斜め追波中の危険出会い群波現象に対する一考察

高石 敬史*

A Consideration on Dangerous Encounter Wave Group Phenomena in Quartering Seas

Yoshifumi TAKAISHI

Abstract

When ship speed is almost the same as the group velocity of dominant wave in following or quartering seas, the ship will be attacked by highest waves successively in a certain probability. This phenomena is particularly dangerous, because such repeated attack of high waves will induce various bad effects on ship safety such as stability loss, unstable or synchronous rolling motions, shipping water, etc.

This dangerous encounter wave group phenomena can be explained by the feature of encounter wave spectrum which is transformed from wave spectrum for the sea state concerned, i. e. a large part of wave energy of the sea concentrates in a narrow band of encounter wave frequency. By introducing the wave energy concentration ratio, the degree of danger to encounter with successive high waves is determined. The model test results show the validity of this idea.

The author proposes a diagram to judge the dangerous condition in relation with ship speed, encounter angle and wave period. This diagram will be useful as a guideline for safe navigation in following and quartering seas.

1. ま え が き

著者はさきに追波や斜め追波中の危険出会い群波現象の存在とその危険性について指摘し、船速、出会い角、波の周期で決まる危険条件判定図を安全運航のための一指針として提案した⁽¹⁾⁽²⁾。

図1 波エネルギースペクトラムの出会い波スペクトラムへの変換

角水槽における波浪中の模型実験⁽³⁾においても、この危険条件にあてはまるか、それに近い場合に転覆の確率が高いことが観測されている。そのほか実船の海難例にもこの危険条件下で遭難したと推定できるものも幾つか見られる。これらの事実はこの判定図の有用性を裏付けるものであろう。しかしながら海象や船の運航状態には常にある幅があるので、判定図を安全運航指針とするには危険条件も既発表の図⁽¹⁾から求められる1点ではなく、そのまわりにある広がりを持っているものと理解する必要がある。

危険出会い群波現象は図1に示すように、空間固定の周波数 ω をベースにした波スペクトラムを、船と波の出会い周波数 ω_e ベースのスペクトラムに変換した場合、波のエネルギーの相当な部分が、ほとんど単一と言ってもよい狭い出会い周波数範囲の

* 正会員 日本大学 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1丁目8番地)

(a) 停止時における波の記録

(b) 追波時の出会い波の記録(船速が波の群速度に等しい場合)

図2 停止時と追波時の出会い波の記録例⁽¹⁾

ところに集中することにより発現する。これを時間領域の波形でみると、図2に示すように、固定点で測った波の記録 図2(a)は、船の出会いの波形としては、図2(b)に示すように、波高と周期が一定の値をとる規則波のような時系列になる。その場合の出会い波の波高は図2(a)に示す海象で現れる波高の確率に応じて小さい場合から大きい場合まで種々の値を取り得るのであるが、図2(b)はそのようなうちで最大の波群に出会った場合を例示したもので、その波高もその海象の有義波高の2倍に達することも有りうる。

このような大波に連続して襲われるならば、船の動揺の増加や船側からの海水打ち込みの危険が増大し、船の復原性を劣化させ、最悪の場合には転覆につながる可能性がある。この危険性の度合いは連続大波の波高の大きさや、そのような大波高の連続する数により支配されると考えることができる。本論では、そのような大波高連続群波現象の度合いが、不規則波のエネルギーの出会い波における集中の度合いと相関を持つと仮定し、船の運航条件と波エネルギーの集中度の関係を調べ、転覆の模型実験の結果をあてはめることにより、危険条件を定量的に示す判定図を導くことができた。

2. 波のエネルギーの集中度の検討

不規則波として(1)式に示す Pierson-Moskowitz 型をとる。

$$S'_w(\omega') = \frac{2\pi S_w(\omega)}{T_v H_v^2} = 0.11 \omega'^{-5} \exp\{-0.44 \omega'^{-4}\} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $\omega_0 = 2\pi/T_v$ 、 T_v : 平均波周期、 H_v : 有義波高、であり、無次元周波数 $\omega' = \omega/\omega_0$ に対する無次元スペクトラム $S'_w(\omega')$ を示している。出会い波スペクトラムへの変換は(2)式により行われ、

$$S'_w(\omega'_e) = \frac{S'_w(\omega')}{|1 - \alpha' \omega'|} \quad \dots\dots(2)$$

出会い周波数と波周波数の関係は(3)式により求められる。

$$\omega'_e = \omega'(1 - \alpha' \omega'/2) \quad \dots\dots(3)$$

ここに $\omega'_e = \omega_e/\omega_0$ であり、また

$$\alpha' = 4\pi V \cos \chi / (g T_v) \quad \dots\dots(4)$$

とおく。

(2)式の分母がゼロになる ω_e' (ω_{ec}' と表す) において出会い波スペクトラムの値は無限大となる。波のエネルギーの集中度の目安として、図1の中にも示したように、出会い周波数の一定の狭い範囲 $\delta\omega_e'$ に、当初採用した波のエネルギーが含まれる割合 (β と表す) をとることとする。出会い周波数の範囲としては、 $\omega_{ec}' \sim \omega_{ec}' - \delta\omega_e'$ の間をとり、今の場合、試みに $\delta\omega_e' = \omega_{ec}'/10$ とする。そうすると、 β の値は(4)式のようにして求められる。

$$\beta = \frac{\sigma_c^2}{\sigma^2} = \frac{\int_{\omega_l'}^{\omega_u'} S'_w(\omega') d\omega'}{\int_0^\infty S'_w(\omega') d\omega'} \quad \dots\dots(4)$$

ここに

$$\frac{\omega_u'}{\omega_l'} = \frac{1 \pm \sqrt{2\alpha'\delta\omega_e'}}{\alpha'} \quad \dots\dots(5)$$

である。

船速を含むパラメータとしては(2)式、(3)式の中の α' をとり、 $\alpha' = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ の7ケースについて調べた。その結果を図3に示す。この図によれば、 $\alpha' \approx 1.1$ において最大の集中度75%を示している。 α' の値がこれより上下に離れるにつれて、最初は緩やかに減少していき、そのあと急速に集中度が減じる。別の見方をすればエネルギーの集中している危険な条件はかなりの広がりを持つと言える。

図3 波のエネルギーの出会い波スペクトラムへの集中度

図4 危険条件判定図

3. 危険条件判定図

船速と波の平均周期の無次元値 $\alpha = 4\pi V/(gT_v)$ と出会い角 χ の値を用いて、危険条件判定図を図4のように無次元表示により示した。縦軸を追波方向とし、右回りに出会い角 χ を、原点から放射軸方向に α をとる。横軸に平行な点線により図3に示す β の値、即ち波のエネルギーの集中度を同図中に示した。

例えば、 $\chi = 30^\circ$ 、 $4\pi V/(gT_v) = 1.3$ の場合、 $\beta \approx 0.75$ となること、船速をこの点から $\pm 20\%$ 変化させても、 $\beta > 0.65$ であり、集中度はまだかなり高いことが分かる。では β の値がどの程度の大きさであれば危険であるかということを調べるために、文献(3)に示された転覆模型実験の結果をこの図にあてはめてみた。その結果、次節に示すように、波のエネルギーの集中度と転覆の危険性のあいだにはかなりの相関関係が見られる。そこで、

転覆が生じている $\beta > 0.6$ の範囲を危険条件とする。船の運航状態がこの危険条件の範囲の場合には、船速を下げるか、出会い角を変えるかの何れかにより、この範囲を脱する必要がある。なお、利用に便利のように、船速を波周期で割った値、即ち $V(\text{kt})/T_v(\text{sec})$ をパラメータとした場合の数値も下記の関係により図中に示してある。

$$V(\text{kt})/T_v(\text{sec}) = g\alpha / (0.5144 \times 4\pi) \quad \doteq 1.5\alpha \quad \cdots \cdots (6)$$

4. 模型実験結果との比較

文献(3)には、コンテナ船(G船型)模型の斜め不規則波中の転覆実験結果が紹介されている。船の状態は表1に、実験に用いた波のスペクトラムを図5に示す。転覆の頻度(転覆の回数/航走の回数: N_c/N)を各種の

表1 転覆模型実験に用いたコンテナ船の要目
および実験条件

長さ L_{pp} (m)	135.00	GM (m)	0.76, 0.90, 1.02, 1.06
幅 B (m)	24.30	船速 (kt)	24.1, 22.7, 22.0, 20.6,
深さ D (m)	11.50		19.2
喫水 d (m)	8.37	波浪条件	$T_p: 12.4$ (sec), $H_{1/3}: 10$ (m)

図5 模型実験に用いた波スペクトラム⁽³⁾

GM値や船速(フルード数: Fn)について示したのが図6⁽³⁾である。この図中の Fn の値はプロペラ回転数に対する平水中の船速を表しているが、危険条件に当てはめるには、波浪中の実際の船速を用いる必要がある。斜め追い波中の船速は、波との出会い周期で大幅に変動するので、どの値をとるか難しいがここでは単純に変動船速の中心値を取り、これを V の値とした。図4に相当する図7を描いて各実験状態における転覆の頻度を β の値と共に示した。図中の波周期は T_v の代わりに、波スペクトラムのピークのところの周期 T_p を便宜上採用している (α の代わりに α_p と表している)。

この結果によると、波の集中度と転覆の頻度の相関は高いことが分かる。また、 $\beta > 0.6$ の範囲に転覆が発生していることも分かる。またGM値が大きくなれば転覆の頻度も小さくなることが示されている。

5. 危険条件判定図の利用法について

以上の考察により図4に示す危険条件判定図は荒天中の安全運航のために利用することができることが分かった。荒天中に速度と波との出会い角およびその時の波の周期を用いて図4の上に自船の状態をプロットして、図中の危険範囲にあれば、減速あるいは変針の荒天避航操船により危険範囲から脱することが危険群波を避ける手段となる。その場合、大幅な変針は斜め追い波状態から横波状態に近づくことになるので望ましくない。減速を主体に操船するのが適当と思われる。若し減速量が多く必要で、運航上別の不具合が生じる場合には控えめの変針と減速を組み合わせた慎重な操船が望まれる。

図6 斜め追波中における転覆模型実験の結果のサマリー⁽³⁾

図7 模型船の転覆の頻度と波エネルギー集中度の相関

荒天時に波の方向や周期を正確に求めることが困難な場合がある。波の方向は風方向の絶対方位とほぼ等しいとしてよいであろう。波の周期は気象庁の発行している「海洋観測指針」などをガイドとして、ストップウォッチにより波頭の崩れたあとに残る泡の塊の上下動の周期を何波か計り平均する方法が一般的である。夜間や視界が悪い場合にはレーダー画面に映る波頂線のエコー列から平均波長 λ_0 を求め、次式により波の平均周期に換算することも出来る。

$$T_0 = 0.8\sqrt{\lambda_0} \quad \dots\dots(7)$$

危険範囲に入ったことを知る目安として、波が不規則なのに自船の動揺が規則的になり、かつ動揺の周期が波の平均周期の2倍付近になるということがある*。

6. む す び

波のスペクトラムを斜め追い波中航走する船舶の出会い波スペクトラムに変換した場合の、出会い波周波数における波エネルギーの集中度と転覆の危険性との相関を調べることにより、斜め追い波中の危険条件の一つである大波高出会い群波現象の危険範囲を定める判定法を提案した。判定法は図の形になっており、船速、出会い角および波の周期の値を用いて実船の運航の現場において容易に利用できるものである。

この判定法（または判定図）の利用法としては安全運航の操船指針のほかに、斜め追い波中で発生した海難事故の原因究明にも活用できる。また、船舶の復原性基準を検討する場合、斜め追い波中の危険性をどのように考慮するかについても、危険条件の設定などに用いることができる。

謝 辞

本論に用いた模型実験のデータは船舶技術研究所運動性能部で実施された実験によるものである。膨大な実験による詳細なデータを快く提供していただいた菅 信運動性能部長および猿田俊彦主任研究官に深く感謝する。また、この研究結果は当初、日本造船研究協会第24基準研究部会において発表したもので、部会長藤野正隆東大教授をはじめ同部会、とくに追い波中復原性検討ワーキング・グループの委員の方々には貴重な意見や裏付けのデータをいただいた。これらの方々にも併せて感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) Takaishi, Y.; Consideration on the Dangerous Situations Leading to Capsize of Ship in Waves, Proceedings of 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STABILITY'82), Tokyo, pp. 243-253, 1982
- (2) 日本海難防止協会編；小型船の海難防止指針，成山堂，pp. 175, 1980
- (3) 菅 信ほか；斜め追い波中の船の転覆について（第1報 転覆機構に関する模型実験），日本造船学会論文集，第167号，pp. 81-90, 1990

質 疑 応 答

桑島 進（東京商船大学）：船にとって危険な出会い波となる指標に、出会い波スペクトラムの形を用いたことは、非常にユニークな着想と思います。ただし、出会い波スペクトルの形は船の針路と速度によって変化するものであることから、御説の危険なスペクトル形になる時とは、船と波との関係において、どのような物理的メカニズムが働いているのか、いまいし御教示ください。

高石敬史：危険な出会い波になる場合は、出会い周期の値が同じか近接している波成分が多いということで、各出会い波の山が重なるような位相関係になると、高い波が連続して現れることになります。周波数の近い2つの波を重ねるとビート状の波になりますが、ビートの振幅の大きいところで、大振幅の波が幾波か連続する顕

* 図1に示すように、出会い波に波エネルギーの集中が起こる条件は(2)式の分母をゼロにする条件、即ち、 $\omega' = 1/\alpha'$ 、が満足されるか、それに近い場合である。この条件を(3)式に入れると、出会い周波数は $\omega_e' = 1/(2\alpha')$ となり、 $\omega_e' = \omega'/2$ という関係が求まる。即ち、出会い周期は波の周期の2倍である。

著な群波現象が現れることと類似の現象だと考えます。不規則波中の追波状態で出会い波を計算するシミュレーションによっても出会い波のこのような状況を再現することが可能です。

講演でも説明しましたが、出会い群波の波高は時間や場所によって大小がありますが、その海象の波高の出現確率に従って、大波の群波に出会う可能性があります。