

分置

ATR高燃焼54本クラスタ燃料の流力振動試験

1997年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ATR高燃焼度54本クラスタ燃料の流力振動試験

天藤雅之^{*1}、小鷹幸三^{*1}

要　　旨

高燃焼度54本クラスタ燃料集合体の「ふげん」への少数体装荷が計画されており、その設置変更許可申請には炉内滞在中における上記燃料の健全性を確証しなければならない。燃料要素の健全性評価では、燃料被覆管表面のスペーサとの接触部に生じるフレッティング摩耗深さが設計許容値を越えないことを確認することが重要である。フレッティング摩耗の進展特性では、燃料要素の振動（流力振動）特性が重要な因子となることから、上記燃料についても炉心流動条件下での振動特性、特に摩耗進展速度に直接影響する振幅値を正確に把握しておく必要がある。本報告書では、振動計測用燃料要素を組込んだ54本クラスタ燃料集合体をコンポーネント・テストループに装荷し、各種流動条件下で行った振動測定結果を示す。

流力振動での周波数特性では、105Hzおよび160Hz近傍に卓越した周波数が観察され、フレッティング摩耗解析コード（流力振動計算部）で求めた振動モードおよびその固有振動数と概ね一致した。流力振動振幅は、総流量および蒸気重量率の増加で増大し、その傾向は従来の上記解析コードによる計算結果と一致するが、低流量領域での振幅測定値が計算値に比べ大きく現れた。この差については、解析コード内の振動振幅計算式を改良、すなわちPaidousis の式を主に全流量に依存する成分と主に蒸気重量率に依存する成分に分離し、各々について最適な定数を決めることにより、安全側に縮小できることが確認された。

本燃料の流力振動振幅値は、「ふげん」用28本クラスタ燃料、ATR実証炉用36本クラスタ燃料のいずれに対しても増加するが、今回の試験での流動条件範囲では、最大でも $2 \mu\text{m}$ （実効値）程度の振幅値であった。流動条件と振幅値との関係から、「ふげん」装荷が予定されているチャンネルでの流動条件においては振幅値は $1.9 \mu\text{m}$ と予想され、コンポーネント・テストループで実施した本燃料集合体の耐久試験条件での振幅値（ $1.7 \mu\text{m}$ ）との差も僅かであり、「ふげん」装荷時の振幅値変化が、耐久試験で実測しているフレッティング摩耗進展特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

*1 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室

Flow-induced Vibration Measurements of ATR High-burnup Fuel Assembly

Masayuki Tendo*, Kozo Kodaka *

Abstract

Since the 54-rod cluster high-burnup fuel assemblies are planning to be loaded in Fugen, it must be confirmed that the mechanical integrity of the assemblies will be retained during the dwelling period in the reactor core. In the integrity verification, the confirmation that fretting wear, which occurs on fuel cladding surface at the contact with the spacer ring-elements, will not exceed the design margin is important. Accurate measurements of the flow-induced vibration characteristics under the hydraulic condition of coolant simulating the reactor core, especially measurements of the vibration amplitude, is necessary because the vibration amplitude directly affects the fretting wear depth. The flow-induced vibration measurements of the 54-rod cluster high-burnup fuels in which accelerometers were installed, were carried out under the various hydraulic conditions in the Component-Test-Loop (CTL). The results of the measurements are described in this paper.

From the frequency analysis, the characteristic frequency of the fuel was observed around 105 Hz and 160 Hz. This frequency approximately coincided with that estimated by the fretting wear analysis code. The amplitude of flow-induced vibration was increased with increase in total flow rate and steam quality. Though these tendencies coincided with the results calculated by the analysis code, the amplitude measured at the region of low flow rate tended to be large compared with the calculated values. It was confirmed that this difference can be reduced on the safety side by the modification of the equation in the analysis code. The Paidoussis equation is divided into two terms in this modification, in which one term depending on total flow rate and the other term depending on steam quality, and proper coefficients are determined for each term.

Though the amplitudes of flow-induced vibration for this fuel were larger than for either of the 28-rod cluster fuel of Fugen and 36-rod cluster fuel of ATR demonstration plant, the maximum amplitude (effective value) measured in this test condition was approximately $2 \mu\text{m}$. According to the relationship between the amplitude and the hydraulic conditions, the amplitude of flow-induced vibration for the 54-rod cluster fuel can be estimated to be $1.9 \mu\text{m}$ at the position where this fuel will be loaded in Fugen. There was a small deviation from the value ($1.7 \mu\text{m}$) estimated under the hydraulic condition of endurance tests performed in the CTL. It is supposed that this small deviation will have little influence on the fretting wear characteristics measured in the endurance tests.

* Structure Safety Engineering Section, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. まえがき	1
2. 試験体および試験装置	2
2.1 試験体	2
2.2 試験装置	2
2.2.1 コンポーネント・テストループ	2
2.2.2 流力振動計測部	3
2.3 計測器	3
2.3.1 振動検出用加速度計	3
2.3.2 振動データ処理装置	3
3. 試験方法	5
3.1 加速度計の校正および周波数特性測定	5
3.1.1 加速度計の校正	5
3.1.2 加速度計の周波数特性測定	5
3.2 気中振動測定	5
3.3 流力振動測定	6
4. 試験結果	7
4.1 気中振動での卓越周波数および減衰定数測定結果	7
4.2 流力振動試験結果	7
4.2.1 流動条件と卓越周波数の関係	7
4.2.2 流動条件と振動振幅の関係	7
5. 考 察	9
5.1 解析コードによる検証	9
5.2 ふげん装荷チャンネルでの振幅予測	10
6. まとめ	12
7. 謝 辞	13

表リスト

表 2-1 加速度計の仕様	14
表 2-2 信号調整器の仕様	15
表 2-3 ローパスフィルターの仕様	16
表 2-4 A/D変換器の仕様	17
表 2-5 パーソナルコンピューターの仕様	18
表 2-6 アナログデータレコーダーの仕様	19
表 2-7 データロガーの仕様	20
表 3-1 流力振動試験の流動条件（設定値）	21
表 3-2 流力振動測定方法	22
表 3-3 C T L 流動条件の測定方法	22
表 4-1 気中振動波形から得られた減衰定数	23
表 4-2 各種流動条件での流力振動振幅値	24

図リスト

図 2-1 ATR高燃焼度54本クラスタ燃料集合体	25
図 2-2 ATR高燃焼度54本クラスタ燃料集合体(1次試作体)	26
図 2-3 スペーサ・リング素子および燃料要素	27
図 2-4 振動計装燃料要素の配置図	28
図 2-5 振動計装燃料要素	29
図 2-6 コンポーネント・テストループ	30
図 2-7 流力振動測定計装部概略	31
図 2-8 燃料集合体装荷直後の状況	32
図 2-9 流力振動計測部組立直後の状況	33
図 2-10 加速度計寸法図	34
図 2-11 振動データ処理装置のフロー図	35
図 2-12 振動データ処理装置の外観写真	36
図 3-1 加速度計の周波数特性	37
図 4-1 気中振動波形(打振方向:a)	38
図 4-2 気中振動波形(打振方向:b)	39
図 4-3 気中振動波形(打振方向:c)	40
図 4-4 気中振動波形(打振方向:d)	41
図 4-5 気中振動のパワースペクトル(打振方向:a)	42
図 4-6 気中振動のパワースペクトル(打振方向:b)	43
図 4-7 気中振動のパワースペクトル(打振方向:c)	44
図 4-8 気中振動のパワースペクトル(打振方向:d)	45
図 4-9 気中振動における卓越周波数	46
図 4-10 流力振動波形(No.13)	47
図 4-11 流力振動波形(No.15)	48
図 4-12 流力振動波形(No.22)	49
図 4-13~34 流力振動のパワースペクトル	50

~71

図 4-35～38 流力振動における卓越周波数	7 2
	～7 5
図 4-39～47 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響	7 6
	～8 4
図 4-48～56 流力振動振幅におよぼす総流量の影響	8 5
	～9 3
図 5-1 フレッティング摩耗解析コード・流力振動計算部の計算フロー	9 4
図 5-2 フレッティング摩耗解析コードによる振動モード解析	9 5
図 5-3 卓越周波数のコード計算値と測定値の比較	9 6
図 5-4 振動振幅の比較（従来解析コードの計算結果との比較）	9 7
図 5-5 振動振幅の比較（改良解析コードの計算結果との比較）	9 8
図 5-6 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較（蒸気重量率：5%）	9 9
図 5-7 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較（蒸気重量率：10%）	1 0 0
図 5-8 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較（総流量：30t/h）	1 0 1
図 5-9 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較（総流量：40t/h）	1 0 2
図 5-10 ふげん装荷チャンネルの流動条件での振幅予測（X-Y 方向合成振幅）	1 0 3

1. まえがき

ATR燃料の高燃焼度化を目指して、54本クラスタ燃料集合体の「ふげん」への少數体装荷が計画されている。その照射用54本燃料の設置変更許可申請には、炉内滞在中における燃料要素の健全性を確証する必要がある。燃料要素の健全性評価では、燃料被覆管表面のスペーサとの接触部に生じるフレッティング摩耗の進展特性評価が重要であり、摩耗深さが炉内滞在中に設計許容値を越えないことを確証しなければならない。現在までに大洗工学センター／機器・構造安全工学室において、実炉流動条件を模擬できるコンポーネント・テストループ（略称：CTL）を使用し、同燃料の模擬試験体を用いての耐久試験を実施し、フレッティング摩耗深さの進展挙動を実測してきた。さらに、長期におよぶ炉内滞在期間中の摩耗進展挙動を予測するために、上記実測値を基にフレッティング摩耗解析コードの開発も併せて行ってきた。

フレッティング摩耗は、高速で流れる冷却水の流動抵抗あるいは圧力変動に起因する強制力を受けて燃料要素が振動（流力振動）することにより生じ、その振動特性が摩耗進展には重要な因子となる。上記解析コード内においても各種流動条件下での振動振幅値を予測し、フレッティング摩耗深さの計算を行っている。従って、本燃料集合体についても炉心流動条件下での振動特性、特に摩耗進展速度に直接影響する振幅値を正確に把握しておく必要がある。

本報告では、振動計測用燃料要素を組込んだ54本クラスタ燃料集合体をコンポーネント・テストループに装荷し、各種流動条件下で行った振動測定の結果を示し、本燃料の正確な流力振動特性を把握するとともに、フレッティング摩耗進展速度の評価に重要な流動条件と振幅値の関係を明らかにし、フレッティング摩耗解析コードの精度向上に反映する。

2. 試験体および試験装置

2.1 試験体

ATR高燃焼度54本クラスタ模擬燃料集合体は、図2-1に示すように、約4mの燃料要素54本が同心円状三層（外層24本、中間層18本、内層12本）に配列された構造で、各燃料要素は軸方向に12個のスペーサと上下タイプレートによって保持されている。スペーサは燃料集合体中央のスペーサ支持管に一定間隔に固定されている。本試験に使用した燃料集合体はその一次試作体であり、その詳細寸法を図2-2に示す。各スペーサは、図2-3に示すように、一つのばねディンプルおよび四つの固定ディンプルを有する54個のスペーサ・リング素子から構成されており、燃料要素はこの5つのディンプルにより支持されている。本試験体を構成する部品の材料は、ペレットを除いて実機燃料集合体と同じであり、燃料要素被覆管内にはUO₂ペレットの比重と等価に製作したPb&SUS製の模擬燃料を充填した。

加速度計が組込まれた振動計装燃料要素はいずれもフリーロッド型で、図2-4に示すように、外層(No.17)、中間層(No.32)、内層(No.44)に各1本装填した。図中▲で示す中間層燃料要素6本は、上下タイプレートにロックナットで固定されたタイロッド型で、周方向に60°間隔で配列されている。その他の燃料要素は、ロックナットで固定されていないフリーロッド型である。

振動計装燃料要素の詳細図を図2-5に示す。耐高温加速度計は、「ふげん」用28本クラスタ燃料および実証炉用36本クラスタ燃料で測定した位置と同じ位置、すなわち流力振動振幅が最大となると予測される燃料要素軸方向上部のS₁₁スペーサとS₁₂スペーサの中央部の被覆管内部に装着した。加速度計からの信号ケーブルは模擬ペレット中心穴を通して、燃料要素上部栓から引き出した。

2.2 試験装置

2.2.1 コンポーネント・テストループ

本試験は、ATR炉心冷却水の流動条件（二相流）を模擬できるコンポーネント・テストループ（図2-6参照）を用いて行った。同ループは、実機と同一の圧力管集合体テスト部ならびに炭素鋼製配管、ボイラ、蒸気ドラム、ポンプ、ヘッダ、

ドライヤ、ミキサ及びステンレス鋼製の蒸気圧縮機等から構成されている。

蒸気ドラムから送られた水は循環ポンプを通り、ヘッダとボイラ給水ポンプに導かれる。ボイラ給水ポンプを通った水はボイラに送られ、過熱蒸気となってドライヤに入り、蒸気ドラムで分離した蒸気と混合され過熱乾燥した蒸気となる。この蒸気は蒸気圧縮機で加圧され蒸気ヘッダを経て、先に熱水ヘッダに送られた水とミキサで混合され、蒸気と水の二相流となって、模擬燃料集合体を装荷した圧力管集合体テスト部を通った後、ヘッダを経て蒸気ドラムへ戻り、循環する。

2.2.2 流力振動計測部

流力振動計測部の概略を図2-7に示す。振動計装燃料要素が組込まれた模擬燃料集合体を圧力管テスト部に装荷し、信号伝送ケーブルを高温高圧水から保護するようにステンレス鋼(SUS304)製のフレキシブルチューブ等でシールし、ケーブルを圧力管外部へ引き出した。模擬燃料集合体を圧力管テスト部に装荷した状態での外観写真を図2-8に、フレキシブルチューブで保護し信号伝送ケーブルを圧力管外部へ引き出した状態での外観写真を図2-9に示す。

2.3 計測器

2.3.1 振動検出用加速度計

本試験に使用した加速度計(三計エンジニアリング製A7H-10D型)は、X・Y二軸型のひずみゲージ式加速度計で、最高使用温度300°Cまで保証されている。加速度計の寸法概要を図2-10に、仕様一覧を表2-1に示す。購入した全ての加速度計について、加振器を用いてその周波数特性、測定データの精度等を確認した後に、振動計装燃料要素に組み込んだ。温度補償については、加速度計の試験検査で得られた感度の温度特性0.03%/°Cを基にして、287°Cで得られた試験データを補正した。

2.3.2 振動データ処理装置

本試験で使用した振動データ処理装置のフロー図を図2-11に、各測定機器の仕様詳細を表2-2~7に示す。振動計装燃料要素からの信号伝送ケーブルを直流ブリッジ方式の信号調整器(三計エンジニアリング製M-1101S型)に接続し、加速度

信号を $1 \text{ G} / 1 \text{ V}$ の電圧信号に変換した。その波形中に含まれる 300 Hz 以上の高周波成分をローパスフィルター (N F回路製 DN-16) で遮断した。これらの信号処理を行う振動計測部は、模擬燃料集合体を装荷した圧力管テスト部近くに設置した。振動計測部の外観写真を図 2-12(a) に示す。

振動計測部からコンポーネント・テストループ制御室に設置された計測データ収録部へ同軸ケーブルを用いて電圧信号を伝送した。計測データ収録部の外観写真を図 2-12(b) に示す。伝送されたアナログ信号を高速の A/D 変換器によりデジタル化し、DMA 方式でパーソナルコンピューター内のメモリに直接データを収録した。メモリ内に収納されたデータを振動解析ソフト (ELMEC 製 WAAP-02) によりデータファイルとし、光磁気ディスク内に保存した。さらに、A/D 変換器の前で信号ケーブルを分歧させ、データレコーダーに接続し、バックアップ用としてアナログデータを磁気テープに収納した。

信号処理系のデータ精度 (2重積分後) を調べるため、各周波数で入力した正弦波信号とデジタルデータを2重積分した値を比較し、 $20 \sim 200 \text{ Hz}$ の周波数範囲では誤差が 2% 以下であることを確認した。

さらに、流力振動計測中のコンポーネント・テストループ流動条件の変動を記録するために、ループ制御盤から流力振動に関する流動条件の信号を出力させ、A/D 変換機能を有するデータロガーにデジタル化された信号を収納した。

3. 試験方法

3.1 加速度計の校正および周波数特性測定

3.1.1 加速度計の校正

流力振動試験に供した燃料要素と同一の被覆管を短尺に加工し、その円筒管内に前述の加速度計を挿入した。加速度計を信号調整器に接続した状態で円筒管を定盤上で水平にローリングさせ、重力を利用した 1 G 出力の静的な校正を行った。

次に、加速度計を挿入した上記円筒管を、全自動振動試験装置（エミック社製、F-050BM-E04）に圧電式の標準加速度計と共に固定した。標準加速度計の出力を基準として 100 Hz、1 G で加振し、円筒管内に挿入された加速度計の出力が静的に校正したレベルと同じあることを確認した。

3.1.2 加速度計の周波数特性測定

前述と同じ状態で、加振周波数を 0 ~ 500 Hz の範囲で変化させて円筒管を 0.1 G で加振し、標準加速度計の出力を基準に被測定加速度計の出力を測定した。図 3-1 は内層に装填した加速度計の周波数特性を示したもので、各周波数における出力を 100 Hz の出力に対する比で表している。実験に使用した全ての加速度計について上記測定を行い、20 ~ 300 Hz の範囲内ではいずれも平坦な出力特性を有していることを確認した。また、出力信号の再現性はいずれの加速度計も 0.2 % 以下であった。

3.2 気中振動測定

上記加速度計を組込んだ振動計装燃料要素を定盤上で水平にローリングさせ、重力を利用した 1 G 出力の確認を行った後、燃料集合体内に装填し、加速度計からの信号伝送ケーブルを前述の振動データ処理装置に接続した。燃料集合体をワイヤーロープにて垂直に吊るし、上部タイプレート部を木槌で軽く叩いた。打振直後の自由減衰振動を上記計測器にて測定し、その波形データから固有振動数ならびに減衰定数を求めた。図 2-4 中に示すように 4 方向 (a ~ d) から打振を行い、上記測定を 4 回行った。

3.3 流力振動測定

振動計装燃料要素を組込んだ燃料集合体をコンポーネント・テストループの模擬圧力管テスト部（チャンネルB）に装荷し、「2.2.2 流力振動計測部」で記述した方法で、各信号伝送ケーブルを圧力管テスト部から引出し、振動データ処理装置に接続した。

各計測器の動作確認を実施した後、コンポーネント・テストループを起動し、模擬冷却水を 287°C 、 $72\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ に昇温・昇圧し、流力振動を測定する流動条件（熱水および蒸気流量）に調整した。本実験での流動条件（設定値）の一覧を表3-1に示す。各流動条件に設定後約5分間放置し、模擬冷却水の循環状態を安定させた後、振動測定を開始した。振動測定は各々1分間行い、表3-2に示す条件でデジタルおよびアナログの振動データを収録した。さらに、振動測定中の流動データを表3-3に示す条件で収録した。

4. 試験結果

4.1 気中振動での卓越周波数および減衰定数測定結果

打振直後の自由振動波形（加速度）を図4-1～4に示す。図中のX方向はスペーサのねじ印方向を示し、Y方向はそれに直交する方向である（図2-3参照）。これら振動データのFFT解析から求めたパワースペクトルを図4-5～8に示す。さらに、パワースペクトル上で認められるピーク周波数を図4-9に示す。データにはらつきはあるが、いずれも160～180Hzの周波数が卓越していることがわかる。

次に、上記気中振動データで減衰傾向が明確な波形について、ピーク高さを対数回帰曲線に近似させ、減衰定数を求めた。その結果を表4-1に示す。減衰定数は1.12～1.35（平均：1.26）の範囲で、「ふげん」用28本クラスタ燃料での測定値：1.38、実証炉用36本クラスタ燃料での測定値：1.67～1.74と比較し、本燃料の減衰定数が明らかに小さくなっていることが確認された。

4.2 流力振動試験結果

4.2.1 流動条件と卓越周波数の関係

流力振動波形（加速度）の代表例を図4-10～12に示す。各流動条件での振動データから求めたパワースペクトルを図4-13～34に示す。いずれのスペクトルにおいても105Hzおよび160Hz近傍に卓越した周波数が認められる。また、外層から内層に向けてピークが高くなっていること、内層側で振動が大きくなっていることがわかる。各流動条件での卓越周波数の一覧を図4-35～38に示す。これらの図から流動条件の変化による卓越周波数の変化は認められなかった。

4.2.2 流動条件と振動振幅の関係

上記振動データを60～200Hz範囲内で二重積分し、振動振幅値（実効値）を求めた。各流動条件での振幅値一覧を表4-2に示す。表中に示す流動条件は、振動測定中に記録した時刻歴の実績データを平均化した値である。なお、二相流での振動測定後、外層および中間層のY方向の加速度計が故障し、30t/hおよび40

t/h の単相流（蒸気重量率：0 %）のデータが採取できなかった。この結果を基に流力振動振幅と蒸気重量率の関係を図4-39～47に、総流量との関係を4-48～56に示す。X方向あるいはY方向の振幅データでは明確ではないが、X・Y方向の合成振幅値については蒸気重量率および総流量の増加により直線的に増加する傾向が明確に認められる。中間相および内相の振幅と蒸気重量率の関係において、単相流（蒸気重量率0 %）の振幅値が相当小さく、単相流から二相流に変化させることにより振幅値が急激に増加することがわかる。さらに二相流（蒸気重量率5、10%）の振幅と総流量の関係では、総流量0 t/h に外挿しても振幅は0 μm とならず、低流量側での振幅におよぼす蒸気の影響が大きいことが推測される。なお、今回実施した流動条件範囲では最大2.1 μm の振幅値（X・Y方向合成振幅値）が測定された。

5. 考 察

5.1 解析コードによる検証

上記試験で得られた ATR 高燃焼度 54 本クラスタ燃料の流力振動特性を、現在開発中のフレッティング摩耗解析コードにより検証した。本コードの流力振動計算部の計算フロー概略を図 5-1 に示す。燃料要素の固有値計算ではマルチスパンビームモデルによる有限要素法を使用し、振幅計算では ATR 燃料設計においても使用された Paidousis の半経験式を採用した。計算に必要な形状および寸法パラメーターは 54 本クラスタ燃料の公称値を入力し、スペーサー支持部の剛性に関するパラメーターは 36 本クラスタ燃料で測定した値を入力した（計算コードおよび入力値の詳細は別途報告書を作成予定）。

解析コードにより計算した 54 本クラスタ燃料の各振動モードの形状および固有振動数を図 5-2 に、流力振動試験から得られた卓越周波数との対比を図 5-3 に示す。周波数解析にて最も顕著に現れた 160 Hz 近傍の卓越周波数は、燃料要素の中央スパン部を中心に振動する 7 次モード (154 Hz) および 8 次モード (167 Hz) に相当する。105 Hz 近傍に現れた卓越周波数は、加速度計を装填した上部スパンを中心に振動する 3 次モード (103 Hz) に対応する。7 次モードと 8 次モードの周波数が近いこと、ならびに実測されたピーク周波数が試験条件によって変動していることから、卓越周波数がいずれのモードに起因するか判別することは難しい。さらに、160 Hz 近傍の卓越周波数が顕著であることから、両モードが同時に励起されている可能性も考えられる。図 5-3 に示す比較から、解析コードにより計算した 54 本クラスタ燃料の各モードの固有振動数と本実験によって得られた卓越周波数は対応することがわかる。

加速度計を装荷したスパンの振動振幅値について、解析コードによる計算値（1 次～9 次モードまでの合成値）と本実験での測定値（X および Y 方向の合成値）を対比させたグラフを図 5-4 に示す。全流量との関係では、高流量側で計算値と測定値が一致するが、低流量側では測定値に対して計算値が小さくなる傾向を示す。蒸気重量率との関係では、5～10% の低蒸気重量率領域で測定値が若干大きくなり、低流量の 30 t/h でその傾向は大きくなる。このように現状の解析コードでは

低流量側で振幅値を実際よりも小さく見積もることが明らかとなった。この計算値と測定値の差を現状コード内の計算式の変更（Paidousis 式中のパラメーターの変更）で補うことは難しく、計算式の修正が必要と考えられる。低流量・低蒸気重量率で測定値と計算値の差が大きくなること、ならびに蒸気を含む2相流での全流量と振幅値の関係において、総流量=0に外挿しても振幅測定値が0に漸近しないことから、流力振動計算式を単相流相当の流速、密度等で励起される成分（主に全流量に依存する成分）と、2相流での流速、密度等で励起される成分（主に蒸気重量率に依存する成分）に分離することを検討した。各成分についてPaidousis の式を適用し、式中に含まれる定数KをPaidousis 式本来の適用範囲（1～5）内で各々調整し、測定値に合致させるのである。図5-5に、測定値を安全側（振幅値を大きめに計算する）に維持するように定数Kを調整（全流量に依存する成分の定数K : PAW=4、蒸気重量率に依存する成分の定数K : PAS=4）した場合の計算結果を示す。なお、従来の解析コードで計算した結果についても併せて示す。この図から、高流量側で計算値が大きくなる（安全側）に傾向は残るもの、従来の計算式に比べ、実験値と計算値の差が小さくできることがわかる。

解析コードによる検証により、各振動モードの固有振動数については現状コードによる計算値と今回の試験による測定値は良く一致したが、振動振幅値については低流量側で計算値が測定値に比べ小さくなることが判明した。この差については、振幅計算式を主に全流量に依存する成分、および主に蒸気重量率に依存する成分に分離し、各々について最適な定数Kを選択することにより縮小させることができることも明らかとなり、本解析コードの改良を行った（解析コードの改良については別途報告書内で記述する予定）。

5.2 ふげん装荷チャンネルでの振幅予測

振動振幅の全流量および蒸気重量率に対する依存性を「ふげん」用28本クラスタ燃料、実証炉用36本クラスタ燃料と比較したグラフを図5-6～9に示す。いずれの流動条件においても、28本および36本クラスタ燃料に比べ振幅値が増加している。振幅値の増加は燃料要素の細径化によるものと考えられるが、今回の試験条件範囲では最大でも $2 \mu\text{m}$ (RMS) 程度の振幅値であり、燃料の健全性に直接影響を与えるレベルではないと考えられる。

図5-10には、本試験により得られた振動値（全層平均）を蒸気重量率に対してプロットしたグラフを示す。この図に示される各総流量（30 t/h, 40 t/h）での蒸気重量率と振幅値との関係から、コンポーネント・テストループで実施した耐久試験条件での振幅値、ならびに「ふげん」装荷チャンネルでの振幅値を予測した。図中●は耐久試験での流動条件（総流量：33.5 t/h、蒸気重量率：16.4%）に相当する位置を示し、▲は「ふげん」装荷チャンネルの出口側流動条件（チャンネル総流量：30.8 t/h、出口蒸気重量率：27.1%）に相当する位置を示す。グラフの縦軸から、耐久試験条件では $1.7 \mu\text{m}$ 、ふげん装荷チャンネルでは $1.9 \mu\text{m}$ の振幅値（実効値）と予測される。「ふげん」装荷チャンネル（蒸気重量率が最大となる出口側流動条件を適用した場合）での振幅値がコンポーネント・テストループでの耐久試験時の振幅値より若干大きくなることが予測されるが、この程度の上昇ではフレッティング摩耗進展挙動に重大な影響を及ぼすことはないと考えられる。フレッティング摩耗特性への影響については、本実験結果を基にフレッティング摩耗解析コードを使用し、確認する必要がある。

6. ま と め

振動計測用燃料要素を組込んだ 54 本クラスタ燃料集合体をコンポーネント・テストループに装荷し、各種流動条件での流力振動測定を実施した。その測定結果から、ATR 燃料のフレッティング摩耗解析コード内にある流力振動計算部を検証するとともに、上記燃料集合体「ふげん」装荷位置での振動振幅予測を行った。

本試験により得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 流力振動での周波数特性では、105 Hz および 160 Hz 近傍に卓越した周波数が観察され、フレッティング摩耗解析コード（流力振動計算部）で求めた振動モードおよびその固有振動数と概ね一致した。
- (2) 流力振動振幅は、総流量および蒸気重量率の増加で増大し、その傾向は従来の解析コードによる計算結果と一致するが、低流量領域での振幅測定値が計算値に比べ大きく現れた。解析コード内の振動振幅計算式を改良、すなわち Paidousis の式を主に全流量に依存する成分と主に蒸気重量率に依存する成分に分離し、各々について最適な定数を決めるこにより、この差を縮小することができ、かつ安全側に予測できることが確認された。
- (3) 本燃料の流力振動振幅値は、「ふげん」用 28 本クラスタ燃料、ATR 実証炉用 36 本クラスタ燃料のいずれに対しても増加するが、今回の試験での流動条件範囲では最大でも $2 \mu\text{m}$ (実効値) 程度の振幅値であった。
- (4) 流動条件と振幅値との関係から、「ふげん」装荷が予定されているチャンネルでの最大振幅値（燃料集合体上部）は $1.9 \mu\text{m}$ (実効値) 程度と予想された。

7. 謝 辞

本試験の遂行にあたり、振動測定・データ解析・整理作業を行って頂いた菱和工業(株)の大川亮二氏、板橋茂樹氏、ならびにコンポーネント・テストループの運転作業を行って頂いた同社社員の方々に心から感謝申し上げます。

表 2-1 加速度計の仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー (型式)	三計エンジニアリング(株) (A7H-10D)
2) 振動検出方向	半径方向直角二方向 (X・Y二軸)
3) 定格容量	±10G
4) 出力電圧	1G/1V (信号調整器: M-1101Sを含む)
5) 応答周波数	D C ~ 300Hz (±3dB)
6) 分解能	1/500 (ダイナミック)
7) 過負荷	±200%F S以上
8) 非直線性	±1%F S以下
9) 再現性	0.5%F S以下
10) 使用温度範囲	-10 ~ 300°C
11) 温度特性	0.1%F S/°C以下
12) 横感度	±5%以下
13) 入力抵抗	500Ω±10%
14) 出力抵抗	450Ω±10%
15) 固定方式	バネ式 (固定型の固有振動数 1KHz以上)
16) 信号コード	耐熱ガラスコード $\phi 3.2\text{-}7\text{ m}$ (PVCコード 2m NDISコネクタ付き)

表2-2 信号調整器の仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー (型式)	三計エンジニアリング(株) (M-1101S)
2) 出力電圧	$\pm 10\text{VFS}$ (負荷抵抗 $5\text{K}\Omega$ 以上)
3) 零点調整範囲	$\pm 100\%\text{FS}$ ($\pm 10\text{G}$ 相当)
4) 感度調整範囲	$50 \sim 150\%\text{FS}$
5) 入出力抵抗	$1\text{M}\Omega$ 以上
6) 周波数特性	DC $\sim 1\text{kHz}$
7) 温度特性	$0.05\%\text{FS}/^\circ\text{C}$ 以下
8) ドリフト	$0.5\%\text{FS}/10\text{H}$
9) ノイズレベル	$\pm 20\text{mV}_{\text{p-p}}$ /DC $\sim 300\text{Hz}$
10) ローパスフィルタ	300Hz
11) 非直線性	$\pm 0.1\%\text{FS}$
12) 入力コネクタ	PRC03-12A10-7M(NDIS-7P)
13) 出力コネクタ	BNC-R
14) 電 源	AC $100 \pm 10\text{V}$

表2-3 ローパスフィルターの仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー (型式)	エヌエフ回路設計ブロック(株) (DN-16)
2) 遮断周波数	0.1 Hz ~ 199.9 kHz
3) 遮断周波数確度	± 2 %以内
4) 減衰傾度	48 dB/oct
5) 減衰傾度確度	± 2 dB/oct (0.1 ~ 199.9 kHzでは± 3 dB/oct)
6) 通過帯域利得	0 ± 0.5 dB
7) 利得安定度	0.7 %/H (温度一定)
8) S/N比	80 dB以上 (3 Hz ~ 1 MHzでの最大出力に対し)
9) 入力インピーダンス	1 MΩ以上
10) 電圧出力	最大± 10 V (7 V _{rms})
11) 歪 率	最大出力、定格負荷 (2 KΩ) 20Hz ~ 20kHz 間にて遮断周波数より平坦部に 1 oct 離調して点にて 0.2 %以内
12) 出力DCオフセットドリフト	± 500 μV / 8 H (温度一定)
13) 電 源	AC 100 ± 10 V

表2-4 A/D変換器の仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー (型式)	E L M E C(株) (EC-2396)
2) 変換時間	10.0 μ S
3) ダナミックレンジ	90 dB
4) 入力チャンネル	1~8 ch
5) 入力インピーダンス	1 M Ω 以上
6) 測定レンジ	± 5 V
7) 変換コード	2の補数
8) タイマー	外部クロック
9) 外部スタート	TTL レベル負論理
10) データ転送方式	DMA方式 (パーソナルコンピュータ内のメインメモリへの直接転送)
11) データ転送速度	1 Mword/Sec
12) データ転送容量	~ 32 MB
13) データ最少転送単位	64 kword
14) 対応するパーソナルコンピュータの機種	日本電気製 PC-9800シリーズ
15) 電 源	A C 100 50/60 Hz

表2-5 パーソナルコンピューターの仕様

項目	仕様 詳 紹
1) 製作メーカー (型式)	日本電気(株) (NEC9821AP)
2) RAM容量	32MB
3) 内蔵ハードディスク 容量	120MB
4) データ収納ディスク	600MB光磁気ディスク (PC-OD501)
5) 計測ソフト	WAAP-02 (ELMEC製)
6) サンプリング速度	0.1mS
7) データファイル形式	16ビットバイナリーデータ (標準イメージデータファイル)
8) 波形解析ソフト (FFT解析等)	WAAP-02 (ELMEC製) DADISP/98 (ASTRODESIGN製)

表2-6 アナログデータレコーダの仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー (型式)	共和電業(株) (RTP-800A)
2) 記録方式	FM方式
3) 使用テープ	ベータフォーマットテープ (L-500)
4) テープ速度	1.19~76.2 cm/sec
5) テープ速度偏差	±0.2%以内
6) フラッタ (2σ)	0.25~0.8%P-P
7) S/N比	41~50 dB
8) 入力レベル	±0.2V~16V PEAK
9) 入力インピーダンス	100KΩ
10) 出力電圧	0~±5V PEAK, 負荷 600Ω以上
11) 出力インピーダンス	10Ω 不平衡
12) 直線性	±0.5%F.S以内
13) 歪 率	1%以内
14) クロストーク	雑音レベル以下
15) ドリフト	±0.5%以内

表2-7 データロガの仕様

項目	仕様 詳 細
1) 製作メーカー(型式)	日本電気三栄(株)(DL1100)
2) 入力チャンネル	1~16ch
3) 入力電圧	±2、±5、±10V
4) A/D変換機能	逐次比較形・12ビット、同時サンプリング方式
5) サンプリング速度	0.1mS/16ch(内部クロック使用時)
6) メモリ容量	DRAM・4MB
7) データ記録装置	3.5インチフロッピーディスク (2HD、MS-DOSフォーマット)
8) データファイル形式	

表3-1 流力振動試験の流動条件（設定値）

試験番号	総流量	熱水流量 (t/h)	蒸気流量 (t/h)	蒸気重量率 (%)
1	24.0	22.8	1.2	5.0
2	30.0	28.5	1.5	5.0
3	45.0	43.0	2.3	5.0
4	58.0	55.0	2.9	5.0
5	15.0	13.5	1.5	10.0
6	20.0	18.0	2.0	10.0
7	30.0	27.0	3.0	10.0
8	40.0	36.0	4.0	10.0
9	50.0	45.0	5.0	10.0
10	30.0	30.0	0.0	0.0
11	30.0	28.5	1.5	5.0
12	30.0	27.0	3.0	10.0
13	30.0	25.5	4.5	15.0
14	30.0	24.0	6.0	20.0
15	30.0	23.4	6.6	22.0
16	40.0	40.0	0.0	0.0
17	40.0	39.0	1.0	2.5
18	40.0	38.0	2.0	5.0
19	40.0	37.0	3.0	7.5
20	40.0	36.0	4.0	10.0
21	40.0	35.0	5.0	12.5
22	40.0	34.0	6.0	15.0

[温度 : 287°C]
[圧力 : 72 kg/cm²G]

表3-2 流力振動測定方法

データの種類	項目	条件
デジタルデータ	サンプリング時間	約1分間
	サンプリング速度	0.1 m/s
	ファイル形式	16ビットバイナリ形式
アナログデータ	テープ記録時間	約1分間
	テープ速度	9.5 cm/s
	入力レベル(単位)	±5 V (1 G/1 V)

表3-3 CTL流動条件の測定方法

入力パラメーター	蒸気系：差圧、温度、圧力 熱水系：差圧、温度 チャンネル入口：温度、圧力 チャンネル出口：圧力
サンプリング時間	約1分間
サンプリング速度	50 m/s
データの形式	デジタル(12ビットバイナリ形式)

表4-1 気中振動波形から得られた減衰定数

打振方向	加速度計	減衰定数
a	外層・Y方向	1.28
	内層・X方向	1.25
	内層・Y方向	1.31
b	内層・X方向	1.12
c	中間層・X方向	1.35
	内層・Y方向	1.25
d	中間層・X方向	1.24
	内層・X方向	1.29
	平均	1.26

表4-2 各種流動条件での流力振動振幅値

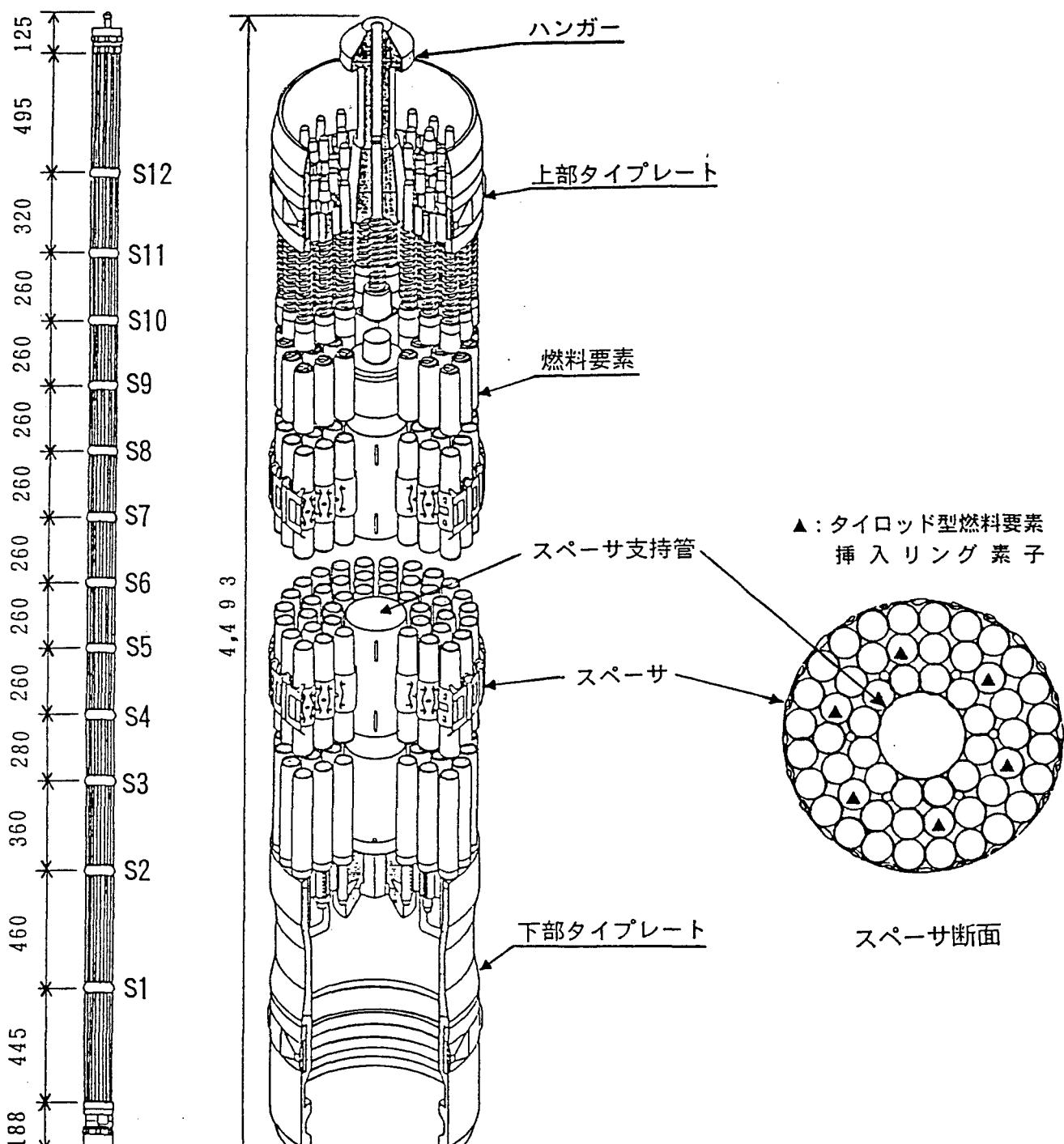
試験番号	流 動 条 件				振 幅 値 ($\mu\text{m-rms}$)						合 成 振 幅 値 ($\mu\text{m-rms}$)			
	総流量 (t/h)	熱水流量 (t/h)	蒸気流量 (t/h)	蒸気重量率 (%)	外層 (R17)		中間層 (R32)		内層 (R44)		外層 (R17)	中間層 (R32)	内層 (R44)	平均値
					X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向				
1	23.7	22.5	1.2	5.1	0.53	0.65	0.49	0.92	0.93	0.91	0.84	1.04	1.30	1.06
2	30.3	28.9	1.4	4.6	0.65	0.78	0.57	1.13	1.06	0.97	1.02	1.27	1.44	1.24
3	46.4	44.2	2.2	4.7	0.82	—	0.65	1.41	1.21	1.04	—	1.55	1.60	1.57
4	58.8	56.2	2.6	4.4	0.81	1.15	0.75	1.39	1.19	1.69	1.41	1.58	2.07	1.68
5	14.8	13.3	1.5	10.1	0.63	0.76	0.60	1.00	0.97	0.85	0.99	1.17	1.29	1.15
6	19.2	17.4	1.8	9.4	0.68	0.79	0.53	1.07	1.01	0.87	1.04	1.19	1.33	1.19
7	30.3	27.4	2.9	9.6	0.74	0.90	0.63	1.36	1.21	1.04	1.17	1.50	1.60	1.42
8	39.9	36.0	3.8	9.5	0.79	1.08	0.82	1.59	1.21	1.28	1.34	1.79	1.76	1.63
9	50.8	45.9	5.0	9.8	0.98	1.33	1.04	1.81	1.45	1.51	1.65	2.09	2.09	1.94
10	(30.0)	(30.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—	0.38	0.42	0.39	—	—	0.57	0.57
11	29.9	28.5	1.4	4.7	0.53	0.67	0.64	0.94	0.92	0.89	0.85	1.14	1.28	1.09
12	29.5	26.6	2.9	9.8	0.70	0.82	0.73	1.31	1.13	1.01	1.08	1.50	1.52	1.36
13	29.3	25.0	4.3	14.7	0.72	0.83	0.91	1.20	1.02	1.20	1.10	1.51	1.57	1.39
14	29.5	24.0	5.5	18.6	0.76	1.07	1.15	1.39	1.02	1.32	1.31	1.80	1.67	1.59
15	29.1	22.9	6.2	21.3	0.80	1.19	1.34	1.41	1.10	1.50	1.43	1.95	1.86	1.75
16	(40.0)	(40.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—	0.45	0.50	0.49	—	—	0.70	0.70
17	40.6	39.2	1.4	3.4	0.72	0.75	0.71	1.15	0.96	0.90	1.04	1.35	1.32	1.24
18	39.5	37.7	1.8	4.6	0.70	0.85	0.73	1.25	1.03	1.01	1.10	1.45	1.44	1.33
19	40.1	37.3	2.8	7.0	0.80	0.88	0.89	1.48	1.21	1.10	1.19	1.73	1.64	1.52
20	39.5	35.7	3.8	9.6	0.78	1.05	0.90	1.47	1.24	1.18	1.31	1.72	1.71	1.58
21	39.5	34.8	4.7	11.9	0.83	1.07	1.24	1.47	1.17	1.36	1.35	1.92	1.79	1.69
22	39.7	34.0	5.7	14.4	0.83	1.20	1.48	1.49	1.22	1.53	1.46	2.10	1.96	1.84

No.1～4：蒸気重量率5%、総流量20～60t/h

No.5～9：蒸気重量率10%、総流量15～50t/h

No.10～15：総流量30t/h、蒸気重量率0～20%

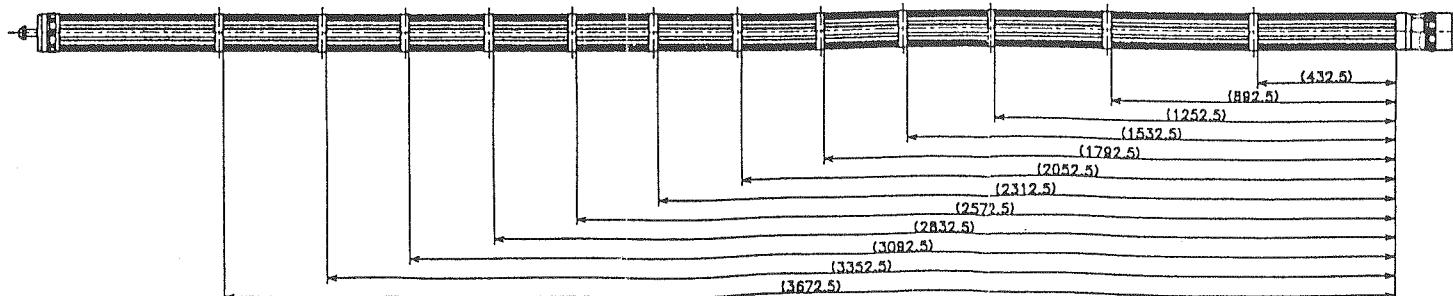
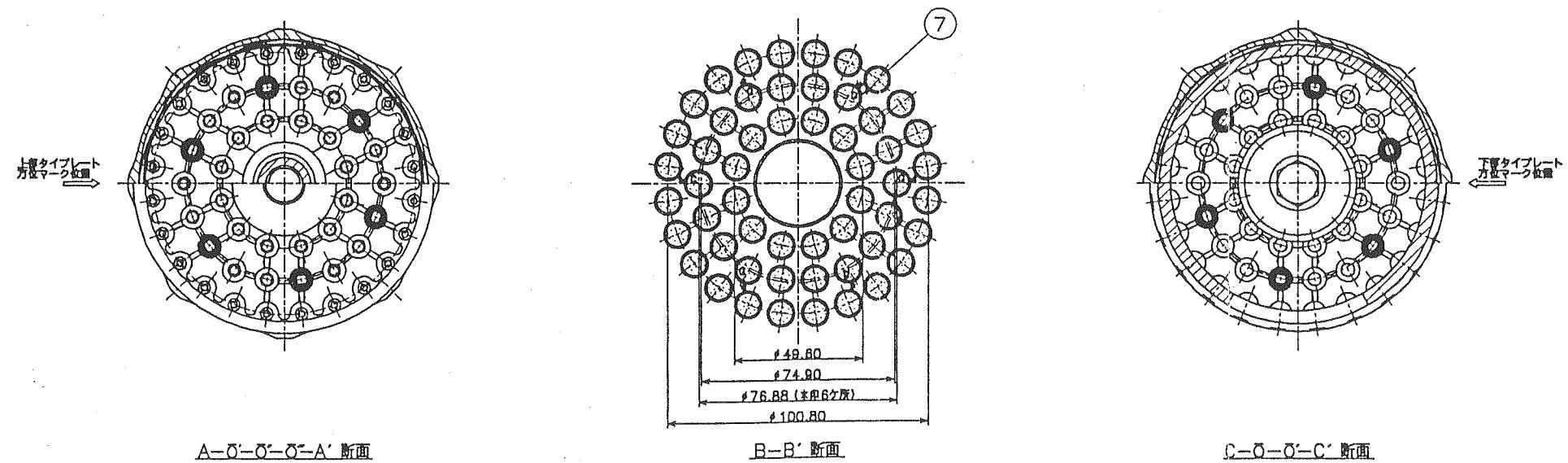
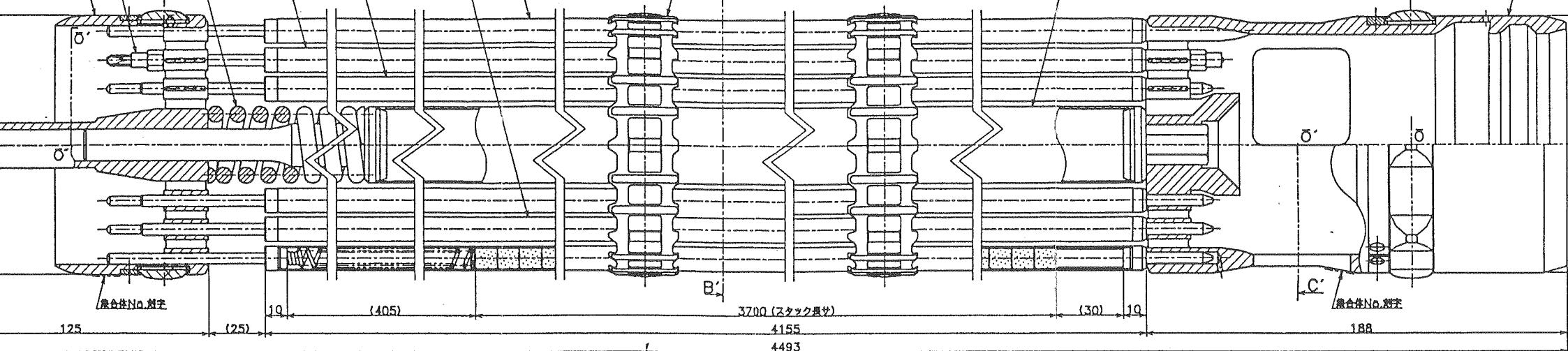
No.16～22：総流量40t/h、蒸気重量率0～15%



S1~S12 : スペーサ位置

単位 : mm

図2-1 ATR高燃焼度54本クラスタ燃料集合体



全体図 (1/10)

	品名	材
1	上部タイププレート組立図	
2	下部タイププレート組立図	
3	スペーサ組立図	インコネ
4	内層燃料要素	
5	中間層 (フリーロッド) 燃料要素	
6	中間層 (タイロッド) 燃料要素	
7	ガドリニア入りウラン・プルトニウム複合酸化物燃料要素	
8	外層燃料要素	

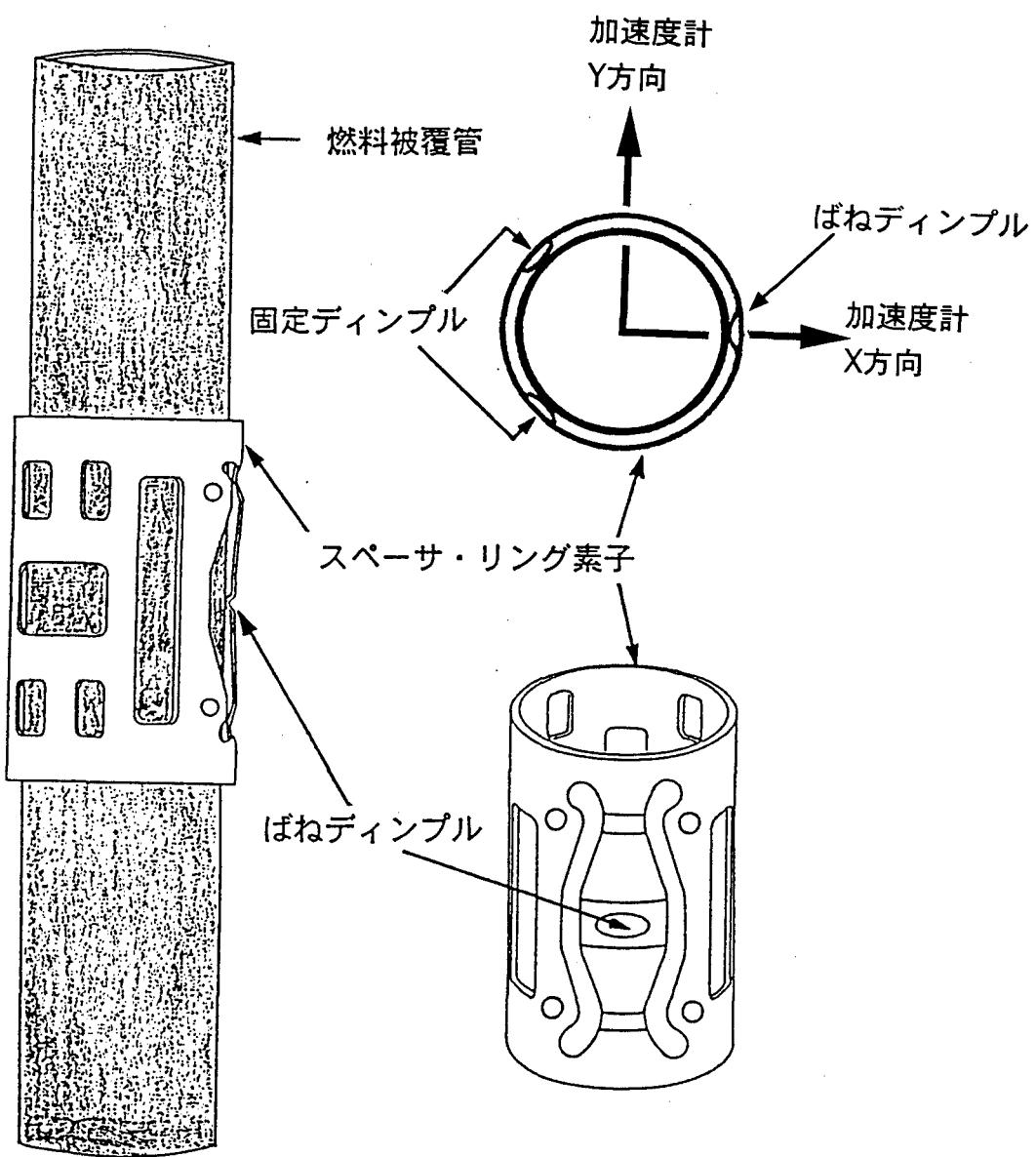


図2-3 スペーサ・リング素子および燃料要素

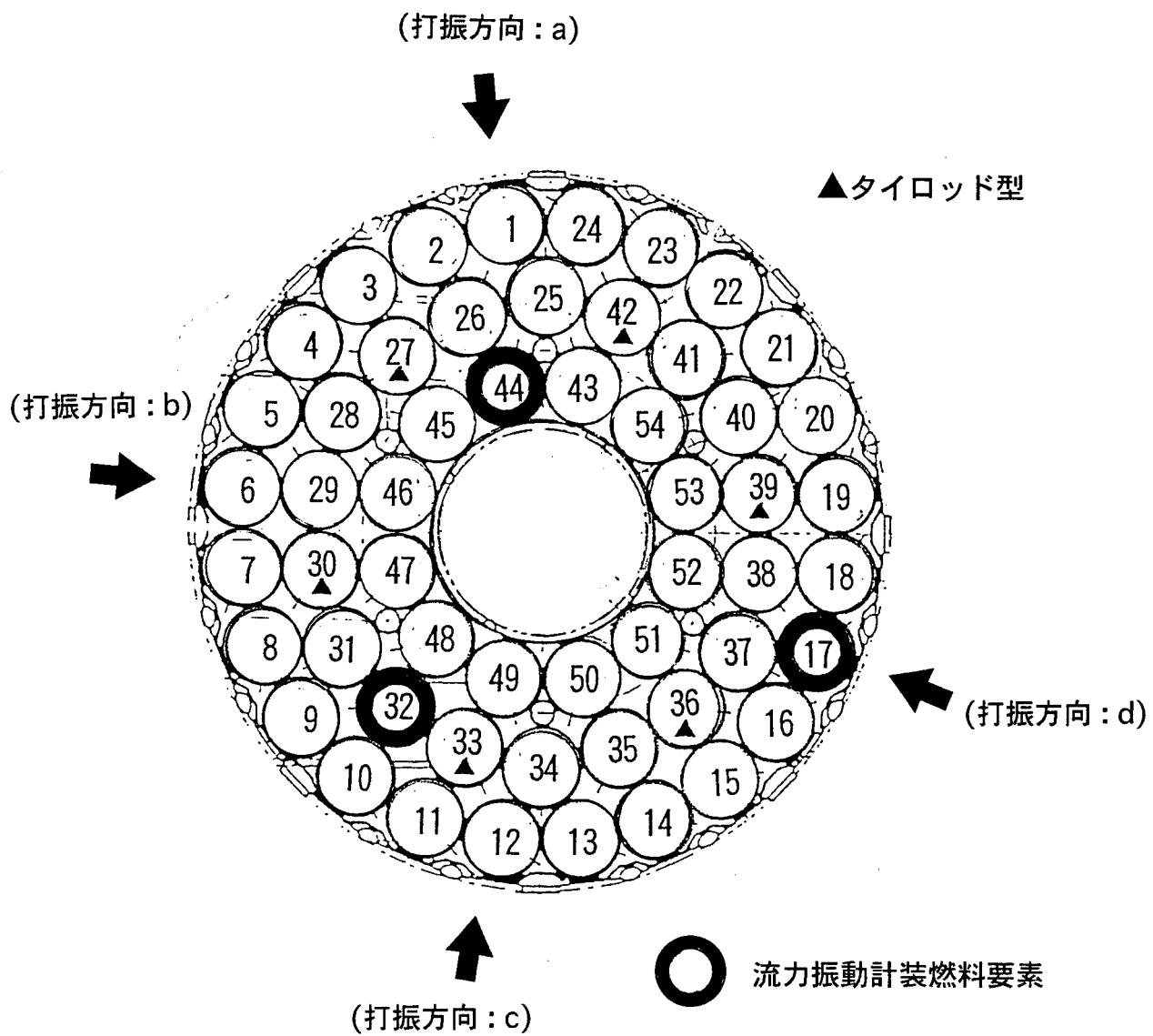
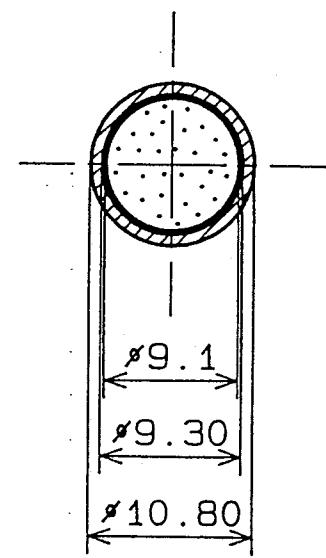
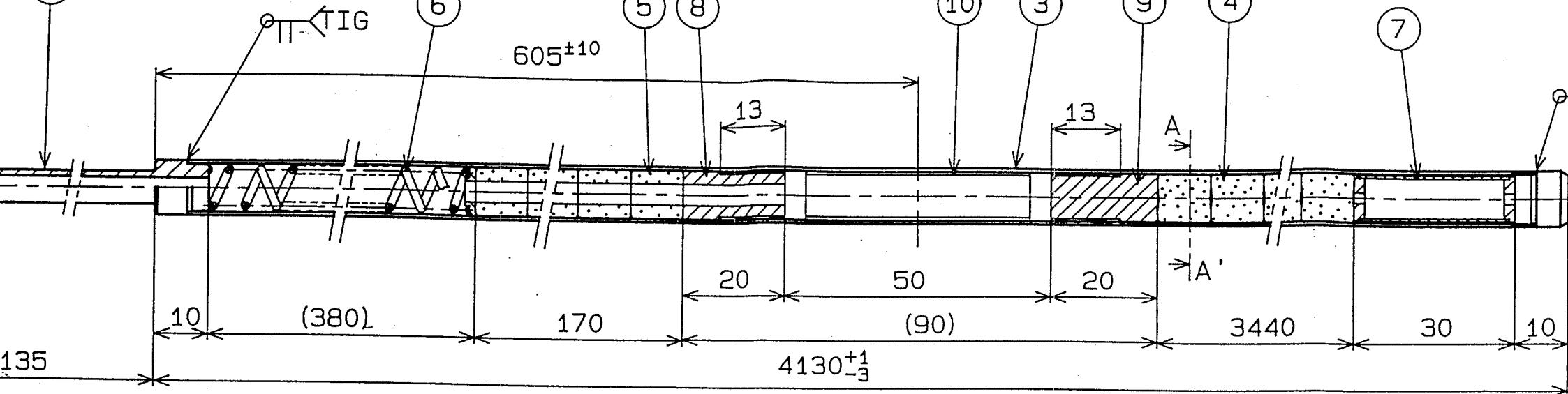


図2-4 振動計装燃料要素の配置図
(矢印は気中振動測定時の打振方向を示す。)



A-A' 断面 (2/1)

	品名	材質
1	上部	Zry-2
2	下部端栓	Zry-2
3	被覆管	Zry-2
4	模擬ペレット (1)	W-Cu
5	模擬ペレット (2)	W-Cu
6	押え板付上部プレナムスプリング	SUS304-WPB
7	押え板付下部サポートスリーブ	SUS304
8	加速度検出器保護具 (1-a)	SUS304
9	加速度検出器保護具 (1-b)	SUS304
10	加速度検出器 (A7H-10D)	

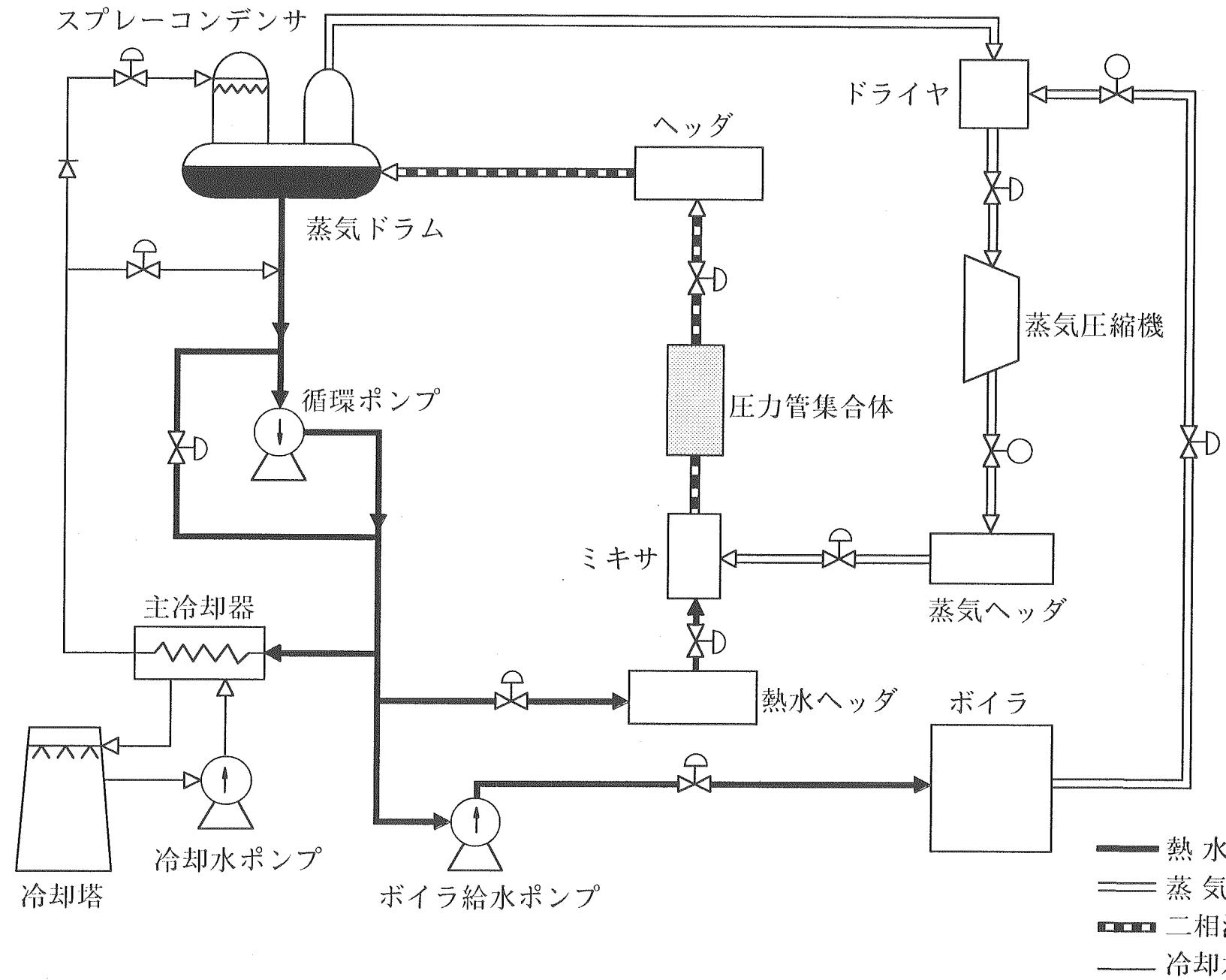


図2-6 コンポーネント・テストループ

信号伝送ケーブル

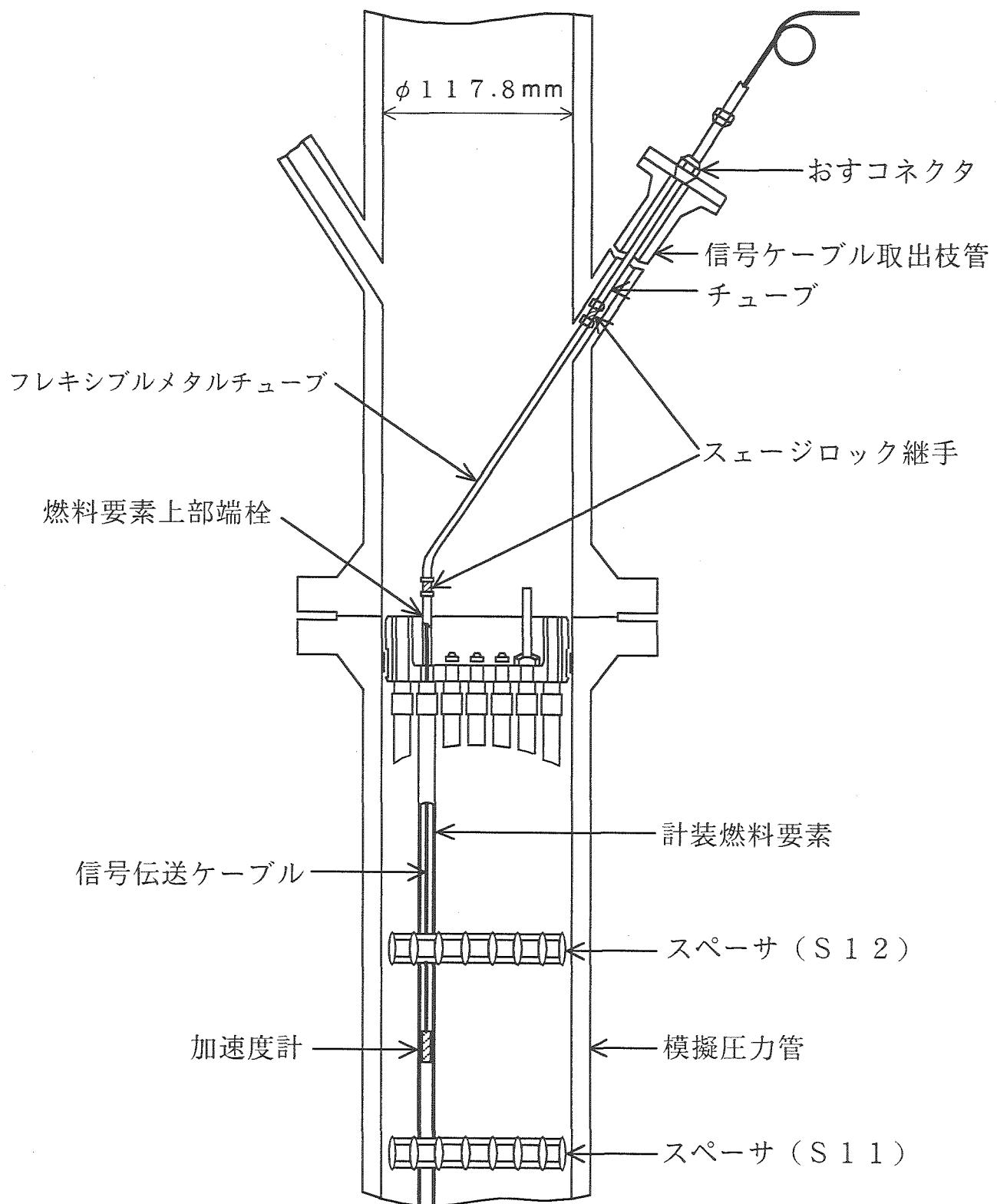


図2-7 流力振動測定計装部概略

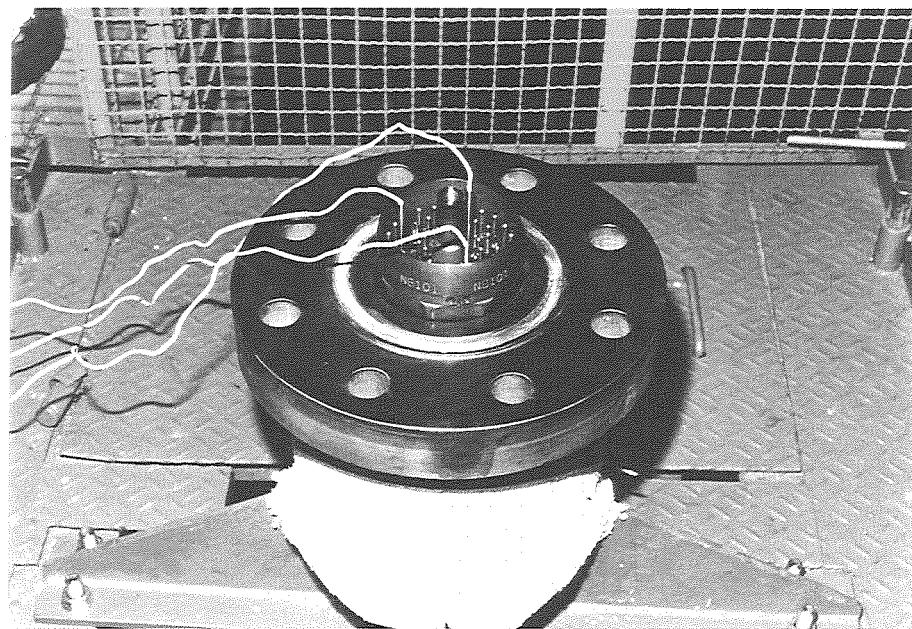
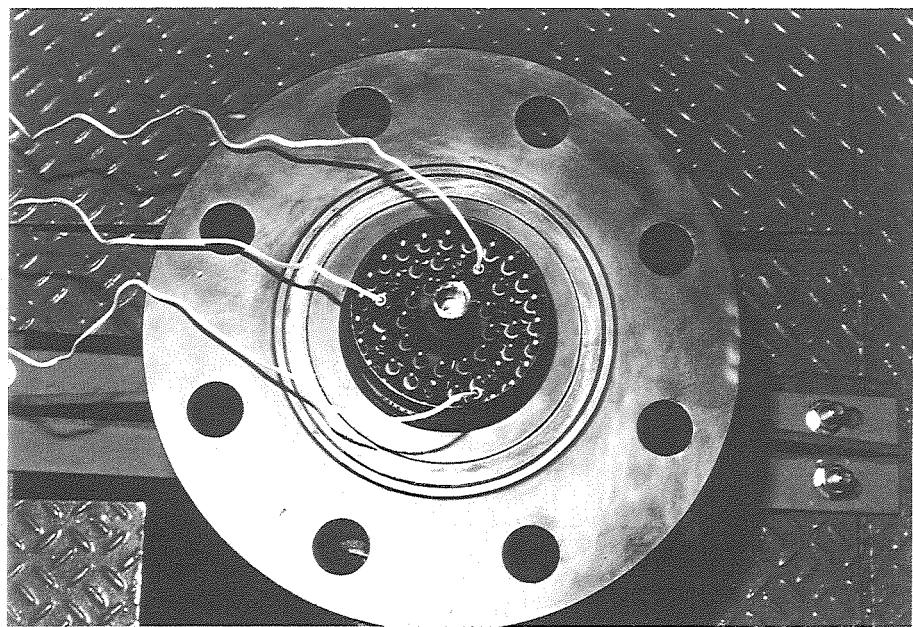


図2-8 燃料集合体装荷直後の状況

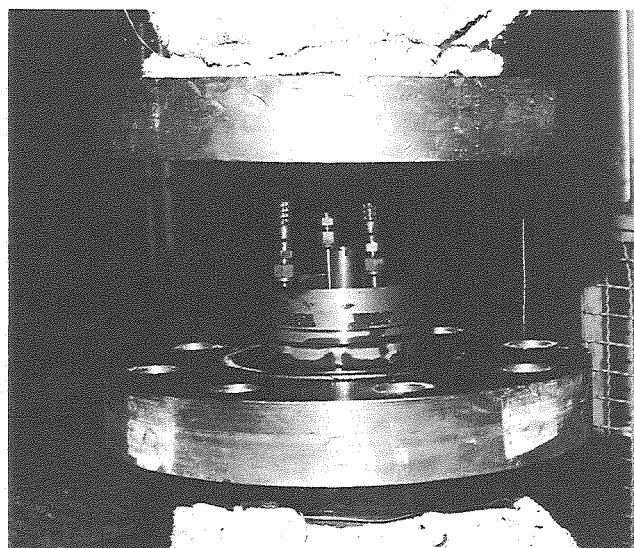
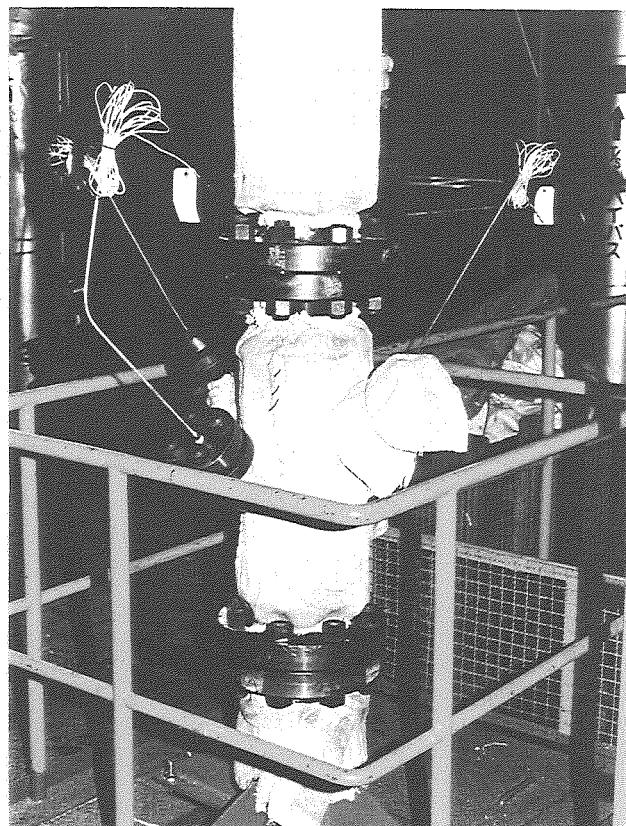


図2-9 流力振動計測部組立直後の状況

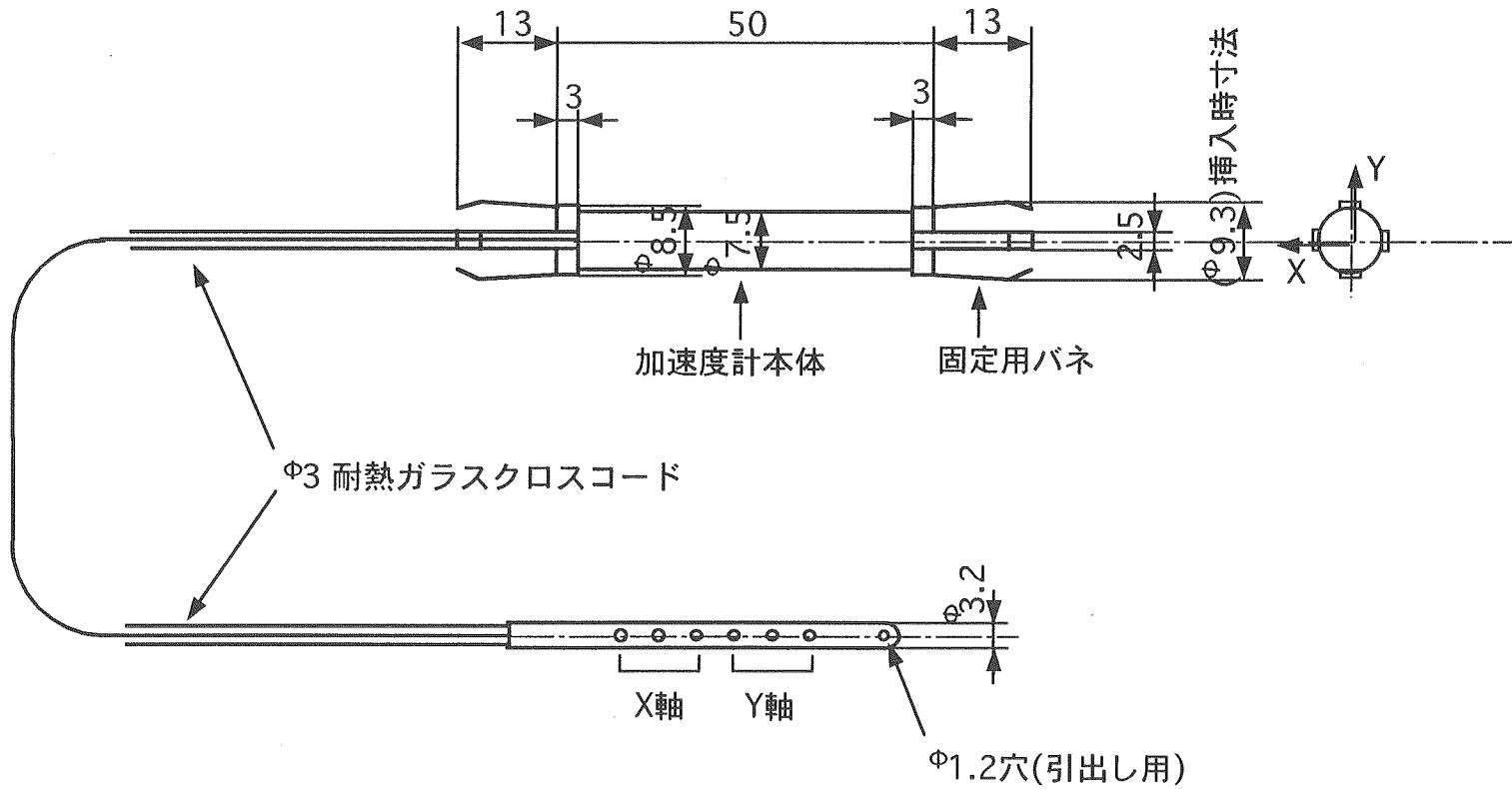


図2-10 加速度計寸法図

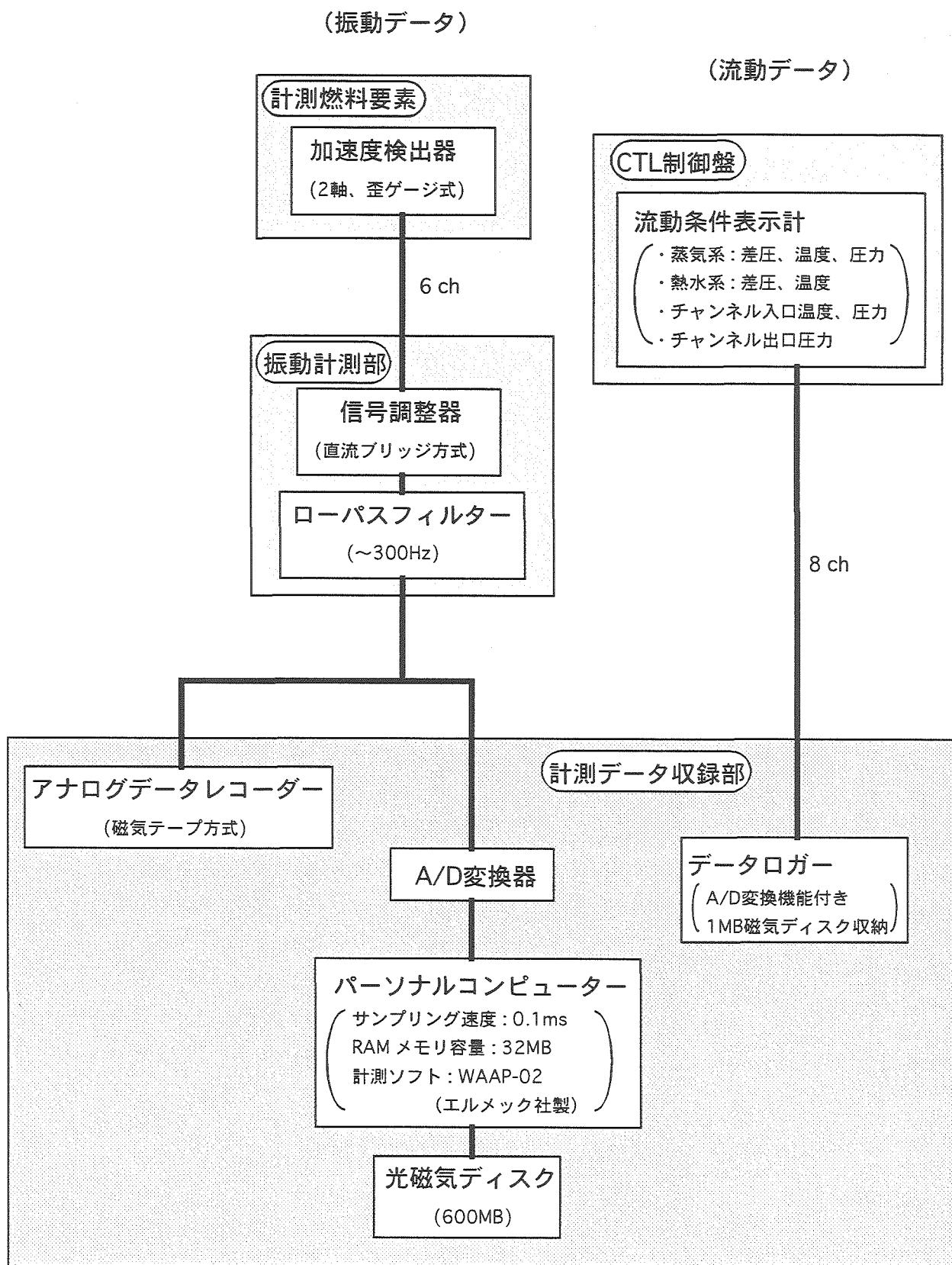
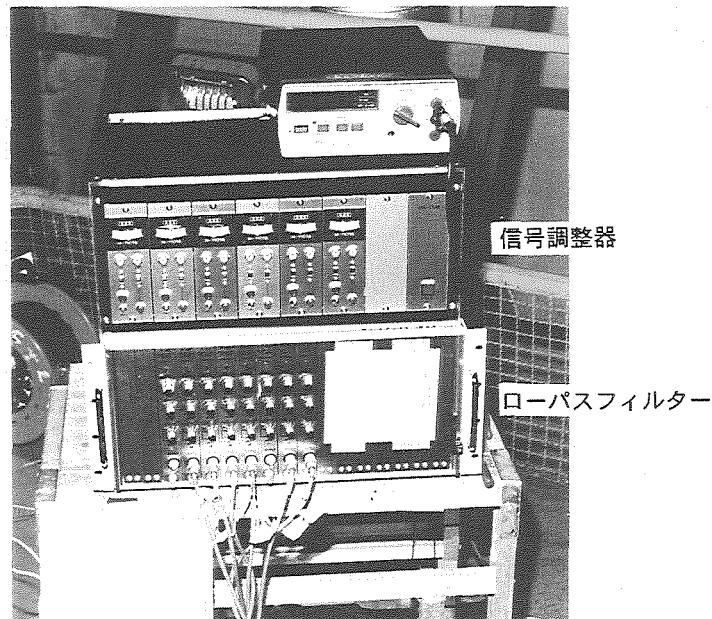


図2-11 振動データ処理装置のフロー図

a) 振動計測部



b) 計測データ収録部

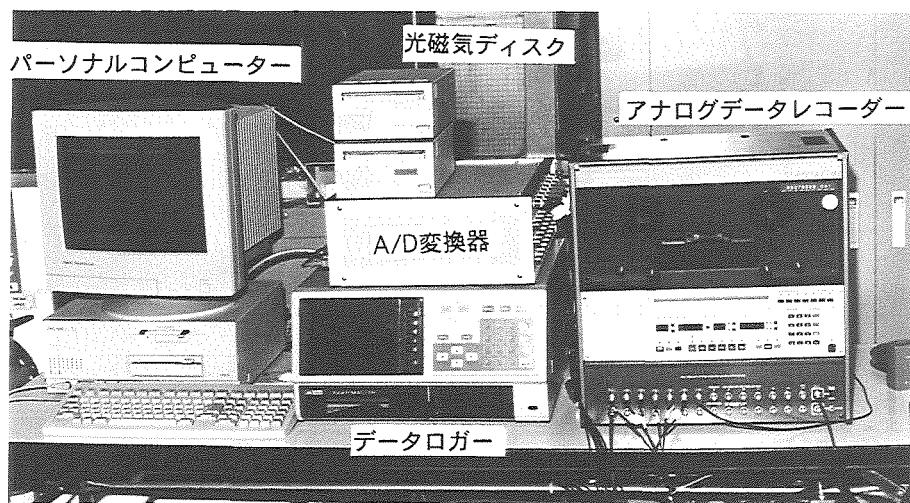


図2-12 振動データ処理装置の外観写真

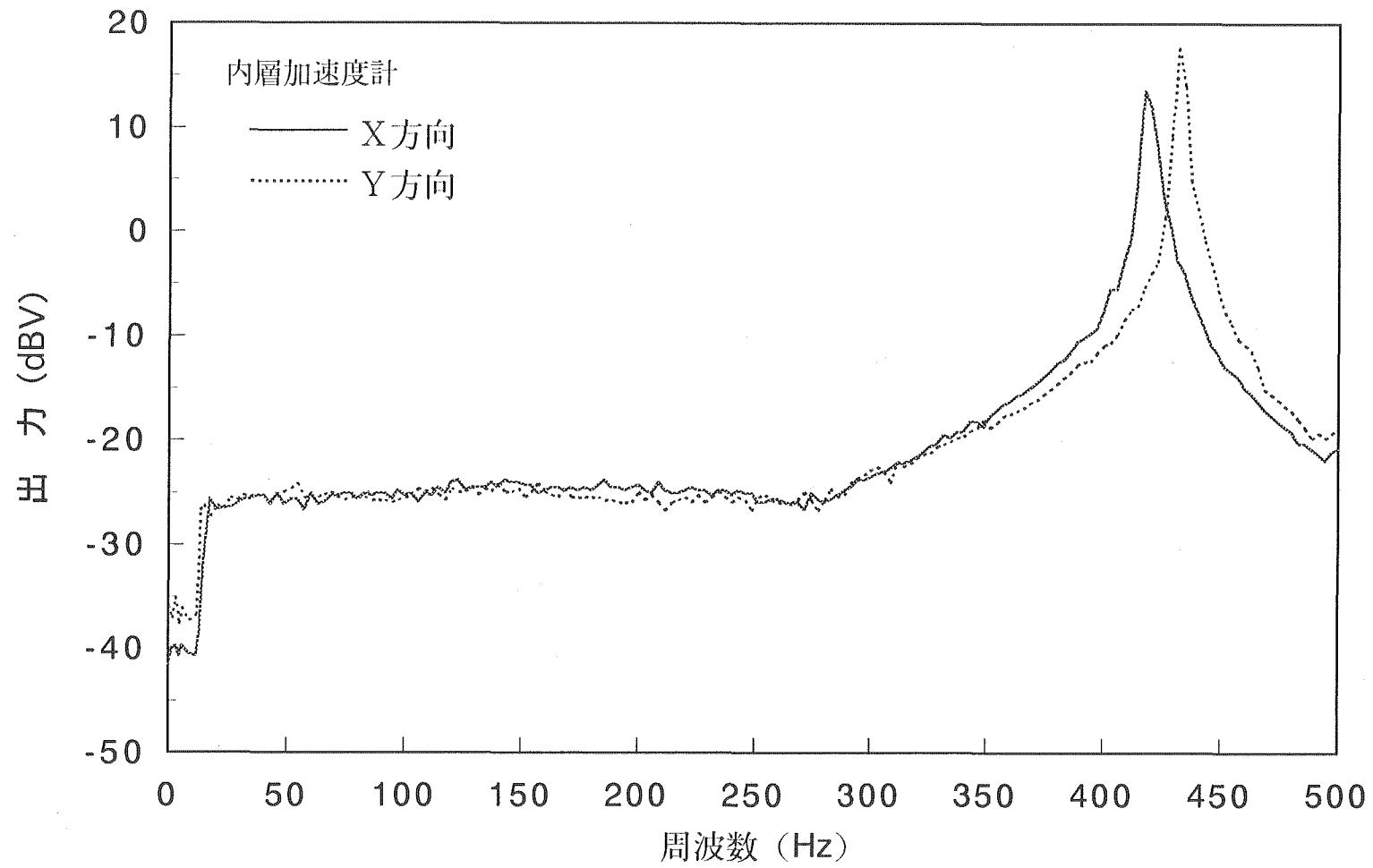


図3-1 加速度計の周波数特性

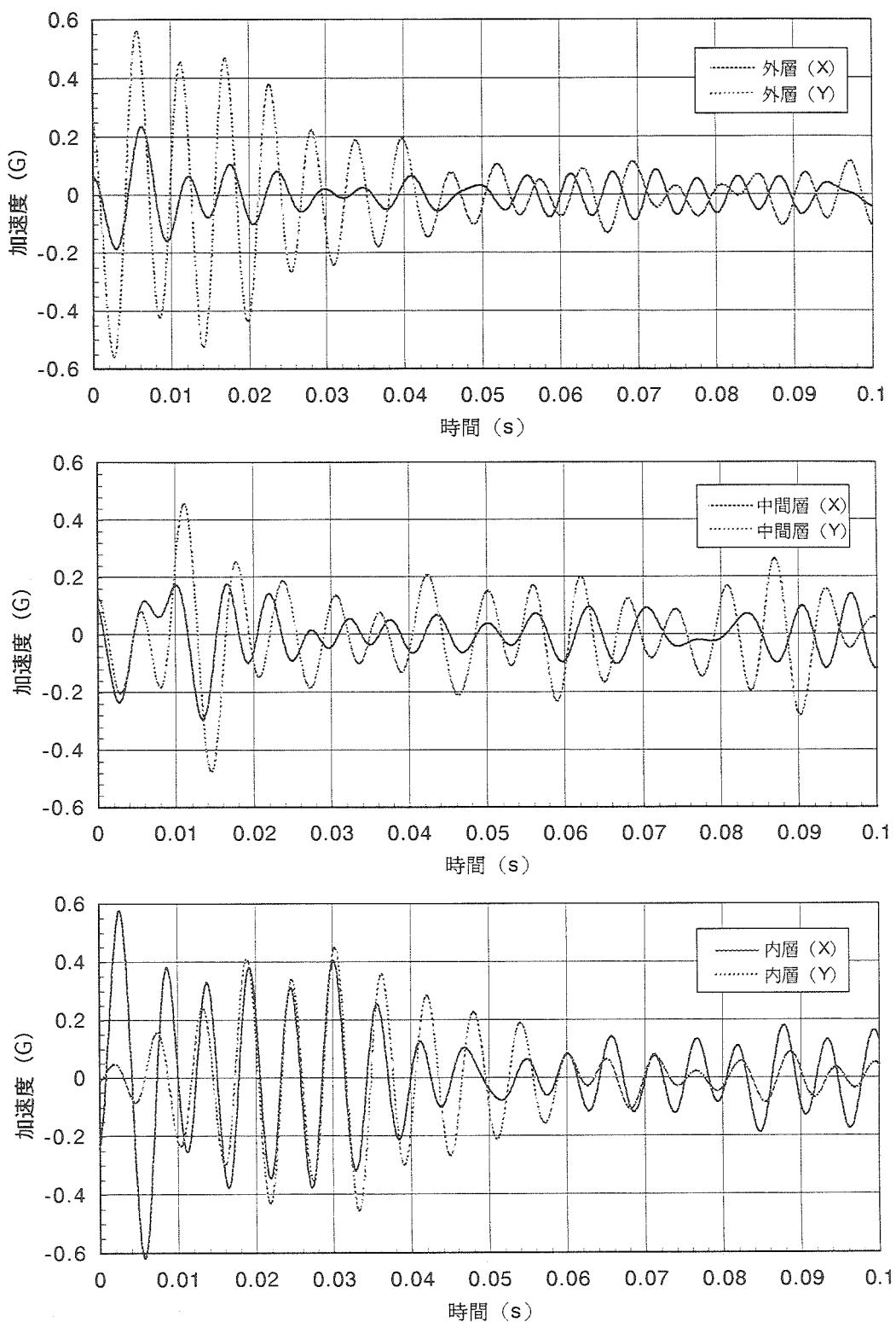


図4-1 気中振動波形
(打振方向:a)

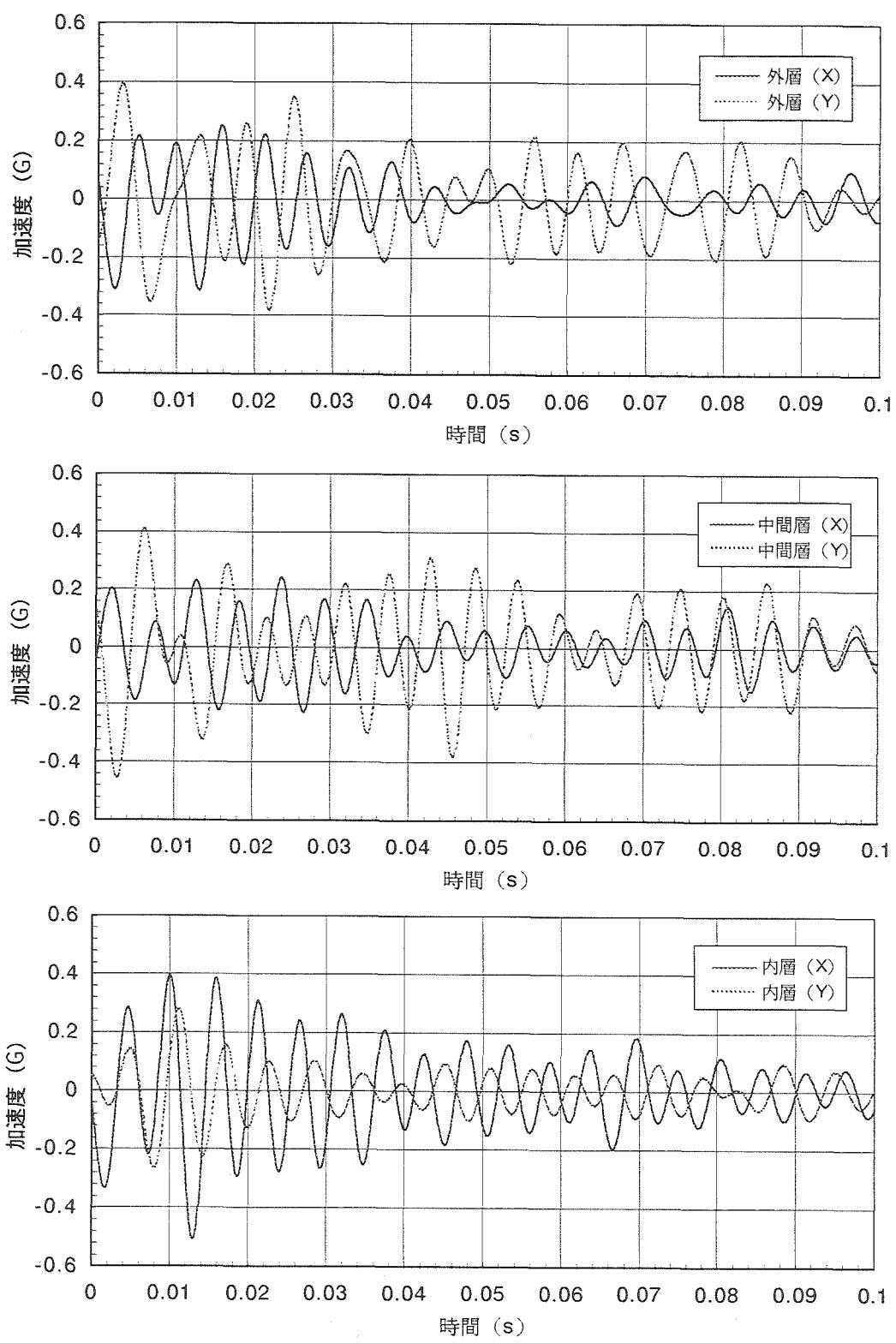


図4-2 気中振動波形
(打振方向:b)

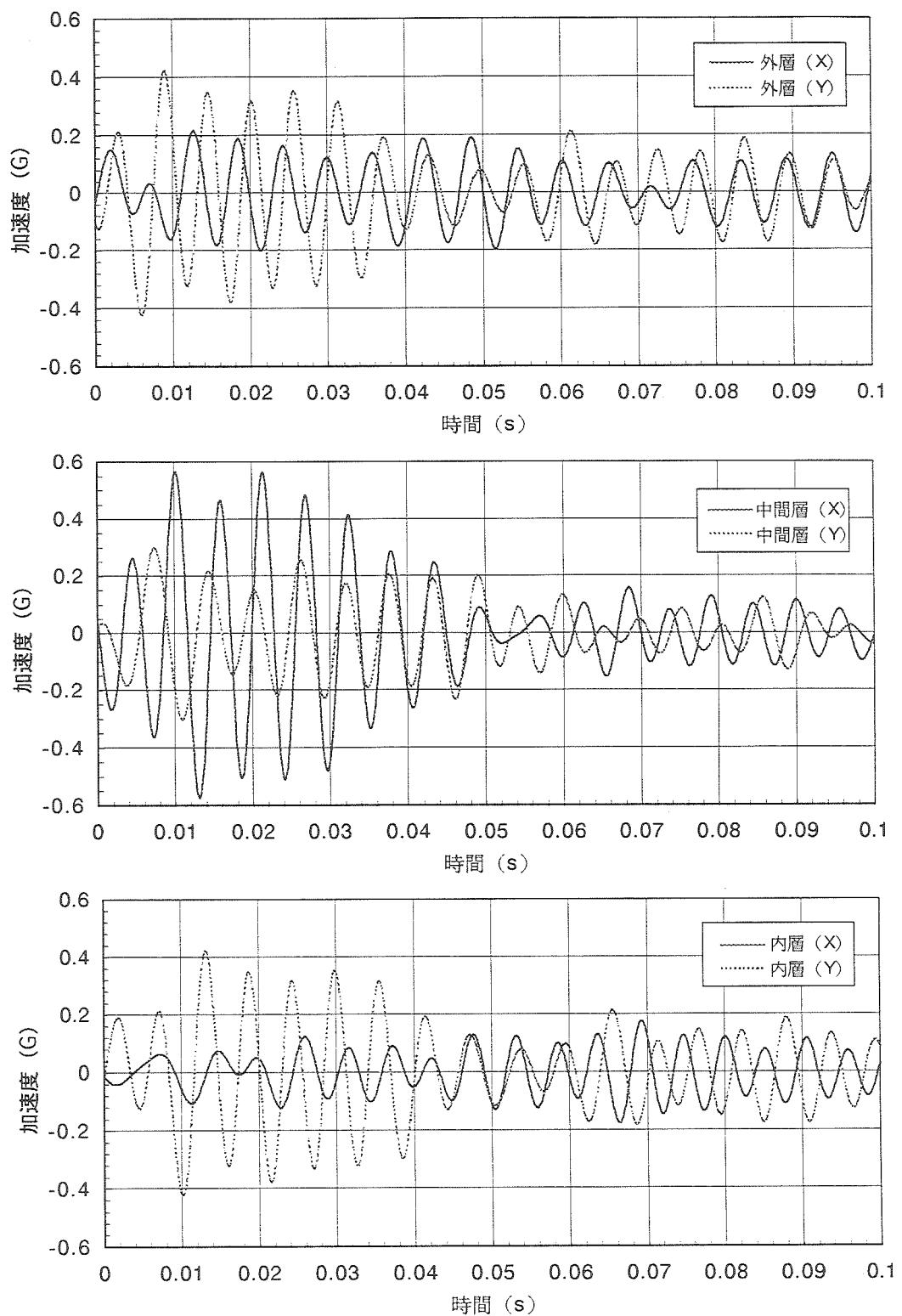


図4-3 気中振動波形
(打振方向:c)

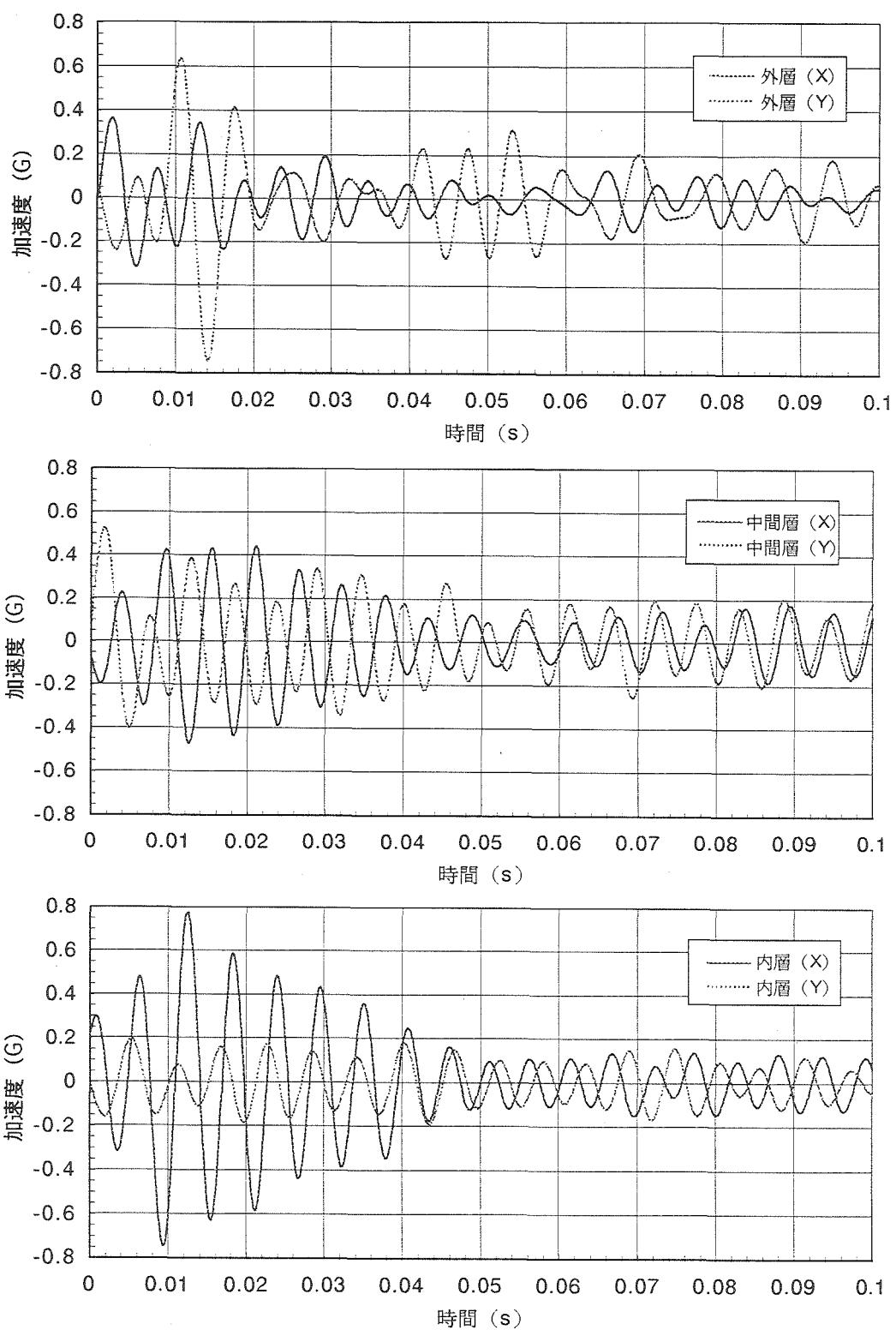


図4-4 気中振動波形
(打振方向:d)

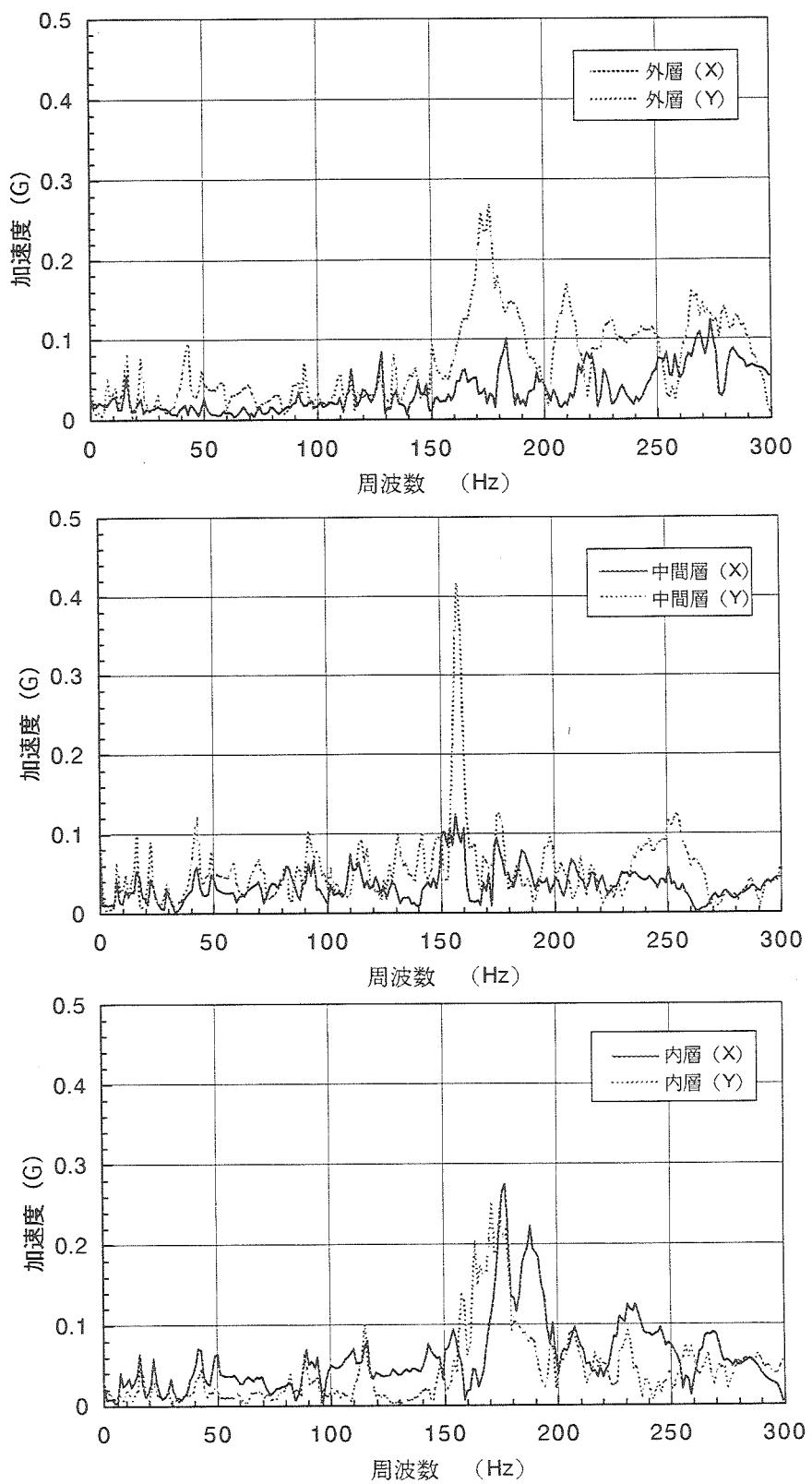


図4-5 気中振動のパワースペクトル
(打振方向:a)

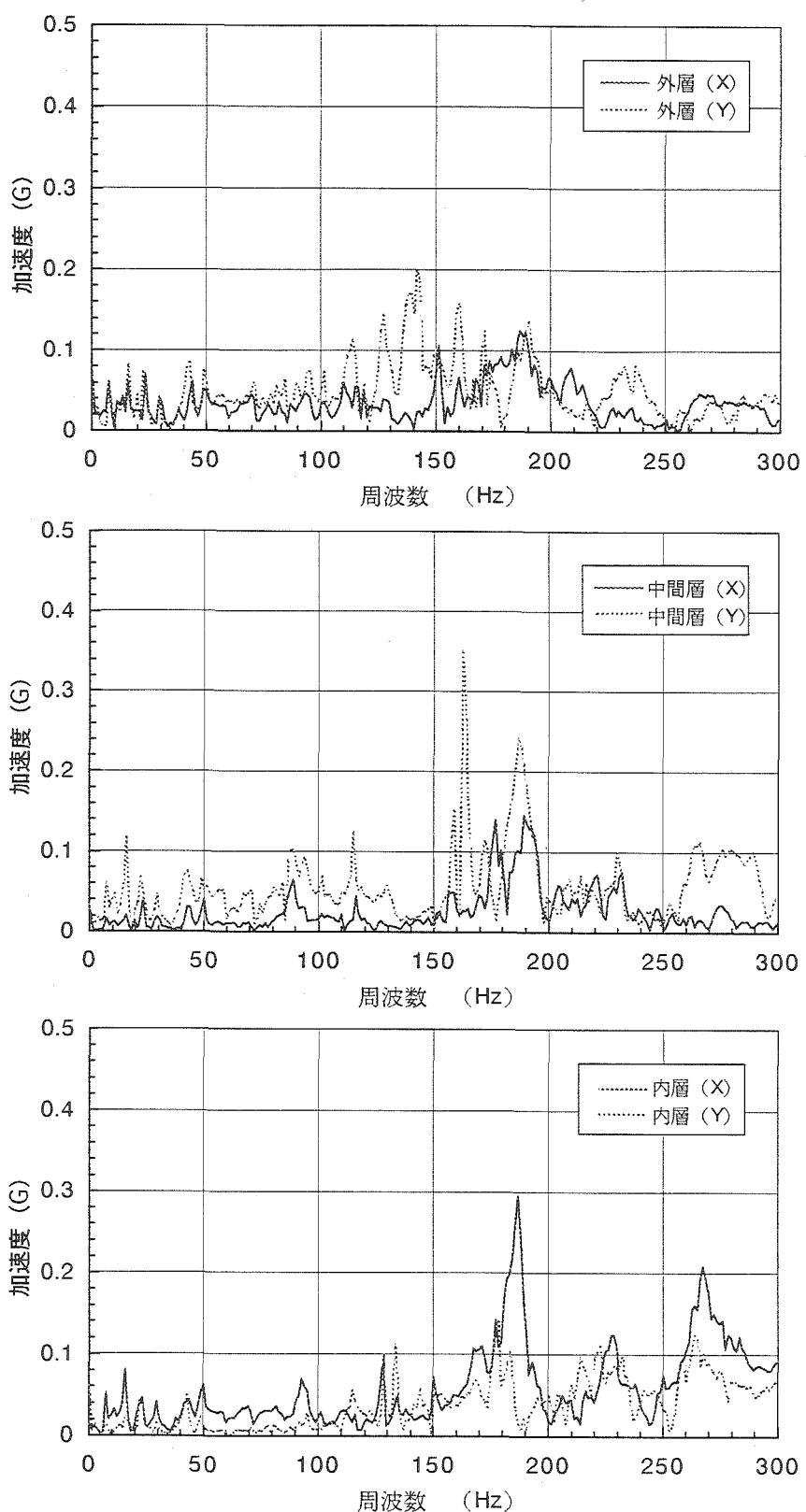


図4-6 気中振動のパワースペクトル
(打振方向:b)

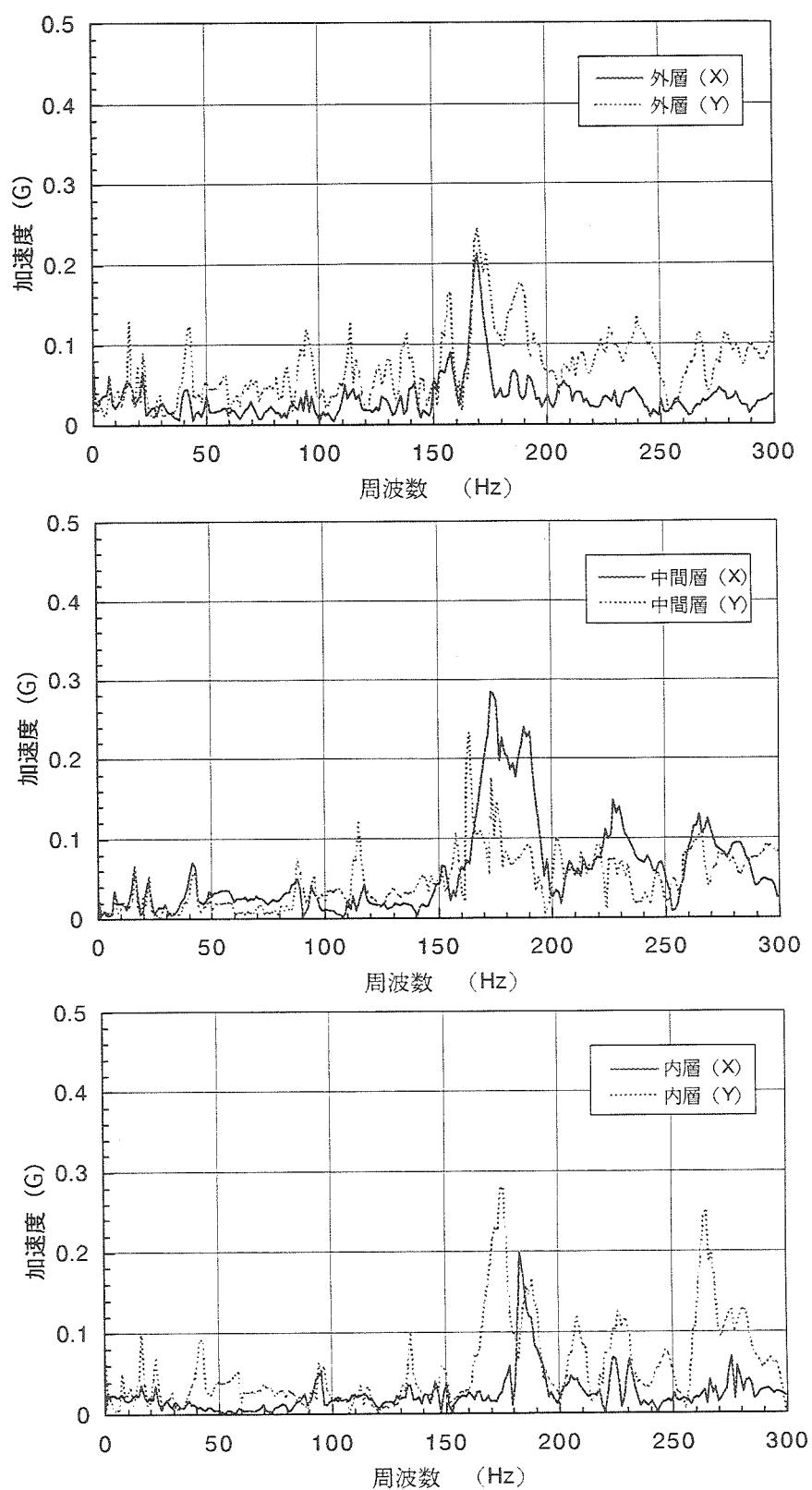


図4-7 気中振動のパワースペクトル
(打振方向:c)

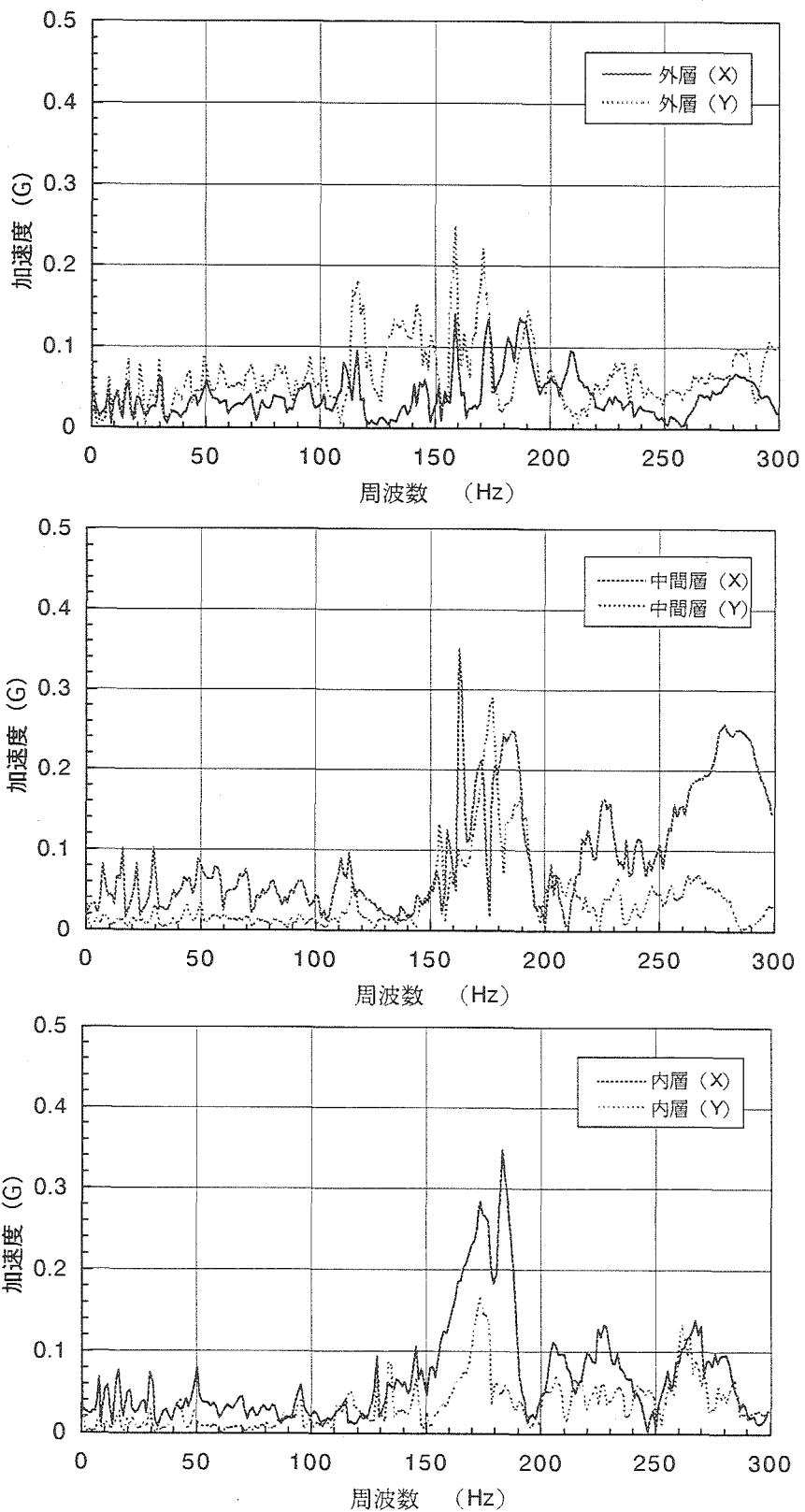


図4-8 気中振動のパワースペクトル
(打振方向:d)

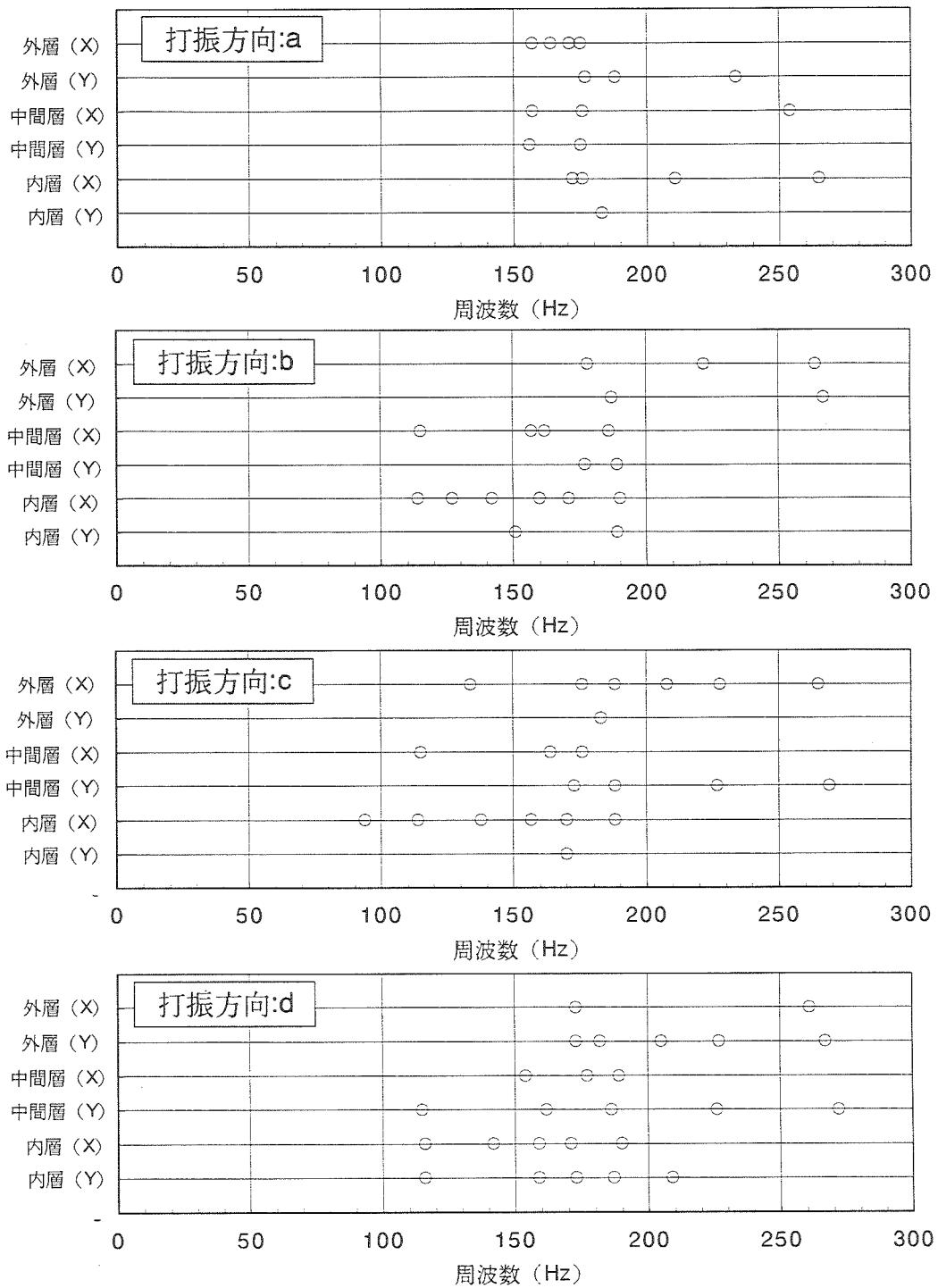


図4-9 気中振動における卓越周波数

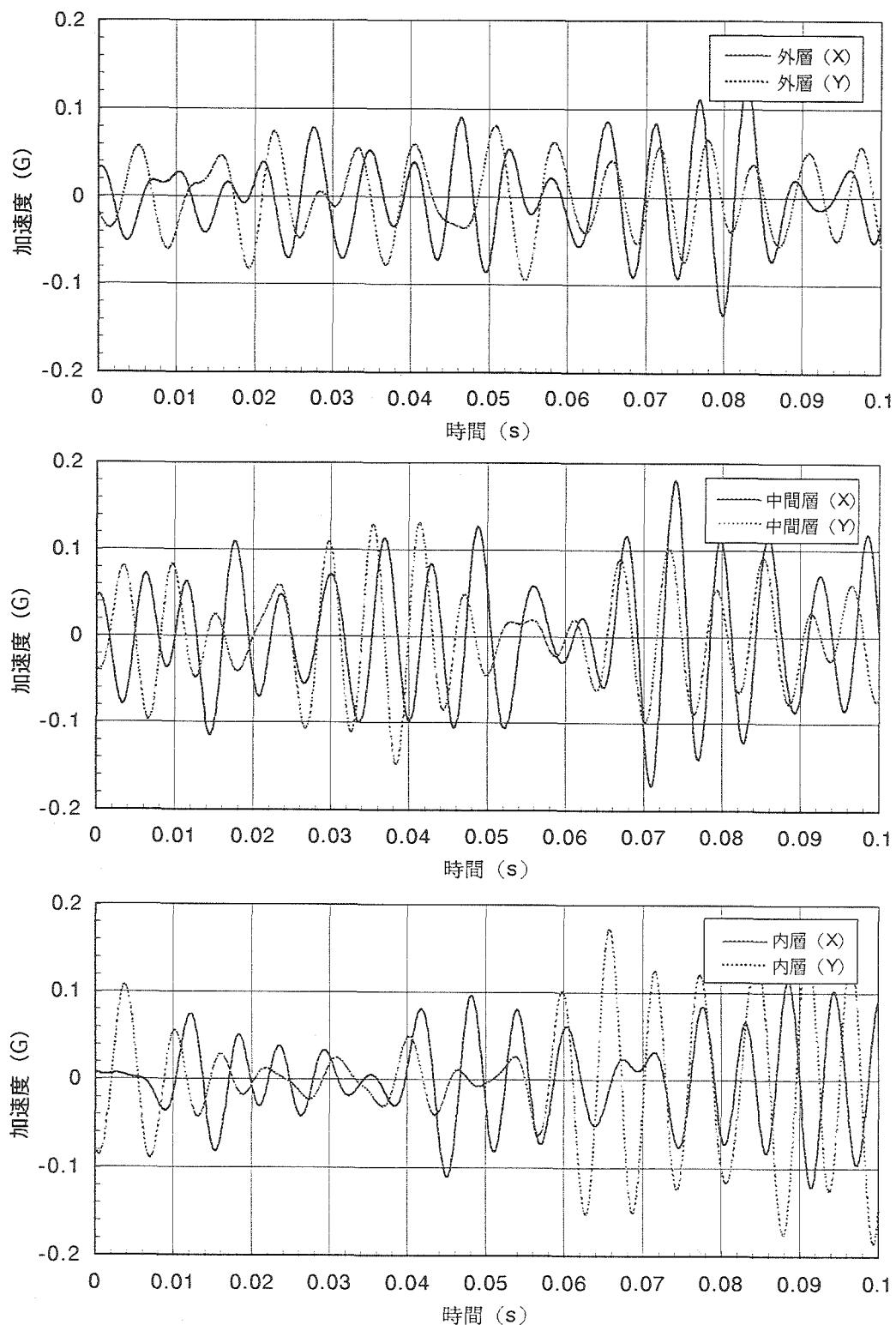


図4-10 流力振動波形 (No.13)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 15%

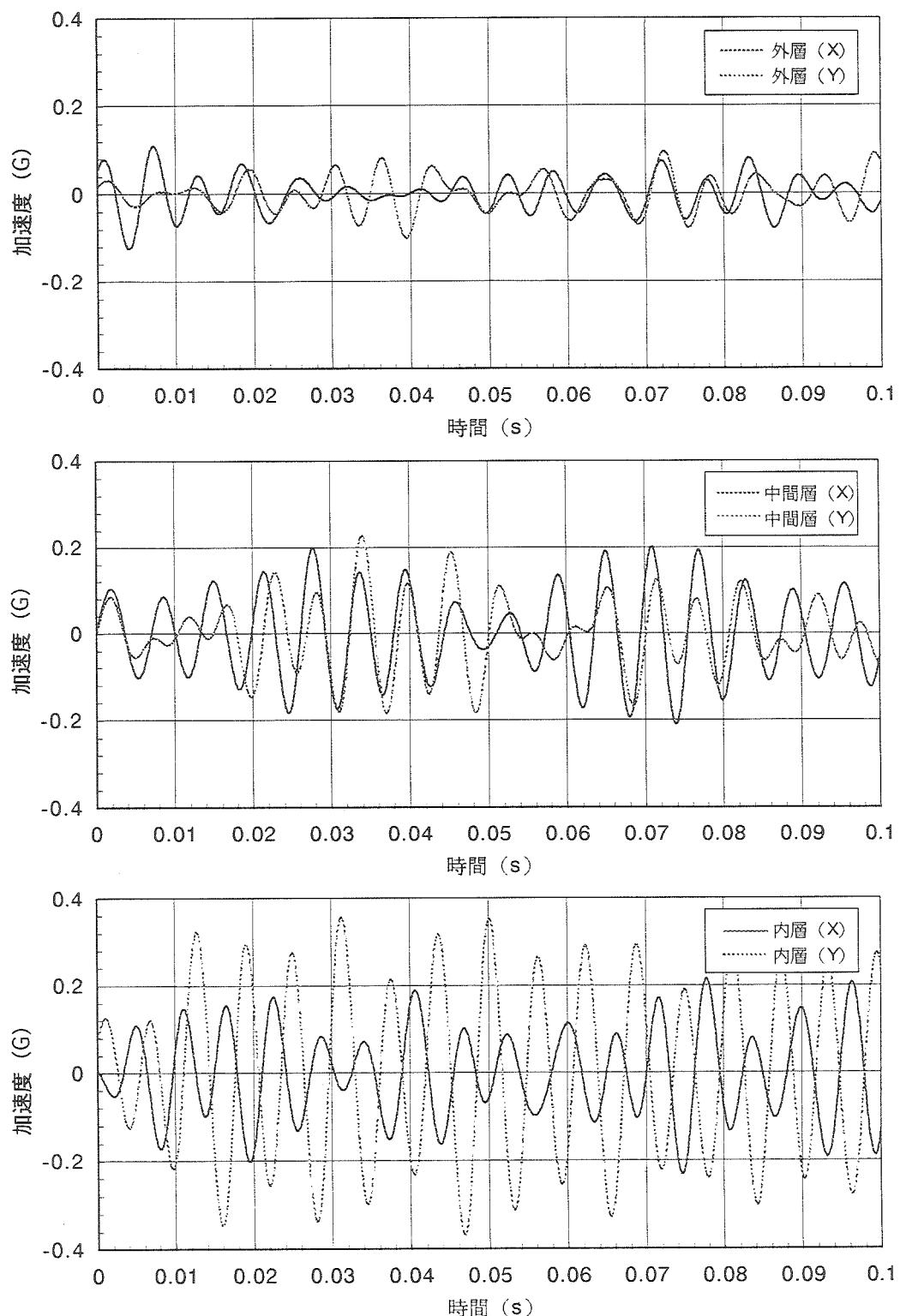


図4-11 流力振動波形 (No.15)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 22%

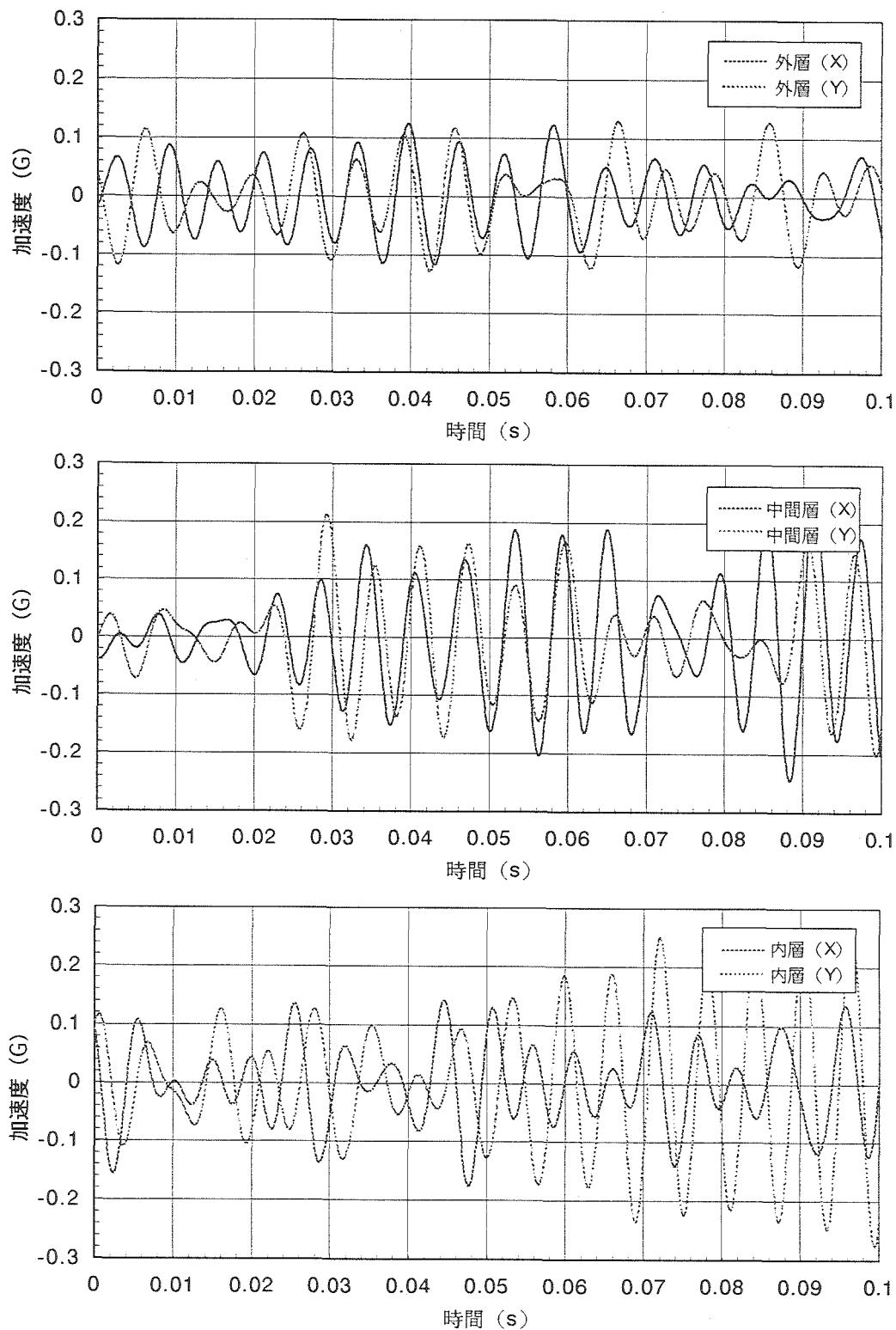


図4-12 流力振動波形 (No.22)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 15 %

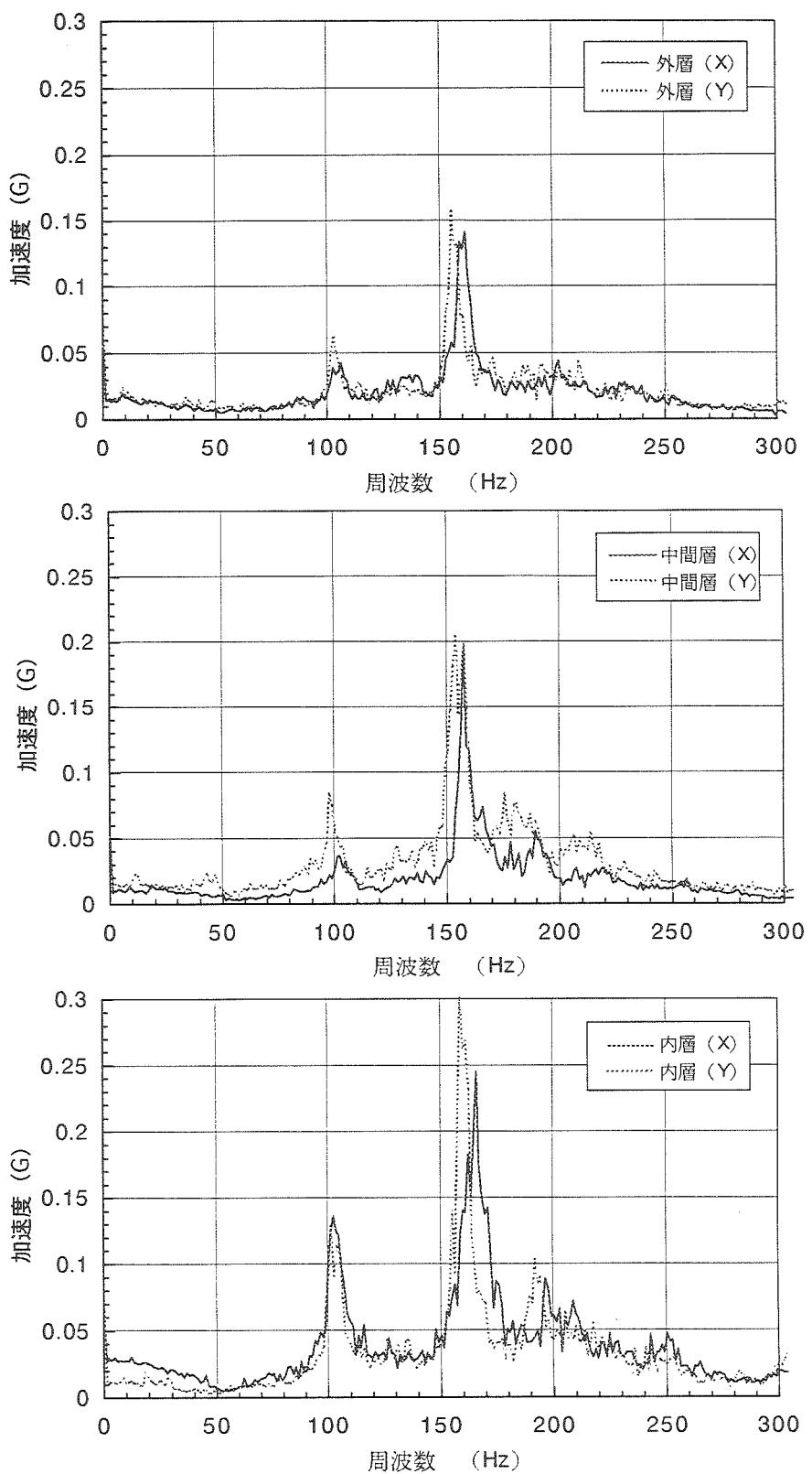


図4-13 流力振動のパワースペクトル (No.1)

総流量 : 24t/h

蒸気重量率 : 5%

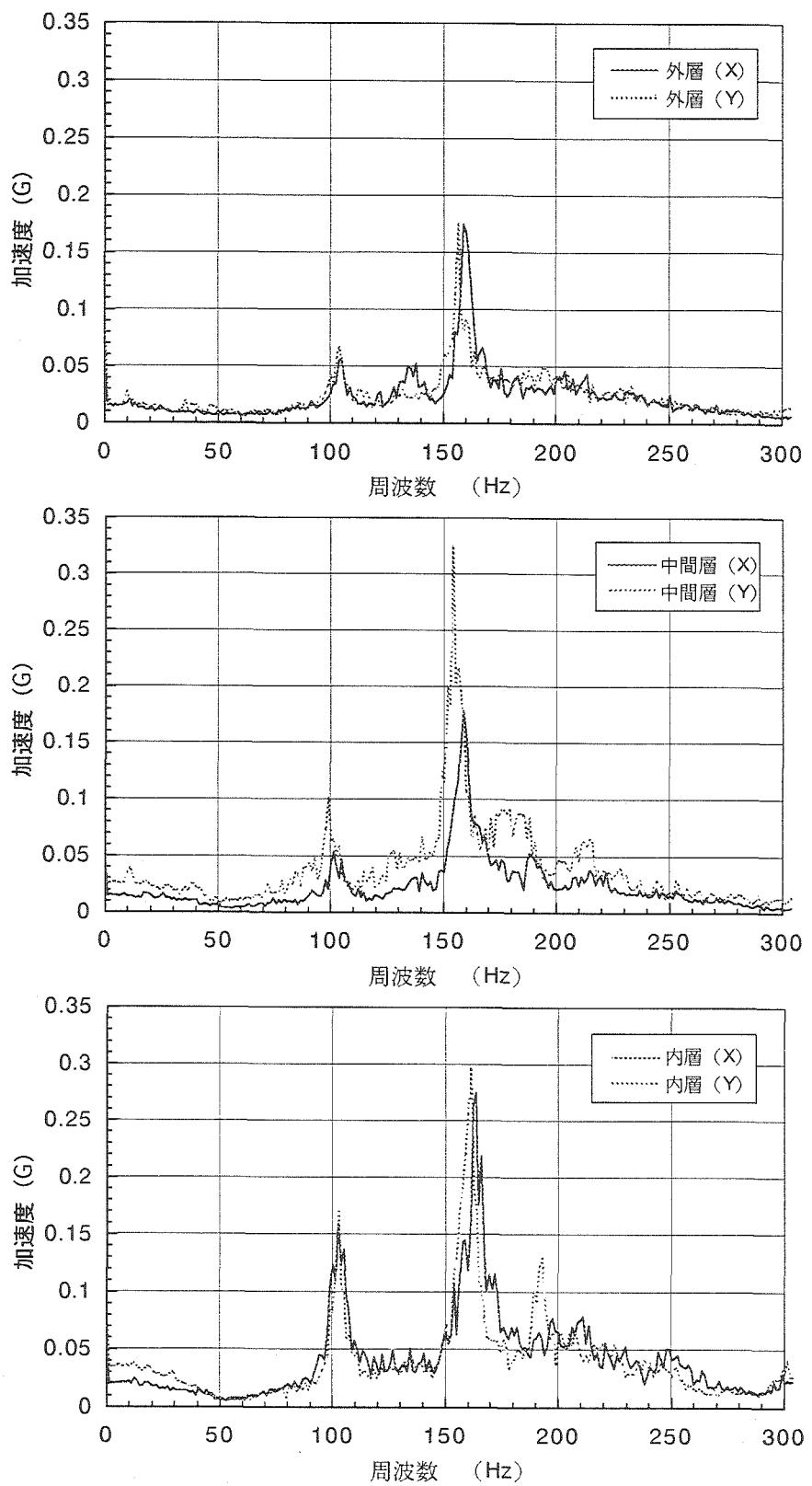


図4-14 流力振動のパワースペクトル (No.2)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 5%

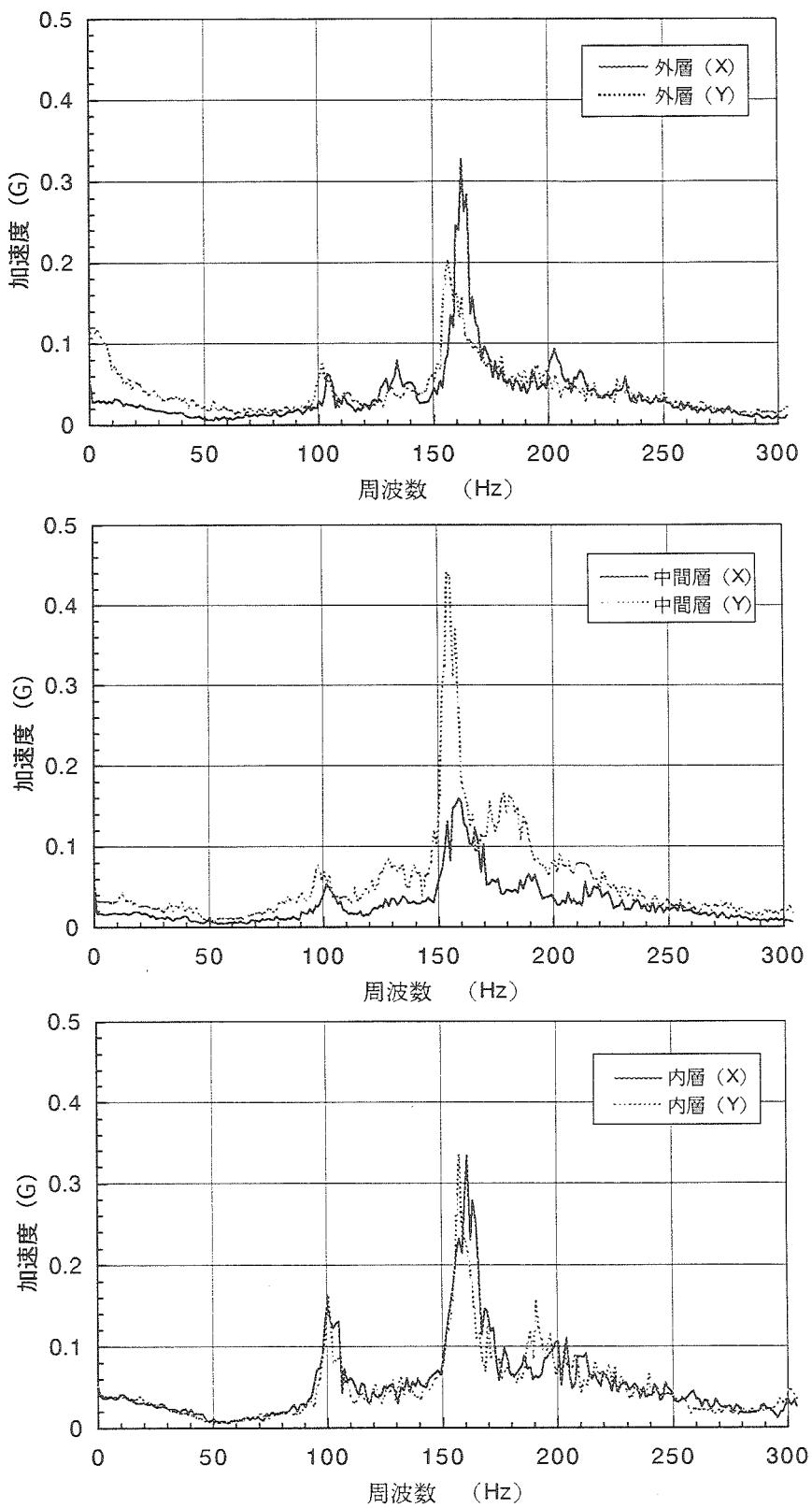


図4-15 流力振動のパワースペクトル (No.3)

総流量 : 45t/h

蒸気重量率 : 5%

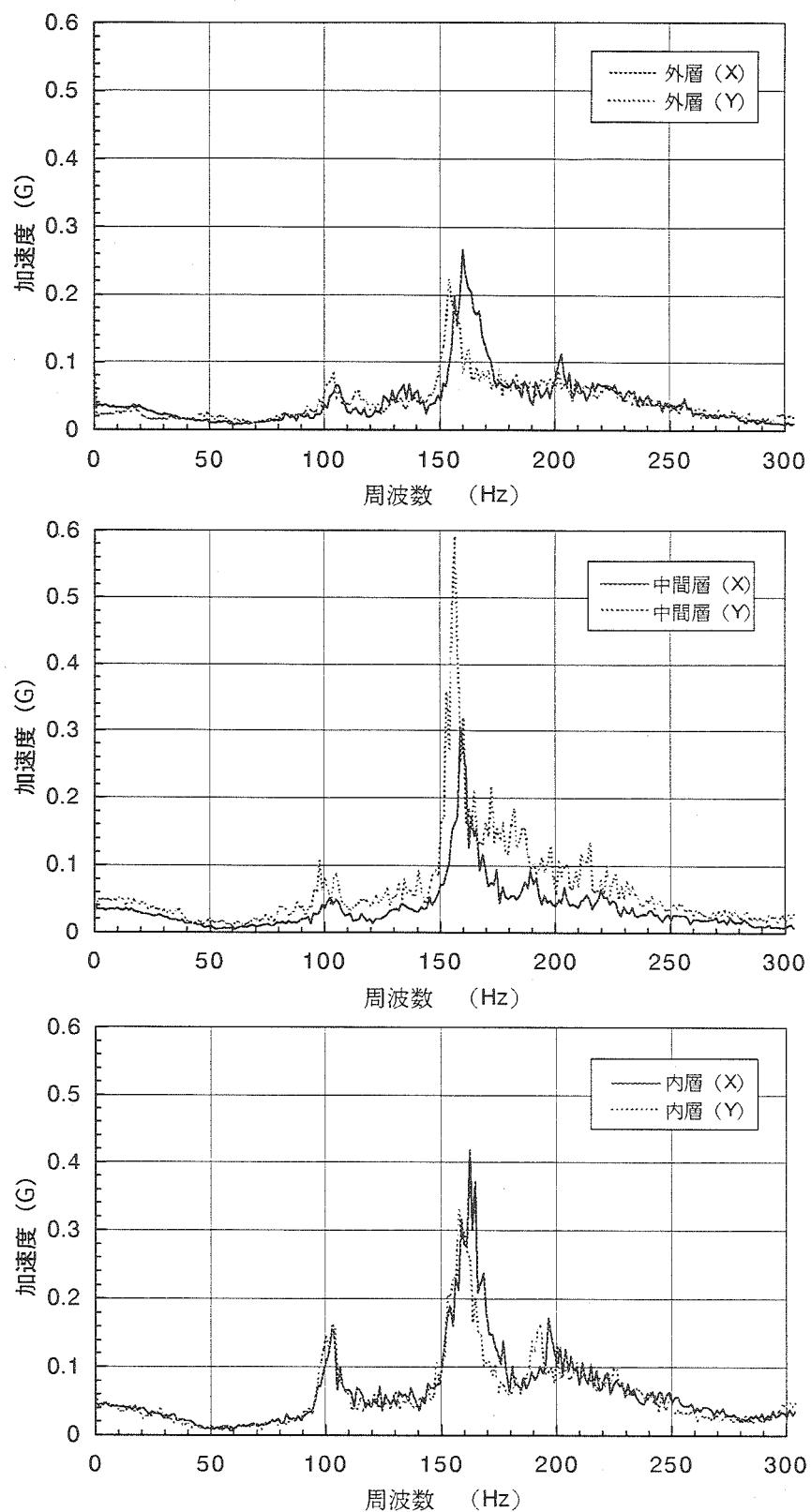


図4-16 流力振動のパワースペクトル (No.4)

総流量 : 55t/h

蒸気重量率 : 5%

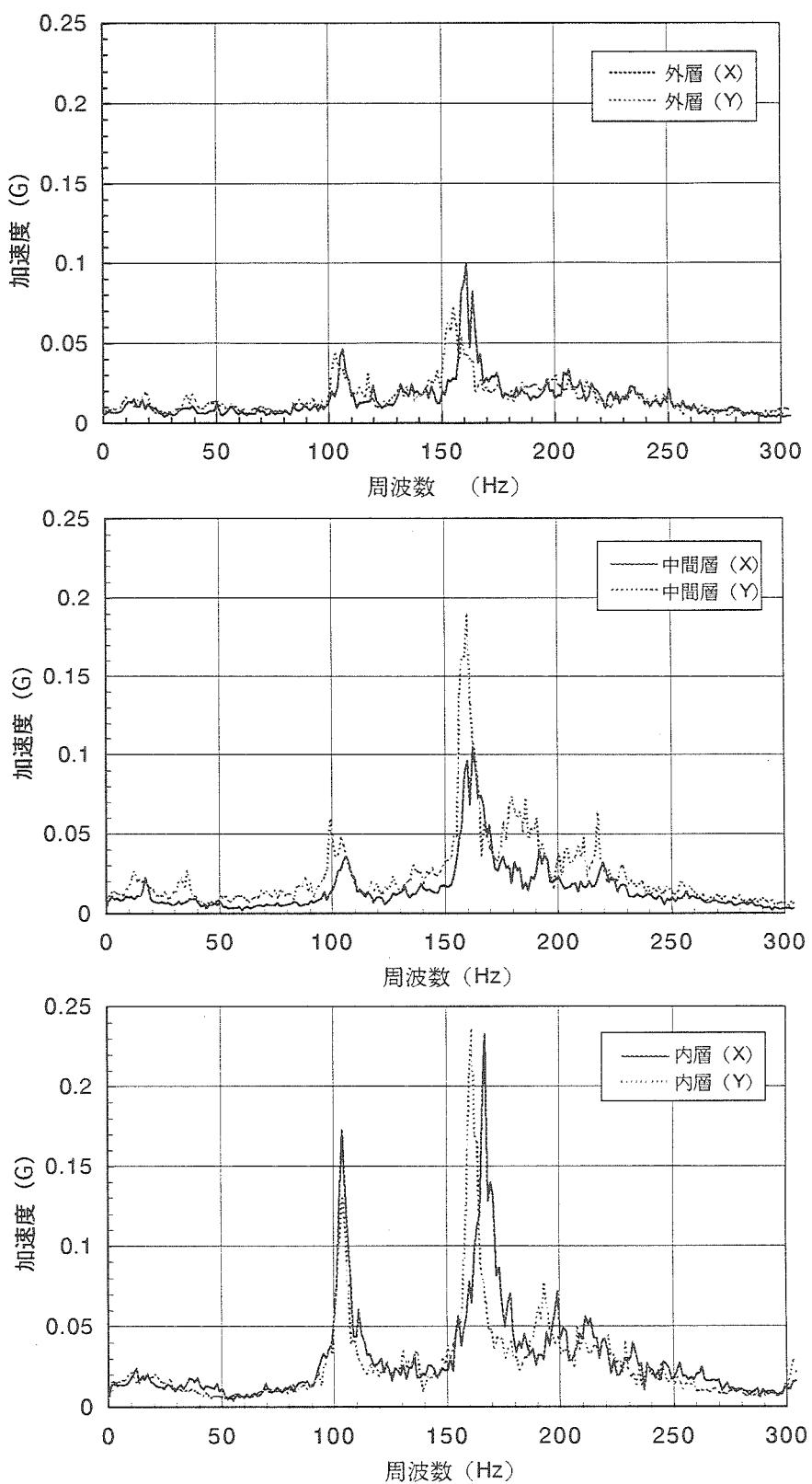


図4-17 流力振動のパワースペクトル (No.5)

総流量 : 15t/h
蒸気重量率 : 10%

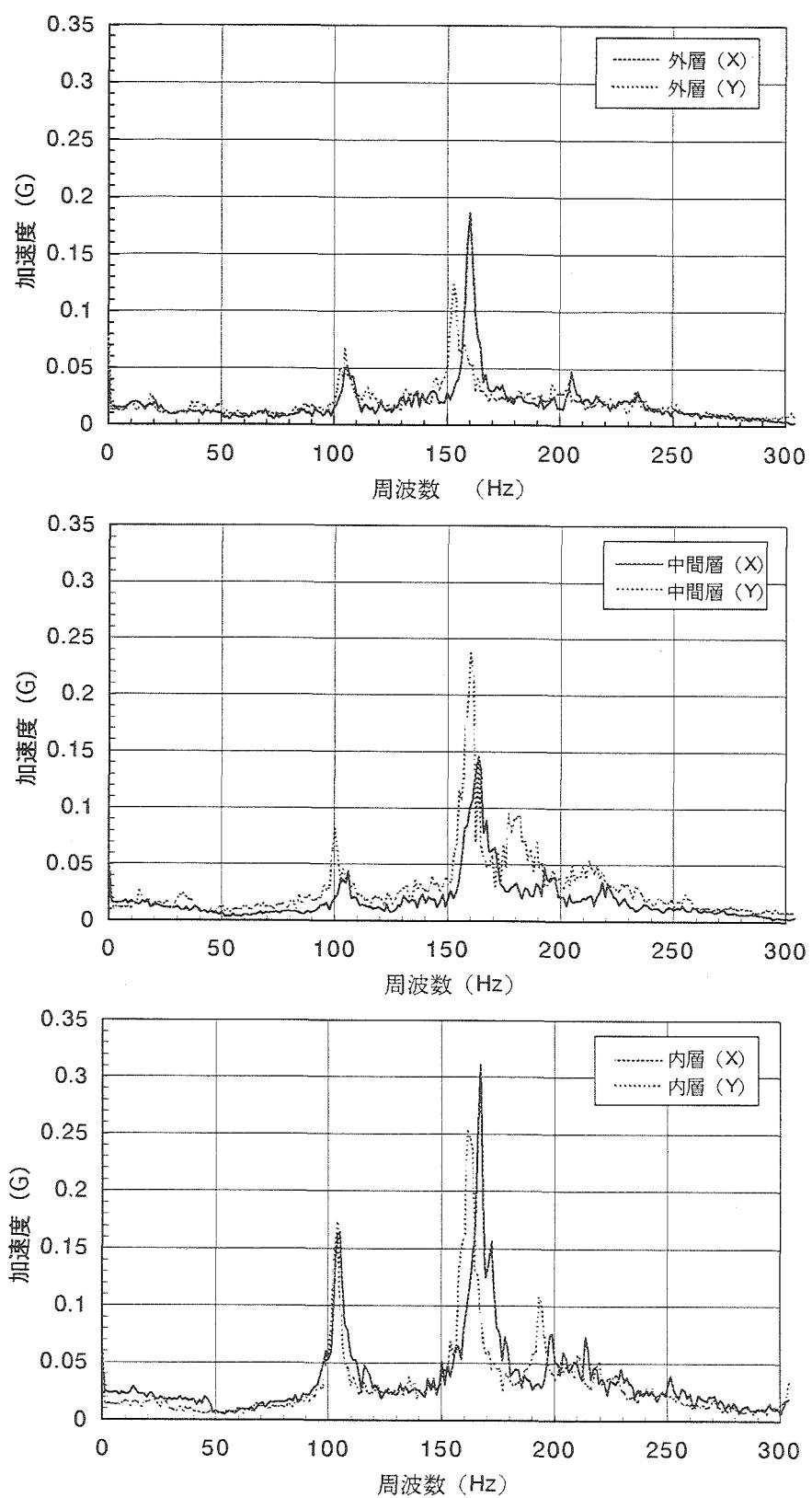


図4-18 流力振動のパワースペクトル (No.6)

総流量 : 20t/h

蒸気重量率 : 10%

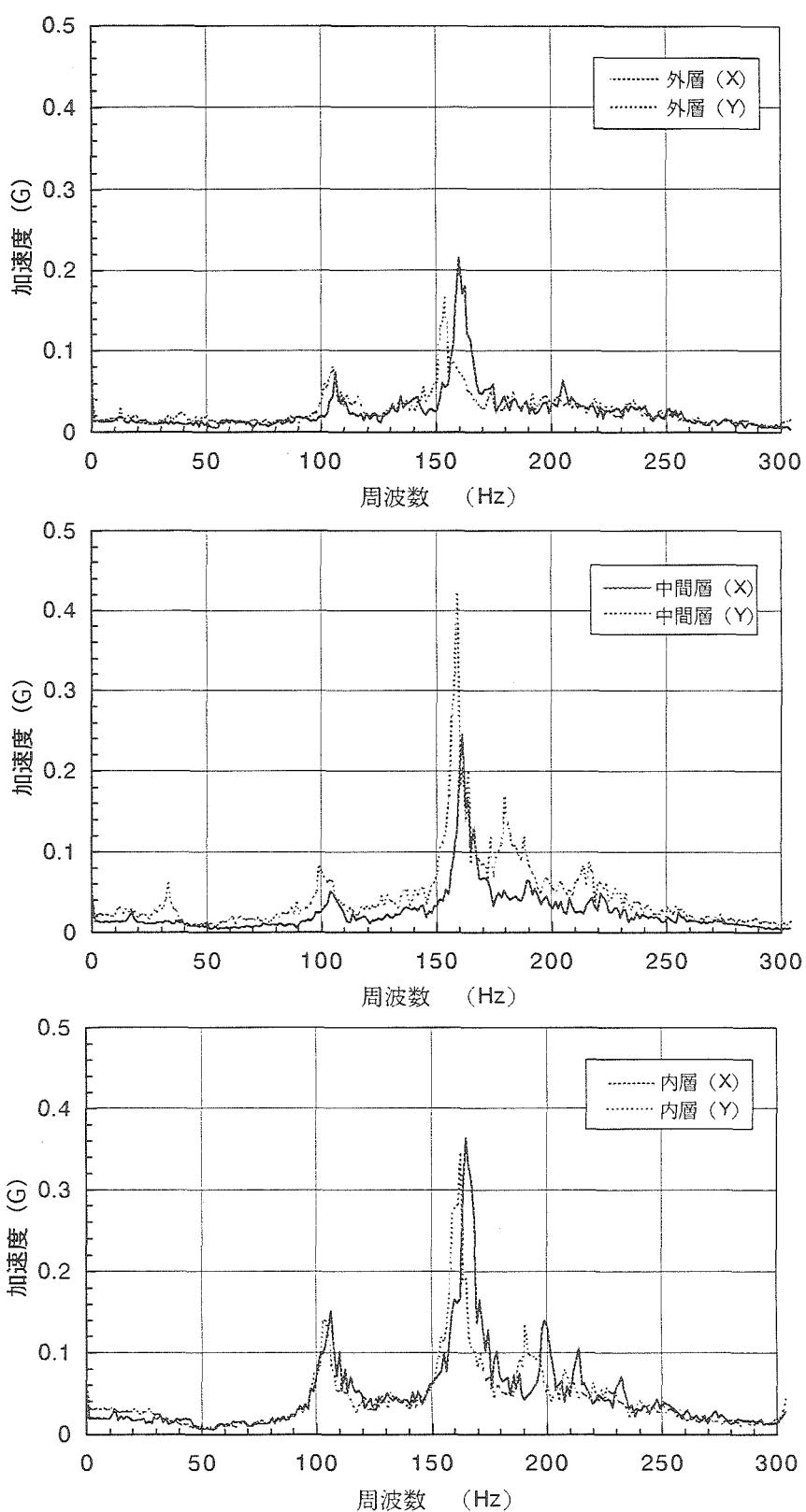


図4-19 流力振動のパワースペクトル (No.7)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 10%

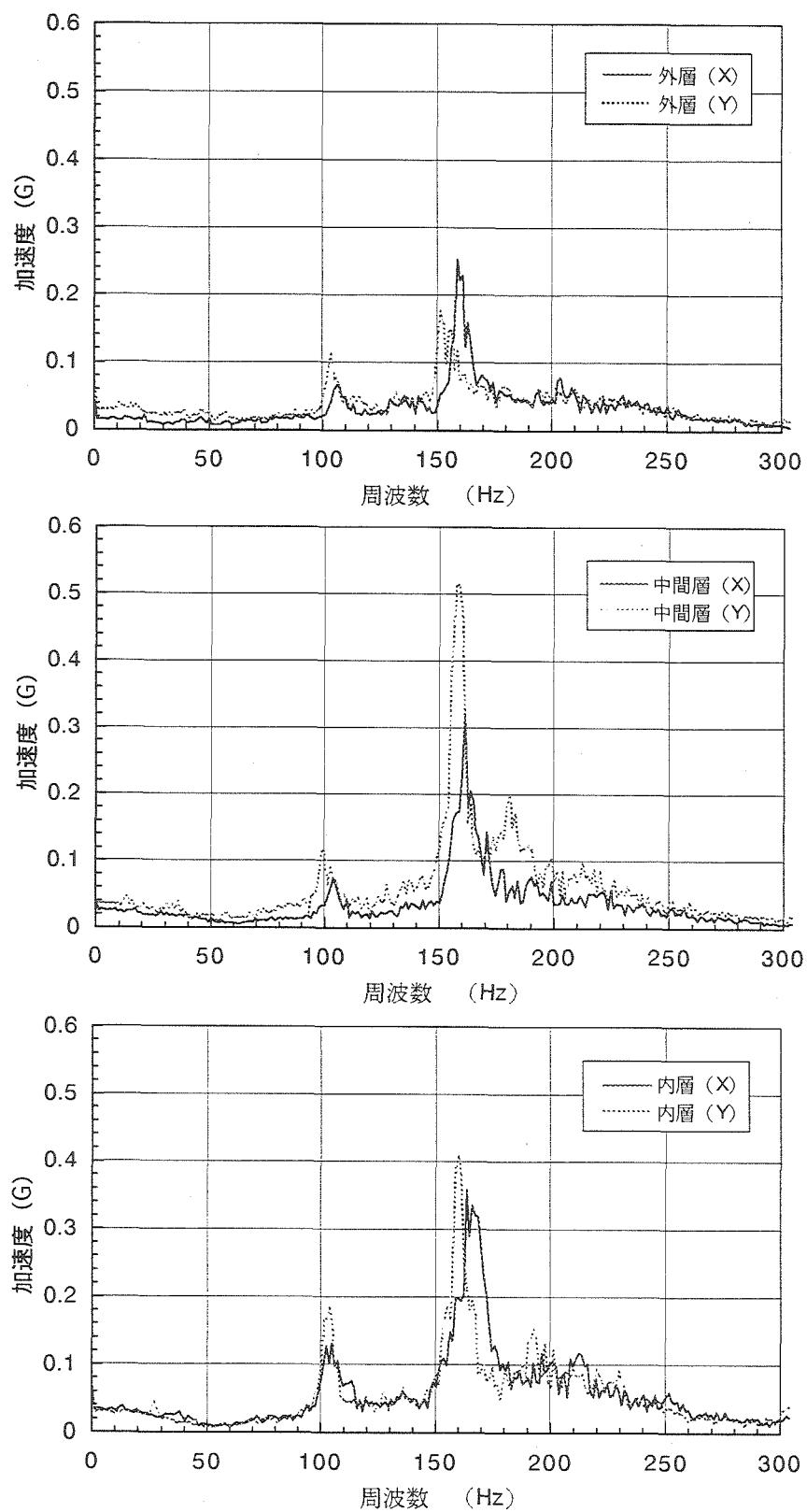


図4-20 流力振動のパワースペクトル (No.8)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 10%

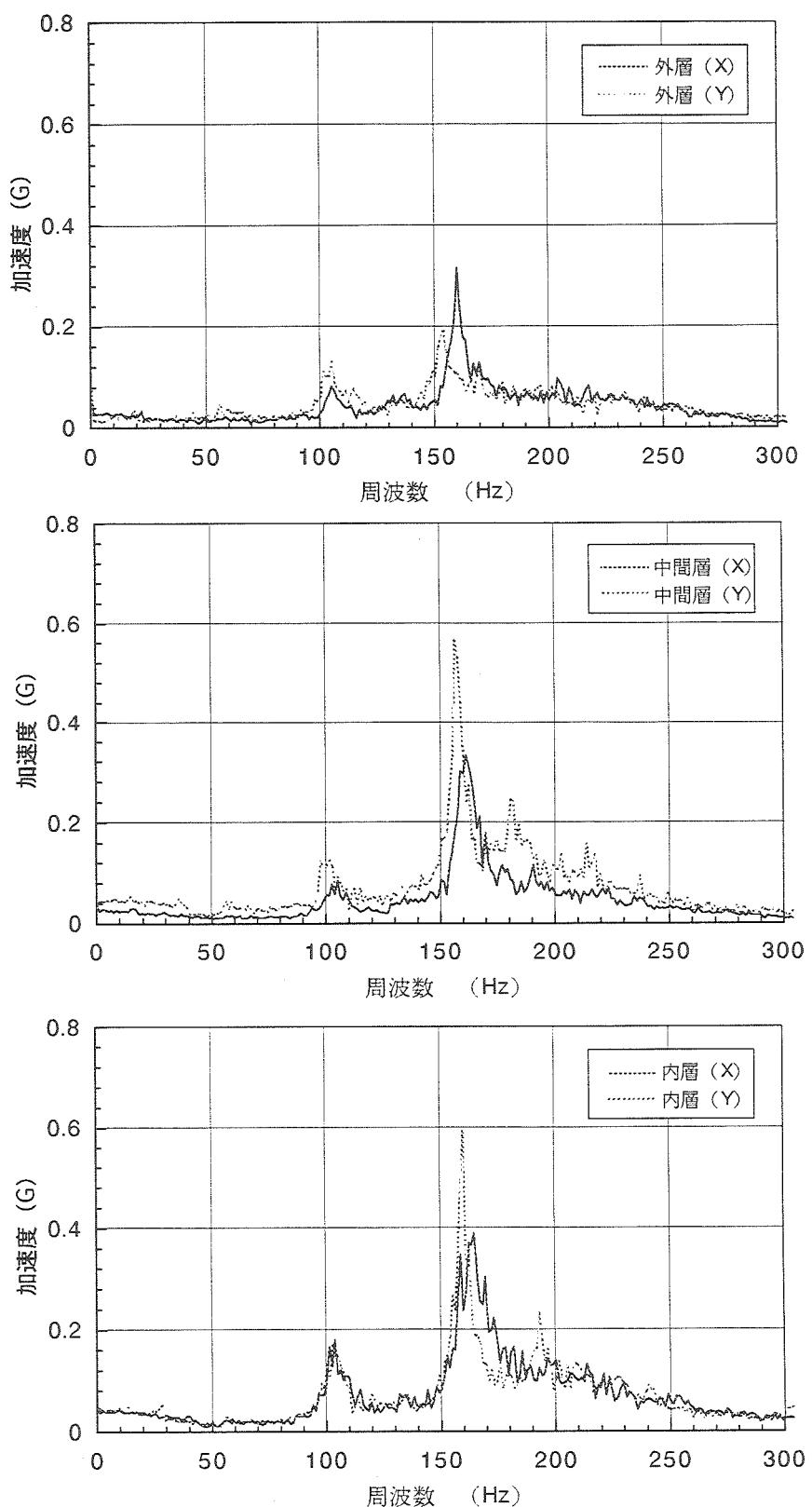


図4-21 流力振動のパワースペクトル (No.9)

総流量 : 50t/h

蒸気重量率 : 10%

加速度計不調のため
内層データ採取できず

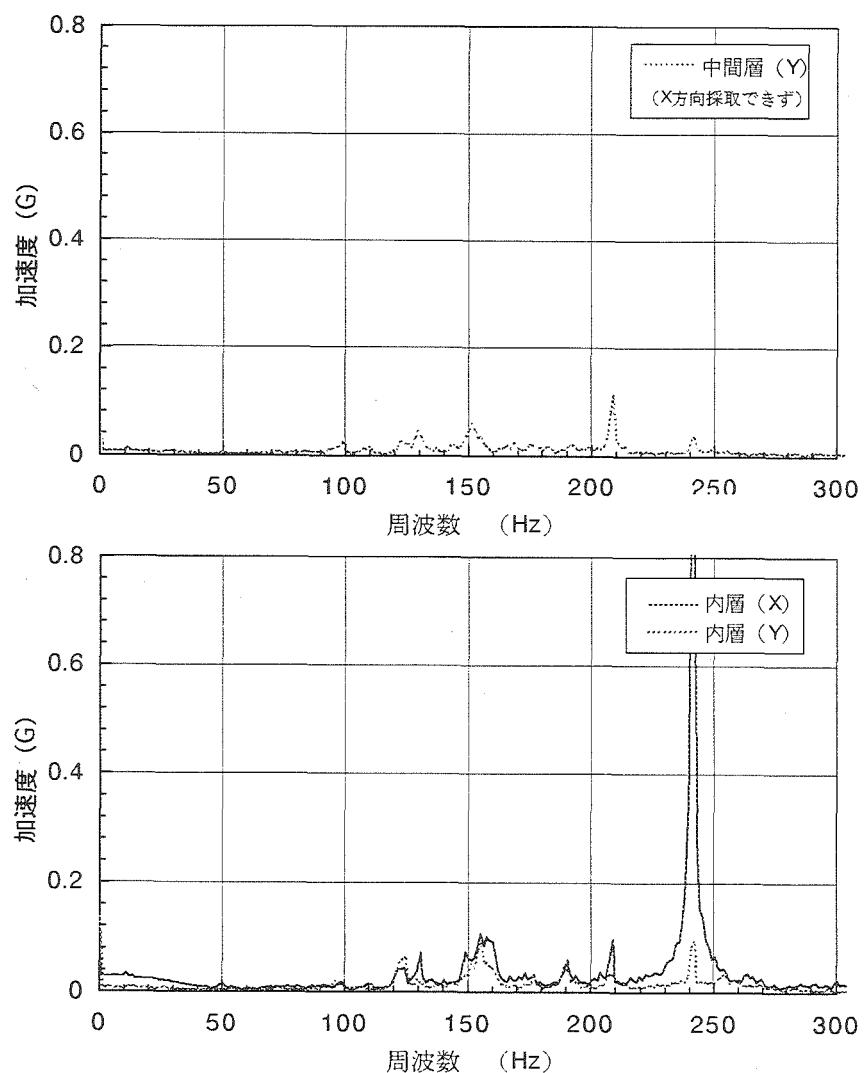


図4-22 流力振動のパワースペクトル (No.10)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 0%

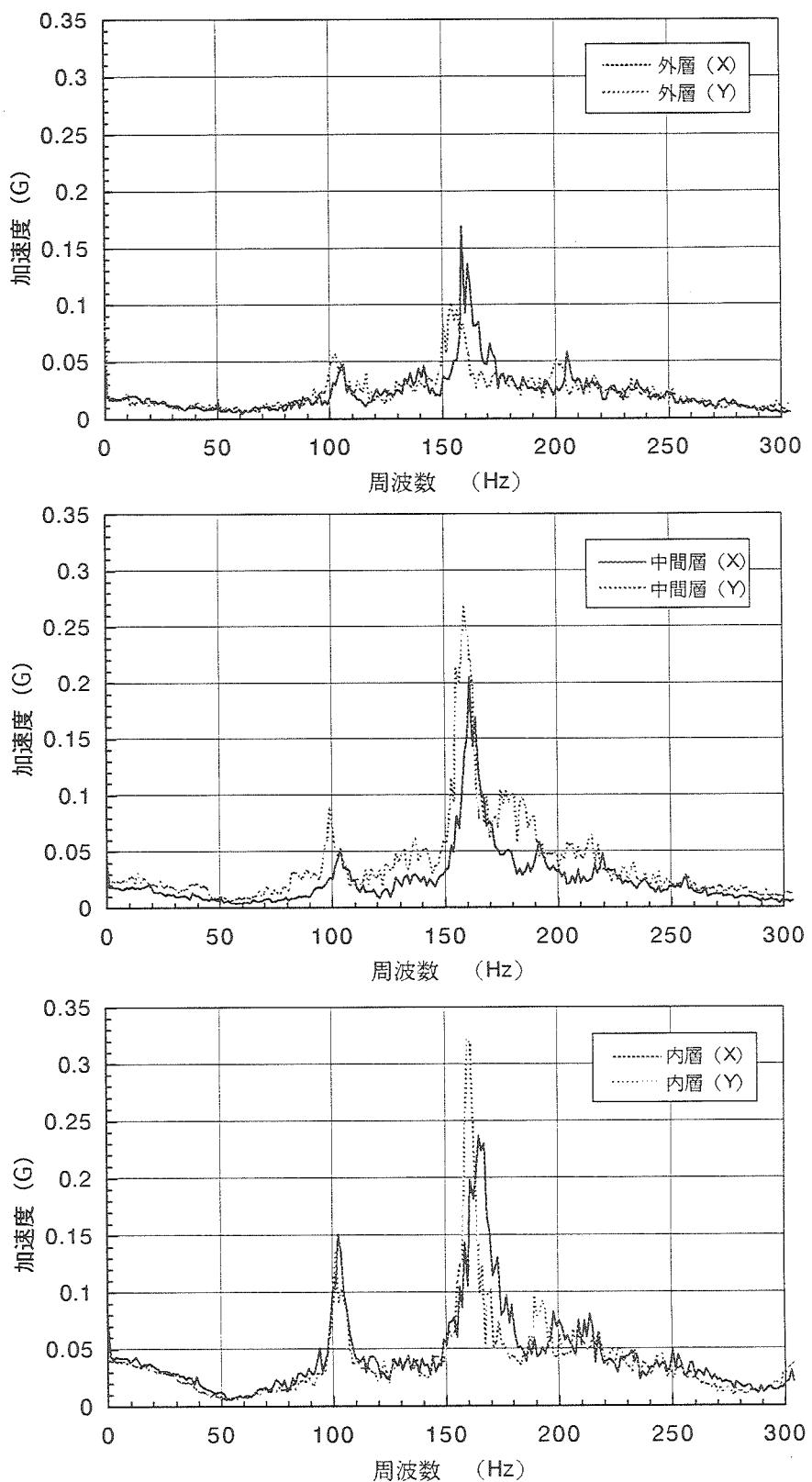


図4-23 流力振動のパワースペクトル (No.11)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 5%

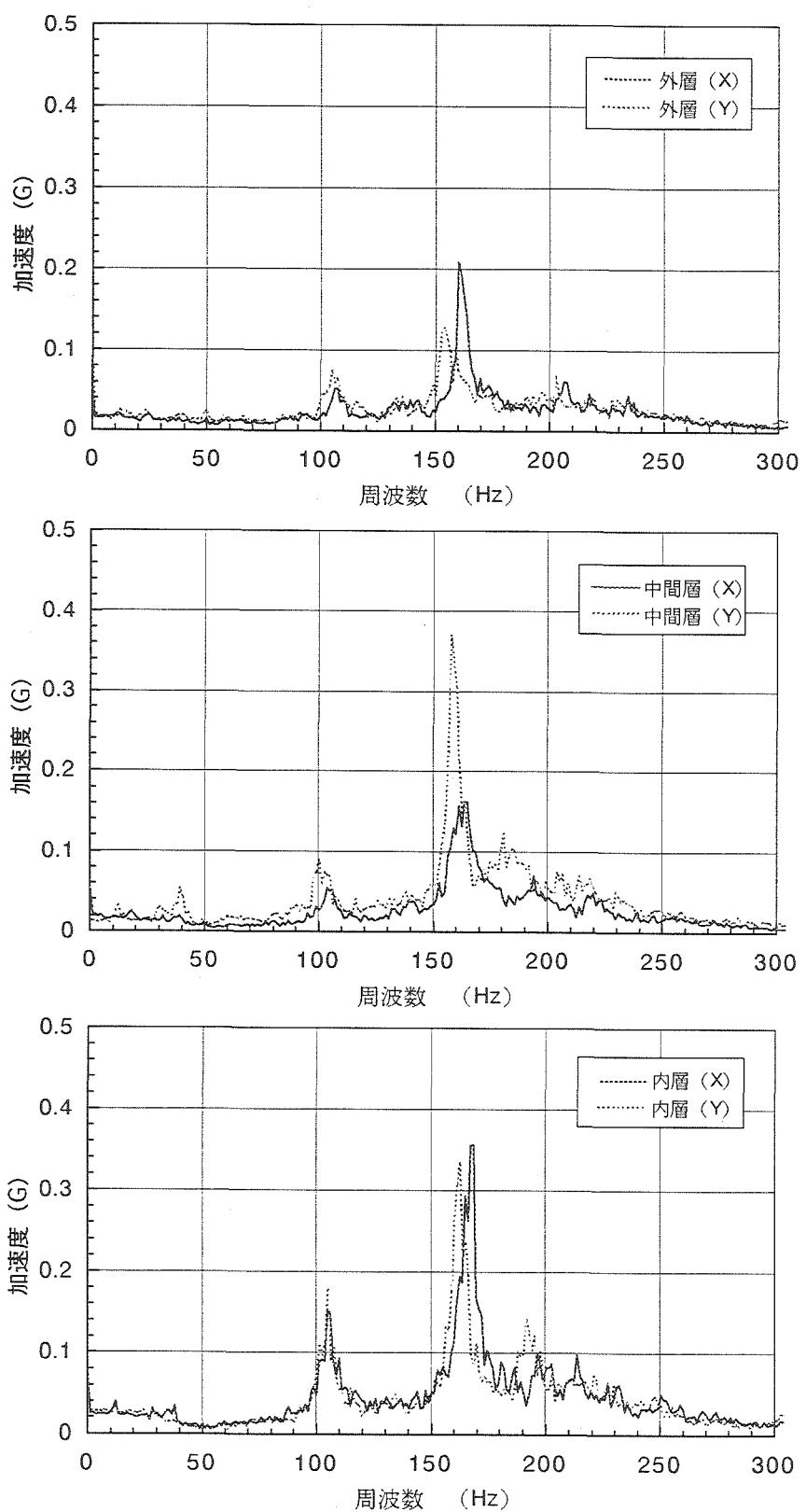


図4-24 流力振動のパワースペクトル (No.12)

総流量 : 30t/h
蒸気重量率 : 10%

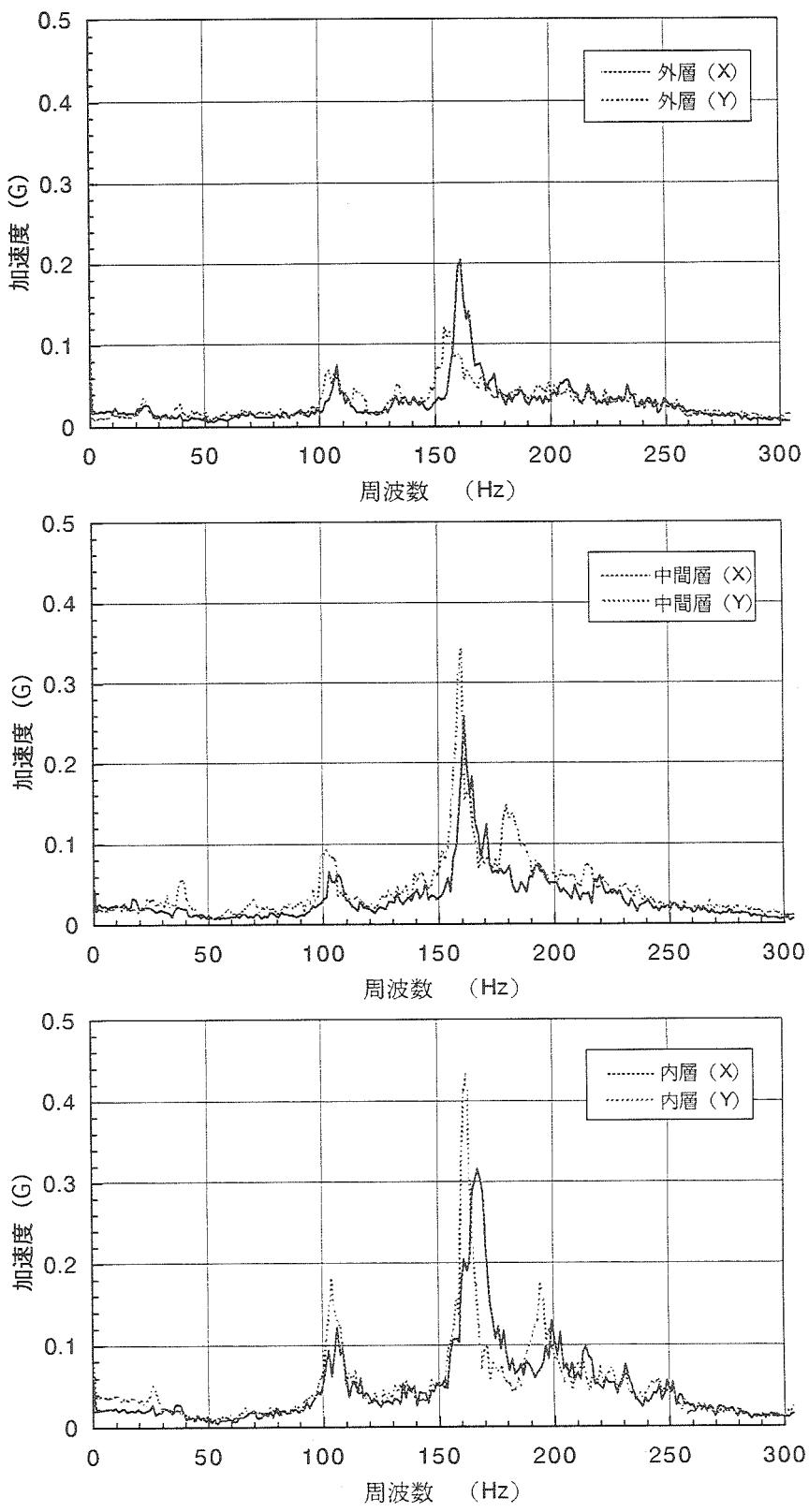


図4-25 流力振動のパワースペクトル (No.13)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 15%

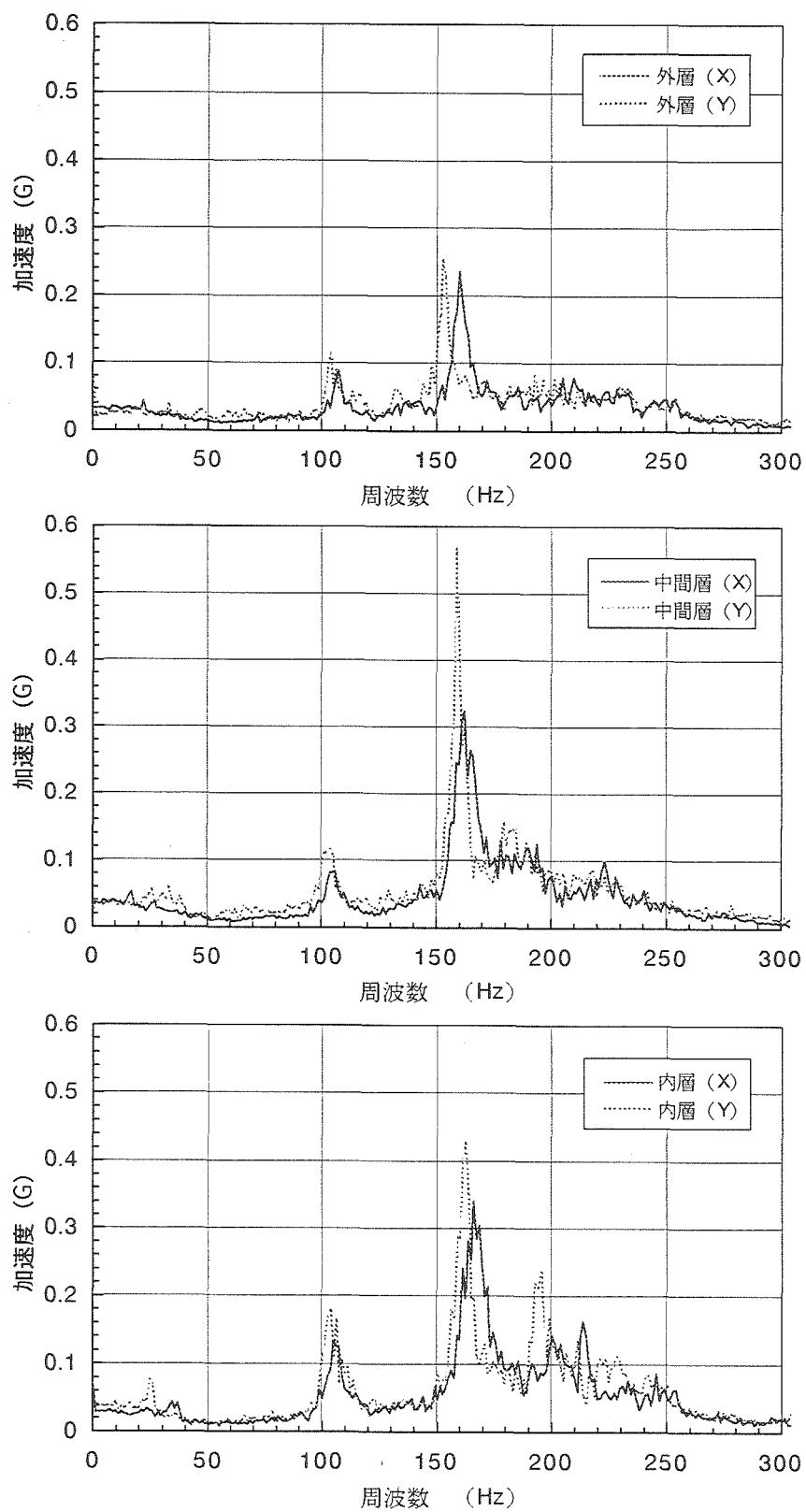


図4-26 流力振動のパワースペクトル (No.14)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 20%

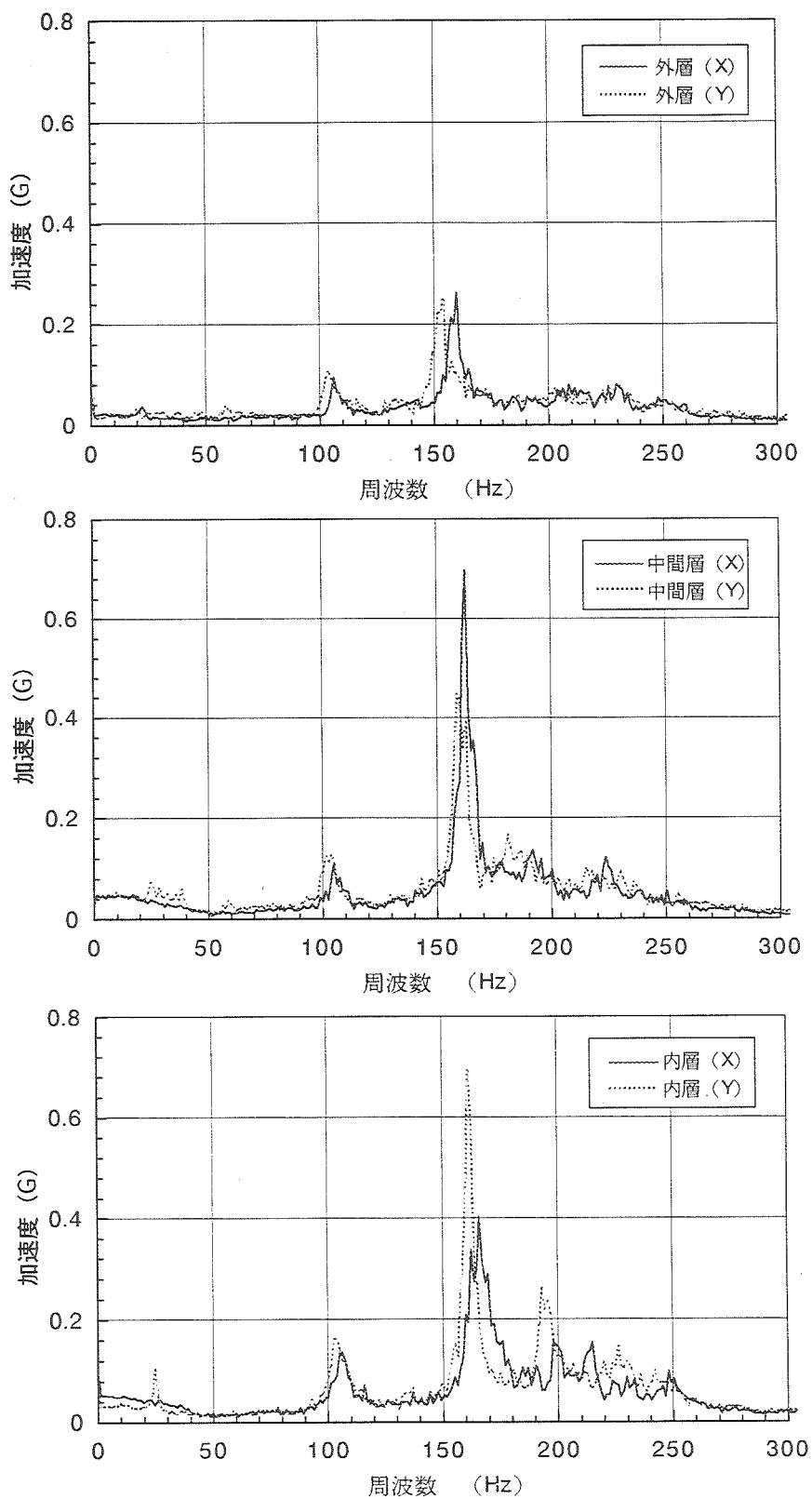


図4-27 流力振動のパワースペクトル (No.15)

総流量 : 30t/h

蒸気重量率 : 22%

加速度計不調のため
内層データ採取できず

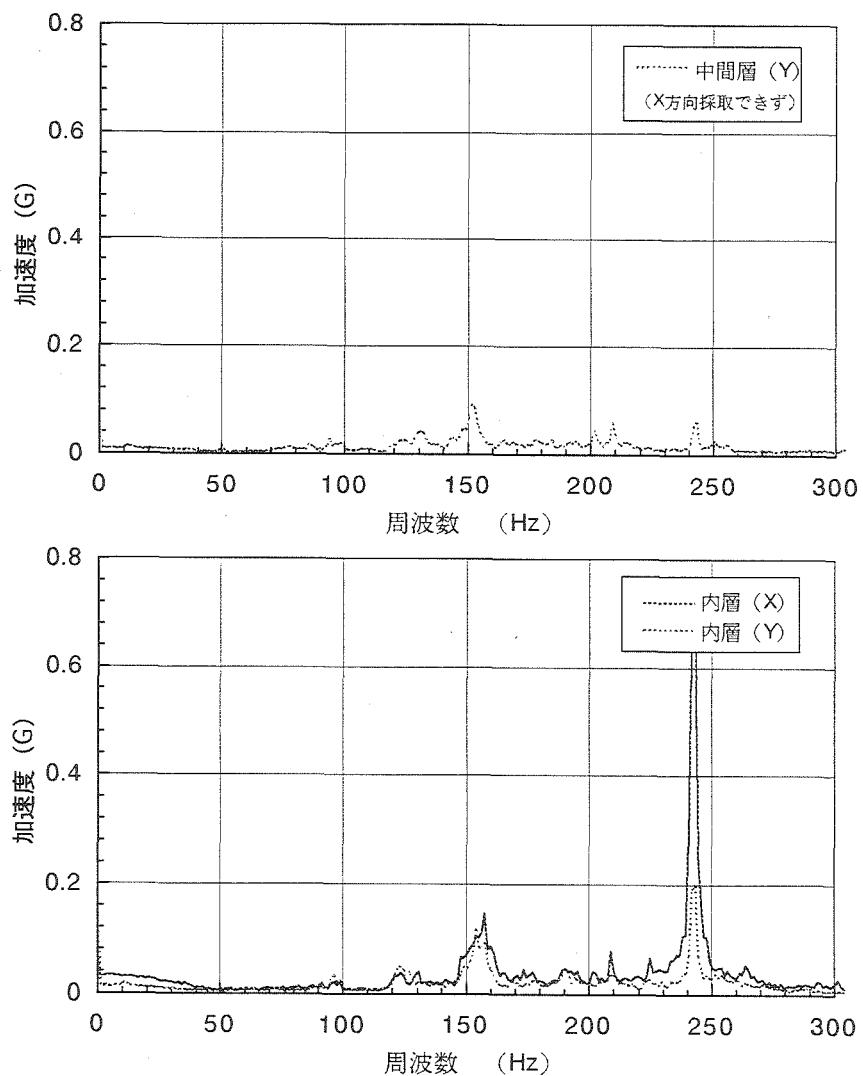


図4-28 流力振動のパワースペクトル (No.16)

総流量 : 40t/h
蒸気重量率 : 0%

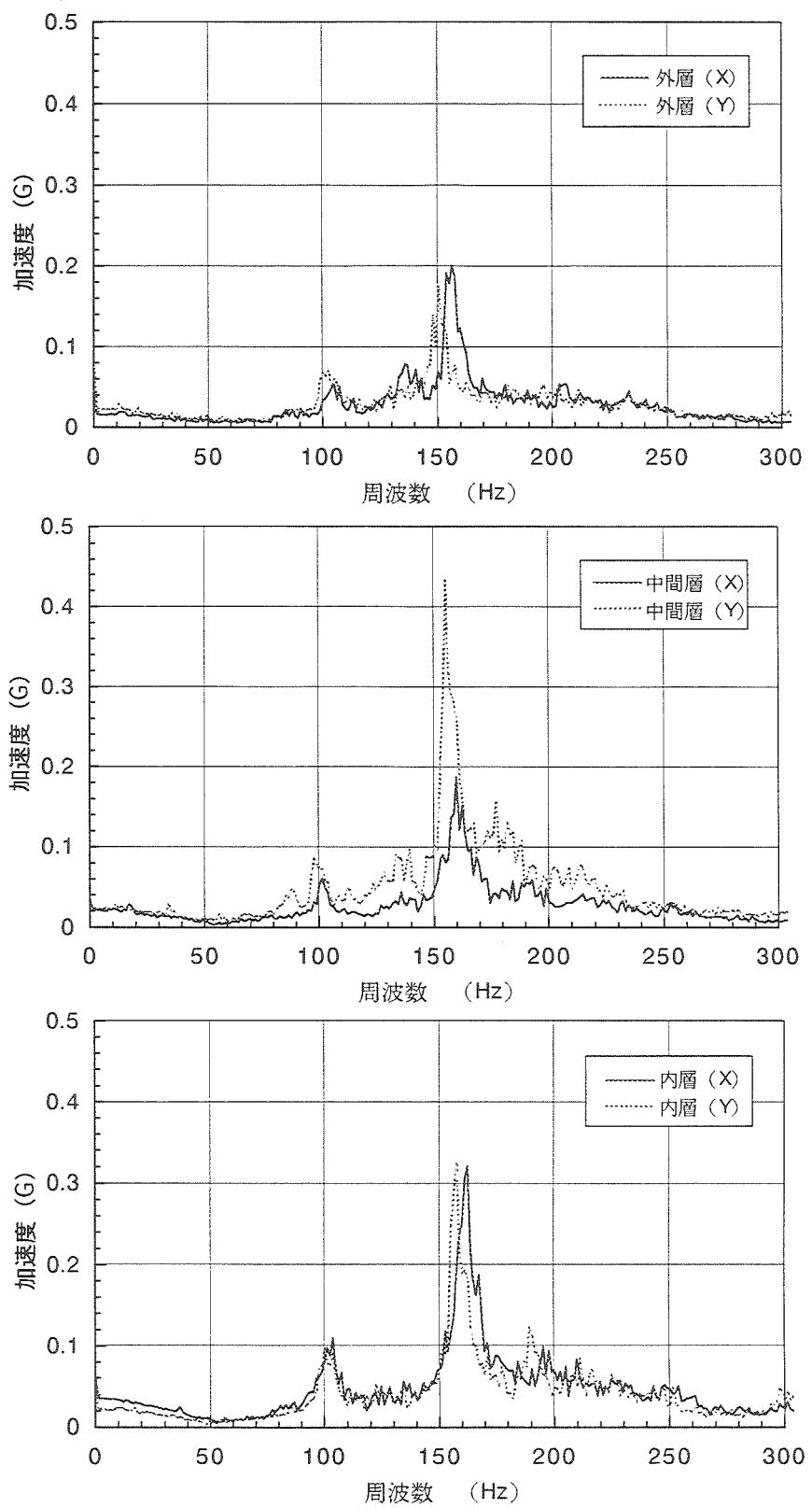


図4-29 流力振動のパワースペクトル (No.17)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 2.5%

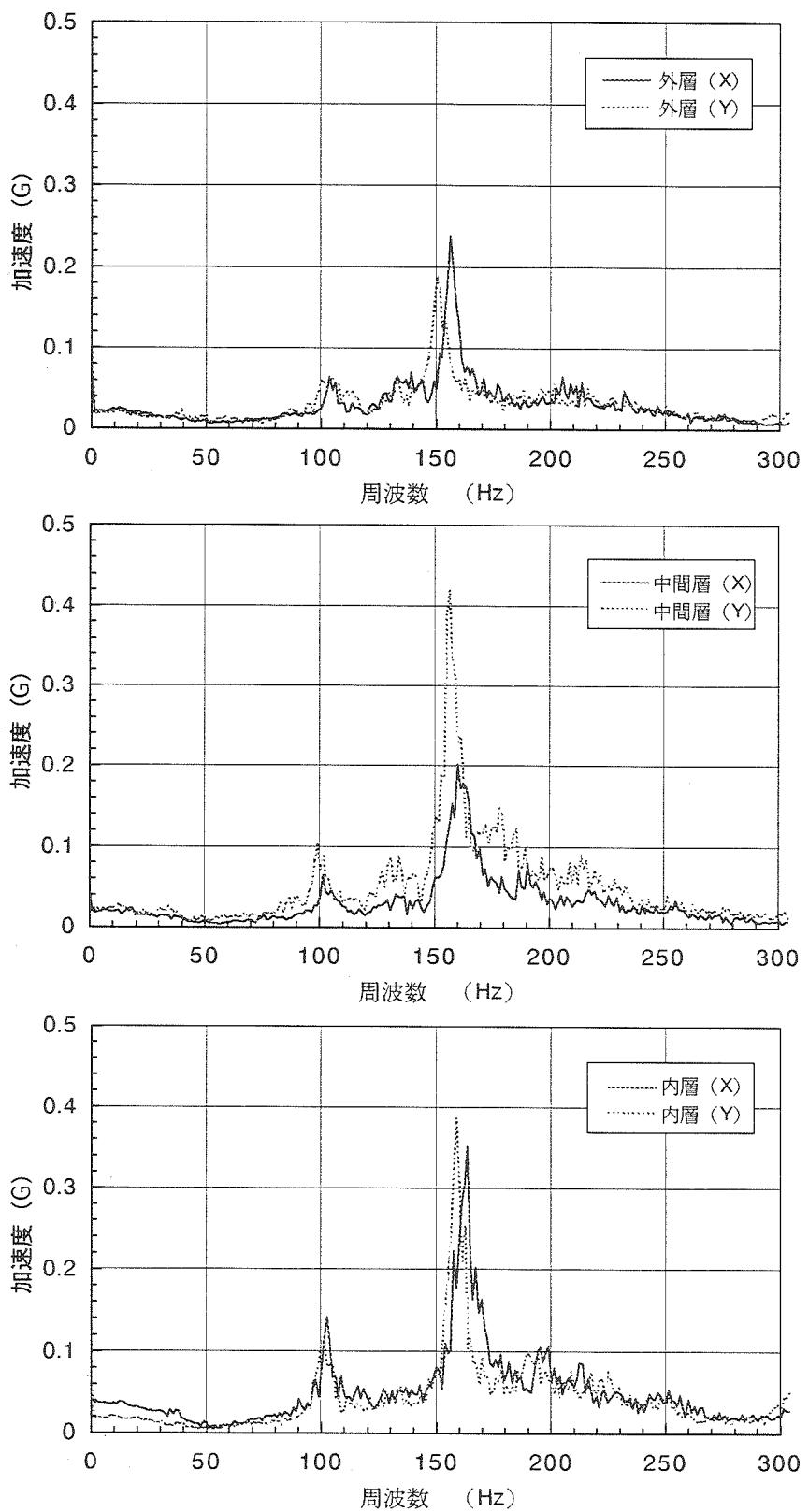


図4-30 流力振動のパワースペクトル (No.18)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 5%

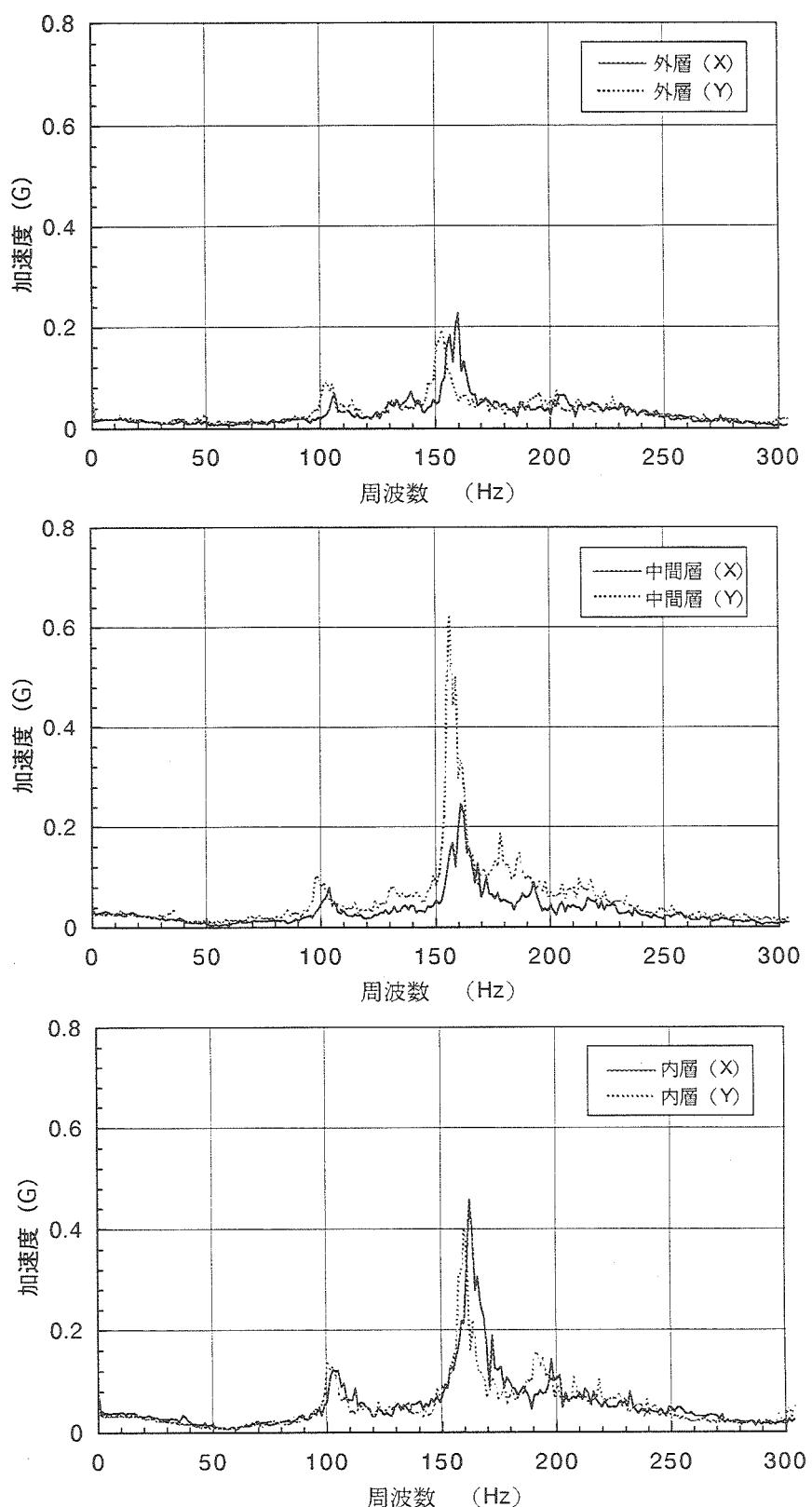


図4-31 流力振動のパワースペクトル (No.19)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 7.5%

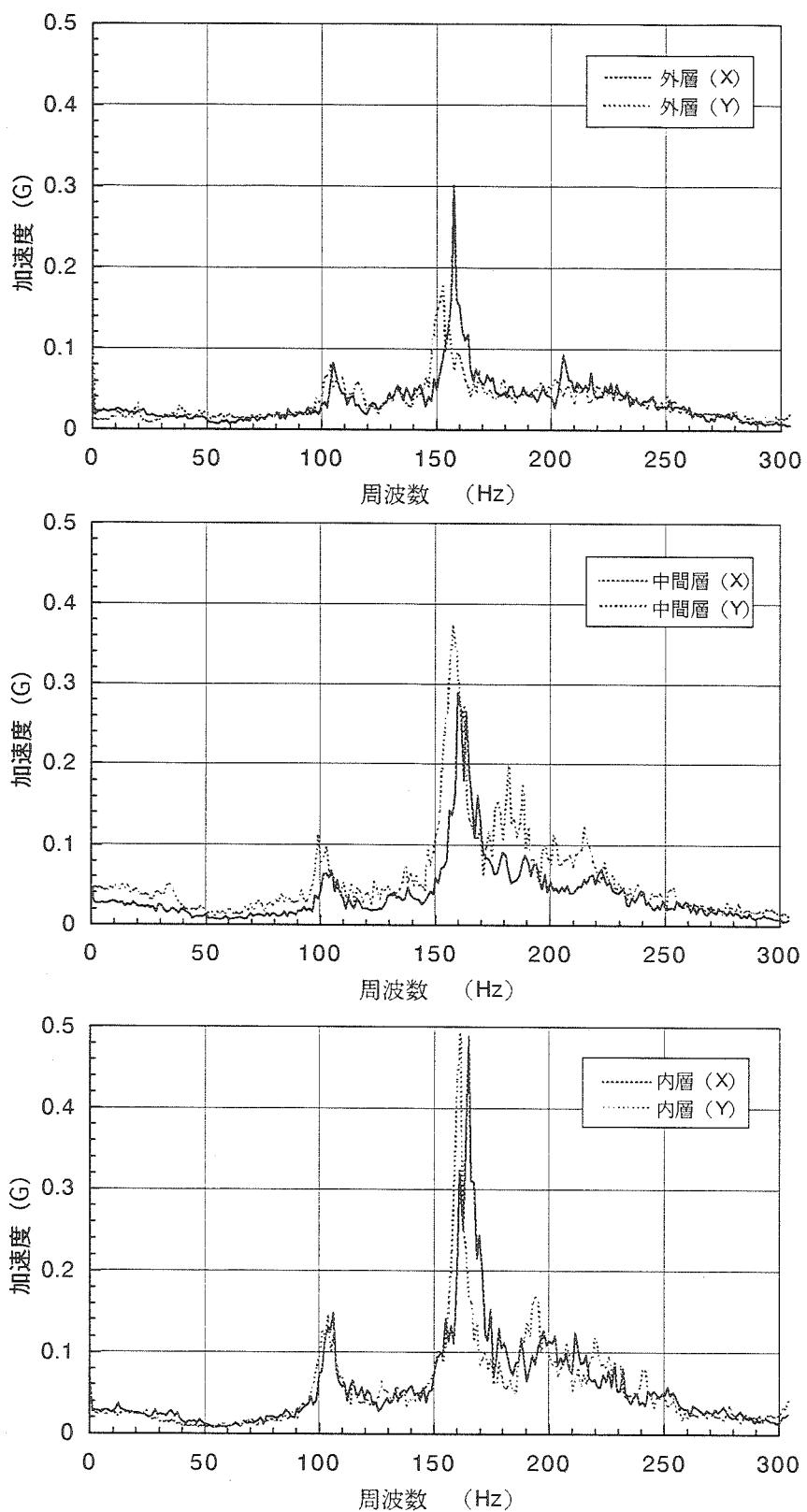


図4-32 流力振動のパワースペクトル (No.20)

総流量 : 40t/h

蒸気重量率 : 10%

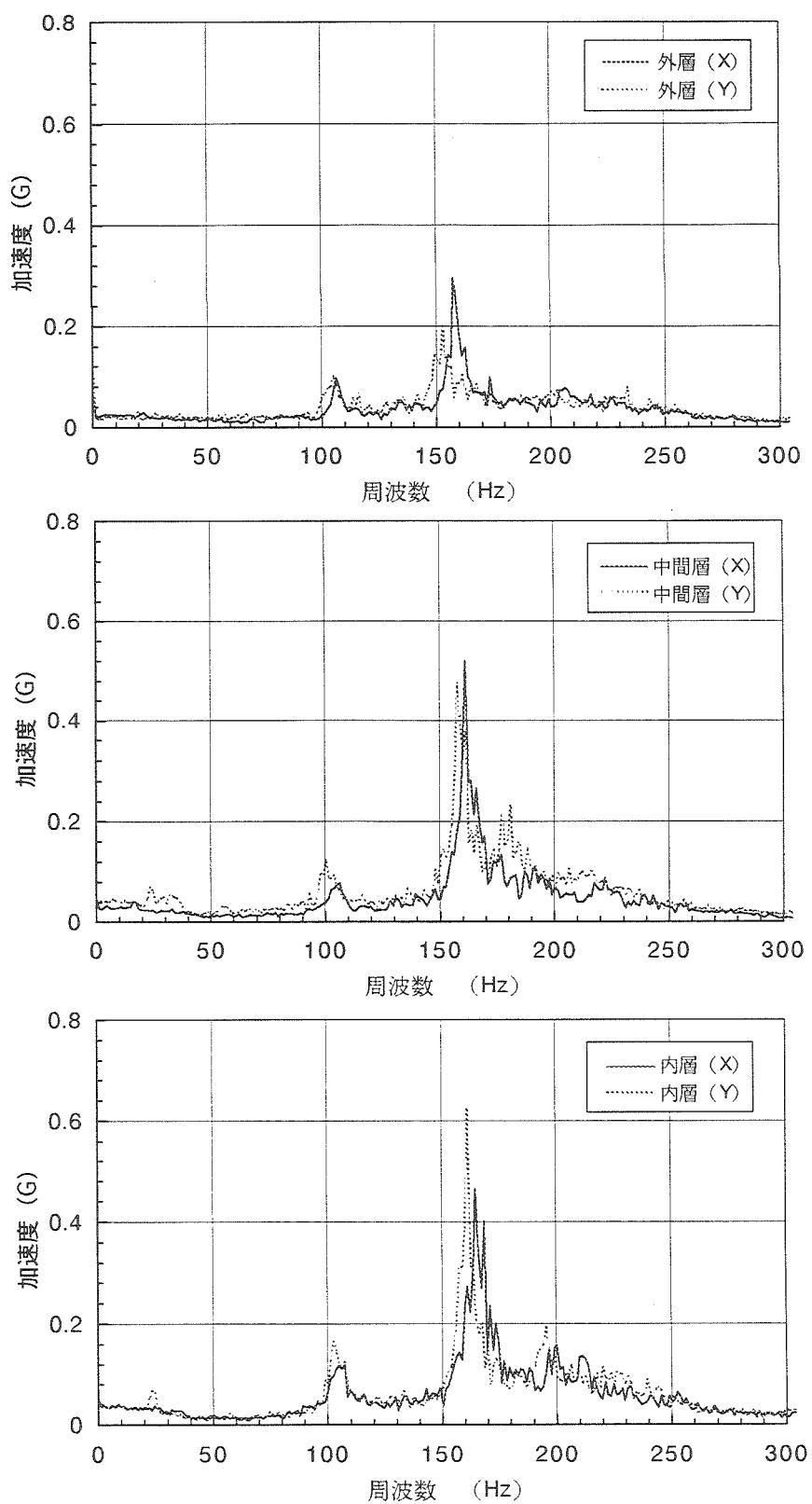


図4-33 流力振動のパワースペクトル (No.21)

総流量 : 40t/h
蒸気重量率 : 12.5%

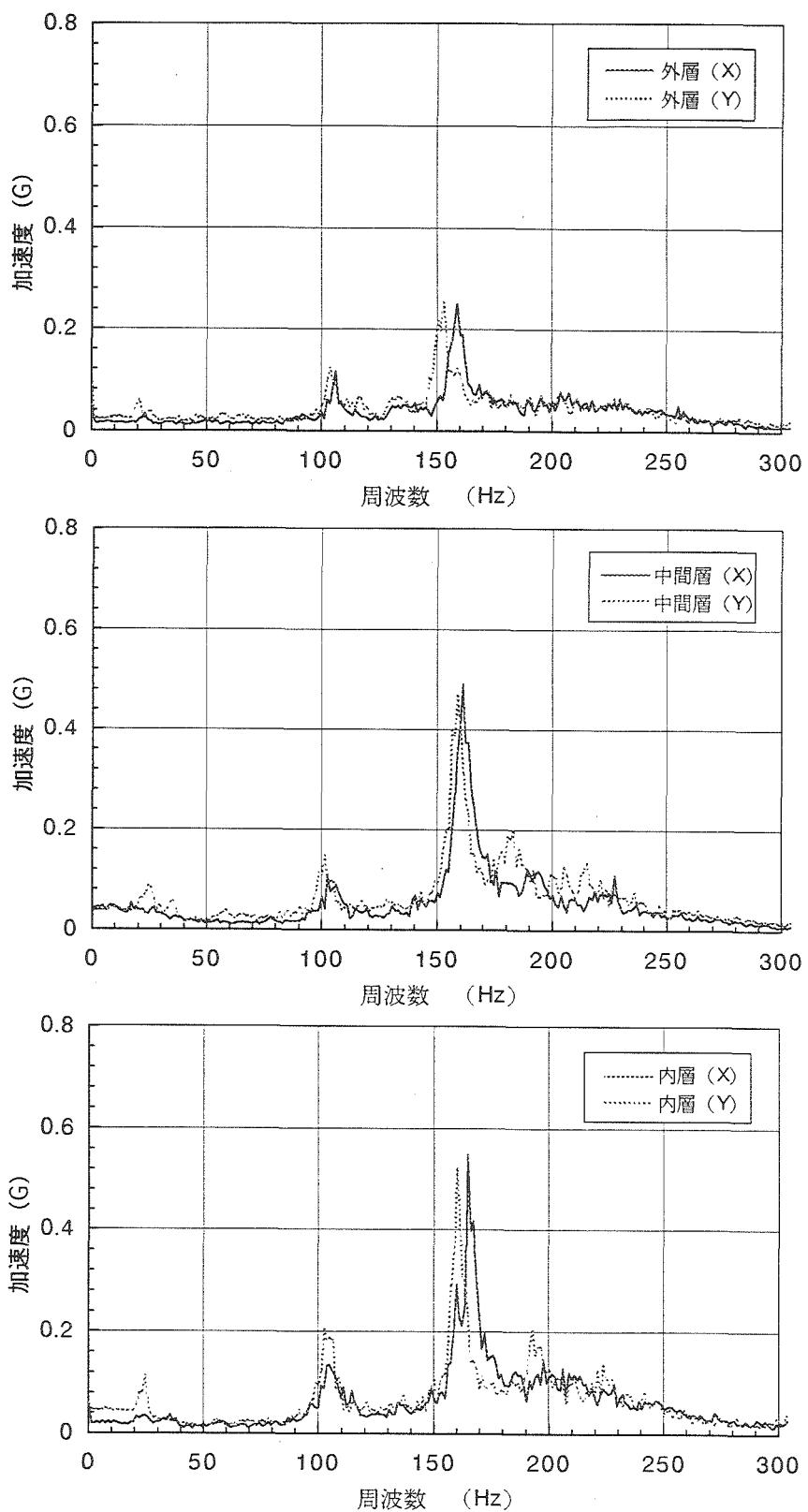


図4-34 流力振動のパワースペクトル (No.22)

総流量 : 40t/h
蒸気重量率 : 15 %

蒸気重量率 : 5%

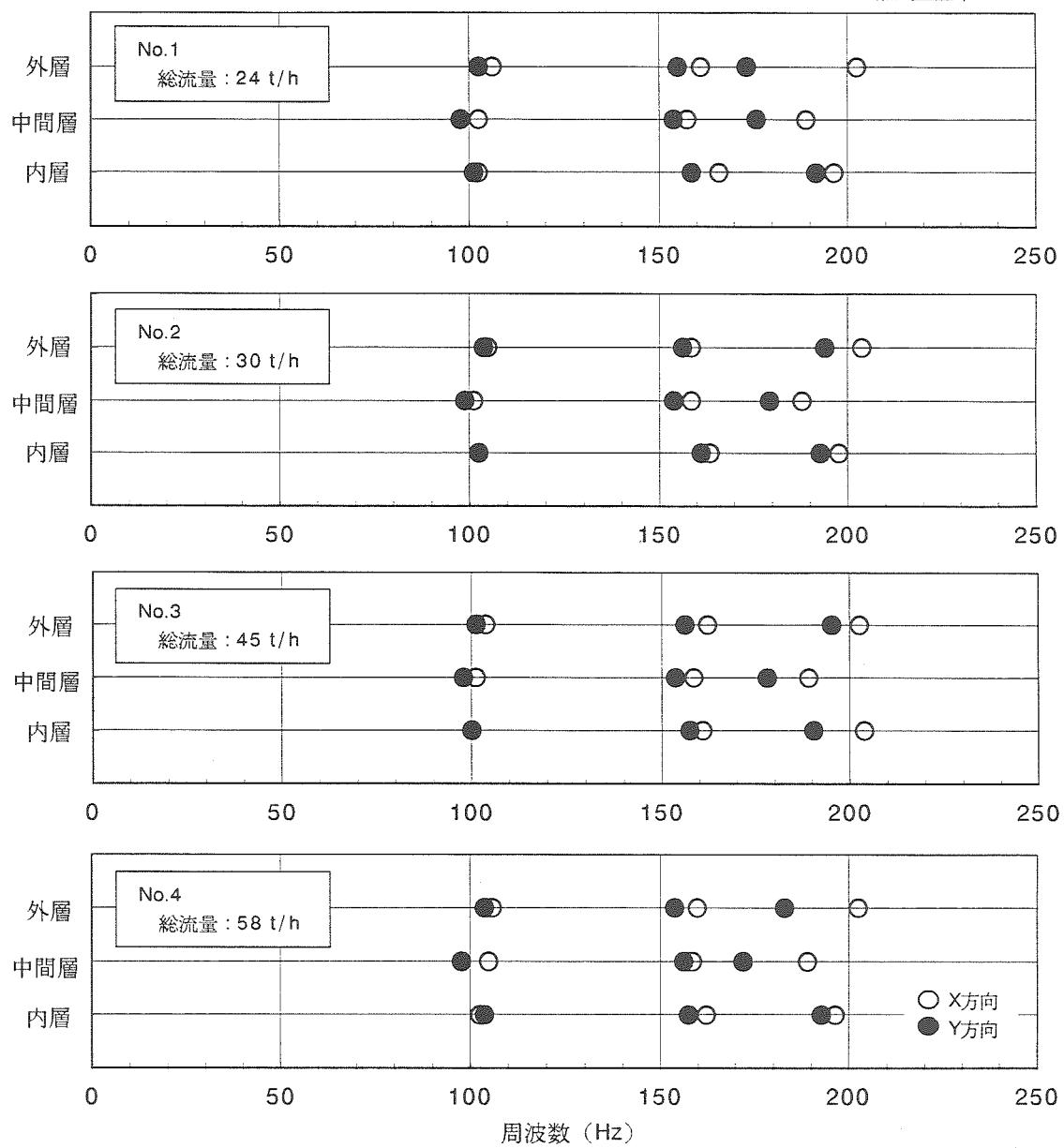


図4-35 流力振動における卓越周波数
(No.1~4)

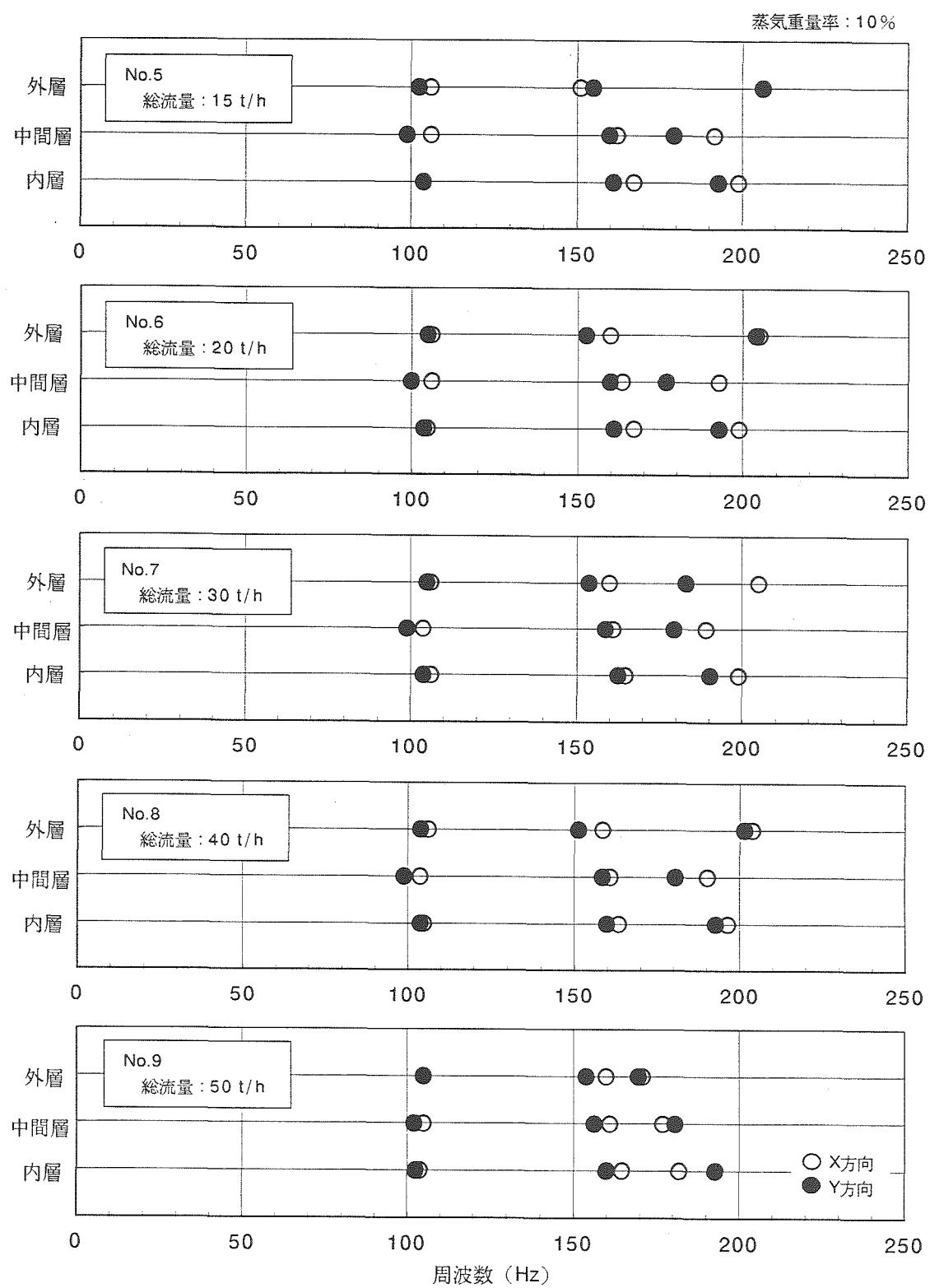


図4-36 流力振動における卓越周波数
(No.5~9)

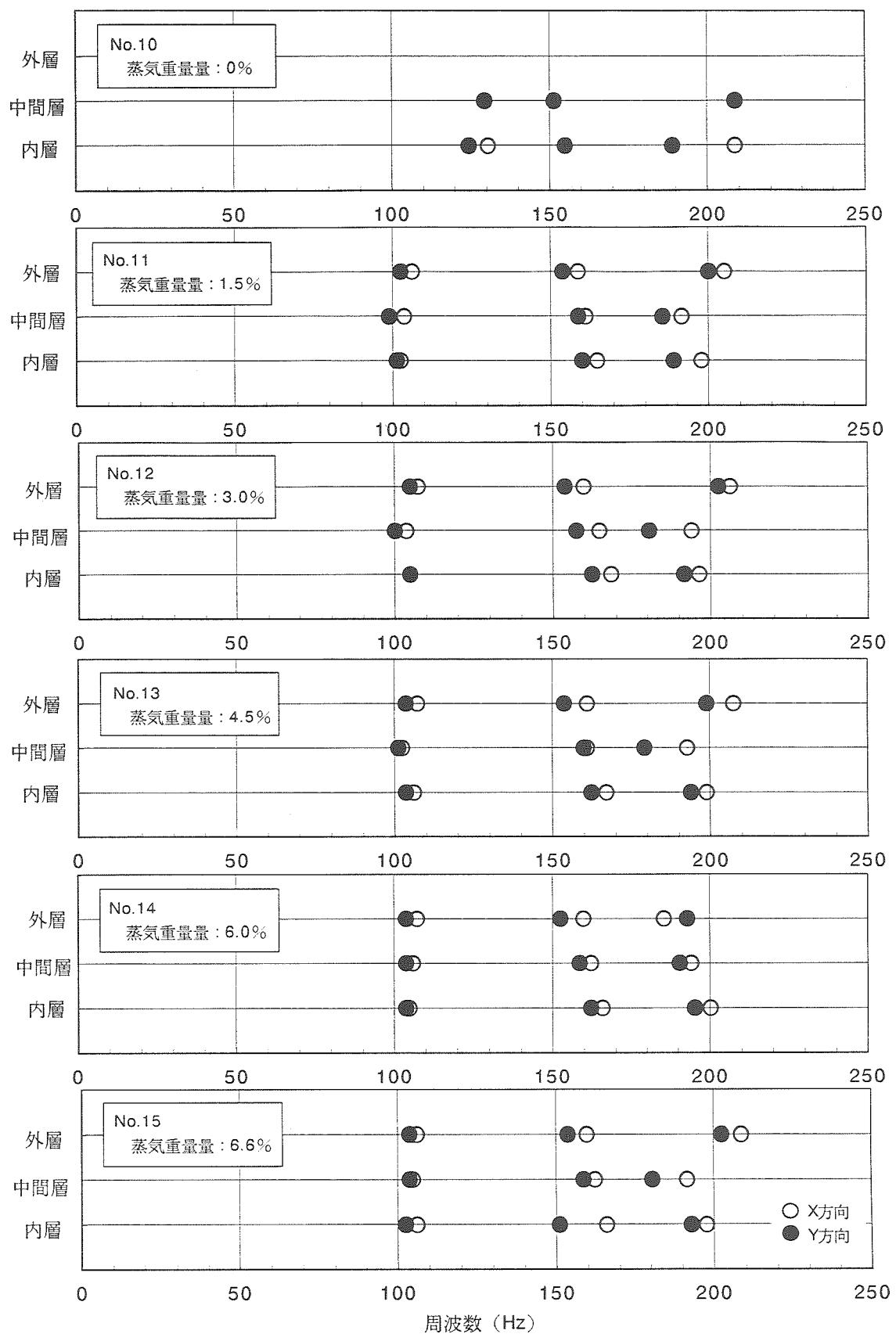


図4-37 流力振動における卓越周波数
(No.10～15)

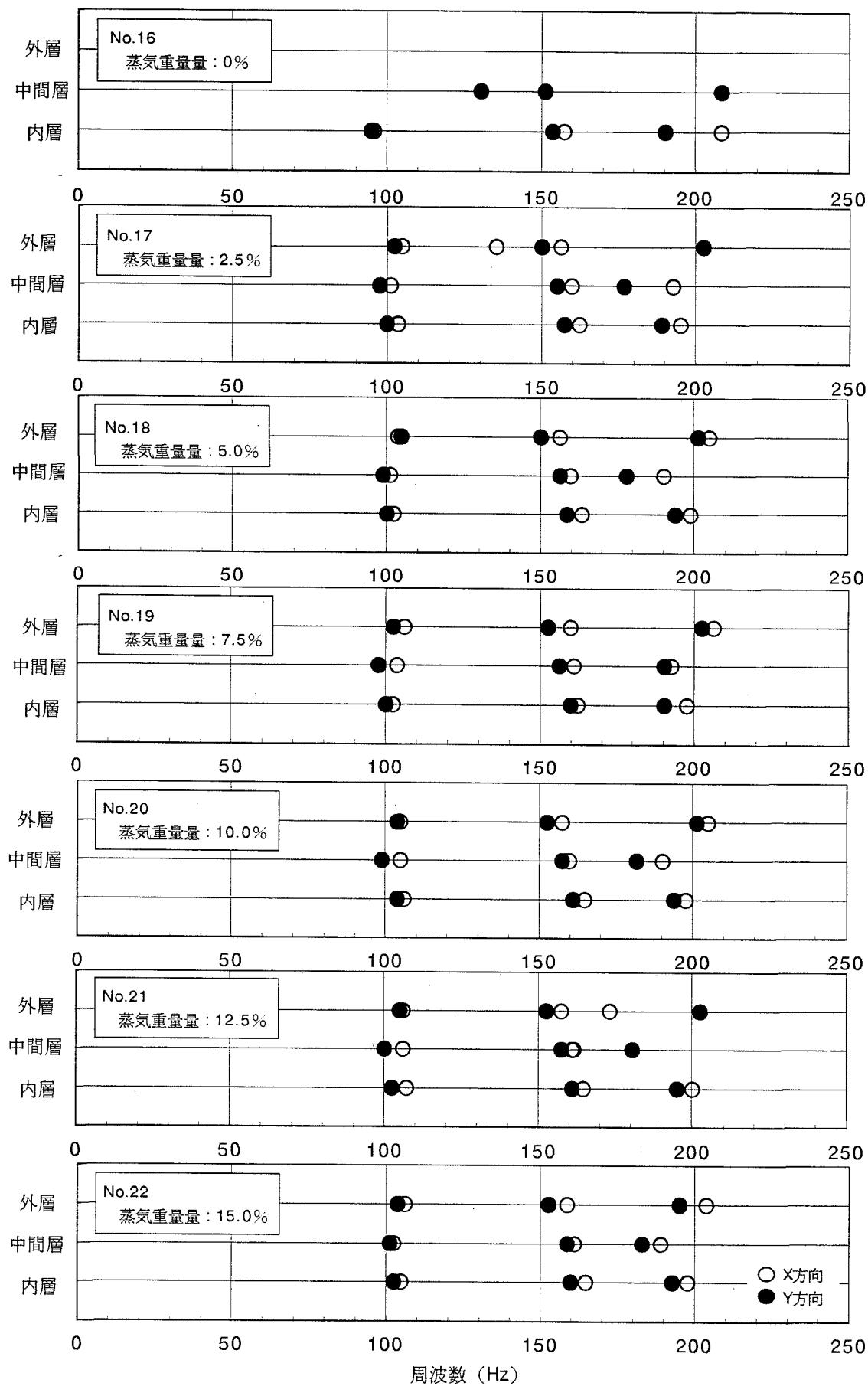


図4-38 流力振動における卓越周波数
(No.16～22)

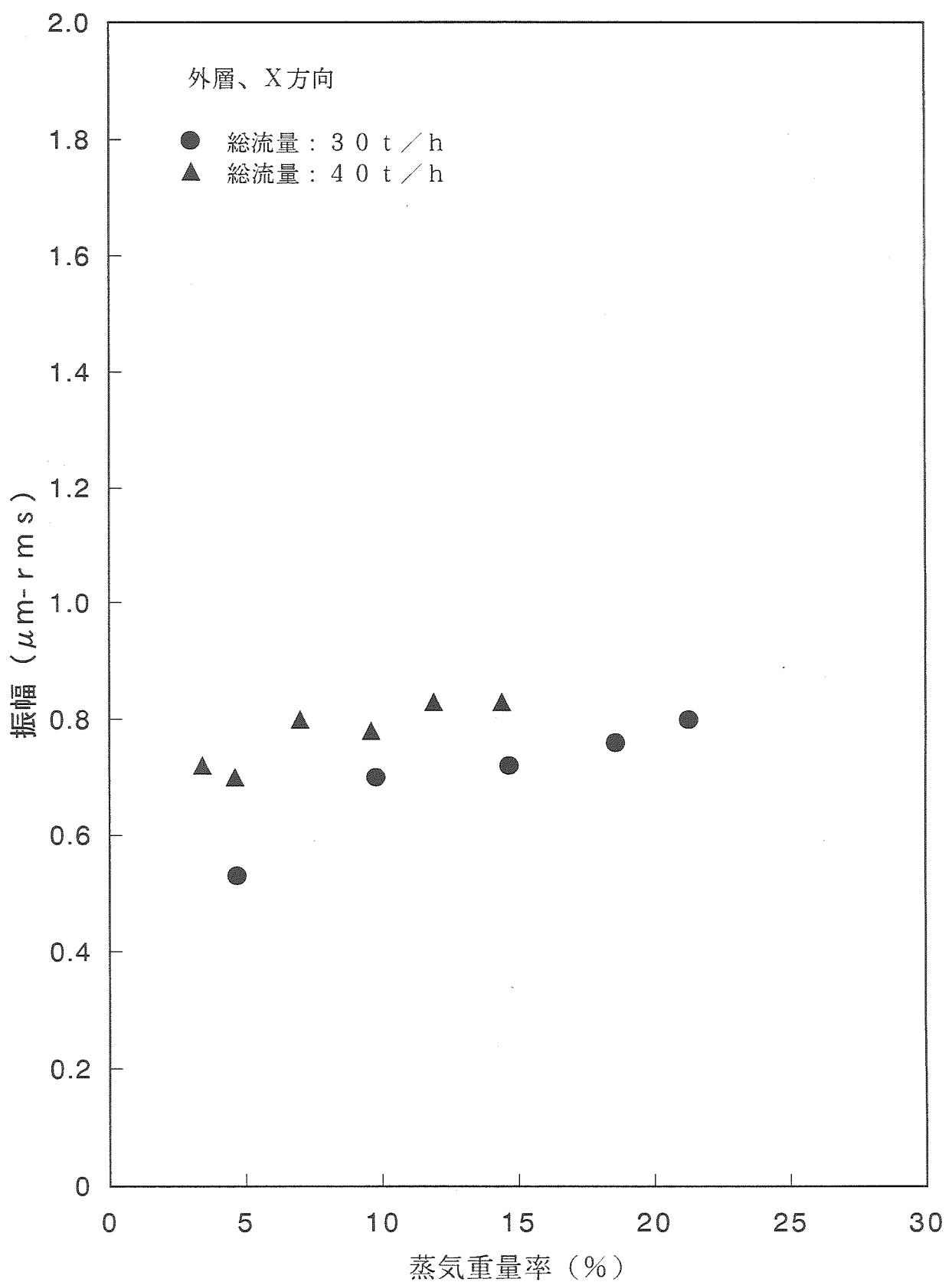


図4-39 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

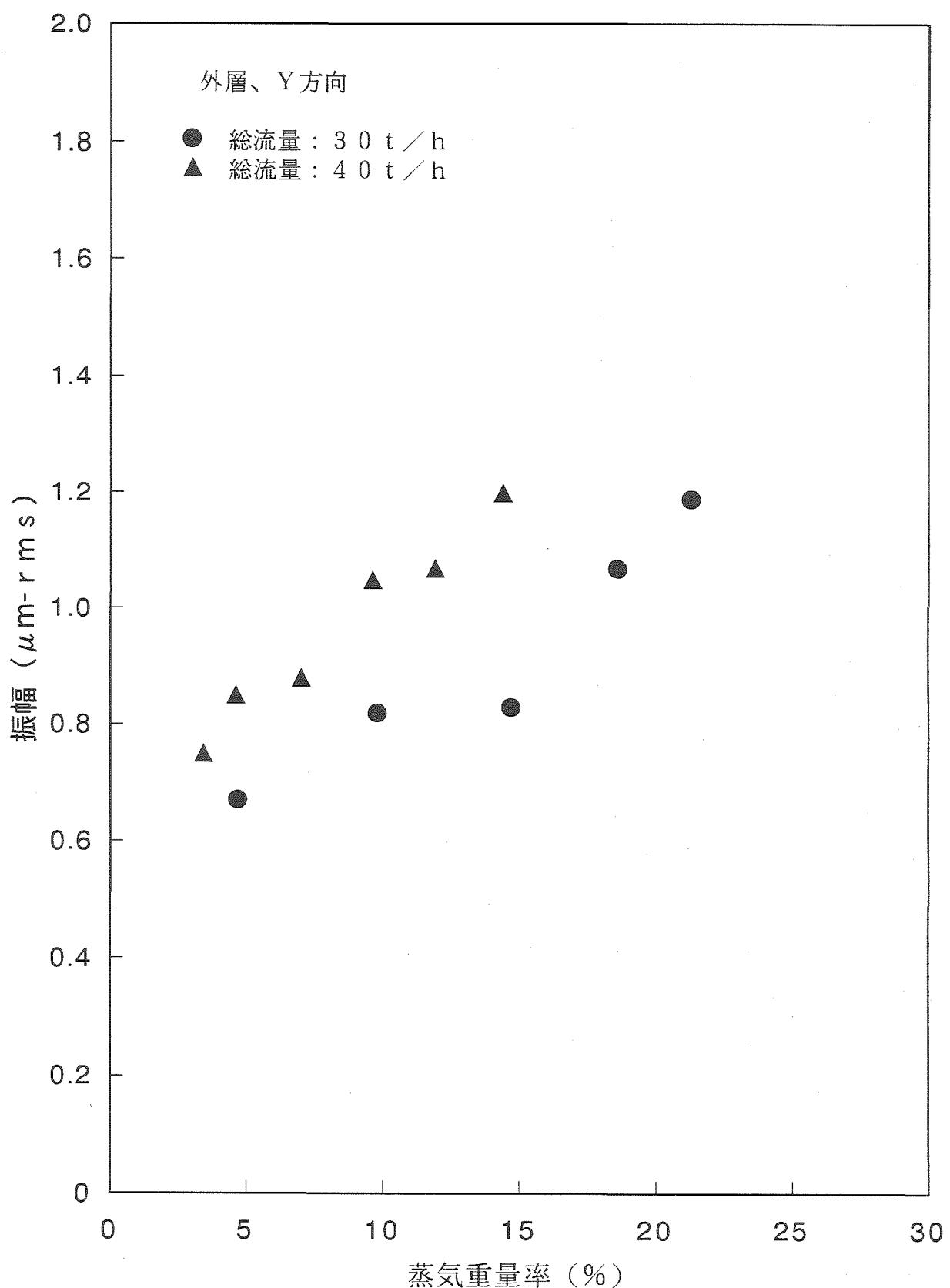


図4-40 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

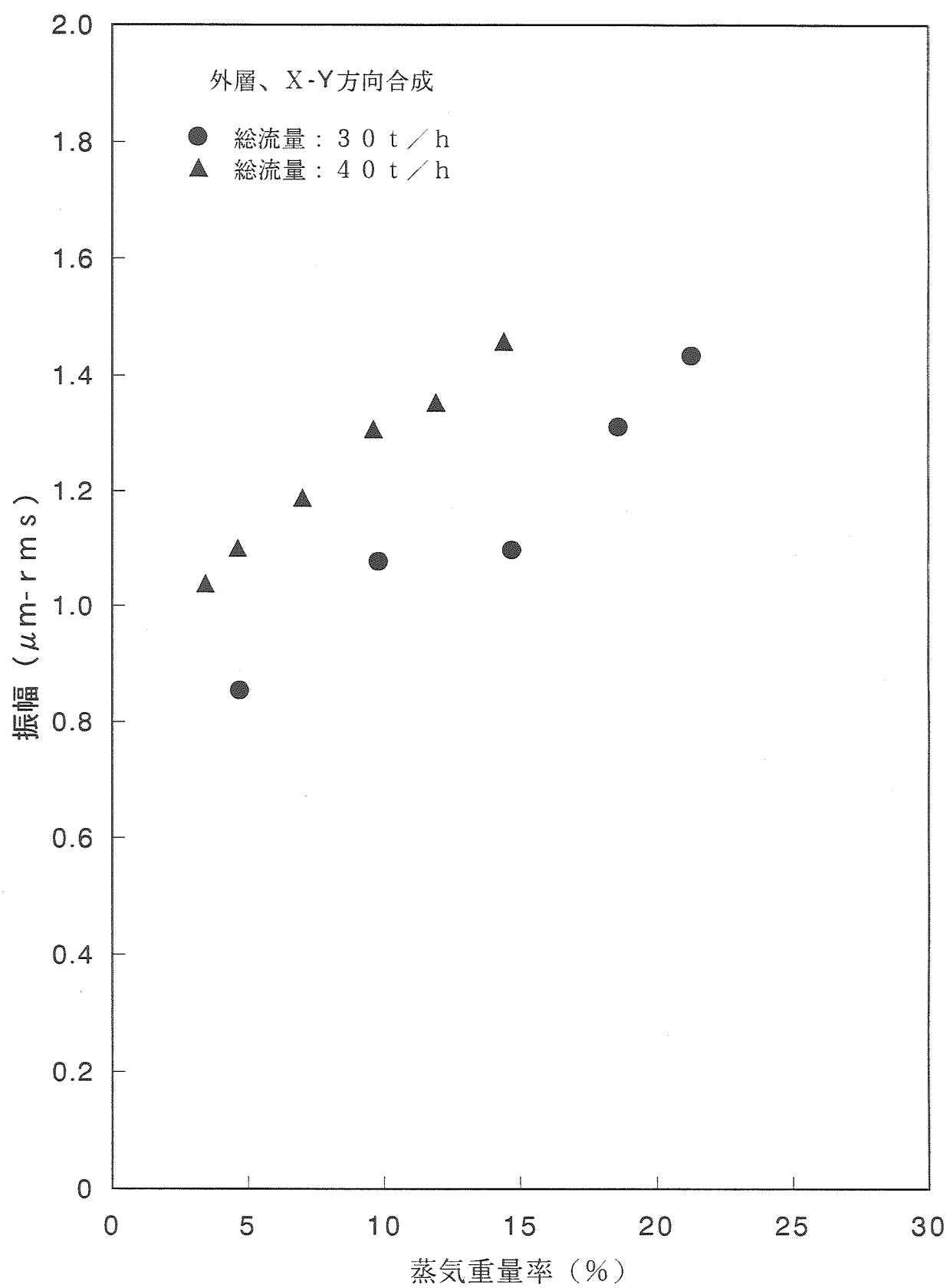


図4-41 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

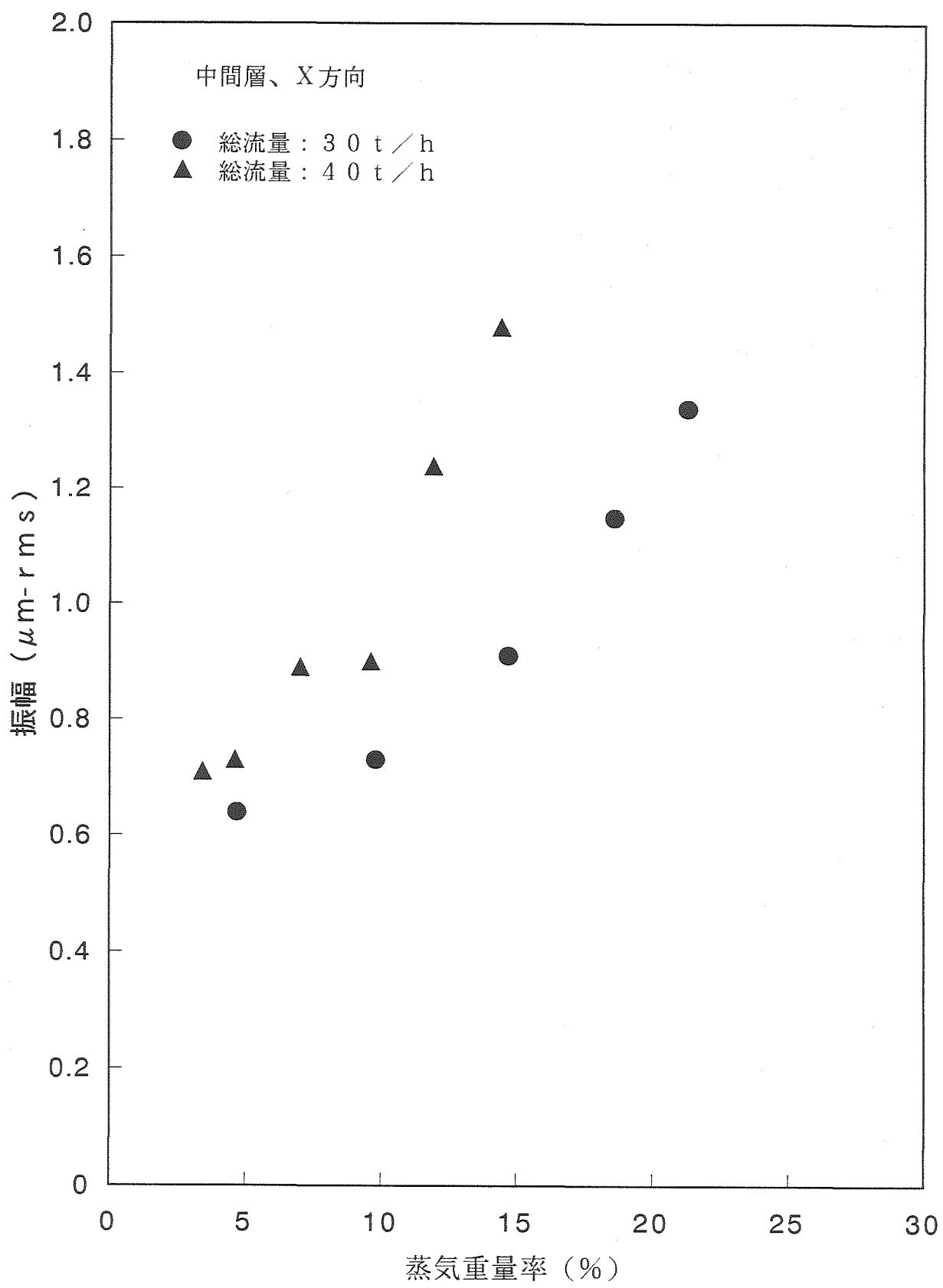


図4-42 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

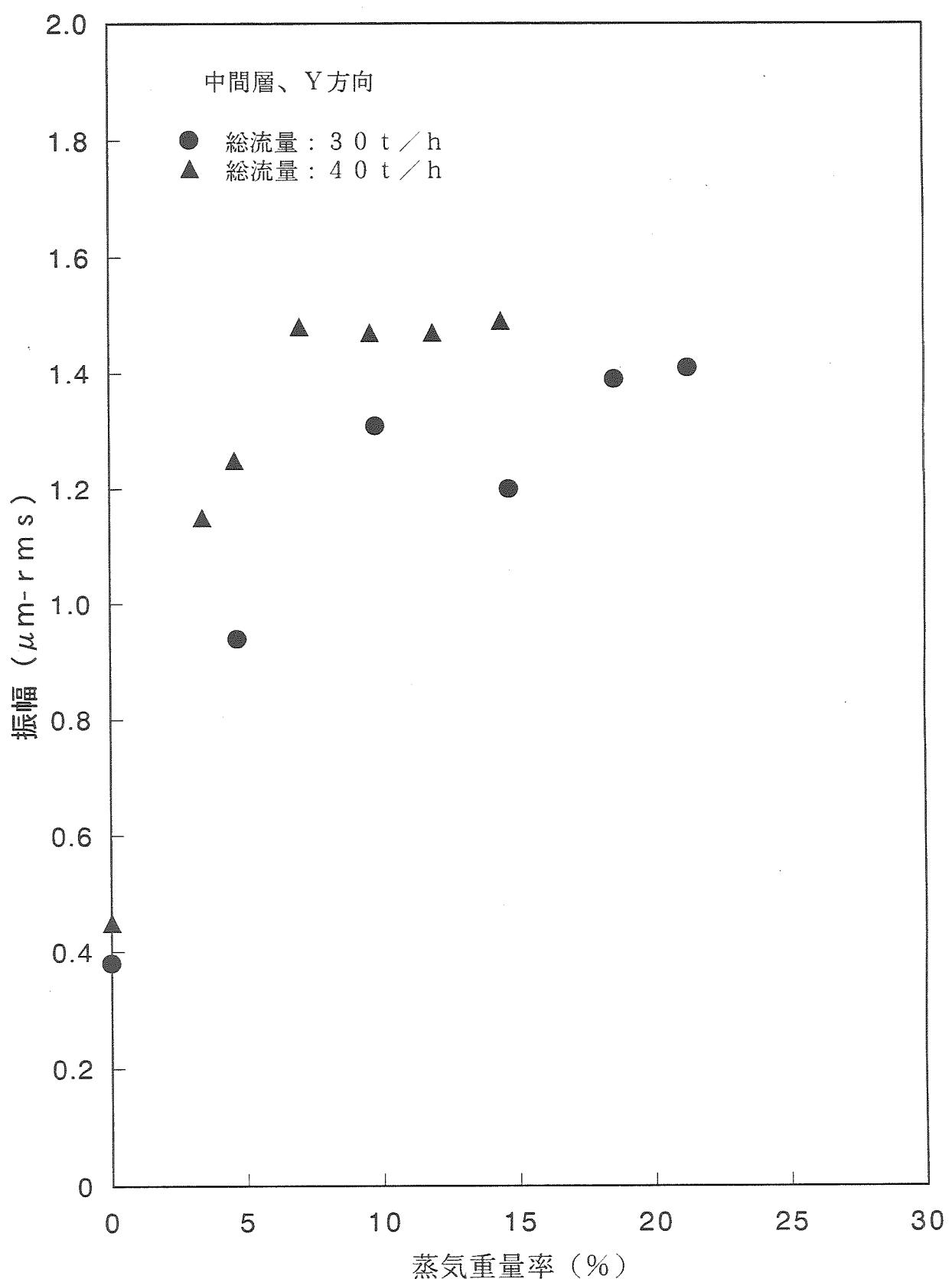


図4-43 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

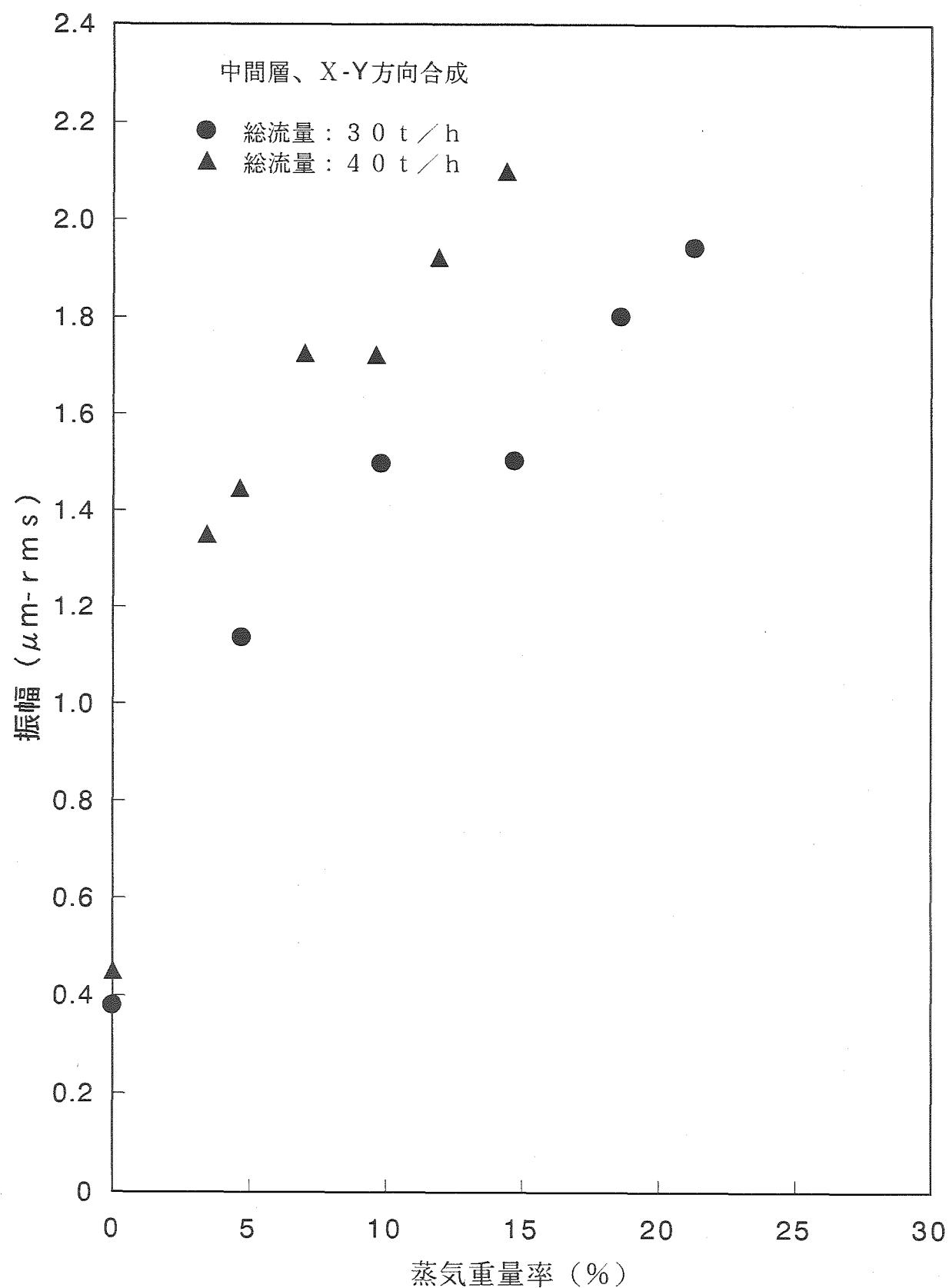


図4-44 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

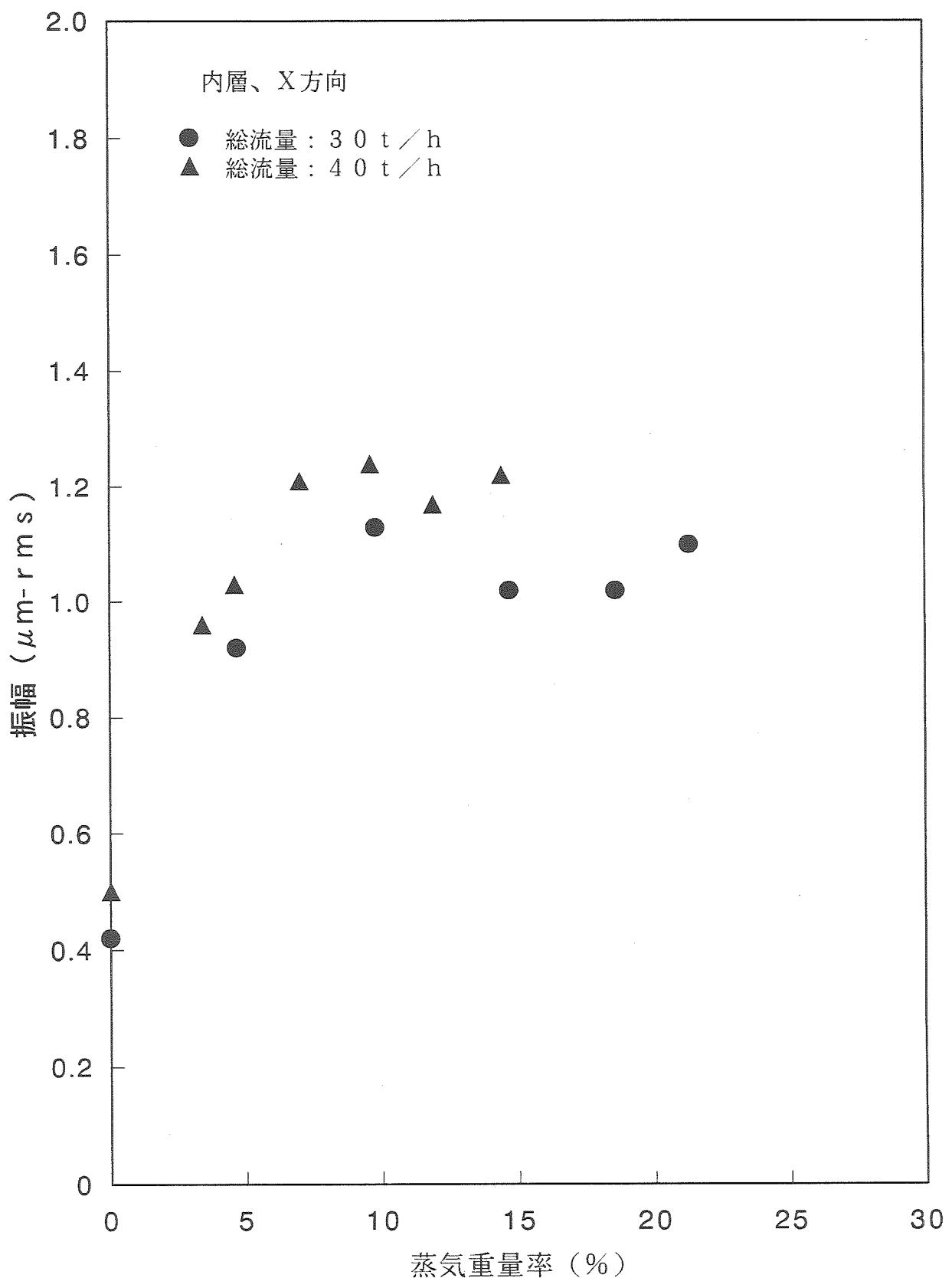


図4-45 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

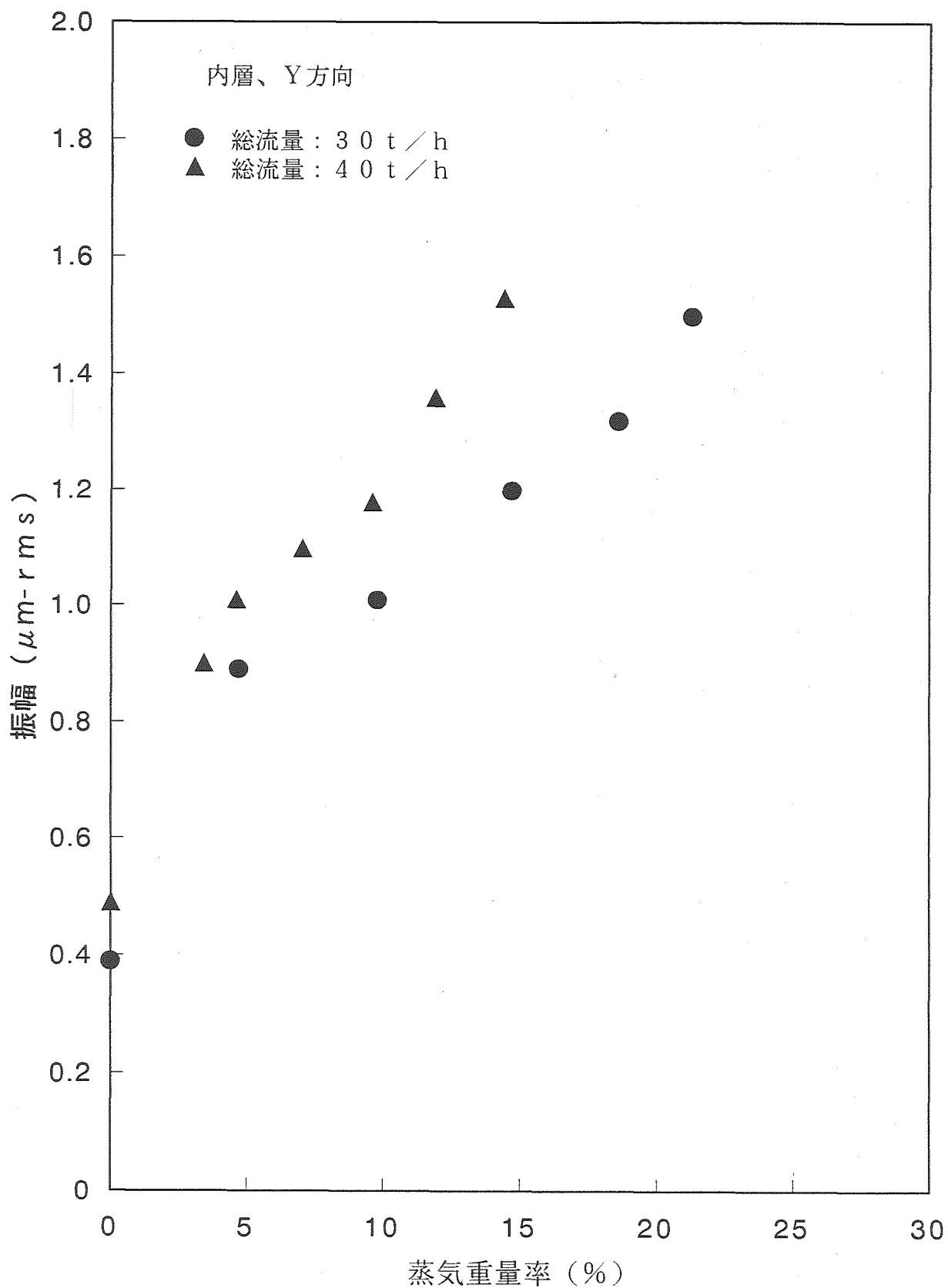


図4-46 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

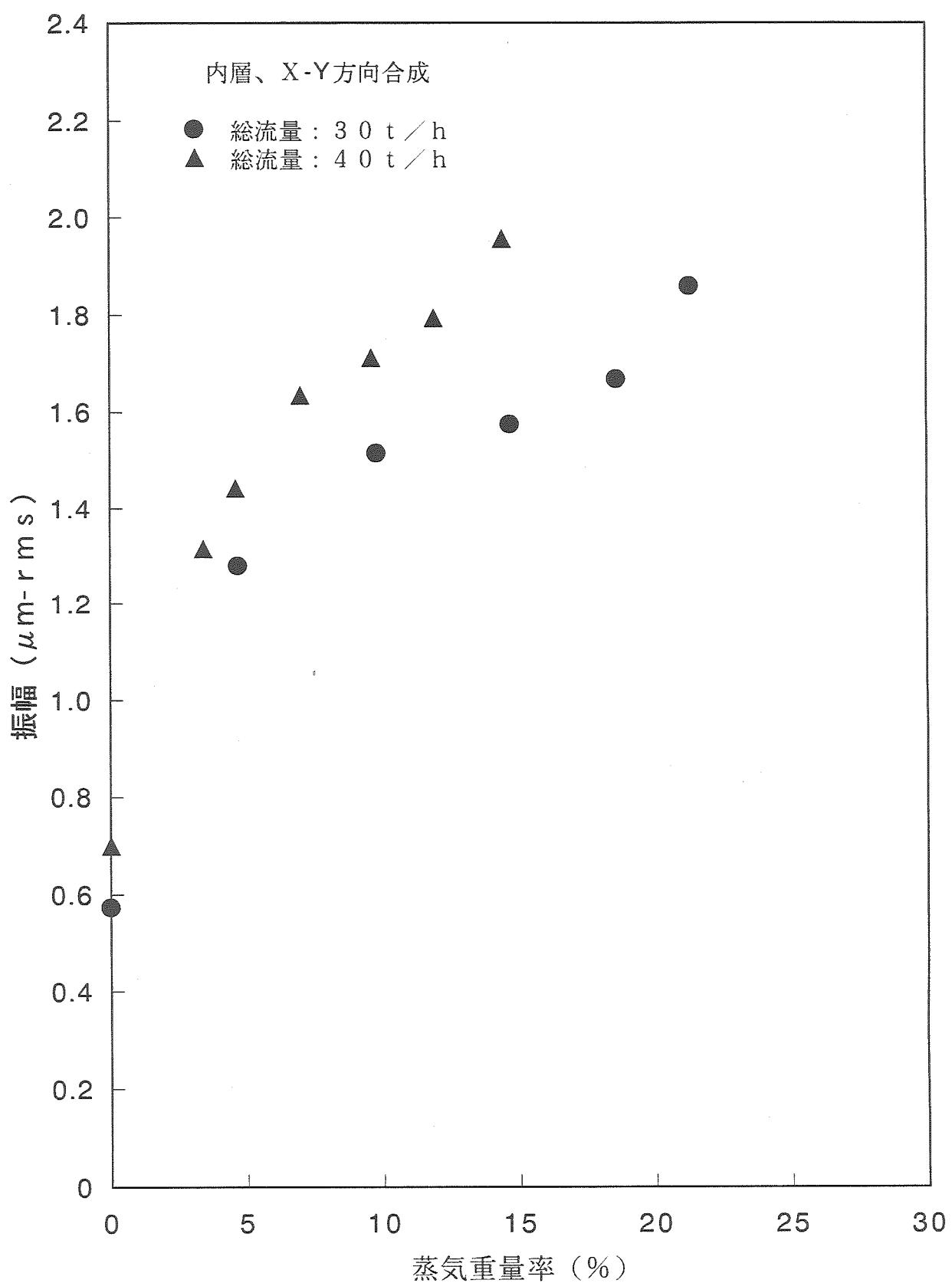


図4-47 流力振動振幅におよぼす蒸気重量率の影響

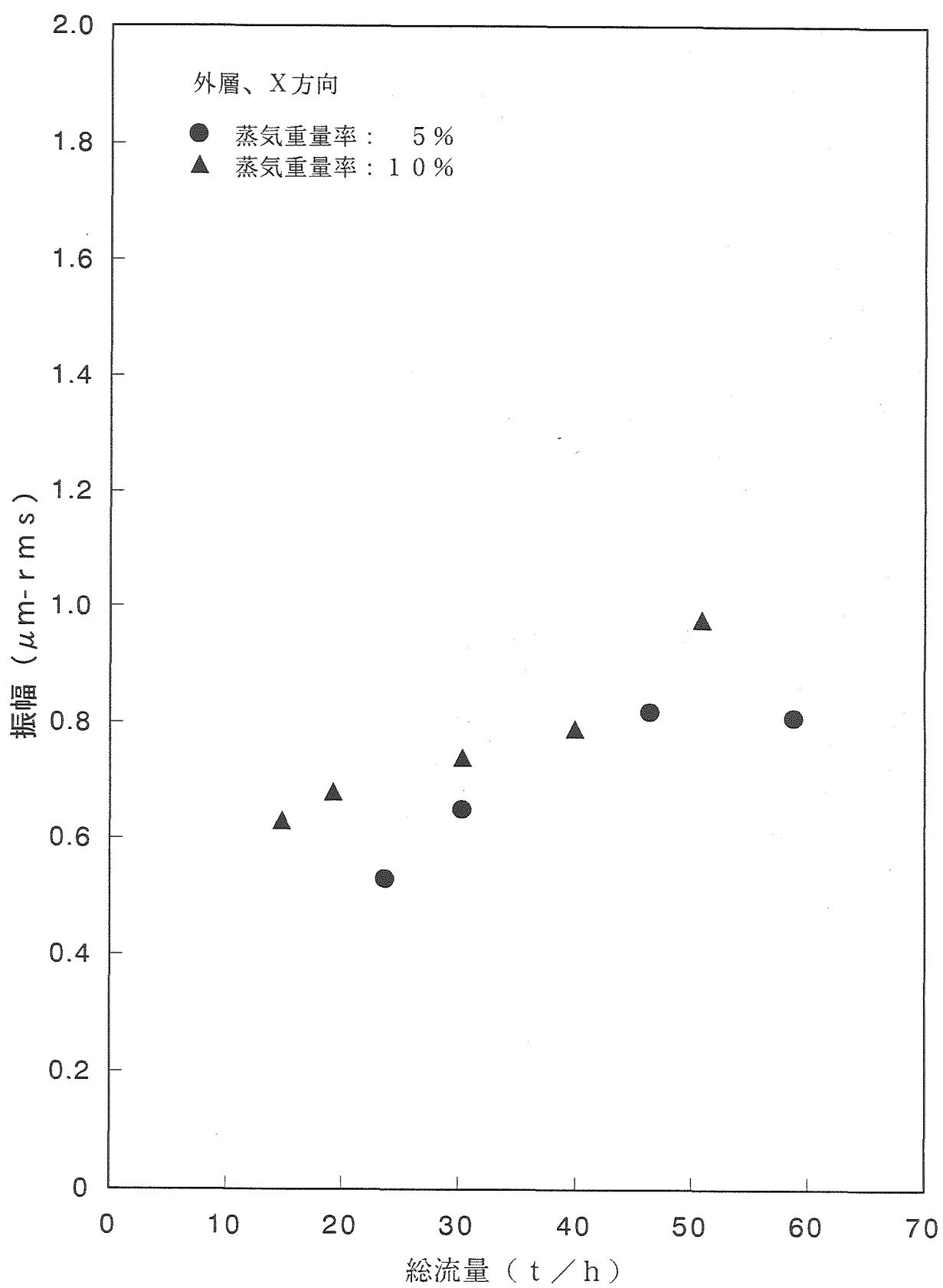


図4-48 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

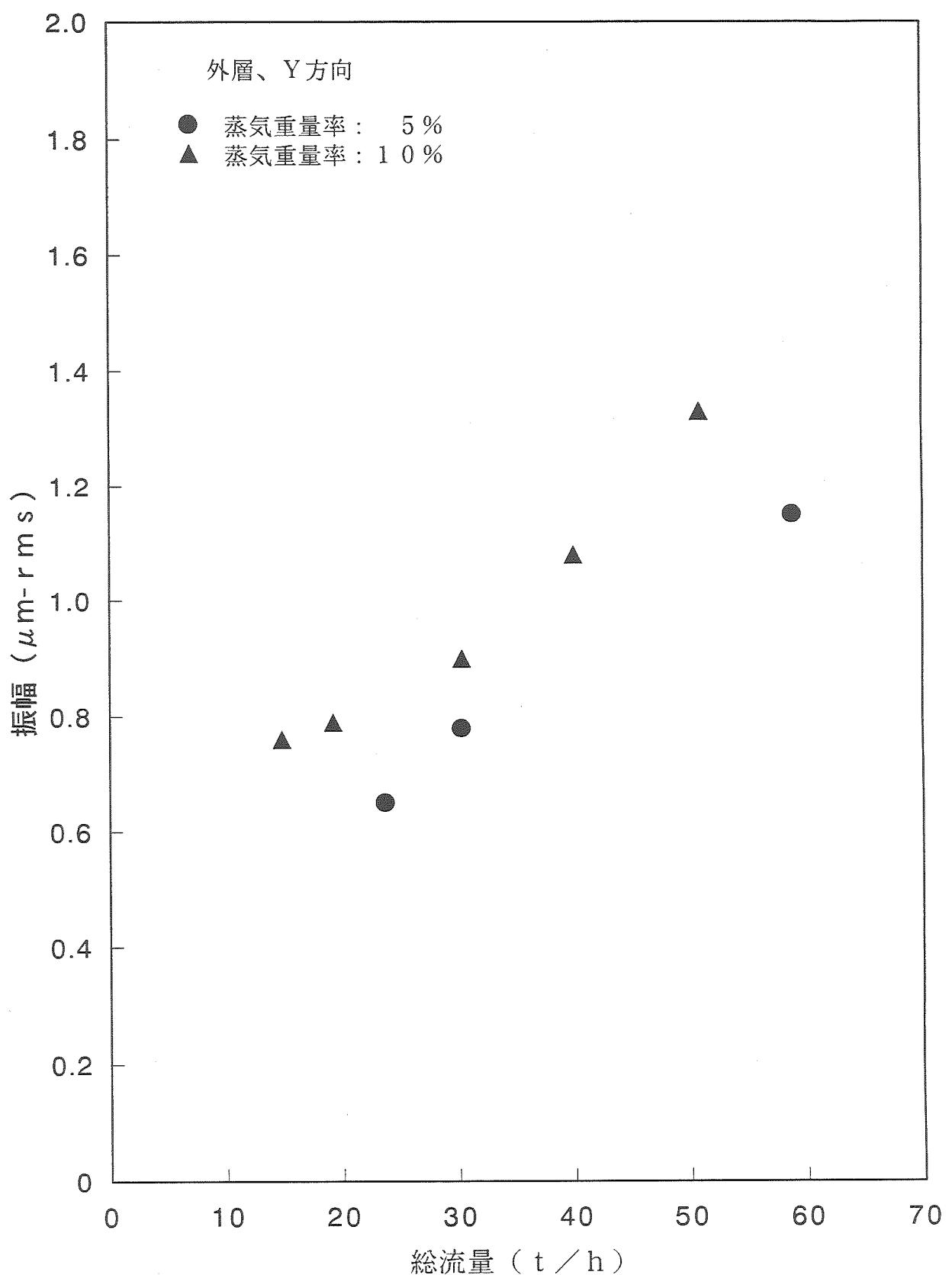


図4-49 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

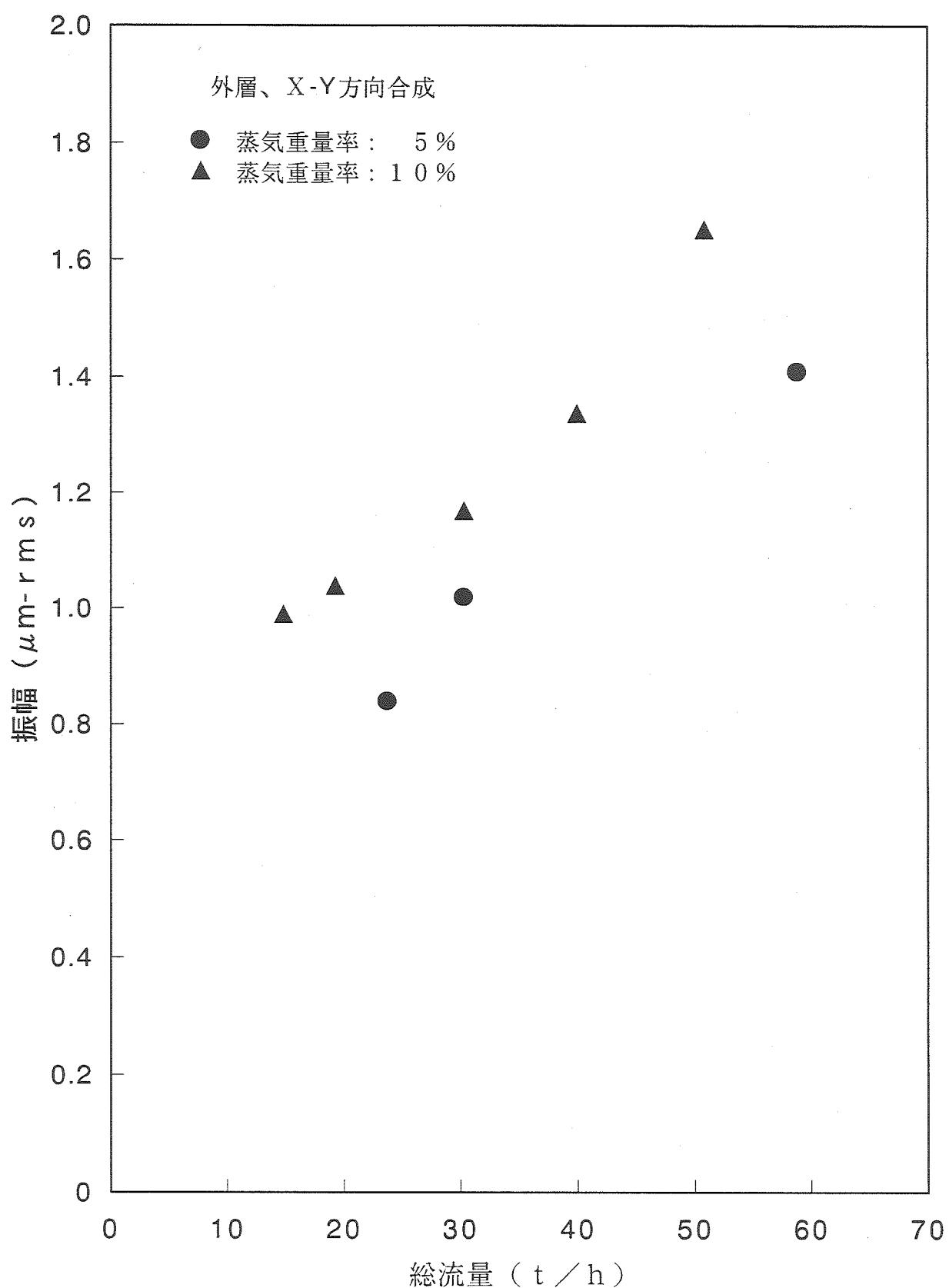


図4-50 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

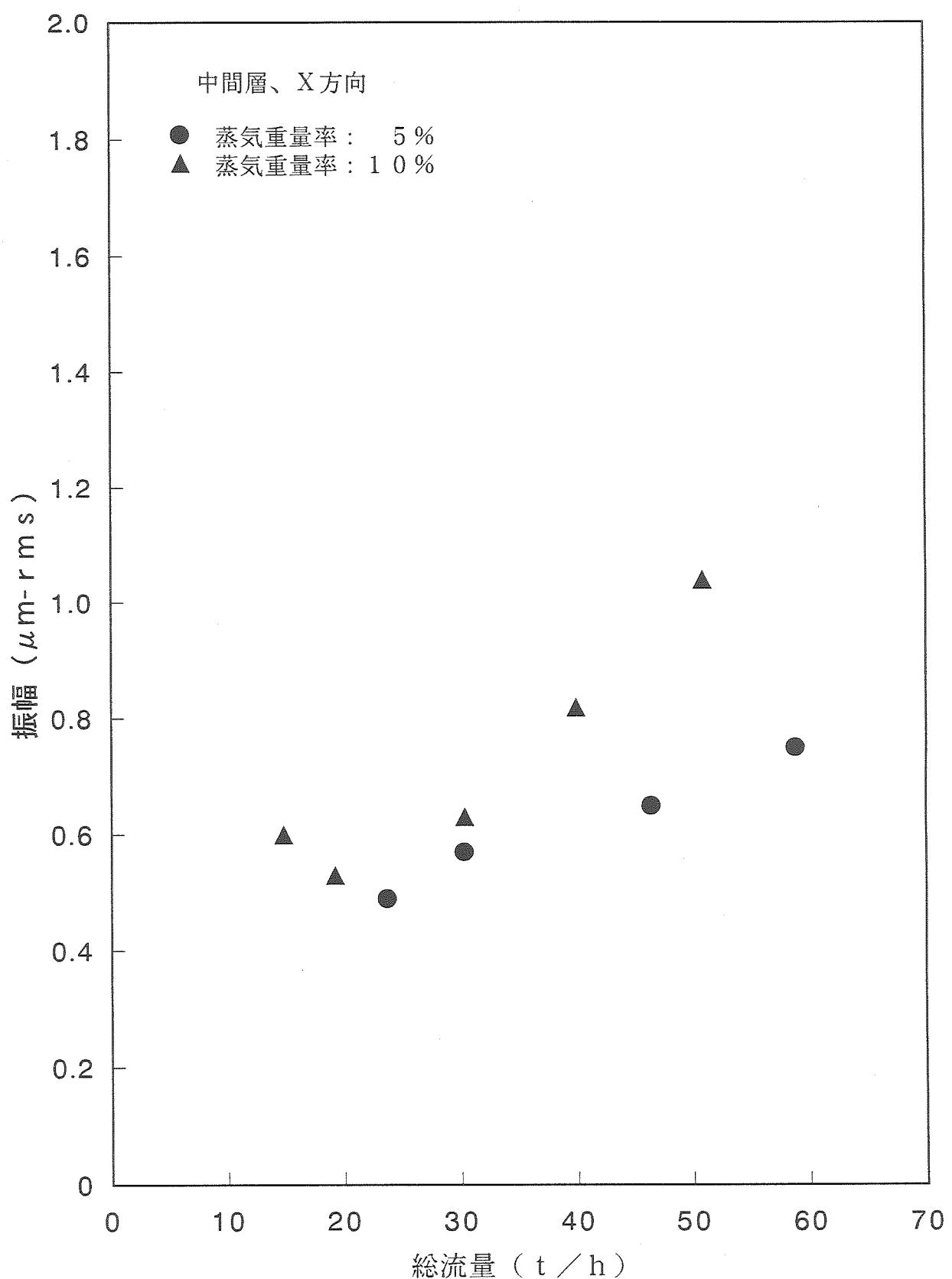


図4-51 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

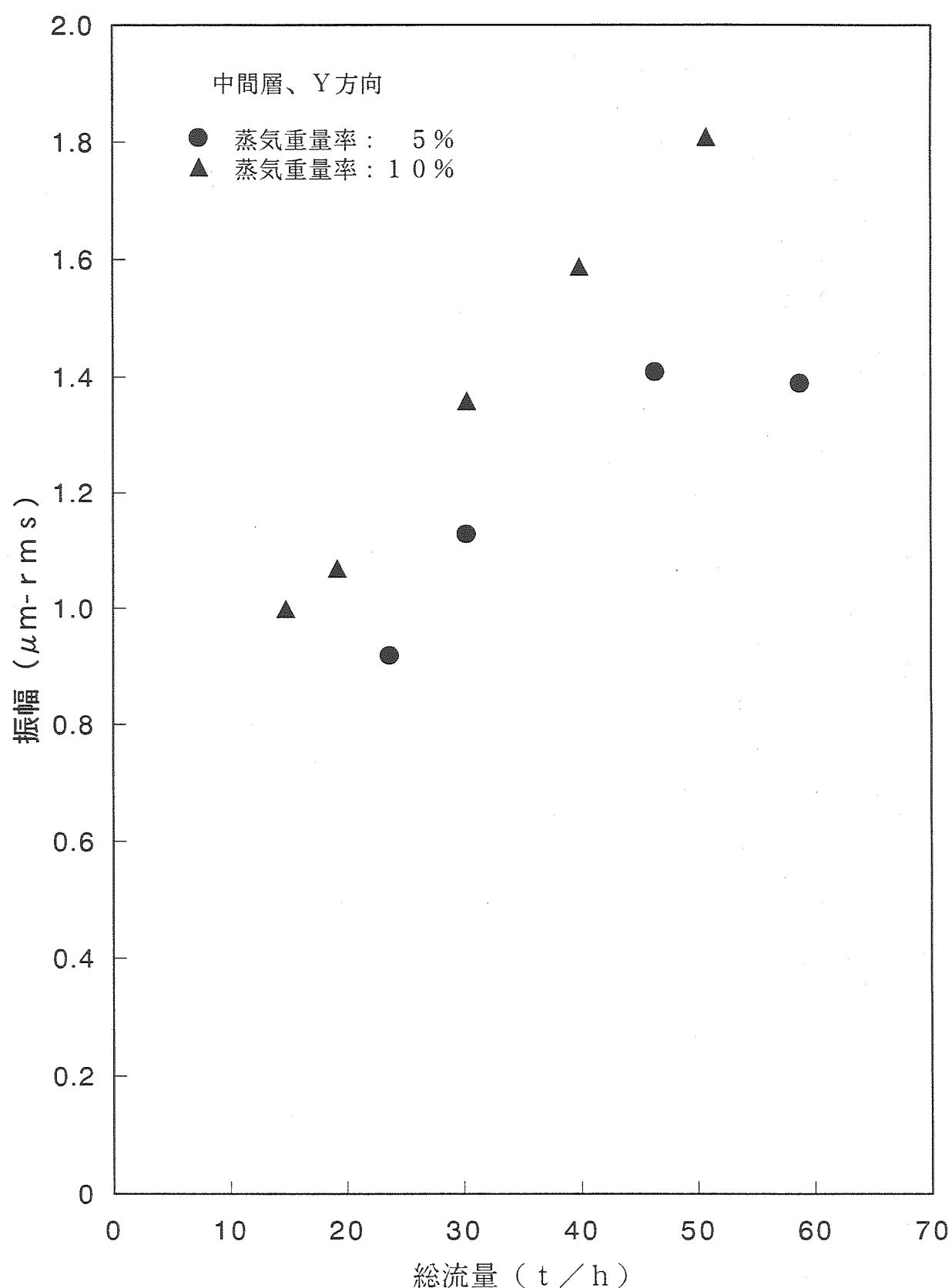


図4-52 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

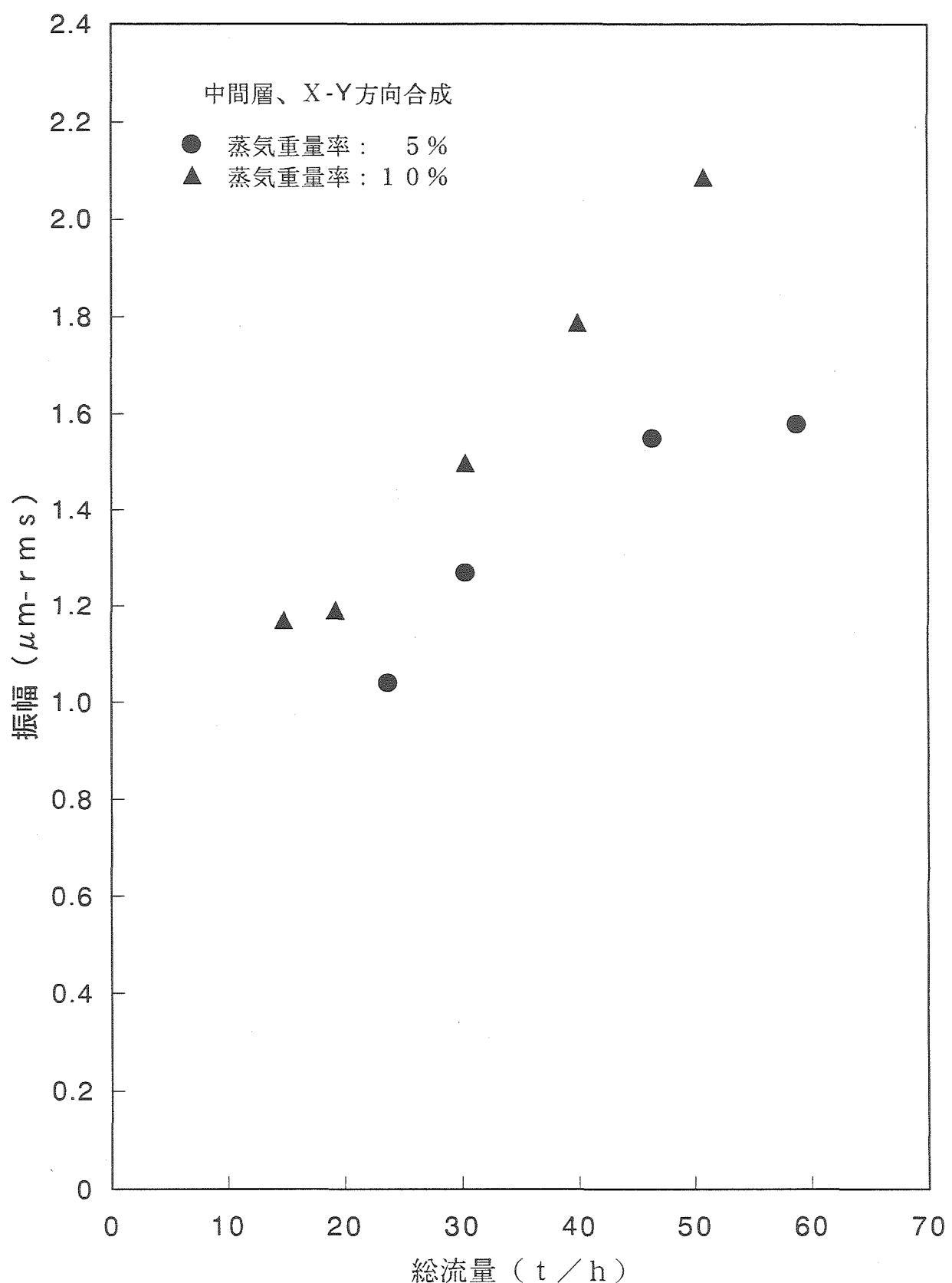


図4-53 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

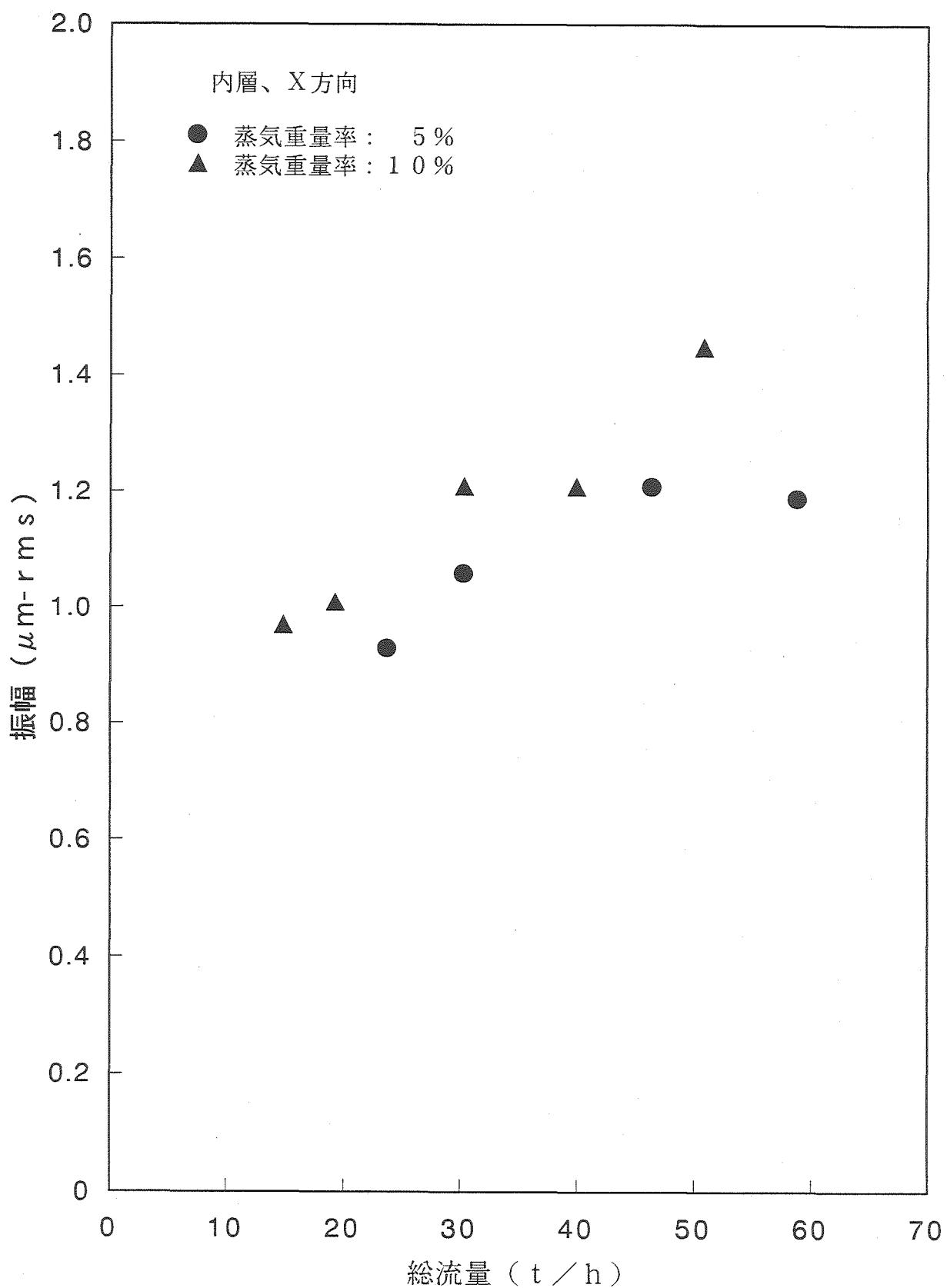


図4-54 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

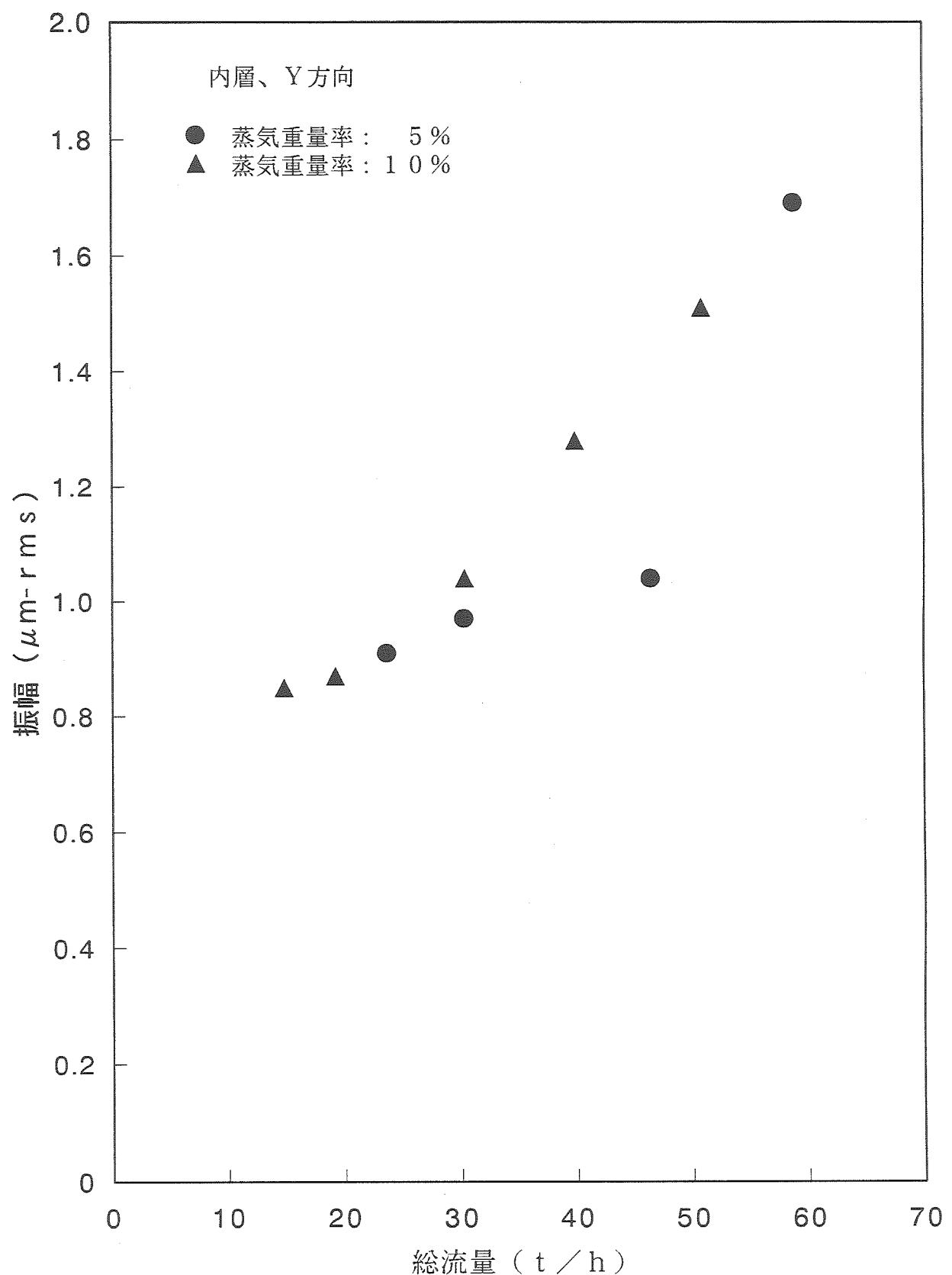


図4-55 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

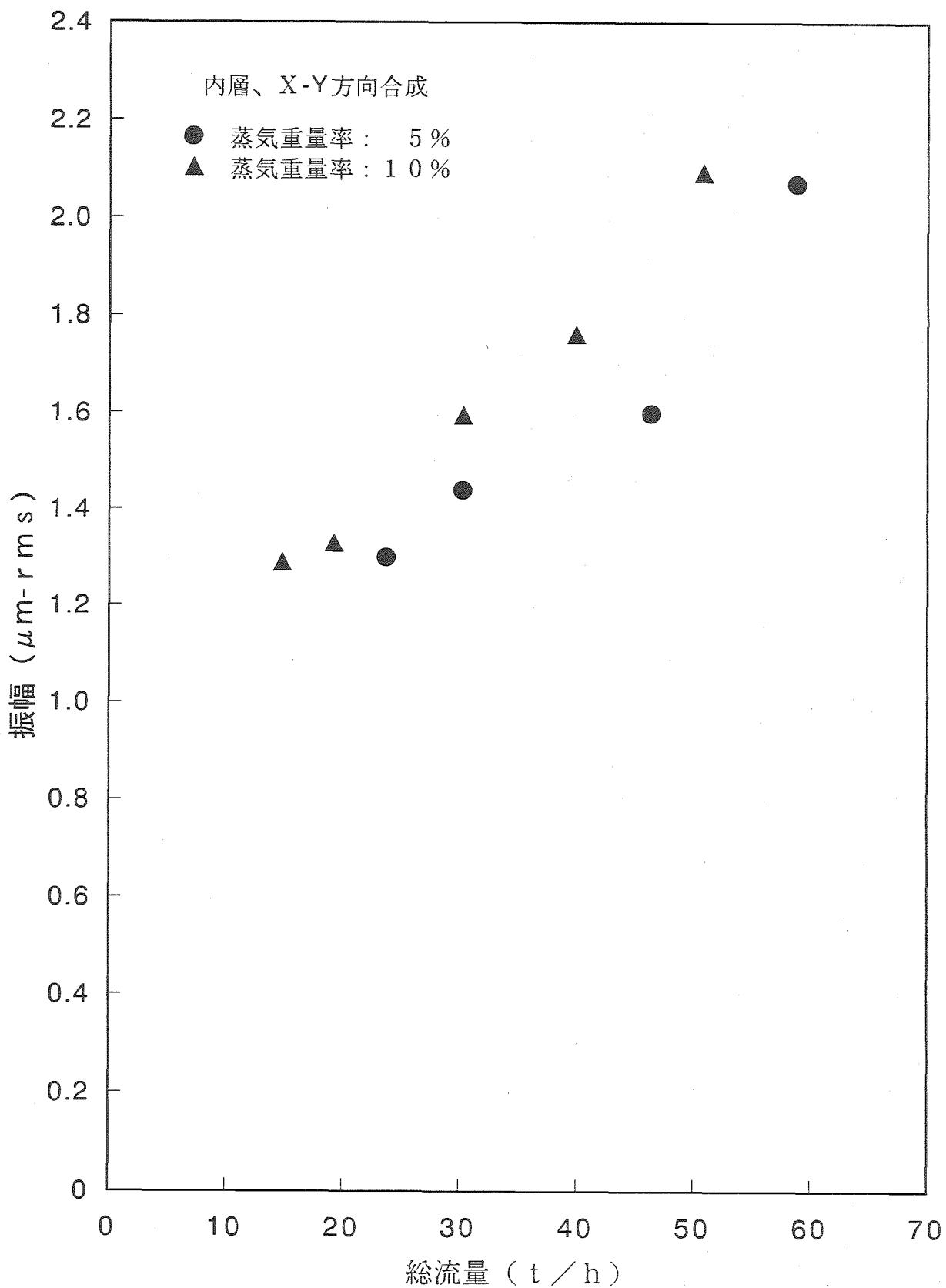


図4-56 流力振動振幅におよぼす総流量の影響

燃料要素の固有値計算

マルチスペルビームモデルを用いた有限要素法解析により、燃料要素の固有振動数および各モードの形状を計算する。各モードは最大値1で規格化された形状で表示される。



最大振幅スパンでの振幅計算

各モードで最大振幅を生じるスパンにおける振幅を計算する。流力振動振幅値の計算には、ATR燃料設計で用いられている下記のPaidousisの半実験式を使用する。

$$\frac{\delta}{D} = 5 \times 10^{-4} K \alpha_1^{-4} \left(\frac{u^{1.6} \varepsilon^{1.8} R e^{0.25}}{1+u^2} \right) \left(\frac{D_h}{D} \right) \left(\frac{\beta^{2/3}}{1+4\beta} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta &: \text{流力振動振幅} & D &: \text{被覆管外径} & D_h &: \text{水力等価直径} \\ \alpha_1 &: 1 \text{次モード振動の固定端特性} & u &: \text{無次元冷却材流速} \\ \varepsilon &: (\text{スパン長})/D & Re &: \text{レイノルズ数} & \beta &: \text{付加質量係数} & K &: \text{定数} \end{aligned}$$



各モードでの振幅分布計算

最大振幅値および最大値1で規格化されたモード形状から、各モードの軸方向振幅分布を計算する。



全モードでの振幅分布計算

各モードの振幅分布を合成(RMS)し、実際の振幅分布を計算する。



スペーサ支持部の滑り振幅計算

フレッティング摩耗解析に必要なスペーサ支持部での滑り振幅を計算する。

図5-1 フレッティング摩耗解析コード・流力振動計算部の計算フロー

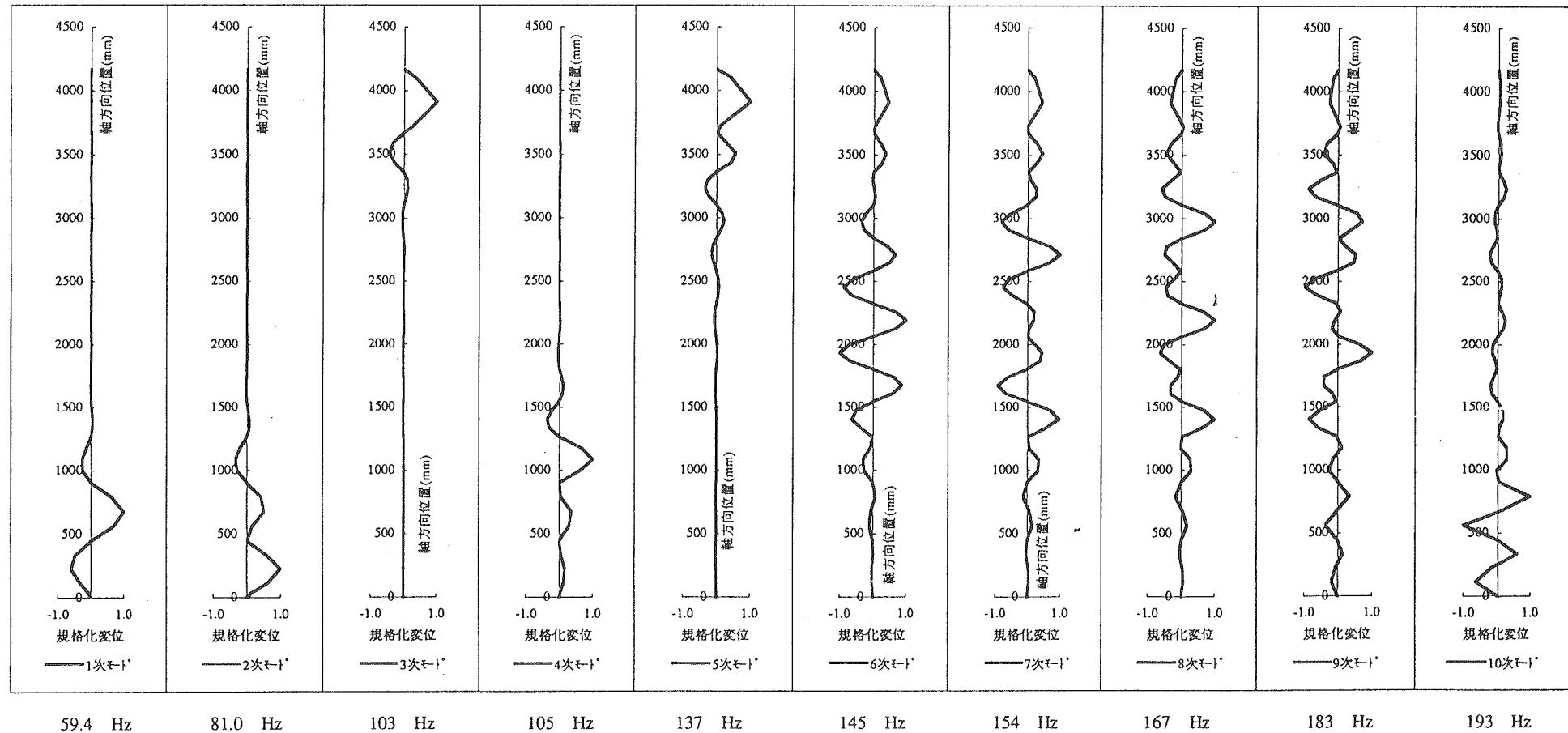


図5-2 フレッティング摩耗解析コードによる振動モード解析

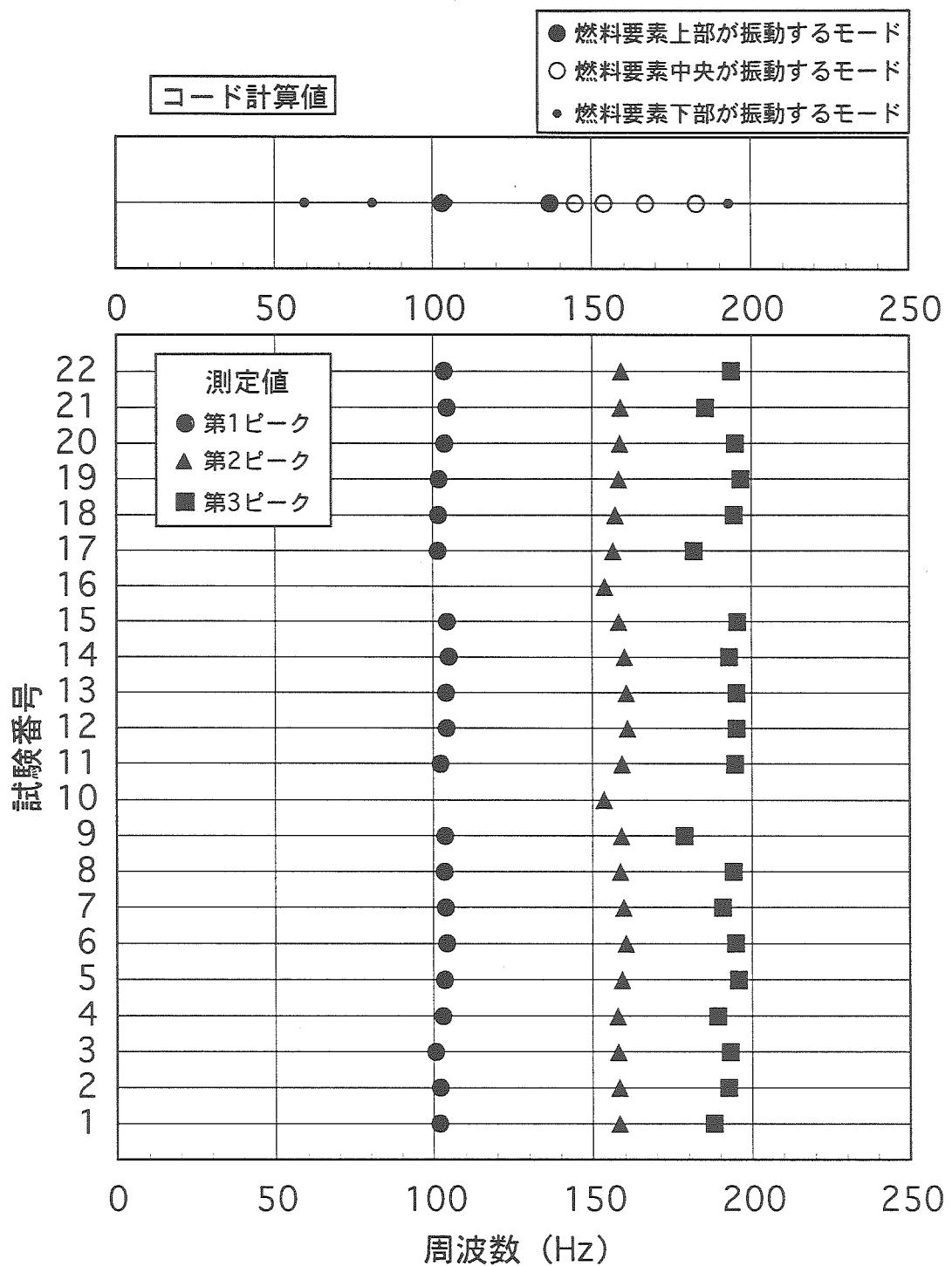


図5-3 卓越周波数のコード計算値と測定値の比較

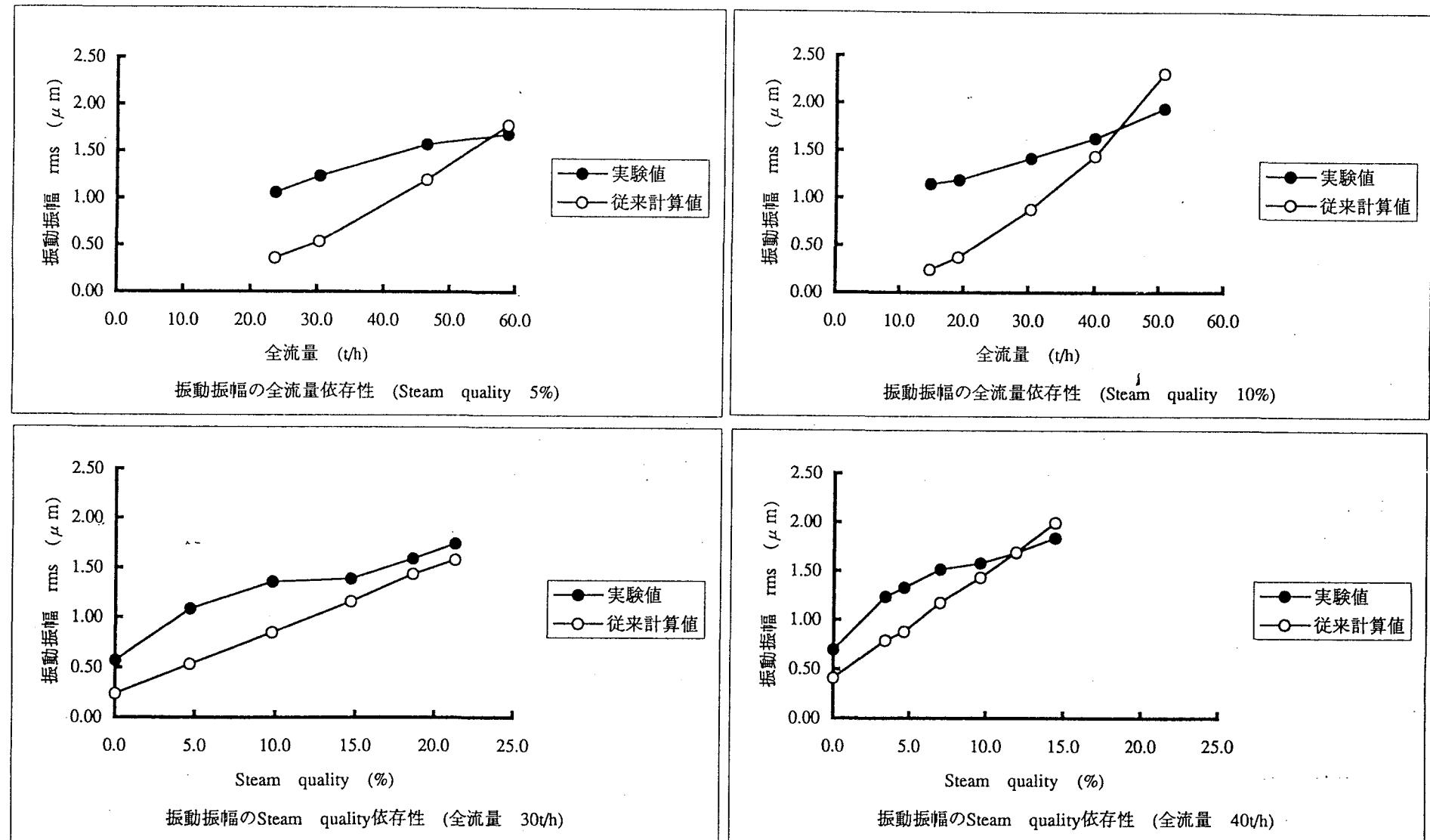


図5-4 振動振幅の比較（従来解析コードの計算結果との比較）

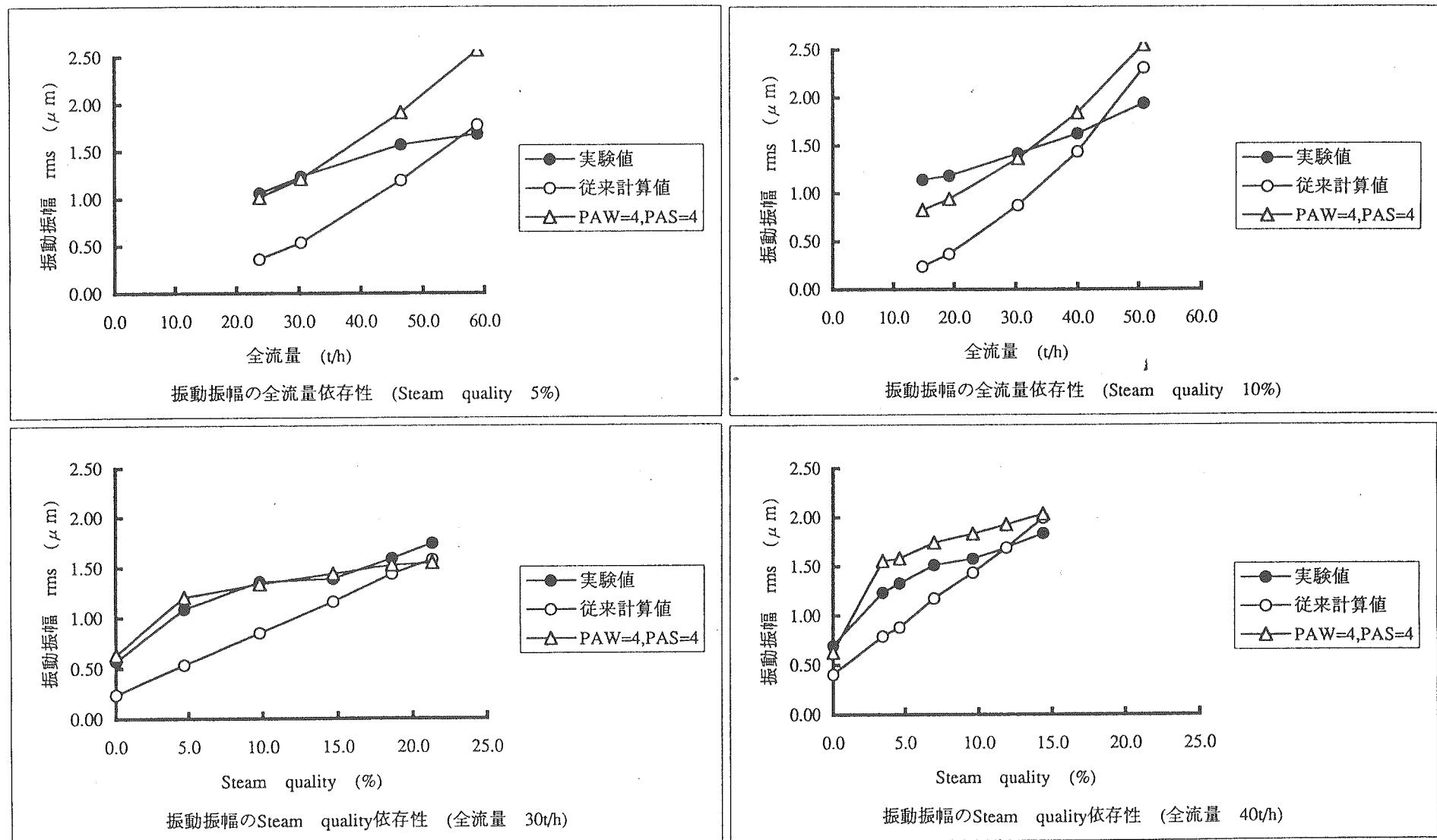


図5-5 振動振幅の比較（改良解析コードの計算結果との比較）

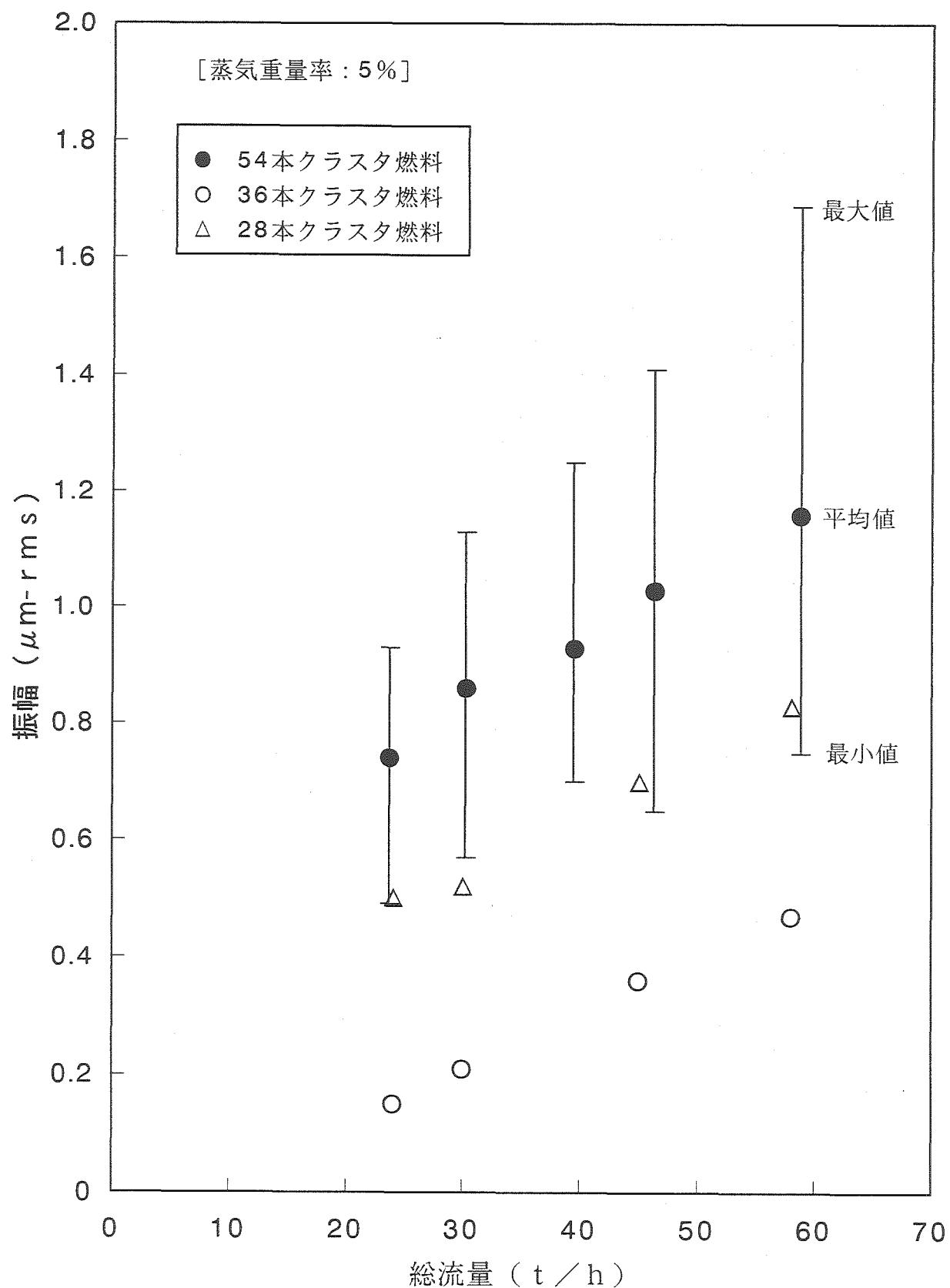


図5-6 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較
(蒸気重量率 : 5 %)

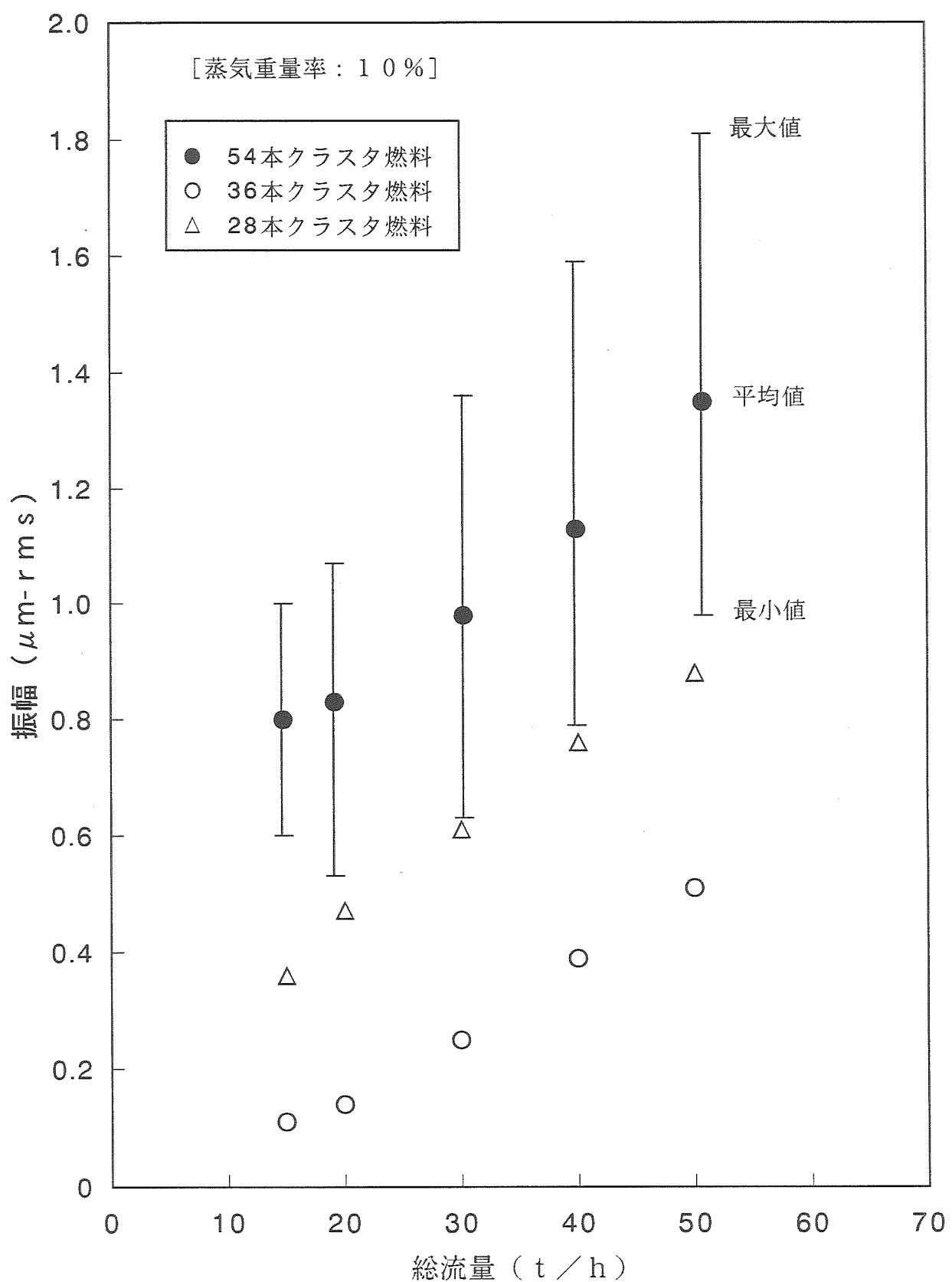


図5-7 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較
(蒸気重量率 : 10 %)

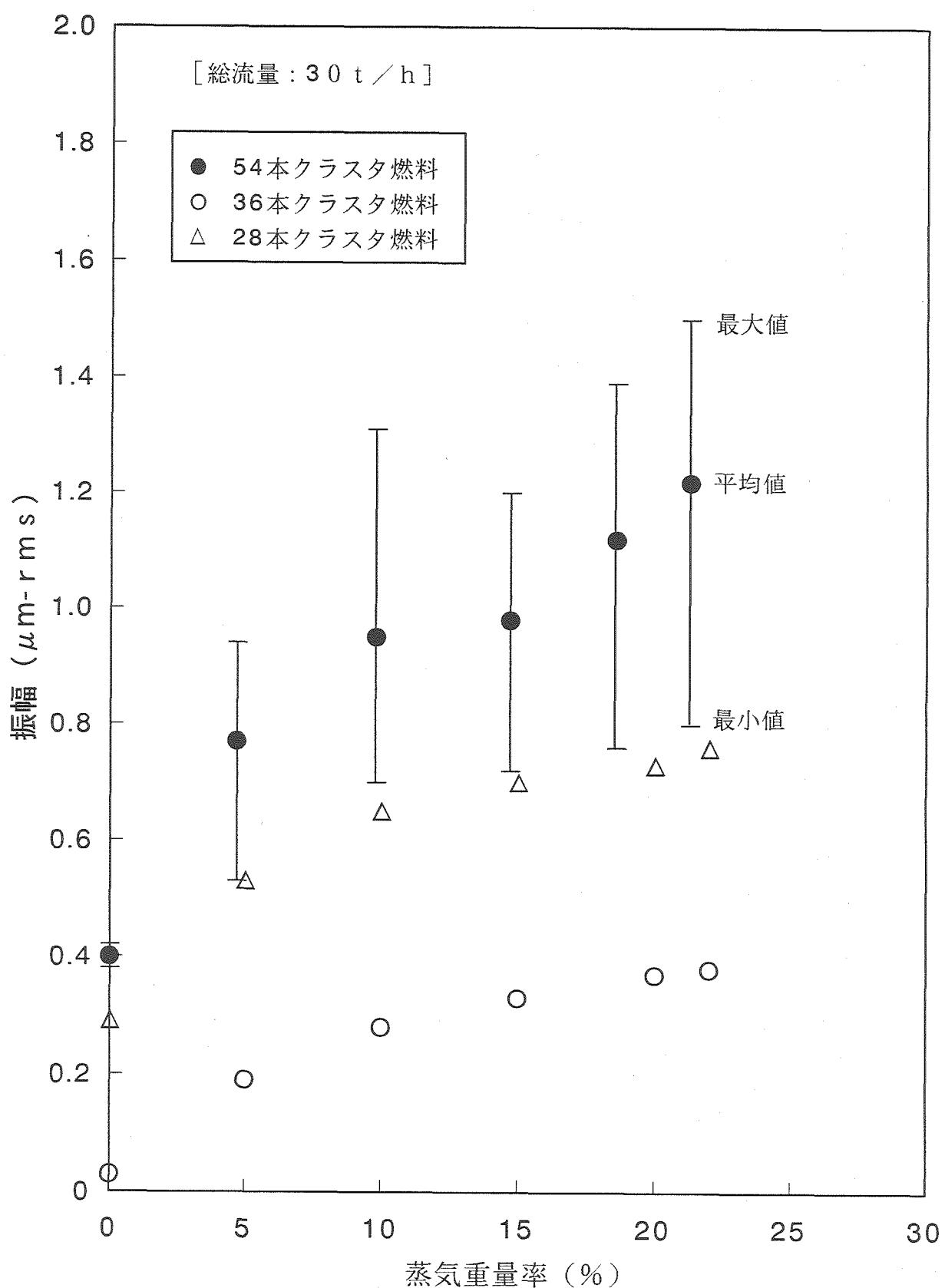


図5-8 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較
(総流量 : 30 t/h)

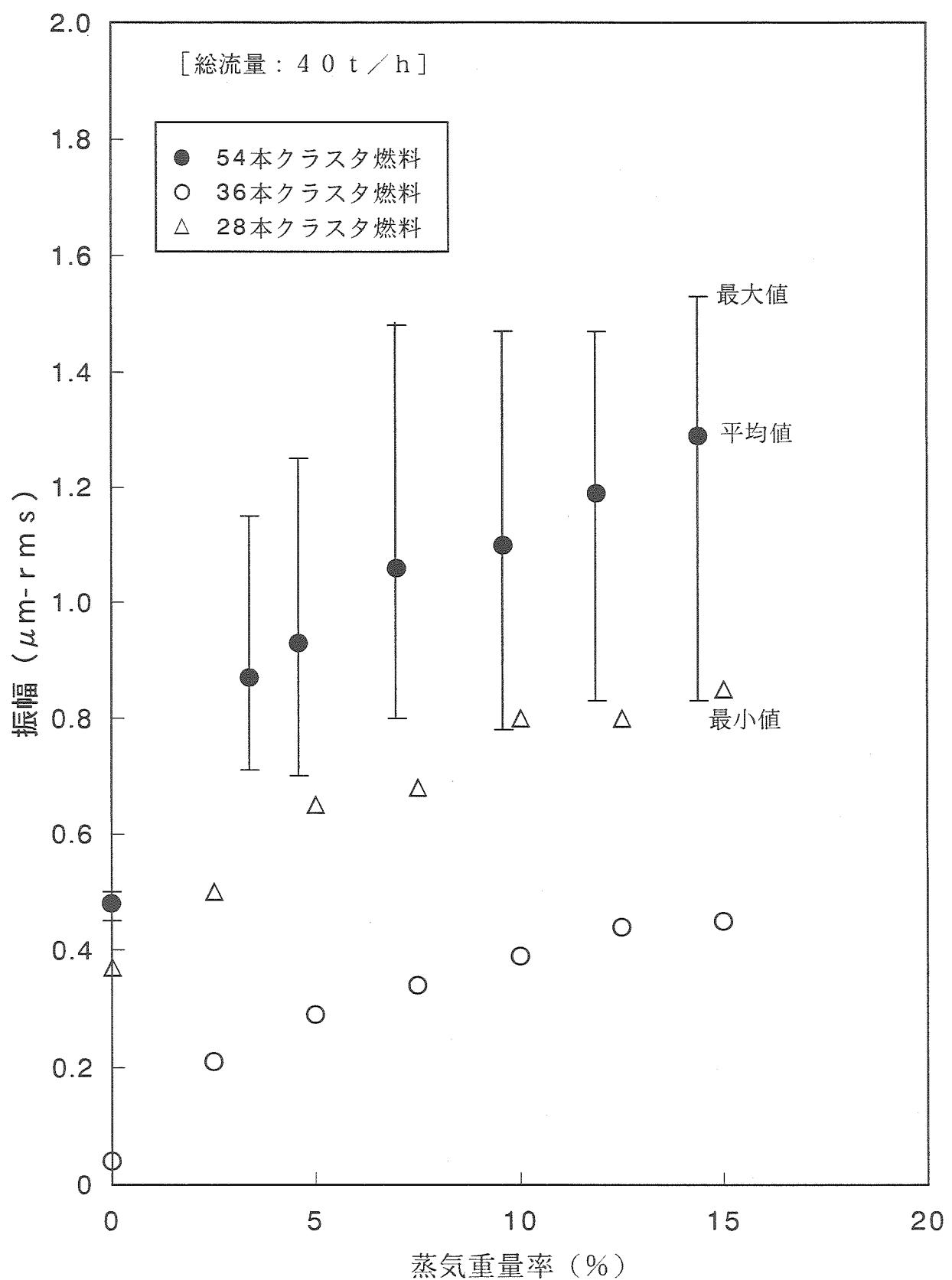


図5-9 28本および36本燃料集合体の振幅値の比較
(総流量 : 40 t/h)

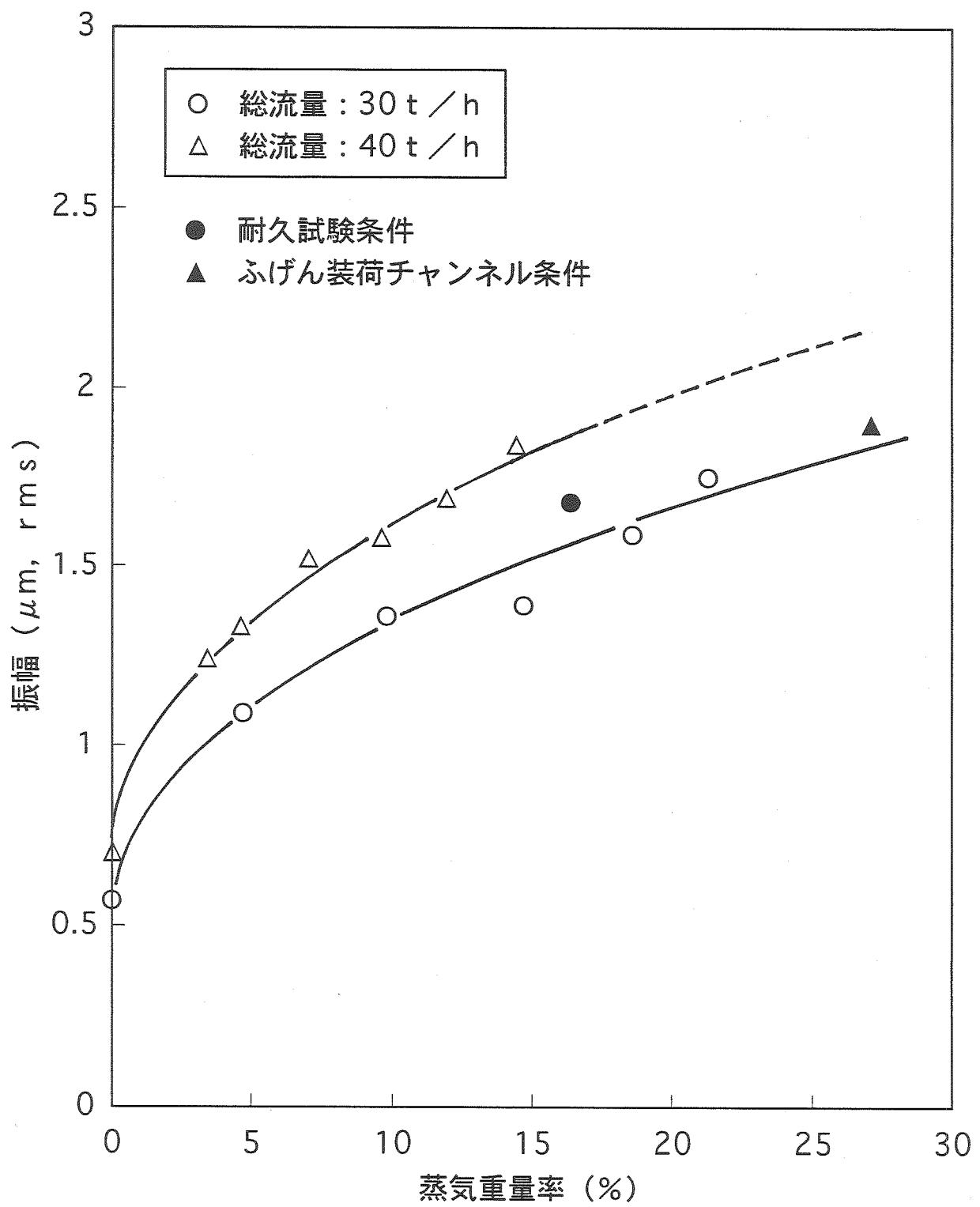


図5-10 ふげん装荷チャンネルの流動条件での振幅予測
(X-Y方向合成振幅)