

# 目的物探知の確率モデル

## Probability Model for Detecting Objects

矢田部 学\*  
Manabu Yatabe

搜索理論は「潜水艦探し」を目的として第二次世界大戦中に基礎が築かれた。その理論は確率モデルをベースとして体系化されている。搜索理論はオペレーションズ・リサーチ(OR)の一分野とみなされる。戦後爆発的に発展した他のOR分野とは異なり、搜索理論は、その目的が特定の分野に限られていたために、少数派により研究されてきた。そのために、一般に知られることはあまりなかった。本レポートでは、搜索理論の基礎概念(探知確率、探知ポテンシャルなど)について概観する。

A foundation of “search theory” was built for the purpose of “submarine hunting” during World War II. The theory is formulated by probability models and is regarded as branch of operations research (OR). In the postwar period, many areas of the OR have been developed explosively. On the contrary, the search theory has been researched by minority expert groups due to the purpose restricted to specific areas. Therefore it has been little known to the general public. We review the fundamental concepts (detection probabilities, potentials, etc.) of the search theory in this report.

### 1. まえがき

長い間、人類は生活の中で「物探し」という行為を繰り返してきた。物探しの基本は「ありそうな所を探せ」である。しかし、これが科学として体系化されたのは最近のことである。物探しの理論、すなわち搜索理論はオペレーションズ・リサーチ(OR)の一分野として、第二次世界大戦中の「潜水艦探し」から生まれ、それは確率モデルに基づいて体系化された<sup>(1)</sup>。米国はこの理論に基づき独海軍のUボート(独語:潜水艦 das U-Boot, Unterseeboot)の搜索に大きな成果をあげた。戦後まもなく、この研究内容は出版され、この分野の古典となっている<sup>(2)</sup>。

その後、搜索理論は、その研究目的が軍事などの特定分野に限定されていたため、少数派により研究されてきた。そのために、搜索理論は他のOR関連分野(数理計画、統計・データ解析、待ち行列、ゲーム理論など)が成し遂げたような爆発的な発展から取り残された。

この事情はわが国においても同様で、孤立した分野という感がある。現時点で、入手可能な書籍は、飯田・宝崎による「改訂搜索理論(2003)」くらいである<sup>(3)</sup>。これは、搜索理論を数理学として体系化し紹介したもので、この分野の内容を「ちょっと知る」のに便利で貴重な本である。

他方、搜索理論の適用範囲は「物探し問題」であり、

日常生活にも応用範囲が広いと考えられる。また、将来的に人類が地球上から宇宙空間などに活動範囲を広げた場合、新たな応用の可能性もある。今後、いろいろな分野に搜索理論が適用され、発展していくことが期待される。

本稿では、筆者が文献(3)に基づいて、搜索センサーの探知確率や区域搜索など搜索理論の基礎概念について整理した私的メモの一部を紹介する。

### 2. 搜索センサーの探知能力モデル

搜索センサーの探知能力を特徴づける概念について述べる。

#### 2.1 瞬間探知確率

搜索センサーの能力は「センサーからどの程度離れた目標を、どの程度の確率で探知できるか」により評価される。センサーから  $r$  の距離にある目標を、微小時間  $\Delta t$  搜索したときの探知確率  $\Delta P$  は搜索時間  $\Delta t$  に比例すると考えて

$$\Delta P = b(r) \cdot \Delta t \quad (1)$$

と記す。この比例定数  $b(r)$  は、単位時間当たりの探知確率を表し、「瞬間探知確率」という。

「単位時間当たり」という表現には注意を要する。 $b(r) \cdot \Delta t \leq 1$  ならば、 $b(r)$  は単位時間当たりの探知確率である。しかし、これが1を超えると探知確率として

の意味を失う。つまり、(1)の表現は微小な時間内で成り立つ。したがって、一般に  $b(r)$  の有限時間長  $[t_0, t_1]$  の積分  $\int_{t_0}^{t_1} b(r(\tau)) d\tau$  は確率の意味を持たない。なぜならば、有限時間で積分すると1を超えてしまうことが起こるからである。後で述べるように、この積分は「探知ポテンシャル」としての意味をもつ(第2.2節を参照)。

瞬間探知確率を「距離-探知確率」で表す。典型的な場合を図1に示す。タイプIは距離  $R$  内では確実に探知(確率1)される。タイプIIはセンサーの近傍では探知しにくく、距離  $R$  で最大となる。そして、タイプIIIはセンサーの距離とともに探知確率が下がる。

瞬間探知確率は、センサーが搜索空間を連続的に搜索する場合のモデルである。センサーが離散的な搜索を行なうときの探知確率を「瞥見(べっけん)探知確率」という。本稿は連続センサーに限定して、その考え方を述べる。したがって、この瞥見確率については、他の文献を参照されたい(例えば、飯田・宝崎、2003)<sup>(3)</sup>。

距離-探知確率の数学的な表現を「発見法則」という。以下に、代表的な発見法則について述べる。

### 2.1.1 完全定距離発見則

目標-観測者間距離が  $R$  以内では必ず探知し、 $R$  より離れると探知しないとした距離-探知確率曲線を「完全定距離発見則」という。これは、図1のタイプIの極端な場合と考えられる。近距離における探知確率が大きなセンサーについてはこのモデルで近似できる。

$$b(r)\Delta t = \begin{cases} 1 & : r \leq R \\ 0 & : r > R \end{cases} \quad (2)$$

$r \leq R$  のとき、 $b(r)\Delta t = 1$  が微小時間  $\Delta t$  について成り立つためには

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} b(r)\Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \Delta t = 1$$

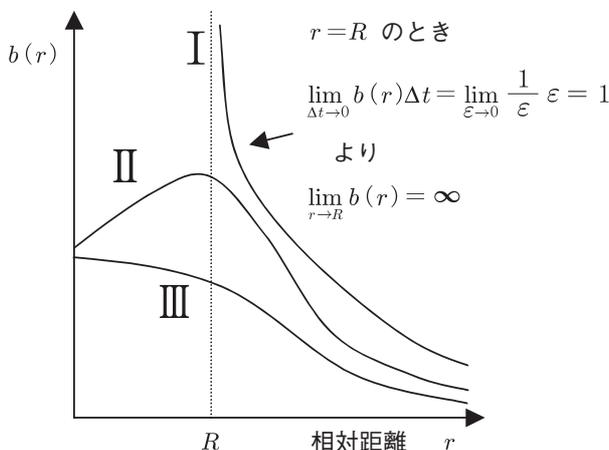


図1 距離-探知確率

である必要があるので

$$b(r) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} = \infty \quad (3)$$

でなければならない。

### 2.1.2 不完全定距離発見則

微小時間  $\Delta t$  の搜索で距離が  $R$  以内では一定確率  $b_0\Delta t$  で探知し、 $R$  より離れると探知しないとしたモデルを「不完全定距離発見則」という。これは図1のタイプIIIの極端な場合である。近距離の探知確率が小さいセンサーはこのモデルで近似できる。

$$b(r)\Delta t = \begin{cases} b_0\Delta t & : r \leq R \\ 0 & : r > R \end{cases} \quad (4)$$

$r \leq R$  の場合、 $b_0 \rightarrow \infty$  とすれば完全定距離発見則となる。(式(3)のように考える。)

### 2.1.3 逆3乗発見則

目視の探知モデルは「逆3乗発見則」で表現可能であると言われている。これは、瞬間探知確率は目標物の大きさ(目標物がセンサーに対して張る立体角)に比例するという考え方である。逆3乗発見則は図1の距離-瞬間探知確率曲線のI型及びIII型を近似する。

図2のように面積  $S$  の目標物を高度  $h$  から見下ろしている場合、面積  $S$  の視線  $\ell$  に垂直な投影面積は

$$A = S \cos \theta = \frac{Sh}{\ell}$$

したがって、目標物がセンサーに対して張る立体角は、 $h \ll r$  として

$$\Omega = \frac{A}{\ell^2} = \frac{Sh}{\ell^3} = \frac{Sh}{(h^2 + r^2)^{3/2}} \approx \frac{Sh}{r^3}$$

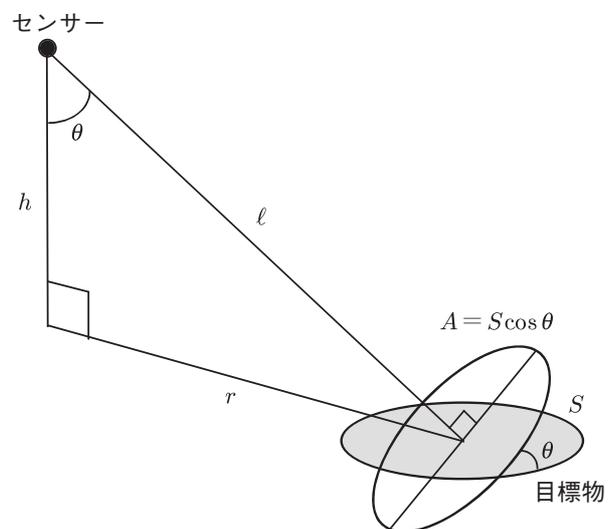


図2 逆3乗発見法則の説明

瞬間探知確率  $b(r)$  は目標物の張る立体角に比例すると仮定すると、比例定数を  $\kappa$  として

$$b(r) = \kappa \frac{Sh}{r^3}$$

$\kappa Sh = k^3$  とおくと

$$b(r) = \left(\frac{k}{r}\right)^3 \quad (5)$$

$k$  は目標物及び環境条件によって定まるパラメータである。

### 2.1.4 逆 $n$ 乗発見則

瞬間探知確率が距離の単調減少関数で、至近距離の探知が確実 ( $\lim_{r \rightarrow 0} b(r)\Delta t = 1$ ) な瞬間探知確率  $b(r)$  は

$$b(r) = \left(\frac{k}{r}\right)^n \quad (6)$$

でモデル化できる。2つのパラメータ ( $k, n$ ) は、センサーの種別、目標物、環境条件などによって決まる。

(6) で  $n = 3$  とおくと、逆3乗発見則になる。また、 $n \rightarrow \infty$  の極限では

$$b(r) = \begin{cases} \infty & : r < k \\ 0 & : r > k \end{cases}$$

これに  $\Delta t$  を乗じると、 $r < k = R$  に対して  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} b(r)\Delta t = 1$  なので、連続センサーの完全定距離発見則(2)になる。したがって、逆  $n$  乗発見則は、特殊なケースとして逆3乗発見則と定距離発見則を含む一般的な法則と考えることができる。

### 2.2 探知確率と探知ポテンシャル

座標原点がセンサーに固定された「センサー座標系」からみた目標物の運動を考える(図3)。相対経路  $C$  上を目標が相対速度  $w$  で運動している。時刻  $t_i$  における目標物の位置ベクトルを  $r(t_i)$  とする。

距離  $r(t)$  にある目標を時間  $[0, t]$  の間スキャンしたとする。時間的に重ならない探知が互いに独立と仮定すると、時刻  $t$  までに目標を探知しない確率  $q(t)$  は以下をみたす。

$$q(t + \Delta t) = q(t)q(\Delta t)$$

ここで、 $q(\Delta t)$  は  $[t, t + \Delta t]$  の搜索で目標を探知しない確率で、瞬間探知確率を  $b(r)$  とすると、 $q(\Delta t) = 1 - b(r)\Delta t$  である。したがって

$$q(t + \Delta t) = q(t)[1 - b(r)\Delta t]$$

$\Delta t \rightarrow \infty$  とすると

$$\frac{dq(t)}{dt} = -b(r)q(t)$$

初期条件  $q(0) = 1$  (最初は目標を0%しか探知できない)のもとに解くと

$$q(t) = \exp\left[-\int_0^t b(r)dt\right]$$

したがって、時刻0から時刻  $t$  までに目標を発見する探知確率  $P(t)$  は

$$P(t) = 1 - q(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t b(r)dt\right] \quad (7)$$

ここで、時刻0から時刻  $t$  に至る経路  $C$  の探知ポテンシャル

$$F(C) = \int_0^t b(r(\tau))d\tau \quad (8)$$

を導入すると、探知確率(7)は

$$P(C) = 1 - \exp[-F(C)] \quad (9)$$

これより、探知ポテンシャル  $F(C)$  が増大すると、探知確率  $P(C)$  は1に近づくことがわかる。また、第2.1節で述べた瞬間探知確率  $b(r(t))$  の有限時間にわたる積分として探知ポテンシャルは定義される。

#### [探知ポテンシャルの加法性]

探知ポテンシャルは「重ね合わせ」が可能である。図4のように、相対経路  $C$  を二つに分解して

$$C = C_1 + C_2$$

とすると、それぞれの経路における探知確率は以下のようにになる。

$$P(C_1) = 1 - \exp[-F(C_1)], P(C_2) = 1 - \exp[-F(C_2)]$$

ここで、経路  $C$  で目標を探知するという事は、 $C_1$ 、 $C_2$  の少なくともいずれかで探知することを意味するから、余事象についての確率を考えて

$$P(C) = 1 - [1 - P(C_1)][1 - P(C_2)] \\ = 1 - \exp\{-[F(C_1) + F(C_2)]\}$$

が成り立つ。これを(9)と比較すれば以下の関係(探知ポテンシャルの加法性)を得る。

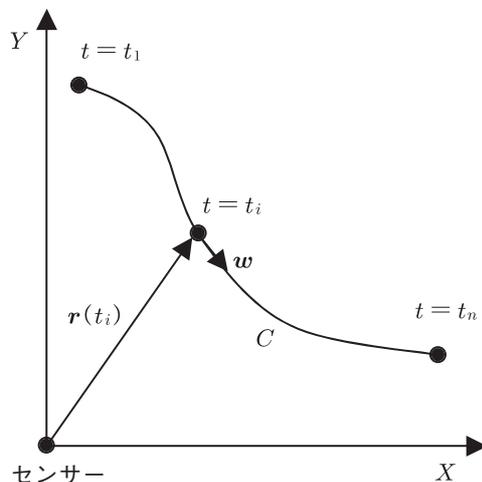


図3 センサー座標系からみた目標の運動

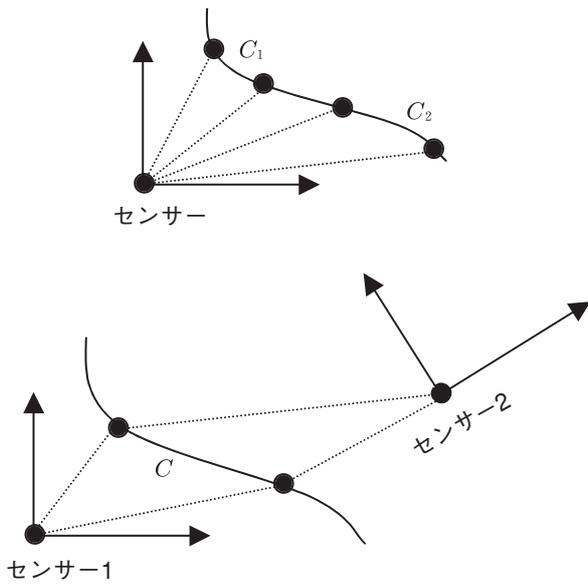


図4 探知ポテンシャルの加法性

$C = C_1 + C_2$  のとき  $F(C) = F(C_1) + F(C_2)$   
 この加法性は、経路  $C$  に沿う探知ポテンシャルが  $F_1(C)$  と  $F_2(C)$  のセンサーの合成についても成り立つ (図4)。

$$F(C) = F_1(C) + F_2(C)$$

### 2.3 横距離探知確率と有効搜索幅

#### 2.3.1 横距離探知確率

探知ポテンシャル(8)は一般的な曲線経路  $C$  について定義されている。現実問題では、センサーから見ると、目標物は長時間、直線運動をする場合が多い。そこで、相対経路を直線経路に限定してモデル化しても差し支えない場合がある。相対経路を直線経路に限定すれば、探知ポテンシャルはセンサーからの最接近距離 (CPA距離, Closest Point of Approach) で表される。このCPA距離を「横距離」という。

ここで、横距離  $x$  を通る直線を考え無限遠から接近し無限遠に去っていく目標を考える (図5を参照)。この目標の探知確率を「横距離探知確率」  $PL(x)$  といい、以下で定義する。

$$PL(x) = 1 - \exp[-F(x)] \quad (10)$$

ただし、(8)より

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} b(r(\tau)) d\tau$$

(10)はセンサーから測って横距離  $x$  の位置に置かれた無限長の直線経路上のどこかで目標を探知する確率を表す。また、(10)の定義では、無限長の直線経路を考えている。有限の大きさの探知可能圏を考える場合は、探知可能圏内の直線経路で積分して探知ポテンシャルを算出すれば

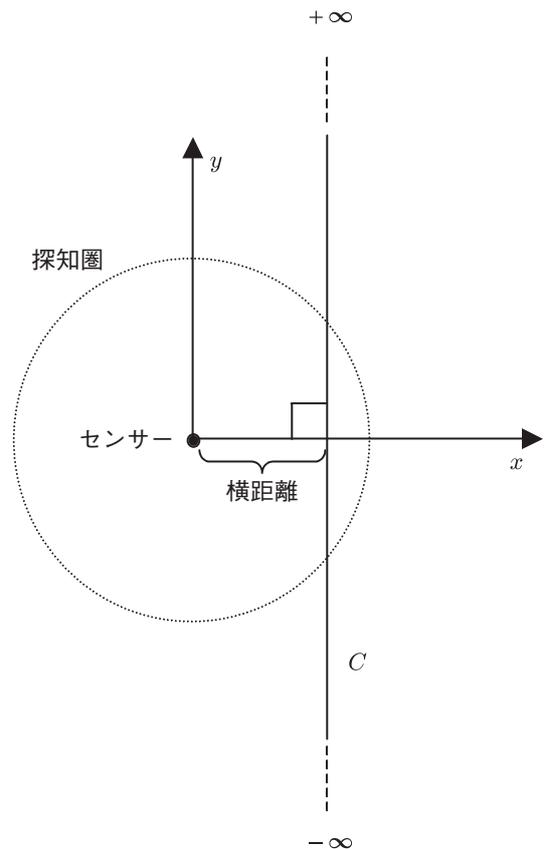


図5 横距離

よい (図7を参照)。

#### 2.3.2 有効搜索幅

横距離  $x$  の分布は目標物の分布を意味し、これは確率変数と考えることができる。この  $x$  の分布が一様、すなわち目標が一様分布しているとき、横距離探知確率曲線の下面積は

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} PL(x) dx \quad (11)$$

である (図6)。ここで、これと等価な面積を持つ高さ1、幅  $2R$  の長方形を考えると、これは探知レンジ  $R$  の完全定距離発見則に従うセンサーの横距離探知確率を表している (式(2)より、探知レンジ  $R$  内にある経路上で横距離探知確率は1、それ以外では0)。したがって、面積  $W$  は完全定距離センサーの探知レンジ幅  $2R$  を表す。すなわち、

$$W = 2R$$

である。この意味で  $W$  を「有効搜索幅」という。

いま、静止目標が単位面積あたり密度  $\rho$  で一様に分布しているとする。この空間を横距離探知確率  $PL(x)$  のセンサーを用いて搜索速度  $v$  で目標を搜索するものとする。十分長い時間  $T$  の間に、横距離  $[x, x + dx]$  の区間

を通過する目標数は  $\rho v T dx$  である。このうち  $PL(x)$  が探知されるから、 $x$  の全域で探知される目標数の期待値  $E[N]$  は以下のように表せる。

$$E[N] = \int_{-\infty}^{\infty} (\rho v T) \cdot PL(x) dx = \rho v TW$$

つまり、一定の搜索速力で目標空間を1回搜索するとき、探知される目標数の期待値は、横距離探知確率曲線  $PL(x)$  の形状に関係なく、有効搜索幅  $W$  に比例する。すなわち、上述のような「区域搜索」では、センサーの探知能力を表す特徴量として、横距離探知確率の代わりに有効搜索幅  $W$  を用いることができる。

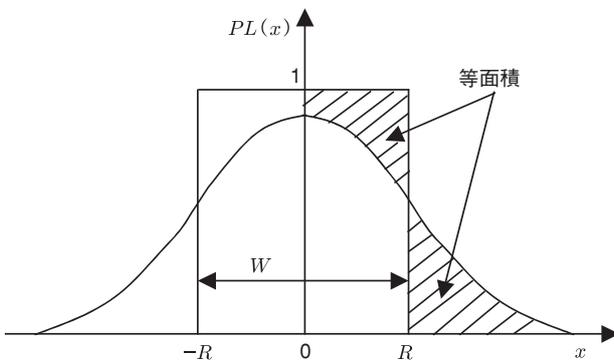


図6 有効搜索幅と横距離探知率曲線の関係

**[計算例]**

探知ポテンシャルを具体的に評価して、探知確率を算出した例を示す。図7に示すような長方形(大きさ  $a \times b$ ) の領域を考える。この領域に外部から進入する物体があるとする。このとき、この進入物体が探知される確率について考える。

以下の条件で、センサーからのCPA距離  $x$  の位置を通過する物体の横距離探知確率をモデル化する。

- センサーの探知法則は逆3乗則に従う。
- センサーは領域内の位置  $(x_s, Y_s)$  に設置されている。
- センサーの探知レンジは  $R$  である。
- 進入物体が  $Y$  に平行に速力  $u$  で進入し、進路は変更しない。
- 進入物体の監視は、センサーに初探知されてから領域を離脱するまで(図7(a)参照)、または探知レンジを離脱するまで(図7(b)参照)行なう。
- この監視時間に基づいて横距離探知確率を評価する。まず、センサーの探知法則は、(5)より以下のように表される。

$$b(r(t)) = \frac{k^3}{\{(x - x_s)^2 + [(R' + Y_s - u \cdot t) - Y_s]^2\}^{3/2}} \tag{12}$$

$$= \frac{u \cdot R^2}{2[(x - x_s)^2 + (R' - u \cdot t)^2]^{3/2}}$$

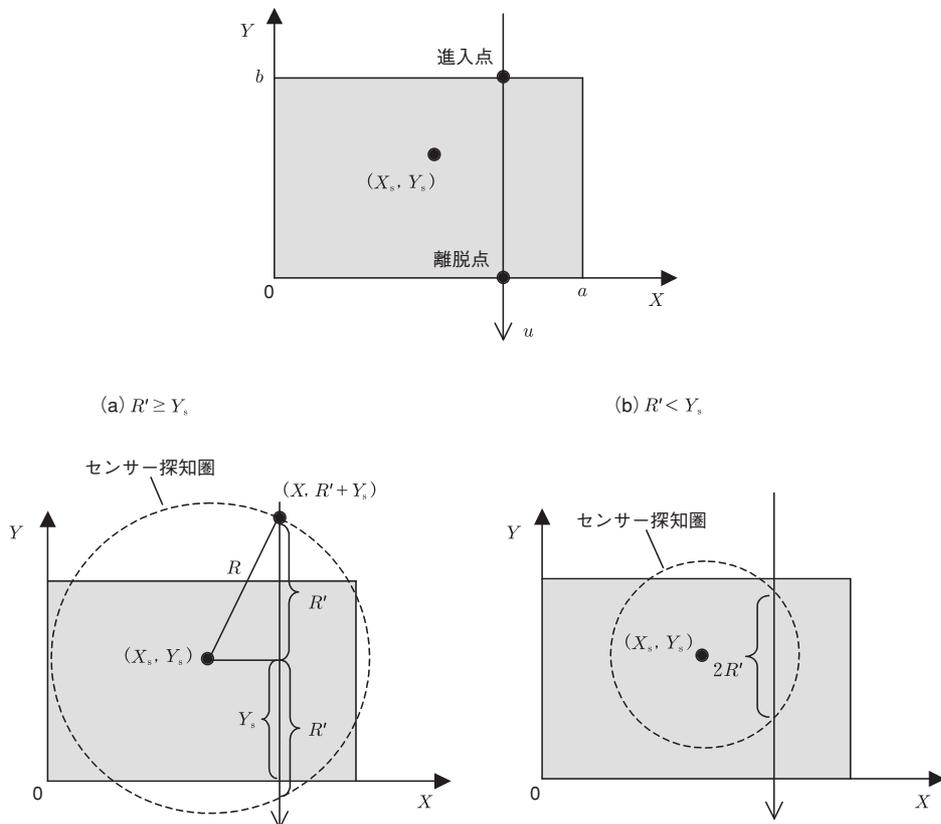


図7 センサー位置と搜索領域

ここで、 $R' = \sqrt{R^2 - (x - x_s)^2}$ である。また、逆3乗発見則の係数は $k^3 = u \cdot R^2/2$ で表されることを用いた<sup>(3)</sup>。

次に、(12)を積分して探知ポテンシャルを求める。

(a)  $R' \geq Y_s$ のとき

このケースはセンサーの探知範囲が離脱点を越えて下方まで広がっている場合である(図7(a)を参照)。

$$F(x) = \frac{u \cdot R^2}{2} \int_0^{(R'+Y_s)/u} \frac{dt}{[(x-x_s)^2 + (R'-u \cdot t)^2]^{3/2}}$$

これは以下のように評価される。

(i)  $x \neq x_s$ のとき

$$R' - u \cdot t = |x - x_s| \cdot \tan \lambda \text{ とおくと}$$

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{R^2}{2(x-x_s)^2} \int_{\tan^{-1}(-Y_s/|x-x_s|)}^{\tan^{-1}R'/|x-x_s|} \cos \lambda d\lambda \\ &= \frac{R^2}{2(x-x_s)^2} \left\{ \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{R'}{|x-x_s|} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-Y_s}{|x-x_s|} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $x \rightarrow x_s$ のとき、 $F(x) \rightarrow \infty$ となる。

(ii)  $x = x_s$ のとき

$R' = R$ なので

$$F(x) = \frac{u \cdot R^2}{2} \int_0^{R/u} \frac{dt}{(R - u \cdot t)^3}$$

ただし、 $t = R/u$ で進入物体はセンサーの位置に到達することを考慮して、積分区間は $0 \leq t \leq R/u$ としている。 $R - u \cdot t = w$ とおくと

$$F(x) = \frac{R^2}{2} \int_0^R \frac{dw}{w^3} = \frac{R^2}{4} \left[ -\frac{1}{R^2} + \frac{1}{0} \right] \rightarrow \infty \quad (14)$$

これは、(i)の結果において、 $x = x_s$ としたものに一致する。

(b)  $R' < Y_s$ のとき

このケースはセンサーの探知範囲が離脱点を越えない場合である(図7(b)を参照)。

積分範囲は $0 \leq t \leq 2R'$ となるので

$$F(x) = \frac{u \cdot R^2}{2} \int_0^{2R'/u} \frac{dt}{[(x-x_s)^2 + (R'-u \cdot t)^2]^{3/2}}$$

(a)の評価と同様にして

(i)  $x \neq x_s$ のとき

$$F(x) = \frac{R^2}{(x-x_s)^2} \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{R'}{|x-x_s|} \right) \right] \quad (15)$$

(ii)  $x = x_s$ のとき

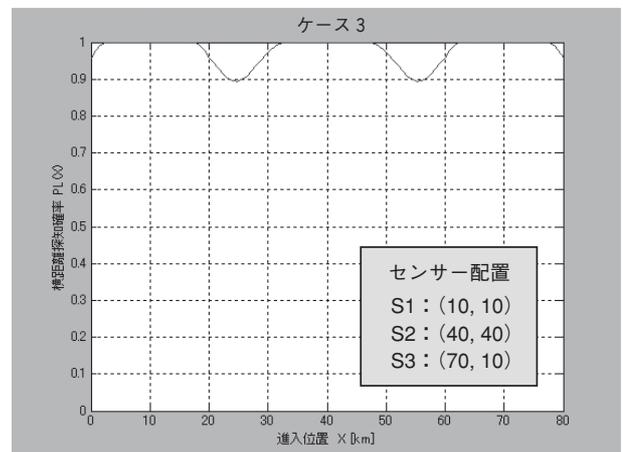
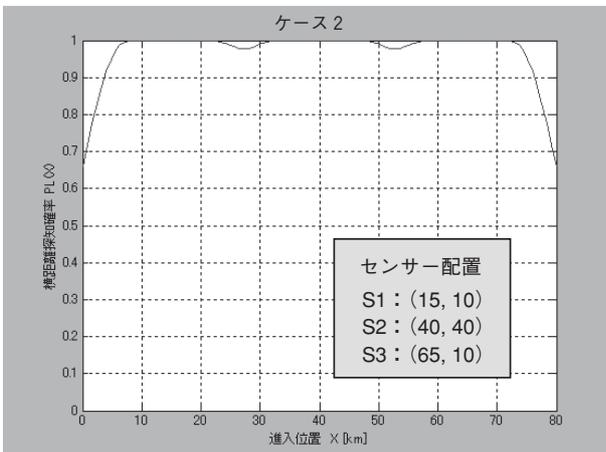
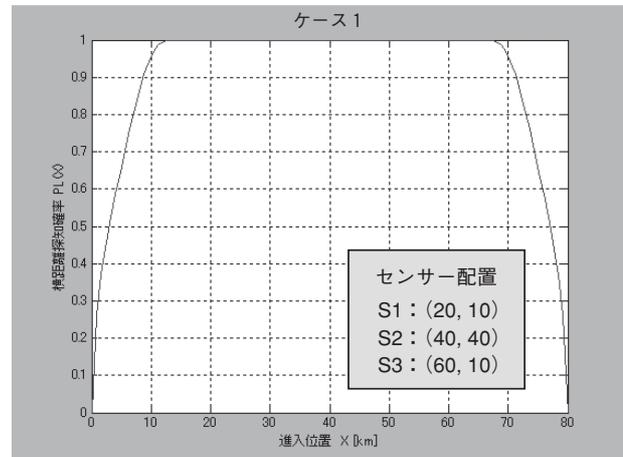
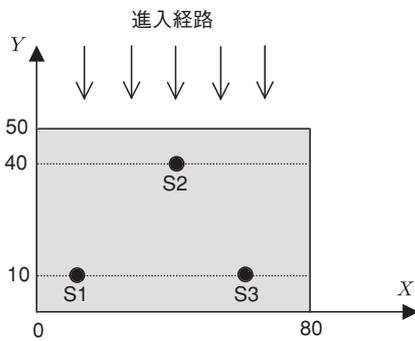


図8 数値計算例

$$F(x) \rightarrow \infty \quad (16)$$

探知ポテンシャル(13)、(14)、(15)、及び(16)を用いると横距離探知確率は

$$PL(x) = 1 - \exp[-F(x)] \quad (17)$$

で算出できる。

進入物体が探知される確率を(17)に基づいて調べてみる。領域の大きさを  $a=80\text{km}$ 、 $b=50\text{km}$  とする。探知レンジ  $R=20\text{km}$  のセンサー 3 個 (S1, S2, S3) を以下のように領域に設置する (図 8 参照)。

ケース 1 S1 : (20, 10) S2 : (40, 40) S3 : (60, 10)

ケース 2 S1 : (15, 10) S2 : (40, 40) S3 : (65, 10)

ケース 3 S1 : (10, 10) S2 : (40, 40) S3 : (70, 10)

ケース 1 と 3 は、センサーの探知範囲が離脱点を越えている場合で、探知ポテンシャルは(13)と(14)で算出される。他方、ケース 2 は、センサーの探知範囲が離脱点を越えない場合で、探知ポテンシャルは(15)と(16)による。このときの探知確率(17)を示したものが、図 8 のケース 1 から 3 である。

ケース 1 の横方向のセンサー配置では  $10 < x < 70$  では高い確率で探知されるが、その外側では探知確率は急激に下がる。したがって、物体が領域の両端付近から進入すれば、センサーに探知されずに通過できる可能性が高くなる。

ケース 2 と 3 は、センサー S1 と S3 を領域の外側にずらした場合である。ケース 2 では、どのような位置  $x$  で物体が進入しても、およそ 70% 以上の確率で探知される。ケース 3 では、どのような位置  $x$  でも 90% 以上の確率となる。ただし、ケース 2 と比較して  $x=25\text{km}$  及び  $55\text{km}$  付近の確率が少し下がる。

### 3. 探索システムとしての探知能力

これまではセンサーの探知能力について述べてきた。しかし、通常の探索は、航空機で海域を探索する場合のように、センサーを搭載したビークル(航空機や船舶のような移動可能物体)を用いて行なわれることが多い。ここでは、センサーとビークルより成る探索システムの能力について述べる。

#### 3.1 有効探索率

センサーを搭載したビークルが、単位時間に掃引する探索面積の期待値を「有効探索率」と定義する。この定義より明らかなように、有効探索率は、「確率」ではなく、「時間率(rate)」の意味であり、「面積/時間」の次元をもつ量である。有効探索幅  $W$  のセンサーを用いて探索速度  $v$  で探索したときの有効探索率は

$$Q = v \cdot W$$

で与えられる (図 9 参照)。

#### 3.2 カバレッジファクター

有効探索率は、探索ビークルの単位時間当たりの探索能力を表す特性値であるが、有効探索率  $Q$  のビークルが  $T$  時間探索した場合、探索領域をどの程度探索したか (探索の割合) を表す量として、「カバレッジ・ファクター (coverage factor)」  $CF$  がある。

有効探索率  $Q = v \cdot W$  のビークルが、面積  $A$  の領域を、 $T$  時間探索したときのカバレッジファクターは

$$CF = \frac{Q \cdot T}{A} = \frac{v \cdot W \cdot T}{A} \quad (18)$$

である (図 9 参照)。

#### 3.3 区域探索の探知確率モデル

有効探索幅、有効探索率、及びカバレッジファクターを用いる具体例として、区域をランダム探索するモデルについて考える。

静止目標が領域 (面積  $A$ ) に存在する確率は一様分布に従うものとする。探索者は有効探索幅  $W$ 、探索速度  $v$  でランダム探索を  $T$  時間実施する (図 10)。このとき、(9) の導出と同様にして、時刻  $t$  までの目標の未発見確率を  $q(t)$  とすれば

$$q(t + \Delta t) = q(t) \left( 1 - \frac{v \cdot W}{A} \Delta t \right)$$

が成り立つ。これより

$$\frac{dq(t)}{dt} = - \frac{v \cdot W}{A} q(t)$$

を得る。初期条件  $q(0) = 1$  のもとに解けば、探索時間  $T$  の目標探知確率  $P(T)$  は

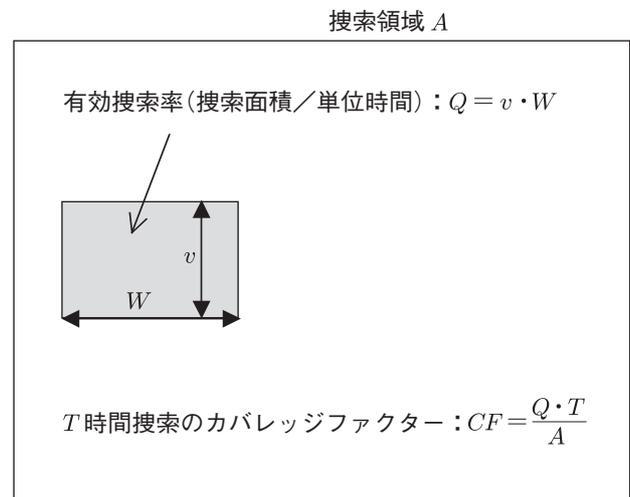


図 9 有効探索幅とカバレッジファクター

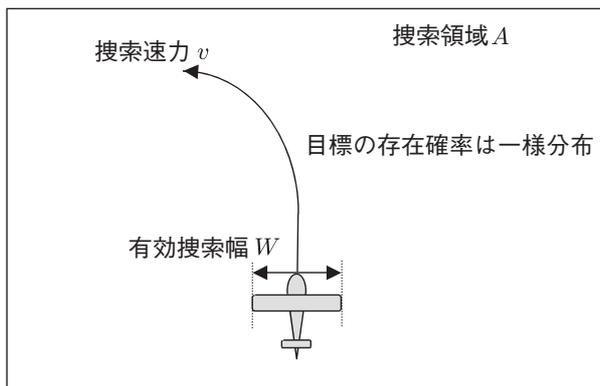


図10 ランダム搜索

$$\begin{aligned}
 P(T) &= 1 - q(T) \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{v \cdot W \cdot T}{A}\right) \\
 &= 1 - \exp(-CF)
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

となる。ただし、(18)の関係を用いた。(19)より、センサーの有効搜索幅  $W$  が大きくなるほど、また搜索時間  $T$  が長くなるほど、カバレッジ・ファクター  $CF$  が大きくなり、目標が探知される確率は1に近づくことが分かる。

#### 4. むすび

目標物を探す場合の搜索理論の基礎概念について概観した。本稿では、探知確率の考え方(瞬間探知確率、探知ポテンシャル、探知確率)と搜索システムの能力(有効搜索率、カバレッジファクター)を中心として述べてき

た。また、内容を連続センサーについて限定し、離散センサーについては言及しなかった。探知確率に関する事項の詳細については、飯田・宝崎の教科書<sup>(3)</sup>を参考にされたい。

物探しは日常生活で頻繁に遭遇する。その場合、搜索理論を適用すれば効率的な物探しができる可能性がある。今後、搜索理論が一般の分野に広まり応用されることが期待される。

#### 参考文献

- (1) 飯田耕司：情報化時代の戦闘の科学—軍事OR入門，三恵社，190 pp.，2004.
- (2) Koopman, B.O.: Search and Screening, OEG Rep. No.56, 172 pp., 1946. (2nd Ed., Pergamon Press, NY, 1980.)
- (3) 飯田耕司、宝崎隆祐：改訂搜索理論—搜索オペレーションの数理，三恵社，450 pp.，2003.