

15. 外部コスト換算比較による建設機械排出ガス削減効果の評価

(社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 ○ 稲葉 友喜人
 国土交通省 総合政策局 建設施工企画課 施工環境技術推進室 西ノ原 真志
 (社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 佐藤 充弘

1. はじめに

日本における建設機械の排出ガス対策は、1992年の建設省排出ガス対策型建設機械指定制度（以下、「指定制度」という。）に始まり、現在は法律による特定特殊自動車の排出ガス規制を中心に進められている。一方、建設機械のこれまでの地球温暖化対策は、燃料費の縮減を目的とした製造業者の自主的な燃費低減による二酸化炭素（以下、「CO₂」とする。）の削減が主体となっている。

今後、排出ガス対策だけでなく地球温暖化対策を目的とした燃費低減の必要性が高まるものと推察されるが、両者は相反する関係にあることから、対策の推進は適正に進める必要がある。

そこで、建設機械の排出ガス対策及びCO₂対策を適正に進めるための一資料とするため、これまでの対策による両者の削減効果及び両者の現況排出量について外部コストでの比較評価を行った。

本稿は、「建設機械における排出ガス及び温室効果ガス対策に関する調査検討業務」（発注者：国土交通省 総合政策局，受注者：(社)日本建設機械化協会）によるものであり、ここでの排出ガス対策次数は指定制度初回基準値を1次としている。

2. 排出ガス及びCO₂排出量の試算方法

建設機械全体の排出ガス及びCO₂排出量は、試算区分（1機種又は1機種を細分した区分。）毎に単年度排出量を計算して合計した。

$$A=B \times C \times D \times E \times F \times G \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A：1 試算区分の単年度排出量

B：保有台数

C：年間運転時間

D：平均的な稼働率

E：代表規格の定格出力

F：負荷率

G：排出ガス原単位 G_{GAS} 又は CO₂ 原単位 G_{CO2}

(1)式の B~F について以下に記述し、G については3章、4章に記述する。

2.1 試算建設機械

表-1 に試算建設機械と試算区分数を示す。

試算建設機械は、「建設機械動向調査報告（経済産業省・国土交通省）」（以下、「動向調査」という。）に揚げられた機種の内、次の条件に該当する機種とした。

- ・ディーゼル8モード排出ガス測定方法の範疇にある機種
- ・台数の極めて少ない機種（累計販売台数が全体の0.1%未満）以外

また、試算精度の向上を図るため、寄与率の高い油圧ショベルについては、動向調査の規格区分を更に細分した。

2.2 保有台数

保有台数は、動向調査の保有台数を用いた。動向調査に販売台数しか記載のない機種は、保有台数が記載されている主要建設機械の保有台数と販売台数の関係から当該機種の保有台数を推定した。図-1 に推定した保有台数を示す。

表-1 試算建設機械

No.	機 種	[形式区分等]	試算区分数
1	ブルドーザ	[クローラ型]	3
2	小型油圧ショベル	[ハッドが1ト除く]	3
3	油圧ショベル		5
4	クローラローダ		3
5	ホイールローダ		3
6	クローラクレーン	[掘削機含む]	3
7	トラッククレーン	[作業用エンジン]	1
8	ラフテレーンクレーン		1
9	建設専用ダンプトラック		1
10	不整地運搬車	[1t積以上]	1
11	アースオーガ		1
12	クローラドリル		1
13	モータグレーダ	[除雪含む]	1
14	アスファルトフィニッシャ		1
15	ロードローラ	[マカダム, グラベム]	1
16	タイヤローラ		1
17	振動ローラ	[タンDEM, コンバインド]	1
18	空気圧縮機	[可搬式15kW以上]	1
19	発動発電機	[可搬式15kW以上]	1
20	ロータリー除雪車	[搭乗式]	1
21	路面清掃車	[搭乗式]	1
22	高所作業車	[トラック架装外]	1

(1) 販売台数と保有台数の考え方

保有台数の推定においては、販売台数と保有台数の関係として次のことが成り立つものとした。

$$\left[\begin{array}{c} \text{その年の} \\ \text{保有台数} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{その年の販売台数を含} \\ \text{め「保有年数」分遡っ} \\ \text{て積み上げた台数} \end{array} \right]$$

(2) 2006年度以降の台数

排出量の試算は、1990年度以降の評価を目的にして2007年度まで行った。2006年度以降は動向調査公表前となるので、次のとおりとした。

- ・(社)日本建設機械工業会が販売台数を公表している機種は、その販売台数を用いた。
- ・上記以外の機種は、それまでの販売台数の傾向を基に推定した。

2.3 年間運転時間

年間運転時間は、「建設機械等損料表(日本建設機械化協会)」(以下、「損料表」という。)の「標準年間運転時間」を適用した。毎年更新される損料表は、年間運転時間の実態調査から掲載までの期間を2.5年(見直し時の変化を吸収するために0.5年追加。)と見込み適用した。

2.4 平均的な稼働率

本稿でいう「平均的な稼働率」及び後述の「対策毎の稼働率」とは、前述の年間運転時間を適用する保有台数の割合(あるいは年間運転時間への乗率)を意味するもので、実質的な稼働に見合った仕事量を求めるためのものである。

平均的な稼働率は、保有台数を「高稼働機械」と「それ以外の機械」に分け、(2)式を用いて設定した。図-2に高稼働機械のイメージを示す。

$$D = \alpha \times 1 + (1 - \alpha) \beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α : 高稼働機械の比率

$$\alpha = Nh / B$$

Nh : 高稼働機械の台数

$$Nh = 0.26Ic$$

Ic : 建設投資(1990年換算億円)

B : 保有台数

β : 高稼働機械以外の平均稼働率
0.38675

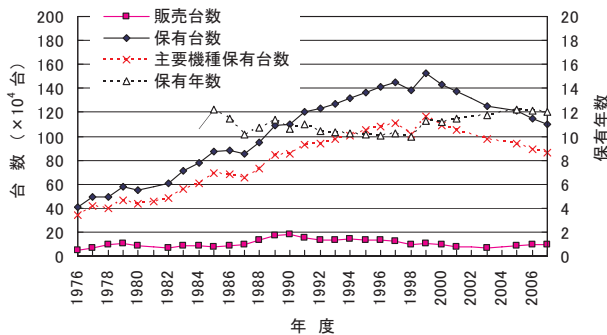


図-1 建設機械保有台数

(2)式における「高稼働機械の台数 Nh 」の算出式は、図-3の建設投資と販売台数の関係(図中の回帰式の傾き)から設定したもので、建設投資に直結して変動する台数を高稼働機械と見なしたものである。図-4に計算した平均的な稼働率を示す。「高稼働機械以外の平均稼働率 β 」については、3章に記述する。

2.5 代表規格の定格出力

機種あるいは細分した規格範囲を代表する規格は、販売台数の少ない機種を除き指定型式毎の報告販売台数整理結果に基づき設定した。

代表規格の定格出力は、損料表の「定格出力」を適用した。適用に際しては、前の年間運転時間と同様2.5年の掲載遅れを見込んだ。

2.6 負荷率

定格出力を作業時平均出力に換算するための負荷率は、「国土交通省土木工事積算基準」(以下、「積算基準」という。)の「原動機燃料消費量」に示す定格出力当たり燃料消費量と表-2に示す8モード燃料消費率を元に(3)式により設定し、得られた負荷率を全ての年に適用した。

なお、8モード燃料消費率は、8モード排出ガス測定で得られる燃料消費率であり、排出ガス測定と同じように8測定点で測定され重み付けされた燃料消費率であって、建設機械の代表的な負荷状態が反映されている。

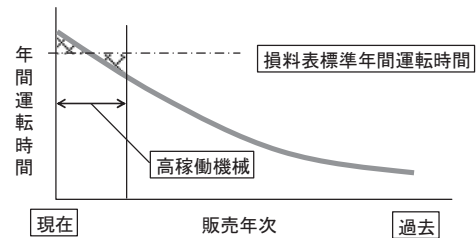


図-2 高稼働機械のイメージ

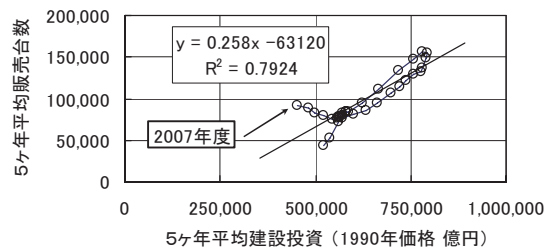


図-3 建設投資と販売台数の関係

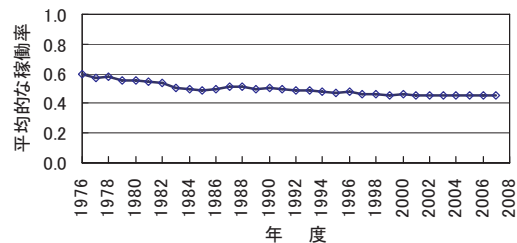


図-4 仕事量算出に用いる平均的な稼働率

算出した負荷率を表-3に示す。

$$k = (Br/Lc) \cdot \rho / b \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 k ：負荷率

Br ：積算基準の定格出力当たり燃料消費量 (l/kWh)

Lc ：積算基準に含まれる油脂類の経費を除くための定数 1.2

ρ ：燃料密度 830g/l

b ：8モード燃料消費率 (g/kWh)

(1) 定格出力当たり燃料消費量について

積算基準における定格出力当たり燃料消費量の最終見直しは、平成15年(2003年)度版となっており、(3)式に用いる定格出力当たり燃料消費量は平成15年度版の値とした。

(2) 8モード燃料消費率について

負荷率の設定に用いた8モード燃料消費率は、1999年度までに販売された53万台の1次基準指定機械搭載エンジン集計値と、2002年12月指定までに販売された2次基準指定機械929型式搭載エンジン集計値の平均値である。1次対策と2次対策の8モード燃料消費率に大差がないことから、前記(1)の積算基準見直し年との整合性(1次対策と2次対策の寄与率)は考慮していない。

3. 排出ガス原単位

試算年度の排出ガス原単位は、対策次数毎の排出ガス原単位にその年の対策次数毎の寄与率を乗じて合計することで求めた。

表-2 負荷率の設定に用いる8モード燃料消費率

定格出力 (kW)	8モード燃料消費率 b (g/kWh)
15未満	293
15～30未満	270
30～60未満	244
60～120未満	241
120以上	233

表-3 建設機械の負荷率

No.	機種	負荷率	備考(積算基準の機種等)
1	ブルドーザ	50%～52%	
2	小型油圧ショベル	41%～45%	
3	油圧ショベル	50%～52%	
4	クローラローダ	45%～52%	
5	ホイールローダ	39%～45%	
6	クローラクレーン	26%	
7	トラッククレーン	13%	
8	ラフテレーンクレーン	31%	
9	建設専用ダンプトラック	25%	
10	不整地運搬車	45%	
11	アースオーガ	24%	クローラ式アースオーガを適用
12	クローラドリル	43%	ボーリングマシンを適用
13	モータグレーダ	32%	
14	アスファルトフィニッシャ	43%	加熱用燃料は含まない
15	ロードローラ	31%	
16	タイヤローラ	29%	
17	振動ローラ	39%	
18	空気圧縮機	54%	
19	発動発電機	49%	
20	ロータリー除雪車	41%	
21	路面清掃車	19%	
22	高所作業車	10%	リフト車を適用

$$G_{GAS} = \sum (G_{GASi} \cdot Wfi) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 G_{GAS} ：試算年度の排出ガス原単位

G_{GASi} ：対策次数*i*の排出ガス原単位

Wfi ：対策次数*i*の寄与率

3.1 対策次数毎の排出ガス原単位

試算に用いた対策次数毎の窒素酸化物(以下、「NOx」とする。)原単位と粒子状物質(以下、「PM」とする。)原単位を表-4、表-5に示す。

2次対策以前の原単位は、次の資料による。

- ・未対策 NOx：指定制度発足時調査結果
- ・未対策 PM：土木研究所資料第3742号(平成12年10月)
- ・1次対策：1999年度までに販売された53万台の1次基準指定機械搭載エンジン集計値
- ・2次対策：2002年12月指定までに販売された2次基準指定機械929型式搭載エンジン集計値

3次対策の原単位は、最小出力帯を除き2次対策における30kW以上の原単位と基準値の比率を用いて推定した。2次対策における30kW未満は、排出ガス値に余裕があることから、3次対策の原単位設定に用いなかった。

表-4 2次対策以前の排出ガス原単位

定格出力 (kW)	NOx (g/kWh)			PM (g/kWh)		
	未対策	1次	2次	未対策	1次	2次
15未満	5.9	5.28	5.31	0.53	0.53	0.355
15～30未満	8.9	6.77	5.76	0.59	0.54	0.423
30～60未満	13.6	7.67	6.13	0.63	0.50	0.272
60～120未満	12.6	8.33	5.43	0.45	0.34	0.218
120以上	10.8	8.37	5.28	0.41	0.31	0.149

表-5 3次対策型の排出ガス原単位

定格出力 (kW)	2次対策NOx (g/kWh)			3次対策NOx (g/kWh)		
	原単位	基準値	A/B	基準出力 (kW)	基準値	原単位
15未満	5.31	9.0	0.59	8～19未満	6.4*1	5.31*2
15～30未満	5.76	8.0	0.72	19～37未満	6.0	5.34
30～60未満	6.13	7.0	0.88	37～56未満	4.0	3.56
60～120未満	5.43	6.0	0.91	56～75未満	4.0	平均
				75～130未満	3.6	3.48
120以上	5.28	6.0	0.88	130～560未満	3.6	3.20

*1 基準値HC+NOx 7.5をその上の出力帯のHCとNOx基準値の比で配分した値。
*2 係数0.89の場合に2次原単位を上まわるため、2次原単位を適用した。

定格出力 (kW)	2次対策PM (g/kWh)			3次対策PM (g/kWh)		
	原単位	対応基準	A/B	基準出力 (kW)	基準値	原単位
15未満	0.36	0.8	0.44	8～19未満	0.8	0.355*1
15～30未満	0.42	0.8	0.53	19～37未満	0.4	0.288
30～60未満	0.27	0.4	0.68	37～56未満	0.3	0.216
60～120未満	0.22	0.3	0.73	56～75未満	0.25	平均
				75～130未満	0.2	0.162
120以上	0.15	0.2	0.75	130～560未満	0.17	0.122

*1 基準値が見直されていないので2次と同じとした。

3.2 対策次数毎の寄与率

排出ガス量の試算における対策次数毎の寄与率は、試算区分に関わらず建設機械全体の対策次数毎の普及率、対策次数毎の稼働率及び2.4の平均的な稼働率 D を用いて(5)式で計算した。

$$Wf_i = S_i \times D_i / D \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 S_i : 対策次数 i の普及率
 D_i : 対策次数 i の稼働率

図-5 に対策次数毎の寄与率を示す。寄与率は、新しい機械の稼働率が高いため図-6 の普及率図と比較してピークが左側にシフトしていることが分かる。

(1) 対策次数毎の普及率

普及率（あるいは販売率）は、全ての保有台数（あるいは販売台数）に対する当該対策次数の台数比率である。図-6 に対策次数毎の普及率を示す。

2005年度までの対策次数毎の保有台数は、前述した「2.2(1)販売台数と保有台数の関係」を用いて国土交通省に報告された指定型式毎の販売台数から推定し、それ以降2ヶ年の対策次数毎の保有台数は、2次対策型販売率の傾向から3次対策型販売率を設定して推定した値である。

(2) 対策次数毎の稼働率

機械の稼働率は、一様ではなく機械の古さの程度、すなわち対策次数が低い程低くなるものと考えられるところから、これまでの調査資料を元に現場で稼働する機械のアワメータ（年式の代わり）の分布を解析した。

675台（油圧ショベル429台、その他246台）の

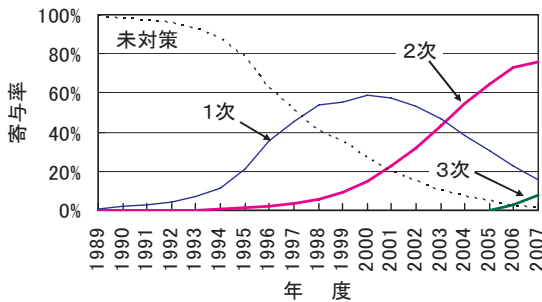


図-5 対策次数毎の寄与率

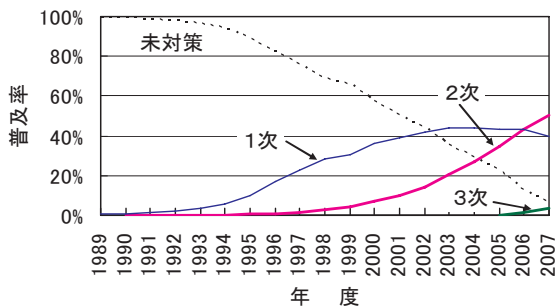


図-6 対策次数毎の普及率

アワメータの分布を解析した結果、図-7a)に示すとおりアワメータと稼働頻度（稼働台数）の間に高い相関があることが分かった。

対策毎の稼働率の設定に用いる機械年式と稼働率の関係式は、複数の回帰式の中で最も相関が高かった二次式を採用した。

対策毎の稼働率の設定に用いる関係式は、図-7b)に示すように、アワメータ軸と稼働頻度軸を指数化したときの線形式とし、図-8に示す方法で高稼働機械以外の稼働率を設定した。

対策次数毎の稼働率は、高稼働機械と高稼働機械以外の台数加重平均とした。

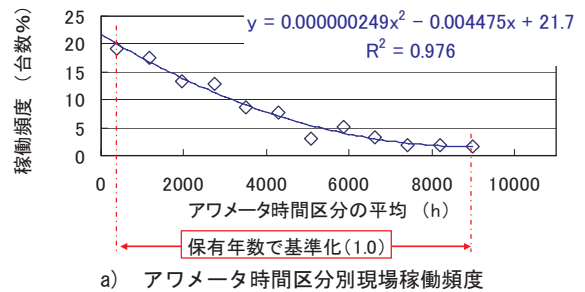
$$D_i = (T_{ia} \cdot 1 + T_{ib} \cdot \beta_i) / T_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 T_{ia} : 対策次数 i の台数比率の内、高稼働機械分

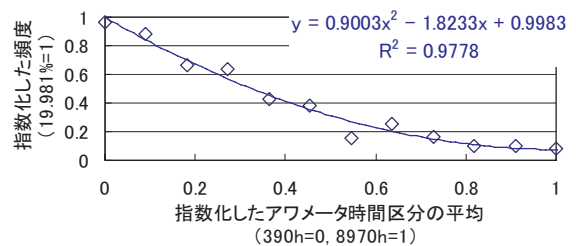
T_{ib} : 対策次数 i の台数比率の内、高稼働機械以外の分

β_i : 対策次数 i の高稼働機械以外の稼働率

T_i : 対策次数 i の台数比率



a) アワメータ時間区分別現場稼働頻度



b) 指数化したときの回帰式

図-7 現場稼働機械のアワメータ分布

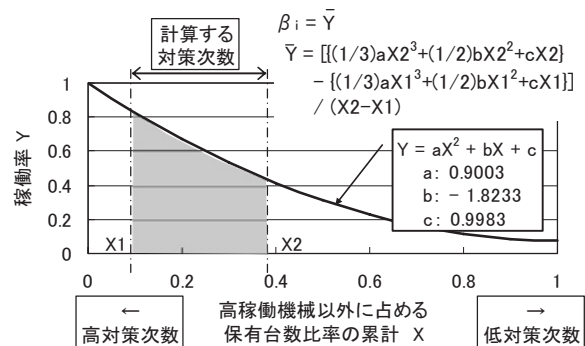


図-8 高稼働機械以外の稼働率計算方法

4. CO₂原単位

CO₂原単位は、表-2の8モード燃料消費率、以下に記述する燃費変化率、及び軽油の排出係数から計算した。

$$G_{CO_2} = b \times f_x \times c / \rho \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 G_{CO_2} ：試算年度のCO₂原単位

f_x ：試算年度xの燃費変化率

1990年以降 $f_x = 1.23849(x-1983)^{-0.07433}$

1989年以前 $f_x = 1.072$

c ：軽油の排出係数 2.62kg-CO₂/l

燃費変化率は、積算基準の定格出力当たり燃料消費量の見直し値の傾向から求めたもので、見直しの実態調査から掲載までを2年と見込み最終見直しの調査年を2001年度として、その年度を基準にした変化率とした。機種毎の定格出力当たり燃料消費量は、過去に試算した機種毎の仕事量寄与率で加重平均して試算機種全体の値とした。設定した燃費変化率を図-9に示す。

5. 貨幣換算原単位

排出ガス排出量とCO₂排出量を外部コストに換算するための元になる貨幣換算原単位は、既存資料を基に設定した。

排出ガス排出量の貨幣換算原単位は、CO₂と異なり人的被害が排出地点の人口の集中程度により変化することで、その貨幣換算原単位も地域で大きく異なる。そのため、今回は、日本全体の排出量に適用することを目的に、人口の集中程度で4区分（人口集中地域、その他市街部、非市街部(平地部)、非市街部(山地部)）した地域毎の建設機械存在確率を考慮した貨幣換算原単位を作成した。

5.1 文献調査による貨幣換算原単位

(1) 排出ガス貨幣換算原単位

NO_x貨幣換算原単位については、複数の資料におけるその他市街部の原単位を平均した。この値は、最新の資料である次の資料と同様である。他の地域の原単位は、この資料の値を採用した。採用した値を表-6に示す。

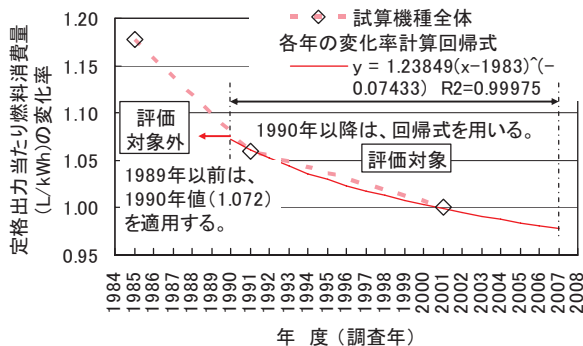


図-9 2001年度を基準にした燃費変化率

道路投資の評価に関する指針(案) (平成17年5月(第5刷) 編者：道路投資の評価に関する指針検討委員会、発行：(財)日本総合研究所)

PM貨幣換算原単位については、複数の資料における人口集中地区相当の原単位を平均し、NO_xの地域区分毎の値の比を適用して、上記地域区分以外の値を設定した。設定した値を表-6に示す。

(2) CO₂貨幣換算原単位

CO₂貨幣換算原単位は、複数の資料を検討した上で、次の資料の値とした。値を表-7に示す。

公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編) (平成20年6月 国土交通省)

5.2 存在確率を考慮した貨幣換算原単位

(1) 建設機械の存在確率

建設機械の地域区分毎の存在確率は、機械の位置情報を地図上にプロットし、その点がどの地域区分に該当するかを判定して集計することで行った。集計結果を図-10に示す。

- ・集計対象とした都道府県：人口集中地域面積割合、人口密度及び平地部面積割合が日本全体と乖離していないことを条件に代表的な8府県を選んだ。
- ・非稼働機械の除外：製造会社、販売会社及びレンタル会社に在ると推測されるデータは除外した。

(2) 存在確率を考慮した貨幣換算原単位

建設機械存在確率を考慮した日本全体の排出ガス貨幣換算原単位は、表-6に示した値を、図-10の地域毎の建設機械存在確率で重み付けして求めた。日本全体の排出ガス量に適用する貨幣換算原単位を表-7に示す。

表-6 資料調査による排出ガス貨幣換算原単位

地域区分	人口集中地域	その他市街部	非市街部(平地部)	非市街部(山地部)
NO _x 貨幣換算原単位(万円/トン)	292	58	20	1
PM貨幣換算原単位(万円/トン)	1,857	368	129	5

表-7 日本全体の排出量に適用する貨幣換算原単位

建設機械存在確率を考慮した貨幣換算原単位		貨幣換算原単位
NO _x (万円/t)	PM (万円/t)	CO ₂ (万円/t-CO ₂)
62	391	0.29

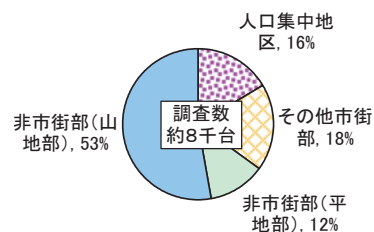


図-10 建設機械の稼働位置

6. 排出ガス基準値の外部コスト比較

今後の排出ガス規制に伴う NOx, PM 及び CO₂ 排出量外部コストの変化を予想するため、排出量寄与率が最も高い 20t 級油圧ショベルをサンプルに、CO₂ 原単位を 2001 年度値とし排出ガス基準値毎の排出量外部コストを試算した。図-11 で示すように、排出ガス排出量外部コスト (NOx+PM) と CO₂ 排出量外部コストは、4 次排出ガス規制で逆転すると予見される。

7. 試算排出量と削減量の外部コスト換算値

試算結果を図-12~図-14 に示す。図中の未対策は、排出ガス対策を行わなかった、あるいは燃費低減努力を行わなかったと仮定した場合であり、削減は未対策時を基準に示したものである。

指定制度による排出ガス対策効果は、概略 1990 年度から出始めている。その排出ガス対策効果と、1990 年度を基点とした燃費低減効果を外部コスト換算で比較すると、NOx の削減効果が突出して高いことが分かる。

現在の排出量外部コストは、高い方から NOx, CO₂, PM の順序となっている。この順序は、4 次排出ガス規制により NOx と PM の大幅削減が見込まれるので、将来的に CO₂ 排出量が高位となる。このことは、今後の対策として燃費対策が極めて重要になることを示唆するものであり、今まさに岐路に立っていると思われる。

8. 試算排出ガス量の確認

今回の試算排出量の妥当性を確認するため、総合エネルギー統計 (資源エネルギー庁) の建設業軽油消費量を全て建設機械によるものと見なして CO₂ 排出量を計算し、今回の CO₂ 排出量試算結果と比較した。今回試算した CO₂ 排出量中の建設業使用機械分は、動向調査における「建設業」保有台数分と「リース・レンタル業」保有台数分と仮定した。比較結果を図-15 に示す。

図が示すように、統計ベースの建設業 CO₂ 排出量と今回試算の建設業使用機械 CO₂ 排出量は、概ね近い計算結果となった。仮定で不確かな要素も多分にあるが、大きな乖離はないと思われる。

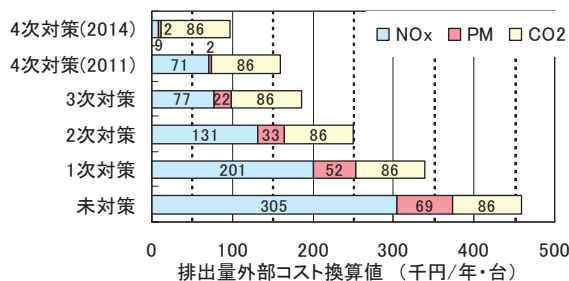


図-11 20t級油圧ショベル排出量の外部コスト換算値

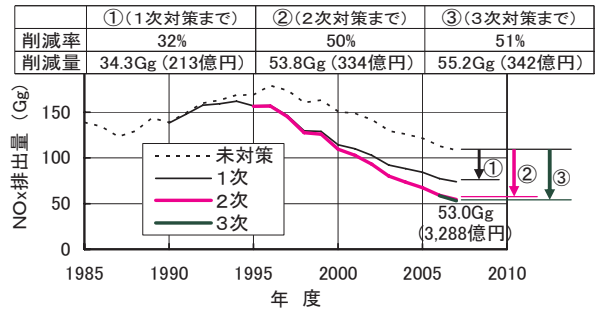


図-12 試算NOx排出量と外部コスト換算値

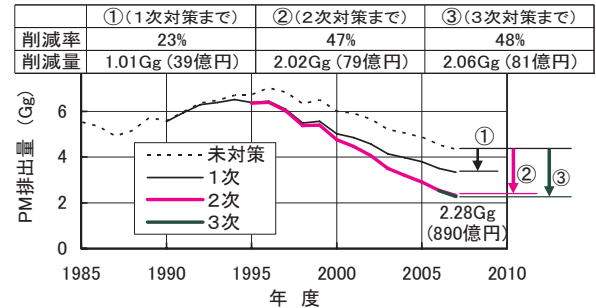


図-13 試算PM排出量と外部コスト換算値

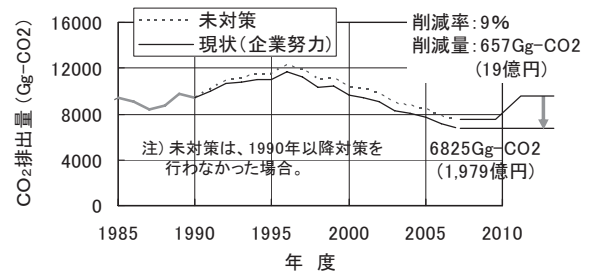


図-14 試算CO₂排出量と外部コスト換算値

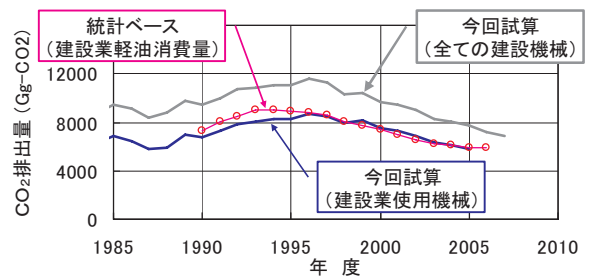


図-15 建設業使用建設機械CO₂排出量の比較

9. おわりに

今回、建設機械の排出ガス量と CO₂ 排出量を外部コスト換算することで、異なる成分の比較評価を行った。今回の結果は、採用した貨幣換算原単位に左右されるが、文献によりその数値にひらきがあることに注意する必要がある。

排出量の試算においては、まだ調査検討すべき事項が残っているが、今後の課題としたい。

最後に、建設機械の存在確率調査に御協力頂いた (社) 日本建設機械化協会機械部会ショベル技術委員会委員諸氏に感謝の意を表す。