1323 衝撃のアクティブ制御の砕氷船への応用

Application of Active Shock Control to Icebreaker

○ 渡邊 圭 (千葉大) 正 西村 秀和 (慶應大)
正 下郷 太郎 (慶應大)

Kei WATANABE, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522
Hidekazu NISHIMURA, Keio University 2-15-45, Mita, Minato-ku, Tokyo, 108-8345
Taro SHIMOGO, Keio University, 3-14-1, Kohoku-ku, Yokohama, 233-8522

Abstract: This paper shows that the active hammer can reduce the deformation of the icebreaker by applying Active Control of Shock to the icebreaking process in the icebreaker. Although a usual icebreaker pushes the ice which has elastoplastic deformation characteristic to break ices by the breaker's hull, the icebreaker in this paper has the active hammer provided at the bow. The motion of active hammer is controlled by using two types of the triangular pulse, an acceleration pulse and a velocity pulse. For various peak positions and durations, the optimal command is searched to reduce deformation of the ice breaker by the numerical simulation. This paper shows not only the effective pulse shape of the active hammer, but also the difference of performance between steel and ice as the object to be plastically deformed.

Key Words: Active Control of Shock, Icebreaker, Active Hammer, pulse Input, Elastoplastic Deformation

1. 緒言

衝撃のアクティブ制御の先行研究として、下郷ら⁽¹⁾は、2物体間の衝突に関する問題を単純化するため、2物体間の衝突部にアクチュエータを配置したモデルを用いて1自由度系モデルで表した。そして、最適制御理論による状態フィードバック制御を行った。また、力の伝達の割合を2物体の変形比ととらえ、2次形式評価関数に基づく最適レギュレータによる制御方法を適用することで、変形比の最大化が可能となることを数値シミュレーションにより示した。王ら⁽²⁾⁽³⁾は同モデルに基づきアクティブ衝撃制御の実証試験を行った。そこではカルマンフィルタによる状態推定に基づくLQI(Linear Quadratic Integral)制御と H_∞ 制御、終端状態制御をそれぞれ用い、衝撃のアクティブ制御が実現可能であることを実証している。このような2物体間の衝撃のアクティブ制御は鍛造機械や、削岩機、砕氷船などへ応用できると考えられる。

現在、北極海に埋蔵されているエネルギー資源の輸入や氷海観測技術の発展のため等、いろいろな目的で砕氷船の開発が行われている。北極海は一年中氷で囲まれており、大型の水塊もある。その中を進む砕氷船は、氷塊の抵抗で船体停止に至ることがある。このような場合には、船体を一度後退させ、再び前進して、推力をかけながら氷塊に激突する。その際、最悪の場合には沈船に至ることにもなり得る⁽⁴⁾。

そこで本研究では、下郷らのモデルと同様に衝突部にアクチュエータを配置したモデルを用いてこれを砕氷船に応用し、アクチュエータを搭載したアクティブハンマーを船首に取り付けた力学モデルを作成する。そして、砕氷船が氷塊を砕氷する際の船体と氷塊の変形を能動的に制御する方法について検討する。また、破壊する物体を鉄鋼材料的な弾塑性変形特性の物体としたときの数値シミュレーションを行い、氷塊の場合との比較を行う。

2. アクティブハンマーを有する砕氷船

制御対象のモデルをFig. 1に示し、その模式図をFig. 2に示す。衝撃を与える船体は、質点 m_2 とばね k_3 で弾性結合された質点 m_3 で構成され、アクチュエータを搭載したアクティブハンマーを船首に取り付け、氷塊を破壊する。また、船体と氷塊との接触剛性は k_2 とする。衝撃を受ける氷塊は、弾塑性変形特性を有するため、 $x_1 = x_0$ で弾性変形領域から塑性変形領域へ

Fig. 1 Schematic diagram of icebreaker with active hammer and ice

Fig. 2 Dynamical model of ice breaker and ice

遷移するものとして (Fig. 3), ばね定数 k_1 のばねとクーロンダンパ F_0 で構成されるものとする。

Fig. 2に示した制御モデルの各パラメータをTable 1に示す。この値は、文献⁽⁵⁾を参考にして与えられた。また、接触剛性 k_2 は、衝突時による船体の跳ね返りや接触部の変形量を考慮して与えた。Fig. 2に示した制御モデルの運動方程式を導くと式(1)となる。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -F + k_2(x_2 - x_1 + y) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -k_2(x_2 - x_1 + y) + k_3(x_3 - x_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= -k_3(x_3 - x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 x_1 , x_2 , x_3 は各質点の絶対変位、 y はアクチュエータの変位を表し、速度パルス積分して得られる変位である。相対変位 $y_1 = x_1 - x_2$, $y_2 = x_2 - x_3$ を用いると式(1)は次の

Fig. 3 Load-deflection characteristic of ice

ように表される.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -F - k_2 y_1 + k_2 y \\ m_2 (\ddot{x}_1 - \ddot{y}_1) &= k_2 y_1 - k_3 y_2 - k_2 y \\ m_3 (\ddot{x}_1 - \ddot{y}_1 - \ddot{y}_2) &= k_3 y_2 \end{aligned} \quad (2)$$

氷塊の変形荷重特性は断片線形となるため式(2)の F は、弾性変形領域と塑性変形領域で次のとおりとなる. また、氷塊の変形荷重特性をFig. 3に示す.

$$F = \begin{cases} k_1 x_1 & (x_1 \leq x_0) \\ F_2 & (x_1 > x_0) \end{cases} \quad (3)$$

シミュレーションの解析結果の汎用性を持たせるために、運動方程式の無次元化を行うと、式(2)は式(4)となる.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \xi_1}{d\tau^2} &= -\frac{F}{F_1} - \Omega_2^2 \mu_2 \eta_1 + \Omega_2^2 \mu_2 \eta \\ \frac{d^2 \eta_1}{d\tau^2} &= -\frac{F}{F_1} - \Omega_2^2 (1 + \mu_2) \eta_1 + \Omega_3^2 \frac{\mu_3}{\mu_2} \eta_2 + \Omega_2^2 (1 + \mu_2) \eta \\ \frac{d^2 \eta_2}{d\tau^2} &= \Omega_2^2 \eta_1 - \Omega_3^2 (1 + \frac{\mu_3}{\mu_2}) \eta_2 - \Omega_2^2 \eta \end{aligned} \quad (4)$$

無次元化を行う上での基本量、無次元量は以下のように定義する.

- 基本量
 - 長さ: x_0 (氷塊の降伏点変形量)
 - 時間: $1/\omega_1$ (ω_1 : 氷塊の弾性領域固有角振動数)
 - 質量: m_1 (氷塊の質量)
- 無次元量
 - 変位: $\xi_1 = x_1/x_0$, $\xi_2 = x_2/x_0$, $\xi_3 = x_3/x_0$
 - 入力: $\eta = y/x_0$
 - 時間: $\tau = \omega_1 t$
 - 振動数比: $\Omega_2 = \omega_2/\omega_1$, $\Omega_3 = \omega_3/\omega_1$
 - 質量比: $\mu_2 = m_2/m_1$, $\mu_3 = m_3/m_1$

Table 1 Parameters for simulation

m_1	$283.5 \times 10^3 \text{ kg}$	F_1	$150 \times 10^6 \text{ N}$
m_2	$6500 \times 10^3 \text{ kg}$	F_2	$40 \times 10^6 \text{ N}$
m_3	$6500 \times 10^3 \text{ kg}$	x_0	0.3 m
k_1	$5.0 \times 10^8 \text{ N/m}$		
k_2	$4.5 \times 10^8 \text{ N/m}$		
k_3	$1.0 \times 10^9 \text{ N/m}$		

ここで、状態変数ベクトルを式(5)と定義して、弾性変形領域と塑性変形領域の状態方程式を導くと式(6)のようになる.

$$x = [\xi_1 \quad \eta_1 \quad \eta_2 \quad \dot{\xi}_1 \quad \dot{\eta}_1 \quad \dot{\eta}_2]^T \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_l x + B \eta \quad (\xi_1 \leq 1) \\ \dot{x} &= A_n x + B \eta + E_n \quad (\xi_1 > 1) \end{aligned} \quad (6)$$

A_l は弾性変形領域のシステム行列、 A_n は塑性変形領域のシステム行列、 B は制御入力の係数、 E_n は塑性変形領域におけるクーロンダンバを表す非線形行列であり、以下のように表される.

$$A_l = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ A_{l21} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ A_{n21} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_{l21} = \begin{bmatrix} -1 & -\Omega_2^2 \mu_2 & 0 \\ -1 & -\Omega_2^2 (1 + \mu_2) & \frac{\mu_3}{\mu_2} \Omega_3^2 \\ 0 & -\Omega_2^2 & -\Omega_3^2 (1 + \frac{\mu_3}{\mu_2}) \end{bmatrix}$$

$$A_{n21} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_2^2 \mu_2 & 0 \\ 0 & -\Omega_2^2 (1 + \mu_2) & \frac{\mu_3}{\mu_2} \Omega_3^2 \\ 0 & -\Omega_2^2 & -\Omega_3^2 (1 + \frac{\mu_3}{\mu_2}) \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \Omega_2^2 \mu_2 \quad \Omega_2^2 (1 + \mu_2) \quad -\Omega_2^2]^T$$

$$E_n = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{F_2}{F_1} \quad \frac{F_2}{F_1} \quad 0]^T$$

3. 速度パルスによるシミュレーション

3.1 パルス形 本章では、砕氷船が氷塊に衝突することを想定した場合のシミュレーションを行った. なお、シミュレーションソフトとしてMATLABを用いて、アクチュエータの入力にFig. 4に示す速度パルスを与えた. このとき、サンプリングタイムは0.003 sとした. また、氷塊の変形荷重特性より、氷塊の破壊後の船体に対する荷重は、破壊前の荷重と比べて非常に小さいため、破壊後の氷塊の変形量は検討せずに船体の変形量のみを検討する. t_m は三角波パルスのピーク時刻を、 t_0 はパ

Fig. 4 Velocity pulse for simulation

ルスの作用時間を示す。入力には速度パルスを積分したものを用いるものとし、無次元化した入力の式を式(7)に示す。また、 t_m , t_0 , $\dot{y}_m$ を無次元化すると、それぞれ τ_m , τ_0 , $\dot{\eta}_m$ となる。

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\dot{\eta}_m}{2\tau_m} \tau^2 & (0 \leq \tau < \tau_m) \\ \eta &= -\frac{\dot{\eta}_m}{2\tau_l} \tau^2 + \frac{\dot{\eta}_m \tau_0}{\tau_l} \tau + B & (\tau_m \leq \tau < \tau_0) \\ \eta &= \frac{\dot{\eta}_m \tau_0}{2\tau_l} + B & (\tau_0 \leq \tau)\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\tau_l &= \tau_0 - \tau_m \\ B &= \frac{\dot{\eta}_m \tau_0^2}{2\tau_l}\end{aligned}\quad (8)$$

以降のシミュレーションでは、この速度パルスの面積を一定とするため、アクティブハンマーの終端ストローク量が一定となる。また、船体には衝突前に初速度のみを与えるものとし、衝突後に推力を与えないものとする。

3.2 アクチュエータの有用性 アクチュエータの有用性を検証するために、アクチュエータへ入力を与えた場合と、入力を与えずに船体の初速度のみで氷塊を破壊する場合（非制御時）とのシミュレーションの比較を行う。このシミュレーション結果をFig. 5に示す。非制御時の船体の初速度は、2.6 m/sとし、これは非制御時に氷塊が降伏に至る最小の初速度である。また、制御入力を与えた場合の船体の初速度は、2.0 m/sとし、この初速度のみでは氷塊は降伏に至らない。点線、実線はそれぞれ非制御時とアクチュエータに速度パルス入力を与えた場合の結果である。ピーク時刻とパルス作用時間は、それぞれ $t_m = 0.2t_0$, $t_0 = 0.06$ sとした。

Fig. 5 Time history responses of velocity pulse and without control

(a) は氷塊の変形量, (b) は船体の変形量, (c) は接触部の変形量, (d) は船体の速度, (e) はアクティブハンマーのストローク量, (f) はアクティブハンマーのストローク速度を示す。

(a) より、それぞれ非制御時、入力を与えた場合のどちらの場合とも氷塊は、変形量が降伏点 0.3 m を超えて降伏していることがわかる。また、入力を与えた場合、非制御時よりも早く降伏に至ることがわかる。(b) より、入力を与えた場合、船体の最大変形量は非制御時より約 40 % 小さく抑えられていることがわかる。(c) より、入力を与えた場合、非制御時より接触部の変形量が抑えられていることがわかる。

したがって、アクチュエータに入力を与え、アクティブハンマーで砕氷したほうが、非制御時よりも氷塊を早く降伏させることができ、船体の最大変形量を小さく抑えられることがわかる。このことから、アクティブハンマーの有用性が示された。

3.3 ピーク時刻による比較 船体に初速度 2 m/s を与えて、アクチュエータへの入力に速度パルスを用いてシミュレーションを行った。パルス作用時間 t_0 を一定とし、ピーク時刻 t_m を変化させた。ここで、パルス作用時間は、 $t_0 = 0.09$ s、アクティブハンマーの終端ストローク量は、0.3 m とし、このシミュレーション結果をFig. 6に示す。鎖線、一点鎖線、実線、点線は、ピーク時刻を $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0, 0.8t_0$ とした場合の結果である。

(a) は氷塊の変形量, (b) は船体の変形量, (c) は接触部の変形量, (d) は船体の速度, (e) はアクティブハンマーのストローク量, (f) はアクティブハンマーのストローク速度を示す。

Fig. 6 Time history responses by changing t_m of velocity pulse for a beginning speed of 2 m/s

(a) より, $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0, 0.8t_0$ の場合とも氷塊の変形量が降伏点 0.3 m を超えて降伏していることがわかる。(b) より, ピーク時刻 $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0$ の場合, 船体の最大変形量に差はないが, ピーク時刻 $t_m = 0.8t_0$ の場合, 船体の最大変形量が $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0$ の場合よりも大きいことがわかる。(c) より, ピーク時刻 t_m を遅く与えるほどゆるやかに接触部の変形は進むが, 接触部の最大変形量は大きいことがわかる。(d) より氷塊が降伏した後も前進していることがわかる。(e), (f) より, アクティブハンマーの終端ストローク量が一定であることがわかる。

したがって, ピーク時刻 t_m を早めに与え, アクティブハンマーの速度のピークを早めに与えると, 接触部の最大変形量が抑えられ, 船体の最大変形量も抑えられる。

3.4 パルス作用時間による比較 船体に初速度 2 m/s を与え, パルス作用時間 t_0 を変化させるシミュレーションを行った。ここで, ピーク時刻は $t_m = 0.2t_0$, アクチュエータのストローク量は, 0.3 m とし, このシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。鎖線, 一点鎖線, 実線, 点線は, パルス入力時間を $t_0 = 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 \text{ s}$ とした場合の結果である。

(a) より, $t_0 = 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 \text{ s}$ の場合とも氷塊の変形量が降伏点 0.3 m を超えて降伏していることがわかる。(b) より, パルス作用時間 t_0 を短く与えるほど船体の最大変形量が小さく抑えられていることがわかる。(c) より, パルス作用時間 t_0 を短く与えるほど接触部の変形は早く進み, 接触部の最大変形量も大きいことがわかる。(d) より氷塊が降伏した後も前進していることがわかる。(e), (f) より, アクティブハンマーの終端ストローク量が一定であることがわかる。

Fig. 7 Time history responses by changing t_0 ($= 0.06 \sim 0.09 \text{ s}$) of velocity pulse

したがって, パルス作用時間 t_0 を短く与えるほど, 接触部の最大変形量は大きくなるが, 船体の最大変形量は抑えられることができる。

3.5 考察 氷塊のように降伏後に塑性変形の抵抗による相当質量が減少するような物体に対しては, 速度パルスのピークは早く与えたほうが反力が小さくなって船体の最大変形量は小さくなる。衝撃に関与した相当質量と速度パルスとの積, すなわち力積 (運動量) パルスは, Dirac のデルタ関数として最初に与えることによって衝撃力を大きくすることができる。力積の変化をゆるやかにすれば, 衝撃力が小さくなるだけである。パルス作用時間を短くすると反力が大きくなるが, 反力のピークがみられる時刻は, 船体の最大変形量がみられる時刻よりも十分に早いため, 船体の最大変形量が大きくなることはない。また, 反力のピークを早めに与え, 氷塊を早く破壊し, その後は船体の慣性によって衝突させたほうが船体の変形量が小さくなる。

4. 鉄鋼材料を塑性変形させる場合との比較

前章までは, 破壊する物体を氷塊としてシミュレーションを行ってきたが, 本章では破壊する物体が鉄鋼材料の弾塑性変形特性を有するものとする。そして, 船体が氷塊に衝突した場合との比較を行う。Fig. 8 に代表的な鉄鋼材料の変形荷重特性を示す。また, 弾性変形領域と塑性変形領域の荷重 F は, 次のとおりとなる。パラメータ k_1, F_1, x_0 の値は氷塊の場合と同様とする。

$$F = \begin{cases} k_1 x_1 & (x_1 \leq x_0) \\ F_1 & (x_1 > x_0) \end{cases} \quad (9)$$

このように, 鉄鋼材料の変形荷重特性は氷塊のそれとは異なり, 塑性変形領域に遷移しても荷重は減少しない。したがって, 塑性領域での変形量も検討する必要がある。そこで, 鉄鋼材料的な対象物体の最大塑性変形量 $x_{1max} - x_0$ と船体の最大変形量 $|y_2|_{max}$ の比で定義された塑性変形率⁽¹⁾を用いた。

$$\text{deformation ratio} = \frac{x_{1max} - x_0}{|y_2|_{max}} \quad (10)$$

この塑性変形率が高いほうが対象物体を破壊するのに効率的といえる。これを鍛造機械の問題におきかえると, ハンマーの先端に制御棒を装着した場合に相当し, 上式は工作物の塑性変形量とハンマーの弾性ひずみとの比に対応している。

Fig. 8 Load-deflection characteristic of steel

4.1 ピーク時刻による比較 船体に初速度 2 m/s を与えて、アクチュエータへの入力に速度パルスを用いてシミュレーションを行った。パルス作用時間 t_0 を一定とし、ピーク時刻 t_m を変化した。ここで、パルス作用時間 t_0 は、 $t_0 = 0.09$ s、アクティブハンマーの終端ストローク量は、0.3 m/s とし、このシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。鎖線、一点鎖線、実線、点線は、ピーク時刻を $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0, 0.8t_0$ とした場合の結果である。

(a) は物体の変形量、(b) は船体の変形量、(c) は接触部の変形量、(d) は船体の速度、(e) はアクティブハンマーのストローク量、(f) はアクティブハンマーのストローク速度を示す。また、Table 2 に物体の最大塑性変形量 $x_{1max} - x_0$ 、船体の最大変形量 $|y_2|_{max}$ 、塑性変形率を示す。

Fig. 9 (a), Table 2 より、 $t_m = 0.2t_0, 0.4t_0, 0.6t_0, 0.8t_0$ の場合とも物体の変形量が降伏点 0.3 m を超えて降伏していることがわかる。また、ピーク時刻 t_m を早めに与えるほど物体の最大塑性変形量は大きいことがわかる。Fig. 9 (b), Table 2 より、ピーク時刻 t_m を早めに与えるほど船体の最大変形量が抑えられることがわかる。(c) よりピーク時刻 t_m を遅く与えるほど、接触部の変形量の最初のピークが大きいことがわかる。(d) より船体は初速度 2 m/s で衝突し、物体が降伏した後に後退していることがわかる。(e), (f) よりアクティブハンマーの終端ストローク量は一定であることがわかる。

Table 2 Shimulation results by changing t_m of velocity pulse

t_m [s]	$0.2t_0$	$0.4t_0$	$0.6t_0$	$0.8t_0$
$x_{1max} - x_0$ [m]	0.0611	0.0652	0.0604	0.0480
$ y_2 _{max}$ [m]	0.1073	0.1080	0.1098	0.1124
deformation ratio	0.5692	0.6034	0.5504	0.4275

Fig. 9 Time history responses by changing t_m of velocity pulse on steel

したがって、ピーク時刻 t_m を早めに与えるほど船体の最大変形量は抑えられ、物体の最大塑性変形量が大きい。また、Table 2 より、塑性変形率はピーク時刻 t_m を早めに与えるほど大きい。

4.2 パルス作用時間による比較 船体に初速度 2 m/s を与え、パルス作用時間 t_0 を変化するシミュレーションを行った。ここで、ピーク時刻は $t_m = 0.2t_0$ 、アクチュエータの終端ストローク量は 0.3 m とし、このシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。また、Table 3 に物体の最大塑性変形量 $x_{1max} - x_0$ と船体の最大変形量 $|y_2|_{max}$ 、塑性変形率を示す。鎖線、一点鎖線、実線、点線は、パルス作用時間を $t_0 = 0.01, 0.03, 0.06, 0.09$ s とした場合の結果である。

Fig. 10 (a), Table 3 より、 $t_0 = 0.01, 0.03, 0.06, 0.09$ s の場合とも物体の変形量が降伏点 0.3 m を超えて降伏していることがわかる。また、パルス作用時間 t_0 を短く与えたほうが物体の最大塑性変形量が大きいことがわかる。Fig. 10 (b), Table 3 より、パルス作用時間 t_0 を短く与えるほど船体の最大変形量が抑えられていることがわかる。(c) より、パルス作用時間を短く与えるほど接触部の変形は早く進み、最初のピークが大きいことがわかる。(d) より船体は初速度 2 m/s で衝突し、物体が降伏した後に後退していることがわかる。(e), (f) よりアクティブハンマーの終端ストローク量は一定であることがわかる。

Table 3 Shimulation results by changing t_0 of velocity pulse

t_0 [s]	0.01	0.03	0.06	0.09
$x_{1max} - x_0$ [m]	0.1213	0.1233	0.1007	0.0611
$ y_2 _{max}$ [m]	0.0925	0.0941	0.0998	0.1073
deformation ratio	1.3113	1.3099	1.0091	0.5692

Fig. 10 Time history responses by changing t_0 of vlocity pulse on steel

したがって、パルス作用時間 t_0 を短く与えるほど船体の最大変形量が抑えられ、物体の最大塑性変形量は大きい。また、Table 3より、塑性変形率はパルス作用時間 t_0 を短く与えるほど大きい。

4.3 考察 鉄鋼材料のように降伏後も塑性変形の抵抗による相当質量が維持されるような物体に対しては、速度パルスのピークは早く与えたほうが反力が小さくなって船体の最大変形量は小さくなる。また、速度パルスによる衝撃では、材料の特性の如何によらず、Diracのデルタ関数として最初に与えることによって衝撃力を大きくすることができる。その際、反力が大きくなるが、反力のピークがみられる時刻は、船体の最大変形量がみられる時刻よりも十分に早いいため、船体の最大変形量が大きくなることはない。また、衝撃パルスのピークを早めに与え、対象物体を早く破壊し、その後は船体の慣性によって衝突させたほうが船体の変形量が小さくなる。これを氷塊の場合と比較すると、同様の傾向がみられたと考えられる。

5. 結言

本研究では、砕氷船が氷塊に激突する際の船体への衝撃力を緩和させるため、船体の船首にアクチュエータを搭載したアクティブハンマーを取り付けることを提案した。そして、その力学モデルに基づいて数値シミュレーションを行った結果、アクチュエータの入力に速度パルスを用いて、そのピーク時刻、パルス作用時間を変化させることにより、船体への衝撃力を緩和するための条件を明らかにすることができた。また、衝突する物体を鉄鋼材料とした場合のシミュレーションを行い、氷塊とした場合との比較を行った。その結果、氷塊の場合と同様の傾向がみられた。

文 献

- (1) 下郷, 川島, 住, 衝撃制御に関する研究 (一方向への衝撃伝達), 日本機械学会D&D2001講演論文集, 529.pdf, (2001)
- (2) 王, 西村, 下郷, 衝撃のアクティブ制御 (LQI制御と H_∞ 制御の適用), 日本機械学会論文集 (C編), vol.71, No.704, pp.1223-1230, (2005)
- (3) 王, 西村, 下郷, 天野, フィードフォワード入力による衝撃のアクティブ制御, 日本機械学会論文集 (C編), vol.71, No.710, pp.2912-2919, (2005)
- (4) 北川, 小野, 泉山, 北極海航路, シップ・アンド・オーシャン財団, (2000)
- (5) 野澤, 氷海工学, 成山堂書店, (2006)