

I-1 道路工事に係る環境影響予測技術の向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平成 15 年度～17 年度

担当チーム：技術推進本部（先端技術）

研究担当者：山元 弘、林 輝、吉田 潔

【要旨】

本研究は平成12年度に策定した工事騒音・振動・大気環境影響評価の技術手法において不足している知見、解析手法を検討するものである。降下ばいじんについては、降下ばいじんの鉛直拡散幅、水平拡散幅はガス状物質と同程度であり「重力沈降を考慮したプルームモデル」の適用が可能、裸地由来降下ばいじんは土質ごとに設定した「基準発生量」が風速のべき乗に応じて増減する式が適切との結論を得た。騒音については、マイクロホンアレイで建設機械の音源別の騒音発生量を分析する実験を無響室で行い、半無響（地表面からの反射がある）条件で複数の建設機械音の音源別のA特性実効音響パワーレベルが分析できることを実証した。

キーワード：工事騒音、環境影響評価、マイクロホンアレイ、降下ばいじん、粉じん

1. はじめに

平成 12 年度に策定した工事騒音・振動・大気環境影響評価の技術手法においては、基本的な考え方がまとめられているが、環境影響評価の実務への適用では、予測方法や予測データの不足のため予測に苦慮している事例もある。本研究は、技術手法で不足している事項への対応として、1) 降下ばいじんについて、裸地の影響や仮囲いの効果の予測手法、2) 工事騒音について、複数の建設機械の音を音源別に現場計測する手法を検討したものである。

2. 工事大気質

2.1 工事大気質の予測手法研究方法

現在の降下ばいじんの予測式は、プルーム式を基本とする経験式（式-1 参照）である。この式は経験式であるため、発生源高さの変化に対応させた予測ができないなど汎用性が低い、粉じん等の発生量と係数 a の関係が不明確である、などの問題点がある。

都市部での工事においては、建設工事騒音のように平面のみでなく三次元的な予測が求められることも考えられる。（ex. 高架で工事する場合（発生源高さへの対応）、マンションを保全対象とする場合（予測点高さ対応））

現行予測式の問題点を解決する予測モデルとして、高さの変化に対応できる重力沈降を考慮したプルーム式（図-1、式-2 参照）の適用を前提として検討し、予測精度、運用性等の観点から現行簡易式と比較検討

することとした。

なお、(式-2)による予測では①拡散幅②落下速度③発じん量のパラメータが必要となるが、①については Pasquill-Gifford の式②については Stokes の式を基本とし、これらと工事現場での実測値から③をとりまとめ、工種毎のパラメータを整理する予定である。

$$C_d(x) = a \cdot \left(\frac{u}{u_0} \right)^{-b} \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^{-c} \quad (\text{式-1})$$

Cd(x) : 1 ユニットから発生し拡散する粉じん等のうち発生源からの距離 x(m)の地上 1.5m に堆積する 1 日当たりの降下ばいじん量(t/km2/日/ユニット)
a : 基準降下ばいじん量(t/km2/日/ユニット) (基準風速時の基準距離における 1 ユニットからの 1 日当たりの降下ばいじん量)
u : 平均風速(m/s)
u0 : 基準風速(u0=1m/s)
b : 風速の影響を表す係数(b=1)
x : 風向に沿った風下距離(m)
x0 : 基準距離(m) (x0=1m)
c : 降下ばいじんの拡散を表す係数

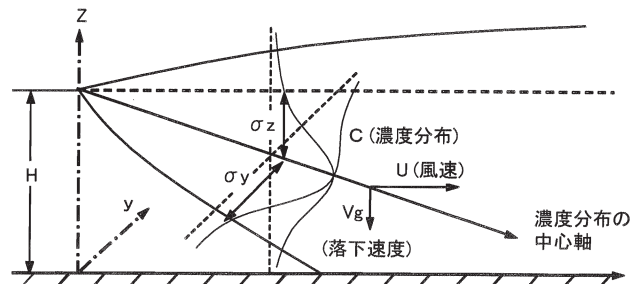


図-1 重力落下する粒子の拡散モデル

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - He + V_s \cdot x/u}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

(式-2)

C: 粉じん濃度 (mg/m³)
 Q: 発じん量 (mg/s),
 U: 平均風速 (m/s),
 x: 風向に沿った風下距離 (m),
 y: x 軸に直角な水平距離 (m),
 z: x 軸に直角な鉛直距離 (m),
 σ_y, σ_z : 水平 (y), 鉛直 (z) 方向の拡散幅 (m)
 He: 発じん箇所の高さ (m),
 Vs: 落下速度 (m/s)

2. 1. 1 降下ばいじん拡散実験

(式-2)の拡散幅についてはこれまでガス状物質について多くの実験が行われている Pasquill-Gifford の拡散幅を引用する予定であり、妥当性を確認するための拡散実験を行った。

ブラス機を準用した発じん装置を考案し屋外で拡散幅を測定した(写真-1)。発じん材料は関東ローム (JIS Z8901 7種: 代表粒径 30 μ m) とベントナイト (60 μ m, 200 μ m) とした。拡散幅はホーロー製のバットによる降下ばいじん量計測、デジタル粉じん計計測およ



写真-1 拡散実験

びトレーサーガスの計測を同時に行い測定値を比較した。

2. 1. 2 風速等と発じん量の関係調べる実験

(式-2)の発じん量及び裸地由来降下ばいじんに関する知見を得るため、風速、粒径、含水比等と発じん量の関係を調べる実験を行った。

実験に当たっては、自然風測定から求めた「べき数」をもとに適切な鉛直風速分布を再現することが可能な装置を新たに考案し製作した。風の発生は最大風速 14.0m/s 以上が発生可能なジェットファンを使用し、ジェットファンで発生させた風をダクトで整流装置に導き、この整流装置を調整して必要とする鉛直風速分布を発生させた。風速は粉じん発生部直前に無指向性の熱線式風速計を設置して測定した。発じん部の面積約は 0.1m² とし、転動した発じん材はポケットに落下する形状の容器を実験台に設置した。発じん量は発じん前後の重量を測定して求めた。

実験装置を図-2、写真-2に示す。

発じん実験は 72 条件で 92 回行った。実験条件の一覧を表-1に示す。

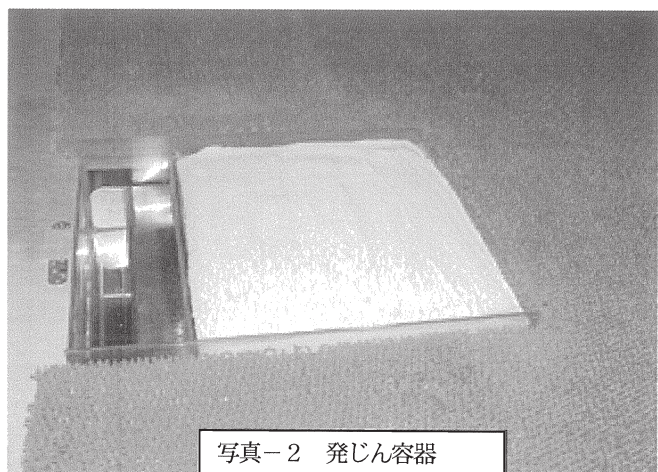


写真-2 発じん容器

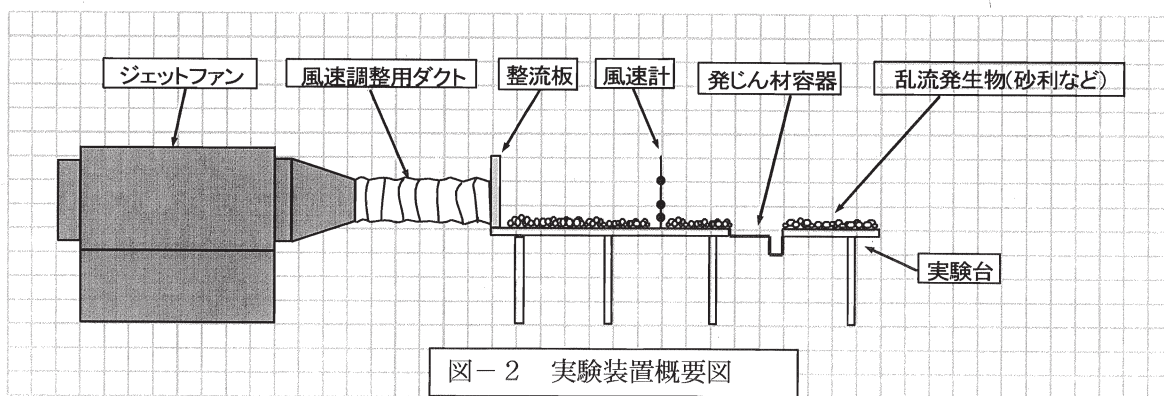


図-2 実験装置概要図

表-1 発じん実験条件一覧

1-1 予備実験	粉体	条件								条件数	測定数
		風速		送風時間(s)				地表面状態			
		14m/s	変動	15	30	45	60	FLAT	砂利		
予備-1~4	50 μ m	●		●	●	●	●	●		4	4
予備-5~6	50 μ m		●		●			●		1	2
予備-7	200 μ m	●			●			●		1	1
予備-8	50 μ m	●			●				●	1	1

1-2 発じん量	粉体	条件						条件数	測定数	
		風速(m/s)				地表面状態				
		6m/s~20m/s(10段階)		変動	任意	FLAT	砂利			
No.1~No.38	50 μ m		●				●		10	11
	50 μ m					●			4	7
	50 μ m						●	●	2	3
	200 μ m		●						10	10
	200 μ m					●		●	3	4
	200 μ m						●	●	2	3

1-3 含水比	粉体	条件								条件数	測定数
		風速	含水比(%)					地表面状態			
		18m/s	0	1.0	2.5	5.0	7.5	10	15		
No.39~No.58	50 μ m	●	●			●	●	●	●	6	7
	200 μ m	●	●	●	●	●		●		5	6
	30 μ m	●	●							1	3
	100 μ m	●	●							1	2
	500 μ m	●	●							1	2

1-4 粒径混在	粉体	条件								条件数	測定数
		重量混合比(%)			風速	含水比		地表面状態			
		50 μ m	200 μ m	砂利	18m/s	0		FLAT	砂利		
No.59	M2-1	10	90		●	●		●		1	1
No.60.68	M2-2	20	80		●	●		●		1	2
No.61.69	M2-3	30	70		●	●		●		1	2
No.62.70	M2-4	40	60		●	●		●		1	2
No.63	M2-5	50	50		●	●		●		1	1
No.64	M2-6	60	40		●	●		●		1	1
No.65	M2-7	70	30		●	●		●		1	1
No.66	M2-8	80	20		●	●		●		1	1
No.67	M2-9	90	10		●	●		●		1	1
No.71	M2-9	100	0		●	●		●		1	1

1-5 表面状態	粉体	条件								条件数	測定数
		面積比(%)			風速	含水比(%)		地表面状態			
		50 μ m	200 μ m	砂利	18m/s	0		FLAT	砂利		
No.72.73	M3-1	100		10	●	●			●	1	2
No.74	M3-2	100		20	●	●			●	1	1
No.75	M3-3	100		30	●	●			●	1	1
No.76	M3-4	100		40	●	●			●	1	1
No.77	M3-5	100		50	●	●			●	1	1
No.78	M3-6	100		60	●	●			●	1	1
No.79.84	M3-7	100		70	●	●			●	1	2
No.80.83	M3-8	100		80	●	●			●	1	2
No.81	M3-9	100		90	●	●			●	1	1
No.82	M3-10	100		100	●	●			●	1	1

2. 1. 3 重力沈降を考慮したブルーム式の検討

(式-2)に適用する沈降速度等について検討を行った。なお、拡散幅については拡散実験によりガス状物質と同程度であることが確認されており、既存式(Pasquill-Giffordの拡散幅)を引用した。

検証に用いた実測調査は、道路土工(硬岩掘削)の2003CB1216AMと2003CB1216PMの2ケースである。

2. 1. 4 仮囲いの効果予測検討

ここでは、「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」と「裸地由来の降下ばいじん」それぞれについて、予測式を適用し、環境保全措置としての仮囲いの効果を定量的に評価する手法を提案する。

2. 2 工事大気質の予測手法研究結果

2. 2. 1 降下ばいじん拡散実験結果

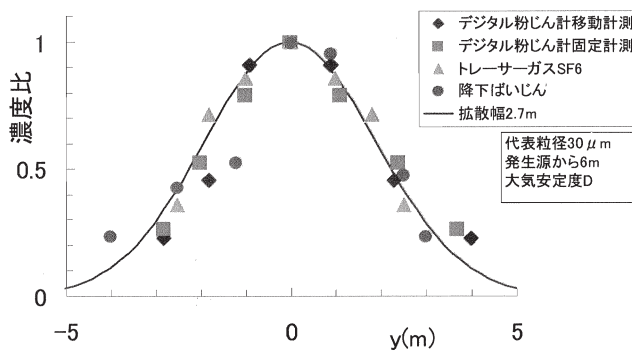


図-3 降下ばいじんの水平方向拡散幅の比較

図-3は鉛直方向、図-4は水平方向の拡散幅の測定事例である。水平方向の拡散幅の測定結果から工事降下ばいじんの拡散幅はガス状物質と同程度であることが確認できる。鉛直方向の降下ばいじん拡散幅はガス状物質との差がやや大きい箇所もあるが、重力による影響とは認められず、降下ばいじんとガス状物質は同じような傾向であると言える。実験は同一条件で3回づつ行い同様な結果を得ることができた。

本実験結果から工事降下ばいじん予測の拡散幅はガス状物質に関する文献値を使用することとした。

2. 2. 2 風速等と発じん量の関係を実験結果

1) 風速との関係

図-5、図-6に高さ0.03mにおける風速と発じん量の関係を示す。

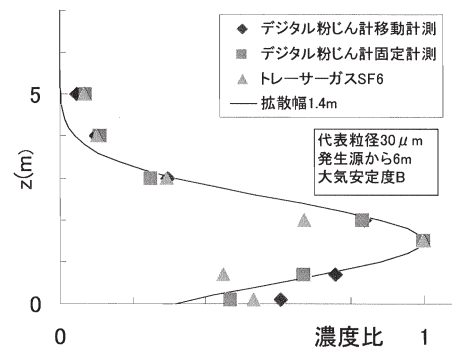


図-4 降下ばいじんの鉛直方向拡散幅の比較

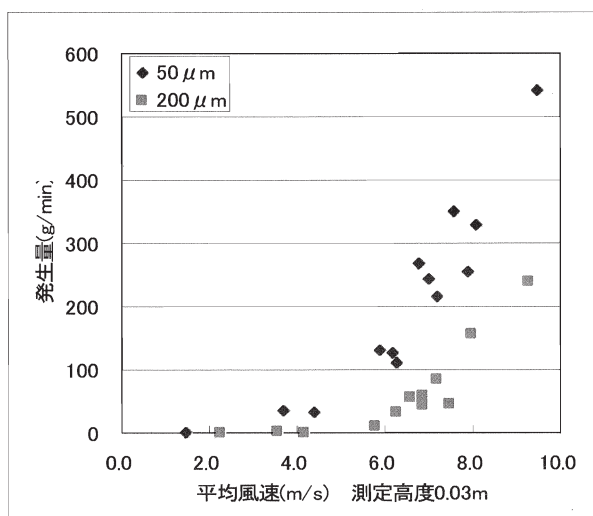


図-5 平均風速と発じん量の関係

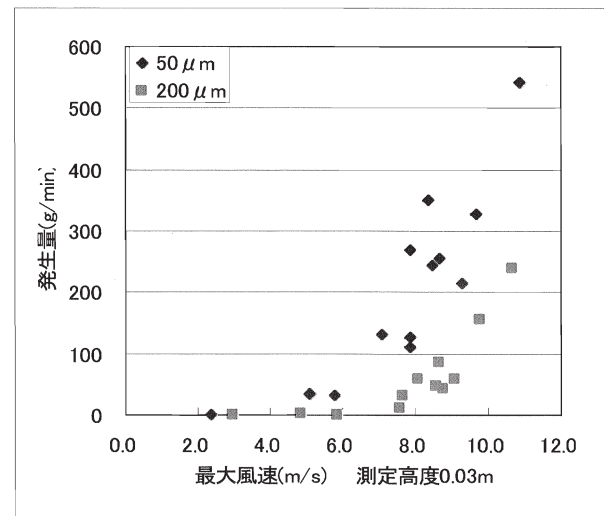


図-6 最大風速と発じん量の関係

降下ばいじんの発生量は、風速が強まるのと同時に指数曲線的に増加し、粒径 $50\mu\text{m}$ では風速 5m/s を $200\mu\text{m}$ では風速が 6m/s を超えた時点から発生量が多くなっている。最大風速と発生量の関係も傾向的には、平均風速と類似している。

また、風速が変動する場合と変動しない場合の風速波形を比較した。風速の変動は整流装置の前を約1秒間隔で障害物にて遮ることにより変動を発生させた。

高さ 0.03m で平均風速がほぼ同じ場合の定常風速と変動風速の比較を図-7に示す。変動風の方が乱流強度は大きくなっている。

定常風速および変動風速と発じん量の比較を図-8 図-9に示す。乱流強度の差が小さいため顕著な差は見受けられないが、変動風の方が発じん量がやや多目となる傾向がある。風のエネルギーは風速の2乗に比例し、発じん量は風速の4~5乗に比例するため、同じ風のエネルギーでも乱流等でむらがあると風速が強められるので発じん量が多くなると考えられる。したがって、発じん量の予測を行う場合においては安全側(予測値が大きくなる側)の最大風速をベースに予測することが妥当と考えられる。

2) 含水比との関係

図-10に含水比と発じん量の関係を示す。発じん時の平均風速(高さ 0.03m)は $7.5\sim 8.0\text{m/s}$ であった。

これによると、含水比が5%を超えると、 $50\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ ともに降下ばいじんの発生は見られなくなった。

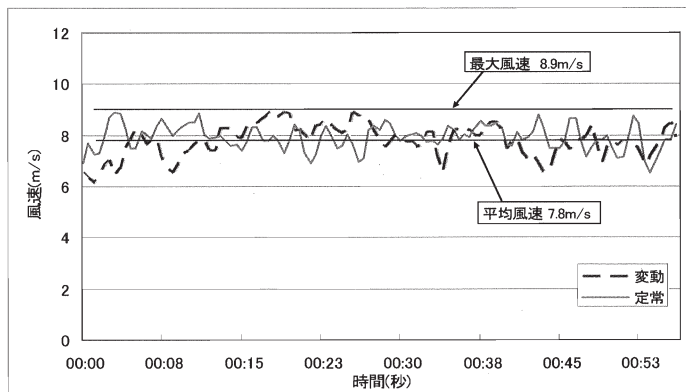


図-7 定常風と変動風の比較

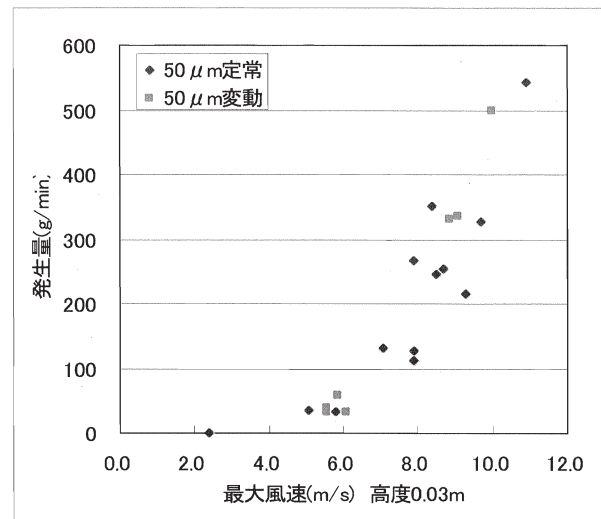


図-8 定常風と変動風速の比較(粒径 $50\mu\text{m}$ 平均風速)

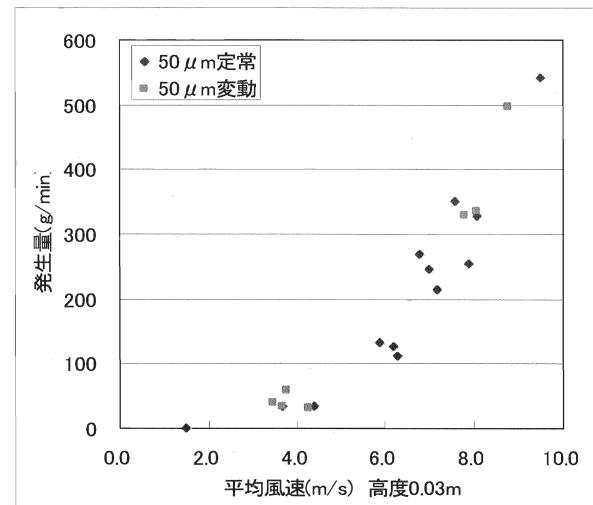


図-9 定常風と変動風速の比較(粒径 $50\mu\text{m}$ 最大風速)

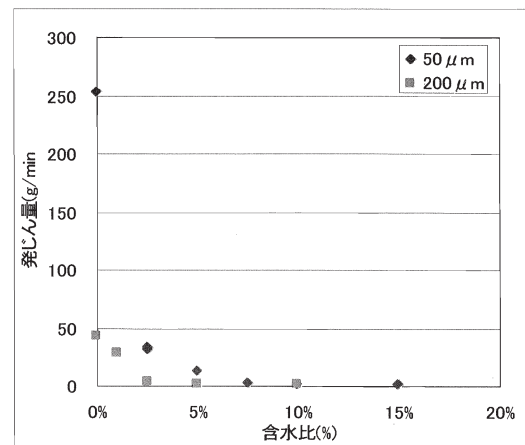


図-10 含水比と発じん量の関係

3) 粒径との関係

① 粒径別発じん量

含水比 0% でほぼ同じ風速のときの粒径別での発じん量を比較した結果を図-11 に示す。粒径 $50\mu\text{m}$ 以上の場合は粒径が大きくなるに従って発じん量が減少している。これは単粒の重量が増えるためと考えられる。しかし、粒径 $30\mu\text{m}$ の場合は極端に発じん量が減っている。これは粒径が小さいため、粒間の摩擦が大きくなるためなどさまざまな要因が考えられるが、今後調査する必要がある。

② 粒径混合比と発じん量

粒径混合比と発じん量の関係を図-12 に示す。使用した粒径は $50\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ の粉体で、含水比は 0% 地表状況はフラット（人口芝）とした。

紛じんの発生量は、粒径が小さい $50\mu\text{m}$ の混合比が高くなるのに伴い、ほぼ直線的に発じん量が増加

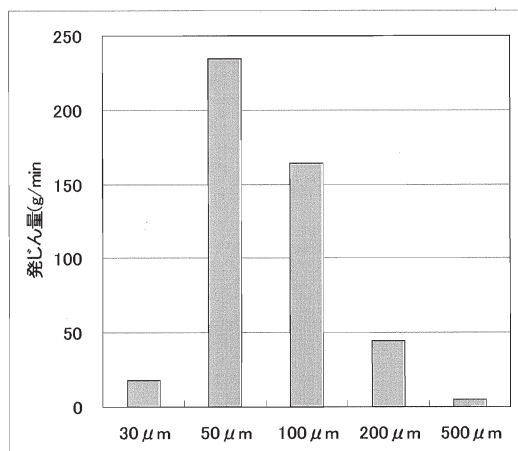


図-11 粒径と発じん量の関係

している

4) 表面状態との関係

発じんさせる粉体表面に砂利で覆いその面積比を変化させた場合の発じん量を測定した。砂利の大きさは $1\text{cm}^3 \sim 130\text{cm}^3$ で平均 74cm^3 であった。表面を覆った状態を写真-3 に示す。

砂利の面積比と発じん量の関係を図-13 に示す。

これによると、砂利の粉体材容器に対する面積が大きくなるに伴い、紛じんの発生量はほぼ直線的に減少している。但し、面積比 10%、20% の場合は砂利で覆わない場合より発じん量が多くなっている。発じん後の状態を写真-4 に示す。写真から砂利の周囲の粉体が減少して発じんしている様子が伺える。面積比 20% 以下の場合には砂利の周辺の気流に乱れが発生して粉体が巻き上げられるためと考えられる。



写真-3 砂利で覆った発じん容器

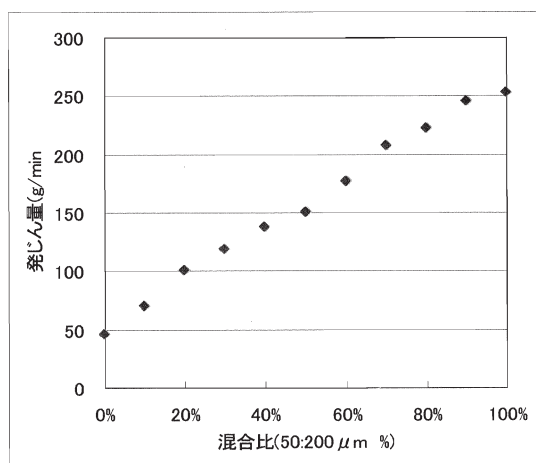


図-12 粒径混合比と発じん量の関係

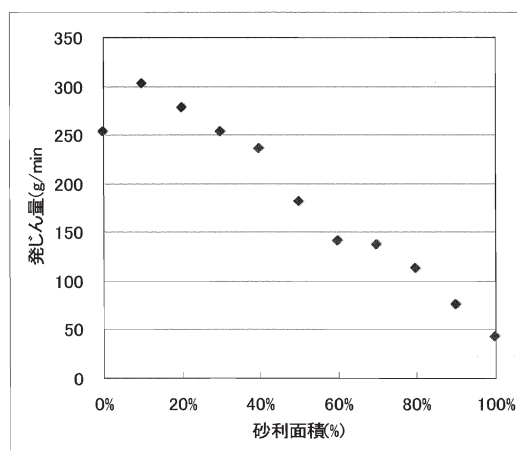


図-13 表面状態と発じん量の関係



写真-4 砂利面積10%の発じん後の状態

風速との関係では風速の時間的なむら（乱流）により発じん量が増える傾向が見受けられた。表面状態との関係においては、空間的なむら（乱流）が発じん量を増やす要因になったと考えられる。表面状態については、例えばビル風のように構造物形状等の条件により風速が極端に大きくなる場合があるが、土木工事の現場において安全側の条件として構造物を考慮することは不可能である。したがって、発じん量の予測においては平坦な条件をベースにして予測することが妥当と考えられる。

2. 2. 3 重力沈降を考慮したブルーム式の検討結果

1) 沈降速度

(式-2) を用いて降下ばいじんを予測する場合、粒子の沈降速度が必要となるが、沈降速度は粒径や密度によって異なる。ここでは、沈降速度を一定の値とし11ケース(0.4m/s~2.4m/s)の計算を行い、計算による降下ばいじん量の分布パターンが実測値に近くなる沈降速度を求めた。

その他の計算条件として、発生源高さは1.5mとし、大気安定度はCとした。また、鉛直方向初期拡散幅 σ_{z0} は2.9mとし、水平方向初期拡散幅 σ_{y0} は計算時に配置した点発生源の間隔の1/2(2.5m)とした。

実測調査における発生源と測定点の位置関係を図-14、図-15に、風向頻度および平均風速を表-2、表-3に示す。なお、計算は地上1.5mの気象条件を用いて行った。

A地点における降下ばいじん量を1として基準化し、実測値と計算値を比較したものを図-16に示す。距離減衰測定メインのラインで比較すると、実測値との対応が良いのは、2003CB1216AMでは沈降速度：1.6m/s、2003CB1216PMでは沈降速度：1.4m/sの計算

値である。

2) 発生源高さ

沈降速度の検討では、発生源高さを1.5mとして計算を行っているが、実際の発生源高さは不明である。ここでは、発生源高さ別に7ケース(0m~4m)の計算を行い、発生源高さの違いによる計算結果への影響について検討を行った。計算の結果を図-17に示す。距離減衰測定メインのラインで比較すると、

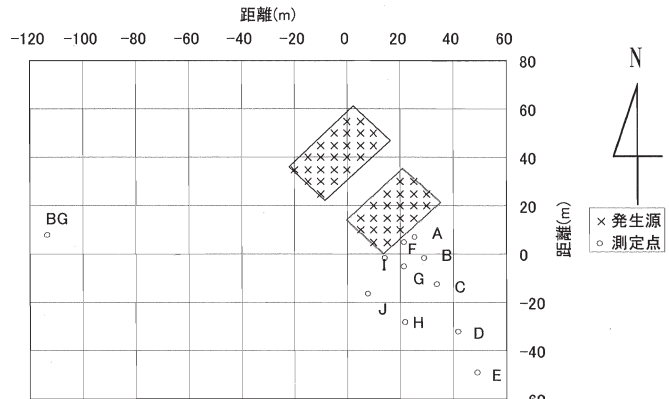


図-14 発生源と測定点の位置(2003CB1216AM)

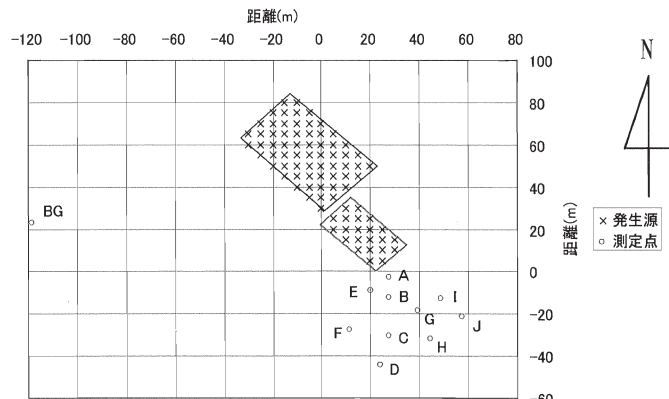


図-15 発生源と測定点の位置(2003CB1216PM)

表-2 風向風速 (2003CB1216AM)

風向	平均風速(m/s)		平均風速(m/s)	
	頻度	(地上10m)	頻度	(地上1.5m)
N	13.0	5.5		
NNE				
NE				
ENE				
E				
ESE				
SE				
SSE				
S				
SSW				
SW				
WSW				
W				
WNNW				
NW			4.3	4.2
NNW	87.0	4.7	95.7	3.6
calm				
計	100.0	-	100.0	-

表-3 風向風速 (2003CB1216PM)

風向	平均風速(m/s)		平均風速(m/s)	
	頻度	(地上10m)	頻度	(地上1.5m)
N	25.8	3.0	6.5	1.9
NNE			3.2	1.5
NE				
ENE				
E				
ESE				
SE				
SSE				
S				
SSW			3.2	0.7
SW				
WSW				
W				
WNNW				
NW	6.5	3.9	48.4	3.1
NNW	67.7	4.0	38.7	2.7
calm	0.0	-	0.0	-
計	100.0	-	100.0	-

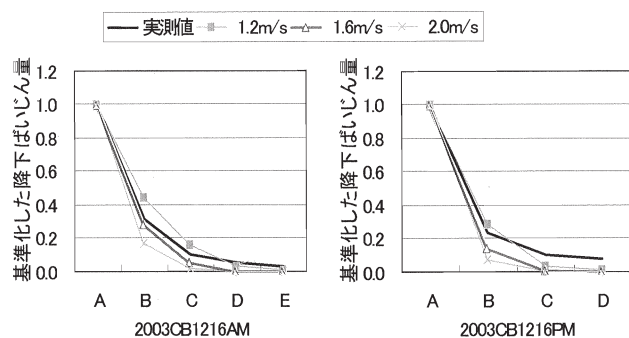


図-16 沈降速度の違いによる分布パターンの比較

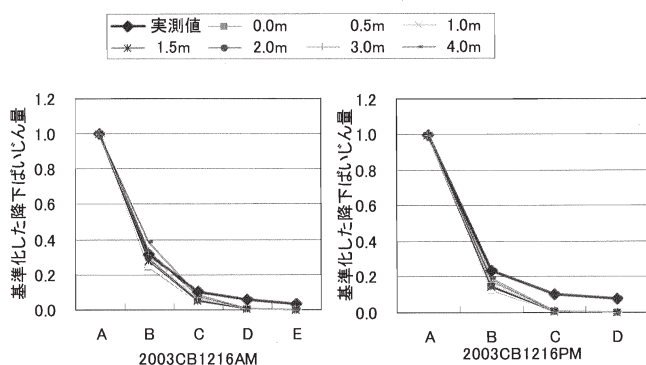


図-17 発生源高さの違いによる分布パターンの比較

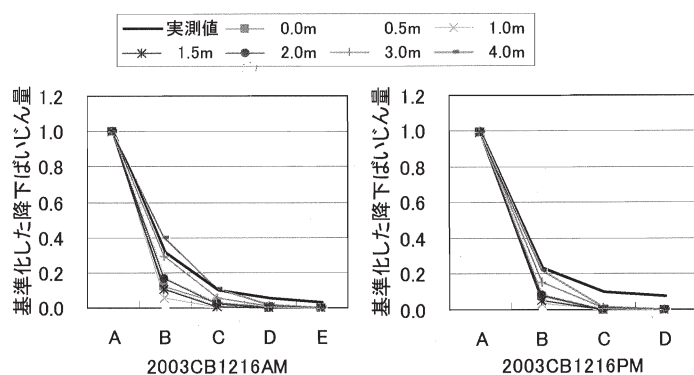


図-18 鉛直方向初期拡散幅 σ_{z0} の違いによる分布パターンの比較

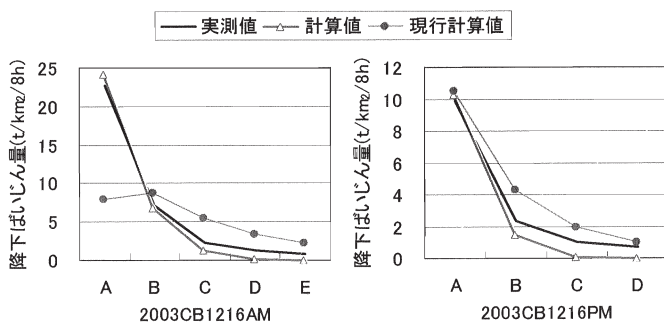


図-19 現行予測式による計算結果との比較

2003CB1216AMでは発生源高さ：1.5m、2003CB1216PMでは発生源高さ：2.0mにおける計算値が実測値と整合が良い結果となっているが、図からわかるように発生源高さの違いによる、分布パターンへの影響は小さい。

3) 鉛直方向初期拡散幅 σ_{z0}

沈降速度の検討では、 σ_{z0} を2.9mとして計算を行っている。ここでは、 σ_{z0} 別に7ケース(0m~4m)の計算を行い、 σ_{z0} の違いによる計算結果への影響について検討を行った。計算の結果を図-18に示す。距離減衰測定の本線のラインと比較すると、2003CB1216AMと2003CB1216PMの2ケースとも3.0mにおける計算値が実測値と整合が良い結果となっている。

4) 現行予測式との比較

検討を行った道路土工(硬岩掘削)の2003CB1216AMと2003CB1216PMの2ケースについて現行予測式による計算を行い、計算値(重力沈降を考慮したプルーム式による計算結果)と比較した。現行予測式に用いる基準降下ばいじん量 a は84000、拡散を表す係数 c は2.0とした。

計算値(重力沈降を考慮したプルーム式による計算結果)を現行予測式による計算結果と比較したものを図-19に示す。計算値は実測値より過小になる傾向が見られるがこれはバックグラウンド及び地面反射の影響と考えられる。しかし、実測値との相関は重力沈降を考慮したプルーム式による計算結果が良いことから予測精度は、現行予測式と同程度以上と考えられる。

2.2.4 仮囲いの効果予測検討結果

1) 「裸地由来の降下ばいじん」への仮囲いの効果

裸地からの発じん抑制及び降下ばいじん飛散防止については、仮囲いの形状及び仮囲い内側の風速分布状況に依存すると考えられる。既存調査事例から類推すると、仮囲いの効果が及ぶ範囲は、仮囲いの高さに比例するものと考えられる。すなわち、裸地に仮囲いを設置することによって発じんする領域を限定するという形で発じん抑制を表せる可能性がある(図-20参照)。

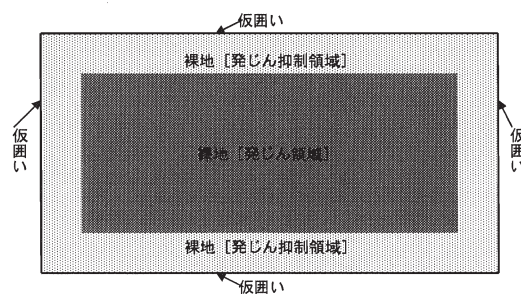


図-20 仮囲いによる発じん抑制(平面模式図)

2) 「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」への仮囲いの効果

風下側の仮囲いによる降下ばいじんの飛散防止効果については、仮囲い位置で天端より上に分布する降下ばいじんのみが仮囲いを越えて飛散するものと仮定する(図-21)。

この場合、仮囲いより遠方の予測計算では発生量Qを式-3のように補正することでその効果を取り込むことができると考えられる(重力沈降あり、反射なしとした場合)。

$$Q' = Q \cdot \left[1 - \int_{-\infty}^{H_w} \frac{1}{\sigma_z \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z - H + V_g \cdot x/u}{\sigma_z} \right)^2 \right] dz \right]$$

H_w : 仮囲い高さ

(式-3)

ただし、壁高の3/4くらいのところに風が壁を乗り越すか吹き下ろすかの境があるとも言われており、詳細は数値解析あるいは実験等で確認する必要がある。

なお、数値解析と文献調査だけでは検証ができないため、実測又は実験が必要である。数値解析によって仮囲いによる気流の変化を把握し基本的なモデルを作り、実測又は実験で検証することが考えられる。

3. 工事騒音

3.1 工事騒音の計測手法研究方法

土木研究所では環境影響評価における騒音予測用のデータを工事の実測調査に基づいて整備している。工事は複数の機械で行われており、予測用データはこの機械の組み合わせを最小単位としているが、予測の実務担当者からは機械別の発生量が求められている。

機械別の騒音発生量がわかれば、同じ種類の機械を使用する工事騒音の予測や、機械別に騒音対策を施した場合の効果の予測など様々な応用が期待できる。

3.1.1 分析方法の比較検討

機械別騒音の分析方法として1)機械の周囲にマイ

クロホンを設置する方法、2)音源探査で適用されているマイクロホンアレイを応用する方法および3)音響インテンシティを応用する方法を検討した。

3.1.2 実証実験

マイクロホンアレイを応用する方法について、完全無響および半無響の条件で測定を行った。音源は純音、1/1 オクターブバンドノイズおよび建設機械騒音の音源ファイルをスピーカーで再生した。

3.2 工事騒音の計測手法研究結果

3.2.1 分析方法の比較検討結果

1)機械の周囲にマイクロホンを設置する方法

音源と同数以上のマイクロホンを設置すれば、原理的には音源別の騒音発生量を変数とし、各マイクロホンの測定値と各音源-マイクロホン間の距離から、連立方程式または最小2乗近似することで音源別の騒音発生量が分析できるはずである。しかし、現場測定データで計算した結果の多くは異常値となった。音の指向性、測定誤差、干渉、地表面の影響、風等の影響が無視できないためと考えられる。良好な解析結果を得るためには各機械に近接してマイクロホンを設置し、他の機械による騒音をバックグラウンドとして扱う方法が考えられる。機械が動く建設工事においては測定時の安全確保など測定時の制約が多い。

2)マイクロホンアレイによる方法

機械に近寄れない場合の測定方法としてマイクロホンアレイの適用を検討した。音源となる機械の配置は工事の事例から5m間隔の正三角形の頂点3点と仮定した。また、マイクロホンは安全のため7m離れた位置とし、運搬の便を考慮して全長2mで10cm間隔の21個とした(図-22)。

最初にビームフォーミングの試算をした。図-22左の配置で音源Bの方向に位相を合わせた場合の指向性は図-23となる。音源方向と正反対の方向の音の影響を受けるが音源がA、B、Cのみの場合は支障がない。図-22の右の配置で音源Bの方向からの音波到達時間差を考慮してBの方向に位相を合わせた

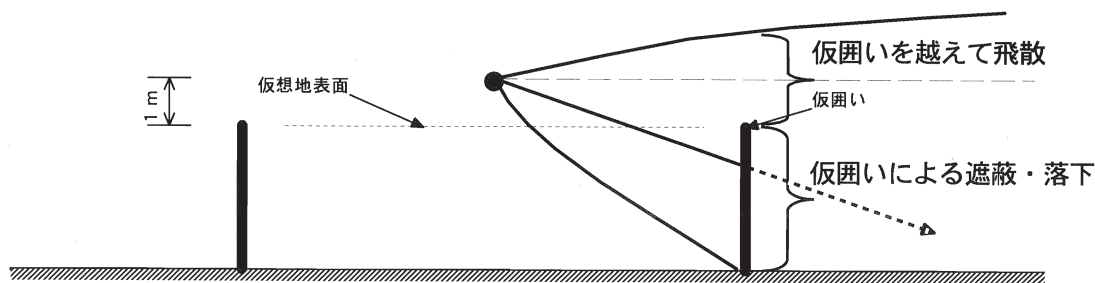


図-21 仮囲いを設置した場合の排出源高さの設定

◆ : Sound sources

(,) : Coordinates of each sound sources

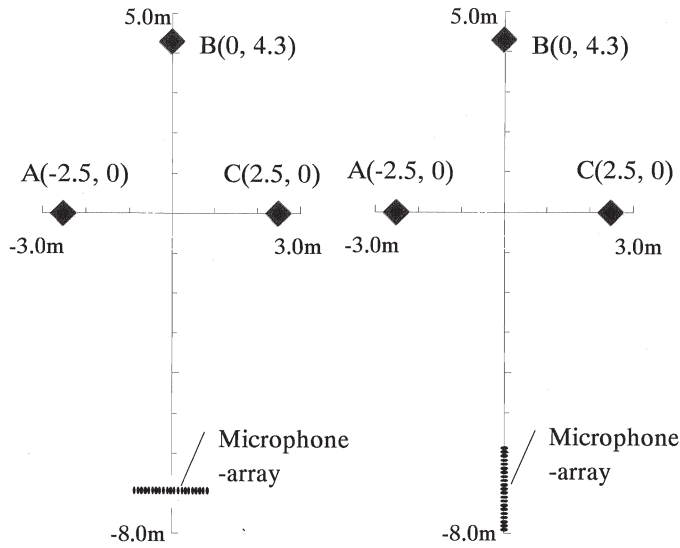


図-22 音源とマイクロホンアレイの配置

表-4 試算による音源別の騒音発生量の分析値

	仮定した音響パワーレベル	周波数別分析値	
		500Hzの場合	250Hzの場合
音源A(左)	100dB	100dB	100dB
音源B(中央)	なし	79dB	99dB
音源C(右)	なし	70dB	71dB
判定	-	分析可	不正解

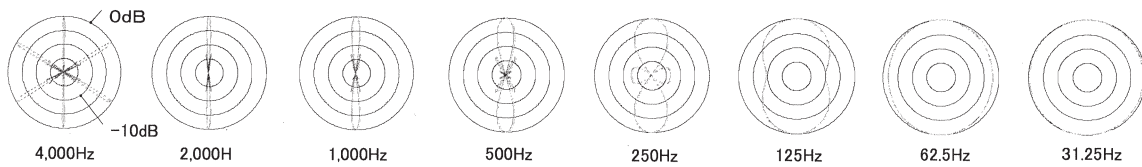


図-23 音源方向と直角方向に配置したマイクロホンアレイの指向性

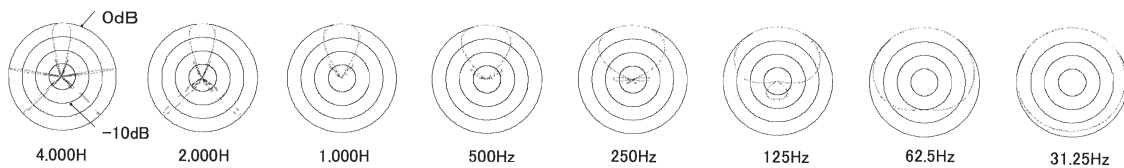


図-24 音源方向に配置したマイクロホンアレイの指向性

場合の指向性は図-24となる。虚音源は減るが分解能が悪くなる。以上の検討から図-22の左の配置を採用することとした。

次に音源別の定量的な分析の可能性について試算した。分析時には音源の位置に関する情報もあると仮定し、音源から各マイクロホンまでの距離による減衰および位相差が計算できると仮定した。音源面を再生する音響ホログラムの考え方に近い。表-4は100dBの音源がAの位置にあると仮定した場合の音源別発生量の分析値である。500Hz以上では音源B(中央)の計算値は-20dB以下となり分離できるが250Hzでは分離できない。また、図-23から4,000Hzを越える場合には虚音源が多数発生すると考えられる。これ

らの検討結果から Band-pass Filter をかけて 500Hz ~ 4,000Hz の周波数成分のみを取り出して分析することとした。A特性の建設機械騒音のエネルギーは500Hz~4,000Hzで84%を占めるため分析には問題ないと考えられる。

3) 音響インテンシティ計測による方法

音響インテンシティマイクの指向性は図-25となり周波数によらないため、500Hz未滿も分離できる可能性がある。この特性を利用した音源別の発生量分析を検討した。音源に対するマイクロホンの位置はマイクロホンアレイと同じとし各マイクロホンの配置は図-26に示すようにマイクロホン間隔は0.05mの正三角形とした。マイクロホン間隔0.05mで計測可

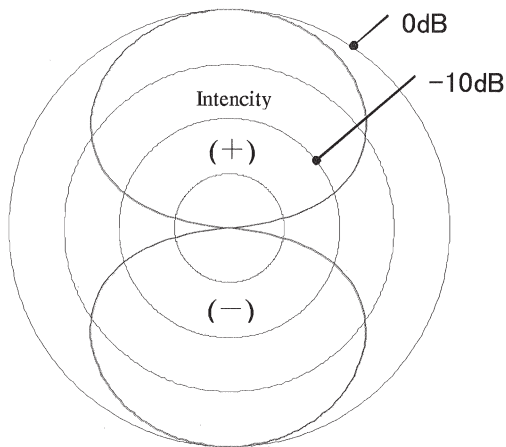


図-25 音響インテンシティ法の指向性

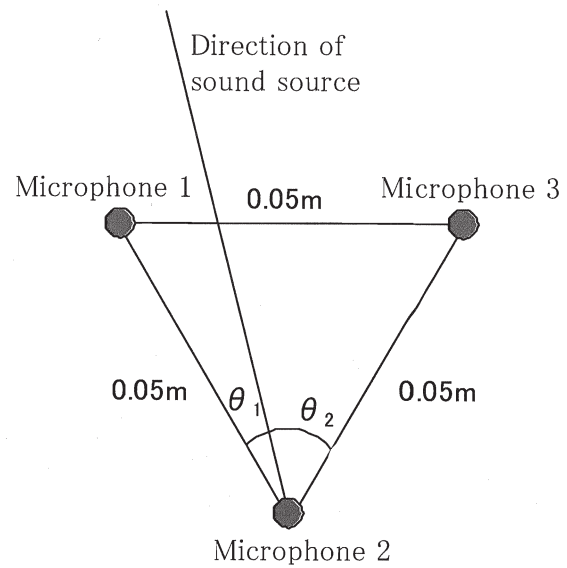


図-26 音響インテンシティ法で仮定したマイクロホン配置

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_{A-(M1 \rightarrow M2)} & \cos \theta_{B-(M1 \rightarrow M2)} & \cos \theta_{C-(M1 \rightarrow M2)} \\ \cos \theta_{A-(M3 \rightarrow M2)} & \cos \theta_{B-(M3 \rightarrow M2)} & \cos \theta_{C-(M3 \rightarrow M2)} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{M1 \rightarrow M2} \\ I_{M3 \rightarrow M2} \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (\text{式-4})$$

$\cos \theta_{A-(M1 \rightarrow M2)}$: Microphone 1 から Microphone 2 の方向と音源 A のなす角度。他も同様。
 I_A : 音源 A からの音の大きさ (Sound Intensity)。他も同様。
 $I_{M1 \rightarrow M2}$: Microphone 1 から Microphone 2 の方向を正とした音響インテンシティ (Acoustic Intensity)。他も同様。
 I_2 : 音源 A、B、C 分を加算した音の大きさ (Sound Intensity)。

能な周波数は 1,250Hz 以下となる。図-26 では式-4 が成立し M1→M2、M3→M2 の音響インテンシティ (Acoustic Intensity) と M2 での音の大きさ (Sound Intensity) から連立方程式を解くことで音源別の騒音発生量が分析できるはずである。

音源の周波数を 250Hz、音源別の音響パワーレベル (Soundpower level) を A: 100dB、B: 94dB、C: 103dB として試算した。音響インテンシティは直接法をシミュレーションし積分時間を 0.1s とした。計算結果は音のエネルギーがマイナスの結果になるなど誤差が大きく、ダミーで M2 に 1% の誤差を与えただけでも計算結果は大きく変動した。このように連立方程式を解く方法では入力値のわずかなずれで計算結果が大きく変動するため実現は困難と考えた。

3.2.2 実証実験結果

完全無響および半無響の条件でマイクロホンアレイによる測定・分析を行った。音源は純音、1/1 オクターブバンドノイズおよび建設機械騒音の音源ファイルをスピーカーで再生した。マイクロホンは 10cm 間隔で 21 個配置し AD コンバータを使用して 24,000 個

/sec で同時サンプルし、建設機械音については A 特性補正をかけ、他は Flat でノートパソコンに記録した。各マイクロホンの出力は B&K 4231 による校正値で音圧に変換し、器差も補正した。実験は無響室から半無響室へと固定周波数音から建設機械の再生音へと段階を踏みながら現場条件に近づけていった。地表面からの反射音があってもマイクロホン相互の相対的な遅延時間が反射音と直接音の場合でほとんど変わらないため支障はないと考えた。

図-27 のように音源と各マイクロホン間の距離が異なるため、マイクロホンで受信した信号のタイミングはずれている。音源の位置を仮定しタイミングを合わせて加算した値 (遅延和) は仮定した音源の位置が真の位置の場合に最大となるはずなので、この位置を平面内で検索することとした。

平面内の全領域でしらみつぶしに遅延和を計算すると計算量が莫大となるため、アルゴリズムは次の通りとした。遅延和は距離よりも方向に敏感に変化するため最初に一定の距離を仮定して 1° ピッチで方向をずらして遅延和を計算する。次に極大点 (複数) の方

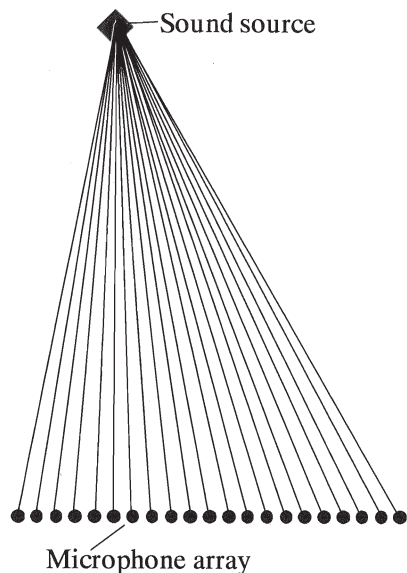


図-27 音源とマイクロホンの位置関係

向で距離を 1.5 倍間隔で変化させ音源の概算位置を把握する。最後に概算位置の近郊で角度は 0.1° ピッチ、距離を 1.1 倍ピッチで変化させしらみつぶしに調べ遅延和が最大になる点を音源位置とする。このアルゴリズムは単純なため並列処理のハードウェア化等の高速化への対応が容易であるし、位置の変化や音速の変化などの外乱にも柔軟に対応できる。さらに開発費を投入すれば画面上に音源の位置と大きさをリアルタイムに表示することも可能である。

1) 無響室固定周波数音

図-28 は図-29 の配置で無響室において音源 A から 500Hz 100dB、音源 B から 1000Hz 100dB、音源 C から 2000Hz 100dB の音を発生させ、音源までの距離を 7m と仮定した場合の方向別の遅延和である。また、表-5 は音源までの距離も変化させて分析した値をあらかじめ設定した値と比較したものである。

音源の方向は比較的良好に分析でき、音源までの距離もある程度は分析できた。音響パワーレベルの計

算における距離は設定値を、遅延和は最大値を使用した。音源 A、C に挟まれた音源 B で 1.8dB の誤差があるものの音源 A、C は 0.1dB の精度で分析できている。音源 B の精度が悪いが、それぞれ整数倍の固定した周波数を用いたため干渉の影響を受けていることが原因と考えられる。音源 A、B、C ともに 100dB で無相関の 1000Hz のノイズを発生させて分析した場合には 0.2~0.3dB の誤差に収まった。

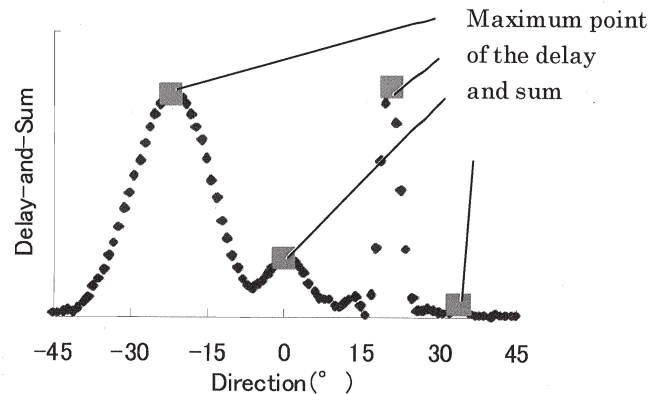


図-28 方向別遅延和・固定周波数音 3 音源

(,):Coordinates of each sound sources

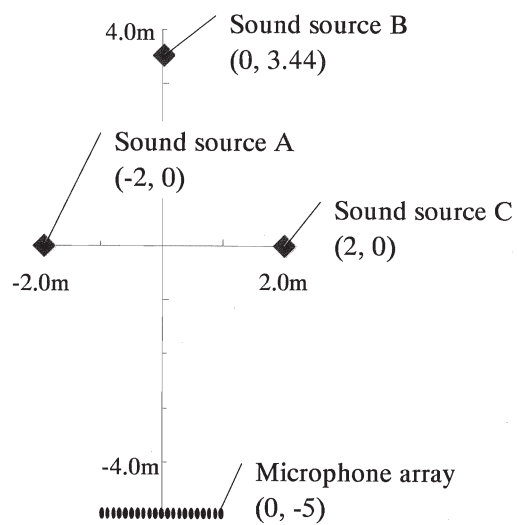


図-29 音源とマイクロホンの配置

表-5 音源分析結果-無響室固定周波数音

	角度 (°)		距離 (m)		音響パワーレベル (dB)		
	分析値*	正解	分析値*	正解	分析値*	正解	誤差
音源 A	-21.5	-21.8	6.8	5.4	99.9	100.0	-0.1
音源 B	0.0	0.0	4.9	8.4	98.2	100.0	-1.8
音源 C	20.9	21.8	6.2	5.4	100.1	100.0	0.1

※: マイクロホンアレイの音圧信号の分析に基づいて算出した結果

2) 半無響室建設機械音

土木工事現場には風、地表面の反射、温度変化など分析値に誤差を与える多くの要因が存在すると考えられる。また音は高周波分および低周波分を含み大きさが変化する。今回、地表面の反射があり、大きさが変化し、低周波分・高周波分が混在する条件での分析の実証のために半無響室で建設機械の音を模擬的に発生させて実験を行った。分離性能を調べるため単一音源とし、Aから油圧ショベルの掘削音（変動音）を発生させ音源までの距離を7mと仮定した場合の方向別の遅延和が図-30である。

音源B方向(0°)の遅延和が1/20(-13dB)程度となった。工事現場における騒音測定はバックグラウンド音が-10dB以下の条件を基本としているので、当初予定していたBand-pass Filterはかけなくても分離可能である。図-31は単一のマイクロホンで計測された騒音レベルと遅延和をかけて1マイクロホンあたりに換算した騒音レベルを比較したものである。1dB程度の違いはあるが時間変動がよく一致しているのでデー

タを蓄積し補正値を加算するだけで計測精度が向上できると考えている。

次に図-29の配置でAから油圧ショベルの掘削音（変動音）、Bから発動発電機（定常音）、Cからホイールローダーによる岩石運搬の音（変動音）を同時に発生させて分析した結果が表-6であり、正解欄が単独音を騒音計で計測して(A特性実効音響)パワーレベルを計算したものである。(A特性実効音響)パワーレベルの計算値の補正値を仮に+1.0dBとすると音源A、B、Cの誤差は-0.1dB、+3.2dB、+0.5dBとなり、A、Cは方向、距離ともに騒音発生量がほぼ分析できている。

一方、Bは遅延和が正解の2倍程度ということになる。Bからの音はもともとA、Cの1/10程度であるが、図-30で説明したようにAからの滲み出し音が1/20でCからも同程度と考えれば計1/10程度なので分析値が2倍の+3dB程度となったと考えられる。この誤差をなくすためバンドパスフィルタをかけて分析能を向上させることで対応することも考えられる。

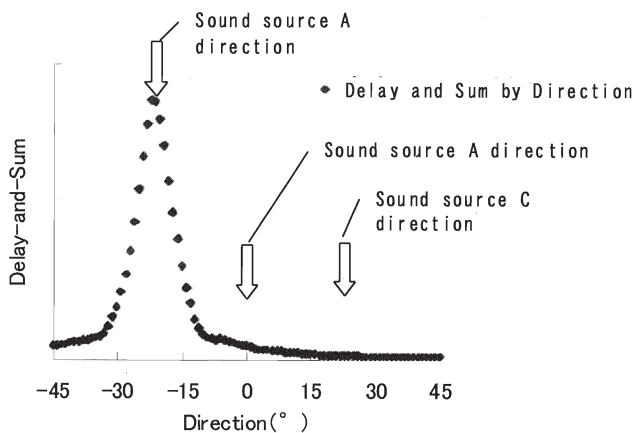


図-30 方向別遅延和-油圧ショベル単音源

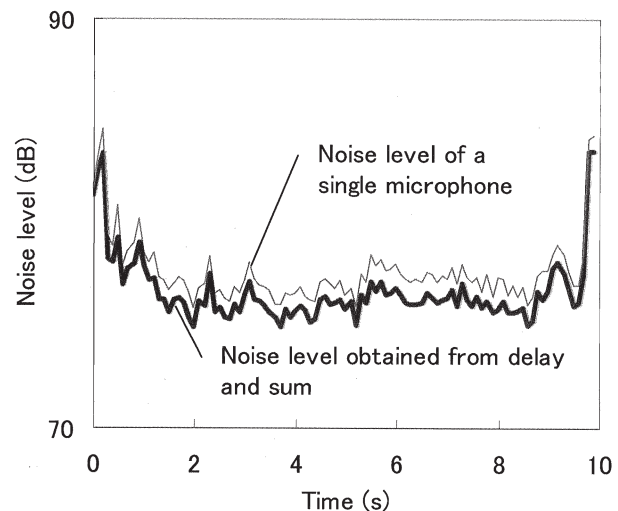


図-31 単一マイクロホンと遅延和の比較

表-6 音源分析結果-建設機械音3音源

音源	方向(°)		距離(m)		A特性実効音響パワーレベル(dB)		
	分析値 ^{※1}	正解	分析値 ^{※1}	正解	分析値 ^{※1}	正解 ^{※2}	誤差
A	-21.7	-21.8	5.8	5.4	99.8	100.9	-1.1
B	-0.1	0.0	14.3	8.4	97.5	95.3	2.2
C	21.2	21.8	5.6	5.4	99.7	100.2	-0.5

※1: マイクロホンアレイの音圧信号の分析に基づいて算出した結果

※2: 各単独音を騒音計で計測し計算した値

4 まとめ

本研究では、工事騒音・振動・大気環境影響評価の技術手法で不足している事項への対応として、1) 降下ばいじんについて、裸地の影響や仮囲いの効果の予測手法、2) 工事騒音について、複数の建設機械の音を音源別に現場計測する手法を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 工事降下ばいじんの拡散幅はガス状物質と同程度であり、ガス状物質に関する文献値を「重力沈降を考慮したプルームモデル」に適用し工事降下ばいじんの予測が可能である。
- 2) 降下ばいじんの発生量は下記①～④の特性があるが、
②含水比は現場毎、日毎に変動するため、裸地由来降下ばいじんに反映させるのは適切でないと考えられる。一方③粒径混合比(=土質)は、アセス段階でも得られる情報であるため裸地由来降下ばいじんに反映させるのが適切と考えられる。
このことから、裸地由来降下ばいじんは土質ごとに設定した「基準発生量」が風速が強まるのとともに指数曲線的に増加する式が適切と考えられる。
①風速が強まるのとともに指数曲線的に増加する
②含水比が5%を超えると降下ばいじんの発生はない
③粒径混合比と発じん量の関係は、粒径が小さい50 μ mの混合比率が高くなるのに伴い、ほぼ直線的に発じん量が増加する
④砂利の面積比が大きくなると降下ばいじんの発生量は直線的に減少するが、面積比20%以下の場合砂利で覆わない場合より発じん量が多くなる。
- 3) 「重力沈降を考慮したプルームモデル」の検証のため、道路土工(硬岩掘削)の2003CB1216AMと2003CB1216PMの2ケースで、沈降速度、鉛直方向初期拡散幅、発生量を適切に設定して計算することにより、実測値と良く一致する計算結果を得ることができた。これにより、予測精度が現行予測式と同程度以上であることが確認できた。
- 4) 仮囲いの効果については、「裸地由来の降下ばいじん」は発じんする領域を限定するという形で、「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」は仮囲い位置で天端より上に分布する降下ばいじんのみが仮囲いを越えて飛散するものとして、反映させることが適切であると考えられる。
- 5) 機械別騒音の分析方法として 1)機械の周囲にマイクロホンを設置する方法、2)音源探査で適用され

ているマイクロホンアレイを応用する方法および3)音響インテンシティを応用する方法を検討した結果、分析方法はマイクロホンアレイによることとした。

しかし、マイクロホンアレイによる解析では、250Hzでは音源を分離できない、4,000Hzを越える場合には虚音源が多数発生すると考えられるため場合によっては、Band-pass Filterをかけて500Hz～4,000Hzの周波数成分のみを取り出して分析する必要がある。この場合には、騒音のエネルギー分布から分析値を100/84倍することで考慮することとする。

- 6) 複数の機械から発生する音をマイクロホンアレイで分析することでそれぞれの音源の(A特性実効)音響パワーレベルが誤差0.5dB程度で算出できることを半無響の条件で確認した。

今後は、降下ばいじん予測手法、騒音測定手法ともに現場実測データの解析を蓄積し、技術手法に反映させることが必要である。

参考文献

- 1) 吉永弘志、吉田 正、林 輝：工事における機械別騒音発生量の分析、(社)日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.1-4, Oct.2004
- 2) 吉永弘志、吉田 正：工事粉じんの拡散、第45回大気環境学会講演要旨集, p.621, Oct.2004
- 3) 吉永弘志、吉田 正：工事粉じんの予測手法、第45回大気環境学会講演要旨集, p.622, Oct.2004
- 4) 吉永弘志、林輝、山元弘：工事における機械別騒音発生量の分析、騒音制御, Vol.29, No.6, pp.493-500, 2005年12月
- 5) 吉永弘志、林 輝、山元 弘：工事における機械別騒音発生量の分析(2)、(社)日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, Vol.2005, 秋季, pp.49-52, 2005年9