

ずい道等建設工事中の質量濃度変換係数 (K 値) に関する文献等について

1 文献レビュー

(1) 新藤ら (1985) は、NATM 工法のトンネル坑内において、 $10\mu\text{m}$ 以下の粉じんについて、切羽から $3\text{m} \times 3\text{m}$ のメッシュの 6 点 (Fig. 4) で測定を行い、デジタル粉じん計とローボリュームサンプラ ($15\text{--}30\text{L}/\text{min}$) と TR サンプラ ($20\text{L}/\text{min}$) により併行測定を行い、K 値を求めた。その結果、相対濃度と質量濃度の関係はおおむね直線の関係となり、相対濃度が 500cpm 超えると、K 値が大きくなる傾向があったが、掘削・ずり出しとコンクリート吹きつけ時の K 値に大きな違いは見られなかったとしている (Fig. 5)。

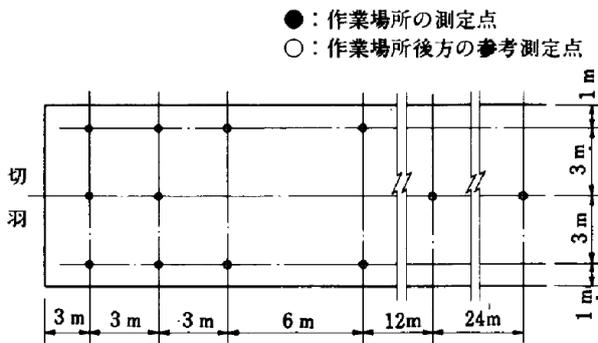


Fig.4 測定点の標準配置図

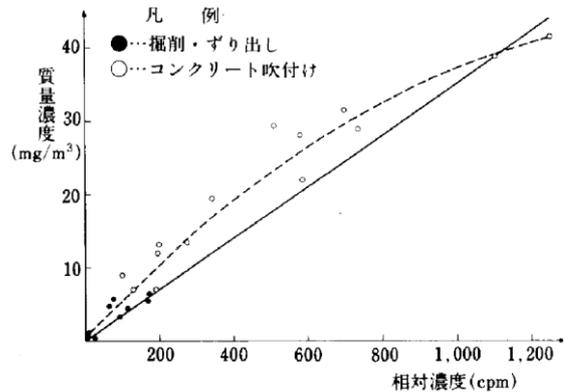


Fig.5 相対濃度～質量濃度の関係

(2) 日本作業環境測定協会 (2010) は、NATM 工法の 4 つのトンネルを対象に、個人ばく露測定 (8 時間) と切羽から 50m 地点での定点測定を行った。個人ばく露測定

は、Dorr Oliver サイクロン付きサンプラ ($4\mu\text{m}$ 、50%カット相当) を装着したろ紙捕集方式サンプリングと、分粒装置の付いていない光散乱方式の相対濃度計 (LD-2) との併行測定を行った。定点測定 (10 分以上) は、多段階分粒装置 (レスピコンパーティクルサンプラ) を装着したろ紙捕集サンプリングと、

表 30 LD-2 型粉じん計の全作業時間の質量濃度変換係数 (K 値)

トンネル名		K 値 ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{cpm}$)	平均値	50m 地点 (併行測定) の K 値 ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{cpm}$)
Aトンネル	作業者 A1	0.0008	0.0009	0.0010
	作業者 A2	0.0006		
	作業者 A4	0.0010		
	作業者 A5	0.0010		
Bトンネル	作業者 B1	0.0012	0.0012	0.0015
	作業者 B2	0.0012		
	作業者 B3	0.0013		
	作業者 B4	0.0014		
	作業者 B5	0.0012		
Cトンネル	作業者 C1	0.0012	0.0012	0.0006
	作業者 C2	0.0014		
	作業者 C3	0.0018		
	作業者 C4	0.0011		
	作業者 C5	0.0005		
Dトンネル	作業者 D1	0.0008	0.0009	0.0013
	作業者 D2	0.0012		
	作業者 D3	0.0014		
	作業者 D4	0.0006		
	作業者 D5	0.0010		
	作業者 D6	0.0007		
平均値		0.0011		0.0011
最小値		0.0005		0.0006
最大値		0.0018		0.0015

分粒装置のついていない光散乱方式の相対濃度計 (LD-2、LD-3K2) の併行測定を行った。これらにより、それぞれ K 値を算定した (表 30)。この結果、個人ばく露測定のトンネル毎の平均値 (0.0009~0.0012) は、全トンネルの平均値 (0.0011) の 0.81~1.1 倍 であり、定点測定のトンネル毎の平均値 (0.0006~0.0015) は、全トンネルの平均値 (0.0011) の 0.55~1.36 倍 のばらつきがあった。

- (3) 名古屋 (2008) は、分粒特性が $5 \mu\text{m}$ 、50%カットから $4 \mu\text{m}$ 、50%カットに変更されたことに伴い、切羽から 50mの地点において、ローボリュウムサンプラーによる質量濃度測定と、光散乱方式の相対濃度測定器による併行測定を行って K 値を算定した。K 値は、同一の測定値であっても作業内容やトンネルによりばらつきがあった (表 3 LD-1H:0.0010-0.0025、LD-2:0.0013-0.0030、LD-3K2:0.0011-0.0036、LD-5:0.0012-0.0029、LD-5D:0.012-0.028) が、平均値がおおむね 0.002 付近であった (表 3 LD-1H:0.0019、LD-2:0.0022、LD-3K2:0.0020、LD-5:0.0024、LD-5D:0.020) ことから、LD系相対濃度の K 値は 0.002 が妥当であるとしている。

表 3 各トンネルに於ける質量濃度変換係数 K 値

トンネル	作業内容	測定時の粉じん濃度 (mg/m ³)	LD-1H	LD-2	LD-3K2	LD-5	LD-5D
A	2次吹き	1.40	0.0022		0.0022		
		3.42	0.0025		0.0027		
	ずり積み	0.28	0.0015		0.0015		
		4.26	0.0017		0.0018		
B	掘削〜ずり	1.09		0.0021	0.0019	0.0023	0.019
		7.56		0.0020	0.0021	0.0028	0.020
	2次吹き	7.90		0.0024	0.0036	0.0028	0.021
C	ずり積み	0.61			0.0013		
		0.21			0.0013		
		0.10			0.0014		
D	ずり積み	1.00	0.0010	0.0013	0.0011	0.0012	0.012
		9.15	0.0025	0.0030	0.0028	0.0029	0.028
	2次吹き	9.63	0.0019	0.0022	0.0021	0.0023	0.021
平均値			0.0019	0.0022	0.0020	0.0024	0.020

- (4) 赤坂ら (2005) は、NATM 工法トンネルのコンクリート吹きつけ時において、吹きつけ箇所から 10mと 50mの地点で、ローボリュウムサンプラーと光散乱方式の相対濃度計による併行測定を行って K 値を算定した。スランブの区分、圧送エア流量、フレッシュコンクリートの性状をパラメータとして変動させた結果、10m、50mいずれも K 値に大きな違いはなく、50mが 10mよりも若干高めの場合が多かったとしている (表 6)。

表 6 試験結果一覧表 1

スランブの区分	圧送エア流量 (m ³ /min)	フレッシュコンクリートの性状				粉じん			
		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	実測 K 値		粉じん濃度		
					10m (mg/m ³ /cpm)	50m (mg/m ³ /cpm)	10m (mg/m ³)	50m (mg/m ³)	
1	9	13.5	2.2	24.6	0.0023	0.0024	9.61	4.66	
		7	13.0	1.8	24.2	0.0024	0.0023	4.67	3.50
		5	13.5	2.6	24.0	0.0022	0.0025	3.09	2.70
2	9	20.0	1.6	24.0	0.0023	0.0027	6.25	5.40	
		7	20.0	2.0	24.4	0.0024	0.0024	5.15	3.51
		5	18.0	2.0	26.2	0.0038	0.0025	5.33	2.40
3	9	10.5	3.5	27.0	0.0026	0.0022	8.42	5.40	
		7	10.5	3.2	27.3	0.0024	0.0037	5.11	7.13
		5	8.5	2.6	27.8	0.0025	0.0026	3.06	2.27

- (5) 名古屋 (2014) は、NATM 工法の 2つのトンネル坑内の掘削、ずり出し及び吹きつけ時の一連の作業において、切羽より 20mの地点で、いずれも排気管が設置されていない側に測定点を置き、ローボリュウムサンプラーによるろ紙捕集方法と光散乱方式の相対濃度測定器による併行測定を行い、K 値を算定した (図 3.2、図 3.7)。K 値は測定器によって異なり、LD-3K2:0.0027-0.0069、LD-5:0.0032-0.0063、LD-5D:0.028-0.033、LD-6N:0.0032-

0.0037 であった。切羽からの複雑な気流の影響により、切羽に向かって右側と左側で測定点をとることでK値が変化した可能性があるとしている。さらに、同様の作業を行っている現場であっても発生粉じん量やK値が著しくことなることはトンネル現場において一般的なことだとし、どのようなトンネル現場においても使用できるような十分安定した標準的なK値を求めることは困難であるとしている。

- (6) 労働安全衛生総合研究所（2018）は、NATM 工法による5つの山岳トンネルの坑内において、吸入性粉じん用サンプラーによる質量濃度測定と光散乱方式の相対濃度測定器（分粒装置付きと分粒装置無しのもの）で併行測定を行い、K値を算定した。定点測定（LD-5R）での1サイクルを通じた測定については、切羽から25mから100mで行った。さらに、個人サンプラー（LD-6N, LD-6N2）及び重機内（LD-5, LD5R）での併行測定も行った。定点測定（LD-5R）での1サイクルでのK値は、外れ値の2点（いずれも、吹きつけ開始直後に15mg/m³を超える高濃度を記録しており、何らかの特殊要因があったと推定される。）を除くと、0.002を中心として0.001-0.003の範囲に分布している（図9）。また、切羽からの距離との関係を観てみると、外れ値の2点を除くと、おおむね0.002付近に分布した（図11上図）。分粒装置の有無によるK値の違いについては、分粒装置の機能により相対濃度が低くなることを反映して分粒装置無しのものよりK値は相対的に大きくなったとしてい

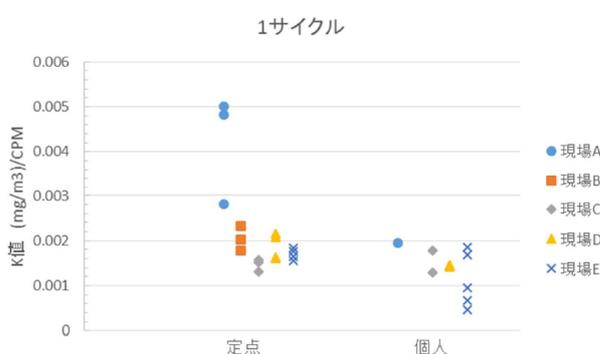


図9 測定方法毎のNATM 1サイクルでのK値

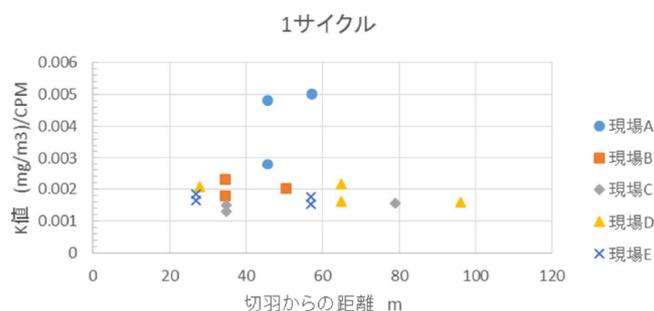


図11 定点観測における作業毎のK値の距離変動

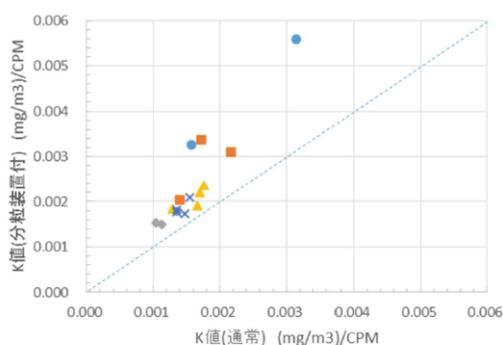


図12 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計のK値の関係

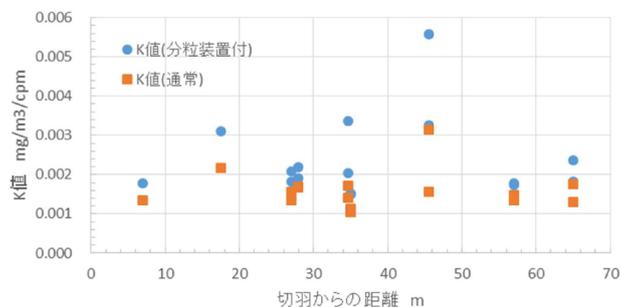
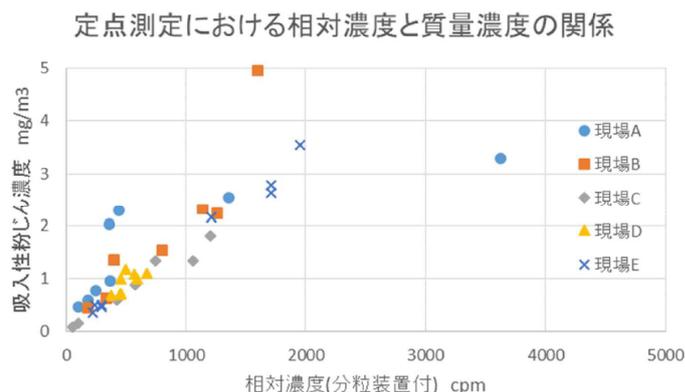


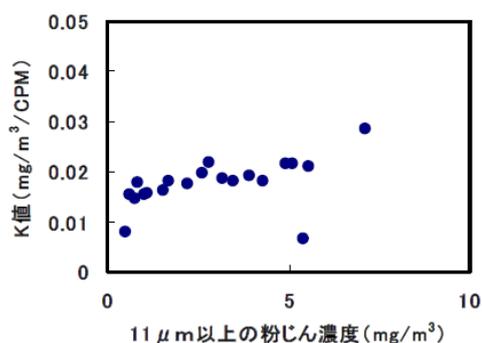
図13 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計のK値の切羽からの距離による変化

る (図 12)。この傾向は切羽からの距離に対しても大きな変動はなかったとしている (図 13)。さらに、定点測定における相対濃度と質量濃度の関係を追加解析したところ、おおむね直線関係となっている (追加図)。



(7) 大下ら (2007) は、模擬トンネル内の模擬岩盤を用いた機械掘削実験に

より、粒径別の粉じん濃度とK値の関係について調査した。測定は、切羽から 10 m、30m、50mの地点に、光散乱方式の相対濃度計 LD-5 を 8 台、LD-3K を 1 台、ローボリュームエアサンプラー (LV-40BR) 4 台、アンダーセンサンプラー (AN-200) 1 台により行った。その結果、粒径が大きい範囲 (11 μm 以上) の粉じん濃度が増加するのに従って、K値が大きくなっているとした (図 a))。その原因としては、光散乱方式では、照射光に対して粉じんの粒径が大きくなるほど前方散乱量が大きくなる傾向があるため、受光側の散乱量が相対的に低くなり、K値が大きくなるものと考えられるとしている。さらに、粉じんの粒度分布が統計的なフラクタル分布 (粒度の細かい部分を拡大したときに粒度の粗い部分と類似の分布形態を示す分布) を示すことを仮定し、フラクタル次元と LD-5D のK値との関係を調べたところ、フラクタル次元が大きくなる (粉じん中の細粒分が大きくなる) ほどK値が減少しており、K値が粉じんの粒度分布特性に依存していることを示しているとしている (図 8)。



a) 11 μm以上の粉じん濃度とK値の関係

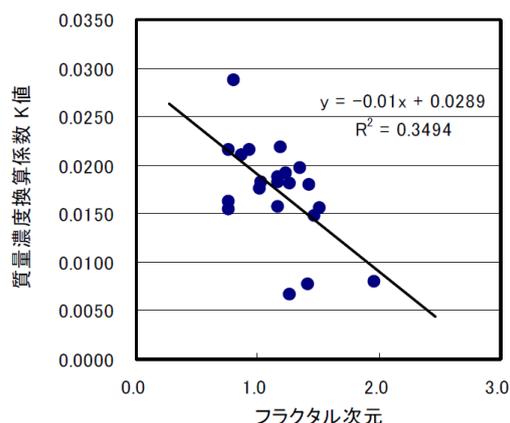


図8 粉じん粒度分布のフラクタル次元とK値の関係(LD-5D)

2 トンネル粉じん対策ガイドラインに記載されている標準K値の設定根拠

(1) 「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」(平成 12 年 12 月

26 日基発第 768 号。以下「ガイドライン」とい。) の制定当初の標準 K 値は、建設業労働災害防止協会の「ずい道工事における換気技術委員会報告書」(平成 12 年 3 月)において提言されている数値と一致している。

- (2) 平成 20 年にガイドラインが改正され、標準 K 値は測定機器が追加されるとともに、従来の標準 K 値が修正 (LD-1L:0.03→0.02、LD-1H 等:0.003→0.002) されている。これは、名古屋 (2008) の提言と合致する。
- (3) 平成 23 年にガイドラインが改正され、LD-5D, LD-5, LD-2 及び 3442 の光散乱方式の相対濃度測定器の標準 K 値が追加された。これは、平成 22 年 12 月の「平成 22 年度管理濃度等検討会中間報告」に基づくものである。平成 22 年 12 月に開催された平成 22 年度第 2 回管理濃度等検討会の資料 2-9 では、切羽から 50m 地点において、コンクリート吹きつけ作業中 (一部ずり出しを含む。) に、分粒装置 (4 μm 50%カット) を備えたサンプラーによる質量濃度と光散乱方式の測定器による相対濃度を併行測定し、K 値を算定した (管理濃度等検討会 (2010) 別添 1)。同一の作業であっても、K 値には一定のばらつきがあった (LD-5D:0.013-0.038、LD-5:0.0012-0.0028、LD-2:1.36-2.85、3442:0.0024-0.0054)。標準 K 値は、測定器ごとの平均値の有効数字の 2 桁目を四捨五入して設定されたとみられる (LD-5D:平均 0.021、K 値 0.02、LD-5:平均 0.0024、K 値 0.002、LD-2:平均 2.015、K 値 2.00、3442:平均 0.0034、K 値 0.003)。
- (4) 平成 29 年にガイドラインが改正され、LD-5R の標準 K 値が追加された。平成 29 年度第 1 回管理濃度等検討会の資料 1-2 で NATM 工法のずい道坑内の切羽から 50m の地点において、ずり出しと吹きつけの 1 サイクルの間、ローボリュームサンプラーによる質量濃度と LD-5 と LD-5R による相対濃度を 2 器ずつ同時に併行測定し、K 値を算定した (管理濃度等検討会 (2017) 別添 2)。この結果、K 値は作業内容によりばらついた (別紙 2 表 1 LD-5:0.001-0.0017、LD-5R:0.0012-0.0017) が、LD-5 と LD-5R の相対濃度が非常によく相関した ($R^2=0.9977$) ことから (別紙 2 図 4)、LD-5 と同じ標準 K 値 (0.002) が採用された。

3 考察

- (1) 作業の内容による K 値への影響については、新藤ら (1985) では、K 値に大きな違いは見られなかったとしているが、名古屋 (2008) では、作業の内容による K 値の変動は大きい。赤松ら (2005) はコンクリート吹きつけ時のみの測定結果であるため、変動はほとんどない。
- (2) 切羽からの距離による実測 K 値への影響については、赤坂ら (2006) では、10m 地点と 50m 地点で K 値に明確な違いは認められないが、名古屋 (2014) での 20m 地点での実測 K 値と名古屋 (2008) での 50m 地点での光散乱方式の同一機種 (LD-5) の平均値 (0.002) と比較すると、20m 地点の値が 1.6~3.2 倍 (0.0032-0.0063) 大

きかった。一方、労働安全衛生研究所（2018）での1サイクル平均の定点測定の本値は、5つのトンネルの測定結果を通じて、切羽からの距離による偏りはみられない（図13）。名古屋（2014）は、分粒装置を装着していなかったため、粒度分布における大粒径の粉じん割合が高くなり、本値が大きくなったと推定される（大下ら（2007））。

- (3) ガイドラインに定める標準本値の設定については、作業内容やトンネルにより実測された本値は、平均値の0.5～1.5倍のばらつきがある。（名古屋（2008）では、平均値と比較して、平均値をまたがる一定のばらつきがあることを前提とした上で、全ての測定された本値の平均値を算出している。光散乱方式の測定器については、制定時、平成20年、平成23年の改正のいずれも、実測された本値の平均値に近い値を標準本値に採用している。
- (4) 過去の標準本値の設定方法を踏まえると、労働安全衛生研究所（2018）の1サイクル平均の実測本値は、定点測定（LD-5R）については、外れ値の2点を除けばガイドラインの標準値である0.002の0.6～1.4倍の範囲で収まっており（図9）、また、切羽からの距離による偏りもみられない（図13）。さらに、定点測定における相対濃度と質量濃度の関係は、おおむね直線関係となっている（追加図）。以上から、これら測定結果に基づいて切羽における標準本値を定めることは、過去の標準本値の設定方法と矛盾しないといえる。ただし、この標準本値は、分粒装置が装着可能な光散乱方式の相対濃度計を使用する必要があり、具体的には、LD-5、LD-5R、LD-6Nに使用機種を限定することが望ましい。
- (5) なお、名古屋（2014）での切羽からの20m地点での実測本値（LD-5:0.0032-0.0063）は、光散乱方式の相対濃度計に分粒装置を付けなかったため、粒度分布に占める大粒径粉じんが大きくなったことにより、本値に大きな影響を受けたと考えられる（大下ら（2007））。労働安全衛生研究所（2018）の値と比較して、標準本値である0.002との乖離が大きく、乖離もプラス方向に偏っているため、この結果に基づいて標準本値を定めるのは困難であったという判断は妥当である。
- (6) 日本作業環境測定協会（2010）では、個人ばく露測定、切羽から50m地点での定点測定のいずれも、LD-2の総測定点の本値の平均値は0.0011であった。この値は、労働安全衛生総合研究所（2018）の分粒装置が付いていなかったLD-5等の本値の分布（図13）の範囲内に収まっており、労働安全衛生研究所（2018）の測定結果と矛盾しない。ただし、分粒装置による本値への影響は明らかなため、分粒装置付きの光散乱方式の相対濃度計による吸入性粉じんの標準本値の設定及びその妥当性について、今年度の調査で検証する必要がある。

(参照文献)

- 赤坂雄司、大下武志、波田光敬、井谷雅司 (2005) 吹付けコンクリート工の施工条件を変動させた場合の粉じん濃度について コンクリート工学年次論文集 Vol. 27, No. 1 pp. 1393-1398
- 大下武志、宇田川義夫、井谷雅司、徐永強 (2007) ずい道建設工事における機械掘削時の粉じん対策技術の開発 国立研究開発法人土木研究所平成 19 年度重点プロジェクト研究報告書
- 建設業労働災害防止協会(2000)ずい道工事における換気技術委員会報告書(平成 12 年 3 月)
- 管理濃度等検討会(2010) ずい道等建設工事におけるガイドラインに示されている粉じん計の K 値を新たに追加するための新規粉じん計の現場調査の実施結果について 平成 22 年度第 2 回管理濃度等検討会 (平成 22 年 12 月 7 日) 資料 2-9
- 管理濃度等検討会(2017) 新規粉じん計 LD-5R 型の質量濃度変換係数(K 値)について 平成 29 年度第 1 回管理濃度等検討会 (平成 29 年 5 月 23 日) 資料 1-2 別紙
- 新藤敏郎、平田篤夫、稲葉力(1986)トンネル坑内の浮遊粉じんについて-粉じんの性状、濃度測定、対策、新方式の集じん装置- 西松建設情報 Vol. 8 pp. 19-28
- 名古屋俊士(2014)トンネル建設工事における相対濃度計等を用いた粉じん濃度測定に係る実証試験報告書 早稲田大学理工学院創造理工学部資源工学科
- 名古屋俊士(2008) 隧道等建設工事の現行測定法の検証とアーク溶接等への新測定法の提案に関する研究 厚生労働科学研究費補助金平成 19 年度総括研究報告書
- 日本作業環境測定協会(2010) トンネル建設工事における個人ばく露濃度測定等推進事業検討委員会報告書(平成 21 年度厚生労働省委託事業)(社)日本作業環境測定協会
- 労働安全衛生総合研究所(2018)トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究報告書 独立行政法人労働者健康安全機構

ずい道等建設工事現場におけるガイドラインに示されていない新規相対濃度計の質量濃度変換係数(K値)一覧

機種	P-5L P-5L2 P-5L3	P-5H P-5H2 P-5H3	LD-1L	LD-1H	3411	LD-1H2	LD-3K	LD-3K2	3423	3451	LD-5D	LD-5	LD-2	3442	備考	
製造メーカー	柴田科学㈱				日本カノ マックス㈱	柴田科学㈱			日本カノマックス㈱		柴田科学㈱			日本カノマックス㈱	作業内容 測定位置	
K値の単位	(mg/m ³ /cpm)								(mg/m ³ /mg/m ³)	(mg/m ³ /cpm)		(mg/m ³ /mg/m ³)	(mg/m ³ /cpm)			
ガイドラインに示されていないK値(有無)	0.04	0.004	0.02	0.002	0.02	0.002			0.003	0.6	無	無	無	無		
ト ン ネ ル で の 実 測 値	1						0.0024				0.026	0.0028	2.00		二次吹き(50m)	
	3								0.0016		0.015		1.36		二次吹き(50m)	
	7						0.0008				0.013		2.31		二次吹き(50m)	
	8							0.0019			0.019	0.0023	2.06		二次吹き(50m)	
	9							0.0021			0.020	0.0028	2.01		二次吹き(50m)	
	10							0.0036			0.021	0.0028	2.37		二次吹き(50m)	
	11							0.0016					2.21		二次吹き(50m)	
	12							0.0021					2.85		二次吹き(50m)	
	13							0.0015					1.70		二次吹き(50m)	
	14							0.0016					1.61		二次吹き(50m)	
	15							0.0017					1.68		二次吹き(50m)	
	16									0.0033				0.0028	二次吹き(50m)	
	17									0.0033				0.0030	二次吹き(50m)	
	18									0.0031				0.0032	二次吹き(50m)	
	19									0.0031				0.0033	二次吹き(50m)	
	20									0.0030				0.0034	二次吹き(50m)	
	21									0.0030				0.0035	二次吹き(50m)	
	22									0.0050				0.0044	二次吹き(50m)	
	23									0.0050				0.0054	二次吹き(50m)	
	24									0.0036				0.0036	二次吹き(50m)	
	25									0.0036				0.0038	二次吹き(50m)	
	26									0.0024				0.0025	二次吹き(50m)	
	27									0.0024				0.0024	二次吹き(50m)	
	28									0.0031				0.0032	二次吹き(50m)	
	28									0.0031				0.0032	二次吹き(50m)	
	30								0.0019			0.019	0.0023		ずり積み(50m)	
	31								0.0021			0.020	0.0028		二次吹き(50m)	
	32								0.0036			0.021	0.0028		二次吹き(50m)	
	33								0.0011			0.012	0.0012		ずり積み(50m)	
	34								0.0021			0.021	0.0023		二次吹き(50m)	
	35								0.0019			0.022	0.0021		二次吹き(50m)	
	36								0.0031			0.038	0.0032		二次吹き(50m)	
	37								0.0016			0.021	0.0017		二次吹き(50m)	
	実測値の 平均値							0.0016	0.0021	0.003		0.021	0.0024	2.015	0.0034	
	ガイドライン 追加K値(案)											0.02	0.002	2.00	0.003	

表 1 ずい道建設工事現場における並行測定結果

機種	LD-5 型		LD-5R 型		併行測定 結果	備考
製造メーカー	柴田科学					
K 値の単位	mg/m ³ /CPM					
	ガイトラインで示されている K 値(有無)					
	0.002		無			
測定結果	CPM	K 値 (mg/m ³ /CPM)	CPM	K 値 (mg/m ³ /CPM)	(mg/m ³)	作業内容/位置
1	744	0.0017	747	0.0017	1.240	ずり積み/左
2	765	0.0015	740	0.0016	1.173	ずり積み/右
3	210	0.0011	195	0.0012	0.225	吹付け/左
4	229	0.0011	221	0.0012	0.254	吹付け/右
5	220	0.0012	212	0.0013	0.267	2 回目吹付け/左
平均	-	0.0013	-	0.0014	-	

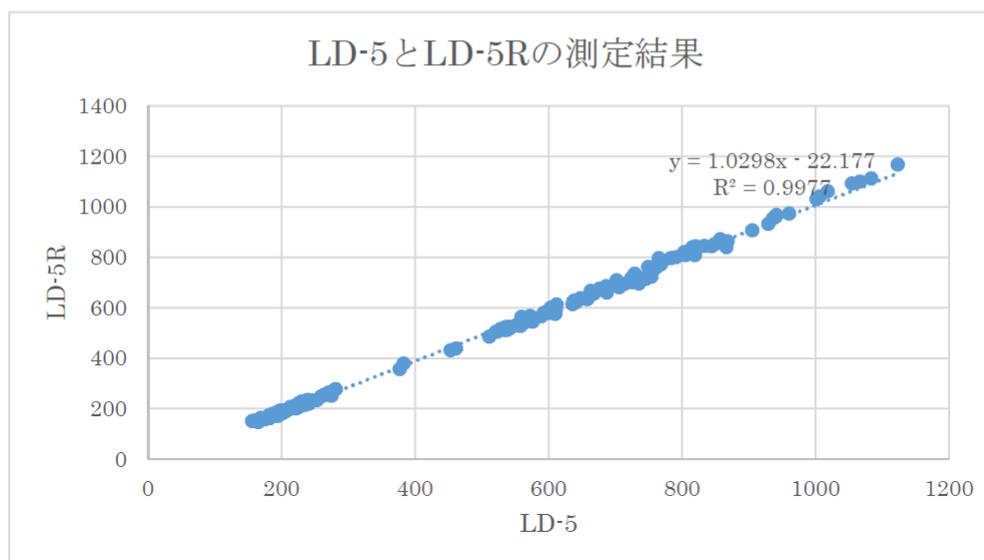


図 4 LD-5 型と LD-5R 型の相関