

不審船対処の OR 分析

宝崎 隆祐, 小宮 享

海上保安庁のホームページには、不審船は、「薬物の密輸入、不法入出国等の重大犯罪に関与している疑いのある犯罪共用船舶であると考えられる」とある。ここでは、不審船の中でも経済原理に従って行動するであろう密輸船ないしは非武装不審船に焦点を当て、3つのレベルの意思決定問題を取り上げる。すなわち、密輸組織と取締機関との密輸取締ゲームおよび不審船発見のための搜索ゲーム、さらには発見した不審船を実際に捕獲するための強制停船用阻止索の使用問題である。

キーワード：密輸取締ゲーム、搜索ゲーム、最適制御

1. はじめに

不審船といえば、平成8年から11年にかけて、不法密入国を目的とし東シナ海を経て日本の沿岸海域に漂流して問題となった多数の中国籍船舶や、平成13年12月奄美大島沖で海上保安庁の巡視船との間で銃撃戦の末に自爆沈没した北朝鮮国籍とおぼしき不審船が記憶に新しい。このような不審船は工作船とも呼ばれ、その運用形態も様々で推測し難い意図を持っている。また、不審船がミサイルやロケット、機関銃といった火器によって武装している場合には、その対処過程で一種の戦闘状態に突入する可能性も大きく、これらの不審船対処法の科学的な取扱いは大変難しい。これに対し、取締機関の網の目をかいくぐって密輸行為を働こうとする密輸組織や密輸船の行動を、経済原理やコスト効率性により分析することはある程度可能であろう。以上から、この報告では不審船の中でも密輸船や非武装不審船に焦点を当て、OR的な3つの意思決定問題の分析例を紹介する。

まず、問題を密輸組織と取締機関との丁々発止のせめぎ合いと見なし、ゲーム理論的立場から密輸組織の意図や行動の特徴を分析した例を紹介する。次に、海上における不審船情報が実際に寄せられて以降、航空機その他の手段を用いて不審船を発見しようとする搜索活動の帰趨を、搜索理論の道具立てを借りて議論する。最後に、非武装不審船への接近から始まる取締艦船による捕捉・拿捕行為において、強制停船用阻止索

と呼ばれる仮想的な器具を効果的に使用方法を幾何学的手法により検討した結果を紹介する。

2. インスペクション・ゲームと密輸取締

ここで取り扱う密輸取締ゲームは一般にインスペクション・ゲームと呼ばれ、その原型は1960年代、当時RAND研究所にいたDresher[2]の研究と、それを一般化したMaschler[14]の研究に遡ることができる。彼らは軍縮条約に付随して起こる査察問題を取扱い、条約に対する違反行為への誘因をもつプレイヤーとその取り締まりのために査察を実施しようとするプレイヤーとの問題を多段階の2人ゼロ和ゲームとして論じている。その後彼らのモデルは、密輸者とその違法行為を監視する税関との密輸取締ゲームに置き換えられて、Thomas and Nisgav[17], Sakaguchi[16], Hohzaki[5][8]その他の研究者らによって研究が進展してきた。

ここでは文献[5]にある2人ゼロ和の多段階ゲームモデルを紹介し、密輸取締における意思決定者である取締者と密輸者の合理的な行為の行く末を考察してみよう。

- (1) 取締者と密輸者が1日に1回のアクションをとる多段階ゲームを考え、ゲームのステージ数を残り日数により表す。
- (2) 取締者には最大パトロール日数が与えられ、密輸者には必ず実施すべきノルマとしての密輸日数が与えられる。ただし、それぞれの最大日数が残り日数を超過する場合は、超過分の機会は失われる。
- (3) 1回のアクションに際し、取締者はパトロールを実施するか否か、密輸者は密輸を行うか否か

の手をもつ。

- (4) 密輸者が密輸を行う日に取締者がパトロールを実施すれば、確率 p_1 で密輸を摘発できるが、逆に密輸が成功することも確率 p_2 で起こる。また、パトロールが実施されなければ、密輸は必ず成功する。
- (5) 密輸摘発は取締者に利得 $\alpha > 0$ をもたらし、逆に密輸の成功により密輸者は利得 1 を得るものとするが、両者の利得、損失には 2 人ゼロ和を仮定する。ただし、 $\alpha p_1 - p_2 > 0$ とする。
- (6) ある日において取締者が密輸者を摘発できない場合は、次の日のゲームに移る。密輸者の摘発により、また残り日数が尽きた場合にゲームは終了する。
- (7) 各ステージが終わるごとに、両プレイヤーの行った戦略は互いの知るところとなる。

いま残り日数 n 日のステージにおいて、取締者の最大可能パトロール日数が k 、密輸者の残り密輸実施日数が l であるゲームを $\Gamma(n, k, l)$ 、そのゲームの値を $v(n, k, l)$ で表すと、これは次のような漸化式で表現できる。

$$\begin{aligned}
 v(n, k, l) &= \text{val} \left(\begin{array}{c} \alpha p_1 - p_2 + (1 - p_1)v(n-1, k-1, l-1) \\ -1 + v(n-1, k, l-1) \\ v(n-1, k-1, l) \\ v(n-1, k, l) \end{array} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

右辺は 2 行 2 列の行列ゲームであり、記号 val はそのゲームの値を表す。2 つの行は、上から取締者のパトロール実施、未実施の戦略に対応し、2 つの列は、左から密輸者の密輸決行、未決行に対応する。行列ゲームの各要素は、戦略の組合せの結果起こりうる支払とゲームの推移を表している。例えば、取締者がパトロールを、密輸者が密輸を実施する場合の 1 行 1 列の要素は、この日の期待利得が $\alpha p_1 - p_2$ であり、さらに確率 $1 - p_1$ で密輸者は摘発されずに次の日のゲーム $\Gamma(n-1, k-1, l-1)$ に移ることを示している。

初期条件は $v(0, k, l) = 0$, $v(n, k, 0) = 0$, $v(n, 0, l) = -l$ であるが、 $l = n$ の場合には密輸が強制されるため(1)式の行列は 1 列のみとなり、次の境界条件となる。

$$\begin{aligned}
 v(n, k, n) &= \max \{ -1 + v(n-1, k, n-1), \\
 &\quad \alpha p_1 - p_2 + (1 - p_1)v(n-1, k-1, n-1) \}
 \end{aligned}$$

漸化式(1)を用いれば、各ステージにおけるゲームの最適解やゲームの値を数値的に求めることは容易である。詳細は文献[5]に譲るが、行列ゲーム(1)の最適解は混

合戦略となり解析的な分析も容易となる。例えば、特殊ケースにおける次のような解析的な結果が得られる。

定理 1 $l = n, k = n$ または $l = 1$ のそれぞれの場合のゲームの値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 &\frac{\alpha p_1 - p_2}{p_1} \{ 1 - (1 - p_1)^k \} - (n - k)(1 - p_1)^k \\
 &\frac{\alpha p_1 - p_2}{p_1} \{ 1 - (1 - p_1)^l \} \\
 &\frac{k}{n} (\alpha p_1 - p_2 + 1) - 1
 \end{aligned}$$

$l = 1$ の場合、両プレイヤーが最適戦略を採る限り当該ステージからみたパトロール実施確率は将来のどのステージでも同じとなり、密輸者が密輸を計画する上で将来のステージ間に有利、不利の差はない。

数値例によりゲームの特徴をみてみよう。次の表 1 は、 $\alpha = 2$, $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.3$ のパラメータ設定の下で n, k, l を変化させてゲームの値を求めたもので、値の正、負によりプレイヤーの勝ち負けが判定できる。

$(n, k) = (4, 1)$ の行から、密輸回数 l が大きくなるとゲームの値も小さくなるが、あまり大きな l では密輸決行がパトロールの網にひっかかる可能性が大きくなり、返ってゲームの値は小さくなる。 $n = 4$ 日のうちの半分でパトロールが行われる $k = 2$ の場合には、密輸決行はせいぜい 1~2 回程度が限度で、それ以上の実施は密輸者にとってはむしろ不利益となる。プレイヤーの最適戦略に関する分析も面白いが、ここでは割愛する。

3. デイタム検索ゲーム

前節では、密輸取締ゲームに参加する二人の意思決定者（取締者と密輸者）が経済原理に従った場合、ど

表 1 ゲームの値

n	k	l			
		1	2	3	4
1	0	-1			
	1	0.7			
	0	-1	-2		
3	1	-0.15	0.20		
	2	0.70	1.05		
	0	-1	-2	-3	
4	1	-0.43	-0.64	-0.30	
	2	0.13	0.40	0.80	
	3	0.70	1.05	1.23	
4	0	-1	-2	-3	-4
	1	-0.58	-1.00	-1.19	-0.80
	2	-0.15	-0.15	0.06	0.55
	3	0.28	0.54	0.83	1.10
4	0.70	1.05	1.23	1.31	

のように行動を起こすかについての分析を行った。密輸船が実際に行動を起こした場合に生じる情報を手がかりに、取締者による搜索活動が始まる。

目標物の探知を意図する海難活動、軍事行動等において、暴露された目標物の位置（デイトム点）や時刻情報をデイトム情報といい、この情報により動機付けられた搜索者による搜索活動をデイトム搜索と呼ぶ。搜索理論はオペレーションズ・リサーチ誕生に寄与した一研究分野であるが、第2次大戦中の米海軍のOR活動の理論的成果をまとめたKoopman[13]も、デイトム点から一定速度で拡散する目標物に対する搜索について論じている。2人ゼロ和の搜索ゲームは1960年代から論じられていて、Danskin[1]やWashburn[18], Kikuta[11]やEagle[3]の研究がある。特に搜索者の戦略を搜索資源配分とした搜索ゲームに対しては、Nakai[15], Iidaら[10]やHohzaki[4]の研究がある。

ここではデイトム搜索に特化した2つの研究[9][19]を概説し、密輸船と取締航空機は2次元海域でどのように行動すべきかをゲーム理論の立場で考えてみる。

- (1) 搜索空間を2次元連続ユークリッド空間 \mathbf{R}^2 とし、時刻 $t=0$ に密輸船は原点（デイトム点）にいる。
- (2) 取締機はこのデイトム情報を得て、時刻 τ から T まで密輸船の搜索を実施する。搜索にあたっては単位時間あたり ρ の搜索資源が利用可能であり、これを任意の地点に分割・投入して密輸船探知に努める。
- (3) 最初原点に位置していた密輸船は時刻 $t=0$ 以降 \mathbf{R}^2 上を連続的に直進移動するが、速度 v を使用するにあたっては、単位時間あたりエネルギー量 $\mu(v)$ (v の単調増加凸関数) を消費する。また、使用速度は最大速度 S を超えてはならず、初期時点において保持しているエネルギー総量は E である。
- (4) ある地点に存在する密輸船に対する探知確率はそこに投入される搜索資源量に依存するとし、密輸船の存在確率密度で重み付けられた資源投入量の空間・時間積分により密輸船に対する探知確率の指標とする。ここでの問題は、この指標を支払関数とし、搜索資源の配分戦略をもつ取締機をマキシマイザー、エネルギー制約下で連続移動をする密輸船をミニマイザーとする2

人ゼロ和ゲームである。

搜索資源とは密輸船発見に役立つ資源のことであり、機上にいる搜索者の目視時間やレーダー、水中目標物に対する音響センサーといったものを指す。

問題は原点を中心として点対称であるから、平面座標を原点からの距離 $x \in [0, \infty)$ で代表し、時刻 t 、地点 x における取締機の搜索資源投入密度を $h(x, t)$ 、移動による密輸船の存在確率密度を $f(x, t)$ とすると、プレイヤーの戦略 $\mathbf{H} = \{h(x, t), x \in [0, \infty), t \in [\tau, T]\}$, $\mathbf{F} = \{f(x, t), x \in [0, \infty), t \in [0, T]\}$ に対する支払関数は次式で与えられる。

$$G(\mathbf{H}, \mathbf{F}) = \int_{\tau}^T \int_{X_t} h(x, t) f(x, t) 2\pi x dx dt \quad (2)$$

ただし、 X_t は時刻 t における密輸船の存在領域を表す。

搜索資源密度 $h(x, t) \geq 0$ の制約は $\int_0^{\infty} h(x, t) 2\pi x dx \leq \rho (\tau \leq t \leq T)$ であり、密輸船の存在確率密度 $f(x, t) \geq 0$ は船の移動制約に依存しつつ $\int_{X_t} f(x, t) 2\pi x dx = 1 (0 \leq t \leq T)$ を満たさなければならない。船の移動は、時刻 t における位置 $x(t)$ と速度 $v(t) := dx(t)/dt$ に関して、 $v(t) \leq S$ 、また $\int_0^T \mu(v(t)) dt \leq E$ の制約をもつ。

(2)式の被積分項 $h(x, t)f(x, t)2\pi x$ の連続性および積分範囲の有限性から、支払関数のミニマックスとマクスマインは一致することが知られている。以下では、このゲームの値を上下で挟むための上界値、下界値の評価法について、その概要と結果を解説し、その後実際の人間を被験者とした実験による結果と比較する。

その前に密輸船にとっての望ましい移動戦略が何かを問うと、それは2つの性質に集約される。第1は、存在確率密度 $f(x, t)$ をできるだけ一様にする（一様戦略）により、支払関数の最大化をねらおうとする取締機の搜索資源の集中活用を許さないことである。その第2は、各時点での存在領域 X_t をできるだけ広くし（拡散戦略）、搜索資源投入を広く薄くさせることである。この両方を満足させる密輸船の移動は、エネルギー制約があるためなかなか難しい。

[下界評価] 上述した移動制約を考慮し、密輸船の特定の時刻 t における最大到達距離 $x(t)$ を変分法で求める。その後 $x(t)$ を半径とする領域内で、常時一様存在分布が形成できるとして船側の運動を過大評価することにより、ゲーム値の下界 G_L が得られる。

[上界評価] 実行可能である密輸船の位置 $y(t)$ の半

径内で常に一様存在分布を作ることにより得られる支払関数を最小化する次の問題により，ゲームの値の上界値 G_U が得られる。

$$G_U = \lim_{v(t)} \int_{\tau}^T \rho / (\pi y(t)^2) dt \quad s, t. \quad v(t) = dy(t)/dt, \\ 0 \leq v(t) \leq S, \int_0^T \mu(v(t)) dt \leq E \quad (3)$$

これは $v(t)$ を制御ベクトルとする制御問題である。これを解いて得た速度ベクトル $v(t) = dy(t)/dt$ に対し，確率密度関数 $g(z) = 2z$ に従って $[0, 1]$ で値をとる確率変数 Z を用い，時刻 t での速度を $Zv(t)$ にとる戦略により，密輸船は任意の時刻 t で半径 $y(t)$ の領域内での一様存在確率分布を実現できる。

[シミュレーション実験] これまでの理論を検証するために，ここではパーソナル・コンピュータ (PC) 上に模擬した搜索海域内において，二人の人間が密輸船および取締機としての役割を演じるシミュレーション実験を実施した結果を提示しよう。

2台のPCを通信ケーブルでつないで必要な情報のやり取りを行うが，その1台を密輸船操作パネル，もう1台を取締機の操作パネルとして各1人のオペレータを配置し，共通の設定海域を移動しあいながら，お互いの状態が見えない状況でデイトム搜索ゲームをプレイさせる。このハードウェアが提供する環境は，必ずしも簡略化された理論モデルの前提(1)–(4)とは忠実には合致しない。共通の2次元搜索空間， τ や T といった搜索時間管理の他，密輸船が理論モデルにある S ， E ， $\mu(v)$ といった移動制約の下で自らの針路，速力を制御する機能は提供されている。これに対し，取締機の操作パネルでは実際の作戦と同じく，密輸船に比べ十分大きな速度を使用しつつ，主に針路を変えながら搜索海域を移動して，船の発見に努める。また，取締機が搭載している探知センサーからある距離（有効搜索幅という）内に船がいれば確実に発見でき，それ以遠だと決して発見できないとして，時間経過に対する探知確率のデータを取得する。実験の詳細やゲームの値の探知確率への変換法については，文献[6][7]を参照願いたい。

PC上の環境設定は，搜索海域を半径1,000ピクセルの円形領域とし，搜索時間を $\tau=10$ 秒から $T=100$ 秒としたほか，密輸船に関する設定として $S=50$ ピクセル/秒， $\mu(v)=v^2$ ， $E=10,000$ （ピクセル/秒）²，取締機に関する設定として， $\rho=1$ ，移動速度 $u=250$ ピクセル/秒，有効搜索幅150ピクセルを用いた。プレイヤーは互いの位置情報を知らされないまま，好き

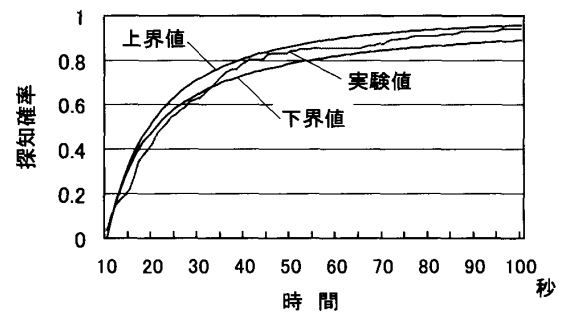


図1 探知確率

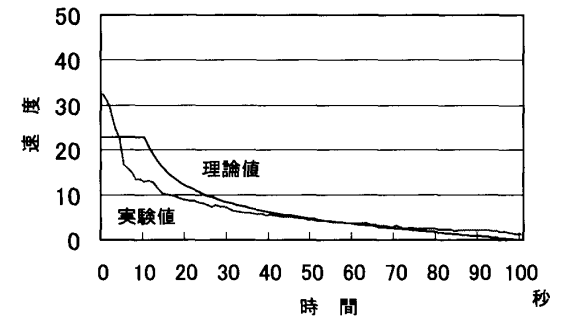


図2 逃避速度制御

な移動戦略を取りつつ，搜索機は密輸船の探知に，密輸船は取締機のセンサーに捕捉されないことに努力する。シミュレーション実験では，9名の人間が役目を代えながら，この1回100秒の対戦を計166回行った。

以上の概念的な理論モデルと現実的な搜索活動を模擬した実験の比較は，以下のとおりである。図1は，理論式におけるゲームの値の下界値 G_L と上界値 G_U を探知確率に変換した値と，実験による探知確率を，横軸に時間をとって描いたものである。実験結果は理論的評価式とほぼ合致しているといつてよいだろう。図2は，密輸船オペレータが実際に採用した速度の平均値と(3)式から得られる最適速度とを比べたものである。

密輸船側オペレータの行う速度制御の中には，初期にはデイトム点から離脱し，後半は接近する欺瞞的行動も観測できたが，全体としては初期に高速度使用の拡散逃避戦略，後半はエネルギー節約を意図しての低速度使用という特徴は理論および実験結果に共通している。ただし，ゲーム理論的に合理的な速度制御は，最もデイトム点から拡散逃避する(3)式の最適速度を規準として，より低速な速度も使用しつつ一様存在分布を形成することであるから，人間にはデイトム点からできるだけ離れようとする心理が働くといえるかもしれない。

4. 強制停船用阻止索による対処モデル

最後の話題として、発見した不審船を対処艦船が追跡している状況下で、不審船の捕捉・拿捕を企図し、逃避を妨害するための仮想的な装備品の最適な運用方法を探るモデルを紹介する。平成13年に法改正され、不審船船体に対する最低限の武器使用が認められることとなった。しかし、事態の深刻化を未然に防止するため、不審船にできる限り危害を与えずに捕捉したいという運用要求も根強い。以下では逃避する不審船を追跡している状況で、追跡艦船から先導するロケット等によりロープ（索）を展張しつつ不審船の前方に投射して、逃避行動を妨害する装備品を想定し、その最適な運用方針を検討する。

この索は、不審船の直接的な破壊ではなく、逃避領域を制限する効果や間接的な破壊（索をスクリューに巻き込ませ停船させる効果やロケット等推進部による不審船の一部の破壊）を期待するものである。ただし、領域を制限する効果以外は評価が困難なため、以下では、もっぱら不審船の逃避可能領域を最小化（＝阻止可能面積を最大化）する索の最適な発射方位角について議論する。なお、以下の装備品は個人的な想定であり、公的機関が正式に検討しているものではないことをあらかじめお断りする。

逃避する不審船（以下、目標）への索発射による阻止をモデル化するためにあたって、図3のような状況を想定する。

問題を簡略化するために、ロケットを発射する瞬間（ $t=0$ ）に目標と艦船は同方向に並走しているとする。発射時の艦艇位置を原点（0,0）とし、その後は y 軸に沿って等速度 V_e で進むとする。同時点の目標位置を

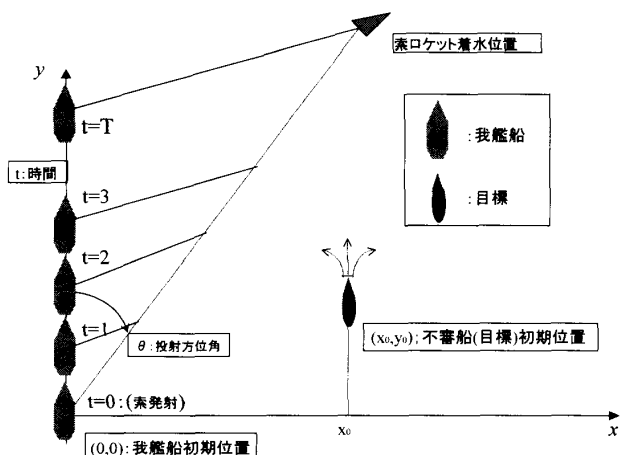


図3 索投射後の対処艦船・目標の移動状況

(x_0, y_0) とする。目標の最大速力 V_e や左右の単位時間当たりの最大操舵角 $\pm\Phi$ は上空から追跡している航空機が観測した情報から既知とする。また、目標・対処艦船とも双方の位置を常時把握でき、対処艦船からの阻止索発射に応じて目標は自由に回避進路を選択できるとする。

以上の前提で阻止索を進行方向から角度（方位角） θ で発射すると、発射時（ $t=0$ ）から着水時（ $t=T$ ；整数を仮定）までの対処艦船および阻止索、目標の変位は図4に示す状況になる。目標の最大逃避可能領域は、 V_e 、 Φ の制限から図のような扇型領域となる。この中で目標が索に接触しないように回避すれば、ある程度の逃避領域が制限される（図4a）。仮に図4bのように方位角が大きい場合は、目標が右方向へ急旋回したり、索をかいくぐって陰影部で示すような目標が索に先行して逃避できる領域も発生する。このような索発射時から着水時まで目標が阻止索に接触せず逃避できる領域の最小化（＝阻止領域の最大化）により発射方位角の最適性を評価する。

阻止領域を求めるには推進するロケットと対処艦船間の索が単位時間ごとに描く線分とその時点までの目標の逃避可能領域を考慮する。先行する阻止索に目標が接触する領域、あるいは将来において阻止索線分に交差してしまう領域を阻止領域とした。索着水時の阻止領域を A_T とする。1時点前（ $t=T-1$ ）での目標と阻止索との位置関係により付加される阻止領域を A_{T-1} とする。この領域は $T-1$ 時点での目標進出位置とそこで操作できる舵角 ϕ の関数であり、どのような $\phi \leq |\Phi|$ で逃避しても必然的に阻止領域に到達してしまう領域である。これを繰り返して得られる領域の和集合 $\bigcup_{t=0}^T A_t$ が1回の発射での阻止領域となる。一般には複雑な多角形となるが、その境界辺の（ $n+1$ ）コの端点座標を周回順に (X_i, Y_i) （ $i=0, 1, \dots, n=0$ ）とすれば、阻止領域の面積は、 $S(\theta) = \frac{1}{2} |\sum_{i=1}^n (X_i + X_{i-1})(Y_i - Y_{i-1})|$ により求まる。設定する範囲

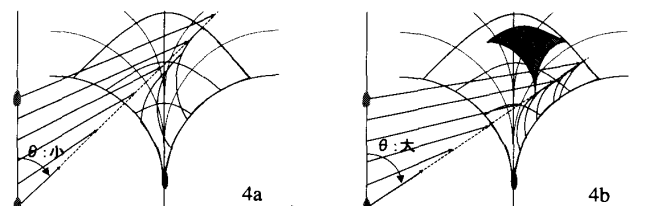


図4 目標の逃避可能領域が制限される様子

200	10	20	20	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30
190	20	20	20	20	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30
180	10	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30
170	20	20	20	20	10	10	10	20	20	30	30	20	30	30	30	30	30	30	30
160	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30	30	30
150	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30	40	40	40
140	20	20	20	20	20	20	20	20	30	20	30	30	30	30	30	30	40	40	40
130	20	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40
120	20	10	20	10	30	20	20	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40
110	20	10	10	10	20	20	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40
100	10	10	10	20	20	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40
90	10	20	20	20	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	50
80	20	20	20	20	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50
70	20	20	20	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50
60	20	20	30	30	30	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	20	30	30	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
40	30	30	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	30	30	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
y_0/x_0	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	200

図5 初期位置 (x_0, y_0) に対する最適な発射方向 $[\circ]$

200	2	4	7	9	13	8	13	10	9	9	10	13	9	11	10	11	12	14	
190	3	4	8	12	28	21	13	13	12	14	14	15	13	13	15	17	20	21	
180	5	7	11	14	24	19	16	13	13	14	15	14	13	15	19	21	23	24	
170	6	9	13	19	24	18	14	15	14	14	21	19	18	22	24	26	30	33	
160	8	12	14	32	22	17	15	17	18	27	22	19	22	24	28	31	33	15	
150	11	14	20	30	22	19	16	32	28	24	21	22	24	26	34	18	19	19	
140	13	19	22	32	17	18	41	36	31	22	26	28	32	33	30	25	25	27	
130	14	44	34	27	18	19	38	33	27	27	28	38	33	29	25	28	31	35	
120	19	42	35	28	20	40	35	41	30	32	46	41	29	34	29	37	43	48	
110	21	40	33	23	48	43	41	30	49	46	41	35	38	37	42	51	42	39	
100	44	37	30	51	44	42	33	49	46	40	36	29	42	48	44	40	37	33	
90	47	43	54	47	42	54	57	52	46	44	59	100	56	50	47	42	30	31	
80	38	52	49	47	55	57	52	44	54	100	100	51	48	44	38	37	49	64	
70	47	58	49	55	83	57	53	100	100	100	56	52	46	52	88	100	54	53	
60	54	56	100	100	57	100	100	100	57	54	54	100	100	100	100	60	47	45	
50	58	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	56	51	48	45	
40	59	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	56	52	48	100	100
30	82	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
y_0/x_0	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	200

図6 最適方向発射時の逃避可能領域カバー率 $[\%]$

の θ に対し、この値を最大にする方位角を最適な発射方向とする。

図5は $V_f = V_e$ の条件で発射時の目標位置 (x_0, y_0) を10ごとに設定して、最適な発射方位角を10°単位で求めたものである。図より明らかなように、阻止索は不審船の行動に先んじて、進路を妨害する方向に発射すべきである。また、図6はその際に逃避可能領域から索によりカバーされる面積比をパーセント表示したものであるが、不審船を真横に見るような位置関係で発射する方が領域を大きくカバーし、効果があることが示唆される。ただし、舷側を相手に向ければ阻止索以外にも搭載しているであろう通常武器の攻撃が双方とも容易となり、被害を受ける可能性も同時に高まる点に注意を要する。なお、今回の阻止索による分析

は、幾何学的に効果を発揮する器具、例えば、放水銃やネットガン、暴走族対処用ゲート等の運用方法の検討にも応用できるだろう。

不審船事案のような低脅威の事案への対処方法は、ほとんど検討されてこなかった。近年、これらの事案への対処機会が増加傾向にあり、初期対処での細やかな対応により事態の深刻化を回避する意味でも、低脅威事案への対応方法の検討を進めねばならない。

5. おわりに

オペレーションズ・リサーチとは意思決定問題の解決を支援する科学的手法であるが、問題に対する見方や意思決定のレベルにも様々なものがあり、それぞれに問題の設定法やアプローチ法が異なる。ここでは不審船対処問題に対し3つのレベルの問題を考え、ORによる理論的、実務的な分析例を紹介した。

参考文献

- [1] J. Danskin, "A Helicopter versus Submarine Search Game," *Operations Research*, 16 (1968), 509-517.
- [2] M. Drescher, "A Sampling Inspection Problem in Arms Control Agreements: A Game-Theoretic Analysis," Memorandum RM-2972-ARPA, The RAND Corporation, Santa Monica, California, 1962.
- [3] J. Eagle and A. Washburn, "Cumulative Search-Evasion Games," *Naval Research Logistics*, 38 (1991), 495-510.
- [4] R. Hohzaki, "Search Allocation Game," *European Journal of Operational Research*, 172 (2006), 101-119.
- [5] R. Hohzaki, "A Compulsory Smuggling Model of Inspection Game Taking Account of Fulfillment Probability of Players's Aims," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 49 (2006), 306-318.
- [6] 宝崎隆祐, 井田好彦, 「ゲーム理論による目標捜索法の新展開」, 防衛技術ジャーナル, 24 (2004), 42-50.
- [7] 宝崎隆祐, 井田好彦, 「テイタム捜索ゲームに関する理論と実験」, 統計数理研究所共同研究レポート, 191 (2006), 8-15.
- [8] R. Hohzaki, D. Kudoh and T. Komiya, "An Inspection Game: Taking Account of Fulfillment Probabilities of Players' Aims," *Naval Research Logistics*, 53 (2006), 761-771.
- [9] R. Hohzaki and A. Washburn, "An Approximation for a Continuous Datum Search Game with Energy Constraint," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 46 (2003), 306-318.

- [10] K. Iida, R. Hohzaki and S. Furui, "A Search Game for a Mobile Target with the Conditionally Deterministic Motion Defined by Paths," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **39** (1996), 501-511.
- [11] K. Kikuta, "A Search Game with Traveling Cost," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **34** (1991), 365-382.
- [12] 小宮享, 宝崎隆祐, 「強制停船用阻止索の最適投射方法」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2003 年秋季研究発表会アブストラクト集 (2003), 214-215.
- [13] B. Koopman, *Search and Screening*, Pergamon, pp. 221-227, 1980.
- [14] M. Maschler, "A Price Leadership Method for Solving the Inspection's Non-Constant-Sum Game," *Naval Research Logistics Quarterly*, **13** (1966), 11-33.
- [15] T. Nakai, "Search Models with Continuous Effort under Various Criteria," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **31** (1988), 335-351.
- [16] M. Sakaguchi, "A Sequential Game of Multi-Opportunity Infiltration," *Mathematica Japonica*, **39** (1994), 157-166.
- [17] M. Thomas and Y. Nisgav, "An Infiltration Game with Time Dependent Payoff," *Naval Research Logistics Quarterly*, **23** (1976), 297-302.
- [18] A. Washburn, "Search-Evasion Game in a Fixed Region," *Operations Research*, **28** (1980), 1290-1298.
- [19] A. Washburn and R. Hohzaki, "The Diesel Submarine Flaming Datum Problem," *Military Operations Research*, **4** (2001), 19-30.