

## ◆ 温暖化ガス対策特集 ◆

## コンクリートダム建設に伴って発生する二酸化炭素量の分析

永山 功\* 宮内茂行\*\*

## 1. はじめに

近年、地球温暖化の原因とされる二酸化炭素(以下CO<sub>2</sub>という)の排出量を削減することが世界的な課題となっている。

我が国におけるCO<sub>2</sub>排出量の20%は建設産業関連分野からの排出といわれている。このため、各種建設工事においてもCO<sub>2</sub>排出量削減に積極的に取り組む必要がある。ダム工事に伴うCO<sub>2</sub>排出量に関しては、その算定について既にいくつかの研究がなされている<sup>1),2)</sup>。本論文ではコンクリートダム工事におけるCO<sub>2</sub>排出量について分析し、CO<sub>2</sub>排出量の削減方法について考察を加えた。

## 2. 検討方法

2.1 CO<sub>2</sub>排出量の算出方法

本研究では、建設省総合技術開発プロジェクト「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」において提案された方法<sup>3)</sup>によってCO<sub>2</sub>排出量を求めた。この方法は、産業連関分析より求められた各項目のCO<sub>2</sub>濃度(単位価格あたりのCO<sub>2</sub>排出量)をもとに、以下の式よりCO<sub>2</sub>排出量を算出するものである。

①設備、機械等の損耗 :

$$\text{CO}_2 \text{排出量} =$$

$$\text{CO}_2 \text{濃度} \times \text{機械等の基礎価格} \times \text{運転時間} \\ \div \text{耐用時間}$$

②設備、機械等の燃料または電力消費 :

$$\text{CO}_2 \text{排出量} =$$

$$\text{CO}_2 \text{濃度} \times \text{燃料(または電力)単価} \\ \times \text{燃料(または電力)消費量}$$

③建設資材の消費

$$\text{CO}_2 \text{排出量} =$$

$$\text{CO}_2 \text{濃度} \times \text{資材単価} \times \text{施工数量}$$

主な項目のCO<sub>2</sub>濃度は表-1に示すとおりである。表中、C-kgは炭素換算kgを表し、1C-kgは3.67kgのCO<sub>2</sub>に相当する。なお、軽油、火薬のCO<sub>2</sub>濃度は燃焼に伴うCO<sub>2</sub>排出量も含んだ値である。

Estimation of Carbon Dioxide Emissions from Concrete Dam Construction

表-1 CO<sub>2</sub>濃度

項目	CO <sub>2</sub> 濃度 (C-kg/千円)
建設機械(ブルドーザー等)	1.14
運搬機械(ダンプトラック等)	0.967
ポンプ等	1.17
セメント	22.3
鋼材	6.06
化学製品	2.22
プラスチック製品	2.15
ダイナマイト	1.42
ANFO	1.71
圧縮ガス、液化ガス	3.55
電力	7.33
軽油	33.3

表-2 対象工事の範囲

工種	内容
	本体工事
基礎掘削工	掘削、掘削グリヤ運搬、法面処理
コンクリート工	コンクリート製造、コンクリート打設、打継目処理、目地切り、型枠、クーリング、継ぎ目グラウチング、濁水処理、止水工、鋼材・鉄筋工
基礎処理工	カーテングラウチング、コンソリデーショングラウチング、濁水処理
	原石山工事
原石採取工	原石掘削、原石運搬、廃棄岩処理
骨材製造工	一次破碎、二次破碎、ふるい分け、製砂、濁水処理、骨材運搬

また、施工設備、機械の耐用年数、時間あたり標準作業量、機械出力、燃料消費率、電力消費率は「平成8年度土木工事標準積算基準書(機械経費編)」(関東地方建設局)<sup>4)</sup>に、建設資材の単位作業時間当たりの施工数量は「多目的ダムの建設」(ダム技術センター)<sup>5)</sup>によった。なお、CO<sub>2</sub>濃度は平成2年度の産業連関表に基づいて算出されているため、機械の価格、資材の単価は平成2年度における平均的な値を用いた。

## 2.2 ダム工事の範囲

本研究では、重力式コンクリートダムを対象とし、工事の対象範囲はダム本体工事に限定し、付

替え道路、補償工事、また仮設備の土木工事は対象外とした。ただし、仮設備機械、原石山掘削、廃棄岩処理は工事の対象に含めた。工事の対象範囲の概要を表-2に示す。なお、各工種とも使用機械は主たる機械に限定し、細かな機械は省略した。

### 2.3 計算ソフトの開発

CO<sub>2</sub>排出量の算出にあたっては、市販の表計算プログラムを利用したCO<sub>2</sub>排出量算出ソフトを開発した。本ソフトを用いれば、ダムの諸元等を入力することにより、各工種別、費目別（機械損

表-3 試算のための入力データ（主なもの）

項目	単位	数量
ダム諸元		
堤高	m	100
堤頂長	m	250
堤体積	m <sup>3</sup>	508,000
鋼材量(対堤体積)	%	0.5
コンクリート関係		
単位セメント量	kg/m <sup>3</sup>	210(外部) 120(RCD)
単位骨材量	kg/m <sup>3</sup>	2,100 (外部) 2,200 (RCD)
外部コンクリート厚	m	2
リフト厚	m	1
プラント関係		
骨材生産ロス	%	15
スラッジ発生率 (骨材プラント)	%	10
(ダムサイト、基礎処理)		2
基礎処理		
カーテングラウチング	m	23,300
コンソリデーショングラウチング	m	5,300
単位セメント注入量	kg/m	20
基礎掘削		
基礎掘削量(対堤体積)	%	100
土砂比率	%	20
原石山		
地山の単位体積質量	t/m <sup>3</sup>	2.5
骨材歩留まり	%	60
運搬距離		
原石山-骨材プラント	km	2
原石山-土捨場	km	2
骨材プラント-土捨場	km	2
ダムサイト-土捨場	km	2

料、動力、資材)にCO<sub>2</sub>排出量を自動的に計算できるようになっている。

### 3. 検討結果

#### 3.1 モルダムによるCO<sub>2</sub>排出量の試算

##### (1) 試算条件

まず、堤高100m、堤体積約50万m<sup>3</sup>の重力式コンクリートダムを例にとり、RCD工法で施工した場合のCO<sub>2</sub>排出量を試算した。なお、コンクリート運搬はケーブルクレーンとダンプトラックの組み合わせとした。試算に用いた入力データのうち主要なものを表-3に示す。

##### (2) 試算結果

表-3の条件のもとでCO<sub>2</sub>排出量を試算すると、総排出量は34,900C-t、堤体積1m<sup>3</sup>あたりの排出量は68.6C-kgとなった。また、その内訳を工種別、費目別に整理すると図-1のようになった。ここで、工種は次のように分類した。

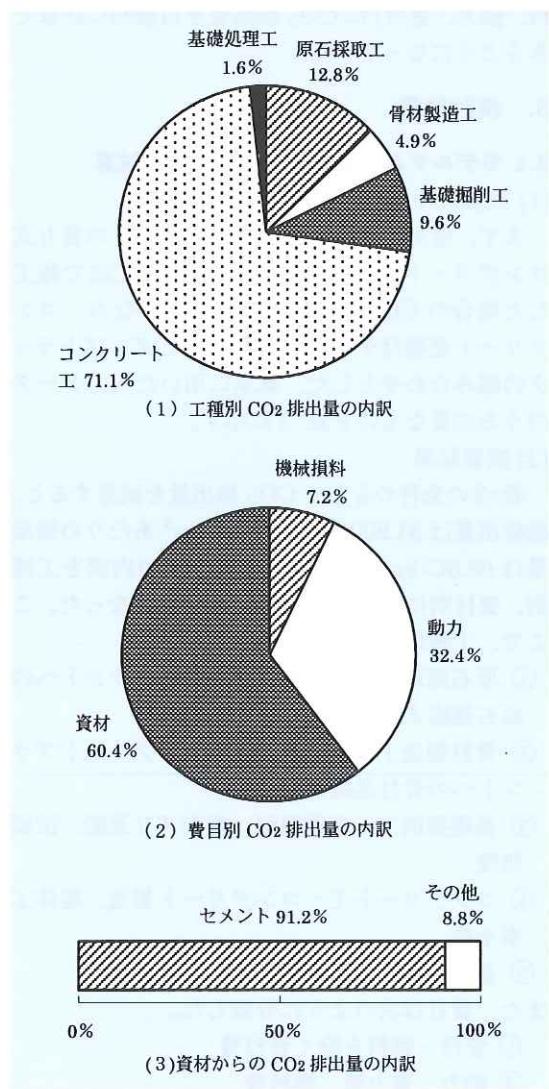
- ① 原石採取工：原石掘削から骨材プラントへの原石運搬まで・廃棄岩処理を含む。
  - ② 骨材製造工：原石破碎からコンクリートプラントへの骨材運搬まで
  - ③ 基礎掘削工：基礎掘削、掘削ズリ運搬、法面処理
  - ④ コンクリート工：コンクリート製造、堤体工事全般
  - ⑤ 基礎処理工：基礎グラウチング全般
- また、費目は次のように分類した。
- ① 資材：燃料を除く資材費
  - ② 動力：電力費、燃料費
  - ③ 機械損料：設備、機械の損料

図によれば、工種別に見るとコンクリート工に関わるCO<sub>2</sub>排出量が全体の71%を占め、また、費目別では資材に関わるCO<sub>2</sub>排出量が全体の60%を占めている。また、資材に関わるCO<sub>2</sub>排出量の内訳を図-1に併記したが、セメントからのCO<sub>2</sub>排出量がその91%(排出量全体の56%)を占めている。これより、コンクリートダムの建設においてCO<sub>2</sub>排出量を削減するにはコンクリートの単位セメント量の削減に努めることが重要であるといえる。

#### 3.2 RCD工法と柱状工法のCO<sub>2</sub>排出量の比較

##### (1) 比較の概要

重力式コンクリートダムの施工法には、従来型の施工法である柱状工法と合理化施工法である

図-1 CO<sub>2</sub>排出量の内訳 (堤高 100m)

RCD 工法がある。RCD 工法はコンクリートダムの合理化施工を目指して開発された工法で、以下のような特徴を有している。

- ① 貧配合コンクリートを用いることによるセメント使用量の削減
- ② 面状施工法の採用による機械化施工の推進
- ③ 貧配合コンクリートの採用と温度応力に配慮した打設方法の採用によるパイプクーリングの省略

ここでは、上述したモデルダムを柱状工法で施工した場合と RCD 工法で施工した場合について比較検討した。なお、試算に用いた入力データのうち、柱状工法に伴う変更箇所を表-4 に示す。また、柱状工法におけるコンクリートの運搬はケー

ブルクレーンによるものとした。

## (2) 試算結果

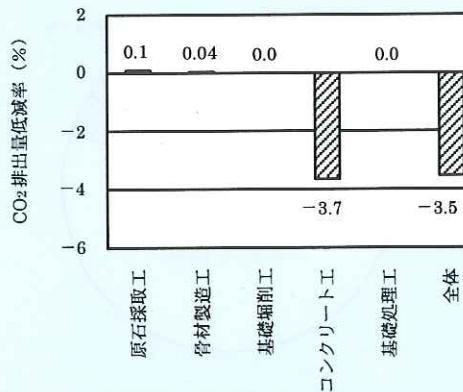
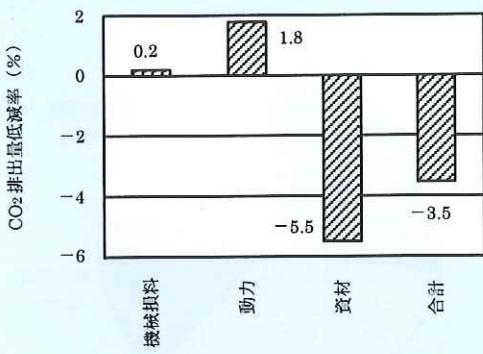
表-4 の条件のもとで柱状工法における CO<sub>2</sub> 排出量を試算すると、総排出量は 36,100C-t、堤体積 1m<sup>3</sup>あたりの排出量は 71.1C-kg となり、RCD 工法における CO<sub>2</sub> 排出量は柱状工法における CO<sub>2</sub> 排出量より 3.5% 少ない結果となった。すなわち、RCD 工法は、より経済的な施工法であると同時に、より CO<sub>2</sub> 排出量の少ない工法といえる。

ここで、CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果を各工種別、費目別に求めると図-2 のようになる。図によれば、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に貢献しているのは、工種別ではコンクリート工、費目別では資材である。これは、RCD 用コンクリートが貧配合コンクリートであり、セメント使用量が少ないのである。一方、工種別では原石採取、骨材製造、費目別では機械損料、動力で CO<sub>2</sub> 排出量が増加している。機械損料、動力で CO<sub>2</sub> 排出量が増加しているのは、RCD 工法では機械化施工がより進んでいるからであり、また原石採取、骨材製造で CO<sub>2</sub> 排出量が増加しているのは、RCD 用コンクリートは貧配合コンクリートであるため、単位骨材量が増加しているからである。

なお、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が最も大きかったコンクリート工について、その低減率の内訳を示すと図-3 のようになる。工種細目において CO<sub>2</sub> 排出量削減に最も効果があるのはコンクリート製造 (RCD 用コンクリートの使用) とクーリング (クーリングの省略) となっている。なお、継日グラウチ

表-4 試算のためのデータ諸元 (主なもの)

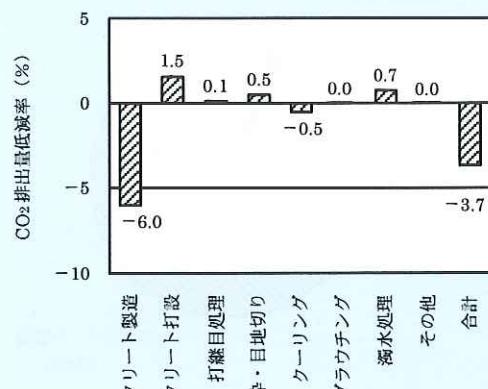
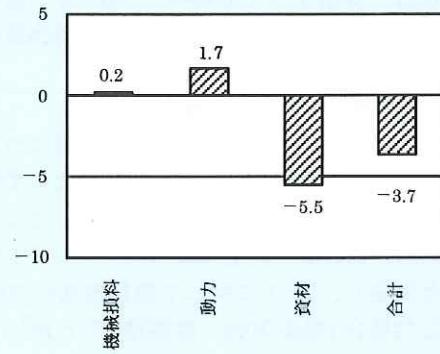
項目	単位	数量
コンクリート関係		
単位セメント量	kg/m <sup>3</sup>	210(外部) 140(内部)
単位骨材量	kg/m <sup>3</sup>	2,100 (外部) 2,180 (内部)
リフト厚	m	1.5
クーリング・継日グラウチング工		
縦継目間隔	m	40
クーリングパイプ間隔	m	2
年平均気温	°C	15
年平均河川水温	°C	10
縦継目開度	mm	1
グラウチング配管間隔	m	1
グラウト濃度(W/C)		2:1

(1) 工種別に見た CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果(2) 費目別に見た CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果図-2 柱状工法と比較した RCD 工法の CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果

ングの省略も CO<sub>2</sub> に削減に効果があるはずであるが、全体の CO<sub>2</sub> 排出量削減に及ぼす影響は極めて小さい。なお、RCD 工法におけるコンクリート工に関わる CO<sub>2</sub> 排出量の内訳を図-4 に示す。

### 3.3 コンクリートに関わる CO<sub>2</sub> 排出量

コンクリートダムの建設における CO<sub>2</sub> 排出量の主要な要因はコンクリート工である。そこで、コンクリート 1 m<sup>3</sup>あたりの CO<sub>2</sub> 排出量について分析した。コンクリートに関わる CO<sub>2</sub> 排出量は図-1 における原石採取工、骨材製造工、コンクリート工の三つであり、上述のダムの場合、これら工種における CO<sub>2</sub> 排出量はコンクリート 1 m<sup>3</sup> あたり 60.8C·kg となる。この内訳を示すと図-5(1) のようになり、セメントが約 60%、骨材が約 20%、残りがコンクリートの製造や打込み、および鋼材等の材料に関わるものである。

(1) 工種細目別に見た CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果(2) 費目別に見た CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果図-3 柱状工法と比較した RCD 工法の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果(コンクリート工)

ここで、セメントに次いで CO<sub>2</sub> 排出量が多い骨材について分析する。骨材による CO<sub>2</sub> 排出量は図-1 における原石採取工、骨材製造工の二つであり、その内訳を示すと図-5(2) のようになる。図によれば、原石採取工(廃棄岩掘削・運搬、原石採取・運搬)が約 7 割を占めており、骨材の CO<sub>2</sub> 排出量に大きく影響しているといえる。そのうち、原石運搬が最も多く、次に廃棄岩(掘削、運搬)が大きな割合を占めている。すなわち、ダムサイトの近傍に原石山を見いだすことが骨材の CO<sub>2</sub> 排出量の削減にとって極めて有効であることがわかる。また、廃棄岩については、近年、省資源、自然環境改変の最小化といった観点からも骨材の有効利用が呼ばれており、その削減が求められている。いま、表-1 に示した計算条件から骨材の歩留まりを変化させ、骨材の歩留まりと CO<sub>2</sub> 排出量

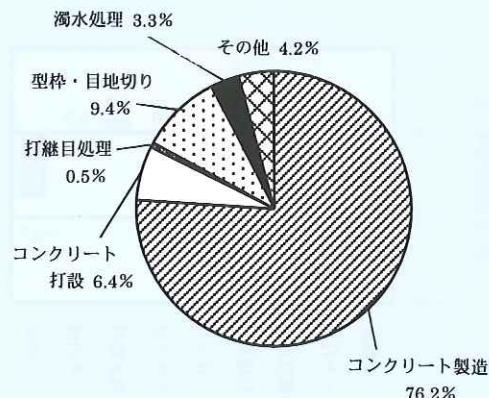


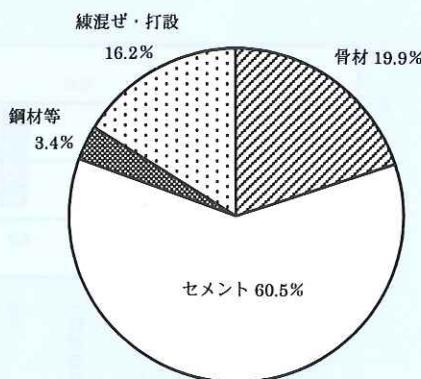
図-4 RCD工法のコンクリート工に関わるCO<sub>2</sub>排出量の内訳

削減効果の関係を求めるとき図-6のようになる。図によれば、歩留まりを60%から80%まで高めると、コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量は約3%削減されることがわかる。

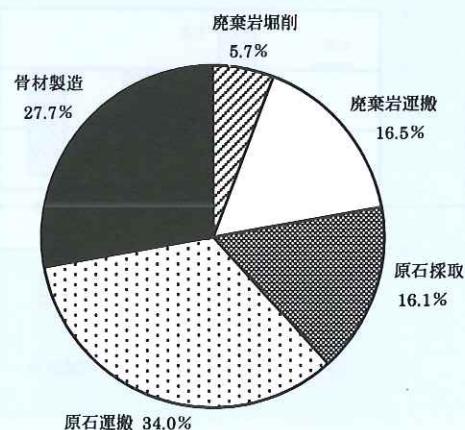
#### 3.4 ダム規模とCO<sub>2</sub>排出量の関係

次に、ダム規模とCO<sub>2</sub>排出量の関係について検討を加えた。実際には、ダム規模によって仮設備や施工機械の規模が変わってくるが、ここでは便宜的に、仮設備、施工機械は同一のものを使用すると仮定し、表-1に対して堤体形状が70%に縮小した場合(堤高70m、堤体積17万m<sup>3</sup>)を想定した。

このような条件でCO<sub>2</sub>排出量を試算すると、総排出量は12,400C-t、堤体積1m<sup>3</sup>あたりの排出量は71.5C-kg/m<sup>3</sup>となり、堤高100mの場合(図-1)と比べて堤体積1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量は約4%増加する結果となった。また、その内訳を工種別、費目別に整理すると図-7のようになつた。図によれば、堤高100mの場合と比べて内訳比率が増加した工種は、基礎処理工、コンクリート工である。基礎処理工の比率が増加する理由は、堤体積は堤高の3乗に比例するのに対して基礎処理工の規模は堤高の2乗に比例し、規模の小さいダムほど基礎処理工の比率が増大するためである。また、コンクリート工の比率が増加する理由は、外部コンクリートの比率の増加と型枠工の比率の増加によつている。これも、外部コンクリート量、型枠量は堤高の2乗に比例して変化するからである。ただし、大局的に見れば、堤体積1m<sup>3</sup>当たりのCO<sub>2</sub>排出量はダム規模にそれほど大きく依存していないといえる。



(1) コンクリートに関わるCO<sub>2</sub>排出量の内訳



(2) 骨材に関わるCO<sub>2</sub>排出量の内訳

図-5 コンクリートに関わるCO<sub>2</sub>排出量の内訳

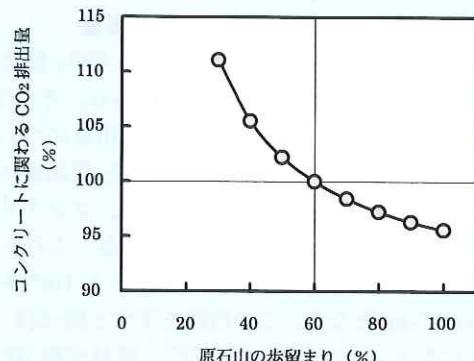


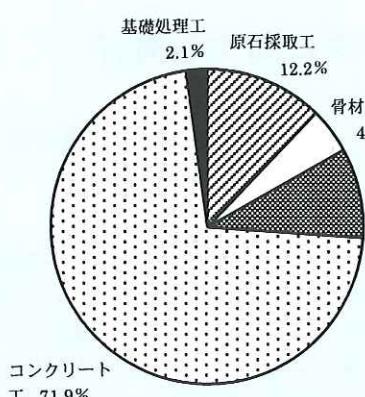
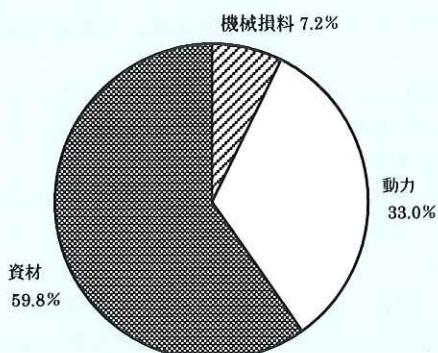
図-6 原石山の歩留まりとコンクリートに関わるCO<sub>2</sub>排出量の関係

#### 4.まとめ

以上、重力式コンクリートダムの建設におけるCO<sub>2</sub>排出量について検討した。その結果、CO<sub>2</sub>排出量を削減するには、コンクリート中のセメント使用量を抑えること、またはCO<sub>2</sub>排出量の小さいセメントを使用することが重要なことが分かった。このためには、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの混和材をセメントの代替として積極的に利用していくこと、または省エネルギーセメント<sup>6)</sup>を積極的に利用していくことが考えられる。その具体的方法については、今後、検討を加えていきたい。また、今回の分析はダム建設時のCO<sub>2</sub>排出量に限定したが、今後は、運用後のダムの効用も含め、ライフサイクルにわたっての評価も必要になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 小泉泰通、高柳則男：ダム建設のライフサイクル評価、第4回地球環境シンポジウム講演集,pp49-56,1996.7
- 2) 久保田勝、田中 靖、花田弘幸：ダムによる水質源開発のCO<sub>2</sub>発生量について、ダム技術, No.147, pp15-20, 1998.12
- 3) 建設省：省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発第一編土木分野最終報告書,pp22-38,1996.10
- 4) 関東地方建設局：平成8年度土木工事標準積算基準書(機械経費編),1996.
- 5) (財)ダム技術センター：多目的ダムの建設(工事積算編),1995.
- 6) 例えば寺田剛、坂本浩行、片脇清：省エネルギー型セメントの現状調査と室内試験、土木技術資料, Vol.37-9, pp26-31, 1995.9

(1) 工種別CO<sub>2</sub>排出量の内訳(2) 費目別CO<sub>2</sub>排出量の内訳図-7 CO<sub>2</sub>排出量の内訳(堤高70m)

永山 功\*



建設省土木研究所  
企画部地下開発研究官  
(前ダム構造研究室長)  
Isao NAGAYAMA

宮内茂行\*\*



同ダム部ダム構造研究室  
主任研究員  
Shigeyuki MIYUCHI