

우라노우찌灣 環境改善에 關하여

金 治 弘* 森本辰雄

§ 1. 概 說

本報告書는 1980年 8月 13, 14日 森本氏와 함께 日本四國高知市西南端에 있는 우라노우찌灣을 土佐市深浦漁業協同組合으로부터 委託을 받아 그 灣內의 「水質」과 「底質」의 改善에 關한 基本的 構想을 綜合한 것이다.

우라노우찌灣은 別名 요코나미산리(橫浪三里)라고도 불리우고 灣의 길이 約 12km에 達하는 안속깊은 灣이고 奧部에 가까워짐에 따라 汚染이 甚해지고 있다. 이 水域의 流水에 對해서는 灣內로 流入하고 있는 河川水와 干滿에 依한 潮汐의 影響밖에 없는데 奧部에 갈수록 그 影響力이 낮다.

10數年前까지도 眞珠도가 조개의 養殖이 旺盛해서 年間 相當한 賣上高를 올렸는데 現在에는 이 水域을 利用한 水産業도 汚染 때문에 大幅으로 衰退하고 있다.

이와같은 汚染의 原因은 물의 流通이 充分하지 않기 때문에 灣底質의 惡化를 들 수 있고 이것을 改善하기 위해서는 이 水域에 外海水를 導入하는 以外的 方法은 없다. 特히 灣奧部에 外海水가 導入되어 宇佐(宇佐)쪽으로 流出하는 流水의 패턴이 形成된다면 이 水域의 汚染은 急速히 改善될 것이다.

이 檢討書에서는 이와같은 觀點에서 다음의 5項目에 對하여 概略의 構想을 記述한 것이다.

1. 外海水導入의 方法
2. 灣內에 導水하는 水路의 構想
3. 導入水流가 주는 影響評價
4. 底質改善의 方法
5. 今後의 環境保全의 方法

§ 2. 基本構想

이 水域의 環境을 改善하기 위해서는 上述한 것과 같이 되도록 灣奧部에 外海水를 導入하기 위한 터널을 掘鑿하고 터널入口에서 自然의 힘 또는 人工動力에 依해 外海水의 流入을 促進하는 導入裝置를 設置하므로써 外海水가 灣奧部로 流入하고 그 流入水가 灣奧部로부터 灣入口로 向하여 流出한다는 流水의 패턴을 促進하는 以外的 方法은 생각할 수가 없다. 이 流水의 패턴(pattern)은 大小의 差는 있지만 現狀態에서도 持續되고 있는 形態로서 無理가 없다. 다만 充分히 流水가 되겠음 灣入口의 여울의 浚渫을 行할 必要가 있다.

이와같은 灣內流水의 패턴을 形成하는데 必要한 各部의 基本構想到 對하여 以下에 記한다.

1) 外海水導入의 方法

動力을 人工的으로 求하는 方法과 自然의 에너지를 利用하는 方法과를 比較하고 維持管理의 便利性이든가 經費든가 建設費 등을 綜合적으로 생각해서 取水方法을 設定한다.

*土木技術士(水資源)

2) 灣內로 導水하는 方法

灣奧部에 이르러도 海側의 山地는 比較的 높으므로 開渠으로서의 檢討는 必要없고 터널로서 檢討한다. 터널斷面은 必要導水量을 흐르는 데 足한 크기를 求하여 建設費의 檢討를 한다.

3) 導入水流가 주는 影響評價

이 件에 對해서는 現地水域의 汚染度 其他條件을 充分히 調査한 然後아니면 影響評價는 어렵지만 流入水에 依해 灣內水域의 DO가 改善되는 것을 期待하고 差分法 또는 有限要素法에 依해 平面的으로 灣內各水域에 있어서의 影響度의 分布를 求한다.

4) 底質改善의 方法

이 件에 對해서는 今回는 基本的인 考察方法을 記하고 詳細計劃은 다음 機會에 本格的으로 檢討해 하고저 한다.

5) 今後의 環境保全의 方法

改善된 環境을 維持하기 위한 基本姿勢에 對하여 記述하기로 한다.

§ 3. 外海水導入計劃

1. 灣內水의 水質改善을 위한 灣內水의 溶存

酸素濃度(DO濃度)를 改善度의 파라메터로 하여 換水하므로써 DO濃度의 向上을 期하는 것이 適當한 方法이다.

그러나 換水는 完全한 置換이 아니고 現存하는 灣內水에 新鮮한 外海水를 導入하여 混合하면서 漸次 換水를 期하기 때문에 灣內의 複雜한 地形과 더불어 DO濃度의 定量的 豫測은 相當히 困難하다.

外海水를 灣內에 導入하면 灣內의 水質이 改善되는 것은 時間의 問題이므로 DO濃度의 檢討는 다음 段階의 作業으로 미루고 今回는 外海水를 어떻게 取水하여 灣內에 導入하는가에만 集中하여 說明하고저 한다.

2. 外水導入의 方法은 여러가지 생각할 수 있으나 取水機構의 動力源으로부터 다음과 같이 分類할 수 있다.

人工動力源

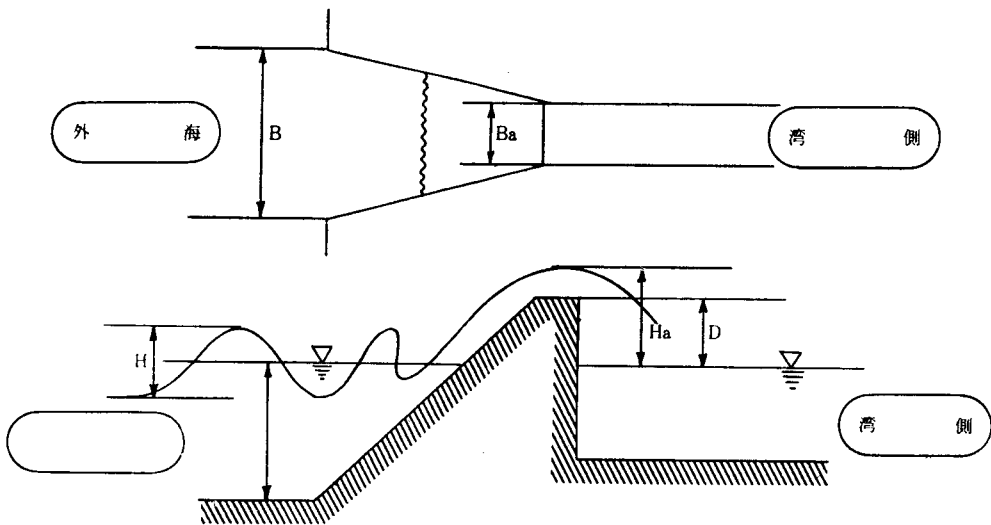
電力 } → 原動機 → 取水 또는 排水펌프
化石燃料 }

自然動力源

風力 }
波力 } → 에너지變換 → YES → 原動機
潮汐 } → NO → 自然現象의 利用

人工動力源에 의하는 方法은 設備費는 생각안더라도 運轉費가 방대하여 運營上 經濟的이 아니라고 생각된다.

또 風力, 波力 등의 變換에너지의 利用은 아



적 문제가 많아 實用化에는 時間이 많이 所要될 것이다.

一般的으로 가장 確實하고 經濟的인 方法은 潮汐의 利用인데 다른 調査에 依하면 요코나미(橫浪)半島의 基部附近에서 灣內와 外海의 潮汐의 時間差는 不過 20 分으로 되어있고 遺憾스럽게도 이것만을 信賴할 수 없다.

따라서 우라노우찌灣에 있어서는 運轉費도 包含하여 가장 經濟的인 取水本法은 波力 및 潮汐의 自然에너지를 그대로 利用하는 것이고 도사(土佐)灣으로 쳐올려오는 太平洋의 波浪을 狹窄水路에 依해 水位를 上昇시켜 웨어(weir)를 越流케 하여 外海水의 導入을 하자는 計劃을 提案하고 싶다.

3. 狹窄水路라 함은 위의 Fig. 1에 表示하는 것과 같이 開口部로부터 奧部로 向하여 幅을 좁게하고 水深을 얇게 한 水路이다.

開口部부터 들어간 波는 內側으로 進行함에 따라 波高가 크게되고 水路奧部の 웨어를 넘어서 流込된다. 이 越流水를 모두 터널을 通하여 灣內로 流入시키고저 하는 것이다. 또 灣內水를 外海로 流出안시키기 위해 웨어는 恒常 灣內의 水位보다 높게 해 두지 않으면 안되지만 潮汐도 利用하고 越流水量을 많게하기 위해 높이를 自動的으로 調節할 수 있는 후로오트·게이트(float gate)의 構造로 한다.

4. 狹窄水路의 水理計算(中村氏의 式)

$$H_a - D = \sqrt{\frac{1}{g} \left(\frac{q}{\beta K} \right)^2} \quad (1)$$

여기서 H_a (m) : 越流水位

D (m) : 웨어의 높이

q ($m^3/sec \cdot m$) : 越流水量

g (m/sec^2) : 重力의 加速度

β : 웨어上에서의 平均流에 關한 係數

K : 前面水深 a 의 段波 波速係數 實驗的으로 $\beta K = 0.29$

$$y^7 - y^6 + c_1 y^5 + c_2 y^4 - c_3 = 0 \quad (2)$$

y : 狹窄率 B/B_a

$$c_1 = \frac{K_1^2 D}{H^4 h}, c_2 = \frac{K_1^2}{H^4}, c_3 = \frac{K_1^7 K_0^2 (h+D)}{H^2 h^3}$$

$$K_1 = \frac{2H_a + K^2(H_a - D)(H_a - D)}{\alpha(K_0 + a)}$$

여기서 h : 前面의 水深

H : 計劃波高

a : 碎波에 있어 靜水面上의 波高의 全波高에 對한 比($a=0.5$)

α : 碎波에 依한 流速係數($\alpha=0.6$)

K_0 : 碎波에 있어 水深波高比 ($K_0=1.28$)

5. 計算結果

(1) 既存의 調査結果로부터 橫浪半島外側의 平均波高 發生率 年間發生日數는 第1表 아래와 같이 推定된다.

(2) 水路1基當의 越流水量을 假定하면서 前項(2)式을 풀면 $y=3$ 이 된다. 따라서 間口 15m, 웨어의 幅 5m, 前面水深 5m의 狹窄水路를 設置하는 計劃이 된다.

〈第1表〉

平均波高 H(m)	發 產 率 (%)	日 數 (년)
0.4	18	53
0.6	39	112
0.9	28	82
1.2	10	29
1.8	3	9
2.4	1.5	5
2.8	0.5	2
合 計		292

水路1基當取水量	水路1基當의 年間導入量
1.23m ³ /s	563萬 m ³ /年
2.15 "	2,080萬 m ³ /年
3.68 "	2,607萬 m ³ /年
5.38 "	1,348萬 m ³ /年
9.10 "	707萬 m ³ /年
13.2 "	570萬 m ³ /年
16.1 "	278萬 m ³ /年
合 計	8,153萬 m ³ /年

(3) 다음에 (1)式의 $D=0.3m$ 로 하여(터널의 抵抗에 이기고 灣內에 流込하기 위한 必要한 水頭), (2)式부터 求해지는 H_a 및 第1表의 數值를 (1)式에 代入하면 水位1基當의 取水量(越流水量)이 얻어진다. 그 結果를 第1表右側에 表示하고 있다.

6. 外海水의 導入量을 얼마로 하는가는 어려운 問題이다. 本節의 序頭에서도 記한 것과 같

이 DO 濃度에 의한 判斷이 必要한데 本檢討書의 段階에서는 遺憾이지만 解明할 수 없다.

여기서는 灣內의 全水量을 約 8,000 萬 m³ 라고 推定하고 大端히 大膽한 假定이지만 季節에 依한 導入水量의 變化는 無視하고 灣內全水量에 該當하는 水量을 每月導入하는 것으로 한다. 즉 1 年間に 灣內全水量의 12 倍의 水量을 導入한다. 前項의 計算으로부터 狹窄水路 1 基로 年間 8,153 萬 m³의 外海水導入이 可能하기 때문에 이 水路를 12 基를 罷列하면 이 假定을 滿足하는 水量이 導入되는 것이 된다.

§ 4. 灣內에 導水하는 水路의 構想

[A] 水路地點의 選定

1) 水路地點으로서의 候補地를 5 萬分之 1의 地形圖에 表示한 것과 같이 No.1~No.5의 5 地點을 擇하였다. 地點選定の 條件으로서는 ① 될 수 있는데로 灣奧部에 位置할 것, ② 水路길이 가 可及的 짧을 것, ③ 外海波浪을 받기쉬울 것 ④ 터널掘鑿을 위한 地質에 問題가 없을 것, ⑤ 土地取得이 容易할 것 등을 생각할 수 있다. 이 中 ①②③은 希望條件이나, ④는 그다지 問題가 되지 않지만 ⑤는 決定的 條件이 될 수 있는 要素를 갖고 있다. 例컨대 어떻게 해도 土地取得이 어려울 때에는 地點을 안 옮길 수 없게 된다

2) 上記 5 地點에 對한 對比表로 摘記하면 第 2 表와 같다.

3) 第 2 表에서는 水路地點選定이라는 觀點으로 比較指數 등을 表示했으나 이것은 概略의 感覺的 數值이고 其他 諸要素도 影響을 주기 때문에 이것만으로는 決定的이라고 말할 수 없다. 今後 本件을 推進해 나가는데 있어 이와같은 要

件을 加味해서 最終的인 結論을 얻게 되겠지만 希望으로서는 可及的 No.1, No.2 程度의 位置로 가지고 가고 싶다.

[B] 水路의 構造

1) 터널水路에 對해서는 施工上 「圓形터널」과 「馬蹄型터널」과를 생각할 수 있다. 圓形터널은 TBM(Tunnel Boring Machine) 등을 써서 完全機械掘鑿이지만 馬蹄型터널 쪽은 이 程度의 水路길이에서는 잠보드릴程度를 使用한 半機械掘鑿이어야 한다. 實際施工에서는 後者를 採用 하여야 할 줄 아나 여기서는 簡略化를 期하여 前者에 依해 水理計算 등을 하기로 하였다.

2) 터널斷面積으로서는 流速 0~3m/sec의 範圍, 流量 0~150m³/sec 程度를 생각하여 內徑 8m의 圓形斷面으로서 計劃한다. 勿論 위의 內徑이 있으면 充分하고 費用도 터널直徑에 依해 變化하기 때문에 施工上의 便宜도 생각해서 8~10m 範圍에서 適正한 徑을 選定하겠끔 한다. 그러나 馬蹄形을 採擇할 때에는 流量換算하여 同等以上의 것이면 좋다고 思料된다.

3) 開水路의 形狀은 函渠型開水路와 石積式開水路가 생각된다. 前者는 水路高가 높아지면 急速으로 費用증가가 되는 流水抵抗이 적다. 後者는 費用은 싸나 流水抵抗이 크다. 여기서는 前者를 主體로 한 構造로 하고 터널에 가까운 水路高가 큰 部分에 對해서는 後者를 併用한 複合型의 構造로 하고저 한다.

4) 開水路의 終點附近에는 沈砂池와 角落(stop-log)에 依한 上水路를 設置하여 水替에 依한 水路點檢을 容易하게 하겠끔 하고저 한다.

5) 開水路部는 自然力에 依한 「外海水導入」으로 名所가 될것이 豫測되므로 周邊美觀을 생각

〈第 2 表〉

比較 內容	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	備 考
水路 全長	650m	680m	820m	1,150m	950m	No. 1, No. 2, No. 3, No. 5, No. 4 順
터널 길이	430m	420m	600m	950m	850m	
開水路長	220m	260m	220m	200m	100m	
取水 條件	B	A	D	C	E	No. 2, No. 1, No. 4, No. 3, No. 5 順
全體比較指數	95	100	85	75	50	No. 2, No. 1, No. 3, No. 4, No. 5 順

하여 公園과 같이 施設을 하고저 한다.

[C] 水理計算

터널을 圓形으로 생각하여 Manning의 公式에 依해 滿流로 보고 計算을 하고 開水路는 이 流量을 흐르는데 充分한 形狀으로 하고저 한다.

$$D = \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i^2 \cdot V_i^2}{R_i^4} \cdot l_i \right) + \sum_{j=1}^k h_j$$

- 여기서 D : 水位上昇量
- n_i : Manning 粗度係數
- l_i : 區間長(m)
- A_i : 通水斷面積(m²)
- R_i : 徑深
- m : 區間數(斷面·粗度係數가 相異한 水路數)

지금 直徑 8m, 길이 400m의 터널에서 滿流로서 水位上昇量(m)과 流量 $Q(m^3/s)$ 를 求할 수 있다. 위 式이다.

- $n=0.02$
- $A=50m^2$
- $R=2m$
- $m=1$
- $k=2$ (入口損失 $h_1=0.026m$)
(出口損失 $h_2=0.056m$)

§ 5. 導入水流가 주는 影響評價

우라노우찌(浦ノ内)灣과 같이 複雜한 形狀을 갖는 灣內에 灣奧部로부터 外海水를 導入하여 灣口로 向하여 灣內水를 흘리는 경우 水流가 주는 影響을 調査하자면 任意地點에서의 流水의 狀態가 時間과 함께 어떻게 變하는가를 追跡할 必要가 있다.

1) 基礎方程式

靜水面內의 水平直角座標를 x, y 軸, 垂直下方으로 z 軸을 取하면 運動 및 連續의 式은 다음과 같이 된다.

a. 運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

(Navier-Stokes의 運動方程式)

b. 連續式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

여기서 u, v, w 는 x, y, z 方向의 速度成分 ζ 는 平均水面부터의 水位, ν 는 鉛直方向의 渦粘性係數, L 은 水平方向의 渦粘性係數, g 는 重力加速度이다.

上式 (1), (2), (3)式을 聯立으로 풀면 任意地點의 흐름의 特態가 時間과 함께 어떻게 變하는가를 알 수가 있다. 그러나 一般으로 上式을 解析的으로 풀다는 것은 거의 不可能하다. 그래서 上式에 潮汐波에 對한 單純化된 假定을 導入하고 實際의 흐름을 理想化하고 數學的으로 取扱하기 쉽게 한다. 즉 本計算에서는 各點에서의 水平流速은 全水深에서 같다고 생각하여 上式을 z 方向에 關하여 積分한다. 그렇게하면 潮汐波에 對한 基礎方程式이 다음과 같이 變形된다. 但 (1), (2)式의 L 을 含有한 項은 一般으로 r 의 項에 比하여 적으므로 分離해서 생각하기로 한다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \left[\frac{n^2 g \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \zeta)^{4/3}} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{U}{h + \zeta} \frac{\partial (h + \zeta)}{\partial x} \right] M - \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{U}{h + \zeta} \frac{\partial (h + \zeta)}{\partial y} \right] N - g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \left[\frac{n^2 g \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \zeta)^{4/3}} + 2 \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{h + \zeta} \frac{\partial (h + \zeta)}{\partial y} \right] N - \left[\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{h + \zeta} \frac{\partial (h + \zeta)}{\partial x} \right] M - g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (6)$$

여기서 M, N 은 垂直斷面에서의 單位幅 單位時間當의 流速成分으로 다음과 같이 定義한다.

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-r}^h U dz = (h + \zeta) U \\ N &= \int_{-r}^h V dz = (h + \zeta) V \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

但 U, V 는 表面부터 底面까지의 垂直面內的 平均流速 h 는 平均水深을 表示한다. 또 (4), (5) 式의 右邊 第1項 $n^2g\sqrt{U^2+V^2}/(h+\zeta)^{4/3}$ 는 底面摩擦을 表示하는 項으로서 河川 등의 1次元에 있어 Manning 公式을 應用한다. 여기서 n 은 Manning의 粗度係數를 表示하고 底面의 粗度和 底質에 關係한다.

2) 差分方程式

本計算에서는 (4), (5), (6)式의 모든 微分係數를 中央差分으로 고쳐서 時間的으로 逐次積分을 行하였다. 또한 計算水域을 格子間隔 ΔS 로 잘라서 되도록 電子計算機의 記憶容量을 적게하고 또한 演算速度를 빠르게 하기 위해 水深, 流量, 流速 潮位의 諸量의 格子를 取하는 方法을 Fig. 2와 같이 했다.

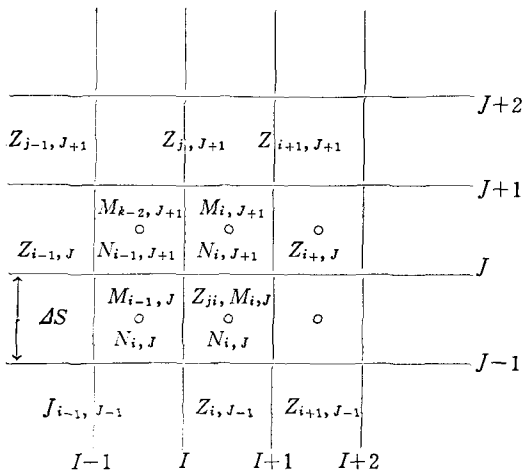


Fig. 2

즉 水深, 流量, 流速은 格子의 中央, 潮位는 格子點上에 計算을 行한다.

3) 計算結果의 表示

우라노우찌灣을 200m의 格子狀으로 圖形化하여 流速을 求하여 電算作圖한 것을 Fig.9와 Fig. 10에 表示한다.

Fig. 9는 導水量 50m³/sec인 경우, Fig. 10은 導水量 100m³/sec인 경우를 求한 것이다.

§ 6. 底質改善의 方法

〔A〕 底質의 現狀

底質의 現狀에 關係서는 지금까지 몇번이고 調査되어 있고 相當히 狀況은 判明되고 있으나 年年 惡化一路를 걷고있으며 灣奧部에 갈수록 汚染이 甚한 것이 지금까지 發表되고 있다.

〔B〕 改善의 構想

1) 底質에 對해서는 汚染度의 分布가 相當히 허터짐이 클것이 豫測되므로 汚染度가 큰곳과 적은 곳으로 나누어 그 分布範圍를 調査後에 明確化하고 큰곳을 重點的으로 改善해 나가는 것이 得策이라고 생각된다.

2) 汚染度가 큰곳은 조개養殖을 行했던 水域을 들 수 있으나 반드시 判異하게 分布되어 있다고는 생각안되기 때문에 傾向的으로 分布狀態를 整理할 必要가 있고 이것에 依해 큰 水域을 優先的으로 改善해 나가기로 한다.

3) 汚染度가 커서 改善을 要하는 範圍를 明確化하고 各 改善水域에 있어 汚泥의 堆積狀況 및 物性を 잘 調査하여 나아가서 綿密한 檢討를 行한後에 處理對策의 立案을 行하는 것이 適切하다.

4) 底質改善의 方法으로서는 여러가지 方法이 생각되지만 여기서는 一旦 水上으로 끌어 올려 埋立 등을 하는것이 適切하다고 생각된다. 有機性物質이 多量으로 含有하고 있을 때에는 物性에 따라서는 肥料化 또는 飼料化 등도 可能하다

5) 이 우라노우찌灣에서 조개養殖을 旺盛하게 行했던 것은 相當히 오래된 일이므로 底質은 거이 無機化되어 있어 有機成分은 그 當時와 比하면 훨씬 낮은것이 豫測된다. 그렇다면 底質汚泥의 除去는 長期間 걸려 無機化되어 왔으므로 急速히 實施의 必要性이 그다지 없는지도 모르나 있다면 小規模의 設備로서는 어렵다.

1日 적어도 500m² 以上の 汚泥를 除去할 수 있는 設備가 必要하고 또한 될 수 있으면 船上에서 脫水까지해서 脫水된 것을 埋立하고 싶다.

§ 7. 今後의 環境保全에 對하여

우라노우찌灣內에 對하여 外海水가 導水되어
<P. 31로 계속>