

淡水湖における塩分拡散について

長谷川紘一*・田中宏平**

昭和 56 年 8 月 1 日受付

On the Salinity Diffusion at the Interface of Stratified Flow in a Desalted Reservoir

Kōichi HASEGAWA* and Kōhei TANAKA**

This paper deals with the salinity diffusion at the interface of stratified flow in a desalted reservoir. A long term observation was carried out in order to pursue the mechanism of the variation of salinity in the reservoir situated in Miike reclamation. The results are summarized as follows.

- (1) The freshening process is divided into the period of replacement of sea water by fresh water and that of the variation of salinity.
- (2) The coefficient of salinity diffusion is non-isotropic and the horizontal coefficient is very much larger than the vertical.
- (3) Calculation of the discharge of salt intrusion is indispensable to a long-term water utilization scheme.
- (4) In the balance of mean salinity, wind over the critical velocity has a strong affect on the salinity diffusion.
- (5) The depth of the interface is made deeper by drift current.

ま え が き

わが国の年間降水量は約 6,700 億トンであり、そのうち農業、上水道及び工業用水に利用されているのはわずか 12.5% の 840 億トンである。このことから考えると全体的には水は豊富であるといえるが、しかし雨季がかたよっているため流況の悪い河川が多く、局地的には水の需給関係は満足されていないのが現状である。また経済の高度成長にともない都市への過密化現象が生じ、水需要の増大が地域的にかたよってくると水資源の高度利用が要求され、その結果として淡水湖が各地で造成されたり計画されたりしている。

海面あるいは半かん湖を締切って貯水池を造成し、内部の塩水を淡水と交換することを淡水化といい、淡水化

された貯水池を淡水湖という。わが国では主として干拓地の用水源として造成されたものが多く、大規模なものでは児島湾干拓、八郎潟干拓が施工済みであり、中海干拓が施工中である。小規模なものでは三池干拓、有明干拓が施工済みであり、羊角湾干拓が施工中である。

淡水湖内の水は一般には完全な淡水化が行われず、下層に比重の大きい塩水が残存し、上層に淡水、下層に塩水という二層流の形態をなすので、風波、吹送流などによる淡塩二層の混合が問題となる。

ここでは施工済みの淡水湖として三池干拓貯水池（福岡県大牟田市）での実測例をもとに、淡水湖において風によって生ずる二層流の塩分挙動についての研究結果を報告する。

* 鳥取大学農学部農業工学科農業水文学研究室
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

** 九州大学農学部農業工学科排水干拓工学研究室
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Kyūshū University

淡塩二層の混合について

淡塩二層の混合は大別すると次の二つの形態になる。

- (1) 淡塩二層が明確な境界面を有している場合。この場合は二層間の速度差が増してくると内部波が境界面で形成される。主流の流速が限界値を超えると内部波が砕波し混合が生じる。
- (2) 淡塩二層の間にある厚さを有する中間層が存在し、密度、流速の遷移領域が形成されている場合。この場合は明確な内部波は認められず、淡塩二層の混合は運動量交換に関連して生じる。

(1)については内部波の波長が長い場合の伝播速度は次式で与えられる。

$$C_i = \frac{u_2 h_1}{H} \pm \sqrt{g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{h_1 h_2}{H} - \frac{u_2^2 h_1 h_2}{H^2}} \dots\dots\dots ①$$

- C_i : 内部波の波速
- u_2 : 下層の平均流速
- h_1 : 上層水深
- h_2 : 下層水深
- H : 全水深
- g : 重力加速度
- $\Delta\rho$: 淡塩の密度差
- ρ : 淡水の密度

短周期微小振巾波の伝播速度は次式で与えられる。

$$C_i = \frac{u_2 \tanh \sigma h_1}{\tanh \sigma h_1 + \tanh \sigma h_2} \pm \sqrt{\Delta\rho/\rho \cdot g/\sigma \cdot \frac{\tanh \sigma h_1 \tanh \sigma h_2}{\tanh \sigma h_1 + \tanh \sigma h_2} - \frac{u_2^2 \tanh \sigma h_1 \tanh \sigma h_2}{(\tanh \sigma h_1 + \tanh \sigma h_2)^2}} \dots\dots\dots ②$$

σ : $2\pi/L_i$, L_i : 内部波の波長

内部波が砕波する限界は①, ②式の平方根のなかが負になる条件によって決定される。

$$\frac{u_2}{\sqrt{\Delta\rho/\rho \cdot g h_2 (L_i/\pi h_2)}} \geq \left\{ \frac{1}{2} (\tanh \sigma h_1 + \tanh \sigma h_2) \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots ③$$

特に波長が短くて $\sigma(h_1 + h_2) \geq 2$ のときは

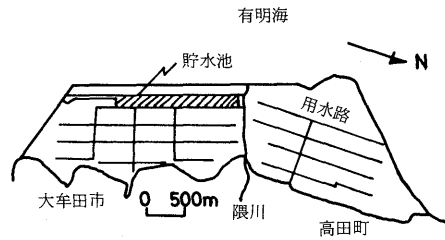
$$\frac{u_2}{\sqrt{\Delta\rho/\rho \cdot g h_2 (L_i/\pi h_2)}} \geq 1 \dots\dots\dots ④$$

すなわち淡水湖内の下層塩水の流れが十分小さければ、内部波は安定であり二層間の混合は生じない。

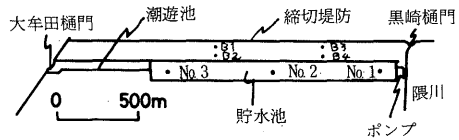
(2)については、分子拡散によって一般には淡水と塩水の間には半塩水の間層が形成できる。この層は塩分、密度及び速度の遷移領域を形成しており、上層あるいは下層

の運動がたとえ乱流状態であっても、この中間層は大きな密度こう配による安定性のため層流状態で流れている。このため下層流に擾乱を与えたとしても、粘性力のみならず重力効果によっても大きく乱されることはなく、流れは安定している。

三池干拓貯水池の水質について



第1図 三池干拓平面図

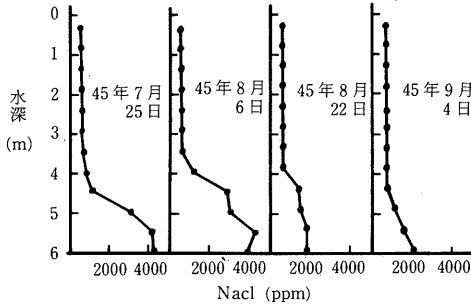


第2図 測点位置図

三池干拓は福岡県大牟田市地先に位置しており、昭和42年9月に完工したもので、干陸総面積540haのうち水田面積372haでこの用水源として巾120m、長さ1500m、深さ6mの貯水池が設けられている。第1図に三池干拓平面図を示す。この貯水池の特色は直接流入する河川がないので、特にかんがい期には大降雨時を除いて淡水流入量がきわめて小さいことと、大降雨時や非かんがい期に排水路より流入する淡水の塩素量が300~500p.p.m.あるということである。排水方法は躍層をできるだけ低下させる目的で除塩サイフォンを使用しているが、かんがい期間中はほとんどサイフォン操作を行わず、かんがい期前にサイフォン操作を行ってあらかじめ躍層を低下させている。

この貯水池の中央部と両端の3カ所に、また貯水池と堤防との間の干陸地に4カ所(ポーリング孔)測点を設け、各測点について鉛直方向に50cm間隔で測定を行った。測定項目は塩分濃度、水温、水位の3項目で、塩分濃度と水温についてはかんがい期には10日に1回、非かんがい期には1か月に1回の間隔で測定を行い、貯水池水位は水研62型の長期自記水位計によって記録させた。塩分

濃度の測定は電気伝導度測定と採水後モール氏法による硝酸銀滴定とを併用して行い、水温はサーミスター温度計により測定した。第2図に測点の略図を示す。また解析に用いた気象データは、昭和45年のみ九州農業試験場(羽犬塚)のものを用い、昭和46、47年は現地での測定データによった。



第3図 かんがい期の塩分の鉛直分布(測点No.1)

第3図は昭和45年の7月下旬から9月上旬までの貯水池塩分の測点NO.1での鉛直分布を示している。この図では8月6日と8月22日の分布に顕著な差がみられる。これは8月15日に台風9号(10分間最大風速25.7m/s)の襲来によるものと思われる。また8月の降雨量は旬別に2.2, 131.3, 49.5mmとなっており、中旬の大部分は台風によるものである。貯水池における淡塩二層流の安定性を示すものとして、リチャードソン数があり次式で示される。

$$R_i = \frac{g|\partial\rho/\partial z|}{\rho(\partial u/\partial z)^2} \dots\dots\dots ⑤$$

R_i : リチャードソン数

$R_i > 1$ 安定, $R_i < 1$ 不安定

z : 貯水池底から鉛直上方にとった距離

u : 流速の水平成分

ρ : 流体(貯水)の密度

g : 重力加速度

⑤式において ρ , u を近似的に z のみの関数とすると次式になる。

$$R_i = \frac{g|dp/dz|}{\rho(du/dz)^2} \dots\dots\dots ⑥$$

⑥式は速度こう配 du/dz の項を含んでいるが、岸・加藤²⁾は実験的に次式を得た。

$$\frac{du}{dz} = \frac{20u_{*s}}{h_1} \dots\dots\dots ⑦$$

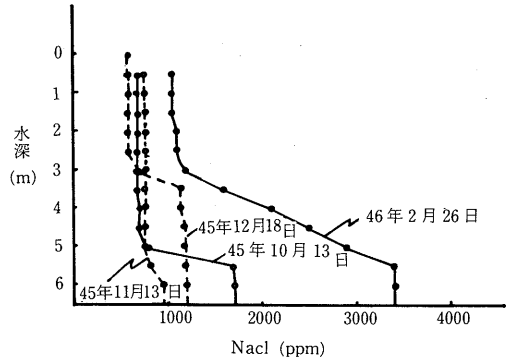
u_{*s} : 水面摩擦速度

h_1 : 淡水層水深

$$u_{*s} = 1.289 \times 10^{-3} V_5 \dots\dots\dots ⑧$$

V_5 : 水面上5cmの風速

⑥, ⑦, ⑧式より三池干拓貯水池での台風時におけるリチャードソン数を計算すると、 $R_i \approx 0.7$ となり不安定となる。このことは台風時においては淡塩二層の混合作用が行われ、更に降雨による淡水流入が加わり、貯水容量を超えた分は越流堤から貯水池外へ排水されたので、下層の塩分濃度が減少したと思われる。

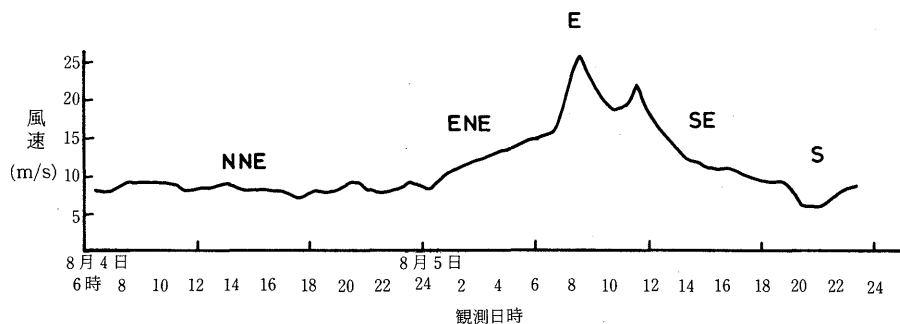


第4図 非かんがい期の塩分の鉛直分布(測点No.1)

第4図は非かんがい期における貯水池塩分の鉛直分布を示している。かんがい期における第3図と比較すると、上層濃度漸増と二層境界面(躍層)の上昇が見られる。

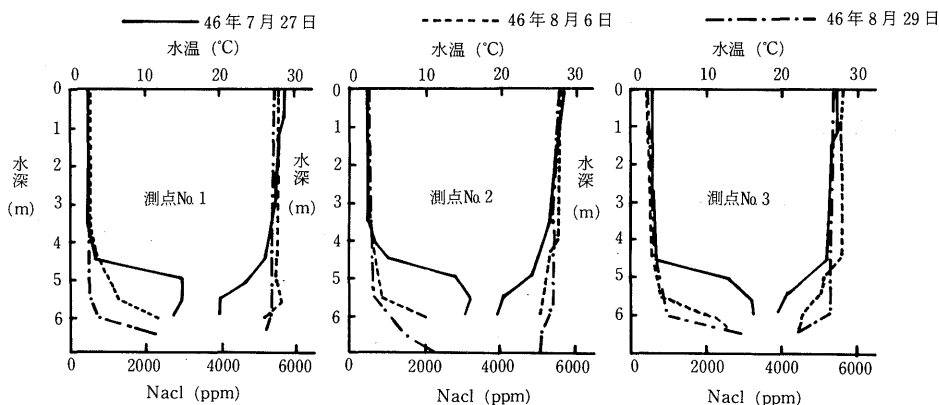
第1表 ポンプ揚水量

期 間	ポンプ揚水量	降雨量	平均水位
昭和.年.月.日 月.日	m ³	mm	m
45.7.1~7.20	374,018	85.4	-0.82
7.11~7.20	354,240	552.4	-0.40
7.21~7.31	518,371	2.3	-0.70
8.1~8.10	451,656	2.2	-0.80
8.11~8.20	350,993	131.3	-0.65
8.21~8.31	410,623	49.2	-0.42
9.1~9.10	437,486	35.7	-0.63
9.11~9.20	319,406	181.6	-0.62



NNE, ENE, …… , S は風向を示す (北北東, 東北東, …… , 南)

第5図 風速の経時変化



第6図 塩分と水温の鉛直分布

これは前述のように淡水流入が少ないのと、非かんがい期には締切堤防の排水樋門管理が不十分になり海水の貯水池への侵入があるからと考えられる。

第1表はポンプ揚水量結果を示した。このポンプは揚水量 $0.82 \text{ m}^3/\text{s}$ 、全揚程 7 m 、電力量 80 kW のものである。

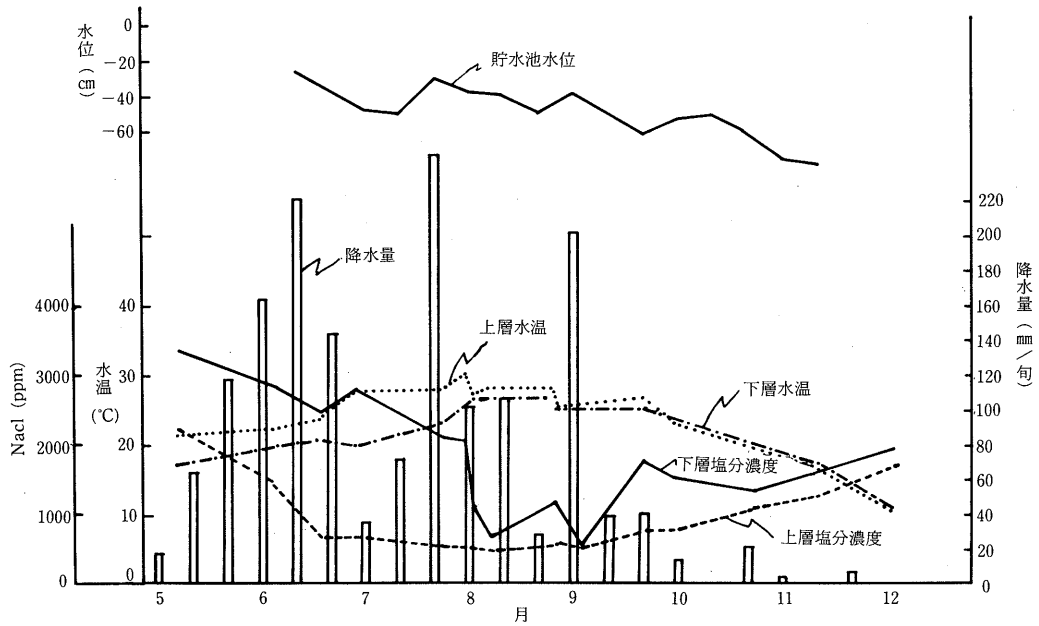
昭和45年度の調査では、淡塩二層の混合に対して風の影響の大きいことがわかったので、昭和46年度には測点NO.1に観測塔を建設し、標高 0 m と 5 m に風速計を設置した。また標高 10 m 用の風向風速計をポンプ小屋の屋上に設置した。降雨量についてもポンプ場の敷地内に雨量計を設置して測定した。

第5図は台風19号が襲来した46年8月4日から5日までの風速と風向(いずれも標高 10 m)の経時変化である。台風19号は九州の西海岸沿いに北上しているが、貯水池に最も接近した8月5日8時~9時に1時間最大風

速 23.0 m/s を記録した。第6図は台風19号襲来前後での貯水池塩分の鉛直分布を示しており、台風の前後における分布に顕著な変化が見られる。

第7図は46年における測定結果である。上層の塩分濃度はかんがい期間中はほぼ一定であるが、非かんがい期には漸増し、上、下層の濃度差が小さくなっている。これに対して下層の塩分濃度は台風19, 23号の影響を受けて減少しており、特に19号による影響が大である。これは19号が1時間最大風速 23.0 m/s の風台風であるのに対して、23号は 9.0 m/s と小さく、降雨量が 170.7 mm の雨台風のためと考えられる。

第2, 3表は47年に測定した貯水池の水質分析結果である。夏、冬二回の測定で採水点の水深が異なるもののあるのは躍層水深の変化によるもので、採水前に電導度の測定を行い躍層水深の見当をつけて、躍層水深付近を採水しているからである。第2表によると、夏期には塩



第7図 昭和46年の測定結果

第2表 貯水池の水質(1)

測点	採水点		水温		pH		Cl ⁻		DO		COD	
	水深	m	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
No. 1	0	0	31.2	11.6	8.10	8.58	498	1707	11.8	13.6	6.61	18.8
	2.5	2.5	30.2	10.3	7.43	8.35	541	1992	1.00	7.65	6.65	16.6
	—	3.0	—	—	—	8.09	—	2347	—	6.27	—	15.1
	4.5	4.5	28.2	11.4	7.20	7.38	697	4133	0.12	4.59	8.08	13.9
No. 2	0	0	35.6	11.7	8.28	8.63	501	1600	12.9	14.6	6.69	16.6
	2.5	2.5	31.2	10.6	7.43	8.01	533	2027	3.10	8.30	6.86	13.3
	—	3.5	—	12.7	—	7.30	—	3770	—	3.33	—	9.75
	4.0	—	28.6	—	7.09	—	647	—	0.15	—	7.49	—
	—	4.5	—	12.9	—	7.20	—	4126	—	2.86	—	10.0
	5.0		27.4		7.06		833		0.09		13.3	
No. 3	0	0	35.9	11.0	8.47	8.70	503	1679	13.2	15.5	6.33	16.4
	2.5	2.5	30.7	10.5	7.53	7.71	537	2383	0.85	5.82	6.77	16.2
	—	3.5	—	11.8	—	7.27	—	3663	—	3.04	—	13.8
	4.5	—	27.6	—	7.18	—	626	—	0.08	—	6.69	—
	5.0	5.0	26.3	12.7	7.02	7.19	717	4232	0.04	2.49	8.10	14.9

A: 昭和47年8月16日採水, B: 昭和47年12月5日採水, —: 採水せず

第3表 貯水池の水質(2)

測点	採水点		PO ₄ -P		T-P		NH ₄ -N		NO ₂ -N		NO ₃ -N	
	水深	m	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
No. 1	0	0	3.60	4.25	4.90	5.14	4.24	0.00	5.59	0.00		0.00
	2.5	2.5	6.37	4.52	8.67	6.26	7.20	0.00	9.42	0.00		0.00
	—	3.0	—	3.72	—	5.82	—	10.6	—	0.46		15.2
	4.5	4.5	15.6	4.52	18.6	7.14	12.6	47.2	6.38	1.67		57.8
No. 2	0	0	3.12	3.72	4.21	4.80	4.24	0.00	3.83	0.00		0.00
	2.5	2.5	5.49	3.83	7.35	5.36	3.58	0.00	6.86	0.00		0.00
	—	3.5	—	6.75	—	8.82	—	58.3	—	1.28	測定せず	46.6
	4.0	—	14.7	—	26.0	—	77.8	—	24.9	—		—
	—	4.5	—	7.55	—	9.27	—	66.6	—	1.47		70.2
5.0	—	30.8	—	33.8	—	224.9	—	10.7	—	—		
No. 3	0	0	3.04	4.25	12.3	4.90	5.29	0.00	3.83	0.00		0.00
	2.5	2.5	6.22	4.25	11.8	6.20	4.64	0.00	3.83	0.00		0.00
	—	3.5	—	6.64	—	8.93	—	62.8	—	1.54		29.3
	4.5	—	11.2	—	13.2	—	52.9	—	39.5	—		—
5.0	5.0	7.71	19.5	19.5	10.2	105.8	75.0	12.2	1.64		61.7	

A：昭和47年8月16日採水，B：昭和47年12月5日採水，—：採水せず。

分躍層は認めにくく温度躍層の存在が認められる。またCODが高く底層になるにつれて増加している。冬期には塩分躍層の存在が顕著で水温の上下差は小さくなっている。CODは夏よりも更に高くなっている。第3表によると、窒素化合物がかなり多量含まれているが、これはかんがい用水の反復利用のためと考えられる。つまりかんがい用水に溶解した窒素肥料の一部が、還元される用水に含まれて貯水池に流入するからであろう。

考 察

淡水湖造成後の塩分変動を左右する要素として次の事項が考えられる。

- (1) 淡水流入量と貯水容量
- (2) 混合作用
- (3) 塩分の侵入
- (4) その他

淡水流入量は河川流入量と淡水湖への直接降水量の和から使用水量(取水)及び水面蒸発量を差し引いたものである。貯水容量は時期的に変動するが、近似的な解析の際には年間平均水位に対する貯水容量が用いられる。淡水湖造成直後の塩分変動は主として淡水流入量と貯水容量の比によって左右され、淡水湖の平均塩分濃度が低下するにつれて(2)以下の各事項が塩分変動に大きな影響

を与えるようになる。造成後約半年から1年経過すると、淡水湖の塩分の鉛直分布は上層に淡水、下層に塩水といった二層流の形をとるようになり、その躍層の位置は排水関係の構造により異なってくる。例えば三池干拓貯水池においては、躍層の位置は除塩サイフォンの呑口の高さ(G.H.=−4.0m)にほぼ等しい。

二層流が形成されてくると淡塩二層の混合作用が重要な問題点となってくる。上下両層の混合が進むと淡水湖からの塩分の排出はスムーズに行われることになる。奥田³⁾は岡山県の児島湖での実測によって淡水湖内の混合拡散係数はきわめて異方性が強く、鉛直方向には $10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}$ 、水平方向には $10^3 \text{cm}^2/\text{s}$ 程度であるとしている。三池干拓貯水池における実測においても、水平的な塩分分布はほぼ同様であったので、淡水湖内の水平方向の混合拡散係数は鉛直方向のそれに比較して非常に大きいことがわかった。

また次に問題となるのが塩分の淡水湖への侵入で、締切堤防からの海水の浸透、樺門及び舟通しからの海水の侵入、淡水湖底からの塩分の放出などが考えられる。これらの塩分侵入は明らかに淡水湖における淡塩水交換の支障となるが、造成直後は平均塩分濃度も高く、少量の塩分侵入の影響は相対的に無視し得る。しかし十分時間が経過して平均塩分濃度が平衡状態に達した時点では、

少量の塩分侵入も最終的な塩分濃度の決定に大きな役割を演ずるから、長期の利水計画に際しては塩分侵入量の算定も重要な問題となってくる。

その他の要素としては気象条件、淡水湖内外の水位条件、淡水湖の形状などが考えられる。なかでも三池干拓貯水池での実測からも明らかのように、風の影響が非常に大きいことがわかる。

淡水湖内における乱れエネルギーは主として風による湖面の接線応力を通じて獲得されている。Munk⁹⁾が計算した結果によると、接線応力 τ と高さ10 mの風速 W_{10} (cm/s)との間には次式が成立する。

湖面が滑らかならば

$$\tau = 0.8 \times 10^{-3} \cdot \rho_a \cdot W_{10}^2 \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

湖面が粗ならば

$$\tau = 2.6 \times 10^{-3} \cdot \rho_a \cdot W_{10}^2 \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

ここに ρ_a は空気の密度で、 $\rho_a = 1.25 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ となる。多くの観測や理論の結果によると、湖面の粗滑の臨界値として $W_{10} = 5 \sim 6 \text{ m/s}$ 程度と考えられている。

和田⁵⁾は吹送流による水面上昇量及びそれに伴う躍層面の低下量を求める式を次のように与えている。

$$\xi = -\frac{\Delta\rho \cdot h_1}{\rho_2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho \cdot h_1}{\rho_2}\right)^2 + \frac{2\tau \cdot \Delta\rho \cdot x}{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot g}} \dots \dots \dots \textcircled{11}$$

ξ : 吹送流による水面上昇量

h_1 : 上層の水深

ρ_1 : 上層の密度

ρ_2 : 下層の密度

$\Delta\rho$: 上下層の密度差

τ : 風による接線応力

g : 重力加速度

x : 風の流れ方向に測った淡水湖始点からの距離

$$\Delta h = \frac{\rho_1}{\Delta\rho} \cdot \xi \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

Δh : 躍層の低下量

⑩, ⑪, ⑫式より前掲の第5図に示される台風19号来襲時における三池干拓貯水池における ξ と Δh を求めてみる。第1図に示されているように、三池干拓貯水池の長辺方向はほぼ南北に近い。第5図で貯水池の長辺方向に近くかつ継続時間の長いものとして、NNEの風向で風速約10 m/sをとる。⑩式より τ を求めると $\tau = 3.25 \text{ dyne/cm}^2$ 。

次に⑪式において、 $h_1 = 4.0 \text{ m}$ 、 $\rho_1 = 1.0005$ 、 $\rho_2 = 1.0040$ 、 $x = 1500 \text{ m}$ として ξ を求めると、 $\xi = 0.99 \text{ cm}$ となる。また⑫式より Δh を求めると、 $\Delta h = 2.83 \text{ m}$ となり非常に躍層の低下量が大きくなる。貯水池の風下側では水面が吹き寄せで約1 cm程度上昇し、躍層水深の低下量が下層水深(約2 m)を超過しているの、躍層はなくなっている。貯水池中央部($x = 750 \text{ m}$)において ξ 、 Δh を求めると、 $\xi = 0.52 \text{ cm}$ 、 $\Delta h = 1.49 \text{ m}$ となり、上層水深約5.5 m、下層水深約0.5 mと変化している。貯水池の風上側($x = 0 \text{ m}$)では ξ 、 Δh ともに0であるから、躍層面が貯水池の長辺方向に大きく傾斜していることになる。

総 括

ここでは三池干拓貯水池での水質の測定データをもとに、淡水湖における塩分拡散について考察を行った。結果を要約すると次のようになる。

- (1) 淡水化過程は淡塩水交換期と塩分変動期の二つに分けられる。
- (2) 淡水湖における混合拡散係数は異方性が強く、水平方向のそれが鉛直方向に対して非常に大きい。
- (3) 塩分侵入量の算定も長期利水に対しては不可欠である。
- (4) 平均塩分濃度が平衡状態に達したら、限界風速以上の風による混合が大である。
- (5) 吹送流による躍層の低下が非常に大きい。

謝 辞

本研究を行うにあたり終始御指導いただいた佐賀大学農学部教授戸原義男博士に深く感謝の意を表す。また現地測定にあたり多大の援助を受けた九州農政局長崎南部地域総合開発調査事務所の関係各位に厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 渡辺潔・長谷川絏一:佐賀大学農学集報, **32** 97~106 (1972)
- 2) 岸 力・加藤正進:第14回海岸工学講演集, 240~245 (1967)
- 3) 奥田節男:京大防災研究所年報, **8** 526~529 (1965)
- 4) Munk, W.H.: *J. Mar. Res.*, **6** 203~218 (1947)
- 5) 和田明:第12回海岸工学講演集, 137~143 (1965)