

# 反射波吸収型造波装置の動作原理について

Mechanism of Absorbing Wave Maker

木 下 健\*

Takeshi KINOSHITA

## 1. ま え が き

長周期運動のような、波による 2 次の現象を水槽で実験する場合、模型や消波板からの反射波のうち、2 次のフリーウェイブが実験結果に大幅に影響を及ぼすことが知られている。そのような場合に反射波吸収型の造波装置を利用することが考えられるが、10 年ほど前に Salter<sup>1)</sup>により発明されて以来、動作原理や吸収性能については、十分に検討されておらず、経塚<sup>2)</sup>や川口<sup>3)</sup>の研究がある程度である。

経塚<sup>2)</sup>は造波板の運動方程式から、完全吸収に必要な造波板の動揺とトルクとの間の伝達関数を示し、規則波を用いて実験を行い、小さい反射波係数(約 0.08)を実現している。しかしモータや制御系の応答には触れていない。また力学系の摩擦も無視している。Salter や経塚の装置は造波板のトルクを検出して、速度を制御する方式であるが、検出トルクには力学系の摩擦の影響を含む。それを避けるため、川口<sup>3)</sup>は波面検出、速度制御の方式を開発し、モータや制御系を含めた応答モデルから完全吸収の制御条件を示している。

一方、反射波係数の計測に関しては、長時間造波して安定な standing wave を作ることで、波エネルギーを吸収していることの証しとしているが、吸収特性の詳細を調べる方法は確立していないのが現状である。経塚は規則波を用いているが、規則波の場合、過渡現象の影響が避けられないので問題が残る。

まず本報では Salter, 川口の両装置の動作原理を波浪発電の立場から統一的に説明し、次報では本装置に適した反射波係数の計測法と計測例を示すことにする。

## 2. 動 作 原 理

この造波装置は造波装置の駆動力を制御信号に使う点に特徴がある。駆動部に取り付けられた検力計に加わるトルク  $T_0$  は、モータの駆動トルクを  $T$ 、慣性モーメントを  $J$ 、摩擦等による減衰力係数を  $d'$  とすると

$$T_0 = T - J\ddot{\theta} - d'\dot{\theta} \quad (1)$$

である。一方、造波板の慣性モーメントを  $I$ 、付加慣性モーメントを  $I'$ 、造波減衰力係数を  $N$ 、造波板の摩擦等による減衰力係数を  $d''$ 、復原力を  $C$ 、そして造波板に向かってくる消波装置からの反射波による強制力を  $E$  とし、 $\theta$  を造波板の回転角とすると、

$$T_0 = (I + I')\ddot{\theta} + (N + d'')\dot{\theta} + C\theta - E \quad (2)$$

である。

モータとして電機子制御分巻電動機を考えると、駆動力  $T$  は入力電流  $i$  に対し、トルク定数を  $K_t$  とすると

$$T = K_t i \quad (3)$$

である。そして指令電圧  $e$  は、電機子回路抵抗を  $R$ 、 $n$  をモータと造波板の回転の増速率とすると

$$e = iR + nK_t\dot{\theta} \quad (4)$$

である。

さて、今指令電圧として、造波信号  $v$  とともに、feedback として  $\alpha T_0 + \beta\theta$  ( $\alpha, \beta$  は定数) を考えると、

$$e = v + \alpha T_0 + \beta\theta \quad (5)$$

(3), (4), (5) より  $i$  と  $e$  を消去し、(1) を代入すると

$$\begin{aligned} T &= K_t [v + \alpha T_0 + \beta\theta - nK_t\dot{\theta}] / R \\ &= K_t [v + \alpha(T - J\ddot{\theta} - d'\dot{\theta}) + \beta\theta - nK_t\dot{\theta}] / R \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \therefore TR/K_t - \alpha T &= v - \alpha J\ddot{\theta} - \alpha d'\dot{\theta} + \beta\theta - nK_t\dot{\theta} \\ T &= [\alpha(J\ddot{\theta} + d'\dot{\theta}) - \beta\theta + nK_t\dot{\theta} - v] / (\alpha - R/K_t) \end{aligned} \quad (7)$$

したがって、(1), (2) より

$$\begin{aligned} E &= (I + I' + J)\ddot{\theta} + (N + d' + d'')\dot{\theta} + C\theta - [\alpha(J\ddot{\theta} \\ &+ d'\dot{\theta}) - \beta\theta + nK_t\dot{\theta} - v] / (\alpha - R/K_t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで  $\theta = \theta_1 + \theta_2$  とし、

$$v / (R/K_t - \alpha) = (I + I' + J)\ddot{\theta}_1 + (N + d' + d'' + d)\dot{\theta}_1 + C'\theta_1 \quad (9)$$

$$E = (I + I' + J)\ddot{\theta}_2 + (N + d' + d'' + d)\dot{\theta}_2 + C'\theta_2 \quad (10)$$

where  $J' = J - \alpha J / (\alpha - R/K_t) = JR' / [K_t(R/K_t - \alpha)]$  (11)

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研

$$d = (\alpha d' + nK_t) / (R/K_t - \alpha) \quad (12)$$

$$C' = C - \beta / (R/K_t - \alpha) \quad (13)$$

(9)式は信号  $v$  による強制動揺を表し, (10)式は波強制力  $E$  による運動を表している. (10)式のほうを完全吸収状態にすれば, 反射波吸収型の造波装置が実現できる. すなわち波浪発電の理論より良く知られているように造波装置が片側だけに発散波を持ち, かつ

$$C' - \omega^2(I + I' + J') = 0 \quad (14)$$

$$d' + d'' + d = N \quad (15)$$

であればよい (Appendix 参照). したがって (12) ~ (15) 式より

$$\begin{aligned} \beta &= (R/K_t - \alpha)[\omega^2(I + I' + J') - C] \\ \alpha d' + nK_t &= (R/K_t - \alpha)(N - d' - d'') \\ \therefore \alpha &= [R(N - d' - d'')/K_t - nK_t] / (N - d'') \\ \beta &= (Rd'/K_t + nK_t)[\omega^2(I + I') - C] / (N - d'') \\ &\quad + \omega^2 JR/K_t \end{aligned} \quad (16)$$

が得られる. したがって (5) 式の  $\alpha, \beta$  として (16) 式のように調節すると反射波吸収型造波装置になる.

### 3. 安 定 性

フィードバックの制御系は安定である必要があるので, 安定性について検討する. 簡単のため指令信号  $v$  のみの場合と, 反射波による強制力  $E$  だけの場合の 2 つに分けて考える.

(a)  $v$  のみの場合:

(9)式から直に求めることもできるが, フィードバック回路をもう一度考えてみる.  $v, \theta, T_0$  の Laplace 変換を  $V, \Theta, Y$  とすると, (8), (2) 式より

$$G_1 = 1 / [(I + I' + J)s^2 + (N + d' + d'' + nK_t^2 / R)s + C]R/K_t \quad (17)$$

$$G_2 = (I + I')s^2 + (N + d'')s + C \quad (18)$$

$$Z = V + \alpha Y + \beta \Theta, \quad \Theta = G_1 Z, \quad Y = G_2 \Theta \quad (19)$$

$$\therefore V = \Theta / G_1 - \alpha G_2 \Theta - \beta \Theta \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \therefore Y/V &= G_2 / (1/G_1 - \beta - \alpha G_2) \\ &= [(I + I')s^2 + (N + d' + d'' + nK_t^2 / R)s + C] / [(I + I' + J)s^2 + (N + d' + d'' + nK_t^2 / R)s + C] \\ &\quad R/K_t - \beta - \alpha \{ (I + I')s^2 + (N + d'')s + C \} \end{aligned} \quad (21)$$

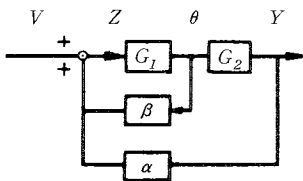


Fig. 1 Block diagram

分母は

$$(R/K_t - \alpha)[(I + I' + J')s^2 + (N + d' + d'' + d)s + C'] \quad (22)$$

となり (9) 式に対応する.

(22) 式を零とおいたものが特性方程式であり, Hurwitz の安定条件より,  $I + I' + J', N + d' + d'' + d, C'$  のすべてが同符号のとき安定となる. 一般的には各項が正のときということになる.

(b)  $E$  のみの場合:

$v / (R/K_t - \alpha)$  を  $E$  に置き換えると全く (a) と同じになるので, (a) と同じ条件が得られる.

さて (14), (15) 式の完全吸収条件を満たす場合,

$$d = N - d' - d'' \quad (23)$$

$$C' = \omega^2(I + I' + J')$$

となり, 特性方程式の各係数は  $I + I' + J', 2N, \omega^2(I + I' + J')$  となる. さらに (16) 式より

$$\alpha - R/K_t = -(Rd'/K_t + nK_t) / (N - d'') \quad (24)$$

であるから (11) 式より,  $d'' < N$  であれば

$$J' > 0 \quad (25)$$

したがって, 各係数は正となるため, 系は  $d'' < N$  のとき安定である.

### 4. 速度制御の電動機の場合

前節までに速度制御をしない直流電動機を用いた場合について述べたが, 本節では速度制御の電動機を用いた場合の利点を調べる.

速度制御の場合, 指令電圧と回転速度の伝達関数は (17) 式の場合より簡単になり, 造波板側の特性値である  $I, I', N, d'', C$  を含まない形になるが, 今それを  $G(i\omega)$  とすると (5) 式より

$$i\omega\theta = G(i\omega)(v + \alpha T_0 + \beta\theta) \quad (26)$$

(2), (26) 式より

$$\begin{aligned} [-\omega^2(I + I') + i\omega\{N + d'' - \frac{1}{\alpha G(i\omega)}\} \\ + (C + \frac{\beta}{\alpha})]\theta = E - \frac{v}{\alpha} \end{aligned} \quad (27)$$

(14), (15) 式と同様に完全吸収条件は次式のようになる.

$$d'' - \frac{1}{\alpha G(i\omega)} = N$$

$$-\omega^2(I + I') + C + \beta/\alpha = 0$$

$$\therefore \alpha = -1 / \{(N - d'')G(i\omega)\} \quad (28)$$

$$\beta = -\{\omega^2(I + I') - C\} / \{(N - d'')G(i\omega)\} \quad (29)$$

したがって速度制御の電動機を用いると, 電動機の慣性モーメント  $J$  や摩擦  $d'$  の影響を受けない完全吸収条件が得られる利点がある. Salter の装置がこれにあたる. しかしこの場合も力学系の力, 特に摩擦  $d''$  の影響を受けている.  $d''$  が  $N$  に近づくと  $\alpha, \beta$  を非常に大きくす

研究速報

る必要があり、設計上好ましくない。

5. 造波板上の圧力または波面を制御信号に使う場合

川口<sup>3)</sup>の装置では駆動力  $T_0$  のかわりに、造波板上の波面変動を制御信号に用いている。本節では造波板上の圧力または波面変動を制御信号に用いる場合について調べる。

造波板上または近傍の変動圧、あるいは波面変動、造波板に加わる変動流体力、入射波、造波板変位のそれぞれの複素振幅を  $\eta_0$ ,  $T_0'$ ,  $\eta_i$ ,  $\xi$  とすると、diffraction 問題、radiation 問題から得られる応答関数  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  を用いて

$$\eta_0 = A_1 \eta_i + B_1 \xi \tag{30}$$

$$T_0' = A_2 \eta_i + B_2 \xi \tag{31}$$

と書けるので、一般的に

$$T_0' = A \eta_0 + B \xi \tag{32}$$

となる。速度制御の電動機を用いると(26)式と同様に造波板の速度は、円周波数  $\omega$  の規則波を考えると

$$i\omega \xi = G(i\omega)(v + a\eta_0 + \beta \xi) \tag{33}$$

となる。電動機の駆動力には流体力のほか、力学系の慣性力  $I \ddot{\xi}$ 、摩擦  $d'' \dot{\xi}$ 、復原力  $C \xi$  が加わるので

$$\begin{aligned} T_0 &= T_0' + I \ddot{\xi} + d'' \dot{\xi} + C \xi \\ &= A \eta_0 + I \ddot{\xi} + d'' \dot{\xi} + (B + C) \xi \end{aligned} \tag{34}$$

したがって、(33)、(34)を(2)式に代入して次の力学系の運動方程式を得る。

$$\left\{ -\omega^2 I + i \omega(N - \frac{A}{\alpha G}) + (\frac{A\beta}{\alpha} - B) \right\} \xi = E - \frac{A}{\alpha} v \tag{35}$$

したがって入射波を完全に吸収する条件は次のようになる。

$$\begin{cases} -A/(\alpha G) = N \\ -\omega^2 I + A\beta/\alpha - B = 0 \end{cases} \therefore \alpha = -A/(NG) \tag{36}$$

$$\beta = -(\omega^2 I + B)/(NG) \tag{37}$$

このとき、造波板の変位は(35)式より

$$\xi = Gv / (2i\omega) \tag{38}$$

であるから、造波振幅は

$$\eta_a = -i \frac{\omega^2}{g} H^+ \xi = -\frac{\omega}{2g} H^+ Gv \tag{39}$$

であり

$$v = -2g\eta_a / (\omega H^+ G) \tag{40}$$

と入力すると求める造波振幅  $\eta_a$  が得られる。

反射波係数は次のようにして得られる。(35)式で  $v=0$  として

$$\begin{aligned} \xi/E &= [-\omega^2 I + i\omega\{N - A/(\alpha G)\} \\ &\quad + (A\beta/\alpha - B)]^{-1} \end{aligned} \tag{41}$$

波強制力は Haskind の関係より

$$E/\eta_i = \rho g D H^+ \tag{42}$$

そして造波板の運動  $\xi$  による発散波は  $-i\omega^2 H^+ \xi/g$ , diffraction wave は造波板が垂直壁の前にあることを考慮して  $H^+ \eta_i / H^+$  であるから反射波の応答関数は

$$\begin{aligned} \eta_r &= \frac{H^+}{H^+} [1 - i\omega^2 \rho D |H^+|^2 / \{-\omega^2 I + i\omega(N - \frac{A}{\alpha G}) \\ &\quad + \frac{A\beta}{\alpha} - B\}] \end{aligned} \tag{43}$$

また Haskind-Newman の関係から、片側にしか発散波がないとすると

$$N = \rho \omega D |H^+|^2 / 2 \tag{44}$$

$$\therefore \eta_r = \frac{H^+}{H^+} \left[ \frac{-i\omega\{N + A/(\alpha G)\} - \omega^2 I + A\beta/\alpha - B}{i\omega(N - A/(\alpha G)) - \omega^2 I + A\beta/\alpha - B} \right] \tag{45}$$

$\alpha, \beta$  が(36)、(37)式を満足するとき、確かに  $\eta_r = 0$  となる。

川口<sup>3)</sup>はピストン型の装置の造波板上の波面  $\eta_0$  を制御信号に用いたが、このときは(32)式の  $A, B$  そして(37)式の  $I'$  は次のようになる。

$$A = \rho(\omega/K)^2 \tag{46}$$

$$B + \omega^2 I' = -\rho(\omega/K)^2 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \tag{47}$$

ここで  $K, C_n$  は次式で与えられる。

$$\omega^2/g = K \tanh Kh = -K_n \tan K_n h \tag{48}$$

$$C_n = 2 \sin^2 K_n h / (K_n h + \sin K_n h \cos K_n h) \tag{49}$$

(46)、(47)式を(36)、(37)式に代入し、(44)式の関係より完全吸収条件を、また(45)式に代入することにより反射波係数を得られる。それらは川口の得た結果と一致する。

以上に示したように造波板近傍の変動圧、または波面変動を、造波板の形状によらず制御信号に使うことができる。そしてその場合、電動機の慣性力や摩擦のみならず力学系の慣性力、摩擦、復原力の影響を受けない完全吸収条件が得られる利点がある。

6. あとがき

反射波吸収型造波装置の動作原理を波浪発電の理論を用いて統一的に論ずることにより以下の結論を得た。

(1) ごく普通の直流電動機で実現可能であるが、設計条件に電動機、力学系の慣性力、摩擦等が入り複雑になる。また安定条件は力学系の摩擦が造波減衰力を越えないことである。

(2) 電動機を速度制御することにより、設計条件は電動機の慣性力、摩擦等によらなくなるが、力学系の慣性力、摩擦等の影響はうける。

(3) 造波板近傍の変動圧、または波面変動を、駆動力

研 究 速 報  
 のかわりに制御信号に用いることができる。このことは造波装置の形状によらない。この場合設計条件は、電動機のみならず力学系の慣性力、摩擦等によらないので大変優れた装置となる。(1986年10月28日受理)

Appendix 完全吸収条件

(10)式中の外部負荷、 $d'+d''+d$ により吸収される波のパワーは、円周波数  $\omega$  の規則波の場合、

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \omega^2 (d' + d'' + d) |l|^2 \quad (A1)$$

であり、運動振幅  $l$  は (10) 式と Haskind の関係

$$E = \rho g a D H^+ e^{i\omega t} \quad (A2)$$

より

$$l = \rho g a D H^+ / [ \{ C' - \omega^2 (I + I' + J') \} + i\omega (N + d' + d'' + d) ] \quad (A3)$$

ただし、ここで  $\rho, g, a, H^+$  はそれぞれ水の密度、重力加速度、波振幅、そしていわゆる Kochin 関数である。また  $D$  は浅水影響を示し、水浅を  $h$  とすると

$$D = \tanh Kh + Kh \operatorname{sech}^2 Kh \quad (A4)$$

そしと波数  $K$  は分散関係

$$\omega^2 = Kg \tanh Kh \quad (A5)$$

より与えられる。

$\bar{P}$  を最大にする  $(d' + d'' + d)$  および  $C'$  の条件は

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial (d' + d'' + d)} = 0, \quad \frac{\partial \bar{P}}{\partial C'} = 0 \quad (A6)$$

より得られ、(14)式、(15)式のようになる。そのときの吸収される波のパワーは(A1)、(A3)、(14)、(15)式より

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{2} \omega^2 |\rho g a D H^+|^2 / (4\omega^2 N) \\ &= \frac{1}{2} \rho g a^2 V_g |H^+|^2 / (|H^+|^2 + |H^-|^2) \quad (A7) \end{aligned}$$

である。ここで波の群速度、造波減衰力について次の関係式を用いている。

$$V_g = gD / (2\omega) \quad (A8)$$

$$N = \rho \omega D (|H^+|^2 + |H^-|^2) / 2 \quad (A9)$$

入射波のパワーは  $\rho g a^2 V_g / 2$  であるから吸収効率は

$$\eta = |H^+|^2 / (|H^+|^2 + |H^-|^2) \quad (A10)$$

である。ここで  $H^+$  は反射波方向への発散波に対応する radiation Kochin 関数であり、 $H^-$  は透過波方向へのそれである。したがって  $H^- = 0$ 、すなわち片側だけに発散波を持つ装置では吸収効率は 1.0 となる。

参 考 文 献

- 1) Salter, S. H.: Absorbing wave-makers and wide tank, Proc. of the Conf. on Directional Wave Spectra Applications, 1981, p.185
- 2) 経塚雄策：吸収式造波装置の研究，西部造船会会報，第70号，1985，p.77
- 3) 川口 隆：波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式，三井造船技報，第128号，1986，p.20

