

土 木 研 究 所 資 料

下り坂省エネルギー道路トンネル
(重力利用走行方式)の適用性に
関 する 調 査 報 告

昭和 59 年 3 月

建設省土木研究所
道路部新交通研究室

Copyright © 1984 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ま え が き

近年高速道路の発達に伴って、横断道の建設も本格化し山岳部における長大トンネルの建設が余儀なくされ、これに伴って、換気装置も大規模化する傾向が見られる。このようなトンネルにおいては、換気のための施設の建設費や維持管理費が増大し、トンネルの建設費や維持費に占める割合も増加するため、経済性を考えるうえで換気に関する費用は重要な要素となる。このため、排ガス量の少い自動車走行方式を導入することにより、換気に関連する費用の軽減化を図ることは有意義である。

本調査は、道路トンネルの縦断線形が下り勾配（2～3%程度）となるよう路線選定し、そこに重力を利用した走行方式（「重力利用走行方式」と呼ぶ）を導入した際、どの程度換気設備費やその維持管理費の節減が期待できるかについて分析したものである。

その結果、第9次道路整備5ケ年計画で現在計画されているいくつかのトンネルを対象としたケーススタディにおいては、原案に対し、比較路線の平面・縦断線形がやや厳しくなる結果となったが-2.5%程度の勾配を有するトンネルを採用することにより、明かり部を含めて全体的には省エネルギー効果を有するケースのあることが実証的に明らかとなった。

本報告書は、トンネルの維持管理に関する実態調査、自動車の排出ガスに関する基礎実験等を通じて実施した重力利用走行方式の適用性についての検討結果をとりまとめたものである。

昭和59年3月

道路部新交通研究室

室 長 神 崎 紘 郎

主任研究員 杉 山 保 利

研 究 員 浦 野 隆

川 名 万寿雄

「トンネル内自動車輸送システム調査委員会」名簿

順不同

	氏 名	所 属 (役 職)
委 員 長	武 部 健 一	元日本道路公団 常任参与
委 員	小 林 芳 夫	道路局 道路経済調査室長
	(岡 田 哲 夫)	
	宮 原 克 典	道路局 高速国道課長
〃	(鈴 木 道 夫)	
〃	田 中 敬 一	土木研究所 道路部長
〃	近 藤 正	日本道路公団 技術部長
	(桂 木 睦 夫)	
	(中 大 路 為 昭)	
〃	稲 見 悦 彦	日本道路公団 技術部調査役
	(長 友 成 樹)	
〃	今 村 浩 三	日本道路公団 計画部長
	(内 田 恵 之 介)	
〃	橋 本 弘 之	日本道路公団 計画部 調査役
〃	後 藤 健 一	(財)日本自動車研究所 理事
〃	伊 達 英 夫	(株)住友道路研究所 技術部長
〃	小 川 哲 夫	(財)土木研究センター 参与 (埼玉大学 工学部助教授)
〃	田 中 柳 之 助	(財)土木研究センター 理事
幹 事	城 処 求 行	道路局 道路経済調査室補佐
	(霜 島 稜 一)	
〃	落 合 定 流	道路局 高速国道課補佐
	(倉 沢 真 也)	
〃	水 谷 敏 則	土木研究所 道路部トンネル研究室長
〃	島 田 厳 乃	元土木研究所 道路部トンネル研究室主任研究員
〃	吉 田 幸 信	日本道路公団 技術部
	(三 浦 克)	
々	鬼 頭 幸 三	(財)日本自動車研究所
〃	神 崎 紘 郎	土木研究所 道路部新交通研究室長
〃	杉 山 保 利	土木研究所 道路部新交通研究室主任研究員
〃	浦 野 隆	土木研究所 道路部新交通研究室研究員
事 務 局	荒 居 昇	(財)土木研究センター 常務理事
〃	土 井 努	(財)日本自動車研究所
〃	田 村 正 一	開発コンサルタント株式会社
〃	川 口 聡	開発コンサルタント株式会社

*()書きは前任者

目 次

まえがき	
第1章 調査概要	1
1.1 調査目的	1
1.2 調査内容	1
第2章 自動車の走行特性	2
2.1 エンジンブレーキ性能	2
2.2 下り坂における追従走行特性	3
第3章 排出ガステ性の分析	5
3.1 排出係数の推定	5
3.1.1 台上試験による要因分析	5
3.1.2 トンネル内調査による排出係数の推定	9
3.2 換気量係数の検討	14
3.2.1 換気量係数の誘導方法	14
3.2.2 走行方法別換気量係数の比較	17
3.2.3 強制換気を必要としない交通量の範囲	20
第4章 重力利用走行方式の適用性の検討	25
4.1 トンネル部の概略設計	25
4.1.1 トンネルの選定	25
4.1.2 比較ルート of 検討	26
4.1.3 換気設備の検討	37
4.1.4 維持管理費用の検討	44
4.2 経済性の検討	44
4.3 非常時、走行安全性の検討	50
4.3.1 非常時等	50
4.3.2 走行安全性の検討	51
第5章 まとめ	52
あとがき	53

第1章 調 査 概 要

1.1 調査目的

長大トンネルでは、換気のための施設の建設費や維持管理費が増大し、トンネルの建設費や維持費に占める割合も増加するため、経済性を考えるうえで換気に関する費用は重要な要素となる。したがって、排ガス量の少ない自動車走行方式を導入することにより、換気に関連する費用の軽減化を図ることは、きわめて有意義といえる。

本調査は、道路トンネルの縦断線形が下り勾配（2～3％程度）となるよう路線選定し、そこに重力を利用した走行方式（「重力利用走行方式」と呼ぶ）を導入した際、どの程度換気設備費やその維持管理費の節減が期待できるかについてケーススタディを通じて分析することを目的とした。

1.2 調査内容

トンネルの維持管理の現状を把握するための実態調査、排出係数の実態、走行安全性を検討するための走行実験、台上試験を実施し、これらの調査、実験結果の分析を行った。次に重力利用走行方式の適用性を調べるため、ケーススタディとして、第9次道路整備5ヶ年計画で現在計画されているいくつかのトンネルを選定し、トンネルの明かり部を含めた建設費等の算定ならびに維持管理費について分析を行い、経済性を比較検討した。

主な検討項目は次のとおりである。

① 自動車の走行特性

下り勾配における走行試験等によりエンジンプレーキ性能を明らかにするとともに連続走行時の運転挙動を検討する。

② 排出ガス特性の分析

通常走行時の排出ガス量を調べるために路側調査データを用いて排出係数を推定する。また、下り勾配の強さと排出ガス軽減効果の関係を明らかにし、走行方法と換気量係数の関係を求める。さらに、自然換気で処理できる最大交通量（換気方式を選定する判断基準となる）を算出するために、換気モデルを作成する。

③ 重力利用走行方式の適用性の検討

建設費や維持管理費の実態調査を行い、ケーススタディによる実証的な方法により経済的な観点から重力利用走行方式の適用の可能性を検討する。

第2章 自動車の走行特性

2.1 エンジンブレーキ特性

下り勾配における力の釣合は、式(2-1)によって表わされる。

$$\left. \begin{aligned} W \sin \theta &= R(V) \\ R(V) &= M\alpha = aV^2 + bV + cW \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-1)$$

ここに、 $R(V)$: 走行抵抗 (kg), V : 車速 (km/h)

α : 減速度 (m/s^2), a, b, c : 走行抵抗係数

M, W : 車の質量 (kgS^2/m) および重量 (kg)

θ : 勾配 (%)

図-2.1は下り坂におけるエンジンブレーキ時の釣合速度を表わしている。これは平坦路における実験等を

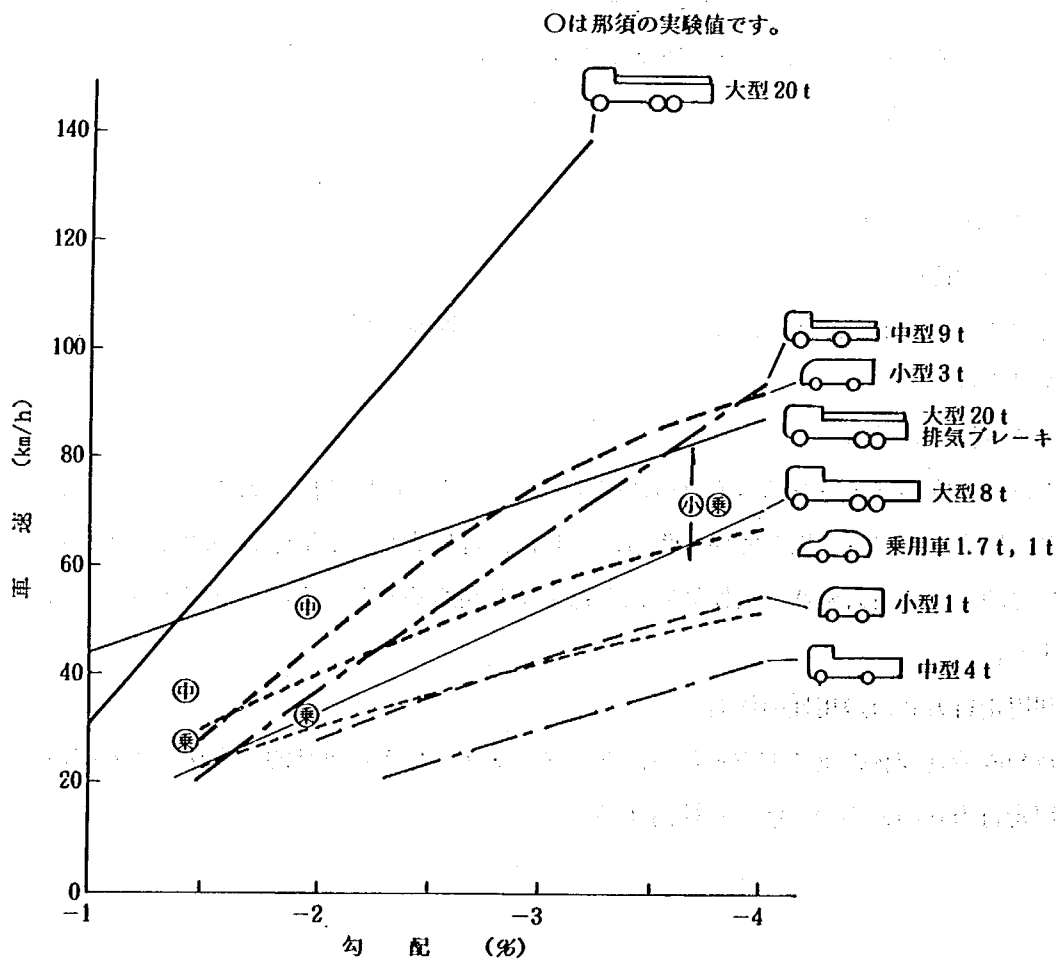


図-2.1 車種別エンジンブレーキ特性

実車試験においては重量固定

車速の変動誤差は約10km/h

線より上はアクセル使用域, 下はブレーキ使用域

参考に、式(2-1)により導いたものである。変速機の位置は原則として最高段を用いたので、ノッキングを起さない範囲の速度を示してある。また大型車の排気ブレーキの使用時の値も参考として示した。図より勾配-2.5%設定速度40km/hの場合、空荷の貨物車と乗用車の一部はエンジンプレーキの方が大きいので、惰行運転(クラッチ断)を混えるか又はアクセルによる駆動を行う必要が生じることを示しているが、大方の車両はエンジンプレーキとフットブレーキの併用により坂を下れることを示している。

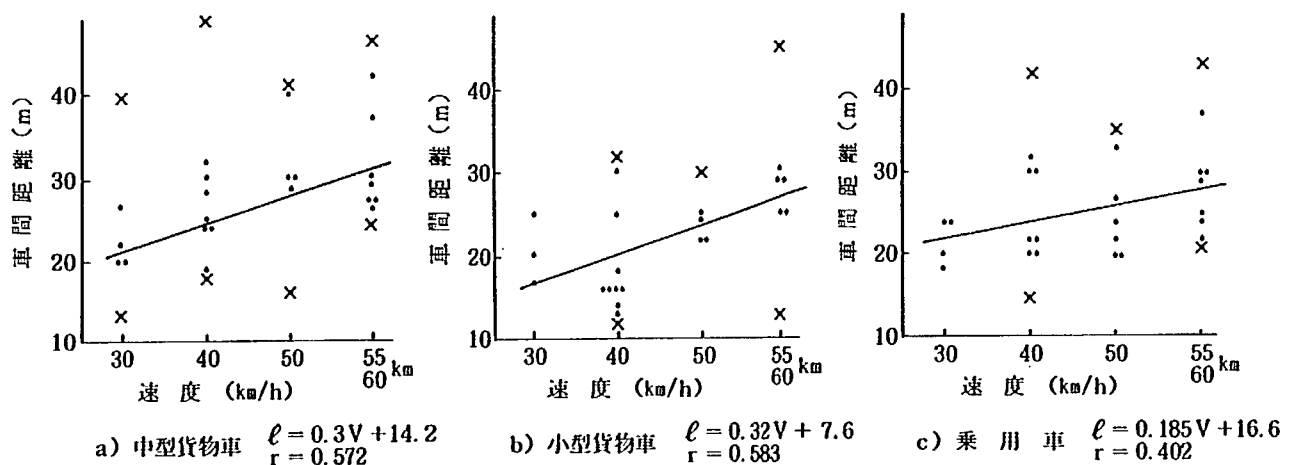
以上のことから、次のことがいえる。

- ① 下り勾配2.5%を仮定したとき貨物車が積載状態ならばエンジンプレーキをかけながら速度60km/hで走行することができる。大型貨物車のほとんどはディーゼルエンジンであるため、エンジンプレーキの燃料流量はゼロに等しく⁽¹⁾従って全交通における排出ガスの大幅な減少が期待できる。
- ② 乗用車や空荷の貨物車は、下り勾配2.5%のときエンジンプレーキによる走行速度は40km/h付近となり、これより高い速度では、アクセルによる駆動走行の割合が増える。

2.2 下り坂における追従走行特性

下り勾配1~4%のできるだけ一定勾配で直線区間が約1km程度の場所を一般道路より選定し、そこを連続走行した時の自動車の追従走行特性(車間距離)を調べた。

車間距離の分析結果を図-2.2に示す。



注 { データの前処理として、各車速における車間距離の最大値と
最小値は、原則として除外した。これを×で示す。 }

図-2.2 車間距離と車速度の関係

走行調査の結果次のことが明らかとなった。

- ① 車種別の特徴としては、車間距離について車種間で有意な差は見られなかった。しかし、車間距離の変動幅について見ると中型貨物車が最も安定した走行をしていると言える。
- ② 設定車速の影響としては、車速が上がると車間距離も増加する傾向がどの車種についても見られ、車間距離を車速により回帰して見ると図-2.2に示すようにデータのばらつきは大きい、有意性の検定を行っ

て見たところの車種についても有意であった。また、車間距離の変動幅から見ても各車両とも特定の関係は見られないが小型貨物車が、他車よりやや変動が大きかった。

③ 勾配による影響(図は省略)としては、今回の実験ケースだけでははっきりしたものが認められないが中型貨物車については急勾配ほど車間距離が大きくなる傾向が見られた。また、車間距離の変動幅については中型貨物車および乗用車ともに勾配にあまり影響されずにほぼ一定幅を保っていた。

④ 縦列走行時の並び順による影響(図は省略)としては、追従する側から見て見通しが悪くなるようなケース(中型貨物車—小型貨物車—乗用車の順)と逆に最も見通しが良いケースを比較して見ても車間距離に大差は認められなかった。しかし、車間距離の変動幅について見ると中型貨物車は小さく安定で小型貨物車では逆の傾向が見られた。

第3章 排出ガス特性の分析

3.1 排出係数の推定

3.1.1 台上試験による要因分析

多数の車の平均的な排出係数の推定はトンネル内ガスサンプルなどに依った方が都合が良いが、車種別の排出特性を車速・勾配などの要因と共に調べるには台上試験に従った方が都合がよい。

そこで定常運転による台上試験結果⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づいて煤煙(SMOKE)、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NO_x)につき排出量を左右する要因の影響を調べる。台上試験結果の表示にあたってはエンジン形式別、車両の大きさ別とし、車速は40km/hから100km/hまでを対象とし、勾配は-4%から+4%までを考える。このときの排出量を図-3.1~3.5に表わす。図においてエンジン負荷率は、ある車速と勾配の組合せにおける燃料流量をこの車の最大燃料流量で割った値をもって表示した。これらの図より次のことがわかる。

- ① 図-3.1より、ディーゼル車の煤煙はエンジン負荷率にほぼ比例するか、場合により急増するが、この度合は車種により異なる。
- ② 図-3.2より、ディーゼル車のCOはエンジン負荷率にあまり関係なく排出される傾向がある。
- ③ 図-3.3より、ガソリン乗用車のCO排出量はきわめて少ないが、一方、小型貨物車は排出量が多い。
- ④ 図-3.4より、 NO_x についてはガソリン車、ディーゼル車ともにエンジン負荷率にほぼ比例した排出の傾向を示す。

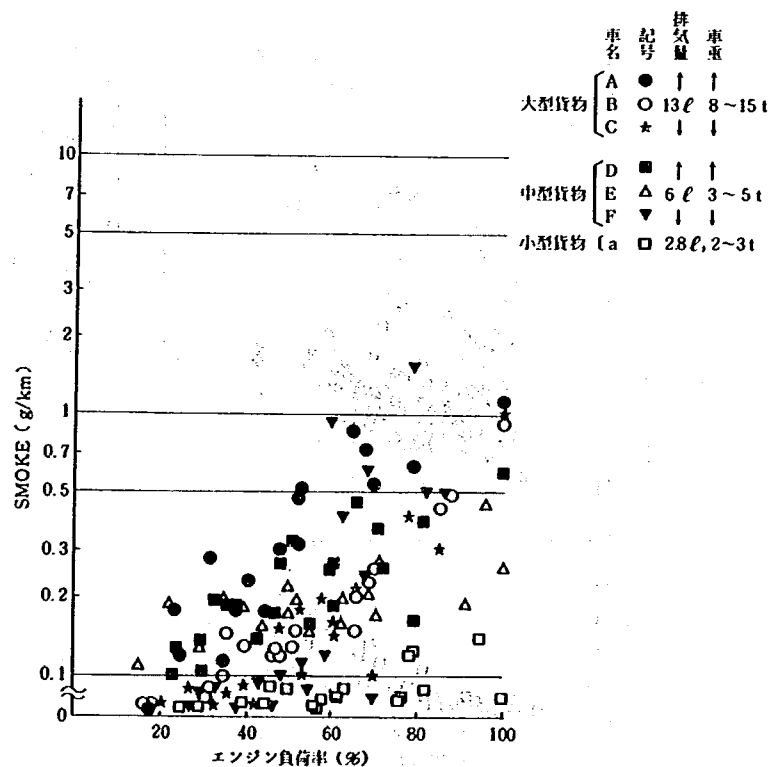


図-3.1 (ディーゼル車の煤煙排出量)

* 台上試験における定常運転
* 54年対策車

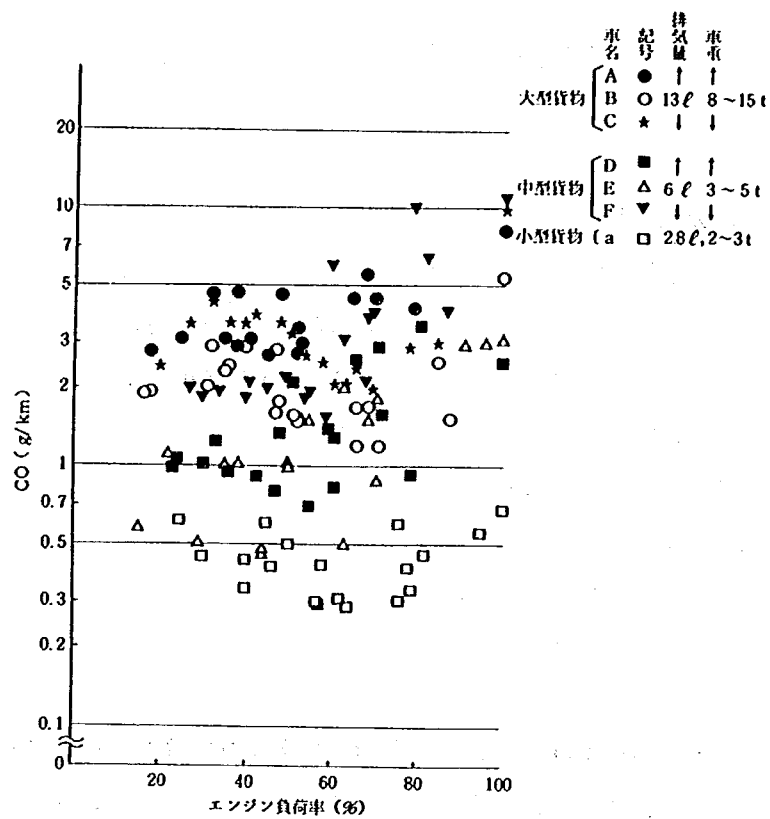


図-3.2 ディーゼル車のCO排出量

* 台上試験における定常運転
* 54年対策車

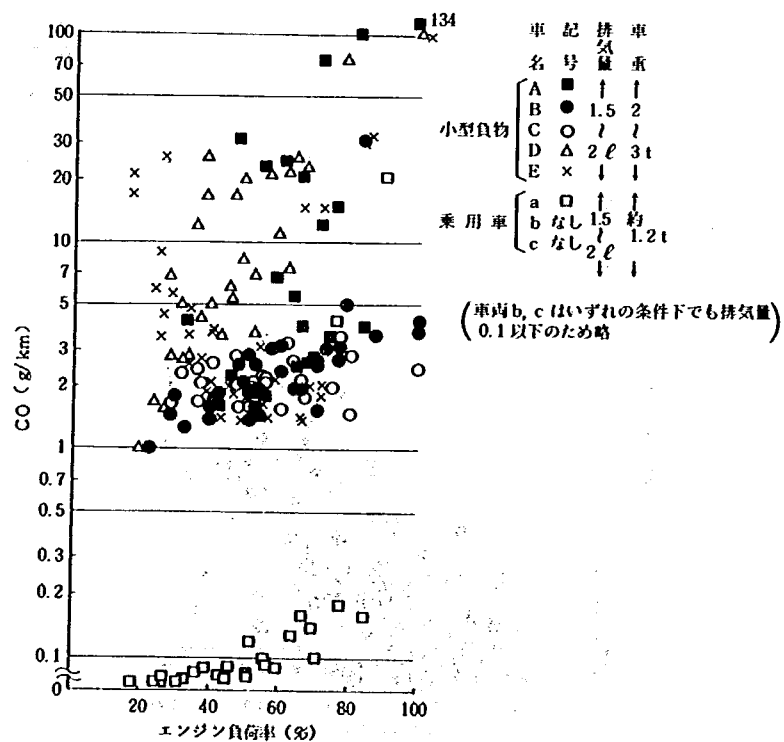


図-3.3 ガソリン車のCO排出量

* 台上試験における定常運転
* 54年対策車

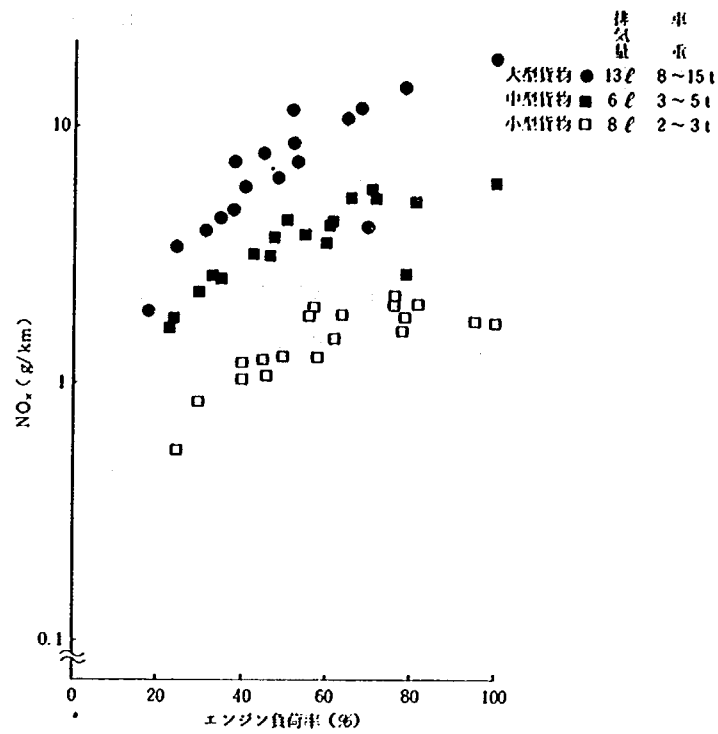


図-3.4 ディーゼル車の NO_x排出量

* 台上試験における定常運転
* 54年対策車

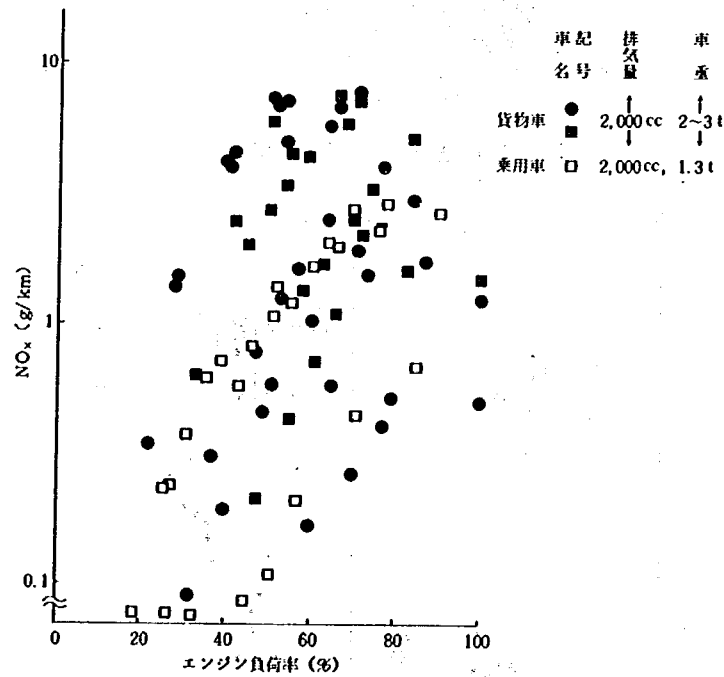


図-3.5 ガソリン車の NO_x排出量

* 台上試験における定常運転
* 54年対策車

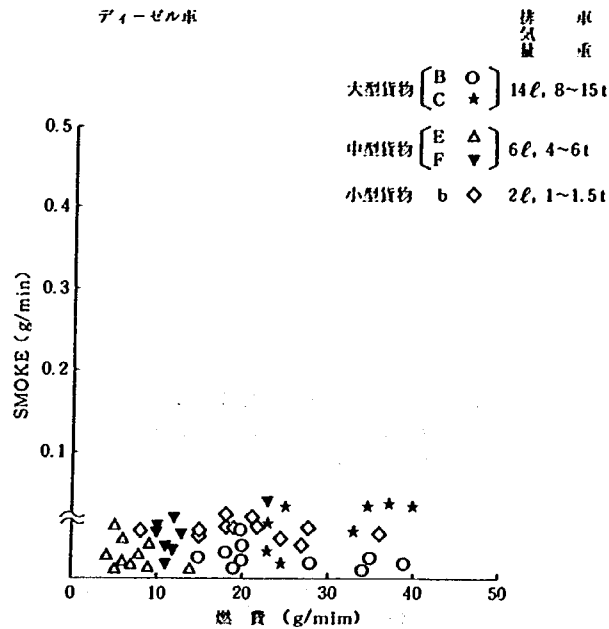
通常の走行とは別に、エンジンブレーキ使用時の排出ガス量を知ることは下り勾配トンネルのエンジンブレーキ走行方式を評価するための基礎資料となるが、これらを台上試験による結果⁽³⁾を用いて推定する。図

—3.6～3.8に台上試験の結果を示すが、これらは平坦路において初速度を40, 60, 80km/hの3段階に設定し、そこから減速し停止するまでの排出量を燃費との関係によって示したものである。

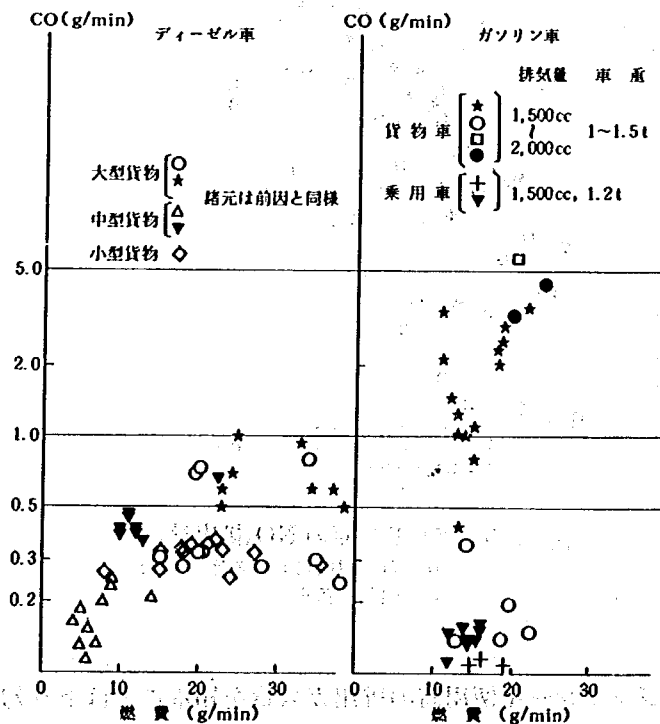
これらの図より次の傾向が見られる。

- ① 図—3.6より、ディーゼル車の煤煙排出量は減速時はほとんど無いと言える。
- ② 図—3.7より、COについては乗用車は排出量は零、そしてディーゼル車、ガソリン貨物の順に増加する。
- ③ 図—3.8より、NO_xに関してはディーゼル車の排出量は燃費にほぼ比例する傾向を示している。

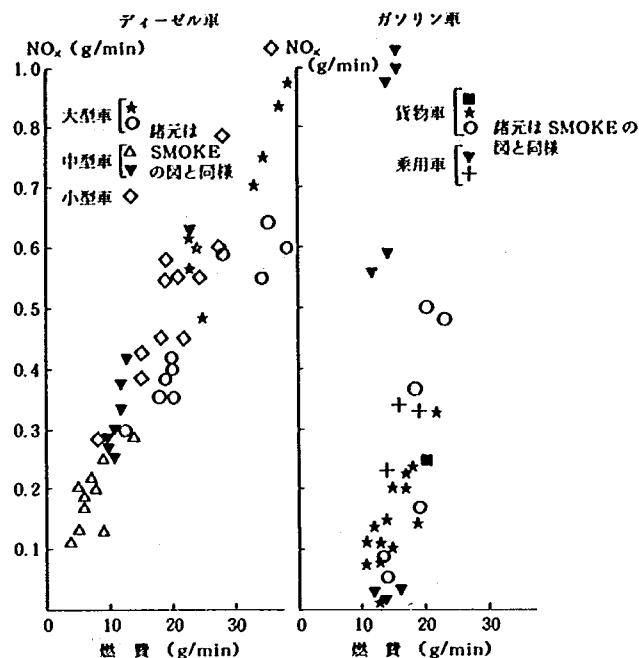
また、ガソリン車のNO_x排出量は車種によりかなり異なることがわかる。



図—3.6 減速時の煤煙排出量



図—3.7 減速時のCO排出量

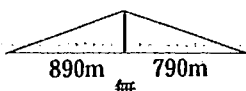
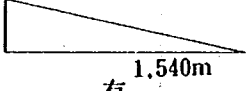


図—3.8 減速時の NO_x 排出量

3.1.2 トンネル内調査による排出係数の推定

車種別の排出係数を求めるため、都夫良野トンネル ($l=1,680\text{m}$) と小仏トンネル ($1,620\text{m}$) における調査結果⁽⁶⁾⁽⁷⁾ を利用する。調査対象トンネルの概要を表—3.1に示す。車種別排出係数の推定方法は、サンプリングされたガスの濃度を車種別排出ガスの混合されたものとみなし、車種別交通量を知ることによって排出係数を回帰分析するものとした。

表—3.1 調査対象トンネルの概要

項 目	都 夫 良 野 ト ン ネル	小 仏 ト ン ネル
ト ン ネル 長	1,680m	1,620m
断 面 積	43m ²	44m ²
調 査 線	一方通行トンネルの下り線	一方通行トンネルの上り線
縦 断 勾 配	-0.5% ← +1.4%	← +2.3%
		
換気装置運転の有無	無	有
測 定 項 目	煤煙, CO , NO_x , 温度, 湿度, 車の交通量	風速, 乗用車, 大型車, 小型貨物
サ ン プ ル 地 点	出入口より30m 内側の2地点	出入口より300m 内側, 中央部, 外部の4地点
サ ン プ ル 時 間	1時間おき24時間	1時間おき3日間
平 均 交 通 量	1,020台/H	649台/H
平均大型車混入率	62%	25%
平 均 風 速	7.8m/s	4.0m/s
測 定 日	S56.9.8(火)と9.9(水)	S57.11.5(金), 6(土), 7(日)

すなわち、ガス濃度については次のようになる。

ガス濃度 ($P \times 10^6 = \text{総排出量/換気風量}$)

$$= el \sum_i \mu_i Q_i / 3600 (ua + c) \dots\dots\dots (3-1)$$

ここに,

u : 換気装置を用いないときのトンネル内風速 (m/s)

a : トンネル断面積 (m²)

c : 換気装置による風量 (m³/s)

e : ガスの比体積 (m³/g)

l : トンネル長 (km)

μ, μ_i : 混合排出係数および車種 i の排出係数 (g/台/km)

Q, Q_i : 総交通量および車種 i の交通量 (台/h)

また, 混合排出係数 (μ) の内訳は, 3車種分類の場合, 式 (3-2) のようになる。

$$\mu Q = \mu_1 Q_1 + \mu_2 Q_2 + \mu_3 (Q - Q_1 - Q_2) \dots\dots\dots (3-2)$$

式 (3-2) において車種別交通量 Q_i を無次元化し, 車種別混入率 $x_i = Q_i / Q$ を用いて書き直せば式 (3-3) となり, 一方, 回帰式の一般的な形を説明変数 x_1, x_2 を用いて表わせば式 (3-4) となる。

$$\mu = (\mu_1 - \mu_3)x_1 + (\mu_2 - \mu_3)x_2 + \mu_3 \dots\dots\dots (3-3)$$

$$\mu = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 \dots\dots\dots (3-4)$$

式 (3-3), (3-4) を対比させることにより排出係数 μ_i と回帰係数 a_i の関係は次のように決めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} \mu_1 = a_1 + a_3 \\ \mu_2 = a_2 + a_3 \\ \mu_3 = a_3 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3-5)$$

図-3.9~3.11に大型車混入率とトンネル内の混合排出係数との関係図を示す。これらの結果から次のことが言える。

① 煤煙(SMOKE)

煤煙と大型車混入率との相関は高いので回帰の信頼性は良い。大型車100% ($\beta = 1$) のときの排出係数は小仏トンネルが2.1g/台/km, 都夫良野トンネルが1.25g/台/kmである。しかし小仏トンネルは全体が2.3%の上り勾配になっていることを考え, 平坦路に修正(公団設計要領による補正係数1.8)すると,

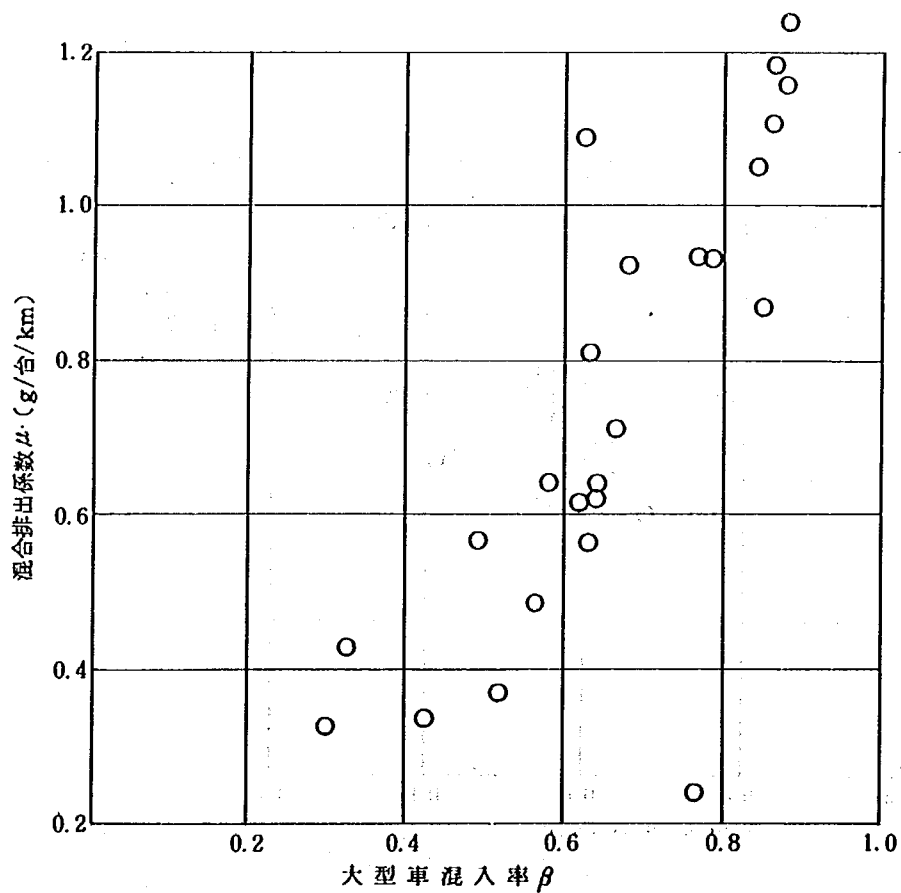
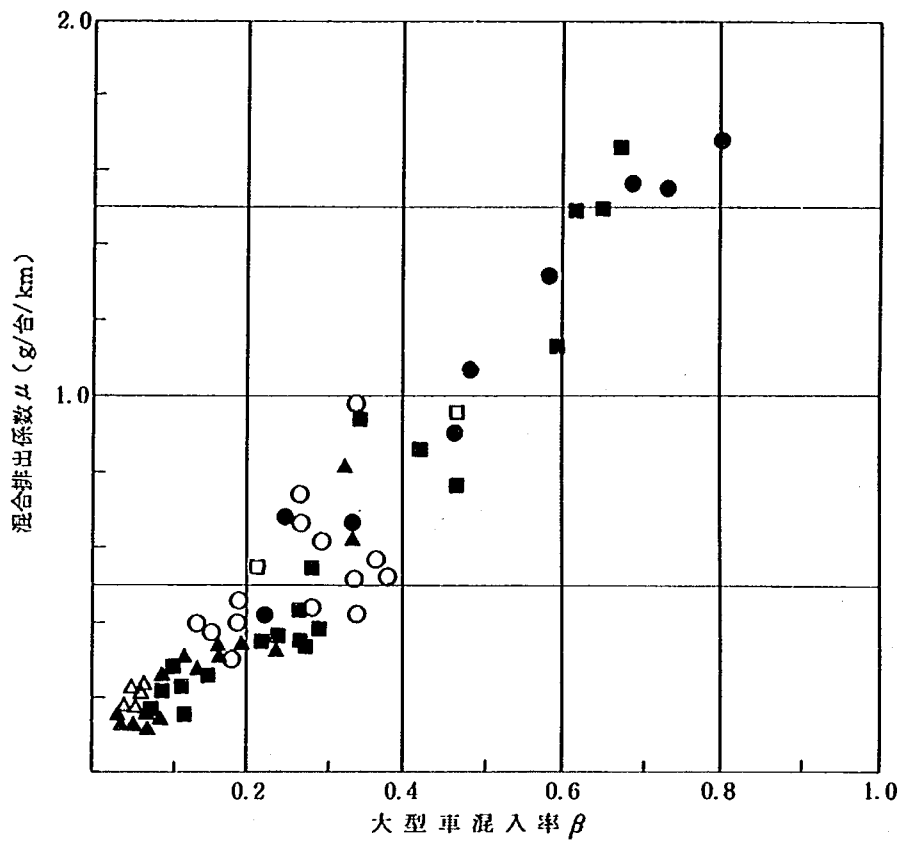


図-3.9 煤煙排出係数

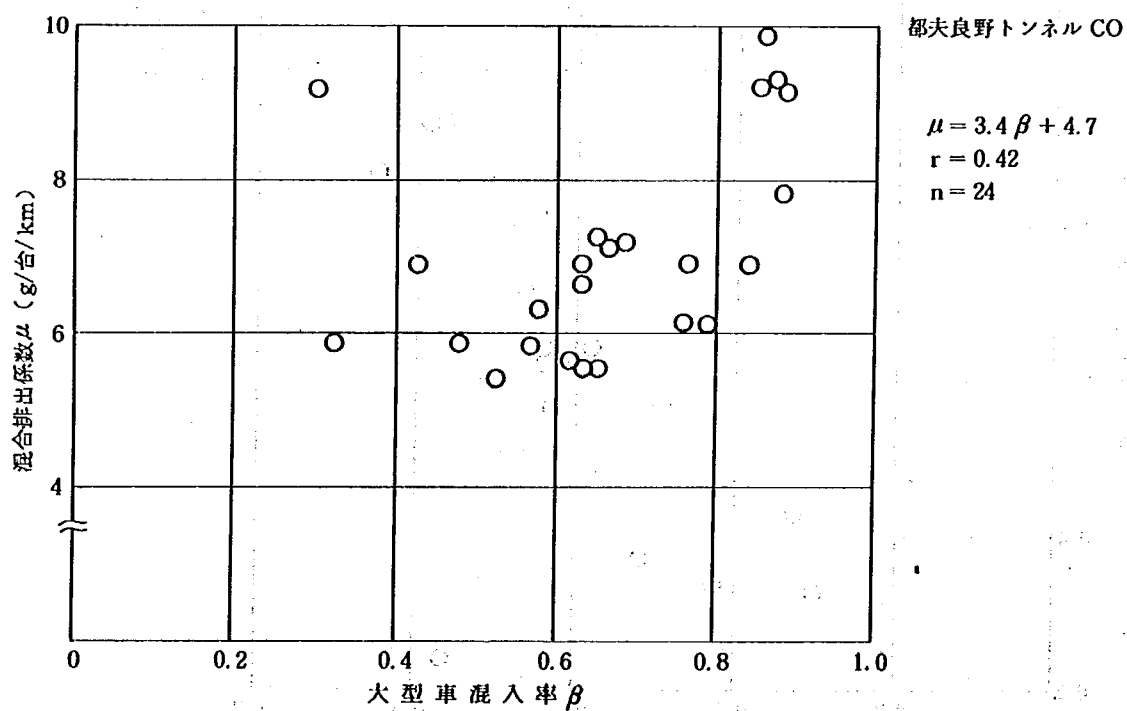
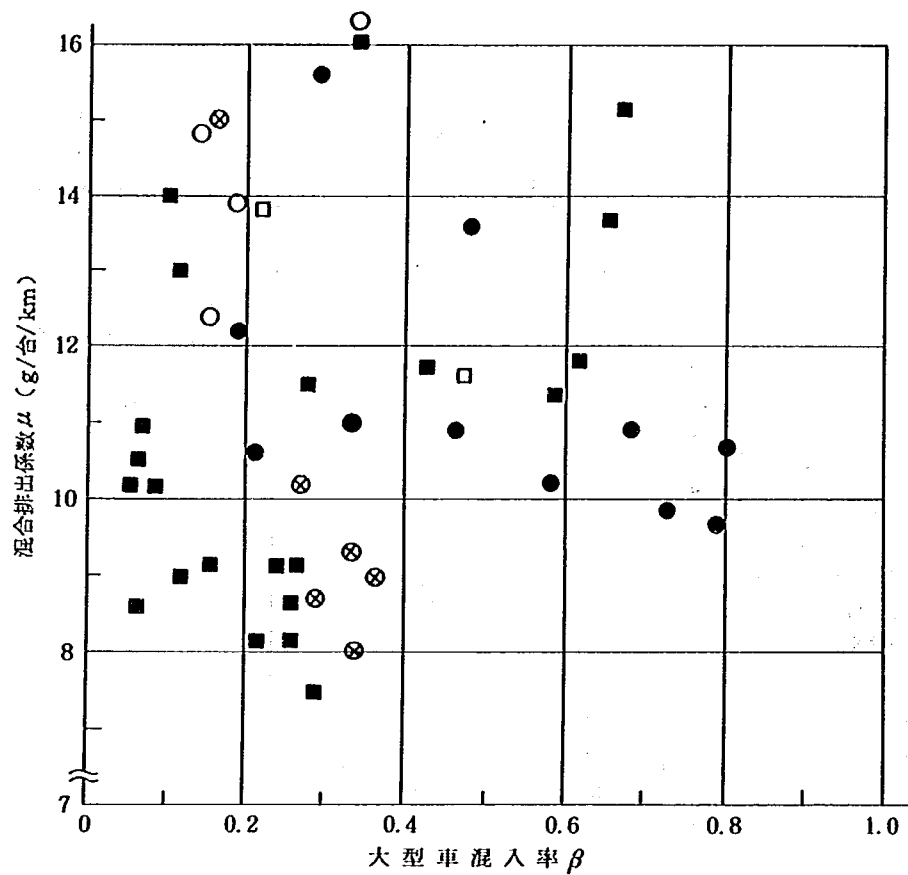


図-3.10 CO 排出係数

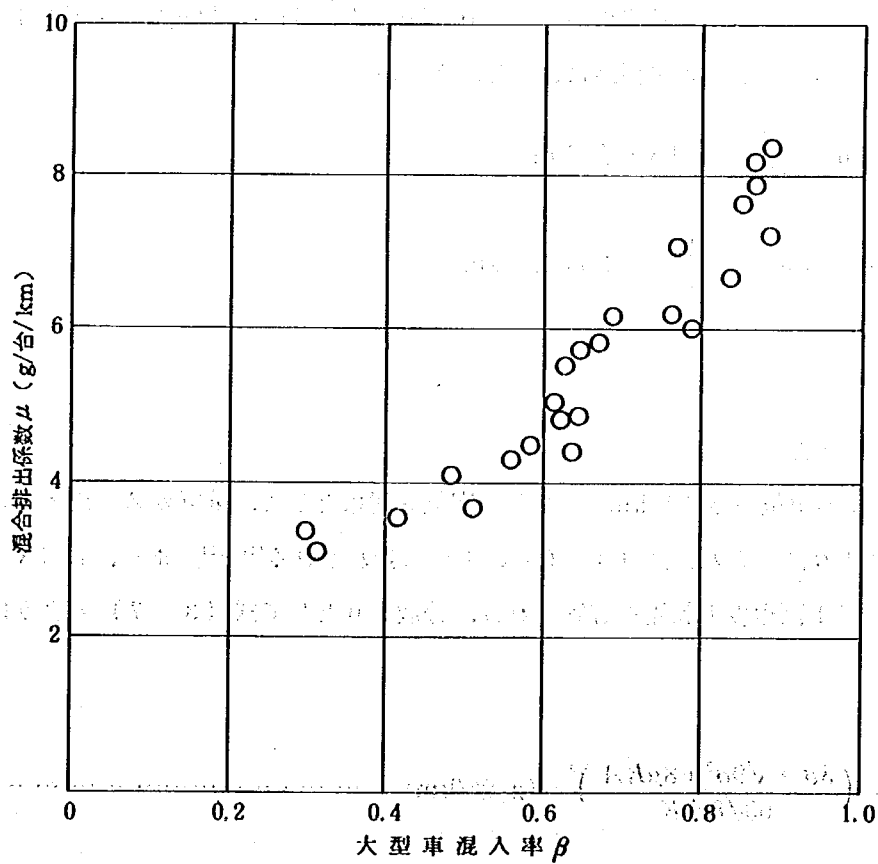
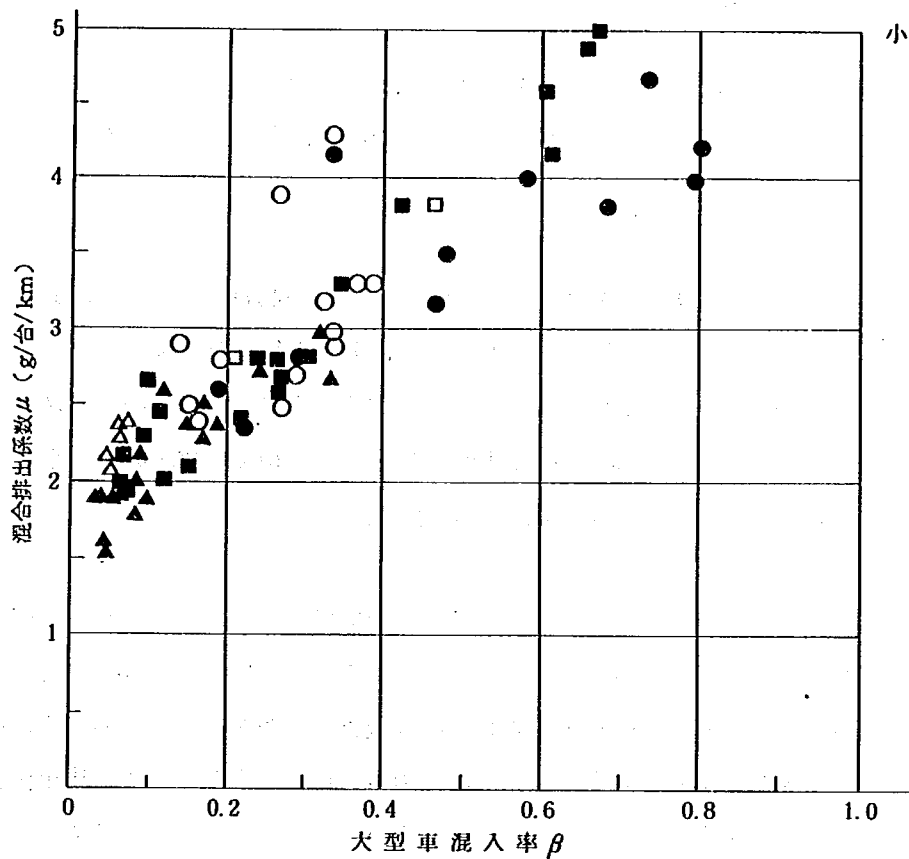


図-3.11 NO_x排出係数

$$2.1 \times 1 / 1.8 = 1.17 \text{ g/台/km}$$

となり両トンネルの煤煙推定値は、よく一致した値となる。なお図-3.9に示した回帰式の定数項に負の値が入っているが、これは大型車以外のデータ数が少なかったため、全変動に対する寄与率が小さかったためと思われる。

② 一酸化炭素(CO)

小仏トンネルは大型車混入率とCOの相関は、ほとんど無いので回帰分析は行えなかった。一方、都夫良野トンネルでは低いながら大型車との相関が見られたので、分析を行った。図において大型車の排出係数($\beta = 1$ のときの μ の値)は、8.1g/台/km、それ以外の車(ガソリン車全部と見做せる)についての排出係数($\beta = 0$ のときの μ の値)は4.7g/台/kmと推定した。相関係数が0.42と小さいので推定値に対する信頼区間は他の排出成分のものより広く、精度は悪い。

③ 窒素酸化物(NO_x)

NO_xに関しての両トンネルの測定値は大型車混入率と良い相関を示しているが、都夫良野トンネルにおける値は定数項に-0.15と負の値が入っている。これは乗用車の排出係数($\beta = 0$ のときに対応)が負となることを意味するので、この値をそのまま受入れるのは現実上問題が残る。このようになった理由として考えられることは、煤煙の場合と同様であるが、乗用車の比率が小さいので、排出係数があまり大きくないことと合せて、混合排出係数の全変動に対する寄与率が小さかったことである。

よってNO_xの排出係数としては小仏トンネルの測定値をとりあげることにした。そこで、大型車とそれ以外の車種に分け回帰分析を行った結果に対し、上り勾配2.3%に対する勾配補正係数1.3(公団設計要領のCO成分を適用)の逆数をかけ平坦路に修正し、次の値とした。

$$\text{大型車: } 5.6 \text{ g/台/km} \times \frac{1}{1.3} = 4.3 \text{ g/台/km}$$

$$\text{大型車以外: } 1.8 \text{ g/台/km} \times \frac{1}{1.3} = 1.4 \text{ g/台/km}$$

3.2 換気量係数の検討

3.2.1 換気量係数の誘導方法

換気量係数^(注)はトンネルの単位長さ(1 km)あたりの空気を対象として、排気ガスの出入を定常的な平衡状態の下で考えることにより誘導され、式(3-6)のように表わされる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、式(3-6)は、実用的な数値の範囲において1割程度の誤差を許容すれば、分散を0として式(3-7)のように単純な形で表わすことができる。

$$\text{換気量係数}(q) = \left(\frac{3\sigma + \sqrt{9\sigma^2 + 8\mu KA}}{60\sqrt{8AK}} \right)^2 \text{ (g/台/km)} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$\rightarrow \frac{\mu}{3600K} \text{ (m}^3\text{/台/km)} \dots\dots\dots (3-7)$$

ここに、

μ : 混合排出係数 (g/台/km)

K : 許容基準値 (g/m³)

σ : μ の標準偏差 (g/台/km)

A : トンネル長 1 km の体積 (m³)

注) <換気量係数>

トンネル内のガス濃度を、許容される基準値以下に保つためには、ある一定量の空気を換気のために送り込む必要があるが、この換気風量は、交通量、トンネル長、排出係数などの要因によって左右される。トンネル換気の設計にあたっては、種々の要因を下に示すような関係式にまとめるのが一般的である。

(i) 換気量 (m³/s) = 換気量係数 × 交通量 × トンネル長

(ii) 換気量係数 (m³/台/km) = f (許容基準, 混合排出係数)

(iii) 混合排出係数 (g/台/km) = Σ (車種別排出係数 × 車種別混入率)

なお、煤煙についての許容基準は光学濃度で決められているが、排出係数 (3.1) は重量濃度であるため両者の換算が必要となる。そこで、煤煙濃度測定単位の換算は次のように考えた。

煤煙濃度の測定法は大きく分けて、汚染空気を吸引、ろ紙上に捕集し、重量を直接計量する方法と、レーザー光などの光が一定距離透過する間における光の減少率を計測する方法に分けることができる。この2つの方法に関する換算については従来から数々の試みがなされているが、⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ここでは、データ点数が多いという点で信頼性の高いと思われる文献 (14) による値を参考する。なお、図-3.12には、他の資料による測定結果も併せて、重量濃度と光学濃度の関係を示した。

<参考—光学濃度を測定する際の関係式>

$$\text{透過率} (\tau) = \frac{\text{受光した光の強さ}}{\text{入射光の強さ}} = 10^{-a l}$$

a : 吸光係数 (光学濃度とも呼ばれる) (m⁻¹)

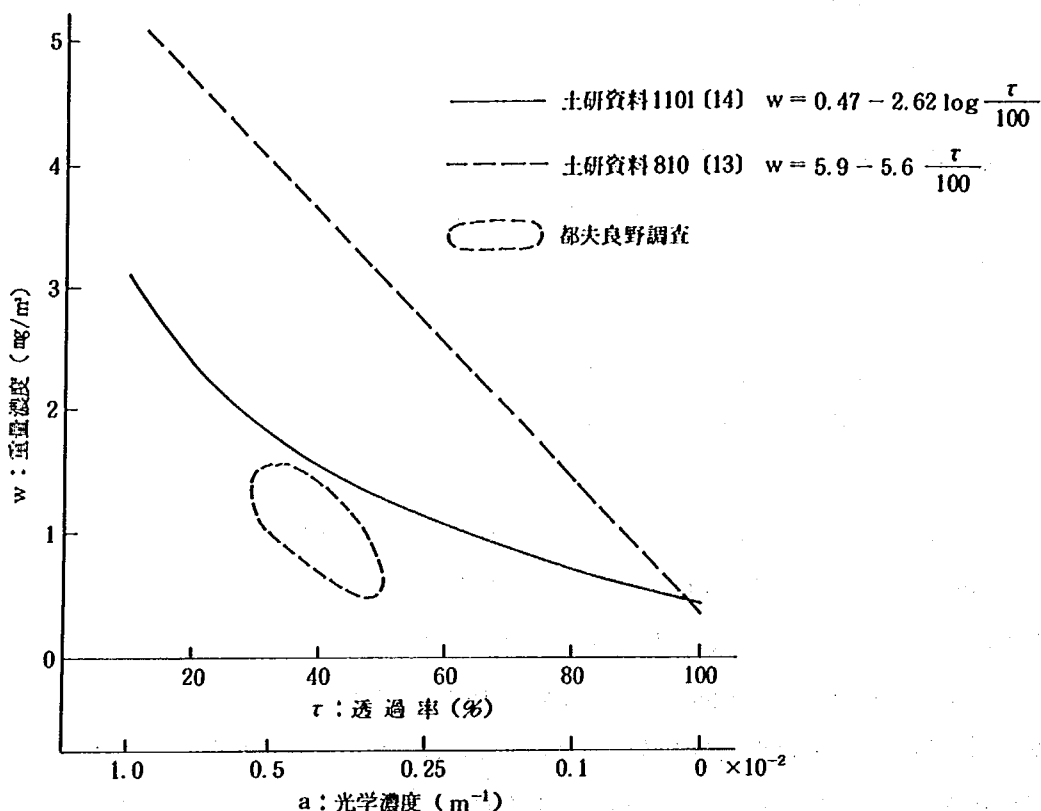
l : 光が透過した距離 (m)

上式は Beer-Lambert の法則として知られている。一方トンネル換気の実用的観点からは、常用対数を用いて、次のように光学濃度 a が定義される。

$$a = -\frac{1}{l} \log \tau$$

図-3.12において換算曲線が上方に行く程、同一の透過率に対応した煤煙の重量濃度が大きくなるので、この対応を許容値に適用した場合、より汚れた空気が許容されることになり、従って基準としては緩い傾向となる。この観点から見れば土研資料1101による単位換算は他の曲線と比べ中間的な許容基準を与えと言

えよう。また図中土研資料810による換算曲線は昭和40年当時の一般国道のトンネルにおける調査値であり、都夫良野トンネルに比べ砂塵が多く含まれているものと思われる。一方、都夫良野トンネルにおける測定は自動観測によるもので、透過率の基準値の変動幅が大きく正確性という点で問題を残している。したがって、換算曲線としてはデータ点数が多く、最も信頼性の高い土研資料1101の値を採用する。



図一3.12 煤煙濃度に関する測定例の比較
(a と τ の関係：レーザー光100m, $\tau = 10^{-100a}$)

換算曲線に基づいて、光学透過率を重量濃度に換算する過程は以下④～⑩に示すとおりであり、公団設計要領の中に煤煙の許容基準として設けられている透過率30%および50%をそれぞれ重量濃度に換算した結果、公団設計要領が仮定している大型車の煤煙排出係数は 1.3g/台/km^* と推定された。この値は都夫良野トンネルによる推定値 1.25g/台/km 、小仏トンネルによる推定値 1.17g/台/km と比較してもかなり近い値と言える。

* 設計要領 (S45) と同一の換気量係数を与える排出係数の算出過程 (④～⑩)

④ 設計要領における換気量係数 q と大型車混入率 β との関係を求める。ただし誤差が実用範囲内であることを確認して、 q 、 β は線形関係となる。

$$q = \begin{cases} 0.32\beta & (\tau=50\%) \\ 0.17\beta & (\tau=30\%) \end{cases} \quad (\text{m}^3/\text{s/台/km})$$

τ : 光学的透過率

⑧ 煤煙許容基準 K_g を満たすときの換気量係数 q と排出係数 μ_g との関係式は、分散 $\sigma_g = 0$ として

$$q = \left(\frac{3\sigma_g + \sqrt{9\sigma_g^2 + 8\mu_g K_g A}}{60\sqrt{8A} K_g} \right)^2 \div \frac{\mu_g}{3600 K_g}$$

$$\therefore \mu_g = 3600 K_g q$$

⑨ 土研資料1101より透過率 τ と重量濃度上の基準値 K_g の関係は

$$K_g = 10^{-3}(0.47 - 2.62 \log \frac{\tau}{100}) = \begin{cases} 1.26 \times 10^{-3} (\tau = 50\%) \\ 1.84 \times 10^{-3} (\tau = 30\%) \end{cases} \quad (\text{g/台/km})$$

⑩ 設計要領の排出濃度を重量 μ_g に換算すると、④、⑨の結果を⑧の式に代入して

$$\mu_g = \begin{cases} 1.45\beta (\tau = 50\%) \\ 1.13\beta (\tau = 30\%) \end{cases} \quad \approx 1.3\beta (\text{g/台/km})$$

(注) 添字の「 g 」は、重量単位であることを示す。

3.2.2 走行方法別換気量係数の比較

平坦路のトンネルにおける通常の走行方式と下り勾配2.5%におけるエンジンプレーキを主体とした走行方式の2つに分け換気量係数を算出する。計算にあたっての前提条件は、次のとおりである。

① 排出係数

平坦路走行時の排出係数はトンネル調査値 (A_0 とする)、公団設計要領 (B_0 とする) に基づいて決定する。一方、下り勾配における排出係数は、エンジンプレーキと通常走行との使用割合を加味して (C とする) 決定するが、基礎となるエンジンプレーキ時の排出係数は減速時の台上試験の結果 (3.1.1) を用いる。

② 勾配補正係数

公団設計要領によれば下り勾配においては車に対する負荷が軽減されることから、下り勾配に対する補正係数を従来から用いている。これによる換気量を他と比較する (A_0 に対する勾配補正を A 、また B_0 に対する勾配補正を B とする)。なお-2.5%勾配のときの補正值は、煤煙成分に対し0.58、CO と NO_x 成分に対し0.65を用いる。

③ 車種分類

公団設計要領における車種分類は大型ディーゼル車と小型ガソリン車の2つに分けられているが、これに従うこととする。したがって、小型ガソリン貨物車は乗用車と同一の分類に入ることになる。

④ 対象とするガス成分

トンネル内のガス濃度が許容値に達しないように換気量係数を決める訳であるが、対象とするガス成分は煤煙と一酸化炭素を基本として、窒素酸化物を補助的に考える。現実問題としては、煤煙が許容限界に達することによって換気装置を回すケースがほとんどであるが、大型車混入率が低い場合などは一酸化炭素が煤煙よりも先に許容値に達することも考えられるので、煤煙と一酸化炭素を併用して取り上げる。

⑤ 速度補正係数

排出係数がある車速の条件下で求めた場合、他の車速に適用するためには補正が必要である。エンジンブレーキを併用した走行方法では車速を80, 60, 40km/hと変化させたケースも検討するので、速度変化に対する排出係数の補正を行う。ただし、公団設計要領において速度補正係数は定義されていないので、速度変化も勾配と同じに走行抵抗で置換えられると仮定して、便宜的に補正係数を求める。

換気量係数を比較検討するケースは表-3.2のとおり設定した。

以上より走行ケースごとの換気量係数を求め、図-3.13に示す。

表-3.2 設定した走行ケース

ケース			使用する換気量係数	勾配	走行速度
基本ケース	B ₀	1	道路公団設計要領	0%	60km/h
		2	〃	0%	80km/h
	B	3	ケース1の係数を勾配補正	-2.5%	60km/h
		4	ケース2 〃	-2.5%	80km/h
	A ₀	5	ケース6の係数を速度補正	0%	60km/h
		6	都夫良野トンネル調査結果係数	0%	80km/h
	A	7	ケース8の係数をさらに速度補正	-2.5%	60km/h
		8	ケース6の係数を勾配補正	-2.5%	80km/h
	C	9	* 那須走行実験エンジン・ブレーキ	-2.5%	80km/h
		10	〃	-2.5%	60km/h
		11	〃	-2.5%	40km/h

* ケース9, 10, 11の換気量係数は、台上試験より求められた、燃費と排出量の関係に、那須走行実験の燃費をあてはめて算出したものである。

換気量係数は排出ガス成分のうち、許容基準に達したある成分によって決定されるが、分析の結果、煤煙の透過率によって決定される場合がほとんどであることが判る。

なお、CO成分による換気量係数は極めて小さく大型車混入率が100%のとき、高々0.02(m³/台/km)であった。

図-3.13から次のことがいえる。

- (i) 平坦なトンネルを通常に走行するケースを比較すると、トンネル調査値によるケースA₀は公団設計要領B₀の内に含まれているので、B₀の方が幅広く安全側をとって換気量係数を決定していることがわかる。
- (ii) トンネル内実態調査によるケースA₀に対し、下り勾配2.5%の補正を施した換気量係数がケースAで

記号	走行方式
A ₀	トンネル内調査による
A	A ₀ を勾配補正
B ₀	公団設計要領による
C	エンジンブレーキ併用走行

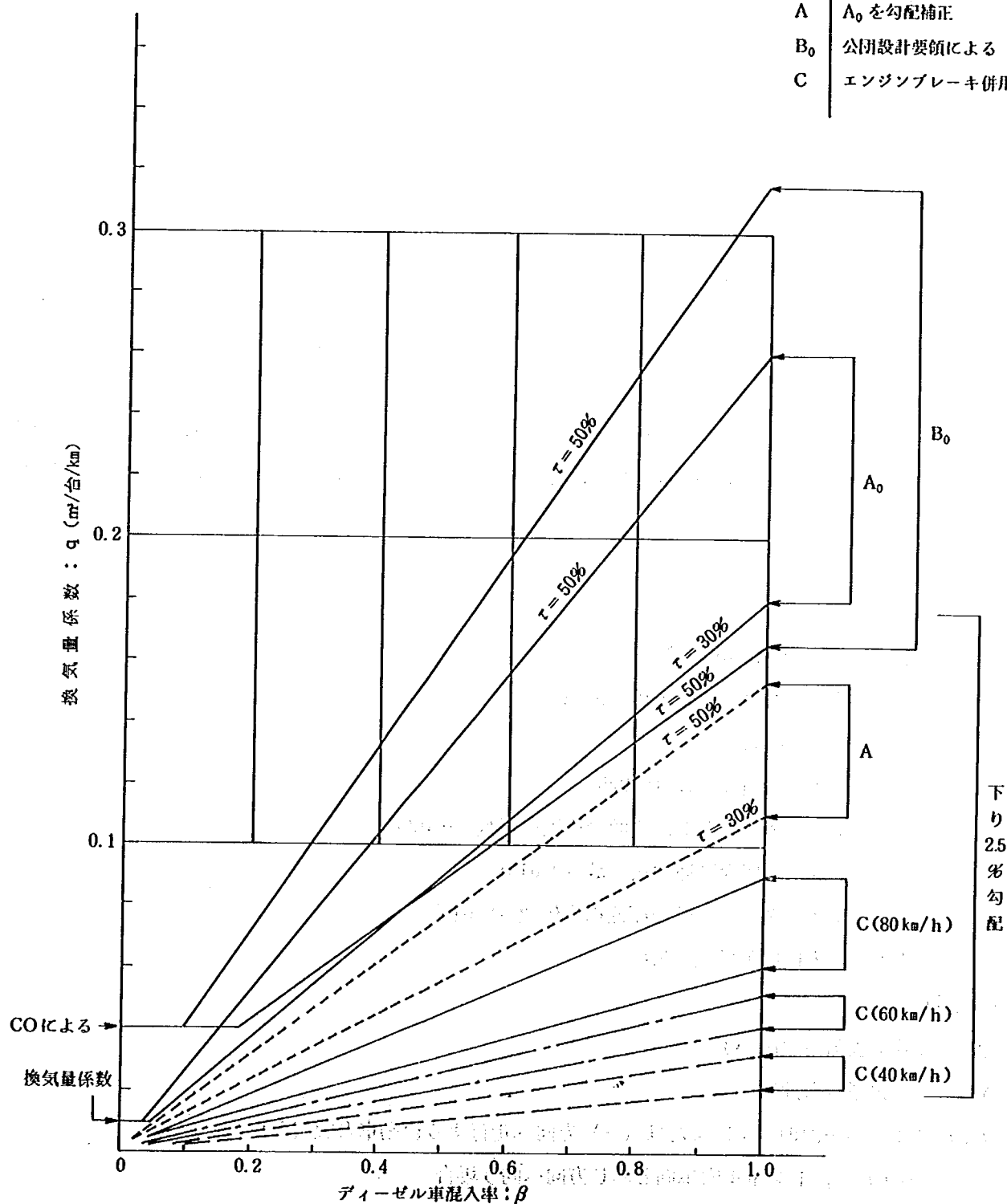


図-3.13 走行方法による換気量係数の比較

(注) 許容基準煤煙透過率50%(各ケース上側のライン)

30%(各ケース下側のライン)

ある。勾配補正係数の作用により A は A_0 より平均値で $0.08\text{m}^3/\text{台}/\text{km}$ だけ換気量係数が下っている。

- ii) エンジンブレーキ併用のケース C は、設定速度が下がるに従い換気量係数がより小さくなっているが、これは設定速度が小さければ、アクセルを使用する割合が低下することを反映している。車種別に考えると、このケースにおいて大型車は、ほとんどエンジンブレーキ走行となるので、排出係数はきわめて小さい(エンジンブレーキ時は燃料流量はゼロに近いことによる)。一方、小型車は多少アクセル駆動による走行が必要とされるが、この時の排出係数は下り勾配による補正係数を基に算出されているので、あまり大きくない。

3.2.3 強制換気を必要としない交通量の範囲

交通のピストン作用による換気を期待して、排出ガス濃度を基準値以内に保てるような交通量の範囲を求める。まず交通の流れによるピストン作用を考慮した場合の、トンネル内風速を求める。次に、換気量係数から基準排出ガス濃度を越えないために必要なトンネル内風速を求める。これら2つの方法で得られたトンネル内風速について前者が後者より大きい場合には換気装置による強制換気を必要としない。

本節では、平坦路における通常走行と下り勾配におけるエンジンブレーキ走行との2つの走行方法を評価の対象にし、交通量と大型車混入率を変数として、強制換気を必要としない交通量(可能交通量と呼ぶ)を求める。

① 各種の定数および記号

(各種定数)

- ρ : 空気の密度 ($0.1224\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)
- ν : 空気の動粘性係数 ($1.45 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$)
- λ : 壁面摩擦損失係数
- λ_r : 車道内壁面摩擦損失係数 (0.025)
- $\lambda_{b,e}$: トンネルダクト内壁面摩擦損失係数 (0.025)
- λ_s : 立坑内壁面摩擦損失係数 (0.015)
- λ_n : 連絡ダクト内壁面摩擦損失係数 (0.015)
- ζ_e : トンネル入口損失係数 (0.6)

(各種記号)

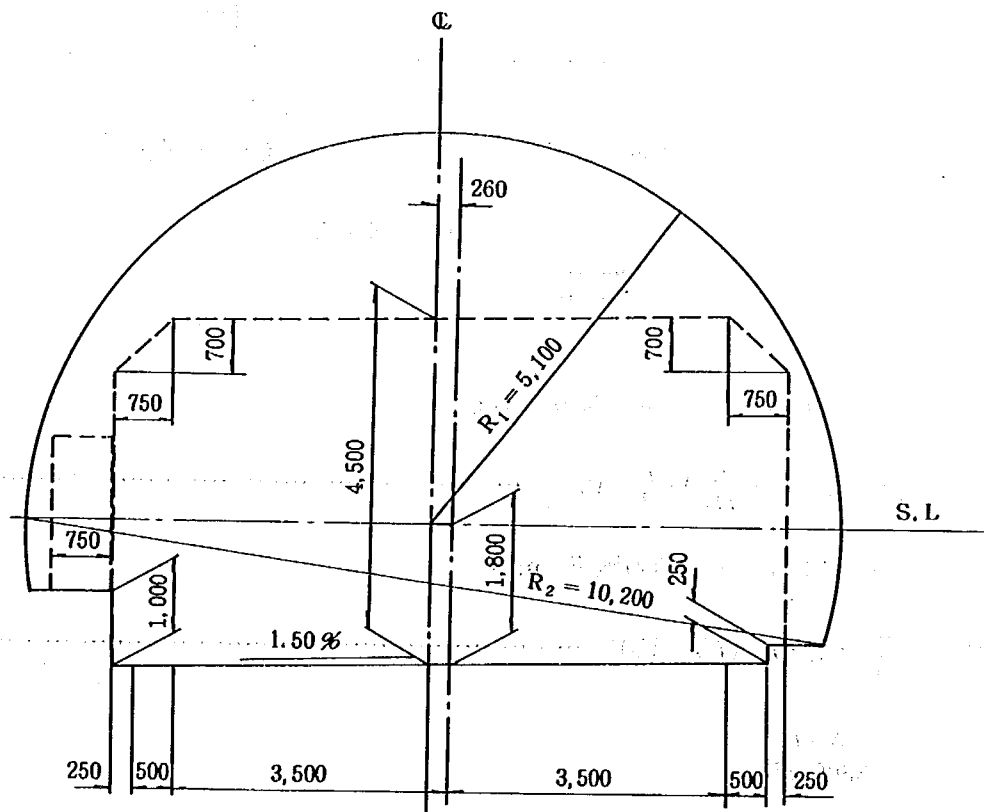
- Q : 所要換気量 (m^3/s)
- N : 交通量 (台/時)
- n^+, n^- : トンネル内の (+) または (-) 方向へ走行する自動車台数 (台)
 - (+) は、トンネル内風向と同じ方向へ向う場合
 - (-) は、トンネル内風向と逆の方向に向う場合
- A_e : 自動車等価抵抗面積 (m^2) (大型5.4, 小型1.1)
- U_t : 自動車走行速度 (m/s)
- τ : 透過率 (%) (30, 40, 50)

D_r : 車道代表寸法 (m)

V_r : 車道内風速 (断面平均風速) (m/s)

$$V_r = \frac{Q}{A_r}$$

本章で扱うトンネルの形状は、比較的交通量の少ない所を対象にしているため道路構造規格は第1種第3級、設計速度は80km/hとし、トンネル防災等級は、延長3 km程度と考えAA¹⁾とする。従ってトンネルには監視員通路が設けられる。



図—3.14 標準断面図(第3級—B規格)

* 上記断面は日本道路公団「トンネル標準設計図集」を使用したものである。

トンネル車道断面積: $A_r = 58.5 \text{ m}^2$

車道断面の周長 $L_r = 29.7 \text{ m}$

車道代表寸法 $D_r = 4 \cdot \frac{A_r}{L_r} = 7.879\text{m}$

換気モデル

 ΔP_r ; 車道の入口損失および壁面摩擦損失 mmHg ΔP_t ; 交通換氣力 mmHg ΔP_M : 自然換氣力 mmHg

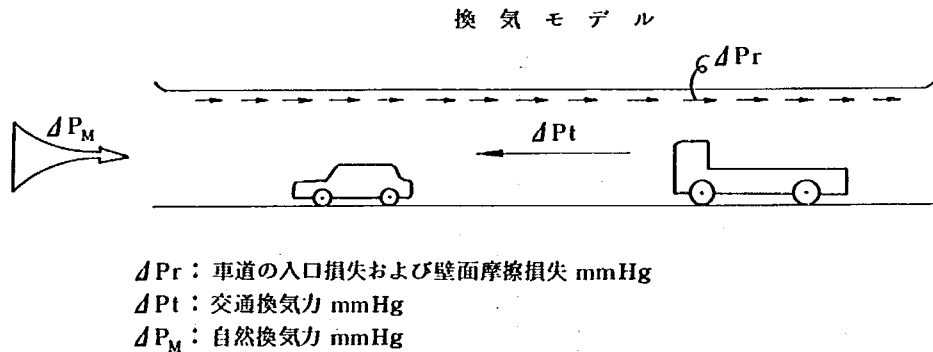
注) トンネル延長と設計交通量との関係から決定されるトンネルの等級区分を示す。等級区分には、等級の高いものから AA, A, B, C, D の 5 種類があり各等級ごとに設備の設置基準が設けられている。

③ 換気モデルの検討

ここでは、強制換気力を行わない場合、自動車の流れより生ずるピストン作用（交通換気力）で、何台位までの交通量を通すことができるか計算を行うものである。この場合次の 3 つ要因に基づき、トンネル内の風圧を考える必要がある。

- (i) 自然風の影響、気圧差および温度差によって生ずる気圧差による換気力(自然換気力 ΔP_M)
- (ii) トンネル内を走行する自動車のピストン作用により生ずる換気力(交通換気力 ΔP_t)
- (iii) トンネル壁面の持つ通気抵抗 (ΔP_r)

自然換気力は換気作用を助けるようにも作用するが、防げる方向にも作用する。一方向交通の場合は自然換気力を抵抗として考えれば安全側となる。この場合の自然換気力の大きさは、トンネルの長さ、環境等によって異なるが、車道内風速として 2.5m/s 考慮するのが標準となっている。



3 つの換気作用力の力学式は次に示す通りである。

$$\Delta P_r = \left(1 + \xi_e + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_r^2 \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

V_r ; 最終的に生ずる車道内風速 m/s

$$\Delta P_t = \frac{A_e}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (U_t - V_r)^2 \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

$$n = \frac{N \cdot L}{3600 \cdot U_t}$$

$$\Delta P_M = \left(1 + \xi_e + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_n^2 \quad \dots\dots\dots (3-10)$$

V_n ; 自然換気力による車道内風速 m/s

これによって生ずるトンネル内での圧力上昇の方程式は、組合せによって次式の通りとなる。

$$\Delta P_r = \pm \Delta P_t \pm \Delta P_M \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

今回のモデルケースについては

$$\Delta P_r = \Delta P_t - \Delta P_M \dots\dots\dots (3-12)$$

となる。

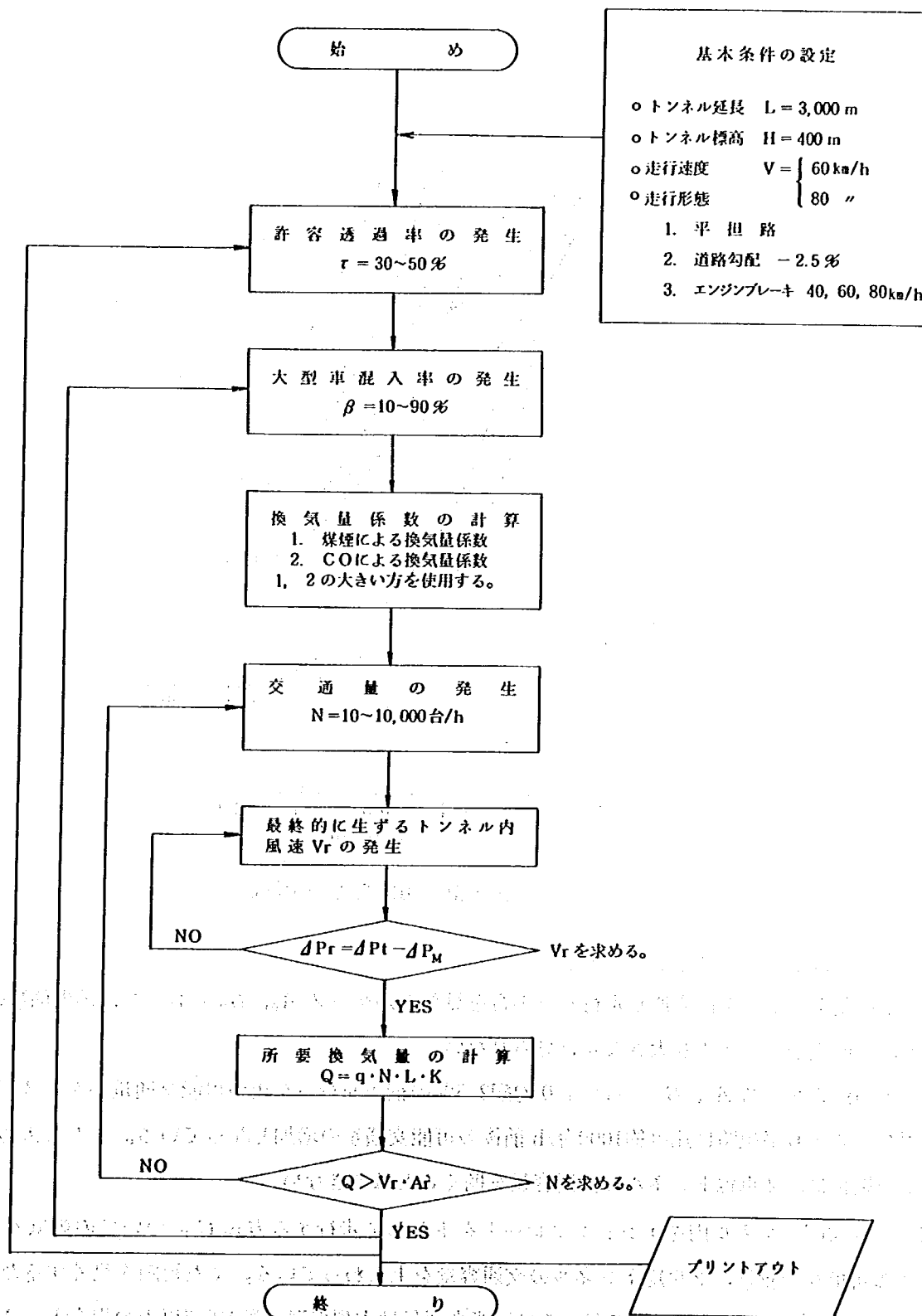


図-3.15 交通量算出フローチャート

④ 各種走行方式による可能交通量

排出ガス成分が許容値以内に保たれるような交通量(可能交通量)の計算結果(同一比較のため80km/h走行のみを対象とした。)を図-3.16に示す。換気量係数から決定される可能交通量のうち、現実的な値はトンネル部の構造から決定される交通容量以下であるので、図には文献(10)によるトンネル部交通容量を参考のため太線で示した。

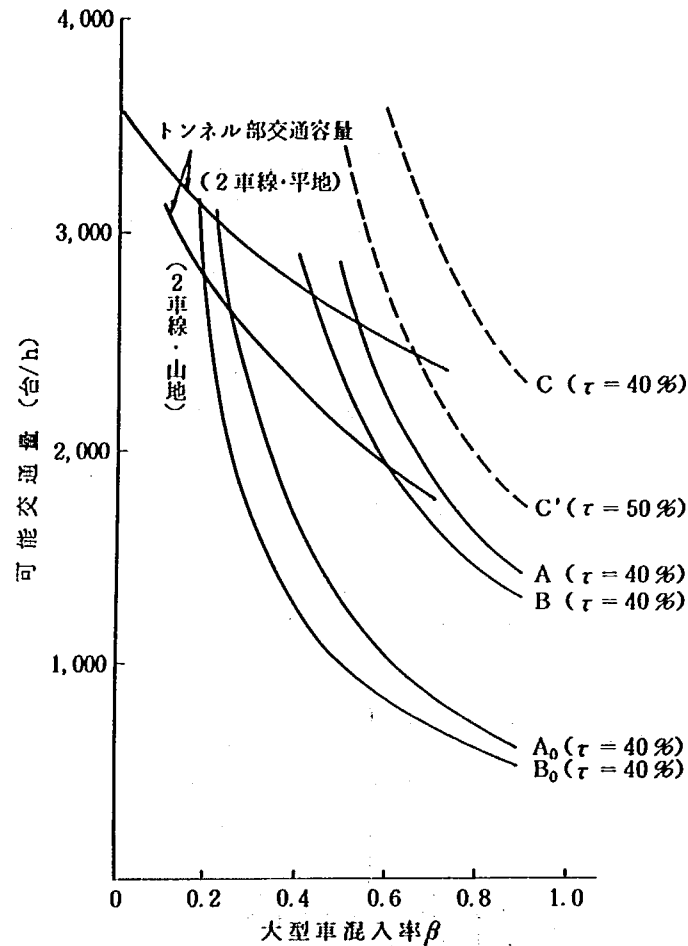


図-3.16 可能交通量の比較

この図から次のことがいえる。

- (i) 平坦路トンネルを従来通り走行した場合を見たのがケース A_0 , B_0 であるが、排出係数の資料が異っても、可能交通量にあまり大きな差は見られない。
- (ii) 平坦路のケース A_0 , B_0 に対し下り勾配2.5%の補正を行った後の可能交通量がケース A , B であるが、両ケースとも平坦路に比べ約1000台/h前後の可能交通量の増加となっている。しかし大型混入率が0.5以上の場合、2車線トンネルの交通容量を捌くことはできない。
- (iii) 下り勾配トンネル内をエンジンプレーキを主として走行する方式 C についての排気ガスの関係から決まる可能交通量は、2車線トンネルの交通容量を上まわっている。また視距を良くするため煤煙透過率を50%としたケース C' については、この可能交通量は大型車混入率が0.7以上の場合トンネル部交通容量以下となり、強制換気をしないとトンネルの構造上可能な交通量を捌けないこととなる。

第4章 重力利用走行方式の適用性の検討

4.1 トンネル部の概略設計

4.1.1 トンネルの選定

調査対象トンネルとして、延長3～4 km程度のトンネルを全国から10ヶ所程度選出し、各々について下り勾配の建設が可能かどうかの検討を行った。

検討にあたっては、上下線共下り坂にしなければならないことに必ずしもとらわれず、片側車線（上下線どちらか）でも下り坂が可能な場合は、選定するようにした。

その結果、重力利用走行方式の導入可能なトンネルとして、表4.1に示す4つのトンネルが選定された。

他のトンネルで本方式の導入が不適当となった要因としては、地形条件が急峻なこと、アプローチ道路の

表4.1 ケーススタディの対象トンネル

トンネル名	路線名	延長 (m)	上下線ともか 片側車線か
トンネルー①	東北自動車道	上り 4,255 下り 4,265	上下線とも
トンネルー②	中国横断道	上り 3,188 下り 3,212	上り線のみ
トンネルー③	東北横断道	上り 1,840 下り 1,840	上下線とも
トンネルー④	東北横断道	上り 1,150 下り 2,125	上下線とも

表4.2 トンネルの選定経緯

トンネル名	路線名	縦断勾配	良・否	理由
①トンネルー①	東北自動車道	0.747% 0.500%	○	比較的地形がゆるやかで、路線選定が容易。
②トンネルー②	中国横断道	1.252%	△	地形が急峻。上り線は可能であるが、下りは困難。
③	四国横断道	2.130% 0.30%		下り線だけは、可能と思われるが全体的に地形が急峻でむづかしい。
④	〃	1.650%		地形が急峻で困難。中央構造線に位置。
⑤	中央自動車道	2.29% 0.40%		地形急峻。
⑥	関越自動車道	2.00% 0.30%		地形は非常に急峻。
⑦	東北横断道	0.50% 1.50%		比較的地形もゆるく可能と思われるが、地形図が不足。
⑧トンネルー③	〃	2.00%	○	抗口付近の地形がゆるやかであるので路線選定が容易。
⑨	山陽自動車道	1.70% 1.00%		地形が急峻。トンネルの連続であり縦断の変更困難。
⑩トンネルー④	東北横断道	1.50%	○	比較的地形がゆるやかで比較路線の選定が容易。

選定が困難なこと、またはトンネル・橋梁の連続のために縦断線形の変更が困難であること等があげられる。
表-4.2に選定理由を示す。

4.1.2 比較ルートの検討

トンネル4ヶ所、各々について平面線形及び縦断線形を考え、比較ルートを選定した。

路線選定を考える上では、できるだけ地形の利点を生かすように、また、原案より建設費が増加しないように考慮した。

トンネル①の場合、上り線は約1.5kmの区間に、平面線形を修正することによってトンネル内縦断勾配を2.5%に確保できた。その結果、ルート総延長が5,890mから5,800mに、トンネル延長が4,255mから3,125mにそれぞれ減少したものの、橋梁延長が410mから1,220mに大幅に伸びることになった。

下り線は、大幅にルート変更する以外 $\ominus 2.5\%$ の勾配をとれず総延長は5,170mから5,800mに約630mもの延長増となった。橋梁延長が127mから930mに増えたものの、トンネル延長は4,265mから2,720mに大幅に短縮された。

トンネル②の場合は、上り線のみについてであるが、原案の縦断勾配が $\ominus 1.252\%$ であるので、これを $\ominus 2.4\%$ とするよう縦断線形を修正し、それに伴い、切盛を少なくするため、山側に線形をシフトさせた。この結果、総延長、個々の延長とも大きく変わらなかった。

トンネル③の場合、上り線は原案が $\oplus 2\%$ の勾配であるところを $\ominus 2.3\%$ 確保するため、大きく線形をシフトすることになった。その結果、総延長が4,650mから5,330mへ約700m、また橋梁延長も470mから1,030mへ約560m伸びることになった。

下り線は、基本設計が $\ominus 2\%$ についているので、大きなルートの変更することも、延長構成も大きく変わることもなく、 $\ominus 2.5\%$ 確保できた。

トンネル④の場合、上り線は原案が $\oplus 1.5\%$ の勾配であるところを $\ominus 2.5\%$ 確保するため、大きく線形をシフトすることになった。その結果、総延長が4,896mから5,550mへ約650m伸びたが、橋梁延長は415mから65mに減少し、トンネルは、2,150mが1,725mと550mの2本となった。橋梁延長が短くなった理由は、縦断が下がり、土工で処理できるようになったからである。下り線は、原案が $\ominus 1.5\%$ の勾配がついていて、大きなルートの変更することなく、 $\ominus 2.5\%$ を確保できた。A案は、線形を変えないで、縦断のみで $\ominus 2.5\%$ つけた場合であり、橋梁延長が415mから815mと400mも伸び、しかも高橋脚となった。B案、C案は少し山側にシフトすることによって、橋梁延長も短縮でき、橋脚高も低くなった。

トンネル④の1/10000平面図と縦断図を図-4.1に示す。

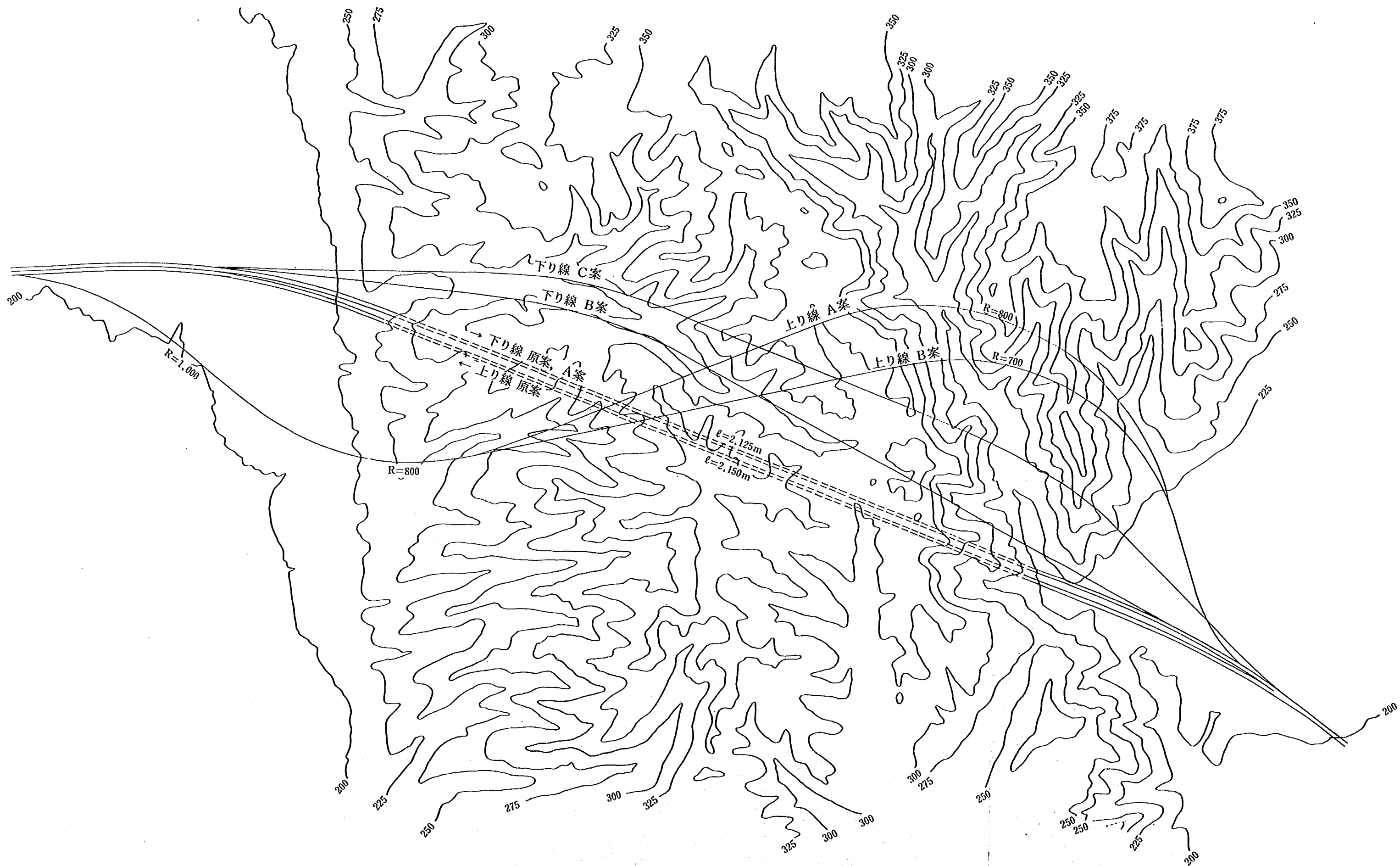


図-4.1 トンネル④平面図

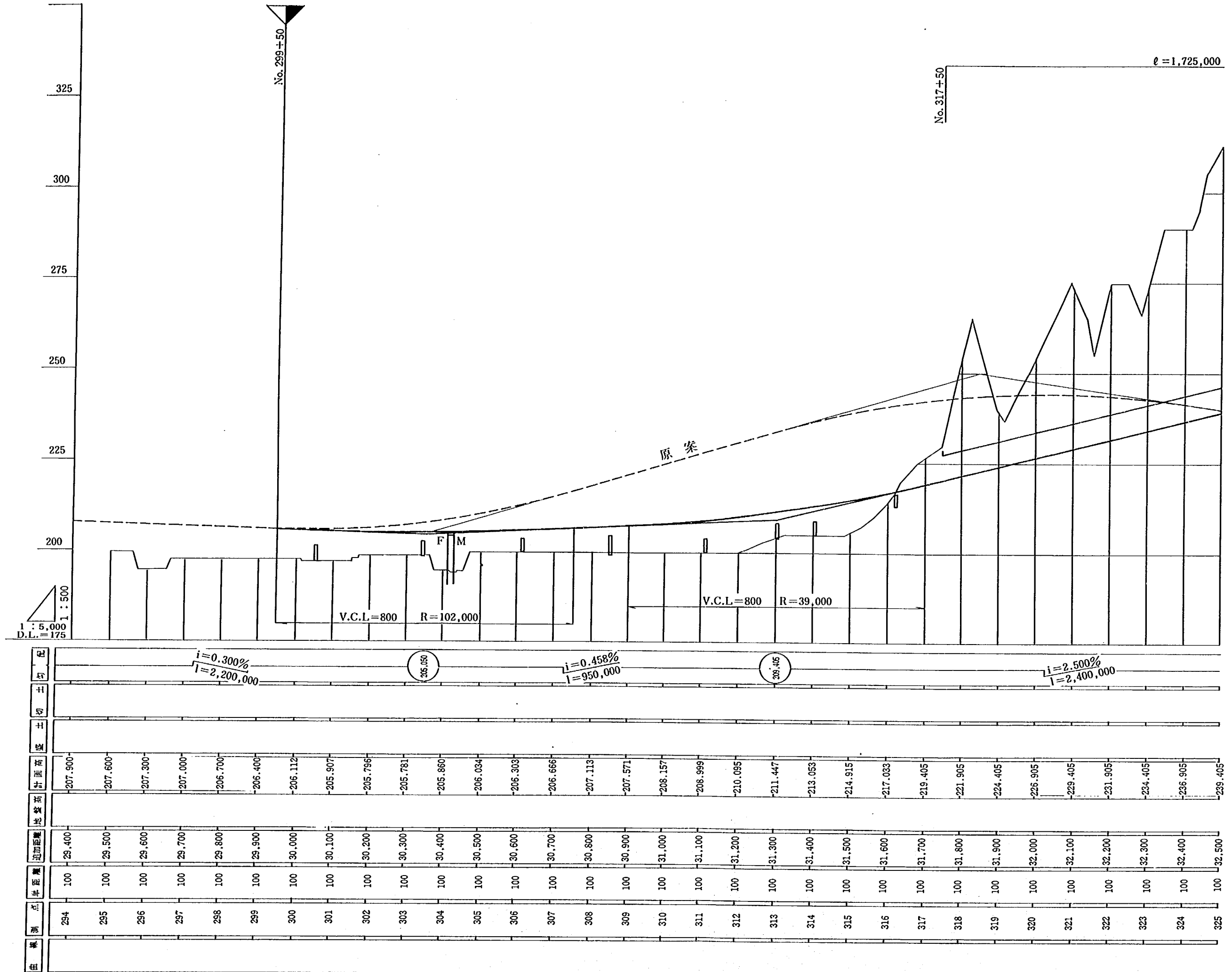
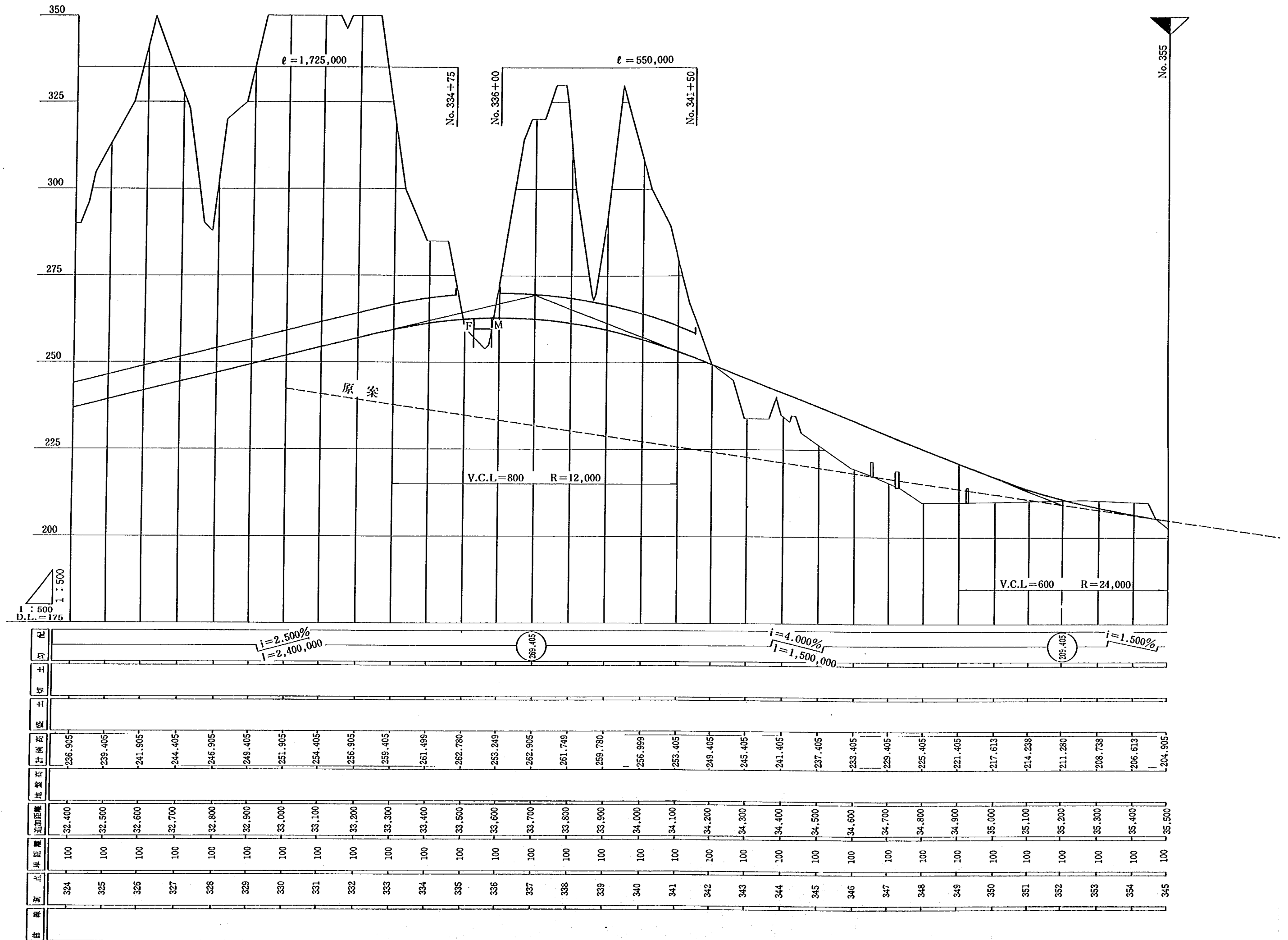


図-4.1.2 トンネル⑥ 縦断面図 (上り線, A案)



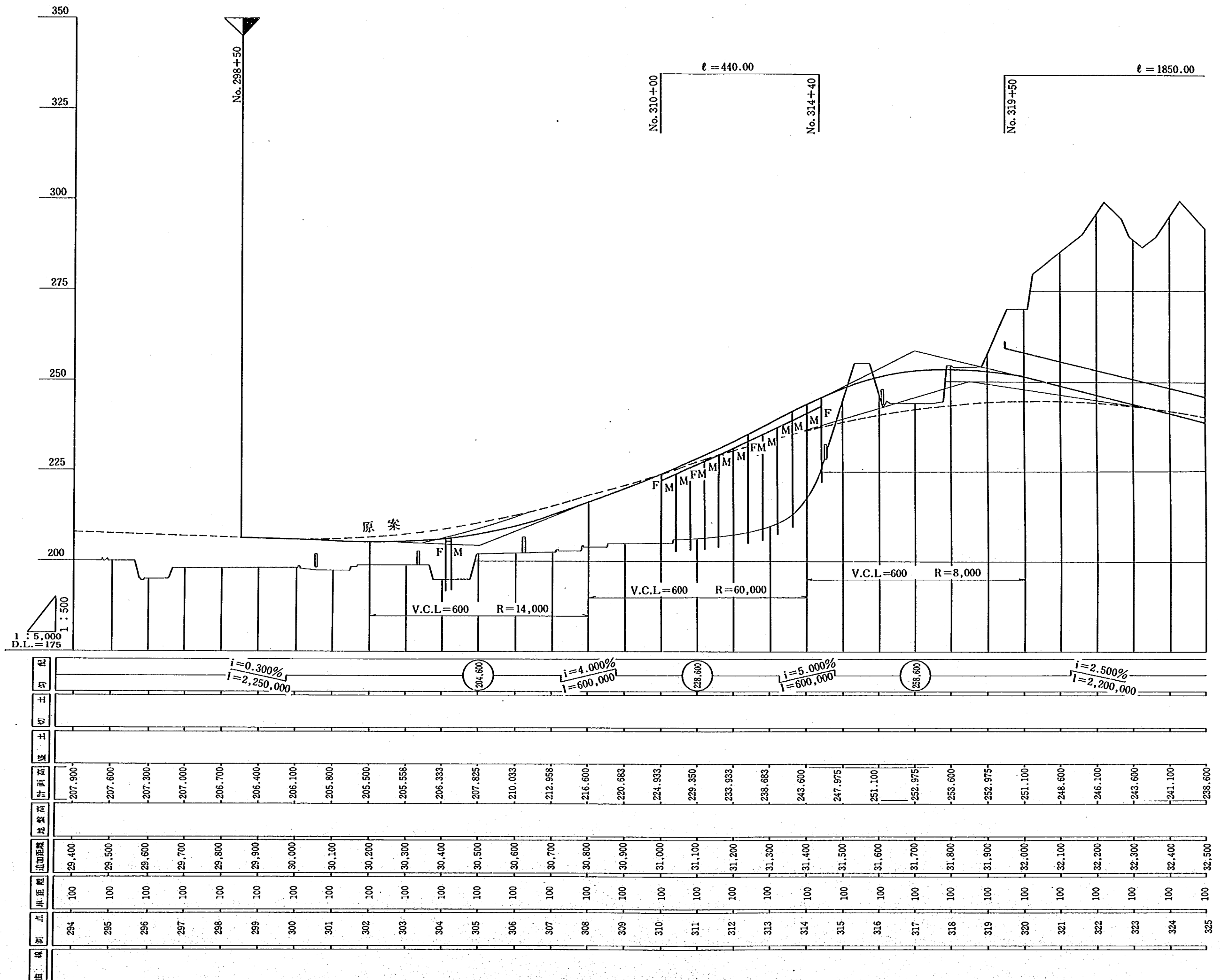
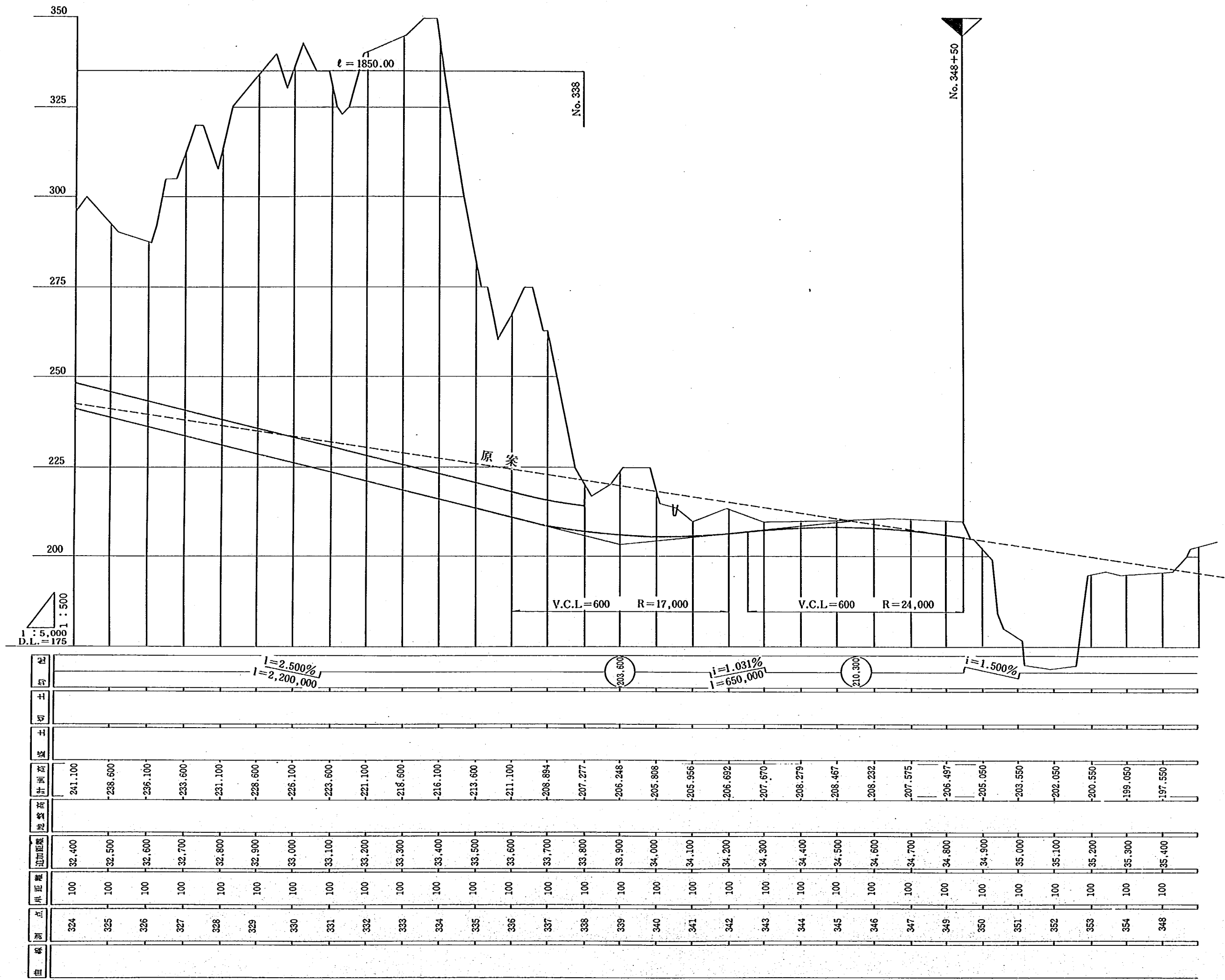


図-4.1.3 トンネル④ 縦断面図 (下り線, B案)



4.1.3 換気設備の検討

(1) 所要換気量

各トンネルの所要換気量は日本道路公団設計要領（第3集）に基づき算定する。算定に際しての基本的条件は下記の通りである。

① 道路構造諸元

検討対象トンネル区間の道路諸元を表-4.3に示す。

表-4.3 道路構造諸元

トンネル名	種 別	地 形	級 別	設計速度 (km/h)	車線幅員 (m)	側方余裕 (m)	大型車混入率 (%)	計画水準
トンネル-①	第1種	山 地	3 級	80	3.5	0.75	50	1
トンネル-②	第1種	山 地	3 級	80	3.5	0.75	50	1
トンネル-③	第1種	山 地	3 級	80	3.5	0.75	50	1
トンネル-④	第1種	山 地	3 級	80	3.5	0.75	50	1

② 交通量

対象とする交通量は、原則としてトンネルを含む道路の設計交通容量を用いるものとする。ただし、20年後における推定時間交通量が設計交通容量を大幅に下回る場合は、20年後における推定時間交通量を用いるものとする。その場合、検討対象トンネルの20年後の計画交通量を表-4.4に示す。

表-4.4 計画交通量

トンネル名	年 度	計 画 交 通 量
トンネル-①	S 75	5,861台/日
トンネル-②	S 75	7,300台/日
トンネル-③	S 75	6,369台/日
トンネル-④	S 75	12,031台/日

③ 許容濃度

換気量算定上の許容濃度は表-4.5の通りである。

表-4.5 許容濃度

計 画 内 容	煤 煙	C O
推定時間交通量を用いた場合	$r=50\%$	100 p p m
設計交通容量を用いた場合	$r=40\%$	

④ 基準換気量の算定

トンネルの換気は排気ガス中の煤煙および一酸化炭素を対象とし、おのこの基準換気量を次式により算出するものとする。

$$Q_0 = q \cdot N \cdot L$$

Q_0 : 基準換気量

q : 換気量係数

N : 交通量 (台/時)

L : トンネル延長 (km)

なお、換気量係数は、当該トンネルの車道断面、一酸化炭素許容濃度、許容煤煙透過率、大型車混入率から求められる。今回の計算結果を図-4.2に示す。

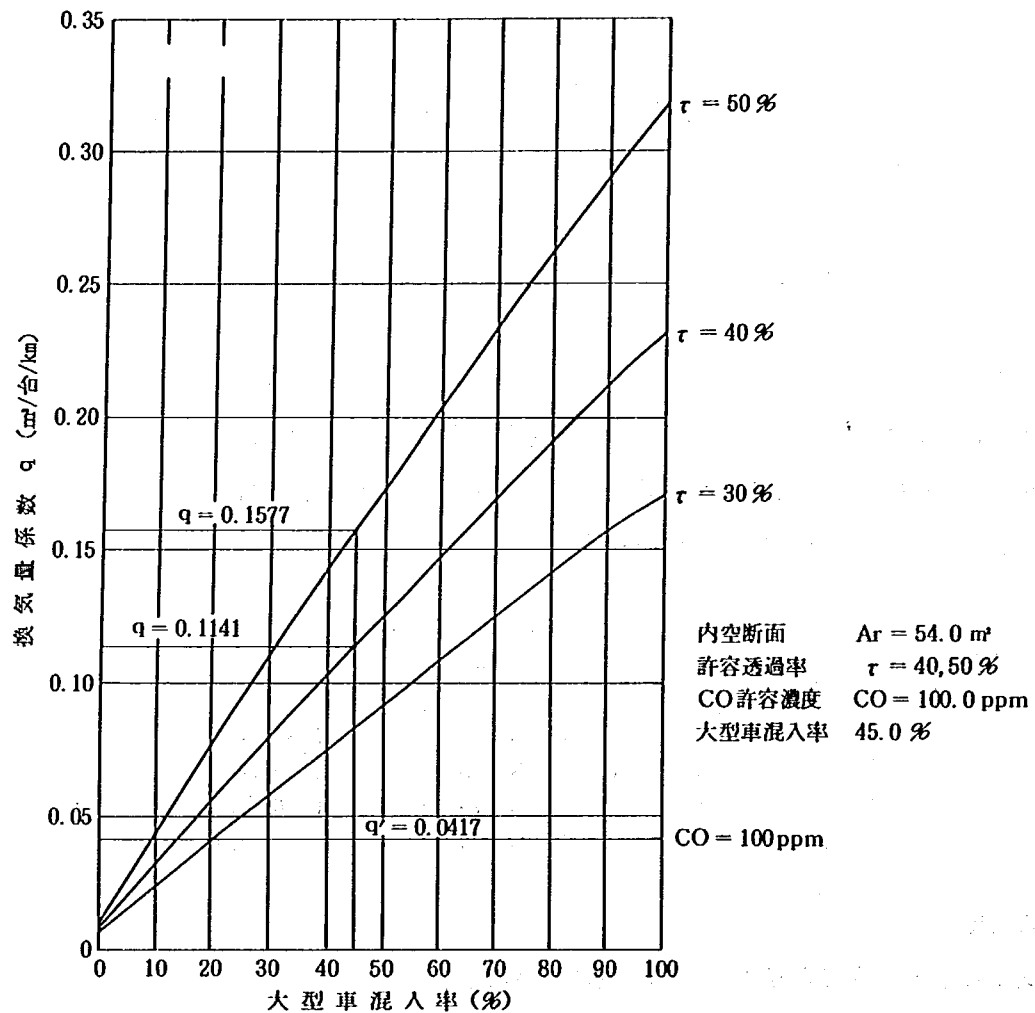


図-4.2 換気量係数

この場合、

煤煙換気量係数は $\tau = 50\%$ の場合 $q = 0.158$

$\tau = 40\%$ の場合 $q = 0.114$

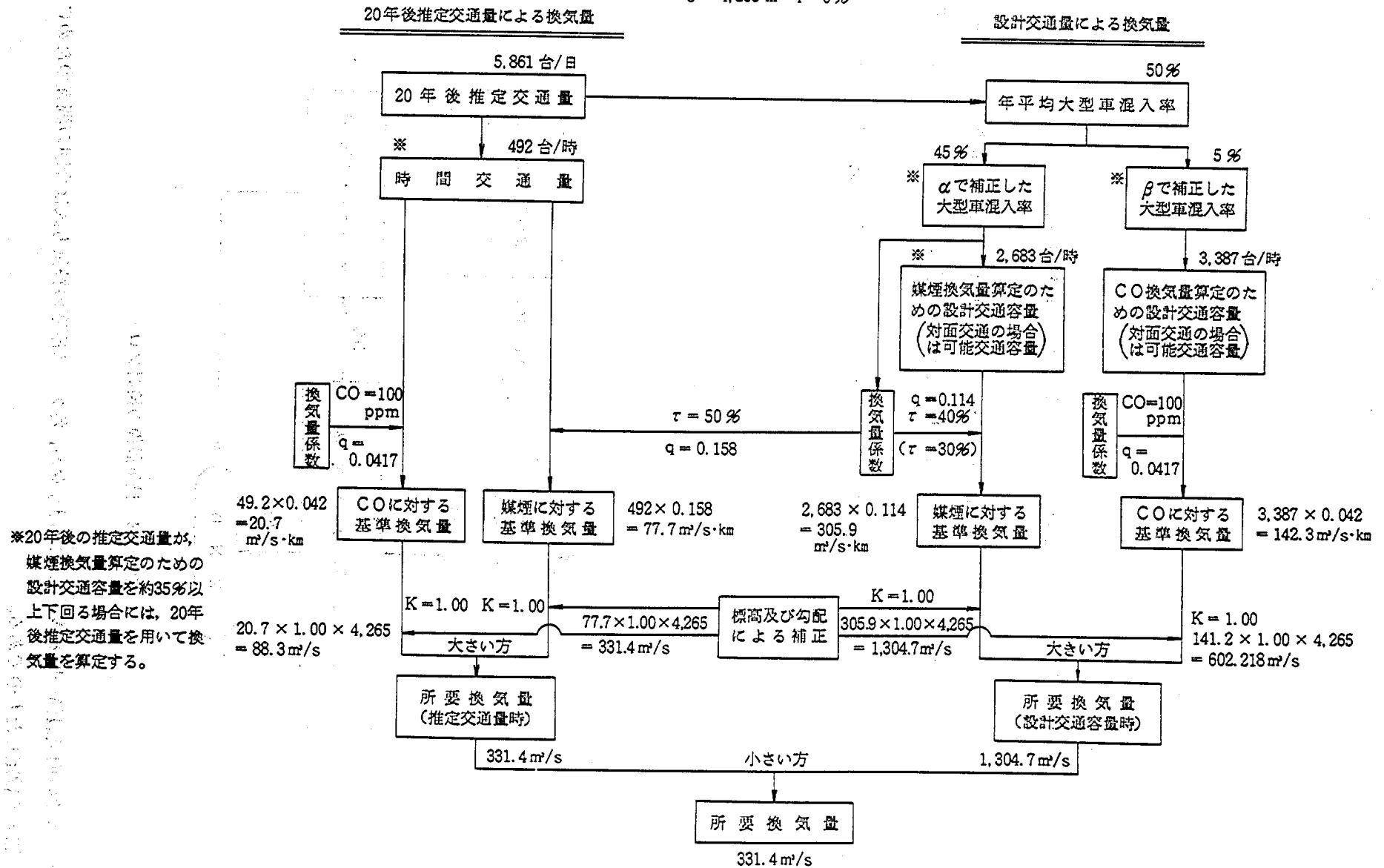
CO 換気量係数は $q' = 0.042$

となる。

なお、煤煙許容透過率 $\tau = 50\%$ の数値は20年後の推定時間交通量の場合に用い、 $\tau = 40\%$ の数値は、道路規格より決定する設計交通容量の場合に用いる。

⑤ 基準換気量に対する補正

トンネル—②A, Bライン (原案)
 $\ell = 4,265 \text{ m}$ $i = 0\%$



※20年後の推定交通量が、
 媒煙換気量算定のための
 設計交通容量を約35%以
 上下回る場合には、20年
 後推定交通量を用いて換
 気量を算定する。

※ここに α とは、媒煙換気量を算出するための大型車混入率の修正率
 β とは、CO換気量を算出するための大型車混入率の修正率

図一4.3 所要換気量の算定過程

所要換気量は、基準換気量にトンネルの勾配および標高に対する補正を行って算出するものとする。

$$Q = K \cdot Q_0$$

$$K = K_1 \cdot K_2$$

Q : 所要換気量

K_1 : 勾配補正係数

K_2 : 標高補正係数

これらの諸条件に基づく、所要換気量の算定過程の1例を図-4.3に示す。

(2) 換気設備

ここでは各々ケースについて、換気設備の検討を行った。考え方の基本としては、車道内風速が10m/s以下の場合は、原則として、超大口径ジェットファンで、10m/s 以上の場合は、電気集じん機で対処することとした。

結果的には、下り勾配トンネルにすることによって、大部分のトンネルが交通換気力でまかなっている。換気設備の検討フローを図-4.4に示す。

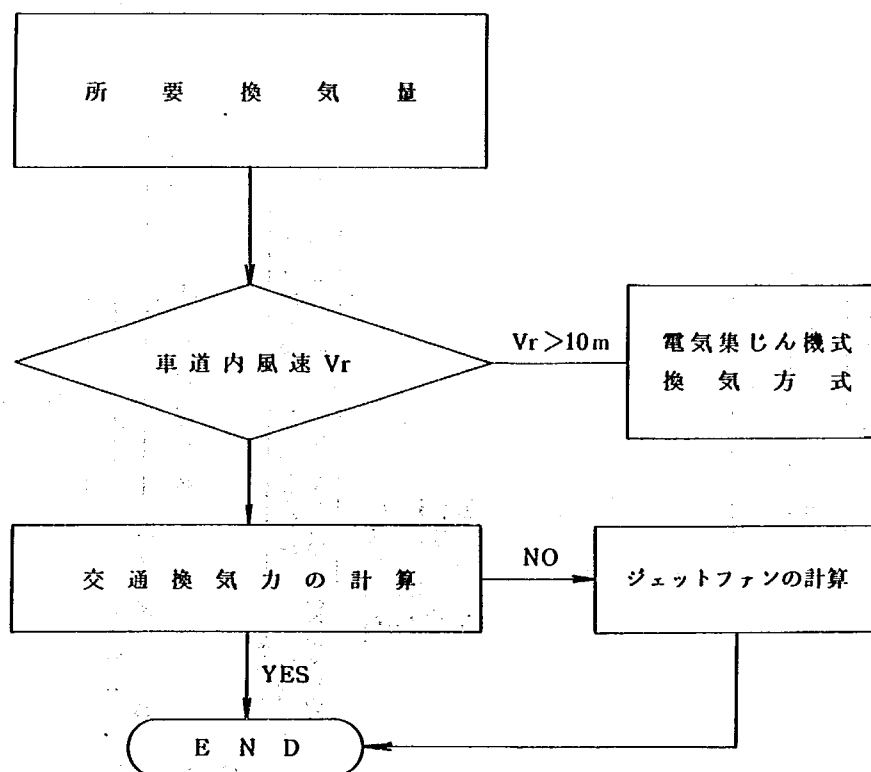


図-4.4 換気設備の検討フロー

各ケースでの換気設備一覧を表-4.6に示す。なお、各ケース原案の換気方式は今回の調査のために独自に検討を加えて設定したものである。

表-4.6 換気設備一覧(1)

路線名			東 北 自 動 車 道						中 国 横 断 道					
トンネル名			トンネル ③						トンネル ⑤					
比較案			A, Bライン原案		AーラインA案		BーラインA案		Aーライン原案		AーラインA案		AーラインB案	
延長	トンネル		上り線 4,225m (下り線) (4,265m)		3,125		(2,075+475+170) 2,720		3,188		2,900		3,050	
	土工		1,225m (778m)		1,455		2,150		2,110		2,298		2,198	
	橋梁		410m (127m)		1,220		930		150		250		200	
	総延長		5,890m (5,170m)		5,800		5,800		5,448		5,448		5,448	
縦断勾配			0.747% ↗ 0.500%		2.500% ↗		2.500% ↗		1.252% ↗		2.400% ↗		2.400% ↗	
交通量	推定	20年後推定日交通量	5,861台/日		5,861		5,861		7,300		7,300		7,300	
		時間交通量	492台/時		492		492		613		613		613	
		大型車混入率	50%		50		50		50		50		50	
	設計交通量	α: 煤煙換気量を求めるための大型車混入率	45%		45		45		45		45		45	
		β: CO換気量を求めるための大型車混入率	5%		5		5		5		5		5	
		煤煙換気量算定のための設計交通量	2,683台/時		1,981 2,683		1,981 2,633		1,932		1,981		1,981	
		CO換気量算定のための設計交通量	3,387台/時		3,213 3,387		3,213 3,387		3,199		3,213		3,213	
所要換気量	20年後推定時間交通量	331m ³ /s		141		94		232		163		171		
	設計交通容量	1,305m ³ /s		409 554		272 368		527		379		399		
換気方式	20年後推定時間交通量	超大ジェット8台		交通換気		交通換気		交通換気		交通換気		交通換気		
	設計交通容量	電気集じん機付噴流換気方式 Q=1,305m ³		*超大ジェット4台 超大ジェット20台		交通換気 交通換気		超大ジェット20台		交通換気		超大ジェット4台		
計算に使用した諸数値	標高		310m		320		320		380		400		400	
	換気量係数の補正係数	煤煙	1.00		0.58		0.58		0.75		0.58		0.58	
		CO	1.00		0.73		0.73		0.85		0.73		0.73	
					*ここで、超大ジェットとは「超大口径ジェットファン〜噴流換気方式」のことを示す。									

表-4.6 換気設備一覧(2)

路線名			東北横断道												
トンネル名			トンネル ㉔					トンネル ㉕							
比較案			Aライン原案		Bライン原案		AラインA案		BラインA案		Aライン原案		Bライン原案		
延長	トンネル		1,840m		1,840		1,720		1,890		2,150		2,120		
	土工		2,340m		2,350		2,700		2,315		2,331		2,410		
	橋梁		470m		1,010		1,030		995		415		415		
	総延長		4,650m		5,200		5,450		5,200		4,896		4,950		
縦断勾配															
交通量	推定	20年後推定日交通量	6,369台/日		6,396		6,369		6,369		12,031		12,031		
		時間交通量	534台/時		534		534		534		1,010		1,010		
		大型車混入率	50%		50		50		50		50		50		
	設計交通量	α: 煤煙換気量を求めるための大型車混入率	45%		45		45		45		45		45		
		β: CO換気量を求めるための大型車混入率	5%		5		5		5		5		5		
		煤煙換気量算定のための設計交通量	2,683台/時		2,683		1,981		2,683		2,683		2,683		
		CO換気量算定のための設計交通量	3,387台/時		3,387		3,213		3,387		3,387		3,387		
所要換気量	20年後推定時間交通量	249m ³ /s		96		87		93		480		237			
	設計交通容量	901m ³ /s		349		233		316		335		921		455	
換気方式	20年後推定時間交通量	超大ジェット2台		交通換気		交通換気		交通換気		交通換気		超大ジェット12台		交通換気力	
	設計交通容量	電気集じん機付噴流換気方式 Q=901m ³ /s		交通換気		交通換気		交通換気		交通換気		電気集じん機付噴流換気方式 Q=921m ³ /s		超大ジェット5台	
計算に使用した諸数値	標高		200m		200		210		200		230		230		
	換気量係数の補正係数	煤煙	160		0.62		0.60		0.58		1.40		0.70		
		CO	1.30		0.77		0.75		0.73		1.25		0.80		

表-4.6 換気設備一覧(3)

路 線 名			東 北 横 断 道											
ト ン ネ ル 名			ト ン ネ ル ④											
比 較 案			AーラインA案		AーラインB案		BーラインA案		BーラインB案		BーラインC案			
延 長	ト ン ネ ル		(1,725+550) 2,275m		(1,875+550) 2,425		2,100		1,850		2,150			
	土 工		3,210m		2,915		2,035		2,695		2,555			
	橋 梁		65m		50		815		455		375			
	総 延 長		5,550m		5,390		4,950		5,000		5,080			
縦 断 勾 配			2.50%		2.50%		2.50%		2.50%		2.50%			
交通量	推 定	20年後推定日交通量	12,031台/日		12,031		12,031		12,031		12,031			
		時 間 交 通 量	1,010台/時		1,010		1,010		1,010		1,010			
		大 型 車 混 入 率	50%		50		50		50		50			
	設計交通容量	α : 煤煙換気量を求めるための大型車混入率	45%		45		45		45		45			
		β : CO換気量を求めるための大型車混入率	5%		5		5		5		5			
		煤煙換気量算定のための設計交通量	2,144台/時	2,683	2,116	2,683	1,981	2,683	1,981	2,683	1,981	2,683		
		CO換気量算定のための設計交通量	3,258 //	3,387	3,216	3,387	3,213	3,387	3,213	3,387	3,213	3,387		
所要換気量	20年後推定時間交通量	160㎡/s		174		194		171		199				
	設 計 交 通 容 量	245㎡/s	306㎡/s	262	333	275	373	242	328	282	382			
換 気 方 式	20年後推定時間交通量	交 通 換 気		交 通 換 気		交 通 換 気		交 通 換 気		交 通 換 気				
	設 計 交 通 容 量	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気	交通換気			
計算に使用した諸数値	標 高		240m		240		240		240		240			
	換 気 量 係 数 の 補 正 係 数	煤 煙	0.58		0.58		0.58		0.58		0.58			
		CO	0.73		0.73		0.73		0.73		0.73			

4.1.4 維持管理費用の検討

高速道路のトンネル部の維持管理費用の実態を把握するため、東名高速道路のトンネルを（1ヶ所）対象として関連資料を収集し、検討を加えた。

トンネル部の維持管理費用を

- ① 改良費……照明設備の改良，VI計の改修，交通量計測設備等に要する費用。
- ② 保守委託……巡回点検等道路保全のための日常作業。
- ③ 維持作業……清掃，照明のソケット，ランプの取替等の道路施設物の修繕に要する費用。
- ④ 事故復旧……自動弁箱取替，消化栓取替等の事故復旧に要する費用。
- ⑤ 換気設備使用電力料……換気設備運転に要する電力料。

の5分類とすると，内訳は表-4.7の通りとなった。

表-4.7 トンネル部の維持管理費用(上下線含む)

S 56		
項 目	費 用 (千円)	比 率 (%)
① 改 良 費	164,900	58.6
② 保 守 委 託	13,410	4.8
③ 維 持 作 業	20,820	7.4
④ 事 故 復 旧	5,600	2.0
⑤ 換 気 設 備 電 力 料	76,600	27.2
合 計	281,330	100.0

トンネル延長…上り線1,660m，下り線1,690m

トンネル部の維持管理費用としては改良費が最も大きく，全体の58.6%も占めている。これは56年度にトンネル照明設備の改良工事が行なわれたことによる。次に大きいのは換気設備電力料であり全体の27.2%を占めている。これは保守委託4.8%，維持作業7.4%に比較してもかなり大きい値である。またトンネル1 km 当たり（上下線含む）の維持管理費（改良費を除く）は約7,000万円となった。これは高速道路全体でみた値とほぼ一致している。

4.2 経済性の検討

各トンネル区間に重力利用走行方式を導入する場合の評価を，建設費，維持管理費の面から検討を行う。

ここでは供用開始 n 年後の便益額の累計（ Rn ）を下記式で表現されるものとする。

$$Rn = (A_0 - A) + \sum_{i=0}^n \{(B_0 - B) \cdot T^{-1} + (I_0 - I) \cdot M + (L_0 - L) \cdot N + (K_0 - K)\}$$

Rn : 供用開始 n 年後の累計便益額

A_0 : 原案の工事費 (千円)

A : 比較路線の工事費 (千円)

B_0 : 原案の施設関係費用 (千円)

B : 比較路線の施設関係費用 (千円)

T : 施設関係平均耐用年数 (年)

調査結果より $T = 12$ 年

l_0 : 原案の明り部延長 (km)

l : 比較路線の明り部延長 (km)

M : 明り部に要する km 当り維持管理費

L_0 : 原案のトンネル延長 (km)

L : 比較路線のトンネル延長 (km)

N : トンネルに要する km 当り維持作業費 (千円)

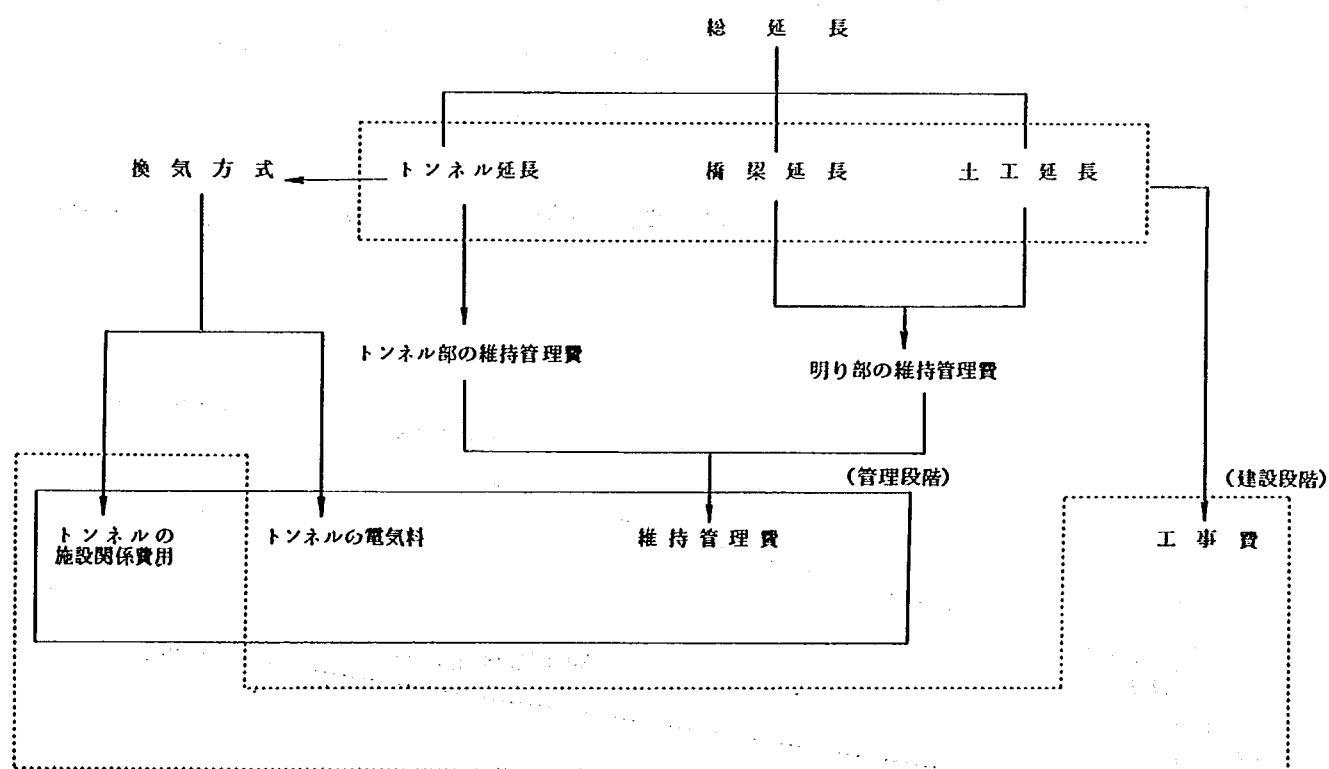
K_0 : 原案のトンネルに要する電力料

K : 比較路線のトンネルに要する電力料

n : 供用後の年数

即ち, Rn は本方式を導入する場合と導入しない場合での工事費, 施設関係費用, 維持管理費, およびトンネルに要する電気料それぞれの差を合計した値である。

便益構成を模式的に表現すると図—4.5の通りである。



図—4.5 便益構成

なお工事費 (A_0, A) および施設関係費用 (B_0, B) は日本道路公団の基準により算出した。

明り部に要する km 当りの維持管理費は, 600万円, トンネル部の km 当り維持作業費は1,020万円, 超大口径ジェットファン一基当りの電気料は480万円, 電気集じん機一基当りの電気料は8,000万円として, 便益額を算定した。

各ケースでの累計便益額を図-4.6に示す。

以下各ケースでの原案と比較案との関係について述べる。

トンネル③の A ラインの場合、総延長に差はないが、トンネル部が短くなり、逆に橋梁部が長くなり、換気方式は交通換気が可能となった。したがって工事費については差が見られないが、施設関係費用および維持管理費が節減され、25年間の累計便益は約19億円と見込まれた。

トンネル③の B ラインの場合、総延長は約600m 伸びたが、トンネル延長は大幅に短縮され、換気方式は交通換気が可能となった。

したがって工事費、施設関係費用および維持管理費が節減され、25年間の累計便益は約37億円と見込まれた。

トンネル④の場合、総延長、トンネル延長それぞれ差がなく、工事費および維持管理費の面でも顕著な効果は見られない。

トンネル⑤の A ラインの場合、橋梁延長が伸びて、総延長が約700m 長くなったため、工事費が増加しており、便益面での効果は見られなかった。

トンネル⑤の A ラインの場合、総延長は約650m 長くなったが、橋梁延長が短くなり、トンネル延長はほとんど差がなかったことから、工事費は減少している。また換気方式は道路勾配の関係で交通換気が可能となったことから、施設関係費用、電気料が節減され、25年間の累計便益は約25億円と見込まれた。

トンネル⑤の B ラインの場合、総延長、トンネルともそれぞれ差がなく、工事費および維持管理等の面でも顕著な効果は見られない。

なお参考として、所要換気量を算出する際、設計交通容量を使用する場合について累計便益量を検討して

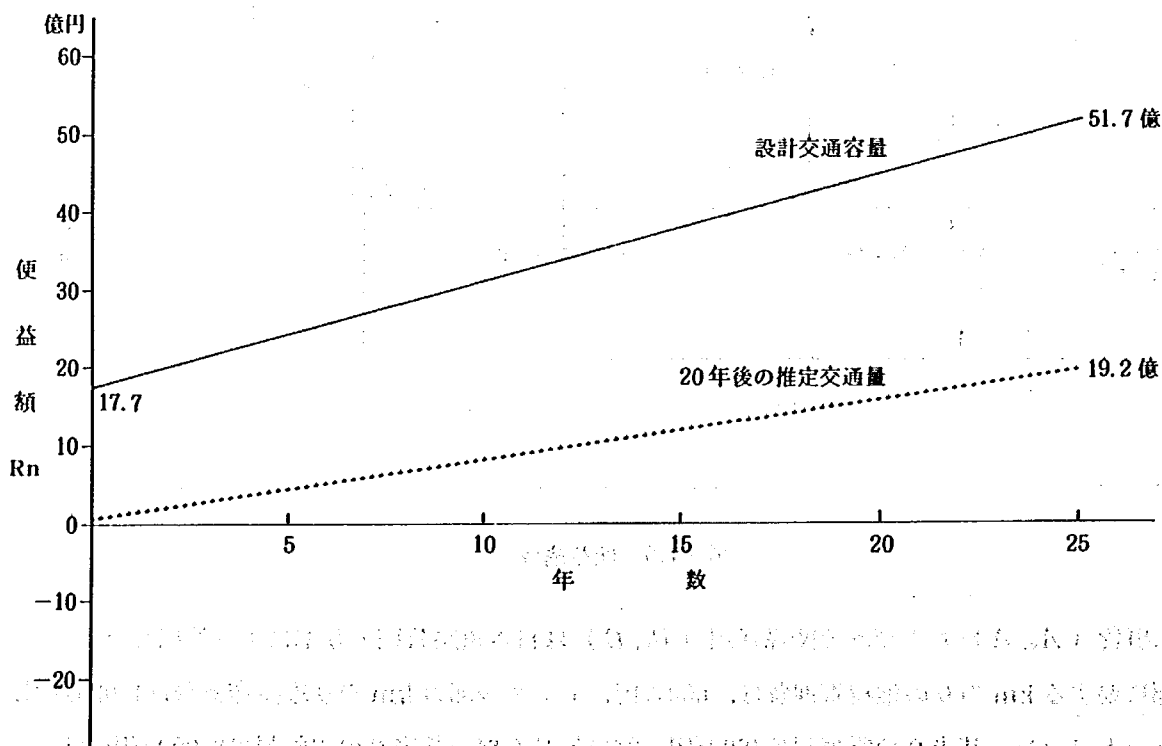


図-4.6.1 トンネル③ A ライン A 案

みると、ほとんどのケースで換気方式の変更が可能となり、20年後推定時間交通量を使用する場合に比べて、累計便益も多く見込まれる。

試みに、トンネル①の A ラインの場合、25年間の累計便益額は52億円と推定された。

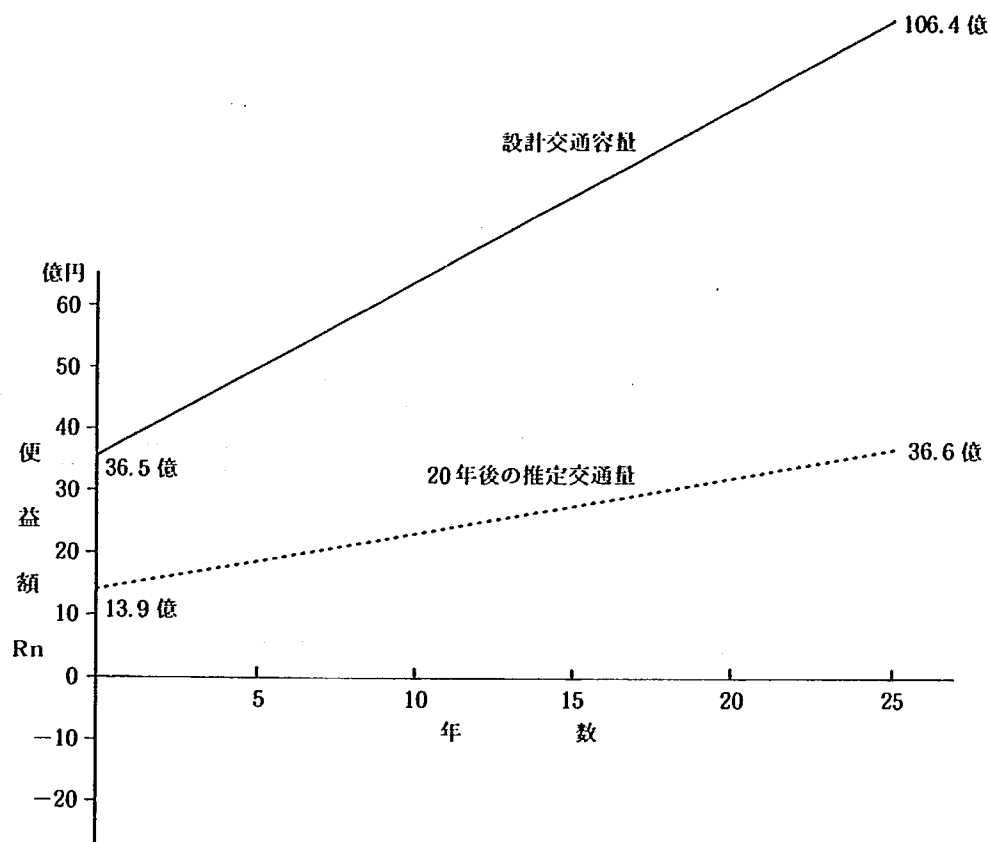


図-4.6.2 トンネル① B—ライン A 案

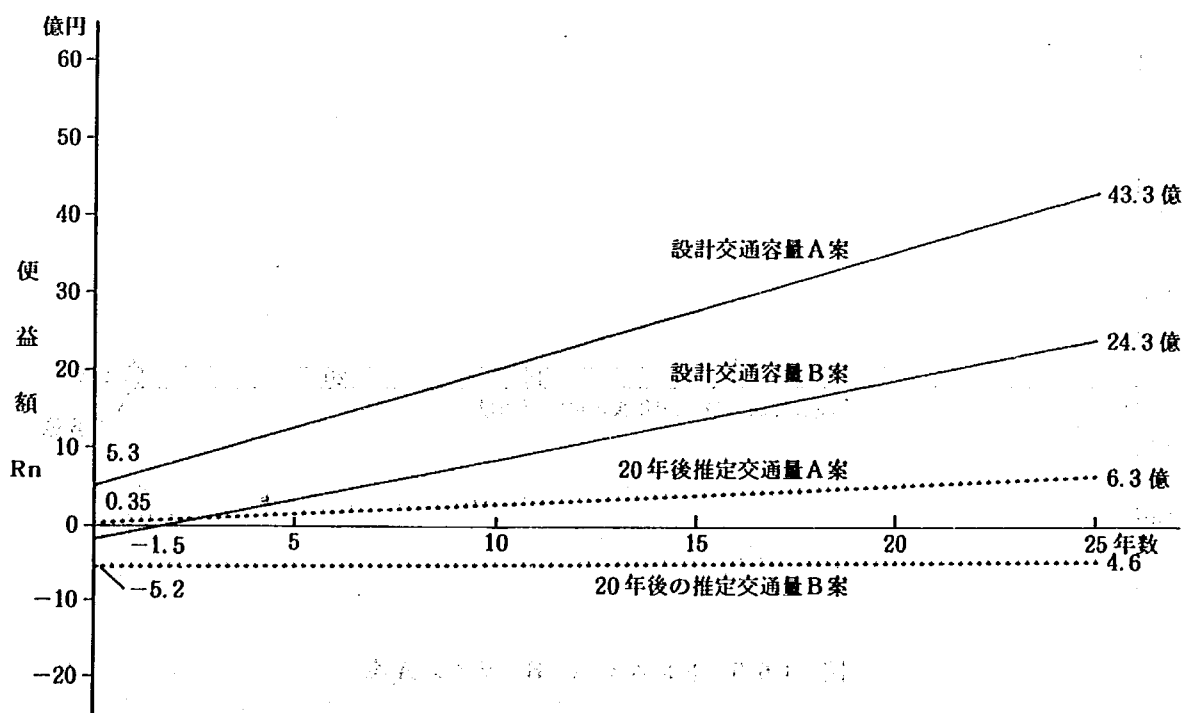


図-4.6.3 トンネル② A 案(B 案)

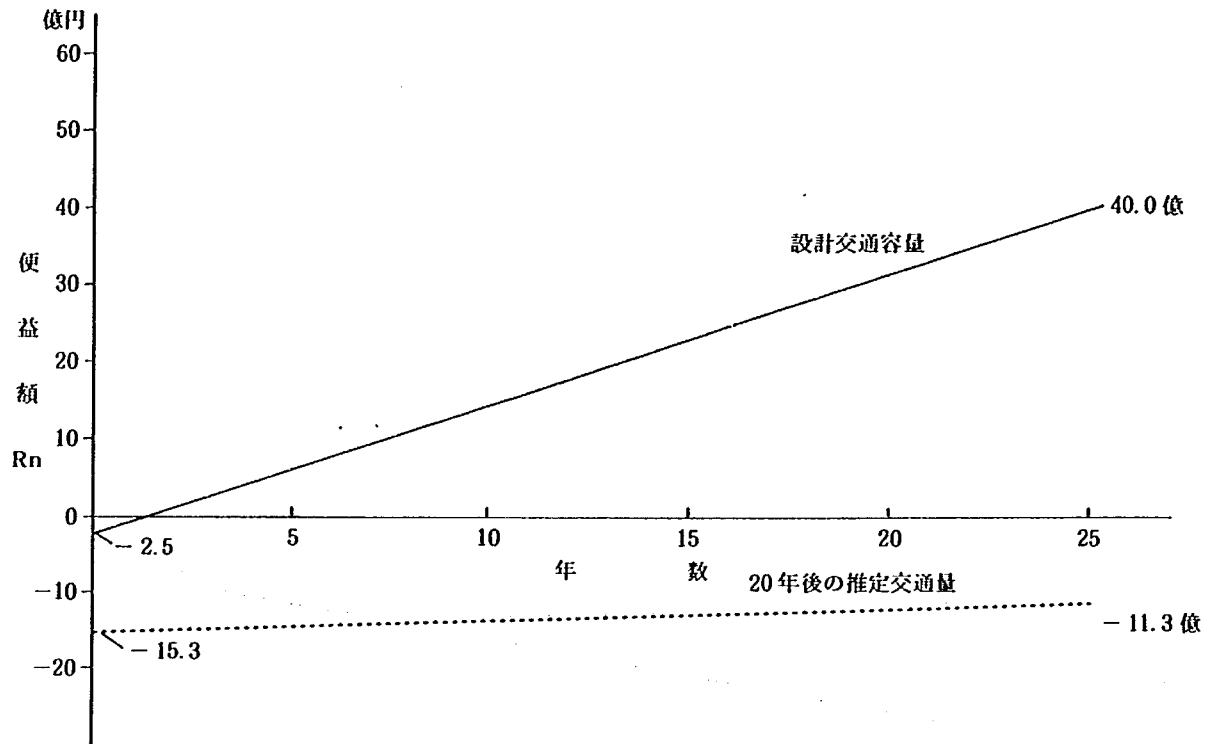


図-4.6.4 トンネル-㉔A-ライン A 案

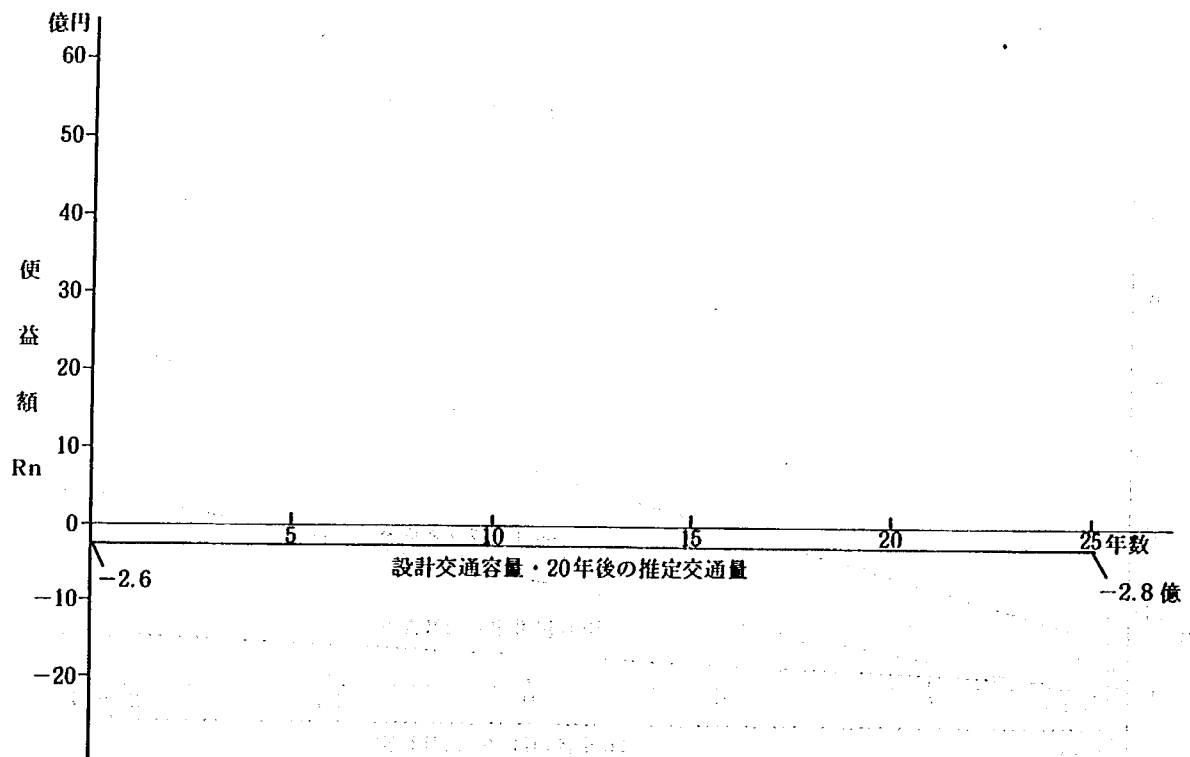
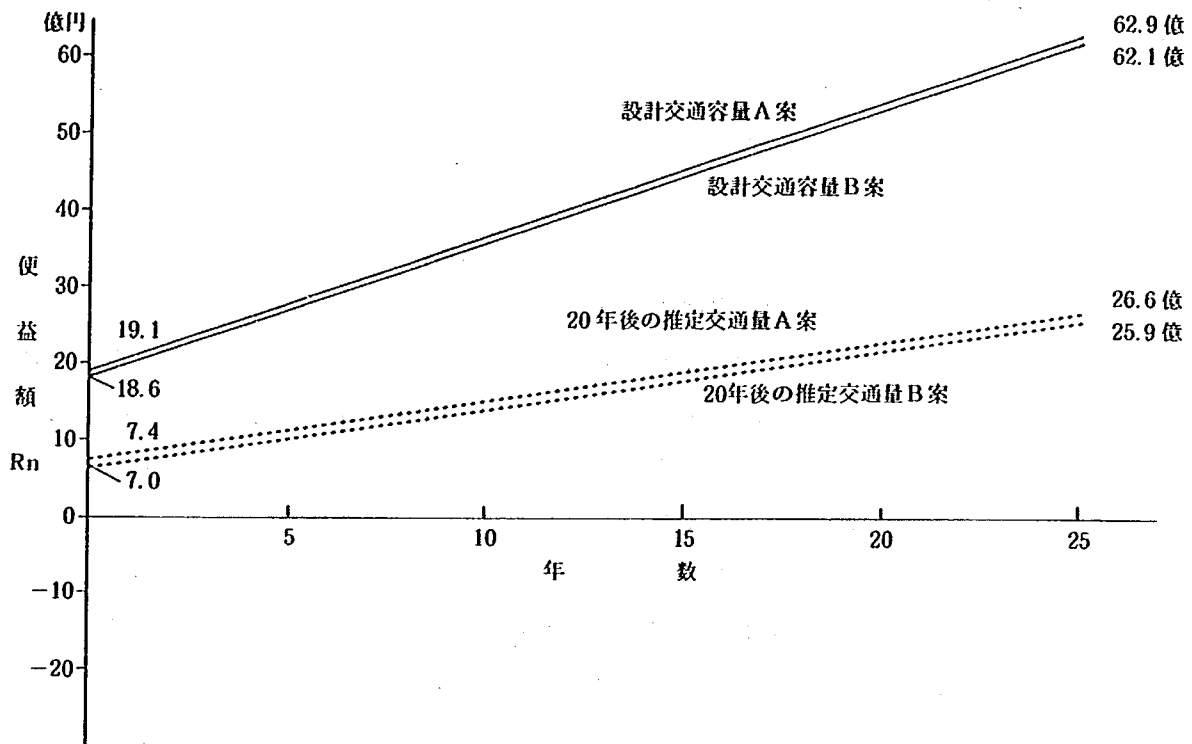
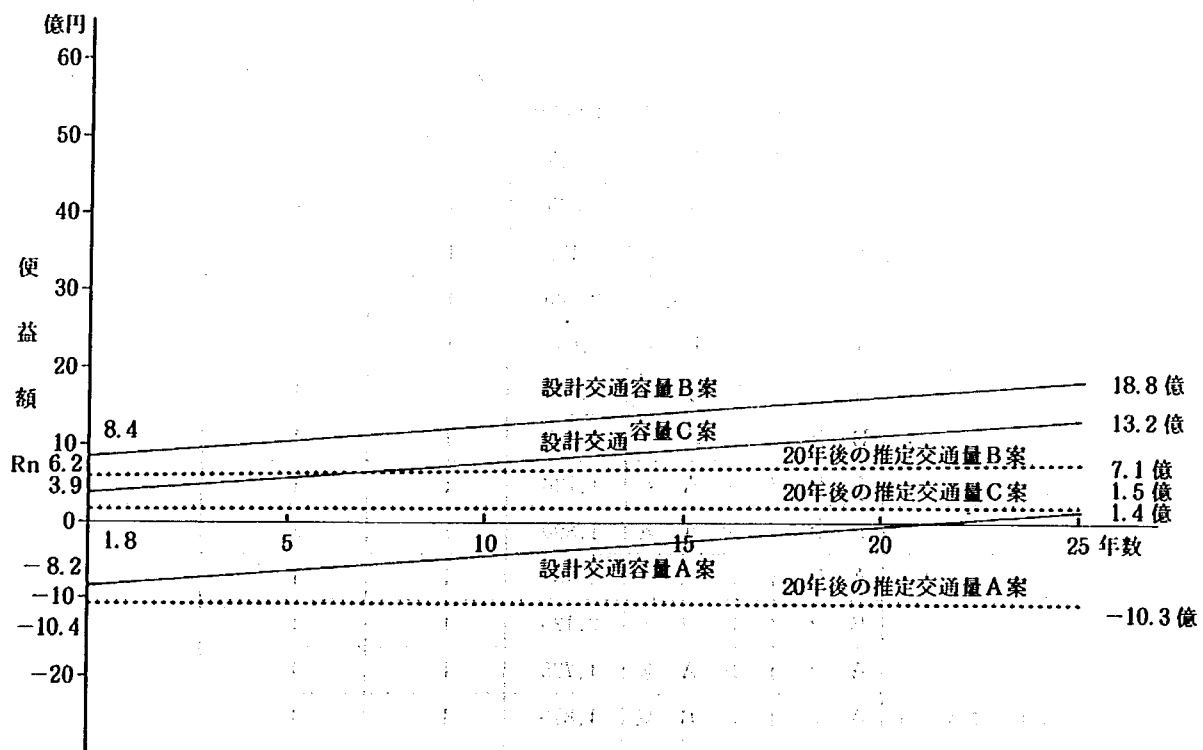


図-4.6.5 トンネル-㉔B-ライン A 案



図—4.6.6 トンネル—④A—ラインA案(B案)



図—4.6.7 トンネル—④B—ラインA案(B案)(C案)

4.3 非常時、走行安全性の検討

4.3.1 非常時等

道路トンネルを下り勾配とすることにより、平常時には自然換気力のみで対応可能であるというケースが多いことは、これまでの検討で明らかとなった。

しかしながら、実際にトンネルを計画する場合には、非常時等に対する検討も必要である。

検討項目には、渋滞時に対する考え方や、火災時の対応策がある。

トンネル内で交通が渋滞する場合には、平常時と同じCO許容濃度を満足させようとする多量の換気量を必要とする場合が考えられる。一つには、状況設定を見直し、許容濃度そのものも状況に合わせて見直すということが考えられよう。しかしながら、今回検討の対象としたトンネルは山地部の一方向交通トンネルで、しかも通常での交通量は少ないということを考慮すると、突発的な事故以外に渋滞は考え難い。事故時の対応を考えることが第一であり、基本的には渋滞時の換気は考慮する必要がないと言える。

他方、トンネル内の火災時においては、換気施設を利用して排煙を効果的に行うことが基本である。ところで、常用換気が必要でないような場合に関しては、日本道路公団の設計要領において次のような解説がある。それは、トンネル延長が特に長くなるような場合や、一方向交通トンネルの上、下線いずれかに換気用ファンが設置される場合には、防災用ファン（ジェットファン）を設置することが望ましいというものである。また、防災用ファンの設計については、2 m/secの風速となるように設計すれば良いと言われており、これによりジェットファンの必要台数を計算すると表4.8のとおりである。

表4.8 防災用ファンの必要台数

トンネル名	比 較 案	延 長	20年後推定 時間交通量	設計交通容量
トンネルー㉑	A, B ライン 原 案	4,265m	2 台	2 台
	A ラ イ ン A 案	3,125	1	2
	B ラ イ ン A 案	2,075	1	1
トンネルー㉒	A ラ イ ン 原 案	3,188	1	2
	A ラ イ ン A 案	2,900	1	2
	A ラ イ ン B 案	3,050	1	2
トンネルー㉓	A ラ イ ン 原 案	1,840	1	1
	B ラ イ ン 原 案	1,840	1	1
	A ラ イ ン A 案	1,720	1	1
	B ラ イ ン A 案	1,890	1	1
トンネルー㉔	A ラ イ ン 原 案	2,150	1	1
	B ラ イ ン 原 案	2,125	1	1
	A ラ イ ン A 案	1,725	1	1
	A ラ イ ン B 案	1,875	1	1
	B ラ イ ン A 案	2,100	1	1
	B ラ イ ン B 案	1,850	1	1
	B ラ イ ン C 案	2,150	1	1

(注1) 台数はすべて超大口径ジェットファンで計算している。

なお、20年後推定交通量と設計交通容量におけるジェットファン台数の差異は、トンネル内の車の存在台数により空気抵抗に差が生ずると考え、参考のため計算したためである。

結論として、今回検討したトンネルにおいては、平常時に自然換気（交通換気）のみで済む場合にも、トンネル火災時の防災用として超大口径ジェットファン1台ないし2台程度の設備を設けることが望ましいと言える。

4.3.2 走行安全性の検討

高速道路の下り勾配部およびトンネル部では事故率の高いことが想定される。したがって重力利用走行方式をトンネル部に導入するにあたっては事故対策を十分に考えておく必要があると言える。

本方式導入に伴う留意事項をまとめると以下の通りである。

- ① 安全性の面からは、下り勾配の度合はなるべく緩い方が望ましい。
- ② さらに安全性を確保するため、視距の向上（煤煙透過率の引上げと照明の増設などによる）が望まれる。
- ③ 設定車速をドライバーに知らせるための工夫が必要となろう。

第5章 ま と め

本報告書は、重力を利用した走行方式の導入が可能となるよう路線選定を適切に行い、これによりもたらされるトンネルの換気等に要する費用の節減効果を定量的に把握することを目的として実施した、トンネルの維持管理に関する実態調査、排出ガスに関する分析、及び、ケーススタディによる本方式の導入の可能性についての検討結果をとりまとめたものである。

主な結果は次のとおりである。

- 1) 下り勾配2.5%を仮定したとき貨物車が積載状態の場合、エンジンプレーキをかけながら速度60km/hで走行することが可能である。また、大型貨物車のほとんどはディーゼルエンジンであるため、エンジンプレーキ中の燃料流量はゼロに等しく、したがって全交通における排出ガスの大幅な減少が期待できる。
- 2) 乗用車や空荷の貨物車は、下り勾配2.5%のとき、エンジンプレーキによる走行速度は40km/h付近となり、これより高い速度では、アクセルによる駆動走行の割合が増える。しかし、この際の排出係数は平坦路に比べかなり減少する。
- 3) 3 km 程度のトンネルに2.5%の下り勾配をつけた場合を想定し、公団設計要領とトンネル内調査による資料（換気量係数）を用いて可能交通量の算出を行った。排出係数に勾配補正を施すことによったが、可能交通量は平坦路の場合より増大し、大型車混入率が0.5以下の場合は、交通のピストン作用による換気に頼れる。
- 4) 3)の結論は煤煙に対する許容透過率が40%の場合であるが、視距を上げるため許容透過率を50%に上げたケースでも、可能交通量はトンネル部の交通容量以上を確保できる場合がある。
- 5) 高速道路の実績データによれば、トンネルの維持管理費は、1 km あたり約7,000万円を要している。これにより、昭和70年度におけるトンネルの維持管理費の全体維持費に占める割合を推定すると約35%にもなる。
- 6) 下り坂トンネルにすることによって、路線の線形を大きくシフトし総延長が伸びることがあるが、このことによって必ずしも建設費が増大するとは限らず、建設費の増大はむしろ構造物延長（橋梁、トンネル）によって左右される。
- 7) 維持管理費の節減は、トンネルに起因することが大きく、中でも換気設備の削減によって大きな維持管理費の節減が期待できる。
- 8) トンネル延長が短かく（2 km 前後）交通量が少い場合においては、交通換気力でまかなえる場合が多いので、本方式導入による顕著な効果は期待できないことが多い。
- 9) 選定された各路線（トンネル）の建設費および累積の維持管理費を算定し、長期的な経済性を検討したところ、ケースによっては20年間で20～50億円程度の便益（経済効果）を有する場合がある。

あ と が き

重力利用走行方式の導入のねらいは、道路トンネルに下り勾配をつけ、自動車のエンジン負荷量を減らすことにより排出ガス量の低減ならびにトンネルの換気設備費や維持管理費の低減化を図るものであるが、導入にあたっては地形条件等を十分に吟味し、アクセス道路の線形や道路構造等に十分留意して路線選定を行うことが重要である。本調査のケーススタディにおいては、原案に対し、比較路線の平面・縦断線形がやや厳しくなる結果となったが2.5%程度の下り勾配を有するトンネルを採用することにより、明かり部を含めて全体的には省エネルギー効果を有するケースのあることが実証的に明らかとなった。

最後に、本調査を実施するにあたり、ご協力を戴いた「トンネル内自動車輸送システム調査委員会」(武部健一委員長)の各委員の方々、ならびに資料等を提供下さいました日本道路公団の関係諸氏に厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 「下り坂における重力惰行運転の実験」 土木研究所, 日本自動車研究所 S.58.3
- 2) 「高速道路における自動車排出ガスの排出係数に関する調査報告書」
日本道路公団, 日本自動車研究所 S.54.2
- 3) 「高速道路における自動車排出ガスの排出係数に関する調査報告書」
日本道路公団, 日本自動車研究所 S.55.1
- 4) 「自動車排出ガスの排出特性に関する調査報告書」 日本道路公団, 日本自動車研究所 S.55.2
- 5) 「自動車排出ガス量測定調査報告書」 建設省土木研究所 S.55.3
- 6) 「自動車排出ガスの排出特性に関する調査」 日本道路公団, 日本自動車研究所 S.57.1
- 7) 「トンネル施設の環境特性に関する調査」 日本道路公団, 日本環境衛生センター S.58.3
- 8) 「トンネル抗口からの自動車排出ガスの拡散に関する調査研究」
日本道路公団, 環境技術研究所 S.57.3
- 9) 「長大トンネル特設委員会報告書」 高速道路調査会トンネル研究委員会 S.52.1
- 10) 「トンネル換気データ処理方法に関する調査研究」 高速道路調査会 S.45.2
- 11) 伊吹山「道路トンネルの換気」
- 12) 「トンネル内自動車排出ガス濃度試験調査」 高速道路調査会トンネル委員会 S.48
- 13) 「道路トンネル内浮遊粉塵の実態調査」 土木研究所資料810 S.48.3
- 14) 「 同 (2) 」 土木研究所資料1101 S.51.3
- 15) 「SAE Handbook, Diesel Smoke」 Society of Automotive Engineering 1982
- 16) 「The measurement and Analysis of the Physical Character of Diesel Particulate Emissions」
Carl. T. Vub et al/SAE tram 760131
- 17) 「上り小仏トンネル交通容量改善に関する調査」
日本道路公団八王子支局 東京道路エンジニア S.57.2
- 18) 「道路トンネル便覧」 日本道路協会
- 19) 「大口径ジェットファンの換気効果に関する調査研究報告書（東北自動車道、福島トンネル）」
高速道路調査会トンネル研究委員会 S.50.4
- 20) 「谷稲葉トンネル換気効果に関する調査研究報告書」 高速道路調査会トンネル研究委員会 S.56.9
- 21) 「電気集じん機付縦流換気に関する調査研究報告書」 高速道路調査会 S.56.2
- 22) 「関越トンネル電気集じん機付立抗送排気縦流式換気の運用に関する研究報告書」
高速道路調査会 S.54.3
- 23) 「関越トンネル電気集じん機付立抗送排気縦流式換気の運用に関する研究報告書（その2）」
高速道路調査会 S.55.3
- 24) 「関越トンネル電気集じん機付立抗送排気縦流式換気の運用に関する研究（その3）報告書」
高速道路調査会 S.56.3

25) 「一方交通トンネルの換気方式に関する調査研究報告書」	高速道路調査会	S.48.2
26) 「設計要領第1集～第4集」	日本道路公団	
27) 「道路の長期計画」	技術書院	S.46.7
28) 「道路の経済効果と投資基準」	技術書院	S.40.4
29) 「土木計画とOR」吉川和広	丸善	S.50.5
30) 「費用・便益の研究事例」	経済企画庁経済研究所	S.44.3
31) 「道路の便益算定についての研究」	高速道路調査会	S.53.3
32) 「道路」S.57年11月号	日本道路協会	

下り勾配省エネルギー道路トンネル
(重力利用走行方式)の適用性に
関する調査報告

I S S N 0386-5878
土研資料 第 2073 号
昭和 59 年 3 月 (1984)
建設省 土木研究所
道路部新交通研究室

キーワード：道路計画，交通システム，線形設計

要 旨

自動車のエンジン負荷量を軽減し，排出ガス量の低減なら
びにトンネルの換気設備費や維持管理費の低減化を図るた
めに道路トンネルが下り勾配となるよう路線選定を行い，
重力を利用した走行方式(重力利用走行方式)を導入した時
の経済効果について検討した結果をとりまとめたものである。

郵便はがき

40円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
道路部 新交通研究室
御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2073号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印