

(14) 湖沼の比較研究とその湖沼水管理への応用

LAKE COMPARATIVE STUDY AND ITS APPLICATION TO THE MANAGEMENT OF THE DRAINAGE BASIN

福島武彦*、原沢英夫*

Takehiko FUKUSHIMA*, Hideo HARASAWA*

ABSTRACT; To propose the software and hardware systems for promoting environmentally sound management of lake and its drainage basin, the first step was made to pointing out the similarities and differences among the four East-Asian lakes; L. Kasumigaura (Japan), L. Laguna (Philippines), L. Songkhla (Thailand), and L. Dianchi (China). They are seriously expected to play a central part in the supply of water resources, but now confronted with the shortage of water quantity and the deterioration in water quality. Some comparisons from the many different kinds of viewpoints for example topographical, meteorological, socio-economic environments, characteristics of ecosystems, etc. indicated the vulnerability of water resources in the lakes of such type. A simple calculation with the aid of the notion of human carrying capacity also suggested that larger forest area would be necessary in the catchment area for satisfying the demand for drinking water and that for maintaining the good condition of lake water quality.

KEYWORDS; Management of lake watershed, Comparative limnology, Water resources, Carrying capacity

1. はじめに

比較社会学、比較言語学、比較生理学など、'比較'が'学'の手法として用いられているのは、(1)実験系での検証が不可能なことを対象としている、(2)膨大な要因が関連しているものの系のサンプル数が少なく統計解析手法を適用できない、(3)系の変化してゆく方向に重点が置かれる、などが理由と考えられる。最近まとめられた比較河川学では、研究地域の拡大と研究の総合化、統合化が基本方針とされている(岸 1987)。本報告でも湖沼学に比較手法の適用を試みたが、ここでの比較湖沼の目標は、(1)湖沼のみならず流域を含めての比較、(2)自然環境の他に社会環境の比較、(3)管理の立場

から湖沼に生じる問題点の整理とその有効な解決案の提案につながるもので、詳細な流域・湖沼モデル作成の前段階にあってその方針・大まかな構造を与えるもの、(4)各種指標の整理、(5)比較がdescriptiveでなくanalytical、などである。ここでは湖沼、流域の環境、管理をFig. 1のような視点で見ている。対象としたのは日本のL.Kasumigaura、フィリピン人のL.Laguna、タイのL.Songkhla、中国雲南省のL.Dianchiであり、共に最近、地域の水資源の核として注

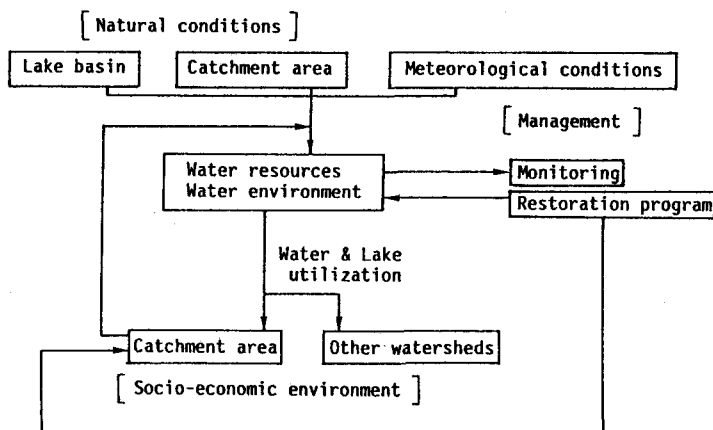


Fig. 1 A Schematic view of the comparing procedure.

*国立公害研究所 The National Institute for Environmental Studies

目され、同時に汚濁、汚染の問題が表面化している湖である。

2. 自然環境

湖沼、流域の起源、諸元、地形に係わる指標をTable 1 にまとめる。これ以外の情報も含めて4湖沼の地形、地質、土壌、植生などの特徴を整理すると以下のようなものである (Hutchinson 1975, 中野 1976)。

(1)流域面積と湖面積の和は各国の面積の約1%であり (L.Dianchiは雲南省に対して)、最大のあるいは二番目に大きい湖である。

(2)平均水深は5 m以下と浅い。Table 3に後述するように鉛直混合しやすい (Holomictic)。

(3)L.Dianchiを除き湖面標高が低く、水門がない場合海水の侵入がある。海岸沿いでは地下水に海水が侵入している所もある (Depth of cryptodepressionが正)。

(4)relative depthは0.1%以下と湖盆が平らなことを示す。shoreline developmentは2以上で形が複雑なことを表し、littoral系の相対的重要性と水域間の混合のしにくさを示す。理科年表から、日本では10km²以上、世界では4000km²以上の湖沼についてこの二つの指標を計算してその頻度分布を書く Fig. 2のようになる。広い湖ではrelative depthが小さく、shoreline developmentが大きいことがわかる。また、development of volume はL. Songkhlaを除き1以上で、これらの湖沼と同一の体積、最大水深を持つ円錐と比べ尖っていない。

(5)流入河川図から本流長 (湖に流入している河川それぞれについて最長の長さの和)、本支流合計長を測定し、河川流域の平均幅、河川密度、形状係数を算定した。L.Songkhlaは流域面積が広く、地図に全河川が載っていない恐れもあるが、他の湖沼流域と比べ流域幅は広く、地表流出の割合が少ないことを示している。日本の大中河川の平均は10-30kmが標準と言われているので (金子 1973)、比較的小河川が多いといえる。形状係数は小さく、最大流量は小さいが、洪水継続時間は長い傾向にある。

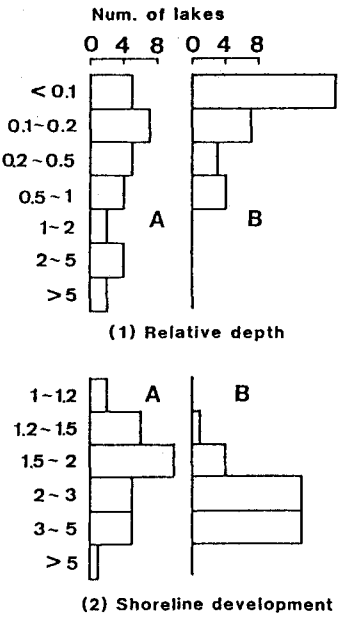


Fig. 2 Frequency distributions of two morphometric parameters on lake basin. A; Japanese lakes larger than 10km², B; world lakes larger than 4000km².

Table 1 Lake origin and morphology

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi ¹
Origin	Lagoon	Lagoon	Lagoon	Tectonic
Surface area (km ²)	220 ²	891 ³	1,082 ^{4,5}	307
Catchment area excluding lake (km ²)	1,949	2,920 ³	6,938 ⁴	2,627
Mean depth (m)	4	2.8	1.53	4.4
Maximum depth (m)	7	7.3	>6	10.9
Volume (10 ⁶ m ³)	848	3,200	1,600	1,200
Length of shoreline (km)	252	200		163.2
Total length of the main streams (km)	317	366	470	310
Total length of all streams (km)	471	608	844	472
Altitude of the lake (m)	0.16	1.8	0	1,886
Maximum difference in altitude in the watershed (m)	875	2,163	1,300	934
Relative depth (%)	0.047	0.022	0.028	0.055
Shoreline development	3.0 ⁶	2.1	2.7 ⁷	2.6
Development of volume	1.7	1.2	0.77	1.2
Area of watershed/lake surface area	8.9	3.3	6.4	8.6
Mean basin width (km)	6.0	8.0	14.8	8.5
River density (km ⁻¹)	0.25	0.21	0.12	0.18
Basin shape factor	0.019	0.021	0.031	0.027

*1; Liu 1988, *2; Nishiura basin 171km², Kitaura basin 34km², *3; Pacardo et al. 1988, *4; Setamanit 1987, *5; Thale Sap Songkhla 176km², Thale Sap 365km², Thale Luang 418km², Thale Noi 28km², *6; Nishiura, *7; Thale Sap, no annotation; LEC' S 84

(6)L.KasumigauraとL.Songkhlaでは平坦な、L.Lagunaではゆるやかな起伏、L.Dianchiでは丘陵性の地形が卓越している。また、L.Kasumigauraでは火山灰土壌（畑地に適）、沖積低地土壌（水田に適）、L.Lagunaは肥沃な粘土ローム、L.Songkhlaは貧栄養の硫酸酸性土、L.Dianchiはラテライト土壌が特徴である。L.Songkhla, L.Lagunaには熱帯雨林、L.Dianchiには常緑広葉樹、雲南松、L.Kasumigauraでは落葉広葉樹、松林が多い。

次に、Table 2には気象条件を整理して示す。気温、降水量とも30年間の月間値データを用いた（地点名はFig. 4）。また、Fig. 3(1),(2)には降水量、流出高の季節変化、Fig. 4には年降水量を正規確率紙にHazen plotしたもの、Fig. 5には横軸に全平均月流出量の $k(\%)$ 値（ k %月平均化流量）、縦軸にそれを安定して得るのに必要な貯水池容量（月流出量の何倍であるかを月数で示す）の関係を示す（植原 1987）。なお、Fig. 5では長期の流出量データはないので、流出率が時間遅れなく1であるとして降水量から求めた。すなわち、降水の特性を表現するグラフである（科技庁資源調査会 1965）。これらの結果をまとめると次のようになる。

(1)L.Laguna, L.Songkhlaは熱帯モンスーン型、L.Kasumigaura, L.Dianchiは温帯型気候といえる。前者では年最低の月平均気温が 25°C 以上であり、また降水量の地点差、季節差が激しい（Manila, Songkhlaはそれぞれの流域の平均的な降水量を有する）。また、L.Dianchiでは月平均気温の年較差が 10°C 程度と極めて少ない。

(2)有効積算気温からL.Laguna, L.Songkhla流域では熱帯作物の栽培が可能である。温量指数(warm index)よりL.Kasumigaura, L.Dianchiは北部暖帯にあたりすぎ、シロガシなどが優占樹木となることが予想される。東南アジアの土壌は浸透性が乏しいので、稲作に必要な水量は日本（代かき期； $140\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ を10日、普通期； $25\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ を100日、磯崎他 1986）と比べ少なく済むが（ $1000\sim1200\text{mm}$ 、江崎 1980）、蒸発量を補うため月 150mm 程度は必要である（大矢 1976）。このため、温暖湿潤指標(warm humid index)が小さいL.Dianchiなどでは灌がいの施設

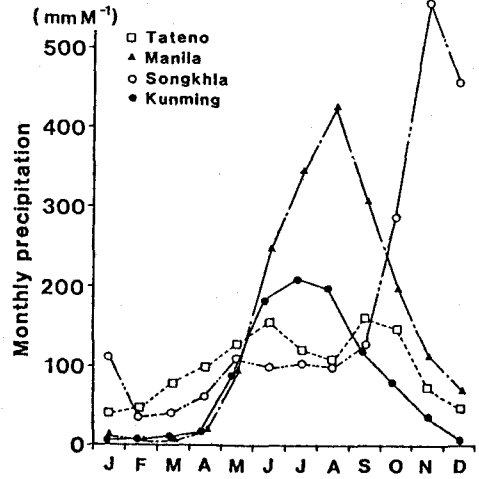


Fig. 3(1) Seasonal change in precipitation

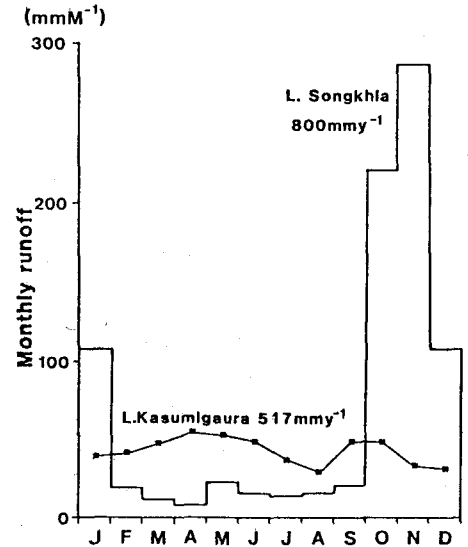


Fig. 3(2) Seasonal change in runoff. L. Kasumigaura; EX(1981), L. Songkhla; SLB Rep. No. 8.

Table 2 Climatic features

	L. Kasumigaura	Laguna L.	Songkhla L.	L. Dianchi
Annual mean temperature ($^{\circ}\text{C}$)	13.3 ± 0.5	27.4 ± 0.4	27.6 ± 0.2	14.7 ± 0.5
Annual precipitation ($\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$)	1240 ± 165	1876 ± 430	2115 ± 422	1008 ± 158
Total of effective temperature ΣT_{eff} (degree-day) ^{*1}	$\sim 4,000$	$\sim 10,000$	$\sim 10,000$	$\sim 5,000$
Warmth index (degree-month) ^{*1}	105	268	272	116
Warm humid index (month) ^{*2}	4	7	9	4
Net primary productivity ^{*1} ($\text{tha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$) due to temperature	17.0	26.2	26.3	18.2
due to precipitation	16.8	21.4	22.6	14.6

*1; Uchijima 1982 *2; Takahashi 1988

が必要となる。また、どの流域も純一次生産量を制限するものとしては気温より降水量であることがわかる。

(3)年降水量はFig. 4から正規分布に極めて近い分布型をもって変化すること、変動係数はL.Laguna, L.Songkhlaで2割近くあり、年変動が極めて大きいことがわかる。すなわち、30年間の最大値と最小値では優に2倍を越える差となる。

(4)Fig. 5からL.Kasumigauraでは80%月平均化流量を得るためにその5カ月分の容量の貯水池で足りることわかり、降水量の季節変化、経年変化が少ない。これに対し、L.LagunaとL.Dianchiでは大きな容量の貯水池が必要となる。

(5)Fig. 3, (2)の流出高の季節変化から、L.Kasumigauraでは降水量の特性と同じくその変化が少ないこと、L.Songkhlaでは雨期である10月-1月以外には極めて少ない流出量(約 0.4mm d^{-1})になっている。

熱帯湖沼、浅い湖沼の特徴を整理したのがTable 3である。

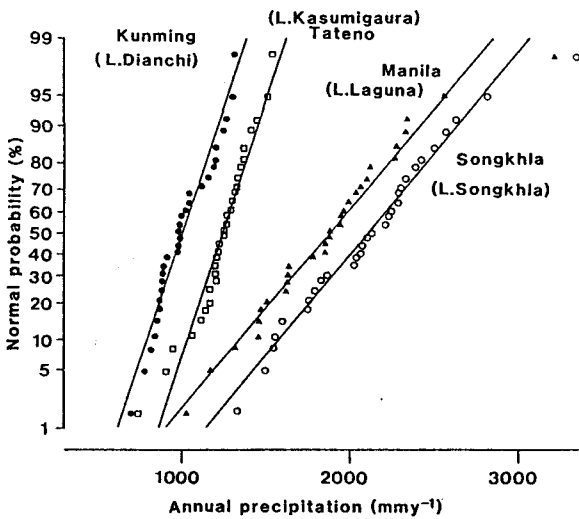


Fig. 4 Normal probability versus the amounts of annual precipitation for 30 years.

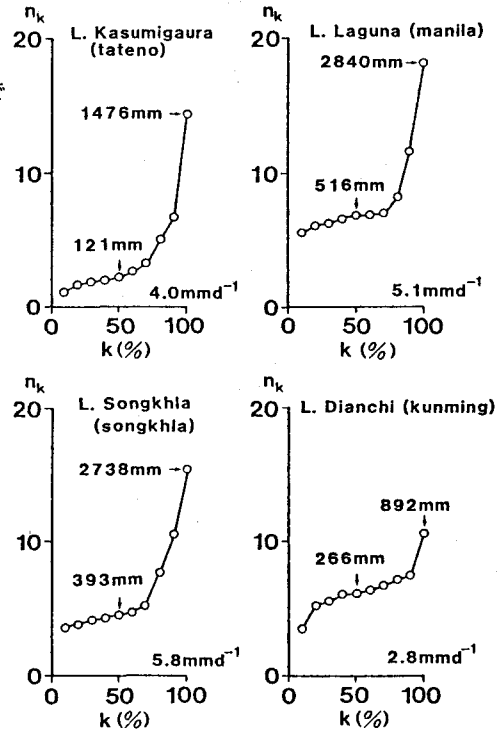


Fig. 5 Relationship between the average discharge ($k(\%)$; the proportion to the average for 30 years) and necessary reservoir capacity (n_k ; the multiple of $k(\%)$ discharge) obtained by the monthly precipitation data.

Table 3 (1) Characteristics of tropical lakes (compared with arctic and temperate lakes)

Physical (Lewis 1973)	* considerably lower differences in maximum density across the thermocline (a few degrees) * small effect of the Coriolis force → * difficulty in the formation of stable thermocline
Chemical (Lewis 1973)	* so efficient in the degradation of organic compounds that they are generally more transparent for a fixed standing crop and hence have a deeper eutrophic zone and thus a higher potential for primary production
Biological (Taub 1984)	* less pronounced seasonal patterns of primary and secondary production * shorter time lags between primary production and its utilization * important role of seasonal precipitation patterns on seasonal biological cycles in spite of the uniformity of temperature
(Burgis & Morris 1987)	* dominant role of the daily pattern of events in regulating the plant and animal communities in comparison with the seasonal variation

Table 3 (2) Characteristics of shallow lakes (Burgis & Morris 1987)

Physical	* never experiences of thermal stratification for more than a few days at a time * high resuspension rate → * turbid water due to silt * frequently return of organic matter and nutrients
	* greater portion of lighted zone and warmer water → * high productivity
Biological	* primarily littoral community → * often abundance in submerged, floating, and emergent macrophytes

水質、生態系の特徴については4. で検討する。また、水収支の話も水利用と関係するので後に記す。

3. 社会経済環境

国民所得、人口増加率、米の収量など国全体として統計のある社会経済項目をTable 4にまとめる。日本と比べフィリピン、タイ、中国は収入、物価で1/10以下で、人口増加の圧力は高いものの生産性が悪いことがわかる。Table 5は流域単位で整理されている社会経済環境の統計量を示すが、国全体の人口増加率を流域単位では上回っていること、L.Songkhlaの流域は他に比べ人口密度も低く、第一次産業比率が高く開発が遅れていることなどがわかる。また、単位面積当りの漁獲量が少ないのは漁獲効率の悪さが影響している。Table 6の流域土地利用比率から、L.Dianchiを除き森林が20%台、農地が50%以上と市街化されていない土地が広いことを示す。L.Dianchiで

Table 4 Economic and social conditions (Natl. Diet Lib. 1988)

	Japan	Philippines	Thailand	China
Per capita national income (US dollars)	8,712	476	579	219
Tap water rates at the capital city (yen/30m ³)	3,600	591	267	174
Population growth rate (%y ⁻¹)	0.6	2.5	2.0	1.2
Infant death rate (per 1000)	6.2	50	12.4	
Expectation of life at birth (y)	77.0	64.6	60.6	55.1
Rice yield (tha ⁻¹)	6	1.7	1.8	3.5
Rate of irrigated farm land (%)	98	45	37	
Fertilizing rates (tkm ⁻² y ⁻¹) N	13		1.3	3.54
P	14		0.69	0.94

Table 5 Watershed socio-economic features

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi ^{*1}
Population (10 ⁴)	85 ^{*2} (1985)	238(1980)	120(1980) ^{*3}	165(1982)
Increase rate (%y ⁻¹)	3.0	5.22 ^{*4}	2.09	2.75
Population density (km ⁻²)	436	815	171	439
Person engaged in primary industry (%)	20.4	9.8	77.0	47.7
Population of the largest city (10 ⁴)	12	10	10	>100
Rice production (ty ⁻¹)	227,000 ^{*5}		500,000 ^{*3}	
Livestock (heads) Cattle	40,000 ^{*5}			
Pig	370,000 ^{*5}	270,000 ^{*6}	158,000 ^{*7}	
Duck		670,000 ^{*6}	200,000 ^{*7}	
Chicken		5,700,000 ^{*6}	3,000,000 ^{*7}	
Fish catch (ty ⁻¹)	11,000 ^{*5}	19,000 ^{*6}	7,000 ^{*9}	
Cultured fishery (ty ⁻¹)	6,600 ^{*5}	63,000 ^{*8}		
Fish productivity (tkm ⁻² y ⁻¹)	80	92	6.5	

*1; Zhang & Liu 1989, *2; Ibaraki Pref. 1987, *3; Setamanit 1987, *4; Pacardo et al. 1988, *5; Maeda 1986, *6; Morioka 1984, *7; SLB Rep. No.10, *8; Lopez & Centeno 1987, *9; Setamanit 1988

Table 6 Watershed land use (%)

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi ^{*1}
Forest	28.6	23.8	22.5	16.5
Herbaceous vegetation		16.2		
Swamp	4.2	0.7	2.2	
Agricultural land	50.8	52.0	73.0	17.1
paddy field	23.2	14.4	35.3	
others	27.6	26.7	37.7	
Settlement	12.7	6.5	2.3	
Others	3.7	0.3		

*1; Liu 1988, Others from LECS'84

は詳細な数値は不明であるが灌木、裸地の割合が高い。次に、Table 7には水田における窒素の収支の概略をL. Kasumigaura, L. Songkhlaに対し示す。窒素の場合、肥料から作物の流れが大きいが（リンでは肥料→土壌への吸着）、施肥量、降水濃度の違いほど流出量の違いはないことがわかる。また、発生源別負荷量割合をTN, TPについてTable 8に示すが、共にどの湖沼とも農地、生活系の比率が高い。主に原単位法から計算された流入水平均濃度と比べ、河川水の実測平均濃度は若干高いものの（流量重み付き平均ではなく単純平均になっていることなどが原因）かなりよく一致している。平均的な生活系の原単位は最下欄に示すようにL. Kasumigauraで高くなっている。流域での排水処理の実態をTable 9にまとめるが、L. Kasumigaura（雑排水の未処理は半数以上）を除いてほとんど処理が行われていないのが実情である。

以上のような統計量に加えて、あるいはまとめて、(1)流域の発展度、(2)流域の自立性、(3)流域内の人口、発生源の分散度などを表現する指標が必要であろう。(1)の例としてはdevelopment function(David 1985)などがあるが、一般化と利用の意義付けが問題である。(2)は隣接する流域、あるいは下流流域との関係性を表現するものであるが、(1)の指標に組み込めれば理想的である。(3)は自然浄化能への期待度の評価、水処理システムの選択に利用したい。今後の重要な課題である。

Table 7 TN budget in paddy field ($\text{tkm}^{-2}\text{y}^{-1}$)

	Input			Output		Export coef.
	rainfall	irrigation	fertilizer	products	outflow	
L. Kasumigaura	0.64^{*1}	1.53^{*1}	14.1^{*1}	11.3^{*1}	1.80^{*1}	2.12^{*6}
L. Songkhla	0.19^{*2}	?	3.5^{*3}	4.5^{*4}	0.71^{*5}	0.9^{*6}

*1; Takamura et al.(1977) May-January, averaged conc. 0.89mg l^{-1} *2; conc. 0.1mg l^{-1} , *3; $27.5-41.3\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$, *4; rice productivity: L. Songkhla $200\text{tkm}^{-2}\text{y}^{-1}$, L. Kasumigaura $502\text{tkm}^{-2}\text{y}^{-1}$, *5; conc. 0.9mg l^{-1} , *6; Export coef. used for the loadings from paddy field

Table 8 Loadings (ty^{-1} and % in the parentheses) and inflow concentrations (mg l^{-1})

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi ^{*1}
Nitrogen	(1981)	(1977)		
Industrial	219 (5.2)	190 (4.8)	485^{*4} (5.9)	
Domestic	1,299 (30.6)	1,400 (35.5)	$1,500^{*4}$ (18.1)	
Agricultural	$2,099^{*6}$ (49.4)	1,904 (48.3)	$6,296^{*5}$ (76.0)	
Natural or others	632 (14.9)	448 (11.4)		
Total	4,249 (100.1)	3,942 (100.0)	8,281 (100.0)	8,785
Inflow conc. ^{*1}	2.10	0.986	1.51	
Observed river conc.	3.27^{*2}	1.11^{*3}	2^{*4}	7.08
Phosphorus				
Industrial	121 (26.5)	40 (4.2)	102^{*4} (5.4)	
Domestic	124 (27.1)	197 (20.9)	129^{*4} (6.9)	
Agricultural	164^{*6} (35.9)	625 (66.3)	$1,650^{*5}$ (87.7)	
Natural or others	48 (10.5)	80 (8.5)		
Total	457 (100.0)	942 (99.9)	1,881 (100.0)	2,072
Inflow conc. ^{*1}	0.209	0.236	0.342	
Observed river conc.	0.216^{*2}	0.454^{*3}	0.5^{*4}	1.67
Per capita value ($\text{kg capita}^{-1}\text{y}^{-1}$)				
TN	1.53^{*8}	0.59^{*8}	1.16^{*4}	—
TP	0.146^{*8}	0.083^{*8}	0.1^{*4}	—

*1; Total loadings÷Annual river inflow water volume, *2; Ibaraki Pref. 1988, (Ave. of 28 rivers), *3; LLDA 1987 ($\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$, IP, Ave. of 9 rivers), *4; SLB Rep. No.10, *5; nutrient load factors for pigs were changed, TN: $80.3\rightarrow3.0$, TP: $25.3\rightarrow1.6\text{ kg head}^{-1}\text{y}^{-1}$, *6; including fish culture, *7; Zhang & Liu 1989, Total of 5 rivers, Sum of the water discharge $1,242\times10^9\text{m}^3\text{y}^{-1}$, *8; Domestic loadings/population, no annotation; LECS'84

4. 水資源、水環境

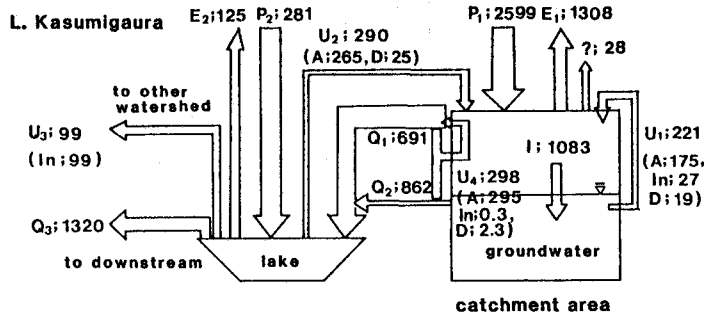
各種資料から推測される各流域での水循環の年平均像をFig. 6に示す(資料名は省略)。また、こうしたデータをもとに水資源の観点からいくつかの計算を行った結果と水資源の利用率をTable 10に整理した。以上から、

(1)どの流域とも、湖への流入量は河川からのものが湖面降雨を上回り、湖からの流出量では河川と水利用によるものが蒸発よりかなり大きい(Open lake)。

(2)降水量と蒸発量の関係は、L.Dianchiを除き温帯湿潤気候、熱帯モンスーン気候の標準に近い(樫根 1989)。L.Dianchiの場合には資料が少ないのでハッキリしたことは言えないが、蒸発量の見積もりが若干大き過ぎるようである。

(3)基底流量はFig. 3,(2)などを参考にして推定した。L.Kasumigauraの数値は日本での平均的な量と一致する(科技庁資源調査会 1971)。

貯水池がない場合には、水資源としては基底流量をベースとして考えることになるので、それに流域面積、あるいは森林面積(水質を考えて、詳細は後述)を乗じて賦存量を求め(Q_s^1 、 Q_s^2)、さらに流域人口で割り一人当りの利用可能水量を算出している。森林面積をもとにした数値の場合、どの湖沼流域とも平均的な生活用水使用量一人一日



L. Laguna

L. Songkhla

L. Dianchi

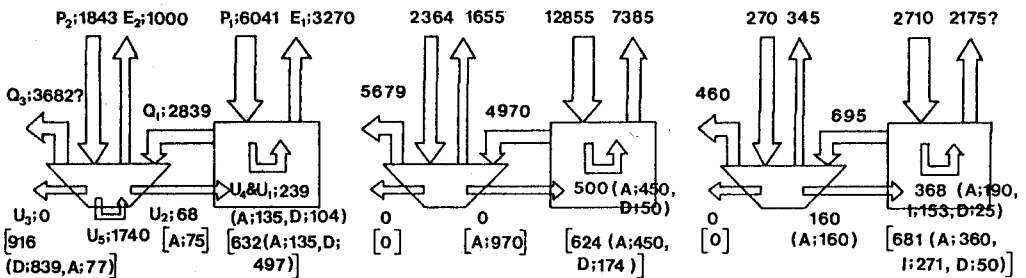


Fig. 6 Water flows in the four lake watersheds. P₁; Precipitation, E₁; Evaporation in the watershed, P₂; Precipitation, E₂; Evaporation in the lake, Q₁; Discharge through streams, Q₂; through groundwater, Q₃; to downstream, U₁; Utilization of groundwater, U₂; of lake water by watershed activity, U₃; Conveyance to other watersheds, U₄; Utilization of stream water, U₅; of lake water for cooling water.

Table 9 Wastewater treatment

L. Kasumigaura ^{*1}	L. Laguna ^{*2}	L. Songkhla ^{*3}	L. Dianchi
*Public sewerage 8.4%, Septic tanks 18.7%, Nightsoil treatment plant (miscellaneous effluent discharged from ordinary life; untreated) 72.9% *Effluent standards are applied to manufactures, sewerage treatment plants, live stock sheds, etc. *More than 80% of livestock nightsoil is used as fertilizer in farm land. Only 6%(TN) and 5%(TP) of supplied nutrients effluent from there.	*No adequate sanitary facilities of public sewerage (Upper or middle class households have individual septic tanks, but low class have none.) *Only 85 out of 424 plants have wastewater treatment systems (1975)(removal factor TN: 7%, TP: 24% (1980)) *The low ratios(Domestic: TN 20%, TP: 14%, Live stock: TN 11%, TP 13%) of inflow load to generated load in domestic and livestock waste indicate some self-purification in streams etc.	*No sewerage and sewerage treatment system *Self purification is expected before reaching to the lake(removal factor TN: 30%^{*4} or 100%^{*5} TP: 70%^{*4} or 100%^{*5}). (*Some industries are required by law to have wastewater treatment facilities.)	*Most of the domestic sewerage and industrial waste water is untreated.^{*6} *The total loading rate of waste water accounts for 25.6% of the total surface runoff.^{*7} *In most water resources, the contents of conlonbacillus and bacteria exceed the standard.^{*8}

*1; Ibaraki Pref. 1988, *2; Pacardo et al. 1988, *3; SLB Rep. No.10, *4; near the lake, *5; far more than 30 km from the lake, *6; Liu 1988, *7; Zhang & Liu 1989

2801に近く（丹保 1987）、特に L.Dianchi, L.Lagunaで少ない。無限に大きい貯水池が下流にある場合の利用可能水量が Q_T で、工水、農水も含めた水需要との比は現在でもL.Kasumigaura, L.Dianchiで1に近く、将来計画では1を越える。降水量としては平水年を仮定しているの、渇水年では需要を大幅に下回る可能性がある。

次に、各流域ごとに河川水質の頻度分布を求めた結果を、 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ を例としてFig. 7に示す。農地系の排水の多い河川で $\text{NO}_3\text{-N}$ 、生活系の排水が多く嫌気的な河川で $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い。特に、L.Kasumigauraでの $\text{NO}_3\text{-N}$ 、L.Dianchiでの $\text{NH}_4\text{-N}$ が高濃度である。流域に人為負荷の少ない河川、すなわち森林を主たる流域土地利用形態とする河川で、窒素をはじめとする水質濃度はその他の河川に比べ低い。水量の基底流量と同じく、水質のベースを示していると言えよう。Fig. 7には各種用水基準も示している。TNで 1mg l^{-1} を越えると、上水、農水、工水とも障害の可能性があることを表して、これら4湖沼では問題が予想される。

湖内水質の概略をTable 11にまとめる。それを考察すると次のようである。

(1)L.Kasumigaura, L.Lagunaでは淡水化用の水門が建設されていて、両湖とも塩水害は減っている。L.Songkhlaでも灌がい用水の取得を目的とした閉め切り計画が検討されている。水道基準では 200mg l^{-1} 、農業用（田植）では 350mg l^{-1} 、工業用水では 80mg l^{-1} 等（すべてClとして）の基準があり、水門操作、閉め切りがうまくゆかない場合、これらの湖沼の水は利用価値が乏しい。

(2)pHは光合成速度が高いので一部を除いて7以上である。DOは高い光合成量と水深が浅いため全層で飽和していることが多いが、風の吹かない期間が続くと低層で低下し、魚の酸欠死が起こる。なお、L.Dianchiは標高が高く気圧が800mb程度しかなく、飽和DO濃度が 5.4mg l^{-1} となる。

(3)TN,TP濃度から計算される富栄養化状態指標（TSI、相崎 1981）は、L.Kasumigaura, L.Laguna, L.Songkhlaでほぼ等しく富栄養湖と判定される。L.DianchiではCaohaiは超富栄養

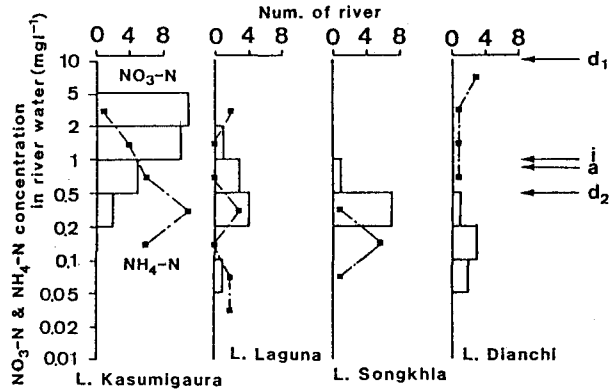


Fig. 7 Frequency distributions of river water concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ in the four watersheds. d_1 ; drinking water standard (Japan), $\text{NO}_3\text{-N } 10\text{mg l}^{-1}$, d_2 ; drinking water standard (EC), $\text{NH}_4\text{-N } 0.5\text{mg l}^{-1}$, a ; agricultural water standard (Japan), $\text{TN } 1\text{mg l}^{-1}$, i ; upper limit for industrial water, $\text{TN } 1\text{mg l}^{-1}$.

Table 10 Water resource

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi
Annual precipitation (mm y^{-1}), P	1,332 ¹	2,069 ²	1,853 ³	1,032 ⁴
Annual evaporation in watershed (mm y^{-1}), E	671 ¹	1,122 ⁵	1,064 ³	828 ⁴
P-E (mm y^{-1})	531	947	789	204
Base flow rate (m m d^{-1}), B	1 ⁶	(0.5)	0.33 ³	0.40 ⁴
$B \times \text{Area 1 } (10^6 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1})$, Q_1	1.95	(1.46)	2.29	1.05
$Q_1 / \text{Population } (1 \text{ d}^{-1} \text{ person}^{-1})$	2,293	(613)	1,908	637
$B \times \text{Area 2 } (10^6 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1})$, Q_2	0.56	(0.35)	0.52	0.17
$Q_2 / \text{Population } (1 \text{ d}^{-1} \text{ person}^{-1})$	659	(147)	433	103
Annual water supply $[(P-E) \times \text{Area 3}] (10^6 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1})$, Q_T	1,434	3,609	6,328	599
Annual water demand $(10^6 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1})$, D_r (the future plan)	908(1,533)	307 ⁵ (1,623)	500 ³ (1,594)	528 ⁴ (841)
Streamwater or groundwater	519	239(632)	500(624)	368(681)
Lake water	290	68(75)	0(970)	160(160)
to other watershed	99(625)	0(916)	0(0)	0(0)
Utilization ratio, D_r / Q_T	0.63(1.07)	0.085(0.45)	0.079(0.25)	0.88(1.40)
Annual difference in water level (m)	0.32 ¹	1.7 ⁵	0.62 ⁷	<1 ⁴
	(regulated)	(regulated)	(unregulated)	(regulated)
Residence time (y)	0.46	0.68	0.22	1.24

*1; Ibaraki Univ., 1984, *2; LEC'S 84, *3; SLB Rep. No. 8, *4; Liu 1988, *5; Pacardo 1988, *6; EX(1981), *7; SLB Rep. No.10, Area 1; watershed area, Area 2; forest area, Area 3; watershed area+lake area

養、Waihaiは中栄養程度となる。日本の湖沼ではL.Kasumigauraぐらいの富栄養湖の場合、SSは8-30mg l^{-1} となるが、他の湖沼で高い。後述する土壌流出とあわせて、流入する懸濁物の沈降性に差があるようである。一次生産速度はL.Kasumigaura（制限要因は水温等、Otuki 1987）で若干高いが、他の湖沼では濁度、水草（water hyacinth）が繁茂などが制限要因となっている。

（4）どの湖とも汽水域を除いてらん藻が大発生することがある。また、L.Songkhlaでバクテリア数が少ないのは塩分が原因と考えられている。L.Kasumigauraでは物質循環に底生動物の寄与が大きく、L.Songkhlaでは水草—デトリタス—底生動物といった流れが大きい。

（5）河川水中のCa、Mgイオン濃度からL.Lagunaを除く湖沼ではやや軟水である。

（6）L.Songkhla、L.Dianchiでは富栄養化以前の問題として重金属、有害化学物質（農薬等）による水質、底質汚染が激しい。Table 12には底質中重金属濃度の範囲を示すが、多くの元素でL.Kasumigauraを上回っている。バックグラウンド値と考えられるShalesの組成と比べ（Forstner & Wittmann 1983）、特にCd、Pb（Shalesでそれぞれ0.3、20mgkg $^{-1}$ ）で高い。L.Dianchiでは特に肥料工場から出るフッ化物が灌がい用水、農作物、土壌、人間を汚染している（Liu 1988）。

最後に、流域、湖沼での水にかかわる問題を整理しておこう。

（1）洪水；熱帯モンスーン型気象のL.Laguna、L.Songkhlaでは雨期に水位上昇が2mに達することがある程で、浸水は頻繁に生じている。L.Kasumigaura、L.Dianchiでは1930-1940年代に大洪水に襲われたが、水門、堤の建設によって最近では被害は少ない。

（2）干拓；人口圧力、洪水の危険性、湖水の灌がい用水としての利用などの理由から、L.Kasumigaura(27km 2)、L. Dianchi(13km 2)では湖岸が干拓された。

（3）貯水池・ため池；前述したようにL.Kasumigaura、L.Dianchiでは稲作時に降水のみでは水が足りない。このため、数多くの貯水池、ため池が作られていたが、L.Kasumigauraでは湖水が利用できるようになり農地に転用された。

Table 11 Water quality

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi ^a
Salinity(10 $^{-1}$ ‰)	0.02~0.2 ¹	sometimes >1 ²	Songkhla: 0~30 Sap; 0~15, Luang; 0~11, Noi; 0	40mg/l Cl $^{-1}$
pH	7.7~8.8	7~8	6~8	8.9
DO(mg l^{-1})	7.6~12.0	8~10 (sometimes below 2)	Luang; 6.1~7.7, Noi; 4.1~5.7	Caohai; 4.6, Waihai; 5.4
Annual mean water temperature(°C)	14.3	25.6	29.4	17
Transparency(m)	0.8~1.7	0.1~0.7	Sap; 0.3~0.9, Luang; 0.4~0.7	Caohai; 0.35, Waihai; 1
SS(mg l^{-1})	5~17	5.0~78.5mg l^{-1} SiO $_2$ ³ 168(west bay) ⁴	Luang; 32.9~35.1 Noi; 26.2~176.7	Caohai; 40, Waihai; 18
Annual mean of TN(mg l^{-1})	0.964	0.893	Luang; 0.77	Caohai; 2.91, Waihai; 0.58
TP(mg l^{-1})	0.061	(IP 0.068 ³)	(IP, Sap 0.1~0.15)	0.14, 0.031
COD(mg l^{-1})	8.1		Sap; 1~2	58.8, 39.5
TSI(0~100) ⁵	84	60~70	60~70	Caohai; 70~90, Waihai; 50~80
Coliforms(MPN/100ml)	10 2 ~10 $^{4.5}$	10 2 ~10 4	1~10 3	
Primary Prod. (gCm $^{-2}$ d $^{-1}$)	1.3~2.7(gross) 0.9~1.9(net) ⁶	0.4(net, Jan.-Dec., 1986) ³	Noi; 0.1~0.5, Luang; 1.3, Sap; 0.1~0.3, Songkhla; 0.4 ¹⁰	

*1; Maeda 1986, *2; Morioka 1984, *3; LLDA 1987, *4; Setamanit 1987, *5; Ibaraki Pref. 1988, *6; Zhang & Liu 1989, *7; Fukushima 1989, Others; LECS '84, *8; Aizaki et al.(1981), *9; Otsuki 1987, *10; SLB Rep. No.10

Table 12 Heavy metals in lake sediments (mgkg $^{-1}$)

	Cr	Mn	Zn	Cd	Hg	Pb
L. Kasumigaura ^{*1}	23~43	488~1,179	84~185	0.32~1.05	0.03~0.09	24~46
L. Songkhla ^{*2}		200~734	29~89	1.9~16.1		32~79
L. Dianchi ^{*3}	94~116			3.3~23.2	0.08~0.22	58~146

*1; Ibaraki Univ. 1977, 0~10cm layer, *2; SLB Rep. No.10, *3; Zhang & Liu 1989

(4)地下水；どの流域とも貴重な水源となっているが、L.Kasumigauraでは海岸沿岸での塩水侵入、農地でのNO₃-N汚染、都市域での有機塩素化合物汚染、L.Dianchiでは利用量が多いことによる水位低下、地盤沈下、バクテリア汚染などが問題となっている。

(5)土壌侵食；Table 13には4流域でのerosion量の予測値を示す。黄河流域などの極めて大きい数値(>1000 m³km⁻²y⁻¹，岸 1987)と比べ小さいが、特にL.Dianchiでは土壌層が薄く裸地化の恐れが大きい。

(6)森林面積の減少；L.Kasumigauraを除いて10%を超える減少があり、水量、水質の変化にも影響を与えているものと考えられる(Table 13)。

5. こうした湖沼での水環境管理の実態と方向

湖沼の持つ機能の観点で湖と人間の関わり方を分類してみると、(a)レベル1；生産の場（漁業）&生活で発生したものが流れていく場、(b)レベル2；水の貯め場、(c)レベル3；人をひきつける場、などがあると考えられる。L.Kasumigauraを除く湖沼では、今まさにレベル1からレベル2に移行しようとしていて、各セクター間でコンフリクトが発生している。レベル1から2への移行は後述するように、流域（及び周辺域）での水資源量と需要の関係から決まる。水環境管理の実態としては、やっと水質モニタリングが始まり、水質基準が作られようとしている段階であり、しかしまだ 'Payment to pollute' (L.Laguna)という言葉に代表されるように生産の経済性が重要視されている。これに対し、L.Kasumigauraではレベル1、2が主体とはいえ、レベル3を通しての評価も生まれようとしている。水環境管理では他の湖と同様な面もあるが、経済的な余裕をもとに、市民の中から湖との共存、あるいはつき合い方を模索する動きも出ている。

以上をまとめて、こうした湖とその流域を対象とした今後の水環境管理を考えてゆく際には、以下のようなことに注意しなければならない。

(1)自然環境の特徴の把握とその利用

Table 13 Problems in watershed

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi
Soil erosion (tkm ⁻² y ⁻¹)	67~91 ^{*1}	<400 ^{*2}	60~75 ^{*3} (or 750 ^{*4})	325 ^{*5}
Deforestation (% of catchment area)	4%(1960-1985) ^{*6}	14%(1946-1977) ^{*2}	10.8%(1975-1985) ^{*7}	33.5%(1950-1981) ^{*8}

*1; Otsubo 1984, from the profile of ¹³⁷Cs, etc., *2; Pacardo 1988, *3; SLB Rep. No. 4, from the river sediment data, *4; from the profile of ¹³⁷Cs, *5; Liu 1988, *6; Ibaraki Pref. 1987, *7; Setamanit 1988, *8; Zhang & Liu 1989

Table 14 Maximum population density and TN concentration

	L. Kasumigaura	L. Laguna	L. Songkhla	L. Dianchi
Required area per person (m ² capita ⁻¹)				
Agriculture ^{*1} , A	450	1,130	1,130	646
Settlement ^{*2} , B	250	250	250	250
Forest ^{*3} , C	280	560	848	700
Total, (A+B+C)	980	1,940	2,280	1,596
Population density (km ⁻²) Maximum, 1/ (A+B+C)	1,020	515	449	627
TN loadings (kg·capita ⁻¹ ·y ⁻¹)				
Agricultural ^{*4} , D	0.95	1.02	1.02	0.97
Domestic ^{*5} , E	1.53	0.59	1.18	1.53
Natural ^{*6} , F	0.35	0.22	0.34	0.28
Total, (D+E+F)	2.8	1.8	2.5	2.8
Runoff water ^{*7} (10 ³ m ³ capita ⁻¹ ·y ⁻¹), G	0.52	1.84	1.80	0.33
Concentration (mg/l ⁻¹), (D+E+F) / G	5.4	0.98	1.4	8.5

*1; rice for one person: 113kgcapita⁻¹·y⁻¹, rice yield: 502, 200, 200, 350tkm⁻²·y⁻¹, respectively, other agriculture area=area of paddy field, *2; 4,000 persons km⁻², *3; required domestic water: 280lcapita⁻¹·d⁻¹, base flow: 1, 0.5, 0.33, 0.40mm·d⁻¹, *4; export coef.: 2.12, 0.9, 0.9, 1.5tkm⁻²·y⁻¹, *5; per capita value: 1.53, 0.59, 1.16, 1.53kgcapita⁻¹·y⁻¹(Table 8), *6; L. Kasumigaura 12.7, others 4kgha⁻¹·y⁻¹, *7; (A+B+C)×(Annual precipitation-Annual evaporation)

L.Laguna, L.Songkhlaは年降水量は多いとはいえ、利用可能な水量は少なく、また経年変動も大きい。さらに、洪水の危険性、高濁度などの問題もあり、水資源としては脆弱 (vulnerable) といえよう。また、L.Dianchiは土壌侵食、降水量の少なさ、乾期の存在など日本の湖沼と比べかなり自然的条件が悪い。水資源の開発にあたってはこうした点に十分に注意しなければならない。次に、今回対象とした湖沼はどれもShoreline developmentが大きく、水域間の水環境差が大きい。逆にこうした点を利用して、いろいろな機能を持った水域を分けて作ってゆくことも検討されるべきである。

(2) 水とつきあうシステムの考え方

流域での活動量の増加からこれらの湖沼流域の水資源は逼迫しようとしている。このため、河川水、地下水、湖水のそれぞれの水資源としての特徴を活かしたシステム作りをしなければならない。例えば、L.Dianchiでは上流にある貯水池を農水に、都市の地下水を上水、工水に利用してきたが、地下水の枯渇、汚濁から水利用全体のシステムを変えざるを得なくなって来ている。また、これらの湖沼では一次産業の比率が高く、代謝系が分散型である。このような空間的特性に見合って、かつ風土に即したシステムの構築が急がれる。

(3) 環境容量的な考え方

資源量と需要との関係から、資源とのつき合い方が変わらざる得なくなる点があり、このいき値を環境容量 (いくつも存在) と呼んでおこう。ここでは、流域内での食糧の自給、良好な飲料水の獲得といった条件から、非常に簡単であるが流域の人口密度の問題を考えてみる。農業のみを主たる産業としている水域を考え、飲料水は水質の点から森林域よりの流出水のみを利用するものとする。灌がい用水には農地、住宅地への降水の流出水、あるいは流域下流に貯水池を作り、その水を利用する。一人当り食糧として必要な米の量、単位面積当りの米の収量、住宅域面積、一人当りの生活用水量としてTable 14の欄外に示すような数値を用い、また森林域からの水は貯めることはなくすべて基底流量を用いることとすれば、一人当りに必要な面積は表中の(A+B+C)となり、最大人口密度はその逆数となる。これをTable 5の実際の人口密度と比較すれば、L.Kasumigaura, L.Songkhlaでは2倍以上の余裕があるが、L.Dianchiでは1.5倍もなく2000年にはほぼ等しく、L.Lagunaでは実際の人口密度の方が高い。上記の計算は簡単すぎるものではあるが、これらの湖ではかなり水資源に余裕がなくなっていることを示している。

同じように簡単に、各発生源の原単位及び流出水量から、下流湖沼の平均的なTN濃度を予測してTable 14中に示した。L.Kasumigauraでは 5mg l^{-1} 、L.Dianchiでは 8mg l^{-1} を越え、Fig. 7に示した各種用水基準から判断すればいくつかの利水障害が発生しそうである。最大人口密度の予測では、下流湖沼は農業用水の水源として利用する予定であるので、農業用水基準を上回ってはならない。 1mg l^{-1} とは厳しそうなので (国松・村岡 1989)、例えば守るべき水質を 5mg l^{-1} とすると、L.Kasumigauraでは一人当り 448m^2 、L.Dianchiでは 2565m^2 、 3mg l^{-1} とすると、それぞれ 4211m^2 、 9198m^2 もの森林面積が必要となる。Table 13に記したように森林面積の減少が進む中、もう一度その水資源、水質に及ぼす影響を真剣に考えなければならない。

最後に、本研究はUNCRD, I L E CによるRiver/Lake Basin Approaches to Water Resources Managementプロジェクト及び文部省科学研究費海外共同研究 (研究課題番号63044149、代表者相崎守弘) により得られた資料を利用した。また、海外の気象データは気象庁予報部長期予報課より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 相崎守弘他 (1981) 修正カールソン富栄養化状態指標の日本湖沼への適用と他の水質項目との関連。国公研報告, 23, 13-31.
- Burgis M. J. & Morris P. (1987) The Natural History of Lakes, Cambridge Univ. Press, 218p.
- David L. (1985) River basin development strategies in the Tisza Valley. Strategies for River Basin Management, D. Reidel Pub., 19-29.
- 江崎要 (1980) タイ国におけるLand Consolidationについて。熱帯資料49.

- EX都市研究所 (1981) 霞ヶ浦長期水質予測調査報告書。
- Forstner U. & Wittmann G. T. W. (1983) *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer, 486p.
- Fukushima (1989) 未発表
- Hutchinson G. E. (1975) *A Treatise on Limnology*. Vol.1-1, John Wiley & Sons, 540p.
- 茨城大学地域総合研究所 (1984) 霞ヶ浦. 古今書院, 300p.
- 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編 (1977) 霞ヶ浦. 三共出版, 203p.
- 茨城県 (1987) 茨城県統計年鑑.
- 茨城県 (1988) 公共用水域の水質測定結果、昭和62年度.
- 磯崎義正他 (1986) 日本の地下水. 地球社, 1043p.
- 科学技術庁資源調査会 (1965) 水資源の変動様相に関する調査報告、34号、301p.
- 科学技術庁資源調査会 (1971) 将来の資源問題、第2編水、60号、241-344.
- 金子良 (1973) 農業水文学. 共立出版, 286p.
- 榎根勇 (1989) 水と気象. 朝倉書店, 180p.
- 岸力 (1987) 総論、比較河川学の研究、文部省科研費特定研究(1)研究成果.
- 国松孝男・村岡浩爾 (1989) 河川汚濁のモデル解析. 技報堂出版, 266p.
- LECS'84 (1984) *Data Book of World Lakes*. LECS'84, Otsu, 513p.
- Lewis, W. M. (1973) The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications. *Limnol. Oceanogr.*, 18, 200-217.
- Liu H. (1988) Management, development and utilization of water resources in Dianchi basin, EGW on River/Lake Basin, Otsu.
- LLDA (1987) 1986 Water Quality Data on the Laguna de Bay and the Tributary Rivers. LLDA, 35p.
- Lopez, M. D. & Centeno, J. D. (1987) Water quality and fisheries of Laguna de Bay.
- Maeda, O. (1986) Lake Kasumigaura chronology. EGW on Environmental planning and management for local and regional development.
- 盛岡通 (1984) 2. ラグーナ湖流域の開発と保全の構想. 文部省科研費報告、B250-R40-9, 219-269.
- 中野秀章 (1976) 森林水文学. 共立出版, 228p.
- Natl. Diet Lib. (国立国会図書館調査立法考査局) (1987) 国政統計ハンドブック昭和62年度版, 423p.
- 大矢雅彦 (1980) 3. 自然と人間と技術. 土木工学体系4、彰国社、83-171.
- 大坪国順他 (1984) 霞ヶ浦底泥の物性と栄養塩の分布特性 (1). 国公研報告, 51, 157-173.
- Otsuki A. et al. (1987) Hypertrophic Lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.*, 48.
- Pacardo, E. P. et al. (1988) Basin approach to water resources management; a case study of Laguna Lake. EGW on River/Lake Basin, Otsu.
- Setamanit, S. (1987) Environmental planning and management in Thailand, with particular reference to Songkhla Lake Basin. *Regional Develop. Dial.*
- Setamanit, S. (1988) Environmental and social effects of the proposed salinity barrier project in the Songkhla Lake. EGW on River/Lake Basin, Otsu.
- SLB Rep. No.4 (1985) Songkhla Lake Basin Planning Study, Vol. 4, Projects Water Resources.
- SLB Rep. No.8 (1985) Songkhla Lake Basin Planning Study, Vol. 8, Songkhla Lake system.
- SLB Rep. No.10 (1985) Songkhla Lake Basin Planning Study, Vol. 10, Environmental management.
- 高橋裕 (1988) 東アジアの河川の水文学的特性. 土木学会論文集, 339, 1-12.
- 高村義親他 (1977) 水田の物質収支に関する研究 (第2報). 日本土壤肥科学雑誌, 48, 431-436.
- 丹保憲仁 (1987) 流域都市の水利用の形態と河川の様態、比較河川学の研究、文部省科研費特定研究(1)研究成果
- Taub F. B. (1984) 2. Ecosystem process. *Ecosystems of the world* 23, Elsevier, 9-42.
- 内嶋善兵衛編 (1982) 農林・水産と気象. 朝倉書店, 202p.
- 植原茂次 (1987) 日本の河川流域の月単位水収支に基づく水文特性に関する研究、国立防災科学技術センター研究報告、第40号、21-309.
- Zhang J. & Liu H. (1989) Institutional analysis for water resources management in Lake Dianchi Basin. EGW on River/Lake Basin, Bangkok.
- (EGW; Expert Group Workshop)