

行政要請研究

「除染作業における内部被ばく線量管理のための浮遊粉じん濃度評価手法」報告書の概要

平成 25 年 2 月 27 日 独立行政法人労働安全衛生総合研究所

1. 背景及び目的

本研究は厚生労働省の要請に基づき、東日本大震災に伴って発生した放射性物質に係る汚染土壌の除染作業時において、作業者の防護措置を決定するために行う粉じん濃度測定に関する知見を得るために実施した。

厚生労働省は、「除染作業等に従事する労働者の放射線障害防止に関する専門家検討会」(以下、専門家検討会という)による検討事項を踏まえ、除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のために「東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則」(以下、「除染電離則」という)ならびに「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」(以下、「ガイドライン」という)を制定した。

除染電離則では、除染対象土壌の放射性物質の濃度と、作業に伴い発生する粉じん濃度により、作業者の被ばくリスクを区分し、それに応じた被ばく防止対策を行うこととされている。具体的には除染対象の土壌中の放射能濃度が 500,000 Bq/kg を超えるかどうか、作業によって発生するインハラブル粉じん濃度が 10 mg/m³ を超えるかどうかにより、線量管理、保護具の選定などが異なる。ここで、インハラブル粉じんを対象としているのは、放射性物質（今回の除染作業については主にセシウム）が付着した粉じんによる内部被ばくは、粉じん粒子が肺胞に到達する吸入性粉じんだけではなく、鼻や咽喉にまでしか到達しない粒径の大きな粒子でも引き起こされるからである。

粉じん濃度の測定は従前より、吸入性粉じんを捕集・秤量して求める質量濃度と、デジタル粉じん計などの相対濃度計による測定を同時に行う併行測定を行い、相対濃度から質量濃度を求めるための質量濃度変換係数(K 値)を求め、以後相対濃度計の測定により粉じん濃度を求めるという方法が採られている。ガイドラインにおいても、その別添資料 1 に相対濃度指示方法によることとされている。一般に質量濃度を求める作業は、長時間のサンプリングが必要となり、すぐに結果が得られないなどの問題点がある。除染作業において長時間の測定時間を要することは、測定作業に従事する人間の被ばくにもつながる可能性がある。そこで、実験的に行った併行測定の結果より予め K 値を指定することにより、粉じんの捕集・秤量を略し、デジタル粉じん計だけで粉じん濃度測定を行う方法の可否が検討されることとなった。

除染作業には様々な作業が存在するが、粉じん濃度が最も高くなると予想されるのは汚染土壌のはぎ取りおよびフレキシブルコンテナ等への土壌の詰め込み作業であることから、特に土壌取り扱い作業時にデジタル粉じん計による粉じん濃度測定について検討する

こととした。

既に述べた通り、除染では対象となるのはインハラブル粉じんである。光散乱式のデジタル粉じん計は元々、じん肺予防の為に、吸入性粉じんの濃度測定を目的として設計されている。その原理上も粉じん計は大粒径の粉じん粒子に対する感度が低くなり、インハラブル粉じんについて、粉じん計の特性を研究した例は少ないが、Thorpe の研究 (Thorpe(2007), Assessment of Personal Direct-Reading Dust Monitors for the Measurement of Airborne Inhalable Dust, Ann. Occup. Hyg.,51(1) p97-112) によれば、インハラブル粉じんに対するデジタル粉じん計の応答は吸入性粉じんにくらべ、一様に低い上、粒子・装置による違いが顕著であるとされている。そこで併行測定省略の可否を判断する場合には、実際の除染作業あるいは除染作業に非常に近い作業におけるデータの検討が非常に重要である。

以上の背景を踏まえ、本行政要請研究では、主に土壌取り扱い作業時において、インハラブル粒子の質量濃度を粉じん計で適切に測定するための知見を得ることを目的とし、除染作業時の重量分析による粉じん質量濃度、デジタル粉じん計による粉じん相対濃度および粉じんの粒度分布等の測定を行った。

2. 研究の方法

本研究では、土壌取り扱い作業中の粉じんに対してインハラブル粒子を対象とした質量濃度測定とデジタル粉じん計による相対濃度測定を同時に行う併行測定を実施し、K 値を求めた。その他、参考となるデータとして粉じんの粒径分布、吸入性粉じんの質量濃度、風速・気温などの気象条件、作業中の空間線量等も測定した。これらのデータは別途作成する研究報告書に掲載するが、本概要版では粉じん濃度に関するデータのみ示すこととする。本研究では、福島県内の除染作業での現場における調査（3 回）と圃場における模擬実験で測定を行った。模擬実験を行った理由は、実際の除染作業では、測定に合わせて作業日程を動かすことが困難であるため、気象条件（例えば降雨があると土壌が湿潤化するため、粉じん濃度は低くなる。）や作業内容により必ずしも本研究が着目している粉じん濃度 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 付近の状態の作業が実現できないことや、放射線防護・電源確保の観点から補強データを得るための大型機器の持ち込みが困難である為である。尚、模擬実験は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センターの協力を得て、同研究センターの実験圃場において同研究センター所有の重機を用いて実施した。

調査および実験における作業内容を表 1 にまとめた。実際の測定に用いた機器の一覧を表 2 に示す。粉じんの質量濃度測定は、インハラブル粉じんが IOM サンプラー(米国 SKC)、参考データとして測定した吸入性粉じんの測定には個人サンプラー用ホルダー PM4 NWPS-254 型(柴田科学、以下 NWPS-254 という)を用いた。大型機器の使用が可能であった実験では、インハラブル粉じんの測定にろ紙ホルダー A 型(柴田科学、ガイドラインに従い捕集面の線速度を $19\text{cm}/\text{s}$ として捕集)、吸入性粉じんの測定に慣性衝突式分粒装置付ホ

ルダーPM4 NW-354 型（柴田科学，以下 NW-354 という）も併用した。この他，実験ではアンダーセンサンプラーによる粒度分布測定も行った。

デジタル粉じん計はガイドラインで例示されているデジタル粉じん計 LD-5 型（柴田科学，以下 LD-5 という）に加え，個人ばく露測定に対応した小型のデジタル粉じん計 LD-6N 型（柴田科学，以下 LD-6N という）を用いた。この他実験では参考として，粉じん相対濃度測定と粉じん捕集の両方の機能を持つ Split2（SKC），高濃度粉じん用のデジタル粉じん計高濃度用 LD-5D 型（柴田科学）も用いた。本概要版では全ての模擬実験・現場調査で用いた LD-5 および LD-6N の結果について述べる。

模擬実験・現場調査においては IOM および NWPS-254 サンプラーとデジタル粉じん計を一組として同時に測定を行い，質量濃度とデジタル粉じん計による相対濃度から K 値を求めた。作業者の協力が得られる場合は IOM サンプラーと LD-6N を作業者の体に装着して測定を行ったが，基本的には研究所職員が測定器を装着して作業者の近傍で粉じん濃度を測定することとした。

3. 結果

模擬実験・現場調査における粉じん濃度（インハラブル質量濃度・デジタル粉じん計による相対濃度）および K 値の測定・計算結果を表 3 に示す。またこの結果を両対数軸でプロットしたものを図 1 に示す。尚，表 3 で*印をつけたデータについては，サンプラーに砂粒が直接飛び込んだこと（図 2 参照）による異常値と判断してデータの計算・解析から除外した。模擬実験・現場調査で得られた K 値を統計学的に検討した結果，対数正規分布であったことが確認できた。インハラブル粉じんサンプラー（IOM と A 型ホルダー）及び 2 種の粉じん計（LD-5 と LD-6N）ごとの平均値・標準誤差・中央値等の統計量を表 4 に示したが，サンプラーや粉じん計の違いによる K 値の平均値を統計学的に検討した結果（t 検定），統計的な有意差は認められなかったため，以後は全てのデータを同一のデータセットとして解析を行った。尚，データの統計学的処理等には IBM-SPSS(Ver.19)を用いた。

4. 考察

図 1 に示すように，模擬実験・現場調査を通して，粉じん濃度が高くなると K 値が大きくなり，言い換えれば粉じん計の感度が下がる傾向にあった。粉じん濃度と K 値について，Pearson の相関係数を計算すると 0.646 ($p<0.0001$) であり，粉じん濃度と K 値は比例関係にあるといえる。K 値は，デジタル粉じん計による相対濃度の数値から質量濃度を求めるための換算値であるため，本来なら粒度分布が変わらなければ濃度にかかわらず一定の値であるはずで，逆に K 値が一定であるとみなせる範囲でなければデジタル粉じん計による粉じん濃度測定はできない。今回の結果の原因として考えられるのは，デジタル粉じん計に対する感度が異なる粉じん粒子の構成比が作業（粉じん濃度）により異なるためだと考えられる。模擬実験・現場調査で行った作業中に存在する粉じん粒子は，土壌粒子（粗大

粒子)、土壌粒子(微粒子)、重機の排気ガス由来の粒子などから構成されていると予想される。デジタル粉じん計の感度は **土壌粗大粒子<<土壌微粒子<排気ガス粒子** である。従って、粉じん濃度に比例して、粗大粒子の割合が大きくなる傾向にあると考えられる。インハラブル粉じんと吸入性粉じんでは K 値が 10 倍異なっており、土壌の粒径分布を無視して K 値を決めると質量濃度を低く見積もる可能性があるため、注意が必要である。

K 値が一定では無かった事に加え、今回の調査・実験対象以外にも様々な土質の土壌があり得ることや、発じんした粒子中での放射性セシウムの分布などの情報が全くないことなどから、除染作業では、デジタル粉じん計による粉じん測定は、当初の前提のように、粉じん濃度や内部被ばくリスクを定量的に測定するためではなく、高濃度粉じん作業かどうかを定性的に判断するための手段に留めておくことを厳に遵守すべきである。除染電離則では、高濃度粉じん作業であるかどうかを 10 mg/m^3 という値で判断する。現場調査ではこれに近い粉じん濃度はなかったが、実験では、 15 mg/m^3 の粉じん濃度を観測している。K 値の最大値(±標準誤差)は LD-5 で $0.10 \pm 0.005 \text{ mg/m}^3/\text{cpm}$, LD-6N で $0.14 \pm 0.006 \text{ mg/m}^3/\text{cpm}$ であった。粉じん濃度と K 値の関係を示すグラフより 10 mg/m^3 での K 値を推定するよりも実験で得られた最大値を使用の方が適切だと考えられる。統計解析の結果 LD-5 と LD-6N の値に有意差はなかったため、LD-5 を使用する場合も全体の最大値である $0.14 + 0.006 \text{ mg/m}^3/\text{cpm} \div 0.15 \text{ mg/m}^3/\text{cpm}$ を使用することが妥当だと考える。尚、実験のデータより、インハラブル粉じん濃度が 10 mg/m^3 を超えるような環境では、吸入性粉じんの濃度も 1 mg/m^3 を超える高濃度であり、粉じんばく露だけをとっても十分に高性能な呼吸保護具の着用が不可欠な点にも注意を要する。

LD-6N は、本来は個人ばく露濃度を測定するために設計されており、作業員自身の呼吸域近傍の粉じん濃度を測定することが可能である。実際今回の調査では、作業員の協力を得て作業員自身に LD-6N 並びに粉じんサンプラーを装着して測定を行った。しかし実際の作業では作業員自身の体に粉じん計を取り付けることは、作業性や作業員の安全性を考慮すると全く現実的ではない。今回、作業員と同時に研究所職員が粉じん計・サンプラーを体に取り付け、重機などの安全が許す限り作業員の近傍に立って測定を試みた。その場合には、作業員近傍の濃度と、研究所職員近傍の濃度に大きな差はみられなかった。作業場所の移動があまり無い場合は定点による測定も可能だと考えられるが、実際には、多くの作業で発じん源の頻繁な移動があり、定点よりは測定者が作業場所近傍に立つ方法の方がより実態を反映すると考えられる。

粉じん計による粉じん濃度の時間変化例を図 3 をに示した。他の測定においても同様な結果が得られている。このように、粉じん濃度が高濃度になる時間は非常に短時間である。従って、測定時間が極端に短いと発じんの瞬間をとらえられなくなる可能性が高い。

5. 測定手順の提案

以上の結果をふまえて、併行測定を行わず高濃度粉じん作業かどうかを判定する作業

は、以下の手順で行えるのではないかと考えられる。尚、ガイドラインの別紙でも述べられているとおり、デジタル粉じん計で行うのは高濃度粉じん作業かどうかの判定であり、内部被ばく量の推定ではない。また、同一原理のデジタル粉じん計であっても、粒径に対する応答や試料吸入口の構造などの違いにより粉じんへの応答は異なるため、本研究の手順は LD-5 及び LD-6N のみに適用できる。

(1) 基本的考え方

高濃度粉じん発生作業の下限值であるインハラブル粉じん濃度 10 mg/m^3 を超えているかどうかを判断するために、デジタル粉じん計による相対濃度指示値に厚生労働省が予め指定した質量濃度変換係数(K 値)を乗じて質量濃度を推定する。本研究では K 値の候補として、 $0.15 \text{ mg/m}^3/\text{cpm}$ を例示する。

(2) 測定の方法

以下の手順で行う。測定は専門の測定業者に委託して実施することが望ましい。

ア 測定点の設定

高濃度粉じん作業の判定は、粉じん作業中に作業者の近傍で、原則としてデジタル粉じん計による相対濃度指示方法によって行う。測定位置は、粉じん濃度が最大になると考えられる発じん源の風下で、重機等の排気ガス等の影響を受けにくい位置とする。測定は粉じんの発生すると考えられる作業内容毎に行う。同一作業を行う作業者が複数いる場合には、代表して 1 名について測定を行う。作業者の負担となり、多くの場合作業の安全性に問題があるため、測定者がデジタル粉じん計を携行し、作業の邪魔にならず、測定者の安全が確保される範囲で作業者になるべく近い位置で測定を行うことを基本とする。作業の安全上問題が無い場合は、作業者自身が LD-6N を装着して測定する方法も検討されてよい。

イ 測定時間

測定時間は濃度が最大となると考えられる作業が行われている継続した 10 分間以上とする。作業の 1 サイクルが数分程度の短時間の作業が繰り返し行われる場合は、作業が行われている時間を含む 10 分間以上の測定を行う。作業の 1 サイクルが 10 分～1 時間程度であれば作業 1 サイクル分、それより長い連続作業であれば、作業の途中で 10 分程度の測定を数回行い、その最大値を測定結果とする。

ウ 評価

デジタル粉じん計により測定された相対濃度指示値(1 分間当たりのカウント数, cpm)に指定された K 値を乗じて質量濃度を算出し、 10 mg/m^3 を超えているかどうかを判断する。

表 1 現場調査および実験と作業内容

	場所	実施日時	作業内容
調査 1	福島県双葉郡大熊町 坂下ダム管理棟	平成 24 年 3 月 21 日	バックホウによる土はぎ取り コンクリ床研磨*
調査 2	福島県伊達郡川俣町 山木屋中学校	平成 24 年 4 月 10 日	刈り払い機による根切り 手作業による土壌回収
調査 3	福島県双葉郡楡葉町 楡葉南小学校	平成 24 年 12 月 6 日	バックホウによる土(芝地)のは ぎ取り
実験	中央農業総合研究セン ター	平成 24 年 7 月 4 日～5 日	①, ⑤パワーハローによる土お こし ②, ⑥リアブレードによる回収 ③, ⑦フロントローダーによる ダンプへの回収 ④, ⑧バックホウによるフレキ シブルコンテナへの詰め込み

*土壌取り扱い作業ではないので、本概要版の結果には含めていない。

**実験での作業は2日間同じ機器を用いて作業を繰り返しおこなった。①～④は初日(4日),
⑤～⑧は2日目(5日)の作業を示す。

表 2 使用した機器

測定機器名	分類	対象粉じん	濃度	測定
IOM サンプラー	サンプラー	インハラブル	質量濃度	個人
NWPS-254	サンプラー	吸入性	質量濃度	個人
ろ紙ホルダーA 型**	サンプラー	インハラブル	質量濃度	定点
NW-354**	サンプラー	吸入性	質量濃度	定点
アンダーセン**	サンプラー	—	粒径別質量濃度	定点
Split2*	サンプラー／ 粉じん計	インハラブル	相対濃度 質量濃度	個人
LD-6N	粉じん計	—	相対濃度	個人
LD-5	粉じん計	—	相対濃度	定点
LD-5D**	粉じん計	—	相対濃度	定点

*機器トラブルなどにより十分なデータを得られなかったため、質量濃度測定用のサン
プラーとしてのみ使用

**大型機器であり、実験でのみ使用

表 3 粉じん濃度および K 値の結果（全データ）

	質量濃度		相対濃度(粉じん計)		K 値			
	IOM	A	LD-5	LD-6N	IOM/LD-5	IOM/LD-6N	A/LD-5	A/LD-6N
	mg/m ³		cpm		mg/m ³ /cpm			
調査 1	0.70		15.96		0.044			
	0.13		15.1		0.009			
調査 2	0.62			50.5		0.012		
	0.53			79.7		0.007		
	0.50		29.6		0.017			
	0.43		37		0.012			
	0.44		38.9	33.7	0.011	0.013		
	0.37			32.3		0.011		
調査 3	0.03			5.58		0.005		
	0.07			3.97		0.019		
	0.02			4.25		0.004		
	0.05		8.26		0.006			
	0.06		3.6		0.016			
	0.01		0.38		0.032			
実験								
作業①-②	1.33		63	44	0.021	0.030		
	3.53	3.37	77		0.046		0.044	
作業③-④	14.40		138.65	102.58	0.104	0.140		
	148.2*	42.0*	249.39*		0.59*		0.17*	
	3.0			256.45		0.012		
作業⑤	14.39		216	172	0.067	0.084		
	13.37	5.72	204	200	0.066	0.067	0.0280	0.0286
	8.33			914		0.009		
作業⑥	0.48		80	70	0.006	0.007		
	0.64	0.336	64	69	0.010	0.009	0.0053	0.0049
	0.56			101		0.006		
作業⑦	5.67			373		0.015		
	2.22	2.34	102	93	0.022	0.024	0.0229	0.0252
	3.88		311		0.012			
	6.44			183		0.035		
作業⑧	2.89			45		0.064		
	1.89	1.48	51	61	0.037	0.031	0.0290	0.0243
	0.65		80		0.008			
	1.90			60		0.032		

作業①-②は連続して測定したことを意味する。

作業内容は表1を参照

*サンプラーに土粒が混入したことによる異常値と判断してデータは使用しない。

表 4 模擬実験・現場調査によって得られた K 値 (mg/m³/cpm)

	LD-5	LD-6N	A	IOM	全体
データ数	24	26	9	41	50
算術平均	0.028	0.028	0.024	0.029	0.0279
標準偏差	0.024	0.031	0.012	0.030	0.027
標準誤差	0.005	0.006	0.004	0.005	0.0039
幾何平均	0.020	0.018	0.019	0.019	0.019
中央値	0.21	0.017	0.025	0.016	0.020
最小値	0.005	0.004	0.005	0.004	0.004
最大値	0.10	0.14	0.044	0.14	0.14
t 検定*	N.S.(p=0.590)		N.S.(p=0.942)		

t 検定*: いずれも対数変換した値で t 検定を行った。

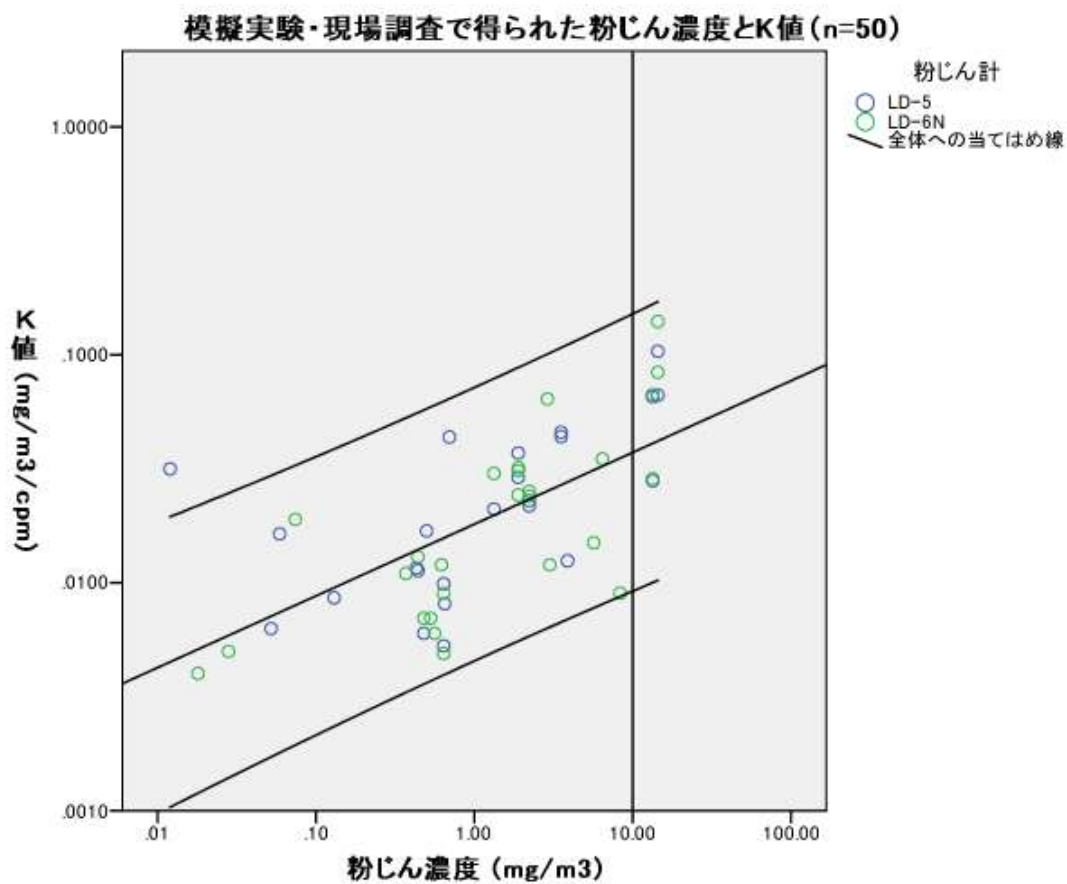


図 1 粉じん濃度と K 値の関係 (両軸対数目盛)

Pearson の相関係数 : 0.646 ($p < 0.0001$)

両側の線は 95%信頼区間を示す



図 2 粉じん濃度 14.4mg/m^3 のフィルター (左) 148.16mg/m^3 のフィルター(右)

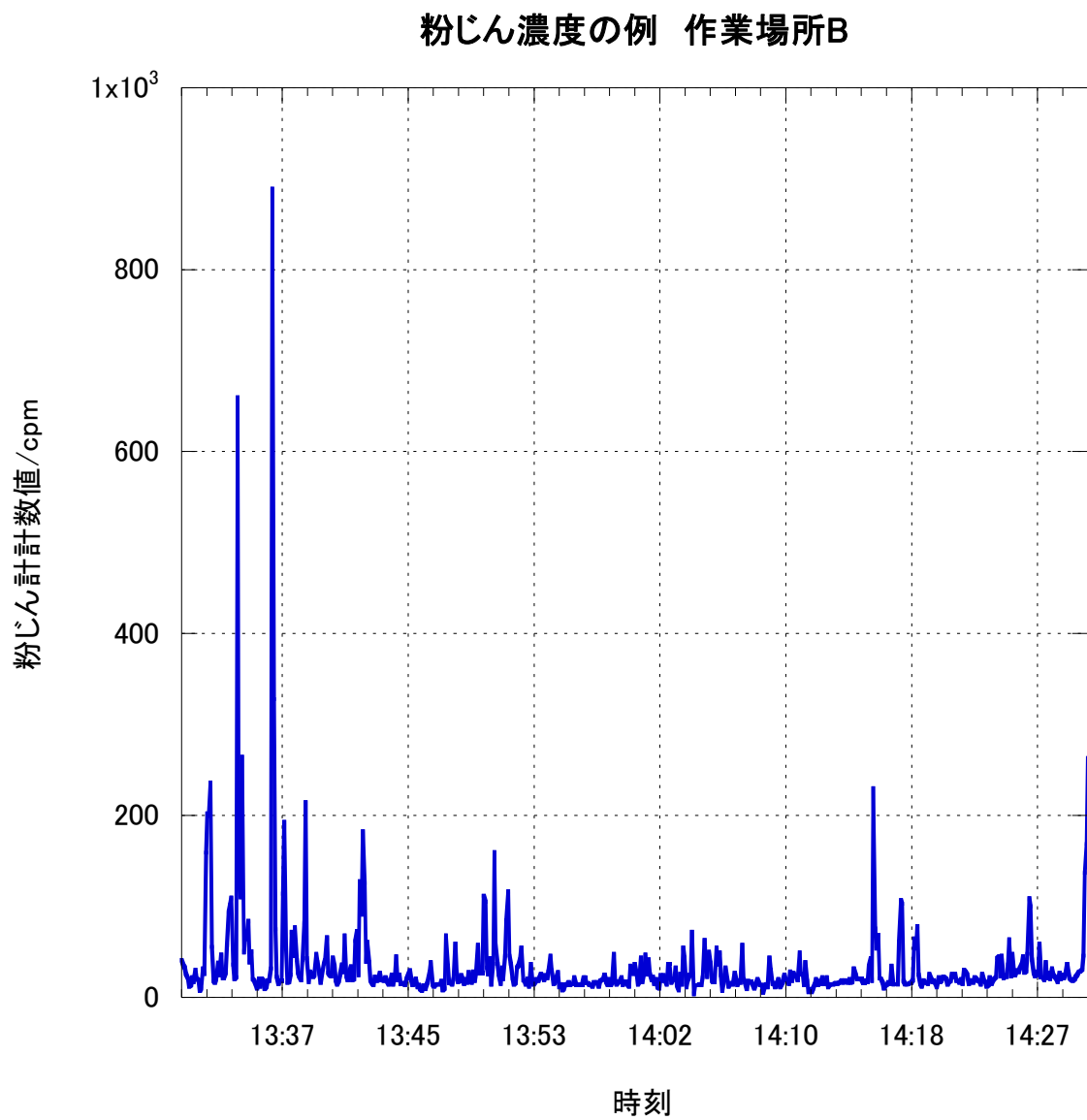


図 3 粉じん濃度の時系列変化例（2 回目調査のデータ）