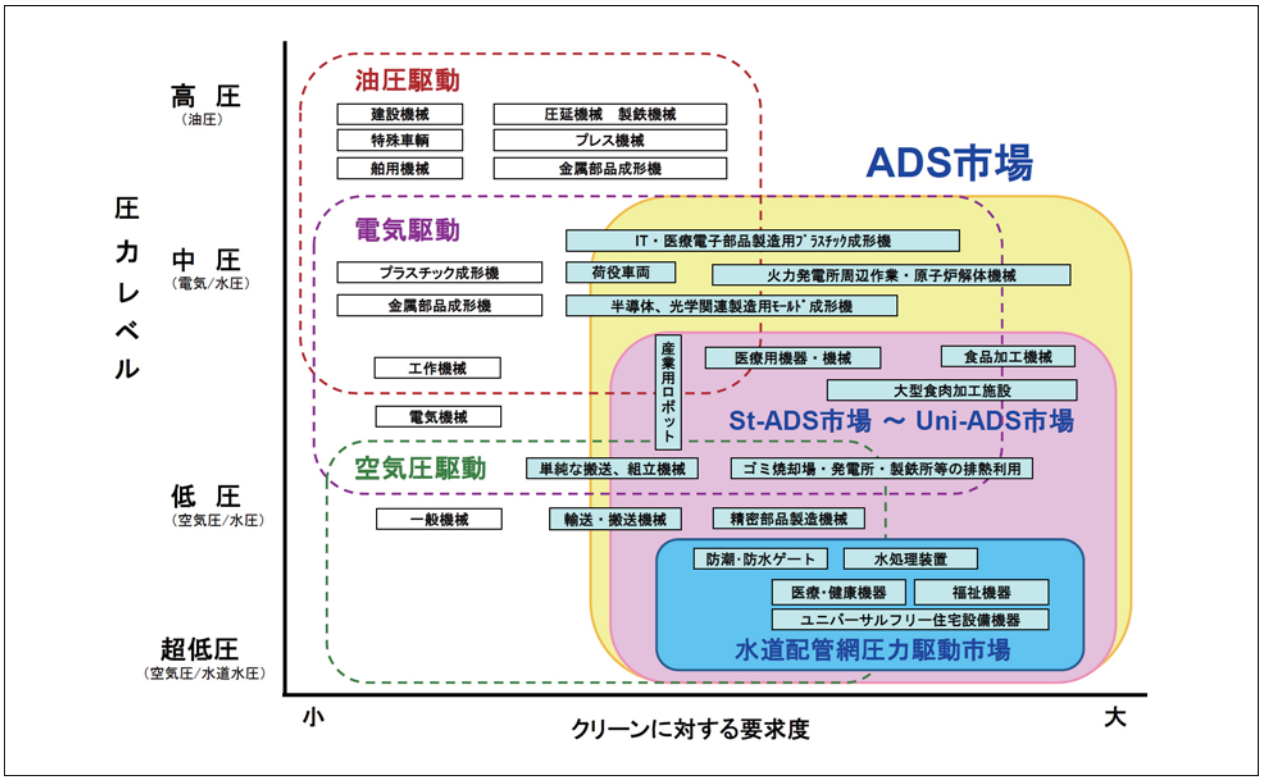


図7.1　クリーンに対する要求を軸とした市場マップ

置や食品･食肉機械などにも拡がります。

Uni（ユニバーサル）-ADSは、インフラの整った水道配管網圧力をエネルギー源として使用する超低圧領域から、必要に応じて増圧装置により圧力を昇圧して使う低圧域までを指します。防水ゲート、住宅設備機器、医療･福祉機器などです。

ADS- Robo.（ロボティクス）は、産業用ロボット装置や工場内の搬送組立機械、輸送機械などの複雑な動きをする機械･装置の水圧駆動を指します。

ここでは、これらの”水環境”といわれる分野から、中圧領域の産業用装置までの応用分野を包含してADS市場と呼ぶことにします。

8．ADSはこんなところで使われる―ADS応用事例

8.1　食品機械分野のADS

食卓で日常的に見る鶏肉、豚肉などの食肉の解体・加工工程、あるいはハムやロース肉をスライスする食肉スライサーにはADSの適用が拡がっています。食品機械分野では、衛生的でかつ高い安全性が要求されます。従来は人手による作業に依存していましたが、ADSを適用して、全洗浄が可能な安全で信頼性の高い自動化機械が実現できました。

8.1.1　食品加工機械と周辺装置

食品の安心・安全は近年の大きな関心事です。特に、衛生面の「食の対応」は人間が生活する上で十分に注意を払わねばなりません。輸入食品の安全からも、今や食の安全・衛生は必須です。そのため、食の製造工程における殺菌・滅菌、そして菌を持ち込まないなどの衛生対応が必要なのです。ADSの採用は食品加工機械の丸洗い洗浄を可能にします。使う立場にとって、使いやすい機械が設定できます。

機械といえば、ほとんど全てといってよいほど油を使って部品の錆び止めや潤滑を行い、スムー

ズに動かしています。一方、ADSには一切「油成分」は一切使われません。食品加工機械を見たことがあるでしょうか。機械自身の本体素材にはステンレスを使用しますので、本体そのものは清潔です。

ADSを適用した周辺装置例を**図8.1**に示します。左図は水中のベルトコンベアであり、右下隅に設置した水圧モータがベルトを駆動します。水圧モータは、ホースによって送られる水圧の力で回転します。右図は、コンベアで野菜を洗浄しながら搬送している状況です。2008年4月フルードパワー国際見本市での展示が、テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」の「トレンドたまご」のコーナーで紹介されました。

8.1.2 鶏肉・豚肉処理装置

鶏胸肉自動脱骨機

鶏の上半身を胸肉、ササミおよびガラに分割加工する装置を**図8.2**に示します。**図8.3**は分割前後の鶏胸肉です。ロボット化した装置により、ばらつきなく1時間に最大900羽の加工が可能となりました。

ADSの活躍する工程は、ターンテーブルを昇降させ回転位置を割り出す部分と、加工（カット）する部分です。ADS機器は丸洗いが可能なため、頻繁に洗浄作業を行うことができ、食品の安全と衛生が十分に確保できるという大きな特徴が得られました。**図8.4**に、カッター部とカッターを回転させる水圧モータの例を示します。

図8.1　水中コンベアと野菜を洗浄・搬送している様子
（2008 年 4 月 23 日：テレビ東京で放映）

図8.2　鶏胸肉自動脱骨機

図8.3　分割前後の鶏胸肉

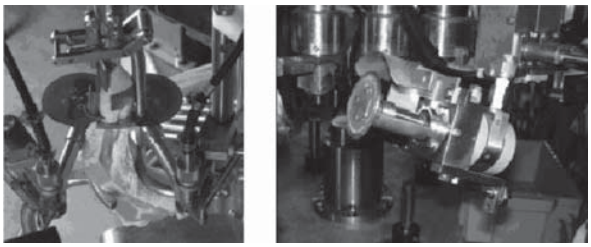


図8.4　カッター部と水圧モータの例

豚肩肉自動脱骨機

豚の肩肉の脱骨作業を自動で行う装置を**図8.5**に示します。骨を把持（はじ）する機構と丸刃物から構成されていて、やはり頻繁な洗浄作業を行います。この装置では、1時間当たり最大450頭の豚肩肉が自動脱骨できるようになりました。

これらの装置は、ADSの適用によって省人化が可能となったばかりでなく、次のような具体的なメリットが得られました。

① 漏電やさび付きが無く耐水性が向上したため、頻繁な洗浄が可能となり、従来、装置各部に取り付けていたカバーが不要となった

② 食品の安全・衛生を管理する手法HACCP*に対応可能となり、食品に対する衛生管理面が向上した

③ 小形・高出力で機器の配置が容易となり、また駆動源が一元化できたため、メンテナンスが簡単になった

8.1.3　食肉スライサー

ハムやロース肉をスライスする機械を食肉スライサーといいます。ここにもADSが適用され、2011年に開催された第23回フルードパワー国際見本市（IFPEX2011）に試作機が出展されました。**図8.6**は食肉スライサー実演機の外観です。

この装置は、水圧モータで駆動する丸刃によって毎分80枚スライスします。厚みは水圧シリンダで設定します。スライスするための駆動部は、筐体を含めて質量が約100 kgあります。そのスライダ機構部を水平往復動作させるためのシリンダ、比例制御弁を使用して制御します。

図8.7に水圧駆動式食肉スライサーの概略図を示します。また、参考として**図8.8**にスライダ機構部の水圧回路と制御方法の概念図を示します。

スライダ機構部の制御方法は、フィードバック制御といわれる方法で、シリンダの変位を制御パラメータとし入力信号と比較して修正を行います。正弦波状の目標波形に対して、振幅と周波数は肉

*）Hazard Analysis Critical Control Point（危害分析重要管理点）：食品製造過程で感染症や食中毒の原因となる細菌の危害から防御するねらい

図8.5　豚肩肉自動脱骨機

図8.6　食肉スライサー展示実演機の外観

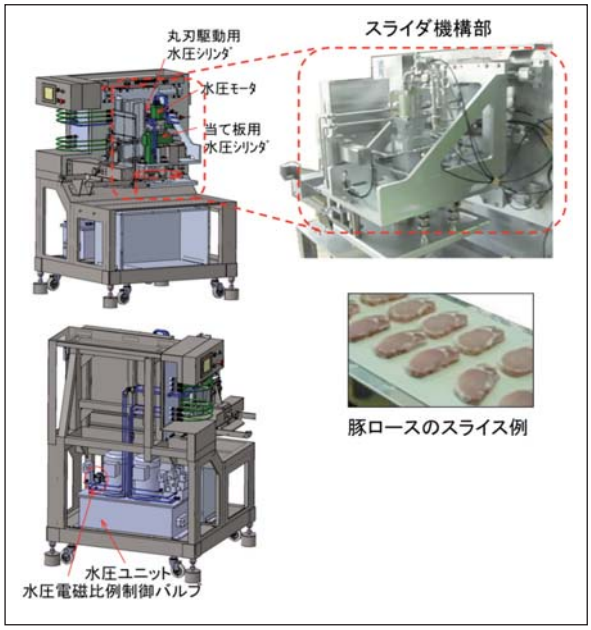


図8.7　水圧式駆動食肉スライサーの概略図

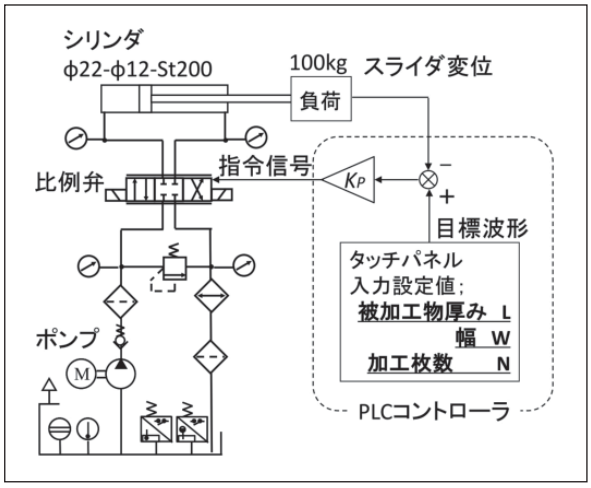


図8.8　水圧回路と制御方法

片の厚みと幅及び加工枚数から自動算出するため、任意の寸法の肉片に合わせて最適なストロークで加工ができます。ADS化することにより、従来できなかったストロークの変更が可能になり、生産性が向上しました。

水圧電磁比例制御弁について

図8.9に、食肉スライサーの駆動部制御に用いる水圧電磁比例制御弁の構造断面を示します。この弁は、**図6.4**に示したソレノイド比例制御切換弁を高精度・高性能化したものです。これにより食肉スライサーの高度な制御が初めて可能となりました。

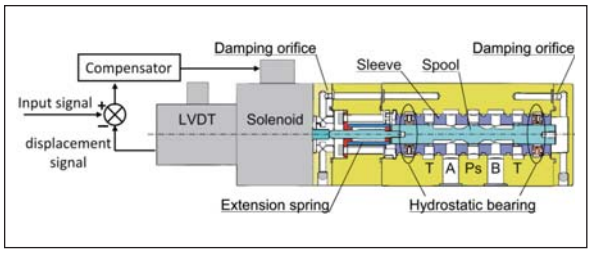


図8.9　水圧電磁比例制御弁の構造

8.2 生産機械分野の ADS

8.2.1半導体関連産業

常にクリーンな場が要求される半導体関連産業。IT技術はナノレベルへの挑戦、つまりゴミとの戦いです。ADSは、作動流体に「水道水」「純水」レベルの流体を採用しているのでゴミや汚れとは無縁です。ここでの応用例は、半導体ICチップ生産ラインに使われています。ICチップをウエハにマウントした後、ウエハ上に埋め込まれたチップを保護するため薄膜を精密プレスで成型しています。

図8.10に、このプレス機械にADSを組み込んだ様子を模式的に示します。図の下部に、ウエハに保護膜を生成した様子を示します。このウエハを小さい四角形状のチップ（ウエハレベルチップサイズ）にカットし、ITチップができあがります。このような作業はクリーンルーム内で行われます。

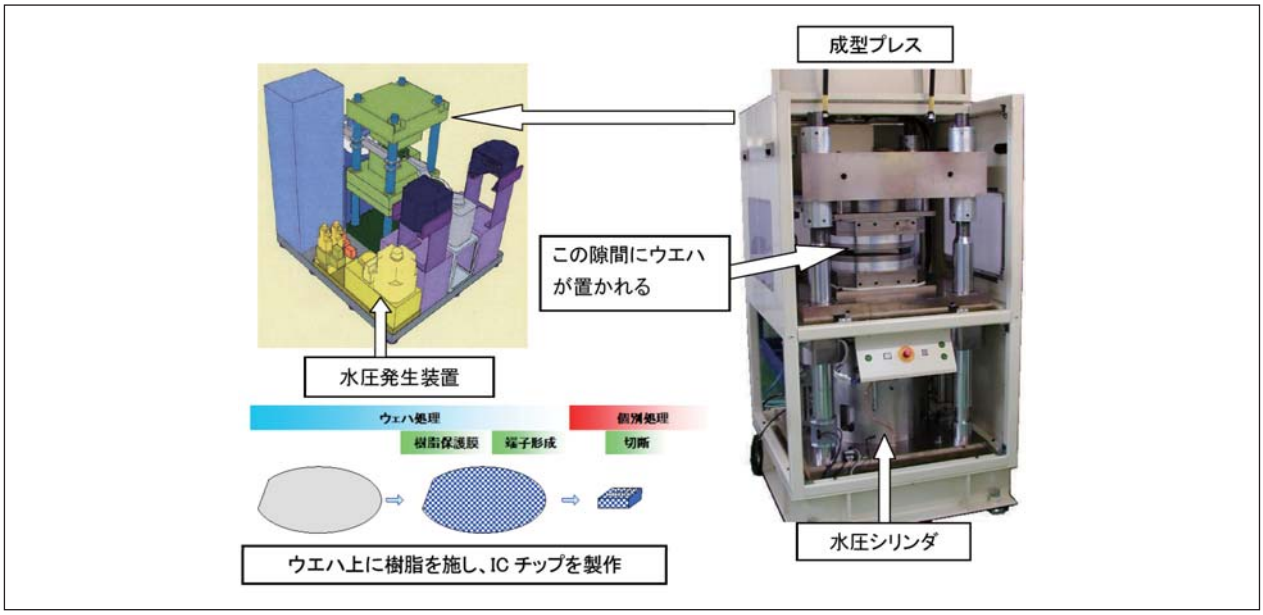


図8.10　半導体精密成型プレス装置

8.2.2 工作機械への応用

皆さんはきっと工作機械を見たことがあると思います。その工作機械にADSを応用していると聞くと、きっと奇異に感じるかもしれません。工作機械は、精密成型プレスと同様、食品機械のような安全・衛生のための水洗いが必要なわけでもないだろうし、特に、鉄系の金属などを加工する場合、漏れたら錆の問題も出るだろうし……。

では、どの部分に使っているのでしょう。次に説明するいくつかの開発機器のメリットを読めば、目からうろこ、となること請け合いです。

ADS高精度ドライブを利用した超精密工作機械の開発

超精密工作機械の用途と要求性能を、三つにまとめました。

①何を作る？：各種レンズ用金型やシリコンウエハなどの高精度製品

②要求精度？：数nm～数十nmの加工精度

③何が必要？：加工装置の高い運動精度・高い剛性・高い熱的安定性

ADSを応用した場合の利点についても、三つの簡潔な言葉で示します。

(1) 低粘度、(2) 高い熱伝導率(対空気、油)、(3) クリーン(半導体製造装置)

代表的な応用例として、やはり三つ挙げてみましょう。

第一番目は、スピンドル、簡単にいえば主軸のことです。これにADSを応用したウォータドライブスピンドル（**図8.11**）は、水静圧軸受で支持された回転軸内部に流路が構成されます。これに20L/min程度の水を流すことにより、10,000rpmの高速高精度の回転数で回転します。また、回転軸内部に温度制御された水が流れることから、高い熱的安定性も得られます。

第二番目は、ウォータドライブ小型超精密加工システム（**図8.12**）です。このシステムは、ウォータドライブスピンドルとウォータドライブ直動テーブルを組み合わせた、小型超精密加工システムとして開発されました。この加工装置は、切削による鏡面の創成に利用することが可能です。

第三番目は、ウォータドライブ直動テーブルです（**図8.13**）。超精密工作機械には、高精度な直動テーブルが必要不可欠です。ウォータドライブ直動テーブルは、水静圧軸受で浮上状態にあるテーブルを水圧駆動により非接触に駆動します。特に、駆動力はテーブル重心に作用するため、高い運動精度が得られます。

図8.11　ウォータドライブスピンドル

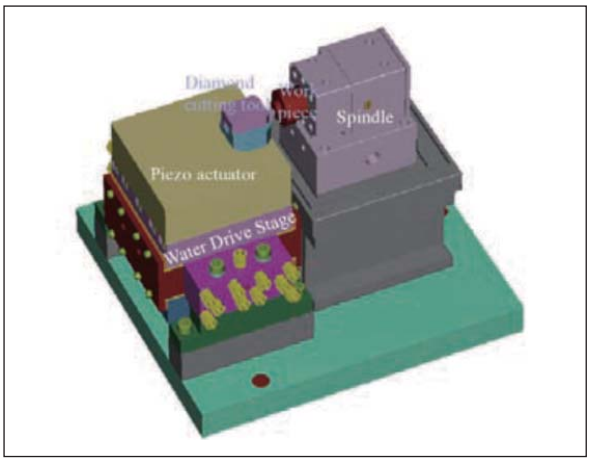


図8.12　ウォータドライブ小型超精密加工システム

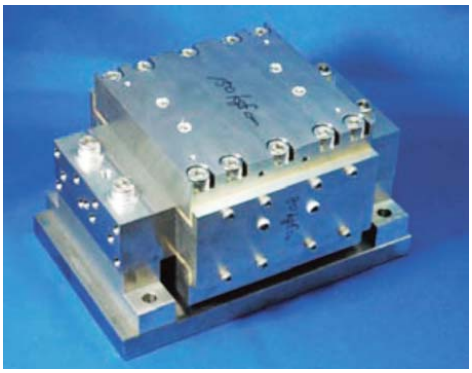


図8.13　ウォータドライブ直動テーブル

8.3 家庭・介護分野のADS

日本の人口構成は、早晩高齢化社会を迎えます。国連のまとめでは、2050年に高齢化のトップは日本（人口の36～37％が65歳以上）となり、2位がドイツ、3位が中国と予測しています。その過程で、10年後の2025年に、高齢者が262万人増、要介護者が171万人増、逆に介護人材は38万人不足となるそうです（厚労省推計）。これが、人手不足の介護を支えるロボット技術に期待が集中する所以です。

私たちの日常生活に目を向けてみましょう。高齢者の快適な生活のためには住宅のバリアフリーが欠かすことはできません。朝夕の洗面、トイレ、台所、入浴 など、“水環境＝水場”といえる中で頻繁に身体を動かします。高齢化による筋力の衰えは、時としてそれらの動作に重荷となってのしかかってきます。高齢者や身体障害者が極力自身で、あるいは最小限の介護により生活するための住宅内生活支援設備には、次の例があります。

①玄関の上りがまちの昇降
②台所シンク、洗面台、戸棚の上下動作
③台所床下収納の昇降
④トイレの便座昇降
⑤風呂の床あるいはバスタブの深さ調整
⑥ホームエレベータ

これらの住宅設備を備えた高齢者･身障者ハウスには、**図7.1**の市場マップの解説で述べた、水道配管網圧力をエネルギー源として使用する超低圧力領域のADSが最適となります。その実現には、ADSを利用した設備機器の開発･商品化のみならず、住宅の構造自体もバリアフリーで、ムーバブルかつスムーズな動線のもとに動けるよう計画する必要があり、住宅メーカとの総合的な取組みが必要となります。ここでは、入浴設備に限定して、家庭用の介護リフト及び大規模な福祉施設を対象とした入浴装置についてADSの応用例を紹介します。

図8.14はバリアフリーのユニバーサル住宅のイメージ図です。図中、右の写真は化粧台の昇降機能を、水道配管からの圧力をそのまま利用して開発された実用例です（泉工業㈱提供）。

8.3.1 入浴介護用リフトのADS

図8.15に水道水圧で上下動が可能なリフターを家庭の入浴介護用として商品化している例を示します。浴室内の電気工事が不要で、かつ入浴中の感電の心配がないという特長があります。

操作は、手動レバーを開閉することによって行います。水圧シリンダに約0.2MPaの水道水圧をかけて700～800mm上昇させ、所定の高さで停止させてアームを回転させた後、自重により水を放出させて下降させるだけのごく簡単なものです。作動が滑ら

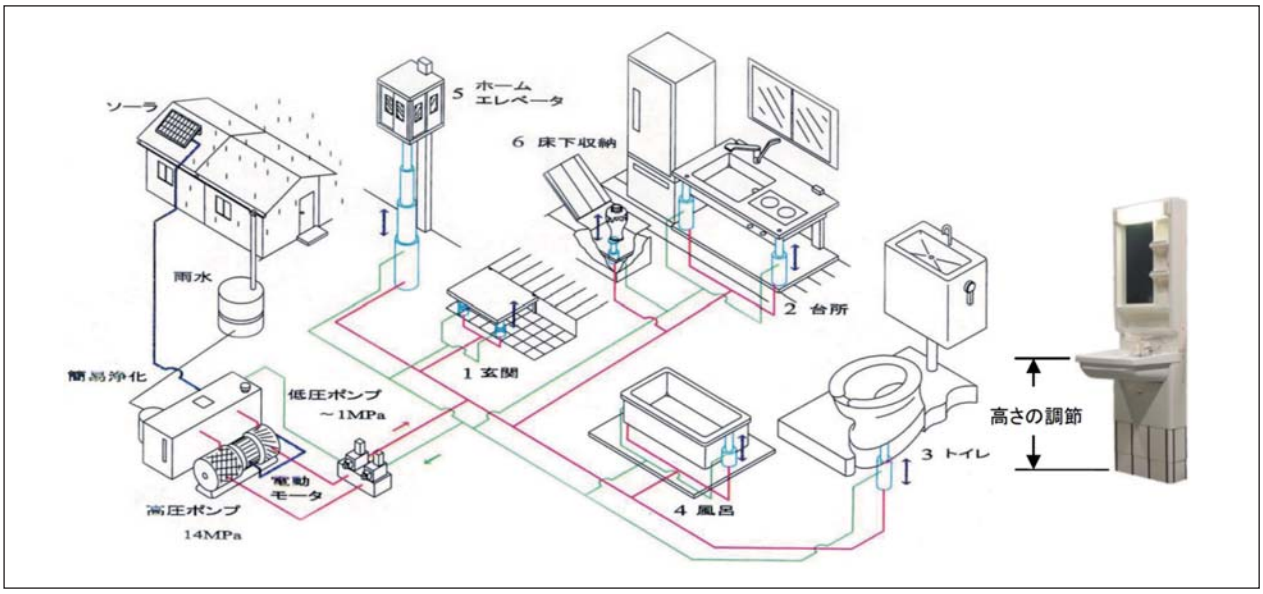


図8.14 ユニバーサル住宅と洗面化粧台

図8.15　入浴介護用水圧リフト

図8.16　特殊入浴装置

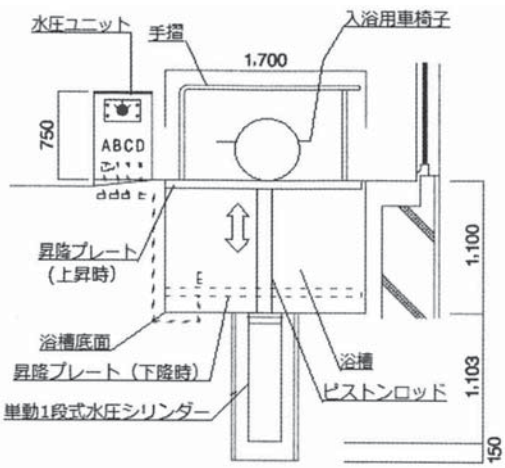


図8.17　特殊入浴装置の構造と概略寸法

かで静かなことから、利用者に不安を与えないという水圧式ならではの特長も有しています。

8.3.2 特殊入浴装置のADS

図8.16の特殊入浴装置は、車椅子に乗ったまま入浴が可能で、比較的大規模の福祉･介護施設用として実用化した例です。一般に、入浴施設内は高温･多湿であり、昇降装置は常に浴槽に浸かっているため、電動方式や油圧方式などは必ずしも適しているとはいえません。この様な環境下ではADSが優位で、水圧シリンダによる上下動により最もシンプルで信頼性の高い構造が実現できます。

この例では、昇降機構に単動式低圧用水圧シリンダを採用しています。入浴（自重降下）･出浴（加圧上昇）の動作は手動切換弁の操作によって行います。図の装置は、最高使用圧力1.5MPa、最低作動圧力1.0MPaの範囲で、ロッド径φ100、125mm、ストローク900mmのシリンダを作動させます。

水圧駆動ではシリンダのサイズの選択により、また圧力を変えることにより、大型ストレッチャーを載せる大形入浴設備も容易に計画できます。

図8.17に特殊入浴装置の構造と概略寸法を示します。単動式低圧用水圧シリンダを採用しているため、次のような特長があります。

- 車いすごとの入浴のため、要介護者の入浴時に介助スタッフの作業負担が少ない
- 単動式機構のため利用者･介助スタッフにとって操作手順が分かりやすい
- ショック防止対策を施しているため昇降時の作動がなめらかで利用者にストレスがない
- タイロッド式水圧シリンダ構造の採用により定期点検作業が容易である

少し専門的になりますが、水圧シリンダは常時水中で使用されるため、ピストンロッドには硬質クロムメッキを施したSUS材を使用します。人が微妙な動きを敏感に感じることに対しては、シリンダの加工精度の向上に加え、低摩擦でスティックスリップを生じないようなシールと、水圧専用樹脂系のウエアリングが使用されています。また、任意の位置で停止・保持する必要があることから、シールにはNBR系のロッドパッキンを使用して密

封性を高めています。

図8.18に水圧シリンダの作動性能や耐久性を確認するための試験装置を示します。

図8.18　水圧シリンダの試験装置

8.4　医療・福祉分野のADS

医療の分野では検査、手術用として様々なアクチュエータやロボットが使用されます。それらには微妙で細かな動きや、再現性、操作性の良さが求められます。ここでは現在、開発過程のものも含めて、水圧フレキシブルアクチュエータを利用したカテーテルと人工筋、及び水圧リニアアクチュエータ利用の手術支援ロボットなどいくつかの応用例を紹介します。

8.4.1　水圧駆動方式能動カテーテル

医療用に用いる柔らかな中空の管をカテーテルといいます。血管や尿管、腹腔などに挿入して、体液の排出、薬液や造影剤の注入点滴、ひいては血管内手術などに使用します。

１系統の水圧を伝搬・作用させるだけで複数の能動関節を制御できる水圧駆動方式能動カテーテルとして、図8.19～図8.20が提案されています。先端にシリコンゴム製ベローズ型アクチュエータを有し、水圧の制御によってアクチュエータへ液体を送り込み、体幹を屈曲させることができます。

水圧の伝搬には生理食塩水が利用でき、体内挿入部には一切の通電型素子を有していないため、万一の破損時にも漏電などの危険性がありません。また、水圧を伝搬するラインが一つだけであるため、関節数を増やしても系が肥大しないといった特長があります。

図8.19　水圧駆動方式能動カテーテル

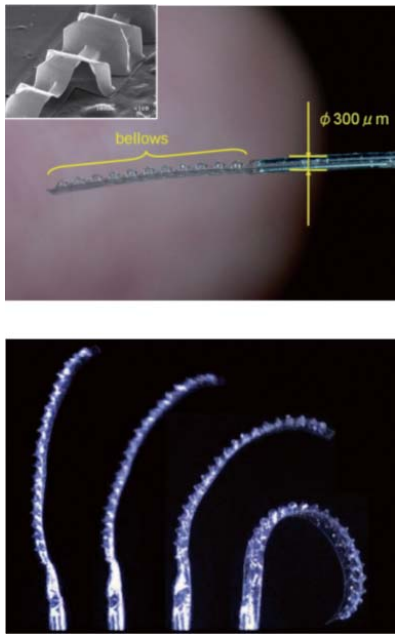


図8.20　薄膜構造利用の水圧駆動カテーテルと0～180度の屈曲実証例

8.4.2　ケブラー繊維強化型人工筋アクチュエータ

対人接触を前提としたロボット用として、軽量で柔らかい人工筋アクチュエータが開発されています。図8.21にその外観を示します。従来型の欠点であったヒステリシスを克服しつつあることや、空気圧と水圧の両駆動方式による駆動時の特性比較結果などが報告されています。水道水圧で駆動できるようになると、駆動源が家庭内に存在することになり利用範囲が大幅に拡大されます。

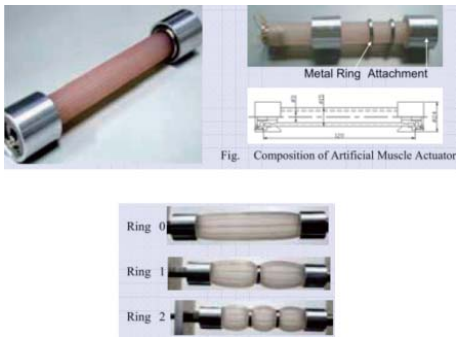


図8.21　ケブラー繊維強化型人工筋アクチュエータ

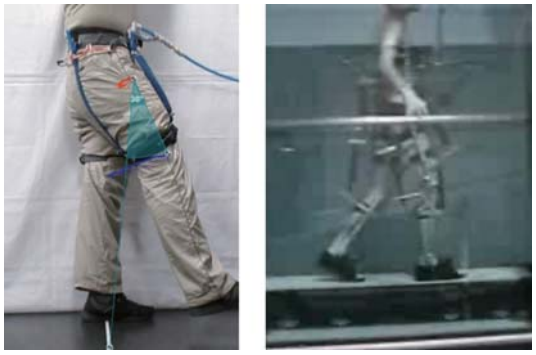


図8.22　歩行訓練補助装具（左：陸上、右：水中）

8.4.3　マッキベン型水圧人工筋

リハビリテーション分野では、ADSの新たな応用の可能性を探るための研究が進められています。この分野では理学療法士の不足が深刻な問題となっていることから、医療分野での工学的支援は必要不可欠となってきています。現状は空気圧でマッキベン型人工筋を駆動するパワーアシスト装置やリハビリ支援機器のリハビリテーション向け研究開発が活発に行われています。

マッキベン型人工筋は、圧縮空気を内圧として作用させると収縮するゴムチューブで、周りをナイロン繊維で覆ったものです。柔軟かつ軽量で低価格という特徴があります。マッキベンの名称は、開発者のJoseph McKibbenに由来しています。

8. 3で述べたように、身近に水道設備がある在宅用のリハビリテーション装具や、水中歩行訓練補助装具（図8.22）への実用化に期待が持たれています。水道配管網圧力駆動では駆動源の騒音や振動が患者に嫌悪感や不快感を与える懸念がなくなり、この点もリハビリ分野では大きなメリットとなります。また、水圧人工筋の使用範囲を拡大するため、人工筋そのものの性能を向上させる研究も進められています。

8.4.4　内視鏡手術支援ロボット

内視鏡手術は、従来、カメラ助手を必要としていましたが、これに代わる手術支援ロボットが開発されています。

図8.23に内視鏡手術支援ロボットの外観を示します。内視鏡カメラの視野角度、遠近などをこまかく調整する必要があり、図8.24に示す水圧駆動型リニアアクチュエータにより調整します。その駆動量は、チューブを通じて清潔野外に設置したシリンダから送られる水量によって制御されます。このため清潔野での漏電の可能性がなく、安全・清潔で軽量・低コストという特長があります。アクチュ

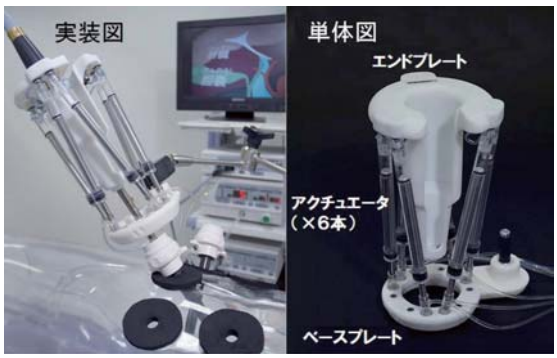


図8.23　内視鏡手術支援ロボット

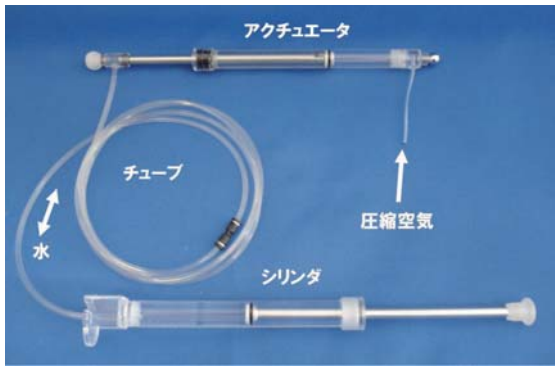


図8.24　水圧駆動型リニアアクチュエータ

エータの仕様は、外径12mm、全長297.5mm、最大収縮量112.5mm（最大収縮時全長185mm）で、医薬品を高精度で患者に投与する注射筒輸液ポンプの機構が応用されています。

参考として**図8.25**にロボット先端のハンドと指部の外観を示します。この例では指部は空気圧駆動の人工筋によって動かされます。

図8.25　ロボットハンドと空気圧駆動の指部

8.5　防災・レスキュー分野のADS

日本では古くから様々な災害を日常的に経験してきましたが、最近の都市部では舗装化、地下の活用増加により従来と異なる様相の水害対策が必要です。また、林立するビル街での火災や地震後の救護活動におけるレスキュー活動でも、高性能の動力機器や自律機器などが必要とされています。

8.5.1　防水板

図8.26は、地下駐車場入口に設置された防水板の外観を示します。近年、異常気象によるゲリラ豪雨や台風、高潮や津波による浸水被害が増えています。防水板は、建物の出入口などに設置して、水の侵入を防ぎ浸水被害を未然に防ぐことができる装置です。

図に示すように、4本の複動式低圧用水圧シリンダに水道の蛇口から水道配管網圧力を供給して防水板を起立･倒伏動作させます。最大の特長は、水道配管網圧力を利用しているため、災害時に停電が発生しても電動方式の場合のような動力源を必要とせずに作動ができることです。仮に、水源が利用できない場合には、手動復帰機構（空気入れ手押しポンプ）が併用できます。

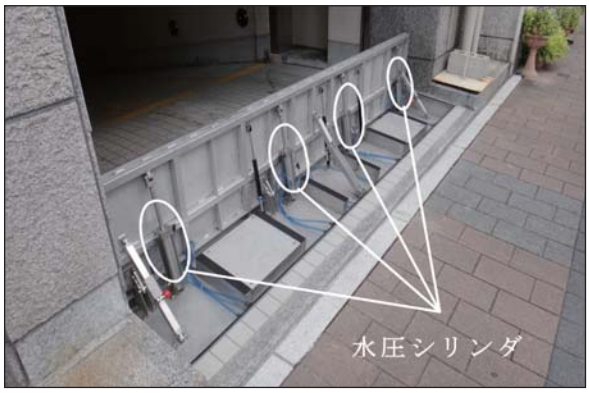


図8.26　防水板の外観

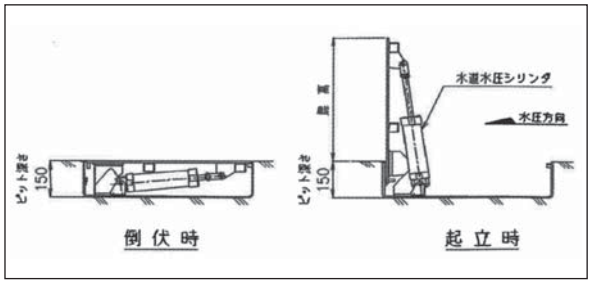


図8.27　防水板の状態図

表8.1　水圧シリンダの仕様

シリンダ構造	複動形片ロッド
作動流体	水道水
定格圧力	1.0 MPa
試験圧力	1.5 MPa
最低作動圧力	0.1 MPa
チューブ内径	63 mm
ロッド径	20 mm
ストローク	170 mm

図8.27に、防水板の倒伏時と起立時の状態図を示します。水圧シリンダは、通常防水板の中に格納されますが、災害時には確実に作動する必要があります。さらに0.1～0.2 MPa程度の低圧で作動できるように、しゅう動抵抗を極限まで小さくした水圧シリンダが使用されています。

表8.1に水圧シリンダの仕様を示します。メンテナンスを容易にするためタイロッド構造を採用しています。

図8.28に回路図を示します。起立･倒伏の切換えはロータリ形切換弁の手動操作によって行います。安全衛生上、装置から水道配管への水の逆流を防ぐため、水道配管から切換弁までの管路途中に逆方向の流れを阻止する逆止弁が挿入されています。

図8.29は、一般家庭に設置された高潮対策自動ゲートの事例です。水道配管網圧力の利用により、維持管理が容易で費用も節約でき、環境に優しく開閉時のゲート走行音が静かという特長があります。

8.5.2 消防自動車

消防自動車には、火災鎮火を目的とする消防自動車と人命救済などを目的とするレスキュー自動車があります。火災放水車は、大量の水を放水するために遠心ポンプを用いています。一方、レスキュー車はハシゴの伸縮や救助のための工具を具備しています。これらの動作は、通常、容積式ポンプの高圧油圧駆動です。海外では、消防自動車は放水用の遠心ポンプと容積式の高圧水供給可能な水圧ポンプを同時に搭載し、レスキュー機能と放水機能を併せ持ち、消火・人命救助を同時に可能としたものがあります。

従来のレスキュー自動車にしても、火災現場での救済活動には「油」よりも「水」の方が安全です。国内では法規で「油圧式」としています。初期の器具の導入の際、水圧式はなかったためです。しかし、徐々に全水圧式自動車が普及されると予測されます。

8.5.3 高圧水駆動カッター ＊p114参照

災害現場での救助活動に活躍するエンジンカッターは、切断時に発生する大量の火花のため可燃ガスのある雰囲気、酸欠現場、水中などでの使用は困難です。そこで東京消防庁、民間企業、大学の共同研究により、高圧水駆動のカッターが開発されています。

図8.30に、高圧水駆動カッターの外観と各部の名称を示します。消防ポンプ車などからの送水圧力1.0～1.5MPa、駆動水量300～450L/minの水圧源を利用して、水圧モータを駆動して切断刃を回転させます。鋼材などの切断時に発生する火花を抑制するため、戻りの水のうち約30～40L/minが冷却水噴射装置から噴射されます。残りの水は排水されますが、消防ホースを結合して、再度、ポンプ車のタンク水へ戻し循環して活用することも可能です。

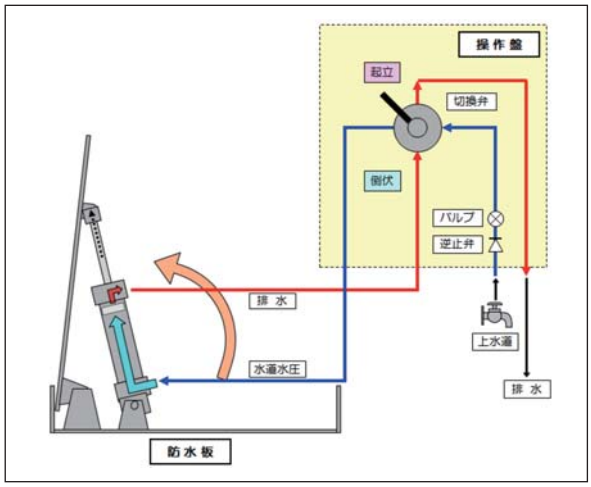


図8.28　防水板の回路図

図8.29　高潮対策自動ゲートの例

図8.30　高圧水駆動カッター

表8.2は、検証実験に使用された高圧水駆動カッターの諸元性能です。

表8.2　高圧水駆動カッターの諸元·性能

項　目	諸元性能
駆動圧範囲	1.0 − 1.5MPa（標準）
駆動水量	300 − 450Q/mi n
冷却水噴射量	30 − 40Q/min
切断刃	ダイヤモンド刃
最大切断速度	44mm/ 秒（鋼板 1.6 mm 時）
本体重量	10.2kgf（切断刃は除く）
長さ×高さ×幅	811 × 376 × 210mm
切断材用途	金属、コンクリート、木材等

＊）8.5.3 資料提供：東京消防庁 平成 22 年消防技術安全所報 47 号

8.5.4 災害救助支援ロボット

地震災害現場における人命救助活動にはレスキューロボットやツールが必要となります。

図8.31は現場で作業空間を確保するための小形ジャッキアップロボットです。研究段階ですが、超高圧水圧シリンダにより最大推力3.4ton、最大ストローク370mmが実現できています。従来のものに比べ操作性・制御性が向上しているため、複数台での協調作業ができるという優れた特徴があります。

図8.32は、ROBODEX 2000展に発表された大形水圧駆動ロボットのコンセプトモデルです。全高2.5m、全幅1.8mで人の近付けない工事現場や災害現場で人の代わりに作業することを想定した遠隔操作自在ロボットで、上半身の動作用駆動部は、環境に配慮して水圧を使用しています。

図8.31　水圧ジャッキアップロボット

図8.32　水圧駆動ロボット

8.6 対放射性環境分野の ADS

近年化石燃料による発電が二酸化炭素排出の視点から問題とされ、火力発電所においては排出の削減のための発電効率向上の努力がなされています。一方、これまで社会的な側面から注目、関心、課題を持たれてきた原子力発電ですが、二酸化炭素排出が極めて少ない発電手段であるとの認識が国内外とも急速に高まっています。特に、ヨーロッパにおいては、デンマーク、ドイツ、イギリスなどこれまで消極的であった国々が政策の転換に至っています。皆さんもテレビを見たり新聞を読んだりしてご存じでしょうか、日本はこの分野において世界で最も優れた技術を保有しています。地震国日本は多くの課題を経験してきました。新潟の刈羽発電所は多くの信頼性に対する策を乗り越えようとしています。これらの技術は世界から注目され、この分野に関連する企業は今後ますます忙しい時期を迎えるでしょう。

特に、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関しては、同年8月に特別措置法が制定され、即日施行されています。この対策は急務であり、かつ我々全員がほぼ永続的に付き合っていかなければならない事態となっています。

そのような社会的背景のもと、効果的で永久的な対策は「技術の革新、向上と長い経験で蓄積された優れた技術の集積」があって初めて実現されます。特に、この分野では安全を第一として、設備性能の高効率化、高寿命化、発電の使用率の向上

などに対する努力が必要です。発電効率向上対応には蒸気タービンの高効率化、長寿命化対応には、炉心等の安全設計を基に、各機器やシステムの常なる安全監視・検査技術の向上、炉心対応においては冷却水ポンプの運転管理、発電上極めて重要な燃料棒の信頼性ある駆動制御等様々な視点からの安全、保守管理が重要な日常の作業となります。発電機能が終了した燃料棒の廃棄処理、発生する多くの放射性廃棄物の処理、発電能力が終了し、寿命を迎えた廃炉作業もあります。

以上説明したように、原子力発電に関わる中で、対放射性の視点からADSが有望視されています。それは「水」が対放射性の特性を持っているからです。沸騰水型発電所において炉心の燃料棒の駆動に既に「水圧技術」が使用されています。**図8.33**にその様子を模式的に示しました。燃料棒を炉心に挿入したり、引き抜いたりして核反応の促進、抑制、停止など重要な機能を果たしています。およそ185本の燃料棒を、水圧シリンダと制御弁の組合せで個別に制御している膨大なADS技術です。

その他、使用済みの燃料棒の貯蔵が青森県六ケ所村の設備で行われていますが、貯蔵は水槽の中です。これらの作業機械の一部にも既に水圧技術が使用されています。発電所の寿命向上のためには、設備の中心である炉壁の状況を定期的に速やかに点検する必要があります。炉心内は放射線を帯びた水で満たされています。このような環境下では全水圧マニュピレータの構築が期待されます。

8.7 その他の分野のADS

8.7.1 レジャー設備・テーマパーク・各種施設

近年、大規模なテーマパークが話題です。大きな池の中から怪獣が突然現れるアトラクションの動きに、空気圧や水と油の混合流体の駆動技術が使用されます。安全面、環境汚染面ではADSが最適です。今後検討される可能性は大きいでしょう。

ADSが利用されるレジャー装置としては、プールの深さを調整して、大人、子供、シンクロナイズ、水球などの多目的利用が可能となる可動床式プールも開発されています。

なお、ショッピングセンター、食品工場、クリーンルームなどで、油を使用しないクリーンな設備として水圧リフトが普及し始めています。

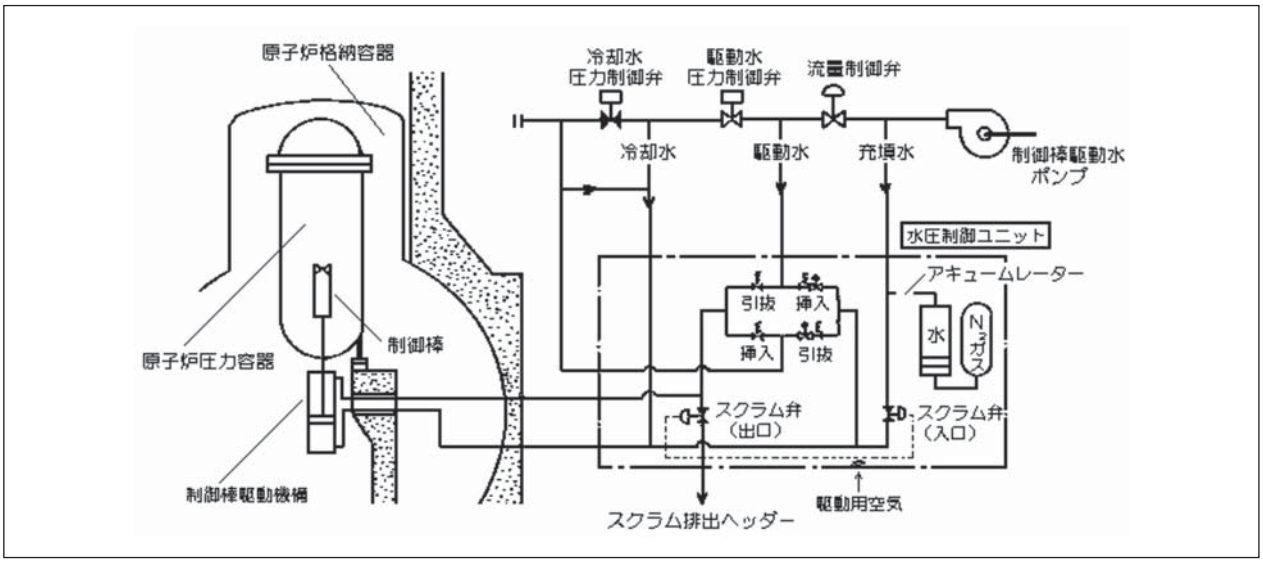


図8.33 制御棒駆動水圧系統図(日本原子力発電株式会社1997年度プレスリリース)

9. ADSの未来

9.1 ADSとコジェネレーションとの融合―環境調和、省エネ、省資源、水の有効利用への貢献

近年、地球温暖化防止対策として「二酸化炭素の削減と省エネルギー」が緊急課題となっています。地球規模では、単なる技術革新だけでは解決できません。特に環境問題は、ややもすると経済活動と相反する状況に置かれ、その対策は置き去りにされがちです。技術革新には、社会システムの構築とともに経済の活性化にもつながるような状況を創造していかなければならない難しい局面があります。

このような世相を反映し、風力発電、太陽光発電、燃料電池、電気自動車など多くのテーマがグローバルに推進されるべく努力が重ねられています。結果的には技術革新が重要です。二酸化炭素の排出は、先に述べましたが、産業の中では電力、鉄鋼、化学などにおいて多いと報告されています。その中では原子力発電が二酸化炭素排出対策として注目されています。ADS技術がこのような社会的背景のもと、課題解決の一つとして関心が高まっています。それは「ADSとコジェネレーションとの融合」です。

多くの産業分野で排熱の有効利用から蒸気を利用した発電が注目され、これまでにも数々の実績を作ってきました。蒸気タービンシステムは、熱、蒸気、復水、など「水」が基本的仲介的物理量であり水を作動流体とする「ADS」との相性に優れています。**図9.1**はADSを火力発電所で発生する一部の蒸気や水を利用して水圧ポンプを駆動し、工場で利用される機械を駆動することを想定した全体像です。従来は発電された電気を利用して機械を動かしていましたが、ここで示した様に、蒸気が電気を介することなく、直接ADSの動力源となれば、エネルギーの伝達効率は向上します。さらに、ADSは環境的に安全・衛生的で、クリーンな特性を併せ持っています。今後、実現化されるものと思われます。また、近い将来深刻な問題となるであろう「水不足」に対応する「水の有効利用」にもつながります。

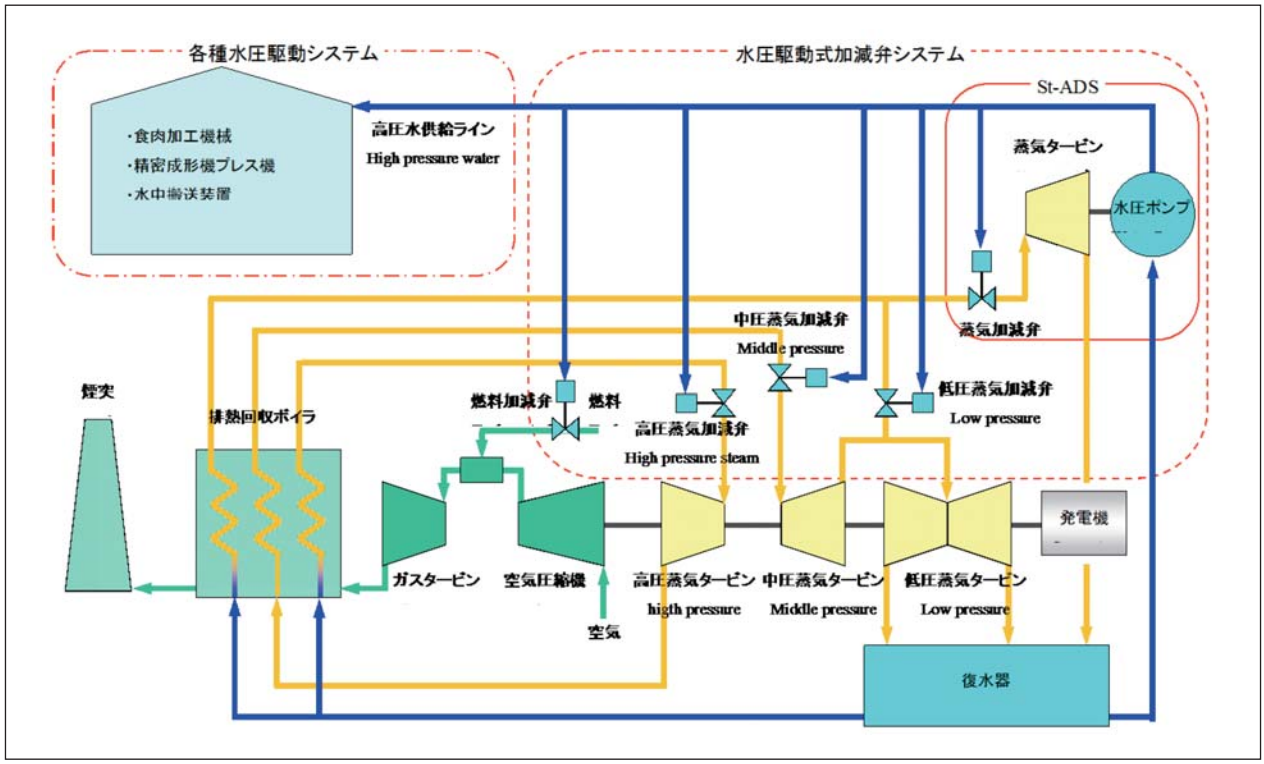


図9.1　ADSとコジェネレーションとの融合システム

9.2 ADSの未来イメージ図

まずはADSによって拓ける未来の社会を想像してみましょう。**図9.2**はADSが未来に貢献するネットシステムのイメージ（アクアドライブネットシステム）図です。

われわれが日常使う“水”の源は、湖、川、海、地下水、雨水などです。家庭や工場で使われた水も廃水として集められ浄化・再利用する循環システムが形成されています。水の役割には、飲料・生活用の水道水から、冷却・洗浄など工業用水、農業用水、消火用水まで、“水そのもの”の利用があります。水力発電用エネルギー源としても欠かせません。状態の変化した水蒸気は蒸気機関として鉄道、船舶、自動車などの交通機関に応用され産業革命後、人間の活動の幅が拡大しました。

一方、モノを動かし、素形材を圧縮・成形・加工する工場内の産業用機械や装置では、フルードパワーとして空気圧や油圧とともに“水の圧力”が使われます。アクアドライブネットシステムは水圧と水の利用を包含し、電力のスマート社会との融合を視野に置いています。省エネ・省資源などの地球環境融和性をより一層高め、安全・安心な社会・生活環境の実現をねらいとします。

既にインフラの整った水道配管網圧力の利用が、このネットワークのキーテクノロジーです。家庭内の洗面台・台所シンクの上下、風呂場での入浴介護リフターやバリアフリー設備、医療福祉施設における医療器具・福祉機器、自動ドア、地下通路入り口の防水板など、すでにその一部で利用が始まっています。工場では、搬送・昇降から加工工程まで、必要に応じ増圧して使用します。食品・食肉工場では頻繁に洗浄を行うことによって衛生面での安全・安心な工場内環境が得られます。ボイラーを使う工場では、排熱や余剰蒸気などを利用して水圧の供給源を構築することができます。

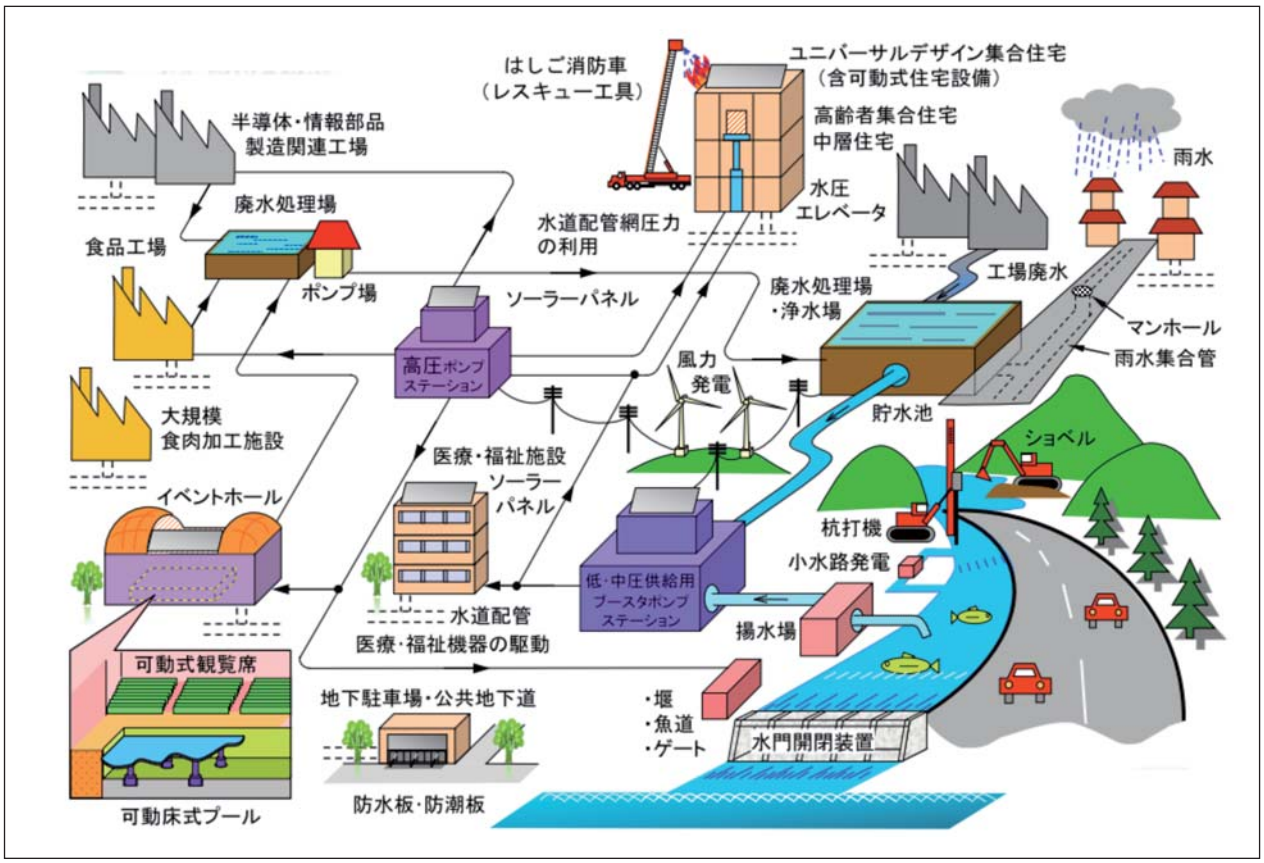


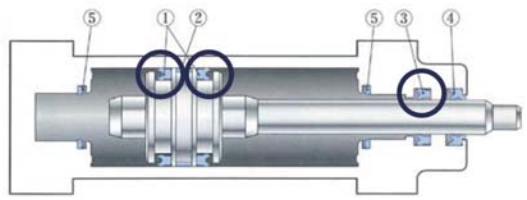
図9.2　ADSの未来イメージ（アクアドライブネットシステム）

10. ADS要素技術の要(かなめ) ―シール技術

本格的な水圧装置･ブラマーの水圧プレスはどの程度の圧力だったのでしょう。ピストン部で水が漏れると圧力は上がりません。当時は漏れを防ぐシールには皮や繊維が使われました。ゴム系高分子材料や樹脂の使用は潤滑性の良い油圧機器の時代になってからです。シールの材質･構造、相手材の材質･加工精度など、シール技術は向上しました。ここではADSシリンダ用のシールを簡単に紹介しましょう。

10.1 シリンダの構造とシール

シリンダの構造とシールの名称・使用箇所を**図10.1**に示します。



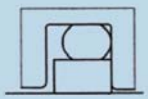
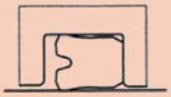
①ピストンパッキン ②ピストン軸受 ③ロッドパッキン
④ワイパリング(ダストシール) ⑤クッションシール

図10.1 シリンダの構造とシール

10.2 ADS 機器のシール

水圧、空気圧、油圧機器のシール性能や耐久性(寿命)は、密封する流体の特性や使用圧力範囲などが大きく影響します。それぞれの機器に適したシール形状、材質などを基に、水圧用途としての性能比較という観点から三者の特徴を比較すると**表10.1**のようになります。実際のADSシリンダでは、

表10.1 水圧、空気圧、油圧機器用シールの比較

	密封流体の特徴				シール（ピストンパッキン･ロッドパッキン）の特徴					水圧用途における性能特性			
	密封流体	動粘度	潤滑性	環境負荷	使用圧力	潤滑	形状		材質	耐久性	シール性	摩擦力	円滑作動性
水圧	水（液体）	低い（油の約1/50）	低い	なし	水道圧～高圧	・適度な厚さの水膜形成が重要だが，水は粘性が低く膜厚が薄いため，潤滑不良を起こしやすい	 水圧シール例（組合せシール）	・低圧仕様では空気圧用パッキンを流用 ・中圧仕様では油圧用パッキンを流用 ・高圧仕様では樹脂製シールリングとOリングの組合せシール	・シール性重視であれば合成ゴムを使用 ・耐久性重視であれば自己潤滑性のある特殊合成樹脂を用いた組合せシールを使用	◎	△	○	◎
空気圧	空気（気体）	やや高い（水の約25倍）	なし	なし	低圧	・空気には潤滑性が無いため，潤滑剤（グリース）の併用が不可欠 ・潤滑油膜上を滑ることで密封作用を得る	空気圧シール例（ゴム製Uパッキン）	・潤滑油膜（グリース）を掻き取らないようにリップ先端はR面形状 ・低圧仕様に適応し低摩擦設計とするため，低剛性の断面設計	・低圧仕様，低摩擦のため，柔らかい	△	○	◎	○ ʃ △
油圧	作動油（液体）	高い（水の約50倍）	高い	あり	高圧	・適度な厚さの油膜を形成しながらしゅう動する ・油膜が厚すぎると油漏れの問題につながる	 油圧シール例（ゴム製Uパッキン）	・高いシール性が要求されるため、リップ先端はシャープエッジ ・高圧，高負荷に耐えるように高剛性の断面設計	・耐圧性と高いシール面圧が要求されるため、硬い ・耐油性に優れたもの	△	◎	○ ʃ △	△

注)使用圧力範囲:ここでは、水道圧(0.15～0.74MPa)、低圧(～1MPa)、中圧(1～10MPa)、高圧(10～14MPa)と定義しています。

使用圧力範囲に応じて、これら単体のシールを複数個組み合わせたシールシステムとして使用することが推奨されています。今後、ADS専用のシールが開発されることが期待されます。

11. さらなる情報・知識の習得に向けて

今後さらに深く情報や知識を得たい方々のために、いくつかの資料を紹介します。未来に拡がるADSの世界に興味を抱いていただき、より深く勉強を進めていくための参考としてください。

11.1 JFPA 出版物・報告書・Web Site などから参考資料

1) 日本フルードパワー工業会：水が機械を動かす, PR用パンフレット（A5版, 8頁）, 2011年
2) 宮川:水圧ミニ知識1～4, JFPA機関誌・フルードパワー, Vol.22 No.3～Vol.23 No.2
3) JFPA-URL: http://www.jfpa.biz
4) 水圧ブログ: http://aquadrive1999.blog129.fc2.com
5) 日本フルードパワー工業会：アクアドライブシステム－技術資料, 平成13年12月
6) 日本フルードパワー工業会：アクアドライブシステム－技術資料2, 平成15年3月
7) 日本フルードパワー工業会：アクアドライブシステム－技術資料3, 平成16年3月
8) JFPA：Aqua Derive System - A Technical Guide, Mar. 2001, & Mar. 2005 ……図11.1
9) 日本フルードパワー工業会：水圧機器技術の現状及び市場予測等に関する調査研究、平成16年3月
10) 日本フルードパワー工業会：水道配管網圧力を利用した次世代型ユニバーサルアクアドライブシステム（UniADS）に関するフィージビリティスタディ報告書, 平成16, 17, 18年
11) 日本フルードパワー工業会：新・水圧技術（ADS）を用いたロボティックスの新基軸応用に関する調査研究報告書1～3, 平成20, 21, 22年
12) 日本フルードパワー工業会：水が機械を動かす—現代に甦る「水圧駆動」の技術Ⅱ—, PR用パンフレット（A5版, 8頁）, 2014年…… 図11.2
13) 日本フルードパワー工業会：サプライヤーリスト, PR用パンフレット（A5版, 8頁）…… 図11.2
14) 大林：“水が機械を動かす”—IFPEX2014 特別展示コーナー出展報告—, JFPA機関誌・フルードパワー,Vol.29 No. 1（平成27年1月）
15) 宮川ほか：この10年の技術動向—水圧編総論ほか,JFPA機関誌・フルードパワー「JFPA創立60周年記念特集号」, Vol.30 No. 2（平成28年5月）

11.2 その他の出版物から参考資料

1) 山口ほか：特集・水圧システムの開発に向けて, JHPSフルードパワーシステム,Vol.29 No.7（Nov.1998）
2) 浦田・宮川：水圧駆動技術入門—アクアドライブシステム, 日刊工業新聞社, 2002年7月
3) 日本フルードパワーシステム学会：水圧駆動テキストブック, 学会創立30周年出版, 2003年4月
4) 日本フルードパワーシステム学会：アクアドライブ技術の進展, 学会創立40周年出版, 2011年4月
5) 宮川ほか：特集・ADS—新水圧技術の今！, JFPSフルードパワーシステム, Vol.44 No.4（July.2013）

図11.1　技術資料（全5冊：和文3、英文2）

図11.2　「水が機械を動かす！」及び「サプライヤーリスト」