



インパルス応答理論と 船舶・海洋構造物の運動

齋藤 公 男*

The Impulse Response Function and Motions of Ship and Ocean Structures.

Key Word : Impulse response, Time domain analysis, Motions of ship and ocean structures

電気・通信や制御工学の分野で発達したインパルス応答理論は、現在では工学のさまざまな分野において広く用いられている。船舶工学においても、かなり以前から船の操縦性能に関し操舵と船の運動という制御工学的な観点からこの理論が用いられてきた。一方、船に働く流体力についてもインパルス応答理論を用いた理論的解法の研究が従来よりなされていたが、具体的な数値計算結果が見られるようになったのはコンピュータが手軽に使えるようになってからである。そこで本小稿では、インパルス応答理論の船舶流体力学への応用例を紹介する。

水面波の問題や水面に浮かぶ船、海洋構造物に働く流体力に関する問題においては自由表面の影響が重要となる。この場合、出力値は自由表面の存在のためにその時刻における入力値だけでは定まらず、過去の履歴の影響を受けるので厳密にはインパルス応答理論を用いて出力値を記述する必要がある。例えば、水面上任意の点Aにおける1次元水面波の波形 $\eta_A(t)$ を知って、そこから距離 x だけ離れた点Bにおける波形 $\eta_B(t)$ を推定する問題においては、 $\eta_A(t)$ を入力、 $\eta_B(t)$ を出力と考えると、インパルス応答理論より次の関係式を得る。

$$\eta_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, \tau) \eta_A(t - \tau) d\tau \quad (1)$$



*Kimio SAITO
1943年1月29日生
大阪大学大学院工学研究科
博士課程、
昭和46年単位取得
現在、大阪大学工学部船舶
海洋工学科、助教授、工学
博士、船舶工学、
TEL 06-877-5111

ここで、 $G(x, \tau)$ は重み関数 (weighting function) とも呼ばれ、その周波数応答関数

$$\hat{G}(x, \omega) = e^{i\omega |x|/g} \quad (2)$$

を用いて次式で与えられる。

$$G(x, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{G}(x, \omega) e^{i\omega \tau} d\omega \quad (3)$$

また、図1に重み関数 $G(x, \tau)$ の計算例を示す。

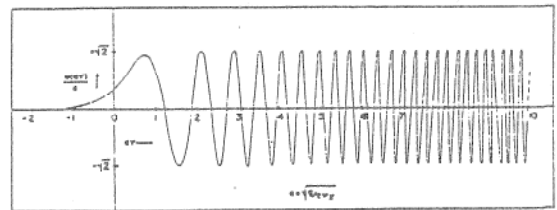


図1 重み関数

次に、水面に浮かぶ船、海洋構造物に働く流体力とその波浪中運動を考える。ここでは簡単のため、図2に示すような2次元係留浮体の水平運動を考える。この浮体に $t=0$ においてインパルス関数の変位速度が与えられたとき、そ

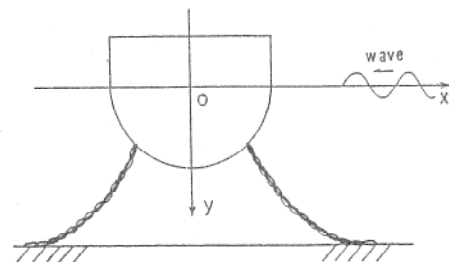


図2 2次元係留浮体

の応答（インパルス応答）としての流場の速度ポテンシャルは、流体が非粘性、非圧縮であると仮定すると

$$\Phi_2'(x, y; t) = \Psi_2(x, y) \cdot \delta(t) + \chi_2(x, y; t) \quad (4)$$

で表わされる。また、浮体に作用する流体力は

$$F_{22}'(t) = \rho \int_S \Psi_2(x, y) \delta'(t) n_j dS + \rho \int_S \frac{\partial \chi_2(x, y; t)}{\partial t} n_j dS \quad (5)$$

で与えられる。一方、フーリエ変換を用いると

$$F_{22}'(t) = -a_{22}(\infty) \delta'(t) - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty d\omega \cos(\omega t) b_{22}(\omega) \quad (6)$$

とも書き表わすことが出来る。

ただし、 $a_{22}(\infty)$ は $\omega = \infty$ における付加質量係数、 $B_{22}(\omega)$ は減衰力係数、 $\delta(t)$ は Dirac の δ 関数である。(4)~(6) 式のいずれの場合も右辺第1項は浮体がインパルス運動をしている時間内の流場に対するものであり、第2項はインパルス運動の終了後その運動によって与えられた攪乱が時空間を伝播する流場に対応している。すなわち、過去の浮体運動に基づく流体の攪乱が現在における浮体の運動に及ぼす影響を示しており、いわゆるメモリー（履歴）を持っている。そこで、(5), (6) 式の右辺第2項を

$$K_{22}(t) = -\rho \int_S \frac{\partial \chi_2(x, y; t)}{\partial t} n_j dS = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty d\omega \cos(\omega t) b_{22}(\omega) \quad (7)$$

と定義すると、任意の速度で運動する浮体に働く流体力は

$$F_{22}(t) = -a_{22}(\infty) \ddot{x}_2(t) - \int_0^t K_{22}(t-\tau) \dot{x}_2(\tau) d\tau \quad (8)$$

となる。(7) 式で定義された $K_{22}(t)$ を特にメモリー影響関数 (memory effect function) 又は遅延関数 (retardation function) と呼ぶことがある。今、浮体の質量を M 、係留系に基づく復元力係数を $c(x_2)$ 、波力を $F_w(t)$ とすると、

波浪中における浮体の運動方程式は、連成を無視した水平運動のみについて考えた場合

$$\{M + a_{22}(\infty)\} \ddot{x}_2 + \int_0^t K_{22}(t-\tau) \dot{x}_2(\tau) d\tau + c(x_2)x_2 = F_w(t) \quad (9)$$

で与えられ、運動周波数に依存しない形の運動方程式が得られる。

一方、実用計算法として広く用いられている方程式は、定常周期運動に対するもので次式のように運動周波数に依存した表現式である。

$$\{M + a_{22}(\omega)\} \ddot{x}_2 + b_{22}(\omega) \dot{x}_2 + c(x_2)x_2 = F_w(t) \quad (10)$$

(9) 式の運動方程式が注目されるようになったのは、海洋構造物の運動解析において数値シミュレーション手法が盛んに行なわれるようになってからである。すなわち、運動方程式左辺に係留系や粘性影響に基づく非線形項が加わり、また右辺においては長周期の変動波漂流力や、場合によっては風及び潮流の影響をも考慮する必要から時間領域での運動解析において、より厳密な運動方程式が必要となったためである。

メモリー影響関数を求める方法としては、(7) 式から明かなように時間項を含む速度ポテンシャル $\chi_2(x, y; t)$ を用いて時間領域で計算する直接方法と減衰力係数 $b_{22}(\omega)$ を用いて周波数領域で計算する間接的方法がある。実用計算法の観点からは後者の方法が簡便でその計算例も比較的多い。しかし、浮体の形状や動揺モードによっては高周波数領域での減衰力係数の取り扱いに注意しないと精度が悪くなる場合がある。一方、実験的にメモリー影響関数を求める研究も行われているが、強制動揺装置やその計測値の解析法に工夫が必要とされる。

図3は、計算によって求められた水平運動に対するメモリー影響関数の一例で横軸に時間の無次元値をとって示している。また、図4は模型実験で計測された半円筒断面の波浪中水平運動 (sway motions, measured) の一例で、横軸に時間を取り数値計算結果 (predicted) と比較している。図中、incident waves, restoring forces はそれぞれ波、係留反力を示す。また、C.I. とあるのは、(9) 式の運動方程式を

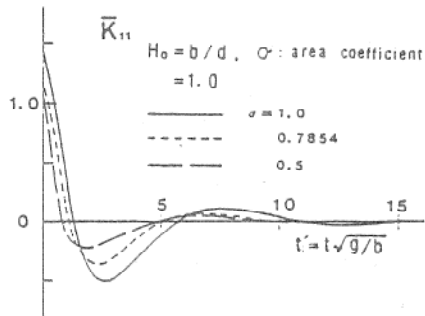


図3 メモリー影響関数

用いて計算された結果であり、C.C.は(10)式のものである。前者の方が後者に比べ波の作用を受け始めた過渡状態において実験結果との対応の良いことが分かる。

インパルス応答理論を用いた上述の計算法は、厳密には線形と考えられる範囲においてのみ有効である。しかし、1) 大きな振幅で運動する場合 2) 前進速度の影響を受ける場合 3) 複雑な構造の海洋構造物を扱う場合 などにおける流体力やその運動を精度良く推定するためにインパルス応答理論をどのように適用するかを研究することは今後の興味ある課題と思われる。

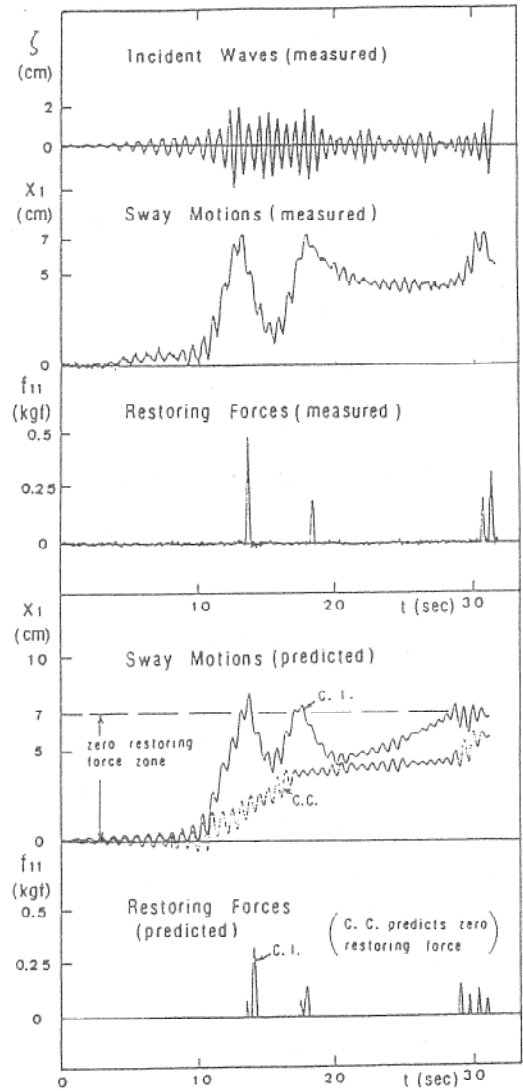


図4 波浪中水平運動の模型実験結果と計算結果の比較

