

陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ)

*Comprehensive Studies on the Eutrophication of Fresh-water Areas*

霞ヶ浦流域の地形、気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響

*Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment*

昭和53～54年度

1978—1979

安部 喜也・植田 洋匡・宇都宮揚二郎・河合 崇欣  
佐橋 謙・白井 邦彦・土屋 巖・細見 正明  
増田 啓子・村岡 浩爾

Yoshinari AMBE, Hiromasa UEDA, Yōjirō UTSUNOMIYA, Takayoshi KAWAI,  
Ken SAHASHI, Kunihiko SHIRAI, Iwao TSUCHIYA, Masaaki HOSOMI,  
Keiko MASUDA, Kohji MURAOKA

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

## 序

本冊は特別研究「陸水域の富栄養化に関する総合研究」の昭和53～54年度報告となった8分冊の一つである。

霞ヶ浦の富栄養化はリンおよび窒素が湖内に流入し、底部に沈殿する他、一部は外洋に流出することによって発生する事態である。そこで霞ヶ浦に関する物質収支を探求するにはこの地域における河川や地下水の流入、湖面よりの蒸発、降水などについて精密に計算する必要がある。本シリーズの海老瀬の論文は主として河川中のリンおよび窒素の見積りに関するものであったが、本報告はもっと広く降水や地下水をも対象とした。

まず霞ヶ浦への河川による流入の算定に先立って周辺の流域の地勢を、宇都宮は地理学的な見地から研究した。

土屋らは霞ヶ浦の湖面よりの蒸発量について実測や資料解析により推定を行った。村岡らは霞ヶ浦沿岸の地下水の挙動とその水質について研究し、安部は降水の分析より霞ヶ浦流域へ大気中から補給される栄養源の総量を見積った。

以上のように各方面の協力によって霞ヶ浦の水や汚染物質の収支状況が次等に明らかになってきたことは喜ばしい。霞ヶ浦は浅い内陸湖であるが、その面積は日本で第二位に位する。この湖を対象として地理学的、気象学的、水文学的、化学的なアプローチを総合してシステム的研究を行った結果である。このような取り組みの経験が、霞ヶ浦の富栄養化の原因解明に役立つと同時に、一般に広く陸水域や内湾における富栄養化の現象の解明に役立つことを期待している。本研究に関し大方の御批判を得たいと念願する次第である。

昭和56年1月

国立公害研究所

所長 近藤 次郎

## 緒 言

本冊の内容概要「特別研究「陸水域の富栄養化に関する総合研究」において、本冊は先ず霞ヶ浦と周辺の地形につき既存資料、航空写真及び現地調査にもとづき地形学的な諸特徴を明らかにした。次に霞ヶ浦流域の降水量分布とその特徴、rainoutとfalloutに由来する栄養塩流入量を論じ、更に湖面蒸発に関してクラスA panによる通年観測や係数補正等により年間蒸発量を推定した。また沿岸地下水の挙動と水質について、美浦村モデル地区での観測と西浦沿岸の既存井に関する調査結果から、一般に推測が難しいとされる地下水流入量、水質を論じた。最後に、これらの成果をもとに、物質収支をとる上での基礎となる霞ヶ浦の水収支につき、昭和47年以來の諸観測値を整理し、農業用水などの収支に肌理細かい分析をして昭和54年時点および昭和61年頃に予想される項目別水収支の数値を示したものである。

**研究のいきさつ** この特別研究は当研究所創立の翌年、すなわち昭和50年に企画され、約1年での準備・調整期間を経て実施に移されたもので、対象陸水として研究所から至近の距離にある霞ヶ浦を選び、フィールド調査とデータ収集が始まった。52年4月に特別研究として正式にスタートしてからは霞ヶ浦のみでなく、全国の湖沼をも対象としたが、湖沼と汚染源の流域の関係が比較的シンプルな系として独特の調査を行った湯の湖を除き、霞ヶ浦以外の他湖沼では霞ヶ浦で行ったようなルーチンサーベイが不可能であったので、主として夏期における各湖沼の水質特性をつかむためのフィールド調査のみに止め、その成果は湖沼一般の富栄養度評価の研究や、他湖沼との比較における霞ヶ浦の特性把握に役立てた。

**研究スタッフと研究の性格** この特別研究には、研究所の9部のうち6部が参加し、35名の研究者が寄与している。その内訳は水質土壌環境部13、総合解析部6、生物環境部5、環境情報部5、計測技術部4および技術部2である。その専門分野も陸水学、生態学、環境工学のようなフィールド調査に直接関係のあるものから、気象学、地文学、情報工学、社会工学といった諸分野にまで亘っていて、まさに典型的な学際研究である。第1期の特別研究の特徴は、第2期（昭55年4月より）のそれが「陸水域の富栄養化防止」をかかげたのに対し、明らかに基礎研究の色彩が濃い。霞ヶ浦でいえば、その流域、後背地まで含めた面、空間でみられる物質移動、状態変化から、視覚・心理学的価値評価まで、富栄養化に関連する可能な限りの角度からスポットをあてて、その実態、実相をつかむことを試みた。

**本報告各分冊の紹介** 成果をまとめて1冊にするには種々難点があるので、全体をRシリーズで8分冊（R-19……R-26）、プラス総括編（R-27）計9冊とした。本冊はその一つであるが、全体との関係を知って貰うため分冊のタイトルを紹介すると、Ⅲ、「霞ヶ浦（西浦）の湖流」、Ⅳ、「霞ヶ浦の微地形、気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響」、Ⅴ、「霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価」、Ⅵ、「霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量」、Ⅶ、「湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究」、Ⅷ、「湖利用におよぼす富栄養化の影響の定量化」、Ⅸ、「*Microcystis*の増殖特性」、Ⅹ、

「藻類培養試験法」で、これに加えて総括編がある。Ⅲ～Ⅹを通じて、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵは標題が示す通り霞ヶ浦、とくに西浦の現象を扱ったもので、Ⅶもその色彩が強い。

霞ヶ浦をめぐる行政の現実と研究の今後 第一期特別研究のこれらの成果（Ⅰ～Ⅹ）を足がかりに第二期特研で富栄養化防止策を研究するにあたり、霞ヶ浦の現実を見直すと、一方で現行水質環境基準A類型を達成すべしという命題が重くのしかかっており、富栄養化防止関係の諸要求充足のための対応策を早急に講じなければならない。また一方では、水資源公団が昭和60年度完成を期している霞ヶ浦開発事業があって、その主たる目的である $43\text{m}^3/\text{秒}$ の新規利水と沿岸の浸水や塩害防止のため湖周の護岸や常陸川水門の改造が行われ、それにより調節可能水深は2.85mとなり、治水容量 $3.4\text{億}\text{m}^3$ 、利水容量 $2.8\text{億}\text{m}^3$ となる。この合計である有効貯水量 $6.2\text{億}\text{m}^3$ は、霞ヶ浦の現貯水容量 $8.8\text{億}\text{m}^3$ に比し極めて大きな数字であり、この新規利水により常陸川水門を流下する放流量は、現在の $14\text{億}\text{m}^3/\text{年}$ から $5\text{億}\text{m}^3/\text{年}$ と大幅に減ずる。富栄養化しやすい浅湖の代表である霞ヶ浦にとって極めて重大なこの改造が将来水質にどう影響するかの予測も重要な課題である。われわれはこうした行政上の現実を注視して今後の研究を有効に展開することを心掛けるつもりだが、将来水質の予測は正直なところ難しいものになると予想される。研究グループがなお保持している高いポテンシャルに期待するのみである。

昭和56年1月

国立公害研究所

水質土壌環境部長

合 田 健

## 目 次

1. 霞ヶ浦とその周辺の低地の地形について.....	1
宇都宮陽二郎	
2. 霞ヶ浦流域の降水特性および大気中からの栄養塩の供給について.....	27
安部 喜也	
3. 湖面蒸発量の研究.....	43
土屋 巖・白井 邦彦・増田 啓子・河合 崇欣・植田 洋匡・佐橋 謙	
4. 霞ヶ浦沿岸地下水の挙動と水質.....	69
村岡 浩爾・細見 正明	
5. 霞ヶ浦の水収支.....	103
村岡 浩爾	
資 料	
資料(1) Class A pan観測日表〔東京(気象庁), 県内水試, 江戸崎中学〕.....	121
資料(2) 霞ヶ浦流域の気象資料.....	127
資料(3) 西浦沿岸観測井地質柱状図.....	143

## CONTENTS

1. Geomorphological Study of the Alluvial Plain in the Kasumigaura Area and Its Vicinity .....	1
Y. UTSUNOMIYA	
2. Precipitation Characteristics and the Fallout Nutrients Supply in the Watershed of Lake Kasumigaura .....	27
Y. AMBE	
3. A Study on Lake Evaporation .....	43
I. TSUCHIYA, K. SHIRAI, K. MASUDA, T. KAWAI, H. UEDA and K. SAHASHI	
4. Hydraulic Behavior and Water Quality of Groundwater in the Lakeside Area of the Kasumigaura .....	69
K. MURAOKA and M. HOSOMI	
5. Water Volume Balance of Lake Kasumigaura .....	103
K. MURAOKA	
Data	
Data(1) Daily Observation Data of Class A Pan (Tokyo, Tamatsukuri, Edosaki) .....	121
Data(2) Meteorological Data in the Kasumigaura watershed .....	127
Data(3) Vertical Profile of Geological Characteristics at Test Well Sites .....	143

1. 霞ヶ浦とその周辺の低地の地形について

宇都宮陽二郎<sup>1</sup>

Geomorphological Study of the Alluvial Plain in the Kasumigaura Area  
and Its Vicinity

Yōjirō UTSUNOMIYA<sup>1</sup>

**Abstract**

The author's examination on topographies of the alluvial plain in the Kasumigaura area and its vicinity brought the following interpretations.

- 1) The topographies of Kasumigaura area can be divided into such topographies as mountains, plateaus, river terraces (upper & lower) and alluvial plains (upper & lower). The upper alluvial plain along the coast of L. Kasumigaura, Kitaura and on the lower Tone River are formed with such topographies as sand spit, sand bar and cusped bar or foreland, and the lower one are occupied mainly with natural levee in the Kokaigawa-Kinugawa-Tonegawa lowland.
- 2) The plateau consists of such plateaus as Kashima, Namekata Ishioka, Nihari, Tsukuba-Inashiki and Mōka-Sekijo plateaus. Though the altitudes of these surfaces of the plateaus become higher with a distance from the western part to the eastern part of this area in general, they may indicate local tectonic movement (e.g. warping and faulting).
- 3) There are regional differences in development of river terrace; the upper terrace on the lower Tone, and the lower Terrace on the upper stream of such rivers as Ono, Sakura, Koise, Sonobe, Tomoe and Nanase river. It is remarkable that the surface of these terrace is developing on the right bank of these rivers.
- 4) The upper alluvial plain seems to be formed in the circumstance of the slightly high sea level (so called Jōmon transgression, about 6000 years before) and the development of such coastal topographies as sand spit, sand bar (or barrier) and cusped forland on these surfaces indicate geomorphologically the extent of the sea and the directions of the coastal currents at that time.

---

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
Environmental Information Division, The National Institute for Environmental  
Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan.

## 1. はじめに

霞ヶ浦の汚濁および水収支の研究を進めるうえで、湖沼とその周辺の地学的特性が明らかにされる必要がある。筆者は、すでに、中間報告 R-6-1'79で、おもに霞ヶ浦の湖沼内の地形について記載したが、ここでは霞ヶ浦・北浦とこれに流入する河川の流域と周辺地域の低地の地形を取扱うことにする。本地域の地形・地質に関しては、東木(1926)による貝塚分布及び地形の研究をはじめ、数多くの研究成果が公表されている。

これらの研究は東木(1928)、貝塚(1962, 68)、石井(1962)、青木ら(1977, 79)、菊地ら(1962, 65)、上杉ら(1977)、国土地理院(1972, 77, 79, 80)らによる台地の地形・地質に関する調査・研究、木内(1968)、長谷川(1966, 67)、籠瀬(1975, 76)、斉藤(1959)、田中(1959)、小笠原(1952)、池田ら(1976, 77)、高木(1975)、国土地理院(1972, 77, 79, 80)らによる低地の地形・地質に関する調査・研究、多田(1948)、小笠原(1951, 52)らの砂丘に関する研究、東木(1926)、江坂(1972, 75)らの沖積世の旧汀線変化に関する研究、桜井(1948)、国土地理院(1960, 70)、藤下ら(1967)、外岡ら(1976)、宇都宮(1979)、らによる湖底地形・地質に関する調査・研究等の4種類に分類されよう。

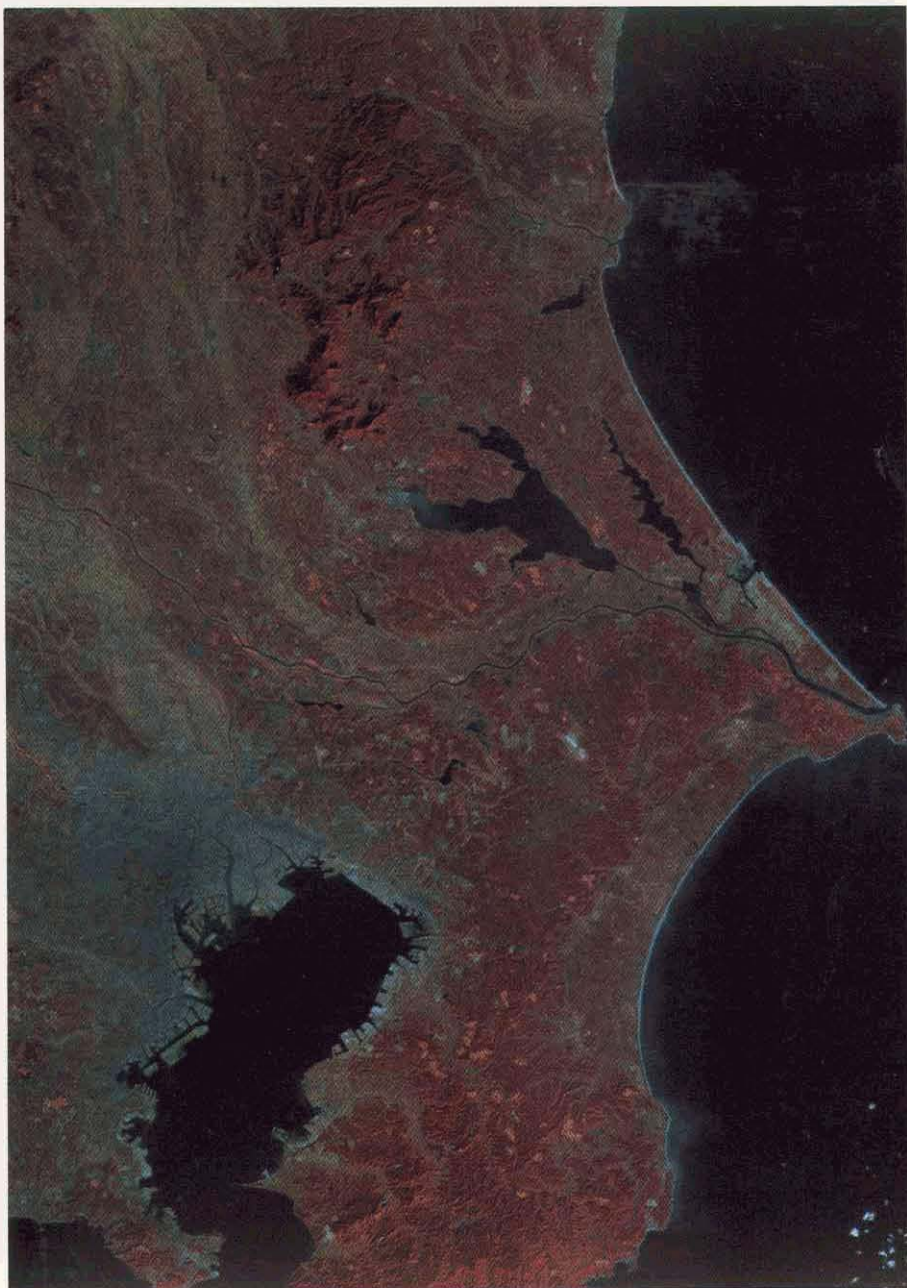
筆者は陸水域の富栄養化防止に関する総合研究の研究分担者の1人として、本地域の地形一特に低地の地形について調査・研究を進めてきた。しかし、調査対象地域が広大であるため、未だ、野外調査は終了したとは言えず、未調査地域もかなり残されたままであるが、既存資料の検討に加え、航空写真の判読と現地調査によって作成された地形学図をもとに地形の概略を記載し、今後の霞ヶ浦地域の地形研究のための一資料としたい。

## 2. 地形概説

写真1はLANDSAT 3号の写真の一部である。北に高浜入、北西に土浦入の2大肢節を有する霞ヶ浦の北方には八溝山地の南端をなす筑波山塊(標高876m)がゆるやかな逆S字状を描きながら南に突出し、高浜入に注ぐ恋瀬川、園部川と土浦入に注ぐ桜川の分水界をなす。この山塊と土浦入、高浜入に挟まれた地域に出島の台地(新治台地)が、その西方には桜川の低地を挟み真壁一筑波一稲敷の台地(筑波・稲敷台地)がある。この台地は西方を南流する小貝川と桜川との分水界をなし、小貝川の西には真岡一下館一関城の台地(真岡・関城台地)があり、さらに西方には鬼怒川が南流している。筑波・稲敷台地の南には本地域としては最も幅の広い利根川の沖積低地が発達している。

一方、高浜入の北方には恋瀬川と園部川に挟まれ、石岡の市街地の乗る台地(石岡台地)が、霞ヶ浦の東には北微西一南微東に細長い北浦が、その東には鹿島灘が認められる。筑波山塊に源をもち北東に流れる巴川は北浦の湖頭部に注ぐ。この巴川、北浦と園部川、霞ヶ浦の間には羽島、玉造、行方、麻生、潮来に連なる台地(行方台地)が、巴川、北浦と鹿島灘の間には岩間、旭、鉾田、大





(宇宙開発事業団提供)

写 真 1 関東平野東北部の衛星写真 (LANDSAT 3号, 1979年12月14日)

Photo 1 Satellite Imagery of Northeastern Kanto Plain  
(LANDSAT-3, 14. Dec., 1979)

野、鹿島に続く台地（鹿島台地）が発達する。

これら、霞ヶ浦、行方、鹿島台地の南には利根川が、ゆるやかに曲流しつつ、初め東流するが、行方台地の南からは南東に流向を転じ、銚子で鹿島灘（太平洋）に注いでいる。この南東流する利根川の東には鹿島台地から南東に向う沖積低地が発達し、この上には砂丘が認められる。利根川の南には下総台地が広く分布するが、利根川の沖積低地とは上述の他の台地と同様に、リアス状の入り組んだ境界をなしている。以上、本地域の地形の輪郭を示したが、低地の地形を記載する前に低地の地形の発達に密接に関わる台地の地形について述べてみたい。ただし、段丘については低地の説明の際に記載することにした。

下総および関東平野の台地の地形面は貝塚（1962）、菊地・羽島（1969）、杉原（1970）、杉原ら（1972）によると下末吉面と成増面あるいは小原台面、武蔵野面、立川面に区分されているが、本地域の地形面は菊地・羽島（1969）によると鹿島、行方台地が下末吉、下総面に、石岡、筑波・稲敷台地、真岡—関城台地が、それより低い成増、常陸、我孫子面に区分されている。市川～木下付近を調査した杉原（1970）によれば、筑波・稲敷台地の稲敷付近は成増面に対比されている。本地域を菊地ら（1962, 65）、青木ら（1977, 79）は地質学的に吟味し、台地を構成する常陸粘土層、竜ヶ崎砂礫層および、その相当層の分布を追跡している。これらの研究によれば、筑波・稲敷台地の南部は河川の下流部の氾濫原、それ以東は三角州性の堆積環境のもとに形成されたと推定されている。以上の地質学的事実から、本地域の台地の原面をなす地形面の形成時は極めて低平な起伏の小さい地形であったと考えてよいであろう。

これらの地形面は現在、台地の原面として残されているため、その原面の高度を連ねた接峰面図を描くことにより、地形面形成後の地殻変動の傾向を知ることができる。

図1は利根川以南を除いた調査地域の接峰面図で、1/2.5万地形図の独立標高点が移写された1/5万地形図をもとに谷埋め法で作成されている。実線のコンターは5mで、破線は1m間隔のForm Lineを示す。本図によると、台地の高度は鹿島台地で35～43m、行方台地で35～40m、新治台地で25～35m、筑波・稲敷台地の南部では22～31m、北部では100～50m、小貝川西方の真岡・関城台地は80～22mであり、すでに花井（1938）が記載した、いわゆる関東造盆地運動による台地面の西への傾動が知られる。しかし、詳細にみると、鹿島、行方、石岡、新治、筑波・稲敷の各台地面上には比高数mの小丘が認められる。これらの小丘は1/5,000国土基本図によれば、周辺の台地面より孤立した小丘をなすことが知られる。鹿島台地上では、風蝕砂丘（小笠原、1951）の発達が知られており、小丘の一部には砂丘によるものもあろう。新治台地では標高26～28mの台地面上に標高31～34mの小丘が孤立している。

青木ら（1977）によれば、筑波山南麓の周辺および牛久沼周辺などに局地的に厚さ10～100cmの砂層が、下位の常陸粘土層と関東ロームの間に挟まれると記載されており、上述の小丘を原面に加わった2次的な地形—旧砂丘—と考えることもできる。しかしながら標高30m余の地形面が侵蝕され



図 1 霞ヶ浦とその周辺地域の接峰面図 (宇都宮原図)

Fig. 1 Summit plane of L. Kasumigaura area and its vicinity

て低くなったと考えることも可能である。これらの地域で台地の原面を構成する竜ヶ崎砂層 (又は、砂礫層) は厚さ 2~7 m の砂、砂礫層、砂泥互層、泥層からなり、下位の成田層とは不整合をなし、上位の常陸粘土層 (板橋層) とは整合・漸移関係にあり、かつての鬼怒川の氾濫原ないし、三角州的堆積物 (青木, 1977) とされている。しかし、霞ヶ浦沿岸では下位の成田層とは整合関係にある (上杉ら, 1977) とも報告されており、これらの台地を全て侵蝕面と解釈することは無理であろう。これらの小丘の構成層を十分に吟味しなければ、正確をきしがたいが、現在のところ、小丘より数 m 低く、かなりの面積を占める台地面を鹿島、行方台地に対比する方がより自然であろう。

これらの台地の原面の高度を詳細にみると、関東平野全域に比べれば、そう広くない本地域においても、小規模な曲隆が認められる。貝塚 (1961) により記載された鹿島、行方台地の走向を支配

する曲隆に加え、新治台地及び筑波・稲敷台地にも曲隆が認められる。新治台地では出島東方の菱木川下流、筑波・稲敷台地では筑波山西方の明野一大穂付近と小野川下流の美浦～桜川村付近に発達する。美浦村と桜川村間の26～30mの高度を有する曲隆部は南東流する小野川の下流部に発達し、小野川の流路決定後にその活動が開始されたと考えてよいであろう。上杉ら(1977)は谷田部一竜ヶ崎-阿波の地形・地質断面を作成し、地形面および、成田層が西に傾動することを述べたが、筆者の曲隆に対する地質学的証拠をなすであろう。新治台地の菱木川下流域の曲隆の開始も菱木川の流路決定後であろう。

本地域の西部を南北に走る小貝川・鬼怒川の低地をはさみ、その東側の筑波・稲敷台地は西側の真岡・関城台地に比較し、北部の下館付近では10m、南部の下妻～水海道付近では5m程度高い。今後、詳細な調査を行わなければならないが、東西の台地の形成時期が、上記の鬼怒川・小貝川低地を境にして急激に異なり、形成の新しい西側の台地の地形面が低高度に位置すると解釈するには無理があり、むしろ、ほぼ、同時期に形成された地形面が、その後示差的な地殻変動を受けた結果、西側の台地が低い高度にあると考える方が自然であろう。さらに、この小貝川・鬼怒川低地にそっては、南北性の西落ちの基盤断層(鳥山-菅生沼断層)が知られており(石井, 1962)、また、水海道-谷田部付近に発達する深度80～100mの帯水層より推定される東上がりの変動が報告されている(新藤, 1975; 青木ら, 1979)。以上の地質学的事実に加え、後述のように小栗-海老ヶ島の地形面は、その上流を小栗-大塚の比高2m弱の、ほぼ南北走向の崖線で切られ、いわゆるWind gap\*をなす。この面を切る小河川の大排水も、この崖線近くにWind gapを有する。以上の事実からこの小貝川、鬼怒川の低地を境に、その東西では示差的な地殻変動が認められ、石井(1962)が報告した基盤を切る鳥山-菅生沼断層は台地の構成層、台地面(武蔵野～下末吉面相当面)及び小栗-海老ヶ島の地形面(立川面≦ < 沖積面(?))形成後も継続して変位しているようである。

### 3. 低地の地形

本地域の低地は霞ヶ浦に注ぐ桜川、恋瀬川、園部川及び小野川などの比較的大きな河川とその間の中小河川の流域、霞ヶ浦沿岸、小貝川、鬼怒川、利根川流域、北浦に注ぐ巴川、七瀬川とその他の中小河川の流域、および北浦沿岸に発達する。(付図1参照)

これらの低地(霞ヶ浦、北浦、利根川下流部)には6,000～5,000 Y. B. P. に現海面上2～3mの海水準の上昇をもたらせた、いわゆる後水期の海侵(Sugimura and Naruse, 1954; 阪口, 1968; 井

\* 隣り合う河川の間で侵蝕力に差がある場合、侵蝕力の強い河川(A)の侵蝕が別の河川(B)の中流部に及ぶと、それより上流部の河川(B)の流水を奪取してしまう。この流水の奪取の行われた地点では河川(B)の谷底は一般にU字形を示し、河川(A)と河川(B)との分水界をなす。このような地形はWind gap(風隙)と呼ばれている。

関, 1977) にともなう海水の侵入によって広い内湾が形成されていた。このような推定は貝塚分布 (東木, 1926; 江坂, 1972),  $^{14}\text{C}$ 年代値 (籠瀬, 1975), 局地的な地形 (多田, 1948; 籠瀬, 1975, 76; 田野, 1980), 古文書 (吉田, 1910) などによるものである。本節ではこれらの低地の地形 (ただし, ここでは河岸段丘も含める) を, (1)桜川低地, (2)恋瀬川・園部川低地, (3)小野川低地, (4)霞ヶ浦湖岸低地, (5)小貝川・鬼怒川及び佐原以西の利根川低地, (6)巴川・七瀬川低地, (7)北浦沿岸低地, (8)佐原以東の利根川低地について各地区別に記載し, それぞれの地形の特性を明らかにしたい。

#### (1) 桜川低地

桜川の流域に発達する低地は桜川低地と呼ばれ (高木, 1975; 池田ら, 1977), 地形の概要が明らかにされてきている。桜川は筑波・稲敷台地と筑波山塊に挟まれ, 中流部の筑波山西方で観音川, 大排水と合流し, ほぼ南微東に流れ, 土浦の南で霞ヶ浦 (土浦入) に注ぐ, 桜川の上流, 岩瀬には小さな盆地性の低地 (標高 $40\text{m}^{\pm}$ ) があり, 筑波山塊の北を限り, 城山, 高谷山および雨巻山などの間の低いコルにより, 北方の山根川流域と分けられている。なお, そのコルの一部は低位の地形面により形成されている。岩瀬の盆地には筑波・稲敷台地に対比される蓬田・宮後の台地を下刻して形成された低い段丘面 (沖積面との比高 $1\text{m}^{\pm}$ ) が認められ, 岩瀬の市街地, 上坪, 坂下~高森の標高 $40\sim 50\text{m}$ の高度に分布している。この地形面は木崎, 前原, 中根, 雨引~阿部田, 東飯田西方に断片的に分布し, 東押尾で, 小栗~海老ヶ島の地形面に連続している。一方, 標高 $55\sim 30\text{m}$ の蓬田~宮後の台地とは, 中根より北で南東走向, その南では, ほぼ, 南北方向の西向きの崖線で限られる観音川; 大排水の流域は標高 $47\sim 25\text{m}$ 余の相対的に低い地形面よりなるが, 西方の大塚以北では, 小貝川の沖積低地と約 $2\text{m}$ の比高を有する西向きの小崖が認められ, 規模の大きなWind Gapをなし, 大塚以南では筑波・稲敷台地の東を限る南東走向の東向きの崖線が発達する。

この地形面には曲流する旧流路跡 (池田ら, 1977) が発達し, その北西部の北茂田付近では不明瞭ながらWind gapが認められる。地形面構成層は協和町, 下小栗の砂利採掘穴の観察によると, 下部に向って厚さ $0.6\text{m}$ の黒褐色土, 厚さ $0.4\text{m}$ の褐色ローム層, 砂礫のレンズをはさむ厚さ $1\text{m}$ のローム層, 厚さ $3.5\text{m}$ 以上の砂礫層よりなる。砂礫層は径 $15\sim 20\text{cm}$ の垂円, 円礫からなり, 露頭ではみかけ上, 南に向うインプリケーションが明瞭である。以上の事実から, この地形面は南~南東に向う河流により形成されたことは明らかで, ローム層中に $Kp$ , その他のパミスが認められず, かつ, 砂礫レンズを挟むことから, 下位のローム層は水成2次堆積ロームと考えられる。従って, この地形面は武蔵野面に対比されていたが, それより新しい, おそらく立川面か沖積面相当の地形面と考えられ, 池田ら(1977)の記載と矛盾しない。

小栗~大塚の地形面と比高 $2\text{m}$ の南北性の崖線で境される小貝川の沖積低地には旧流路跡, および現河道にそう礫まじり砂層よりなる自然堤防の発達が著しい。この低地は北方から下館市街地に連なる南北走向の台地の東側の崖線で限られ, 小栗西方で $4\text{km}$ , 下館付近で $3\text{km}$ の幅を有する。こ

の崖線は下館市街で消滅するが、下館の南西には関城に続く台地の東を限る南東走向の崖線が発達する。図1によると、これらの台地は左岸に発達する筑波・稲敷台地の地形面と10~5mの差はあるが、ほぼ同高度にあり、小栗一海老ヶ島に続く地形面よりは明らかに高い。

以上の事実から、小栗一海老ヶ島の低地帯は池田ら(1977)の考えた様に古鬼怒川の形成した地形面ではなく、その東を南流する古小貝川又は古五行川(仮称)の形成した地形面と考えるのが妥当である。地形面の発達から古い時代の鬼怒川が下館の南西部を流れ、古小貝川に合流したことは明らかであるが、この河流が、下館付近で東又は北東の小栗の方向に流れたと考えることは地形面の一般傾斜に対し異常であり、構成層の礫のインプリケーションから推定される流向とも異なる。さらに、小栗一海老ヶ島の東を限る崖線、特に、新治より北方の崖線の形成を説明することは不可能であろう。

ただし、池田ら(1977)の図示しているように小栗一海老ヶ島の地形面の形成時に、当時の古鬼怒川が、本地域の北方で古貝川に合流していたと解釈することも可能であろうが、これには本地域の北方の河道変化と上記の地形面形成時代の同時性が検討されなければならない。

小栗一海老ヶ島の地形面は筑波山の西方の筑波駅付近、<sup>さいかじどう</sup> 豊英堂、北条付近に発達するが、これより下流には追跡できない。桜川低地の幅は筑波山より上流で1km、下流で3kmである。また、沖積面上の自然堤防の発達も、その上流では貧弱であるのに対し、下流では明瞭で、かつ規模も大きく、土浦市街地付近まで分布している。また、この沖積面には標高7m以下(現沖積面との比高1m<sup>±</sup>以下)の砂礫堆が栗原、上境一穴塚付近より下流に発達し、前述の新治、筑波・稲敷台地の崖下及び桜川の自然堤防の背後に発達する。その最も発達の明瞭な地区は上境一穴塚にかけた地区である。この地形面は、小栗一海老ヶ島の段丘面に対比される段丘面(国土地理院, 1975)、あるいは高位の自然堤防(高木, 1975)として記載されている。この微高地の間に発達する低地は堀下田により形成される部分もあるが、その集合からなる低地は本地区では、他の地区と異なり、本来の地形の高低に支配された分布パターンを示している。この低地の分布パターンは現在の桜川の一般的な流向に対し直角をなすものもあり、桜川の曲流により形成された旧流路と単純に解釈できない形状を示すこと、これらの微高地の幅が、本流域内の他の自然堤防に比べて、広すぎることから筆者は高海水準時に形成された砂州と解釈した。この面は後述の美浦村一土浦につづく、沖積低地上位面に対比されるであろう。

## (2) 恋瀬川・園部川低地

恋瀬川は筑波山の東に発達する柿岡の盆地を経て千代田村北方から石岡、新治台地の間を南東流し、石岡の西方で新治台地を下刻する天ノ川と合流し高浜で霞ヶ浦(高浜入)に流入する。恋瀬川流域の地形は十分に踏査していないが、地形学図によれば、台地および丘陵を下刻して低位の河岸段丘が形成されている。この河岸段丘は柿岡盆地を出て下流の下志筑まで追跡できるが、それより

下流では分布しない様である。おそらく、桜川の中・上流に発達する段丘面に対比することが可能であろうが、詳細な検討は今後に残されている。沖積面は上述の柿岡盆地では幅 0.5 km、千代田村北方より下流で 1～1.5 km の幅を有する。この沖積面上には桜川低地で認められた自然堤防はほとんど発達せず、千代田村、高倉、中志筑、石岡南方（中津川）付近にわずかに認められるのみである。

園部川は柿岡盆地の東に位置する筑波山塊の一支脈の東斜面に源を発し、南東流し、新治、石岡台地のそれぞれの台地を分けている。本流域では小川町付近より上流に低位の河岸段丘が発達するが、沖積低地の幅は小川町より上流で 0.7 km、下流では 1.5 km である。この小川町付近より下流には自然堤防状の微高地が大井戸～川中子にかけて発達するが、上流では自然堤防状の地形は認められない。上記の微高地は大井戸付近の石岡台地から北東方向に発達し、現在の湖岸線に協和的な走向を有する。さらに、この微高地の伸長方向は園部川の流向とは異なり園部川の形成した自然堤防とは考えられない。以上のことから、この微高地は離水砂嘴と考えられる。

以上に述べた様に恋瀬川および園部川流域には自然堤防の発達はほとんど認められない。筆者は中間報告で、霞ヶ浦の湖底地形について考察し、高浜入と土浦入では底質が異なり、前者が泥質であるのに対し、後者では砂質泥が卓越することを記載したが、この両肢節の底質分布の相異は陸上の低地の地形、特に自然堤防の発達の差とよく一致している。これは桜川が自然堤防を形成するような砂礫の供給が豊富な河川であるのに対し、高浜入に流入する河川では土砂の流入が極めて少なく、かつ、泥質の堆積物が卓越したことを意味している。これは流域の大小と河川争奪前の古五行川、又は古小貝川の旺盛な堆積などによるであろう。

### (3) 小野川低地

小野川は筑波・稲敷台地の中・南部の標高 25 m 付近（上原～乙戸沼）に源を発し、牛久町をへて、下君山まで南東流し、ここから北東に流向を転じ、古渡で霞ヶ浦に流入する。下君山より上流では台地を下刻し、低位の河岸段丘が形成されている。この小野川の沖積低地は上流部で 0.5 km、下君山で 1 km、それより下流で 2 km の幅を有し、下流部には羽賀、江戸崎の両干拓地が認められる。江戸崎より下流では、これらの現沖積低地より高い、標高 5 m<sup>±</sup> の地形面が発達し、江戸崎町の市街地、須賀～古渡の集落をのせている。この地形面は河口部で、北方の鳩崎および東方の古渡につづく連続性のよい地形面である。鳩崎から南の古渡にかけてはこの地形面上に比高 1 m 以下の微高地が、現汀線に、ほぼ平行して発達し、新田の集落を乗せており、その走向から、河流以外の営力により形成された地形（離水砂嘴）と推定される。

### (4) 霞ヶ浦湖岸低地

霞ヶ浦湖岸にそう低地は標高 6～7 m 以下で、一般に 2～3 m の高度に発達し、0.5 km（最大で 1.5 km）の幅を有する。本地域の地形は高・低の 2 段の地形面からなり、特に上位面には田野（1980）

も報告しているように海成の地形が認められる。ここでは、説明の都合上、この低地を新治台地外縁を限る霞ヶ浦北岸ぞいの、(a)土浦～高浜の低地、(b)行方台地の西方、霞ヶ浦東岸ぞいの高浜～麻生の低地、(c)南岸ぞいに発達する浮島～古渡、(d)下馬渡、須賀津、(e)美浦～大岩田の低地の順で記載する。

#### (a) 土浦～高浜の低地

本地域の低地は標高3～5m以下の高度にあり、比高約1mの小崖で区分される標高3～5mの地形面と、標高1～2mの地形面に区分される。これらの地形面には排水路工事による霞頭でみるとローム層が認められないことから、沖積面と推定される。高位の地形面は土浦・田村町～沖宿、崎浜、赤塚、兵庫峰～根山、有河、二宮、志戸崎の各集落ののる地形面で、横須賀～田伏～上根、柏崎～小津、入木～梶和崎～羽成子まで追跡でき、霞ヶ浦北岸の低地に一般に発達することが知られる。沖宿、崎浜、二宮、横須賀、入木、石川付近の上位面上には現湖岸線に協和的な走向の微高地が認められ、沖宿では少なくとも2列、二宮では3列の微高地が発達するが、新治台地を下刻する侵蝕谷の谷口を閉塞するような分布を示し砂層により構成されている。付図1によると、低位面は田村町付近、沖宿付近、崎浜東方～志戸崎、田伏～柏崎～八木にかけて分布する。この低位面は土浦東方の田村町付近では上位面との間の崖線は不明瞭であるが、標高2～5mの上位面の前面にあり、幅2～300m、標高2m以下の高度に発達する。この面は一ノ瀬川の河口付近が、700～800mのデルタ性の低地を示す外は湖（海）成の地形面である。有河西方の耕地整理作業時にみられた深さ1.2mの水路溝の観察によれば、上部から下部に向かって、厚さ30cmの褐黒土、厚さ70cmの褐灰色砂層、厚さ20cmの粘土層が認められる。以上のことから、低位面は湖（海）成の地形面と推定されるが、上位面は標高3～5mの高度にあり、その上に現在の湖岸線に協和的な走向の微高地（離水砂嘴または砂州）を発達させることから、いわゆる沖積世高海水準時代に形成されたものと考えられる。

#### (b) 高浜～麻生の低地

本地域の低地は標高6m以下の高度にあり、その幅は小川付近の湾入部を除き、北部では0.5km以下、中央部の玉造～今宿間では1km前後、南部の麻生付近では再び狭くなり0.5km以下である。本地域にも、土浦～高浜間と同様に、高度の異なる新旧の地形面が認められるが、標高3m以上を上位面、それ以下を下位面として示した。本地域の上位面は台地が霞ヶ浦に向かって突出した部分および新治台地を限る崖線にそった標高3～5mの高度に発達する。この上位面は上高崎、平山、沖州、今宿、麻生にかけて断続的に認められるが、上高崎、沖州北西、羽生、平須賀、玉造、横須賀、五町田北東、塚原、麻生では崖端侵蝕谷の谷口を閉塞する様な北西走向の微高地が発達し、その走向は現在の湖岸線と協和的な走向を示している。この地形面は沖洲および浜での観察によると径2～5cmの円礫まじり砂層により、微高地は主に砂層により構成されている。以上のことから、この上位面は沖積世高海水準時に形成された海成の地形面で、微高地は離水砂嘴または砂州と考えられ、



南部の湖尻近くの麻生で、最も明瞭であり、北西～南東走向を示す。北東にゆるいカーブを描き、市街地の乗る標高5m余の微高地は宿～粗毛に連なる尾根を有し、背後の台地との間には水田として利用されている低湿地（標高3～4m）が認められる。

低位面は上高崎、大井戸、川中子、沖州、玉造南方～島並、麻生、永山にかけて標高3～2.5m以下の高度に発達する。その幅は北部では100～300m以下、中央部の玉造～島並で1,500～300m、南部で100～300m以下であり、現在の霞ヶ浦の湖心部の東および北東に幅広く発達する。この低位面上の大井戸、玉造南西、船津、五町田、今宿、新田～麻生（古宿～西浜）には、一般に現在の湖岸線に協和的な走向の微高地（標高1～3m）が発達する。この地形は沿岸州から発達した、いわゆる浜堤と推定される。これらの地形は田野（1980）により、低位砂州と呼ばれたが、以上のように、その形成時期および成因を異にしている。

#### (c) 浮島～古渡の低地

浮島は現在、標高0～3mの西ノ州、野田奈川、甘田入の干拓地により、西方の沖積低地と陸続きとなっているが、明治39年測量による1/5万地形図—佐原（陸地測量部、1909）によると、文字どおり島であった。干拓地を除く浮島は開析の進んだ中郷～柳縄の台地を核に北西～南東に伸びた標高2～5mの地形面と、その北西および南東に突出する標高1m余の低地からなる。この標高5m<sup>±</sup>の中郷～小船戸の地形面には現汀線に協和的な走向の微高地が認められ、背後の侵蝕谷の出口を閉塞している。同様の地形は丘陵の東側にも認められる。このため、前原から和田勝木にぬける峠状部には小凹地が形成されている。一方、低位の地形面では和田勝木に認められるように砂嘴が形成されている。以上のことから、この浮島の標高2～5mの沖積低地上位面には離水砂嘴または砂州が発達することが知られる。

#### (d) 下馬渡～古渡および須賀津付近の低地

須賀津から古渡にかけて幅1km、標高4m以下の低地が発達し、標高3m以上の上位面と標高2m以下の低位面に区分される。上位面は谷津、谷原および北～須賀津<sup>\*</sup>の標高3.5～5mに発達し、下位面との比高は谷原、北で1m<sup>±</sup>であるが、北～三次にかけては下位面との境界は不明瞭になる。この地区では須賀津付近を除き、他の地域に発達の良い離水砂嘴・砂州の分布は少ない。小野川下流域の地形の説明の際に記載した鳩崎～新田の標高2m以下の離水砂嘴の背後には崖端侵蝕谷を閉塞する、さらに古い離水砂嘴が認められる。

#### (e) 美浦～大岩田付近の低地

美浦村大須賀津～上新田にかけては標高25m以下の孤立した丘陵または小丘が散在している。馬

\* 霞ヶ浦の湖岸及び利根川中～下流域の低地で谷口を閉塞する離水砂嘴・砂州の発達する場所には須賀または横須賀の地名が一般に認められる。

見山、上新田の丘陵はこれらの中で最も大きい丘陵である。これらの丘陵の周囲には標高5～1 mの低地が認められる。この低地は標高3.5～5 mの上位面と標高2 m以下に発達する低位面に区分される。上位面は大須賀津～根火、馬掛～上新田西方、馬見山の標高3.5～5 mの高度に侵蝕谷の谷口を閉塞する微高地として発達している。上新田の集落が乗る標高2.5～5 mの地形面は厚さ0.4 m以上、径2 cm以下の亜円、円礫まじり砂層により構成される。馬見山南東ではこの礫まじり砂層にラミナ\* が認められた。籠瀬(1976)は上新田の地形面構成層(砂層)中の木片の<sup>14</sup>C年代を6,710±190 Y. B. P. (GAK-6131)と報告している。上新田の地形面は南に突出する三角状の平面形を示すことから、いわゆるカスプ、さらに、上記の微高地は離水砂嘴・砂洲であり、その<sup>14</sup>C年代値から、後水期の海侵による高海水準時に形成されたことが知られる。

大須賀津～根火の標高2.5～4 mの微高地は根火から西に伸びる離水砂洲をなすが、この微高地の尾根状頂部は南の美浦より、北の土浦入近くにある。一方、その南に位置する孤立丘はこれらの微高地または上位面で連結されており、離水した陸繋島として認められる。この上位面構成層は大須賀津東方の水路工事現場での観察によると、下部に向かい、厚さ60 cmの褐色砂層、厚さ100 cm以上の黒灰色砂層よりなる。大須賀津の西方の木原、古屋、舟子、高津、青宿、大岩田でも上位面が台地を限る崖線にそって発達する。古屋付近では東崎に向かう離水砂嘴が認められる。下位面は上位面と比高1 m<sup>±</sup>の崖線で区分され、上位面の周囲の標高2 m以下の高度に発達する。土浦入の南岸では0.5 km以下の幅を有し、上新田の南方には離水カスプが認められる。

以上のことから、霞ヶ浦沿岸の沖積低地は、標高3～6 mの上位面と標高3 m以下の下位面から構成され、上位面には離水砂嘴又は砂洲が、下位面には沿岸洲から発達した浜堤が認められる。この上位面は<sup>14</sup>C年代値の年代からも明らかのように、いわゆる沖積世高海水準時に形成された海岸平野であり、下位面は海成～湖成の地形面であろう。

#### (5) 小貝川・鬼怒川および佐原以西の利根川低地

小貝川・鬼怒川に沿う低地は下館～水海道で4 km、牛久西方で5～6 kmの幅を有するが、これらの河水が集まる利根川低地では竜ヶ崎で8 km、佐原で6～7 kmの幅を有する。現在の鬼怒川・小貝川ではそれぞれ、川島付近(標高35 m)および下館下流(標高20 m)に縦断勾配の変換点があり、上流の扇状地性低地と下流の谷底平野とが区分され、石下より下流では自然堤防および沼沢地の発達

\* はば、同時に堆積した堆積物によって形成される葉片状の構造で、普通、厚さ0.3～1 cm程度の厚さを有する。

\*\* 筒浦(1965)は鬼怒川、小貝川流域にも河畔砂丘が発達すると記載しているが、この報告では自然堤防と河畔砂丘との区別、分離は行わず、一括して自然堤防としてあわすことにした。

が著しい（池田ら、1977）と報告されている。付図1によれば、石下より上流の小貝川に沿って微高地が認められる。これはさまざまな形状を示すが、現河道または旧河道状低地にそって形成されており、自然堤防\*\*（脚注前ページ）と考えられ、その幅、長さおよび連続状態は下妻付近を境にして、その下流部では上流部に比較し、大規模である。

鬼怒川および小貝川の自然堤防は下妻～水海道の間では前者の規模が大きい。後者は低地の東側に押しやられている。水海道より下流では現在の小貝川に沿う自然堤防はその上流側に比較し、規模が大きい。寛永7年（1630）の瀬替以前の鬼怒川の形成した自然堤防にそって現在の小貝川が流れているためであろう。この自然堤防は牛久付近から現在の小貝川を離れ（寛永年間の小文間の開削により）竜ヶ崎を通り、人工河川である新利根川（寛文中に工事）を斜めに切り、金江津にかけて認められる。

牛久付近より下流に相当する旧自然堤防の間の旧河道は江川などの弱小河川または水田として利用されている。金江津より下流、佐原までは利根川の流路に沿う幅2kmの間に小規模な自然堤防が断続的に発達する。特に利根川の左岸側の沖積低地は旧河道および自然堤防が散在している。しかしながら、その旧河道の幅は現在の利根川のそれより小さく、むしろ、金江津西方の旧自然堤防の間を流れている江川のそれに近い。前述の1/5万地形図 佐原（1909）によれば、神崎北西には沼沢地が、さらに神崎の北東の下結佐付近には利根川の河道が認められる。その後、この利根川は南に移動し、下結佐付近には現在の利根川の河道幅とほぼ等しい旧河道状の地形を残している。一方、木下北方から金江津にかけて、主に、利根川の流路にそって自然堤防が発達するが、利根川の右岸（南側）に比較し、複雑な形態を示す。これは、寛永年間の布佐一布川の開鑿により、利根川の河道が南の木下付近に移動させられたため、左岸（北側）に自然堤防の重合が著しいのに対し、南側では地形形成の時間が短く、地形の重合が少ないことによるであろう。

竜ヶ崎付近より下流には沖積低地の中央部近くに発達する自然堤防と同様に礫まじり砂によって構成される標高3～5mの地形面が前述の台地および下総台地の崖線近くに発達する。その中には、崖端侵蝕谷の谷口および入江状の低地を閉塞する微高地も認められる。柴崎の集落の乗る標高3～5mの地形面は北部で崖端侵蝕谷の谷口を閉塞し、南部に向い三角状に突出するいわゆるカスプ状地形をなす。この先端部から西に向かい、台地の南を限る崖線の一般走向に協和的な走向を有する2列の微高地が認められる。内側の微高地は0.5kmで消滅するが、外側の微高地は西方の上根本、長峰に向かい断続的に分布する。この微高地は標高3～2.5mの高度にあり、その南側の低地との比高は1m<sup>\*</sup>である。長峰から西方の八代町（標高5～7.5m）、さらに竜ヶ崎の城下付近にも、標高5m<sup>\*</sup>の地形面が認められる。城下では竜ヶ崎の市街地を乗せる自然堤防と連続し、その区別は明瞭ではない。

柴崎より東にも谷中、下太田、桑山、市崎、横須賀、幸田、釜井、前芝の各地に崖端侵蝕谷の谷口を閉塞する微高地および標高3～5mの地形面が認められる。この地形はさらに、阿波崎、北須

賀、甘田へ続いている。その形態から、阿波崎、甘田は離水カスプ、谷口を閉塞する微高地は離水砂嘴と考えられる。小貝川に切られる小文間の丘陵は利根川の低地帯の中に東西に長い紡錘状を示している。この丘陵にも、侵蝕谷を閉塞する、標高4～6mの微高地が発達しており、押戸一大房間に特に明瞭である。この地形面の高度は竜ヶ崎市街の乗る自然堤防（標高5m）より高いことなどから海成の地形面として図示したが、詳細な検討が必要であろう。

一方、利根川右岸にあたる木下西方の浅間前新田にも台地を刻む侵蝕谷を閉塞する標高4～5mの地形面があり、現沖積面との比高は2m余である。安食東方の木塚部落は西方の丘陵から南東に突出する標高4～5mの微高地上に位置する。これに対応して、北辺田から須賀～酒直にかけて北東から南西、さらに南東へ曲る標高4～5mの微高地が認められ、幅の広い侵蝕谷の谷口を狭めている。同様の地形は北東方の矢口、台、石橋、長沼、茅場、安崎、磯部、滑川、西須賀、四谷、水掛に発達するが、特に、滑川では2重の離水砂州が認められ、背後の砂州は谷口を完全に閉塞している。これらの東の高岡、小松、神崎、江口、西部田～堀ノ内、大戸山～谷中、森戸にかけては下総台地を限る崖線近くに、上記と同様の地形が分布している。

以上のことから、佐原西方の利根川低地、鬼怒川、小貝川低地には、一般に、自然堤防が発達する。その規模は金江津より上流では、下流側に比較して大きく、自然堤防の重合が行われている。沖積低地の中央部に発達するこれらの自然堤防に対し、筑波・稻敷台地および下総台地の基部近くには、これらの台地を刻む崖端侵蝕谷の谷口を閉塞する微高地および、それに続く沖積低地上位面が認められ、その分布形態から、離水砂嘴又は砂州および離水カスプなどの海成の地形と推定される。

これらの離水砂嘴・砂州などの地形の発達には竜ヶ崎より下流側の標高3～6mの高度に認められ、霞ヶ浦沿岸低地の沖積低地上位面と、ほぼ同時期の形成によるものと推定される。竜ヶ崎より上流側にこれらの地形の発達が悪いのは河川による堆積にともなう地形の重合により、海成の地形が埋積されたか、その発達が、上流では貧弱であったためであろう。貞方（1972）は下妻（山尻および若宮）の厚さ3m余の自然堤防が8～9Cから14Cに形成され、下流の竜ヶ崎（宮淵）の自然堤防下の泥炭の<sup>14</sup>C年代が770±110Y. B. P.を示すことから、1,180～1,630の間に厚さ1.6mの自然堤防が形成されたと記載し、下妻では8～14C、竜ヶ崎では12～17Cに堆積の大きな時期があったと推定した。貞方（1972）は堆積力の大きな時期を考えたが、小貝川、鬼怒川および、利根川の低地の地形学図をみると、むしろ、海退により、浅海性の低湿地上を延長河川である鬼怒川・小貝川が下流に向かって伸長するのに伴い、旺盛な自然堤防の発達の下流に向い進出させてきたと考える方がより適当であろう。吉田（1910）は古文書の考察から、9C頃の竜ヶ崎付近は沼沢地又は内湾状態であったと解釈している。

#### (6) 巴川・七瀬川低地

行方、鹿島の台地を分離し南東流し銚田で北浦に流入する巴川流域では上流の柴高から世楽、上吉影、下吉影、青柳、借宿、野友にかけて、標高10~25mの高度に河岸段丘が発達する。行方、鹿島の台地および、上述の段丘に挟まれる沖積低地は上流で0.5km、下流で1.5kmの幅を有するが、この沖積面上には自然堤防は発達していない。巴川に比較すると、小さな七瀬川流域にも石八戸、鎌田、徳宿新田、飯名の標高10~20mの高度に河岸段丘が発達する。本流域においても巴川流域と同様に自然堤防の発達は見られない。この七瀬川下流部の銚田の市街地の乗る微高地は標高3~5mの高度にあり、七瀬川の谷口を閉塞し西方の塔崎に続いており、河川の流向に対し、ほぼ直交する走向を有する。

#### (7) 北浦湖岸低地

この北浦湖岸にそう低地は標高6~7m以下で、一般に標高1~3mの高度に発達し、0.3~0.7kmの幅を有する。霞ヶ浦沿岸低地と同様、この北浦沿岸の低地でも、標高3~7mの上位面と、標高1~3mの下位面から構成され、上・下位のいずれの地形面上にも微高地が認められる。ここでは説明の都合上、北浦を(a)西岸と、(b)東岸に分けて記載することにした。

##### (a) 北浦西岸沿いの低地

北浦西岸沿いの低地は標高5m以下の高度にあり、比高0.5~3mの小崖で区分される標高3~5mの上位面と標高1~3mの下位面により構成される。古瀬、穴瀬、鶴ヶ居、馬渡、天掛、新宿、白浜、宇崎、新宮~小泉にかけ新治台地を限る崖線にそった標高3~5mの高度に上位面が発達する。その一部には崖端侵蝕谷の谷口を閉塞する微高地(離水砂洲)が認められる。この上位面は天掛付近の観察によると、径2~3cm以下の円礫まじり砂層により構成されている。出入の激しい北浦西岸の湾頭には4本の河川が流入し、北部の武田川および山田川には低位の河岸段丘が発達する。山田川ぞいの段丘面と沖積面との比高は下流の宮下で4m<sup>±</sup>、上流の行戸で3mを示し、上述の湖岸ぞいに発達する上位面に続くように見える。低位面は上位面と比高1~3m前後の崖線で区分され、上位面の前面に発達し、帆津倉および吉川付近の観察によると径3~4cm以下の円礫又は砂層より構成されている。小舟津、吉川、天掛、金谷、水原、新宮~洲崎の低位面上には現汀線と協和的な走向の微高地が発達している。低位面との比高は吉川で0.5m、新宮で0.3mを示し、その幅は一般に50m程度である。南部では、この微高地は低位面上の湖岸線寄りに分布し、沿岸洲の発達による浜堤状地形をなす。

##### (b) 北浦東岸沿いの低地

北浦東岸ぞいの低地は標高7m以下の高度にあり、比高1~4mの小崖で区分される標高3~7mの上位面と標高1~3mの低位面によって構成されている。上位面は銚田、梶山、井ノ塚、札、額賀、須賀、爪木、木滝にかけて鹿島台地を限る崖線近く、および岬状に突出した前面に発達する。この上位面にも、西岸沿いの上位面と同様、離水砂嘴・砂洲が認められるが、その発達は西岸ほど

ではない。この面の構成層は爪木の観察によると径5cm以下の円礫まじり砂層であり、西岸の上位面構成層と、ほぼ同様の構成物質よりなることが知られる。低位面は上位面と比高1～3mの小崖で区分されるが、北部では南部に比較して、崖線の発達是不明瞭で、その区分は容易ではない。

この低位面は銚田付近、重作西方、井ノ崎北方、田塚西方、江川～沼里～居合、沼尾、爪木、新田～長洲付近の標高2～3m以下に発達する。掛崎～居合、爪木～新田～長栖では、湖岸寄りに現汀線と協和的な走向の幅2～300m以下、標高1～3mの微高地が、居合では、さらにこれらの外側の湖岸近くに幅50m以下の微高地が認められる。北浦の東岸では西岸に比較し、湖岸線の出入は小さいが、岬状の台地の突出および中小河川の微小なデルタの形成に対応した小さな屈曲が認められる。以上のことから、北浦沿岸の低地にも、標高3～5mの上位面と3m以下の低位面が発達し、上・下のいずれの地形面にも離水砂洲および沿岸洲から発達した浜堤が認められる。これらの地形、特に浜堤の発達は北浦の南半部に著しい。

#### (8) 佐原以東の利根川低地

佐原以東の利根川低地は7～11kmの幅を有し、標高1～8mの高度に発達する。この低地の北側の牛堀～横須賀～潮来～小泉では標高4～6mの高度に行方台地の南を限る崖線の一般走向に協和的な走向の微高地があり、背後の侵蝕谷の谷口をほとんど閉塞する。この微高地は砂層により構成されており、籠瀬(1975)、田野(1980)らの推定したように離水砂洲と解釈される。牛堀～潮来の離水砂洲の前面には現沖積低地を挟み、現在の湖岸線に協和的な走向の微高地が新田、古宿～西浜、永山西方、横須賀の標高1m余の高度に発達する。これは、常陸利根川とほぼ併走しており、自然堤防とも考えられるが、霞ヶ浦及び北浦沿岸に発達する微高地(沿岸洲の発達した浜堤)に似ている。

利根川北部には上述のように標高4～6mの離水砂洲が発達するが、利根川以南にも同様の地形が認められる。佐原の市街地は西北方の境田および北東の西辺田から牧野の方向に、それぞれ伸長した標高3～5mの微高地上に位置し、牧野以南の幅広い侵蝕谷の谷口を閉塞している。特に、西辺田から仁井宿に伸びる微高地は、現在では境田～西辺田の一続きの微高地を形成しているが、細かくみると、仁井宿付近で分岐しており、分岐砂嘴として形成されたことは明らかである。同様の地形は小見川付近にも認められ、北西の大倉および東方の原宿から小見川の市街地(羽根川)に向けて伸びる標高2～5mの微高地が、その背後の埋積谷の谷口を閉塞している。この微高地の頂面は、比較的平坦な標高4～5mと4m以下の2つの地形面からなり、低位の地形面は上位面より北側(外側)に認められるが、小見川市街から羽根川、小見にかけては上位面よりなる離水砂嘴の先端から内側(南側)にまわり込んで発達している。一方、これらの離水砂洲に対し、黒部川の低地の周囲の下総台地を限る崖線近くには標高5～8m(沖積低地との比高2～3m)の地形面が認められ、普通畑または集落として利用されている。これらの地形面は上述の上位面に対比されると思われる。

小見川市街の北（八日市場の東）には黒部川の流路に並行する標高 $1\text{ m}^{\pm}$ の微高地が発達するが、分布状態から、自然堤防と考えられる。

小見川の東の笹川でも、北西の新切、および東の伊勢から中内にかけて微高地が発達し、下総台地を刻む侵蝕谷の谷口を閉塞している。この微高地は標高 $3\sim 7\text{ m}$ の地形面と標高 $1\sim 3\text{ m}$ の地形面により構成され、この2つの地形面の比高は鹿野戸で $3\text{ m}^{\pm}$ を示し、低位面は高位面の北側の新切-新田に位置する。この微高地は伊勢西方の観察によると、径 $5\sim 6\text{ cm}$ の円礫まじり砂層により構成されており、砂層中には貝殻片あるいは土器片が散点している。笹川の南東の羽計-谷津の下総台地の崖下には標高 $5\sim 6\text{ m}$ （沖積低地との比高 $1\sim 2\text{ m}$ ）の地形面が認められ、谷津では、さらに小さな侵蝕谷の谷口を閉塞している。

笹川-銚子間の利根川右岸には標高 $4\text{ m}$ 以下、標高 $5\sim 8\text{ m}$ 、標高 $10\text{ m}^{\pm}$ の地形面が発達する。この地形面は北西-南東走向の下総台地を限る崖線と利根川に挟まれ、 $1.3\text{ km}$ 以下の幅を有する。上述の崖線より西側の台地を下刻する侵蝕谷には標高 $30\sim 42\text{ m}$ の高度に河岸段丘が認められる。この段丘は地形面の高度から上位面に区分しているが、上記の崖線で、その下流側が切られており、ロームによる正確な対比は今後の問題として残されている。

標高 $10\text{ m}^{\pm}$ の地形面は上記の崖線にそい、新田西方、今泉、桜井、富田町、船木町、柴崎町西方、春日町に断片的に認められ、その幅は最大で $150\text{ m}$ 、一般に $50\text{ m}^{\pm}$ 以下である。標高 $5\sim 8\text{ m}$ の地形面は北西の新宿-東今泉、宮原町、桜井町-塚本町-柴崎町-春日町にかけて発達する。この面は幅 $1\text{ km}^{\pm}$ を示し、下位の標高 $2\sim 4\text{ m}$ の地形面との崖線近くに標高 $6\sim 7\text{ m}$ 、幅 $300\sim 1,000\text{ m}$ の微高地を乗せている。この微高地は新宿から南東の東今泉にかけて緩やかなカーブを描く微高地と、宮原町、船木町-春日町にかけて発達する小丘状の微高地に分けられ、前者はその形態から離水砂嘴をなすものと考えられる。後者の構成層は余山南方の観察によれば、下部に向かい、厚さ $0.5\text{ m}$ の褐黒色砂、厚さ $1\text{ m}^{\pm}$ の褐色砂、厚さ $0.5\text{ m}$ の黒褐色砂、水平層理を有する厚さ $2\text{ m}$ 以上の褐色砂層からなる。最下部層の褐色砂層は明らかに水成の堆積物であり、これを被覆する褐色砂層は表層の褐黒色砂（腐植砂層）と似ており、地表部で形成されたと考えられる。従って、上部の褐色砂は二次的な堆積物であり、この地形面の陸化後に堆積したものと思われる。小笠原（1952）はこれらの小丘を砂丘または砂堆としたが、以上の事実から、砂丘と推定される。

標高 $2\sim 4\text{ m}$ の地形面は新宿-宮原町、芦崎町-四日市場町にかけて微高地をなし、下位の沖積低地との比高は $0.8\text{ m}$ 程度である。牛堀-潮来の行方台地および鹿島台地と佐原-銚子の下総台地に挟まれた利根川下流の低地帯のうち、佐原-潮来間の横利根川ぞいの砂場、長島、八筋川、本津、大島および、大割-下ノ洲では標高 $1\sim 1.5\text{ m}$ （沖積面との比高は $0.5\text{ m}$ 以下）の微高地が認められる。付図の地形学図では自然堤防として示されているが、砂洲、その他人工による地形も混在している可能性がある。本地域の沖積低地は標高 $1\text{ m}^{\pm}$ にあり、 $1/5$ 万鹿島（陸地測量部、1903）、 $1/5$ 万潮来（国土地理院、1974）の地形図の比較によっても地形変化が著しく、現在、形成されつつ

ある低地（三角洲性低地）と考えられる。

外浪逆浦の東には栗生、息栖、神栖、波崎の集落の乗る標高5～10mの地形面が発達し、その上には砂丘が乗っている。これらの砂丘は近年の鹿島の工業開発により、人工的に削られ、本来の形態を保っているものは少ない。鹿島の掘込み港の建設に伴い、神之池は消滅し、かわって人工池が造られている。このように、鹿島港を中心に、地形改変が著しく、かつて、神之池の周辺に発達した低地の分布は追跡できないが、開発前の地形図および研究報告に示された地形学図等によれば、この地形面は大野原、一貫野、波崎の3つの地形面によって構成されていた様である。この中で、北部の大野原は高浜付近の観察によれば、下部に向って厚さ1.5mの褐色砂、厚さ0.3mの黒色砂（腐植砂層）、厚さ1.2m以上の径5～6cm以下の円礫まじりの砂層により構成されている。本層の下部層は多田（1948）の息栖層に相当するであろうが、上部の褐色砂は黒色砂上に乗り、比較的新しい2次堆積物と推定される。従って、これらの砂丘地形として認められる場所以外の地形面も単純な海岸平野の原面ではなく、その上には薄い2次堆積の砂層（砂丘砂）を乗せているものと思われる。

本地域の低地の地形を地区別に記載してきたが、大きく、霞ヶ浦、北浦沿岸低地とそれに流入する桜川、恋瀬川、園部川、小野川、巴川、七瀬川の低地および小貝川・鬼怒川・利根川低地に分けられよう。霞ヶ浦・北浦沿岸の沖積低地は標高3m以上の上位面とそれ以下の下位面に区分され、上下のいずれの地形面にも離水砂嘴・砂洲および浜堤が発達する。この霞ヶ浦・北浦に流入する河川の中・上流部には低位の河岸段丘が認められる。付図の地形学図によるとこれらの段丘面は一般に河川の右岸（西側）に発達がよい。

これらの低地の中で、最も規模が大きい桜川の低地では、上～中流にかけて、自然堤防の発達が著しく、下流部では離水砂嘴・砂洲が認められる。この自然堤防は桜川を除く他の河川流域ではほとんど発達していない。高浜入および小野川のエスチュアリーの下質が泥質よりなるのに対し、土浦入では砂質泥から構成されており、陸上の地形、特に自然堤防の発達の程度とよく対応している。小貝川・鬼怒川・利根川低地は本地域の中で最も幅が広く、それに対応して自然堤防の発達も著しい。その自然堤防は下流部の小見山付近まで発達するが、中流部の金江津より上流では、その発達は著しく、規模の大きな微高地が形成されている。鬼怒川及び小貝川はその旺盛な自然堤防の形成地域を下流に向って発達させてきたことが知られる。この自然堤防の発達は竜ヶ崎以東では低地の中央部付近に限られており、背後の台地との崖線近くには標高2～7mの上位面が発達し、その一部は離水砂嘴・砂洲あるいは離水カスプをなす。この上位面は下位面と1～4mの比高を有し、霞ヶ浦・北浦沿岸低地の上位面に対比される。この面はいずれもローム層に被覆されず、堆積物中の木片の<sup>14</sup>C年代等から、いわゆる後氷期の海侵（縄文海侵）による高海水準時に形成されたものと推定される。また、この地形面は利根川下流部の息栖～波崎では標高4～6m、銚子付近では標高5～8mの高度にあり、花井（1938）が指摘した程、著しいものではないが、関東造盆地性の地盤



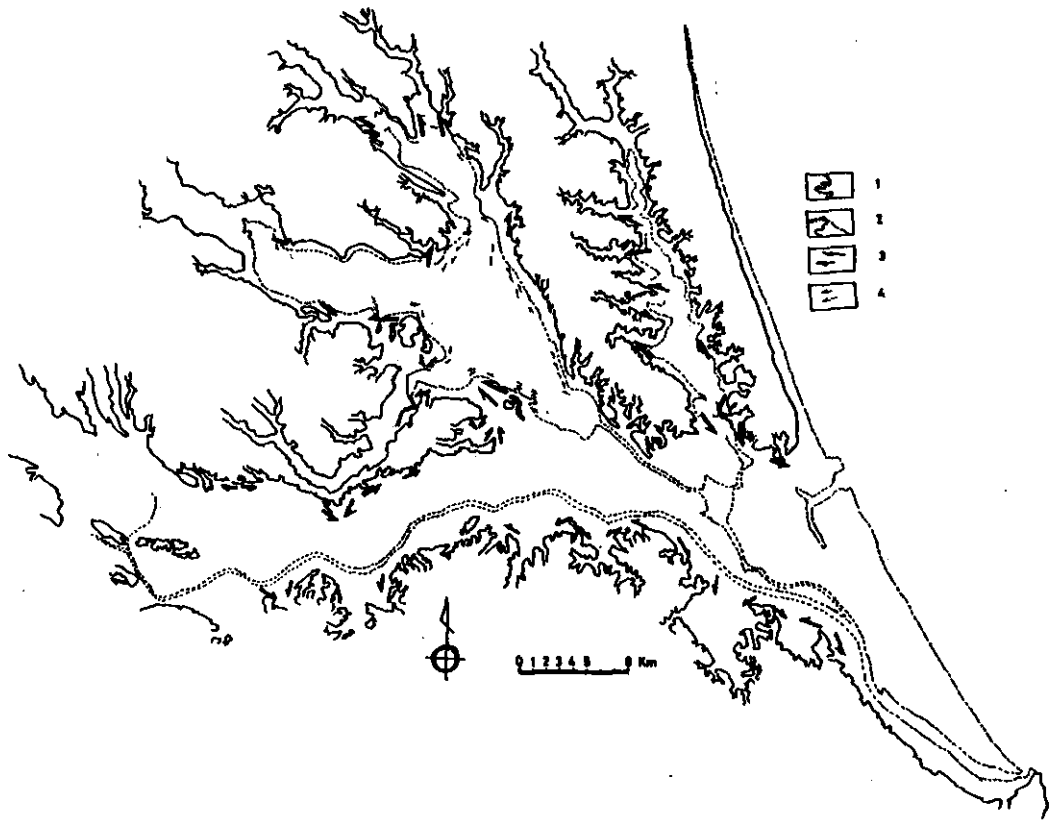


図 2 沖積低地上位面上の微地形から推定された古沿岸流の流向分布図 (宇都宮原図)

Fig. 2 Direction of coastal current deduced from the micro-topographies (about 6,000 Y. B. P.) on the upper Alluvial plain.

Legend

- 1) Scarp line at the rear of alluvial lowland (it may coincide shoreline ;6,000Y. B. P)
- 2) Shoreline and river course of the existing topographies.
- 3) Deduced direction of the coastal current.
- 4) Direction of coastal current deduced from the micro-topographies of L. Kasumigaura.

運動が知られる。以上の地形学的事実から、沖積世の高海水準時の海域は利根川流域では竜ヶ崎付近、桜川流域では上境～金田付近、園部川流域では小川付近、北浦では鉾田まで追跡可能である。図2は沖積低地上位面および下位面に発達する離水砂嘴・砂洲の伸長方向から推定された古流向（特に沿岸流の流向）を示したものである。本図によると、この地域が内湾状態にあった時期の沿岸流は現在の霞ヶ浦の沿岸流よりも大規模であったことが推定される。また、その走向は局地的な走向しか示さず湾流を推定するにはデータが不充分である。これは、当時の地形の一部しか残されていないことによるであろう。

#### 4. まとめ

霞ヶ浦とその周辺の地形について、既存資料の検討、航空写真の判読と現地調査により作成された地形学図をもとに考察した結果、以下のことが明らかとなった。

1. 本地域の地形は山地、台地、河岸段丘（上位・下位面）、沖積低地（上位・下位面）に区分される。沖積低地上位面には砂嘴・砂洲およびカस्पなどの海成の地形が、低位面上には自然堤防の発達ที่著しい。

2. 台地は鹿島、行方、石岡、新治、筑波・稲敷台地および真岡・関城台地から構成されている。これらの台地の高度変化等から、いわゆる関東造盆地運動の外に局地的な変動—小野川下流部の曲隆および小貝川に沿う西落ちの南北走向の活構造—が推定された。

3. 河岸段丘面は上・下の2面に分けられるが、上位面は銚子付近にのみ発達し、低位面は河川の中～上流にかけて左岸側に認められる。

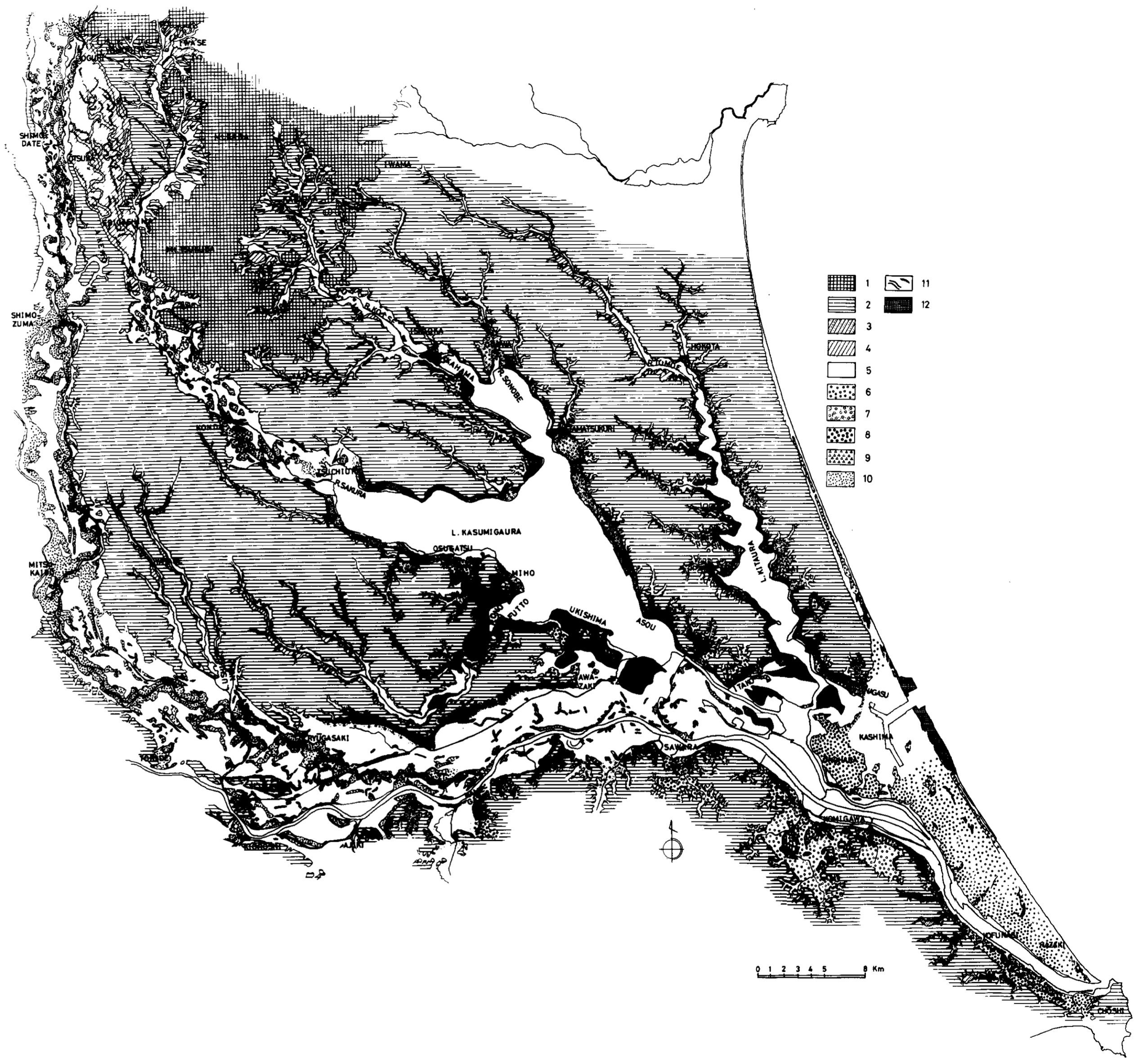
4. 沖積低地上位面は沖積世高海水準時（いわゆる縄文海侵）に形成された地形面で、この地形面上の海成の地形の発達から、地形学的に海域の範囲を推定することが可能である。また、上記の地形形成期における沿岸流の流向も推定することができる。

#### 引用文献

- 青木直昭・馬場勝良（1977）：茨城県南西部の竜ヶ崎層、筑波の環境研究，2，114—120。  
青木直昭・馬場勝良（1979）：霞ヶ浦—北浦地域の下総層群、筑波の環境研究，4，186—195。  
青木直昭（1980）：関東平野中央部の地下地質の研究、筑波の環境研究，5，26—50。  
青木直昭・馬場勝良（1980）：茨城県沼沼地域の下総層群、筑波の環境研究，5，36—38。  
江坂輝彌（1971）：遺跡の分布からみた海岸線の変化、海洋科学，3，614—621。  
江坂輝彌（1972）：自然環境の変貌—縄文土器文化期における—、第四紀研究，11(3)，135—141。  
江坂輝彌（1975）：関東平野における貝塚遺跡から見た沖積世における海岸線の進退、日本大学地理学科50周年記念論文集，69—74。  
藤下利男・松本一明・堀江宏保・小川富美子（1967）：霞ヶ浦の土質調査および湖底土の土性について、港湾技研資料，No27，2—66。  
花井重次（1938）：関東構造盆地東縁の地形と造盆地運動の分析、地理，1(1)，92—107。  
原田嘉兵衛（1960）：利根川流域の土地利用—小貝川下流と田中遊水池—、地理，5(3)，322—225。  
長谷川康雄（1966）：関東平野の後～晩期縄文時代における沖積土の微古生物学的研究。—化石・珪藻について，そのⅠ。資源科学研究所彙報，67，73—83。  
長谷川康雄（1966）：関東平野の後～晩期縄文時代における沖積土の微古生物学的研究。—化石・珪藻について，そのⅡ。資源科学研究所彙報，67，84—96。  
長谷川康雄（1967）：関東平野の後～晩期縄文時代における沖積土の微古生物学的研究。—化石・珪藻について，そのⅢ。資源科学研究所彙報，68，139—151。  
長谷川康雄（1967）：関東平野の後～晩期縄文時代における沖積土の微古生物学的研究。—化石・珪藻について，そのⅣ。資源科学研究所彙報，69，139—157。  
池田宏・小野有五・佐倉保夫・増田富士雄・松本栄次（1977）：筑波台地周辺低地の地形発達—鬼怒川の流路，変更と霞ヶ浦の成因—、筑波の環境研究，2，104—113。

- 池田宏・小野有五・佐倉保夫・増田富士雄・松本栄次 (1976): 鬼怒川の流路変更と筑波研究学園都市周辺の地形発達. 日本地理学会予稿集, 10, 83—84.
- 石井基裕 (1962): 関東平野の基盤. 石油技術協会誌, 27, 405—430.
- 井関弘太郎 (1977): 沖積世の海面変動. 日本の第四紀研究. 日本第四紀学会, 東京, 87—97.
- 籠瀬良明 (1975): 関東および周辺の戦後の綿作地域. 日本大学地理学科50周年記念論文集, 51—65.
- 籠瀬良明 (1975): 隆起砂洲上の潮来, 古鬼怒湾の海面高. 地理, 20(8), 104—105.
- 籠瀬良明 (1976): 北浦のむら. 地理, 21(7), 72—75.
- 籠瀬良明 (1976): 北浦・霞ヶ浦岸の条理水田と用水. 日本地理学会予稿集, 10, 216—217.
- 貝塚爽平 (1958): 関東平野の地形発達史. 地理学評論, 31(2), 59—160.
- 貝塚爽平 (1961): 日本の新期洪積段丘にみられる波状の変形. 辻村古稀記念論文集, 119—131.
- Kaizuka, S. (1967): Rate of Folding in the Quaternary and the Present. Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University, No. 2, 1—10.
- 国土地理院 (1972): 土地条件図. 野田.
- 国土地理院 (1977): 土地条件図. 竜ヶ崎.
- 国土地理院 (1978): 土地条件図. 佐原.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 八日市場.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 鉾田.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 水海道.
- 国土地理院 (1977): 土地条件図. 土浦.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 玉造.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 潮来.
- 国土地理院 (1979): 土地条件図. 銚子.
- 国土地理院 (1980): 土地条件図. 小山.
- 菊地隆男・館野俊男 (1962): 茨城県江戸崎町および千葉県多古町周辺の第四系. 地質学雑誌, 68 (796), 17—28.
- 菊地隆男・常総団研グループ (1965): 霞ヶ浦南方洪積台地の地質. 地質学雑誌, 71 (838), 359.
- 菊地隆男 (1968): 茨城県鹿島半島北部の地形発達史. 資源科学研究所彙報, 70, 63—76.
- 菊地隆男・羽島謙三 (1969): 古海岸平野研究への提言. 一海岸平野としての関東洪積台地. 海岸平野, 141—146.
- 木内四郎兵衛・岩下茂子 (1968): 利根川下流域における地下水—特に小貝・佐原・鹿島域における地下水の塩素含有量について. 地理学評論, 41(7), 450—460.
- 真野勝友 (1965): 成田層の層相と下底の地形との関係. 一霞ヶ浦・北浦および北浦および北浦周辺の第四系. 地質学雑誌, 71 (835), 155—166.
- 三井嘉都夫 (1951): 利根川, 小貝川, 合流点付近における水害の研究. I. 資源科学研究所彙報, 19—21, 103—110.
- 成田研究グループ (1962): 下末吉海侵と古東京湾. 地球科学, 60・61, 8—15.
- 小笠原義勝 (1951): 日本の風蝕地形に関する若干の考察—下北半島および関東・東部を中心として—. 資源科学研究所彙報, 19—21, 110—118.
- 小笠原義勝 (1952): 関東東部における先史時代以降の地形発達史概報. 資源科学研究所彙報, 26, 82—90.
- 大炊御門経輝 (1931): 霞ヶ浦付近の洪積層について, (演旨). 地質学雑誌, 43 (513), 457—458.
- 大竹一彦 (1963): 潮来付近. 地理, 8(1), 1, 174—1, 175.
- 大槻文彦 (1900): 常陸の霞ヶ浦の地変. 歴史地理, 1(6), 173—175.
- 大矢雅彦 (1975): 地形分類による関東地方の河成平野の比較研究. 日本大学地理学科50周年記念論文集, 75—89.
- 貞方昇 (1972): 鬼怒川下流氾濫原の形成過程. 日本地理学会予稿集, 2, 20—21.

- 齊藤登志雄 (1959) : 霞ヶ浦の自然立地条件. 霞ヶ浦北浦地域総合研究報告書, 第1集, 1—21.
- 齊藤登志雄 (1961) : 霞ヶ浦附近の天然ガス. 霞ヶ浦北浦地域総合研究報告書, 第2集, 1—8.
- 齊藤登志雄 (1963) : 茨城県廉島群南部の地質学的考察. 霞ヶ浦北浦地域総合研究報告書, 第4集, 8—13.
- 阪口豊 (1968) : 沖積世における関東平野中央部の陸化期の年代. 第四紀研究, 7, 57—58.
- 佐藤正・市川正己・榎根勇・海老原寛・新藤静夫・青木直昭・小沼直樹・田中正 (1979) : 筑波地区における深層地質, および深層地下水の地球科学的研究. 筑波の環境研究, 4, 136—147.
- 佐藤正・新藤静夫・青木直昭・市川正己・榎根勇・田中正・小沼直樹・海老原寛 (1980) : 筑波地区における深層地質および深層地下水の地球科学的研究, —その2—. 筑波の環境研究, 5, 1—8.
- 新藤静夫 (1975) : 常総台地の地下水. 東洋大学工学部昭和50年研究報告, 53—71.
- 杉原重夫 (1970) : 下総台地西部における地形の発達. 地理学評論, 43, 703—718.
- 杉原重夫・高原勇夫・細野衛 (1972) : 武蔵野台地における関東ローム層と地形面区分についての諸問題. 第四紀研究, 11(1), 29—39.
- Sugimura, A. and Naruse, Y. (1954) : Changes in sea level, seismic upheavals and coastal terraces in the Kanto region, Jpn. J. Geol. Geogr., 24, 101—176.
- 菅野三郎・鈴木淑夫・佐藤正・藤井隆・猪郷久義・青木直昭・本間久英・増田富士雄 (1980) : 筑波研究学園都市地域の地質. 筑波の環境研究, 40—42.
- 鈴木正章 (1979) : 茨城県協和台地の段丘地形と関東ローム. 日本地理学会予稿集, 16, 44—45.
- 多田文男 (1948) : 廉島半島の侵蝕砂丘. 地理学評論, 21, 18—24.
- 多田文男・入江敏夫・三井嘉都夫 (1948) : 遠州横須賀附近干潟の地下水の諸性質とその遠洲灘地震による変化. 資源科学研究所彙報, 41(2), 52—56.
- 多田文男 (1964) : 自然環境の変貌. 東大出版会, 東京, 282pp.
- 高木勇夫 (1975) : 関東地方における河川下流域の地形面と条里について, 日本大学地理学科50周年記念論文集, 91—101.
- 田野宏 (1980) : 霞ヶ浦北浦岸における水稻・蓮根栽培地の土地条件. 地図, 18(1), 1—10.
- 東木龍七 (1928) : 侵蝕面の発達史より見たる霞ヶ浦地方の地殻運動. 地理学評論, 4(2), 157—174.
- 東木龍七 (1926) : 貝塚分布の地形学的考察. 人類学雑誌, 41(1), 524—552.
- 筒浦明 (1965) : 関東平野における河畔砂丘の地形学的研究. 北海学園大学学術論集, 9, 1—22.
- 上杉陽・遠藤邦彦・岡重文・菊地隆男・羽鳥謙三・府川宗雄 (1977) : 関東地方の第四紀構造盆地の形成過程に関する一考察. 地質学論集, No.14, 133—149.
- 漆原和子 (1972) : 廉島半島の砂丘地形. 日本地理学会予稿集, 2, 18—19.
- 宇都宮陽二郎 (1979) : 霞ヶ浦の湖底地形とその堆積速度について. 国立公害研究所研究報告, 第6号, 7—21.
- 宇都宮陽二郎 (1979) : 霞ヶ浦の湖底地形とその堆積速度について. 日本地理学会予稿集, 16, 88—89.
- 和島誠一・松井健・長谷川康雄・岡本勇・塚田光・田中義昭・中村嘉男・小宮恒雄・黒部隆・高橋健一・佐藤孜 (1968) : 関東平野における縄文海進の最高水準について. 資源科学研究所彙報, 70, 108—129.
- 渡辺景隆・梶橋昇 (1962) : 那須野ヶ原の関東ローム—那須野ヶ原の水理地質. 4. 地質学雑誌, 68(803), 451—460.
- 吉田東伍 (1910) : 利根川治水論考. 254p. 復刻版, 崙書房, 1974, 千葉県流山.
- 常総団研グループ (1969) : 常総台地の第四系について. 海岸平野, 155—158.



付図 1 霞ヶ浦とその周辺地域の地形学図 (宇都宮原図)

Enclosure 1 Geomorphological Map of L. Kasumigaura area and its vicinity.

Legend

- |                        |   |   |
|------------------------|---|---|
| 1) Mountain, hill      | 5) Alluvial lowland (delta, back marsh and recently formed lowland) | 9) Dune                                 |
| 2) Plateau             | 6) Alluvial lowland upper (coastal plain)                           | 10) Natural levee                       |
| 3) River terrace Upper | 7) Alluvial lowland lower (coastal and lacustrine)                  | 11) Abandoned river channel, and cliff. |
| 4) River terrace Lower | 8) Sand spit, sand bar and other coastal topographies.              | 12) Reclaimed area                      |

## 2. 霞ヶ浦流域の降水特性および大気中からの栄養塩の供給について

安部喜也<sup>1</sup>

### Precipitation Characteristics and the Fallout Nutrients Supply in the Watershed of Lake Kasumigaura

Yoshinari AMBE<sup>1</sup>

#### Abstract

- 1) The distribution and annual variation of the precipitation in the watershed of Lake Kasumigaura were studied and the secular variation of the total amount of precipitation was calculated to discuss the budgets of water and nutrients in this area.
- 2) To estimate the amounts of nutrients entering the lake water directly from the atmosphere, the concentrations of total-P,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  were determined for the fallout samples collected at NIES monthly in the period from June 1977 to Nov. 1980. The amounts of fallout nutrients per area per month were calculated as shown in Tab.2 from the amount of monthly precipitation and the concentration of the nutrients. Assuming that these values can be applied for the whole area of Lake Kasumigaura (Nishiura), the amounts of total phosphorus and total inorganic nitrogen were estimated as 6 ton/year and 175 ton/year respectively. These values are nearly comparable to those of the major rivers flowing into the lake.
- 3) Comparing the concentrations of N and P in the rainwater and those of total fallout, it was estimated that nitrogen compounds are mainly attributed to the rainwater and phosphorus compounds are to the dry fallout.

#### 1. 霞ヶ浦流域における降水特性

霞ヶ浦の湖水中に、リンや窒素などの栄養塩が入るコースとして、河川からの流入によるもののほかに、大気中から降水や降下物とともに入りこむものがあげられる。こうした栄養塩としては、

---

1. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental  
Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

大気中から水面に直接降下するものもあれば、流域の地表に落下して、他の供給源からの栄養塩とともに河川を通じて流入するものもある。かかる大気からの栄養塩の量を見積っておくことは水域の栄養塩収支を論ずる際の基本的な項目の一つとなる。本章では霞ヶ浦流域に大気圏より供給される栄養塩の総量を推定するための測定結果についてまとめるが、その前段として、大気からの供給の媒体の一つである降水についてとりあげ、この流域における実体について概観することを試み、特に流域全体における降水の総量の算出を目標とし、水収支、栄養塩収支に関する議論の基礎資料とした。

降下栄養塩量の測定を月単位で行っていることから降水に関する議論も月間降水量あるいは年間降水量の単位で行った。用いた降水量資料はいずれも気象庁、気象台の公表資料による。

### 1.1 霞ヶ浦流域における降水量分布

霞ヶ浦の流域としては、本研究所環境情報部が作製した流域図にもとづいて西浦、北浦それぞれの流域を合わせた地域を設定した。

はじめに1941~1970年の平年値<sup>1)</sup>による平均的な分布の概要を図1に示す。霞ヶ浦の流域内にある降水量観測点は真壁、柿岡、美野里、銚田、麻生、筑波山、土浦、館野、龍ヶ崎の9地点である。30年間の平均値で、最大は麻生1,476mm/y、最小は筑波山1,242mm/yでその差は20%たらずで、流域内でそれほど著しい差はないといつてよい。平均的な分布傾向としては、西側の内陸部で低く、南東部の海岸部にむかって高くなっており、また北部の山地域で若干高くなっている。月別の平均値によって分布図をみると、この西低東高のパターンは1、2、3、4、5、10、11、12月の各月にあらわれ、うち4月5月の両月には北部に若干高いところが現われる。6、7、8月の夏の3か月は、南東部が近く、北西が高くなっている。9月はあまり地域差はみられない。平均月間降水量で流域内でもっとも大きな差が出るのは冬季の降水量の少ないときで、2月には筑波山と麻生の間でそれぞれ36mm/月と76mm/月と約2倍の差を示した。

以上の議論は、平年値にもとづいたものであって、平均的なイメージを得るにはある程度有効であるが、年々の水収支の実態を対応するには必ずしも十分な方法でない。こうした平年値は年々の状態の積み重ねであるという観点から、1966年~1978年までの13年間について各年の分布の状況の比較を試みた。資料<sup>2) 3)</sup>の関係で平年値の計算の期間とは必ずしも一致していないが、平年値と類似の分布パターンを示す年と、そうでない年とがあることが認められた。すなわち前者としては、1966、1968、1969、1970、1971、1972、1978年の各年で1974、1975の2年は平年型に似ているが南側がとくに高い分布型で、1973、1976、1977年は流域の北西部から南東部にかけて低い領域が現れるというパターンを示している。1967年度はいずれとも若干異っている。以上のようにこの流域の年々の降水分布のパターンとしては基本的には平年値の分布で示されるタイプが現れることが多いが年によっては、まったくちがったパターンの分布を示すことがあることが認められた。これは降水の起りかた

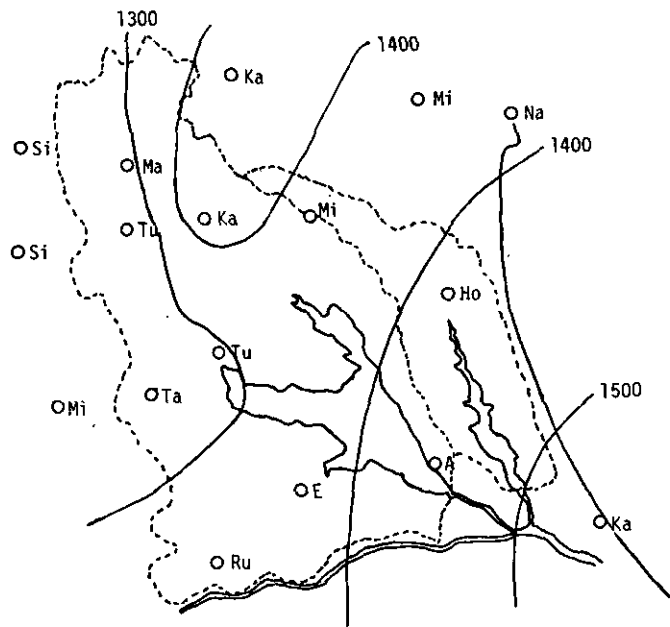


図 1 年降水量平年値 (1941~1970) の分布

Fig. 1 Distribution of the average annual precipitation (mm), 1941—1970

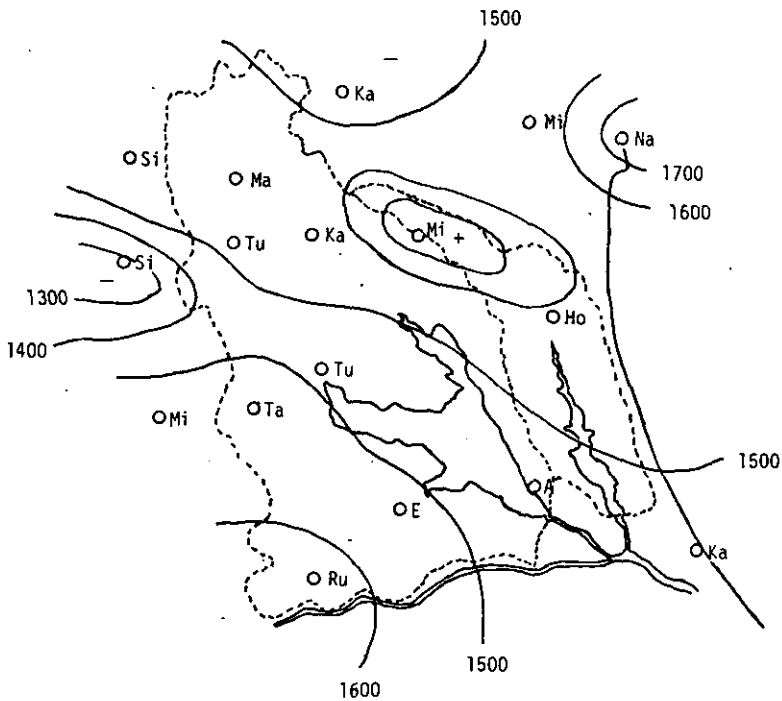


図 2 年降水量の分布の例 (1976)

Fig. 2 Distribution of the annual precipitation (mm), 1976



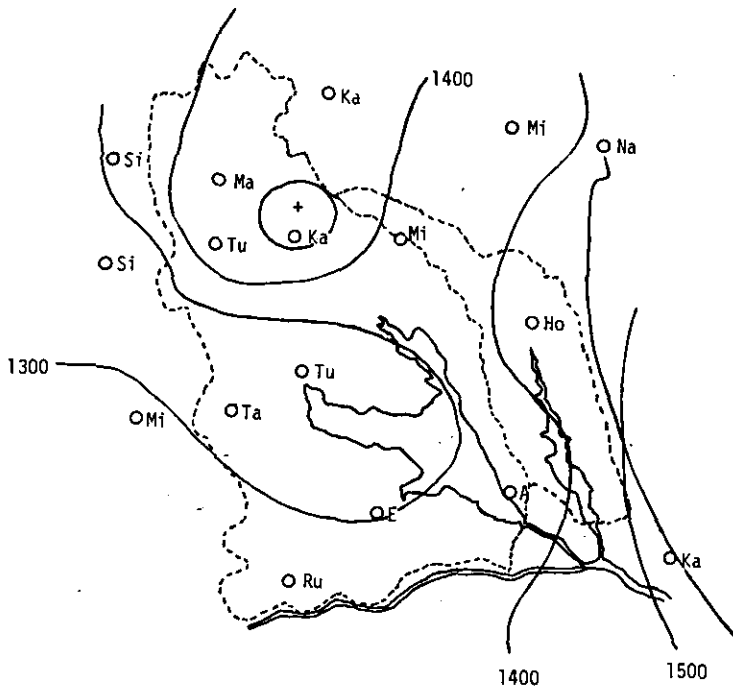


図 3 年降水量の分布の例 (1975)

Fig. 3 Distribution of the annual precipitation (mm), 1975

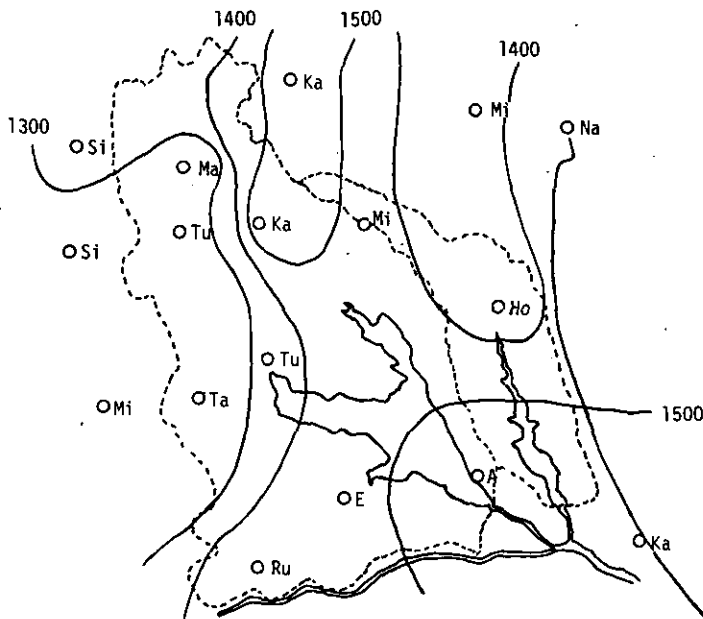


図 4 年降水量の分布の例 (1966)

Fig. 4 Distribution of the annual precipitation (mm), 1966

が年によって異なることを反映していると考えられるが、ここではこれ以上の解析は行わない。

## 1.2 降水の季節変化

霞ヶ浦流域のほぼ中央に位置する土浦の値を例として降水量の季節変化をみる。この地域も基本

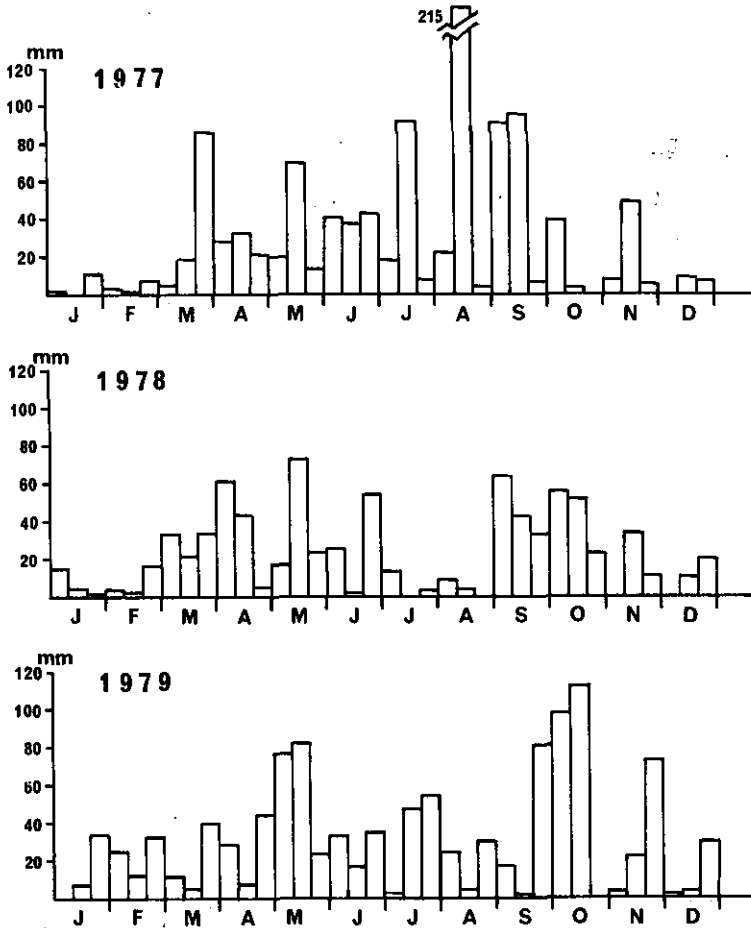


図 5 土浦における降水量の季節変化

Fig. 5 Seasonal variation of precipitation at Tsuchiura

的には表日本型<sup>4)</sup>の季節変動のパターンを示す。すなわち降水量は冬季に少く、春さきにかけて増えはじめ、6月ごろと9月ごろの二回の雨季による二つの山をもち、その間7月末ごろの集中豪雨や夏の雷雨、9月10月ごろの台風といったエピソードがあれば特に多くなるという季節推移をするが、年によっては、このパターンから著しくずれることがある。

降下栄養塩の測定をした1977~1979年の3年について旬毎<sup>2)</sup>の降水量を作製した(図5)。この3年間はいずれも典型的な季節推移型と比べて差があった。すなわち、いずれの年も梅雨季の降水量

がそれほど多くなかった。1977年度にはむしろ8月9日に特に多雨であり、1979年には、冬期における降水量も平年と比べて多かった。

この様に降水量の季節変化のパターンに差異がいちじるしいこともあって、それにともなう降下栄養塩量も季節的な差がきわめて複雑になっている。

さらに年によって季節推移の状態には少なからぬ差があり、それが年間の降水量に反映し年々の変動を生じている。

### 1.3 年間降水量の経年変動

流域内でもっとも古くからの測定値がある筑波山を例として年降水量の経年変動をみると1902年から1976年までの75年間について、平均して約1,300mm/yで最小は893mm/y(1926),最大は2,072mm/y(1920年)である。長期的な変動傾向としては1920年ごろまでの20年間の平均と最近の20年間の平

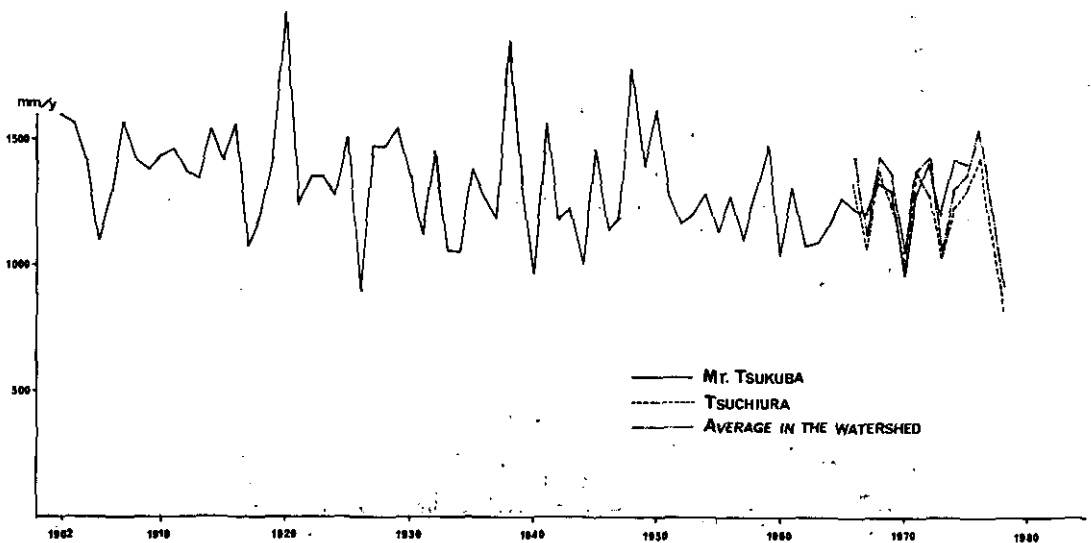


図 6 年降水量の経年変動

Fig. 6 Secular variation of annual precipitation

均と比べるとそれぞれ1,362mm/y, 1,236mm/yとおよそ9%ほど減少している傾向がみられる。しかし、年々の値は図に示すように20~30mm/yの中で変動している。この変動の状態は筑波山と土浦でも類似している。著しい周期的な変動はみとめられないが、1930~1950年の期間は他の期間と比べて変動の幅も頻度も大きかったことが認められる。

#### 1.4 流域における年間総降水量の推定

霞ヶ浦流域のうちとくに西浦流域 (1,641km<sup>2</sup>) 内に降る降水の年間の総量を次の様な方法で、1966~1978年の13年間について求めた。

すなわち、前節で作製した年々の年間降水量分布図で等値線にはさまれた領域の面積を求めて、それぞれに等値線の中間の降水量を乗じたものを積算するいわゆる等雨量線法を用いて総降水量を求め、さらに流域内の平均降水量を計算した。結果を表に示す。

表 1 西浦流域内における年降水量の年平均值および降水全量の経年変化  
Table 1 Average annual precipitation and annual total amount of precipitation in the watershed of Lake Nishiura

	Average annual precipitation	Annual total amount of precipitation
1966	1,425 mm	2.3 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
1967	1,115	1.8
1968	1,425	2.3
1969	1,363	2.2
1970	1,053	1.7
1971	1,363	2.2
1972	1,425	2.3
1973	1,053	1.7
1974	1,301	2.1
1975	1,363	2.2
1976	1,549	2.5
1977	1,301	2.1
1978	929	1.5
mean	1,301	2.1

またこれより求めた流域平均月間降水量の値を図6にプロットすると、土浦、筑波山の値と類似の変動を示すことから、この流域の長期的な降水の経年変化については古くからの測定値がある筑波山の値をもって論じることが可能であることがわかる。

#### 2. 大気降下物にともなう栄養塩量の測定

本研究は、前節でのべた様な降水と、いわゆるドライフォールアウトに伴って、リンや窒素の化合物であるいわゆる栄養塩がどれだけ湖水の水面や流域の地表面に供給されるものか、水域の富栄養化問題において大気圏のもつ意義を評価し、とくに霞ヶ浦流域における栄養塩収支を計算するた

めのデータを得ることを目標とするものである。

降水、あるいは降下物中の栄養塩濃度についての測定はすでに我国でもいくつかの例はあるが<sup>5)</sup>いずれも断片的に行われたものであって、長期間にわたって組織的に測定が行われたものはほとんどない。霞ヶ浦についても茨城大農学部<sup>6)</sup>を中心に行った例があるが、期間も限られており、さらに多くのデータの蓄積が必要とされている。

## 2.1 サンプルング

国立公害研究所研究棟屋上（地上約10m）に直径23cmのガラス製ロートとガラスビンを組合せた採取装置2基を設置し、降水と降下物を一緒にして採取するシステムを1977年6月から開始した。毎月月初めに新しいビンを設定し、月末に1か月分として採取し分析を行った。サンプルング間隔は基本的には30又は31日であるが、時によって若干の長短が生じた場合もある。

ロートには昆虫や大形の固形物が混入するのを防ぐため、直径3cmほどの磁製ルツボのフタを置き、フタとロート壁面のすき間から水が流れ込む様にした。またロートの壁面に付着した降下物はサンプルング時に50mlほどの蒸留水で洗浄して、採水ビンに流し込んだ。

並置した2個の採水ビンには、試水の変質および損失を防ぐため、あらかじめ一方には1N硫酸20mlを入れて、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ の分析に用い、他のビンには1N水酸化ナトリウム溶液20mlを加えておき $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定に用いた。よくふりまぜた試料の一部をとりリンの分析に、また放置した上澄液の一部をとり窒素の測定にそれぞれ用いた。

試料ビン中に降下してから分析までの期間における変化については、特に $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合に濃度によって多少の誤差が生じることも考えられたが、本研究では降下量の大まかな値を知ることとで、この影響を無視することにした。

また試水量とロートの面積とから月間の降水量を求めたが、この値はサンプルング期間における蒸発による誤差と、洗浄水による誤差とを含むものである。

## 2.2 分析操作

栄養塩として分析した項目は、Total  $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の4種であり、それぞれ以下の方法により、いずれもオートアナライザー（Techniron社製）を用いて定量した。<sup>7)</sup>

### i) Total $\text{PO}_4\text{-P}$

けんだく物を含んだ試水100mlを石英ガラス製試験管に入れて、1,200Wの紫外線を3時照射して含まれている有機物を分解した後Murphy, J & Riley, J. Pの方法を用いて測定した。

### ii) $\text{NH}_4\text{-N}$

Solorzano, Lの方法でフェノールの代わりにサリチル酸ナトリウムを用いた改良法によった。

### iii) $\text{NO}_2\text{-N}$

Bendschneider, K. & Robinson, R. J. の方法を用いた。

iv)  $\text{NO}_3\text{-N}$

銅-カドミウムカラムを用いて還元するE. D. Woodらの方法の改良法を用いて、 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ を $\text{NO}_2$ の形で測定し、 $\text{NO}_2$ の分をさしひいて求めた。

v) Total N

以上の測定値より

$(\text{NH}_4\text{-N}) + (\text{NO}_2\text{-N}) + (\text{NO}_3\text{-N})$  をここでTotal-Nと表すが、有機態のNは含んでいない。

## 2.3 結果と考察

### (1) 降下物中の栄養塩濃度の月変動

1977年6月から1980年11月までの約3年半の期間の各月の降水量と採取した試料水の各成分の濃度を表2に示す。これは降水とドライフォールアウトを合わせた溶液の濃度であって、1か月間に降下したリンと無機態窒素の平均値に相当する。測定した期間内で降水の皆無であった月はなく、いずれも溶液の形で測定を行ったが、降水量の少ない場合に極端な高濃度を示したのを別にすると、Total-P濃度は $0.1\text{mgP/l}$ 以下、Total-Nは $2.0\text{mgN/l}$ 以下であった。濃度については図7, 8に示すように降水量とほぼ反比例する傾向がみとめられた。

Nについては2, 3の例外を別にすると、Total-Nの $1/2 \sim 2/3$ が $\text{NH}_4\text{-N}$ であり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ は時に $\text{NO}_3\text{-N}$ と同じレベルになることもあるが、ほとんどの場合 $\text{NO}_3\text{-N}$ の $1/10 \sim 1/30$ 程度である。

季節な変動特性は濃度については雨量と逆の関係を示しており、降水の多い月には低く、少ない月には高くなっているが、さきにも述べた様に測定した各年において降水の季節性がそれほど明確でなかったため、栄養塩濃度の方もあまりはっきりした季節特性があらわれていない。

### (2) 単位面積あたりの栄養塩の総降下量について

試料水中の栄養塩濃度に降水量を乗ずることにより、単位面積あたりの月間降下量が得られる。結果を表3に示す。カッコの中はサンプリング日数を30日とした場合の値である。

Total-PとTotal-Nの面積あたり降下量の年変化を図9に示す。一部の時期には両者の間に相関がみられるが、全体的には必ずしもそうでなく、Total-Nについては1979年以降増加している。

3年間の各年の平均値と変動係数、年間降下量を表4に示すが、(1980年12月については前2年の値の平均をもって代用した)年間降下量については他地域で測定された値<sup>6)</sup>と比較して著しい差は認められない。

またTotal-Nについては秋から冬にかけて低く春から夏に高い傾向がみられるが、Total-Pについては季節変化の特性は明らかでない。

両者の相関を図10に示すが明確な関連はほとんどみとめられない。一方Total-Nの面積当り月間降下量は図11の様にある程度の相関があることがみとめられる。このことは降下物中の窒素の供給

表 2 筑波における降下物中の栄養塩濃度

Table 2 Concentration of Fallout Nutrients at NIES, Tsukuba

			Days	(mm)	Total PO <sub>4</sub> -P	(mg/l)			Total-N
				Precip.		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	
1977	June	1—June	30 30	160	0.019	0.49	0.004	0.085	0.58
	July	1—July	31 31	123	0.012	0.54	0.009	0.220	0.77
	Aug.	1—Aug.	31 31	297	0.011	0.26	0.004	0.063	0.33
	Sept.	1—Sept.	30 30	238	0.002	0.17	0.012	0.074	0.25
	Oct.	1—Nov.	1 32	49	0.018	0.33	0.030	0.165	0.53
	Nov.	2—Nov.	30 29	76	0.057	0.51	0.011	0.192	0.71
	Dec.	1—Dec.	28 28	16	0.077	1.25	0.009	0.571	1.83
1978	Dec.	29—Jan.	31 34	45	0.050	0.68	0.025	0.314	1.02
	Feb.	1—March	1 29	37	0.092	0.68	0.609	0.494	1.78
	March	2—March	31 30	115	0.041	0.49	0.010	0.224	0.72
	Apr.	1—May	1 31	141	0.049	0.43	0.006	0.188	0.63
	May	2—May	31 30	100	0.043	0.66	0.008	0.334	1.00
	June	1—July	1 31	80	0.043	0.55	0.009	0.370	0.92
	July	2—July	31 30	39	0.063	0.36	0.013	0.410	0.79
	Aug.	1—Aug.	31 31	6	0.759	0.58	0.019	0.164	0.76
	Sept.	1—Sept.	30 30	146	0.029	0.46	0.009	0.326	0.79
	Oct.	1—Oct.	31 31	118	0.027	0.31	0.008	0.230	0.55
	Nov.	1—Nov.	30 30	54	0.060	0.13	0.011	0.290	0.43
	Dec.	1—Dec.	27 27	39	0.083	0.69	0.040	0.268	1.00
1979	Dec.	28—Jan.	31 35	59	0.059	0.13	0.008	0.415	0.55
	Feb.	1—March	5 33	101	0.013	0.50	0.003	0.415	0.92
	March	6—March	31 26	53	0.030	0.85	0.010	0.419	1.28
	April	1—May	1 31	94	0.025	0.01	0.003	0.979	0.99
	May	2—May	31 30	167	0.011	0.02	0.003	0.582	0.61
	June	1—July	2 32	70	0.049	0.04	0.476	0.391	0.90
	July	3—July	31 29	95	0.025	0.63	0.160	0.721	1.51
	Aug.	1—Aug.	31 31	69	0.046	0.66	0.002	> 1.071	1.74
	Sept.	1—Oct.	1 31	149	0.012	0.54	0.002	> 0.714	1.25
	Oct.	2—Nov.	1 31	223	0.003	0.27	0.002	> 0.337	0.61
	Nov.	2—Dec.	1 30	156	0.006	0.33	0.002	> 0.426	0.76
	Dec.	2—Dec.	28 27	39	0.038	0.81	0.002	> 1.056	1.87
1980	Dec.	29—Feb.	1 35	75	0.016	0.43	0.002	> 0.521	0.96
	Feb.	2—Feb.	29 28	22	0.071	0.86	0.863	0.262	1.99
	March	1—April	2 32	149	0.012	0.45	0.022	0.419	0.87
	April	3—May	1 29	113	0.027	0.49	0.014	0.353	0.86
	May	2—May	31 30	144	0.043	0.47	0.448	0.237	1.15
	June	1—July	1 31	163	0.015	0.33	0.136	0.259	0.72
	July	2—Aug.	1 31	179	0.005	0.32	0.002	> 0.561	0.89
	Aug.	2—Sept.	1 31	95	0.020	0.54	0.002	> 0.383	0.92
	Sept.	2—Oct.	2 31	108	0.039	0.34	0.177	0.282	0.80
	Oct.	3—Nov.	1 30	120	0.008	0.28	0.016	0.206	0.51
	Nov.	2—Dec	2 31	116	0.090	0.31	0.016	0.184	0.51

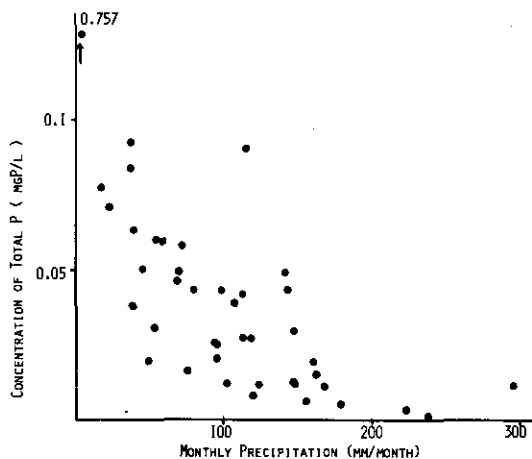


図 7 月降水量と降水物中Total-P濃度の関係

Fig. 7 Relation between monthly precipitation and concentration of total-P

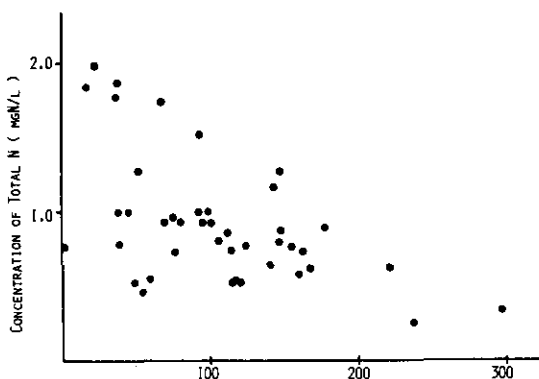


図 8 月降水量と降水物中Total-N濃度の関係

Fig. 8 Relation between monthly precipitation and concentration of total-N

に降水が関与するところが多く、したがってそれがTotal-Nの変化にみられる季節性に反映されていることを示すものと考えられる。

平均のN/P比は約29で、河川水における値とくらべてPが少ないことが特徴的である。

### (3) 霞ヶ浦水面および流域全体への降下量の推定

今回の測定は1地点のみの値であり、降下栄養塩量についても当然地域的差異の存在が考えられるが、仮にこの値をもって西浦の流域全体(1,614km<sup>2</sup>)あるいは湖水面(西浦171km<sup>2</sup>)に一樣に降下したものとすると、この3年間についてそれぞれ表5の様な値となる。



表 3 月間栄養塩降下量

Table 3 Monthly Amounts of Fallout Nutrients at NIES, Tsukuba

		(mg/m <sup>2</sup> · month)				
		Total PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Total-N
1977	June	3.04 (3.04)	77.9 (77.9)	0.64 (0.64)	13.6 (13.6)	92.1 (92.1)
	July	1.48 (1.43)	66.3 (64.2)	1.11 (1.07)	27.1 (26.2)	94.5 (91.5)
	Aug.	3.27 (3.16)	77.5 (75.0)	1.19 (1.15)	18.7 (18.1)	97.4 (94.3)
	Sept.	0.48 (0.48)	39.3 (39.3)	2.86 (2.86)	17.6 (17.6)	59.8 (59.8)
	Oct.	0.88 (0.83)	16.2 (15.2)	1.47 (1.38)	8.1 (7.6)	25.8 (24.2)
	Nov.	4.33 (4.48)	38.5 (39.8)	0.84 (0.87)	14.6 (15.1)	53.9 (55.8)
	Dec.	1.23 (1.32)	20.0 (21.4)	0.14 (0.15)	9.1 (9.8)	29.2 (31.3)
1978	Jan.	2.25 (1.99)	30.7 (27.1)	1.13 (1.10)	14.1 (12.4)	45.9 (40.5)
	Feb.	3.40 (3.52)	25.0 (25.9)	22.53 (23.31)	18.3 (18.9)	65.8 (68.1)
	March	4.72 (4.72)	56.2 (56.2)	1.15 (1.15)	25.8 (25.8)	83.2 (83.2)
	April	6.91 (6.69)	60.9 (58.9)	0.85 (0.82)	26.5 (25.7)	88.3 (85.5)
	May	4.30 (4.30)	65.9 (65.9)	0.80 (0.80)	33.4 (33.4)	100.1 (100.1)
	June	3.44 (3.33)	43.6 (42.2)	0.72 (0.70)	29.6 (28.7)	73.9 (71.5)
	July	2.46 (2.46)	14.1 (14.1)	0.51 (0.51)	16.0 (16.0)	30.6 (30.6)
	Aug.	4.54 (4.44)	3.5 (3.4)	0.11 (0.11)	0.98 (0.95)	4.6 (4.5)
	Sept.	4.23 (4.23)	66.7 (66.7)	1.31 (1.31)	47.6 (47.6)	115.6 (115.6)
	Oct.	3.19 (3.09)	36.3 (35.1)	0.94 (0.91)	27.1 (26.2)	64.4 (62.3)
	Nov.	3.24 (3.24)	6.8 (6.8)	0.59 (0.59)	15.7 (15.7)	23.1 (23.1)
	Dec.	3.24 (3.60)	26.9 (29.9)	1.56 (1.73)	10.4 (11.6)	38.9 (43.2)
1979	Jan.	3.48 (2.98)	7.6 (6.5)	0.47 (0.40)	24.5 (21.0)	32.6 (27.9)
	Feb.	1.31 (1.19)	50.5 (45.9)	0.30 (0.27)	41.9 (38.1)	92.7 (84.3)
	March	1.59 (1.83)	44.8 (51.7)	0.53 (0.61)	22.2 (25.6)	67.5 (77.9)
	April	2.35 (2.27)	1.13 (1.09)	0.28 (0.27)	92.0 (89.0)	93.4 (90.4)
	May	1.84 (1.84)	3.34 (3.34)	0.50 (0.50)	97.2 (97.2)	101.0 (101.0)
	June	3.43 (3.22)	2.59 (2.43)	33.3 (31.2)	27.4 (25.7)	63.3 (59.3)
	July	2.38 (2.46)	59.6 (61.7)	15.2 (15.7)	68.5 (70.9)	143.3 (148.2)
	Aug.	3.17 (3.07)	45.8 (44.3)	0.14 (0.14)	73.9 (71.5)	119.8 (115.9)
	Sept.	1.79 (1.73)	79.7 (77.1)	0.30 (0.29)	106.4 (103.0)	186.4 (180.4)
	Oct.	0.67 (0.65)	60.0 (58.1)	0.45 (0.44)	75.2 (72.8)	151.6 (146.7)
	Nov.	0.94 (0.94)	51.3 (51.3)	0.31 (0.31)	66.5 (66.5)	118.1 (118.1)
	Dec.	1.48 (1.64)	31.6 (35.1)	0.08 (0.09)	41.2 (45.8)	72.9 (81.0)
1980	Jan.	1.20 (1.03)	32.6 (27.9)	0.15 (0.13)	39.1 (33.5)	71.8 (61.5)
	Feb.	1.56 (1.67)	18.9 (20.3)	19.0 (20.4)	5.76 (6.17)	43.7 (46.8)
	March	1.79 (1.68)	66.9 (62.7)	3.28 (3.08)	62.4 (58.5)	132.6 (124.3)
	April	3.05 (3.16)	55.4 (57.3)	1.58 (1.63)	39.9 (41.3)	96.8 (100.1)
	May	6.19 (6.19)	67.2 (67.2)	64.5 (64.5)	34.1 (34.1)	165.9 (165.9)
	June	2.45 (2.37)	53.5 (51.7)	21.8 (21.1)	42.4 (40.9)	117.8 (114.0)
	July	0.90 (0.87)	58.0 (56.1)	0.36 (0.35)	100.4 (97.2)	158.8 (153.7)
	Aug.	1.90 (1.84)	51.2 (49.5)	0.19 (0.18)	36.4 (35.2)	87.8 (85.3)
	Sept.	4.21 (4.07)	33.9 (32.8)	19.1 (18.5)	30.5 (29.5)	86.4 (83.6)
	Oct.	0.96 (0.96)	34.1 (34.1)	1.92 (1.92)	24.7 (24.7)	60.7 (60.7)
	Nov.	10.44 (10.10)	36.4 (35.2)	1.86 (1.80)	21.3 (20.6)	59.6 (57.7)

(normalized value)

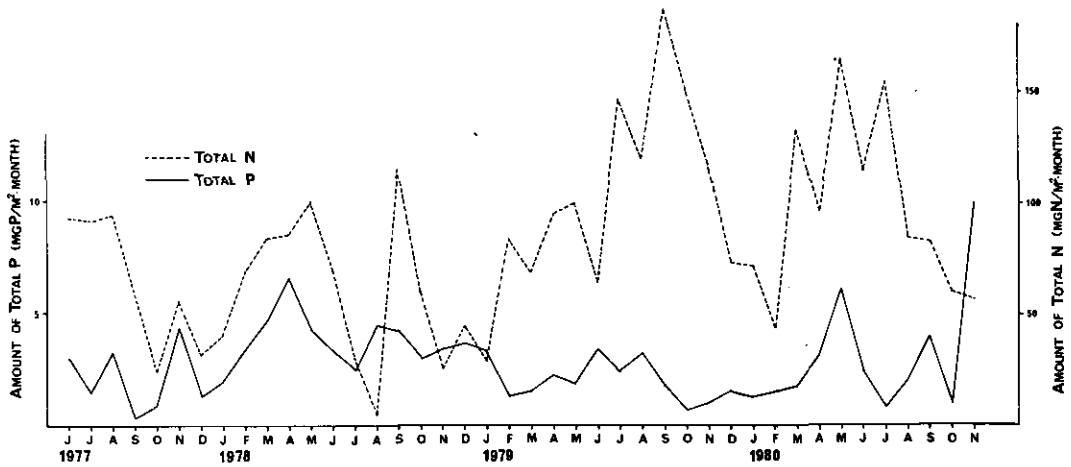


図 9 単位面積当り栄養塩降下量の経年変動

Fig. 9 Variation of the amounts of tota-P and total-N on unit area from atmospheric fallout

表 4 単位面積当りの月間栄養塩降下量とその変動および年間栄養塩降下量

Table 4 Annual amount of fallout nutrients in unit area at Tsukuba

	precipitation	Total-P	Total-N
1978 Mean monthly amount of fallout	77mm	3.8 mgP/m <sup>2</sup> /month	60.7mgN/m <sup>2</sup> /month
Coefficient of variation	58%	31%	52%
Annual amount of fallout in unit area	920mm	45.6mgP/m <sup>2</sup> /year	728.2mgN/m <sup>2</sup> /year
1979 Mean monthly amount of fallout	106mm	2.0mgP/m <sup>2</sup> /month	102.6mgN/m <sup>2</sup> /month
Coefficient of variation	50%	40%	33%
Annual amount of fallout in unit area	1,275mm	23.8mgP/m <sup>2</sup> /year	1,231.1mgN/m <sup>2</sup> /year
1980 Mean monthly amount of fallout	110mm	3.0mgP/m <sup>2</sup> /month	92.1mgN/m <sup>2</sup> /month
Coefficient of variation	42%	86%	49%
Annual amount of fallout in unit area	1,315mm	36.1mgP/m <sup>2</sup> /year	1,105.3mgN/m <sup>2</sup> /year
Mean monthly amount of fallout	98mm	2.9mgP/m <sup>2</sup> /month	85.1mgN/m <sup>2</sup> /month
Coefficient of variation	50%	52%	45%
Annual amount of fallout in unit area	1,170mm	35.1mgP/m <sup>2</sup> /year	1,021.5mgN/m <sup>2</sup> /year

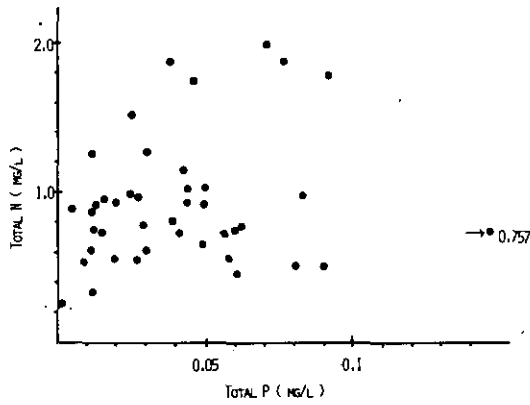


図 10 降下物中のTotal-P濃度とTotal-N濃度との関係

Fig. 10 Relation between total-P and total-N

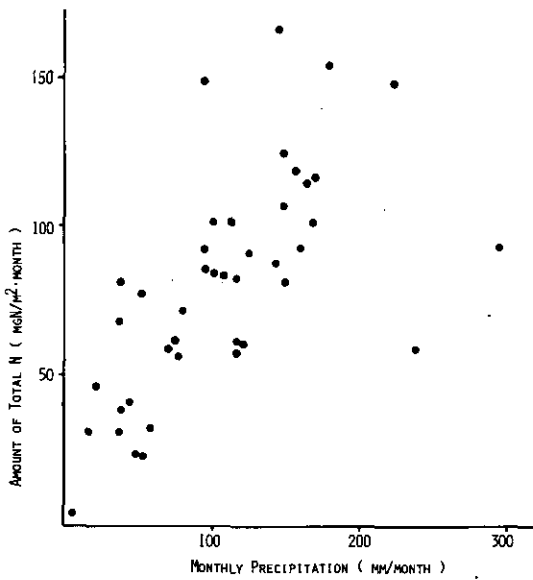


図 11 月降水量と単位面積当りのTotal-N降下量との関係

Fig. 11 Relation between monthly precipitation and amount of total-N on unit area

この値は西浦に流入する主要河川である園部川、恋瀬川からの流入量と比べて無視出来ないオーダーであり<sup>8)</sup>、富栄養化現象の解析や対策にあたって大気圏の役割を考慮する必要性が示されたといつてよい。

#### (4) 雨水中の栄養塩量について

降雨期間中のみ蓋が開いて、雨水のみを採取出来るような自動雨水採取装置を用いて、3か月ば

表 5 西浦流域全体および水面上への年間栄養塩降下量

Table. 5 Annual total amount of nutrients fallout in the watershed and water surface of Lake Nishiura

	Watershed		Water surface	
	Total-P	Total-N	Total-P	Total-N
1978	73.6 ton/year	1175 ton/year	7.8 ton/year	125 ton/year
1979	38.4	1987	4.1	211
1980	58.3	1784	6.2	189
mean	56.7	1649	6.0	175

表 6 雨水中の栄養塩濃度および雨水による単位面積当りの月間栄養塩降下量

Table. 6 Nutrients in rain water

1980	Days	(mm)	Total PO <sub>4</sub> -P	(mg/l)			Total-N	
		precip.		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N		
	Sept. 2-Oct. 4	33	108	0.004	0.212	0.013	0.183	0.408
	Oct. 5-Nov. 1	28	120	0.002	0.208	0.009	0.169	0.386
	Nov. 2-Dec. 2	31	116	0.002	0.165	0.014	0.134	0.313
(mg/m <sup>2</sup> /month) *								
1980	Sept.		0.36	19.5	1.19	18.5	37.5	
	Oct.		0.30	27.2	1.18	22.1	50.5	
	Nov.		0.22	18.7	1.59	15.2	35.4	

\* normalized value

表 7 雨水による月間降下栄養塩量の全降下物中の月間降下養塩量に対する割合

Table. 7 Ratio of monthly amount of the nutrients in rain water and those in total fallout in the unit area

	Total-P	NH <sub>4</sub> -H	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Total-N
1980 Sept.	0.09	0.59	0.06	0.62	0.45
Oct.	0.31	0.80	0.61	0.89	0.83
Nov.	0.02	0.53	0.88	0.73	0.61
Mean	0.14	0.64	0.41	0.75	0.63

かりであるが月間の雨水を採取して同じ項目について測定を行った。濃度と面積当りの降下量を表6に示す。

降下物全体の栄養塩のうち降水が占める割合は、Total-Pについては約10%程度、Total-Nについては50~80%と、窒素成分と降雨との関係が大きいことが、この点においても示された。また、以上の値から、仮りに降下物中のリン濃度の90%がドライフォールアウトにNの30%がドライフォールアウトに帰せられるものとする。ドライフォールアウトのN/P比は約10以下となり生物体中のN/P比に近いものとなり、このことは降下中の栄養塩の起源を推定するさいの重要な資料となると考える。また、N化合物が雨水中に多いことは、これら物質でガス状で大気中に存在するものが降雨のさいにとりこまれるものと考えられ大気汚染との関連性が問題となるであろう。

### 3. むすび

一地点のデータではあるが降下物による栄養塩の供給について連続した測定値が得られ水圏の富栄養化に対する寄与を算定するさいの資料が得られた。議論の精度を高くするためにはさらに多くの地点での測定が必要である。その際地域的特性についての研究を進めることにより、有効な測定地点を選ぶことが出来るであろう。

降下物中の栄養塩の起源としては、いろいろ考えられるが、いずれにせよ地表面から、供給されたものが再びもどって来たものである。降水のみの栄養塩濃度を分けて分析することにより、降下物中の栄養塩の起源についての情報が得られる見通しがついたので、今後さらに測定をつづけてゆく予定である。

### 謝 辞

栄養塩濃度の分析については、計測技術部水質計測研究室大槻晃室長ならびに平島徳子氏の全面的協力を得たことを感謝する。

### 引 用 文 献

- 1) 気象庁 (1972): 全国気温降水量月別平年値表. 気象庁観測技術資料, 第36号.
- 2) 水戸地方气象台: 茨城県気象月報.
- 3) 気象庁: 累年気候表.
- 4) 水戸地方气象台 (1959): 茨城県の気候.
- 5) 渡辺義人 (1979): 降雨の窒素, リン濃度と陸水域への負荷. 環境創造, 1979年6月号. 21-26.
- 6) 茨城大学霞ヶ浦研究会 (1977): 霞ヶ浦. 三共出版203p.
- 7) 合田 健ら (1978): 霞ヶ浦全域調査データ. 国立公害研研究報告, 第6号, 335-375.
- 8) 津野 洋ら (1978): 高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について. 国立公害研研究報告, 第6号, 55-63.

3.

湖面蒸発量の研究

土屋 巖<sup>1</sup>・白井邦彦<sup>1</sup>・増田啓子<sup>1</sup>・河合崇欣<sup>2</sup>・植田洋匡<sup>3</sup>・佐橋 謙<sup>4</sup>

A Study on Lake Evaporation

Iwao TSUCHIYA,<sup>1</sup> Kunihiko SHIRAI,<sup>1</sup> Keiko MASUDA,<sup>1</sup> Takayoshi KAWAI,<sup>2</sup>  
Hiromasa UEDA<sup>3</sup> and Ken SAHASHI<sup>4</sup>

Abstract

The evaporation of Lake Kasumigaura is one of major regulating factors in the water balance because its small depth (mean: 4m), and the evaporation is a main factor in environmental considerations of the water pollution of this lake.

After several examinations of many estimating methods of evaporation, we adopted the use of pan ratio to the observational data of Class A pan near lake from July 1977 to March 1980. Estimated annual evaporation amounts are ranging from  $1.20 \times 10^8$  tons in a wet year to  $1.47 \times 10^8$  tons in a dry year over 220 km<sup>2</sup> water area. These estimations are rather small values than old estimations of about  $2.0 \times 10^8$  tons.

Further experimental examinations were progressed about the wind tunnel experiment which aimed to explain a quantitative relationship between wind speed and evaporation rate, and several experiments of short period evaporation observations were carried, and these experiments included some new observation systems.

We examined several practical climatological estimates of lake evaporation and suggested the contribution of the wind speed near water surface and the reliable water surface temperature and proposed the use of rinsed Class A pan observations in a waterway from Lake Kasumigaura.

- 
1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
  2. 国立公害研究所 計測技術部  
Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies.
  3. 国立公害研究所 大気環境部  
Atmospheric Environment Division, The National Institute for Environmental Studies.
  4. 岡山大学教育学部 〒700 岡山市津島中1-1-1  
Faculty of Education, Okayama University, Tsushimanaka 1-1-1, Okayama 700, Japan.

## 1. はじめに

湖の水収支に関する一般的な式は次のとおりである。

$$S \frac{dh}{dt} = S \frac{dE}{dt} - S \frac{dR}{dt} - f_r A \frac{dR}{dt} + Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

ここで、 $S$ ：湖水の面積、 $h$ ：湖水位、 $E$ ：蒸発量、 $R$ ：降水量、 $f_r$ ：流域から湖への流出率、 $A$ ：湖の流域面積、 $Q_1$ ：湖からの地下水流出量、 $Q_2$ ：湖への地下水流入量。

これによって湖面からの蒸発が、湖の水収支にとっての重要な要素であることがわかるが、これら各項の中で、定数としての $S$ と $A$ 以外に、 $R$ と $h$ は面的代表性にある程度の問題はあるにしても、実測値として比較的信頼性の高いものが得られるが、 $Q_1 - Q_2$ についてはきわめて困難であり、 $E$ と $f_r$ については信頼度に疑問を残しながら、種々の実験式が用いられてきた。もし、 $E$ と $f_r$ についての算定値の精度が上がれば、収支残としての $Q_1 - Q_2$ を考えれば良いことになる。

水面からの蒸発量 $E$ の算定は、基本的気象要素の中で真の値を測定することが困難なものとして、いくつかの算出法が提案されてきた。算出法は大別して、蒸発計 (evaporation pan) による測定値に簡単な係数を乗じて求めるものと、風や気温あるいは降水量の観測値に、水収支、熱収支その他の経験式や理論式を適用した算定式によって求めるものとに分けられる。

算定式では観測値や気候値の精度と面的代表性の点で実用上の困難が多いため、浅くて広い水面には国際的な標準測器としてのClass A panによる方法が適している (Hounam, 1973 ; 土屋・白井, 1979 ; WMO, 1976)。現在のところClass A panを使用する場合、0.6~0.8の係数を乗ずることが多いが、この係数の決定は十分な検証によって求められたわけではなく、さらに大きな蒸発計 (たとえば面積約20m<sup>2</sup>、深さ2 mのUSSR20m<sup>2</sup>タンク)との比較試験、湖面での実験観測あるいは他の手段 (たとえば水収支法で蒸発項以外の精度が高いとき) で真の蒸発量が得られると説明されたものとの比較で求められてきた (WMO, 1976)。したがって、限られた条件のもとで成立する経験的なものといえるので、蒸発に関する要因を制御した実験観測や要因の変動についての野外での実態を観測することによって、係数の根拠を確立する必要がある。係数の根拠が明らかになることは、同時に気候資料によって求める算定式の内容を改善するものと考えられる。

霞ヶ浦からの湖面蒸発量を算定するために採用した方法は、まず数年間のClass A panによる継続観測を続け、平行して蒸発関連要因の制御を含めた実験観測を実施して、妥当な係数を求め、あわせて各種の算定式の作成とそれを吟味することである。

昭和54年度までに得られた大型蒸発計の記録による算定と、風洞内にClass A panを設置し、風とその温湿度を制御した予備実験による蒸発現象の観測に加え、短時間の蒸発を測定するために考えられた2種の測定法、すなわち「塩水蒸発計」(Fujita and Honda, 1979) と微差圧計を用いる測定法をテストした。これらの観測記録と実験の結果によって、水面からの蒸発を支配する要因の主

要なものについての定量的説明に着手することができる。

## 2. 霞ヶ浦の湖面からの蒸発量

### (1) Class A panの通年観測

調査対象水域に近い陸地にClass A pan(大型蒸発計)を設置して、0.6~0.8の係数を測定値に乗じて、広い水面からの蒸発量に換算する方法を、1977年7月以来実施しているが、1978年8月までの測定結果(土屋・白井, 1979b)に加えて、1978年6月以降は図1に示すように霞ヶ浦(西浦)の北岸と南岸に委託観測地点を設置した。

委託観測は茨城県内水面水産試験場と江戸崎町立江戸崎中学校の協力を得て実施されているが、前者には試験場としての雨量観測があり、後者は気象庁の地域気象観測網の構成施設としての雨量自動観測がある。両施設は湖岸に近く、都市化の影響が少なくしかも北岸と南岸に位置することで、湖周辺の卓越気流の影響の比較と観測値の補正等の点で最適の場所として選定したものである。

報告の終りに付けた観測表(p. 122-125)には、比較資料として、東京都千代田区大手町にある気象庁の東京管区気象台における観測値を並べて示した。

気象庁の統計法(気象庁, 1973)では、蒸発計水面での結氷の場合、集計値では蒸発がなかったものとして扱われている。霞ヶ浦の蒸発量算定では、できるだけ実際の蒸発量を見積ることをめざしたので、結氷のあった場合にはそれが解けた時に測定するようにした。また、日々の蒸発量よりも月合計値に重点をおいたので、休日等の欠測では翌日までの累積値を用いることにした。さらに、風雨等で観測不能の場合、他の観測値から推定値をいれた場合もある。なお、1978年6~8月は、観測器材の調整、予備観測、および国立公害研究所の測定値との比較等に用い、湖面からの蒸発量算定に用いたのは、1979年9月以降である。この月以降は、公害研敷地内の継続観測は停止し、継続的な比較観測や実験観測を行い、また敷地内大気モニタリングポストの一部に設置した同じ型式の蒸発計による自動測定記録を参考に使うことにした。

資料(1)(p. 122-125)には1978年9月~1980年3月について、気象庁、内水試および江戸崎中の毎日の測定結果を1か月ぶんずつまとめて示したが、1977年7月~1978年8月の記録は前に発表した報告(土屋・白井, 1979b)に掲載したので省略した。図2は1977年7月~1979年12月の月ごとの平均気温(高層気象台)、月降水量(江戸崎中)、湖面からの算定日蒸発量を示したものである。蒸発量は夏に多いが、冷夏多雨型の1977年とひでり型の1978年では極端に違い、それぞれの算定日蒸発量の平均は、1977年の7月が2.5mm、8月は1.5mmであるのに対し、1978年の7月と8月はともに3.4mmである。表1は、この図2に相当する期間の観測日表を整理してまとめたもので、資料(1)に基づいて算出した。

1979年からは湖の北岸にある県内水試と南岸にある江戸崎中学の2か所での測定が軌道に乗り、湖岸に測定点を置いた場合の地形その他の影響を検討することが可能になった。関連する気象要素



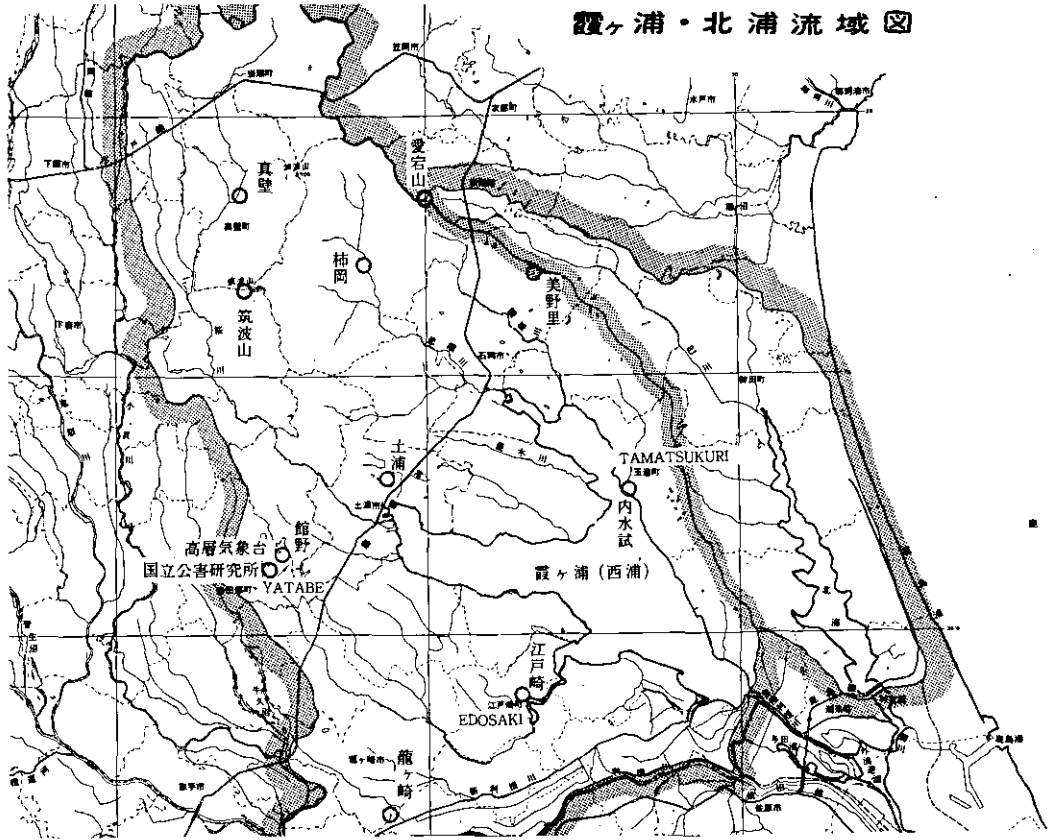


図 1 霞ヶ浦の流域および気象観測地点

Fig. 1 The basin of Lake Kasumigaura and meteorological stations

としては降水量しか測定値がないので、定性的な卓越風や地表の違いによるおおまかな推測ができるだけであるが、一般に内水試のほうが江戸崎中学より蒸発量がやや多い理由のいくつかをあげることができる。主なものとして、

- 1) 湖岸に近い内水試のほうが、冬の気温が高いため、蒸発計内の水温が高く、
- 2) 江戸崎中学は高台ではあるがやや内陸で地形の起伏や建物による地表粗度が大きく、風速は開けた湖岸にある内水試のほうが大となる可能性が高く、そして
- 3) 夏季の空気の移流については、気象庁地域観測所の土浦の卓越風から推定すると東風がかなり多く、内水試の周辺のうち半分以上が畑作地帯であり、江戸崎中では水域、森林地帯、水田地帯の部分の占める割合が内水試の場合より大きいため蒸発量を低下させる可能性が考えられる。

1) については、たとえば、朝9時の水温(蒸発計内)測定記録で、1979年1月の場合、内水試では平均4.2℃に対し江戸崎中学では1.7℃である。2)と3)については定量的資料はないが、湖面蒸発量の算定精度を上げるためには考慮すべきものと考えられる。

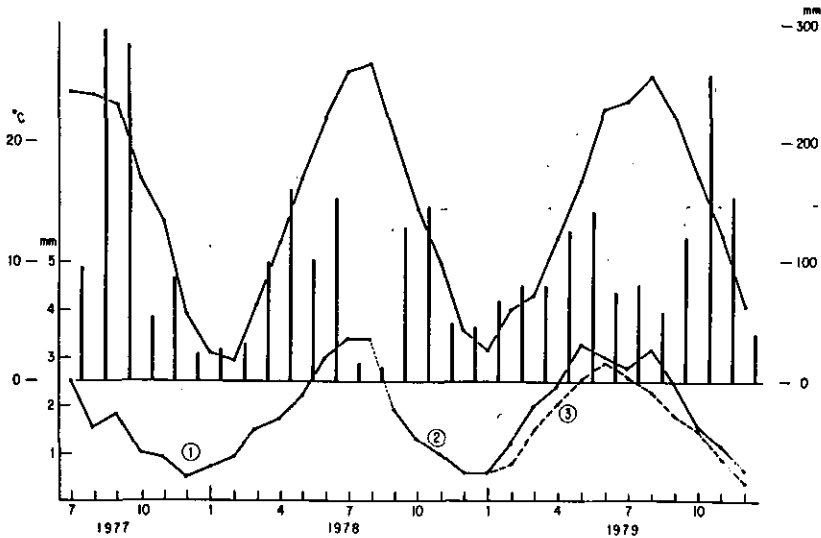


図 2 1977年7月—1979年12月の霞ヶ浦における月別日平均蒸発量 (mm/day) および月平均気温と月降水量

Fig. 2 Mean daily lake evaporation and mean monthly air temperature and monthly precipitation from July 1977 to December 1979 in the basin of Lake Kasumigaura

## (2) 算定蒸発量の吟味

湖の近くに置いた大型蒸発計で測定した蒸発量は、湖面蒸発量に換算するために0.6~0.8の係数を乗ずることが習慣として実施されているが、この係数は乾燥気候のもとでは小さく湿潤気候のもとでは大きくなるとみなされているだけで、個々の地域についての信頼性の高い係数が与えられているわけではない。

日本の場合、昭和41年1月25~26日に気象庁観測部が主催した「昭和40年度観測課長会議」に会議資料として出されたものに、「いわゆる大型と呼ばれるClass A panと湖からの蒸発量の詳細な比較が米国、ソ連を始め多くの国でなされてきたが、それによれば大型で測った月平均値は湖の値の大略1.3倍になることが分っている。」(会議資料 p.54~55)と記載されている。この場合は係数が0.77ということになるが、その後編集され現在も用いられている「地上気象観測法」(気象庁,1971)では、「……湖水の深さや季節によって結果はかなり違うが、湖水と大型蒸発計の比は年蒸発量で約0.72……」と表現されている。

これら係数についての日本での実証的研究はほとんど行われていなかったもので、筆者等は種々の方法で根拠ある数値を求めることをめざしている。ここでは前の報告(土屋・白井,1979a)で説明したのと同じ0.8を暫定的に用いることにした。なお、表1には月量・平均日量ともに0.8を乗じてあるが、季節による係数の変化を省略しているので、この場合の算定値は誤差の幅が大きくなっている。

表 1 1977年7月～1979年12月の大型蒸発計 (Class A pan) による観測と霞ヶ浦湖面蒸発量の算定

Table 1 Monthly evaporations from Class A pan and estimated monthly and mean daily evaporations of Lake Kasumigaura from July 1977 to December 1979

	Tokyo	NIES	Tamatsukuri	Edosaki	Lake	
	(JMA気象庁)	(国立公害研)	(内水試)	(江戸崎中学)	month	day
1977. 7	119.4	97.0			77.6	2.5
8	77.3	59.2			47.4	1.5
9	89.0	67.6			54.1	1.8
10	64.4	40.0			32.0	1.0
11	50.8	33.4			26.7	0.9
12	37.5	17.6			14.1	0.5
1978. 1	6.8	25.4			20.3	0.7
2	4.1	30.0			24.0	0.9
3	45.5	59.2			47.4	1.5
4	74.4	63.2			50.6	1.7
5	101.8	86.2			69.0	2.2
6	115.1	112.8			90.2	3.0
7	132.1	132.0			105.6	3.4
8	169.2	130.0			104.0	3.4
9	67.7		72.6		58.1	1.9
10	66.6		50.6		40.5	1.3
11	60.2		37.9		30.3	1.0
12	32.2		23.5		18.8	0.6
1979. 1	18.7		24.4	22.0	18.6	0.6
2	48.7		40.3	28.5	27.5	1.0
3	70.2		77.7	57.0	53.9	1.7
4	97.2		90.5	78.0	67.4	2.3
5	117.5		128.1	102.8	92.4	3.0
6	129.6		117.7	106.8	89.8	3.0
7	102.0		107.1	86.2	77.3	2.5
8	124.8		123.3	90.4	85.5	2.8
9	93.9		91.7	66.4	63.2	2.1
10	71.7		62.4	58.2	48.2	1.6
11	58.0		44.5	31.9	30.6	1.0
12	52.7		25.6	16.8	17.0	0.6
July, 1977 —June, 1978	786.1	691.6			553.4	
Jan. —Dec., 1978	875.7	823.4	823.4		658.8	
Jan. —Dec., 1979	985.0		933.3	745.0	671.3	
CLINO, year	1062.8	1081.0 (Mito)			mean 627.8	

湖面蒸発の算定は、1977年7月～1978年8月は公害研実験池付近、1978年9月～12月は県内水試の測定値、そして1979年1～12月は県内水試と江戸崎中学の平均値に係数0.8を乗じて求めた。

る。表1によって、1977年7月～1978年6月の場合553.3mmの算定年蒸発量を霞ヶ浦（西浦171km<sup>2</sup>、北浦34km<sup>2</sup>、外浪逆浦6km<sup>2</sup>および河道9km<sup>2</sup>、建設省、1980）の合計220km<sup>2</sup>に乗じて約1億2千万トンになり、1978年1～12月では658.8mmを乗じて約1億4千万トン、そして1979年1～12月では671.3mmを乗じて約1億5千万トンとなる。1979年が1978年に比べて極端な干ばつ年でないのにやや増加しているのは、3～5月の好天高温の効果が大きかったためと考えられる。なお、内水試の5月と9月の値が、江戸崎中学に比べてかなり大きい原因については、1980年以後の記録を加えて解明する必要がある。

ここで算定した1億2千万～1億5千万トンという数値は、いずれも従来しばしば用いられることの多かった2億トン（たとえば、茨城大、1977）に比べてかなり少ない。他方、小型蒸発計による東京と水戸の年蒸発量平年値をそのまま適用すると約2.2億トンである。ただし、前述の会議資料（気象庁、1966）では、小型蒸発計の値が自然水面より60～80%大きいことを示しているので、それに準拠すると、湖面蒸発量の算定値は約1.2～1.4億トンとなり、大型蒸発計に基づく算定値と大きな差はないことになる。

2億トンという算定値は、後述のDalton型の実験式で、風速および水面温度を若干高く見積ることと、また熱収支の式の場合も水面温度を高く見積ることとで与えられてしまう。水面付近わずか1～2mmの層での風速や気温および水面温度によって蒸発現象は左右される（Penman, 1948）ので、この部分の推定が適切でない場合は、算定値は真の値と大きくずれることになる。後述の風洞実験では、表面水温はそのすぐ下の水中温度より低いことが認められ、通常の気象観測施設で風速計が設置されている高さ（10m前後以上のことが多い）よりかなり低い高さでは風速も低下することが多い。気象観測値を用いた算定式による結果との違いについては、定性的に風速あるいは表面水温の推定値が高すぎるのが原因になり得ることが指摘できる。

たとえばPenman（1948）が作成したDalton型の経験式

$$E=0.35(1+9.8\times 10^{-3}u_2)(e_s-e_a) \quad (\text{mm/day}) \quad (2)$$

において、 $u_2$ は水面からの高度2mの風速（mile/day）であるが、彼は $u_2=0.78u_{10}$ という推定例を示している。ここで $u_{10}$ は水面上10mの風速であるので、もし $u_{10}$ を補正せずにそのまま $u_2$ の値に置きかえたと、蒸発量 $E(\text{mm/day})$ は $u_{10}$ が2m/sの場合ではほぼ10%増加する。また、 $e_s$ と $e_a$ はそれぞれ水面温度と露点温度における飽和蒸気圧（mmHg）であるが、もし水面温度の代りに気温で代用したとすると、1.8°F（1°C）だけ水面温度が気温より低かった場合、湿度と気温によって違いますが、気温と露点温度の差が9°F（5°C）のとき気温86°F（30°C）で水温がそれより1.8°F（1°C）低い場合に約20%の蒸発量が減少する。したがって、表面水温の推定が算定式における大きな誤差要因であるといえる。算定式に関連しての問題はさらに第4節で詳細に検討するが、今回の湖面蒸発量の推定値が、従来の値よりかなり低かったことの理由に、今までの推定では風速と表面水温をそれ

それ実際の値よりも高めに推定していたことの可能性が考えられる。

### 3. 蒸発の実験観測

蒸発計 (evaporation pan) を用いる実験観測は、算定のための係数の精度を高めるためのものとして、水面に作られたいかだに蒸発計を設置する方法が数多く実施されてきた。蒸発計を直接湖水面に設置するという方法は、長期間の実験例の報告は少ないが、短期間のもは多数あり、湖水面からの蒸発算定の参考になるものが多い。たとえば、Neuwirth (1973) はハンガリーのノイジードル湖 (Neusiedl) での湖水面蒸発計 (GGI-3000) と陸地上の蒸発計 (Class A pan) との78日間の比較観測によって A pan に 0.64 の係数を乗ればよいと説明した。日本では、A pan に対して、このような比較実験はなく、湖水のいかだに吊した蒸発計の記録がいくつかある程度である (関西電力, 1959, 1960 ; Yamamoto and Kondo, 1964, 1968)。山本と近藤 (1968) は十和田湖と野尻湖での実験観測の結果等を整理して、風速と表面水温に対する蒸発の依存性の高いことを説明している。

筆者等が計画した実験観測で、まず風洞実験に着手したのは、風速依存の程度を調べるためであることと、風つまり風洞内空気の温湿度を一定にした場合の平衡水温の鉛直分布を知ることによって、日射による加熱のない場合の蒸発にかかわる熱収支解析についての手がかりを得ることである。

その他の実験観測は、定常的な気象状態 (風・日照・湿度・気温など) が短時間しか維持できない野外での、短時間蒸発量測定の手段を開発して、蒸発量算定の可能性を改善するためである。ここでは、水底のわずかな水圧変化を記録できる微圧変換器によって容器内水面からの蒸発に伴う水底の圧力変化を利用する方法と塩水が蒸発によって塩分濃度が増加する現象を利用する方法の2種類を実験した。

#### (1) 風洞実験

水面からの蒸発に関与する気象要素を一定にして、単位時間当りの蒸発量を測定することは、考え方としては単純であるが、精度の高い実験を行うことはそれほど簡単ではない。ここでは、風による熱の移流以外の日射等による加熱の無い場合について、風速・気温・湿度を一定にした状態を風洞内に設定し、そこに大型蒸発計を置いて水位の変化を測定するという実験を進めた。

風洞内に蒸発計をいれる実験は、現在ほとんど報告されていない、わずかに他の目的のため蒸発現象を含めた風洞実験が数件だけ、200万件のJICST (日本科学技術情報センター) 理工学文献ファイル (1975年4月~1980年11月) 中に存在しただけで、蒸発計の定量的研究のためのものではない。大部分の風洞が風の制御に重点を置き、温度制御のはいったものは、比較的最近になって設置されるようになったことも、蒸発計の風洞試験の実現を遅らせた原因かも知れない。

当研究所には、大気拡散実験棟の中に大型風洞と略称される2.0mH×3.0mW×24mLの測定部に温

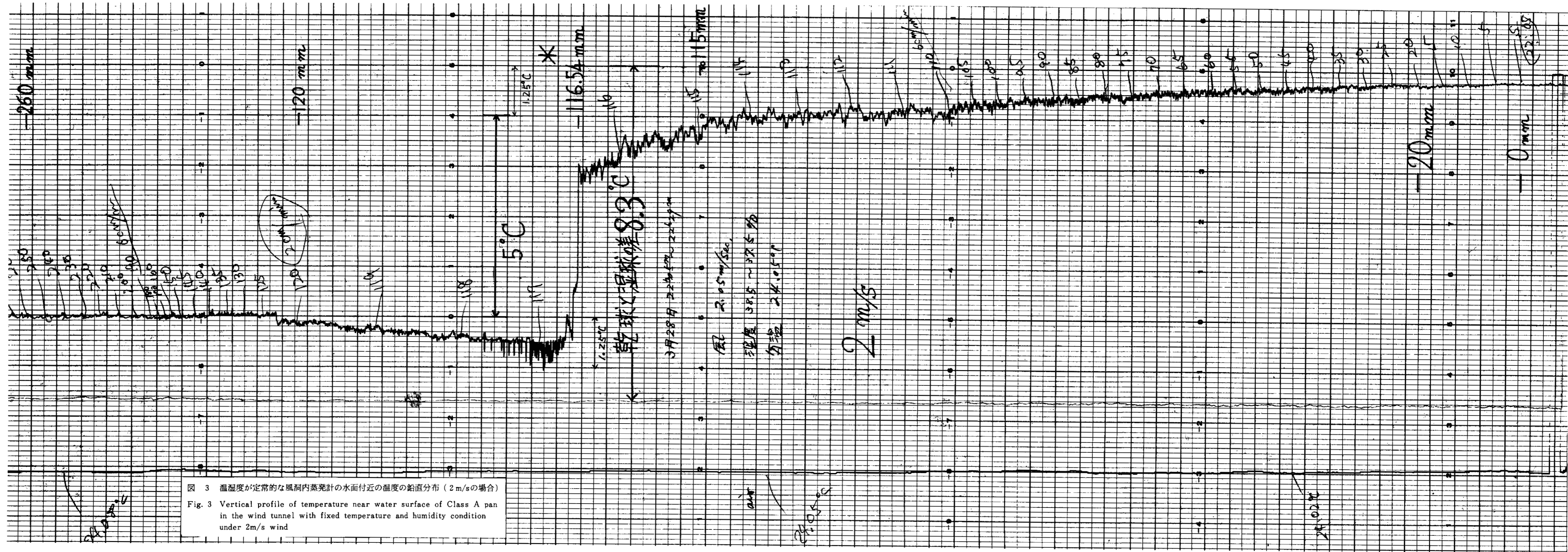


図 3 温湿度が定常的な風洞内蒸発計の水面付近の温度の鉛直分布 (2 m/s の場合)  
 Fig. 3 Vertical profile of temperature near water surface of Class A pan in the wind tunnel with fixed temperature and humidity condition under 2 m/s wind

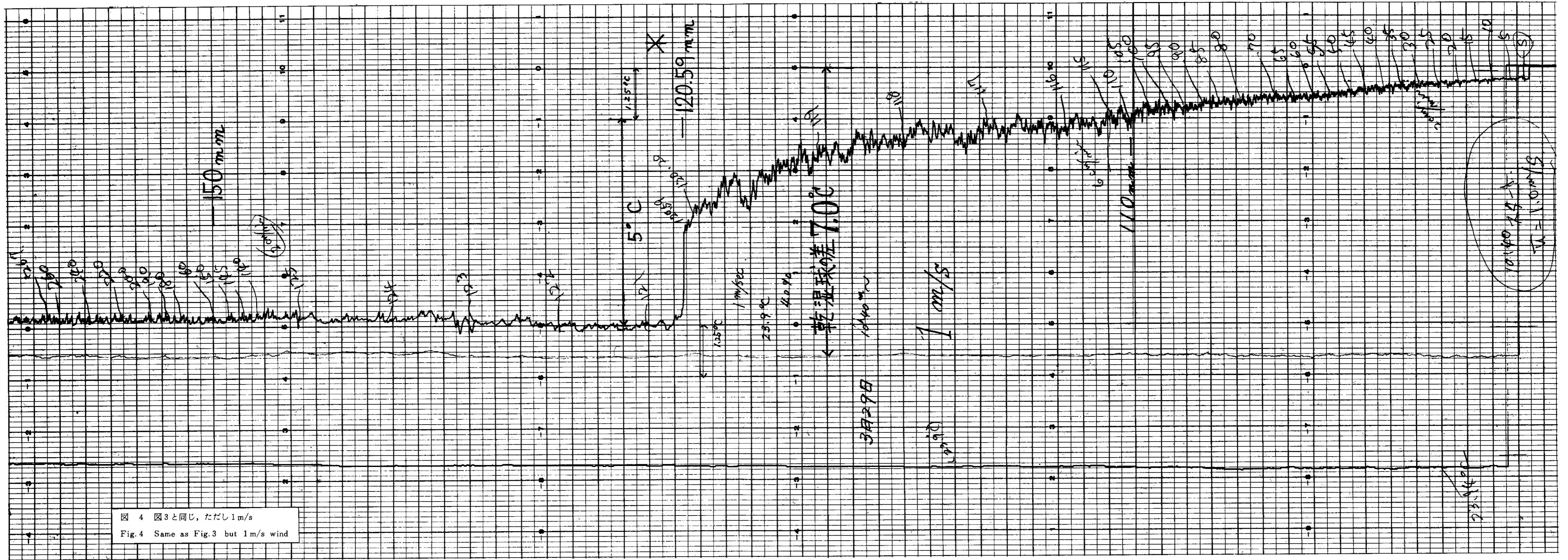


図 4 図3と同じ、ただし 1 m/s  
 Fig. 4 Same as Fig. 3 but 1 m/s wind

度成層装置のついたものと、中型風洞と略称される水盤装置付きの1.0mH×1.5mW×19mLの測定部を持ったものがある。大型風洞運用のための設備によって、実験棟内に温度と湿度を一定にした空気を常時流入させることができる。しかし、大型風洞で温度成層を発生させると、実験棟内の温湿度は変化する。したがって、温度成層を必要としない場合、中型風洞内の温湿度を一定にすることができる。この実験では、大型蒸発計 (Class A pan: 直径120cm) を水深20cm (ふちから5cm) にして測定部に置き、24℃40%の空気で風速1 m/sおよび2 m/sでの単位時間当りの蒸発量を測定し、あわせて制御された環境下の測定記録から蒸発のメカニズムを考察することをめざした。

水面からの蒸発では蒸発の潜熱によって水面上の空気および水体の温度が下げられるので、サーミスターを計測用のトラバース装置につけて温度の鉛直分布を測定すれば、水位の変化と蒸発のメカニズムを説明するための温度分布とがわかる。この風洞のトラバース装置は10 $\mu$ mピッチの水平および鉛直の移動精度である。

1980年3月27日、蒸発計を風洞内に搬入し、約24時間24℃40%の実験棟空調のもとに置き、3月28日20時から測定を開始し、第1回は風速2 m/sで翌日10時まで、第2回は風速1 m/sにして同日29日の11時から14時まで実施した。サーミスターによる水位測定は、サーミスターが水中にはいると同時に温度が急激に下降するので、その時の鉛直の位置をデジタル表示の記録計で読みとることによってなされる。風による水位の振動があるため (測定部にはいる風は層流であるが、蒸発計上では乱れてくる)、4 m/s以上では共振その他によって測定が困難になる。2 m/sでも振動はあるが、サーミスターを1時間に数回水面を中心にして上下させることで平均的な水位が求められる。

水位の測定は、水面下水上それぞれ1 cm足らずを往復する回数を多くして求めたが、蒸発のメカニズムを解析するための記録はそれぞれ10cm前後以上測定して求めた。図3と4はその例でありそれぞれ風速2 m/sと1 m/sの場合である。なお水位測定の結果は図5に示した。

図3によって理解されるように、水面上約10cmより上の温度は風洞流入空気の温度であるが、水面からの蒸発の潜熱による温度低下が始まり、水面付近で2.7℃低下し、水面直下の水中では7.3℃低下する。この低下量は乾球と湿球の温度差8.3℃にかなり近い。野外の観測では、自然水面あるいは大型蒸発計において、かなり乾燥した強風のある場合でも、このような大きな温度低下現象を認めることは、日照のない場合であってもほとんどないものと思われる。

図4は風速を1 m/sにした場合である。温度低下量は全体としてはやや小さくなっているが、水面付近では3.5℃の低下量で2 m/sの場合より大きく、水面直下の水中では5.9℃の低下量となっていて、乾球と湿球の温度差7℃にかなり近い点は図3の場合と同じである。

サーミスターを上下させて、鉛直温度分布を記録する作業は数回くり返したが、前述の内容とほぼ同じ結果が得られたので、図3と4は風以外に熱の移流要因のない場合についての、蒸発現象に伴う熱のやりとりを定常的に反映したものと考えられる。水面直下に見られる温度低下量の最大が乾湿球の温度差の範囲で、蒸発の潜熱量に関連し、直上の空気を冷却する部分と冷水塊になって下



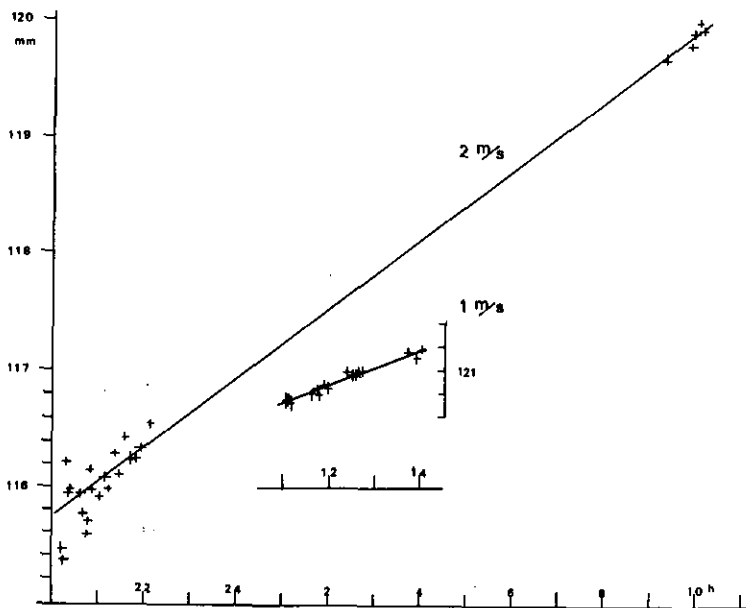


図 5 温湿度を一定 (24℃, 40%) にした風洞内Class A panからの蒸発による水位変化

Fig. 5 The water level change of Class A pan resulted from evaporation

降する部分とに分れ、風による熱移流と平衡するのが、水面下10cm前後になる。水中での熱のやりとりは、風速 2 m/s の場合冷水塊下降現象が水面から約 7 mm 前後、風速 1 m/s の場合約 5 mm 前後まで卓越し、それ以下では蒸発計の主として底面からの周辺空気による加熱による熱移流との混合層になっているものと見られる。もし、この熱移流がなければ、乾湿球の温度差に等しいところまで水温は低下するはずである。

風洞内と野外では条件は大きく違うが、乾湿球の温度差に近い水温低下量が観測されない原因を検討する必要がある。蒸発現象は水面を中心にして比較的せまい鉛直距離での熱のやりとりが主要部分であると見なすと、野外では風洞内の条件すなわち水面直上で 1 m/s ~ 2 m/s という風速が維持され難いことを原因の第 1 に推定することができる。つまり自然界での風の鉛直分布は水面の直上で急激に風速が低下するものと思われるが、観測が困難なためまだ良い記録が得られていない。なお、風洞内に自然に近い乱流を発生させた場合の実験を次に予定している。

図 5 は 1 時間の間にサーミスターを数回上下させて得た長時間の測定記録によって、温度・湿度・風速が一定の場合の単位時間の蒸発量を示したものである。温度は 24℃ ± 1℃、湿度は 40% ± 2%、および風速は 2 m/s と 1 m/s についてそれぞれ ± 5% 以内で制御できることを前提にして実験を進めたが、この条件は実験期間を通じてほぼ維持できた。

2 m/s の実験では、実験開始後 1 時間ほどは水位の振動がやや大きくなっているが、これは実験

開始までの約24時間約3 m/sでならし運転をしていたための水位振動の影響が残っていたためと考えられる。水位振動は風速を低下させると小さくなり、1 m/sではかなり小さく、実験時間を短縮することができた。単位時間蒸発量は2 m/sで0.30mm、1 m/sで0.17mmとなり、ほぼ風速に比例する。

## (2) 野外実験

湖面全体についての蒸発量を実用的手段によって、おおまかに算定する手法を、より信頼性の高いものにするために、蒸発に関連する要素のいくつかを制御できる風洞実験に加えて野外実験を計画した。風洞実験の時間・空間スケールに対応するようなものとして、微圧変換器を用いた分単位の測定方式の開発と試作装置によるテスト、および分～時単位の測定に考えられていた塩水法 (Fujita and Honda, 1979) のテストである。

### A. 微圧変換器を用いる蒸発測定

蒸発の直接測定には、pan等の容器を用いる場合、表面積が大きくなると、水位測定を用いるため、風や温度による測定の誤差と補正值の問題が発生する。微圧変換器を容器の底に置くと、容器の底にかかる水圧と大気圧との差を測定して、容器内水量の変化を測定することができる。この方法は、水温の変動に伴う水の体積膨張と収縮の影響がなく、また風の吹き寄せによる水位の偏りという現象をはずして、測定装置の精度に応じた高精度測定が可能である。測定に適した微圧変換器としてひずみゲージ型 (感度 $\leq \pm 0.005 \text{ mm H}_2\text{O}$ ) や差動トランス型 (感度 $\leq \pm 0.001 \text{ mm H}_2\text{O}$ ) などがある。

図6は測定装置の概念図であるが、微圧変換器のほかに、体積変動吸引管と大気圧ゆらぎ吸引管を含めたものが基本的構成であり、これらの機能を小さな装置で安定して作動させるための恒温水槽と蒸発容器 (Class A pan) とを連結してある。図のBは体積変動吸引管であるが、水平にした内径2mmの肉厚ガラス管で、蒸発容器の水深に伴う水圧を相殺するため、恒温水槽内に立てた管を経て、蒸発容器の水面とほぼ同じ高さに設置されている。この吸引管によって絶対圧および差圧の変動に伴うゲージ内容積の変動による測定値への影響を消すことができる。

図のCに示した大気圧ゆらぎ吸引管は、約 $200 \text{ cm}^3$ の空管と通気断面積を調節するためのコックとから構成される。微圧変換器の大気圧側開口部に設置することにより、底面水圧側では水の慣性により消されてしまうような0.1Hz以上の速い変動で、 $\pm$ 数 $\text{ mm H}_2\text{O}$ 程度までの気圧のゆらぎを吸収することができる。これにより、測定値は4.0m/s程度の風速のもとでも、 $\pm 0.1 \text{ mm H}_2\text{O}$ 程度の安定したものとなり、日蒸発量8mm程度までの連続測定が定常的に行える。

図7は、装置の感度を調べるために、 $1,100 \text{ cm}^2$ に対し110mlの水を加えて、水位上昇を1mmにした時の記録である。装置に微圧変換器としてひずみゲージ (共和電業PG-W-5GA)、シグナルコンディショナー (共和電業CDA-210A GAIN 1) および記録計 (PANTOS日本電子科学工業U-425D 1 V/f.s. range) を用いた。

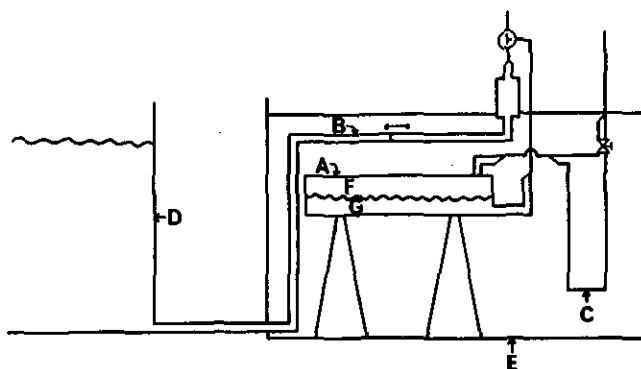


図 6 微圧変換器を利用した微細水位変化測定装置 (微差圧計式蒸発量計)

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| A : 微差圧変換器          | B : 体積変動吸引管        |
| C : 大気圧ゆらぎ吸引管       | D : 標準蒸発容器 (A pan) |
| E : 恒温水槽            | F, A : Pressure    |
| G : Bottom Pressure |                    |

Fig. 6 A schematic illustration of a micro-evaporimeter with a highly sensitive pressure gauge ( $\pm 0.005\text{mm H}_2\text{O}$ )

本装置によって日蒸発量 8mm 程度までを風速 4.0m/s でも  $\pm 0.2\text{mm}$ 、無風の場合には  $\pm 0.01\text{mm}$  程度の精度で連続測定ができるので、蒸発速度の日変化や蒸発に関連する日照・日射・気温・水温・湿度・風速などの気象要素あるいは海水と真水とか富栄養湖と貧栄養湖というような水質と蒸発量との関係を秒・分単位の微細な現象記録の形で測定できる。また、蒸発容器の口径が小さくても良いので、植物の蒸発散測定にも使えるなど、種々の応用が考えられる。

図 8 は、1978年 4月 13~14日、研究所構内実験池の近くで、野外測定に使った例であるが、約 5mm の降雨があり、降雨計としての記録にもなっている。雨が一時的に止んだ場合の蒸発がどのように進むかが、解析できる形で記録されていることがわかる。

この装置は、微差圧計式蒸発量計として特許申請中である。

#### B. 塩水法による蒸発測定

塩田の天日製塩法による海水の濃縮と同じ原理を蒸発量測定に応用したのが塩水法である。近年、電気伝導度法による塩分測定装置の精度 ( $0.003\%$ ) が向上したので、1~2 時間程度の短時間の蒸発量測定が可能になった。原理と測定方法および気象研究所による 1967年秋の千葉港と 1970年秋の霞ヶ浦湖岸での実験観測の吟味が報告されているが (Fujita and Honda, 1979)、筆者等の実験観測は霞ヶ浦湖岸での観測を進めた藤田氏の示唆に基づいて計画した。塩分計および塩水容器は測定精度が高く安定していてかつ保守の容易なものを選定し、次のように実施した。

塩分計は鶴見精機(株)のデジタル塩分計 E-202、卓上型で電磁誘導型セルをセンサーに用い電

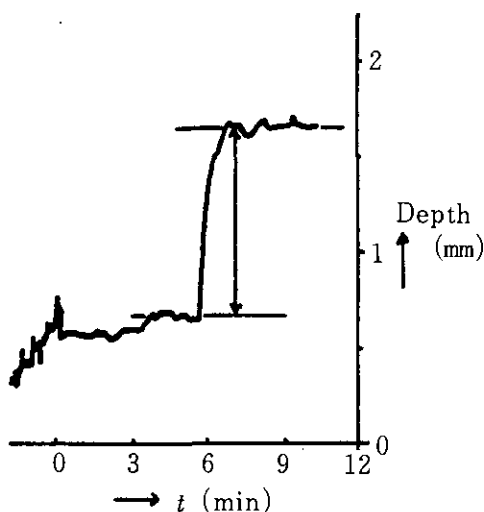


図 7 微差圧計式蒸発量計の感度測定

Fig. 7 A calibration of the micro-evaporimeter  
 (A noisy fluctuation was less than  $\pm 0.05\text{mm H}_2\text{O}$ . And initial shift of the graph was observed during warming up of this meter)

極は使用していないので分極現象による不安定化はなく、またサーミスターによる温度補償が自動化され、表示は5桁である。蒸発パンには直径20cm深さ20cmの円筒パイレックス製のものを用いた。

研究所構内大気モニター棟露場の大型蒸発計の中に設置した場合と実験池に浮かべた場合の観測結果を表2に示す。

いま、容器にいた当初の塩水の量を  $Q(\text{cm}^3)$ 、単位時間の蒸発量を  $x(\text{cm}^3)$ 、当初の塩分を  $a(\%)$ 、単位時間後を  $b(\%)$ 、容器の水面の面積を  $S(\text{cm}^2)$  とすると、

$$aQ = b(Q - x) \text{ となって}$$

$$x = Q \cdot (b - a) / b \text{ が得られる。}$$

蒸発量を水深で表現すると  $x/S$  となる。この実験観測では小さな容器を使用したため、観測ごとに  $5,000\text{cm}^3$  の当初水量から  $200\text{cm}^3$  ずつの採水をしたので  $Q$  の変化量が  $x$  に影響してくる。 $Q$  の値が採水量に比べて十分に大きいときには、Fujita and Honda (1979) の提案した計算法が使えるが、ここでは前述の理由で採水量を計量しながら測定した。水量の計測誤差が  $10\text{cm}^3$  以下の場合、蒸発計測の誤差は  $0.01\text{mm}$  以下である。

この実験観測で、1時間単位での蒸発量がどの時間帯で多いかの定量的判定が可能であること、および24時間測定値は実験地と大型蒸発計の数値がほぼ等しいことがわかったが、天候や季節との関係にはさらに多くの実験観測が必要である。

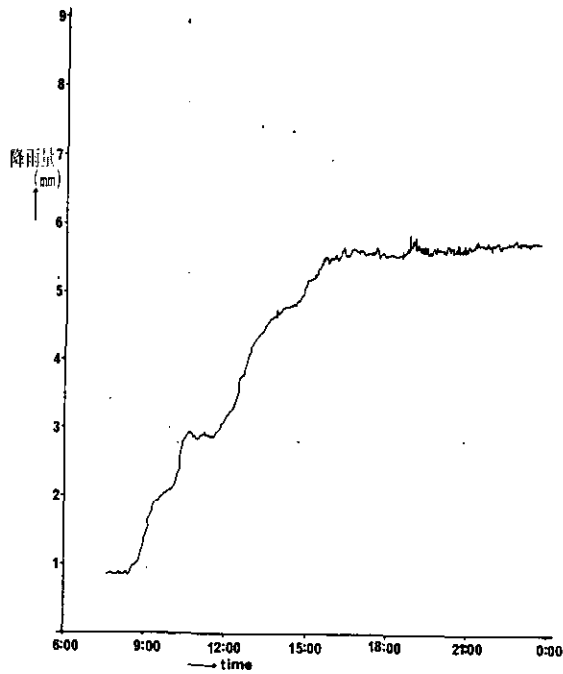


図 8 微差圧計式蒸発量計の記録例 (1978年 4月13~14日)

Fig.8 An example of a temporal rainfall pattern by the micro-evaporimeter for a misty rain during 13-14 April 1978

表 2 塩水法による蒸発量の観測

Table 2 Measured evaporation from salt water pan

Date	Time	Evaporation (salt water pan, mm)	Evaporation (Class A pan, mm)	Weather
10 July 1979	10:00			Fine, humidity min. 41%, wind mean 2.2m/s
	11:00	0.3/1h		
	12:00	0.1/1h		
	13:00	0.2/1h		
	15:00	0.7/2h	0.8/2h	
	16:00	0.6/1h	0.4/1h	
	17:00	0.1/1h*	0.5/1h	
27 Aug. 1979	17:00			Fine, humidity min. 52%, wind mean 3.6m/s
28 Aug. 1979	17:00	2.7/24h	2.7/24h	Cloudy, humidity min. 60% wind mean 2.6m/s
29 Aug. 1979	17:00	2.8/24h	2.9/24h	Cloudy, humidity min. 57%, wind mean 2.5m/s

\* : 容器内塩水が減少してきたための影響が考えられる。

#### 4. 気候資料による算定式作成上の問題点

気候資料を使う算定法は主として1) 水収支法 (water balance method), 2) 熱収支法 (heat budget method), 3) 空気力学的傾度法 (aerodynamic profile method), および4) 経験式 (empirical evaporation formulae) に分けられるが, はじめに説明したように水収支法では利用できる観測データが事実上存在しないことが多く, 2) と3) についても信頼できる観測値が得にくい (土屋・白井, 1979a)。4) の経験式がダルトン (Dalton) 型の実験式として知られ, 月ごとの気候資料を用いる方式である。原理から, バルク法 (bulk aerodynamic method) あるいは質量輸送法とも呼ばれ, 実用性を重視した式の開発が行われ, Penman (1948) の大量の野外実験に基づくものが著名である。いずれもDaltonの式と呼ばれる。

$$E = f(u) (e_w - e_a) \quad (3)$$

を原型にしている。

ここで, 蒸発量  $E$  は水面上の蒸気圧  $e_w$  と一定高度の空気の蒸気圧  $e_a$  との差に風速  $u$  の関数  $f$  を乗じて得られるとしているが, 最近, Morton (1979) がいくつかの国の湖に適用した方式はPenman (1948) が前述のダルトン型とは別に提案した熱収支項を取入れた式を修正したKohler and Parmele (1967) の式,

$$E_p = DR_w + (1 - D)f_w (v - v_p) \quad (4)$$

を湖での算定に用いるために変形したPriestley and Taylor (1972) の式,

$$E_w = 1.26(1 + \gamma p / \Delta)^{-1} R_w \quad (5)$$

をさらに改変して,

$$E_w = \psi (R_w + M) \quad (6)$$

を提案している。

式(4)と(5)において,  $E_p$  は potential evaporation を示し, 無制限に水の補給のある場合の蒸発量であり,  $E_w$  はそれを湖などの水面と規定したものである。 $R_w$  は水面の温度が気温に等しいと仮定した場合の純放射量,  $f_w$  は水蒸気輸送係数,  $v$  と  $v_p$  は水面近くの気温と露点温度における飽和蒸気圧であり,  $D$  は  $(1 + \lambda / \Delta)^{-1}$  で定義される量である。なお,  $\Delta$  は気温による飽和蒸気圧の傾度であり,  $\lambda$  は  $\gamma p + 4 \epsilon \sigma (T + 273)^3 / f_w$  で表わされる熱輸送係数であるが,  $\gamma$  は蒸発計係数,  $p$  は気圧,  $\sigma$  は Stefan-Boltzman 係数,  $\epsilon$  は水面放射率,  $T$  は気温の最高と最低の平均である。

(6)式ではエネルギーの重み因子としての  $\psi$  と移流エネルギー  $M$  で説明しているが,

$$\psi = 0.26 \left[ 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \left( \frac{0.5 + 0.5\gamma + \lambda/\Delta}{r + \lambda/\Delta} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$M = 0.66B - 0.44R_w \quad (8)$$

(ただし  $M \geq 0$ )

と定義され、 $r$ は相対湿度であって $v_D/v$ に等しく、 $B$ は水面温度が気温に等しいとした場合の正味の長波放射損失である。

(6)式はMorton (1978) が(4)と(5)の式を改善して、最終的に気温、湿度および日照時間(または放射量)の月ごとの観測統計値だけで湖面蒸発量を算定するために作成したものであるが、世界中の種々の気候条件のもとでの他の手法との比較を示している(Morton, 1979)。その特色は、水面の風下効果が反映されていることで、そのために乾燥地の湖では他の手法によるものに比べて極端に少ない算定値になる。

気象観測値の統計結果、すなわち気候表を利用する算定式ではその多くがPenman (1948)のいくつかの式を出発点にしているので、Penmanの考え方を再検討する必要がある。Penman自身は、当時の気象観測の実情から見て、蒸発現象が水面上1mm程度の分子拡散の実態を測定することが困難であり、重要な役割を果す水面温度の測定がきわめて困難であることを理由にして、3種の方式すなわちDalton式の改善といえる経験式とその変型としての空気力学的な式および理論的に考案した熱収支の式を提案し、空気力学的な式の適合性が悪く、古典的ではあってもDalton型の式が良好であり、熱収支の式が良く適合したことを数多くの実験結果との照合で説明した。

その後、Penmanの熱収支の式から多数の変型や改善案が出され、その一部を紹介したが、いずれの場合も水面温度が気温に等しいとか、風の影響の反映されにくい表現となっている。

現在、Penmanが測定困難とした水面の温度は放射温度計によって、利用可能性の検討が必要な状態であるといえるし、また水面上1mm前後での蒸発に関連しての現象は、筆者等の風洞実験でもかなりの精度で測定可能であり、風速に依存する量が大いことを示唆している。また、水面の温度も風速に依存するので、逆に一定の条件のもとでは表面水温と水中温度の測定値から水面付近の風速が算定できる可能性も考えられる。

通常の気象観測施設で得られる気候資料は、水面上について得られたものでないため、算定式にそのまま利用することはできない。したがって、Penmanの経験式および熱収支式のどちらを利用するにしても、この注意は必要であり、Penmanの経験式自体が水面から2mの高さの風速で水面の風速を仮定に基づいて算出していることを前提にしている。彼の経験式では、まず、Rohwer (1931)の式

$$E = 0.40(e_s - e_d) (1 + 0.27 u_0) \quad (\text{mm/day}) \quad (9)$$

の $u_0$ すなわち水面の風速を2m高の $u_2$ に置きかえ

$$E = 0.40(e_s - e_a) (1 + 0.17 u_2) \quad (\text{mm/day}) \quad (10)$$

といたうえで、最終的には、

$$E_a = 0.35(1 + 9.8 \times 10^{-3} u_2) (e_a - e_d) \quad (\text{mm/day}) \quad (11)$$

を提案している。 $u_2$  は mile/day であるため、風速 1, 2, 3 および 4 m/s に対して、 $(e_a - e_d)$  が一定の場合の係数  $0.35(1 + 9.8 \times 10^{-3} u_2)$  はそれぞれ、0.535, 0.717, 0.902 および 1.087 となる。湖面全体を代表するような風速を算定することはかなり困難であるが、誤差は低風速において寄与率が大きくなるので、通常的气象観測施設のような 10m 高の記録を利用する場合十分な注意が必要である。たとえば、真の平均風速が 1 m/s であるものを、2 m/s と算定したときは算定蒸発量は 34%、2 m/s であるのを 3 m/s と算定すると 26%、それぞれ過大な蒸発量を算定することになる。

## 5. 蒸発現象と水質

富栄養化現象は、霞ヶ浦の場合、アオコと呼ばれる植物プランクトンの一種 *Microcystis* の大量増殖となって認められることが多い。アオコは高い水温と多い日照によって増殖が顕著になることが知られており（矢木ほか, 1981）、干ばつ型の天候の卓越した 1978 年と冷夏多雨型の 1977 年の水質観測結果もその傾向を反映している（国立公害研, 1979）。また、水質についての総合的な指標として提案された TSI（Carlson, 1977；相崎ほか, 1981）も、図 9 に示したように、冷夏多雨の年と干ばつ型の年の違いをある程度反映している。すなわち、水質汚濁の程度が比較的低い湖心部で（図の A）暖候期月の TSI は 1977 年と 1978 年であまり大きな違いはないが、夏の終りに近い 9～10 月についてみると 1977 年のほうが低い。また、汚濁の進んだ高浜入についてみると、局地的に極端に汚濁の進んだ部分があるため、湖としての代表性に問題はあがるが、10 月の TSI はやはり 1977 年のほうが低い。

水面からの蒸発は、前述の風洞実験、野外における実験観測および数年間の委託定時観測の結果を見ても理解されるように、乾燥した強風にさらされた高い水温で多くなる。反対に低い水温の湖面に湿った空気がよんで動かなければ蒸発量は極端に少なくなる。蒸発が多ければ水収支の残を示す水位は低下し、水量が減少するので水質汚濁の原因となる物質の量が同じであったとしても濃度が高まることになる。したがって、干ばつ型の天候はアオコなどの植物プランクトンの増殖を進めるだけでなく、水量の減少をもたらすことで濃度を高めるために 2 重に水質汚濁を加速する。すなわち、夏の蒸発が多いことは富栄養化現象の進行と同時現象であり、また濃度を高める加速要因であるといえる。いいかえれば、蒸発は水質汚濁に関連して正のフィードバック機構に組み込まれた要因である。



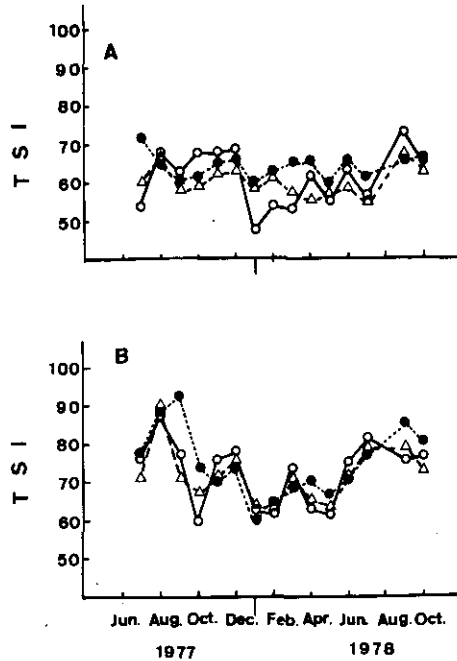


図 9 霞ヶ浦におけるTSI (Trophic State Index: 富栄養化状態指標) の季節変化 (相崎ほか, 1981による)

Fig. 9 Seasonal changes in TSI (Trophic State Index) values in Lake Kasumigaura (from Aizaki *et al.*, 1981)

## 6. 湖面蒸発問題の検討

広い水面からの蒸発量を高い精度で算定することはきわめて困難であるが、湖の水質汚濁に関連の深い水収支を構成する要素のひとつとして考える場合には、他の要素の精度と同程度であれば、実用的な精度であるとみなすことが可能である。約3年間の研究期間中に典型的な冷夏多雨型の1977年とひでり型の1978年とが存在したが、水資源対策等で規定される霞ヶ浦(西浦に北浦その他の付属水域を加えたもの)220km<sup>2</sup>の年間蒸発量約2.0億トンに対して、1.2~1.5億トンの算定値を得た。この算定値が従来の平年値として出されたものよりかなり低いことが、果して妥当であるか否かについては今後さらに多くの継続的調査研究が必要であるが、多くの研究例を検討することで、この算定値がある程度妥当であることが説明できる。

たとえば、昭和30~33年の4回の夏における関西電力三浦貯水池の湖水に浮かべた大型の蒸発計を用いた観測では、天気の良い月の平均日蒸発量を約3mmとしている(関西電力,1959,1960)。今回の霞ヶ浦湖面蒸発量の算定でも6~8の3か月では冷夏多雨の1977年8月における平均日量1.5mmを最小に、ひでりの1978年7,8月の3.4mmが最大であり、8月の平均日蒸発量を4mm以上としたのは

(たとえば茨城大, 1977), 過大であることを示唆している。

また, 十和田湖と野尻湖について, 空気力学的方法 (Dalton型) と熱収支法の適用を研究した山本・近藤 (1968) の見解では, 年平均蒸発量は水深が浅くても深くてもほとんど変わらないとしているので, さらに他の深い湖についての算定例を含めて検討してみた。

霞ヶ浦と並んで水資源の面から注目されている琵琶湖については, 湖面蒸発量の推定の研究は古くから進められており, 年間総蒸発量の推定値も最小の692mmから最大の921mm (古藤田, 1977, 1978) までかなりの幅がある。この場合, 最大値はPenman (1963) の式に基づいたものであり, 彦根気象台の小型蒸発計のものにはほぼ等しく, 前述の理由で真の湖面蒸発量より60~80%過大であるとみなせる。最小値は熱収支法による算定 (古藤田, 1977) である。

表3に琵琶湖を含めて, いずれもPenmanの式では過大になることを指適したうえで, 他の方式を採用した例をいくつか示した。いずれの方式によっても600~800mmの値が得られている。しかし, いずれの方法も信頼度の高い蒸発量の測定値との照合が行なわれていないので, 推定値の精度が保証されているわけではない。

表 3 湖面蒸発量を算定した湖  
Table 3 Annual evaporations of four lakes

	Kasumigaura 霞ヶ浦	Biwako 琵琶湖 <sup>1)</sup>	Noziriko 野尻湖 <sup>2)</sup>	Towadako 十和田湖 <sup>2)</sup>
緯度・経度(湖心)	36°02' 140°23'	35°50' 136°07'	36°50' 138°15'	40°25' 140°55'
海拔高度	1 m	86 m	656 m	400 m
湖の面積	220*km <sup>2</sup>	681km <sup>2</sup>	4.4km <sup>2</sup>	59.7km <sup>2</sup>
平均の深さ	4 m	40 m	41 m	80 m
年平均気温			8.8℃	8.0℃
年平均表層水温度			11.9℃	10.0℃
年平均風速	1.0**m/s		2.9m/s	3.3m/s
年間総降水量	土浦 1,033mm 江戸崎 1,198mm+	1,637mm	1,679mm	2,142mm
年間総蒸発量	628***mm	811mm 706mm	618mm	756mm

1) 古藤田 (1977, 1978)

2) 山本・近藤 (1968)

\* 湖沼学では171km<sup>2</sup>の西浦を指すが, 水資源対策では北浦等を含めて220km<sup>2</sup>と表示している。

\*\* 湖心の風速観測統計が公表されていないので, 土浦 (地域気象観測) の1978~79の平均を示した。

\*\*\* 表1の平均 (553.4+658.8+671.3) / 3

信頼度の高い蒸発量測定は, 単純ではあるが土木的に大がかりな設備を必要とする。たとえば, 大型蒸発計を湖水に浮かべるためのいかだを用意するか, あるいは湖水の表層水を水温の点で代表

するような実際の湖の水を実験池に流し込んで、そこに大型蒸発計を浸して置くという方法がある。これらの方法によっても風との関係で広い湖面全体を代表させるにはある程度の限界があるが、今までの多くの比較観測によって、湖の水を引込んだ水流中に蒸発計を設置する方法が、観測を継続しかつ水温の点で湖に近似させる最も良い方法とされている (Neuwirth, 1973)。

このような、基準になる実測値が数年以上蓄積できれば、通常的气象観測設備 (たとえば公的に展開されている気象庁の地域気象観測網) 等の公開資料を使うための、算定式の作成が実用的な精度で可能になる。

したがって、湖面蒸発量を算出するためには、湖心近くの表層水の水温条件を保持したままパイプ等によって湖岸の水路に導き、そこに大型蒸発計を設置して継続的観測 (自動記録方式を用いる) を行い、その観測値を基準値として、風速、表面水温などの要因を考慮した気候資料を用いる算定式を開発するのが最良であるといえる。

## 7. ま と め

水深の浅い葎ヶ浦は水量のわりには面積が広いので、水量に対する蒸発量の比重はかなり大きい。したがって、湖水に対しての汚濁負荷量の評価に必要な水収支の中で、蒸発量は重要な構成要素となる。

浅い湖に対して適用されてきたいくつかの蒸発量算定法を検討したうえで、湖岸に国際規格の Class A pan を 2 台設置して、数年間の通年観測によって得た値に係数を乗じて湖面蒸発量を算出する方法を用いた。その結果 1977 年 7 月～1980 年 3 月の観測値によって、年間蒸発量を湖水面積 220km<sup>2</sup> について 1.20～1.47 億トンと算定した。この値は従来よく使われた約 2 億トンよりかなり少い。

係数を吟味するための風洞実験によって風速との関係を定量的に求めた。さらに、短時間蒸発量を測定するための機器の開発と野外実験等によって、蒸発現象の機構を検討した。

また、蒸発量算定を気候資料によって求める実用的な算定式を作成するために必要な問題点を検討し、水面風速と水面温度の信頼度の高い観測値または推定値が効果的に用いられることを示し、そのような算定式の精度を湖の水を利用した水路での Class A pan の観測によって確認することを提案した。

## 謝 辞

この研究では多くの方々の御協力を得たが、とくに長期にわたる毎日の蒸発計測定では県の内水面水産試験場の方々および江戸崎町立江戸崎中学の方々には、蒸発計設置場所についての御配慮とともに、炎熱厳寒の候にも熱心に測定をして頂いたことを感謝する次第である。また、蒸発についての多くの未解決の物理過程を究明するために、前例のない風洞実験を計画したが、大気環境部の風洞使用に際しては、大気環境計画研究室員および運転担当の多くの方々に、測定装置の運用な

ど深夜にまたがる実験に協力して頂いた。合わせてお礼を申し上げたい。

### 引用文献

- 相崎守弘・大槻 晃・福島武彦・河合崇欣・細見正明・村岡浩爾 (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. 国立公害研究所研究報告. No. 23, 13—31
- Carlson, R. E. (1977) : A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 378—379.
- Fujita, T. and N. Honda (1979) : Measurement of evaporation from salt water pan. *Pap. Met. Geophys.*, **31**, 1—6.
- Hounam, C. E. (1973) : Comparison between pan and lake evaporation. WMO Tech. Note, No. 126, 52pp.
- 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会 (1977) : 霞ヶ浦, 三共出版, pp. 11—13.
- 関西電力株式会社 (1959, 1960) : 三浦貯水池における蒸発量の観測, 電力気象連絡会彙報第2輯, **9**, 173—186 ; **10**, 6—23.
- 気象庁 (1966) : 蒸発観測について. 観測課長会議資料. pp. 53—60. (未刊行資料)
- 気象庁 (1971) : 地上気象観測法. pp. 163—166.
- 気象庁 (1973) : 地上気象観測統計指針, 第2章. pp. 30—32.
- 建設省 (1980) : 霞ヶ浦——環境と水質, (説明付1/5万地図).
- Kohler, M. A., and L. H. Parmele (1967) : Generalized estimates of freewater evaporation. *Water Resour. Res.*, **3**, 997—1005.
- 国立公害研究所 (1979) : 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅱ) ——霞ヶ浦を中心として——昭和53年度. 国立公害研究所研究報告, No. 6, 420pp.
- 古藤田一雄 (1977) : 気候学的資料を用いた湖面蒸発量の推定法, 筑波大学水理実験センター報告, No. 1, 53—66.
- 古藤田一雄 (1978) : 琵琶湖流域の水収支. 日本の水収支, 市川・樫根編, 古今書院, 東京, pp. 104—113.
- Morton, F. I. (1978) : Estimating evapotranspiration from potential evaporation : Practicality of an iconoclastic approach. *J. Hydrol.*, **38**, 1—32.
- Morton, F. I. (1979) : Climatological estimates of lake evaporation, *Water Resour. Res.*, **15**, 64—76.
- Neuwirth, F. (1973) : Experiences with evaporation pans at a shallow steppe-lake in Austria. *IAHS Pub.*, No. 109, 290—297.
- Penman, H. L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and glass. *Proc. Roy. Soc. London, A*, **193**, 120—145.
- Penman, H. L. (1963) : *Vegetation and hydrology*. Commonwealth Agric. Bureaux, 124pp.
- Rohwer, C. (1931) : U. S. Dept. Agric. Tech. Bull. 271. [from Penman, (1948)]
- 土屋 巖・白井邦彦 (1979a) : 霞ヶ浦の湖面蒸発の算定について, 国立公害研究所研究報告, 第6号, 23—31
- 土屋 巖・白井邦彦 (1979b) : 国立公害研究所と気象庁の大型蒸発計観測日表(1977年7月—1978年8月), 国立公害研究所研究報告, 第6号, 405—407.
- WMO(1976) : The CIMO international evaporimeter comparisons. WMO—No. 449, 38pp.
- 矢木修身・岡田光正・須藤隆一・萩原富司・高村義親 (1981) : *Microcystis*の増殖特性. 国立公害研究所研究報告, 第25号, 47—58
- Yamamoto, G. and J. Kondo (1964) : Evaporation from Lake Towada. *J. Met. Soc. Japan*, **42**, 85—96.
- Yamamoto, G. and J. Kondo (1968) : Evaporation from Lake Nojiri. *J. Met. Soc. Japan*, **46**, 166—177.
- 山本義一・近藤純正 (1968) : 湖面蒸発の季節変化について. 電力気象連絡会彙報, **18**, 87—103.

4.

#### 霞ヶ浦沿岸地下水の挙動と水質

村岡浩爾<sup>1</sup>・細見正明<sup>1</sup>

### Hydraulic Behavior and Water Quality of Groundwater in the Lakeside Area of the Kasumigaura

Kohji MURAOKA<sup>1</sup> and Masaaki HOSOMI<sup>1</sup>

#### Abstract

Hydraulic behavior and water quality of the groundwater in the lakeside area of the Kasumigaura were observed in nine test wells and about sixty used or utilizable wells distributed in the Miho model area and the lakeside area. The purpose of this work is to solve the quantitative relationship concerning water volume and materials like nutrients between the groundwater and the lake water.

- (1) In the Miho model area the response of groundwater level against the precipitation is very sensitive, and the equation  $\Delta h = 15R_a$  was found between the available rainfall  $R_a$  for one precipitation and the risen height  $\Delta h$  of groundwater level.
- (2) The groundwater level in irrigation term in the same model area is rather lower than one in non-irrigation term in spite of rainy season, therefore the uplift of groundwater in irrigation term might have any influence on the behavior of groundwater motion in the lakeside area.
- (3) In the zone of 300 meters' width along the coast line in this model area, the groundwater table inclines downwards toward the lake basin in all seasons, consequently the inflow of groundwater into the lake across the coast line may be calculated to be  $54.84\text{m}^3/\text{year}/\text{m}$  on the average in season. Not only in the Miho model area but almost all lakeside except for the little part of west/southern coast has also the inflow of groundwater as a result of the observation of groundwater table in the area around the lake, and the annual influx of the groundwater was estimated to be approximately a percent of the annual discharge of rivers flowing into the lake.
- (4) The water quality with respect to  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Fe, and Mn in the group of deep wells in the lakeside of the Kasumigaura is a little concentrated rather than

---

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental  
Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

that in the group of shallow wells. The items : pH,  $(\text{NO}_2 + \text{NO}_3)\text{-N}$ , Si, K, and E.C. have statistically significant difference among the two groups, especially former three items could be regarded as important items to distinguish the difference of groundwater quality in those two groups of wells.

- (5) The average concentration in the groundwater in the lakeside area with respect to the items Fe and Si is higher in one order than that of the lake water, but there is not significant difference in other items among them. However, the concentration of total-N and total-P in the groundwater was observed to be two or three times larger than that in the lake water.
- (6) The influx load due to the groundwater across the coast line of the lake is estimated to be 0.3~2.0 percents with respect to total-N and 0.12~0.72 percents with respect to total-P of the load due to the rivers flowing into the lake.

## 1. はじめに

地球上に存在する水の量はおよそ13.5億 $\text{km}^3$ といわれ、その2.6%に当る3,450万 $\text{km}^3$ が淡水である。また、この淡水量の70%は氷として、29%が浅層および深層地下水として存在し、その残りが湖沼水、河川水、土壌水となっている。したがって、陸水域で地表に存在する湖沼水、河川水にくらべると、地下水の量は圧倒的に大きいと見られる<sup>1)</sup>。

我が国の水資源賦存量は降水量から蒸発散量を差し引いて、年平均量は4,500億 $\text{m}^3$ 程度である。またこの半分は表流水、残りの半分は地下水となる。昭和50年の資料では<sup>2)</sup>この賦存量から876億 $\text{m}^3$ を生活用水、工業用水、農業用水として利用しており、その水源内訳の比率は、河川水74%、地下水16%、その他(湧水、ため池等)10%となっている。こうして見ると、水資源として河川水の利用率は大きいけれども、地下水もかなり利用されていること、またその存在量、賦存量からみて地下水の利用は今後更に高まる可能性のあることがわかる。

一方、霞ヶ浦流域では第1次、第2次、第3次産業のうちで、第1次産業の占める割合は46.8%<sup>3)</sup>で、全国の水準にくらべて極めて高く有数の農業地帯となっている。特に霞ヶ浦の湖岸地帯は、水郷に代表されるような水田が多く、湖岸線の大部分はその後背地が田地、畑地であるといえる。この農業用水の取水は古くからの湖水利用に加え、干拓地や農地整備された地帯では機場からの機械力による湖水利用があるほかに、地下水利用も活発である。農業用水の余剰水は、特に雨期や多降雨時には地表排水として湖水に戻るほか、浸透排出として浅層地下水へ供給されることになる。浅層地下水は深層地下のかん養源ともなり、また、湖水位と地下水位との動水勾配の在り方によっては湖水と浅層地下水の間を往ききする地下水流となり得る。このように、沿岸農耕地帯は取水・排水を通じて、また地下水流を通じて湖水と密接に結びついており、その水循環は図1のように表わすことができよう。

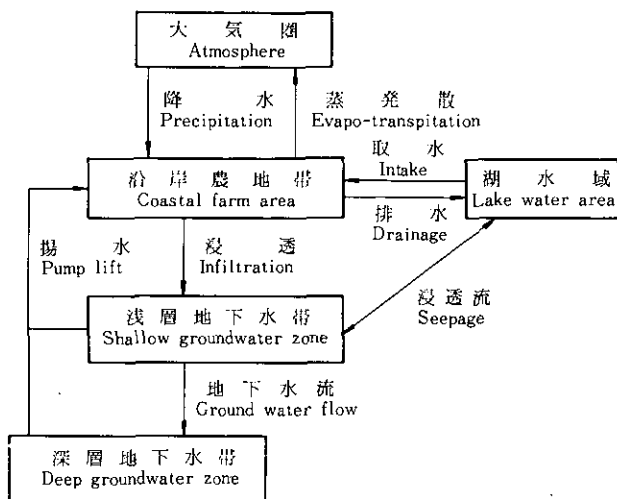


図 1 沿岸農地を主体とした水循環  はサブ・システムであり、それらをつなぐ線は動態、すなわち水の動きを表す。

Fig. 1 Water circulation system around coastal farm.

霞ヶ浦の湖水は河川および下水道排水による流入汚濁負荷に起因する水質汚濁があるほか、湖内の水産活動、沿岸の農産・畜産活動に起因するものもある。その一方で、湖水は水がめとして各種用水に供され、かつ将来の水資源確保のために開発事業が進められている。このような開発と保全のために、霞ヶ浦の水質汚濁機構の解明と汚濁防止に関する研究が多角的に行われているが、ここでは沿岸の地下水と湖水との間でどのような汚濁機構が存在するかを解明することを意図している。既述のごとく、沿岸の大部分は農耕地帯であるため、農産活動がこの機構に関係するのは当然であるが、従来から農耕地帯を主体とした栄養元素の動態と収支についてはすぐれた研究<sup>4)</sup>があるが、地下水流を通じての物質移動については研究は少ない。しかしながら、霞ヶ浦の全沿岸についてこのことを探究するのは極めて困難であるため、第一段階として美浦村（西浦南岸）に設定したモデル地区の既存の井戸および観測井による詳細な調査と、それと併行する形で第二段階として、西浦沿岸の数十個所の集落における既存の井戸と若干の観測井による調査とから、表記の課題について検討を試みたものである。

## 2. モデル地区周辺の人文地理特性

### 2.1 地形および地質

図 2 に示す約 14km<sup>2</sup> のモデル地区について現地を踏査し、地形・地質の調査を行なった。

以下に、調査結果の概要を示す。

[地形]

霞ヶ浦流域の地形は、別項の宇都宮の研究<sup>5)</sup>のように山地・台地・沖積低地に大別される。モデル地区を含む霞ヶ浦南岸一帯には、海拔30m程度の常総台地（稲敷台地）が広がっている。モデル地区付近では、台地下部が沖積平野に埋積され、一種の沈降山地地形をなしている。

沖積低地部には、砂州性の微高地が点在し、その後背地には湿地が発達している。

なお、余郷から稲荷の鼻にかけての地域は、かつて入江であったものが干拓されたものである（昭和22年～41年）。

[地質]

モデル地区の地質構成を地形と対比したのを表1に示す。また図3に代表的な地質断面を示す。地質構造は全体として北方および東方に非常にゆるやかに傾斜しているのが認められる（1/1000～3/1000）が、部分的には起伏がある。とくに最下位のやぶ層は、姥神・石灘・端山付近ではやや高く、他地域では平地下に没している。

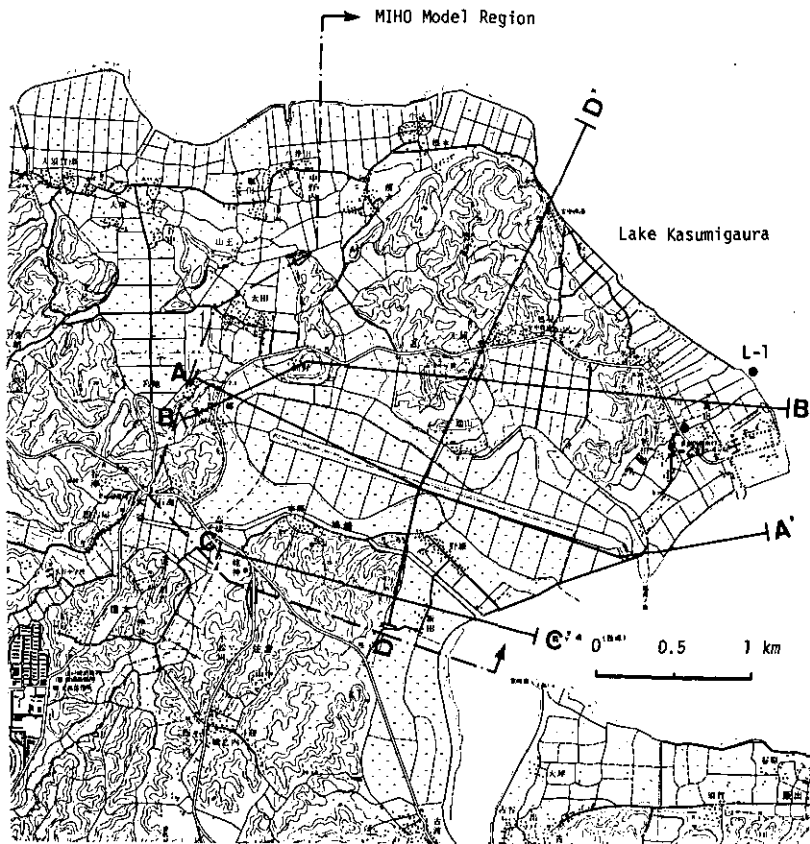


図 2 美浦モデル地区の地形図

Fig. 2 Topographic map of Miho model region



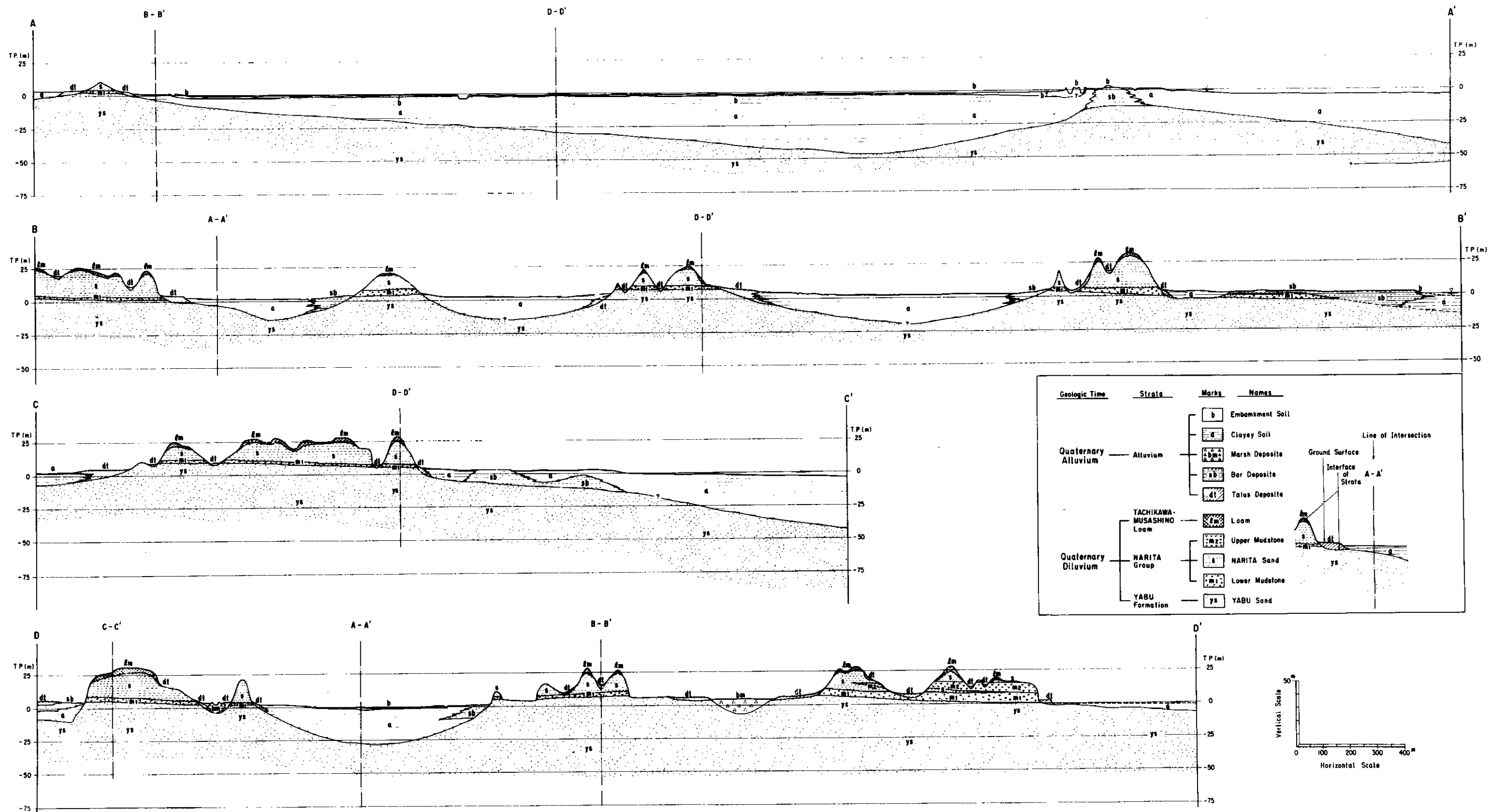


図 3 美浦モデル地区における代表的な地質断面図

Fig. 3 Geological profiles along section of A-A'; B-B'; C-C'; and D-D'; as shown Fig.

表 1 美浦モデル地区における地質構造と地形区分との対比

Table 1 The correspondence of geological structure to classification of landform in Miho model region

地質時代	地層名	地質記号	地質名	記 事	※ 層厚	地形 区分
第四紀・沖積世	沖積層	b	盛土・埋土	干拓地および堤防を構成する。主として砂質土からなるゆるい堆積物。 堆	1 └ 5 m	干堤 拓地 防
		a	低地堆積物	沖積平野を構成する。粘性土～砂質土で、ゆるい堆積物	2 └ 30 m	沖積 低地
第四紀・沖積世	沖積層	bm	湿地堆積物	後背湿地に分布し、粘性土～腐植土からなり、極めてゆるい。	2 └ 10 m	後背 湿地
		sb	砂州堆積物	沖積平野中に砂州状の微高地を構成して分布。主として細～粗粒砂からなる。	5 └ 10 m	砂微 州高 状地
		dt	崩土堆積物	小規模な崖錐性堆積物で、粘性土～砂質土からなり、ゆるい。	2 └ 5 m	台地 下部 斜面
第四紀・洪積世	立川・武蔵野ローム層	lm	ローム	台地部の最上位に分布。多孔質で割れ目の多いローム層。下位に薄い粘土層を含む。	2 └ 5 m	台
	成田層群	m2	上部泥岩	成田・砂層中に挟在している。調査地の北東部方向に厚く発達し、他地域では薄いので、その部分は図上に表現していない。	0.5 └ 6 m	
		S	成田・砂層	細～粗粒砂でシルト～粘土分の混入が多く、一部に礫を含む。クロスラミナの発達が著しい。	15 └ 20 m	
		m1	下部泥岩	調査地の北東部方向で厚く、貝化石をふくむ。その他の地域では薄く、腐植土を含んでいる。	2 └ 15 m	
	やぶ層	ys	やぶ・砂層	細～粗粒砂で全体に淘汰がよく粒径がそろっている。クロスラミナが発達している。	20 m 以上	地

※層厚は推定により大まかな目安を示したものである。

なお、その上位にある成田層の下部泥岩は沖積平野よりわずかに高いレベルにあるが、調査地の北方では層厚も大きく、貝化石・生痕が密集しているのに対し、中部～南部では層厚も薄く、腐植物を多量に含むようである。

## 2.2 井戸調査

地下水の水質や地下水位の特性をは握する上で、調査対象とした既存井戸の深さや井戸の種類、ストレーナーの位置、井戸水の利用状況が重要となる。ここでは、調査対象井戸の属性に関する聞き取り調査を行なった。

対象井戸は、115か所で、そのうち掘抜井戸は80か所、打込井戸は35か所であった。打込井戸は、井戸深が10m以上のものが大半で飲料水をはじめとする生活用水に使用されている。掘抜井戸は、井戸深が10m未満のものが多く、そのうち現在使用されているのは16か所である。それらは飲料水としてよりも風呂・洗濯用水として利用されているものが多い。なお調査対象とした各井戸の深さや種類、現在の使用状況については既に記述した<sup>6)</sup>。

聞き取り調査の中で、多くの浅い（井戸深が10m未満）掘抜井戸は、水枯れ、水質悪化の理由で、井戸深が10m以上の深い打込井戸にして、飲料水その他の生活用水として利用していることが明らかとなった。これは、生活排水がほとんど地下浸透による自然放流であることと関係しているとも考えられる。

## 2.3 降水量

モデル地区の近傍にある江戸崎の月別降水量（気象庁：アメダス江戸崎）と霞ヶ浦流域の30年間における平均降水量<sup>3)</sup>とを図4に示す。モデル地区における昭和53年9月から昭和54年8月までの年降水量は、1,077mmで、霞ヶ浦流域の年平均降水量1,353mmと比べるとかなり少ない。これは、昭和54年6月がカラツユに終わったことと夏期の異常渇水のためである。なお昭和54年における年降水量は1,281mmで流域と比べると若干少ない程度であった。

## 2.4 土地利用

モデル地区および霞ヶ浦流域における土地利用状況について表2に示す。

モデル地区は、霞ヶ浦流域<sup>3)</sup>と比べて水田の構成比が大きく、畑地の構成比が小さい。これは、モデル地区に沖積低地が多いことを示していると考えられる。また水稻作付面積が経営面積の70%を越える市町村は東村をはじめとする西浦沿岸の南部地域で、モデル地区もこの中に入る。

## 2.5 人口

表3にモデル地区における世帯数および人口の経年変化を示す。昭和50年から人口と世帯数とも

若干増加している。

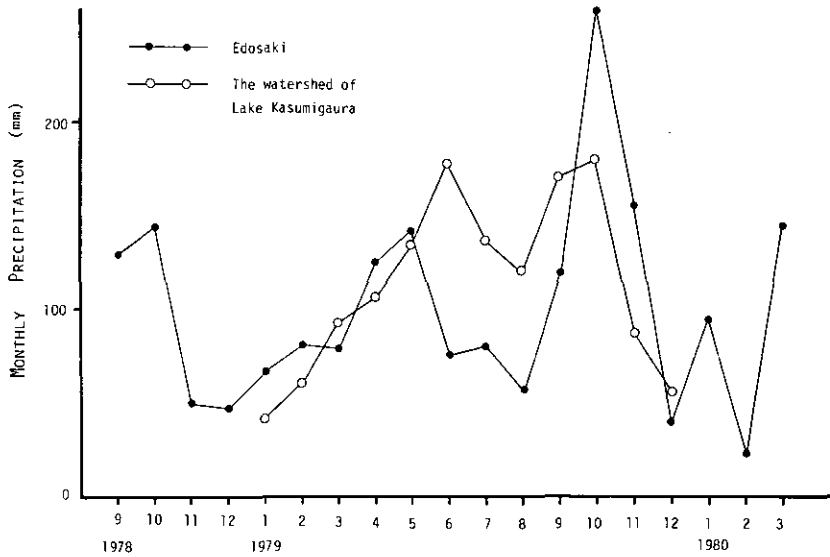


図 4 江戸崎および霞ヶ浦流域の月別降水量

Fig. 4 Monthly precipitation of Edosaki near Miho model region and the watershed of Lake Kasumigaura

表 2 美浦モデル地区および霞ヶ浦流域における土地利用状況

Table 2 Land uses in Miho model region and the watershed of Lake Kasumigaura

	モデル地区		霞ヶ浦流域	
	面積 (ha)	構成比 (%)	面積 (km <sup>2</sup> )	構成比 (%)
水田	753.35	53.8	472.7	19.8
畑	105.32	7.5	571.9	23.9
森林	291.60	20.8	560.4	23.4
原野・荒地	72.70	5.2	48.7	2.0
内水面(河川など)	19.97	1.4	—	—
道路	31.81	2.3	—	—
住居地	102.62	7.3	127.8	5.3
その他	23.50	1.7	—	—
合計	1,400.94ha	100	2,387.2km <sup>2</sup>	100

表 3 美浦モデル地区における世帯数および人口

Table 3 The number of households and population in Miho model region

	世帯数	人口		
		男	女	計
昭和50年	748	1,592	1,736	3,328
“ 51 “	745	1,591	1,731	3,322
“ 52 “	747	1,599	1,734	3,333
“ 53 “	753	1,602	1,741	3,343

人口密度については、昭和50年でモデル地区が238人/km<sup>2</sup>、霞ヶ浦流域<sup>3)</sup>が284人/km<sup>2</sup>（ただし、湖面を除けば311人/km<sup>2</sup>）となり、霞ヶ浦流域に比較してモデル地区の人口密度が低い。

### 3. モデル地区における沿岸地下水の水理および水質特性

#### 3.1 観測方法

霞ヶ浦沿岸を代表する地域として選んだ美浦村モデル地区内に、地下水位観測井を5基設置した。その平面位置は図5に示すように、湖岸線にほぼ垂直に丘陵部に向う井1、井2、井3、井4、井5の5基であり、井1、井2、井3は田地部、井4は丘陵山麓部、井5は丘陵中腹部に設置され、湖岸から井5までの距離は約800mである。各観測井には、2週間巻きの自記水位計が備わっている。

観測井設置付近の地層は、観測井ボーリング時の土質柱状図（付録資料参照）より、図6のように示される。地表面下数mから下部に透水性のよい5～8m層のやぶ・砂層（透水係数 $1.21 \times 10^{-2}$  cm/s）が湖内に向ってほぼ水平に伸びており、井1から井4までの観測井のストレーナーは、おおむねこの地層内に設置している。

観測開始は昭和53年9月からであるが、昭和54年秋期から行われた農地整理によって、井2、井3の観測井の撤去が余儀なくされたため、資料の整理は昭和53年9月からの1年間を対象とした。

また地下水位の観測と平行して、井1～井5までの観測井と、井3から200mほど東南に離れた畑地に掘削した25m深の観測井（井A）とにおいて地下水の水質調査を行った。採水は観測井が細孔であるため、注射器によって地下水を吹上げる方法をとった。分析項目はpH、Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub>-P、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-Nである。分析方法は、既に記述したとおり<sup>6)</sup>である。なお一部の試料について発光分光法（ICP）によって、Ca、Mg、K等の分析を行った。

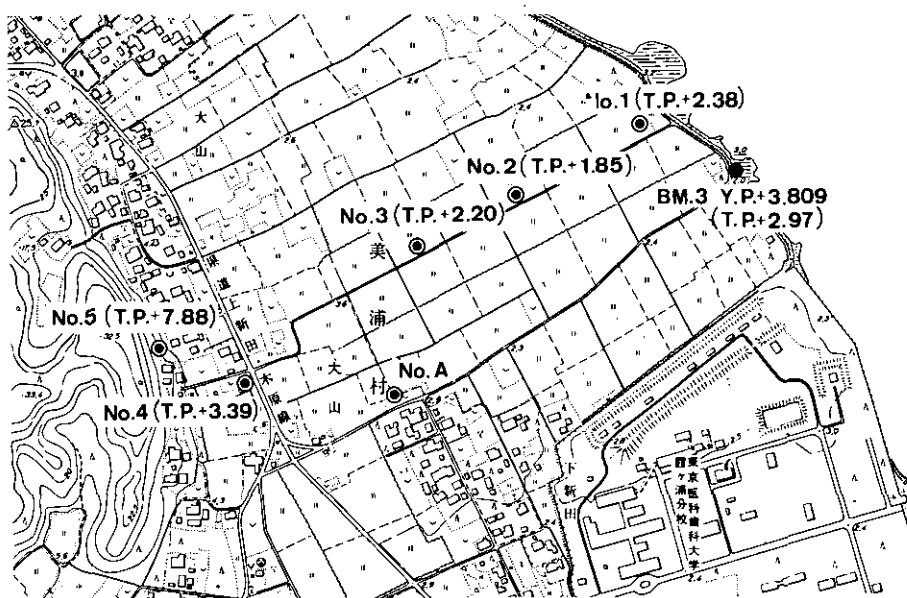


図 5 観測井平面位置

Fig. 5 Location of test wells

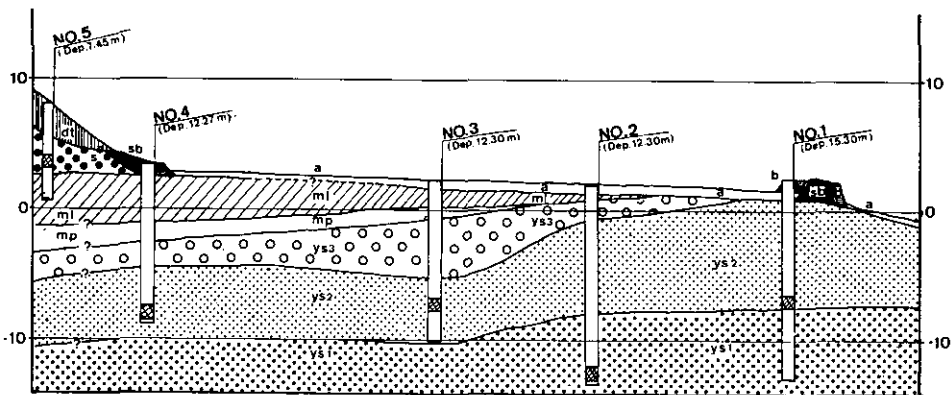


図 6 観測井付近の地層図

Fig. 6 Geological profile in the vicinity of test wells

### 3.2 地下水水位変動の特性

各観測井の地下水水位変動の例を図7, 図8に示す。降雨量は隣接の江戸崎町の測定値を利用した。非かんがい期の10月の例で見られるように, 降雨に対する地下水水位の上昇は井5を除いて極めて敏

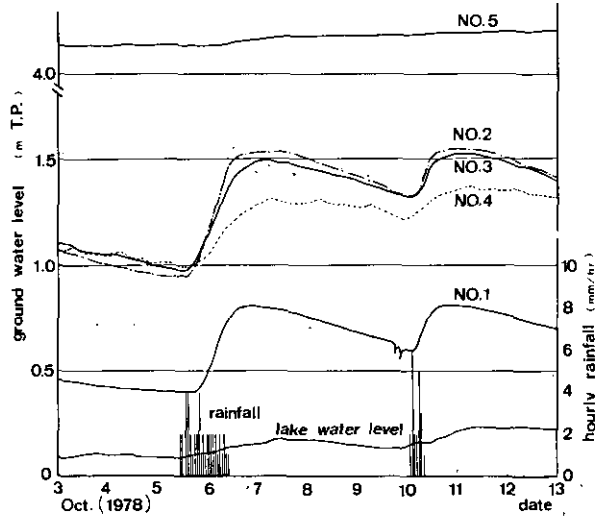


図 7 降雨による観測井水位の変動 (非かんがい期)

Fig. 7 Variation of ground water level in test wells (irrigation term)

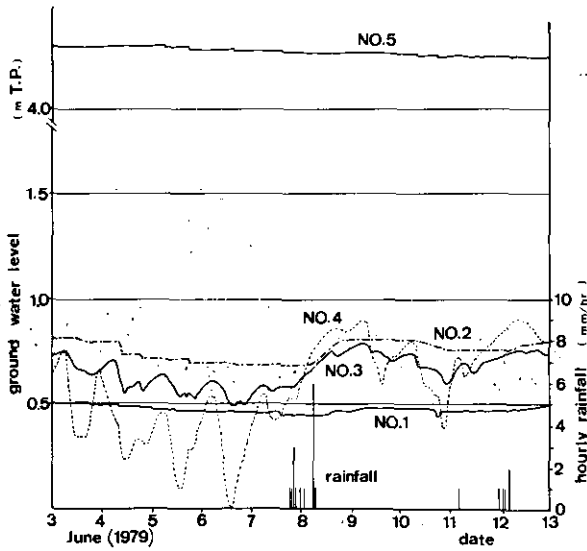


図 8 降雨による観測井水位の変動 (かんがい期)

Fig. 8 Variation of ground water level in test wells (non-irrigation term)

感に応答しており、井1から井4までは連動性が高い。井5の観測井はそのストレナーを難透水地層の直上に設置しているため、干天が続く場合には井戸内の水がなくなり、見かけ上記録紙上の水位変動はない。幾分大きな降雨量があった場合、および雨期で降雨頻度が高い場合に、井戸内に湛水し水位応答が生ずるが、丘陵腹部の斜面上に位置することによる諸影響を受けて、その水位上昇は他に比べて著しくないようである。一方、かんがい期の6月の例では、降雨の有無に拘らず井3、井4の水位は日周期で変動しているが、これは近傍の農業用井戸（揚水量の大きい井戸が少なとも井4から200m以遠に点在）からの揚水による影響と見られる。井4付近には民家もあり、生活用水を揚水する共同井戸もあるが、非かんがい期の例にみられるようにこの影響は少ないようである。したがって大量の農業用水の揚水があるとき、井4を含む山麓に沿って透水層が伸びていることが考えられる。

### 3.3 降雨による地下水の応答特性

1回の降雨に対する地下水の水位変動曲線は、おおむね図9に示すような形をとる。この様子は流域降雨に対する河川のhydrographに類似している。地下水位変化にかかわる基本量としては、降雨量： $R$ 、降雨継続時間： $T_r$ 、雨の降り始めから水位の立ち上がりまでの時間： $T_i$ 、水位の立ち上がりからピークまでの時間： $T_p$ 、雨の降り始めから水位のピークまでの時間： $T_p (= T_i + T_p)$ 、降雨による地下水位の最大上昇量： $\Delta h$ などが考えられる。ここでは簡単に $R$ と $\Delta h$ の関係について考察する。

観測期間（昭和53年9月23日から昭和54年9月22日までの1年間）中のすべての降雨のうち、1回の降雨量が10mmを越す降雨20数個について、 $R$ と $\Delta h$ の関係を各観測井について示したのが図10である。井5の資料を除き、他の資料は一つの傾向を示しているがばらつきが大きいようである。

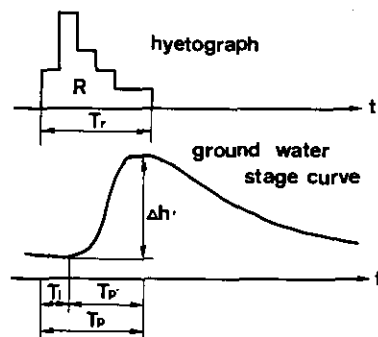


図 9 降雨による水位応答曲線

Fig. 9 Response curve of ground water level due to rainfall



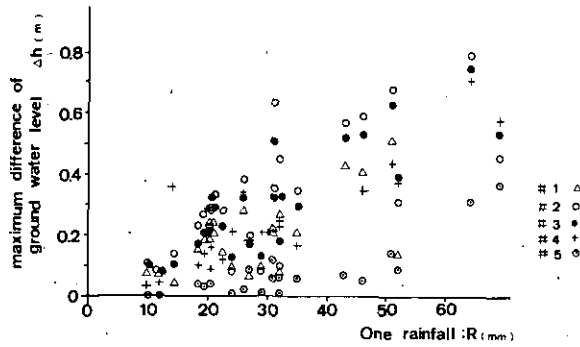


図 10 ひと雨の降水量と水位上昇量との関係

Fig.10 Relation between precipitation and water level rising due to one rainfall

特にばらつきの大きい資料は夏期の観測によるものが多いが、これは夏期には蒸発散も大きく土壌水への供給も大きくなる筈で、これらの損失降雨も考慮に入れなければならない。したがって1降雨量  $R$  の代りにそれに対する有効降雨  $R_a$  について考察することにする。

蒸発散量を気温で評価する最も簡単な式として Thornthwaite 式を採用する。すなわち

$$E = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (1)$$

ここに  $E$  : 月蒸発散量 (mm/month),  $T$  : 月平均気温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), また

$$a = (0.675I^2 - 77.1I^2 + 17920I + 492390) \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T/5)^{1.514} \quad (3)$$

である。式(1)を日蒸発散量  $E_d$  (mm/day) に換算すると次式となる。

$$E_d = 0.5 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (4)$$

観測期間中の月平均気温として土浦の観測値を用いると、 $I=65.33$ ,  $a=1.522$ となる。ひと雨の降雨量のうち無効降雨量として、その雨の継続日数  $n$  と、その前の無降雨日数  $N$  の日数分の蒸発散を補償する分で表わせば、有効降雨量  $R_a$  は次式で表わされよう。

$$R_a = R - \theta \cdot (N+n) E_d \quad (5)$$

ここに、 $\theta$  は1以下の数をもつ係数である。もし  $\theta=1$  とすれば Thornthwaite がモデル地域で得た蒸発散量を示すことになるが、日本の気候状態、特に夏場の湿度の高い場合などを反映していない上に、土地利用の形態の影響も加味されないことになる。 $\theta$  の値を正確に見積ることは困難である

が、観測地域が田地であってかんがい期の蒸発散は降雨のもたらす水ではなく、湖水等から取水された農業用水である場合が多いことに鑑み、 $\theta$ の値を次のように設定する。すなわち、4月と9月は0.8、5月と8月は0.6、6月と7月は0.4、それ以外の月は1.0として、実際に水田の中にある井2、井3について式(5)より $R_a$ を算定し、 $\Delta h$ との関係を見ると図11のようになる。まだまとまりが悪いが、 $R_a$ と $\Delta h$ との関係は近似的に次式によって表わされる。

$$\Delta h / R_a = 15 \quad (6)$$

ただし、この式中の $\Delta h$ と $R_a$ は同じ単位を用いるものとする。両者の比が非常に大きいことから、湛水層の空隙率は小さいこと、また地下水面より上層の不飽和帯の含水率は高いことが予想される。

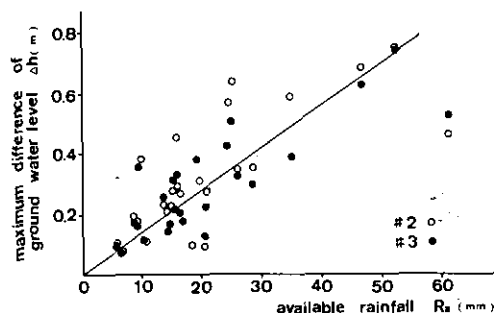


図 11 ひと雨の有効降水量と水位上昇量との関係

Fig.11 Relation between available precipitation and water level rising due to one rainfall

### 3.4 地下水面の変動と湖水への流入量

各観測井の月平均地下水位の月変化と、月雨量の分布を示したのが図12である。対象年の年雨量は1,077mmで、この地方の平均年降水量1,353mmに比べて寡雨であった。井1から井4まではその変動パターンは類似しており、特に井2、3、4はその水位は互いに近い。かんがい期で5月以降は水位が減少する傾向にあり、用水くみ上げの影響と考えられるが、月雨量の減少もみられる。地下水位は湖水位より高く、一般には地下水の湖水への流入が存在することが確認できる。

このことをより詳細に検討するため、地下水面の月変動をまとめたのが図13である。井2、3、4の水位が似通っていることは既述の通りであるが、よく見ると井4の水位は他の水位より低い場合が多い。このことは井4付近の帯水層が付近の揚水などの供給源になっていることを暗示している。また井2から湖域の方向に地下水面が低下しており、地下水の湖への流入が存在する。動水勾配が明確に存在するのは、このモデル地区では、湖岸から井2に至る約300mの区間のようにある。

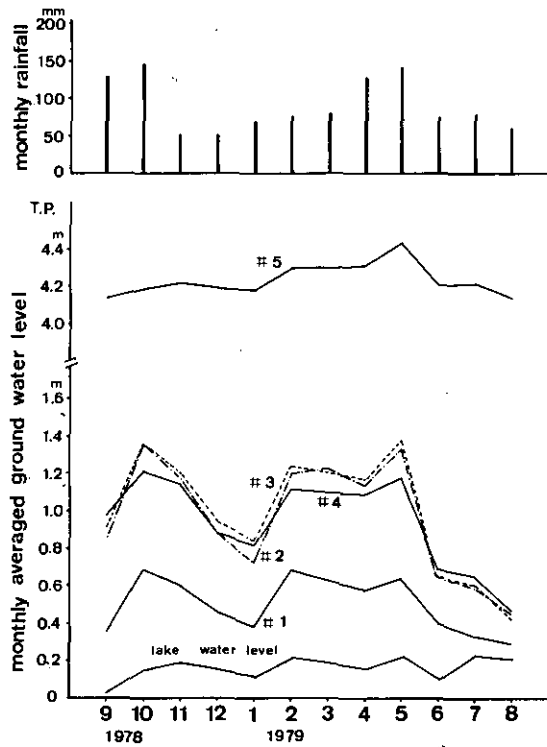


図 12 各観測井水位の月変化

Fig.12 Monthly variation of ground water level in each test well

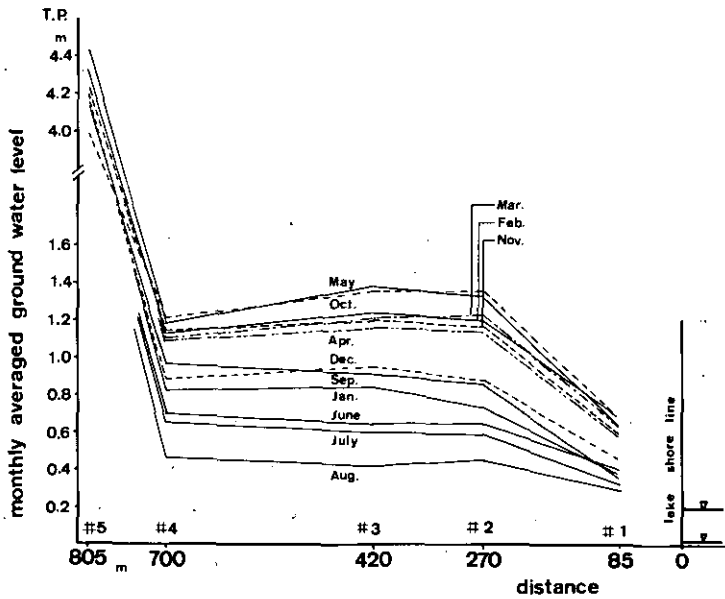


図 13 地下水面の月変化

Fig.13 Monthly variation of ground water table

地下水から湖への流入量を見積るために、井1と井2の間の動水勾配を採用した。すなわち、動水勾配  $I = \Delta H / L$  において、 $\Delta H$  は井1と井2の地下水位差、 $L$  はそれらの水平距離で185mである。湖岸線の単位長さ、単位時間当りの流入量  $Q_u$  は次式で表わされる。

$$Q_u = v \cdot d = kId \quad (7)$$

ここに、 $v$  は地下水流速で、 $d$  は湖へ流入する地下水層の厚さであり、 $d = 6$  mとした。この理由は、図6に示したように、湖岸付近のやぶ層（粗砂）は10m程度に存在し、これが湖底に伸びていること、また湖の水深が6mであることなどを参考に決めたものである。また、 $k$  はこの透水層の透水係数で  $k = 1.21 \times 10^{-2}$  cm/s を採用した。その理由は、井Aにおける現場透水試験（昭和53年3月実施）で得られた3地質の透水係数と、土質試験から Hazen 公式を用いて得た4地質の透水係数を参考とし、今回の観測井の透水層地質と最もよく符合する地質の値を用いたものである。

式(7)を用いて、モデル地区の湖岸線1m当りの地下水から湖内に流入する量を月別にまとめたものが表4である。これによると年間流入量は  $54.84 \text{ m}^3/\text{year}/\text{m}$  となる。西浦の湖岸長を121kmとみなすと、西浦の全沿岸からの年間流入量は  $6.64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  となる。この値は極めて不確かなものであるが、観測期間の一年に河川からの西浦に流入した流入量の推定値  $7.5 \text{ 億 m}^3$  のおよそ1%に当たっている。

### 3.5 モデル地区における水質特性

まず表5に各観測井における平均水質を示す。さらに、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$  濃度の経時変化を図14、15、16に示す。

井5を除く観測井の水質が似かよっていることが地質図から予想されるわけだが、平均水質をみるかぎり、井1～井4あるいは井Aの間でバラツキがみられ、各観測井の水質特性が異なっているようである。

地下水の動きと関連性が考えられる  $\text{Cl}^-$  についてみると、粘土層の上部にある井5は、 $13.8 \text{ mg/l}$  と最も低い値を示すが、井2と井3は、モデル地区内の既存井戸の平均  $\text{Cl}^-$  濃度 ( $49\text{--}50 \text{ mg/l}$ )<sup>6)</sup> と比べると非常に高い値である。井Aは、昭和54年4月まで  $140\text{--}170 \text{ mg/l}$  であったが、5月以降急に減少し ( $50\text{--}70 \text{ mg/l}$ )、その結果として標準偏差が大きくなっている。このことは、井A付近の地下水の動きがかなり大きいことを示唆していると考えられる。

次に  $\text{PO}_4\text{-P}$  については、井1、井5、井Aはほとんど季節的な変化がなく、 $0.03 \text{ mg/l}$  以下であることが多い。ところが、井4は5月ごろから、井2は6月ごろから除々に高くなり、8月には、 $0.25 \text{ mg/l}$  程度となる。

$\text{NH}_4\text{-N}$  は、 $\text{PO}_4\text{-P}$  と同じような経時変化を示す。なかでも井2は、 $\text{PO}_4\text{-P}$  と同時に6月ごろ

表 4 美浦村モデル地区における地下水の湖内流入量

Table 4 Seepage from land to lake at Miho model site

年月	井1, 井2 水位差 $\Delta H$	動水勾配 $I$	浸透流速 $v$	流入量 $Q_u$
53. 9	0.51m	$2.76 \times 10^{-3}$	2.88cm/day	5.19m <sup>3</sup> /月/m
10	0.59	3.19	3.33	6.20
11	0.56	3.03	3.16	5.69
12	0.42	2.27	2.37	4.41
54. 1	0.36	1.95	2.03	3.78
2	0.52	2.81	2.94	4.94
3	0.60	3.24	3.39	6.31
4	0.55	2.97	3.11	5.59
5	0.70	3.78	3.96	7.36
6	0.26	1.41	1.47	2.64
7	0.26	1.41	1.47	2.73
8	0.16	0.86	0.94	1.68
平均		$2.47 \times 10^{-3}$		計 54.84m <sup>3</sup> /年/m

Note

$\Delta H$ : Difference of ground water level between #1 and #2 (m).

$I$ : Hydraulic gradient of shallow ground water.

$v$ : Seepage flow velocity (cm/day).

$Q_u$ : Seepage discharge in unit coastline length in unit time (m<sup>3</sup>/month/m or m<sup>3</sup>/year/m).

表 5 観測井の地下水質

Table 5 Ground water quality of test wells in Miho model region

Wells	pH		Cl <sup>-</sup> (mg/l)		PO <sub>4</sub> -P (mg/l)		NH <sub>4</sub> -N (mg/l)		NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	
	Mean	S. D.	Mean	S. D.	Mean	S. D.	Mean	S. D.	Mean	S. D.
# 1	6.89	0.102	52.3	16.6	0.006	0.008	0.01	0.01	0.04	0.03
# 2	7.33	0.110	161	28.3	0.116	0.075	0.20	0.23	0.40	0.39
# 3	7.24	0.238	142	35.6	0.020	0.039	0.03	0.04	0.14	0.14
# 4	6.95	0.150	55.4	13.7	0.135	0.093	0.22	0.11	0.17	0.24
# 5	7.39	0.207	13.8	7.0	0.022	0.014	0.00	0.00	4.94	3.09
# A	6.23	0.177	98.6	47.5	0.005	0.005	0.00	0.05	4.29	2.00

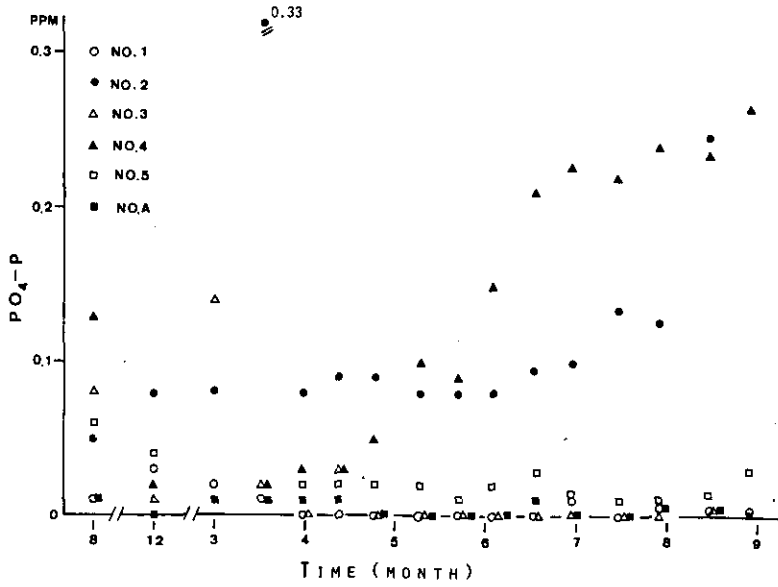


図 14 観測井における  $PO_4-P$  濃度の季節変化

Fig. 14 Seasonal change of  $PO_4-P$  concentration in test wells in Miho model region

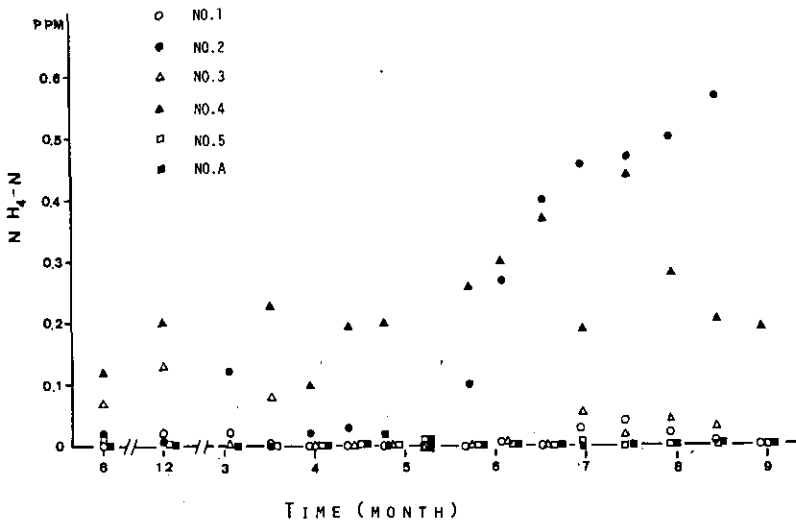


図 15 観測井における  $NH_4-N$  濃度の季節変化

Fig. 15 Seasonal change of  $NH_4-N$  concentration in test wells in Miho model region

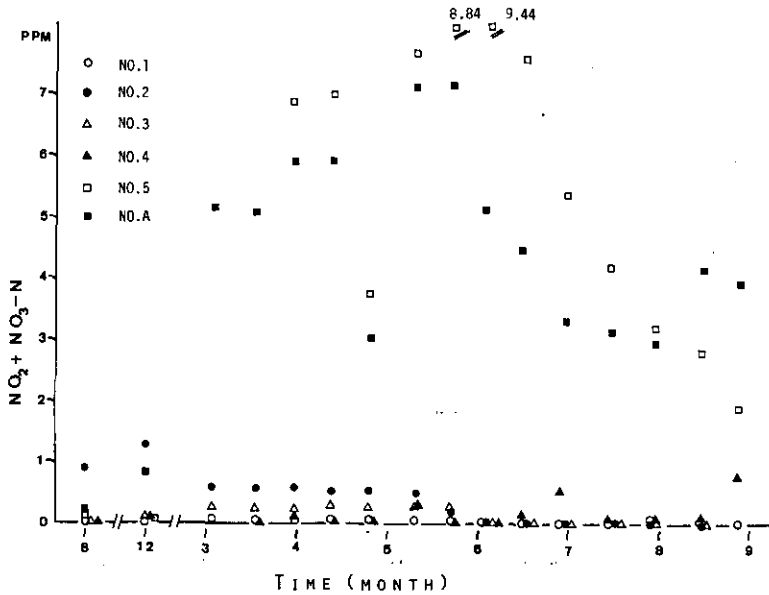


図 16 観測井における $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化

Fig.16 Seasonal change of  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$  concentration in test wells in Miho model region

から高くなる。

$\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ については、井1、井3、井4はほとんど季節的な変化がなく、 $0.00 \sim 0.03\text{mg/l}$ である。井2は、5月ごろまで $0.5 \sim 1.2\text{mg/l}$ であったものが、それ以降 $0.02\text{mg/l}$ 程度に減少する。すなわち井2では、6月まで $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ として存在していたものが、6月以降は、 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ がほとんどなくなり、かわって $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ が同時に増加しはじめたことになる。また井5と井Aは春先から濃度が高くなり、5～6月には、井5で $9.44\text{mg/l}$ 、井Aで $7.20\text{mg/l}$ に達するが、それ以降減少していく。特に井Aが畑地の中にあることからこうしたパターンになるのは、農肥の影響を受けていることが考えられる。

井5を除く観測井と、霞ヶ浦の湖水および観測井付近の表流水S-20(図2)における水質に関して各地点間の関連性を示すために、多成分濃度相関マトリックス法<sup>7)</sup>によって解析したのが表6である。ここで用いた水質項目は、pH、アルカリ度、 $\text{Cl}^-$ 、Ca、Mg、Kである。本表から、井1と霞ヶ浦の湖水および表流水、湖水と表流水、井3と井Aとの間で、関連性が高いことがわかる。このことから、湖岸付近の地下水は、湖水との交換があると考えられる。また観測井間には関連性が乏しいことが示されており、地下水の流れをより明確にするためには、この理由について、地質構造の面から検討しなおす必要があると考えられる。

表 6 多成分濃度相関マトリックス

Table 6 Correlation matrix of concentrations of multi-components in ground water, lake water and surface water in the vicinity of test wells

	井1	井2	井3	井4	井A	L-1	S-20
井1	1						
井2	0.27	1					
井3	0.40	0.47	1				
井4	0.27	0.27	0.20	1			
井A	0.27	0.47	0.53	0.13	1		
L-1	0.87	0.47	0.20	0.20	0.20	1	
S-20	0.67	0.47	0.27	0.20	0.27	1.00	1

L-1 : Lake water as shown Fig. 2

S-20 : Surface water as shown Fig. 2

#### 4. 西浦湖岸域における沿岸地下水の水利および水質特性

##### 4.1 地質の概要

霞ヶ浦周辺の地質は洪積世後期の地層と沖積層からなる。洪積層はやぶ層、成田層、竜ヶ崎砂(礫)層、常総粘土層、新期ローム層などからなり、沖積層はこれら洪積層からなる台地を開析した古水系の作る谷を埋積して形成されたものである。これらの各地層のうち湖岸の沖積面下に分布するものについてその概要を以下に述べる。また図17に西浦湖岸沿いの地質断面を示す。

##### [洪積層]

##### ○やぶ層

中粒砂(砂鉄質)から成り、ときに小礫を混じえ、薄いシルト層もはさむ。砂層には斜層理が発達し、本層上限付近にはサンドパイプが発達することがある。本層の上限はほぼ水平であるが、ときに著しく浸食されて不規則な形状を示すことがある。これは上位層堆積前の浸食によるものと考えられる。

##### ○成田層下部層

中～細粒の砂層またはシルト層よりなる。貝化石、砂管または植物化石を豊富に含む。本層は下位のやぶ層上面の凸凹に影響され、やぶ層上限の低い所では粘性土層に富み、やぶ層上限の高い所では砂質に富む。層厚は、数mないし12～15mで下位のやぶ層の上限面が低いところでは厚く、やぶ層上限の凹部を埋めて堆積した形をとっている。

##### [沖積層]

沖積層の供給源は、利根川(古鬼怒川)の運搬物が主要なものである。湖の周辺では、波浪によ



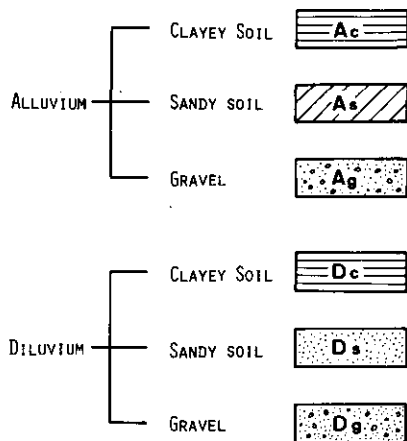
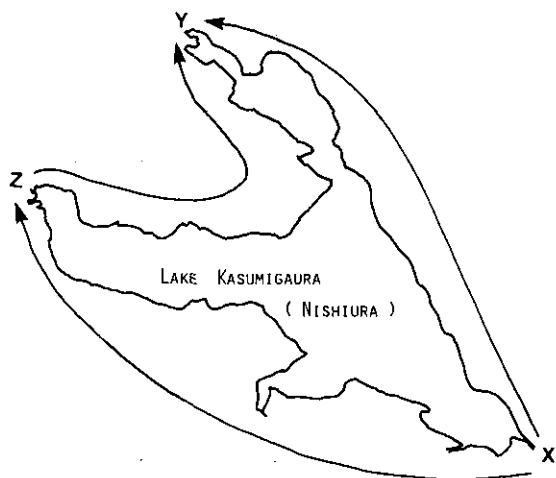


図 17(a) 地質断面線X-Y, X-Z, Z-Y

図 17(b) 地質記号

Fig. 17(a) Index lines X-Y, X-Z, Z-Y shown in geological figures

Fig. 17(b) Geological marks

(c)(d)(e)

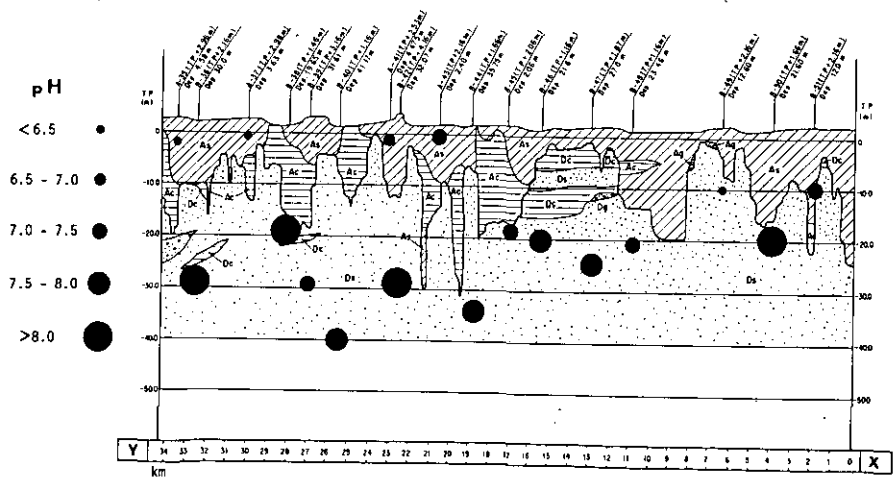


図 17(c) 地質断面図およびpHの分布 (X-Y)

Fig. 17(c) Geological profile along X-Y line and distribution of pH in sampling wells

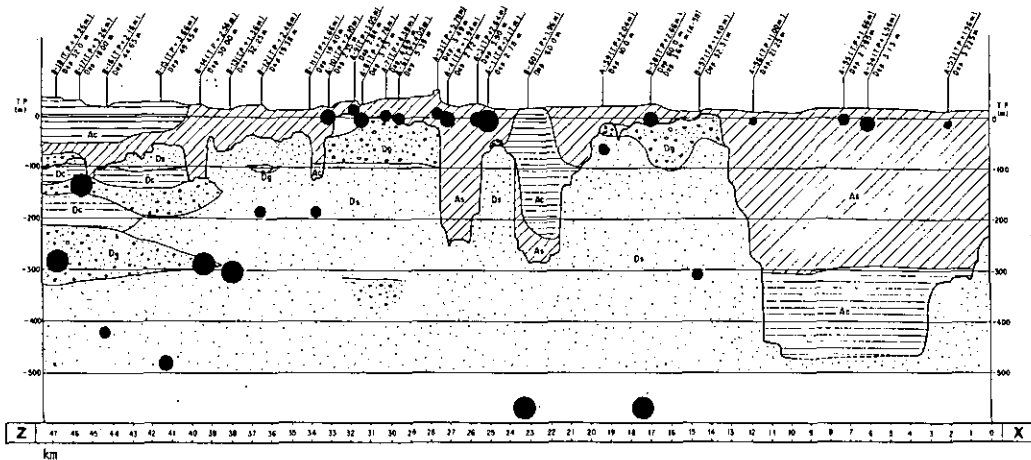


図 17(d) 地質断面図およびpHの分布 (X-Z)

Fig.17(d) Geological profile along X-Z line and distribution of pH in sampling wells

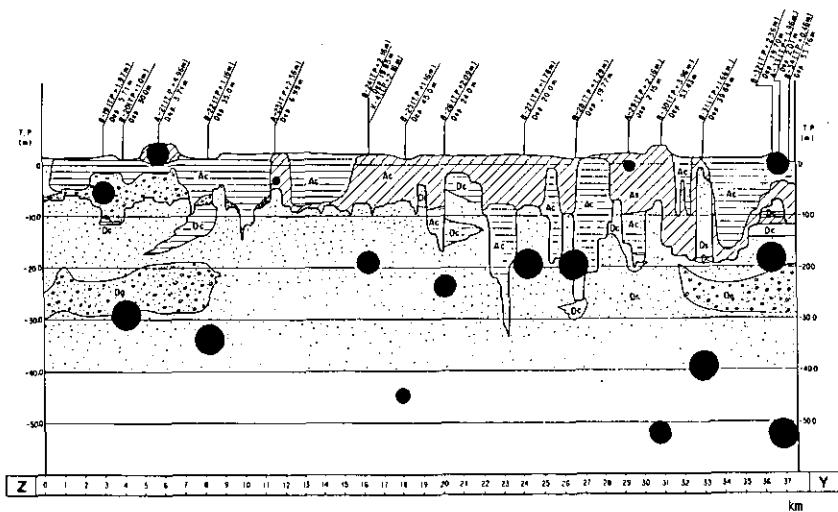


図 17(e) 地質断面図およびpHの分布 (Z-Y)

Fig.17(e) Geological profile along Z-Y line and distribution of pH in sampling wells

る沿岸台地の土砂がこれに次ぎ、本来の湖に流入している諸河川の運搬物が最も少ない。

沖積層を構成する地層は、砂、粘性土、砂礫であり、主体は砂と粘性土である。砂層は沿岸部や利根川筋に分布し、粘性土は主に湖の中心部に分布する。湖の中心部では、その表面から基底までほぼ一様な粘土層が厚く堆積することがある。これに対し、湖の沿岸部および利根川流域では、地層の変化が複雑であり、全般的には砂の多い地質を構成している。

#### 4.2 西浦湖岸域の地下水調査方法

本調査は、沿岸地下水が霞ヶ浦の富栄養化に及ぼす影響を評価することを目的として、モデル地区から西浦湖岸域に対象を拡大し、湖岸域にある既存井戸の地下水位および地下水質の調査を行なったものである。

霞ヶ浦湖岸にはおよそ100か所の集落が点在する。それらの集落を大別すると、湖岸に沿って発達しているものと、湖岸よりやや離れた国道に浴って発達しているものとに分けられる。

まず、湖岸沿いの集落から60か所を選び出した。次に各集落ごとに井戸調査を行い、上述した目的から考えて、次の3点を基準として採水井戸の選定を行った。

- 1) 集落の中で比較的湖岸に近い井戸
- 2) 現在使用中の井戸
- 3) 浅井戸

しかしながら、井戸調査の結果、上記の3点すべてに該当するものは極めて少なく、湖岸には近いが、深井戸を調査対象井戸(図18)とすることが多くなった。

地下水の水位および採水調査は、昭和54年8月、12月、昭和55年3月に実施した。なお分析方法および分析項目は、3.1と同様である。

#### 4.3 西浦沿岸地下水の流入量

沿岸地下水の動水勾配は以下のように求めた。調査対象とした既存井戸60か所余りについて、井戸の標高および湖までの鉛直方向の距離を1/5000の地形図(国土基本図、国土地理院発行昭48年)から読み取る。地下水位は、3回の調査の平均値を用い、井戸の標高からT.P.で表示した。一方、湖水位は木原沖の湖水位観測記録から、T.P.で0.00~0.20mの範囲にあることが多いので、ここでは、0.10mとした。以上から、沿岸地下水の平均動水勾配Iは、

$$I = \frac{\text{地下水位 (T.P.m)} - \text{湖水位 (T.P.=0.10m)}}{\text{湖岸までの距離 (m)}}$$

となる。



図 18 西浦湖岸域における調査対象井戸の分布  
 ■ 浅井戸, ● 深井戸, △ 観測井。

Fig. 18 Location of wells for sampling ground water in the lakeside area of Lake Kasumigaura (Nishiura)  
 ■ shallow well, ● deep well, △ test well.

図19に各地点における動水勾配を矢印の大きさで示した。本図から、おおむね沿岸地下水が湖の方に向かって流れていると考えられるが、西浦の西南部では、逆に湖の方から湖岸に向かって流れているといえる。

また動水勾配の大きさの頻度分布をみたのが図20である。このように動水勾配はバラツキがみられるが、 $0 \sim 5 \times 10^{-3}$ の範囲にあるものが最も多い。平均動水勾配を求めると、 $7.4 \times 10^{-3}$ となり、3.4で求めたモデル地区沿岸の平均動水勾配 $2.47 \times 10^{-3}$ の約3倍の大きさである。しかしながら、図

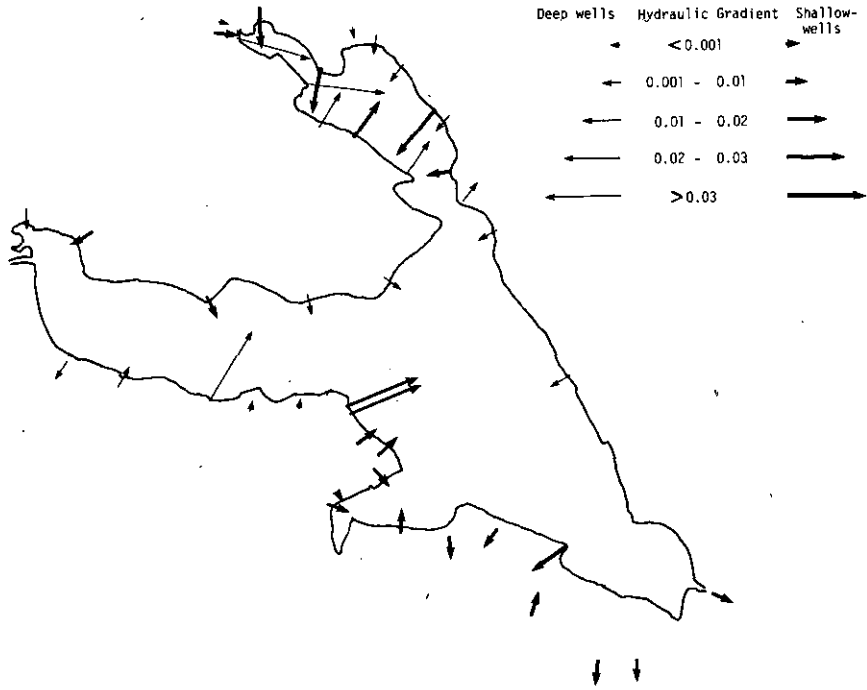


図 19 西浦湖岸域における地下水の動水勾配

Fig.19 Hydraulic gradient of ground water in sampling wells in the lakeside area of Lake Kasumigaura (Nishiura)

19でわかるように湖岸沿いの動水勾配は地域的にかたよっており、特に西浦東南部では、動水勾配の得られな井戸が少ないということ、しかも動水勾配の頻度分布からバラツキがみられることなどから、ここでは、平均動水勾配に幅を持たせて考え、 $5 \sim 10 \times 10^{-3}$ を沿岸地下水の平均的な動水勾配とした。

沿岸地下水の平均流入水量を求めるためには、3.4で述べたように、透水係数 $k$ と湖へ流入する地下水層の厚さ $d$ が必要である。

湖岸の地質断面図から、地下水が湖へ流入していく地質は、おおむね砂質の部分であると考えられる。この透水係数は、 $10^{-3}$ cm/secのオーダーである。また $d$ については3.4と同様に、6mとし、湖岸長を121kmとする。以上から地下水が湖へ直接流入する量は、 $1.1 \sim 2.3 \times 10^6$ m<sup>3</sup>/年となる。この西浦全域においてごく大雑把に求めた値は、モデル地区の地質および動水勾配、透水係数などから推測された $6.64 \times 10^6$ m<sup>3</sup>/年に比べると少し低い。いずれにしても、これらの値は、河川からの平均流入水量の1%以下となる。

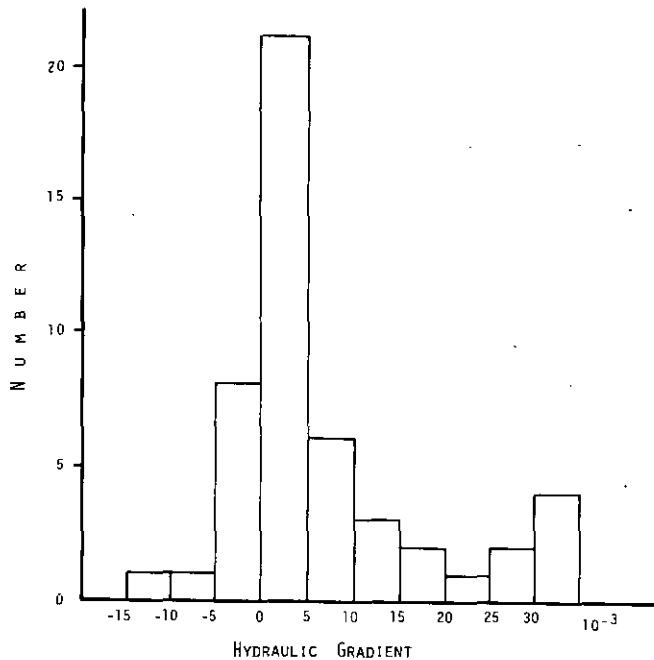


図 20 動水勾配の頻度分布

Fig. 20 Frequency distribution of hydraulic gradient of ground water in the lakeside area of Lake Kasumigaura

#### 4. 4 西浦沿岸における地下水の水質特性

まず 3 回分の地下水調査における地下水の平均水質を表 7 に示す。これと比較する意味で霞ヶ浦湖心における代表的な水質を列挙すると、pH 7 ~ 9, E. C. 300 ~ 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , T-P (全リン) 0.1 mg/l, T-N (全窒素) 1 mg/l, Na 34 ~ 36 mg/l, Ca 18 mg/l, Mg 9 mg/l, Fe 0.03 mg/l, Si 1 mg/l, Sr 0.1 mg/l, K 8 mg/l となる。沿岸地下水質と比較すると、Fe, Si は 1 オーダー地下水の方が高い。その他の項目については比較的似た値を示す。湖水の場合、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NO}_2\text{+NO}_3\text{-N}$  は、植物プランクトンによって摂取されて溶存している状態で残っているものはほとんどないので、T-N, T-P で比較する。一方、地下水中には、窒素およびリンは、ほとんど、 $\text{NO}_2\text{+NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  として存在しているので、地下水はリンとして  $\text{PO}_4\text{-P}$ 、窒素として  $\text{NO}_2\text{+NO}_3\text{+NH}_4\text{-N}$  として考える。そうすると、湖水に比較して地下水の方が T-P, T-N いずれも 2 ~ 3 倍高い。

また  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{+NO}_3\text{-N}$ , Na, Mg, Fe, Mn の項目は、変動係数が 1 を越え、その他項目についても井戸間のバラツキが大きい。こうした井戸間のバラツキはモデル地区においてもみられた<sup>6)</sup>。これらのことは、井戸水に対して、井戸の周辺の地質構造、土地利用状況、井戸の構造 (特にストレーナーの位置) 等の各因子が独立に影響を及ぼしたためだと考えられる。

表 7 西浦沿岸地下水の平均水質

Table. 7 Mean values of chemical components in the ground water in the lakeside area of Lake Kasumigaura (Nishiura)

	pH	S.E.C. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (mg/l)	Si (mg/l)	Sr (mg/l)	K (mg/l)	Mn (mg/l)
Mean values	7.37	471	0.213	0.27	3.05	44.3	32.4	10.4	0.32	21.8	0.20	10.7	0.15
Standard deviation	0.667	283	0.313	0.34	5.75	78.4	22.5	11.6	0.43	4.3	0.16	9.7	0.33
Coefficient of variation	0.09	0.60	1.47	1.27	1.88	1.77	0.69	1.12	1.37	0.20	0.80	0.91	2.16

次に地質構造の面から井戸の深さ別に地下水質をまとめる。ここでは、井戸深が10m未満の浅い掘抜井戸と井戸深が10m以上の深い打込み井戸および掘抜井戸の中に打込んでつくった井戸とに分けて、各グループごとの平均水質を示したのが表8である。前者は沖積層にある井戸、後者は洪積層にある井戸とおおむね一致する。これらの水質と比較するために、茨城県が、昭和43年に行った井戸水の水質調査結果<sup>8)</sup>を霞ヶ浦流域の市町村について平均水質を求めてみると、検体数816で、pH 6.83, NO<sub>3</sub>-N 7.0mg/l, Cl<sup>-</sup> 49.0mg/l, 硬度 96.2, 鉄 0.06mg/lとなる。昭和43年当時には、検体数の約7割が浅井戸であったことから、今回の浅井戸の平均水質と比べると、ほぼ昭和43年当時とそれほど変化していないといえる。特にNO<sub>3</sub>-Nが、その当方で7.0mg/lあったことは注目される。

表 8 西浦沿岸域の浅井戸および深井戸における地下水水質

Table. 8 Ground water quality in shallow wells and deep wells in the lakeside area of Lake Kasumigaura (Nishiura)

	pH*	S.E.C.* ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N <sup>o</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> -N <sup>o</sup> (mg/l)	Na <sup>o</sup> (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg <sup>o</sup> (mg/l)	Fe <sup>o</sup> (mg/l)	Si* (mg/l)	Sr (mg/l)	K* (mg/l)	Mn (mg/l)	
Shallow-wells	Mean	6.90	592	0.197	0.19	7.39	41.9	39.5	10.4	0.21	18.2	0.23	15.4	0.10
	S.D.	0.46	285	0.364	0.20	7.27	25.4	23.4	5.1	0.25	3.8	0.14	11.5	0.23
	C.V.	0.07	0.48	1.84	1.10	0.98	0.60	0.59	0.49	1.18	0.21	0.61	0.74	2.32
	Max	7.87	1,433	1.83	1.14	30.28	112.0	118.0	26.6	1.13	24.8	0.73	57.2	1.15
	Min	6.13	232	0.013	0.08	0.01	9.8	8.1	2.4	0.03	9.5	0.08	3.8	0.00
Deep-wells	Mean	7.67	392	0.223	0.32	0.20	45.9	27.7	10.4	0.39	24.1	0.18	7.5	0.19
	S.D.	0.61	256	0.280	0.40	0.27	99.4	20.8	14.5	0.51	2.6	0.17	6.7	0.38
	C.V.	0.08	0.65	1.25	1.24	1.34	2.16	0.75	1.39	1.33	0.11	0.95	0.89	2.06
	Max	9.07	1,370	1.57	1.99	1.39	605.0	95.6	75.9	2.12	29.9	0.75	33.0	2.08
	Min	6.00	145	0.036	0.03	0.00	7.0	0.2	0.3	0.03	19.9	0.95	1.9	0.00

\* Mean values between shallow wells and deep wells have 5% significance level.

o Variations between shallow wells and deep wells have 5% significance level.

以下に、浅井戸と深井戸との水質の比較を示す。

(1) pHは、浅井戸で中性よりやや酸性側で、深井戸はアルカリ側にある。地質図に井戸深に応じたプロットしたのが図17である。両グループの平均値間には5%レベルで有意な差がある。

(2) 電気伝導度は、溶解塩の量を表わしており浅井戸の方が溶解塩の量が多いといえる。これも両グループの平均値には有意な差がある。

(3)  $\text{PO}_4\text{-P}$ は、わずかに深井戸が高いがほとんど両者に差がない。最大値は、浅井戸で1.83mg/l、深井戸で1.57mg/lと非常に高い値を示す。

(4)  $\text{NH}_4\text{-N}$ の平均値は、深井戸の方が高く、両グループの分散は5%レベルで有意な差がある。すなわち、浅井戸は、0.1mg/l前後の値が多いが、深井戸は、0.03~1.99mg/lまで幅広く分布している。

(5)  $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の平均値は、浅井戸が7.39mg/l、深井戸が0.20mg/lと両者に大きな差がある。浅い井戸に $\text{NO}_3\text{-N}$ が高く、深い井戸は低い値を示すという傾向は、モデル地区でもみられた。<sup>6)</sup>浅井戸の場合、最大値が30.28mg/lで10mg/lを越える井戸数は7か所あり、1mg/l程度から10mg/l程度まで幅広く分散している。ところが、深井戸では、1mg/lを越える井戸は1か所で、その他はほとんど0.2mg/lである。pHと同様に地質図にプロットしたのが図21である。浅井戸と深井戸の差が明瞭である。

(6) Naに関する両グループの平均値にはほとんど差がないが、各グループ間における頻度分布はかなり異なる。深井戸では最大605mg/lという値があるが、大半は20mg/l以下である。一方、浅井戸は平均値を中心として正規分布に近い分布を示す。

(7) CaおよびMgの平均値は差がない。Caは、Srとよい相関がある。Mgについては、浅井戸のバラツキが小さく、深井戸で大きい。

(8) Feの平均値は、深い井戸の方が高く、その頻度分布は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ のそれと似ている。

(9) Siは両グループともバラツキが小さい。図22に示すように浅井戸の方が低い濃度を示す。なお両者の平均値には有意な差がある。

(10) Kの平均値は浅井戸の方が高く、両者の平均値には有意な差がある。

(11) Mnは、Feと同様に深い井戸群の方が高い値を示す。

(12) 最後に、浅井戸と深井戸とのグループについて判別分析の結果を示す。

両グループを最もよく判別する指標は、Si、pH、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ である。また浅井戸の判別関数は、 $(\text{pH}) \times 29.26 + (\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}) \times 0.7999 + (\text{Si}) \times 3.276 - 134.4$ 、深井戸の判別関数は、 $(\text{pH}) \times 32.71 + (\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}) \times 0.4843 + (\text{Si}) \times 4.088 - 175.5$ となる。

判別後の両グループの度数表(表9)は、浅井戸25か所のうち3か所が深井戸のグループに入り、深井戸の38か所はすべて深井戸のグループに判別されることを示している。



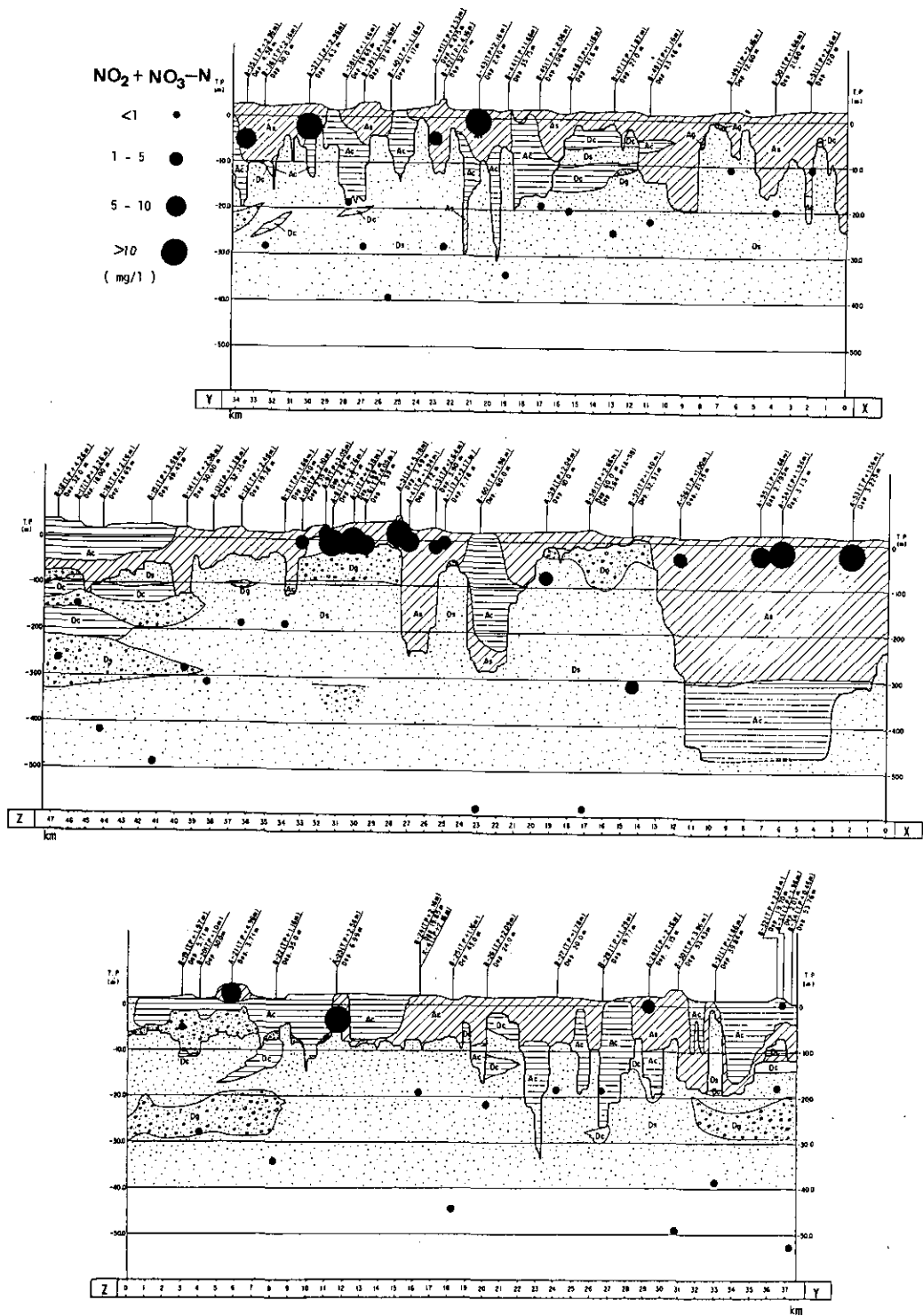
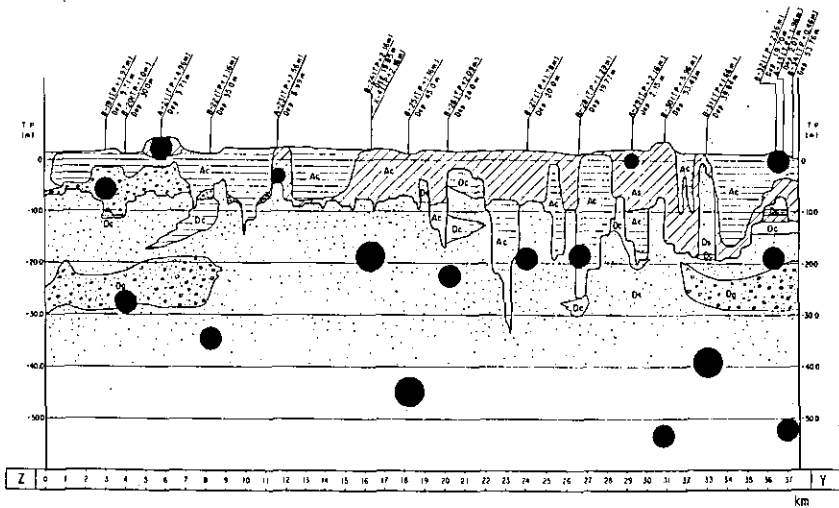
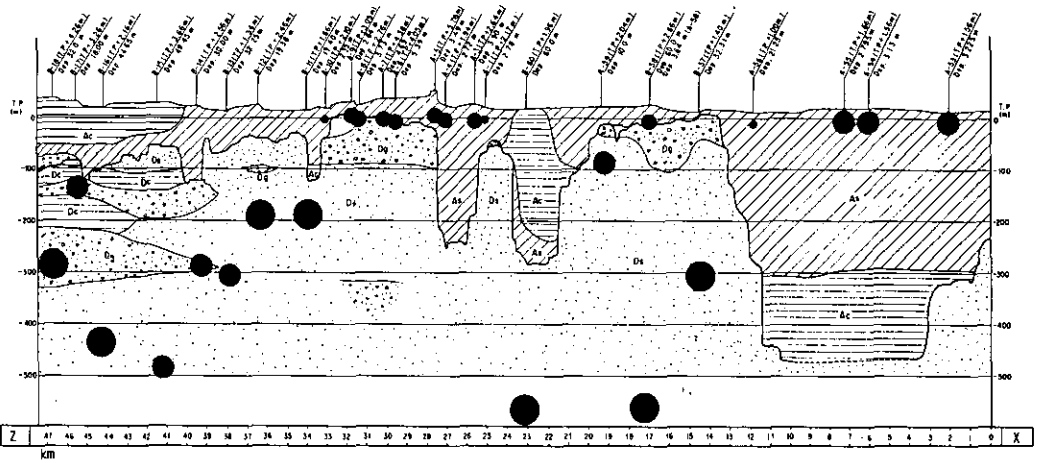
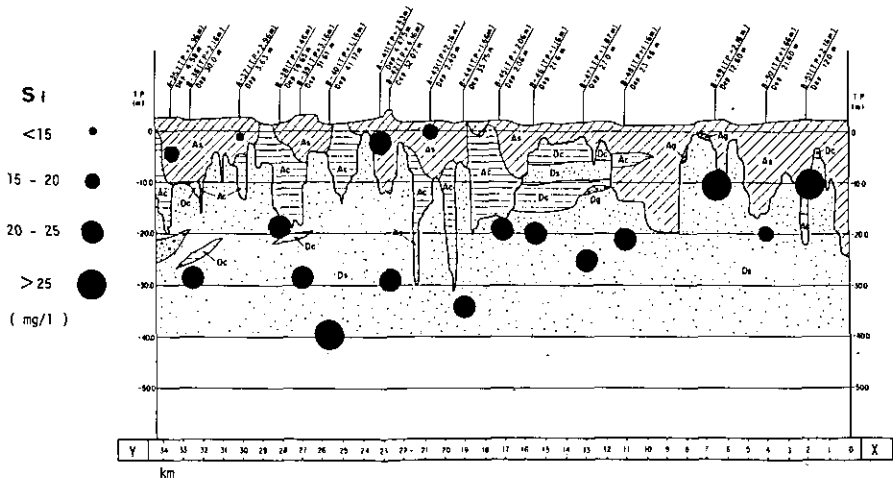


図 21 井戸深ごとの $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ 濃度分布  
 Fig.21 Distribution of  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$  in sampling wells



22 井戸深ごとのSi濃度分布  
 Fig. 22 Distribution of Si in sampling wells

表 9 判別後における両グループの度数表

Table. 9 Classification matrix

Group	Percent correct (%)	Number of cases classified into group-	
		Shallow wells	Deep wells
Shallow wells	88.0	22	3
Deep wells	100.0	0	38
Total	95.2	22	41

#### 4.5 地下水由来の窒素およびリンの流入負荷量

ここでは、現在まで得られた地下水の流入水量、水質のデータをもとにして、浅層地下水の湖への直接流入による窒素およびリン負荷量を算定して、河川からの流入負荷量と比較検討することとする。

湖盆を通じて直接流入する地下水の窒素およびリン負荷量は、

(湖盆を通じて流入する地下水量) × (地下水中の窒素およびリン濃度) ×  $d$  (湖盆を通過する際の物質変化率、例えば湖沼底質での脱窒、吸着現象など)

で表わされるが、ここでは  $d=1$  として考える。湖盆を通じて流入する地下水量は、モデル地区内の観測井の水位やその付近の地質構造から推定した、 $6.64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  と西浦沿岸域の動水勾配と湖岸の地質構造などから推定した値、 $1.1 \sim 2.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  とを用いる。一方、浅層地下水の窒素、リン濃度は、4.4で得られた浅井戸の水質に等しいと考えられる。ただし、湖盆を通じて直接流入する場合、溶存態の全窒素、全リンを考える必要がある。モデル地区では<sup>6)</sup>、溶存態全窒素あるいは全リンのうち、 $\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3 - \text{N}$  や  $\text{PO}_4 - \text{P}$  が占める割合は90%程度であった。したがって、この比率を適用すると、浅層地下水中の平均溶存態全窒素および全リン濃度は、それぞれ  $8.42 \text{ mg/l}$ 、 $0.219 \text{ mg/l}$  となる。

以上から、地下水が直接湖盆を通じて流入する窒素負荷量は、9～56トン/年、リン負荷量は、0.24～1.5トン/年になる。一方、河川からの年間流入負荷量<sup>9)</sup> は、窒素で2,723トン/年、リンで207トン/年とされている。したがって地下水による負荷量は、河川からの負荷量に対して、窒素で、0.3～2.0%、リンで0.12～0.72%にあたる。

#### 5. おわりに

伎ヶ浦沿岸の地下水が水量と水質の面で湖水にどのような影響を及ぼしているかを、美浦村のモデル地区と、西浦沿岸の観測井の調査により判断したものである。これをまとめると以下の通りである。

(1) モデル地区における観測では、降雨による地下水位の応答は非常に敏感であり、一雨の有効降雨 $R_a$ と地下水位上昇量 $\Delta h$ との間には、 $\Delta h = 15 R_a$ の関係がある。

(2) 同地区では、一般にかんがい期の水位は非かんがい期のそれより低い。観測井の水位が近傍の農業用井戸の場水により敏感に反応することからみても、かんがい期の地下水揚水が沿岸浅層地下水の水力挙動に影響を及ぼし、その水質にも何らかの作用が働いていることが推測される。

(3) この地区では湖岸線から約300 mの地帯が湖に傾く動水勾配を持ち、これによって湖盆に流入する地下水量を西浦について概算すれば $6.64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ となる。また、湖岸に最も近い観測井の水質と湖水の水質との類似度が高いことも、地下水、湖水の間に連関性のあることを示唆している。

(4) 西浦沿岸の60か所余の既存井の水位観測では、その勾配が西浦西南部（浮島付近）を除き全て湖盆に傾いていることから、湖岸地下水の大半は湖に流入するといえる。この場合、平均的な動水勾配、沿岸の地質構造からみて、西浦への地下水流入量は $1.3 \sim 2.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ と推定され、美浦村モデル地区の調査結果から推定した値よりは小さい値となった。いずれにせよ、これらの値は年間の河川流入量の1%あるいはそれより小さいとみるが妥当のようである。

(5) 西浦沿岸の地下水質は、浅井戸と深井戸のグループに分けて観測するとき、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Mn}$ について深井戸群の方が高い値を示す傾向があった。また  $\text{pH}$ 、 $(\text{NO}_2 + \text{NO}_3)\text{-N}$ 、 $\text{Si}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{E.C.}$ について両井戸群の平均値間に有意な差がみられ、特に前三者の項目は両群の判別に重要な水質項目であることがわかった。

(6) 沿岸地下水の平均的な水質と湖水の水質とを比較すれば、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Si}$ は地下水の方が一桁高く、その他の項目は際だった差異はない。しかし、窒素とリンについては、地下水と湖水ではその存在形態が異なるが、 $\text{T-N}$ と $\text{T-P}$ で比較する限り、地下水の濃度は湖水のそれに比べて2、3倍高い。

(7) 西浦沿岸から浅層地下水によって湖盆に流入する負荷量は、窒素については河川からの負荷量の0.3~2.0%、リンでは0.12~0.72%と推定された。

以上のように霞ヶ浦沿岸の地下水についてまとめたが、水量、負荷量とも極めて概略的な推定に依ったもので、実用的に信頼できるためには更に調査を継続しなければならない。地下水流については、もともと、霞ヶ浦は関東平野の北東部から南下する地下水脈からの流入があるという説がある。その出口は土浦の奥部、桜川の河口付近であろうと推察されているが、その詳細は不明である。一方、降雨と湖水位の観測値をもととして、沿岸地帯に降った雨の30~60%が湖内に地下水として流入することもあるという報告<sup>10)</sup>もある。しかし、沿岸地帯で地下水の長期的な記録から流入量を検討した例は少なく、この報告での調査は有意義であったと考えられる。水質の面で、地下水による窒素、リンの流入負荷は、大雑把にみて河川からの負荷の1%前後、また水量も1%弱ということで、それらの物質の地下水の濃度は河川水のそれと大きく隔たるものではない。河川からの負荷は表流水としての流出であり、地下水が多孔体としての土壌を浸透する流出であることを考えると、地下水水質の汚濁の現状を憂慮しないわけに行かない。このことより地下水の汚濁機構についても

今後解明する必要があるとみられる。

## 謝 辞

霞ヶ浦の富栄養化機構を解明する上に、沿岸の地下水がどのような役割をしているか、この問題を特別研究の中の一課題として取り上げる必要を説かれたのは、水質土壌環境部合田健部長である。以来、同部長にはその調査方法、調査結果について適切な御指示、御討議を賜わった。ここに厚く謝意を表する次第である。

## 引 用 文 献

- 1) 梶根 勇 (1974) : 水の循環. 水文学講座 3, 共立出版.
- 2) 国土庁水資源局 (1979) : 水資源便覧. 昭和54年度版, 創造書房.
- 3) 茨城大学霞ヶ浦研究会 (1977) : 霞ヶ浦. 三共出版.
- 4) 文部省「環境科学」特別研究「環境動態領域」班 (1974) : 農業生態系における栄養元素の動態と水域へのインパクト. 「環境科学」研究報告書B 8-R12-1.
- 5) 宇都宮陽二郎 (1981) : 霞ヶ浦とその周辺の低地の地形について. 国立公害研究所研究報告, 第20号, 1-25.
- 6) 細見正明・津野 洋・村岡浩爾・合田 健(1979) : 美浦村モデル地域における地下水の水質分布特性と地下水流に関する調査研究. 国立公害研究所研究報告, 第6号, 65-77.
- 7) 日本地球化学会編 (1978) : 水汚染の機構と解析. 産業図書.
- 8) 茨城県衛生部 (1970) : 茨城県における生活用水質の実態.
- 9) 国土開発技術センター (1977) : 霞ヶ浦汚濁制御調査報告書.
- 10) 桜井徳雄 (1950) : 霞ヶ浦湖沼沼観測報告. 東京管区気象研究会誌, 昭和25年度第2号, 97-129.

## 5. 霞ヶ浦の水収支

村岡浩爾<sup>1</sup>

### Water Volume Balance of Lake Kasumigaura

Kohji MURAOKA<sup>1</sup>

#### Abstract

Noticing rescent eight years from 1972 to 1979, annual balance of water volvme in Lake Kasumigaura was estmated. As the income of water into the lake, items of rainfall on the water surface, inflow from rivers, inflow of groundwater, drainage from sewers, drainage of irrigation water; as the outgo from the lake, evaporation from the water surface, out flow of rivers from the lake, intake of city and irrigation waters were considered. Balancing the volumes of the above items with the change of water storage in the lake, Table 10 was obtained in the gross.

From the estimation of water volume balance in about 1986 on the basis of the design of water resources development, which is planned as a link of the comprehensive development of Lake Kasumigaura, the utilization of the lake water is to reach up to seventy percents of total income of water supplied from the watershed of the lake. This condition offers a new problem whether Lake Kasumigaura would be able to maintain the normal circumstances for servicing water and natural lake environment.

#### 1. 水収支の概要

一つの水域で水収支を論ずるのは、その水域での水の動きを量的にとらえるために必要なことである。水量の保存則からある水域での水収支は結果的には平衡状態にあるのだが、水の出入りがどのような経路で、またどのような量で移動しているかを調べることは、極めて困難なことである。実際、霞ヶ浦の水収支を検討するために多くの文献や資料を参考にしたが、信頼できるのは地点降水量ぐらいのもので、河川流入量にしる、湖面蒸発量にしる、精度を上げるための努力はなされて

---

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
Water and Soil Enviroment Division, The National Institute for Environmental  
Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

いるものの、未だ推定値の域をでていない。

霞ヶ浦は富栄養化現象を含み水質汚濁が憂慮すべき状態にあることは周知の事実であるが、古くから農業用水として利用されているほかに、上水、工業用水の取水量が増加すると同時に下水排水を引受ける水域でもある。更に将来計画として、他流域への用水送水があり、霞ヶ浦は水資源開発の水がめとしてその重要性は増すばかりである。水資源として用水を取水または開発するためには、必要な水量と適正な水質を確保しなければならず、このためにきめの細かい水収支が基本的検討事項として必要である。それだけでなく、湖盆の貯水量の変化は、その水質を検討する上で重要な検討事項となる。

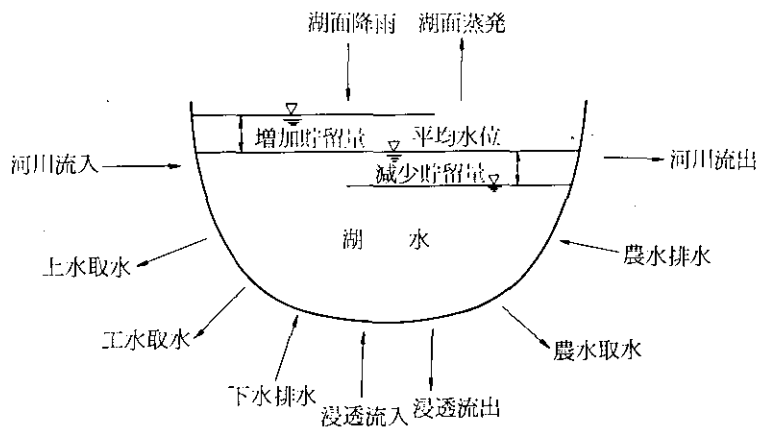


図1 湖の水収支

一般に湖沼の水収支には図1に示すような水の出入りの形態が考えられる。これらの形態に対し水量を定めるとき、どのような期間を対象とするかを設定しなくてはならない。通常、湖沼の水収支という場合は年単位が多いが、水の出入の烈しい湖沼、あるいは農業用水のようにかんがい期、非かんがい期の別があり、河川流入量の豊水期、渇水期との関係で、貯水量の変化を考慮しなければならない場合には時間単位を月、旬などと短かくとる必要がある。霞ヶ浦の水資源開発にしても、取水計画の詳細については短かい時間単位で水収支を考慮しなければ、貯水量に対する水質現象まで論ぜられないであろう。しかし現実には短期の水収支を規定するほど、確実な観測資料があるわけではない。時間スケールを短縮すると、湖盆容量を一つの水塊とする貯留関数法による水収支論ということになるが、この場合には細かい時間変動の特性を論ずるのが目的となり、一般の水収支論とはいえない。

霞ヶ浦を対象として、以下にまとめたのは1年を単位とした水収支である。対象期間は昭和47年から昭和54年までとした。昭和47年は、建設省(文献5)が霞ヶ浦の水収支を検討する上で設定さ

れた基準年である。年単位水収支は、霞ヶ浦の水環境を展望するのに、また用水量の増加に伴う経年変化を把握するのに便利である。

## 2. 流入河川流量

霞ヶ浦の基本諸元をまとめたのが表1である。従来から利用されている慣用値と、茨城県、建設省で公的に用いられている値とは若干の相異がある。これは最近まで行われた干拓地を含む農地整備、都市周辺や流域の土地改造、治水水利施設の整備などによって再整理された結果生じた差異であろう。

霞ヶ浦流域に降る雨の年降水量に関する空間変動は、それ程大きくはないが、太平洋寄りに増加の傾向がある。気象台の管理する雨量観測所の資料(文献7)によって、西浦、北浦、外浪逆浦の湖面を除く各流域、および各湖面を代表する年降水量を、昭和48~54年までについて表2のように

表 1 霞ヶ浦基本諸元

項 目	慣 用 値 (文献1)(文献2)など	茨城県・建設省 (文献3)(文献4)
[湖 面 積]		
西 浦	167.7km <sup>2</sup>	171 km <sup>2</sup>
北 浦	38.7	34
外 浪 逆 浦	7.3	6
そ の 他 <sup>(註1)</sup>	—	9
(計)	( 213.7)	( 220)
[湖 水 深 など]		
最大水深		
西 浦	7.3m	} 7 m
北 浦	7.0	
外 浪 逆 浦	8.9	
平均水深	約 4 m	4 m
平均水位海拔高度	0	T. P. +0.16m
[湖 岸 線]		
西 浦	138 km	121 km
北 浦	—	75
外 浪 逆 浦	—	} 54
そ の 他	—	
(計)		( 250)
[湖容積または貯水量]	約 8 億m <sup>3</sup>	(註5) 約 8 億m <sup>3</sup>
[流 域 面 積]		(註2) 1,597.0km <sup>2</sup>
西 浦	—	394.5
北 浦	—	165.2
外 浪 逆 浦	—	(註4) ( 2,156.7)
(計)	(註3) ( 1,950)	

註1：「その他」は主として常陸利根川などの河川面積をいう。

註2：この資料は(文献4)により、各流域面積は湖面積を含んでいる。

註3：この値は湖面積を含んでいない。

註4：(文献4)の別表には2,169.3km<sup>2</sup>の記載がある。

註5：(文献10)ではY. P. +1.20mのとき8.48億m<sup>3</sup>(利水計画湖面積219km<sup>2</sup>)とある。



表 2 霞ヶ浦流域の年降水量

単位：mm

	観測所	(註1) 昭47	昭48	昭49	昭50	昭51	昭52	昭53	昭54	備 考
(西浦領域を代 表する降雨)	柿岡		1,128	1,356	1,525	1,575	1,374	1,023	1,390	
	真壁		935	1,188	1,419	1,559	1,327	—	—	
	筑波山		1,209	1,427	1,413	—	—	—	735	
	土浦		1,026	1,227	1,294	1,423	1,132	824	1,143	
	館野		1,054	1,297	1,223	1,565	1,323	749	1,251	
	江戸崎		—	—	—	—	—	938	1,281	
	竜ヶ崎		1,160	1,318	1,390	1,626	1,212	875	1,209	
	(平均)	1,441	1,085	1,302	1,377	1,550	1,274	882	1,168	
(北浦流域を代 表する降雨)	美野里		1,151	1,486	1,389	1,713	1,484	1,455	1,603	
	鉾田		1,181	1,438	1,430	1,579	—	—	1,458	
	鹿島		1,127	1,467	1,540	1,438	1,430	1,050	1,535	
	(平均)	1,537	1,253	1,464	1,453	1,577	1,457	1,253	1,532	
(外浪逆浦流域 を代表する降雨)	鹿島	1,591	1,127	1,467	1,540	1,438	1,430	1,050	1,535	
(西浦湖面を代 表する降雨)	土浦		1,026	1,227	1,294	1,423	1,132	824	1,143	
	江戸崎		(1,094)*	—	—	—	—	938	1,281	*麻生
	(平均)	1,522	1,060	1,227	1,294	1,423	1,132	881	1,212	
(北浦湖面を代 表する降雨)	鉾田		1,181	1,438	1,430	1,579	—	—	1,458	
	鹿島		1,127	1,467	1,540	1,438	1,430	1,050	1,535	
	(平均)	1,595	1,254	1,453	1,485	1,509	1,430	1,050	1,497	
(外浪逆浦湖面 を代表する降雨)	鹿島	1,613	1,127	1,467	1,540	1,438	1,430	1,050	1,535	
(全流域の平均 降水量)			1,108	1,356	1,403	1,560	1,326	988	1,289	

註1：昭和47年の雨量は（文献5）による。観測所は必ずしもこの表に記したのではない。

整理した。なお昭和47年の値は（文献5）または（文献6）に従っている。雨量の少ない年は昭和48年と昭和53年であり、昭和48年は霞ヶ浦にアオコの大発生をみた年である。

河川から霞ヶ浦に流入する水量を正確に見積るのは容易でない。一つの方法は、流域の降雨量から蒸発量を差し引いた分が霞ヶ浦流入量とみなすことであり、（文献2）はこれに従っている。この方法は降雨の一部が一時的に地下水貯留されても、最終的には河川や沿岸を通じて湖内に流入するという考え方である。もう一つは代表的ないくつかの流入河川で年間を通じて流量観測を行ない、降雨記録から流出解析によって照合した上、これを参考にして観測を行わなかった河川について、流域の降雨および地形などの特性から流出率を決めて流出量を求めるものである。（文献5）はこれに従い、昭和47年の河川流入量が算定された。表3の左欄、昭和47年流量はこの値を転載したものである。なお、河川名は（文献4）に記載されているものを採用している。従って流量の算定には、対象とならなかった（あるいは対象となっても河川名の不明な）河川がある代りに、無冠名河川として整理されている。もちろん対象外の河川も、残流域として評価されている筈である。

表3 霞ヶ浦流入河川年流量 (昭和47年)

流域面積: km<sup>2</sup>, 年流量: ×10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>/年

区 域 (流域)	(註1) 河 川 名	(文献5, 6) によるまとめ			(註2)			備 考
		流域面積	昭和47年 流 量	流出率	流域面積	昭和47年 流 量	流出率	
西 浦	1 麻 生 前 川	4.0	6.0	1.04	4.0	(註3)		大 川 (註4) 鎌田川 (註5)
	2 城 下 川	9.7	14.2	1.02	7.4			
	3 弁 財 天 川*	8.8	5.7	0.45	5.2			
	4 船 子 川	—	—	—	11.8	(8.0)	(0.47)	
	5 新 田 川	2.7	1.9	0.49	2.7			
	6 船 津 排 水 路	—	—	—	1.9	(1.3)	(0.47)	
	7 手 賀 川	5.2	3.5	0.47	5.2			
	8 梶 無 川	33.0	23.0	0.48	30.7			
	9 沖 州 川*	—	—	—	16.6	(11.2)	(0.47)	
	10 園 部 川	79.3	52.0	0.46	79.3			
	11 山 王 川	12.8	20.5	1.11	12.3			
	12 恋 瀬 川	218.1	137.8	0.44	212.6			
	13 菱 木 川	23.9	18.0	0.52	23.7			
	14 一ノ瀬 川	25.7	18.5	0.50	29.4			
	15 川 尻 川	8.8	12.9	1.02	15.0			
	16 田 村 川	—	—	—	6.7	(4.5)	(0.47)	
	17 境 川	20.3	15.1	0.52	19.9			
	18 新 川	15.8	25.3	1.11	15.6			
	19 桜 川	333.3	108.8	0.23	350.3			
	20 備 前 川	19.7	31.5	1.11	3.7			
	21 花 室 川	36.6	59.0	1.12	38.8			
	22 清 明 川	25.3	18.9	0.52	25.5			
	23 余 干 入 路 拓 承 水 路	—	—	—	9.7	(6.6)	(0.47)	
	24 高 橋 川	—	—	—	15.7	(10.6)	(0.47)	
	25 小 野 川	176.0	61.8	0.24	175.7			
	26 新 利 根 川	180.1	167.0	0.64	184.0			
	N-1	9.2	6.0	0.45	—	—	—	
	N-2	7.5	5.0	0.46	—	—	—	
	N-3	0.4	0.3	0.52	—	—	—	
	N-4	5.7	3.8	0.46	—	—	—	
	N-5	6.0	4.1	0.47	—	—	—	
	N-6	19.2	12.6	0.46	—	—	—	
	残 流 域 (計)	138.8 (1,426.0)	133.0 (970.0)	0.66	122.5 (1,426.0)	(116.5) (960.1)	(0.66)	
北 浦	1 流 川	3.9	6.3	1.05	3.6			
	2 水 神 川	6.3	4.1	0.42	5.9			
	3 中 里 川	—	—	—	8.1	(8.2)	(0.66)	
	4 居 合 排 水 路	—	—	—	7.7	(7.8)	(0.66)	
	5 武 井 川	—	—	—	3.6	(3.7)	(0.66)	
	6 沼 里 排 水 路	—	—	—	7.2	(7.3)	(0.66)	
	7 白 鳥 川	—	—	—	5.5	(5.6)	(0.66)	

表3 (つづき)

区 域 (流域)	(註1) 河 川 名	(文献5, 6) によるまとめ			(註2)			備 考
		流域面積	昭和47年 流 量	流出率	流域面積	昭和47年 流 量	流出率	
	8 大 洋 川	3.7	5.4	0.95	3.4			
	9 境 重 水 路	—	—	—	4.5	(4.6)	(0.66)	
	10 大 二 重 排 水 路	—	—	—	8.9	(9.0)	(0.66)	
	11 第 2 重 排 水 路	—	—	—	4.7	(4.8)	(0.66)	
	12 長 茂 川	6.8	4.4	0.42	6.4			
	13 鈴 田 川	43.9	32.8	0.49	52.7			
	14 巴 川	128.4	83.9	0.43	131.8			
	15 長 野 江 川	7.1	4.7	0.43	6.6			
	16 武 田 川	18.4	27.1	0.96	19.7			
	17 山 用 川	19.9	14.8	0.48	19.9			
	18 大 円 寺 川	—	—	—	6.8			
	19 藏 川	17.7	26.2	0.96	16.1			
	20 雁 通 川	8.2	12.0	0.95	8.2			
	21 堀 川	—	—	—	2.9	(2.9)	(0.66)	
	K-1	7.3	4.7	0.42	—	—	—	
	K-2	5.0	4.1	0.53	—	—	—	
	K-3	9.6	6.3	0.43	—	—	—	
	K-4	7.7	5.0	0.42	—	—	—	
	K-5	8.7	5.7	0.43	—	—	—	
	残 流 域	57.5	125.0	1.41*	26.3	(26.7)	(0.66)	*(註6)
	(計)	(360.3)	(372.0)		(360.5)	(301.7)		
外浪逆浦	1 前 川	6.3	4.1	0.41	11.7			*福井川を含む
	2 夜 越 川	16.5	12.3	0.47	16.4			
	3 横 利 根 川	—	—	—	6.5	(5.0)	(0.48)	
	4 与 田 浦	—	—	—	30.1	(23.0)	(0.48)	
	5 野 川	—	—	—	30.1	(23.0)	(0.48)	
	S-1	35.0	23.0	0.41	—	—	—	
	S-2	1.0	0.6	0.38	—	—	—	
	残 流 域	97.4	83.0	0.54	55.4	(47.6)	(0.54)	** (註7)
	(計)	(149.3)	(123.0)		(150.2)	1(115.0)		
	合 計	1,935.5	1,465.0		1,936.7	1,376.8		

註1：(文献4) によって記載した。但しN, K, Sの河川群は(文献5, 6) によるものである。

註2：(文献4) による流域面積で年流量をまとめなおしたもの。

註3：年流量, 流出量の欄で空欄の部分は(文献5, 6) の値と同じとみなす。また( )内の値は推定値である。

註4：推定の必要な河川の流出率は(文献5, 6) に従って、西浦0.47, 北浦0.66, 外浪逆浦0.48の平均流出率を当てた。ただし残流域については別である。

註5：西浦残流域の流出率は(文献5, 6) で求まる0.66を適用した。

註6：北浦残流域の流出率は(文献5, 6) の値が1.41と不可解なので西浦と同様0.66を適用した。

註7：外浪逆浦の流出率は(文献5, 6) で求まる0.54を適用した。

表4 霞ヶ浦流入河川流量と湖面降水量

単位：×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/年

区別	地域	(註1)	(註2)								平均
		昭47	昭47	昭48	昭49	昭50	昭51	昭52	昭53	昭54	
流域	西浦	970	960.1	713.6	856.2	905.3	995.6	837.8	580.4	768.2	827.2
	北浦	372	301.7	260.6	330.5	328.2	356.0	329.0	283.2	346.0	316.9
	外浪逆浦	123	115.0	83.9	109.2	114.5	107.1	106.6	78.2	114.3	103.6
	計	1,465	1,376.8	1,058.1	1,295.9	1,348.0	1,458.7	1,273.4	941.8	1,228.5	1,247.7
湖面	西浦	260	260.3	181.3	209.8	221.3	243.3	193.6	150.7	207.3	208.4
	北浦	55	54.2	39.2	49.4	50.5	51.3	48.6	35.7	50.9	47.5
	外浪逆浦	24	24.2	16.9	22.0	23.1	21.6	21.5	15.8	23.0	21.0
	計	339	338.7	237.4	281.2	294.9	316.2	263.7	202.2	281.2	276.9
	合計	1,804	1,715.5	1,295.5	1,577.1	1,642.9	1,774.9	1,537.1	1,144.0	1,509.7	1,524.6

註1：(文献5)の値。

註2：本文に記述した方法で推定した値。

表3の右欄、昭和47年流量は同表中の各河川について流量を再整理したものである。この場合、左欄流量で値の判っているものについてはそのまま利用することにし、流量が判らない河川については、(文献5)に記載された西浦、北浦、外浪逆浦の各流域からの平均流出率0.47、0.66、0.48を流出率として流量を推定した。ただし、残流域については、それぞれ左欄残流域に対する流出率を用いたが、北浦の残流域については左欄で1.41となっていて、これは異常に大きいため、ここでは北浦流域の平均流出を0.66与えた。右欄の流量は、値の既知河川では左欄の流域面積を、未知河川は(文献4)の流域面積を用いるという矛盾があるが、この誤差は大した量ではない。総流出量は、左欄の値で14.65億m<sup>3</sup>/年、右欄の値で13.77億m<sup>3</sup>/年と多少の相異を示すが、北浦残流域の流出率1.41の値の信頼性にかかわる原因が内在している可能性がある。

次に昭和48年以降昭和54年までの年流入量を推定する方法として、表3の右欄で設定した流域面積と流出率を用い、表2で整理した各年の流域降水量から各河川の流出高を計算することとする。同時に、各年の湖面降水量も算定し、両者を表4にまとめた。表の結果は当然年降雨量に比例する形で流出量が算定され、昭和47～54年の8年間の平均値は(文献2)で記された値に近い。

### 3. 各種用水の取水量と排水量

#### 3.1 上水および工業用水の取水量

霞ヶ浦を水源とする上水道および工業用水道の事業概要を、(文献6)(文献8)によってまとめれば表5の通りである。このうち大規模の水道事業は、鹿島上水道、鹿島工業用水道、霞ヶ浦水道の三つである。これらの事業による給水計画量は表中で日最大取水量で表わされているため、霞ヶ浦の水収支を検討するには不適當である。したがってここでは(文献9)による実績取水量をまとめた

表6に着目する。これによると、昭和54年の実績で、湖水の取水量は約1.25億 $m^3$ であり、昭和50年以降減少を辿っている。

将来の上工用水の予想取水量は、表5の各事業が完了した場合の取水量に加えて、霞ヶ浦総合開発事業にもとづく水資源開発事業による新規開発量を考慮しなければならない。(文献10)によると、新規利水量42.92 $m^3/s$ のうち、都市用水は23.36 $m^3/s$ (茨城県19.10 $m^3/s$ ,千葉県2.76 $m^3/s$ ,東京都1.50 $m^3/s$ )であり、事業工期終了時は昭和61年3月である。表7はこれらの事業が完成される昭和61年頃を想定し、年間取水量を推定したものである。

### 3.2 下水処理場からの排水量

霞ヶ浦に直接排水される処理下水は、霞ヶ浦浄化センターが活動に入った昭和54年1月以来のことである。昭和54年の年間排水量実績は4,985 $\times 10^6 m^3$ であった。

表5 霞ヶ浦を水源とする水道事業

水道事業名	取水水域	所在地	給水区域	計 給 水 人	1日最大給水量		給 水 開 始	建設期間	備 考
					表流水	地下水			
(上水)									
潮来上水道	常利根川	牛堀町		15,000	2,400			昭和37年	
東村上水道(1)	西浦	上東八筋			300				
同(2)	横利根川	東村西代			150				
佐原上水道(1)	横利根川	佐原	市田		600				
同(2)	常利根川	北佐加	原市		750				
鹿島水道	北浦	鹿島	市田						
上水7ヵ年計画			鹿島町	*50,000	*20,000	*5,000		昭和41~	*下欄一次拡張に吸収。
同第1次拡張			鹿島町, 神橋町, 波崎町	60,000	30,000	5,000		47年度 昭和48~	
霞ヶ浦水道	西浦	土浦市							
創設時		土浦市	阿見町の一部	*47,000	*8,460		昭35.12	昭和32~	*下欄一次拡張に吸収。
第1次拡張		土浦市	阿見町, 県内水道企業団	175,700	47,215		昭39.10	34年度 昭和39~	
第2次拡張		筑南水道企業団		100,000	92,000	8,000	昭48.10	54年度 昭和46~	
美浦村分水		美浦村		7,200	6,000		昭53.4	54年度 昭和51~	
(上水)計					179,415	13,000			
(工業用水)									
鹿島工業用水道	北浦	大野村							
工水第1期事業		鹿島町	神橋町	—	200,000	10,000	昭44.2	昭和41~	
鹿島水道	北浦	鹿島町							
工水第2期事業		鹿島町	神橋町, 波崎町	—	600,000		昭47.11	昭和44~	
(工業用水)計					800,000	10,000		52年度	
合計					979,415	23,000			

註：(文献2)(文献6)(文献8)より整理

表6 上工水の霞ヶ浦からの年間取水量

単位：10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/年

	霞ヶ浦水道		鹿島水道	鹿島工業水道	合 計	地下水を除く合計
	(湖水)	(地下水)	(湖水)	(湖水)		
昭和47年	1,012	—	169	8,828	10,009	10,009
48	1,192	1	347	9,892	11,432	11,431
49	1,239	10	359	12,422	12,432	12,422
50	1,333	77	400	12,973	14,783	14,706
51	1,324	147	429	12,641	14,541	14,394
52	1,488	208	465	12,308	14,469	14,261
53	1,835	121	546	11,276	13,778	13,657
54	2,046	100	501	9,941	12,588	12,488
取水地点	美浦村 <sup>(註1)</sup>	—	鹿島町	鹿島町・大野村		

註1：昭和53年7月以降で、それまでは土浦市。

表7 霞ヶ浦から取水される都市用水・農業用水の予想量<sup>(註1)</sup>

		常 時 送 水 量 m <sup>3</sup> /S	1日最大 取 水 量 m <sup>3</sup> /日	1日平均 取 水 量 m <sup>3</sup> /日	年間推定 取 水 量 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /年	備 考
上 水	現状施設での将来予測量 (表5の全上水道事業)	—	179,415	*119,610	43.66	*(註2)
	総合開発による新規開発量	5.56	—	480,384	175.34	
	小 計	5.56	—	599,994	219.00	
工 業 用 水	総合開発による開発量	*17.80	—	1,537,920	561.34	*(註3)
	小 計	17.80	—	1,537,920	561.34	
農 業 用 水	現状施設での将来予測量 (表8の沿岸水田)	—	—	—	*265.00	*(註4)
	総合開発による新規開発量	*19.56	—	—	**207.87	*(註5) *(註6)
	小 計	19.56	—	—	472.87	
合 計		—	—	—	1,253.21	

註1：昭和61年頃の予測とする。

註2：1日最大取水量の2/3とする。

註3：表5の鹿島水道（工水）、鹿島工業水道の第1期・第2期の給水量80万m<sup>3</sup>（1日最大）は、総合開発による開発量17.80m<sup>3</sup>/sに含まれている。

註4：この値は予想困難のため現状維持とみた。

註5：かんがい期の平均送水量。

註6：かんがい期を5・6・7・8月（123日間）とみた。

### 3.3 農業用水の取・排水量

霞ヶ浦の湖岸地帯は干拓地も含めて古くから水田が発達し、その用水は一部地下水に依存するものもあるが、大半は湖水を利用している。ここで対象とする農業用水は、湖水依存のものを取り上げるが、これには湖の沿岸はもとより、河川であっても湖水位の背水が及ぶ水域からの取水も湖水利用とみなさなければならない。したがって常陸利根川、横利根川、鱒川からの取水は湖水依存である。また新利根川の流域には河川水を取水する水田が発達しているが、この河川は河川勾配のない低平地河川であるため、かんがい期の大量の取水時には湖水が逆流するので、これも湖水利用と考える。しかし河川固有水も当然利水されているので、上のように考えるのは的確でないことは否定できない。

沿岸水田のかんがい面積は（文献11）にしたがった。この文献では水田の形態をAからDまでに分類している。すなわち、A型は雨のほか湖水取水の用水はあるが、排水はないとみられる地域、B型は用水は雨だけで湖への排水はある地域、C型は雨のほか取水、排水によって湖水の出入がある地域、D型は取・排水のほか循環利水が行われている地域である。一方、（文献12）によれば、干拓地の水田群は機械力による取水・排水の形態が特異であることが指摘されているため、ここでは上記のC型を二つにわけ、C<sub>1</sub>型として一般の取排水方式によるもの、C<sub>2</sub>型として干拓地の取排水方式によるものとした。干拓地面積は（文献2）（文献12）によったが、これによって不明な地域は1/25,000土地利用図（国土地理院昭和52年4月発行）で推定した。

かんがい用水の取水量および排水量は水田の類型によって大きく異なる。（文献13）では沿岸のいくつかのモデル水田（群）について観測を行った上、水収支をまとめている。この成果は霞ヶ浦沿岸全域の取排水量を推定するため貴重な参考資料となる。ここではこの量の概略値を推定する方法として原単位方式をとる。すなわち

$$(\text{取水量または排水量}) = (\text{原単位}) \times (\text{水田面積})$$

とし、この原単位を水田の類型別に設定することとする。まず、取水量の原単位は以下の通りである。

#### (1) A型水田

この水田は浸透性の高い土壌と考えられる。かんがい期間中の蒸発量を700mm（以下、雨量の単位はかんがい期間中の雨量としてmmで表わす）とみなし、浸透損失を800mmとすると、この両者を期間中の降雨量と用水でまかなうこととなる。降雨量は700～1,100mm程度と考えられるから、400～800mmが必要取水量である。蒸発量が比較的明確な値であるのに対し、浸透量は地質、しろかきの程度で変る非常に不明瞭な値である。浸透損失は（文献13）の乾田では1,255mm、湿田（柴崎単位水田）で428mmと記録されている。後者は畦畔浸透量であるため、これに降下浸透量を加われればその値はもう少し大きいと考えられる。以上のことから必要取水量400～800mmに対する原単位として、4,000～8,000m<sup>3</sup>/haを得るを得るが、ここではその平均値6,000m<sup>3</sup>/haを採用する。

(2) B型水田

取水がないから考慮する必要はない。

(3) C<sub>1</sub>型水田

(文献13)の湿田(柴崎単位水田)では取水量は756mm、(文献14)の浸透量が少ないとみられる三河湾集水域では1,560mm～1,606mmと記録されている。したがって800～1,600mmが必要取水量とみなされ、ここではその平均をとって12,000m<sup>3</sup>/haを原単位とする。

(4) C<sub>2</sub>型水田

(文献12)(文献13)で記述されているように、代表的な干拓水田群である余郷入での取水量は2,980mmの記録がある。したがって、すべての干拓地が余郷入と同様の取水量があるとみなすのは問題があるが、ここでは余郷入の値にならない、原単位を30,000m<sup>3</sup>/haとみなす。

(5) D型水田

この類型の水田は(文献13)にみられる馬掛水田群で代表させる。その取水量は314mmであって、循環水の活用によって取水量を最低限におさえている。原単位は3,000m<sup>3</sup>/haとなる。

次に排水量に関する原単位を考えるに当たって留意すべきことは、ここでは雨水の流出分を排水量に含ませないことである。すなわち、降雨による余剰水の表流出分は、降雨流出としてすでに流入河川流入量として計算されているはずである。具体的には残流域からの流出分がこれに相当していると考えられる。ここでは取水された水の排出分を評価する原単位を考えることになる。排出分とは量の評価値であって、取水された水そのものが排水されるというわけではない。

(6) A型水田

排水がないため、考慮する必要はない。

(7) B型水田

取水がないため、排水はすべて降雨流出であるから考慮する必要はない。実際にB型水田があるのは西浦沿岸の120haだけである。

(8) C<sub>1</sub>型水田

(文献13)による馬掛水田群の例を参考にする。この水田群はD型水田で、循環利水によってほぼ理想的にかんがいが行われている。湖への排水量670mmのほとんどは降雨流出分であったと指摘されており、この値は表3に示した残留域の流出率0.66を用いて計算される降雨967mmの流出量638mmとよく符合する。したがって損失降雨967mm-670mm=297mmは、浸透量が少ないとみられるこの水田では、すべて蒸発散として消費されたとみなされる。これはまた、蒸発量の不足分は用水が補っていることになり、馬掛の例では取水量のすべてが蒸発散に費やされている。したがって、どのような水田でも蒸発量の半分は雨に依存し、半分は用水に依存するとみることができる。そして馬掛の取水量300余mmは水田群としてかんがいに必要な最小の取水量であると言えよう。ここでは



一般に蒸発散量を700mmとみて、350mmが取水依存と考える。さて、C<sub>1</sub>型水田ではすでに取水量を1,200mmと設定したから、これから350mmを差し引いて850mmが排水分であるとすれば、排水量の原単位は8,500m<sup>3</sup>/haとなる。なお、浸透がある程度以上みられる水田では再考慮しなければならない。

#### (9) C<sub>2</sub>型水田

取水量原単位で設定した取水量3,000mmから350mmを引いた2,650mmを排水量とみなし、その原単位26,500m<sup>3</sup>/haを得る。(文献12)の余郷入の例では、取水量2,980mmから350mmを引いた2,630mmが取水依存の排水分であり、実際の排水量3,270mmとの差640mmが降雨依頼の排水量とみなせる。この値は流出率から求まる流出量570mmとほぼ見合った数字である。

#### (10) D型水田

すでに述べたように、この水田から取水依存の排水分はない。

以上の原単位を用いて霞ヶ浦沿岸水田の取排水量を推定したのが表8である。2.65億m<sup>3</sup>の取水量に対し、1.91億m<sup>3</sup>の排水量である。この差し引き7,420万m<sup>3</sup>がかんがいによって消費された湖水量である。これを減水深に直すと360mmとなり、蒸発量の湖水依存量に似合う量である。かんがい期間中の雨量を900mm、残流域の流出率を表3にしたがって0.66とすると降雨流出は594mm、これでは若干収支が合わないが、水田からの降雨浸透は微量とみなせることになる。また、降下浸透量を100mmと仮定し、収支をとると降雨流出は440mmとなり、この場合には流出率は0.49が適当という見方もできる。いずれにしても、残流域の流出率を表3のように外浪逆浦で0.54、そのほかで0.66としても、大きな矛盾はなさそうである。

以上の予測は特定の年に対して行ったのではない。(文献11)の農地面積などは昭和45～48年の資料が用いられており、(文献13)の調査は昭和49～51年に行われている。霞ヶ浦周辺の水田面積の推移は明確でないが、(文献11)によると、土浦地方生活圏と鹿島地方生活圏での農用地の減少率は、昭和40年から昭和50年まででそれぞれ2.4%、4.0%、昭和50年から昭和60年までの予測値でそれぞれ1.3%、7.5%である。両生活圏は都市化が進むあるいは拡大している地域で、その他の地方は減少しているとしてもそれ程の減少率は大きくないであろう。したがって表8の予測値は昭和50年頃とみることにしよう。

将来の農業用水は、霞ヶ浦総合開発によって大きく伸びることになる。(文献10)によると、新規利水としてかんがい用水平均19.56m<sup>3</sup>/sを開発する計画である。その内訳は、茨城県の6地区32,800haに対し、かんがい期平均18.13m<sup>3</sup>/s(最大約35.59m<sup>3</sup>/s)、千葉県2地区8,700haに対してかんがい期平均1.43m<sup>3</sup>/s(最大約4.78m<sup>3</sup>/s)である。年間取水量は、かんがい期を5月から8月の4か月(123日)とみなして平均用水量19.56m<sup>3</sup>/sで送水すると考えると、207.87×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>となる。

表 8 霞ヶ浦沿岸水田の推定年間取排水量

地域 水田 類型別	地域							計	原単位 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /ha	備考
	西 浦	北 浦	常陸利根川 (茨城県側)	鰯 川	横利根川 (茨城県側)	(註1) 新利根川	常陸利根川 (千葉県側)			
*かんがい面積(ha)										*(註2)
A型(用水のみ)	893.2	274.0	—	—	9.5	—	—	1,176.7		
B型(排水のみ)	120.0	—	—	—	—	—	—	120.0		
C <sub>1</sub> 型(用排水一般型)	3,212.7	1,139.0	622.5	219.0	456.6	7,467.1	2,623.0	15,739.9		
*C <sub>2</sub> 型(用排水干拓型)	1,039.0	217.0	157.0	250.0	—	—	489.0	2,152.0		*(註3)
D型(循環利水型)	774.5	494.5	174.0	—	—	—	—	1,443.0		
計	6,039.4	2,124.5	953.5	469.0	466.1	7,467.1	*3,112.0	20,631.6		*(註4)
*推定年間取水量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )										*(註5)
A	5.4	1.6	—	—	0.1	—	—	7.1	6.0	
B	0	—	—	—	—	—	—	0	0	
C <sub>1</sub>	38.6	13.7	7.5	2.6	5.5	89.6	31.5	189.0	12.0	
C <sub>2</sub>	31.2	6.5	4.7	7.5	—	—	14.7	64.6	30.0	
D	2.3	1.5	0.5	—	—	—	—	4.3	3.0	
計	77.5	23.3	12.7	10.1	5.6	89.6	46.2	265.0		
*取水依存の年間排水量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )										*(註5)
A	—	—	—	—	—	—	—	—	0	
B	—	—	—	—	—	—	—	—	0	
C <sub>1</sub>	27.3	9.7	5.3	1.9	3.9	63.2	22.3	133.8	8.5	
C <sub>2</sub>	27.5	5.8	4.2	6.6	—	—	13.0	57.0	26.5	
D	—	—	—	—	—	—	—	—	0	
計	54.8	15.5	9.5	8.5	3.9	63.2	35.3	190.8		

註1：かんがいは霞ヶ浦からの逆流水が多いとみて新利根川を考慮に入れた。

註2：(文献11)による。ただし以下の註に記したものは除く。

註3：干拓型水田面積は、西浦は(文献12)より、北浦は延方干拓、常陸利根川(茨城県側)は浪逆干拓、鰯川は鰯川干拓、常陸利根川・横利根川(千葉県側)は市和田干拓・日川干拓・仲ノ洲干拓を当てる。

註4：1/25,000土地利用図(国土地理院昭和52年4月発行)より求めた。

註5：水田類型別に原単位を設定して推定した。詳細は本文参照。

註6：取水された水の排水量であって雨水流出(排水)は考慮していない。求め方は註5と同様。

#### 4. その他の流入出量

##### 4.1 湖面蒸発量

湖面蒸発量の算定方法は種々あるが、ここでは国立公害研究所で実施している蒸発計の資料に基づいた値を最近の蒸発量として用いる。その手法や検討は(文献15)に詳しい。その結果は、他の機関の予測値と合わせて表9に示す。

表 9 霞ヶ浦の年間湖面蒸発量推定値

(昭和)	(文献5)	(文献6)					国立公害研究所(文献15)			備考 *(註1)		
	47	50	51	52	53	54	*52	53	54			
年間蒸発水頭mm												
西 浦	755.3	575	532	479	702	641	553.4	658.8	668.1			
北 浦	873.8	—	—	—	—	—						
外浪逆浦・その他	1,083.9	—	—	—	—	—						
年間蒸発水量10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>												
西 浦	129	98	90	82	120	110	94.6	112.7	114.2			
北 浦	31	—	—	—	—	—	17.2	22.4	22.7			
外浪逆浦・その他	16	—	—	—	—	—	8.3	9.9	10.0			
計	176	—	—	—	—	—	120.1	145.0	146.9			

註1：昭和52年の値は、昭和52年7月から昭和53年6月までの資料に基づいている。

#### 4.2 地下水流入量

霞ヶ浦の周辺から湖に流入する地下水量の予測は極めて困難であるが、(文献16)に記述された調査結果を適用することにする。調査期間は昭和53年9月から昭和54年8月までの一年間で、美浦村のモデル地区沿岸での地下水流入量は54.84m<sup>3</sup>/年/mと推定された。これに各水域の湖岸長をかけると、西浦から664万m<sup>3</sup>、北浦から411万m<sup>3</sup>、外浪逆浦その他から296万m<sup>3</sup>、合計1,371万m<sup>3</sup>の地下水量が流入したことになる。流入河川水量(昭和53年と54年の平均)は表4より13.27億m<sup>3</sup>であるから、地下水流入量はこの1.03%に当る。

#### 5. 水収支の総合的検討

各種の取排水量について検討した結果をまとめると、霞ヶ浦の年別水収支として表10を得る。この表についての検討をすると以下のようである。

湖面降水量は水域を代表する降雨量が的確に与えられれば最も信頼できる値である。

河川流入量は、湖面降水量と合わせて、霞ヶ浦の湖水をかん養する重要な源であるが、(文献5)にもとづく各流域の流出率の値によって流入量が決定されてしまう。この意味で流出率の信頼性が問われるが、簡単に精度を上げるのは難しい。特に小河川では毎年同じ流出率を持つわけではなく、その年の気候条件など短期的な外因によって流出率が変わる可能性がある。また流域の地下水位の低下など、地下水揚水に係わる長期的な流出率の変化もあり得る。表3に示された残流域は、そのほとんどが沿岸農地地帯と考えられ、農業排水と降雨時の内水排除など複合的な排水形態をとるなかで、正確な流出率を見積ることは極めて難しい。殊に、今後、開発事業で湖岸堤が整備されれば、排水の機構はますます複雑になる。いずれにせよ、流出率の見直しは今後も行わなければならない。

地下水流入量は地下水の挙動が不明瞭であるため、従来から考慮に入れられなかった量であるが、

表 10 水収支総括表

単位：億 $m^3$

	(文献5)	本報告書での予測値								昭和61年 頃の予想 値*	備 考
	昭 47	昭 47	昭 48	昭 49	昭 50	昭 51	昭 52	昭 53	昭 54	値*	*(註1)
年降水量(流域平均)mm	1,523	1,523	1,108	1,356	1,403	1,560	1,326	988	1,289	1,319	
入 流	1. 湖面降水量	3.39	3.39	2.37	2.81	2.95	3.16	2.64	2.02	2.81	2.77
	2. 河川流入量	14.65	13.77	10.58	12.96	13.48	14.59	12.73	9.42	12.29	12.48
	3. 地下水流入量*	—	0.14	0.11	0.13	0.13	0.15	0.13	0.09	0.12	0.13
	4. 処理下水排水量	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	1.22
	5. 農業用水排水量*	—	(1.91)	(1.91)	(1.91)	1.91	(1.91)	(1.91)	(1.91)	(1.91)	1.91**
	1, 2, 3の小計	18.04	17.30	13.06	15.90	16.56	17.90	15.50	11.53	15.22	15.38
小 計	18.04	19.21	14.97	17.81	18.47	19.81	17.41	13.44	17.18	18.51	
湖内貯留変化量*	—	—	—	—	+0.32	+0.17	—	—	+0.26	—	
	-0.04	-0.02	-0.20	-0.33	—	—	-0.17	-0.08	—	—	
出 流	6. 湖面蒸発量*	1.76	(1.57)	(1.54)	(1.32)	(1.43)	(1.21)	1.20	1.45	1.47	1.25
	7. 河川流出量	15.33	13.97	9.44	12.11	13.24	14.68	11.97	7.89	12.08	4.73
	8. 上水取水量	—	0.12	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.24	0.25	2.19
	9. 工水取水量	0.91	0.88	0.99	1.24	1.30	1.26	1.23	1.13	0.99	5.61
	10. 農水取水量*	—	(2.65)	(2.65)	(2.65)	2.65	(2.65)	(2.65)	(2.65)	(2.65)	4.73**
	8, 9, 10の小計	0.91	3.65	3.79	4.05	4.12	4.09	4.07	4.02	3.89	12.53
小 計	18.00	19.19	14.77	17.48	18.79	19.98	17.24	13.36	17.44	18.51	

註1：年降水量および1, 2, 3の項目は昭47～54の平均値。  
 註2：河川流入量の1%と見積った。詳しくは本文参照。  
 註3：昭50以外の値は予測が困難なため、同年の値を当てた。詳しくは本文参照。  
 註4：+は増加量, -は減少量を示す。  
 註5：昭47～51の値は昭52～54の資料をもとに気象条件を参考にして推定した。  
 註6：昭47～54, および昭61の予測値は他の収支の残量として求めた。  
 註7：註3と同義。  
 註8：既往の取水量2.65億 $m^3$ に新規開発量2.08億 $m^3$ (本文参照)を加えたもの。  
 註9：総合開発による農業用水の流域内からの排水量は推定困難のため見積っていない。

ここでも美浦村で観測した湖岸からの流入量を全湖岸長に拡大して求めた大胆な推定値にすぎない。この値は全河川流入量の1.03%に当るが、より正確な値は今後の調査をまつほかはない。

処理下水の排水は、昭和54年から活動に入った湖北流域下水道の霞ヶ浦浄化センターからの排水のみである。将来の計画対象地域は8,610 ha、人口は43万人、処理排水は1日最大50万 $m^3$ の予定である。これは年間にならして1.22億 $m^3$ となる。

農業用水の取水量、排水量も極めて漠とした値である。霞ヶ浦では利水権があって、慣行で最大取水量30.72 $m^3/s$ 、許可で同じく21.81 $m^3/s$ であるが(文献5)、平均取水量をこの2/3とみ、かんがい期を4か月(123日)とみれば、年間取水量は3.72億 $m^3$ となって、これでは実態と合いそうにない。ここでは(文献13)などの調査結果をもとにした原単位から推測を試みたが、これによると取水量が2.65億 $m^3$ 、排水量が1.91億 $m^3$ 、差し引き0.74億 $m^3$ となり、この差し引き0.74億 $m^3$ が実質的に水稻のかんがいに消費されたとみて妥当である。これらの収支をより精度よく調べるには、調査成果を期待して的確な原単位を見積ることにあるが、干拓型水田の大量のかけ流し方式を循環方式に改良することにより、取排水量を減少せしめることが可能である。しかし将来具体的にどのよう

な農地改革が行われ、原単位がどのように変わっていくかは予想し難い。

上水、工業用水の昭和47年から54年までの取水量は、実績にもとづくものであるから信頼性は高い。将来の予測は、現行の取水設備で当初の計画一ぱいまで拡大し稼動する量と、霞ヶ浦総合開発事業にもとづく開発量との和で表わされる。後者は一応計画案にしたがって算定できる。なお、この開発量のうち、流域外に排水されるものを除き、石岡地区へ送水されたあとは、湖北流域下水道を経て霞ヶ浦浄化センターからの排水として、その将来計画に折り込まれているところでは考えている。

農業用水のうち、総合開発による開発量はその計画案にもとづいて将来予測は可能であるが、その排水について、明らかに流域外に出て行くものは別として、石岡台地、羽賀沼などへの給水が、どのような排水量となって河川水、地下水、あるいは一部下水排水となって霞ヶ浦に戻るかは予想できないため、その量はここでは見積っていない。

次に、湖水貯水量の年間変動量が必要となるが、霞ヶ浦の水位を高崎、湖心、木原、潮来、賀、白浜の6地点平均水位と考え、毎年1月1日の水位から年間変動量を算定したものを使用する。水位記録は建設省関東地方建設局潮来工事事務所によるものである。

以上を総合して表10を見ると、昭和54年までの流出量に比べて、将来の流出量が極めて大きいことに驚かされる。常陸川水門からの排水量はこれによって大幅に減少させられることになるが、このために湖内の水位が被害のない範囲に収められるかどうかは、慎重に検討されなければならない。また、年間の激しい水位変動に対し、生物生態系がどのように対応し、水質がどのように変り得るか、それぞれの専門的な立場から早急に検討しなければならない課題と考える。

## 謝 辞

霞ヶ浦の水収支をまとめるに当たり、常に当を得た指示を賜わり、本文中の資料を細かく検討頂いた 水質土壤環境部 合田健部長に深甚の謝意を表する次第である。また、湖面蒸発量の推定に協力して頂いた 環境情報部 土屋巖室長にもお礼申し上げる。参考にした多くの資料の一部は茨城県から提供を受けたものである。御協力頂いた関係各位に深く謝意を表する次第である。

## 引 用 文 献

- 1) 東京気象台 (1980): 理科年表. 丸善.
- 2) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会 (1977): 霞ヶ浦. 三共科学選書7.
- 3) 茨城県 (1979): 霞ヶ浦総合開発 (霞ヶ浦開発事業. 霞ヶ浦水源地域整備事業).
- 4) 建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 (1980): 霞ヶ浦 (環境と水質).

- 5) 建設省・国土開発技術研究センター (1977, 1978): 霞ヶ浦汚濁制御調査報告書.
- 6) EX都市研究所 (1979, 1980): 霞ヶ浦水質保全対策総合解析調査報告書.
- 7) 気象庁水戸気象台 (1973—1979): 茨城県気象月報.
- 8) 茨城県企業局霞ヶ浦水道事務所 (1978): 霞ヶ浦水道事業の概要.
- 9) 茨城県企業局による整理資料 (1980).
- 10) 水資源開発公団霞ヶ浦開発事業建設部 (1980): 「霞ヶ浦開発 (昭和53年11月発行)」中に修正案を記載したもの.
- 11) 茨城県農地部農地計画課 (1978): 富栄養化対策現況. 対策計画報告書 (昭和52年度).
- 12) 久保田治夫・田淵俊雄・高村義親・鈴木誠治 (1979): 湖岸水田の水収支と物質 (N, P) 収支. 農業土木学会論文集, 84, 22—28.
- 13) 高村義親・田淵俊雄・鈴木誠治・久保田治夫 (1978): 霞ヶ浦流域農業生態系——水田における栄養元素の動態と水域へのインパクト——. 文部省「環境科学」特別研究報告書「農業生態系における栄養元素の動態と水域へのインパクト, 昭和54年3月, B8—R12—1, 1—21.
- 14) 沖村逸夫 (1978): 三河湾集水域農業生態系——水田における窒素・リンの流出入収支——. 文部省「環境科学」特別研究報告書「農業生態系における栄養元素の動態と水域へのインパクト, 昭和54年3月, B8—R12—1, 53—69.
- 15) 土屋 巖・白井邦彦・増田啓子・河合崇欣・植田洋匡・佐橋 謙 (1981): 湖面蒸発量の研究. 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (IV), 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響, 国立公害研究所研究報告, 第20号.
- 16) 村岡浩爾・細見正明 (1981): 霞ヶ浦沿岸地下水の挙動と水質. 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (IV), 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響, 国立公害研究所研究報告第20号.

# 資 料

## Data

- 資料(1) Class A pan 観測日表〔東京(気象庁)、  
県内水試、江戸崎中学〕
- 資料(2) 霞ヶ浦流域の気象資料
- 資料(3) 西浦沿岸観測井地質柱状図

## 資料(1) Class A pan観測日表 および 資料(2) 霞ヶ浦流域の気象資料

湖面蒸発量の研究（土屋ほか）本文に示した表1（p.48）の基になった蒸発の観測日表および公開されている気象観測の記録を整理していくつかの表にまとめた。

現在、気象庁における大型蒸発計（Class A pan）の観測日表は、大部分が印刷されていない。東京の場合も印刷発表はなく、資料(1)の日表では、東京管区気象台がまとめた千代田区大手町の気象庁露場での気象観測日原簿から転載した。県内水試と江戸崎中学の協力によって進められた観測では、さきに公害研で実施したのと同様に（土屋・白井，1979），原則として気象観測法に準拠したが、凍結した場合氷の解けた日に測定して、数日分の積算値として記録した。休日の場合の扱ひも同様にして、月単位の積算蒸発量を記録することに重点を置いた。

資料(2)は公刊された資料である茨城県気象月報から抜粋し編集した。観測地点は本文の図1に示してある。研究所の調査が湖沼学的に区分された狭義の霞ヶ浦，すなわち西浦に重点を置いたので、観測地点は西浦流域に関連したものに限定した。

なお、1977年1月～1978年8月の気象資料については、「陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)」（国立公害研究所，1979）のpp.405—420にまとめられている。

表に用いられた記号のうち資料(1)蒸発日表の（ ）は雨雪等の降水のあった場合、[ ]は欠測その他測定上の障害によって、ほかの地点の測定値を用いて推定した場合、\*は東京（気象庁）の測定値から、\*\*は内水試については江戸崎、江戸崎については内水試のそれぞれの測定値に基づいて推定した場合、†は2日以上積算蒸発量を測定した場合、そして気象庁記録の×は凍結等による欠測の場合を、(××)は大雨のため測定不能になった場合のものである。

資料(2)の表2では、×は欠測、\*は起日、時が複数回、)は欠測を除外した統計値および／は冬季などの計画休止、表3の太数字はその月の極値であり、×は欠測を示す。



資料(1) 気象庁 (東京千代田区大手町) (左), 内水試(中) および江戸崎中学(右)の大

1978		1979											
日	月	9		10		11		12		1			
1		1.9	3.6	3.3	{3.3}	1.9	2.3	1.4	1.2	×			
2		5.0	7.2	1.6	{1.6}	(2.7)	2.8	1.7	(3.2)	×	{2.8}	1.1	
3		(2.6)		5.2	{5.2}	2.6		2.7		×			
4		(1.6)	(0.0)	(3.6)	1.7	2.5	2.7	(1.8)	(1.1)	×			
5		(1.4)	(0.0)	(0.4)	(1.1)	1.9		2.2			×	1.7	
6		2.6	(1.8)	(0.8)	(0.0)	1.8	1.2	1.5	(3.4)		3.6	(1.5)	
7		4.4	5.3	3.3	5.1	1.1	1.4	0.7		(0.6)		(0.8)	
8		4.7	5.4	3.5		1.4	2.0	1.2			1.1		
9		3.6	(7.7)	(2.5)	(3.5)	4.0	2.3	1.4	(0.9)		1.1	(0.4)	
10		(6.1)		0.4		2.6	1.1	(0.5)		1.9			
11		(0.6)	(0.9)	1.2	1.9	1.5	(0.5)	×	(1.0)		3.3	1.0	0.8
12		(0.3)	(0.9)	2.3	2.9	(1.6)		×	0.5		×		
13		(0.0)	1.4	3.9	1.3	(0.3)	(0.7)	1.2	0.3	×			
14		(0.7)	(12.1)	2.8	(3.4)	1.0	(1.5)	1.4	0.2	×	(2.6)		
15		(1.2)		(0.0)		2.9	1.3	(0.3)	0.0			×	
16		(0.0)	5.0	4.1	(2.8)	1.3	1.1	0.9		×			
17		6.6	3.1	2.4	(0.7)	(0.4)	1.3		×	0.1	(13.0)		
18		3.9	4.7	(1.9)	(1.0)	(0.7)	(2.2)	1.5	(1.3)	×	(1.9)		
19		1.9	1.6	(0.6)	(0.0)	2.0		(0.4)	1.2		×	1.4	
20		2.2	1.9	1.3	(0.1)	3.5	2.8	×		×			
21		(1.4)	(1.8)	4.2	3.1	4.3	1.0	×		×	2.0		
22		(2.6)	2.7	1.7		2.7	1.7		1.0	(3.9)	×	1.5	
23		(1.1)	(5.8)	1.6	2.0		1.5		(1.7)		×		0.3
24		(2.4)		2.0	1.1	1.5	0.6	1.3		1.0	1.6	0.0	
25		2.1	4.4	0.7	0.8	1.7	(1.8)	1.8	0.8	1.3	0.3	0.4	
26		2.7	2.2	1.2	(0.6)	(1.4)		1.4	0.6		1.8	1.2	1.0
27		2.3	3.9	1.8	(1.1)	(0.2)	(0.2)	1.4	0.2	×	2.6	(2.2)	
28		(1.1)	0.0	(1.1)	(0.4)	2.5	1.5	1.3		×			
29		0.7	(0.0)	(0.6)	(0.0)	3.6	2.5	×		×	(0.6)	(2.4)	
30		0.0	{0.0}	2.9	2.7	2.3	1.1	×	{2.8}	(0.8)	1.4		
31				1.1	0.2			×		(0.5)	{1.5}	(0.0)	
合計 (mm)		67.7	72.6	66.6	50.6	60.2	37.9	32.2	23.5	18.7	24.4	22.0	

型蒸発計観測日表 (1978年9月~1980年3月)

2			3			4			5			6		
2.4	(0.4)**	(0.0)	×	2.6	2.0	(3.3)	(5.0)	**	3.2	0.9	1.6	6.6	6.0	4.2
×		(0.0)	×		1.5	(0.0)	(0.0)		[4.0]	1.3			4.3	
×	(5.6)	2.0	×	(15.0)	(1.7)	2.5	(1.2)	(5.0)	5.3	6.5	(4.2)	4.7	(10.3)	8.2
×						×	4.7	3.2	2.0			3.9		
(1.0)	(2.5)	(4.3)	1.3		1.2	1.4	1.8	3.1	3.2	14.7	9.1	3.9	3.0	2.0
(2.2)				1.7	0.5	1.4	1.8	2.4	1.1			3.6	4.9	5.4
3.3	2.1	1.4	3.2	(2.3)	(0.5)	3.0	(4.1)	(9.8)	(5.3)	(3.8)	(4.8)	(1.6)	(2.1)	4.1
2.3	2.6	0.9	(1.2)	1.0	0.7	(3.7)						(2.7)		
1.5			1.0	2.8	1.7	1.7	4.0	6.8	8.7	3.4	(6.2)**	(7.4)	3.4	(6.7)
(1.2)		(3.4)			4.8	4.5		2.6						
1.9	(1.9)**	(1.9)	×	(6.0)	(5.3)	6.1	5.6	6.6	5.3	4.2	5.0	(0.9)	(1.7)	(6.6)
3.5			×	1.9		4.8	4.9	3.7	6.2	6.0		(1.6)	1.8	
(1.6)	(1.1)	(0.3)	(0.1)	(0.3)	(2.9)	2.6	(3.8)	0.4	(3.5)	11.2	(9.3)	(2.4)	(3.3)	(2.2)
1.8	1.4		(1.6)	2.4		4.2	7.2	(7.2)	(1.9)					
2.6	0.8	1.0	2.9	1.6	1.0	2.0				(2.8)	(4.0)		4.2	4.2
2.3	1.3	3.6	3.0	1.7	2.4	2.1	(1.2)	(1.1)	(0.0)	4.0	[4.0]**	4.5	10.8	12.6
(0.7)	(5.3)	(1.6)	(4.0)	6.7	5.1	6.7	8.5	4.8	(1.4)	(4.7)	(1.4)	4.6		
2.4						3.5		4.2	2.8			0.9	3.5	
3.1	2.6	2.3	2.7	2.3	(3.0)	(0.7)	(0.2)		4.1	(12.0)		5.9	4.0	5.3
2.0	1.2	2.0	1.5			(2.1)	0.0	(0.6)	4.0				7.2	6.2
3.0	1.2	0.8	1.9	3.8	2.8	(3.9)	(7.0)		5.2	4.6	18.3	6.6	5.3	5.7
(2.0)	(2.9)		3.0	2.3	1.8	3.9			7.2	4.6	4.8		7.5	6.7
(0.0)	(4.8)	(3.7)	(2.8)	(3.2)	(5.1)	6.3	4.6		3.6	2.6		7.9	9.5	9.2
(1.0)				(××)		(0.0)	6.5	5.6	3.2	3.8	1.6	6.1		
2.2			5.7		3.7	3.1	3.0	4.5	4.3	4.0	4.9	5.0	2.6	
0.0	(0.7)	(0.7)	2.9		1.4	(1.5)	1.1	(0.4)	5.8	(11.5)	6.6	4.8	3.9	4.6
2.0	(0.9)		3.7	8.0	2.6	(1.6)	(0.7)					(3.9)		
2.7	(1.0)	1.0	3.6		2.7	(1.6)	(4.6)	(2.8)	6.8	5.5	5.1	(5.1)	[0.0]**	(0.8)
			(4.9)	(3.5)		(2.4)				4.0	4.2	3.9	(0.2)	
			(1.8)	[10.9]	(2.9)	(1.7)			(6.0)	4.0	3.5	(-0.2)	[1.1]**	[1.1]
			7.0			(3.6)				2.7	4.6	3.2		
48.7	40.3	28.5	70.2	77.7	57.0	97.2	90.5	78.0	117.5	128.1	102.8	129.6	117.7	106.8

資料(1) (つづき)

1979															
日	7			8			9			10			11		
1	2.0	{4.0}	{4.0}	6.4	7.7	8.1	3.3	{(5.5)}		3.9	5.9	{5.9}	(2.9)	2.2	1.0
2	(6.3)	4.6	5.0	5.9		4.3	1.9		{(7.2)}	(0.8)	{5.4}		3.9		
3	6.3	2.2	3.1	{(4.4)}	5.7		(1.9)	(5.0)		(0.1)	(1.7)	{(7.1)}	(2.5)	3.2	
4	3.1	4.0	3.2	2.4	{(2.9)}	{(6.5)}	5.7	(2.4)		0.7	(1.8)		(0.0)		{(3.0)}
5	4.3	5.2	4.1	5.0	6.1		7.4	5.5	5.0	(2.6)	(3.0)		(1.9)	1.3	
6	4.9	5.9		{(5.4)}	{(5.0)}		4.4	3.8	7.5	{(2.9)}			4.6	3.7	
7	3.8		11.8	{(5.5)}	{(3.8)}		4.2	3.0	2.5	{(××)}			2.4	1.4	1.6
8	(2.4)	8.4		{(2.4)}	4.8	3.5	6.4		{(9.6)}	3.9	2.7		2.4	2.6	1.1
9	2.9	4.7	4.7	3.9	3.2		2.6			2.9			(1.4)	0.8	
10	7.4	{(5.4)}	2.7	4.5	6.3		4.8	4.6	3.8	(1.7)		{(6.4)}	{(29.7)}		{3.5}
11	2.8	(1.2)	3.4	{(9.1)}	3.7	3.6	5.3	4.4	3.1	1.8	(0.0)		(2.5)	{(2.7)}	
12	4.7	{(5.6)}	(2.6)	{(3.5)}	7.0	3.1	3.7	3.2	2.2	3.7	(3.1)		3.2	2.5	
13	(1.8)	(2.3)	1.6	5.0	6.2	5.5	4.4	4.1	3.3	1.6		{(5.1)}	3.5	3.0	3.5
14	(0.1)			7.1	5.4	5.3	4.7		2.7	3.8			2.6	2.7	2.0
15	(1.8)	{(1.7)}	{(3.6)}	{(4.9)}	5.9	2.6	4.0	{(10.3)}	(1.1)	2.2	1.5		0.1	0.8	0.4
16	2.5	2.2	1.7	6.1	{(5.7)}	{4.4}	4.3		2.4	{(5.6)}	3.2		1.2	1.5	0.3
17	(3.5)	(1.8)		5.3	4.4	3.3	(1.2)	5.3	2.3	3.2	2.9	2.0	(1.6)		
18	(1.5)	(0.0)	{(1.2)}	{(2.1)}		5.8	(2.9)	0.8		{(3.8)}	{(2.1)}		(1.1)		{3.8}
19	0.7			{(1.3)}			4.4	3.9		{(××)}		{(0.0)}	1.8	1.1	
20	(1.1)	{(1.3)}	{(1.9)}	{(2.6)}	2.1		{(3.4)}	3.8	1.9	3.0		{3.1}	0.9	(1.6)	2.3
21	1.5		1.9	{(0.5)}	{(0.0)}	{(4.3)}	1.5	2.0	(1.0)	3.0		2.2	(1.8)	0.2	
22	3.0	8.1	2.0	{(2.2)}	2.4		2.8			4.1	3.5	1.5	(0.7)		
23	4.4	4.4	4.4	(3.1)	2.1	2.0	7.0		{(9.8)}	2.8	2.0	{2.0}	(0.9)		
24	4.8	5.3	4.8	(3.1)	{(2.0)}		(0.0)		{(9.9)}	(0.9)	(0.2)	(0.3)	(1.4)	{3.1}	
25	4.0	(4.9)	(1.8)	(0.6)	(3.9)		(0.0)			1.4	0.5	1.4	(0.1)		{8.7}
26	2.0	3.8	3.1	4.5	2.0	4.5	(0.1)			1.4	0.7	0.4	0.3	0.6	
27	(1.8)	4.7		(6.6)	(6.0)		0.0			2.0			1.3		
28	2.7		{(6.5)}	(4.2)	(1.2)		(0.1)	(1.2)		{(1.7)}	(2.1)		2.9	1.6	
29	4.9	{(7.6)}		(2.5)	(2.9)		(0.2)		{(3.4)}	1.6	0.5	0.3	2.1		1.3
30	4.2	3.8		(1.1)	(2.0)		(1.3)			3.9	1.9	1.6	2.8	0.5	1.3
31	4.8	4.0	{7.1}	3.6	3.2	(1.8)				2.0	1.5	1.3			
合計 (mm)	102.0	107.1	86.2	124.8	123.3	90.4	93.9	91.7	66.4	71.7	62.4	58.2	58.0	44.5	31.9

1980

12		1		2		3					
1.2	2.3	1.2	×	0.7	×	1.1	1.1	(2.8)	(4.1)	(3.0)	
2.9		0.5	×	4.0**	×	3.6	1.5	3.7			
1.7	0.9	0.5	(0.1)		×			1.2	0.3	2.3	1.6
0.9	0.3	0.4	(0.7)	(5.2)	×	(0.0)	(1.3)	0.0	(1.5)		
(0.9)	0.6	0.1	×	1.9	×	1.7	4.2	(1.1)	0.4		
(1.6)	0.7	0.8	×		1.0			0.9	×	0.9	(2.1)
0.6	1.5	0.9	×	0.6	0.0	×	2.2	0.6	4.0	(4.5)	(1.7)
2.4	2.0	×	1.5		0.2	×					
1.9		×		1.8	0.4	0.2	×	5.3	2.9	5.3	5.5
2.3	2.0	0.9	×	1.4	1.8	×		×	8.9	(10.9)	
1.8	1.0	0.6	×	(0.5)	(0.3)	×	2.0	1.7	×	(1.3)	
2.2	0.2	0.0	×			2.5	1.1	×	2.2		
1.9	0.9	1.3	×	3.6	0.1	×	1.4	1.7	(1.4)	(0.3)	
1.3	1.8	×	1.2		3.9	×	6.9	2.6	2.5	5.1	3.7
2.6		×		2.0	0.6	×					
2.0	0.9	×	0.6	2.9	0.5	×	3.3	3.3**	2.1	2.3	1.0
1.2		×			1.0	×			3.7	2.1	5.0
(1.2)	×	1.8	(0.9)	×	2.0	2.1	2.0				
1.2		×									
(1.1)	(1.3)	(1.3)	×	1.4	0.1	×	2.0	1.3	(1.5)	(2.2)	
(1.9)			×	2.2	1.9	×	1.5	2.0	(0.1)	(1.7)	
(2.0)			×	1.5	0.8	×	4.0	2.1	2.9		
(0.8)	(0.3)	0.3	×	1.5	1.2	3.1			1.7	1.6	2.0
2.0	(1.4)	0.9	×	1.2	0.8	3.2	1.7	1.6			1.1
1.0	0.9	0.3	×	1.7	2.1	2.5	1.1	0.9	2.3	2.4	
2.1	0.7	×	(1.5)						(0.0)	(2.4)	(2.4)
1.9			(0.9)	(3.3)*	(3.3)*	3.2	2.0	1.6	(3.4)	(9.5)*	
2.0	4.1	2.7	(0.9)	(3.3)*	(3.3)*	3.2	2.0	1.6	(3.4)		
1.2				(0.9)						4.9	
1.8			×	2.8	1.1				(1.2)		
52.7	25.6	16.8	5.9	35.7	27.6	14.0	46.7	37.6	62.3	67.9	

資料(2) 霞ヶ浦流域の気象資料 (表1-3)

表1 霞ヶ浦(西浦)流域の気象観測所

地域気象観測所

昭和55年1月1日現在

観測所名	観測種目					所在地	設置個所	緯度	経度	高さ m
	気温	降水量	風向・風速	日照時間	積雪の深さ					
柿岡		○			○	新治郡八郷町柿岡595	地磁気観測所	36.14	140.12	27
筑波山	○	○	○	○		筑波郡筑波町筑波1	筑波山測候所	36.13	140.06	868
愛宕山		○				西茨城郡岩間町大字泉100-2	無線ロボット雨量計	36.17	140.15	280
美野里		○			○	東茨城郡美野里町部室1195-1	美野里中学校	36.14	140.20	25
土浦	○	○	○	○	○	土浦市東真鍋町21番7号	土浦第二中学校	36.06	140.13	26
江戸崎		○			○	稲敷郡江戸崎町江戸崎甲2595	江戸崎中学校	35.58	140.19	25
龍ヶ崎	○	○	○	○	○	龍ヶ崎市大徳町3974	県農業試験場龍ヶ崎試験地	35.53	140.13	4

観測所

昭和55年1月1日現在

館野	○	○	○	○	○	筑波郡谷田部町長峰1-2	高層気象台	36.03	140.08	25
----	---	---	---	---	---	--------------	-------	-------	--------	----

表 2 霞ヶ浦

1978年9月								10月								
地点名	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎
日付	1	2	3	4			1				×					
	2										×					
	3	8	9	8	9	8	10	7								
	4	38	×	22	66	42	7	3								
	5	33	×	36	51	13	7	3	18	8	16	30	18	28	20	
	6		×	1					17	10	17	31	16	18	16	
	7		×													
	8		×													
	9		×													
	10		×						16	9	14	20	21	21	26	
	11	18	×	31	12	12	12	15								
	12	9	×	8	14	8	10	17								
	13	8	×	6	11	9	11	11								
	14		×													
	15	4	×	1	1	1	5	4	1	2			2	4	4	
	16	20	×	22	29	13	36	28	2	3	4	12	2	2	4	
	17		×	1												
	18		×													
	19		×						9	8	9	21	19	13	12	
	20		×						23	19	28	54	28	30	26	
	21	4	×	3	3	4			1	1	5		2		1	
	22		×													
	23		×			2										
	24	2	×	2	2	4	4	5								
	25		×													
	26		×													
	27		×						6	1	7	2	1			
	28	3	×	3		1	2	3	12	3	17	23	5	6	5	
	29	5	×	5	5	2	4	3	23	10	22	30	15	23	19	
	30	7	×	8	17	20	19	23								
	31															
最大日量	38	×	36	66	42	36	28		23	19)	28	54	28	30	26	
日	4		5	4	4	16	16		29*	20	20	20	20	20	20*	
最大1時間	22	×	13	33	19	10	10		8	5)	11	18	8	7	8	
日/時	4/23		5/02	4/24	4/24	16/01	30/09		20/06	20/06	20/06	20/06	10/04	20/07	10/03	
(旬計)																
上旬	81	×	71	126	63	25	13		51	27)	47	81	55	67	62	
中旬	59	×	69	67	43	74	75		35	32	41	87	51	49	46	
下旬	21	×	21	27	33	29	34		42	15	51	55	23	29	25	
月計	161	×	161	220	139	128	122		128	74)	139	223	129	145	133	
(日数)																
1mm以上	14	×	16	12	14	13	12		11	11)	10	9	11	9	10	
10mm以上	4	×	4	7	5	6	5		6	3)	6	8	6	6	6	
30mm以上	2	×	2	2	1	1	0		0	0)	0	4	0	1	0	

流域降水量

11 月								12 月							
柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎
														2	2
										/					
										/					
								8	1	/	8	8	12	13	
26	8	27	47	20	32	25				/					
	1	1		1		1				/					
										/					
10	7	10	10	9	10	9				/					
6)	4)	5)	5)	4)	2	3		1		/	3	2	1	1	
								2		/	2	1	1	1	
										/					
								14	2	/	16	16	23	17	
								2		/	2	4	8	7	
										/					
22	24	24	21	11	5	5				/					
	×		1			1				/					
										/					
										/					
26	24)	27	47	20	32	25		14	2	/	16	16	23	17	
13	27	13	13	13	13	13		23	23	/	23	23	23	23	
7)	7)	6)	6)	5)	5	4		4	1	/	4	3	5	4	
27/04	27/04	27/05	13/14	17/13	17/13	17/13		23/22	23/20*	/	23/22	24/01*	23/21	24/01*	
										/				2	2
42	20	43	62	34	44	38		11	1	/	13	11	14	15	
22	24)	24	22	11	5	6		16	2	/	18	20	31	24	
										/					
64	44)	67	84	45	49	44		27	3	/	31	31	47	41	
										/					
4	5)	5	5	5	4	6		5	2	/	5	5	6	6	
3	1)	3	3	2	2	1		1	0	/	1	1	2	2	
0	0)	0	1	0	1	0		0	0	/	0	0	0	0	

表 2 (つづき)

		1979年1月						2月								
地点名	栂	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎	栂	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎
日付	1		(ケイカク キュウシ)						8	5 (ケイカク キュウシ)	6	5	4	4	4	
	2															
	3															
	4															
	5								4		3	4	4	4	3	
	6								19	9	16	13	15	13		
	7		1				1	3								
	8															
	9															
	10								3	2	5	3	6	8		
	11								1	1	1	1	3	3		
	12	1	1		×	2	3	1								
	13	10	4		(11)	12	16	10								
	14								3	2	7	6	4	6		
	15															
	16															
	17								7	4	9	7	4	4		
	18							1	2	1	3	2	3	2		
	19															
	20															
	21															
	22															
	23								21	5	19	16	17	15		
	24								8	2	8	5	4	2		
	25															
	26								13	5	14	10	14	15		
	27								1	2	2	2	3	1		
	28															
	29				1	1	1	1								
	30	41	3		41	29	41	32								
	31	5	1		4	4	5	4								
最大日量		41	4		41	29	41	32	21	9	19	16	17	15		
日		30	13		30	30	30	30	23	6	23	23	23	26*		
最大1時間		12)	2		12)	9	11)	10	6	5	4	4	3	4		
日/時		30/09	30/09		30/09	30/09	30/09	30/09	6/08	6/09	17/16*	14/03	26/20*	26/20		
(旬計)																
上旬			1				1	3	34	16	30	25	29	28		
中旬		11	5		(11)	14	19	12	13	8	20	16	14	15		
下旬		46	4		46	34	47	37	43	14	43	33	38	33		
月計		57	10		57)	48	67	52	90	38	93	74	81	76		
(日数)																
1mm以上		4	5		5)	5	6	7	12	11	12	12	12	12		
10mm以上		2	0		1	2	2	2	3	0	3	3	3	3		
30mm以上		1	0		1	0	1	1	0	0	0	0	0	0		





表 2 (つづき)

1979年5月

6 月

地点名	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土	浦	江戸崎	龍ヶ崎	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土	浦	江戸崎	龍ヶ崎	
日付 1																			
2	1													1					
3														1	30	22			
4																			
5																			
6																			
7										8	6	7	8	7	6	8			
8	80	54	80	70	78	63	47			8	5	11	7	5	9	9			
9			1			1													
10	5	4	6	3															
11	1		3							2	3	2	2	2	1	1			
12										7	8	16	4	6	5	3			
13																			
14	57	26	26	55	37	42	46			11	8	10	3	9	7	8			
15	80	28	45	41	37	27	37												
16			1																
17	8	5	11	12	8	9	7												
18				1			1												
19																			
20			4	5															
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26			1																
27	5	12	22	21	20		6			2	3	2	4	9	18	12			
28											1	1			1				
29	8	1		1	4					22	16	28	24	19	17	18			
30			1							2	4	5	3	7	12	14			
31																			
最大日量	80	54	80	70	78	63	47			22	16	28	30	22	18	18			
日	15*	8	8	8	8	8	8			29	29	29	3	3	27	29			
最大1時間	19	11	19	17	14	21	23			3	5	8	15	16	6	6			
日/時	15/02	8/21	27/12	15/01	/04	15/04	15/04			29/08*	12/02	12/03	3/17	3/17	8/07	29/06*			
(旬計)																			
上旬	86	58	87	73	78	64	47			16	11	19	46	34	15	17			
中旬	146	60	89	114	82	78	91			20	19	28	9	17	13	12			
下旬	13	13	24	22	24		7			26	24	36	31	35	48	44			
月計	245	131	200	209	184	142	145			62	54	83	86	86	76	73			
(日数)																			
1mm以上	9	8	11	9	6	5	7			8	9	10	10	9	9	8			
10mm以上	3	4	5	5	4	3	3			2	1	4	2	2	3	3			
30mm以上	3	1	2	3	3	2	3			0	0	0	1	0	0	0			



表 2 (つづき)

		1979年9月							10月						
地点名		柿岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎	柿岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	龍ヶ崎
日付	1								2	3	2	4	4	3	10
	2	2	1	3	2	1	6	1	2	2	1	1			
	3								15	8	13	13	14	19	32
	4	3	5	2	12				2	1	1			2	1
	5		1	1	1	1	1				1				
	6								12	6	13	20	17	19	22
	7		1						57	27	48	68	62	79	81
	8									2	1				
	9	2		2	2	15									
	10		1		1								1	1	2
	11								28	29	30	26	21	16	13
	12														
	13											2		3	1)
	14									1					
	15	1			1		1	1							
	16	2	3	4	1	1									
	17											1			
	18								16	6	12	20	13	12	20
	19	1	1	1	3	1			89	21	54	110	78	104)	86
	20														
	21						2	1							
	22														
	23	2	3	9											
	24	2	2	1								1			
	25	7	5	9	7	7	3	4							1
	26	36	34	37	39	17	19	17							
	27	15	18	14	21	16	12	13							
	28	34	18	35	31	17	31	29							
	29	10	10	11	4	2	2	2							
	30	31	10	30	41	22	34	19							
	31														
最大日量		36	34	37	41	22	34	29	89	29	54	110	78	104	86
日		26	26	26	30	30	30	28	19	11	19	19	19	19	19
最大1時間		13	15	15	19	11	11	11	27	6	10	25	23	13)	23)
日/時		30/23	26/23	26/22	30/23	30/23	30/23	30/23	19/14	19/07	19/15	19/15	19/14	7/14	19/15
(旬計)															
上旬		7	9	8	18	17	16	4	90	49	80	106	98	123	148
中旬		4	4	5	5	2	1	2	133	57	96	159	112	135	120
下旬		137	100	146	143	81	103	85				1			1
月計		148	113	159	166	100	120	91	223	106	176	266	210	258	269
(日数)															
1mm以上		14	15	14	14	11	11	12	9	11	11	11	8	10	11
10mm以上		5	5	5	5	5	4	4	6	3	6	6	6	6	7
30mm以上		3	1	3	3	0	2	0	2	0	3	2	2	2	3



表 2 (つづき)

1980年1月

2 月

地点名	栂	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土	浦	江戸崎	龍ヶ崎	栂	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土	浦	江戸崎	龍ヶ崎	
日付										(ケイカク キューシ)									
1																			
2																			
3	4	1			4		5		9	8									
4	7	3			8		6		11	12									
5	2						2		3	2	1			1		2	2	1	
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13	21	6			29		22		25	22									
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19										7				7		8	12	9	
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28	15	9			9		10		16	19				6		9	8		
29	8	7			8		8		13	13									
30	15	5			19		14		18	15									
31																			
最大日量	21	9			29		22		25	22	7			7		8	12	9	
日	13	28			13		13		13	13	28			28*		19	19	19	
最大1時間	7	4			4*		4		6	6	2			2		2	2	2	
日/時	28/22	28/23			30/15		28/23		28/21	28/24	28/10			19/13		19/12	28/03*	28/03*	
(旬計)																			
上旬	13	4			12		13		23	22	1			1		2	2	1	
中旬	21	6			29		22		25	22	7			7		8	12	9	
下旬	38	21			36		32		47	47	7			7		6	9	9	
月計	72	31			77		67		95	91	15			15		16	23	19	
(日数)																			
1mm以上	7	6			6		7		7	7	3	0		3		3	3	4	
10mm以上	3	0			2		3		5	5	0	0		0		0	1	0	
30mm以上	0	0			0		0		0	0	0	0		0		0	0	0	

3 月

柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土 補	江戸崎	龍ヶ崎
5	2 (ケイカク キューン)		9	8	11		
1	1		2	6	10		
29)	11)		32)	19)	21)		
13	2		32	16	31		
14	4		13	13	14		
4	2		6	3	1		
3	2		6	6	7		
19	2		23)	16	23		
			2	1	2		
1							
					1		
12	11		10	10	8		
41	11		71	32	15		
41	11		71	32	31		
30	30*		30	30	8		
15)	3)		31)	13)	10)		
30/04	30/05*		30/05	30/04	8/03		
66	22		94	65	88		
3	2		6	6	7		
73	24		106	59	49		
142	48		206	130	144		
11	10		11	11	12		
6	3		6	6	7		
1	0		3	1	1		

表 3 高層氣象

1978年

種別 日	9 月			10 月			11 月			12 月		
	最高氣溫 ℃	最低氣溫 ℃	降水量 mm	最高氣溫 ℃	最低氣溫 ℃	降水量 mm	最高氣溫 ℃	最低氣溫 ℃	降水量 mm	最高氣溫 ℃	最低氣溫 ℃	降水量 mm
1	25.1	17.9	0.0	24.7	13.4	—	20.5	8.8	—	13.9	-0.2	—
2	26.7	15.1	—	25.7	11.8	—	17.7	7.5	0.0	<b>18.4</b>	-0.6	—
3	26.9	17.5	8.5	<b>25.8</b>	8.7	—	16.5	2.6	—	17.0	-0.7	—
4	25.8	19.2	<b>28.0</b>	25.4	10.8	—	15.5	-0.2	—	14.0	0.8	0.0
5	20.8	17.5	3.0	18.9	11.7	15.5	18.8	1.0	—	13.6	-1.2	—
6	25.3	15.8	—	17.3	10.6	15.0	19.5	3.2	—	9.2	-2.9	—
7	24.2	16.9	—	19.4	9.3	—	18.9	4.2	0.0	11.7	-5.2	—
8	24.4	16.6	—	18.5	8.3	—	20.2	7.9	—	18.0	-2.6	—
9	29.1	13.9	—	20.9	6.6	—	<b>22.3</b>	5.5	—	17.1	-0.5	—
10	<b>32.0</b>	20.0	—	22.6	13.6	19.0	14.2	-0.1	—	16.9	0.0	0.0
上旬	26.0	17.0	39.5	21.9	10.5	49.5	18.4	4.0	0.0	15.0	-1.3	0.0
11	24.3	19.1	4.5	21.4	14.3	0.0	14.0	4.7	—	12.7	-2.8	9.0
12	19.1	16.0	7.5	21.6	14.0	—	15.0	3.3	0.0	9.9	-4.9	—
13	21.2	15.8	9.0	17.9	6.9	—	10.8	8.3	<b>21.5</b>	12.9	-4.6	—
14	22.8	17.8	0.0	17.7	<b>1.3</b>	—	17.9	9.3	0.0	13.5	0.1	—
15	24.9	18.2	2.5	16.8	6.3	2.0	19.8	8.8	—	14.9	-1.0	0.0
16	23.0	18.0	10.5	23.1	7.9	1.0	16.6	3.7	—	13.1	-2.4	—
17	30.8	17.0	—	20.2	3.7	—	10.4	2.4	7.0	16.4	-0.3	—
18	27.9	<b>13.3</b>	—	20.1	4.3	0.0	16.2	1.5	—	8.5	3.8	2.0
19	28.0	19.4	—	17.0	13.0	14.5	18.2	10.2	2.5	4.3	1.1	0.5
20	28.9	19.2	—	20.0	15.4	<b>24.0</b>	16.8	0.6	—	8.2	-4.4	—
中旬	25.1	17.4	34.0	19.6	8.7	41.5	15.6	5.3	31.0	11.4	-1.5	11.5
21	23.6	19.4	3.0	20.4	5.5	1.5	15.2	-0.1	—	9.3	<b>-7.4</b>	—
22	24.4	18.1	0.0	17.9	3.0	—	14.4	1.3	—	8.1	-5.0	—
23	20.7	17.0	2.0	20.4	6.7	—	14.8	0.8	—	8.3	-2.1	<b>15.5</b>
24	23.4	16.1	4.5	20.6	7.3	0.0	13.3	1.8	—	13.3	-2.1	5.0
25	26.1	15.6	—	20.6	8.7	—	13.9	<b>-1.8</b>	—	10.0	-4.1	—
26	25.5	15.2	—	21.3	9.4	0.0	14.7	-0.2	0.0	12.4	-3.2	—
27	23.2	<b>13.3</b>	—	20.0	12.9	0.0	11.9	8.9	11.5	12.6	-2.6	—
28	21.0	14.5	1.5	16.9	11.7	5.0	17.1	6.0	—	8.8	-1.2	—
29	16.5	14.8	1.0	13.7	11.0	13.0	14.4	-0.9	—	9.7	-5.0	—
30	21.5	16.0	18.5	17.0	7.7	—	14.7	-0.5	—	6.5	-4.5	—
31				17.5	9.0	—				8.4	-6.6	—
下旬	22.6	16.0	30.5	18.8	8.4	19.5	14.4	1.5	11.5	9.8	-4.0	20.5
月	24.6	16.8	104.0	20.0	9.2	110.5	16.1	3.6	42.5	12.0	-2.3	32.0



台 氣 象 日 表  
1979年

1 月			2 月			3 月			4 月		
最高气温℃	最低气温℃	降水量mm	最高气温℃	最低气温℃	降水量mm	最高气温℃	最低气温℃	降水量mm	最高气温℃	最低气温℃	降水量mm
11.4	-5.7	—	14.0	6.0	5.5	11.2	-4.2	0.0	14.9	2.5	—
12.1	-3.2	—	10.1	-3.8	—	9.9	<b>-5.8</b>	0.0	9.4	5.8	13.5
9.5	-4.4	—	10.8	<b>-5.5</b>	—	10.4	-5.7	—	17.4	7.1	1.0
13.8	-4.7	—	13.0	-3.2	—	4.7	0.1	8.0	13.5	6.4	0.0
13.3	-2.9	0.0	5.2	-3.7	4.0	9.9	-4.2	—	10.4	4.6	—
9.9	-3.8	—	13.1	1.1	14.0	13.0	-2.8	—	16.3	6.0	0.0
6.5	-3.6	0.0	13.0	2.3	—	12.8	-2.3	1.5	19.2	6.9	—
13.0	-2.4	—	11.7	-0.7	0.0	11.0	0.8	—	18.9	11.2	14.5
<b>16.1</b>	-2.7	—	10.1	-3.0	0.0	15.9	-2.2	—	<b>25.0</b>	12.1	—
14.5	2.0	—	10.5	3.0	3.0	16.1	7.6	2.5	20.7	9.7	—
12.0	-3.0	0.0	11.2	-0.8	26.5	11.5	-1.9	12.0	16.6	7.2	29.0
10.6	-0.7	—	19.0	1.2	0.5	13.1	-2.9	—	21.1	7.4	—
8.2	1.2	2.5	15.6	-1.9	—	8.2	-3.1	0.0	18.9	4.4	—
1.2	-3.8	14.0	14.4	-2.7	—	7.8	-1.7	2.5	13.9	<b>-1.5</b>	—
3.0	<b>-8.2</b>	—	12.3	5.4	6.0	11.0	-4.2	3.0	21.2	8.0	2.0
7.7	-6.2	—	10.4	-0.5	—	12.8	1.6	0.0	15.2	9.9	0.0
9.7	-4.8	—	11.7	-2.2	—	13.9	-1.5	—	16.7	8.6	0.0
9.3	-6.6	—	10.2	-2.0	8.0	16.1	1.5	0.0	15.9	5.7	—
7.0	-4.2	0.0	13.2	-0.6	1.5	13.6	-0.1	—	16.0	1.2	—
6.2	-4.0	—	15.0	-2.6	—	11.7	0.7	0.0	12.7	3.6	0.5
7.9	-7.0	—	13.6	-4.3	—	14.2	5.6	0.0	11.5	8.3	9.0
7.1	-4.4	16.5	13.5	-1.0	16.0	12.2	-0.4	5.5	16.3	5.6	11.5
13.5	-6.2	—	<b>19.2</b>	1.2	—	9.9	1.5	—	17.9	2.9	4.0
8.2	-4.7	—	16.9	5.3	—	15.7	-2.7	—	17.6	0.5	—
12.4	-6.4	—	9.9	5.6	<b>17.5</b>	13.6	-0.1	—	20.3	4.6	—
14.3	-4.2	—	10.2	5.5	3.5	14.7	5.7	<b>28.5</b>	23.4	14.2	—
10.3	-5.3	—	12.0	3.8	—	16.5	0.5	—	24.2	14.9	—
15.3	-0.2	0.0	7.1	4.4	10.0	15.4	-0.8	—	16.0	10.9	6.5
14.9	-2.8	—	7.7	-0.5	4.0	18.6	-0.5	—	14.1	7.4	<b>20.0</b>
8.0	-4.2	—	11.7	-1.9	—	18.2	0.6	—	14.3	5.4	—
4.0	-7.4	1.0				<b>21.6</b>	3.7	—	18.2	9.5	7.0
11.7	0.0	<b>32.5</b>				20.4	11.2	7.5	22.2	7.6	0.0
8.9	-0.3	3.5				19.6	8.8	—			
11.0	-3.8	37.0	11.8	2.9	35.0	16.7	2.5	36.0	18.8	7.8	37.5
10.1	-3.8	53.5	12.2	0.2	77.5	13.6	0.2	53.5	17.2	6.9	78.0

1979年

表 3 (つづき)

種別 日	5 月			6 月			7 月			8 月		
	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm
1	19.5	6.3	—	25.1	<b>11.6</b>	—	28.2	20.0	3.5	32.1	23.1	—
2	16.0	7.4	—	24.8	14.6	—	30.5	21.3	0.5	<b>32.4</b>	23.9	—
3	22.5	4.8	—	26.2	14.6	0.0	28.7	20.4	0.0	28.9	21.2	0.5
4	20.4	11.9	—	26.0	13.1	—	24.7	16.7	—	28.2	20.8	<b>22.5</b>
5	21.5	10.0	—	25.0	12.5	—	29.2	15.4	—	<b>32.5</b>	22.7	0.0
6	23.6	6.9	—	27.6	12.2	—	28.5	17.2	—	32.0	23.5	0.0
7	21.4	11.8	0.0	25.5	17.2	6.5	28.7	19.2	—	30.9	24.4	9.0
8	19.3	14.7	<b>69.0</b>	27.9	19.8	4.0	27.7	19.4	—	29.1	23.4	—
9	25.5	14.4	—	27.1	19.0	—	28.6	18.5	—	29.9	23.4	—
10	21.9	15.5	—	29.4	17.4	—	29.5	17.5	—	32.3	23.1	—
上旬	21.2	10.4	69.0	26.5	15.2	10.5	28.4	18.6	4.0	30.8	23.0	32.0
11	25.1	12.0	0.0	23.7	20.1	0.5	28.0	19.4	1.0	30.2	22.9	0.0
12	20.1	5.0	—	22.3	16.7	4.5	30.8	21.0	0.0	31.2	22.0	—
13	21.4	<b>2.5</b>	—	23.7	18.4	—	26.0	19.9	0.0	30.9	22.0	—
14	15.1	12.7	36.5	18.8	15.7	6.5	20.3	18.6	22.0	30.8	21.7	—
15	19.8	12.1	30.5	26.3	13.8	—	23.1	18.8	1.0	30.6	21.3	0.0
16	14.9	11.6	0.0	28.1	15.5	—	22.3	16.7	0.0	31.4	22.4	—
17	16.3	11.2	6.5	30.5	20.1	—	24.8	15.7	—	31.0	22.6	0.0
18	21.2	6.5	—	30.3	19.9	—	20.7	18.5	8.0	30.8	23.2	0.5
19	21.8	9.3	—	29.9	21.6	0.0	22.9	17.0	4.5	32.3	23.3	0.0
20	24.7	10.7	0.0	29.9	20.1	—	24.0	<b>14.9</b>	14.5	27.4	22.0	6.0
中旬	20.0	9.4	73.5	26.4	18.2	11.5	24.3	18.1	51.0	30.7	22.3	6.5
21	25.8	11.4	—	30.6	23.1	—	26.2	19.3	0.5	25.7	21.7	1.5
22	<b>27.5</b>	10.8	—	31.4	21.0	—	28.7	21.9	—	29.4	22.9	1.0
23	22.6	16.3	—	31.1	21.1	0.0	30.9	22.0	—	29.9	22.5	0.0
24	23.0	13.2	—	<b>33.3</b>	22.0	—	<b>33.2</b>	22.0	—	29.1	21.1	13.5
25	24.5	17.0	—	33.0	20.9	—	32.1	22.2	1.0	25.2	20.0	2.0
26	25.8	16.6	0.0	30.2	22.0	—	29.9	23.0	—	30.0	21.8	—
27	22.3	14.0	9.5	27.1	21.9	8.5	29.0	21.3	<b>37.0</b>	32.0	21.1	—
28	27.0	10.7	—	29.1	21.8	0.0	26.9	21.7	0.5	27.5	21.2	0.0
29	24.7	14.2	0.0	26.1	20.1	<b>17.5</b>	31.0	23.2	26.5	26.8	20.1	2.0
30	20.6	11.7	—	21.6	19.7	7.5	33.1	23.3	—	23.6	19.2	10.0
31	23.0	12.9	—				33.1	23.3	—	27.3	<b>18.3</b>	—
下旬	24.3	13.5	9.5	29.4	21.4	33.5	30.4	22.1	65.5	27.9	20.9	30.0
月	21.9	11.2	152.0	27.4	18.3	55.5	27.8	19.7	120.5	29.7	22.0	68.5

1979年

9 月			10 月			11 月			12 月		
最高气温 ℃	最低气温 ℃	降水量 mm	最高气温 ℃	最低气温 ℃	降水量 mm	最高气温 ℃	最低气温 ℃	降水量 mm	最高气温 ℃	最低气温 ℃	降水量 mm
27.3	18.3	—	<b>32.4</b>	×	5.5	20.9	5.8	0.0	12.9	4.1	0.0
26.1	20.9	1.0	22.6	18.9	0.0	<b>23.5</b>	11.0	0.0	13.7	1.0	—
30.7	21.3	—	19.4	17.5	24.5	20.4	10.3	—	14.3	-0.8	—
29.5	21.9	2.5	24.3	15.9	1.0	18.4	12.6	1.5	12.2	-0.8	—
<b>32.0</b>	17.3	0.5	24.8	18.7	0.0	22.6	15.8	1.5	16.6	6.5	—
27.9	<b>14.1</b>	—	19.1	14.7	16.5	23.0	11.9	0.0	<b>18.9</b>	6.1	0.5
27.4	21.2	0.0	14.9	13.2	73.5	18.7	5.2	—	13.8	5.5	—
30.1	19.9	—	25.6	13.0	0.5	20.1	5.2	—	15.5	2.8	—
26.9	20.3	<b>30.5</b>	23.0	13.8	—	19.2	7.9	—	16.0	0.1	—
27.8	18.2	—	23.9	12.6	0.5	16.2	11.1	23.5	14.5	-1.1	—
28.6	19.3	34.5	23.0	(15.4) <sup>9</sup>	122.0	20.3	9.7	26.5	14.8	2.6	0.5
26.9	17.3	—	21.5	14.5	32.5	23.2	11.7	<b>33.0</b>	11.7	-1.7	—
25.5	15.2	—	22.8	15.1	0.5	21.1	12.2	0.0	9.0	-2.9	—
27.6	14.9	—	21.5	14.2	0.0	17.6	8.3	0.0	11.3	-3.8	—
28.5	16.3	0.0	22.9	12.4	—	13.7	0.1	—	11.0	<b>-4.7</b>	—
29.0	19.9	0.0	23.8	11.1	—	13.1	<b>-0.7</b>	0.0	12.0	-2.2	—
26.1	16.8	0.5	22.9	11.7	—	16.0	2.8	0.0	13.3	-3.4	—
23.8	18.3	—	23.7	12.5	—	15.6	6.2	4.0	11.8	-4.5	—
28.2	16.5	—	23.4	16.1	11.0	10.5	8.8	11.5	12.5	-4.2	—
30.0	18.8	1.5	25.7	18.5	<b>88.5</b>	14.0	4.9	—	12.5	-3.0	0.0
26.7	19.2	—	24.9	12.7	—	13.4	-0.4	—	18.4	4.8	2.5
27.2	17.3	2.0	23.3	13.9	132.5	15.8	5.4	48.5	12.4	2.6	2.5
27.0	19.8	5.0	23.9	9.8	—	14.9	3.1	0.0	17.2	3.1	1.5
30.0	20.9	0.0	19.6	8.8	—	13.7	8.3	6.0	16.0	7.3	5.0
31.3	20.0	0.0	20.2	<b>6.4</b>	—	16.6	8.0	26.5	13.9	4.8	9.5
20.7	17.3	0.5	18.4	10.7	0.0	9.7	6.7	1.0	6.3	1.8	17.0
18.9	17.0	8.5	20.9	9.3	0.5	10.7	6.7	9.0	13.4	-0.5	0.0
22.2	16.9	21.0	22.1	6.8	—	14.4	8.8	7.0	10.4	-1.6	—
23.0	19.2	15.5	22.9	10.3	—	15.7	7.7	—	13.4	-2.2	—
19.2	15.8	25.0	22.4	10.0	—	14.2	8.3	27.0	11.2	-3.9	—
20.1	15.8	2.0	18.8	14.4	0.0	18.1	9.3	11.5	10.2	1.0	—
24.1	17.7	24.0	22.1	12.6	—	15.2	4.2	—	14.0	-1.2	—
			20.0	7.3	—				15.8	-2.9	—
23.7	18.0	101.5	21.0	9.7	0.5	14.3	7.1	88.0	12.9	0.5	33.0
26.5	18.2	138.0	22.4	(12.8) <sup>30</sup>	255.0	16.8	7.4	163.0	13.3	1.8	36.0

表 3 (つづき)

1980年

種別 日	1 月			2 月			3 月		
	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm
1	9.7	-3.1	—	8.5	-3.9	—	12.8	0.7	7.5
2	8.9	-6.6	0.5	9.0	-5.6	—	11.7	-1.0	—
3	9.8	2.8	7.5	10.2	-5.9	—	6.2	0.6	0.0
4	12.7	4.9	6.0	10.1	-5.1	—	11.6	-0.4	—
5	8.9	-4.0	4.5	6.3	-0.1	1.5	8.5	-2.1	0.0
6	6.8	-6.0	—	6.1	-5.6	—	6.9	1.8	7.0
7	11.7	-4.7	—	7.9	-7.9	—	7.6	2.3	17.5
8	5.7	<b>-9.6</b>	—	5.6	<b>-8.6</b>	—	14.7	4.1	14.5
9	4.5	-7.0	0.0	9.3	-5.4	—	8.2	0.1	12.5
10	11.4	0.5	0.0	10.5	-7.3	—	18.2	5.6	2.0
上旬	9.0	-3.3	18.5	8.4	-5.5	1.5	10.6	1.2	61.0
11	7.5	-5.2	—	11.4	-4.9	—	10.2	-0.6	—
12	6.1	-6.8	—	10.2	-6.2	—	9.8	0.3	—
13	2.9	-1.8	<b>23.5</b>	10.1	-4.1	—	13.0	-1.7	—
14	9.0	-3.3	—	6.2	-6.3	—	8.5	-0.5	4.5
15	9.5	-5.0	—	10.3	-7.1	—	12.7	-2.0	—
16	9.8	-7.4	—	7.8	-5.7	—	11.8	<b>-3.5</b>	—
17	10.0	-7.4	—	7.9	-8.2	—	13.0	-1.3	—
18	7.6	-6.3	—	8.7	-6.2	0.0	12.9	2.3	—
19	8.1	-6.4	0.0	4.4	-2.4	<b>7.5</b>	4.9	1.7	0.0
20	11.1	-4.2	—	11.3	-4.9	—	18.3	-1.3	—
中旬	8.2	-5.4	23.5	8.8	-5.6	7.5	11.5	-0.7	4.5
21	8.7	-5.9	—	8.7	-4.0	—	13.2	6.5	0.0
22	7.3	-7.5	—	9.1	-6.9	—	7.9	0.5	20.0
23	9.1	-6.5	—	9.3	-5.9	—	10.6	0.1	1.0
24	10.8	-6.0	—	<b>13.6</b>	-3.6	0.0	9.6	-0.4	0.0
25	9.7	-4.1	—	12.6	-5.4	—	9.5	-3.1	0.0
26	11.2	-4.5	—	9.4	-1.0	—	13.3	0.0	2.5
27	13.5	-8.0	—	12.8	-1.1	0.0	15.9	0.2	—
28	<b>17.8</b>	-2.7	7.5	6.3	-2.2	6.0	14.0	-1.5	—
29	10.7	7.6	6.5	13.2	-4.0	—	18.3	2.5	9.0
30	7.6	4.2	13.0				<b>22.0</b>	7.8	<b>28.0</b>
31	9.7	2.6	0.0				13.9	4.0	0.0
下旬	10.6	-2.8	27.0	10.6	-3.8	6.0	13.5	1.5	60.5
月	9.3	-3.8	69.0	9.2	-5.0	15.0	11.9	0.7	126.0

資料(3) 西浦沿岸観測井地質柱状図 (付図1~9)

付図1 美浦村観測井地質柱状図 (No. A)

調査地点 稲敷郡美浦村大山東部 2009 標 高 T.P +2.55m  
 調査年月日 昭和53年3月8日~3月14日 自然水位 G.L -1.25m

標高 m	深 度 m	層 厚 m	柱 状 図	色 調	地 質 名	観 察	相 対 密 度	相 対 稠 度	標準貫入試験					試 料 採取 方法	試 料 採取 深 度 m
									深 度 m	N 値 /cm	10cm 打撃回数	10 20 30	N 値		
2.15	0.40	0.40	[Symbol]	黄褐色	粉土	等厚に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	軟	2.15	36	11	15	16	12.5m	○-1
1.60	0.81	0.53							2.15	36	11	15	16		
2	3	1	[Symbol]	黄褐色	シルト質粘土	ブロック状の細砂を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	軟	2.15	36	11	15	16	○-1	
									2.15	36	11	15	16		
4	5	1	[Symbol]	黄褐色	細~中砂	細砂の塊状に、シルトを混入し、含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-2	
									2.15	50	15	20	25		
7	8	1	[Symbol]	黄褐色	中~粗砂	細砂の小塊を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
10	11	1	[Symbol]	黄褐色	中~粗砂	細砂の小塊を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
13	14	1	[Symbol]	黄褐色	細砂	全体に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
17	18	1	[Symbol]	黄褐色	細砂	全体に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
20	21	1	[Symbol]	黄褐色	細砂	全体に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
22	23	1	[Symbol]	黄褐色	細砂	全体に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		
24	25	1	[Symbol]	黄褐色	細砂	全体に腐植質を混入し、粘り強い。含水率が多い。	0.95	極密	2.15	50	15	20	25	○-3	
									2.15	50	15	20	25		

(注) 1. 試料採取方法の記号 (記号の右の数字は試料番号)

- 1 乱さない試料
- 2 貫入試験機による試料
- 3 コア試料

2. 試料採取深度と固率比

3.20 / 45 / 50 / 3.70  
 3.20-3.70 は試料採取深度 (m)  
 45 / 50 は固率比 (50cm:貫入深さ, 45cm:試料長さ)

3. 標準貫入試験の項で10cm毎の打撃回数とは最初の10cm貫入に要した打撃回数、10cm~20cmの間で要した打撃回数、20cm~30cmの間で要した打撃回数をそれぞれ示したものである。

付図2 美浦村地下水観測孔地質調査地質柱状図 (No. 1)

調査地点 茨城県稲敷郡美浦村大山等下 598-1 標高 I.P. 2.38m  
 調査年月日 昭和53年7月25日～7月26日 孔内水位

標高 m	深度 m	層厚 m	柱状 図	色調	地質 名	観 察	相 对 密 度	相 对 稠 度	標準貫入試験					試料 採取 方法	採取 深度 m		
									深度 m	N 値 cm	10 cm	20 cm	30 cm				
1.32	1.00	1.10	[Symbol]	黄灰色	盛工	上層地盤の盛土 の成り		軟	1.15	50	1	1	1				
0.78	1.60	0.60		暗褐色	砂礫りシルト(粗砂土)	礫径0.25mm(最大) 砂礫りシルトの成り			17.45	22.15	2	3	4				
			[Symbol]	暗灰色	小礫混り中砂	粒径0.42mm 中砂を主体とし 一部細かい粗 砂及び短砂を 混じり含む。		極密	23.15	26.0	9	11	15				
							深層部の所産の 10%前後の小礫 を混じり 含水量大。		極密	23.45	26.15	50	12	18	25		
									極密	24.15	26.4	50	15	21	28		
									極密	24.45	26.55	50	16	21	28		
									極密	24.75	26.7	50	15	21	28		
									極密	25.05	26.85	50	15	21	28		
									極密	25.35	27.0	50	15	21	28		
									極密	25.65	27.15	50	15	21	28		
									極密	25.95	27.3	50	15	21	28		
									極密	26.25	27.45	50	15	21	28		
-7.52	9.90	0.30	[Symbol]	緑灰色					26.55	27.6	10	12	19				
			[Symbol]	暗灰色	細砂	粒径0.42mm 細～微細砂の 成り。		密	26.85	27.75	11	15	22				
							少量の雲母片を 混入する。		密	27.15	27.9	10	12	19			
									密	27.45	28.1	10	12	19			
									密	27.75	28.25	10	12	19			
									密	28.05	28.4	10	12	19			
									密	28.35	28.55	10	12	19			
									密	28.65	28.7	10	12	19			
									密	28.95	28.85	10	12	19			
									密	29.25	28.9	10	12	19			
									密	29.55	29.0	10	12	19			
-13.07	15.45		[Symbol]	暗緑灰色					29.85	29.1	11	16	23				



付図4 美浦村地下水観測孔地質調査地質柱状図 (No. 3)

調査地点 茨城県稲敷郡美浦村大山字下578 標高 T.P. 2.20m  
 調査年月日 昭和53年7月22日～7月23日 孔内水位 G.L. -0.50m

標高 R m	深 高 m	層 厚 m	柱状 図	色 調	地質 名	観 察	相 対 密 度	相 対 稠 度	標準貫入試験					採取 方法	採取 深度 m		
									深 度 m	N 値 回	10-箇の 打撃回数	N 値					
									0	10	20	30	40	50			
1.50	0.70	0.70		暗褐色	粘土	水田のため上部は 非常に軟弱である。			2.15	9/50	3	3	3				
2.20	2.00	1.30		茶褐色	固結シルト	固結し少量の細砂 混る。コア状に なる。			2.15	19/50	5	6	7				
3.50	2.90	0.80		暗褐色	腐植土	含水少く固結状の 腐植土である。			2.45	50/50	12	17	21				
4.30				暗緑灰色	中砂	粒径0.43mm、 露ら中砂の混る。 全体に腐植片 混入する。 下部はやや粗粒 である。	極密		2.48	50/50	13	18	21				
5.10	7.50	4.60		暗褐色					2.43	50/50	12	18	21				
9.70				暗灰色	小砾混り粗砂	含水量は大きい。 砾石は径10mm～ 30%程度小砾 混る。粗砂の混 入。			2.65	50/50	10	22	28				
10.30									2.60	50/50	10	22	28				
10.70									2.75	50/50	18	21	25				
10.80									2.70	50/50	18	21	25				
10.90									2.75	50/50	18	21	25				
11.00									2.75	50/50	18	21	25				
11.10									2.75	50/50	18	21	25				
11.20									2.75	50/50	18	21	25				
11.30									2.75	50/50	18	21	25				
11.40									2.75	50/50	18	21	25				
11.50									2.75	50/50	18	21	25				
11.60									2.75	50/50	18	21	25				
11.70									2.75	50/50	18	21	25				
11.80									2.75	50/50	18	21	25				
11.90									2.75	50/50	18	21	25				
12.00									2.75	50/50	18	21	25				
12.10									2.75	50/50	18	21	25				
12.20									2.75	50/50	18	21	25				
12.30									2.75	50/50	18	21	25				
12.40									2.75	50/50	18	21	25				
12.50									2.75	50/50	18	21	25				
12.60									2.75	50/50	18	21	25				
12.70									2.75	50/50	18	21	25				
12.80									2.75	50/50	18	21	25				
12.90									2.75	50/50	18	21	25				
13.00									2.75	50/50	18	21	25				
13.10									2.75	50/50	18	21	25				
13.20									2.75	50/50	18	21	25				
13.30									2.75	50/50	18	21	25				
13.40									2.75	50/50	18	21	25				
13.50									2.75	50/50	18	21	25				
13.60									2.75	50/50	18	21	25				
13.70									2.75	50/50	18	21	25				
13.80									2.75	50/50	18	21	25				
13.90									2.75	50/50	18	21	25				
14.00									2.75	50/50	18	21	25				
14.10									2.75	50/50	18	21	25				
14.20									2.75	50/50	18	21	25				
14.30									2.75	50/50	18	21	25				
14.40									2.75	50/50	18	21	25				
14.50									2.75	50/50	18	21	25				
14.60									2.75	50/50	18	21	25				
14.70									2.75	50/50	18	21	25				
14.80									2.75	50/50	18	21	25				
14.90									2.75	50/50	18	21	25				
15.00									2.75	50/50	18	21	25				
15.10									2.75	50/50	18	21	25				
15.20									2.75	50/50	18	21	25				
15.30									2.75	50/50	18	21	25				
15.40									2.75	50/50	18	21	25				
15.50									2.75	50/50	18	21	25				
15.60									2.75	50/50	18	21	25				
15.70									2.75	50/50	18	21	25				
15.80									2.75	50/50	18	21	25				
15.90									2.75	50/50	18	21	25				
16.00									2.75	50/50	18	21	25				
16.10									2.75	50/50	18	21	25				
16.20									2.75	50/50	18	21	25				
16.30									2.75	50/50	18	21	25				
16.40									2.75	50/50	18	21	25				
16.50									2.75	50/50	18	21	25				
16.60									2.75	50/50	18	21	25				
16.70									2.75	50/50	18	21	25				
16.80									2.75	50/50	18	21	25				
16.90									2.75	50/50	18	21	25				
17.00									2.75	50/50	18	21	25				
17.10									2.75	50/50	18	21	25				
17.20									2.75	50/50	18	21	25				
17.30									2.75	50/50	18	21	25				
17.40									2.75	50/50	18	21	25				
17.50									2.75	50/50	18	21	25				
17.60									2.75	50/50	18	21	25				
17.70									2.75	50/50	18	21	25				
17.80									2.75	50/50	18	21	25				
17.90									2.75	50/50	18	21	25				
18.00									2.75	50/50	18	21	25				
18.10									2.75	50/50	18	21	25				
18.20									2.75	50/50	18	21	25				
18.30									2.75	50/50	18	21	25				
18.40									2.75	50/50	18	21	25				
18.50									2.75	50/50	18	21	25				</





付図 6 美浦村地下水観測孔地質調査地質柱状図 (No. 5)

調査地点 茨城県稲敷郡美浦村山下 下 065 標 高 T.P. 7.88 m  
 調査年月日 昭和 53 年 7 月 17 日 - 7 月 18 日 孔内水位 G.L. - 3.00 m

標高 m	深度 m	層厚 m	柱状 図	色調	地質名	観察	相対 密度	相対 稠度	標準貫入試験					採取 方法	採取 深度 m	
									深度 m	N 値 cm	10-毎の 打撃回数					N 値
										10	20	30	40	50		
6.88	1.00	1.00		暗茶褐色	表土	上部 水層根 20% 腐植質混入 不規則 2-5cm		中	1.18	4/30	2	2				
				暗褐色	粘土	部分的に細砂を若干混入する粘土。若干不規則。50%程度は円礫を混入する。		中	1.45	5/30	4	8	11			
3.18	2.78	1.78		暗茶褐色					中	2.07	5/30	4	8	11		
				茶褐色	シルト並み細砂	全体にシルト若干混入。細砂の割合は 50% 程度。		緩	2.45	5/30	4	8	11			
2.58	4.28	1.60		茶褐色	砂質シルト	不規則に細砂をシルトに混入する。		緩	2.28	3/30	7	7				
				青灰色	砂質シルト	不規則に細砂をシルトに混入する。		堅	2.45	5/30	9	11	15			
2.38	5.58	1.20		青灰色	団粒シルト	細砂を部分的に混入する。		極硬	2.45	3/30	7	10	15			
				暗灰色				極硬	2.45	2/30	7	8	12			
0.39	7.44	1.84						極硬	2.45	2/30	7	8	12			



付図8 西浦湖岸域の地下水調査（観測井戸建設工事）地質柱状図（K-5 in Fig. 18）

調査地点 王彦町高須甲 1936-1  
 調査年月日 昭和54年8月25日 - 月 日

標高 T.P + 1.15M  
 孔内水位 GL - 0.81M

標尺	深	層	柱状	色	地質	観	相対	相対	標準貫入試験					採取	採取				
									度	N	10m	N値				方法	深		
m	m	m	図	調	名	察	密度	稠度	深	値	打撃	0	10	20	30	40	50	方法	m
	0.75	0.60	0.40	茶褐色	凝土	細砂より厚く 腐植物と混入		軟	11.15	4	12	10	10	10					
1	0.05	1.20	0.80	茶灰色	シルト	粒子不均一で 細砂・礫角を 混入			11.47	5	12	10	10	10					
2	0.85	1.80	0.60	青灰色	中砂	200m-300m 粒子不均一で 若干粗砂を 混入する	硬		12.15	10	15	15	15	15					
3				緑青灰色		300m-500m 粒子不均一で 若干粗砂を 混入する	硬		12.45	10	15	15	15	15					
4				緑灰色		500m-700m 粒子不均一で 比較的水量 高い	硬		13.72	10	15	15	15	15					
5				暗黄灰色			硬		14.15	10	15	15	15	15					
6				暗黄灰色			硬		14.45	10	15	15	15	15					
7							硬		14.75	10	15	15	15	15					
8							硬		15.05	10	15	15	15	15					
9							硬		15.35	10	15	15	15	15					
10	9.26	10.61	8.61		微細砂		硬		15.65	10	15	15	15	15					
11							硬		15.95	10	15	15	15	15					
12							硬		16.25	10	15	15	15	15					
13							硬		16.55	10	15	15	15	15					
14							硬		16.85	10	15	15	15	15					
15							硬		17.15	10	15	15	15	15					
16							硬		17.45	10	15	15	15	15					
17							硬		17.75	10	15	15	15	15					
18							硬		18.05	10	15	15	15	15					
19							硬		18.35	10	15	15	15	15					
20							硬		18.65	10	15	15	15	15					

付図9 西浦湖岸域の地下水調査（観測井戸建設工事）地質柱状図（K-6 in Fig. 18）

調査地点 新潟県上島村浜田地区 標高 T.P + 1.12 M  
 調査年月日 昭和54年8月24日～ 月 日 孔内水位

層	深	層	柱	色	地	観	相	相	標準貫入試験					試	料			
									深	N	10m	N 値						
尺	高	度	状	調	質	察	対	対	度	値	層の	打	0 10 20 30 40 50				採取	採取
m	m	m	因		名		密度	稠	m	値	厚	撃					方法	深
0.62	0.50	0.50		暗褐色	土	耕作土より成												
1				茶褐色	中	砂	粒子不均-2mm	粒	2.15	8		3	3	2				
0.48	1.60	1.10		暗灰色	シルト質	微細砂	2.00M	粒	2.15	2	1	1	1					
2						者子の質粗物混じ			2.44	3	1	1	1					
3									2.15	3	1	1	1					
2.30	0.50	1.80							3.45	4	1	1	1					
4									2.14	4	1	1	1					
5									4.44	13	1	1	1					
6									2.15	1	1	1	1					
0.50	0.70	2.20							2.15	1	1	1	1					
0.98	0.10	0.40							2.15	1	1	1	1					
7									2.15	1	1	1	1					
8									2.15	1	1	1	1					
9									2.15	1	1	1	1					
10									2.15	1	1	1	1					
11									2.15	1	1	1	1					
10.27	11.50	5.20							2.15	1	1	1	1					
12									2.15	1	1	1	1					
13									2.15	1	1	1	1					
14									2.15	1	1	1	1					
15									2.15	1	1	1	1					
16									2.15	1	1	1	1					
17									2.15	1	1	1	1					
18									2.15	1	1	1	1					
19									2.15	1	1	1	1					
20									2.15	1	1	1	1					

- No.22\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.23\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978-1979. (1981)
- No.24\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of *Microcystis* – 1978-1979. (1981)
- No.26\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of argal growth potential by algal assay procedure – 1978-1979. (1981)

\* in Japanese

## Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1966. (1977)
- No. 2\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1977. (1978)

[ Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to: ]

## Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5\* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977-1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
- No.14\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.15\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1979. (1980)
- No.16\* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- No.17\* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes – Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No.19\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and hydro-meteorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment – 1978-1979. (1981)
- No.21\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)

- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)  
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ) — 霞ヶ浦(西浦)の湖流 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅸ) — *Microcystis* (藍藻類) の増殖特性 — 昭和 53 / 54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X) — 藻類培養試験法による AGP の測定 — 昭和 53 / 54年度. (1981)



## 国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 — 霞ヶ浦を対象域として、(1977)  
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/52年度研究報告、(1978)

(改 称)

## 国立公害研究所研究報告

- 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae) (1978)  
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属 9 種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和52年度中間報告、(1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素 — 窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究 — 昭和51/52年度研究報告、(1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(II) — 霞ヶ浦を中心として、(1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)  
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和52/53年度研究報告、(1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和53年度中間報告、(1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/53年度特別研究報告、(1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)  
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)  
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)  
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.  
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.  
(多摩川に発生するユスリカの研究  
— 第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —  
— 第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53, 54年度特別研究報告、(1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和54年度特別研究報告、(1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測、(1980)
- 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果 — 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 昭和53/54年度 特別研究報告、(1980)