

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820422

研究課題名(和文) 海洋構造物に対するセルフパワード振動制御装置の研究

研究課題名(英文) Research on self-powered vibration suppression technology for marine structures

研究代表者

竹澤 晃弘 (Takezawa, Akihiro)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10452608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：固定式の海洋構造物において、地震や波浪による振動は構造及び施設の損傷原因となる恐れがあり、その対処法の一つとして振動制御技術がある。振動制御技術の一つとして、外部からのエネルギー供給が不要な省エネ装置として、セルフパワード振動制御(Self-Powered Vibration Suppression: SPVS)装置が提案されている。しかし、SPVS装置には制御系設計の既存理論が適用できず、設計難易度が高いという問題点がある。本研究では、構造最適化法を活用し、海洋構造物に対するSPVS装置の最適設計法を構築した。

研究成果の概要(英文)： Vibration of tower type marine structure could be a serious problem damaging the structure and equipment. Vibration control technologies could resolve this issue. As a vibration control technique requiring no external energy supply, Self-Powered Vibration Suppression (SPVS) technology is proposed. However, since conventional design methodologies cannot apply to SPVS systems, the design difficulty of SPVS system is a crucial issue. In this research, we developed design methodology of SPVS system for marine structures based on structural optimization methodology.

研究分野：構造最適化

キーワード：海洋構造物 振動制御 構造最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、洋上風力発電等の海洋エネルギー利用及び海底資源開発が注目されており、その基盤となる海洋構造物の重要性が高まっている。固定式の海洋構造物において、地震や波浪による振動は構造及び施設の損傷原因となる恐れがあり、その対処法の一つとして振動制御技術がある。振動制御技術の一つとして、外部からのエネルギー供給が不要な省エネ装置として、セルフパワー振動制御 (Self-Powered Vibration Suppression: SPVS) 装置が提案されている。この技術は圧電アクチュエータを利用して振動エネルギーから電力を取り出し、圧電アクチュエータにコイルを付加し構成する LCR 回路とスイッチから成る制御用電子回路により、電流を増幅・反転させ圧電アクチュエータに回生し、振動による変位と反対方向の力を効率的に発生させ優れた制振効果を生み出す。電力供給手段が海底ケーブルであり、振動制御のための余剰電力を有さない海洋構造物にとって、外部エネルギーが不要な SPVS 装置は有効な制振法になりうる。

2. 研究の目的

SPVS 装置は既存の制御装置設計のセオリーが適用できず、圧電アクチュエータの設置位置等の設計難易度が高い。さらに、海中での構造物の挙動は陸上とは異なるため、制御系設計においてもそれに対応しなければならない。また、SPVS 装置の制振過程において、スイッチ切り替えにより電圧が急激に反転し、構造物に衝撃が加わり、それが高周波振動を励起するという問題がある。そこで本研究では、以上の課題をふまえ、海中での利用を前提とした、SPVS 装置における圧電アクチュエータの最適設計法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 圧電アクチュエータのモデル化

本研究では、海洋構造物のモデルとして、図 1 に示すトラス構造を考える。このトラス構造の振動を抑制するために、SPVS 回路を組み込んだ圧電アクチュエータをトラス部材に設置する。トラスと圧電アクチュエータは図 2 に示すように直列に結合する。全トラス要素を圧電アクチュエータの設置候補と

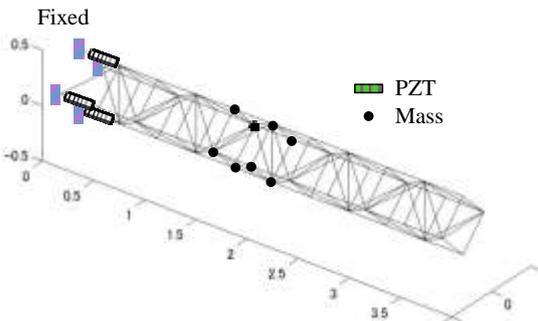


図 1 海洋構造物モデル

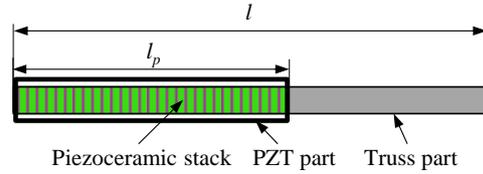


図 2 圧電アクチュエータ設置方法

し、圧電アクチュエータの長さを設計変数とし、最適化を行うことで、圧電アクチュエータの最適レイアウトが得られる。

圧電アクチュエータに及ぼされる引張力 f_p 、発生する電圧 V は、積層型圧電素子の変位 δl_p 、蓄えられる電荷 Q を用いて次のように表される。

$$f_p = k_p \delta l_p - b_p Q \quad (1)$$

$$V = -b_p \delta l_p + \frac{Q}{C_p} \quad (2)$$

ただし

$$k_p \equiv \frac{A_p \epsilon_{33}}{l_p (\epsilon_{33} s_{33} - d_{33}^2)} \quad (3)$$

$$b_p \equiv \frac{d_{33}}{n_p (\epsilon_{33} s_{33} - d_{33}^2)} \quad (4)$$

$$C_p \equiv \frac{A_p n_p^2 (\epsilon_{33} s_{33} - d_{33}^2)}{l_p s_{33}} \quad (5)$$

k_p , b_p , C_p はそれぞれ圧電アクチュエータの軸力方向の剛性、圧電係数、キャパシタンスを表す。また s , d , ϵ は、弾性コンプライアンス定数、圧電定数、誘電率を表す。これら二つの式が圧電アクチュエータ内の積層型圧電素子の特性を表す方程式となる。

今回、圧電アクチュエータとトラス要素が同じ軸力方向剛性を持っていると単純化することで、圧電アクチュエータの配置変更に伴う固有値、および固有ベクトルの変更を回避するため圧電素子の変位は次のように表すことができる。

$$\delta l_p = \frac{l_p}{l} \delta l \quad (6)$$

圧電アクチュエータは、Fig. 2, Fig. 3 で表すように圧電素子、またそれを外部の金属部、接続される金属部より構成されている。それぞれの剛性を k_p , k_1 , k_2 とすると、圧電アクチュエータに及ぼされる引張力 f_a 、電圧 V は圧電アクチュエータ変位 u_a 、電荷 Q を用いて次のように表せる。

$$f_a = k_a u_a - b_a Q \quad (7)$$

$$V = -b_a u_a + \frac{Q}{C_a} \quad (8)$$

$$k_a \equiv \frac{k_2(k_1 + k_p)}{k_1 + k_2 + k_p} \quad (9)$$

$$b_a \equiv \frac{b_p k_2}{k_1 + k_2 + k_p} \quad (10)$$

$$C_a^s \equiv \left(\frac{1}{C_p^s} - \frac{b_p^2}{k_1 + k_2 + k_p} \right)^{-1} \quad (11)$$

(2) セルフパワー振動制御回路

SPVS 装置において、トラス部材に配置される各圧電アクチュエータは、電源、キャパシタ、抵抗として働き、またインダクタ、スイッチが設置され図 3 に示すような LCR 回路を成す。SPVS 装置では図 4 に示すように回路のスイッチの開閉を制御することにより、電荷として可能な限りの電気エネルギーを蓄える。スイッチをオンにした後、速度が正のときは電荷が減少し始め、速度が負のときは電荷が増加し始める。しかし、電荷の減少（あるいは増加）は電気振動であり継続的ではないため、スイッチ制御法則により変位のピークでスイッチを回路の固有周期の半分の間だけ閉じることで、電荷は次の変位のピークまでの間そのピーク値を維持する。これにより振動エネルギーが電気エネルギーに素早く変換され、振動が抑制される。

(3) 付加流体質量

陸上構造物と海洋構造物の振動の違いは、周囲流体にある。陸上のように周囲流体が密

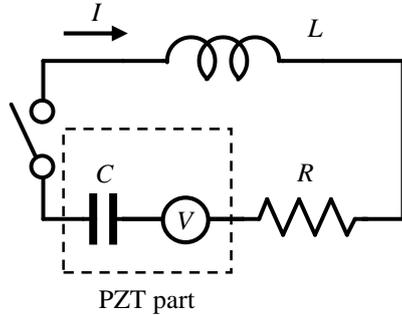


図 3 SPVS 装置の LCR 回路

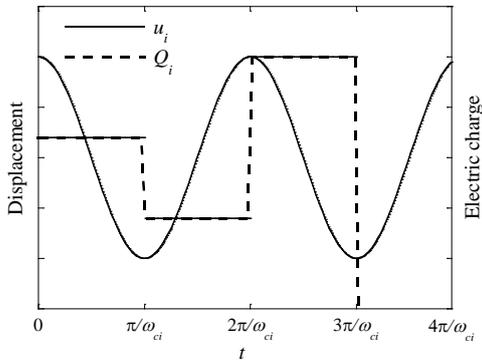


図 4 SPVS 装置における電荷変動概略図

度の小さい気体の場合は影響が小さいが、水中、すなわち周囲流体が水や海水のように大きな密度を持っている場合は周囲流体も構造物の振動により運動していると考えらなければならない。この影響を付加質量効果という。これは流体中を運動する物体は、加速度に比例した流体反力を周囲流体から受ける現象を示し、見かけ上その物体の質量が増加したように振舞う。

本研究では、簡単のため周囲流体が粘性、圧縮性を持たない完全流体であると仮定し算出を行う。図 5 に示すように半径 a の無限長の円柱が静止流体中を x 軸方向へ運動すると考えると、流体運動は 2 次元流と考えることができ、このとき、流体の速度ポテンシャル φ 、流れの関数 ψ はラプラス方程式 $\Delta\varphi = 0, \Delta\psi = 0$ の解、円柱速度 U より次のように得られる。

$$\varphi = -\frac{a^2 U}{r} \cos\theta, \psi = \frac{a^2 U}{r} \sin\theta \quad (12)$$

複素ポテンシャル Φ は、オイラーの公式を適用することで次のように表せる。

$$\Phi = \varphi + i\psi = -\frac{a^2 U}{r e^{i\theta}} = -\frac{a^2 U}{z} \quad (13)$$

ただし

$$z = x + iy = r e^{i\theta} \quad (14)$$

また、ベルヌーイの定理より

$$p = -\frac{\partial\varphi}{\partial t} \rho - \frac{q^2}{2} \rho \quad (15)$$

ここで q, ρ は流体速度、流体密度を示す。式 (12), (13), より式 (15) を変形すると

$$p = a^2 \frac{\dot{U}}{r} \cos\theta + \frac{a^2 U^2}{r^2} \cos 2\theta - \frac{a^4 U^2}{2r^4} \quad (16)$$

円柱に作用する流体力の x 成分、 y 成分を P_x, P_y とすると、以下のように計算できる。

$$P_x = -\int_0^{2\pi} P|_{r=a} \cos\theta \cdot a d\theta = -\rho\pi a^2 \dot{U} \quad (17)$$

$$P_y = -\int_0^{2\pi} P|_{r=a} \sin\theta \cdot a d\theta = 0 \quad (18)$$

上式からわかるように円柱は運動の反対方向に加速度に比例した流体反力を受けることがわかる。加速度の比例定数の $-\rho\pi a^2$ が円柱の付加質量となる。以上の付加流体質量を構造物に作用させ最適化を行う。

(4) Shock Response Spectrum

Shock Response Spectrum (SRS) とは構造物の衝撃に対する影響を評価する手法の一つであり、その構造物にある範囲内で固有振動数を持つ機器が設置されていると仮定し、それを 1 自由度系ですべて近似し、それぞれの固有振動数での機器の受ける慣性力を評価

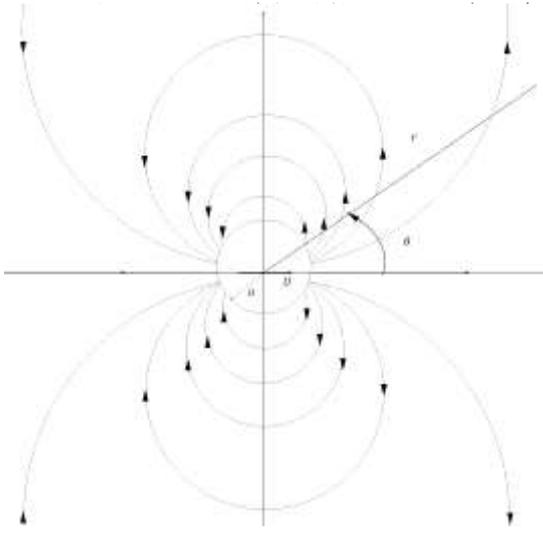


図5 付加流体質量モデル

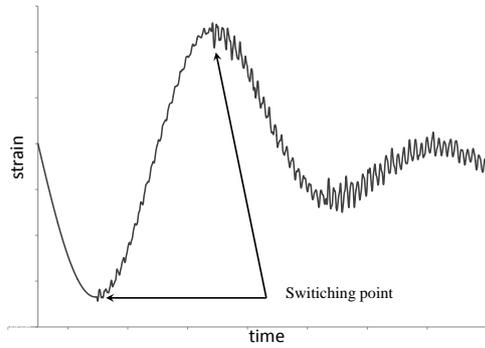


図6 SPVS装置の二次励振概略

系に、変位、速度、加速度を付加し、衝撃に対する応答をその1自由度系の固有振動数ごとに計算を行う。この値がSRS値と呼ばれ、構造物への大きく影響を与える周波数帯を探す指標となる。本研究ではセミアクティブ振動制御法の制御則において、図6に示すように、スイッチ切り替えのタイミングで電圧の急激な反転により構造物に高周波の衝撃が加わり、宇宙構造物内に設置される電子機器が破損する恐れがある。これを回避するためにSRS制約を導入する。

SRS値を求めるにあたって、構造物より時間毎の変位、速度、加速度を構造解析により得る。これを1自由度系に作用させることで次の運動方程式を得る。

$$m\ddot{u} + c(\dot{u} - \dot{z}) + k(u - z) = 0 \quad (19)$$

$\omega = \sqrt{k/m}$, $Q = \sqrt{mk/c}$ とすると、

$$\ddot{u} + \frac{\omega}{Q}(\dot{u} - \dot{z}) + \omega^2(u - z) = 0 \quad (20)$$

$u - z = y$ の相対座標をとると次の式を得る。

$$\ddot{y} + \frac{\omega}{Q}(\dot{y} - \dot{z}) + \omega^2 y = \ddot{z} \quad (21)$$

上式より、固有角振動数 ω を持つ1自由度系

に対してのSRS値は次のようになる。

$$SRS(\omega) \equiv \max \|\ddot{y} + \ddot{z}\| = \max \|\ddot{u}\| \quad (22)$$

ある範囲の固有角振動数 ω に対して $SRS(\omega)$ を計算し、その最大値が制約条件を満たすように最適化を行う。

(5) 最適化アルゴリズム

本研究では、次のように最適化問題を設定する。

$$\text{minimize } F(\mathbf{r}, \mathbf{u}) = \int_0^T \|\mathbf{u}\|^2 dt \quad (23)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^{n_p} r_i l_p \leq l^U \quad (24)$$

$$r_{\min} \leq r_i \leq 1 \text{ for } i = 1, \dots, n_p \quad (25)$$

$$\max \{SRS(\omega)\} \leq SRS^U \quad (26)$$

ここで、 \mathbf{r} は設計変数ベクトル、 \mathbf{u} は変位ベクトル、 l^U はアクチュエータ長さ上限値、 n_p はトラスの本数、 SRS^U はSRS制約の上限値である。目的関数、制約条件に関しては随伴変数法で、SRS値は数値微分で設計変数に関する感度を計算し、勾配法の一つであるMethod of Moving Asymptotes (MMA)を用い設計変数を更新する。

4. 研究成果

最適化計算に用いる各種パラメータとして、トラスは $1.99 \times 10^6 \text{N/m}$ の軸方向剛性、 $9.5 \times 10^{-2} \text{kg/m}$ の線密度を持つものとする。また、単純化のため、配置される圧電アクチュエータに関しても同様の剛性、密度を持つものとする。圧電アクチュエータの各種物性値は $b_0 = 1.31 \times 10^8 \text{N/C}$ 、 $C_0 = 2.28 \times 10^{-7} \text{F}$ 、 $R_0 = 1.97 \times 10^3 \Omega$ とする。各ベイの長さは 0.38m とし、4番5番ベイの各節点に 0.5kg の集中質量が作用するものとする。また、許容する圧電アクチュエータの総長はトラス部材の総長の30%とする。

(1) 様々なモードに対する最適化

最初に、付加水質量及びSRS制約を考慮せずに、様々なモード励振に対して最適化を行う。得られた結果を図7に示す。トラス部材に対する圧電アクチュエータの長さ比をグレースケールで表す。各振動モードの腹にあたる部分に圧電アクチュエータがレイアウトされており、妥当な解であるといえる。

(2) 付加流体質量を考慮した最適化

次に付加流体質量をモデル内で考慮して最適化を行う。(1)と同様の条件で最適化したところ、付加流体質量を考慮しない場合

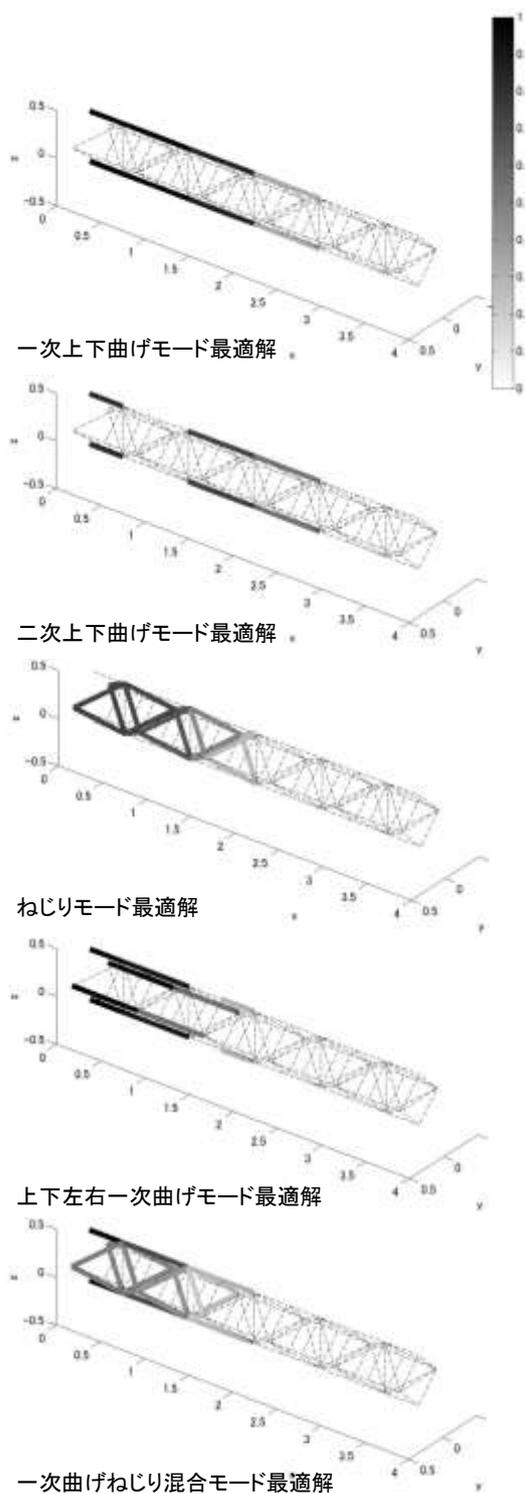


図7 様々なモードに対する圧電アクチュエータレイアウト最適解

とほぼ同じ形状が得られた。すなわち、圧電素子の設置においては、静水中では陸上における最適解がそのまま使用できることがわかった。ただし、図8に示すように、付加流体質量の影響により構造物の固有周期は変化するため、制御システム的设计では静水の影響を考慮する必要がある。

(3) SRS 制約を考慮した最適化

最後に、上限値を 43m/s^2 とし、SRS 制約を導入して最適化を行う。図9に一次モード共振の最適解を、図10にSRSのグラフを示す。SRS 制約を適用した場合、構造物中央付近のNo.5-7のベイにおいて、圧電アクチュエータの長さが短いことがわかる。図10より、SRS 計算のために用いた1自由度系の固有角振動数が $10000\sim 12000\text{rad/s}$ であるときにSRSが大きく減少している。構造物の固有角振動数とSRS 計算時の1自由度系の固有角振動数には相関があり、両者が一致すると値が大きくなることが知られている。すなわち、最適化対象の構造には、 $10000\sim 12000\text{rad/s}$ の周波数

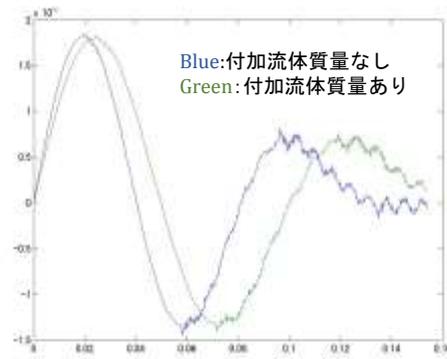


図8 付加流体質量による固有周期変化

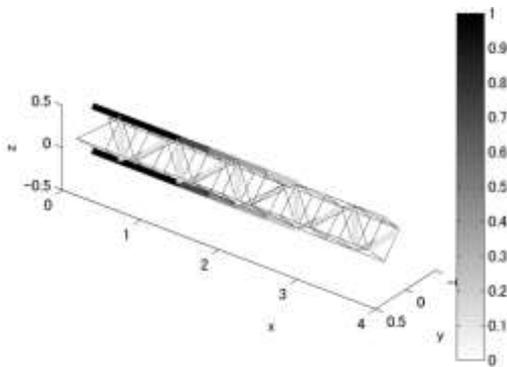


図9 SRS 制約を考慮した一次上下曲げモードに対するアクチュエータレイアウト最適解

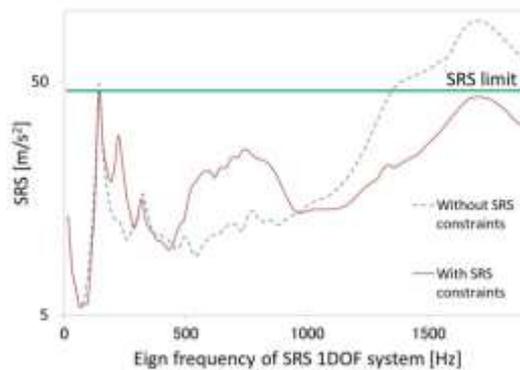


図10 SRS 制約によるSRS 値の低下

帯に、No.5-7 のベイが大きく変形する固有振動モードが存在する可能性がある。以上より、SPVS 装置において圧電アクチュエータ内における電荷反転による二次励振の緩和に、提案する最適設計手法が有効であることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. 中野陽平, 竹澤晃弘, 榎原幹十朗, 北村充, エネルギー回生式セミアクティブ振動制御装置に対する SRS 制約を導入した圧電アクチュエータ最適配置, 日本機械学会論文集, 査読有, 採択済.

2. M. Daifuku, T. Nishizu, A. Takezawa, M. Kitamura, H. Terashita, Y. Ohtsuki, Design methodology using topology optimization for anti-vibration reinforcement of generators in a ship's engine room, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 査読有, accepted.

DOI: 10.1177/1475090214543081.

3. A. Takezawa, K. Makihara, N. Kogiso, M. Kitamura, Layout optimization methodology of piezoelectric transducers in energy-recycling semi-active vibration control systems, Journal of Sound and Vibration, 査読有, Vol. 333, 2014, pp. 327-344.

DOI:10.1016/j.jsv.2013.09.017

4. A. Takezawa, M. Kitamura, S.L. Vatanabe, E.C.N. Silva, Design methodology of piezoelectric energy-harvesting skin using topology optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 査読有, Vol.49, No.2, 2014, pp.281-297.

DOI:10.1007/00158-013-0974-x

5. T. Nishizu, A. Takezawa, M. Kitamura, Damage detection method by topology optimization based on eigenvalue analysis, Proceedings of ISOPE 2014, 査読有, CD-ROM.

6. T. Nishizu, A. Takezawa, M. Kitamura, Damage detection method for plank using topology optimization in non-destructive testing, Proceedings of CJK-OSM8, 2014, 査読有, CD-ROM.

7. 西津卓史, 竹澤晃弘, 北村充, トポロジー最適化と固有振動数解析に基づく非破壊検査での損傷同定手法, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, Vol.18, 2013, pp.73-80.

DOI:10.2534/jjasnaoe.18.73

8. M. Daifuku, K. Kawasaki, A. Takezawa, M. Kitamura, Anti-vibration reinforcement design methodology of ship engine room using topology optimization, Proceedings of ICCAS2013, 査読有, Vol.3, 2013, pp175-179.

[学会発表] (計 7 件)

1. 中野陽平, エネルギー回生式セミアクティブ振動制御法の海洋構造物への適用に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 26 年秋季講演会, 2014 年 11 月 20 日, 長崎ブリックホール (長崎県).

2. 西津卓史, 溶接残留応力の低減に向けたトポロジー最適化の活用に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 26 年秋季講演会, 2014 年 11 月 20 日, 長崎ブリックホール (長崎県).

3. 中野陽平, エネルギー回生式セミアクティブ振動制御装置に関する SRS 制約を導入した PZT 配置, 日本機械学会 第 24 回設計工学・システム部門講演会, 2014 年 9 月 18 日, 徳島大学 常三島キャンパス (徳島県).

4. 能勢統章, 調和 CSR 対応直接計算ソフトウェアの防振最適設計への活用に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 25 年秋季講演会, 2013 年 11 月 22 日, 大阪府立大学 I-site なんば (大阪府).

5. 西津卓史, 振動解析に基づくトポロジー最適化による非破壊検査での損傷特定手法, 日本船舶海洋工学会平成 25 年秋季講演会, 2013 年 11 月 22 日, 大阪府立大学 I-site なんば (大阪府).

6. M. Daifuku, Topology optimization of reinforcement in the ship engine room, ACDDE 2013, Aug. 13, 2013, Seoul (Korea).

7. T. Nishizu, Damage detection method based on vibration characteristic in non-destructive inspection, ACDDE 2013, Aug. 13, 2013, Seoul (Korea).

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹澤 晃弘 (TAKEZAWA AKIHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10452608