

宍道湖における塩分濃度と関連水文量の時系列分析(I)

——月別資料にみる変動・相関の概要——

竹山 光一* 田中礼次郎* 近重 文男*

Time Series Analysis of the Salinity of Shinjiko Lake
and Related Hydrological Observations (I)
Abstracts of the Variations and Correlations
by Monthly Observations

Kouichi TAKEYAMA, Reijirou TANAKA and Fumio CHIKASIGE

ま え が き

宍道湖の水は長い間かんがい用水として利用されていたが、大正13年に大橋川がしゅんせつされたため、中海より海水が逆流するようになり、昭和12年頃よりこの塩分のために上記のかんがい利用ができなくなった。さらに昭和14年にこの地方は大旱拔と塩害を経験し、この頃より宍道湖淡水化の要望が高まってきた。以来約半世紀、宍道湖・中海淡水化事業は、国内外の状況の変遷と共に、干拓地の面積を縮小し、作物も米作より他の農作物に転換を求められ、これに伴って淡水化後の目標塩分濃度もこれに対応しうるまでに下げることが要求された。この水は5地区の2,500haの新しく干拓、埋立によって造成された農地と沿岸の既耕地73,00haへ供給される計画である。

干拓事業着手以前の中海の湖水面積は97km²で大根島と江島を含み、平均水深は5.4m、最大水深8.4m、貯水容量5.2億m³、塩素イオン（以下塩分）濃度は12000PPM前後の汽水湖であるが、淡水化後は湖水面積66km²、最大水深16m、貯水容量3.8億m³、塩分濃度200PPMとする計画である。

宍道湖は湖面積81km²、平均水深4.5m、最大水深6.4m、貯水容量3.7億m³で、大橋川・佐陀川より塩分が逆流し2000PPMの塩分濃度をもつ汽水湖であるが、淡水化後は中海同様200PPMになる計画である。淡水は年間約25億m³流入するものであり、このうち8千万m³が農業用水として利用される計画である。この計画の下で、これまで大根島の西部を流れていた、中海への最大の淡水流入源である斐伊川からの淡水は、中海湖心

を通るようになり、栄養塩類の多い密度流は湖底の勾配と中浦水門から米子港への航路のために掘られた溝に沿って、水門の直上流側にある最深部にたまり、底層排水機能によって速やかに境水道へ排除する計画である。

現在の宍道湖は大橋川からの塩分の逆流と、斐伊川からの淡水の供給を受け、強風の下では底泥の巻き上げによって、無風時と大きく異った濁度と色を呈している。

本研究は水門操作が行なわれていない時点での宍道湖塩素イオン濃度を中心に、これに関連する降水量、河川流量、潮汐などの月単位のデータの時系列特性、変量間の相関の概要について調べたものである。

観 測 資 料

宍道湖の流域面積は約1,308km²、そのうち斐伊川の流域面積は約915km²である。図1の鳥上、馬木、阿井、吉田等が雨量観測点であり、大津が河川水位観測点

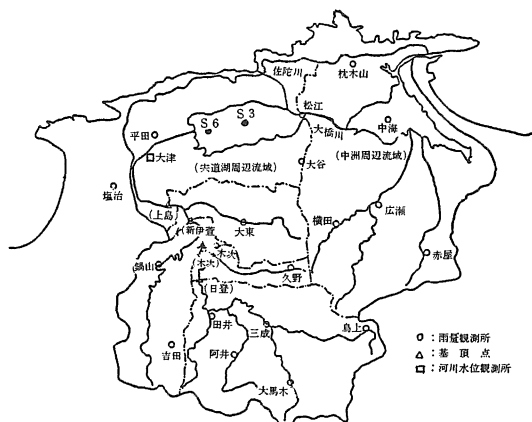


図1 観測点の概要

* 農業水利工学研究室

である。

中海の流域面積は約 742km² であり、宍道湖を加えた総流域面積約 2,050km² の河川流入量の平年値 25億m³ は昭和32年のものであり、これは日平均約 600万m³、毎秒約 70m³/sec となる。これに相当する斐伊川大津地点での流量は約 45m³/sec である。これらの雨量、流量は建設省の「日雨量、日流量年表」よりの値を採用した。建設省の斐伊川計画洪水量は 3,600m³/sec 大橋川では 1,300m³/sec であり農水省もこれを採用している。

宍道湖の塩分濃度および水深は、島根県の「公共用水域水質測定結果報告書」より宍道湖の“斐伊川河口地先”の S6 と湖心付近の S3 地点における水深 1m の上層(添字H)と 4m の下層(添字L)を採用した。日本海潮位は松江气象台発行の「島根県気象月報」より採用した。

時系列特性、相関特性の概要を知るため、月単位の時系列として解析を進めるとき、月雨量や月平均流量や潮位は日単位の総和または平均として処理されているが、塩分濃度は月に 1～2 度の定点観測値である。2 度の測定値があるものについては月の半ばから後半のものをもって代表値として処理を進めたことをこわしておく。

データ解析の基礎手法

Δt 毎の離散型時系列 $X_t(t=1\sim N)$ の持続性や周期性

表 1 松江の降水量 昭和16年1月～35年12月、松江地方気象台

月別 種別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計又は 平均	備考
平均降水量 (mm)	170.5	161.6	129.5	115.9	132.1	189.2	219.2	149.8	268.6	166.1	124.7	153.1	1980.3	
平均降水 日数(日)	20	18	14	11	10	11	12	8	14	11	13	19	161	日雨量 1mm以上

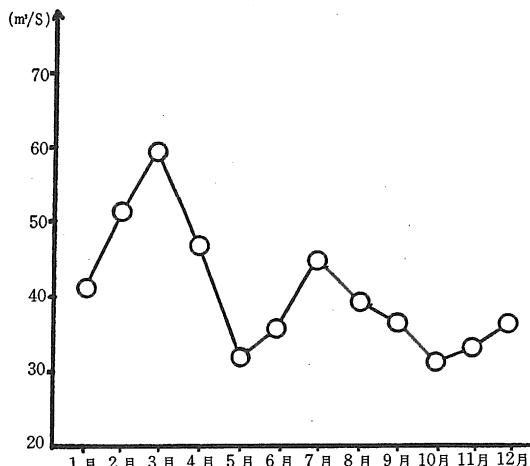


図 2 S.47～S.56年の斐伊川(大津)における、日平均流量データの月毎の平均値

は、傾向変動成分を除いた定常過程のものとは、(1)の自己相関係数やこれを(2)で COSINE 変換し、(3)のウィンドをかけたスペクトルによって確かめることができる。

$$R_k = \frac{\sum_{t=1}^t (X_t - \bar{X}_t)(X_{t+k} - \bar{X}_{t+k})}{\sqrt{\sum_{t=1}^t (X_t - \bar{X}_t)^2 \sum_{t=1}^t (X_{t+k} - \bar{X}_{t+k})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_j = \{R_0 + 2 \sum_{k=1}^{m-1} R_k \cos \frac{jk\pi}{m} + R_m \cos j\pi\} \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

$$S_0 = 0.5(V_0 + V_1)$$

$$S_j = 0.23V_{j-1} + 0.54V_j + 0.23V_{j+1}, (j=1\sim m-1)$$

$$S_m = 0.5(V_{m-1} + V_m) \dots\dots\dots (3)$$

また水文時系列 X_t と $Y_{t+\tau}$ の相関係数は、(4)で表わされる。

$$\gamma_\tau = \frac{\sum_{t=1}^t (X_t - \bar{X}_t)(Y_{t+\tau} - \bar{Y}_{t+\tau})}{\sqrt{\sum_{t=1}^t (X_t - \bar{X}_t)^2 \sum_{t=1}^t (Y_{t+\tau} - \bar{Y}_{t+\tau})^2}} \dots\dots\dots (4)$$

ここでは季別などの分類の下での変動やヒストグラム、非超過確率を調べ、時系列 X_t 自身の特性と他の時系列 Y_t との相関および Y_t の $t-n$ から t までの累計ととの相関を分析した。

宍道湖周辺の降水量、河川流量の特性

昭和20年から昭和55年までの松江地方気象台における

表 2 流量と雨量の相関 昭和41年～56年

	阿 井	鳥 上	吉 田	馬 木
斐伊川(大津)流量	0.523	0.611	0.599	0.652
ティーセン分割率 (%)	15.8	16.8	3.3	20.6

年間降水量の平均値は 2,008mm と報告されている。昭和40年から昭和55年の間では昭和47年が最多雨年で 2,604mm、最少は翌48年の 1,141mm であった。同気象台の豪雨記録(昭和16～48年)から日雨量 100mm 以上を含むもの31個を選び、これを生起原因別に梅雨前線性豪雨(5月下旬～7月13個)、台風性豪雨(9月～10月中旬9個)その他の前線性豪雨に3分類し、それぞれの豪雨を構成する特性値として、断続時間、総雨量最大時

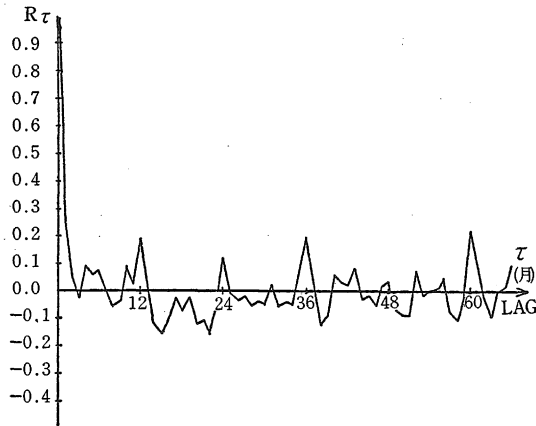


図3 斐伊川流量（大津）自己相関

間雨量などについて主成分分析を行うと、これらの3者にはかなりの相違があり、一連の豪雨継続時間中の無降雨時間は、台風性豪雨では変化が大きく梅雨性、前線性では小さい。台風性では 30mm 以上の時間雨量強度のものがなく、5~10mm の範囲が最も多いのに対し、梅雨性豪雨では 20~30mm の範囲のものが多くなど、豪雨によって異なった構造があるが、月別の平均では表1の例にあるように、9月、7月、6月、1月、2月には雨が多く、これらが斐伊川流出システムに入力され大津地点での流量となって出力される。

昭和41年から56年までの雨量観測点と大津地点の流量との相関およびティーン分割率の一例は表2である。このときの5%有意水準は0.2弱であるため、十分その相関があるといえる。この時間の大津地点での日流量の

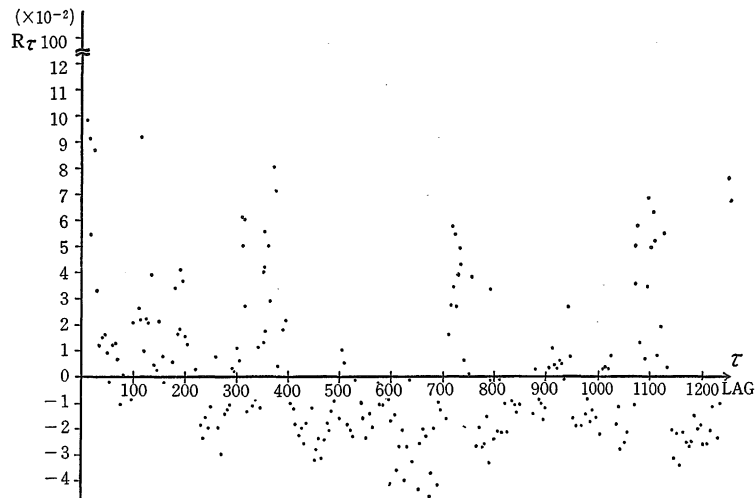


図4 斐伊川流量（大津、日平均）の自己相関[S.41.~S.56.N=5800]

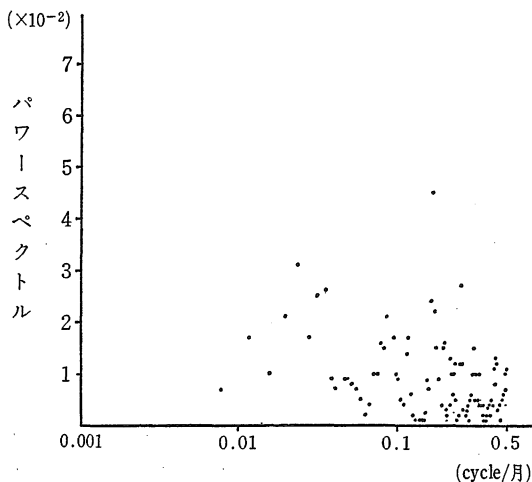
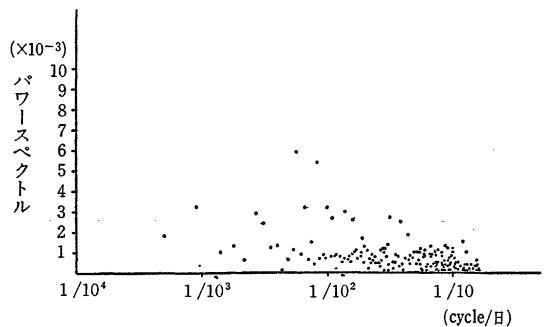


図5 斐伊川流量の月単位のスเปクトル

図6 斐伊川流量の日単位のスเปクトル
S.41~S.56年の斐伊川における
日平均流量データ使用

月別平均値は図2であるが、この自己相関係数は図3、4となり、スペクトルは図5、6となった。これらによ

りここでの流量の時系列は年周期のみが卓越する型のものではなく、マルコフ型の持続性と3～6ヶ月の周期成分の影響が大きい。

なおここでは3月の平均流量が最大となったが、昭和32年から44年の13年間の平均では、最大は7月の62m³/sec, 2位は3月の48m³/secであった。

宍道湖塩分濃度と関連水文学量との相関

昭和47年から56年までのS3, S6 両観測点での上層(H)と下層(L)における平均塩分濃度は表3のとおりでS3Lを除き2000PPM以下である。またS6はS3よりかなり濃度は低く、かつ両点とも上層の方が下層よりも濃度が低い。時系列として欠測のなかった昭和48年5月より56年12月までの92ヶ月間のS3Hの自己相関係数は図7となり、 $t=24, 36$ で有意な値が得られないこ

表3 宍道湖の平均塩分濃度 (S.47～S.56)

	宍道湖 C 1' 測定点			
	S 3 H	S 3 L	S 6 H	S 6 L
平均 M	1973.8	2338.9	1387.3	1577.2
標準偏差 S D	1299.1	1736.5	936.9	989.8
S D / M	0.658	0.742	0.675	0.628

(M, SDの単位はPPM)

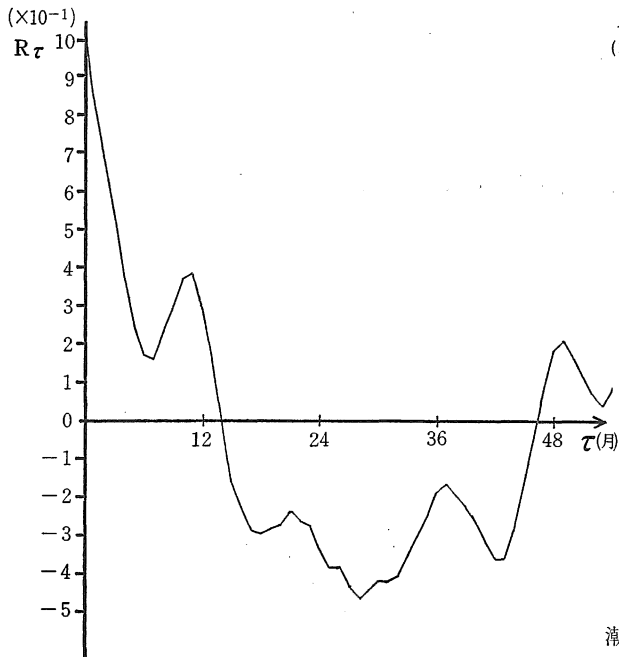


図7 宍道湖中央部上層における月平均塩分濃度の自己相関係数 (昭和48年5月～56年12月)

とより、これは年周期の成分が大きいとはいえず、マルコフ型の持続性の存在が強くみられる複雑な時系列である。

宍道湖の塩分濃度に大きな影響を与える潮位の特徴は、潮差が約0.2mと小さく、月平均潮位の年格差が約0.4mと大きいこと、美保湾や境水道に顕著な副振動が発生していることである。また潮汐による水位変動は通常1日2回潮であるが1日1回潮がしばしば起っている。

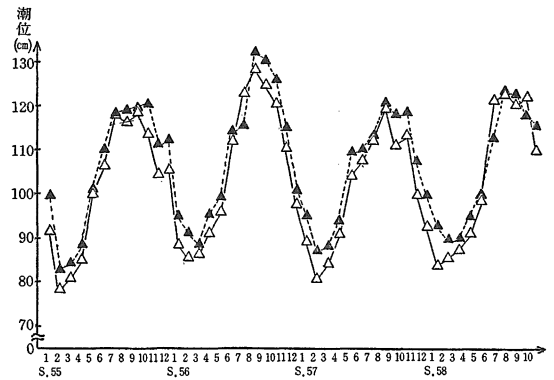


図8 島根県の日本海月平均潮位の変動例
▲西郷, △浜田 (TP東京湾平均海面, 浜田89.1, 西郷119.9)

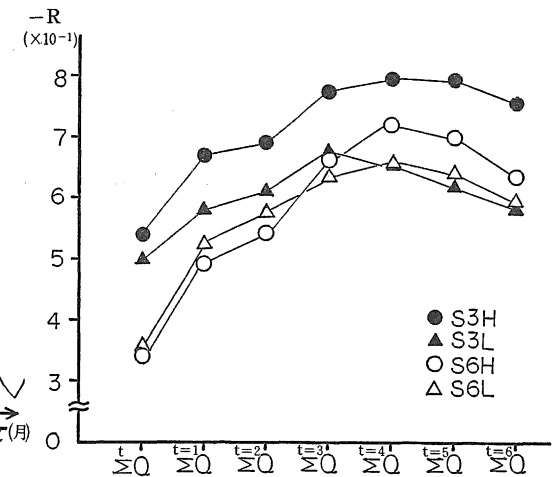


図9 月平均流量の総和と塩分濃度の相関 (昭和48～56年)

宍道湖・中海および日本海潮位の相互関係は、月平均潮位で8月頃が最高で、2月頃が最低であり、年平均潮位では美保湾→境水道→中海→宍道湖に向って約3cm, 3cm, 9cm高くなっている。

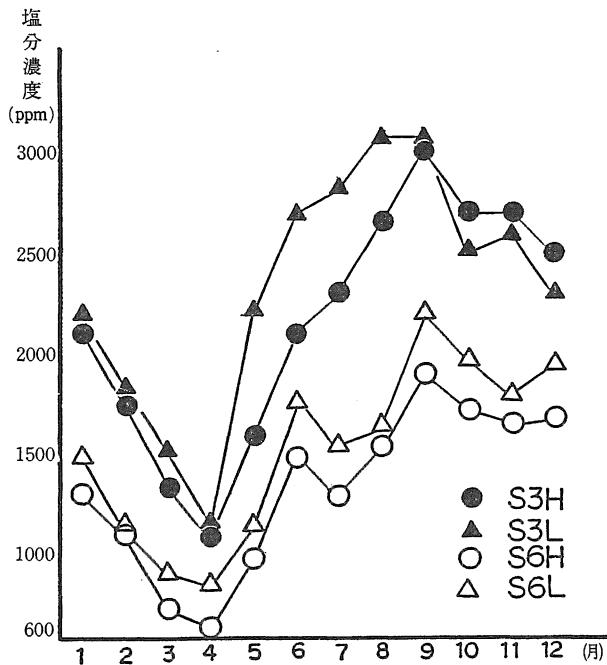


図10 宍道湖における月平均塩分濃度（昭和47～56年）

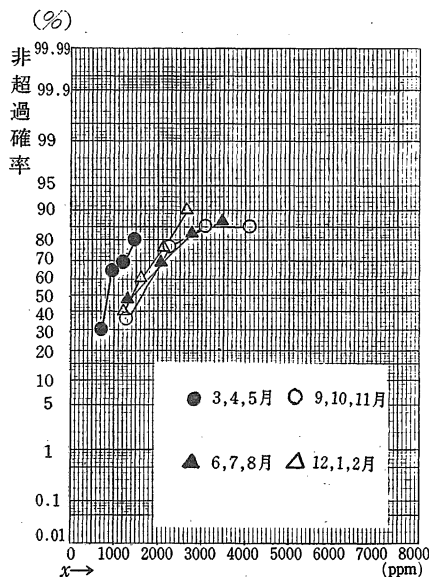


図12 S 6 点下層塩分濃度非超過確率

宍道湖・中海の洪水による水位上昇の影響を受けない日本海（浜田，西郷）の月平均潮位は図8で夏と冬の年格差の大きいことを示している。

ここで前述した月平均降水量や月平均流量の特性を考慮し，塩分濃度時系列 Cl_t を X_t にとり， Y_t として k ケ月前からの月平均流量の累計値 $\sum_{i=0}^k Q_{t-i}$ をとって相

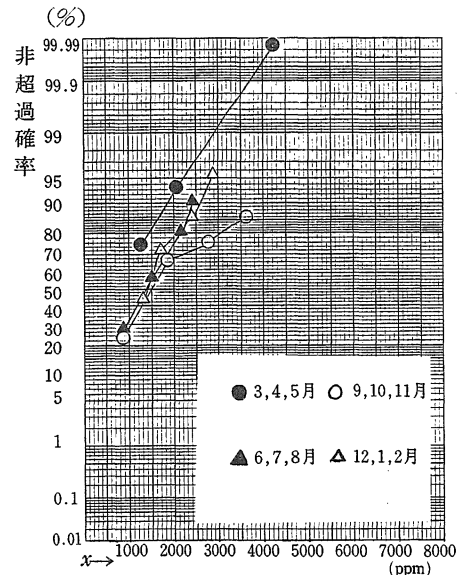


図11 S 6 点上層塩分濃度非超過確率

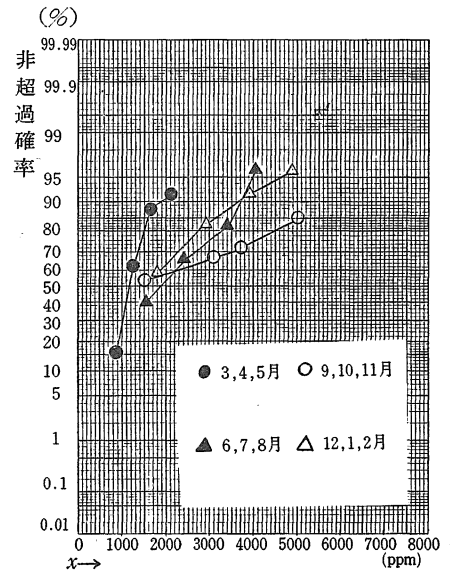


図13 S 3 点上層塩分濃度非超過確率

関を調べると図9となり，斐伊川河口先（S6）より宍道湖心付近の方が負の相関が大きく，3～4ケ月以前からの累計流量との負の相関が大きいこと，S3 ではこれと Cl_t との相関値は，上層と下層の差が大きいことが宍道湖の特徴である。従って図10のような月平均塩分濃度を示す宍道湖は，冬場の河川流量が多いときこれと潮位の低下に伴って3～4月頃の塩分濃度をS6，S3に低下させ，S6では上層，下層共に1000PPM以下である。その後4月以降の平均潮位の上昇に伴って塩分濃度は高くなり，6～7月の流量増によってS6では濃度が低下す

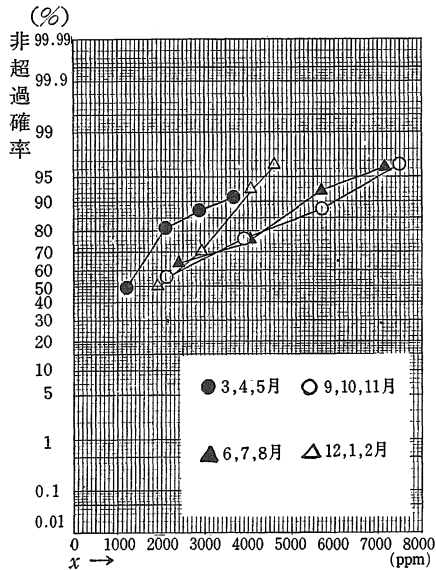


図14 S3下層塩分濃度非超過確率

るが、S3 では上層と下層の濃度差が増大し、9月頃にS3, S6とも濃度のピークを生じ、この時S3では上層と下層の濃度差がきわめて小さい。その後潮位の下降によって濃度は低下するが、10月11月の流量の減少によってS6ではその後やや増大している。

塩分濃度の生起確率と水資源としての利用性

淡水化によって実現しようとする塩分濃度は当初は米作のための500~1000PPMであったが、その後かんがい用水としての使用は畑作に転換し、200PPM以下となり、この上水や工業用水の基準にも適合する濃度を目標とするようになった。

現況の、これまでのS6, S3の上下層における観測された塩分濃度を季節毎に分類し、累積度数を求め、この比率を正規確率紙上にプロットして、塩分濃度の非超過確立を調べ、図11~14を得た。これによるとS6では春期には60~70%の確立で1000PPMがみられるものの、夏期では数年に一度しか1000PPM以内がみられないこと。逆に稲が枯死するといわれる3000PPM以上の塩分がS6Hでも秋期に約20%生じていることがわかる。

表4 異常気象、下の塩分濃度例 (昭和48年)
(ppm)

観測点	7月	8月	9月
S3H	3510	4890	5530
S3L	5565	8980	9390

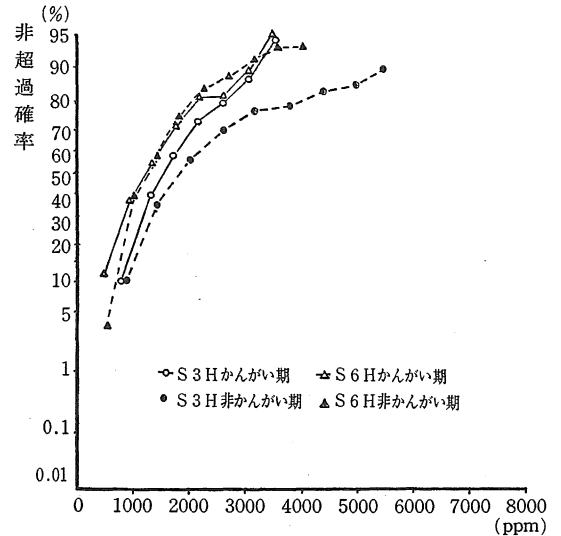


図15 宍道湖上層、かんがい期(4.5.6.7.8月)、
非かんがい期の塩分濃度非超過確率

ここで1年をかんがい期(4月~8月)と非かんがい期に2分して同様の処理を行った結果図15を得た。これによると1000PPM以内のなるのは宍道湖中央上層でも10%、斐伊川河口先でも40%と概算される。

本報告で取り扱った資料には、昭和47年の豪雨と翌48年の大かんばつが含まれている。47年の7月には松江気象台の降水量は600mmであったが翌年はわずか12mmであり、7月下旬には宍道湖中央部で表4のように例年の2.7倍といわれる塩分濃度を記録した。昭和16年から35年までの連続干天日数(日雨量0.1mm以下)は1位39日、2位23日、3位21日いずれも夏期であるが、48年の松江市では降水量が10mmを超したのは6月29日以来57日ぶりと報じられた。

あ と が き

宍道湖の水は今日大きな注目を集めている。松江市は遠く山佐ダムからも給水し、その水道料金は全国で一番高いクラスといわれ、昭和67年にはこの給水も需要を満たされないと予測が報じられている。一方宍道湖の水は約40年余前までには淡水としてかんがい用に利用されていたこと、大橋川の浚渫によって塩害が発生すると共に汽水湖としての魚が定着した。

本報告はデータの精度や処理方法に問題を残しつつも水門操作前の宍道湖塩分濃度とこれに関連する水文諸量との相関を分析し、計量化を試みたものである。今後このような資料がより詳細に観測、整理され、これによる湖の水利水質システムの解析によって水資源の長期的有

効利用を確立してほしい。

おわりに本研究をすすめるにあたりデータ収集に本学農学部伊達善夫教授、松井桂久教授、教育学部秋山優教授および農林水産省中海干拓事務所より資料の提供など多大な御助力を得た。記して深謝の意を表する。

本研究のすすめるにあたり島根大学電子計算センターの M140F および京都大学大型計算機センターの M200, M380 を使用した。

また本報告は文部省科学研究費による研究成果の一部であることを付記し、あわせて謝意を表する。

引用文献・資料

- 1) 中国 四国 農政局：“中海地区全体実施設計書”，1966.
- 2) 農業土木学会中海水管理研究委員会水質研究小委員会：中海 淡水湖化に伴う 環境諸要素の変化特性，1979.
- 2) 川上誠一，穴道湖の水質と汚濁物質の流入負荷，水圏の環境動態における諸問題，日本農芸化学会西日本支部，1981.
- 4) 島根大学地域分析研究会編 飢宇の入海 1982.
- 5) 島根県：公共用水域水質 測定結果 報告書 1972～1981.
- 6) 建設省：日流量年表 1966～1981.
- 7) 建設省：日雨量年表 1966～1981.
- 8) 磯部 孝編：相関係数とスペクトル，東大 出版会 1968.
- 9) 農業土木学会穴道湖中海淡水化に伴う水管理及び生態変化に関する研究委員会：穴道湖中海淡水湖化に関連する水理水質及び生態の挙動について，1983.
- 10) 田中礼次郎，竹山光一：松江地方の豪雨特性について，島根大学農学部研究報告8，pp.72～75 1974.
- 11) 島根県気象月報，松江気象台，1980～1983.

Summary

This paper investigated the characteristics of time series of the salinity (chlorine ion) at Shinjiko Lake, which is under construction of refreshing water, for the surrounding area has been caused many drought damage by the intrusion of saltywater from Nakauni Lake since 1922.

This refreshing water was planned to use for newly reclaimed land and the existing farmland.

The salinity has been measured once or twice by month since 1972 to 1981, and their variations and correlations with related hydrological observations such as rain, streamflow and sea level were examined. Moreover the probability of nonexceedance of the salinity for paddy field was examined.

Correlogram and spectrum of streamflow showed the periodicity of 3～6 months than that of 1 year, and the effect of markov chain. The salinity had little periodicity, while the variation as markov chain was shown.

The most effectual factor to the salinity is the sea level of Japan Sea, which rises up in Summer (this season has many dearth of water), and falls down in winter (this season has much water with much snow). And from winter to summer, the salinity decreased, on the contrary from spring to fall it mostly increased, for the annual tidal range of mean monthly level is 0.4 meters but tidal range in a day is only 0.2 meters in this area.

The probability of nonexceedance of the salinity showed that the water could not be used even for rice paddy field in this condition. Because this sample even at the upper lawyer (1 meter depth) and near the entrance of Hi River showed that the probability of that use was about 20% in irrigation period.