

# 攪拌機講座

**AOKI** CO.,LTD. 青木株式会社

<b>第1章 攪拌概説</b>	
はじめに.....	1
1. 攪拌とは.....	3
2. 攪拌の形態と目的.....	3
3. 攪拌機の主たる適応分野と応用例.....	3
4. 攪拌槽内の流動形態（フローパターン）.....	7
5. 攪拌の作用.....	9
6. 攪拌装置の分類.....	9
7. 攪拌装置の構成要素.....	9
<b>第2章 攪拌機の最適選定・設計</b>	
1. 攪拌操作条件の設定.....	15
2. 攪拌翼形状の選定.....	18
2.1 攪拌翼形状選定の考え方.....	18
2.2 各種攪拌翼の種類と特長.....	18
2.2.1 エッジドタービン翼.....	22
2.2.2 プロペラ翼.....	23
2.2.3 タービン翼.....	24
2.2.4 パドル翼.....	25
2.2.5 アンカー翼.....	26
2.2.6 リボン翼.....	27
2.2.7 その他の攪拌翼.....	28
2.3 攪拌翼の設計ポイント.....	29
2.3.1 翼径に関して.....	29
2.3.2 翼段数について.....	30
2.3.3 翼取り付け位置に関して.....	31
3. 翼径および回転数の決定.....	32
4. 攪拌動力の算出.....	33

5. 攪拌装置ハード部の選定と設計.....	34
5.1 駆動装置（電動機・変減速機）の選定.....	34
5.1.1 電動機容量（出力）の決定.....	35
5.1.2 電動機の型式選定上の注意.....	35
5.1.3 インバータの使用について.....	36
5.1.4 減速機について.....	39
5.1.5 変速機について.....	42
5.2 軸封部について.....	47
5.3 攪拌機本体および攪拌軸の設計.....	53
5.4 攪拌翼の設計.....	59
5.5 攪拌槽および付帯設備につい.....	60
5.6 邪魔板の効果と弊害について.....	63
5.7 使用材質の選択.....	65

## 第1章「攪拌概説」

### はじめに

一般化学工業、石油化学工業をはじめとする多くの近代工業は原材料から製品になるまでにさまざまな単位操作が連続的に行われるプロセス工業である。その中でも攪拌装置は製品の品質やコスト及びプラントの円滑な運転に大きく影響を与える特に重要な装置である。

しかし、一般に使用する側から見ると、その構造や作動が比較的単純であるために安易な装置と捉えられがちである。あまり神経を使わなくても良いような攪拌操作もあるが、製品の良し悪しが、その攪拌によって決定されるような非常に神経を使う攪拌操作も多いのも事実である。

また、攪拌操作はその方法(攪拌方式、攪拌翼形状など)や能力(攪拌動力、回転数など)には絶対にこうでなければならないという制限がなく、効率的な本来の姿ではなくても、少々無理をしても目的を達成させることが出来てしまうという性格を持つ装置でもある。したがって、製造現場では、効率が悪いと思われても、次期計画も現装置を踏襲した攪拌機が選定されてしまうということは多々ある。このような状況は攪拌装置の選定や設計方法が十分に体系化されていないこと、使用者に十分な認識を持たせるような教育が出来ていないことに起因していると言える。同じ流体機器で機械的構成も類似したポンプの場合は、流量と揚程が与えられれば、その種類や動力は比較的容易に選定出来るような指針が一般化されているが、攪拌機の場合は経験や実績などから類推的に選定されるのが実情である。攪拌機の使用目的や使用条件がポンプのように単一的ではなく、さまざまな目的を持ち、またその結果の評価方法も各々異なるということから体系的な選定方法が得に難しいということは事実である。

本講座は、攪拌機の選定方法をできるだけ体系的に行なうための考え方を学ぶことを目的として書かれた。



## 攪拌機と類似機械との比較

攪拌機は翼の回転により、その機能を生じさせる流体機器のひとつである。この攪拌機と類似の機械としてよく知られているものにポンプがある。ここで、両者を各項目ごとに比較を試みる。

表1のように攪拌機もポンプも機器の構成要素や動力特性はほぼ同じであるが、使用目的や目的達成の評価方法におおきな違いがあり、攪拌機の方に圧倒的な難しさがある。これが体系化された選定方法の確立を阻んでいる理由でもある。

表1 攪拌機とポンプの比較

比較項目	ポ ン プ	攪 拌 機
機器の構成要素	電動機 減速機 ポンプ本体 軸封部 軸 インペラ(翼)	電動機 減速機 攪拌機本体 軸封部 軸 インペラ(翼)
回転翼の作用	Q : 吐出量 H : 揚程	Q : 吐出量 または 循環量 H : 剪断力
動力特性	$P \propto Q \cdot H$ $P \propto N^3 \cdot D^5$	$P \propto Q \cdot H$ $P \propto N^3 \cdot D^5$
使用目的	主として流体輸送	混合、物質移動、熱移動、反応などの促進、制御を含む多くの目的に使用
目的達成の評価	Q : 流量計 H : 圧力計による測定で容易に確認可能	各目的ごとに異なる測定方法、評価基準など難しい問題有り
機種を選定	QとHから体系的に確率されているので誰でも容易に行なえる	体系化されていない。 実際上は経験値重視したがって難しい



## 1. 攪拌とは

明確な定義はないが、一般に比較的低粘度の液体を媒体とする流体をあつかう場合を”攪拌”と言い、固体と固体を混ぜ合わせる”混合”や非常に高粘度の流体を練り合わせる”混練”または”捏和”とは区別される。

攪拌は攪拌槽内の流体に攪拌翼によって機械的に流動を与え、様々の目的を達成させる操作である。それは単に混合(物を混ぜ合わせる)だけでなく、物質移動、熱移動や反応などの促進や制御を行わせることが主目的となることが多い。

2. 攪拌の形態と目的 攪拌の定義から攪拌操作には必ず液相が存在し、この液相と他の液相、固相および気相が関係する。したがって相別の攪拌形態として、液-液、液-固、液-気および液-固-気の4形態がある。表2は相別の攪拌形態ごとの主な攪拌目的を表したものである。

目的の名称はその時の操作から 感覚的に言われるので、例えば水とアルコールを混ぜる操作があったとしたら、溶解とする場合も希釈とする場合もあるように厳密な区分けがあるわけではない。

3. 攪拌装置の適応分野と応用例 攪拌装置は、一般の人たちが目にする機会は少ないが、表3にあるように、私たちの生活に関わる多くの製品の製造現場や生活環境を支える様々なところ、たとえば上下水道、電力、土木建設 関連のような個所でも多く使用されている。言ってみれば私たちの豊かな生活を支える“縁の下の力持ち”的存在なのである。また図1は製造プラントにおける攪拌機の使用例であるが、それぞれの使用個所で重要な役割を持つ機器として機能しているのである。



表2 攪拌の形態と目的

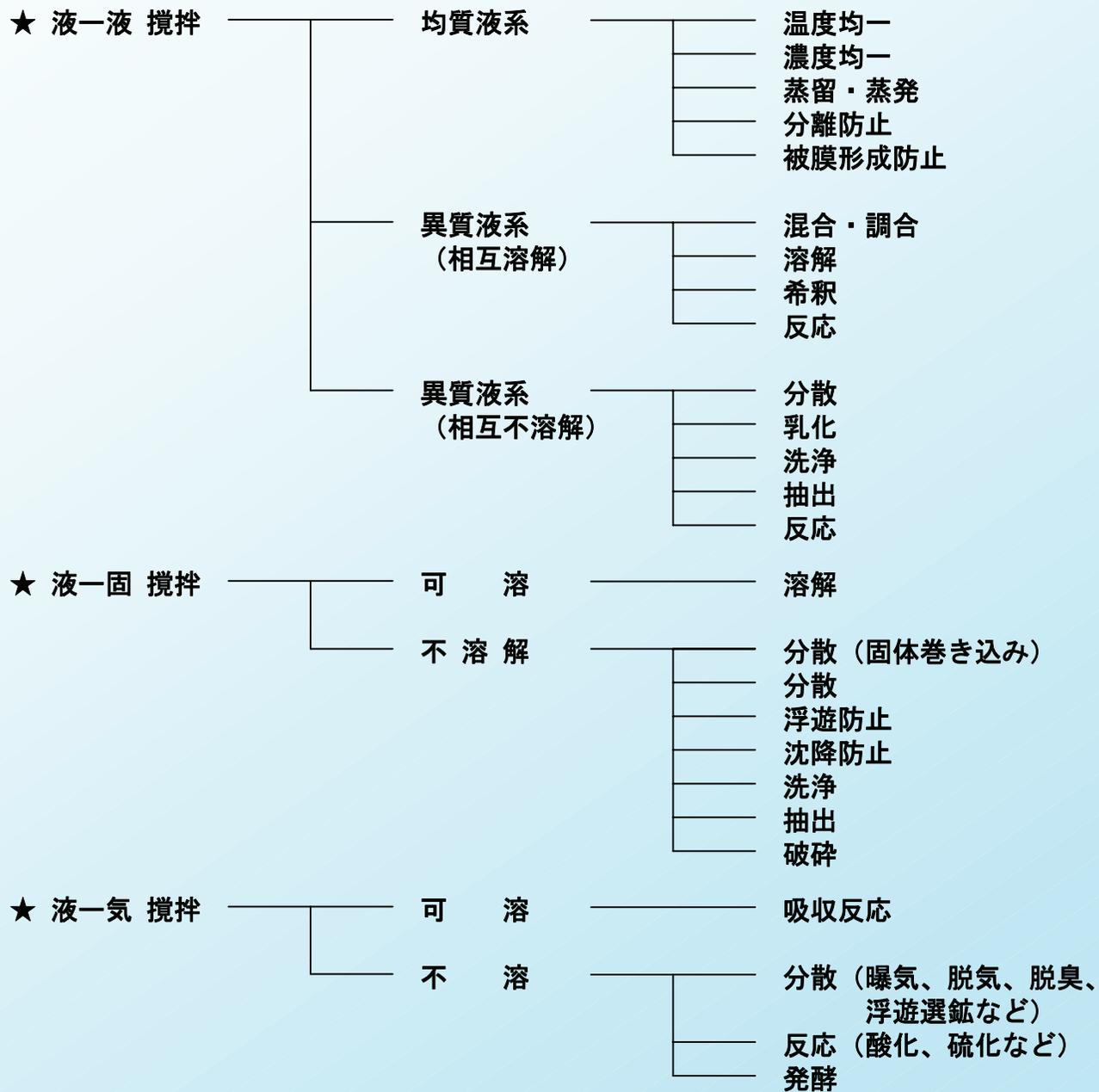
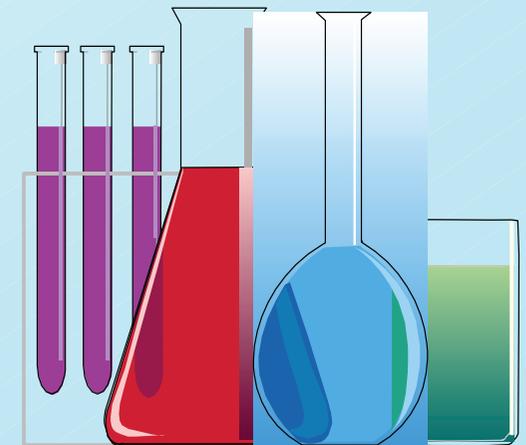


表3 主たる適応分野と応用例

一般化学工業	(各種酸、アルカリ等の薬液調製、反応等)
石油化学工業	(各種炭化水素液、アスファルト、潤滑油等の調製、反応等)
樹脂工業	(ABS、PP等各種樹脂重合反応、晶析、沈降防止等)
ゴム工業	(ゴム溶解、均一混合等)
接着剤工業	(溶解、均一混合等)
塗料インク工業	(ワニス反応、混合、均一混合、原料分散等)
磁気材工業	(原料分散、調合、貯蔵)
製紙工業	(白土分散、澱粉分散、蒸煮、塗液均一混合、パルプ混合等)
医薬品工業	(各種薬液調合等)
食品工業	(果汁、乳製品、調味料、菓子製造等)
醗酵醸造業	(日本酒、ビール、ワインの調合等)
鋳業	(湿式精練=金属スラリ反応、均一、沈降防止等)
窯業	(粘土溶解等)
環境設備	(排煙脱硫装置用、上下水処理用等)
土木建設業	(モルタル混合、セメント排水処理等)
エネルギー関連	(電力、原子力関連等)



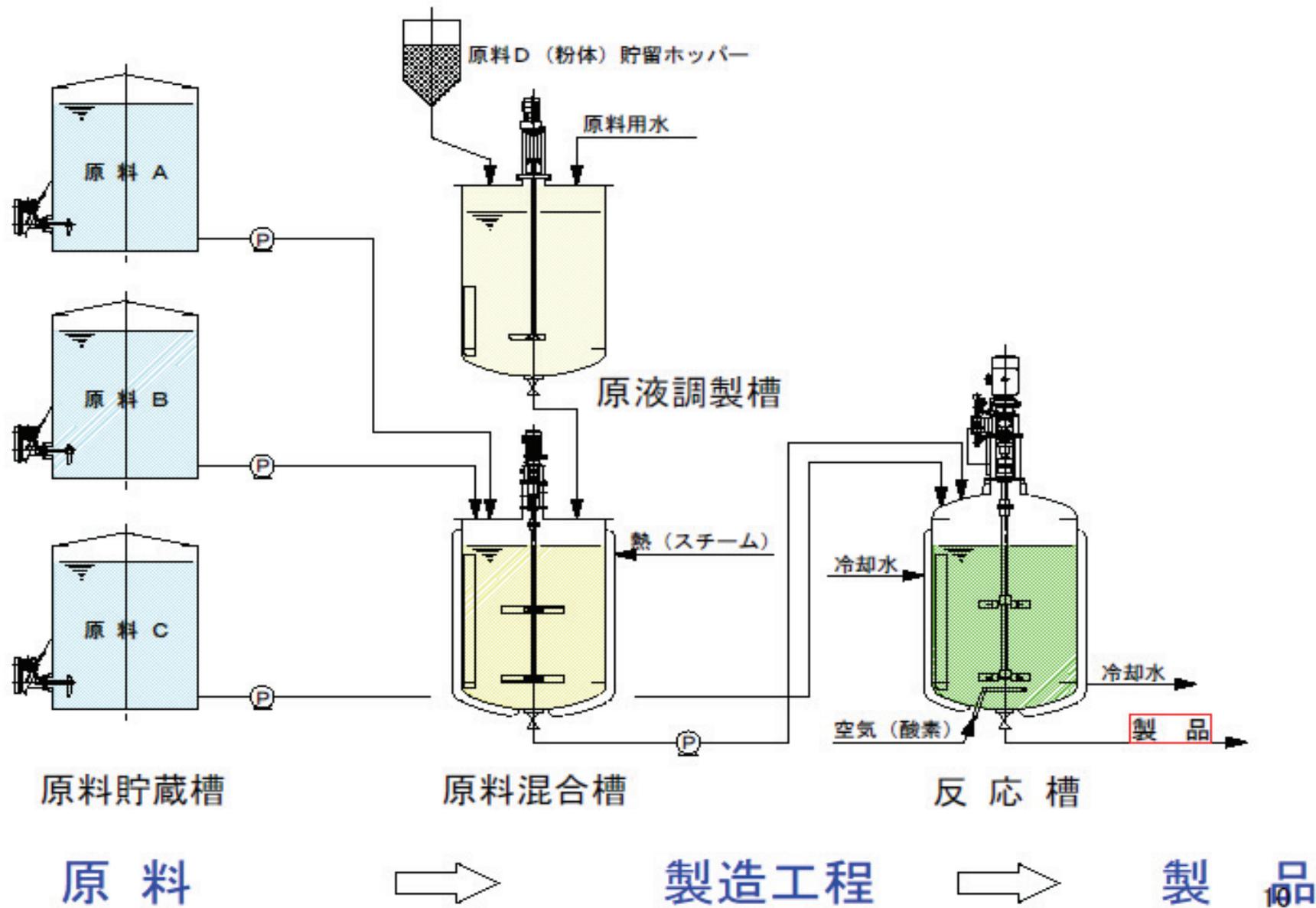


図1 製造プラントにおける攪拌機の使用例

#### 4. 攪拌槽内の流動形態(フローパターン)

攪拌槽内の流動形態は攪拌装置の各条件(攪拌翼形状、攪拌槽形状、邪魔板の有無、攪拌機の取付位置など)により異なるが、下記の3形態が基本となる。邪魔板とは、通常、槽壁に数カ所取り付けられた板状の突起物で、攪拌翼によって発生される旋回流を制御し、主に上下循環流に転換する役目を持つ。なお、邪魔板については攪拌槽および付帯設備のところで詳述する。

##### a 旋回流(Tangential Flow)

攪拌軸と同一方向に槽内を回転する流れで、邪魔板のない攪拌槽ではこの流動形態が支配的である。特に軸の中心から攪拌翼の外周近辺までは、軸と同一角速度で回転する固体的回転部といわれる領域がある。ここでは、流体各部に速度差を生じないため、攪拌のひとつの作用である剪断力に乏しく攪拌効率は良いとは言えない。

##### b 上下循環流または軸流(Axial Flow)

主にプロペラ翼や傾斜タービン翼により発生させられる軸に平行な方向の流れである。特に邪魔板付きや、ドラフトチューブ付きの場合にその流れは顕著になる。攪拌槽内全体の流体の循環、入れ替りに寄与する攪拌効果に有効な流動である。

##### c 放射流または輻流(Radial Flow)

主に垂直に取り付けられた羽根を持つ攪拌翼が軸付近から吸い込んだ流体を軸と垂直の方向に吐出することにより発生させられる。主に翼近辺での発生が多く、流速も大きい。邪魔板との組み合わせにより比較的大きな剪断作用を発生する。

図2は各々の流動形態の模式図と流速分布の一例を表したものである。流速分布図は、攪拌槽内の流速測定をした一例を示すもので、旋回流と上下循環流については、槽側断面の半径方向の流速を示す。放射流については垂直方向の流速を示している。また、図中、実線(赤線)は邪魔板がある場合、点線(青線)は邪魔板がない場合の流速を示す、これらから、邪魔板がない場合は旋回流のみ流速が大きく、上下流や放射流はほとんど発生していないことがわかる。邪魔板を取り付けることにより旋回流の成分は激減し、代わって上下流や放射流の発生が多くなることがわかる。したがって、通常の回転型攪拌機において攪拌効果の向上を望むのであれば、攪拌に対して有効な上下循環流、放射流を形成させるように、邪魔板やドラフトチューブなどの設置を考える必要がある。



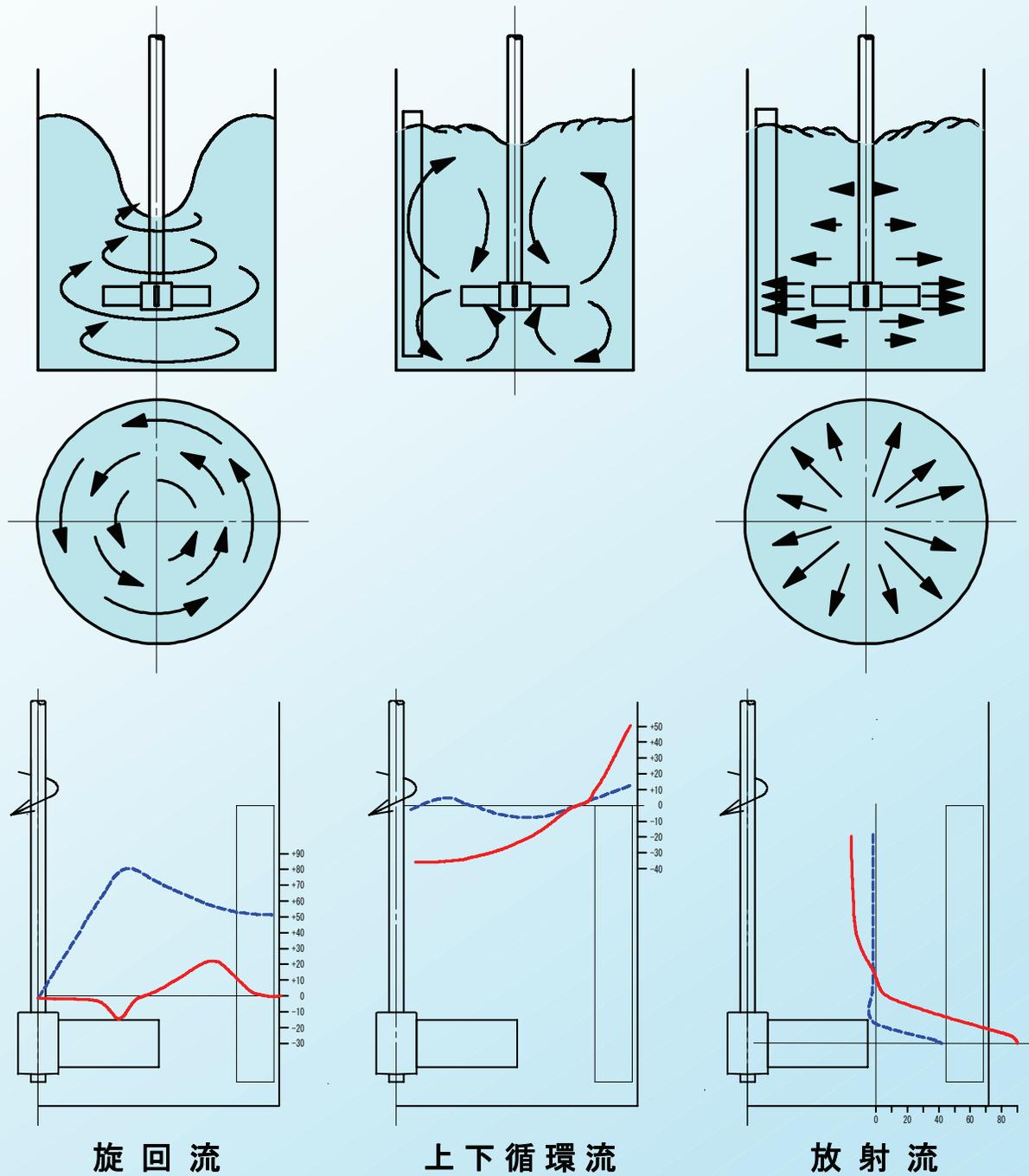


図2 攪拌槽内の流動形態と流速分布

## 5. 攪拌の作用

攪拌翼が槽内流体に与えるエネルギーは翼近傍または攪拌槽内の各所で剪断力を与える剪断作用(H)と翼のポンプ作用によって循環流を形成する吐出作用(Q)の2つの大きな作用に分けられる。この(H)と(Q)は攪拌動力(P)と $P \propto H \cdot Q$ の関係を持ち、ポンプと同様である。各々の作用は下記の攪拌性能に寄与する。

攪拌エネルギー

- 剪断作用(H): 分散能力(液滴、気泡の微細化など)
- 吐出作用(Q): 循環能力(混合時間、伝熱、固体の浮遊化など)

## 6. 攪拌装置の分類

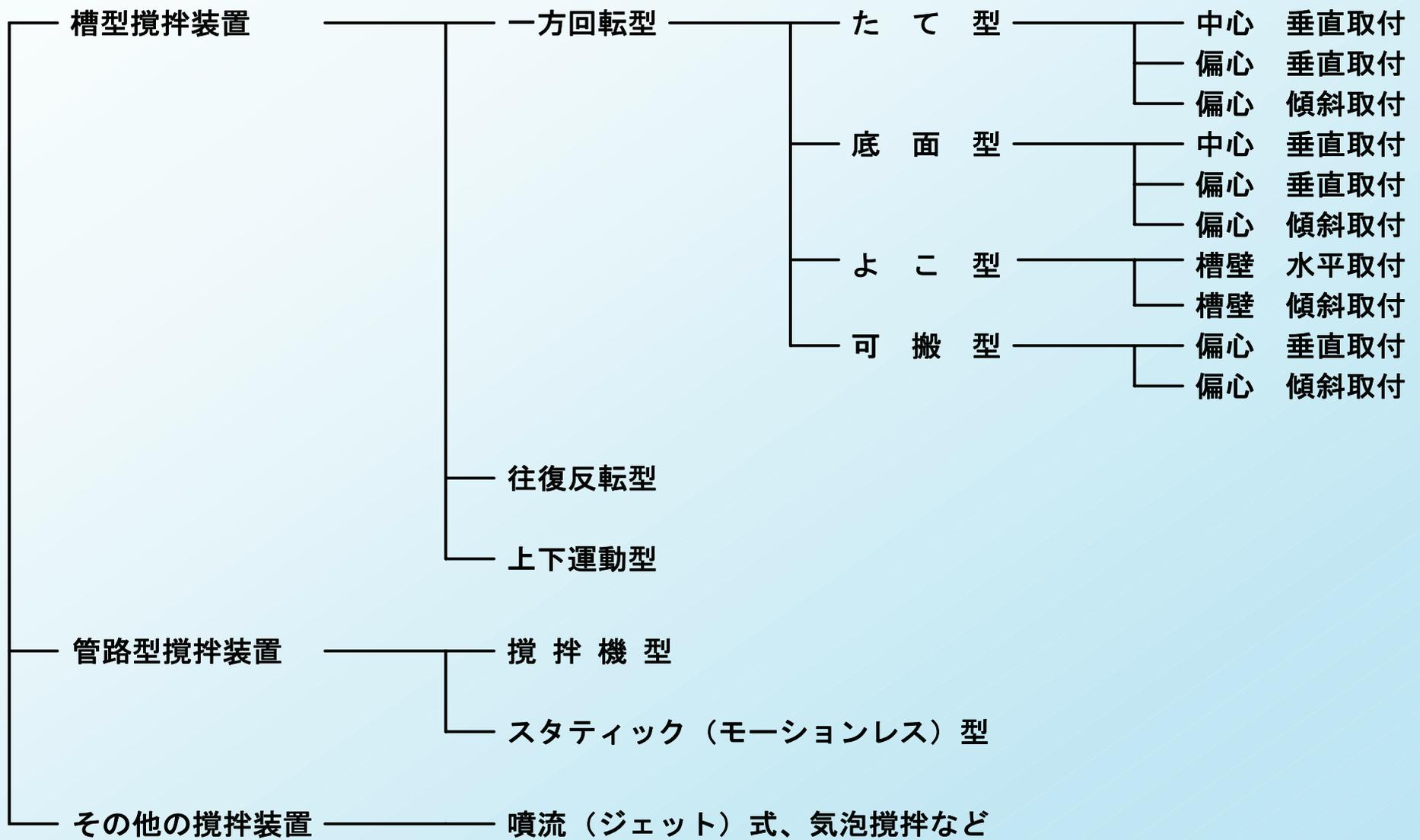
被攪拌液に効率的に流動を与えるべく様々な攪拌装置が考案されている。表4はこれらの攪拌装置を分類したもの、図3はそれぞれの攪拌装置の外観の一例であるが、最も一般的な攪拌装置は槽型、一方向回転たて型攪拌機である。これらの攪拌装置は構造的にも比較的簡単であるためコスト的に有利であり、装置に合わせ様々な取付方法や取付位置を選ぶことができる。(図4参照) 往復回転型、上下運動型は邪魔板を用いなくて、攪拌に有効な流動を発生させることができる攪拌装置であり、特定の使用条件において他の攪拌機では得られない威力を発揮することができるが、構造的に複雑となり、メンテナンスやコストに対して不利となり、常に選定の対象にすることはできない。管路型攪拌装置は連続操作を可能とし、機器のコンパクト化、コストの低減化を図ることができる機器であるが、ショートパスの問題は避けられず、導入に当たり注意を要する。本稿で対象とするのは、最も一般的な攪拌装置である槽型、一方向回転、たて型攪拌機である。

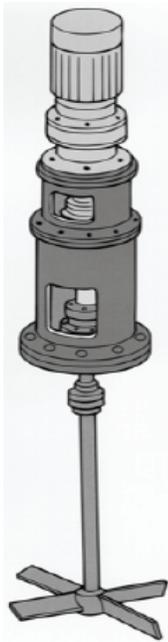
## 7. 攪拌装置の構成要素

図5および表5は最も一般的なたて型攪拌機付き槽型攪拌装置の構成要素である。各構成要素は、駆動部、軸封などのように様々な形状、性能をもった機器に細分され、おのこの操作条件、設置条件や周囲環境などに合わせ最適なものを選定する必要がある。



表4 攪拌装置の分類

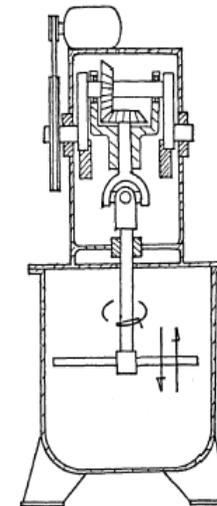




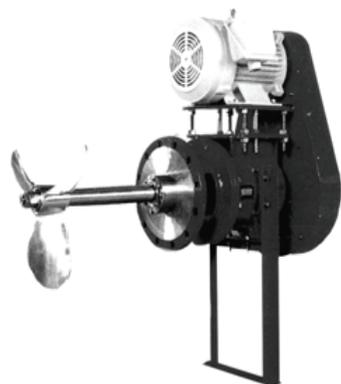
一方向回転型（たて型）



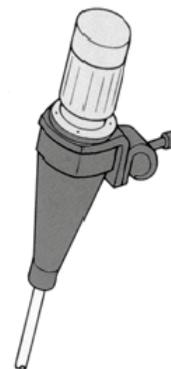
往復反転型



上下運動型



一方向回転型（よこ型）



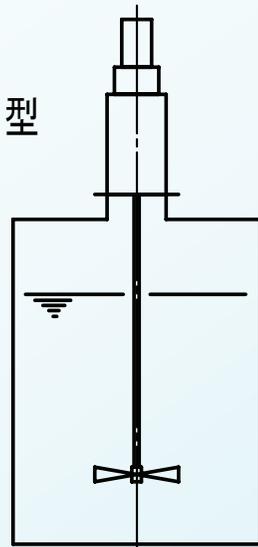
可搬型



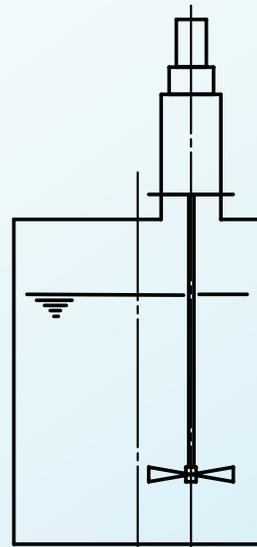
管路型

図3 主な攪拌装置の概略図

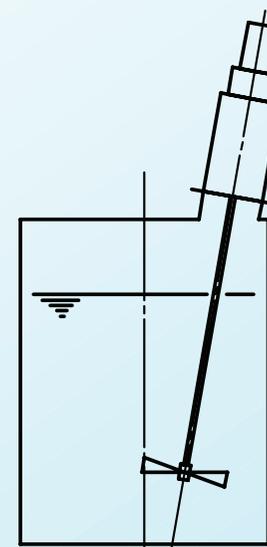
たて型



中心 垂直取付

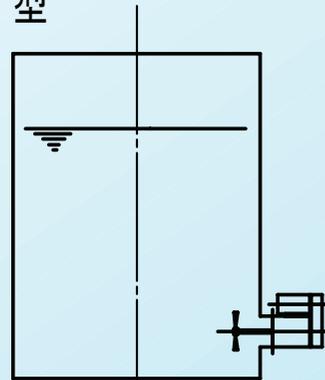


偏心 垂直取付

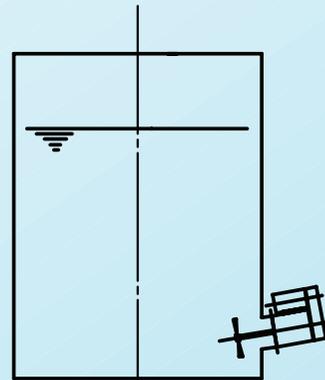


偏心 傾斜取付

よこ型

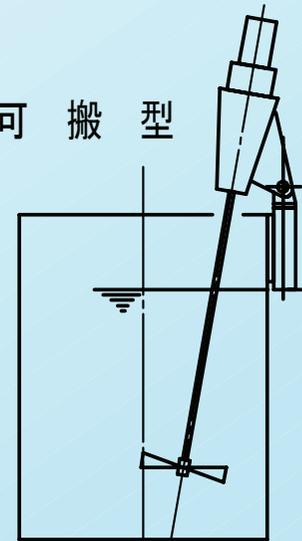


槽壁 水平取付



槽壁 傾斜取付

可搬型



偏心 傾斜取付

図4 攪拌機タイプと取付位置による分類

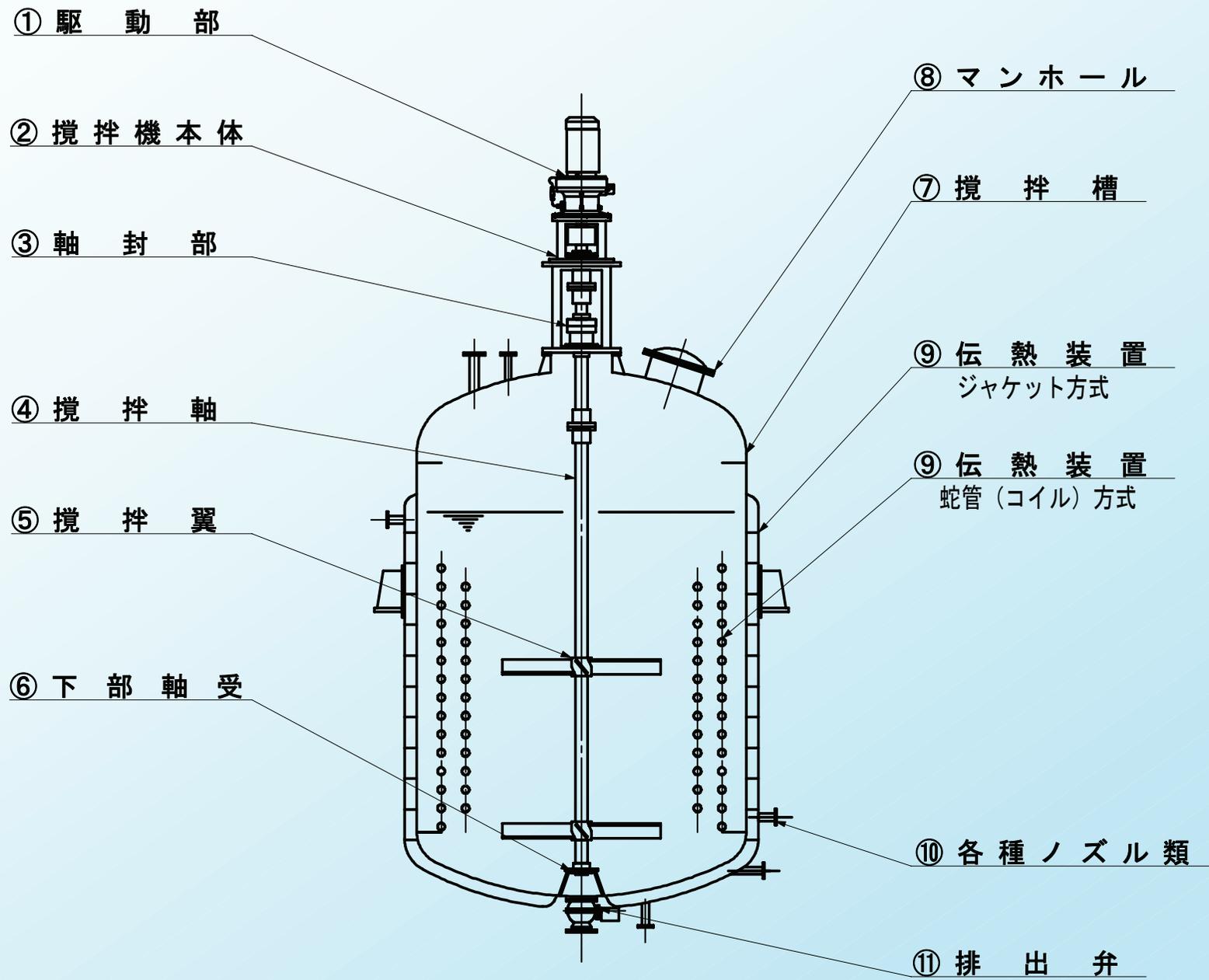


図5 攪拌機の構成要素概略図

表5 攪拌機構成要素の種類と概要

各構成要素名	各構成要素の種類	概 要	
①駆動部	原動機	電動機	.....一般に使用される原動機。 様々なタイプがあり、特殊環境（屋外、爆発性雰囲気など）でも使用可能な機種もある。インバータとの組み合わせで変速も可能。
		エアーマータ	.....圧縮空気でピストンやペーンを介して回転力を出力する。爆発性気体などの雰囲気で使用されることが多い
	減速機	油圧モータ	.....油圧でピストンやペーンを介して回転力を出力する。出力の割に駆動部をコンパクトに出来る
		ギア減速	.....コンパクト、高効率で高い減速比が得られる
		ベルト減速	.....低騒音、回転数の変更が可能
		機械式変速機	.....インバータによる変速より大きなトルクが得られる。市販機種としてはパイエル、リングコーンなどがある
②攪拌機本体	カップリング（軸継手）	.....攪拌機本体は駆動部からの回転を攪拌軸、攪拌翼に伝え、円滑に運転できるように支持する役目を持つ。	
	ベアリング（軸受）		
	支持架台／取付ベース		
③軸封部	オイルシール	.....安価な簡易型軸封装置	
	グランドパッキン	.....一般的な軸封装置であるが耐圧力は低い	
	メカニカルシール	.....高温、高圧に耐える軸封装置。シール液を使用しないドライメカニカルシールも使用される	
	水封（水シール）	.....簡易型軸封装置 水柱100～200mm程度で使用される	
④攪拌軸	.....軸にかかるねじりや曲げに対する強度が得られているか危険回転数範囲と運転回転数が合致していないかなどの点から安全に運転が出来る軸径が選定される。		
⑤攪拌翼	攪拌翼の形状、選定方法についての詳細は後述		
⑥液中軸受	.....攪拌軸が長い、曲げの力が大きいなどの場合に設置する。軸受材としては強化アクリル、カーボン、特殊合金等が用いられる。		
⑦攪拌槽	.....攪拌効率を向上させるための形状や寸法、使用温度や圧力に耐得る強度を考慮して設計される。		
⑧マンホール	.....原料の投入や槽内のメンテナンスのために設置される。一般にφ400～500程度の大きさが用いられる。		
⑨伝熱装置	.....槽内液の加熱や冷却を必要とする場合ジャケットやコイルが用いられる。		
⑩各種バルブ類	.....各液の出入口用、各種計測機器取付用等として設置される。		
⑪排出弁	.....攪拌後の液抜き用として、閉塞のないもの、液溜まりのないものが選定される。		

## 第2章 攪拌機の最適選定・設計

### はじめに

攪拌はその目的を達成させるために有効な流動を流体に与えれば良く、その方法は問われないので、実際には理論的に効率が悪いと思われても経験的、習慣的により攪拌機の選定や設計が行なわれてきた。しかし、工業的に使用される攪拌機は常にトータルコストの低減化が要求される。したがって、コスト低減のために効率と言うものを重視しなければならない。そのために各要素（例えば、翼形状、翼径、翼段数、翼取り付け位置、回転数、槽形状、邪魔板など）について最適な選定、設計を行なう必要がある。本章では、攪拌機の選定方法をできるだけ体系的に行うための考え方を学ぶことを目的としている。選定の手順として特にきめられたものはないが、理想的には以下のようなになる。

STEP-1 『攪拌条件の設定』

STEP-2 『攪拌翼形状の選定』

STEP-3 『翼径および回転数の決定』

STEP-4 『攪拌動力の算出』

STEP-5 『攪拌装置ハード部の選定と設計』

以下に各手順ごとの説明を詳述する。

### 1. 攪拌操作条件の設定

攪拌装置を選定、設計するにあたり、攪拌目的、攪拌強度、被攪拌流体の物性、機械的使用条件など様々な条件を実際の操作を考慮してあらかじめ決定しておかなければならない。これら一つでも情報にもれがあったり不適正な情報であったりすると、最終的に組み込まれた攪拌装置は正常に働かなくトラブルになってしまう。また、情報が不十分だからといって、過大な条件を課すこともひとつのトラブルといえる。すなわち、過大な条件により選定・設計された攪拌装置は、コスト的にも過大となり、それもひとつのトラブルと言えるからである。これらの条件を明確にする意味で「攪拌機仕様書」を作成することは有効な手段といえる。

その「攪拌機仕様書」の一例を表6に示し、書込む際の重要なポイントを下記に示した。



### (1) 攪拌仕様

実際に行われる攪拌操作の詳細を記述する。攪拌容量については、一定量で攪拌が行われるのか、または運転中に液量に変化があるのか、その場合液面が攪拌翼を通過し、さらに空転状態になるかどうかなどが記入されなければならない。

攪拌されるものの物性については、粘度、比重だけでなく配合割合なども記入すべきである。特に固体がある場合は、浮遊化を検討するにあたり真比重、かさ比重、粒度が重要な情報となる。攪拌目的については、溶解、分散等という単なる目的だけでなく、出来るだけ詳細で具体的な記述が必要である。例えば、固一液の溶解を目的とした攪拌について考えた場合、固体は攪拌中に投入されるのか、または攪拌開始前に投入されるのか、固体は液体に容易に溶解するのかどうか、液面上に浮遊して巻き込まれ難いか、または簡単に沈降してゆくか等々と言うように同じ固一液の溶解でもこのような具体的な検討を行わないと適正な攪拌機の選定が出来ないのである。また、既に同様の攪拌を行なっている実績があれば、そのできるだけ詳しいデータを収集し、必要な部分は新規の攪拌機にも取入れ、改善すべき部分は抽出し検討を加えて新設機に反映させるようにするべきである。

### (2) 攪拌機仕様

回転数や攪拌翼に関しては、スケールアップデータがある場合は、そのデータにより決定される。また攪拌機メーカーに一任する場合は、記入不要となる。接液部の材質に関しては、特に腐食性の液の場合に使用可能な金属、樹脂やゴムの種類などの記述が必要である。軸封部に対しては、設計に対する圧力(攪拌槽の強度上の圧力ではなく攪拌機運転時の必要保持圧力)、またメカニカルシールを使用する場合は、どのようなシール液が使用可能かなどが必要な情報となる。

### (3) 駆動部仕様

攪拌機の駆動用としてほとんどの場合で使用される電動機については、電源の周波数や電圧だけでなく、使用場所の特殊雰囲気(屋内外、防水、防塵、防爆)およびそのグレードを知る必要がある。

それによって、おののくに適合した型式を選定する必要があるからである。

減变速機を選定にあたっては、負荷条件(起動頻度、衝撃の程度)の確認、变速機の場合は運転中のトルク変化の有無、およびトルク特性の確認などが必要となる。

### (4) 攪拌槽仕様

攪拌槽の寸法、上部／底部の形状、邪魔板の取り付けの可否、攪拌機と攪拌槽との取り合い(取り付け方法、取り付けフランジ規格、寸法等)などが必要な情報である。



表6 攪拌機仕様書の例

Ref. No. \_\_\_\_\_

年 月 日

攪 拌 機 仕 様 書

1	貴会社名:		
2	御担当者氏名:		御所属部署名:
3	Tel. No.		Fax. No.
4	Item. No.	装置名称:	数量: 台
<b>◆攪拌操作条件</b>			
5	搅拌液量: 運転中増減 無・有 Max.          Nor.          Min.		空転: 無・有
6	被搅拌物: 液① (                      ) 比重=          粘度=          mPa・s		混合後の物性 比重= 粘度=
7	液② (                      ) 比重=          粘度=          mPa・s		
8	固体 (                      ) 真比重=          かさ比重=          粒度=		
9	気体 (                      ) 流量=          濃度=		
10	搅拌目的: 均一・混合・溶解・沈降防止・分散・反応・乳化・気体分散・晶析・抽出・ (                      )		
11	詳細記述 _____		
12			
13	操作方法: 回分 (          Hr/回・          回/day) 連続 (流量          /Hr)		
14	詳細記述 _____		
15	_____		
16	_____		
17	温 度: (操作          /設計          )		圧 力: (操作          /設計          )
<b>◆攪拌機仕様</b> 御指定事項には*印を付記してください。			
18	回転数: 変速 無 (          rpm) ・有 (          ~          rpm)		
19	攪拌翼: 枚数          翼段 (翼径          mm) / 枚数          翼段 (翼径          mm)		
20	接液材質: CS・SUS304・SUS304L・SUS316・SUS316L・ (                      )		
21	表面処理: 酸洗・バブ研磨 (#200・#250・#300・#400) ・電解研磨・ (                      )		
22	ライニング: HRL・SGL・テフロン・FRP・ (                      ) → 用途: 耐食・付着防止		
23	軸封部: 不要・要 [グランド] (                      ) ・メカシール (S・D・Dry) ・液封 (                      ) ・ (                      )		
24	スリーブ: 不要・要 (                      )          ↳ 加压装置 不要・要 (シボット・加压缶・OPU) シーブ液 (                      )		
25	下部軸受 (振止め): 不可・可 (材質                      )		
<b>◆駆動部仕様</b> 原動機手配 (弊社・貴社 (御支給品使用)) 減速機手配 (弊社・貴社 (御支給品使用))			
26	原 動 機: 電動機・エンジン・油圧機・ (                      ) メーカー指定 無・有 (                      )		
27	電動機型式: 全閉外扇 非防爆・安全増・耐圧防爆 / よこ・たて / 屋外・屋内 / 防食 (                      )		
28	電 源: 50・60Hz / 200・220・380・400・440V /		
29	変・減速機仕様: 方式                      / 型式                      減速比          メーカー指定 無・有 (                      )		
30			
<b>◆その他</b>			
31	設置場所: 屋内・屋外 (                      )		据付制限: 無・有 (                      )
32	塗装使用: 御指定色 無・有 (                      )		(                      )
33	予 備 品: 無・有 (                      )		付属品: 無・有 (                      )
<b>◆攪拌槽仕様</b> 見積に 不含・含む          ◆略図/備考			
34	適用法規: 無・有 (1圧・2圧・高圧・消防                      )		
35	型 式: 密閉・半密・開放・移動・横転・ (                      )		
36	蓋 部: 平板・鏡板 (10%皿・半楕円・                      ) ・円錐 度		
37	直胴部: 縦型・横型/円筒 (φ          xH                      ) ・角型		
38	底 部: 平板・鏡板 (10%皿・半楕円・                      ) ・円錐 度		
39	取付フランジ: 規格/サイズ 指定 無・有 (                      )		
40	邪魔板: 取付 可能・不可能 (                      )		
41	その他: _____		
42	_____		
43	_____		

## 2. 攪拌翼形状の選定

### 2.1 攪拌翼形状選定の考え方

攪拌翼の選定に関しては、絶対的に決められた方法があるわけではない。ある攪拌操作に対して複数の攪拌翼形状が選択の候補に挙がることは希ではない。多少本来の選定から逸脱をしても強引に攪拌をさせてしまい、それで済んでいるケースも実際にはある。攪拌操作は、このような側面を持つが、ここで考えなければならないのは効率であり、最少のコスト、エネルギーで最大の効果を得るための攪拌翼形状の選定が求められているのである。ここではその効率的な攪拌翼形状の選定について述べる。

攪拌翼の作用は翼の近傍または攪拌槽内の各所で剪断力を与える剪断作用(H)と翼のポンプ作用による液の吸い込みと吐出による循環流の形成を与える循環(または吐出)作用(Q)との2つの大きな作用に分けられる。剪断力は、流体に速度差したがって、変形を与え、液滴や気泡の分散などに寄与する。また吐出作用は、槽内全体の流れを生じさせることで槽内の均一化に寄与し、その量的大小は、混合時間に関係してくる。攪拌性能や攪拌機のコストなどを比較検討するうえの最重要因子として、一般に攪拌動力(P)があげられる。この攪拌動力との関係は $P \propto H \cdot Q$ であるから、剪断作用と循環作用とは一定動力内では相反する因子である。したがって、目的としている攪拌はどちらの作用を主体に考えるかが効率アップのポイントとなる。

攪拌翼はその形状により剪断性能の優れた翼、循環性能に優れた翼、両者をバランスよくもった翼に分けることが出来る。また各々の攪拌操作では、その目的を達成するために与えられるべき作用がある。効率的な攪拌翼の選定とは、行おうとしている攪拌が要求している性能(作用)は何かを捉え、その作用をより多く引き出せる翼形状を選定することである。(図6参照)





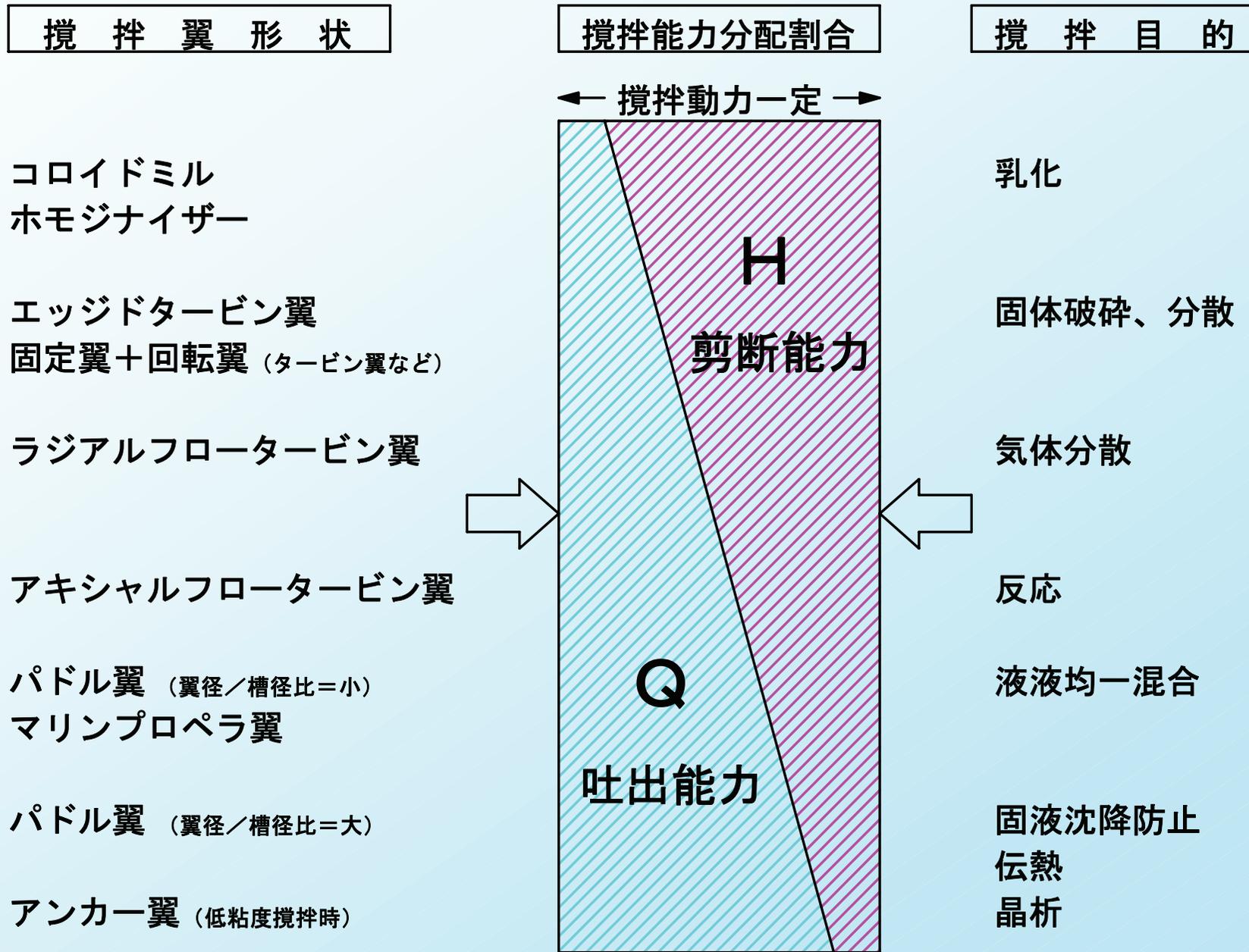
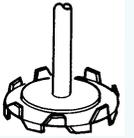
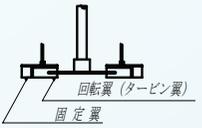
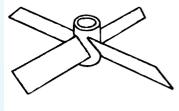
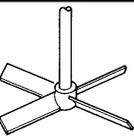
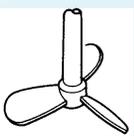
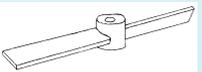
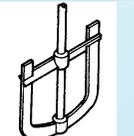


図6 攪拌翼形状と特性及び攪拌目的 概念図

表7 攪拌翼選定図表(主な攪拌翼の形状、特性及び適応)

翼名称	概略形状	翼径/槽径比	一般的な回転数範囲	使用粘度範囲 最高使用可能粘度 mPas	性能指向	(液相) 主なる攪拌目的	概略攪拌強度 P/V [KW/m <sup>3</sup> ]	
エッジタービン翼		0.25 ~ 0.35	500 ~ 3000	低 ~ 高 Max. 50000	剪断型 H	(液-液) 乳化 強分散	7 ~ 20	
固定翼&タービン翼		0.25 ~ 0.35	300 ~ 1000	低 ~ 中 Max. 1000		(液-固) 破碎 分散 急速溶解	5 ~ 10	
ラジアルフロータービン翼		0.25 ~ 0.50	50 ~ 300	低 ~ 高 Max. 30000		(液-液) 均一化 分散 反応	0.5 ~ 3	
アキシアルフロータービン翼		0.25 ~ 0.50	50 ~ 300	低 ~ 高 Max. 30000		(液-固) 分散 溶解	0.5 ~ 2	
小翼径 パドル翼		0.35 ~ 0.50	100 ~ 300	低 ~ 中 Max. 5000		(液-液) 均一化 混合 伝熱 分離防止	0.3 ~ 1	
プロペラ翼		0.20 ~ 0.35	200 ~ 400	低 ~ 中 Max. 3000		(液-固) 均一化 沈降防止	0.2 ~ 1	
大翼径 パドル翼		0.50 ~ 0.70	20 ~ 100	低 ~ 高 Max. 50000		(液-液) 均一化 混合 伝熱 分離防止	0.1 ~ 0.5	
アンカー(錨)翼		0.70 ~ 0.95	10 ~ 50	低 ~ 高 Max. 200000		(液-固) 均一化 晶析 沈降防止	0.1 ~ 0.5	
						吐出型	(液-気) 分散 反応	1 ~ 3
							(液-気)	

## 2.2.1 エッジドタービン翼（図7参照）

エッジドタービン翼は一枚の金属円盤の外周に鋸歯状のブレードをつけたもので、通常は円盤の外周に切込みを入れ、上下に互いに折り返したものがよく用いられている。この翼は攪拌機としては、最も高速域の回転数がとられ、その範囲は通常、500～3000rpm程度（翼外周速度としては15～30m/sec）である。

また、翼の大きさは槽径との比で表わせば低粘度の場合で0.25～0.35程度であり、粘度の増加とともに大きくするが、0.5を越えることはほとんど無い。能力的な特徴は外周の鋸歯状のブレードを高速回転することで得られる高剪断力で、投入される全エネルギーの約75%が翼近傍での剪断力として消費される。槽内のフローパターンは軸を中心とした渦流を形成するが、ブレードには円周に対して若干の角度が付けられているため、翼の内側から外側にラジアル方向に放射される強力な流れが発生する。この流れは槽壁まで達し、ここで上下方向に転換され、前述の渦流と合成され、螺旋流となって槽内を循環する。邪魔板は翼の回転速度と流体の回転速度との差が大きいので、必ずしも必要はなく実際使用されているもので邪魔板が設置されている例は少ない。特にかさ比重の小さな（したがって液面に浮き易い）粉体を取り扱う場合は邪魔板はない方がよい。しかし、低粘度の流体で渦流が高くなり、槽外へ溢れ出る可能性のある場合や流体中への空気の巻き込みを嫌う場合は邪魔板を付けるようにする。なお、非常に粘度が高い場合には全体を流動させるような流れはなくなり、翼を中心とした限られた範囲だけの流動となってしまうので、補助的手段（例えば、翼が槽内の任意の位置に移動できるような構造にして、各部分々を攪拌するか、または多段翼、多軸にする方法等）をとる必要がある。

この多軸方式では、高速のエッジドタービン翼と低速で槽全体を攪拌するアンカー翼とを組み合わせたものが多用されている。エッジドタービン翼の使用に当たり注意を要することは、投入されるエネルギーの大部分が剪断力として消費されるが、エネルギー投入密度（投入エネルギー／攪拌容量）が高く、これらのエネルギーは最終的には熱に転換されるので槽内の液温が上昇することである。したがって取り扱う流体が昇温してはならない場合はジャケット等により十分な冷却を行うことが必要である。また、摩耗性のスラリーを取り扱う場合は翼の耐摩耗の考慮をしなければならず、時々摩耗の状態を点検すべきである。この攪拌翼が、主に使用されるのは液－液分散では樹脂の混合等、また固－液系ではカオリン、クレイ、炭カル等製紙業界での顔料の分散や磁気テープ材の分散など非常に高度な分散が必要なところで多用されている。

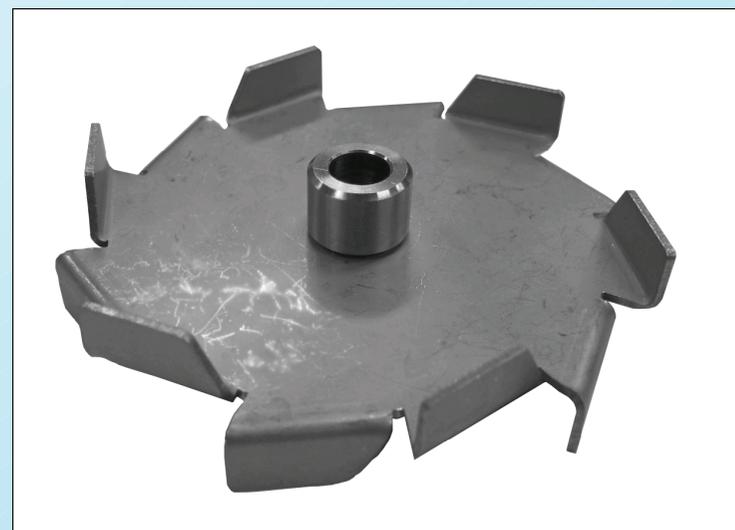


図7 エッジドタービン翼

### 2.2.2 プロペラ翼(マリンプロペラ翼) (図8参照)

プロペラ翼は3枚のブレード(羽根)を持ったマリン(船用)プロペラのことを言う。各々のブレードはヒネリ角(ピッチ)がつけられている。この翼を回転することで流体は前方に押し出され、船舶の場合は推力となって船舶自身が動くわけであるが、攪拌機の場合、翼は固定されているから流体が軸流となって吐出され、槽内を循環する。しかし、一般的に使用される丸槽の中心に垂直に取り付けられた場合、プロペラの回転で槽内液も回転し、軸流よりも水平回転流が支配的となり(共回り)攪拌効果は減少する。したがって、水平回転流を防ぐ措置として邪魔板の取り付け、ドラフトチューブの設置、偏芯や傾斜取り付けの方法がとられている。特にドラフトチューブと案内翼を併用した場合は整然とした軸流が得られ、特殊な例として晶析、熱交換などの目的に使用されている。傾斜取り付けは小型(0.1~1.5KW程度)の可搬式攪拌機に多く見られる。また攪拌槽の側壁に水平に取り付けて使用することも出来、水平方向の取り付け角度を変えることでフローパターンを変えることが出来る。このプロペラ翼を使用した攪拌機は200~400rpm程度で使用され、この範囲の回転数では機械的にコンパクトに出来るので標準機種として多くの種類を備えられるのも一つの特徴である。一般的な使用範囲でのプロペラの直径は槽径の10~30%程度で比較的小さい。したがって、あまり高い粘度には使用されず、使用可能な粘度は2000~3000mPas程度までである。プロペラ翼の能力的特徴としては攪拌機の二大作用のうち吐出能力に優れ、剪断力の必要な各種の分散、反応などの攪拌目的には不向きである。主に液-液系の混合、温度均一等、または液-固系の低濃度スラリの沈降防止等に使用されている。特に動力の割に吐出量が多い点、攪拌機自身がコンパクトで比較的安価である点から大容量攪拌に用いられ、その代表的な使用例が槽の側壁に取り付けて数千~数万KLの原油や精製油を攪拌していることである。

なお、本来のプロペラ理論に基づいて翼径、回転数、翼のヒネリ角度、更に翼の断面形状を最適に設計した翼では非常に効率の高い性能が得られるが、コスト的に高価となり、通常の攪拌ではそこまでの要求は少なく、そのコンパクト性、低コストの面から標準機種が広く使用されている。

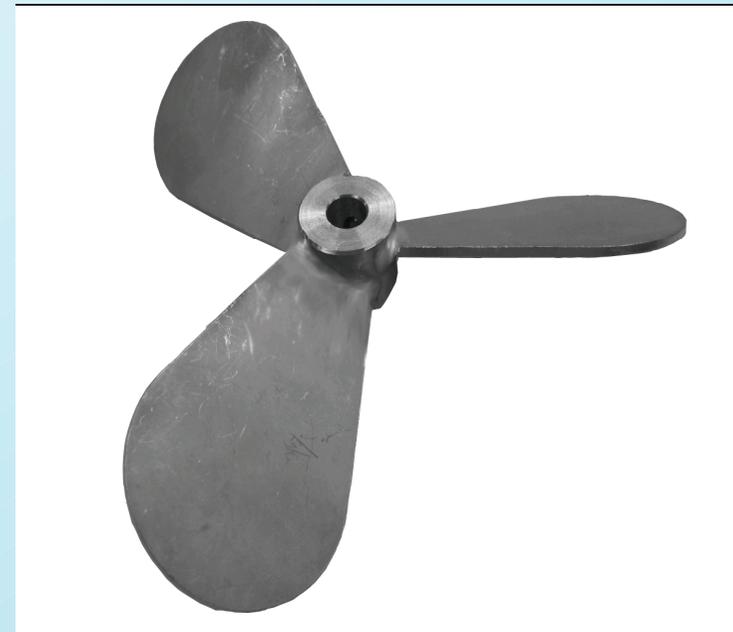


図8 プロペラ翼

### 2.2.3 タービン翼 (図9参照)

タービン翼は翼の形状およびブレードの取り付け角度により、その名称および用途が異なっている。形状については、パドル翼に似た形状でブレードを直接、ボスに取り付けた開放タービン翼(またはファンタービン翼)とボスに円盤を取り付け、その円盤にブレードを取り付けた円盤タービン翼(またはディスクタービン翼)の2種類に大別される。さらにブレードの取り付け角度が垂直の平タービン翼(またはフラットタービン翼、ラジアルフロータービン翼)とブレードを傾斜させて取り付けられた傾斜タービン翼(またはピッチドタービン翼、アキシャルフロータービン翼)に分類される。ブレードの取り付け角度により、槽内のフローパターンや特性が大きく変わり、当然その用途も異なってくる。平タービン翼は、翼を回転させることにより流体を軸方向から吸引し、軸方向に垂直な方向(ラジアル方向)に吐出させる。槽内に邪魔板がある場合には、吐出された流体は槽壁に達し、そこで上下に分かれ、全体として上下攪拌のフローパターンとなる。この翼の消費動力は大きい、剪断力の発生能力が高く、また吐出能力もある翼と言える。したがって、その用途としては前に述べたエッジドタービン翼ほどではないがある程度強力な剪断力と吐出量(循環量)が必要な例えば、液-液系では、乳化、乳化および懸濁重合反応、抽出など、液-固系ではケーキ(塊状物)の分散、固体を破碎しながらの溶解、液-気系では酸化反応のような気体の分散、吸収を伴う反応に用いられ、特に円盤付き平タービン翼は翼の下に一度気体をホールドしてから分散するので気体を無駄にすることが少ないためによく用いられる。一方、傾斜タービン翼は流体を軸に平行な方向(アキシャル方向)に吐出させ、効果的な上下循環を行なうことができる。この翼は同一の吐出量を発生させるのに平タービン翼のおよそ半分の動力で済むので、槽内の循環量が重要な攪拌に有効な翼と言える。この翼の用途は主に液-液系、液-固系で吐出量(循環量)が主に必要で比較的強い攪拌(均一混合、反応、伝熱)に使用されている。なお、タービン翼の使用実例からみると、主に使用される翼径/槽径比は0.25~0.5程度、回転数は50~300rpm程度、適応流体粘度は最高30000mPas程度である。

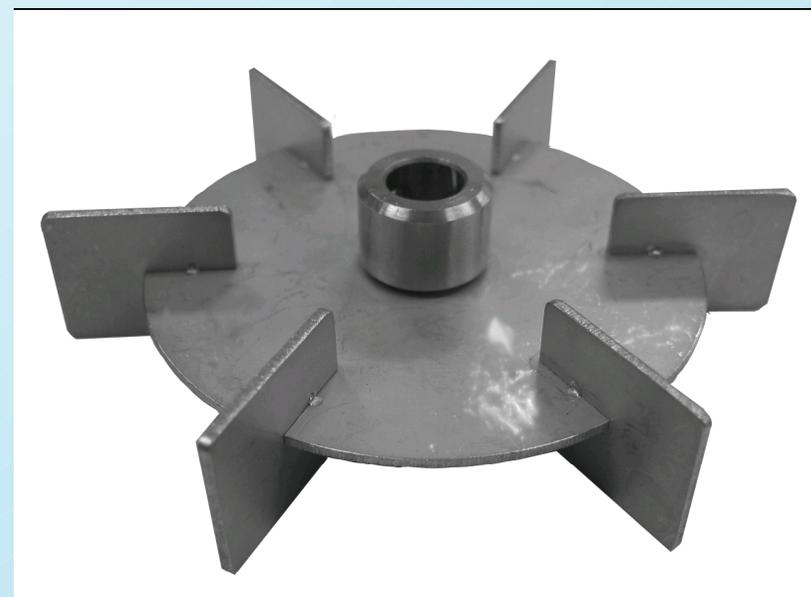


図9 タービン翼(6枚ディスクタービン翼)

#### 2.2.4 パドル翼 (図10参照)

パドル翼は、その名の通り外見上は船のパドル(櫂)に似ていて、翼を軸に取り付けるボス(ハブ)に溶接又はボルト止めされた細長い板状のブレードが翼端まで続いている形状で攪拌翼の中で最もシンプルな構造をしている。翼1段当りのブレード(羽根板)の枚数は2枚が基本であるが3~4枚のこともある。パドル翼もタービン翼と同様にブレードが垂直である平パドル翼(フラットパドル翼)と傾斜パドル翼(ピッチパドル)とに分類される。フローパターンもタービン翼同様各々輻流(ラジアルフロー)と軸流(アキシャルフロー)となる。実際上はパドル翼は主として攪拌機の働きのうちの吐出作用が必要な目的の攪拌に使用され、同じ吐出量でも動力が大きくなる平パドル翼よりランニングコストセーブの点で有利な傾斜パドル翼が多く用いられている。パドル翼はその構造がシンプルであるために大きな翼径でも比較的安価であるので、大翼径、低回転数で用いられることが多い。この場合高い剪断作用は得られないが、槽内の循環は良好である。このような特性のため主な用途は液-液系の場合は分離防止、温度均一などに用いられ、液-固系では固体の沈降防止に多く使用されている。しかし、液-気分散のような気体をホールドし、微細化する目的には使用することは出来ない。その他、翼径を大きく出来ることから粘度の高い液の攪拌にも用いられ、リボン翼のような高価な翼を用いなくても良いような攪拌に適している。この場合は上下方向の液の入れ替わりを良くするために翼を3~5段の多段翼とするか、通常のパドル翼に縦方向のブレードを取り付けた特殊なパドル翼も使用されている。実際の攪拌目的にはパドル翼を使用するのが適するものが多く、納入実績からもその傾向が現われている。(最近の縦型攪拌機の納入実績を分析してみるとパドル翼、タービン翼、プロペラ翼の3種類で全体の75~80%を占め、パドル翼についてはそのうちの約半分、したがって全体の35~40%の割合で使用されている。

一般的な選定上の数値を挙げると、翼径/槽径比は低粘度液の場合では0.35~0.5、高粘度液の場合では0.65~0.9程度、使用回転数は20~100rpm、適応粘度は最高50000mPas程度である。



図10 パドル翼 (2枚傾斜パドル翼)

### 2.2.5 アンカー翼（図11参照）

アンカー（錨）翼は本来のように船の錨のような形状からその名が付いたわけであるが、一般には、槽底から槽壁に沿った翼の総称になっている。本来のアンカー翼とパドル翼を組み合わせたような翼、また門型翼、ゲート翼とも言われるものも含まれる。

これらの翼は、翼径／槽径比を大きくとり、低回転数で使用されるのが普通で、低粘度の流体を攪拌する場合は、大きな剪断力は働かないが、槽内を移動する流量は多い。フローパタン的には水平回転流が支配的で良好な均一性はあまり望めないが、槽壁付近の流速は他の翼に、ジャケット伝熱、晶析等の目的によく用いられる。

その他、翼が大きく、槽底に沿っているので濃度の高いスラリーや沈降性の高いスラリーの攪拌にもよく用いられる。また、粘度の高い流体のときもよく使用させるが、流体の粘度が高まるにつれ、槽内の流動は減少し、駆動部から伝わるエネルギーは翼と流体との摩擦（剪断）として消費される割合が大きくなる。攪拌効果の面からみても、翼近傍では液の入れ換わりもあるが、軸のまわりではほとんど攪拌されない部分もある。粘度の高い流体を完全に流動させるにはヘリカルリボン翼のような押し出し流れを強化して流体を強制的に動かすようにしなければならない。

しかし、ヘリカルリボン翼に比較して安価であり同一翼径、回転数であれば消費動力は約2/3 であるので特別に攪拌の良否が問われることがない限り、このアンカー翼でも十分の場合が多い。

特別な場合としてアンカー翼の欠点である剪断力が大きくないこと、軸付近の攪拌がないことをカバーして高い攪拌効果を出せる二軸式攪拌機として使われる。また、槽底、槽壁全面に翼に沿っているのを利用して伝熱効果を更に高めたり、槽壁に付着し易い液を掻き取るためのスクレーパ（掻き取り翼）が付けられるのもこの翼の特徴である。なお、これらの翼が使用されている実例からみると、翼径／槽径比は低粘度においては、70～90%、高粘度においては80～95%、回転数の範囲は10～50rpm、使用可能な粘度は低粘度～30 万mPas 程度である。



図11 アンカー（錨型）翼

### 2.2.6 リボン翼（図12参照）

リボン翼はいまでは特殊というより高粘度の攪拌には欠かせない翼といえる。名称は、リボン翼といわれる他にヘリカル(リボン)翼、スパイラル(リボン)翼、日本語では螺旋帯翼等と呼ばれ、その名のとおり細長い帯状の金属板を螺旋に巻いた攪拌翼である。リボンの幅は翼径のおよそ5～15%程度で通常は10%前後とする場合が多い。リボンの枚数は2枚(2条)のダブルリボン翼のことが多いが、1条のシングルリボン翼や稀に3条以上のこともある。多条の場合は翼を径違いとし中心部の流動をより強化することもある。翼径については、この翼が高粘度に適していること、そのフローパタンの特性を生かす点から、翼径／槽径比は大きくとられ、通常その値は0.9程度からほとんど槽壁とのクリアランス無しまでの範囲がとられている。また伝熱能力を高めたり、槽壁への付着を極力少なくするためにスクレーパ(掻き取り翼)をつけることもある。リボンの高さは、槽底から液面までの高さをとるのが一般的である。なお、リボンの一周期の高さをピッチといい、これを1～2ピッチ使用することが多い。1ピッチの高さはおよそ翼径程度がとられる。

高粘度の攪拌というと、リボン翼とアンカー(錨型)翼が取り上げられるが、両者の混合能力にはかなりの差があり、アンカー翼についてはほとんど上下の攪拌が望めない、槽中心部の攪拌が悪いなどの弱点も多く、粘度が高くなるにつれて一層その傾向が強くなる。一方、リボン翼はその構造と液の粘性力を利用することで、流動は上下流が主体となる。リボンがある外周部ではその回転方向により、螺旋状に押し上げまたは押し下げられ、槽中心部を垂直に降下または上昇し、全体的には外側から内側またはその逆に上下を繰り返す。どちらの回転方向が良いかは各々のケースで異なるので一概には言えないので、出来れば小規模な実験でもして確認するのが良い。なお、回転方向により負荷動力が異なる場合もあり注意が必要である。

リボン翼がよく使用されるのは、ゴムや合成樹脂の製造やその原料製造時の(重合)反応等で、液体のほか粉体、オカラのような湿泥状のものにも使用されている。しかし、一見使用出来そうなものでもホイップクリームのように粘着性がなく剪断され易いものや粘度の低いスラリー液には適していない。



図12 リボン翼

### 2.2.7 その他の攪拌翼（図13参照）

上述の攪拌翼のなかで、プロペラ翼、パドル翼、タービン翼は構造的にも比較的簡易であるため従来より多用されてきた攪拌翼であるが、各々短所もあり改善すべきところはある。最近の各種測定装置の発達と共に攪拌槽内の流動状態を可視化、数値化することが可能となり、より効率の高い攪拌翼が開発されるようになった。そのひとつの傾向は槽内に大きな攪拌翼を設置し、比較的 low 回転数で使用する方式でマックス・ブレンド（住友重機械工業）、フル・ゾーン（神鋼環境ソリューション）、スーパー・ミックス（佐竹化学機械工業）、HI-Fミキサー（綜研化学）、フルファインミックス翼（青木株式会社）などが該当する。これらの各翼はいずれも幅の広い平板状の羽根を持ち、多量の循環流を得られ、また、単一翼の特色である循環経路の単純化、局部剪断の低減化が発揮され、均一な槽内流動が得られることがその特徴である。

使用粘度範囲は低粘度から比較的高い粘度まで幅広く、重合反応、気液接触、スラリー攪拌など多目的に使用されている。

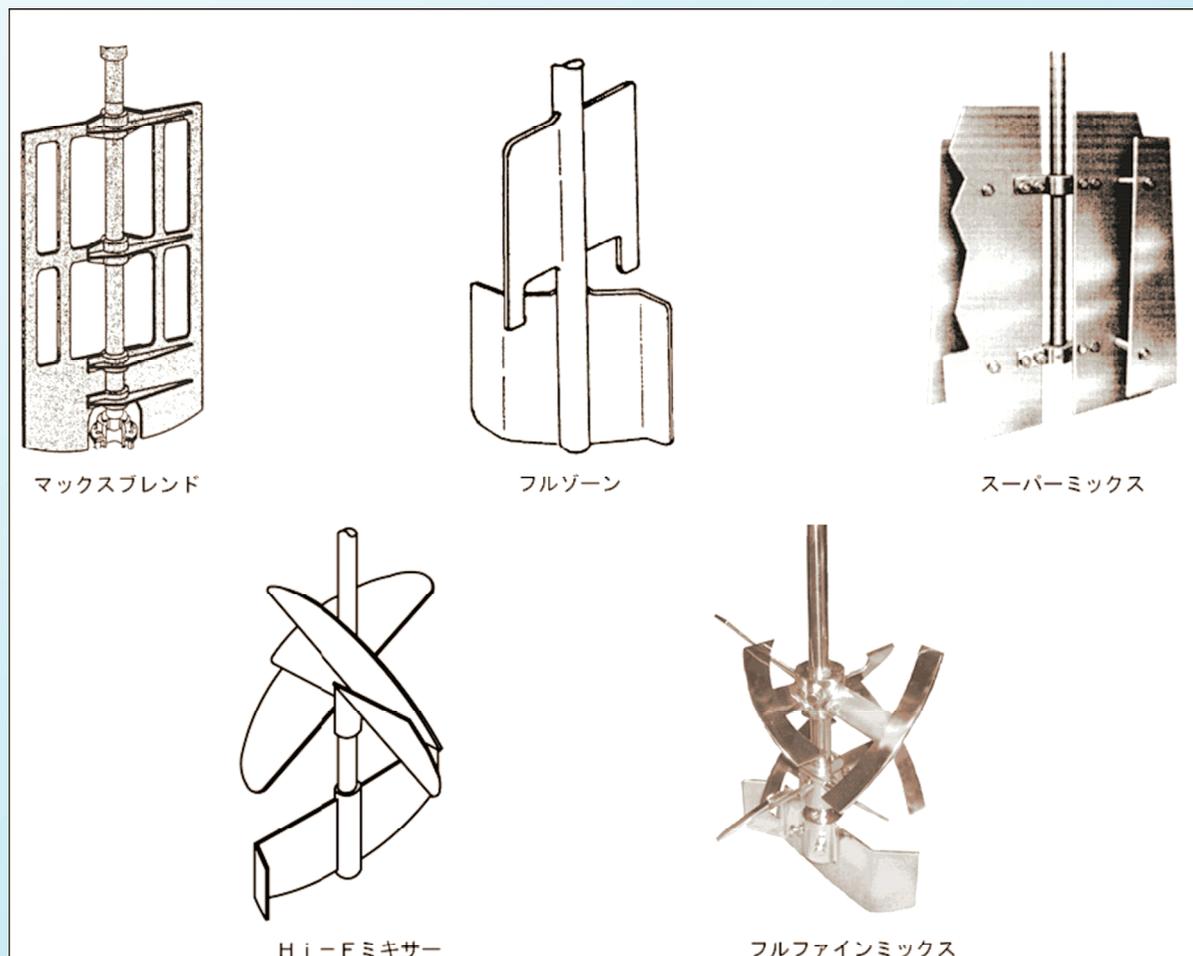


図13 各種大型翼

## 2.3 攪拌翼の設計ポイント

目的に合った翼形状が選定できたら、翼径、翼段数、翼の取り付け位置などについても検討を行うべきである。これらの設計が不適當であると効率も悪く、場合によっては全く目的を達成させることができないこともある。

### 2.3.1 翼径に関して

攪拌翼径を検討する場合、槽径との比率(翼径/槽径比)として考えるのが一般的である。これらの概略値は上述の各々の攪拌翼の特徴の説明のところでも述べたが、これらは攪拌翼の特性や製作上、コスト上の問題などから必然的にその範囲が定まってくるが、あまり厳密にとらわれる必要はない。

したがって記載の範囲から大きくはずれないところで選定すれば良いが、範囲から小さな方にはずれた場合は、局部的に流動の強いところと弱いところができ、均一な攪拌ができなかったり、極端な場合は攪拌されない部分(デッドスペース)を生じさせる場合がある。

また、翼径は流体の粘度を考慮して決定しなければならない。

低粘度(およそ3000mPas以下程度)の場合は、翼径/槽径比は0.25~0.4程度で十分であるが、高粘度(およそ10000mPas以上)では、翼径/槽径比は0.6以上とし、粘度が高くなるにしたがい翼径/槽径比を大きくし槽全体に流動が行き渡るようにする必要がある。

(図14参照)

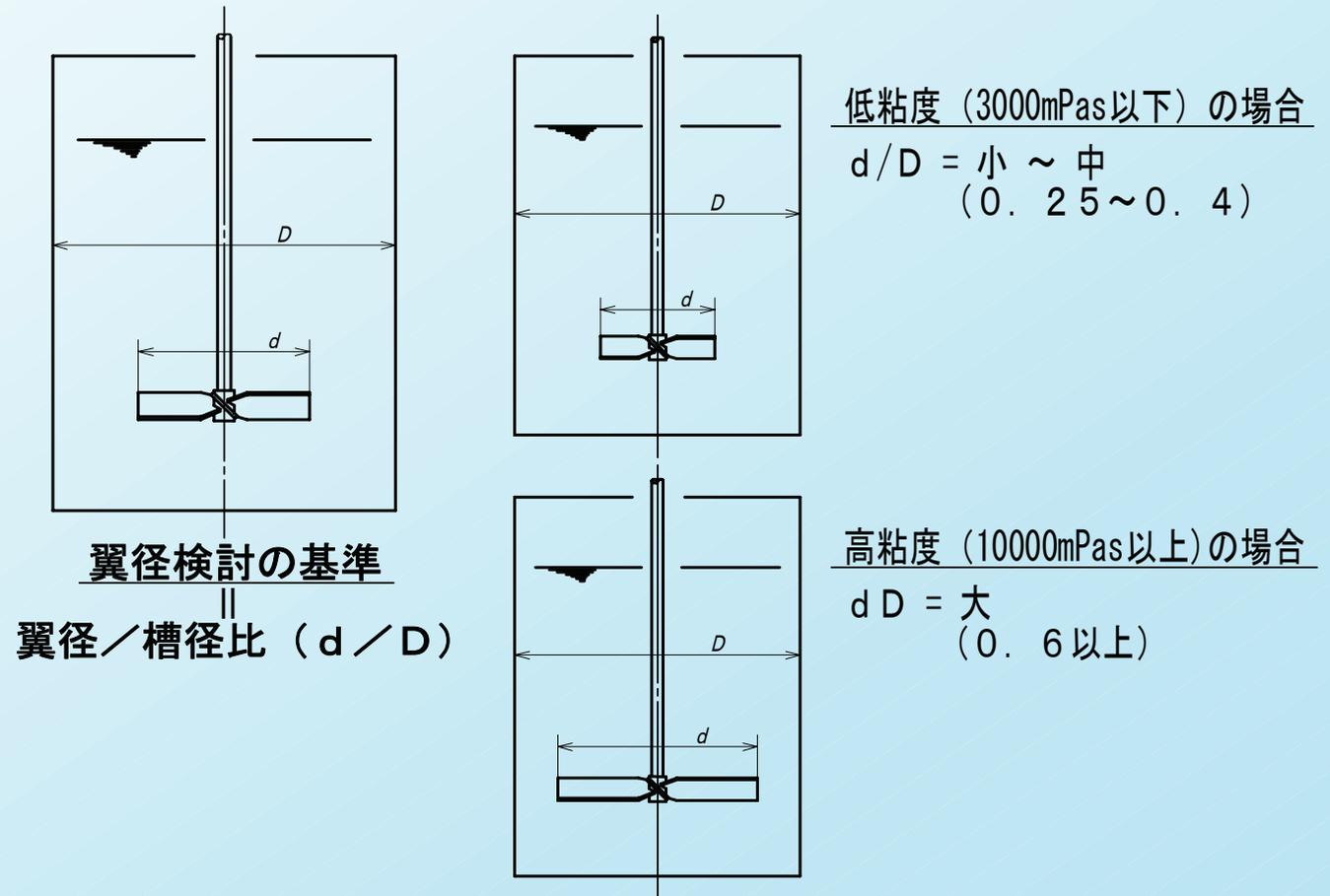


図14 翼径について

### 2.3.2 翼段数について

翼段数は液深と槽径との比と関係してくる。攪拌的には液深／槽径比は $1 \pm 0.2$ 程度が望ましく、この範囲でしかも低粘度であれば翼は1段で十分である。これより大きな液深／槽径の場合は液深／槽径比=1に対して翼1段を追加してゆけば良い。

しかし、粘度が高くなるにつれ流動は悪くなるので3000mPas越えるような場合は、液深／槽径=1に対し2段、さらに数万mPasの高粘度では3段と翼段数を増やす必要がある。

また、低粘度でも二液の粘度差、比重差が大きい場合は多段にしたほうがよい場合もある。

なお、多段翼にした場合、それぞれの攪拌翼からの循環流の干渉から一部流動の停滞や分断が生じ、攪拌不良の原因となる場合があるので注意が必要である。事前に 実験や実機における試運転時に取付位置を検討したり、攪拌翼の取付位置を変更可能なような構造とするなどの対処をとっておくべきである。(図15参照)

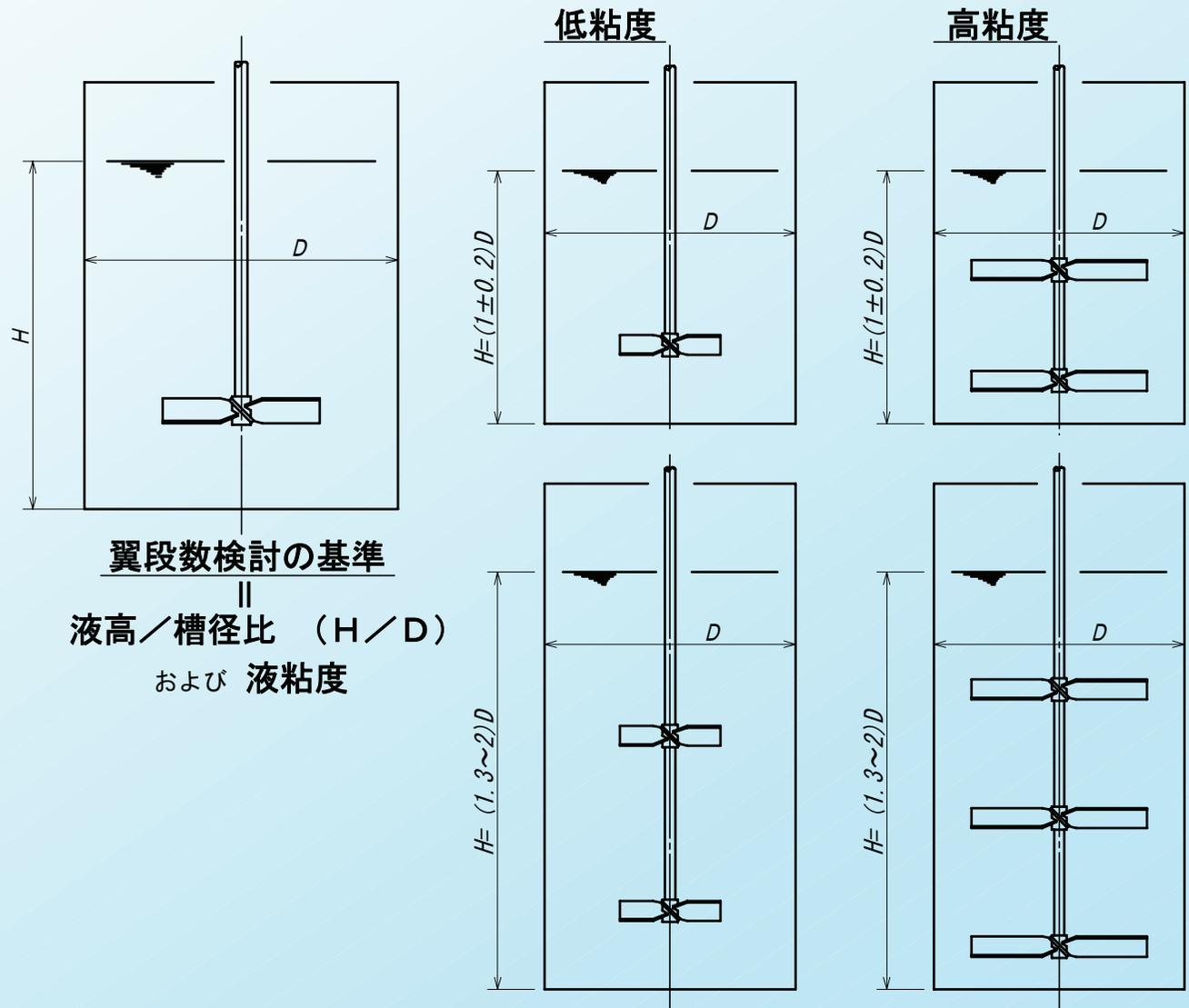


図15 翼段数について

### 2.3.3 翼取り付け位置に関して

一般的には、低粘度の液液攪拌で液深／槽径比 $\approx 1$ 、翼1段の時は翼の位置は槽底から液深の約 $1/4 \sim 1/3$ 程度、翼が2段の場合は下段翼の位置を槽底から液深の約 $1/6 \sim 1/5$ 程度とし、上段翼は液面と下段翼の中間付近とする。粘度が高い場合や、沈降性の高い固液系の攪拌では翼は出来るだけ槽底に近づけたほうが良い。

(図16参照)

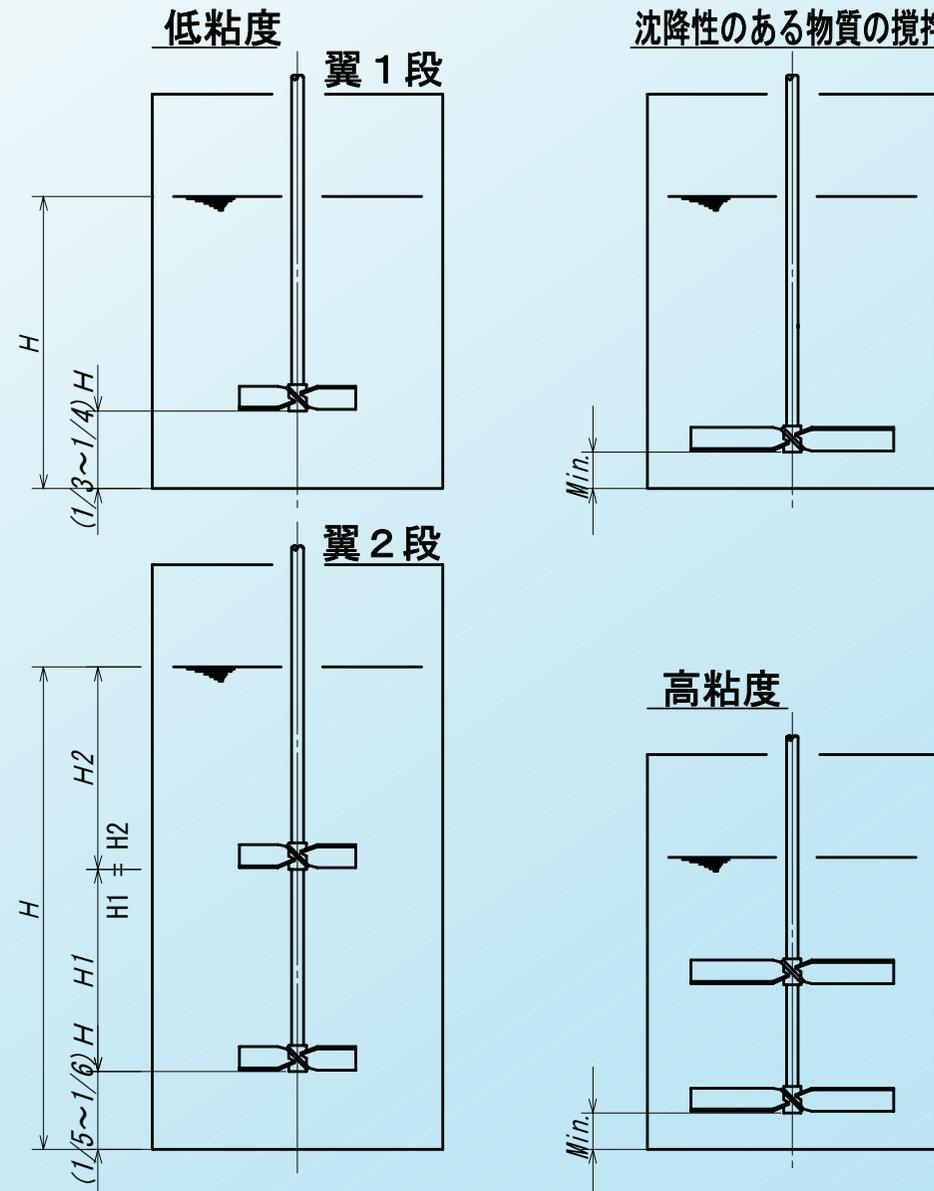


図16 翼取り付け位置に関して

### 3. 翼径および回転数の決定

与えられた攪拌目的を達成させるに必要な最小限の攪拌翼径と回転数を決定する。翼径は前述のように翼の形状により通常使用される翼径／槽径比が決まっていることと、スケールアップ(またはダウン)の条件として幾何学的相似を保つことの意味から翼径は決められる。

次に回転数の決定は攪拌機のスケールアップの手法を用いる。与えられた攪拌目的を達成されたかどうかの評価とその攪拌にかかる各因子との相関関係を実験的に求めれば、その中に必ず回転数も含まれるはずでここから必要な回転数は求められる。

スケールアップの前後の流体の物性は変化がなく、幾何学的相似が保たれていれば次の関係式からスケールアップ後の回転数は求められる。

$$n_2 = n_1(D_1/D_2)^a$$

ここで  $n_1$  および  $n_2$  : スケールアップ前および後の回転数

$D_1$  および  $D_2$  : スケールアップ前および後の代表長さ(一般には槽径または翼径)

a: 実験的に定まる指数

なお、本来は与えられた攪拌操作ひとつひとつについての関係式(指数 a)を求める必要があり、そのためには少なくとも3種のスケールを変えた実験が必要であるが、日常的な攪拌機選定作業の各々についてこれらを求めることは不可能である。しかし、全てに適応できるわけではないが多くの場合に  $P/V = \text{一定}$  とすることでスケールアップ出来ることが経験的に知られている。なお、 $P/V = \text{一定}$  の場合の攪拌機選定の作業は本来の作業順序とは異なる。本来は「翼径の決定」→「回転数の決定」→「動力の決定」の順であるが  $P/V = \text{一定}$  の場合は「動力の決定」→「翼径の決定」→「回転数の決定」となる。

最後に決定される回転数は特にギア減速機を使用する場合には計算で求められた回転数に合致させることが出来ない場合もあり、この様なときは出来るだけ計算で求められた回転数に近い回転数を選び、最終的に翼径で調整することになる。

なお、スケールアップに関しては、次章で詳述する。



#### 4. 攪拌動力の算出

翼形状、翼径および回転数が決定できたら、これらと取扱流体の物性から攪拌動力を計算する。攪拌動力は攪拌機の各構成要素(電動機、減速機、攪拌軸等)の選定や設計のベースとなり、また運転コストの算出に必要である。攪拌動力の計算の一例としては次式で表わされる。

$$P = N_p \cdot \rho \cdot (N/60)^3 \cdot d^5 / 1000$$

ここで P : 攪拌動力 [kW]

N<sub>p</sub> : 動力数 [-]

N : 回転数 [1/min]

d : 翼径 [m]

ρ : 液密度 [kg/m<sup>3</sup>]

これらのうち、動力数 N<sub>p</sub> は翼形状、槽形状、邪魔板の有無、液深、液の物性等多くの因子との関数で、実験的に求められる値である。

これら攪拌動力については次章で詳述する。



## 5. 攪拌装置ハード部の選定と設計

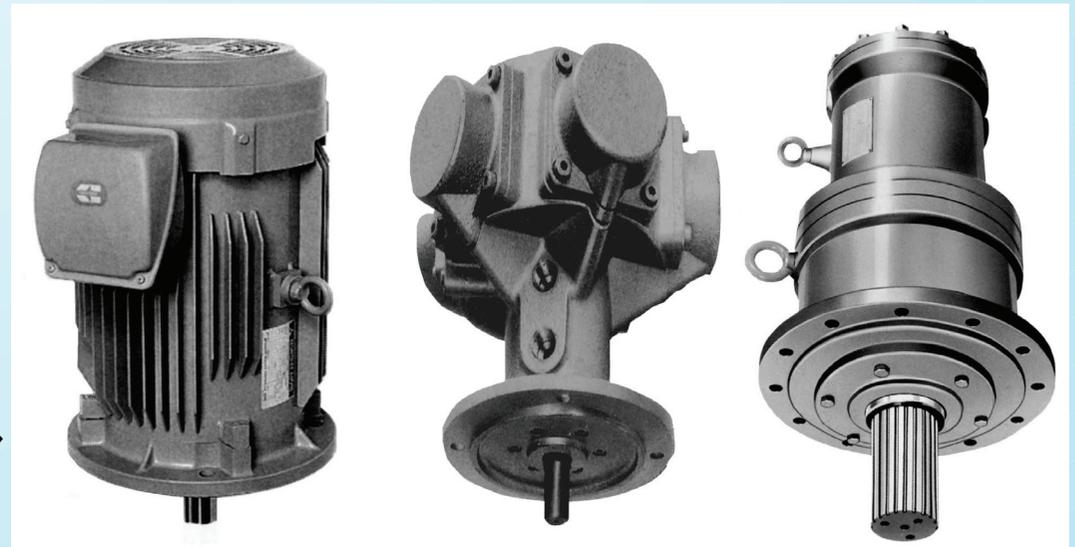
決定された翼形状、翼径、回転数、動力、および使用条件から攪拌機の各構成要素(電動機、減速機、攪拌機本体、軸封装置、攪拌軸、攪拌翼、攪拌槽およびその付帯設備等)の選定と設計を行う。攪拌装置の一般的な構成要素は前出の図5のようであるが、攪拌装置は一般化学工業、石油化学工業をはじめとする諸工業において、長時間の連続運転、高温、高圧、高腐食性流体内での運転や運転中の流体の物性変化や液面変動などによる負荷や荷重の変動を伴う運転など非常に苛酷な条件下において安定した運転ができなければならない。また円滑な操作性や容易な点検、保守性が要求される機械である。さらに装置が使用される周辺の雰囲気(たとえば外気温度、湿度、爆発性や発火性の気体の有無など)に対応可能なことや周辺の環境に騒音や振動などの影響を及ぼさないことなども要求される。したがって、攪拌装置の各々の構成要素は運転条件を十分把握、検討したうえで慎重に選定、設計しなければならない。

### 5.1 駆動装置(電動機、変減速機)の選定

攪拌機用の原動機としては、電動機、エアーマータ、油圧モータ等が用いられるが、効率、付帯設備、取り扱い、騒音等の点からほとんどの場合、電動機が使用されている。

(図17参照)

電動機以外の原動機が使用される例としては、高度な引火性および爆発性のある気体の雰囲気であるために電気機器を使用したくない場合、また突発的な停電が発生しても攪拌機を停止できない場合のバックアップ用としての使用等がある。



電動機

エアーマータ

油圧モータ

図17 攪拌機に使用される原動機の一例

### 5.1.1 電動機容量(出力)の決定

計算によって求められた攪拌動力に減变速機の損失動力、攪拌機自体の損失動力および計算誤差や操作条件の変動などを吸収するための余裕動力を見込む必要がある。一般的には減变速機と攪拌機自体の機械的損失動力として10～20%、余裕動力として20%、攪拌動力として60～70%程度の配分になるように電動機の容量を決定する。電動機の容量は負荷動力に対して不足してはならないことは言うまでもないが、余りに過大にすると効率、力率が悪くなり無負荷電流が大きくなり不経済となる。

### 5.1.2 電動機の型式選定上の注意

電源の相数(単相または三相)、周波数(50Hzまたは60Hz)、電圧(200V級、400V級、3kV級、6kV級等)を確認し、これに合った電動機を選定する。特に周波数は攪拌機の回転数に関係するので十分に注意を要する。電動機が屋外に常設される場合には風雨、雪、塵埃 および塩害を防ぐために軸貫通部には特殊な防水カバーを設け、端子箱や軸受部は防水性を高め、更に絶縁物にも十分な耐湿性を持たせた屋外型を選定する。また、屋内の使用であっても水などが掛かりやすい場所では屋外型にしたほうが良い。

また、一般の化学工場や石油化学工場のように 電動機の置かれる区域が発火性や爆発性のガスの雰囲気になるところでは火花や過熱による火災や爆発事故の発生を防ぐような対策がたてられた特殊な電動機を使用しなければならない。このような電動機は公益社団法人産業安全技術協会の防爆検定に合格したものでなければ使用できない。

通常使用される防爆電動機は主に安全増防爆型(通常運転中にコイル、軸受、端子箱などに火花、過熱などが発生しないような構造で、非防爆電動機と比較して温度上昇、絶縁などに安全度を増したもの)と耐圧防爆型(全閉構造で電動機内で爆発ガスが爆発してもその圧力に耐え、かつ微小隙間を通して火災が外部にもれて外部のガスに引火しないような構造)である。



### 5.1.3 インバータの使用について

攪拌操作中に攪拌強度を変化させる要求は、よくあることである。一般に攪拌強度を変化させる方法は回転数の変化だけと言ってよい。近年、攪拌機の回転数を変化させるために電動機の回転数を変化させるインバータと呼ばれる周波数変換器を用いることが多くなっている。インバータは、電子的制御により、電源周波数に関係なく任意の周波数をほぼ連続的に得ることが出来る装置であり、周波数を変えることで電動機の回転数を変えられるのである。インバータでは入力された交流を一度直流に変換し、電子的制御により疑似的に交流に逆変換させる。このときに周波数は自由に変えることが出来るので、電源周波数に関係なく任意の周波数をほぼ連続的に得ることが出来る。また、インバータは電子制御機器であるため容易に多くの機能が付加されコンピュータ等による高度な制御運転も可能となっている。特に最近では、技術の向上によりインバータは高性能化、高機能化、小型化および低価格化され、攪拌機への使用も増加している。このような利点のある反面、使用上注意しなければならない事項も多い。ここでは攪拌機におけるインバータ使用上の注意点をいくつか挙げることにする。(図18参照)

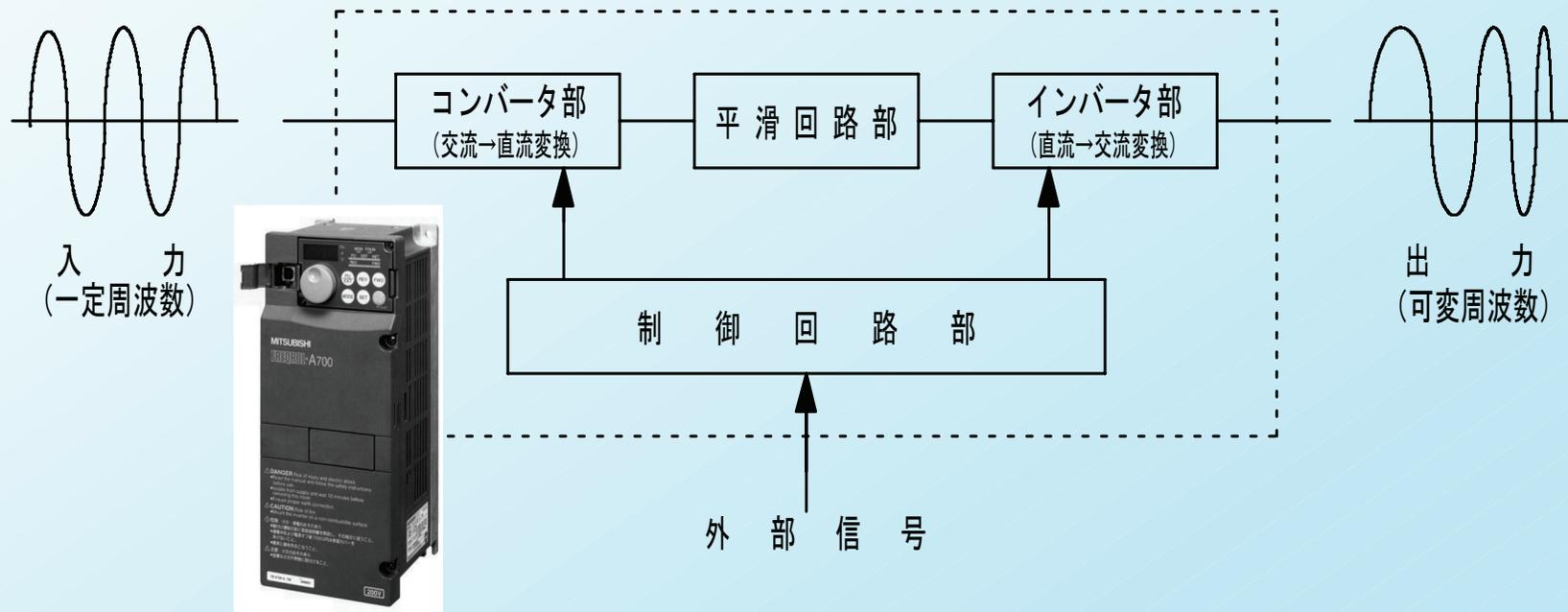


図18 インバータの基本回路構成



## インバータ使用上の 注意点

①電動機の実出力特性(またはトルク特性)と攪拌負荷の特性を把握し、両者を適合させる必要がある。一定速の運転では過負荷に対してその回転数のみの考慮で良かったが、変速をさせる場合にはすべての範囲での考慮が必要である。攪拌中に粘度変化があるような場合は特に注意しなければならない。(図19参照)

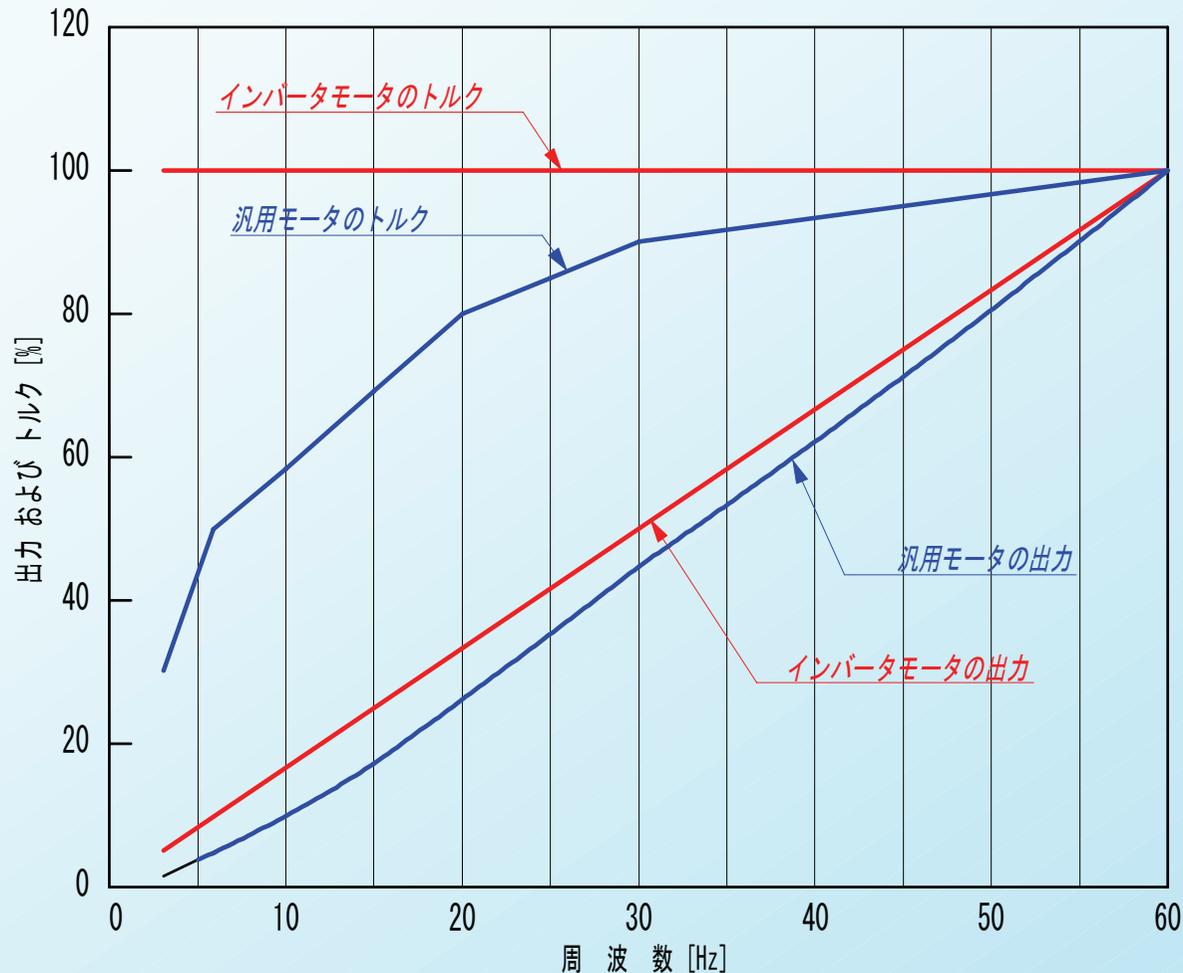


図19 インバータモータと汎用モータの周波数によるトルクと出力の違い



②攪拌軸の固有振動数(一般には危険回転数と呼ばれる)を把握し、これを避けるような対処が必要である。全ての物体にはそれ固有の振動数を持っており、この振動数と攪拌機の運転回転数が合致するといわゆる共振現象が発生し、軸が激しく振れ、運転が出来なくなったり、軸の損傷という事故を引き起こしかねない。変速範囲の中にこの固有振動数が存在しなければ問題ないが、どうしても避けられない場合も多い。特にインバータのように変速範囲が広いとなおさらである。この回転数区域は速やかに通過するようになる必要があるが、インバータの周波数をダイヤル(周波数変更ボリューム)で手動変更させると、時として時間がかかり、その間に軸を曲げてしまったという事故も実際にはある。このような場合は、インバータの機能のひとつである周波数のジャンピングを利用し、危険回転数域の回転数に相当する周波数は出力せず、一瞬で次の周波数に移行させるような設定が必要である。

③従来になかった低回転数や高回転数での使用も有り得るが、減速機など他の機械への影響を考慮する必要がある。例えば低回転時の減速機内の潤滑油の循環不良や高速回転によるベアリングの寿命の短縮化や騒音発生の問題などである。

④前述のようにインバータでは疑似的に交流を作り出しているが商用電源のような完全な正弦波ではなく高調波を含んでいるため、汎用電動機では温度上昇、騒音、振動等が増加する。このような影響を少なくするためにはインバータ専用の電動機を使用することが推奨されている。

⑤防爆区域での使用に関しては、電動機とインバータとで対になって防爆検定を合格したものが検定を受けたときの使用条件内で使用可能となる。なお、インバータ自身は現状では防爆区域内に設置できるものはなく防爆区域外に設置しなければならない。(図20参照)

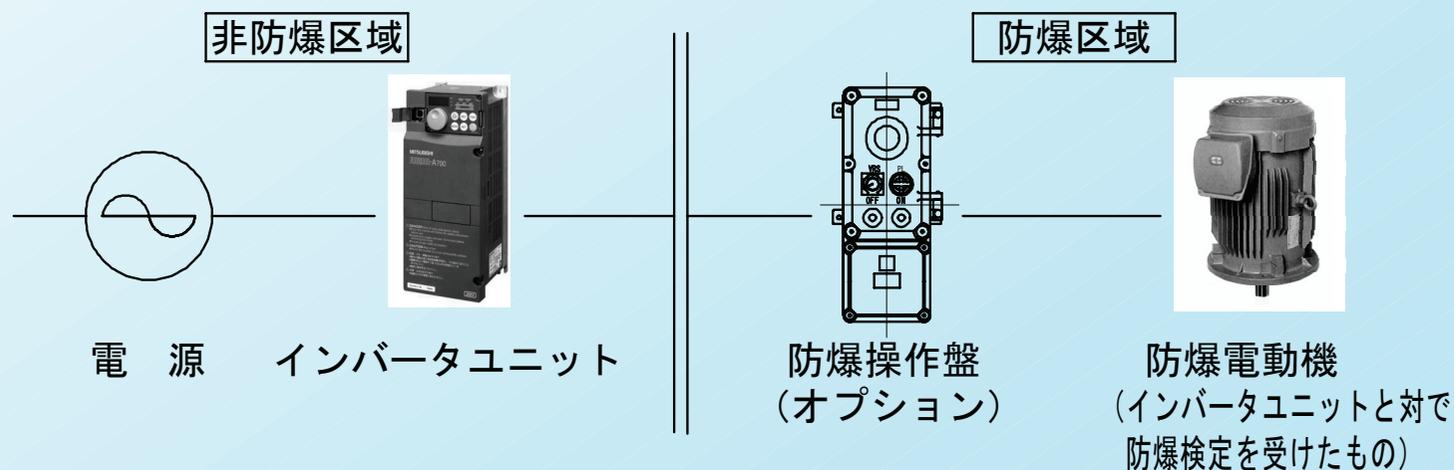


図20 防爆区域における使用例

#### 5.1.4 減速機について

減速機は電動機の回転数(一般に1000~1800rpm)を攪拌に適した回転数に減速するものである。大部分の攪拌機の回転数はおよそ10~400rpmの範囲にあり、なんらかの減速機を使用している。一般に攪拌機に使用される方式はギア減速、ベルト減速および両者の併用である。

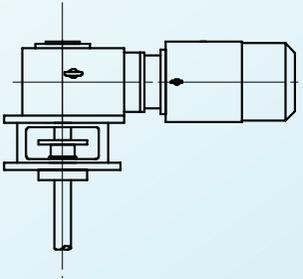
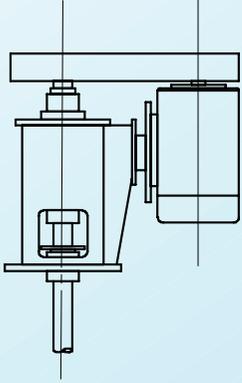
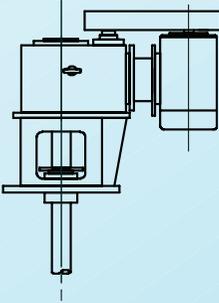
各々、一長一短があり、使用条件により選定する。それぞれの方式の特徴を表8にまとめた。減速機の具体的な選定については各々のメーカーのカタログや技術資料に基づいて、行なわなければならないが、ここで一例として、ある市販の標準化されたギア減速機の選定の手順に沿って、選定上の注意点などを述べてみる。必要な回転数を得るための減速比を持った各容量(枠番)の中から、使用する条件にあった容量の減速機を選定する。容量決定には、強度と寿命に基づく機械的容量と減速機の温度上昇に基づく熱的容量について検討をする必要がある。

それぞれの枠番の持っている容量を各々、定格伝達容量および定格熱容量と言い、使用条件から決定される等価伝達容量および等価熱容量より大きくなるような枠番を選定する。等価伝達容量は実伝達動力にサービスファクタ(負荷係数等と表す場合もある)を乗じたもので、サービスファクタは従動機側の荷重の性質と1日当りの平均運転時間により決定される。また等価熱容量は実伝達動力を周囲温度と温度補正係数表から決定される温度補正係数で除した値で、もし等価熱容量>定格熱容量の場合は強制冷却装置を付けるなどの対策が必要となる。

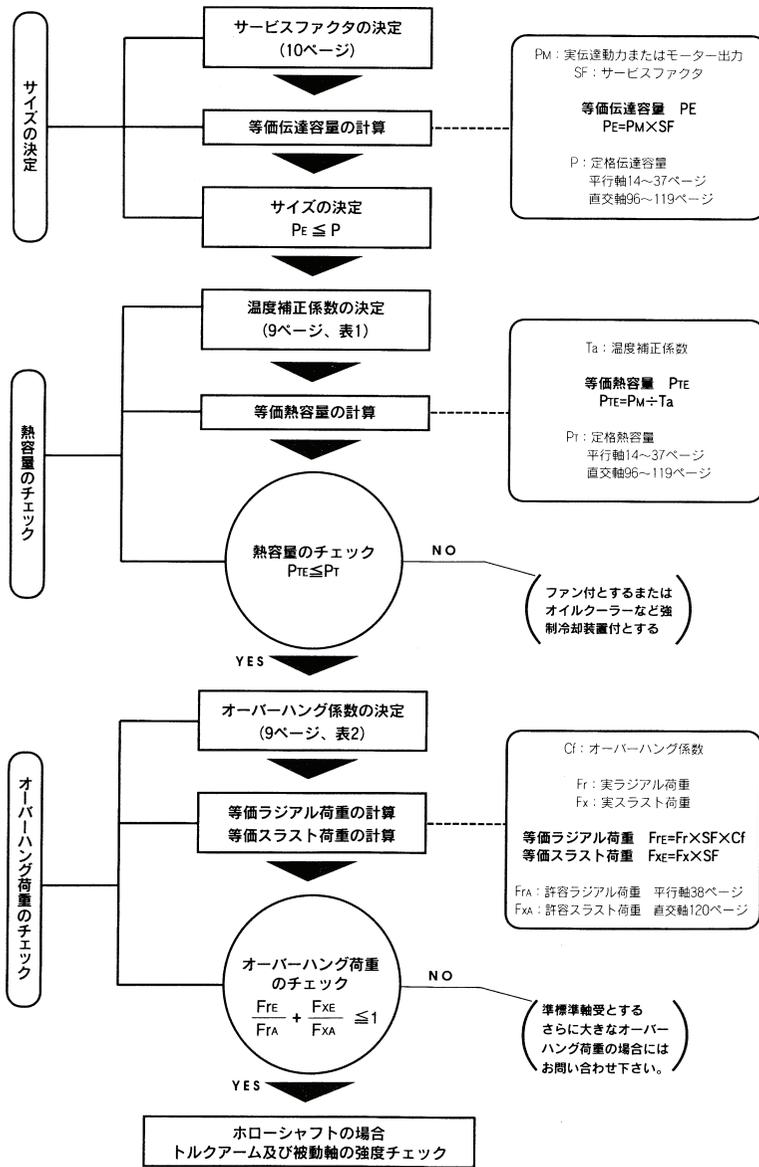
その他、減速機の出軸に掛かるラジアル荷重およびスラスト荷重に基づくオーバーハング荷重を算出し、選定された枠番の減速機で問題ないかチェックを行なう。必要に応じて枠番を上げたり、フレキシブルカップリングによる接続としてラジアル荷重およびスラスト荷重の影響をなくした構造とする必要がある。他の減速装置についても同様に必要事項についてチェックし過大にならないように、しかも必要十分な容量(枠番)を選定することが肝要である。(図21参照)(表9参照)



**表8 減速方式とその長所、短所**

	たて型ギア減速	直交軸型ギア減速	ベルト減速	ギア、ベルト併用
概略図				
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>★比較的コンパクト</li> <li>★伝達効率が高い</li> <li>★減速比を大きくとれる</li> <li>★目的や装置の配置に応じた種類が多い</li> </ul>	たて型ギアの長所に加え <ul style="list-style-type: none"> <li>★高さを低くできる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★回転数の変更が可能</li> <li>★騒音が少ない</li> <li>★故障が少ない</li> <li>★高さを低くできる</li> <li>★比較的安価である</li> </ul>	ギア、ベルト両者の長所参照
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>★回転数の変更が難しい</li> <li>★騒音が大きい</li> <li>★潤滑油の管理が必要</li> </ul>	たて型ギアの短所に加え <ul style="list-style-type: none"> <li>★偏芯荷重となる</li> <li>★一般に多少高価となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★減速比を大きくとれない</li> <li>★ベルトの交換が必要</li> <li>★ベルトの磨耗カスが出る</li> </ul>	ギア、ベルト両者の短所参照

選定のフローチャート及び計算式



被動機	運転時間 (時間/日)					
	3時間	10時間	24時間			
<b>クレーン</b>						
クレーンの分類	巻上	横行	走行	旋回	起伏	クレーンの分類はJIS規格「クレーン鋼構造部分の設計基準」によります。
I群	1.00	1.50	1.25	1.00		
II群	1.25	1.50	1.00	1.00		
III群	1.50	1.75	1.25	1.00		
IV群	1.75	2.00	1.50	1.00		
<b>コンベア (一般)</b>						
均一荷重または一定搬送量		1.00	1.00	1.25		
重荷重						
変動搬送機		1.00	1.25	1.50		
レシプロ、シェーカ		1.50	1.75	2.00		
<b>エレベータ</b>						
エレベータ		1.50	1.50	1.50		
エスカレータ		1.25	1.25	1.25		
<b>圧延機</b>						
ドローベンチ台車・主駆動		1.50	1.50	1.50		
ランアウトテーブル						
逆転なし						
グループ駆動		1.50	1.50	1.50		
単独駆動		2.00	2.00	2.00		
リバーシング		2.00	2.00	2.00		
スラブブッシャ		1.50	1.50	1.50		
せん断機		2.00	2.00	2.00		
伸線機		1.25	1.25	1.25		
線材巻取機		1.25	1.50	1.50		

被動機	運転時間 (時間/日)			
	3時間	10時間	24時間	
<b>ゴム</b>				
ミキサー		1.75	1.75	2.00
ミキシングミル - 2ズムズロール		1.50	1.50	1.75
パッチドロップミル - 2ズムズロール		1.50	1.50	1.50
クラッカーウオーマー				
- 2ロール: 1コルゲートロール		1.75	1.75	1.75
クラッカー 2コルゲートロール		2.00	2.00	2.00
ホールディング、フィード&ブレンドミル - 2ロール		1.25	1.25	1.25
リファイナー - 2ロール		1.50	1.50	1.50
カレンダー		1.50	1.50	1.50
<b>製紙機械</b>				
抄紙機含め全種		2.00	2.00	2.00
<b>アジテータ、ミキサ</b>				
液体		1.00	1.00	1.25
液体と固体		1.00	1.25	1.50
液体-濃度変化あり		1.00	1.25	1.50
<b>ミキサー</b>				
コンクリート		1.25	1.25	1.50
<b>クラッシャ</b>				
鉱石用		2.50	2.50	2.50
<b>ブロウ</b>				
遠心力		1.00	1.00	1.25
ローブ		1.00	1.25	1.50
ペーン		1.00	1.25	1.50

表9 ギヤ減速機のサービスファクターの一例

図21 ギヤ減速機の選定手順の一例



### 5.1.5 変速機について

攪拌機には回転数を有段または無段で変えることの出来る変速機もよく使用される。特に攪拌中に物性の変化がある場合、一バッチの間に攪拌目的が多くあり、各々に合わせた回転数が必要な場合等に用いられている。変速の方式は種々あるが、代表的な方式と特徴が表10に示されている。

変速を行うことは、攪拌操作にとって便利で有用なことであるが、以下のような注意を払うことが必要である。それは、回転数を変えることにより負荷動力(攪拌動力)が変化するだけでなく、変速機自身の出力も変化する事である。そこで、インバータも含め変速機の出力特性(またはトルク特性)と攪拌負荷の特性を把握し、両者を適合させる必要がある。

一般的に駆動側の出力特性としては、表11のように(a)馬力一定型 (b)トルク一定型(c)複合型に大別できる。ここで、馬力一定型を除き、回転数が低下するにしたがい出力も低下していることが注目すべき点である。

一方、攪拌機の回転数の変化による負荷の変化は、低粘度においては回転数の3乗に比例し、高粘度では回転数の2乗に比例するという特性を持っている。一定回転の場合はその回転数における攪拌動力と電動機の定格出力だけを対象に過負荷になるかどうかを検討すればよかったが、変速をさせた場合は、使用回転数内で駆動側の出力と攪拌負荷との関係をグラフなどにあらわして明かにし、過負荷にならないか、また攪拌目的を達成するのに必要な回転数が得られるかどうかなどを検討しなければならない。

更に攪拌中に粘度変化がある場合は、同一回転数でも負荷は変化するのでこれも合わせて検討する必要がある。インバータの特性はトルク一定型で回転数の低下に比例して出力も低下するので最も注意を要するタイプである。なお、トルク一定が得られるのは、特にインバータ用として設計された電動機を使用した場合であるが、一般の汎用電動機と組み合わせて使用した場合は更に出力が低下するので十分に負荷動力と出力の関係を検討する必要がある。(図22、23参照)



表10 各種変速方式とその特徴

	機 械 式	電 気 式	油 圧・空 圧 式
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>★変速範囲は比較的狭い</li> <li>★低速時のトルクは電気式に比較して大きい</li> <li>★騒音が比較的大きい</li> <li>★給油などのメンテナンスが必要</li> <li>★防爆仕様に適している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★変速範囲が広い</li> <li>★変速操作が容易</li> <li>★トルク特性は一定または遞減トルクで低速時の出力が小さい</li> <li>★メンテナンスはほとんど不要</li> <li>★防爆仕様に対して制限がある</li> <li>★攪拌機自体はコンパクトになる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★変速範囲が広い</li> <li>★効率は良くない</li> <li>★メンテナンスが必要</li> <li>★防爆仕様に適している</li> <li>★攪拌機自体はコンパクトになる</li> </ul>
代 表 的 機 種	<ul style="list-style-type: none"> <li>☆バイエル無段変速機</li> <li>☆バイエルサイクロ無段変速機</li> <li>☆リングコーン無段変速機</li> <li>☆ディスコ無段変速機</li> <li>☆コップ無段変速機</li> <li>☆バリプーリー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☆渦電流継手方式 VSモータ、ASモータ、ECモータ など</li> <li>☆極数変換方式</li> <li>☆インバータ制御方式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☆油圧モータ</li> <li>☆エアーマータ</li> </ul>

表 1 1 代表的な変速機の回転数と出力の関係

	出力一定型	トルク一定型	複合型
図 特 性 出 力	<p>The graph shows a horizontal line at 100% output power from 0% to 100% speed. The y-axis is labeled '出力 [%]' (Output [%]) with ticks at 0, 50, and 100. The x-axis is labeled '回転数 [%]' (Speed [%]) with ticks at 0, 50, and 100. A dashed horizontal line is at 100% and a dashed vertical line is at 100%.</p>	<p>The graph shows a diagonal line from (0,0) to (100,100). The y-axis is labeled '出力 [%]' (Output [%]) with ticks at 0, 50, and 100. The x-axis is labeled '回転数 [%]' (Speed [%]) with ticks at 0, 50, and 100. Dashed lines are at 100% on both axes.</p>	<p>The graph shows a diagonal line from (0,50) to (100,100). The y-axis is labeled '出力 [%]' (Output [%]) with ticks at 0, 50, and 100. The x-axis is labeled '回転数 [%]' (Speed [%]) with ticks at 0, 50, and 100. Dashed lines are at 100% on both axes.</p>
変 速 機 名	B型バイエル B型バイエルサイクロ RX型リングコーン	インバータ 渦電流カップリング	A型バイエル A型バイエルサイクロ NRX型リングコーン

(注) 本表中の線図は模式化したもので実際とは多少異なる

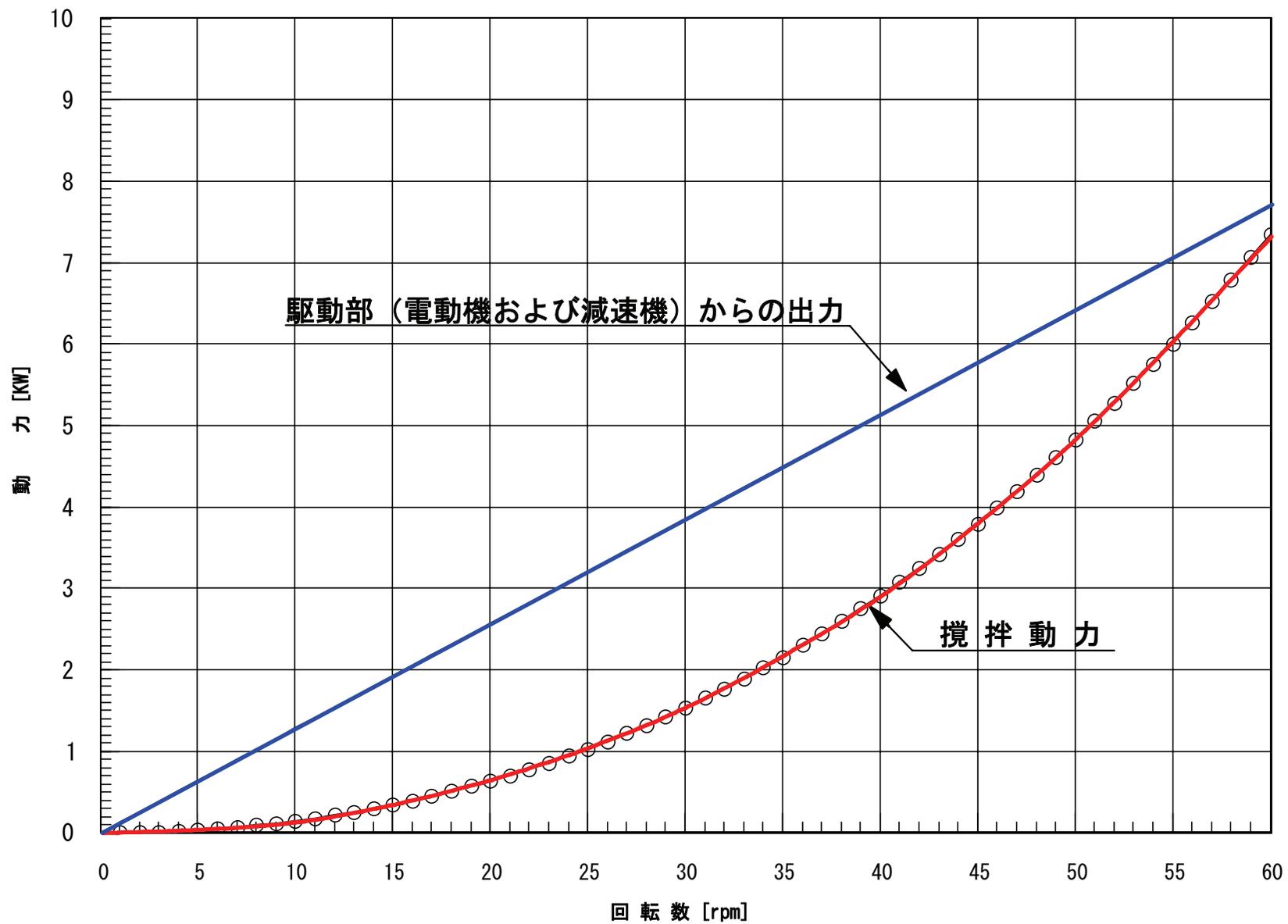
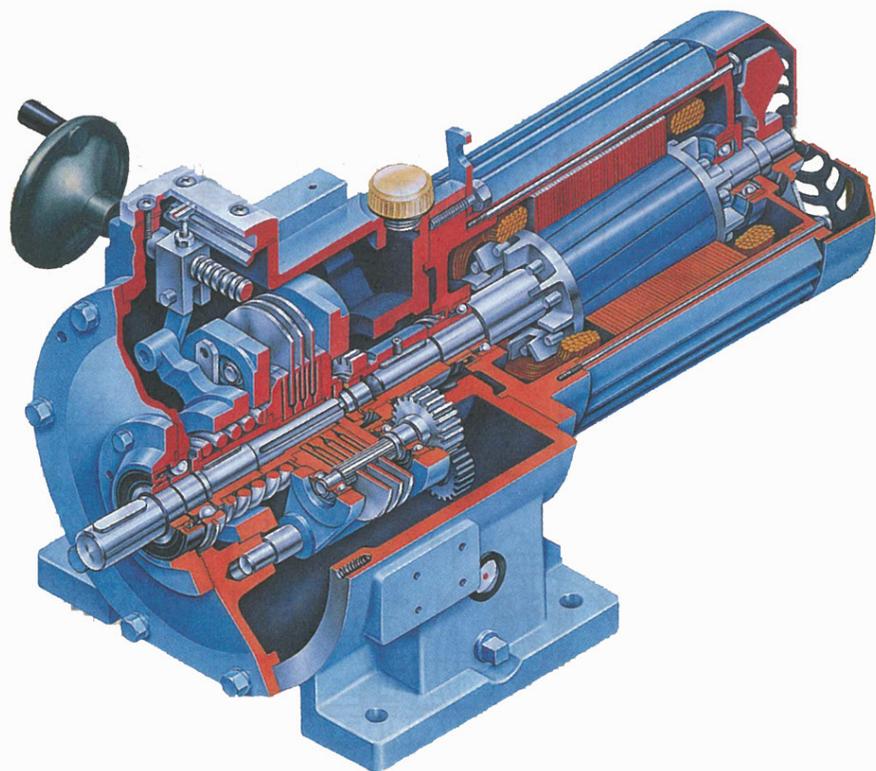


図22 駆動部からの出力(トルク一定)と攪拌動力との関係の一例



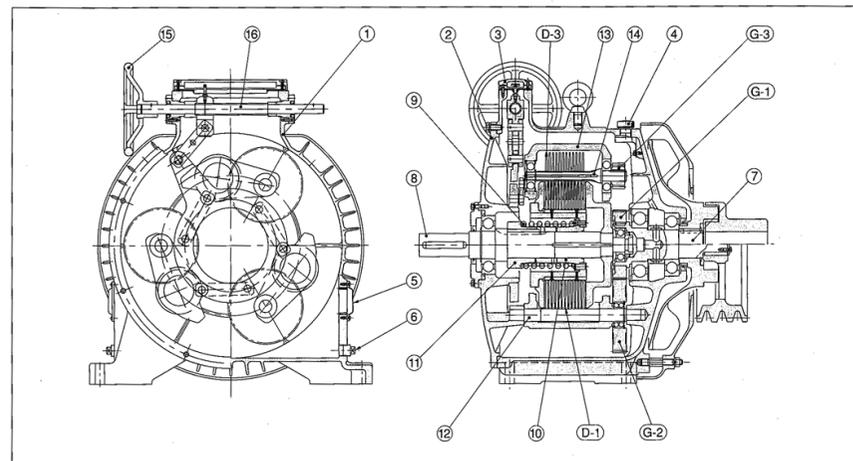
バイエル無段変速機カット断面イラスト

図23 機械式変速機の構造(住友バイエル変速機の場合)  
住友重機械工業株式会社カタログより

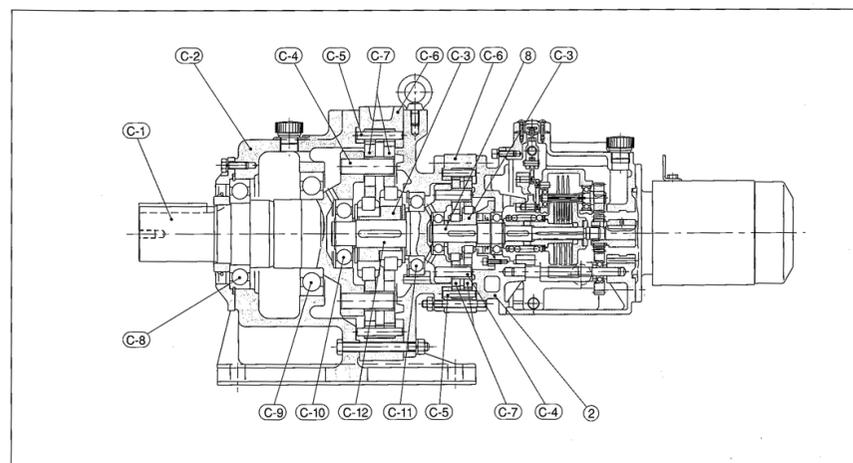
● 主要部品

品番	部品名	品番	部品名	品番	部品名	品番	部品名
1	ケース	10	フェースカム1	D-1	フランジディスク	C-5	外ピン
2	カバー	11	フェースカム2	D-3	コンディスク	C-6	枠
3	指針窓	12	揺動軸	G-1	入力軸歯車	C-7	曲線板
4	給油栓	13	アーム	G-2	揺動中心歯車	C-8	低速軸軸受A
5	オイルゲージ	14	スプライン軸	G-3	スプライン軸歯車	C-9	低速軸軸受B
6	排油栓	15	操作ハンドル	C-1	低速軸	C-10	中間軸軸受A
7	入力軸	16	操作軸	C-2	外カバー	C-11	中間軸軸受B
8	出力軸(図2では高速軸)			C-3	偏心体(偏心軸受)	C-12	中間軸
9	バネ			C-4	内ピン		

● A・B形バイエル無段変速機基準形



● バイエル・サイクロ可変減速機



## 5.2 軸封部の選定

軸封部は軸が回転していても槽内を密封し、槽内圧力を保つ装置である。それは槽内の圧力、温度、槽内流体の有毒性、腐食性などによりその方式や型式が選定される。図24は主な軸封方式の種類と特徴、使用範囲をまとめたものである。

攪拌機は様々な反応装置に使用され、高温高圧や腐食性流体に晒されることが多い。このような状況下で使用される代表的な軸封装置はメカニカルシールであるが、攪拌装置全体の中でも最もクリティカルな個所であり選定、設計、製作、据付および保守等の全てにわたり細心の注意が必要である。選定、設計においては適正な型式と構造 および各部の材質の選定、摺動材の組み合わせと潤滑液の選択などが重要である。特に摺動部に固形分の混入があると摺動面が損傷を受け槽内の流体や気体の漏洩の原因となる。槽の側面に取付られ、液体をシールする横型攪拌機の場合だけでなく、縦型攪拌機で気体をシールする場合でも固形分が飛散したり、析出固着するような場合は摺動部に固形分が到達しないようにフラッシング等を行なう必要がある。潤滑液、フラッシング液は槽内に漏洩しても問題ない液性状のもので潤滑性、清澄性に優れたものを選択することが重要である。また、メカニカルシールは構造的に複雑な間隙を有するので液溜まりによる残留異種液混入、腐敗、雑菌の繁殖等の問題を避けなければならない食品、医薬、化粧品およびバイオ関係における使用の際には洗浄や殺菌が十分に行なえるシンプルな構造のシールの選択と設計が必要である。また、製作、据付に関しては精密機械としての 工作精度や軸の芯だし、直角度などが要求され、トラブルを未然に防ぐためには日頃の十分な保守点検が必要な個所でもある。メカニカルシールの選定については、メカニカルシールメーカーと十分な仕様打ち合わせなどをもって、慎重に行う必要がある。

近年、摺動部にシール液を使用しないで、ガラス入りテフロンやカーボンとセラミックや超硬合金、SiC（炭化珪素）などのリング状の面をドライタッチで摺動させ密封するいわゆるドライメカニカルが多用されるようになった。耐圧性能は、真空から0.2MPa程度で、従来のシール液を使用するメカニカルシールと比較すれば劣るが、比較的簡単な構造でコストや取扱いの面で有利である。食品、医薬品関係では、従来から使用されていたグランドパッキン方式に替えてドライメカニカルシールを使用するケースが増加している。それはグランドパッキン方式の構造上からくる洗浄性、密閉性の悪さやパッキンの摩耗粉の槽内への混入などの問題を解消するためである。なお、ドライメカニカルシールにすることで摩耗粉の問題はかなり解決されるが、摩耗粉がまったくゼロであるというわけにはいかない。コンタミ（汚染物質）に関して厳密さが要求されるところでは、さらに摩耗粉の受けを設置し槽内に直接落下しないような工夫をする必要がある。（図25、26、27参照）

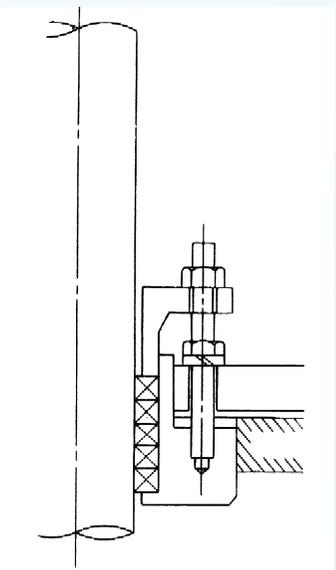
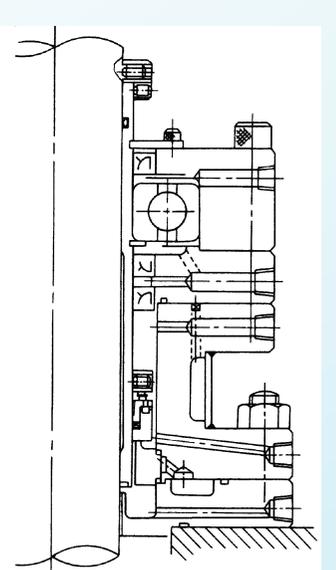
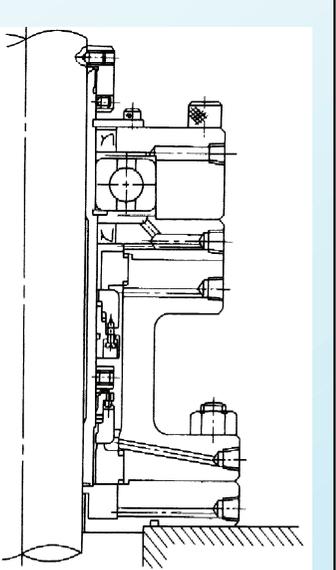
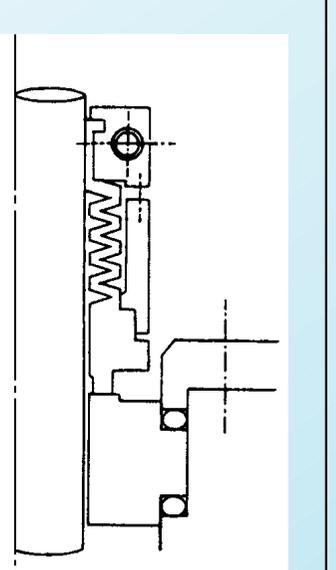
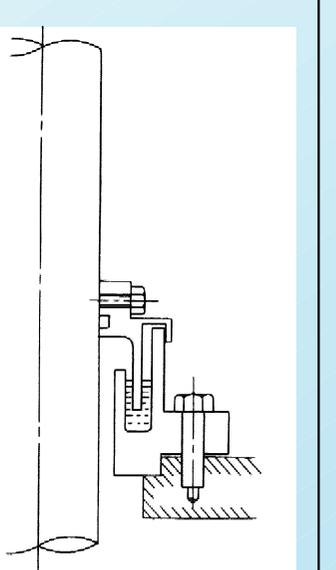
軸封方式	グランドパッキン	シングルメカニカルシール	ダブルメカニカルシール	ドライメカニカルシール	水シール（液封）
概略構造図					
耐圧性	耐圧性には乏しい オイルシールやVリングを併用して 真空～0.3MPa程度で使用する 場合もあるが、多少の漏洩は免れない	基本的にはFV～大気圧で使用 加圧側で使用する場合は、最高でも 0.03MPa程度	標準型でFV～4.5MPa程度 特殊型で～30MPa程度	標準型でFV～0.3MPa程度	一般に100～200mm水柱程度

図24 軸封装置の構造と耐圧性能

Vessel Pressure		Vessel Temperature					
		°F	-148	158	392	482	752
		°C	-100	70	200	250	400
Vessel Pressure	PSIG	kg/cm <sup>2</sup> G	UV11 (Po or SP)	UV11(Po) or 2 UV11(PU)	2 BV23-VE (Po or PU)		
	0	0	2 UV11 (PT or PU)	2 UV11 (PU)			
	114	8	2 BV11 (PT or PU)	2 BV11 (PU)			
	285	20	2 BV23-VE (PU)				
	640	45	SS (PU)				
	1280	90	ST (PT or +PU PP)				
2845	200						
4270	300						

- ※1). 上記仕様以外の物については適宜御相談下さい。  
 2). 上記選定は500r.p.m.までとし、それ以上は特殊選定と  
 します。

a) **メカニカルシール型式**

- UV11 ……シングルアンバランスメカニカルシール
- 2UV11 ……ダブルアンバランスメカニカルシール
- 2BV11 ……ダブルバランスメカニカルシール
- 2BV23-VE ……標準静止型メカニカルシール
- SS ……特殊静止型メカニカルシール
- ST ……三段メカニカルシール

b) **加圧装置**

- Po ……流し込み
- SP ……シールポット
- PT ……加圧缶、均圧缶
- PU ……プレッシャーユニット
- PP ……ピストン缶

(例)

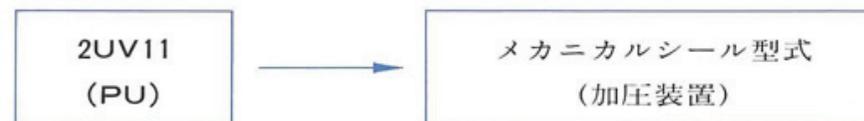
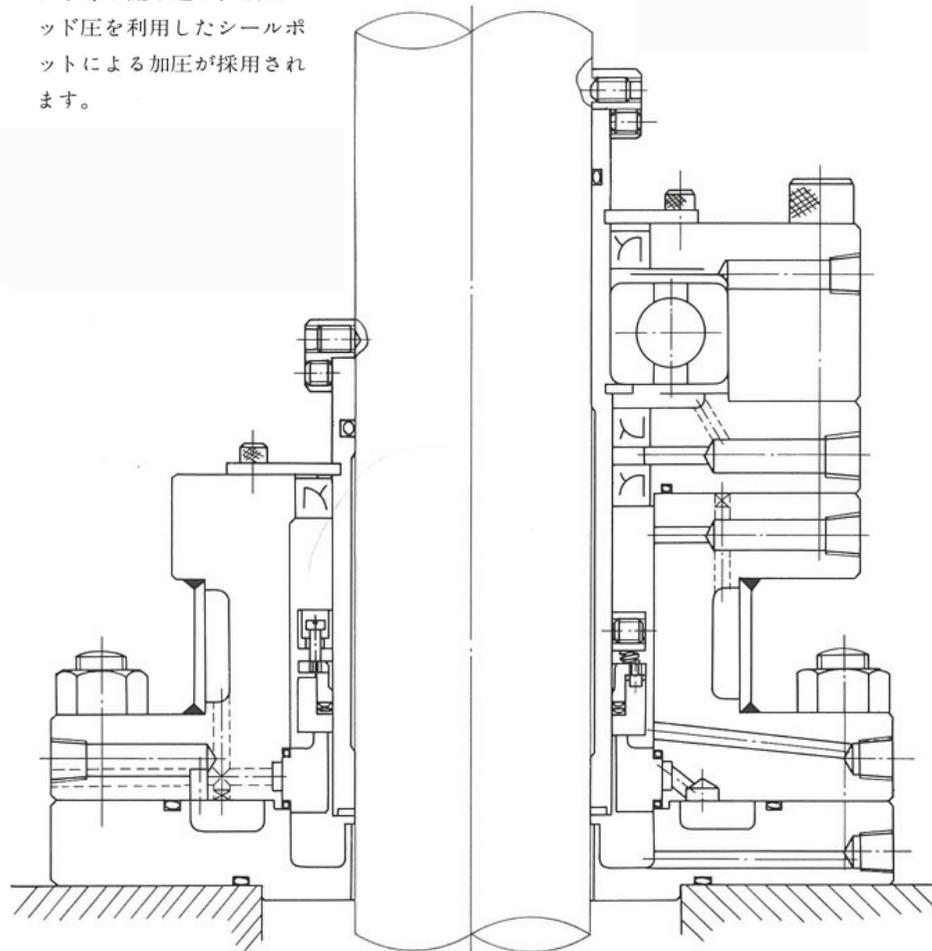


図25 メカニカルシールユニットおよび加圧装置の選定例  
 (株式会社タンケンシールセーコウ カタログより抜粋)

### ① シングルメカニカルシールユニット

- 缶内圧力が大気圧以下に使用する標準タイプメカニカルシールユニットです。
- 加圧方式としては、一般的に水等の流し込み、或はヘッド圧を利用したシールポットによる加圧が採用されます。



### ② ダブルメカニカルシールユニット

- 最も広く使用されている標準タイプのメカニカルシールユニットです。
- 一般的に缶内圧力が  $8 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  以下はアンバランス型、 $8 \sim 20 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  はバランス型のメカニカルシールを使用します。
- 加圧装置は仕様条件、設置環境等に応じて、プレッシャーユニット、或は加圧管が採用されます。

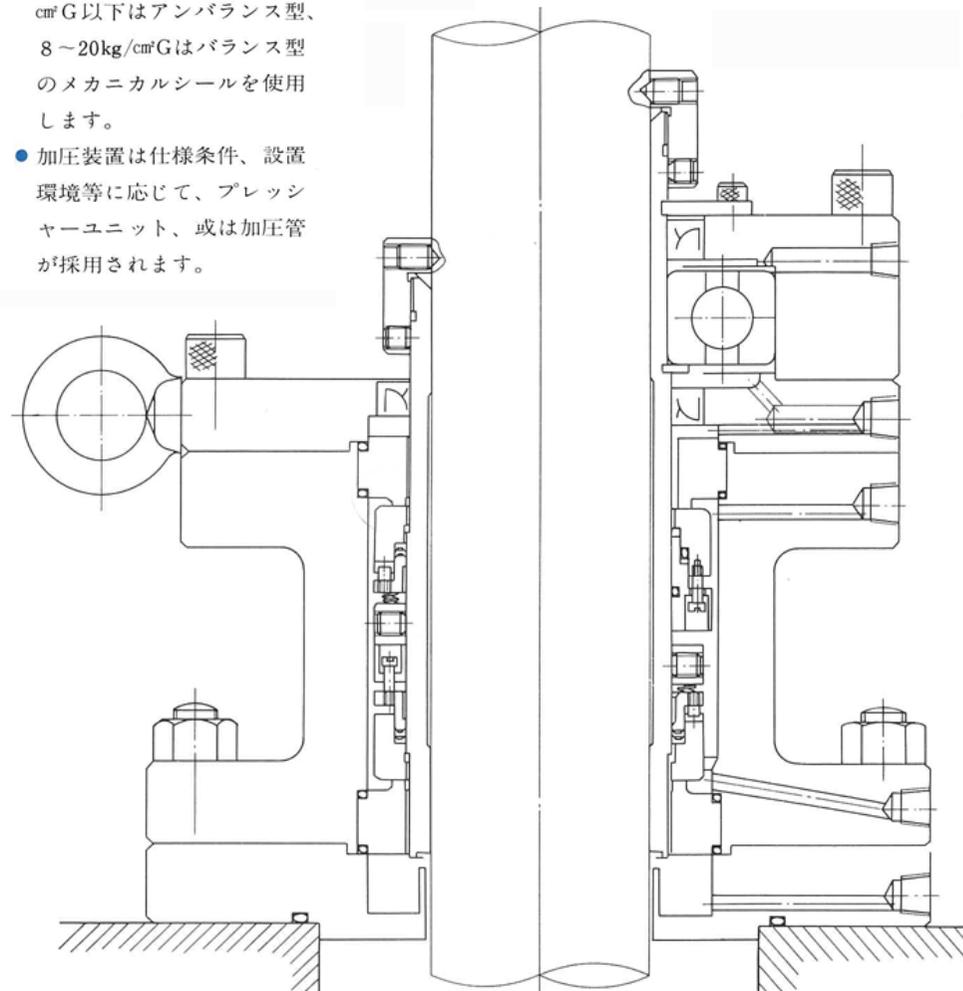
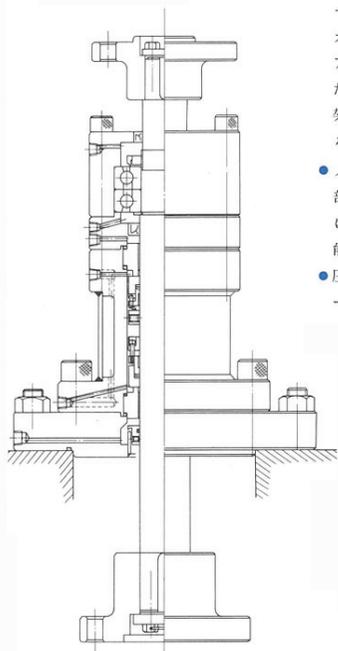


図26-1 メカニカルシールユニットの型式と概略

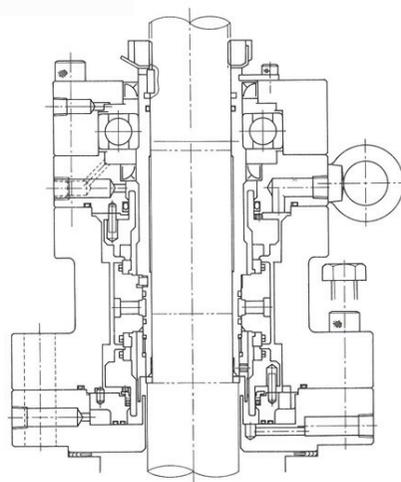
(株式会社タンケンシールセーコウ カタログより抜粋)

### ③ 軸直タイプメカニカルシールユニット



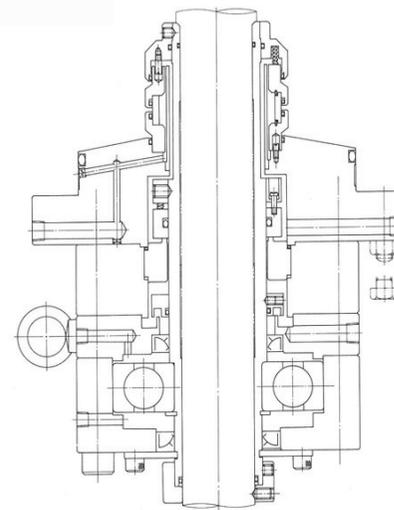
- スリーブを使用せずにシャフトに直かに標準メカニカルシールを組み込み、ラジアルとスラスト荷重を受けたものです。したがって、架台でラジアル荷重を受けるだけで攪拌機は完成です。
- メカニカルシールユニット部のベアリングをはずさずメカ・シールの交換が可能です。
- 圧力区分は②ダブルメカシールユニットと同様です。

### ④ 静止型メカニカルシールユニット



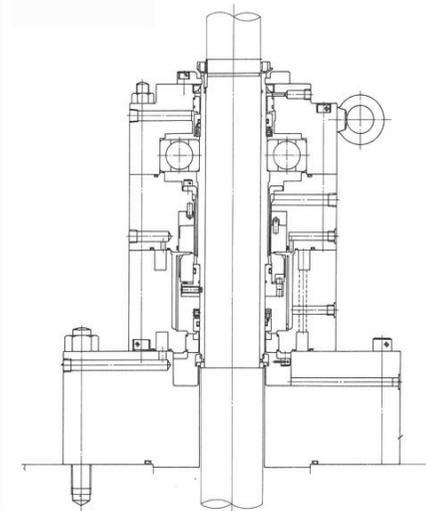
- 缶内圧力20kg/cm<sup>2</sup>G以上の高圧および250°C以上の高温用に使用される標準メカニカルシールユニットです。
- 加圧装置はプレッシャーユニットが標準となります。

### ⑤ 下部攪拌用メカニカルシールユニット



- 下部攪拌オートクレーブ用に、その特徴を最大限生かす様設計された、標準メカニカルシールユニットです。

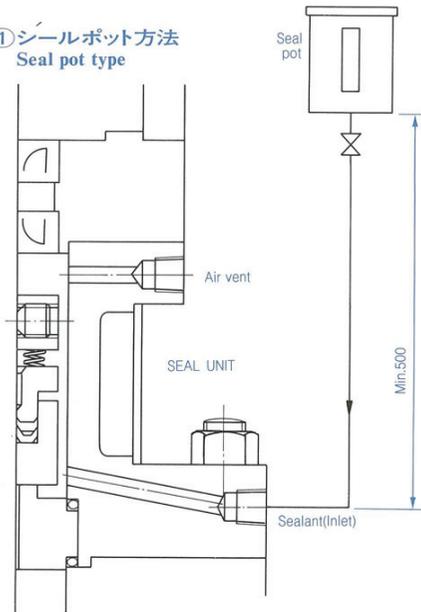
### ⑥ 三段メカニカルシールユニット



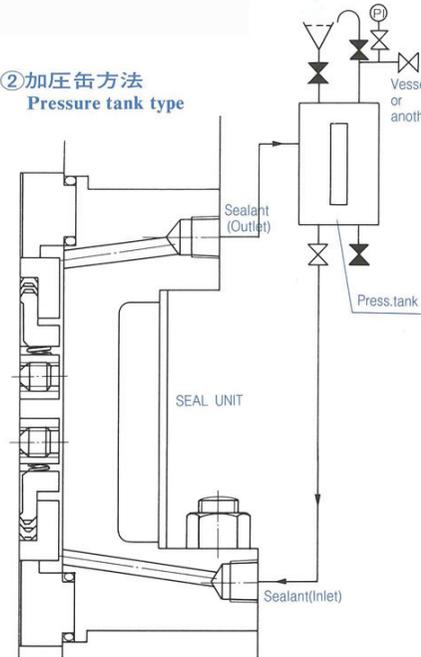
- 缶内圧力90～300kg/cm<sup>2</sup>G以上用のシールユニットです。
- 加圧装置は、ピストン缶と低圧プレッシャーユニットの併用となります。

図26-2 メカニカルシールユニットの型式と概略  
(株式会社タンケンシールセーコウ カタログより抜粋)

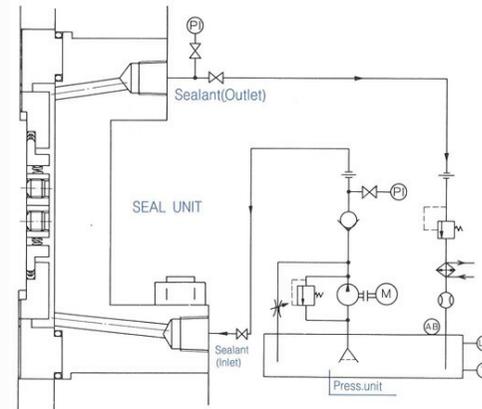
① シールポット方法  
Seal pot type



② 加圧缶方法  
Pressure tank type



③ プレッシャーユニット方法  
Pressure unit type



④ ピストン缶、プレッシャーユニット方法  
Piston pressure tank + pressure unit type

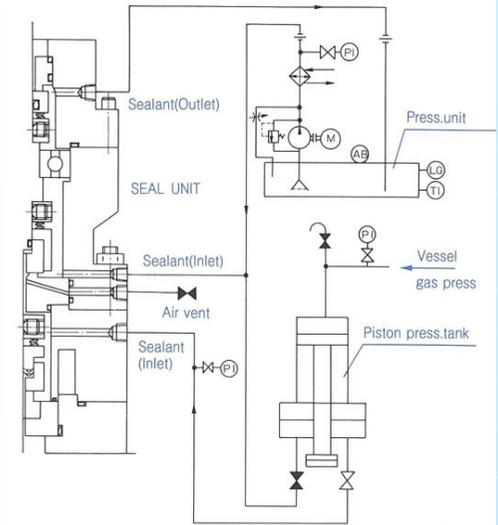


図27 加圧装置の配管方法の例  
(株式会社タンケンシールセーコウ カタログより抜粋)

### 5.3 攪拌機本体および攪拌軸の設計

攪拌機本体は駆動部からの回転を攪拌軸、翼に伝え、円滑に運転できるように支持する役目を持つ。ここには単に動力を伝達するねじり(トルク)だけでなく、槽内での流動が引き起こすアンバランス水力による曲げ(ラジアル)荷重や攪拌軸および翼の自重、攪拌翼の推力による垂直(スラスト)荷重が掛かる。特に多くの場合、攪拌槽内の軸の先端の軸受は設置しないので回転機器としては異例な非常に長いオーバーハング(片持ち)の回転軸を上部の軸受で支持しなければならないのでこれらの荷重に対して連続的な長期の運転に耐える構造とする必要がある。また、長期の連続運転を保持するためには定期的な点検、保守が必要でこれらの作業がし易い構造としなければならない。(図28参照)

攪拌軸は上述のように非常に長いオーバーハング軸であり、その先端に不規則に変動する荷重を受けるという苛酷な条件で使用される。そこには大きな曲げモーメントが作用するため、これらの荷重を予測し、十分に余裕を持った設計を行わなければならない。特に攪拌軸に対する設計上の検討が不十分であると攪拌軸の曲がりや折損という重大な事故を起こしかねない。その攪拌軸を設計するにあたり検討しなければならない主な項目は次の通りである。

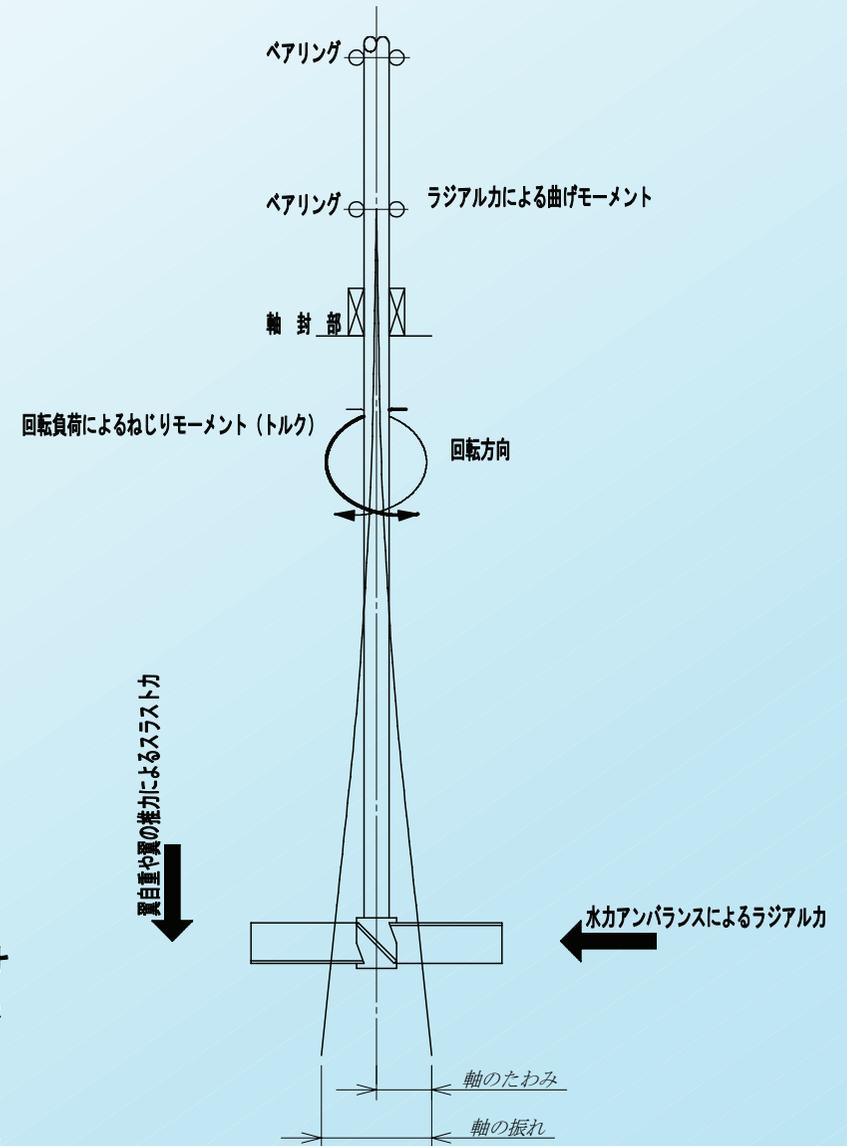


図28 攪拌軸にかかる荷重

### (1)軸にかかるねじり応力および曲げ応力

攪拌軸には攪拌翼の仕事に伴う動力の伝達によるねじりモーメントと攪拌翼が槽内の流体の不規則な流動から受けるアンバランスな横荷重および軸や攪拌翼自体のアンバランスからくる横荷重による曲げモーメントが働く。したがって、攪拌軸の強度計算には両モーメントが同時に作用した場合の計算式を用いて不足のない軸径を選ぶ必要がある。なお、軸にキー溝加工が施されている場合や段付軸のように軸が一様でない場合は応力集中が起き使用応力が大きくなるのでその補正が必要である。

また、軸には変動荷重や衝撃荷重が作用するので静荷重の場合よりも大きな応力を生じるが、各々の条件に見合った動的効果係数を乗じてその補正も行う必要がある。アンバランス水力(流体の不規則な流動から受けるアンバランスな横荷重)について 攪拌軸に掛かる曲げ応力やたわみを求めるのに必要であるのは翼が受ける横荷重 $F_i$ である。運転中の攪拌軸を曲げようとする力は、翼が流体から受けるアンバランス水力や軸や翼の工作上発生する偏心荷重による遠心力などであるが、特に高速回転の場合でない限りアンバランス水力による影響が強い。この力は槽内で発生する非定常的な流れのために羽根に不均等な力がかかることによるものであり、非常に予測し難いものであるが動力数  $N_p$ と同様に翼の形状、羽根の枚数、攪拌機の槽への取付位置および邪魔板の有無等の関数として表せると考えられる。

攪拌翼が流体から受ける抵抗力 $R_f$ [N]は次式で表される。

$$R_f = C_d \cdot \rho \cdot A \cdot u^2 / 2$$

ここで  $C_d$ : 抵抗係数[-]     $\rho$ : 流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]     $u$ : 攪拌翼の速度[m/sec]

$A$ : 翼の流体に対する垂直方向投影面積[m<sup>2</sup>]

上式を攪拌機の翼径 $d$ [m]と回転数 $n$ [1/sec]を使用して書き直すと  $A \propto d^2$  および  $u \propto d \cdot n$  であるから

$$R_f = C_d' \cdot \rho \cdot d^2 \cdot (d \cdot n)^2$$

ここで、翼に掛かるアンバランス水力を $F_i$ 、アンバランス荷重係数 $N_{Fu}$ とすれば、

$$F_i = N_{Fu} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot d^4$$

この様な力は軸に張り付けた歪ゲージにより曲げ応力を測定し、材料力学の計算から求めることが出来る。(図29参照)



実際に種々の翼形状、翼枚数、邪魔板の有無、偏心取付け、液面の変動など様々の条件を変化させてアンバランス水力を測定した結果、アンバランス水力を小さくするためには翼の枚数を多くするほうが良く、また攪拌槽の中心に取り付け、邪魔板の枚数も多く、しかも対称に設置することがよかった。特にアンバランス水力を増加させる条件は偏心取付の場合であり、偏心量によりその値は変化するが、最大では中心取付の場合の3～4倍の力が働くことが測定されている。したがって偏心取付は攪拌軸には非常に苛酷な条件となり、攪拌軸に係わる不具合の原因のひとつに挙げられている。一般に邪魔板を設置しない代わりに偏心取付をするとよいとされているが、以上のような理由と攪拌効果についても邪魔板付きの場合と同等というわけでもないのだから、邪魔板付きで中心取付にするようにすべきである。

(2)軸の振れおよびたわみ 攪拌軸は運転中にアンバランス水力および軸や翼の工作上発生する偏心荷重による遠心力などによる横荷重によりたわみ、軸を振れさせる。軸の振れにより攪拌機全体の振動やゆれを生じさせ他の構成要素に悪影響を及ぼすのでできる限り少なくする必要がある。また特に振れ量が問題になる箇所は軸先端および軸封部である。運転中に軸先端部の振れ量が大きいと攪拌翼が槽内挿入物(邪魔板、蛇管、ドラフトチューブ等)に接近して取り付いている場合は両者が接触する可能性もある。

また、軸封部ではグランドパッキンおよびメカニカルシール共にある面で接触して密封しているわけで常にその面は接触していなければならないため多少の追従性は持たせてはいるが限度があり、その限度を超えるような振れ量があってはならないのである。振れ量については実際に攪拌機が組み立てられて試運転を行うときに初めて測定されるわけであるが、これらの値が規制値内に納まることを確認することが重要である。



### 3) 固有振動数(危険回転数)

運転中の攪拌軸は多少なりとも偏心荷重による振れ回りをしている。振れ回りの周期はその軸系の横振動の固有振動数である。この振動数と攪拌機の運転回転数が合致するといわゆる共振をおこし、振動が激しくなり、攪拌軸が曲がったり、場合によっては折損するなどの重大な事故を引き起こしかねない。

攪拌機においては、この固有振動数に合致する回転数を危険回転数と呼ぶ。

危険回転数は攪拌機の基本的要素である軸径、軸長、翼の重量や取付位置に関係するが、計算によってあらかじめ求めることが出来るので、安全運転のために設計時に十分検討すべき事項である。

実際上は計算値の危険回転数の前後20～30%の範囲で振動が発生する可能性があるためこの範囲の運転は避けるようにすべきである。

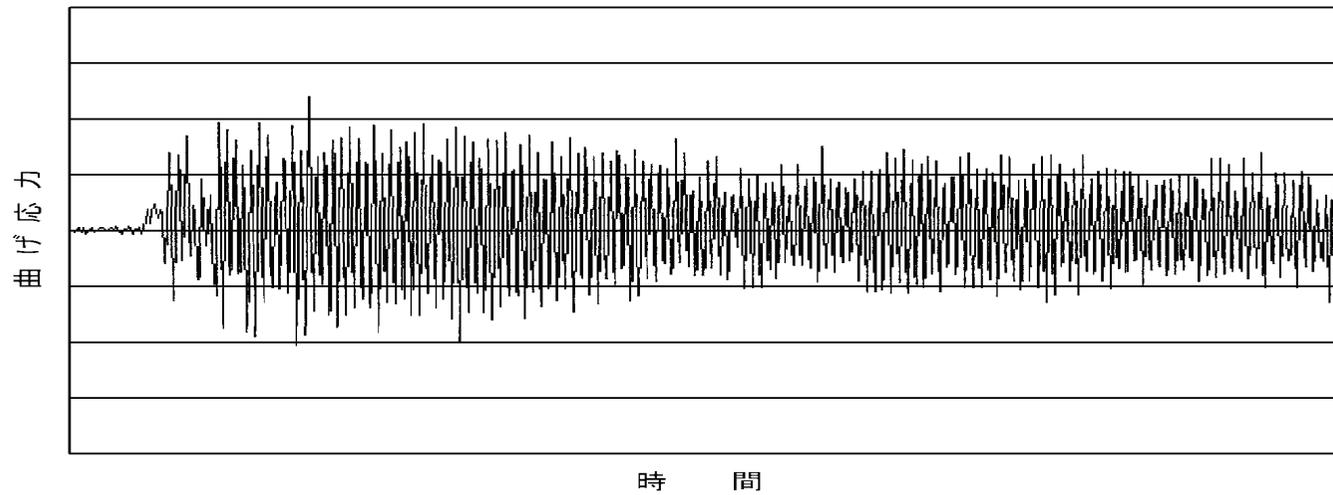
また、危険回転数の整数倍および整数分の1の前後10～15%の範囲でも振動が発生することもあるので注意が必要である。(図30参照)

実用サイズの攪拌機では、およそ100～500rpm程度の範囲に危険回転数が存在するが、設計上は、出来れば危険回転数の70～80%以下で運転できるようにしたい。

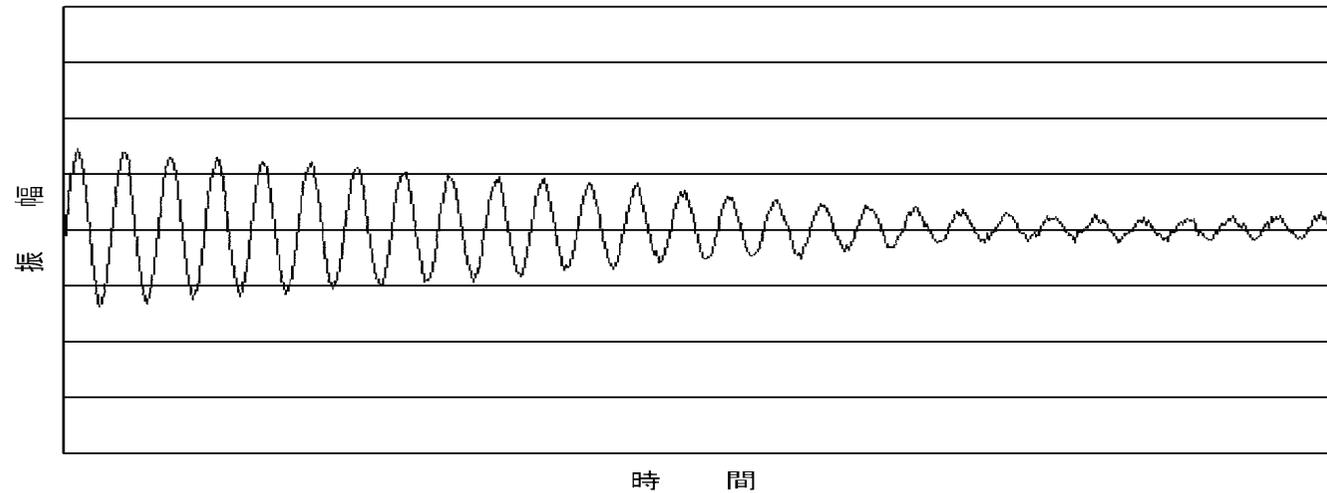
やむを得ず危険回転数を通過して使用する場合は、重量の調整等をして運転回転数と危険回転数が十分に離れるようにしなければならない。

さらに偏心荷重を少なくする意味で軸の初期曲がりを最小にすることや翼のバランス精度を向上させる等の製作および組み立て精度を上げるようにすべきである。





a 攪拌軸にかかる曲げ応力測定例



b 攪拌軸の固有振動数測定例

図29 攪拌軸にかかる曲げ応力及び固有振動数測定例

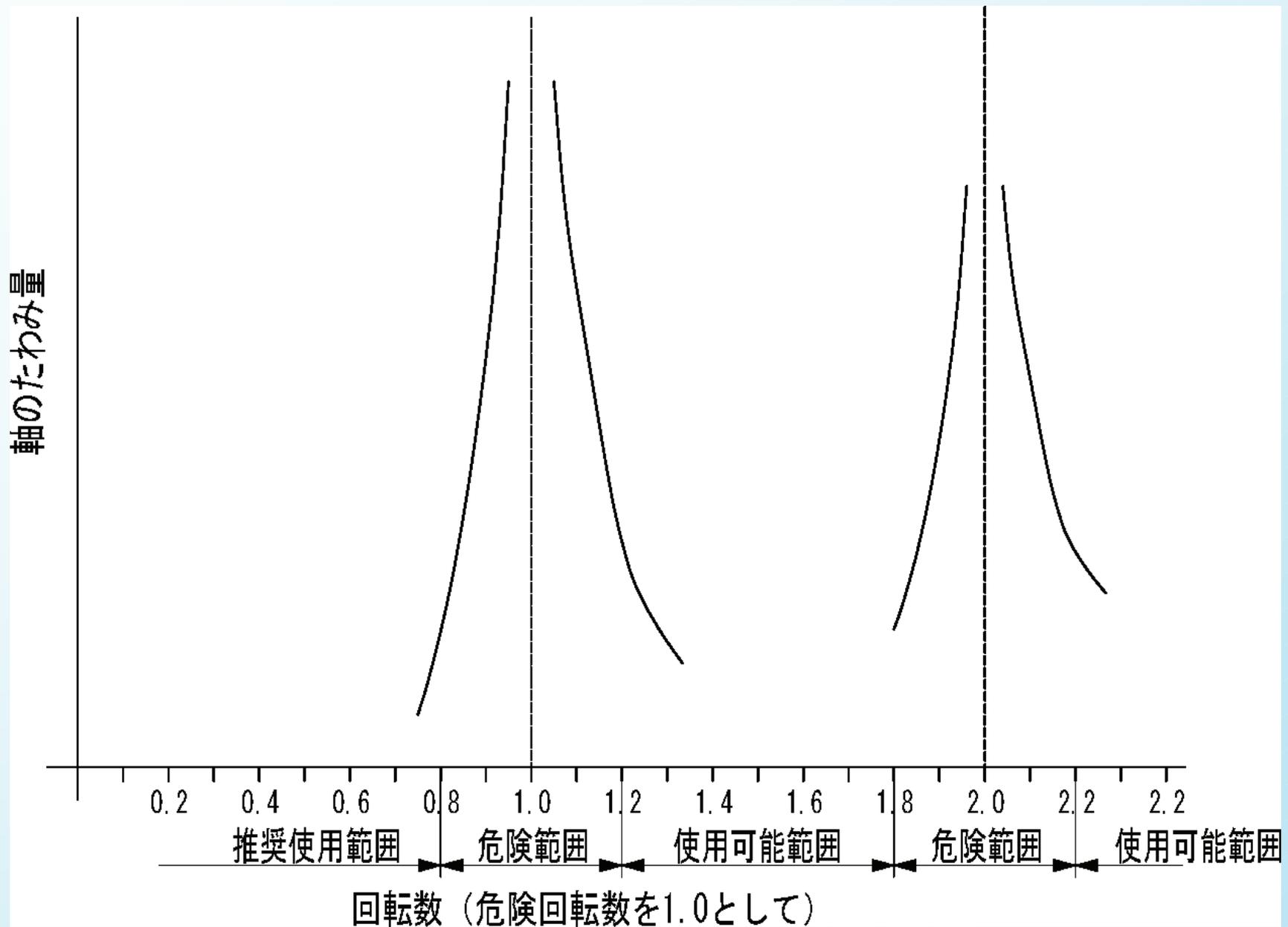


図30 攪拌機の危険回転数範囲

本図の回転数と軸のたわみ量との関係は模式的なもので、実際とは異なる場合があります

## 5.4 攪拌翼の設計

荷重に対する十分な強度を有することは当然であるが、300rpmを越えるような高速型の攪拌機の場合にはバランスの問題も重要なチェック項目である。

攪拌翼は製造物である以上多少の偏心荷重は免れない。高速になるほど偏心荷重を基とした遠心力の影響が大きくなり、攪拌軸を振れ回りとさせる。

振れ回りが大きければ安定した運転は出来なくなるため必要なバランス修正を行わなければならない。

300rpm程度の小型の攪拌翼では静的バランス修正で十分であるが、更に高速回転の攪拌機や質量の大きな攪拌翼では動的バランス修正が必要である。

また、バランスは単に質量的なものでなく水力的にもバランスが取れている必要があり工作精度の管理を十分に行わなければならない。

また、既設の攪拌槽に据え付ける場合などに起きやすいトラブルとして攪拌槽内に攪拌翼を挿入させるたとえばマンホールなどの開口寸法が攪拌翼を通過させるに十分な大きさがない場合がある。このようなことをなくすために事前に十分開口寸法を確認し、必要に応じて攪拌翼を分割構造などとしなければならない。



## 5.5 攪拌槽および付帯設備について

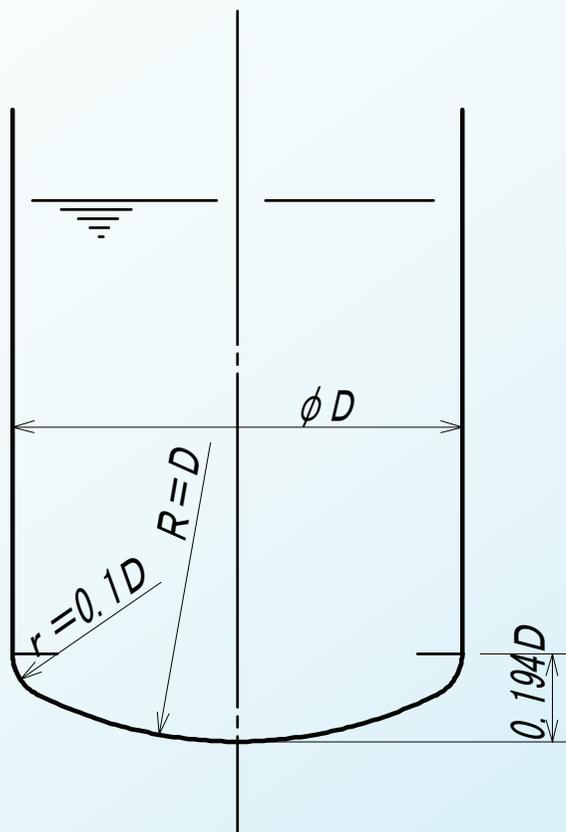
攪拌槽の底部の形状は、槽内圧やジャケットに圧力が掛かる場合は強度上の観点から皿鏡板や半楕円鏡板とすることが多い。これらは緩やかな曲面を持ち、底部の流れの停滞を防ぐことから攪拌効果上も望ましい。液の排出の面から円錐形の底部にすることもあるが、攪拌効果の面からは余り深い円錐は避け、出来れば120度以上の頂角としたい。（図31参照）

また攪拌槽の大きさを決定する時に必要な空間容積を確保しておくことも重要である。攪拌槽の全容積は攪拌液量が80%前後になるようにすることが多いが、必要な空間容積は槽内液の反応や熱膨脹および気体のホールドアップによる増量、攪拌による渦の形成による液面上昇（コーニング）、真空による槽外への吸引防止のための空間確保など状況により異なるので検討の上、十分にとるようにはしなければならない。とくに真空にする場合、発泡がある場合は空間部を多くとるようにする。

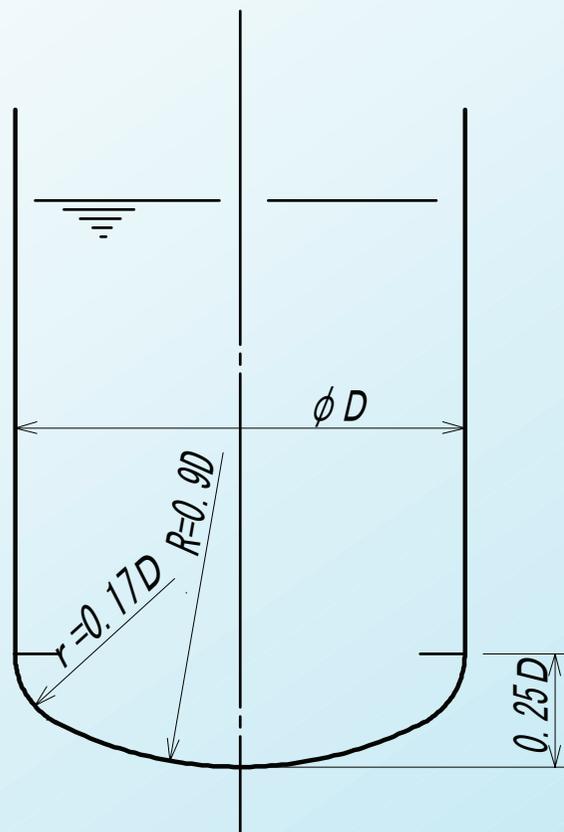
また、攪拌効果上からは液深と槽径の比率  $H/D$  は0.8～1.2程度が望ましい。槽内には2～8枚（通常は3～4枚）の邪魔板を設置することが多い。邪魔板の幅は通常、槽径の $1/8$ ～ $1/12$ 程度で板状のものを垂直に取り付ける。長さは特に決まりはなく、槽底付近から液面に達するまでの邪魔板を取り付けることが多いが、液面より上に出した場合に気液界面に汚れが発生することもあり、特に長くしなくても液高の $1/2$ ～ $2/3$ 程度の長さでも邪魔板効果は期待できる。邪魔板の形状は、板状だけでなくパイプ状、フィンガー状のものや伝熱用のヘアーピンコイルを代用とする場合もある。（図32参照）

邪魔板の取付は、板状の場合を例にとると、小さな攪拌槽では邪魔板を直接槽壁に溶接することもあるが、実用レベルの大きさの攪拌槽では、邪魔板を取り付けるための支持金具を数カ所槽壁に溶接し、その支持金具に邪魔板を溶接またはボルトによって固定するのが一般的である。

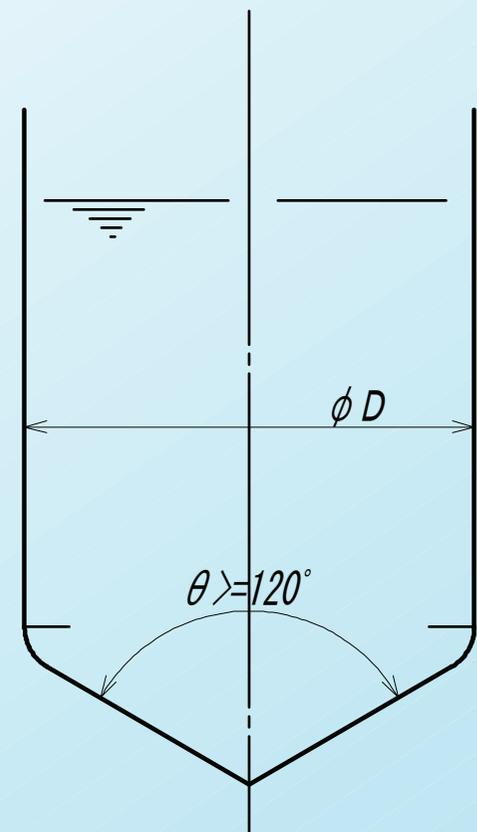
その他、攪拌槽にはジャケットやコイル等の伝熱装置やマンホール、ノズル、計測用の挿入管、場合によってはドラフトチューブやガス吹き込み用のスパージャー等の付帯設備が取り付けられるが、これらは攪拌軸、翼と同様に流体から非定常的な力を受けるので十分な強度と振動の発生しないような設計が必要である。また、これらの設置には攪拌のための流動を阻害したり、槽内液排出時の閉塞をさせたりしないような配慮をすべきである。



a) 10%皿鏡板



b) 2:1半楕円鏡板



c) コニカル (円錐)

図31 代表的な攪拌槽の底部形状

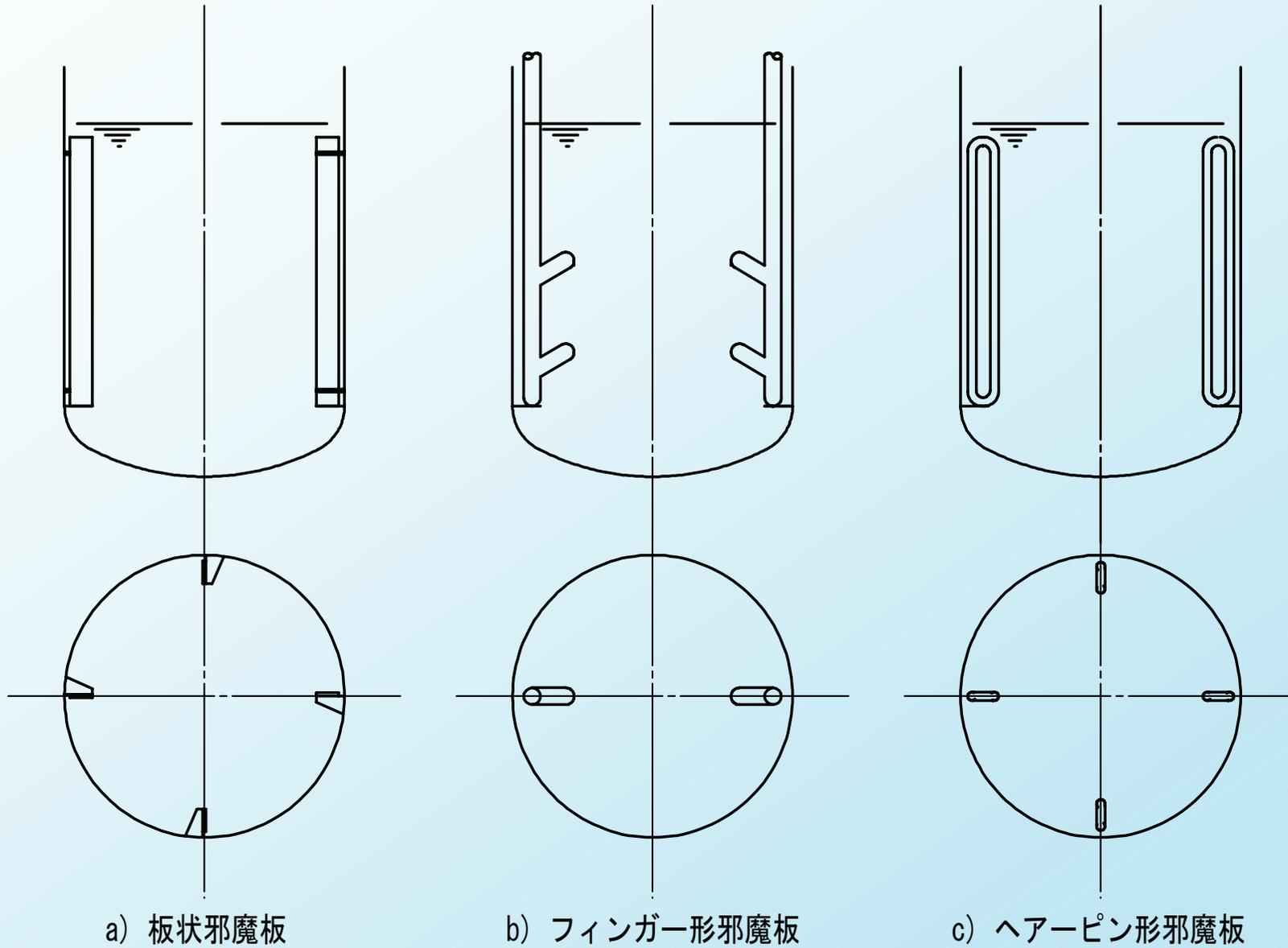


図32 代表的な邪魔板形状

## 5.6 邪魔板の効果と弊害について

前述のように攪拌槽内に邪魔板を取り付けることにより、旋回流を減少させ、上下循環流および放射流が増強されるので、攪拌槽全体の循環もよくなり、剪断力も強化されるので、良好な攪拌 効果を望むのであれば、邪魔板の設置を考える必要がある。

特に液液分散、気液分散のように 剪断性能を求める場合は、邪魔板の設置は必須である。また、邪魔板のない場合は、攪拌性能だけでなく、操作上の問題を引き起こす可能性がある。旋回流が主体の場合は、旋回により遠心力が働いており、重力とのバランスにより、軸心部が凹状になり槽壁部で液位が盛り上がるような渦流(コーニング現象)が発生する。このことにより流体が槽外に溢れ出してしまうというトラブルも 実際発生している。更にこの渦流が上下方向にも揺動する(スロッシング現象)こともあり、このような状況では、攪拌軸にも大きなアンバランス荷重がかかり、安全な運転が出来なくなる。(図33参照)攪拌性能に対して有用な邪魔板も、時として操作上弊害となることも多い。弊害の大部分は、付着の問題である。邪魔板は槽内の突起物であり、流体との接触面積が増加するだけでなく、邪魔板背面の流動の淀みのためにどうしても付着物が多くなる。また攪拌終了後に洗浄する際に邪魔板部が陰となり十分な洗浄ができずに、汚染の原因になったりする。このような場合は邪魔板の形状を考慮したり、高度の研磨を行なうことで出来るだけ付着しないようにし、邪魔板と槽壁の間に隙間を設け流れのよどみが出来ないように工夫する必要がある。過去の攪拌不良の事例を見ると、邪魔板がないことに起因するケースが非常に多いことも事実であり、攪拌不良やスロッシングなど実際に今までに発生したさまざまなトラブルの解決方法として邪魔板を設置することになった例は少なくない。邪魔板は、攪拌操作にとって相反する二面性を持つために両者の妥協の範囲を考えながらの選択が必要となる。

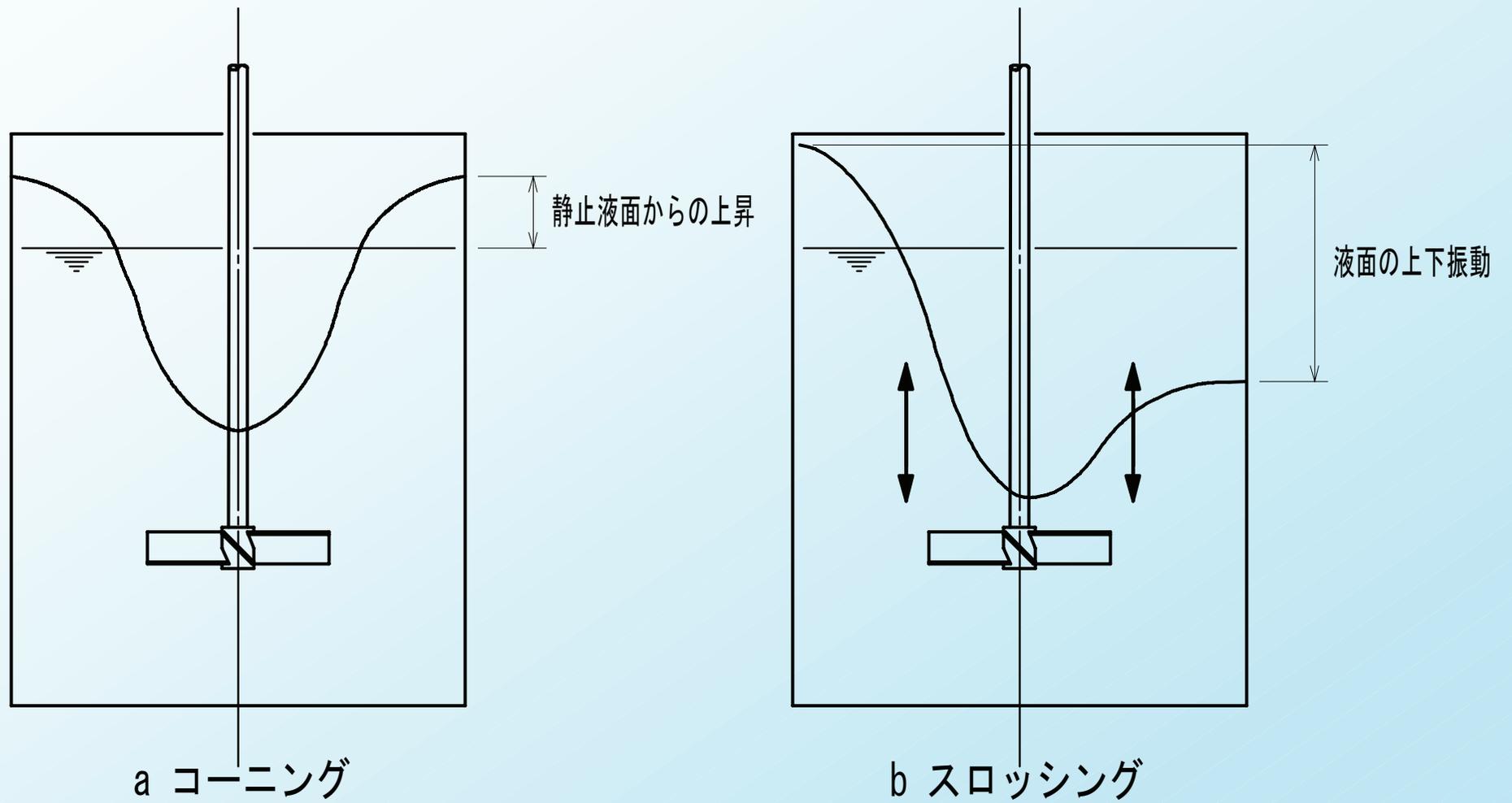


図33 邪魔板のない攪拌槽内の液面上昇(コーニング)と振動現象(スロッシング)

## 5.7 使用材質の選択

攪拌装置は時として酸やアルカリ、ハロゲンイオン、酸化物や還元物などが含まれる流体に曝される。更には、槽内温度は200～300℃に達する場合もある。このような環境は、金属の腐食の面からは非常に厳しい環境といえる。通常、攪拌機に使用される材料は、強度的、コスト性に優れ、加えて比較的耐食性のあるオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304、SUS316、SUS316Lなど)が使用されているが、上記のような物質や温度条件により耐食的に不十分な場合も多い。オーステナイト系ステンレス鋼が使用できないような場合に攪拌機の材料として、良く用いられる金属材料は、チタニウム(チタン)、純ニッケル、ニッケル／銅合金、各種ハステロイ(ニッケル／クロム／モリブデンなどの合金)などがある。これらの金属は、優れた耐食性を示すが、難点は非常に高価なことである。(たとえば、ハステロイの場合、SUS304と比較すると材料のみのKg単価は、20倍程度にもなる)また、これらの金属は、加工の面も通常のステンレス鋼に比較して時間がかかり、加工費用も1.5～2倍程度みる必要がある。このように材料費、加工費共に高価な金属であるので、その選択には十分な検討が必要である。検討の中には、これらの金属のライニング(炭素鋼または通常のステンレス鋼の表面を高級材料で被覆する)も加えることもある。小さな機器の場合は、ライニングによる費用効果は出ないが、大きな機器になるにしたがいライニングにした方が費用対効果がでるのが一般的である。以上の金属材料の他にゴムや各種の樹脂を炭素鋼または通常のステンレス鋼の表面のコーティング(またはライニング)する場合もある。ゴムや樹脂は酸やアルカリに強く優れた耐食性を示すが、高温や有機溶剤に弱いという欠点もある。耐食性について検討することは難しい点が多い。通常存在する耐食データは、限定された条件であることが多いので、試験片を実際に使用する流体に長時間浸漬しテストするなどして耐食性を確認することが望ましい。