

片持送水管の構造系と制御系の同時最適設計 - 複合送水管に対する実験的検証 -

A simultaneous optimal design for cantilevered pipes conveying fluid -Experimental verification for combined pipe conveying fluid-

土岐 仁*, 平元和彦*, 齊藤 勇**, 宮崎智充***

Hitoshi Doki*, Kazuhiko Hiramoto*, Isamu Saito** and Tomomichi Miyazaki***

*秋田大学, **NEC秋田, ***秋田大学大学院

*Akita University, **NEC Akita Ltd., ***Graduate school of Akita University

キーワード： 片持送水管 (Cantilevered pipes conveying fluid), アクティブ制御 (Active control), 構造系と制御系の同時最適設計 (Simultaneous optimal design of structural and control systems)

連絡先： 〒010-8502 秋田市手形学園町1-1 秋田大学工学資源学部機械工学科
平元和彦, Tel.: (018)889-2348, Fax.: (018)837-0405, E-mail: hira@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

弾性送水管内部を流体が流れる場合, ある流速 (限界流速) を越えるとフラッタやダイバージェンスなどの不安定現象が生じることが知られている。これらの不安定現象は弾性体と流体との相互作用により発生する流力弾性不安定問題として, パイプラインやウォータージェットカット等の振動問題に見られる。

送水管の不安定現象に関して, ばね支持や集中質量, 減衰器の付加が限界流速に及ぼす影響が研究されている^{1), 2)}。これらの結果は, 送水管の限界流速を向上させるための受動的な振動制御系設計のための指針となる。しかし, 一般に受動的制振法は, 構造系の特性が変化する場合制振効果が大きく低下する。一方, 送水管にセンサやアクチュ

エータを取り付け, 外部からエネルギーを供給することによって振動を抑制する能動的制振方法に関する研究が行われている。能動的制振手法は, 前述した受動的制振法の問題点を回避できる可能性があり, 現在まで制御則として最適レギュレータ^{3), 4)}, PID制御⁵⁾, H_∞ 制御⁶⁾, LQG制御⁷⁾などを用いた種々の能動制御手法が提案され, 限界流速の向上に著しい効果があることが理論的, 実験的に明らかにされてきた。

能動制御手法を用いる場合, 制御を行うコントローラを最適に設計するだけでなく, それと同時に制御対象の形状などの構造パラメータや, センサ・アクチュエータ配置等を調節し構造系の最適設計を行う“構造系と制御系の同時最適設計”に関する研究が行われている。構造系と制御系の同時

最適設計法の送水管への適用として, Borglund⁸⁾, 平元⁹⁾の研究が挙げられる. 文献⁸⁾では, 送水管にはりを組み合わせた片持送水管を用いて, 管の先端のノズルに取り付けられたアクチュエータの向きを変えることにより能動制御を行い, 限界流速が一定となるような拘束の下で, 構造部材であるはりの質量が最小となるようにはりの幅分布を最適化している. 実験でも有効な結果が得られているが, 制御則が単純な静的出力フィードバックであるため, 安定性を含んだ制御性能に関して何ら保証されておらず, また, 本来の目的と考えられる制御を行った閉ループ系の限界流速の最大化は行われていない. 文献⁹⁾では, はりの外径が段付状に調整可能であるという前提の下で, LQG制御を行った場合の閉ループ系の限界流速が最大となるようなセンサ・アクチュエータ配置と送水管の外径分布を数理計画法の手法を援用して最適化している. しかし, 文献⁹⁾では, 能動制御のために消費されるエネルギー量が設計候補間で一定ではなく, さらに, 段付管の製作が容易でないことから, 実験的な検証は行われていない.

そこで本報告では, 制御対象として文献⁸⁾で取り上げているはりと送水管から構成される複合送水管を用いて, LQG制御を前提とした構造系と制御系の同時最適設計を行い, 閉ループ系の限界流速を最大とする最適なセンサ・アクチュエータ配置および最適なはり形状を求める. 求められた複合送水管の最適設計に基づき, 実験を行い, 提案する設計手法の有効性を示す.

本報告の構成は以下のようなものである. 2章では, 本報告で検討する複合送水管の有限次元近似された数学モデルを求める. 3章では, 複合送水管に対して, 構造系と制御系の同時最適設計問題を定式化し, 最適設計のためのアルゴリズムを提案する. 4章では提案したアルゴリズムを用いて同時最適設計を行い, 5章では得られた最適設計の結果を用い

て制御実験を行う. 6章で本報告のまとめを行う.

2. 複合送水管のモデル化

図1に本報告で用いる複合送水管のモデルを示す. 本複合送水管は, 1本のはりと2本の送水管により構成されており, 送水管はそれぞれはりの幅方向の中心線に対称に取り付けられている.

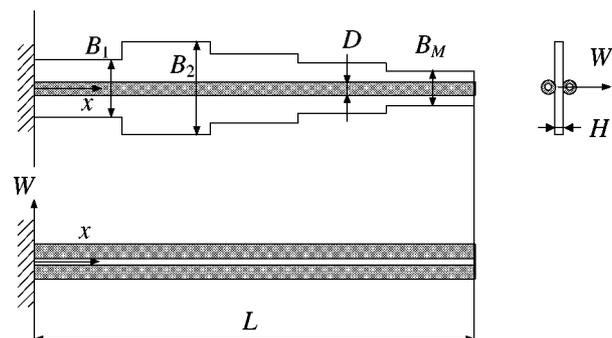


Fig. 1 Model of the combined pipe conveying fluid

水平座標を x , はりおよび送水管のたわみを W とする. 送水管, はりともに長さ L であり, 管外径, 内径はそれぞれ D, d , はりの厚さは H とする. 本報告では, はりの長手方向の幅分布を設計パラメータとして最適設計を行う. はりの幅は, その長手方向に M 等分した各要素の幅が調整可能であるとし, 図1のような段付形状を持つ. はりの幅の x に関する分布 $B(x)$ は, 次式のように表される.

$$B(x) = \sum_{k=1}^M B_k(x), \quad B_k(x) = \begin{cases} B_k & \left(\frac{(k-1)L}{M} \leq x \leq \frac{kL}{M}\right) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

図1に示される複合送水管のスラスト制御系を図2に示す. 2本の送水管内部をそれぞれ単位長さあたり m_f の質量の流体が速度 V で流れている. 複合送水管は, N_s 本の長さ l の系によって, 水平になるように支持されている. 管の $x = L_s$ における変位がセンサにより検出され, コントローラが $x = x_a$ におかれたアクチュエータに制御変位 U を与える.

アクチュエータは、ばね定数 K のばねを介して管を直角方向に駆動し管の振動を制御する。

送水管の材質をKelvin-Voigt型の粘弾性材と仮定し、はり、送水管それぞれの縦弾性係数をそれぞれ E_b, E_t 、内部減衰係数をそれぞれ E_b^*, E_t^* とすると、複合送水管の運動方程式および境界条件式は次式ようになる。

$$\begin{aligned}
L(W) \equiv & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ (E_b I_b(x) + E_t I_t) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right. \\
& \left. + (E_b^* I_b(x) + E_t^* I_t) \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t} \right\} \\
& + m_f \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 + m_b(x) \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \\
& + (m_f + m_l(x)) \frac{gL}{l N_s} \sum_{i=1}^{N_s} C_i W \delta(x - x_i) \\
& + K(W - U) \delta(x - L_a) = 0 \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{cases}
x = 0 : W = \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \\
x = L : \\
(E_b I_b(x) + E_t I_t) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + (E_b^* I_b(x) + E_t^* I_t) \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t} = 0 \\
(E_b I_b(x) + E_t I_t) \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + (E_b^* I_b(x) + E_t^* I_t) \frac{\partial^4 W}{\partial x^3 \partial t} = 0
\end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $I_b(x)$ および $m_b(x)$ は、それぞれ式(1)でその外径分布が与えられるはりの断面二次モーメントおよび単位長さあたりの質量であり、 C_i は、クラベイロンの3連モーメントの定理より定まる定数、 g は重力加速度である。

式(3)を考慮し、たわみ $W(x, t)$ を以下のように近似する。

$$\begin{aligned}
W(x, t) &= \sum_{m=1}^N a_m(t) \phi_m(x) \quad (4) \\
\phi_m(x) &= \cosh \frac{\alpha_m x}{L} - \cos \frac{\alpha_m x}{L} \\
&\quad - \sigma_m \left(\sinh \frac{\alpha_m x}{L} - \sin \frac{\alpha_m x}{L} \right) \quad (5) \\
\sigma_m &= \frac{\sinh \alpha_m - \sin \alpha_m}{\cosh \alpha_m + \cos \alpha_m}
\end{aligned}$$

ここで、 $a_m(t)$ は t に関する未知関数(t は時刻)、 $\phi_m(x)$ は、片持はりの正規化された固有関数であり、 α_m は振動方程式 $1 + \cosh \alpha_m \cos \alpha_m = 0$ の解である。式(4)を用いて式(2)式にGalerkin法を適用した後、

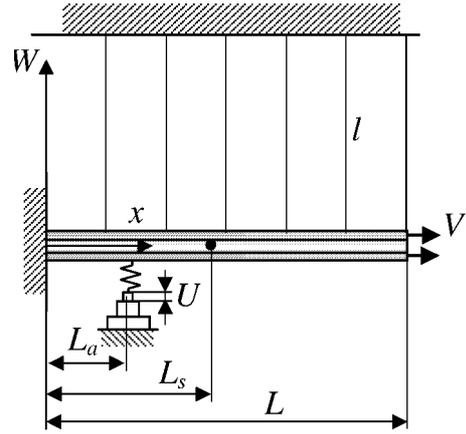


Fig. 2 Control system of the combined pipe conveying fluid

状態ベクトルとして $\mathbf{x}(t) = [a_1(t), \dots, a_N(t), \dot{a}_1(t), \dots, \dot{a}_N(t)]^T$ をとると、複合送水管の N 次モードに近似された状態方程式は、次式となる。

$$\begin{cases}
\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} U(t) \\
Y(t) \equiv W(L_s, t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t)
\end{cases} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{D}^{-1} \mathbf{F} & -\mathbf{D}^{-1} \mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [\phi_1(L_s) \quad \dots \quad \phi_N(L_s) \quad \mathbf{0}] \quad (7)$$

3. 同時最適設計問題

3.1 閉ループ系限界流速

本報告では、能動制御に使用されるエネルギー量を次式で規定する。

$$E_u = E(U(t)^2) \quad (8)$$

ここで E は期待値演算子である。設計者が定める使用可能な制御エネルギーの上限値を $\mu > 0$ と定義する。本報告では、閉ループ系を安定化し、かつ、

$$E_u \leq \mu \quad (9)$$

を満足するコントローラが設計可能な最大の流速を、閉ループ限界流速 V_{cr}^c と定義する。本報告では、式(9)の拘束条件を満足するコントローラを、最適

レギュレータの極限的性質¹⁰⁾を利用して，以下のようなアルゴリズムで求める．

Step 0: 繰り返し回数を i とする．制御エネルギーの上限值 $\mu > 0$ を定める．

Step 1: 閉ループ限界流速の上限値の候補 $(V_{cr}^c)^i$ において，式(6)に対してモード座標変換 $\mathbf{z}(t) = \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$ を施す．式(6)の $\mathbf{z}(t)$ に関する実現は，次式のようになる．

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_m U(t) \\ Y(t) = \mathbf{C}_m \mathbf{z}(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{T}^{-1} = \text{blockdiag}(\mathbf{A}_m^1, \dots, \mathbf{A}_m^N)$$

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{T}\mathbf{B} = [(\mathbf{B}_m^1)^T, \dots, (\mathbf{B}_m^N)^T]^T$$

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{C}\mathbf{T}^{-1} = [\mathbf{C}_m^1, \dots, \mathbf{C}_m^N]$$

$$\mathbf{A}_m^j = \begin{bmatrix} -\zeta_j \omega_j & \omega_j \\ \omega_j & -\zeta_j \omega_j \end{bmatrix}, \mathbf{B}_m^j = \begin{bmatrix} b_j^1 \\ b_j^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_m^j = \begin{bmatrix} c_j^1 & c_j^2 \end{bmatrix}, j = 1, \dots, N$$

ここで， ζ_j および ω_j は，それぞれ j 次モードの減衰係数および固有振動数である．

Step 2: 式(8)から， $\zeta_j \leq 0$ となっている(そのモードが漸近安定でない)モードをすべて取り出し，次式のような反安定システムを構成する．

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_a(t) = \mathbf{A}_a \mathbf{z}_a(t) + \mathbf{B}_a U(t) \\ Y_a(t) = \mathbf{C}_a \mathbf{z}_a(t) \end{cases} \quad (11)$$

Step 3: 行列 \mathbf{A}_a の固有値を $\lambda_l(\mathbf{A}_a)$ ($l = 1, \dots, k$, k : 不安定なモードの数)としたとき， \mathbf{A}_a に対して $\text{Re}(\lambda(\mathbf{A}_a)) = -\text{Re}(\lambda(\mathbf{A}_a - \mathbf{B}_a \mathbf{F}_a))$ とする(行列 \mathbf{A}_a と $\mathbf{A}_a + \mathbf{B}_a \mathbf{F}_a$ の固有値が，複素平面上で虚軸に対して鏡像となる)状態フィードバック制御 $U(t) = -\mathbf{F}_a \mathbf{z}_a(t)$ を極配置法で求める．このような \mathbf{F}_a は，対 $(\mathbf{A}_a, \mathbf{B}_a)$ が可制御であれば必ず求めることができる．

Step 4: 求められたに対して変換行列 \mathbf{T} を用いて，式(6)に対応する状態フィードバックゲイン \mathbf{F} を求める．オブザーバとしてカルマンフィ

ルタを用い，出力フィードバックコントローラを求める．

Step 5: 次式の閉ループ系を定義する．

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{B}_c U(t) \\ U(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{B}\mathbf{F} \\ \mathbf{H}\mathbf{C} & \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F} - \mathbf{H}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}$$

ここで， \mathbf{H} はStep 4で求めたカルマンフィルタゲインである．

Step 6: 以下の量を計算する．

$$E_u^i = \mathbf{C}_c \mathbf{X} \mathbf{C}_c^T \quad (13)$$

ここで行列 \mathbf{X} は次式のLyapunov方程式の正定対象解である．

$$\mathbf{A}_c \mathbf{X} + \mathbf{X} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{B}_c \mathbf{B}_c^T = \mathbf{0} \quad (14)$$

Step 7: $E_u^i \geq \mu$ ならば，閉ループ限界流速として $(V_{cr}^c)^i$ を出力して終了．もし， $E_u^i < \mu$ ならば， $(V_{cr}^c)^{i+1} \leftarrow (V_{cr}^c)^i + \Delta V$ ($\Delta V > 0$)とした後， $i \leftarrow i + 1$ として，Step 1に行く．

3.2 同時最適設計問題の定式化と設計アルゴリズム

本報告では，前節で定義した閉ループ限界流速が最大となるように最適化を行う．以下，センサ・アクチュエータ配置は無次元量 $\xi_s = L_s/L$, $\xi_a = L_a/L$ を用い，同時最適設計問題を，以下のように定式化する．

複合送水管の構造系と制御系の同時最適設計問題: 設計変数候補 $(B(x), \xi_a, \xi_s)$ の中で，閉ループ限界流速 V_{cr}^c を最大化する最適な最適なもの $(B(x)^{opt}, \xi_a^{opt}, \xi_s^{opt})$ を求めよ．ただし，最適化の課程ではりの総体積は一定とし，かつはりの幅は $B_l \leq B_k(x) \leq B_u$, $k = 1, \dots, M$ を満足しているとする．

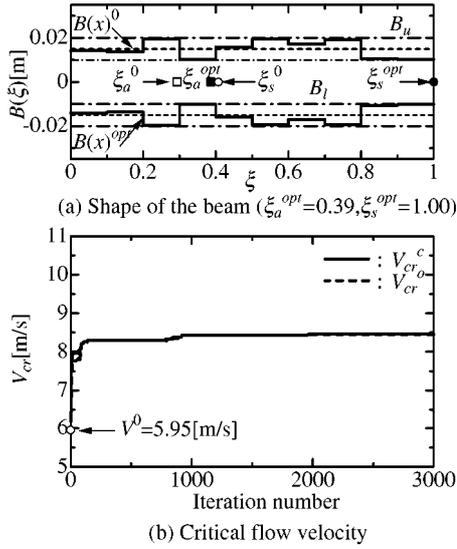


Fig. 3 Result of the optimal design ($\mu = 1$)

送水管においては，あるはりの幅分布 $B(x)$ とセンサ・アクチュエータ配置 ξ_s, ξ_a に対してコントローラを設計して閉ループ系を構成した場合，どのモードで閉ループ系が不安定になるかはわからない．この事実は，本報告の目的関数である閉ループ限界流速 V_{cr}^c は，設計変数 $(B(x), \xi_a, \xi_s)$ に関して微分不可能な関数になりうることを意味しており，最大傾斜法などの評価関数の勾配に基づく最適化手法の適用は困難である．本報告では，評価関数の勾配の情報を用いない最適化の手法として，以下に示す局所ランダム探索を用いた．本アルゴリズムは，設計変数が探索に伴い限界流速が高くなるように更新されていくため，得られる解の局所最適解への収束は保証される．

Step0: 最大繰り返し回数 N_f を定め，繰り返し回数を i とする．解の候補 $B(x)^1, \xi_a^1, \xi_s^1$ を定め，閉ループ限界流速 $(V_{cr}^c)^1$ を計算する．

Step1: $i = N_f$ ならば，現在得られている最適解 $B(x)^1, \xi_a^1, \xi_s^1$ を出力して計算を終了する． $i < N_f$ のときは，現在の最適解候補 $B(x)^1, \xi_a^1, \xi_s^1$ の近傍 $B(x)^2, \xi_a^2, \xi_s^2$ を1つランダムに選び再度閉ループ限界流速を計算し，これを $(V_{cr}^c)^2$

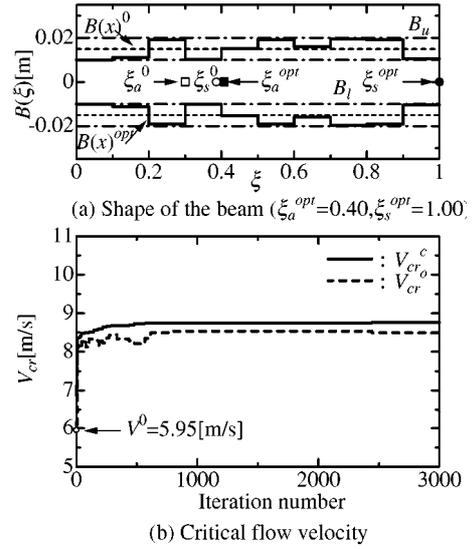


Fig. 4 Result of the optimal design ($\mu = 10$)

とする．

Step2: $(V_{cr}^c)^2 - (V_{cr}^c)^1 > 0$ ならば $B(x)^1 \leftarrow B(x)^2, \xi_a^1 \leftarrow \xi_a^2, \xi_s^1 \leftarrow \xi_s^2$ と更新する． $(V_{cr}^c)^2 - (V_{cr}^c)^1 \leq 0$ ならば $B(x)^1, \xi_a^1, \xi_s^1$ をそのまま暫定解とする．

Step3: $i \leftarrow i + 1$ としてStep 2に戻る．

4. シミュレーション

前章までで提案された構造系と制御系の同時最適設計を行うにあたり，センサ・アクチュエータ配置の初期値はそれぞれ $\xi_s^0 = 0.4, \xi_a^0 = 0.3$ とした．またはりの幅分布初期値は $B(x)^0 = 30$ [mm]一定とし，はりの幅の上下限界値はそれぞれ $B_u = 40$ [mm], $B_l = 20$ [mm]とした．はりの分割数は $M = 10$ ，近似モード数 $N = 10$ とし，最適化の最大繰り返し数 $N_f = 3000$ とした．本報告ではこれらの条件の下で，使用可能なエネルギー量を $\mu = 1, 10, 100$ と変化させて最適設計を行った．

結果を図3~5に示す．それぞれの図において(a)は最適なはりの形状およびセンサアクチュエータ配置を表し，(b)は最適化過程における閉ループ限

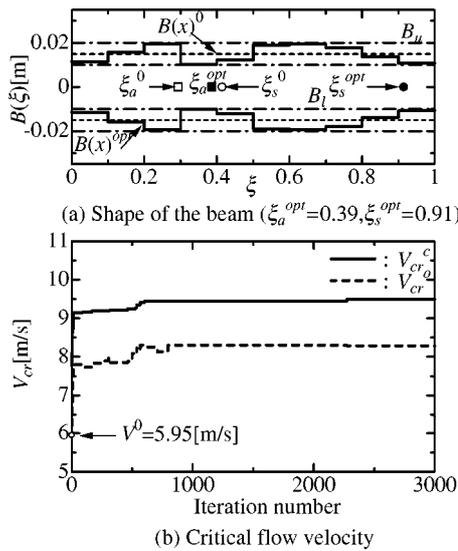


Fig. 5 Result of the optimal design ($\mu = 100$)

| μ | V_{cr}^c [m/s] |
|---------------------|---------------------|
| 0 (without control) | 5.95 (V_{cr}^o) |
| 1 | 8.46 |
| 10 | 8.77 |
| 100 | 9.49 |

界流速 V_{cr}^c と開ループ限界流速 V_{cr}^o の変化，白丸は初期状態の限界流速を表わしている．それぞれの μ の値に対する最適形状における閉ループ限界流速を表1に示す．この表より，使用可能なエネルギー量が大きくなるに伴い閉ループ限界流速が上昇していることがわかる．

図3～5の(b)に着目すると， $\mu = 1$ の場合，コントローラはほとんど制御力を発生することができず，閉ループ限界流速 V_{cr}^c と開ループ限界流速 V_{cr}^o はほとんど一致している． μ が大きくなるにつれ，使用可能な制御エネルギー量が増えるため閉ループ限界流速と開ループ限界流速の差は大きくなり， $\mu = 100$ の場合では，開ループ限界流速に比べ閉ループ限界流速は1.20 [m/s] (15%)向上していることがわかる．

これらの結果から，本研究で提案した最適設計

手法により最適化されたはりの幅分布，およびセンサ・アクチュエータ配置が閉ループ限界流速を著しく向上させることが確認された．また，最適なはりの幅分布とセンサ・アクチュエータ配置は，投入可能なエネルギー量 μ に依存して変化することがわかった．この結果は，送水管の能動制御系を設計する場合，使用できるエネルギー量を考慮に入れて最適設計することが必要であることを意味している．

5. 実験

5.1 実験装置

実験装置の概略を図6に示す．複合送水管は一端を固定し，長さ2.14 [m]の糸で0.1 [m]の等間隔で空間に水平になるように糸支持されている．また，送水管は0.05 [m]の等間隔で糸によりはりに取り付けられている．送水管はシリコン管，はりは変性ポリエチレンテレフタレート板を用いた．送水管およびはりの諸元はそれぞれ表2に示す．ばねにはピアノ線を片持ばねとして用いた．ばね定数は $K = 24.3$ [N/m]である．

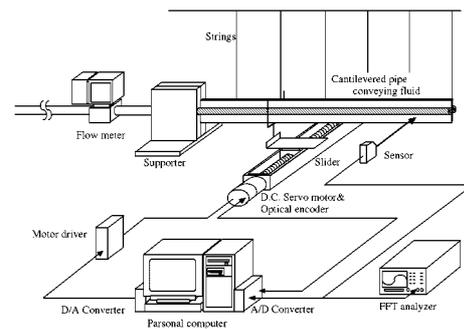


Fig. 6 Experimental setup

5.2 周波数応答実験

予備実験として，糸支持された一様なはりと送水管を組み合わせた複合送水管の周波数特性を求め，数学モデルとの比較を行った． $V = 0$ [m/s]の

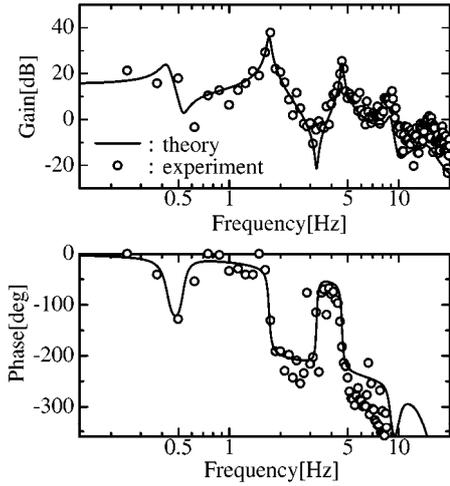


Fig. 7 Bode plot of the combined pipe conveying fluid ($V = 0$ [m/s])

Table 2 Physical parameters of the combined pipe system

| Parameters [Unit] | Value |
|---|--------------------|
| Outer diameter of the pipe D [mm] | 6.13 |
| Inner diameter of the pipe d [mm] | 4.00 |
| Density of the pipe ρ_t [kg/m ³] | 1.21×10^3 |
| Young's modulus of the pipe E_t [Pa] | 5.49×10^6 |
| Initial width of the beam B [mm] | 30.0 |
| Thickness of the beam H [mm] | 1.03 |
| Density of the beam ρ_b [kg/m ³] | 1.32×10^3 |
| Young's modulus of the beam E_b [Pa] | 2.01×10^9 |

場合と、フラッタが発生しない程度の流速($V = 4.0$ [m/s])で水を流した状態において、周波数応答を測定した。結果をそれぞれ図7および図8に示す。双方ともに理論値と実験値はよく一致していることが分かる。この結果より、数学モデルが制御対象である複合送水管の特性を十分精度よく近似していることがわかる。

5.3 最適形状による実験

本実験で用いる実験装置では、図3~5で得られたはりの最適形状および最適なセンサ・アクチュ

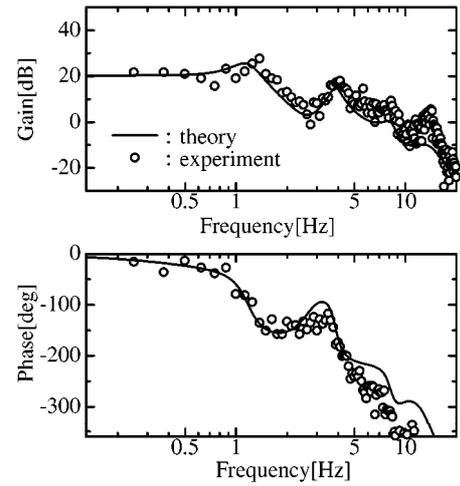


Fig. 8 Bode plot of the combined pipe conveying fluid ($V = 4.0$ [m/s])

エータ配置に対応する限界流速を発生させることができなかった。そこで本報告では、発生可能な流速で実験を行うために、次のような制限の下で最適形状を求めた。

Case 1: $\xi_a = 0.1$ に固定し、開ループ系において開ループ限界流速 V_{cr}^o を最大化する開ループ系の最適形状。

Case 2: $\xi_a = 0.1$, $\xi_s = 0.4$ と固定し、 $\mu = 10$ の下で閉ループ限界流速を最大化する最適形状

いずれの最適設計の場合も、はりの分割数 M 、幅分布の初期値 $B(x)$ およびその上下限 B_u , B_l はそれぞれ10, 30 [mm], 40 [mm], 20 [mm]とした。Case 1, Case 2に対して得られた最適設計の結果を図9, 10に示す。得られた二つの最適設計に対して、閉ループ限界流速を求めた。実験を行った複合送水管に以下のような名前を付けて整理する。

Design A: 初期形状である30[mm]の一樣なはりを用いた複合送水管。

Design B: Case 1で求められた開ループ系の最適形状のはりを用いた複合送水管。

Design C: Case 2で求められた閉ループ系の最適

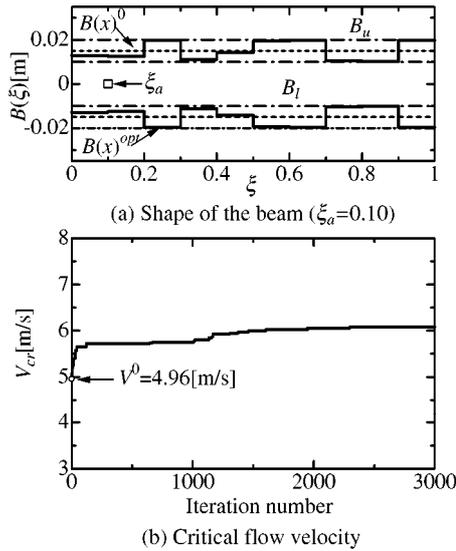


Fig. 9 Result of the optimal design ($\mu = 0$: no active control case)

| Design | V_{cr}^c [m/s] (Theory) | V_{cr}^c [m/s] (Experiment) | Relative error [%] |
|--------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| A | 6.18 | 5.91 | 4.6 |
| B | 6.26 | 6.08 | 3.0 |
| C | 6.53 | 6.36 | 2.7 |

形状のはりを用いた複合送水管．

Design A, B, Cの閉ループ限界流速を表3に示す．限界流速の理論値と実験値は，いずれもよく一致していることが確認できる．また，理論的には， V_{cr}^c を最も向上させる形状はDesign Cであるが，実験においてもDesign Cの閉ループ限界流速が最も高くなっており，最適形状の閉ループ限界流速向上の効果が実験によっても検証された．

6. 結 言

本報告では，はりと送水管で構成された複合送水管に対して，制御エネルギーに関する拘束条件の下で，はりの幅分布とセンサ・アクチュエータ配置を設計パラメータとして，閉ループ限界流速

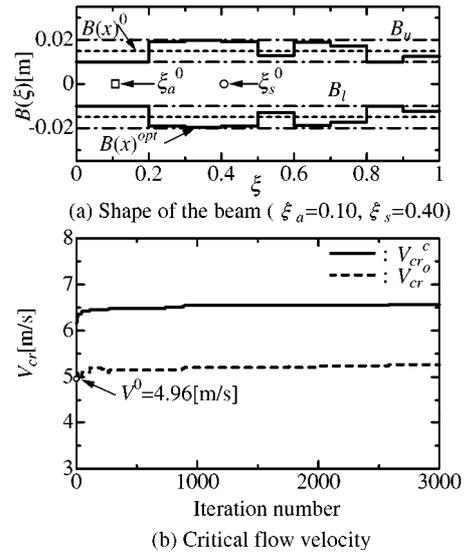


Fig. 10 Result of the optimal design ($\mu = 10$)

の最大化を目的とした構造系と制御系の同時最適設計を行った．得られた結果を以下にまとめる．

- 最適化の結果，能動制御に使用可能なエネルギーが大きくなるにつれて閉ループ限界流速は大きくなることを確認した．
- 拘束条件により最適形状および最適なセンサ・アクチュエータ配置が変化することから，使用できる制御エネルギー量を考慮に入れた構造系と制御系の同時最適設計が必要であることを示した．
- 実験可能な範囲において実験を行った結果，最適形状においては限界流速の向上が見られ，本報告で用いた最適化手法が実対象に対しても有効であることを明らかにした．

今後の課題としては，最適なセンサ・アクチュエータ配置においても実験が可能となるような実験装置を用いて，最適形状および最適なセンサ・アクチュエータ配置を用いた場合の実験を行うことが挙げられる．

謝 辞

本研究の一部は、平成12, 13年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号12650222)の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 杉山吉彦・他3名, 日本機械学会論文集, **51**-463, C(1985), 905-910.
- 2) 杉山吉彦・他3名, 日本機械学会論文集, **51**-467, C(1985), 1506-1514.
- 3) 土岐仁・谷順二, 日本機械学会論文集, **54**-498, C(1988), 357-362.
- 4) 土岐仁・他3名, 資源・素材学会誌, **108**-10(1992), 747-752.
- 5) 土岐仁・他2名, 日本機械学会論文集, **61**-585, C(1995), 1816-1821.
- 6) 土岐仁・他4名, 日本機械学会論文集, **62**-601, C(1996), 3394-3399.
- 7) 土岐仁・他2名, 日本機械学会論文集, **62**-604, C(1997), 4507-4512.
- 8) Borglund, D., Journal of Fluids and Structures, **13**(1999), 269-287.
- 9) 平元和彦・土岐仁, 日本機械学会論文集, **66**-641, C(2000), 45-52.
- 10) Kwakernaak, H. and Sivan, R., *Linear Optimal Control Systems*, Wiley-Interscience (1972).