

環境汚染のモニタリング。一汚染源、観測者かとも移動する場合一

京都大学工学部 ○青山 勲
井上 頼 輝

〔I〕はじめに

モニタリングは、環境に放出された汚染物質の挙動を把握し、環境の管理・制御システムの全体にとって重要な作業である。モニタリングプログラムは環境の管理・制御を行うためのフィードバックループを有していることが不可欠の要素であるが、そこで問題になるのは、(1)モニターの時空間的配置方法、(2)サンプルの数、(3)データの解釈である。これらはモニタリングプログラムを有効に実施し、環境の不確定な現象を正確に把握する上に、重要な課題である。本研究は、上述の(1)の問題について、汚染発生源が移動し、汚染物の放出について何等の情報も与えられていない場合に、任意に動き得る観測者の探索行動のあり方について、定量的な評価を与える試みを行ったものである。事例として、原子力船から放出された放射能(目標物)をモニタリングボートで検出(探索)する場合を取りあげる。この時、原子力船からの放射能放出時点に関する情報は一切与えられていないとする。

〔II〕探索モデルの設定

観測者が目標物を探索する方法についてのモデルを考える場合、Fig.1に示すように、観測者および目標物の特性によって、幾通りものモデルが考えられる。ここでは、それぞれの特性を次のように考える。

(i) 目標物の特性

(i) 平面2次元の連続的空間(海洋)において、目標物は非停留的である。

(ii) 目標物の存在は時間の経過とともに変化する確率分布則に従う。

(iii) ある点における目標物は、上記の

確率分布則に従って、消滅状態→出現状態→消滅状態へと、その存在状態を変える。

(2) 観測者の特性

(i) ここでは観測者は一隻のモニタリングボートであり、これが海上を航行して目標物を探索する。(ii) 目標物探索のための投入努力は任意に可分できる。(iii) 探知状態の信憑性については、放射のバックグラウンド、検出器の特性などの雑音を考慮しない。(iv) 探索過程は連続、多段的に行う。以上の目標物および観測者の特性のもとに、次に述べる発見確率を定義して、これを最大にすることを探索行動の最適基準とする。

〔III〕探索モデルの定式化

(i) 発見確率：上に述べたモデルを前提として、探索開始後、時刻 t までの目標物の発見確率を次の様に定義する。①時刻 t までに目標物が発見されない確率を $Q(t)$ 、②時刻 t における目標物の瞬間探知確率密度を $r(t)$ と表わす。但し、2次元平面において、 $r(t)$ は $\iint r(t) dx dy = 1 \dots (1)$ を満たしていなければならない。

この時、時刻 $(t+\Delta t)$ において、目標物が発見されない確率は、 $Q(t+\Delta t) = Q(t) \{1 - r(t)\Delta t\} \dots (2)$

(2)式を変形し、 $\Delta t \rightarrow 0$ なる極限において、 $d \log Q(t) / dt = -r(t) \dots (3)$

したがって、 $Q(t)$ は(4)式で表わされる。 $Q(t) = Q_0 \exp \left\{ - \int_0^t r(t) dt \right\} \dots (4)$

定義から明らかに、 $Q(0) = Q_0 = 1$ であるから、結局、時刻 t における目標物の発見確率 $P(t)$ は次式となる。

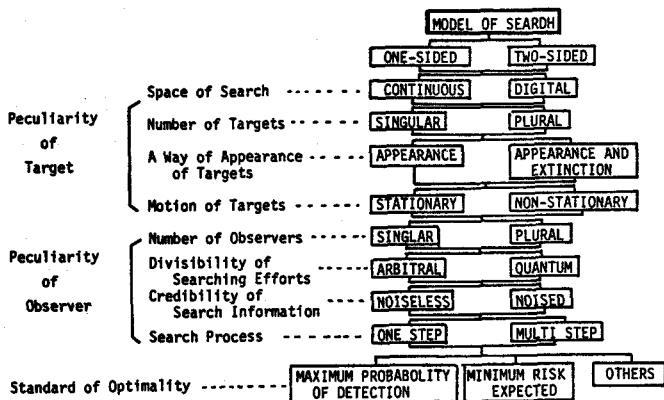


Fig. 1 Classification of Search Model

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t r(t) dt\right\} \quad \dots (5)$$

(iii) 発見ポテンシャル

$$F(C) = \int_C r(t) dt = \int_0^t r(t) dt \quad \dots (6)$$

探索行動が、経路Cにそって、時刻 $t=0$ から t までの間で行なわれる時、(6)式とおくと、(5)式は(7)式と書くことができる。ここで、

$$P(C) = 1 - \exp\{-F(C)\} \quad \dots (7)$$

$F(C)$ は発見ポテンシャルと呼ばれ、(7)式から明らかなように、この発見ポテンシャルが大きい程、目標物の発見確率は大きくなる。即ち、発見ポテンシャルの大小は、発見確率の大小と同値なものとして良い。

今、探索過程の経路Cが、 n 個の部分経路 $C_1, C_2, \dots, C_n$ の合成から成り立つ時、この事を表わすのに、 $C = \sum_{i=1}^n (C_i)$ と表わすと定義しておく。この時、経路Cを辿った時の発見確率は、(8)式で表わされ、各経路 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 上での発見確率は、それぞれ独立であると思わせるから、

$$P(C_i) = 1 - \exp\{-F(C_i)\} \quad \dots (8)$$

全経路C上での発見確率(9)式が得られ、一方、定義

$$P(C) = P\left(\sum_{i=1}^n C_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P(C_i)\} \\ = 1 - \exp\left\{-\sum_{i=1}^n F(C_i)\right\} \quad \dots (9)$$

より、(10)式が成立し、(9)、(10)式より、(11)式が得られる。

$$P(C) = 1 - \exp\{-F(C)\} = 1 - \exp\left\{-F\left(\sum_{i=1}^n C_i\right)\right\} \quad \dots (10)$$

(11)式に見られるように、探索経路が、いくつかの部分経路より合成される場合には、それぞれの部分経路上での発見ポテンシャルの総和が、全経路上での発見ポテンシャルになる。即ち、発見ポテンシャル $F(C)$ は

$$F\left(\sum_{i=1}^n C_i\right) = \sum_{i=1}^n F(C_i) \quad \dots (11)$$

加法性を有していることがわかる。

さて、ここで、2次元平面上の点 $O(x, y)$ の時刻 t における瞬間探知確率密度 $r(x, y, t)$ を、(1)式の条件を満たすように、点 (x, y) 上における目標物(放射能)の存在確率(濃度)の期待値に比例するものと仮定する。実際には、点 O で、汚染物質が探知されるかどうかは、その点における汚染物質濃度が、測定器の検出感度以上であるかどうかによって依存するのであるが、汚染度を安全側で評価するという点で、なるべく濃度の高い地点で観測を行った方が効率的であるとの判断から、上の仮定をおき、各地点に、評価上の重みを付した。したがって、(5)式の発見確率は、時刻 t までの探索行動によって、汚染物質が検出される確率という意味ではなく、経路上の探索行動による相対的な発見能とも言うべき、一つの概念的な測度として定義されたものと解釈すべきであり、発見確率は、言葉の持つ物理的な概念を有していない。既に述べた様に、発見確率は発見ポテンシャルに依存するので、以下の議論では、主として、発見ポテンシャルについて考察をすすめる。

原子力船からの放射能の放出に対するモニタリングの具体例は、

Fig. 2に示された横須賀港におけるモニタリング体制がある。

ここでは、モニタリングの対象となる湾をFig. 3のように、簡略化して考え、原子力船の出発点を O 点、航行コースを X 軸にとる。

今、無限平面上の一点に単位量の汚染物質が放出された時の濃度分布は次式で与えられる。

$$C_1(x, y, t) = \frac{1}{4\pi t D_x D_y} e^{-\left\{\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} + \frac{(y-u_y t)^2}{4D_y t} + \lambda t\right\}} \quad \dots (12)$$

ここに、 D_x, D_y ; x, y 方向の過動拡散係数 $[m^2/min]$ 、 D_m ; 混合深さ (m) 、 u_x, u_y ; 潮流 U の x, y 成分 $[m/min]$ 、 λ ; 放射性核種の物理学的崩壊定数 $[1/min]$ 、である。

原子力船が X 軸正方向に、 V の一定速度で航行し、出発後、時刻 t において、放射能を一時的に放出した時、

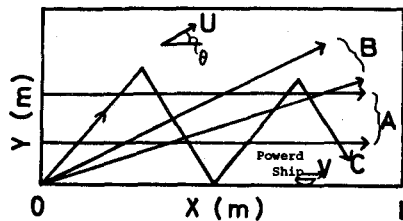


Fig. 3 Search Course of a Observer in a Model Bay

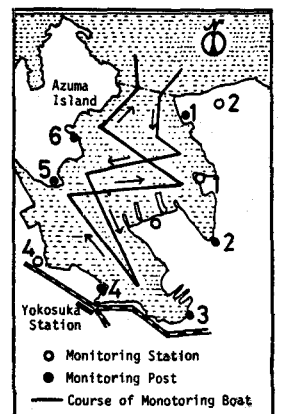


Fig. 2 Monitoring System in Yokosuka Port

時刻Tにおける濃度分布は、

(13)式となる。モニタリングの

$$C(x, y; T) = \frac{1}{4\pi(T-t)D_M\sqrt{D_x D_y}} e^{-\left\{\frac{(x-vt-u_x(T-t))^2}{4D_x(T-t)} + \frac{(y-u_y(T-t))^2}{4D_y(T-t)} + \lambda(T-t)\right\}} \quad \dots(13)$$

範囲を 内に限るとして、原子力船は停泊地から湾口までの距離L上を航行中に放射性物質を放出する可能性があるとし、放出に関する情報が与えられない時、この航路上、微小区画dx上における放射能の放出確率密度g(x)は、どの地点においても、等確率であると考えるのが合理的である。

原子力船の航速はvであり、出発後、湾口に達するまでに要する時間 $\int_0^L g(x)dx = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ dx/L & 0 \leq x \leq L \\ 0 & L < x \end{cases} \dots(14)$

をT_Bとすると、 $dx = vdt$, $L = vT_B$ $\dots(15)$ となる。

放出確率g(x)/dxを、時間の関数で表わすと、 $P(t)dt = dx/T_B$, $0 \leq t \leq T_B$, $\dots(16)$ となる。

したがって、時刻Tにおける放射能濃度分布の期待値E[C(x, y; T)]は、 $E[C(x, y; T)] = \int_0^T C(x, y; t) P(t) dt \dots(17)$

となる。
$$Y(T) \propto E[C(x, y; T)] = \int_0^T \frac{1}{4\pi D_M(T-t)\sqrt{D_x D_y}} e^{-\left\{\frac{(x-vt-u_x(T-t))^2}{4D_x(T-t)} + \frac{(y-u_y(T-t))^2}{4D_y(T-t)}\right\}} \frac{dt}{T_B} \dots(18)$$

瞬間探知確率密度Y(T)

は、期待濃度分布に比例すると仮定しているの、Y(T)は(18)式のように表わせる。但し、以下の議論では、問題となる長半減期核種の入の値は小さいので、(18)式では、入は無視されている。

次に、モニタリングボートの時刻Tにおける位置をO(x, y)とし、その速度ベクトルをW(w_x, w_y)と表わす。

O(w_x, w_y, T)の時間的変化はモニ $O(x, y) = O(w_x T, w_y T) \dots(19)$

タリングボートの探索経路Cを表

$$F(C) = \int_0^{T_B} \frac{1}{4\pi D_M(T-t)\sqrt{D_x D_y}} e^{-\left\{\frac{(w_x T - vt - u_x(T-t))^2}{4D_x(T-t)} + \frac{(w_y T - u_y(T-t))^2}{4D_y(T-t)}\right\}} dt \quad \dots(20)$$

時刻T_Bまでの、経路C上での発見ポテンシャルは(20)式で求めることができる。W(w_x, w_y)を適当に

選ぶことによって、任意の探索経路を辿った時の発見ポテンシャルを計算することができる。

(iii) 探索の時間遅れの影響

上述の議論では、観測者(モニタリングボート)は、原子力船と同時に出発すると仮定しているが、一般には、一定の時間遅れをもって出発するのが普通であると思われる。

$$O(x, y) = O(w_x(T-t_d), w_y(T-t_d)), \quad T_2 + t_d \dots(21)$$

この遅れ時間をt_dで表わすと、モニタリングボートの位置O(x, y)

$$F(C) = \int_{t_d}^{T_B+t_d} Y(T) dT \quad \dots(22)$$

は(21)式で表わされる。この時、探索時間を(20)式と同様に、

T_Bに等しくするために、探索時間の積分範囲をt_d→T_B+t_dとおくと、発見ポテンシャルは(22)式で与えられる。

(IV) 計算結果および考察

(i) 瞬間探知確率密度Y(x, y; T)

計算に用いたパラメータの値をTable 1

に、計算結果をFig. 4~8に示す。

上に述べたように、瞬間探知確率密度

期待濃度に比例すると考えているので、

図の数値は、原子力船から、単位量(

1G)の放射能が放出された場合の海水中

の放射能の等濃度線を[PG/l]の単位で与

えられている。これらの数値も[cm³]の

単位に換算すれば、Y(T)は(1)式の条件を

満たす確率で表示できる。

Table 1 Value of Parameters Used for Calculation

Parameter		Value
Depth of the Mixed Layer	; D _M	10 m
Diffusion Coefficient	; D _x , D _y	1000 cm ² /sec
Time when the Ship Reached the Mouth of a Bay after Departure	; T _B	60 min.
Speed of a Powered Ship	; V	50 m/min.
Flow Velocity of Tide	; U	0, 5, 10, 15 m/min.
Angle between the Direction of a Powered Ship and that of Tide	; θ	0, π/6, π/3, π/2, 2π/3, 5π/6.
X-axis Component of a Speed of a Monitoring Boat	; W _x	50 m/min.
for Parallel Course		
Distance between the X-axis and the Course of a Monitoring Boat	; Y	0, 20, 40, 60 m
for Linear Course		
Y-axis Component of a Speed of a Monitoring Boat	; W _y	10, 6, 2, -2, -6 m/min.

Fig. 4は、湾内に海流がない場合(U=0)に、原子力船が湾口(3kmの地点)に達した時、すなわち60分後の期待等濃度(瞬間探知確率密度)の曲線を表わしている。Fig. 5は、海流が原子力船の進行方向と同方向で、流速が10m/min.の場合、Fig. 6と7は、流向が、図に示すように、π/3の角をなす場合で、20分、40分、60分後の等濃度曲

線である。原子力船の速度を50m/min.と仮定している。1km, 2km, 3kmの地点は、それぞれ、20分, 40分, 60分後の原子力船の航行地点を表わしている。

発見ポテンシャルを求める基礎的概念は、瞬間探知確率密度 $\gamma(x, y, t)$ である。

既に述べたように、瞬間探知確率密度は、汚染物質の期待濃度に比例

すると仮定して、簡単化する

ために、(18)式によって計算

したが、言う迄もなく、この

式は固定的なものではなく、

環境条件に応じて、適切な式

を採用すれば良い。瞬間探

知確率の等高線の時間的変化

が求まれば、観測者の最適経

路はおよそ推測し得るものである。

(iii) 発見ポテンシャル

発見ポテンシャル $F(C)$ は、(20)式に示したように、モニタリングボートの軌路上の瞬間探知確率の積分によって求められる。現状のモニタリング体制は、Fig. 2に示されているように、汚染源(原子力船)の進行方向、海流の状況にかかわらず、所定のコースを航行し、観測を行っているだけである。ここでは、Fig. 3に示したように、 X 軸上を進行する原子力船に対し、観測者(モニタリングボート)の経路を単純化し、仮に、Aのような経路を平行探索(Parallel Search), Bの経路を直線探索(Linear Search), Cの経路をジグザグ探索(Zigzag Search)とあづけ、それぞれの経路は、(23)~(25)

式で表わされる。この時の各経路における発見ポテンシャルの相異について論じる。

モニタリングボートの速度の X 成分(W_x)は、どの場合にも、原子力船と同じ速度 $V=50\text{m/min.}$ で計算した。計算に用いたパラメータの値をTable 1に、また、計算結果をTable 2~4に示す。

表の数値は、期待濃度分布の場合と同様に、原子力船から1Ciの放射能が、航路上、等確率で放出された場合の発見ポテンシャルに 10^{30} を割ったもので、例えば、 $(.62\text{E}38)$ と記されているのは実際に

は、 0.62×10^8 を意味し、また、 $(.26\text{E}-3)$ は 0.26×10^{-33} のことである。

平行探索の計算結果(Table 2)を見ると、海流の状況にかかわらず、ボートの航路と X 軸との距離(Y)によって、発見ポテンシャルは著しく異なる。原子力船の方向と海流との間の角度(θ)が $0 \sim \pi/2$ の間では、海流速 U

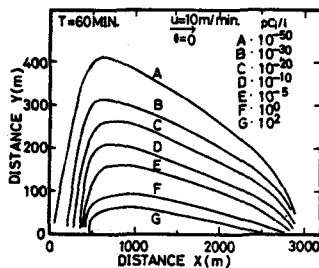


Fig. 5 Contour Line of Activity Concentration

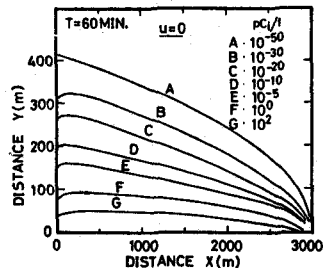


Fig. 4 Contour Line of Activity Concentration

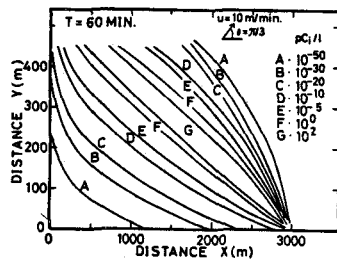


Fig. 7 Contour Line of Activity Concentration

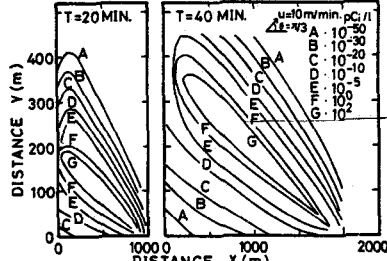


Fig. 6 Contour Line of Activity Concentration

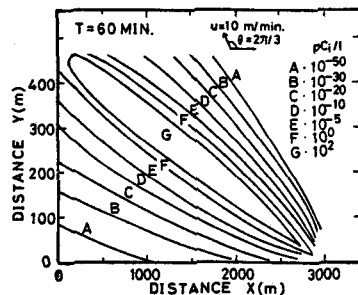


Fig. 8 Contour Line of Activity Concentration

$$\text{平行探索} \quad ; \quad X = W_x T, \quad Y = Y(\text{const}) \quad \dots (23)$$

$$\text{直線探索} \quad ; \quad X = W_x T, \quad Y = W_y T \quad \dots (24)$$

$$\text{ジグザグ探索} \quad ; \quad X = W_x T, \quad \dots (25)$$

$$Y = \begin{cases} W_y T & (0 \leq T \leq 10 \text{ min}) \\ 10 W_y T - W_y (T - 10) & (10 < T \leq 20) \\ W_y (T - 20) & (20 < T \leq 30) \\ 10 W_y - W_y (T - 30) & (30 < T \leq 40) \\ W_y (T - 40) & (40 < T \leq 50) \\ 10 W_y - W_y (T - 50) & (50 < T \leq 60) \end{cases}$$

か速い程、ポテンシャルは高くなって
いる。これは、期待濃度曲線から
予想されるように、
海流の方向に、汚
染物質が圧縮され
、モニタリングボ
ートが同方向に航
行するためである。
海流の成分が、
ボートの進行方向
と反対の場合には
、海流度の増加に
つれて、ポテンシ
アルは減少する。

それ故、この場合
には、むしろボートの速
度を遅くした方がポテン
シャルは高くなると予想
される。平行探索の最大
ポテンシャルは、 $\theta = 0$ 、
 $U = 15 \text{ m/min}$ 、でX軸上を
ボートが航行した場合で、
 0.91×10^4 であった。

直線探索の場合(Table 3)
は、ボートのY軸成分速
度($W_y = 10 \sim 6 \text{ m/min}$)によ
るポテンシャルの相対は、
平行探索程に着しくなか
った。 θ が0または π の
場合には、期待濃度分布
は、X軸について対象と
なるから、ボートが正

負どちらの方向に進んでも、ポテンシャルの値も対 になっている。ボートのY軸成分速度(W_y)が大きい程、
ポテンシャルは小さい。 θ と流速Uのポテンシャルに及ぼす影響は平行探索の場合と同様な関係にあるが、 θ が
 $0 \sim \pi/3$ ではUの大きい程、ポテンシャルは高く、 θ が $\pi/6$ をこえると、逆の関係になっている。しかし、この
場合も、 W_y が負の場合には、 θ が $\pi/2$ 以上になると、Uの増加とともに、ポテンシャルは減少する。直線探索の場
合の、最大ポテンシャルは、 $\theta = \pi/6$ 、 $U = 15 \text{ m/min}$ 、で、 0.8×10^4 であった。

ジグザグ探索の場合は、海流の条件にかかわらず、ポテンシャルはほぼ同じであった。表には示されてい

Table 2 Detection Potential for the Search of Parallel Course ($\times 10^{-30}$)

θ	U	Y	Potential	θ	U	Y	Potential	θ	U	Y	Potential	θ	U	Y	Potential
m/min.	m			mm/min.	m			mm/min.	m			m/min.	m		
0	0	0	.62E 38												
	20		.71E 1												
	40		.33E-35												
	60		.33E-78												
	5	0	.71E 38	270/6	5	0	.66E 38	470/6	5	0	.58E 38	π	5	0	.54E 38
	20	.31E 5			20	.45E 6			20	.11E 3			20	.18E- 2	
	40	.55E-26			40	.13E-25			40	.78E-33			40	.18E-42	
	60	.96E-64			60	.28E-48			60	.52E-66			60	0	
	10	0	.81E 38	10	0	.69E 38			10	0	.53E 38		10	0	.47E 38
	20	.14E 9			20	.44E 11			20	.11E 4			20	.35E- 6	
	40	.55E-21			40	.12E-16			40	.64E-31			40	.11E-49	
	60	.38E-58			60	.28E-48			60	.52E-66			60	0	
	15	0	.91E 38	15	0	.72E 38			15	0	.49E 38		15	0	.41E 38
	20	.61E 12			20	.20E 15			20	.55E 4			20	.72E-10	
	40	.15E-14			40	.22E- 8			40	.21E-29			40	.53E-57	
	60	.20E-51			60	.12E-36			60	.36E-63			60	0	
70/6	5	0	.69E 38	370/6	5	0	.62E 38	570/6	5	0	.55E 38				
	20	.58E 6			20	.19E 5			20	.32E 0					
	40	.20E-25			40	.24E-28			40	.58E-38					
	60	.16E-61			60	.86E-64			60	0					
	10	0	.77E 38	10	0	.61E 38			10	0	.49E 38				
	20	.37E 11			20	.24E 8			20	.10E- 1					
	40	.53E-16			40	.36E-22			40	.75E-41					
	60	.11E-49			60	.29E-54			60	0					
	15	0	.85E 38	15	0	.59E 38			15	0	.43E 38				
	20	.16E 16			20	.13E 11			20	.26E- 3					
	40	.36E- 7			40	.11E-16			40	.74E-44					
	60	.95E-39			60	.13E-45			60	0					

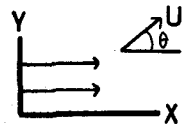
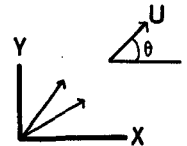


Table 3 Detection Potential for the Search of Linear Course ($\times 10^{-30}$)

θ	U	W _y	Potential	θ	U	W _y	Potential	θ	U	W _y	Potential	θ	U	W _y	Potential
m/min.	m/min.			m/min.	m/min.			m/min.	m/min.			m/min.	m/min.		
0	0	10	.45E 18												
	6		.10E 26												
	2		.28E 33												
	-2		.28E 33												
	-6		.10E 26												
	5	10	.28E 20	270/6	5	10	.11E 21	470/6	5	10	.18E 19	π	5	10	.65E 16
	6	.13E 27			6	.28E 27			6	.21E 26			6	.69E 24	
	2	.63E 33			2	.82E 33			2	.21E 26			2	.13E 33	
	-2	.63E 33			-2	.19E 33			-2	.88E 32			-2	.13E 33	
	-6	.13E 27			-6	.37E 25			-6	.28E 24			-6	.69E 24	
	10	10	.19E 22	10	10	.19E 23			10	10	.49E 19		10	10	.75E 14
	6	.15E 28			6	.63E 28			6	.36E 26			6	.42E 23	
	2	.15E 34			2	.23E 34			2	.49E 33			2	.60E 32	
	-2	.15E 34			-2	.13E 33			-2	.27E 32			-2	.60E 32	
	-6	.15E 28			-6	.11E 25			-6	.63E 22			-6	.42E 23	
	15	10	.13E 24	15	10	.22E 25			15	10	.97E 19		15	10	.92E 12
	6	.20E 29			6	.11E 30			6	.51E 26			6	.28E 22	
	2	.38E 34			2	.61E 34			2	.62E 33			2	.28E 32	
	-2	.38E 34			-2	.79E 32			-2	.81E 31			-2	.28E 32	
	-6	.20E 29			-6	.25E 24			-6	.12E 21			-6	.28E 22	
70/6	5	10	.12E 21	370/6	5	10	.24E 20	570/6	5	10	.88E 19				
	6	.30E 27			6	.11E 27			6	.34E 25					
	2	.84E 33			2	.51E 33			2	.21E 33					
	-2	.37E 33			-2	.11E 33			-2	.92E 32					
	-6	.25E 26			-6	.72E 24			-6	.28E 24					
	10	10	.30E 23	10	10	.82E 21			10	10	.13E 19				
	6	.82E 28			6	.88E 27			6	.97E 24					
	2	.26E 34			2	.13E 34			2	.21E 33					
	-2	.37E 33			-2	.46E 33			-2	.31E 32					
	-6	.55E 26			-6	.41E 23			-6	.66E 22					
	15	10	.65E 25	15	10	.19E 23			15	10	.18E 16				
	6	.20E 30			6	.57E 28			6	.27E 24					
	-2	.65E 33			-2	.16E 32			-2	.10E 32					
	-6	.11E 27			-6	.17E 22			-6	.15E 21					



いが、ボートが湾口に達するまでのジグザグの振動数が同じであれば、その振幅(W_y に依存する)の大小によらず、ポテンシャルは一定であった。これは、 X 軸上の瞬間探知確率が他の点と比べて、何々違いに大きい、 X 軸上での観測の回数、即ち、振動数に大きく依存して、振幅には余り影響されないためである。この場合の最大ポテンシャルは、 $\theta=0$, $U=15\text{m/min.}$ の時、 0.3×10^7 で、 X 軸上を航行する平行探索のポテンシャルの約 $1/2$ であった。こゝで言う最大ポテンシャルとは、各経路について、計算した条件の範囲内のことである。

[V] 最適探索経路

モニタリング方法の最適性の基準として、次の3つが考えられる。

- (1) 発見確率の最大化 — 汚染物質の探知について、確実性を高めるモニタリング
- (2) 限界効用(投資効率)の最大化 — 観測1回当りに要する費用を考慮した経済性を高めるモニタリング
- (3) 発見時間の最小化 — 迅速性を第一と考えるモニタリング

これらの基準は、現実のいろいろなモニタリング活動において、どれも、それぞれの重要性を有しているが、ここで対象としている様な問題では、経済性、迅速性よりも、まず第一に、放出された放射能が、確実に検知されることが最優先されるべきであろう。それ故、ここでは発見確率を最大にする探索経路を考えることにする。

(10)式から明らかな様に、発見確率を最大にすることと、発見ポテンシャルを最大にすることは、同値の問題であるので、発見ポテンシャルの最大化について論じる。

発見ポテンシャルを定義した(20)式で、任意に変え得るパラメータは、モニタリングボートの経路と速度であるが、経路は速度の x, y 成分(W_x, W_y)を決めれば必然的に定まる。(20)式中右辺の積分の指数部は非正の値となるので、この値が0のとき発見ポテンシャルは最大になる。

(26)式で、 T は原子力船の出発後の時間であり、 t は放射性物質が放出された時間である。放出時刻 t についての情報が得られない時は、放射能が検出されるまでは、 t は T とともに変化すると考えるのが妥当であり、 $t=T$ とおくと、(27)式が得られる。ある時点で $t=t_0$ であることが確認されたなら、(28)式が得られ、 T について消去すると、(29)式が、発見ポテンシャルを最大にする探索経路となる。この時、モニタリングボートの速度 $W(x, y)$ は、 $x=W_x T$, $y=W_y T$ において(30)式が得られる。こうして得られた最大ポテンシャルは、 0.24×10^7 となり、 X 軸上を航行する平行探索の最大ポテンシャルの約2.6倍となる。これらの最大ポテンシャルは、計算した条件内のことであり、パラメータが変れば当然異なる。

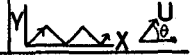
以上のことから、現状の放射能監視体制には不備が多いと思われる。発見確率を最大にする最適な方法は、直感的な予想と一致する通り、原子力船の直後をモニタリングし、放射能放出の情報が得られた時点で、その時の海象条件を考慮に入れ、瞬間探知確率を計算しながら、進路を変えれば良い。

本研究では、原子力船から放出される放射能のモニタリングを例として、汚染源、観測者がともに移動し、かつ観測者は平面上任意に動き得る場合を対象とした。(18)式で定義した瞬間探知確率は、問題の対象に応じて、任意に与えることが可能である。本研究の考え方の応用として、大気汚染の観測をモニタリングカーで行う時、ポテンシャルの加法的から、経路ごとに発見ポテンシャルを計算し、それが最大になる経路を選ぶ方法等が考えられる。

ここでは、1つの観測者が一定速度で進むとして、簡単な場合について論じたが、今後の課題として、観測者複数個あるモデル、ノイズを考慮したモデル、各地点での投入努力の配分法、最適基準のとり方などで、モニタリングの対象と、目的に応じた探索モデルの開発が期待される。

Table 4 Detection Potential for the Search of Zigzag Course ($\times 10^{-30}$)

θ	U Potential m/min.	θ	U Potential m/min.
0	0 .21E 37 5 .24E 37 10 .28E 37 15 .31E 37	4 π /5	5 .20E 37 10 .18E 37 15 .17E 37
π /6	5 .24E 37 10 .27E 37 15 .25E 37	5 π /6	5 .19E 37 10 .17E 37 15 .15E 37
2 π /6	5 .23E 37 10 .24E 37 15 .25E 37	π	5 .19E 37 10 .16E 37 15 .14E 37
3 π /6	5 .21E 37 10 .21E 37 15 .20E 37		



$$\begin{cases} x-vt-u_x(T-t)=0 \\ y-u_y(T-t)=0 \end{cases} \quad \dots(26)$$

$$x=vT, y=0 \quad \dots(27)$$

$$\begin{cases} x=u_x(T-t_0)+vt_0 \\ y=u_y(T-t_0) \end{cases} \quad \dots(28)$$

$$y = \frac{u_y}{u_x} (x-vt_0) \quad \dots(29)$$

$$\begin{cases} W_x = u_x + (v-u_x) \frac{t_0}{T} \\ W_y = u_y (1 - \frac{t_0}{T}) \end{cases} \quad \dots(30)$$