アクアドライブシステム

ー　技術資料

財団法人 日本フルードパワー工業会

Copy right © 2001 by Japan Fluid Power Association

表紙：Copy right © 福岡県朝倉町、国指定史跡の三連水車
裏紙：茨城県、袋田の滝

１章　ADS の概要

２章　ADS の選定

2.1　機器及びアクセサリ
2.1.1　ポンプ
2.1.2　アクチュエータ（モータ＆シリンダ）
2.1.3　制御弁
2.1.4　配管＆継手
2.1.5　タンク
2.1.6　アクセサリ（ﾌｨﾙﾀ、ｱｷｭﾑﾚｰﾀ、その他）

2.2　媒体　―　水道水
2.2.1　作動水
2.2.2　水質

2.3　材質

３章　ADS の運転

3.1　ADS の技術的検討
3.1.1　管路の圧力損失
3.1.2　キャビテーションの防止
3.1.3　サージ圧力の防止
3.1.4　サーボ弁を使用したシステムの特性

3.2　ADS の運転指針
3.2.1　水質評価実験
3.2.2　水質の維持管理
3.2.3　運転温度
3.2.4　冷却器の効果
3.2.5　装置の保存

3.3　その他の注意点

４章　ADS の応用と分野

参考資料
JFPA 水圧部門委員会メンバー

第１章　アクアドライブシステムの概要

1.1　　アクアドライブシステムとは

水を圧力媒体とする液圧技術は、大きい動力を伝達する手段としてすでに 18 世紀末に欧州において使われていた。当時の水圧技術は、漏れによる効率の低下、低潤滑性による摩耗・摩擦や錆などによる材料の劣化に悩まされた。ましてや、作動水の管理などはなされていなかった。

その後、水に添加剤を加えることによって、防錆性、耐腐食性、潤滑性などを向上させた様々な水系作動液が、プレス、鉱山機械などに使用されるようになった。この種の水性系作動液の主なねらいは難燃性であり、製鉄設備などにおいて多くの使用実績がある。現在、一般的にいわれている水圧駆動システムは、これらの水性系作動液を加えた広義の「Water Hydraulics」である場合が多い。

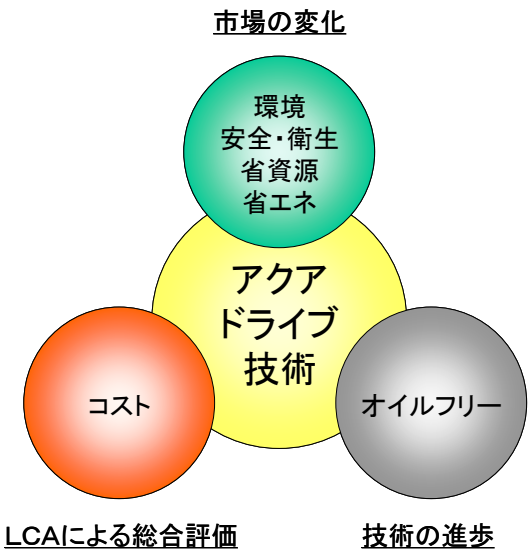


図 1.1　アクアドライブ技術を支援する三つの条件

本報で扱う「アクアドライブシステム」（以下 ADS と呼ぶ）は、上述した水圧技術と異なり「添加剤を全く含まない水＝清水＝水道水」を作動媒体とする液圧技術を応用するものである。すなわち、

(1)　「オイルフリー」が基本的コンセプト
- グリース、作動油、機械油などを含まない機器により構成
- 現在の駆動技術である電気、油圧、空圧と同等の駆動特性

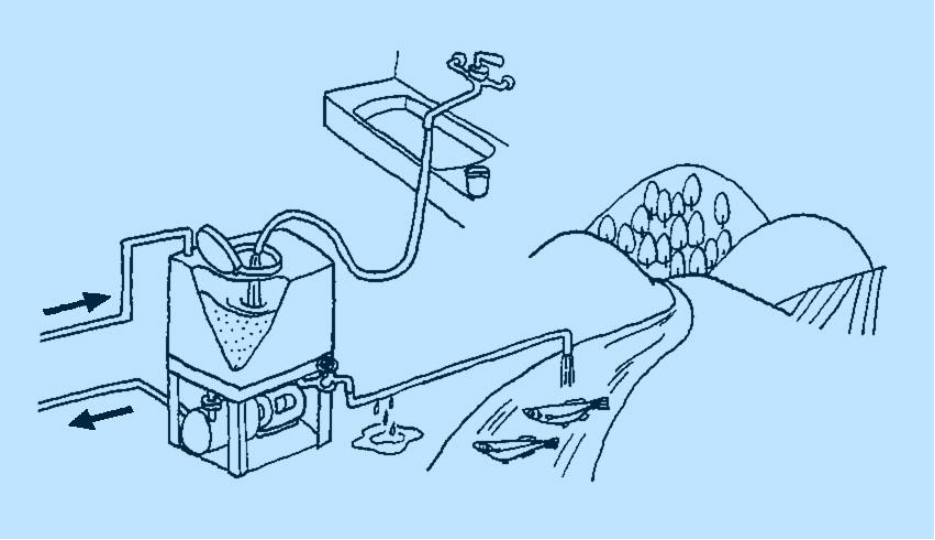
(2)　「LCA（ライフサイクルアセスメント）」の考えを導入
- 省資源、省エネルギー
- 環境の保全、環境調和性生産プロセスに要求されるクリーン性、衛生的安全性
- イニシャルコストのみでなく、サービス、保守・管理など考慮した総合的経済性

(3)　「ハイテクノロジー」によるバックアップ
- セラミックス、エンジニアリングプラスチックス、高度表面処理などの先端基盤技術
- コンピュータを援用した設計・解析技術、制御技術、管理技術

1.2　特長と解決すべき課題

特　長

(1)　入手性：身近な水道水が作動媒体。
(2)　易廃棄性：使用後、特別な廃棄処理は必要とせず河川や下水に放流が可能。
(3)　低管理コスト：流体の入手コスト、管理費が低い。
(4)　低環境汚染：運転時何らかの原因で漏れても流体が無臭、無毒、無害。
(5)　製品融和性：清浄性にも優れ衛生管理もし易い。
(6)　防火性：火災に対して安全、かつ周囲で発生する火災の延焼をも防止できるため、消防法の適用からは排除され,火災保険･安全管理など点からも優位。
(7)　低圧力損失：流体が低粘性のため配管損失が少なく、システムの拡張が容易, 一方同規模システムの場合は逆に必要動力の節約が可能。
(8)　高応答性：流体の剛性が高いため力の伝達が速い。



解決すべき課題

(1)　潤滑性、シール特性：低粘度特性のため潤滑性の欠如、機器を構成する隙間からの漏れによる効率低下、機器内の相対運動面の摩耗･摩擦の増大による効率低下、シール性の低下がある。
(2)　耐キャビテーション性:飽和蒸気圧が高いことによりキャビテーション、エロージョンが発生しやすく、材料が劣化しやすい。
(3)　防錆性：錆びが発生しやすい。
(4)　水質維持：細菌、スラッジ、スライムの発生、金属化合物の析出がある。

これらの ADS 特有の問題は、機器の構造、材料の選定、コンピュータを用いた高度設計手法などで解決可能である。また材料および表面処理技術においては今日のハイ・テクノロジーを駆使することが可能である。

第2章　アクアドライブシステムの選定

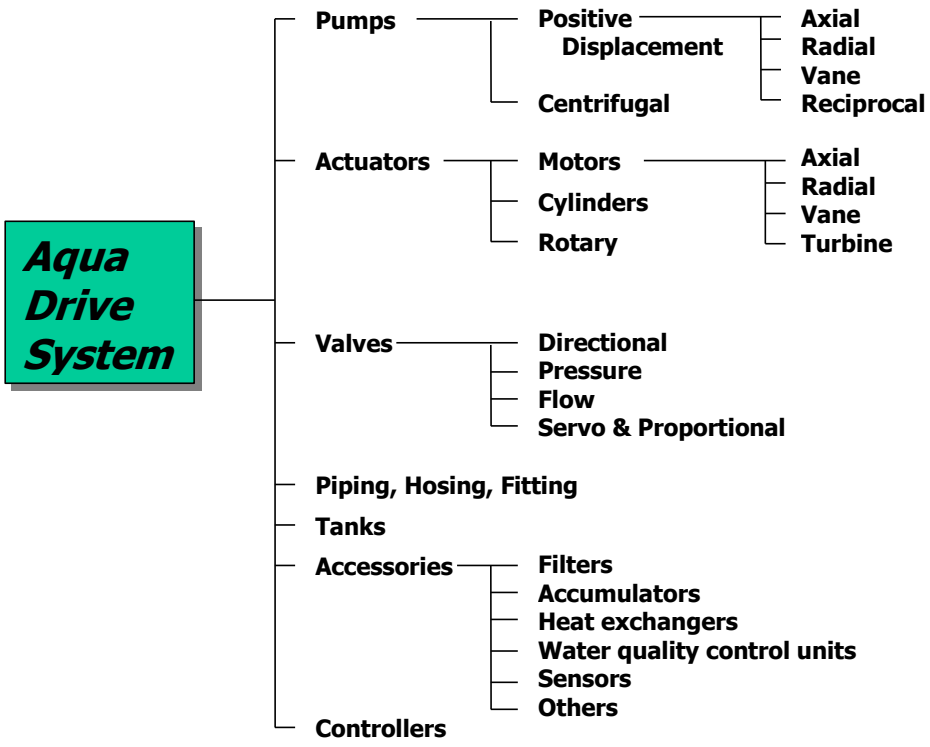


図 2.1　ADS の構成機器とアクセサリ

2.1　ポンプ

構造：水圧駆動システムに用いる水圧ポンプは、システムの仕様や用途に応じ、容積式ポンプ又はターボポンプの中から選定する。現状の水圧駆動システムでは、容積式ポンプが主流である。なお、これまで多くの産業分野において、流体輸送等に広く使われているターボポンプも、一般的に容積式に比べて圧力レベルは低いが、例えば低圧の駆動システムなどに適用できると考えられる。

押しのけ容積：水圧ポンプのサイズは、システムに必要な流量、回転速度などが得られるように選定する。このとき、ポート部の流速は、配管部の推奨流速範囲にあることが望ましい。

回転速度：ポンプの回転速度は、以下の吸込み条件に基づいて選定する。

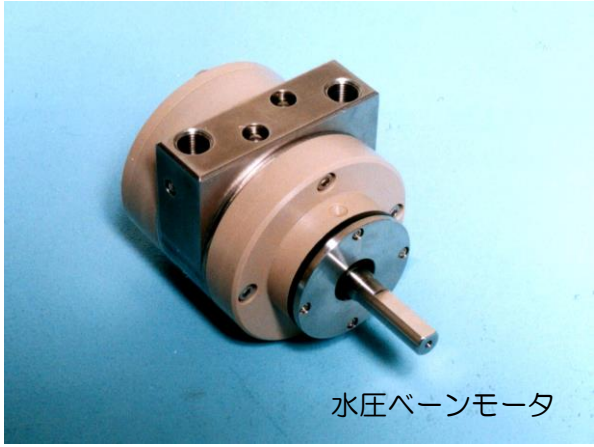
- ポンプと水面の相対位置
- 吸込みポート部圧力（上限、下限）
- 吸込み配管のサイズと長さ、サクションフィルタの抵抗など
- ブーストポンプの要否
- 取付け位置

2.1.2　アクチュエータ

水圧モータ

構造：容積式モータ、タービン式モータなどが用いられる。　容積式モータとしては、アキシアルピストンモータやラジアルピストンモータが市販されており、また、低圧用としてはベーンモータもある。

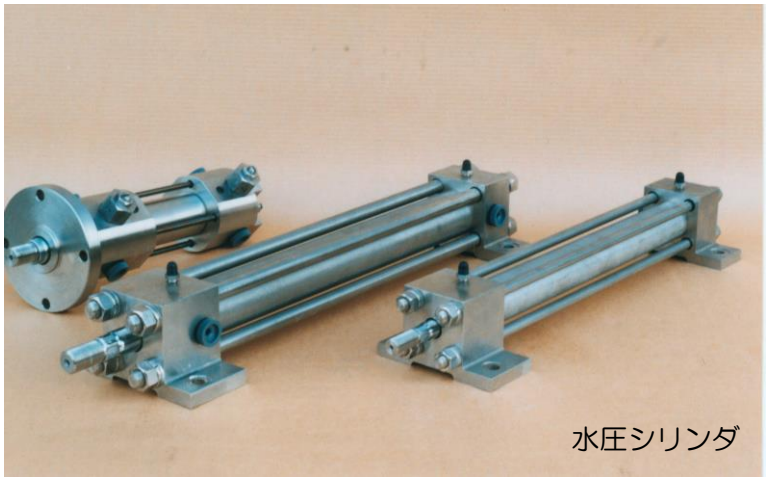
回転速度：水圧モータを低い回転速度で使用する場合は、推奨値を下回らない範囲で選定する。適正なものがない場合には、減速器と組合わせて使用する。なお、水潤滑型減速器と水圧モータを一体化したアクチュエータも開発・市販されており、用途に応じた選択が可能である。



水圧ベーンモータ

水圧シリンダ

構造：作動形式から単動形と複動形に分類され、ラム形、シングルロッド形、ダブルロッド形、テレスコープ形など、各種のシリンダを選定することが可能である。ただし、シリンダ材質やシールシステムについては、シリンダ速度・動作頻度及び負荷条件等を明確にする。



水圧シリンダ

シリンダ速度：水圧シリンダの速度は、ほぼ油圧シリンダの推奨速度範囲を目安として選定することが可能である。ただし、極力摺動抵抗の小さいシールシステムを使用したシリンダを選定することが望ましい。

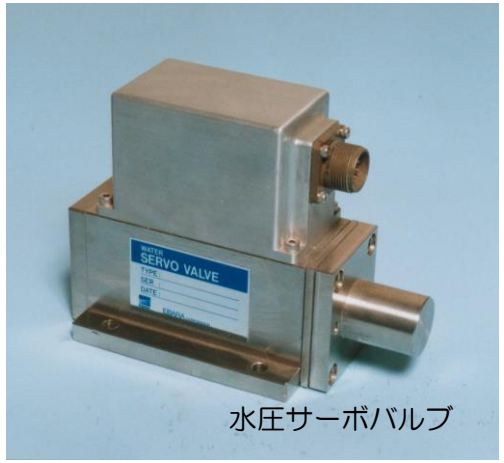
空気抜き：自動的に空気が抜けるように取り付けるか又は、近づきやすい位置に空気抜きを設ける。

座屈強度：シリンダピストンロッドがどの位置にあっても、曲がり又は座屈が生じないようにストローク長、負荷の方法及びシリンダの取付け方法に注意を払わなければならない

負荷の方法及び過剰負荷：過剰負荷や外部負荷が生じるような使用方法においては、予想される最大負荷又は圧力ピークを考慮した取付け方法にしなければならない。

圧力の増幅：ピストンの面積差によって定格圧力の制限を超えた圧力が発生しないような手段をシステムに講じなければならない。

2.1.3　制御弁



水圧サーボバルブ

概要：水圧バルブは、作動水の圧力・流量・方向を制御する機能に分類され、要求される水圧回路構成に応じた選択が可能である。サーボ弁や比例弁については、スプール弁タイプが入手可能である。

サイズ：最大流量で使用する場合は、別に定める配管部の流速が推奨範囲であることが望ましい。

構造：バルブ構造はスプールタイプとポペットタイプに大別され、各種機能のバルブが市販されている。バルブ本体及びマニホールドの内部通路は、作動水の滞留による水質の変化や異物の堆積などを防ぐため、作動水が常に入替わる構造のものを選定することが望ましい。

電気式操作弁の電気接続：電気接続部の防水、防湿は IEC 規格に合格しなければならない。

ソレノイド部分の防水、防湿：IEC 529 に従い外部からの液体やほこりの侵入を防止し、またバルブ内からソレノイドへの作動水の漏れがなく安全なものを選定する。

水圧リリーフバルブ

2.1.4　管路＆継手

配管のサイズ：流速が以下の推奨値になるように選定する。

高圧ライン	：	3～8　m/s
戻りライン	：	2～5　m/s
吸込みライン	：	0.5～1 m/s

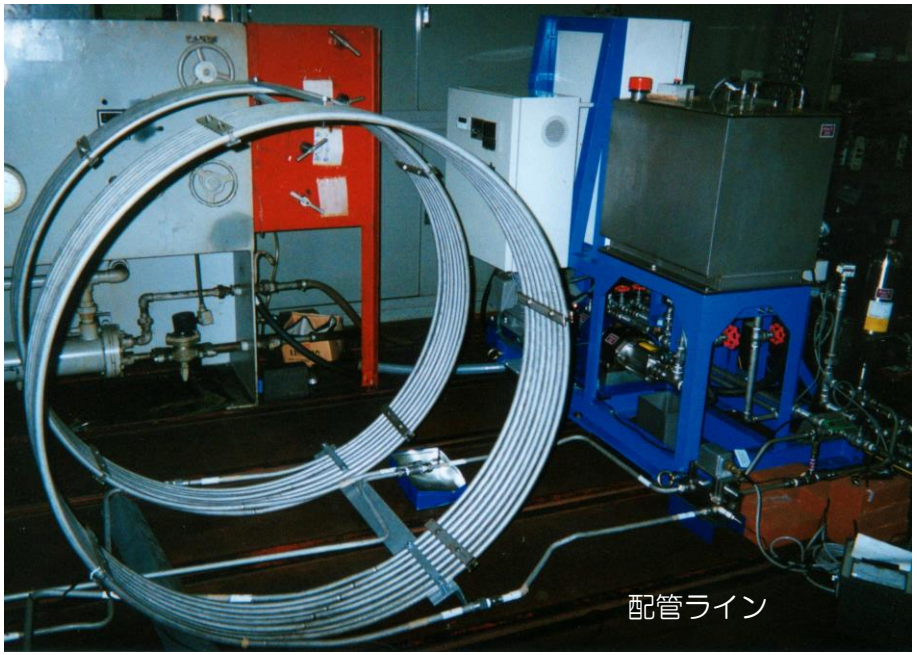
注）同一配管に同一流量を流した場合について、水と油の物性値の差による管路摩擦損失、サージ圧力などを計算すると、水は油に比して、摩擦損失は概ね 1/2、水撃によるサージ圧力は概ね 1.3 倍となる。摩擦損失を同等の値まで許容すれば、水圧の場合、油圧の２倍の流速まで流すことが可能となるが、サージ圧力の影響を考慮すれば、1.5～1.6 倍程度とするのが妥当である。従って、油圧配管内の流速の上限値を 5～6 m/s と仮定すると、水圧の上限値は 8 ～10 m/s 程度となる。

高圧ラインの配管：流速が上記推奨範囲を超える場合であっても、運転方法によるサージ圧力の発生に留意し、システムの損傷を避けられるように選定する。

ホースアセンブリ：金具やゴムホースなど、作動水との適合性が確認されたものを選定する。

配管の接続：外部漏れのない形状とし、管用テーパネジやシール剤を必要とするような接続方式は使用しないことが望ましい。

管継手及びホース継手：弾性体シールを用いた継手の使用が望ましい。弾性体シールは作動水との適合性が確認されたものを選定する。



継手類の定格圧力：システムの最高使用圧力を超える値のものを選定する。

配管の規格：JIS G 3448(一般配管用ステンレス鋼管)に定める仕様に従うことが望ましい。

2.1.5　タンク

容積：システムから流入する全ての作動水を完全に収容できる容積を有すると共に，作動中の水面は安全に使用できる高さを維持できるものでなければならない。
　また，水温上昇，混入空気の分離性，コンタミの沈降速度等を考慮した容量の選定が必要である。
水面：作動状態の水面は、ポンプ吸込みポートよりも上にあるように設計する。ポンプの吸込み条件によっては，加圧タンクやブーストポンプを用いることが望ましい。

内部構造：内部構造は，特にポンプの吸込み条件に影響する。仕切り板その他の方法で，ポンプの吸込み側及び戻り側を分離し，タンク内では十分に空気の放出がなされるような作動水の循環速度にする。

遮光性：バクテリア，細菌の発生を防ぐため，タンク内に直射日光が入らない構造が望ましい。

吸込み管路と位置：ポンプ製造者が推奨する吸込み特性が得られる管路サイズと位置に設置しなければならない。サクションフィルタは，清掃や交換を考慮した位置に取付けることが望ましい。

汚染物質の滞留防止：タンク内に汚染物質が滞留・沈殿すると，錆の発生，バクテリアの繁殖の要因となる。このため，底部及び角部に汚染物質が滞留・沈殿なく，また，作動水が完全に抜き取れる構造としなければならない。

内面仕上げ：スラッジ，糸クズ，スケール，その他の汚染物質が混入した場合に容易に取除けるものとする。

2.1.6　アクセサリ

<u>フィルタ</u>

ろ過：システムの使用圧力範囲などの運転条件に応じ、粒子状汚染物質を適切な値以下に制限するためにろ過を行わなければならない。汚染度レベルの表示は、ISO4406 に従うことが望ましい。

選定：水圧機器の内部隙間は、一般の油圧機器よりも小さい場合が多いため、機器製造者が推奨する基準に従ってフィルタを選定することが望ましい。但し、作動水がフィルタを通過する際の圧力降下値は、供給者の仕様範囲内に制限しなければならない。

給水：初期及び液面維持のための給水時には、システムに取付けられているフィルタと同等以上のろ過精度をもつ給水用のフィルタを介して、タンクに作動水を満たさなければならない。

ポンプ吸込みライン：ポンプ製造者の吸込み条件に合致したフィルタを選定し、エレメント交換などの保守性を考慮した構成にしなければならない。なお、ポンプによっては、吸込みラインへのフィルタの取付けを認めていない場合がある。システム全体として適切なフィルトレーション構成を採用する必要がある。

アキュムレータ

構造：アキュムレータには、ダイヤフラム形、ブラダ形、ピストン形などがあり、中でもブラダ形アキュムレータが最も一般的に用いられる。水圧仕様のアキュムレータと指定することによって、市販の標準品が容易に選定できる。また、性能・機能的には油圧用アキュムレータに準じて使用することが可能である。

脈動防止：水圧ポンプとして、三連プランジャポンプを用いる場合などは、システムの要求圧力仕様に応じ、脈動吸収用アキュムレータを使用することが望ましい。

その他の機器

熱交換器：自然冷却では，作動水温度が規定値（セクション 3.2.3、運転温度を参照）を超える場合には，作動水に適合した冷却器を使用する。また凍結防止のため必要に応じて加熱器を使用する。

エアブリーザ：大気開放形の場合は，システムが設置されている周囲環境状態を考慮し，水タンクに入る空気を清浄化するエアブリーザを設置しなければならない。エアブリーザのろ過精度は，大気中の細菌も考慮に入れて選定することが望ましい，

水処理装置：必要に応じ、塩素処理、オゾン処理、紫外線処理など、殺菌処理のための装置を水圧ユニットまたは配管系に組込むことにより、バクテリアや細菌の繁殖を防ぐものとする。それぞれの殺菌処理に有効な装置が市販されており、要求される水質や運転方法に応じ適切な仕様の機器を選定することが可能である。

センサ：システムの安全な運転及び水圧機器の保護のため、ユニットには圧力スイッチ、レベルスイッチ、温度スイッチなどを設け、運転状態をモニタできるシステム構成とすることが望ましい。

2.2.1　作動水

作動水の範囲

(1)　システムに使用する作動水は、日本国厚生省令第 69 号（1992 年）「水道水」（表 2.1 参照）を基準とする。
(2)　国外で使用する場合は、基準が異なるので水質を充分に考慮しなければならない。

表 2.1　水道水の水質基準

項目(単位)		水道水の水質
単位の異なる項目も併記 水質の参考項目も記載		水質基準 厚・第 69 号
水素イオン濃度	PH	5.8 ～ 8.6
硬度	mg/L (Ca, Mg etc.)	300 以下
塩素イオン	mg/L	200 以下
亜鉛	mg/L	1.0 以下
鉄	mg/L	0.3 以下
銅	mg/L	1.0 以下
ナトリウム	mg/L	200 以下
マンガン	mg/L	0.05 以下
蒸発残留物	mg/L	500 以下
濁度	度	2 以下
一般細菌	個/mL	100 以下
大腸菌群	個/m^3	検出されないこと

システム性能への影響が考えられる水質項目

腐食：pH 値、電気伝導度、遊離酸、遊離炭酸(CO_2)、塩化物イオン(Cl^-)、Cl_2、溶存酸素、硫化水素など
スケール発生：硬度、シリカ(SiO_2)、 Ca、Mg、硫酸イオン(SO_4^{2-})、油脂分など
スライム発生：バクテリアなどの微生物表

表 2.2　水道水の性質

項目（単位）		水道水（20℃）	（参考）油圧作動油	水圧システムの主な特徴
密度	kg/m^3	1000	860 ～ 920	キャビテーションエロージョンが大きい
動粘度	m^2/s	1×10^{-6}…小	小 ～ 非常に大	配管の圧損が小さい（配管のサイズダウン） 漏れ流量が大きい
温度に対する粘度変化	ー	小	大	流体温度が変化しても性能の変化が小さい
体積弾性係数	GPa	2.4	1.36 ～ 1.88	システムの剛性が大きい サージ圧が大きく減衰が遅い
蒸気圧	kPa	2.34	9×10^{-6}	キャビテーションエロージョンが大きい
比熱	J/kgK	4180	2018	温度上昇が遅い
熱伝導率	W/m・K	0.6	0.13	冷却効果が大きい
引火点	℃	不燃	200 ～ 230	火災の危険がない

2.3　材質

材料選択：耐食合金材料（チタン合金，アルミニウム合金，銅合金，ニッケル合金，ステンレスなど），樹脂やセラミックスなどの選択にあたっては，その機械的性質，耐食性，加工性，熱的性質などを把握しなければならない。

表面処理：めっき法，蒸着法，溶射法など母材，表面処理品の材質及び処理法を使用個所により選定しなければならない。

キャビテーション・エロージョン：機器は，キャビテーションが発生しないように設計，設置されるべきであるが，発生しても重大な損傷につながらないような材料選定をすることが望ましい。強度，加工性を考慮すると，ステンレス鋼，アルミ青銅，ニッケルアルミ青銅などが優れる。

水圧用シール：水圧システムの媒体である水と適合性のあるシール材料は、一般に次のような種類がある。

(1)　エラストマー：NBR, HNBR, FKM(FPM)、など
(2)　サーモプラスチックエラストマー：ポリウレタン、など
(3)　　プラスチック：充填材入り PTFE, 超高分子量 PE、など

Element	Material	Notes
Pump & Motor	Ceramics & its Coating, Stainless Steel, Titanium Alloy, Engineering Plastics	Corrosion Wear Errosion Cavitation
Valve	Ceramics, Stainless Steel	
Cylinder	Stainless Steel, Ceramics & its Coating	
Tank	Stainless Steel & Plastics	
Filter	Stainless Steel & Plastics	
Pipe & Fitting	Stainless Steel & Plastics	
Manifold	Stainless Steel	

表 2.3　機器と材質

第３章　アクアドライブシステムの運転

3.1　ADS の技術的検討

ADS は、現在 14 MPa（140 bar）までの圧力であれば、市販の機器類で十分に構成することができる。運転するにあたって留意しなければならない点がいくつかあり、水の物性と、水質に関する内容である。主な事項を挙げると次のようになる。

低粘度である。：管路の圧力損失が油圧に比べて小さいことを示し、システムのコンパクト化が計れる。一方、潤滑性の面で不利であるので、高圧を使用する場合、寿命など検討を要す。

キャビテーション：流動している液体の圧力が局所的に低下し、気泡が生じる現象であり、これを避ける工夫が必要である。キャビテーションエロージョンが生じにくい材料を選定するとともに、流れ場の形状を工夫することが大切である。

体積弾性係数が大きい（波動伝播速度が速い）：回路を急激に遮断したときにサージ圧が高くなり、衝撃力が大きいことを示している。運転操作にあたっては、急激な回路の遮断

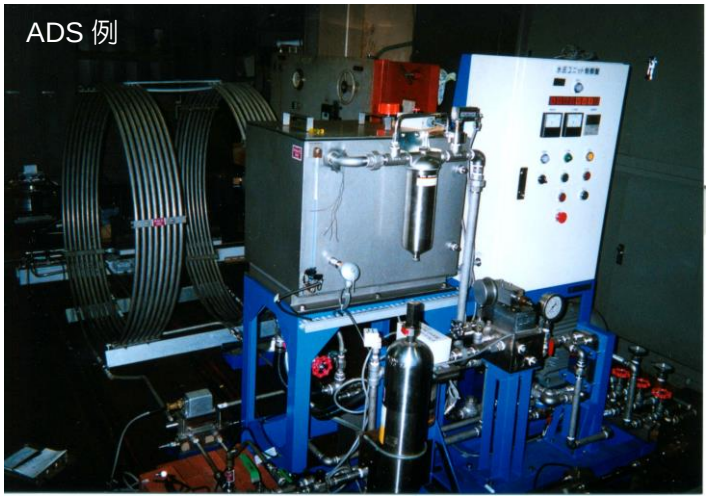
水質：作動液として、水道水が使用に耐えうるためには、密閉タンクとし、外部からの塵芥、異物が入らぬようするとともに、直射日光が当たらないようにすることでバクテリヤや微生物有機体の発生を抑制することが大切である。

比熱が大きい：同一熱量に対する温度上昇速度が油より遅く、また、冷却器使用の場合の同一通過流量に対する交換熱量が油より大きいことを示している。

本章は、上記事項に対する理論的、実験的な検討を行い、ADS の運転に関する“技術的検討”と“指針”に大別してまとめたものである。

特に、ADS の特徴を引き出し有効に運転するための手段に注目し、サーボ弁を使用して入力信号の折れ線操作により、サージ圧を効果的に下げることの可能性を示した。また、サーボ弁を使用したシステムの周波数応答特性についても実験結果を示した。

水質に関しては、模擬回路により約 12.5 ケ月にわたって水質の変化を調査した結果、使用上問題になるような現象は見られなかった。



3.1.1　管路の圧力損失

水は動粘度が低く、管路の圧力損失は作動油の場合より少ないので次の特長がある。

- 管路の内径を小さくできる。
- アクチュエータとポンプを離して設置する場合でもエネルギーロスが小さい。

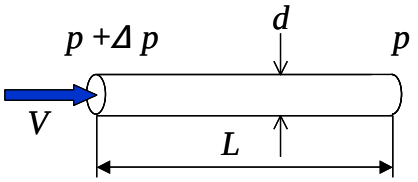


図 3.1　管路

ここで、密度 ρ (kg/m³)は、水の場合 1000(= ρ_w)、作動油は 880(= ρ_o)とし、動粘度 ν (m²/s)は、水の場合 1.0×10^{-6} (= ν_w)、油は 34.0×10^{-6} (= ν_o)とした。(表 2.2 参照)。

同一寸法の管路に同じ流量が流れるときの圧力損失を比較する。
内径 d 、長さ L の管路に、密度 ρ 、動粘度 ν の流体が流速 V で流れているとき、圧力損失 Δp は次式で表される。

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho L}{2d} V^2$$

係数 λ は管摩擦係数であり、流れが層流の場合は次式で、

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

乱流の場合は次式で表される。

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$$

Re はレイノルド数であり、 $\mathrm{Re} = Vd/\nu$ で示される。

水圧管路の流れを乱流とし、油圧管路の流れを層流と仮定すれば、それぞれの圧力損失の比は次式で表される。ここで、添え字 w は水圧を、添え字 o は油圧を表す。

$$\frac{\Delta p_w}{\Delta p_o} = \frac{\lambda_w \rho_w}{\lambda_o \rho_o} = 6.46(Q/d)^{3/4}$$

3.1.2　管路の圧力損失

水圧管路の圧力損失 Δp_w と油圧管路の圧力損失 Δp_o の比を左図にプロットする。縦軸は圧力損失の比 $\Delta p_w / \Delta p_o$ 、横軸に流量 Q をとり、管路内径 d をパラメータにとった。図に示す範囲では、圧力損失の比はいずれも１よりも小さい。また、水圧管路と油圧管路の両方の流れとも乱流である場合の圧力損失の比を破線で示す。この場合もその比は１より小さい。
この比較結果から、水圧管路の圧力損失は油圧管路の場合よりも小さいことがわかる。

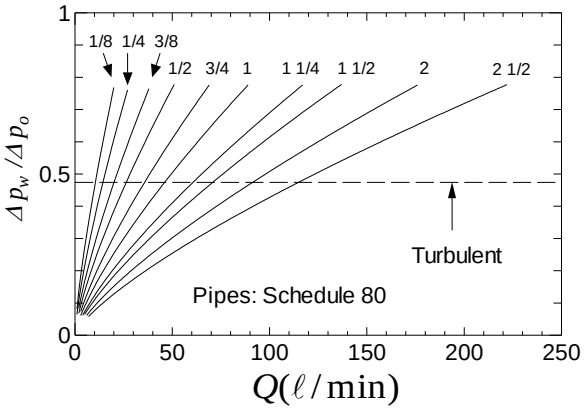


図 3.2　水圧管路と油圧管路の圧力損失の比較

水の動粘度が小さいために水圧管路の圧力損失は小さく、動力伝達管路として優れた特長をもつ。ポンプと制御弁やアクチュエータが互いに離れたところに設置された駆動システムへの応用や、径の小さな管路をもつ小型・コンパクトなシステムへの応用にも適している。

3.1.2　キャビテーションと壊食

(1) キャビテーション

キャビテーションは、流動している液体の圧力が局所的に低下し、気泡を生じる現象である。低圧の発生、核となる微小気泡（気泡核）の存在が主な発生要因である。気泡発生の限界圧力は、実用上、蒸気圧を用いてよい。最も容易な防止策は圧力の調整であり、ポンプの場合、吸込み部内の最低圧力が、蒸気圧以上になるように、配管径・長さ・水面位置などの作動条件を定める。

バルブなどの絞り部では、キャビテーション係数 $k=(p_2-p_v)/(p_1-p_2)$ が発生の目安となる。ここに、p_1：上流圧力、p_2：下流圧力、p_v：蒸気圧である。防止策は、絞りを２段とする、背圧を加えるなど、k が限界値を上回るように p_2 を高める。

(2) キャビテーション壊食（エロージョン）

壊食は、キャビテーション気泡の崩壊に際して生じる衝撃圧力のため、機器構成部材が損傷を受ける現象である。壊食とこれに伴う振動、騒音を抑制するには、気泡の数・大きさを減ずること、気泡崩壊場所を部材表面から隔てること、耐食性材料の選定などが有効である。

(3) 絞り部に生じるキャビテーション発生限界と壊食量

ポンプ･モータの圧力の切換時に過渡的に構成される絞り部及びバルブなどの絞り部では、噴流により容易にキャビテーションが発生し、機器の高圧化、高性能化、長寿命化をはかる上で大きな問題となる。
噴流に伴なうキャビテーションの発生限界は、前述のキャビテーション係数ｋとレイノルズ数 Re で整理され、図 3.4 のように示される。
一方、壊食量は水と作動油とでは差が大きく、キャビテーション噴流を試験片に衝突させた試験での壊食量は、水の場合、石油系作動油に比べ 5～6 倍となることが報告されている。

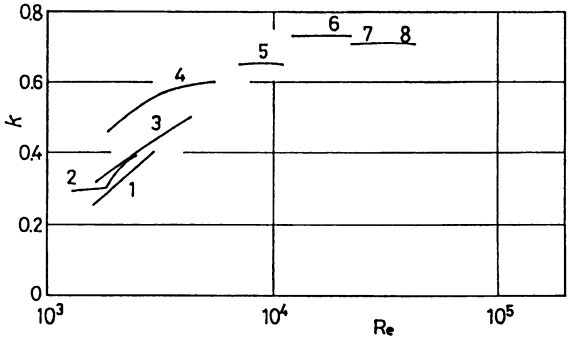


図 3.3　作動液の種類と Re - k 特性

3.1.4　サージ圧力の防止

サージ圧力

　システムの流速が大きく、かつ急激な運転・停止などを行う場合は、サージ圧力の発生に留意する必要がある。水圧システムでは、作動流体の物性の違いから、油圧に比べサージ圧力が大きくなる。このため、高速作動を行い過大なサージ圧力の発生が予測されるようなシステムでは、設計段階において水圧回路や構成機器などに工夫をすることが望ましい。例えば、比例弁・サーボ弁などの制御機器を用いて、ショックレス駆動をする方法などが考えられる。

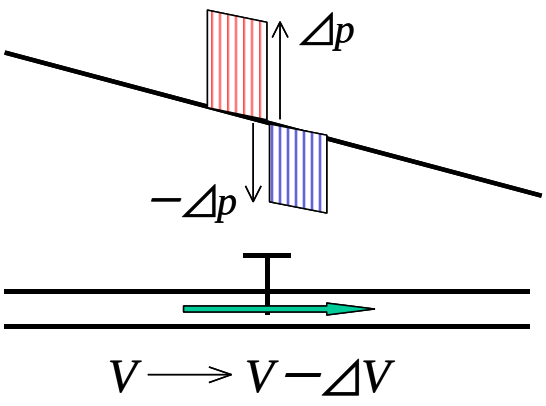


図 3.5　弁急閉鎖によるサージ圧力の発生

弁の急操作等によってサージ圧力が発生すると管路を伝ぱして他の機器の動作に影響を及ぼす。サージ圧力 Δp は、波動伝ぱ速度 c と密接な関係がある。

$$\Delta p = \rho c \Delta V$$

波動伝ぱ速度は、流体の体積弾性係数 K と密度 ρ によって決まり、$c = \sqrt{K/\rho}$ で表される。

したがって、水と作動油のサージ圧力 Δp は、それぞれ以下のように計算される。同じ流速変動 ΔV に対して水のほうがサージ圧力が高いことがわかる。

- 水　　$\Delta p = 1.55\Delta V$ (MPa)　　ただし　$c \approx 1550$ m/s
- 作動油　　$\Delta p = 1.15\Delta V$ (MPa)　　ただし　$c \approx 1305$ m/s

ここで、密度 ρ (kg/m^3)は、水の場合 1000、油は 880 とし、動粘度 ν (m^2/s)は、水の場合 1.0×10^{-6}、油は 34.0×10^{-6} とした。また、体積弾性係数 K（GPa）は、水の場合は 2.4、油の場合は 1.5 とした（表 2.2 参照）。

シリンダ駆動回路におけるサージ圧力の実験

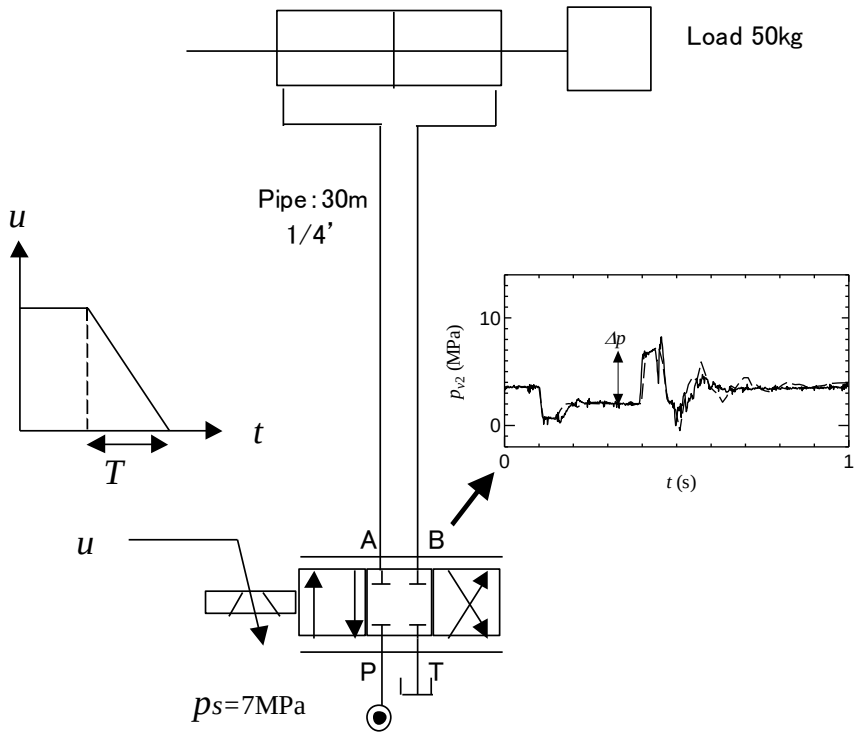


図 3.5　サージ圧力の実験

図 3.5 のシリンダ駆動回路を使用して弁の急閉鎖に伴うサージ圧力の実験を行った。質量 50kg の負荷を両ロッドシリンダで駆動する。はじめ供給ポート P は負荷ポート A に、ポート B は戻りポートに接続されている。シリンダとサーボ弁は内径 1/4'、長さ 30m のステンレス管路で接続されている。負荷が一定速度で運動しているとき、サーボ弁を急閉鎖する。弁は直線的に閉鎖される。ポート B の過渡圧力波形からサージ圧力 Δp を測定した。

さまざまな弁閉鎖時間 $T(s)$ に対するサージ圧力 Δp の測定結果を図 3.6 に示す。丸印はサージ圧力の測定結果を、破線はシミュレーション結果である。シミュレーションは、管路動特性を特性曲線法で計算し、サーボ弁と負荷の運動方程式を考慮した。

弁閉鎖時間 T が長いほどサージ圧力 Δp が減少する。

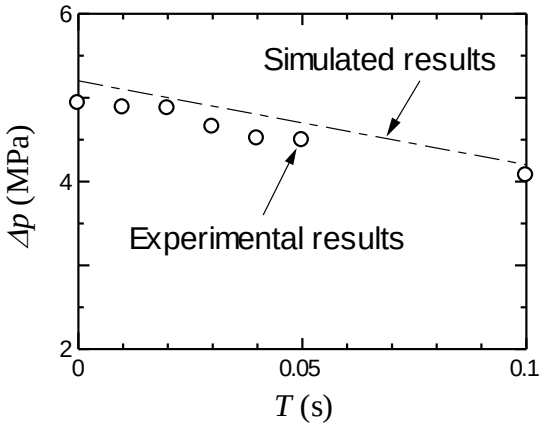


図 3.6　弁閉鎖時間とサージ圧力

折れ線操作によるサージ圧力の制御

弁を直線的に閉鎖するのではなく、折れ線閉鎖することによって、サージ圧力を効果的に低減することができる。

図 3.7 で、パターン A は直線的な弁閉鎖、パターン B と C は折れ線操作を表す。折れ点の弁開度 は一定値(1V)とし、折れ点の時間 を弁閉鎖時間 T の半分である $T/2$、あるいは $(3/4)T$ に設定して実験を行った。

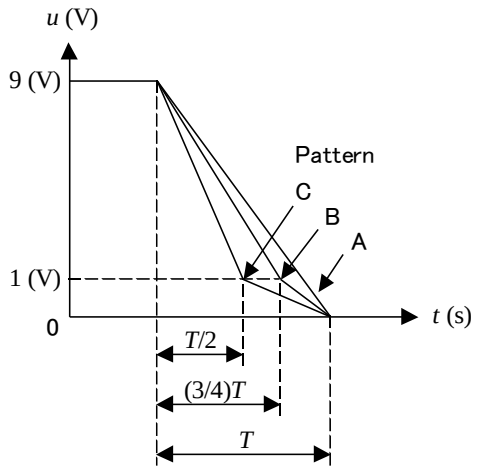


図 3.7　折れ線操作

さまざまな弁閉鎖時間 T に対するサージ圧力 Δp の測定結果を図 3.8 に示す。

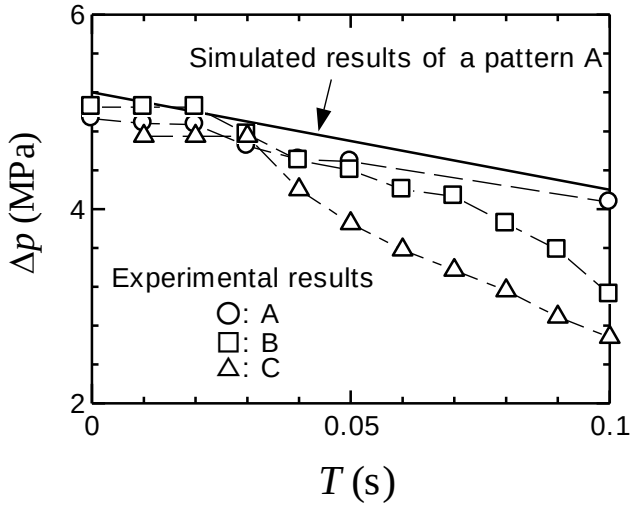


図 3.8　折れ線操作によるサージ圧力の制御

直線閉鎖であるパターン A より、折れ線操作であるパターン B と C の方が、同じ弁閉鎖時間でも生じるサージ圧力はより小さいことがわかる。また、パターン C の方がパターン B よりサージ圧力がより小さい。これは、パターン C の方が弁閉鎖直前の閉鎖速度が B より遅いからである。

3.1.4　サーボ弁を使用した ADS の周波数特性

(1)　水温変化の影響（10℃および 45℃の場合）
実験結果から、水温変化による水の粘度変化が小さいため、各温度における周波数特性は変化しないことが分かる。

- 回路：図 3.5、 管路長さ：0.8m、シリンダ：片ロッド
- 結果：図 3.9、入力信号振幅：一定、ゲイン：0.05Hz 時の出力振幅基準（シリンダ変位）

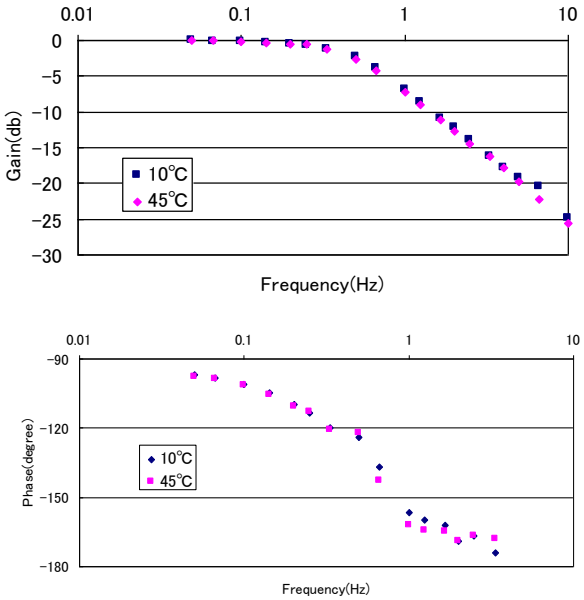


図 3.9　周波数応答（水温変化の影響）

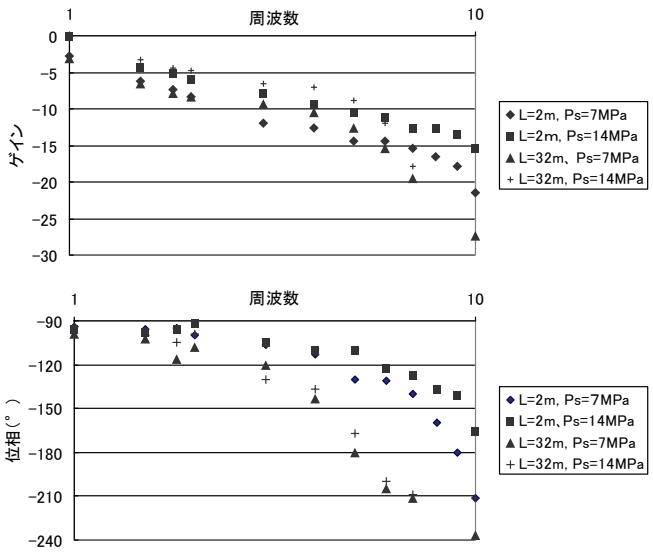


図 3.10　周波数応答（管路長さの影響）

(2)　管路長さの影響（2mおよび 32mの場合）

管路が長い場合、供給圧力に関わらず、入力周波数が高くなると、ゲインは低下し、位相遅れが大きくなることが確認できる。これは、管路が長いと、管摩擦抵抗が増し、シリンダ部の負荷圧力が低下するためと考えられる。

- 回路：図 3.5、 管路長さ：2mおよび 32m、供給圧力：7MPa および 14MPa
- 結果：図 3.10、ゲイン：14MPa、2m 時の出力振幅基準（シリンダ変位）

3.2　ADS の運転指針

3.2.1　水質評価実験

水圧駆動システムの運転に伴う水道水の水質変化を追跡実験した。
水温３0℃、運転時間１600 時間（９ヶ月）及び、水温 40℃、1650 時間（約 12.5 ケ月）の 2 回にわたって実験を行った結果、水質に関して問題は生じないことがわかった。また、使用した水圧機器類に対しても使用上問題になるような影響は見られなかった。

(1)　　実験装置と実験条件

実験装置回路図を図 3.12 に示す。実験期間中、水は循環して使用することとし、新たな水を供給しないようにした。水は東京の水道水を使用した。

図 3.11　水質実験装置

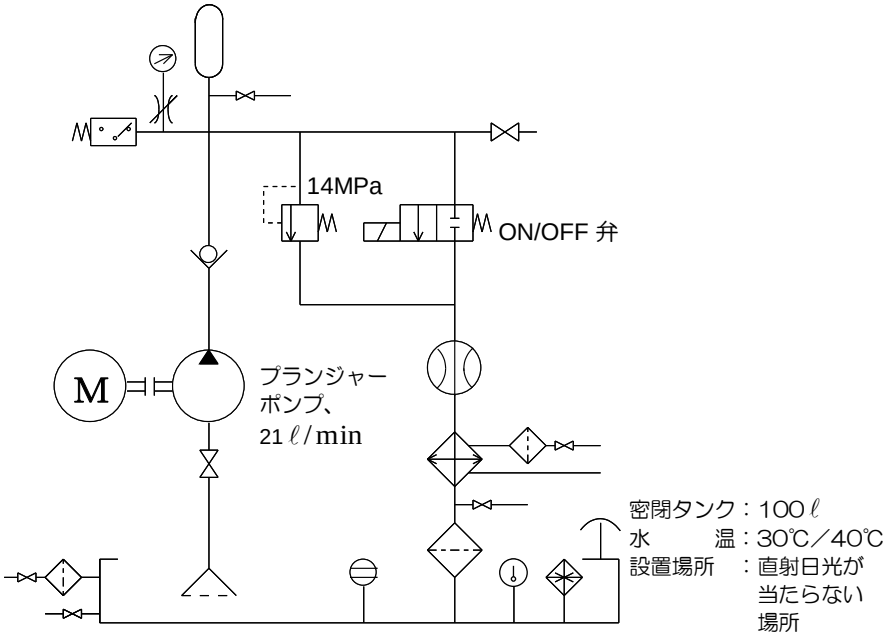


図 3.12　実験装置回路図

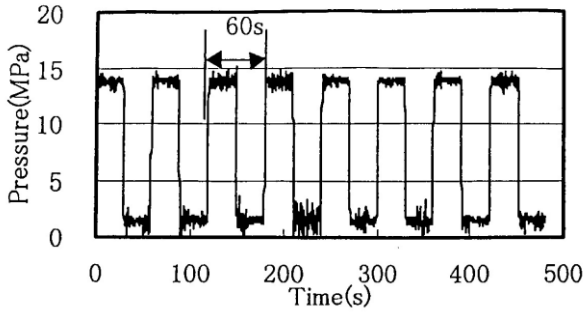
(2)　　検査項目と実験結果

【検査個所】タンク内／リターンフィルタ直前／アキュムレータ接続管路途中

【検査項目】ｐＨ値／塩素イオン／硬度／蒸発残留物／一般細菌

【回路圧力】回路圧力の実測値を図 3.13 に示す。

【検査結果】図 3.14 に結果を示す。



3.13　実験回路圧力

3.14　(3)　　分析・評価

ｐＨ値、塩素イオン、硬度、蒸発残留物：厚生省の水道水水質基準値よりも十分小さな値のまま推移しており、大きな変動は見られない。また、サンプリング個所による差異も認められない。

一般細菌：アキュームレータ部分の 4 回目のデータを除くと、サンプリング個所に係らず、初期（0 から 15 日、120 時間まで）に繁殖期があり、その後、飢餓、枯死のために細菌数は減少していく。

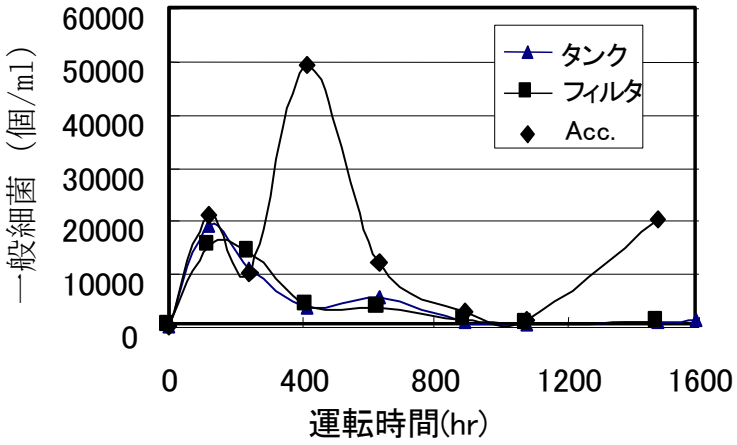


図 3.14　水質試験結果（30℃）

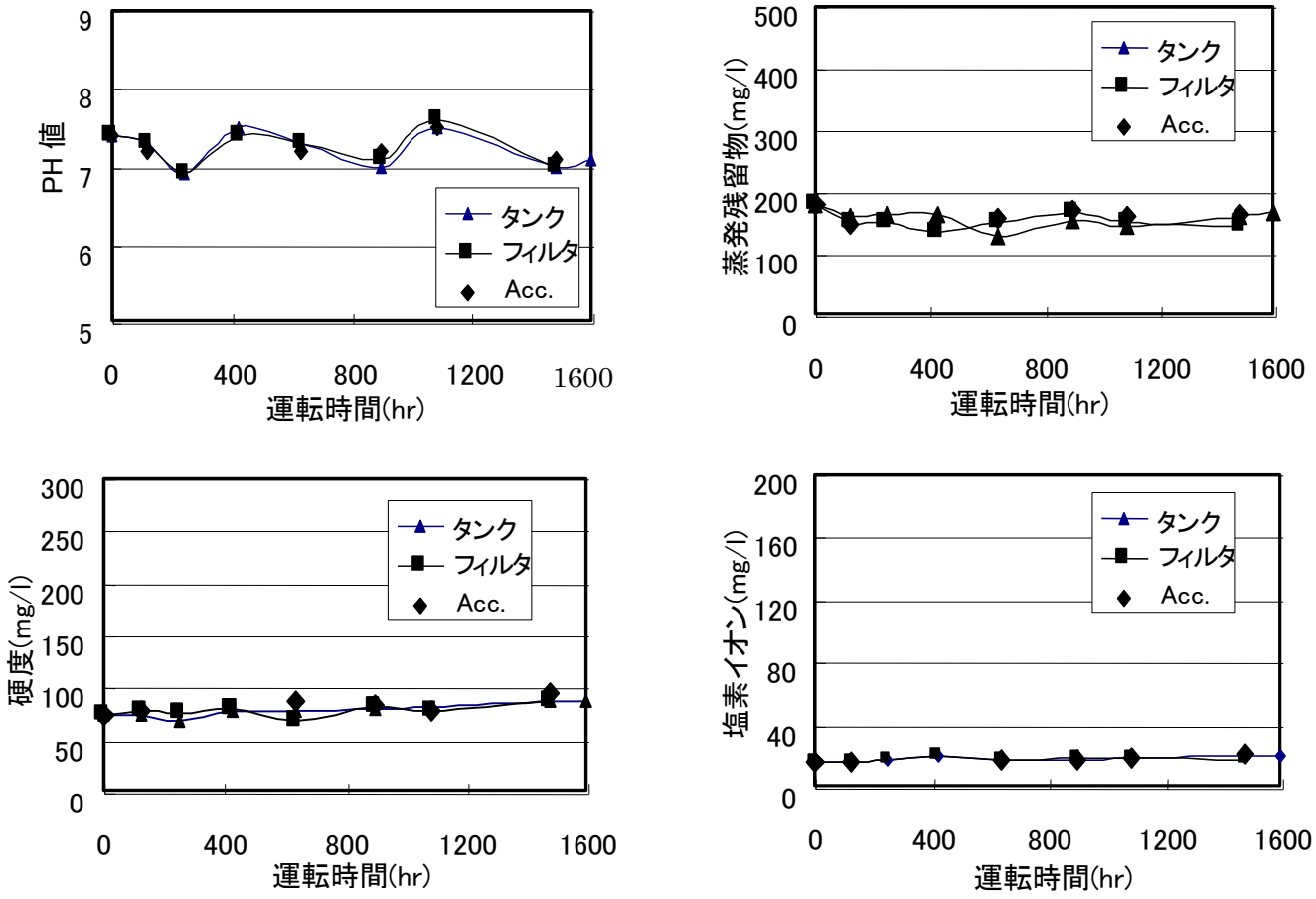


図 3.14　水質試験結果（30℃）

3.2.2　水質の維持管理

(1)　**濾過装置**　作動水から汚染要因物質及びバクテリアやその他の微生物有機体を除去するため、供給ラインや、戻りライン、サクションラインには、適宜濾過装置（フィルタ）を備えるものとする。また、フィルタの目詰まりが監視出来るシステムとすることが、望ましい。

(2)　**給水**　運転初期及び水面維持のための給水時には、給水フィルタを設けること。

(3)　**交換**　使用頻度や使用環境に応じ作動水の交換を行うこと。

(4)　**整備**　エアブリーザ、フィルタ等は、クリーン度を保つよう定期的に整備する。

3.2.3　運転温度

(1)　**システムの温度**　凍結の防止、蒸気発生の抑制のため、実用的な運転水温は、＋５～４５℃とするのが望ましい。

(2)　**機器の温度**　機器メーカにより、使用温度が規定されている場合はその値の範囲内で使用しなければならない。この条件を勘案してシステムの運転温度を決める必要がある。また、表面温度は人の触り得る限界を超えないように考慮すること。

(3)　**温度管理**　適正な温度範囲での使用が難しい場合には対策を施す必要がある。作動水は０℃近辺で凍結するため寒冷地及び周囲温度が氷点下になる場合には加熱機等を設置してシステムのいずれの箇所においても凍結が生じないような対策が必要となる。また、タンクが高温になる場合には作動水の蒸発が問題となるためタンクの形状を工夫するか、熱交換器等の設置が必要となる。特にシリンダや揺動モータなどの作動水が循環しない箇所についても十分考慮するものとする。

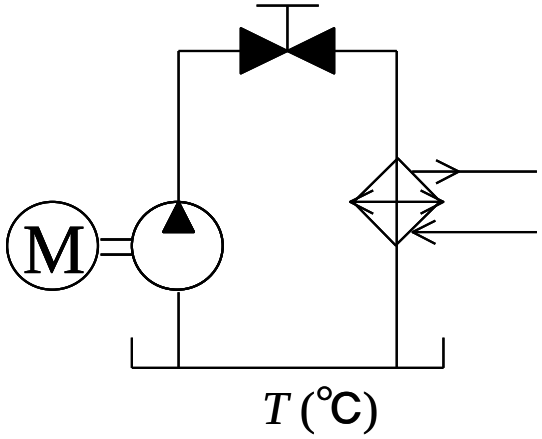


図 3.15　冷却器の効果を調べる実験装置

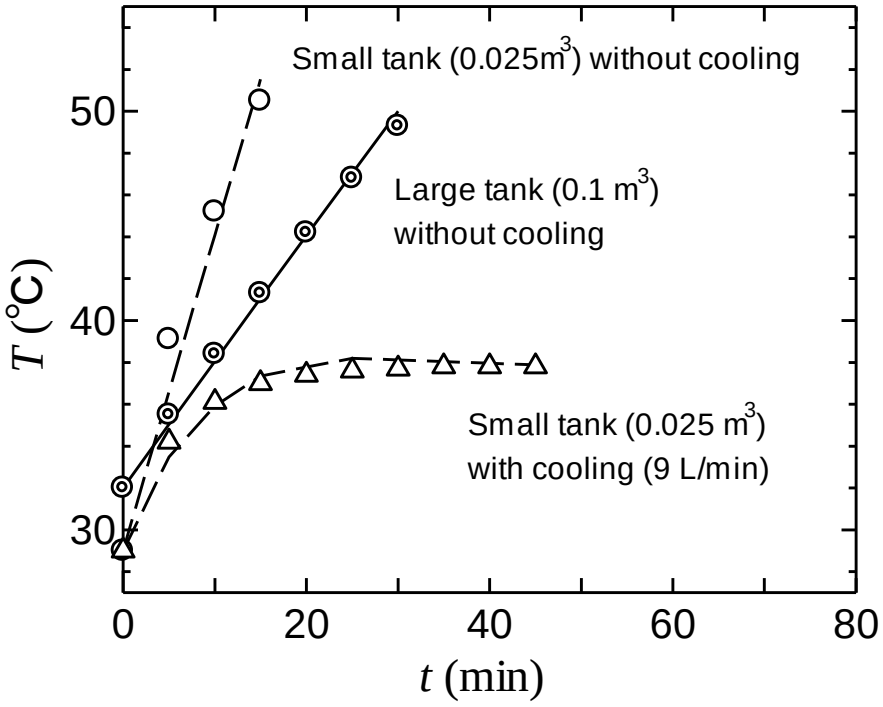


図 3.16　タンクのサイズによる水温上昇の違いと冷却器の効果

- 水温が規定された温度範囲を越える場合には冷却器を用いる。図 3.15 の装置で冷却器の効果を調べる実験を行った。ポンプから吐出された水は弁を通過した後、冷却器を通過してタンクに戻る。弁を絞るとその圧力損失によって水は加熱される。また、ポンプにおける動力損失も過熱源となる。

- 冷却器を使用しない場合のタンク水温の時間変化を想定した結果が左の下の図に丸印で示した。タンク水量が小さいと温度上昇速度が速くなる。

- 少ない水量（0.025m^3）の場合に冷却器を使用したときの水温の測定結果を三角印で示す。冷却器によって水温が規定の温度範囲内に納まっている。実線や破線は、回路の熱収支を考慮して計算した水温の推定値である。

- 水と作動油では比熱 C_p (J/(kgK))が異なり、水は 4180、作動油は 2018 である。水の比熱は作動油の比熱の約 2 倍である。それゆえ、同じ熱量だけ加熱しても水の温度上昇速度は作動油のそれの約半分である。

3.2.4　冷却器の効果

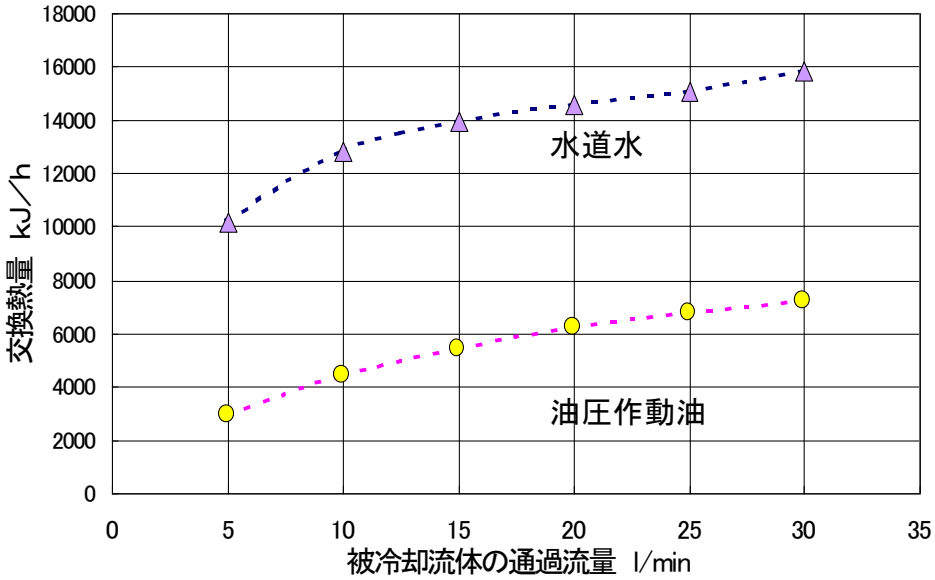


図 3.17　被冷却流体の流量と交換熱量の関係 [1)]

[1)]大生工業株式会社の資料より

（条件）
熱交換器型式：TCW-106-2[1)]
被冷却流体の入口温度：45 ℃
被冷却流体の出口温度：42℃
冷却水の入口温度：27 ℃
冷却水の流量：9 ℓ/min

図 3.17 は熱交換器 TCW-106-2[1)]を使用して、水道水と鉱油系作動油を冷却したときの通過流量と交換熱量を示す。

ここで，交換熱量は、

$Hc = \rho_o \times C_o \times Q_o \times \Delta T \times 60$（油の場合）

$\rho_w \times C_w \times Q_w \times \Delta T \times 60$（水の場合）　　で表わす。

水道水の交換熱量は水の物性により，油圧作動油に対して約２．５倍大きい。このことから水圧システムの冷却器は，鉱油系作動油仕様に対して小型化が可能である。

3.3 その他の注意点

(1)	ドライ運転の防止	ドライ運転による損傷を避けるため、ポンプは常に作動水が供給されている状態で運転しなければならない。
(2)	空気抜き	システムを最初に運転する際には、機器の保護及び所定の性能を得るため、水圧ユニットや配管系、アクチュエータ等の空気を完全に抜かなければならない。
(3)	フィルタ圧力損失の監視	作動水の適切なフィルトレーションは、水圧機器の寿命を長くすると共に、システムの十分な性能を発揮する上で重要となる。フィルタの圧力損失が監視できるシステムとすることが望ましい。
(4)	フラッシング	作動水への異物混入によるトラブルを未然に防ぐため、配管や継手、機器に付着している油やゴミは十分除去した上でシステムに組込まなければならない。さらに、水圧ユニットや配管系統の異物を除去するため、新規にシステムを駆動する際には必ずフラッシングを実施するものとする。フラッシング時の水温は、フラッシング効果を高めるため、運転可能範囲でなるべく高く保つ方が良い。
(5)	三連プランジャーポンプにおける脈動、騒音	三連プランジャーポンプは、低速回転で使用されることが多いので、脈動による弊害がシステムに発生するケースがある。この場合、アキュムレータ、ゴム配管等の脈動防止対策やポンプユニットを分離して装置を構成する事が望ましい。
(6)	機器・ユニットの保管	機器やユニットの保管については、供給者の指示に従わなければならない。海外の機器メーカでは、保管・貯蔵時に、機器内部の腐蝕や凍結を防止する目的で不凍液を封入している場合が多い（例えば、モノプロピレングリコール）。使用時には不凍液を十分洗い流した上で使用する必要がある。
(7)	定期点検	ポンプなどから発する振動によって配管の締付けがゆるむことがあるので、作動水の漏れや空気の吸込みを防ぐために、定期的に点検を実施してジョイント部や 配管のネジ部の増し締めを行う。

第4章　アクアドライブシステムの応用と分野

ADS の適用環境と期待される応用分野は、以下に示すようなものである。

(1) **クリーン性、清浄性が求められる生産・製造業環境**：食品加工機械、食料・飲料などの包装および製缶機械、半導体．情報機器、医療・医薬に係わる生産ライン、3K 追放の一般産業、生産・加工機械の駆動

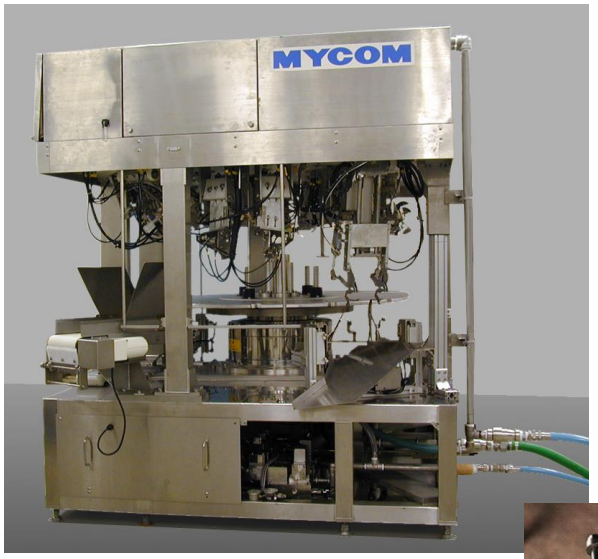
(2) **自然環境保全を配慮しなければならない作業環境**：臨海河川における作業機械や水門などの可動構造物の駆動、水中や海水中の作業機械

(3) **原子力の放射能雰囲気場などの特殊雰囲気環境**：炉心内部の検査、及び補修のための作業機械、廃炉のための作業機械

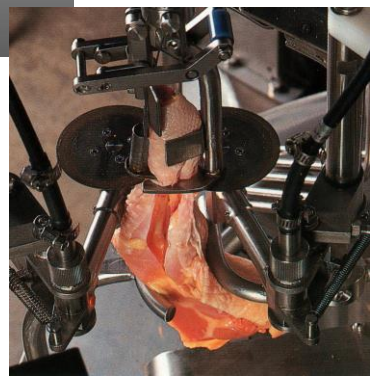
(4) **防火安全が求められる対人環境**：消防機器、レスキュー工具、医療・福祉機器・高齢化住設機器、スポーツ・レジャー装置、可動舞台装置

近年、特に ISO14000、HACCP など規格の普及により認証取得の手段としても、ますますその重要性が認識されつつある。あわせてアクアドライブ技術は、第 3 章に示したような優れた液圧駆動特性を支えに、各種生産機械の「エミッションフリー」指向に対する基盤技術としての期待が高まっている。

図 4.1 は、「アクアドライブ技術」を支える基盤技術、システムの構成に必要な機器やアクセサリー、さらに上述した本技術の適用環境とその応用分野を総合的にまとめたものである。



イエルダス
（とり胸肉脱骨装置）



トリダス
（とりもも肉脱骨装置）

写真提供：株式会社 前川製作所

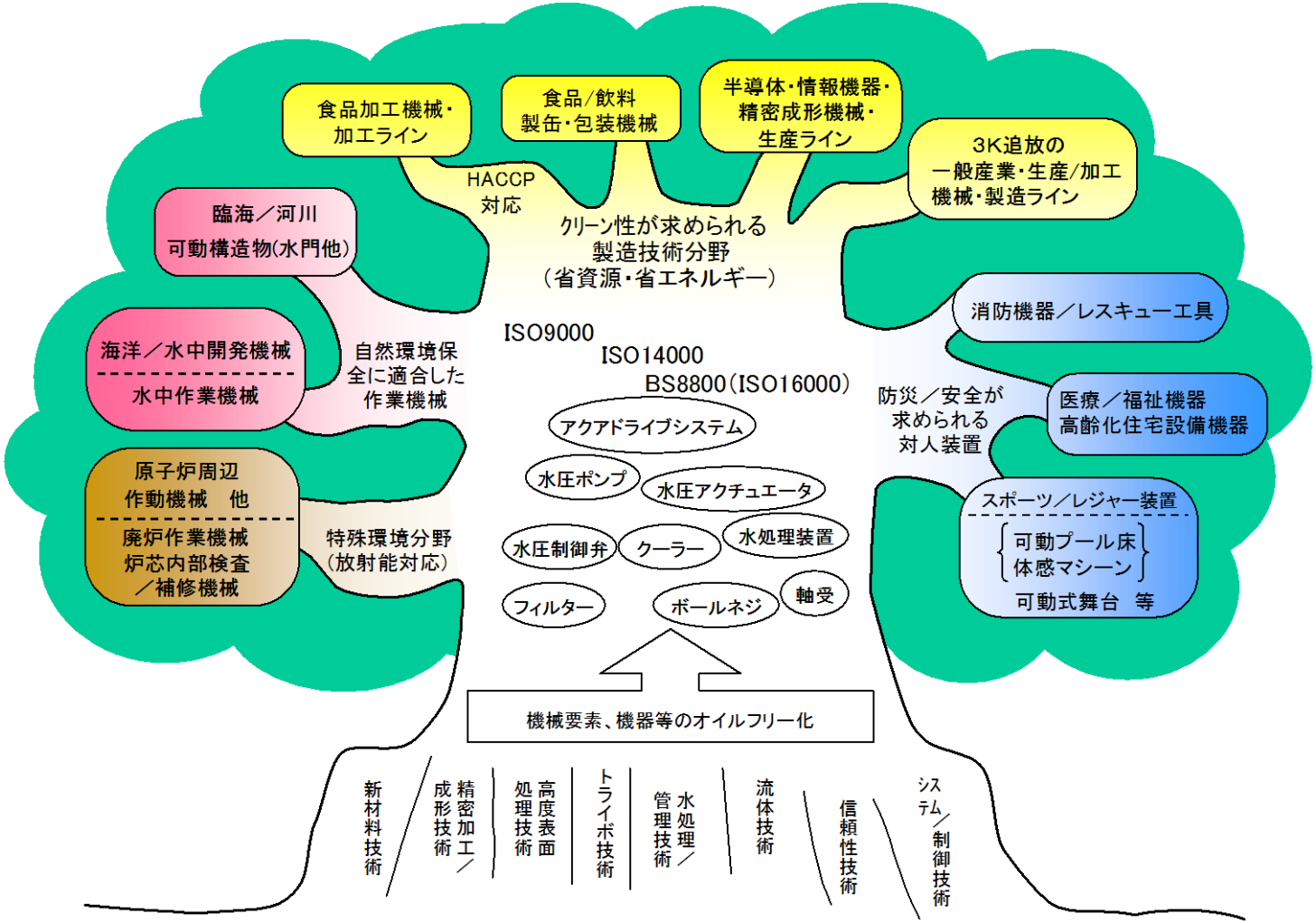


図 4.1　アクアドライブシステムの応用分野とそれを支える基盤技術

参　考

JFPA 水圧委員会メンバー（あいうえお順）：本冊子の内容または製品に関するお問い合わせは（社）日本フルードパワー工業会まで

株式会社荏原総合研究所
〒251-8502
藤沢市本藤沢４－２－１
TEL：0466-83-7660
FAX：0466-81-7220

株式会社阪上製作所
〒130-0013
墨田区錦糸４－１７－６
TEL：03-3625-1111
FAX：03-3625-8270

カヤバ工業株式会社
〒228-0828
相模原市麻溝台１－１２－１
TEL：0427-45-8113
FAX：0427-45-9687

喜多村商工株式会社
〒111-0041
台東区元浅草２－１－７
TEL：03-3843-3218
FAX：03-3843-2718

株式会社タカコ
〒579-8004
東大阪市布市町３－１－４８
TEL：0729-88-2622
FAX：0729-88-2620

豊興工業株式会社
〒444-3512
444 岡崎市鉢地町字開山４５
TEL：0564-48-2715
FAX：0564-48-5911

株式会社ナブコ
〒105‐0022
港区海岸１－９－１８
TEL：03-5470-2412
FAX：03-5470-2417

株式会社不二越
〒930-8511
富山市不二越本町１－１－１
TEL：076-423-5134
FAX：076-493-5263

株式会社山本水圧工業所
〒561-0835
豊中市庄本町２－８－８
TEL：06-6334-4655
FAX：06-6331-2516

油研工業株式会社
〒251-8525
藤沢市宮前１
TEL：0466-23-9094
FAX：0466-23-9124

上智大学　理工学部
〒102-0094
千代田区紀尾井町７－１
TEL：03-3238-3302
FAX：03-3238-3311

横浜国立大学　工学部
〒240－8501
横浜市保土ケ谷区常盤台７９－５
TEL：045-339-3800
FAX：045-331-6593

この事業は、オートレースの機械工業振興補助金を受けて実施したものです。

社団法人 日本フルードパワー工業会
〒105-0011
東京都港区芝公園３－５－８
機械振興会館 311 号室
TEL：03-3433-5391
FAX：03-3434-3354