

水中探査の場合

- ・媒質：水 → 音速 1430m/s 密度 1000(kg/m<sup>3</sup>)
  - ・破損モデル → 境界条件 音響インピーダンス 1.43—e6
- (波長変化により、分解能向上させるため 100Hz～1kHz まで 20Hz 間隔で詳細計算)
- 第 1 波(直接波)・・・ $0.4/1430=0.000279(\text{sec})$
- 第 2 波 (破損箇所での反射波)・・・ $(0.9+0.5)/1430=0.000979(\text{sec})$
- 右端反射波・・・ $(3+2.6)/1430=0.00391$

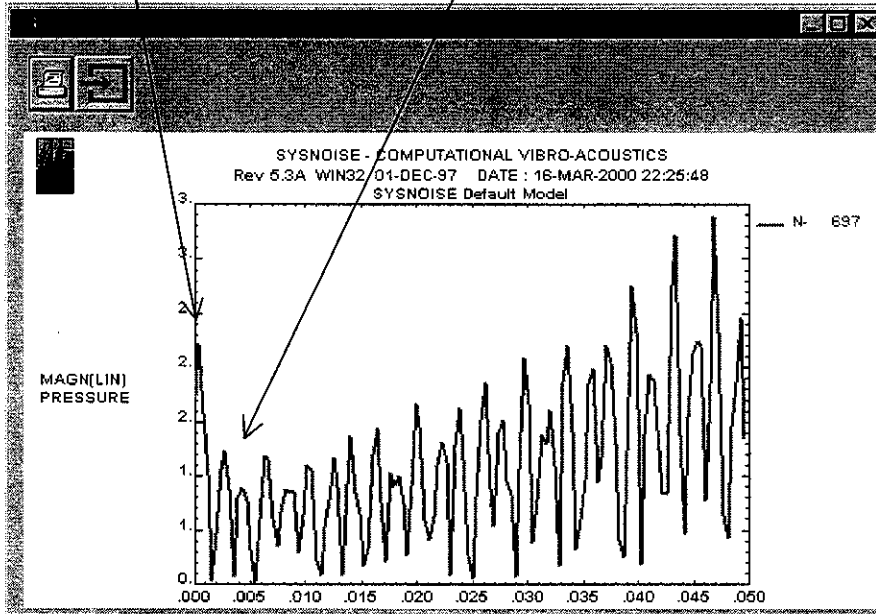


図 3.3.10 受信点1におけるインパルス応答

第 2 波 (破損箇所での反射波) 右端反射波 両端多重反射波

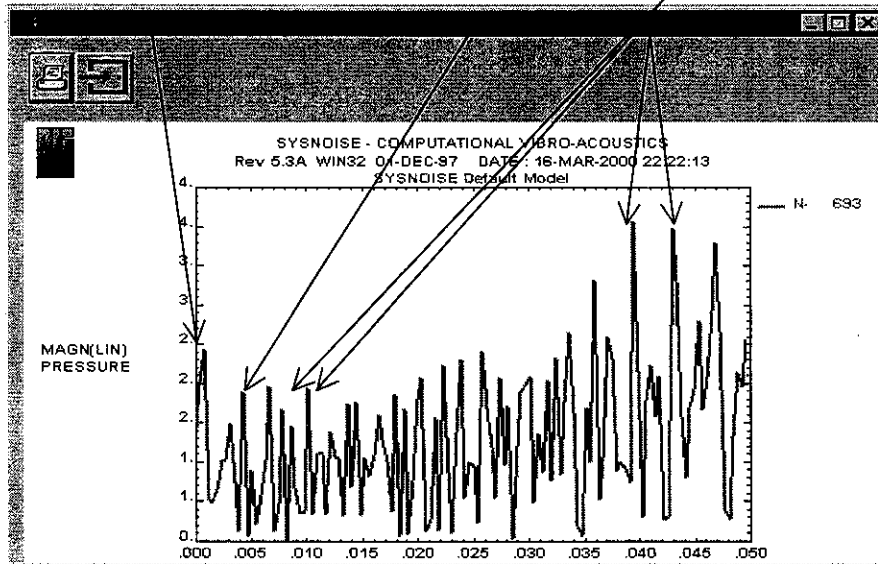
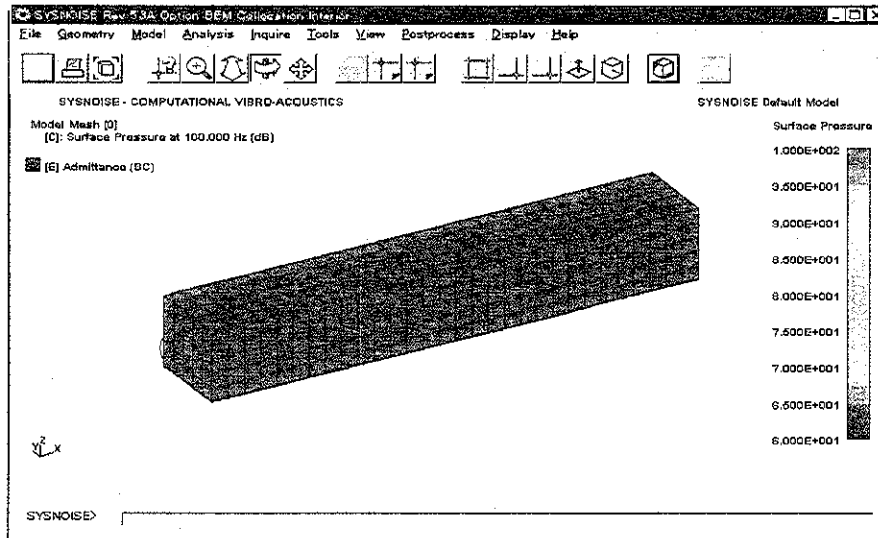
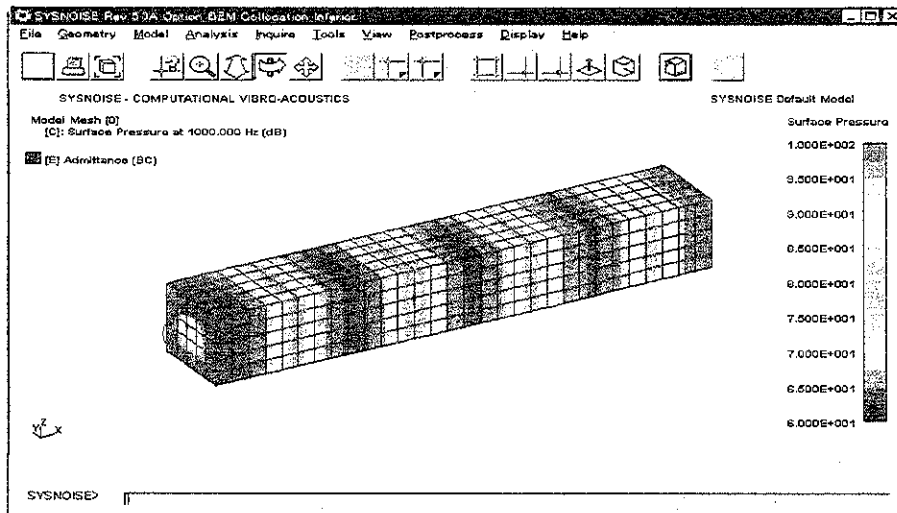


図 3.3.11 受信点2におけるインパルス応答



100Hz



1000Hz

图 3.3.12 配管表面音压分布

②音響探査による簡易水中実験（アクティブ音波注入法）

■目的

破損箇所で局所的に流速変化が起こると、音響インピーダンスが変化し、水中スピーカで発生させた音波が反射する。破損箇所を挟む形で離間配置した2本の水中マイクで反射波の到達時間を検出し、水中音速を乗じることで、破損位置を推定する。この原理を実証するにあたり、まずは簡易的な試験で水中スピーカ、水中マイクの特性を確認し、今後のフィールド試験へ向けての問題点を洗い出し、手がかりとなる要因を考察する。

■実験方法

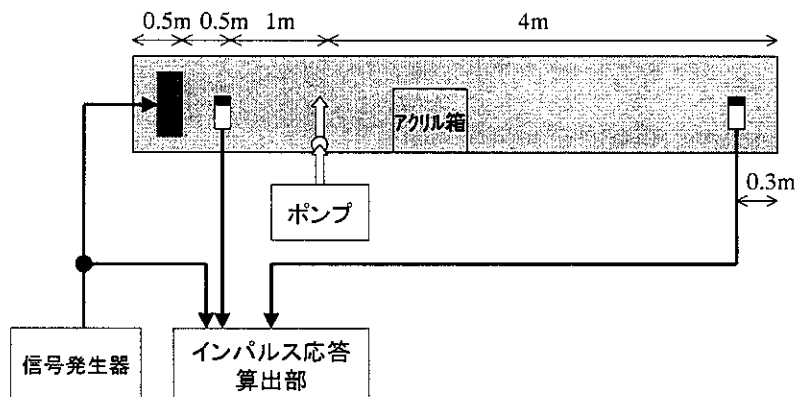


図 3.3.13 簡易試験システム構成

水槽：全長 6 m たて×よこ=0.4m×0.4m 材質 アクリル（1 mm）  
 水中マイク：ウエタックス(株) アクアホーン(RH-328) 水深 50m 耐圧 0.3W 出力  
 水中スピーカ：フォステックス(株) US300 全指向型 出力 60W 最大使用水深 3 m  
 音波注入条件：

- (1) 0~10kHz のランダム信号
- (2) 100~10kHz のスイープ周期信号

上記条件で発生させた音波の音圧信号を水槽内に離間配置したマイクで検出する。そして、3つの測定条件の違いによる音波の水中伝搬の様子を調べ、本技術開発への手がかりとする。

測定条件：

- ① 対策なし（静水時）
- ② 口径 5cm の穴からポンプで強制的に水槽内に水注入  
→局所的に流水発生（模擬漏水）
- ③ 水槽内に反射体（アクリル箱）設置

注) 本技術は漏水により局所的に発生する媒質（水）の流れを手がかりとしていることから、本試験では流れを起こす手段として、ポンプを用いて強制的に水槽内に水を注入して行っている。なお、反射体は両端の壁面以外での反射の様子を調べるために設置したもので、漏水とは直接的には関係はない。

測定項目：

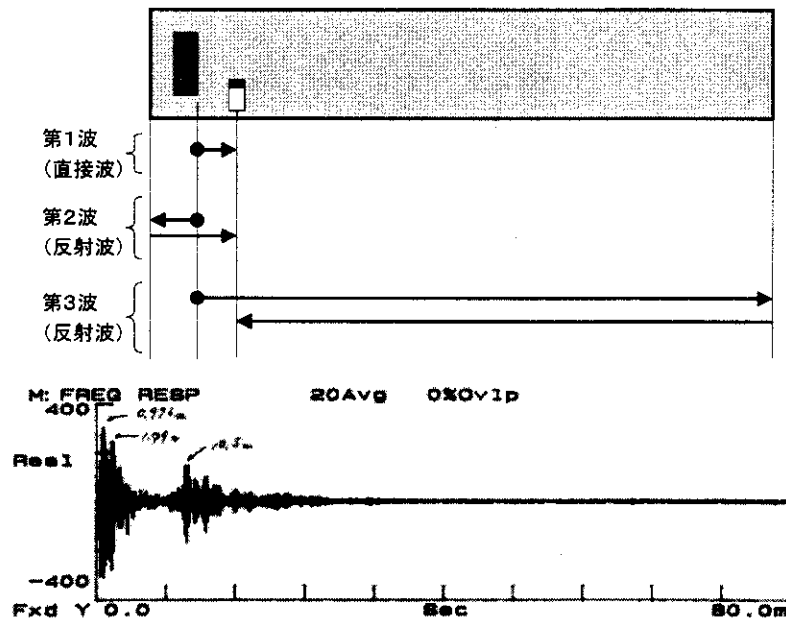
インパルス応答（検出信号 2 点間）	測定条件 ①	②	③
マイク 1 - 発生信号間			
マイク 2 - 発生信号間			
マイク 2 - マイク 1 間			

## ■現象分析

実験：インパルス応答計測など（水槽内の伝搬状況の確認）

解析：SYSNOISE（周波数応答→逆FFT）

### （1）対策なし（静水時）



- 考察ポイント
- ・周波数の違いによる反射波強度
  - ・スピーカ位置、マイク位置の違いによる反射波強度
  - ・水体積の違いによる反射波強度

### （2）水注入時→局所的に流水発生（模擬漏水）

- ・流速（水注入圧）の違いによる反射波強度

### （3）水槽内に反射体（アクリル箱）設置

- ・反射体の位置、大きさの違いによる反射波強度

## ■対策

模擬漏水（水注入）位置推定精度向上のための対策案の検討

- ・音波注入の最適化（周波数、スピーカ位置、音波の種類（パルス、ランダム、スイープ））
- ・マイクの最適化（位置）

## ■水槽モデル試験及びシミュレーションから得た考察

検知可能な最小断面（破損断面／配管断面）の見積り  
有効な配管口径／全長

■結果

水中音波の伝播特性

音波注入条件： (1) 0~10kHz のランダム信号

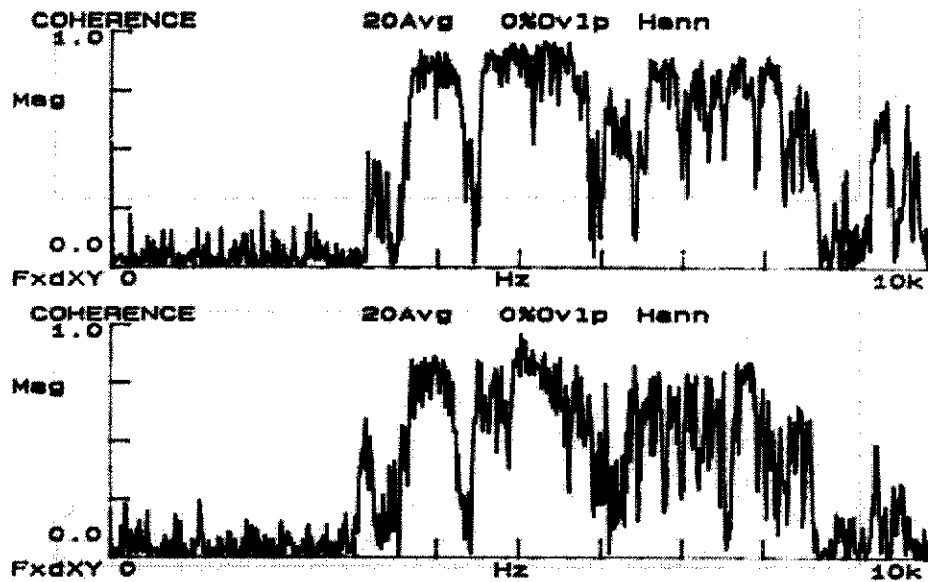


図 3.3.14 マイク2-発生信号間のコヒーレンス(相関性)  
上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

水中では 3kHz 以下では約 5 m 離れた地点(マイク 2)までも音波で伝搬しにくい。音量を上げれば S/N が向上し、全く伝わらないということはないが、相対的に 3kHz 以上の高周波数帯域の方がよく伝搬しやすい。

途中に局所的な水の流れがあっても、ほぼ特性は同じであった。

・水中音波の伝搬経路の確認

音波注入条件： (1) 0~10kHz のランダム信号  
 測定条件： 対策なし (静水時)

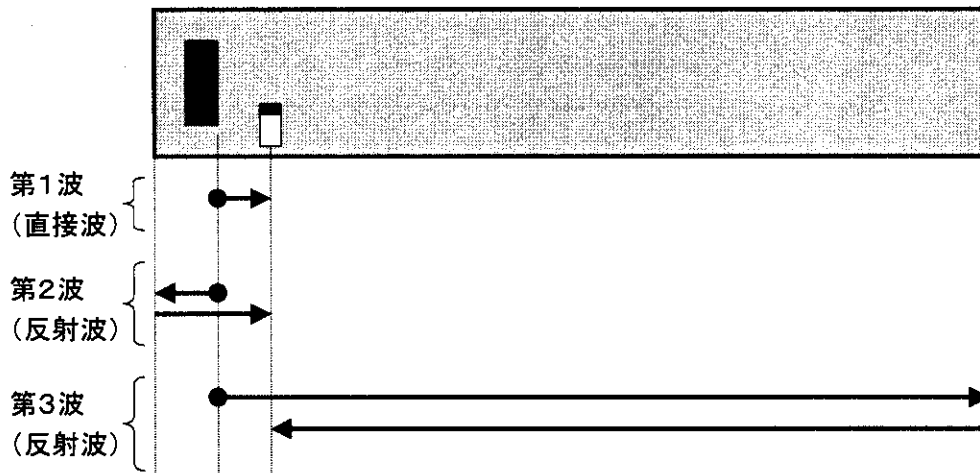


図 3.3.15 スピーカから発生した音波がマイク1に伝搬する経路  
 (時間の短い順に)

第1波 (1.97msec) 第2波 (1.95msec) 第3波 (10.43msec)

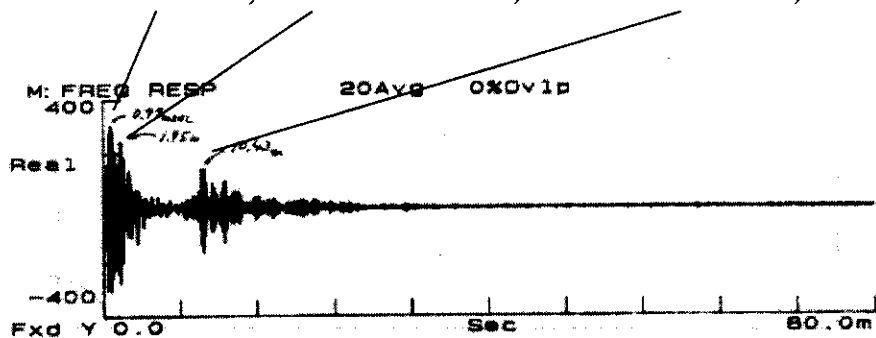


図 3.3.16 マイク1-発生信号間のインパルス応答

注) 図中のピーク時間はスピーカの応答時間とスピーカからの音波がマイク1まで到達する時間の合計である。(スピーカ応答時間は約 0.698msec)

従って、2つのピーク間の時間差が図2の音波伝搬経路差分に相当する。

(時間差 × 伝搬速度 (1100m/s) = 伝搬経路差)

例えば、第1波と第2波の経路差 =  $0.98\text{msec} \times 1100 = 1.078\text{m}$

→ 左端からマイク1までの距離約 0.5m

第1波と第3波の経路差 =  $9.46\text{msec} \times 1100 = 10.4\text{m}$

→ 右端からマイク1までの距離約 5mとなり、

ほぼ実際の配置と一致する。

音波注入条件： (1) 0~10kHz のランダム信号  
 測定条件： 対策なし (静水時)

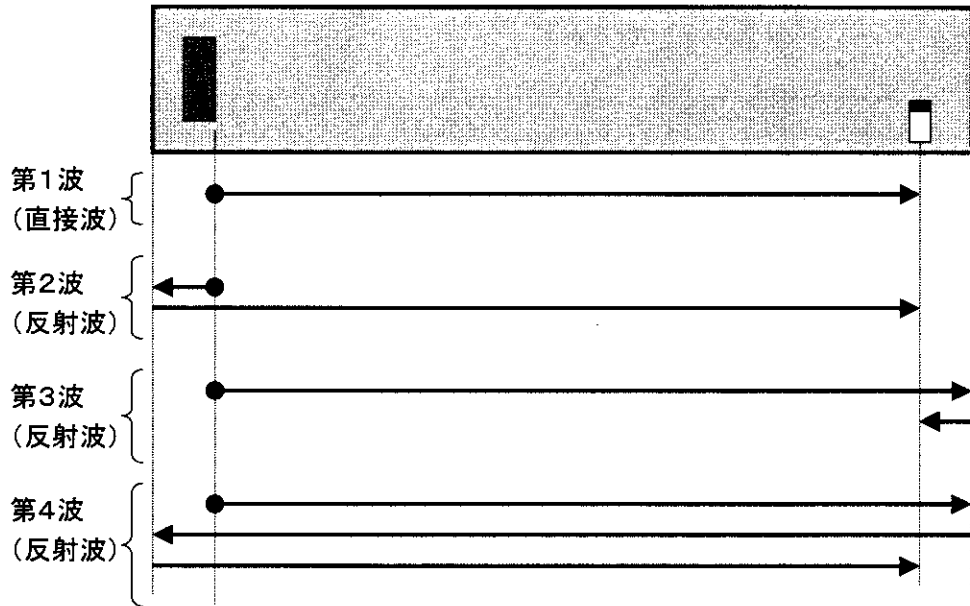


図 3.3.17 スピーカから発生した音波がマイク1に伝搬する経路 (時間の短い順に)

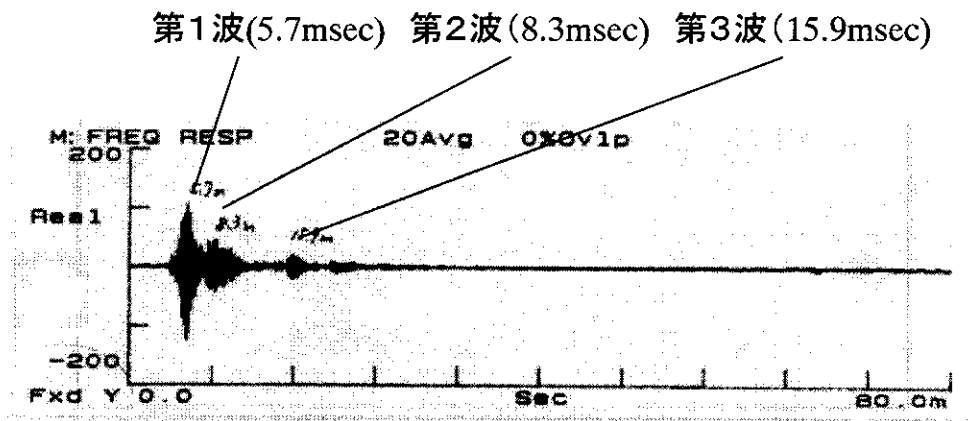


図 3.3.18 マイク2-発生信号間のインパルス応答

反射体(アクリル箱)の有無による違い

音波注入条件： (1) 0~10kHz のランダム信号

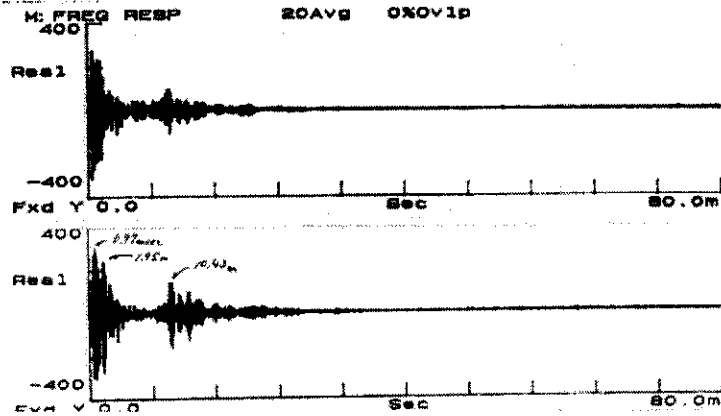


図 3.3.19 マイク1-発生信号間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

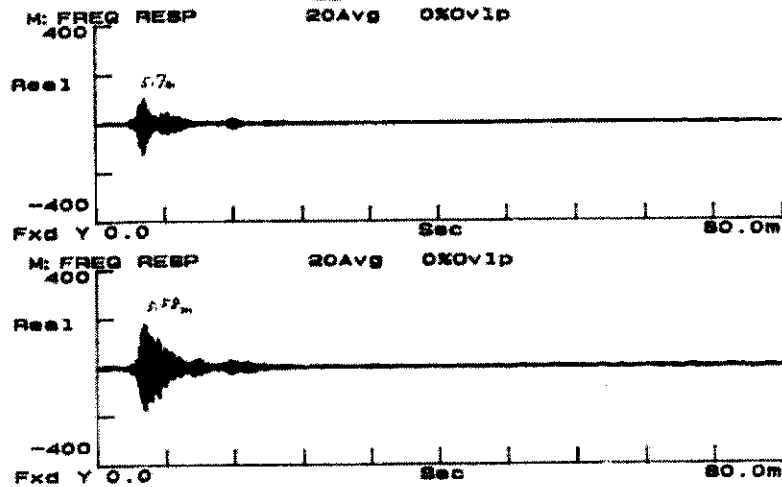


図 3.3.20 マイク2-発生信号間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

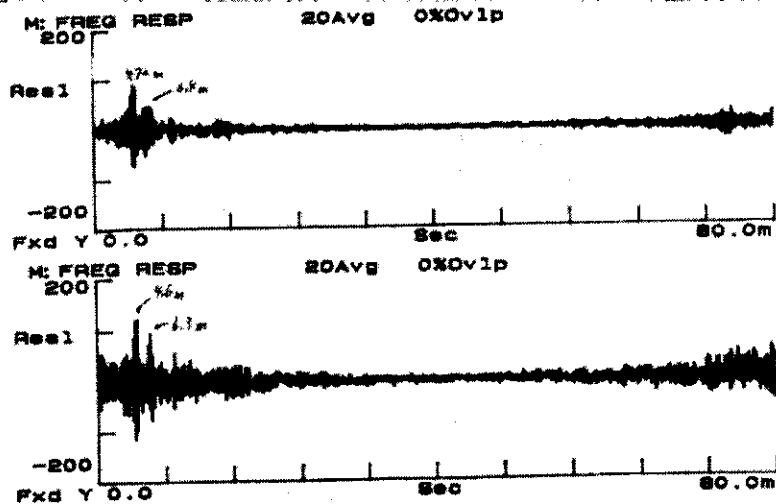


図 3.3.21 マイク2-マイク1間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)



模擬漏水(水注入)の有無による違い

音波注入条件： (1) 0~10kHz のランダム信号

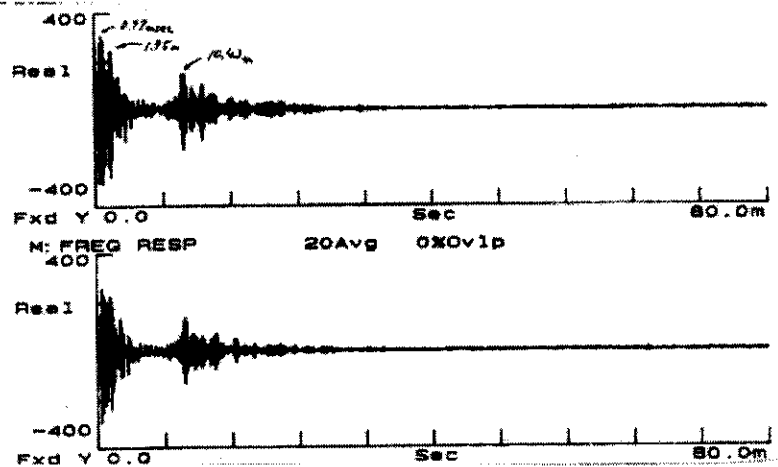


図 3.3.22 マイク1-発生信号間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

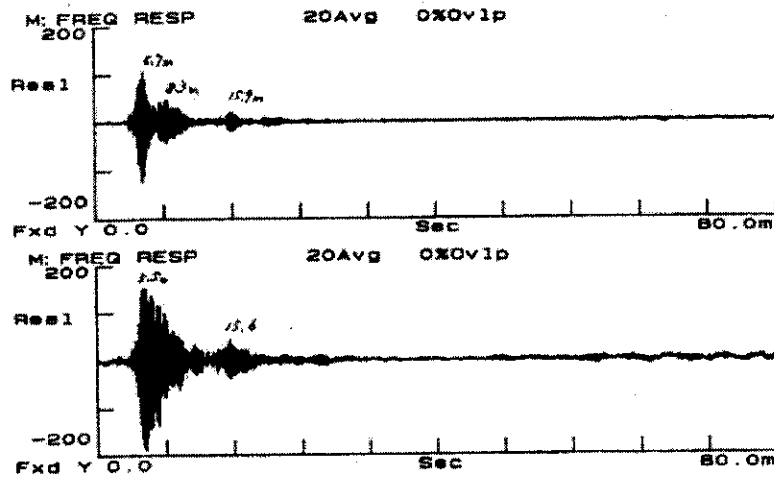


図 3.3.23 マイク2-発生信号間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

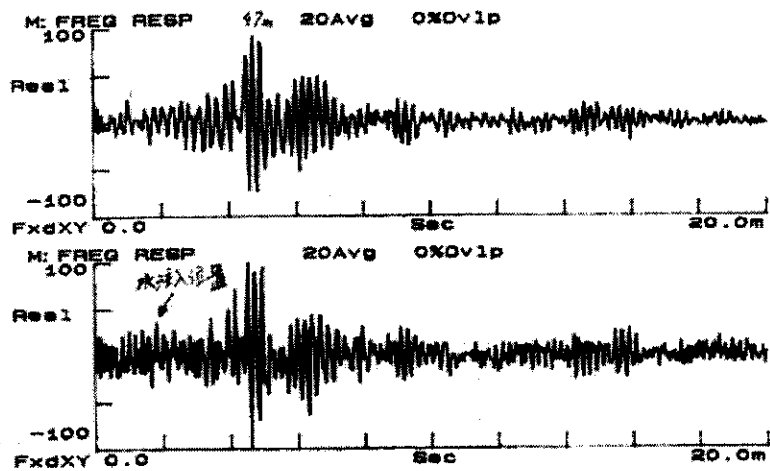


図 3.3.24 マイク2-マイク1間 上図(水注入なし) 下図(水注入あり)

■考察

前年度まで行ってきた空管検知の場合は、現象把握を簡単にするため音波の進む方向が1次元となる(ダクト長手方向となる)平面波を用いた。平面波となる周波数範囲は音速と管口径で決まり、 $1.2 \times \text{音速}(340\text{m/s}) / (2 \times \text{口径})$  (Hz) 以下となる。

今回の水槽基礎試験では音速は1100m/s、口径(直方体たて・よこ0.4m)より、1375Hz以下が平面波となる。しかしながら、この範囲は高周波数帯域に比べ、音波が伝搬しにくいことがわかった。そこで、水中試験では平面波でなくなる、10kHzまでの高周波数帯域を発生音として用いて、実験を行った。

本来この周波数領域では図3.3.24のような斜め方向へも伝搬するが、卓越しているピーク時間から伝搬経路を推定すると、音波は1次元の伝搬で反射している場合に相当した。したがって、平面波にこだわらなくても信号さえ伝搬すれば、推定できる可能性があることがわかった。

模擬漏水として用いた水注入がある場合はマイク2までのインパルス応答(図3.3.20)を見る限りでは、1)直接波が大きくなる、2)直接波以外にわずかな時間後れのピークが複数重なって現れるなどの違いが顕著に現れた。

ただし、水注入位置に起因したピークははっきりと観測できなかった。これは水注入による水槽内流速が小さかったと考える。

反射体の場合も同様の傾向となった。(図3.3.23)先の水注入はいいかえれば水中内に反射面を起こすことであることから、実際の反射体と同じ傾向であることはうなずける。次回は周波数ごとに詳細に音波を発生させ、周波数と反射強度との関係を考察する。

■今後の予定

水槽基礎実験ではこれ以上水注入量を増すことはできない。そこで、実際の水道管にて漏水を発生させ、同様の試験を実施する予定である。

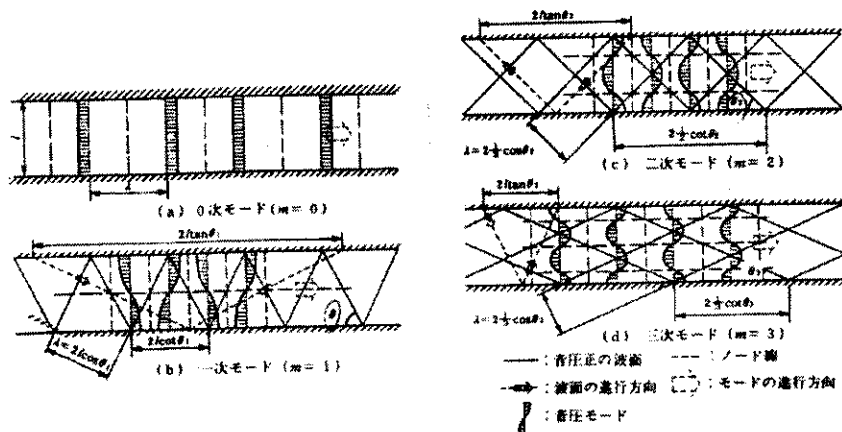
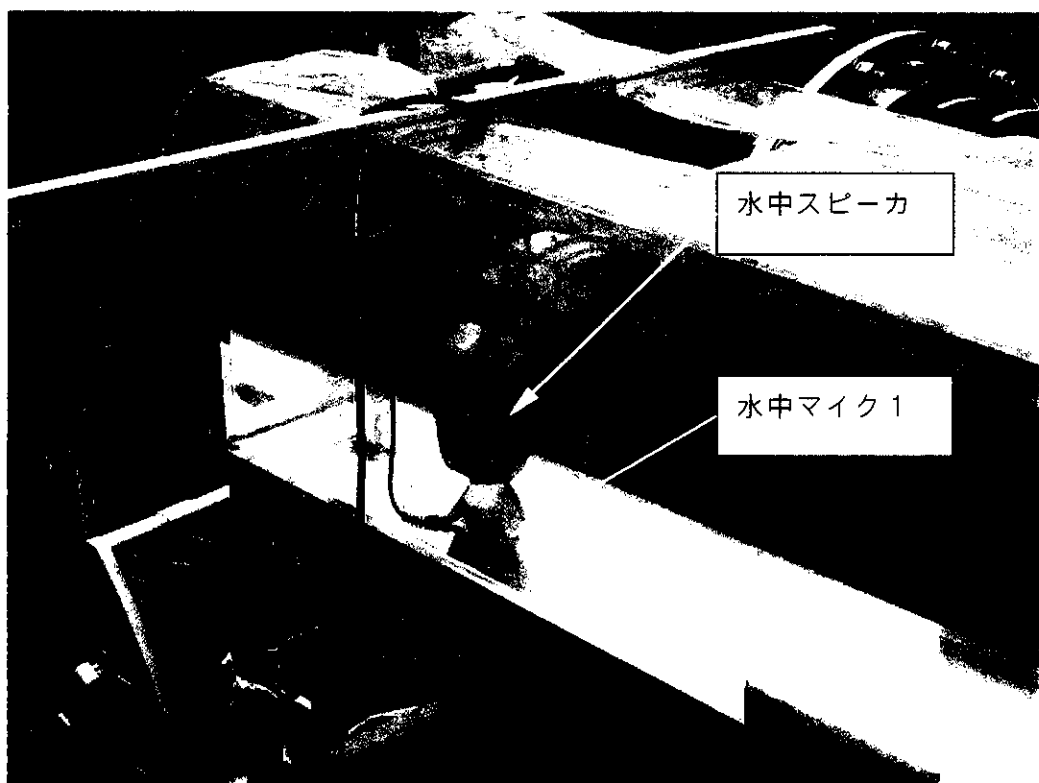
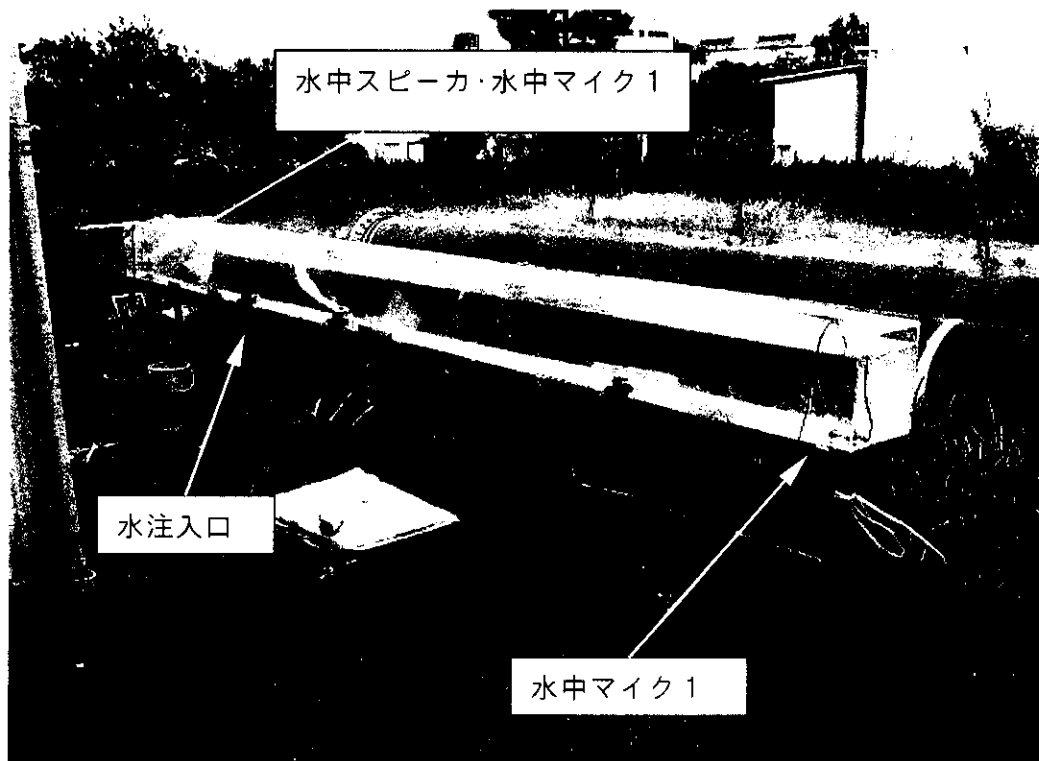
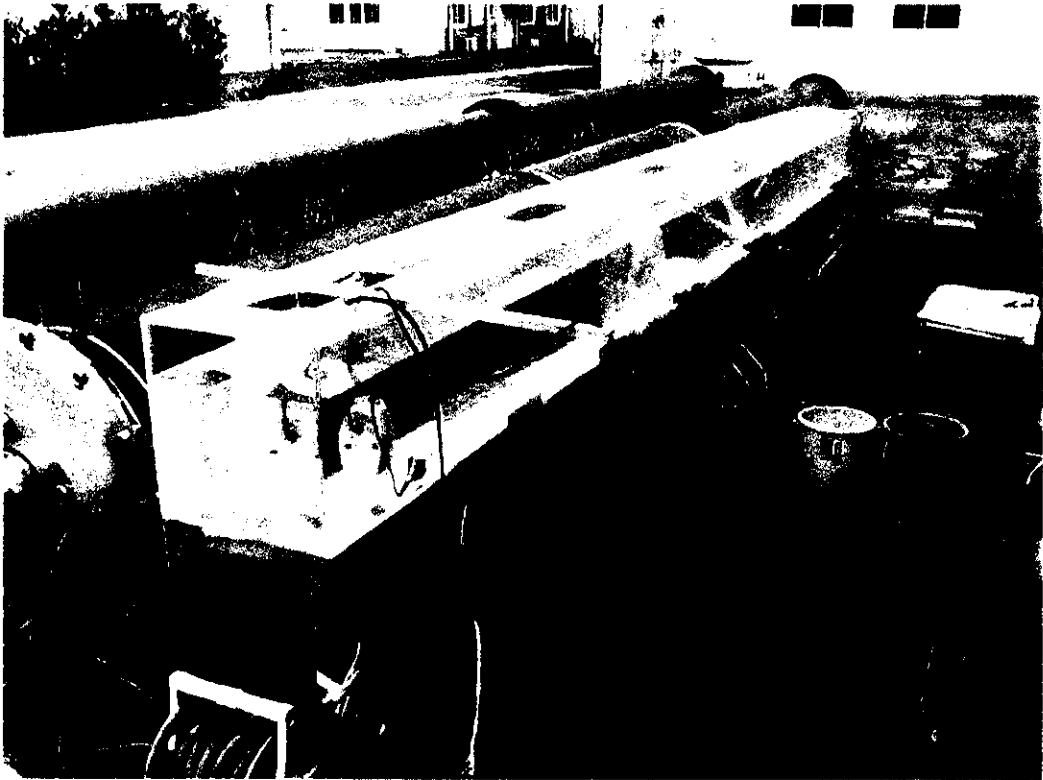


図 3.3.25 ダクト内部の音波伝搬の様子

(参考) 状況写真





2) 音圧・水圧・(圧力波) による漏水監視手法の検討 (概要)

(1) 基礎的概念/既存の調査方法の整理実施予定 (平成 11 年 12 月～平成 12 年 4 月)

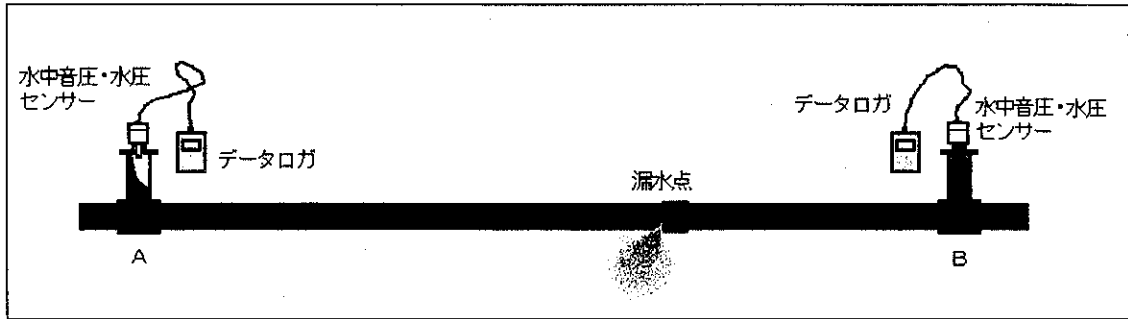


図 3.3.26 センサ設置イメージ

① 正常時 (漏水発生前) (A および B 点)

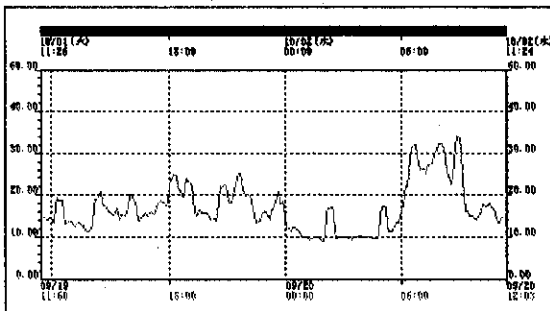


図 3.3.27(1)音圧グラフ

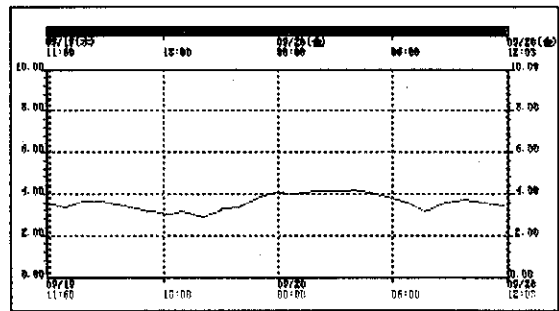


図 3.3.28(1)水圧グラフ

② 異常時 (漏水発生後) (A および B 点)

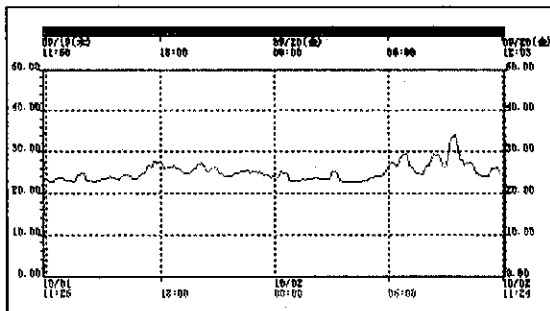


図 3.3.27(2)音圧グラフ

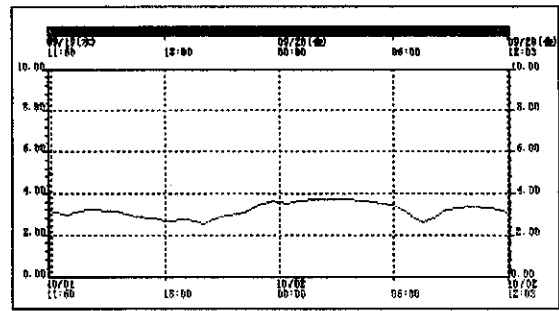


図 3.3.28(2)水圧グラフ

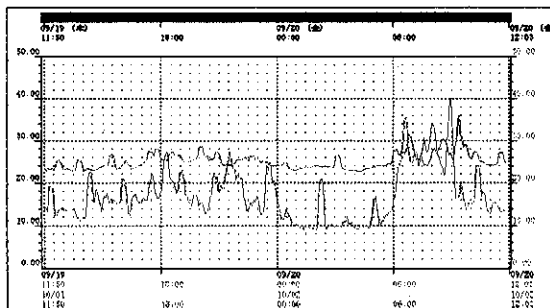


図 3.3.27(3)正常時との音圧比較

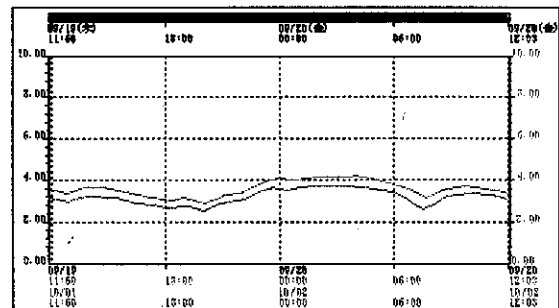


図 3.3.28(3)正常時との水圧比較

## (2) 漏水判定の検討（基礎実験）

正常の状態から、大きな漏水が発生する時には音圧・水圧の変化と圧力波が発生する。

音圧・水圧の変化は変動の少ない深夜の時間帯ほど識別しやすい。

また、圧力波は既存の研究結果より、小さな漏水発生による圧力波はポンプ稼動等によるものとの識別が困難とされている。したがって、今回、圧力波の測定は漏水判定の補助データとして扱う予定。

実験は①漏水発生の前後と②漏水発生時に分けて行う。また、位置の探知方法として、同センサを使用する③相関法による探知実験を行う。

実験は横浜市川井浄水場内に設けた実験施設（別紙：実験施設と実験条件）を使用する。

### ①漏水発生の前後でのデータ比較

漏水発生の前後での水中音圧・水圧の測定情報から漏水判定基準を検討する。

測定時間はノイズの影響の少ない深夜時間帯を想定して行う。

図 3.2.29 は図 3.2.27.3 および図 3.2.28.3 からの深夜帯データ比較イメージ。

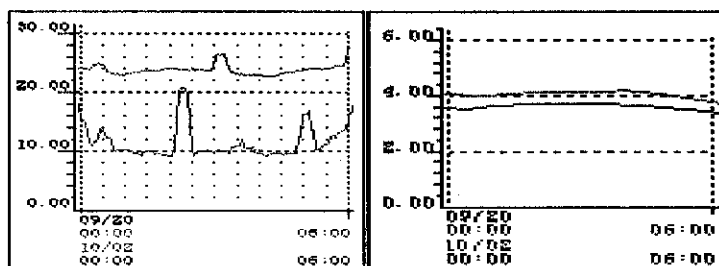


図 3.3.29 音圧・水圧比較（深夜時間帯）

### ②漏水発生時のデータ検証

漏水発生時の水圧・音圧の変化および圧力波を実験により測定する。主に漏水による圧力波発生の有無を検証し、漏水判定の補助情報となるかを検討する。

圧力波の測定実験には、ハンマーロガ（ウォーターハンマー測定器（開発中）、mm Sec 間隔でのロギングが可能）を使用予定。

2 地点にセンサーを設置し、圧力波の伝播時間による検討も実施予定。

### ③相関法による探知

①で使用したセンサーを相関式漏水探知器と接続して位置の探知実験を実施。

## (3) 測定方法の検討／測定器の設計

### ①測定方法（データロギング方法）の検討

基礎実験の結果より、データロギング方法を検討し、データロガを設計試作する。

測定したデータはパソコンに排出し、漏水有無または推定ランクの判定方法を検討。

### ②測定器（ロガー内部のソフトウェア）の設計

①の結果からロガー用の簡易的な漏水判定（ランク）のソフトウェアを設計、試作する。

## (4) 試作器による実証実験と改良検討／まとめ

音圧・水圧による漏水監視装置（プロトタイプ）概要

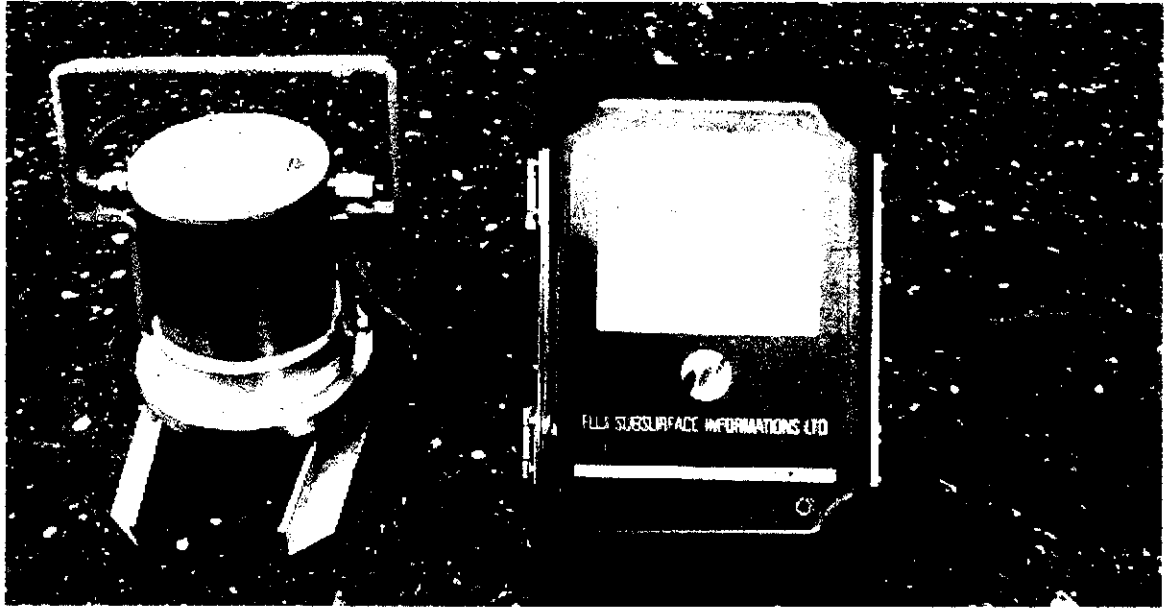
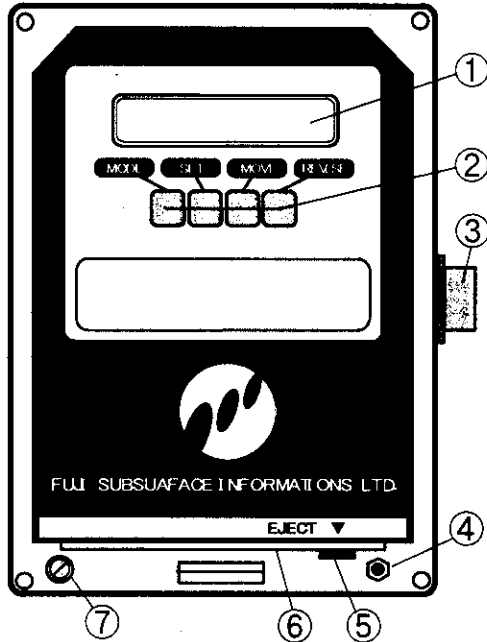
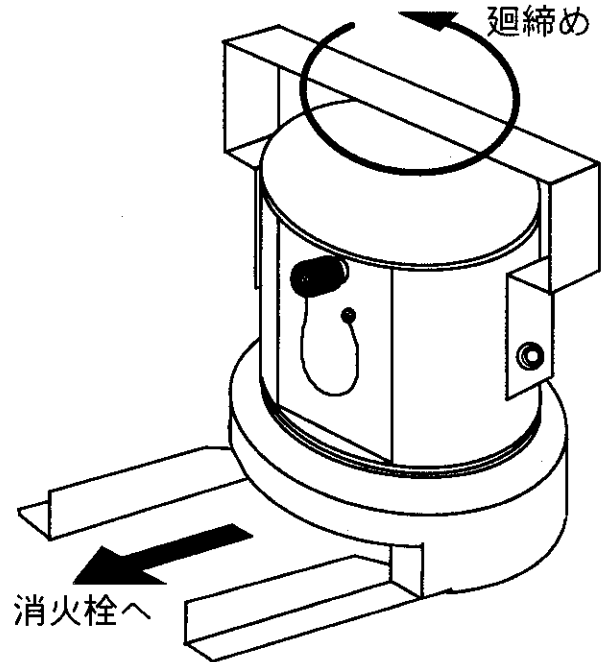


写真 音圧・水圧データロガー

データロガー



音圧・水圧センサー



①LCD表示部

②操作キー

③センサー入力コネクタ

④ヘッドホンジャック

⑤メモ리카ードEJECTボタン

⑥メモ리카ード挿入部

⑦ヘッドホンボリューム

### 3) 川井浄水場内実験設備の改造計画

#### a. 実験設備等の改良の必要性

平成8～10年度の研究のために横浜市川井浄水場内に設けた実験設備を本研究でも利用することにしたが、かつて実施した実験は主に空管を対象としたものであった。

今年度からの満水時を対象とした漏水箇所探知実験にあたり、必要水圧等を確保できないことが明らかとなったため実験設備までの連絡方法及び実験設備の一部について変更する必要が生じた。

#### b. 実験設備改良条件

今回実施する実験のために実験設備が満たすべき条件は以下のとおりである。

動水頭	$H_d=10\text{m}$ 以上
流速	$v=0.1\sim 0.2\text{m/sec}$ 程度
流量	$Q=23\text{m}^3/\text{hr}$ 程度（漏水量を含む全流量であり、上記流速条件より算定）
漏水量	$Q=11\text{m}^3/\text{hr}$ 程度（上記流量の内数であり、実験管路 $\phi 200$ 、漏水量 $v=0.1\text{m/sec}$ 相当より $Q=11.3\text{m}^3/\text{hr}$ と試算）

#### c. 実験設備にいたる連絡管の現況とその改良方法

大和バイパス沿に布設された配水管 $\phi 400$ より分岐する $\phi 100$ が川井浄水場4号配水池廻りに布設してあり、当該配水管末より $\phi 50$ にて受水タンク（ $1.8\text{m}^3$ ）に引き込まれている。

実験管路は圧力を開放された受水タンクを水源として $\phi 75$ により連絡されている。

また、受水タンクの流入管と流出管を連絡するバイパス管（ $\phi 50$ ）が設けられているが常時は閉である。

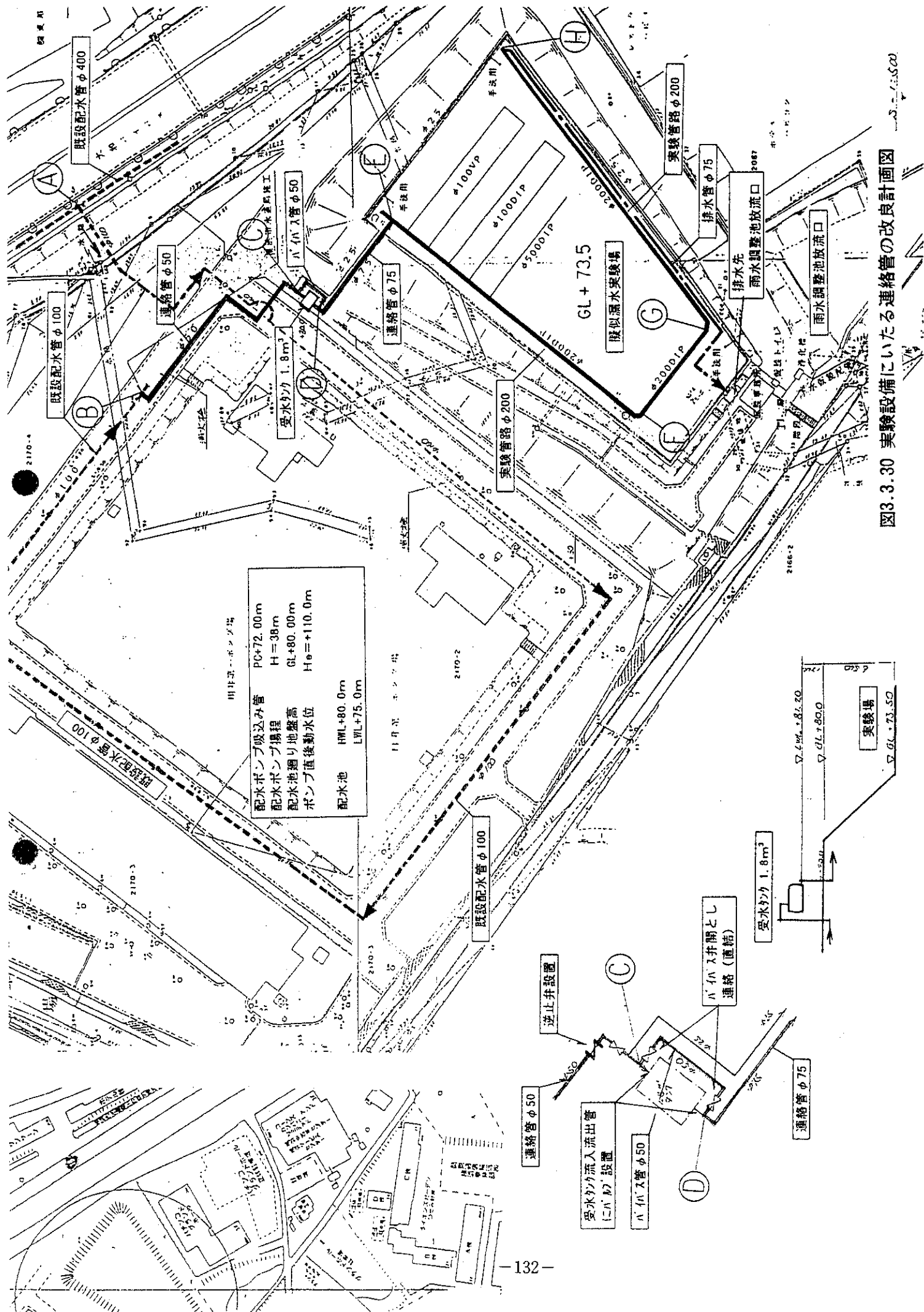
実験設備にいたる連絡方法の改良方法を図3.3.30に示しており、改良項目は以下のとおりである。

- i 今回の実験にあたり、受水タンクからの自然流下の場合、最大静水頭で7m程度しか確保できず実験の条件を満足しないことから既存バイパス管（ $\phi 50$ ）を利用して直結方式にする。
- ii 万一の逆流防止のために逆止弁を設置する。
- iii 量水器を設置し使用水量を計測する。
- iv 実験に使用した水の排水先を雨水調整池放流口とする。

#### （参考）既設実験設備の能力

受水タンクより自然流下の場合	$Q=20.8\text{m}^3/\text{hr}$ （動水頭 $H_d=6\text{m}$ ）
直結方式の場合	$Q=25.0\text{m}^3/\text{hr}$ （動水頭 $H_d=10\text{m}$ ）





配水ポンプ吸込み管 PC+72.00m  
 H=38m  
 配水ポンプ揚程 GL+80.00m  
 配水池廻り地盤高 He=+110.0m  
 ポンプ直後動水位  
 配水池 HWL+80.0m  
 LWL+75.0m

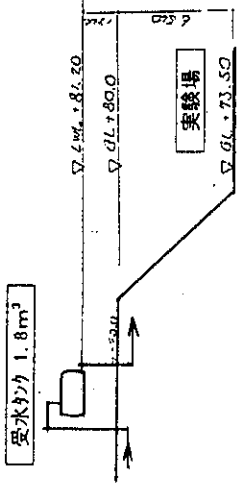


図3.3.30 実験設備にいたる連絡管の改良計画図

横浜市川井浄水場内テストコース (実験概要図)

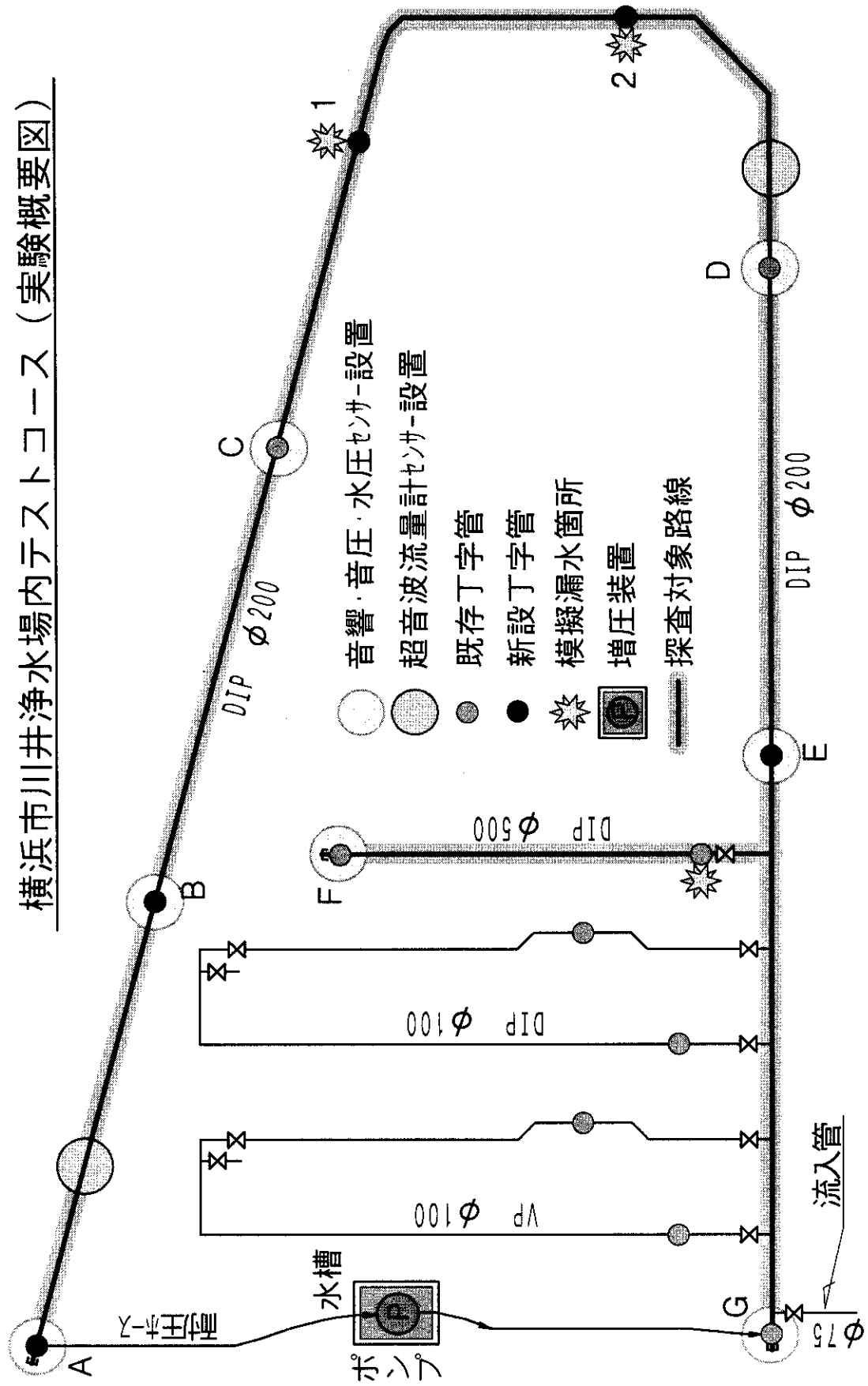


図 3.3.31 実験設備改良計画図

4) 実験工程と使用水量

i. 実験の目的

既設実験施設を使用し漏水箇所特定技術の実験を行うため。

ii. 実験日程（概案）

①フジ地中情報（株）

項目	月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
実験計画の作成		←→											
H12年度分実験				*1	←→								
次年度分予備実験												*2	←→

（年間計10回）\*1：6月は予備実験として1回実施予定

7～10月の本実験は月2回程度実施予定

\*2：H13/2に補足および次年度計画分の予備実験を予定

②（株）東芝

項目	月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
実験計画の作成 実験用機材の準備		←→											
H12年度分実験 1)音響実験 2)漏水音・振動検出実験			*1	←→	←→	←→	←→	←→					
次年度分予備実験											*2	←→	

（年間計10回）\*1：5月は予備実験として1回実施予定

6～11月の本実験は月2回（1～2日/回）程度実施予定

\*2：H13/1～2に補足および次年度計画分の予備実験を予定

注) フジ地中と東芝の実験は、同一日には実施しない

iii. 使用水量

実験1回あたり通水時間	2 時間/回
実験時通水量	20 m <sup>3</sup> /時
実験一日あたり使用水量	20 m <sup>3</sup> /時×2時間/回=40 m <sup>3</sup> /回
下水放流量	20m <sup>3</sup> /時（実験1回あたり：40 m <sup>3</sup> /回）

①使用水量 ○フジ 40 m<sup>3</sup>/回×10回 = 400 m<sup>3</sup>

○東芝 40 m<sup>3</sup>/回×13回 = 520 m<sup>3</sup> 計 920 m<sup>3</sup>

②下水放流量 フジ、東芝いずれも実験一回あたり 20 m<sup>3</sup>/時 (=40 m<sup>3</sup>/日)

総放流量は上記と同様 920 m<sup>3</sup>

iv. その他

1) 使用水量は流量計（局量水器）により計測する。

2) 具体的な実験計画は、実験1週間前に提出する。

(資料) 事業体ヒアリング調査結果 (その1: 現在実施している漏水調査・監視について)

事業体名	東京都水道局	千葉県水道局	徳島市水道局	大塚市水道部	名古屋市水道局	神戸市水道局
調査対象	個別測定管(伊豆地区)の管内で管内径4年以上経過し、その管内で漏水検出率が高い(漏水発生率が0.51件/km以上の管)を調査対象としている。	φ300mm以上の管径で管内径4年以上経過し、その管内で漏水検出率が高い(漏水発生率が0.51件/km以上の管)を調査対象としている。	(なし)	(なし)	(なし)	プロック計量と管線調査を組み合わせて、新規調査の初期配水率はプロックを形成して3年経過で計量し、計量配水率を超過すれば管線調査を行う。
調査手法	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他(管圧測定:試用中)	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他	○戸別調査 ○管線調査 ○管線調査 ○プロック計量 ○その他(管線調査) * 従来管線調査と併行していたが戸別調査に移行 * 戸別調査は、配水管調査及び止水体等の管線
検知手法	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他	○管線調査 ○相関調査 ×トレーサ法 ×その他
使用機器	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ○その他(相関調査専用装置)	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ○その他(相関調査専用装置)	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ○その他(相関調査専用装置)	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ○その他(相関調査専用装置)	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ○その他(相関調査専用装置)	○管線計(可変式微小流量測定装置) ×水圧計 ×その他 ○流量計(電子式ウォルトマン) ×水圧計 ×その他
計量精度	20L/分/km * 差別測定作業のしきい値として	未設定	未設定	未設定	未設定	プロック計量による許容配水率は配水管区1km当たり0.6m <sup>3</sup> /h 流量及び管径 流量計φ300mm以下、1~3年経過 (管径)φ300mm以上、4年経過 (管径)φ300mm以上、4年経過
検出率	特に設定なし 作業量から割り戻すと原則1日に1回程度 現状の調査方法は管内の漏水調査にも対応可能と 考えている。	特に設定なし	特に設定なし	特に設定なし	管内管内に、管線調査、相関調査による対応が 可能であるが、管線調査の対応は困難である。	管内管内に、管線調査、相関調査による対応が 可能であるが、管線調査の対応は困難である。 そのため、水圧が上昇するとともに、2次、3次の漏水 調査を実施する必要がある。
課題	水運用センターにおける総合管理の一端で管線調査 検知システムにおける監視を行っている。	(回答なし)	配水システムの流出部に流量計・系統差別に水圧計を設 けて常時監視しており、流量増加または圧力低下で 何か事故が起きていると判断	用水供給管であるため、管線の維持管理が継続的に 必要であること * 漏水した場合は、水量が大いため、一般的には上 部への漏出で漏水が検出されること * 漏水の監視は、漏水管理センターでの24時間体制 体制で、並びに管線調査で対応していること	配水プロック情報管理システムを導入している * 管線(対象口径、配水管径及び配水管線からの分 岐管) * プロック * ポイント * その他	* 一日は10分~15分程度に収集されている。 * 毎日の管内管線調査を月単位で集計し、漏水の 発生があるかどうか判断している。
監視対象	○管線(対象口径φ400mm以上) ○プロック(管線区長22.855km) ×ポイント ×その他	×管線 ×プロック ×ポイント ×その他(漏水装置)	○管線(対象口径φ50~350mm) ○プロック(管線区長8.831km) ×ポイント ×その他	○管線 ×プロック ×ポイント ×その他	○管線(対象口径、配水管径及び配水管線からの分 岐管) * プロック * ポイント * その他	* 管線 * プロック * ポイント * その他(配水池配水子一帯で監視、1系統の配管 区長1~42km、管線配水率が安定しているものを対 象)
監視手法(情報)	○流量 ○水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他	○流量 ○水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他	○流量 ○水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他	○流量 ○水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他(管線調査)	○流量 ○水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他	○流量 ×水圧 ×管圧 ×水質 ×波形 ×その他
使用機器・ 情報収集 装置方法	管線調査専用システムによる (標準配水率の圧力・流量子一帯をもとに、運用上 下限・変化率・相関関係の異常をチェックして警報を発 するシステム)	テレメータによる 異常流量検知知照アラームを発生する	管線調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	配水プロック情報管理システム)運用監視 (管線(トローラー)目録	配水プロック情報管理システム)運用監視 (管線(トローラー)目録	* 配水池入水率(入水流量計またはポンプ能力)と配 水池位からの配水流量計算 * 配水流量計測定 * 流量計による測定値と流量計による測定値との 不一致を、計算値と使い分けしている
監視対象と 監視精度 特徴	特に設定なし 上送システムのチェック項目に抵触した場合は漏水検 知に依りて警報を発生する	なし	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)
運用上の 留意性	現状の調査方法は管線調査にも対応可能と 考えている。	なし	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)	漏水調査時に管線調査監視を行っている (人員等)