

土砂管理の軽減を目的とした治水利水分離型 ダム事業のライフサイクルコストに関する研究

STUDY ON THE LIFE CYCLE COST OF DAM PROJECTS THAT HAVE
FLOOD CONTROL AND STORAGE FOR WATER USE FUNCTIONS
SEPARATEDLY TO REDUCE SEDIMENTATION MANAGEMENT.

角 哲也¹・高田 康史²・岡野 眞久³

Tetsuya SUMI and Yasufumi TAKATA and Masahisa OKANO

1. 正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
2. 正会員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒540-0008 大阪市中央区大手前)
(株)建設技術研究所大阪支社水工部)
3. フェロー 工修 (財)ダム水源地環境整備センター (〒102-0083 東京都千代田区麹町)

In Japan, many multipurpose dams have been constructed. A multipurpose dam attains flood control and storage for water use functions on a single dam site. However, multipurpose reservoirs should be dammed up all the time and inflow sediments during flood periods also easily deposit in the reservoirs. From this point of view, constructing only a flood control dam which has gateless bottom outlets at the original river bed level in the main stream is under planning to reduce necessary sedimentation management for a long period. If water storage function is necessary, e.g. multipurpose project, additional water storage dam for water use out of river channel or on the tributary, e.g. off-stream reservoir, with a conveyance facility can be constructed almost without sedimentation management.

In this paper, we study on the life cycle cost of dam projects that have flood control and storage for water use functions separately, and have presented conditions such that these projects can be applicable in Japan.

Key Words: life cycle cost, multipurpose dam, reservoir sedimentation management, off-stream reservoir

1. はじめに

現在、我が国のダム事業の主流となるいわゆる“多目的”ダムは、1箇所のダムサイトにおいて、治水と利水の目的を同時に達成するダムである。通常、多目的ダム(治水目的+利水目的)を建設した場合、そのダム貯水池は常時貯留されるため土砂の堆積が進行し易く、貯水容量を持続的に維持するためには土砂管理対策費が多額となるケースが多い。現に今日では、戦後、我が国において数多く建設された多目的ダムの幾つかで土砂堆積問題が顕在化してきている¹⁾。

一方では、土砂堆積の進行抑制の期待より、河床部に洪水吐きを有し、積極的な土砂排出を目指す治水専用ダム(益田川ダムなど)や排砂バイパスの使用により河道外貯留に近い形式の利水ダム(旭ダム、布引ダムなど)が近年注目を浴びている。ここで、土砂管理軽減の観点からすれば、従来のように多目的ダムを1箇所に建設する代わりに、治水専用ダムと利水専用ダムを本川と支川にそれぞれ分離して建設することにより、土砂管理費を含むライフサイクルコストを最小限にできる(長期的なトータルコストでは分離型が有利となる)可能性が考えられる。

そこで本研究では、これらの得失を明らかにするため、集中型ダム事業(従来の多目的ダム)および分離型ダム事業(治水、利水目的を分離)を対象に、ライフサイクルコストの観点から比較検討を行った。なお、以下の検討は、ダム形式として、重力式コンクリートダムを想定している。

両ダム事業の概要を図-1に示す。

2. ダム事業のモデル化

(1) 貯水池およびダム堤体のモデル化

a) 貯水池形状

図-2に示す三角錐形状の貯水池モデルを考える。水深 h (m)、山地勾配 J 、河道勾配 K とすると、

同図より、貯水池容量 $V_R = \frac{h^3}{3JK}$ であるから、

$$\cdot \text{水深 } h = (3JKV_R)^{1/3}$$

$$\cdot \text{湛水面積 } A_R = \left(\frac{9V_R^2}{JK} \right)^{1/3}$$

となる。また、同図には、我が国の直轄ダムの諸元²⁾と今回のモデルとの比較を示す。

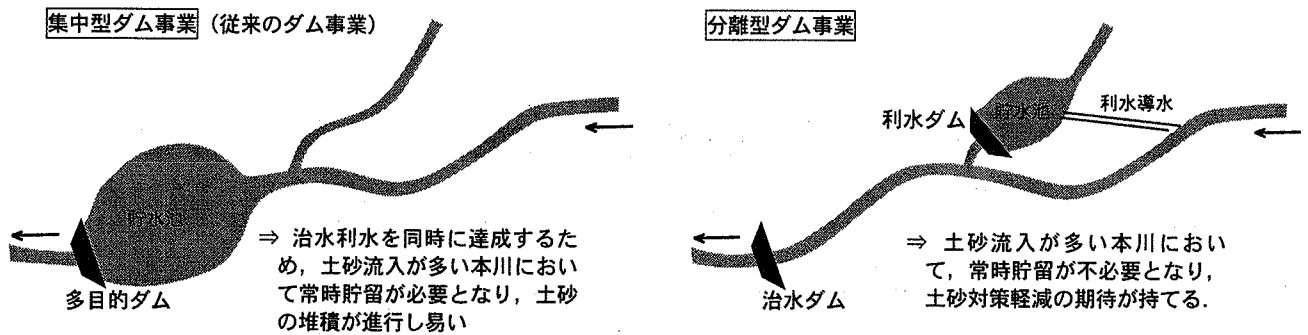


図-1 両ダム事業の概要

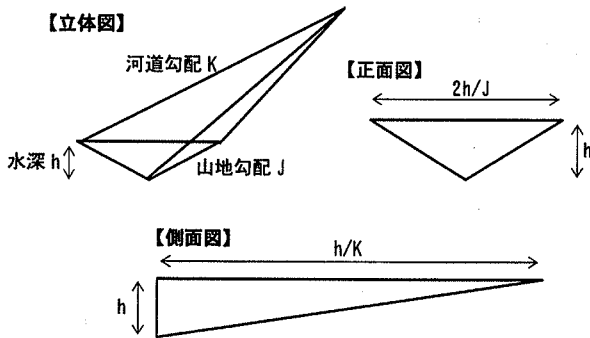
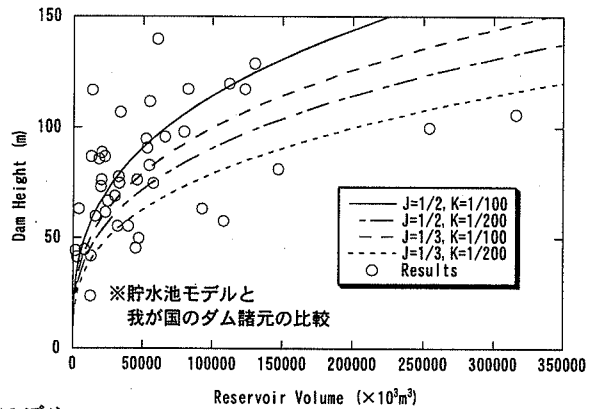


図-2 貯水池モデル



b) 貯水容量

治水容量を V_F (m^3), 利水容量を V_W (m^3), 堆砂容量を V_S (m^3), 比堆砂量を q_s ($m^3/km^2/年$), 流域面積を A (km^2) と表す。

ここで、通常のダム計画と同様に100年分の堆砂量を見込めば、堆砂容量 V_S は $100q_s A$ となるが、治水専用ダム（洪水吐きを河床に設置することにより、排砂が促進される期待が持てる）等の土砂堆積に対して抑制効果が期待出来るダム形式については、多目的ダムに対して R_{CS} 倍の堆砂量を見込むものとする ($R_{CS} \leq 1.0$)。つまり堆砂容量 V_S は $100q_s A R_{CS}$ と表せる（多目的ダムは $R_{CS} = 1$ ）。

$$\text{総貯水容量 } V_R = V_F + V_W + 100q_s A R_{CS} \quad (1)$$

c) ダム堤体

総貯水容量 V_R (m^3) に対する水深 h を ≒ ダム高さとし、堤体積をダム高の2次関数と仮定する。

$$\text{堤体積 } V_D = (a + bh)h \quad (2)$$

(a, b は定数)

我が国の直轄ダムを対象に、ダム高 h と堤体積 V_D の関係を調査した結果²⁾ を図-3 に示す。これらによると、我が国のダムの標準は、 $a = -2000$, $b = 100$ 程度であることがわかる。

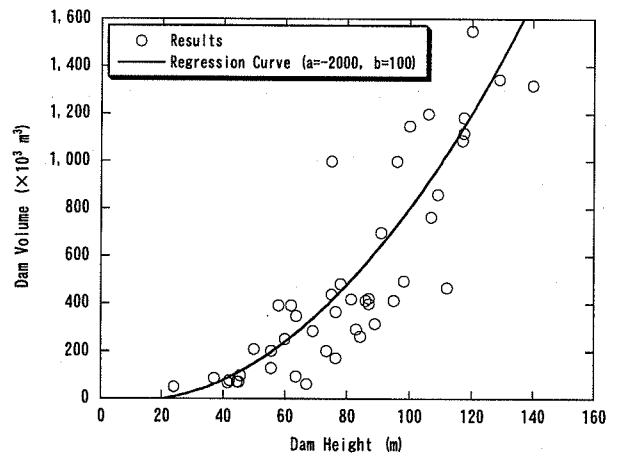


図-3 我が国のダムのダム高さと堤体積の関係

(2) 初期投資費 (Initial cost)

a) ダム工事費 (本工事費, 付帯工事費)

ダム本体の工事費として、堤体コンクリートの単位体積当たりの工事費単価 C_D (円/ m^3) をパラメータとする (ダム工事費は、 $C_D V_D$)。我が国の直轄ダムの堤体積～事業費の関係²⁾ を図-4 に示す (ただし、同図の値は総事業費を示すことに留意する必要がある)。これらより、 C_D の範囲は、30,000円/ m^3 ~ 100,000円/ m^3 程度であると考えられる。

また、一般的に、利水専用のダムを建設すると、多目的ダムに比べ放流設備等が軽減できるため、 C_D が割安となる。ここでは、多目的ダムに対する

利水専用ダムの単価の割合を R_G とする (利水専用ダムの事業費単価 $R_G C_D$)。なお、文献²⁾によると、日本のダム全体で考えて、 R_G は約0.75程度である。

また、分離型ダム事業の場合には、導水施設 (本川から利水専用ダムへの導水) が必要となる。ここでは、導水距離 L_T (m) に対して、単位長さ当たりの導水トンネル工事費を C_T (円/m) とし、導水施設費用は $L_T C_T$ とする (揚水を伴う場合のポンプ等の費用はこれに含むものとする)。 C_T の範囲は、トンネル径にもよるが、実績値より500,000円/m ~ 1,000,000円/m程度である。

以上の工事費 (本工事費+付帯工事費) の30%を間接経費として算定する (文献³⁾より)。

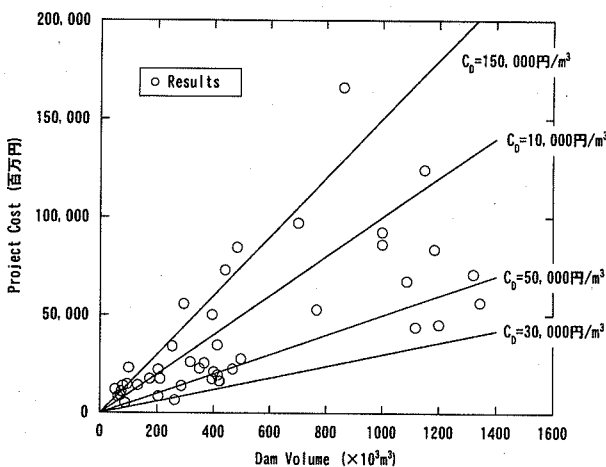


図-4 堤体積～事業費関係

b) 水没補償費 (家屋補償費, 用地費)

ダム貯水池内の1km²当たりの水没家屋数を N_H (戸/km²)、家屋一戸当たりの補償費を C_H (円/戸)、また、1m²当たりの用地費 C_L (円/m²) とする。任意の水没面積 A_R (km²) に対するトータル水没補償は、 $A_R(N_H C_H + 10^6 C_L)$ となる。

また、文献³⁾によると、都道府県別家屋1m²当たり評価額は、平成12年評価額で、120~170千円/m²程度である。実績より、ダムサイトにおける標準値としては、 $C_H=30,000,000$ 円/戸、 $C_L=5,000$ 円/m²程度である。

c) 初期投資費のまとめ

工事諸費を、本工事費、付帯工事費、用地費、補償費および間接経費の合計の20%として算定し (文献³⁾より)、初期投資額は下記のとおりとなる。

Initial cost

$$= 1.2 \left[1.3 \left\{ C_D (a + bh) h + L_T C_T \right\} + A_R (N_H C_H + 10^6 C_L) \right] \quad (3)$$

必要容量 V_R に関する表現に変形して、

Initial cost

$$= 1.2 \left[1.3 \left\{ C_D \left[a + b(3JKV_R)^{1/3} \right] (3JKV_R)^{1/3} + L_T C_T \right\} + \left(\frac{9V_R^2}{JK} \right)^{1/3} (N_H C_H + 10^6 C_L) \right] \quad (4)$$

(3) 維持管理費 (Running cost)

維持管理費に関する研究成果としては金銅ら⁴⁾がある。当成果を参考とし、維持管理費は、水質保全、土砂管理、管理用設備 (放流設備・取水設備、操作・制御設備)、その他 (例えば、事務所人件費、定期点検費など) の4項目に分類してモデル化を行った。

a) 土砂管理費

堆積土砂対策としては、掘削・浚渫、貯砂ダム、排砂バイパス、およびフラッシング排砂等が考えられる。ここでは、一般的な土砂対策手法として、掘削・浚渫後、ダンプ運搬することを想定する。大矢ら⁴⁾によると、運搬距離 T_L (km) に対する単位体積当たりの土砂処理コスト C_S (円/m³) は、下式のとおり表せる。

$$C_S = p \cdot T_L + q \quad (5)$$

ここに、 p : 運搬距離に対する単位体積当たりの処理コスト増加の傾き、 q : 運搬距離がゼロの場合における処理コスト ($C_S \sim T_L$ グラフにおける切片) である。なお、大矢らの研究成果によると、 $p=75$ 円/m³/km、 $q=3,000$ 円/m³程度である。

土砂対策は、ダム完成の N 年後から実施するものとし、 R_{CS}' を生産土砂量に対して土砂対策が必要となる割合とする (※前出 R_{CS} とは意味合いが異なる)。これより、対象土砂量は $q_s A_R C_{CS}'$ となる (治水専用ダムの場合、土砂対策は不要と考えて $R_{CS}'=0$)。

よって、年間の土砂管理費は、ダムの完成 N 年後以降に、年間 $q_s A_R C_{CS}' (p \cdot T_L + q)$ 発生する。

b) 水質保全費

利水容量に対する単位体積当たり (m³) の年間水質保全費 (濁水長期化対策費等) を C_{WP} とし、年間水質保全費は $C_{WP} V_W$ となる (常時貯留が必要となる V_W に対して発生)。水質保全の必要性は流入条件 (回転率等) によって異なるが、水質保全が必要となる場合の C_{WP} の範囲は5~10円/m³/年程度である。

c) 管理設備費

堤体の単位体積当たり (m³) の年間管理設備費を C_{CE} とすると、年間の管理設備費 (放流設備の更新

や補修等)は、 $C_{CE}(a+b(3JKV_R)^{1/3})(3JKV_R)^{1/3}$ となる。 C_{CE} は、300~600円/m³/年程度である。ここでは、多目的ダムには $C_{CE}=600$ 円/m³/年、治水専用および利水専用ダムについては $C_{CE}=400$ 円/m³/年程度を設定する(多目的ダムはゲートを有し、利水専用ダムには大規模なゲートは不要となるため)。

また、機械の更新等を考慮すると、本来、管理設備費はある程度の周期性を有して発生するものと考えられるが、ここでは検討の簡略化のため、毎年平均的に発生するものとする。

d) その他維持管理費

工事箇所1箇所につき、 C_{PE} (円/箇所)の費用が発生するものとする(分離型は2箇所必要)。 C_{PE} は、100,000,000円/箇所/年程度である。

e) 維持管理費のまとめ

以上より、運用開始から発生する維持管理費は以下のとおりである。

Running cost

$$= |q_s AR_{CS}'(p \cdot T_L + q)|_{N年以降} + C_{WP}V_W + C_{CE}(a+b(3JKV_R)^{1/3})(3JKV_R)^{1/3} + C_{PE} \quad (6)$$

(4) トータルコスト (Total Cost)

ある必要貯水池容量に対する T 年経過時のトータルコストは式(6)のとおりである。

なお、現在価値化に用いる割引率は、山上ら⁵⁾の成果より2%とする。

Total cost

$$= 1.2 \left[1.3 \left[C_D \left\{ a + b(3JKV_R)^{1/3} \right\} (3JKV_R)^{1/3} + L_T C_T \right] + \left(\frac{9V_R^2}{JK} \right)^{1/3} (N_H C_H + 10^6 C_L) \right] + \sum_{t=1}^T \left[\frac{|q_s AR_{CS}'(p \cdot T_L + q)|_{N年以降}}{(1+0.02)^t} + \frac{C_{WP}V_W + C_{CE}(a+b(3JKV_R)^{1/3})(3JKV_R)^{1/3} + C_{PE}}{(1+0.02)^t} \right] \quad (7)$$

3. 検討条件

(1) 想定するダム事業

前節までのモデル化により、式(7)を用いることで、任意のダム計画諸元に対して、任意の経過年(T 年)における事業トータルコストの算出が可能となる。ここでは、我が国における標準的なダム事業として、表-1に示すダム事業を想定する。また、土砂管理は、両事業ともにダム完成後50年目から実施するものとする(堆砂容量を100年分と考えて、1/2を経過した時点)。

表-1 想定するダム事業

	集中型ダム事業	分離型ダム事業	
		[本川]治水専用ダム	[支川]利水専用ダム
山地勾配 J	1/3	1/3	1/2
河道勾配 K	1/100	1/100	1/50
堆砂抑制係数 R_{CS}	1.0	0.3	1.0
堤体積係数 a	-2000	-2000	-2000
堤体積係数 b	100	100	100
ダム堤体単価 C_D (円/m ³)	80,000	80,000	80,000
単価割合 R_C	1.0	1.0	0.75
導水距離 L_T (m)	-	-	500
導水施設単価 C_T (円/m)	-	-	700,000
1km ² 当たりの水没家屋数 N_H (戸/km ²)	200	200	200
一軒当たりの補償費 C_H (千円/戸)	30,000	30,000	30,000
1m ² 当たりの用地費 C_L (円/m ²)	5,000	5,000	5,000
土砂対策抑制係数 R_{CS}' (R_{CS} とは異なる)	1.0	0.0	1.0
土砂処理パラメータ p	75	75	75
土砂処理パラメータ q	3000	3000	3000
土砂運搬距離 T_L (km)	40	40	40
水質保全単価 C_{WP} (円/m ³ /年)	7	7	7
管理設備単価 C_{CE} (円/m ³ /年)	600	400	400
その他維持管理費 C_{PE} (千円/箇所/年)	100,000	100,000	100,000

(2) CAP/MAS (貯水池寿命) を用いた整理

Basson⁷⁾は、下に示す指標によりダム貯水池の排砂の可能性を検討することを提案しており、著者⁸⁾は我が国の多目的ダムを対象に、同指標を適用し、フラッシング排砂の可能性について検討している。本検討においてもこれを採用する。

・貯水池の流況に関する指標

$$1/\text{貯水池回転率} = \text{CAP}/\text{MAR} \quad (8)$$

(CAP: 総貯水容量, MAR: 平均年間流入量)

・貯水池に流入する土砂量に関する指標

$$\text{貯水池寿命} = \text{CAP}/\text{MAS} \quad (9)$$

(MAS: 平均年間土砂流入量)

集中型事業のCAP/MASは次式のとおりとなる。

$$\frac{CAP}{MAS} = \frac{\text{総貯水容量}}{\text{年間流入土砂量}} = \frac{V_F + V_W + 100q_s A}{q_s A} \quad (10)$$

ここで、上式より、 V_F と V_W が一定であれば、検討パラメータとして CAP/MAS に着目することは、年間土砂流入量 $q_s A$ に着目することと同等であり（但し q_s と A の組合せは無数にある）、 $q_s A$ に応じて、一意的に貯水容量（トータルコスト）が決定されることがわかる。

(3) 検討結果の評価方法

集中型ダム事業と分離型ダム事業のトータルコストの比較には、以下に示すパラメータを用いた。

- 集中型ダム事業のコストが分散型ダム事業のコストを追い越すまでの年数 T_0 。（同価値年数）
- 経過年数 1年、100年、200年における両事業のコスト比 C_D/C_C
 $(C_D$: 分離型事業費, C_C : 集中型事業費)

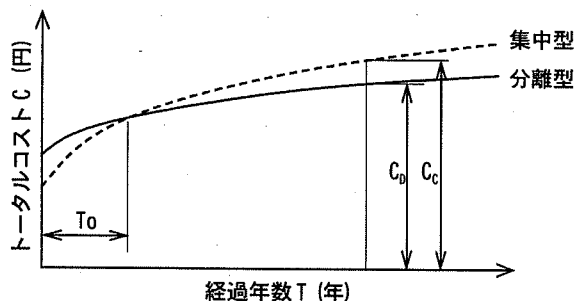


図-5 評価方法模式図

4. 検討結果および考察

(1) C_D/C_C の経時変化

任意の貯水池寿命 CAP/MAS と経過年 T 年に対する C_D/C_C の値をコンターラインにして図-6に示す（ $C_D/C_C < 1.0$ の領域で分離型事業が有利となる）。

これによると、貯水池寿命 CAP/MAS が300年程度のダム事業であれば、経過年に支配されず集中型事業の方が有利であることがわかる。一方、経過年ごとに、 $CAP/MAS = 150 \sim 200$ 年程度の範囲に $C_D/C_C = 1.0$ の境界がみられる。

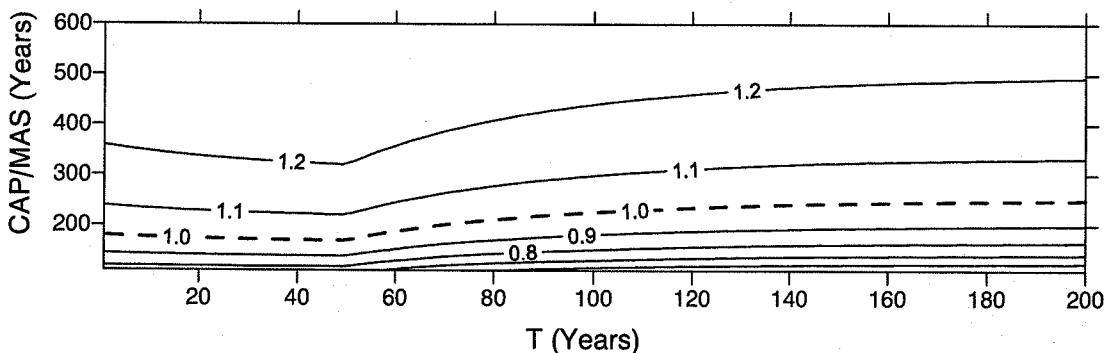


図-6 C_D/C_C コンターライン

(2) CAP/MAS と C_D/C_C の関係

図-6の $C_D/C_C = 1.0$ の境界を確認するために、 $T=1$ 年、100年、200年における CAP/MAS と C_D/C_C の関係で書き換えたものを図-7に示す。これによると、以下の範囲で分離型ダム事業が有利（ $C_D/C_C < 1.0$ ）となる。

$$\begin{cases} T=1\text{年} : & CAP/MAS \leq 170\text{年} \\ T=100\text{年} : & CAP/MAS \leq 220\text{年} \\ T=200\text{年} : & CAP/MAS \leq 240\text{年} \end{cases}$$

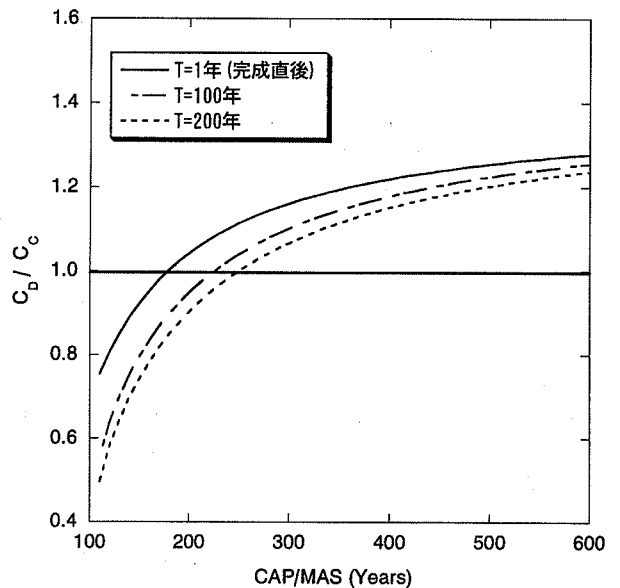


図-7 $CAP/MAS \sim C_D/C_C$ の関係

(3) 我が国のダム事業に関する考察

我が国の多目的ダム（直轄・公団・補助ダム256ダム）を対象とした $CAP/MAR \sim CAP/MAS$ プロット図⁸⁾に対して、今回の検討で得られた分離型ダム事業がトータルコスト面で有利となる CAP/MAS の境界線（ $T=1$ 年： $CAP/MAS \leq 170$ 年、 $T=100$ 年： $CAP/MAS \leq 220$ 年）を記入した結果を図-8に示す。なお、同図には著者の検討成果⁸⁾のフラッシング排砂可能範囲も併せて示す（ Fe （排砂効率）=0.02、 β （排砂使用可能水量比）=0.1）。また、我が国の多目的ダムのうち、分離型ダム事業として計画する方が有利となる可能性のあるダム事業の数を表-2に整理する。

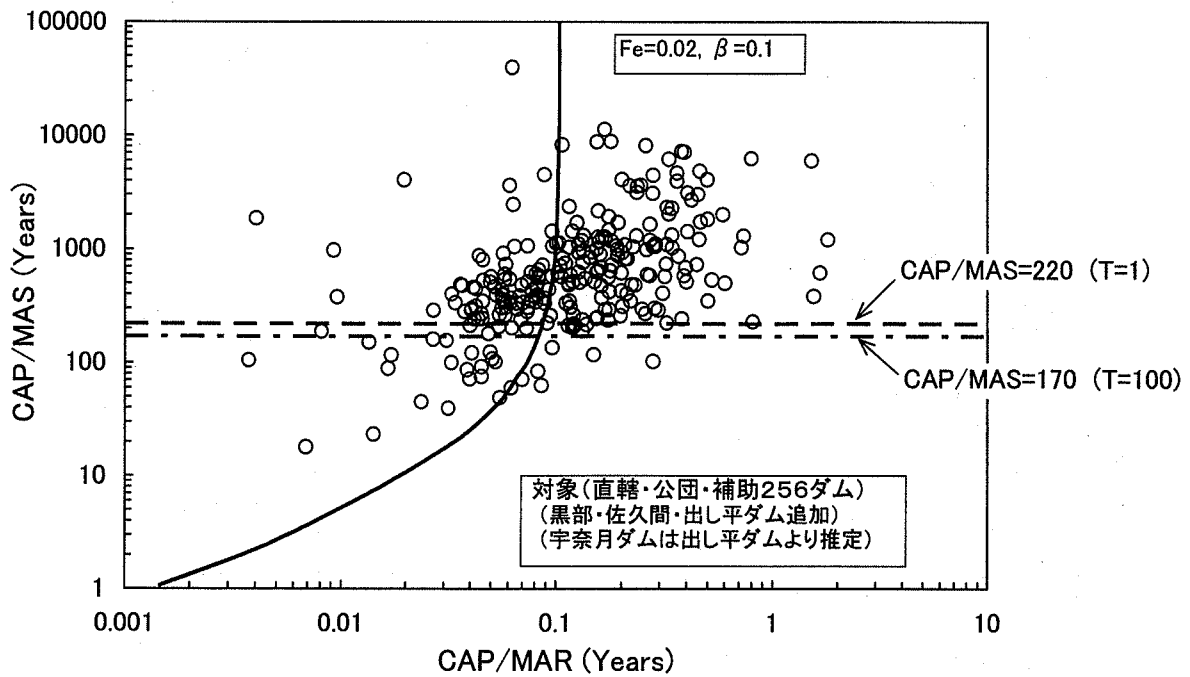


図-8 分離型ダム事業が有利となる境界線 (T=0, T=100)

5. まとめ

本研究は、ダム事業の簡略的なモデル化を行い、ライフサイクルコストの観点より、土砂管理の軽減を目的とした治水利水分離型ダム事業の可能性を検討したものである。検討の結果、次の点が明らかとなった。

- 貯水池寿命 CAP/MAS が170年程度以下のダム計画の場合、建設初期の段階から分離型ダム事業が有利となる可能性がある。
- 貯水池寿命 CAP/MAS が220年程度以下のダム計画の場合、ライフサイクルコストの観点より、建設後100年程度で分離型ダム事業が有利となる可能性がある。
- 我が国における多目的ダムにおいて、上記aおよびbの条件に該当するダムは、それぞれ、a: 9.4%, b: 14.5%程度である。

これは、今後我が国において、多目的ダム事業を計画する際には、分離型ダム事業も視野に入れた検討がなされるべきであることを示唆している。また、今後、既設ダムの再編成を検討する場合に、治水ダムと利水ダムの目的を分離した事業も検討に値するものと考えられる。

なお、本研究では、土砂管理手法として、一般的な「掘削・浚渫後にダンプ運搬」を想定したが、近年土砂管理手法として様々な方策が提案されており、場合によっては、今回想定した手法よりも安価に実施できる可能性がある。参考までに図-8には著者⁸⁾が提案しているフラッシング排砂可能範囲も図示した。これからも明らかなように、今後は、技術的観点からの、「土砂管理手法として何を採用するか」と、経済的観点からの「ライフサイクルとして有利となるか」の両面からの検討が必要となる。

表-2 分離型ダム事業が有利となるダム事業数

	ダム数	全体に占める割合
$CAP/MAS \leq 170$ (建設初期の段階より分離型事業が有利となるダム)	24	9.4%
$CAP/MAS \leq 220$ (建設後100年の時点で分離型事業が有利となるダム)	55	14.5%

参考文献

- 角哲也：水資源の持続的管理のための貯水池土砂管理の推進，水文・水資源学会2003年研究発表会要旨集，pp. 34-35, 2003.
- ダム年鑑 2004.
- 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアルH12年5月
- 金銅将史，川崎秀明：ダムの維持管理コストとライフサイクルマネジメント，土木技術資料 45-6, pp46-51, 2003.
- 大矢通弘，角哲也，嘉門雅史：ダム堆砂りサイクルのコスト分析とPFIによる事業化検討，ダム工学 Vol. 13, No. 2, pp. 90-106, 2003.
- 山上裕也，松下博通，佐川康貴，上村祐二：ライフサイクルコスト (LCC) 試算で用いられる割引率に関する検討，土木学会第58回年学術講演会，pp. 61-62, 2004.
- Basson, G.: Sediment pass-through operations in reservoirs, Proc. Int. Conf. on Reservoir Sedimentation, 2, pp. 946-991, 1996.
- 角哲也：ダム貯水池のフラッシング排砂における排砂効率，ダム工学, Vol. 10, No3, pp. 211-221, 2000.

(2004. 4. 7受付)