

卒業論文

T字分岐管の

気液二相流の流動様式に

及ぼす影響

通し番号 1 - 6 2

平成 1 5 年 2 月 7 日 提出

指導教官 庄司正弘 教授

丸山茂夫 助教授

1 0 2 0 3 平兼 慎司

記号一覧

P	: 圧力
W	: 質量流量
X	: 乾き度・クオリティ
J	: みかけ速度 (m/s)
	: 標準偏差

添え字

G	: 気相
L	: 液相

目次

第1章 序論

1 - 1	研究の背景	6
1 - 2	気液二相流の流動様式	7
1 - 3	従来の研究	9
1 - 4	本研究の目的	11

第2章 実験装置と手順

2 - 1	実験装置の仕様	13
2 - 2	実験装置	14
2 - 3	実験の手順	18

第3章 実験結果

3 - 1	垂直T字管・垂直直管比較実験	20
3 - 2	垂直直管脈動実験	35

第4章 考察

4 - 1	流動様式について	4 8
4 - 2	流路形状の影響について	5 1
4 - 3	脈動現象について	5 3

第5章 結論

5 - 1	結論	5 8
5 - 2	今後の課題	5 9

参考文献

謝辞

第 1 章 序論

1 - 1 研究の背景

1 - 2 気液二相流の流動様式

1 - 3 従来の研究

1 - 4 本研究の目的

1 - 1 研究の背景

同一管路内を気体と液体が流れる気液二相流は原子力発電所や熱機関の冷却系機器，ランキンサイクルを利用した蒸気機関や冷凍サイクル，石油パイプラインや各種化学プラントの配管などに工業的に広く使われている．また，近年では蒸気圧縮式冷凍機の効率の向上やコンパクト化の手段として熱交換器の細管化や，電子機器の冷却，冷凍機，微小機械等に関して，マイクロチューブ内の流動や伝熱なども研究されるようになってきた．しかし，流れる気液二相流は気液の流量比や流れの方向によって様々な流動様式をとり，その流動様式に応じて流動機構や伝熱過程の特性も変化し，複雑な流れを持つ特徴がある．そのため，分岐管における気液二相流の流れは非常に複雑となり，流れの時間変動や脈動を伴う．上述したように気液二相流は工業的に広く使われており，それらの機器の性能予測をより正確に行うために，流動様式を判定・予測する方法の確立が求められている．

1 - 2 気液二相流の流動様式

気液二相流の気相と液相の界面は、両者の持つ物理的性質(密度, 粘性係数, 表面張力など)の違い, あるいは流路管内の流動条件(温度, 圧力, 流量など)の違いに起因し, 様々な幾何学的形状を呈している。また, 気液相分布は, 時間及び空間的に変動する。そのため, 気液二相流の様相は非常に複雑であり, 気液二相流の流動機構の定式化あるいはモデルによる表現は, 非常に困難である。従って, 気液二相流の流動状態をいくつかの標準形, 即ち流動様式に分類し, それにより気液二相流問題の取り扱いを単純化するとともに気液両相の持つ性質とそれらの時空間分布を明らかにしようとする研究が多くなされている。

以下に気液二相流の代表的な流動様式を示す。

垂直管内流

気相の容積流量が液相よりかなり小さい場合には, 気相は不連続で, 液中に気泡状に分散した流れになり, この流動様式を**気泡流 (bubbly flow)**という。気相流量を増加すると, 幾つかの気泡が合体し, 管断面をほぼ満たすような大きい気体プラグに成長するため, 流れは**スラグ流 (slug flow)**という小気泡を含む液体スラグと気体プラグが交互に流れる状態となる。液相流量が大きい場合は, 気体プラグは歪んだ状態となり, また液体スラグ中に多数の気泡を含んだ状態となる。この状態を**チャーン流 (churn flow)**, または froth flow, semi-annular flow と呼ぶこともある。気相流量がさらに増加すると, 液相は壁面方向に押しやられ管壁に沿った環状液膜として流れ, 気相は管中心部を連続的にかなりの流速で流れる状態となり, この状態を**環状流 (annular flow)**, または**環状噴霧流 (annular-dispersed flow)**という。垂直管内流の流動様式を図 1-1 に示す

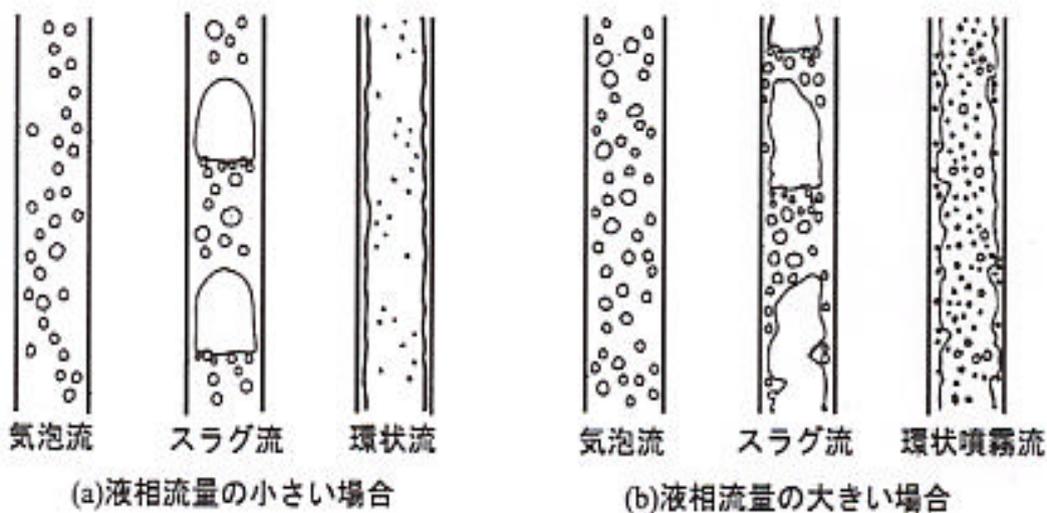


図 1-1 垂直管内流の流動様式

水平管内流

二相流の流量が低い場合は、液相は管底面に沿って流れる。上部を流れる気相はその流量により、不連続に流れる気泡流またはせん状流(plug flow)、連続に流れる成層流(stratified flow)がある。気相流量を増加すると、気液界面が波立ち、波状流(wavy flow)、またはスラグ流となり、さらに気相流量を増すと、液の一部が飛散して環状流または環状噴霧流となる。液相流量の大きい場合の流動様式は垂直管の場合とほぼ同じである。水平管内流の流動様式を図 1-2 に示す

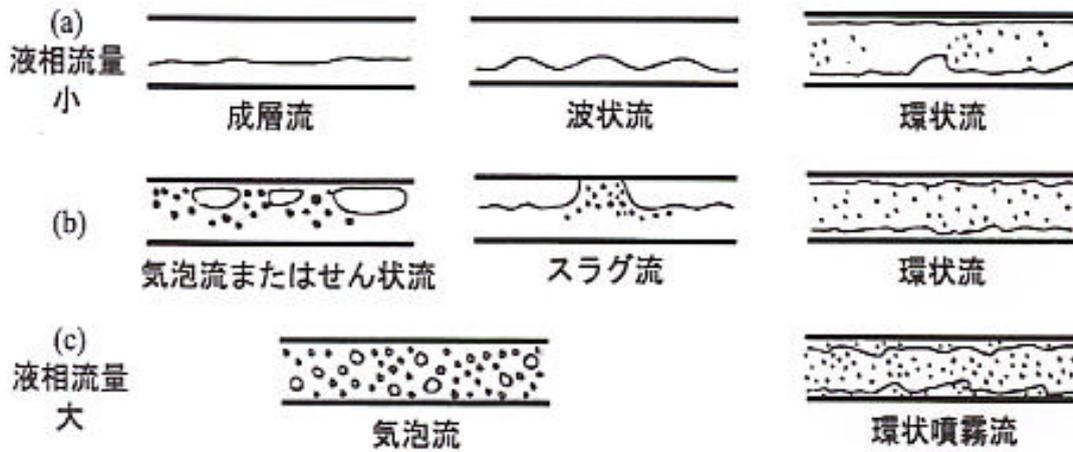


図 1-2 水平管内流の流動様式

1 - 3 従来の研究

気液二相流の流動様相に関する研究は数多くされているが、以下に具体的な研究例を示す。

1 - 3 - 1 流動様式線図

気液両相の流量，路形状，寸法などの条件に対して，どのような流動様式が生じるのかの推定は，従来，流動様式線図に基づいて行われている．これまでに多くの流動様式線図が報告されているが、その中でも比較的信頼性が高く代表的な垂直管のものを紹介する．また，流動様式線図は，実際に二相流が見られる管の設計において一助となっている．

* Griffith - Wallis 線図

Griffith と Wallis (1961) は、垂直管内を流れるスラグ流の流動挙動に着目し、内径 0.5、0.75 及び 1 インチの空気 - 水二相流と内径 2.34 インチの蒸気 - 水二相流の実験を行い、気体スラグ上昇速度や気体スラグ長さ等を詳細に調査する一方で、フルード数 (F_{rm}) と気体の体積流量比を座標軸とする流動様式線図を作製している．

* Taitel-Dukler 線図

Taital と Dukler (1980) は、各流動様式の遷移機構をモデル化し、気液の見かけ速度 (j_G, j_L) を座標軸とする **fig 1** のような流動様式線図を報告している．これによれば、チャーン流はスラグ流への過渡的流動状態であり、スラグ流とチャーン流との境界線は、気液混合室からの助走距離によって変化するということである．

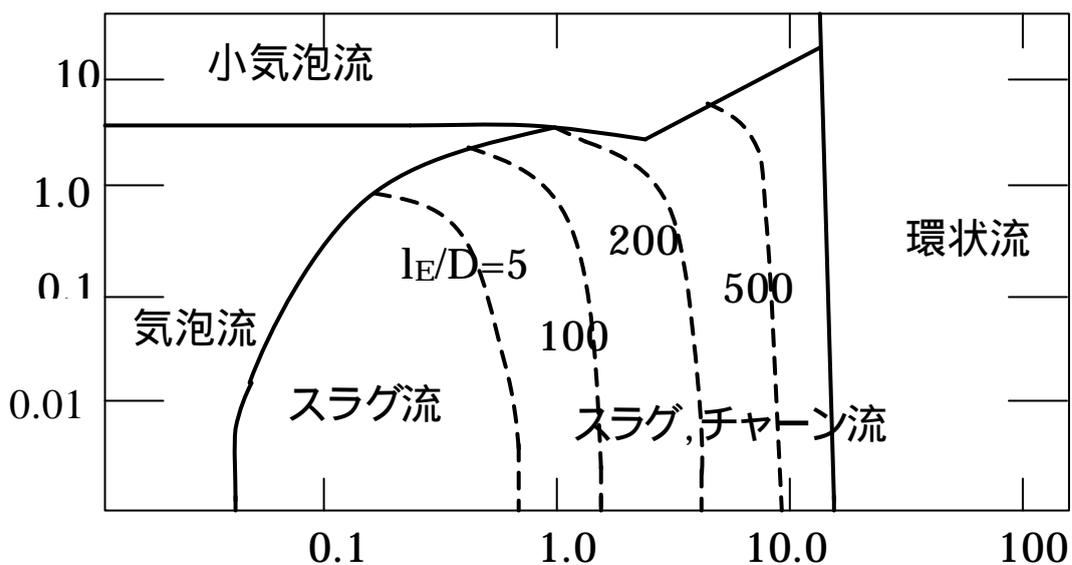


Fig.1 Taitel-Dukler 線図

1 - 3 - 2 高速 X 線 CT による計測

・三澤，高田，菊池の研究

高速 X 線 CT が測定対象物を透過するときにかかる減衰を利用している．通常の CT 計測では，移動・変形対象物の内部を可視化することは測定できないので，医療用 X 線 CT の約 250 倍の速度でスキャンできる電子ビーム制御型高速 X 線 CT を用いている．

1 - 3 - 3 差圧測定による流動様式

X 線を用いた流動様式の同定法は，非接触で計測できる等の利点はあるものの，設備が高価であり，実際にプラントで利用することは難しい．そこで，比較的安価に計測が可能であり，流動様式の特長も含まれていると言われている差圧に注目した研究が行われている．

松井らによる実験

松井ら（1981）は，内径 22 mm の垂直管内を流れる窒素 - 水二相流の差圧変動信号を測定し，その統計的性質（PDF，PSD，相互相関関数，平均値及び分散）から気泡流，スラッグ流，チャ - ン流及び環状流を分類している．

1 - 4 本研究の目的

最終的な目標は気液二相流の流動様式の決定因子を確定し計測により流動様式を判定・予測できるようにすることである。

T字分岐管における気液二相流の流動様式についての研究が同研究室においてなされているが、その際、流路形状が垂直上昇する気液二相流の流動様式に及ぼす影響を検証する必要があるため、本研究においてはまず垂直T字分岐管と垂直直管との比較実験を行い、T字分岐の影響を調べる。次に、垂直上昇管の特徴的現象である脈動現象に注目し、その条件やメカニズムを理解することを目的とする。

第 2 章 実験装置と手順

2 - 1 実験装置の仕様

2 - 2 実験装置

2 - 3 実験の手順

2 - 1 実験装置の仕様

空気 - 水気系気液二相流をテストセクションに供給し、垂直直管の流動様式を観察しながら開放端近傍の圧力変動を測定する装置である。

実験条件

- ・作動流体 : 空気・水道水
- ・流路 : 管径 15mm, 管長 1500mm の垂直上昇管
- ・空気流量範囲 : 500 ml/min ~ 500 l /min
- ・水流量範囲 : 0.10 l/min ~ 15 l/min

去年の実験装置からの改良点は、T字分岐部を取り外して上昇端部を大気開放とし、差圧計を開放端部近傍（垂直管下端から高さ 1200mm, 差圧間隔 80mm）に取り付けて脈動現象の際の差圧変動を計測できるようにしたこと、である。

2 - 2 実験装置

2 - 2 - 1 実験装置の概略

実験装置の概略図を図 2-1 に、写真と図を図 2-2 に示す。

実験装置における流体の流れは以下の通りである。

- 1, 空気をコンプレッサから混合室に送る。
- 2, 水道水をフィルタに通し、不純物を取り除いた水を混合室に導く。
- 3, 混合室で作られた気液二相流は、垂直上昇管を經由し、大気開放されている水槽に達する。
- 4, 開放端から噴出した気液二相流は、開放端上部に置かれた斜板によって、逆流することなく気相と液相に分離される。
- 5, 分離された空気は大気に開放される。
- 6, 水槽に蓄えられた水は逆流しないように常時排水される。

2 - 2 - 2 実験装置の詳細

- ・コンプレッサ (日立製 5.5P-9.5VA5 50Hz 170 l)
- ・入口側気相流量計
コンプレッサから混合室に向かう空気の流量をフロート式流量計 (OMEGA 製 SMA-250 型×2, SMA-1 型) により測定した。流量範囲が 0.5 ~ 5l / min , 5 ~ 50l / min , 50 ~ 500l / min の 3 本の流量計を用いた。
- ・水道水用フィルタ (ADVANTIC 製, プラスチックハウジング IPC)
地下実験室の水道水は不純物を含んでいる可能性があるため、フィルタを通しろ過した。
- ・入口液相流量計
フィルタにより不純物をろ過した水の流量をフロート式流量計 (OMEGA 製 TM3-30) により測定した。流量範囲が 0.1 ~ 2.0l / min の流量計を用いた。
- ・気液混合室
空気と水を混合させる黄銅製の混合室である。混合室内を多孔質状にすることで小さな気泡を発生しやすくしている。空気は混合室下部中央から、水は混合室側面から水平に流入させる構造になっている。
- ・母管
気液混合室と水槽を結ぶ内径 15mm, 外径 25mm, 管長 1500mm の透明なアクリル製のパイプである。

- ・ 水槽

内径 21mm の排水口を持ち，上部は大気開放されたアクリル製の水槽である．溜まった水が母管に逆流しないように常時排水されている．また，母管から噴出した気液二相流が再び母管に戻って系を乱すことがないように，噴出部には斜板が取り付けられている．

噴出部の写真を図 2-3 に，水槽の写真を図 2-4 に示す．

- ・ 差圧計（VALIDYNE 製 DP55 可変リラクタンス圧カトランスデューサ）

噴出部近傍の差圧変動を計測した．差圧計取り付け部を図 2-5 に示す．

- ・ アンプ（VALIDYNE 製 PA2101 model 280）

- ・ デジタルレコーダー（TEAC 製 DR-M3 MK2）

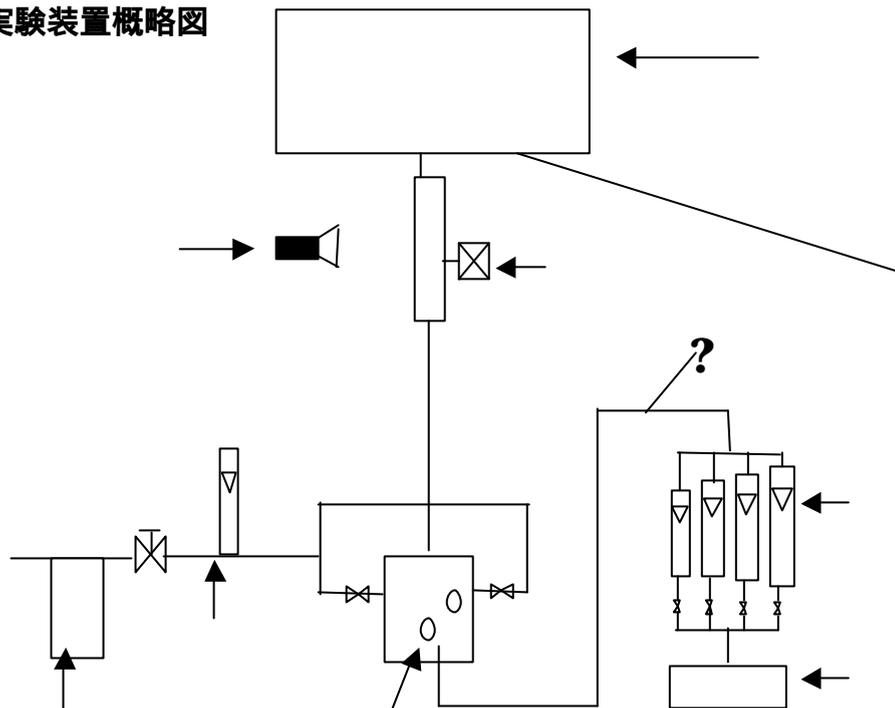
- ・ 高速ビデオカメラ（PHOTRON 製 FASTCAM-Net Max）

流れの様子を観察するために，開放端部を 250FPS で約 8 秒間撮影した．

- ・ 光源（岩崎電気 PSR100V500W）

ビデオカメラでの撮影のために，開放端部に備えた．

図 2-1 実験装置概略図



Compressor	Air Flow Meter
Filter	Water Flow Meter
Mixing Room	Tank
Differential Pressure Sensor	
High Speed Video Camera	

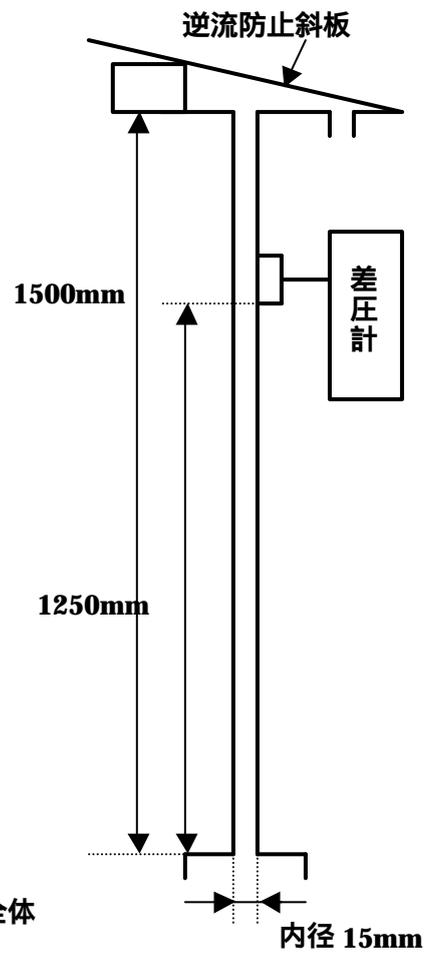


图 2-2 实验装置全体



图 2-3 噴出口写真

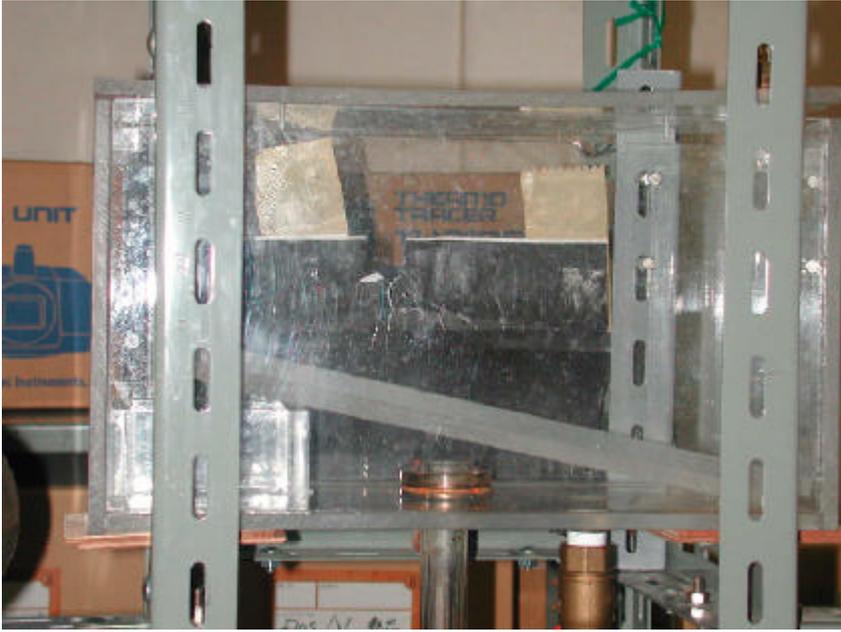


图 2-4 水槽写真

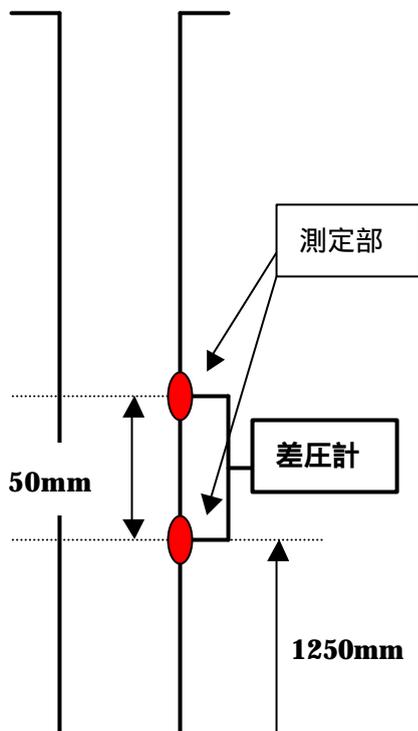


图 2-5 差圧取り付け部

2 - 3 実験の手順

2 - 3 - 1 実験手順の概要

作動流体は空気 水二相流である．それぞれの流量をフロート式流量計により計測した後，混合室に導き，混合室内で二相流となった流れは内径 15mm，管長 1500mm の垂直上昇管である母管へと流れ出し，差圧計を取り付けた計測部を経て水槽に噴出する．差圧計の出力はデジタルレコーダーに記録した．それぞれサンプリング周波数は 200kHz，測定時間は 30 秒とした．また，高速ビデオカメラにより測定部および噴出部における流動状態を観測した．

2 - 3 - 2 実験手順

準備

実験装置の垂直を確認する．

- ・非垂直が確認されたら実験装置を調整して，垂直が確認されるまで調整を繰り返した．
- 差圧計を校正する．

本実験

実験装置に水を導く．

コンプレッサで空気を圧縮する．

圧縮空気およびフィルターにてろ過された水を気液混合室に導き，気液二相流を作る．

気液各相の流量をフロート式流量計で調整し，系が安定するまで待つ．

系が安定したら，差圧計の出力を測定する．

同時に，高速ビデオカメラで計測部を撮影し，流動を観察する．

第3章 実験結果

3 - 1 垂直 T 字管・垂直直管比較実験

3 - 1 - 1 測定条件

3 - 1 - 2 実験結果

3 - 2 垂直直管脈動実験

3 - 2 - 1 測定条件

3 - 2 - 2 実験結果

3 - 1 垂直 T 字管・垂直直管比較実験

3 - 1 - 1 測定条件

本実験は，大気圧下，空気流量 0.4 ~ 100 l/min，水流量 1.0 ~ 15 l/min の範囲で行った．
気液二相流の流入点から母管方向に高さ 1300mm の区間の差圧変動を，垂直 T 字管・垂直直管両方において，サンプリング周波数 200 Hz で 30 秒間測定した．

表 3 - 1 は測定条件である．

水流量 (L/min)	空気流量 (L/min)	水流量 (L/min)	空気流量 (L/min)	空気流量 (L/min)	空気流量 (L/min)
1.4	0.4	3	1	5	1
1.4	1	3	3	5	3
1.4	1.5	3	7	5	5
1.4	2	3	10	5	10
1.4	3	3	12	5	13
1.4	3.5	3	15	5	15
1.4	4	3	20	5	20
1.4	5	3	30	5	30
1.4	8	3	40	5	40
1.4	10	3	50		
1.4	15	3	75		
1.4	20	3	100		
1.4	25	3	125		
		3	150		
		3	175		

表 3 1 測定条件表

3 - 1 - 2 実験結果

差圧変動, パワースペクトル, PDF の比較

同一条件下での垂直T字管および垂直直管の, 差圧変動のグラフ・変動のパワースペクトル・PDF (確率密度関数) を図 3-1-1~3-1-37 に示す。左から, 差圧変動, 変動のパワースペクトル, PDFである。

* 差圧変動のグラフについて

横軸は時間, 縦軸は強度である。時間変化の時間変動を示す。

* 変動のパワースペクトルについて

横軸は周波数, 縦軸は強度である。差圧変動のグラフをフーリエ変換することにより得た。

* 確率密度関数 (PDF) について

横軸は差圧強度, 縦軸は割合である。得られた差圧変動の差圧強度ごとの存在確率を示す。

水量 1.4 L/min における差圧変動比較グラフ(図 3-1-1 ~ 図 3-1-13)

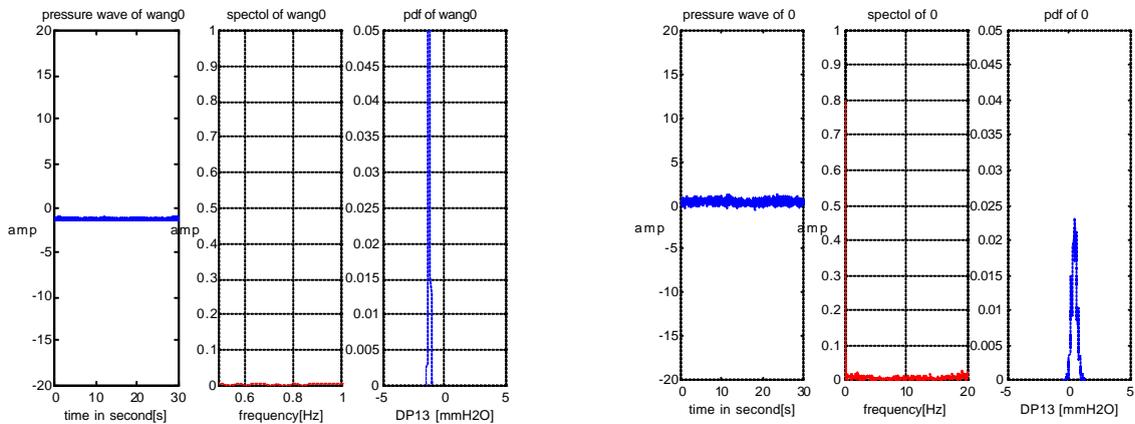


図 3-1-1 water 1.4 L/min, air 0.4 L/min (左:T字,右:直管)

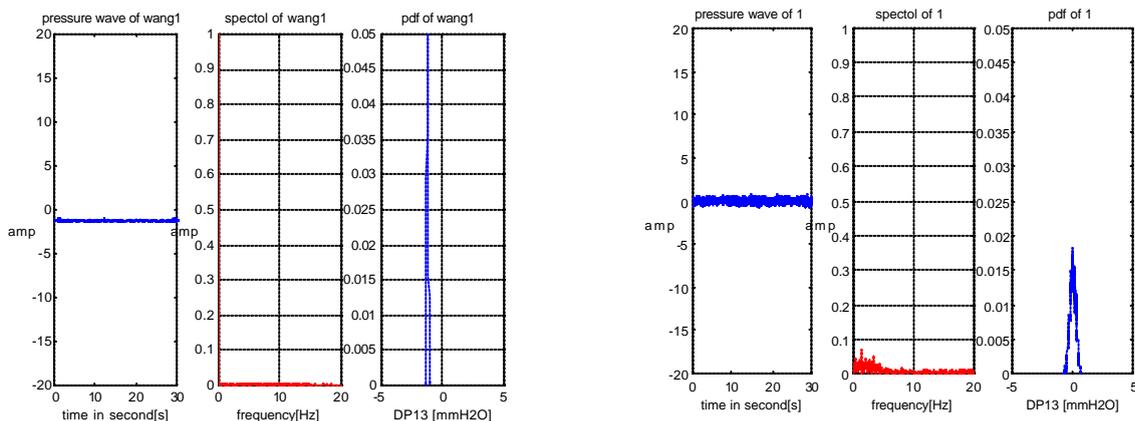


図 3-1-2 water 1.4 L/min, air 1.0 L/min (左:T字,右:直管)

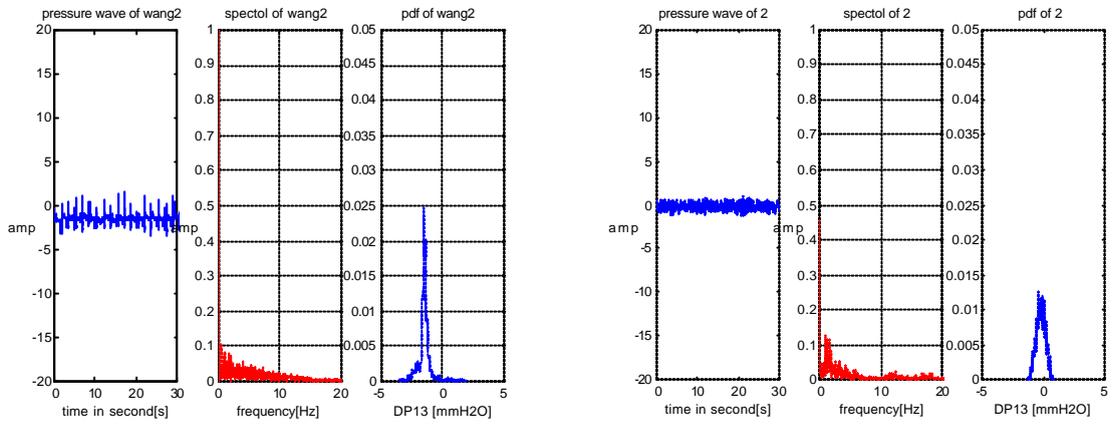


图 3-1-3 water 1.4 L/min, air 1.5 L/min (左:T 字,右:直管)

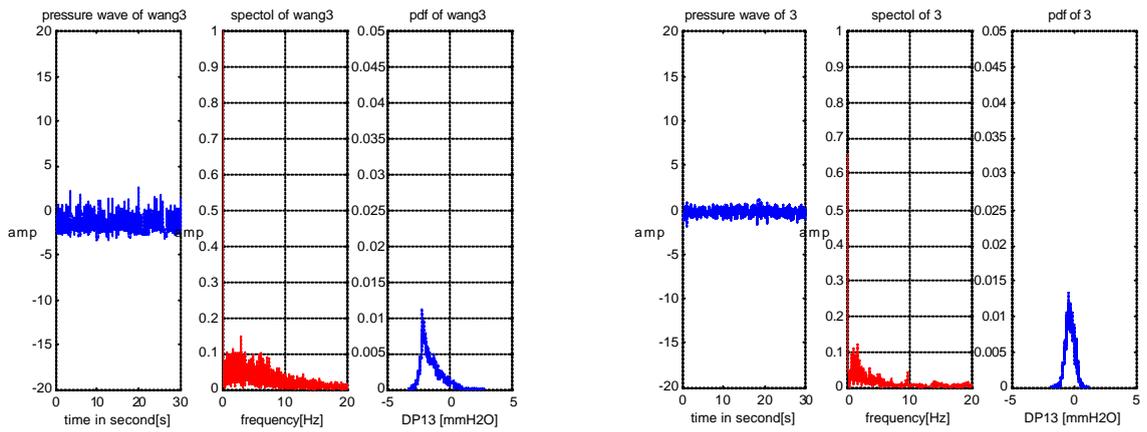


图 3-1-4 water 1.4 L/min, air 2.0 L/min (左:T 字,右:直管)

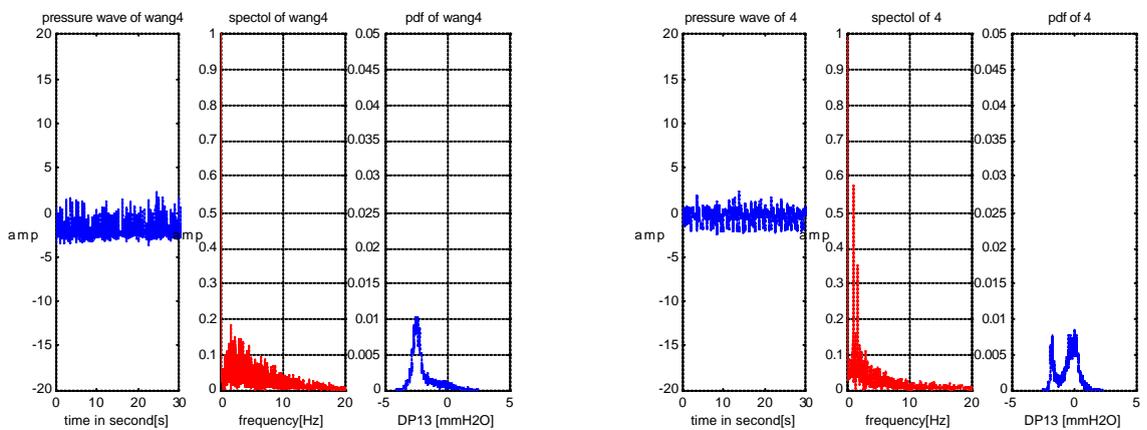


图 3-1-5 water 1.4 L/min, air 3.0 L/min (左:T 字,右:直管)

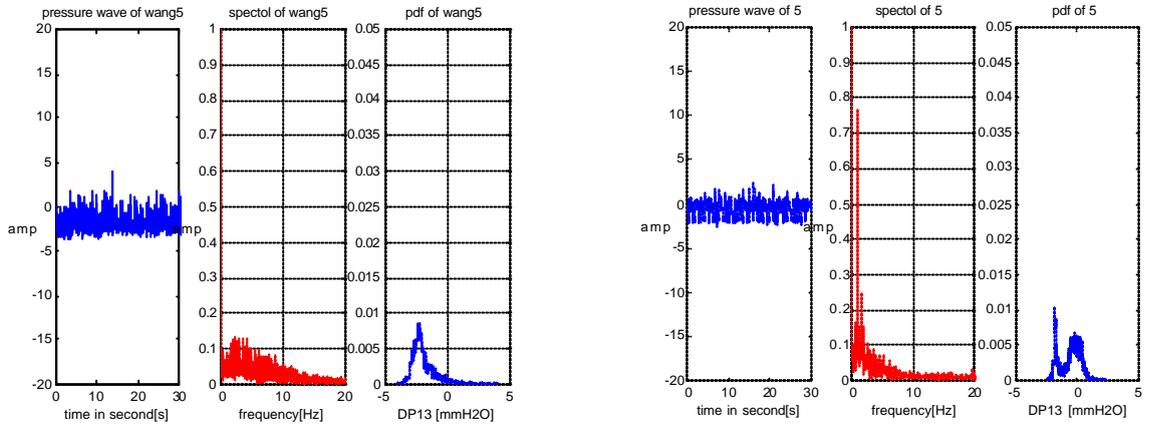


图 3-1-6 water 1.4 L/min, air 3.5 L/min (左:T 字,右:直管)

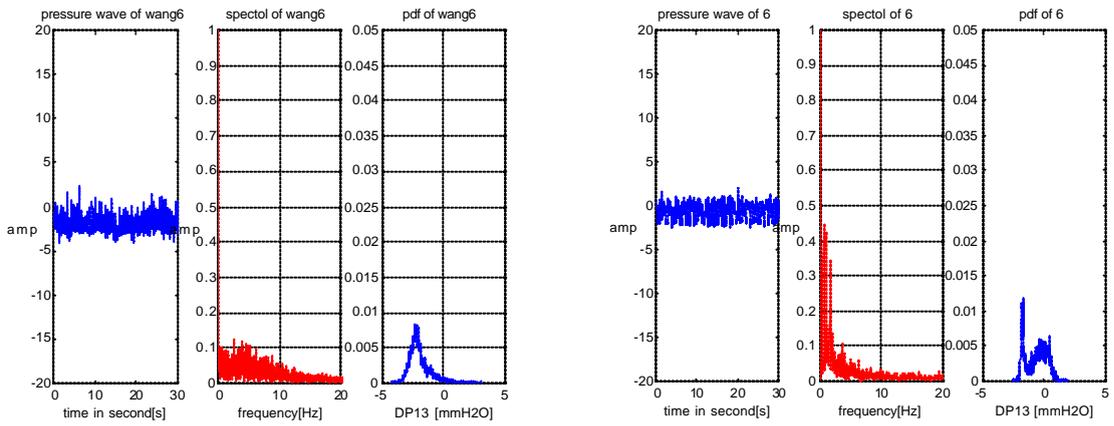


图 3-1-7 water 1.4 L/min, air 4.0 L/min (左:T 字,右:直管)

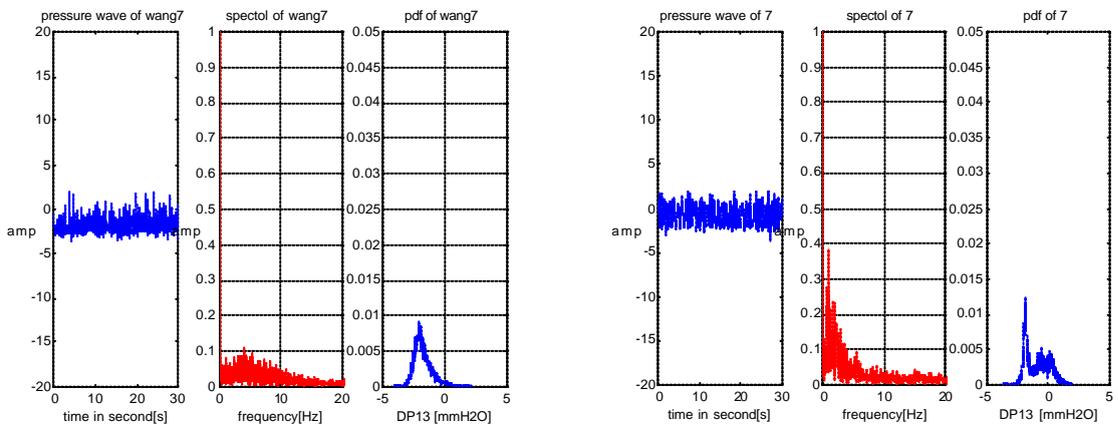


图 3-1-8 water 1.4 L/min, air 5.0 L/min (左:T 字,右:直管)

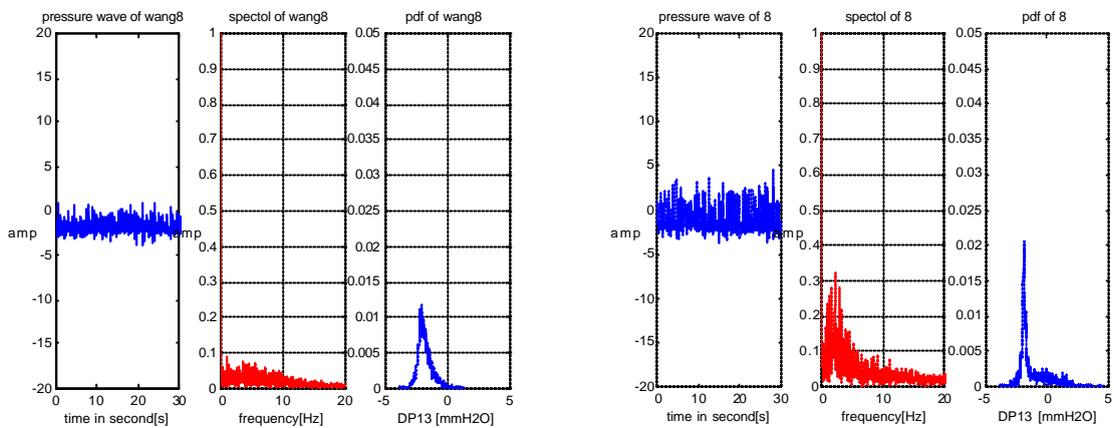


图 3-1-9 water 1.4 L/min, air 8.0 L/min (左:T 字,右:直管)

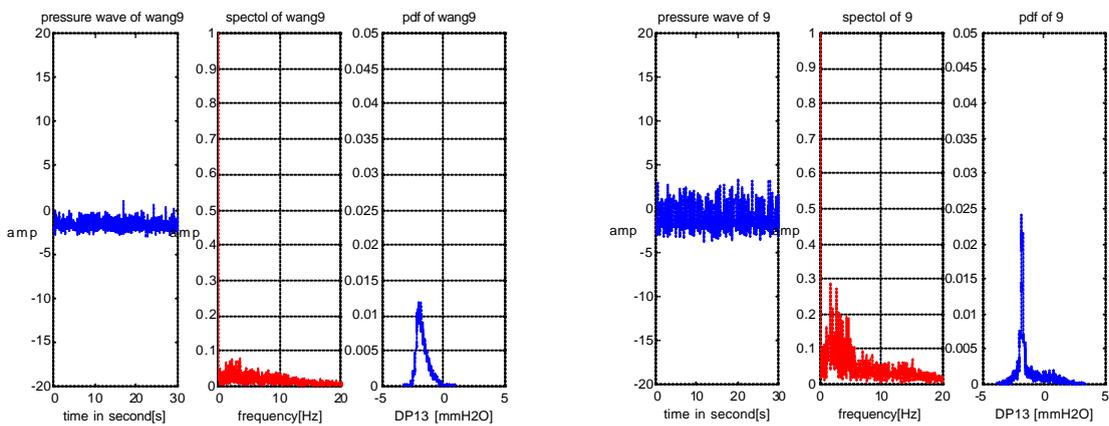


图 3-1-10 water 1.4 L/min, air 10.0 L/min (左:T 字,右:直管)

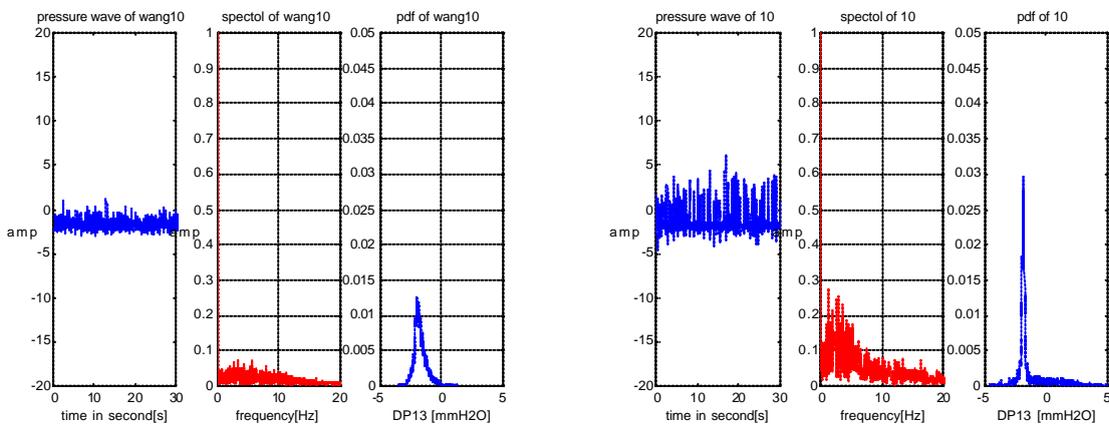


图 3-1-11 water 1.4 L/min, air 15.0 L/min (左:T 字,右:直管)

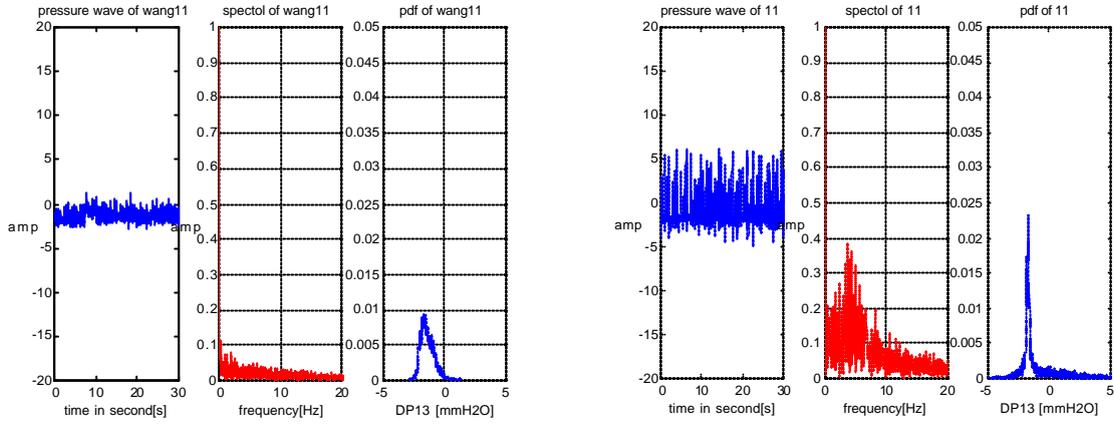


图 3-1-12 water 1.4 L/min, air 20.0 L/min (左:T 字,右:直管)

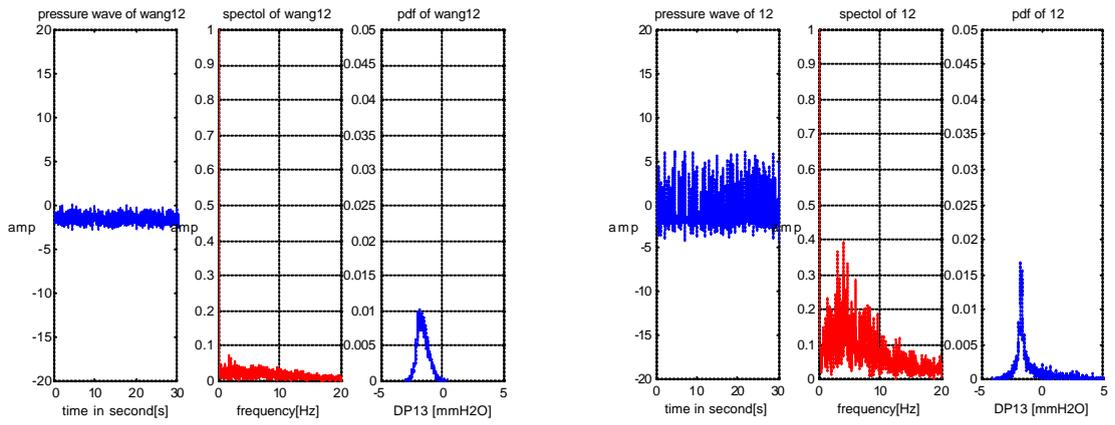


图 3-1-13 water 1.4 L/min, air 25.0 L/min (左:T 字,右:直管)

水量 3.0 L/min における差圧変動比較グラフ(図 3-1-14 ~ 図 3-1-28)

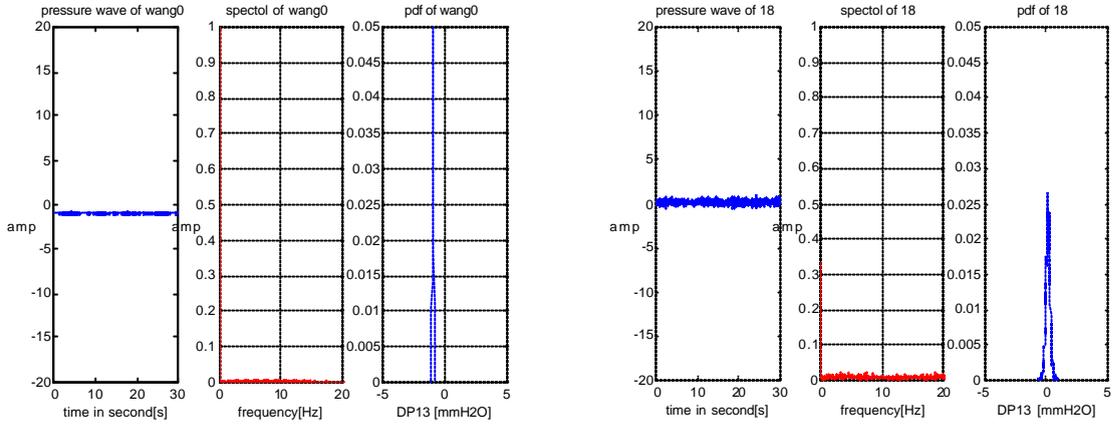


図 3-1-14 water 3.0 L/min, air 1.0 L/min (左:T 字,右:直管)

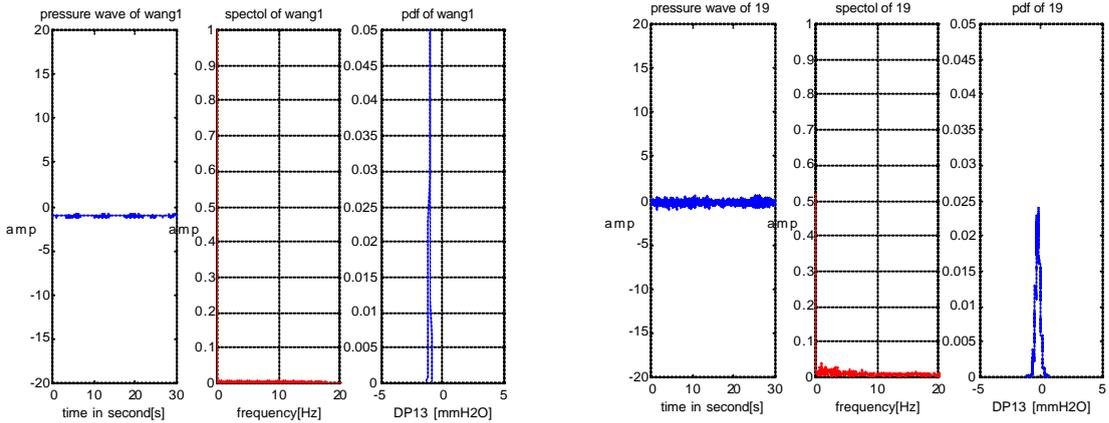


図 3-1-15 water 3.0 L/min, air 3.0 L/min (左:T 字,右:直管)

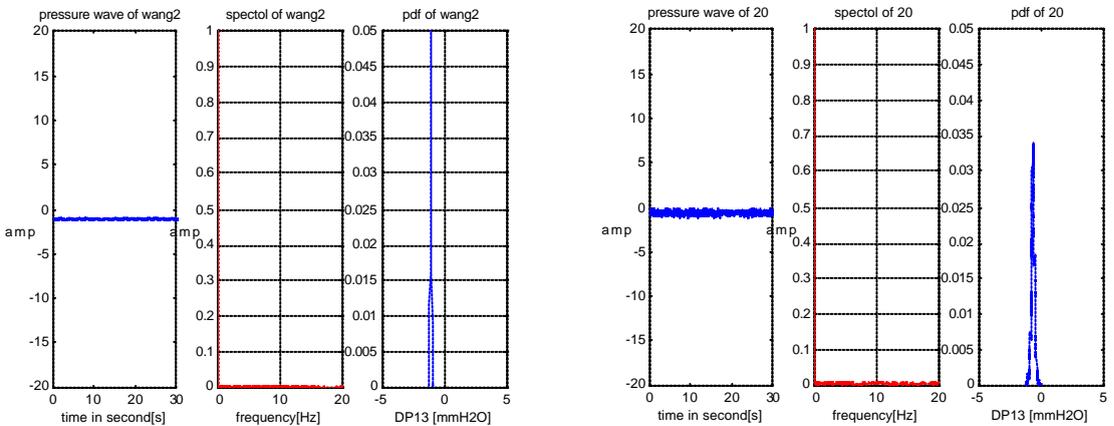


図 3-1-16 water 3.0 L/min, air 7.0 L/min (左:T 字,右:直管)

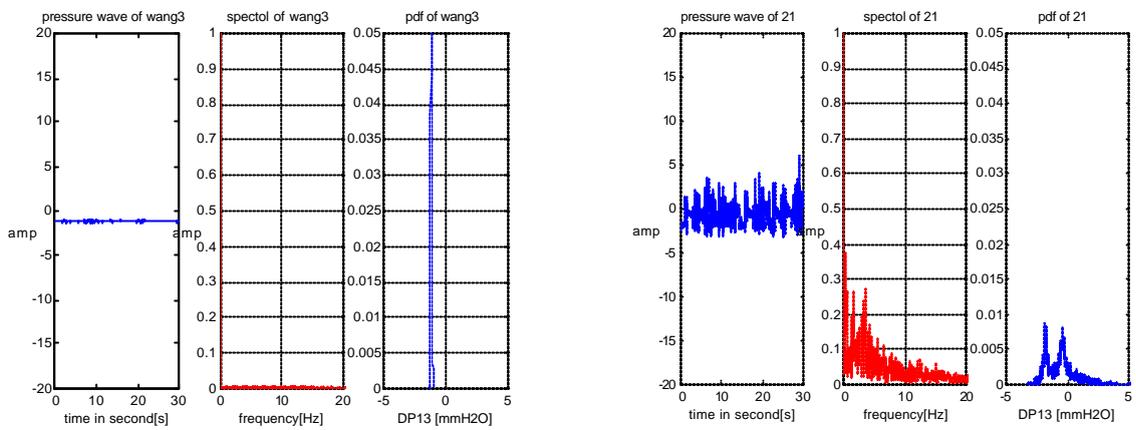


图 3-1-17 water 3.0 L/min, air 10.0 L/min (左:T 字,右:直管)

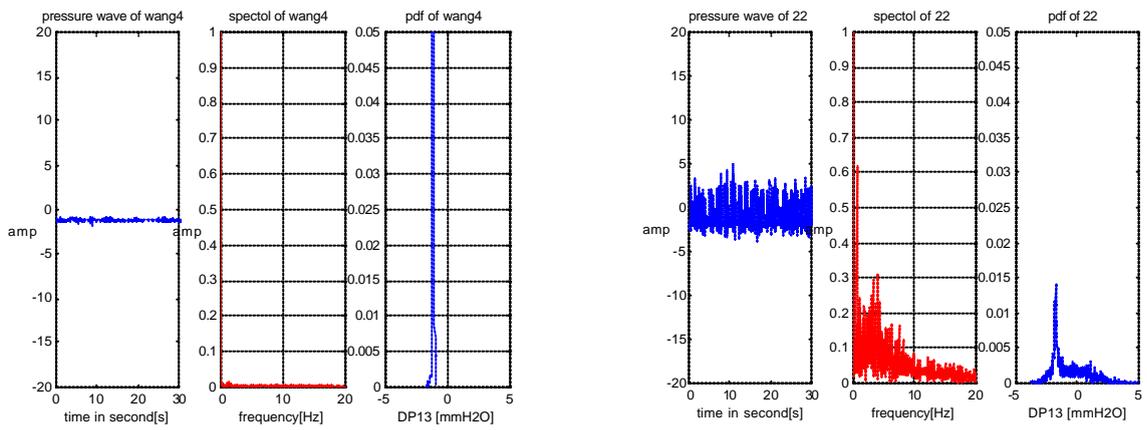


图 3-1-18 water 3.0 L/min, air 12.0 L/min (左:T 字,右:直管)

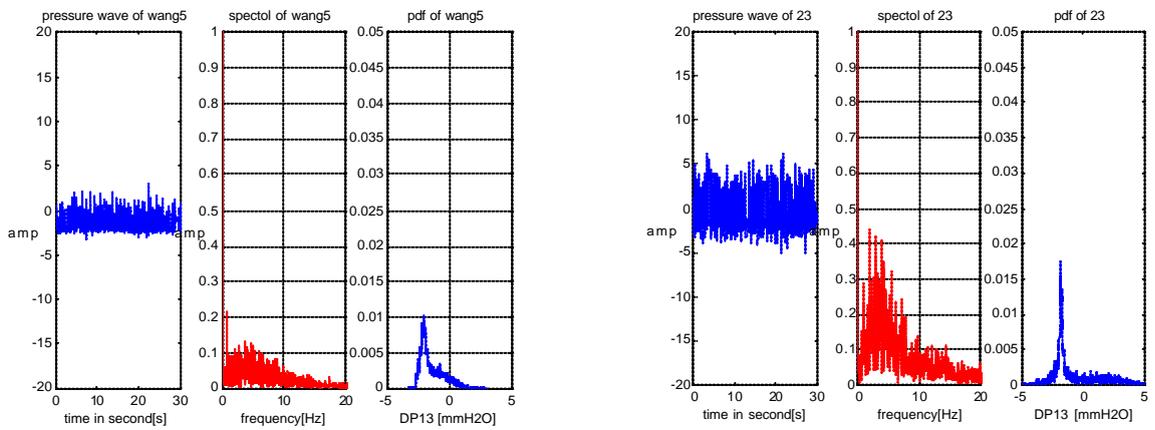


图 3-1-19 water 3.0 L/min, air 15.0 L/min (左:T 字,右:直管)

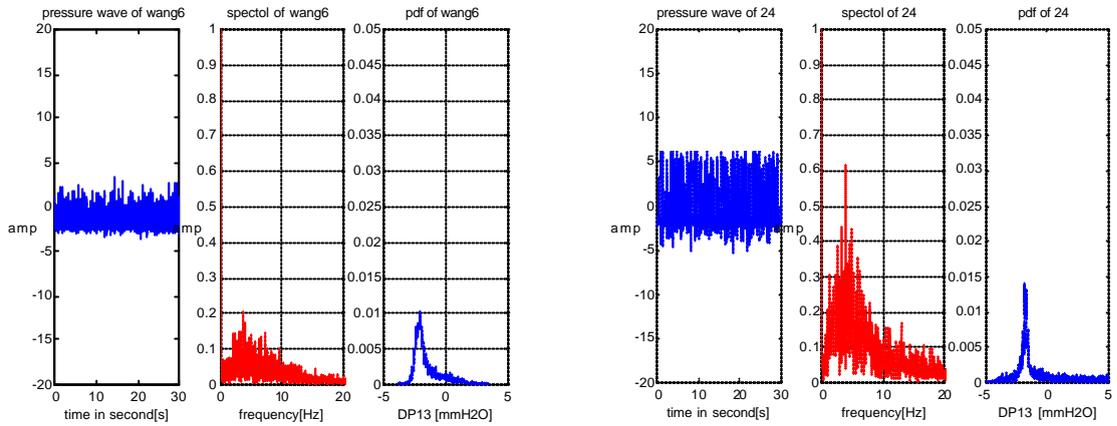


图 3-1-20 water 3.0 L/min, air 20.0 L/min (左:T 字,右:直管)

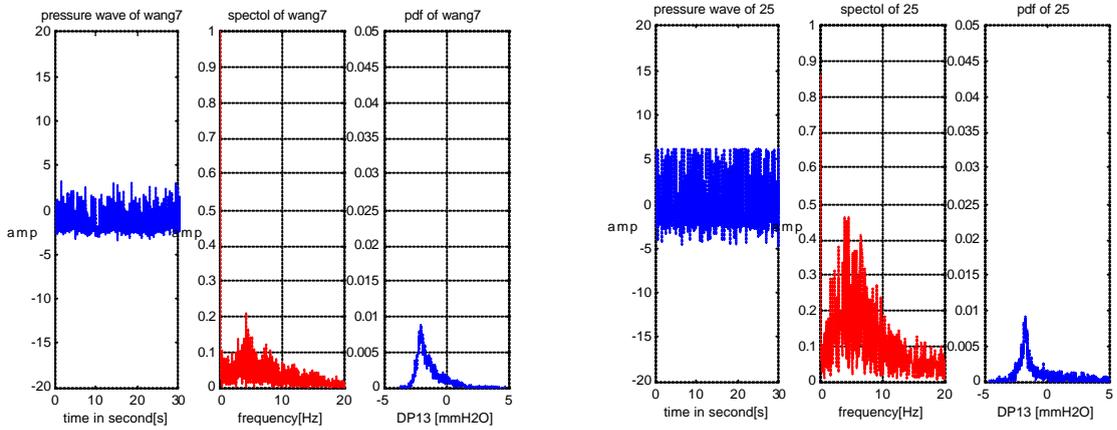


图 3-1-21 water 3.0 L/min, air 30.0 L/min (左:T 字,右:直管)

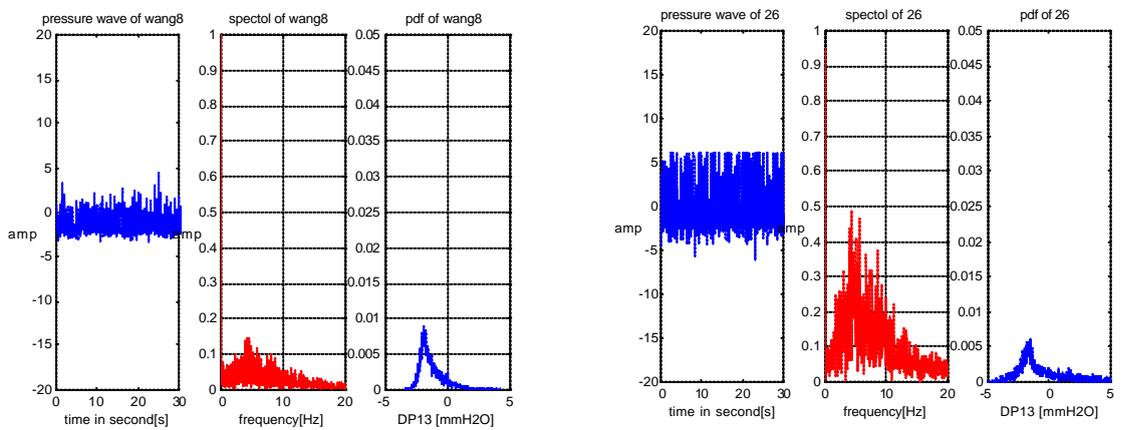


图 3-1-22 water 3.0 L/min, air 40.0 L/min (左:T 字,右:直管)

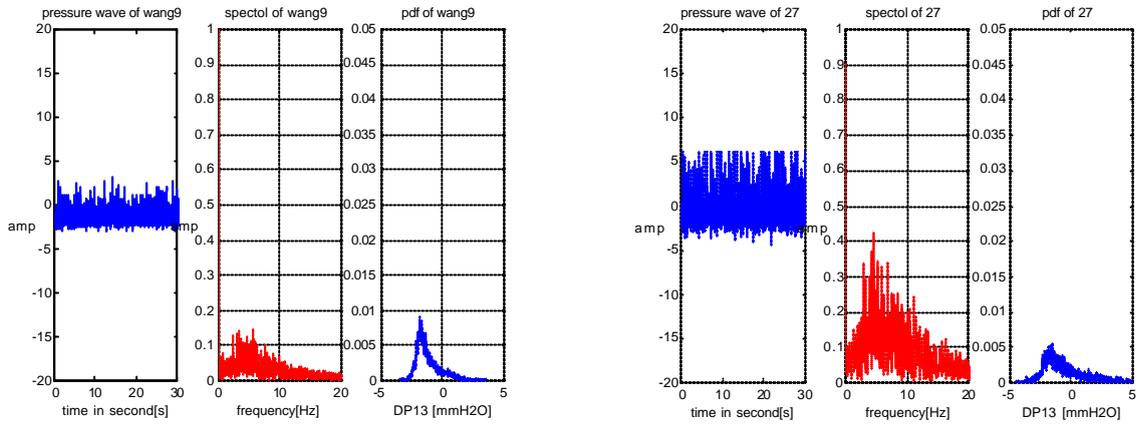


图 3-1-23 water 3.0 L/min, air 50.0 L/min (左:T字,右:直管)

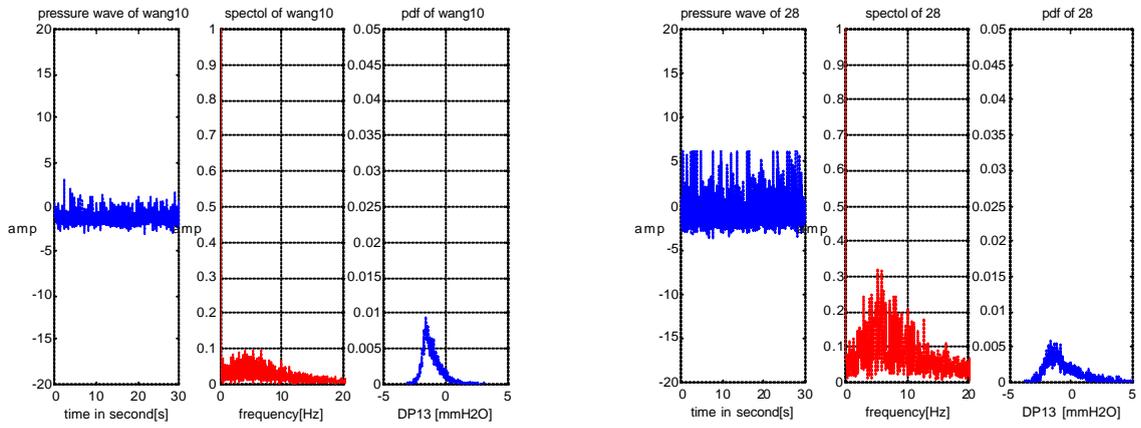


图 3-1-24 water 3.0 L/min, air 75.0 L/min (左:T字,右:直管)

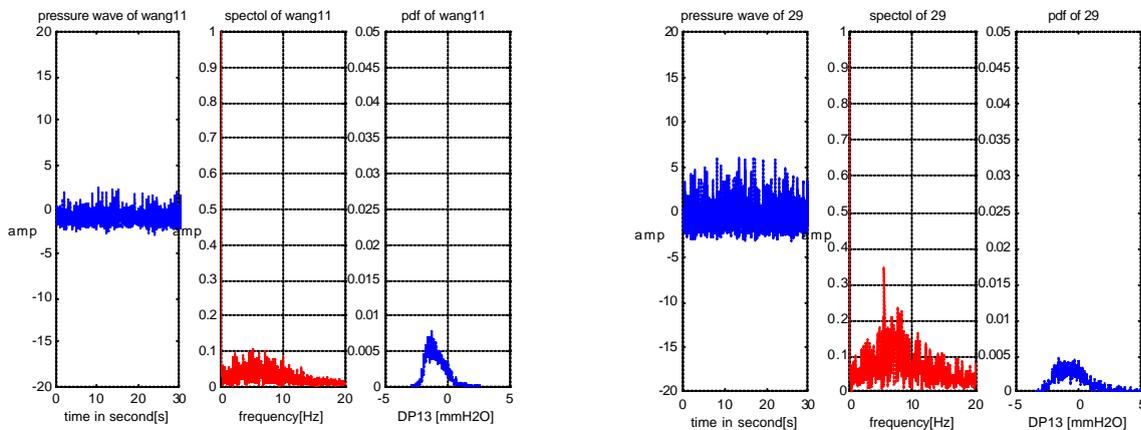


图 3-1-25 water 3.0 L/min, air 100.0 L/min (左:T字,右:直管)

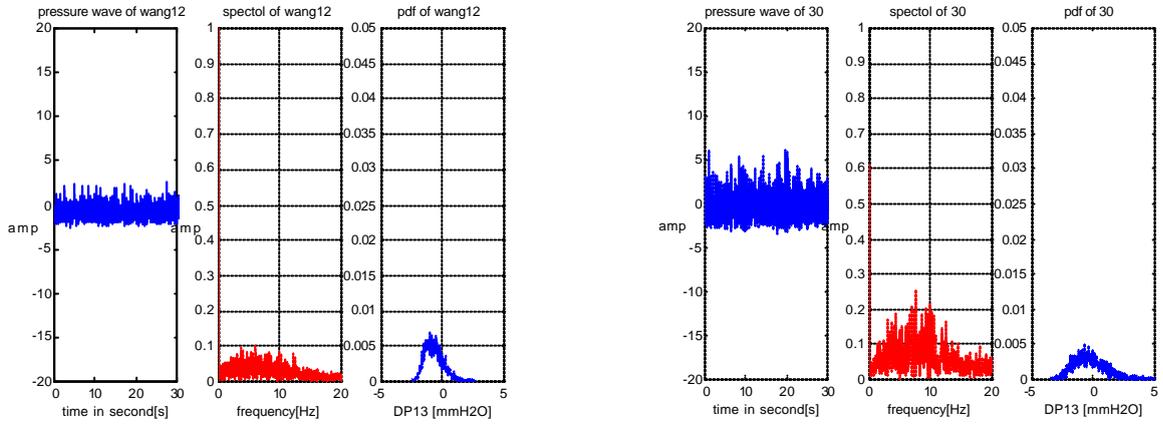


图 3-1-26 water 3.0 L/min, air 125.0 L/min (左:T字,右:直管)

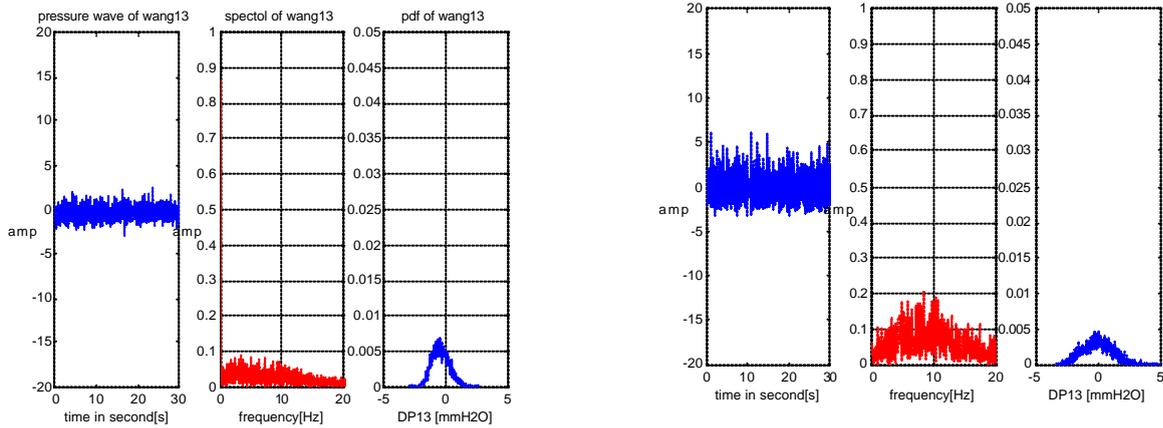


图 3-1-27 water 3.0 L/min, air 150.0 L/min (左:T字,右:直管)

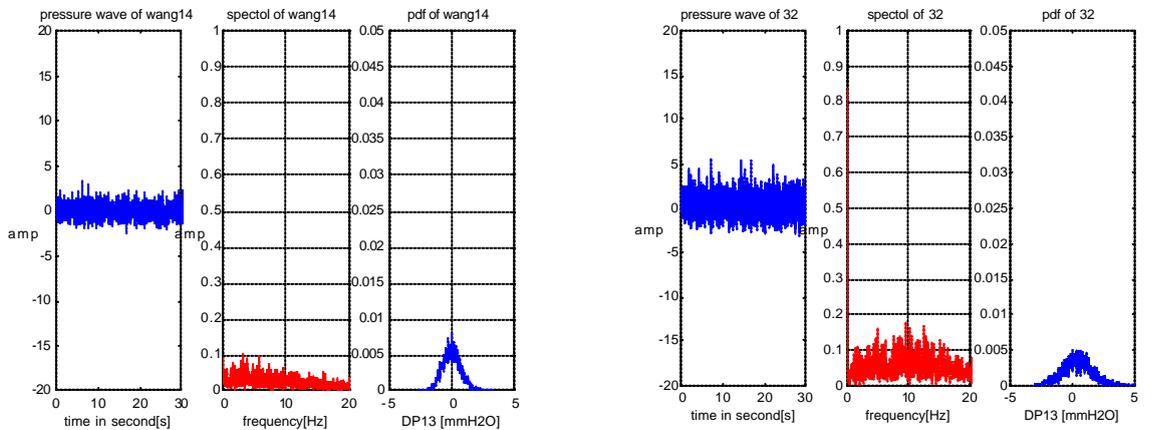


图 3-1-28 water 3.0 L/min, air 175.0 L/min (左:T字,右:直管)

水量 5.0 L/min における差圧変動比較グラフ(図 3-1-29 ~ 図 3-1-37)

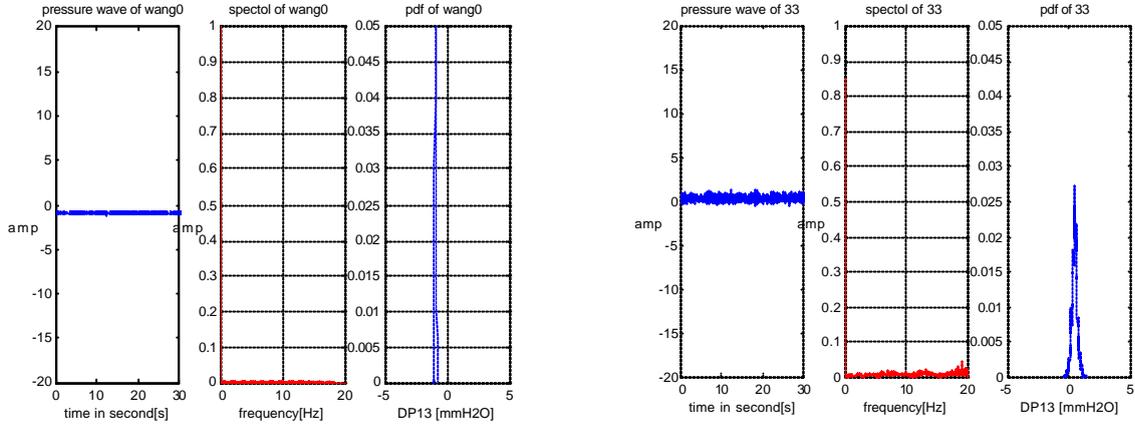


図 3-1-29 water 5.0 L/min, air 1.0 L/min (左:T 字,右:直管)

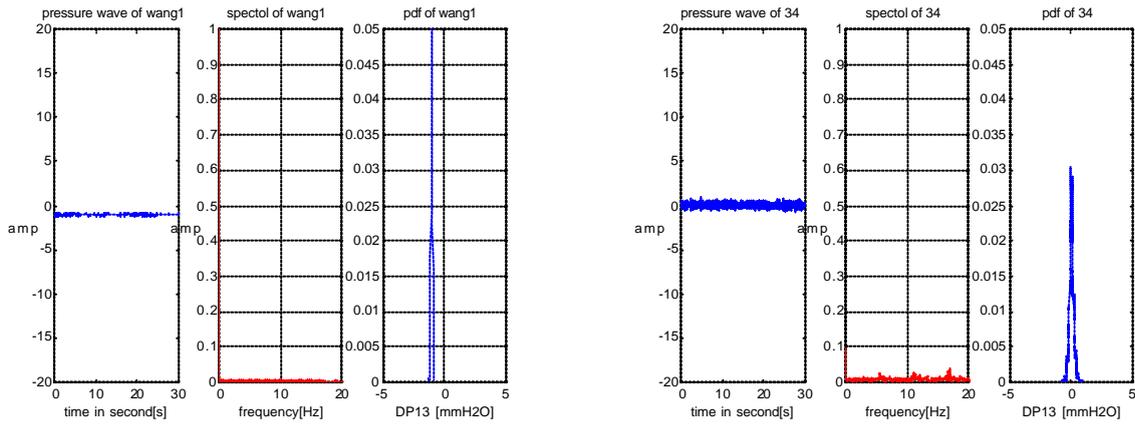


図 3-1-30 water 5.0 L/min, air 3.0 L/min (左:T 字,右:直管)

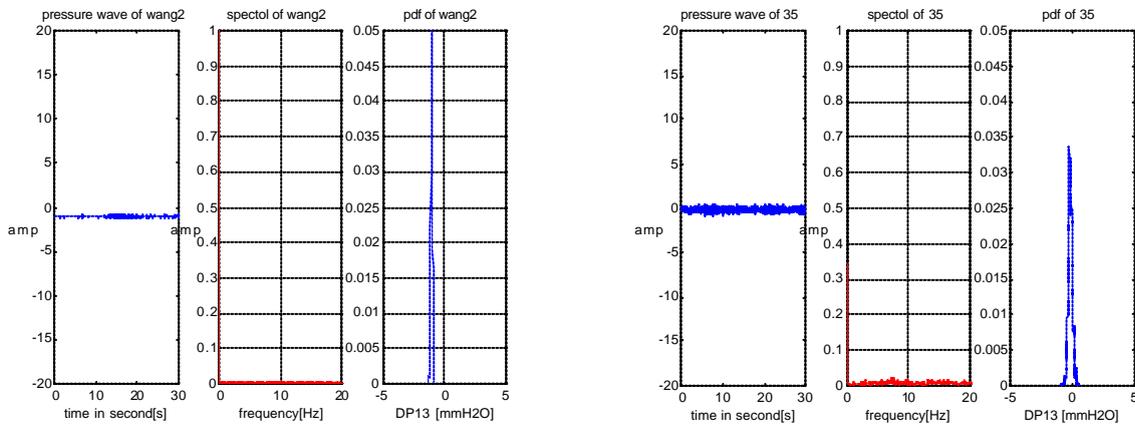


図 3-1-31 water 5.0 L/min, air 5.0 L/min (左:T 字,右:直管)

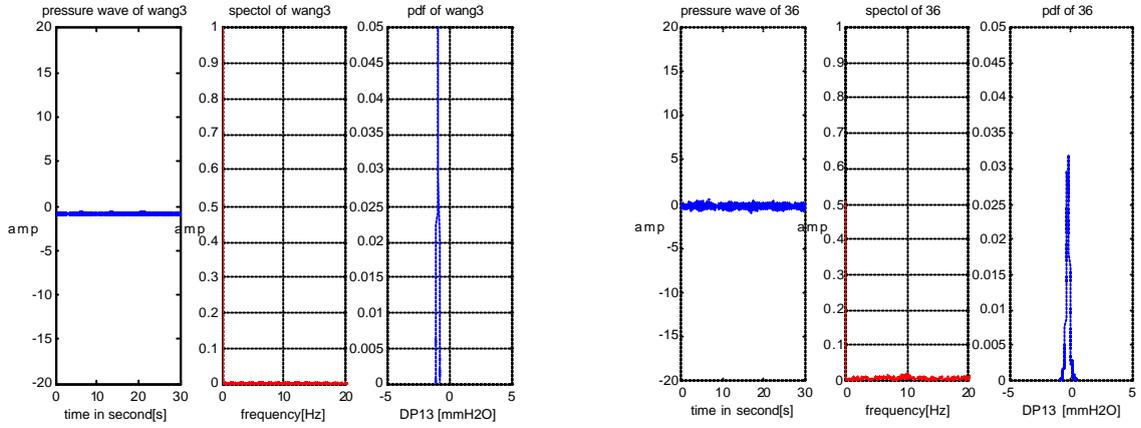


图 3-1-32 water 5.0 L/min, air 10.0 L/min (左:T 字,右:直管)

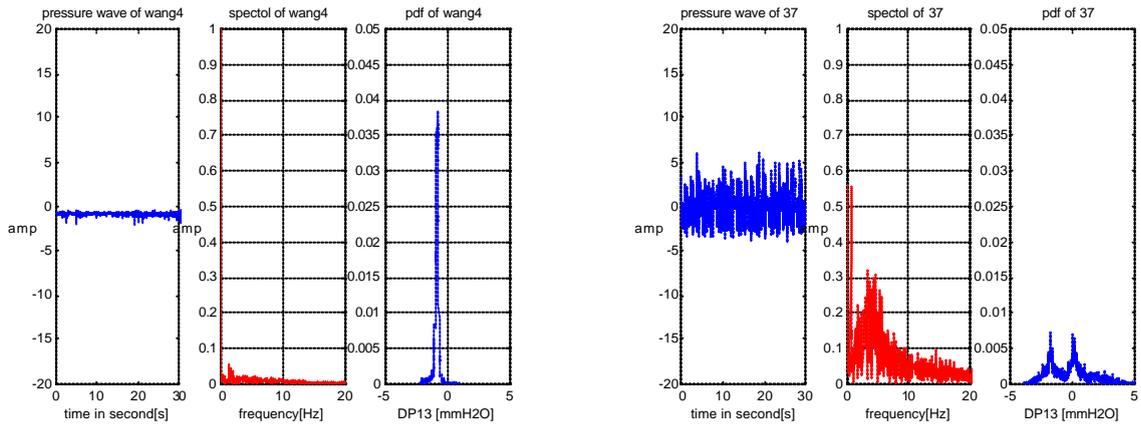


图 3-1-33 water 5.0 L/min, air 13.0 L/min (左:T 字,右:直管)

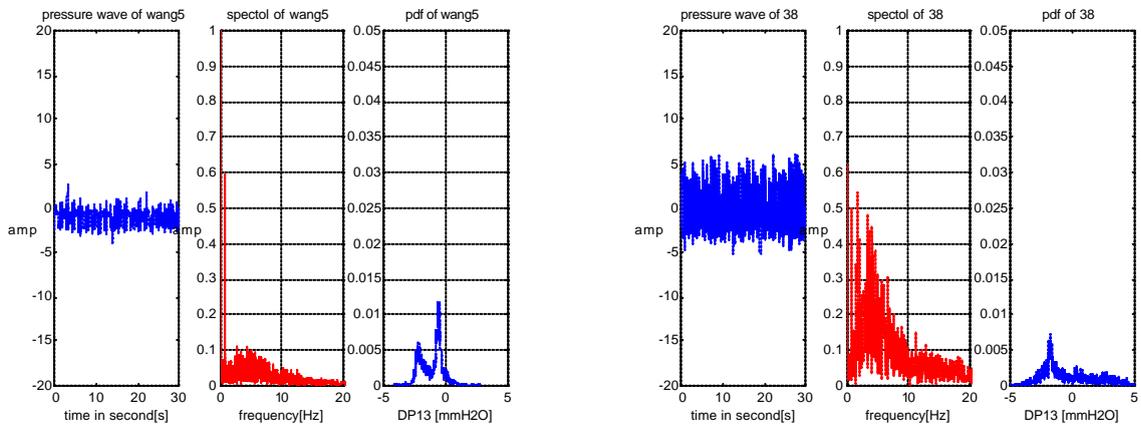


图 3-1-34 water 5.0 L/min, air 15.0 L/min (左:T 字,右:直管)

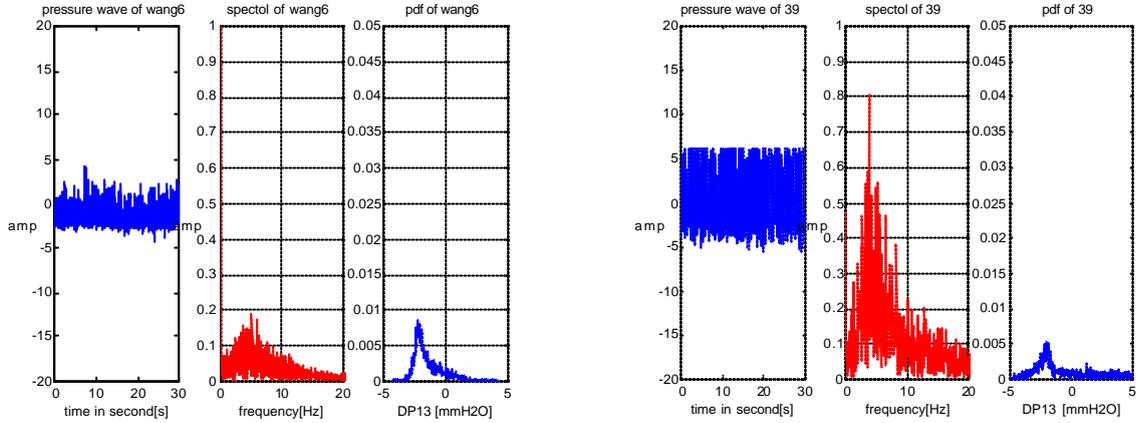


图 3-1-35 water 5.0 L/min, air 20.0 L/min (左:T 字,右:直管)

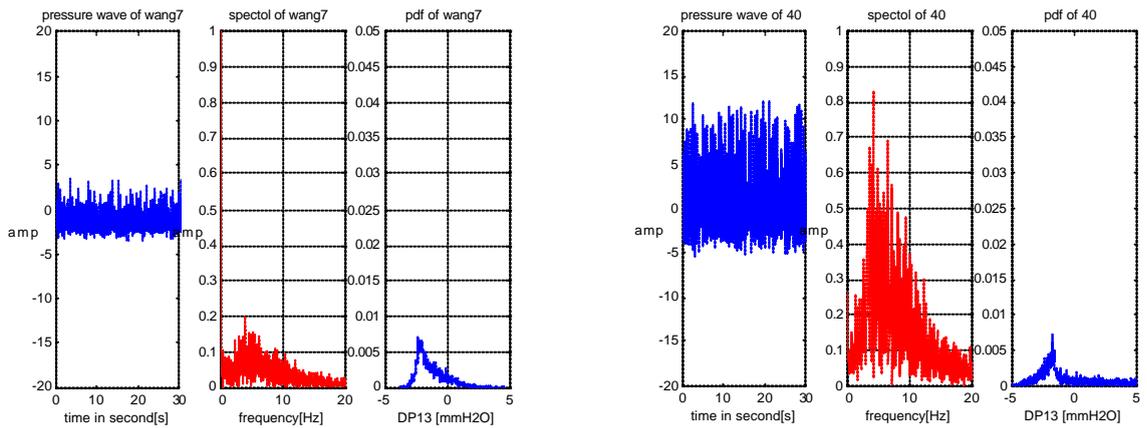


图 3-1-36 water 5.0 L/min, air 30.0 L/min (左:T 字,右:直管)

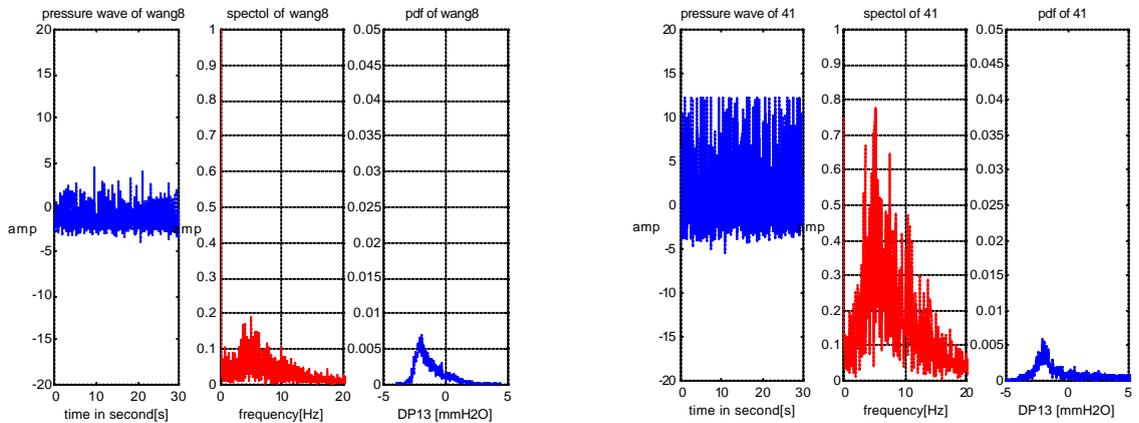


图 3-1-37 water 5.0 L/min, air 40.0 L/min (左:T 字,右:直管)

標準偏差の推移の比較

振動の大きさを示す指標として標準偏差に注目し,その推移を示す。(図 3-1-38~図 3-1-40)

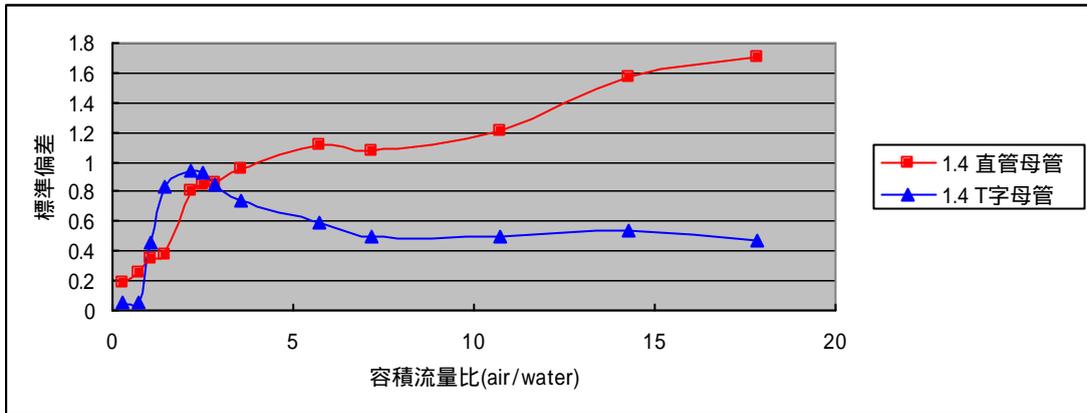


図 3-1-38 水量 1.4 L/min の標準偏差の推移

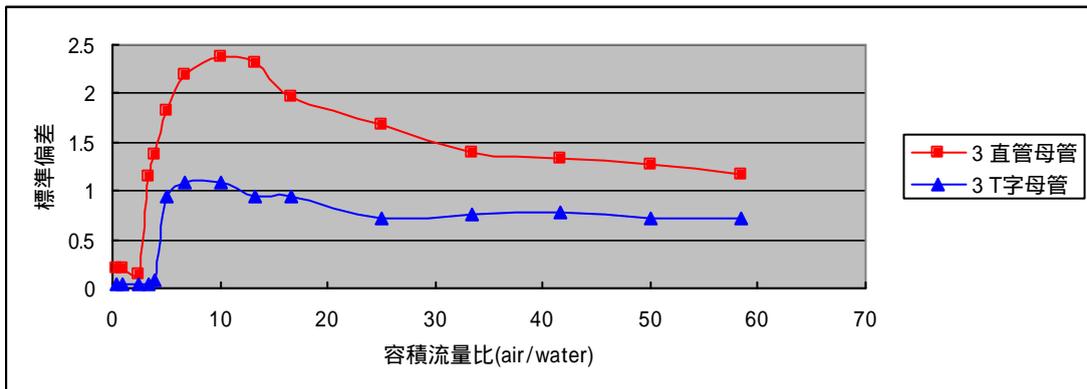


図 3-1-39 水量 3.0 L/min の標準偏差の推移

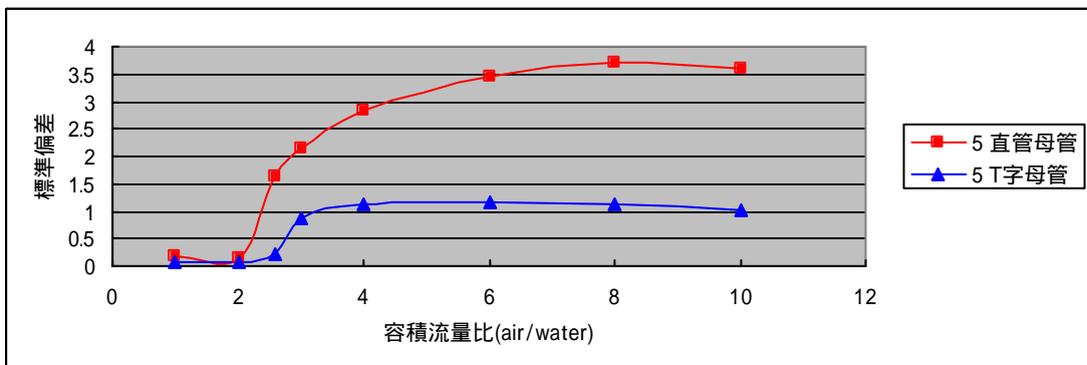


図 3-1-40 水量 5.0 L/min の標準偏差の推移

3 - 2 垂直直管脈動実験

3 - 2 - 1 測定条件

脈動開始点測定

本実験は、大気圧下、空気流量 0.4 ~ 100 l/min、水流量 1.0 ~ 15 l/min の範囲で行った。水量を

表 3-2 の条件にしたときの、内径 15mm、管長の 1500mm 垂直直管において脈動現象が観測される空気量を記録した。

脈動開始点近傍差圧測定

本実験は、脈動開始点近傍である測定条件(表 3 - 3 に示す)での母管の差圧を計測した。

水流量 (L/min)	水流量 (L/min)	水流量 (L/min)
1	4	7
1.25	4.25	7.25
1.5	4.5	7.5
1.75	4.75	7.75
2	5	8
2.25	5.25	8.25
2.5	5.5	8.5
2.75	5.75	8.75
3	6	9
3.25	6.25	10
3.5	6.5	12
3.75	6.75	14

表 3-2 脈動開始点測定条件

水流量 (L/min)	空気流量 (L/min)	水流量 (L/min)	空気流量 (L/min)
1	2	5	10
1	2.5	5	13
1	3	5	15
1.4	2	5	20
1.4	3	7	13
1.4	4	7	14
1.4	5	7	15
2	2.5	7	16
2	3		
2	3.5		
2	4		
2	4.5		
3	7		
3	10		
3	12		
4	10		
4	1		
4	12		
4	13		

表 3-3 脈動点近傍差压測定条件

3 - 2 - 2 実験結果

脈動開始点測定結果

測定結果を図 3-2-1 に示す。

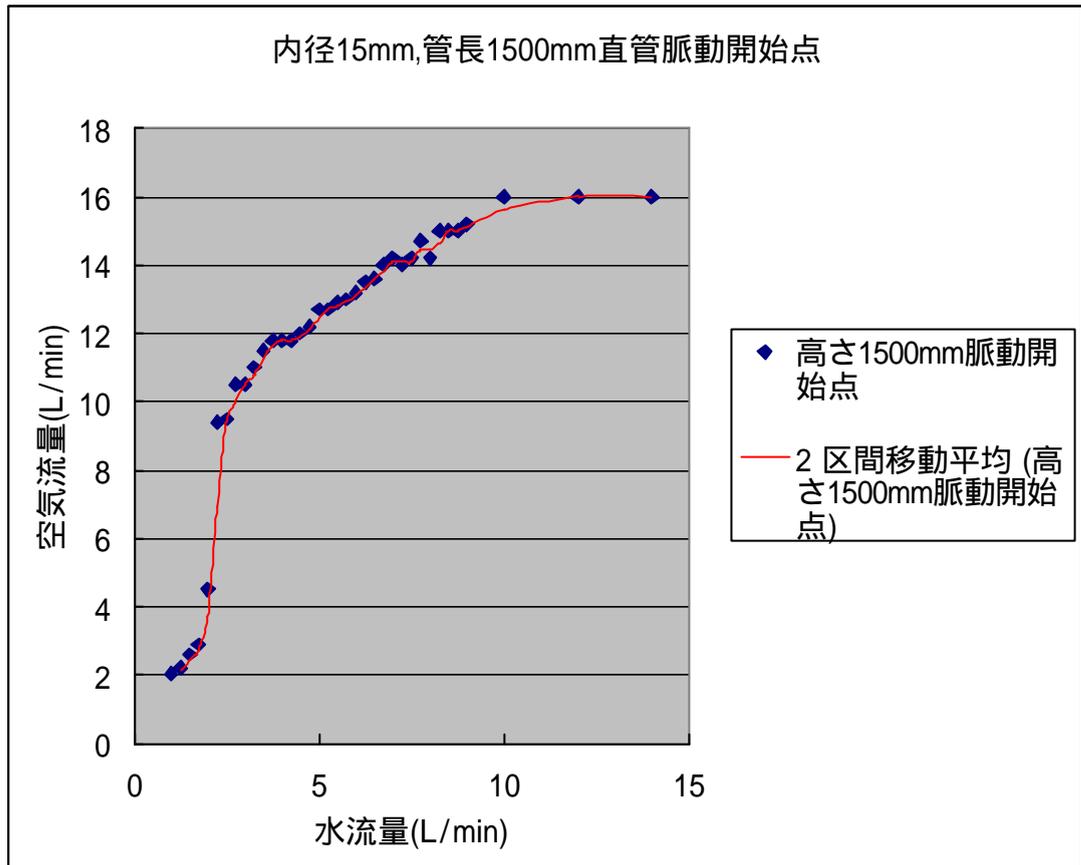


図 3-2-1 脈動開始点グラフ

脈動点近傍差圧測定結果

測定結果を図 3-2-2～図 3-2-28 に示す。(左から、差圧変動、パワースペクトル、確率密度関数)

水量 1.0L/min 脈動点近傍 (図 3-2-2～図 3-2-4)

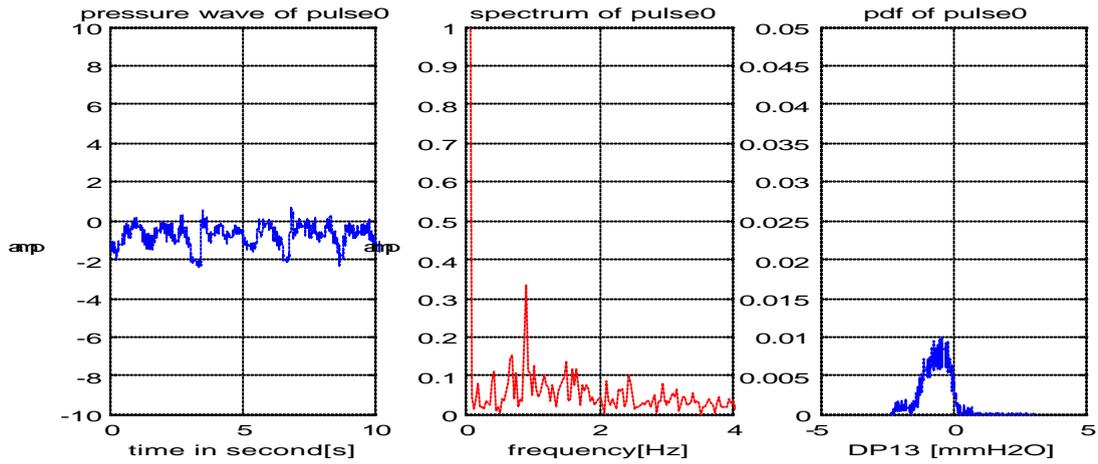


図 3-2-2 水量 1.0 L/min, 空気量 2.0 L/min 差圧変動グラフ

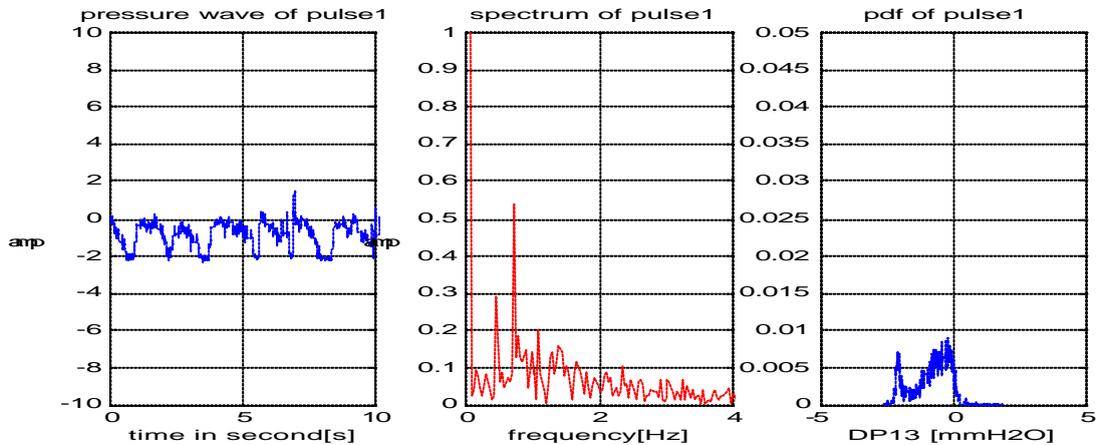


図 3-2-3 水量 1.0 L/min, 空気量 2.5 L/min 差圧変動グラフ

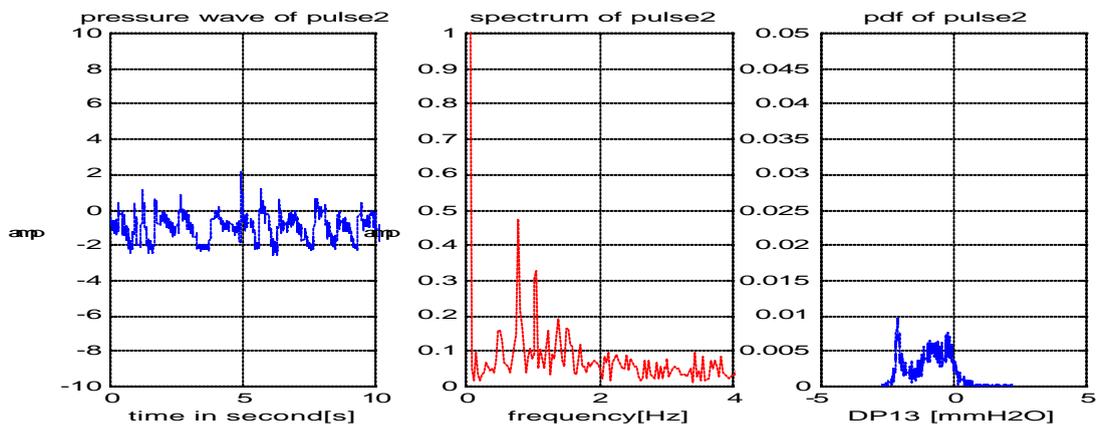


図 3-2-4 水量 1.0 L/min, 空気量 3.0 L/min 差圧変動グラフ

水量 1.4 L/min 脈動点近傍 (図 3-2-5 ~ 図 3-2-8)

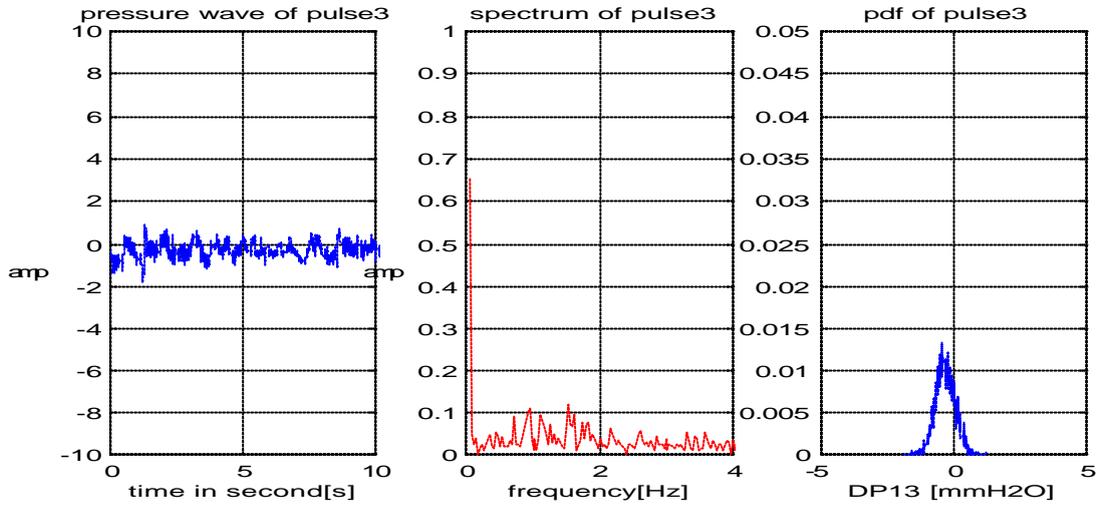


図 3-2-5 水量 1.4 L/min, 空気量 2.0 L/min 差圧変動グラフ

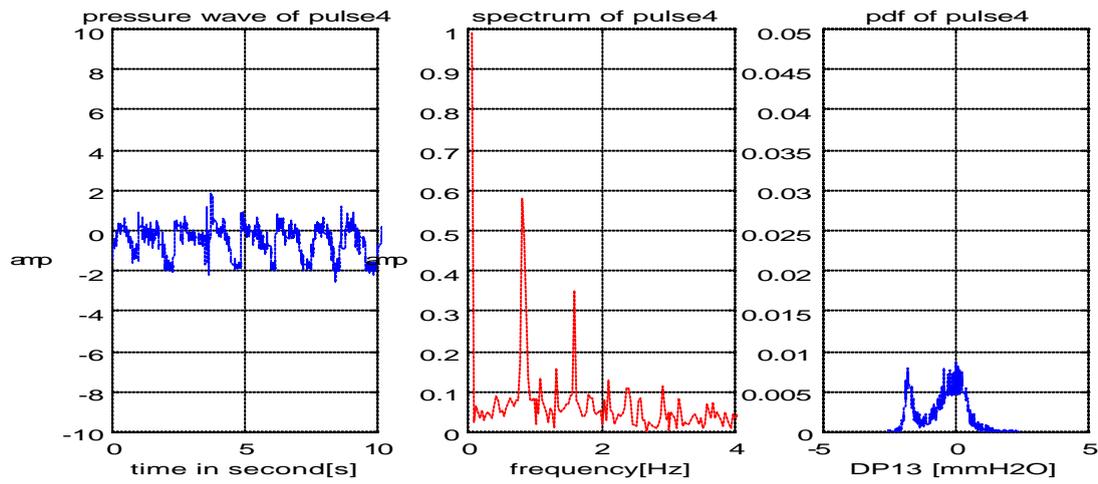


図 3-2-6 水量 1.4 l/min, 空気量 3.0 l/min 差圧変動グラフ

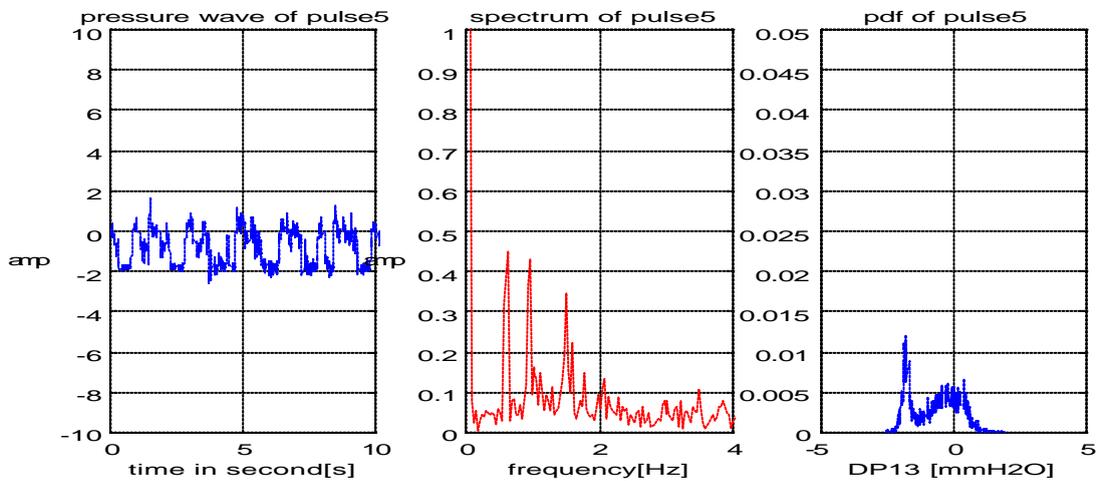


図 3-2-7 水量 1.4 l/min, 空気量 4.0 l/min 差圧変動グラフ

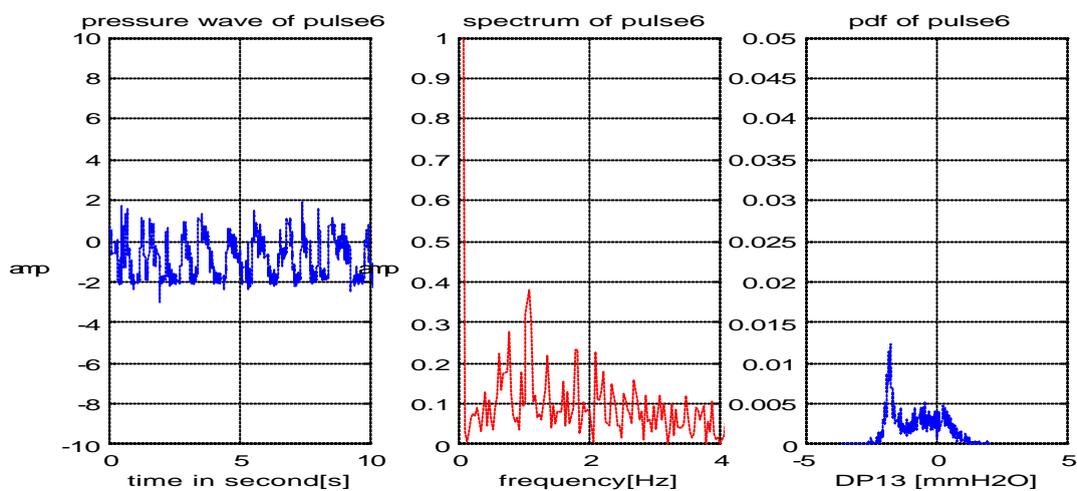


図 3-2-8 水量 1.4 L/min, 空気量 5.0 L/min 差圧変動グラフ

水量 2.0L/min 脈動点近傍 (図 3-2-9 ~ 図 3-2-13)

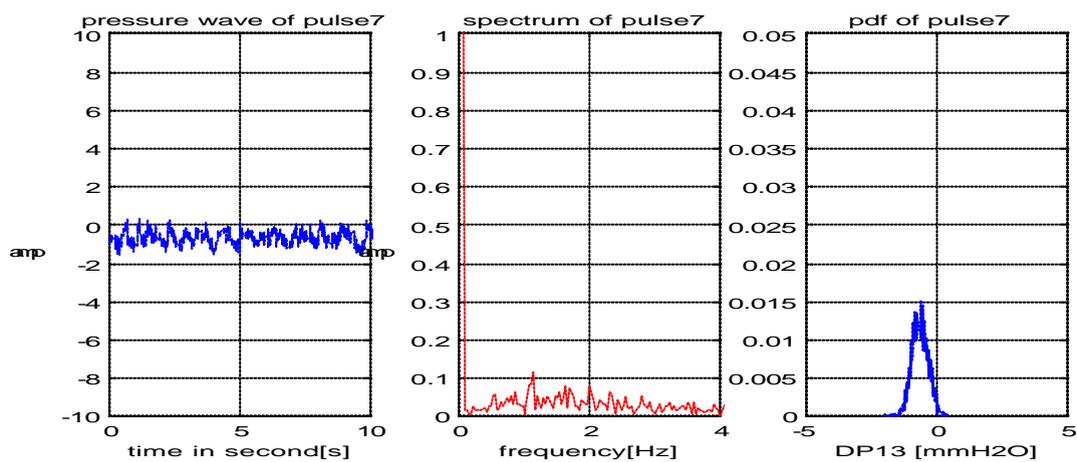


図 3-2-9 水量 2.0 L/min, 空気量 2.5 L/min 差圧変動グラフ

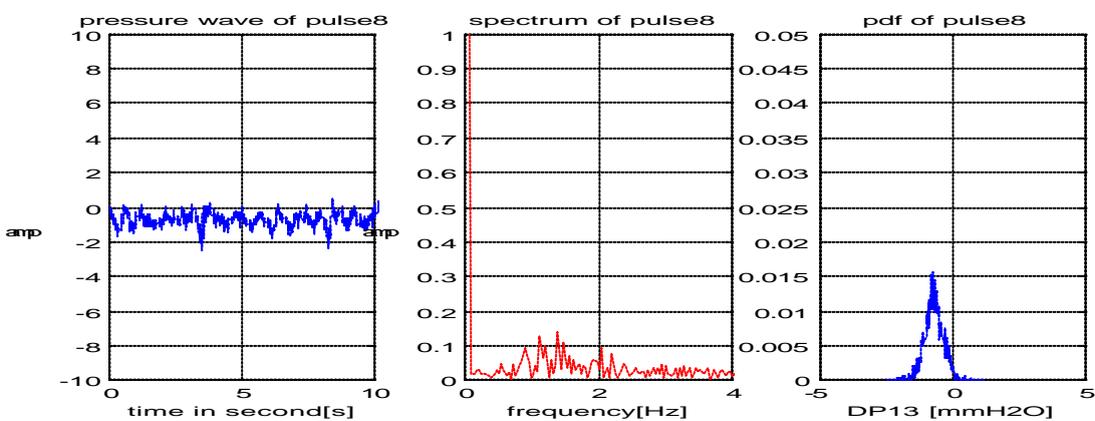


図 3-2-10 水量 2.0 L/min, 空気量 3.0 L/min 差圧変動グラフ

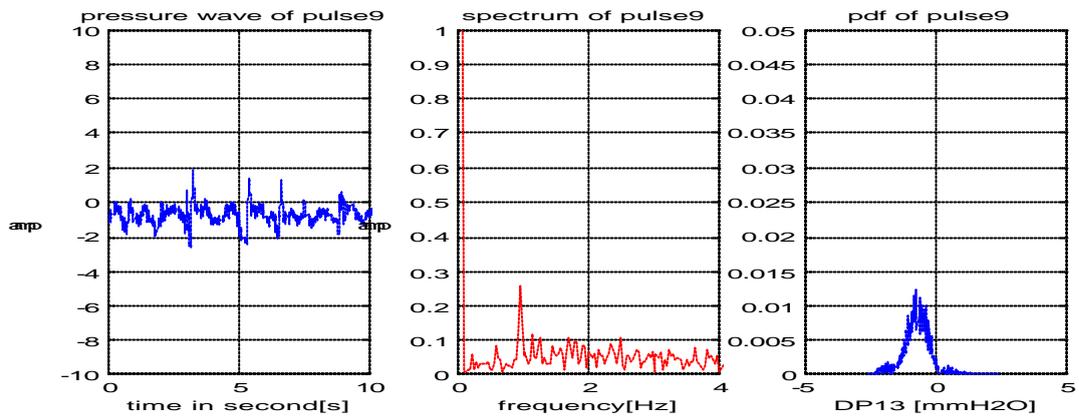


図 3-2-11 水量 2.0 L/min, 空気量 3.5 L/min 差圧変動グラフ

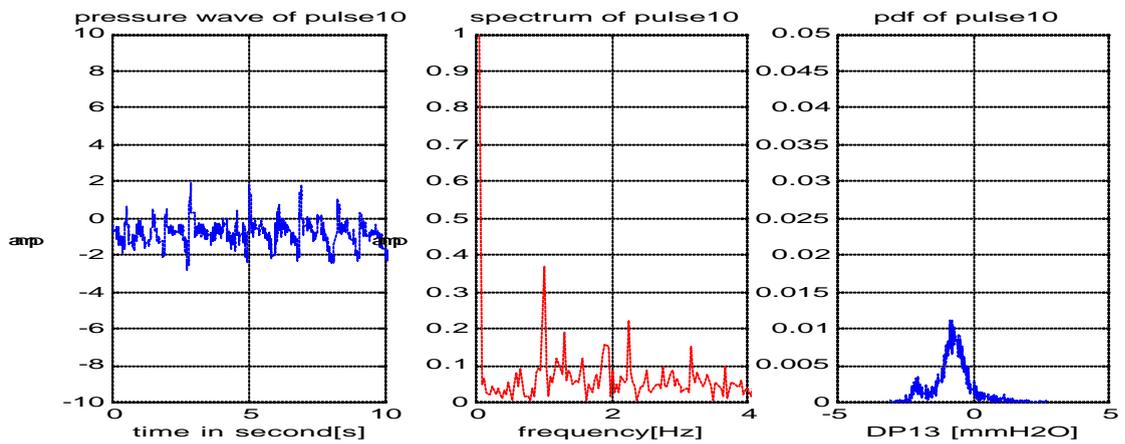


図 3-2-12 水量 2.0 L/min, 空気量 4.0 L/min 差圧変動グラフ

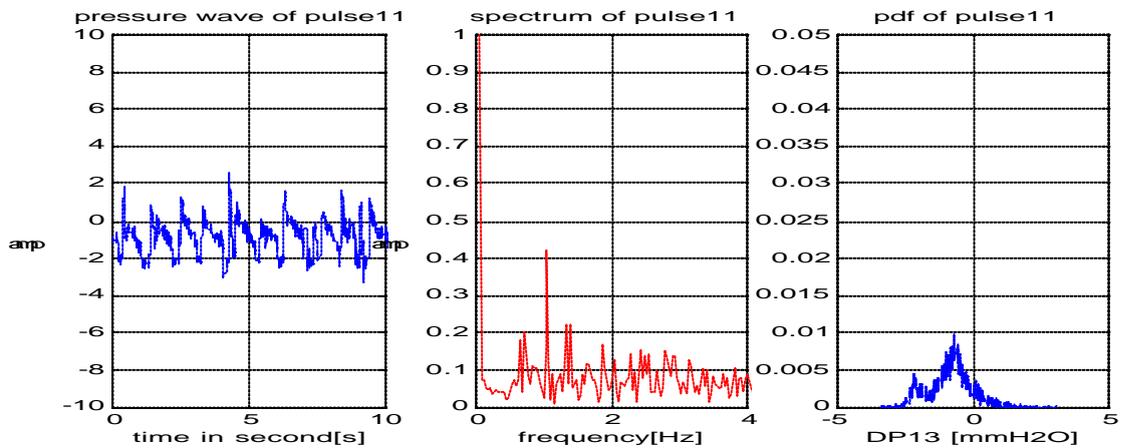


図 3-2-13 水量 2.0 L/min, 空気量 4.5 L/min 差圧変動グラフ

水量 3.0 L/min 脈動点近傍 (図 3-2-14 ~ 図 3-2-16)

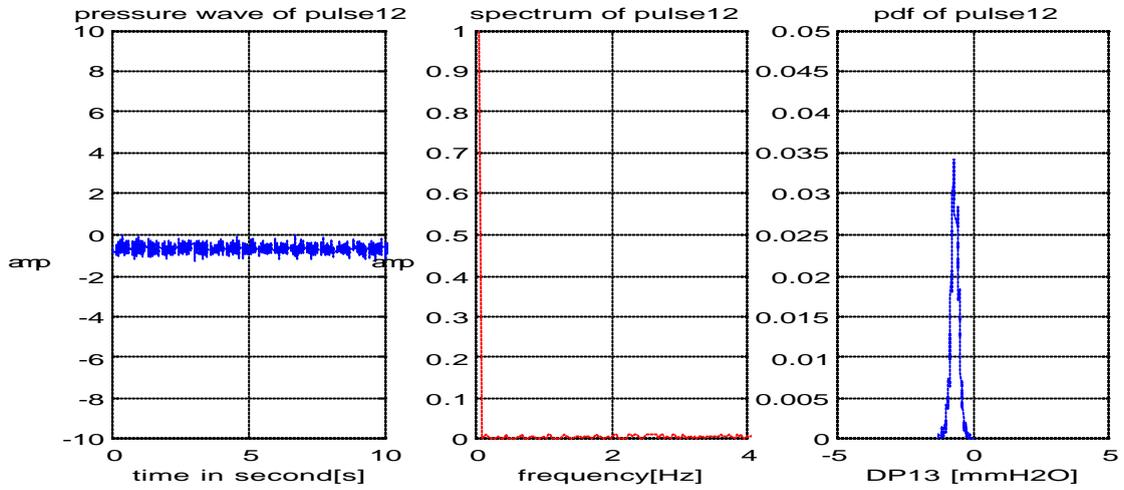


図 3-2-14 水量 3.0 L/min, 空気量 7.0 L/min 差圧変動グラフ

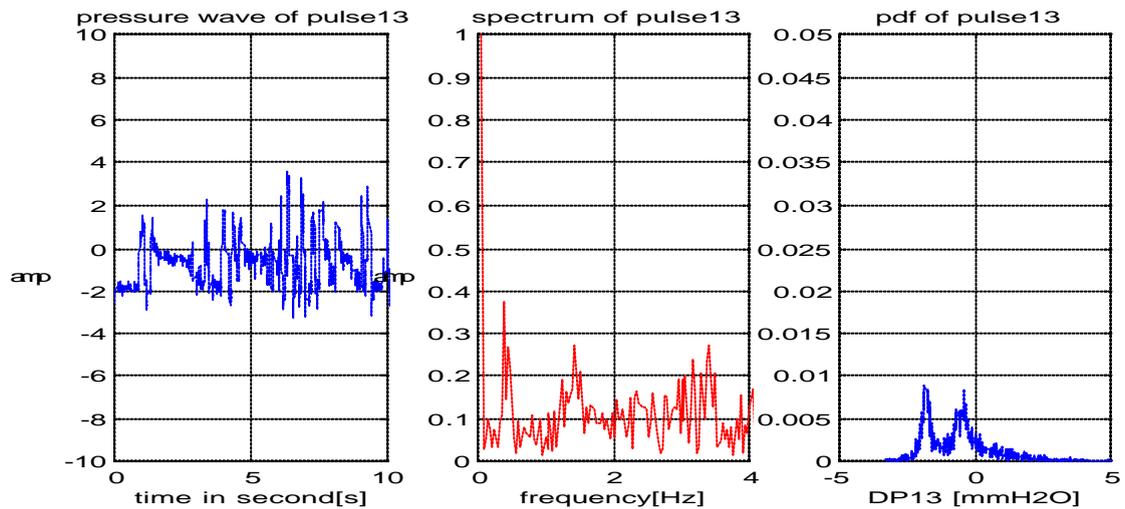


図 3-2-15 水量 3.0 L/min, 空気量 10.0 L/min 差圧変動グラフ

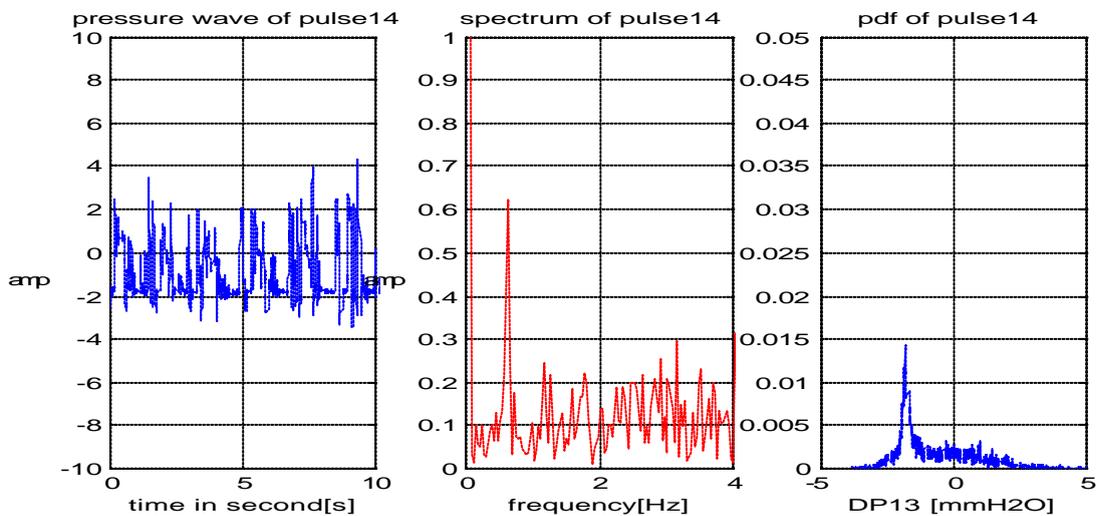


図 3-2-16 水量 3.0 L/min, 空気量 12.0 L/min 差圧変動グラフ

水量 4.0 L/min 脈動点近傍 (図 3-2-17 ~ 図 3-2-20)

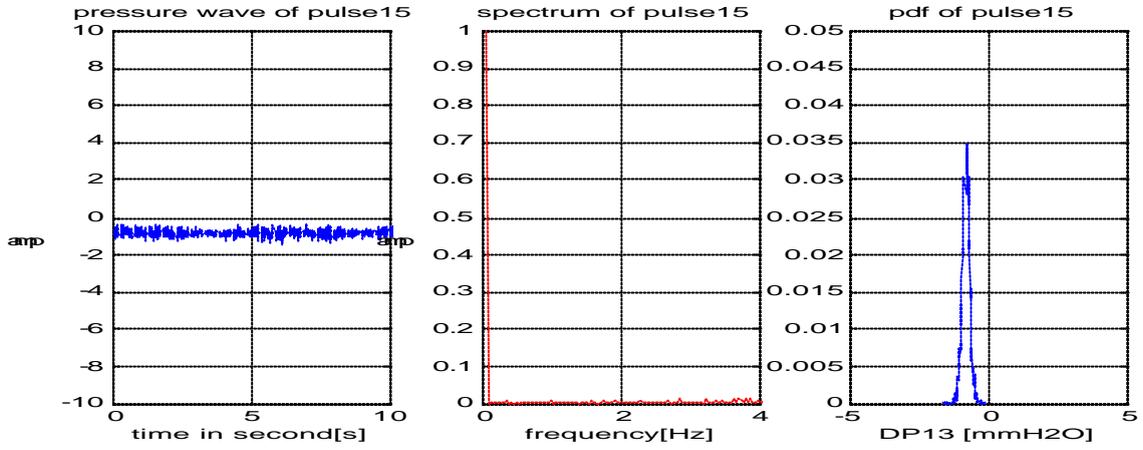


図 3-2-17 水量 4.0 L/min, 空気量 10.0 L/min 差圧変動グラフ

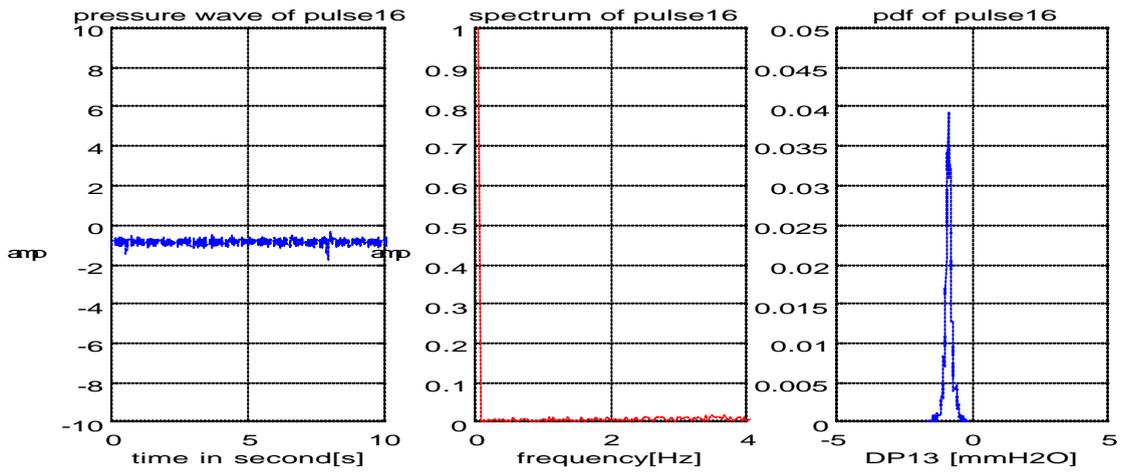


図 3-2-18 水量 4.0 L/min, 空気量 11.0 L/min 差圧変動グラフ

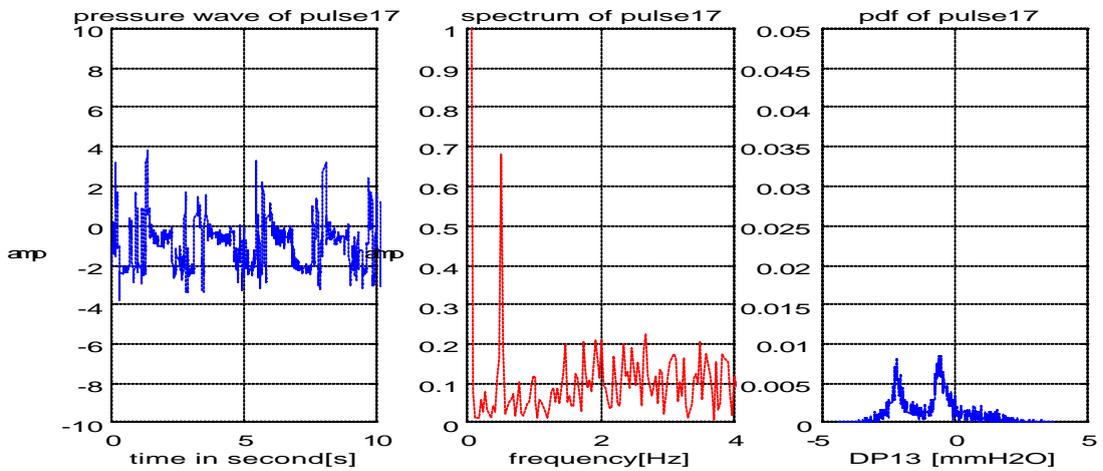


図 3-2-19 水量 4.0 L/min, 空気量 12.0 L/min 差圧変動グラフ

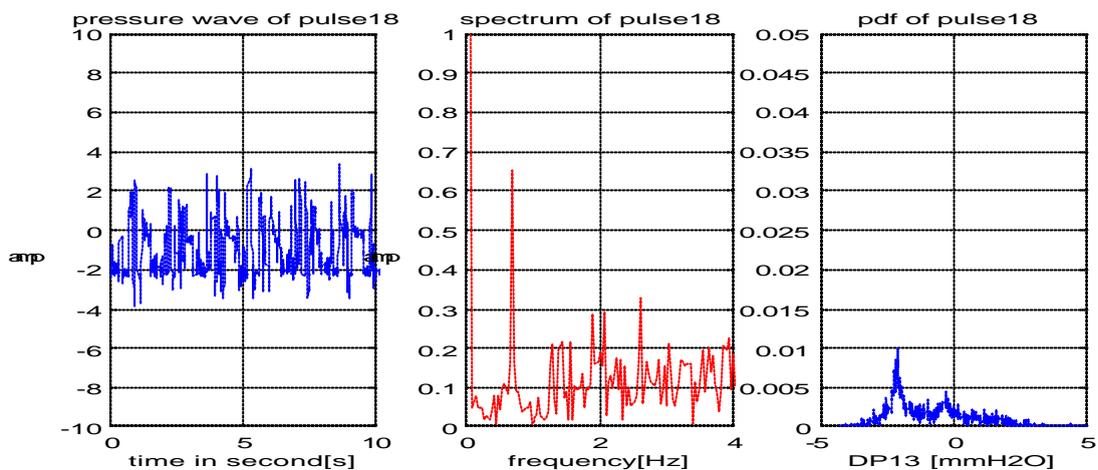


図 3-2-20 水量 4.0 L/min, 空気量 13.0 L/min 差圧変動グラフ

水量 5.0 L/min 脈動点近傍 (図 3-2-21 ~ 図 3-2-24)

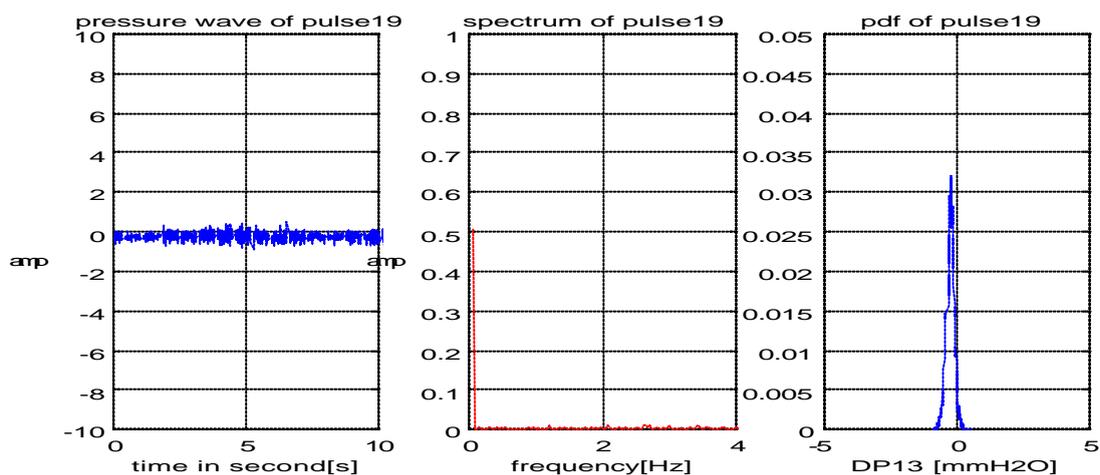


図 3-2-21 水量 5.0 L/min, 空気量 10.0 L/min 差圧変動グラフ

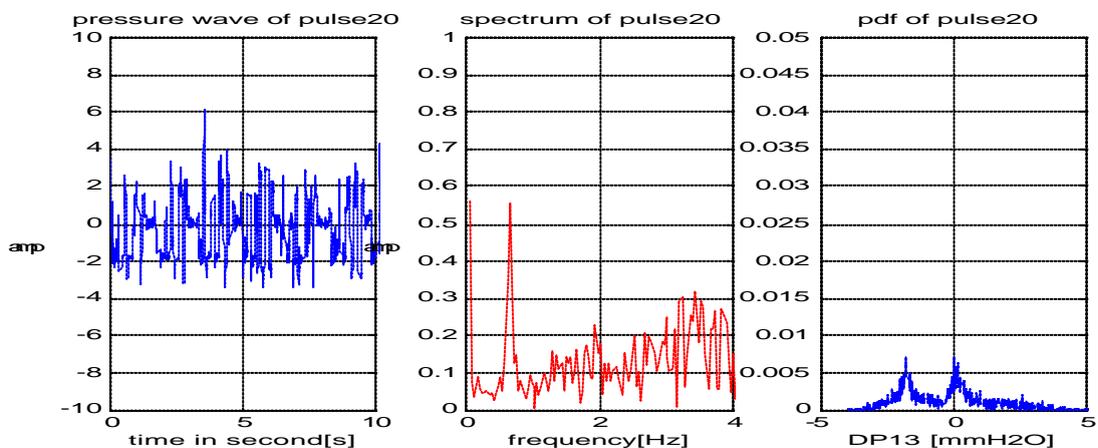


図 3-2-22 水量 5.0 L/min, 空気量 13.0 L/min 差圧変動グラフ

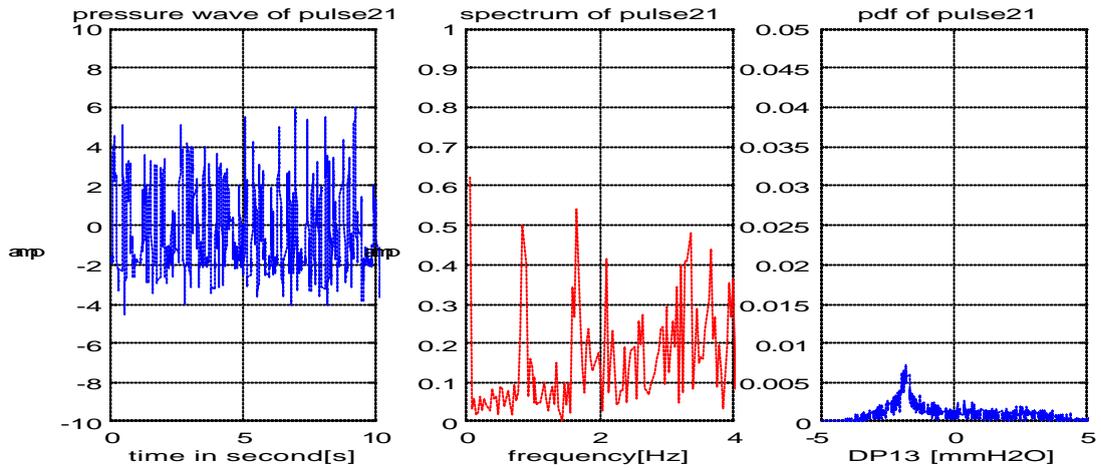


図 3-2-23 水量 5.0 L/min, 空気量 15.0 L/min 差圧変動グラフ

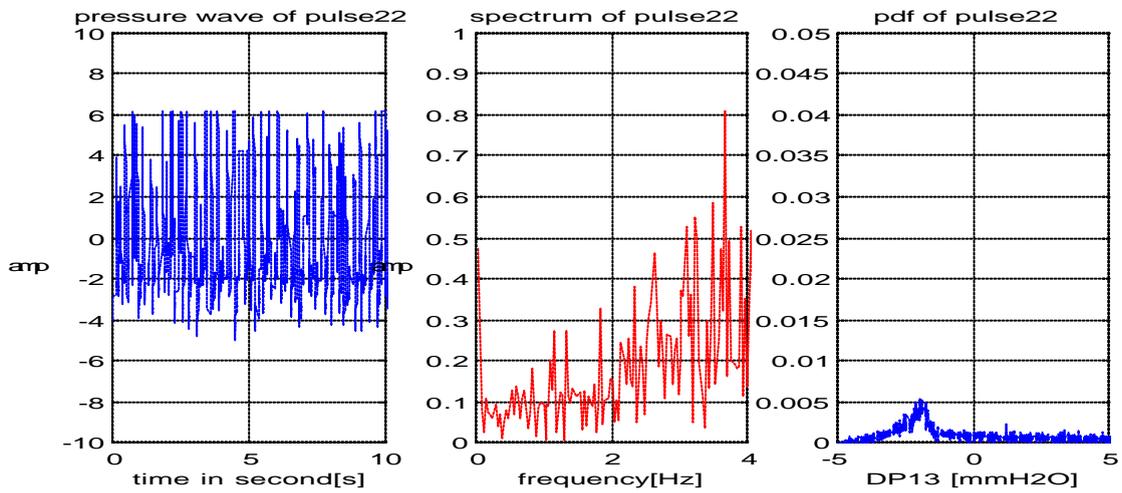


図 3-2-24 水量 5.0 L/min, 空気量 20.0 L/min 差圧変動グラフ

水量 7.0 L/min 脈動点近傍 (図 3-2-25 ~ 図 3-2-28)

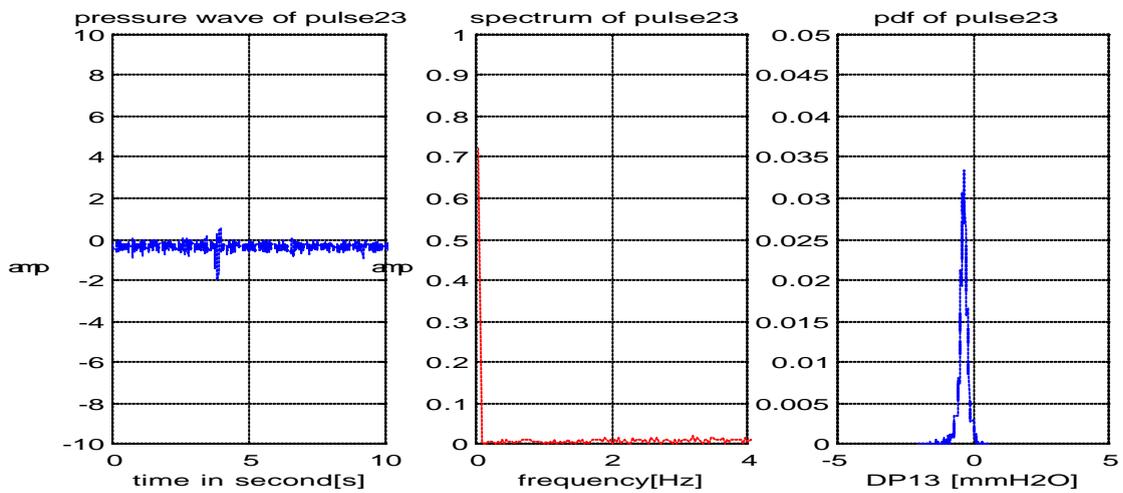


図 3-2-25 水量 7.0 L/min, 空気量 13.0 L/min 差圧変動グラフ

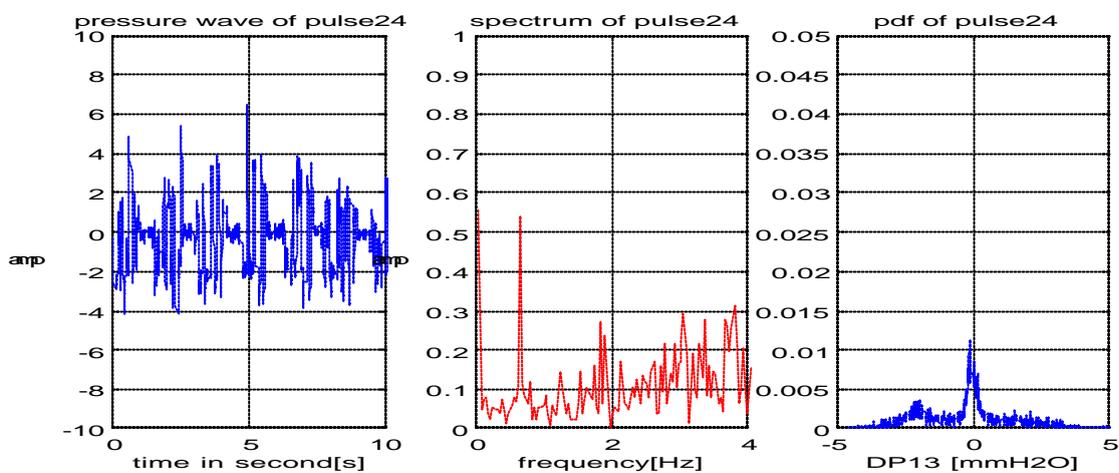


図 3-2-26 水量 7.0 L/min, 空気量 14.0 L/min 差圧変動グラフ

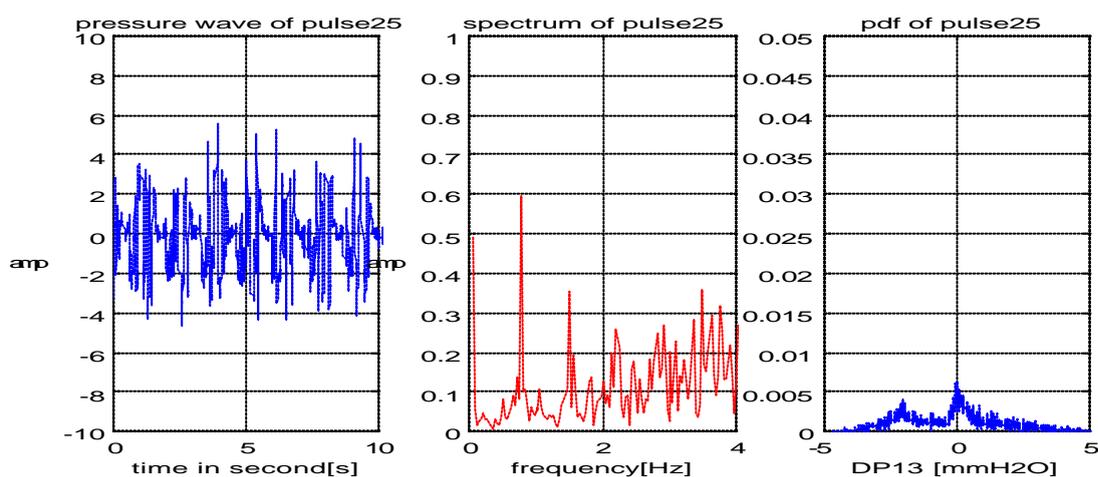


図 3-2-27 水量 7.0 L/min, 空気量 15.0 L/min 差圧変動グラフ

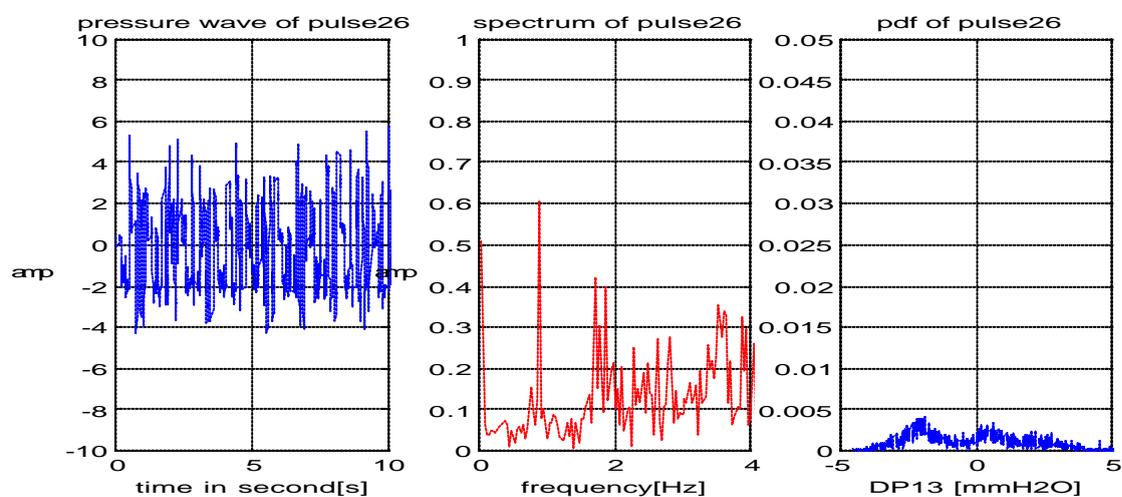


図 3-2-28 水量 7.0 L/min, 空気量 16.0 L/min 差圧変動グラフ

第4章 考察

- 4 - 1 流動様式について
- 4 - 2 流路形状の影響について
- 4 - 3 脈動特性について

4 - 1 流動様式について

垂直T字管及び、垂直直管における差圧変動測定および、脈動点近傍差圧測定により、垂直上昇管における気液二相流の流動様式は、差圧変動の統計的性質であるPSD（パワースペクトル）とPDF（確率密度関数）において、おおむね以下のような特徴があることが観察された。

なお、本来ならば気液二相流は気泡流・スラグ流・プラグ流・チャーン流・環状流と区別するべきところであるが、スラグ流・プラグ流・チャーン流の区別は脈動現象が起こる本実験においては困難であったので、気泡流・脈動・環状流の3パターンで区別することにした。

4 - 1 - 1 各流動様式におけるPSDの特徴

気泡流

白色雑音と見られる一様な分布を示す。パワーは小さい。(例；**図 4-1**)これは、気泡流が単相流に近い流れであることと一致する。

脈動時

低周波領域（約5Hz以下の領域）において明瞭なピークを持つ。(例；**図 4-2**)

環状流

幅の広いなだらかなピークを有する分布を示す。(例；**図 4-3**)これは、不均一な気液界面の通過が不規則的であるためと思われる。

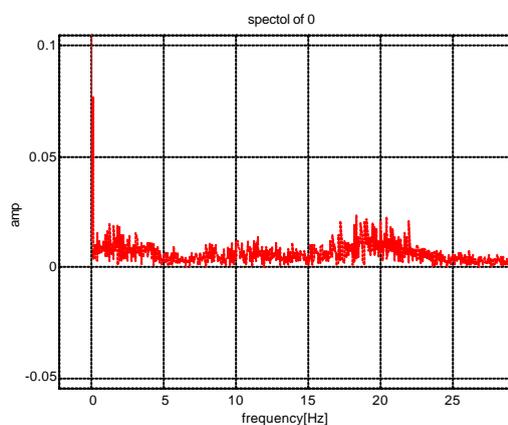


図 4-1
気泡流時のPSD
(水流量 1.4 L/min ,
空気流量 0.4 L/min)

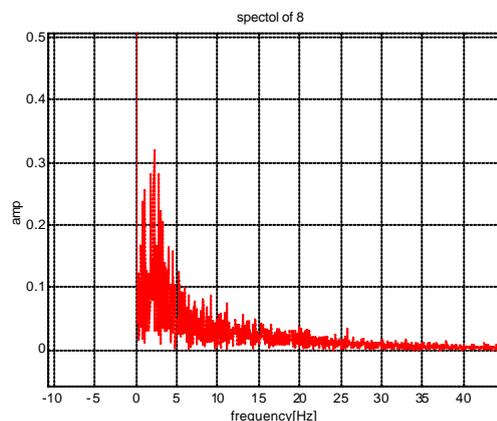


図 4-2
脈動時のPSD
(水流量 1.4 L/min ,
空気流量 8.0 L/min)

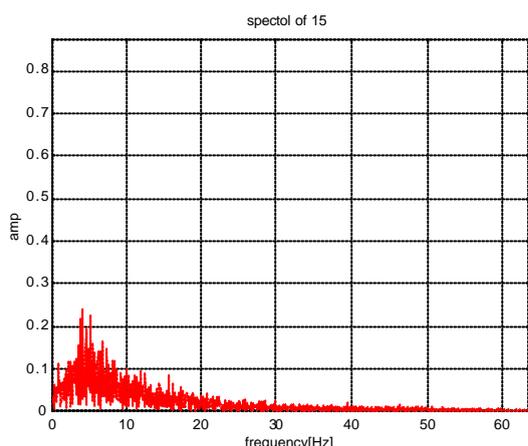


図 4-3
環状流時の P S D
(水流量 1.4 L/min ,
空気流量 50.0 L/min)

4 - 1 - 2 各流動様式における PDF の特徴

気泡流

正規分布と見られる形状を示す．分布の幅は小さい．ピークは気泡流量により決定するようである．(例；**図 4-4**) これは，気泡の分散を表しているものと思われる．

脈動時

図 3-2-2 ~ 図 3-2-28 を見ると分かるように，脈動時には二つのピークを持つ形状が現れる(例；**図 4-5**) 一方のピークは気泡流時から観測されていたものと同等とみなせ，空気流量を上げていくと徐々にピークが小さくなり，みかけ環状流になったときには見えなくなる．(これを **P1** とする．) もう一方のピークは，**P1** と違う範囲(本実験の場合，もともとあったピークの負の側)に，脈動が始まる条件になった時突然あらわれ，空気流量を増やしていくとピークの高さはあまり変わらずにちらばりが大きくなり，見かけ環状流になったときのピークとほぼ一致する．(これを **P2** とする．) 以上のことから，**P1** はテストセクションが液相 > 気相の状態にあり，主に液相による効果が大きい時のものと考えられそうである．一方，**P2** はテストセクションが気相 > 液相の状態にあり，気相による効果が大きい時のものであると考えられる．

脈動は，この液相優位と気相優位の状態が不規則に入れ替わるために起こると思われる．

環状流

幅の広い正規分布の形状を示す．(例；**図 4-6**)

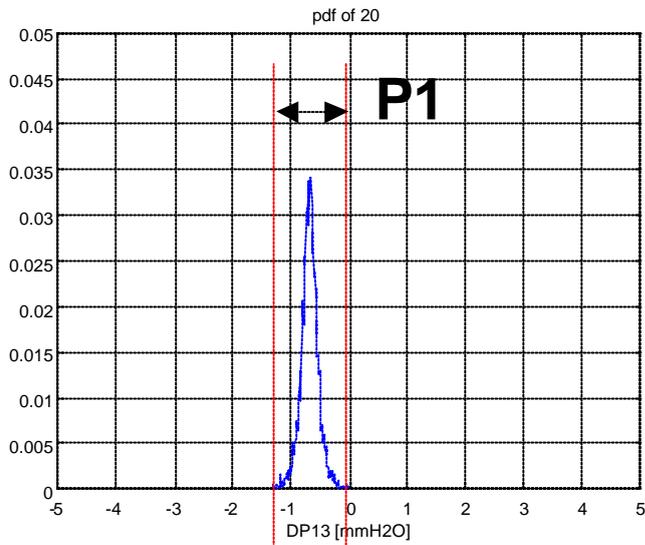


図 4-4
 気泡流時の PDF
 (水流量 3.0 L/min ,
 空気流量 7.0 L/min)

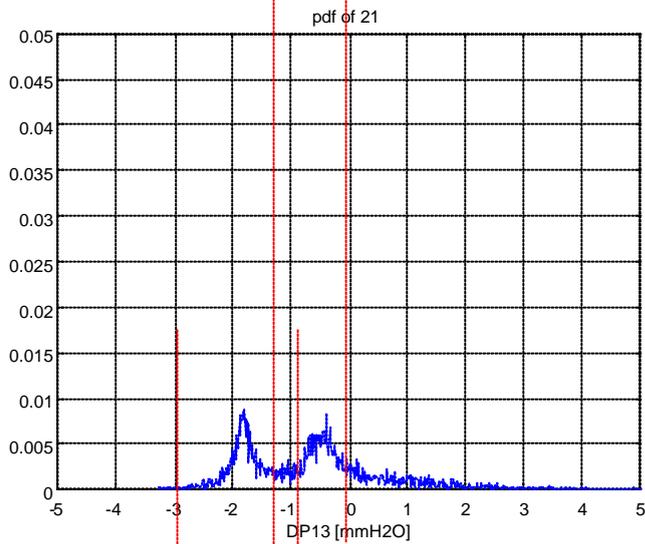


図 4-5
 脈動時の PDF
 (水流量 3.0 L/min ,
 空気流量 10.0 L/min)

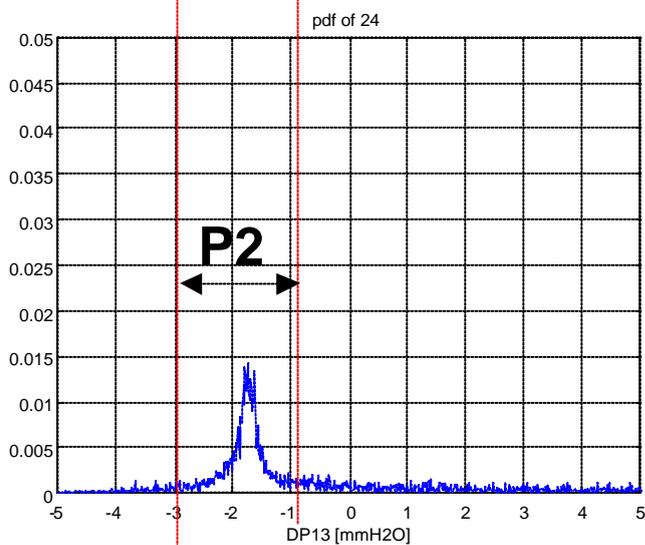


図 4-6
 環状流時の PDF
 (水流量 3.0 L/min ,
 空気流量 20.0 L/min)

4 - 2 流路形状の影響について

水流量 1.4 L/min

図 3-1-1 ~ 図 3-1-13 を見てわかるように，T 字管においては，差圧変動・PSD・PDF ともにあまり変化が見られない。

一方，直管においては，図 3-1-5 以降，激しい差圧変動，PSD における低周波領域での強いピーク，PDF における双峰状分布が見られ，観察において，脈動現象が観察された。また，同じ気泡流状態においても違いが見られる。PSD においては T 字の方はほぼ平坦なのに対し，直管の方は弱い分布が空気量の少ない段階から見られる。また，PDF において，T 字のほうはピークが鋭い分布であるのに対し，直管の方はピークが鈍く，なだらかに広がっている。全体としても，T 字管より直管の方が差圧，PSD，PDF ともにばらつきが大きい。このことは，T 字管よりも直管の方が気泡の物理量が分散しやすいことを示している。おそらくそれは，直管は上端を大気開放されており，そのために T 字分岐されて，より圧力の変化が激しいことによるものであろう。その結果，T 字管では，気相・液相の不均一が小さく，脈動がおこる条件を満たす前に気相が液相を巻き上げる条件を満たして気泡流からチャーン流・環状流へと移行したのに対し，直管においては，気相・液相の不均一が激しいために，気相が液相を巻き上げる条件を満たす前に，重力による失速が原因の液相の逆流が起こり，気泡流から脈動へと移行したのだと考えられる。

水流量 3.0 L/min

図 3-1-17 ~ 図 3-1-18 を見てわかるように，同条件下において，T 字管においては気泡流であるのに対し直管では脈動している。また，水流量 1.4 L/min における実験と同様に，ここでも，T 字管では脈動 PDF 波形が見られない。この要因は 1.4 L/min の実験と同様であらう。

水流量 5.0 L/min

T 字管においても脈動 PDF 波形が見られるようになる(図 3-1-34)。水流量がある程度大きくなると，気相の巻き上げ効果よりも液相が逆流しようとする効果が勝り，脈動が生じるものと考えられる。

総括

大気開放した垂直直管よりも T 字管の方が母管に対する影響が少ない。図 3-1-38 ~ 図 3-1-40 を見るとわかるが，差圧のばらつきを示す標準偏差も，概して垂直直管の方が T 字管よりも大きく，流れが不均一であることを示している。また，標準偏差の推移を見ると，低水量ではその傾向が大きく異なるのに対し(図 3-1-38)，水流量がある程度大きくなると傾向がほぼ似通ったものとなる(図 3-1-39, 40)。これは，流動様式の違いによるものであり，流路形状の影響は低水流量だと大きく，高水流量だと小さくなるといえる。それは，上端が開放されたことによる母管内圧力変化によるものと考えられる。T 字分岐が起

こす乱流や流れの剥離の影響で、T字管の方が不均一流となりやすく脈動が起こりやすいと予想していたが、その効果はあまり大きくないといえる。また、観察により、脈動現象の本質はスラグ流であり、その気泡があまりに大きく速いために側壁の液相が逆流してしまい、後方からくる流れを乱す現象ではないかと考えられる。

4 - 3 脈動特性について

4 - 3 - 1 脈動開始点

脈動開始点グラフ（図 3-2-1）を見ると，脈動が開始する水流量と空気量の間には相関関係が見られたが，低水流量域（D 1）と高水流量域（D 2）の間には遷移領域が見られる．この領域は，水流量 2.25 L/min 近傍にあたるが，脈動が開始する空気量が実験するごとに異なり，D 1 に属したり，D 2 に属したりする．（図 4-7 に示す）

なぜこの領域では脈動点が安定しないのかは現時点ではわからなかった．

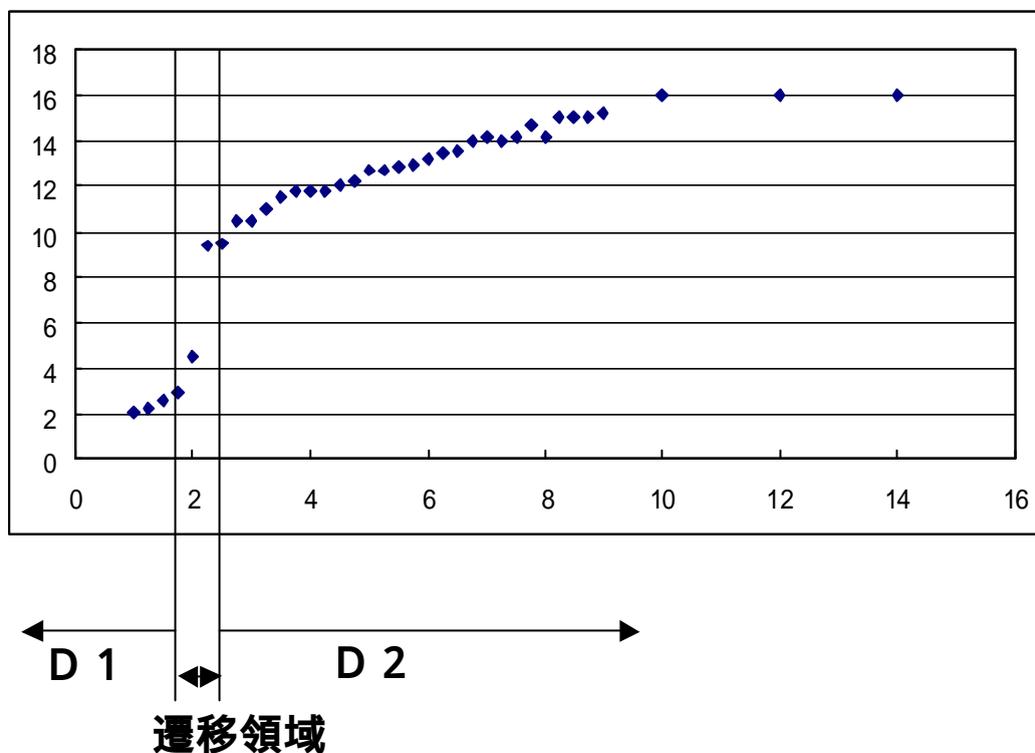
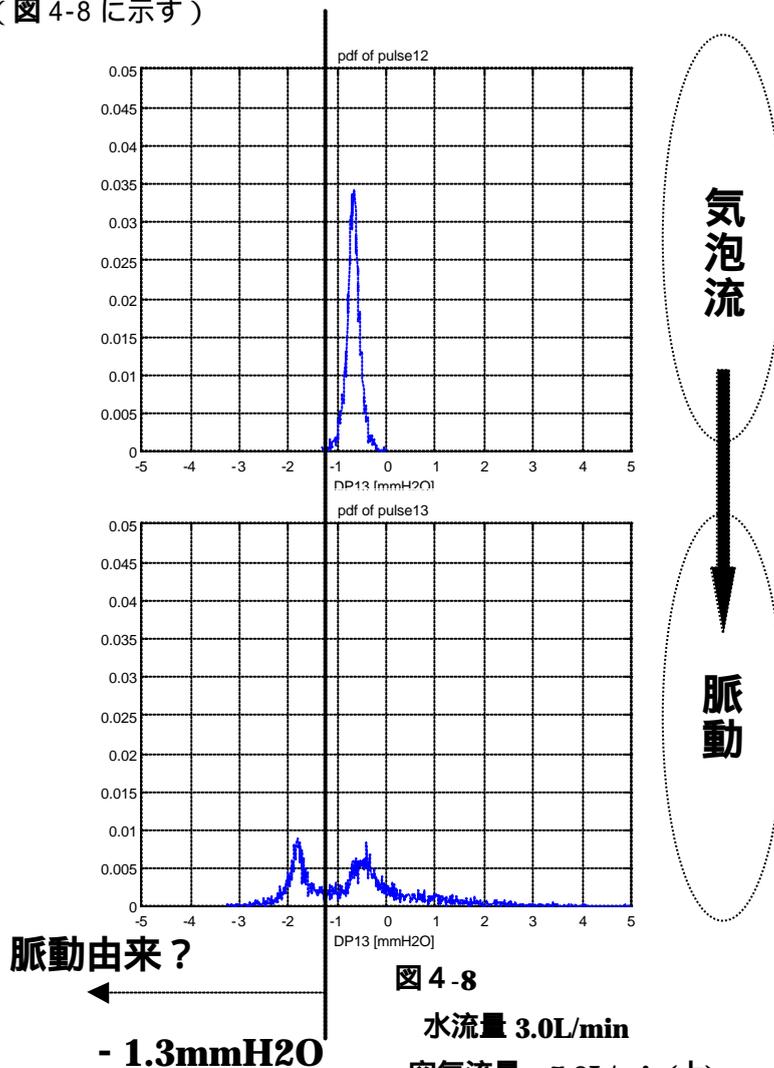


図 4 - 7 脈動開始点推移

4 - 3 - 2 脈動時差圧変動

脈動の周波数を得ることを目的とし、まず差圧変動のPSDに注目した。しかし、低周波部にピークが見られるものの、水流量および空気流量との関連性が見受けられなかった。例えば、図3-2-3と図3-2-4を比べると、同一水量で空気量が増えていくとピークは高周波側へと移っていくようにも見える。一方、図3-2-6と図3-2-7を比べると、同一水量で空気量が増えると新しいピークが現れるように見える。水流量が増えると、全体的に高周波に移行し、全体的な強度が増していくという傾向はあるものの、ピークの選定は主観によるところが多いのでPSDからは脈動由来の周波数を抽出することはできないと考える。

そこで、PDFに注目し、脈動時には気泡流時には見られなかったピークが突然現れることから、新しく現れるピークの範囲が脈動特有の差圧範囲であると考え、この範囲のみに注目する。(図4-8に示す)



そうすると，**図 4 - 9** に示すような差圧変動の波形が得られる．この範囲の波形は離散的なパルスであるので，30 秒間のパルス個数 N を計測し，クオリティ比と平均脈動振動数 $F = N/30$ の関係を求めてみた．(**図 4-10**)

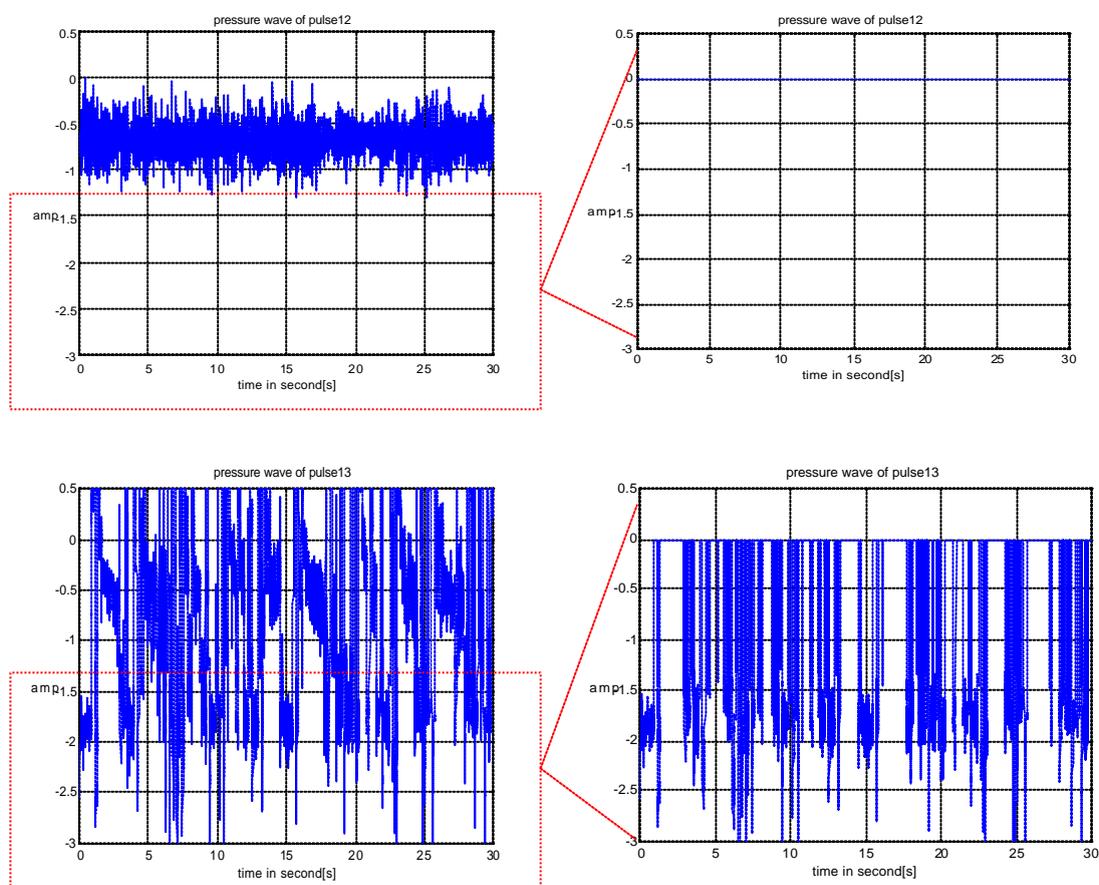


図 4-9 差圧範囲限定
上；水量 3.0L/min, 空気量 7.0L/min(気泡流)
下；水量 3.0L/min, 空気量 10.0L/min(脈動)

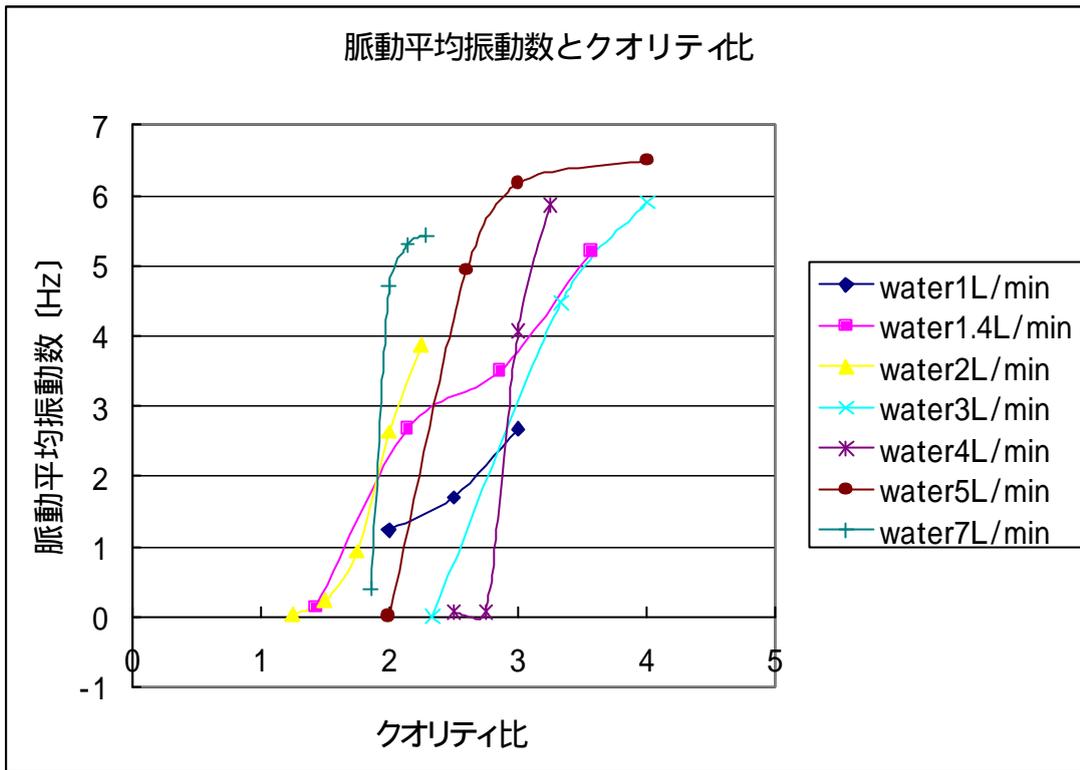


図 4-10 脈動平均振動数

ところが、データ点数の少なさと、実験の精度の問題から、クオリティ比と脈動平均振動数との相関関係を得ることはできず、水流量によって傾向が異なっていることしかわからなかった。

第5章 結論

5 - 1 結論

5 - 2 今後の課題

5 - 1 結論

本実験により、以下の結論を得た

- 1, 本実験においては、垂直直管の流動様式は、気泡流・脈動・環状流の3パターンしか観測されなかった。
- 2, 気泡流・脈動・環状流のそれぞれの流動様式に特徴的なPSD・PDFの波形が得られる。
- 3, 母管の差圧変動は、垂直T字分岐管よりも上端大気開放型垂直直管のほうが激しく、水流量が小さい時と大きい時では傾向が違う。
- 4, T字分岐の母管に及ぼす影響は、母管の流れを乱す性質のものではない。
- 5, 上端大気開放型垂直上昇管ではT字分岐管に比べ脈動が起こりやすい。
- 6, 本実験においては、脈動が開始する空気流量と水流量のあいだには、遷移領域を伴う相関関係がある。

5 - 2 今後の課題

本研究においては，T字管と直管とを比較することによってT字分岐の母管に及ぼす影響を考察し，その影響については結論を導き出せたが，さらに行った脈動について考察ではその動的特性については導き出せなかった．その原因は主にデータの不足によるものであった．本実験で見られた脈動は数Hz程度のものであり，脈動の周期性や非線形性を考察するには，長時間に渡る計測が必要である．長時間に渡って計測すれば，脈動の特性が導かれ，そのメカニズムの理解の一助になるかもしれない．

参考文献

- 1 , 松井剛一ら , 水平管内気液二相流の圧力降下変動の統計的性質と流動様式 , 機械学会論文集 (B 編) , 53 巻 485 号 (昭 62-1)
- 2 , 浅野 等ら , Y 字分岐管による気液二相流の相分離に関する研究 , 日本機械学会論文集 (B 編) , 67 巻 654 号 (2001-2)
- 3 , 上田 敏之 , T 字分岐管における気液二相流の流動特性に関する研究 , 東京大学卒業論文 (2002-2)
- 4 , 藤井ら , T ジャンクションによる気液二相流の相分配特性 , 日本機械学会論文集 (B 編) 62 巻 594 号 (1966-2) 447-453
- 5 , 赤川浩爾著 , 機械工学大系 気液二相流 , コロナ社

謝辞

本論文の作成に際して、ご指導いただいた庄司教授には心から感謝いたします。
実験装置の組み立てを手伝っていただき、様々な要望を快く引き受けてくださった渡辺技官には大変お世話になりました。

二相流研究の先輩として稚拙な僕の意見にも丁寧に答えてくださった伊藤さんには大変感謝しております。

Matlab のソフトの使い方を教えてくれ、いろいろ心配りをしていただいた丹下さんには、本当に助けられました。

同じ 4 年生の岩本君、奈良本君、山本君、吉澤君たちのおかげで、楽しく研究することができました。

そして最後に、なにからなにまで僕の研究の面倒を見てくれた wang さん、本当にお世話になりました。

以上

通し番号 1 ~ 61 完

卒業論文

平成 15 年 2 月 7 日提出

1 0 2 0 3 平兼慎司