

低水量管理に関する諸問題

北海道大学工学部 岸 力

1. 水需給の動向

わが国の水需給の見通しを表一1および表一2に示す。この表にみられる通り、水の供給不足は今後数年間に最も甚しくあらわれ、昭和56年には全国ほとんどの地域で水不足が発生する。この状態は昭和60年になっても解消せず、関東、近畿、九州では水不足が続くと予想される。昭和45～50年の開発水量（建設省関係分）は32.8億トン／年であるから、表一2に示した昭和60年までの開発水量180億トン／年を実現することも決して容易ではないであろう。したがって、新規の水資源開発とならんで、河川の低水量管理がますます重要になって来るに違いない。

表一1 昭和56年における水需給見通し

（建設省資料による）

地 域 名	S 51～56 河川水必要量*			ダ ム 開 発			河 川 自 流			過 ・ 不 足 量			不 足 率	
	都 市	農 業	計	都 市	農 業	計	都 市	農 水	計	都 市	農 業	計	総 合	都 市
北 海 道	4 7	2 2	6 9	0 53	0.08	0.61	2 0	1 0	3 0	△ 2 17	△ 1.12	△ 3 29	△ 4 2 %	△ 10 00 %
東 北	7 3	4 7	12 0	2 23	0 78	3.01	0	0.5	0 5	△ 5 07	△ 3.42	△ 8 49	△ 5 0	△ 15 04
関 東	内 陸													
	臨 海													
	計	41 2	5 8	47.0	18. 53	0 93	19 46	—	—	—	△ 22 67	△ 4 87	△ 27 54	△ 14 3 △ 21 88
北 陸	5 0	0 1	5 1	2 71	0	2.71	0 5	0 1	0 6	△ 1 79	0	△ 1 79	△ 3 9	△ 10.46
東 海	20.4	2 4	22 8	12. 60	0 32	12 92	0.6	2 6	3 2	△ 7.20	0 52	△ 6 68	△ 5.6	△ 10.46
近 畿	内 陸													
	臨 海													
	計	2.1	1 2	23 3	4. 81	0	4 81	0	0.3	0.3	△ 17 29	△ 0 90	△ 18 19	△ 16 1 △ 25.76
中 国	山 陰													
	山 陽													
	計	6 1	0 2	6 3	3 61	—	3 61	—	—	—	△ 2 49	△ 0 2	△ 2.69	△ 3.4 △ 8.35
四 国	△ 0.4	0.9	0 5	0 87	0.41	1.28	—	—	—	1 27	△ 0 49	0.78	△ 1 8	6 79
九 州	北九州													
	南九州													
	計	11 9	3.9	15 8	3 10	0 24	3 34	—	—	—	△ 8.80	△ 3 66	△ 12 46	△ 10.8 △ 25.96
沖 縄	(0.5)	(0.1)	(0 6)	(0 33)	(0 20)	(0 53)	—	—	—	△ 0 17	0 1	△ 0 07	△ 2.9	△ 8.50
合 計	118.3 (118.8)	21.4 (21.5)	139 7 (140.3)	48.89 (49 32)	2.76 (2.96)	51.75 (52 28)	3.1 (3.1)	4 5 (4.5)	7.6 (7 6)	△ 66 38	△ 14.04	△ 80 42	△ 8.35	△ 16.74

* 利水者単独による開発分を除く
数字は億トン／年

表－２ 昭和 60 年における水需給見通し

(建設省資料による)

地 域 名	S 51～60 河川水必要量*			ダ ム 開 発			河 川 自 流			過 ・ 不 足 量			不 足 率		
	都 市	農 業	計	都 市	農 業	計	都 市	農 業	計	都 市	農 業	計	総 合	都 市	農 業
北 海 道	7 8	3 6	11 4	5 39	0 46	5 85	2 5	3 5	3 5	0 09	0 36	0 45	0 53	0 35	1 70
東 北	11 9	7 9	19 8	13 45	4 25	17 70	—	3 0	3 0	1 55	△0 65	0 90	0 50	4 04	△0 46
関 東	内 陸														
	臨 海														
	計	53 7	9 7	63 4	52 49	6 93	59 42	—	—	—	△1 21	△2 77	△3 98	△1 95	△1 09
北 陸	7 6	0 2	7 8	6 20	—	6 20	1 5	0 3	1 8	0 10	0 10	0 20	0 41	0 51	0 34
東 海	31 2	4 0	35 2	30 74	0 75	31 49	0 6	3 3	3 9	0 14	0 05	0 19	0 14	0 18	0 09
近 畿	内 陸														
	臨 海														
	計	29 2	2 0	31 2	22 8	—	22 81	—	0 5	0 5	△6 39	△1 50	7 89	△6 60	8 74
中 国	山 陰														
	山 陽														
	計	9 2	0 4	9 6	9 76	—	9 76	—	—	—	0 56	△0 40	0 16	0 19	1 70
四 国	△0 9	1 4	0 5	1 78	0 41	2 19	—	—	—	2 68	△0 99	1 69	3 87	15 58	△3 75
九 州	北九州														
	南九州														
	計	19 6	6 5	25 1	6 39	2 99	9 38	—	—	—	13 21	△3 51	16 72	△2 84	31 75
沖 縄	(0 9)	(0 1)	(1 0)	(0 59)	(0 20)	(0 79)	—	—	—	(△0 31)	△0 10	(△0 21)	(△7 50)	(△12 92)	25 00
合 計	169 3 (170 2)	35 7 (35 8)	205 0 (206 0)	149 01 (149 60)	15 79 (15 99)	164 80 (165 59)	4 6 (4 6)	10 6 (10 6)	15 2 (15 2)	△15 69 (△16 00)	△9 31 (△9 21)	25 00 (△25 21)	△2 45 (△2 46)	△3 61 (△3 66)	△1 59 (△1 57)

* 利水者単独による開発分を除く
数字は億トン／年

現在でも水の需給ギャップは存在する。暫定取水（豊水水利権）という形で供給の不足分が埋められている。表－３に暫定取水の現状を示す。関東、近畿など水が窮迫している地域では現在でも河川水必要量のうち約20％が暫定取水に依存していて、これらの地域の水需給は既に不安定な状態にあるといえる。特に上水道用水が暫定取水に依存する割合が大きく、関東、近畿、東海の3地域ではその割合が30～40％にも達している点が注目される。

表－3 暫定取水の現況

(建設省資料による)

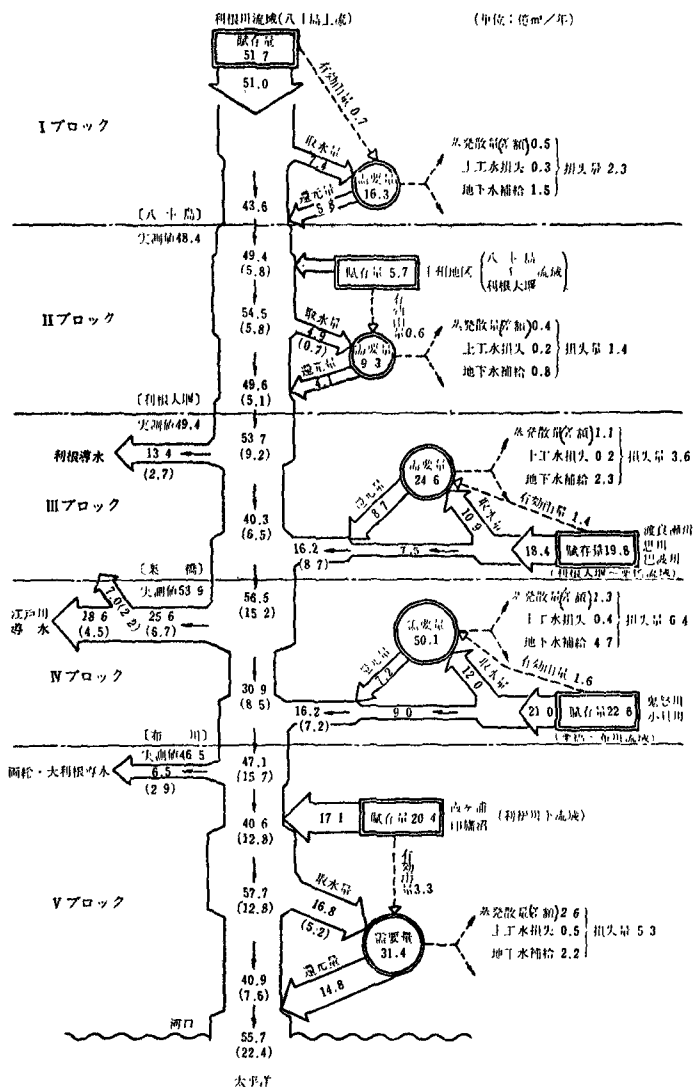
地 域 名	S 50 河川水必要量				④ S 45 暫定取水				⑤ S 50 暫定取水				⑥=⑤-④ S 46-50新規暫定取水			
	上 水	工 水	農 水	計	上 水	工 水	農 水	計	上 水	工 水	農 水	計	上 水	工 水	農 水	計
北 海 道	5.7	9.1	50.9	65.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
東 北	8.2	12.3	99.0	119.5	0.1	0	0	0.1	0.3	0	0	0.3	0.2	0	0	0.2
関 東	内 陸				0.4	0.4	0	0.8								
	臨 海				3.8	0.1	0	3.9								
	計	43.5	24.4	63.5	131.4	4.2	0.5	4.7	16.3	6.1	0	22.4	12.1	5.6	0	17.7
北 陸	1.5	4.1	21.7	27.3	0	0	0	0	0.3	0.7	0	1.0	0.3	0.7	0	1.0
東 海	11.9	16.6	37.1	65.6	1.2	0	0	1.2	3.9	0.4	0	4.3	2.7	0.4	0	3.1
近 畿	内 陸				0.1	0	0	0.1								
	臨 海				3.4	2.4	0	5.8								
	計	23.1	21.5	34.1	78.7	3.5	2.4	5.9	7.3	4.1	0.1	11.5	3.8	1.7	0.1	5.6
中 国	山 陰				0	0	0	0								
	山 陽				0.1	0.4	0	0.5								
	計	7.2	15.6	37.1	59.9	0.1	0.4	0.5	0.9	0.6	0	1.5	0.8	0.2	0	1.0
四 国	3.8	12.9	19.3	36.0	0	0.4	0	0.4	0	0.4	0	0.4	0	0	0	0
九 州	北九州				0	0	0	0								
	南九州				0	0	0	0								
	計	5.8	11.1	54.2	71.1	0	0	0	0	0.3	0	0.3	0	0	0	0.3
沖 縄	(0.9)	(0.3)	(0.2)	(1.4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合 計	110.7 (111.6)	127.6 (127.9)	416.9 (417.1)	655.2 (656.6)	9.1	3.7	0	12.8	29.0	12.6	0.1	41.7	19.9	8.9	0.1	28.9

数字は億トン／年

2. 河川流域における水収支

2.1 利根川流域の水収支

国土庁水資源局ではわが国の「水資源賦存量と水利用」に関する調査結果を報告している（人と国土，1976－11）。その中で利根川流域全域にわたる水収支を調べ極めて示唆に富む結論を示している。図－1は昭和45年における水収支である。図によると，利根川流域の総賦存量は120.2億トン／年で，流域内および流域外を含めた総使用量は86.5億トン／年であるが，このうち還元水を除いた自然水の使用量は72.8億トン／年であり，利根川の水資源使用率は61％であることがわかる。自然水の未使用分が47.4億トン／年（本流：33.3億トン／年，江戸川：14.1億トン／年）あるが，これから両河川の維持用水を差引いた残りが将来の開発可能量である。栗橋地点の維持流量は59 m³/s（藤吉，利根川における水利上の諸問題，S・46）であるが，この値が将来も保もたれるとすれば維持用水は約20億トン／年に達する。

(単位: 億 m^3 /年)

- 注 1. 需要量は第2次全国水需要量調査(国土庁)による。
 2. 江戸川流域は域外導水として扱う。
 3. () 内は取水量及び河川水に含まれる還元水量(内書)である。
 4. 実測値は流量年表(建設省河川局)による。

図-1 利根川流域の水収支(国土庁水資源局)

2.2 農地の水収支

水需給の窮迫とともに農業用水の利用合理化が求められている。これに対し、農業用水のうち純消費は蒸発散量で残りは結局河川に還元されているから、農業が水を浪費しているわけではないとの反論もある。筆者も一部分この意見に賛成である。例えば図-1の水収支計算においても、期間を1年間で考え、また各ブロックの流域面積を十分広くとっているから、取水量の大部分は還元水量として河川に戻されている。しかし、水資源の価値は、質は無論のこと利用できる場所とタイミングを抜きにしては考えられない。この意味で農業用水の使用実態を明らかにし、可能な限り合理化すべきであると思う。

全国統計による農業用水の使用量を表-4に示した。①欄は農地面積に原単位（減水深）を乗じた値で（国土庁水資源局「第2次全国水需量調査中間まとめ、51年2月」）、②欄は広域利水調査第2次報告書（建設省河川局、48年8月）に記載された値で取水量の総和と考えられる。①欄と②欄の比は農地における用水の反復率をあらわす（厳密には農地の降水量の補正を要するが、ここではそこ迄細かい数値を問題にしていない）から③欄に比の値を示した。全国平均では反復比は約2であるが、関東、北陸、九州が高い反復率を示すに対し中国、四国、東北では反復率が低い。反復率のちがいがどの様な理由に起因しているのかさらに検討を進める必要が感じられる。

表-4 農業用水の使用量と反復率

地 域		① S 45 (国土庁)	② S 45 (広二次)	反 復 率 ①/②
東 北	北	226.2	129.5	1.74
	内陸	217.9	51.6	4.22
	臨海	55.2	31.7	1.74
	計	273.1	83.3	3.28
北 陸		118.9	28.4	4.19
東 海		97.8	46.4	2.11
近 畿	内陸	47.7	34.3	1.39
	臨海	46.9	10.2	4.60
	計	94.6	44.5	2.13
中 国	山陰	21.2	13.2	1.61
	山陽	47.2	35.6	1.33
	計	68.4	48.8	1.40
四 国		40.7	23.1	1.76
九 州	北部	70.4	17.3	4.07
	南部	100.7	52.6	1.90
	計	171.1	69.9	2.45
総 計		1090.8	523.6	2.08

①, ②欄の単位は億トン/年

2.3 重回帰分析を用いた水田の水収支解析

白石、大西、伊藤（農林省農業土木試験場報告、B 37, 1976. その他）は水田を含む流域の水収支解析に新しい方法を提案している。用水の反復利用の実態を把握するのに適した優れたアイデアであり、また内部機構の複雑な水系の水収支であるからパラメーター同定に統計的な手法を用いて解析手順を簡明にしてい

るなど手法として応用範囲が広いものと思う。

図-2 は水田を含む流域の水系略図である。河川が水田地域を流下するにつれて取水のために流量が減じて来るが、ある地点で河川流量が必要取水量を下廻れば、不足分は反復水で賄なわれることになる。任意の地点への流入流量を $Q(x)$ 、取水後の流量を $Q'(x)$ 、取水権水量を q' 、取水量を q とすれば、

$$\left. \begin{aligned} Q(x) \geq q' \text{ のとき } q &= q', \quad Q'(x) = Q(x) - q \\ Q(x) < q' \text{ のとき } q &= Q(x), \quad Q'(x) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

したがって、上流からの河川流入量から取水量を差引いた値を河川残流量 Q_y と書けば

$$Q_y = \sum_{j=1}^m \left\{ Q_j(t) - \left[\sum_{k=1}^l q_{kj}(t) \right] \right\} \dots\dots\dots(2)$$

(2)においては、流域が極端に大きくなく、計算の時間単位（ここでは1日）より河道を通る水の流下時間が短いと仮定している。

下流基準点における実流量を $y(t)$ とあらわすと $y(t) - Q_y$ は観測日以前の水田地域内降雨と取水の反復水に起因する流量と考えられる。実際に1つの河川から、取水されている取水量の合計がその河川の流量を上廻っているのが通例で、反復水の効果を解析しなければ水田地域の水収支は論ずることができないのである。図-3 に米沢平野松川における河川流量と取水量との比較を示す。低水時には取水総量が河川流量の約2倍になっていることがわかる。

反復利用を考慮した水収支は(3)であらわされる。

$$y(t) - Q_y = \sum_{i=1}^n A_i \left\{ FR(t - \tau_i) + q_1(t - \tau_i) + q_2(t - \tau_i) - q_3(t - \tau_i) \right\} \dots\dots\dots(3)$$

- ここに A_i : 偏回帰係数, F :流域面積, R :降水量, 計算が日単位で行なわれるときは日降水量
- $\tau_i = (i - 1) \Delta t$, Δt : 計算の時間刻み
- q_1 : 流域内の取水量の総和
- q_2 : 流域内の湧水および他地区からの補給水
- q_3 : 流域からの蒸発散量および他地区への補給水

(3)の A_i は統系学的には多重回帰モデルにおける偏回帰係数であるが、水文学的には統計的単位図である。 A_i の和は水文学的には流出率 f であり、また $1/(1-f)$ が取水の反復率をあらわす。すなわち

$$\sum A_i = f, \quad f: \text{流出率}, \quad 1/(1-f): \text{反復率} \tag{4}$$

図-4 および図-5 に米沢平野における適用例を示す。図-4 の樺地点では流域面積が約30km²で、単位図の形は1段線形貯水池形であるが、図-5 の西大塚地点では流域面積が約550km²あり、単位図の形は多

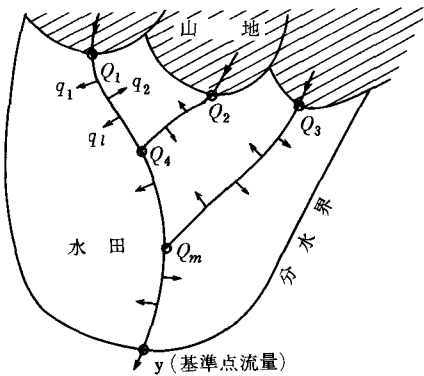


図-2

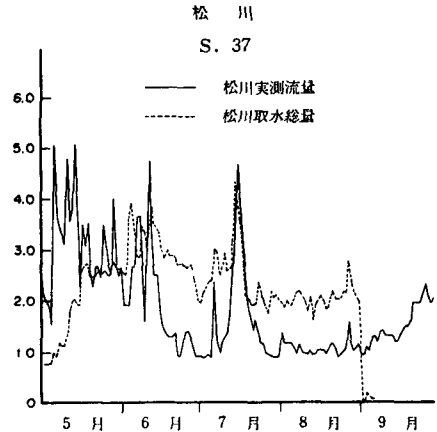


図-3 河川流量と取水量の比較(松川 昭和37年)

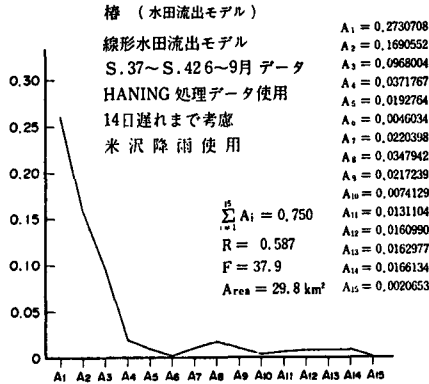


図-4 水田流出特性(白川地区樽)

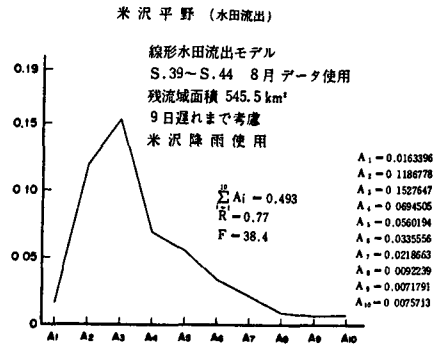


図-5 水田流出特性(米沢平野地区西大塚)

段線形貯水池型を示し、この結果はわれわれの直観と一致している。反復率は樽地区で4、西大塚地区で2になる。

ここで述べた水収支の解析方法は、前にもふれたように、水田地域ばかりでなく、水の循環利用を含む水系の解析に適用でき、応用範囲の広い手法である。白石らは非線型流出モデルに対しても理論を展開している。

3. 水文量時系列の統計的予測

低水量の管理のためには貯水池群の統合利用が重要性を増し、例えば並列貯水池の放流式として space rule の導入が行なわれるようになるであろう。 m 個の並列貯水池があるときの space rule は(5)で与えられる。

$$\frac{S_{max j} - S_{Ijk} - Q_{jk} + R_{jk}}{\sum_j^m (S_{max j} - S_{Ijk} - Q_{jk}) + R_T} = \frac{Q_{j, n-k}}{\sum_j^m Q_{j, n-k}} \quad (5)$$

ここに

$S_{max j}$: m 個の並列貯水池の j 番目のものの貯水容量

S_{Ijk} : k 月の初めにおける j 貯水池の貯水量

Q_{jk} : j 貯水池に流入する k 月の月間流入量

R_{jk} : j 貯水池から放流する k 月の月間放流量

R_T : m 個の貯水池からの放流量の和, $R_T = \sum_j^m R_{jk}$

$Q_{j, n-k}$: 満水期までの残りの期間 ($n-k$) 月の間に j 貯水池に流入する予測流入量

space rule は無効放流を量小にし、合理的な放流方式であるが、これを実際に適用するには Q_{jk} , $Q_{j, n-k}$ など予測流量が必要である。わが国の実情は、気象学的方法による降雨予測が難しく、したがって流量予測も信頼性に乏しいという理由で space rule とは別の放流方式がとられている。例えば(5)に代えて(6)が用いられている(藤吉「利根川における利水上の諸問題」, 46月7月)

$$\frac{S_{Ijk} - R_{jk}}{S_{max j}} = \text{const} \quad (6)$$

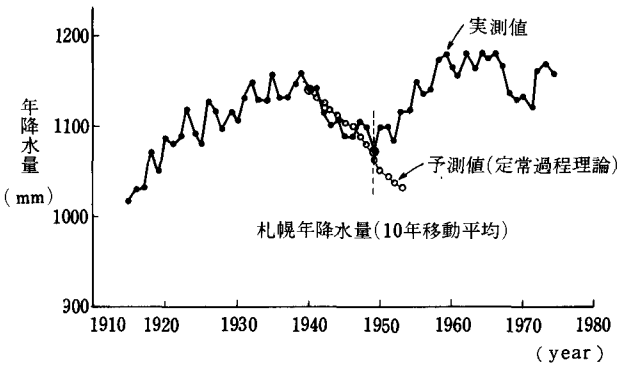
(5)が、将来予想される流入量に比例する貯水池スペースを作っていくという自然な考え方をあらわしているに比べ、(6)は放流後に残る貯水量の比率をすべての貯水池について一定に保っておくという考え方

で、日本の平等主義ではあっても合理性には乏しい。将来予想される流入量が不確実だということであれば、筆者は(5)に代えて、せめて(7)を貯水池操作に導入して欲しいと思う。

$$\frac{S_{maxj} - S_{Ijk} - Q_{jk} + R_{jk}}{\sum_j (S_{maxj} - S_{Ijk} - Q_{jk}) + R_T} = \frac{\alpha_{jk} F_j}{\sum_j \alpha_{jk} F_j} \tag{7}$$

ここに
 F_j : j 貯水池の流域面積
 α_{jk} : 流域の流出特性をあらわす係数、基準流域を $\alpha = 1$ とする。

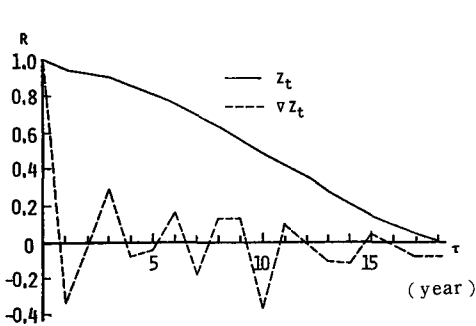
流量予測は貯水池操作に限らず、河川の流量管理を行なうための基本的要素である。以下に、統計的手法による水文量時系列の予測手法を述べる。水文量時系列は平均値および分散が時間的に変動し、非定常確率過程の特性を示すのが特長である。例えば図－6 に札幌の年降水量の10年移動平均値の経年変化を示す。10年移動平均をとることによって短期の変動が消去され、降水量時系列はほぼ一定値のまわりの変動になるであろうと予想していた。結果は図に示した通りで、非定常時系列と考えなければならない。従来用いられてきた定常過程理論では、図－6 の降水量時系列に Fourier 級数をあてはめ、経年変化を確定成分(週期成分)として取除いた上で変動成分を解析する手法を用いていた。構造物設計のための水文量発生ならばこの方法でも差支えないが、水管理のための水文量予測には不適当である。確定成分と考えた Fourier 級数の外挿は気象学的にも水文学的にも根拠に乏しく、採用する資料の期間によってはしばしば誤った予測値を与えるからである。



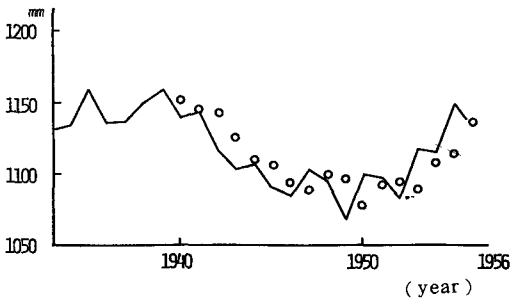
図－6

図－6 の資料で 1949 年までの資料を用いて定常過程理論によって 1950 年以後の年降水量の予測値を計算してみると図中の○印が得られるが、これは其の後の実測値として甚しく違っている。

岸、長谷部、藤田(水工学夏期研修会, A, 1975; 水理研究会, 1976; 年次講演会, 1976) は水文量時系列の解析に Box & Jenkins の ARIMA モデルおよび季節性モデルを用いることを試みている。図－6 の年降水量(10年移動平均値)を Z_t とあらわし、 Z_t および $\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$ の自己相関をしらべると図－7 が得られる。図によると ∇Z_t は定常過程で、しかも $P_1 < 0$ であるから ARIMA(0, 1, 1)モデルが適



図－7 札幌年降水量の10年移動平均系列 Z_t および ∇Z_t の自己相関係数



図－8 ARIMA(0, 1, 1)モデルによる札幌年降水量の10年移動平均系列の予測

合すると思われる。

解析を進めた結果では、図－6の年降水量時系列は次式であらわされることが判った。

$$FZ_t = (1 - 0.338B) a_t = a_t - 0.338 a_{t-1} \quad (8)$$

ここに a_t は平均値 0，標準偏差 $\sigma_a = 18.7 \text{ mm}$ の不規則変量

Z_t は10年移動平均値であるから，毎年の降水量を y_t とすれば $FZ_t = Z_t - Z_{t-1} = (y_t - y_{t-10})/10$ である。したがって(8)は(9)になる。

$$y_t - y_{t-10} = 10(a_t - 0.338 a_{t-1}) \quad (9)$$

(8)によって行った予測結果を図－8に示す。定常過程理論にくらべ非定常過程理論は，はるかに合理的な予測値を与えることがわかる。

4. むすび — 水管理を行うための社会的条件

これ迄は，水管理に関連する技術上の問題を論じて来た。学会の発表論文でも，最近は難解な数式を駆使して水系の最適管理を論じたものが多く見られる様になった。管理理論あるいは技術の進歩はそれなりに価値がある。しかし，これらの理論あるいは技術を実際に役立てるためには，整備すべきいくつかの「条件」があると思う。

低水量管理は水の「適正利用」のために河川流量を制御することであるが，適性利用の意味について社会的な合意があるであろうか。水は非常に多面的に利用されている。したがって適性利用といえは，多くの利用面のもつ価値を計量化し，その上で最大価値を論ずることになろう。価値の計量化まで進まないとしても，少くとも利水目的に優先順位を付けることが必要である。

水の管理は供給不足の懸念があるから行われるのであるが，これに対しわが国の水利権には優先順位がついていないから，管理のための基本条件が整っていないとさえ云える。水利権に優先順位をつけようとするれば，それぞれの利水の内容がきびしく問われることになる。異常渇水の年に農業用水を削って上水道用水にあてる事例がしばしばある。現在は水利権者の協議によって用水の流用が行なわれているが，これを制度化しようとするれば，上水道用水のすべてが農業用水より優先すべきものが問題になる。また工業用水の原単位は漸減の傾向をもっている。この傾向からすれば，用水の再利用率はさらに向上の余地があり，用水量は削減可能ではないかという意見も当然予想される。これらの議論はすべて，わが国の水利用のあり方の再検討に通ずるものである。結局低水量の管理は供給側だけの問題ではなく利水者側の問題でもあるのである。