

博士論文

船用ディーゼル機関から排出される  
粒子状物質の粒径分布計測に関する研究

佐々木 秀次

## 目次

第1章 序論	
1.1 はじめに	1
1.2 船用ディーゼル機関の特徴	2
1.2.1 2ストローク機関	3
1.2.2 過給機関	4
1.2.3 長行程化と最高圧力の増大	4
1.2.4 電子制御機関	4
1.2.5 現状の船用ディーゼル機関の出力	5
1.2.6 船用機関の運転特性	6
1.3 排ガスに係る規制と基準値	6
1.3.1 陸上における大気環境基準	6
1.3.2 陸上における排出規制	7
1.3.3 船舶の排ガス規制	9
1.4 粒径による粒子状物質の定義	11
1.4.1 空気動力学径	11
1.4.2 モビリティ径	11
1.4.3 粒径による定義	12
(a) 浮遊粒子状物質	
(b) PM10	
(c) PM2.5	
(d) Nano Particles、Ultrafine Particles	
1.5 PMの発生源と一次粒子生成・二次粒子生成	13
1.6 船舶のディーゼル機関から排出される粒子状物質	14
1.7 船用ディーゼル機関の排ガス計測	18
1.8 本研究の目的と論文の構成	19
第2章 PM計測に関する希釈手法	
2.1 全流希釈法と分流希釈法	22
2.2 分流希釈法に用いる希釈トンネル	24
2.3 ホットダイリューション	24
2.4 ホットダイリューションを用いた計測例	26

### 第3章 実験装置の概要

3.1 供試機関	28
3.1.1 船用2ストロークディーゼル機関	28
3.1.2 船用4ストロークディーゼル機関	32
3.2 希釈トンネル	34
3.3 希釈空気前処理系統	35
3.4 二次希釈器	36
3.4.1 ロータリーディスク型希釈器	36
3.4.2 エジェクター型希釈器	38
3.5 計測器	39
3.5.1 排ガス分析計	39
3.5.2 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)	40
3.5.3 Electric Low Pressure Impactor (ELPI)	43
3.5.4 SMPS と ELPI の計測範囲と特性	45

### 第4章 希釈トンネルの希釈率、希釈空気温度が計測される粒径分布へ及ぼす影響

4.1 実験の目的および概要	46
4.2 低負荷率時の排ガスによる検討	47
4.2.1 実験装置および方法	47
4.2.2 実験ケース	48
4.2.3 希釈空気の計測	49
4.2.4 SMPS による粒径分布の計測	52
4.2.5 SMPS による重量濃度の検討	56
4.2.6 SMPS によって計測した総個数濃度	59
4.2.7 ELPI による粒径分布の計測	59
4.2.8 ELPI による総個数濃度	61
4.3 機関負荷率75%時の排ガスによる検討	62
4.3.1 実験ケース	62
4.3.2 SMPS による粒径分布の計測	62
4.3.3 SMPS による重量濃度の検討	68
4.3.4 ELPI による検討	70

4.3.5 ELPI によって計測した総個数濃度	73
4.4 機関負荷率 75 %と負荷率 30 %の粒径分布計測結果の比較	73
4.4.1 SMPS による小さい粒径領域の比較	73
4.4.2 ELPI による粒径分布の比較	76
4.4.3 SMPS と ELPI の粒径分布の比較	77
4.4.4 ELPI の計測結果とフィルタ重量濃度の比較	79
4.5 まとめ	79
第 5 章 ホットダイリューションによる船用 4 ストロークディーゼル機関の 排ガスの粒径分布計測	
5.1 実験の目的および概要	81
5.2 実験装置および方法	81
5.3 発電機特性の粒径分布	83
5.3.1 SMPS による個数濃度粒径分布	83
5.3.2 SMPS による重量濃度粒径分布	85
5.3.3 希釈排ガスの粒径分布変化	88
5.3.4 ホットダイリューションと希釈トンネル希釈の粒径分布比較	93
5.4 船用特性の粒径分布	97
5.4.1 SMPS による個数濃度粒径分布	97
5.4.2 SMPS による重量粒径濃度	99
5.5 運転特性、負荷率と粒径分布の関係	101
5.5.1 船用特性と発電機特性の粒径分布比較	101
5.5.2 排出される個数濃度	104
5.6 まとめ	108
第 6 章 船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の PM	
6.1 フィルター計測による船用 4 ストロークディーゼル機関と 船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の PM の違い	109
6.2 実験の目的および概要	110
6.3 実験装置および方法	111
6.4 SMPS による粒径分布の計測	112
6.4.1 ホットダイリューションによる粒径分布	112
6.4.2 ホットダイリューションによる船用 2 ストロークディーゼル機関と 船用 4 ストローク機関の比較	118

6.5 希釈トンネル希釈による粒径分布	121
6.5.1 SMPS による粒径分布計測	121
6.5.2 ELPI による粒径分布計測	124
6.5.3 SMPS によるホットダイリューションと希釈トンネルによる希釈の比較	127
6.6 まとめ	131
第7章 HFO 運転時の PM 粒径分布	
7.1 供試燃料油	133
7.2 実験の概要	134
7.3 実験装置および方法	134
7.3.1 実験装置の概要	134
7.3.2 供試機関の運転方法と計測タイミング	135
7.4 SMPS による粒径分布計測	136
7.4.1 ホットダイリューションによる粒径分布	136
7.4.2 ホットダイリューションした排ガスの SMPS による HFO と A 重油の比較	138
7.5 希釈トンネルによる希釈排ガスの粒径分布計測	141
7.5.1 SMPS による粒径分布計測	141
7.5.2 SMPS によるホットダイリューションと希釈トンネルによる希釈の比較	143
7.5.3 ELPI による粒径分布計測	144
7.6 まとめ	145
第8章 凝縮性成分の核生成と条件別の計測法	
8.1 船用4ストロークディーゼル機関の排ガスにおける希釈の状況	146
8.2 船用2ストロークディーゼル機関の排ガスにおける希釈の状況	152
8.3 核生成領域の検討	153
8.4 目的による条件別の計測法	155
第9章 結論	159
参考文献	164
謝辞	174

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

ディーゼル機関は、ルドルフ・ディーゼル博士(Dr. Rudolf C.K., Diesel)によって1893年に発明され、1897年にアウグスブルグ(MAN社)によって最初の商用機が製作され、工場の動力源として実用化された。ディーゼル機関は他の熱機関と比べて単体での効率が最も高く、単位出力当たりの二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出が少ない<sup>1-1)</sup>。低速、中速機関では、低質な燃料も使用が可能であることから、経済性にも優れている。そのため、車輛の主機関、陸上の小規模発電施設の発電機原動機などで、幅広く利用されており、特に船舶の主機関、発電機関としては、最も多く利用されている。

ディーゼル機関は上述の利点があるが、その反面排ガスに含まれる粒子状物質(Particulate Matter, PM)、窒素酸化物(Nitrogen Oxide, NO<sub>x</sub>)、炭化水素(Hydrocarbon, HC)等の有害物質は他の機関と比較して多く<sup>1-2)</sup>、また、船舶では燃料油の硫黄分に起因する硫黄酸化物(Sulfur Oxide, SO<sub>x</sub>)も多い。これらの大気汚染物質に起因する、酸性雨や光化学スモッグ等の環境への悪影響<sup>1-3)</sup>、呼吸器障害や発ガン要因等の健康への悪影響が危惧されている<sup>1-4~11)</sup>。

現在、陸上の工場、事業所等からの排気、および自動車からの排ガスに対しては、さまざまな規制が行われてきており、さらに、陸上では環境基準値が設けられ、今後のさらなる取り組み強化が展開されている。

一方、船舶からの排出ガスに関しては、国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)において船舶からの大気汚染の防止に関連した国際的取り決めを確立すべく、1990年初頭より検討が開始され、1997年秋に船舶大気汚染に関する新たな取り決め<sup>1-12)</sup>が採択された。2005年5月にこの規制が発効し、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、揮発性有機化合物(VOCs)、ハロンおよびフロン類に対する規制が開始した。さらに2008年10月に開催されたIMOの海洋環境保護委員会(MEPC)においてNO<sub>x</sub>およびSO<sub>x</sub>規制の強化案が採択されている。一方、船舶から排出される粒子状物質は、計測が難しいこと等から、それに関する直接的な規制は行われておらず、船舶からの粒子状物質については、SO<sub>x</sub>規制により燃料中の硫黄分が制限されるため、これに伴う削減は期待できるとされている。

船用ディーゼル機関から排出されるNO<sub>x</sub>は、その削減手法の研究に伴って様々な形式の機関を対象に排出濃度の計測、排出特性の把握が行われているが<sup>1-13~17)</sup>、粒子状物質に関しては規制の対象となっていないこともあって、計測例は少ない。特に、大型船の主機関として使用されている大形2ストローククロスヘッド型低速ディーゼル機関に関しては、陸上の実験用機関がほとんど存在していなかったことから特に計測例が少ない。また、大気汚染物質の低減対策についてもこれまではNO<sub>x</sub>が中心であり<sup>1-18~27)</sup>、粒子状物質についてはほとんど検討されていない。この様に船用ディーゼル機関に関する粒子状物質の計測および低減対策技術の開発は、自動車用や陸上用の機関に比べて非常に遅れているのが現状

である。

しかし、粒子状物質が環境や健康に悪影響を及ぼしていることと、計測技術の発展<sup>1-28~32)</sup>、環境意識の更なる高まり等から、船舶から排出される粒子状物質に関しても例外なく、計測技術の研究、排出状態の把握を進めていく必要がある。

## 1.2 船用ディーゼル機関の特徴<sup>1-33-36)</sup>

ここでは、船舶で使用されるディーゼル機関に関して用途と特徴を述べる。船舶で使用される機関は、船舶の推進のための動力源となる機関を主機(もしくは主機関)と呼び、それ以外の機関(発電機原動機等)を補助機関と呼ぶ。これらの機関は、機関速度により、低速機関(Low speed engine)、中速機関(Medium speed engine)、高速機関(High speed engine)に分類される。これらの分類は、明確な区分はないが、平均ピストン速度によって分類するのが適当とされ<sup>1-37)</sup>、概ね表 1-1 に示す分類とされている。

表 1-1 機関速度の分類<sup>1-37)</sup>

	種類	機関回転数 [rpm]	平均ピストン速度 [m/s]
4-stroke engine	低速機関	100 ~ 500	4.0 ~ 6.0
	中速機関	500 ~ 1000	6.0 ~ 9.0
	高速機関	1000 ~ 2100	9.0 ~ 12.0
2-stroke engine	低速機関	100 ~ 600	4.0 ~ 5.5
	中速機関	600 ~ 1000	5.5 ~ 7.0
	高速機関	1000 ~ 1800	7.0 ~ 10.0

現在、大型船舶の主機では、主に大型低速 2 ストローク機関が用いられる。この機関は回転数が低速であるため、船舶のプロペラに直結してプロペラを回転させ、推進のため用いられる。この大型低速 2 ストローク機関の開発は、MAN 社、Win-GD 社(元バルチラ社、ズルザー社)、三菱重工船用機械エンジン(三菱重工業)の 3 社が行っており、ライセンス方式によって多くのメーカーにて製作されている。日本では表 1-2 に示すように、三菱重工業の機関を、三菱重工業とともに、神戸発動機、赤阪鐵工所、宇部興産機械にて製作している。また、MAN 社の機関を、三井造船(小口径機関はマキタ)、川崎重工業(小口径機関は阪神内燃機)、日立造船で製作しており、Win-GD 社の機関を、ディーゼルユナイテッド(旧石川島播磨重工業)、三菱重工業、日立造船にて製作している。

表 1-2 ライセンサーと日本における大型 2 ストローク機関  
のライセンサー

ライセンサー	ライセンサー
三菱重工業	神戸発動機 赤阪鐵工所 宇部興産機械
MAN	三井造船・マキタ 川崎重工業・阪神内燃機 日立造船
Win-GD (バルチラ)	ディーゼルユナイテッド 三菱重工業 日立造船

中型の船舶、小型の船舶、機関搭載スペースに制約のある客船等では低速 4 ストローク機関、中速 4 ストローク機関、高速 4 ストローク機関が主機関として用いられる。

また、大型の船舶から小型の船舶まで共通して、補助機関である発電機原動機では中速 4 ストローク機関、高速 4 ストローク機関が用いられている。

ルドルフ・ディーゼル博士によって開発され、最初に製作された商用機は 4 ストローク機関であった。この頃、船舶の主機関は蒸気往復動機関、蒸気タービンが主流であったが、第 2 次世界大戦後ディーゼル機関が本格的に使用され始め、特に 1973 年、1978 年の石油危機から、燃料消費率の低いディーゼル機関の採用が進んだ。船舶主機関としてディーゼル機関が本格的な外洋航行船に採用されたのは、1912 年に就航した「Selandia 号」(4,950 GT)が最初とされており、その機関はシリンダ数が 6 の単動 4 ストローク機関(Bore:530 mm, Stroke:730 mm, 回転数:145 rpm)で 2 基搭載された。また、日本における最初の採用は、1924 年に就航した貨客船「音戸丸」(688 GT)である。

### 1.2.1 2 ストローク機関

商用機として 4 ストローク機関が使われ始め、その後間もなく、デスランド・デュフォーによって 2 ストローク機関が開発された。船舶では、機関の重量あたりの出力が大きいことによる機関室の省スペース化やカーゴスペースの増加が行えることから、2 ストローク機関の有用性が認められ、さらに、大出力とするため、ピストンの上部と下部に燃烧室を持つ 2 ストローク複動機関も開発された。しかし、複動機関は構造が複雑であり、船用燃料油の重質油化に伴う掃気口、ピストン棒のメンテナンスが難しく、機関の故障が多発したため 1958 年にこの機関の製作が中止された。現在、製作されている船用 2 ストローク機関は、全てが単動機関である。



### 1.2.2 過給機関

ディーゼル機関の最大出力は、燃料油の燃焼に必要な空気量によって制限され、出力の増大を図るにはより多くの給気(掃気)を燃焼室内に送入する必要がある。その送入の手段として、給気(掃気)を排気タービンによって駆動するブロアによって密度を高め、燃焼室内に送り込むことで出力を増大する過給機関が開発された。排気過給機関は、アルフレッド・ブッチ博士(Dr. Alfred Buchi)によって 1926 年に試験された。しかし、材料の耐熱性能に問題があることから、過給機関が実用化されたのは 1952 年であった。その後、1975 年には、2 台の過給機を掃気に直列に用いることで、過給圧力を向上させる 2 段過給機関が開発され、その翌年には 1 段の過給機で十分な掃気圧力を得ることができる過給機が開発された。

その後、船用 2 ストローク機関では、熱効率向上の観点と、比較的高い負荷率で長時間運転される使用状況の背景、排気干渉の解決の点から、高負荷率時において熱効率の良い静圧過給方式が一般的に採用されている。

### 1.2.3 長行程化と最高圧力の増大

機関の出力( $P_s$ )は式(1)で表される。

$$P_s = \frac{P_e \cdot L \cdot A \cdot N \cdot k \cdot i}{75 \times 60} \quad \dots (1)$$

ここで、 $P_e$ ：平均有効圧、 $L$ ：行程、 $A$ ：ピストン面積、 $N$ ：機関回転数、 $k$ ：シリンダ数、 $i$ ：定数である。

船舶は燃料消費率低減のため、推進用大口径プロペラの採用、低回転化によるプロペラ効率向上が行われている。ピストン面積が等しい場合、行程と平均有効圧の積は機関の出力に比例する。そのため、シリンダ直径とシリンダ数を変えずに出力の増大と機関回転数の低回転化を行う場合、平均有効圧、行程を増加させる必要がある。大型船舶の 2 ストローク機関では、ユニフロー掃気を採用していることもあり、超ロングストローク化による出力向上と機関回転数の低速化が進んでいる。

### 1.2.4 電子制御機関<sup>1-38~42)</sup>

近年、燃料消費率の低減、窒素酸化物( $NO_x$ )等の環境汚染物質の低減、機関の低負荷領域の長時間運転を可能とすることを目的として電子制御機関が発展、普及してきた。またこれは、電子制御機器、高速電磁弁等のデバイスの信頼性が向上したことも普及の要因である。船用 2 ストローク低速ディーゼル機関では、カム軸によって駆動していた燃料噴射ポンプの動作、排気弁の駆動、始動時の始動空気管制弁の開閉動作、シリンダ内へのシリンダ注油の電子制御化によって作動させることで最適化する電子制御機関が商用化されている。また、船用 4 ストローク機関では、燃料噴射、始動時の始動空気管制、シリンダ内へ

のシリンダ注油を電子制御化する電子制御機関の開発が進められている。

船用 2 ストローク機関の燃料噴射ポンプの電子制御化は、カム軸によって駆動していた部分に、MAN 社、三菱重工業の方式では、油圧アクチュエータを設置し、その油圧アクチュエータの駆動力になる高圧油(高圧作動油)のアクチュエータ出入りを高速応答電磁弁にて制御している。また、Win-GD 社では、コモンレール方式を製品化しており、燃料油を約 1,000 bar に加圧しコモンレールに蓄圧した後、高圧管の途中に設置してある、制御油圧による開閉駆動の噴射弁を開弁することによって燃料を噴射させる。この噴射弁を駆動する制御油圧を電磁弁によって制御している。船用 4 ストローク機関の燃料噴射は、コモンレール方式を使用する研究が進められており、この方式は、船用 2 ストローク機関のコモンレール方式と異なり、電磁開閉方式の燃料噴射弁を開閉させることで燃料噴射を行うものである。船用 2 ストローク機関の排気弁駆動は、従来のカム軸によってプッシュロッドを突き上げロッカーアームを介して排気弁を開閉駆動していたが、シリンダヘッド部分のコンパクト化やメンテナンスの効率化から、全ての機関の標準型式で油圧駆動となっている。この油圧駆動は、カムによって排気弁作動油のプランジャーを突き上げ、油圧回路を介して排気弁の開閉動作を行っている。電子制御機関の排気弁駆動は、このカム軸による突き上げ動作を、電磁弁によって制御される制御油圧によって行っている。

#### 1.2.5 現状の船用ディーゼル機関の出力

各ライセンスにおける船用 2 ストロークの商用機関の最小出力機関、最高出力機関を表 1-3 に示す。主機関に使用される 2 ストローク機関では、上記 1.2.1~1.2.4 の改良が行われ、現在の商用機関の出力は、三菱重工業の方式では 1,325 kW (シリンダ径：330 mm、4 シリンダ、157 rpm)から、35,520 kW (シリンダ径：880 mm、8 シリンダ、80 rpm)、MAN 社の方式では、1,950 kW (シリンダ径：300 mm、5 シリンダ、148 rpm)から、82,440 kW (シリンダ径：950 mm、12 シリンダ、80 rpm)、Win-GD 社の方式で、3,475 kW (シリンダ径：350 mm、5 シリンダ、142 rpm)から、80,080 kW (シリンダ径：960 mm、14 シリンダ、102 rpm)が製作されている。

表 1-3 船用 2 ストロークの商用機関の最小出力機関、最高出力機関

ライセンサー/型式		出力[kW]/ 回転数[rpm]		ボア [mm]	シリンダ 数	ストローク[mm] (平均ピストン 速度 [m/s])	ボア ストローク 比	SFOC (100 %) g/kwh
三菱重工業	4UEC33LS	1,325	157	330	4	1,050 (5.5)	3.18	171.7
	8UEC80LSE-Eco-B1	35,520	80	800	8	3,150 (8.4)	3.94	166.0
MAN	5S30ME-B9	1,950	148	300	5	1,328 (6.6)	4.43	172.0
	12G95ME-C9	82,440	80	950	12	3,460 (9.2)	3.64	166.0
Win GD	W5X35	3,475	142	350	5	1,550 (7.3)	4.43	174.0
バルチラ	14RT-flex96C	80,080	92	960	14	2,500 (7.7)	2.60	172.0

### 1.2.6 船用機関の運転特性

船用機関の運転特性(機関回転数とトルク、出力の関係)には、船用特性と発電機特性がある。船用特性(またはプロペラ特性と呼ぶ)(Propeller load operation)は出力軸にプロペラが装着されている状態の運転で、理論上、軸出力は機関回転数の 3 乗に比例する運転特性である。発電機特性(Constant speed operation)は、発電機の前動機として使用される状態の運転で、機関回転数は一定で、軸出力は、トルクに比例する運転特性である。

一般的には船舶の主機関、補機関の両方に採用される船用 4 ストロークディーゼル機関では、船用特性と発電機特性の 2 つの運転特性に対応しており、船舶の主機関に採用される船用 2 ストロークディーゼル機関では、船用特性に対応した連続運転が行える。

## 1.3 排ガスに係る規制と基準値

現在、陸上の工場、事業所等からの排ガス、および自動車からの排ガスに対しては、さまざまな規制が行われてきており、さらに、陸上では大気汚染に係る環境基準値が設けられ、今後のさらなる取り組み強化が展開されている。ここでは、陸上における大気環境基準、船舶の排ガス規制に関して、これらの基準値、規制に関して整理する。

### 1.3.1 陸上における大気環境基準

大気汚染に係る環境基準を表 1-4 に示す。陸上では環境基本法によって、人の健康を保護する上で維持することが望ましい基準として、大気汚染に係る環境基準が定められている。大気汚染に係る環境基準では、1. 大気汚染に係る環境基準、2. 有害大気汚染物質(ベンゼン等)に係る環境基準、3. ダイオキシン類に係る環境基準、4. 微小粒子状物質に係る環境基準に分類され、1. 大気汚染に係る環境基準では、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)、浮遊粒子状物質(SPM)、二酸化窒素(NO<sub>x</sub>)、光化学オキシダント、2. 有害大気汚染物質(ベンゼン等)に係る環境基準では、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、3. ダイオキシン類に係る環境基準ではダイオキシン類、4. 微小粒子状物質に係る環境基準では、50 %分離粒径 2.5 μm 以下の大気中に浮遊する粒子についての環境基準が定められている。さらに、光化学オキシダントの生成防止のため、日最高 1 時間値 0.06 ppm に対応する午前 6 時から 9 時までの非メタン炭化水素の 3 時間平均値は、0.20 ppmC から 0.31 ppmC の範囲にあることを指針としている。さらに、粒子状物質の環境基準では、2009 年 9 月に新たに微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)の環境基準が告示されている。これは、工業専用地域や車道等の一般公衆が通常生活していない地域を除いて、50 %分離粒径 2.5 μm 以下の微粒子に対して、1 年の平均値が 15 μg/m<sup>3</sup> 以下で、かつ、1 日の平均が 35 μg/m<sup>3</sup> 以下を基準値としている。それ以前の環境基準では粒径 10 μm 以下の浮遊粒子状物質を対象としていたが、微小な粒子になるほど重量あたりの表面積が多いことなどから、呼吸器や循環器への悪影響が強いことが示唆されている<sup>1-43, 1-44</sup>)とともに、重力沈降が非常に小さく大気中に長時間浮遊する<sup>1-45</sup>)ため、より微小な粒子に関する基準が設定された。

表 1-4 大気汚染に係る環境基準

	物質	環境上の条件
1.大気汚染に係る環境基準	二酸化硫黄(SO <sub>2</sub> )	1時間値の1日平均値が0.04ppm以下であり、かつ、1時間値が0.1ppm以下
	一酸化炭素(CO)	1時間値の1日平均値が10ppm以下であり、かつ、1時間値の8時間平均値が20ppm以下
	浮遊粒子状物質(SPM)	1時間値の1日平均値が0.10mg/m <sup>3</sup> 以下であり、かつ、1時間値が0.20mg/m <sup>3</sup> 以下
	二酸化窒素(NO <sub>2</sub> )	1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内又はそれ以下
	光化学オキシダント(O <sub>x</sub> )	1時間値が0.06ppm以下
2.有害大気汚染物質(ベンゼン等)に係る環境基準	ベンゼン	1年平均値が0.003mg/m <sup>3</sup> 以下
	トリクロロエチレン	1年平均値が0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
	テトラクロロエチレン	1年平均値が0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
	ジクロロメタン	1年平均値が0.15mg/m <sup>3</sup> 以下
3.ダイオキシン類に係る環境基準	ダイオキシン類	1年平均値が0.6pg-TEQ/m <sup>3</sup> 以下
4.微小粒子状物質に係る環境基準	微小粒子状物質	1年平均値が15μg/m <sup>3</sup> 以下であり、かつ、1日平均値が35μg/m <sup>3</sup> 以下

### 1.3.2 陸上における排出規制

大気環境の保全を目的とする大気汚染防止法が1968年に制定された。この法律では、陸上の固定発生源(工場及び事業所)から排出される大気汚染物質である、ばい煙、揮発性有機化合物、粉じんに対する排出の規制、有害大気汚染物質対策の推進、自動車排出ガスに係る許容限度等が制定されている。

ばい煙は、燃焼によって発生する硫酸化物、ばいじん、有害物質(カドミウム及びその化合物、塩素及び塩化水素、フッ素、フッ化水素及びフッ化ケイ素、鉛及びその化合物、窒素酸化物)と定義されており、発生施設を33項目に分類し、一定規模以上の施設をばい煙発生施設と定め規制している。また排出基準は、一般排出基準、特別排出基準、上乘せ排出基準、総量規制基準に大別されている。

揮発性有機化合物は、大気放出時、飛散時に気体である有機化合物に対して、発生施設を9項目に分類し、一定規模以上の施設を揮発性有機化合物排出施設と定め規制している。

粉塵に関して、物の破砕やたい積により発生、飛散する物質を対象に、発生施設を5項目に分類し、一定規模以上の施設を一般粉塵発生施設と定め規制している。また、石綿を対象に人の健康に被害を生じる恐れのある物質を特定粉塵として、発生施設を9項目に分類し、一定規模以上の施設を一般粉塵発生施設と定め規制している。

自動車排出ガスに係る許容限度に関しては、CO(一酸化炭素)、NMHC(非メタン炭化水素)(二輪車に限ってはHC(炭化水素))、NO<sub>x</sub>(窒素酸化物)、PM(粒子状物質)に関して、単位走行距離あたり、もしくは、単位出力時間あたりの排出量を規制しており、年々強化され

ている。また、1995年の大気汚染防止法の改正により、使用する自動車燃料油品質規制として、ガソリンに関して、鉛、硫黄、ベンゼン、メチルターシャリーブチルエーテル(MTBE)、酸素分、軽油に関しては、硫黄、セタン指数、90パーセント流出温度の許容限度が規制されている。それぞれの許容限度をまとめた自動車燃料品質規制値を表1-5に示す。

このように陸上の発生源からの粒子状物質の排出量が低減されると、陸上の環境濃度に対して、沿岸を航行する船舶や、港内に停泊、仮泊する船舶から排出される粒子状物質の影響は相対的に大きくなると考えられ、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の粒径分布や個数濃度の把握が最重要課題であると考えられる。特に、直径の小さい粒子は大気における浮遊時間が長いことから、公海上を航行する船舶においても影響があると考えられる。

表 1-5 自動車燃料品質規制値

種類	物質	許容限度
ガソリン	鉛	検出されないこと
	硫黄	0.001 mass%以下
	ベンゼン	1 vol%以下
	メチルターシャリーブチルエーテル(MTBE)	7 vol%以下
	酸素分	1.3 mass%以下 (バイオエタノール10 vol%混合ガソリン、及び、ETBE 22 vol%混合ガソリンにおいては、1.3 mass%を超え 3.7 mass%以下)
軽油	硫黄	0.001 mass%以下
	セタン指数	45 以上
	90 パーセント流出温度	摂氏 360 度以下

### 1.3.3 船舶の排ガス規制

船舶から排出される汚染物質は、海洋汚染防止条約(MARPOL73/78、International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto)によって規制されている。MARPOL 73/78 は、船舶の運航中や、事故の際、環境への悪影響を防止するための処置が定められており、2つの議定書と6つの附属書から構成される。MARPOL 73/78 の構成を表 1-6 に示す。船舶の排ガス規制に関しては、1997年議定書で追加され、2005年5月19日に発効した附属書にて、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、揮発性有機化合物(VOCs)、ハロンおよびフロン類に対する規制が開始した。

表 1-6 MARPOL 73/78 の構成

構成		内容
本文	条約本文	一般的義務、適用、条約の改正手続き及び発効要件等
議定書	議定書 I 有害物質に係る事件の通報に関する規則	事故等により条約で規制する物質の排出が行われた場合の通報義務、その手続き等について規定
	議定書 II 紛争解決のための仲裁に関する規則	条約の解釈又は適用に関する締約国間の紛争の解決のための仲裁手続き等について規定
附属書	附属書 I 油による汚染の防止のための規則	<1983年10月2日発効> 船舶の運航に伴う油の排出を規制するための排出方法及び設備基準並びにタカ事故による油の流出を最小に押さえるための緊急措置及び構造基準を定め、これらに係る検査及び証書について規定
	附属書 II ばら積みの有害液体物質による汚染の規制のための規則	<1987年4月6日発効> 有害液体物質をばら積輸送する船舶の貨物タカの洗浄方法、洗浄水等の排出方法及びこれに係る設備の要件並びに事故時の汚染を最小にするための構造要件等を定め、これらに係る検査及び証書について規定
	附属書 III 容器に収納した状態で海上において運送される有害物質による汚染の防止のための規則	<1992年7月1日発効> 容器等に収納されて運送される有害物質の包装方法、容器の表示、積付け方法等について規定
	附属書 IV 船舶からの汚水による汚染の防止のための規則	<2003年9月27日発効> 船舶の運航中に発生する汚水の排出方法、検査、証書の発給等について規定
	附属書 V 船舶からの廃物による汚染の防止のための規則	<1988年12月31日発効> 船舶の運航中に発生するゴミの処分方法等について規定
	附属書 VI 船舶からの大気汚染防止のための規則	<2005年5月19日発効> 船舶の運航中に発生する機関からの窒素・硫黄酸化物等の排出規制、船上焼却装置に関する規制、検査、証書の発給等について規定

NO<sub>x</sub> に関しては、130 kW を超えるディーゼル機関を対象に規制されている。この規制では、発効後 5 年ごとに技術向上を踏まえた規約強化が計画されており、2008 年の IMO の環境環境保護委員会(MEPC 58)において、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の規制案が採択されており、NO<sub>x</sub> に関しては 2011 年から 2 次規制、2016 年から指定海域(Emission Control Areas、ECA) において 3 次規制が発効する予定で審議が進められている。MARPOL 73/78 による NO<sub>x</sub> 規制値を表 1-7 に示す。2 次規制では、1 次規制に対して約 15~22 %の排出量削減が求められ、3 次規制では 2 次規制からさらに、約 80 %の削減が求められている。

表 1-7 MARPOL 73/78 による NO<sub>x</sub> 規制値

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh)		
		n < 130	n = 130 – 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45.n^{-0.2}$	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44.n^{-0.23}$	7.7
III	1 January 2016*	3.4	$9.n^{-0.2}$	2.0

n = engine's rated speed (rpm)

SO<sub>x</sub> に関しては、SO<sub>x</sub> 生成要因となる燃料油の硫黄分規制を行っている。また、SO<sub>x</sub> について排気後処理技術等の代替技術による達成も可とされている。燃料油の硫黄分規制は、指定海域(SO<sub>x</sub> Emission Control Area)と一般海域に区別され、それぞれの規制値が設定されている。燃料油に含まれる硫黄分濃度の規制を表 1-8 に示す。表 1-5 で示した自動車燃料品質規制値と比較すると、硫黄分濃度規制値は大きく異なり、船舶に対する規制が自動車と比較して緩いことが分かる。

表 1-8 MARPOL 73/78 による燃料油硫黄分濃度の規制

	一般海域	指定海域
現行	4.50% m/m	1.50% m/m
1 July 2010	↓	1.00% m/m
1 January 2012	3.50% m/m	↓
1 January 2015	↓	0.10% m/m
1 January 2020	0.50% m/m	↓

揮発性有機化合物(VOCs)に関しては、指定された規制港湾において貨物の荷役を行う一定以上のタンカー、LNG 船に対して、揮発性有機化合物放出防止設備を設置および使用することが決められている。

ハロンおよびフロン類に関しては、すべての船舶を対象に、ハロン、CFC、HCFC、HBFC のオゾン層破壊物質を含む設備を搭載して航行してはいけないと決められている。

PM に関して MARPOL 73/78 条約では、SO<sub>x</sub> 規制により燃料中の硫黄分が制限されるため、これに伴う削減は期待できるとされており、現在のところ米国における 3,700 kW 未満の船用機関に対する米国 EPA(US Environmental Protection Agency)の規制<sup>1-46)</sup>を除いては、PM に対する直接的な規制は行われていない。

CO<sub>2</sub> の削減に関連して、ディーゼル機関のみではなく、船舶としてのエネルギー効率関連の条約が、2013 年 1 月 1 日に発効した。これは、2011 年に開催された海洋環境保護委員会(MEPC62)において、エネルギー効率設計指針(EEDI, Energy Efficiency Design Index)、および船舶エネルギー効率管理計画書(SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)を強制化するため、MARPOL 条約付随書 の改正案が採択された物である。EEDI は、1 トンの貨物を 1 マイル輸送する際に排出される二酸化炭素重量で定義される。この条約では、船種毎に削減率が決定されており、2025 年 1 月 1 日以降に完工する大型船舶に関して船種毎に決められている計算式から 30 %削減する必要がある。

#### 1.4 粒径による粒子状物質の定義

ディーゼル機関から排出される粒子状物質は、様々な密度や、形が不均一なため、粒径に対して一定の基準が必要となり、空気動力学径やモビリティ径等が基準として使用される。また、大気中の粒子は、大きさ(粒径)、その分級方法で分類されており、各種の定義がされている。ここでは、粒子の分級方法と、関連する定義に関して記述する。

##### 1.4.1 空気動力学径

空気動力学径(Aerodynamic diameter)は空気などの粘性流体中の粒子の物理的性質によって分級される粒径のことである。ディーゼル機関から排出される PM は一般的に、直鎖状で不規則な形をした粒子であるため、直径を測ることは一般には難しい。そのため、密度・形状が未知の粒子と終末沈降速度が等しい 1 g/cm<sup>3</sup> の球の直径を考え、この量が空気動力学径と呼ばれる。すなわち、空気動力学径は対象とする粒子と空気中で同じ挙動をする仮想的な水滴の直径のことである。通常、空気動力学径による分級は、インパクトが用いられる。インパクトは複数のステージで構成されており、各ステージには複数もしくは単一のホールがある。PM 粒子がこのホールを通過するとき速度が上昇し、重量の重たい粒子に関してはそのままホール出口正面の捕集板へと衝突するが、重量の軽い PM に関しては空気の流れにそって次のステージへと輸送される。各ステージで捕集板へ衝突して捕集された PM 重量あるいは個数が粒径毎に分級された PM の重量あるいは個数となる。

##### 1.4.2 モビリティ径

モビリティ径(Mobility diameter)とは、計測する粒子に帯電させ、その帯電粒子が電界を通過する際の軌跡の違いにより分級された粒径のことである。通常、モビリティ径による分級計測には、DMPS (Differential Mobility Particle Sizer)や SMPS (Scanning Mobility



Particle Sizer)が用いられる。これらは、DMA (Differential Mobility Analyzer)によって分級をおこなっている。DMA は二重円筒型をしており、内側の円筒と外側の円筒の間に清浄空気の空気流を形成する。また、内側の円筒、外側の円筒は電極となっておりその間に高電圧を印可する。計測する粒子は性状空気の空気流の上流部の外側円筒近傍より流入し、清浄空気の空気流に沿って輸送される。ここで、内側円筒電極と外側円筒電極による電界によって計測する粒子は内側電極に引き寄せられる。内側円筒の下流には空気の流出する孔があり、電極間に印可する電圧を変化させた時に、この孔に流入するかしないかによって分級している。

その他、連続的な計測や、ディーゼル機関から排出される粒子状物質の粒径分布計測に適用するのは難しいが、光学顕微鏡や電子顕微鏡を使用し、直接的に計測を行う幾何学粒径や、粒子に光を照射し、その散乱光によって計測する光学相当径等がある。

#### 1.4.3 粒径による定義

大気中の粒子は、粒径によって下記に記す定義が行われている。

##### (a) 浮遊粒子状物質

浮遊粒子状物質(Suspended Particulate Matter, SPM)は、前述(1.4 項(1))の環境基本法によって定義が行われており、大気中に浮遊する粒子状物質であってその粒径が  $10 \mu\text{m}$  以下の物と定義されている。

##### (b) PM<sub>10</sub>

PM<sub>10</sub>は、米国 EPA によって、1987年に設定された環境基準(Total Suspended Particulate (TSP) air quality standard with a PM-10 standard)によって定義されており、空気動力学径が  $10 \mu\text{m}$ (50% 分離径)以下の物と定義されている。SPM は、全ての粒子が  $10 \mu\text{m}$  以下であるのに対して、PM<sub>10</sub> は粒径  $10 \mu\text{m}$  の粒子が 50%分離される粒径を指している。

##### (c) PM<sub>2.5</sub>

PM<sub>2.5</sub>(Fine Particles)は、PM<sub>10</sub>と同様に米国 EPA によって、1997年に追記された環境基準(Area Designations for 1997 Fine Particle (PM<sub>2.5</sub>) Standards)によって定義されており、空気動力学径が  $2.5 \mu\text{m}$ (50% 分離径)以下の物と定義されている。

##### (d) Nano Particles、Ultrafine Particles

Nano Particles (ナノ粒子)は、研究領域によって異なり、多くの定義が存在する。Kittelsonによると、Nano Particle と Ultrafine Particle に関しては明確な定義がされていないと前置きした上で、 $0.05 \mu\text{m}$  以下の粒子を Nano Particle、 $0.1 \mu\text{m}$  以下び粒子を Ultrafine Particle として扱っており、ディーゼル機関の PM 粒径分布に関する研究におい

て多く採用されている。ISO では作業環境分野において ISO (TR27628 : 2007)で、Nano Particles を直径 100 nm 以下の粒子で、幾何学粒径、光学相当径、空気動力学径、モビリティ径等の全ての粒径に対応するとしており、使用される分野によって異なる定義となっている場合が多いと考えられる。

#### 1.5 PM の発生源と一次粒子生成・二次粒子生成

表 1-9 に大気中に浮遊する粒子状物質の主な発生源を示す。粒子状物質の生成は、一次粒子生成、二次粒子生成に分類される。一次粒子生成は、物の燃焼、破碎や研削によって生成され発生源から直接排出される粒子状物質であり、人為起源としてばいじん(ばい煙)発生施設、粉塵発生施設、自動車、船舶、建機、航空機等が発生源とされている。また自然起源として、海塩粒子、土壌粒子、黄砂、花粉、火山灰等が発生源とされている。また、一次生成粒子には、煙突等から排出された高温のガスが大気によって冷却されることで凝縮・凝集する凝縮性粒子も含まれ、生成メカニズムは複雑であるとされる。

二次粒子生成は、主に光化学反応によって生成される粒子であり、主な物として SO<sub>2</sub> から変換される硫酸塩、NO<sub>x</sub> から変換される硝酸塩等である。人為起源として、燃焼由来であり、ディーゼル機関からも排出される、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> に起因する SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>や、VOC 等である。また、自然起源として火山から噴出する SO<sub>x</sub>、海洋から放出する塩化ジメチル (CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>、DMS)に起因する SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等が起源であるとされる。

表 1-9 粒子状物質の主な発生源 <sup>1-47, 1-48)</sup>

	人為起源	自然起源
一次 粒子	[固定発生源] ・ばいじん、粉塵発生施設 ・一般家庭等 [移動発生源] ・自動車 ・船舶 ・建設機械、航空機	・海塩粒子 ・土壌粒子 ・黄砂 ・花粉 ・火山灰
二次 粒子	・燃焼由来の SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> ガスから変換された SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ・燃焼や蒸発系発生源由来の VOC からの変換	・火山由来の SO <sub>x</sub> 等からの変換、海洋の DMS からの変換された SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ・雷放電、森林火災由来の NO <sub>x</sub> から変換された NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ・土壌などから発生する NH <sub>3</sub> から変換される NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>

## 1.6 船舶のディーゼル機関から排出される粒子状物質

ディーゼル機関から排出される PM は図 1-1 に示す構造とされている<sup>1-49)</sup>。一般的に固体の炭素を主成分とする粒子(スス)の周囲に比較的沸点の高い有機物質や硫酸塩などが吸着していると考えられている。ススの生成は、図 1-2 に示すように、凝縮核の生成、成長、凝集の過程からなり、これによりススの基となる核が生成される。この核の表面成長および粒子同士の凝縮によってススの塊が形成される。これらが、大気に放出されると同時に、排気管内では気体であった高沸点成分の凝縮によってナノメートルオーダーの微粒子が生成される。これら PM は大きく二つに分類できる。一つはジクロロメタン( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )などの有機溶剤に溶ける可溶性有機物質(Soluble organic fraction、SOF)、もう一つは有機溶剤に溶けない不可溶性有機物(Insoluble organic fraction、ISF)である。SOF は未燃燃料油や潤滑油、および熱分解反応などによって生じた多環芳香族炭化水素等であり、これらの物質の中には発ガン性、変異原性が医学的に確認されているものである。ISF は燃焼室内での燃料の熱分解や酸素・燃焼温度等の不足による不完全燃焼によって発生し、合体・凝集を繰り返し成長することによって微粒子となったすす(Dry soot)や、硫酸塩(Sulfate)等から構成されており、喘息や体内粘膜の炎症を引き起こすほか、酸性雨やスモッグの原因にもなるとされる。

Kittleson<sup>1-50, 1-51)</sup>によると PM はその粒径に 3 種類の対数正規分布を持つ粒子で構成されることを指摘しており、その例を図 1-3 に示す。PM は核生成モード(Nuclei Mode)、凝集モード(Accumulation Mode)、粗大モード(Coarse Mode)によって形成されるとされている。核生成モードは 50 nm 以下の粒子で構成され、その成分は金属化合物、炭素(単体)、希釈・冷却によって粒子を形成する半揮発性有機粒子およびサルフェイト(Sulfate)とされている。核生成モードの粒子は質量では全体の 20%未満に過ぎないが、粒子数では全体の 90%を占めるとされている。凝集モードの粒子は 30~500 nm 程とされており、上述のススの塊および周囲の凝集物質とされている。

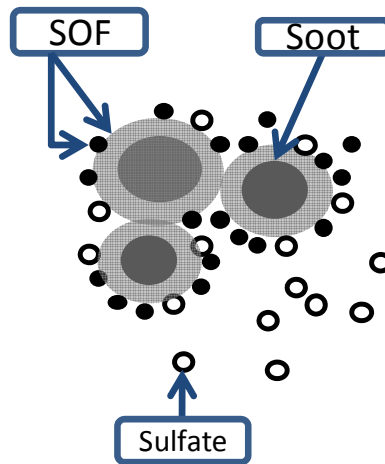


図 1-1 PM の構造

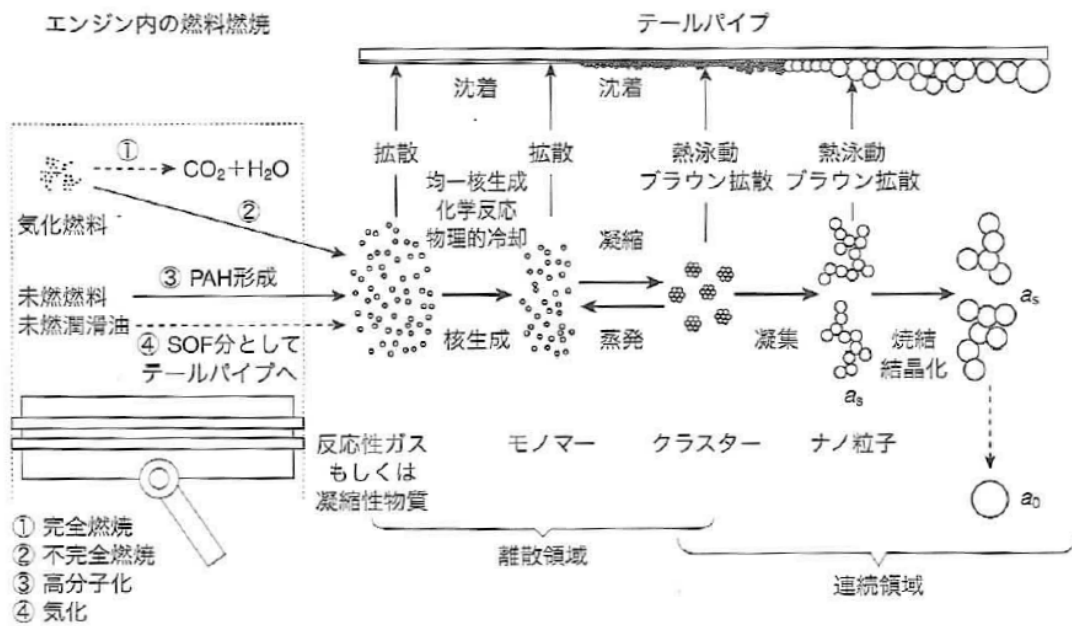


図 1-2 微粒子生成機構<sup>1-43)</sup>

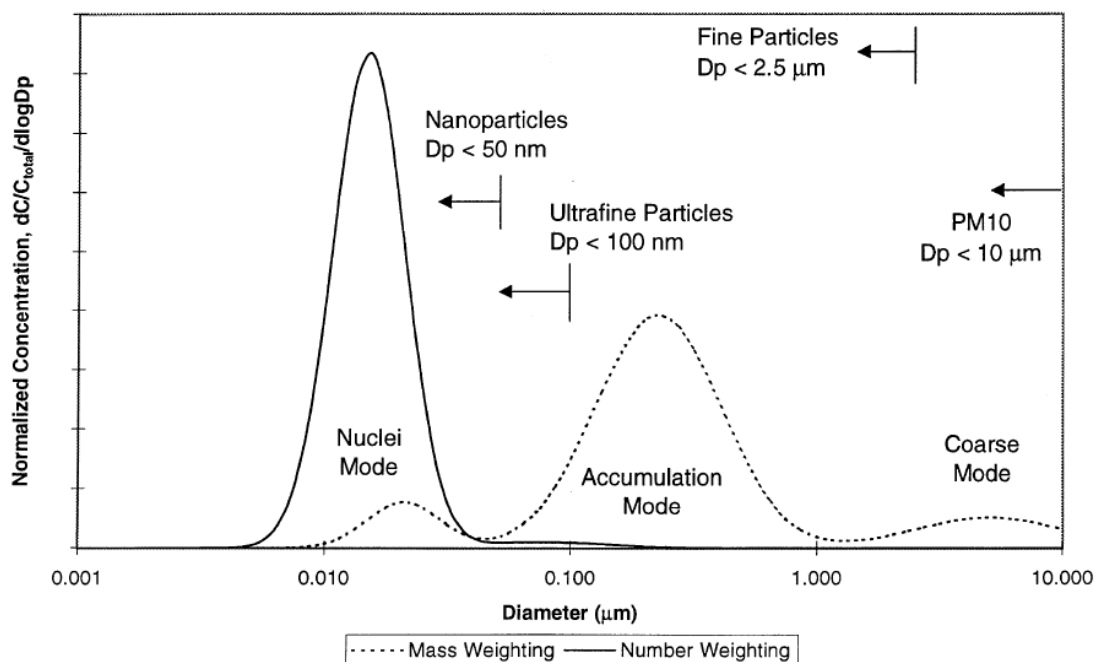


図 1-3 Kittleson による機関から排出される粒径分布

ディーゼル機関から排出される粒子状物質について、ISO(国際標準化機構)では往復動内燃機関全般に希釈トンネルを用いて排ガスを希釈・冷却して計測する方法を採用することを提案しており、ISO 8178-1(Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions)にその測定法が定められている。また、日本工業規格(JIS)においても、ISO8178-1 に対応した規格として、JIS B8008-1(往復動内燃機関-排気排出物測定-第 1 部：ガス状排出物及び粒子状排出物の台上測定)が制定されている。

これらの規格では、ろ過した清浄な空気中で、一次捕集フィルタの直前において、315 K(42 )を超え 325 K(52 )以下まで希釈した排気から、決められたフィルタ上に捕集するすべての物質を粒子状物質(PM)と定義している。主にこのフィルタ上に捕集された物質の重量で PM 排出量が評価されてきた。

希釈方法には、排ガス全量を希釈空気にて希釈する全量希釈法と、排ガスの一部を希釈トンネルに導き、そのトンネル内で希釈する部分希釈法がある。全量希釈法では、排ガス量の多い大形機関ではトンネル本体や希釈空気を送る装置が大きくなり、測定自体に困難が伴う。全量希釈法によってトラックやバスで使用されるディーゼル機関を対象とした粒子状物質計測設備(フルトンネル)は、国内にも存在するが、それでもトンネルの全長は 12 m

と巨大なものになっており、トラック、バスのような自動車用ディーゼル機関に比べて出力が 100 倍以上にもなる船舶のディーゼル主機関を対象とした設備は非現実的である。

このため最近、大形機関からの粒子状物質計測のためにマイクロ希釈トンネル(超小型の希釈トンネルで機関からの排気ガスの一部をトンネルに導き希釈する)に関する規格が、従来の希釈トンネルでの計測結果との相関などの調査研究<sup>1-52~55)</sup>の後に、ISO で承認され (ISO 16183)、これを利用した計測<sup>1-56)</sup>も一部で開始されている。

しかし、上述の ISO8178-1、JIS B8008-1 では、燃料油の硫黄分が 0.8 %までが適応範囲とされており、船舶が燃料油として主に使用する MDO(Marine Diesel Oil, JIS 規格で言う 1 種重油(A 重油))や MFO(Marine Fuel Oil, JIS 規格で言う 3 種重油(C 重油))は、適応範囲を逸脱する。また、使用燃料油や機関速度が異なるため PM の性質が自動車と異なること<sup>1-57)</sup>や、使用する潤滑油の違い、潤滑方法の違いにより PM の排出特性が異なることから、船舶から排出される PM 計測には多くの課題が残されている。

ディーゼル機関から排出される粒子状物質の粒径分布の計測では、主に、アンダーセンサンプラ、ELPI(Electric Low Pressure Impactor)、SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)、パーティクルカウンタが使用されている。アンダーセンサンプラは、多段のインパクトによって構成され、それぞれのインパクトによって粒子状物質は空気動力学径別に分級される。分級された粒子状物質は、それぞれのインパクト出口の衝突板に設置したフィルタ上に捕集し、主に重量によって粒子状物質を計測する。ELPI は、アンダーセンサンプラと同様に多段のインパクトを使用して空気動力学径別に分級されるが、分級前の粒子状物質に荷電させ、インパクト出口の衝突板に衝突・捕集される時に放電されることにより、アースに向かって流れる電流量から粒子状物質の濃度を計測する。SMPS は、シングルステージインパクトによってモビリティ径別に分級し、その後、後術のパーティクルカウンタによって粒子個数を計測する。パーティクルカウンタは、微粒子個数を計測する装置で、ピエゾバランス法による計数や光学的に計数する方式があり、特にディーゼル機関から排出される粒子のように粒径の大部分が 1 μm 未満である場合には、水やブタノール等により粒子に凝縮させることで径を大きくしてから光学的に計数する凝縮粒子カウンター (Condensation Particle Counter, CPC)が主に使用される。

それぞれの計測器は、センサ部のコインシデンス防止や計測感度の制約から、排ガスを一段希釈もしくは二段希釈することが必須となっているが、自動車用ディーゼル機関や産業用機関を対象とした計測で、この希釈の方法により粒径分布が影響を受けることが指摘されている<sup>1-58~60)</sup>。

大型の船用ディーゼル機関から排出される PM の粒径分布については、Kasper<sup>1-61)</sup>らによって計測が行われている。この計測では、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出された排ガスの一部を分流し、エジェクター希釈器によって希釈した排ガスの粒径分布の計測を行い、自動車用ディーゼル機関から排出される PM との比較を行っている。比較の結果、船用ディーゼル機関から排出される PM は、自動車のディーゼル機関より粒径の小さい

ところに排出濃度のピークがあり、硫黄分の高い燃料によって核生成領域とされる粒径の濃度は上昇すると報告しているが、希釈方法等による計測値への影響については言及していない。

このように、船用ディーゼル機関の排ガス中の PM の粒径分布は、計測例が少ない上、計測条件によって計測結果が変化することが指摘されているとともに、船用 4 ストローク機関を発電機特性で運転した場合の低負荷時や船用低速 2 ストローク機関では、自動車用機関と比較して PM に占める有機溶剤に溶ける成分(可溶性有機物質、Soluble organic fraction(SOF))の割合が大きく<sup>1-62~64)</sup>、そのような場合には、計測条件によって計測結果へ与える影響が異なると考えられる。

### 1.7 船用ディーゼル機関の排ガス計測

船舶(船用ディーゼル機関)と自動車、産業用機関の粒子状物質係る比較を表 1-10 に示す。表では、前項までに記述した内容から船舶のディーゼル機関と自動車、陸上施設等の粒子状物質に関して比較している。本項では船用ディーゼル機関が自動車等の計測と異なる点に関してまとめる。

船用ディーゼル機関は、その出力の大きさから排ガス発生量が大きく、自動車においてデファクトスタンダードとされる全量希釈である CVS(Constant volume sampling)が使用できない。そのため、大型の産業用機関とともに ISO8178-1 による部分希釈方式が用いられる。また、船舶で用いられる燃料油では硫黄分が MARPOL 73/78 条約で規制される物の、サルファーフリーが標準となっている自動車と比較して高硫黄燃料油が用いられている。また、その燃料油は、大型船舶では重油が主であり、残渣油が多く含まれ使用されている。そのため、硫黄分とともに灰分等も多く含まれ、排出される粒子状物質も異なる事が考えられる。

自動車においては、ガソリン機関では三元触媒によって炭化水素は一酸化炭素、窒素酸化物ともに酸化還元される。ディーゼル機関においても、尿素水を用いた SCR や EGR システムにおいて窒素酸化物を低減するとともに、セラミック方式 DPF 等によって PM は低減される。一方、船舶では揮発性成分が多いことからセラミック方式 DPF 等はガス成分として素通りして大気に排出される。また、燃料油に硫黄分が多く含まれることや、排ガスの酸素濃度が高い事によって触媒にも悪影響、非適応な状態を及ぼしている。

産業用機関が用いられる、内燃力発電所等では重質油が使用される場合もあるが、大気汚染防止法によって規制されていることと、船舶と異なり脱硝装置、脱硫装置等のスペースにやや余裕があるため大気に放出される排ガスは船舶とは異なる。大気汚染防止法では粒子状物質の計測として、ばい煙計測が用いられている。この計測は、JIS Z8808 (排ガス中のダスト濃度の測定方法)に規定されており、排ガスを希釈せずに高温なままフィルター上に採取する方法であり、揮発性成分はガス状物質としてフィルターを通過し測定されない。

このように、船舶においては粒子状物質の計測手法が限られるとともに、揮発性成分（凝縮性のガス状物質）が多く含まれる、さらには排出されていることから揮発性成分も加味する計測の必要がある。

表 1-10 船舶(船用ディーゼル機関)と自動車、産業用機関の粒子状物質に係る比較

項目	対象	自動車	陸上施設 産業用機関	船舶
希釈法 (排ガス流量による制限)		CVS 全流希釈方式	ばい煙計測 ISO 8178-1	ISO8178-1 による
燃料油		軽質油	軽質油～重質油	重質油
		サルファーフリー	硫黄分含有	高硫黄分含有
揮発性成分		HC は触媒によって低減		硫黄分に起因して 触媒の使用不可

船舶に搭載された船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測では、繰り返しになるが、扱う排ガス流量が自動車機関等と比較して非常に大きく、自動車分野でデファクトスタンダードとされる全流希釈方式は行う事が出来ない。そのため、部分希釈方式を採用する必要がある。また上述の通り、船用ディーゼル機関の排ガスでは、燃料油に硫黄分が多く含有している事と、ディーゼル機関排ガスの酸素含有量が多いことから触媒による HC 低減等が不可能であり、PM の計測では揮発性成分も考慮した計測を行う必要がある。このように、船用ディーゼル機関の PM 計測には特有の課題が多く残されている。

## 1.8 本研究の目的と論文の構成

本論文では、船用ディーゼル機関から排出される PM の計測条件が粒径分布に与える影響を明らかにするとともに、粒径分布および粒子濃度を把握することを目的として、船用 2 ストロークディーゼル機関、船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される PM を対象に、粒径分布を Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) および Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) の 2 種類の計測器を用いて計測し、希釈トンネルにおける希釈率および希釈空気温度の影響について検討を行った。本論文は以下に示す 8 章で構成される。

### (1) 第 1 章 序論

第 1 章では、船舶の排ガスに含まれる汚染物質とその規制に関する状況、船用ディーゼル機関の特徴について述べ、陸上における規制、基準値、海上における規制に関して整理する。また、粒子状物質に関する定義、発生源に関して記述するとともに、船用ディーゼル機関から排出される PM の既往の研究と問題点を整理し、本論文の目的と構成に関して記述する。



(2) 第 2 章 PM 計測に関する希釈と計測手法

第 2 章では、ディーゼル機関から排出される PM の計測時に行われる希釈手法および計測手法に関して整理を行う。

(3) 第 3 章 実験装置の概要

第 3 章では、本研究で用いた実験装置である供試機関(船用 2 ストローク低速ディーゼル機関、船用 4 ストローク高速ディーゼル機関)に関して説明すると共に、実験で用いた各種計測装置に関して記述する。

(4) 第 4 章 希釈トンネルにおける希釈空気温度および希釈率が計測される粒径分布に及ぼす影響

第 4 章では、船用 4 ストローク高速ディーゼル機関の排ガスを対象に、ISO8178-1 に準拠した希釈トンネルによるコールドダイリューションを行い、希釈空気温度、希釈率、希釈後の滞留時間等が計測される粒径分布に及ぼす影響を検討した。粒径分布の計測は SMPS および ELPI で実施し、希釈条件による粒径分布変化を確認すると共に、分級方法・濃度計測手法の異なる 2 種類の計測器の差異を確認する。

(5) 第 5 章 船用 4 ストローク高速ディーゼル機関におけるホットダイリューションによる PM 粒径分布の計測

第 5 章では、計測する排ガスの希釈にホットダイリューション手法を適用し、PM 計測までの排ガスサンプリング、希釈過程での凝縮性粒子の生成を低減させた計測を実施した。計測は、船用特性、発電機特性の 2 種類の負荷特性で実施し、各負荷率の PM 排出状況の計測を行った。その計測結果と、第 4 章で得られたコールドダイリューション時の知見から、排ガスサンプリング、希釈時の凝縮性粒子の核生成(Nucleation)の状況に関して考察する。

(6) 第 6 章 船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の PM 粒径分布

第 6 章では、供試機関に船用 2 ストローク低速ディーゼル機関を使用し、コールドダイリューションおよびホットダイリューションによる粒径分布の計測を実施し、船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の PM 排出状況を明らかにする。この計測結果と、第 4 章、第 5 章で得られた知見から、機関方式の違いによる PM 粒径分布の差異を検討する。

(7) 第 7 章 HFO 運転時の PM 粒径分布

第 7 章では、供試機関に船用 2 ストローク低速ディーゼル機関を使用し、燃料油に HFO を使用した排ガスの PM 粒径分布を計測した。希釈手法は、コールドダイリューション、

ホットダイリユーションの 2 種類を実施し、HFO 運転時の船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の PM 粒径分布を明らかにする。また、第 6 章で得られた知見と整理を行い、燃料油の違いが PM の粒径分布へ与える影響について検討する。

(8) 第 8 章凝縮性成分の核生成と条件別の計測法

第 8 章では、前章までに行った希釈手法と希釈条件に関して、ガス温度と凝縮性成分濃度の関係として、図上に状態をプロットし希釈過程と希釈後の凝縮性成分濃度等の関係を検討する。また、船用ディーゼル機関が船舶へ搭載された排気管系統を例に、計測の目的別による希釈手法に関してまとめる。

(9) 第 9 章 結論

第 9 章では、第 4 章から第 7 章で得られた知見を整理し結論を記す。

## 第2章 PM計測に関する希釈手法

試験台上で定常状態の往復動内燃機関から排出されるガス状排出物質及び粒子状排出物の測定方法及び評価方法について ISO8178-1<sup>2-1)</sup>や JIS B8008-1<sup>2-2)</sup>で規定されている。この規格は、自動車機関を除いた移動式、可搬式、定置式の往復動内燃機関に適用されており、船用ディーゼル機関の排ガス計測では、多くの研究や排出特性の把握<sup>2-3,2-4,2-5)</sup>がこの方法で行われている。

ディーゼル機関の PM 計測で希釈トンネルによる排ガスの希釈および冷却が行われ、フィルター上に捕集して重量による濃度計測が行われる。また、粒径分布の計測では、SMPS の CPC 部分における計測時のコインシデンス現象の低減、ELPI 計測時のオーバーカレントの防止等の計測器における計測条件の制約、サンプリング後の凝縮性粒子の核生成や、ブラウン凝集による粒径分布変化を低減すること等を目的に希釈が必須である。希釈および冷却は、計測の目的、計測濃度の制約等によって様々な手法がとられる。ここでは、希釈手法および特徴に関してまとめる。

### 2.1 全流希釈法と分流希釈法

全流希釈法(Partial Flow Dilution Method)は、機関の排ガス全量をフルトンネルにて希釈空気と混合して希釈を行う。JIS B8008-1 に記載されている全流希釈システムを図 2-1

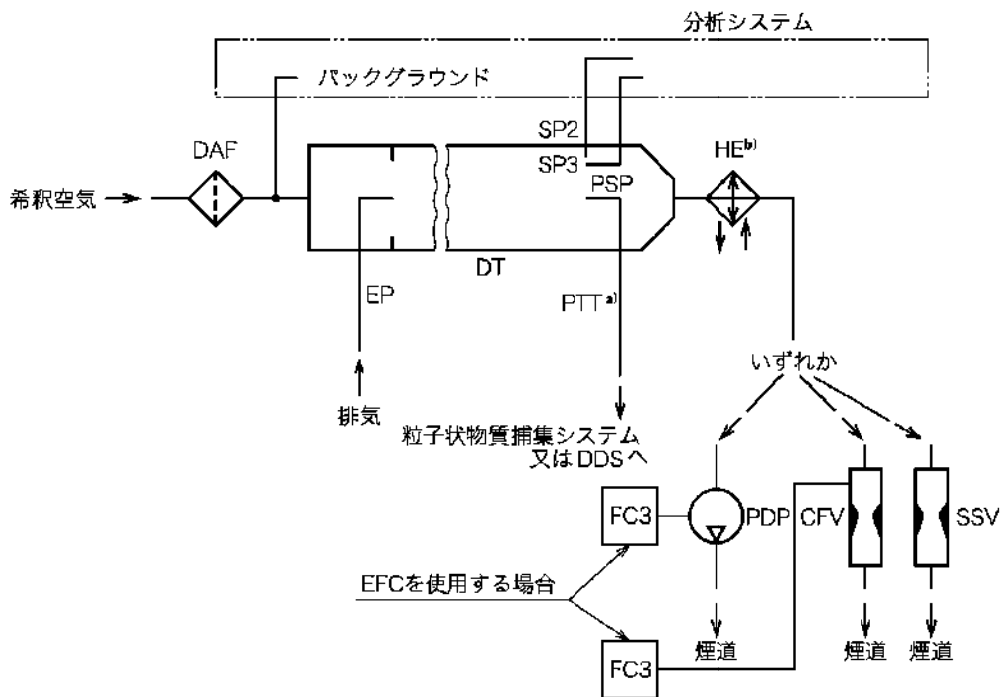


図 2-1 全流希釈システム(JIS B8008-1)

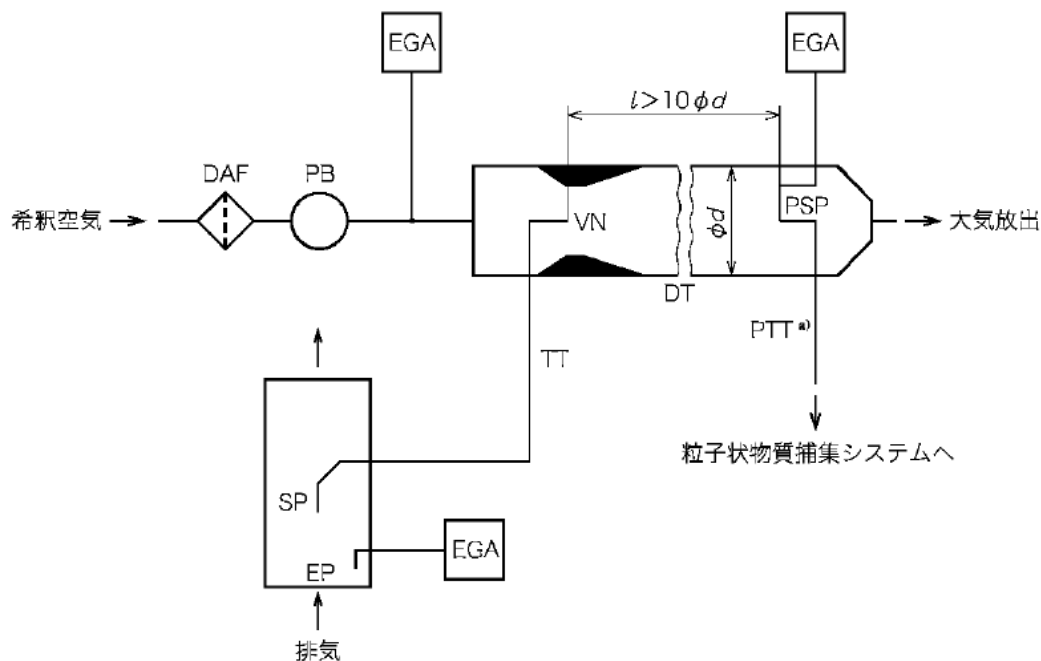


図 2-2 分流希釈トンネルの一例 (JIS B8008-1)

に示す。図 2-1 内の DAF は希釈空気フィルター、EP は排気管、DT は希釈トンネル、PTT は粒子状物質トランスファーチューブである。機関の排ガスは排気管(EP)を経由し全量を希釈トンネル(DT)(フルトンネル)へと導く。希釈トンネル内でフィルター(DAF)によって過した希釈空気によって希釈する。この時の、希釈空気は 15 以上とする事が規定されている。希釈後の排ガスは、希釈トンネルの下流から一部をトランスファーチューブ(PTT)によって粒子状物質捕集システムに導き計測を行う。粒子状物質トランスファーチューブ(PTT)の長さは 1,020 mm 以内と規定されている。粒子状物質捕集システムでは、希釈された排ガスをそのままフィルターによって捕集し計測する方法と、希釈後の排ガスがフィルター直前で適切な温度、濃度となるようにもう一度希釈(二次希釈)してから計測する方法の 2 種類が規定されている。重量車に搭載される大型機関の PM 計測では、全流希釈トンネルの大型化を避けるため、全流希釈トンネルのみでフィルター直前の温度条件( $47 \pm 5$ )までの希釈冷却はせず、二次希釈による計測が通常行われている。また、さらに大型の船用ディーゼル機関の排ガスを対象としたフルトンネルは、現実的な大きさとはならず、現時点では存在していないと思われる。

分流希釈法は、機関の排ガスの一部を排気管から分流し、希釈トンネルによって希釈する。分流希釈システムの一例を図 2-2 に示す。図 2-2 内の SP はサンプリングプローブ、TT は排気トランスファーチューブ、VN はベンチュリを表している。機関の排ガスの一部を排気管に設置したサンプリングプローブ(SP)から一部を分流し、トランスファーチューブ(TT)を経由し、希釈トンネル(DT)(ミニトンネル)に導く。トランスファーチューブ(TT)の長さは、

5,000 mm 以内で可能な限り短くすることと規定されている。希釈トンネル内では希釈空気(15 以上)によって排ガスを希釈し、希釈トンネルの下流で希釈された排ガスを粒子状物質捕集システムにて計測する。この時、希釈された排ガスの全量の PM をフィルターによって計測する全量捕集方式(Total sampling type)と、希釈された排ガスの一部をフィルターによって計測する部分捕集方式(Fractional sampling type)があり、これらの違いを含め、ISO8178-1 および JIS B8008-1 では、分流希釈法として図 2-2 に示した方式以外に 8 種類の方式が規定されている。

マイクロトンネルによる分流希釈法を用いた PM 濃度の計測結果は、フルトンネルによる全流希釈法を用いた計測結果に対して低い値を示すことが多く各種の研究が行われている<sup>2-6)</sup>。上述の通り、希釈トンネルの大きさの制約から、船用ディーゼル機関の排ガスの PM 計測は、ミニトンネル、マイクロトンネルを使用した部分希釈による計測が殆どである。

## 2.2 分流希釈法に用いる希釈トンネル

分流希釈法で用いる希釈トンネル(分流希釈トンネル)は、ISO8178-1 および JIS B8008-1 において、希釈トンネルの内径は部分捕集方式の場合は 75 mm 以上、全量捕集方式の場合は 25 mm 以上であることを推奨するとしている。通常、直径 75 mm 以上のトンネルはミニトンネル、直径 30 mm 程度のトンネルはマイクロトンネルと呼ばれている。欧州においては、分流希釈トンネルの全てをミニトンネルとしており、ミニトンネル、マイクロトンネルの区別はされていない。希釈トンネルの長さは、排ガスと希釈空気が完全に混合するに足りる十分な長さであることと決められており、かつ、部分捕集方式では排気トランスファータッチューブ(TT)の希釈トンネル内出口から、粒子状物質トランスファータッチューブに接続するサンプリング位置までの距離を、希釈トンネルの内径の 10 倍以上とすることが規定されている。希釈トンネルの素材は、ステンレス製とし、管壁厚さと直径の比が 0.025 以下であり、かつ、1.5 mm 以上であることと規定されている。

## 2.3 ホットダイリユーション

上述の希釈では、排ガスの希釈空気による希釈と同時に、希釈空気によって冷却を行う希釈方法(本項では、比較のためコールドダイリユーションと記す。)である。これらのコールドダイリユーションでは、排ガスが温度の低い希釈空気によって希釈されることから、高温雰囲気中で気体であった、凝縮性成分の一部も核生成する。核生成した凝縮性成分は粒子状物質となることから、凝縮性成分も含めた濃度計測を対象とした場合に有効であり、排ガスが大気中に排出される状況を模擬している希釈である。

ホットダイリユーションは、高温である排ガスを高温な状態で維持したまま、高温な希釈空気希釈することで、気体状態である凝縮性成分を凝縮させないで低濃度化させ、その後、希釈排ガスの温度低下によって起きる凝縮を低減し、粒径分布の変化を低減する手法である。また、同時に高倍率で希釈を行うことで希釈後のブラウン凝集による粒径・個

数濃度の変化も低減できる。気体温度と揮発性成分(凝縮性成分)濃度の関係を示した模式図を図 2-3 に示す。図 2-3 では、横軸にガス温度、縦軸に気体中の揮発性物質濃度を表している。また、グラフ内の曲線は、蒸発状態(気体)と凝縮状態の境界を示している。例えば、図中 が排ガスの排気管内の条件で、 が計測時の状態であると仮定すると、コールドダイリューションでは、希釈によって揮発性物質の濃度の低下と共に、ガス温度も低下するため、凝縮粒子の形成(図中 )が考えられる。その後、二次希釈を行い の条件にしたとしても、凝縮粒子は形成されたまま、粒子状物質となり計測される。一方、ホットダイリューションでは、排気管内の条件 から、ガス温度の低下を抑えながら、高倍率に希釈することで の条件とする。 の条件となった後、ガス温度を計測器が対応する温度まで低下させたとしても、凝縮領域には入らず に到達することが出来る。

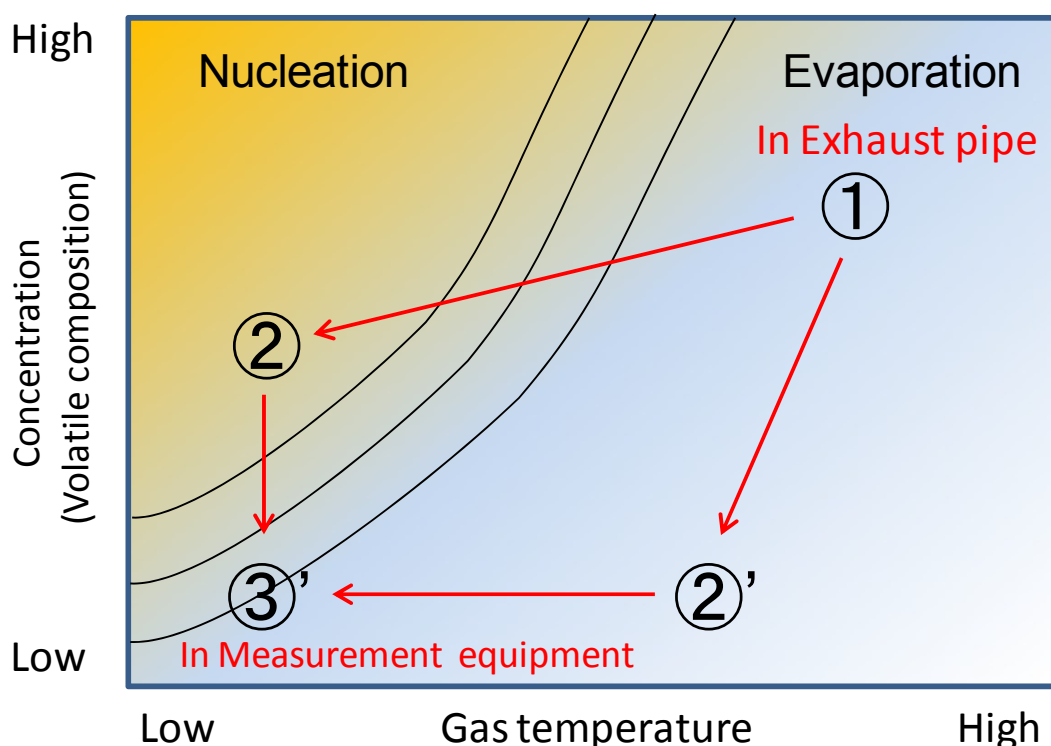


図 2-3 気体温度と揮発性物質濃度の関係 (模式図)

## 2.4 ホットダイリューションを用いた計測例

現状、船用を対象としたディーゼル機関の排ガスにおける粒径分布の計測に関しては規格は無い。自動車分野では粒径分布の計測手法に関する研究や、排出特性に関する研究が多く行われている。自動車の機関から排出されるPMは、排出重量で規制されていたが、排出されるPMの重量が減少してきたことや、粒子径の小さいPMの方が健康影響などが大きいこと等から、欧州を中心に排出粒子数に関する規制の関心が高まり、2001年にUN/ECE(United Nations Economic Commission for Europe)ではGRPE(Groupe des Rapporteurs pour Pollution et Energie)にPMP(Particle Measurement Programme)を発足させ、既存のフィルター法の代替となるPM粒子数(PN, Particle number)測定の検討が行われてきた。図2-4にUN/ECE Regulation<sup>2-7)</sup>に示されている粒子サンプリングシステムを示す。

PN測定では、計測法や手順等によって変化する揮発性物質の影響を除外するため、ホットダイリューションを採用している。希釈トンネル(CVSトンネル)にて一次希釈した排ガスの一部を分流し、分級器(PCF, Pre-Classifier)によって50%分離粒径 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子を除外する。CVSトンネルとは、CVS法を行うための希釈トンネルで、全流希釈で希釈後の排ガス量、すなわち排ガスと希釈空気の合計が常に一定となるように、ブローで吸引若しくはベンチュリの使用によって行うトンネルである。希釈後の排ガスは一部を、粒子状物質トランスファーチューブ(PTT)を經由し、希釈器(PND<sub>1</sub>)にてホットダイリューションを行う。希釈後、加熱蒸発チューブ(ET)によって、粒子状物質表面に凝集した凝縮性物質を再蒸発させ、その後、さらに希釈することで冷却し粒子計数機(CPC等)によって個数の計測を行う。自動車機関のPM計測ではこのようにCVS法が用いられる。これは、走行距離あたりのPM排出量が規制されており、機関負荷も決められた走行パターンに応じて変化し、それぞれの排ガス希釈率を一定にすることは難しい。また、機関負荷にかかわらずPM総排出量を把握する目的もある。このように、粒径分布を求めない個数濃度の計測であっても、希釈条件等によって凝縮性成分の個数が大きく変わるため、凝縮性成分を除外した計測が行われており、凝縮性成分の計測時の取扱が難しいことが分かる。一方、船舶の主機関では海象、気象条件による負荷変動はあるものの、航海上では一定回転数を運転設定値とする運用が行われるため、自動車の計測法と目的が異なる点もある。

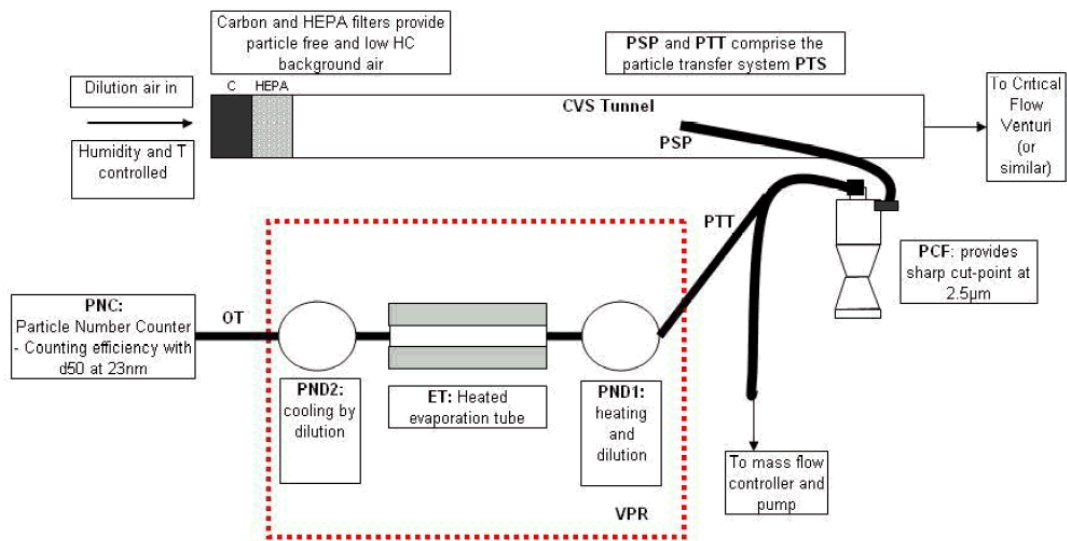


図 2-4 粒子サンプリングシステム (UN/ECE)



## 第3章 実験装置の概要

### 3.1 供試機関

本研究では、船舶の主機関として主に利用されている、船用 2 ストロークディーゼル機関(3UEC37LA)および、小型、中型の船舶の主機関、発電用の補機関として主に利用されている、船用 4 ストロークディーゼル機関の 2 種類を供試機関とした。それぞれの機関の概要を以下に述べる。

#### 3.1.1 船用 2 ストロークディーゼル機関

この供試機関は、船用 2 ストローク低速ディーゼル機関(3UEC37LA、赤阪鐵工所製)で、機関の運転に必要な補助機械装置とそれらを接続する配管等によって形成されるディーゼルプラント、および運転制御装置で構成される。供試機関の外観を図 3-1、供試機関の断面図を図 3-2 に、機関の主要目を表 3-1 に示す。この機関は、3 シリンダのクロスヘッド型で、静圧過給、ユニフロー掃気方式で、主軸からギヤを介して回転力を得るカムによって燃料噴射ポンプ、排気弁が駆動されるカム式の機関である。シリンダの内径は 370 mm、



図 3-1 供試機関(3UEC37LA)

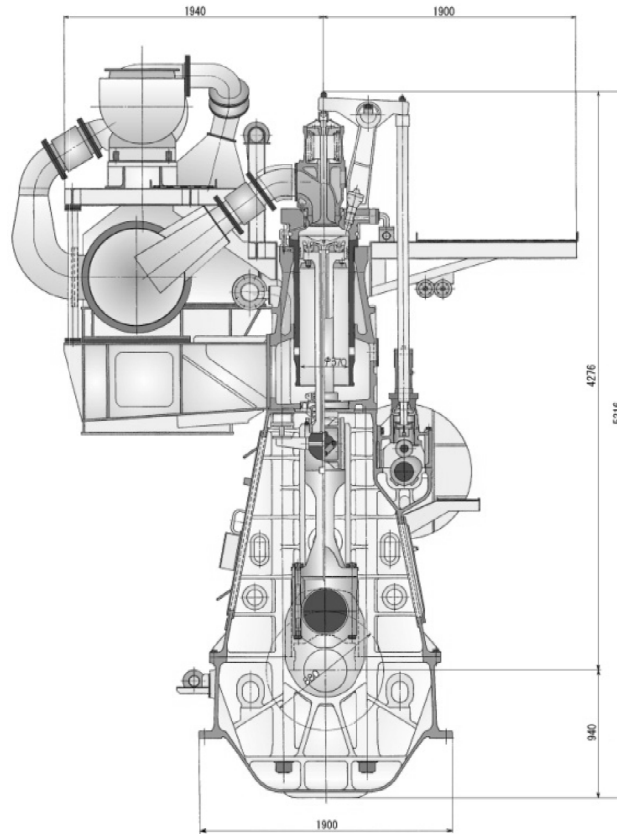


図 3-2 供試機関の断面

表 3-1 供試機関の主要目

機関名称	3UEC37LA
方式	ユニフロー掃気 排気過給器付き クロスヘッド型 2ストロークディーゼル機関
シリンダ径	370 [mm]
ストローク	880 [mm]
シリンダ数	3
圧縮比	14.8
正味平均有効圧力	1.24 [MPa]
出力(MCR)	1,103 [kW]
回転数	188 [rpm]
平均ピストン速度	5.51 [m/s]
冷却方式	ピストン冷却：システム油 シリンダ、過給機冷却水：1次冷却水(清水)

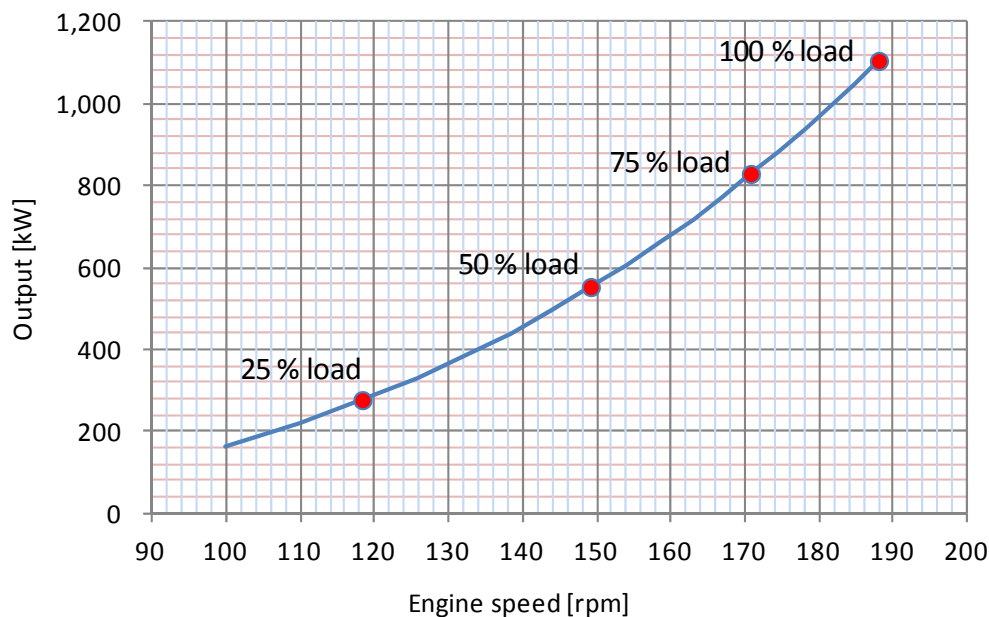


図 3-3 機関回転数と出力の関係（船用特性）  
（船用 2 ストロークディーゼル機関、3UEC37LA）

ピストンのストロークは 880 mm であり、その圧縮比は 14.8 である。連続最大出力(M.C.R.)は、回転数 188 rpm で 1,103 kW (1,500 PS) であり、その時のピストン平均速度は 5.51 m/s、正味平均有効圧力は 1.24 MPa である。機関回転数と出力の関係を図 3-3 に示す。図は縦軸に機関出力、横軸に機関回転数を示しており図中の青線が船用特性による運転時の機関回転数と出力の関係を表している。赤い丸のプロットが本研究で使用した運転状態を示しており、船用特性の負荷率 25 % では 118.4 rpm - 275.8 kW、負荷率 50 % では 149.2 rpm - 551.5 kW、負荷率 75 % では 170.8 rpm - 827.3 kW、負荷率 100 % では 188 rpm - 1103 kW である。この機関は燃料油に、A 重油(MDO)、C 重油(MFO, HFO)を用いることができる。機関に使用する潤滑油は、主軸の潤滑、ピストンの冷却、過給機軸受けの潤滑を行うシステム油と、ピストンとシリンダの擦動部を潤滑するシリンダ油の 2 種類が用いられている。機関で発生した動力は、軸を介して接続されている水制動力計にて吸収される。

ディーゼルプラントは、潤滑油系統、1 次冷却水系統、2 次冷却水系統、燃料油系統、圧縮空気系統によって構成される。

潤滑油系統は、システム油を機関の下部に設置されたサンプタンクからポンプによって、潤滑油を冷却するための熱交換器を介し、機関へ供給している。潤滑・冷却を行った潤滑油は機関下部のオイルパンへ集まり、オイルパンからサンプタンクへ落下する。

1 次冷却水系統は、建屋上部に設置されたエキスパンションタンクによって熱膨張を吸収できる閉ループ構造となっている。ポンプによって機関に供給された 1 次冷却水は 3 経路

に分岐され、機関のシリンダを外周から冷却するジャケット冷却、燃料噴射弁の冷却、過給機の冷却を行い、燃料噴射弁の冷却を行った経路だけはエキスパンションタンクを経由した後、合流し、熱交換器によって冷却され再びポンプによって機関へ送られる。

2次冷却水系統は、屋外の地下ピットからポンプによって、機関の空気冷却器と、潤滑油と1次冷却水を冷却する熱交換器へ送られ、機関の空気冷却器では過給機によって圧縮された掃気を冷却し、熱交換器では、潤滑油、1次冷却水を冷却し地下ピットへ戻る。地下ピットの冷却水は屋外に設置された開放式冷却塔で冷却される。その他に2次冷却水は、水制動力計の給水に利用されている。

燃料油系統は、屋外地下の燃料油タンクから燃料油を移送ポンプによって移送と昇圧をし、ミキシングタンクを0.2 MPaに保つ。機関への燃料油の供給はミキシングタンクから供給ポンプによって供給され、その末端には圧力調整リリーフ弁が設置されており、機関入口で0.5 MPaに保たれると同時に、余剰な燃料はミキシングチューブへ返油され循環する。

機関の運転は、機関が設置された実験室に隣接した機関制御室にて行う。機関制御室には、機関の運転を行うリモコンシステム、機関の各部圧力、温度等を監視するロガーシステム、水制動力計の負荷制御を行うシステム、および各補助機械類に給電する電源盤・制御盤が設置されている。

### 3.1.2 船用 4 ストロークディーゼル機関

この実験装置は、船用 4 ストロークディーゼル機関(3L13AHS、新潟原動機製)である。

機関の外観を図 3-4、主要目を表 3-2 に示す。この機関は、3 シリンダのトランクピストン型で、動圧過給方式の過給機を備えており、連続最大出力(M.C.R.)は、回転数 1,200 rpm で 73.55 kW (100 PS)であり、その時のピストン平均速度は 6.4 m/s、正味平均有効圧力は 1.177 MPa である。機関回転数と出力の関係を図 3-5 に示す。図は縦軸に機関出力、横軸に機関回転数を示しており図中の青線が船用特性による運転時の機関回転数と出力の関係、赤線が発電機特性による運転時の機関回転数と出力の関係を表している。赤い丸および黄色の四角が本研究で使用した運転状態を示している。船用特性の負荷率 30 %では 803.3 rpm - 22.07 kW、負荷率 50 %では 952.4 rpm - 36.78 kW、負荷率 75 %では 1090.3 rpm - 55.16 kW、負荷率 100 %では 1,200 rpm - 73.55 kW である。発電機特性では、機関回転数は全ての負荷率で一定の 1200 rpm であり、出力は船用特性のそれぞれの負荷率と同様である。この機関はクランク軸からギヤを介して回転力を得るカムによって、燃料噴射ポンプ、給気弁、排気弁を駆動している。



図 3-4 供試機関(3L13AHS)

また、一次冷却清水を循環させるポリュートポンプ、機関に潤滑油を循環させるギアポンプも機関本体に設置されており、すべてクランク軸からギヤを介した回転で駆動する。二次冷却水は、屋外の地下ピットからポンプアップされた冷却水を、機関のヤブスコポンプを介して、潤滑油クーラー、一次冷却清水冷却器へと送られる。機関の出力軸は、水制動力計に接続されており、機関から発生する出力を吸収する。

表 3-2 供試機関の主要目

機関名称	3L13AHS
方式	排気過給器付き トランクピストン型 4 ストロークディーゼル機関
シリンダ径	130 [mm]
ストローク	160 [mm]
シリンダ数	3
行程容積	6370 [cc]
正味平均有効圧力	1.177 [MPa]
出力(MCR)	73.55 [kW]
回転数	1,200 [rpm]
平均ピストン速度	6.4 [m/s]
冷却方式	過給機：空冷 シリンダ冷却水：1 次冷却水(清水)

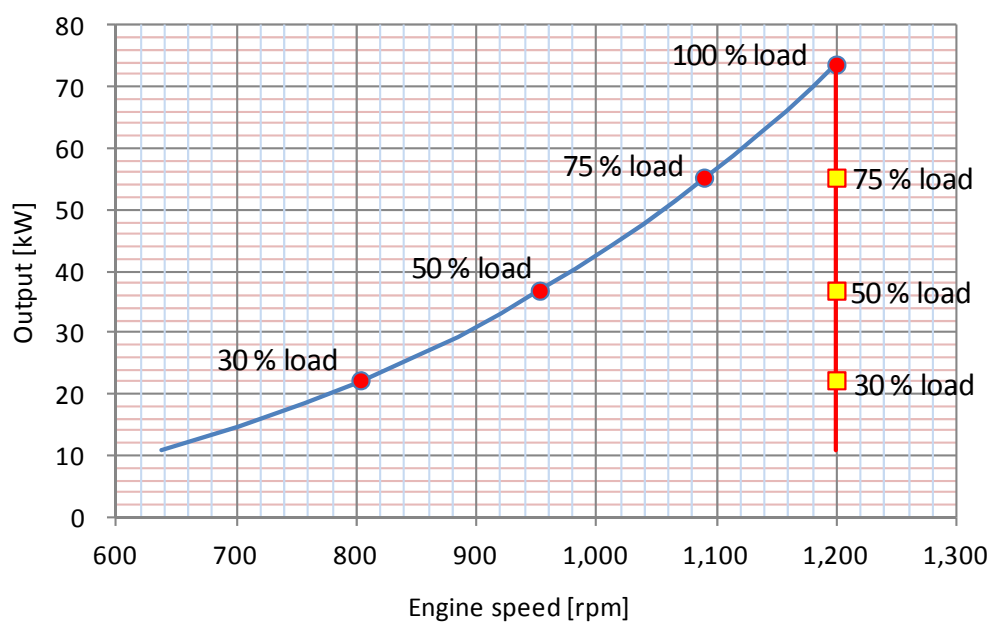


図 3-5 機関回転数と出力の関係 (船用特性と発電機特性)

(船用 4 ストロークディーゼル機関、3L13AHS、青線：船用特性、赤線：発電機特性)

### 3.2 希釈トンネル

図 3-6 に実験で用いた希釈トンネルの外観を示す。本研究に用いた希釈トンネル(東京ダイレック製)は全長 1,600 mm、内径 70 mm、外径 76.3 mm のステンレス製である。この希釈トンネルは、分流希釈部分捕集方式の希釈トンネルで、2 章(図 2-2)で記した方式である。次節で説明する希釈空気系統からの希釈空気は、希釈トンネル直前に設置されたフィルタホルダ内の HEPA フィルタを通して、トンネル内へ流入する。機関の排ガスは、排気管内に設置したプローブにより一部を分流し、トランスファーチューブを介して希釈トンネルへと導かれる。希釈トンネル内に流入した排ガスは、HEPA フィルタを通った希釈空気と混合し、希釈・冷却されながら希釈トンネル下流へと到達する。希釈トンネルの出口は、大気開放されており、希釈トンネル内は大気圧に保たれている。本研究では、トンネル内で希釈された排ガスの温度変化や、トンネル内壁面への PM 凝集の影響を低減するために断熱材(セラミックペーパー)によってトンネル全体を保温した。また、トランスファーチューブも同様の理由で、リボンヒーターによる加熱保温を行っている。計測用の排ガスサンプリングを行うため、希釈トンネル出口には計測用のプローブを設置した。

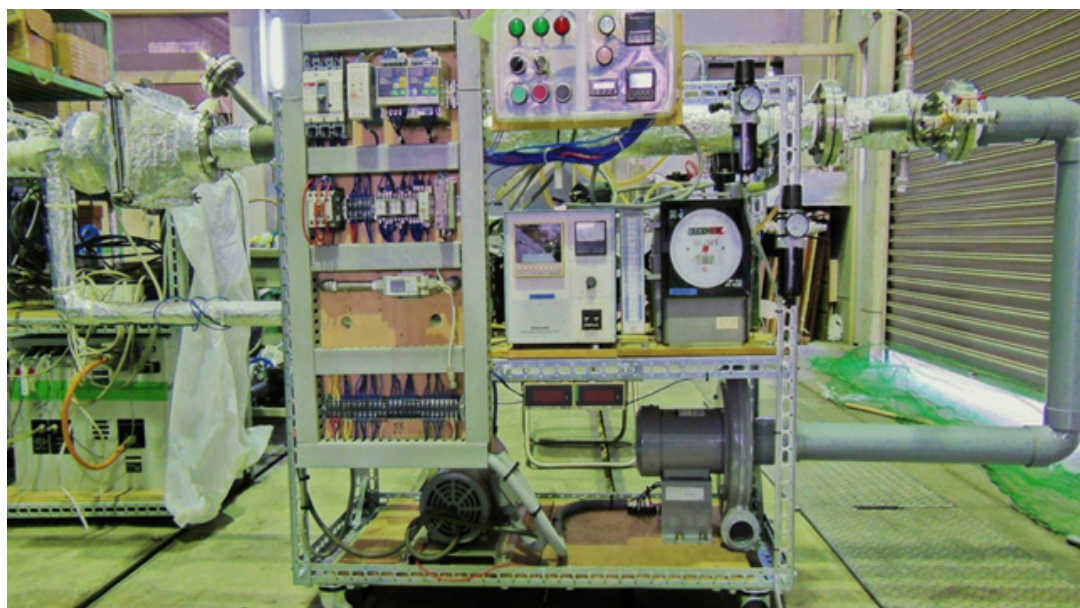


図 3-6 希釈トンネルシステム

### 3.3 希釈空気前処理系統

希釈トンネルにおける排ガス希釈に使用する希釈空気は、他の圧縮空気利用機器の負荷変動を考慮した実験中の流量安定と、実験日の大気温湿度状態の影響を低減するために、調湿処理を行い使用した。希釈空気前処理系統の概要を図3-7に示す。コンプレッサーによって圧縮した空気が充填された空気タンク(2.5 MPa)から、一次レギュレーターによって、0.8 MPaまで減圧する。減圧後、ドレンなどを除去する一次フィルター、二次フィルター、マイクロミストフィルターを通過させ、その後、ドライヤーによって除湿を行った。ドライヤーには、中空系膜式エアドライヤー(DMM301, PISCO製, 図3-8参照)を用いており、大気圧下における露点温度が-15℃以下となるまで除湿される。除湿後、各種の圧縮空気を必要とする計測器に分配する。分配の途中にはレギュレータを適切に配置し圧力(空気流量)の変動が無いようにした。

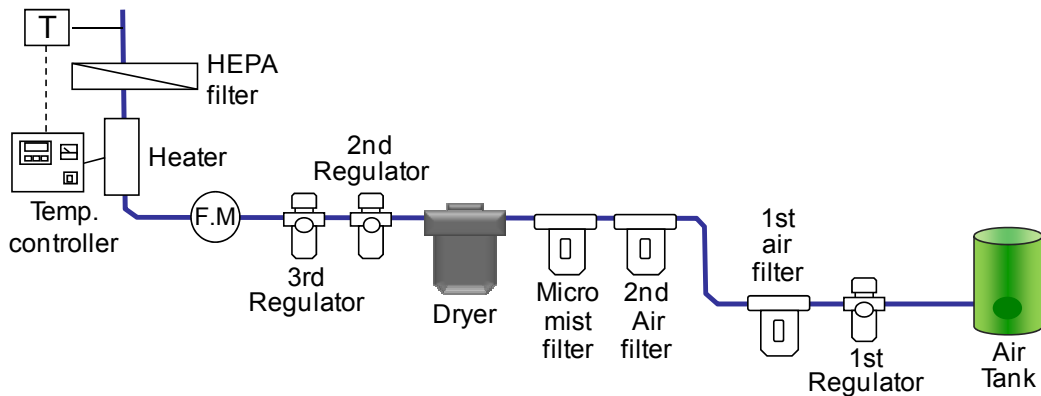


図 3-7 希釈空気前処理系統の概要

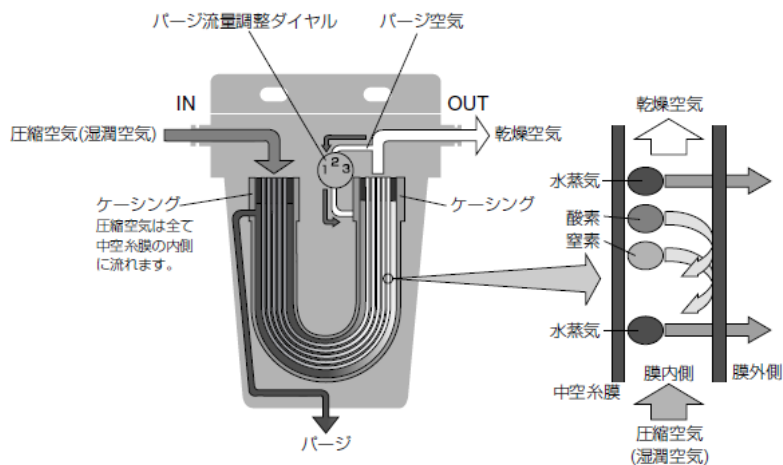


図 3-8 中空系膜式ドライヤーの除湿原理<sup>3-1)</sup>



### 3.4 二次希釈器

#### 3.4.1 ロータリーディスク型希釈器

本研究では、ホットダイリューション時、および、SMPS による計測時の二次希釈時にロータリーディスク型希釈器を使用した。ロータリーディスク型希釈器の概要図、ロータリーディスク、希釈ブロックをそれぞれ図 3-9、3-10、3-11 に示す。また、ロータリーディスク型希釈器の外観および制御ユニットをそれぞれ図 3-12、3-13 に示す。この希釈器は、希釈空気エリア(図 3-9, 右側部分)と、排ガスエリア(図 3-9, 左側部分)に接した、一定体積の凹みが複数個あるディスクを、設定した一定速度で回転させることによって排ガスを希釈空気エリアの清浄空気中へと輸送し希釈を行う。希釈ブロックにセットするディスクと、回転速度で希釈率を変更させることができる。希釈空気は、制御ユニット内に設置されているポンプによって、HEPA フィルター、空気流量計を経由して希釈ブロックに送られる。希釈ブロックでは、上述のようにロータリーディスクによって一定量の排ガスが希釈空気に混合され、希釈空気エリアの出口のガス(希釈された排ガス)を計測器へ送る仕組みとなっている。また、ディスクとディスクが接する希釈ブロックは金属製であり、ブロックに取り付けられている電気ヒーターによって希釈空気、排ガス、希釈ブロック自体を加熱することが可能で、ホットダイリューションに対応している。



図 3-9 ロータリーディスク型希釈器の概要図(希釈ブロック部)<sup>3-2)</sup>



図 3-10 ロータリーディスク(10穴タイプ)



図 3-11 希釈ブロック

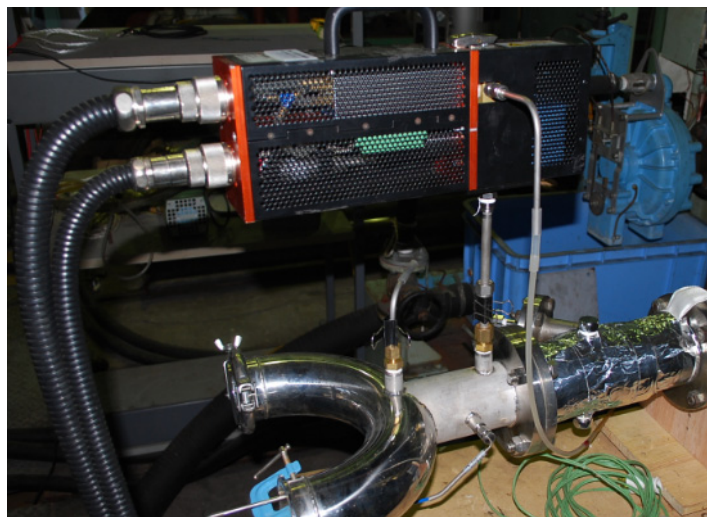


図 3-12 ロータリーディスク型希釈器の外観



図 3-13 制御ユニット

### 3.4.2 エジェクター型希釈器

計測に多くの希釈排ガスが必要となる ELPI による計測では、2 次希釈器にエゼクタ型希釈器(FPS-4000、DEKATI 製)を使用した。エジェクター型希釈器の外観、および制御ユニットをそれぞれ図 3-14、3-15 に示す。

エジェクター型希釈器は、大きく分けて、エジェクター部、ダイリユーター部で構成される。エジェクター部は、エジェクターによって希釈空気を駆動空気とすることで、計測を行う排ガスを吸引すると共に駆動空気が混ざること希釈が行われる。その後、ダイリユーター部では筒状(トンネル状)の焼結金属にて希釈を行う。排ガスは焼結金属の筒内(トンネル)を通過する際に、焼結金属を通過してきた希釈空気によって希釈される。焼結金属の筒状外側は希釈空気であらされており、この部分の圧力を変化させることで、焼結金属の筒内を通過している排ガスへの希釈空気流入量を変化させ希釈率を設定する。また、筒状焼結金属部の出口にエジェクターが付いており、清浄空気によって排ガスを吸引する仕組みとなっている。

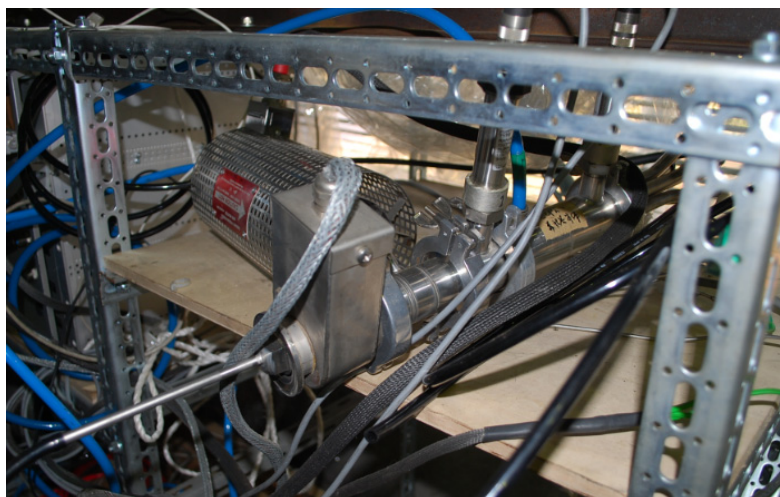


図 3-14 エジェクター希釈器

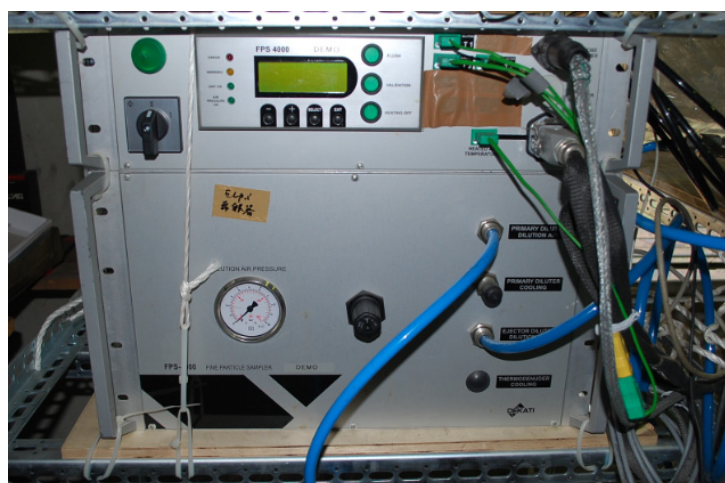


図 3-15 エジェクター希釈器制御ユニット

### 3.5 計測器

#### 3.5.1 排ガス分析計

希釈トンネルにおける排ガスの希釈率を算出するために、赤外線式ガス濃度測定装置 (CGT-7000、島津製作所製) を用いて希釈前(排気管内)排ガス、希釈後排ガスおよび希釈空気の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度を測定した。この排ガス分析計は、レシオ方式の非分散型赤外線吸収法 (NDIR 法) で CO や CO<sub>2</sub> が特定の波長の赤外線を吸収する性質を利用してガス中に赤外線を透過させた赤外線量の残量を赤外線センサで検出して CO 濃度および CO<sub>2</sub> 濃度を計測する。



図 3-16 排ガス分析計 (CGT-7000)

### 3.5.2 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

排ガス中の PM 粒径計測に用いた SMPS(Scanning Mobility particle Sizer, TSI 製)の外観を図 3-17 および 3-18 に示す。本研究では、SMPS(Model3034)、SMPS(Model3080 + 3772)の 2 種類を使用している。

SMPS はエアロゾルのモビリティ径別の分級および分級後の個数濃度を計測することができる計測器である。SMPS は大きく分け、静電式分級器(DMA、Differential Mobility Analyzer)と、凝縮粒子カウンター(CPC、Condensation Particle Counter)の 2 つの部分より構成される。Model3034 は、DMA と CPC が一体化されており、Model3080 は SMPS の分級装置であり、Model3772 は CPC である。

SMPS の概要を図 3-19 に示す。計測するサンプルガスは、最初にインパクトを通過し、分級に影響を及ぼさずサンプルガス中の粒径の大きな粒子が除去される。その後、ニュートライザ(線源： $^{241}\text{Am}$  (241-アメリカシウム))を通過し、粒子は一価の帯電粒子となり DMA に輸送される。図 3-20 に DMA の模式図を示す。ニュートライザーによって荷電された粒子は DMA 入口で清浄な空気流により加速され、内部の電場で進行方向を変えられながら下流に流れる。この進行方向の変化角度は電気移動度に依存し、荷電量すなわちモビリティ径に依存する。その結果、出口となるスリット部には、特定の粒径範囲にある粒子のみが到達することになる。DMA の電場条件を変化させることによって、この粒径範囲が変化するため、粒径毎に分級することができる。スリットから出た粒子は CPC へ導かれる。DMA は、その長さを変化させることで分級範囲を変更することも可能である。

計測する粒子は可視光の波長より小さい物も存在するため、CPC へと導かれた粒子はアルコール( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ , 1-ブタノール)の過飽和状態(温度雰囲気：39 )の中を通過させ、その後冷却(温度雰囲気：22 )することで、計測する粒子は凝縮により大きな粒子へと成長する。その後、粒子数をレーザー光にて計数する(計数部温度：40 )。CPC ではこのように大きな粒子へ成長させてから計数することで、粒径の小さい粒子も計測することが可能となる。SMPS は、DMA に荷電する電圧を段階的に変化させながら、粒径別の濃度を計測していくため、1 回の計測に時間が必要であり、全粒径範囲を連続して計測することは出来ない。

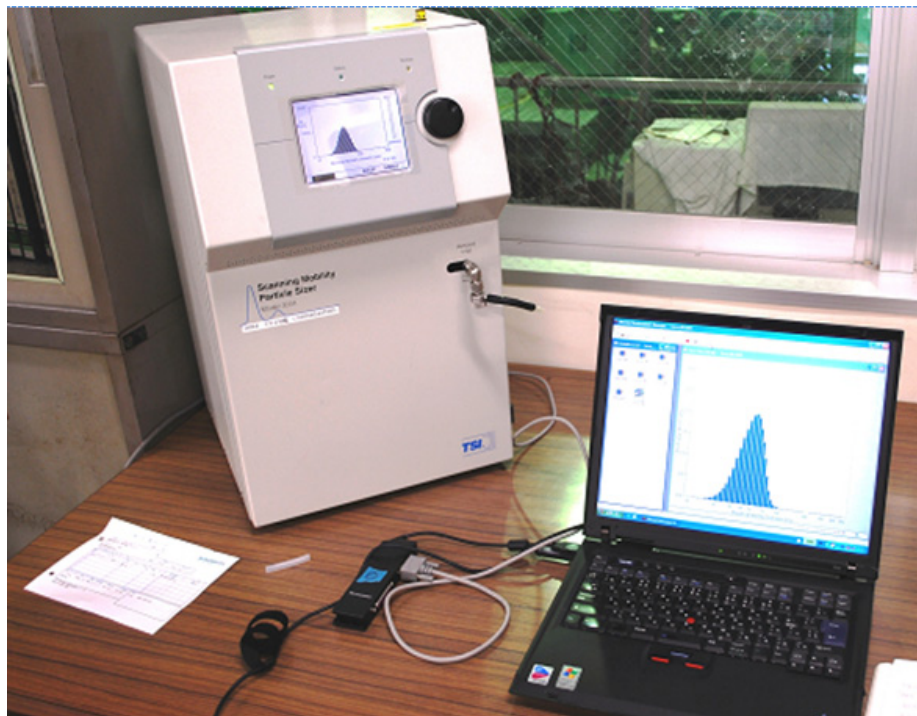


図 3-17 SMPS の外観 (Model 3034)



図 3-18 SMPS の外観 (Model 13080 (左) および CPC Model 13772 (右))

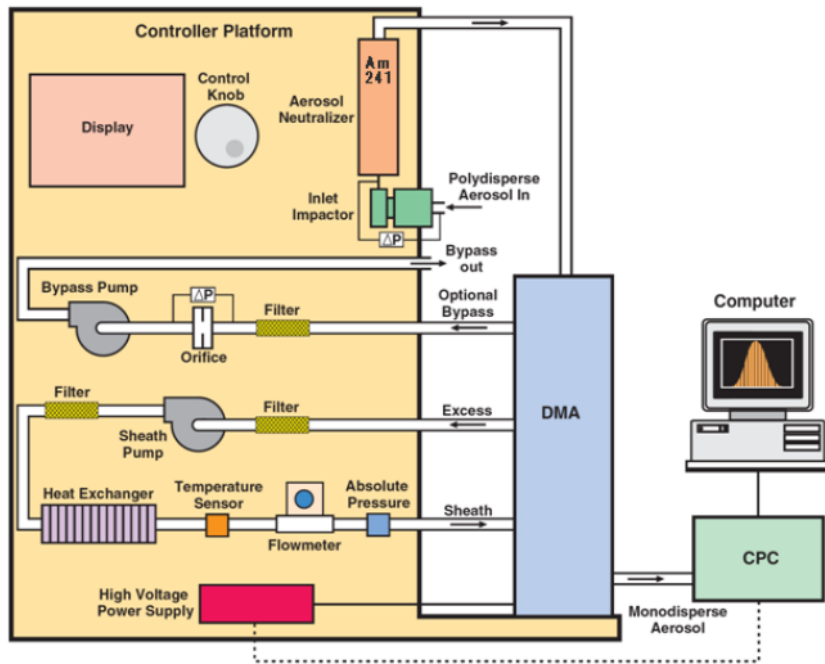


図 3-19 SMPS の概要<sup>3-3)</sup>

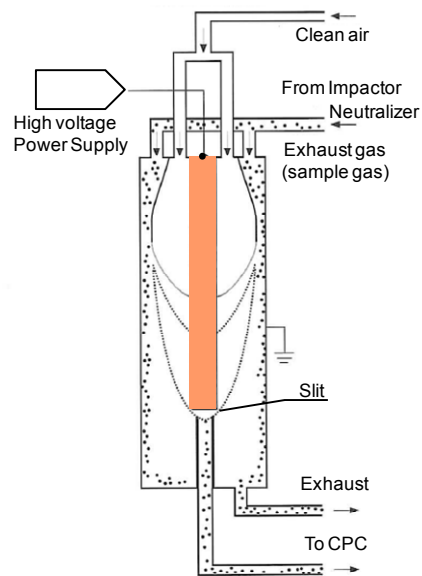


図 3-20 DMA の模式図<sup>3-3)</sup>

### 3.5.3 Electric Low Pressure Impactor (ELPI)

図 3-21 に ELPI(Electrical Low Pressure Impactor、DEKATI 製)の外観を示す。ELPI はコロナチャージャー、多段のインパクタ、エレクトロメータで構成される。

ELPI は、インパクタの下流を真空ポンプによって吸引し負圧とする低圧インパクタで、粒径(空気動力学径)0.029 ~ 10.01  $\mu\text{m}$ (50%分離粒径)をインパクタによって 12 段に分級しそれぞれの PM 濃度の測定を行う。ELPI の分級原理を図 3-22 に、ELPI のインパクタを図 3-23 に示す。

サンプルガスと共に ELPI に流入した PM は、コロナチャージャーによって帯電させられる。帯電した PM は、12 段のインパクタで粒径毎に分級され、分級後の PM は各ステージの捕集板に衝突するとともに帯電した電子を放出する。エレクトロメータではその放出された電子を電流として検出し PM の濃度へと変換する。本研究に用いたインパクタの各ステージの分級特性を表 3-3 に示す。ELPI の最大の特長は、PM を含む排ガスをインパクタに流している期間に連続的に実時間で流径分布を計測できることである。



図 3-21 ELPI の外観



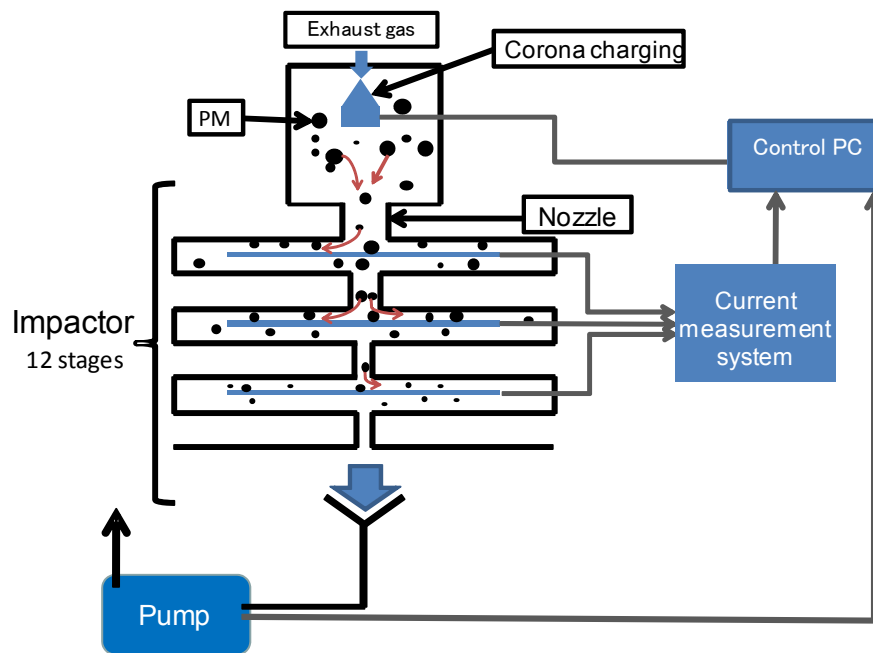


図 3-22 ELPI の分級原理



図 3-23 インパクタ

表 3-3 各ステージの分級特性(ELPI)

Stage	Dp [ $\mu\text{m}$ ] <sup>)</sup>	Stage	Dp [ $\mu\text{m}$ ] <sup>)</sup>
1	0.029	7	0.627
2	0.058	8	0.98
3	0.101	9	1.58
4	0.161	10	2.42
5	0.249	11	3.92
6	0.386	12	6.59

) 50% cut-off diameter

#### 3.5.4 SMPS と ELPI の計測範囲と特性

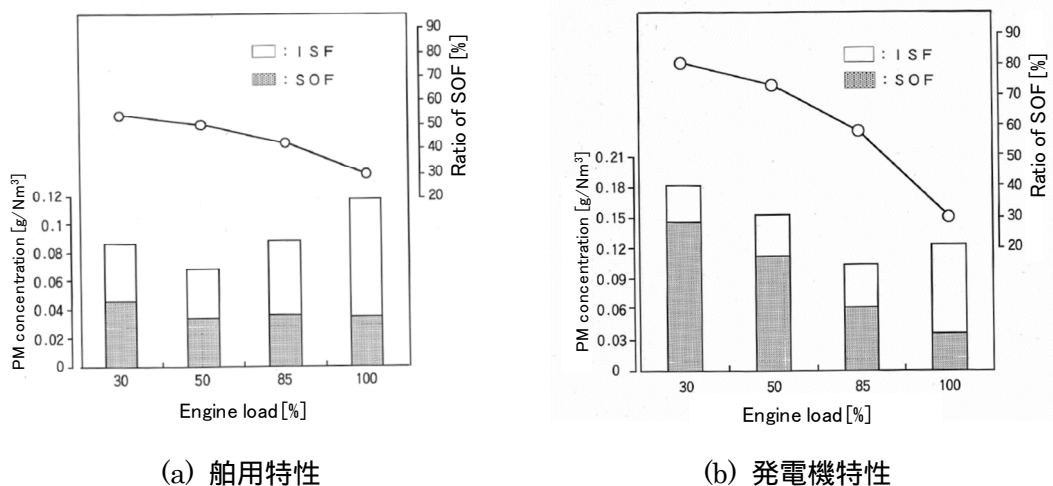
本研究に使用した SMPS(Model 3034, 3080)の分級粒径範囲はそれぞれ、7.64 ~ 469.8nm であり、その粒径間隔を 54 段もしくは 102 段に平均化している。ELPI による計測では、0.029  $\mu\text{m}$ (29 nm)から 6.59  $\mu\text{m}$ (6,590 nm)を 12 段のインパクタによって分級している。

SMPS では、469.8 nm 未満の粒子径を対象にした計測であるが、特に粒径の小さい範囲を多段に分級していることから、PM の核生成後から凝集過程における粒径分布の計測が可能である。一方、ELPI では SMPS より分級、計測の粒径範囲が広いが、12 段の分級である。ELPI では、各ステージ間の分級粒径が広いため、凝集による粒径変化等の確認には適していないが、PM 全体の粒径分布を把握することが可能である。

## 第 4 章 希釈トンネルの希釈率、希釈空気温度が 計測される粒径分布へ及ぼす影響<sup>4-1, 4-2, 4-3)</sup>

### 4.1 実験の目的および概要

フィルタ重量による PM 濃度の計測には、前述の通り希釈トンネルが用いられる。本章では、フィルタ計測と同様に希釈トンネルを用いて、希釈率、希釈空気温度が計測される粒径分布に与える影響を検討する。供試機関には船用 4 ストローク高速ディーゼル機関 (3L13AHS) を使用し、その排ガスを対象に実施する。希釈トンネルは、ISO 8178-1 および JIS B8008-1 に準拠した、分流希釈システムである。塚本らは、ISO 8178-1 に準拠した分流希釈トンネルを用いて、部分捕集方式によって船用 4 ストローク高速ディーゼル機関の PM 排出特性を調べており、その結果を図 4-1 に示す。図は(a)に船用特性時、(b)に発電機特性時の PM 濃度を示している。グラフは左から負荷率 30 %、50 %、85%、100%を示しており、それぞれの棒グラフが PM 濃度(微粒子濃度)(ハッチング部が SOF 濃度、白色部が ISF 濃度)を示している。また、折れ線グラフ PM 濃度に対する SOF 分の重量割合を示している。船用特性(図 4-1, (a))では、負荷率が 100 %から 50 %に減少すると共に、PM 濃度も減少するが、低負荷率である 30 %では PM 濃度が 50 %に対して上昇する。SOF 分割率は、負荷率が低い程、上昇していく。一方、発電機特性(図 4-1, (b))では負荷率 100 %から 85 %に減少する事で、船用特性と同様に一度 PM 濃度は低下するが、それより低い 50 %以下において PM 濃度は上昇する。SOF 分割率は、負荷率が低い程、上昇していくが、船用特性と比較すると、その上昇幅は大きく、負荷率 30 %では 81 %まで上昇する。これらは、負荷率が低いほどシリンダ壁面温度が低下し、壁面付近で火炎が冷やされたため SOF が生成



(a) 船用特性 (b) 発電機特性  
図 4-1 塚本らによる負荷率と PM 濃度の関係  
(船用 4 ストローク高速ディーゼル機関)

し、かつ、空気過剰率が大きく変化する発電機特性の方が、SOF の生成も大きく変化するためであるとしている。本章では、希釈トンネルにおける希釈率、希釈空気温度を変化させ SMPS および ELPI による粒径分布計測を行った。

## 4.2 低負荷率時の排ガスによる検討

ディーゼル機関の排ガスに含まれる凝縮性成分は、希釈過程によって計測される粒径分布に大きく影響する。ここでは、凝縮性成分の割合が高いと考えられる、SOF 分割率が最も高い、発電機特性の低負荷率時(負荷率：30%)の排ガスを対象に、希釈トンネルにおける希釈率、希釈空気温度を変化させ粒径分布の計測を行った。

### 4.2.1 実験装置および方法

実験装置の概要を図 4-2 に示す。実験を行った供試機関は、船用 4 ストローク高速ディーゼル機関(3L13AHS, 3.1 (2)参照)である。燃料油には市販の低硫黄 A 重油(硫黄分 = 0.07%)を使用した。燃料油の代表性状を表 4-1 に示す。

PM 計測装置は、希釈トンネル (3.2 参照)、希釈空気系統 (3.3 参照)、二次希釈器、SMPS および ELPI で構成される。二次希釈器は、SMPS の計測にロータリディスク型希釈器(3.4 (1) 参照)、ELPI の計測にエジェクター型希釈器(3.4 (2) 参照)を使用した。

供試機関を起動後、暖機運転が完了した後、発電機特性(機関回転数 1,200 rpm 一定)で運転し負荷率 30%に設定後、排ガス、冷却水等の機関各所の温度が定常となってから、希釈率および希釈空気温度の設定を行った。その後、希釈トンネル出口の希釈排ガス温度が定常となるのを確認し、SMPS および ELPI にて希釈トンネル出口の排ガスを計測した。SMPS では 3 分間の計測(1 scan)を計 3 回、ELPI では 20 秒間の計測(20 scan)を実施した。

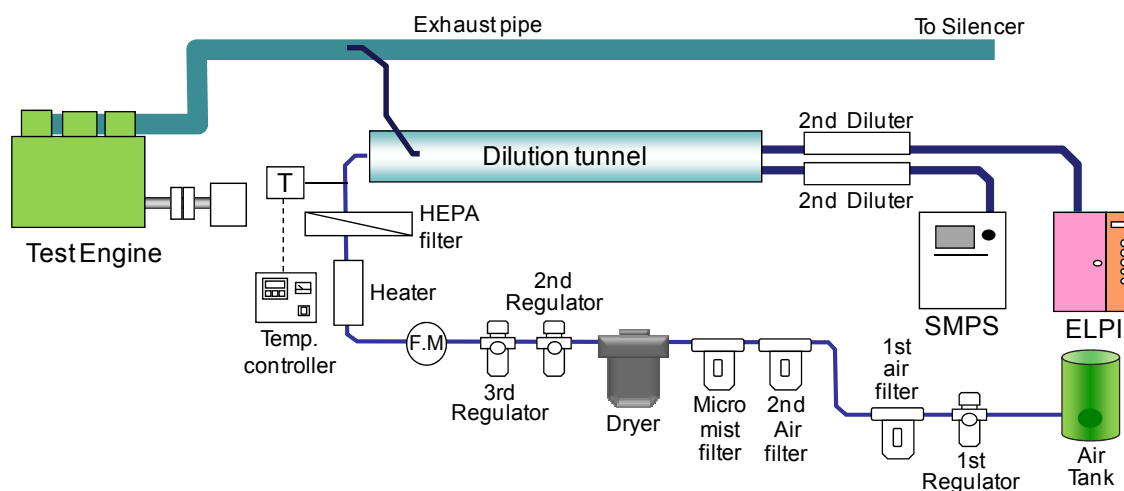


図 4-2 実験装置の全体図

表 4-1 燃料油の性状(代表性状)

Item	Value
Ash	0.001 (mass %)
Cetane number (JIS K2204)	47
Cetane number (JIS K2280)	44.6
Density (15 )	0.8616 (g/cm <sup>3</sup> )
Flash point	84.0 ( )
Pour point	- 25 ( )
Sulfur content	0.07 (mass %)
Water content	0.05 (mass %)
Calorific value (gross)	45340 (kJ/kg)
Calorific value (net)	42580 (kJ/kg)

SMPS の計測では、CPC の計数部に複数の粒子が同時に流入し計数値に誤差を生じる現象(コインシデンス現象)を防止するため、希釈トンネルからの排ガスを希釈器(ロータリーディスク型)で更に 250 倍に希釈した計測を行っている。また ELPI の計測では、エレクトロメータのレンジオーバーを防止するため、エジェクター希釈器にて希釈トンネルからの排ガスを更に 8 倍の希釈を行い計測を行った。

希釈トンネルの希釈率は、CO<sub>2</sub> 濃度計(3.5 (1)参照)にて計測した排ガス、希釈後の排ガスおよび希釈空気の CO<sub>2</sub> 濃度から算出した。算出式を式(4-1)に示す。

$$q_{DT} = \frac{C - C_a}{C_d - C_a} \quad \dots\dots\dots(4-1)$$

ここで、 $q_{DT}$  : 希釈トンネルによる希釈率  
 $C$  : 排ガス CO<sub>2</sub> 濃度  
 $C_d$  : 希釈後の排ガス CO<sub>2</sub> 濃度  
 $C_a$  : 希釈空気 CO<sub>2</sub> 濃度 を表している。

#### 4.2.2 実験ケース

実験条件を表 4-2 に示す。供試機関を発電機特性 30 % (22.1 kW)で運転した際の排ガスを対象に、希釈トンネルでの希釈率 8、10、12 の 3 段階に対して、それぞれ希釈空気温度を 20 、 30 、 40 とし、合計 9 ケースの計測を実施した。

表 4-2 実験条件

Name	Output (kW)	Dilution rate	Dilution air temperature (K)/[ ]
Case 30-8-1	22.07 (30 % load) (Constant speed operation)	8	293 / 20
Case 30-8-2		8	303 / 30
Case 30-8-3		8	313 / 40
Case 30-10-1		10	293 / 20
Case 30-10-2		10	303 / 30
Case 30-10-3		10	313 / 40
Case 30-12-1		12	293 / 20
Case 30-12-2		12	303 / 30
Case 30-12-3		12	313 / 40

#### 4.2.3 希釈空気の計測

ISO 8178-1 および JIS B8008-1 では、PM のフィルター計測前に希釈空気に含まれる粒子状物質濃度を計測し、PM 計測後の濃度から差し引いても良いとしている。ここでは、希釈空気に含まれる粒子状物質濃度の把握と、計測結果へ与える影響が無いことを確認するために、供試機関を停止した状態での粒径分布を SMPS および ELPI にて計測した。ELPI による計測では、個数濃度を算出するために粒子(PM)の密度を仮定する必要があるが、ここでは密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定した。SMPS による粒径と個数濃度の関係を図 4-3、ELPI による粒径と個数濃度の関係を図 4-4 に示す。

図 4-3 および図 4-4 では、横軸に粒径、縦軸に個数濃度を示しており、横軸は対数軸で表している。グラフ内のプロットは、各粒径における個数濃度を示しており、縦軸の濃度は「 $dN/d\log D_p$ 」で表している。これは、粒径が大きいほど各計測粒径の粒径間隔も大きい為、個数濃度をその粒径範囲で除すことで一定の基準として扱っている。すなわち、縦軸が個数濃度( $dN/d\log D_p$ )で横軸に粒径を示す場合、折れ線グラフの下部の面積は総個数濃度と比例する面積となる。また、図 4-3、4-4 に示した個数濃度を重量濃度に換算した結果を図 4-5、4-6 に示す。

図 4-5 および図 4-6 では、横軸に粒径、縦軸に重量濃度( $dW/d\log D_p$ )を表している。個数濃度から重量濃度への換算は、図 4-3、4-4 で計測された粒子状物質を完全な球形と仮定し、粒子の密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定して行った。

図 4-3 から 4-6 に示した通り、希釈空気に含まれる粒子状物質は非常に少なく、計測結果へ影響を与えないことを確認した。

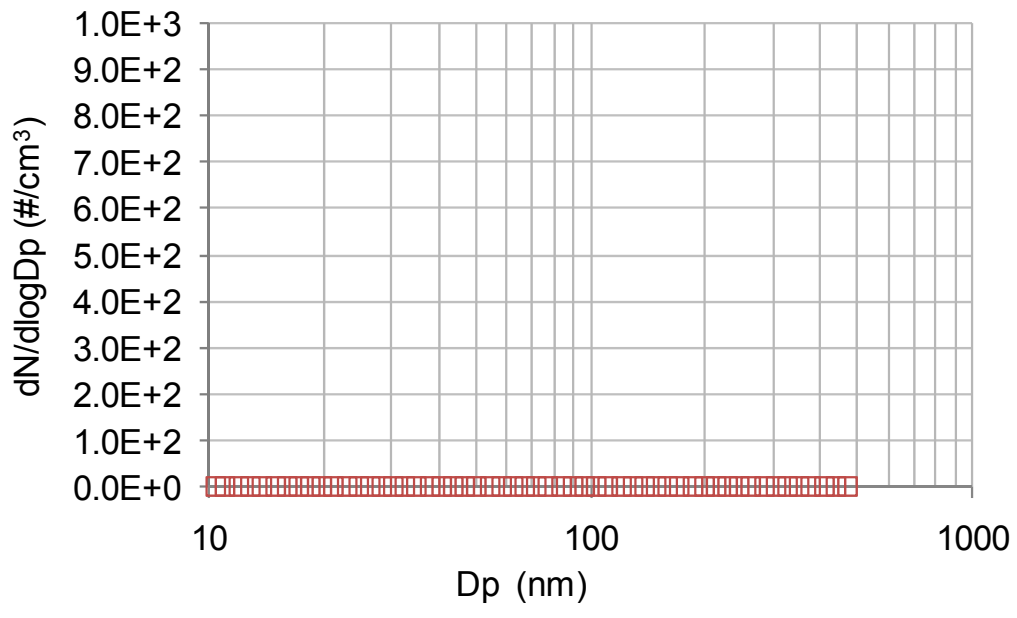


図 4-3 希釈空気中の粒径分布(個数濃度、SMPS)

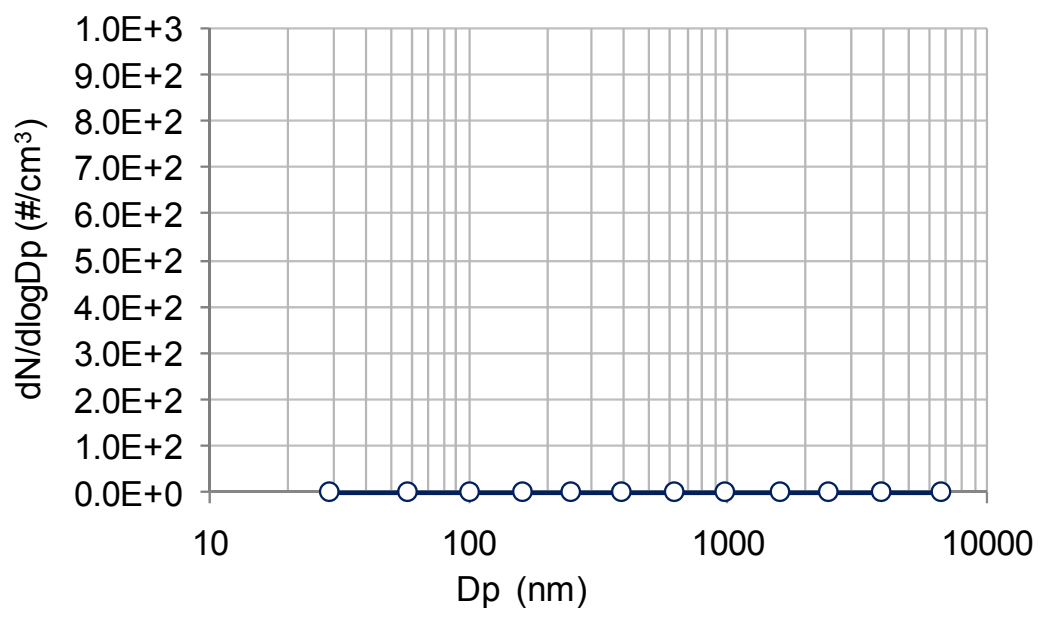


図 4-4 希釈空気中の粒径分布(個数濃度、ELPI)

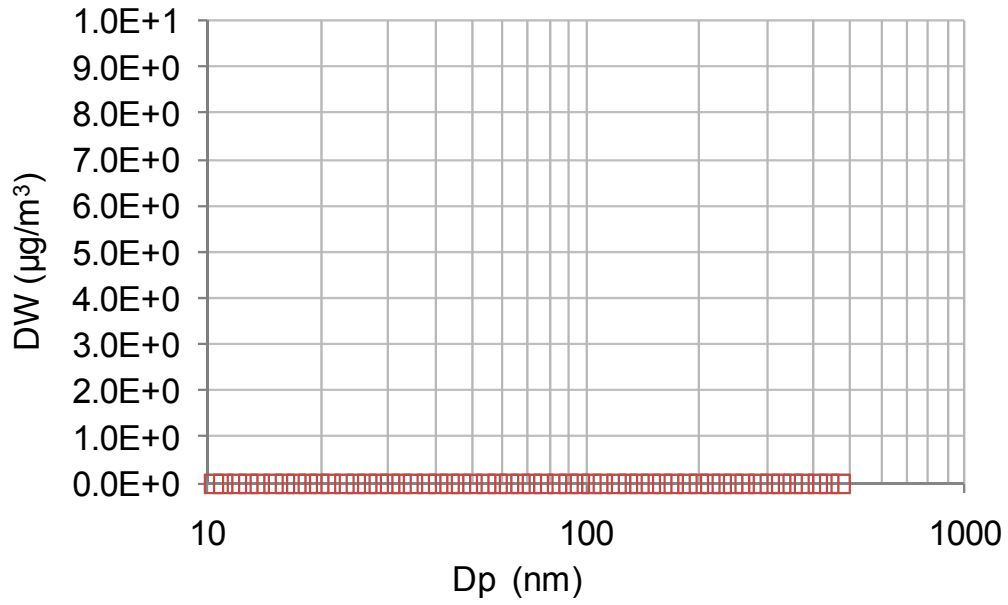


図 4-5 希釈空気中の粒径分布(重量濃度、SMPS)

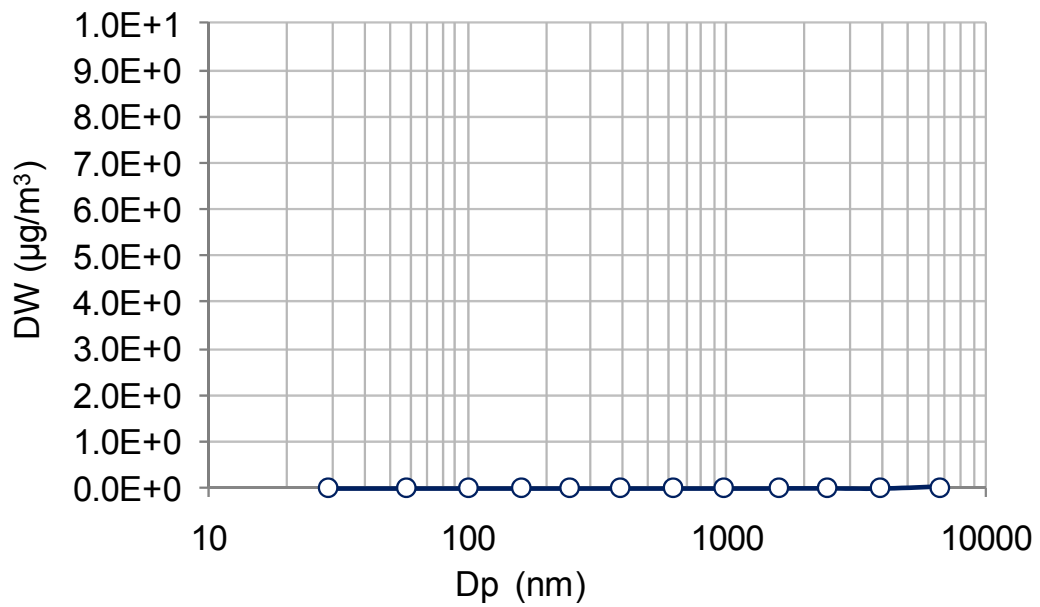


図 4-6 希釈空気中の粒径分布(重量濃度、ELPI)



#### 4.2.4 SMPS による粒径分布の計測

図 4-7, 4-8, 4-9 にそれぞれ発電機特性の負荷率 30 % で機関を運転した場合の SMPS による、粒径と個数濃度の関係を示す。図 4-7, 4-8, 4-9 では、縦軸は個数濃度(dN/dlogDp)、横軸は PM の粒径(モビリティ径、50%分離径)を表しており、図 4-7 は希釈トンネルによる希釈率が 8、図 4-8 は希釈率が 10、図 4-9 は希釈率が 12 の計測結果である。それぞれの図中の青丸の記号は希釈空気温度 20、赤三角の記号は希釈空気温度 30、緑四角の記号は希釈空気温度 40 の場合の粒径分布を示している。これらの図の縦軸に示す濃度はトンネル希釈率、2 次希釈器希釈率を考慮し、4-2 式で示す式で排気管内排ガス濃度に換算した換算濃度である。

$$C_{\text{calc.}} = C_{\text{meas.}} \times q_{\text{DT}} \times q_{\text{D}} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

- ここで、 $C_{\text{calc.}}$  : 換算濃度
- $C_{\text{meas.}}$  : 計測濃度
- $q_{\text{DT}}$  : 希釈トンネルによる希釈率 (4-1 式 参照)
- $q_{\text{D}}$  : 二次希釈器による希釈率 を示している。

負荷率 30%の希釈トンネル希釈率 8(図 4-7)では、全ての希釈空気温度の場合で個数濃度が 60 ~ 70 nm の粒径でピークを持つ粒径分布となる。希釈空気温度が高くなると個数濃度のピーク値が減少するとともに、個数濃度がピークとなる粒径(以降、モード径と記す)は、

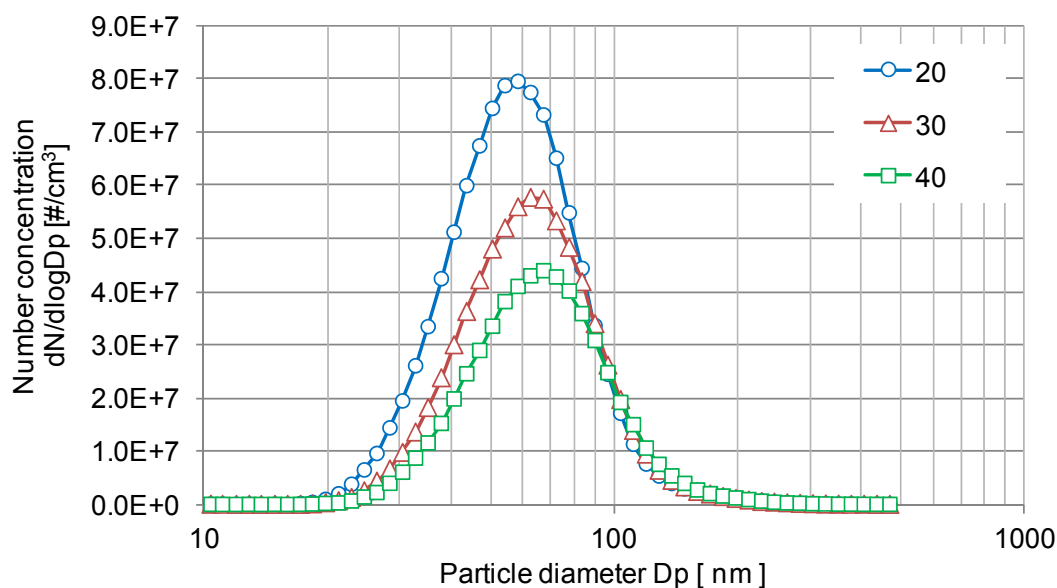


図 4-7 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:8, SMPS, 発電機特性 30 % load)

希釈空気温度 20 では 58 nm、希釈空気温度 30 では 64 nm、希釈空気温度 40 では 67 nm と大きくなる。

負荷率 30%の希釈トンネル希釈率 10(図 4-8)では、希釈率 8 の粒径分布(図 4-7)と同様に希釈空気温度が高いほど個数濃度は減少する。またモード径は希釈空気温度 20 では 46

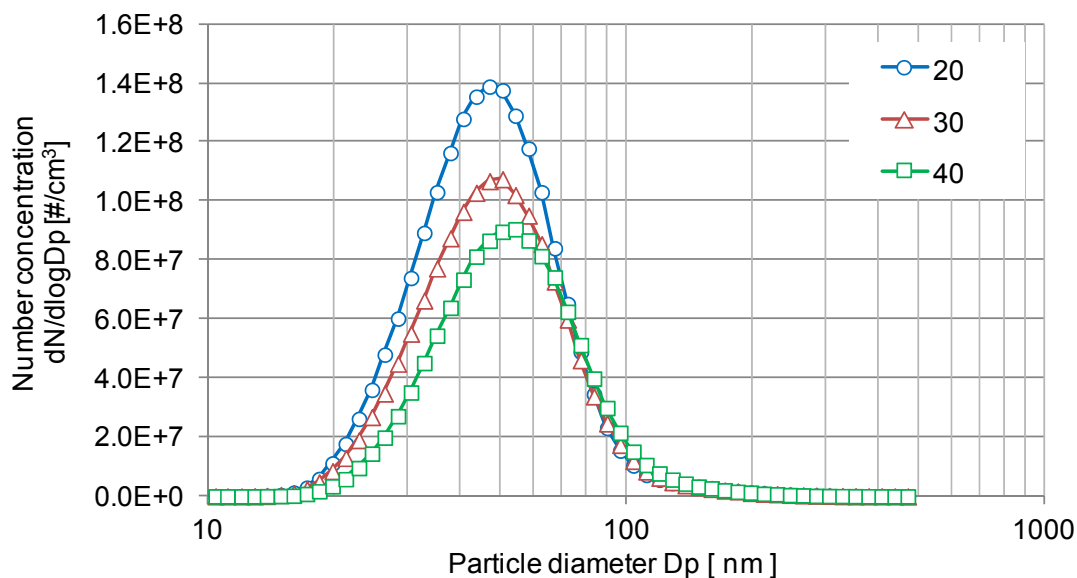


図 4-8 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:10, SMPS, 発電機特性 30 % load)

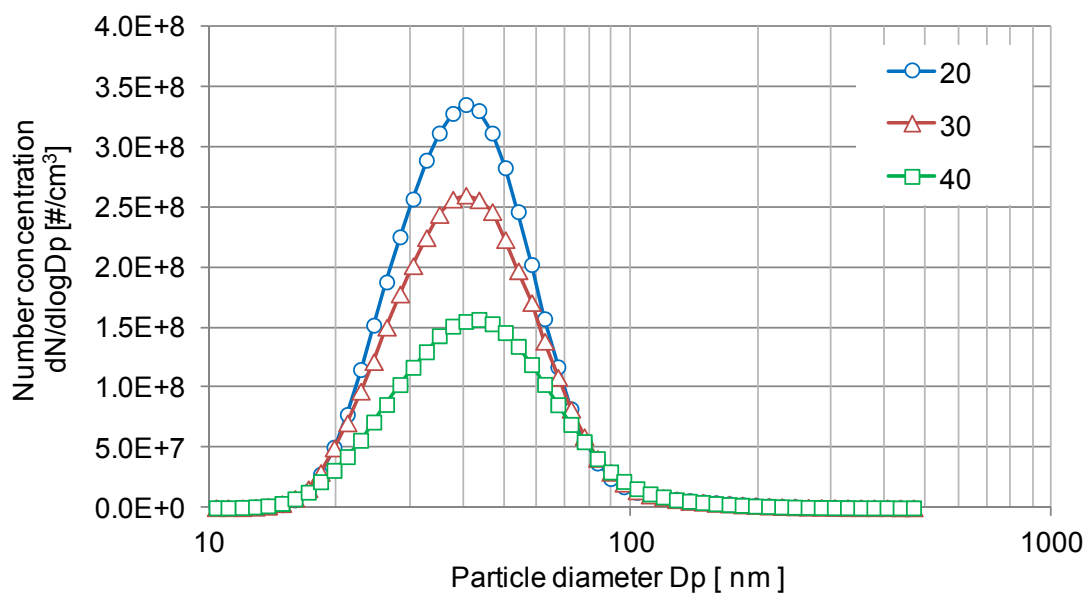


図 4-9 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:12, SMPS, 発電機特性 30 % load)

nm、希釈空気温度 30 では 49 nm、希釈空気温度 40 では 52 nm となり、希釈率 8 の粒径分布と比較して変化は小さいが、希釈空気温度の上昇によりモード径は大きくなる。希釈トンネル希釈率 12(図 4-9)では、希釈率 8、10 の粒径分布(図 4-7, 4-8)と同様に希釈空気温度が高いほど個数濃度は減少する。モード径は希釈空気温度 20 では 40.8 nm、希釈空気温度 30 では 39.7 nm、希釈空気温度 40 では 43.7 nm となり、希釈率 8 および 10 の粒径分布と比較して希釈空気温度によるモード径の変化は小さくなっているとともに、粒径は小さい方へシフトする。実験を行った範囲では、図 4-7, 4-8, 4-9 から分かるように、希釈空気温度が高い方が、計測される個数濃度のピーク値が減少し、モード径は粒径が大きい方へシフトする。

図 4-10 に希釈空気温度とモード径の関係を示す。図は横軸に希釈空気温度、縦軸にモード径を示しており、図中の線グラフは上から希釈トンネルによる希釈率が 8、10、12 の結果である。このグラフより、希釈トンネルによる希釈率が高い方がモード径は小さく、希釈空気温度が高い方がモード径も大きくなる傾向がある。

図 4-11, 4-12, 4-13 にそれぞれ図 4-7, 4-8, 4-9 で示した粒径分布から、個数濃度のピーク値が最も小さい希釈空気温度 40 の個数濃度に対して、希釈空気温度 30、20 の場合に計測される個数濃度の差を示している。図 4-11, 4-12, 4-13 では横軸に粒径、縦軸に個数濃度の増減を示している。希釈率が 8 の図 4-11 では、希釈空気温度 40 の場合の計測値を基準とした場合、希釈空気温度 30 では粒径 50~60 nm、希釈空気温度 20 では、50 nm をピークとする粒子状物質が増加している。粒径 100 nm 付近ではやや減少してい

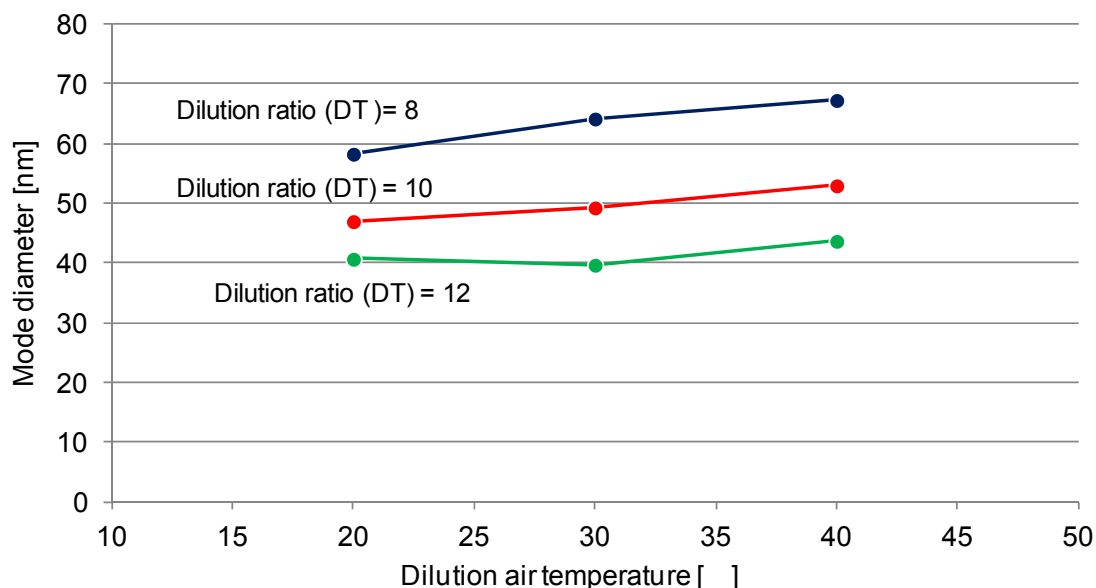


図 4-10 希釈空気温度とモード径の関係  
(希釈トンネル希釈率:8,10,12, SMPS, 発電機特性 30 % load)

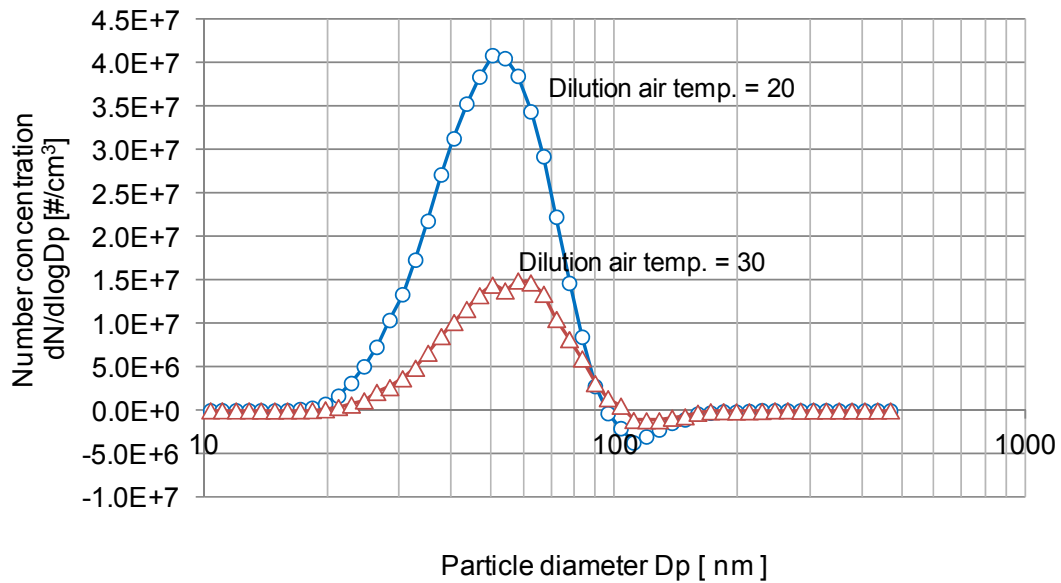


図 4-11 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
 (希釈トンネル希釈率：8, SMPS, 発電機特性 30 % load)

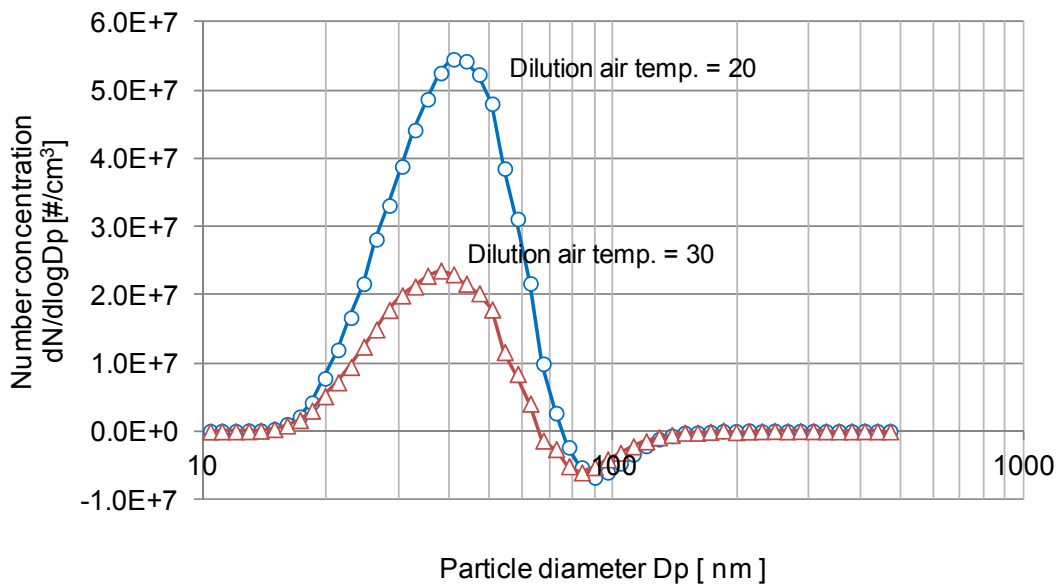


図 4-12 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
 (希釈トンネル希釈率：10, SMPS, 発電機特性 30 % load)

ることが確認出来る。粒径 20 nm 以下、粒径 200 nm 以上の粒子状物質の増減は殆ど無い。  
 希釈率が 10 の図 4-12 では、希釈空気温度 20 、 30 とも粒径 40 nm をピークとする粒

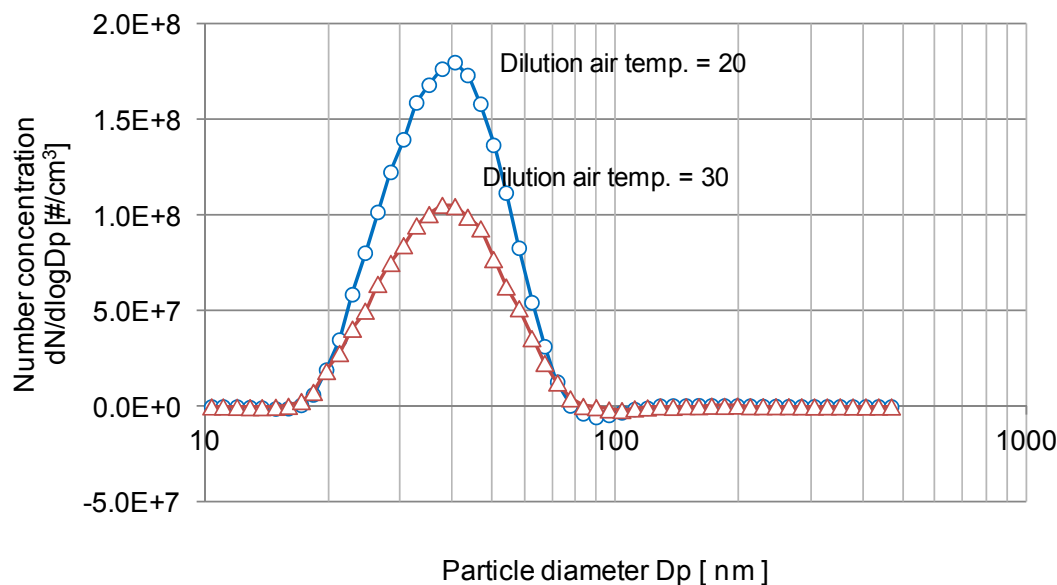


図 4-13 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
(希釈トンネル希釈率：12, SMPS, 発電機特性 30 % load)

子状物質の増加が確認でき、希釈率 8(図 4-11)と比較すると、増加のピークとなる粒径はやや小さい。また、希釈率 8 の場合と同様、100 nm 付近では個数濃度がやや減少していることが確認出来る。

希釈率が 12 の図 4-13 では、希釈空気温度 20、30 とともに粒径 40 nm をピークとする粒子状物質の増加が確認出来る。これらの結果より、希釈トンネルによる希釈率、希釈空気温度を変化させた場合、計測される粒径分布変化は、20 nm ~ 200 nm 付近であることが確認出来る。

希釈空気温度が低いほど、個数濃度のピーク値が高くなるのは、希釈空気温度 40 では気体で、SMPS によって計測されなかった SOF 分が、希釈空気温度の低下によって凝縮し、粒子となることで粒径 60 ~ 70 nm 程度の粒子が出現したためだと考えられる。また、希釈率が低いほど、個数濃度が小さくなり、かつモード径が大きくなるのは、希釈率が低い場合には、希釈トンネル内での粒子濃度が高いため、ブラウン運動による凝集もしくは粒子同士の衝突が頻繁に生じることによると考えられる。

#### 4.2.5 SMPS による重量濃度の検討

ここでは SMPS で計測した個数濃度を重量濃度に換算した。図 4-7, 4-8, 4-9 に示した負荷率 30%の粒径と個数濃度の計測結果を重量濃度に換算し、それぞれ粒径と重量濃度の関係として図 4-14, 4-15, 4-16 に示す。重量濃度の換算は、4.2.3 項と同様に、粒径から PM を完全な球体で密度 1.0 g/cm<sup>3</sup> と仮定した体積から重量へ換算した。図 4-14, 4-15, 4-16 とともに、縦軸は重量濃度(dM/dlogDp)、横軸は PM の粒径(モビリティ径、50%分離径)を表して

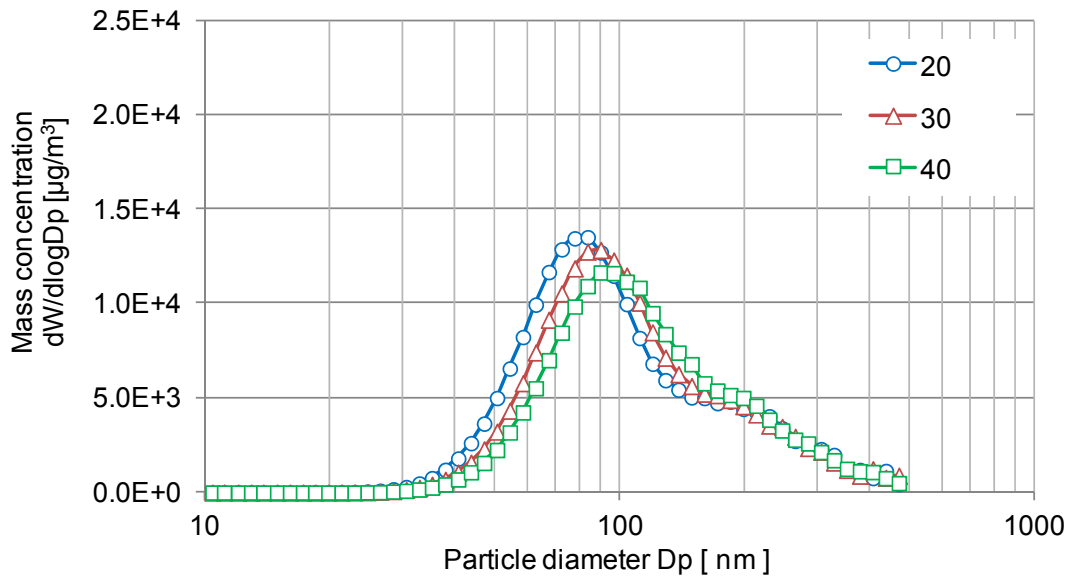


図 4-14 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:8, SMPS, 発電機特性 30 % load)

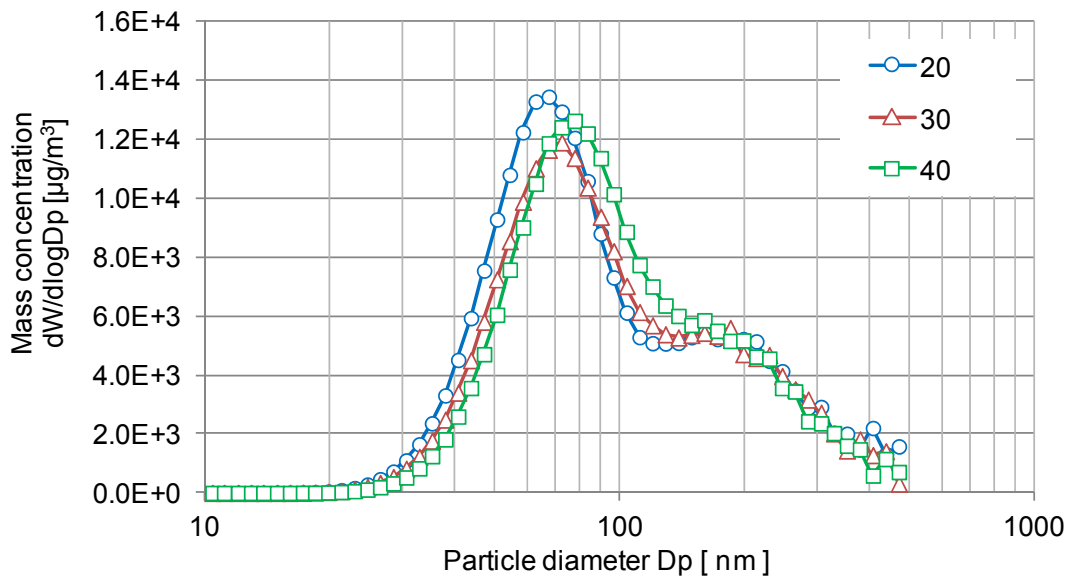


図 4-15 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:10, SMPS, 発電機特性 30 % load)

おり、図 4-14 は希釈トンネル希釈率 8、図 4-15 は希釈トンネル希釈率 10、図 4-16 は希釈トンネル希釈率 12 の場合の結果を示している。また、図中の青丸の記号は希釈空気温度 20、赤三角の記号は希釈空気温度 30、緑四角の記号は希釈空気温度 40 の粒径分布を示している。

ここで示した重量濃度は 4-2 式で示した換算式を使い、トンネル希釈率、二次希釈器希釈

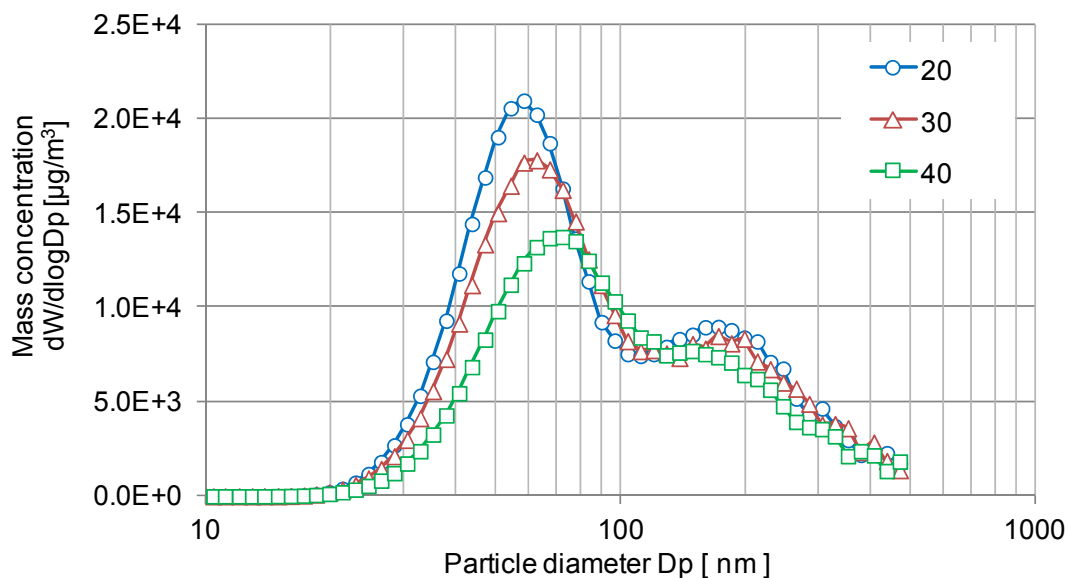


図 4-16 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:12, SMPS, 発電機特性 30 % load)

率を考慮し、排気管内の排ガス濃度に換算した値である。

負荷率 30%の希釈トンネル希釈率 8(図 4-14)では、希釈空気温度の上昇とともにモード径が大きくなり、希釈空気温度 20 でのモード径 81.6 nm が、希釈空気温度 30 で粒径 87.7nm、希釈空気温度 40 で粒径 92 nm となる。それぞれの重量濃度のピーク値は希釈空気温度の上昇とともにわずかに小さくなるが、粒径 150 nm 付近では希釈空気温度が高いほど重量濃度が高くなっている。

負荷率 30%の希釈トンネル希釈率 10(図 4-15)では、希釈率 8 の場合と同様に、希釈空気温度が上昇するとモード径が大きくなり、希釈空気温度 20 で 67.3 nm、希釈空気温度 30 で 72.3 nm、希釈空気温度 40 で 77.7 nm となる。また、希釈空気温度 40 では、粒径 90 ~ 150 nm 付近の PM が増加していることがわかる。

負荷率 30%の希釈トンネル希釈率 12(図 4-16)では、希釈率 8(図 4-14)、10(図 4-15)と比較すると明確にバイモーダル分布となった。各希釈空気温度の場合の粒径分布の 2 つのピークの内、粒径が小さい方のピークでは、希釈空気温度の変化によって個数濃度変化も大きかったことから、重量濃度のグラフにも明確に、希釈空気温度が高い程、ピーク濃度が減少していることが確認出来る。また、粒径が大きい方のピークは希釈空気温度の変化による差異が少ないが、希釈トンネルによる希釈率 8、10 の場合と比較すると、やや高いピークである。これは、ディーゼル機関から排出される PM が完全な球形ではないことによる誤差と、実際、希釈トンネルによる希釈の際に、凝縮性成分の凝縮によって粒径の大きい粒子状物質の周りに凝集した事によって生じた差異であると考えられる。

#### 4.2.6 SMPS によって計測した総個数濃度

SMPS によって計測された個数濃度の合計値を図 4-17 に示す。ここで示す総個数濃度は、図 4-7, 4-8, 4-9 で示した粒径分布における、各計測点の計測値を  $dN/d\log D_p$  とはせず、合算した値である。図 4-17 では横軸に希釈トンネルによる希釈率、縦軸に総個数濃度を示しており、図中の青線が希釈トンネルの希釈空気温度が 20℃、赤線が 30℃、緑線が 40℃の結果である。総個数濃度は、同一希釈率の場合、希釈トンネルの希釈空気温度が低い方が大きく、また、全ての希釈空気温度で希釈率が高い程、計測される総個数濃度も高くなる。

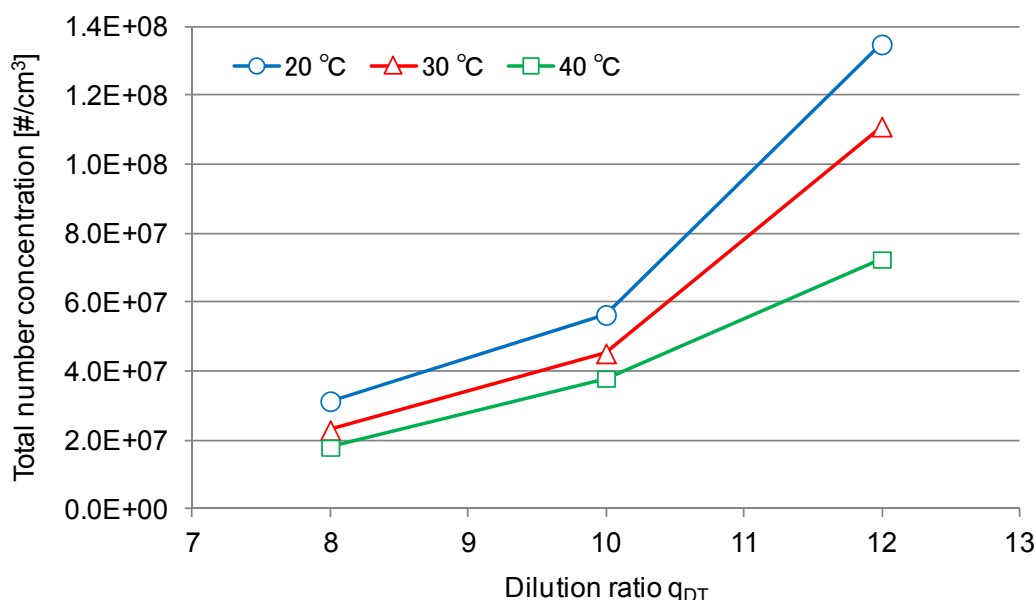


図 4-17 総個数濃度

(希釈トンネル希釈率:8, 10, 12, SMPS, 発電機特性 30 % load)

#### 4.2.7 ELPI による粒径分布の計測

ELPI によって計測した負荷率 30 % の粒径分布を図 4-18, 4-19, 4-20 に示す。ELPI による計測では、個数濃度を算出するために粒子の密度を仮定する必要があるが、ここでは密度を空気動力学径の密度である  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定した。図の縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸は粒径を示しており、図 4-18 は希釈トンネル希釈率 8、図 4-19 は希釈トンネル希釈率 10、図 4-20 は希釈トンネル希釈率 12 を示している。また、図中の青丸の記号は希釈空気温度 20℃、図中の赤三角の記号は希釈空気温度 30℃、図中の緑四角の記号は希釈空気温度 40℃の結果を示している。希釈トンネルによる希釈率が 8 の図 4-18 では、全ての希釈空気温度の結果において最も粒径の小さい、29 nm がモード径となる。また、希釈空気温度が高い程、そのピーク値は低くなる。希釈トンネルによる希釈率が 10 である図 4-19 では、



希釈トンネルによる希釈率が8である図 3-17 と同様に、モード径は 29 nm であり、希釈空気温度が 30 の場合と、40 の場合の差異は小さいものの希釈空気温度が高い程、個数濃度は低くなる。希釈トンネルによる希釈率が 12 である図 4-20 でも同様に、モード径は 29 nm となり、希釈空気温度が高い程、個数濃度は低くなる。

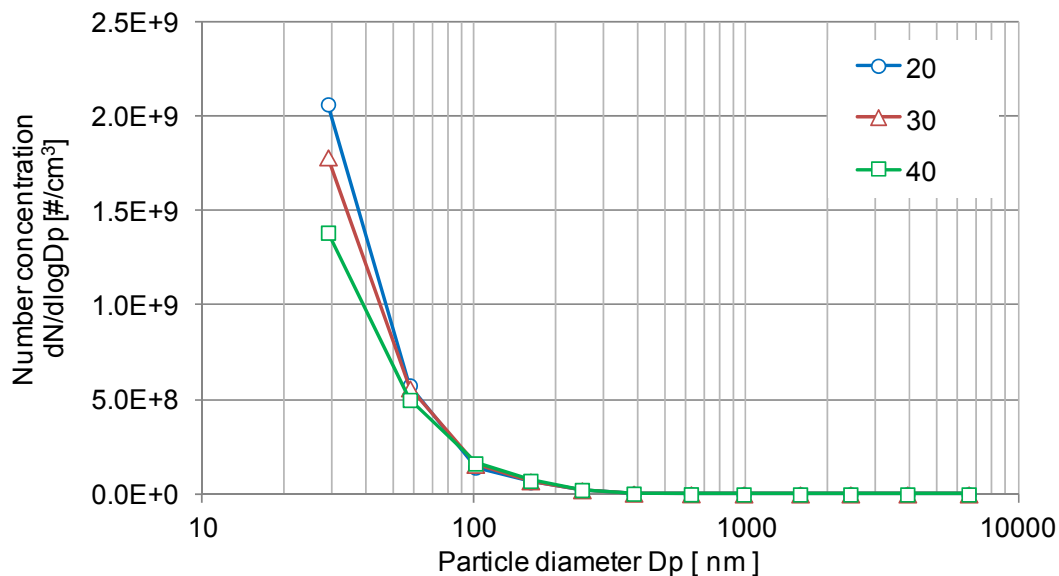


図 4-18 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:8, ELPI, 発電機特性 30 % load)

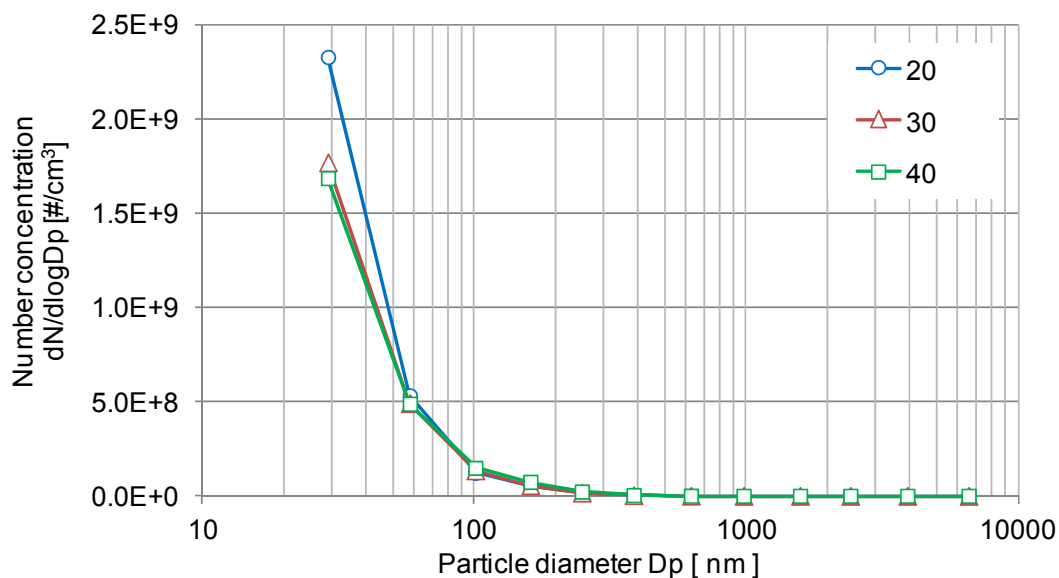


図 4-19 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:10, ELPI, 発電機特性 30 % load)

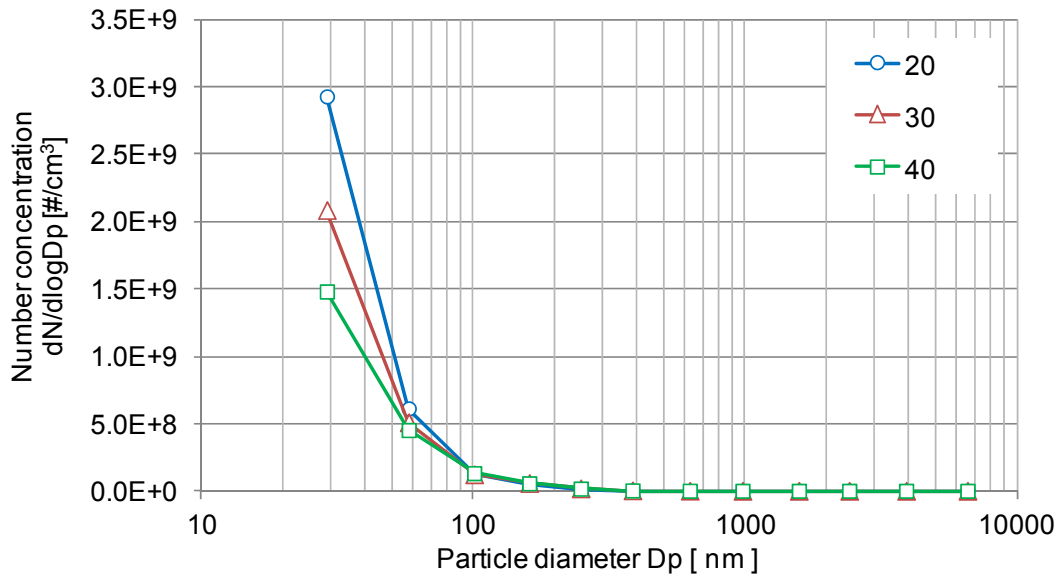


図 4-20 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:12, ELPI, 発電機特性 30 % load)

図 4-18, 4-19, 4-20 とともに、粒径 100 nm 以上では、希釈空気温度の違いによる濃度の変化は無く、また濃度のピーク値は ELPI の分級範囲の最も小さい粒径となる。希釈空気温度 20 の希釈トンネル希釈率 8、10、12 を比較すると希釈率が高くなると個数濃度のピーク値も高くなる。また、同様に希釈空気温度 40 を比較すると希釈率の違いによる個数濃度ピーク値の変化は小さい。

#### 4.2.8 ELPI による総個数濃度

ELPI によって計測された個数濃度の合計値を図 4-21 に示す。図 4-17 と同様に、ここで示す総個数濃度は、図 4-18, 4-19, 4-20 で示した粒径分布における、各計測点の計測値を  $dN/d\log D_p$  とはせず、合算した値である。図 4-21 では横軸に希釈トンネルによる希釈率、縦軸に総個数濃度を示しており、図中の青線が希釈トンネルの希釈空気温度が 20、赤線が 30、緑線が 40 の結果である。希釈空気温度が 20 の場合、希釈率が増加すると、総個数濃度の上昇する。希釈空気温度が 30、20 では、希釈率の増加による、明確な総個数濃度の増加は無い。

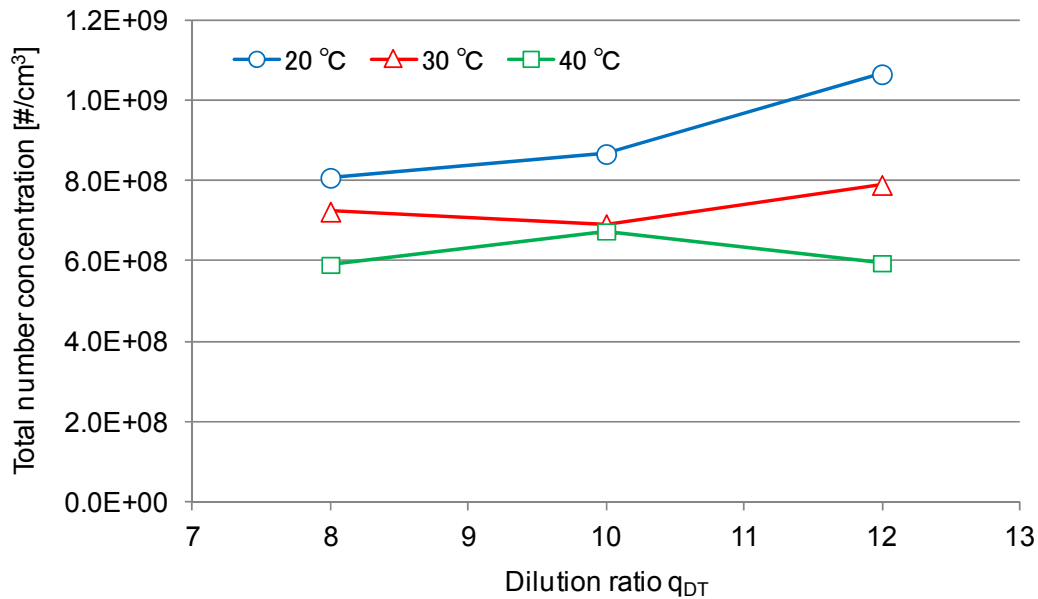


図 4-21 総個数濃度

(希釈トンネル希釈率:8, 10, 12, ELPI, 発電機特性 30 % load)

#### 4.3 機関負荷率 75 %時の排ガスによる検討

前項(4.2 項)では、船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象に、SOF 分割合が最も高い、発電機特性の低負荷率時(負荷率:30%)の排ガスを対象に検討した。本項では、発電機特性上で、PM 濃度、SOF 分割合とも、低負荷率時より低い負荷率 75 %の排ガスを用いて前項同様の検討を行う。なお、実験装置構成、計測器は、前項(4.2, 図 3-1 参照)と同様の構成とし、使用燃料油も同一の燃料油を使用した。なお、希釈トンネルおよび希釈空気系統は前項と同一システムを使用しており、ここでは、希釈空気計測結果は省略する。

##### 4.3.1 実験ケース

実験条件を、表 4-3 に示す。供試機関を発電機特性負荷率 75 %(55.16 kW)で運転した際の排ガスを対象に、4.2 項と同様な条件で、希釈トンネルによる希釈率 8、10、12 の 3 段階に対して、それぞれ希釈空気温度を 20、30、40 とし、合計 9 ケースの計測を実施した。二時希釈条件も前項と同様に、SMPS ではロータリーディスク型希釈器を用い 250 倍、ELPI ではエジェクター型希釈器を用い 8 倍に希釈を行っている。

##### 4.3.2 SMPS による粒径分布の計測

図 4-22, 4-23, 4-24 にそれぞれ、発電機特性の負荷率 75 %で機関を運転した場合の粒径分布を示す。図 4-22, 4-23, 4-24 では、縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸は粒径(モビリティ

表 4-3 実験条件

Name	Output (kW)	Dilution rate	Dilution air temperature (K)/[ ]
Case 75-8-1	55.16 (75 % load) (Constant speed operation)	8	293 / 20
Case 75-8-2		8	303 / 30
Case 75-8-3		8	313 / 40
Case 75-10-1		10	293 / 20
Case 75-10-2		10	303 / 30
Case 75-10-3		10	313 / 40
Case 75-12-1		12	293 / 20
Case 75-12-2		12	303 / 30
Case 75-12-3		12	313 / 40

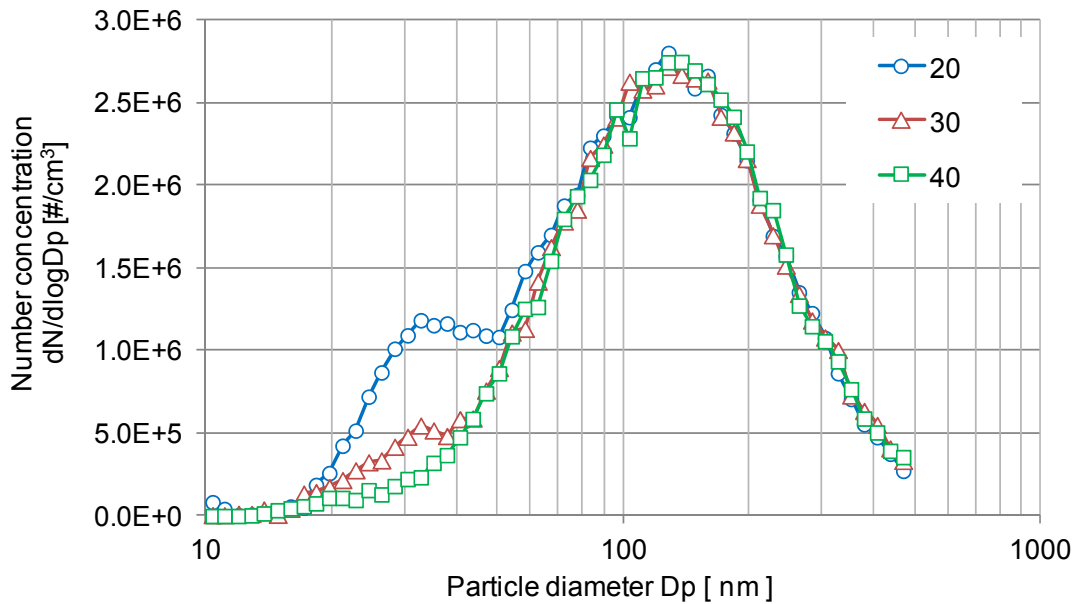


図 4-22 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:8, SMPS, 発電機特性 75 % load)

イ径、50 %分離径)を表しており、図 4-22 は希釈トンネルによる希釈率が 8、図 4-23 は希釈率 10、図 4-24 は希釈率 12 の計測結果である。それぞれの図中の青丸の記号は希釈空気温度 20 、赤三角の記号は希釈空気温度 30 、緑四角の記号は希釈空気温度 40 の場合

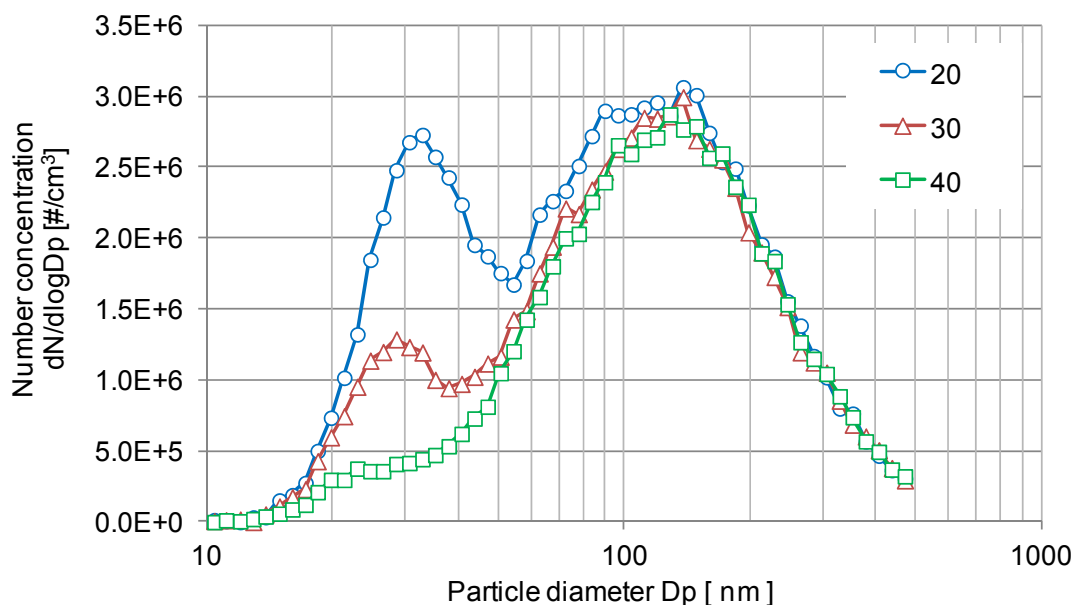


図 4-23 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:10, SMPS, 発電機特性 75 % load)

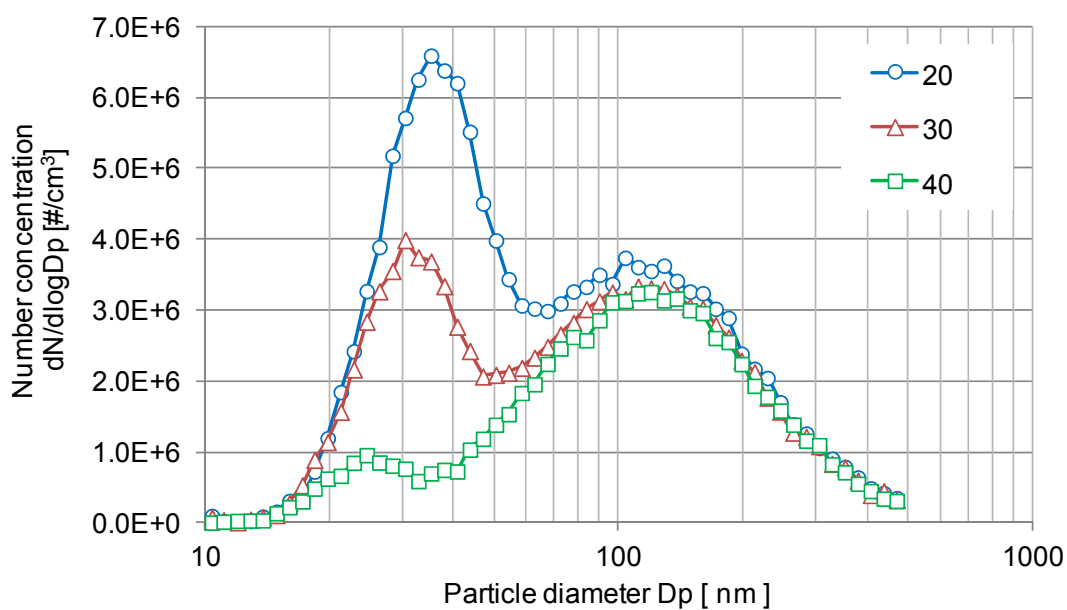


図 4-24 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:12, SMPS, 発電機特性 75 % load)

の粒径分布を示している。これらの図の縦軸に示す濃度はトンネル希釈率、2次希釈器希釈率を考慮し、前項の4-2式で示す式で排気管内排ガス濃度に換算した換算濃度である。

供試機関の負荷率75%の希釈トンネル希釈率8(図4-22)では、希釈空気温度20、30で個数濃度のピークが2カ所に現れるバイモーダルな粒径分布となる。希釈空気温度の上昇とともに、2つのピークのうち粒径の小さい方の個数濃度のピーク値が小さくなり、粒径の大きい方のピーク値はほとんど変化しない。希釈トンネル希釈率10(図4-23)では、希釈率8の粒径分布(図4-22)と同様に希釈空気温度20、30でバイモーダルな粒径分布となり、希釈空気温度の上昇とともに、2つのピークのうち粒径の小さい方の個数濃度のピーク値が小さくなり、粒径の大きい方のピーク値はほとんど変化しない。希釈トンネル希釈率12(図4-24)では、希釈空気温度20、30、40でバイモーダルな粒径分布となる。希釈率8、10の粒径分布(図4-22、4-23)と同様に、希釈空気温度の上昇とともに2つのピークのうち粒径の小さい方の個数濃度のピーク値が、小さくなり、粒径の大きい方のピーク値はほとんど変化しない。

バイモーダルな分布の粒径の大きい方のピークでは、希釈条件が変化しても大きく変化しないため、希釈トンネルへ排ガスが流入する前に生成されている粒子であると考えられる。発電機特性の負荷率30%の排ガスでは、SOF分割率が高いため、希釈トンネルへ排ガスが流入する前に生成された粒子に対して、希釈トンネル内で生成される粒子が非常に多く、希釈条件によって変化するモノモーダルな分布であったと考えられる。

また、希釈率が高い程、バイモーダルな分布の粒径の小さいピークが大きく変化したのは、揮発性成分は希釈されるほど核生成される粒子数は減少すると考えられるが、希釈トンネルの希釈率が8-12程度においては、希釈による濃度低下より希釈空気による冷却が大きく影響した物であると考えられる。また、希釈温度が高いほど粒径の小さい方のピークとなる粒子径が小さいのは、負荷率30%の排ガスと比較して個数濃度は小さく凝集による粒子の粗大化が遅いためであると考えられる。

図4-25、4-26、4-27にそれぞれ図4-22、4-23、4-24で示した粒径分布から、個数濃度のピーク値が最も少ない希釈空気温度40の個数濃度に対して、希釈空気温度30、20の場合に計測される個数濃度の差を示している。図4-25、4-26、4-27では横軸に粒径、縦軸に個数濃度の増減を示している。

希釈率が8の図4-25では、希釈空気温度40の場合の計測値を基準とした場合、希釈空気温度30、20の粒径分布の計測とも粒径30nmでピークとなる個数濃度の増加が見られた。粒径60nm以上の範囲では、Y軸スケールが小さい事もあるが、乱れた分布となっている。

希釈率が10の図4-26では、希釈空気温度20、30とも粒径30nmをピークとする粒子状物質の増加が確認でき、希釈率8(図4-25)と比較すると、増加のピークとなる粒径はほぼ同じである。

希釈率が 12 の図 4-27 では、希釈空気温度 20、30 とともに粒径 40 nm をピークとする粒子状物質の増加が確認出来る。これらの結果より、希釈トンネルによる希釈率、希釈空気温度を変化させた場合、計測される粒径分布変化は、20 nm ~ 200 nm 付近で変化していることが確認出来る。

希釈空気温度が低いほど、個数濃度のピーク値が高くなるのは、希釈空気温度 40 では気体で、SMPS によって計測されなかった SOF 分が、希釈空気温度の低下によって凝縮し、粒子となることで粒径 30 ~ 40 nm 程度の粒子が出現したためだと考えられる。また、負荷率 30 % の結果と比較し、それらのモード径が小さいのは希釈トンネル内における核生成された粒子の個数濃度が低く、ブラウン運動による凝集や粒子同士の衝突の頻度が低かったためであると考えられる。

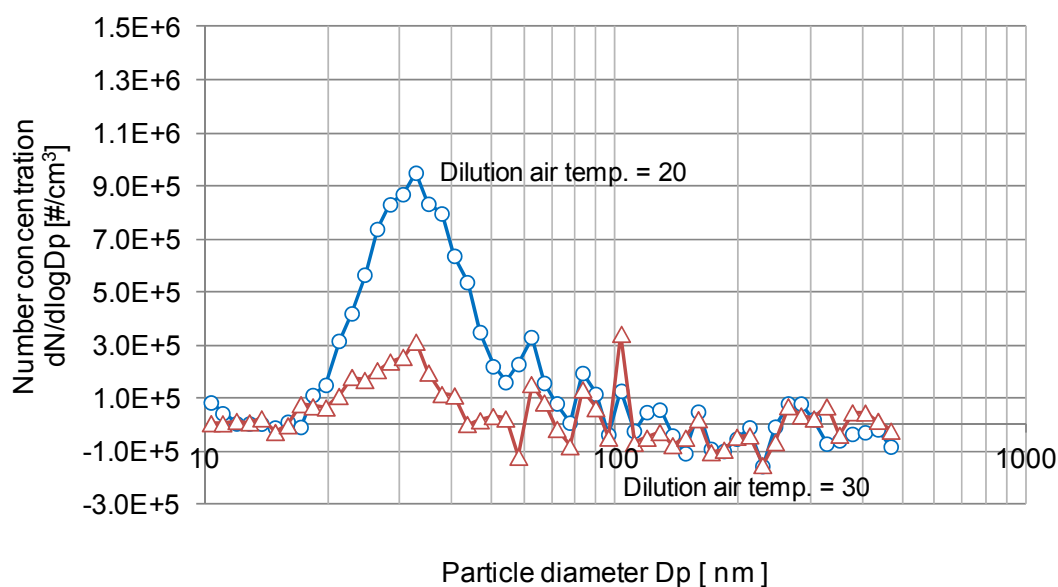


図 4-25 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
(希釈トンネル希釈率：8, SMPS, 発電機特性 75 % load)

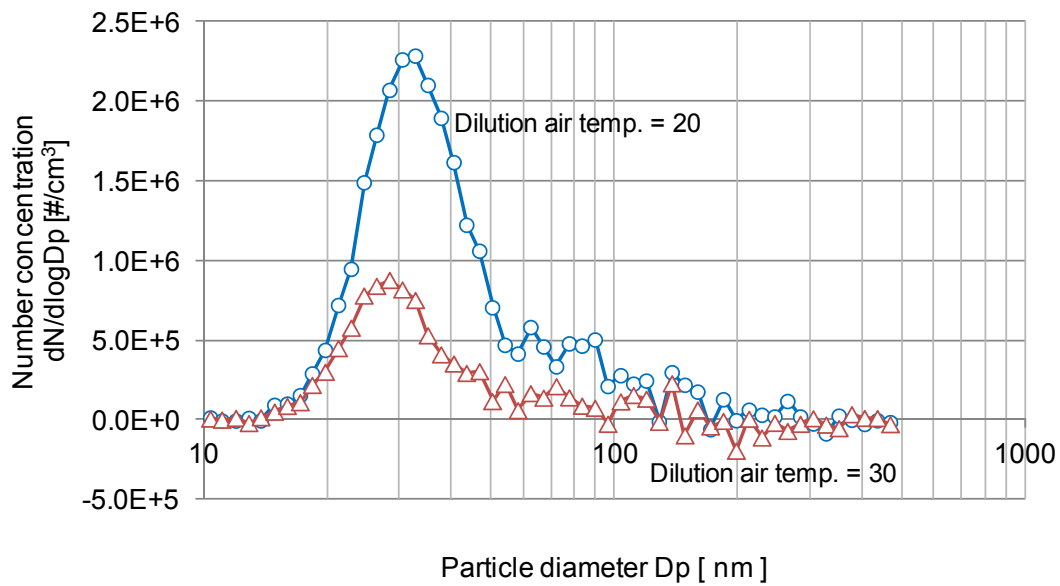


図 4-26 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
 (希釈トンネル希釈率：10, SMPS, 発電機特性 75 % load)

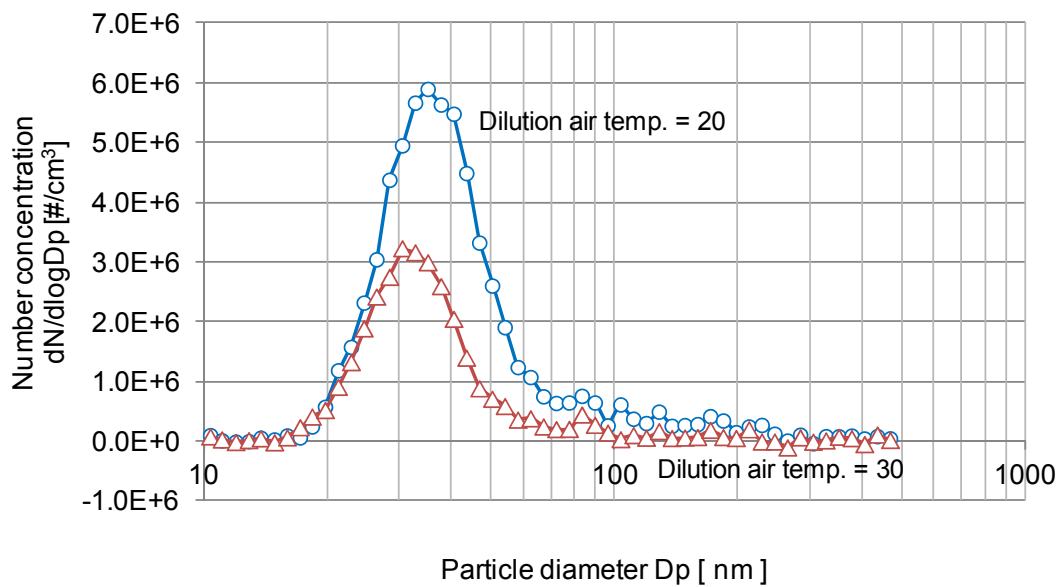


図 4-27 個数濃度差 (ベース：希釈空気温度 40 )  
 (希釈トンネル希釈率：12, SMPS, 発電機特性 75 % load)



#### 4.3.3 SMPS による重量濃度の検討

ここでは SMPS で計測した個数濃度を重量濃度に換算した。図 4-22、4-23、4-24 に示した負荷率 75 % の個数濃度計測結果を重量濃度に換算し、それぞれ粒径と重量濃度の関係として図 4-28、4-29、4-30 に示す。重量濃度の換算は、4.2.5 項と同様に、粒径から PM を完全な球体で密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定した体積から重量へ換算した。図 4-28、4-29、4-30 とも、縦軸は重量濃度( $dW/d\log D_p$ )、横軸は PM の粒径(モビリティ径、50%分離径)を表しており、図 4-28 は希釈トンネル希釈率 8、図 4-29 は希釈トンネル希釈率 10、図 4-30 は希釈トンネル希釈率 12 の場合の結果を示している。また、図中の青丸の記号は希釈空気温度 20、赤三角の記号は希釈空気温度 30、緑四角の記号は希釈空気温度 40 の粒径分布を示している。

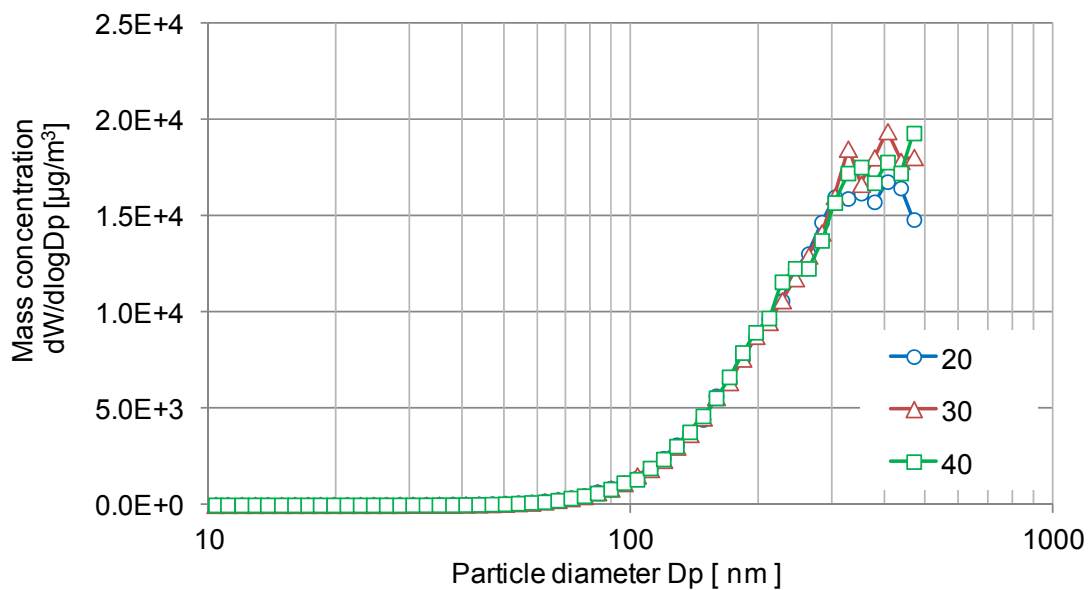


図 4-28 粒径と重量濃度の関係 ( $dW/d\log D_p$ )  
(希釈トンネル希釈率:8, SMPS, 発電機特性 75 % load)

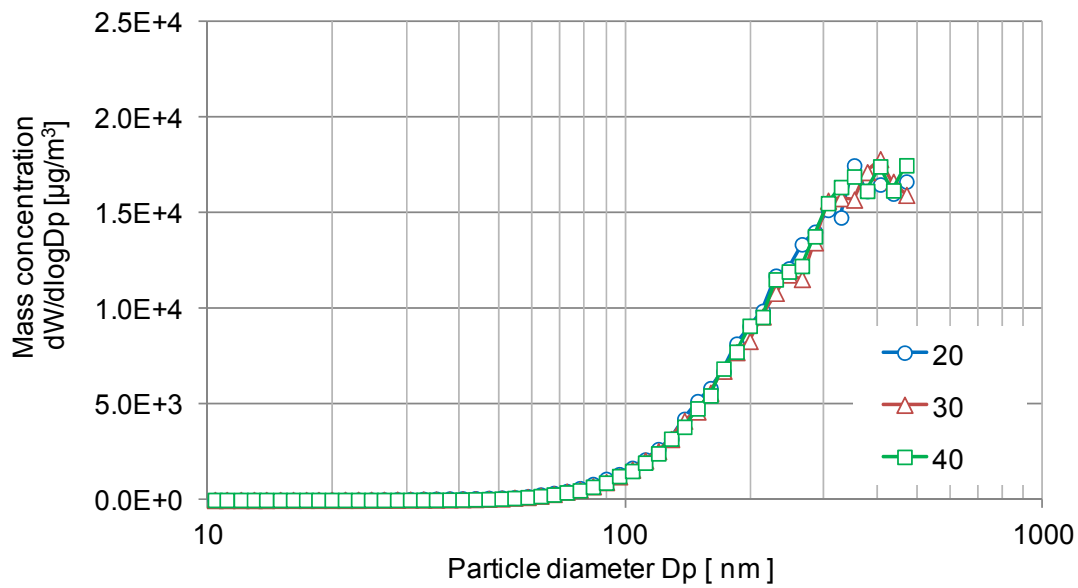


図 4-29 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
 (希釈トンネル希釈率:10, SMPS, 発電機特性 75 % load)

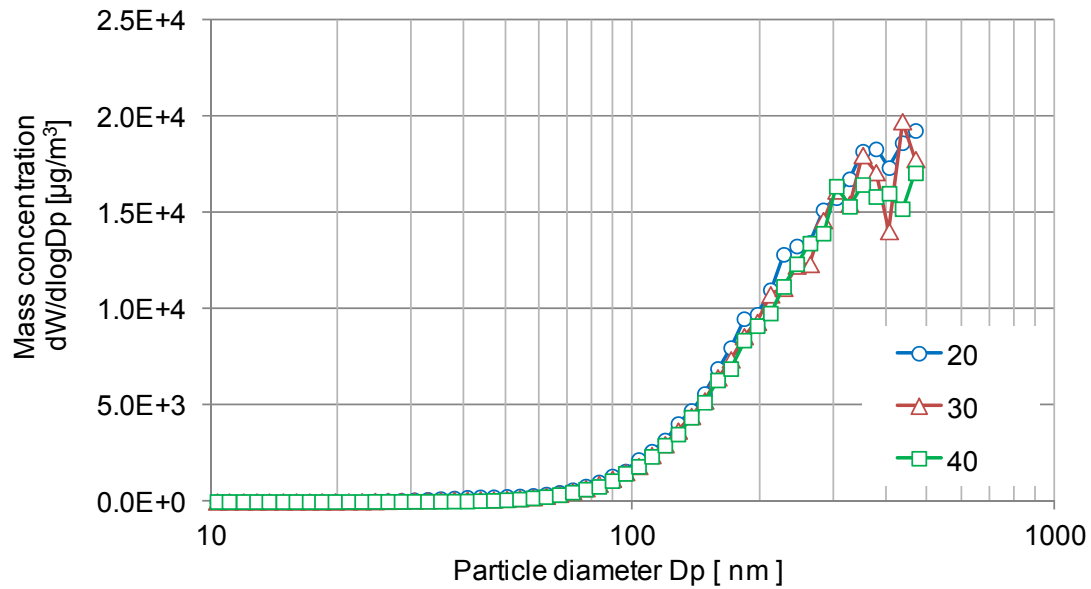


図 4-30 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
 (希釈トンネル希釈率:12, SMPS, 発電機特性 75 % load)

負荷率 75%の希釈トンネル希釈率 8(図 4-28)では、希釈空気温度の違いによる重量濃度分布の明確な違いは確認できない。また、SMPS の計測範囲の粒径上限値近くがピークとなる。負荷率 75%の希釈トンネル希釈率 10(図 4-29)および希釈トンネル希釈率 12(図 4-30)でも、希釈率 8(図 4-28)と同様に希釈空気温度の違いによる重量濃度の明確な違いはなく、SMPS の計測範囲の粒径上限値近くがピークとなる。図 4-22、4-23、4-24 で示したように負荷率 75 %では、個数濃度分布がバイモーダルとなるが、2つのピーク値のうち、粒径の大きい方のピークが重量濃度に換算した場合には支配的となり計測粒径上限値近くピークが現れる。また、この粒径が大きいピークは、希釈空気温度および希釈率の影響をほとんど受けないために、重量濃度分布は希釈空気温度および希釈率によって変化しないためである。

#### 4.3.4 ELPI による検討

ELPI によって計測した負荷率 75 %の粒径分布を図 4-31, 4-32, 4-33 に示す。ここで示す個数濃度は密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定した値である。図の縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸は粒径を示しており、図 4-31 は希釈トンネル希釈率 8、図 4-32 は希釈トンネル希釈率 10、図 4-33 は希釈トンネル希釈率 12 を示している。また、図中の青丸の記号は希釈空気温度 20、図中の赤三角の記号は希釈空気温度 30、図中の緑四角の記号は希釈空気温度 40

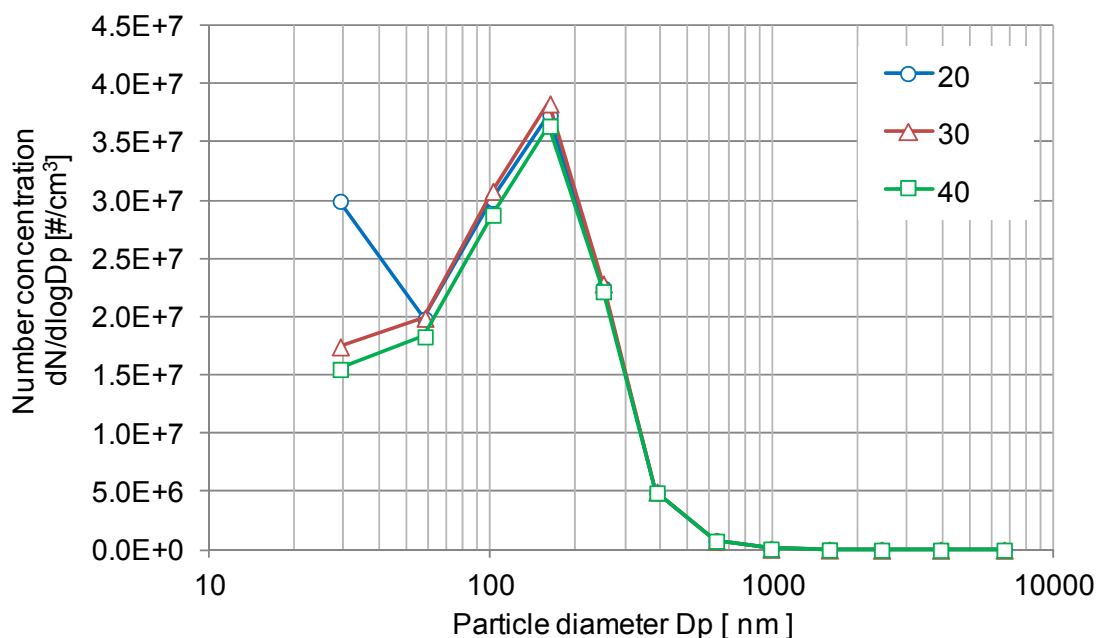


図 4-31 粒径と個数濃度の関係 ( $dN/d\log D_p$ )  
(希釈トンネル希釈率:8, ELPI, 発電機特性 75 % load)

の結果を示している。

負荷率 75%の希釈トンネル希釈率 8(図 4-31)では、希釈空気温度 20 では、29 nm の個数濃度が高くなり、バイモーダルな粒径分布となる。しかし、希釈空気温度 30 および 40 では、29 nm の濃度は希釈空気温度 20 の時より低く、モノモーダルな粒径分布となる。

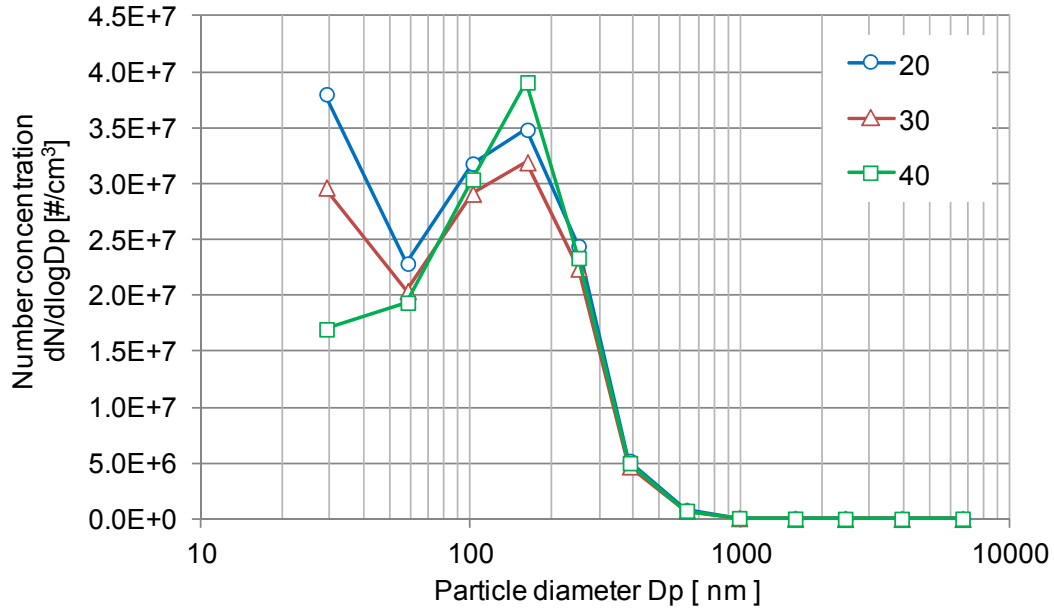


図 4-32 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:10, ELPI, 発電機特性 75 % load)

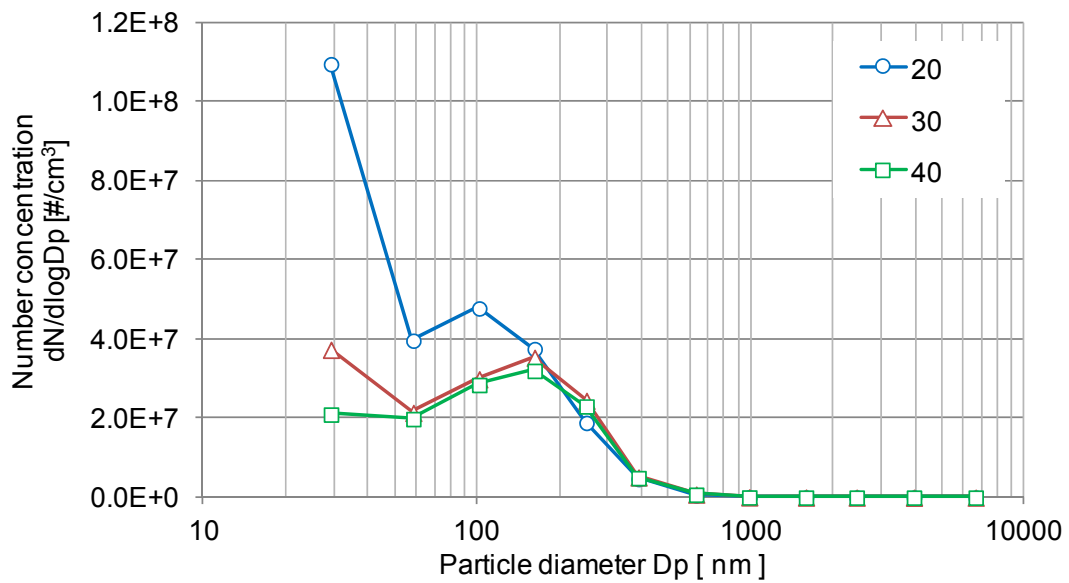


図 4-33 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈トンネル希釈率:12, ELPI, 発電機特性 75 % load)

粒径 58 nm 以上では、希釈空気温度の違いによる濃度の変化は無く、ほぼ同じ濃度となる。また、濃度のピーク値は 3 つの希釈空気温度とも、161 nm となる。

負荷率 75% の希釈トンネル希釈率 10 (図 4-32) では、希釈空気温度が低下するほど 29 nm の個数濃度が高くなる。希釈空気温度 40 °C ではモノモーダルな粒径分布であるが、希釈空気温度 20 °C、30 °C でバイモーダルな粒径分布となる。希釈トンネル希釈率 8 (図 4-31) と同様に粒径 58 nm 以上では、希釈空気温度の違いによる濃度の変化は無く、ほぼ同じ濃度となる。また、粒径の大きい方のピーク値は 161 nm となる。

負荷率 75% の希釈トンネル希釈率 12 (図 4-33) では、希釈トンネル希釈率 8 および 10 と比較して希釈空気温度 20 °C で、101 nm 以下の濃度が大幅に高くなる。また、希釈空気温度 20 °C では、粒径の大きい方のピークが粒径 101 nm となる。粒径 161 nm 以上では、希釈空気温度の違いによる濃度の変化は無くほぼ同じ濃度となる。

SMPS による計測では粒径が 500 nm 以下の粒子状物質を対象に計測を行ったが、ELPI による計測結果から、SMPS によって計測した粒径範囲以上の粒径においては、ピークとなる分布が無いことが分かる。

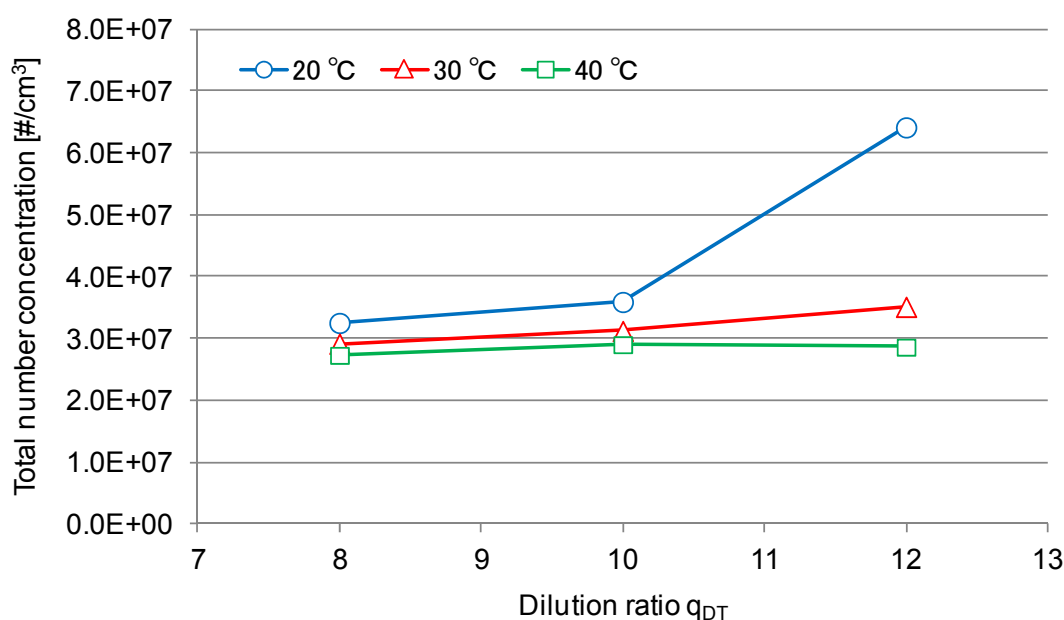


図 4-34 総個数濃度

(希釈トンネル希釈率:8, 10, 12, ELPI, 発電機特性 75 % load)

#### 4.3.5 ELPI によって計測した総個数濃度

ELPI によって計測された個数濃度の合計値を図 4-34 に示す。図 4-21 と同様に、ここで示す総個数濃度は、図 4-31, 4-32, 4-33 で示した粒径分布における、各計測点の計測値を  $dN/d\log D_p$  とはせず、合算した値である。図 4-34 では横軸に希釈トンネルによる希釈率、縦軸に総個数濃度を示しており、図中の青線が希釈トンネルの希釈空気温度が 20、赤線が 30、緑線が 40 の結果である。希釈空気温度が 20 の場合、希釈率が增加すると、総個数濃度の上昇する。希釈空気温度が 30、40 では、希釈率の増加による、明確な総個数濃度の増加は無い。また、同様の希釈率の場合、希釈空気温度が低い方が、総個数濃度は高い。

#### 4.4 機関負荷率 75 %と負荷率 30 %の粒径分布計測結果の比較

##### 4.4.1 SMPS による小さい粒径領域の比較

発電機特性の負荷率 75 %および負荷率 30 %の粒径と個数濃度の関係から、ピークの個数濃度が最も大きい値である、希釈率 12、希釈空気温度 20、および、ピークが最も小さい値である、希釈率 8、希釈空気温度 40 の結果を合わせ、図 4-35 に示す。図 4-35 では、左図が、希釈トンネル希釈率 12、希釈空気温度 20、右図が希釈トンネル希釈率 8、希釈空気温度 40 の結果を示しており、それぞれ横軸に粒径、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )を示している。この図で示す図は、図 4-9, 4-24 および図 4-7, 4-22 で示した個数濃度の一部を比較のために同一の図で示している。

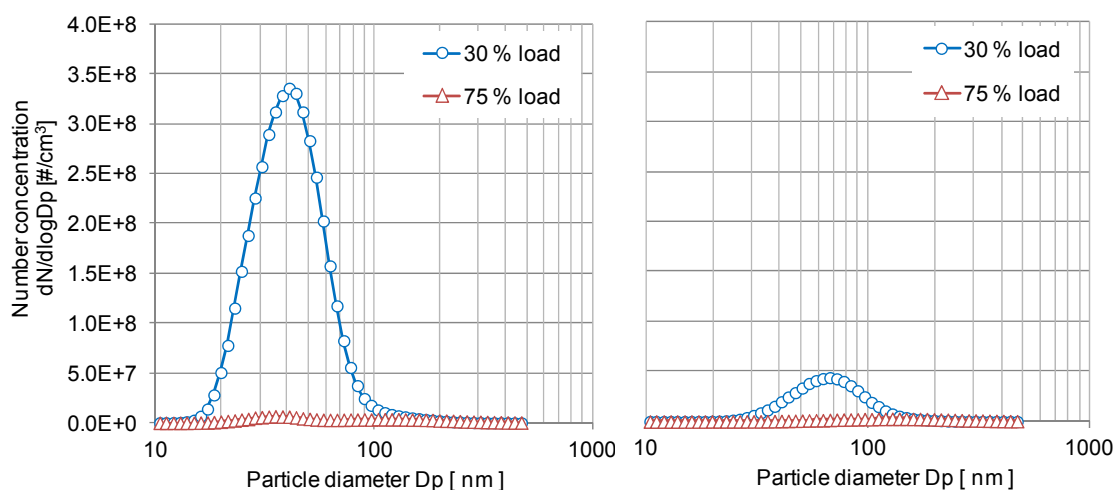


図 4-35 負荷率 30 %と 75 %の比較 (粒径と個数濃度の関係)( $dW/d\log D_p$ )

(左: 希釈トンネル希釈率: 12, 希釈空気温度: 20、  
右: 希釈トンネル希釈率: 8, 希釈空気温度: 40、SMPS)

図 4-35 において負荷率 30 % (図 4-34, 青線) と負荷率 75 % (図 4-34, 赤線) の粒径分布を比較すると、負荷率 30 % の個数濃度のピーク値は、負荷率 75 % の個数濃度より高く差も大きい。また、負荷率 30 % の個数濃度は、希釈トンネル希釈率、希釈空気温度によって大きく変化する。個数濃度の小さい領域を比較するため、図 4-35 に示したグラフの縦軸を対数軸としたグラフを図 4-36 に示す。図 4-36 において、負荷率 30 % (図 4-36, 青線) と負荷率 75 % (図 4-36, 赤線) の粒径分布を比較すると、100 nm 以下の粒径では大部分が負荷率 30 % の個数濃度の方が高い値であるが、粒径 150 nm 程で粒径分布は交差し、200 nm 以上の粒径では、負荷率 75 % の方が個数濃度は高くなる。

図 4-35 で示した粒径分布を、密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定して重量濃度に換算し、粒径と重量濃度の関係とした物を図 4-37 に示す。図 4-37 において、負荷率 30 % (図 4-37, 青線) と負荷率 75 % (図 4-37, 赤線) の粒径分布を比較すると、粒径の小さい 150 nm 以下の範囲では、個数濃度からも分かるように負荷率 30 % の方が濃度が高くなり、また、個数濃度と同様に、希釈トンネル希釈率、希釈空気温度の変化による差が大きい。SMPS の計測範囲では、負荷率 30 % の排ガスは、個数濃度、重量濃度とも 100 nm もしくはそれ以下の粒径でピークがあるのに対し、負荷率 75 % の排ガスでは、個数濃度のピークは 200 nm 以下にあるが、重量濃度では SMPS の計測範囲上限の 469.8 nm がピークとなる。

これらの結果より、SMPS の計測粒径範囲において SOF 分割の高い排ガスでは、希釈トンネルの希釈条件によって個数濃度とともに重量濃度にも変化があるが、SOF 分割の小さい排ガスでは個数濃度、重量濃度ともに希釈条件の影響が少ないと考えられる。

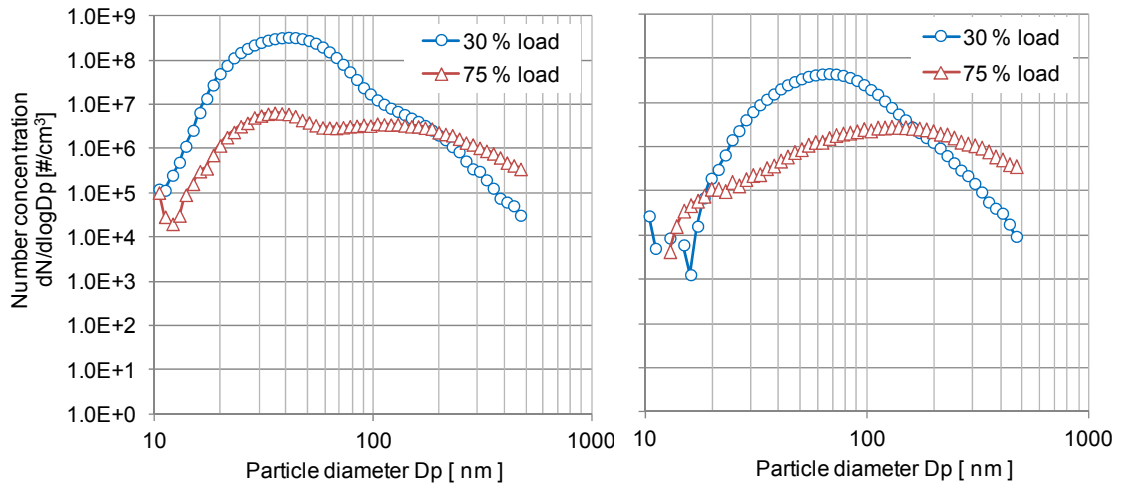


図 4-36 負荷率 30 %と 75 %の比較(両対数グラフ) (粒径と個数濃度の関係)(dW/dlogDp)  
 (左: 希釈トンネル希釈率: 12, 希釈空気温度: 20、  
 右: 希釈トンネル希釈率: 8, 希釈空気温度: 40、SMPS)

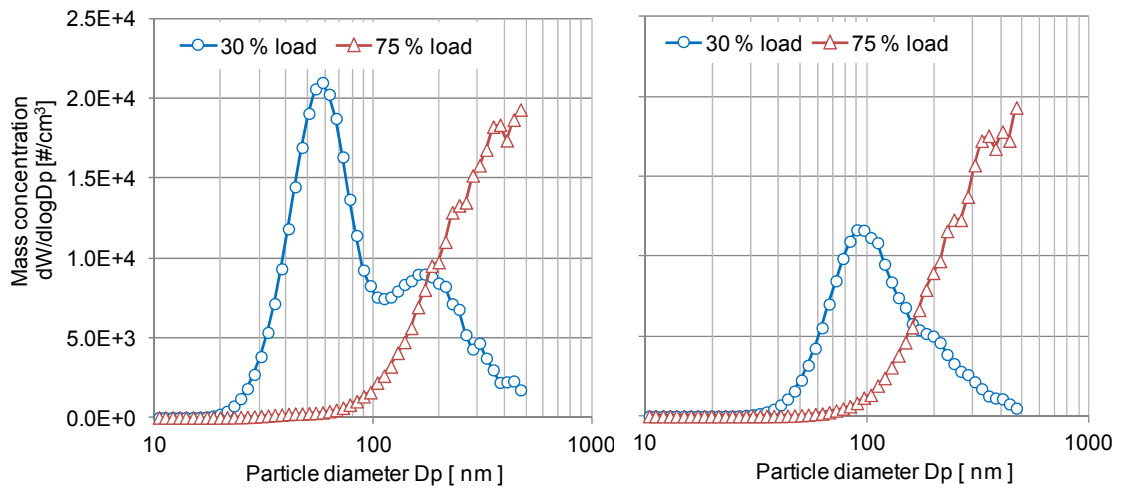


図 4-37 負荷率 30 %と 75 %の比較(粒径と重量濃度の関係)(dW/dlogDp)  
 (左: 希釈トンネル希釈率: 12, 希釈空気温度: 20、  
 右: 希釈トンネル希釈率: 8, 希釈空気温度: 40、SMPS)



#### 4.4.2 ELPI による粒径分布の比較

4.4.1 項と同様に、発電機特性の負荷率 75 % および負荷率 30 % の粒径と個数濃度の関係から、ピークの個数濃度が最も大きい値である、希釈率 12、希釈空気温度 20、および、ピークが最も小さい値である、希釈率 8、希釈空気温度 40 の結果を合わせ、図 4-37 に示す。図 4-38 では、左図が、希釈トンネル希釈率 12、希釈空気温度 20、右図が希釈トンネル希釈率 8、希釈空気温度 40 の結果を示しており、それぞれ横軸に粒径、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )を示している。図 4-38 において負荷率 30 % (図 4-38, 青線) と負荷率

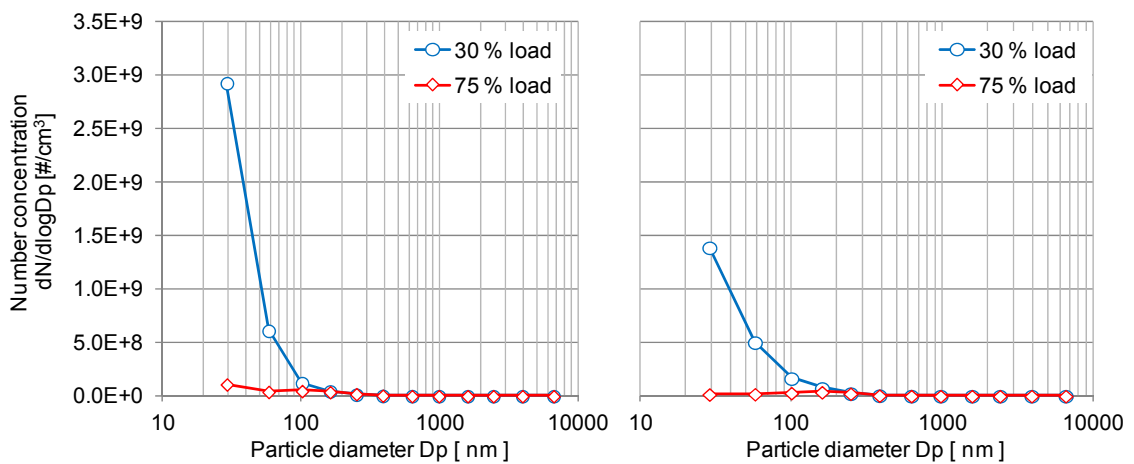


図 4-38 負荷率 30 % と 75 % の比較 (粒径と個数濃度の関係)( $dW/d\log D_p$ )

(左: 希釈トンネル希釈率: 12, 希釈空気温度: 20、  
右: 希釈トンネル希釈率: 8, 希釈空気温度: 40、ELPI)

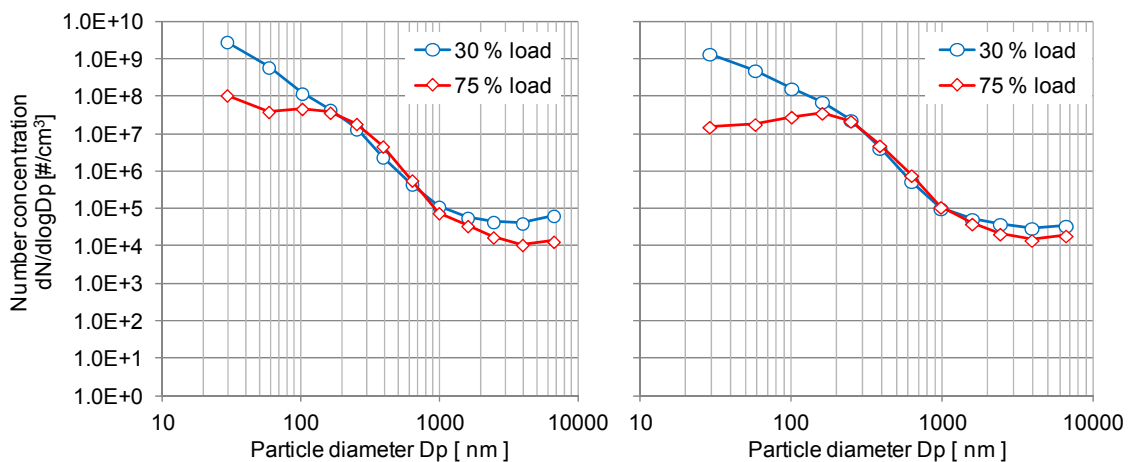


図 4-39 負荷率 30 % と 75 % の比較(両対数グラフ) (粒径と個数濃度の関係)( $dW/d\log D_p$ )

(左: 希釈トンネル希釈率: 12, 希釈空気温度: 20、  
右: 希釈トンネル希釈率: 8, 希釈空気温度: 40、ELPI)

75% (図 4-38, 赤線)の粒径分布を比較すると、負荷率 30%の個数濃度のピーク値は、負荷率 75%の個数濃度より高く差も大きい。また、負荷率 30%では、希釈空気温度、希釈率による差異が大きい。これらの傾向は、SMPS による粒径分布(図 4-35)と同様である。また、SMPS で確認が出来なかった 469.8 nm 以上の範囲においても、新たなピークは出現しなく、個数濃度のピークは 500 nm 以下でことが分かる。前項と同様に、個数濃度の小さい領域を比較するため、図 4-38 に示したグラフの縦軸を対数軸としたグラフを図 4-39 に示す。図 4-39 において、負荷率 30%(図 4-39, 青線)と負荷率 75% (図 4-39, 赤線)の粒径分布を比較すると、200 nm から、1,500 nm の範囲では、両者の個数濃度に大きな差は無い。1,500 nm 以上の粒径では、若干であるが、負荷率 30%の方が高くなっていることが確認出来る。

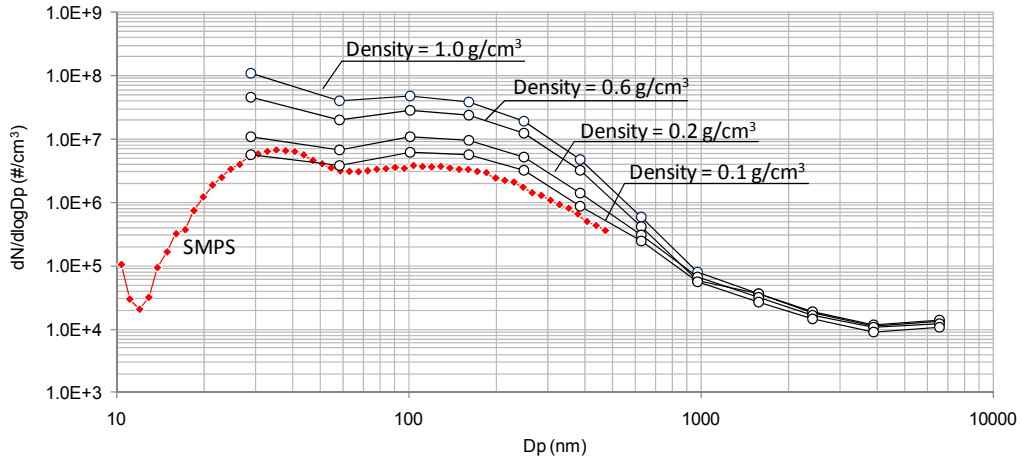
#### 4.4.3 SMPS と ELPI の粒径分布の比較

SMPS はモビリティ径による分級を行っており、ELPI は空気動力学径による分級を行っている。また、個数濃度の検出は、SMPS は光学的に行っているが、ELPI は PM への帯電量で行っている。そのため、前述のように ELPI では個数濃度の算出に粒子密度が必要となる。PM の密度は構造や成分によって異なると考えられ、明らかではない。ここでは負荷率 75%、希釈トンネル希釈率 12 の粒径分布に関して ELPI による計測結果から、4 種類(0.1、0.2、0.6、1.0 g/cm<sup>3</sup>)の PM 密度を仮定して個数濃度分布を算出し、SMPS の計測結果との比較を行った。粒径分布の比較を図 4-40 に示す。図は、縦軸が個数濃度(dN/dlogDp)、横軸が粒径を示している。図中の黒丸の記号は ELPI の計測結果、赤丸の記号は SMPS の計測結果を示しており、(a)は希釈空気温度 20、(b)は希釈空気温度 30、(c)は希釈空気温度 40 の場合の結果を示している。ELPI では多段のインパクトにより空気動力学径に基づいて分級している。そのため、ここで行った PM 密度の仮定は分級には影響しなく、各粒径における個数濃度の変化となる。

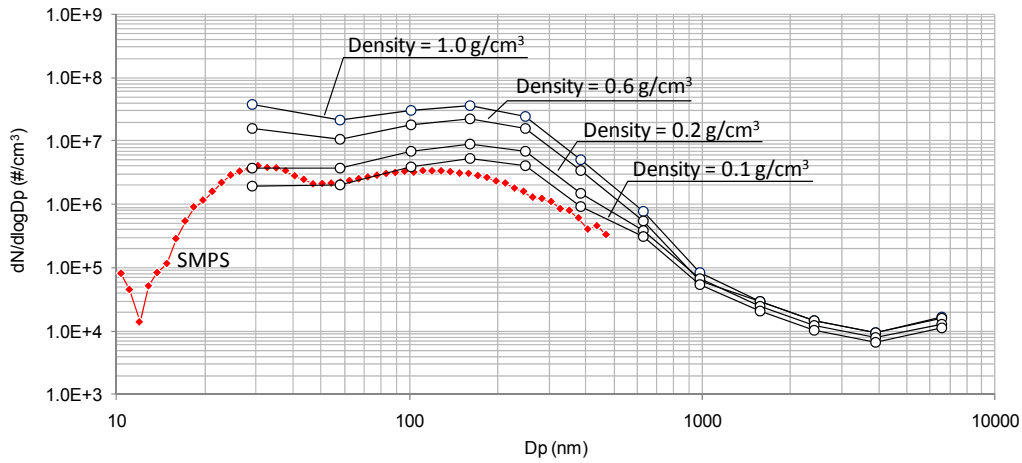
希釈空気温度 20 (図 4-40(a))では、ELPI の粒子密度を小さく仮定するほど SMPS の結果と近い値となる。ELPI の計測結果、SMPS の計測結果の両者ともバイモーダルな粒径分布となり、2つのピーク間の極小値はほぼ同じ粒径となる。粒径分布の傾向には大きな差異はない。

希釈空気温度 30 (図 4-40(b))では、ELPI の粒子密度を小さく仮定した場合(Density = 0.1、0.2 g/cm<sup>3</sup>)にモノモーダルな粒径分布となる。希釈空気温度 20 (図 4-13(a))の場合と同様に個数濃度は粒子密度を小さく仮定するほど SMPS の結果と近い値となる。粒径分布の傾向には大きな差異はない。

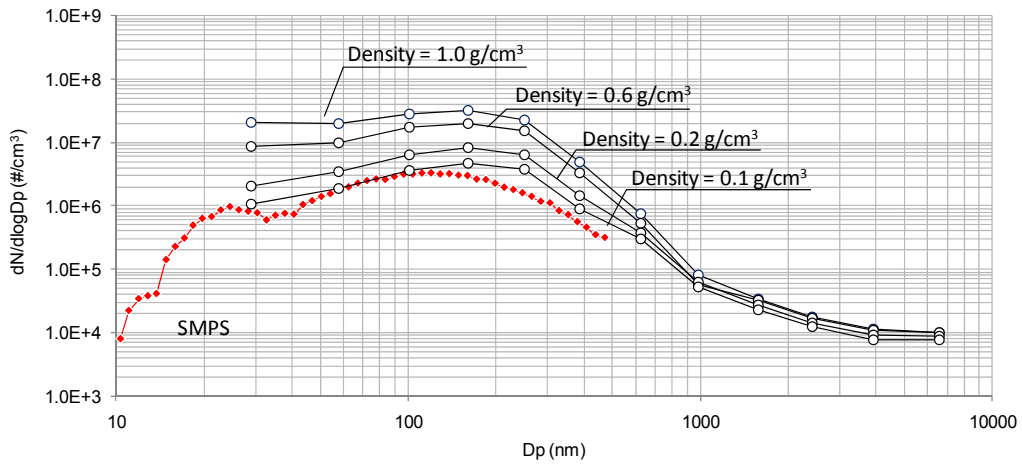
希釈空気温度 40 (図 4-40(c))では、SMPS ではバイモーダルな粒径分布であるのに対して ELPI はモノモーダルな粒径分布となる。ここでも、個数濃度は ELPI の粒子密度を小さく仮定するほど SMPS の結果と近い値となる。粒径分布の傾向には大きな差異はない。いずれの希釈空気温度の場合にも、PM の密度を 0.1 g/cm<sup>3</sup> と仮定した場合に、SMPS による計測と ELPI による計測の粒径 60 nm 付近の個数濃度がほぼ等しい値となっている。



(a) 希釈空気温度 20



(b) 希釈空気温度 30



(c) 希釈空気温度 40

図 4-40 粒径分布の比較(発電機特性 75%負荷、希釈トンネル希釈率 12、SMPS、ELPI)

#### 4.4.4 ELPI の計測結果とフィルタ重量濃度の比較

SMPS では、粒子数のカウントを光学的に行っている。一方、ELPI では粒子の荷電量によって濃度を求めており、船用ディーゼル機関の PM 計測においては粒径の小さい粒子では、SOF 成分、粒径の大きい粒子では ISF 成分であるため、粒子の同一表面積辺りの荷電量にも差があると考えられる。ここでは、SMPS の計測濃度が正であると仮定した場合、ELPI では粒径 60 nm 付近の PM の密度は  $0.1 \text{ g/cm}^3$  程度として計測する必要があると考えられる。なお、ELPI による計測結果から、PM の重量濃度を求めた。重量濃度の換算では粒子密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  で完全球形であるとの仮定をしている。塚本らの実験では、発電機特性の負荷率 30 % で、 $180 \text{ mg/Nm}^3$  であるのに対して、ELPI で計測した図 4-18, 19, 20 を重量濃度換算した場合、 $12,404 \text{ mg/Nm}^3 \sim 19347.6 \text{ mg/Nm}^3$  となり 69 から 108 倍の値となる。一方、発電機特性の負荷率 75 % では、 $120 \text{ mg/Nm}^3$  に対して、 $1,582 \text{ mg/Nm}^3 \sim 2,780 \text{ mg/Nm}^3$  となり、13 から 23 倍の値となる。これらの結果に対しても荷電量の差が出たためであると考えられる。

#### 4.5 まとめ

船用 4 ストロークディーゼル機関を発電機特性の 30 % 負荷および 75 % 負荷で運転し、排ガス中の PM 粒径分布を、SMPS および ELPI の 2 種類の計測器で行った。また、希釈率および希釈空気温度が計測結果に与える影響を調べるとともに、SMPS および ELPI の 2 種類の計測器による計測結果の比較を行い、以下の知見を得た。

- ・ 発電機特性 30 % 負荷の排ガス中の PM 粒径分布は、粒径 60 nm 付近に個数濃度のピークを持つ。またこのピークは、希釈トンネル希釈率の増加により粒径が小さい方へシフトすること、希釈空気温度の上昇によりピーク値は減少することがわかった。
- ・ 発電機特性 75 % 負荷の排ガス中の PM は、粒径 50 nm 付近および粒径 150 nm 付近に個数濃度のピークを持つバイモーダルな粒径分布となる。粒径の大きい方のピークは希釈トンネル希釈率、希釈空気温度によって変化しない。粒径の小さい方のピークは、希釈空気温度が低いほど、また希釈トンネル希釈率が高いほど、濃度が高くなる。
- ・ SMPS の計測結果、ELPI の計測結果ともに希釈率が高くなるほど、また希釈空気温度が低いほど、全個数濃度は高くなる。
- ・ SMPS と ELPI の計測結果を比較すると、粒径分布の傾向には大きな差異はない。また、SMPS の個数濃度と、数種類の粒子密度を仮定した ELPI の個数濃度を比較すると、ELPI では粒径 500 nm 以下の PM の密度は  $0.1 \text{ g/cm}^3$  程度として扱う必要があると考えられる。

船用ディーゼル機関の排ガスに含まれる PM の計測に関する研究では、希釈トンネルを使用した重量濃度による評価が主に行われてきた。この実験から得られた結果では、希釈トンネルの希釈率によって計測される濃度は大きく変化するが、その変化は主に粒径が 500

nm 未満であり、重量濃度には大きく影響していないことが考えられる。しかし、重量濃度の計測による研究では、フィルター捕集した PM の成分分析も行われる事が多く、それらは、核生成および凝集した PM のみとして扱う必要があるとともに、核生成状況を考慮する必要があると考える。

SMPS ではモビリティ径の分級、ELPI では空気動力学径の分級を行っており、計測する粒子の分級方法は異なる。船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスの場合、希釈トンネルによる希釈排ガスの計測結果からは、空気動力学径とモビリティ径に粒径の大きな差異は無いと考える。濃度計測方法に関しては、SMPS の計測粒径範囲において、SMPS の凝縮粒子カウンタによって計測される濃度と、ELPI によって計測される濃度に差があることを留意する必要があると考える。また、その濃度の差は、粒径毎に異なることも考慮した計測を行う必要があることが明らかとなった。

## 第5章 ホットダイリューションによる 船用4ストロークディーゼル機関の排ガスの粒径分布計測

### 5.1 実験の目的および概要

前章(第4章)では、分流希釈トンネルを用いて、希釈率および希釈空気温度が計測される粒径分布に与える影響の検討を行った。その結果、排ガスに含まれる粒子状物質の凝縮性成分の影響で、同条件で機関を運転している排ガスでも、希釈率、希釈空気温度の違いによって、計測される粒子状物質の粒径分布は変化することが分かった。

本章では、前章と同様に、船用4ストローク高速ディーゼル機関の排ガスを対象に、ホットダイリューション手法を利用することで、凝縮性成分の凝縮・凝集の影響を軽減させた計測を行う。

ここで計測される粒径分布は、上述の通り、揮発性成分の凝縮・凝集の影響が軽減された高温状態における粒径分布であり、希釈トンネル上流のトランスファチューブ内、若しくは、排気管内の粒子状物質の粒径分布であると考えられ、この粒径分布は、トンネル内における凝縮性粒子の凝縮・凝集の影響を把握する上での重要なファクターとなる。

船舶においては、船用ディーゼル機関の排ガスの規制対応のためSCRシステム<sup>5-1~9)</sup>やEGRシステム<sup>5-10~13)</sup>の開発や、排ガスに含まれる粒子状物質の低減を目的としてDPF(Diesel Particulate Filter)システムの開発<sup>5-14~22)</sup>が行われおり、これらのシステムは、高温状態な排ガスを扱うシステムであるため、ホットダイリューション手法によって計測される粒子状物質の粒径分布を把握することは重要である。

本章では最初に、供試機関を発電機特性の負荷率30%、50%、75%および負荷率100%によるホットダイリューションによる粒径分布の計測を実施し、第4章で示した、発電機特性の負荷率30%、75%の粒径分布のデータと比較を行った。また、希釈された排ガスはSMPSまでチューブによって送られるが、その間における粒子状物質の減衰に関して、チューブ長を変化させた計測によって考察する。その後、船用特性におけるホットダイリューションを用いた粒径分布の計測を行い、船用4ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質の把握を行った。

### 5.2 実験装置および方法

実験装置の概要を図5-1に示す。供試機関は、船用4ストローク高速ディーゼル機関(3L13AHS, 3.1(2)参照)である。供試機関の運転には、市販の低硫黄A重油(硫黄分=0.088 mass%)を使用した。燃料油の代表性状を表5-1に示す。

粒子状物質の計測装置は、ロータリーディスク型希釈器(3.4(1)参照)、SMPS(Model 3080)、CPC(Model 3772)、および、それらを接続するチューブ類で構成される。供試機関の排ガスの一部を、排気管に設置したプローブより分流し希釈器に導く。希釈器までのトランスフ

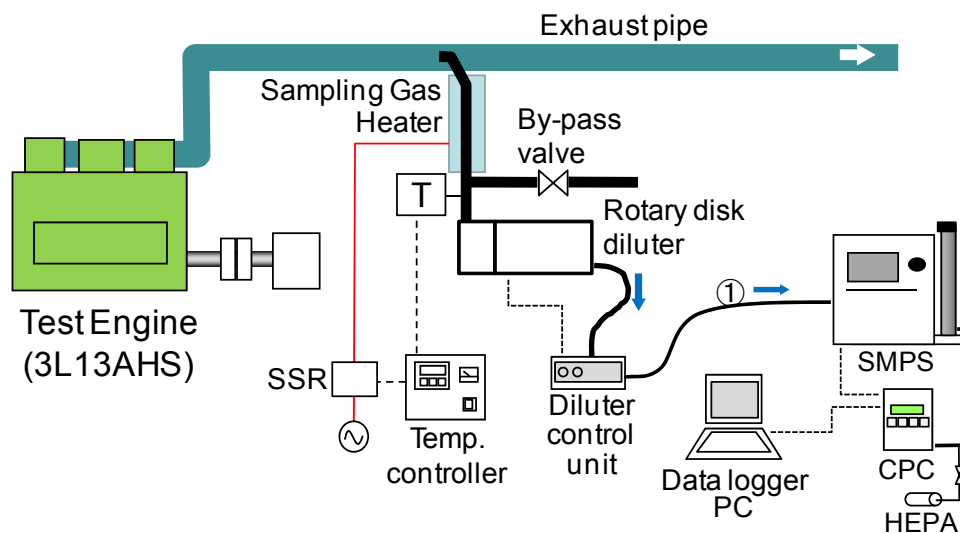


図 5-1 実験装置の全体図

表 5-1 燃料油の性状(代表性状)

Item	Value
Ash	0.001 (mass %)
Cetane number (JIS K2204)	50
Cetane number (JIS K2280)	49.7
Density (15 )	0.8557 (g/cm <sup>3</sup> )
Flash point	93.5 ( )
Pour point	- 17.5 ( )
Sulfur content	0.088 (mass %)
Water content	0.05 (mass %)
Calorific value (gross)	45462 (kJ/kg)
Calorific value (net)	42696 (kJ/kg)

アーチューブ(SUS304 製、内径 8 mm、シームレス管)には、フレキシブルヒーター(500 W)を巻き付けることによって、希釈器入口の排ガス温度を一定とするように、加熱保温を行っている。希釈器は容積ポンプであるサンプリングポンプで一定流量(2.0 L/min)のサンプリングが行われている。希釈器による希釈後の排ガスは、SMPS に導かれ分級され CPC にて濃度計測が行われる。SMPS では DMA の形状から、概ねサンプリング流量とシース流量の比率を 1:10 とし、それらの DMA 流入流速から分級範囲が決定する。本章では凝縮性物質の凝縮を重点的に確認するため、サンプリング流量 0.97 L/min、シース流量 9.7 L/min としてその時の分級範囲を 7.64 - 299.6 nm (103 段階) とした。

実験は、供試機関を始動後、暖機運転を行い、計測する負荷率に制定し排ガス等の各所の温度が一定となるのを確認し計測を実施した。計測は、発電機特性の負荷率 30 %、50 %、75 %、100 % および 船用特性(プロペラ特性、出力軸にプロペラが装着されている状態を

模擬した運転で、出力(L)は回転数(N)の3乗に比例する)の負荷率 30 %、50 %、75 %、100 %で、両特性の負荷率 100 %は同一回転数、トルクとなるため、合計7ケースを実施した。

また、それぞれの負荷率に対して、希釈器の希釈温度を 150 として希釈率を、一段希釈の 200, 400, 600, 1000, 1500, 1800 とした。

SMPS による計測は、1 回の計測(7.67 nm から 299.6 nm までの 103 段階の計測および計測後の無電荷時間)に 120 秒で各ケースに対して 3 回の計測を実施した。

### 5.3 発電機特性の粒径分布

#### 5.3.1 SMPS による個数濃度粒径分布

図 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 にそれぞれ発電機特性で負荷率 30 %, 50 %, 75 %, 100 %で運転した場合の SMPS による粒径と個数濃度の関係を示す。図 5-2 では、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径(モビリティ径)を示している。縦軸に示す個数濃度は、希釈率を考慮し排気管内の濃度に換算した値である。図では希釈率別に 6 種類の粒径分布を示しており、赤色(赤丸プロット:希釈率 200, 白丸プロット:希釈率 400)、青色(青三角プロット:希釈率 600, 白三角プロット:希釈率 1000)、緑色(緑四角プロット:希釈率 1500, 白四角プロット:希釈率 1800)の順に、希釈率が高い計測結果である。

負荷率 30 %の図 5-2 では、全ての希釈率で粒径分布はバイモーダルな分布であり、希釈率の変化することで粒径分布にも変化が起きることが確認出来る。個数濃度の 2 つのピークの内、粒径 70 nm-80 nm 付近にあるピークに関しては、希釈率が変化しても大きな変化は無いが、粒径 10 nm 付近にあるピークに関しては希釈率によって変化する。計測を行っ

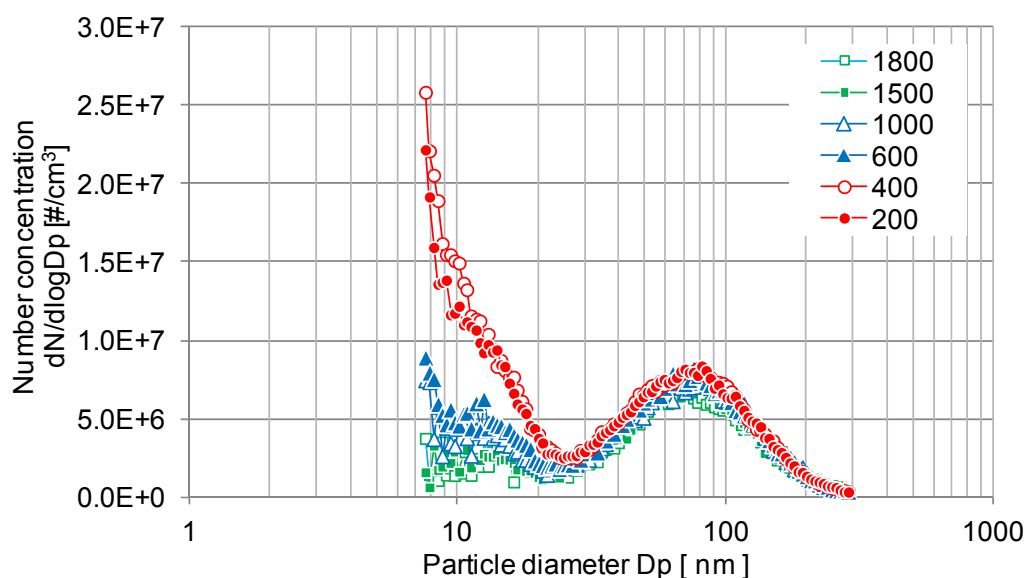


図 5-2 粒径と個数濃度の関係 ( $dN/d\log D_p$ )

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)



た中で、希釈率が低い希釈率 200, 400 に関しては、個数濃度が最も高く、その後希釈率が 600 以上になると、10 nm 付近のピーク値は急激に低下する。希釈率 600 ~ 1800 においても、希釈率が高い程、10 nm 付近のピーク値は低い値となった。

負荷率 50 % の図 5-3 では、全ての希釈率において粒径 100 nm 付近をモード径とするモノ

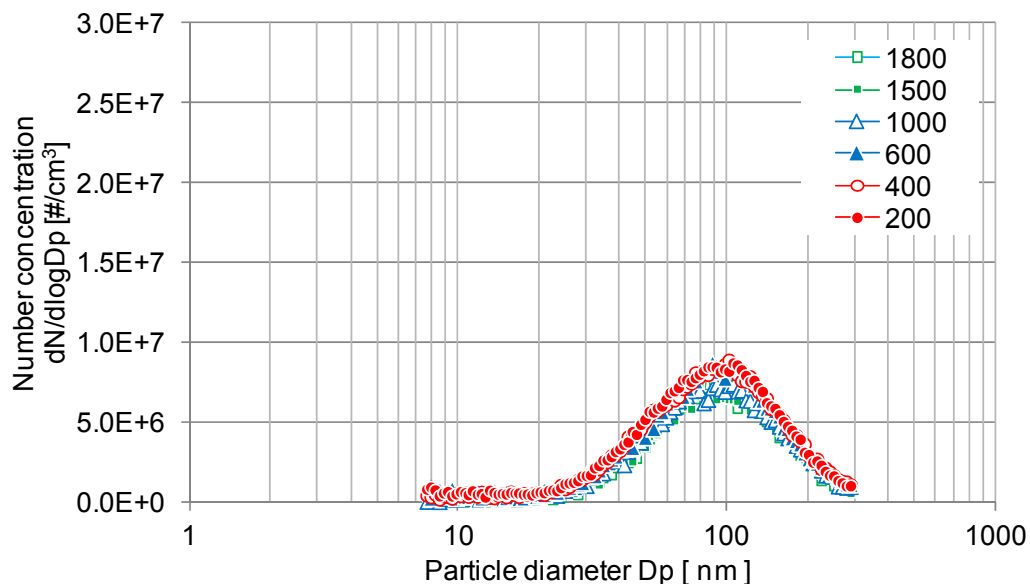


図 5-3 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 50 % load)

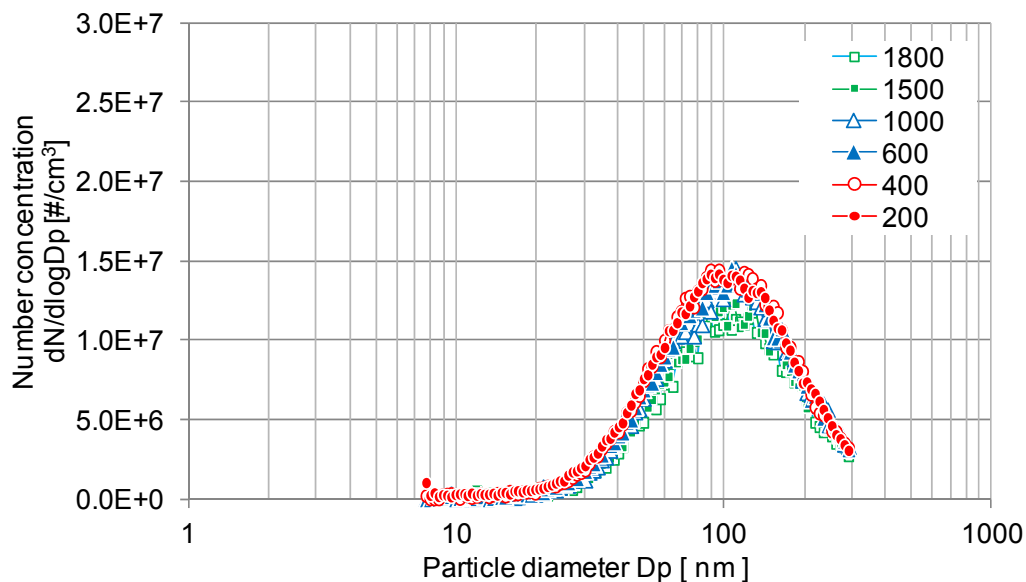


図 5-4 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 75 % load)

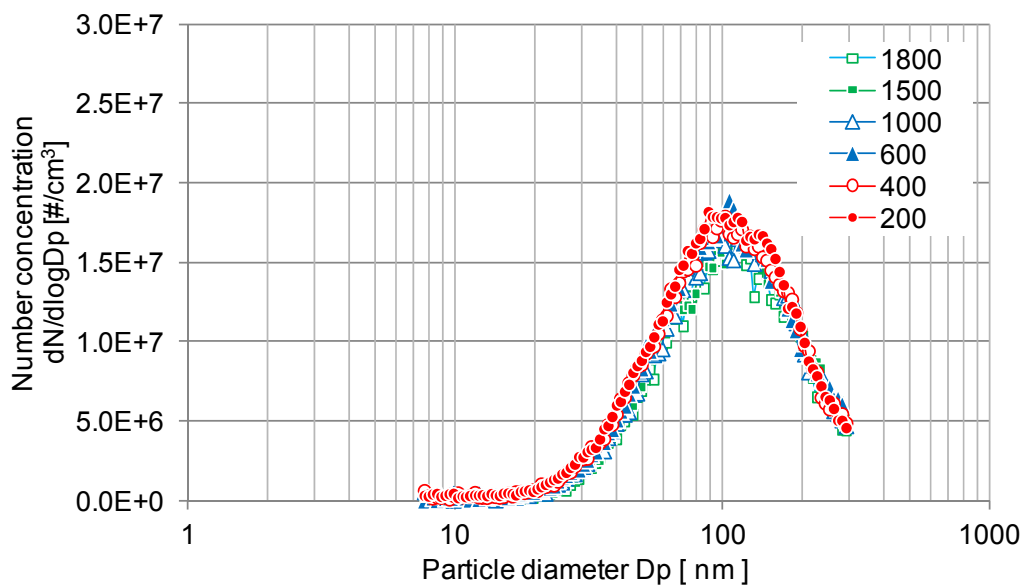


図 5-5 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 100 % load)

モーダルな分布となった。また、希釈率の違いによって粒径分布に大きな変化は無い。

負荷率 75 %の図 5-4 では、負荷率 50 %の粒径分布(図 5-3)と同様に、粒径 100 nm 付近をモード径とするモノモーダルな粒径分布となり、希釈率の違いによって粒径分布に大きな変化は無い。

負荷率 100 %の図 5-5 でも、負荷率 50 %(図 5-3), 75 %(図 5-4)と同様に粒径 100 nm 付近をモード径とするモノモーダルな分布であり、希釈率の違いによって粒径分布に大きな変化は無い。

負荷率 30 %の排ガスのみが、希釈率によって粒径の小さいピークが表れたのは揮発性成分の割合が高いためであり、それは SOF 分割割合が高かったためであると考えられる。1500 倍以上の希釈を行う事で粒径の小さいピークの濃度は近づくが、他の負荷率と比較すると粒径 10 nm 付近の濃度は高いことから、排気管内もしくは希釈温度である 150 に温度が低下するときに核生成が起き始めていると考えられる。図 4-1 に示したフィルター重量濃度から推測すると、SOF 濃度が 0.12 g/Nm<sup>3</sup> 以上においては、150 の雰囲気において揮発性成分の核生成が起こると考えられる。

### 5.3.2 SMPS による重量濃度粒径分布

図 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 で示した粒径と個数濃度の関係を、重量濃度に換算し、それぞれ図 5-6, 5-7, 5-8, 5-9 に示す。重量濃度の換算は、粒子状物質を完全な球形で、粒子状物質の密度を 1.0 g/cm<sup>3</sup> と仮定して行った。図は、縦軸に個数濃度から換算した重量濃度 (dW/dlogDp)、横軸に粒径を示している。図 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 と同様に、希釈率別に 6 種類の粒径分布を示しており、赤色(赤丸プロット:希釈率 200, 白丸プロット:希釈率 400)、

青色(青三角プロット:希釈率 600, 白三角プロット:希釈率 1000)、緑色(緑四角プロット:希釈率 1500, 白四角プロット:希釈率 1800)の順に、希釈率が高い計測結果である。

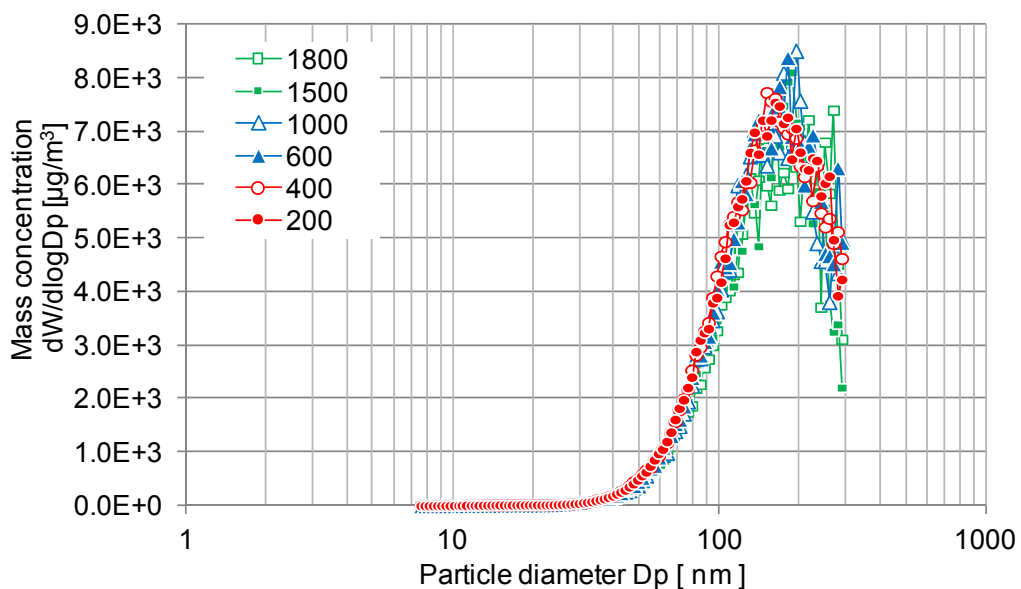


図 5-6 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

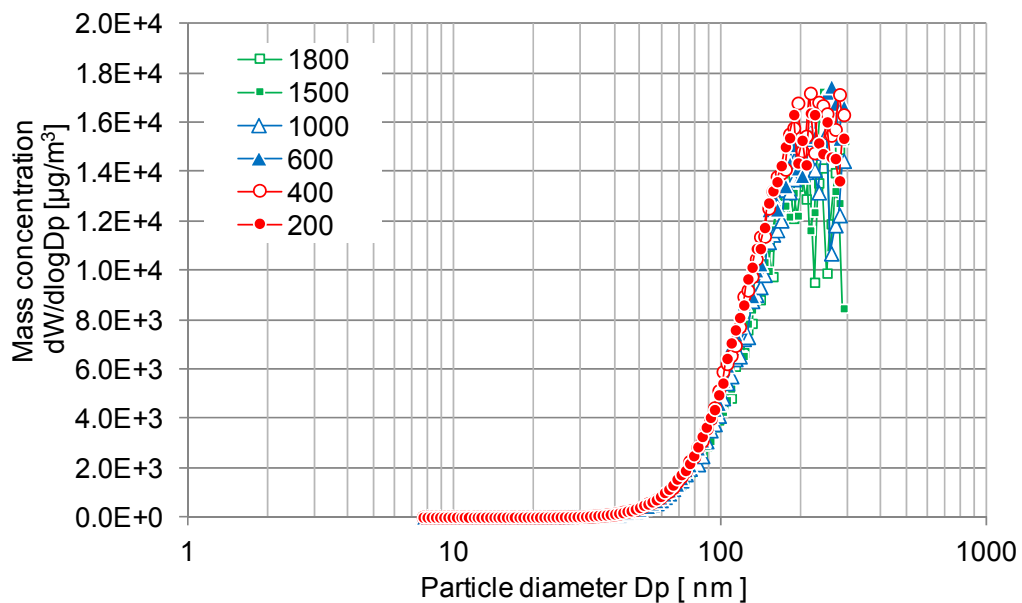


図 5-7 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 50 % load)

負荷率 30 %の図 5-6 では、モノモーダルな分布となりそのモード径は 120 nm ~ 150 nm 程となる。図 5-2 で示した個数濃度の粒径分布では、粒径の小さい 10 nm 付近にももう一つのピークがあり、バイモーダルな分布であったが、重量に換算したことで粒径の小さい粒子状物質の重量がわずかであることから、希釈率の違いによる粒径分布の変化は小さい結

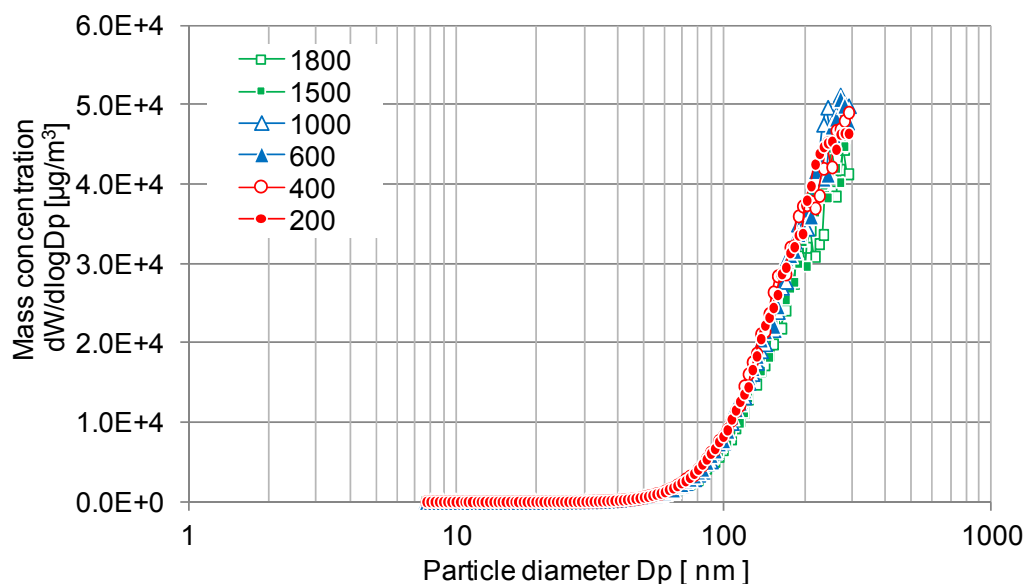


図 5-8 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 75 % load)

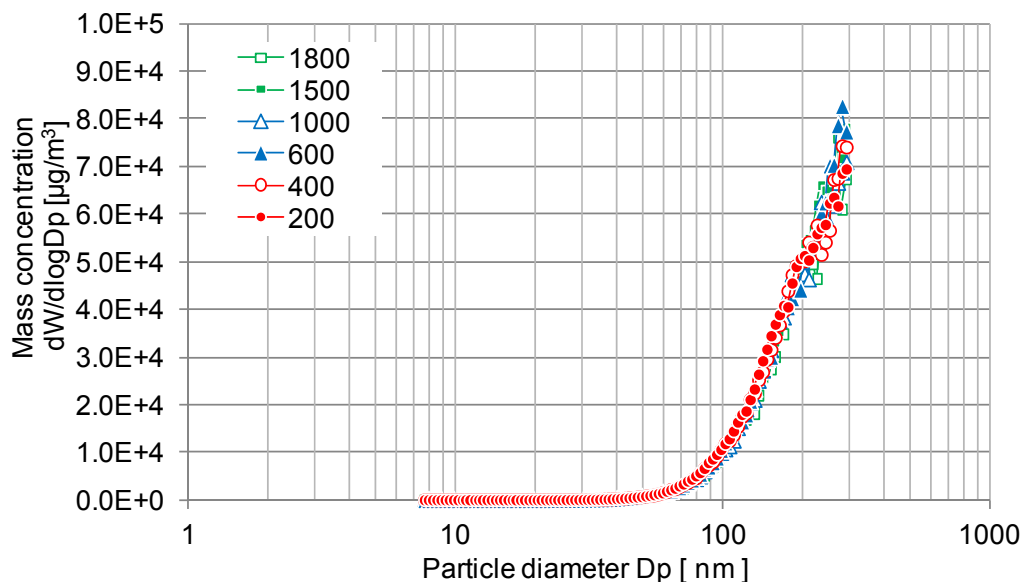


図 5-9 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)  
(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 100 % load)

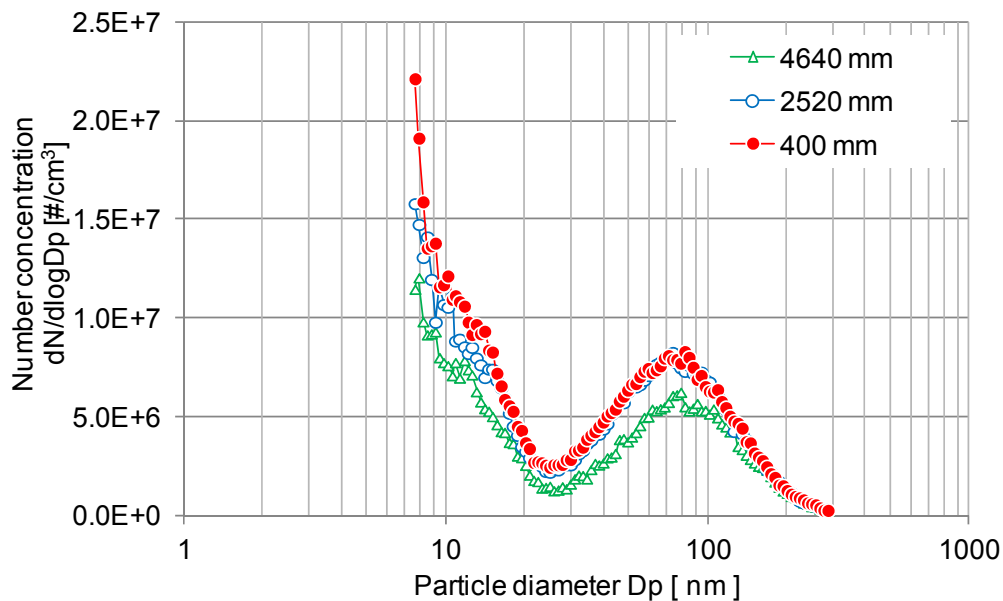


図 5-10 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
 (希釈器希釈率:200, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

果となる。

負荷率 50 %の図 5-7 では、図 5-6 と同様にモノモーダルな分布となるが、ピークを示すモード径は、負荷率 30 % (図 5-6) より大きく 200 nm 以上の粒径となる。

負荷率 75 %の図 5-8 では、図 5-7 と同様にモノモーダルな分布ではあるが、ピークなるモード径は計測範囲である 299.6 nm より大きいと思われる。

負荷率 100 %の図 5-9 では、負荷率 50 %と同様で、モノモーダルな分布であり、ピークとなるモード径は計測範囲である 299.6 nm 以上であると思われる。

### 5.3.3 希釈排ガスの粒径分布変化

5.3.1 および 5.3.2 では、ホットダイリユーション手法によって希釈した排ガスの粒径分布計測を行った。ロータリーディスク型希釈器にてホットダイリユーション手法により希釈された排ガスは、図 5-1 に示すとおり、チューブを経由して SMPS および CPC へ輸送される。ここでは、核生成モードが出現する発電機特性負荷率 30 %の排ガスを対象に、最も高濃度で核生成粒子が多い希釈率 200、最も低濃度となる希釈率 1800 の排ガスについて、ロータリーディスク型希釈器から SMPS へのチューブ (図 5-1, ) の長さを 3 段階に変化させて、希釈後の温度低下による核生成、チューブ内での濃度減衰等の影響を確認した。SMPS のサンプリング流量は、5.2 項で記述したとおり 0.97 L/min である。

標準状態では、希釈コントローラーユニットから SMPS までのチューブ長さは 400 mm であり、静電気による粒子状物質のチューブ内減衰を防止するため帯電防止チューブ (導電性

ポリウレタン製)を使用している。この時の希釈器(希釈ブロック)から SMPS までの到達時間は、約 40 秒である。

ここでは、希釈コントローラユニットと SMPS 間のチューブを、標準である 400 mm, 2520 mm, 4640 mm と変化させて計測を行った。これは、時間に換算すると、2520 mm では 400 mm に対して、+25.7 sec、4640 mm では 400 mm に対して+51.5 sec である。

図 5-10 に、発電機特性負荷率 30 %の排ガスで、希釈率 200、希釈温度 150 の粒径分布を示す。図では縦軸が個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸が粒径を表しており、図中の赤プロットが標準状態であるチューブ長 400 mm、青プロットがチューブ長 2520 mm、緑プロットがチューブ長 4640 mm の粒径分布を表している。図に示す個数濃度は、希釈率を考慮して排気管中の濃度に換算した値であり、標準状態(チューブ長:400 mm, 赤プロット)の粒径分布は、図 5-2(希釈率 200)に対応する粒径分布である。

図 5-10 では、全ての粒径分布がバイモーダルな分布であり、粒径分布の形状は、チューブ長によって変化していない。チューブ長 400 mm に対して、チューブ長 2520 mm では、粒径 20 nm 以下で個数濃度は小さくなる。チューブ長 4640 mm では、粒径 200 nm 以下の粒径で個数濃度が減衰していることが分かる。

図 5-10 に、チューブ長 400 mm の個数濃度に対する、チューブ長 2520 mm および 4640 mm の個数濃度比を図 5-11 に示す。図は縦軸にチューブ長 400 mm を 1.0 とする濃度比率、横軸に粒径を表している。図の赤色のグラフはチューブ長 2520 mm を表しており、青色のグ

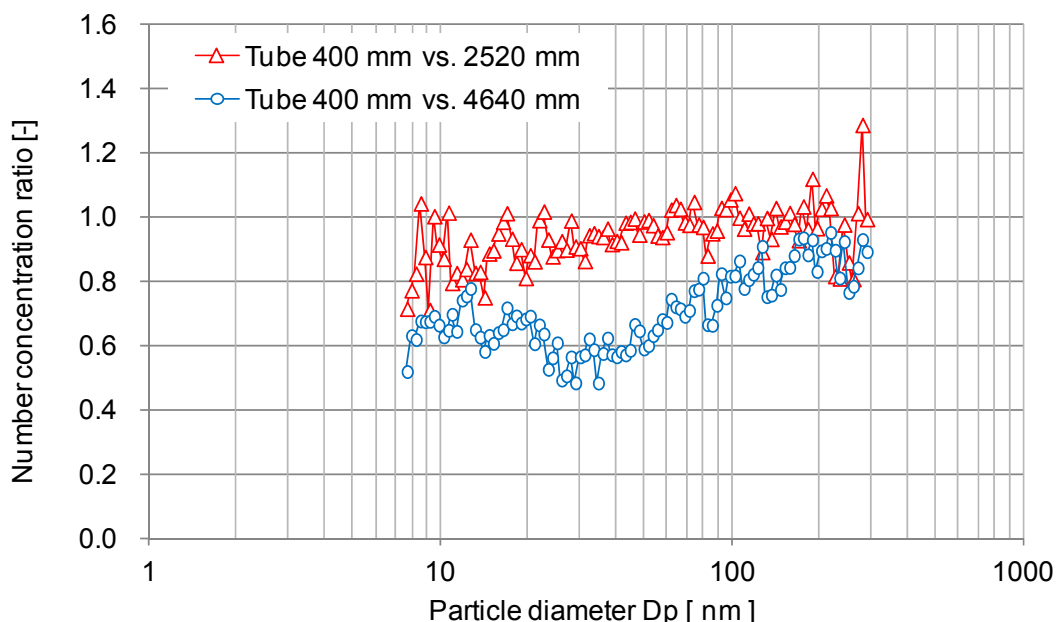


図 5-11 粒径と個数濃度比率の関係

(希釈器希釈率:200, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

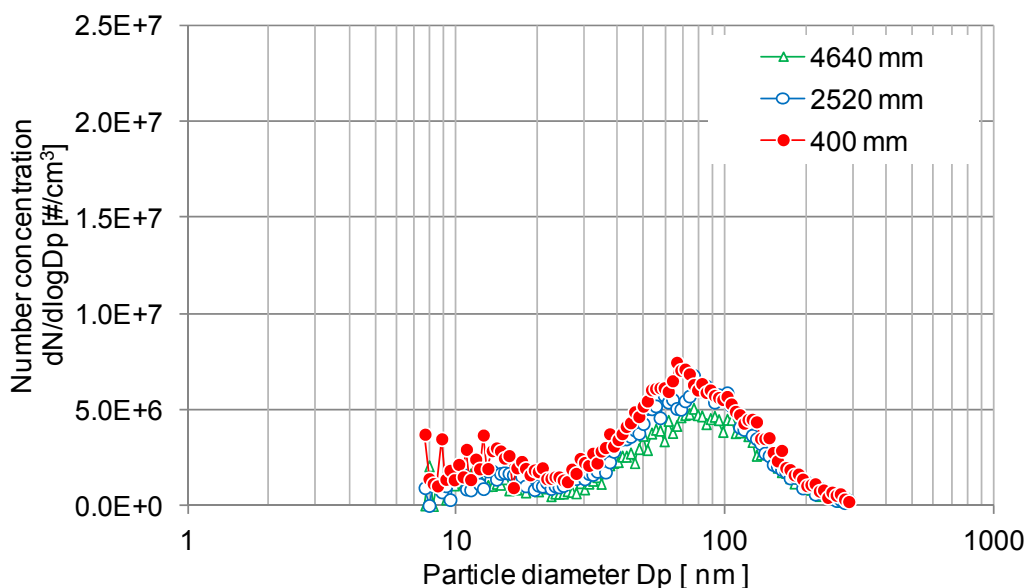


図 5-12 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈器希釈率:1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

ラフはチューブ長 4640 mm を表している。

チューブ長 2520 mm と 4640 mm を比較すると、4640 mm の方が比率が低く減衰量が多いことが分かる。チューブ長 2520 mm では、粒径が小さいほど比率が低くなっており、粒径の小さい粒子状物質の減衰が大きい事が確認出来る。チューブ長 4640 mm では、粒径 200 nm から粒径が小さくなるほど、減衰が大きくなり、粒径 30 ~ 40 nm 付近において最も減衰していることが分かる。

図 5-12 に、発電機特性負荷率 30 % の排ガスで、希釈率 1800、希釈温度 150 の粒径分布を示す。図では縦軸が個数濃度 (dN/dlogDp)、横軸が粒径を表しており、図中の赤プロットが標準状態であるチューブ長 400 mm、青プロットがチューブ長 2520 mm、緑プロットがチューブ長 4640 mm の粒径分布を表している。図に示す個数濃度は、希釈率を考慮して排気管中の濃度に換算した値であり、標準状態 (チューブ長:400 mm, 赤プロット) の粒径分布は、図 5-2 (希釈率 1800) に対応する粒径分布である。

参考として図 5-13 にチューブ長 400 で、希釈器の希釈率 200 および 1800 で、希釈率を考慮しない粒径と個数濃度の関係を示す。図では縦軸に個数濃度 (dN/dlogDp)、横軸に粒径を示しており、図中の青線が希釈率 200、緑線が希釈率 1800 を示している。ここで示す粒径分布の差は、SMPS に流入する排ガスの濃度そのままの結果であり、すなわちここで議論するチューブ内を流れる排ガスの粒径分布である。

図 5-12 では全てのチューブ長で粒径分布に大きな差異は無いものの、希釈率 200 の図 5-10 と同様に、標準であるチューブ長 400 mm に対してチューブ長が長くなるほど個数濃度は低下する傾向があることが分かる。図 5-14 にチューブ長 400 mm の個数濃度に対する、

チューブ長 2520 mm および 4640 mm の個数濃度を図 5-14 に示す。図は縦軸にチューブ長 400 mm を 1.0 とする濃度比率、横軸に粒径を表している。図の赤色のグラフはチューブ長

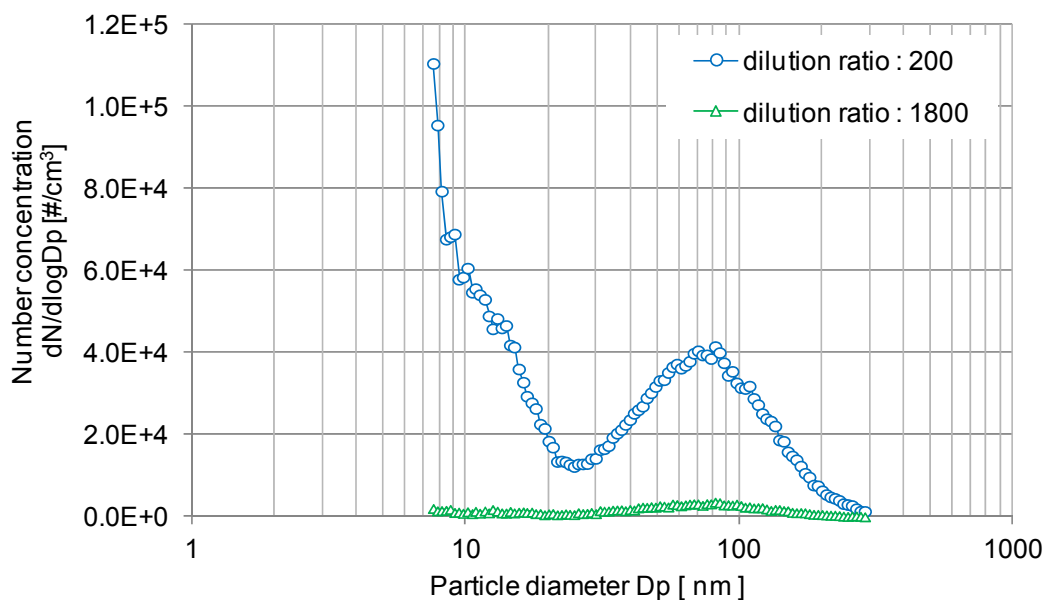


図 5-13 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(希釈器希釈率:1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

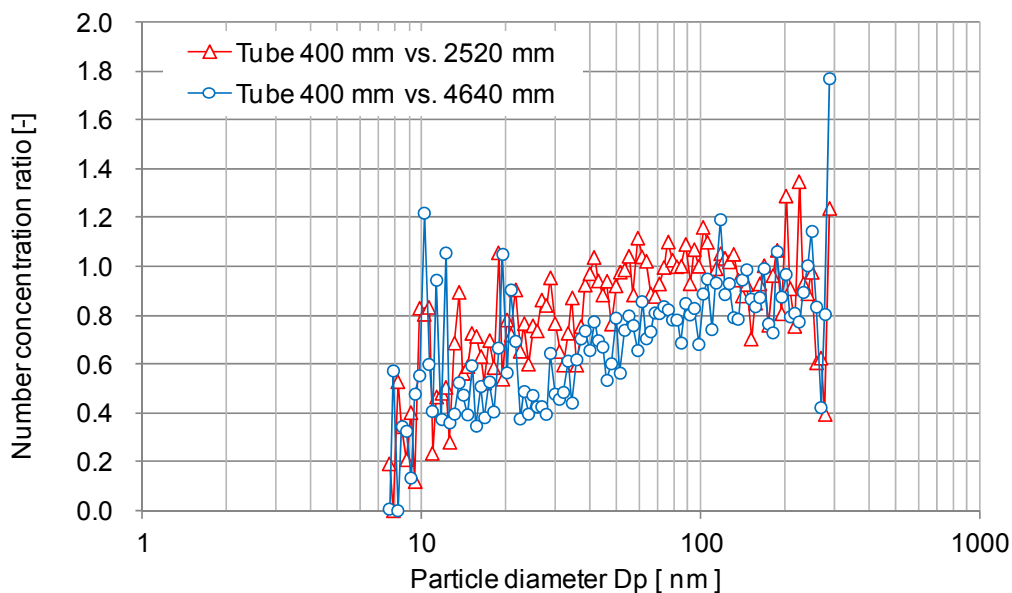


図 5-14 粒径と個数濃度比率の関係

(希釈器希釈率:1800, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)



2520 mm を表しており、青色のグラフはチューブ長 4640 mm を表している。

図では、両方のチューブ長とも、粒径が小さくなるほど比率は小さくなり、粒径が小さいほど個数濃度の減衰率は大きい事が分かる。希釈率 200 の排ガスを対象とした図 5-11 と比較すると比率を表すグラフに乱れが大きいのが、これは、粒径分布自体にも乱れがあり、かつ、比率を求める際の分母となる個数濃度が小さい値となるためである。希釈率すなわち濃度に係わらず粒径が小さくなる程、比率も小さくなり減衰しているのは同様である。チューブ長を長くすることは、計測されるまでの経過時間が延長され、また、流路におけるロス(減衰)も多くなる。通常、チューブ中を流れる粒子状物質のロス要因として、拡散ロス、熱泳動によるロス、静電気によるロスが考えられる。また、ある粒径における個数濃度の増加や減少は、凝集によって個数は低下するが粒径が大きくなることも考えられる。

図 5-15 に比較のため、図 5-11 および 5-14 で示したチューブ長 4600 mm で希釈率 200 と 1800 の結果を合わせて示す。図は縦軸に個数濃度比率、横軸に粒径を示しており、赤色のグラフが希釈率 200、青色のグラフが希釈率 1800 を示している。希釈率 1800 では希釈率 200 と比較して、上述の理由により分布の乱れは大きいのが、両者の個数濃度比率はほぼ一致し、同様の傾向となる事が分かる。

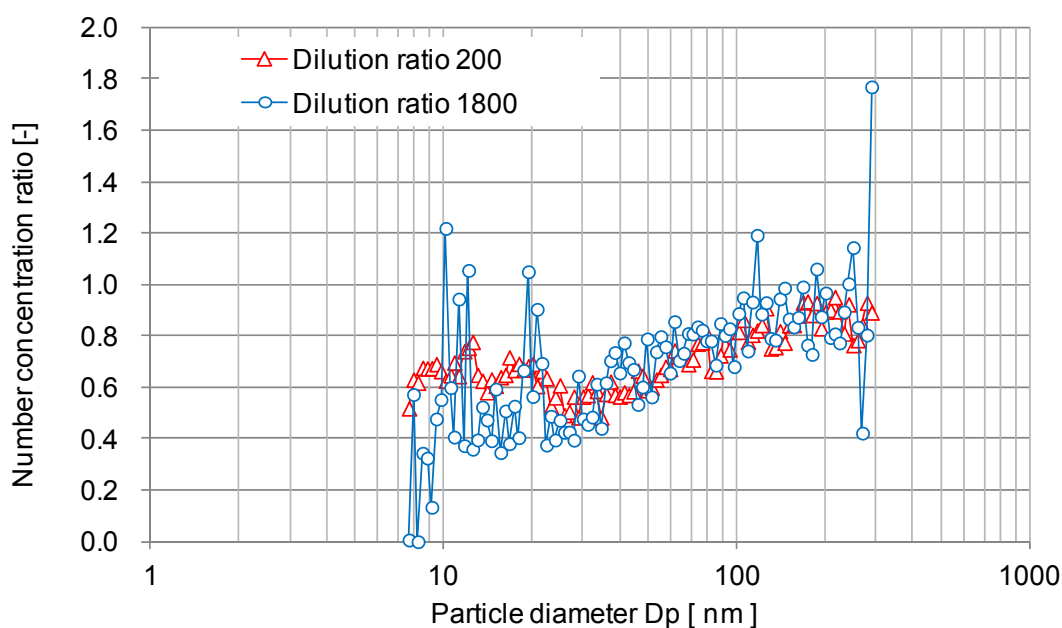


図 5-15 粒径と個数濃度比率の関係(チューブ長:400 mm に対する比率)  
(チューブ長:4640 mm, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性 30 % load)

#### 5.3.4 ホットダイリューションと希釈トンネル希釈の粒径分布比較

ここでは、前項で示したホットダイリューション手法によって計測した粒径分布と、第4章で示した粒径分布の比較を行う。

図 5-16 に発電機特性の負荷率 30 % の排ガスを、ホットダイリューション手法によって計測した粒径分布と、希釈トンネルによって計測した粒径分布を合わせて示す。これらの粒径分布は、凝縮性成分の核生成の違いを確認するため、凝縮性物質に着目したホットダイリューションでは、最も希釈率が高く凝縮性物質による核生成モードの粒子が少ない粒径分布を、希釈トンネルでは、核生成モード粒子が最も多く計測された粒径分布を選択している。

図の赤プロットは、ホットダイリューション(150、希釈率 1800)を示しており、青プロットは希釈トンネルによる希釈率 12、希釈空気温度 20 の計測結果を示している。ここで示すホットダイリューションの結果は、図 5-2 で示した希釈率 1800 の結果と対応しており、希釈トンネル希釈率は、図 4-9 で示した希釈空気温度 20 の結果と対応している。図の縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )を示しており、横軸は粒径分布を示している。また、ここで示す個数濃度は、ホットダイリューションでは希釈器の希釈率、希釈トンネルでは希釈器および 2 次希釈の希釈率を加味し、排気管内の排ガス濃度に換算した濃度である。

希釈トンネルによる希釈を行った粒径分布では、図 4-9 にて説明したとおり、粒径 40 nm 程度をモード径とする、モノモーダルな粒径分布となるが、ホットダイリューションを行った粒径分布では、同一のグラフ上では粒径分布の形の判別が出来ないほど低濃度である。

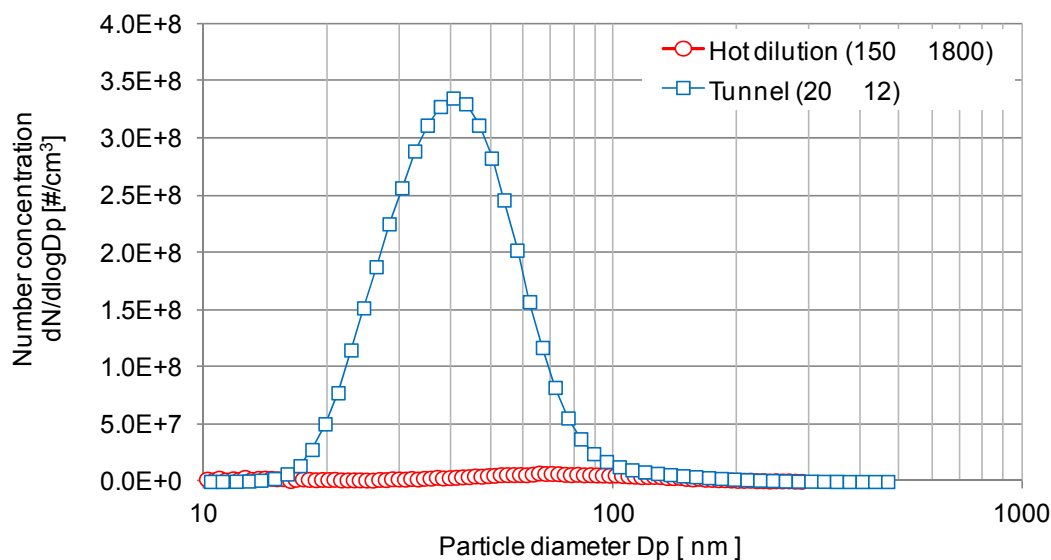


図 5-16 粒径と個数濃度の関係(発電機特性, 負荷率 30 %)  
(ホットダイリューション(150, 希釈率 1800),  
希釈トンネル(希釈率 12, 希釈空気温度 20))

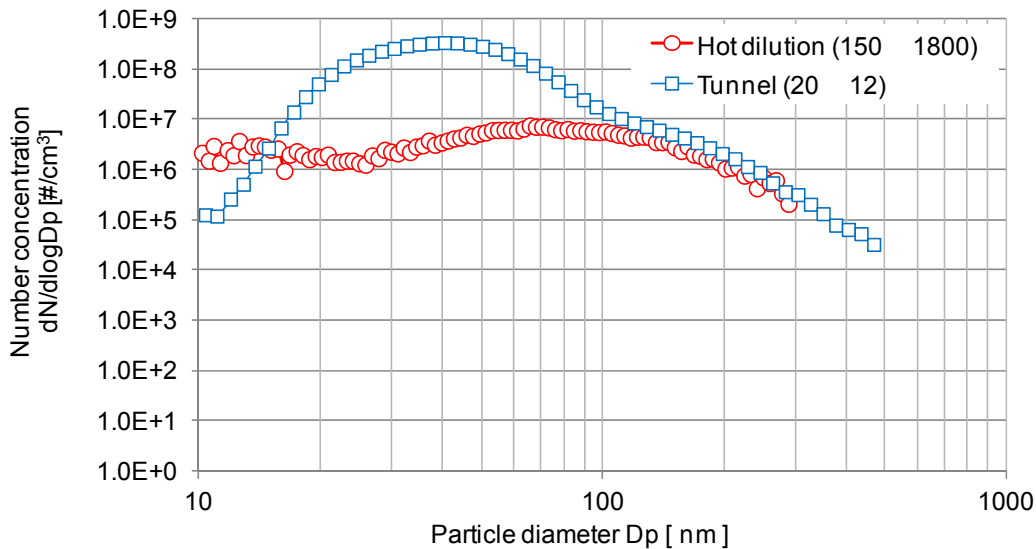


図 5-17 粒径と個数濃度の関係(発電機特性, 負荷率 30 %)  
 (ホットダイリューション(150 , 希釈率 1800),  
 希釈トンネル(希釈率 12, 希釈空気温度 20 ))

発電機特性の負荷率 30 %の排ガスでは、SMPS によって計測した粒径範囲(ホットダイリューション : 7.67 nm から 299.6 nm、希釈トンネル : 10.4 nm から 469.8 nm)では、個数濃度の大部分が凝縮性成分であることが分かる。

分布の比較のため図 5-16 に示した粒径と個数濃度の関係を、縦軸を対数軸とし図 5-17 に示す。図 5-17 では、図 5-16 と同様に縦軸に個数濃度(対数軸,  $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図中の赤プロットはホットダイリューションによる粒径分布を、青プロットは希釈トンネルによる粒径分布を示している。

図 5-16 では、粒径 8nm から 100 nm において、希釈トンネルによる個数濃度が大幅に高濃度であることが分かったが、図 5-17 でそれ以外の部分を確認すると、粒径 5 nm 未満の粒径においてはホットダイリューションによる個数濃度が高濃度となっており、粒径 100 nm 以上の粒径においては、差は小さいが希釈トンネルによる粒径分布が高濃度である。核生成された粒子状物質は、時間が経過するとともに、凝集によって個数濃度が減少すると共に、粒径が大きくなる。ここで、ホットダイリューションの粒径分布が、粒径の小さい範囲において個数濃度が高濃度となったのは、核生成したタイミングから計測までの経過時間が短いためであると考えられ、ホットダイリューション後に希釈後排ガス温度の低下過程による核生成であったことが考えられる。また、100 nm 以上の粒径において、希釈トンネルの方が個数濃度が高く計測されたのは、希釈トンネルによる計測の方が、トランスファーチューブ、希釈トンネル、希釈後の 2 次希釈器までのチューブ等による濃度減衰の影響が大きいと考えられることも考慮すると、凝縮性成分による影響が大きく、100 nm 以上

の粒径にも影響を与えているものと考えられる。

図 5-18 に発電機特性の負荷率 75 % の排ガスを、ホットダイリューション手法によって計測した粒径分布と、希釈トンネルによって計測した粒径分布を合わせて示す。これらの粒径分布は、図 5-16、5-17 と同様に凝縮性物質に着目しホットダイリューションでは、最も希釈率が高く凝縮性物質による核生成モードの粒子が少ない粒径分布を、希釈トンネルでは、核生成モード粒子が最も多く計測された粒径分布を選択している。ここで示すホットダイリューションの結果は、図 5-4 で示した希釈率 1800 の結果と対応しており、希釈トンネル希釈率は、図 4-24 で示した希釈空気温度 20 の結果と対応している。図の縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )を示しており、横軸は粒径分布を示している。また、ここで示す個数濃度は、ホットダイリューションでは希釈器の希釈率、希釈トンネルでは希釈器および 2 次希釈の希釈率を加味し、排気管内の排ガス濃度に換算した濃度である。

希釈トンネルによる希釈を行った粒径分布では、粒径 33 nm 付近および 100 nm 付近を個数濃度の極大値とするバイモーダルな粒径分布であるが、ホットダイリューションによる粒径分布は、粒径 100 nm 付近をモード径とするモノモーダルな粒径分布であり、希釈トンネルによる粒径分布の、粒径の大きい方の極大値である粒径と、ホットダイリューションによる粒径分布のモード径は、ほぼ同一な粒径(100 nm)となる。粒径 20 nm から 43 nm では、希釈トンネルによる粒径分布の個数濃度の方が高濃度となるが、43 nm 以上の粒径では、ホットダイリューションによる個数濃度の方が高くなる。分布の比較のため図 5-18 に示した粒径と個数濃度の関係を、縦軸を対数軸とし図 5-19 に示す。図 5-19 では、図 5-18 と同

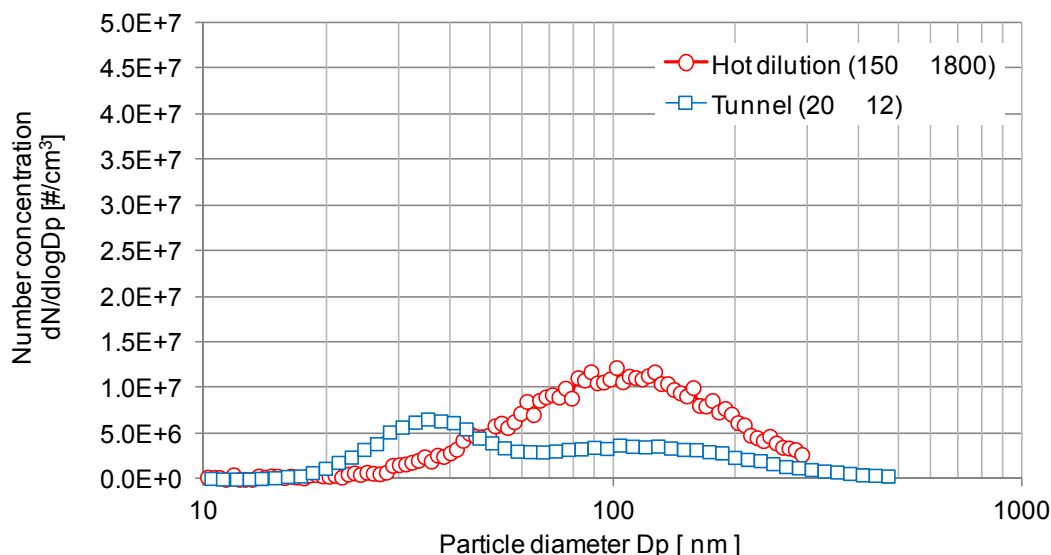


図 5-18 粒径と個数濃度の関係(発電機特性, 負荷率 75 %)  
 (ホットダイリューション(150 , 希釈率 1800),  
 希釈トンネル(希釈率 12, 希釈空気温度 20 ))

様に縦軸に個数濃度(対数軸,  $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図中の赤プロットはホットダイリューションによる粒径分布を、青プロットは希釈トンネルによる粒径分布を示している。発電機特性の負荷率 30 %の図 5-17 と同様に、8 nm 以下の粒径でホットダイリューションの方が個数濃度が高く、ホットダイリューションの粒径分布が、粒径の小さい範囲において個数濃度が高濃度となったのは、核生成したタイミングから計測までの経過時間が短いためであると考えられ、ホットダイリューション後に希釈後排ガス温度の低下過程による核生成であったことが考えられる。

100 nm 以上の粒径に着目すると、発電機特性負荷率 30 %の排ガスでは、ホットダイリューションの個数濃度の方が低濃度であったのに対し、負荷率 75 %では希釈トンネルの個数濃度の方が低濃度となる。前述の通り、希釈トンネルによる計測を行った方が、減衰の減衰の影響が大きいと考えられる。図 4-24 にて確認した 100 nm 以上の凝縮性成分の影響が小さい粒径範囲では、希釈トンネルの個数濃度の方が低濃度であり、減衰による影響であると考えられると共に、負荷率 30 %の排ガスの粒径分布(図 5-16, 5-17)では、凝縮性成分が非常に多いことから、100 nm 以上の範囲の粒径にも影響を与えており、かつ、希釈後、SMPS に到達するまでの間にも、核生成した粒子状物質が、凝集し 100 nm 以上の範囲の個数濃度を高めた為であると考えられる。

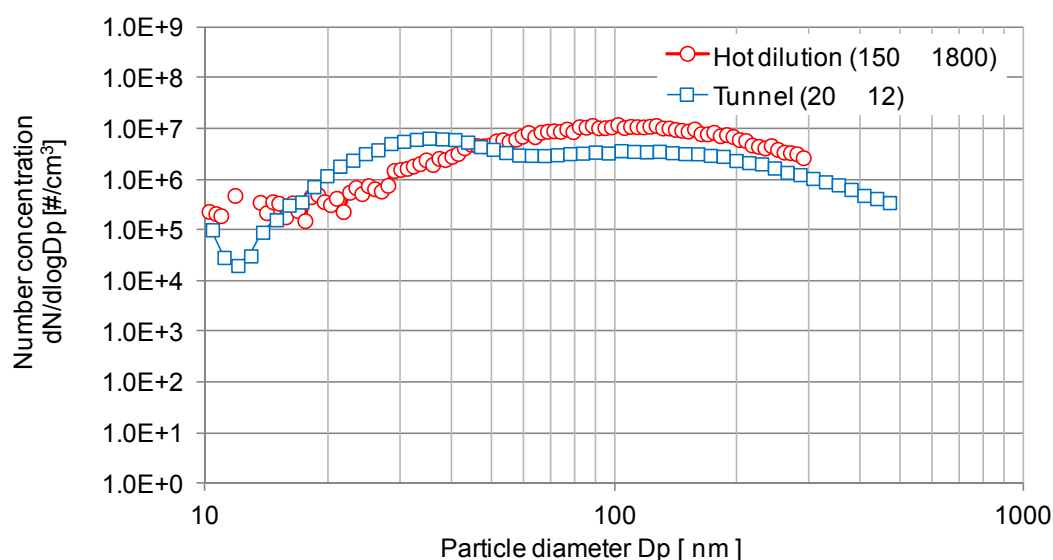


図 5-19 粒径と個数濃度の関係(発電機特性, 負荷率 75 %)  
 (ホットダイリューション(150 , 希釈率 1800),  
 希釈トンネル(希釈率 12, 希釈空気温度 20 ))

## 5.4 船用特性の粒径分布

### 5.4.1 SMPS による個数濃度粒径分布

前項(5.3)では、発電機特性の粒径分布計測を中心に考察した。

本項では、船用 4 ストロークディーゼル機関を船用特性で運転した場合の排ガスを、ホットダイリューション手法を用いた粒径分布計測を行った。図 5-20, 5-21, 5-22 にそれぞれ、船用特性の負荷率 30 %、50 %、75 % の SMPS による粒径分布を示す。なお、船用特性と発電機特性の 100 % 負荷は同一であるため、ここでは割愛する。図では、横軸は粒径、縦軸は個数濃度( $dN/d\log D_p$ )を示している。図では希釈率別に 6 種類の粒径分布を示しており、赤色(赤丸プロット:希釈率 200, 白丸プロット:希釈率 400)、青色(青三角プロット:希釈率 600, 白三角プロット:希釈率 1000)、緑色(緑四角プロット:希釈率 1500, 白四角プロット:希釈率 1800)の順に、希釈率が高い計測結果である。

船用特性の負荷率 30 % の図 5-20 では、全ての希釈率で粒径 100 nm 付近をモード径とするモノモーダルな粒径分布であり、希釈率の違いによる粒径分布の形に大きな差はない。粒径 20 nm 以下の小さな領域と、250 nm 以上の領域では、希釈率による個数濃度の差は小さいが、それ以外の領域では希釈率が低いほど、個数濃度も低く計測される。

船用特性の負荷率 50 % では、全ての希釈率において粒径 100 nm ~ 150 nm 付近をモード径とするモノモーダルな分布となる。負荷率 30 % の図 5-20 と同様に、分布そのものに大きな差異は無いが、粒径 20 nm 以下の小さな領域と、250 nm 以上の領域では、希釈率による個数濃度の差は小さいが、それ以外の領域では希釈率が低いほど、個数濃度も低く計測される。

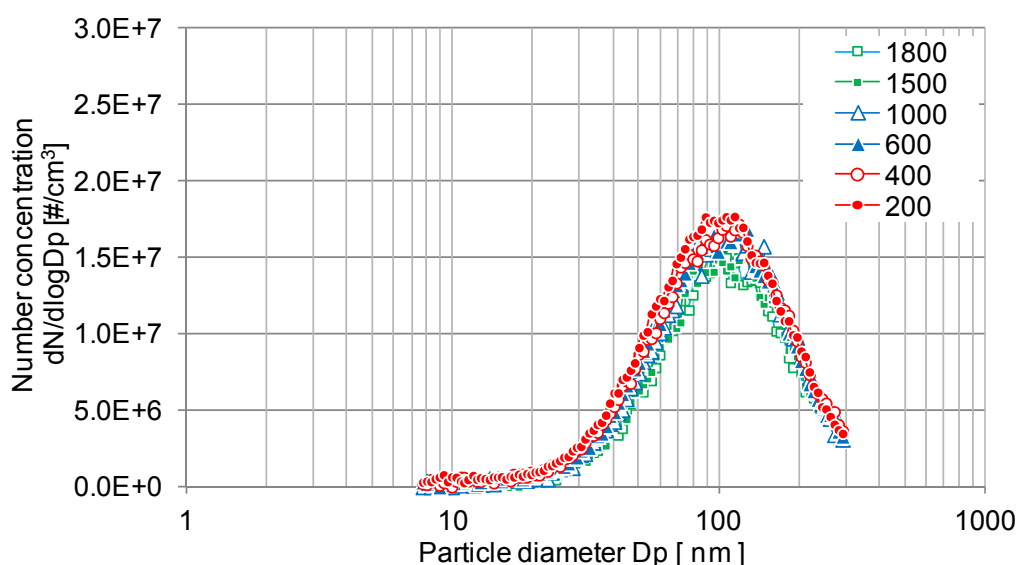


図 5-20 粒径と個数濃度の関係 ( $dN/d\log D_p$ )

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 30 % load)

船用特性の負荷率 75 %の図 5-22 では、全ての希釈率において粒径 100 nm ~ 150 nm 付近をモード径とするモノモーダルな分布となる。負荷率 30 % (図 5-20), 50 % (図 5-21) と同様に分布そのものに大きな差異は無いが、粒径 20 nm 以下の小さな領域と、250 nm 以上の領域では、希釈率による個数濃度の差は小さいが、それ以外の領域では希釈率が低いほど、個数濃度も低く計測される。

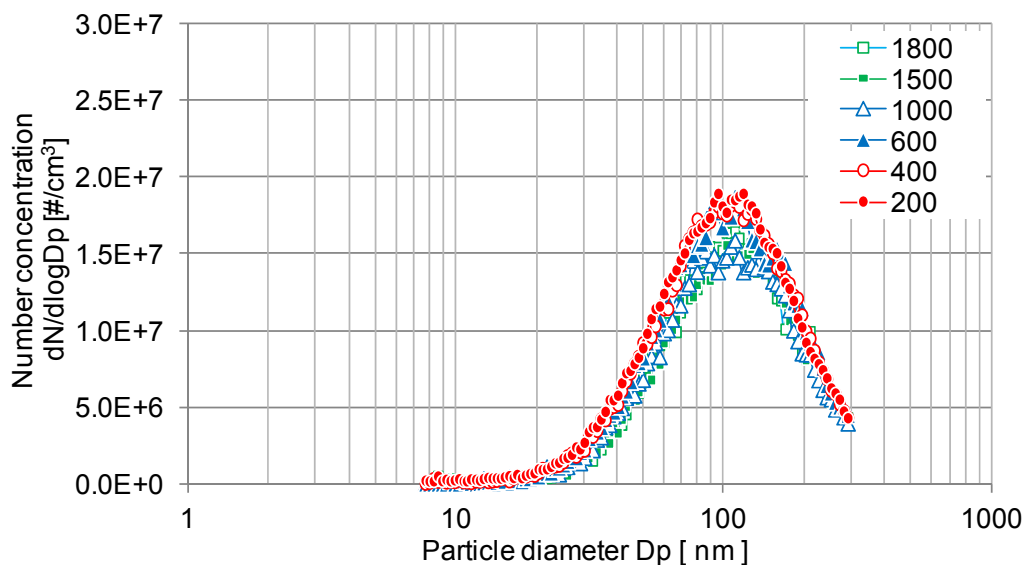


図 5-21 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 50 % load)

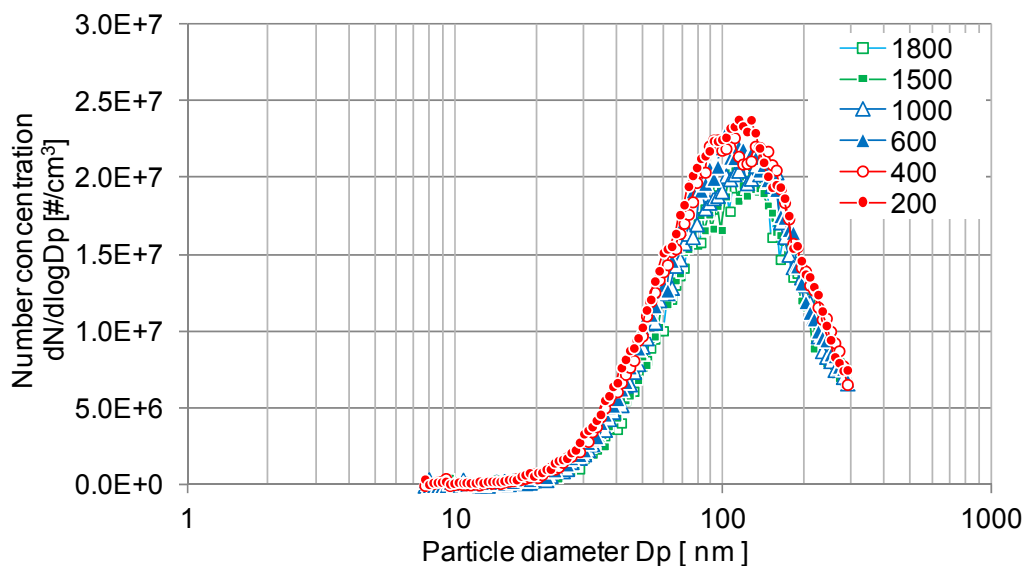


図 5-22 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)  
(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 75 % load)

#### 5.4.2 SMPS による重量粒径濃度

図 5-20, 5-21, 5-22 で示した粒径と個数濃度の関係を、重量濃度に換算し、それぞれ図 5-23, 5-24, 5-25 に示す。重量濃度の換算は、発電機特性にて論じたときと同様に、粒子状物質を完全な球形で、粒子状物質の密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定して行った。図は、縦軸に個数濃度から換算した重量濃度 ( $dW/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図 5-20, 5-21, 5-22 と同様に、希釈率別に 6 種類の粒径分布を示しており、赤色(赤丸プロット:希釈率 200, 白丸プロット:希釈率 400)、青色(青三角プロット:希釈率 600, 白三角プロット:希釈率 1000)、緑色(緑四角プロット:希釈率 1500, 白四角プロット:希釈率 1800)の順に、希釈率が高い計測結果である。

船用特性の負荷率 30 %の図 5-23 では、全ての希釈率において分布に大きな差は無く、計測範囲の最も大きい粒径で極大となる。粒径が 50 nm 以上の範囲から粒子濃度は上昇し、計測範囲の最大粒径で極大となる。個数濃度の粒径分布(図 5-20)では、モード径が 100 nm 付近であったのに対し、重量濃度では 300 nm 以上であると考えられる。

船用特性の負荷率 50 %の図 5-24 では、図 5-23 と同様に粒径 50 nm より大きい範囲で重量濃度は上昇し計測範囲の最大粒径で極大となる。負荷率 50 %においても、全ての希釈率で、粒径分布に大きな差は無い。

船用特性の負荷率 75 %の図 5-25 では、図 5-23, 5-24 と同様に計測範囲の最も大きい粒径で極大となる。粒径が 50 nm 以上の範囲から粒子濃度は上昇し、計測範囲の最大粒径で極大となる。

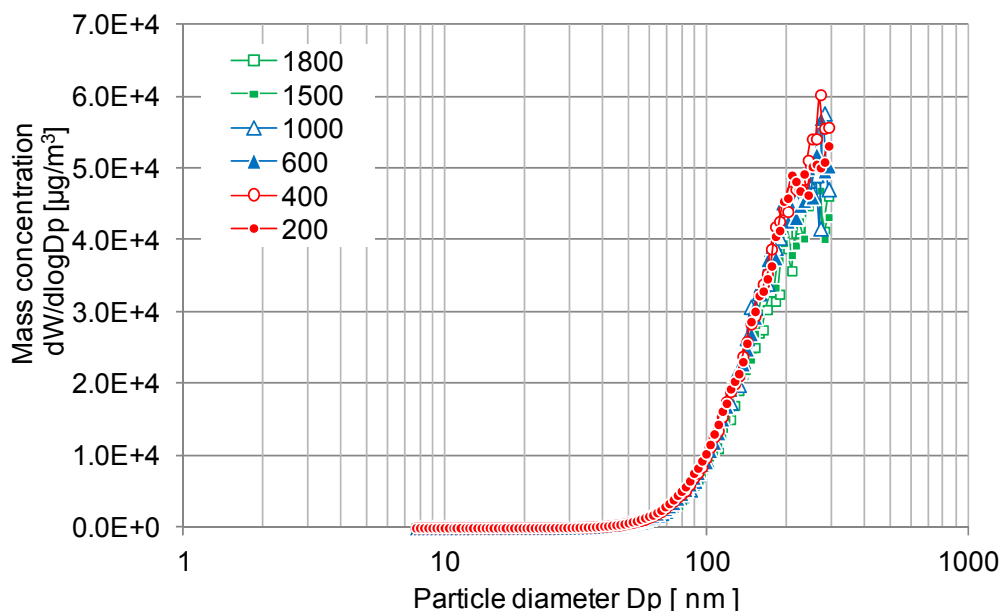


図 5-23 粒径と重量濃度の関係 ( $dW/d\log D_p$ )

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 30 % load)



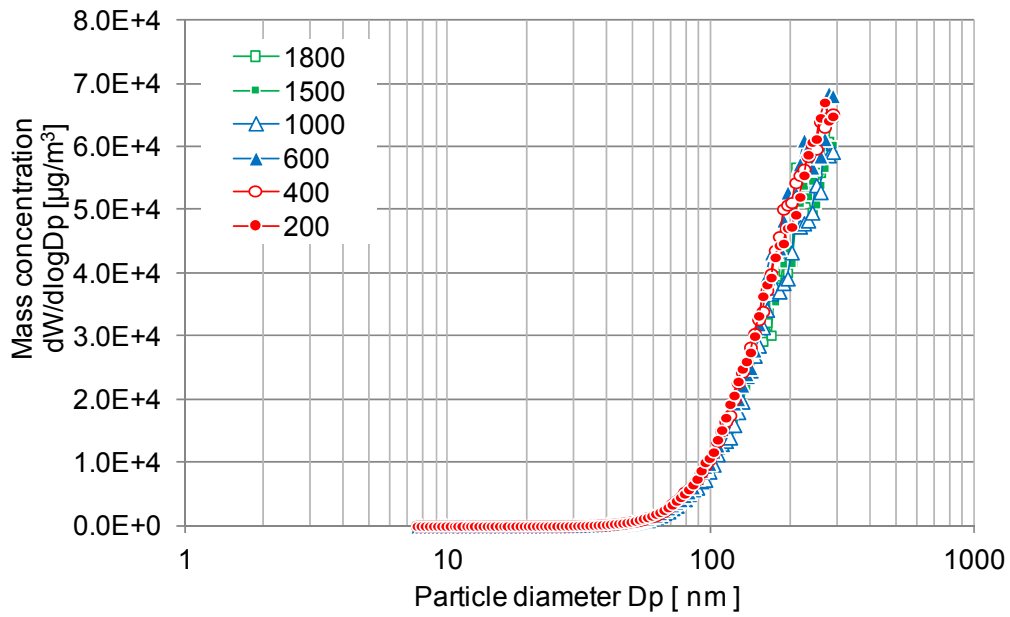


図 5-24 粒径と重量濃度の関係 ( $dW/d\log D_p$ )

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 50 % load)

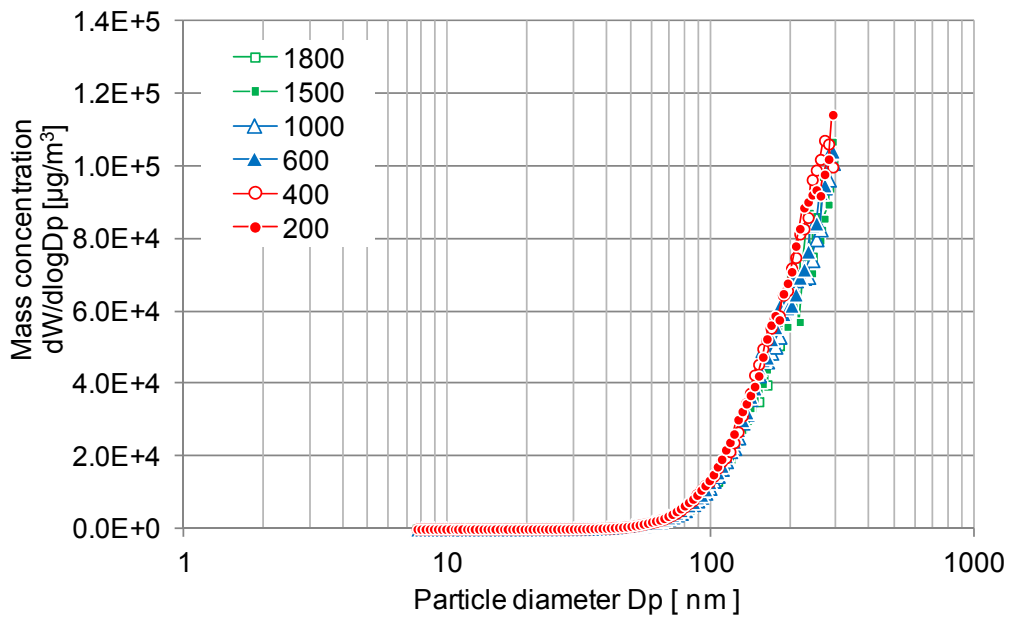


図 5-25 粒径と重量濃度の関係 ( $dW/d\log D_p$ )

(希釈器希釈率:200 ~ 1800, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性 75 % load)

## 5.5 運転特性、負荷率と粒径分布の関係

### 5.5.1 船用特性と発電機特性の粒径分布比較

図 5-26 に低負荷率時の船用特性および発電機特性の粒径と個数濃度の関係を示す。図は、縦軸に個数濃度、横軸に粒径を示しており希釈率を考慮して排気管内の値に換算した分布である。赤線で示しているのが発電機特性の負荷率 30 %、青線で示しているのが船用特性の負荷率 30 %の分布であり、両者、希釈器希釈率 200 倍、希釈温度 150 の計測結果であり、発電機特性は図 5-2 で示した結果の一部、船用特性は図 5-20 で示した結果の一部である。図 5-2 で示したとおり、発電機特性では低負荷率時には粒径の小さい領域と 70 nm 付近の領域に 2 つのピークが現れ、希釈率が変化する事で粒径の小さいピーク値のみが大きく変化した。一方、図 5-20 で示したとおり船用特性の低負荷率時では希釈率が変化しても、モード径であるピーク値は殆ど変化せず、粒径の小さい領域の増加も見られないことから、排ガスが高温状態における粒子の核生成は機関から排出された時点でほぼ終了していることが分かる。発電機特性の粒径の大きい方のピークと船用特性のピークを比較すると、負荷率に 5%の差があるが、船用特性の個数濃度の方が高濃度である事が分かる。図 5-26 で示した粒径分布を、密度を 1.0 と仮定して重量濃度へ換算し図 5-27 に示す。船用特性、発電機特性ともに、50 nm より大きい粒径で重量濃度が高く、船用特性では計測範囲の最大粒径にて最大値となる。一方、発電機特性では船用特性と同様に 50 nm より大きい粒径で濃度が上昇していくが、100-200 nm 間でピークが表れ 200 nm 以上では濃度が下降していく。また、船用特性と比較すると濃度のピーク値は低く 1/10 程度の濃度である。

図 5-28 および 5-29 にそれぞれ発電機特性、船用特性の負荷率 30 %、50 %、75%、100 %の粒径と個数濃度の関係を示す。図は、希釈率 1000 倍、希釈温度 150 の粒径分布を示しており、横軸に粒径、縦軸に個数濃度を示している。また濃度は希釈率を考慮した排気管内の濃度としている。図 5-28 では図 5-2 から 5-5、図 5-29 では図 5-20 から 5-22 と図 5-5 の希釈率 1000 倍の結果をまとめて示したグラフである。

図 5-28 では負荷率 30 %のみがバイモーダル分布となり粒径 10 nm 付近にピークが現れるが、粒径が大きい方のピークは負荷率 30 %、50%ではほぼ同じピーク値となり、負荷率 75 %、100 %とピーク値が高くなる。一方、図 5-29 では全ての負荷率においてモノモーダル分布であり、濃度のピーク値は負荷率 75 %の場合が最も高く、その他の負荷率 30, 50, 100 %ではほぼ同じ値となった。

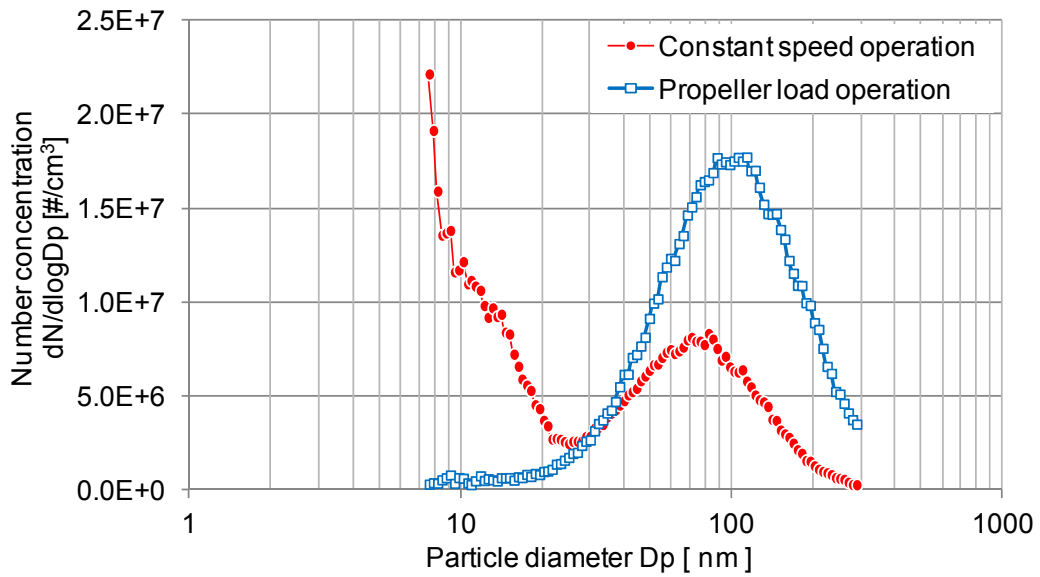


図 5-26 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(負荷率:30%, 希釈器希釈率:200, 希釈温度:150, SMPS, 船用特性/発電機特性)

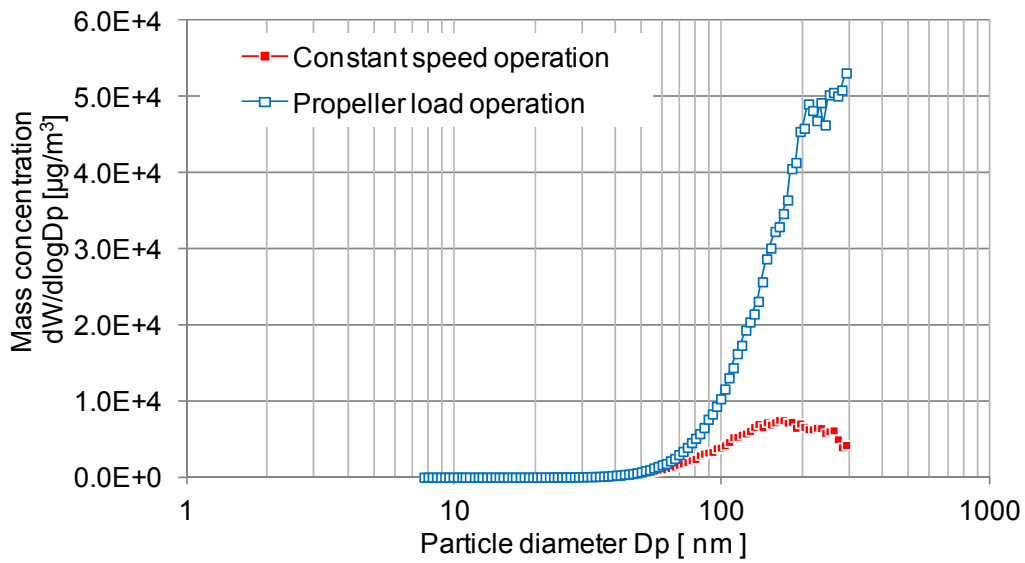


図 5-27 粒径と重量濃度の関係 (dW/dlogDp)

(負荷率:30%, 希釈器希釈率:200, 希釈温度:150, SMPS, 船用特性/発電機特性)

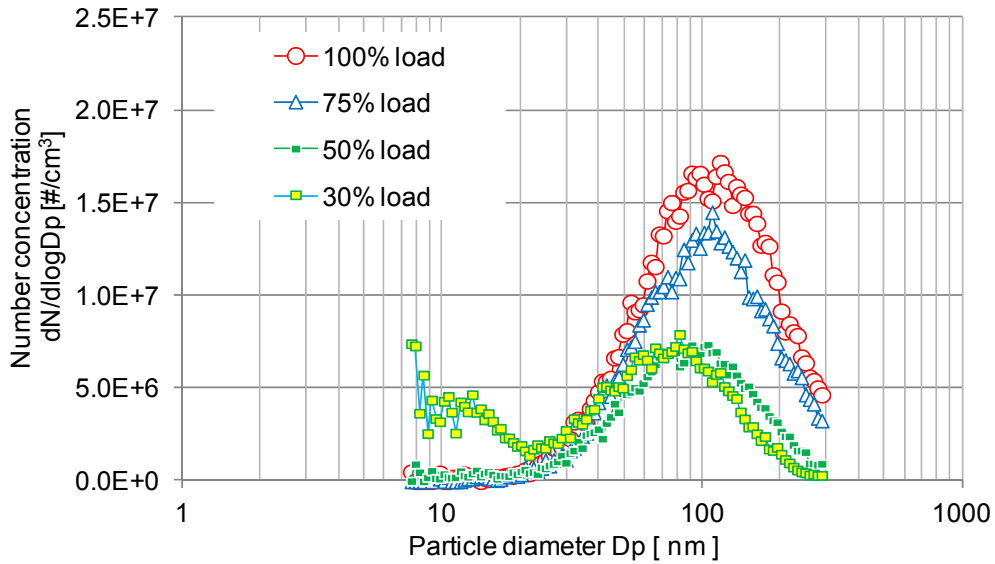


図 5-28 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS, 発電機特性)

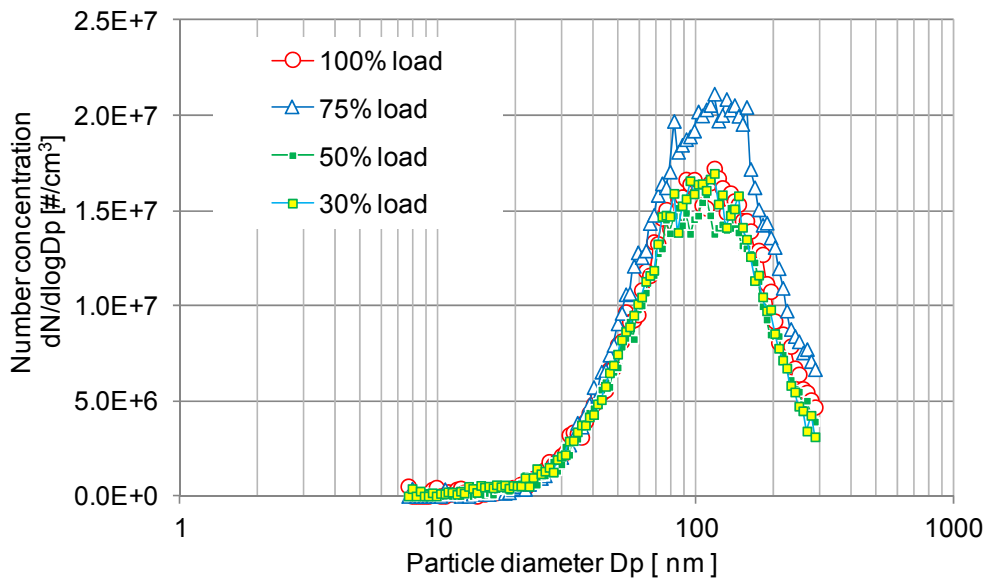


図 5-29 粒径と個数濃度の関係 (dN/dlogDp)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性)

### 5.5.2 排出される個数濃度

図 5-30 および 5-31 にそれぞれ、発電機特性および船用特性の負荷率と全個数濃度の関係を示す。ここで示すグラフは希釈器希釈率 1000、希釈温度 150 の計測結果から希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算した  $1\text{cm}^3$  あたりの個数濃度値である。図 5-30、31 とともに、左から負荷率 30 %、50 %、75 %、100 %の濃度を示している。

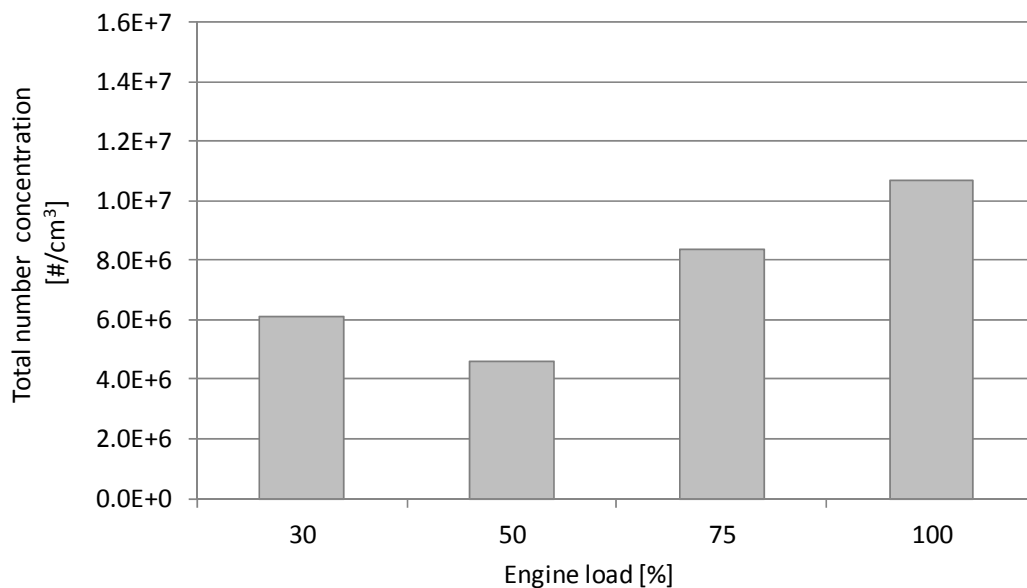


図 5-30 全個数濃度 (発電機特性) (7.64-289 nm)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS)

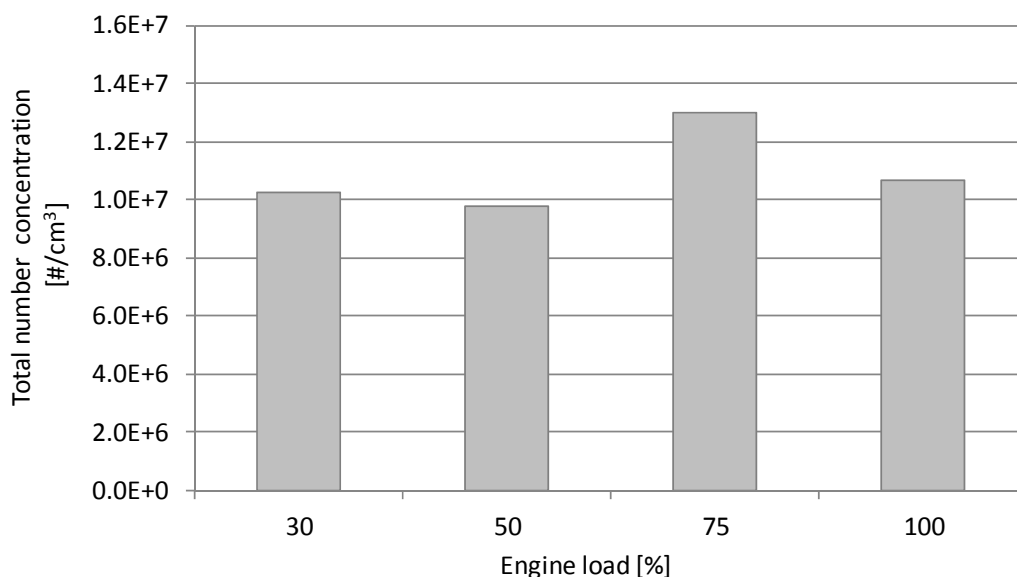


図 5-31 全個数濃度(船用特性) (7.64-289 nm)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性)

発電機特性の図 5-30 では、負荷率 30 %の全個数濃度に対して負荷率 50 %ではやや低い値となり、その後、負荷率 75 %、100 %と負荷率が高い程、濃度も高い値となる。なお、この図で示す負荷率 30 %の全個数濃度は、希釈率 1000 倍として計測した値であり、図 5-2 で示したとおり希釈率によって大きく増減することを考慮して把握する必要がある。

船用特性の図 5-31 では、負荷率 30 %および 50 %の個数濃度には大きな差が無く、それより高負荷の負荷率 75 %が最も高い濃度となる。

ここで、機関から排出される粒子個数を比較するため、図 5-30 および 5-31 で示した単位体積辺りの全個数濃度を時間あたりの排ガス流量に換算し図 5-32 および図 5-33 に示す。排ガス流量は、差圧式流量計によって計測した機関の給気量、および燃料消費重量、CPC のサチュレーター温度から算出した。図 5-32 および 5-33 では縦軸に全個数 (particle/h) を示しており、左から負荷率 30 %、50 %、75 %、100 %の個数を示している。

発電機特性の図 5-32 では、負荷率 30 %から 50 %で全個数濃度はやや低下し、その後 75 %、100 %と負荷率が高い程排出個数も高くなる。船用特性の図 5-33 では、負荷率 30 %より負荷率 50 %の排出個数が多く、その後、負荷率 75 %では大幅に増加する。負荷率 75 %と 100 %の差は、発電機特性の場合より小さい。発電機特性と船用特性を比較すると、負荷率 50 %、75 %とも船用特性の方が多くの粒子が排出されていることが分かる。

図 5-34 および 5-35 にそれぞれ発電機特性と船用特性の機関出力 (kWh) あたりの排出個数率を示す。ここで示す排出個数率は、図 5-32、5-33 で示した排出個数を機関の正味出力で除した値である。

図 5-34 および 5-35 では縦軸に全個数 (particle/kWh) を示している。また、図 5-34 では図 5-32 と同様に、左から負荷率 25 %、50 %、75 %、100 %の個数を示しており、図 5-35 では図 5-33 と同様に、左から負荷率 30 %、50 %、75 %、100 %の個数を示している。

発電機特性の図 5-34 では、負荷率 25 %で最も排出個数が多く、負荷率 50 %で半分近くまで排出個数が減少しその後負荷の上昇とともに排出個数も増加していく。船用特性の図 5-35 では、負荷率 30 %で最も排出個数が多く、負荷率 50 %以上では負荷率 75 %で排出個数が最も多くなる。kWh あたりの排出個数は低負荷率にて多くの粒子が排出されていることが分かる。

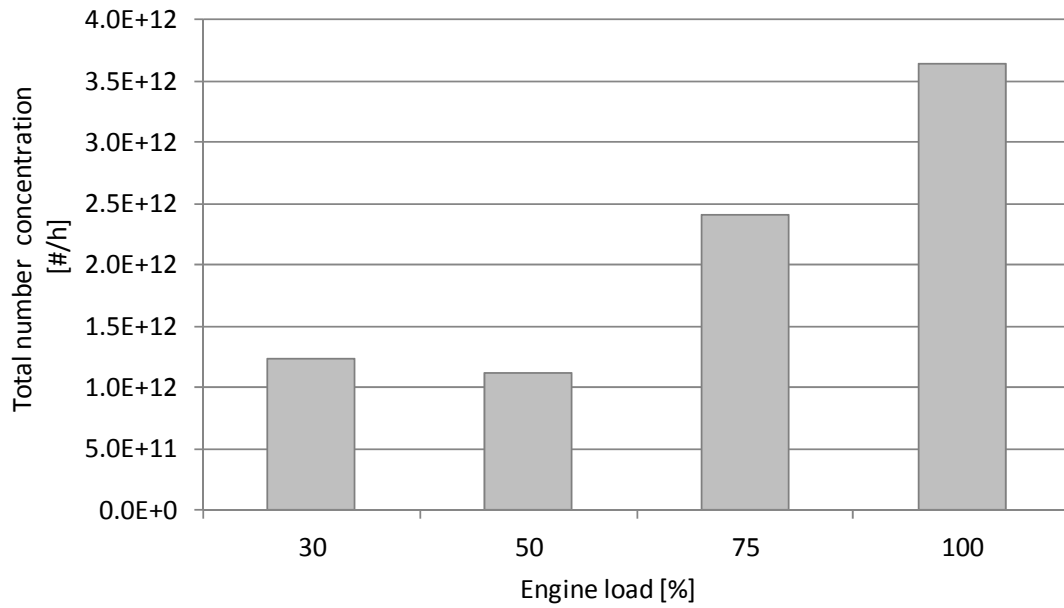


図 5-32 機関総排出個数 (発電機特性) (7.64-289 nm)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS)

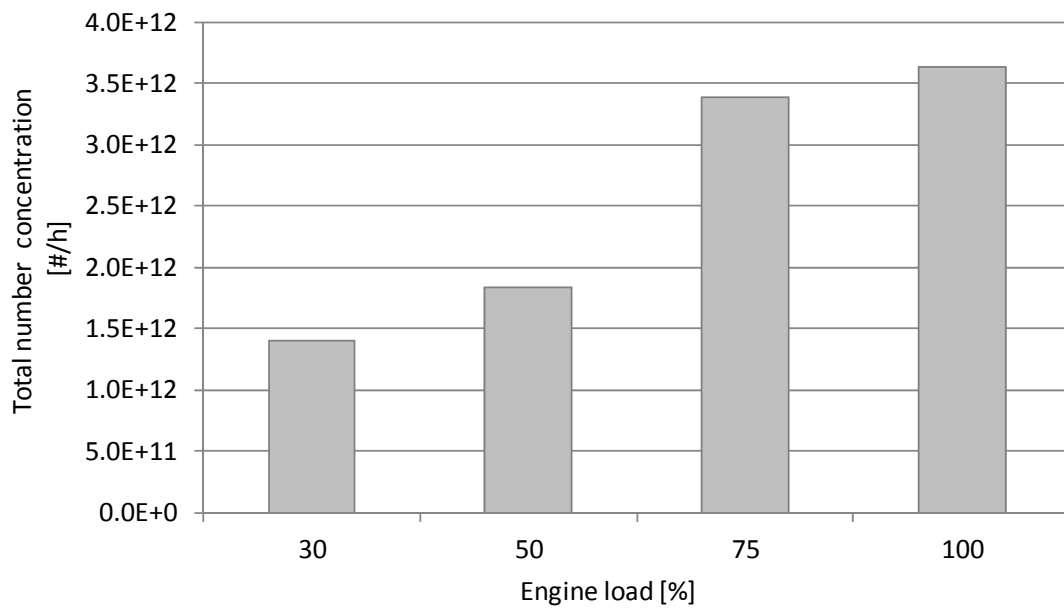


図 5-33 機関総排出個数 (船用特性) (7.64-289 nm)

(負荷率:30,50,75,100 %, 希釈器希釈率:1000, 希釈温度:150 , SMPS, 船用特性)

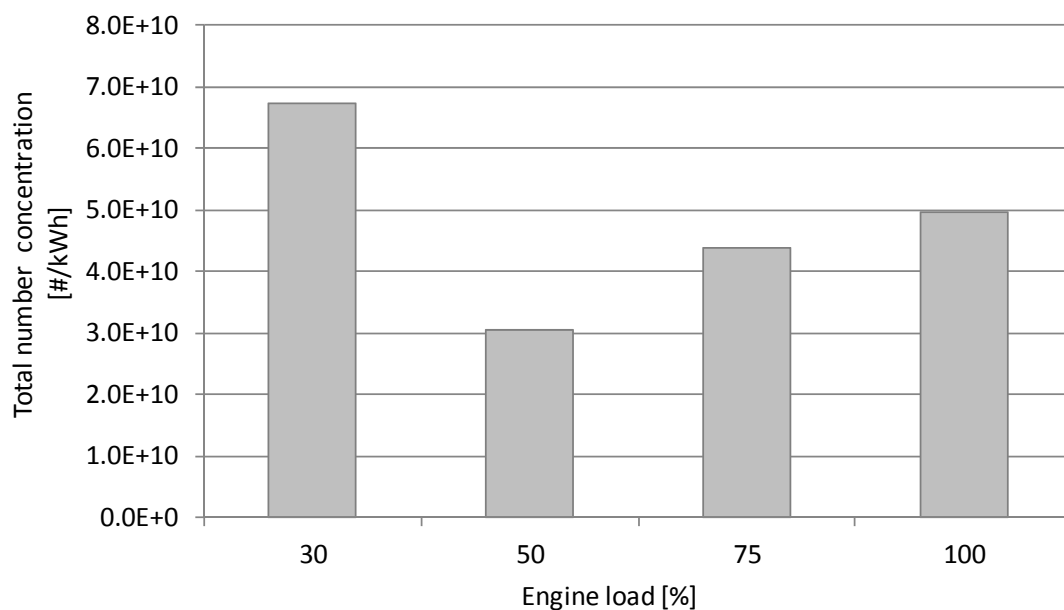


图 5-34 排出個数率 (個/kWh, 發電機特性) (7.64-289 nm)  
 (負荷率:30,50,75,100 %, 希积器希积率:1000, 希积温度:150 , SMPS)

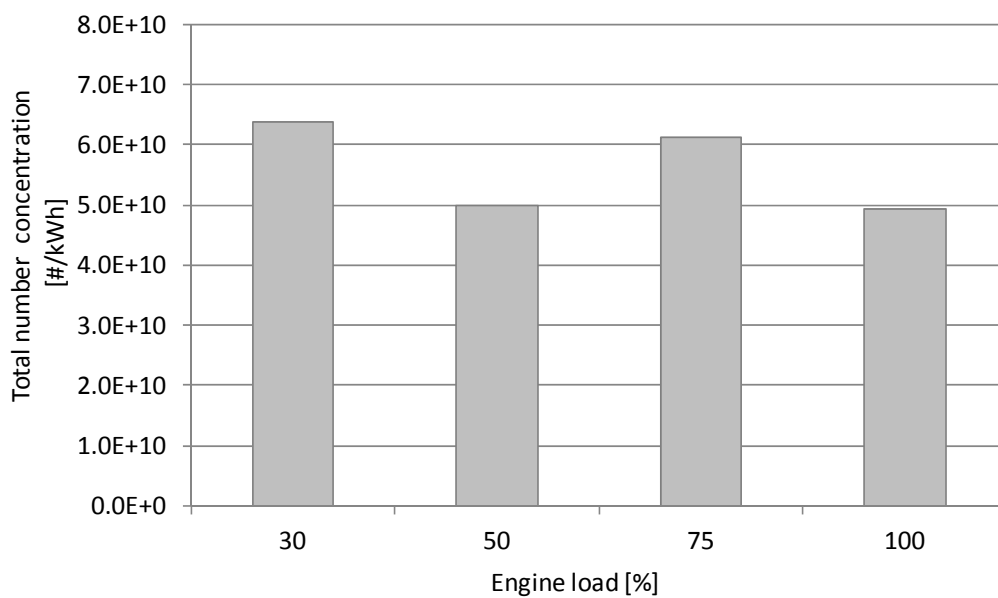


图 5-35 排出個数率 (個/kWh, 船用特性) (7.64-289 nm)  
 (負荷率:30,50,75,100 %, 希积器希积率:1000, 希积温度:150 , SMPS, 船用特性)



## 5.6 まとめ

船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーションによって排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布を計測した。機関は船用特性及び発電機特性の 2 種類の負荷特性において、それぞれ低負荷率から高負荷率の 4 負荷率の排ガスを対象に計測した。また、希釈後の計測系内の濃度減衰の状況を把握することを目的に、希釈後濃度計測器までのチューブ長を変化させた実験を行った。また、ホットダイリユーションの計測結果と希釈トンネルによる希釈を比較した。実験の結果、以下の知見を得た。

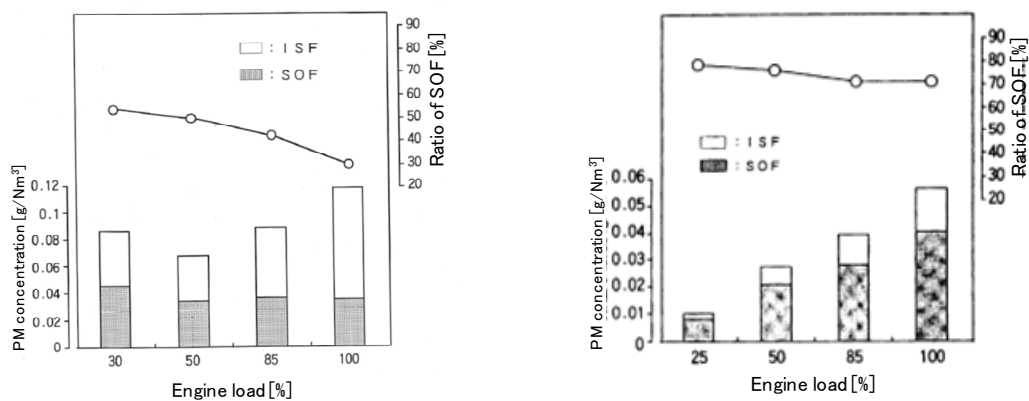
- ・ホットダイリユーションを行った結果、計測される粒子状物質の粒径分布は発電機特性の低負荷時を除き、モード径が 100~120 nm のモノモーダルな粒径分布となる。
- ・発電機特性の低負荷時には、希釈倍率によって小粒径領域の核生成状況が大きく変化することから揮発性成分が多く高濃度で含まれることが分かる。
- ・ホットダイリユーションによる希釈排ガスは、計測系チューブ内にて濃度が減衰するが、減衰率は小粒径ほど高い。また、チューブ長が長いほど減衰率は増加する 2 希釈率の濃度差による減衰率には大きな差は無いことが分かった。
- ・ホットダイリユーションと希釈トンネルによる希釈排ガスを比較すると、揮発性成分が高濃度である発電機特性の負荷率 30 % では 100 nm 以下の粒子で大きく増加する。また、発電機特性の負荷率 75 % の排ガスでは、40 nm 以下の粒径で濃度の上昇が見られたが、それ以上の粒径において濃度の低下が確認された。
- ・SMPS によって計測した粒子の総個数濃度では、単位体積辺りでは船用特性の 75 % にて極大値となった。総排出個数では負荷率が高い程高い値となったが、排出個数率では低負荷率ほど高い濃度となることが分かった。

船用ディーゼル機関から排出される PM は排気管内の排ガスにおいて個数濃度は粒径 200 nm 未満にピークを持つ分布であり、粒子の大部分が非常に小さい核で形成されていることが分かった。また、実験結果から、粒径 289 nm 未満において kWh あたり低負荷率時(発電機特性 負荷率 30 %)では  $6.8E10$  個/cm<sup>2</sup> の粒子が排出され、高負荷率(負荷率 100 %)では  $5.0E10$  個/cm<sup>2</sup> 程の粒子が排出されていることを明らかにした。実際船舶使用される船用機関は、船舶上部のファンネルから大気に放出(排気)される。大気に放出される際に、排ガスは風向きや風速によってどのような希釈状況であるかは明らかではなく、実験的にその再現も不可能ではあるが、外気温の環境での希釈が行われていることは明らかであり、排出直後に生成される粒子は多いと考えられる。さらには、2 次生成の粒子もあるため環境に与える影響は大きい。船用ディーゼル機関から排出される PM に関して低減装置(船舶用 DPF)の研究<sup>5-1,5-2,5-3)</sup>は盛んに行われているが、上述の内容から、大気へ放出する前に核生成と凝集を促進させるとともに 200 nm 未満の粒子も対象とした低減装置が必要であると考えられる。

## 第6章 船用2ストローク低速ディーゼル機関のPM<sup>6-1</sup>

前章(第4章および5章)では、船用4ストロークディーゼル機関から排出されるPMを対象にSMPSおよびELPIにて粒子状物質の計測を行った。また、ホットダイリューションおよび希釈トンネルによる希釈の2種類の希釈方法から計測される粒子状物質の差異の比較を実施した。本章では船用2ストローク低速ディーゼル機関から排出されるPMを対象に検討を行い、船用4ストロークディーゼル機関の排ガスと比較を行う。

### 6.1 フィルター計測による船用4ストロークディーゼル機関と船用2ストローク低速ディーゼル機関のPMの違い



(1) 船用4ストローク機関  
(3L13AHS、A重油)

(2) 船用2ストローク機関  
(3UEC37LA、A重油)

図6-1 塚本らによる負荷率とPM濃度の関係

表6.1 燃料油の性状

密度(288K)	g/cm <sup>3</sup>	0.8360
反応		中性
セタン指数		56
引火点	K	331
流動点	K	260.5
動粘度(323K)	mm/s	2.536
硫黄分	質量%	0.66
窒素分	質量%	0.011
残炭分	質量%	0.47
灰分	質量%	0.005(-)
水分	質量%	0.05(-)
総発熱量(推定)	kJ/kg	45500

図 6.1 に塚本らによる PM 重量濃度の比較を示す。図は(1)に船用 4 ストローク機関の負荷率と PM 濃度の関係、(2)に船用 2 ストローク機関の負荷率と PM 濃度の関係を示しており、ともに船用特性運転時の PM 濃度である。この計測は ISO8178-1 に準拠した計測を行っている。船用 4 ストロークディーゼル機関では、負荷率 30, 50, 85, 100%にて計測が行われており、船用 2 ストロークディーゼル機関では負荷率 25, 50, 85, 100%にて計測が行われている。それぞれの棒グラフでは上に ISF 濃度、下に SOF 濃度を示している。また、上部の折れ線グラフは PM 重量に対する SOF 分の割合を示している。供試機関はそれぞれ、4 ストローク機関では 3L13AHS、2 ストローク機関では 3UEC37LA 機関を用いており、燃料油は表 6.1 に示す A 重油を使用している。

船用 4 ストローク機関を船用特性で運転した PM 重量濃度では、ISF、SOF を合わせた PM 濃度は負荷率 30%から 50%にかけて一度低下し、それより高い負荷率では、負荷率が高い程 PM 濃度も高くなる。一方、船用 2 ストローク機関の PM では、負荷率 25%から 100%にて負荷率が高い程 PM 濃度が高くなる。両者の PM 濃度を比較すると、船用 4 ストロークディーゼル機関では最も濃度の低い負荷率 50 %において 0.05 g/Nm<sup>3</sup> であるのに対して船用 2 ストロークディーゼル機関では最も濃度の高い負荷率 100%において、0.06 g/Nm<sup>3</sup> 程であり、船用 4 ストロークディーゼル機関より船用 2 ストロークディーゼル機関の方が PM 重量濃度は低いことが分かる。また、SOF 分割合を比較すると、船用 4 ストロークディーゼル機関では、負荷率が高い程 SOF 分割合は低くなるのに対して、船用 2 ストロークディーゼル機関では全ての負荷率で SOF 分割合はほぼ一定であり、かつ、SOF 分割合が 70%以上と高い値である。

塚本らはこの理由として、2 ストローク機関はシリンダ内径が大きく、燃料噴射量の少ない低負荷時には火炎が壁面近傍まで達せず SOF 濃度が低く、高負荷時ではシリンダライナ表面温度の上昇により、シリンダ油のミストが SOF として排出されやすくなったと考察している。このように、船用 2 ストローク機関では、船用 4 ストローク機関と比較して SOF 分割合が多いことが指摘されている。

## 6.2 実験の目的および概要

本章では、供試機関に船用 2 ストローク低速ディーゼル機関(3UEC37LA)を採用し計測を実施した。また、実験に使用した燃料油は、第 4 章および第 5 章の実験で用いた燃料油と同様である市販の低硫黄 A 重油(JIS1 種 1 号)である。

実験は最初に、負荷率 50, 75 %の排ガスを対象に、ホットダイリキュションによって高温状態の排ガスの粒子状物質を SMPS によって計測した。

その後、希釈トンネルによって希釈した排ガスを対象に、2 次希釈を用いた SMPS および ELPI による計測を行い、1 次希釈後の希釈状況変化による粒径分布の変化を観察した。

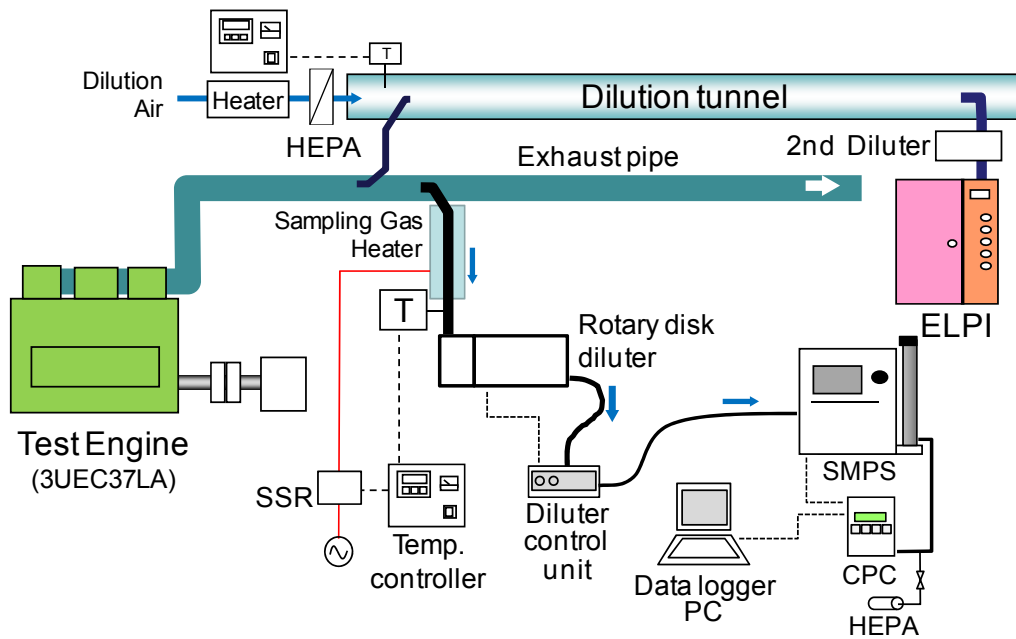


図 6-2 実験装置の概要

### 6.3 実験装置および方法

図 6-2 に実験装置の概要を示す。供試機関は船用 2 ストローク低速ディーゼル機関 (3UEC37LA) である。実験装置は供試機関と希釈トンネルおよびホットダイリューション用のロータリーディスク希釈器、エゼクタ希釈器、ELPI、SMPS によって構成される。

ホットダイリューションでは、排気管を流れる排ガスの一部をロータリーディスク希釈器にてサンプリングする。サンプリングプローブは SUS 製 (SUS304) のシームレス管 (外径 10mm, 肉厚 1mm) の先端を 45° に切断し、切断面が排ガス流れの上流向きで配管の中央にな

表 6.2 燃料油の代表性状

Item	Specifications
Specific gravity (288 K)	0.8778 [g/cm <sup>3</sup> ]
Reaction	Neutrality
Flash point	352 [K]
Pour point	243 [K]
Kinetic viscosity (323 K)	3.371 [mm <sup>2</sup> /s]
Sulphur	0.072 [mass%]
Nitrogen	0.02 [mass%]
Conradson carbon residue	0.04 [mass%]
Gross calorific value (estimated)	45120 [kJ/kg]

るように設置した。そのプローブよりサンプリングした排ガスは、ロータリーディスク希釈器のポンプによって吸引される。排気管とロータリーディスク希釈器間のトランスファーチューブでは、冷却によるPM損失、粒径変化を最小限とするため、ロータリーディスク希釈器の入口排ガス温度が、希釈温度と同一となるようにリボンヒータによる加熱保温を行った。

希釈トンネルを用いた計測では、排気管に挿入したサンプリングプローブよりトランスファーチューブを経由して排ガスの一部を希釈トンネルに導く。サンプリングプローブは、ホットダイリューション時のプローブと同様に、SUS製のシームレス管(外径10mm,肉厚1mm)の先端を45°に切断し、切断面が排ガス流れの上流向きで配管の中央になるように設置した。また、トランスファーチューブにおいても、希釈トンネルの入口排ガス温度が180℃となるように、リボンヒータによる加熱保温を行った。希釈トンネルでは、サンプリングした排ガスと、希釈空気が混ざり合うことで希釈・冷却が行われる。なお、希釈空気には、マイクロミストフィルター(0.01μm)およびHEPAフィルターによって濾過し、中空糸膜式ドライヤーを通過した清浄、乾燥空気を用いた。このように希釈した排ガスを、さらに2次希釈を行いSMPSおよびELPIにて計測した。2次希釈器はSMPSではロータリーディスク希釈器、ELPIではエゼクタ希釈器を使用した。本章における供試機関の運転では燃料油に市販の低硫黄A重油(硫黄分:0.072%)を使用した。その代表性状を表6.2に示す。

## 6.4 SMPSによる粒径分布の計測

### 6.4.1 ホットダイリューションによる粒径分布

機関を船用特性の負荷率50%および75%にてホットダイリューションを用いてSMPSによって計測を行った。計測は機関の起動後、暖機運転を行い、その後負荷率を所定の値に設定し、各所の温度が一定となるのを確認して計測を開始した。ロータリーディスク希釈器の希釈温度は150℃とした。

図6-3に粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図中の赤色の丸で示した分布が負荷率75%、青色の菱形で示した分布が負荷率50%を示している。また、縦軸に示す濃度は、希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算して示している。負荷率50%、75%ともに粒径は38nmでモード径となるモノモーダルな分布であり、粒子の大部分が粒径100nm未満であることが分かる。また、負荷率75%では50%に比べ個数濃度の極大値は高い値を示すことが読み取れる。

図6-3では低濃度の領域(下方のグラフが重なった範囲)において比較することが困難なため、図6-3で示した粒径と個数濃度の関係を縦軸を対数軸として図6-4に示す。図は図6-3と同様に縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図中の赤色の丸で示した分布が負荷率75%、青色の菱形で示した分布が負荷率50%を示している。図6-3では変化が読み取ることが困難であった粒径20nm以下では、負荷率50%の分布が75%の分布

よりやや濃度が高い。また、100 nm より大きい粒径でも同様に負荷率 50 %の分布が 75 %の分布よりやや濃度が高い濃度である。

図 6-3 および 6-4 で示した個数濃度を重量濃度に換算し図 6-5 に示す。図は縦軸に重量

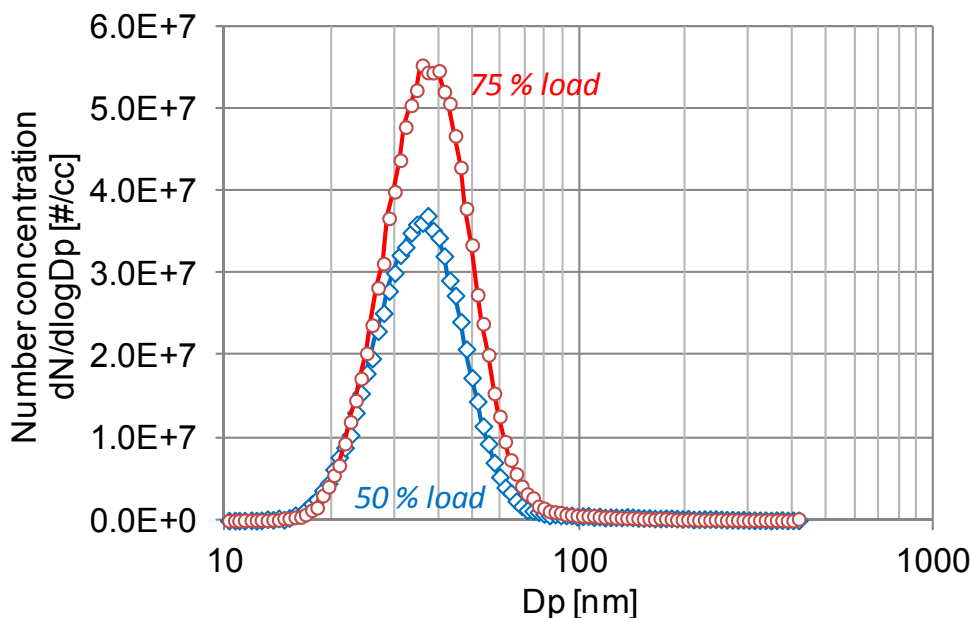


図 6-3 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：50, 75 %、ホットダイリユーション、  
希釈率：250、希釈温度：150 )

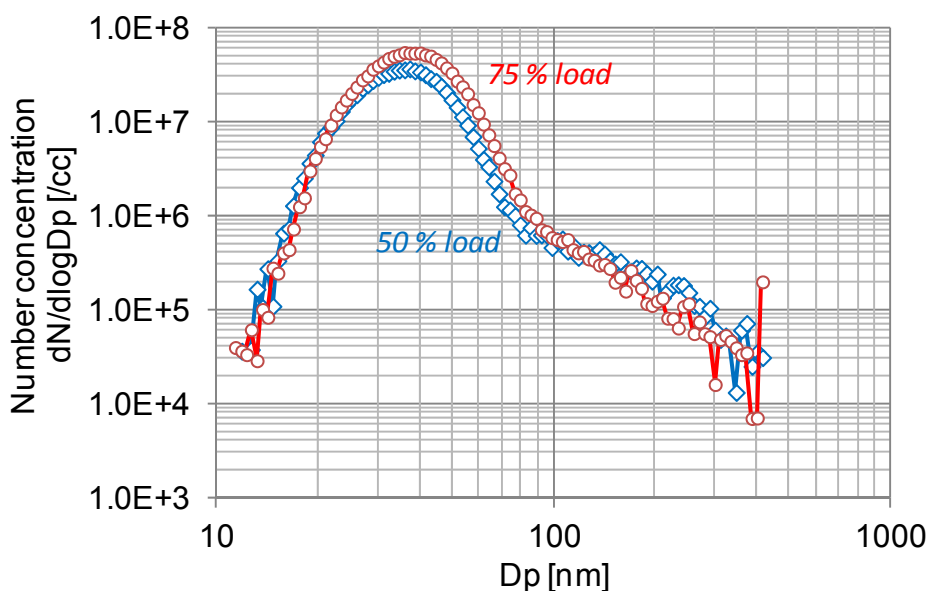


図 6-4 粒径と個数濃度の関係(対数軸による表示)

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：50, 75 %、ホットダイリユーション、  
希釈率：250、希釈温度：150 )

濃度( $dW/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図 6-3, 6-4 と同様に、図中の赤色の丸で示した分布が負荷率 75 %、青色の菱形で示した分布が負荷率 50 %を示している。重量濃度の換算は粒子の密度を 1.0 g/cc と仮定し換算を行っている。

縦軸を個数濃度とした図 6-3 では負荷率 50 %、75 %ともモノモーダルな分布であったが、重量濃度とした場合、負荷率 50 %、75 %とも大きい粒径でも濃度が高くなり、個数濃度でピークとなった粒径 40 ~ 50 nm とともに 200 nm 以上の粒径でもピークが表れる。このことから、SMPS の計測粒径範囲において船用 2 ストロークディーゼル機関の高温状態の排ガスの重量濃度では粒径 40 ~ 50 nm 付近と、200 nm 以上の 2 領域で重量のピークが表れる事が分かる。また、200 nm 以上の粒径では、粒子 1 個辺りの重量が重いために個数濃度の少しの差でも重量は大きく変化するため、100 nm 以下の粒径が小さい領域と比べ高低の変動が激しい分布となっているが、負荷率 50 %の方が負荷率 75 %より高い濃度となることがわかる。

ここで、5.3 項および 5.4 項と同じく、希釈率を変化し粒径分布の計測を実施した。図 6-6 に粒径と個数濃度の関係を示す。図は船用特性の負荷率 50 %の排ガスを希釈温度 150 でホットダイリューションを行った排ガスで、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図中の青色の分布が希釈率 250、赤色の分布が希釈率 350、緑色の分布が希釈率 450 を示しており、それらの濃度は希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算している。

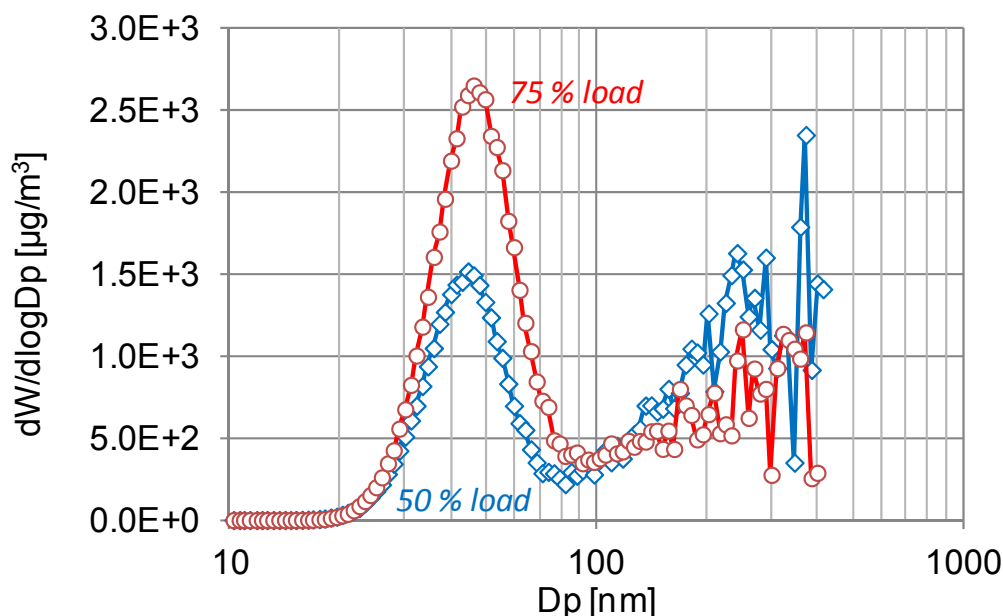


図 6-5 粒径と重量濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：50, 75 %、ホットダイリューション、  
希釈率：250、希釈温度：150、換算密度：1.0 g/cc)

図中の希釈率 250 の分布は図 6-3、負荷率 50 %の分布と同様である。全ての希釈率においてモード径は約 35 nm となり、希釈率が変化してもモード径は変化しない。希釈率が高いほど計測される濃度の極大値は低下する。これは、船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性、負荷率 30 %時の粒径 100 nm 以下の粒径と同じ傾向であり、希釈率を変化させることで濃度が変化する事から核生成領域であることが分かる。しかし、船用 4 ストローク機関では SMPS の計測範囲の最も小さい粒径の範囲で濃度が変化していたが、船用 2 ストローク機関ではやや大きい粒径範囲での変化となった。核生成した粒子は、ブラウン運動等によって凝集し粒径が大きくなるにつれて個数は減少するが、船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスでは、核生成した粒子が高濃度であるため凝集が活発に行われたと考えられる。図 6-6 で示した粒径分布の縦軸を対数軸として図 6-7 に示す。図 6-7 は図 6-6 と同様の船用特性の負荷率 50 %の排ガスに関して、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数表示)、横軸に粒径を示しており、図中の 3 つの分布は図 6-6 と同様に青色の分布が希釈率 250、赤色の分布が希釈率 350、緑色の分布が希釈率 450 を示しており、それらの濃度は希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算している。

図 6-6 で確認が困難であった、粒径 100 nm 以上の粒径範囲では、希釈率の差による濃度差は殆ど無い事が分かる。

図 6-8 に粒径と個数濃度の関係を示す。図は船用特性の負荷率 75 %の排ガスを希釈温度 150 でホットダイリユーションを行った排ガスで、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図中の青色の分布が希釈率 250、赤色の分布が希釈率 350、緑色の分布が希釈率 450 を示しており、それらの濃度は希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算している。

船用特性の負荷率 75 %においても、図 6-6 と同様に希釈率が高い程、濃度の極大値は低くなる。また、モード径に関しても全ての希釈率において粒径が約 35 nm となり希釈率が変化してもモード径に大きな変化は無いが、希釈率 250 の分布と、希釈率 350、450 の分布を比較すると、モード径よりやや大きい粒径 50 nm においても若干高い値となっている。

図 6-9 は図 6-8 と同様に船用特性の負荷率 75 %の排ガスに関して、縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数表示)、横軸に粒径を示しており、図中の 3 つの分布は図 6-8 と同様に青色の分布が希釈率 250、赤色の分布が希釈率 350、緑色の分布が希釈率 450 を示しており、それらの濃度は希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算している。

船用特性の負荷率 50 %の排ガスの場合と同様に、船用特性の負荷率 75 %においても、粒径 100 nm 以上の粒径範囲では、希釈率の差による濃度差は殆ど無い事が分かる。



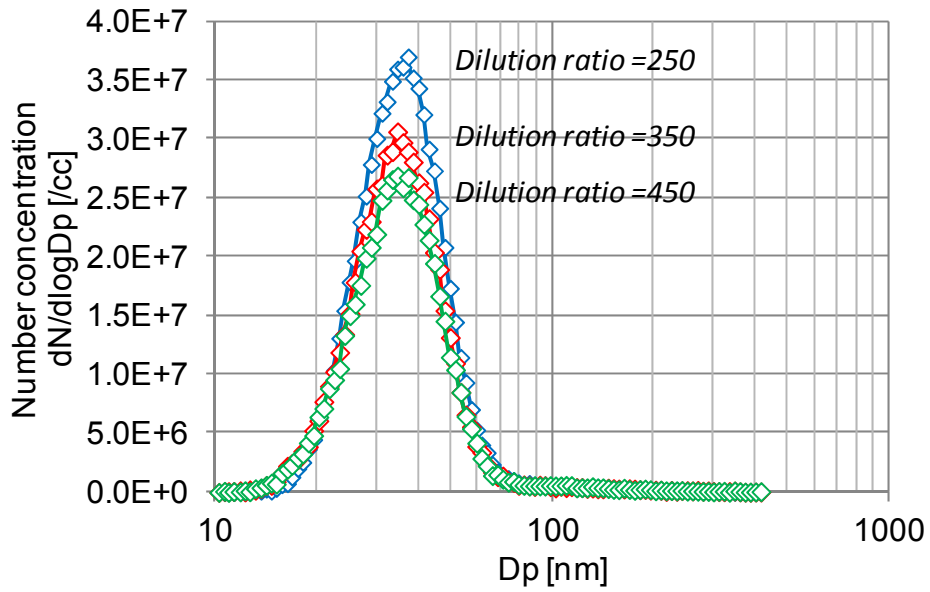


図 6-6 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：50 %、ホットダイリユーション、  
希釈率：250, 350, 450、希釈温度：150 )

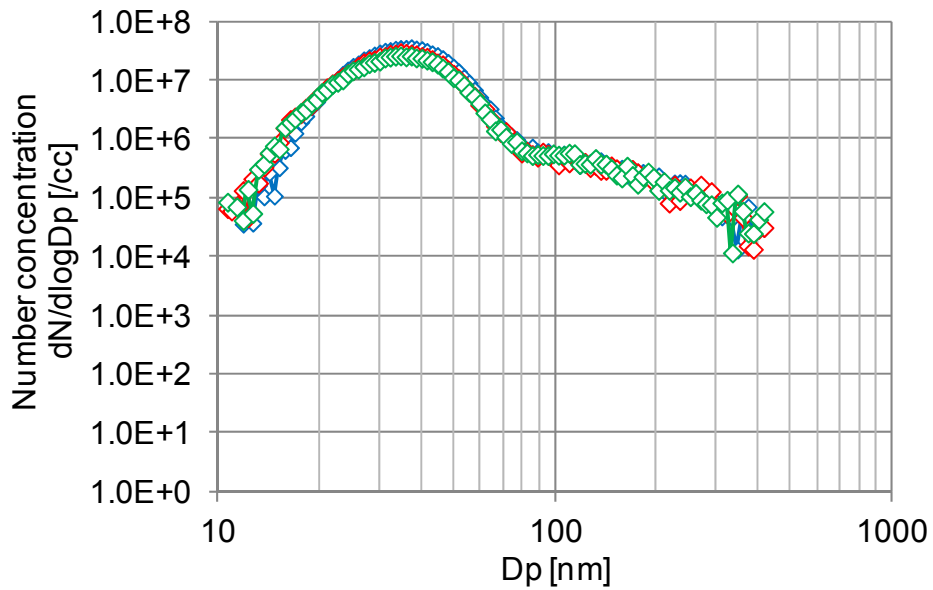


図 6-7 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：50 %、ホットダイリユーション、  
希釈率：250, 350, 450、希釈温度：150 )

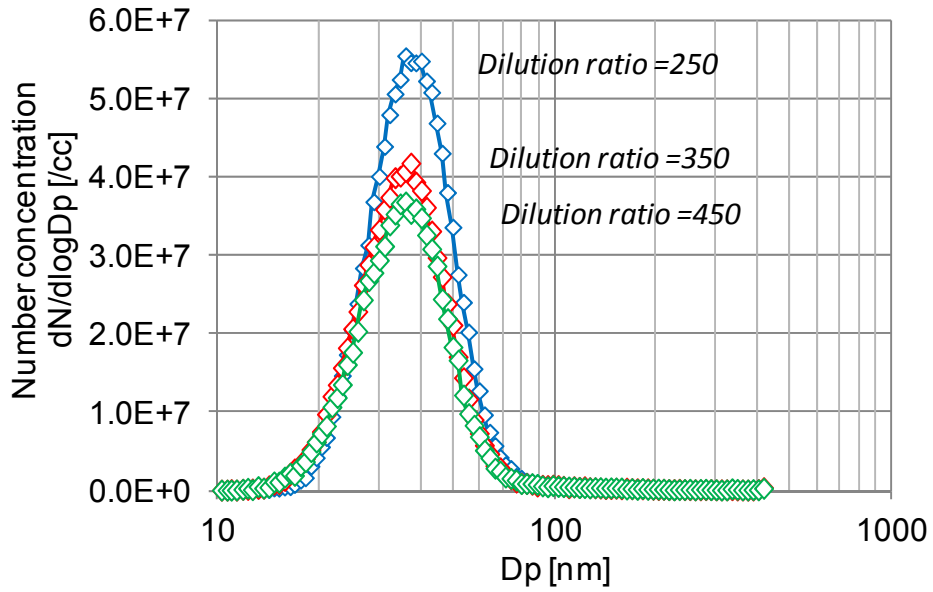


図 6-8 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：75 %、ホットダイリューション、  
希釈率：250, 350, 450、希釈温度：150 )

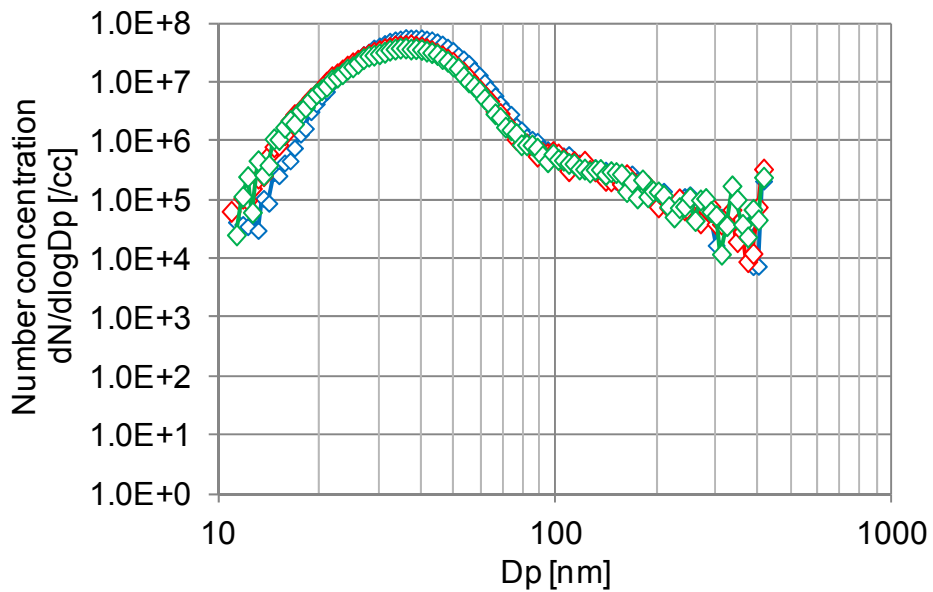


図 6-9 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：75 %、ホットダイリューション、  
希釈率：250, 350, 450、希釈温度：150 )

#### 6.4.2 ホットダイリユーションによる船用 2 ストロークディーゼル機関と船用 4 ストローク機関の比較

本項では、船用 4 ストロークディーゼル機関と、船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスに関して、ホットダイリユーションによって計測した分布の比較を行う。図 6-10 および 6-11 に粒径と個数濃度の関係を示す。図 6-10 は負荷率 50 %、図 6-11 は負荷率 75 %の分布を示しており、図中の緑の分布が船用 2 ストロークディーゼル機関、青の分布が船用 4 ストロークディーゼル機関(船用特性)、赤の分布が船用 4 ストロークディーゼル機関(発電機特性)を示している。全ての分布が希釈温度 150 のホットダイリユーションであり、船用 2 ストロークディーゼル機関では希釈率 450、船用 4 ストロークディーゼル機関では希釈率 1000 の分布を示している。

負荷率 50 %の図 6-10 では、船用 4 ストロークディーゼル機関の分布より船用 2 ストロークディーゼル機関の分布の方がモード径は小さい。全ての分布はモノモーダル分布となる。船用 2 ストロークディーゼル機関のモード径は船用 4 ストロークディーゼル機関の分布より小さい。また、極大値も高い値である。

負荷率 75 %の図 6-11 においても、負荷率 50 %の図 6-10 と同様に船用 4 ストロークディーゼル機関の分布より船用 2 ストロークディーゼル機関の分布の方がモード径は小さく、全ての分布はモノモーダル分布である。船用 2 ストロークディーゼル機関のモード径は船用 4 ストロークディーゼル機関の分布より小さい。また、極大値も高い値である。

これらのことより負荷率 50 %、75 %ともに、船用 2 ストロークディーゼル機関のから排出される粒子状物質は船用 4 ストロークディーゼル機関より小さい粒子が高い個数濃度で排出されることが分かる。

図 6-12 に SMPS によって計測した全個数濃度を示す。ここで示す全個数濃度は、希釈率を考慮した排気管内の値である。図は機関負荷率 50 %および 75 %の排ガスを計測した濃度であり、それぞれの負荷率において左から船用 4 ストロークディーゼル機関(発電機特性)、船用 4 ストロークディーゼル機関(船用特性)、船用 2 ストロークディーゼル機関を示しており、粒径範囲は 10 nm から 300 nm である。これらの濃度は希釈温度 150 のホットダイリユーションであり、船用 2 ストロークディーゼル機関では希釈率 450、船用 4 ストロークディーゼル機関では希釈率 1000 の分布を示している。負荷率 50 %、75 %ともに船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される個数濃度が最も高く、負荷率 50 %では、 $1.1E7$  個/cm<sup>3</sup>であるのに対して負荷率 75 %では、 $1.7E7$  個/cm<sup>3</sup>となる。また、船用 4 ストロークディーゼル機関(船用特性)と比較すると、船用 2 ストロークディーゼル機関では約 2 倍の濃度となる。

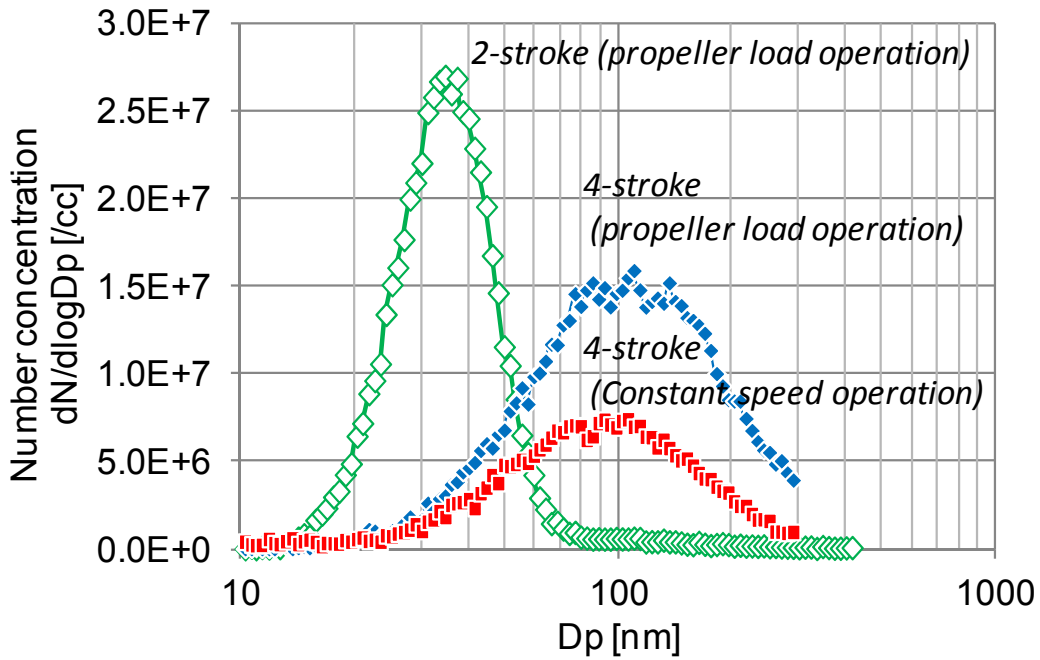


図 6-10 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストローク, 4 ストロークディーゼル機関、負荷率 : 50 %、  
 ホットダイリユーション、希釈率 : 450、1000, 希釈温度 : 150 )

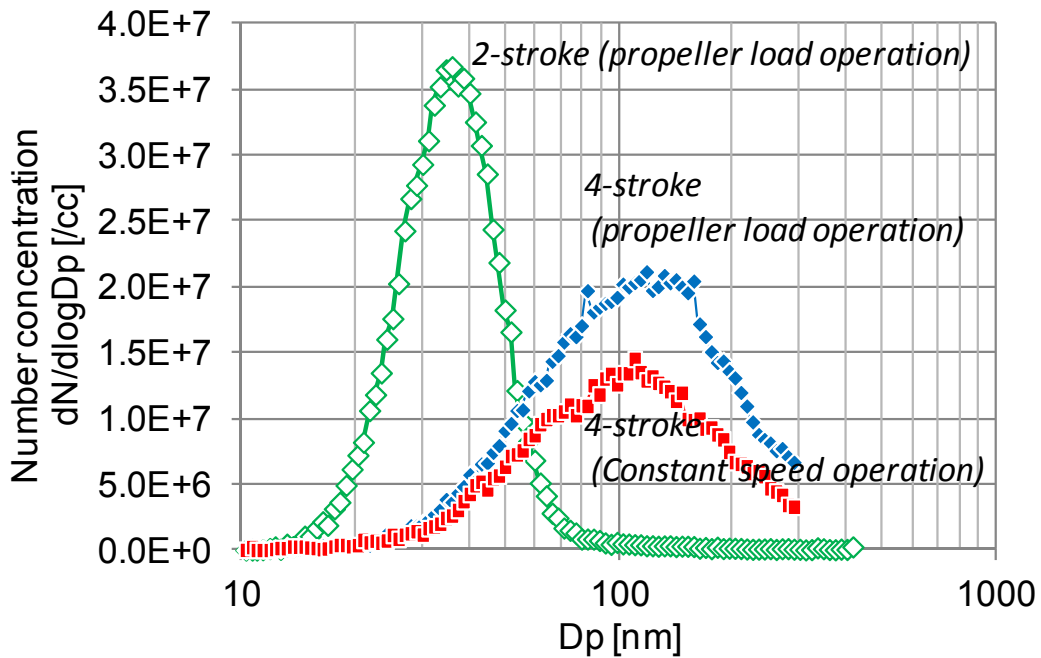


図 6-11 粒径と個数濃度の関係

(船用 2 ストローク, 4 ストロークディーゼル機関、負荷率 : 75 %、  
 ホットダイリユーション、希釈率 : 450、1000, 希釈温度 : 150 )

図 6-13 に図 6-12 で示した全個数濃度から算出した機関出力(kWh)あたりの排出個数率を示す。図は図 6-12 と同様に、排気管内の値に換算した機関負荷率 50 %および 75 %の排ガスを計測した濃度であり、それぞれの負荷率において左から船用 4 ストロークディーゼル機関（発電機特性）、船用 4 ストロークディーゼル機関（船用特性）、船用 2 ストロークディーゼル機関を示しており、粒径範囲は 10 nm から 300 nm である。

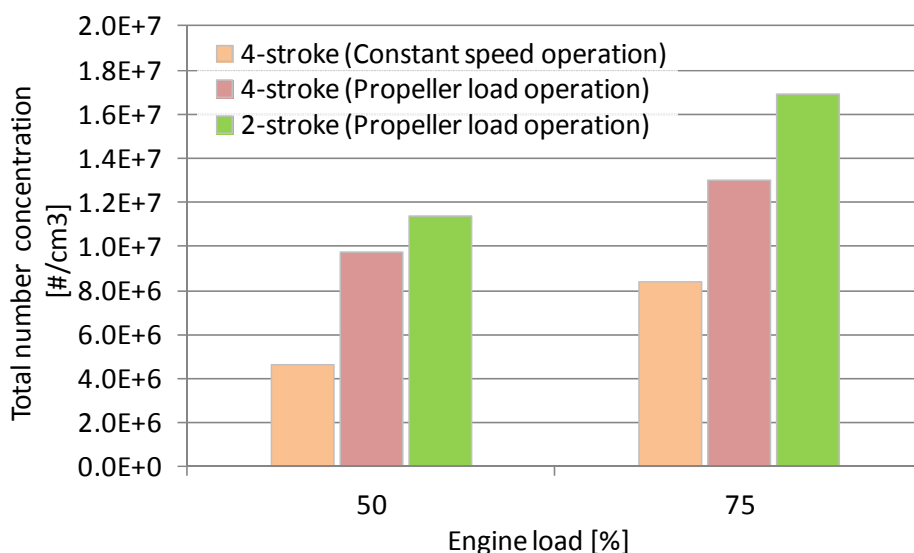


図 6-12 全個数濃度の比較（粒径：10-300 nm）

（船用 2 ストローク、4 ストロークディーゼル機関、負荷率：50, 75 %、ホットダイリユーション、希釈率：450、1000、希釈温度：150 ）

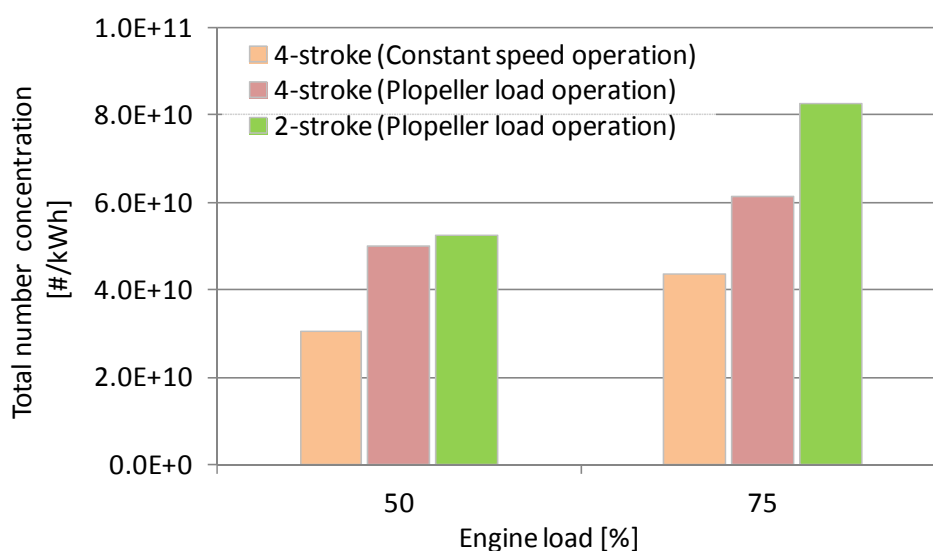


図 6-13 排出個数率（粒径：10-300 nm）

（船用 2 ストローク、4 ストロークディーゼル機関、負荷率：50, 75 %、ホットダイリユーション、希釈率：450、1000、希釈温度：150 ）

図 6-13 においても、負荷率 50 %、75 %ともに船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される個数濃度が最も高くなるが、負荷率 50 %においては船用 4 ストロークディーゼル機関（船用特性）と排出個数率は近い値となる。船用 2 ストロークディーゼル機関では、負荷率 50 %では  $5.2 \times 10^{10}$  個/kWh、 $8.3 \times 10^{10}$  個/kWh の粒子状物質が排出される。

## 6.5 希釈トンネル希釈による粒径分布

本項では希釈トンネルによって希釈した排ガスの粒径分布を SMPS および ELPI によって計測を行った。SMPS ではロータリーディスク希釈器、ELPI ではエゼクタ希釈器によって 2 次希釈を実施している。なお、ロータリーディスク希釈器による 2 次希釈では加熱を行わないダイリュションとしている。計測を行った希釈トンネルは 4 章で用いたものと同様のトンネルを採用した。また、計測は機関を船用特性の負荷率 25 %、50 %、75 %、100 % の 4 負荷率にて実施した。

### 6.5.1 SMPS による粒径分布計測

SMPS による計測では希釈トンネル希釈率を約 13、希釈空気温度を希釈トンネル出口が 47 °C となるように調整し計測を実施した。これは、通常 ISO8178-1 によるフィルタ重量計測にて扱われる値を採用している。

図 6-14 に粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度 ( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、赤色で示す分布が船用特性の負荷率 100 %、青色で示す分布が負荷率 75 %、緑色で示す分布が負荷率 50 %、同じく緑色で黄色マーカで示す分布が負荷率 25 % の計測結果を示している。これらは、希釈トンネルおよび 2 次希釈器の希釈率を考慮し、排気管内の排ガス濃度に換算した値である。

図では、負荷率が高いほど濃度の極大値も高くなる。モード径に着目すると負荷率 25 % の分布では粒径 80 nm、負荷率 50 % では粒径 60 nm、負荷率 75 % では 55 nm、そして負荷率 100 % では 40 nm がモード径となり、負荷率が高い程、モード径は小さくなることが分かる。負荷率 25 %、50 % および 100 % ではものモーダルな分布であるのに対して、負荷率 75 % では粒径 30 nm にもう一つの山があるバイモーダルな分布となった。これらの分布から船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスを希釈トンネルによって希釈した排ガスでは、150 nm 以下の粒径が個数の大部分を占めることが分かる。

図 6-14 の縦軸を対数軸に変換し図 6-15 に示す。図 6-15 は縦軸に個数濃度 ( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示しており、図 6-14 と同様に赤色で示す分布が船用特性の負荷率 100 %、青色で示す分布が負荷率 75 %、緑色で示す分布が負荷率 50 %、同じく緑色で黄色マーカで示す分布が負荷率 25 % の計測結果を示しており、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した濃度分布である。

図 6-14 で分布が重なった、図中左側の粒径 10 - 20 nm では、負荷率 25 % および負荷率 50 % の個数濃度より、負荷率 75 %、100 % の濃度が高くなっており、粒径 150 nm 以上の粒

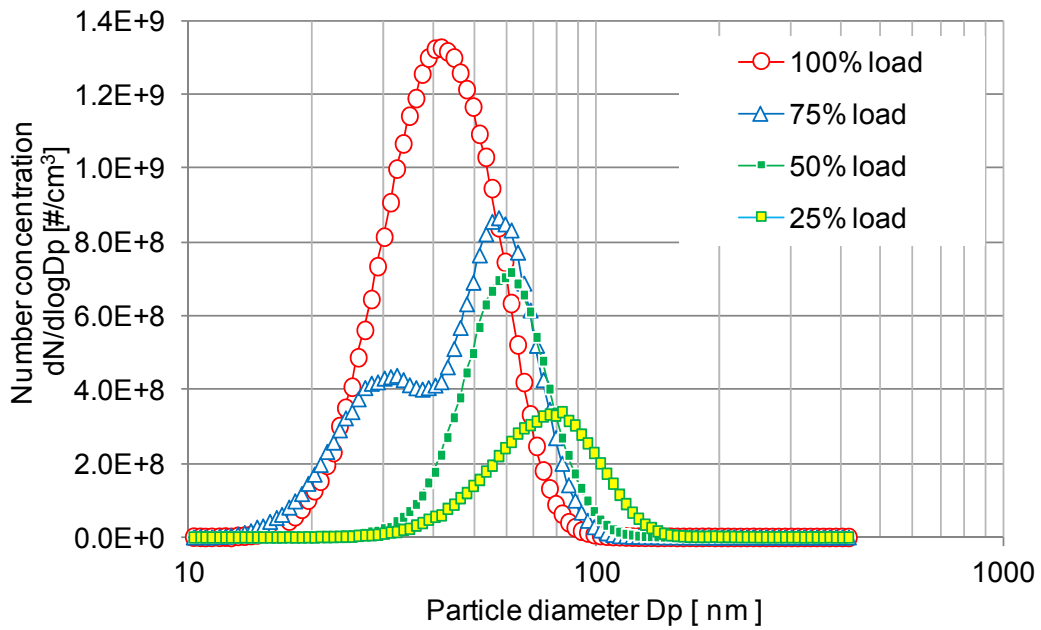


図 6-14 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-ロータリーディスク希釈器(2 段希釈))  
 (船用 2 ストロークディーゼル機関、SMPS、トンネル希釈率：12.80-14.05、  
 2 次希釈率：250、トンネル出口希釈排ガス温度：47 )

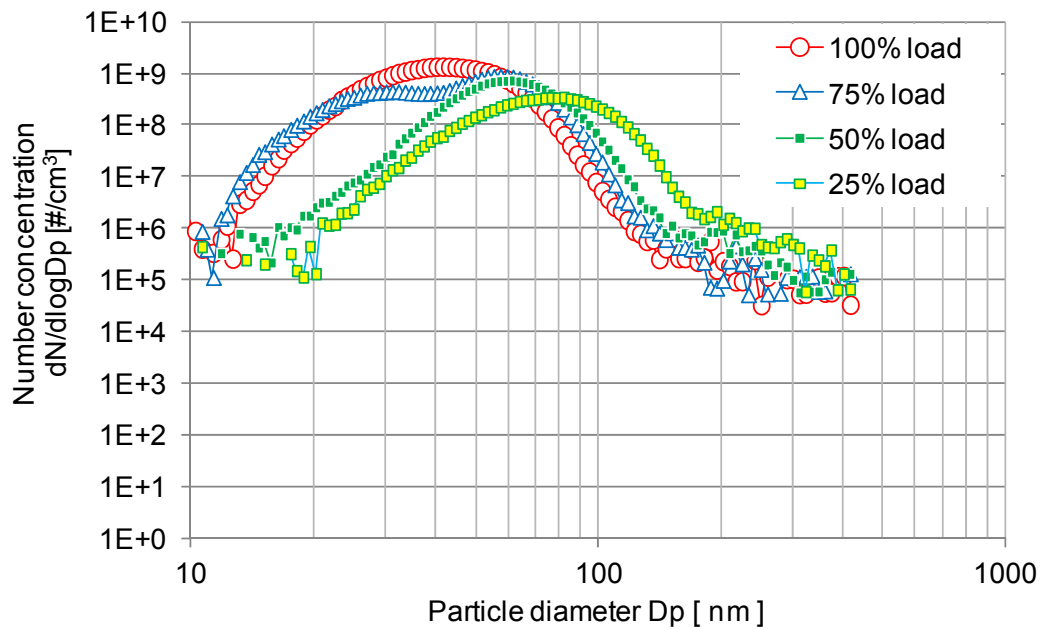


図 6-15 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-ロータリーディスク希釈器(2 段希釈))  
 (船用 2 ストロークディーゼル機関、SMPS トンネル希釈率：12.80-14.05、  
 2 次希釈率：250、トンネル出口希釈排ガス温度：47 )

径範囲では、負荷率 25 %の濃度が最も高いことが分かる。

図 6-14 および 6-15 で示した粒径と個数濃度の関係を重量濃度に換算し図 6-16 に示す。個数濃度から重量濃度への換算は、粒子を完全な球形と仮定して粒子密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$ で行っている。図は縦軸に重量濃度 ( $dW/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図 6-14 および 15 と同様に、赤色で示す分布が船用特性の負荷率 100 %、青色で示す分布が負荷率 75 %、緑色で示す分布が負荷率 50 %、同じく緑色で黄色マーカで示す分布が負荷率 25 %の計測結果を示している。なお、この図においても縦軸の濃度は希釈率を考慮した排気管内の値に換算した濃度としている。全ての負荷率において、粒径 100 nm 未満を極大値とするモノモーダルな分布となる。モード径に着目すると、負荷率 100 %では粒径 58 nm であるのに対して、負荷率 50 %および 75 %ではやや大きい粒径 60-70 nm、負荷率 25 %ではさらに大きく約 100 nm となる。負荷率が高い程、重量濃度のモード径は小さくなる分布となる。濃度の極大値は、負荷率が高い程、濃度は低くなる。

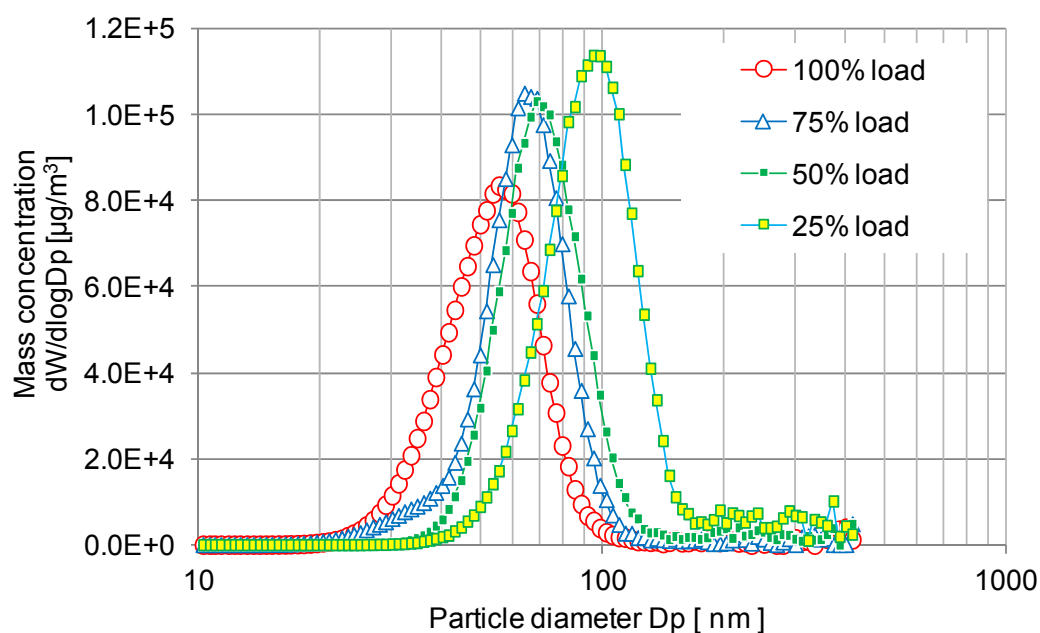


図 6-16 粒径と重量濃度の関係 (希釈トンネル-ロータリーディスク希釈器(2 段希釈))  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、SMPS、トンネル希釈率：12.80-14.05、  
2 次希釈率：250、トンネル出口希釈排ガス温度：47 )



### 6.5.2 ELPI による粒径分布計測

ELPI による計測では希釈トンネル希釈率を約 13、希釈トンネル出口温度が 47 となるように調整し計測を実施した。なお、ここで行った ELPI による計測は 6.4.1 節で示した SMPS による計測と同時計測を実施している。

図 6-17 に粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、赤色で示す分布が船用特性の負荷率 100%、青色で示す分布が負荷率 75%、緑色で示す分布が負荷率 50%、同じく緑色で黄色マーカで示す分布が負荷率 25% の計測結果を示している。これらは、希釈トンネルおよび 2 次希釈器の希釈率を考慮し、排気管内の排ガス濃度に換算した値である。

全ての負荷率において、濃度がピークとなる粒径は  $0.2 \mu\text{m}$  以下であり、それより大きい粒径範囲において濃度の高い箇所は無い。このことから船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスを希釈トンネルにて希釈した場合、大部分の粒子が  $0.2 \mu\text{m}$  以下であることが分かる。モード径に着目すると、負荷率 100%、75%、50% では、最も粒径が小さい箇所となるが、負荷率 25% では  $0.058 \mu\text{m}$  のステージとなる。負荷率が低いとモード径が大きくな

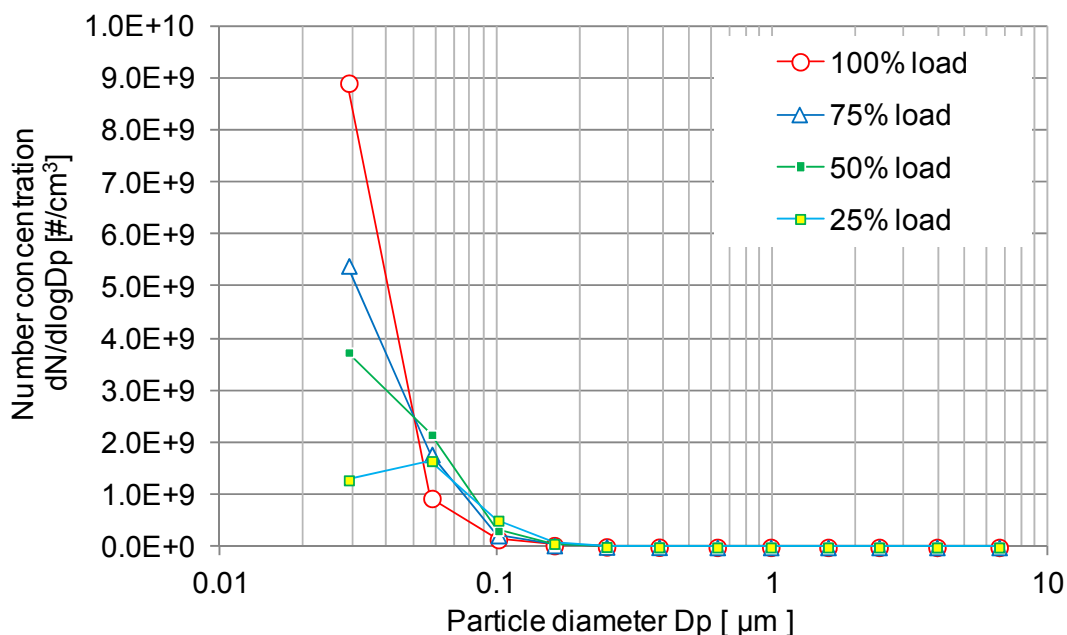


図 6-17 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-エゼクタ希釈器(2 段希釈))  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、ELPI、トンネル希釈率：12.80-14.05、  
2 次希釈率：180、トンネル出口希釈排ガス温度：47 )

ることは、図 6-14 に示した SMPS による計測と同様の傾向である事が分かる。

図 6-18 に図 6-17 で示した粒径と個数濃度の関係を縦軸を対数軸として示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示しており、図 6-17 と同様に赤色で示す分布が船用特性の負荷率 100 %、青色で示す分布が負荷率 75 %、緑色で示す分布が負荷率 50 %、同じく緑色で黄色マーカで示す分布が負荷率 25 %の計測結果を示している。これらは、希釈トンネルおよび 2 次希釈器の希釈率をを考慮し、排気管内の排ガス濃度に換算した値である。

負荷率 25 %の排ガスでは前述の通り最も粒径の小さいステージより一つ大きいステージの粒径がモード径となるが、それを除いては全ての負荷率で粒径が大きいほど個数濃度は低下する傾向が確認出来る。図 6-17 では確認が困難であった粒径  $0.2 \mu\text{m}$  以上の粒径範囲においても同じく粒径が大きいほど個数濃度は低くなる事が分かる。粒径  $1 \mu\text{m}$  以上の範囲においては、負荷率が高い程、個数濃度も高い分布となる。粒径が大きいほど 1 個辺りの重量も増加するため、粒径の大きい範囲の個数濃度差が重量濃度差となって表れる。

図 6-1 で示したフィルター捕集による重量濃度計測では負荷率が高い程、重量濃度も高くなるが、図 6-18 から分かるとおり粒径の大きい方における濃度差がフィルター重量に表れると考えられる。

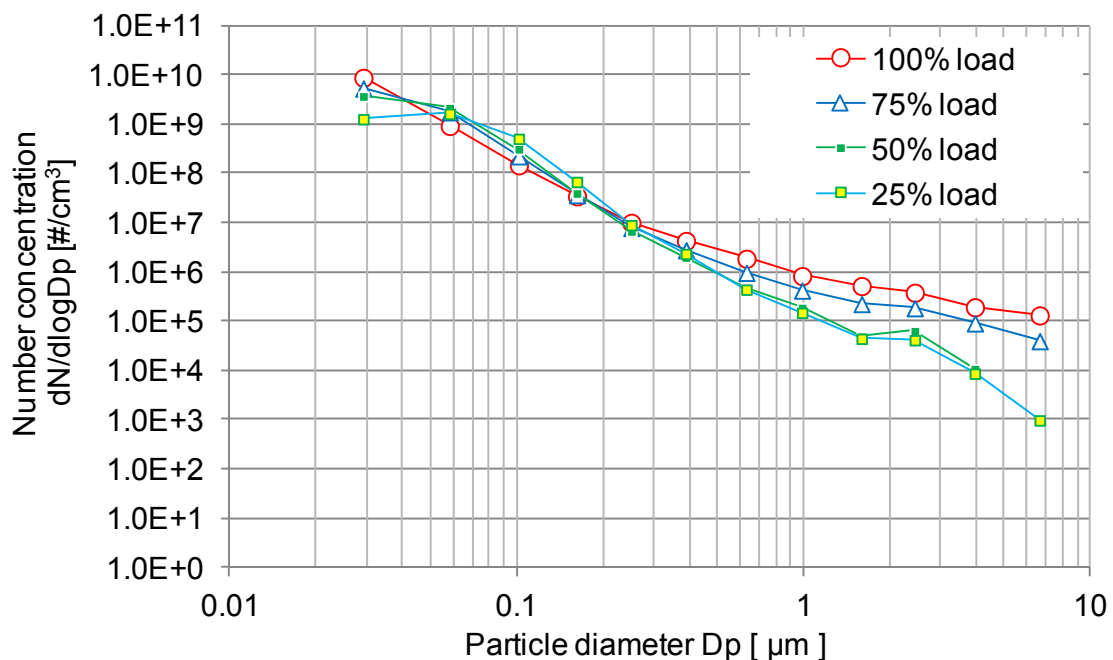


図 6-18 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-エゼクタ希釈器(2 段希釈))  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、ELPI、トンネル希釈率：12.80-14.05、  
2 次希釈率：180、トンネル出口希釈排ガス温度：47 )

ここで、ELPIによる計測結果から、PMの重量濃度を求めた。重量濃度の換算では粒子密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  で完全球形であるとの仮定をしている。希釈トンネルを用いてフィルターによって計測したPM重量濃度では、負荷率25%で  $10 \text{ mg/Nm}^3$ , 50%で  $28 \text{ mg/Nm}^3$ , 75%で  $36 \text{ mg/Nm}^3$ , 100%で  $59 \text{ mg/Nm}^3$  であったが、ELPIによるPM重量濃度は、25%で  $857.9 \text{ mg/Nm}^3$ , 50%で  $1535.2 \text{ mg/Nm}^3$ , 75%で  $4718 \text{ mg/Nm}^3$ , 100%で  $12139 \text{ mg/Nm}^3$  となり、25%で86倍、50%で55倍、75%で131倍、100%で206倍の値となる。

4.4.4節の船用4ストロークディーゼル機関の排ガスを対象としたELPIとフィルタ重量濃度の比較では、SOF分濃度の高い、発電機特性の負荷率30%によって、ELPIから得られる重量濃度が69-108倍の値であったのに対して、比較してSOF分濃度が低い発電機特性の負荷率75%では、13-23倍の値であった。また、船用2ストロークディーゼル機関の排ガスにおいては、SOF分濃度は負荷率が高い程高くなる傾向があり、これらの結果では、SOF分濃度が高いとELPIとフィルタ重量濃度の差が開く結果となった。

### 6.5.3 SMPS によるホットダイリューションと希釈トンネルによる希釈の比較

ここでは、6.3.1 節で示した、ホットダイリューションによる船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスの粒径分布と前節(6.4.1 節)で示した希釈トンネルによる希釈排ガスの粒径分布の比較を行う。

図 6-19 に船用特性の負荷率 75 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図に示す個数濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した値である。図中の青色の分布は、希釈トンネル希釈による粒径分布、赤色の分布がホットダイリューションによる粒径分布を示している。希釈トンネル希釈では、希釈トンネルにて希釈率 13.82、希釈トンネル出口温度 47 °C で希釈し、2 次希釈器希釈率 250 とした分布であり、図 6-14、負荷率 75 % と対応する。ホットダイリューションでは、ロータリーディスク希釈器による 1 段希釈で、希釈温度 150 °C、希釈率 250 とした分布であり、図 6-3、負荷率 75 %の分布と対応する。ホットダイリューションによる分布では、粒径 38 nm をモード径とするモノモーダルな分布であるのに対して、希釈トンネルによる希釈では粒径 22 nm および 58 nm の 2 つの極大箇所をもつバイモーダルな分布である。図 6-19 に示した負荷率 75 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較で縦軸を対数軸として図 6-20 に示す。

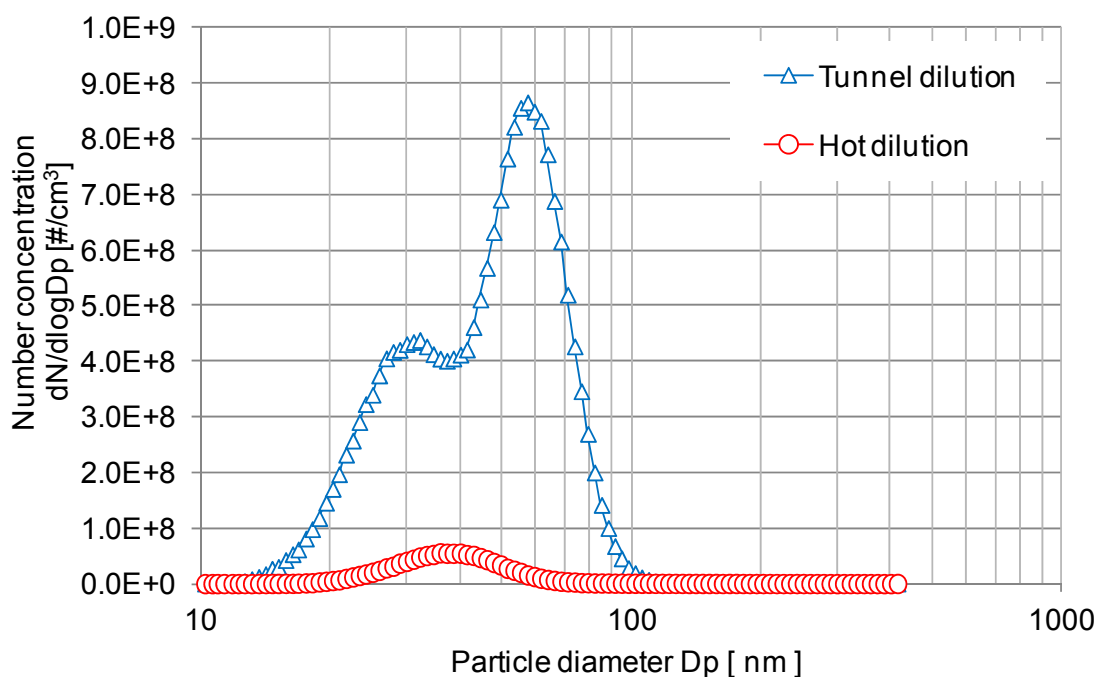


図 6-19 負荷率 75 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率 : 75 %)

図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示している。図 6-19 と同様に図に示す個数濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した値であり、図中の青色の分布は、希釈トンネル希釈による粒径分布、赤色の分布がホットダイリューションによる粒径分布を示している。図 6-19 で濃度が低く確認が困難であった粒径 100 nm 以上の粒径範囲では、200 nm 付近までは希釈トンネル希釈による個数濃度が高いがそれ以上の粒径ではホットダイリューションも希釈トンネル希釈もほぼ同じ濃度であることが確認出来る。また粒径 30 nm 以下の粒径範囲では、希釈トンネル希釈による個数濃度の方が高い値を示す。

図 6-21 に船用特性の負荷率 50 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。図に示す個数濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した値である。図中の青色の分布は、希釈トンネル希釈による粒径分布、赤色の分布がホットダイリューションによる粒径分布を示している。希釈トンネル希釈では、希釈トンネルにて希釈率 13.80、希釈トンネル出口温度 47 °C で希釈し、2次希釈器希釈率 250 とした分布であり、図 6-14、負荷率 50 %と対応する。ホットダイリューションでは、ロータリーディスク希釈器による1段希釈で、

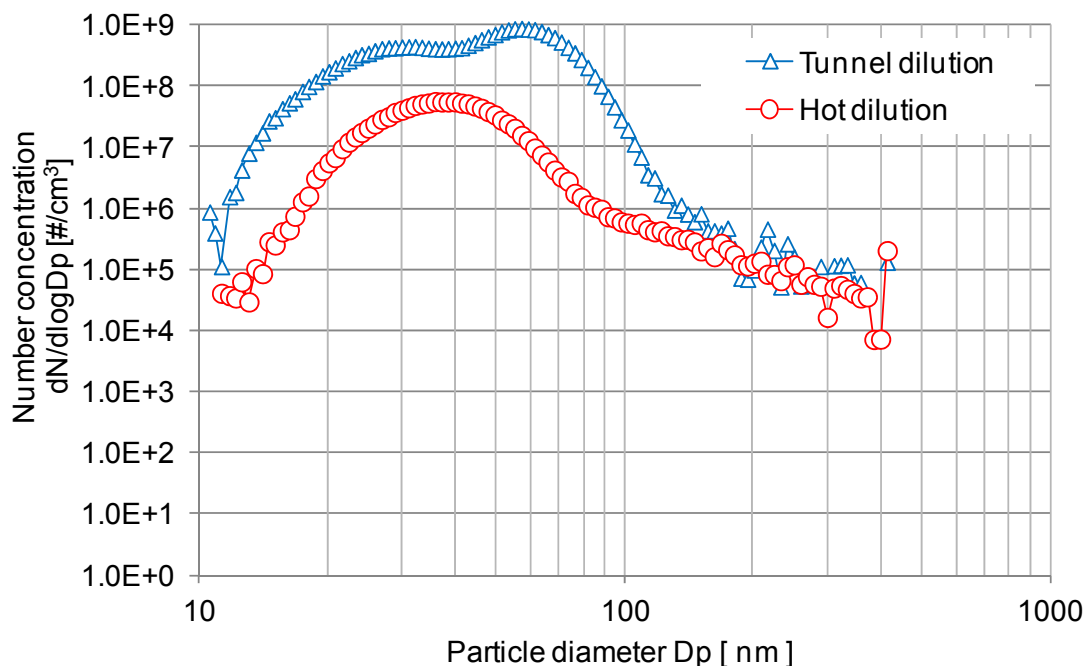


図 6-20 負荷率 75 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率：75 %)

希釈温度 150 、希釈率 250 とした分布であり、図 6-3、負荷率 50 %の分布と対応する。ホットダイリューションでは、粒径 38 nm がモード径となるモノモーダルな分布であり、また希釈トンネル希釈においても粒径 60 nm がモード径となるモノモーダルな分布となる。図 6-21 に示した負荷率 75 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較で縦軸を対数軸として図 6-22 に示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示している。図 6-21 と同様に図に示す個数濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した値であり、図中の青色の分布は、希釈トンネル希釈による粒径分布、赤色の分布がホットダイリューションによる粒径分布を示している。図から、粒径 20nm 未満の粒径範囲で希釈トンネル希釈の方がホットダイリューションよりやや高い濃度で検出している。また、粒径 150 nm 以上の粒径範囲においても希釈トンネル希釈がやや高い濃度となる。負荷率 75 %の比較(図 6-19, 6-20)では、粒径 150nm 以下の粒径範囲において希釈トンネル希釈の方が高濃度であるが、負荷率 50 %においては粒径 20-30 nm の粒径範囲でホットダイリューションの方が高い濃度となる。

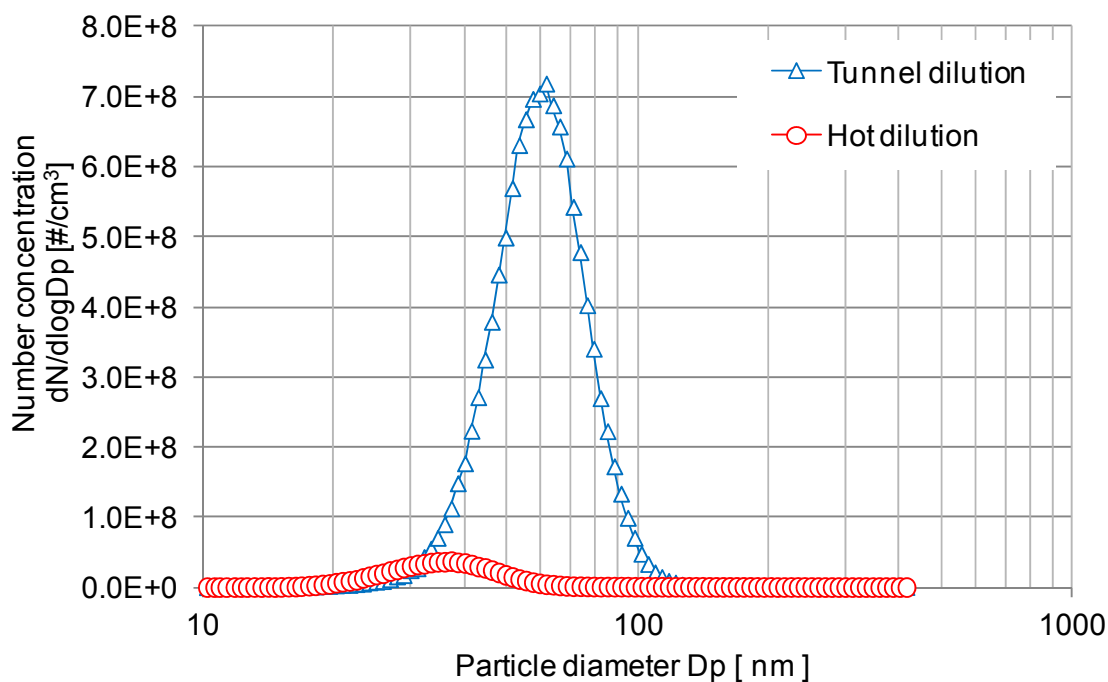


図 6-21 負荷率 50 %の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率 : 50 %)

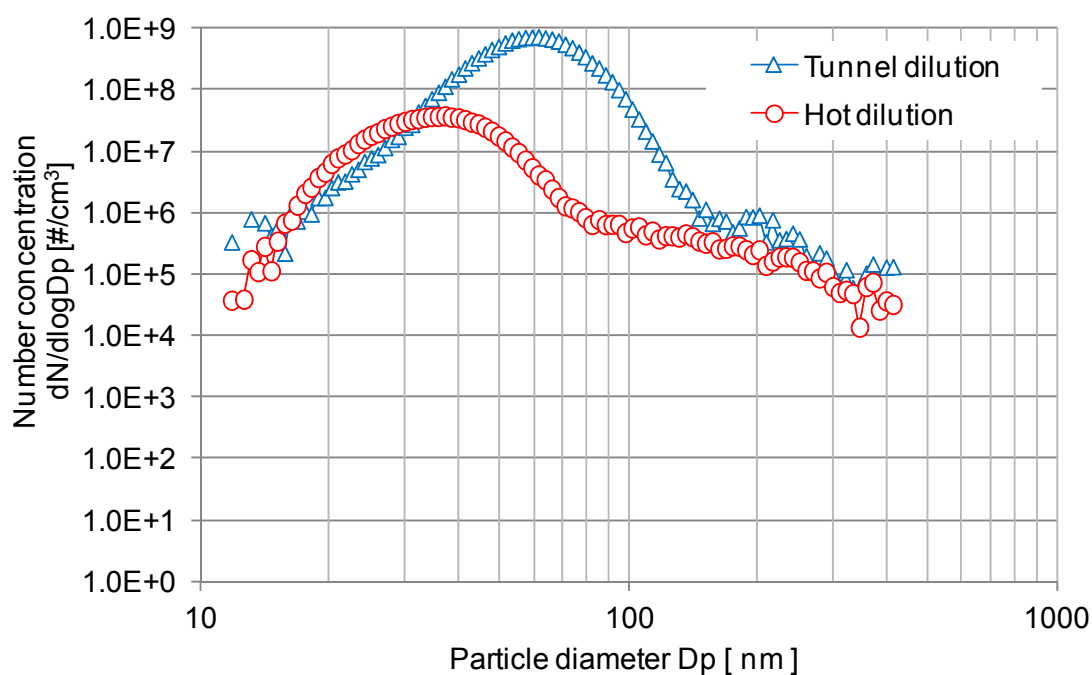


図 6-22 負荷率 50 % の排ガスによるホットダイリューションと希釈トンネル希釈の比較  
 ( 船用 2 ストロークディーゼル機関、負荷率 : 50 % )

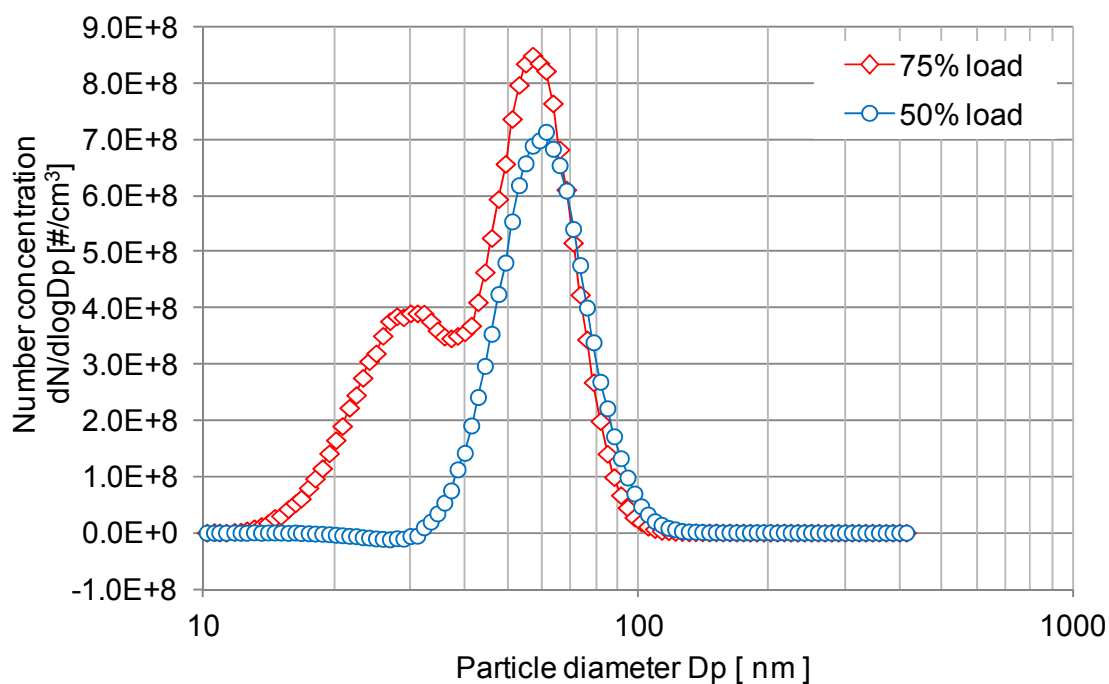


図 6-23 希釈トンネル希釈による生成される粒子の粒径分布  
 ( 希釈トンネル希釈とホットダイリューションの粒径分布から算出 )

ここで、希釈トンネル希釈による生成粒子の分布を確認するため、希釈トンネル希釈による粒径分布からホットダイリユーションによる粒径分布の差を算出した。図 6-23 に希釈トンネル希釈による生成される粒子の粒径分布を示す。図は縦軸に生成された粒子の個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示している。縦軸で示す濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度である。図の赤色で示す分布が負荷率 75 %の排ガス、青色で示す分布が負荷率 50 %の排ガスを対象とした生成される粒子の粒径分布である。

負荷率 50 %の排ガスでは、粒径 20 nm から 30 nm の粒径範囲において 0 以下の個数濃度を示し、それより大きい粒径 30 nm から 100 nm の粒径範囲において粒子の生成がおきる。0 以下の個数濃度を示している箇所は、希釈トンネルおよびそれらに接続しているトランスファーチューブ内表面での吸着による減衰と粒子間における凝集による物であると考えられる。負荷率 75 %の排ガスでは、粒径 30 nm と 58 nm が極大となるバイモーダルな粒子生成となったが、分布の下方の面積から確認すると、負荷率 50 %の排ガスより多くの粒子が生成されたことが分かる。また、負荷率 50 %の排ガス、75 %の排ガスともに粒子の生成では、その大部分が 100 nm 以下であることが分かった。

## 6.6 まとめ

船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーションおよび希釈トンネル希釈を行い排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布を計測した。ホットダイリユーションでは負荷率 50 %および 75 %の排ガスを対象に希釈率を変化させた計測を実施した。また、計測した粒径分布から船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスとの比較を行った。希釈トンネルによる希釈排ガスでは SMPS とともに ELPI を用いる事で SMPS の計測粒径範囲より大きい粒径の計測を実施するとともに、ホットダイリユーションによる粒径分布と比較することで、希釈トンネル希釈で生成される粒子の粒径範囲を確認した。実験の結果、以下の知見を得た。

- ・船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象にホットダイリユーションを行い SMPS によって粒径分布を計測した結果、負荷率 50 %、75 %ともに粒径 38nm をモード径とするモノモーダル分布であり、大部分の粒子が粒径 100nm 以下であることが分かった。また、重量濃度分布とした場合には、個数濃度の高い粒径 38 nm 付近とともに、粒径 100-400 nm 付近でも重量濃度の高い箇所があり、バイモーダルな分布である。
- ・ホットダイリユーションによって同負荷率の船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスと船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを比較すると、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質は粒径の小さい方にピークを持ち、ピーク濃度も高いことが分かった。kWh あたりの排出個数率も船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスの方が多いことが分かった。
- ・希釈トンネルによって希釈した排ガスは、希釈後排ガス温度および希釈率と同様な条件において、負荷率が高い程、モード径は小さくなるとともにピーク濃度は高くなる。ホ



ットダイリレーションによって計測した粒径分布と比較し、希釈トンネル内の粒子生成を確認した所、生成される粒子は大部分が 100 nm 以下である事が分かった。

船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガス中の PM は、ホットダイリレーションによって SMPS による計測では、負荷率 50 %、75 %ともモード径は等しく変化しないが、負荷率が高い程、排ガスの個数濃度は高くなる。また、船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスと比較した場合、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される個数濃度は高く、かつ小さい粒径がピーク濃度となる。フィルタの重量計測による既往の研究では、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される PM の SOF 分濃度が船用 4 ストロークディーゼル機関より高いことが報告されている。本研究においても、計測された大部分の粒子も 100 nm であり、かつ、モード径が 38 nm であり、希釈率の変化にそのピーク濃度が反応することから揮発性成分割合が高く、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される PM は非常に小さい粒子が大部分であると言える。船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスでは、負荷率 50 %では 5.2 E10 個/kWh、8.3E10 個/kWh の粒子状物質が排出されていることが分かった。実際の船舶においては、上述の船用 4 ストロークディーゼル機関の大気への放出時と同様に、外気温の環境での希釈が行われていることは明らかであり、排出直後に生成される粒子は多いと考えられる。

## 第 7 章 HFO 運転時の PM 粒径分布

前章(第 6 章)では、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーションおよび希釈トンネル希釈を行い排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布を計測した。また、船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスとの比較を行った。本章では、燃料油の違いが計測される粒径分布に及ぼす影響を確認するために、船用 2 ストロークディーゼル機関を HFO(Heavy Fuel Oil)を燃料油として運転し、粒径分布の計測を実施した。

### 7.1 供試燃料油

表 7-1 に燃料油の代表性状を示す。表は比較のため 6 章の実験に用いた燃料油(L/S A 重油)とともに示している。本章の実験で使用した燃料油は、密度 0.9886 [g/cm<sup>3</sup>]、動粘度(323 K)122.0 [mm<sup>2</sup>/s]の HFO で、硫黄分濃度は 2.46 %である。

表 7-1 燃料油の代表性状

Item	L/S A 重油	HFO
Specific gravity (288 K)	0.8778 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.9886 [g/cm <sup>3</sup> ]
Reaction	Neutrality	Neutrality
Flash point	352 [K]	378 [K]
Pour point	243 [K]	266 [K]
Kinetic viscosity (323 K)	3.371 [mm <sup>2</sup> /s]	122.0 [mm <sup>2</sup> /s]
Sulphur	0.072 [mass%]	2.46 [mass%]
Nitrogen	0.02 [mass%]	0.21 [mass%]
Conradson carbon residue	0.04 [mass%]	11.5 [mass%]
Gross calorific value (estimated)	45120 [kJ/kg]	42780 [kJ/kg]

## 7.2 実験の概要

本章では、供試機関に船用 2 ストローク低速ディーゼル機関(3UEC37LA)を採用し計測を実施した。実験は最初に、負荷率 50 %の排ガスを対象に、ホットダイリューションによって高温状態の排ガスの粒子状物質を SMPS によって計測した。

その後、希釈トンネルによって希釈した排ガスを対象に、2 次希釈を用いた SMPS および ELPI による計測を行った。

## 7.3 実験装置および方法

### 7.3.1 実験装置の概要

図 7-1 に実験装置の概要を示す。6 章と同様に、供試機関は船用 2 ストローク低速ディーゼル機関(3UEC37LA)である。実験装置は供試機関と希釈トンネルおよびホットダイリューション用のロータリーディスク希釈器、エゼクタ希釈器、ELPI、SMPS によって構成される。

ホットダイリューションでは、排気管を流れる排ガスの一部をロータリーディスク希釈器にてサンプリングする。サンプリングプローブは SUS 製(SUS304)のシームレス管(外径 10mm, 肉厚 1mm)の先端を 45° に切断し、切断面が排ガス流れの上流向きで配管の中央にな

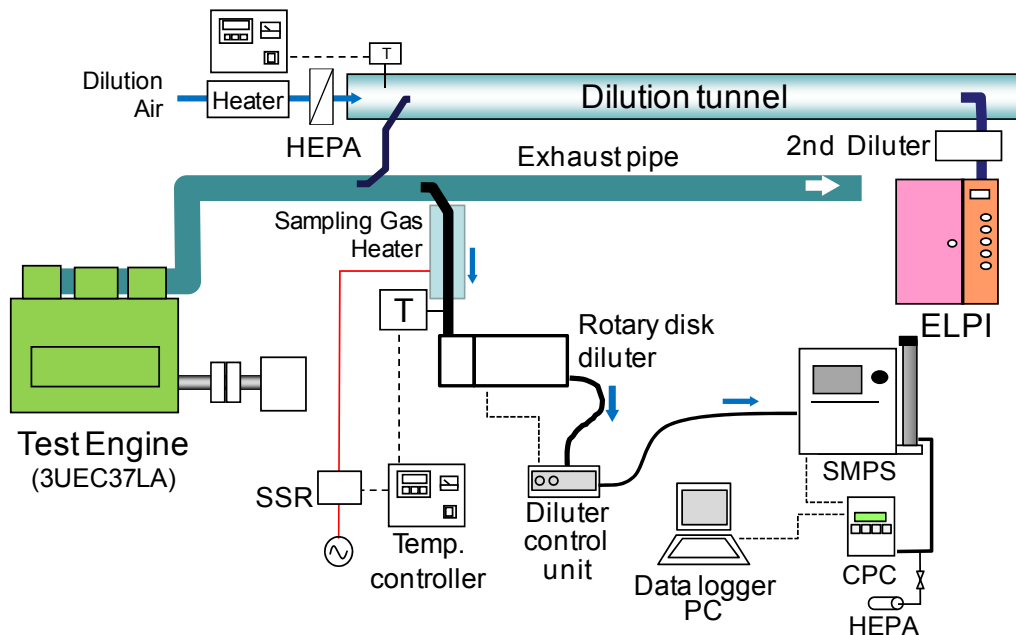


図 7-1 実験装置の概要

るように設置した。そのプローブよりサンプリングした排ガスは、ロータリーディスク希釈器のポンプによって吸引される。排気管とロータリーディスク希釈器間のトランスファーチューブでは、冷却による PM 損失、粒径変化を最小限とするため、ロータリーディスク希釈器の入口排ガス温度が、希釈温度と同一となるようにリボンヒータによる加熱保温を行った。

希釈トンネルを用いた計測では、排気管に挿入したサンプリングプローブよりトランスファーチューブを経由して排ガスの一部を希釈トンネルに導く。サンプリングプローブは、ホットダイリューション時のプローブと同様に、SUS 製のシームレス管(外径 10mm, 肉厚 1mm)の先端を 45° に切断し、切断面が排ガス流れの上流向きで配管の中央になるように設置した。また、トランスファーチューブにおいても、希釈トンネルの入口排ガス温度が 180℃ となるように、リボンヒータによる加熱保温を行った。希釈トンネルでは、サンプリングした排ガスと、希釈空気が混ざり合うことで希釈・冷却が行われる。なお、希釈空気には、マイクロミストフィルター(0.01 μm)および HEPA フィルターによって濾過し、中空糸膜式ドライヤーを通過した清浄、乾燥空気を用いた。このように希釈した排ガスを、さらに 2 次希釈を行い SMPS および ELPI にて計測した。2 次希釈器は SMPS ではロータリーディスク希釈器、ELPI ではエゼクタ希釈器を使用した。

### 7.3.2 供試機関の運転方法と計測タイミング

高粘度の燃料を機関および機関プラントで使用するために加熱によって粘度を低くする必要がある。HF0 を燃料油として使用する船舶においては、燃料油槽を加熱するとともに、燃料油ラインの燃料油粘度を計測し加熱量を制御する粘度センサを使用するか、図 7-2 に示す燃料油粘度-温度線図を使用して機関入口の燃料油温度を所定の値に加熱する方法が行われている。燃料系統は、機関の周りを循環する循環系統と、その系統に油槽から供給する供給系統があるが、本実験では燃料油-温度線図から機関入口の燃料油温度を決定して機関周りの燃料油循環ラインに設置されたオイルヒーターによる加熱を行った。

燃料油の油槽として、加熱の出来る燃料油タンク(1 kL 2 層)を用意し、供給系統での流動を考慮して予め燃料油を 60℃ 程度まで攪拌しながら加熱を行った。

機関の始動と暖機運転は A 重油にて行い、暖機完了後、負荷率 50 %程度まで上昇させ燃料油の供給系統を、A 重油油槽から HF0 の入ったタンクに切り換えた。切替後は、燃料噴射ポンプのプランジャ部および噴射弁のニードルが部分熱膨張によるスティックをしないように、3-4 K/min 程度で循環系統の燃料油の加熱を行った。循環系統の燃料油は、供給系統からの HF0 によって徐々に切り替わるため、実験開始までに 300 L 程の HF0 を消費してから実験を開始している。

実験開始後は、所定の負荷率に制定させ、各部の温度が安定するのを確認した後に計測を開始した。

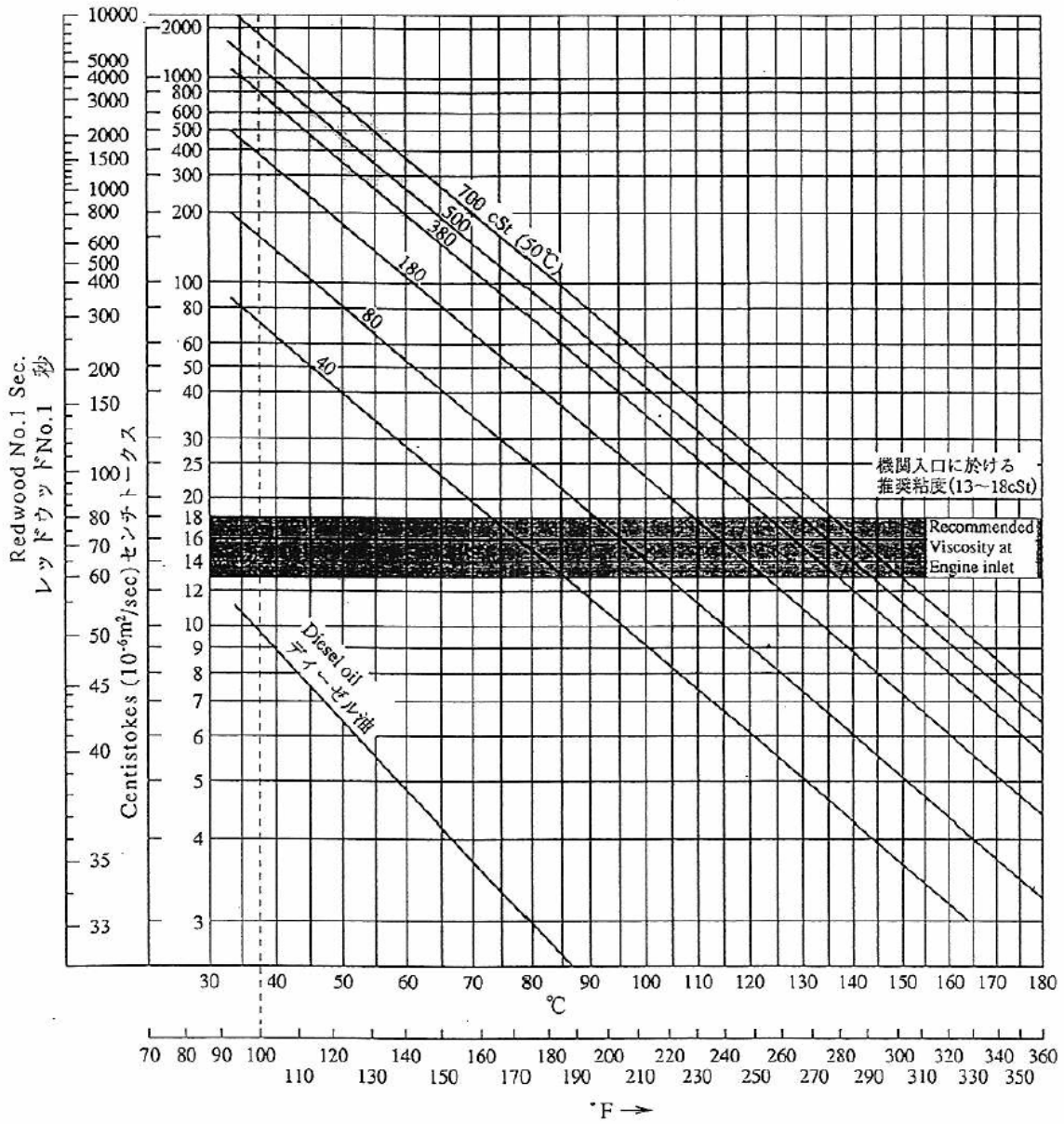


図 7-2 燃料油粘度-温度線図<sup>7-1)</sup>

#### 7.4 SMPS による粒径分布計測

##### 7.4.1 ホットダイリューションによる粒径分布

機関を船用特性の負荷率 50%にてホットダイリューションを用いて SMPS によって計測を行った。本実験ではロータリーディスク希釈器の希釈温度は 150 としており、希釈率は

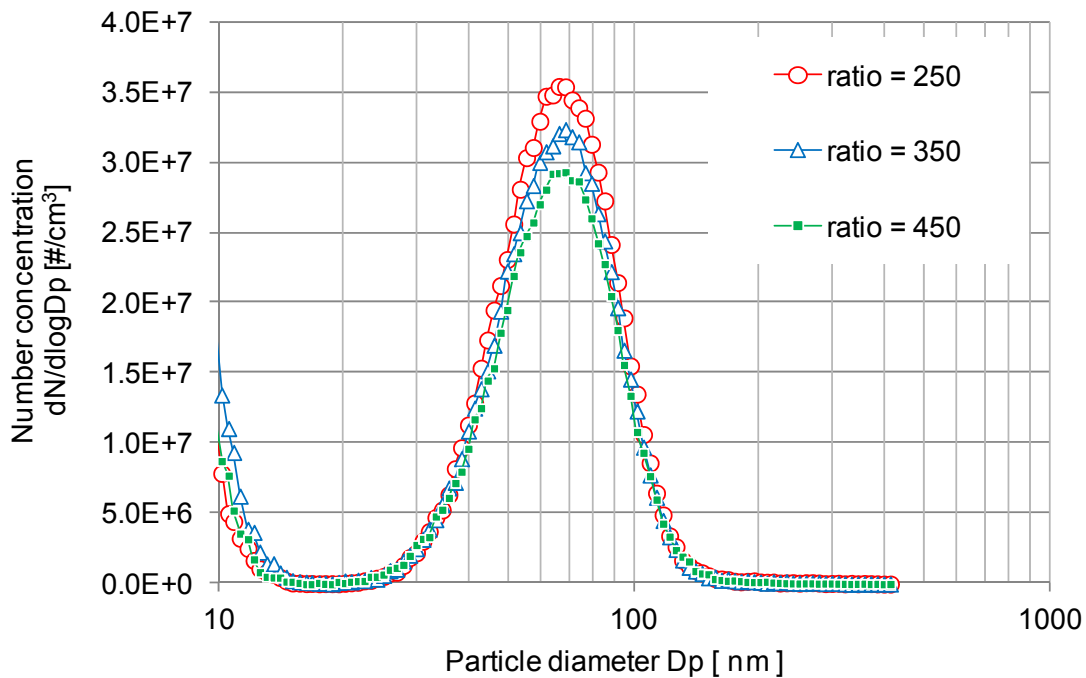


図 7-3 粒径と個数濃度の関係  
(負荷率 50 %、HF0、希釈温度 150 )

250、350、450 とした。図 7-3 に負荷率 50 %における粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており濃度は希釈率を考慮し、排気管内の排ガスに換算した値である。図中の赤色で示す分布は希釈器希釈率 250、青色で示す分布は希釈率 350、緑色で示す分布は希釈率 450 である。全ての希釈率で、粒径の最も小さい 10 nm と 70 nm が濃度のピークとなるバイモーダルな分布となった。

SMPS による計測では、SMPS 内の DMA で印加電圧を変化させることによって粒子の分級粒径を変化させるが、分級粒径の変化と個数濃度の計測は連続的に行われるため、小さい粒子部分で濃度が計測された場合、前計測時の粒子が影響していることも考えられる。ここでは、計測時に凝縮粒子カウンタの濃度制限値を確認するために予備的な計測を実施しているが、この計測時にも粒径 10 nm 付近に高い濃度が検出されたため、計測後の電圧無印加時間(ダウンスキャンタイム)を概ね 3 分として、かつ、無印加時に CPC がカウントしていないことを確認して実験を実施した。特に最も小さい粒径 10 nm 前後の粒径範囲において高い濃度が検出されていることから、CPC に近い箇所においても核生成が頻繁に発生していることが考えられる。粒子の大部分は粒径 30 - 110 nm の粒径範囲である。またピーク濃度に関しても希釈率が高い程、ピーク濃度が低下することから揮発性物質の影響があると考えられる。

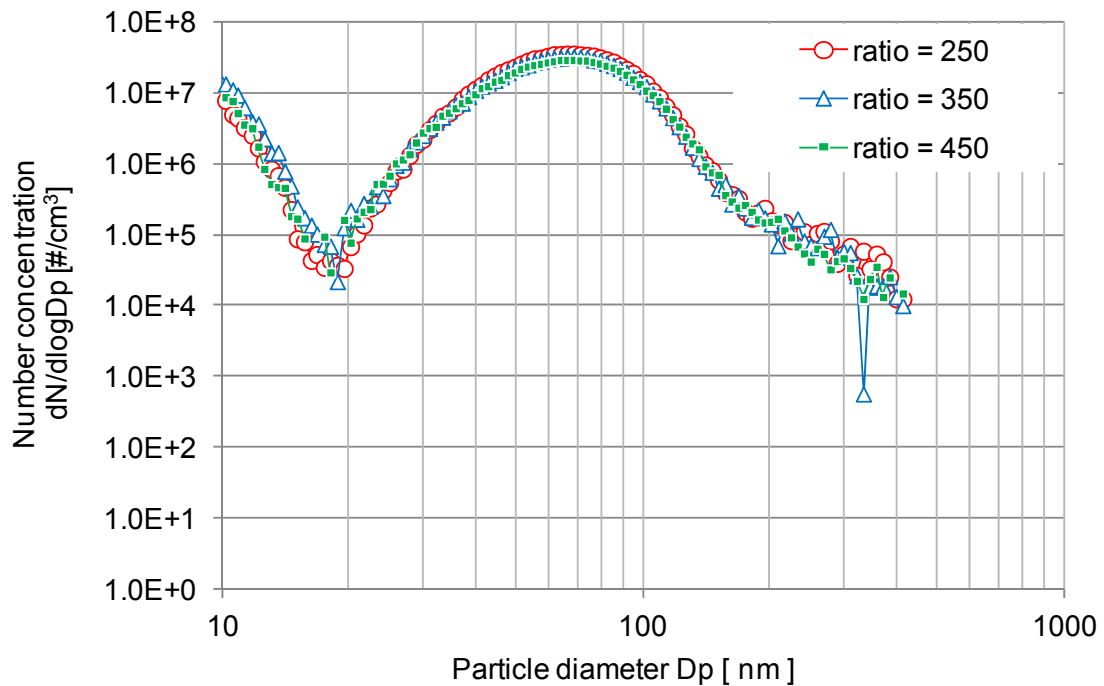


図 7-4 粒径と個数濃度の関係  
(負荷率 50 %、HF0、希釈温度 150 )

ここで、図 7-3 に示した粒径と個数濃度の関係を縦軸を対数軸に変換し図 7-4 に示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示しており図 7-3 と同様に希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算しており、図中の赤色で示す分布は希釈器希釈率 250、青色で示す分布は希釈率 350、緑色で示す分布は希釈率 450 である。

図 7-4 においてもバイモーダル分布であることは変わらない。また、一部計測時のノイズで低く出てる箇所が見受けられるが、300 nm 以下の粒径においては  $1.0E4$ (個/cm<sup>3</sup>)以上の濃度であることが確認出来る。

#### 7.4.2 ホットダイリューションした排ガスの SMPS による HF0 と A 重油の比較

図 7-5 に HF0 および A 重油による運転時の粒径分布を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算している。また、機関負荷率は船用特性の 50 %で、ホットダイリューションによる希釈温度は 150 、希釈率は 250 の粒径分布である。図中の赤色で示す分布が HF0 による運転時の粒径分布で、図 7-3、希釈率 250 と対応しており、図中の青色で示す分布が A 重油による運転時の粒径分布で、図 6-3、負荷率 50 %に対応している。前述の通り、HF0 による運転時には 2 つのピークを持つバイモーダル分であるが、A 重油による運転時にはモノモーダル分布

である。モード径は HF0 による運転時の方が大きい粒径となる。個数濃度の極大値に関しては大きな差は無いが、HF0 による運転時の方がモード径が大きいことから、排出される重量濃度は高いことが確認出来る。

図 7-5 で示した粒径分布を縦軸を対数軸とて図 7-6 に示す。図は、縦軸に個数濃度 ( $dN/d\log D_p$ 、対数軸)、横軸に粒径を示しており、図 7-5 と同様に赤色で示す分布が HF0 による運転時の粒径分布、青色で示す分布が A 重油による運転時の粒径分布である。粒径 200 nm 以上の粒径範囲においては、HF0 による運転時、A 重油による運転時とも大きな濃度差が無いことが確認出来る。

図 7-5 で示した粒径分布の個数濃度を重量濃度に換算し図 7-7 に示す。重量濃度への換算は粒子を完全な球形であり粒子の密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定して行った。図は縦軸に重量濃度 ( $dW/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図中の赤線で示す分布が HF0 による運転時の粒径分布、青線で示す分布が A 重油による運転時の粒径分布である。

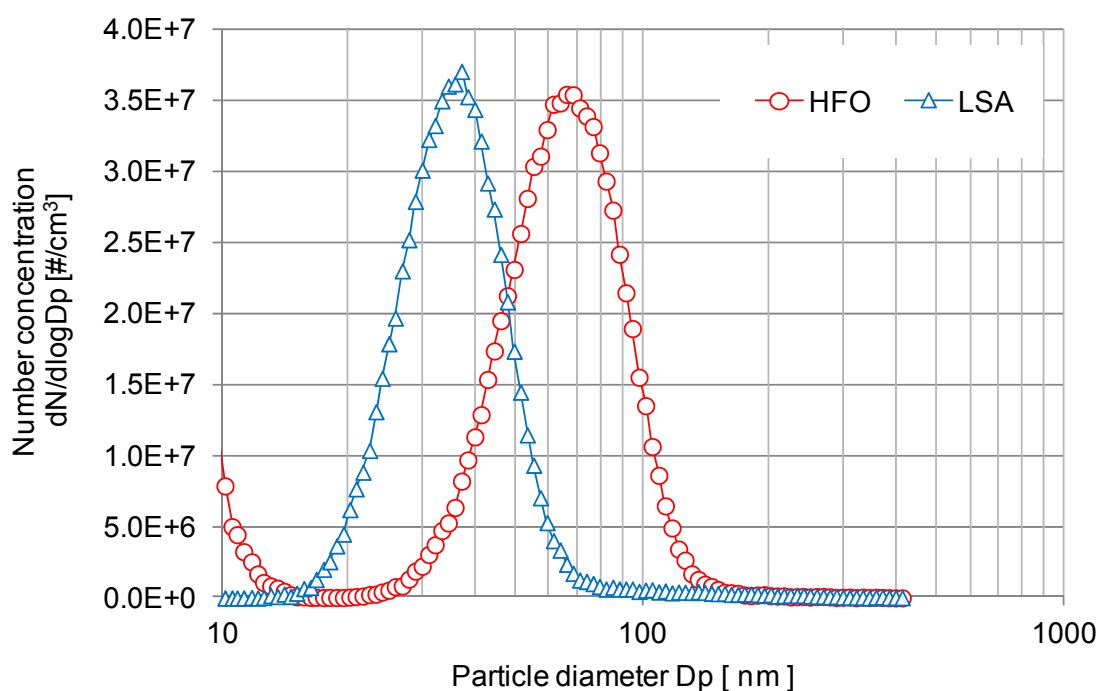


図 7-5 HF0 および A 重油(LSA)による運転時の粒径分布(個数濃度)  
(ホットダイリュージョン、負荷率 50 %、HF0/LSA、希釈温度 150 、希釈率 250)



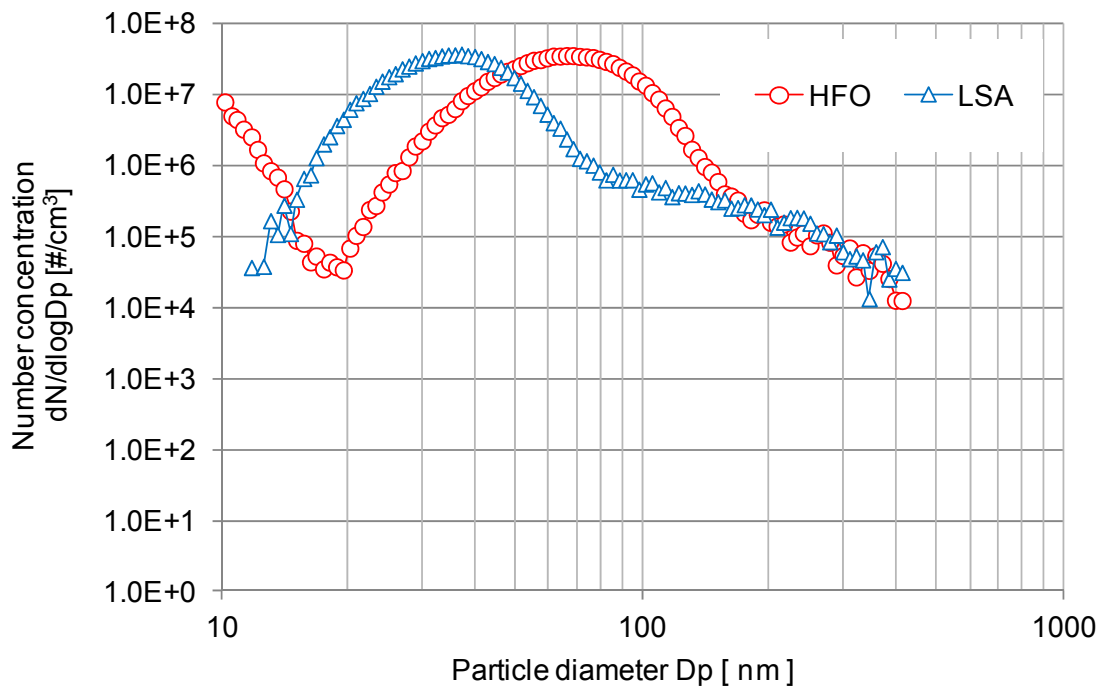


図 7-6 HFO および A 重油(LSA)による運転時の粒径分布(個数濃度、対数軸)  
 (負荷率 50 %、HFO/LSA、希釈温度 150 、希釈率 250)

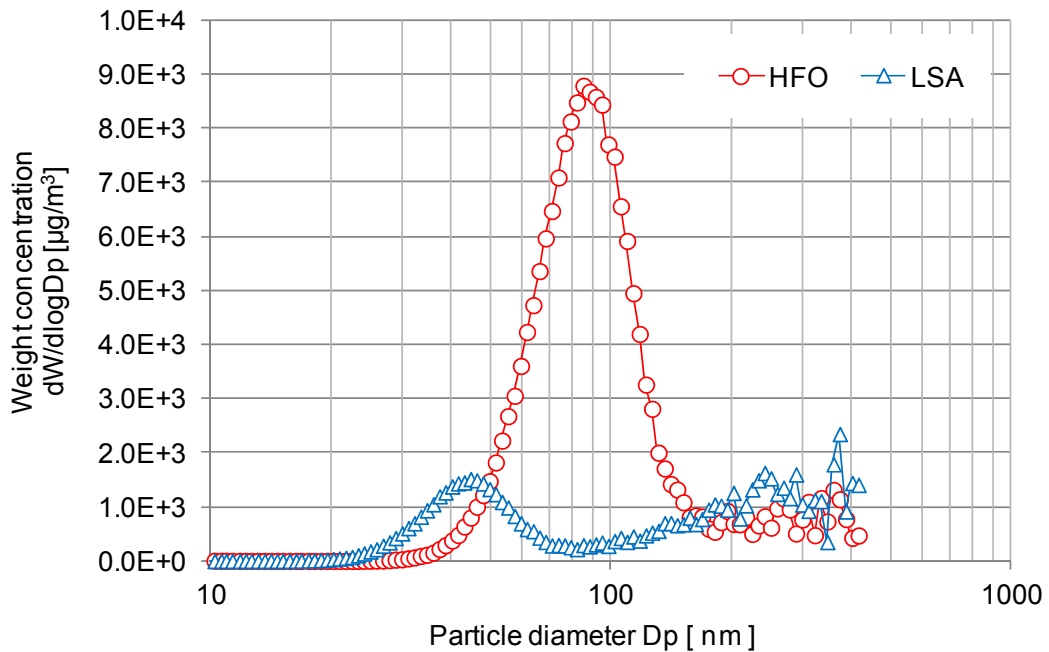


図 7-7 HFO および A 重油(LSA)による運転時の粒径分布(重量濃度)  
 (負荷率 50 %、HFO/LSA、希釈温度 150 、希釈率 250)

A 重油による運転時と HF0 による運転時を比較すると、図 7-5 で示した個数濃度ではピーク値に大きな差は無かったが、重量濃度では差は大きくなる。特に粒径 70 nm -100 nm の粒径範囲では HF0 の重量濃度は高く粒径 90 nm で比較すると濃度差は 40 倍程度となる。ホットダイリューションによる希釈排ガスの SMPS による計測では、HF0 による運転時と A 重油による運転時を比較して個数濃度に大きな差は無いが、重量濃度では HF0 の方が高い値を示すことが分かる。

## 7.5 希釈トンネルによる希釈排ガスの粒径分布計測

希釈トンネルによって希釈した排ガスの粒径分布を SMPS および ELPI によって計測を行った。SMPS ではロータリーディスク希釈器、ELPI ではエゼクタ希釈器によって 2 次希釈を実施している。なお、ロータリーディスク希釈器による 2 次希釈では加熱を行わないダイリューションとしている。本項では機関負荷率 50 %の排ガスを対象に実験を行った。

### 7.5.1 SMPS による粒径分布計測

SMPS による計測では希釈トンネル希釈率を 10.74、希釈空気温度を希釈トンネル出口が 47 となるように調整した。また 2 次希釈の希釈率は 150 としている。図 7-8 に粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており個数濃度は希釈トンネル希釈率および 2 次希釈器希釈率を考慮した排気管内の排ガスの値に換算している。粒径分布は粒径 100 nm および 50 nm にピークを持つ分布となった。また、若干ではあるが粒径 23 nm 付近にもピークがあることが分かる。ここで、A 重油による運時時と比較するため、その分布を加えた粒径と個数濃度の関係を図 7-9 に示す。図は機関が船用特性の負荷率 50 %の排ガスを対象に SMPS によって計測した分布で、HF0 による運転時では上述の通り、希釈トンネル希釈率が 10.74、2 次希釈器希釈率が 150 であり、A 重油による運時時では、希釈トンネル希釈率が 13.8、2 次希釈器希釈率が 250 である。縦軸に個数濃度( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、図 7-8 と同様に個数濃度は希釈率を考慮した排気管内の排ガスの濃度に換算をしている。図の赤色で示す分布が HF0 による運転時の分布で、図 7-8 と対応する。青色で示す分布が、A 重油による運時時の分布で図 6-13、負荷率 50 %と対応する。HF0 による運転時では上述の通り複数のピークを持つ分布であり、A 重油による運転時にはモノモーダルぶんである。7.4 章で示したホットダイリューションによる計測では、HF0 による運転時と A 重油による運転時で個数濃度ピーク値に大きな差は無かったが、希釈トンネルによる希釈排ガスでは、粒径 60 nm 付近において A 重油の個数濃度が高く、分布下部の面積から A 重油による運転時の希釈排ガスの方が個数濃度が高いことが確認出来る。

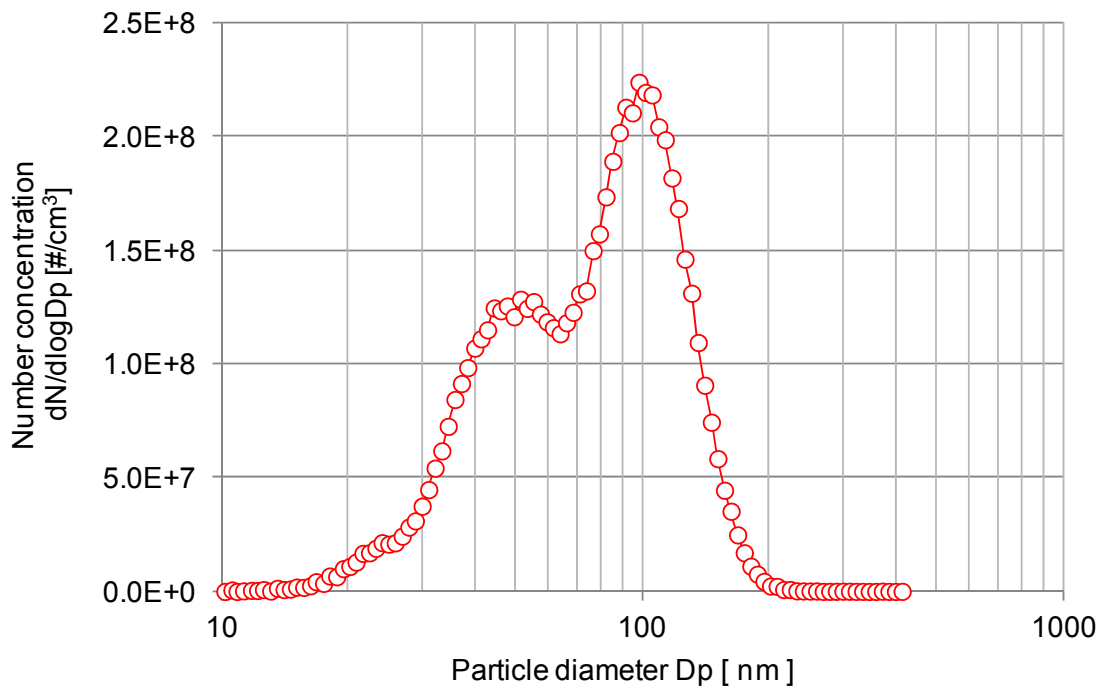


図 7-8 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-2 次希釈)  
 (負荷率 50 %、HF0、希釈トンネル希釈率 10.74、2 次希釈率 150)

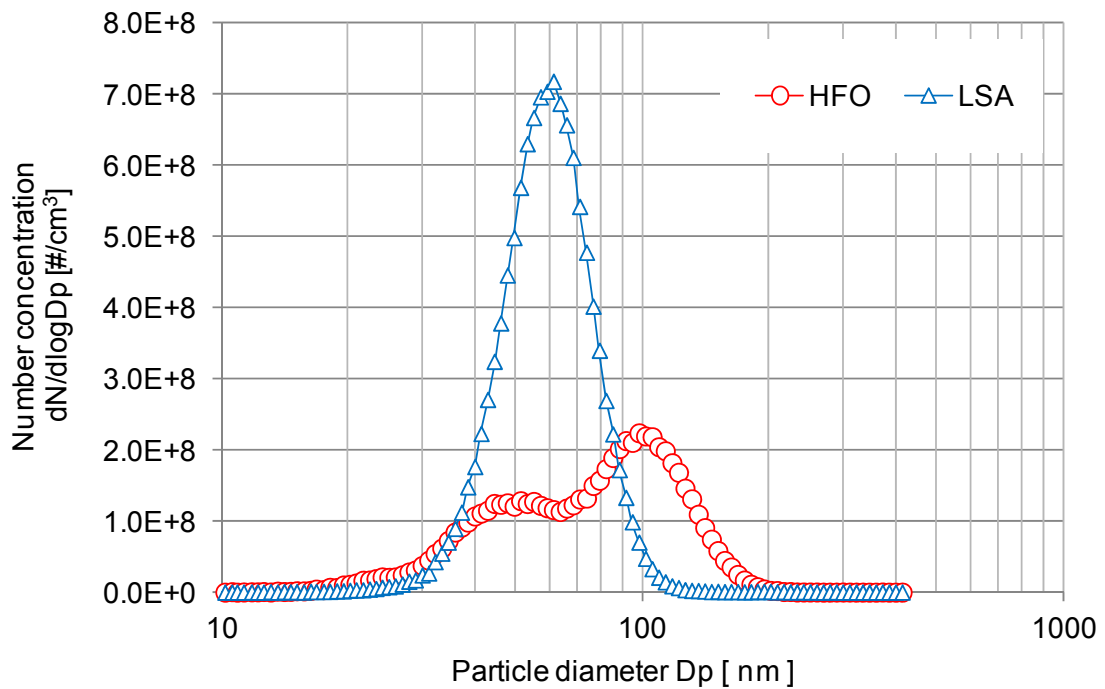


図 7-9 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-2 次希釈)  
 (負荷率 50 %、HF0/LSA、希釈トンネル希釈率 10.74/13.8、2 次希釈率 150/250)

### 7.5.2 SMPS によるホットダイリユーションと希釈トンネルによる希釈の比較

希釈トンネル希釈による生成粒子の分布を確認するため、希釈トンネル希釈による粒径分布からホットダイリユーションによる粒径分布の差を算出した。図 7-10 に希釈トンネル希釈による生成される粒子の粒径分布を示す。図は機関を船用特性の負荷率 50 %の排ガスを対象としており、縦軸に生成された粒子の個数濃度(dN/dlogDp)、横軸に粒径を示している。縦軸で示す濃度は、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度である。図の赤色で示す分布が HF0 による運転時の排ガス、青色で示す分布が A 重油による運転時の排ガスを対象とした生成される粒子の粒径分布である。

HF0 による運転時の排ガスと、A 重油による運転時の排ガスを比較すると、粒径 10 nm から 38 nm の範囲では、HF0 による運転時の排ガスの方が生成量が多いが、それより大きい粒径 40 nm-90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されたことが確認出来る。90nm から 180 nm の粒径範囲では HF0 による運転時の排ガスが多くの粒子が生成されており、それ以上の粒径では大きな差は無いことが分かった。また、図 7-9 と比較すると、HF0 運転時、LSA 運転時ともに粒径分布、個数濃度がほぼ等しく、

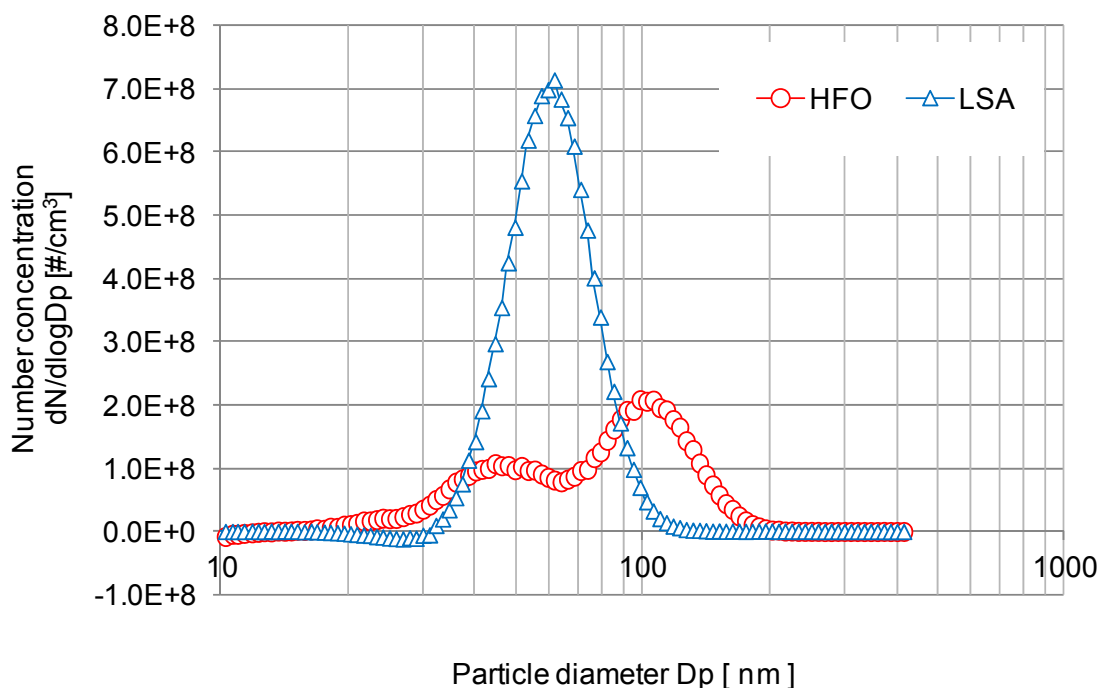


図 7-10 希釈トンネル希釈による生成される粒子の粒径分布  
(負荷率 50 %、HF0/LSA、希釈トンネル希釈率 10.74/13.8、2 次希釈率 150/250)

希釈トンネルによって多くの粒子が生成されるとともに、希釈トンネルによる計測では、トンネル依存のPM、すなわち冷却によって生成した凝縮性成分が多いと考えられる。

### 7.5.3 ELPI による粒径分布計測

ELPI による計測では希釈トンネル希釈率を 10.74、希釈トンネル出口温度が 47 となるように調整し計測を実施した。なお、ここで行った ELPI による計測は 7.5.1 節で示した SMPS による計測と同時計測を実施している。

図 7-11 に粒径と個数濃度の関係を示す。ここでは、A 重油による運転時の排ガスによる計測結果を同時に示す。図は縦軸に個数濃度 ( $dN/d\log D_p$ )、横軸に粒径を示しており、赤色で示す分布が HFO による運転時の排ガス、青色で示す分布が A 重油による運転時の排ガスの計測結果を示している。なお、A 重油による運転時の排ガスの分布は、図 6-16、負荷率 50% の分布と対応している。これらは、希釈トンネルおよび 2 次希釈器の希釈率を考慮し、排気管内の排ガス濃度に換算した値である。

HFO による運転時の排ガスの分布は、粒径  $0.1 \mu\text{m}$  以下では殆ど同一の濃度となり、それより大きい粒径  $0.1 \mu\text{m}$  から  $0.7 \mu\text{m}$  にかけて個数濃度は減少していく。粒径  $0.7 \mu\text{m}$  以上の

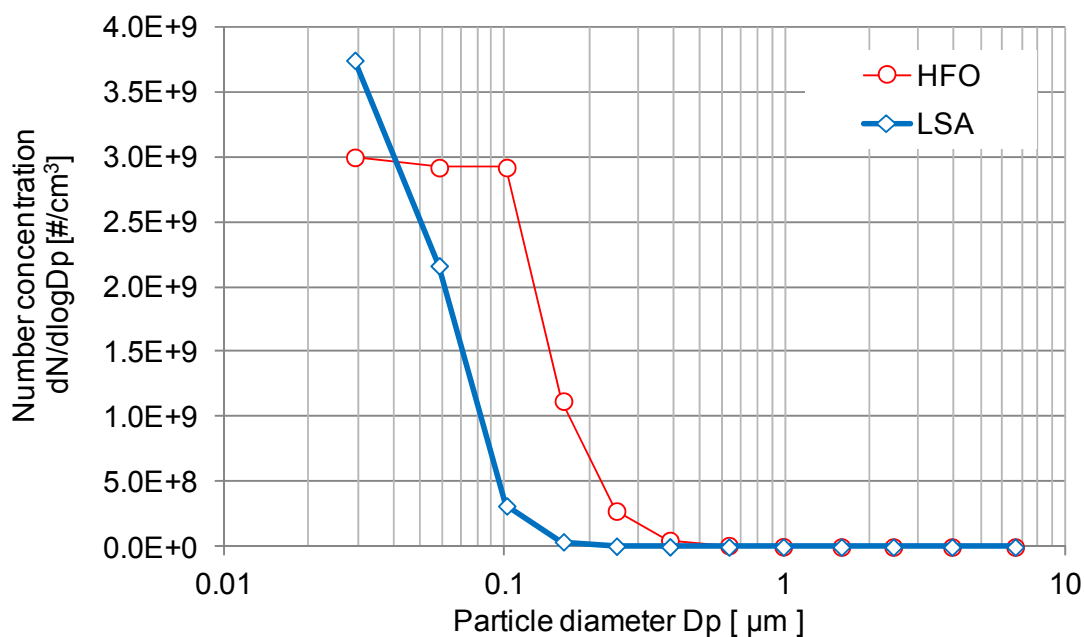


図 7-11 粒径と個数濃度の関係 (希釈トンネル-2 次希釈) ELPI  
(負荷率 50%、HFO、希釈トンネル希釈率 10.74/13.8、2 次希釈率 100/180)

粒径範囲では高濃度な箇所は無いことが分かる。最も小さいステージである 0.029  $\mu\text{m}$  では HF0 による運転時の排ガスより A 重油による運転時の排ガスの方が濃度が高い。これは、粒径に差はあるが図 7-10 で示した SMPS によって計測した個数濃度と対応した結果であると考えられるが、粒径 0.058  $\mu\text{m}$  から 0.7  $\mu\text{m}$  に関しては HF0 による運転時の排ガスの方が高い値となる。SMPS によって計測した粒径分布においても 90 nm から 180 nm の粒径範囲で HF0 による運転時の排ガスの方が高い濃度となるが、ELPI による計測においてはさらに粒径 0.7  $\mu\text{m}$  までで高い値となった。

## 7.6 まとめ

本章では船用 2 ストロークディーゼル機関において HF0 による運転時の排ガスを対象として機関を船用特性の負荷率 50 % で運転した計測実験を行った。希釈はホットダイリユーションおよび希釈トンネルと 2 次希釈器により行った。ホットダイリユーションでは、SMPS によって計測を行い、希釈トンネルによる希釈では SMPS とともに ELPI による計測を実施した。また、A 重油による運転時の負荷率の排ガスとの比較を実施した。実験の結果、以下の知見を得た。

- ・ホットダイリユーションによる希釈排ガスを SMPS によって計測した粒径分布では、粒径の最も小さい粒径 10 nm と 70 nm にピークを持つ分布となり、粒径 10 nm ~ 20 nm に濃度が検出される。このことより、HF0 による運転時の排ガスでは核生成が活発に発生し、かつ計測系において検出部である CPC に近い箇所においても核生成があると考えられる。
- ・ホットダイリユーションによる希釈排ガスを SMPS によって計測した粒径分布では、HF0 による運転時の排ガスと A 重油による運転時の排ガスを比較すると、個数濃度に大きな差は無いが、HF0 運転時の方がモード径は大きく、重量濃度が高いことが分かった。
- ・希釈トンネルによる希釈排ガスでは、A 重油による運転時の排ガスの方が個数濃度のピーク値は高い。希釈トンネル内の粒子生成状態では、粒径 40 nm - 90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されたことが分かった。

船用 2 ストロークディーゼル機関を HF0 による運転を行った場合に排出される PM では、ホットダイリユーションにより SMPS によって計測した粒径分布から、A 重油運転時より粒径の大きい範囲でピークとなるが、10 nm - 20 nm にも濃度が検出されるため、核生成される揮発性成分が多いことが明らかである。HF0 による運転時の排ガスと A 重油による運転時の排ガスを比較すると、個数濃度に大きな差は無いが、HF0 運転時の方がモード径は大きく、重量濃度が高いことが分かった。希釈トンネルによる希釈排ガスの粒径分布から、希釈トンネル内の粒子生成状態は、粒径 40 nm - 90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されたことが分かった。

## 第 8 章 凝縮性成分の核生成と条件別の計測法

第 4 章から第 7 章で示したとおり、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測では、凝縮性成分(揮発性成分)の核生成状況が、希釈率、希釈温度によって大きく異なる。また、燃料油の違いによっても大きく異なった。本章では、凝縮性成分の核生成状況に関してまとめるとともに、目的に応じた計測法に関する考察を行う。

### 8.1 船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスにおける希釈の状況

図 8-1 に気体温度と揮発性物質濃度の関係(模式図)を示す。この図は図 2-3 で示した図と同様である。

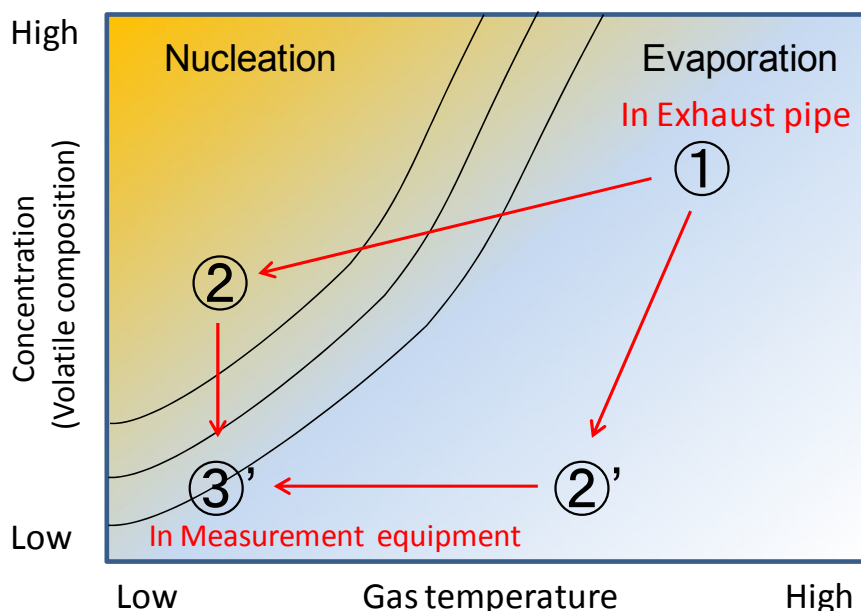


図 8-1 気体温度と揮発性物質濃度の関係(模式図, 図 2-3)

ここで、第 4 章で希釈トンネルの希釈率、希釈空気温度が計測される粒径分布へ及ぼす影響を、図 8-1 と同様にガス温度と揮発性成分濃度の関係とする。

図 8-2 にガス温度と揮発性物質濃度の関係を示す。図は、船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性、負荷率 30% 時の希釈トンネル希釈率 8, 10, 12、希釈空気温度 20、30、40 のガス状況および第 5 章で行ったホットダイリューションによる希釈温度 150、希釈倍率 200-1800 倍の状況を示す。図は横軸に排ガス温度、縦軸に揮発性成分を示している。また、第 3-5 章から揮発性成分濃度は SOF 分濃度と高い相関があると考えられることからここでは、縦軸の値を SOF 分濃度 [g/Nm<sup>3</sup>] として示している。

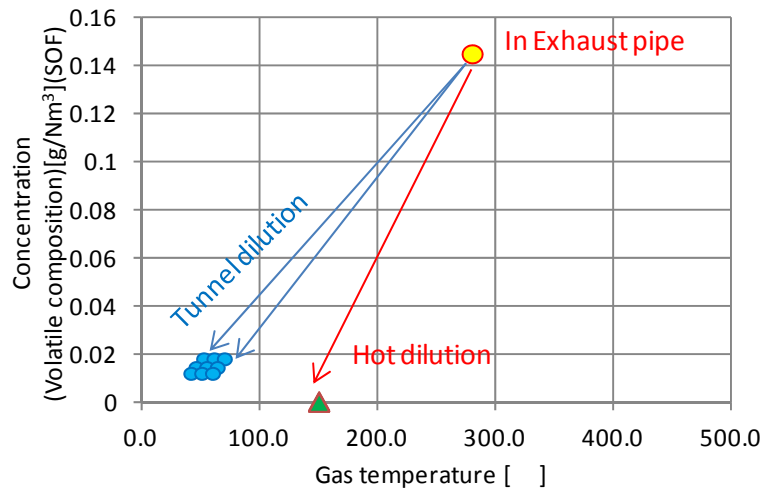


図 8-2 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(第 4 章、第 5 章の実験条件)  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、発電機特性、負荷率 30 %)

図中の黄色箇所が排気管内の状況（排ガス温度 280 °C）を示している。また、青丸で示す 6 点は、希釈トンネルによる希釈を行った希釈後状態を示している。ここでは、希釈空気には粒子状物質が含まれなく、かつ大気を圧縮しフィルターを通した状態であることから揮発性成分濃度を、排気管内の状況から希釈率で除した値としている。

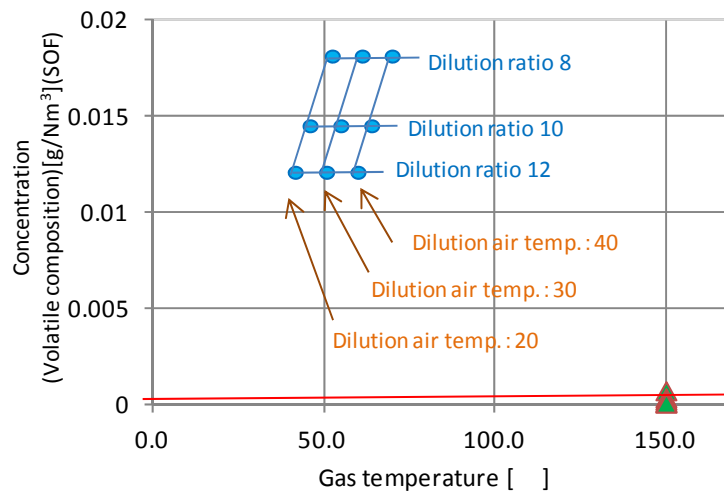


図 8-3 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(第 4 章、第 5 章の実験条件)  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、発電機特性、負荷率 30 %)

船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性、負荷率 30 %において、希釈率が高い程、粒径の小さなピーク濃度が低下することから、ホットダイリューションのプロット領域においても核生成が起きていると考えられる。ここで、図 8-2 に示したガス濃度と揮発性成分の関係において、希釈後条件の領域を拡大し、図 8-3 に示す。図は、図 8-2 と同様に横



軸に排ガス温度(希釈後)、縦軸に揮発性成分濃度を示している。

図中の青丸で示す 9 点が、希釈トンネルによる希釈後排ガスの状態で、図中右下に示す三角のプロットがホットダイリューション時の排ガス状態を示している。

前述の通り、ホットダイリューションによる計測を行った、図 5 - 2 では、希釈温度 150 において、希釈率 200, 400 に対して、希釈率が高い 600-1800 では、粒径の小さい方のピーク濃度が低下することから、図 8-3 に示す排ガス温度 150 のホットダイリューションの領域にも核生成となる領域がある。図中に示した赤線より揮発性成分の低い領域に核生成となる領域があると考えられる。

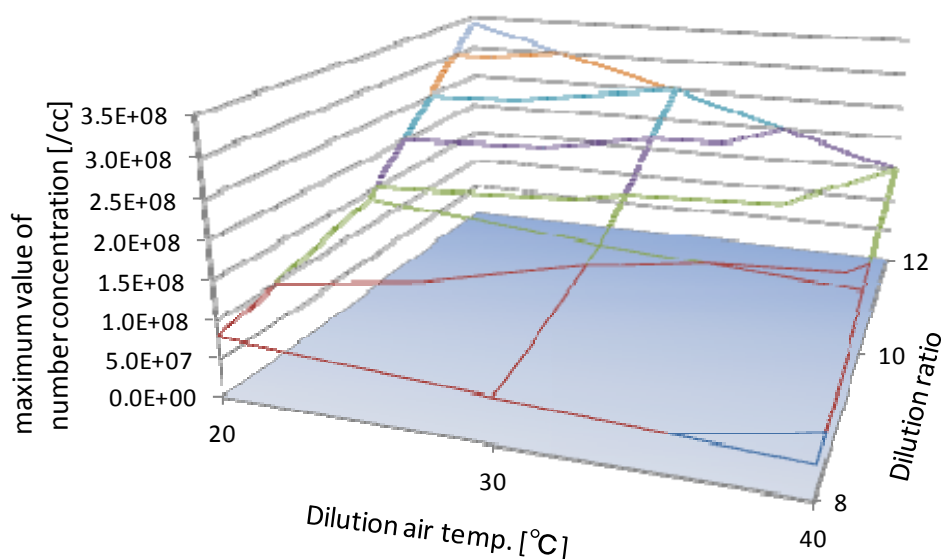


図 8-4 希釈空気温度、希釈率とピーク個数濃度の分布  
(船用 4 ストロークディーゼル機関, 発電機特性, 負荷率 30 %)

図 8-4 に希釈空気温度、希釈率とピーク個数濃度の分布を示す。図は、図 8-3 中の希釈トンネルによる希釈を行った希釈後排ガス 9 点に対して、図 4-7~9 から読み取ったピーク個数濃度の分布を示している。横軸に希釈空気温度、奥行き方向に希釈率を示しており、縦軸にピークの個数濃度を示している。通常の蒸気線図を考えた場合、図 8-3 中の 9 点で考えると希釈空気温度 20 の 3 点が核生成が多く思われるが、図 8-4 から希釈率 8 の場合のピーク濃度が最も低濃度である結果であり、蒸気線図上の核生成量とピーク濃度は一致しない結果であった。

図 8-5 にガス温度と揮発性物質濃度の関係を示す。図は、船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性、負荷率 75 % 時の希釈トンネル希釈率 8, 10, 12、希釈空気温度 20、30、40 のガス状況および第 5 章で行ったホットダイリューションによる希釈温度 150、希

積倍率 200-1800 倍の状況を示す。図は横軸に排ガス温度、縦軸に揮発性成分を示している。また、図 8-2 と同じく、縦軸の値を SOF 分濃度 $[g/Nm^3]$ として単位を $[-]$ として示している。

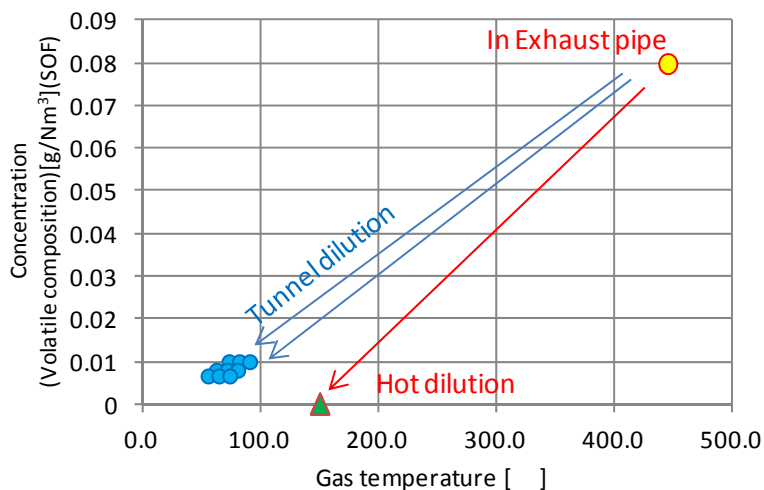


図 8-5 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(第 4 章、第 5 章の実験条件)  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、発電機特性、負荷率 75 %)

図 8-2 で示した発電機特性の負荷率 30 %のガス温度と揮発性物質濃度の関係と比較すると、排気管内の排ガス温度が高く、かつ、SOF 分濃度が低いことから、排気管内の状況と、希釈トンネルによる希釈後排ガスの状態を直線で考えた場合、なだらかな直線となる。

図 8-6 に、図 8-3 と同様に、希釈後排ガスの状態の領域を拡大し示す。図は図 8-3 と同様に、横軸に排ガス温度(希釈後)、縦軸に揮発性成分濃度を示している。図中の青丸は、図 8-3 で示した希釈トンネルによる発電機特性の負荷率 30 %のプロットであり、図中の×印のプロットが希釈トンネルによる発電機特性の負荷率 75 %のプロットである。負荷率 75 %の希釈後排ガスでは、排気管内の揮発性成分濃度が低いことから、負荷率 30 %時の 12 倍の排ガスより、負荷率 75 %の 8-12 倍の排ガスの方が希釈後濃度は低い。また、希釈後温度に関しては、負荷率 75 %のプロット 9 点の内、希釈率 12 の希釈空気温度 20 °C 側の半数程が、負荷率 30 %の排ガス時の希釈後温度と近い値である。

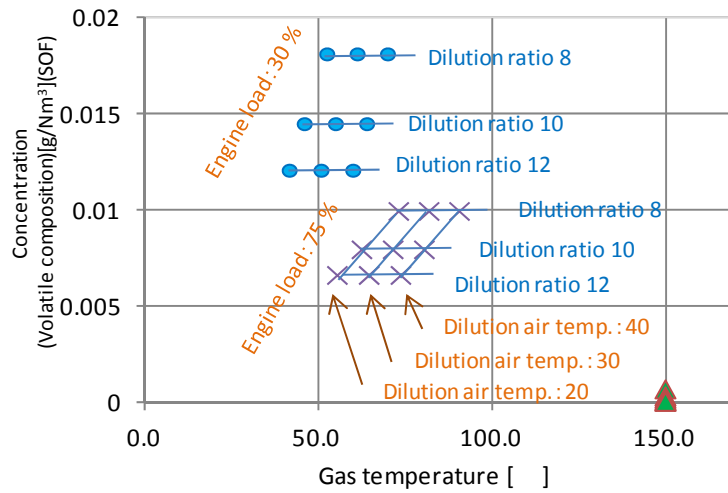


図 8-6 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(第 4 章、第 5 章の実験条件)  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、発電機特性、負荷率 30 %, 75 %)

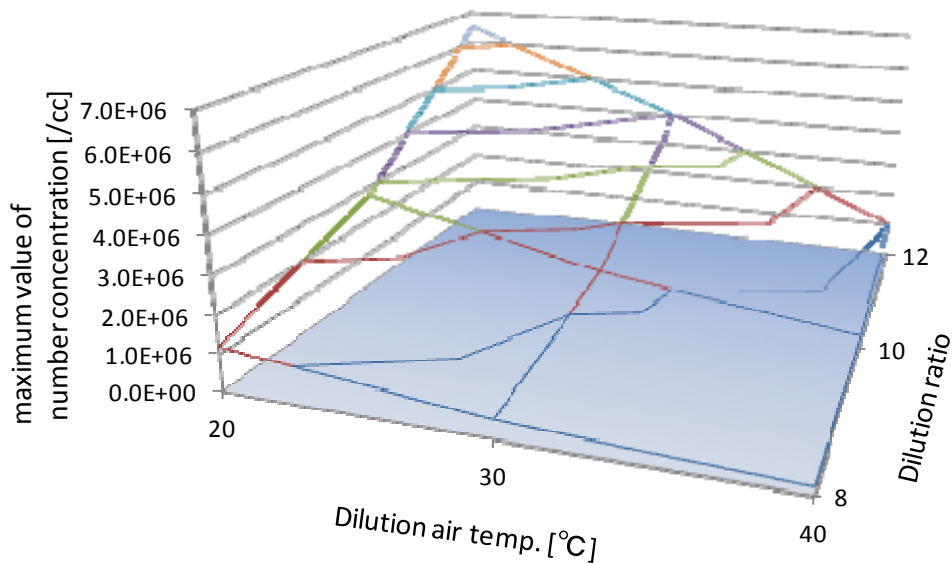


図 8-7 希釈空気温度、希釈率とピーク個数濃度の分布  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、発電機特性、負荷率 75 %)

図 8-7 に図 8-4 と同様に、希釈空気温度、希釈率とピーク個数濃度の分布を示す。図は、図 8-6 中の希釈トンネルによる希釈を行った負荷率 75 %の希釈後排ガス 9 点に対して、図 4-22 ~ 24 から読み取ったピーク個数濃度の分布を示している。横軸に希釈空気温度、奥行き方向に希釈率を示しており、縦軸にピークの個数濃度を示している。

図では、図 8-4 で示した希釈空気温度、希釈率とピーク個数濃度の分布と同様に、希釈

空気温度が高く希釈率が低い所が最も低いピーク濃度であり、希釈率が高く、希釈空気温度が低い箇所が最もピーク濃度が高い分布である。

ここで、希釈トンネルによる希釈、ホットダイリレーションによる希釈後、計測器(SMPSのCPC部)までの変化を図8-8に示す。図は、横軸に排ガス温度、縦軸に揮発性成分濃度を示しており、図中の青丸が負荷率30%の希釈トンネルによる希釈後排ガス状態、×印が負荷率75%の希釈トンネルによる希釈後排ガス状態、三角が負荷率75および30%のホットダイリレーション後排ガス状態を示している。また、橙色で示すプロットがSMPSのDMA部分級後状態、青色の四角で示す状態がCPCのコンデンサー部温度である。

希釈トンネルによる希釈後排ガスは、2次希釈器にて250倍に希釈される。SMPSのDMA部にてさらに10倍に希釈されながら分級される。ここでDMA内の希釈は、排ガス(サンプリングガス)とシースガスは積極的な混合が行われないことから、希釈トンネル等の希釈と異なる。また、DMAによる分級後にはCPCの入口後コンデンサーで23となり、個数濃度の計測が行われる。

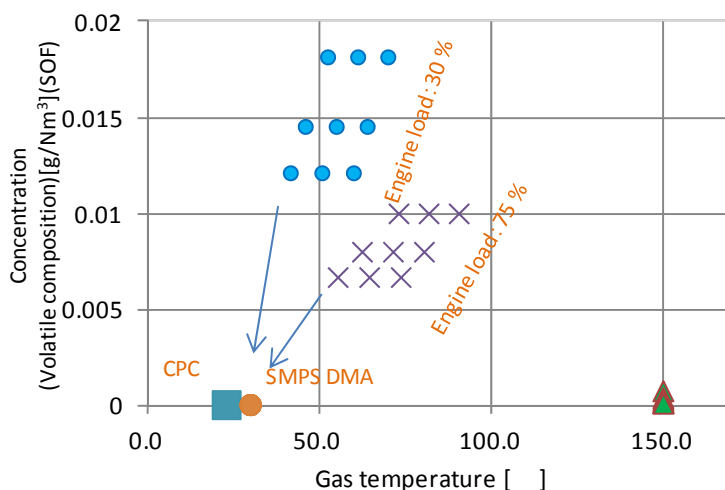


図8-8 ガス温度と揮発性物質濃度の関係 (希釈後排ガスから計測器内)

## 8.2 船用2ストロークディーゼル機関の排ガスにおける希釈の状況

図 8-9 に第 6 章において船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスによって実験を行った、排ガス温度と揮発性成分濃度の関係を示す。図は横軸に排ガス温度、縦軸に揮発性成分濃度を示しており、前項と同様に SOF 分濃度 [g/Nm<sup>3</sup>] を揮発性成分濃度として示している。

船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスでは、船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスより、SOF 分割率は高いが SOF 分濃度は低く、図 8-2, 9-5 と比較すると排気管内の状態でも低濃度位置となる。

ここで、希釈後排ガスの状態を船用 4 ストロークディーゼル機関の希釈時と比較する。

図 8-10 に第 4 章の船用 4 ストロークディーゼル機関の実験および第 6 章の希釈トンネルによる希釈の状況を合わせて、排ガス温度と揮発成分濃度の関係として示す。

図は横軸に排ガス温度、縦軸に揮発性成分濃度を示しており、前項と同様に SOF 分濃度 [g/Nm<sup>3</sup>] を揮発性成分濃度として示している。青色のプロットが、船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性、負荷率 30 %、赤色のプロットが負荷率 75 %でそれぞれ希釈トンネルによる 8 ~ 12 倍の希釈後排ガスの状況である。また、黄色の丸および米印のプロットが船用 2 ストロークディーゼル機関の希釈トンネルによる希釈後排ガスの状態を示している。

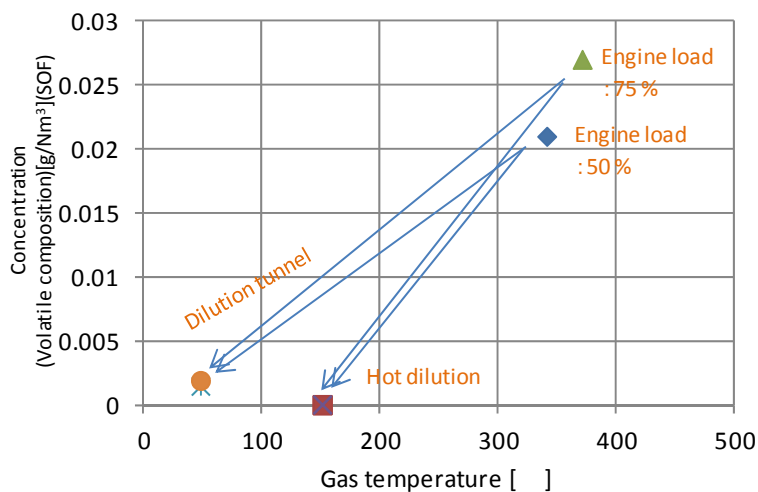


図 8-9 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(第 6 章の実験条件)  
(船用 2 ストロークディーゼル機関、船用特性、負荷率 50, 75 %)

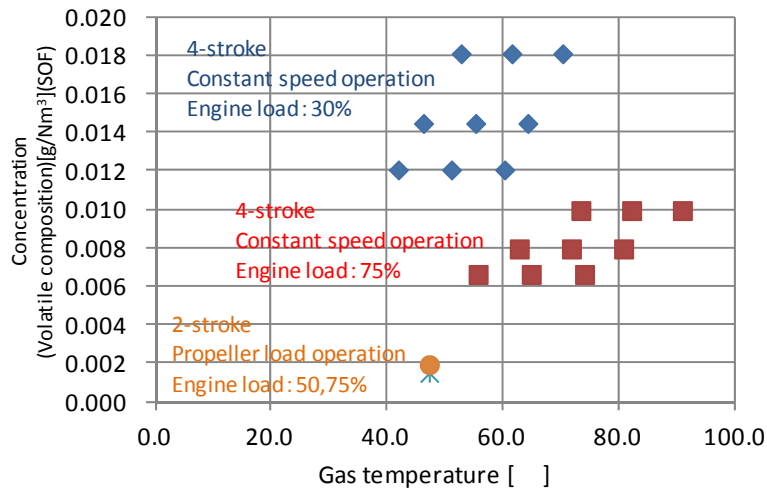


図 8-10 ガス温度と揮発性物質濃度の関係(希釈トンネルによる希釈)  
(船用 4 ストロークディーゼル機関、2 ストロークディーゼル機関)

船用 2 ストロークディーゼル機関の希釈トンネルによる希釈後排ガスでは、揮発性成分濃度は低いが、図 6-19, 6-21 から分かるとおり希釈トンネル内の核生成が確認されており、図 8-10 で示した排ガス温度範囲においても核生成領域が大部分を示していると考えられる。

### 8.3 核生成領域の検討

図 8-11 に船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性で負荷率 30%の希釈排ガス温度とピーク個数濃度の関係を示す。図は横軸に希釈後排ガスの温度、縦軸に個数濃度最大値を示しており、第 4 章の希釈トンネル希釈による実験結果で得られた粒径分布から作成している。図 8-12 に船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機特性で負荷率 75%の希釈排ガス温度とピーク個数濃度の関係を示す。図は横軸に希釈後排ガスの温度、縦軸に個数濃度最大値を示しており、第 4 章の希釈トンネル希釈による実験結果で得られた粒径分布から作成している。

図 8-11、12 とともに、三角で示すプロットが希釈トンネル希釈率 12、四角で示すプロットが希釈トンネル希釈率 10、菱形で示すプロットが希釈トンネル希釈率 8 を示している。発電機特性の負荷率 30%である図 8-11 では、希釈率が高い程、ピーク個数濃度と希釈排ガス温度の関係を示す折れ線グラフの傾きは急になる。一方、発電機特性の負荷率 75%である図 8-12 では、8-11 と比較して濃度が低いとともに、ピーク個数濃度と希釈排ガス温度の関係を示す折れ線グラフの傾きも緩やかな傾きとなる。

図 8-11 および 8-12 に示したピーク個数濃度と希釈排ガス温度の関係から、希釈率毎に近似曲線を算出した。その算出結果から、希釈率毎すなわち濃度毎にピーク個数濃度が同値となる温度を算出し、ガス温度と揮発性物質濃度の関係を表すグラフ内にプロットを行った。ガス温度と揮発性物質、ピーク個数濃度の関係を図 8-13 に示す。

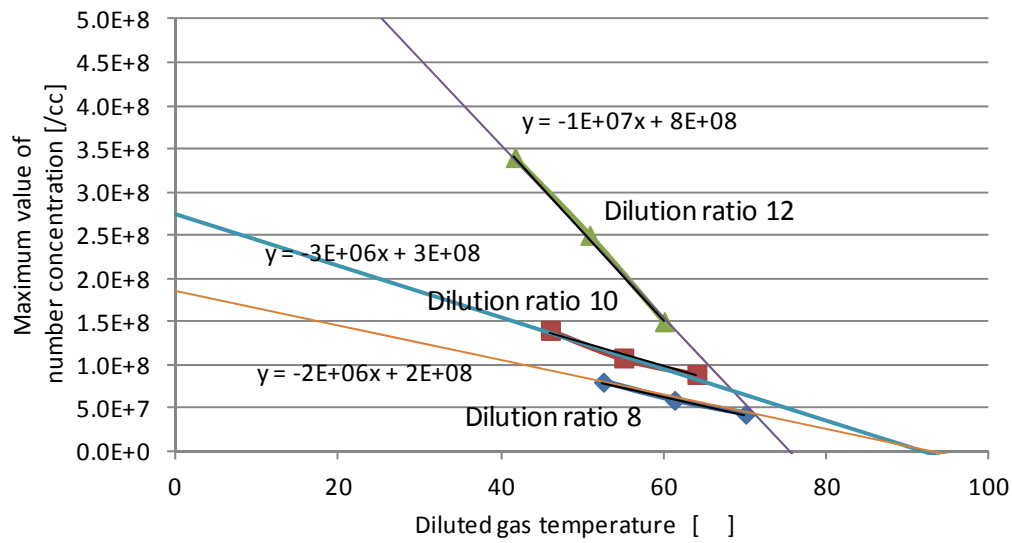


図 8-11 希釈排ガス温度とピーク個数濃度の関係

(船用 4 ストロークディーゼル機関，発電機特性，機関負荷率 30 %，希釈トンネル希釈，SMPS による計測)

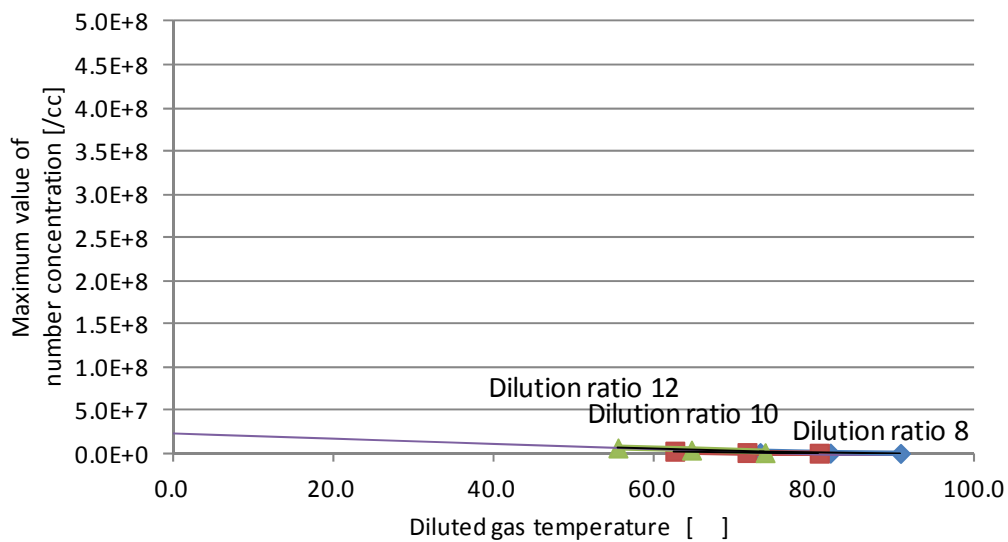


図 8-12 希釈排ガス温度とピーク個数濃度の関係

(船用 4 ストロークディーゼル機関，発電機特性，機関負荷率 75 %，希釈トンネル希釈，SMPS による計測)

図 8-13 では、横軸にガス温度、縦軸に揮発性物質濃度の関係を示しており、図中の曲線では、橙色の線が個数濃度最大値  $0.5e7$  個、赤色の線が個数濃度最大値  $1.0e7$  個、緑色の線が個数濃度最大値  $1.5e7$  個、紺色の線が個数濃度最大値  $2.0e7$  個の近似曲線を示している。このグラフから揮発性成分濃度が高いほど、多くの個数濃度が検出される核生成が起こる温度は高くなるとともに、発生粒子個数濃度最大値の温度による差は小さくなる。一方、揮発性成分濃度が低い排ガスでは、希釈排ガス温度が低い程、計測される最大個数濃度は増加することが把握できる。

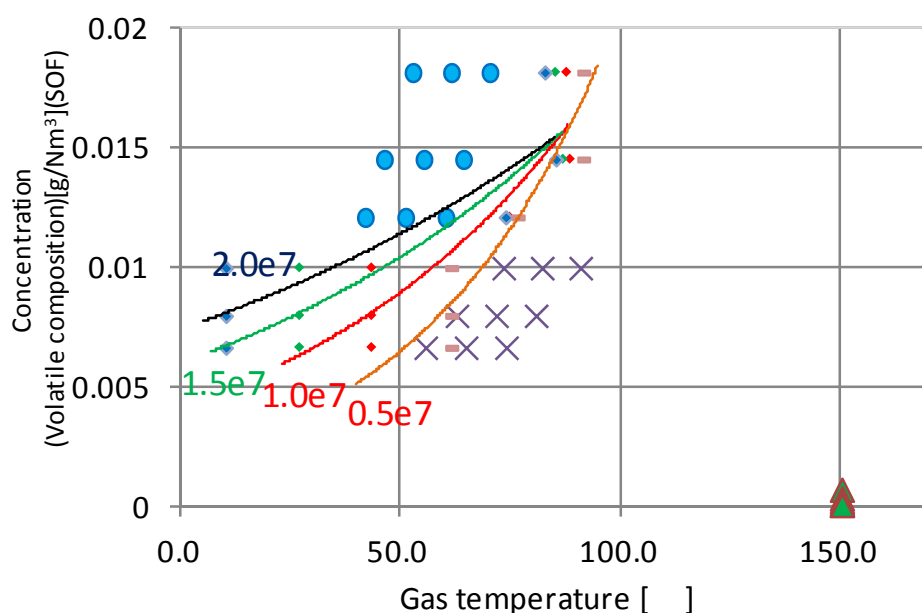


図 8-13 ガス温度と揮発性物質、ピーク個数濃度の関係  
(船用 4 ストロークディーゼル機関, A 重油による運転)

#### 8.4 目的による条件別の計測法

船用ディーゼル機関が船舶に搭載される場合、排気管の構成は主に図 8-14 に示す方式となる。図は(a)に小型、中型の船舶の主機関、発電機関等の補機関を、(b)に大型船舶の主機関を表している。小型・中型の船舶では一部を除きディーゼル機関の排ガスは機関から排出後、排気管、サイレンサーを通過し大気へ放出される。一方大型船舶の主機関の排ガスでは、機関から排出後、排ガスエコノマイザによって熱回収が行われた後に、大気へ放出される。排ガスエコノマイザでは、排ガスの熱によって蒸気を発生させ発電に使用されたり、船内各所の雑用蒸気として使用される。排ガスエコノマイザでは硫酸腐食を防止するため、通常的に出口排ガス温度が  $185 \sim 200$  以上で運用される。

排ガスエコノマイザを通過する排ガスでは、揮発性濃度一定で温度が下げられるため、揮発性成分の核生成の促進が考えられる。大気へ放出された状態の粒子状物質を計測によ



って評価する場合には、希釈トンネルを使用する必要があるが、希釈トンネルへ排ガスを導く過程において実際の大气放出までの温度変化を考慮した方法をとる必要があると考えられる。

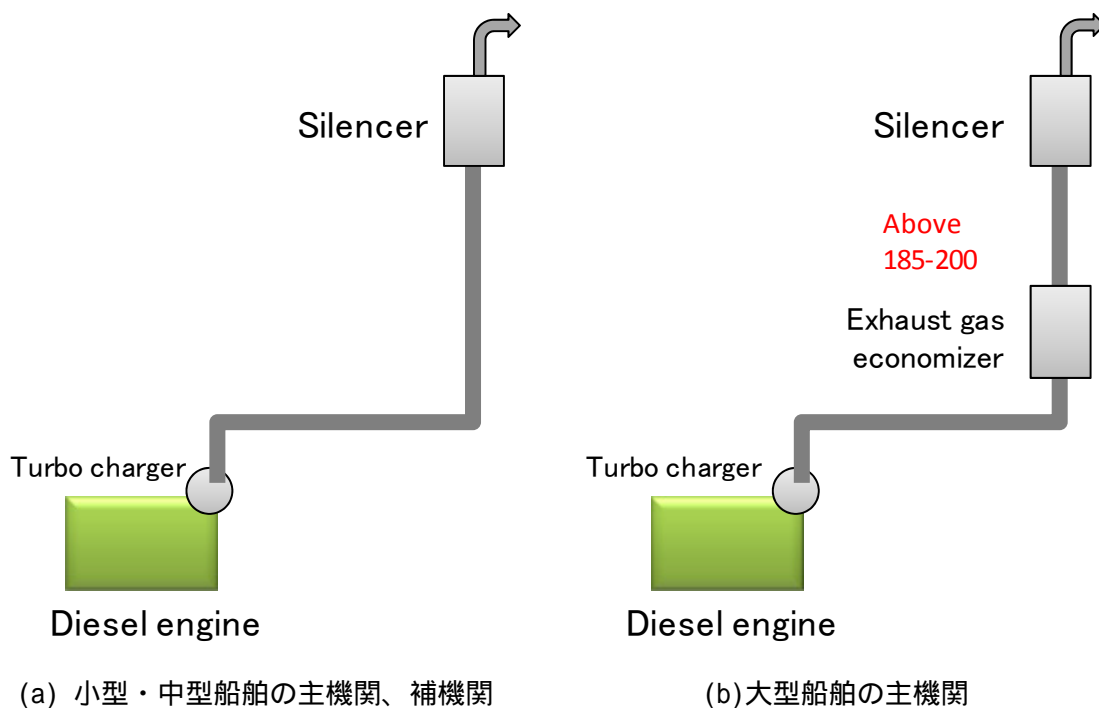


図 8-14 船用ディーゼル機関の排気管構成

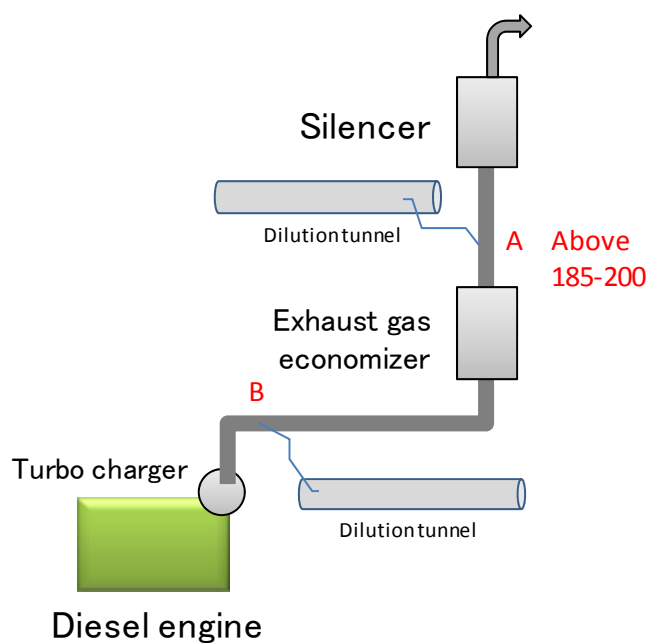


図 8-15 排ガスエコノマイザが搭載される場合の排気管構成

図 8-15 に排ガスエコノマイザが搭載される場合の排気管構成を示す。前述の通り、排ガスエコノマイザ通過時の核生成を考慮した計測を行う場合、図中のポイント A において計測するのが望ましいと考えるが、設置場所の都合や、搭載前の工場試運転時等ではポイント B からの排ガスサンプリングが必要となる。B からサンプリングする場合には希釈トンネルに導く過程において排ガス温度の低下をさせる必要がある。この場合、第 5 章において希釈排ガスのチューブ通過における濃度の減衰が確認されていることから、この場合さらに高濃度であることもあり、事前に減衰量の確認を要すると考えられる。排ガスエコノマイザ通過による核生成状況は、事前に図 8-16 に示すポイント A および B にてホットダイリューションを行う事で排ガス温度低下に伴う核生成状況は把握可能であり、ポイント B においては、サンプリングチューブの温度変化による減衰量の把握も行う必要があると考える。

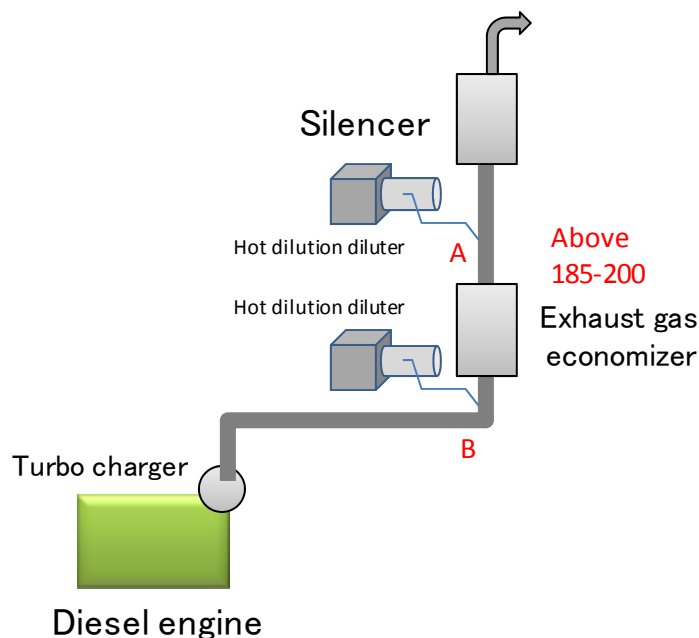


図 8-16 排ガスエコノマイザが搭載される場合の排気管構成

排ガス管路に SCR 装置や DPF 装置が搭載される場合の排気管構成を図 8-17 に示す。SCR では、反応促進のため排ガスが高温である必要があるため、機関の排出直後の排ガス管位置に搭載される。この場合、SCR 内においては排ガスは高温状態で通過するために排気管内の核生成は少ないことが考えられるとともに、その状態の排ガス計測を行う必要がある。例えば、SCR の触媒における孔への目詰まり等の粒子状物質の影響を評価する場合には、ホットダイリューションによって排ガスを計測する必要があると考えられる。この場合、SCR 入口の排ガス状態では、図中のポイント B においてホットダイリューションを行った計測

を実施する。また、SCR 内における尿素水噴霧等の影響までを加味する場合には、ポイント A においてホットダイリューションを行った計測を実施する必要がある。

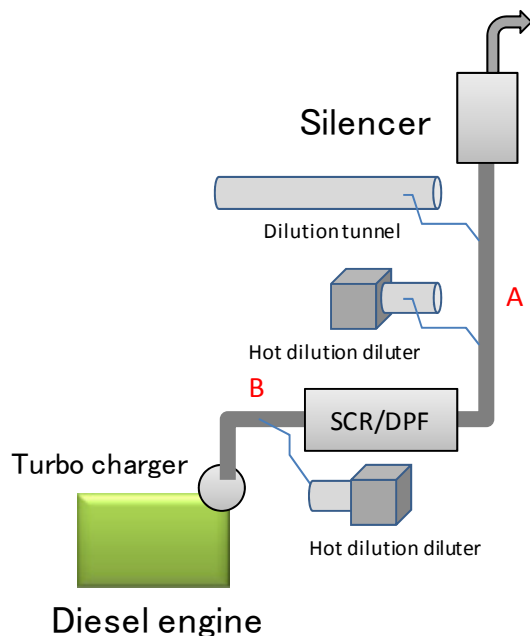


図 8-17 SCR・DPF 等が搭載される場合の排気管構成

また、DPF においては高温ガスを扱う場合揮発性成分のスリップも正しく評価する必要があるとともに、固形粒子のトラップも把握しないとイケない。DPF においては、図 8-17 で示すポイント A および B によってホットダイリューションを行う事で実際の固形粒子、油滴の低減効果を確認することが可能であり、さらには、ポイント A による希釈トンネル希釈を行った計測で大気へ放出される排ガスを評価する必要があると考えられる。

繰り返しになるが、大気に放出される排ガスの粒子状物質計測を実施する場合は、大気放出箇所において大気によって希釈されるとともに冷却が行われ、その結果、異なる核生成状況が生じることが考えられる。大気に排出される PM の粒径と個数の濃度の関係を計測することは、気温や風速等の気象条件による影響があることを考慮する必要がある、また、実船ではその大きさと排ガス流量、設置位置の問題から大気放出後の計測は不可能であるが、希釈トンネル希釈にて意図する条件の計測を行う事で予測が行えると考えられる。また、機関の排ガス出口箇所である過給機出口から、大気へ放出される間には船舶の種類によって廃熱回収を行うエコマイザが設置されていることや、排ガス浄化設備である SCR や EGR 等が設置されることから、それらの機器における粒子状物質の影響を把握するためには、その機器内の排ガス状態を把握するホットダイリューションによって対応する事が必要である。

## 第9章 結論

本章では研究で得られた知見を要約する。要約は以下の通りである。

船用4ストロークディーゼル機関の排ガスを対象として、ISO8178-1 および JIS B8008-1 に準拠した希釈トンネルを使用して、凝縮性成分の割合が高いと考えられる、SOF 分割合が最も高い、発電機特性の低負荷率時(負荷率：30%)の排ガスを対象に、希釈トンネルにおける希釈率、希釈空気温度を変化させ粒径分布の計測を行った。続いて、発電機特性上で、PM 濃度、SOF 分割合とも、低負荷率時より低い負荷率 75 %の排ガスを用いて同様の検討を行った。その要約は以下の通りである。

- ・ 希釈トンネルによる希釈を行った発電機特性の負荷率 30 %の排ガス中の PM 粒径分布は粒径 60 nm 付近に個数濃度のピークを持つ。このピークは、希釈トンネル希釈率の増加により粒径が小さい方へシフトする。また、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した場合においても希釈空気温度の上昇によりピーク値は減少する。また、SMPS によって計測した総個数濃度は希釈率の上昇によって高くなる。
- ・ 発電機特性 75 %負荷の排ガス中の PM は、粒径 50 nm 付近および粒径 150 nm 付近に個数濃度のピークを持つバイモーダルな粒径分布となる。粒径の大きい方のピークは希釈トンネル希釈率、希釈空気温度によって変化しない。粒径の小さい方のピークは、希釈空気温度が低いほど、また希釈トンネル希釈率が高いほど、濃度が高くなる。

希釈条件によって変化する個数濃度のピーク値では、希釈空気温度が低いほど、個数濃度のピーク値が高くなるのは、SMPS によって計測されなかった SOF 分が、希釈空気温度の低下によって凝縮し、粒子となることで粒径 50~70 nm 程度の粒子が出現したためだと考えられる。また、希釈率が低いほど、個数濃度のピーク値が小さくなり、かつモード径が大きくなるのは、希釈率が低い場合には、希釈トンネル内での粒子濃度が高いため、ブラウン運動による凝集もしくは粒子同士の衝突が頻繁に生じることによると考えられる。SMPS の計測粒径範囲において SOF 分割合の高い排ガスでは、希釈トンネルの希釈条件によって個数濃度とともに重量濃度にも変化があるが、SOF 分割合の小さい排ガスでは個数濃度、重量濃度ともに希釈条件の影響が少ないと考えられるとともに、希釈率が高い程、ピークが変化したのは、揮発性成分は希釈されるほど核生成される粒子数は減少すると考えられるが、希釈トンネルの希釈率が 8-12 程度においては、希釈による濃度低下より希釈空気による冷却が大きく影響したためであると考えられる。

船用ディーゼル機関の排ガスに含まれる PM の計測に関する研究では、希釈トンネルを使用した重量濃度による評価が主に行われてきた。この実験から得られた結果では、希釈ト

ンネルの希釈率によって計測される濃度は大きく変化するが、その変化は主に粒径が 500 nm 未満であり、重量濃度には大きく影響していないことが考えられる。しかし、重量濃度の計測による研究では、フィルター捕集した PM の成分分析も行われることが多く、それらは、核生成および凝集した PM のみとして扱う必要があるとともに、核生成状況を考慮する必要があると考える。

- ・ SMPS の計測結果、ELPI の計測結果ともに希釈率が高くなるほど、また希釈空気温度が低いほど、全個数濃度は高くなる。SMPS と ELPI の計測結果を比較すると、粒径分布の傾向には大きな差異はない。また、SMPS の個数濃度と、数種類の粒子密度を仮定した ELPI の個数濃度を比較すると、ELPI では粒径 500 nm 以下の PM の密度は  $0.1 \text{ g/cm}^3$  程度として扱う必要があると考えられる。

SMPS ではモビリティ径の分級、ELPI では空気動力学径の分級を行っており、計測する粒子の分級方法は異なる。船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスの場合、希釈トンネルによる希釈排ガスの計測結果からは、空気動力学径とモビリティ径に粒径の大きな差異は無いと考える。濃度計測方法に関しては、SMPS の計測粒径範囲において、SMPS の凝縮粒子カウンタによって光学的に計測される濃度と、ELPI によって計測される濃度に差があることを留意する必要があると考える。ELPI の濃度と SMPS の濃度に差が生じるのは、排ガスに含まれる粒子状物質が粒径によって構成がことなり荷電できる容量に差があると考えられ、計測される濃度の差は、粒径毎に異なることも考慮した計測を行う必要があることが明らかとなった。

船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーションによって排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布の計測では、機関は船用特性及び発電機特性の 2 種類の負荷特性において、それぞれ低負荷率から高負荷率の 4 負荷率の排ガスを対象に計測を実施し排ガスに含まれる PM の粒径分布を明らかにした。さらに、希釈後の計測系内の濃度減衰の状況を把握することを目的に、希釈後濃度計測器までのチューブ長を変化させた実験を行った。また、ホットダイリユーションの計測結果と希釈トンネルによる希釈を比較した。その要約は以下の通りである。

- ・ 船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象にホットダイリユーションによって SMPS で計測を行った結果、計測される粒子状物質の粒径分布は発電機特性の低負荷時を除き、モード径が 100 ~ 120 nm のモノモーダルな粒径分布となる。
- ・ 発電機特性の低負荷時には、希釈倍率によって小粒径領域の核生成状況が大きく変化的ことから揮発性成分が多く高濃度で含まれることが分かる。
- ・ ホットダイリユーションによる希釈排ガスは、計測系チューブ内にて濃度が減衰するが、

減衰率は小粒径ほど高い。また、チューブ長が長いほど減衰率は増加する。2 希釈率の濃度差による減衰率には大きな差は無いことが分かった。

- ・ ホットダイリユーシオンと希釈トンネルによる希釈排ガスを比較すると、揮発性成分が高濃度である発電機特性の負荷率 30 % では 100 nm 以下の粒子で大きく増加する。また、発電機特性の負荷率 75 % の排ガスでは、40 nm 以下の粒径で濃度の上昇が見られたが、それ以上の粒径において濃度の低下が確認された。
- ・ SMPS によって計測した粒子の総個数濃度では、単位体積辺りでは船用特性の 75 % にて極大値となった。総排出個数では負荷率が高い程高い値となったが、排出個数率では低負荷率ほど高い濃度となることが分かった。

船用ディーゼル機関から排出される PM は排気管内の排ガスにおいて個数濃度は粒径 200 nm 未満にピークを持つ分布であり、粒子の大部分が非常に小さい核で形成されていることが分かった。また、実験結果から、粒径 289 nm 未満において kWh あたり低負荷率時(発電機特性 負荷率 30 %)では  $6.8E10$  個/cm<sup>2</sup> の粒子が排出され、高負荷率(負荷率 100 %)では  $5.0E10$  個/cm<sup>2</sup> 程の粒子が排出されていることを明らかにした。実際船舶使用される船用機関は、船舶上部のファンネルから大気に放出(排気)される。大気に放出される際に、排ガスは風向きや風速によってどのような希釈状況であるかは明らかではなく、実験的にその再現も不可能ではあるが、外気温の環境での希釈が行われていることは明らかであり、排出直後に生成される粒子は多いと考えられる。さらには、2 次生成の粒子もあるため環境に与える影響は大きい。船用ディーゼル機関から排出される PM に関して低減装置(船用 DPF)の研究は盛んに行われているが、上述の内容から、大気へ放出する前に核生成と凝集を促進させるとともに、200 nm 未満の粒子も対象とした低減装置が必要であると考えられる。

船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーシオンおよび希釈トンネル希釈を行い排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布を計測を行い、ホットダイリユーシオンおよび希釈トンネルによる希釈時の粒径分布の計測を行った。また、計測した粒径分布から船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスとの比較を行った。希釈トンネルによる希釈排ガスでは SMPS とともに ELPI を用いることで SMPS の計測粒径範囲より大きい粒径の計測を実施するとともに、ホットダイリユーシオンによる粒径分布と比較することで、希釈トンネル希釈で生成される粒子の粒径範囲を確認した。その要約は以下の通りである。

- ・ 船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象にホットダイリユーシオンを行い SMPS によって粒径分布を計測した結果、負荷率 50 %、75 % とともに粒径 38nm をモード径とするモノモーダル分布であり、大部分の粒子が粒径 100nm 以下であることが分かった。また、重量濃度分布とした場合には、個数濃度の高い粒径 38 nm 付近とともに、粒径 100-400 nm

付近でも重量濃度の高い箇所があり、バイモーダルな分布である。

- ・ホットダイリューションによって同負荷率の船用2ストロークディーゼル機関の排ガスと船用4ストロークディーゼル機関の排ガスを比較すると、船用2ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質は粒径の小さい方にピークを持ち、ピーク濃度も高い事が分かった。kWhあたりの排出個数率も船用2ストロークディーゼル機関の排ガスの方が多いことが分かった。
- ・希釈トンネルによって希釈した排ガスは、希釈後排ガス温度および希釈率と同様な条件において、負荷率が高い程、モード径は小さくなるとともにピーク濃度は高くなる。ホットダイリューションによって計測した粒径分布と比較し、希釈トンネル内の粒子生成を確認した所、生成される粒子は大部分が100 nm以下である事が分かった。

船用2ストロークディーゼル機関の排ガス中のPMは、ホットダイリューションによってSMPSによる計測では、負荷率50%、75%ともモード径は等しく変化しないが、負荷率が高い程、排ガスの個数濃度は高くなる。また、船用4ストロークディーゼル機関の排ガスと比較した場合、船用2ストロークディーゼル機関から排出される個数濃度は高く、かつ小さい粒径がピーク濃度となる。フィルタの重量計測による既往の研究では、船用2ストロークディーゼル機関から排出されるPMのSOF分濃度が船用4ストロークディーゼル機関より高いことが報告されている。本研究においても、計測された大部分の粒子も100 nmであり、かつ、モード径が38 nmであり、希釈率の変化にそのピーク濃度が反応することから揮発性成分割合が高く、船用2ストロークディーゼル機関から排出されるPMは非常に小さい粒子が大部分であると言える。船用2ストロークディーゼル機関の排ガスでは、負荷率50%では $5.2 \times 10^{10}$  個/kWh、 $8.3 \times 10^{10}$  個/kWhの粒子状物質が排出されていることが分かった。実際の船舶においては、上述の船用4ストロークディーゼル機関の大気への放出時と同様に、外気温の環境での希釈が行われていることは明らかであり、排出直後に生成される粒子は多いと考えられる。

燃料油の違いが計測される粒径分布に及ぼす影響を確認するために、船用2ストロークディーゼル機関をHF0(Heavy Fuel Oil)を燃料油として船用特性の負荷率50%で運転し、粒径分布の計測を実施した。希釈はホットダイリューションおよび希釈トンネルと2次希釈器により行った。ホットダイリューションでは、SMPSによって計測を行い、希釈トンネルによる希釈ではSMPSとともにELPIによる計測を実施した。また、A重油による運転時の津負荷率の排ガスとの比較を実施した。その要約は以下の通りである。

- ・船用2ストロークディーゼル機関をHF0にて運転した排ガスを対象にホットダイリューションによる希釈排ガスをSMPSによって計測した粒径分布では、粒径の最も小さい粒径10 nmと70 nmにピークを持つ分布となり、粒径10 nm~20 nmに濃度が検出される。こ

のことより、HF0 による運転時の排ガスでは核生成が活発に発生し、かつ計測系において検出部である CPC に近い箇所においても核生成があると考えられる。

- ・ ホットダイリューションによる希釈排ガスを SMPS によって計測した粒径分布では、HF0 による運転時の排ガスと A 重油による運転時の排ガスを比較すると、個数濃度に大きな差は無いが、HF0 運転時の方がモード径は大きく、重量濃度が高いことが分かった。
- ・ 希釈トンネルによる希釈排ガスでは、A 重油による運転時の排ガスの方が個数濃度のピーク値は高い。希釈トンネル内の粒子生成状態では、粒径 40 nm-90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されたことが分かった。

船用 2 ストロークディーゼル機関を HF0 による運転を行った場合に排出される PM では、ホットダイリューションにより SMPS によって計測した粒径分布から、A 重油運転時より粒径の大きい範囲でピークとなるが、10 nm - 20 nm にも濃度が検出されるため、核生成される揮発性成分が多いことが明らかである。HF0 による運転時の排ガスと A 重油による運転時の排ガスを比較すると、個数濃度に大きな差は無いが、HF0 運転時の方がモード径は大きく、重量濃度が高いことが分かった。希釈トンネルによる希釈排ガスの粒径分布から、希釈トンネル内の粒子生成状態は、粒径 40 nm-90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されたことが分かった。



## 参考文献

- 1-1) 高石 龍夫, 沼田 明, 仲野 良治, 阪口勝彦, ディーゼル・ガスエンジンの高効率化への取組み, 三菱重工技報, Vol.45m No.1, 2008
- 1-2) 坂本 和彦, 古谷 圭一, 竹本 和彦, 寺部 本次, 大気汚染の変遷, 大気汚染学会誌, Vol.24, No.5-6, 1989
- 1-3) 瓦家 敏男, ディーゼル車の排ガス, 生活衛生, Vol.35, No.4, 1991
- 1-4) NIES RESEARCH BOOKLET, No.22, 2006
- 1-5) 岩井 和郎, 河端 美則, 宇田川 忠, 佐藤 秀隆, 林 裕造, 黒石 哲生, ディーゼル排出粒子成人肺癌リスク試験, 大気汚染学会誌, Vol.27, No.6, 2011
- 1-6) 嵯峨井 勝, 古山 昭子, 市瀬 孝道, ディーゼル排気微粒子 (DEP) のマウスへの気管内投与による喘息様病態の発現について, 大気汚染学会誌, Vol.28, No.4, 1993
- 1-7) Health effects of exposure to diesel exhaust particles., Annu Rev Pharmacol Toxicol., No.27, pp.279-300, 1987
- 1-8) 坂本 和彦, 粒子状物質による大気汚染の変遷と現状, 表面科学, Vol.36, No.3, 2015
- 1-9) 鈴木 忠男, ディーゼル排気粒子の生体影響, エアロゾル研究, Vol.15, No.3, 2001
- 1-10) Environmental Health Criteria 171: Diesel Fuel and Exhaust Emissions, WHO, 1996
- 1-11) Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emission, and Health Effects, Health Effects Institute, 1995
- 1-12) The Protocol of 1997 (MARPOL Annex VI)
- 1-13) 前田 和幸, 松下 博, 金岡 浩, 末次 昂之, 船舶から排出される NO<sub>x</sub> の低減方法, 日本船用機関学会誌, Vol.32, No.3, 1997

- 1-14) 前田 和幸, 安成 幹男, 日笠 純扶, 森下 晋一, 船用2サイクル機関における NO<sub>x</sub> の排出特性とその低減方法に関する一考察, 日本船用機関学会誌, Vol.28, No.1, 1993
- 1-15) 近藤 博美, 船用ディーゼル機関の NO<sub>x</sub> 変動因子の影響, 日本船用機関学会誌, Vol.34, No.2, 1999
- 1-16) Jakob Bucher, BBB, Germany, Turbocharging system for NO<sub>x</sub>-optimised medium-speed diesel engines with high mean effective pressure, CIMAC Congress 2007, Paper No.36, 2007
- 1-17) M. Ioannou, N. Alexandrakis, N. P. Kyrtatos, Individual Cylinder Ultra-fast NO Measurement for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2007, Paper No.13, 2007
- 1-18) 柴田 正仁, 船用ディーゼル機関の排気後処理について - IMO 3次規制に対応する SCR 技術, マリンエンジニアリング, Vol.45, No.2, 2010
- 1-19) 仁木 洋一, 平田 宏一, 岸 武行, 塚本 達郎, 市川 泰久, 新田 好古, 柳 東勲, 次元シミュレーションを用いた船用 SCR 装置の脱硝性能評価, マリンエンジニアリング, Vol.47, No.5, 2012
- 1-20) 前田 和幸, 清水 敦, 大野 裕一, 山西 大, 新濱 智広, 塚本 雅弘, 低酸素・高加湿給気による NO<sub>x</sub> の 80%低減, マリンエンジニアリング, Vol.48, No.3, 2013
- 1-21) H. K. Park, J. S. Ha, S. H. Ghal, B. S. Kim, K. H. An, Development of a Charge Air Moisturizer System for NO<sub>x</sub> Reduction of a Medium Speed Diesel Engine, CIMAC Congress 2007, Paper No.122, 2007
- 1-22) A. Shimizu, M. Yoshida, N. Konoshima, Development of large scale DME diesel power generation plant, NO<sub>x</sub> reduction technology by large amount of EGR and DME use SCR, CIMAC Congress 2007, Paper No.62, 2007
- 1-23) P. Kyrtatos, P. Obrecht, K. Boulouchos, Recent developments in the Understanding of the Potential of In-Cylinder NO<sub>x</sub> Reduction though Extreme Miller Valve Timing, CIMAC Congress 2013, Paper No.225, 2013

- 1-24) H. Tajima, Potential Investigation of PCCI Combustion as NO<sub>x</sub> Reduction Measure at Low-load Operation with Low-CN LCO Fuel, CIMAC Congress 2013, Paper No.250, 2013
- 1-25) M. Higashida, T. Nakamura, I. Onishi, K. Yoshizawa, H. Takata, T. Hosono, Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NO<sub>x</sub> Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine, CIMAC Congress 2013, Paper No.200, 2013
- 1-26) Higashida, M., Nagamachi, K., Toyoda, S., EXPERIMENTAL CHALLENGE OF ONBOARD WATER EMULSIFIED FUEL SYSTEM, ISME 2011, Paper-ISME552
- 1-27) K. Maeda, D. Yamanishi, H. Ohno, A. Shimizu, T. Niihama, M. Tsukamoto, Reduction of NO<sub>x</sub> Emission by 80% Using the Newly Developed System with a Polymer Membrane in Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.423, 2013
- 1-28) Sandip D. Shah and David R. Cocker III, A Fast Scanning Mobility Particle Spectrometer for Monitoring Transient Particle Size Distributions, *Aerosol Science and Technology*, 39:519–526, 2005
- 1-29) Birmili, W., Stratmann, F., Wiedensohler, A., Covert, D., Russell, L. M. and Berg, O. , Determination of Differential Mobility Analyzer Transfer Functions Using Identical Instruments in Series, *Aerosol Science and Technology* 27: 215-223, 1997
- 1-30) Reineking, A. and Porstendörfer, J. , Measurements of Particle Loss Functions in a Differential Mobility Analyzer (TSI, Model 3071) for Different Flow Rates. *Aerosol Science and Technology* 5, 483-486, 1986
- 1-31) Ristimäki, J., Virtanen, A., Marjamäki, M., Rostedt, A. & Keskinen, J., On-line measurement of size distribution and effective density of submicron particles. *Journal of Aerosol Science*, vol 33, 1541-1557, 2002
- 1-32) Virtanen, A., Ristimäki, J. & Keskinen, J., Method for Measuring Effective Density and Fractal Dimension of Aerosol Agglomerates. *Aerosol Science and Technology*, vol 38, 437-446, 2004

- 1-33) 田山経二郎, 船用大形 2 サイクル低速ディーゼル機関の技術系統化調査, 国立科学博物館, 技術の系統化調査報告 第 8 集, 2007
- 1-34) 佐藤一也, 4 サイクルディーゼル機関の技術系統化調査, 国立科学博物館, 技術の系統化調査報告 第 12 集, 2008
- 1-35) 鈴木孝, 20 世紀のエンジン史, 三樹書房, 2001
- 1-36) 古野啓二・那須敏行・勝見政芳・山下一彦・山本和裕, 大型船用 UEC ディーゼル機関の信頼性向上, 三菱重工技報, 第 34 巻, 第 4 号, 1997
- 1-37) 長谷川 静男, 船用ディーゼル機関教範, 成山堂書店, 1993
- 1-38) H. Sakabe, Y. Yamazaki, The latest developments and technologies of the UE engines, CIMAC Congress 2007, Paper No.43, 2007
- 1-39) Klaus Heim, Latest Developments of Wartsila Low-Speed Engines To Meet Current and Future Customer Demands, CIMAC Congress 2007, Paper No.115, 2007
- 1-40) T. S. Knudsen, C.-E. Egeberg, Design of the new two stroke engines from MAN Diesel A/S, CIMAC Congress 2007, Paper No.68, 2007
- 1-41) S. Kindt, State-of-the-art MAN B&W Two-stroke Super-long-stroke Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.71, 2013
- 1-42) Henrik CHRISTENSEN, Michael Finch PEDERSEN, Peter SKJOLDAGER, Marco FAM, Tier III SCR for Large 2-Stroke MAN B&W Diesel Engines, ISME 2011, A5-3
- 1-43) 自動車排出ナノ粒子および DEP の測定と生体影響評価, エヌ・ティー・エス, 2005
- 1-44) ナノサイズ粒子問題のリスク管理, Engine Technology, Vol.7, No.1, 2005

- 1-45) 微小粒子状物質環境基準専門委員会報告, 中央環境審議会 大気環境部会 環境省, 2010
- 1-46) CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE MARINE COMPRESSION-IGNITION ENGINES AND VESSELS, US EPA
- 1-47) 平成 18 年度 船舶起源の粒子状物質(PM)の環境影響に関する調査研究報告書, 海洋政策研究財団, 2007
- 1-48) 平成 20 年 4 月 微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書, 環境省, 2008
- 1-49) J. H. Johnson , S. T. Bagley , L. D. Gratz , D. G. Leddy, A review of diesel particulate control technology and emission effects, SAE Paper, No.940233, 1994
- 1-50) D. Kittelson, Diesel Exhaust Particle Size : Measurement Issues and Trend, SAE Paper, No.980525, 1998
- 1-51) Abdul-Khalek, I., Kittelson, D., and Brear, F., The Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurements, SAE Technical Paper No. 1142, 1999
- 1-52) 大橋 厚人, 井亀 優, 石村 恵以子, 西尾 澄人, 高木 正英, 徐 芝徳, 排気希釈システム内のサルフェート損失の定量評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 45 巻, 第 3 号, pp.415-420, 2010
- 1-53) 大橋 厚人, 井亀 優, 石村 恵以子, 希釈トンネル内の沈着が粒子状物質計測に及ぼす影響について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 巻, 第 1 号, pp.111-116, 2012
- 1-54) 前田 和幸, 高崎 講二, 津田 稔, 阿部 清三, 希釈率が PM 計測値に及ぼす影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 38 巻, 第 8 号, pp.509-513, 2003
- 1-55) K. Maeda, K. Takasaki, K. Masuda, M. Tsuda, M. Yasunari, Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2004, Paper No.107, 2004

- 1-56) 高崎 講二, 前田 和幸, ディーゼル機関の大きさと燃料の種類が排気エミッションに及ぼす影響, 日本船用機関学会誌, Vol.33, No.3, pp.226-233, 1998
- 1-57) 前田和幸, 船舶におけるPMの計測と生成機構, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.42, pp.23-30, 2007
- 1-58) 河合英直, Rahaman Montajir, 後藤雄一, 小高松男, エンジン排気管内におけるナノ粒子の挙動に関する研究, 交通安全環境研究所報告, 第6号, 2005
- 1-59) Imad Abdul-Khalek, David Kittelson, Fred Brear, The Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurements, SAE paper, 1999-01-1142
- 1-60) Imad A. Khalek, Matt Spears, William Charmley, Particle Size Distribution from a Heavy-Duty Diesel Engine: Steady-State and Transient Emission Measurement Using Two Dilution Systems and Two Fuels, SAE paper, 2003-01-0285
- 1-61) Kaspera. S et.al., Particulate Emissions from a Low-Speed Marine Diesel Engine, Aerosol Science and Technology, 41:1, pp24-32, 2007
- 1-62) 塚本達郎, 三好朋宏, 大江賢二, 岡田博, 船用ディーゼル機関の微粒子排出特性 -4 ストローク高速機関と2 ストローク低速機関の比較, 日本船用機関学会誌, 第33巻, 第4号, pp.306-310, 1998
- 1-63) 塚本達郎, 船用ディーゼル機関におけるPM排出特性, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第41巻, 第3号, pp.71-77, 2006
- 1-64) G. Hellén, J. Ristimäki, Particulate emissions of residual fuel operated diesel engines – background, particulate size distributions, measurement methods & potential abatement measures, CIMAC Congress 2007, Paper No.56, 2007
- 2-1) ISO 8178-1 Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996

- 2-2) JIS B8008-1(往復動内燃機関-排気排出物測定-第1部：ガス状排出物及び粒子状排出物の台上測定), 2009
- 2-3) 前田和幸, 高崎講二, 田中辰彦, 津田 稔, 上野 修, 船舶における PM の計測, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 38(1), pp.28-35, 2003
- 2-4) 大橋厚人, 徐 芝徳, 佐々木秀次, 塚本達郎, PM 濃度による分流希釈システムの比較, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 49 巻, 第 1 号, pp.126-131, 2014
- 2-5) 塚本達郎, 船舶からの PM 排出実態について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 42(1), pp.31-34, 2007
- 2-6) 土屋賢次, 山崎均, PM 計測におけるマイクロトンネルと全量希釈トンネルの比較, 自動車研究, 25 巻, 5 号
- 2-7) UN/ECE Regulation No. 83
- 3-1) PISCO 社 調湿機器 総合カタログ
- 3-2) T. Johnson, Thermal Dilution and Conditioning, TSI, 2009
- 3-3) TSI 社 SMPS Model3936 Products guide
- 4-1) 佐々木秀次, 小野諭史, 望月貴行, 塚本達郎, 船用4ストロークディーゼル機関から排出される PM 粒径分布の計測, 日本マリンエンジニアリング学会第 81 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.77-78, 2011
- 4-2) 佐々木秀次, 塚本達郎, 船用ディーゼル機関から排出される PM 粒径分布計測-揮発性成分の核生成が計測結果に与える影響, 日本マリンエンジニアリング学会 83 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集, pp.31-32, 2013
- 4-3) 佐々木秀次, 塚本達郎, 船用4ストロークディーゼル機関から排出される PM の粒径分布-希釈率と希釈空気温度の影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 巻, 第 4 号, pp.151-157, 2012

- 5-1) Y. Xiao, P. Zhou, UK, Zhang Wenping, Liu Zhigang, A comparative study of mixed oxides catalysts to improve SCR efficiency at low temperature, CIMAC Congress 2007, Paper No.95, 2007
- 5-2) A. Shimizu, M. Yoshida, N. Konoshima, A. Todoroki, Development of large scale DME diesel power generation plant – NOX reduction technology by large amount of EGR & DME use SCR, CIMAC Congress 2007, Paper No.62, 2007
- 5-3) P. van Houten, M. Boons, Chevron Oronite, Netherlands, J. Fogarty, M. Brandmair, M. Ziesmann, J. McCarney, P. Anderson, Impact of Marine Lubricant Additives on SCR Catalyst Performance, CIMAC Congress 2013, Paper No.108, 2013
- 5-4) N. Soikkeli, M. Lehtikoinen, K. Ronnback, Design Aspects of SCR Systems for HFO Fired Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.179, 2013
- 5-5) H. Christensen, Continuous Development of Tier III SCR for Large 2-Stroke Diesel Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.178, 2013
- 5-6) T. Fujibayashi, S. Baba, H. Tanaka, Development of Marine SCR System for Large Two-Stroke Diesel Engines Complying with IMO NOx Tier III, CIMAC Congress 2013, Paper No.29, 2013
- 5-7) R. Bank, B. Buchholz, FVTR, Germany, H. Harndorf, R. Rabe, U. Etzien, High-Pressure SCR at Large Diesel Engines for Reliable NOx-Reduction & Compliance with IMO Tier III Standards, CIMAC Congress 2013, Paper No.188, 2013
- 5-8) 平田 宏一, 仁木 洋一, 船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR 研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 46 巻, 第 6 号, pp.817-824, 2011
- 5-9) 佐々木 耕, Kjeld Aabo, MAN B&W 型低速機関における SCR の運転実績と新しい NOx 排出低減技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 43 巻, 第 3 号, pp.382-389, 2008



- 5-10) F. Millo, M. Gianoglio Bernardi, E. Servetto, D. Delneri, Computational Analysis of Different Internal & External EGR Systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine, CIMAC Congress 2013, Paper No.74, 2013
- 5-11) C. Stoeber-Schmidt, Computational Analysis of Switching Strategies for a Medium-Speed Diesel Engine EGR Concept Between IMO Tier II & Tier III Operation Modes, CIMAC Congress 2013, Paper No.232, 2013
- 5-12) J. Kaltoft, M. Preem, Development of Integrated EGR System for Two-Stroke Diesel Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.219, 2013
- 5-13) M. Higashida, T. Nakamura, I. Onishi, K. Yoshizawa, H. Takata, T. Hosono, Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NOx Regulation Tier 3 for Two-Stroke Diesel Engine, CIMAC Congress 2013, Paper No.200, 2013
- 5-14) 佐々木秀次, 塚本達郎, 古堅宗勝, 牧野義, 朱洪潤, 静電サイクロン方式集塵装置による船用4ストロークディーゼル機関のPM低減(粒径分布の計測), 日本機械学会論文集B編, Vol.77, No.775, pp.860-866, 2011
- 5-15) 畑中 義博, 川澄 宏徳, 佐々木 秀次, 塚本 達郎, 福岡 養祐, 宮田 周一郎, 竹屋 昭宏, 船用4ストロークディーゼル機関用DPFの誘導加熱システムの研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第48巻, 第1号, pp.124-129, 2013
- 5-16) 畑中 義博, 高島 洸平, 木船 弘康, 高周波誘導加熱利用船用ディーゼル微細粒子フィルタの開発, 電気学会論文誌D, Vol.130, No.10, 2010
- 5-17) 徐 芝徳, 古堅 宗勝, 牧野 義, 塚本 達郎, 船用ディーゼル機関の粒子状物質除去装置の開発 - 静電サイクロン方式DPFのPM捕集特性, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第44巻, 第2号, pp.304-309, 2009
- 5-18) 瑞慶覧章朝, 乾 貴誌, 川上一美, 江原由泰, 船舶用電気集塵装置における再飛散抑制と帯電粒子の挙動の3次元シミュレーション, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第48巻, 第4号, pp.99-104, 2013

- 5-19) M. Tsuda, K. Maeda, D. Yamanishi, Development of DPF [Diesel Particulate Filter] with a Regenerator for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2013, Paper No.255, 2013
- 5-20) M. Furugen, Furugen and Makino lab. inc., Japan, H. Sasaki, T. Tsukamoto, Newly Developed Diesel Particulate Filter for Marine Diesel Engine – Electrostatic Cyclone DPF, CIMAC Congress 2013, Paper No.137, 2013
- 5-21) D. Yulong, H. Fuchen, Z. Suying, W. Fengshuang, M. Lei, Study of DPF Technology to Meet China IV Emissions Regulations, CIMAC Congress 2013, Paper No.386, 2013
- 5-22) Toshihito Kato, Shouichi Ibaragi, Katsunori Matsuoka, Kanehisa Imai, Kazutoshi Sato, Development of Diesel Particulate Filter Applying Non-thermal Plasma Technology for Onboard Diesel Generators, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第45巻, 特集号, pp.962-967, 2010
- 6-1) 佐々木秀次, 塚本達郎, 大橋厚人, 徐芝徳, 石村恵以子, 井亀優, 船用ディーゼル機関から排出される PM 計測に関する研究-(その 2) PM 粒径分布計測による分流希釈システムの比較, 日本マリンエンジニアリング学会第 82 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.77-78, 2012
- 7-1) 三菱重工業 船用 2 ストロークディーゼル機関 LS-II シリーズ 取扱説明書 運転構造編

## 謝 辞

終わりに、本論文の作成に際して、適切なお助言を頂きました東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 教授 津江光洋先生、同工学系研究科航空宇宙工学専攻 教授 小紫公也先生、同工学系研究科航空宇宙工学専攻 特任准教授 岡井敬一先生、同工学系研究科航空宇宙工学専攻 准教授 中谷辰爾先生および、同工学系研究科化学システム工学専攻 教授 土橋 律先生の各先生方に厚く感謝の意を表しますとともに心より御礼申し上げます。

また、本論文の研究は、東京海洋大学海洋工学部内燃機関研究室で行われたものであり、ご指導下さいました、東京海洋大学大学院海洋工学系電子機械工学部門 教授 塚本達郎先生に厚く感謝の意を表しますとともに心より御礼申し上げます。