

排ガス規制に対応したスクールバスの最適購入計画

2002MM048 國枝 明奈

2002MM076 太田 みゆき

指導教員 鈴木 敦夫

1 はじめに

現代社会のあらゆる場面において、環境問題に対する関心は非常に高い。特に自動車に関しては、自動車排ガス規制や NO_x・PM 法といった規制によって有害な排ガスの排出量が厳しく規制されている。南山学園のスクールバス運営においても、それにどう対応していけば良いかということから、本研究を行うに至った。

本研究では、環境に配慮し、かつ費用最小のスクールバス購入計画を考案することを目的とする。

2 南山学園のスクールバス

南山学園は、平成 15 年度の時点で 36 台のスクールバスを保有していた。それらのスクールバスはディーゼルエンジンのバスであるため、NO_x・PM 法により平成 16 年度から順次使用期限が来、廃車しなくてはならなくなった。また必要なスクールバスの台数を満たすため、新しいバスの購入を始めなければならなくなった。

現在、すでに平成 16 年度に 7 台、平成 17 年の 8 月までに 3 台購入済みである。よって今後の購入予定のバスは、平成 17 年度の残りの 7 台とそれ以降（平成 18 年から 26 年まで）のすべてをあわせて 19 台である。

これまでの計画では、NO_x・PM 法により廃車しなくてはならないバスの台数にあわせて不足台数を購入するという、シンプルで無駄のない計画である。しかし自動車の排ガス規制や NO_x・PM 法といった、環境に関する規制の根本的な精神を反映させる必要があると私たちは考える。それらの規制は、深刻化している環境問題に歯止めをかけるため、その対策として制定されたものである。それを正しく理解し、環境への負荷を少なくしていくことが私たち自動車に乗る者としての責任である。

3 環境への配慮

環境への配慮として、低公害車の導入およびディーゼルバス保有台数の削減という方法を導入する。従来はディーゼルバスのみをスクールバスとして購入してきたが、我々は環境省から低公害車として推奨されている CNG バスやハイブリッドバスも新たな選択肢として追加する。さらにディーゼルバスの保有台数に上限を設け、人為的に削減していくことで環境負荷を小さくする。以下に低公害車およびディーゼルバス保有台数制限について説明する。

3.1 CNG バス

CNG 車とは、圧縮天然ガス (Compressed Natural Gas) を燃料とした低公害車である。長所は、NO_x の排出量が極めて少なく、PM はまったく排出しないことで

ある。また低振動・低騒音で、都市部を中心に活躍している。さらに CNG 車の燃料である天然ガスの充填所 (= エコ・ステーション) の設置数は徐々に増加し、燃料費も安定している。国のエネルギー対策の一環として、石油代替エネルギーである天然ガスを使用した CNG 車の普及が今後も加速していくだろう。短所は、1 回あたりの燃料補給可能量が少ないことや、エコ・ステーションの設置数は増えて入るものの、まだ充実しているとは言えないことである。

3.2 ハイブリッドバス

ハイブリッド車とは、ガソリンエンジンまたはディーゼルエンジンと、走行時の発電で動くモーターを持つ低公害車のことを言う。長所は、現在の自動車の走行性能や利便性を落とすことなく、低公害を実現していることである。バスであればディーゼルバスと同様に軽油を燃料とするため、ガソリンスタンドでの燃料補給が可能であり、燃料費も安価だ。またディーゼルエンジンとモーターの両方を使用するため、燃費が非常に良い。ハイブリッドバスの燃費はディーゼルバスの燃費の 3 分の 1 である。短所は、6 年に 1 度の電池交換が必要であることや、わずかではあるが CNG 車と違って PM も排出することである。

3.3 ディーゼルバスの保有台数の制限

有害な排ガスを大量に排出するディーゼルバスには、保有台数に上限を設け、それを毎年一定台数ずつ減らしていくことにする。具体的には、平成 17 年度のディーゼルバスの保有台数を上限 29 台とし、毎年 2 台ずつ減らしていく。すなわち平成 18 年度には 27 台、平成 19 年度には 25 台を上限とし、平成 26 年では 9 台を上限とする。このようにして、低公害車の導入を促す。

4 費用について

本研究では環境に配慮し、かつトータルコストの最小化を図るのだが、トータルコストとはバスの購入コスト、廃車コスト、維持費、および減価償却費の和である。バスの購入コストは、低公害車も補助金制度により従来のディーゼルバスと同額で購入できることからその差は無い。廃車コストは、ディーゼルバスは 4,7000 円の費用がかかり、低公害車はまだ新しいため車体購入価格の 1 % で売却する。維持費、減価償却費については詳しく説明する。

4.1 維持費

維持費は、燃料費およびハイブリッドバスの電池交換費用である。燃料が天然ガスの場合は価格が安定しているが、軽油の場合は価格の変動があるため一定ではない。本研究では、軽油価格の上昇率が 5 %、22 %、30 %、0 %、-5 %、-30 % の場合の 6 つのシナリオを作成する。ハイブ

リッドの電池交換は 6 年に 1 度、600,000 円必要となる。

4.2 減価償却費

減価償却費は、低公害車の耐用年数がまだ不確定なので、減価償却期間を定めることができない。本研究ではディーゼルバスの耐用年数を 15 年とし、低公害車の耐用年数を 2 年、3 年、5 年、10 年の場合で組み合わせ、6 つのシナリオを作成する。また減価償却費の計算方法には定額法と定率法がある。定額法とは耐用年数の期間に渡り、毎年均等額を償却額として必要経費にする方法である。定率法とは、未償却残高に毎年一定率をかけて算出した償却額を必要経費とする方法である。この 2 つの方法で、それぞれのシナリオごとに計算する。

5 最適購入計画

5.1 記号の定義

定式化にあたり、以下のように記号を定義した。

- 添字 i : バスの種類 ($i=1, \dots, 3$)
 - $i = 1$: ディーゼルバス
 - $i = 2$: CNG バス
 - $i = 3$: ハイブリッドバス
- t : 年度 ($t=1, \dots, 10$)
 - $t = 1$: H17 年度
- 決定変数 X_{it} : t 年度におけるバス i の購入台数 (台)
 - Y_{it} : t 年度におけるバス i の使用台数 (台)
 - Z_{it} : t 年度にバス i を実際に廃車する決定台数 (台)
 - ただし X_{it}, Y_{it}, Z_{it} は整数である。
- 定数 C_{it} : t 年度におけるバス i の購入価格 (円)
 - U_t : t 年度におけるディーゼルバスの使用台数の上限 (台)
 - d_{it} : t 年度に廃車が決定しているバス i の台数 (台)
 - D_{it} : t 年度におけるバス i の廃車価格 (円)
 - M_{it} : t 年度におけるバス i の年間維持費 (円)
 - R_{it} : t 年度におけるバス i の年間ランニングコスト (円)
 - B_{t+6} : t 年度に購入したハイブリッドバスにかかる電池交換費用 (円)
 - b : ハイブリッドバスの電池 1 個あたりの価格 (600,000 円とする。)
 - G_{it} : t 年度における減価償却費 (円)

5.2 定数の説明

本研究ではデータをもとに次のように定数を設定した。
 C_{it} : $C_{i1} = 18,940,000$ とし、規制が一段階厳しくなるごとに 100 万円ずつ値上がりする。

U_t : $U_1 = 29$ とし、1 年ごとに 2 台ずつ減る。

d_{it} : 表 1 の「廃車台数」を用いる。

D_{it} : $D_{1t} = 47,000$ で定額である。

また $i = 2, 3$ のとき、 $Z_{it} = -(0.01 \times C_{it})$ である。

M_{it} : ディーゼルバスと CNG バスに関してはランニングコスト R_{it} と減価償却費 G_{it} にあたり、ハイブリッドバスに関してはランニングコストと減価償却費に加え電池交換費用 B_{t+6} が購入後 6 年ごとに発生する。

R_{it} : $R_{1,t}=900,00$

$R_{2,t}=936,000$

$R_{3,t}=300,000$ とする。

これは各バスの燃費比率がディーゼルバス : CNG バス : ハイブリッドバス = 1 : 1.04 : 0.33 であるというデータを用いた。

b : $b=600,000$ で定額である。

G_{it} : 定率法と定額法とで 1 年あたりの減価償却費は異なる。

6 定式化

6.1 目的関数

$$\min \sum_{t=1}^{10} \sum_{i=1}^3 C_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^{10} \sum_{i=1}^3 M_{it} Y_{it} + \sum_{t=1}^{10} \sum_{i=1}^3 D_{it} Z_{it} + \sum_{t=1}^{10} \sum_{i=1}^3 G_{it} X_{it}$$

6.2 制約条件

$$Y_{1t} \leq U_t \quad (t = 1, \dots, 10) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^3 Y_{it} = 29 \quad (t = 1, \dots, 10) \quad (2)$$

$$Z_{1t} \geq d_{1t} \quad (t = 1, \dots, 10) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^3 Y_{it} = \sum_{i=1}^3 Y_{i,t-1} + \sum_{i=1}^3 X_{it} - \sum_{i=1}^3 Z_{it} \quad (t=1, \dots, 10) \quad (4)$$

$$M_{3t} = R_{3t} + B_{t+6} \quad (t = 1, \dots, 10) \quad (5)$$

$$B_{t+6} = bX_{3t} \quad (t = 1, \dots, 4) \quad (6)$$

$$X_{it} \geq 0 \quad (7)$$

$$Y_{it} \geq 0 \quad (8)$$

$$Z_{it} \geq 0 \quad (9)$$

$X_{it} Y_{it} Z_{it}$ は整数である。

6.3 定式化の説明

本研究では環境に配慮し、かつ最も費用のかからないバスの購入方法を求めることを目的としている。したがって目的関数では平成 17 年から 26 年度までのバスの購入コストの総和と、ランニングコストとハイブリッドバス電池交換費用を含む維持費の総和、廃車にかかるコストの総和、および減価償却費の総和の 4 つの和をトータルコストとし、これを最小にすることを旨とする。

- 制約条件 (1) t 年度に使用出来るディーゼルバスの台数の上限を U_t 台とする。
- 制約条件 (2) t 年度のバスの総必要台数が 29 台である。
- 制約条件 (3) t 年度のディーゼルバス廃棄台数が、 t 年度に既に廃車が決定している台数以上である。
- 制約条件 (4) t 年度の使用台数, $(t-1)$ 年度の使用台数, t 年度の購入台数, t 年度の廃車台数の関係式。
- 制約条件 (5) 維持費 = ランニングコスト + ハイブリッド電池交換費用
- 制約条件 (6) t 年度に購入したハイブリッドバスに対して $(t+6)$ 年後に電池交換費用が発生する。
- 制約条件 (7) (8) (9) は, X_{it} Y_{it} Z_{it} の非負条件である。

環境に配慮するという意味で、ディーゼルバスの使用台数の上限を設け、1 年ごとに上限の台数を減らしていく。初年度である今年度 (平成 17 年度) においては、ディーゼルバスの使用台数は 29 台であり、今後毎年 2 台ずつ減らしていく。スクールバスの台数は、運営に必要とされる 29 台を毎年満たさなければならない。またディーゼルバスにおいては、NO_x・PM 法によって毎年廃車にしなければならない台数以上になるようにする。

この制約を全て満たした上で、低公害車である CNG 車やハイブリッド車の導入が自然に促進され、そのトータルコストが最小になるような購入方法を Excel の solver を用いて解く。

7 想定したシナリオ

7.1 軽油価格の変動の違いによるシナリオ (6 つ)

軽油価格の上昇率について、5%、22%、30%、0%、-5%、-30% の 6 つの場合について計算した。

まず軽油価格の上昇率がプラスの場合については、5% が非常に現実的であること、22% が買いのバランスがいいこと、30% が非現実的であることからこの 3 つを設定した。次に 0% については、今後も軽油価格が高騰しない可能性も考えられるので、その場合についても考えた。さらに -5%、-30% については、どこかから新たに原油が発掘される可能性もあることから、上昇率がマイナスになる場合を考えた。

これらのシナリオについて解を求めるにあたり、減価償

却費の計算で用いる各バスの耐用年数はすべて 5 年として計算する。

7.2 各バスの耐用年数の変化によるシナリオ (6 つ)

ここで軽油の価格上昇率を 5% に固定する。今後の軽油価格高騰の傾向として、5% ずつ上昇するという場合が妥当であると考えたためである。

また耐用年数に関しては、ディーゼルバスの耐用年数を 15 年に固定し、CNG バスとハイブリッドバスの耐用年数を 2 年、3 年、5 年、10 年で変化させて計算する。さらに耐用年数が 10 年以下の場合には、耐用年数が経過した翌年に新たにバスを買い替えるという条件を加える。

耐用年数を変化させることによるバスの買い替えに伴い、制約条件を一部変更あるいは追加する。

廃車台数に関する制約条件 (3) を以下のように変更する。

$$Z_{it} \geq d_{it} \quad (i = 1, \dots, 3) \quad (10)$$

これは廃車するバスが、ディーゼルバスだけでなく CNG バス、ハイブリッドバスも廃車する可能性があることを示している。

またバスの買い替えが発生することから、新たに耐用年数を T_i 年と定義し、以下の制約条件を追加する。

$$d'_{i,t+T_i} = d_{i,t+T_i} + X_{it} \quad (11)$$

これは廃車台数において、購入してから耐用年数 T_i 年が経ったバス i は翌年に廃車する必要があることを示している。

必要台数の制約条件 (2) を以下のように変更する。

$$\sum_{i=1}^3 Y_{i,t+T_i} = 29 + \sum_{i=2}^3 X_{it} \quad (12)$$

$$(t=1, \dots, (10-T_i); T_i=2, 3, 5)$$

これはバスを買い替えることにより、購入台数分だけ使用台数が増加することを示している。

8 実行結果

12 個のシナリオのうち、軽油価格の上昇率を 5% にし、耐用年数をどのバスも 5 年とした場合のシナリオについての結果を載せる。廃車台数に関しては、何れの結果もディーゼルバスのみ 23 台廃車するという結果になったので、表は割愛する。減価償却費の計算方法である定額法、定率法それぞれの方法によって計算した結果を載せる。

- 定額法

表 1 購入台数

ディーゼルバス	0 (台)
CNG バス	0 (台)
ハイブリッドバス	20 (台)

たとえ年率 5% ずつ燃費が上昇しても、ハイブリッドバスの燃費はディーゼルバスや CNG バスよりも良く、ハイブリッドバスのみを購入するという結果になった。

また合計で 20 台という購入台数にも無理がなく、とても現実的な結果になったと言える。

表 2 コスト

トータルコスト	911,687(千円)
バス購入コスト	397,800(千円)
維持費	230,170(千円)
減価償却費	282,636,000 (円)
廃車コスト	1,081,000 (円)

バスは合計で 20 台購入するという結果になったため、比較的購入コストは抑えられた。また新規に購入するバスは全てハイブリッドバスであることから、燃費（維持費）に関してもかなり抑えられていると言える。廃車コストにも無理がなく、トータル的に見てとても現実的で無理のない結果になった。

● 定率法

表 3 購入台数

ディーゼルバス	0 (台)
CNG バス	0 (台)
ハイブリッドバス	20 (台)

定額法と同様、ハイブリッドバスのみを購入し、その購入台数は 20 台となった。

表 4 コスト

トータルコスト	943,500(千円)
バス購入コスト	397,800(千円)
維持費	230,170(千円)
減価償却費	314,449(千円)
廃車コスト	1,081(千円)

定額法と比較すると、異なるのは減価償却費のみとなった。定額法では減価償却費が毎年一定なのに対し、定率法では早い時期の方が、つまり購入してまだ年数が浅い時期の方が沢山の費用がかかる。そのため 10 年間というスパンでコストを算出すると、定額法の方がコストが低くなるのである。

9 考察-全体を通じて

軽油の価格や耐用年数によって結果は異なるが、全体を通じてハイブリッドバスを多く購入する結果となった。私たちはハイブリッドバスなどの低公害車を積極的に導入すべきだろう。低公害車は、まだ耐用年数が分からないから導入しないのではなく、積極的に導入することで更なる発展につながるからだ。

12 個のシナリオをもとに、スクールバスの最適購入計画案を以下のように統括した。

9.1 軽油価格上昇率による最適購入計画案 (耐用年数はどのバスも 5 年)

- 軽油価格の上昇率 22% 未満
すべてハイブリッドバスを購入

- 軽油価格の上昇率が 22%
CNG バスを 12 台、ハイブリッドバスを 8 台購入

9.2 バスの耐用年数の変化による最適購入計画案 (軽油価格上昇率は 5%)

- 耐用年数 CNG バス ハイブリッドバス
主にハイブリッドバスを購入する。補足的に数台ディーゼルバスも購入する場合もある。

- 耐用年数 CNG バス > ハイブリッドバス
主に CNG バスを購入する。補足的にディーゼルバスやハイブリッドバスを数台購入する場合もある。

10 おわりに

本研究では、私たち学生が普段利用しているスクールバスの最適購入計画を作成した。実際に身近な題材に関心を持ち、その問題点についてより善い改善策を見いだすというまさに OR の研究としてふさわしい研究ができたように思う。私たちはスクールバスの購入コストの削減という目標のもと、ただ購入コストのみに注目するのではなく、新たに低公害車の導入も視野に入れ、またランニングコスト等の維持費や減価償却費についても考慮することで、より現実的な研究になるよう務めた。この研究が、私たちに通っている南山学園のスクールバスの購入案作成の参考になれば、幸いである。

参考文献

[1] 愛知日野自動車株式会社： ホームページ、
<http://www.hino.co.jp/j/index.html>.
[2] 社団法人愛知県トラック協会： 軽油価格調査、
<http://www.aitokyo.jp/topics/oil-price/>.
[3] 安全工学協会編：「大気汚染」(1982).
[4] 環境省・国土交通省：「自動車 NOx・PM 法の車種規制について」(2005).