

ISSN 0287-086X
CODEN: KSADDC

足利工業大学
研究集録

第 30 号

足利工業大学

2000. 3

研究集録編集委員会

委員長 桃井 徹（土木工学科）
委員 桜井 高夫（共通課程）
小菅 善一（共通課程）
金井 彰（機械工学科）
尾林 康司（電気電子工学科）
園部 泰壽（建築学科）
黒井 登起雄（土木工学科）
横田 孝雄（経営情報工学科）
茂木 規宏（図書館）

足利工業大学研究集録

第30号

平成12年3月17日発行

発行者

黒正清治

発行

足利工業大学

〒326-8558 栃木県足利市大前町268-1

印刷

美ッ和印刷株式会社

〒326-0842 栃木県足利市今福町603

目 次

博士學位論文概要

ハイブリット型遺伝的アルゴリズムによる生産・配送計画問題の

解放に関する研究……………李 銀珍(大学院情報生産工学専攻) … 1

総 論

現在ディーゼル車のおかれている環境……………中原弘勇(機械工学科) … 7

機械工学科

モータ駆動ロボットマニピュレータに対するリアブノフ関数の繰り返し設計に基づく

L_2 ゲイン性能を有するロバスト軌道追従制御……………石井千春・申 鉄龍・Zhihua Qu … 17

大気雰囲気下における熱プラズマCVDによるTiO₂皮膜の形成……………安藤康高・戸部省吾 … 25

ダイヤモンド砥石による脆性材料の延性モード研削技術の開発

—カップ形メタルボンド砥石における研削方式の影響—……………稲葉文夫・金井 彰・立花隆次 … 31

風力/圧縮空気エネルギー貯蔵方式発電システムの研究……………菊地一博・牛山 泉 … 35

低風速用マイクロ風力発電機の試作研究……………田中敏之・牛山 泉・徳山榮基 … 43

可変ソリディティ・△型垂直軸風車に関する研究……………松澤圭介・牛山 泉 … 51

複合型スターリングエンジンの性能特性に関する研究……………呉 仲銘・牛山 泉・一色尚次・一色誠太 … 57

ソーラースターリングエンジンの試作研究……………相馬 優・牛山 泉・一色尚次・一色誠太 … 65

電気電子工学科

SrBi₂Ta₂O₉/BiTaO₄セラミックスの作製とその特性……………中山 徹・柴田和生・荘司和男 … 73

SrBi₂Ta₂O₉系セラミックスの焦電性……………柴田和生・中山 徹・荘司和男 … 77

痴呆性徘徊老人のための家庭用電子保護システム……………山本博美 … 83

EXORに基づいた回路のランダムパターンテスト容易性……………平山貴司・長澤一之・清水賢資 … 87

知識マネジメント指向のWebベース知識ユーザ支援システム

構築手法とその事例研究……………吉田 悟・中原 紀・辻 陽一・長澤一之 … 95

高照度光パルスは覚醒中のウルトラディアン・リズムの同調因子か?……………関口勇輝・伊藤信幸・辻 陽一・長澤一之 … 103

三次元トラップ状態の微小球に作用する光放射圧……………柳澤知行・早川昌敬・大津智宏・中野淳一・大町督郎 … 109

建築学科

28.5年間海水の作用を受けた高炉セメントコンクリートの長さ・質量変化……………依田彰彦・横室 隆 … 115

プレキャストコンクリート部材の配筋精度について……………李 迅・毛見虎雄・藤井和俊 … 121

地方都市の発展に関する研究

—群馬県大泉町の土地区画整理事業について—……………石橋英治・中村恵三・蟹江好弘 … 125

義務教育施設の遊休化の実態について

—栃木県足利市を対象として—……………勝瀬亮助・中村恵三・蟹江好弘 … 129

アミューズメントパークの歴史的考察と配置計画の研究

—1850年～1960年代の代表的な遊園地の配置構成分析—……………亀井誠一・中村恵三 … 133

土木工学科

地方自治体における一般競争入札制度の導入について……………	藤島博英・小林康昭 …	141
北関東における地域交通の変遷についての実証的研究……………	鈴木盛明・福島二郎・為国孝敏・中川三朗 …	149
近代の野蒜築港における港湾立地についての実証的研究……………	中井 靖・為国孝敏・中川三朗 …	157
自動車旅行者からみた宿泊施設の選好意識についての基礎的研究……………	小松礼知・為国孝敏・中川三朗 …	165

経営情報工学科

2つの習熟曲線モデルに関するパラメータを推定するアルゴリズム……………	山城光雄・星野直人・湯浅泰伸 …	173
多変量正規確率の数値計算法……………	星野直人・山城光雄 …	177
制約つき線形回帰分析に関する研究……………	星野直人 …	181
電話音声入力応答システムの開発と大学案内サービスシステムへの応用……………	江袋林蔵 …	185
マクロロジック法による中間管理者のコスト意識調査法の研究……………	江袋林蔵 …	197
NPO経営会計システムの一考察 ……………	中島照雄 …	203
樹木モデルのグラフィックス……………	佐々木 崇・松本直文 …	209
遺伝的アルゴリズムによる生産容量制約付きプラント配置問題の一解法……………	崔 俊五・玄 光男・辻村泰寛 …	215

共通課程

21世紀中国における教育の中心テーマである素質教育について……………	鮑 健強・安原和雄 …	221
------------------------------------	-------------	-----

Study on Hybridized Genetic Algorithm for Production-Distribution Planning Problems

Yinzhen Li*

Dept. of Industrial and Systems Engg.
Ashikaga Institute of Technology

要約

本研究では、生産・物流システム最適化の実現において、最も重要で代表的な活動である生産配送計画問題として従来の輸送問題 (Transportation Problem) と固定費付き輸送問題 (Fixed Charge Transportation Problem), さらに生産容量の制約を伴うプラント配置問題 (Capacitated Plant Location Problem) を取り上げ、それらの遺伝的アルゴリズムに基づく効率的な解法に関する研究を行った。一般的に、これらの効率的な解法の開発に対して、必要メモリ容量及び計算時間の観点からその改善が要求されている。本研究では、GA の開発に当たって、問題の構造的に適合した GA の開発が行われている。すなわち、GA の弱点を補い、解法の性能を向上させるために GA と従来解法を組み合わせたハイブリッド型遺伝的アルゴリズムを提案している。生産・配送計画問題を対象とし、生物進化的アプローチとして問題の構造的を活かした有効なハイブリッド型遺伝的アルゴリズムを提案し、現実的な工学問題を解決するための進化算法を適応させる手法を提案している。

Keyword: Hybridized genetic algorithms, Production-distribution problems, Optimization, Multiple objectives

1. Background of the Study

Production-distribution planning problems are very important and representative activities in the accomplishment of optimizing production and logistics. Such problems include the production planning problem, the transportation problem, the plant location problem and their related problems. Those problems usually can be formulated as network optimization problems. For their solutions, many mathematical programming methods and heuristic methods have been proposed and developed in the three recent decades.

Most of the practical optimization problems can be categorized into two models: (1) single objective optimization problems; and (2) multi-objective optimization problems. The traditional optimization methods often focus on obtaining an optimal solution or Pareto optimal solutions for these two types of optimization problems.

In the past two decades, the evolutionary computation methods based on the evolution principle of nature have been recognized as robust solution methods for handling hard optimization problems such as large-scale optimization problems, combinatorial optimization problems, and so on. However, these general methodology techniques must be able to connect

with the constitutive property of the problem to build an efficient solution method to the problem. Also, reduction of the necessary memory capacity is sometimes needed in order to reduce the computing time.

2. Objective and Approach of the Study

The goal of this study is to investigate how to apply the genetic algorithms to find optimal or near-optimal solutions of the production-distribution problems existing in the production and logistics systems. The objective has three aims: (1) to develop a class of evolution programs based on hybrid genetic algorithms with single or multiple objective functions for the production-distribution planning problems; (2) to develop new techniques for representing the transportation graph in a genetic algorithm approach for solving those varieties of distribution planning problems; and (3) to compare with the results by the matrix-based genetic algorithm approach, and verify the effectiveness and efficiency of the proposed genetic approach on those production-distribution planning problems.

The algorithmic approach is adopted mainly in this study. In solving the production-distribution planning problems, we focused on the network structure which is characterized as a spanning tree. We adopted the Prüfer number encoding, which is one type of tree

*Received Ph.D. degree from Ashikaga Institute of Technology, March 1999. Now she is a system engineer in IT Solution Division, FJB Web Technology Ltd., Tokyo

encoding, to represent the candidate solutions, and construct the genetic algorithm based on the spanning tree. Furthermore, to improve the performance of the searching solution, we combined the local search with reduced costs, which is well known as an important factor in linear programming, into the proposed GA approach. In order to verify the effectiveness and efficiency of the proposed GA approaches, we given some comparisons with results by the existing matrix-based GA approach. Here we present with the fixed charge transportation problem and the capacitated plant location problem on the hybridized GA.

3. Production-Distribution Planning Problems

3.1 Fixed Charge Transportation Problem

The fixed charge transportation problem (fcTP) is an extension of the transportation problem (TP). Many practical transportation and distribution problems, such as the minimum cost network flow (transshipment) problem with a fixed charge for logistics, can be formulated as fixed charge transportation problems.

This problem with given m plants and n warehouses can be formulated as follows:

$$\min \quad f(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{ij}(x) + d_{ij}g_{ij}(x)) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$\text{with} \quad g_{ij}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_{ij} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

where

$x = [x_{ij}]$ is the unknown quantity to be transported on the route (i, j) .

$f_{ij}(x)$ can be viewed as the objective function from the original TP, which means the total transportation cost for shipping per unit from plant i to warehouse j in which $f_{ij}(x) = c_{ij}x_{ij}$ will be the cost function if it is linear.

d_{ij} is the fixed cost associated with route (i, j) .

a_i is the number of units available at plant i .

b_j is the number of units demanded at warehouse j .

Any general mixed integer programming solution method can be used to solve the fcTP, such as the branch-and-bound method or the cutting plane method.

Because they do not take advantage of the special network structure of the fcTP, these methods are generally inefficient and computationally expensive [30].

Since the fcTP is an extension of the TP, it has the same network structure as the solution characterized as spanning tree. Therefore, the spanning tree-based genetic algorithm can be adapted to this problem. The experiments have shown the performance of the proposed hybridized spanning tree-based genetic algorithm.

3.2 Capacitated Plant Location Problem

Plant location problems are actually a variation of the fixed-charge model. There is a number of receiving stations n and the demands at these destinations are satisfied from m potential plants or warehouses. Usually, n is considerably larger than m . This problem is required to decide on the location and capacity of each plant in order to satisfy the demand.

$$\text{cPLP:} \quad \min \quad z(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^m d_i y_i \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i y_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$y_i = 0 \text{ or } 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

The variables are x_{ij} and y_i , which represent the amount shipped from plant i to warehouse j and whether a plant is open (or located) ($y_i = 1$) or closed ($y_i = 0$), respectively.

4. GAs for Fixed Charge Problems

There are two genetic algorithms, matrix-based GA and spanning tree-based GA, for solving the fixed charge problems such as fixed charge transportation problem, plant location problem and so on. In next, we only deal with the different representations on those GAs.

4.1 Matrix-based GA

Matrix representation is direct representation of a solution for a transportation problem. Matrix-based GA is a GA based on matrix representation. The allocation matrix of a transportation problem can be written as follows:

$$X_p = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

where X_p denotes the p th chromosome (solution) and x_{ij} is the corresponding decision variable.

4.2 Spanning Tree-based GA

Spanning tree-based GA is a GA based on tree representation which is a indirect representation of the solution for transportation problem. We use the Prüfer number as a tree representation, which is one type of the node encoding for the tree, to develop our GA approach. The transportation graph in Figure 1 can be represented as a spanning tree such as in Figure 2.

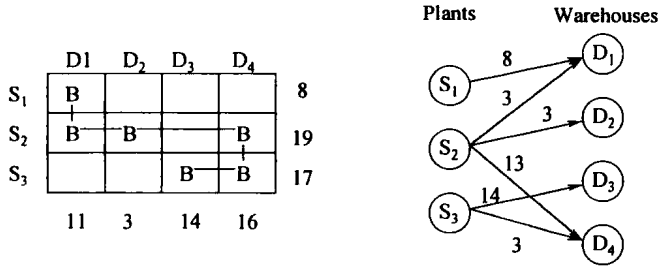
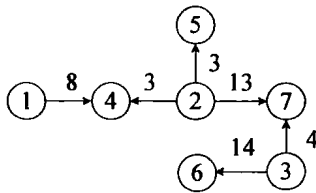


Fig. 1: Illustration of a basis for the transportation tableau and the transportation graph.

To develop the tree representation for TP, we denote plants $1, 2, \dots, m$ as the components of the set $S = \{1, 2, \dots, m\}$ and warehouses $1, 2, \dots, n$ as the components of the set $D = \{m+1, \dots, m+n\}$. Obviously, the transportation problem has $m+n$ nodes and $m \times n$ edges in the transportation tree.



Prüfer number : $P(T) = [4 \ 2 \ 2 \ 7 \ 3]$

Fig. 2: A spanning tree and its Prüfer number

4.3 Overall Procedure

Let $P(t)$ be a population of chromosomes for the iteration t and $C(t)$ be the generated chromosomes at the iteration t . The overall procedure of hybrid genetic algorithm is summarized in Figure 3.

procedure: st-HGA/fcTP
begin

$t \leftarrow 0$;
initialize $P(t)$;
evaluate $P(t)$ based on spanning tree;
while (not termination condition) **do**
 recombine $P(t)$ to generate $C(t)$ by
 genetic operation;
 evaluate $C(t)$ based on spanning tree;
 select $P(t+1)$ from $P(t)$ and $C(t)$;
 renew $P(t+1)$ by traditional operation;
 $t \leftarrow t+1$;

end

end

Fig. 3: Overall procedure of st-HGA for fixed charge TP

5. Numerical Experiments

The proposed hybridized GA approach was implemented in C language and run on a HP 9000 Model 715/100 workstation under the UNIX operating system. The performance of the solution procedure is evaluated by both solution quality and CPU time.

5.1 Experiments for fixed charge transportation problem

Table 1: Ranges of integer fixed costs for different types of test problems

Problem type	Range of fixed costs	
	Lower limit	Upper limit
A	50	200
B	100	400
C	200	800

The coded spanning tree-based GA (st-GA) was run 10 times with the given parameters, mutation rate 0.4, crossover rate 0.2, maximum generation 1000 and different population sizes. For the different sized problems, the given population sizes were 100 for the 5×10 , 200 for the 10×10 and 300 for 10×20 . For the matrix-based GA (m-GA), probabilities of the genetic operators were given as 0.2 for mutation, and 0.4 for crossover, which were known as better

parameter settings. Table 2 compare the results from the m-GA and hybridized GA(st-HGA) for three test problems with problem types. To compare solutions, the solution quality was defined as follows.

$$\text{Solution quality} = \frac{\text{best solution}}{\text{obtained solution}} \times 100$$

The "best solution" means the best of all the m-GA and st-GA solutions for a given problem. The number of trails found best solution is given in the columns labeled "Freq".

Table 3 given the comparison between m-GA and st-HGA on CPU time for three fcTPs.

Figure 4 illustrates the average solution quality as a function of evolutionary process on the problem 5×10 problem of type A (Table 1). It clearly shown that the spanning tree-based encoding has a better mechanism to evolve to the optimal solution in the evolutionary process than the matrix-based encoding.

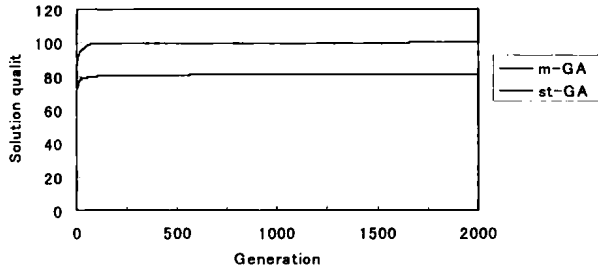


Fig. 4: Evolutionary process on 5×10 fcTP

5.2 Experiments for capacitated plant location problem

The computational results with three problem sizes denoted by $m \times n$ are used. Those are 5×10 , 10×15 and 10×20 shown in Table 4. Each test problem was randomly generated.

Table 4: The capacities and ranges of demands and fixed costs for cPLP

Problem size	Capacity of Plant	Demand	Fixed cost
5×10	5000	[100, 1000]	[200, 500]
10×15	10000	[100, 2000]	[500, 1000]
10×20	20000	[200, 2000]	[500, 1000]

The implemented st-HGA was run 10 times with given genetic parameters, mutation rate $p_m=0.4$, crossover rate $p_c=0.2$. The maximum generation for the two problems 5×10 , 10×15 was taken as 2000, but for the problem 10×20 was 1000. The population sizes

were given as 100, 150, 150, respectively, for the 5×10 , 10×15 , and 10×20 test problems.

From Table 5 we can see the st-GA found the best solution in times than the m-GA. In the comparison of the solution quality, the st-HGA also has higher probability to evolve the optimal solution or near-optimal solution than m-GA and st-GA. Table 6 indicates that the st-GA used much less computational time than m-GA and st-HGA on the small-scale problem. On the large-scale problems, especially for the 10×20 test problem, the CPU time by the st-GA was not greatly different from the computing time of the m-GA and st-HGA. This is because the st-GA requires more time to generate the feasible chromosomes in the initialization procedure.

6. Conclusions

In this study, two genetic algorithm approaches were developed and proposed for solving the production-distribution problems, i.e., traditional transportation problem, multi-objective transportation problem, fixed charge transportation problem, capacitated plant location problem, and the bicriteria transportation problem with fuzzy numbers. The proposed spanning tree-based genetic algorithm absorbed the characteristics of the network structure of the distribution problems and it designed by using tree encoding, which can find the optimal solution or Pareto optimal solutions for variety of transportation problems. In order to improve the performance of the proposed genetic algorithm, hybridized genetic algorithm approach with local search by reduced cost was proposed. The effectiveness of the hybridized genetic algorithm approach has evaluated by comparison with matrix-based genetic algorithm approach. The proposed spanning tree-based genetic algorithm can also be adopted to other production-distribution planning problems with this kind of network structure.

References

- [1] Bazaraa, M. S., J. J. Jarvis and H. D. Sherali, *Linear Programming and Network Flows*, 2nd Edit. John Wiley, Inc., 1990.
- [2] Budnick, F.S., D. Mcleavy, and R. Mojena, *Principles of Operations Research for Management*, 2nd Edition, Richard D. Irwin Inc. 1988.
- [3] Daskin, M.S., *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [4] Davis, P., and T. Ray, "A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.16, pp. 331-344, 1969.

Table 2: Comparison of solution qualities for the two GA approaches on the fcTP

Problem		m-GA				st-HGA			
Size	Type	Worst	Average	Best	Freq	Worst	Average	Best	Freq
5 × 10	A	90.80	95.06	98.73	0	98.98	99.54	100.00	5
	B	88.87	92.86	94.01	0	98.12	99.45	100.00	5
	C	85.41	86.99	90.82	0	98.62	99.79	100.00	9
10 × 10	A	99.62	99.86	100.00	4	99.56	99.83	100.00	4
	B	99.72	99.85	100.00	3	99.78	99.85	100.00	5
10 × 20	A	94.85	95.93	97.62	0	98.36	99.28	100.00	4

Table 3: Comparison of CPU time for GA approaches on the fcTP

Problem		Parameters		Memory on a solution		Average CPU time (min)	
size	type	pop_size	max_gen	m-GA	st-HGA	m-GA	st-HGA
5 × 10	A	100	1000	50	13	11.164	9.325
	B	100	1000	50	13	11.178	9.187
	C	100	1000	50	13	11.169	9.392
10 × 10	A	200	1000	100	18	40.174	35.289
	B	200	1000	100	18	39.881	35.128
10 × 20	A	300	1000	200	28	385.091	380.781

- [5] Dossey, J., A. Otto, L. Spence and C. Eynden, *Discrete Mathematics*, Harper Collins, 1993.
- [6] Efroymsen, M., and T. Ray, "A branch-bound algorithm for plant location", *Operations Research*, Vol.14, No.3, pp.361–368, 1966.
- [7] Gen, M. and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [8] Gen, M., K. Ida, E. Kono and Y. Li, "Solving bi-criteria solid transportation problem by genetic algorithm", *Proc. of 16th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, pp.572-575, 1994.
- [9] Gen, M., and Y. Li, "Solving multi-objective transportation problem by spanning tree-based genetic algorithm", (I. Parmee, ed.) *Adaptive Computing in Design and Manufacture*, pp.95–108, Springer-Verlag, 1998.
- [10] Glover, F., Kelly, J. R., and Laguna, M., "Genetic algorithms and tabu search, hybrids for optimization", *Computers and Operations Research*, Vol.22, pp.111-134, 1995.
- [11] Gottlieb, J. and L. Paulmann, "Genetic algorithms for the fixed charge transportation problem", *Proc. of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.330–335, Anchorage, 1998.
- [12] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [13] Jiménez, F. and J. L. Verdegay, "On interval and fuzzy solid transportation problem", *Proc. of International Fuzzy Systems Association*, 1997.
- [14] Lai, Y. -J., and C. L. Hwang, *Fuzzy Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, 1994.
- [15] Li, Y., "Study on Hybridized Genetic Algorithm for Production-Distribution Planning Problems", Ph.D. Thesis, Graduate School of Engineering, Ashikaga Institute of Technology, March 1999.
- [16] Li, Y., M. Gen and K. Ida, "Genetic algorithms for the fixed charge transportation problem", *Beijing Mathematics*, Vol.4, No.2, pp.239–249, 1998.
- [17] Li, Y. and M. Gen, "Spanning tree-based genetic algorithm for bicriteria transportation problem", *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, Vol.10, No.5, pp.888–898, 1998.
- [18] Li, Y. and M. Gen, "Spanning tree-based genetic algorithm for bicriteria transportation problem with fuzzy coefficients", *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*,

Table 5: Comparison of solution qualities between m-GA and st-GA on the cPLP

Problem Size	m-GA				st-GA			
	Worst	Average	Best	Frequency	Worst	Average	Best	Frequency
5 × 10	92.43	97.02	100.00	2	100.00	1.00.00	100.00	10
10 × 15	90.48	93.10	98.97	0	96.50	98.92	100.00	3
10 × 20	89.16	93.62	97.84	0	92.64	96.47	100.00	1

Table 6: Comparison of CPU time between m-GA, st-GA and st-HGA on the cPLP

Problem size	Memory of a chromosome		Average CPU time (min)		
	m-GA	st-GAs	m-GA	st-GA	st-HGA
5 × 10	50	13	23.519	7.405	13.956
10 × 15	150	23	158.313	62.596	122.348
10 × 20	200	28	372.210	310.434	350.127

Vol.4, No.3/4, pp.220-229, Spring/Summer 1997.

- [19] Li, Y., K. Ida, and M. Gen, "Improved genetic algorithm for solving multi-objective solid transportation problem with fuzzy numbers", *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp.239-250, 1997.
- [20] Marín, A., and B. Pelegrín, "A branch-and-bound algorithm for the transportation problem with location of p transshipment points", *Computers & Operations Research*, Vol.24, No.7, pp.659-678, 1997.
- [21] Michalewicz, Z, "A hierarchy of evolution programs : an experimental study", *Evolutionary Computation*, Vol.1, pp.51-76, 1993.
- [22] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data structure = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Third, revised and extended ed., 1996.
- [23] Michalewicz, Z., G. A. Vignaux and M. Hobbs, "A non-standard genetic algorithm for the non-linear transportation problem", *ORSA Journal on Computing*, Vol.3, No.4, pp.307-316, 1991.
- [24] Miller, J., W. Potter, R. Gandham, and C. Lapena, "An evaluation of local improvement operators for genetic algorithms", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.23, No.5, pp.1340-1351, 1993.
- [25] Murty, K.G., "Solving the fixed charge problem by ranking the extreme points", *Operations Research*, Vol.16, pp.268-279, 1968.
- [26] Ohno, K., M. Kojima, M. Mastumoto, and K. Nakashima, "Optimization of the number of supplier kanbans with consideration for a withdrawal cycle in a JIT production system", *J. of Japan Industrial Management Association*, Vol.45, No.6, pp.505-513, 1995.
- [27] Palmer, C.C. and A. Kershenbaum, "An approach to a problem in network design using genetic algorithms", *Networks*, Vol.26, pp.151-163, 1995.
- [28] Sá, G., "Branch and bound approximate solutions to the capacitated plant location problem", *Operations Research*, Vol.17, No. 6, pp.1006-1016, 1969.
- [29] Salkin, H. M. and K. Mathur, *Foundations of Integer Programming*, North-Holland, 1989.
- [30] Steinberg, D.I., "The fixed charge problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 17, No.2, pp.217-236, 1970.
- [31] Steuer, R.E., *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [32] Sun, M., J.E. Aronson, P.G. Mckeown, and D. Drinka, "A Tabu search heuristic procedure for the fixed charge transportation problem", *European J. of Operational Research* 106, pp.441-456, 1998.
- [33] Taha, H.A., *Integer Programming*, Academic Press, 1975.
- [34] Zhou, G. and M. Gen, "A note on genetic algorithms for degree-constrained spanning tree problem", *Networks*, Vol.30, No.2, pp.91-96, 1997.
- [35] Zhou, G. and M. Gen, "Approach to degree-constrained minimum spanning tree problem using genetic algorithm", *Engineering Design & Automation*, Vol.3, No.2, pp.157-165, 1997.

現在ディーゼル車のおかれている環境

中原弘勇
機械工学科

The Circumstances Around Diesel Engines Today

Hiro NAKAHARA

Abstract

Diesel engines today are at their turning-point. Although they are profitable for restraining global warming, they remain hovering around at a low level in satisfying the environmental standards of overpopulated cities should take immediate measures against these circumstance. By replacing diesel vehicles, which should be considered inappropriate at the moment. With gasoline vehicles whose exhaust fumes are cleaner.

Words Key: Diesel engines vehicles, global warming, air polluting.

1. はじめに

ディーゼル車は今、岐路に立たされている。それは、環境庁の中央環境審議会大気部会の1998年12月に発表された答申が大型車では2004年頃までに NO_x を25%、PMを28%削減、2007年頃には、さらに半減させ、トータルで NO_x 、PMとも70%近くを削減するという厳しい内容である。またこれに加えて地球温暖化防止のために、本来有する高い熱効率をさらに向上しようとするものである。

ディーゼルエンジン車では、ガソリンエンジン車に使われているような排出有害ガスを画期的に低減できる三元触媒システムのような決定的な手段を見出せなかったため、段階的に排出有害ガス低減が行われてきた。

今回の答申内容は、ディーゼルエンジンの排出有害ガスを大胆に低減するもので、従来の燃焼改善の方法では対応しきれない場合もあり、ここで考えかたの整理をふくめて動力の獲得手法から従来実施されてきた燃焼改善の方法、今後有望と思われる燃焼コンセプトと今後の課題について紹介する。

2. ガスの膨張力の変換

2.1 内燃機関の誕生 動力とは力で運動を与えるものであるが、それを利用する運動の形態は多種多様で、往復運動、回転運動または、それらが高速のもの、低速のもの、一様でないもの、等いろいろ在るが現在では、それぞれの形態に応じた原動機を作るのではなく、原動機は回転運動として動力をとり出し、利用形態は運動変換機で応じる方式になっているものが多い。

自然界では熱または温度変化によって大きな運動が起きることは太古の昔から経験されていた。氷で岩が割れ、なだれ、台風、火災による空気の流れの発生、さらには容器内での爆発などがある。

一般に、熱機関の基本はガスの温度変化による圧力および体積変化を応用するものであり、膨張する力とそれに外力に抗して動く距離との積が仕事である。その具体的な方法としては、風船がふくらむように立体的な動きより、シリンダの中をピストンが直線・往復運動する構造が便利であることは容易に考えられたことと想像できる。

その往復運動をどのような形で実用に供するかは現在では、ほとんど回転軸から外に動力を供給している。初期にはもちろん、それぞれの必要にあわせてエンジンも作られたであらう。

往復湯水ポンプを駆動する目的で作られたエンジンは、炉で加熱されているシリンダ内に空気と燃料を手動で供給して爆発させ、重いピストンを高く押し上げ。仕事はシリンダ内ガスの冷却で圧力が低下し、重力で落下するピストンによって行なわれる方式で、実用内燃機関としては最初(1794年)のものである。もちろん当時は既にクランク機構が蒸気機関に応用されていたし、現在も多く使用されている。

クランク機構をもつエンジンは次のような長所をもつ。

- ①構造が簡単で製造も容易。
- ②シリンダ内ガスが非常に高温でも壁温は低く、鋳鉄やアルミ合金のような低コスト材料を主構造材料に使用できる。
- ③頑丈で圧力および熱による変形が少ない。
- ④機密性に富み潤滑も比較的容易である。
- ⑤上死点近くでは複雑な変化があるが、その間ピストンの動きが緩慢である。

欠点としては、

- ①1サイクル中に吸気・圧縮・膨張・排気の4つの作用を間欠的に繰り返すので、大きさの割には吸気量および燃焼熱量が小さく、出力も比較的小さい。
- ②燃焼が爆発的であり、高温高圧ガスを間欠的に排出するので振動および騒音が大きい。
- ③運動部のつり合いが困難で振動、騒音のもとになる。
- ④ピストンはスラスト力でシリンダ壁に衝突させられ、振動・騒音・摩擦などを起こす。

大型ディーゼル機関ではこれが重大な問題で、それを避けるためにクロスヘッド方式を採用している。(ピストンに直接連接棒を連結せずに、ピストンにピストン棒を設け、これに連接棒を連結し、ピストン棒に往復運動のみを許す軸受けを設けた方式)

2.2 内燃機関の発達

近世に至り人類はその欲望と英知によつて大きな動力を物にすることを可能にし、そしてそれを機械装置によって実現した。

都市の近代化による上下水道のための動力、大規模の社会設備や、軍艦、大砲などの軍備の生産などのために大量の鉄や銅合金の製造、船や車の動力化などがあげられ、ワットが蒸気エンジンの実用化に成功して、はじめて人間は熱エネルギーを動力に変えて利用した。

その 100 年後にはオットーはガス機関を生み、それが今日の内燃機関実用化の始まりで、1876 年のことである。それを契機として、近代工学または技術があらゆる分野で発展し、体系づけられた。

蒸気エンジンの小型化・軽便化がちょうど始まり、ディーゼル機関、2 サイクル機関などの発明があり、エンジンの実用化は他の工学または工業の発展を誘発し、人間の生活様式もそれに対応するように大きく変化した。

また第一次、第二次世界大戦は自動車、戦車、船、軍艦、飛行機等の原動機として、軍備の主役として長足の進歩をとげた。

さらに戦後は農耕・土木・建設・船舶および自動車、列車、オートバイ用などとして、ますますその使用台数が急増した。

以上のごとく 1960 年代までは、エンジンは増加の一途をたどり、また技術的には小型で高出力化、または高回転化および熱効率の増大、一方では耐久性の向上および取扱の簡易化が急速に進み、一部専門職の運転する機械から、誰でも利用できる身近な機械へと普及した。

このようにエンジンの一般化はついに一種の飽和現象を発生した。その第一が排気および騒音公害であり、第二が石油資源の枯渇である。エンジンが軍用や一部の特殊階級のものから一般庶民のものへと普及・拡大したことはむしろ歓迎すべきことであり、その要求をさらに十分満たすためには、なんとしても公害対策と新エネルギー対策の新しいエンジンの技術開発に頼るほかに道はない。

従来のエンジンに関する研究成果を生かすとともに、全く新しい科学の組み合わせを必要とし、そのためには単に機械工学のみでなくあらゆる分野の協力が必要であり斬新な発想と長期的開発努力が要求されるのは当然であるが、現在はその入口、すなわちエネルギーおよびエンジンの革命前夜といえることができる。

現在は新しいエンジンへの胎動期であり、それに関する無数の研究・発明・開発がある。しかしその大部分のものは、かつて先輩が試み、不成功に終わったものである。専門書や文献はその手引きとなり、現状に至った経過を示している。

3. 内燃機関の定義

内燃機関は蒸気機関の実用化後、大きなボイラを持つ蒸気機関の欠点を除いて、より軽便な原動機をめざして開発されたもので、蒸気機関は作動ガスである蒸気が機関外のボイラで作られ、機関に導入されるのに対して、作動ガスそのものが動力源であることが内燃機関の特徴であり、内燃機関の定義もその点にある。

ガスタービンやジェットエンジンも内燃機関であるのに対して、蒸気タービン、蒸気機関車、スターリングエンジンなどは外燃機関と呼ばれるものである。表 1 は内燃機関の出力が原動機のなかで今日占める位置を示し、ガソリンエンジンは出力 1 kW 前後から数百 kW まで、ディーゼルエンジンは 1 kW 前後から数万 kW まで製造されていることを表している。

表 1 内燃機関の出力が原動機の中で占める位置

出力 (kW)	0~100	100~1,000	1,000~10,000	10,000~100,000	100,000~以上
ガソリン機関	○	○			
ディーゼル機関	○	○	○	○	
ガスタービン		○	○	○	
蒸気タービン				○	○
水 力			○	○	○

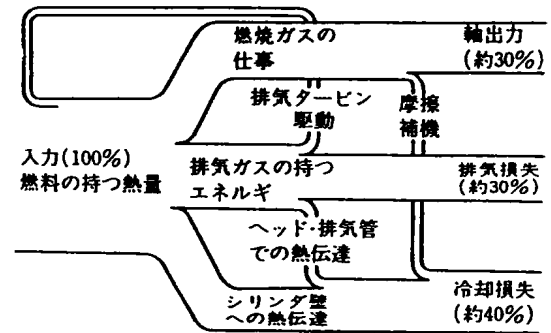


図1 熱勘定図

図1は熱勘定図を示し、燃料のもつ熱量（エネルギー）が、軸出力（仕事のエネルギー）、排気損失（排気を持ち去るエネルギー）、冷却損失（冷却で失うエネルギー）に変換される割合を示す。この軸出力と燃料のもつ熱量との比を熱効率といい、ガソリンエンジンでは最高でおよそ30%、大型船用2サイクルディーゼルエンジンでは50%を超えたものがあるとのことである。この熱効率を向上するためには排気損失および冷却損失をいかにして減らすかということである。

4. 点火法式

最も多く使われている間欠燃焼機関ではサイクルごとの定められた時期に確実に点火することは、エンジンの性能や排気清浄化のためにきわめて重要なことである。

運転の条件、たとえばごく低負荷では点火が不安定になりやすい。また着火のための条件は気化した燃料と空気の混合比がある範囲内（ガソリンの場合、最適混合比は12~13:1で、その前後の可燃範囲）にあること、また、高温の点火源が存在することである。火花点火方式ではエネルギーは小さいが短時間にごく高温の火花（容量火花）を発し、その後続く誘導火花によって、電極間に安定した火炎核を作るので、点火手段としてはきわめて優れている。

4.1 火花点火機関といえはガソリン機関がそれであり、予め点火可能な混合比の混合気を作り、絞り弁で絞って負荷に見合った量の混合気をシリンダ内に吸込み圧縮し（設計上の圧縮比と、実際に圧縮される圧縮比があり、前者は一般に使われる圧縮比であり、後者を有効圧縮比といい、実際、圧縮に有効な比であり、ガソリンエンジンでは有効圧縮比で7~9が用いられている）、火花発生器（点火プラグ）で点火するものである。火花発生時にその場所、すなわち火花発生器の場所に点火可能な混合比の混合気が存在する必要がある。すなわち、あらかじめ点火可能な混合比の混合気ができていることが大切である。この燃焼を予

混合気燃焼といい、火炎伝播（火炎の広がり）は点火位置を中心として、同心円状に広がる。

4. 2 圧縮着火機関といえばディーゼル機関がそれであり、空気のみをシリンダー内に吸込み、これを圧縮し（圧縮比16～24）、圧縮終り近付のシリンダー内空気温度が（400～600℃）になった中へ燃料を高圧（15Mpa以上）で噴霧し、噴霧が高温空气中に広がる（拡散）過程で自然発火させるもので、これを拡散燃焼といい、発火位置および発火数は定まらない。

この燃焼はガソリン機関のように圧縮比を高くしても異常燃焼を起こすことはないので過給、高圧縮比化し、噴霧の拡散を良くし、空気過剰率の大きいところで希薄混合気燃焼させることで、熱効率も高く、しかも、煙の排出の少ない、NO_xの排出量を減らすことが可能であるとされている。

5. 使用燃料

5. 1 ガス機関；プロパン（LPG：液化石油ガス）が広く使われているが、都市ガス機関、天然ガス機関（液化天然ガス、圧縮天然ガス）、水素ガス機関（液化水素ガス、高圧水素ガス）が実用化、一般化を目指してその技術開発が進められている。

液化ガスは、気化して燃料とする場合は蒸発器を必要とし、空気との混合装置が気化器と多少異なるだけで、ガソリン機関と類似しており、寒冷時始動の問題がすくない。

しかし気体燃料は大気圧状態における単位体積あたりの発熱量が小さいので、行程容積当りの最大出力が小さい。特に水素ガスのように軽い気体燃料は不利である（重量当りの発熱量は大きい、容積当りの発熱量は小さい）。そこで空気をシリンダー内に吸い込み、弁を閉じてから、燃料を液体のまま、あるいは高圧でシリンダー内に噴射することが考えられている。

最近では天然ガス（メタンガスCH₄）、都市ガスを燃料とするパスが実験的に稼動し始めた。天然ガスは水素燃料に次ぐ、環境にやさしい燃料であるが、燃料容器が高圧（圧力20～25MPa）であること、一回の充てんでどれほど走れるか（走行距離が短い）、どこで充てんするか（充てん場所）、充てん時間がかかる等が問題となっている。

5. 2 ガソリン機関は乗用車、オートバイ、小型作業用に主として使われ、ガソリンの優れた気化性および、異常燃焼を起こしにくい（灯油、軽油、重油等に対し）性質（圧縮比8～11）を利用し、また、火花点火方式のために、ある狭い範囲の空気と燃料の混合比の混合気を自動的に供給する必要があり、気化器もしくは、電子制御式ガソリン噴射ノズルにより混合気（予混合気）を作り、スロットル弁で絞って負荷に応じた混合気量をシリンダー内に吸込ませるので、軽負荷時の燃焼圧は低く振動・騒音が低いなどの特徴があるが、シリンダー内に吸込む混合気をスロットル弁で絞るので負のポンプ仕事をするので、軽負荷時の熱効率はディーゼル機関よりガソリン機関の方が悪い。

5. 3 石油機関は灯油を燃料とし、火花点火方式で燃焼するものであるがガソリンより気化性が劣り、低出力時に燃料が液状でシリンダー壁に付着して潤滑油中に混入したり、気化性が悪いので始動時にガソリンを使わねばならないこと。またノッキングなどの異常燃焼を起こしやすいなどのために圧縮比を低く押さえなければならない。

灯油は家庭の暖房用燃料として税制上安くしてあるが、

農業用としての使用は見とめられていたようでガソリンより安い燃料として、農業用発動機に使われたこともあったが、現在では使われていない。

5. 4 ディーゼル機関 ディーゼル機関の燃焼方式には直接噴射式燃焼室ディーゼル図2（a）と、副室式燃焼室ディーゼルがあり、副室式にも渦流式燃焼室ディーゼル図2（b）と予燃焼室式ディーゼル図2（c）がある。

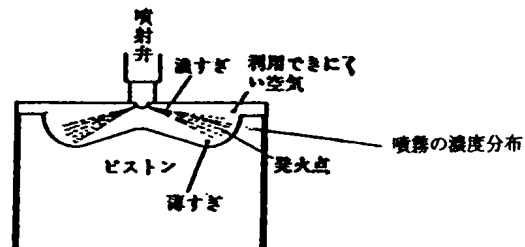


図2（a）直接噴射式（DI）ディーゼル

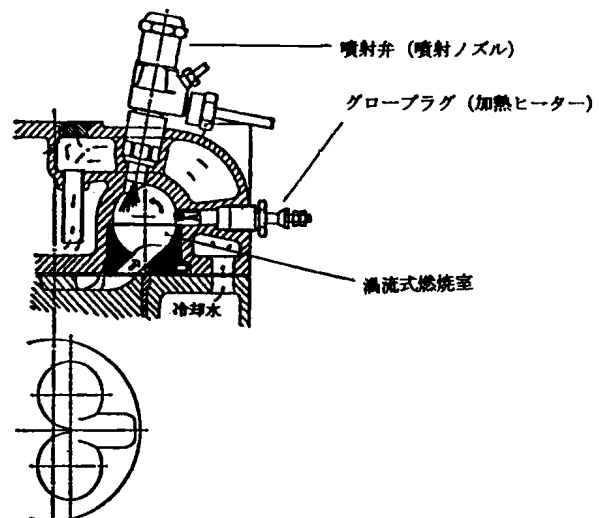


図2（b）渦流式燃焼（IDI）ディーゼル

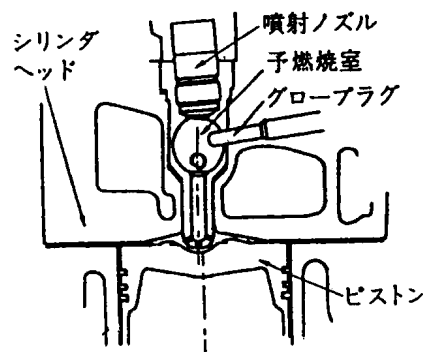


図2（c）予燃焼室式ディーゼル

軽油または重油を燃料とするもので、空気のみを高圧縮比（15～25）で圧縮し、圧縮エネルギー（断熱圧縮）のみで高温（400～600℃）高圧になった空気中へ燃料を高圧（12 MPa以上）で噴霧して自然発火させるもので、これらの燃料の発火温度が高圧中で200℃ぐらいであるので圧縮着火燃焼に適し、また、燃料をあまり選ばない。圧縮比が

高いので熱効率（理論では熱効率は圧縮比のみに関係し圧縮比が高いほど熱効率が高い）が高いという特徴を有するが、燃焼最高圧が高いので振動・騒音が大きく、特に低負荷でも吸入空気を絞らないのでシリンダー内圧が高圧であり、アイドリング時でも騒音が高かったが、いまでは、ゆるやかな圧力上昇をする燃焼方法を選ぶことによりかなり改善できる。また、ディーゼル機関は高圧縮比で熱効率は高いが、排気中の環境汚染物質とされている煙（浮遊微粒子状物質SPM）および窒素酸化物（ NO_x ）が問題である。しかし、化石液体燃料はエネルギー密度が高く、大気状態で液体であるということが最大の長所である。

6. 排 気 対 策

6. 1 ガソリン機関の排気ガス 公害対策が実施されてからは、空燃比または混合比（空気と燃料の重量比を空燃比、吸入空気中の酸素を完全に燃え切って酸素濃度をゼロとするときを、空気過剰率1または理論空燃比という）を空気過剰率1前後のごく狭い範囲に制御し、図3に示すような、ガソリンエンジンの排気有害物質のHC、CO、 NO_x を同時に浄化する三元触媒システムが開発された。

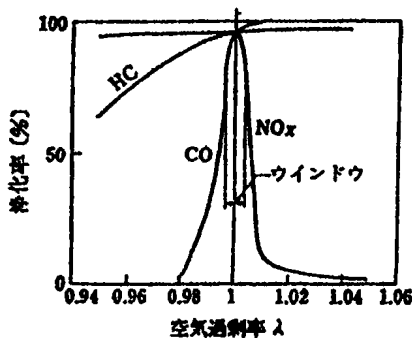


図3 三元触媒の浄化特性

このシステムは排出ガス中の酸素（ O_2 ）濃度を O_2 センサーによって検出し、この O_2 センサーの検出起電力が酸素の有無に対して急変する特性を持ち、その出力を燃料供給系、電子制御式インジェクターにフィードバックして、燃料供給量を空気過剰率1前後のごく狭い範囲（ウインドウという）に制御することを可能にした。この制御は排気を空気過剰率1以下の還元雰囲気と、空気過剰率1以上の酸化雰囲気を交互に作り、酸化雰囲気では触媒表面に吸着されたHC、CO、を酸化し、一方、 NO_x を吸着する。還元雰囲気では NO_x を還元し、HC、CO、を吸着する。これを三元触媒システムといい図3に示すように排気有害物質の浄化率（排気有害物質を無害化する割合）が90%以上にも及んでいる。しかも、ガソリンエンジンはディーゼルエンジンのように環境汚染物質とされている煙（浮遊微粒子状物質SPM）の排出がほとんどないことがさいわいして、このシステムが開発されたおかげでガソリン機関はディーゼル機関に対して断然優位に立ち、排気公害規制から命拾いしたのである。今では、触媒温度の低い始動時における未処理HC、COの排出等を問題に取り上げる余裕をしめしている。

ガソリン機関は、ガソリンと空気を予め燃えやすい混合比に混合して、負荷に見合った量の混合気をシリンダー内に吸込んで火花点火で燃焼するものであり、点火点を中心

としてほぼ同心円状に火炎が広がる。有害排ガス物質は燃焼室壁面の消炎距離（壁面温度が低いので火炎が壁面まで到達しないで消えてしまう距離）付近でHC、COが、 NO_x は図4に示すように理論空燃比前後から希薄側の部

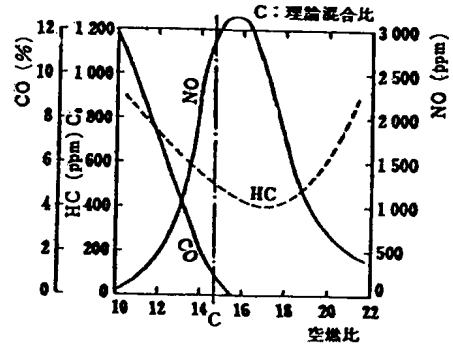


図4 CO、HC、NOの空燃比特性（ガソリン機関）

分において高濃度で生成する。前記のように、三元触媒システムが開発されたおかげで排気が、すばらしくきれいになり、休日などに（ディーゼル車の少ない）車の渋滞に巻き込まれても、一昔前のような悪臭はあまり感じない。

6. 2 ディーゼル機関の排気ガス 図5に直噴式（DI）ディーゼル車、渦流室式（IDI）ディーゼル車、三元触媒システム装着（MPI）ガソリン車の燃費の比較を示す。

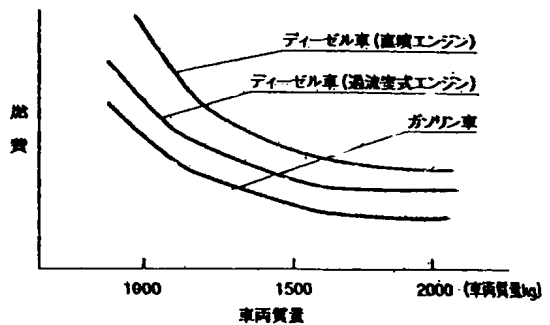


図5 エンジンの種類と燃費（km/L）

エネルギー節約の時代に入り、排気中の炭酸ガスを減らすことと、熱効率をあげることが同時に要求されるとき、ディーゼル機関を乗用車に広く使用する方向は容易に考えられ、最近まではその数が増えつつあった。

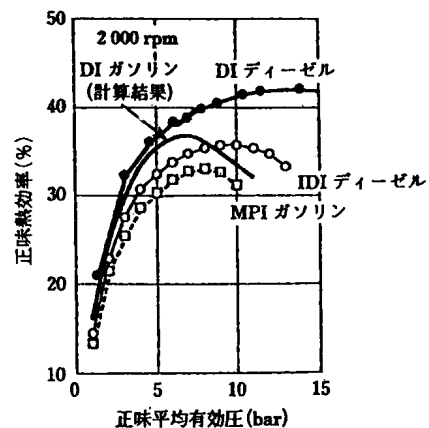


図6 エンジンの種類と熱効率

しかし、後記のごとく、排気対策上ディーゼル車がガソリン車で置き換えられようとしている。図6は各種エンジンの熱効率を比較している。(図中のDIガソリンは後記、筒内噴射ガソリンエンジンをさす)

元来ディーゼル機関はできるだけ多くの空気をシリンダー内に充てんし、圧縮して高温高压となつたその空気中に、負荷に見合った量の燃料を噴霧し、その拡散過程で不特定多数の発火点より自然発火燃焼させるものである。

充てん空気に対して噴霧燃料の重量比、すなわち、ディーゼルエンジンの場合の混合比は、ガソリンエンジンの場合の均一混合気とは違って可燃混合比範囲内にあるとは限らない、それでも燃えるのは拡散燃焼であるためである。

この場合の混合比を見かけ上の混合比といっており、ディーゼル機関では常に希薄混合気側にある。すなわち、酸素過剰状態にあるので、一酸化炭素(CO)は過剰酸素で酸化され二酸化炭素(CO₂)となるのでCOは殆ど排出しない。また、噴霧が直接壁面に衝突する部分では壁面温度が低いので冷却され火炎が壁面までおよばないので壁面に付着した炭化水素(HC)は燃焼せずに蒸発、排出されるが、低負荷時にはその面積は小さく、燃焼室壁面付近の境界層内は殆どが空気層であるため、HCの排出量は少ない。

見かけ上の混合比は常に希薄側にあるが、実際に燃焼している局所部分の混合比は理論空燃比に近いので、窒素酸化物(NO_x)の生成濃度はガソリン機関と同様に多いが、排出ガス中のNO_x濃度は希薄燃焼であるために希釈されて薄い。しかし、ディーゼル車は一般に大型(大排気量)であるのでNO_xの排出総重量は多い。

このほかにディーゼル機関では煙(浮遊微粒子状物質; パーティキュレート; SPM)の排出がある。煙は有機溶剤に溶ける軽質成分の可溶性有機質(SOF)と、すすのような不溶解成分に区別される。不溶解成分は炭素を主体としたすす(黒煙)で、空燃比の濃い高負荷の場合に多く発生する。

SOFの成分は燃料やシリンダー壁から蒸発した潤滑油とそれらの燃焼中間生成物からなる炭化水素で、それに含有する多環芳香族の発ガン性が問題とされている。

ディーゼル機関の燃焼室形式には、直接噴射式と副室式があることは前にも述べた。直接噴射式ディーゼル機関は圧縮比、燃焼室の形、噴霧状態等に敏感であるが、副室式ディーゼル機関はその点あまり敏感ではなく、NO_xの排出量も少ないが、さらに低減させるために噴射時期を遅らせることが有効であるとされ、小型ディーゼル車、ディーゼル乗用車に実用化されている。

ディーゼルエンジンのNO_x低減方法としては、NO_x吸蔵型還元触媒コンバーターを付け、エンジンの排出ガスに還元雰囲気を作るための、炭化水素をNO_x吸蔵型還元触媒コンバーター入口あるいは、後記コモンレール式燃料噴射装置を用いてピストンの膨張行程で燃料を噴き、触媒に吸蔵されていたNO_xを還元させるようなフィードバックシステムが考えられる。しかし、ここで触媒コンバーターに還元剤として加える炭化水素はエンジンとしての熱効率を低くすることになり、熱効率の高いディーゼルエンジンにおいては、ばかにならないがやむをえない。

一方、微粒子状物質低減方法としての酸化触媒はSOFには有効であるが、すすの低減には効がない。排出されたすすを排気管部で捕集する装置(パーティキュレート・ト

ラップ)がすす低減に有効であるか、捕集したすすを取り除く方法が問題で、実験室レベルや試験車ではある程度の成果が得られているものの、価格的な問題を含めて実用的な技術は十分に確立されていないのが実状のようである。

7. 将来燃料

石油資源がいつまで人類のエネルギー需要を満たすのか正確な予測は困難であるが、比較的短期間 30~50 年以内に枯渇することは間違いないといわれている。そこで近い将来の新燃料として、石炭や天然ガスから製造される水素、メタノール(CH₃OH)または合成ガソリン、さらに長期的にはこれら化石燃料も人類の需要を満たしうる期間はそう長くはないので、原子力や太陽エネルギーによって水素を作ることが研究されている。

水素は火花点火方式で使いやすく、排気公害対策が容易で点火できる混合比範囲がきわめて広いので気化器は必要なく、希薄混合気でも自由に運転でき、熱効率が高いなどの長所を有するとするが、一方高負荷での濃混合比では着火が良すぎて(点火可能エネルギーが小さいので非常に小さな火種によっても点火する)異常燃焼を起こしやすいという問題があるとともに比重が最も小さいガス(比体積が最も大きいガス)であるので運転法に研究を要する(単位排気容積当りの出力が小さい)。

メタノールの発熱量はガソリンのほぼ 1/3 であるが、燃費は悪いが、出力はガソリンエンジン並にできる。また、圧縮比が高められ、すすの出ない燃焼ができるなどの特長を有するが、アルコールの吸湿性のため錆がやすいなどの問題もある。

8. ディーゼル車の排出ガス

現実問題として地球環境問題はもちろんであるが東京都のような過密都市での空気の汚れは、ここ 10 数年、いっこうに改善されていない。健康な生活を送るために望ましい水準として決められた、窒素酸化物(NO_x)や浮遊微粒子状物質(SPM)の環境基準達成率は、低いレベルで横ばい状態が続いている。

東京の大気汚染の主因は自動車の排ガスで、なかでも、ディーゼル車が出す排ガスは東京の空を汚す最大の要因であり、走行量では 2 割にすぎないディーゼル車が、自動車から出る窒素酸化物の 7 割、浮遊微粒子状物質(SPM)の殆ど全てを排出しているとされている。

ディーゼル車は、特に物流の面で、東京都の暮らしを支える重要な役割を果たしており、その恩恵は、広く都民が享受しているが、これまでと同じようにディーゼル車の利用を続けていては、東京の空気をきれいにすることはできない。

東京都は現在のディーゼル車、すなわち、今のままのディーゼル車は東京都での利用に適さない、というのである。

本来ディーゼル機関の燃焼は空気過剰状態で行なわれるもので、熱効率を損なわずに窒素酸化物の生成を抑制することは大変困難である。

ディーゼル燃焼は拡散燃焼であるが、一種の成層燃焼ともいえる。噴霧が到達した範囲と到達しない部分が存在する。直噴ディーゼルの例、図 2(a)に示すように、この噴霧は噴口近くは、濃すぎる部分・理論混合比(=空気過剰率 1)近辺の部分・そして希薄な部分、また、空気

のみの部分とに分けることができる。図4は予混合気燃焼の場合を示したものであるが、(空燃比の小さい側)過濃部分では煙の発生量が多く、空気過剰率1の部分では、煙は少なくなるが、 NO_x の発生は空燃比16あたりで最大となり、それより希薄になるにしたがって NO_x の発生が少なくなる。

前記副室式(IDI)燃焼室ディーゼルでは煙、 NO_x の成生を比較的少なく押さえることが可能であるが三元触媒システムを用いたガソリンエンジン(MPI)車には及ばず、小型車用で、大型車にはむかない。燃費、および、効率熱は図5、6に示すように、直噴ディーゼル(DI)エンジンに次いで良い。熱効率の良いエンジンであっても、現在のディーゼル車では東京都は利用に適さないというのである。ガソリン車の場合のように三元触媒システムのような優れた排気浄化装置が出来ない限り熱効率の良さと CO_2 の少ないことだけでは過密都市では太刀打ちできなくなったのである。

しかし、今のところディーゼル機関に対しては経済的に、確立した、優れた排気浄化技術は見当たらない。

9. 公害とその対策

エンジンは、われわれの日常生活に欠かせない機械となり、驚くべき数が生産、使用されるに至った。一方そのことにより日常生活に害を与える問題が起き、特に周囲の人々の健康を害する恐れのある有害成分、「ハイドロカーボン(HC)・一酸化炭素(CO)・窒素酸化物(NO_x)・浮遊微粒子状物質(SPM)」を含むガスの排出、騒音の発生、そして地球の温暖化の原因とされる CO_2 ガスの発生が社会問題となり、その防止対策が従来の性能向上に代わって至上命題として研究、開発がおこなわれている。

これらの対策は一般にエンジンの価格や性能をある程度犠牲にすることはやむを得ないが、最近、エネルギーの節約、そして、資源の節約が、世界的な危機として叫ばれている。この公害と資源の両立する方向への新しいエンジンの開発が望まれている。

エンジンを限られた空間で運転すると、有害物質が蓄積し、やがてその濃度がそこに生活する人々に重大な害を与える。それが都市的な問題になり、なんとかしなければならぬということで法規制がはじまったのであるが、それでも大気汚染が一向に改善されない。そこで規制を厳しくする、といった具合で大気汚染と規制がいたちごっこになっている。幸いにもガソリン車は三元触媒システムのような優れた排気浄化装置が開発されて命拾いしたのである。

しかし前記のように東京都知事(石原知事)は大気汚染が一向に改善されない、これ以上待てないということを理由にその元締めである今のディーゼル車を都内から締め出そうというのである。

10. 東京都が始めたディーゼル車NO作戦

東京都は都民の健康を守るために5つの提案をかかげて自動車公害に挑むことになった。

- 1 都内ではディーゼル乗用車には乗らない。
- 2 代替車のある業務用ディーゼル車は、ガソリン車などへの代替を義務付け。
- 3 排ガス浄化装置の開発を急ぎ、ディーゼル車への装着

を義務付け。

- 4 軽油をガソリンよりも安くしている優遇税制を是正。
- 5 ディーゼル車排ガスの新長期規制(平成19年めど)をクリアする車の早期開発により、規制の前倒しを可能に。

都民と都知事がディーゼル車で議論:東京都は、8月30日(1999年)、都民の代表者と石原都知事が意見を交わす会を開催した。テーマは車と環境、ディーゼル車NO作戦の発表直後でもあり、ディーゼル車が話題の中心となった。知事はペットボトルの中の真っ黒に液化したディーゼル車の排出物を見せながら、東京の大気が深刻な状態であること、ディーゼル車の早急な抑制が必要であることを説いたという。

ディーゼル車NO作戦は、東京都が世界に問う環境政策だ。

ディーゼル車は都市の大気汚染の原因になっている。そして、その大気汚染が道路周辺住民の健康被害と関係していることは明らかである。(2000年1月31日 尼崎公害訴訟で神戸地裁での判決で「一定限度を超す排ガス有害物質の排出差止め命令」をだした。道路周辺住民の健康被害に対して国と道路公団に賠償責任があるとするものである。これに対して2月5日、朝日新聞の夕刊に、「行政の責任は間違いなくあると思う」と東京都知事が言っている。)そのような状況下で、東京都はディーゼル車を減らすための新たな一歩を踏み出したのである。

ディーゼル車の燃料である軽油の税金が安く、その分経済的に使えるため、産業界の強い反発を受ける。ディーゼル車はガソリン車に比べて規制は緩く、排ガスをきれいにする技術開発も遅れてきたとJAF・MATE紙上で館内端氏がいつている。図7に日本のDIディーゼルエンジントラックの排出ガス規制(12t on以上)を、図8に乗用車の NO_x 規制値の推移、図9は走行距離1km当りの NO_x の排出量をgで示し、2005年の最終目標値を示している。

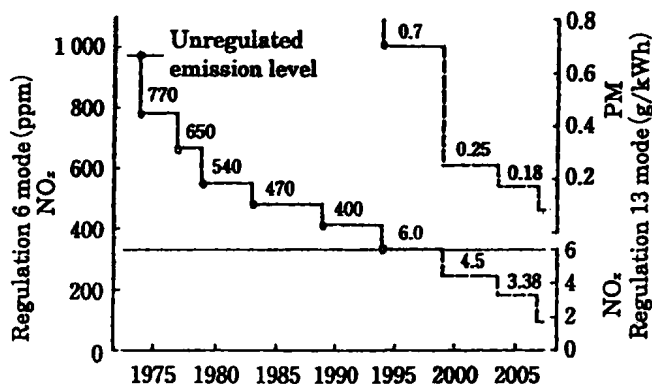
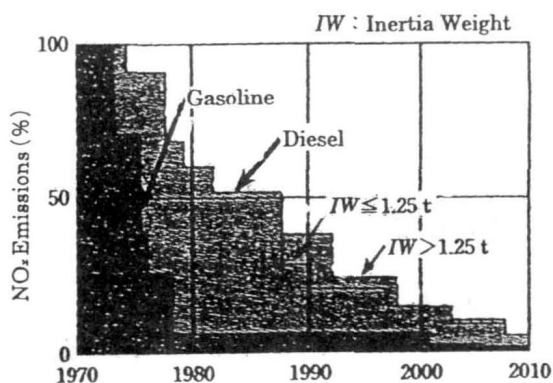
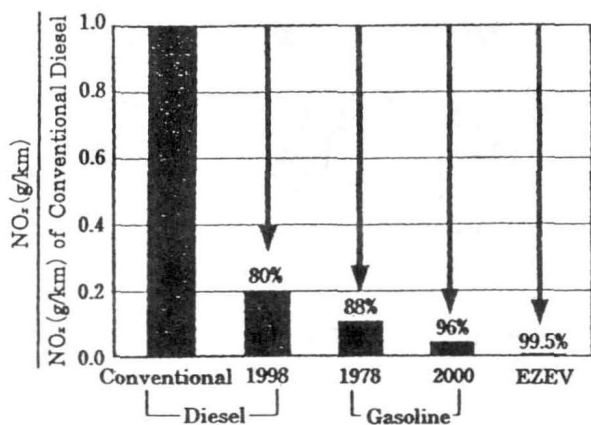


図7 日本のDIディーゼルエンジントラックの排出ガス規制(12t on以上)

ディーゼル車NO作戦はこの最終目標値を達成する2005年までは待てないというのであり、こういった産業界の都合にあわせた行政には任せてはおけないとするものである。

さて、この提案への反論で最も多いのは、ディーゼル車は燃費がよく地球温暖化対策に有効であるというものだろう。一方排ガスのクリーン度は圧倒的に三元触媒システムを装着したガソリン車がきれいだ。また、既に排ガスによる健康被害が出ていることを考えれば、温暖化対策のためにディーゼル車を推進することは、少なくとも都市部ではできない。ただディーゼル車を減らすにしても、大気汚染の主原因で

図8 乗用車のNO_x規制値の推移,図9 走行距離1 km当りのNO_xの排出量

あるにもかかわらず、大型トラックに代替車がないというのは問題だ。また、乗用車などに使われている最新の小型ディーゼル（IDI）は排ガスも比較的きれいだが、それまでも強制的に代替させるのは無駄が多い。この辺は、これから議論を重ねる必要がある。

さらに業務用ディーゼル車を減らすということは、そのトラック輸送にささえられている便利な生活もある程度あきらめるとのこと。つまり、住民の一人一人が何かを犠牲にしなければディーゼル車は減らせないのだ。ディーゼル車NO_x作戦はそのことも訴えている。ディーゼル燃焼はシリンダの中にできるだけおおくの空気を吸入して、高圧縮して高温高圧になった空気中に燃料を高圧噴霧することにより、その噴霧が高温高圧の空気中に拡散しながら燃焼する。

外見では、酸素過剰状態での燃焼であるが、噴霧の拡散過程では過濃な部分から次第に薄くなっていく。図2（a）参照。その過濃な部分では煙が発生し、薄い部分ではNO_xが発生する。そこで、速やかに噴霧濃度が煙発生濃度以下になるようにすること、一方、噴霧濃度が燃焼限界を超えるほど希薄濃度まで拡散させない、つまり、成層燃焼で、常に空気過剰率1以上の混合気を速やかに作れるような噴霧条件が見だせれば、すなわち、後記、コモンレール式燃料噴射制御装置のように超高圧噴霧と、きめ細かな燃料噴射制御を行えば、後記、直噴（DI）ガソリンエンジンのように、超高圧燃料噴射と、成層燃焼をうまく使い分けて、煙の排出しない、そして、NO_xの少ない燃焼を行い、NO_x吸蔵型還元触媒システムと、還元剤としての炭化水素（燃料）により、煙およびNO_xの出ない、燃費の良いディーゼルエンジンが出せるのではないかと考える。

前記東京都の提案3、排ガス浄化装置の開発を急ぎ、ディーゼル車への装着を義務付け。とあるが、ぜひ進めるべきである。ディーゼル車は燃料である軽油の税金が安く、その分経済的に使えるため、産業界の強い反発を受け、ガソリン車に比べて規制は緩く、排ガスをきれいにする技術開発も遅れてきた。そのうえ、ディーゼルエンジンの耐久性はガソリンエンジンのおおよそ10倍もあり、その入れ替えが遅れている原因の一つになっている。

一方ディーゼルエンジンは、燃焼方法上、ガソリンエンジンのような優れた触媒システムが適用できないが、煙のような固形物を排出するため、経済的なその処理技術の開発に窮しているように思える。煙の排出がなければ、NO_x吸蔵型還元触媒を活用した、ディーゼルエンジン専用の触媒システムが作れる。

エンジンをさらに高効率にしCO₂の排出の少ない車、あるいは全くCO₂の排出しない新しい動力源を備えた車を開発する。しかし、今、ほとんどのクルマはエンジン車である。ガソリンで走るにせよ、軽油で走るにせよ、エンジン車であるかぎりCO₂を含んだガスを排出する、エンジン車はそういうしくみのクルマである。そこで地球の温暖化につながるCO₂の排出をエンジン車から少なくするには、燃費をできるだけ節約する。つまり、燃費の向上を実現するしかない。CO₂削減のため、後記、リーンバーンエンジンや直噴ガソリンエンジン、そして、クルマ全体でロスを少なくして燃費を向上する必要がある。すなわち、軽量化、動力伝達ロス、および、走行中の空気抵抗の低減、そして燃費向上のための運転方法などである。

1.1. リーンバーンエンジン

エンジンで燃料が完全に燃えるために必要とする最小空気と燃料の重量比（空燃比）を理論空燃比または空気過剰率1といい、空燃比で表わすと化学的には約14.5:1である。さらに空気をたくさんとり入れ、均一混合気空燃比を大きくして燃費向上を実現しようと開発されたのがリーンバーン（希薄燃焼）エンジンです。最大出力空燃比はおおよそ13であるが、図10に示すように三元触媒システムを用いているエンジンでは理論空燃比を境に、狭い範囲で制御されている。リーンバーン燃焼では、さらに、空燃比を大きくして（21.5~23.3）近辺の安定運転可能範囲で燃やそうとするものである。空燃比をあまり大きく、つまり薄くすると燃焼が不安定になり、運転が出来なくなる。

このリーンバーンエンジンでは従来のエンジンと同様に図11に示すように、シリンダーの手前の吸気ポートで燃料を噴射し、いろいろの工夫によりトルク変動の許容限界の上限を空燃比25あたりまでのばしている。

リーンバーンエンジンではどうして燃費が向上するのか、それは、従来のエンジンより多量の空気を吸込んで燃料と良く混合させ、安定した燃焼を行うため、熱損失とポンピングロスが低減し、熱効率が上がったことによる。エンジンの出力を調節するにはスロットルバルブの開き具合をかせて吸込む空気量を調節する。

低出力時にはスロットルバルブは閉じ気味にするので、シリンダー内に吸込んだ空気圧力は低くなり、ピストンの下降時に負の仕事をすることになる。さらに、空気が狭いところを通過しなければならないので摩擦損失がでる。リーンバーン燃焼を行うとスロットルバルブを開き気味に