

利水安全度指標に関する研究

A study on the reliability of index of water utilization

建設省土木研究所 正員 中 安 正 晃

建設省土木研究所 振 井 茂 宏

1. はじめに

我国の従来の水需要は農業用水を主としたものであり、その大部分は河川の自流に依存するか、せいぜい溜池等を建設することによってまかなわれてきた。しかしながら、近年における産業の急激な発展成長、あるいは人口の都市集中等にみられる社会の高度化に伴い、水に対する需要は全体として大きく増加しており、また、その需要構造も著しく多様化してきている。

この増大し、多様化する水需要に対応するための利水計画は、現在のところ、通常10ヶ年第1位の渇水年、或いは計画渇水基準年を対象とした貯水池必要容量で立案されている。しかし、同一の渇水発生確率を持った流域においても、流域内の水利用の高度化に伴って、異常渇水時に生起する被害はより深刻なものとなる傾向があり、今日の多様化した水需要状況のもとにおいては、渇水の発生頻度という単一の指標のみでは、流域の渇水に対する安全度を、充分に表現しえなくなっているものと思われる。

本論文は、このような状況を踏まえて、利水安全度を表示する指標と、その指標値についての調査・研究の成果をとりまとめたものである。

2. 利水安全度指標の特性

利水安全度を表現する指標には、渇水の発生頻度を表示するものと、一旦渇水が発生した場合の渇水の程度を表示するものがある。利水計画等の立案・策定においては、発生頻度によって検討を行うことが基本であるが、前述したとおり、今日の複雑な水需要状況のもとにある流域の利水安全度を表示するためには、渇水の程度を表わす指標の必要性も検討されなければならない。

このような観点にもとづき「利水安全度に関する研究」では、以下に記す指標について検討を行った。

- (1) 渇水の「頻度」を表わす指標 ①渇水の発生頻度、②貯水池容量不足発生年数、③取水制限実施年数
- (2) 渇水の「長さ(期間)」を表わす指標 ④貯水池容量不足発生日数、⑤取水制限実施日数、⑬渇水被害原単位による重みづけ不足日数
- (3) 渇水の「大きさ(程度)」を表わす指標 ⑥総不足水量、⑦貯水池不足容量、⑨不足%日
- (4) 渇水の「厳しさ(深刻さ)」を表わす指標 ⑧最大取水制限率、⑩(不足%)²日あるいは(不足%)³日
⑪渇水被害関数、⑫渇水被害原単位による重みづけ不足%日
- (5) 渇水の「経済的被害」を表わす指標 ⑭渇水被害額、⑮単位水量あたりの渇水被害額

各指標の持つ特性を調べるために、これらの各群よりそれぞれ一つずつ代表指標を選び、この指標を用いて各流域における利水安全度の検討を実施した。検討に用いた指標は以下のとおりである。ただし、第4群、渇水の「厳しさ(深刻さ)」を表わす指標群からは、(不足%)²日の他に流域の持つ地域特性を表現するために、(不足%)³日に計画確保流量で重みづけを行った渇水被害関数を採り上げ、以下の6指標について検討を行った。

①渇水の発生頻度(頻度)、④貯水池容量不足発生日数(長さ)、⑨不足%日(大きさ)、⑩(不足%)²日(厳しさ)、⑪渇水被害関数(厳しさ)、⑭渇水被害額(経済的被害)

これらの指標を用いて全国の10流域でそれぞれいくつかの異なった河川利用率、貯水池容量率を設定し、

利水安全度の計算を実施した。その結果から、各指標の特性として以下の2点が認められた。

- (1) 各指標間にはひじょうに高い相関がある。各指標間の相関係数の全国平均値を表1に示すが、この表より明らかに、貯水池容量不足発生日数を除き、いずれの指標もそれぞれ高い相関係数を持っており、その値は0.95を上回っている。

しかし、渇水がひじょうに厳しくなってくると、一部の流域では指標間の相関が悪化する傾向が認められている。また、貯水池容量不足発生日数と他の指標値との相関係数が比較的低い理由は、I川流域、J地域等では貯水池容量不足発生日数が、既に上限である365日に近い数値をとっているため、もはや他の指標値の増加に追随しえない状況にあるためと思われる。

表1 各指標値間の相関係数（全国平均値）

	貯水池容量 不足発生日数	不足%・日	(不足%) ² ・日	渇水 被害関数	渇水 被害額
貯水池容量 不足発生日数					
不足%日	0.9260				
(不足%) ² 日	0.8761	0.9687			
渇水 被害関数	0.8605	0.9658	0.9896		
渇水 被害額	0.8712	0.9612	0.9750	0.9788	

(1/10 ペース)

表2 各指標の鋭敏度順位

利水安全 度指標 流域	貯水池容量 不足発生日数		不足%・日		(不足%) ² ・日		渇水被害関数		渇水被害額	
	利用率	容量率	利用率	容量率	利用率	容量率	利用率	容量率	利用率	容量率
A川流域	5	1	4	3	3	4	2	4	1	1
B川流域	5	2	3	2	3	2	2	1	1	5
C川流域	5	5	4	1	3	3	2	3	1	2
D川流域	4	5	4	4	3	1	1	1	2	1
E川流域	5	2	4	2	3	5	2	2	1	1
F川流域	5	5	4	4	3	3	2	1	1	1
G川流域	2	5	4	1	4	2	3	2	1	2
H川流域	1	1	3	2	5	5	3	2	2	2
I川流域	5	5	4	4	2	1	1	1	3	3
J地域	5	5	4	4	2	1	1	1	3	3

- (2) 各指標の鋭敏度は概ね、渇水被害額、渇水被害関数、(不足%)²日、不足%日、貯水池容量不足発生日数の順に順位づけられる。各流域において、河川利用率及び貯水池容量率を変化させた場合に、各指標値がどの程度鋭敏に反応するかを、流域毎に順位づけたのが表2である。各流域の特性により、この順位は必ずしも一致しないが、全体としてみると各指標の鋭敏度は概ね先に述べた順位になっているものと思われる。

3. 利水安全度の指標値に関する検討

前章においては、流域の利水安全度を表現しうる種々の指標とその特性について述べたが、次に、これらの指標の値について検討を加える。流域における利水安全度の指標値の検討を行うためには、いくつかのアプローチが考えられ、それぞれに指標値が提示されるが、アプローチ手法を大別すると、次に示す三通りの方法が代表的なものであると思われる。すなわち、①流域の物理的特性による検討、②流域における水資源開発の経済的効率による検討、及び③水供給に対する利水者の社会的要請からの検討であり、以下これらの検討方法とその検討成果について説明を加える。

3.1 流域の物理的特性による検討

河川の利用率を固定し、貯水池の容量率をあげていった場合には、当然ながら流域の利水安全度は向上し、安全度指標の値は低下する。特に河川の利用率が低い間は、貯水池容量率の増加は、指標値の改善に直結し

ており、効率よく利水安全度の向上を図ることが可能である。しかしながら、流域における河川水の利用率が高くなると、貯水池容量率の増加は、安全度の向上に直線的には結びつかなくなる。すなわち、容量率が低い時点では、容量率をあげるにより利水安全度指標を改善しうるが、その割合はしだいに低下してくる。そして、利用率がある数値以上になった場合には、容量率の増加にかかわらず、利水安全度指標が改善されないという状態が現われる。これは以下の理由等によるものと思われる。

(1) 河川流量の極端な変動による無効放流量の存在

例えば洪水時等においては、すべての河川流量を貯水池に貯留してしまうことは著しく困難であり、このため、洪水時の流量は利水面から見た場合、無効放流量となる場合が多い。高い利用率を実現するためには洪水流量を利用することが必要であるが、このためには、さらに大きな貯水容量を必要とする。しかし、この容量が活用される機会は、ひじょうに少ないため、容量あたりの利水安全度向上に対する寄与率は、極めて小さなものになると思われる。

(2) ダムの流域と基準地点の流域の乖離

流域内において、ダムの建設が見込まれるのは、概ね上流部から中流部の山地部においてであるが、河川の基準地点はほとんどの場合、下流部に設けられている。このため、利水安全度に関する検討を実施した河川のなかでも、ダムの残流域が流域のかなりの割合を占めている場合が多い。いうまでもなく、残流域からの流出に関しては、ダムによる調節効果は限界があり、ダムの容量率をいくらあげても、残流域からの無効流出量をさし引いた値までしか、河川利用率をあげることは不可能である。

容量率を増加しても、流域の利水安全度の向上率が極端に低下する状態が現われる時の利用率を、限界利用率と呼ぶ。限界利用率の値は流域によって異なるが、今までに検討された結果からみると、概ね60～80%の間で出現している。

限界利用率の出現には、先に述べた理由等が大きく作用するため、この数値の差は、河川の流況及び基準地点の面積に占めるダムの流域面積等の河川特性に依るものと思われる。また、限界利用率を上回る高利用率下においては、貯水池の容量率が概ね、利用率の $\frac{1}{3}$ を超えると、利水安全度の向上が認められなくなる傾向がある。この

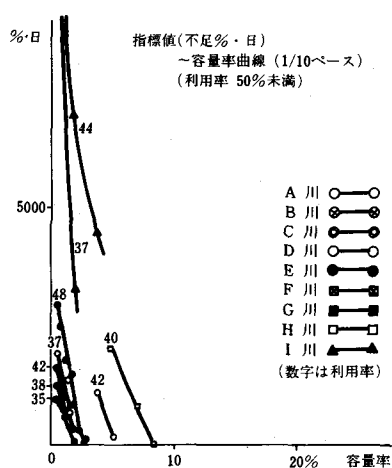


図 1

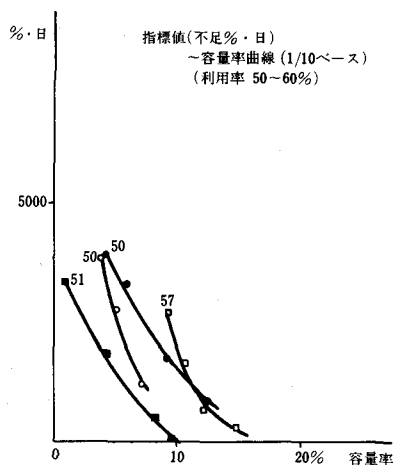


図 2

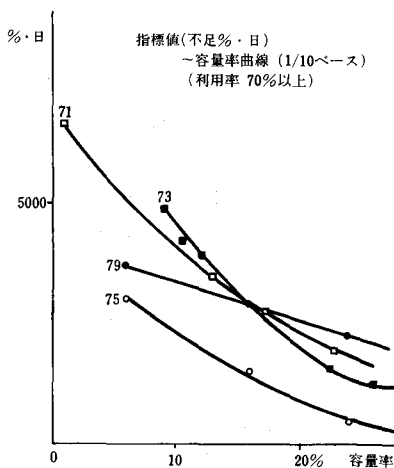


図 3

(容量率=貯水池容量/年間総流出量)

ことは、河川の開発効率を、年間利用水量／貯水池容量として定義すると、河川の開発の高度化（利用率の増大及び容量率の増大）に伴って、開発効率は漸時低下してゆくが、限界利用率を上回るような高利用率の下で、この数値が3以下になれば、もはや年間利用水量の増大は望めないことを意味している。これは、容量率の面からの河川の開発限界を示しているものと思われる。

次に、河川開発の限界が現れた時点の利水安全度指標値の持つ意味について検討する。高利用率下において、指標値の改善限界が現われるということは、この時の指標値で表わされる渇水は、貯水施設の建設では解消しえないものであることを意味

している。F川流域、G川流域の資料をもとに、10年に1度の割で発生が予想される渇水を対象とした指標の改善限界値を表3に示す。検討対象指標は不足日と（不足）²日を選んだ。後述するアンケート調査等の結果より、利用者の受忍しうる渇水の限度として1,000日程度を仮定すれば、70%程度の利用率までは、利用者に対して格別大きな負担を強いることなしに、水資源開発を進めてゆけるが、利用率がこれ以上になると、河川によっては水利用の高度化を含む幅広い利水対策が必要になってくるものと予想される。

表3 指標の改善限界値（例）

指標 利用率	不足日	（不足） ² 日
50%		
60%	400	20,000
70%		
80%	1,700 ～1,800	80,000 ～100,000

（1/10 ベース）

3.2 水資源開発の経済的効率による検討

利水安全度の目標水準に関するもう一つの検討方法は、水資源開発の経済的効率に着目する方法である。現在、投資の費用便益分析に用いられている評価基準としては、純便益価値、費用便益比、内部収益率等が一般的であり、これらのいずれを用いても、実行に値するか否かの判断については、同じ結果を得ることができる。ここでは、対象とする河川の大小に依らずに、河川開発の効率を比較検討できること、計算の容易さ等の理由から費用便益比を用いて検討を行う。費用C及び便益Bは

$$C = \text{建設費} (1 + 0.4 \times \text{建設利率} \times \text{工期}) \times (\text{利率} + \text{原価償却率} + \text{固定資産税率}) + \text{管理費}$$

$$B = \text{年平均渇水被害額（施設なし）} - \text{年平均渇水被害額（施設あり）}$$

で表わされる。

施設の規模を変化させて、それぞれ B/C の値を算定する。河川の利用率が低く、かつ施設の規模が小さい間は建設におけるスケールメリットが働くために、一般に小規模施設より大規模施設の方が、 B/C は大きな値をとる。しかし、施設の規模が大きくなり、これに伴って河川の利用率が高くなると、施設の追加投資によって得られる便益はしだいに小さなものとなってくる。そして、前節で検討した限界点が出現するような状況に至ったならば、便益の値はもはや増加しえなくなるため、 B/C の値は限界点に対応する施設規模に至る以前の時点で、極値をとるものと予想される。 B/C がこの極値をとった時に、施設規模は流域における経済効率最大を実現しており、この時の施設規模に対応する利水安全度指標値が、経済的効率の面から見た利水安全度の指標値を示している。しかし、このような検討方法には、以下のような問題点が含まれている。

- (1) 費用及び便益の分配 費用便益分析は、施設の全体としての費用と便益を用いて、最も効果的な計画を立案するという基準にもとづいているため、これらの負担と受益の分配に関する基準を欠いている。
- (2) 施設の外部経済性 費用便益分析において、検討の対象となりうるのは、施設の建設によって直接得られる便益及び費用のみであり、建設に伴う間接的な効果及び貨幣価値換算の困難な効果については、評価することができない。このため、経済性の検討を行うにあたっては、予想される外部経済及び不経済を、極力内部化すると

ともに、貨幣価値による評価の対象となりえないものについても、充分考慮する必要がある。

3.3 社会的要請による検討

最後に、渇水に対する社会的要請の面からの検討を行うために、社会反応等を整理し、分析を試みた。

渇水に対する社会の反応を検討するための方法としては、新聞等のマスコミに現われた記事等を整理分析する方法、利用者に対して直接アンケートを実施し、その結果より利用者の意識分布を調べる方法等がある。利用者に対するアンケート調査は、建設省の各地方建設局のうちいくつかで実施されており、これをまとめると次のとおりである。

主な流域における渇水許容水準に関する調査結果をとりまとめると、以下のとおりである。

(1) B川流域 許容不足%日；1040 %日（許容節水率；26% 許容日数；40日）

昭和50年 M県北部渇水時調査

(2) C川流域 許容不足%日；900～1000 %日 許容節水率；30% 許容日数；30日

許容節水率；50% 許容日数；20日

昭和39年 オリンピック渇水時調査

(3) F川流域 許容不足%日；945 %日（許容節水率；45% 許容日数；21日）

昭和48年 T市渇水時調査

(4) I川流域 許容不足%日；1010 %日

昭和53年 F市渇水時調査

中澤によると、渇水の許容水準として、概ね1010 %日という数値が紹介されている。これはオリンピック渇水時の調査をもとにしたものであるが他の調査結果も、ほぼこの数値を裏付けるものであると思われる。

次に、もう一つの検討方法であるマスコミ対応の整理分析について述べる。

渇水が進むにしたがって、様々な現象が対象流域において発生してくるが、これらのうち、例えば渇水対

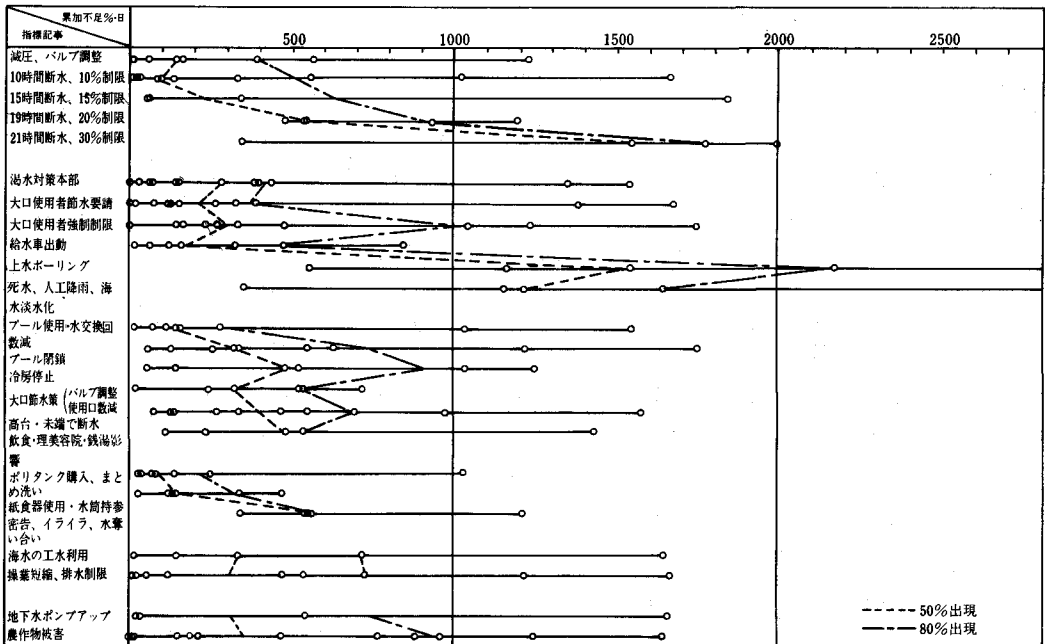


図4 指標記事出現状況図

策本部の設置等、多くの渇水において共通して現われる事象がある。これらの事象を報道した記事を指標記事とし、累加不足%日と指標記事の出現状況に対応づけたものが図4である。図4では各指標記事の出現状況を対比するために、記事の出現した全渇水のうち50%及び80%のケースにおいて記事の出現した位置を、破線及び一点鎖線でそれぞれつないでいる。50%の位置に対応している不足%日の値は、上水ボーリング、死水利用・人工降雨・海水淡水化の記事を除き、概ね200～500%日である。同様に、80%の位置に対応している不足%日の値は概ね300～1000%日であり、また、すべてのケースにおいて記事が出現するのは、渇水が1000%日から1800%日程度に進行した時点においてである。

次に、渇水時の社会的反応が、どのような因子で構成されているかを明確にするために、指標記事の出現状況に因子分析を試みた。

因子分析を行うにあたって、渇水時の社会的反応要因として、表4に示す13要因を選定し、それぞれの要因に関する記事の出現数を半旬ごとにカウントした。要因としては、特定地域の新聞のみに偏ってみられるものは除外し、また、出現数をカウントする期間は、渇水が始まってから第10半旬までとした。

主因子法による固有値が1以上の要因数を求めると、5要因であったので、因子数が5のモデルを設定し、それぞれの因子負荷量の推定を行った。その結果は表5に示すとおりであり、この分析の結果、得られた5つの因子の累加寄与率は0.735である。これら5つの因子の持つ意味は、それぞれ次のように解釈される。

第1因子；利水者間の不公平感、密告、水泥棒、水争い、緊急水運搬といった要因の負荷量が高い。
社会的な不平不満を表わす因子。

第2因子；家庭での水備蓄、紙食器、銭湯等の代替手段、ビル冷房、トイレ使用制限といった要員の負荷量が高い。
家庭生活への影響を表わす因子。

第3因子；医療活動に支障、行政への問合せ、苦情、ビル冷房、トイレ使用制限といった要因の負荷量が高い。
社会的な安全に対する不安を表わす因子。

第4因子；飲食、理美容業営業短縮、雨乞いといった要因の負荷量が高い。
社会活動への影響を表わす因子。

第5因子；工場操業短縮、減産、ビル冷房、トイレ使用制限といった要因の負荷量が高い。
生産活動への影響を表わす因子。

表 4

渇水時の社会反応要因 (13要因)	
生活	
D 1	家庭での水備蓄
D 2	入浴、洗濯頻度等変更
D 3	紙食器、銭湯等の代替手段
商・サービス業	
D 4	ビル冷房・トイレ使用制限
D 5	飲食、理美容業営業短縮
工業	
D 6	工業操業短縮、減産
農業	
D 7	農作物生育不良、枯死
公共	
D 8	医療活動に支障
D 9	緊急水運搬、下水再利用
D 10	雨乞い
社会一般	
D 11	行政への問合せ、苦情
D 12	利水者間の不公平感
D 13	密告、水泥棒、水争い

表 5 バリマックス回転後の因子負荷量

	FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3	FACTOR4	FACTOR5
D 1	0.14100	0.77456	0.23849	0.28263	-0.11591
D 2	0.60177	0.46501	-0.11365	0.22199	0.26106
D 3	0.07211	0.75686	-0.07619	-0.18124	0.06430
D 4	0.15021	0.61613	0.51065	0.09224	0.44940
D 5	0.11464	-0.02164	0.10515	0.85696	-0.01295
D 6	0.08508	0.03340	-0.06849	-0.00172	0.96475
D 7	0.54715	0.34650	0.14727	0.02628	0.08302
D 8	0.04674	-0.05497	0.86776	0.29234	-0.02757
D 9	0.76024	0.17563	0.27728	0.14855	0.21407
D 10	0.41389	0.38089	0.01736	0.45026	0.12223
D 11	0.38726	0.23045	0.73913	-0.22281	-0.10211
D 12	0.86759	-0.14084	0.10087	0.01435	-0.01987
D 13	0.81638	0.13488	0.07091	0.11723	-0.05437
固有値	3.050158	2.160366	1.765500	1.279450	1.300786
寄与率	0.235	0.166	0.136	0.098	0.100
累加寄与率	0.235	0.401	0.537	0.635	0.735

さらに、利水安全度指標値をいくつかの区切り、出現時点に対応する指標値によって指標記事を分類した。そして、それぞれのクラス毎に各因子得点の平均値を求め、これにより、マスコミの対応からみた利水安全度指標に関する検討を試みた。

表 6 指標値クラス別の因子得点の平均値

指標として不足日を用いて、計算を行った結果を表 6 に示す。なお、表中の隔たりの数値は、 Na_i に属する指標記事の、 j 因子得点の平均値を x_{ij} と表わすと、

No	不足日	個数	第 1 因子	第 2 因子	第 3 因子	第 4 因子	第 5 因子	隔たり
1	0～200	33	-0.284	-0.104	-0.163	-0.249	-0.040	0.807
2	200～400	12	0.305	-0.210	0.166	0.145	0.134	1.234
3	400～600	8	0.643	0.870	-0.131	0.109	-0.258	0.666
4	600～800	3	0.251	0.577	-0.538	0.301	-0.290	0.350
5	800～1000	3	0.221	0.324	-0.466	0.116	-0.426	

$$Na_i, Na_{i+1} \text{ 間の隔たり} = \left[\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_{i+1j})^2 \right]^{1/2}$$

として求めたものである。

この結果、渇水の各段階におけるマスコミの対応は、400 日を境界として最も大きな変化が認められる。新聞では、一般にトピカルな現象がとりあげられるため、指標記事の出現は社会の全般的な状況よりも、むしろ局所的な状況を示す傾向がある。このため、この数値を社会全体の利水安全度目標水準とみなすことは困難であるが、マスコミの対応における一種の変曲点が、この数値により提示されているものと思われる。

4. おわりに

本論文では、全国の河川数例を選定し、これらの流域において、流域の渇水に対する安全度を表現する指標と、その目標水準について検討を試みた。流域の利水安全度を表示する指標として、現在最も一般的に用いられているのは、渇水発生頻度である。計画論上は、この指標値を用いて、立案、実施を行うことが基本であるが、水利用形態の多様化により、一旦渇水が発生した場合に被る影響もまた、流域毎にそれぞれ異なったものとなってきている。このため、流域における利水安全度を完全に表現するためには、渇水が発生した際の「長さ」「厳しさ」等を表現しうる指標も必要となってくるものと思われる。これらを表現する指標としては、2 章において述べたとおり多くのものが考えられるが、これらの指標間の相関はひじょうに高いものであり、多くの指標のうち、どの指標が流域の利水安全度の特性を代表しうるものであるかについて、今後の検討が必要であろう。

また、利水安全度の適正值に関する検討では、流域の物理的特性、水資源開発の経済的効率及び渇水に対する社会的反応の 3 つの視点より検討を試み、それぞれの視点から適正と思われる指標値の推算を行った。しかし、河川と人間社会の関り合いはきわめて長く、また、特に近年においては著しく複雑化してきている。このため、利水安全度についての今後の検討は、さらに幅広い視野にたったものであることが必要と思われる。

参 考 文 献

建設省直轄技術研究会「利水安全度に関する研究」(第 35 回～第 36 回)
 土研資料「渇水時の水管理に関する計画学的研究」 中澤弍仁、今村瑞穂、石崎勝義、中村 昭