

パドル翼攪拌槽における旋回スロッシングと共振現象

出口, 雅紀 / DEGUCHI, Masaki

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2006 年度 修士論文

論文題目 **パドル翼攪拌槽における
旋回スロッシングと共振現象**

指導教授 **新井 和吉 教授**

**大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程**

学籍番号 05R1129

氏名 デグチ マサキ
出口 雅紀

Rotary Sloshing and Resonance Phenomena in Stirred Vessel

Masaki DEGUCHI

Abstract

The conditions for generating rotary sloshing of liquid, and the influence of operational conditions, such as the size of equipment, liquid height and impeller speed in a stirred vessel with a flat paddle impeller on the rotary sloshing frequency and resonance phenomenon were examined.

It was found that the rotary sloshing of liquid occurred immediately after the liquid surface touched the lower end of the impeller, and that it was generated when the impeller speed was greater than the rotary sloshing frequency. Moreover, based on the equation for sloshing frequency in the tank without an impeller, the equation of rotary sloshing frequency was derived considering the influence of the impeller's diameter. Furthermore, in the mixing machine, when rotary sloshing of liquid occurred, the vibration was induced by both impeller speed and rotary sloshing.

It was found that the resonance phenomena occurred when the vibration induced by rotary sloshing of liquid was in agreement with the natural frequency of the mixing machine.

From the above, we suggested a safe operation indicator at the time of mixing.

目次

第一章 緒論

1.1 緒言	1
1.2 攪拌の基礎	2
1.2.1 攪拌の分類と用途	2
1.2.2 攪拌装置	4
1.2.3 攪拌翼の形状と攪拌作用	5
1.3 振動の基礎	7
1.3.1 共振現象	7
1.3.2 スロッシング	9
1.4 本研究の目的	10

第二章 基礎研究

2.1 緒言	11
2.1.1 攪拌時の主な液面現象	11
2.1.2 旋回スロッシング	11
2.1.3 旋回スロッシング周波数の定義	13
2.2 攪拌装置	14
2.3 振動計測装置	19
2.3.1 打撃ハンマ	19
2.3.2 加速度計	20
2.3.3 分析処理器と AD 変換	21
2.3.4 フーリエ変換, 高速フーリエ変換	22
2.3.5 周波数応答関数	22
2.3.6 関連度関数	22
2.4 液注入時の液面現象	23
2.4.1 実験目的	23
2.4.2 実験方法・条件	23
2.4.3 結果・考察	26
2.5 旋回スロッシングに及ぼす攪拌槽諸元の影響	30
2.5.1 実験目的	30
2.5.2 実験方法・条件	30
2.5.3 結果・考察	31
2.6 攪拌機の固有振動数	36
2.6.1 実験目的	36

2.6.2	実験方法・条件	36
2.6.3	結果・考察	38
2.7	攪拌機の振動現象	42
2.7.1	実験目的	42
2.7.2	実験方法・条件	42
2.7.3	結果・考察	43
第三章 旋回スロッシングのメカニズムの解明		
3.1	緒言	49
3.2	旋回スロッシングの発生領域と発生条件	49
3.3	旋回スロッシングに及ぼす攪拌槽諸元の影響	49
3.4	相関式の導出	54
第四章 攪拌機の共振現象		
4.1	緒言	56
4.2	攪拌機の共振現象の検討	56
第五章 結論		
5.1	結論	60
5.2	攪拌機の実験指針	61
使用記号		62
参考文献		63
謝辞		64

第一章 緒論(Abstract)

1.1 緒言(Abstract)

攪拌とは、その言葉の通りものをかき混ぜることである。化学工業を例にとるならば、生産プロセスの主幹をなしている操作として、化学原料などから有効成分物質を分離し、得られた成分を数種類、配合混合して反応を行わせることにより、目的とする製品を製造するという混合操作や反応工程などがある。成分物質の配合混合はもちろんのこと、分離装置や反応装置自体も攪拌装置であることは珍しくない。そのほか、食品工業、生化学工業、製紙工業、金属工業、水処理などの環境関連業務などのあらゆる分野のプロセスの一部として必ず攪拌装置が使用されている。日常生活においても、ミキサーやジュースーとして馴染みのものである。中には、高分子工業における攪拌反応槽での重合反応や発酵工業における通気攪拌装置での発酵のように、攪拌操作自体がそのプロセスの主要部をなしている場合もある。このように、攪拌装置は多種多様な分野において不可欠であるが故に、当然のものとして縁の下の力持ち、また脇役として目立たない存在であることが多い。しかし、攪拌装置の生産額は国内のみでも年間数百億円に達する産業機械として機械製造業の中に確実な地位を占めている¹⁾。また、機械であるが故に生産量に比例してトラブルや事故が多く起こるのも事実である。

ここで、攪拌における動的要素である攪拌機運転時の事故について考えてみる。まず、攪拌機は、非常に長いオーバーハング(方持ち)軸を持つ機械で、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や攪拌流体の不規則な流動から受けるアンバランス荷重、設計上の誤差から生じる攪拌翼の偏心荷重による曲げモーメントなどが働く。さらに長時間の連続運転、高温、高圧化における運転、高腐食性流体内での運転、運転中の流体の物性変化などによる負荷や荷重の変動を伴う運転など、非常に過酷な条件下において安定した運転が要求される機械である²⁾。それゆえ、攪拌装置運転中のトラブルも多い。その一例としては、攪拌運転中の攪拌翼の折損事故である。この原因として、ひとつに攪拌機に発生する共振現象によるものが考えられる。まず、攪拌翼を有する攪拌槽の運転開始時の一般的な操作方法としては、初期動力軽減などのため、攪拌流体が入っていない状態から攪拌翼を回転した状態で流体を注入していく方法が多く用いられている。その際、流体自由表面が攪拌翼に触れた直後、液が旋回しながら揺動する旋回スロッシングが発生し、これと同時に攪拌翼に振動が発生する場合があることが経験的に知られている。しかし、攪拌翼を有する攪拌槽内に発生する旋回スロッシング現象についての研究はほとんどなされてい

ない。また、攪拌翼を有する攪拌装置は、回転機械であるがゆえに、攪拌槽の固有振動数とモーターの回転数が一致すると、装置が共振により大きく振動する³⁾。攪拌翼の振動により攪拌槽に損傷が発生する場合があるという報告⁴⁾もある。このため、攪拌槽の設計・操作条件としては、あらかじめ攪拌槽の固有振動数を求めておき、その固有振動数と共振を起こさない回転数で翼を回転させることが重要であり、攪拌機の設計や安全な運転を行う際に重要な動的要素³⁾として考慮されているが、旋回スロッシングが発生した場合の攪拌槽との共振現象についての研究は未知な部分が多く、運転の際の新たな危険因子として検討の必要がある。

1.2 攪拌の基礎(The basis of mixing)

1.2.1 攪拌の分類と用途(A classification and a use of mixing)

攪拌とは、まさにものをかき混ぜることであるが、工業分野での専門的な習慣に従えば、粉末や粉状の固体原料をかき混ぜるのを混合 (Mixing)、または固体混合 (Solid Mixing)、あまり粘調でない比較的流動性のよい流体原料 (固体粉末や粒子、気泡、不容性の液滴などを含んでいてもよい) をかき混ぜるのを攪拌 (Agitation)、非常に粘調、あるいは可塑性半固体の原料で、かき混ぜる (かき混ぜるというより練って混ぜる) のに強い力を必要とするものを対象とする捏和 (Kneading) に大きく分類される。その定義や分類区分は決して明確なものではなく、習慣的、感覚的な面が多い。しかし、実際の固体混合機 (Mixer)、液体用の攪拌機 (Agitator or Mixer) および捏和機 (Kneader) の形状構造を見れば、これら三者には明瞭な違いがある。

現在、攪拌装置は化学工業、食品工業、生化学工業、製紙工業、金属工業、水処理等の環境関連業務などあらゆる分野のプロセスの一部として使用されている。攪拌操作とは、ものを混ぜることがその最も重要な目的であるが、原料やその他種々の物質を混ぜることによって溶解、伝熱の促進はもちろんガス吸収、抽出、反応等、様々な機能を同時に果たす、あるいは促進を促すことが容易にできる。そのため攪拌装置は単なる混合装置としてだけではなく、多種類の材料を取り扱い多種多様の目的に利用されている⁵⁾。

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、固相及び気相が関係する。したがって相別の攪拌形態として、液－液、液－固、液－気及び液－固－気の4形態がある。Fig.1-1 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。目的の名称はそのときの操作から感覚的に言われるので、厳密な区分けがあるわけではない⁶⁾。

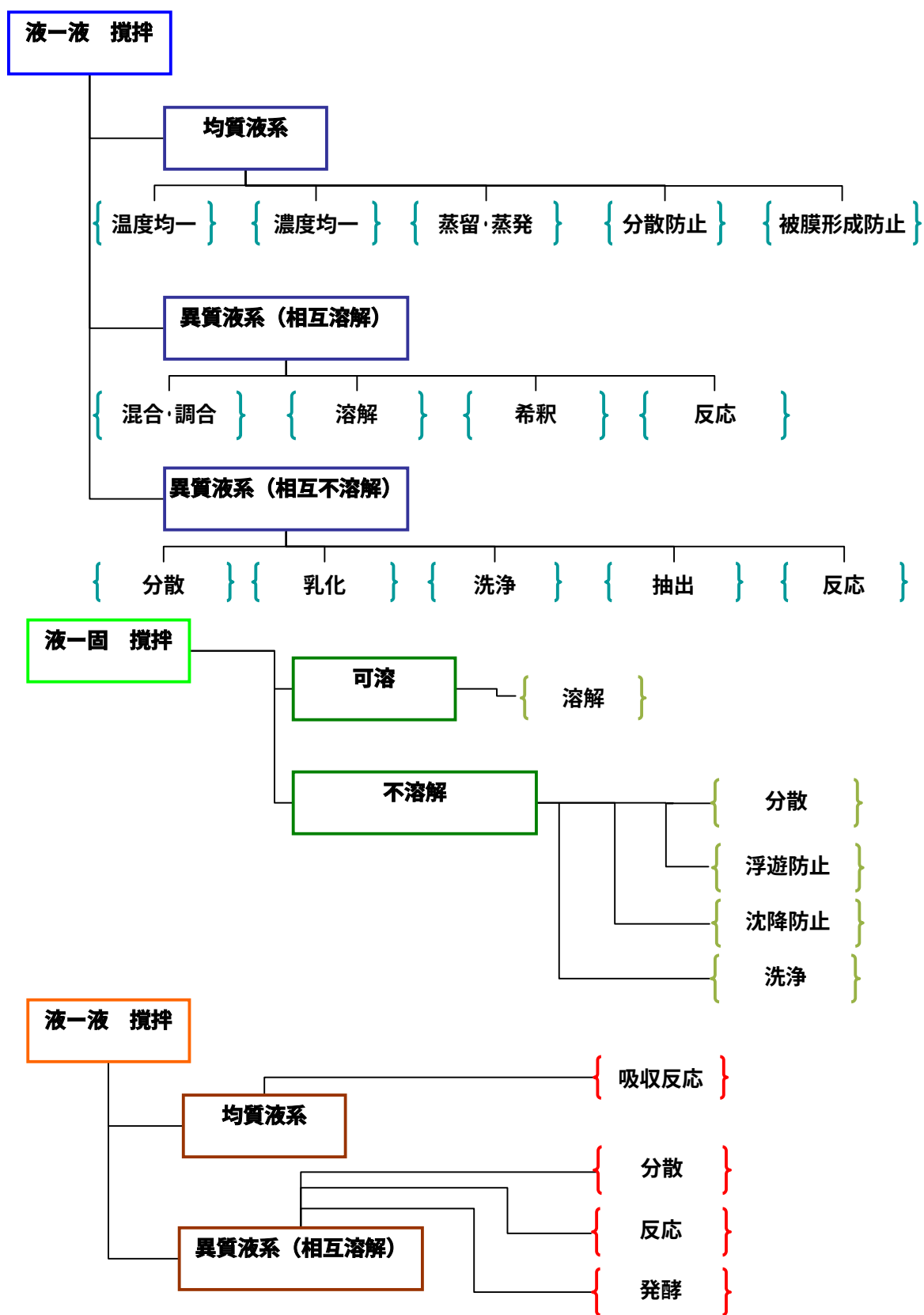


Fig.1-1 mixing flow chart⁶⁾

1.2.2 攪拌装置(stirred vessel)

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。その中でも最も一般的なものは、モーターによって回転される攪拌軸に攪拌翼を取り付けたものであり、攪拌機と原料流体を入れる攪拌槽、およびそれらに付属する諸機器類からなっている。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、装置にあわせ様々な取り付け方法や取り付け位置を選ぶことができる。また、他の攪拌装置としては、往復回転型、上下運動型などがあり、これらは邪魔板なしで、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装置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、常に選定の対象とすることはできない。そこで、本研究で対象としたものは、前者に挙げた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。その構成要素を Fig.1-2 に示した^{5,6)}。

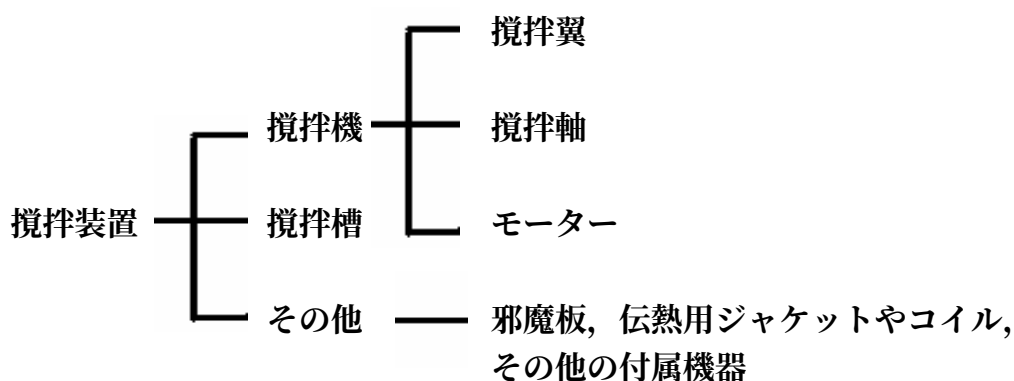


Fig.1-2 Components of mixing machine

攪拌装置は駆動源より与えられたエネルギーを攪拌軸より攪拌翼に伝達させ、適正な流動状態を攪拌槽内の液体に供給する攪拌機（動的要素）と、攪拌液を貯え、プロセス設計条件として与えられた液の仕込量や連続フロー・バッチ攪拌操作、加熱・冷却、加圧・減圧、液の排出などの諸条件を満足させる攪拌槽（静的要素）に大別できる。

1.2.3 攪拌翼形状と攪拌作用

(Shape of impeller and the action of mixing)

攪拌装置の構成要素のなかでも最も重要な部分を占める攪拌翼は、駆動源から回転運動の機械的エネルギーを与えられることにより 2 つの大きな仕事をする。それは、攪拌槽内の液全体を流動させる液循環作用と局所的な達成させる速度勾配によるせん断作用などである。

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、攪拌機の取り付け位置）により異なるが、下記の 3 形態が基本となる。

1. 旋回流(Tangential flow)

攪拌軸と同一方向に槽内を回転する流れ。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ため流体各部に速度差を生じない。したがって、攪拌のひとつの作用であるせん断力が働かないので攪拌効率はよくない。

2. 上下循環流または軸流(Axial flow)

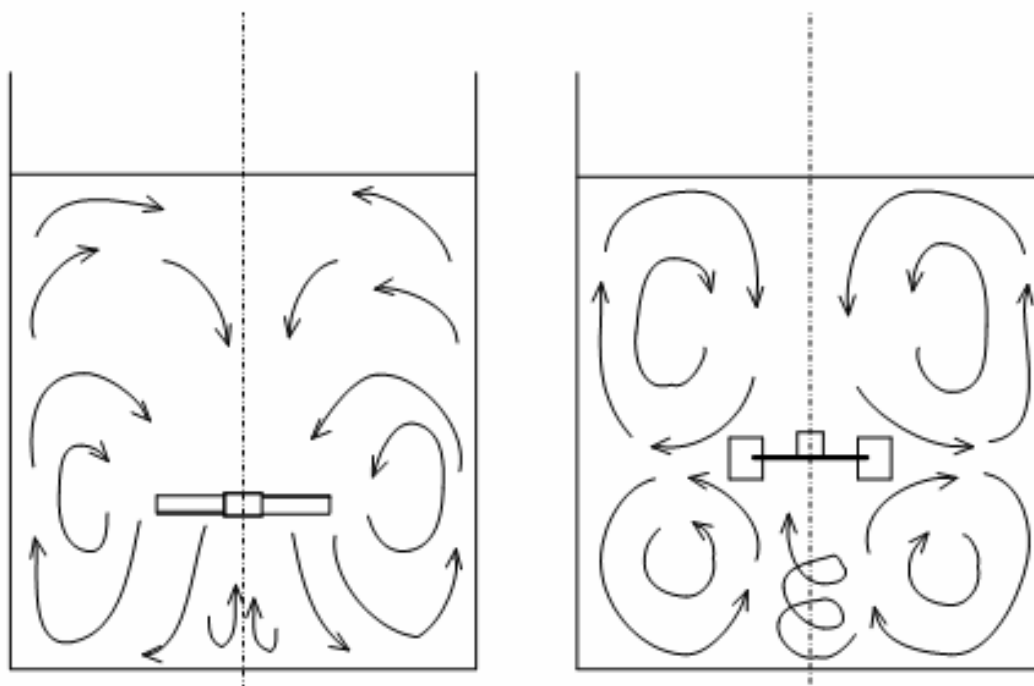
重荷プロペラ翼や傾斜タービン翼により発生させられる軸に平行な方向の流れである。特に邪魔板付きの場合、ドラフトチューブ付きの場合にその流れは顕著になる。攪拌槽内全体の流体循環、入れ替わりに寄与する攪拌効果に有効な流動である。

3. 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。一般に翼近辺の流速が大きく、邪魔板との組み合わせにより比較的大きなせん断作用を発生する。

以上の流動形態について、Fig.1-3 に示した。

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せん断力を与えるせん断作用と翼のポンプ作用によって循環流を形成する吐出作用の 2 つの大きな作用に分けられる。この両作用は攪拌動力と比例関係を持ち、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(Fig.1-4)⁶⁾。



a) Axial Flow type

b) Radial Flow type

Fig.1-3 Flow pattern

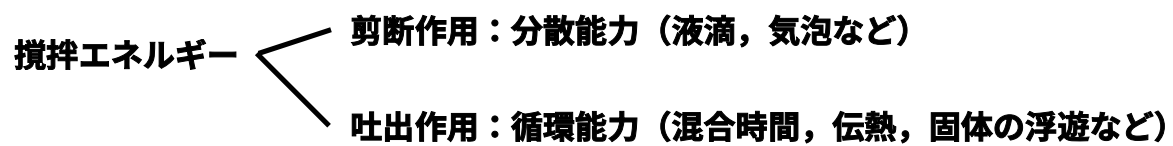


Fig.1-4 Mixing energy flow chart

1.3 振動の基礎(The basis of vibration)

1.3.1 共振現象(Resonance phenomenon)

構造物が振動するときには、固有モードと呼ばれるその構造物固有のかたちでしか振動できない。各々の固有モードは決まった固有の振動数を有し、それ以外の振動数では振動が生じない。ここで、共振現象とは、ある系(システムまたは物体)の固有振動数と外部からの励振力が一致することにより系の振動の振幅が急増する現象である。

ここで、共振現象に関係する基本事項として、固有振動数、固有モード、加振(励振)力について説明する。

・固有振動数

ある系を考えたときに、ある決まった周期の振動を与えるとその振動が増幅されて系が大きく揺れだすという振動数であり、「系に存在する振動しやすい振動数」のことである。そして、これは系の剛性及び質量で決まる。

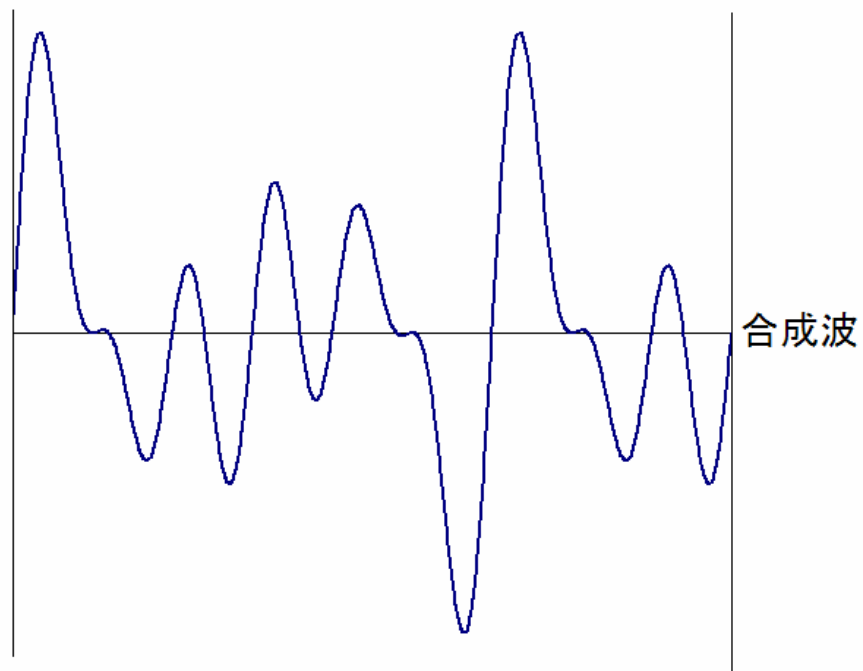
・固有モード

固有振動数と対をなすもので、「系の振動の形態(方向や形)」のことである。たとえば両端が固定端の弦を考えたとき、山の数がいくつあるかを考えればわかりやすい。Fig.2 の n はモードの次数を示している。ある構造物に発生する振動が Fig.2(a)であるとする、この振動を分析すれば、1 次～4 次のモード(Fig.2(b))が重ね合わさってできていることがわかる。ここで、大抵の場合、基本(1 次)モードが卓越する場合が多いということがわかっていきます。ここでの卓越とは、いくつかの振動モードの中で一番影響の大きいモードのことを示している。つまり、ここでは Fig.2(b)の中の最も次数の低いモード、 $n=1$ である。

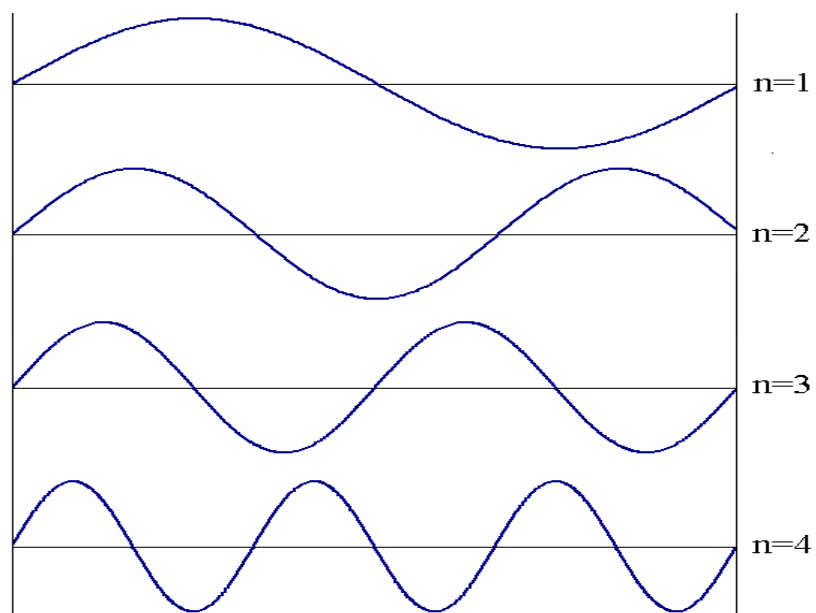
・加振(励振)力

外部からある系に対して、振動を発生させる目的で加える動的作用のこと。

以上のことを踏まえて、共振現象について解説を加えると、系には単純なものから複雑なものまで様々な形状のものがあ、その形状によって振動も複雑になる。外から受ける振動数(外力＝励振力)と物体の固有振動数が一致する時、共振が発生する。この現象が発生すると、励振力が何十倍にも増幅され、大きな振動を引き起こすため、構造物の破壊、色々な機器の破損・故障に繋がるということがいくつも報告されている。この現象は、攪拌時にも当然発生する。よって、その現象のメカニズムについて解明する必要がある⁷⁾。



(a) Composed mode spectrum



(b) Elements of mode spectrum

Fig.2 each dimension mode spectrum

1.3.2 スロッシング(Sloshing)

液体を蓄える構造物が外部からの励振を受け、その内部液体が共振を起こした場合に、液体の自由表面が揺動現象、すなわちスロッシングを発生する。

スロッシングは、プラントに敷設される液体貯蔵や液体貨物運搬船、航空機の燃料タンクの開発、プラント工程の改善など、容器内で液体を扱う場合には工業技術上の取り組むべき重要な課題⁸⁾である。例えば、航空宇宙分野においては、ロケット、人工衛星の発射時や姿勢制御時などに液体燃料タンク内部でスロッシングが発生すると、タンク内の動圧の大きな変動により、飛行挙動に悪影響を与え、さらには制御不能に陥る可能性があるため、安定した飛行や制御のための研究^{13),14),15)}が数多くなされている。鉄精錬分野においては、従来、旋回現象が発生するとスロッピングやスプラッシュなどが激しくなり、安定な操業ができないことからその利用は避けられてきた。しかし、現在はこの現象をプロセス向上に応用するための研究^{16),17),18)}がなされている。また、攪拌の分野においては、スロッシングは揺動攪拌操作として混合や物質移動などに積極的に利用されており、加藤ら^{9,10,11,12)}が旋回揺動攪拌や往復揺動攪拌などで攪拌所要動力や混合時間、気液間および固液間の物質移動容量係数などについて系統的に報告している。このように、スロッシングとは様々な分野で影響をおよぼしており、いい面、悪い面の両方を持ち合わせた現象である。本研究では、この現象による事故などの報告をもとに検討を行った。

1.4 本研究の目的(Purpose)

液体の攪拌は、物質を製造する工業分野において不可欠な操作である。近年、物質製造プロセスの高度化、多様化に伴い、複雑な形状を持つ様々な攪拌翼が開発されている。それに伴い攪拌時の事故も数多く報告されている。そこで、そのような事故の原因を解明し、安全でかつ効率的な攪拌運転の指針が求められる。

そこで本研究では、攪拌槽内にて発生する旋回スロッシングに焦点を当てた。まず、攪拌槽の運転開始時の操作方法としては、初期動力軽減などのため、攪拌流体が入っていない状態から攪拌翼を回転した状態で流体を注入していく方法が多く用いられている。その際、流体自由表面が攪拌翼に触れた直後に旋回スロッシングが発生し、これと同時に攪拌翼が振動する場合がある。ここで、攪拌翼が振動することにより攪拌槽に損傷が発生する場合があるという報告⁴⁾がある。そこで、旋回スロッシングと共に発生する攪拌翼の振動現象についても検討した。この振動発生の原因としては、翼回転数に起因する攪拌翼の共振、他には、旋回スロッシングに起因する攪拌翼の共振が考えられる。前者は、攪拌機の設計や安全な運転を行う際に重要な動的要素³⁾として考慮されている。しかし、後者については未知な部分が多く、運転の際の新たな危険因子として検討の必要がある。

そこで本研究では、パドル翼攪拌槽における旋回スロッシング発生条件を求め、また、旋回スロッシング周波数と、槽径や翼径、液高さ、回転数の攪拌槽緒元との関係を検討した。さらに、攪拌装置の固有振動数を測定し、旋回スロッシング発生時の攪拌装置の振動加速度の周波数解析から、旋回スロッシングが及ぼす攪拌槽の共振現象への影響についても検討した。

第二章 基礎研究(Fundamental researches)

2.1 緒言(Introduction)

これまでの研究から、攪拌時には特定の条件において旋回スロッシングが発生することがわかっている。しかし、その条件は非常に限定的であるため、メカニズムを体系的に解明するには発生時の条件の相関関係を詳細に検討する必要がある。そこで、旋回スロッシングおよび攪拌翼の振動のメカニズムを解明するため、様々な視点による実験、物理的考察を行った。まず、攪拌時に発生する旋回スロッシング現象のメカニズムを検討するため、一般的な攪拌槽操作時の現象と攪拌槽諸元を変化させた場合の液面現象について実験を行った。続いて、攪拌翼の振動メカニズムを検討するため、攪拌時の振動の周波数分析を行った。

本章では、行った実験の条件、方法、またその結果から得られた知見について示した。

2.1.1 攪拌時の主な液面現象

(Free surface phenomena of stirred vessel)

ここでは、攪拌軸と翼を有する攪拌機における、攪拌時の液表面の現象について示す。一般に知られている現象としては、ボルテックス(Fig.2-1)が挙げられる。この現象は、攪拌時に翼回転数を上げていくと、ある回転数より軸中心位置の液面がすり鉢上に落ち窪む現象であり、回転数の上昇に伴いそのくぼみの深さが増していく現象である。この現象は、どのような形状の翼でも発生するということが分かっている。続いて、本研究の対象である旋回スロッシング(Fig.2-2)について説明する。この現象は、前章(1.2.2)に示したスロッシング現象が回転する現象である。発生条件、領域については現段階では、限定的にしか解明できていないので、以下で検討を進めていく。



Fig.2-1 Vortex phenomenon



Fig.2-2 Rotary sloshing phenomenon

2.1.2 旋回スロッシング周波数の定義

(A definition of rotary sloshing frequency)

前章(1.2.2)にて示した旋回スロッシングについて，その周波数の本研究における定義を行う．

旋回スロッシング周期を旋回スロッシングが1回転する時間(Fig.2-3)を

⇒ 旋回スロッシング周期 T (s)

とし，その周期 T より旋回スロッシング周波数 f_s を以下のように導いた．

$$f_s = 1/T \quad (1)$$

この周波数を本研究における旋回スロッシング周波数 f_s (Hz)と定義する．

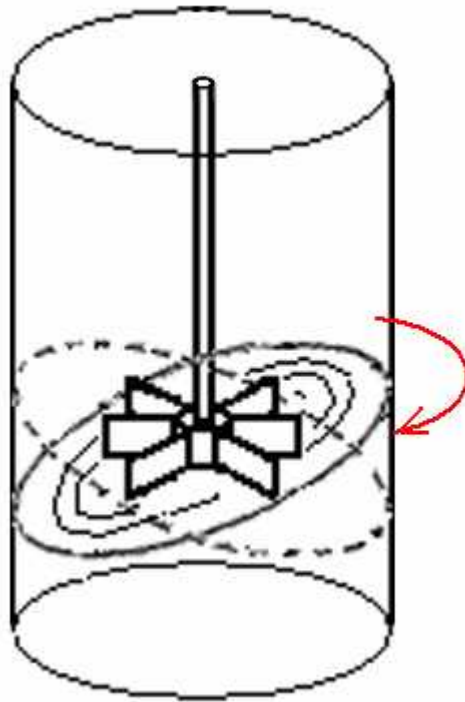


Fig.2-3 Measurement techniques of sloshing frequency

2.2 攪拌装置(Stirred vessel)

本実験に用いた実験装置の概略図を Fig.2-4 に示す。攪拌槽には透明アクリル製平底円筒槽を使用し、攪拌液には水道水を用いた。翼にはパドル翼を用い、各翼は全て直径 8mm の攪拌軸に取り付け、槽横断面の中心に設置した。また、攪拌軸やモーター、スタンド等を含む部分の設置位置、攪拌軸の材質及び直径、軸の保持条件は一定とした。攪拌液の運動状態を槽側面からデジタルビデオカメラにて撮影した。このとき、実験ごとに攪拌槽諸元のうち、Table 2-1 に示すように槽径、翼径、液高さ、回転数、および翼枚数を変化させた。また、翼枚数により翼形状に違いがあるため、その詳細な形状を Fig.2-5,2-6 に示す。

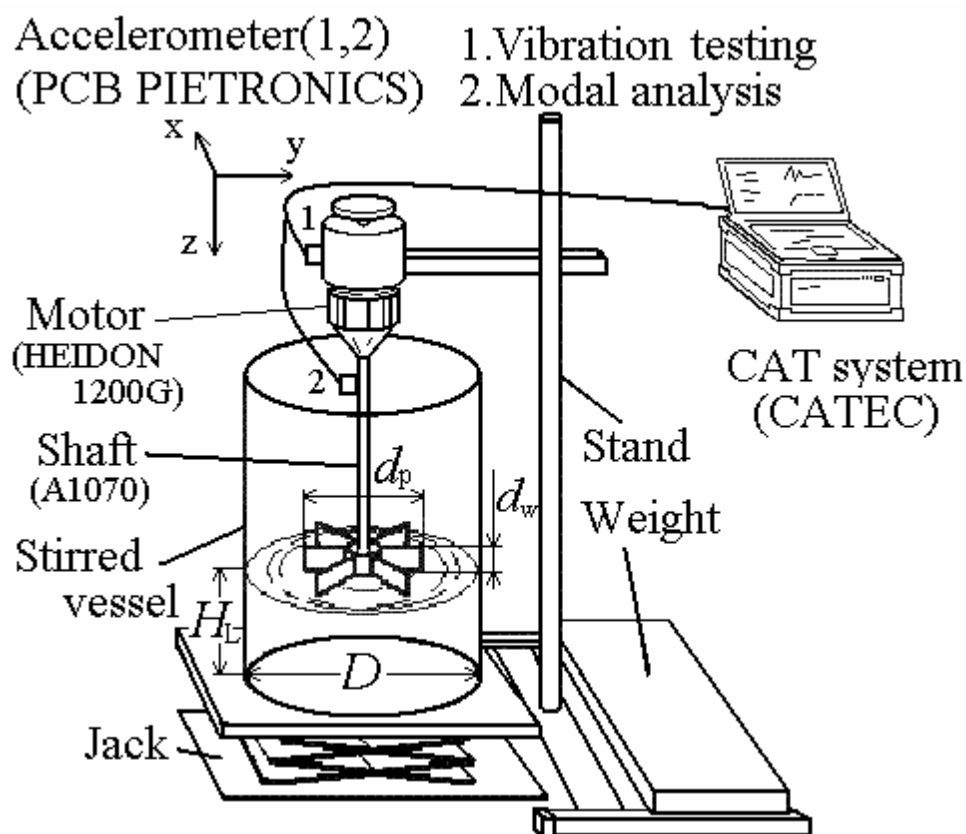


Fig.2-4 Schematic diagram of Stirred vessel

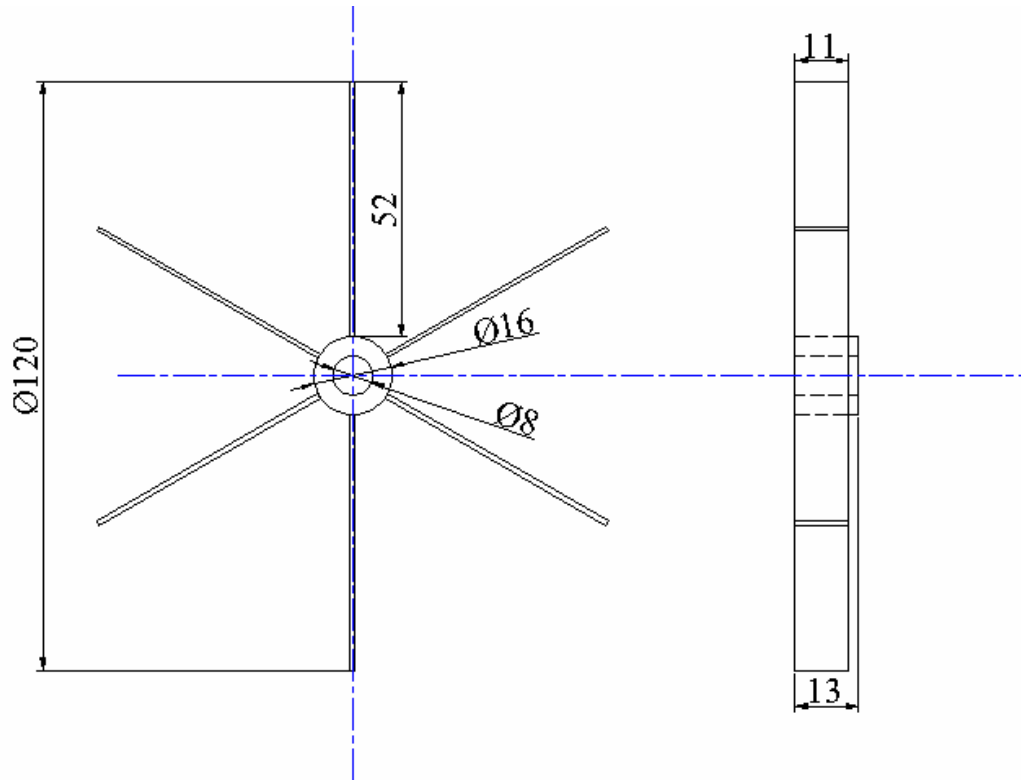
Table 2-1 Experimental conditions

A) Condition no.1

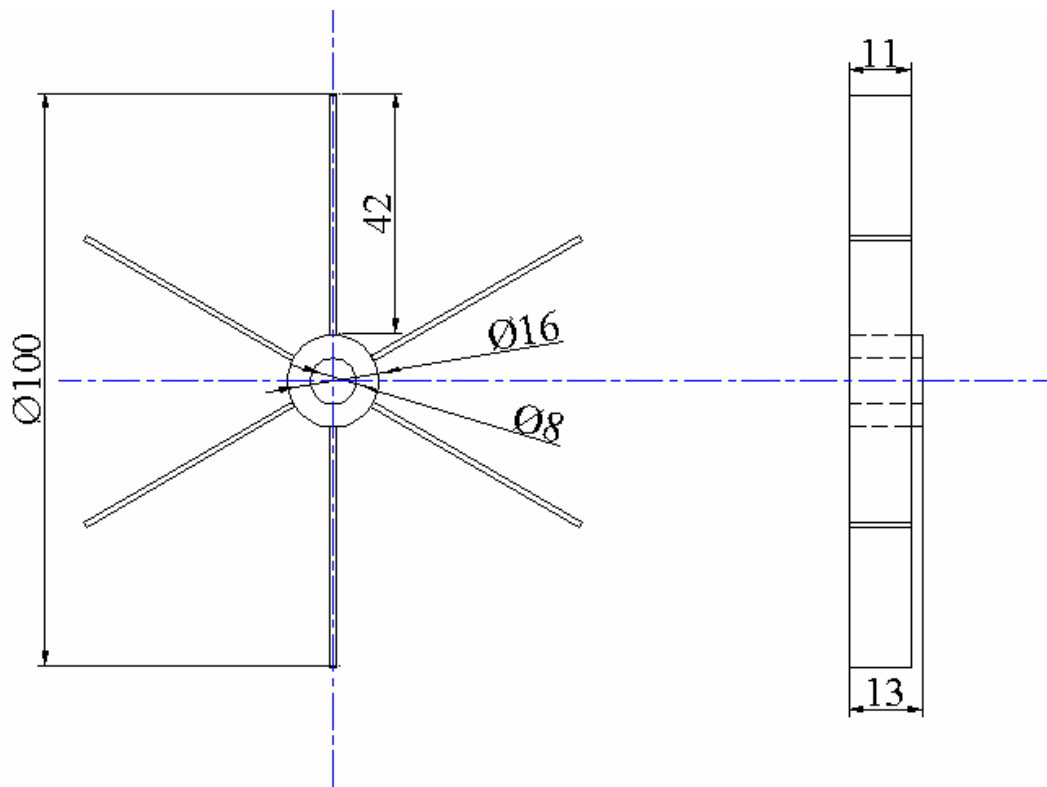
D [mm]	100, 150, 180, 200, 240
d_p [mm]	50, 75, 100, 120
H_L [mm]	10 - 144
n [s^{-1} (rpm)]	3.33 - 8.33 (200-500)
n_p [-]	6

B) Condition no.2

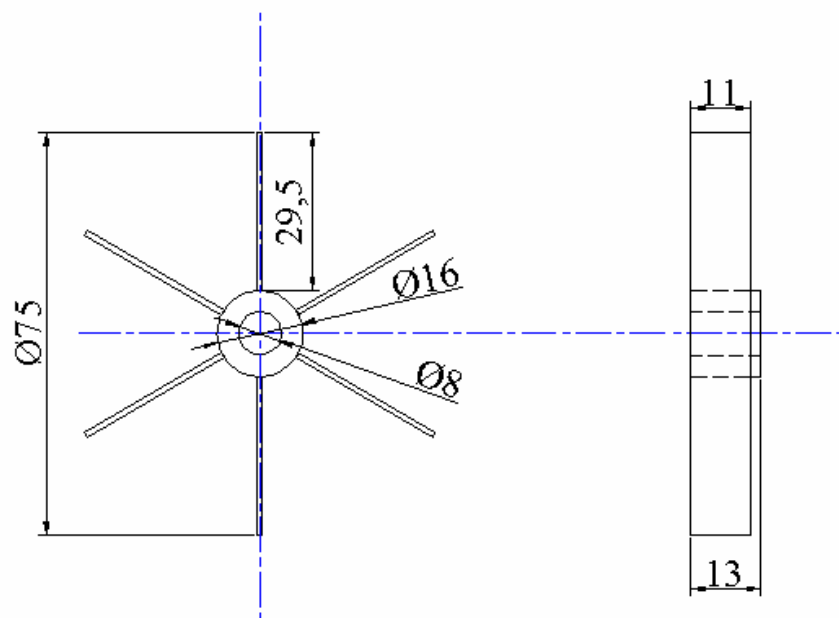
D [mm]	200
d_p [mm]	100
H_L [mm]	60, 100
n [s^{-1} (rpm)]	1.67 - 8.33 (100-500)
n_p [-]	2, 4, 6



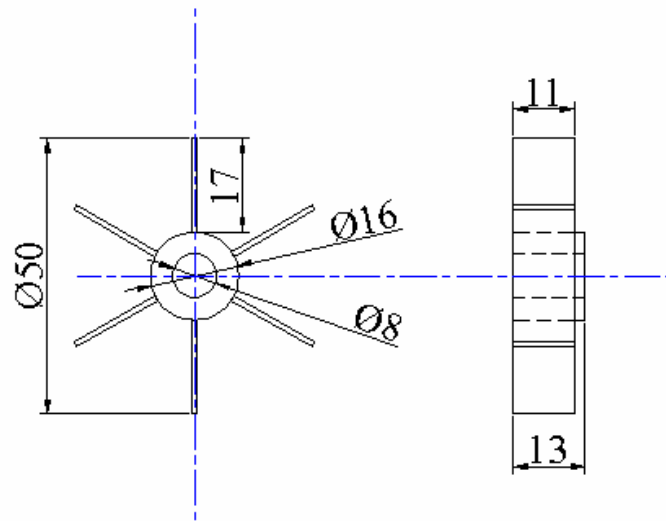
(a) $d_p=120\text{mm}$



(b) $d_p=100\text{mm}$

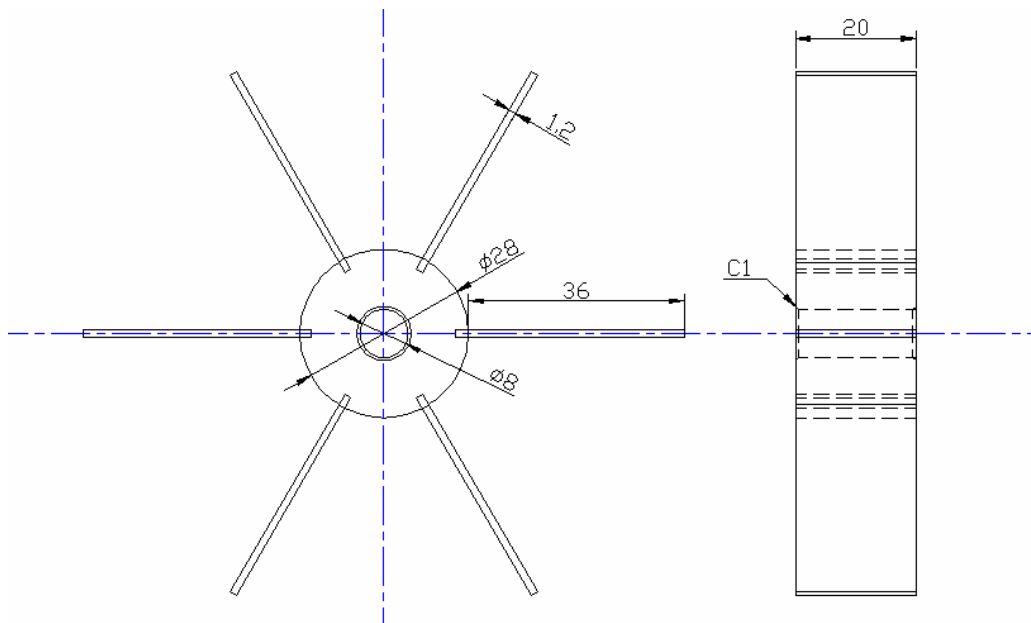


(c) $d_p=75\text{mm}$

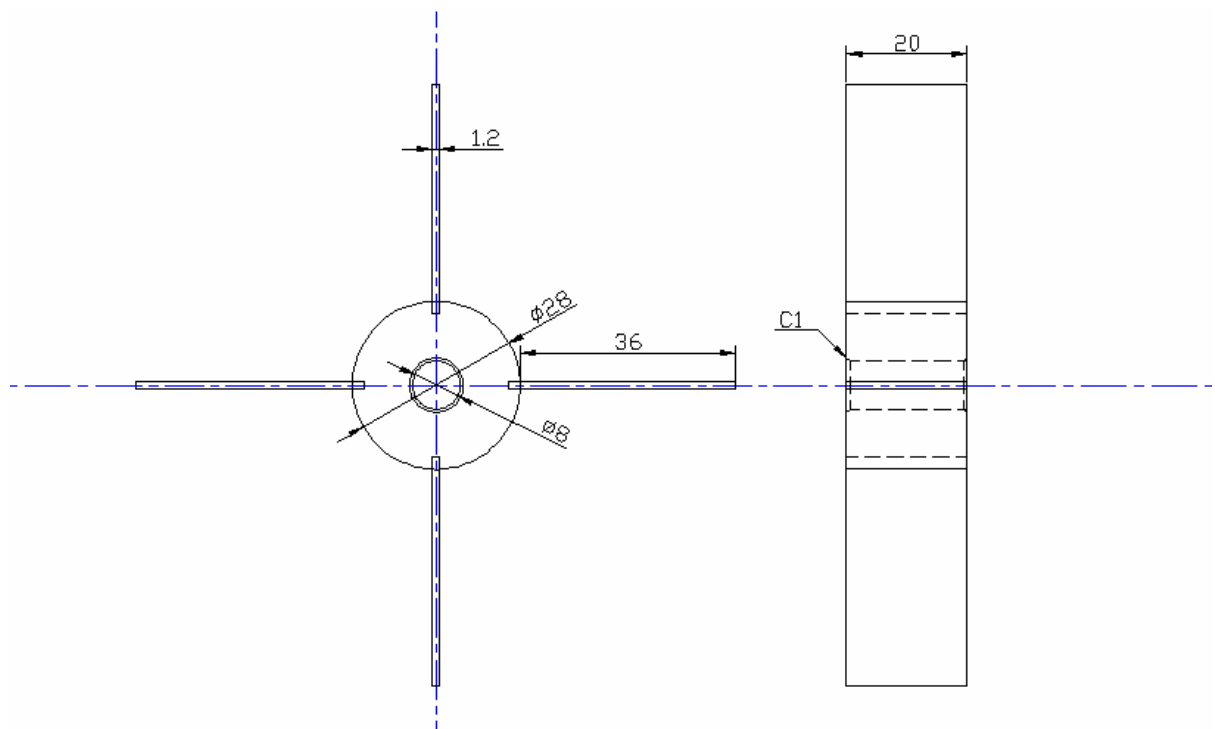


(d) $d_p=50\text{mm}$

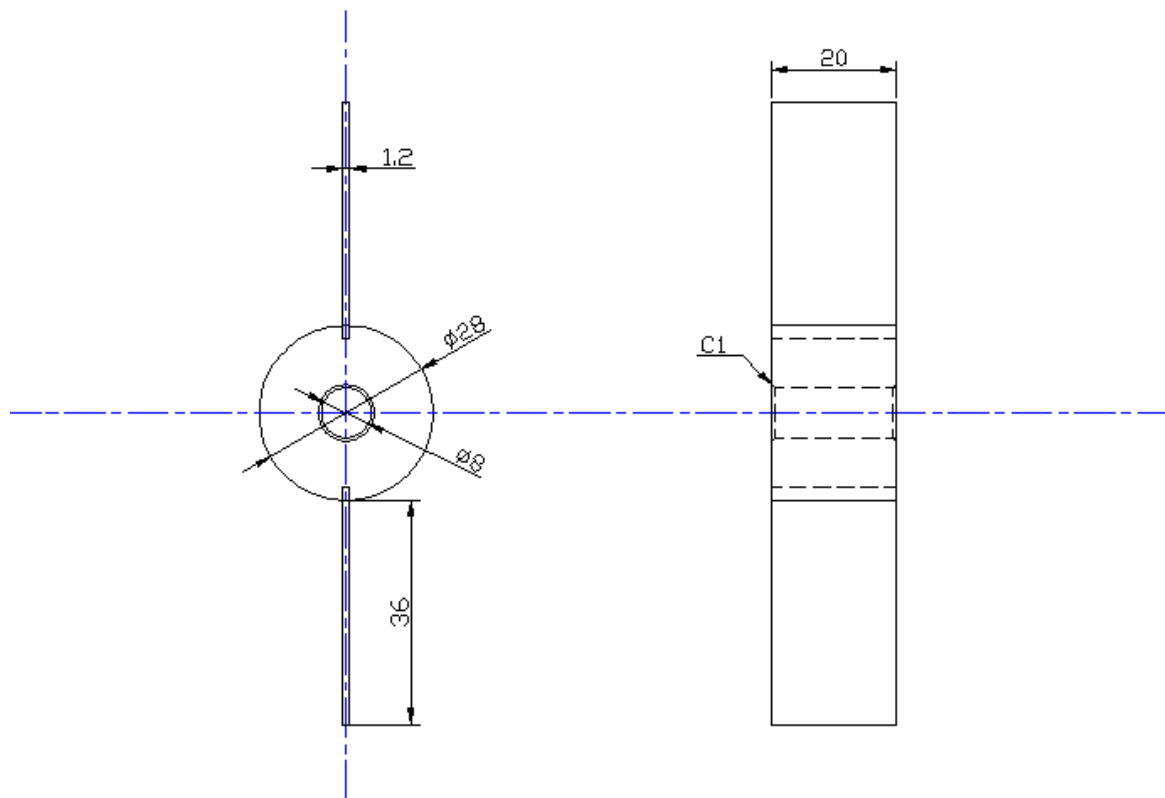
Fig. 2-5 Schematic diagram of 6-flat paddle (Condition no.1)



(a) 6-blade paddle



(b) 4-blade paddle



(c) 2-blade paddle

Fig. 2-6 Schematic diagram of flat paddle (Condition no.2)

2.3 振動計測装置(Measurement devices)

2.3.1 打撃ハンマ(Impact hammer)

本研究には，PCB PIEZOTRONICS 製のインパクトハンマ(086C03)を使用した．また，Fig.2-7(a)に打撃ハンマの構造を，Fig2-7(b)にその画像を示す．

扉をロックして振動から音を発生させるように，被試験物を叩いて衝撃加振する計器である．被試験物に直接接触して衝撃力を与える部分は，チップとよばれる．その背後にある力変換器により，力を電圧に変換して出力する．力変換器内部では，力に応じた電荷が圧電素子表面に発生し，埋め込まれた集積回路により電圧に変換される．

出力電圧を力に換算するには，校正値が必要であり，これは打撃ハンマ固有の値なので，打撃ハンマの形式，製造番号と共に記録する必要がある．

実験モード解析において打撃ハンマの使用法は大変重要であり，過負荷や2度叩きなどの誤差要因となる現象を生じないように注意しながら，被試験物に規定の方向の力を与える．



(a) Schematic diagram of impact hammer



(b) Picture of impact hammer

Fig.2-7 Schematic diagram of impact hammer

2.3.2 加速度計(Accelerometer)

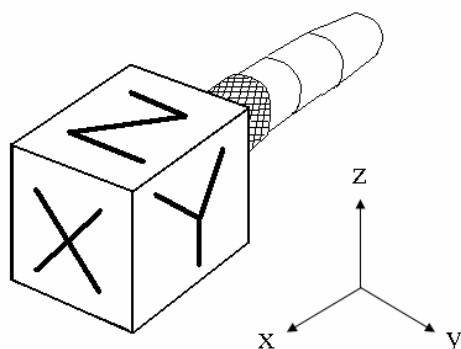
本研究では、PCB PIEZOTRONICS 製の加速度計（356A32/NC）を使用した。その校正値に関するデータを章末に添付した。また、Fig.2-8(a)に加速度計の構造を、Fig2-8(b)にその画像を示す。

質量 m の物体に手で力を加えて加速度 a を与えると、加えた力 $f=ma$ の反力を手に感じる。ボーリング場でレーンの上にボールを置いて手で押し出すことを想像するとよい。この手の部分を前述の力変換器に置き換え、得られた力 f を質量 m で除すれば、加速度 a を得る。

加速度計は、力変換器において力を検出する圧電素子を、重りの代わりとしてのナットで締め付けた構造である。ナットで締め付けて、圧電素子をあらかじめ弾性変形させているので、+ -双方向の加速度を検出できる。

加速度計の電気的特性は、力変換器と同じである。出力電圧を加速度に換算するには、校正値が必要であり、これは加速度計固有の値なので、加速度計の形式、製造番号と共に記録する必要がある。

被試験物の加速度を正確に測定するには、加速度計を被試験物に適切に取り付ける必要がある。取り付け方法には、ネジ止め、接着剤、ワックスなどがある。通常は瞬間接着剤やワックスを使用する。これらは、被試験物の材料である鋼などに比べて剛性が非常に小さいので、なるべく薄く広い面積となるように使用する。



(a) Schematic diagram of accelerometer



(b) Picture of accelerometer

Fig.2-8 Schematic diagram of accelerometer

2.3.3 分析処理器と AD 変換

(Measurement device and Analog to digital conversion)

本研究では、リオン社製の分析処理器 (AD 変換器: CAT SYSTEM SA-01) を使用した。また、その画像を Fig2-9 に示す。

打撃ハンマの力変換器と加速度計からの電圧出力は、量子化されて整数になる。この分解能はビット数で表示され、16 ビットの分解能では 216 個の整数(+1~32768, 1 ビットは正負を表す)に分解する。このときの量子化誤差は分解能ビット数が大きいほど小さい。また、電圧出力は連続的な物理量でありアナログ信号なので、それをデジタル信号に変換して処理する。専用のデータ処理装置を使用し、その結果をノートパソコンに転送する。次いで、その電圧出力をエクセルの表で象徴される数字列に変換する。その変換には、キャテック社製の振動解析システムを使用した。時間と共に連続的に変化する時刻歴信号を毎秒 f 個の割合で取り込む。 f を標本化周波数といい、単位は Hz である。次のフーリエ変換で高速フーリエ変換アルゴリズムを使用するために取り込むデータの数 N は 2 のべき乗にする。



Fig. 2-9 Schematic diagram of measurement device

2.3.4 フーリエ変換，高速フーリエ変換

(Fourier transform and Fast Fourier Transform)

存在する信号の時間波形は，色々の異なる周波数の正弦波に分解できる．逆に，分解した異なる周波数の正弦波を，位相を再現して加え合わせると弦の時間波形を得ることが出来る．数学的に行う前者の操作をフーリエ変換，後者を逆フーリエ変換と呼ぶ．これは正弦波の直交性を利用したもので，数学的簡明さから複素指数関数を使用する．

AD 変換により数字列になった力と加速度の時間領域データをフーリエ変換して，周波数領域のデータに変換し，正弦波の振幅と位相を求める．高速フーリエ変換は，クーリーとチュークーのアルゴリズムを利用したもので，専用の集積回路にプログラムされており，非常に高速で演算される．

2.3.5 周波数応答関数(Frequency response function)

フーリエ変換後の周波数領域において，加速度の複素数データ(振幅，位相)を力の複素数データ(振幅，位相)で除すれば，周波数応答関数を得る．この場合は，加速度/力なのでアクセラランスと呼ばれる．周波数応答関数の各周波数における振幅は，力の振幅を 1 にした場合の加速度の振幅を，位相は力の位相を零にした場合の加速度の位相を表す．

2.3.6 関連度関数(Coherence function)

加振実験を繰り返し，平均化する過程における入力スペクトルと出力スペクトルの相関係数の 2 乗であり，周波数領域における実験の信頼性と再現性を表す．関連度関数は 1 と零の間の数値で表現され，1 に近いほど実験の信頼性は大きい．

2.4 液注入時の液面現象

(At the time of liquid injection, free surface phenomena)

2.4.1 実験目的(Experimental Purpose)

既往の研究より、ある特定の条件において旋回スロッシングが発生することが分かっているが、液高さの条件については、一定の高さにおける現象であり、研究背景と関連性に欠けるため、一般的な攪拌操作に即した方法である「攪拌流体の注入時における」という条件においても同様の現象が発生するのかを検証することを目的とした。

2.4.2 実験方法・条件(Experimental Methods and Conditions)

本実験に用いた実験装置を Fig2-10 に示す。実験条件を Table 2-2 に示す。バルブには、 を、ポンプには を使用した。流量測定は、2通りの方法で行った。1つ目として、メスシリンダーを使用し、50ml 入るのにかかる時間を2回測定し、その平均値を流量とした。二つ目として、実験開始時の液高さと終了時の液高さから体積の増加量を測定し、実験時間で除すことにより流量を測定した。本実験では、2つ目の流量を用いた。尚、このポンプの吐出流量は、目的外の使用方法なので安定性に不安はあるが、2通りの流量測定により、安定性の精度を確認したところ、本実験における精度は満たしていると言えるので、流量一定として実験を行った。

※実験の際の注意点としては、以下のことに気をつけた。

- ・チューブの吐出口の位置ヘッドを流量測定時、実験時ともに同一とする。
- ・2つ目の流量測定において、翼の体積分を除くことを忘れない。

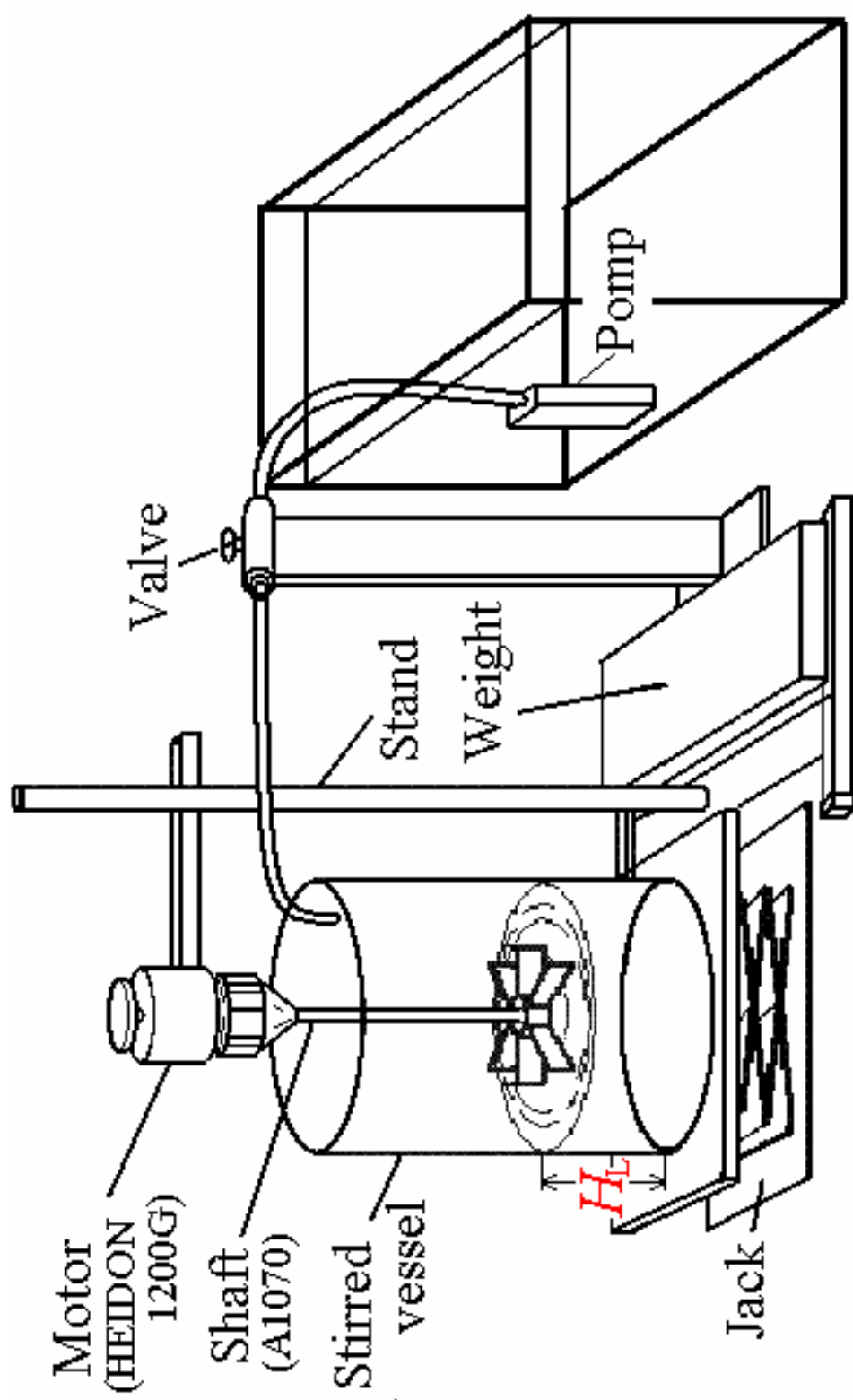


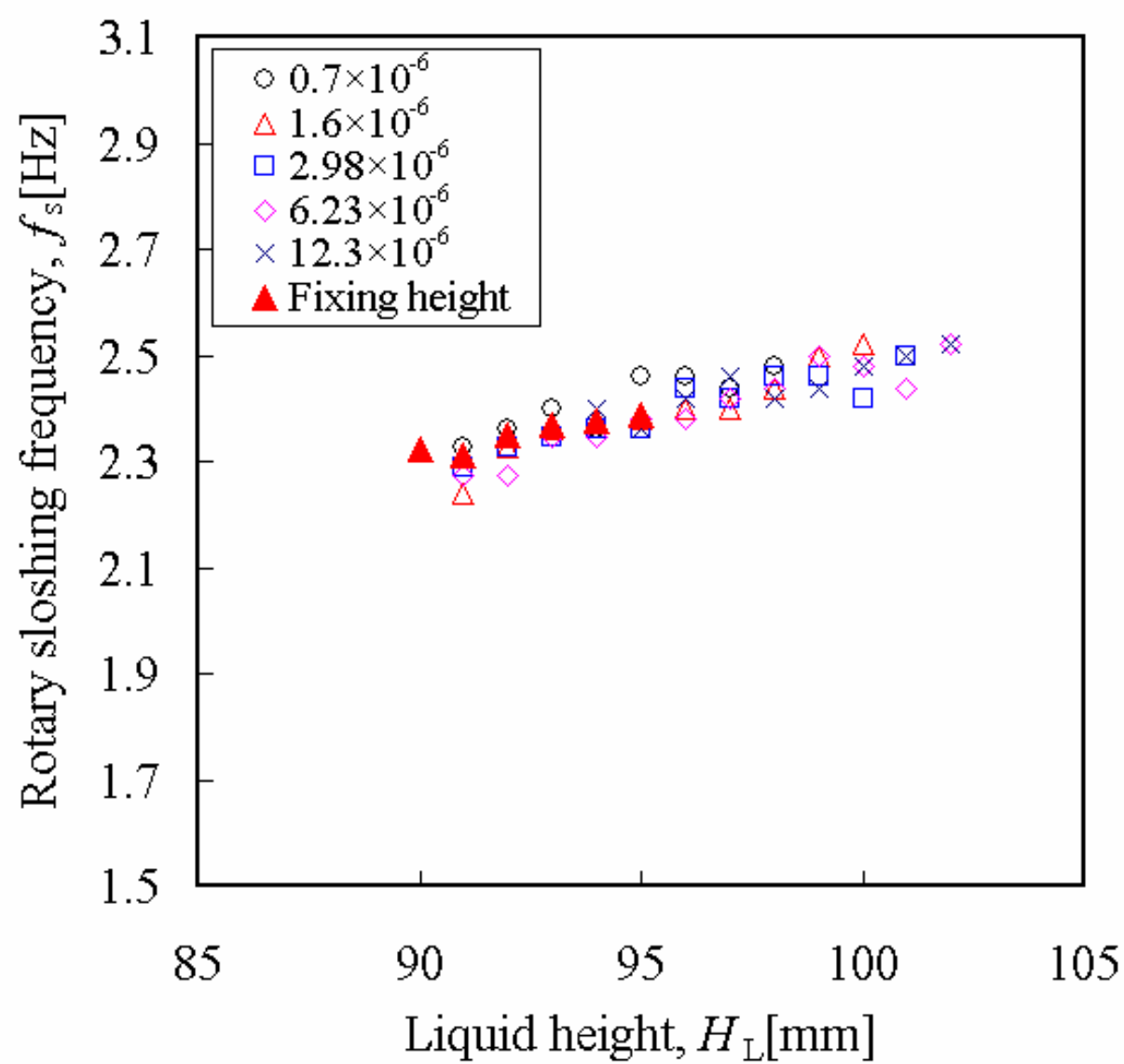
Fig.2-10 Schematic diagram of Stirred vessel

Table 2-2 Experimental conditions

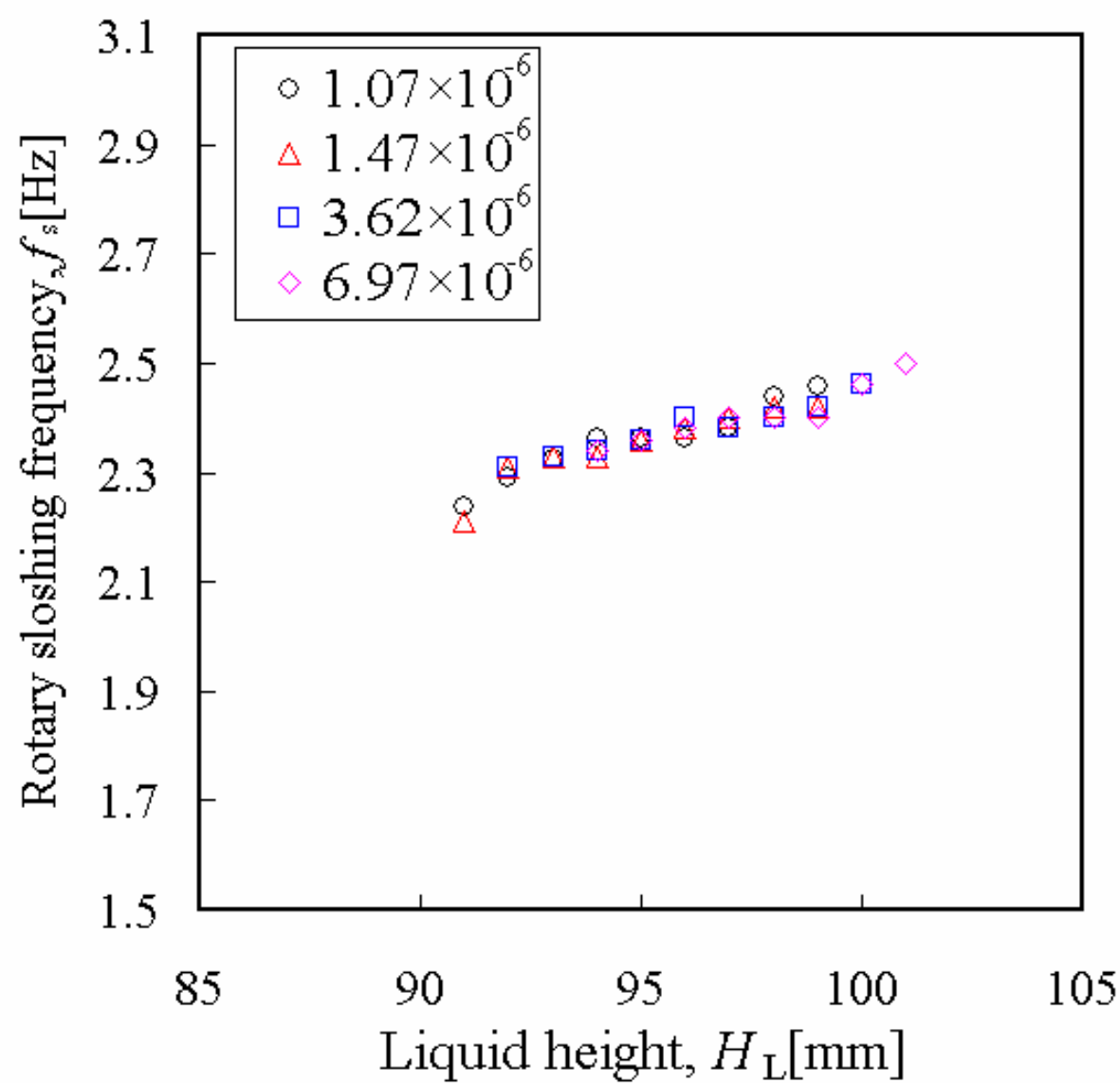
a) 6-blade impeller	
D [mm]	200
d_p [mm]	100
H_L [mm]	85-
H_p [mm]	90
n [s^{-1} (rpm)]	3.33 (200)
n_p [-]	6
$Q \times 10^{-7}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0.50,1.09,1.70,3.34,6.17
b) 4-blade impeller	
D [mm]	200
d_p [mm]	100
H_L [mm]	85-
H_p [mm]	90
n [s^{-1} (rpm)]	3.33 (200)
n_p [-]	4
$Q \times 10^{-7}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	060,1.07,1.47,3.62,6.97
c) 2-blade impeller	
D [mm]	200
d_p [mm]	100
H_L [mm]	85-
H_p [mm]	90
n [s^{-1} (rpm)]	3.33 (200)
n_p [-]	2
$Q \times 10^{-7}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0.93,1.40,4.49,8.78

2.4.2 実験結果・考察(Experimental Results and Considerations)

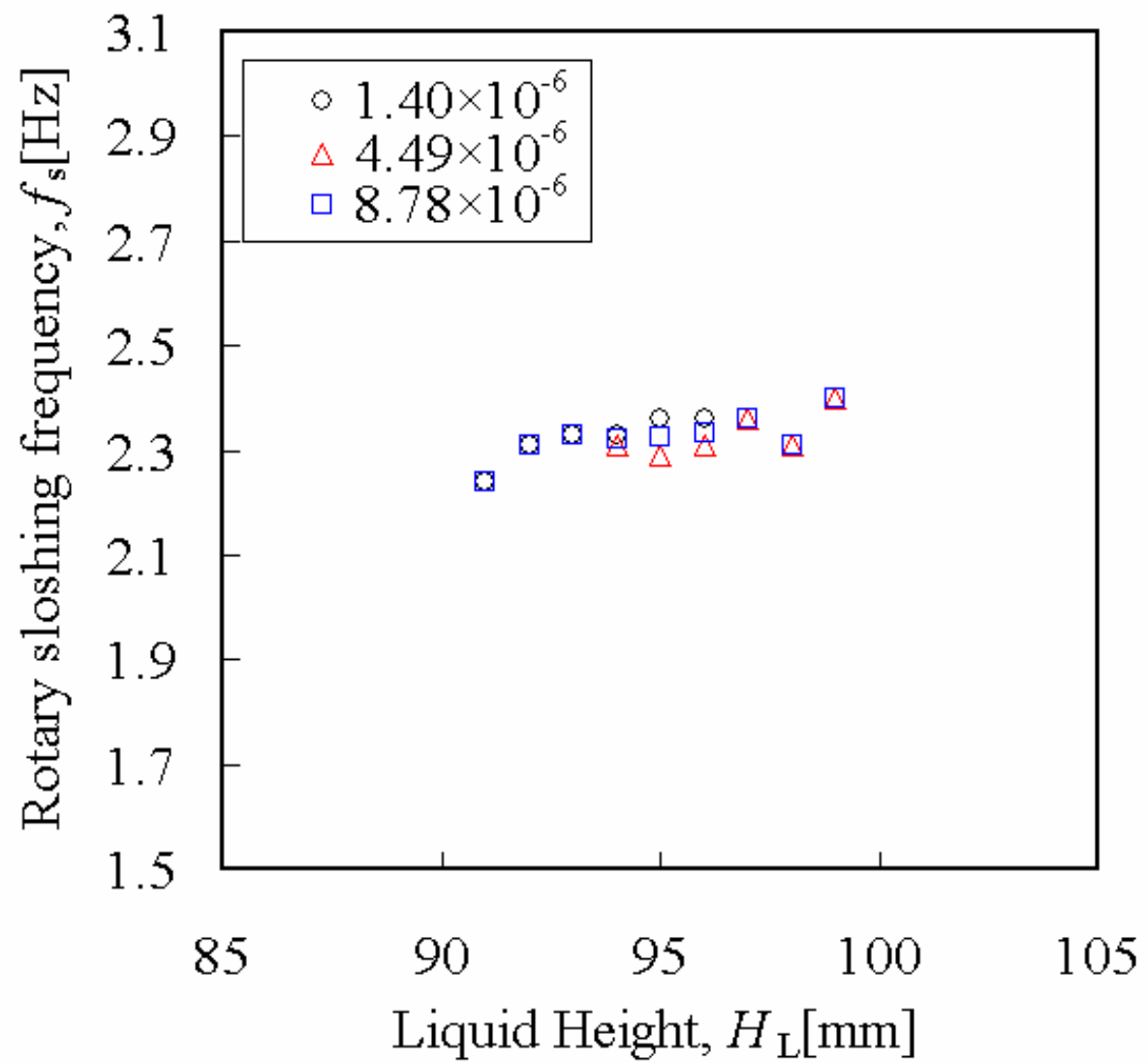
旋回スロッシング周波数におよぼす注入流量の影響について検討した結果を Fig.2-11 に示した。どの翼径においても、攪拌流体の注入流量によらずほぼ同様の傾向を示すことがわかった。また、液高さ固定時の旋回スロッシング周波数と比較しても、ほぼ一致している。以上のことから旋回スロッシング周波数におよぼす攪拌槽諸元の影響について検討する上で、液高さを固定して検討を行っても問題はない。



a) 6-blade impeller



b) 4-blade impeller



c) 2-blade impeller

Fig2-11 Effect of liquid mass flow on rotary sloshing frequency

2.5 旋回スロッシングに及ぼす攪拌槽諸元の影響

(The influence of operational conditions on the rotary sloshing frequency)

2.5.1 実験目的(Experimental Purpose)

既往の研究と 2.4 の結果から、他の攪拌槽諸元が旋回スロッシング周波数におよぼす影響についても検討する必要があると考え、槽径、翼径、液高さを変化させたときの、旋回スロッシング現象およびその周波数に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2.5.2 実験方法・条件(Experimental Methods and Conditions)

実験装置は 2.2 の Fig.2-3 を参照。攪拌槽諸元のうち、2.2 の Table 2-1 A) に示すように槽径 D 、翼径 d_p 、液高さ H_L 、回転数 n を変化させ、これらが旋回スロッシング周波数 f_s に及ぼす影響について検討した。なお、槽底より翼下端までの高さは、 H_L よりも 1mm 低い位置とした。翼高さは、軸中心を基準に取り、槽底より翼下端までの高さを JIS 規格の定規により測定した。回転数は 1 分 30 秒間隔で 0.83s^{-1} (50rpm) ずつ上昇させた。その時間間隔設定の詳細は、0~30 秒で回転数を合わせ、30~60 秒で流体の流動を安定させ、60~90 秒で旋回スロッシング周波数の測定とした。この間隔設定の理由としては、既往の研究より経験的に 10~20 秒で旋回スロッシング現象は安定することがわかっていることによる。

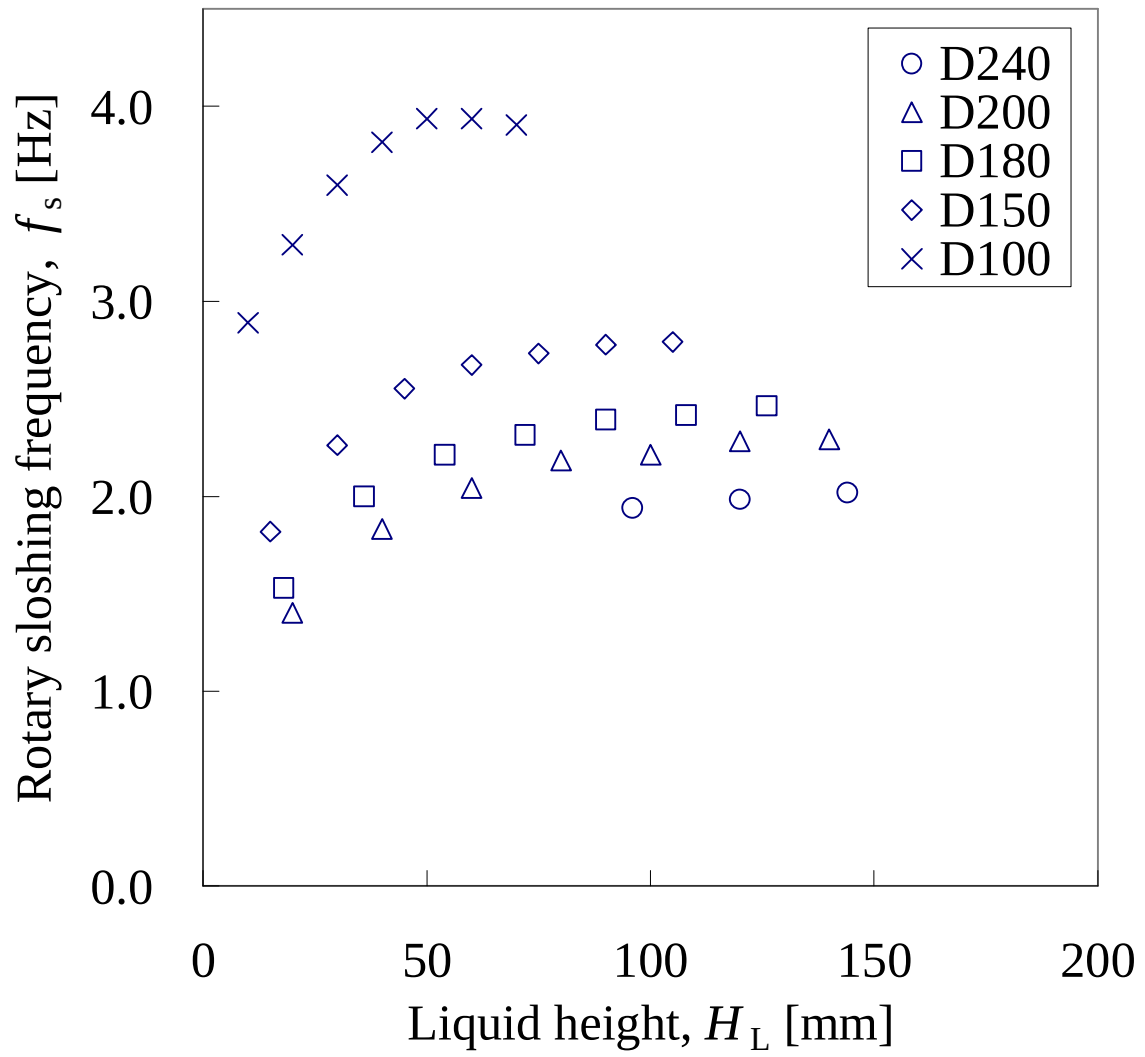
旋回スロッシング周波数の測定は、振幅の頂点が 5 周する時間より、平均の周期を算出し、その逆数を旋回スロッシング周波数とした。

2.5.3 実験結果・考察(Experimental Results and Considerations)

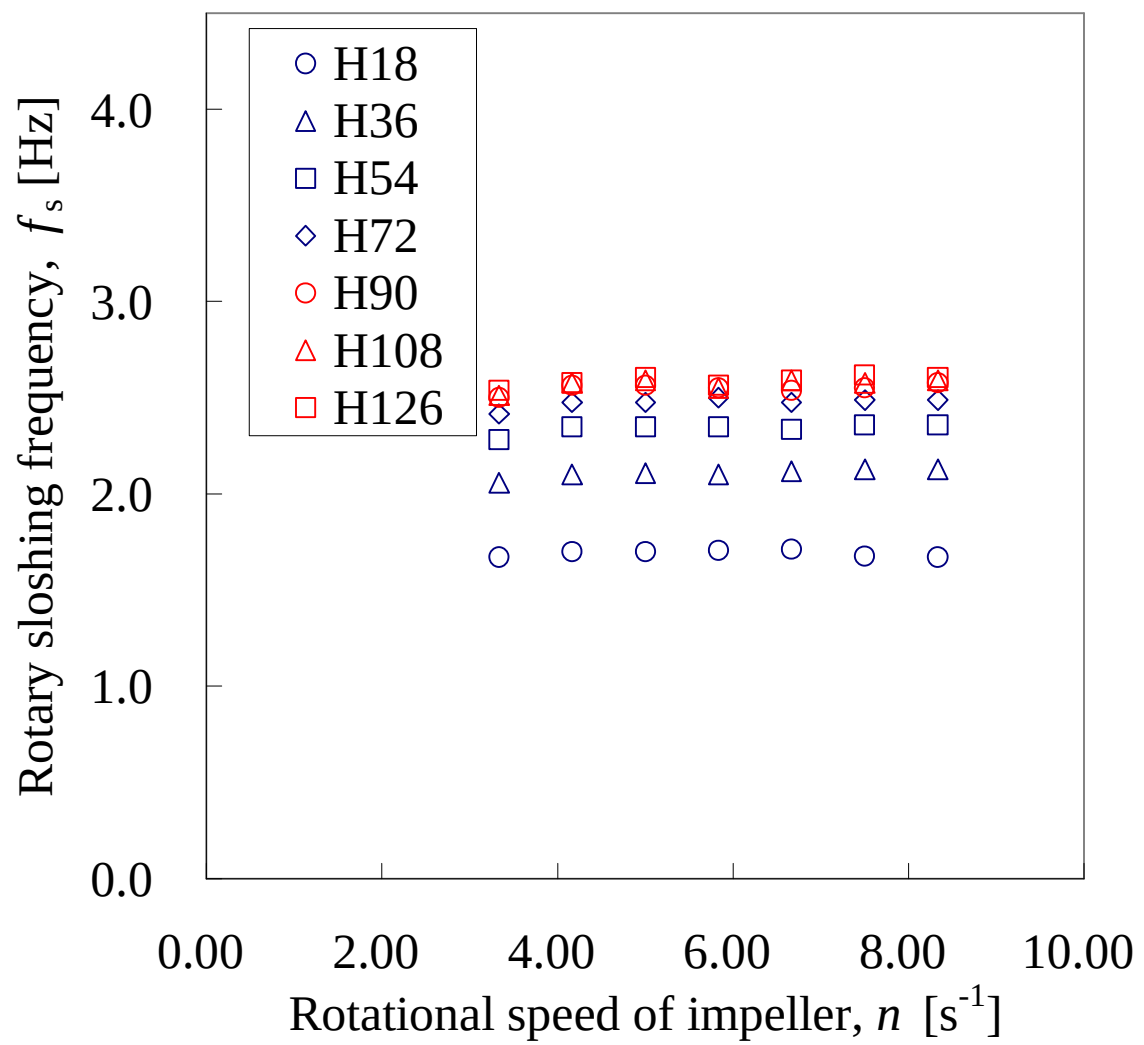
旋回スロッシングにおよぼす攪拌槽諸元の影響を Figure.2-12 に示した※.

a)は、液高さの影響を示しており、液高さの増加に伴い増加していき、徐々に一定になっていることがわかった。これは、 H_L が低い場合には攪拌槽底面が影響を及ぼすためだと考えられる。b)は、回転数の影響を示しており、回転数の増加に関係なく一定の値をとることがわかった。これは、翼面から流体に加わる力がある一定の値を超えると、翼端が流体をせん断するようになり、ある回転数以上においては、翼面から流体に加わる力が一定となるためであると考えられる。c)は、槽径の影響を示しており、槽径の増加に伴い旋回スロッシング周波数は単調減少していることがわかった。これは、攪拌流体の体積が増加するためであると考えられる。d)は、翼径の影響を示しており、翼径の増加に伴い単調増加していることがわかった。これは、翼面と攪拌流体の接触面積が増加することにより、流体に与える力が大きくなるためであると考えられる。

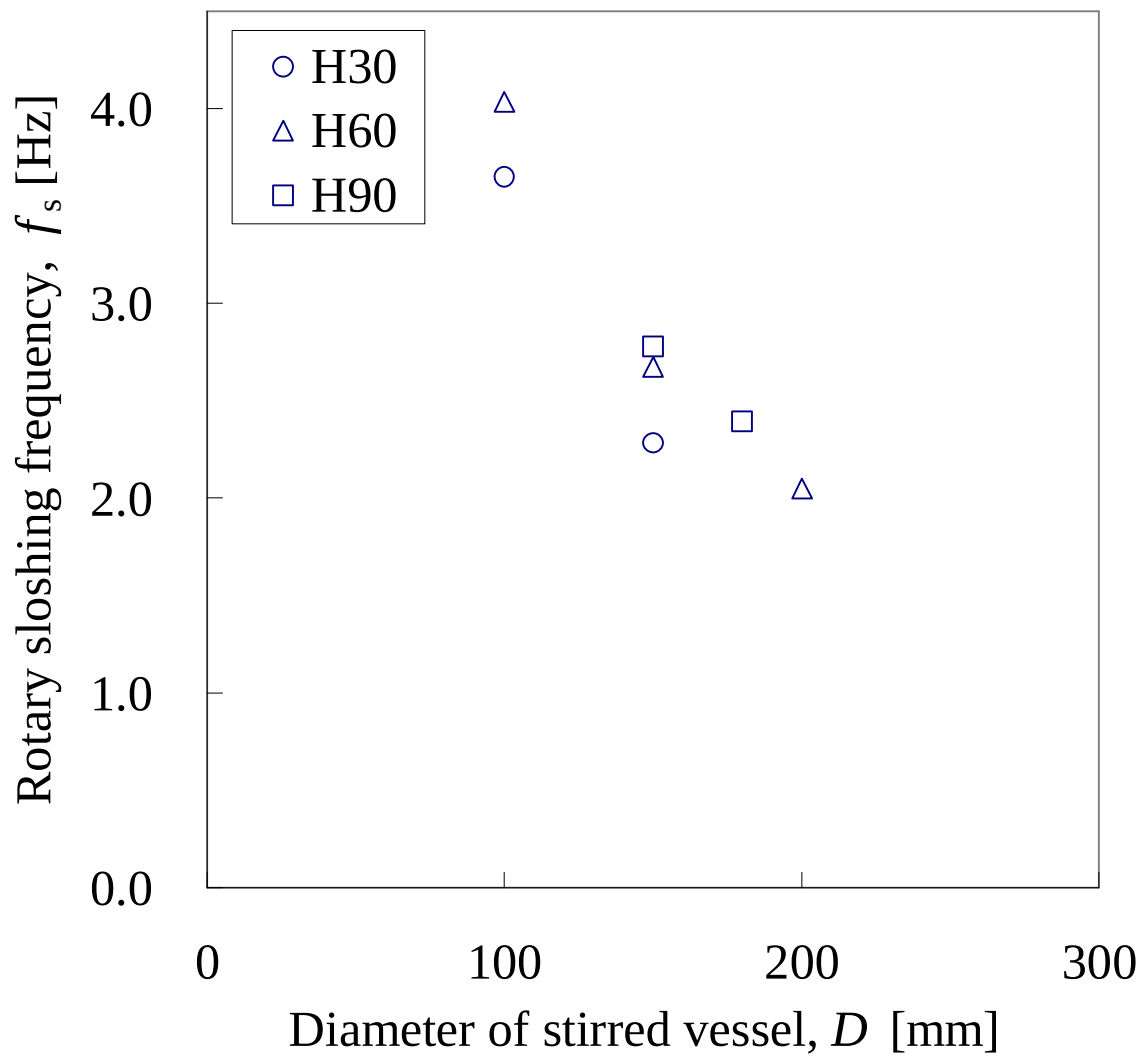
※ここでは、データ量が膨大であるため、ここではその一例としてのデータのみを示した。なお、残りのデータに関しては、巻末に載せた。



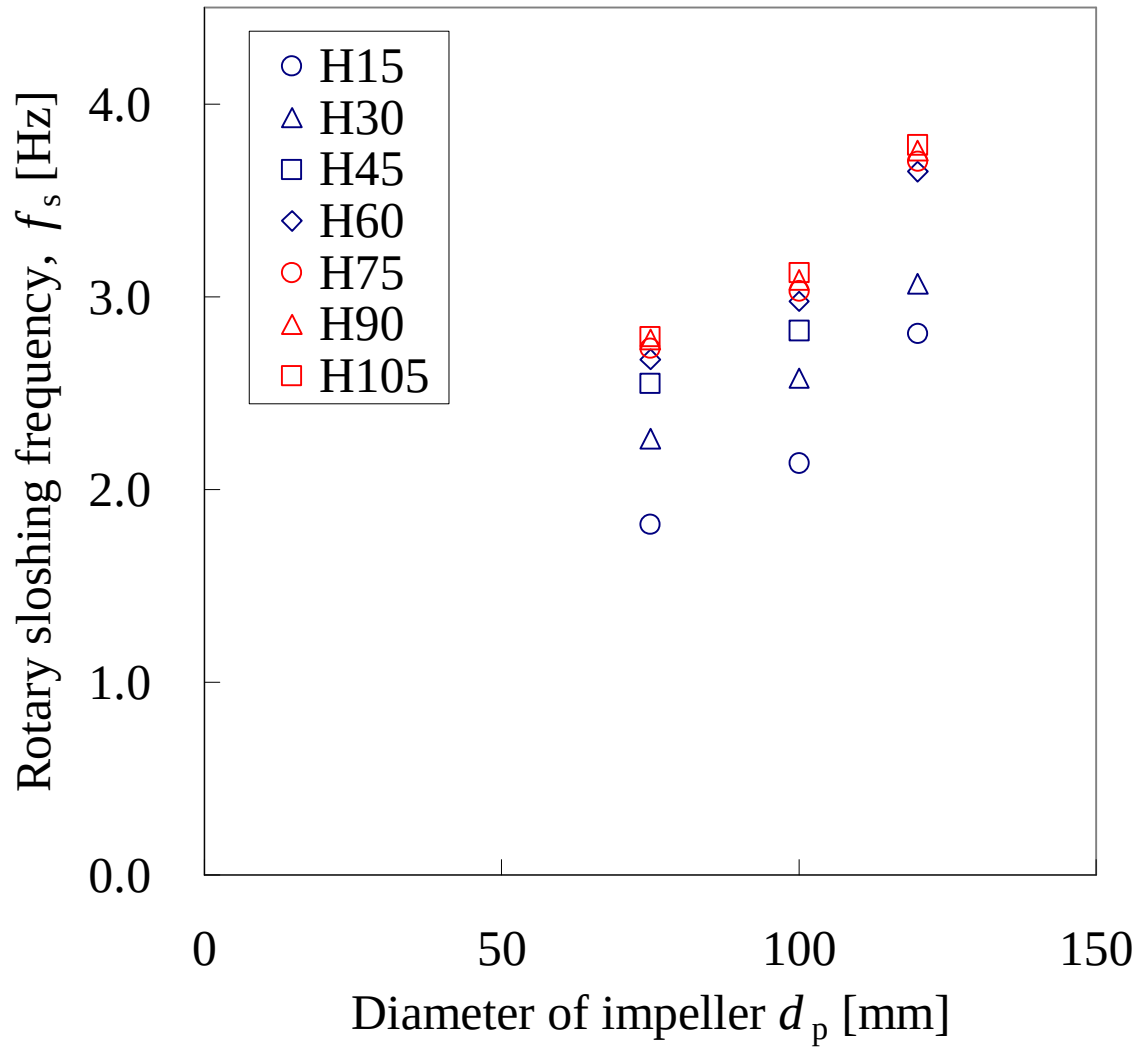
a) Effect of liquid height on rotary sloshing frequency
($d_p=75$, $n=8.33s^{-1}$)



b) Effect of Rotational speed of impeller on rotary sloshing frequency
($D=180$, $d_p=100$)



c) Effect of diameter of stirred vessel on rotary sloshing frequency
($d_p=75$, $n=6.67s^{-1}$)



d) Effect of diameter of impeller on rotary sloshing frequency
 ($D=150$, $n=8.33s^{-1}$)

Fig.2-12 Effect of operational conditions

2.6 攪拌機の固有振動数(Natural frequency of stirred vessel)

2.6.1 実験目的(Experimental Purpose)

攪拌機の振動は、その固有振動数が大きく関わっている。また、外部からの励振により共振が発生する際の原因を解明するためには、固有振動数の測定は必須である。そこで本実験の目的は、旋回スロッシング発生時の攪拌機に発生する振動現象を解明することとした。

2.6.2 実験方法・条件(Experimental Methods and Conditions)

本実験には、2.3.1, 2.3.2, 2.3.3にあるインパクトハンマ、三軸圧電型加速度計、分析処理器を使用した。実験装置を Fig.2-13 に示した。振動解析システムには、キャテック社製の CATSYSTEM を使用した。

攪拌翼の振動は、その固有振動数に影響される。しかし、攪拌翼の固有振動数は、攪拌翼や軸の形状、材質、軸の保持条件などによっても異なる。そこでまず、攪拌翼を回転させない状態で、攪拌翼と軸、モーター、スタンド等を含む部分(以下、攪拌機と称す)の固有振動数を測定した。前述の通り、翼の形状、重さによって固有振動数は異なるため、翼枚数を 2, 4, 6 枚と変化させた際の固有振動数をそれぞれ測定した。実験方法としては、加速度計を軸、スタンド、モーターなど計 6 点(Fig.2-14)に設置し、それぞれの設置位置(Table2-3)において、翼を回転させずにインパクトハンマでモーターに x-y 面 45 度方向から衝撃を与え、その際の加速度応答をデータ処理して攪拌機の周波数応答関数を得て、固有振動数を算出した。加速度を設置する際には、加速度計の方向を安定させるために、アルミ合金 (A1060)製のアタッチメント(Fig.2-15)を軸、スタンドに固定し、その上に加速度計を瞬間接着剤で設置した。

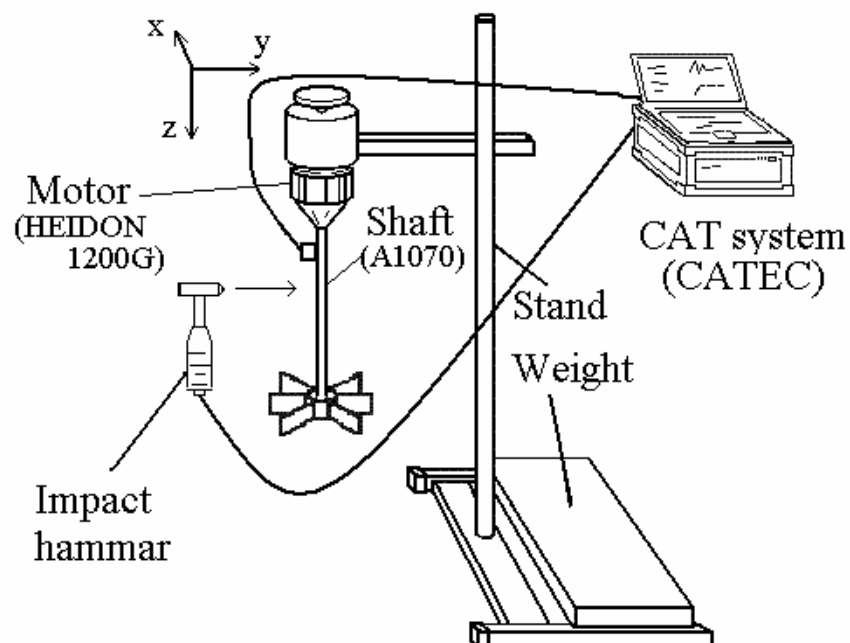


Fig.2-14 Schematic diagram of Stirred vessel

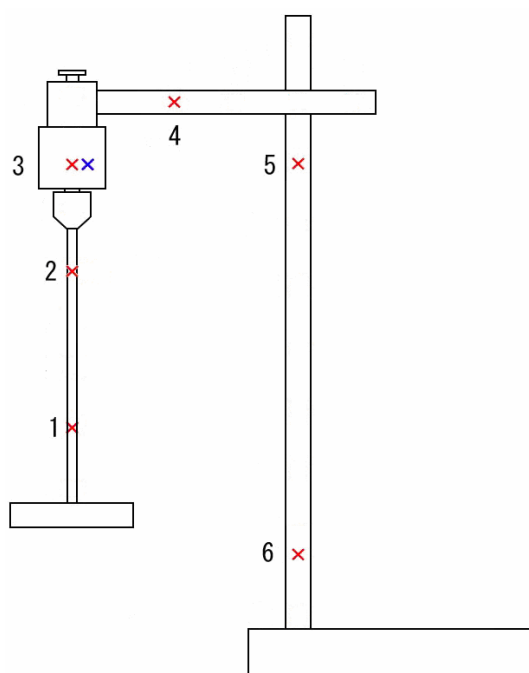


Fig.2-15 Impact point

Table2-3 Impact point

Direction			
Impact point	x	y	z
1	0	0	0
2	0	0	160
3	0	0	300
4	0	190	300
5	0	280	250
6	0	280	100
7	0	280	-150

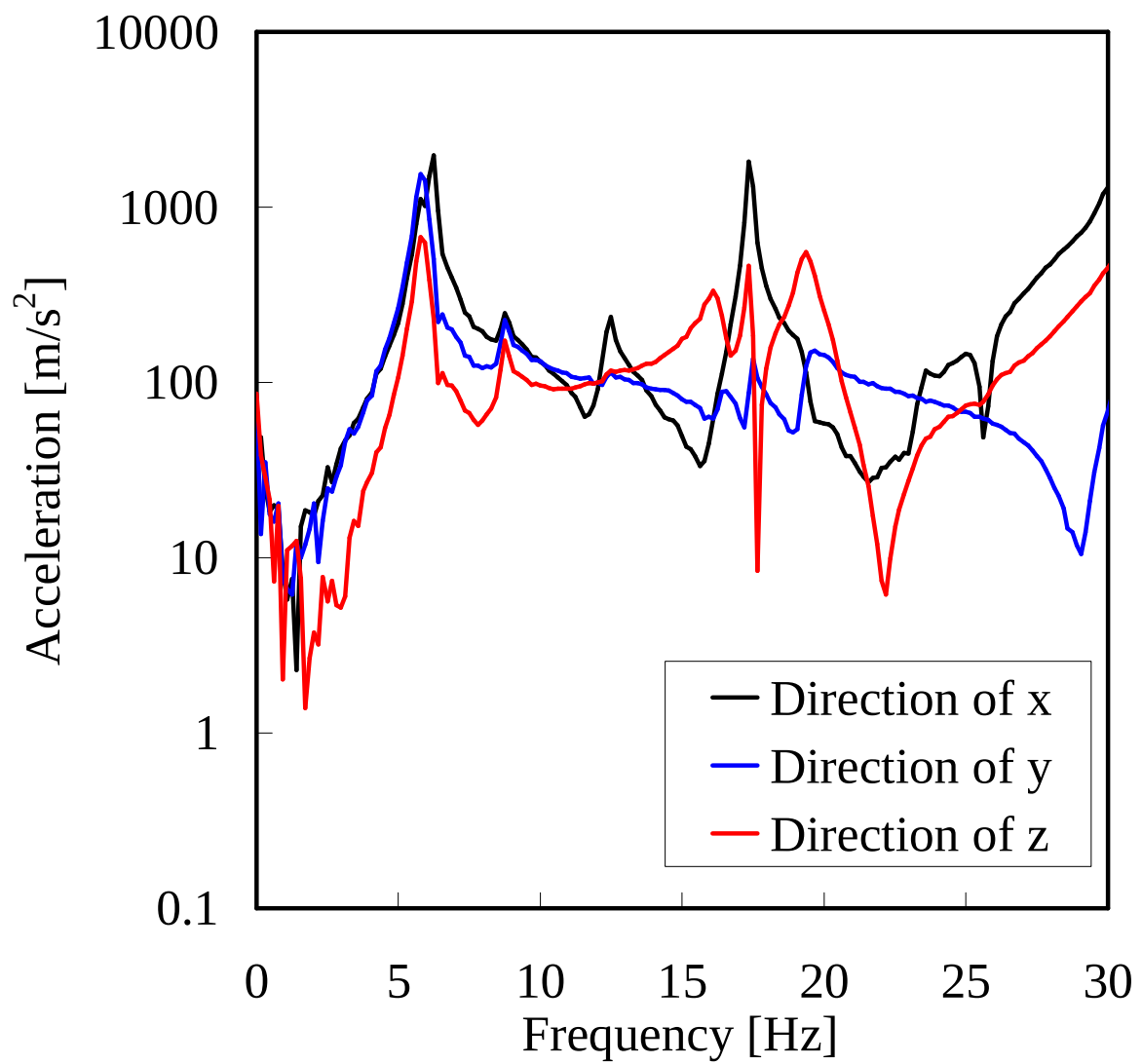
2.6.3 実験結果・考察(Experimental Results and Considerations)

すべての実験条件における固有振動数の測定結果を Table 2-4 に示した。その測定結果の一部を Fig.2-16 に示した※。低周波領域における高いピーク値を示す固有振動数に注目すると、翼枚数 2 枚の攪拌機の固有振動数 (振動方向, Fig 2-3 参照)は, 5.94(y, z), 6.25 (x), 17.34 (x, z), 19.37 (y) Hz, 4 枚のときは, 5.78(x, y, z), 6.25(x), 16.71(x), 18.75(y)Hz, 6 枚のときは, 5.78(x, y, z), 6.25(x), 15.9(x, y, z), 17.6(z)Hz であった。

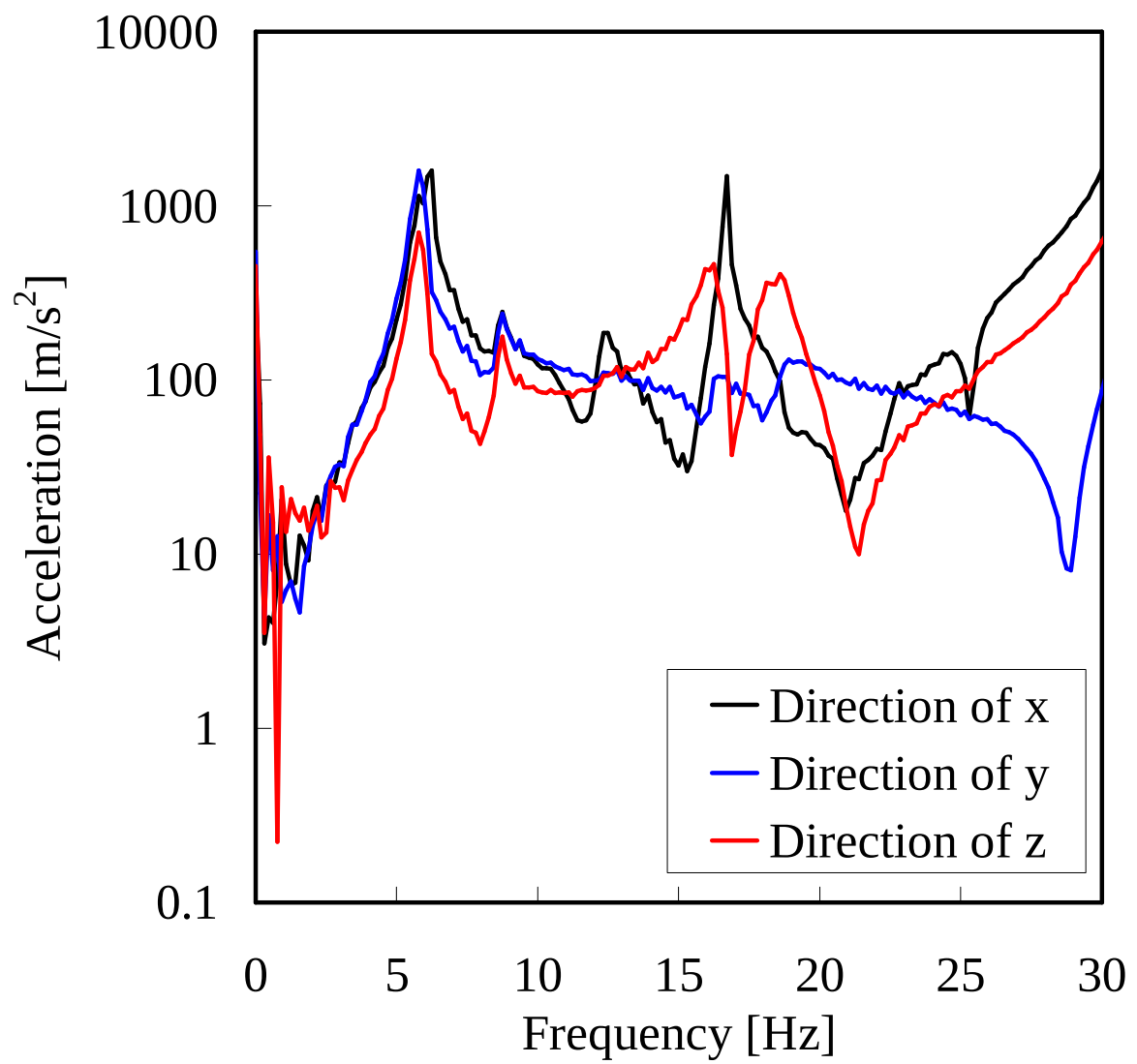
※ここでは、データ量が膨大であるため、ここではその一例としてのデータのみを示した。なお、残りのデータに関しては、巻末に載せた。

Table 2-4 Natural frequency, [Hz]

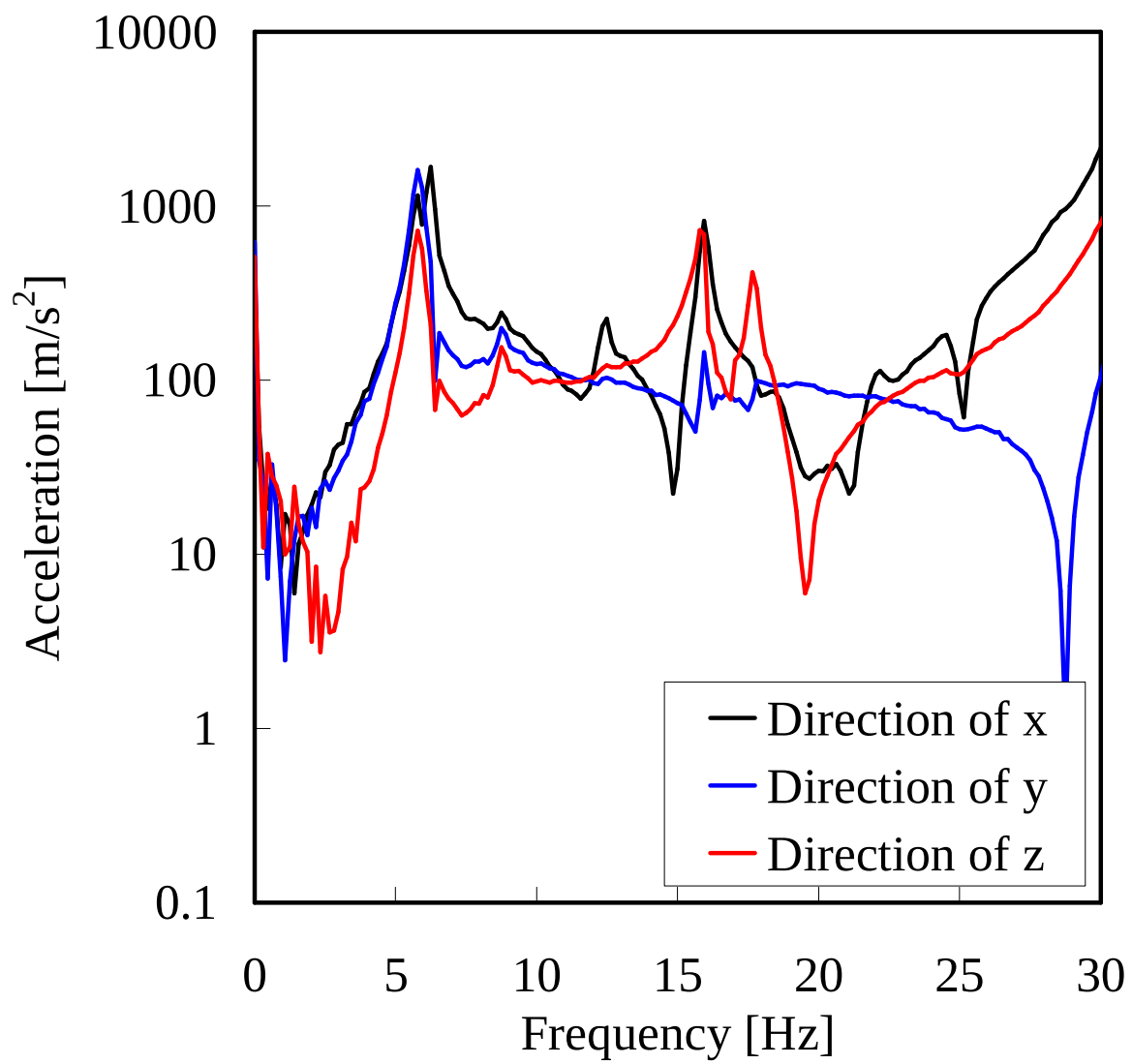
n_p \ mode	1	2	3	4
2	5.94	6.25	17.34	19.37
4	5.78	6.25	16.71	18.75
6	5.78	6.25	15.9	17.6



a) 2-blade impeller



b) 4-blade impeller



c) 6-blade impeller

Fig.2-16 Natural frequency of stirred vessel

2.7 攪拌機の振動現象

(Vibration phenomena of stirred vessel)

2.7.1 実験目的(Experimental Purpose)

攪拌機に発生する振動現象には、様々な要因による振動が複合的に発生しているものであり、視覚的な情報だけでは、共振発生時の厳密な条件、要因について定静的な議論しかできない。そこで、この振動現象を数値データとして出力することで、定量的な分析を行い、振動現象を詳細に解明することを目的とした。

2.7.2 実験方法・条件(Experimental Methods and Conditions)

本実験に使用した装置、条件は Fig.2-1, Table 2-1 A)に示した。攪拌槽諸元として、翼径を変化させて、攪拌翼回転時に攪拌機に発生する振動を、モーターに取り付けた三軸圧電型加速度計(2.3.2 参照)から、振動解析システム(2.3.3 参照)を用いて振動加速度の周波数分析を行った。また、攪拌機に発生する純粋な振動を計測するために、攪拌流体なしの状態での振動解析も行った。その際、翼回転数を1分30秒間隔で、 0.83s^{-1} (5rpm)上昇させ、液面現象安定時の1分～1分30秒の間に振動加速度の周波数分析を行った。間隔設定の詳細は、2.5.2 参照。それと、同時に攪拌槽側面より旋回スロッシング現象、振動現象をデジタルビデオカメラで撮影した。その映像から旋回スロッシング周波数の測定も行った。測定結果は Fig.2-17 に示した。測定には、振幅の頂点が5周する時間より、平均の周期を算出し、その逆数を旋回スロッシング周波数とした。

2.7.3 実験結果・考察(Experimental Results and Considerations)

旋回スロッシング周波数と翼回転数との関係を Fig.2-17 に示した。どの翼枚数においても旋回スロッシング周波数に差はなく、ほぼ 2.3Hz で同様の値を示した、また、発生し始めは若干低くなっているが、回転数が上昇していくにつれ、一定の値になっていることもわかる。以上の結果より、以下の実験では、この条件における旋回スロッシング周波数を 2.3Hz として考察を行った。

続いて、攪拌運転時の攪拌機に発生する振動の周波数分析の結果に基づいて、翼回転数、旋回スロッシングに起因する振動現象についての実験結果とそこから得られた知見を示す。まず、流体を用いずに翼を空回転させた場合における、攪拌機に発生する振動と翼回転数の関係を Fig2-18 に示した。攪拌機に発生する振動のピーク値を示すデータを結んだ直線はすべて原点を通っており、翼回転数(傾き = 1)を示す直線の実数倍となっていることから、翼回転に起因する振動であることがわかる。次に、旋回スロッシングが発生した場合における、攪拌機に発生する振動と翼回転数の関係を Fig.2-19 に示す。それぞれの振動のピーク値を示すデータを結んだ直線を外挿すると、原点を通るグループ I (実線)とある点で交差するグループ II (破線)に分類できることがわかった。グループ I は Fig 2-18 の結果より、すべて原点を通っていることから翼回転に起因する振動であると考えられる。一方、グループ II の外挿線が交差する点の振動のピーク値は、旋回スロッシング周波数 $f_s (=2.3\text{Hz})$ と一致している。さらに、グループ II の直線の傾きは翼枚数の逆数の整数倍になっていることがわかった。これらのことから、グループ II は旋回スロッシングに起因する振動と考えられ、この振動のピーク値は翼枚数によって変化し、次式により表すことができることがわかった。

$$f_p = \frac{m}{n_p}(n - f_s) + f_s \quad (2-1)$$

ここで、 m は整数である。

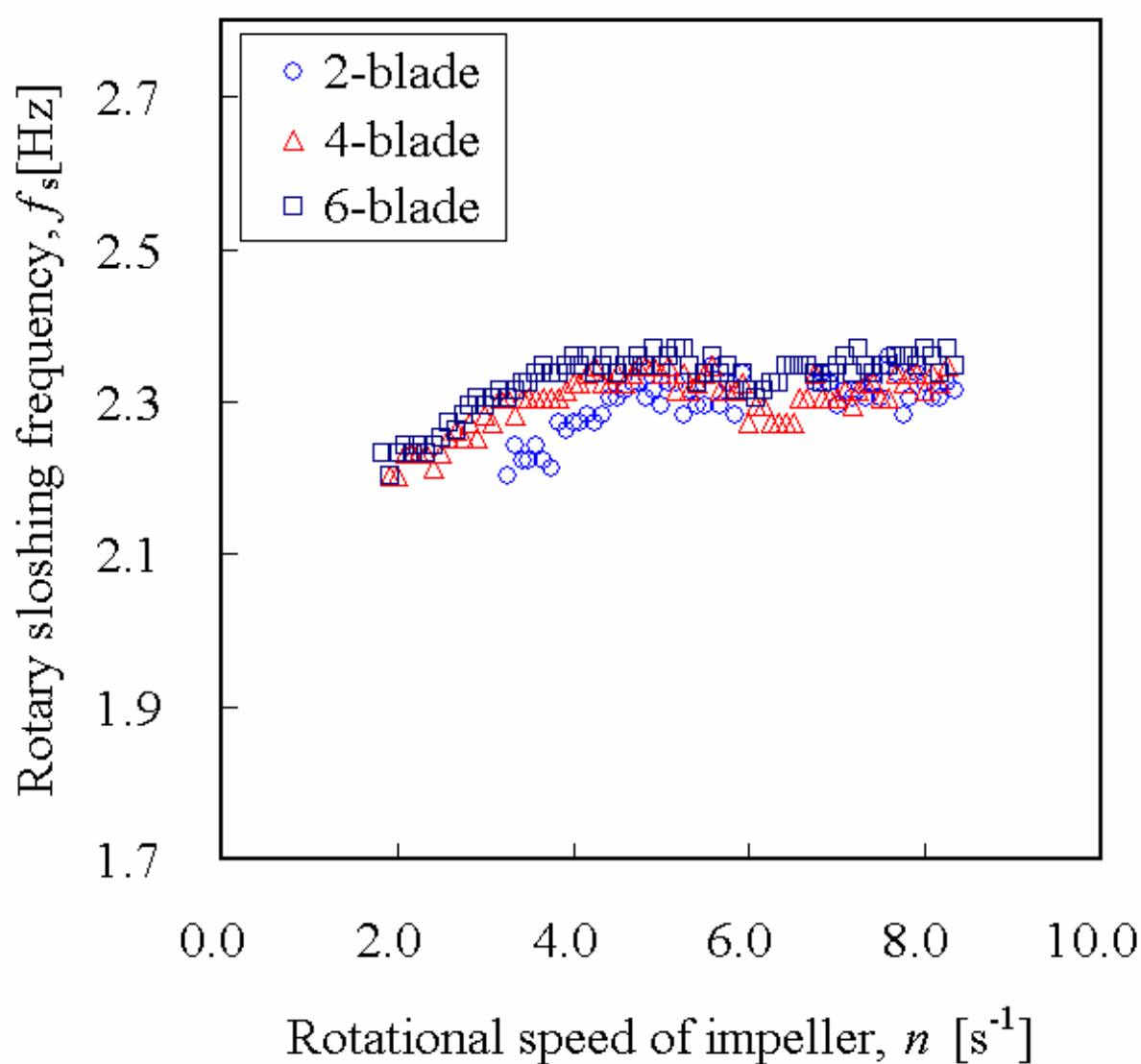
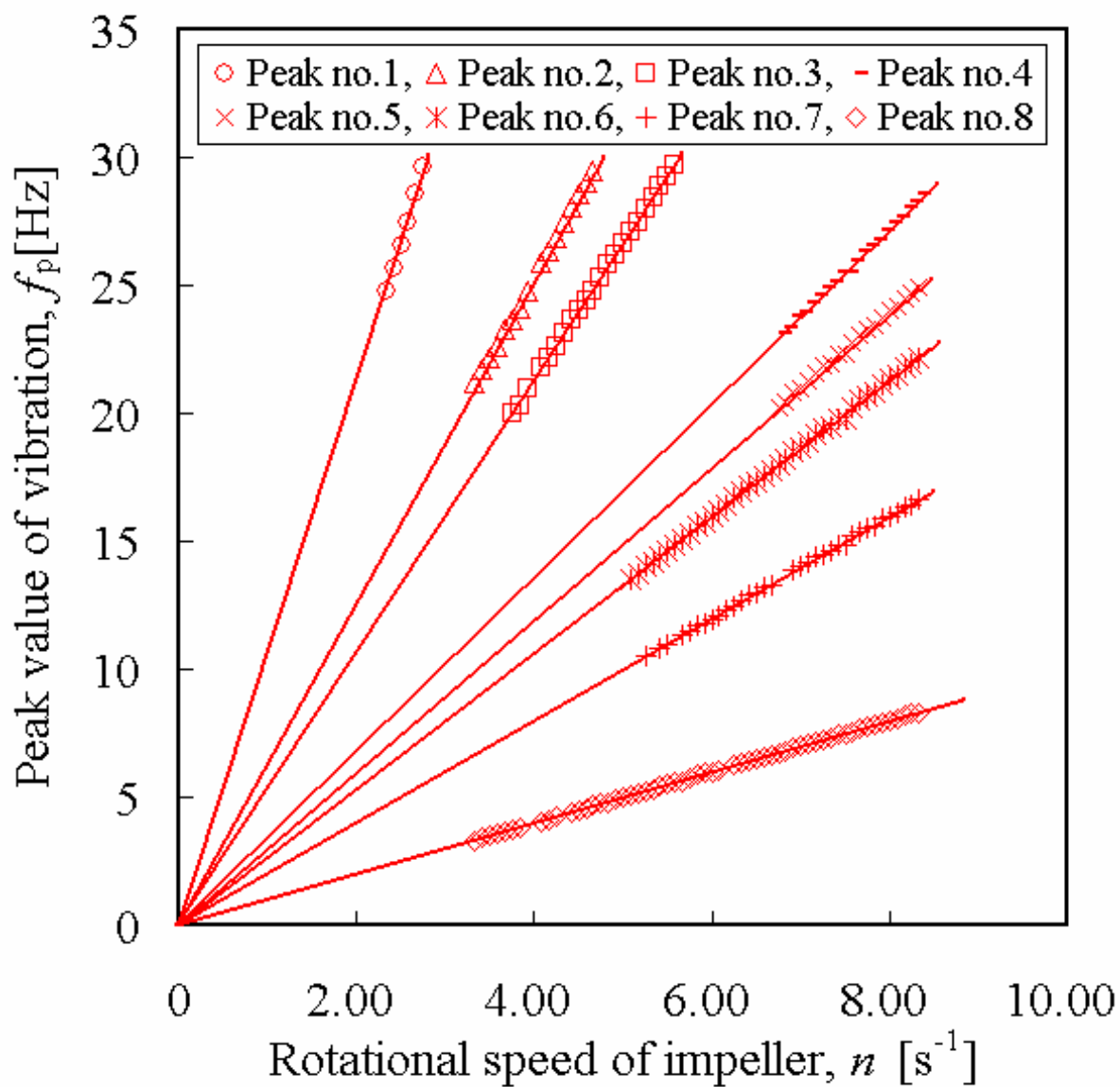
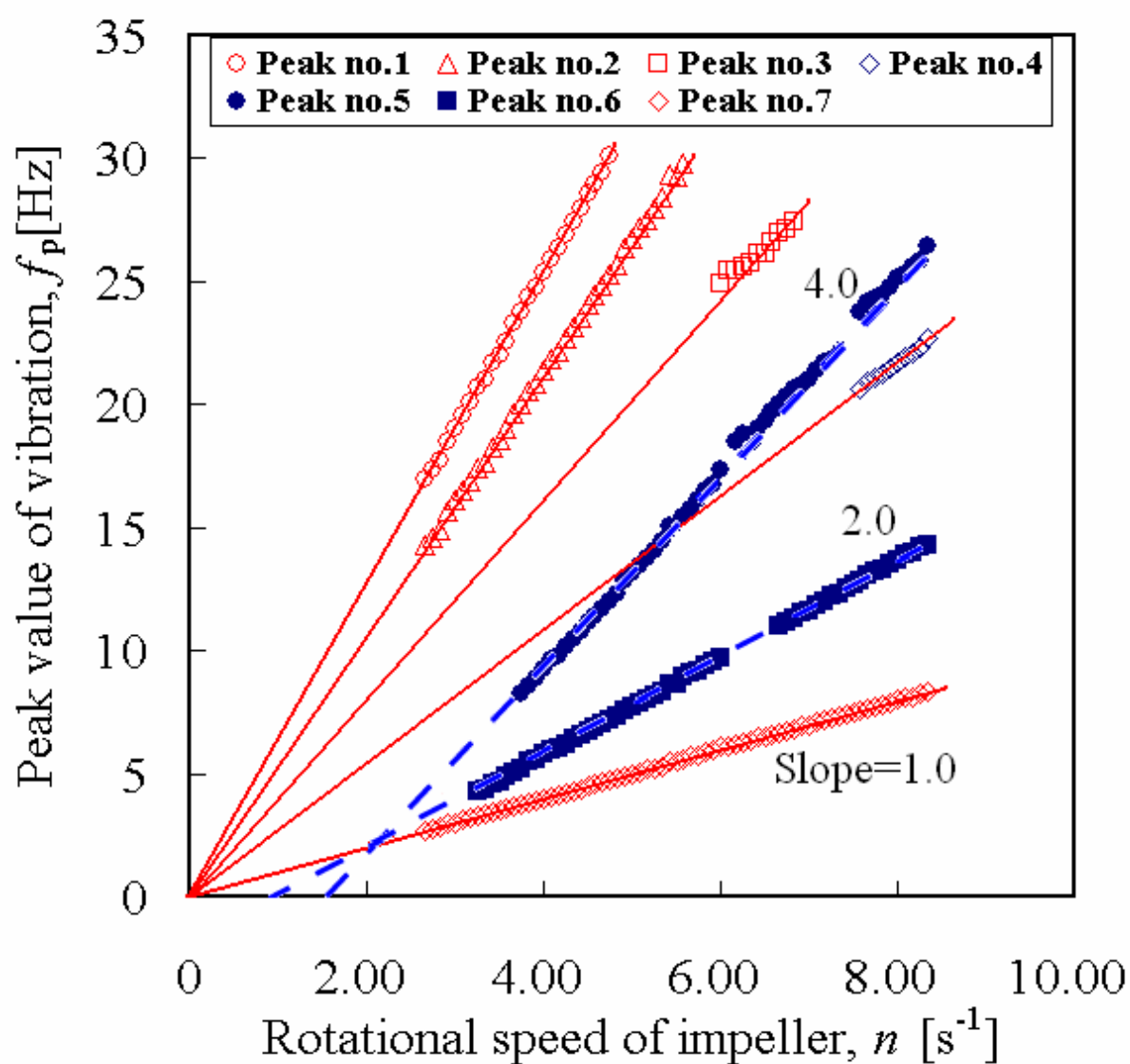


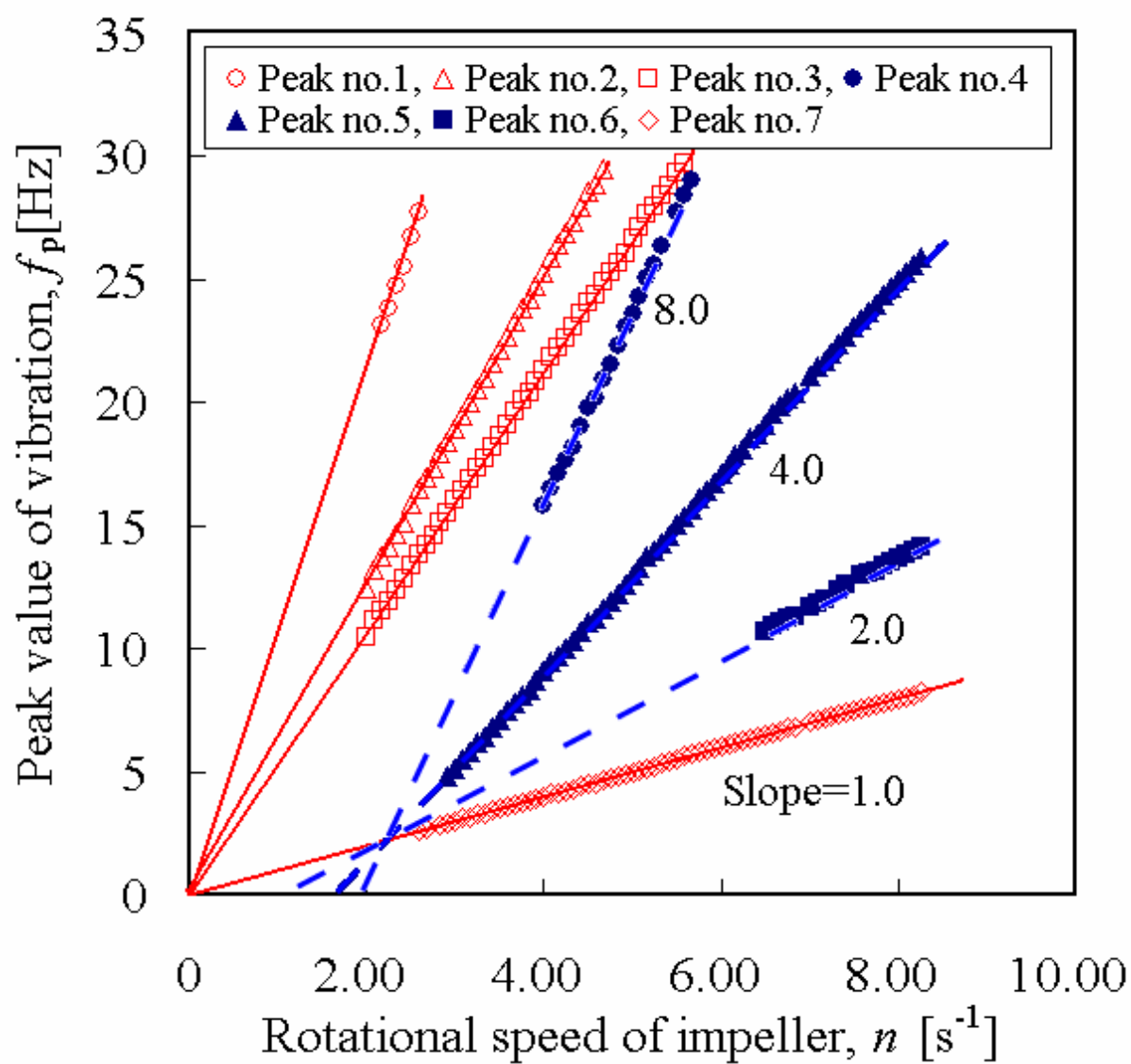
Fig.2-17 Relation of rotary sloshing frequency and rotational speed of impeller



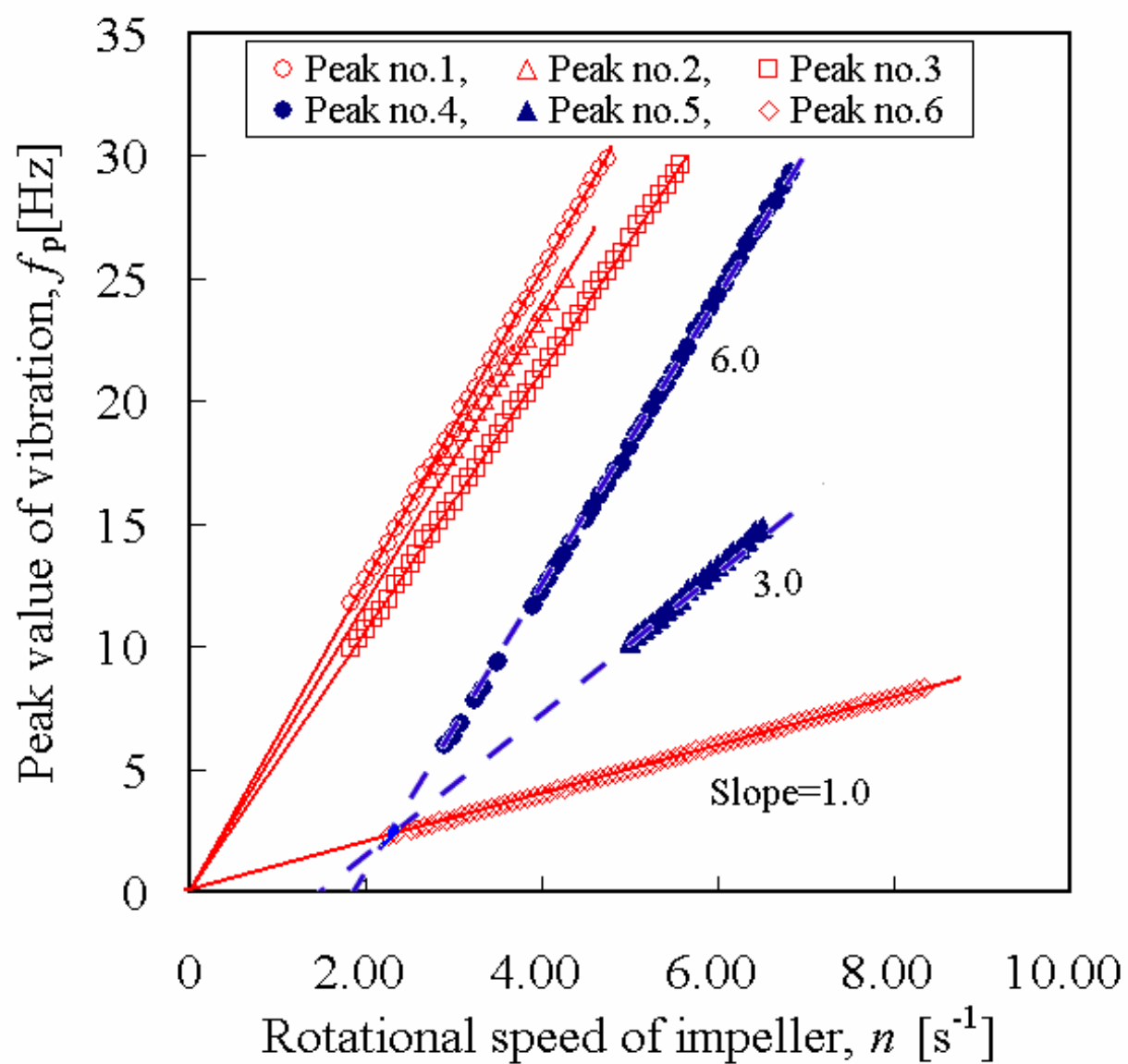
**Fig.2-18 Relation of peak value of vibration
and rotational speed of impeller
(no-liquid)**



a) 2-blade impeller



b) 4-blade impeller



c) 6-blade impeller

Fig.2-19 Relation of peak value of vibration and rotational speed of impeller

第三章 旋回スロッシングのメカニズムの解明

(The equation of rotary sloshing frequency)

3.1 緒言(Introduction)

本章では、パドル翼攪拌槽における旋回スロッシングのメカニズムを解明するため、前章の結果を元にその発生領域、発生条件を求め、また、スロッシング周波数の理論式に基づいて旋回スロッシング周波数と攪拌槽緒元との関係を横断的に評価することで、その相関関係を具体的な式として導いた。

3.2 旋回スロッシングの発生領域と発生条件

(The conditions for generating rotary sloshing)

旋回スロッシングの発生領域の測定結果の一例として、6枚パドル翼を槽底から翼下端までの高さが99mmの位置に設置し、液高さと翼回転数を変化させた場合における攪拌液の運動状態の観察結果をFig.3-1に示す。液面が攪拌翼下端に触れた直後から旋回スロッシングが発生し、翼上端付近まで継続することがわかった。そして、それ以上の液高さになると、旋回スロッシングからボルテックスへ遷移している。以下の実験において液高さを変化させた実験では、翼高さ、すなわち槽底より翼下端までの高さは、すべて液高さよりも1mm低い位置とした。

旋回スロッシングが発生する回転数について検討するため、液高さを変化させた場合の、翼回転数と旋回スロッシング周波数との関係をFig.3-2に示す。旋回スロッシングが発生するとその周波数は、発生した直後の翼回転数では多少低いものの、翼回転数が増加するに従って、ほぼ一定となっており、旋回スロッシングが発生するのは、翼回転数が旋回スロッシング周波数以上の領域であることがわかった。

3.3 旋回スロッシングに及ぼす諸元の影響評価

(The influence of operational conditions on the rotary sloshing frequency)

旋回スロッシング周波数 f_s に及ぼす液高さ H_L/D の影響をFig.3-3に示す。 f_s は H_L/D の増加に伴い増加するが、 H_L/D が約0.5以上ではほぼ一定となっている。これは、 H_L が低い場合には攪拌槽底面が影響を及ぼすためと考えられる。また、 f_s に及ぼす翼径 d_p/D の影響をFig.3-4に示す。 f_s は d_p/D に比例して増加しており、これは翼径の増加に伴い、流体と翼面との接触面積が増加し、それにより流体に加わる力が増加するためと考えられる。

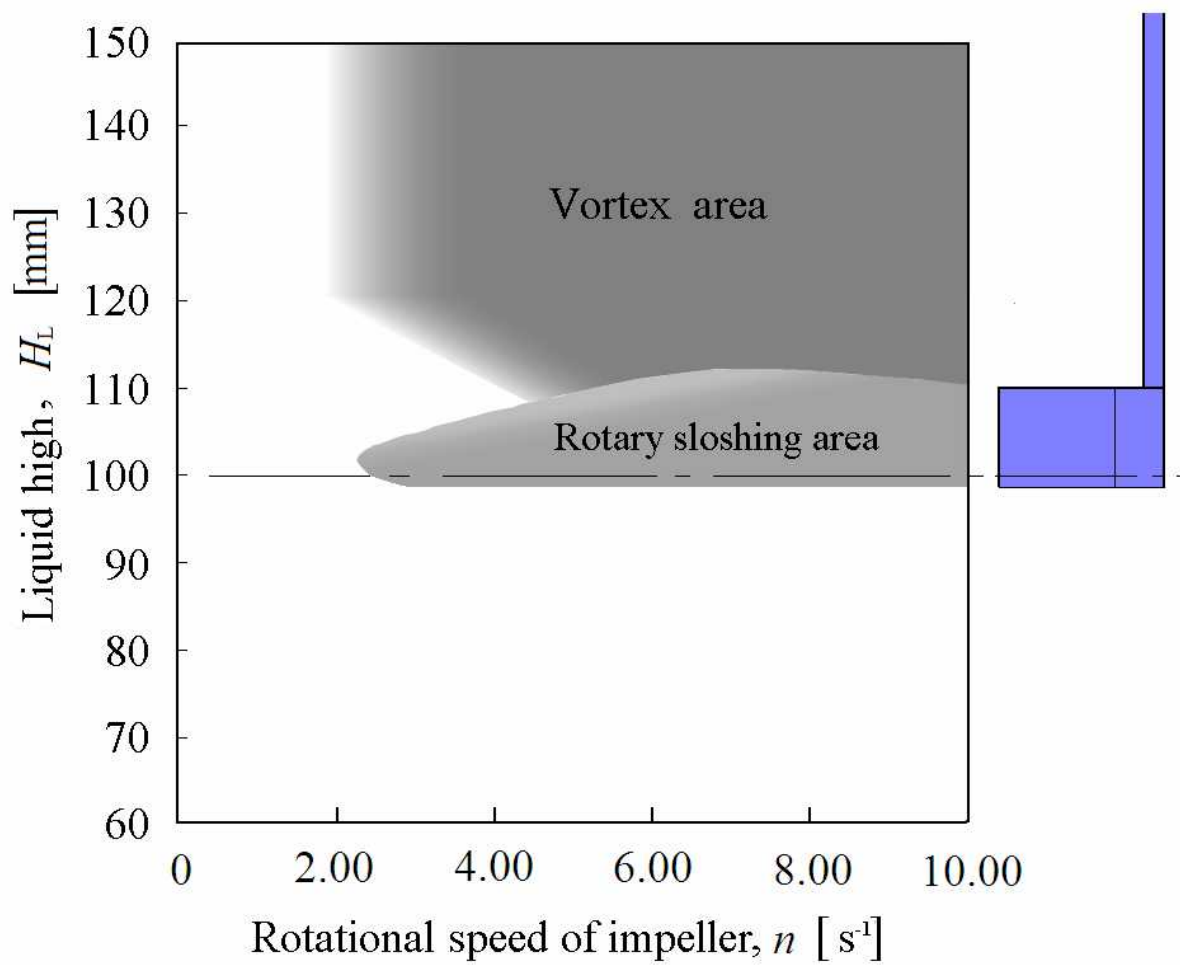


Fig.3-1 Rotary sloshing area in stirred vessel
($D=200\text{mm}$, $d_p=100\text{mm}$, $n_p=6$, $b_w=11\text{mm}$)

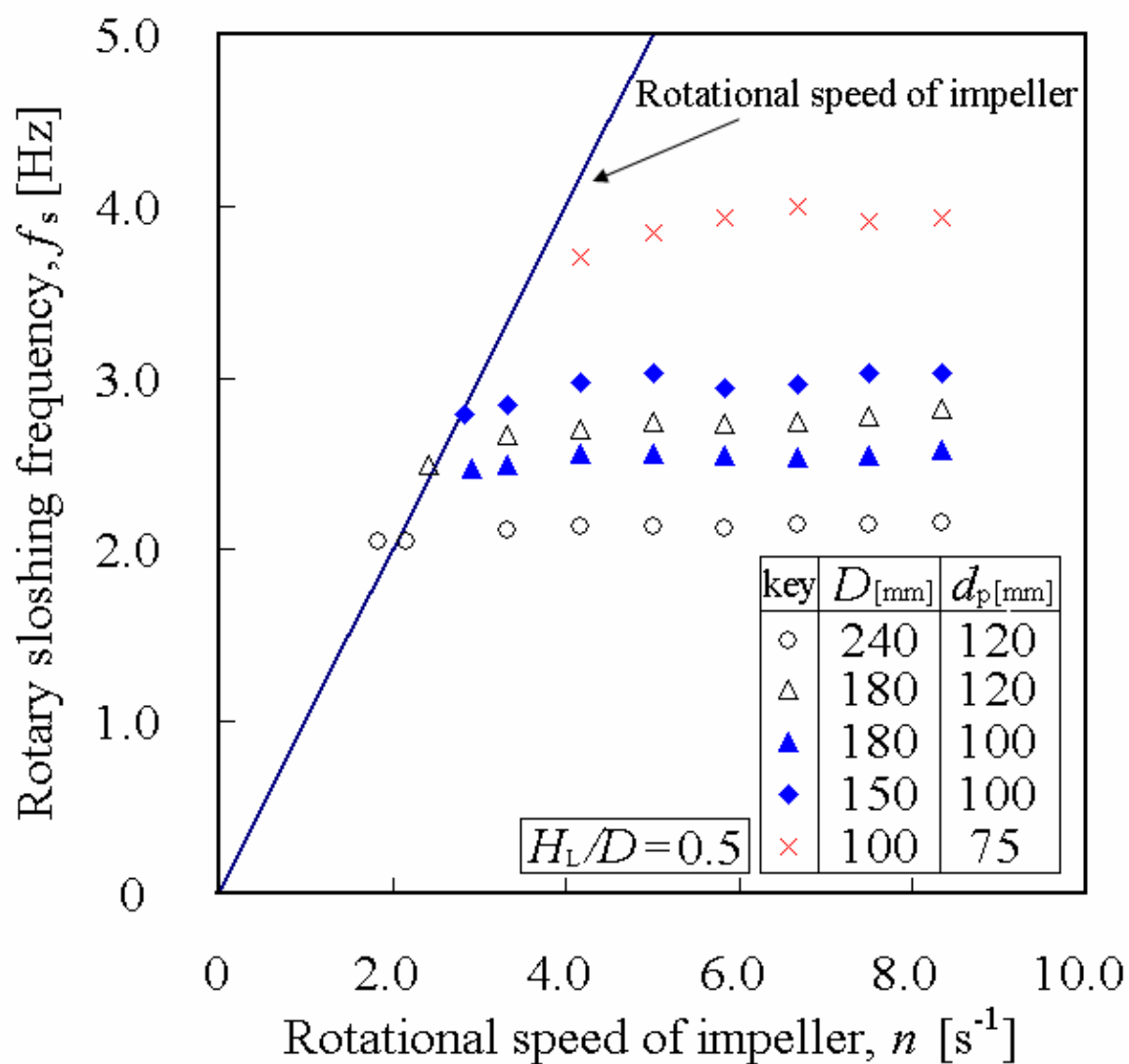


Fig.3-2 Relation of rotary sloshing frequency and rotational speed of impeller to generate rotary sloshing

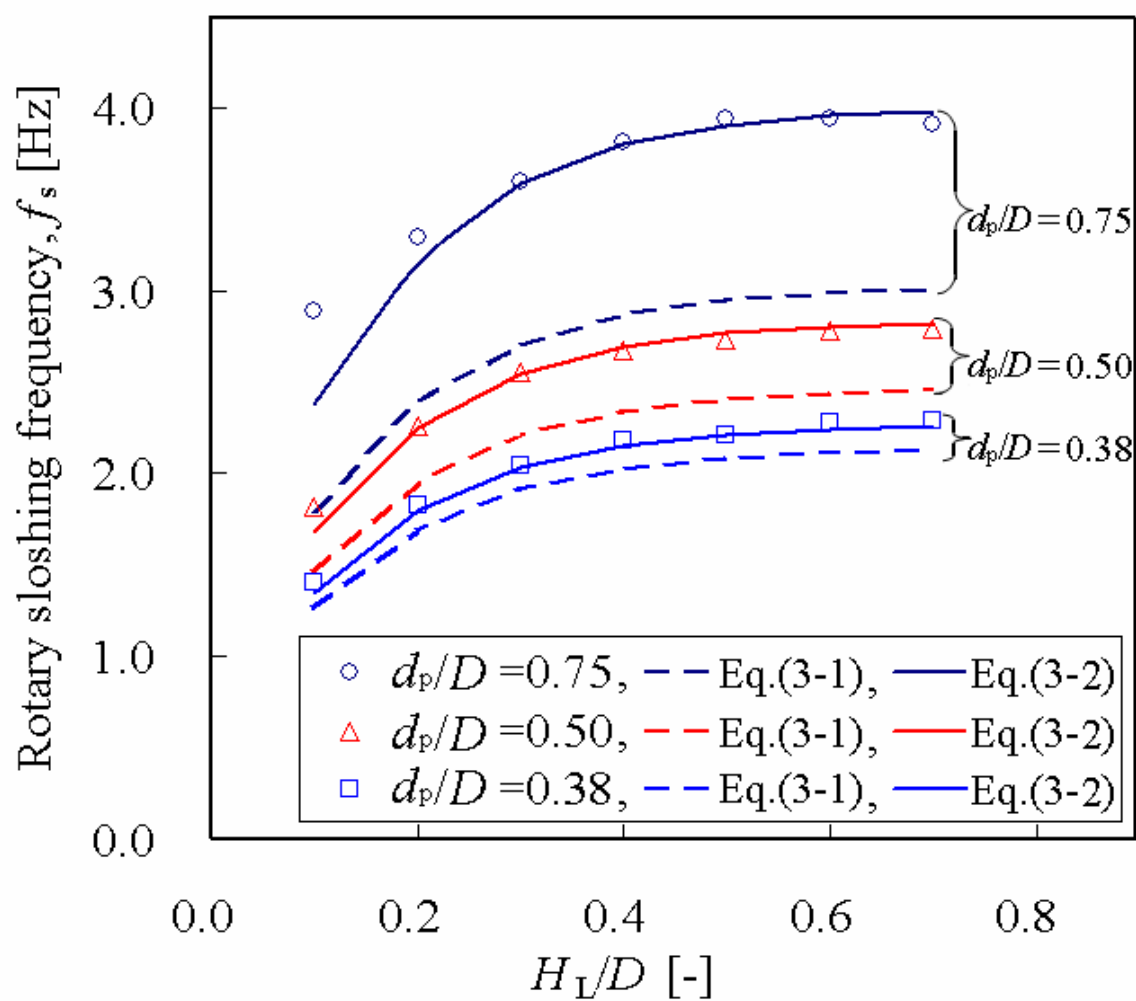


Fig.3-3 Effect of liquid height on rotary sloshing frequency ($n_p=6, b_w=11\text{mm}$)

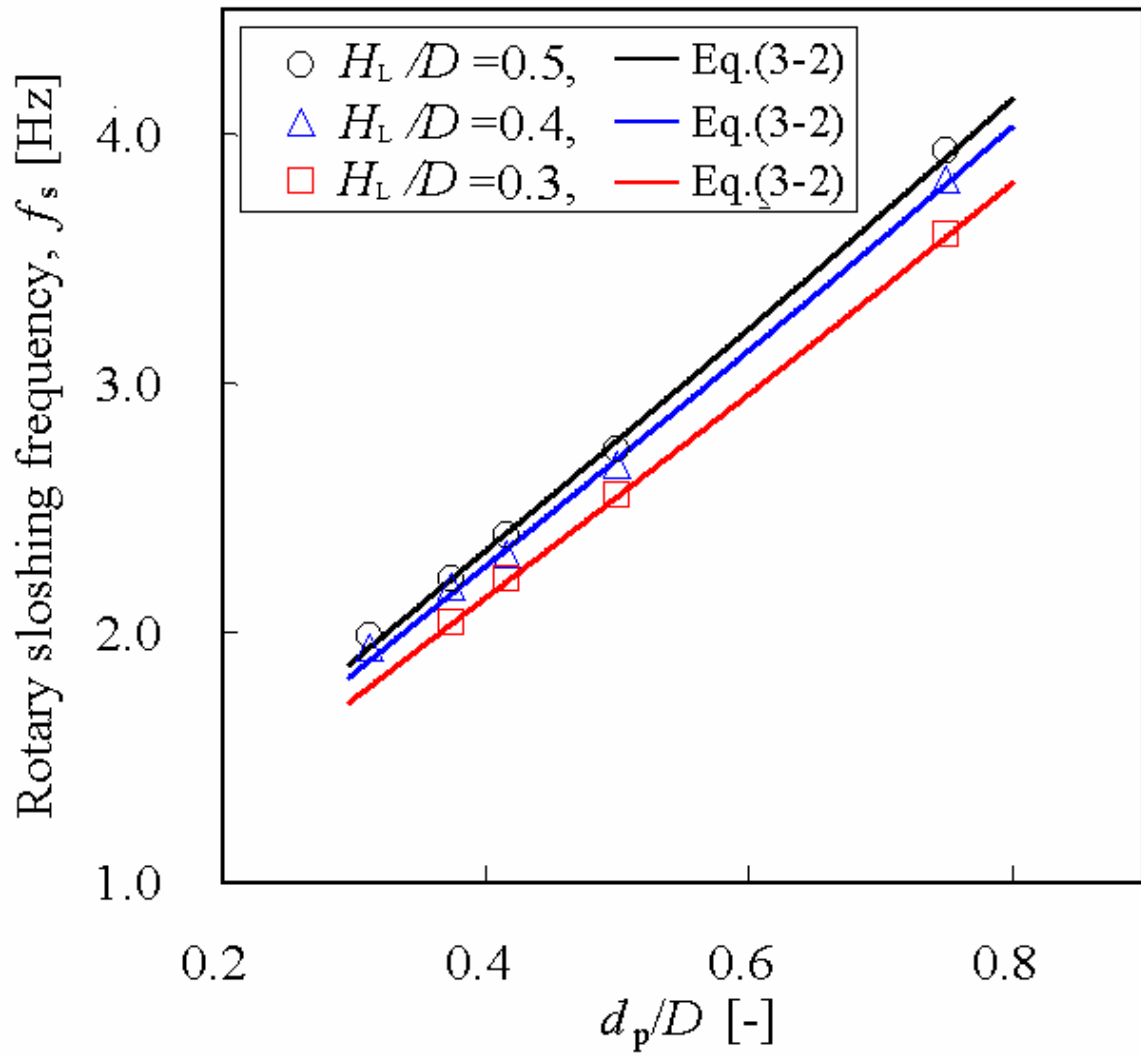


Fig.3-4 Effect of diameter of impeller on rotary sloshing frequency ($n_p=6, b_w=11\text{mm}$)

3.4 相関式の導出

(Deriving the equation of rotary sloshing frequency)

以上の結果より、旋回スロッシング周波数に及ぼす攪拌槽諸元を考慮した相関式を導くことを目的とし、以下のように導出した。

まず、千田らは、石油タンクなどの円筒形容器が地震動などの外部加振を受けたときに発生するスロッシングについて研究報告を行っており、その中で、円筒形容器が液面と水平加振を受けた場合のスロッシング周波数 f を次式により求めている。

$$f = \frac{1}{2\pi} \left[(3.68 g / D) \tanh (3.68 H_L / D) \right]^{0.5} \quad (3-1)$$

Fig.3-3 には上式により求めた f の計算値を破線にて示す。 f は f_s とほぼ同様の傾向を示しているが実験値 f_s よりも小さい。また、 d_p/D が大きくなるに従い f と f_s の差は大きくなっていることがわかる。これは、Eq.(3-1)には攪拌翼の影響の項が含まれていないことによるものと考えられ、攪拌翼を有する攪拌槽の旋回スロッシング周波数には翼から伝わる力が影響を与えているものと考えられる。Figs.3-3 と 3-4 から、同一の d_p/D において f_s と Eq.(3-1)との差は H_L/D によらずにほぼ一定であり、また、 d_p/D に比例して増加している。このことから、Eq.(3-1)と全ての実験データに基づき、旋回スロッシングが発生する領域である $0.31 \leq d_p/D \leq 0.75$ および $0.1 \leq H_L/D \leq 0.7$ の範囲において、旋回スロッシング周波数 f_s を次式のように修正した。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \left[(3.68 g / D) \tanh (3.68 H_L / D) \right]^{0.5} \times [0.7(d_p / D) + 0.8] \quad (3-2)$$

Eq.(3-2) より求めた f_s の計算値を Fig.3-3 および Fig.3-4 中に示す。実験結果と良い一致を示していることがわかる。また、すべての実験条件に対して、実験値と Eq.(3-2)の比較を行った結果を Fig.3-5 に示す。ほぼすべての実験条件に対して実験値と $\pm 8\%$ 以内で、良い一致を示すことがわかった。このことから Eq.(3-2)の相関式は非常に信頼性が高いと言える。また、一般的な攪拌槽で発生する旋回スロッシングについてのメカニズム解明の足がかりをつかむにふさわしい結果を得ることができたと言える。

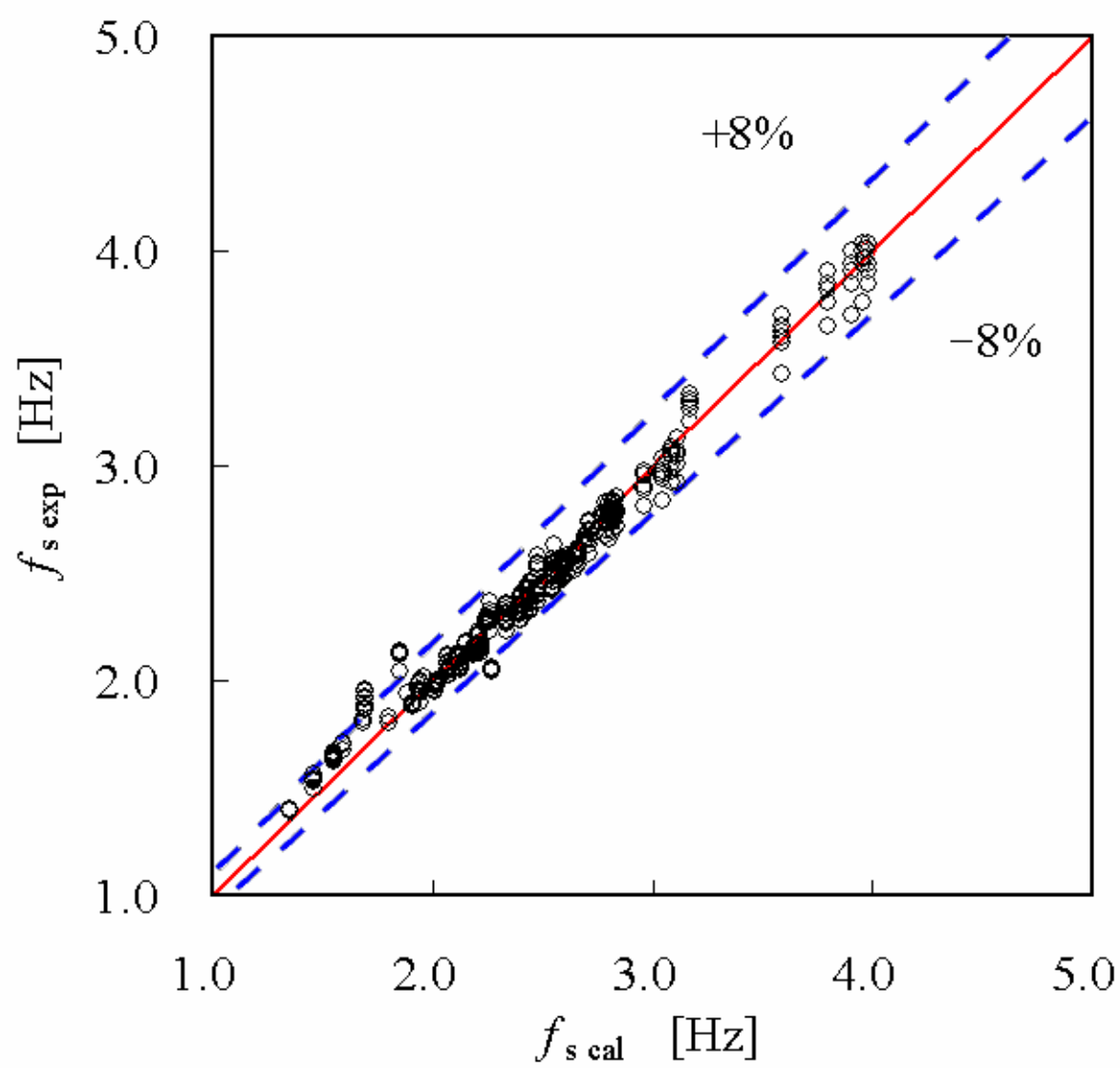


Fig.3-5 Comparison with calculated and experimental results

第四章 攪拌機の共振現象

(Resonance phenomena in a stirred vessel)

4.1 緒言(Introduction)

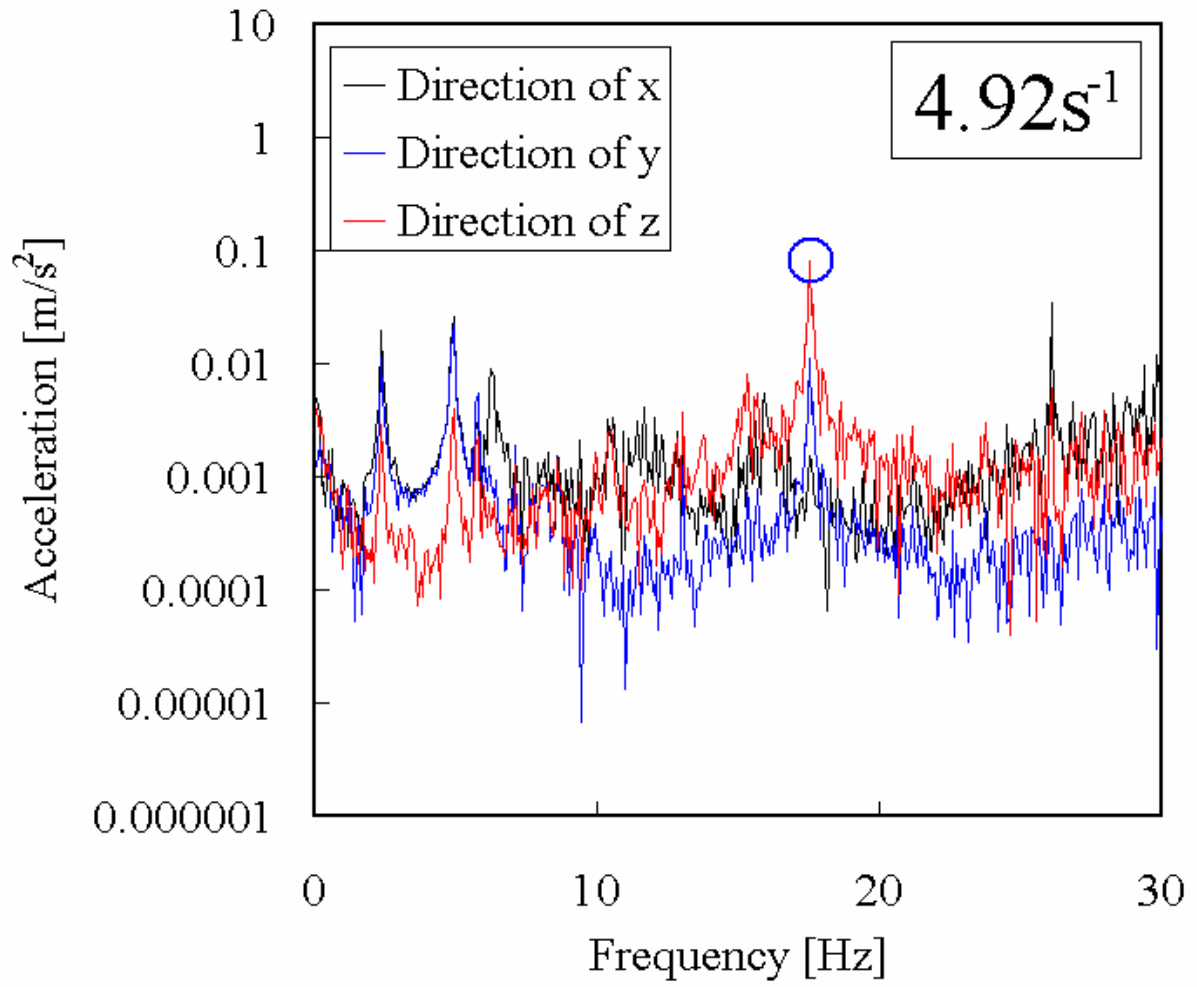
攪拌翼を有する攪拌装置は、回転機械であるがゆえに、攪拌槽の固有振動数とモーターの回転数が一致すると、装置が共振により大きく振動する。攪拌翼の振動により攪拌槽に損傷が発生する場合があるという報告もある。このため、攪拌槽の設計・操作条件としては、あらかじめ攪拌槽の固有振動数を求めておき、その固有振動数と共振を起こさない回転数で翼を回転させることが重要であり、攪拌機の設計や安全な運転を行う際に重要な動的要素として考慮されているが、旋回スロッシングが発生した場合の攪拌槽との共振現象についての研究は未知な部分が多く、運転の際の新たな危険因子として検討の必要がある。

そこで本章では、攪拌装置の固有振動数を測定結果と旋回スロッシング発生時の攪拌装置の振動加速度の周波数解析から、旋回スロッシングが及ぼす攪拌槽の共振現象への影響について検討した。

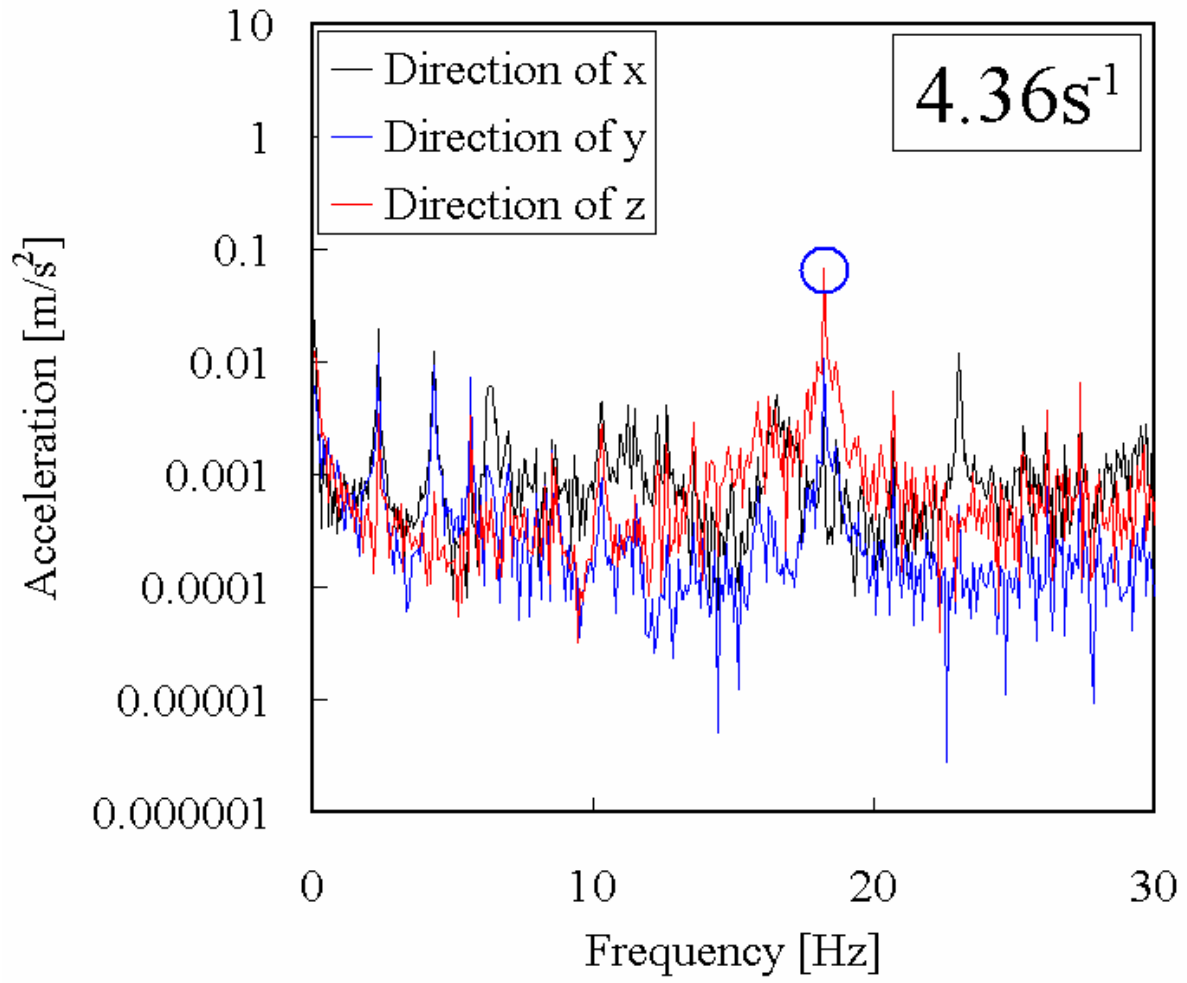
4.2 攪拌機の共振現象

(Resonance phenomena in a stirred vessel)

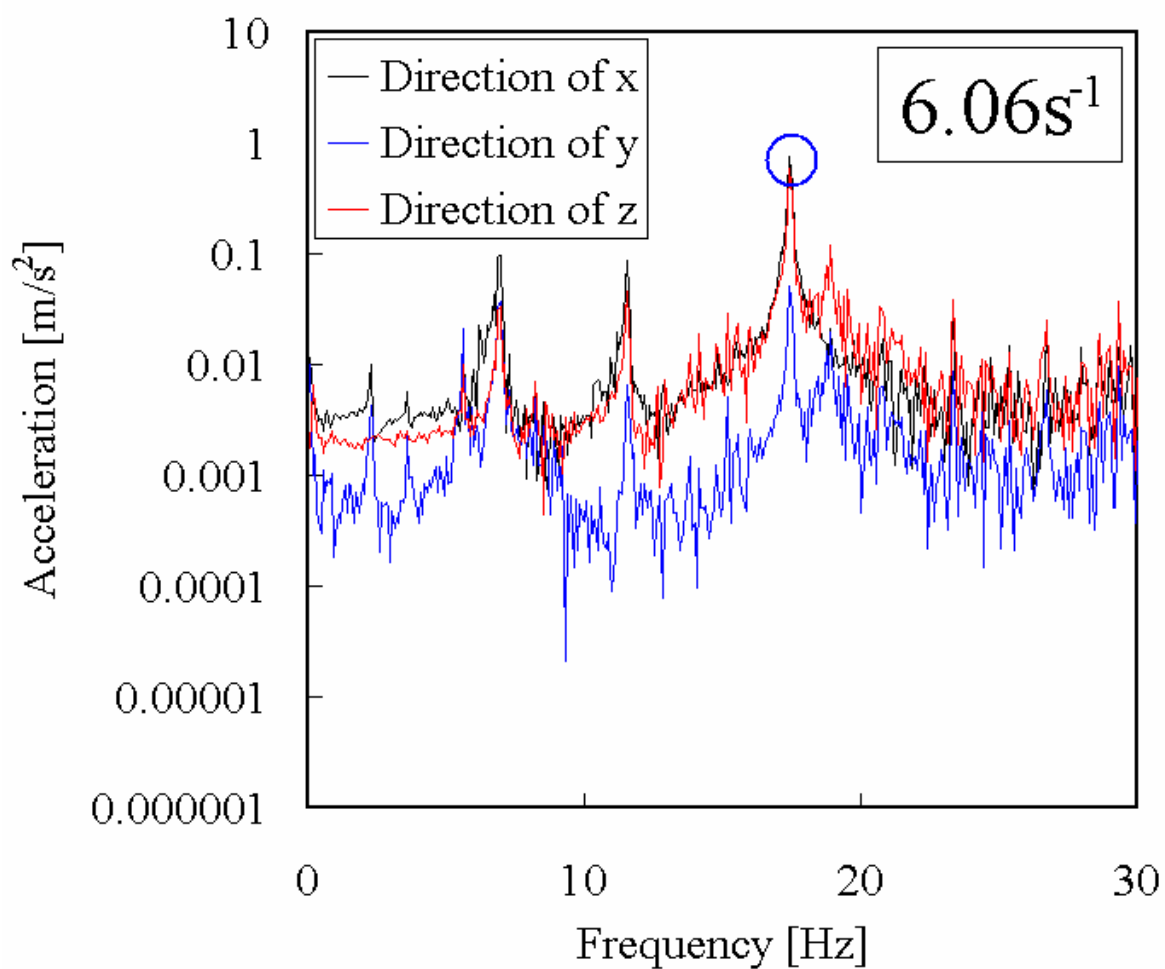
一般に攪拌翼回転時に攪拌機に発生する共振現象としては、翼回転に起因する振動と攪拌機の固有振動数が一致することによるものがある。攪拌運転時に旋回スロッシングが発生した場合には、前章の結果から、これ以外にも液面の振動現象である旋回スロッシングに起因する振動が発生することがわかった。このことから、旋回スロッシングに起因する振動によって攪拌機が共振現象を起こす可能性がある。そこで、旋回スロッシングに起因する振動である Eq.(2-1) の f_p と攪拌機の固有振動数 f_n が一致するときの攪拌機の振動のスペクトル分布を確認した。その詳細としては、6 枚翼の場合(Fig.4-1 a)), 17.7Hz に z 方向に大きな振動のピークが、4 枚翼の場合(Fig.4-1 b)), 18.8Hz の z 方向に大きなピークが、2 枚翼の場合(Fig.4-1 c)), 17.3Hz の z 方向に大きなピークが確認できた。以上のことから、それぞれの翼枚数において共振していることがわかった。さらに、他の固有振動数と一致する f_p においても同様の共振が確認できた。



a) 6-blade impeller
 $(f_n=17.7\text{Hz}, f_s=2.3\text{Hz}, n_p=6, m=36, n=4.92\text{s}^{-1})$



b) 4-blade impeller
($f_n=18.8\text{Hz}$, $f_s=2.3\text{Hz}$, $n_p=4$, $m=32$, $n=4.36\text{s}^{-1}$)



c) 2-blade impeller
 $(f_n=17.3\text{Hz}, f_s=2.3\text{Hz}, n_p=2, m=8, n=4.92\text{s}^{-1})$
 Fig.4-1 Spectrum distribution of stirred vessel

第五章 結論(Conclusion)

5.1 結論(Conclusion)

本研究では、攪拌軸の折損メカニズム、そして攪拌機の振動メカニズムを解明することを目的とし、旋回スロッシングに及ぼす攪拌槽諸元の影響、旋回スロッシング発生時の共振現象について検討した結果を以下にまとめた。

1. 旋回スロッシングの発生領域とその条件

(The conditions for generating rotary sloshing)

発生領域：攪拌流体を注入していく際、液面が攪拌翼下端に触れた直後より翼上端付近までで発生する。それ以上の液高さでは、旋回スロッシングからボルテックスに遷移していくことがわかった。

発生の条件：翼回転数が旋回スロッシング周波数以上の領域において発生

2. 旋回スロッシング周波数に及ぼす攪拌槽諸元の影響

(The influence of operational conditions on the rotary sloshing frequency)

槽径の影響：槽径の増加に伴い単調減少する。

翼径の影響：翼径の増加に伴い単調増加する。

液高さの影響：液高さの増加に伴い増加していき、徐々に一定になる。

回転数の影響：回転数の増加に関係なく一定の値をとる。

以上の結果と円筒形容器が外部加振を受けたときのスロッシング周波数 f を修正することにより、旋回スロッシング周波数 f_s の相関式を導出した。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} [(3.68g/D) \tanh(3.68H_L/D)]^{0.5} \times [0.7(d_p/D) + 0.8]_{(1)}$$

3. 旋回スロッシングに起因する振動

(The vibration induced by rotary sloshing)

旋回スロッシング発生時には、旋回スロッシングに起因する振動が発生し、この振動が固有振動数と共振現象を起こすことがわかった。また、その振動についての実験式を導出した。

$$f_p = \frac{m}{n_p} (n - f_s) + f_s \quad (2)$$

5.2 攪拌機の操作指針

旋回スロッシングは一般的な攪拌の操作条件を検討する際には、重要な検討事項であり、また、様々な問題を引き起こす可能性がある。そこで、既往の研究により提案された安全な操作指針に新たな事項を加えた指針を立てることができた。

操作指針

1)攪拌操作を軸の折損につながる共振現象が起こらないように、攪拌翼が十分攪拌流体に浸るまで、液面揺動が起こり始める回転数より低い回転数で運転し、翼が流体に十分浸ってから回転数を上げていくことが必要である(1)。

2)旋回スロッシングの発生がやむ終えない操作を行う際には、攪拌翼の固有振動数を事前に測定し、式(1)、(2)より旋回スロッシング周波数、共振現象の発生する危険回転数を事前に予測し、その危険回転数付近での攪拌機の運転を避けることが重要である。

以上

使用記号

b_w = width of impeller blade	[m]
D = diameter of stirred vessel	[m]
d_p = diameter of impeller	[m]
f = sloshing frequency	[s ⁻¹]
f_n = natural frequency of stirred vessel	[s ⁻¹]
f_p = peak value of vibration for stirred vessel	[s ⁻¹]
f_s = rotary sloshing frequency	[s ⁻¹]
g = gravity	[m•s ⁻²]
H_L = liquid high	[m]
m = integral number	[-]
n = rotational speed of impeller	[s ⁻¹]
n_p = number of impeller blade	[-]

参考文献

- 1)化学工学会：ミキシング技術，槇書店，pp1
- 2)高薄一弘：攪拌・混合におけるトラブル発生要因と防止対策，技術情報協
- 3)佐竹化学機械工業株式会社：攪拌技術，佐竹化学機械工業株式会社，1992
- 4)Strohmeier,K. and R. Holzl：Vibration damage to a Bio-Reactor, Chem.Eng.Technol, Vol.21, pp365-367, 1998
- 5)本間大士：法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士論文，2004
- 6)青木株式会社：攪拌機講座，2004，2005
- 7)長松昭男：モード解析入門，コロナ社，pp229-338，1993
- 8)橋本弘之：液体スロッシング問題の現状，日本機械学会誌，Vol.48, pp512-517, 1986
- 9)Kato,Y. et al.：Improvement of Particle Dispersion in a Shaking Vessel with Current Pole, J.Chem.Eng.Japan, Vol.29, pp697-701, 1996
- 10)Kato,Y. et al.：Measurement of Mass Transfer Rate from Free Surface in Shaking Vessel Type Bioreactor, J.Chem.Eng.Japan, Vol.30, pp362-365, 1997
- 11)Kato,Y. et al.：Mixing Performance of a Reciprocally Shaking Vessel, J.Chem.Eng.Japan, Vol.36, pp663-667, 2003
- 12)Kato,Y. et al.：Solid-Liquid Mass Transfer and Critical Frequency for Complete Suspension in a Shaking Vessel, J.Chem.Eng.Japan, Vol.36, pp1410-1414, 2003
- 13)木村康治ら：定常回転する円筒容器内の液面揺動の固有振動数（楕円形振動モード），Vol.60, pp374-379, 1994
- 14)高原弘樹ら：ピッチング励振を受ける円筒容器内液面の周波数応答解析，日本機械学会論文集（C編），Vol.60, pp1210-1216, 1994
- 15)Su,T.C. and Y.Wang; “Numerical Simulation of Three-Dimensional Large Amplitude Liquid Sloshing in Cylindrical Tanks Subjected to Arbitrary Excitations,”A.S.M.E.PVP, Vol.191, pp 127-148, 1990
- 16)設楽守良ら：円筒容器内気液二相噴流の旋回現象の発生条件，鉄と鋼，Vol.90, pp345-350, 2004
- 17)Iguchi,M. et al.：The Swirl Motion of Vertical Bubbling Jet in a Cylindrical Vessel, ISIJ.Int, Vol.33, pp1037-1044, 1993
- 18)Yoshida,J. et al.：Proposal of novel Agitation Method Using Swirl Motion of Molten Metal Jet, ISIJ.Int, Vol.43, pp1890-1896, 2003
- 19)Senda,K. and K.Nagasawa：On the vibration of an Elevated water Tank □, Tech.Rep.of Osaka Univ, Vol.117, pp247-264, 1954

謝辞

本研究を行うに際し、適切なご助言ならびに誠意あるご指導を賜りました法政大学工学部機械工学科 新井 和吉 教授に厚く御礼申し上げます。

また、振動計測装置(貸与許可)、三軸圧電型加速度計(寄付)および有益な討議をして頂いた同大学工学部機械工学科 長松 昭男 教授に心より感謝いたします。

さらに、貴重なご指導、ご助言などを賜りました同大学工学部機械工学科助手 岩原 光男 先生に深く感謝の意を表します。

また、ご多忙中、本研究の実験等、終始懇切なるご協力を賜りました、同大学工学研究科機械工学専攻 長松研究室 修士1年後藤 裕太氏に心より御礼申し上げます。

そして、共同研究者として研究および有益な討論をして頂いた本学大学院工学研究科 機械工学専攻 修士課程 1 年 伴 康隆氏、本学機械工学科 4 年 村井 伸太郎氏、八尋 正人氏に深く感謝するとともに、心より御礼申し上げます。

最後になりましたが、共に新井研究室で研究を行い、有益な討論、そして多大なご協力を頂きました本学大学院工学研究科機械工学専攻 修士課程 2 年 岸本 武亮氏、小林 良江女史、中神 正智氏、原 彩水女史、福澤 直也氏、同課程 1 年 小山 修人氏、野中 雅浩氏、美濃輪 秀明氏に心よりお礼申し上げます。