

# 低 PM 車から排出される粒子状物質の安定計測手法に関する検討

- 最新フィルター重量法と個数計測法の比較 -

環境研究領域

山田 裕之

塚本 雄次郎

後藤 雄一

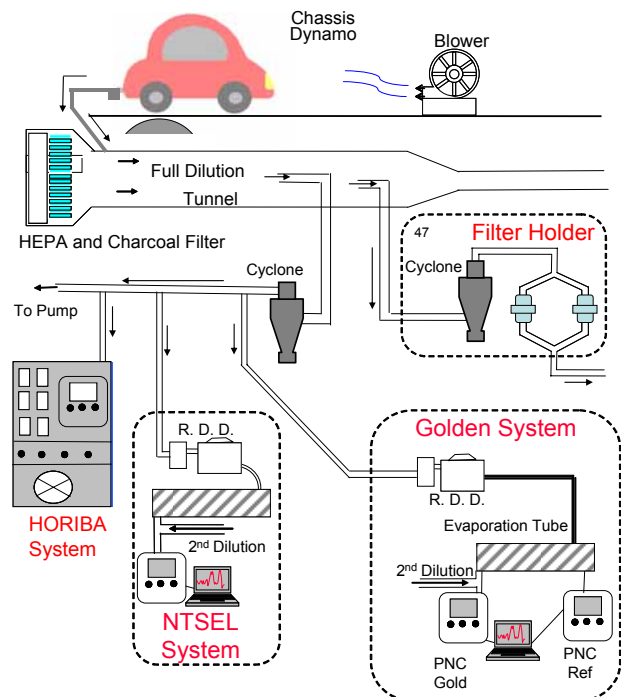
## 1. 所論

UN-GRPE Particulate Measurement Program (以下 PMP)は UNECE/GRPE に属し,英国,ドイツ,スウェーデン,フランス各国政府の強い協力により立ち上げられ,後に日本,韓国,スイスが加わった.この組織の目的は,従来自動車排出ガス中の PM 規制に用いられてきた重量法に代わる新たな計測法の開発である. PMP ではフェーズ 1 で PM の新計測方法の調査,フェーズ 2 ではそれらの評価及びフェーズ 3 で行われるインターラボ試験 (Inter-Laboratory Correlation Exercise 以下 ILCE) で実施する計測方法の決定,が行われた.

ILCE は, Commission's Joint Research Centre のなかで Vehicle Emission Laboratory が取りまとめとなり,同研究所, Ricardo (イギリス), AVL-MTC (スウェーデン), RWTÜV (ドイツ), Aristotle University (ギリシャ), Shell Global Solutions (イギリス) UTAC (フランス), 交通安全環境研究所 (日本) NMVERL (韓国)で行われた. ILCE の内容としては,統一測定器(Golden Particle Measurement System 以下 GPMS) による粒子数計測に加え,最新の重量法に準拠する測定(Modified US2007 method)もすべての計測拠点で実施した. 排出ガス基準車(Golden Vehicle 以下 GV)を採用し,すべての計測拠点での計測車両とした. GV はディーゼル機関と Diesel Particulate Filter(DPF)を有し, EURO IV 規制に適合している. また ILCE 試験を統括する管理者(Golden Engineer) が各拠点での試験方法,結果を管理する. 本報告では,日本の交通安全環境研究所で 2005 年 9 月に行われた ILCE の結果から, PMP の主題である粒子計測法の再現性(repeatability and reproducibility)に関して最新のフィルター重量法と比較した結果について報告する.

## 2. 実験方法

図 1 に本実験の概略図を示す. 一次希釈装置は Regulation83<sup>1)</sup>の要求事項を満たす全量排気ガス希釈トンネル(以下トンネル)を使用した. トンネル内のガス流量は標準状態で 40 m<sup>3</sup>/min とした. 今回の ILCE の推奨トンネル条件が,幅広く使用されている 12 inch 径のトンネルにおいて 12m<sup>3</sup>/min であるのに対し,今回使用したトンネルの径が 18 inch であるため, ILCE 実験手順に従い,トンネル内滞留時間を推奨条件に合わせた結果である. そのため,トンネルでの希釈率は 63 程度であった. 希釈ガスは温度 25 ,湿度 50 %に空調管理された実験室内から採取され,チャコールフィルター,HEPA フィルターを経てトンネル内に導入される.



R. D. D. : Rotary Disc Dilutor

Fig. 1 Experimental apparatus.

本実験での計測項目は、規制ガス、GPMS および NTSEL 粒子計測システムさらには掘場粒子計測システム(以下掘場システム)を用いた粒子計測、US2007 規制相当のフィルター重量法による PM 計測である。

重量計測用フィルターに導入されるプローブには 50%カットオフ点が 2.5 μm のサイクロン分級器が設置されており、それ以上の粒径の粒子は除去される。この分級器及び下流に設置されているフィルターホルダーは図 1 のように恒温槽内に設置されており、試験中は 47 ±5 に保たれる。試験に用いるフィルターは、試験開始 1 日以上前に温度 295K、湿度 45% に保たれた秤量チャンバーで重量を安定化させた後秤量し、試験を実施する。試験終了後フィルターは、同じ秤量チャンバーで 1 日以上放置した後、秤量される。試験で用いた秤は 0.1μg の分解能をもつ。フィルターは現在の PM 規制に用いられている TX40 フィルターを使用した。このフィルター材質以外は US2007 重量法に準拠した計測法である。

ILCE の標準粒子計測装置である GPMS では、サンプリングされたガスはフィルター重量法で用いるサイクロンと同一仕様のものを用いて分級される。その後、rotary disc dilutor を用いた一次希釈装置でサンプルガスは 150 に加熱され、同一温度に過熱した空気希釈される。その後 300 に保たれた evaporation tube を通過させ、さらに 2 段目の希釈を常温の空気で行うことにより、サンプルガス温度を低下させる。このような加熱 2 段希釈により、蒸発性粒子は気化するため、固体粒子のみの検出が可能である。1 段目の希釈率は試験車により変更し、2 段目の希釈の希釈比は 9.5 に固定した。粒子数計測には 25 nm 以上の粒径の粒子数を計測する仕様の凝集粒子カウンタを用いた。粒子カウンタは、2 次希釈後に計測する GOLD カウンタと、一次希釈装置下流からサンプルする REF カウンタを使用した。結果は GOLD カウンタから得られたもののみを使用した。

NTSEL 粒子計測システムは GPMS と同じ構成であり、各構成機器の機差による粒子計測結果への影響を確認するために計測が行われた。GPMS との違いは 2 点あり、1 点目は REF カウンタが存在しないこと、そして 2 点目は 2 次希釈を、マスフローコントローラを用いて制御していることである。

掘場システムは ILCE の粒子計測方法に準拠して設計された粒子計測装置である。ただし、用いた 1 次希

釈部、加熱部等の構成部品は GPMS と異なり、掘場が独自に開発した部品が使用されている。最も異なるのは、1 次希釈方法であり、GPMS では一時期尺装置として rotary disc dilutor を使用しているのに対し、掘場システムでは ejector 方式が用いられている。

運転モードは都市走行モード(780 秒)、高速走行モード(最高 120km/h、400 秒)からなる New European Driving Cycle (NEDC)を用いた。

試験車両は GV に加え 2 台、合計 3 台を用いた。GV はコモンレール式直噴エンジンを搭載しており、EURO IV 規制に適合した DPF を搭載している。そのほかにはガソリン直噴式エンジンを搭載し NOx 吸蔵還元型触媒を装備している JV-1、2 リットルインタークーラターボコモンレール式直接噴射ディーゼルエンジンを搭載し DPF を備える JV-2 を使用した。これらの車両の主要諸元を図 1 に示す。

Table 1 Vehicle specifications.

Name	Golden Vehicle	JV-1	JV-2
Transmission Type	6speed manual	A/T	5speed manual
Engine Type	DI, Comon Rail Diesel + Inter Cooler Turbo +DPF	Gasoline Direct Injection	DI, Comon Rail Diesel + Inter Cooler Turbo +DPF,
Displacement	1997cc 4cylinder	2998cc V6	1998cc 4cylinder
Market	EU(EURO IV)	JP(25% reduction from 2000 regulation)	JP(2003)

### 3. 結果

#### 3.1. 規制ガス

NEDC でのテストにおける規制ガスの結果を図 2 に示す。3 つの車両すべてにおいて分散は非常に小さいため、再現性は良い。この結果から各車両の試験毎の状態、制御等に差異はほとんど無く、後述するフィルター捕集法、粒子数計測法で議論するばつきは、各計測法に起因する誤差であり、各車両からの排出は安定しているものと考えられる。今回の試験での GV から排出される規制物質は ILCE の一環として交通安全環境研究所の試験の前に実施された JRC での結果と CO 以外はほぼ同等であった。CO の排出量は JRC での結果と比べ若干増加した値となった。

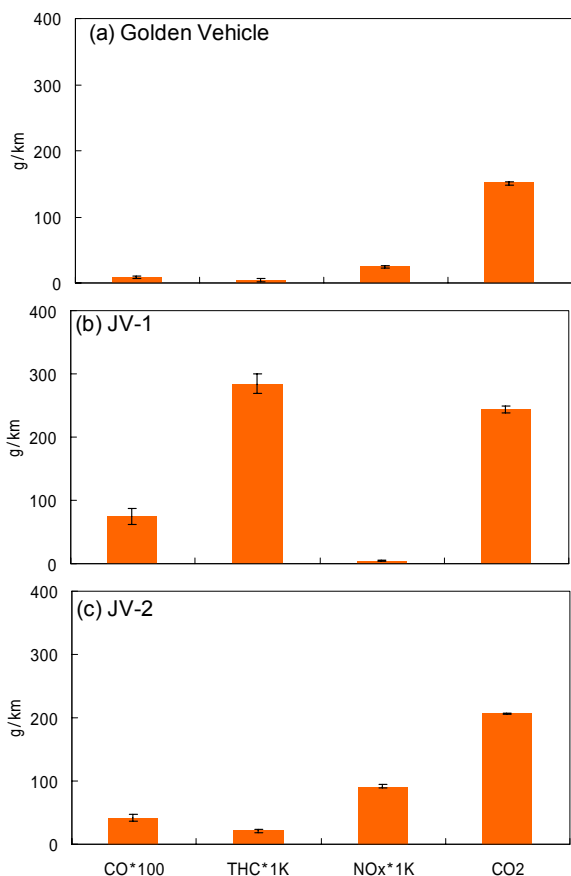


Fig. 2 Results of exhaust gas emissions of regulated gas with golden vehicle, JV-1 and JV-2.

### 3.2. フィルター重量法

NEDC の試験における 3 車両からの PM 排出量および変動係数を図 3 に示す。すべてのデータは ILCE の測定基準で定められている  $\pm 2$  以内のばらつきに収まっている。ただし GV 及び JV-2 の変動係数は比較的大きな値となっている。

図 4 には各試験前後でのフィルターの重量増加量を示す。これをみると今回のトンネル条件では、GV 及び JV-2 は PM の排出量が非常に少なく、 $10 \mu\text{g}$  程度である。つまり、DPF 付小型ディーゼル車は PM 排出量が非常に低いため、高い変動係数が観測された。一方 JV-1 ではフィルターに捕集される PM の量が 1 テスト当たり  $200 \mu\text{g}$  程度と大きく、この程度の捕集量の場合はフィルター重量法でも安定した計測が可能であるといえる。したがって DPF 付小型ディーゼル車の計測を行う場合においては変動係数を改善するために、トンネルの諸条件を変更することにより、フィルター捕集量を増加させる必要がある。

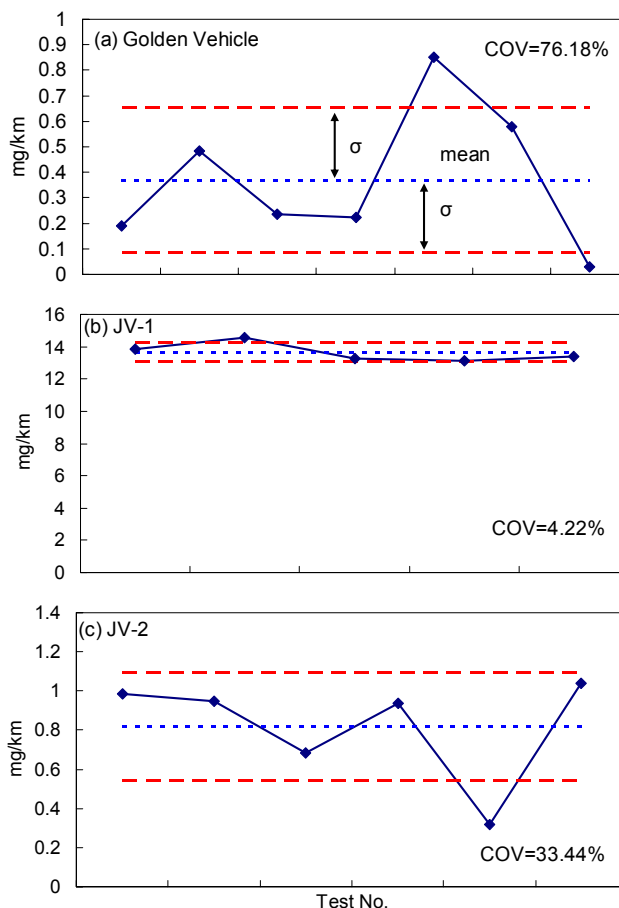


Fig. 3 PM emissions, mean values and dispersions using modified US2007 filter weighing method with golden vehicle, JV-1 and JV-2.

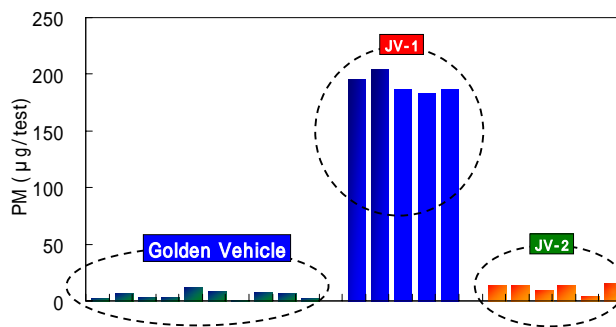


Fig. 4 Amounts of filter weight increase during the tests.

### 3.3. 粒子数計測法(GPMS)

図 5 には NEDC 試験トータルでの粒子数および変動係数をすべての車両に関して示す。GV 及び JV-1 では変動係数は約 10% である。これはつまり、GPMS による試験結果はフィルター重量法に比べより再現

性を示しているということになる。JV-2 においては変動係数がフィルター重量法とくらべて若干高くなっている。これは JV-2 の試験において DPF の再生が頻繁に起こったため、DPF の状態がテスト毎に異なっていたことに起因すると思われる。

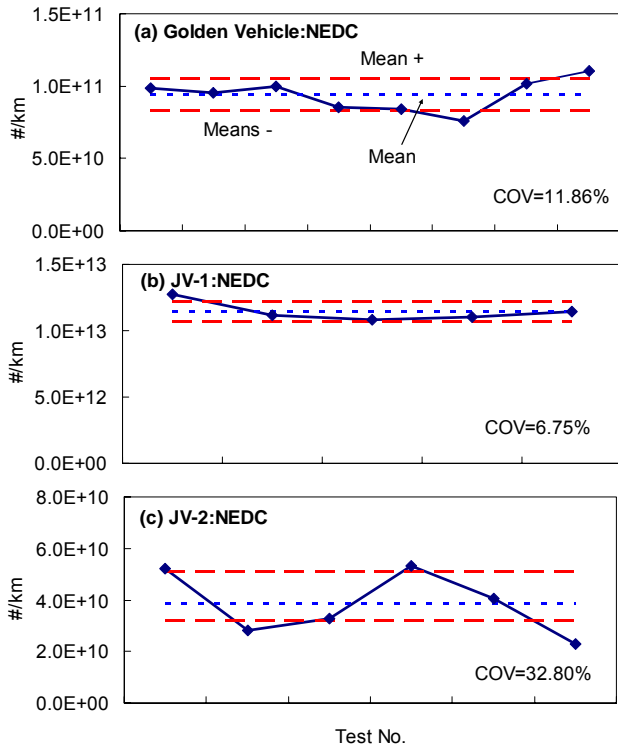


Fig. 5 Total numbers, mean value and dispersions using GPMS with golden vehicle, JV-1 and JV-2.

フィルター重量法と GPMS による粒子数計測における変動係数を図 6 にまとめる。前記のように全体的に変動係数は粒子数計測のほうが安定している。

### 3.4. 粒子数計測の再現性

ここでは今回の試験で使用した GPMS 及び NTSEL システム、堀場システムの結果を比較することにより、PMP 推奨粒子評価方法に準拠した各実験装置での測定誤差について述べる。

図 7 には GPMS での NEDC トータルの粒子数を横軸にとり、その試験での NTSEL システム及び堀場システムの測定により得られた粒子数を縦軸に示す。これをみると、それぞれの結果の相関は非常に強いことがわかる。また、堀場システムは若干粒子数を低めに見積もる傾向が確認できるが、これは一次希釈に用いる原理の違いによるものと考えられる。NTSEL シス

テムの GPMS に対する相関係数は 0.98，また堀場システムの GPMS に対する相関係数は 0.99 であった。

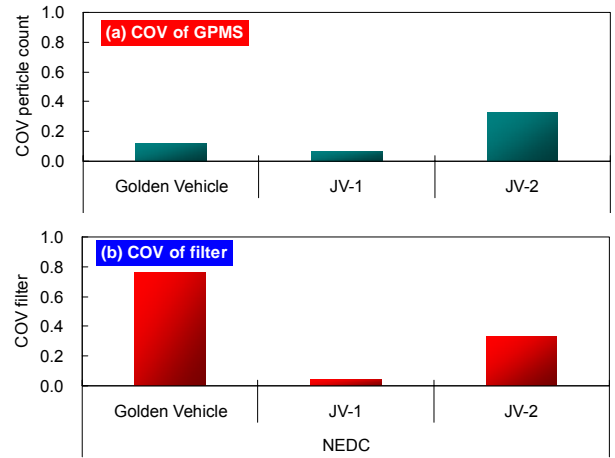


Fig. 6 Comparisons of COV between number counting by GPMS and filter weighing method

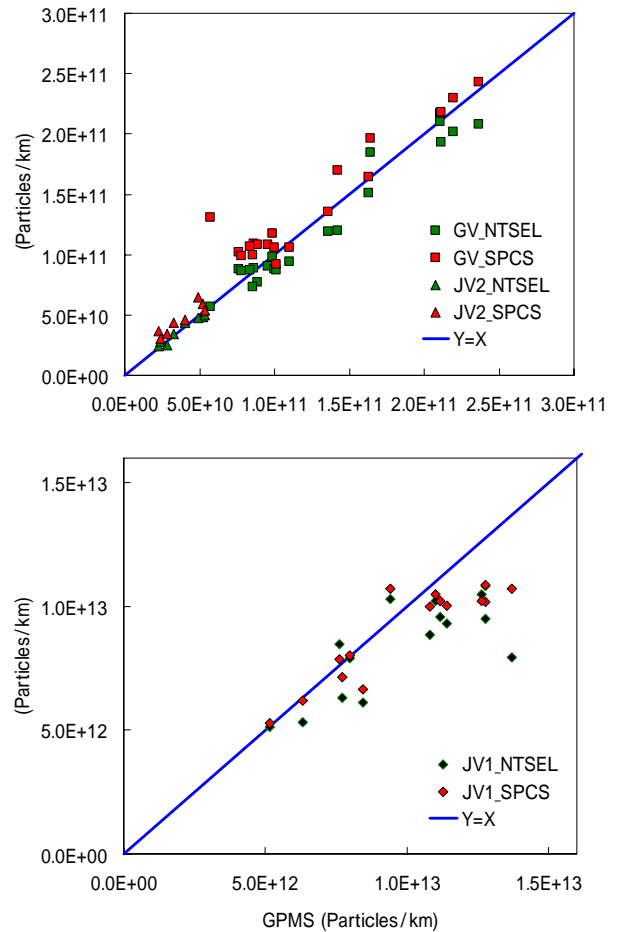


Fig. 7 Total number of NTSEL system and Horiba system as a function of that of GPMS.

Table 2 Comparisons of number counting results between GPMS, NTSEL system and SPCS.

Golden Vehicle			
	GPMS#/km	NTSEL#/km	SPCS#/km
Number of test	8	8	8
$\sigma$	1.11E+10	7.20E+09	7.47E+09
Mean	9.39E+10	8.84E+10	1.05E+11
COV(%)	11.9	8.2	7.1

JV-1			
	GPMS#/km	NTSEL#/km	SPCS#/km
Number of test	5	5	5
$\sigma$	7.72E+11	5.03E+11	3.66E+11
Mean	1.14E+13	9.49E+12	1.03E+13
COV(%)	6.75	5.30	3.54

JV-2			
	GPMS#/km	NTSEL#/km	SPCS#/km
Number of test	6	6	6
$\sigma$	1.26E+10	1.14E+10	9.64E+09
Mean	3.83E+10	3.76E+10	4.55E+10
COV(%)	32.80	30.27	21.18

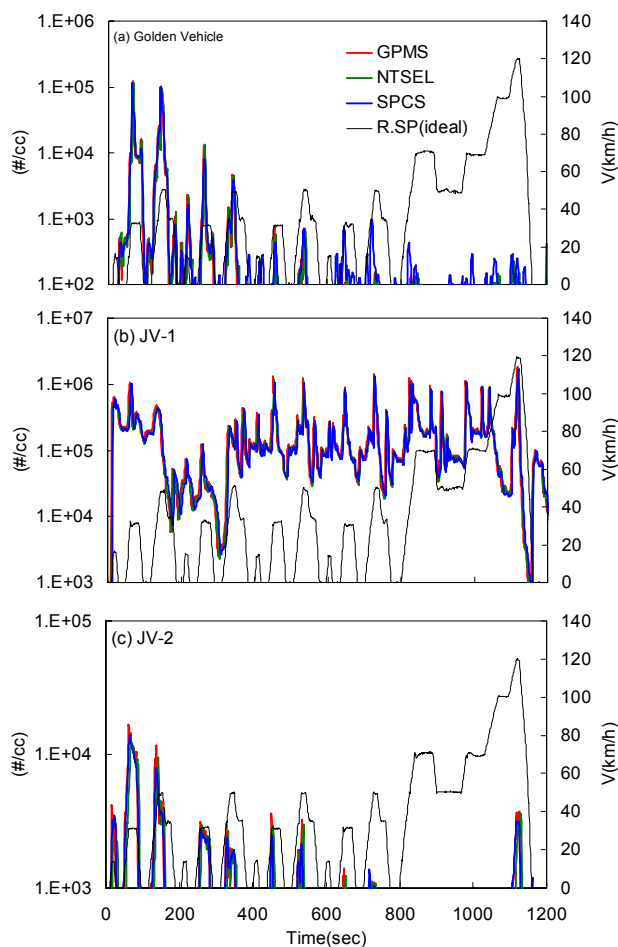


Fig. 8 Typical examples of Particle concentration after revisions of dilution factor as a functions of time.

また、表2にはGPMS, NTSELシステム, 堀場システムそれぞれにより得られた平均粒子排出量, 分散, 変動係数を各車両について示す. 上記のように堀場システムでの計測結果は他の粒子計測システムと比較し若干低めの値が出るが, 変動係数は最も低くなっている.

図8には各測定装置を用いて計測したリアルタイム粒子排出量をそれぞれの車両ごとに示す. この結果を見ると, 粒子排出のピーク位置, ピークの値を含めて3つの計測方法は非常によく一致している. 以上のことより, PMPが定めるILCE粒子計測手法に準拠した計測手法では計測装置間のばらつきは殆ど観測されず, 非常に高いreproducibilityを示す.

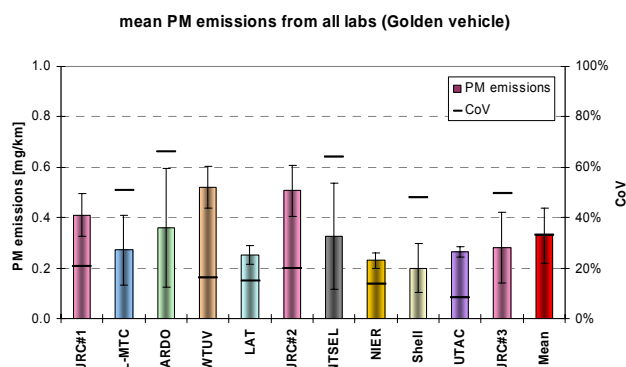


Fig. 9 Mean particulate matter (PM) emissions for the golden vehicle (Au-vehicle).

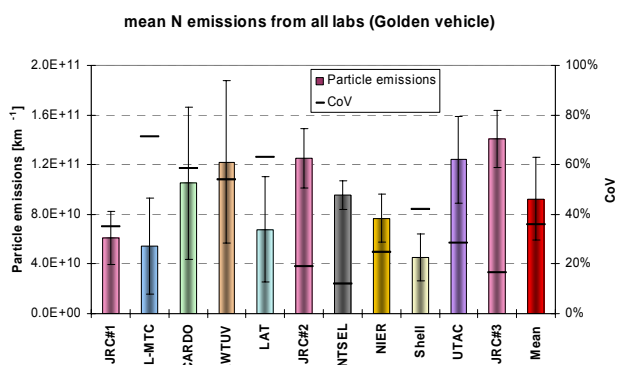


Fig.10 Mean particle number (N) emissions for the golden vehicle (Au-vehicle).

### 3.5. Light duty ILCE 結果

図9にILCEの最終報告<sup>2)</sup>に記載された各国でのGVにおけるPM重量法測定結果を, 図10に粒子数



計測法の結果を示す。ILCE 全体としては重量法，粒子数計測法双方とも変動係数はほぼ同等となった。そのなかで交通研(NTSEL)の結果は，重量法，粒子数計測法双方とも平均値に近い結果となった。

変動係数に注目すると，交通研の結果はフィルター重量法では2番目に大きな値，粒子数計測法では最も小さな値と，非常に特徴的な結果となった。この原因としては，前記のように交通研での実験ではトンネルの条件が異なることに起因すると考えられる。DPF付ディーゼル車からのPM排出量が測定限界付近の重量法では，フィルター捕集量の低下がフィルターに付着するPM量の減少をもたらす，その結果として測定精度が大幅に低下した。一方で，測定限界に余裕がある粒子数計測法では，絶対値低下による精度悪化は起こらず，逆に粒子濃度の減少が測定誤差要因であるトンネル壁面での粒子付着を抑止したため，計測安定性が向上したと考えられる。

### 3.6. フィルター重量法精度向上の可能性

前記の今回のILCEで用いたトンネル条件では，DPF付ディーゼル車をフィルター重量法で計測する際に変動係数が大きな値を示した。これは試験前後のフィルター重量変化量が非常に微小なことに起因すると考えられる。したがって，トンネル希釈率を低下させた場合のフィルター捕集量の増加が，変動係数に与える影響の評価を行った。

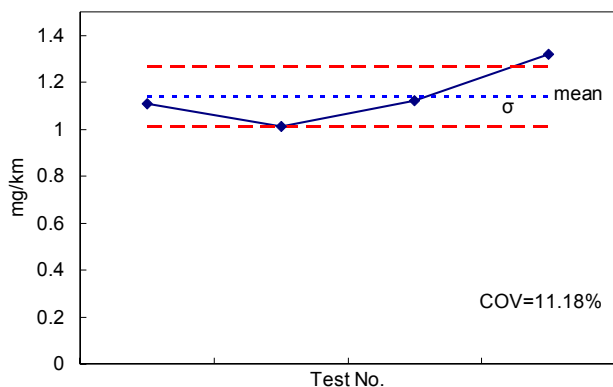


Fig. 11 Results of PM emissions, mean value and dispersions with JV-2. Tunnel flow rate was set to 20 m<sup>3</sup>/min.

図 11 には，トンネル流量を 20 m<sup>3</sup>/min の条件で JV-2 から計測したフィルター法の結果を示す。この際，希釈率は 36 程度であった。また，トンネル流速

を 20 m<sup>3</sup>/min とする一方で，フィルターホルダーへのサンプル流速は前記の条件と同様とした。図 3 に示されるトンネル流量 40 m<sup>3</sup>/min の結果と比較すると，平均値は若干増加したが，変動係数が 11.18%と大きく改善されている。したがって，フィルターに導入される排気流量を増加させることによるフィルター重量増加が，重量法の安定性向上に大きく貢献する。

## 4. 結論

GRPE, PMP の活動の一環として，PMP 推奨粒子数計測法と最新のフィルター重量法である Modified US2007 法を用いて，双方の再現性を確認した。その結果，PM 排出量の高いガソリン直噴機関を搭載した車両では同等の再現性を確認した。一方 PM 排出量の少ない DPF 付ディーゼル車では，今回のトンネル条件では重量法の再現性は著しく悪化したが，粒子数計測法ではそれほどの悪化は確認されなかった。

PMP 推奨粒子数計測法に準拠した 3 台の計測装置により計測した結果，各計測装置からの結果は相関が高く，希釈原理，計測装置個体差に由来する差異は観測されなかった。

ILCE の結果において，交通研の結果は量的には全体の平均値に近い値となった。変動係数は重量法で非常に高い一方，粒子数計測法では最も少ない値となった。その原因として，他の研究機関と比較し高く設定した希釈率が，測定限界の高い重量法では計測精度の低下を招くが，粒子数計測ではトンネル壁面付着等の減少により精度が向上したと考えられる。

フィルターに導入される排気ガス流量を増加させることによるフィルター捕集量増加が，重量法の計測安定性を大きく向上させることが，トンネル流量を変更した試験により確認された。

重量法と粒子数測定法では，計測対象が本質的に異なるため，粒子数計測を様々な場面に適応する際は，この違いに十分留意する必要がある。

## 参考文献

1. R83 - Working Document 6/Rev. 1, Draft UN Working documents.
2. Working paper No. GRPE-PMP-17-3 (17th PMP Working Group meeting, Ispra 12th September 2006)