

作業環境中の粉じん測定と ばく露対策

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所
作業環境研究グループ 山田 丸

空気

窒素(78%)

酸素(21%)

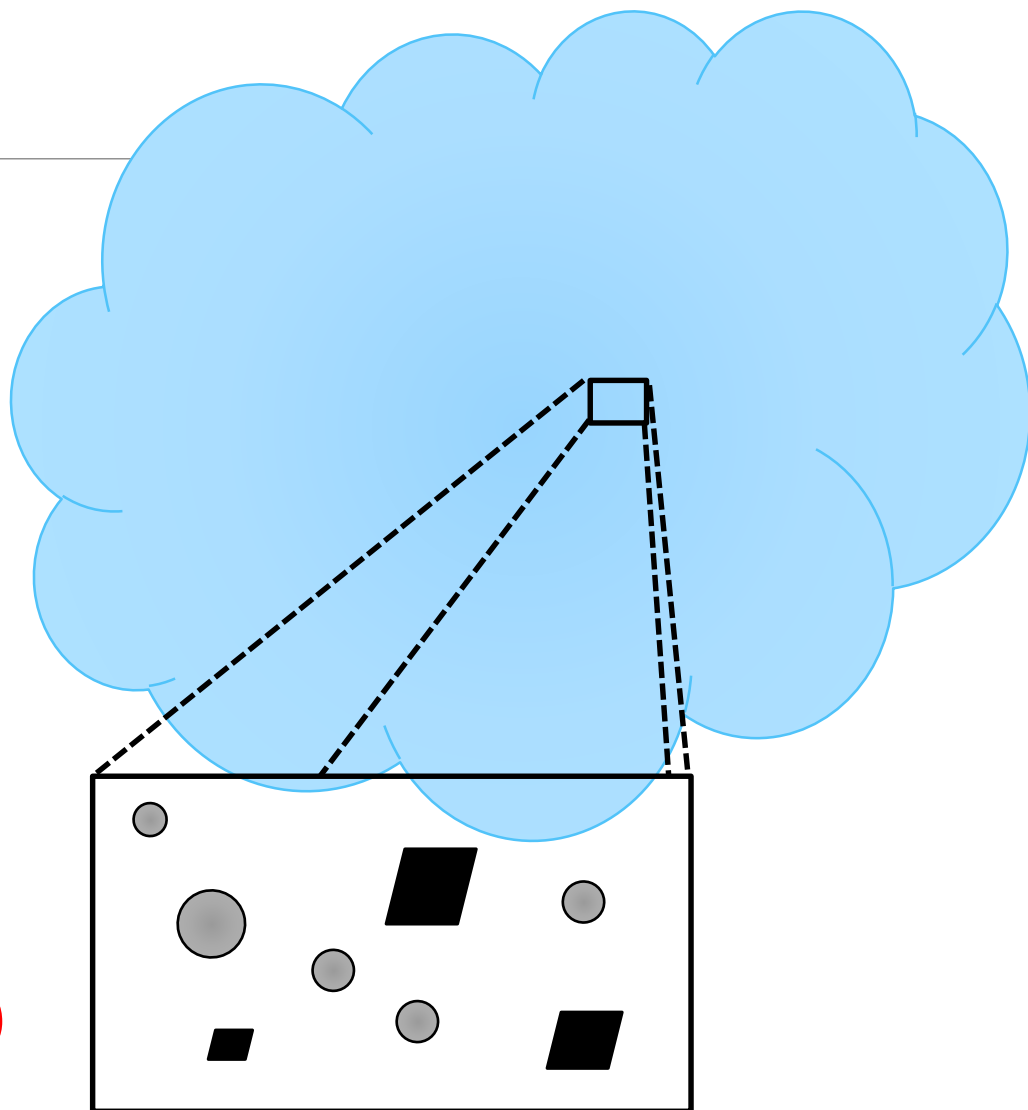
アルゴン、二酸化炭素、
その他、様々な微量気体



水蒸気(0.5~4%)



粒子状物質(粉じん)



私たちは、一日にどれくらいの空気を吸っているのでしょうか？

1回に約0.5 Lの空気を吸います。

1分間に約20回です。

1日の呼吸量は

約14,400 L



四畳半の部屋の大きさ



重さに換算すると、

1日で20kg近い空気を体の中にいれています。
空気中の粒子による健康への影響が想像できます。

職場の粉じんによる健康障害

➤ じん肺症

- 粉じんを吸入することによって肺に生じた線維増殖性変化を主体とする疾病をいう(じん肺法(昭和三十五年三月三十一日法律第三十号) 第2条1号)
- 症状: 咳、痰、息切れ、呼吸困難、動悸など
- じん肺法(昭和30年につくられたけい肺法を改正し制定): 特別に法律を作って対策をとる必要があるくらい社会への影響がおおきな病気
 - 本研究所衛生部門(登戸地区)は、昭和24年に労働省けい肺試験室として発足
- 昭和50年代前半: 新規有所見者が年間6000~7000名
- 平成28年度: 122名(数は減ったが、なくなっていない)

➤ 職業性がん, 中毒症など

講演内容

1. 粉じんとは

- 粉じん粒子の大きさの重要性
- 健康への影響

2. 粉じんの測定方法

3. ばく露防止対策

- マスクの効果を考える

4. 最近の粉じん測定に関する研究紹介

- 粗大粒子
- 超微小粒子

本日は、粉じん粒子の「大きさ」に着目します。

粉じんとは

粉じん： 固体が粉砕、研磨、爆発などで空気中に分散したもの。

(参考)

- **ヒューム**： 固体が蒸発し、その後凝縮したものであり金属の加熱溶解、溶接、溶断などで生じる。
- **ミスト**： 浮遊している粒子が液滴であるものの総称で、液体が蒸発凝縮した場合や噴霧などで生じる。

(作業環境測定ガイドブック1「鉱物性粉じん・石綿」(2012)より)

上記のすべてを含む総称として、「**エアロゾル粒子**」、「**浮遊粒子状物質**」、「**粉じん(広義)**」が用いられる。

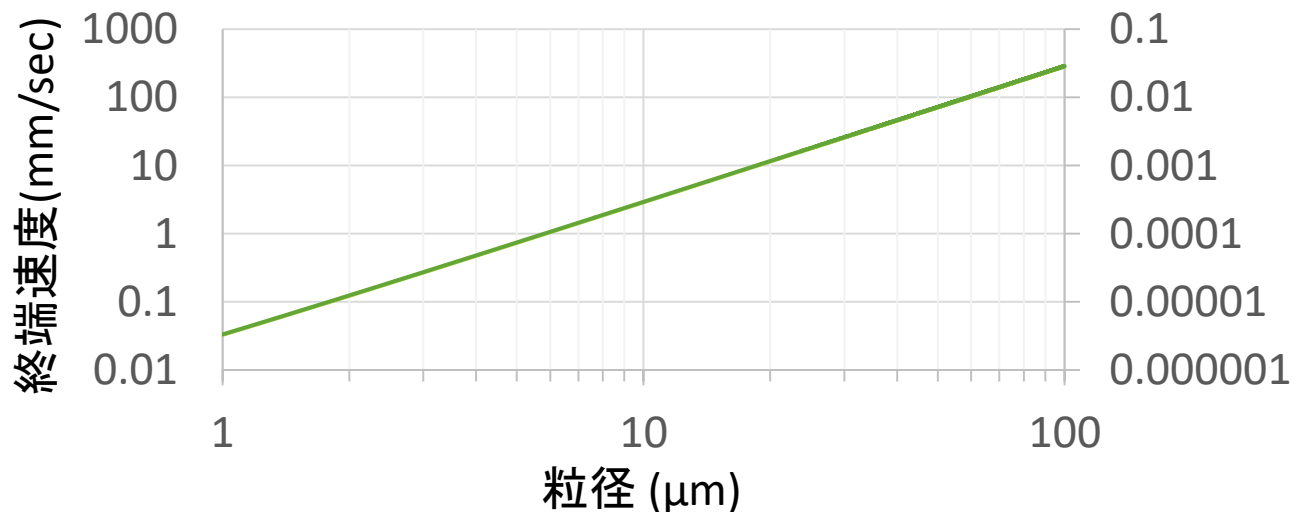
本講演では、特段の断りが無い限り、「**粉じん(広義)**」、「**粒子**」とする。

空気中の粒子の振る舞い： 粒子の大きさと落下速度

落下速度が速くなるにつれて空気抵抗が増す。

最終的に、重力と空気抵抗がつり合い、速度が一定になる（これ以上加速しない：終端速度）。

粒子が大きくなるほど、終端速度は速く、終端速度に達する時間は長くなる。



終端速度に達する時間(sec)

空気中の粒子の振る舞い： 粒子の大きさと落下速度

高さ2メートルから地面に落ちるまでの時間！

直径：0.1 mm
(100 μm)

10 μm

4 μm

粉じんは、ある程度の時間、空気中を浮遊できる大きさ

終端速度

25 cm/秒

3 mm/秒

0.5 mm/秒

滞留時間

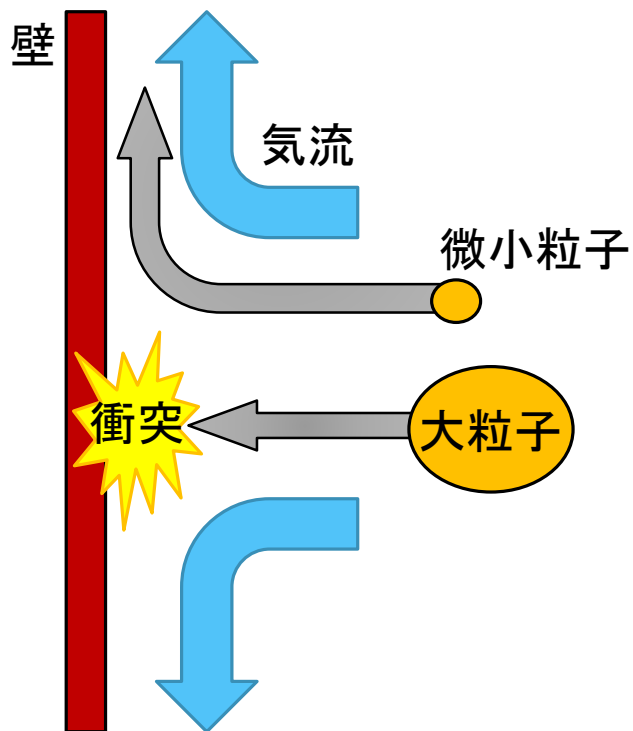
8 秒

10 分

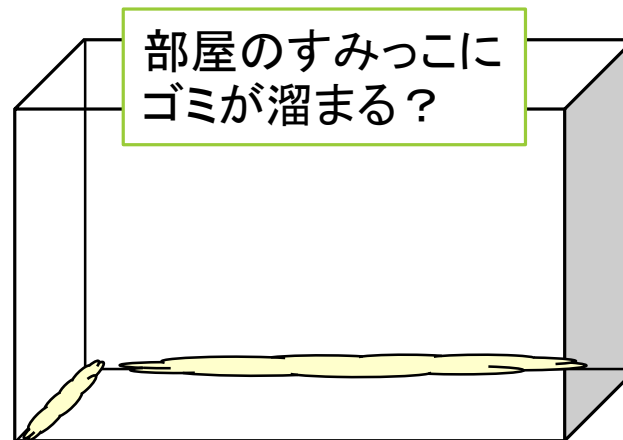
1 時間

空気中の粒子の振る舞い： 気流と粒子の関係（慣性効果）

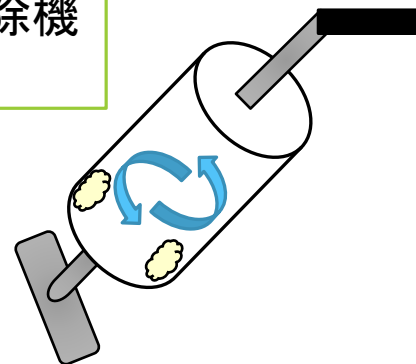
慣性力



身近な例、
掃除



サイクロン掃除機
の集塵原理



気流の速度と粒子の大きさによる。

吸入した粒子の行方

呼吸器への到達の程度により、粒子のサイズの基準を以下の3つに分けている。

1. **吸引性粉じん**： 鼻孔または口を通過する粒子。
(**100 μ m以下**)
2. **咽頭通過性粉じん**： 咽頭を通過し、肺に向かう粒子。
(**10 μ m以下**)
3. **吸入性粉じん**： 肺胞まで達する粒子。
(**4 μ m以下**)

粉じんの大きさのまとめ

粉じんは、ある程度の時間、空気中を浮遊できる大きさである。

おおむね $100\mu\text{m}$ 以下を粉じんとして測定対象をしている。

粒子の大きさによって空気中での振る舞い(滞留、拡散、衝突)が変わる。

$4\mu\text{m}$ 以下の粒子は肺の深部(肺胞)にまで達する。

$10\mu\text{m}$ 以上の粒子は気管より上部で捕捉され、消化器へ移動する。

粒子の大きさによって体内への到達部位が異なる。

- →病気との関わりに影響

講演内容

1. 粉じんとは

- 粉じん粒子の大きさの重要性
- 健康への影響

2. 粉じんの測定方法

3. ばく露防止対策

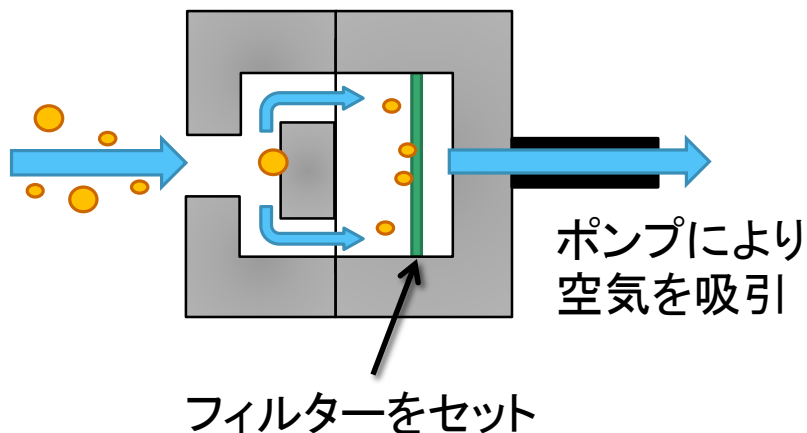
- マスクの効果を考える

4. 最近の粉じん測定に関する研究紹介

- 粗大粒子
- 超微小粒子

粉じん測定法： 1. フィルター捕集法

- 作業環境測定基準における粉じん測定は、じん肺の予防を目的としているため、肺胞にまで到達可能な「**吸入性粉じん**」が対象。
- **分級装置**（インパクタやサイクロン等）を使用して吸入性粉じんをフィルターに捕集。



- 粉じんを捕集する前と後のフィルターの質量を測定することにより、粉じん濃度を求める。

フィルターの選定：

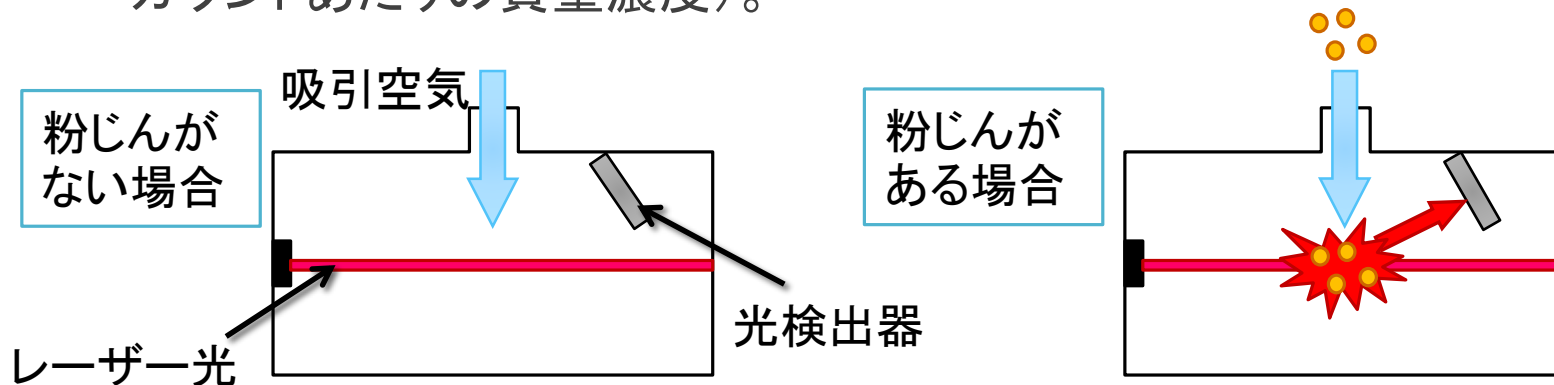
0.3 μ mの粒子を95%以上補足
吸湿性が小さく、圧力損失が低いこと

粉じん測定法： 2. 粉じん計

光散乱式粉じん計： 検出ボリュームに含まれるすべての粒子からの散乱光を検出し、その光量に応じた相対濃度(1分間あたりのカウント数(cpm))を示す装置。

散乱光量(相対濃度)は、粉じんの質量濃度に比例するため、測定で得られた相対濃度(cpm)にK値(質量濃度変換係数($\text{mg}/\text{m}^3/\text{cpm}$))を乗じることで粉じんの質量濃度を求める。

K値は、フィルター捕集法と並行測定することによって得られる係数(1カウントあたりの質量濃度)。



粉じん測定法：

3. 粒径分布測定

粉じんに起因すると推測されるがその原因が不明な健康障害を究明する場合、あるいは毒性実験により作業者に健康影響の恐れがあると示唆される新規・未規制物質の粉じん測定を行う場合は、より詳細な粒径分布測定が必要とされる(調査・研究レベルでの粉じん測定)。

利用可能な測定装置：

- 粒径分布をリアルタイムで測定できる粒径分布モニター
- 粒径を細かく分級してフィルターに捕集できるアンダーセンサンプラーなど

なお、粒径分布モニターは、粉じんの化学成分や形態情報を得られないため、場合によっては化学分析や電子顕微鏡等を併用して全体像をとらえることが必要である。

講演内容

1. 粉じんとは

- 粉じん粒子の大きさの重要性
- 健康への影響

2. 粉じんの測定方法

3. ばく露防止対策

- マスクの効果を考える

4. 最近の粉じん測定に関する研究紹介

- 粗大粒子
- 超微小粒子

マスクで粒子を防ぐ



ばく露防止対策

リスクアセスメントの段階、または作業を実施し問題があるとされた場合のばく露防止において最も好ましい対策は、

有害物質の使用をやめる、または有害性の小さい物質に置き換え。

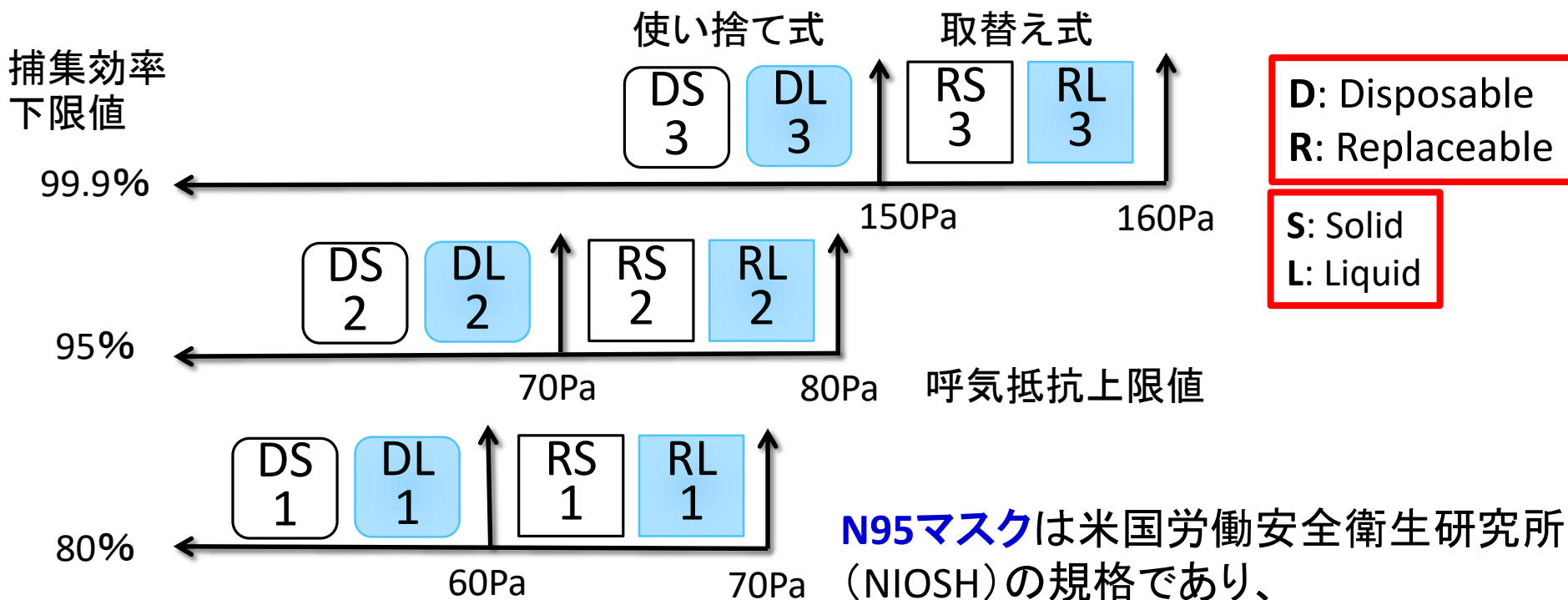
この措置ができない場合、

作業環境の改善や換気により気中濃度を抑えるための工学的対策を実施。

作業上やむを得ない場合に限り、

保護具使用(防じんマスク)による個別管理的対策を実施。

呼吸用保護具(防じんマスク)の規格



最近は、電動ファン付き呼吸用保護具(PAPR)も普及。

→ 規格: PS, PL (1~3)

N95マスクは米国労働安全衛生研究所(NIOSH)の規格であり、

N: Not resistant to oil(耐油性がない)

95: 試験粒子を95%以上捕集できるの略である。**DS2相当**

マスク(フィルター)による粒子の除去メカニズム

慣性力効果

慣性力により気流から外れ
繊維に衝突して捕捉

さえぎり効果

粒子自らの大きさにより
繊維表面に接触して捕捉

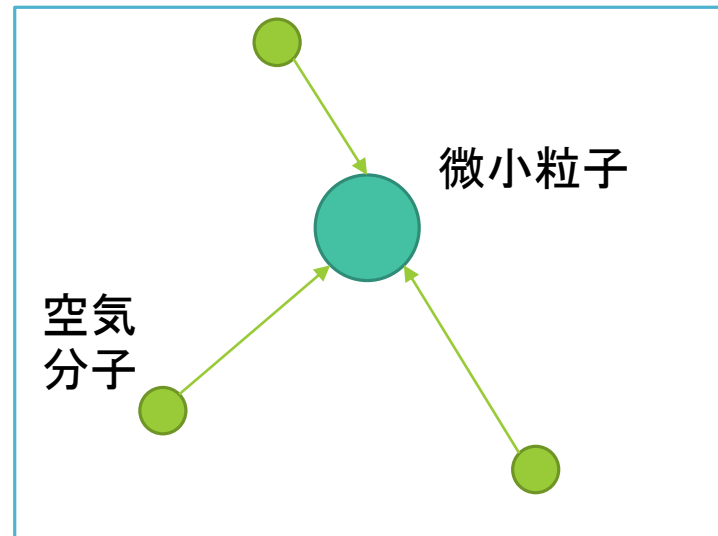
拡散効果

粒子のランダムな振動(ブラウン
運動)により繊維に触れて捕捉

空気中での粒子の振る舞い： 空気と超微小粒子の関係（拡散効果）

拡散効果

粒子のランダムな振動
（ブラウン運動）により
繊維に触れて捕集される。

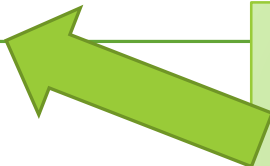


フィルターの粒子捕集効率

粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下： 拡散効果により粒子が小さいほど捕集効率高い

粒径 $0.3\mu\text{m}$ 以上： 慣性力やさえぎり効果により粒子が大きいほど捕集効率高い

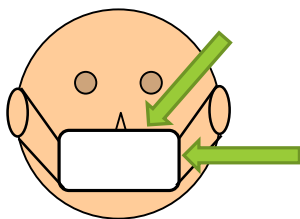
粒径 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ ： このあたりのサイズは最も捕集されにくい
(通過しやすい)



防じんマスクは、
通過しやすいサ
イズの粒子で検
定を実施

防じんマスク使用時の注意点

1. 漏れ(隙間からの粉じんの流入)



$$\text{防護係数} = \frac{\text{マスク外側の粉じん濃度}}{\text{マスク内側の粉じん濃度}}$$

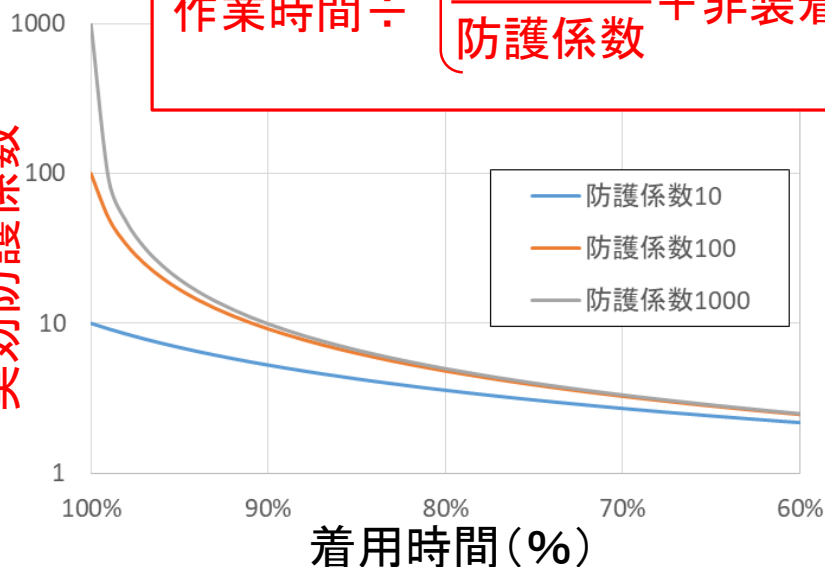
漏れ(ろ過材からの透過、排気弁などの隙間、顔とマスクの隙間の影響)を考慮した係数

2. 着用時間

非着用時を考慮した**実行防護係数**:

$$\text{作業時間} \div \left(\frac{\text{装着時間}}{\text{防護係数}} + \text{非装着時間} \right)$$

実効防護係数*



性能のいいマスクを使っても、適切な着用をしていなかったり、**短時間であっても取り外している**と、効果が期待できない。

講演内容

1. 粉じんとは

- 粉じん粒子の大きさの重要性
- 健康への影響

2. 粉じんの測定方法

3. ばく露防止対策

- マスクの効果を考える

4. 最近の粉じん測定に関する研究紹介

- 粗大粒子
- 超微小粒子

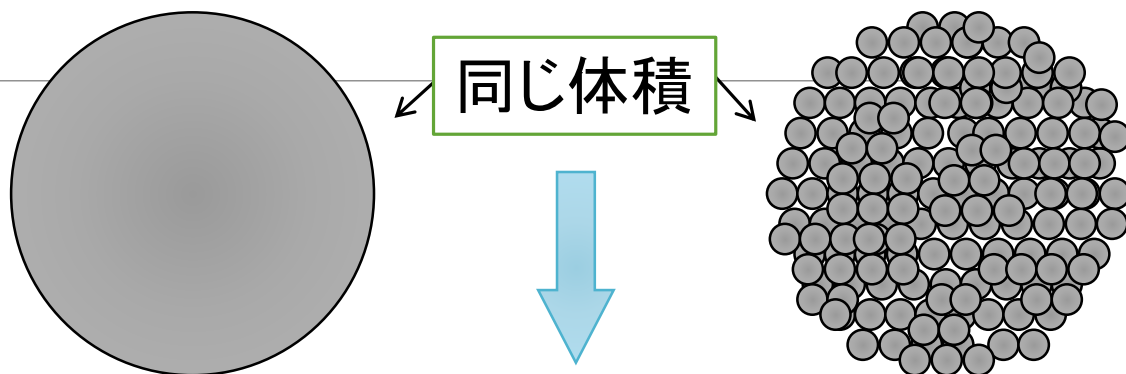
研究トピック① 「超微小粒子」 ナノテクノロジーにより生み出され たナノマテリアル粒子（粉じん）

ナノマテリアル：**ナノ**メートルサイズで制御された工業**材料**

小さくなると、性質が変わる

代表的なナノマテリアル

- ・二酸化チタン
 - ・銀ナノ粒子
 - ・シリカ
 - ・カーボンナノチューブ
 - ・カーボンブラック
- など



1,000 nm	粒子の直径	10 nm
1	表面積の比	100

ナノサイズになることで、新しい性質が発現する。

ナノマテリアルの製品化、将来的に製造量の増加が見込まれる。

ナノサイズになることで、人体にも新たな(悪)影響が懸念される。

ばく露の機会が増える。

背景

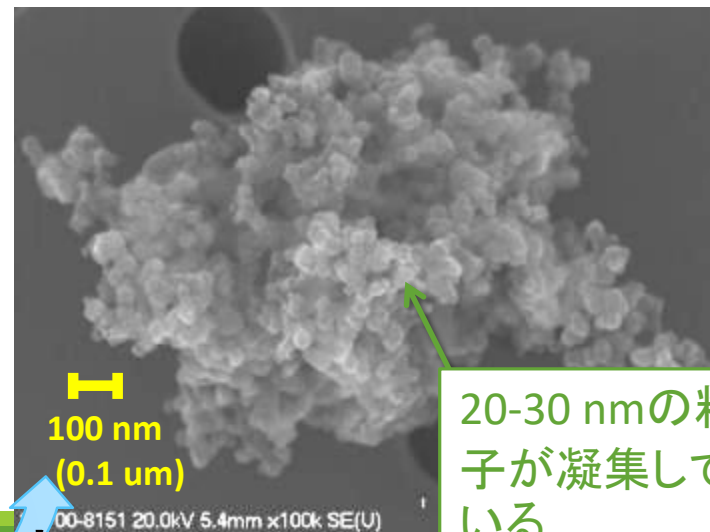
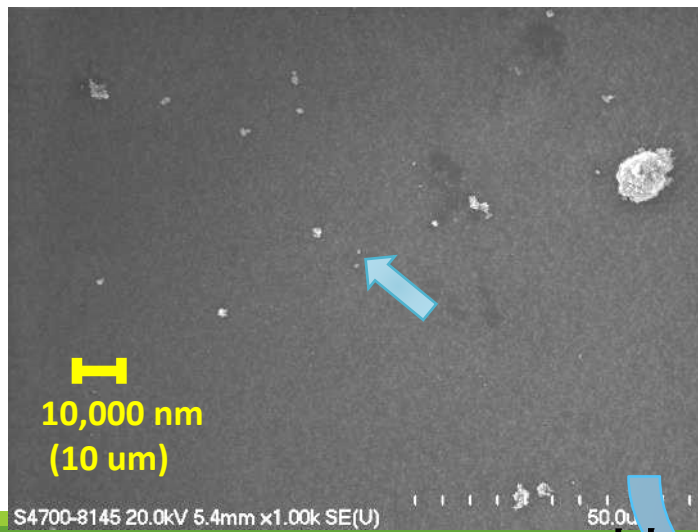
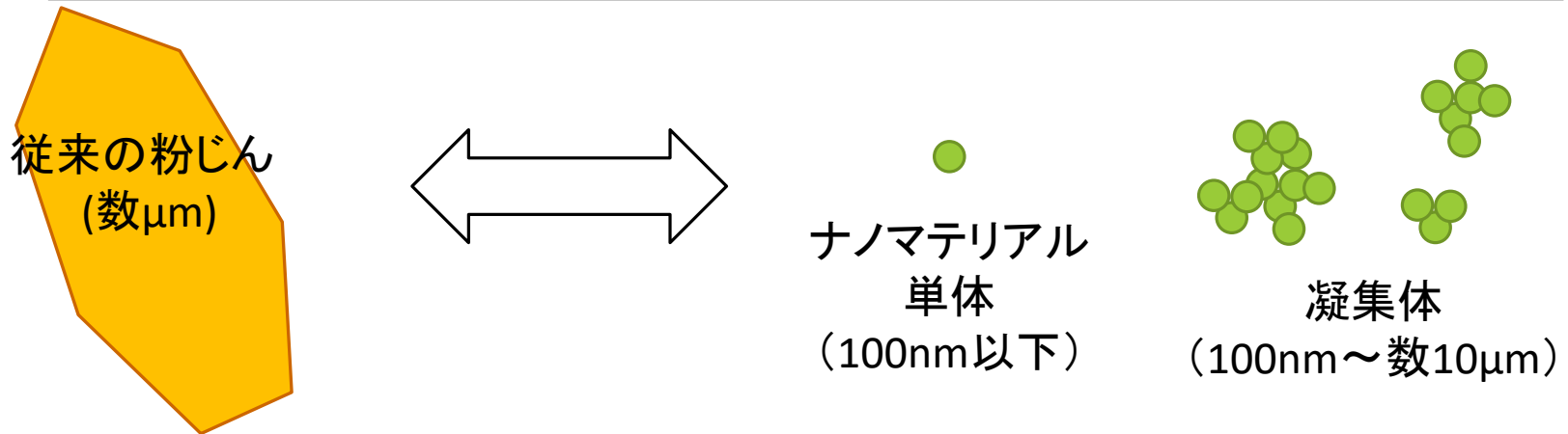
厚生労働省：

「ナノマテリアルに対するばく露防止等のための**予防的対応**について」(平成21年3月31日付け基発第0331013号)を関係団体等に通知

労働安全衛生総合研究所でのナノマテリアル粉じんの測定法およびばく露評価に関する研究

- 現場の気中粒子に近い形での模擬粉じん発生
- 模擬粉じんを用いた測定装置の評価
- ダスティネス評価
- ナノマテリアル取り扱い現場でのばく露測定

ナノマテリアル粉じん測定の難しさ



20-30 nmの粒子が凝集している

拡大すると...

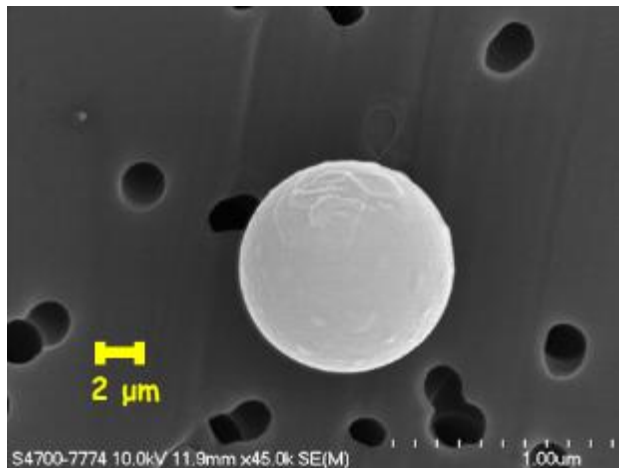
粒径分布測定装置を用いた 現場測定

ナノマテリアル粉じんによる健康影響を理解するためには粒径分布の情報が重要、ただし質量測定で粒径分布を求めるのは困難。

研究では、粒径分布をリアルタイムで測定できる各種粒径分布モニターによる測定法を検討(装置の信頼性や組合せなど)。

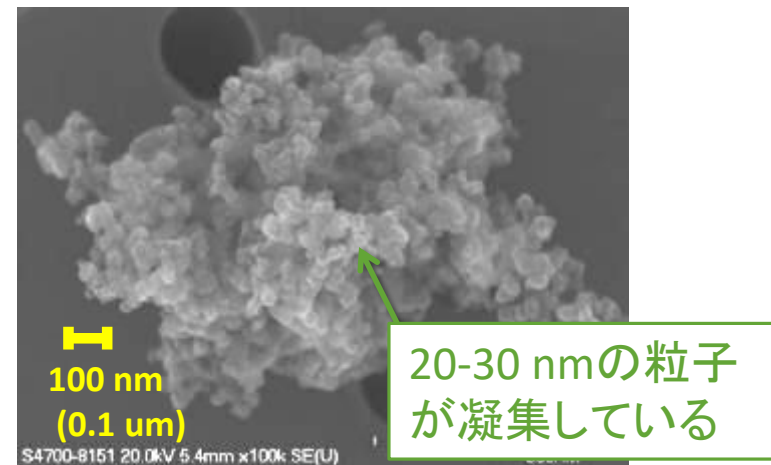
実際のナノマテリアル粉じんを用いた 測定装置の特性評価の重要性

測定装置の評価・校正



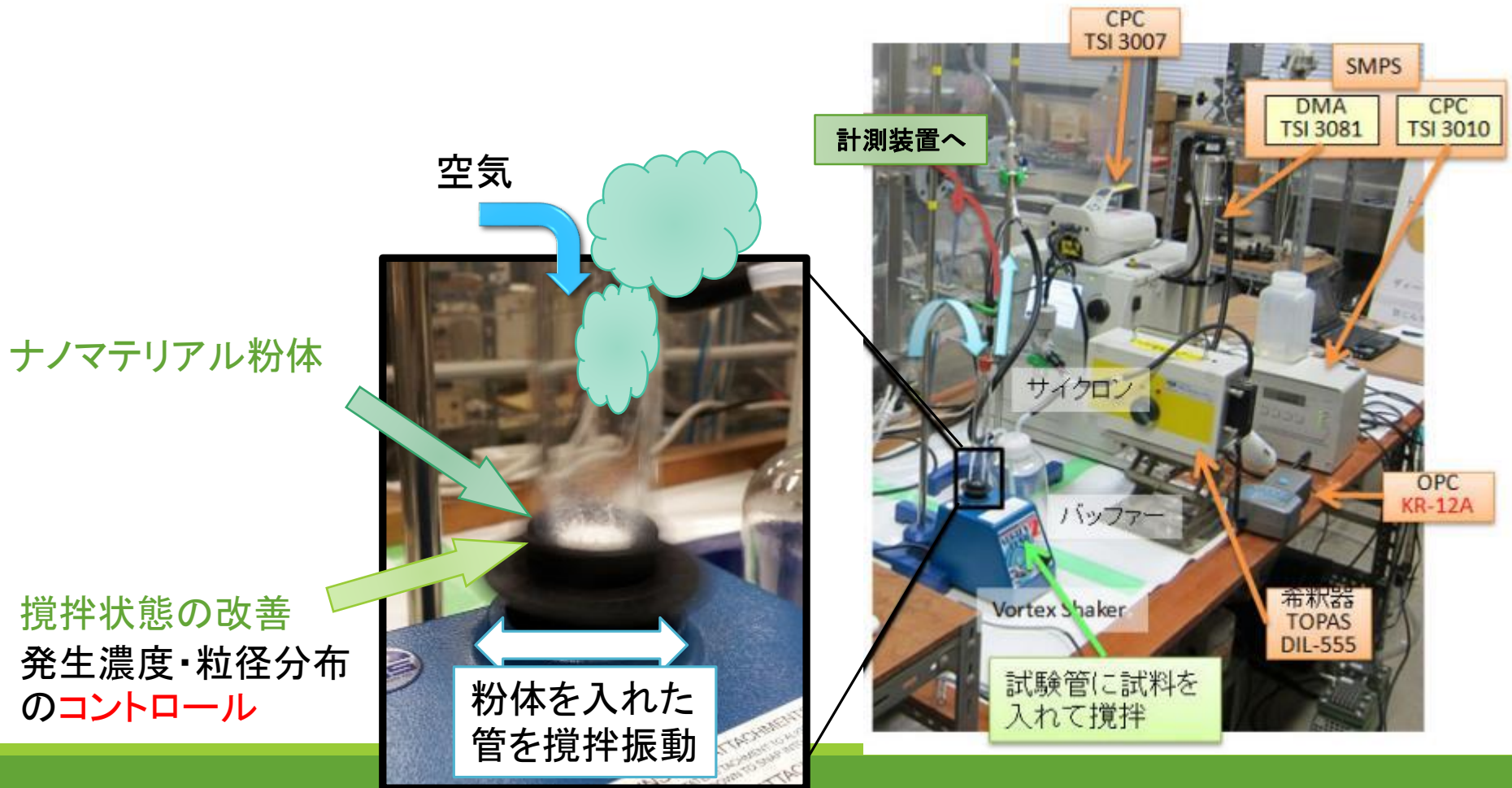
単分散・非凝集
標準粒子

実際の測定対象



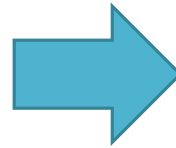
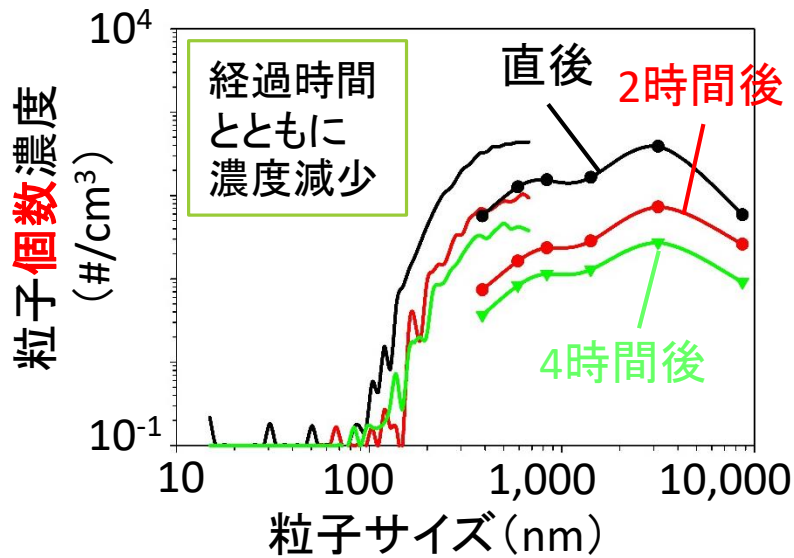
多分散・凝集
粒子

装置の特性評価のために、基準となる ナノマテリアル模擬発生法の研究

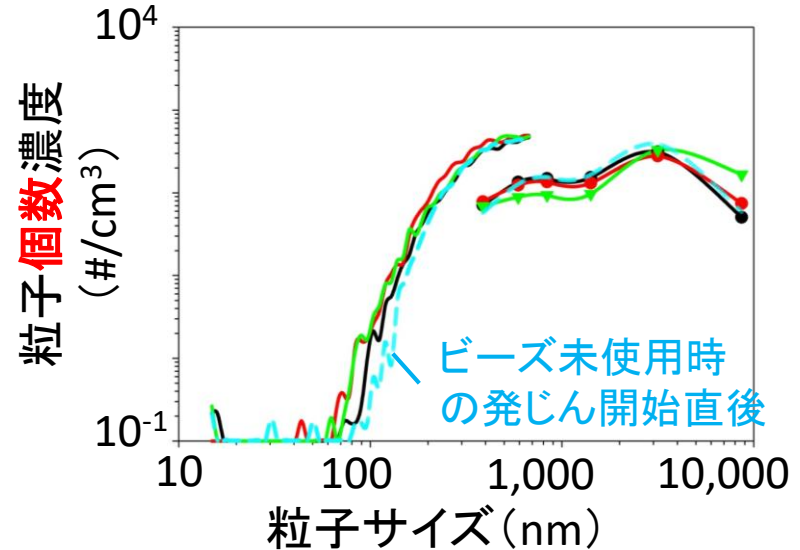


成果

ナノマテリアル粉じんのサイズ分布



攪拌状態を改善



発生方法の検討により、同じ粒径分布で長時間安定して発生させる方法を確認

→ **測定装置の評価に使用可能**

模擬粉じんを用いた測定装置の評価

基準装置



SMPS (Model 3936L10, TSI Inc.)

ポータブル装置1



NanoScan (Model 3910, TSI)

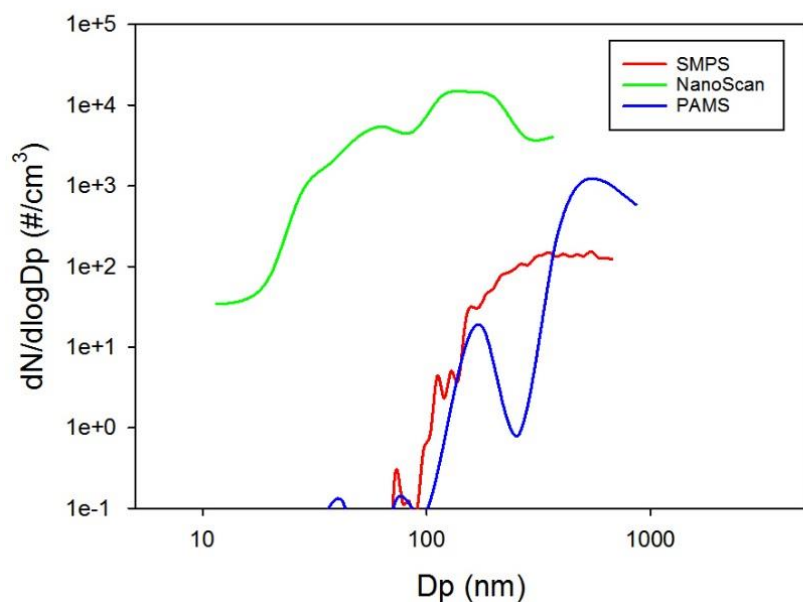
ポータブル装置2



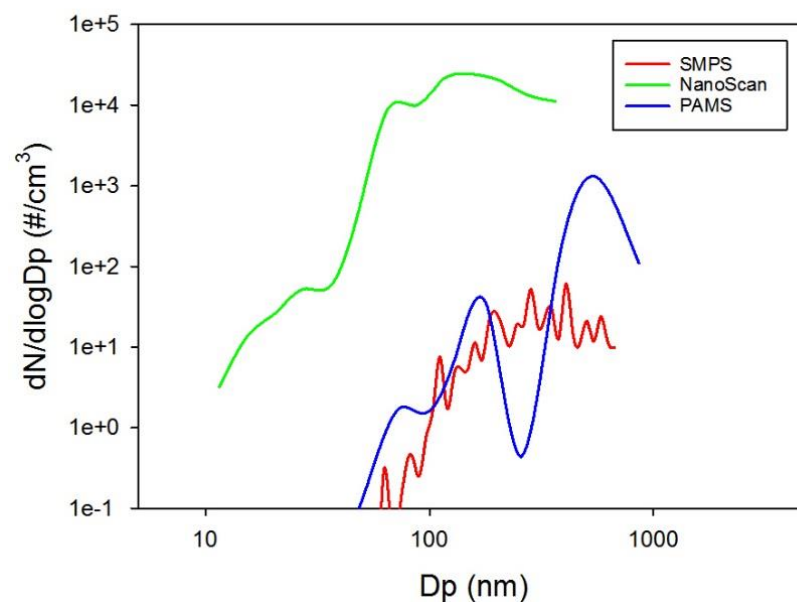
PAMS (Model 3300, KANOMAX)

実施例：測定装置間の比較

P25



T801



校正粒子や、一般大気では問題がないが、ナノ粉体取扱い職場では、装置によっては誤差が出る可能性 (研究中)

粉体の飛散性(ダスティネス): リスク評価への応用を検討

同一化学物質であっても、製造工程や加工によって粒子の形、サイズ、表面処理などが異なる。

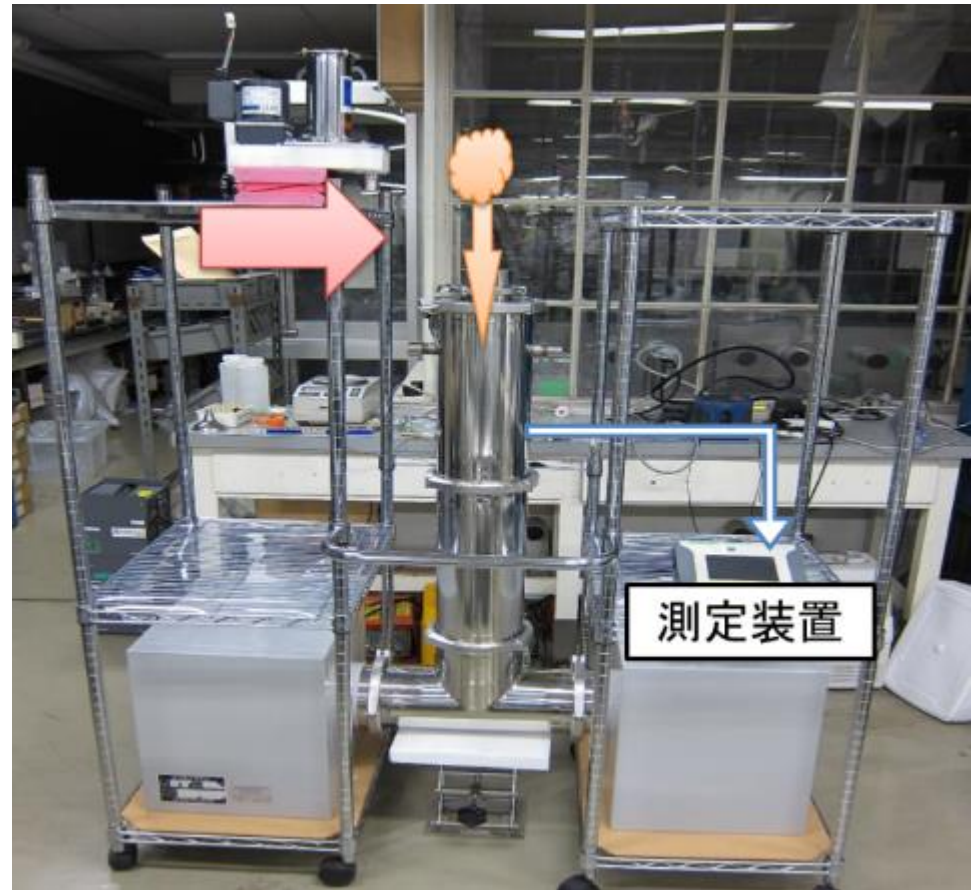
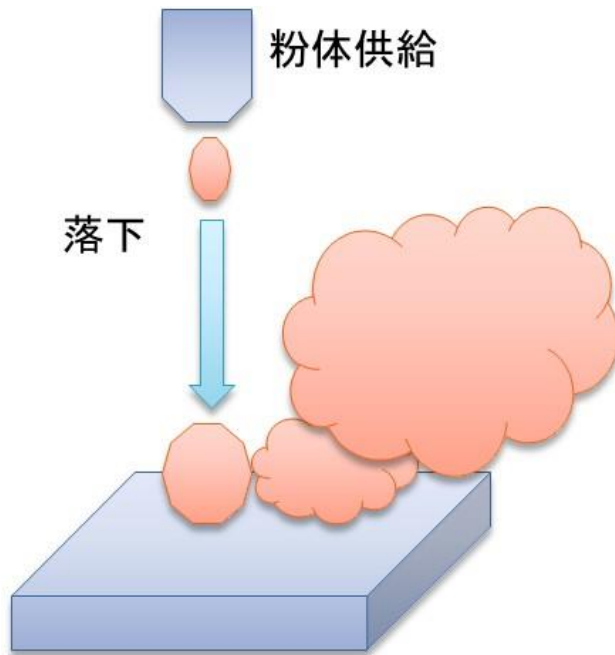
各種粉体に対して、取り扱う前に**ダスティネス**(ある決められた装置で粉体を操作した際の粉じん発生量)を把握する。



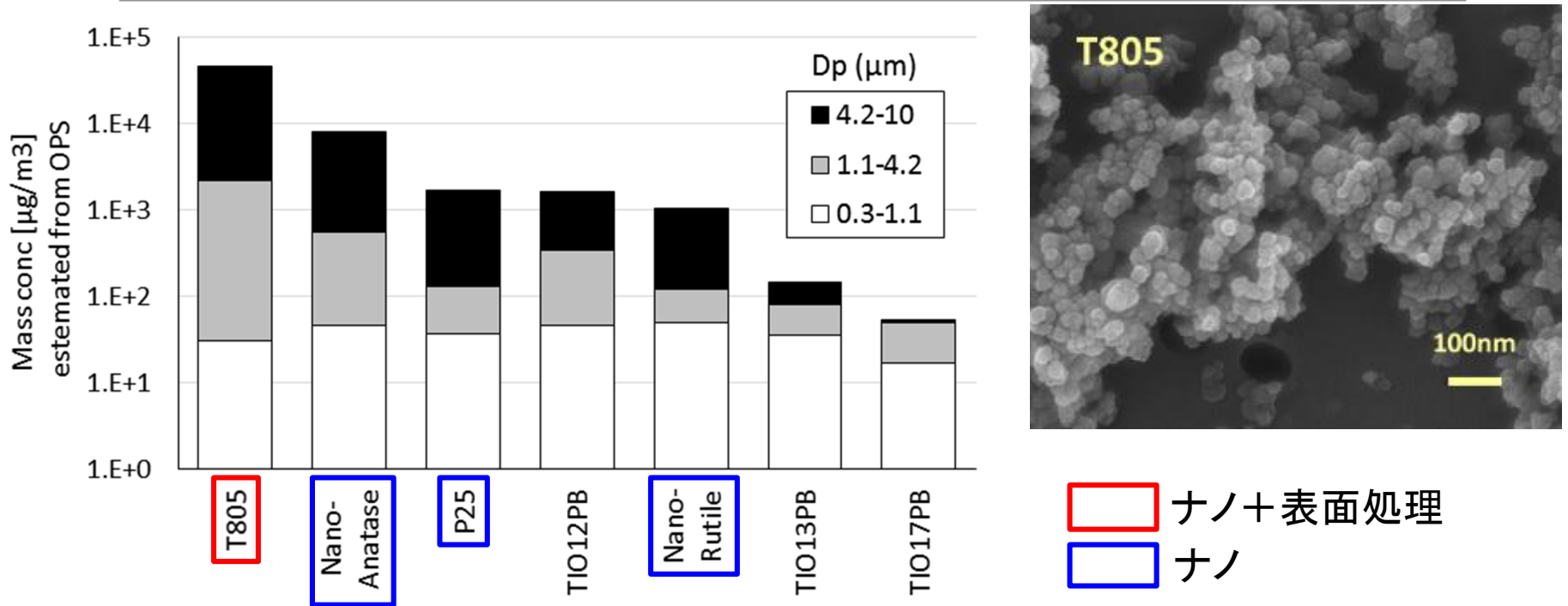
粉じん発生量、粒径分布から、リスク評価、環境管理、ばく露防止策への応用を検討

落下法によるダスティネス評価システム

落下法



実施例：二酸化チタン粉末のダスティネス評価結果



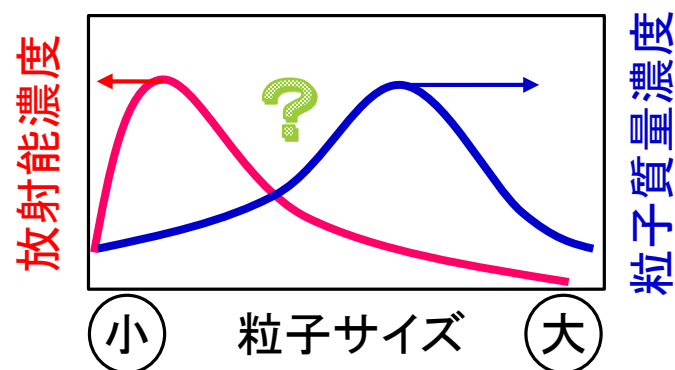
同一化学物質の粉体であっても、発じん濃度に大きな差。
粒子サイズや表面処理が影響することを示唆。
事前にダスティネスを知ることは、ばく露防止対策に有用。

研究トピック② 「粗大粒子」 原発事故にともなう除染作業に 関連した放射能汚染粉じん

研究目的

除染作業時の内部被ばくの簡便・迅速なリスク管理のために

1. 粉じん計による吸引性粉じん(100 μ m以下)の測定法を提案する。
2. 粉じんと放射性セシウムの粒径分布を調査し、その対応関係を解明する。



粉じん濃度と放射能濃度のサイズ分布はどうなっているか？

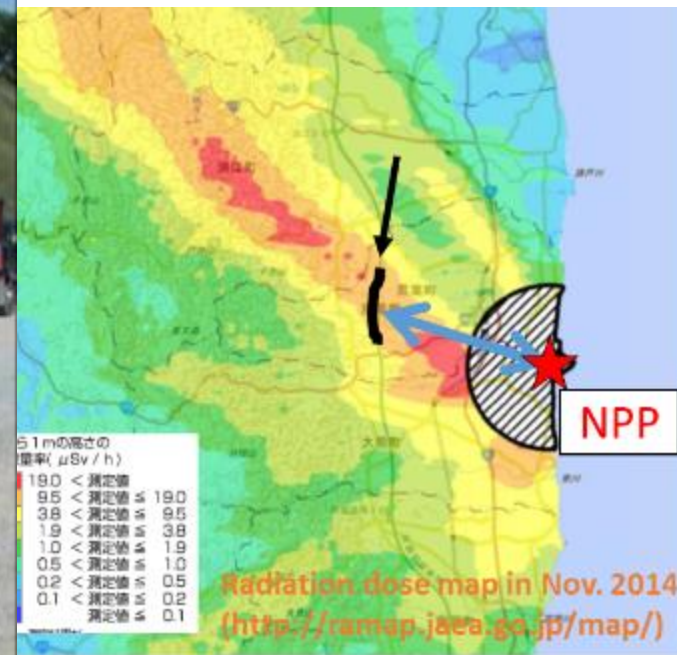
粉じん計による吸引性粉じん濃度の迅速測定法に関する研究

粉じん計は吸入性粉じん(4 μ m以下)を測定するように設計されているが、吸引性粉じんに対応可能か？



現場調査・模擬試験を行い、K値を提案

粉じんと放射性セシウムの粒径分布調査： 常磐自動車道工事現場（2014年）



土壌・粉じんの比放射能

試料	粒径	捕集量 (mg)	粉じん濃度 (mg/m ³)	セシウム濃度 (Bq/kg)
現場土壌	<2mm	—	—	12'000
個人ばく露: 重機周辺作業員	Inharable	0.78	1.47	165'000
個人ばく露: 調査員	Inharable	0.36	0.67	253'000
個人ばく露: 重機運転席	Inharable	0.96	1.82	320'000
定点(オープンフェイス)	Inharable	4.16	—	230'000
定点(NW-354)	Respirable	0.30	—	125'000
定点(アンダーセン)	4.7-7.0 μm	0.26	0.04	349'000
定点(アンダーセン)	3.3-4.7 μm	0.21	0.03	462'000

10倍以上

土壌よりも粉じんの方が比放射能が高いのか？

考えられる理由

セシウムは土壌粒子の表面に付着していると考えられる。同じ重さの土壌粒子でも粒子径が小さい方が表面積が大きい。より小さい粒子のほうが発じんしやすい。

**条件が一定しない現場調査のみでは限界
実験で、より正確に把握する。**

研究のアウトカム

- ナノマテリアル粉じんの「飛散動態」「工学的対策」「体内への取り込み」の適切な評価
- 測定装置による測定の信頼性の向上
- 現場調査への応用

- 除染作業時の内部被ばくの簡便・迅速なリスク管理→「除染等業務特別教育テキスト」(厚労省電離放射線労働者健康対策室)等に採用

本講演のまとめ

粉じんのばく露評価およびばく露防止対策を適切に行うためには、粉じん粒子の大きさを考慮する必要がある。

粉じんは、じん肺症に見られるように古くから問題となっており、研究の歴史も長い。そのため、作業環境測定基準に見られるように測定方法が確立されている。

一方で、科学・技術の進歩に伴う新たな材料や、予期しないアクシデントによって、これまで検討されてこなかった粉じんが新たに問題となることがある。

有害な新規粉じんが出てきた際には、作業場において迅速に簡便に測定できる方法、また一方で精度よく濃度を測定できる手法の確立が必要である。