

香 川 大 学 農 学 部 紀 要

第 41 号

1983年2月

MEMOIRS OF FACULTY OF AGRICULTURE
KAGAWA UNIVERSITY

No. 41, February 1983

カンガイ用管水路における空気混入流の水撃作用

西 山 壮 一

香 川 大 学 農 学 部

香川県木田郡三木町

FACULTY OF AGRICULTURE, KAGAWA UNIVERSITY

Miki-tyo, Kagawa-ken, Japan

香川大学農学部紀要

第 41 号

1983年2月 発行

各研究室の業績を発表するため、本学部は“香川大学農学部学術報告”と“紀要”を発行している。この“紀要”は研究の完成した比較的長い論文を発表するために発行されている。既刊の標題は最後のi-iv頁に記載されている。“学術報告”および“紀要”の交換または寄贈については、香川県木田郡三木町 香川大学農学部 (〒761-07) あて照会されたい。

Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

No. 41, February 1983

The Faculty of Agriculture, Kagawa University publishes “Technical Bulletin” (Gakuzyutu Hokoku) and “Memoirs” (Kiyô), and latter contains extended treatises. The titles of each number of “Memoirs” are printed on the pages i to iv inside back cover. Correspondence concerning the exchange of publications should be directed to Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-tyô, Kagawa-ken, Japan, 761-07.

カンガイ用管水路における空気混入流の水撃作用

西 山 壯 一

STUDIES ON THE WATER HAMMER OF THE AIR-ENTRAINED
FLOW IN IRRIGATION PIPE LINES

Souichi NISHIYAMA

目 次

第1章 緒 言	
—カンガイ用管水路の特殊性と研究の端緒—	1
第2章 空気混入流における水撃作用の解析	2
2・1 概 説	2
2・2 水撃作用の基礎方程式	3
2・3 空気混入流における水撃作用の基礎方程式	4
2・4 基礎方程式の解法	8
2・4・1 特性曲線の誘導	8
2・4・2 空気混入流の水撃解析に用いる物理的諸量	9
2・4・3 基礎方程式の差分法	12
2・5 ま と め	17
第3章 バルブの下流に発生する水撃作用に及ぼす混入空気の影響	19
3・1 概 説	19
3・2 理 論 解 析	19
3・2・1 上流端の境界条件	20
3・2・2 下流端の境界条件	21
3・3 実験装置と方法	21
3・4 結果および考察	23
3・4・1 最大水撃圧の測定値および計算値	23
3・4・2 最大水撃圧に及ぼす空気含有率およびバルブ閉鎖時間の影響	25
3・4・3 最大水撃圧に及ぼす空気混入領域長およびバルブ閉鎖時間の影響	30
3・4・4 空気の混入位置, 空気含有率およびバルブ閉鎖時間と最大水撃圧の関係	32
3・4・5 一定の空気混入領域長における空気含有率およびバルブ閉鎖時間と最大水撃圧の関係	34
3・5 ま と め	34
第4章 水柱分離を伴う水撃作用の解析	35
4・1 概 説	35
4・2 微量の混入空気存在を考慮した水柱分離を伴う水撃作用の解析	37
4・2・1 微量空気と水撃作用	37
4・2・2 管内に混入している微量空気量の現場測定	37
4・2・3 理 論 解 析	39
4・2・4 実験装置と方法	41
4・2・5 結果および考察	42
4・3 ま と め	45

第5章 空気泡の注入による水撃圧の軽減対策	46
5・1 概 説	46
5・2 空気泡の注入によって、軽減される水撃圧の推定	47
5・2・1 基礎方程式	47
5・2・2 境界条件	47
5・3 実験装置と方法	48
5・4 結果および考察	49
5・4・1 最大水撃圧の計算値および実測値	49
5・4・2 空気含有率，バルブ閉鎖時間および最大水撃圧との関係	50
5・5 ま と め	52
第6章 空気室を有する減圧弁の圧力脈動	53
6・1 概 説	53
6・2 実 験 装 置	54
6・3 実 験 方 法	55
6・4 圧力脈動の平滑化作用を存在しないものとした解析	55
6・4・1 解 析 方 法	55
6・4・2 解析結果と考察	56
6・5 サージタンク機能を考慮した解析	60
6・5・1 解 析 方 法	60
6・5・2 結 果	60
6・5・3 考 察	61
6・6 ま と め	61
第7章 総 括	62
参考文献	63
英文要約	66

第1章 緒 言

—カンガイ用管水路の特殊性と研究の端緒—

水の需要が増大する一方、水資源は有限であるので、水の効率的利用が益々重要となってきた。管水路は開水路に比べ、送水中の損失が小さい。さらに、管水路は従来の開水路に比べ、送配水操作が容易な利点を有している。このような理由で、最近、農業用水の送水手段として管水路システムが用いられることが多くなっている。しかしながら、技術的に未解決の問題も多く含まれている。

本論文において述べる管内の水の流れに混入した空気と水撃作用の問題もその1つである。農業水利の分野において、大型化、長距離化された管水路システムが一般化した今日、システムの安全性の確保の観点から水撃作用に関する厳密な検討が重要な課題となった。

水撃作用に関する研究の歴史と現状について、論評を試みる。水撃作用については、19世紀の末から、20世紀の初頭にかけて、JoukowskyやAllieviによって先駆的な研究⁴⁹⁾がなされ、その結果、水撃作用が波動現象であることが明らかにされた。1933年、1937年には水撃作用に関する国際シンポジウムが開かれ、水撃作用の解明の重要性が世界的に認識された^{2, 3, 10, 22, 23, 26, 45, 56, 63)}。当時は、摩擦の項を含む非線型方程式は解法がなく、多くの場合近似解法が採用された。なかでも図式解法が広く使用されていた。この方法は、作図による解法であるため、精度の維持が困難であり、また、煩雑であるため、複雑な境界条件の場合には、実質的に適用できなくなることが多い。

20世紀の中頃、V.L.Streeter⁶⁰⁾は電子計算機を使用して摩擦の項を含む非線型の基礎方程式を解き、水撃解析の方法は、画期的な発展を遂げた。この方法は、複雑な管水路システムに対する適用も可能なことが示されている^{8, 51, 52, 53, 54, 59, 60, 62)}。現在、管内を単一の液体としての水のみが流れている場合の水撃作用の解析はほとんどの境界条件に対して可能となっている。ところが管内における水の流れに空気が混入した場合には、従来の水撃作用の解析法では説明できない特異な現象^{34, 35, 36, 46)}が生じる。この理由は、水中への空気の混入により、流体の物性値、特に弾性係数が大幅に変化し³²⁾、圧力波の伝バ速度が影響を受けるためである。

カンガイ用管水路においては、カンガイ期と非カンガイ期がある等のため、送水開始時、管内に満流する過程において、管内の空気が完全に排除されず、管内に空気が残留することが多い^{4, 17, 41)}。また、農業用水では、温水取水であるため、取水口と水面との距離が他の用水のそれに比べ短く、そのため、水面に発生した渦により、管内に空気が混入する可能性がある^{37, 44, 47)}。このように農業用管水路においては、他の目的の管水路に比べ、管内に空気を混入しやすい条件を備えている。

しかしながら、管水路内の混入空気が水撃作用に対して、危険側に働くか、あるいは安全側に働くかその判定条件が不明であり、またそのメカニズム等については、解明されておらず、このような条件下における管水路の非常圧力脈動に対する解析手法の確立が重要な課題となっていた。

管路の水の流れの中に空気が存在する形態としては、水と空気が均一に混合して存在する場合と水と空気が分離して偏在する場合との2つの場合が考えられる。このうち、まず前者については、混入空気による水の“みかけの弾性係数”の変化および流体抵抗の変化に着目して、運動方程式および連続の方程式を解くことによって、混入空気の水撃作用に及ぼす影響と効果を解明した。さらに空気の混入率およびバルブの閉鎖時間が最大水撃圧に

及ぼす特性の解明を行った。また、後者については、空気室をもつ自動応答型の減圧弁を考え、このシステム内における圧力脈動の緩和効果について、サージタンクモデルの取扱いを導入して解析することによって、そのメカニズムを解明した。

本研究を行なうにあたり、終始懇切な御指導と御校閲を賜った九州大学教授長智男博士、同教授田中宏平博士、同助教授黒田正治博士に深く感謝の意を表する。

また、原稿の校閲と有益な御助言を賜った九州大学助教授四ヶ所四男美博士に感謝の意を表する。

九州大学名誉教授田辺邦美博士には研究開始当初より御助言と御激励を賜った。

さらに、香川大学教授斉藤実博士には、種々の御援助をいただいた。また、香川大学の多くの教官からも御協力をいただいた。なお、原稿のとりまとめに当り、九州共立大学福田哲郎講師、九州大学舟越保枝官をはじめ、カンガイ利水工学研究室員諸氏の御協力を得た。記して謝意を表する。

第2章 空気混入流における水撃作用の解析

2・1 概 説

管内流水中に混入している空気は、水撃圧を上昇させる作用をする場合と水撃圧を下降させる作用をする場合とがある。いかなる条件のとき、上昇または、下降のいずれの現象が生じるか、その判定条件は現段階では不明である。この判定条件を明確にすることが、とくに、圧力上昇が予想される場合には管水路の非常定圧力脈動に対する安全性を維持する上において、重要である。

本論文では、管内流水中に空気が混入している場合、それが水撃作用に及ぼす影響を解明する手法として、水と空気が一体となった混合流体としての水撃作用の解析を試みる。

それに先立ち、本章では、水と空気の混合流の水撃作用を解析しようとする場合に生じてくる諸問題について、論ずることとする。

なお、管内流水中に空気が混入する原因は次のとおりである。

- ① 管水路を満流させる過程において、管内に空気が残留することによるもの。地面の標高に沿って、管水路が凹凸している場合、管水路の頂部または断面の変化部分にこの原因による例が多い^{37, 41, 43)}。
- ② 取水口に渦を生じて、それによって、空気が管内に混入することによるもの^{37, 41, 43, 44, 47)}。
- ③ 負圧が発生する管水路において、空気弁または施工が不良である管の接手部分等から、空気が混入することによるもの^{41, 43)}。
- ④ 圧力の低下、温度の上昇ともなって、水中に溶解していた空気が逸出することによるもの^{41, 43)}。

特に第1章において述べたように農業用管水路においては、カンガイ期と非カンガイ期があるため、管内に水が充滿していない期間が生じ、また温水取水のため、取水口と水面との距離が、他の目的の取水方法に比べ短く、そのため水面に渦を生じ易い。このように農業用管水路においては、他の目的の管水路に比べ、管内流水中に空気が混入し易い傾向を備えている。

これらの原因によって、流水中に混入してくる空気のため、水のみ単一流れでは発生しない種々の現象が生じる。

① 管水路の送水能力が減少する。空気の混入によって、管の通水断面積が減少し、“みかけの諸損失係数”が管内に空気を含んでいない場合に比べ大きくなる。サイフォン内の流れにおいては、サイフォンとしての作用がな

くなる場合がある^{41, 43)}。

② 流水中に空気が混入している場合には、水のみが流れている場合に比べて、流体の弾性係数が小さくなる。したがって水・空気混合流れでは、水の単一流れに比べて圧力脈動を生じやすい状態となっている。特に管水路が地面の標高に沿って、凹凸している場合、その凹凸の程度に応じて、管内圧力が変化し、それに伴って、流水中に含まれる空気の体積が変り、圧力脈動が助長される^{41, 46)}。

③ 流水中に空気を含んでいる流れでは、水のみ単一流れに比べて、弾性係数が減少するために、圧力波の伝バ速度が減少する。したがって、一般的には空気混入流れの最大水撃圧は水のみ単一流れのそれに比べ小さくなる。この現象を利用して、第5章で述べるようにバルブ直上流部の水撃軽減策として積極的に流れに空気を注入する方法が採られる場合がある。

しかし一方、第3章で述べるようにバルブの直下流の水撃は圧力脈動の第1波が負圧で発生するのでその返り波が空気の急激な収縮によって増大する可能性がある^{15, 34, 36, 46)}。

2・2 水撃作用の基礎方程式

管内を水のみが流れている場合、水撃作用の解析に通常用いられる基礎方程式は次のように与えられる⁵⁰⁾。

① 運動方程式

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2 \cdot 1)$$

② 連続の方程式

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin \theta = 0 \quad (2 \cdot 2)$$

ただし、

- H ; 水頭
- V ; 管内平均流速
- x ; 距離
- t ; 時間
- g ; 重力の加速度
- f ; Darcy-Weisbach 式中の摩擦損失係数
- θ ; 管が水平となす角
- D ; 管径
- a ; 圧力波の伝バ速度であり、次式で与えられる。

$$a = \sqrt{\frac{E_l / \rho_l}{1 + (E_l / E_p) (D/b) c}} \quad (2 \cdot 3)$$

ここで、

- E_l ; 水の弾性係数
- E_p ; 管の弾性係数

ρ_l ; 水の密度

b ; 管の厚さ

c ; 接手等による係数

(2・1)式および(2・2)式において、移流項、摩擦の項および管のコウ配の項は、他の項に比べ小さいのでこれらを無視し、さらにHあるいはVを消去すると次の波動方程式が得られる¹⁾。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (2 \cdot 4)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (2 \cdot 5)$$

このことは、上記の省略を行なえば、水撃作用が、波動現象として表現できることを示している。なお、波動方程式の一般解は、いわゆる d'Alembert の解となり、次式で示される。

$$\phi = \phi_1(x+at) + \phi_2(x-at) \quad (2 \cdot 6)$$

2・3 空気混入流における水撃作用の基礎方程式

管内流水中に空気が混入している場合、この流れを、水と空気が一体となった流れと考えて水撃作用の解析を試みる。

まず、水と空気の混合流体の水撃作用における基礎方程式を誘導する。なお、解析の前提として、空気含有率が小さい場合を考える。このような流れは、しばしば送水管路でみられるものである。なお、本節で用いる記号はつぎの通りである。

p ; 圧力

A ; 管の断面積

γ_m ; 水と空気の混合流体の単位重量

ρ_m ; 水と空気の混合流体の密度

V_m ; 水と空気の混合流体の体積

τ_o ; 壁面におけるせん断応力

H ; $H=p/\gamma_m+z$ であり、 z は基準線からの高さである。

なお、本論文においては、特に絶対圧力と断らないかぎり、圧力についてはゲージ圧を用いている。

① 運動方程式

Fig2・1に示す管路の微小区間における、つり合いの式⁵⁾は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} pA - \left[pA + \frac{\partial}{\partial x} (pA) \delta x \right] + \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \\ + \gamma_m \delta x \left(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \right) \sin \theta - \tau_o \pi \left(D + \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \delta x \\ = \rho_m \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \delta x \frac{dV}{dt} \end{aligned} \quad (2 \cdot 7)$$

高次の項を無視して整理すれば、

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{4\tau_o}{\rho_m D} + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2 \cdot 8)$$

なお,
$$p = \rho_m g (H - z) \quad (2 \cdot 9)$$

(2・9) 式を x で微分すると

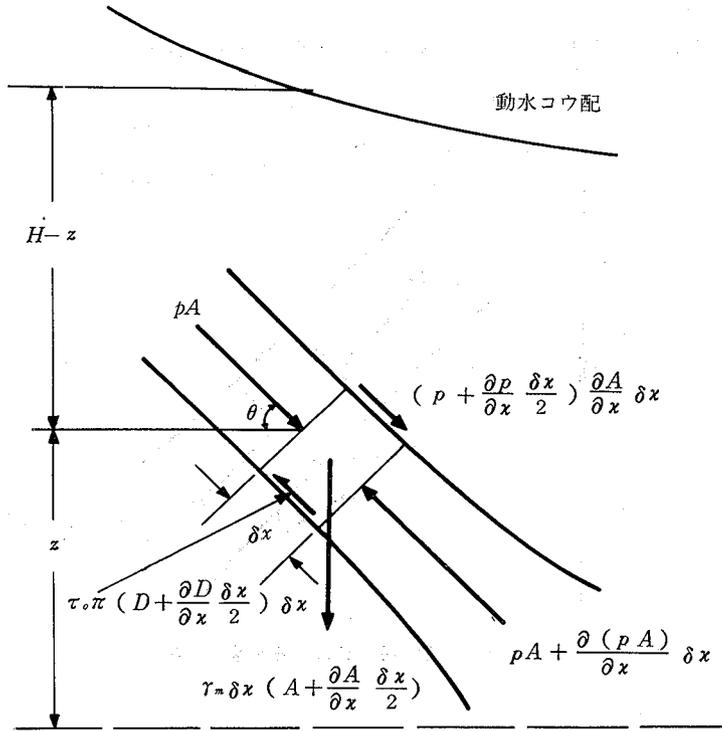


Fig 2・1 微小区間に作用する力

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g(H-z) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} - \rho_m g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (2 \cdot 10)$$

ここで、前述のように空気含有率が小さい場合を解析の対象としているので、

$$\frac{\partial H}{\partial x} \gg \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \quad (2 \cdot 11)$$

したがって、(2・10) 式は次のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_m g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (2 \cdot 12)$$

さらに、 V は x と t の関数であるので

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2 \cdot 13)$$

また、壁面におけるせん断応力 τ_0 と摩擦損失係数 f_m との関係は、

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho_m f_m V^2 \quad (2 \cdot 14)$$

(2・8) 式, (2・12) 式, (2・13) 式および (2・14) 式から, 空気含有率が小さい場合の運動方程式は次のようになる。

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f_m V |V|}{2D} = 0 \quad (2 \cdot 15)$$

② 連続の方程式

Fig.2・2 に示す微小区間に質量保存則を適用すれば,⁵⁵⁾ 連続の方程式を得る。

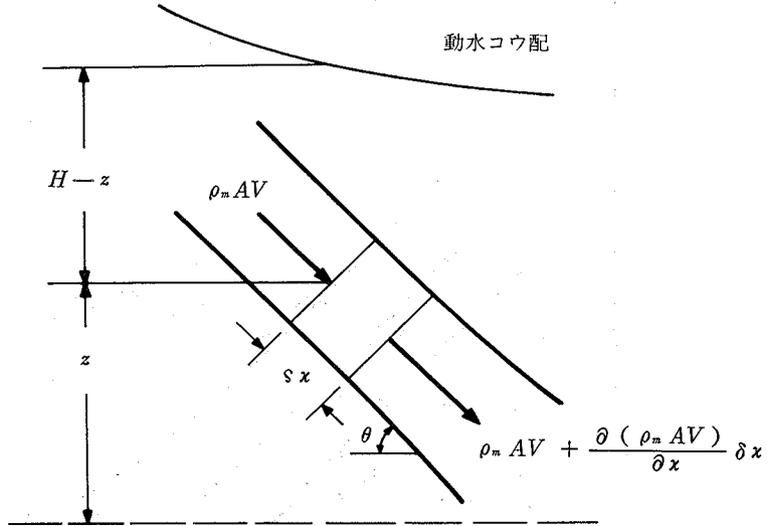


Fig. 2・2 微小区間における質量の保存

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho_m AV) \delta x = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m A \delta x) \quad (2 \cdot 16)$$

(2・16) 式を展開して整理すると,

$$\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{V}{\rho_m} \frac{\partial \rho_m}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2 \cdot 17)$$

これから

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho_m} \frac{d\rho_m}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2 \cdot 18)$$

ここで, (2・18) 式の左辺第1項は, 管の厚さを b とすると

$$\frac{dA}{dt} = \frac{D}{2bE_p} \frac{dp}{dt} \frac{D}{2} \pi D \quad (2 \cdot 19)$$

両辺を断面積 A で割れば

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{bE_p} \frac{dp}{dt} \quad (2 \cdot 20)$$

つぎに, (2・18) 式の左辺第2項は, 嵩 (mass) に対する体積弾性係数の定義から

$$E_m = - \frac{dp}{dV_m/V_m} = \frac{dp}{d\rho_m/\rho_m} \quad (2 \cdot 21)$$

ゆえに

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{d\rho_m}{dt} = \frac{1}{E_m} \frac{dp}{dt} \quad (2 \cdot 22)$$

したがって (2・20) 式および (2・22) 式から (2・18) 式は次のようになる。

$$\frac{1}{E_m} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{E_m}{E_p} \frac{D}{b} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2 \cdot 23)$$

また

$$a = \sqrt{\frac{E_m / \rho_m}{1 + (E_m / E_p) (D / b)}} c \quad (2 \cdot 24)$$

とおくと (2・23) 式は

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2 \cdot 25)$$

ここで、

$$p = \rho_m g (H - z) \quad (2 \cdot 26)$$

さらに p は x と t の関数であるので

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial t} dt \quad (2 \cdot 27)$$

$$\frac{dp}{dt} = V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2 \cdot 28)$$

ここで、(2・26) 式を x と t でそれぞれ微分すれば次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= g (H - z) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} + \rho_m g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= g (H - z) \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_m g \left(\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 29)$$

ここでは、空気含有率が小さい場合を解析の対象としているので、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &\gg \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \\ \frac{\partial H}{\partial t} &\gg \frac{\partial \rho_m}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 30)$$

また、管路が固定されている場合には、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (2 \cdot 31)$$

さらに

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\sin\theta \quad (2 \cdot 32)$$

* 通常の管水路では、外力による管のズレなどを防ぐためスラスト・ブロックなどによって固定されている場合が多い。

連続の方程式 (2・25) 式に (2・26) 式の変形を考慮すれば、空気含有率が小さく、且つ管路が固定されている場合の連続の方程式が次のように得られる。

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin \theta = 0 \quad (2 \cdot 33)$$

したがって、空気含有率が小さく、且つ固定された管路内を流れる空気混入流の基礎方程式は (2・15) 式および (2・33) 式によって与えられる。

これらの方程式の形は管内を水のみが流れている場合のそれと同形となる。しかし、管内流水中に空気が含まれている場合には、連続の方程式に含まれている圧力波の伝播速度 a が時間および場所の関数となるため、その解析方法は非常に複雑なものとなる。

なお、(2・15) 式、(2・33) 式において、水のみ流れる場合、 H は「水頭」とよばれる。しかしながら、管内に空気が混入した場合には、 H を水頭と呼ぶのは適当でない。なぜならば H を圧力 P に変換する際の流体の単位重量 γ_m が変数であるためである。

したがって、具体的な解析においては、(2・15) 式および (2・33) 式をまず H について解き、つぎに

$$H = \frac{P}{\gamma_m} + z \quad (2 \cdot 34)$$

を用いて、圧力 P について変換する。ただし、(2・34) 式で γ_m は変数である。

2・4 基礎方程式の解法

2・4・1 特性曲線の誘導

波動問題の解析には、特性曲線法が多く用いられている。この誘導には多くの方法^{9, 20)}がある。

*P.N.Lin*²⁰⁾ は、*H.J.Putman*⁴⁰⁾ の河川等の非定常流に関する特性曲線についての論文に対する議論の中で、簡単な誘導方法を述べている。ここではその方法を水撃に適用して、特性曲線を求める。

H と V はそれぞれ、 x 、 t の関数、すなわち、 $H=H(x, t)$ 、 $V=V(x, t)$ である。

ゆえに

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2 \cdot 35)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2 \cdot 36)$$

(2・15) 式、(2・33) 式、(2・35) 式および (2・36) 式を $\partial H/\partial x$ 、 $\partial V/\partial x$ 、 $\partial H/\partial t$ および $\partial V/\partial t$ に関する連立方程式と考えると、特性曲線上では、 $\partial H/\partial x$ 、 $\partial V/\partial x$ 、 $\partial H/\partial t$ および $\partial V/\partial t$ はともに、 $0/0$ の不定形となる。

とくに $\partial H/\partial x$ に関して解く場合には、

分母；

$$\begin{vmatrix} g & 0 & V & 1 \\ V & 1 & a^2/g & 0 \\ dx/dt & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx/dt & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2 \cdot 37)$$

分子；

$$\begin{vmatrix} -f_m V |V| / 2D & 0 & V & 1 \\ -V \sin \theta & 1 & a^2/g & 0 \\ dH/dt & 1 & 0 & 0 \\ dV/dt & 0 & dx/dt & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2 \cdot 38)$$

となる。

(2・37), (2・38) 式から次の式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f_m V |V|}{2D} + \frac{g}{a} V \sin \theta &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= a + V \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2 \cdot 39)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f_m V |V|}{2D} - \frac{g}{a} V \sin \theta &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= -a + V \end{aligned} \right\} C^- \quad (2 \cdot 40)$$

2・4・2 空気混入流の水撃解析に用いる物理的諸量

管内流水中に空気が含まれている場合の水撃作用には、流水中に空気が含まれていない場合のそれに比べ、特異な現象がみられる。管内流水中に空気が混入することによって、流体の物性値が、管内を水のみが流れる場合とは著しく異なることが原因となっている。そこで、ここでは、管内流水中に空気が含まれている場合の水撃作用の解析に必要な物理的諸量について述べることにする。

① 管内平均流速

水および空気の流量をそれぞれ Q_w , Q_g とすると輸送速度 (平均流速) は次式で与えられる。

$$V = \frac{(Q_w + Q_g)}{A} \quad (2 \cdot 41)$$

② 平均密度

空気含有率を α , 水および空気の密度をそれぞれ ρ_w , ρ_g とすると平均密度は次のようになる。

$$\rho_m = \rho_w (1 - \alpha) + \rho_g \alpha \quad (2 \cdot 42)$$

③ 摩擦損失係数

管内流水中に空気が含まれた場合の摩擦損失係数を理論的に求めることには、多くの困難をともなう。

したがって、実験³⁴⁾ から得られた次の式を用いることにする。

$$P_m = P_l (1 + n\alpha) \quad (2 \cdot 43)$$

$$(n \approx 5 \sim 7)$$

ただし、

P_l ; 水のみが流れた場合の圧力損失

P_m ; 空気混合流の圧力損失

④ 圧力波の伝バ速度

圧力波の伝バ速度は、管内に空気が含まれているときの水撃作用の解析において、最も重要な物理量である。

小堀ら²⁴⁾は、水と空気が管内に同時に存在するとき、その場合の圧力波の伝バ速度が、水と空気がそれぞれ、単体で管内に存在する場合の圧力波の伝バ速度のいずれよりも、減少する場合があることに疑問をもち、それを究明し、その場合の圧力波の伝バ速度を理論的に誘導した。

これが、管内空気混入流の圧力波の伝バ速度に関する最初の研究であり、その後も2～3の研究^{16, 30, 31)}がある。これらの研究成果によると、たとえば、大気圧において体積にして管内にわずか数%の空気が含まれている場合、圧力波の伝バ速度は数10m/secまで減少する。管内流水中に空気が含まれている場合の水撃作用には、管内空気の存在を無視した従来の理論から得られた結果と比べ、特異な現象がみられることはすでに述べたが、この原因は、管内流水中に混入空気が含まれていることによって、圧力波の伝バ速度が、著しく減少し、さらに圧力波の伝バ速度が場所および時間の関数となるためである。したがって、管内に空気が混入している場合は、それを考慮した解析が必要となる。

そこで、このように管内流水中に空気を含んでいる場合における、水と空気の混合流体の弾性係数²⁴⁾について述べる。

管内圧力 P における水および空気の占める体積をそれぞれ V_l 、 V_g とする。また、圧力が ΔP だけ増加した場合、水および空気の体積増加をそれぞれ、 ΔV_l 、 ΔV_g とする。

体積弾性係数の定義から、 E_l 、 E_g はそれぞれ次のように与えられる。

$$E_l = - \frac{\Delta P}{(\Delta V_l / V_l)} \quad (2 \cdot 44)$$

$$E_g = - \frac{\Delta P}{(\Delta V_g / V_g)} \quad (2 \cdot 45)$$

(2・44)式および(2・45)式から ΔV_l 、 ΔV_g はそれぞれ次のように与えられる。

$$\Delta V_l = \frac{-V_l \Delta P}{E_l} \quad (2 \cdot 46)$$

$$\Delta V_g = \frac{-V_g \Delta P}{E_g} \quad (2 \cdot 47)$$

さらに水と空気の混合流体の弾性係数を E_m とすると、これは弾性係数の定義から次のように与えられる。

$$E_m = - \frac{\Delta P}{(\Delta V_m / V_m)} \quad (2 \cdot 48)$$

この式から

$$\Delta V_m = \frac{-V_m \Delta P}{E_m} = \Delta V_l + \Delta V_g \quad (2 \cdot 49)$$

となる。

さらに、

$$V_m = V_g + V_l \quad (2 \cdot 50)$$

(2・46)式～(2・50)式から、水と空気の混合流体の弾性係数は次のように与えられる。

$$E_m = \frac{E_l}{1 + \frac{V_g}{V_l} \left\{ \frac{(E_l/E_g) - 1}{V_g + V_l} \right\}} \quad (2 \cdot 51)$$

これが管内流水中に混入空気を含んでいる場合の“水のみかけの弾性係数”を求める式である。

つぎにこの式中の空気の体積 V_g とその弾性係数 E_g について考える。

⑤ 空気の体積および空気の弾性係数

管内圧力の変動にともなって、空気の体積およびその弾性係数は変化する。ここでは、この計算方法について述べる。

気体の状態方程式は次式で表わされる。

$$p_a V_g = nRT_a \quad (2 \cdot 52)$$

ただし、 p_a ；圧力（絶対圧）、 V_g ；空気の体積、 n ；気体のモル数、 R ；気体定数、 T_a ；温度（絶対温度）

また、液体中に気泡が存在する場合には、液体の内部エネルギーが気体のそれに比べ十分大きいので、空気の体積変化は等温変化と考えるとよい³⁰⁾。

空気の体積変化を等温変化と考えるので、(2・52) 式中の T_a は一定と考えるとよい。そこで (2・52) 式から

$$p_a V_g = \text{一定} \quad (2 \cdot 53)$$

また、圧力（絶対圧）と密度の関係は

$$\frac{p_a}{\rho_g} = \text{一定} \quad (2 \cdot 54)$$

となるので、圧力が求めれば、空気の体積は次式から求まる。

$$V_g = \frac{p_{a,0} V_{g,0}}{p_a} \quad (2 \cdot 55)$$

ここで、 $V_{g,0}$ は圧力 $p_{a,0}$ における気体の体積を示す。

次に圧力変動に伴う空気の弾性係数の変化について述べる。

空気の体積変化を等温変化と考えるので、次の式が成り立つ。

$$(V_g + dV_g)(\rho_g + d\rho_g) = V_g \rho_g \quad (2 \cdot 56)$$

この式から

$$\frac{dV_g}{V_g} = - \frac{d\rho_g}{\rho_g} \quad (2 \cdot 57)$$

(2・45) 式と (2・53) 式～(2・57) 式から

$$E_g = p_a \quad (2 \cdot 58)$$

これが、空気の体積変化を等温変化とみなすことができる場合の圧力 p_a （絶対圧）における空気の弾性係数を与える式である。

圧力の変動に対して (2・55) 式および (2・58) 式から、それぞれ空気の体積および空気の弾性係数が求まり、(2・51) 式から水と空気の混合流体の弾性係数が求まる。この計算の手順を Fig 2・3 に示す。

なお、計算に際しての初期値は、定常状態における圧力および流速であり、この圧力から、空気の体積およびその弾性係数が求まる。

大気圧において、管内流水中に空気が含まれている場合、水と空気の混合流体の弾性係数の変化を Fig 2・4 に示

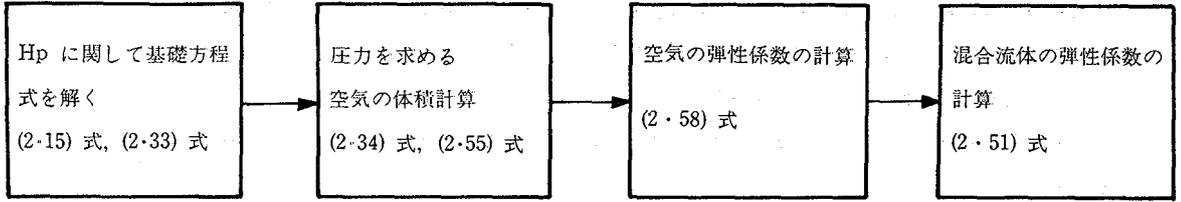


Fig. 2.3 気液流体の弾性係数の計算手順

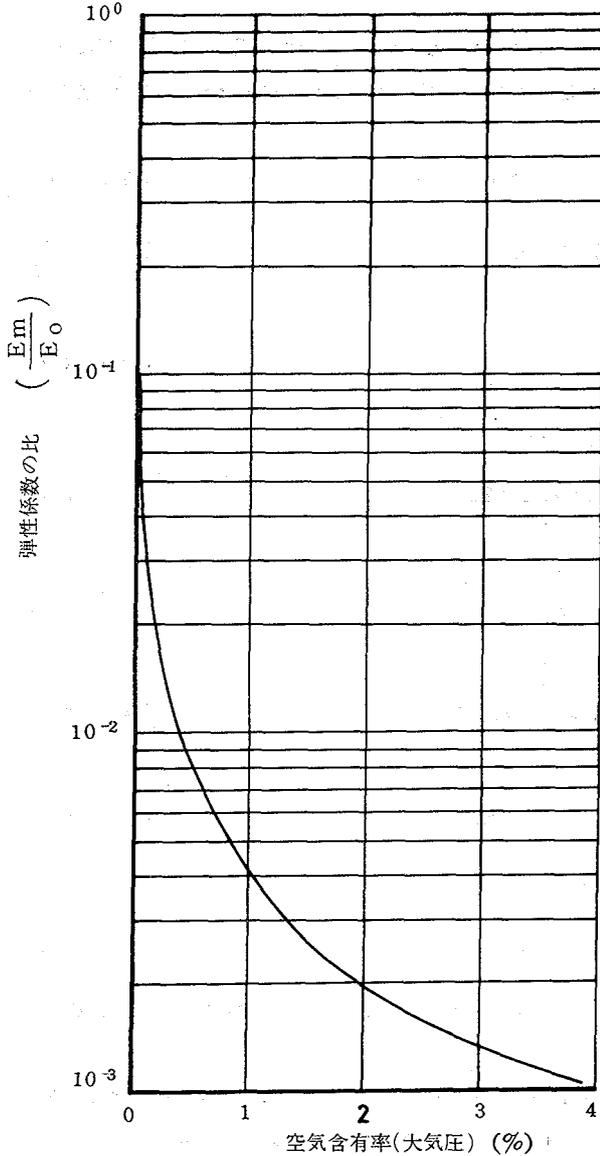


Fig. 2.4 空気泡の含有にともなう水の弾性係数の変化

(E_0 ; 空気を含んでいない場合の水の弾性係数)
(E_m ; 空気を含んでいる場合の水のみかけの弾性係数)

す。

Fig. 2.4 から微量の空気の混入によっても“水のみかけの弾性係数”が大きく減少することが明らかである。

(2.51) 式で与えられる弾性係数 E_m を用いて、水と空気の混合流の圧力波の伝バ速度は次式から求まる。

$$a = \sqrt{\frac{E_m / \rho_m}{1 + (E_m / E_p) (D/b) c}} \quad (2.24)$$

なお、(2.24) 式中の ρ_m は (2.42) 式を用いて、求める。

(2.24) 式を用いて、計算した空気含有率と圧力波の伝バ速度の関係を図 2.5 に示す。管内流水中に混入空気を含んでいると圧力波の伝バ速度が著しく減少することが明らかである。

2.4.3 基礎方程式の差分化

説明を簡単にするため、断面が一様な管路について考える。まず、解析のためのモデルを示す。

管路の全区間を $I = 1 \sim N$ の管路に分割する。さらに任意の I 番目の管路を $J = 1 \sim M$ までに等分する。

任意時刻における圧力波の伝バ速度は、任意の I 番目の管路内では一定とする。

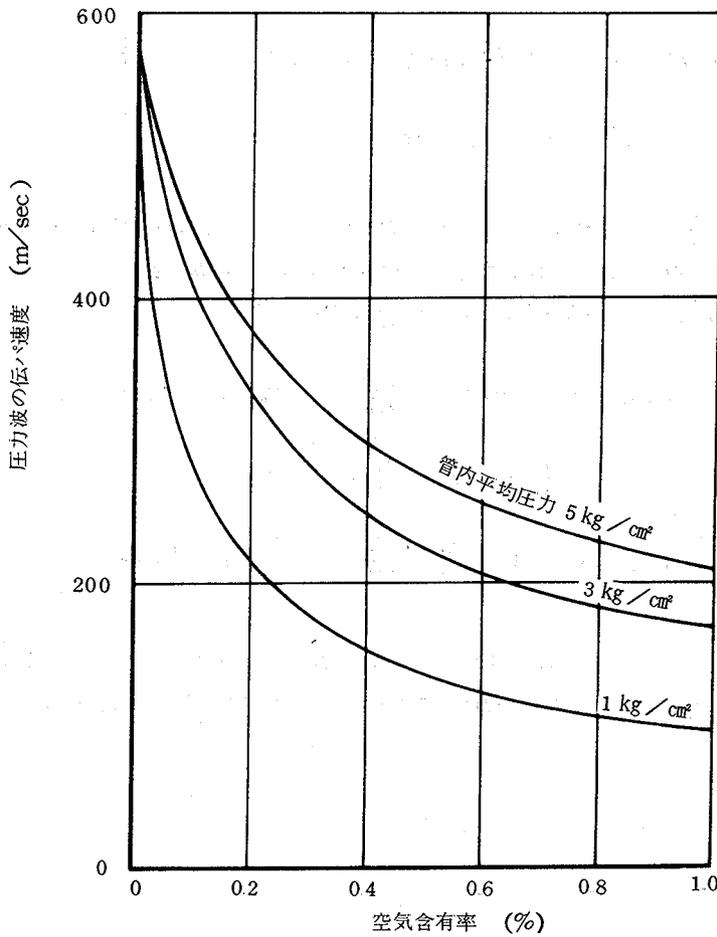


Fig 2・5 空気含有率と圧力波の伝バ速度の関係
(管径51mm, 硬質塩化ビニール管)

すなわち、 $I = 1 \sim N$ 個に、分割された管路のそれぞれでは圧力波の伝バ速度は異なるが、 I 番目の管路内の圧力波の伝バ速度は場所的には同一で時間によってのみ変化するものとする。 $I = 1 \sim N$ の各区間において、それぞれ圧力変動の解析を行う。

任意時刻における I 番目の管路における圧力波の伝バ速度を a_i とする。

(2・39) 式および (2・40) 式から差分方程式は次のようである⁵²⁾。

$$\left. \begin{aligned}
 &V_p(i, j) - V_R + \frac{g}{a_i} \{ H_p(i, j) - H_R \} + \frac{g}{a_i} \times \\
 &V_R \sin \theta (t_P - t_R) + \frac{f_m}{2D} V_R |V_R| (t_P - t_R) = 0 \\
 &x_p - x_R = (V_R + a_i) (t_P - t_R)
 \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2 \cdot 59)$$

$$\left. \begin{aligned} V_p(i, j) - V_s - \frac{g}{a_i} \{ H_p(i, j) - H_s \} - \frac{g}{a_i} \times \\ V_s \sin\theta (t_p - t_s) + \frac{f_m}{2D} V_s |V_s| (t_p - t_s) = 0 \\ x_p - x_s = (V_s - a_i) (t_p - t_s) \end{aligned} \right\} C^- \quad (2 \cdot 60)$$

(2・59) 式および (2・60) 式を H_p および V_p について解けば、任意の I 区間内の管路の $J=2 \sim M$ の再分割番号における (Fig 2・6 参照) $H_p(i, j)$ および $V_p(i, j)$ の値は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} V_p(i, j) = 0.5 \left\{ V_R + V_s + \frac{g}{a_i} (H_R - H_s) \right. \\ \left. - \frac{g}{a_i} D_T \sin\theta (V_R - V_s) - \frac{f_m D_T}{2D} \times (V_R |V_R| + V_s |V_s|) \right\} \quad (2 \cdot 61) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_p(i, j) = 0.5 \left\{ H_R + H_s + \frac{a_i}{g} (V_R - V_s) \right. \\ \left. - D_T \sin\theta (V_R + V_s) - \frac{a_i}{g} \frac{f_m D_T}{2D} \times (V_R |V_R| - V_s |V_s|) \right\} \quad (2 \cdot 62) \end{aligned}$$

なお、これらの式中の (i, j) のうち i は、管路路において、圧力波の伝バ速度を同一とみなして取扱う管路の区間番号、 j はその区間の管路において、圧力変動を計算するための分割点を示している。なお、分割の方法を Fig 2・6 に示す。

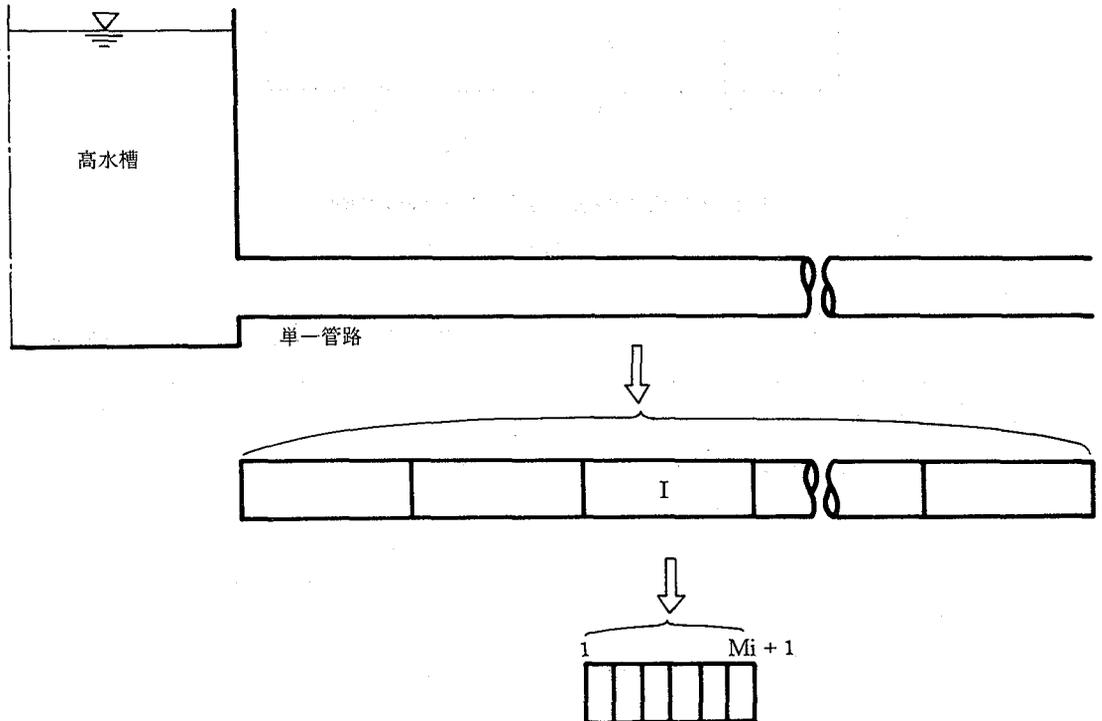


Fig 2・6 数値計算のための管路区間の分割

また、(2・59)式～(2・62)式中の V_R , V_S , H_R および H_S は次のように与える。

$$V_R = \frac{V(i, j) - T_{Hi} \cdot a_i \{ V(i, j) - V(i, j-1) \}}{1 + T_{Hi} \cdot \{ V(i, j) - V(i, j-1) \}} \quad (2 \cdot 63)$$

$$V_S = \frac{V(i, j) - T_{Hi} \cdot a_i \{ V(i, j) - V(i, j+1) \}}{1 - T_{Hi} \cdot \{ V(i, j) - V(i, j+1) \}} \quad (2 \cdot 64)$$

$$H_R = H(i, j) - T_{Hi} (V_R + a_i) \times \{ H(i, j) - H(i, j-1) \} \quad (2 \cdot 65)$$

$$H_S = H(i, j) + T_{Hi} (V_S - a_i) \times \{ H(i, j) - H(i, j+1) \} \quad (2 \cdot 66)$$

ここで、

$$T_{Hi} = \frac{D_T}{D_{xi}} \quad (2 \cdot 67)$$

ただし、 D_{xi} ; 圧力波の伝バ速度を同一とみなして取扱う I 番目の管路の再分割長さ、 D_T ; 計算の時間ステップ。

なお、波速に関する特性曲線を Fig. 2・7 に示す。

また、(2・59)式～(2・66)式中の添字 P, R, S は、Fig. 2・7 におけるそれぞれ P, R, S 点を示している。

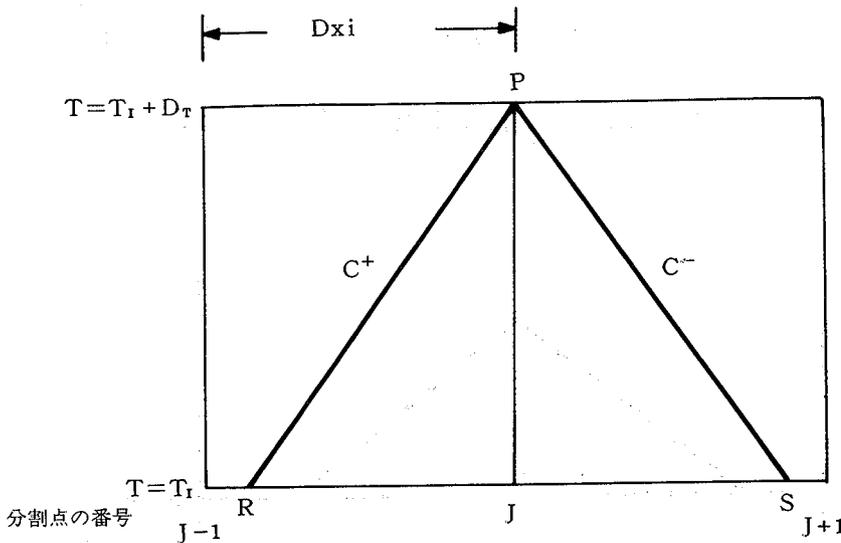


Fig. 2・7 波速に関する特性曲線

また、(2・59)式～(2・66)式中の a_i は次のように計算する。

圧力 $P(i, j)$ に対応して圧力波の伝バ速度 $A(i, j)$ が求まる。すなわち、圧力が求まれば、空気の体積とその弾性係数が求まり、圧力波の伝バ速度は(2・24)式から求まる。

さらに

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^{M+1} A(i, j)}{M+1} \quad (2 \cdot 68)$$

とする。すなわち、このことは、I 番目の管路区間における各断面の圧力波の伝バ速度の平均値を時刻 T における I 番目の管路区間の圧力波の伝バ速度とすることを意味する。

なお、計算における時間ステップ D_T については次の式を満足するように定めた。

$$D_{xi} > (a_i + V_{max}) \times D_T \quad (2 \cdot 69)$$

ここで、 V_{max} ; 管路区間 I における最大管内平均流速。

管路区間の境界における計算

I 番目の管路区間と I + 1 番目の管路区間 (Fig 2・8 参照) における $H_{P(i, m+1)}$ および $V_{P(i, m+1)}$ の値は次のように計算する。

$$H_{P(i, m+1)} = \frac{(-C_5 A_{Ri+1} + C_3 A_{Ri})}{(C_6 A_{Ri+1} + C_4 A_{Ri})} \quad (2 \cdot 70)$$

$$V_{P(i, m+1)} = C_3 - C_4 H_{P(i, m+1)} \quad (2 \cdot 71)$$

ただし、 A_R ; 管の断面積

また、

$$C_3 = V_R + \frac{g}{a_i} \times H_R - \frac{f_m D_T V_R |V_R|}{2 D_i} \quad (2 \cdot 72)$$

$$C_4 = g/a_i \quad (2 \cdot 73)$$

$$C_5 = V_s - \frac{g}{a_{i+1}} \times H_s - \frac{f_m D_T V_s |V_s|}{2 D_{i+1}} \quad (2 \cdot 74)$$

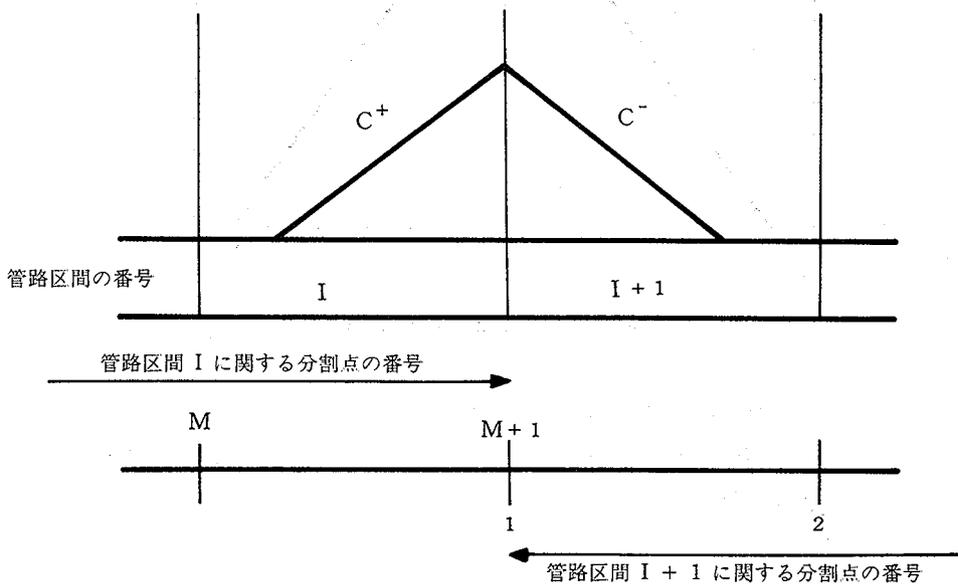


Fig. 2・8 直列管路の境界における波速の特性直線

$$C_6 = \frac{g}{a_{i+1}} \quad (2 \cdot 75)$$

$$H_s = H(i+1, 1) + T_{H_{i+1}} (V_s - a_{i+1}) \{ H(i+1, 1) - H(i+1, 2) \} \quad (2 \cdot 76)$$

$$V_s = \frac{V(i+1, 1) - T_{H_{i+1}} \cdot a_{i+1} \{ V(i+1, 1) - V(i+1, 2) \}}{1 - T_{H_i} \{ V(i+1, 1) - V(i+1, 2) \}} \quad (2 \cdot 77)$$

$$V_R = \frac{V(i, m) - T_{H_i} a_i \{ V(i+m+1) - V(i, m) \}}{1 + T_{H_i} \{ V(i, m+1) - V(i, m) \}} \quad (2 \cdot 78)$$

$$H_R = H(i, m) - T_{H_i} (a_i + V_R) \{ H(i, m+1) - H(i, m) \} \quad (2 \cdot 79)$$

なお、摩擦損失係数については、まず管内平均流速に対応する摩擦損失係数 f を求め、ついで、(2・43)式を用いて、空気が混入している場合の摩擦損失係数 f_m を求めた。

なお、解析手順の概要を Fig. 2・9 に示す。

2・5 ま と め

農業用管水路においては、他の目的の管路に比べ、管内に空気が混入しやすい条件を備えている。管内流水中の混入空気は、水撃圧を上昇させる作用をする場合と下降させる作用をする場合がある。いかなる場合に上昇または下降のいずれの現象が生じるか不明であり、管水路の非常圧力脈動に対する安全性を確保する上において、その解明が重要な課題となっていた。

本論文では、それを解明する手法として、水と空気が一体となった流体の水撃作用の解析を試みた。本章ではこの場合に生じてくる諸問題について論述した。

これらをまとめると次のとおりである。

- ① 空気含有率が小さい場合、空気混入流の水撃作用の基礎方程式は、管内を水のみが流れている場合のそれと形の上では変らない。
- ② 特性曲線の誘導を行った。
- ③ 空気混入流の水撃作用を解析する場合の物理的諸量について述べた。
- ④ 解析のモデルを示した。

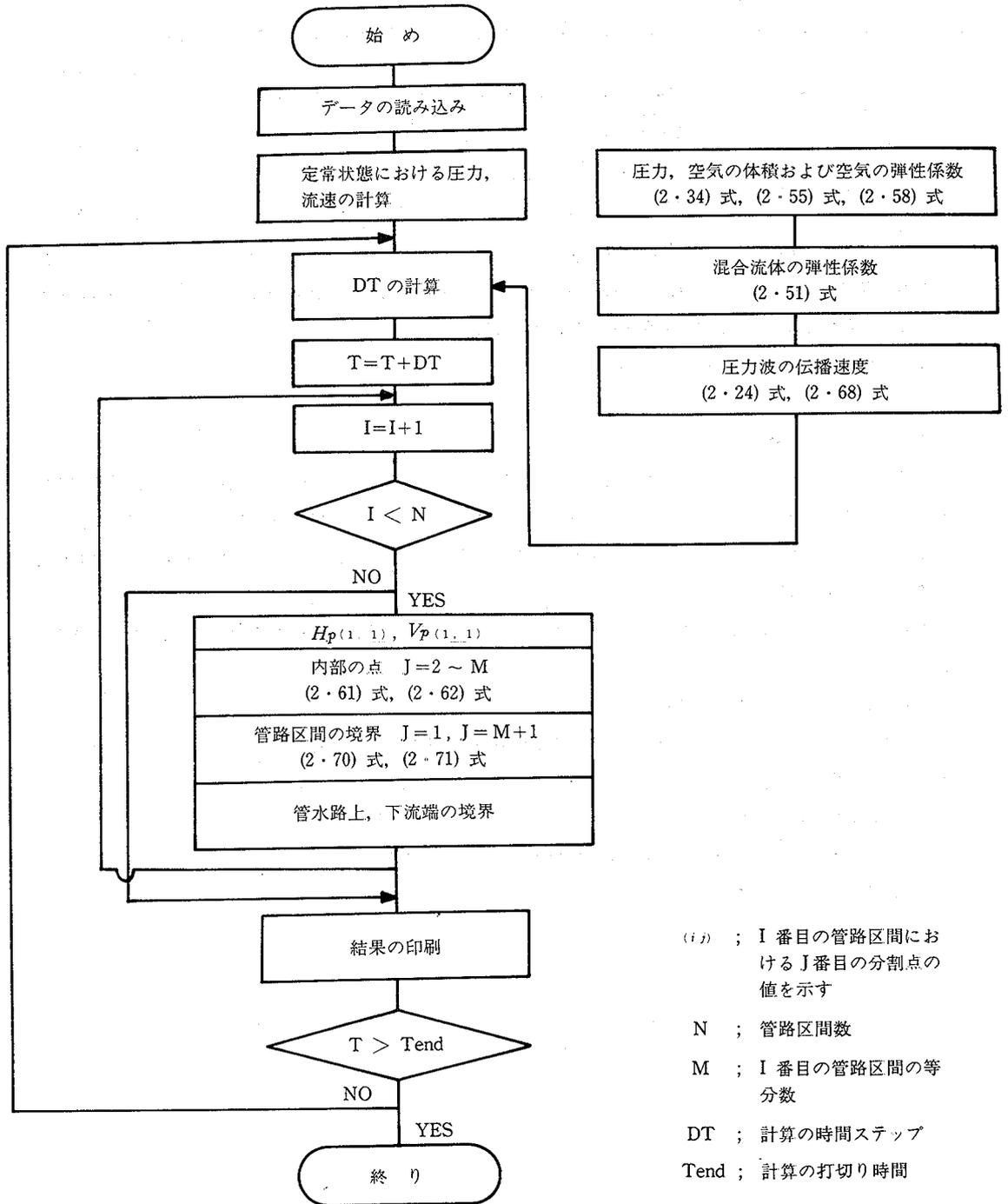


Fig. 2.9 計算手順

第3章 バルブの下流に発生する水撃作用に及ぼす混入空気の影響

3・1 概 説

管水路の途中にバルブが設置してある場合、その操作によって、バルブの上流および下流において、それぞれ水撃作用が生じる。それらの最大水撃圧に関して、水理学的には、次の点異なる。

バルブの上流に発生する水撃作用の場合、定常状態における流れの方向によって、直接最大水撃圧が生じている。一方、バルブの下流に発生する水撃作用の場合、定常状態の流れの逆流によって、最大水撃圧が生じている。

バルブの下流に発生する水撃作用において、バルブの閉鎖時間が短い場合、通常バルブの下流部分において、水柱分離がおこる。すなわち、空洞が発生する。³³⁾ さらにその空洞の崩壊とともに水が逆流し、バルブの直下流に大きな圧力が生じる。

農業用管水路においては、カンガイ期と非カンガイ期があること等のため、他の分野の管水路に比べ、管内に空気が混入する機会が多い。バルブの上流に生じる水撃作用において、管内流水中に空気が含まれると圧力波の伝バ速度が減少し、通常最大水撃圧は、空気が含まれていない場合のそれより減少する。

しかしながら、バルブの下流に発生する水撃作用においては、前述のごとく、最大水撃圧に関する水理学的特性が異なり、管内に混入した空気によって、圧力波の伝バ速度は減少するが、一方最大水撃圧に影響する空洞^{15,34)}の発生が助長される。したがって、最大水撃圧に対して、混入空気がどのように寄与するか不明である。

本章においては、管内流水中に空気が含まれている場合、バルブの下流に生じる水撃作用に関する実験を行った。一方、第2章において述べた解析モデルを用いて、最大水撃圧の推定を行った。さらに、空気含有率、管内に存在する空気の位置、空気混入領域長、その含有率およびバルブの閉鎖時間が最大水撃圧に及ぼす影響について、解明を試みた。

3・2 理論解析

解析の対象とするモデルを Fig 3・1 に示す。

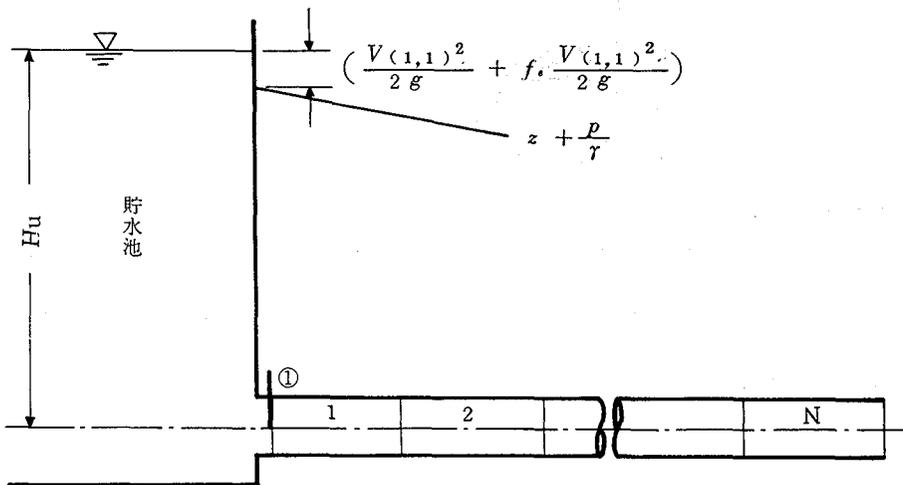


Fig. 3・1 管路上流端の条件と管路区間の分割

解析のための基礎方程式として、第2章の(2・39)式および(2・40)式を用いることとし、このモデルに対する境界条件はつぎのように与える。なお、解析に際し、管水路を*N*個の管路区間に分割して、基礎方程式を差分化した。

3・2・1 上流端の境界条件

上流端に貯水池があり、これを水源としている自然流下系管水路をモデルとして考える。

バルブ操作中およびその終了後の2つの場合に分けて、それぞれについて境界条件を設定する。なお、水平な管について考える。

① バルブ操作中

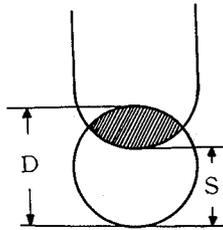
Fig 3・1において、断面①と貯水池の間にベルヌーイの定理を適用すれば

$$H_u \gamma_w = \left\{ H_p(1,1) + f_e \frac{V_p(1,1)^2}{2g} + f_u \frac{V_p(1,1)^2}{2g} + \frac{V_p(1,1)^2}{2g} \right\} \gamma_m \quad (3 \cdot 1)$$

ただし、 H_u ；管の流入口の中心を基準とした貯水池の水頭、 H ； $H = (P/\gamma_m) + z$ で表わされ、 P ；圧力； γ_m ；水と空気の混合流体の単位重量、 z ；基準線からの高さ、 γ_w ；水の単位重量、 g ；重力の加速度、 f_e ；流入損失係数、 f_u ；バルブの損失係数である。なお、添字*p*は未知であることを示す。また(*i, j*)は*i*番目の管路区間内の*j*番目の分割点を示す。したがって、(1, 1)は最も上流の管路区間内且つその最初の分割点を示す。なお、Fig 3・1のバルブはスルースバルブとする。その特性をTable 3・1に示す¹²⁾。

Table 3・1 スルースバルブの開度と損失係数との関係

s/D	1 / 8	2 / 8	3 / 8	4 / 8	5 / 8	6 / 8	7 / 8	8 / 8
f_v	97.8	17.0	5.52	2.06	0.81	0.26	0.07	0.0



バルブ操作中の圧力脈動は(3・1)式と第2章の(2・40)式を差分方程式に直した(3・2)式とを $V_p(1,1)$ および $H_p(1,1)$ に関する連立方程式として解くことによって求める。

$$V_p(1,1) - V_s - \frac{g}{a_1} \{ H_p(1,1) - H_s \} - \frac{g}{a_1} V_s D_T \sin \theta + \frac{f_u}{2D} V_s |V_s| D_T = 0 \quad (3 \cdot 2)$$

② バルブ操作終了後

バルブが完全に閉鎖されている場合は(3・2)式において、 $V_p(1,1) = 0$ とおけば、 $H_p(1,1)$ が得られる。なお、バルブが完全に閉鎖されていない場合には、(3・1)式および(3・2)式から $H_p(1,1)$ 、

$V_{P(1,1)}$ が得られる。

上流端の境界における波速に関する特性曲線を Fig.3・2 に示す。

3・2・2 下流端の境界条件

下流端は、貯水池と接続されている場合を考え、管路の下流端と貯水池の間にベルヌーイの定理を適用すれば

$$H(N, K+1) \gamma_m = H_{DR} \gamma_f \quad (3 \cdot 3)$$

ただし、 H_{DR} ; 下流側貯水池の水頭、 N : 管路区間数、 K ; 最下流管路区間の分割数。

また (2・39) 式を差分方程式に直すと

$$V_{P(N, K+1)} - V_R + \frac{g}{a_N} \{ H_{P(N, K+1)} - H_R \} + \frac{g H_R D_T}{a_N} \sin \theta + \frac{f_m}{2D} V_R |V_R| D_T = 0 \quad (3 \cdot 4)$$

(3・3) 式と (3・4) 式から $H_{P(N, K+1)}$ および $V_{P(N, K+1)}$ が求まる。なお、大気中に放流する場合は、(3・3) 式において、 $H_{DR} = 0$ とすればよい。

下流端の境界における波速に関する特性曲線を Fig.3・3 に示す。

なお、(3・2) 式および (3・4) 式中の V_R , V_s , H_R , および H_s は、それぞれ (2・63) 式～(2・66) 式で与えられる。

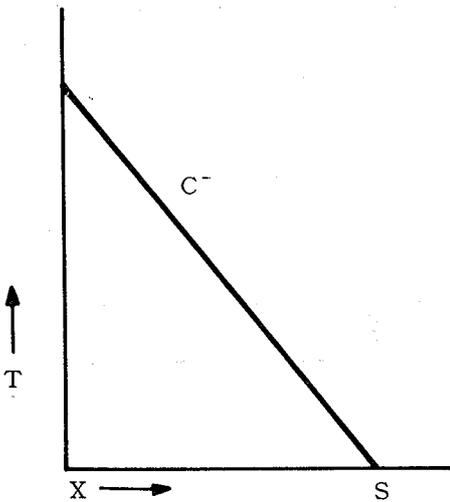


Fig. 3・2 波速に関する特性曲線 (上流端境界)

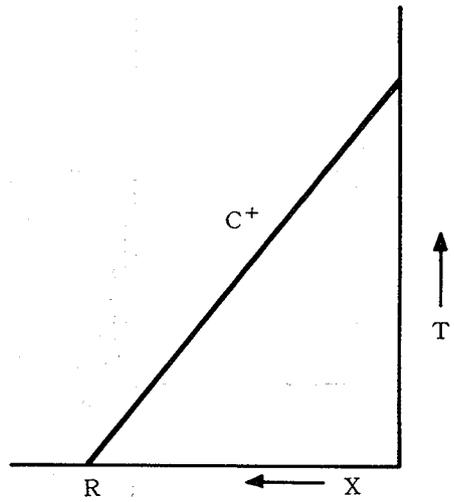


Fig. 3・3 波速に関する特性曲線 (下流端境界)

3・3 実験装置と方法

① 実験装置の概要

実験施設の概要を Fig.3・4 に、またその測定部分を Fig.3・5(A) および Fig.3・5(B) に示す。Fig.3・4 において、水は貯水槽からポンプを使用して揚水され、3の高水槽に供給される。余水吐が設置されているので、高水槽内の水位は定水頭に保たれている。水はさらに管路内を流下し、帰還水路を経て、貯水槽に帰る。

Fig.3・5(A) に示す実験装置においては、管路の長さは30.0m、管径は51.0mm、管材質は透明塩化ビニールであり、また高水槽の高さは2.0mである。なお、Fig.3・5(B) に示す実験装置においては、管路の長さ30.0m

であり、管径は76.0mm、また高水槽の高さは1.0mである。

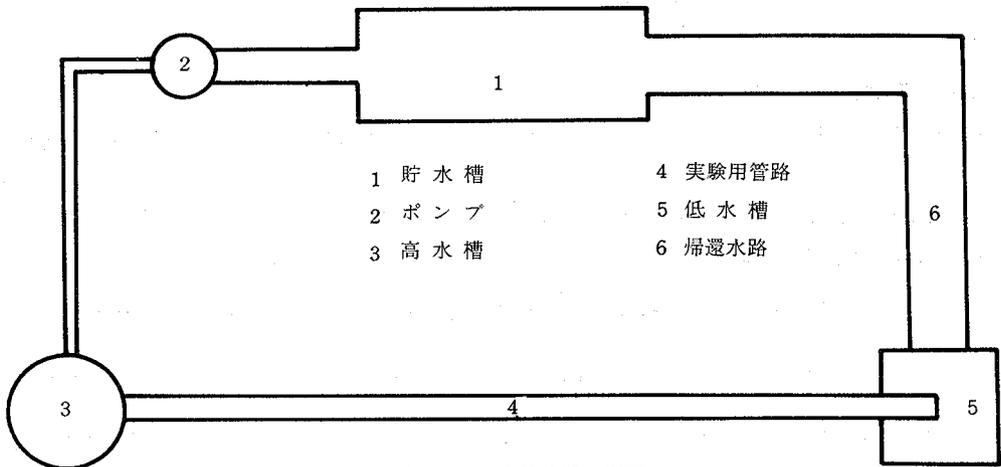


Fig. 3・4 実験施設の概要

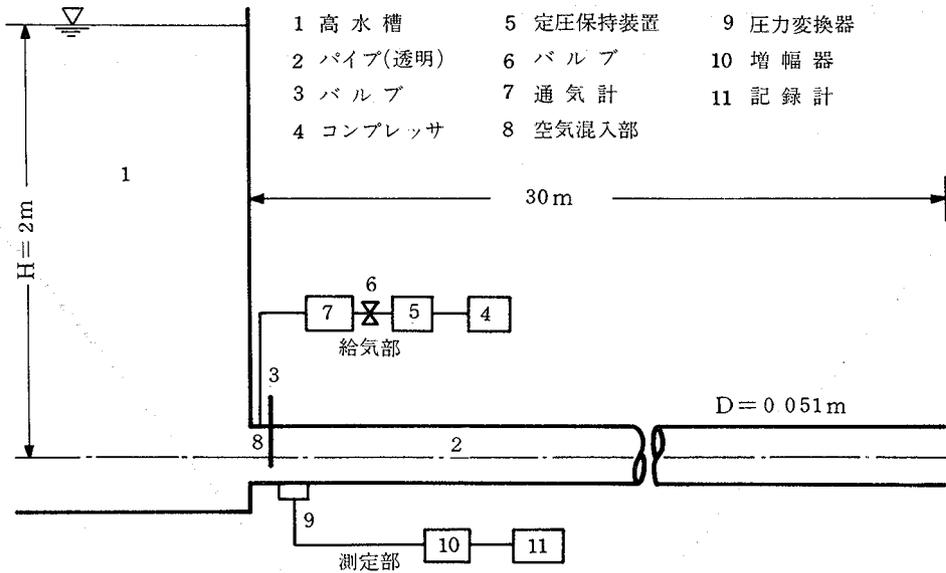


Fig. 3・5 (A) 実験装置のレイアウト

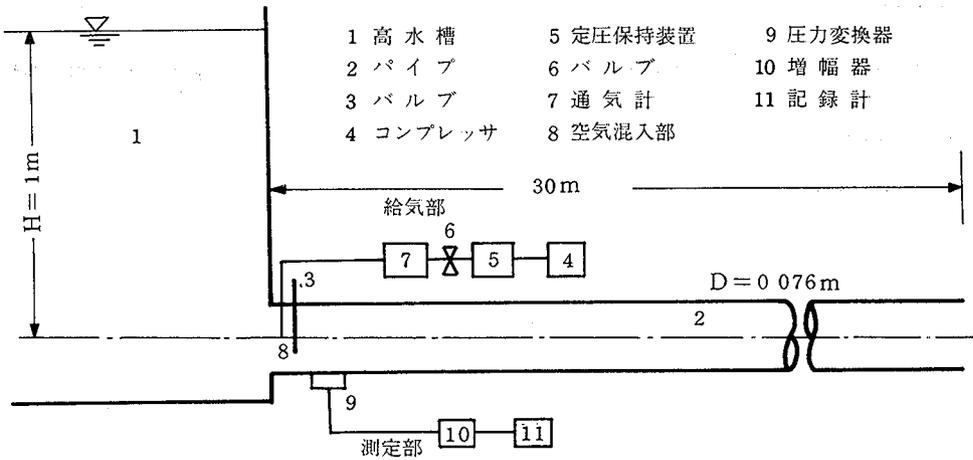


Fig. 3・5 (B) 実験装置のレイアウト

② 実験方法

管の全長に空気が混入している場合の水撃作用の実験においては、Fig 3-5(A)およびFig 3-5(B)の、いずれについても実験を行った。また、管内の一部に空気が存在する場合の水撃作用の実験は、管内に混入している空気の観察が可能な Fig 3-5(A)の装置を用いて行った。Fig 3-5(A)および Fig 3-5(B)において、空気はコンプレッサから送られ、定圧保持装置によって定圧となり、さらに通気計によってその流量が測定された後、管内に混入された。なお、空気の流量調節はバルブ6によってなされる。

空気含有率、バルブ閉鎖時間および空気混入領域長を種々変えて、実験を行った。なお、空気混入領域長は、バルブ閉鎖終了時の長さを指し、たとえば Fig 3-12 の L_A がこの長さである。

3・4 結果および考察

3・4・1 最大水撃圧の測定値および計算値

計算値および実験値を Fig 3-6(A)および Fig 3-6(B)に示す。また、バルブの直下流部に生ずる圧力波の伝播速度の変動も同時に示している。なお、解析に用いた水理学的諸量を Table 3-2 に示す。さらに、最大水撃圧の測定値と計算値を Table 3-3 に掲げる。

これらによると最大水撃圧に関しては、計算値と測定値とは近い値を示している。また、管内に空気が含まれている場合、負圧下においては、空気の体積が正圧下のそれより大きい。したがって、大気中に放流する場合は、

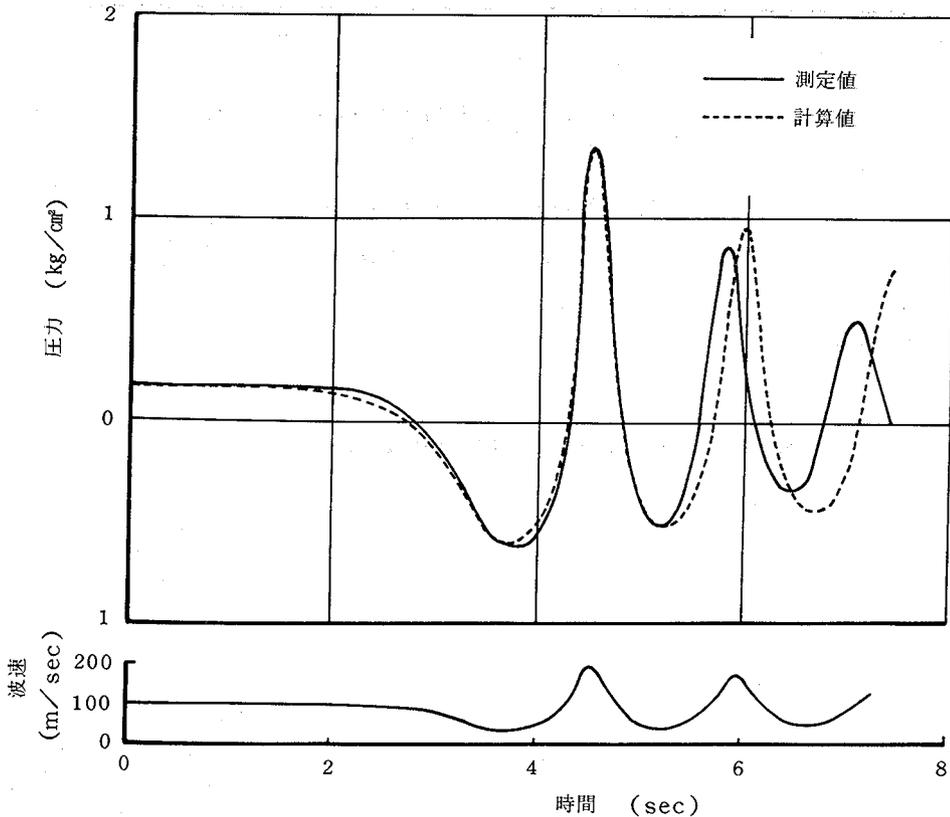


Fig 3-6 (A) バルブ閉鎖にともなう波速の変化と圧力の変化との関係
(位置;バルブ直下流,バルブ閉鎖時間;3.6秒,空気含有率;1.3%)

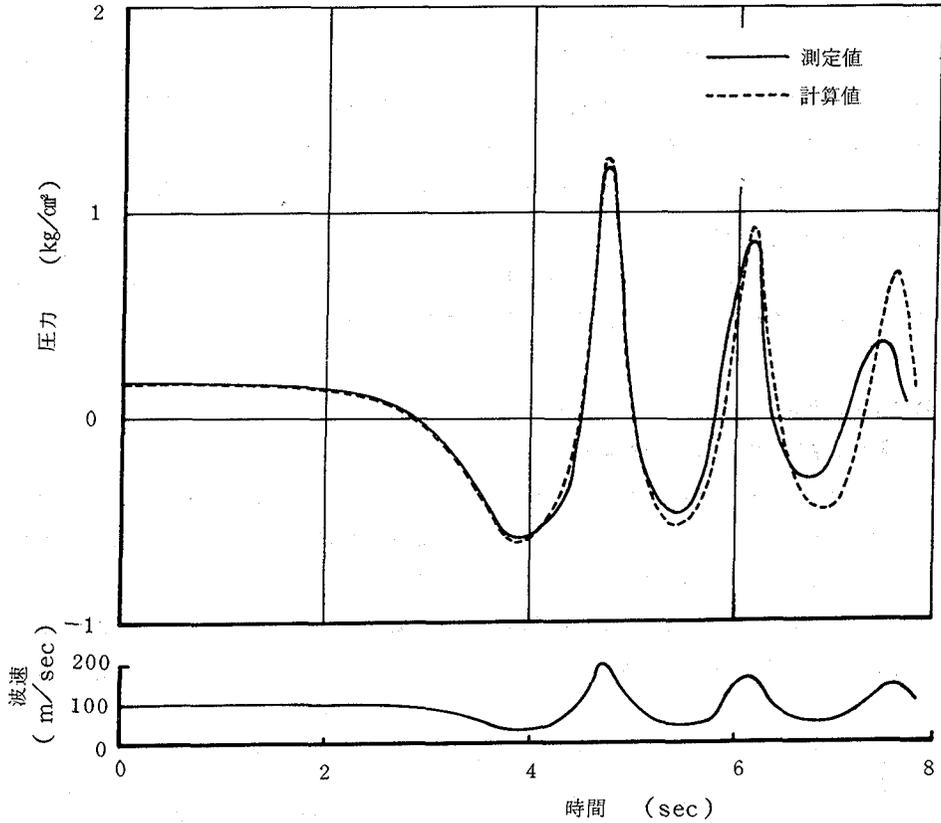


Fig. 3・6 (B) バルブ閉鎖にともなう波速の変化と圧力の変化との関係
(位置;バルブ直下流,バルブ閉鎖時間;3.8秒,空気含有率;1.3%)

Table 3・2 解析に用いた水理学的諸量

	空気含有率 (%)	管内平均流速 (m/sec)	摩擦損失係数	バルブ閉鎖時間 (sec)
Fig 4-6(A)	1.3	1.72	0.020	3.6
Fig 4-6(B)	1.3	1.72	0.020	3.8

Table 3・3 空気含有率とバルブ閉鎖時間による最大水撃圧の相違

	空気含有率 (%)	バルブ閉鎖時間 (sec)	最大水撃圧 (kg/cm²)	
			測定値	計算値
1	1.8	3.8	1.08	1.13
2	1.8	3.1	1.43	1.31
3	1.8	3.5	1.18	1.21
4	0.4	4.0	1.68	1.72
5	1.0	3.2	1.70	1.79
6	1.0	4.4	1.25	1.23
7	1.3	3.5	1.50	1.44
8	1.3	3.9	1.28	1.30

Fig.3・7に示すように、圧力変動の1つのサイクルにおいて、バルブの直下流部における圧力は、負圧下にある時間は正圧下にある時間より長くなる。Fig.3・6(A) および Fig.3・6(B) に示した測定値は、この特徴をよく表わしている。また、測定値と計算値の間には若干の位相のズレは生じているが、計算値にも同様な傾向が示されている。

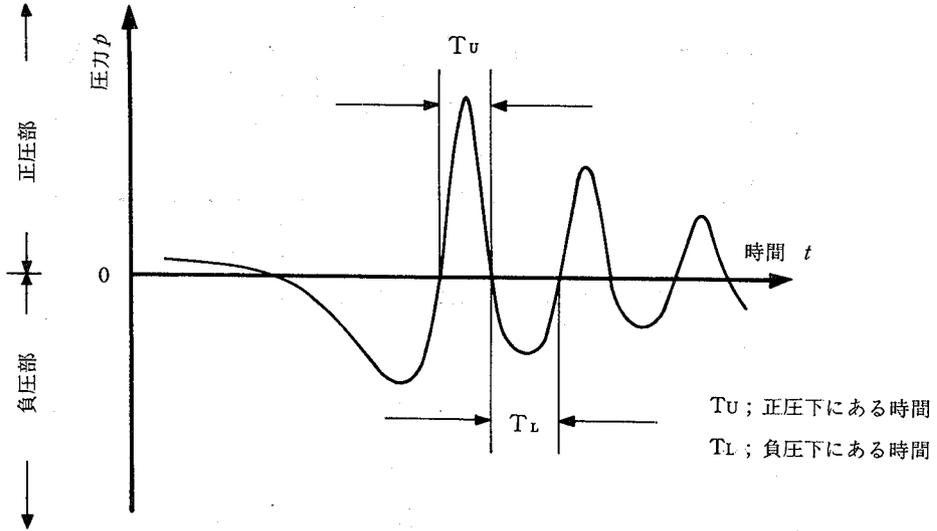


Fig.3・7 圧力脈動が正圧下にある時間と負圧下にある時間

3・4・2 最大水撃圧に及ぼす空気含有率およびバルブ閉鎖時間の影響

空気を含んでいる場合および含んでいない場合におけるそれぞれの水撃作用の圧力変動を Fig.3・8(A)～Fig.3・8(D) および Fig.3・9(A)～Fig.3・9(D) に示す。

これらによれば、管内流水中に空気を含んでいる場合は、含んでいない場合に比べ、周期が長くなっていることが明らかである。

なお、Fig.3・8(A)～Fig.3・8(D) および Fig.3・9(A)～Fig.3・9(D) は、それぞれ、バルブの閉鎖時間が4.5秒および4.0秒で得られた実験結果である。また、これらの実験結果から、空気含有率と最大水撃圧の関係を

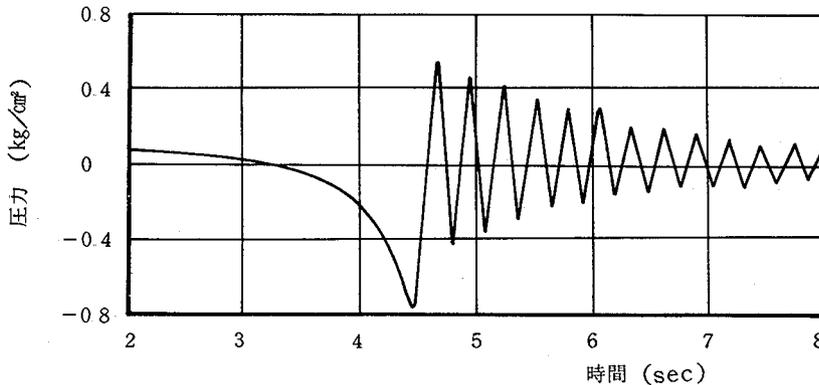


Fig.3・8 (A) 混入空気が存在しない場合の圧力変動
 (装置; Fig.3-5(B), 位置; バルブ直下流, バルブ閉鎖時間; 4.5秒)

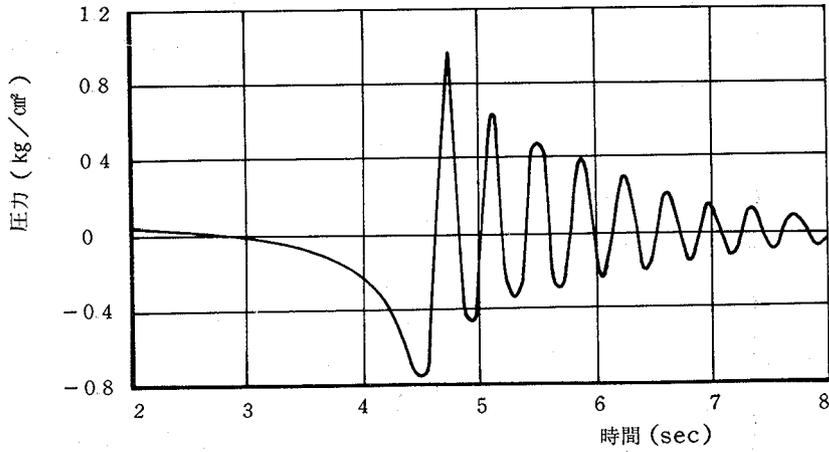


Fig. 3・8 (B) 混入空気が存在する場合の圧力変動
 (装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.1%, バルブ閉鎖時間; 4.5秒)

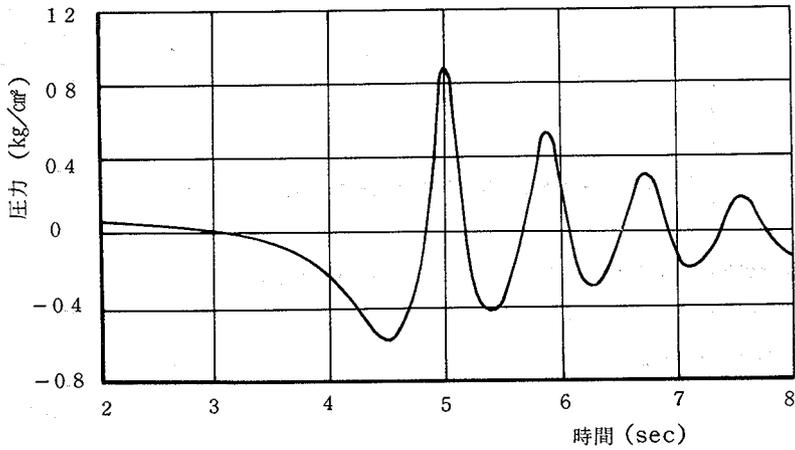


Fig 3・8 (C) 混入空気が存在する場合の圧力変動
 (装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.6%, バルブ閉鎖時間; 4.5秒)

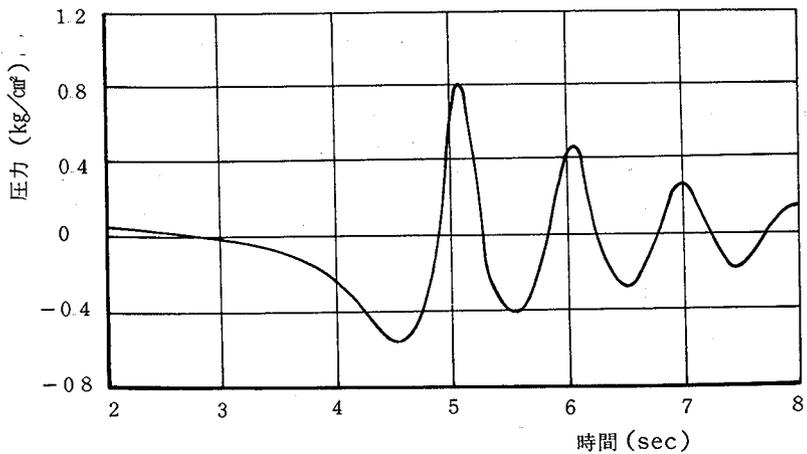


Fig. 3・8 (D) 混入空気が存在する場合の圧力変動
 (装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.8%, バルブ閉鎖時間; 4.5秒)

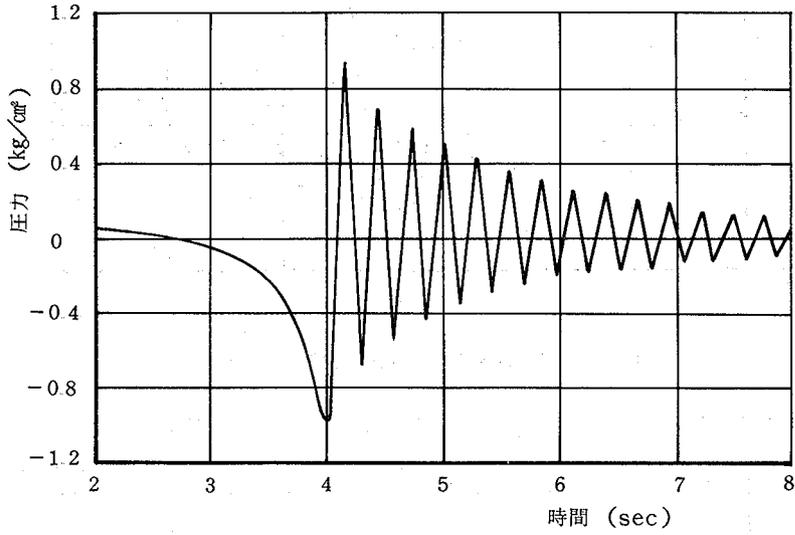


Fig. 3・9 (A) 混入空気が存在しない場合の圧力変動
(装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, バルブ閉鎖時間; 4.0秒)

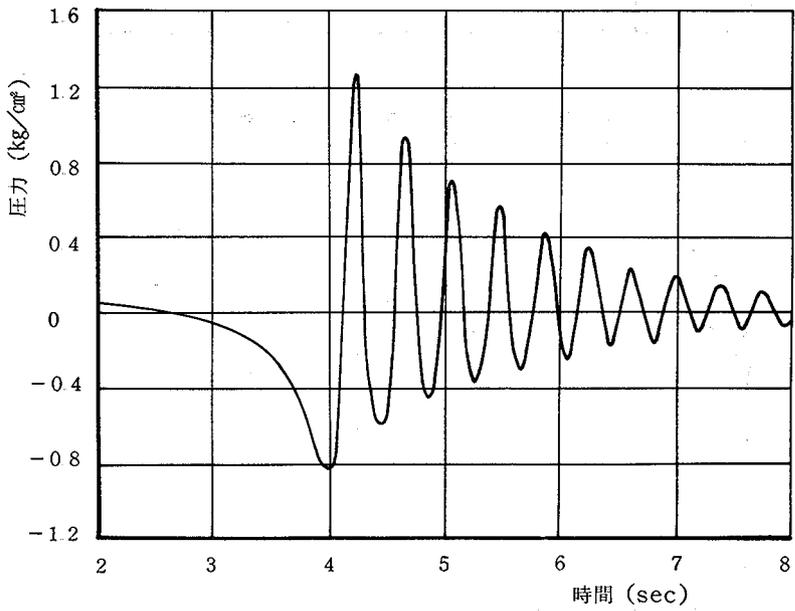


Fig. 3・9 (B) 混入空気が存在する場合の圧力変動
(装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.1%, バルブ閉鎖時間; 4.0秒)

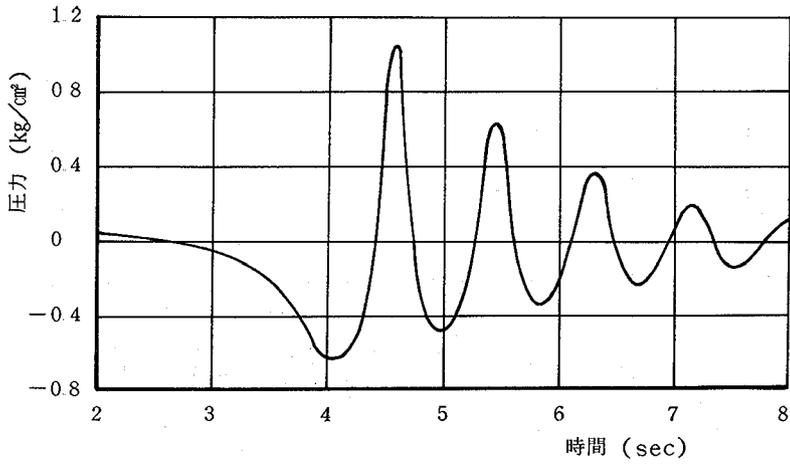


Fig. 3-9 (C) 混入空気が存在する場合の圧力変動
(装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.6%, バルブ閉鎖時間; 4.0秒)

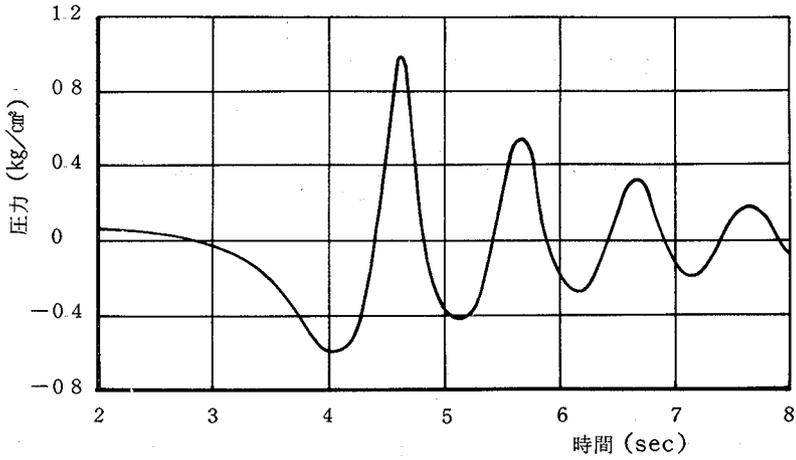


Fig. 3-9 (D) 混入空気が存在する場合の圧力変動
(装置; Fig 3-5(B), 位置; バルブ直下流, 空気含有率; 0.8%, バルブ閉鎖時間; 4.0秒)

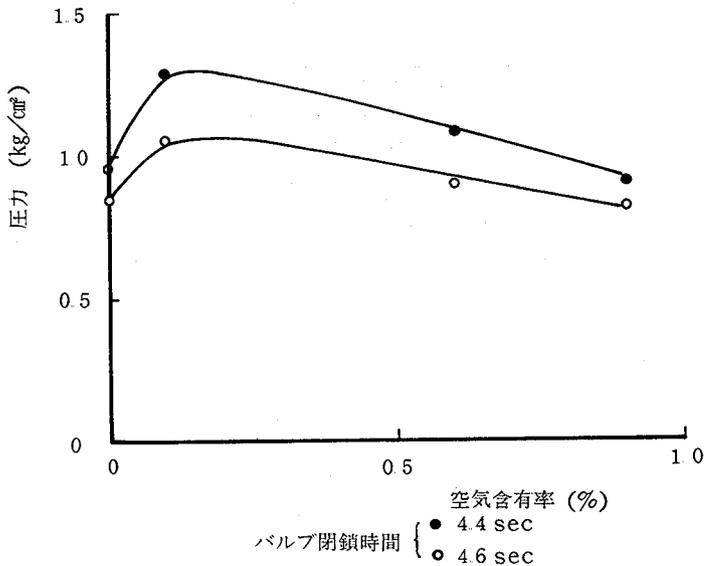


Fig. 3-10 空気含有率と最大水撃圧(測定値)

示すと Fig 3・10 のようになる。Fig 3・10 から管内流水中の空気含有率によって、最大水撃圧は上に凸の変化をする。したがって、ある特定の空気含有率では、空気が含まれないときの水撃圧より、大きくなる可能性がある。

この理由は次のように考えられる。バルブ閉鎖直後には、バルブ直下流における圧力は低下し、これにともなって空気の体積が増加する。逆の相のとき、この増加した空気の体積が急激に減少し、これによって最大水撃圧が助長されたものと考えられる。

なお、空気含有率が増加すれば、空気がクッションとして作用する役割が大きくなり、当然最大水撃圧は空気を含んでいない場合のそれより減少する。すなわち、水撃圧が最も大きくなる空気含有率が存在することが予測される。このことをより明確にするために、Fig 3・5(A)に示した実験装置に出現する流れに関して、空気含有率と最大水撃圧についてのシミュレーションを行った。なお、解析に用いた式は (2・39) 式および (2・40) 式である。

その結果を Fig 3・11 に示す。これによると水撃圧が最も大きくなる空気含有率が存在し、これはバルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって小さくなることが明らかである。

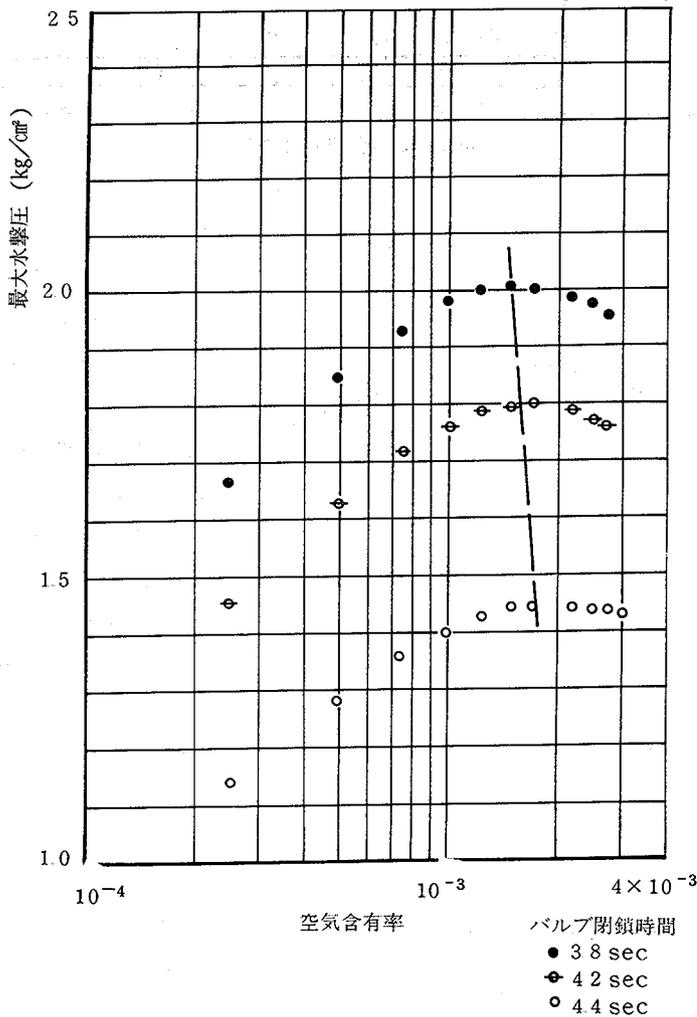


Fig 3・11 空気含有率と最大水撃圧との関係
(実験管路全長にわたって空気が混入している場合)

このように、一定のバルブ閉鎖時間に対して、圧力脈動が最も大きくなる空気含有率が存在する理由は、管内流水中に混入している空気が水撃圧を助長するように作用する場合と減少させるように作用する場合との両面を持っているためである。

3・4・3 最大水撃圧に及ぼす空気混入領域長およびバルブ閉鎖時間の影響

空気混入領域長 (Fig 3・12 の L_A) と最大水撃圧に関する測定結果を Fig 3・13(A)および Fig 3・13(B)に示す。

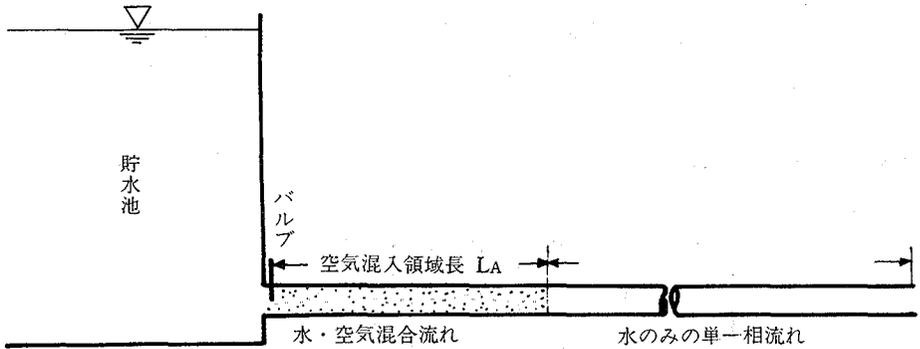


Fig 3・12 空気混入領域長

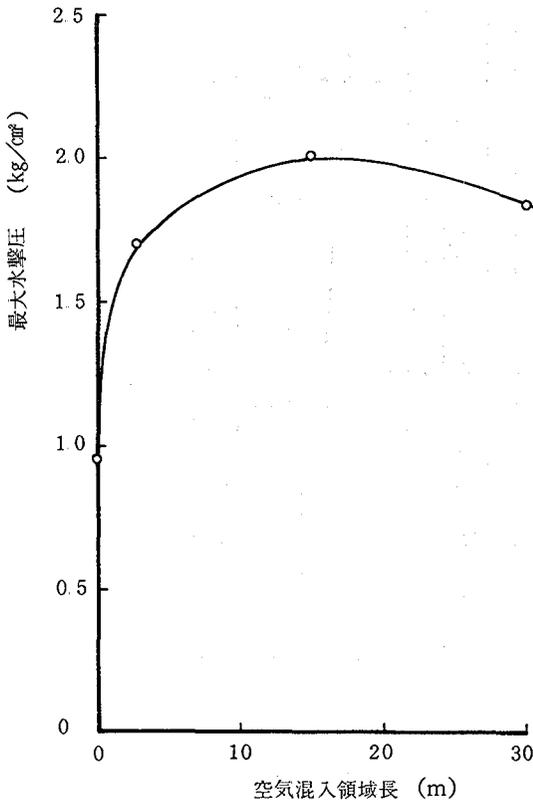


Fig 3・13(A) 空気混入領域長と最大水撃圧(実測値)
(バルブ閉鎖時間;4.2秒, 空気の混入率;0.4%)

この場合、空気混入領域長と最大水撃圧の関係は上に凸の曲線となる。Fig 3・13(A)および Fig 3・13(B)から明らかのように、バルブ直下流部分に空気を含んでいると、このときの最大水撃圧は、空気を含んでいない場合のそれより、はるかに大きくなる。この例では、空気を含んでいる場合の水撃圧は、空気を含んでいない場合のその約2倍に達している。

Fig 3・13(A)および Fig 3・13(B)の凸部よりも、空気混入領域長が著しく短くなると、その場合の最大水撃圧は空気を含まない場合の最大水撃圧に近づくことが予想される。このことをより明確にするため、Fig 3・5(A)の実験装置の流れに関して(2・39)式および(2・40)式を用いたシミュレーションを行った。その結果を Fig 3・14に示す。

図から明らかのように、与えられたバルブ閉鎖時間に対して圧力脈動が最も

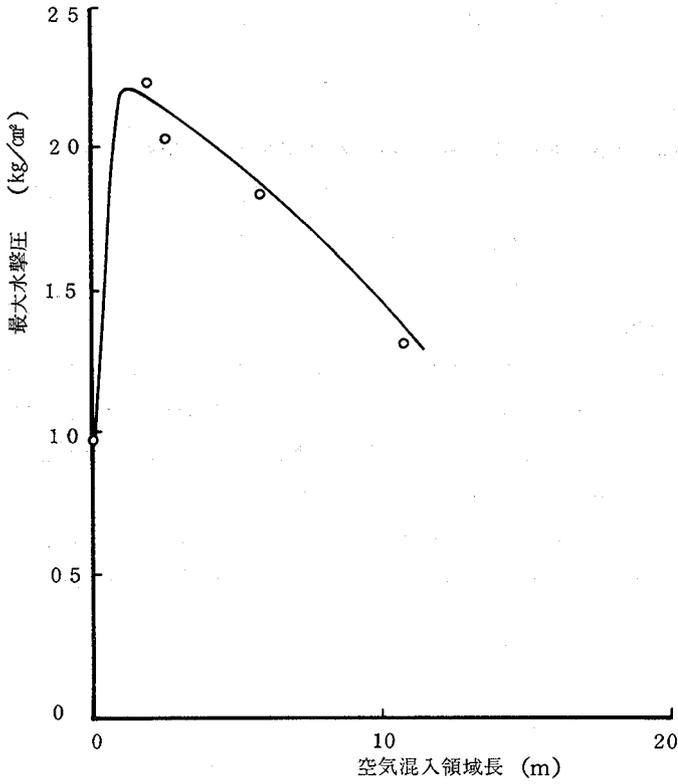


Fig. 3・13(B) 空気混入領域長と最大水撃圧(実測値)
(バルブ閉鎖時間;4.1秒, 空気含有率;5%)

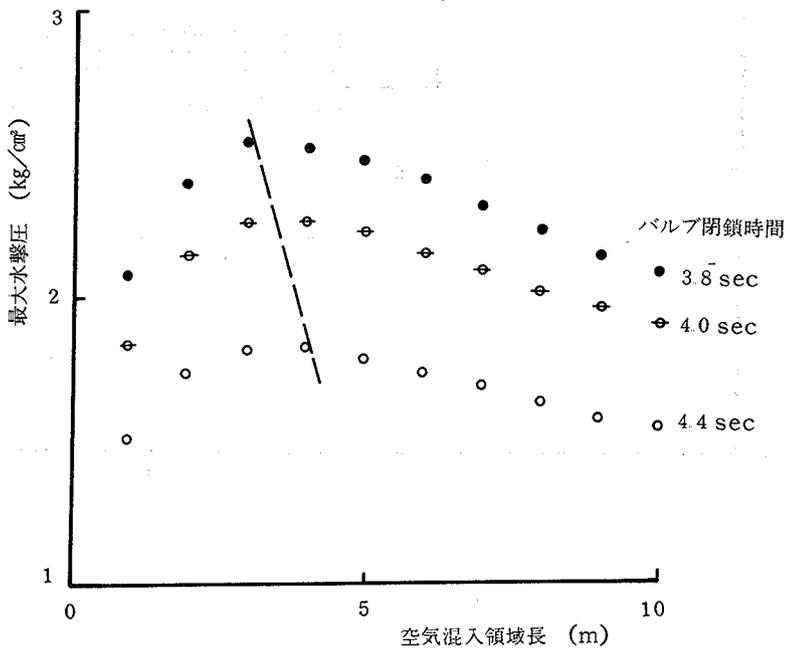


Fig. 3・14 空気混入領域長と最大水撃圧との関係
(空気含有率;1%)

大きくなる空気混入領域長が存在し、この領域長は、バルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、短くなる傾向が認められた。

3・4・4 空気の混入位置、空気含有率およびバルブ閉鎖時間と最大水撃圧の関係

今、空気混入領域長を 2 m と仮定し、管内空気の存在位置、空気含有率およびバルブ閉鎖時間を種々変えて、それに対応する最大水撃圧の変化に関するシュミレーションを (2・39) 式および (2・40) 式を用いて行った。その結果を Fig 3・15(A) および Fig 3・15(B) に示す。

Fig 3・15(A) および Fig 3・15(B) から明らかのように空気混入領域がバルブ近くに存在する場合が最大水撃圧の上昇に最も寄与する。この理由は次のとおりである。まず、最大水撃圧および最大負圧発生時における管路に沿う圧力分布 (計算値) を Fig 3・16 に示す。これによると、バルブに近いほど圧力変動が大きくなっている。このため、バルブに近いほど流れに混入されている空気の体積変化が大きくなり、その結果、圧力波の伝播速度が最も大きく変化し、最大水撃圧の上昇に最も寄与したものと考えられる。

このように、流水中に空気を含有している場合には、バルブの下流側に発生する水撃圧が助長される可能性がある。したがって、バルブ下流側の水撃圧軽減対策として、この部分の空気を可能な限り排除する方策を講ずる必要がある。

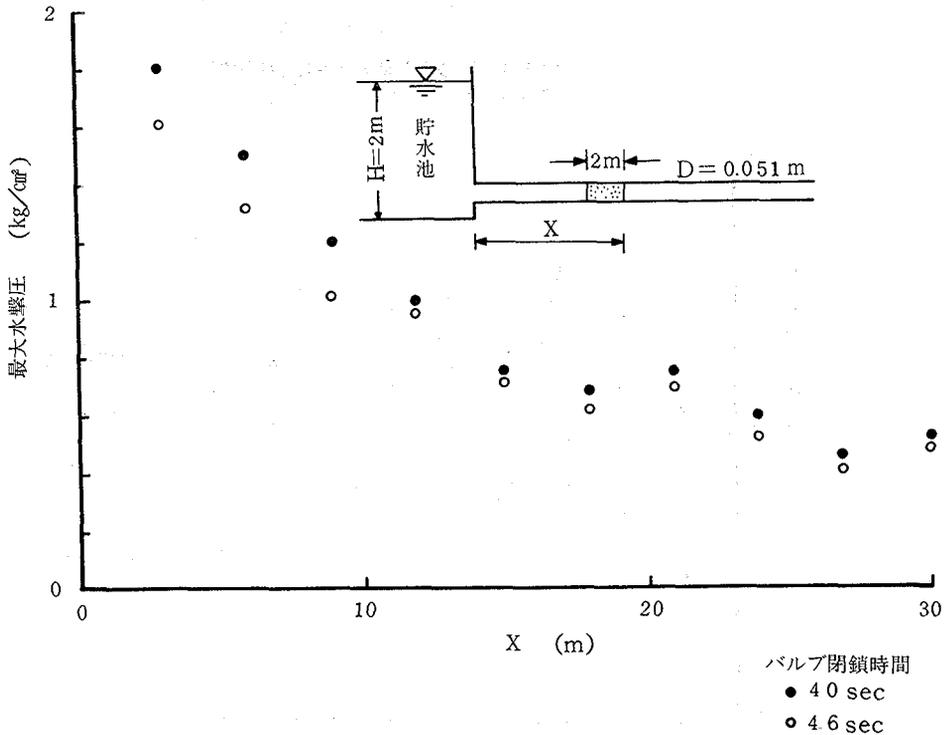


Fig 3・15(A) 水・空気混合部分の位置 X と最大水撃圧との関係 (空気含有率; 1%)

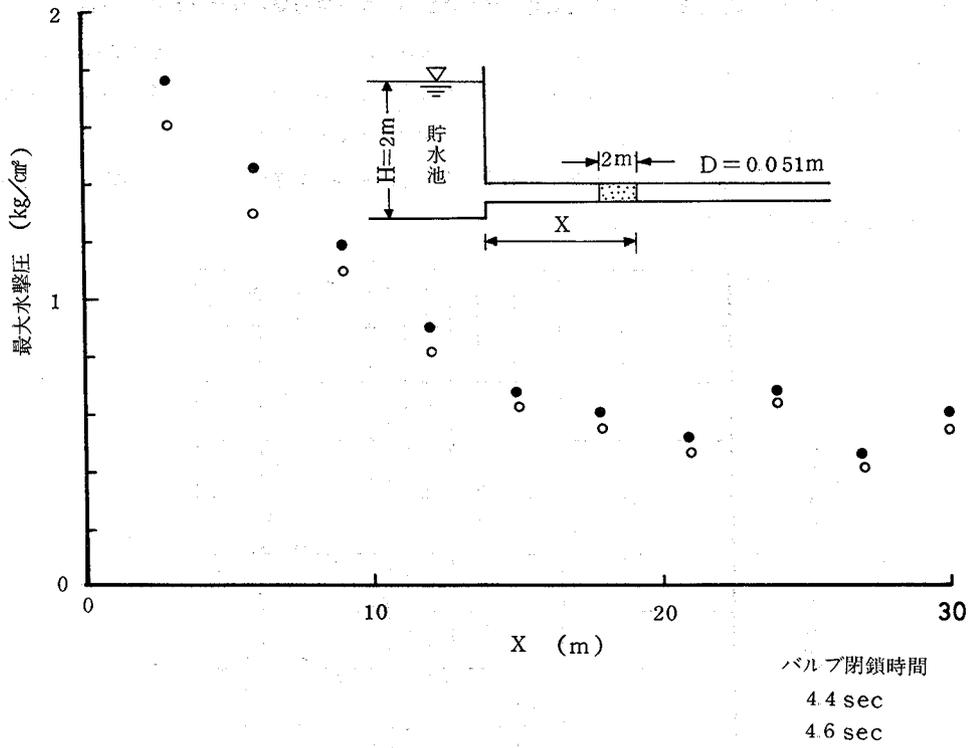


Fig 3・15(B) 水・空気混合部分の位置 X と最大水撃圧との関係
(空気含有率; 2%)

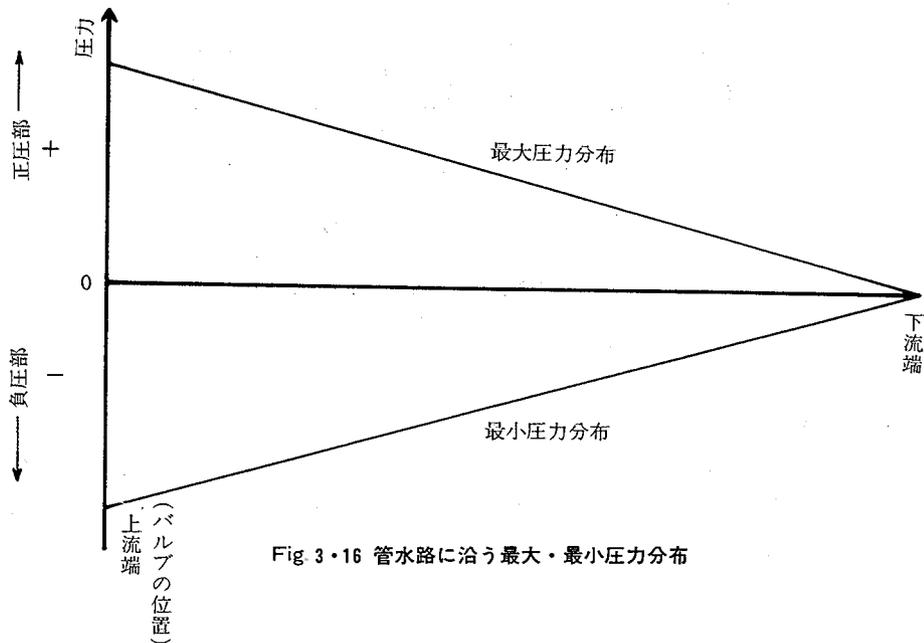


Fig 3・16 管水路に沿う最大・最小圧力分布

3・4・5 一定の空気混入領域長における空気含有率およびバルブ閉鎖時間と最大水撃圧の関係

3・4・4において、空気混入領域がバルブ近くに存在する場合は、最大水撃圧の上昇に最も寄与することが明らかとなった。ここでは、このバルブ近くに空気混入領域が存在する場合、その空気含有率が最大水撃圧に及ぼす影響についてシミュレーションによる検討を行った。その結果を Fig.3・17 に示す。

これによると、圧力脈動が最も大きくなる空気含有率が存在し、その含有率はバルブの閉鎖時間が短くなるにしたがって、小さくなる傾向が明らかとなった。

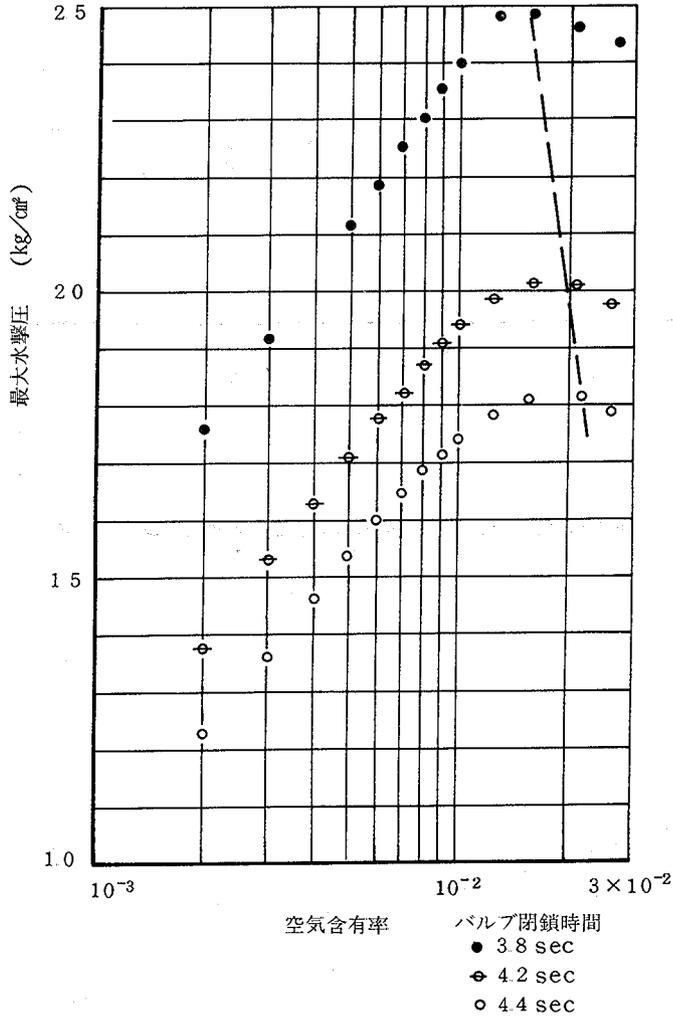


Fig. 3・17 空気含有率と最大水撃圧との関係
(実験管路の上流端から2mまでの区間に空気が混入している場合)

3・5 まとめ

管内流水中に空気が含まれている場合、水と空気が一体となった流体と考え、その場合の水撃作用の解析を行った。さらに、管内流水中に空気が含まれている場合、その空気が最大水撃圧に及ぼす影響について、検討を行った。

得られた成果は次のとおりである。

- ① 第2章に述べた方法を用いて、バルブ上流側の流れに空気が含まれている場合の最大水撃圧の推定が可能である。
- ② バルブ閉鎖時間が一定であるとき、圧力脈動が最も大きくなる空気含有率が存在する。さらに、その含有率はバルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、小さくなった。
- ③ バルブ閉鎖時間が一定であるとき、圧力脈動が最も大きくなる空気混入領域長が存在する。さらに、その空気混入領域長は、バルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、短くなった。
- ④ 空気混入領域が管路の上流端近くに存在する場合は、最大水撃圧の助長に最も寄与する可能性がある。
- ⑤ 流水中の空気混入の状態を空気含有率のみをパラメータとして表現しているため、空気含有率 α と空気混入領域長 L_A の両者が圧力脈動 $H(x_0, t)$ に与える影響の程度を定量的に表現することができなかった。これを定量的に表現するためには、流れに含まれる空気の存在状態を例えば密度流的に表現するなどまえて定量化しておくことが必要となる。

第4章 水柱分離を伴う水撃作用の解析

4・1 概 説

本章においては、水柱分離を伴う水撃作用に関する研究の概要を述べ、従来の解析における問題点を明らかにし、水柱分離を伴う水撃作用の解析方法を提案する。

*J.N.Leconte*²⁶⁾ は、いわゆる古典的方法を用いて、負圧の問題について論じた。*W.H.Li*²⁷⁾ は、まず傾斜したパイプにおける水柱分離、特に気体と水の境界の動きについて、現象論的研究を行い、ついで続報²⁸⁾において、最大水撃圧を解析的に求める方法を示している。これがバルブの下流に発生する水撃作用において、水撃圧を理論的に求めた最初の研究である。また、国内においては、鈴木²⁹⁾によって、水柱分離が述べられ、現象の重要性が指摘された。

*H.K.M. Dighman*¹¹⁾ は溶解空気の負圧下における逸出とそれが圧力変動に及ぼす影響について論じた。すなわち、空気を含んだ水（空気が溶解している水）に対して数学的モデルを考え、そのモデルによる解析結果と空気が、溶解していない水による実験結果の比較を行った。その結果、溶解空気が水撃作用に及ぼす影響は小さいことを述べている。

しかし、*J.A.Swaffield*⁵⁸⁾ は水柱分離を伴う水撃作用の正確な解析は、液体と気体の境界の速度および空洞の大きさの見積りが必要であることを述べ、燃料油を使用して実験を行い、負圧下においては、気体の逸出が無視できないとし、*H.K.M. Dighman*とはやや異なった見解を述べている。この相違は、両者において実験条件が異なるために生じたものと考えられる。すなわち、負圧下において逸出する気体がどの程度空洞の形成に寄与するかは、バルブ閉鎖時間および管路の長さによると考えられる。また、空気は水に対する溶解度が小さく、その溶解については、ヘンリーの法則に従う。しかしながら、ヘンリーの法則が適用され得るのは、十分時間が経過した後には到達した状態量についてである。したがって、水撃作用のように短時間に圧力が変化するような過渡現象に対して、ヘンリーの法則をそのまま適用することには問題がある。長距離パイプラインにおいては、それに応じて、連続的に圧力が低下する時間（Fig 4・1参照）が長くなり、この結果、逸出する空気量が増大することが考えられる。したがって、比較的短い管路で且つバルブの閉鎖速度が大きい場合は水柱分離の部分の蒸気量

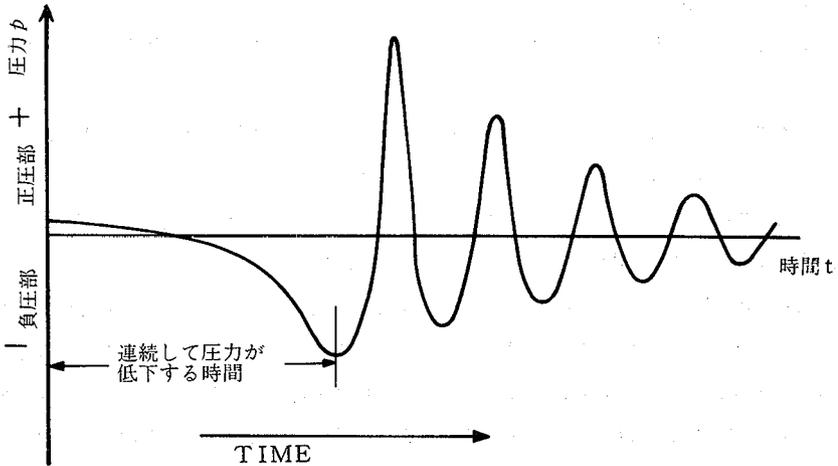


Fig. 4・1 最大水撃圧が生ずる前に連続して圧力が低下する様子

に対して、逸出する空気量は無視できるが、管路が長い場合はそれを考慮する必要がある。

バルブの下流に発生する水撃については、ほとんど研究されておらず、また実験もまれであることを *J.P.Th. Kalkwijk*ら¹⁹⁾は指摘し、長距離パイプラインにおいては、水柱分離を伴う水撃現象が間違っ理解されていることを述べ、さらに空気の逸出を考慮した解析方法を論じている。

また、国内においては、笠原、棚橋²⁰⁾は気体が瞬間的に発生および消滅すると仮定して、水柱分離を伴う水撃の解析方法を述べ、長距離パイプラインのより厳密な安全性の検討に大きく寄与した。萩原^{38, 39)}は水撃作用において、未解決の分野は水の気化現象を伴う場合であることを指摘し、気体の発生および消滅のそれぞれの速度が異なることを考慮して、解析を行い、きわめて現実の現象に近い理論を述べている。しかしながら、低圧下における溶解空気の逸出については圧力、温度、時間および管内平均速度（攪乱の程度）等が複雑に影響し、多くの研究者^{5, 6, 19, 21, 25, 42)}が指摘しているように、正確な予測は困難であり、今後の研究課題である。さし当り、実物程度の装置によって、空気の逸出についての実測が必要であることも述べられている²⁵⁾。

次に空洞の形状について述べる。圧力は管の断面内において通常等しいと仮定して、基礎方程式が誘導されているため Fig 4・2(A) のように空洞が断面全体に発生すると考えた解析例が多い。

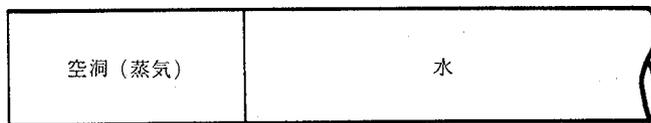


Fig. 4・2 (A) 管路断面の全体に発生する空洞

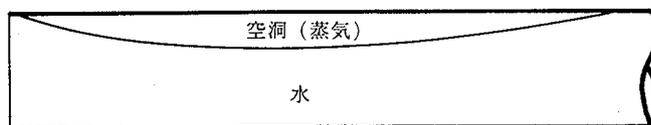


Fig. 4・2 (B) 管路断面の一部に発生する空洞

この点に関して、*J. Siemons*⁴⁸⁾は明らかに管の上側の圧力が下側の圧力より低いので、まず Fig 4・2 (B) のように管の上側が最初に蒸気圧に達し、空洞が発生すると考えて解析を進めている。水柱分離がいかなる形状にあるかについては、今後解明すべき問題であるが、最大水撃圧に大きく寄与する空洞の形状を考慮している点において注目すべき研究である。

4・2 微量の混入空気の状態を考慮した水柱分離を伴う水撃作用の解析

4・2・1 微量空気と水撃作用

カンガイ用管路には、微量の混入空気が含まれているのが通例であり、圧力が異常に低下したときには、これが重要な役割を果たすと考えられる。

本節では、微量の混入空気の状態を考慮して、水柱分離を伴う水撃作用を解析し、最大水撃圧の推定を試みた。

4・2・2 管内に混入している微量空気量の現場測定

4・2・2(1) 実験装置と方法

管内に微量空気がどの程度含まれているかについて、現地で測定した。実験は大分県四日町のカンガイ施設において行った。実験装置の概要を Fig. 4・3 に示す。

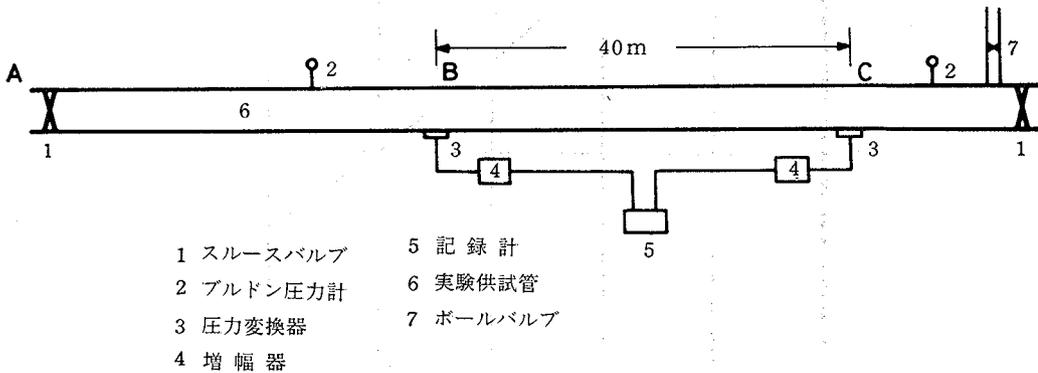


Fig. 4・3 実験装置の概要

Fig. 4-3 における A 点は、自然流下系畑地カンガイ施設の末端である。なお、A 点における静止水頭は約 15 kg/cm^2 である。B, C 間の距離は 40m である。管径 510mm、管厚 6mm、管の材質は塩化ビニールである。下流端には分岐管があり、その一方にボールバルブが設置されている。下流端のボールバルブを急に閉鎖してそれによって圧力波を起し、B, C 点におけるそれぞれの圧力波の応答時間の差から、圧力波の伝播速度を計算する。Fig. 4-3 において、上、下流のバルブの開度を調節し、管内の圧力を種々変えて、実験を行った。

4・2・2(2) 測定結果と考察

(2・24) 式を用いて、計算から得られた空気含有率と圧力波の伝播速度の関係を Fig 4・4 に示す。これに対して、測定から得られた圧力波の伝播速度の値を Fig 4・5 に示す。

(2・24) 式中の諸量については次の値を用いた。

管の弾性係数 $34,000 \text{ kg/cm}^2$

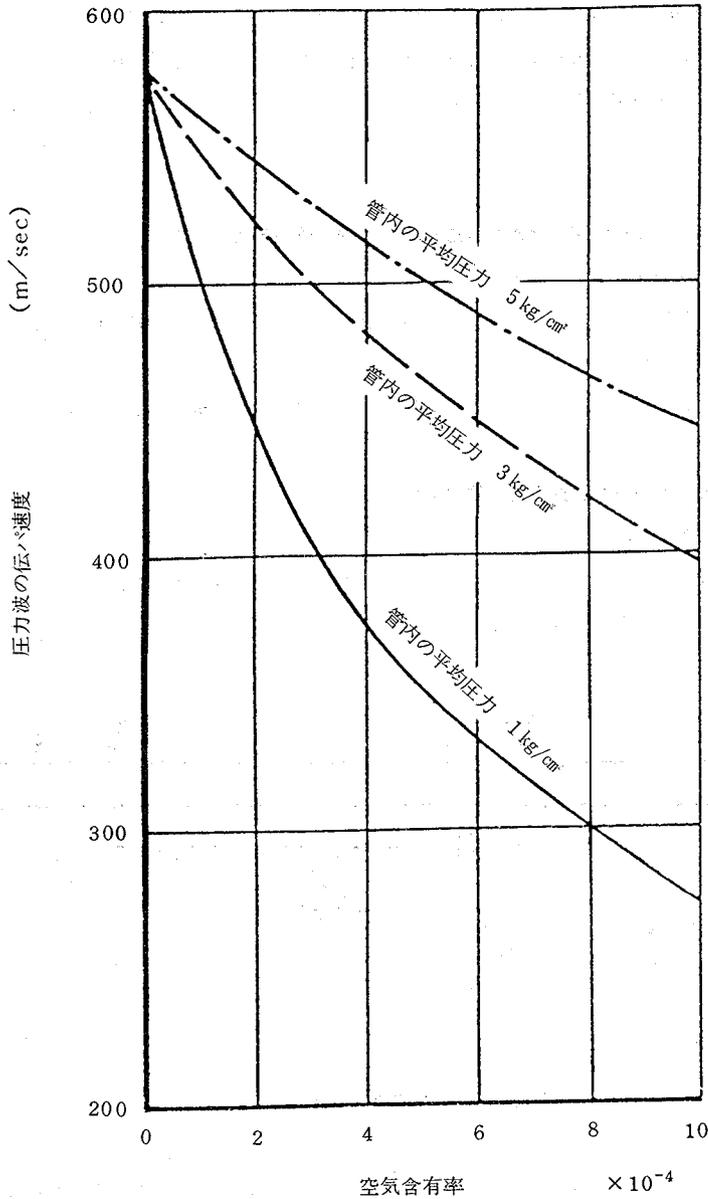


Fig. 4-4 空気含有率と圧力波の伝バ速度との関係
(管径51mm,塩化ビニール管)

接手による係数	1.0
管の厚さ	0.006 m
水の弾性係数	24,000 kg/cm ²

なお、空気が含まれていない場合、計算から得られる圧力波の伝バ速度は約570m/secである。

(2・24) 式中の E_p および C の誤差の最大は、本実験においてはそれぞれ10%および5%程度である。これから考えると圧力波の伝バ速度の誤差¹³⁾の最大は約6%であり、このことを考慮しても実測から得られた値は、管内流水中に空気が含まれていない場合、計算から得られる圧力波の伝バ速度より小さい。このことは管内に空気

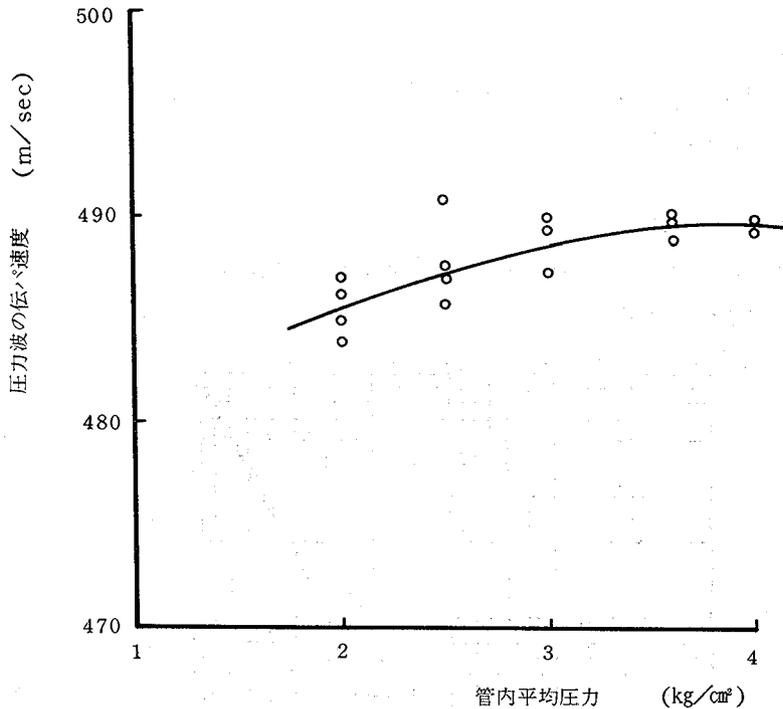


Fig. 4.5 圧力波の伝バ速度の測定結果

の存在を示すものである。測定値から空気量を明確に決めることは、困難であるが少くとも $1/2000 \sim 1/10000$ の空気が含まれていることが明らかである。

このように微量の混入空気の原因としては、いわゆる気泡核として含まれている空気以外に次の諸点が考えられる。

- ① 満流する過程において、管内面の粗い部分に固着したり管の頂部に残留していた空気が下流に流れた。
- ② 圧力または温度の変化によって、溶解していた空気が逸出した。

以上のことは、他のカンガイ用水路にも共通することであり、これらの微量の空気まで完全に管内から排除することは不可能である。

いわゆる気泡核として存在する空気を考慮して、水撃作用の解析において、弾性係数の若干低い値を用いることも述べられている。通常の水撃作用においては、この考えで解析が可能である。しかしながら、圧力が蒸気圧付近まで低下する水撃作用の場合は、たとえ微量の空気でも、その体積が大きくなり、それが圧力波の伝バ速度に影響を及ぼし、水の弾性係数を一定と考える解析方法は不適當である。

4.2.3 理論解析

前項において、管水路内の流水中には、空気が含まれていることが明らかとなったので、これを考慮した水柱分離を伴う水撃作用の解析方法について述べる。

4.2.3(1) 基礎方程式

管内に空気を含んでいる場合の水撃作用の基礎方程式として、第2章の(2.39)式および(2.40)式を用

いる。

4-2-3(2) 解析の前提

相変化による気体の発生および消滅はないと仮定する。

4-2-3(3) 解析に必要な諸量

① 弾性係数

水と空気の混合流体の弾性係数は(2-51)式で与えられる。

大気圧時に、空気が体積比において1/10,000および1/2,000含まれた場合、圧力変動に伴う水と空気の混合流体の弾性係数の変化を Fig. 4-6 に示す。

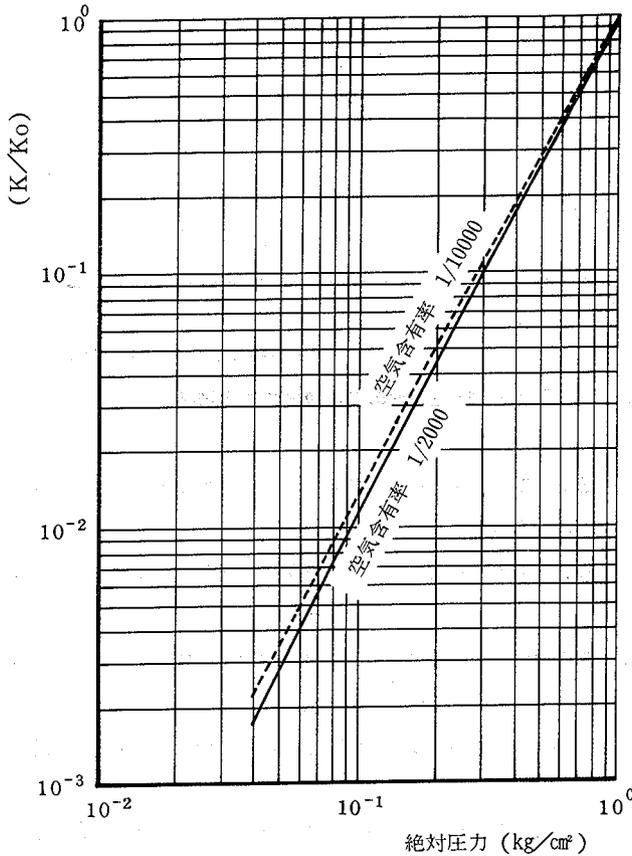


Fig. 4-6 圧力と弾性係数との関係

K_0 ; 1気圧時における弾性係数
 K ; 圧力に対応する弾性係数

さらに、圧力と圧力波の伝バ速度の関係を Fig. 4-7 に示す。

Fig. 4-6 と Fig. 4-7 から明らかのように圧力が低下すれば、流体の弾性係数が大きく減少し、それにとまって圧力波の伝バ速度が急激に減少する。

② 管内平均速度

管内平均速度の算定には、(2-41)式を用いる。

③ 摩擦損失係数

第2章の(2-43)式を用いる。ただし、 $n=6$ とする。

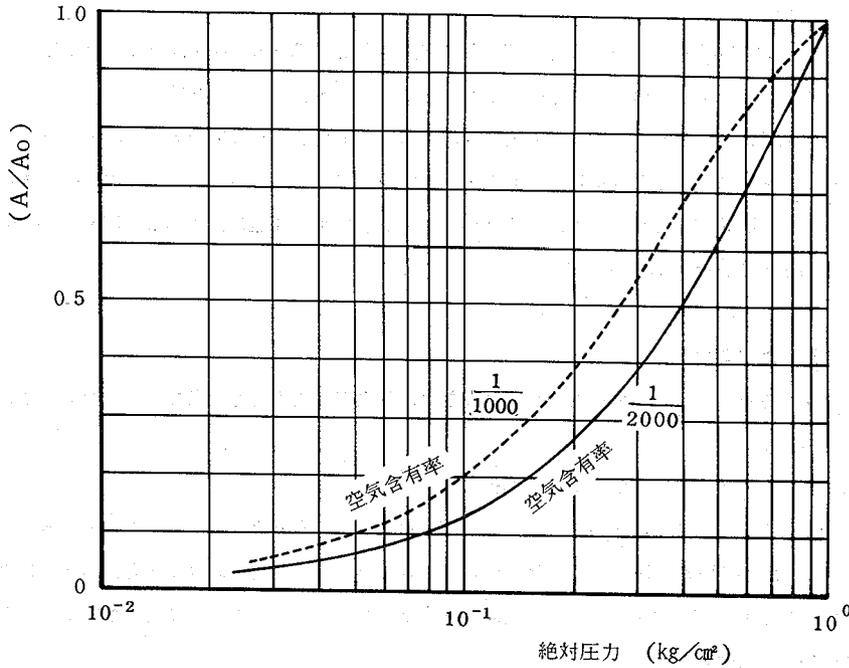


Fig. 4・7 圧力と圧力波の伝バ速度との関係

A_0 ; 1気圧時における圧力波の伝バ速度
 A ; 圧力に対応する圧力波の伝バ速度

4・2・4 実験装置と方法

4・2・2において、述べたように管内に微量の空気が含まれていることが明らかとなった。このような条件で、水柱分離を伴う水撃作用が生じたとき、微量空気の果す役割を明らかにするとともに、本論文において解析に用いた方法の妥当性を示すために実験を行った。

4・2・4(1) 実験装置

実験装置の概要を Fig 4・8に示す。Fig 4・8において、高水槽内の水位は定水頭 (2m) に保たれている。管の長さは30.0mおよび20.0mの2種類がある。それらの管径はいずれも0.051mであり、また材質は塩化ビニールである。なお、管は水平に設置している。Fig 4・8に示しているバルブ3はスルースバルブである。

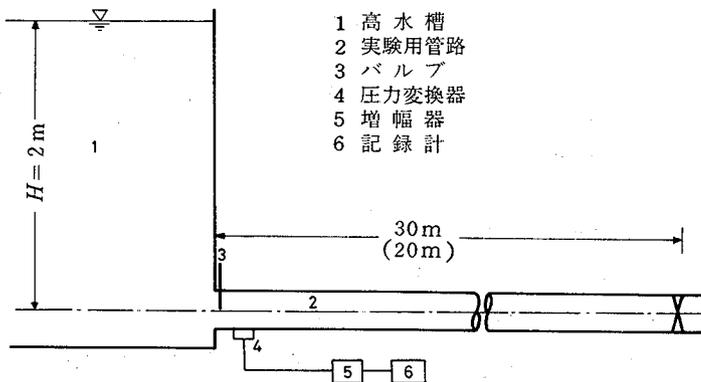


Fig 4・8 実験装置の概要

4・2・4(2) 実験方法

Fig 4・8に示すバルブ3を閉鎖し、それによる管内圧力変動を測定する。測定場所はバルブ直下流である。なお、バルブの閉鎖に際しては、ゲートの降下が等速になるように、モータを使用して閉鎖した。

水柱分離を伴う水撃作用の実験に先立ち、実験装置の管内に含まれている微量空気量の測定を行った。すなわち、下流端のバルブを閉鎖し、圧力波を起し、その伝バ速度から求めた。その結果管内流水中に含まれている空気量は1/2,000~1/5,000であった。また、定常状態における管内平均流速は、管の長さ30.0m, 20.0mの場合それぞれ1.76m/sec, 2.12m/secであった。

4・2・5 結果および考察

水柱分離が発生する場合でも、その程度が小さいときは、基礎方程式の誘導の過程に用いた第2章における(2・30)式が成り立つ。

そこで、第2章において述べた方法を用いて解析する。

微量の混入空気存在によって、圧力波の伝バ速度が変化することを考慮して解析した結果と測定値をFig 4・9(A), Fig 4・9(B)およびFig 4・10に示す。解析から得られたバルブ直下流における圧力波の伝バ速度の変化も同時に示している。なお、解析に用いた水理学的諸量を Table 4・1に示す。また、最大水撃圧に関する測定値と計算値を Table 4・2に掲げる。

Table 4・1 解析に用いた水理学的諸量

	管内平均流速 (m/sec)	摩擦損失係数	バルブ閉鎖時間 (sec)	パイプの長さ (m)	空気含有率 (%)
Fig 5・9(A)	1.76	0.019	3.0	30.0	0.05
Fig 5・9(B)	1.76	0.019	3.2	30.0	0.05
Fig 5・10	2.12	0.019	2.4	20.0	0.05

Table 4・2 水柱分離を伴う圧力脈動における最大水撃圧の測定値および計算値

	パイプの長さ (m)	バルブ閉鎖時間 (sec)	最大水撃圧(kg/cm ²)*	
			測定値	計算値
1	30.0	2.5	3.54	3.72
2	30.0	3.6	2.23	2.10
3	30.0	3.9	1.79	1.74
4	30.0	3.2	2.60	2.67
5	30.0	3.5	2.12	2.24
6	20.0	2.7	1.58	1.62
7	20.0	2.8	1.52	1.46
8	20.0	3.2	1.08	1.01

* 空気含有率は0.0002とした。

圧力波の伝バ速度は、圧力変動に伴って、大きく変動し、その最高値は最低値の10倍以上に達していることが明らかである。水柱分離を伴う水撃作用の特徴の1つは、負圧下において圧力波の伝バ速度が著しく減少することによって、バルブ直下流部の圧力は、負圧下にある時間が正圧下にある時間より長いことである。この点の特徴も解析に表現されている。また、Fig 4・9(A), Fig 4・9(B), Fig 4・10およびTable 4・2から最大水撃圧につ

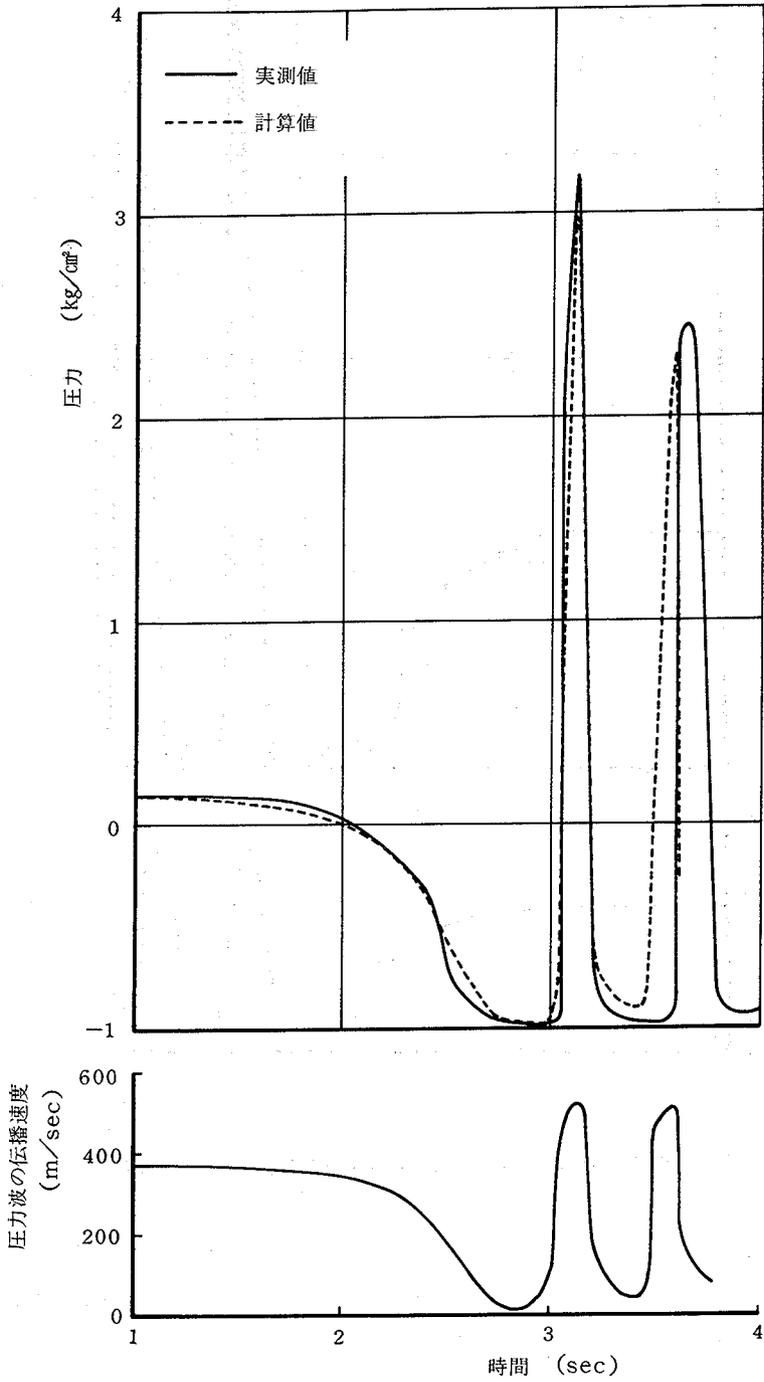


Fig. 4・9 (A) バルブ直下流における水柱分離をともなう圧力脈動
(バルブ閉鎖時間;3秒, 管の長さ;30m)

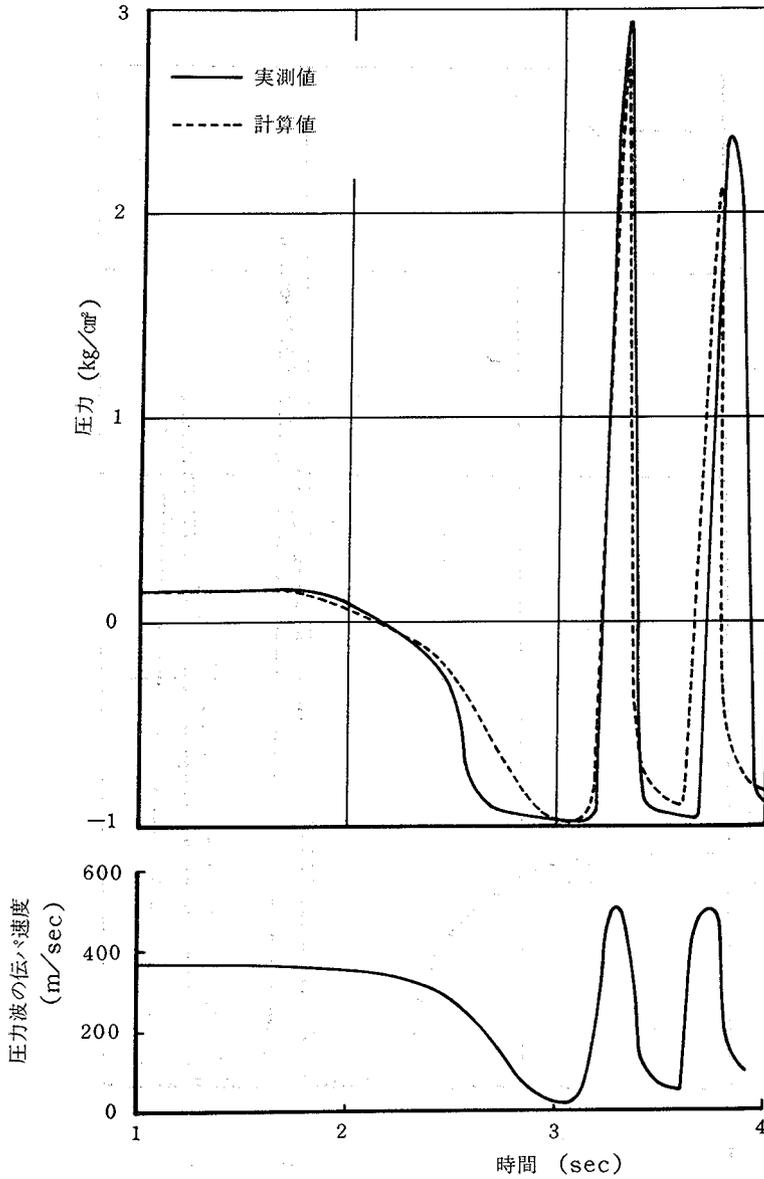


Fig. 4・9 (B) バルブ直下流における水柱分離をともなう圧力脈動
(バルブ閉鎖時間; 3.2秒, 管の長さ; 30m)

いては、計算値と実測値とは近い値を示している。このことは、本論文において提案した方法により最大水撃圧の推定が可能であることを示すものである。すなわち、水柱分離が発生する場合でもその程度が小さい場合は、微量の混入空気が重要な役割を果し、相変化を伴う現象が無視でき、最大水撃圧の推定が可能であることが明らかである。

なお、管内に存在する微量の混入空気を無視し、一定の弾性係数をもつ流体と仮定（すなわち、圧力波の伝播速度を一定と仮定）した解析結果を Fig. 4・11 に示す。これから明らかのようにバルブ直下流部の圧力は蒸気圧以下の値に達し、このような解析は物理的意味がない。これによっても、本論文において述べた方法により、解

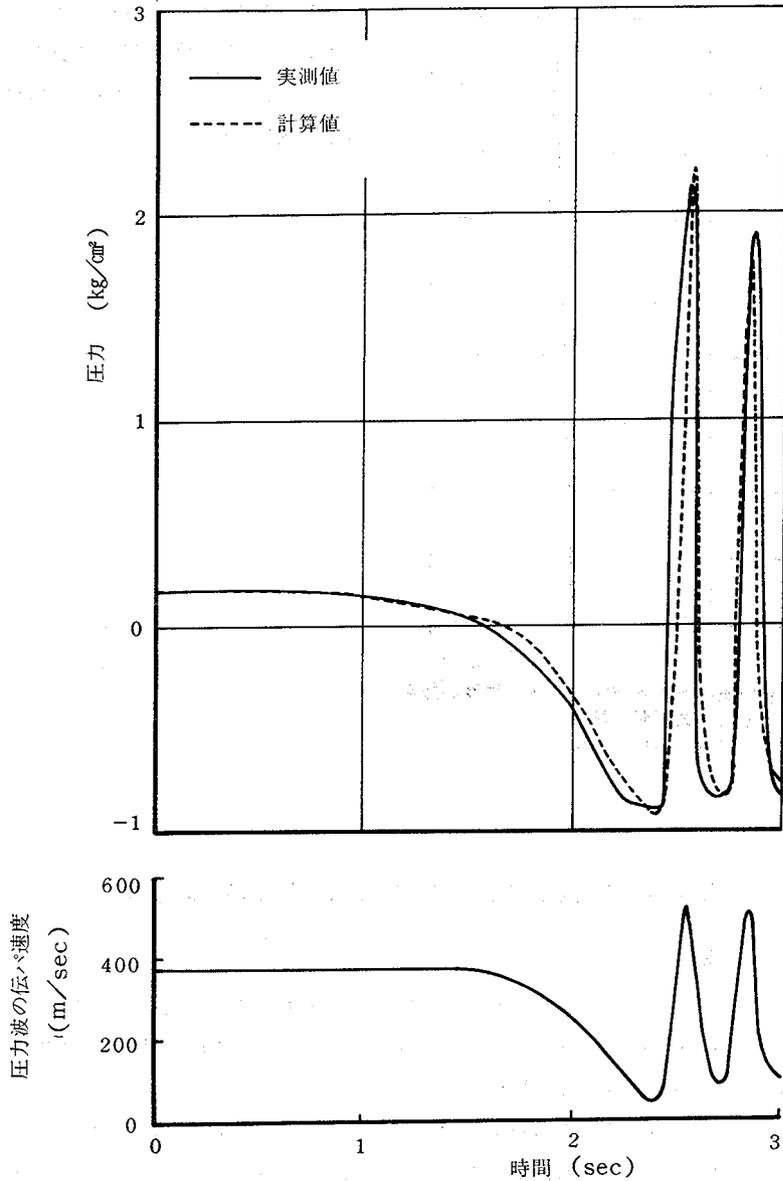


Fig. 4・10 バルブ直下流における水柱分離をともなう圧力脈動
 (バルブ閉鎖時間; 2.4秒, 管の長さ; 20m)

析を試みた意義の1つが明確となる。

4・3 ま と め

水柱分離が発生する水撃作用において、その分離の程度が小さい場合には、微量の混入空気の影響を考慮すれば充分で、水からの空気の逸出、水の気化等の相変化を伴う影響を無視できることを明らかにした。すなわち、管内に微量の混入空気が存在する場合、これが重要な役割を果たすため、現状では未解決な相変化を伴う複雑な現象にふれることなく、水柱分離を伴う水撃作用の解析が可能となる。

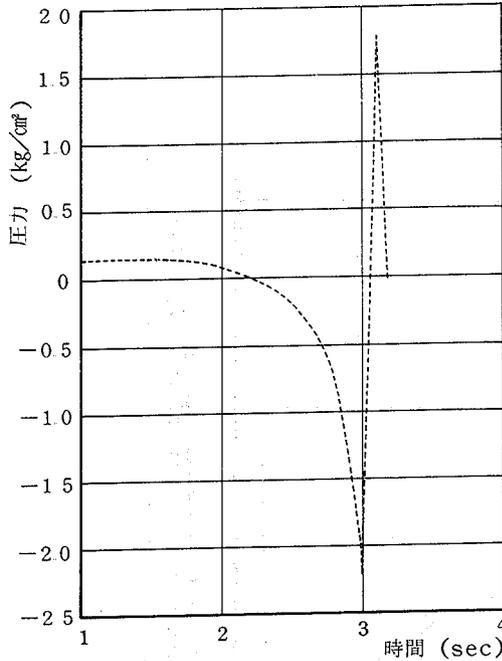


Fig. 4・11 微量空気存在を無視して水の弾性係数を一定とした圧力脈動の解析
(バルブ閉鎖時間;3秒, 管の長さ;30m)

管内流水中の微量空気は、圧力が蒸気圧付近に達すると、その体積が著しく大きくなる。したがって、微量空気は水柱分離を伴う水撃作用には大きな影響を及ぼす。

第5章 空気泡の注入による水撃圧の軽減対策

5・1 概 説

第2章において述べたように、管内流水中に混入空気が含まれている場合の圧力波の伝播速度は、空気が含まれていない場合のそれに比べ、はるかに小さくなる。本章においては、この現象を応用して、管内流水中に空気泡を注入し、これによる水撃圧の軽減効果の検討を試みる。

管路の設計に際し、水撃圧に対応した管の強度を採用するよりも、管の強度は定常圧力に対応させ、水撃圧の発生に関しては、これが生じないように軽減策を講ずる方が経済的な場合が多い。このような観点から水撃圧の軽減対策に関する研究がなされてきた。

この軽減対策は原理的に分類すると次の2つになる。

- ① 圧力波の伝播速度を減少させる方法
- ② 圧力がある値以下に維持するためにそのコントロール装置を設置する方法

本章において取り扱おうとしている「管内に空気泡を注入し水撃圧を減少させる方法」は、前述の①に属する方法である。このほか①に属するものとして、フレキシブルパイプ¹³⁾を使用する方法などがある。なお、②に属する代表的な例はサージタンクまたは空気タンク¹⁴⁾による方法である。

上述の方法は、バルブの上流側に発生する水撃作用の緩和に大きく寄与する。この理由は、水中に含まれた空気のため、管内の水と空気の混合流の弾性係数 E_m が小さくなり、(2・24)式で与えられる圧力波の伝播速度が

大幅に低減するためである。

なお、このようにバルブ上流側の圧力軽減対策として、管内の流れに気泡を注入した場合、第3章で述べたように、バルブ下流側の水撃圧上昇を惹起することがあるので、これに対する留意も合わせて必要である。

本章では、バルブの上流側における水撃軽減対策として、空気泡を注入した場合のバルブ上流側に生ずる水撃圧の大きさと注入空気量との関係の検討を試みる。

5・2 空気泡の注入によって、軽減される水撃圧の推定

5・2・1 基礎方程式

基礎方程式として、第2章において述べた(2・39)式および(2・40)式を用いる。また、解析の手法としては、第2章において述べた方法を用いる。

5・2・2 境界条件

貯水池と一様断面の管水路が接続している自然流下系管水路を考える。この場合境界条件は次のようになる。

5・2・2(1) 上流端の条件

貯水池の位置と管路の流入口との間にベルヌーイの定理を適用すると次のようになる。

$$H_u = H_p(1,1) + \frac{V_p(1,1)^2}{2g} + f \cdot \frac{V_p(1,1)^2}{2g} \quad (5 \cdot 1)$$

ここで、 H_u ; 貯水池の水頭、 f ; 流入損失係数。

なお、上流端境界の模式を Fig 5・1 に示す。一方、負の特性曲線は次のように与えられる。

$$V_p(1,1) - V_R + \frac{g}{a_1} \{ H_p(1,1) - H_R \} + \frac{f_a}{2D} V_R |V_R| D_T = 0 \quad (5 \cdot 2)$$

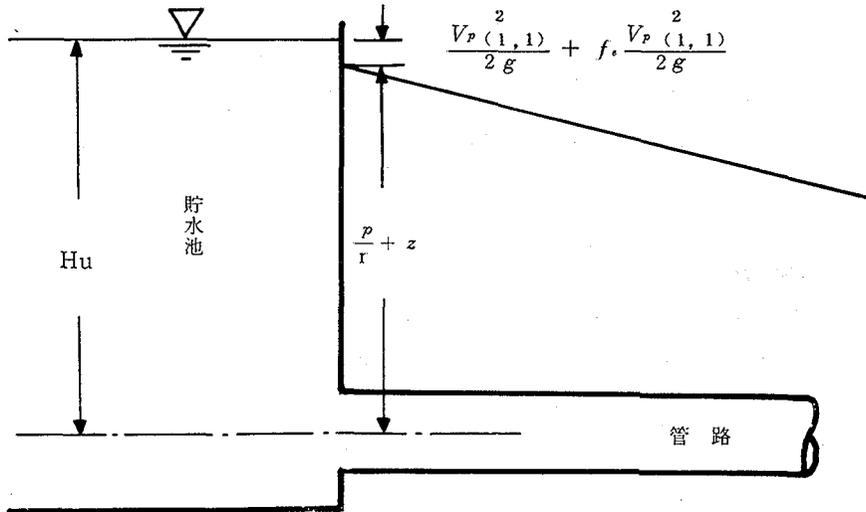


Fig. 5・1 上流端境界条件

(5・1)式と(5・2)式とから連立方程式として、 $V_{p(1,1)}$ および $H_{p(1,1)}$ を求める。

5・2・2(2) 下流端の条件

下流端バルブの上, 下流面にベルヌーイの定理を適用すると次の式が得られる (Fig.5・2 参照).

$$H_p(N, K+1) = f_v \frac{V_p(N, K+1)^2}{2g} \quad (5・3)$$

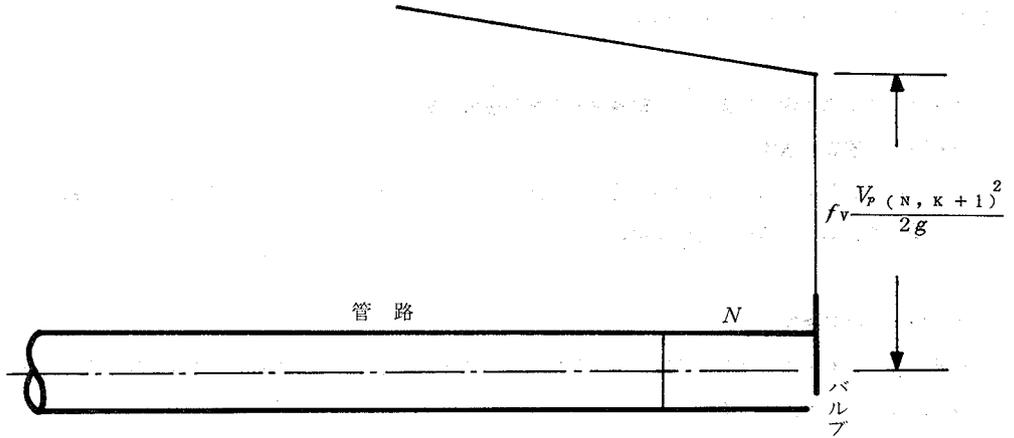


Fig.5・2 下流端境界条件

ここで, f_v ; バルブの損失係数, N ; 下流端の管路区間番号, K ; 下流端管路の分割数。
一方, 正の特性曲線は次のように与えられる。

$$V_p(N, K+1) - V_s - \frac{g}{a_N} \left\{ H_p(N, K+1) - H_s \right\} + \frac{f_m}{2D} V_s |V_s| D_T = 0 \quad (5・4)$$

(5・3) 式と (5・4) 式とから連立方程式として, $H_p(N, K+1)$ が求まる。

なお, バルブ閉鎖終了後については (5・4) 式において, $V_p(N, K+1) = 0$ とすれば $H_p(N, K+1)$ が求まる。ここで (5・2) 式および (5・4) 式中の V_R , V_s , H_R および H_s はそれぞれ, (2・63) 式~(2・66) 式で与えられる。

5・3 実験装置と方法

最大水撃圧と空気含有率との関係を明らかにするために実験を行った。

実験装置の概要を Fig.5・3 に示す。高水槽内の水頭は20m, 管水路の長さは30.0m, 管径は51.0mmである。なお, 管の材質は透明塩化ビニールである。

なお, この装置に水のみを流した場合の定常流れにおける管内平均流速は1.76m/sec以上維持できる。

Fig.5・3 に示すように上流端から空気泡を管内に注入する。管内に注入しようとする空気は図中の定圧保持装置によって, 任意の定圧に調整される。さらに, 通気計によって, その流量が測定された後, 管内に注入した。なお, 空気流量の調節はニードルバルブによって行った。

本実験では, 装置の下流端バルブを緩閉鎖によって水撃圧を生じさせた。

なお, 下流端バルブの閉鎖においては, ゲートの降下が等速となるようにモータを使用した。またこのバルブ

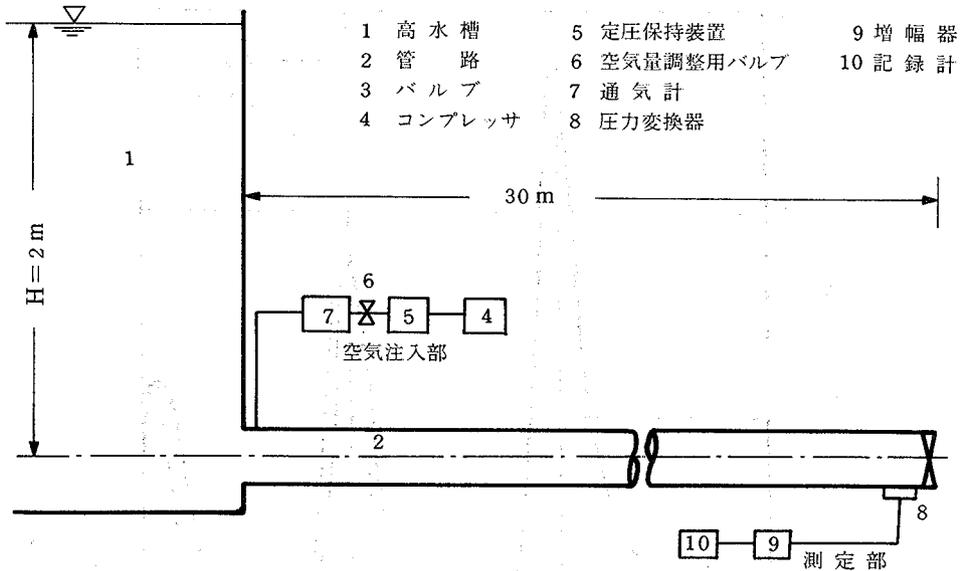


Fig. 5・3 実験装置の概要

閉鎖による圧力変動の測定をその直上流部において行った。

5・4 結果および考察

5・4・1 最大水撃圧の計算値および実測値

第2章で示した解析方法による圧力変動の解析結果と実験結果とを Fig 5-4(A) および Fig 5-4(B) に示す。また、この解析に用いた諸量を Table 5・1 に示す。図から明らかのように計算および実測による最大水撃圧はほとんど同じ値を示している。

Table. 5・1 解析に用いた水理学的諸量

	空気含有率 (%)	管内平均流速 (m/sec)	摩擦損失係数	バルブ閉鎖時間 (sec)
Fig 6-4(A)	0.8	1.74	0.019	2.0
Fig 6-4(B)	0.8	1.74	0.019	3.2

Table. 5・2 空気含有率とバルブ閉鎖時間による最大水撃圧の相違

	空気含有率 (%)	バルブ閉鎖時間 (sec)	最大水撃圧 (kg/cm ²)	
			測定値	計算値
1	1.0	4.4	0.91	0.97
2	1.0	3.2	1.41	1.47
3	1.0	3.4	1.29	1.35
4	1.3	3.9	1.17	1.12
5	1.3	4.8	0.80	0.87
6	1.3	3.5	1.33	1.31
7	1.3	3.8	1.19	1.16
8	1.8	3.1	1.46	1.53

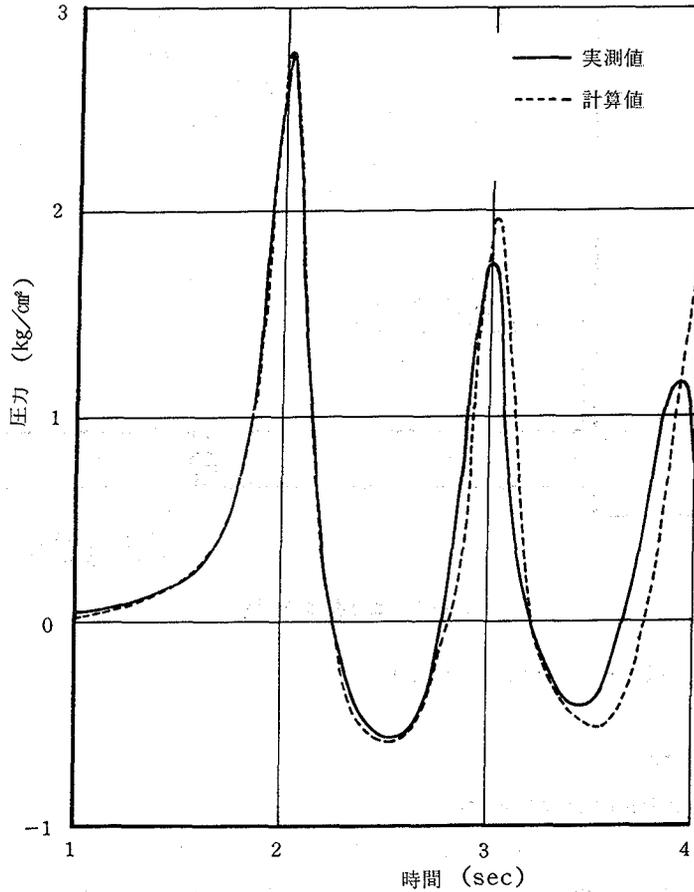


Fig 5・4 (A) バルブの直上流側に生ずる圧力脈動
(バルブ閉鎖時間;2秒, 空気混入率;0.8%)

このことは、第2章で述べた計算法がこのような上流側に空気を混入された流れの圧力脈動の推算に適用可能であることを示している。

なお、種々の空気含有率およびバルブ閉鎖時間を変えながら実験を試みたが、その結果を Table 5・2 に示す。これからも、測定値と計算値がよく一致していることが認められる。

5・4・2 空気含有率、バルブ閉鎖時間および最大水撃圧との関係

空気含有率を一定とし、バルブ閉鎖時間を変えた実験を種々の空気含有率に関して行ない、最大水撃圧とバルブ閉鎖時間、空気含有率の関係を求めた。この結果を Fig.5・5 に示す。

バルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、空気含有率の相違による圧力波の伝バ速度の相違の影響が大きくなり、その結果として、空気含有率の相違による最大水撃圧の相違が明確になる。

バルブ閉鎖時間が長ければ、最大水撃圧に与える空気含有率の相違の影響が小さくなる傾向が認められる。このことは、緩閉鎖のアリエビの式が位相のズレの影響を受けないことと合わせ考えれば、十分肯定できることである。

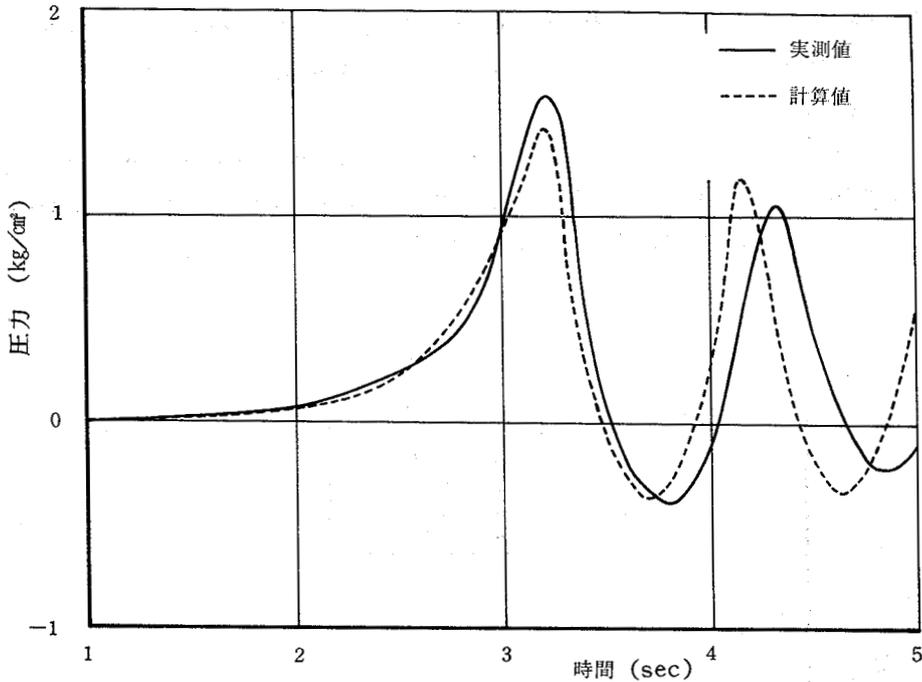


Fig 5・4 (B) バルブの直上流側に生ずる圧力脈動
(バルブ閉鎖時間;3.2秒, 空気含有率;0.8%)

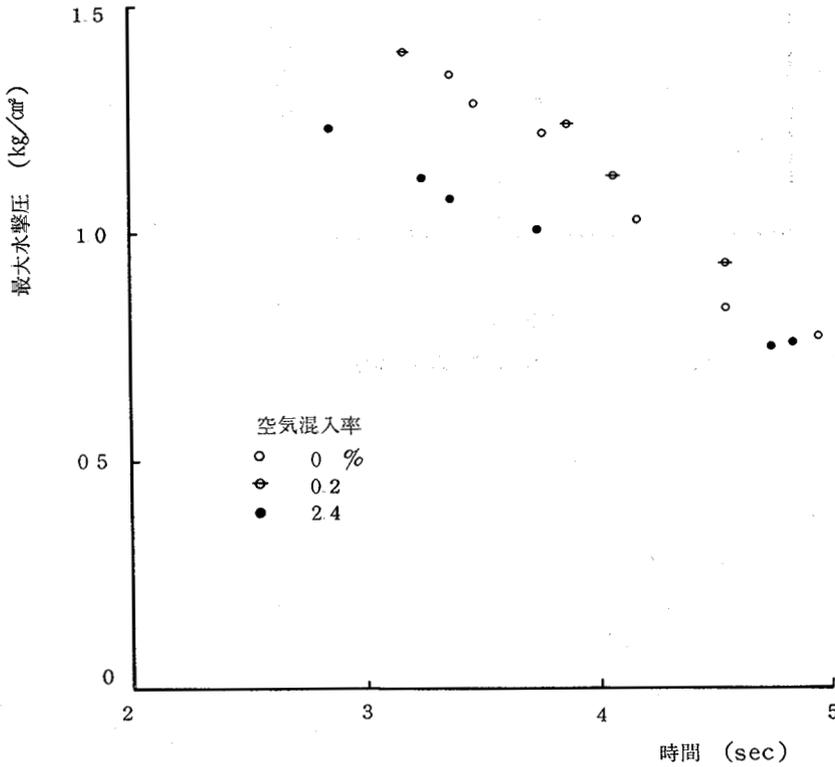


Fig 5・5 バルブ閉鎖時間と最大水撃圧の関係(実測値)

具体的には、Fig.5・5において、バルブ閉鎖時間が3秒程度では、空気含有率が0.2%の場合と0%の場合におけるそれぞれの最大水撃圧の間には、大きな差が認められない。バルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、それらの差が大きくなるものと予想される。

この現象をより明確にするためにシミュレーションによる検討を試みた。その結果をFig.5・6に示す。これによれば、バルブ閉鎖時間が長いときには、空気含有率が最大水撃圧に及ぼす影響は小さいが、バルブ閉鎖時間が短くなるにしたがって、空気含有率が最大水撃圧に及ぼす影響が顕著になることが認められた。

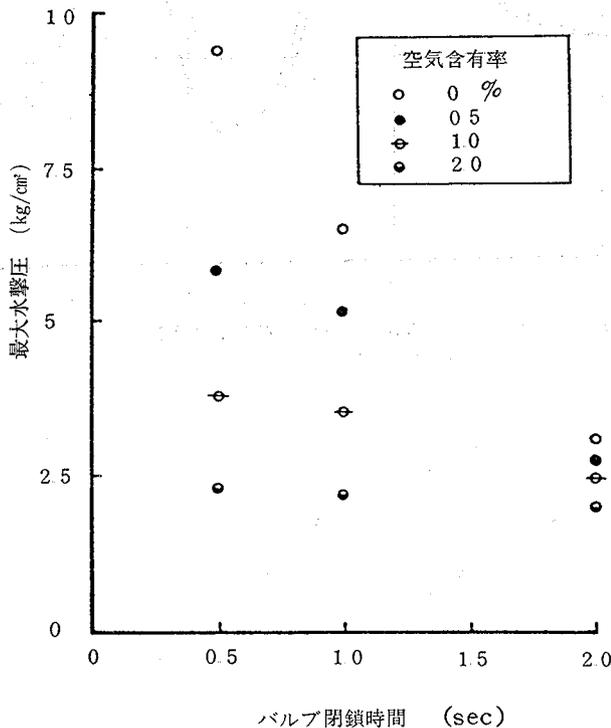


Fig.5・6 バルブ閉鎖時間と最大水撃圧

5・5 まとめ

本章では、空気泡を管内の流れに注入し、これによってバルブ上流側の圧力波の伝播速度を減少させ、水撃圧を軽減させることの効果について検討を試みた。

得られた結果の要約はつぎのとおりである。

- ①第2章の解析方法によってバルブの上流側に発生する空気混入流の最大水撃圧の推算が可能であることおよび
- ②バルブ閉鎖時間が短いほど、最大水撃圧に及ぼす空気含有率の影響が大きくなることが明らかとなった。

第6章 空気室を有する減圧弁の圧力脈動

6・1 概 説

第1章では、管内に空気が存在する形態として管内流水中に均一に分布する場合と偏在する場合とがあることを述べた。

また、空気が管内流水中に均一に分布し、直接空気粒が水と接している場合と、流水中に空気塊として、存在し、その体積が圧力変動によって容易に変化する場合は、圧力脈動の緩和に対して、同じ効果をもつことが第2章で明らかにされた。

本章では、空気室を有する減圧弁を管路システムに設置した場合の水撃圧の脈動の緩和効果に関する評価、検討を試みる。用いた減圧弁の概要を Fig.6・1 に示す。

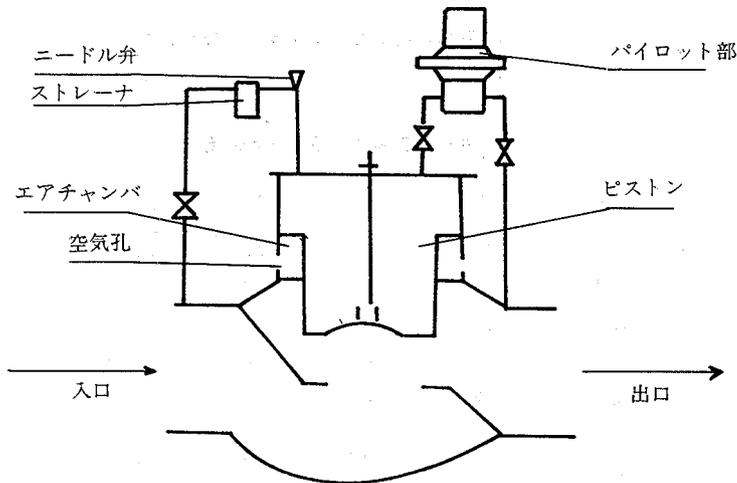


Fig. 6・1 実験に使用したバルブの概要図

この場合、当該形式の減圧弁では、流れの解析に際し空気室が前述の流水中の空気塊と同等の役割を果しているものとして取扱うことができる。

6・2 実験装置

上流端に9,000 m³の貯水地をもつ延長5,000 m、管径1,000～300 mmの管水路の末端部に口径300 mmの自動応答型（シリンダータイプ）の減圧弁を設置して実験を行った。なお、当該管水路は鋼管およびダクタイル鋳鉄管を管径に応じて、選択組合せた構成となっている。減圧弁に直接、接続するため、その上、下流部の管水路は、それぞれ40 mに亘り、管径300 mmの鋼管を、水平且つ直線に配管しており、最下流端は水槽に連絡している。施設の

概要を Fig.6-2 に示し、その諸元を Table.6-1 に掲げる。また、測定部分を Fig.6-3 に示す。

Fig.6-1 に示すように空気室を有していることがこのバルブの大きな特徴である。

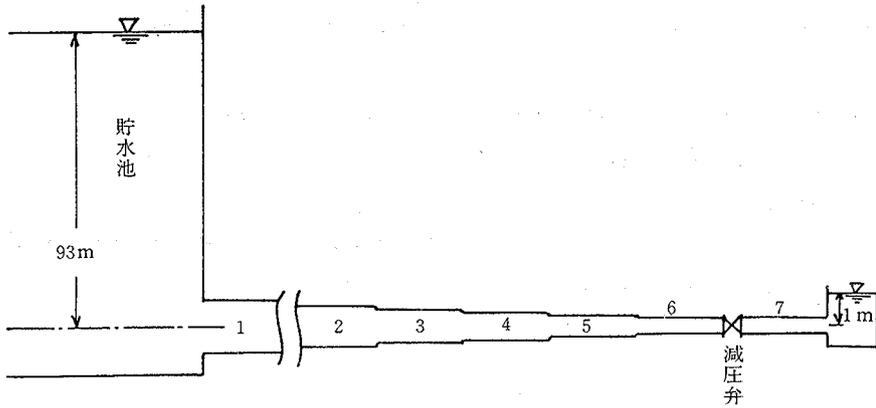


Fig. 6-2 解析に用いたパイプラインのモデル

Table. 6-1 実験に使用した管の諸元

管の番号	管種 *1	管の長さ (m)	管径 (m)	管厚 (mm)	弾性係数 (kg/cm ²)	相当粗度 (mm)
1	SP	2039	1.0	7.9	2.1×10^6	0.4
2	SP	630	0.8	6.0	2.1×10^6	0.4
3	DCP	1273	0.6	8.5	1.6×10^6	0.6
4	DCP	864	0.5	8.0	1.6×10^6	0.6
5	DCP	350	0.4	7.0	1.6×10^6	0.6
6	SP	85	0.3	8.4	2.1×10^6	0.4
7						

*1 SPは鋼管, DCPはダクタイル鋳鉄管を示す。

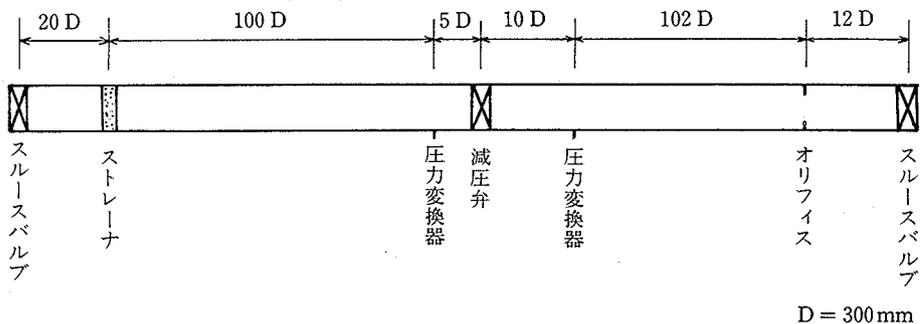


Fig. 6-3 測定部分のレイアウト

6・3 実験方法

パイロット弁を閉方向（あるいは開方向）に操作し、減圧弁の設定圧を変化させることによって、設定圧と実際の流れの2次圧との間に圧力差を生起させ、この差を調整する方向に減圧弁を作動させる。このような過渡状態における圧力脈動に対して、減圧弁の緩衝作用について検討を行った。圧力の測定は減圧弁の直上、下流において行った。また流量の測定にはオリフィスを使用した。

6・4 圧力脈動の平滑化作用を存在しないものとした解析

6・4・1 解析方法

バルブの1次側において、測定した圧力脈動の値を用いて、バルブの2次側の圧力を推定する。解析に用いる基礎方程式は(2・1)式、(2・2)式である。

パイプラインの上、下流端における境界条件は第4章に述べた場合、すなわち、高水槽と一様断面管路が接続している場合と同様であるのでここでは省略する。

バルブの位置においては、次の境界条件を用いて解析を行う。なお、バルブに接続している管路については、Fig.6-2に示すように番号を付す。

$$V_p(j, n+1) = C_3 - C_4 \times H_p(j, n+1) \tag{6・1}$$

$$V_p(j+1, 1) \times A_R(j+1) = V_p(j, n+1) \times A_R(j) \tag{6・2}$$

$$V_p(j+1, 1) = C_5 + C_6 \times H_p(j+1, 1) \tag{6・3}$$

(6・1)式は正の特性曲線を示し、(6・3)式は負の特性曲線を示している。⁵²⁾また(6・2)式は一次側と二次側の流量が等しいことを意味している。すなわち、ここで行うシュミレーションは減圧弁内部への水の吸収、放出作用を存在しないものとしていることになり、減圧弁のサージタンクとしての機能が存在しないと仮定していることになる。

ここで、 A_R ; 管の断面積

j ; 管の配置序列による番号

n ; j 番目の管の等分数

また

$$C_3 = V_R + \frac{g}{a_j} H_R - \frac{g}{a_j} V_R \Delta T \sin \theta - \frac{f_j}{2D_j} \Delta T V_R |V_R| \tag{6・4}$$

$$C_4 = \frac{g}{a_j} \tag{6・5}$$

$$C_5 = V_S - \frac{g}{a_{j+1}} H_S + \frac{g}{a_{j+1}} V_S \Delta T \sin \theta - \frac{f_{j+1}}{2D_{j+1}} \Delta T V_S |V_S| \tag{6・6}$$

$$C_6 = \frac{g}{a_{j+1}} \tag{6・7}$$

a : 圧力波の伝ば速度

D : 管径

f : 摩擦損失係数

である。

なお、摩擦損失係数は Colebrook-White 式から各時間ステップ毎に計算している。

また

$$V_R = \frac{V_C - \theta a (V_C - V_A)}{1 + \theta (V_C - V_A)} \quad (6 \cdot 8)$$

$$V_S = \frac{V_C - \theta a (V_C - V_B)}{1 - \theta (V_C - V_B)} \quad (6 \cdot 9)$$

$$H_R = H_C - \theta (V_R + a) (H_C - H_A) \quad (6 \cdot 10)$$

$$H_S = H_C + \theta (V_S - a) (H_C - H_B) \quad (6 \cdot 11)$$

である⁵²⁾

ここで $\theta = \Delta T / \Delta X$

波速に関する特性曲線を Fig 6・4 に示す。時間ステップは時間によって変化しない。

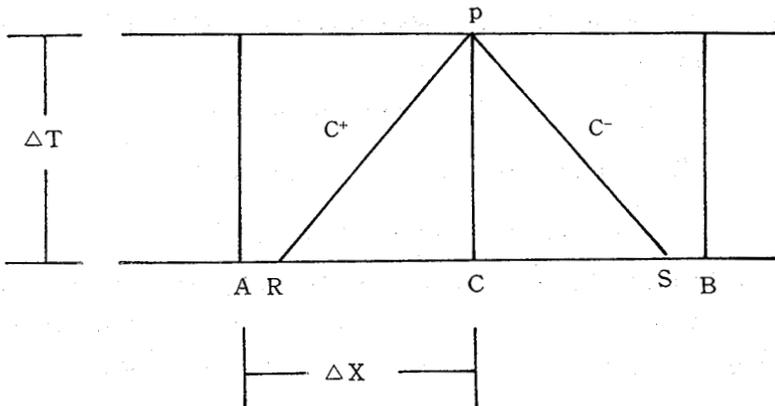


Fig 6・4 波速に関する特性曲線

6・4・2 解析結果と考察

2次圧の設定値を低下させた場合、すなわち、減圧弁を開方向に作動させた場合のシュミレーションの結果を Fig 6・5(A)～ Fig 6・5(C) に示す。

また、2次圧の設定値を上昇させた場合、すなわち、減圧弁を閉方向に作動させた場合の結果を Fig 6・6(A)～ Fig 6・6(C) に示す。

これらのシュミレーション結果から次のことが明らかである。

- ① シュミレーションによる2次圧の圧力脈動は1次圧の周期と大略一致している。
- ② 2次圧変動は、実測による2次圧変動に比べ大きな脈動を生じている。
- ③ このことは、減圧弁の実際の応答は2次圧脈動の緩和効果を備えていることを示しているものと解することができる。

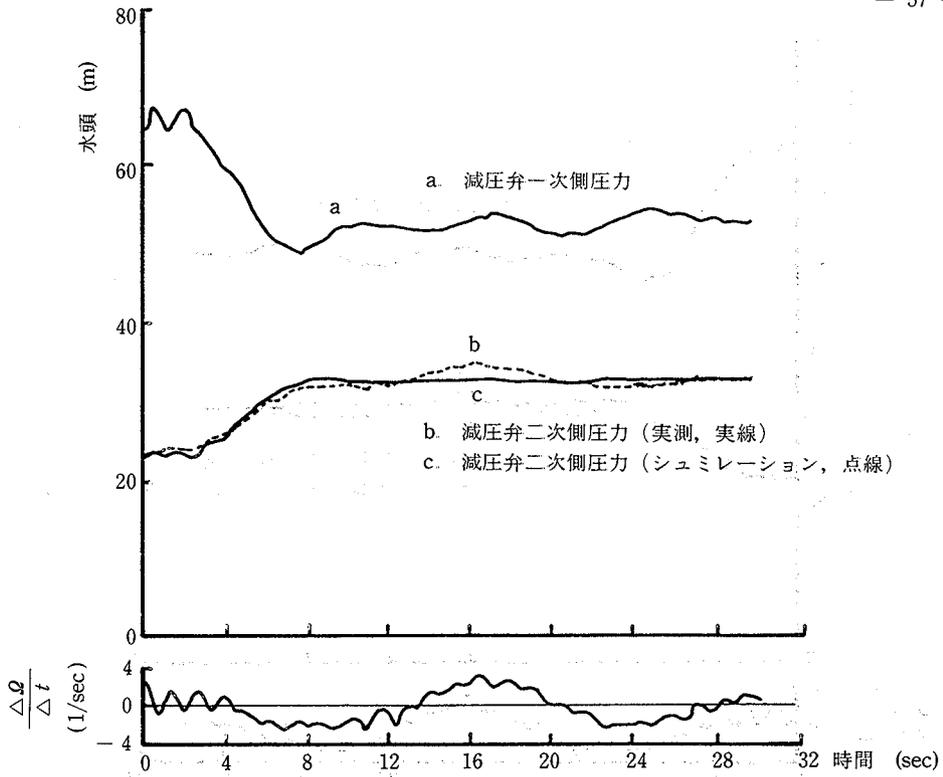


Fig. 6・5 (A) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
 (減圧弁の応答;開方向, ニードルバルブの開度;4回)

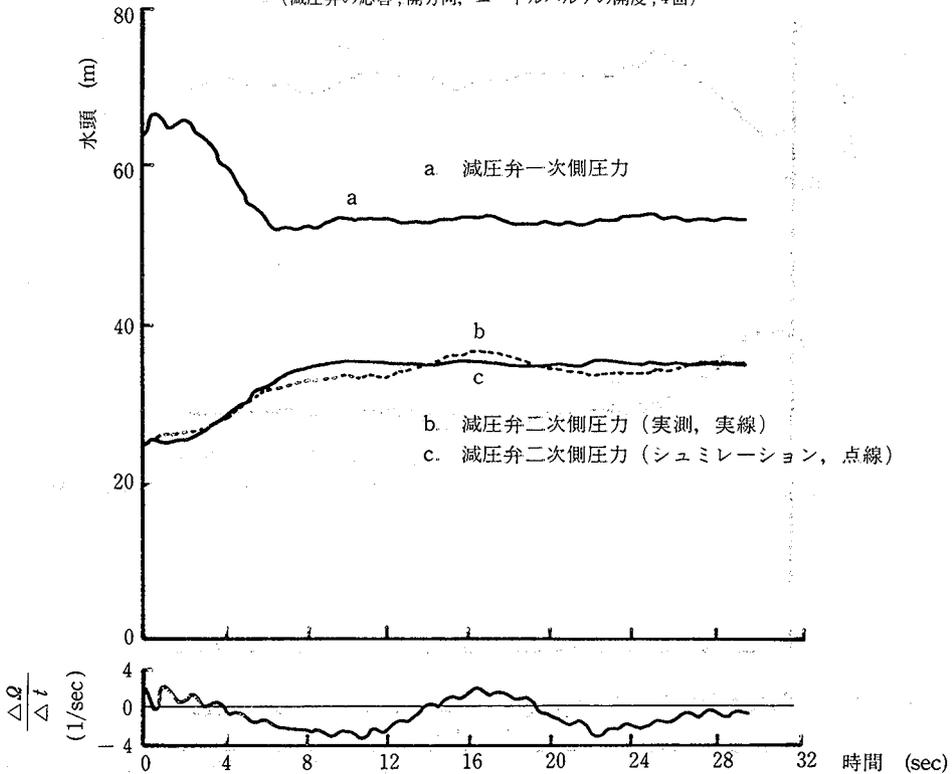


Fig. 6・5 (B) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
 (減圧弁の応答;開方向, ニードルバルブの開度;2回)

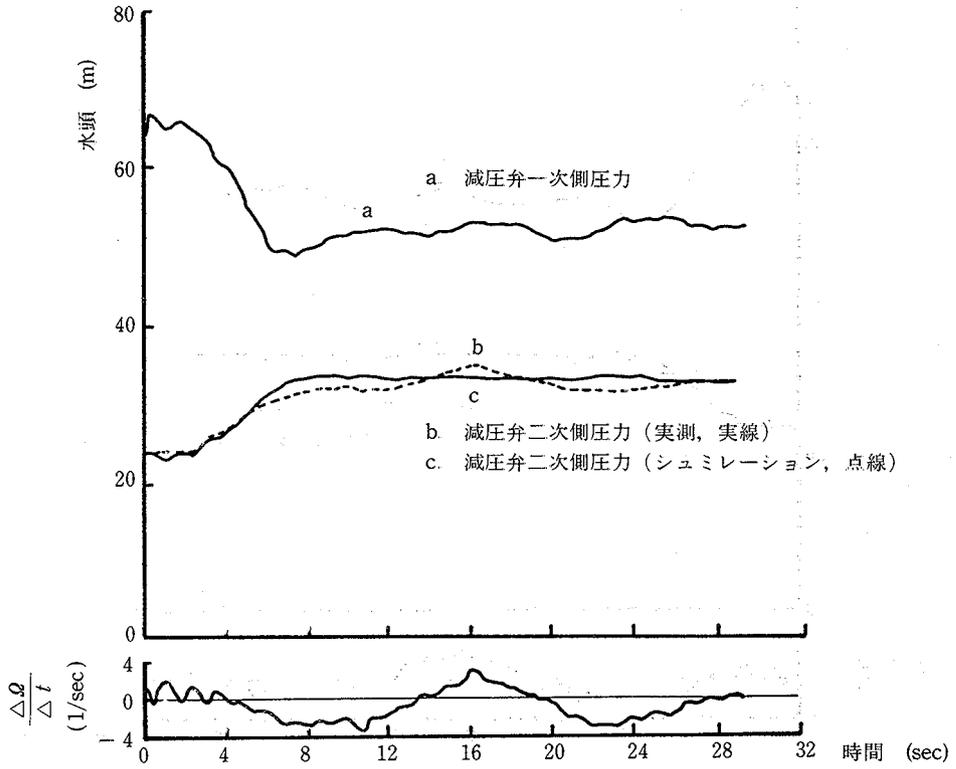


Fig. 6・5 (C) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
(減圧弁の応答; 開方向, ニードルバルブの開度; 0.5回)

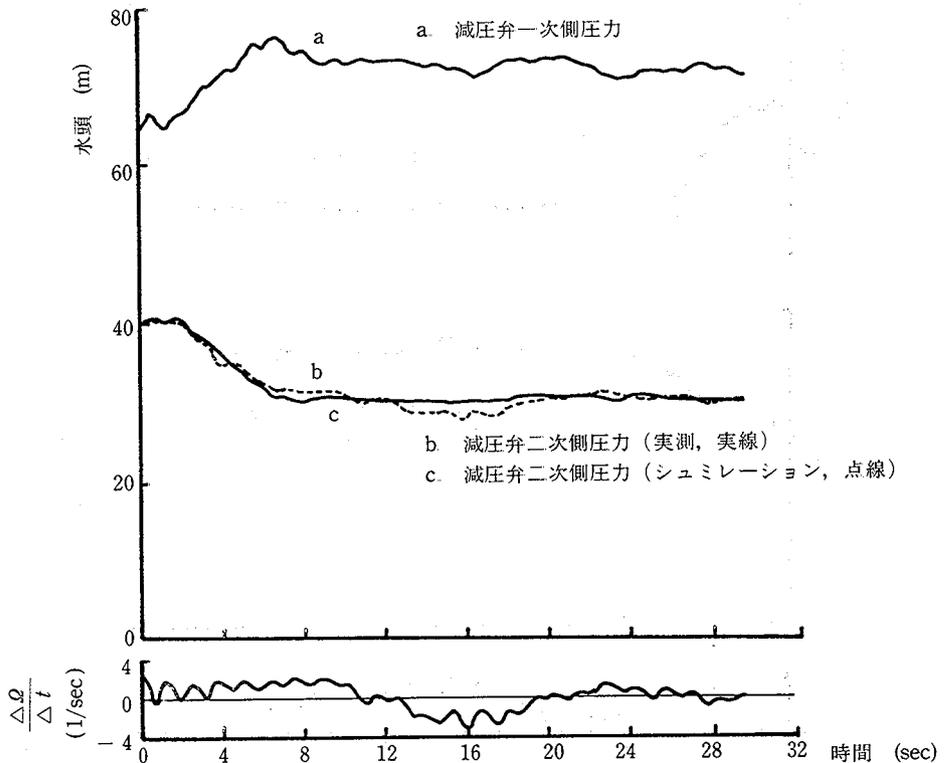


Fig. 6・6 (A) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
(減圧弁の応答; 閉方向, ニードルバルブの開度; 4回)

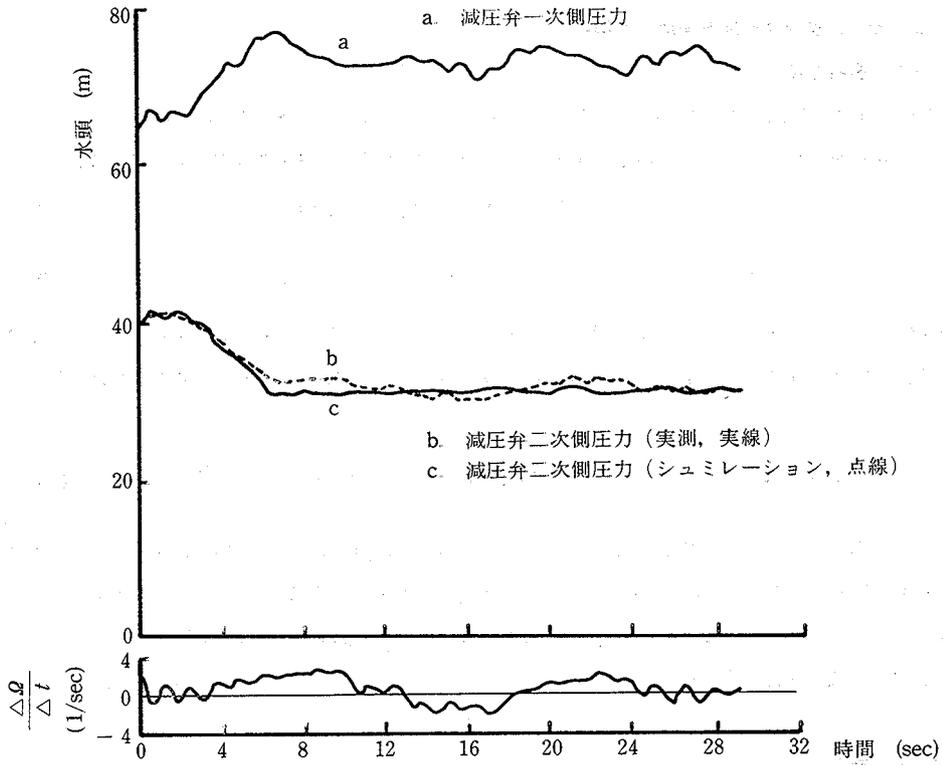


Fig. 6・6 (B) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
(減圧弁の応答; 閉方向, ニードルバルブの開度; 2回)

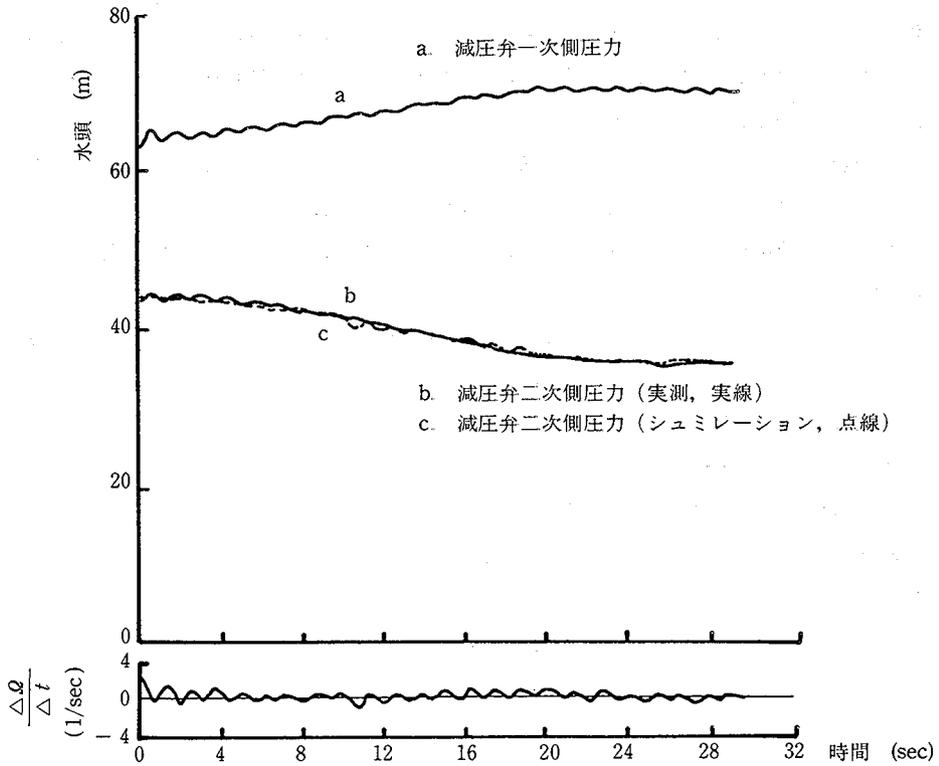


Fig. 6・6 (C) 減圧弁の下流側の圧力脈動および減圧弁内水の貯留量変化率
(減圧弁の応答; 閉方向, ニードルバルブの開度; 0.5回)

6・5 サージタンク機能を考慮した解析

6・5・1 解析方法

Fig 6・2のモデルに関して基礎方程式(2・1), および(2・2)式を解析に用いる。

本節では減圧弁のサージタンク機能を考慮するので減圧弁位置での境界条件は次のようになる。

$$V_p(j, n+1) = C_5 + C_6 \cdot H_p(j+1, 1) \quad (6 \cdot 12)$$

$$V_p(j, n+1) = C_3 - C_4 \cdot H_p(j, n+1) \quad (6 \cdot 13)$$

(6・12) および(6・13)式における $H_p(j+1, 1)$ および $H_p(j, n+1)$ としては実測から得られたデータを条件として与える。減圧弁位置における連続の条件は、単線管路で且つ、減圧弁にサージタンク機能を付与しているので、

$$V_p(j, n+1) A_R(j) = V_p(j+1, 1) A_R(j+1) + \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (6 \cdot 14)$$

となる。すなわち(6・14)式で示されるように減圧弁位置の1次側および2次側の流量は等しくならず $\Delta Q / \Delta t$ に相等する流量が減圧弁によって吸収(あるいは放出)されることになる。ここで Q は減圧弁における水の貯留量であり、したがって $\Delta Q / \Delta t$ は貯留量の変化率である。それ故、(6・14)式中の $\Delta Q / \Delta t$ の項が減圧弁にサージタンク機能を付与する項となる。

6・5・2 結 果

実験から得られた減圧弁の一次側、二次側の圧力測定値をそれぞれ(6・12)式および(6・13)式に与え、基礎方程式(2・1)式および(2・2)式を用いたシミュレーションを試みた。このようにして得られた減圧弁内の貯留量の変化率 $\Delta Q / \Delta t$ の変動を Fig 6・5(A)~Fig 6・5(C) および Fig 6・6(A)~Fig 6・6(C) にあわせて示す。これらの結果をまとめると次のとおりである。

- ① 減圧弁内への水の貯留速度 $\Delta Q / \Delta t$ の変動は1~2秒程度の脈動周期をもった振動をしている。これは、パイロットバルブの間欠的な開閉によって生ずるものと考えられる。
- ② Fig 6・6(A)~Fig 6・6(C)においては、減圧弁の応答は脈動を伴いながら閉方向に作動している。

この場合は

$$\sum_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Delta t > 0 \quad (6 \cdot 15)$$

ここで t_1 : 減圧弁の作動が始まる時刻

t_2 : 減圧弁の作動が終了する時刻

したがって、減圧弁の応答終了時には、減圧弁内の水の貯留量は増加している。

- ③ Fig 6・5(A)~Fig 6・5(C)においては、減圧弁の応答は脈動を伴いながら開方向に作動している。この場合には

$$\sum_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Delta t < 0 \quad (6 \cdot 16)$$

したがって、減圧弁の応答終了時には、減圧弁内の水の貯留量は減少している。

6・5・3 考察

シリング内でのピストンの位置の変化によって生ずる減圧弁内の水の貯留量変化の模式図を Fig 6・7 に示す。

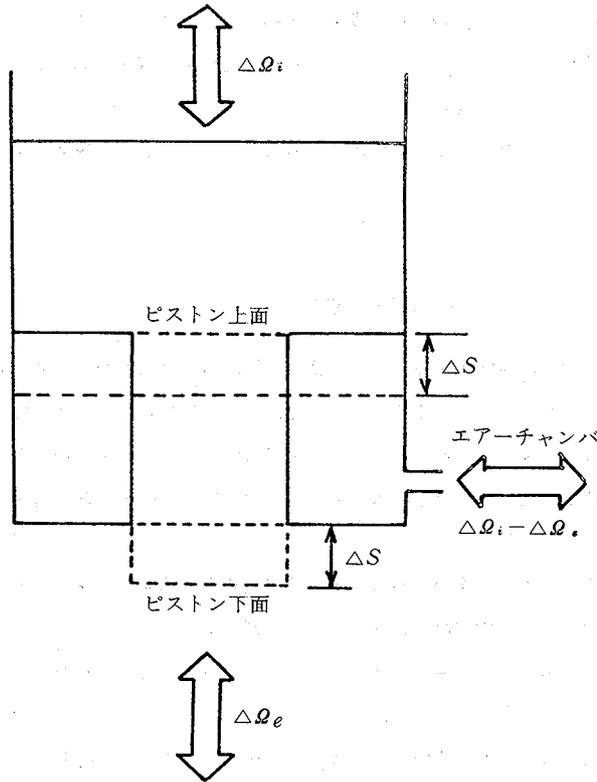


Fig 6・7 減圧弁内における水の貯留量変化模式図

1次側からのシリング内への水の流入によって単位時間 Δt にピストン面が ΔS だけ下がった場合を考える。減圧弁内に貯留される水の増加量は、次の式で与えられる。

$$\frac{\Delta \Omega_i}{\Delta t} - \frac{\Delta \Omega_e}{\Delta t} = A(s) \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (6 \cdot 17)$$

ここで $A(s)$: 空気室の断面積

$\Delta \Omega_i$: シリング内に流入した水の体積

$\Delta \Omega_e$: ピストンの動きによって、減圧弁から排出された水の体積

である。

すなわち (6・17) 式は減圧弁内に貯留される水の増加量 (減少量) と等しい空気量が放出 (から吸入) されることを意味している。いいかえると減圧弁内のシリングおよび空気室から構成される系がサージタンクの機能を果していることになる。そしてこの機能によって、1次圧の変動にかかわらず2次圧の変動が平滑化されていることの支配的要因となっているものと考えられる。

6・6 まとめ

近年、畑地カンガイ施設が大型化し、長距離化しつつある。それに伴って、管内の圧力を調整することが大きな課題の1つとなっている。

空気室を有する自動応答型の減圧弁を管路システムに設置した場合、この減圧弁が圧力の緩衝作用にいかなる役割を果たしているかを明らかにした。得られた成果を要約すると次のとおりである。

- ① 圧力脈動の平滑化作用を存在しないものとして解析した結果、減圧弁の実際の応答は2次圧脈動の緩和効果を備えていることが明らかとなった。
- ② 減圧弁内のシリンダおよび空気室から構成される系がサージタンクの機能を果たしていることが明らかとなった。

第7章 総 括

近年、農業水利の分野では、送配水施設として、施設の管理および操作が一元的で且つ容易な管路方式が多くみられるようになった。しかし一方、管路の長距離化、大口径化ならびに高圧化にともない、当初、設計の際には予測されなかった現象が多く生ずるに至った。空気混入流れの水撃現象もその1つであり、とくに、カンガイ用管路は、その施設構造上、流れに空気を混入し易く、この現象の解明と水理解析手法の確立が、管路の安全設計上、緊要な課題となっている。

本研究では、とくにカンガイ用管路を対象に上記の諸問題を解明することを目的として研究に着手した。

第1章では、まず、カンガイ用管路の特殊性と研究の端緒について概説した。

第2章では、流水中に空気を含んだ流れの運動方程式および連続の方程式を導いた。これらの方程式は形の上では水のみ単一流体の場合の方程式と同じになる。したがって、得られた基礎方程式は波動の方程式である。しかし、空気混合流の場合には、方程式中の圧力波の伝播速度が場所および時間の関数となるため、基礎方程式はいわゆる非線型の波動方程式となる。

さらに本章では、次章以下の解析に用いるため、特性曲線法による上記の基礎方程式の差分化を行った。

第3章では、管内流水中に空気が含まれている場合、この空気含有率が最大水撃圧に及ぼす影響および管内に水と空気の混合流れが存在するときのその領域長さと最大水撃圧との関係を検討した。

その結果①バルブ閉鎖時間を一定としたとき、圧力脈動が最も大きくなる空気含有率が存在する。また、その含有率はバルブの閉鎖時間が短くなるにしたがって小さくなる。②バルブ閉鎖時間を一定としたとき、圧力脈動が最大となる空気混入領域長が存在する。また、バルブの閉鎖時間が短くなるにともなって最大圧力脈動を与える空気混入領域長は短くなる。

このように、圧力脈動はバルブ閉鎖時間、空気含有率および空気混入領域長によって影響されることが明らかとなった。

第4章では、微量の混入空気の存在を考慮して、水柱分離を伴う水撃作用を解析し、最大水撃圧の推定を試みた。この結果、水柱分離が発生する水撃作用において、この分離の程度が小さい場合には、微量の混入空気の存在を考慮すれば充分で、水からの空気の逸出、水の気化などの相変化による影響を無視できることが明らかとなった。したがって、微量の混入空気を含む流れでは、現状では未解決な相変化を伴う複雑な現象にふれることなく、水柱分離を伴う水撃作用の解析が可能となった。

第5章では、空気泡を管内の流れに注入し、これによってバルブ上流側の圧力波の伝播速度を減少させ、水撃

圧を軽減させることの効果について検討を試みた。これによれば、バルブ閉鎖時間が長いときは、空気の含有が最大水撃圧に及ぼす影響は小さいが、バルブ閉鎖時間が短くなるにもなって空気の含有が最大水撃圧に及ぼす影響が顕著になる。このように空気の注入はバルブ閉鎖時間が短い場合、最大水撃圧の抑制に関して効果的であるが、一方、このようにして流れに注入された空気は、第3、第4章で述べたようにバルブ下流側の水撃圧を増大させる可能性もあるので実際の利用に際しては下流側の圧力脈動について第3、第4章の解析を併せて行うことが必要である。

第6章では、空気室を有する自動応答型の減圧弁を管路システムに設置した場合、この減圧弁が圧力の緩和作用にいかなる役割を果しているかを明らかにした。結果はつぎのとおりである。①圧力脈動の平滑化作用を存在しないものとして解析した結果、減圧弁の実際の応答は2次圧脈動の緩和効果を備えていることが明らかとなった。②減圧弁内のシリングおよび空気室から構成される系がサージタンクの機能を果していることが明らかとなった。

以上のように、カンガイ用管路において多く見られる空気混入流に関して、混入流の弾性係数の変動とそれに伴う圧力波の伝播速度の変化に着目し、非線型波動方程式を解くことによって、管内圧力脈動とくに最大水撃圧の推定が可能となることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Abbott, M. B. : An Introduction to the Method of Characteristics, American Elsevier, pp.8-15 (1966).
- 2) Allievi, L. : Air Chambers for Discharge Pipes, Trans. A. S. M. E. HYD-59-7, pp. 651-659 (1937).
- 3) Angus, R. W. : Air Chambers and Valves in Relation to Water Hammer, Trans. A. S. M. E. HYD-59-8, pp. 651-668 (1937).
- 4) Babb, A. F. and W. K. Johnson : Performance Characteristics of Siphon Outlet, Proc. A. S. C. E., HY. 6, pp. 1412-1437 (1968).
- 5) Baltzer, R. A. : Column Separation Accompanying Liquid Transients in Pipes, Jour. Basic Engineering, Trans. A. S. M. E. Vol. 89, pp. 837-846 (1967).
- 6) Brown, R. J. : Water-Column Separation at Two-Pumping Plants, Jour. Basic Engineering, A. S. M. E., Vol. 90, pp. 521-530 (1968).
- 7) Carstens, M. R. and T. W. Hagler, Jr. : Waterhammer Resulting from Cavitating Pumps, Proc. A. S. C. E., HY. 6, pp. 161-183 (1964).
- 8) Contractor, D. N. : The Reflection of Waterhammer Pressure Waves from Minor Losses, Jour. Basic Engineering, A. S. C. E. Vol. 87, pp. 445-452 (1965).
- 9) Courant, R. and K. O. Friedrichs : Supersonic Flow and Shock Waves, Interscience Publishers, pp. 37-78 (1948).
- 10) Dejuhasz, K. J. : Hydraulic Phenomena in Fuel-Injection Systems for Diesel Engines, Trans. A. S. M. E. HYD-59-9, pp. 669-677 (1937).
- 11) Digman, H. K. M. and C. B. Vrengdenhil : The Effect of Dissolved Gas on Cavitation in Horizontal Pipelines, Jour. Hydraulic Research, Vol. 7, pp. 301-314 (1969).
- 12) 土木学会 : 水理公式集, 土木学会, P158 (1963)
- 13) Goldberg, G. E. and M. A. Stoners : Water Hammer in P. V. C. and Rein Forced Plastic Pipe, Discussion, Proc. A. S. C. E. HY. 6, pp. 672-674 (1977).
- 14) Haindle, K. : The Protection of Low Head Irrigation Pipenetworks against Waterhammer Effects, Lenergia Elettrica N. 6, pp. 410-415 (1969).
- 15) 畑 孝造 : 最近の水道用並びに灌漑用ポンプ設備のウォーターハンマー対策, 日立評論, 49(5), pp.26-32(1967).

- 16) Hsieth, D. Y. and M. S. Plesset : On the Propagation of Sound in Liquid Containing Gas Bubbles, *The Physics of Fluid* 4(8), pp. 910-975 (1961).
- 17) 井上光弘, 田辺邦美 : 送水管内の空気の影響について, *農土誌*, 42(3), pp. 153-156 (1974).
- 18) 弥永孝一ほか : フレキシブルパイプ使用による Waterhammer の軽減対策, *農土誌*, 45(8), pp. 535-538 (1977).
- 19) Kalkwizk, J. P. Th and C. Kranenburg : Cavitation in Horizontal Pipelines due to Waterhammer, *Proc. A. S. C. E. HY* 10, pp. 1585-1605 (1971).
- 20) 笠原英司, 棚橋隆彦 : 水柱分離を伴う水撃作用の解析, *日機論集*, 34(263), pp. 1209-1216 (1968).
- 21) Kephart, J. T. and K. Davis : Pressure Surges Following Water-Column Separation, *Jour. Basic Engineering*, *Trans. A. S. M. E.* Vol 83, pp. 456-460 (1961).
- 22) Knapp, R. T. : Operation of Emergency Shut-off Valves in Pipe Lines, *Trans. A. S. M. E. HYD-59-10*, pp. 679-682 (1937).
- 23) Knapp, R. T. : Complete Characteristics of Centrifugal Pump and Their Used in the Prediction of Transient Behavior, *Trans. A. S. M. E. HYD-59-11*, pp. 683-689 (1937).
- 24) 小堀 徹ほか : 導水管内圧力波の伝わり速度について, *日立評論*, 37(10), pp. 33-37 (1955).
- 25) Kranenburg, C. : Gas Release during Cavitation in Pipes, *Proc. A. S. C. E. HY.10*, pp. 1383-1398 (1974).
- 26) Leconte, J. N. : Experimental and Calculations on the Resurge Phase of Waterhammer, *Trans. A. S. M. E. HYD-59-12*, pp. 691-694 (1937).
- 27) Li, W. H. : Mechanics of Pipe Flow Following Column Separation, *Proc. A. S. C. E. EM* 4, pp. 97-118 (1962).
- 28) Li, W. H. and James, P. Walsh : Pressure Generated by Cavitation in a Pipe, *Proc. A. S. C. E. EM* 6, pp. 113-133 (1964).
- 29) Lin, P. N. : Discussion of "Unsteady Flow in Open Channels", by H. J. Putman, *Trans. A. G. U.* 30(2) pp. 302-306 (1949).
- 30) 森 康夫ほか : 二相流中の圧力波の伝播, *日機論集*, 37(317), pp. 305-312 (1973).
- 31) 森 康夫ほか : 二相流中の圧力波の伝播 (第2報, あわ膜流), *日機論集*, 42(355), pp. 877~884(1975).
- 32) 西山壯一 : Waterhammer に及ぼす空気の影響について, 一農業用管水路の基礎的研究 (I)一, *農土論集*, 39, 34-38 (1972).
- 33) 西山壯一, 田辺邦美 : バルブ閉鎖による負圧の解析について, *農土誌*, 43(3), 152-154 (1975).
- 34) 西山壯一ほか : バルブの下流に発生する Waterhammer と, それに及ぼす混入空気の影響, *農土論集*, 77, pp. 21-26 (1978).
- 35) 西山壯一ほか : パイプラインの一部に混入空気が存在する場合, その空気が Waterhammer に及ぼす影響, *農土論集*, 82, pp. 32-39 (1979).
- 36) 西山壯一ほか : 混入空気による異常圧力上昇を伴う水撃作用の解析方法, *農土誌*, 48(6), pp. 23-28 (1980).
- 37) 荻原能男, 増田文彦 : 流出渦の形状に関する研究, *山梨大学工学部研究報告*, Vol. 28, pp. 213-216 (1969).
- 38) 荻原能男 : 水柱分離前の水撃現象の計算方法, 第18回水理講演会論文集, pp. 127-132 (1974).
- 39) 荻原能男 : 異常圧力低下をともなう管水路の流れ, *山梨大学工学部研究報告*, Vol. 28, pp. 31-36 (1977).
- 40) Putman, H. J. : Unsteady Flow in Open Channels, *Trans. A. G. U.* 29(2), pp. 227-232 (1948).
- 41) Report of the Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulic Structure : Factors Influencing Flow in Large Conduits, *Proc. A. S. C. E. HY* 6, pp. 123-152 (1965).
- 42) Richards, R. T. : Water-Column Separation in Pumps Discharge Lines, *Trans. A. S. M. E. Vol.* 98, pp. 1297-1304 (1956).
- 43) Richards, R. T. , Air Binding in Water Pipelines, *Jour. A. W. W. A.* Vol. 54, pp. 719-730 (1962).
- 44) 佐々木大策ほか : セルフブライミング現象について, *山梨大学工学部研究報告*, 第20号, pp. 217-225 (1965).
- 45) Schnyder, O. : Comparisons between Calculated and Test Results on Water Hammer in Pumping Plants, *Trans. A. S. M. E. HYD-59-13*, pp. 695-700 (1937).

- 46) Seipt, W. R. : Waterhammer Considerations for P. V. C. pipes Line in Irrigation Systems, Trans. A. S. A. E. Vol. 17, pp. 417-423 (1974).
- 47) Sharma, H. R. : Air Entrainment in High Head Gated Conduits, Proc. A. S. C. E. HY. 11, pp. 1629-1645 (1976).
- 48) Siemons, J. : The Phenomenon of Cavitation in a Horizontal Pipeline due to Sudden Pumps Failure, Jour. of Hydraulic Research, 5 (1), pp. 135-152 (1967).
- 49) Streeter, V. L. : Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Chap. 20, pp. 2-3 (1961).
- 50) Streeter, V. L. and C. Lai : Waterhammer Analysis Including Fluid Friction, Proc. A. S. C. E. HY. 3, pp. 79-112 (1962).
- 51) Streeter, V. L. : Waterhammer Analysis of Pipelines, Proc. A. S. C. E. HY. 4, pp. 151-172 (1964).
- 52) Streeter, V. L. and E. B. Wylie : Hydraulic Transients, McGraw-Hill, pp. 13-52 (1967).
- 53) Streeter, V. L. : Waterhammer Analysis of Distribution Systems, Proc. A. S. C. E. HY. 5, pp. 185-201 (1967).
- 54) Streeter, V. L. : Waterhammer Analysis, Proc. A. S. C. E. HY. 6, pp. 1959-1973 (1969).
- 55) Streeter, V. L. : Fluid Mechanics, McGraw-Hill, pp. 595-599 (1970).
- 56) Strowger, E. B. : Relation of Relief Valve and Turbine Characteristics in the Determination of Waterhammer, Trans. A. S. M. E. HYD-59-14, pp. 701-705 (1937).
- 57) Suzuki, S. : Experimental Investigation of Waterhammer in Steel Pipe, Jour. of the Faculty of Engineering, Tokyo Imperial University, Vol. XXI, pp. 43-75 (1937).
- 58) Swaffied, J. A. : A Study of the Influence of Air Release on Column Separation in an Aviation Kerosine Pipeline, The Institution of Mechanical Engineers, Thermodynamics and Fluid Mechanics Group, Proc. Vol. 186, pp. 693-703 (1972).
- 59) Tarantine, F. J. and W. T. Rouleau : Waterhammer Attenuation with a Tapered Line, Trans. A. S. M. E. Vol. 91, pp. 341-352 (1969).
- 60) Thorley, A. R. D. : Pressure Transients in Hydraulic Pipelines, Jour. Basic Engineering, A. S. M. E. Vol. 91, pp. 453-461 (1969).
- 61) Wisner, P. E. et al : Removal of Air from Waterlines by Hydraulic means, Proc. A. S. C. E. HY. 2, pp. 243-257 (1975).
- 62) Wood, D. J. and S. E. Jones : Waterhammer Charts for Various Types of Valves, Proc. A. S. C. E. HY. 1, pp. 167-179 (1973).
- 63) Wood, F. M. : The Application of the Operational calculus to the Solution of Problems in Waterhammer, Trans. A. S. M. E. HYD-59-15, pp. 707-713 (1937).

Studies on the Water hammer of the Air-entrained flow in Irrigation Pipe lines

Souichi NISHIYAMA

Summary

Recently, agricultural pipe lines have been used for carrying and distributing water, because they are very easy to control and to operate in the utilization of water.

On the other hand, since the recently used pipes are becoming longer, and with larger diameter and higher water pressures, many phenomena concerning those occurred agricultural pipe lines, which had not been considered at the planning stage are occurring.

The water hammer problem and the air bubbles in the flowing water is another example.

Air entrained flow in agricultural pipe lines occurs frequently.

In this paper, the water hammer problem with air bubbles in the flowing water are clarified, and an analytical method is proposed.

In chapter 1, the peculiarity of the air entrainment in an agricultural pipe line as well as the motives to start this research are described.

In chapter 2, the basic equation of a water hammer with air bubbles in a pipe line is derived. It was the same type of equation as in the case of water flowing alone.

Accordingly, the basic equation type of a water hammer with air bubbles in the flowing water is wave equation.

But in the case of pipe flow with air bubbles, the speed of the pressure wave in the equation of continuity, changes with time and distance.

Further more, a differential analysis for the basic equation using the characteristics method is given.

In chapter 3, water flowing inside a pipe line, the effect of air bubbles in an ultimate water hammer pressure is discussed, as well as the relation between the length of the pipe in which the air bubbles are flowing and the ultimate water hammer pressure.

As a result it is shown that : (1) if the closing time of a valve inserted inside the pipe is constant, there will exist a value of air content which will cause a maximum pressure variation. And the air content will change in proportion to the closing time of the valve. (2) If the closing time of the valve is constant, there will exist a length in which air bubbles mixed in the flowing water will give rise to a maximum pressure variation. And, furthermore, the shorter the valve closing time, will be the shorter the length in which mixed air bubbled producing a maximum pressure will become.

As was stated above, it is clear that the pressure variation is effected by the closing time of a valve, the air content and the length of the pipe through which the liquid disperses.

In chapter 4, there is a try to analyze the case of a water hammer accompanied by a column separation, while taking into account very small amount of entrained air.

As a result, it is shown that if the volume of the column separation is very small compared to the total water volume in the pipe, a very small amount of entrained air will act an important role in the water hammer accompanied by the column separation.

The gas produced by the phase change can be neglected.

Accordingly, we can omit the contribution of the unclarified phase change and are able to analyze the water hammer accompanied by the column separation.

In chapter 5, the effect of air bubbles injected into the flow at the upstream of the valve in order to reduce the velocity of the pressure wave is discussed.

Concerning the effect of air on the water hammer, the shorter is the closing time of the valve, the more profound will be the effect of air on the water hammer pressure.

As was mentioned above, when closing the valve quickly, the injection of air bubbles into the pipe line's flow in front of the valve is very effective in reducing the water hammer pressure.

On the other hand, injection of air into the flowing water behind the valve increases the water hammer pressure at the down-stream. For practical uses, the analysis of the water hammer, occurring at the down stream of a valve, is necessary.

In chapter 6, setting an automatic pressure-reducing valve with an air chamber along the pipe line is discussed. By using this valve, the mechanism of absorbing the pressure variation is clarified ;

1. When using an automatic pressure-reducing valve, the variation of pressures at the down stream of the valve is diminished.
2. It is clarified that a system, composed of a cylinder and an air chamber in the valve, acts a role in the mechanics of a surge tanks.

As above mentioned, an air entrained flow usually occurs in the irrigation pipe line.

The variation of bulk modulus of elasticity and the speed of pressure wave are considered by the solution of non lineation.

The estimation of the pressure variation, especially estimation of the ultimate water hammer pressure is clarified.

香川大学農学部紀要

- 第1号 幡 克 美：アカマツ材の成分並びにパルプ化に関する研究（1955年3月）
- 第2号 内 藤 中 人：植物成長ホルモンに関する植物病理学的研究 特に植物病原菌に及ぼす影響について（1957年10月）
- 第3号 松 沢 寛：アオムシコマユバチの生態に関する研究（1958年3月）
- 第4号 梶 明：和紙原料の醗酵精練に関する研究（1959年3月）
- 第5号 森 和 男：傾斜地蜜柑園経営の構造分析（1960年3月）
- 第6号 玉 置 鷹 彦：ガラク並びに池泥の研究（1960年3月）
- 第7号 上 原 勝 樹：傾斜地開発利用に関する物理気象の研究（1961年3月）
- 第8号 桑 田 晃：オクラとトロロアオイとの種間交雑およびそれらより育成された種々の雑種ならびに倍数体に関する研究（1961年9月）
- 第9号 中 潤三郎：甘藷の生育過程に関する作物生理学的研究（1962年3月）
- 第10号 斉 藤 実：香川県及び北愛媛県の地質について（1962年3月）（英文）
- 第11号 小 杉 清：グラジオラスの生産と開花に関する研究（1962年9月）（英文）
- 第12号 吉 良 八 郎：貯水池の滞砂に関する水理学的研究（1963年2月）
- 第13号 野 田 愛 三：禾穀類の根鞘に関する研究（1963年3月）
- 第14号 川 村 信一郎：豆類のデンブンの研究（1963年3月）（エスペラント文）
- 第15号 浅 野 二 郎：種子の耐塩性を中心とした海岸地帯におけるアカマツおよびクロマツ林の成立に関する研究（1963年3月）
- 第16号 山 中 啓：乳酸菌のペントース・イソメラーゼに関する研究（1964年8月）（英文）
- 第17号 荻 沢 正 義：香川県における葡萄の早害に関する研究（1964年3月）
- 第18号 谷 利 一：カキ炭疽病の病態生理学的研究，とくに罹病果実の病徴発現にあずかるペクチン質分解酵素の役割（1965年3月）
- 第19号 樽 谷 隆 之：カキ果実の貯蔵に関する研究（1965年3月）
- 第20号 狩 野 邦 雄：ラン種子の発芽培地に関する研究（1965年3月）（英文）
- 第21号 山 本 喜 良：コモンベッチおよびその近縁種の雑種に関する研究（1965年3月）
- 第22号 中 広 義 雄：鶏における飼料の消化率測定法に関する研究（1966年10月）
- 第23号 井 上 宏：ナツダイダイの果実発育に関する研究，とくに水腐病の発生機構を中心として（1967年3月）
- 第24号 宮 辺 豊 紀：異常乳の生成と塩類均衡とくにカゼイン磷酸カルシウムに関する研究（1967年8月）（英文）
- 第25号 十 河 村 男：樹皮リグニン及び樹皮フェノール類に関する研究（1971年9月）
- 第26号 大 島 光 昭：赤クローバーサイレージ中の窒素栄養源に関する研究（1971年11月）（英文）
- 第27号 辰 巳 修 三：林木薬部中におけるカルシウムの化合形態とその生理に関する基礎的研究（1974年11月）
- 第28号 樽 谷 勝：ブドウの葉脈黄変による早期落葉の研究（1974年12月）
- 第29号 倉 田 久 男：カボチャ・スイカの性の分化におよぼす日長および温度の影響に関する研究（1976年3月）
- 第30号 鎌 田 万：中小河川治水計画に適用する計画降雨の合理的算定法に関する研究（1976年6月）
- 第31号 山 本 弘 幸：エンバク冠さび病の抵抗性発現機構に関する研究（1978年3月）
- 第32号 岡 本 秀 俊：テントウムシの摂食の生態に関する実験的研究（1978年3月）

- 第33号 山崎 徹：*p*-ヒドロキシフェニル並びにシリングルリグニンに関する研究（1978年9月）(英文)
- 第34号 市川 俊英：イネを加害する4種の同翅亜目顎吻群昆虫の配偶行動に関する研究（1979年2月）(英文)
- 第35号 吉田 博：農業生産共同組織の展開・構造・運営に関する研究（1980年3月）
- 第36号 一色 泰：鶏盲腸の栄養生理学的研究（1980年3月）
- 第37号 中條 利明：富有カキ果実の発育ならびに品質に及ぼす温度条件に関する研究（1982年2月）
- 第38号 五井 正憲：温帯花木の花芽形成ならびに開花調節に関する研究（1982年2月）
- 第39号 松井 年行：和三盆糖の食品学的研究（1982年2月）
- 第40号 藤目 幸擴：ハナヤサイ類の花らい形成並びに発育の温度条件に関する研究
— 特に異常花らいについて — （1983年2月）
- 第41号 西山 壮一：カンガイ用管水路における空気混入流の水撃作用に関する研究（1983年2月）

Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

- No. 1 Katsumi HATA: Studies on the Constituents and Pulping of "Akamatsu" (*Pinus densiflora* STEB et ZUCC) Wood (March, 1955)
- No. 2 Nakato NAITO: Phytopathological Studies Concerning Phytohormones with Special Reference to Their Effect on Phytopathogenic Fungi (October, 1957)
- No. 3 Hiroshi MATSUZAWA: Ecological Studies on the Braconid Wasp, *Apanteles glomeratus* (March, 1958)
- No. 4 Akira KAJI: Studies on the Retting of Plant Fiber Materials for Japanese Paper Manufacture (arch, 1959)
- No. 5 Kazuo MORI: An Analytical Study on the Structure of the Mandarin Orange Growing Orchard Farm in a Sloping Land Region (March, 1960)
- No. 6 Takahiko TAMAKI: Studies of Garaku Paddy Soil and Reservoir Deposits (March, 1960)
- No. 7 Masaki UEHARA: Physical and Meteorological Studies on the Cultivation and Utilization of Slope Land (March, 1961)
- No. 8 Hikaru KUWADA: Studies on the Interspecific Crossing between *Abelmoschus esculentus* MOENGH and *A. Manihot* MEDIC and the Various Hybrids and Polyploids Derived from the Above Two Species (September, 1961)
- No. 9 Junzabro NAKA: Physiological Studies on the Growing Process of Sweet Potato Plants (March, 1962)
- No. 10 Minoru SAITO: The Geology of Kagawa and Northern Ehime Prefectures, Shikoku, Japan (March, 1962) (in English)
- No. 11 Kiyoshi KOSUGI: Studies on Production and Flowering in Gladiolus (September, 1962) (in English)
- No. 12 Hachiro KIRA: Hydraulic Studies on the Sedimentation in Reservoirs (February, 1963)
- No. 13 Aizo NODA: Studies on the Coleorhiza of Cereals (March, 1963)
- No. 14 Sin'itiro KAWAMURA: Studoj pri Ameloj de Legumenoj (March, 1963) (in Esperanto)
- No. 15 Jiro ASANO: A Study on the Formation of Pine Forests on Seaside Areas, giving due Consideration to the Salt Resistance of the Seeds (March, 1963)
- No. 16 Kei YAMANAKA: Studies on the Pentose Isomerases of Lactic Acid Bacteria (August, 1963) (in English)
- No. 17 Masayoshi ASHIZAWA: Studies on the Drought Damage of Grape Trees in the Region of Kagawa Prefecture (March, 1964)
- No. 18 Toshikazu TANI: Studies on the Phytopathological Physiology of Kaki Anthracnose, with Special Reference to the Role of Pectic Enzymes in the Symptom Development on Kaki Fruit (March, 1965)
- No. 19 Takayuki TARUTANI: Studies on the Storage of Persimmon Fruits (March, 1965)
- No. 20 Kunio KANO: Studies on the Media for Orchid Seed Germination (March, 1965) (in English)
- No. 21 Kiyoshi YAMAMOTO: Studies on the Hybrids among the *Vicia sativa* L. and its Related Species (March, 1966)
- No. 22 Yoshio NAKAHIRO: Studies on the Method of Measuring the Digestibility of Poultry Feed (October, 1966)
- No. 23 Hiroshi INOUE: Studies on the Fruit Development of Natsudaidai (*Citrus Natsudaidai* HAYATA), with Special Reference to Water Spot Injury (March, 1967)
- No. 24 Toyoki MIYABE: Studies on the Production and the Salt Balance in Relation to Calcium Phosphocaseinate of Abnormal Milk (August, 1967) (in English)
- No. 25 Murao SOGO: Studies on the Bark Lignin and Bark Phenolic Compounds (September, 1971)
- No. 26 Mitsuaki OHSHIMA: Studies on Nutritional Nitrogen from Red Clover Silage (November, 1971) (in English)
- No. 27 Shuzo TATSUMI: Fundamental Studies of the Chemical Forms of Calcium and Their Metabolisms in the Tree Leaves (November, 1974)
- No. 28 Masaru KURETANI: Studies on the Early Summer Defoliation of Grape Vines Caused by Vein-yellowing (December, 1974)

- No. 29 Hisao KURATA: Studies on the Sex Expression of Flowers induced by Day-length and Temperature in Pumpkin and Watermelon (March, 1976)
- No. 30 Takashi KAMADA: Studies on the Rational Estimation of Rainfall for Design Flood (June, 1976)
- No. 31 Hiroyuki YAMAMOTO: Study on the Mechanism of Resistance Expression in the Crown Rust Disease of Oat (March, 1978)
- No. 32 Hidetoshi OKAMOTO: Laboratory Studies on the Food Ecology of Aphidophagous Lady Beetles (Coleoptera: Coccinellidae) (March, 1978)
- No. 33 Toru YAMASAKI: Studies on *p*-Hydroxyphenyl- and Syringyl Lignins (September, 1978) (in English)
- No. 34 Toshihide ICHIKAWA: Studies on the Mating Behavior of the Four Species of Auchenorrhynchos Homoptera which Attack the Rice Plant (February, 1979) (in English)
- No. 35 Hiroshi YOSHIDA: A Study of the the Development, Structure and Management of Co-operative Groups (March, 1980)
- No. 36 Yutaka ISSHIKI: Nutritional and Physiological Studies on the Function of Ceca in Chickens (March, 1980)
- No. 37 Toshiaki CHUJO: Studies on the Effects of Thermal Conditions on the Growth and Quality of Fruits of Fuyu Kaki (February, 1982)
- No. 38 Masanori GOI: Studies on the Flower Formation and Forcing of Some Ornamental Trees and Shrubs Native to East Asia (February, 1982)
- No. 39 Toshiyuki MATSUI: Food Chemical Studies on Wasanbon-to Sugar (Japanese traditionally refined sugar) (February, 1982)
- No. 40 Yukihiro FUJIME: Studies on Thermal Conditions of Curd Formation and Development in Cauliflower and Broccoli, with Special Reference to Abnormal Curd Development (February, 1983)
- No. 41 Souichi NISHIYAMA: Studies on the Water hammer of the Air-entrained flow in Irrigation Pipe lines (February, 1983)

昭和58年2月20日印刷 昭和58年2月25日発行

香川県木田郡三木町
香川大学農学部

印刷所 アート印刷株式会社
高松市観光通り2丁目3-7
電話 (0878) 35-3031