

5 7. 地下水研究 50 年史

ーコンピュータが雲の上の存在だった頃の地下水シミュレーションー

(その 3)

(4) アメリカ・ロングアイランド島の電気アナログモデル

a) 回想

筆者が初めて本格的な電気アナログモデルを目にしたのは昭和 51 年で、アメリカ・ニューヨーク州のロングアイランド (Long island) 島、ナッソー (Nassou) 郡のミネオラ (Mineola) 村 (写真 4) というところにある合衆国地質調査所(USGS)の分所 (写真 5) を訪ねたときのことである。それは今から 40 年も前の真冬の寒い日であった。

ロングアイランド島は図 27 のようにニューヨーク市に隣接していることもあって、第二次大戦後、そのベットタウンとして人口が急増し、経済活動もこれに伴って拡大した。筆者が訪ねた時はその歪みとでもいえる現象が水問題に集約されたかたちに現れ出した頃である。地下水の涸渇や汚染、更には大雨時の出水への対策などが大きな課題となっていた。

その頃はわが国でも地下水のモデル化、解析については少しずつは普及していて、筆者自身もアナログモデルに関して、若干は手掛けていたこともあって馴染みはあった。しかしそれは実践という面からは程遠いものだったので、ここで目にしたモデルの仕組みや規模は強烈な印象であった。

1960~1970 年代のロングアイランドでは各種のアナログモデル (Analog model) による洪水制御、廃

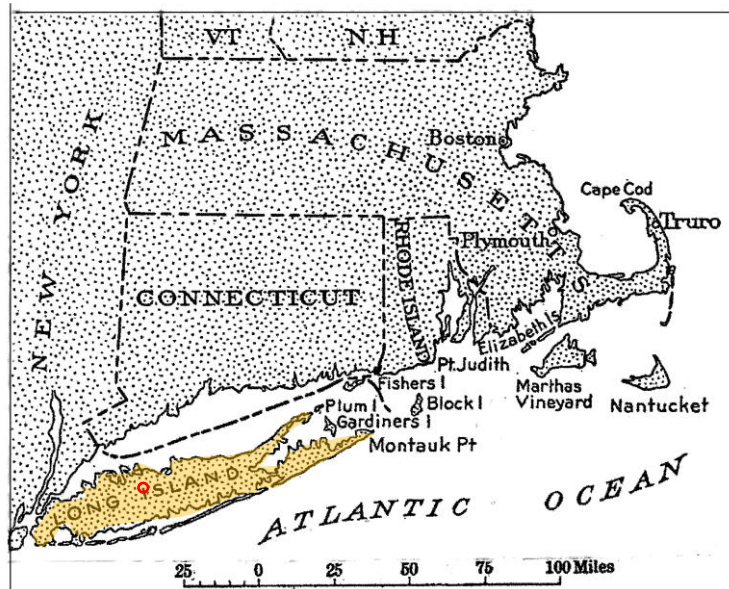


図 27 ロングアイランド島の位置
(赤丸は Mineola 村の位置)



写真 4 Mineola 村

水処理、人工涵養、井戸の性能評価などの解析といった実証的あるいは実践的な調査・研究が行われており、数多くの成果^{脚注 1)}が出されているが、これには上記のような水問題の緊迫性が後押ししているものと推察された。

対して我が国の地下水学は、元々そのような背景との繋がりが薄く、実際との乖離が目立ち、また地域特性に即した独自性に欠けているように思われる^{脚注 2)}。訪問先の研究所内では巨大な電気アナログ装置や廃水処理に関する多種のカラム実験装置を見学し、野外では人工涵養施設、雨水・廃水処理のプラント、またこの地域の主要な帯水層となっている氷河性堆積物を中心とした地質露頭の説明などをいただきながら、このようなことを考えていた。

b) ロングアイランド島の水文地質

ロングアイランド島北岸の海峡側の海岸地方には古生代の結晶質岩からなる基盤岩が露出しているが、その上面は南に向かって傾斜しており、大西洋に面した最深部では600m以深に達する(図28)。この上部を覆って上部白亜系および、それ以新の砂、礫、シルト、粘土からなる氷河性の未固結層が堆積し、ここに新鮮な地下水が存在する。最上部は図29

のようにモレーンおよびアウトウオッシュ堆積物が覆い、これが降水の受け皿になっている。

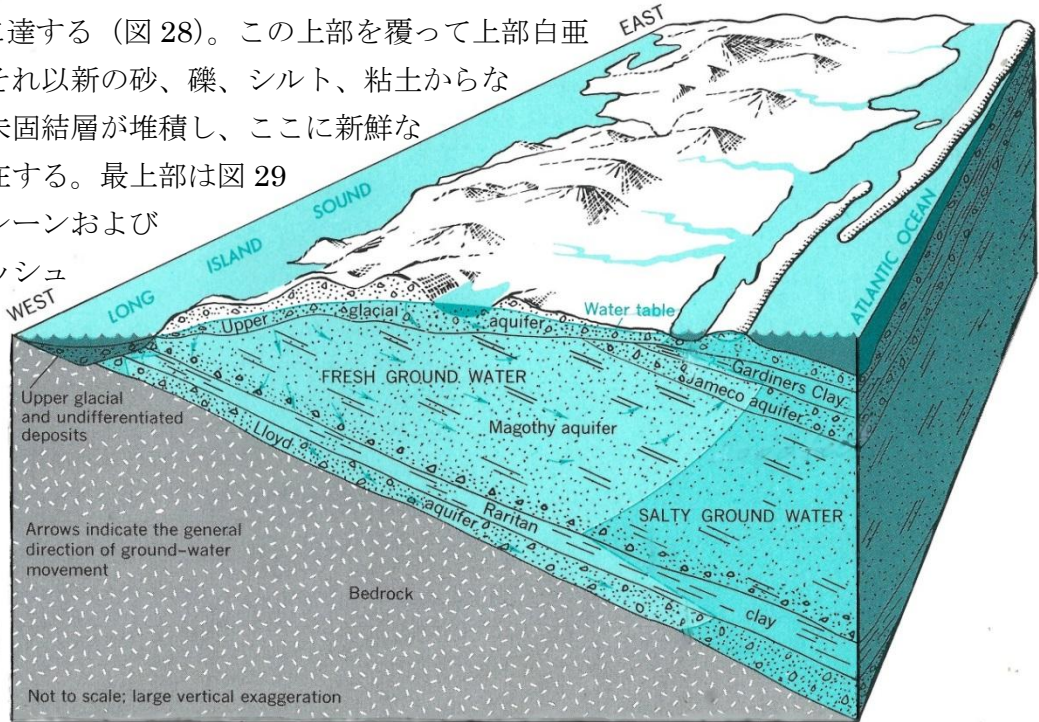
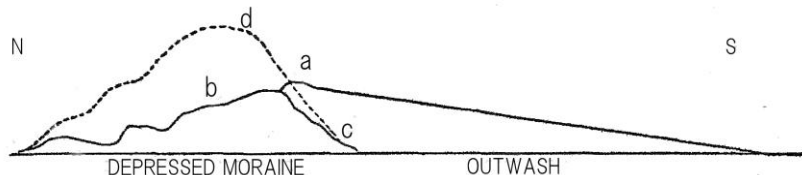


図28 ロングアイランド島を南北に切る地質断面と地下水貯留層⁽¹⁾
 [帯水層は4層準に発達しているが主要なものはMagothy aquiferである。最上位はモレーンおよびアウトウオッシュ堆積物が覆っている。また海岸部には塩水楔が入り込んでいる。]



a; head of outwash plain, b; exposed part of depressed moraine
 c; supposed buried part of depressed moraine d; normal profile of moraine

この模式図は図30の□の範囲にほぼ対応している

図29 ロングアイランド島の南北断面にみるモレーン及びアウトウオッシュ堆積物の関係⁽²⁾

脚注1: Bibliography of Cooperative Water-Resources Reports(1976) Prepared by the U.S. Geological Survey, New York District, Long Island Sub district—1967-1976. Supplement 5 June 1976.

脚注2: 地域性(=多様性)と普遍化(=モデル化)は相互補完の関係にあるが、我が国の地下水学の流れは前者が閉削にされる傾向がある、と考えるのは筆者だけであろうか?

以上のような地形と地質を反映して地下水分水界は図 30、写真 5 のように島の中央部から北に寄ったところに位置している。



図 30 ロングアイランド島の地形と地下水⁽¹⁾

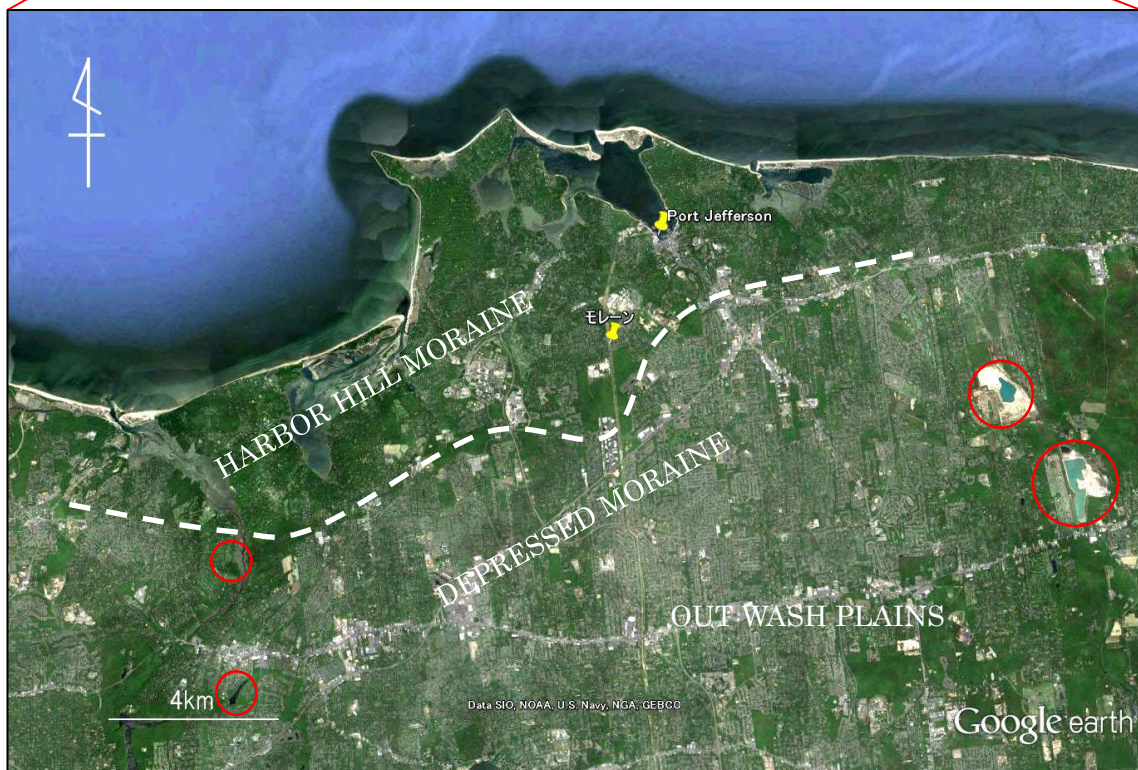


写真 5 ロングアイランド島中央部 Port Jefferson 付近の地形

興味ある現象として氷期の堆積物中に封じ込められていた氷が後氷期になって融けて地表の陥没を惹き起こし、写真 6 にあるような Kettle あるいはこれらが連結したかたちの Kettle chain、



写真 6 Kettle 地形

Kettle valley と呼ばれる地形を残していることがあげられる。写真 5 の各所にみる湖沼（○印）がそれである。また同じ写真にある Depressed moraine も同様のプロセスで形成されたものと考えられていて、共に地下水の存在と密接に関係している。なお参考までに氷河に関係した地質露頭を写真 7～9 に添えておく。

c) 地下水事情

筆者が訪問した 1970 年代はこの地域の人口が急増し、都市化が急ピッチで進んでいた頃で、その様子は図 31 によく示されている。このような流れを支えてきたのは地下水で、その量は地域全体の水需要量の殆ど 100%を占めているといってもよく、それは今日でも多分変わらないであろう^{脚注)}。

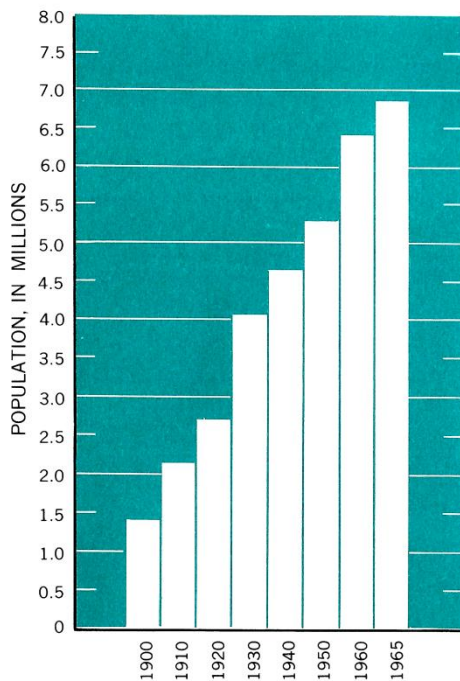


図 31 ロングアイランドの人口増加⁽¹⁾



写真 7 海蝕崖にみるアウトウォッシュ堆積物 (ロングアイランド島の東端 Montauk point)



写真 8 モレーン堆積物に見る巨礫 (Boulder)



写真 9 迷子石 (Erratic boulder)

脚注：およそ 300 万人の住民は 100%地下水に依存しているといつてよい。

なお USGS の資料(2000)によれば、都市化の著しい Nassau 郡と Suffolk 郡では 1 日約 140 万 m³の地下水が水道用水、工業用水、灌漑用水、家庭雑用水として利用されている。

主要帯水層は下位より上位へ、Lloyd Aquifer, Magothy Aquifer, Jameco Aquifer で、いずれも被圧性である。一方最上位層は最終氷期堆積物の Upper Glacial Aquifer が堆積していて、その地下水は不圧状態にある。これらの帯水層の中で最も開発が進んでいるのは Magothy Aquifer であるが、最深部の Lloyd Aquifer は水量、水質ともに優れているため、近年この層を対象とした将来に向けての帯水層管理計画^{脚注)}も企画されている。

一方、地下水にまつわる問題点も指摘されている。その最も危惧されているものは地下水の汚染問題である。その汚染源は多岐にまたがり、これまでに地域全体で数千か所におよぶ汚染源が見つかり、これに潜在的な危険個所を加えるとさらにそれ以上に達するであろうと言われている。人口が増加すればそれだけ汚染源が増加すると言っても良い。それらには工場の汚水溜めや汚水タンクからの漏えい、廃油また廃棄物、各家庭で使用する殺虫剤、投棄された生ごみなどがある。近年は揮発性有機化合物による汚染も問題になっている。

以上に加えて懸念されている問題は、地下水資源の涸渇である。Nassau County の例でいうと、個人消費量は 1979 年時の 470ℓ/day から 2020



FOREWORD	1	HOW MAN'S ACTIVITIES HAVE CHANGED THE NATURAL WATER SITUATION	20
INTRODUCTION	5	WATER-MANAGEMENT ALTERNATIVES	
THE LAND AND THE PEOPLE OF LONG ISLAND		"Safe yield"	22
Description of the land	6	Alternative choice of continuing with present methods of development	24
Population and land use	8	Alternative choice of developing barrier-injection wells:	26
DESCRIPTION OF THE NATURAL WATER SITUATION		Alternative choice of increasing artificial recharge through basins	28
Where the water comes from	10	Alternative choice of developing shallow skimming wells	30
Ground water	12	Alternative choice of allowing controlled salt-water intrusion	32
Streams	14	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	34
Dissolved substances in the water	16		
Quantity of fresh water on Long Island	18	GLOSSARY OF SELECTED TERMS	36

写真 10 ロングアイランド島の水問題、その現状と展望 (ニューヨーク州)

脚注：人工涵養による地下水の利用・保全対策を含むパイロットプランからスタートし、将来は 19 万 m³/day の人工涵養を含む、より規模の大きい計画に繋げようとするものである。

年時には 5130/day に増大するであろうといわれ、いずれは地下水利用量が涵養量を上回る事態は避けられず、また沿岸地域では海水浸入を許すかたちになる。

筆者が当地を訪ねた折に、これらの問題を冊子にまとめたものが用意されており、一般にも配布されていたようである。(写真 10)。この冊子にはロングアイランド地域の地下水環境が将来直面するであろう問題と、それへの取り組みを市民と行政が共に考え、実行するための手立てが提案されている。

すなわち地下水資源の量と質に関わる問題には、①将来に向けての利水の有りよう、②水系汚染の拡散防止、③水利用の合理化、があり、総じて質と量の安定を図るとしている。そしてそのための具体策として、①地下水涵養域の保全と人工涵養の推進、②水消費量の抑制、③節水技術の向上、が提言されている。これらはロングアイランド地域における水供給の安定化にとって重要な課題であり、これを市民と行政が共有すべきことを強調している。中でも人工涵養に関してははかかなり具体的な構想が紹介されており、注目された。図 32、33 にその一例を紹介しておく。

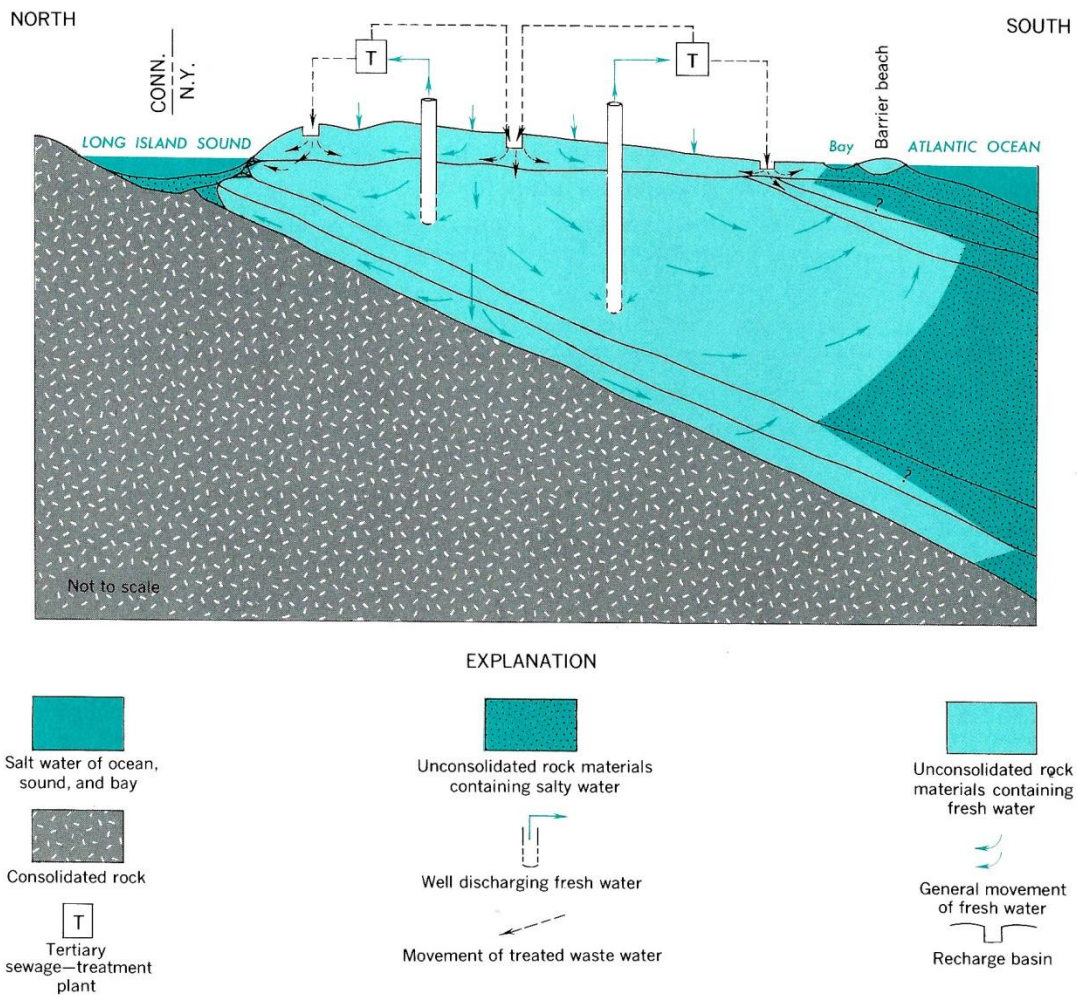


図 32 三次処理水を利用した人工涵養⁽¹⁾

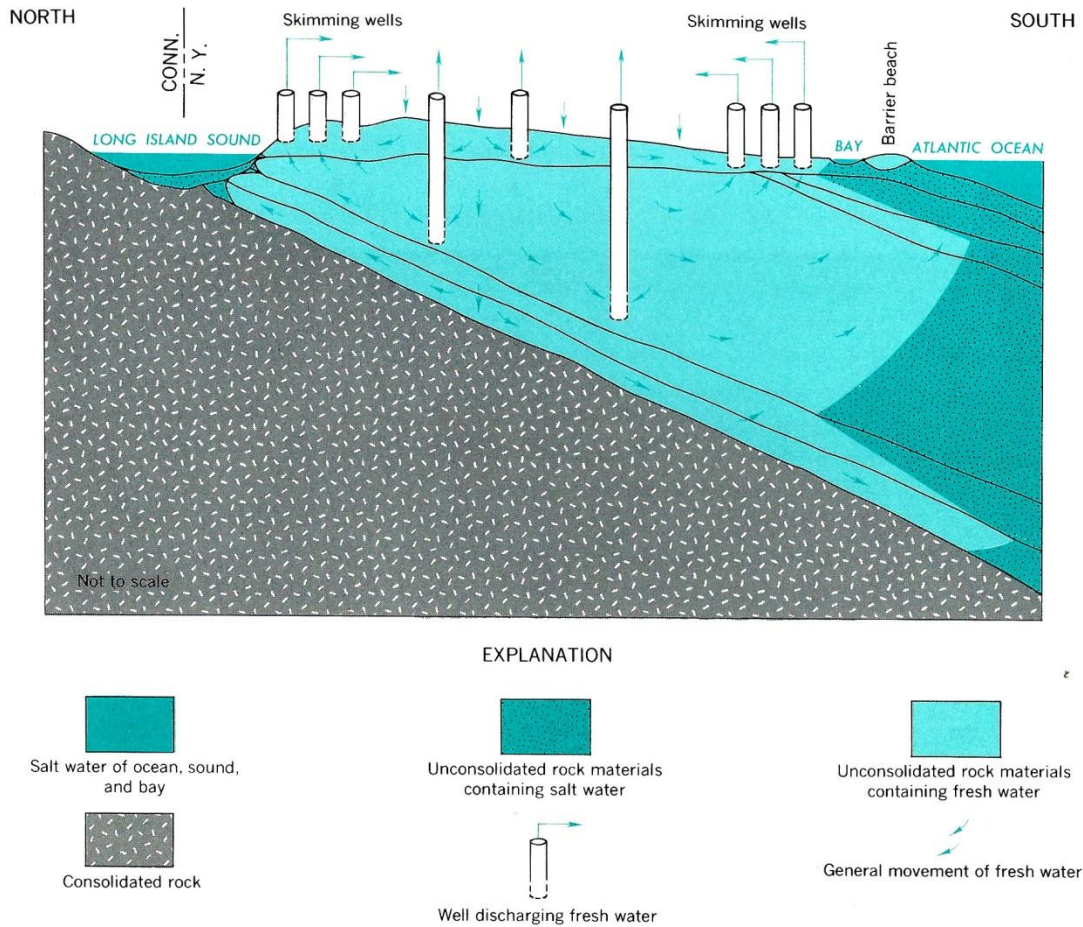


図 33 浅層地下水を“掻寄て”利用した人工涵養⁽¹⁾

筆者が視察した当時は図 32 のタイプによる涵養プラントはかなり普及しており、その多くは洪水処理を兼ねたものであった。その例を写真 11 に示す。これは地表から 5m ほど掘り込んだシンプルなものであるが、時々ブルトーザで沈殿した細粒土を掻き出して滲透機能を回春させていた。

この写真の表札にみるように、この場所は Nassau 郡で、パネルによると 123 号と言うことになるので、少なくともこの地区だけで同様の施設、すなわちベースン法による涵養施設が 123 箇所以上存

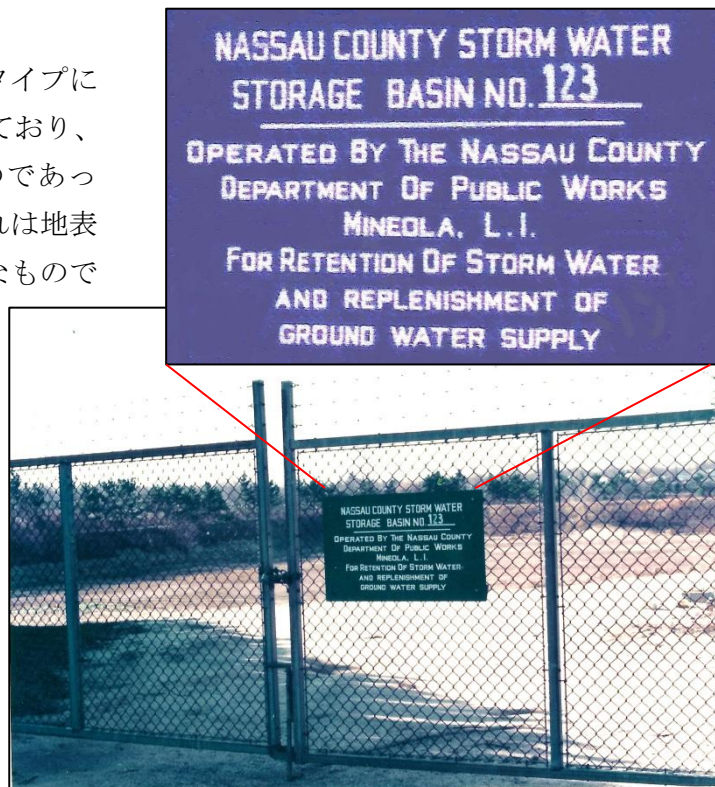


写真 11 豪雨時の出水を利用した涵養施設 (いわゆるベースン法, Nassau 郡)

在することになる。地下水涵養において、もっとも普遍的に行われているこの方法の幾つかの例を下に挙げておく。

図 34 は通常良く見られるタイプで、洪水を一旦沈砂池に導水し、上澄みを滲透地に導水するものである。また図 35 は浸透プラントに補助滲透域 (Auxiliary infiltrating area) を付加

したもので、濁質を混えた洪水は最初に Settling area に入り、ここで濁質が沈殿

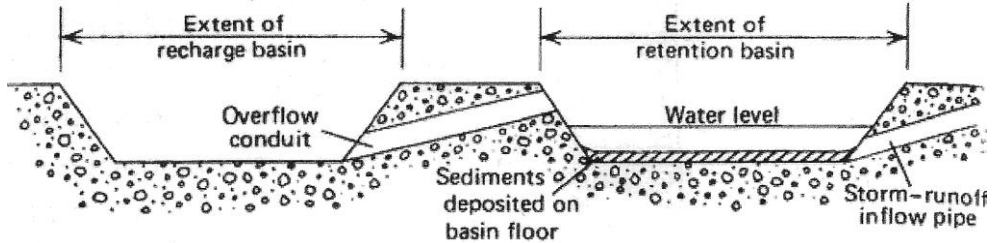


図 34 沈砂池を設けた滲透ベースン⁽³⁾

して水位が上昇する。上昇して濁りのとれた水は横に広がって Auxiliary infiltrating area から浸透するように工夫されている。以上の他により深部に注入させるために、図 36 のように、拡散用の井戸を敷設する場合もある。

多くの場合、表層部の地層は粗鬆質なアウトウォッシュ堆積物から成り、浸透性は元々大きいので涵養は効率よく行われるものと思われる (写真 12)。

なお滲透ベースンの俯瞰を写真 13 に添えておく。

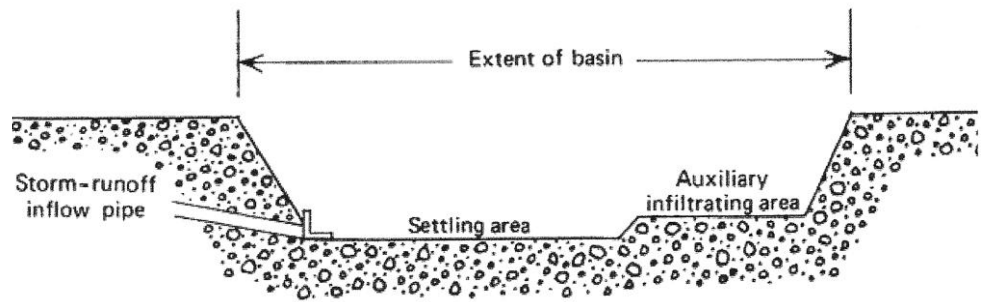


図 35 補助滲透域を備えた滲透ベースン⁽³⁾

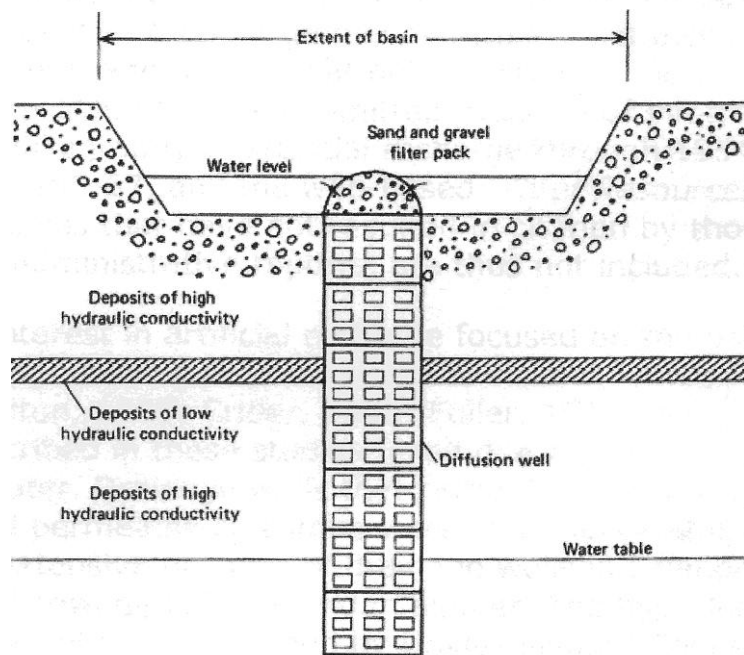


図 36 拡散用の井戸を備えた滲透ベースン⁽³⁾



写真 12 造成中の浸透ベースン
(Nassau 郡)



写真 13 浸透ベースンの俯瞰
(Nassau 郡)

d) アナログシミュレーション

ナッソー (Nassau) 郡のミネオラ (Mineola) 村にある合衆国地質調査所(USGS)の分所でみた電気アナログモデルは圧巻であった。写真 14, 15, 16 がそれであるが、人の背丈と比べて高さは優に 2m は越えているのが分かるであろう。

筆者が当所を訪ねた時のモデルはロングアイランド島の地下水の有限差分法によるデジタル解析法を検証し、同時にそれに用いられる水理定数を調整・固定する目的で行われてきたもので、ここにあるものはその最終的なゴールとも言えるものようであった。



写真 14 3次元アナログモデル

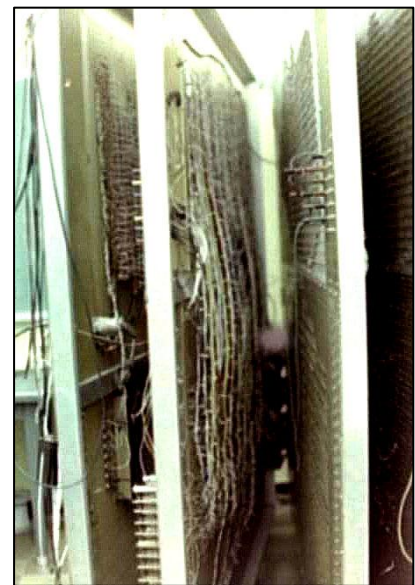


写真 15 同左近接

そのモデルの範囲は図 37 のようにロングアイランド島の全域におよび、これを東西 76、南北 29 に分割し、かつパネルの枚数は 5 枚、つまり地層は 5 層から成るものとしている (図 38, 図 39)。したがってノッドの総数は 11,020 ($76 \times 29 \times 5$) に達する膨大なものであった。

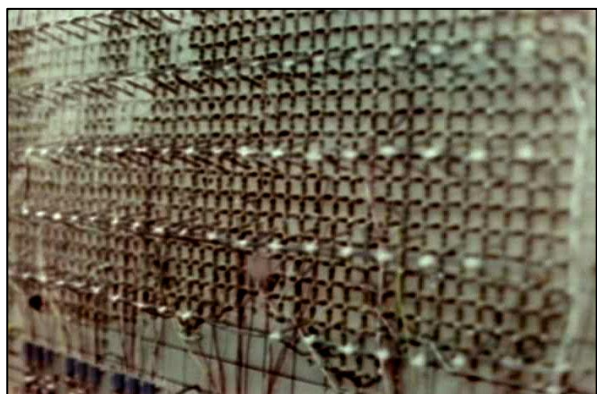
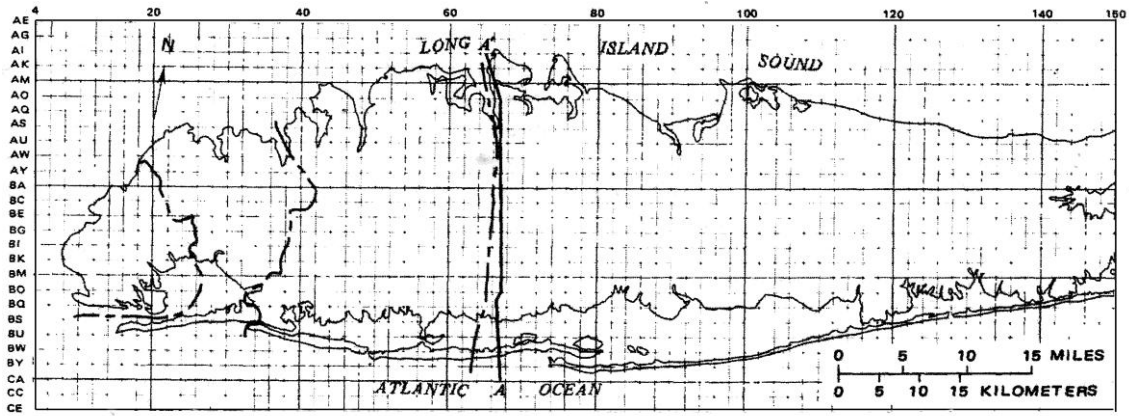


写真 16 resistor と capacitor から成るネットワーク

ここでアナログモデルの上部 2 層は氷河堆積物に対応し、その他の 3 層は Magothy aquifer に対応している (図 28 参照)。



Base from U.S. Geological Survey, 1:250,000 series:
Hartford, 1962; New York, 1957; Newark, 1947

図 37 ロングアイランド島の X-Y 面グリッド⁽⁴⁾

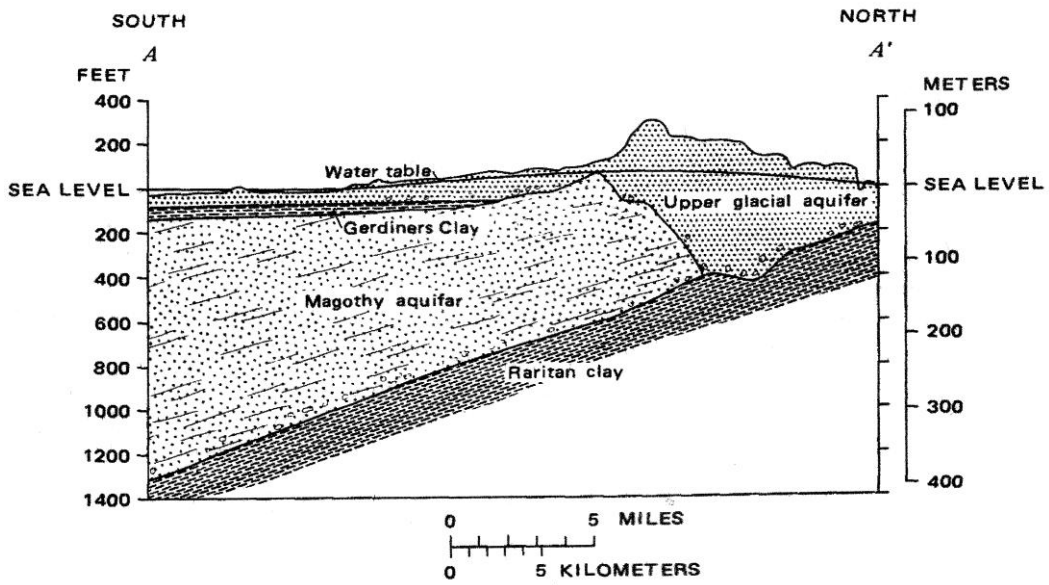


図 38 模式化したロングアイランド島の地質断面⁽⁴⁾

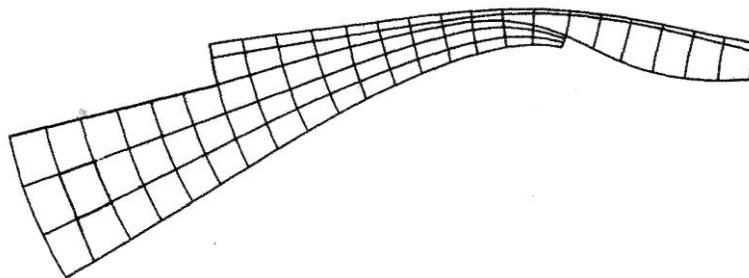


図 39 ロングアイランド島の代表的な Y-Z 面グリッド⁽⁴⁾

有限差分法に基づくデジタルモデルとアナログモデルによる、ロングアイランド島の地下水について 2 例ほど引用しておく。図 40 は都市化以前の Magothy aquifer の被圧地下水面の復元図、また図 41 はロングアイランド島の 4 地区で仮想的に $1.25\text{m}^3/\text{sec}$ の揚水を 20 年間続けた場合の、同じく Magothy aquifer の地下水面である。いずれも両者は殆ど一致し、解析の妥当性が検証されているといえる。

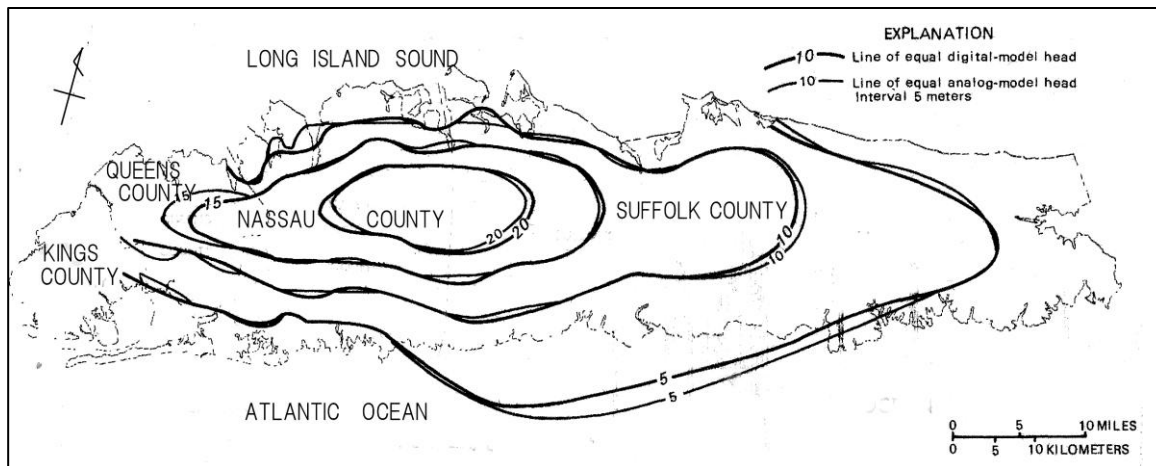


図 40 analog-model と digital-model によって復元された都市化前の地下水面の比較⁽⁴⁾
(対象は magothy aquifer)

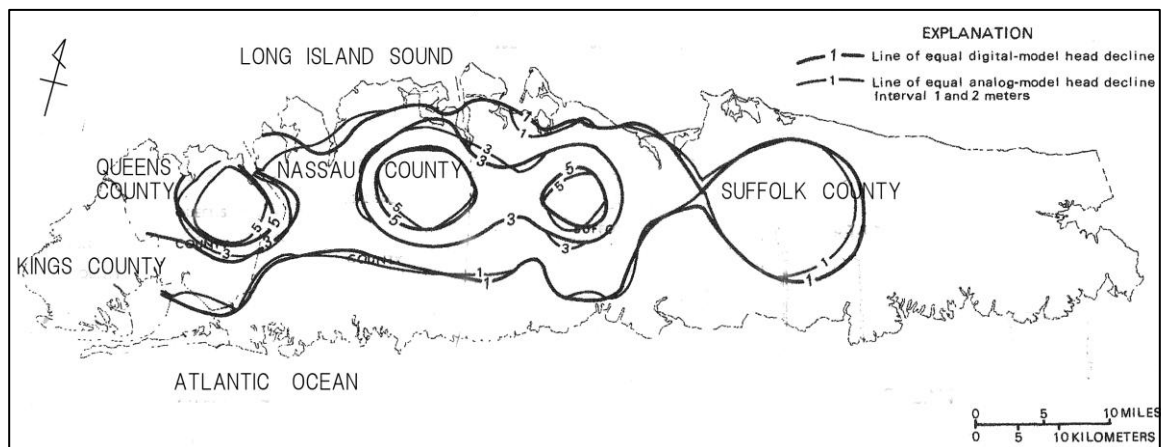


図 41 analog-model と digital-model によって予測された 20 年後の地下水面の比較⁽⁴⁾
(対象は magothy aquifer)

(5) 南関東地方の電気アナログモデル

a) 回想

筆者が手作りアナログモデルの製作に挑戦したのは昭和 47 年ごろで、前段に紹介したロングアイランド行きの前のことである。今から 40 年以上も昔のこと、幸い当時勤務していた東洋大学工学部土木工学科に隣接していた電気工学科に友人がいたので、オシロスコープ以外の装置はすべてその助言によって仕上げる事が出来た。

グリッドの数は南関東地方を東西 28、南北 24 に分けた 672 区画になり、膨大な数の

抵抗とコンデンサを要した。材料はすべて秋葉原の電気街で仕入れ、加工はすべて勤務が終わった夜間におこなった。

この装置は教材に活用するとともに、当時南関東地域地盤沈下調査会から筆者に与えられていた課題の一つ、すなわち観測井の適正配置に関する検討、井戸群の地域間干渉、水理定数の適正值の検討等に活用した。なおその詳細は南関東地域地盤沈下調査総合報告書(1974年12月)に報告するとともに地学雑誌 Vol.85, No.2 (1976)に掲載した。

ところで地下水モデルには図42のように多種のものが知られているが、電気アナログモデルは前項でも触れたように数理モデルの補完として利用されることが多い。いわゆるハイブリッド方式である。余談であるが筆者も当初これを目標にしていたが、筑波大学に転出したため、未着手のまま終わった。

電気アナログ装置は図43のように波形発生装置、パルス発生装置、モニター、R-C回路からなる。図でWellは揚水井、Probeは観測点である。なお図のR-C回路は一層だけで、この場合は2次元モデルということになる。

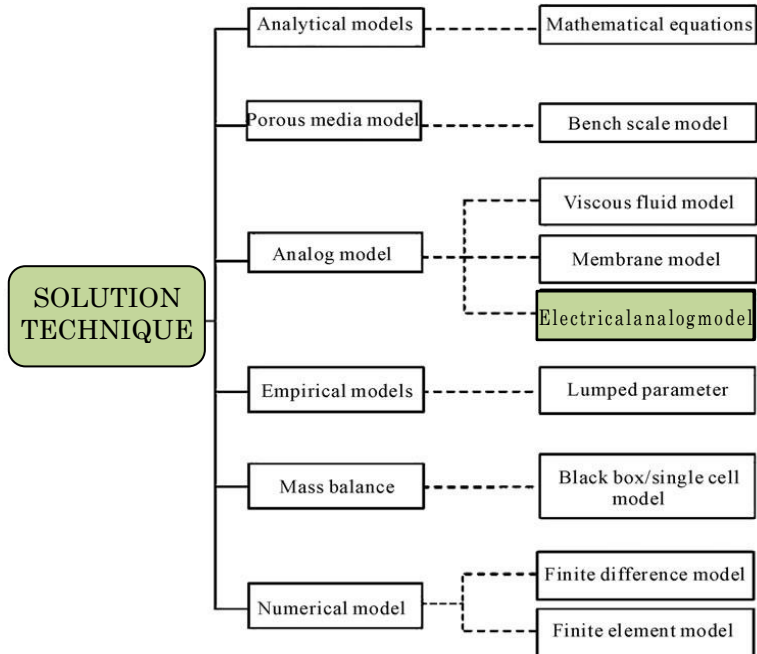


図42 地下水モデルのタイプ⁽⁵⁾

出典: Sarva Mangala PRAVEENA et al.(2010)
Groundwater Solution Techniques: Environmental Applications, J. Water Resource and Protection.

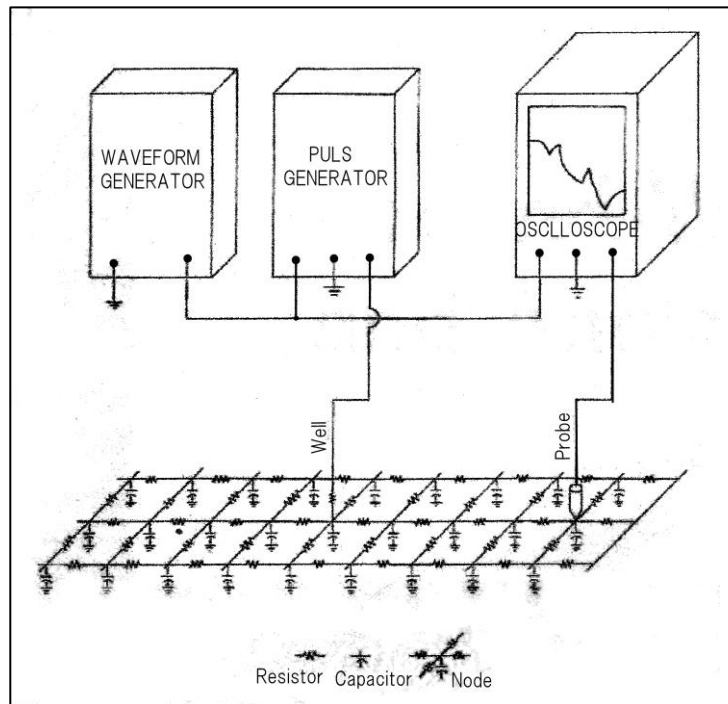
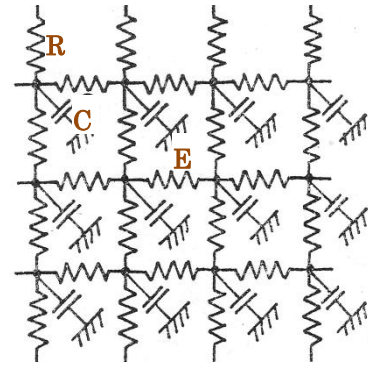


図43 2次元電気アナログ装置

b) 電気アナログモデルの効用と原理

この方法は、①複雑な境界条件でも面倒な数学的な手続きを要しない。②インプットに対する応答速度が速いので結果を見ながらその場で揚水量、井戸間隔などの諸条件を修正、或いは設定し直すことが出来る。③製作に要する費用が少なく、特段の専門的知識も要しない。また R,C 素子（抵抗、コンデンサー）を自由に取り換えられるようにしておけば、一つの装置で色々な地域の問題に適用することが出来る、といった利点がある（次々ページ写真 17~22 参照）。



R ; 抵抗
C ; コンデンサ
E ; アース

図 44 R-C 回路網

さて図 44 に示した R-C 回路網においてはキルヒホッフの法則から(1)式が成り立つ。

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} + \frac{V_4 - V_0}{R_4} = C \frac{\partial V_0}{\partial t} \quad \text{----- (1)}$$

ここに R₁~R₄; 電気抵抗
C ; 電気容量
V₁~V₄; 周辺ノットの電位
V₀; 対象ノットの電位

抵抗値が等しければ

$$\frac{1}{R} \sum_{i=1}^4 (V_i - 4V_0) = C \frac{\partial V_0}{\partial t} \quad \text{----- (2)}$$

(2) 式は Jacob(1950)が示した二次元非定常流の式を差分近似した式

$$T \cdot \sum_{i=1}^4 (h_i - 4h_0) = a^2 S \frac{\partial h_0}{\partial t} \quad \text{----- (3)}$$

ここで q ; 周辺ノットの水位
D ; 対象ノットの水位
a ; グリッドの一辺の長さ
S ; 貯留係数
T ; 透水量係数

と対応し、アナロジーが成立する。ここで両者の関係を一対一に対応させるためには、次の式によるスケールファクターを決める必要がある。

$$\left. \begin{array}{l} K_1 = \frac{q}{D} \\ K_2 = \frac{h}{V} \\ K_3 = \frac{Q}{I} \\ K_4 = \frac{td}{ts} \end{array} \right\} \begin{array}{l} q ; \text{電荷量} \quad \text{クーロン} \\ D ; \text{水量} \quad \text{m}^3 \\ h ; \text{水位} \quad \text{m} \\ V ; \text{電位} \quad \text{ボルト} \\ Q ; \text{流量} \quad \text{m}^3/\text{day} \\ I ; \text{電流} \quad \text{アンペア} \\ td ; \text{揚水時間} \\ ts ; \text{パルス幅} \end{array} \quad \text{----- (4)}$$

一方モデルに用いる抵抗値は $R = \frac{K_3}{K^2 T}$ (オーム) -----(5)

コンデンサーの値は $C = a^2 S \frac{K_2}{K_1}$ (ファラッド) -----(6)

から求められる。

揚水率はパルス発生器とモデルの間に既知の抵抗を挿入し、その時の電位降下量を測り、オームの法則から、

$$Q = K_3 \frac{V}{R} \text{ -----(7)}$$

によって求めることが出来る。

c) 南関東地域への適用

この例で用いたスケールファクターを参考までに示せば以下のようなものである。

① $K_2=1$ 電位 1 ボルト 水位 1m

② $K_3=2 \times 10^7$

抵抗	透水量係数
10kΩ	2,000m ³ /day
20kΩ	1,000m ³ /day
40kΩ	500m ³ /day
⋮	⋮
200kΩ	100m ³ /day

③ $K_4=3.65 \times 10^7$

パルス幅	揚水日数
10 μ sec	365 日

④ $K_1=K_3 \times K_4 = 7.3 \times 10^{14}$

一辺 2,000m として

$$C = 0.55 \times S \times 10^{-8}$$

電気容量	貯留係数
1,500pf	0.27
1,000pf	0.18
500pf	0.09

電気アナログ装置

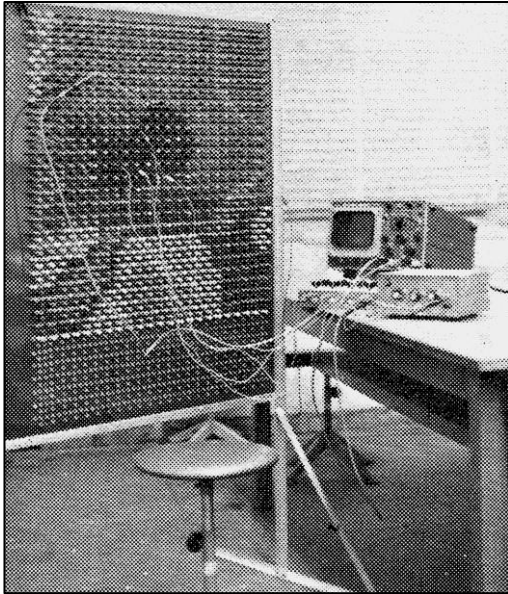


写真 17 手作り電気アナログ装置
(パネルは南関東地下水盆)

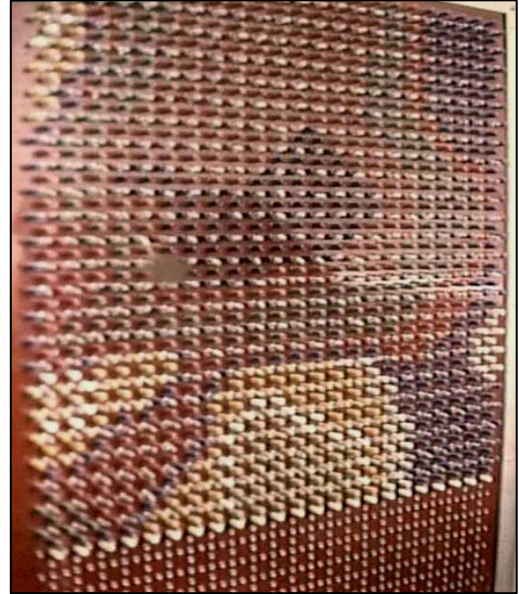


写真 18 同左拡大
(透水量係数によって電気抵抗の色を変えてある)



写真 19 R, C 素子
(左 2 つはコンデンサ、右 3 つは電気抵抗)

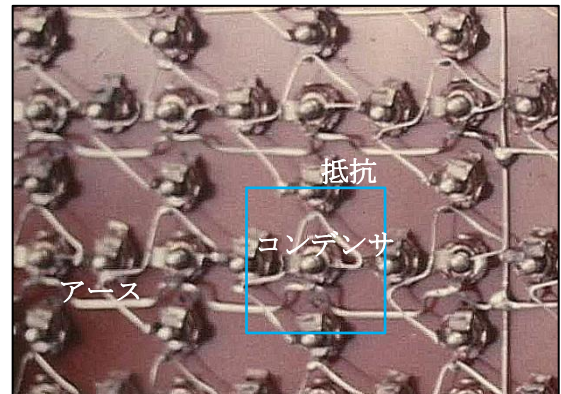


写真 20 パネルの裏面
(□は 1 ノッド、中心はコンデンサ、周辺は電気抵抗)



写真 21 R, C 素子
(抵抗値によって色を変えてある)



写真 22 オシロスコープ
(画面は水位低下曲線)

d) 解析例

i. 地下水位変動の監視

南関東地方には当時、図 45 に示した位置に地盤沈下観測井が設置されており、地下水位の連続観測が行われていた。地下水のモニタリングを詳細に行うためには、まず現状の観測井の配置のもとで、地下水の揚水による水位変動の動向をどれくらいの精度でキャッチできるかを検討しなければならない。図 45 には現状の揚水量に加えて、1 グリッド (4×10⁶m²) 当たり、1 日 5,000m³ の揚水が新たに加わったとした場合、この影響を上記の観測井群が年間水位低下量 10 cm の精度でキャッチできる範囲が示されている。この図から埼玉県北部、中央部、西部、千葉県北部、東京都西部では、現状の観測井群では地下水位の状況をキャッチできない空白地帯の状況がわかる。また図 46 では 1 グリッド当たり 1 日 3,000m³ とした場合であるが、この場合は図 46 のように観測可能な範囲はさらに縮小することが示される。以上を踏まえて報告書では観測井の配置の見直し、また追加を提案した。

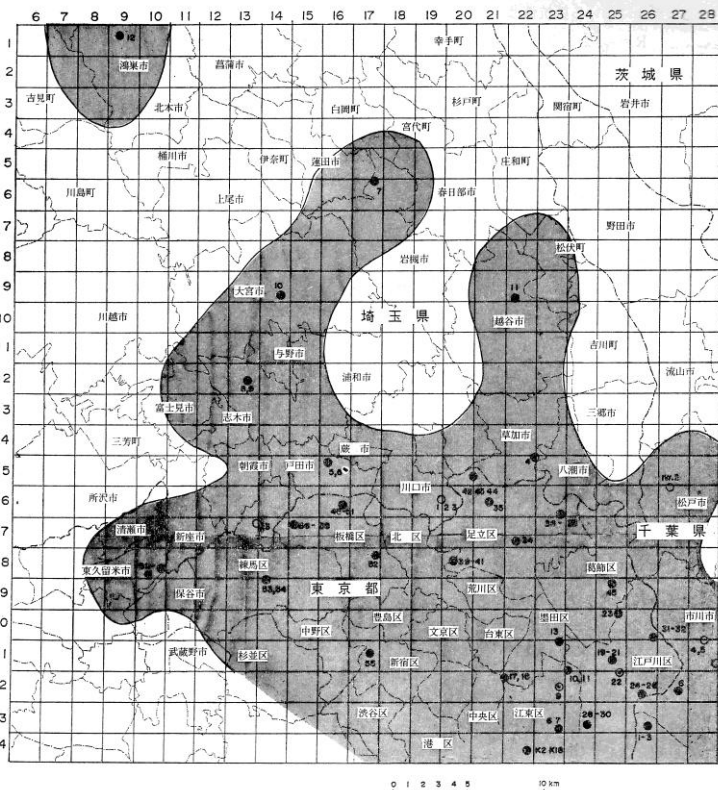


図 45 新規揚水 5,000m³/d の影響を水位低下 10 cm/y の精度で把握し得る範囲⁽⁶⁾

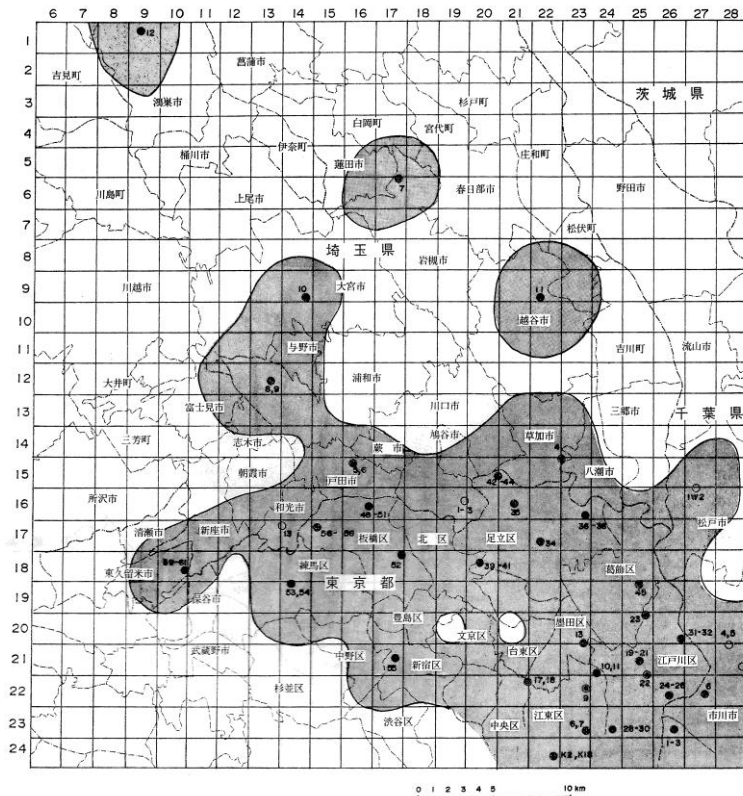


図 46 新規揚水 3,000m³/d の影響を水位低下 10 cm/y の精度で把握し得る範囲⁽⁶⁾

ii. 地下水利用に伴う相互干渉

地下水利用による水位低下がどの範囲にどの程度の大きさで及ぶか、また同時に他地域での揚水の影響とどのように干渉し合うか、さらにはその干渉の大きさをある程度以下にとどめるためには、揚水量を如何にコントロールすればよいか、などの問題は地下水くみ上げを適正值に近づけてゆく過程での段階的な措置として必要と考えられる。このような問題では、揚水量の削減量とその地区別の組み合わせが多岐にわたるため競合の度合いを下げるための揚水量の分配は試行的に検討された上で決定されることになろう。この場合、結果の精度を上げるためには数値計算に依らねばならないが、数多くの事例を素早く処理し、さらにその結果を見て計画を修正してゆくというような場合にはアナログモデルの方が有効である。

図 47 に結果の一例を示す。これは昭和 45 年時の地下水くみ上げの影響が年間 1m の水位低下としてあらわれる範囲を示したものである。なお揚水量は 1 日当りの揚水量として図中に示し、また地域区分は以下に依った。

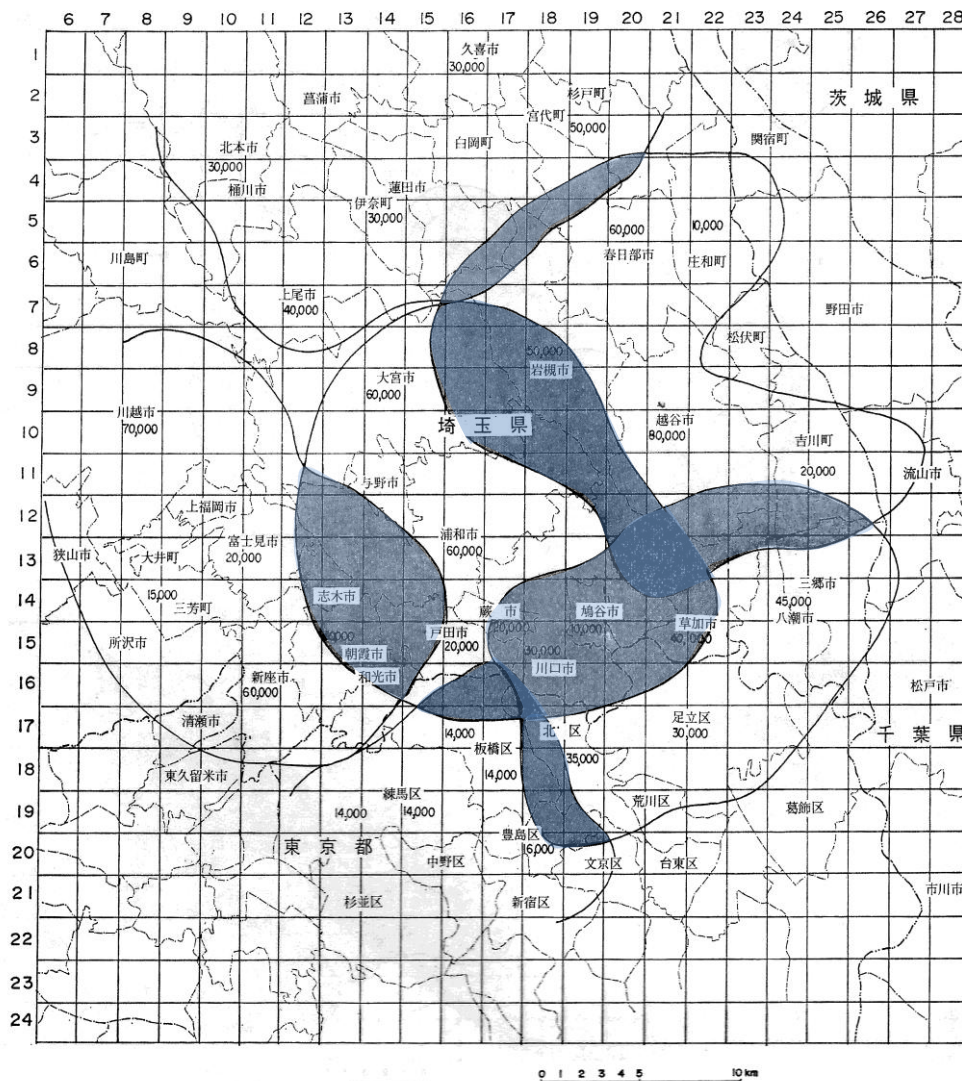


図 47 揚水による水位低下が年 1m 以上に達する地域⁽⁶⁾
(図中の数値は 1 日当りの揚水量)

- 埼玉県南部地区① 大宮、川口、浦和、戸田
- 埼玉県南部地区②および東京都北部①
草加、八潮、三郷、鳩ヶ谷、足立、北
- 埼玉県西部地区 川越、富士見、福岡、三芳、大井、志木、朝霞、和光、新座
- 埼玉県北部地区 北本、桶川、上尾、蓮田、伊奈、久喜、杉戸、宮代
- 埼玉県東部地区 庄和、春日部、岩槻、越谷、吉川
- 東京都北部地区② 板橋、練馬、豊島

次いで図 48 には図中に示したように揚水量を削減した場合に予測される干渉域の縮小の様子が示されている。このような図をもとに干渉域の縮小に必要な揚水量の低減策が講じられることになる。

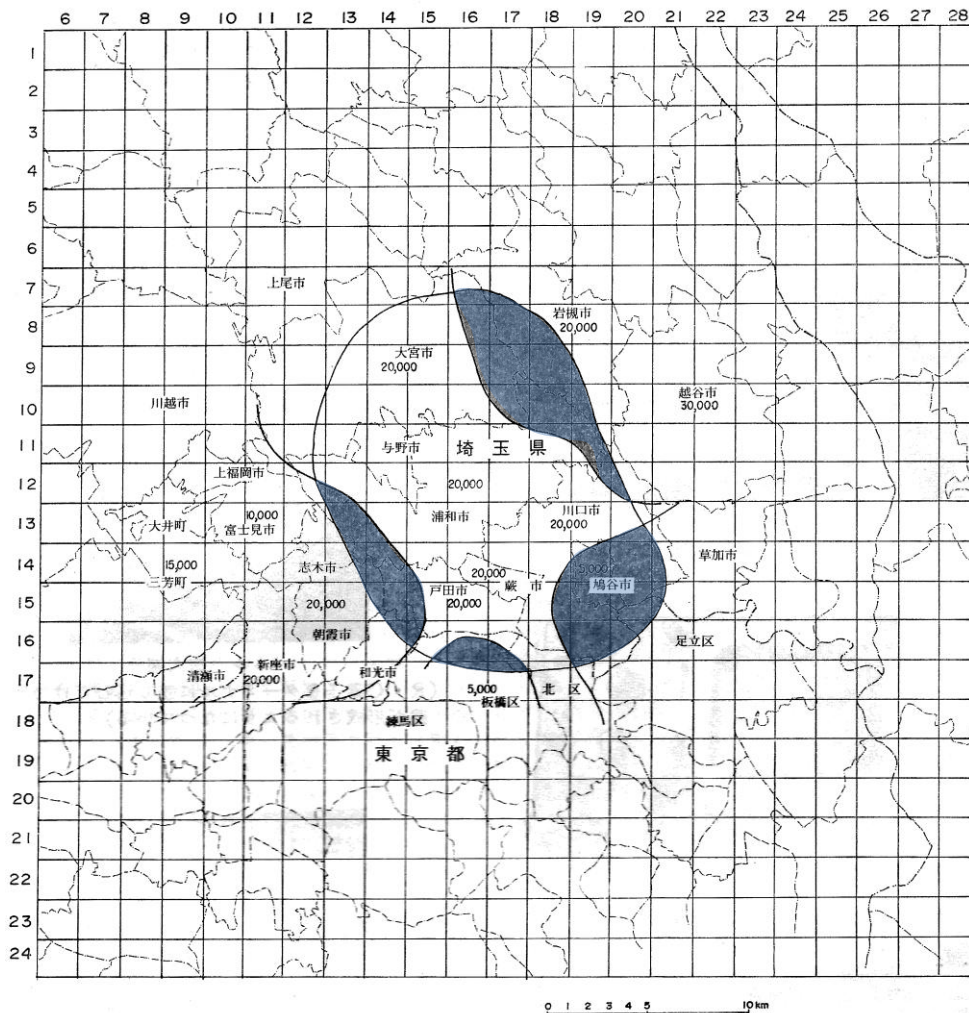


図 48 揚水による水位低下が年 1m 以上に達する地域 (揚水量削減) (6)
(図中の数値は 1 日当りの揚水量)

参考資料

- 1) N.Y. State Department of Environmental Conservation.,1970, Water for the future of Long Island, New York.
- 2) United States Geological Survey.,1914, Geology of Long Island.
- 3) Aronson,D.A., and Seaburn,G.E.,1974, Appraisal of operating efficiency of recharge basins on Long Island, New York in 1969 U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2001-D.
- 4) Thomas E. Reilly and Arlen W. Harbaugh ., 1980, A comparison of analog and digital modeling techniques for simulating three-dimesional ground-water flow on Long Island, New York.
- 5) S.M.Praveena et al. .,2010, Groundwater solution techniques :Environmental Applications, J. Water resource and protection.
- 6) 新藤 静夫 .,1976, 南関東地域の地下水利用と地盤沈下, 地学雑誌 Vol.85,No.2(812).