

無人航空機（UAV）から発生する騒音についての
調査結果報告書

平成 28 年 3 月

株式会社エコリス

一般財団法人 山形県理化学分析センター

1. 目的

無人航空機（以下、UAV と略す）の利用が拡大し環境調査等に用いることも増えてきているが、発生する『音』が及ぼす影響については十分な検討がなされていないといえる。本調査では UAV 飛行時に発生する音を調査し、今後の使用における注意点等を検討する際の基礎資料とすることを目的とする。なお、動物の聴覚に対する検証は不十分であり、数少ない報告事例を比較参考として用いた。本件については、あくまで限られた条件下での測定結果であるが、今後、知見の蓄積や調査手法の改善を行いより良い評価を行うことが望まれる。

2. 調査に用いた機材の概要

(1) UAV

DGI 社製 PHANTOM3 PROFESSIONAL	
重量	1280g (バッテリー、プロペラ込み)
対角線サイズ	350mm
最大上昇速度	5m/秒
最大下降速度	3m/秒
ホバーリング精度	<ul style="list-style-type: none"> ・垂直：$\pm 0.1\text{m}$ (ビジョンポジショニングがアクティブの場合) または $\pm 0.5\text{m}$ ・水平：$\pm 1.5\text{m}$
最大速度	16m/秒 (ATTI モード、無風)
耐久風速	10m/s 以下
動作環境温度	0°C～40°C

※DJI 社公式サイトより引用

(2) 騒音計

RION 社製 精密騒音計 (低周波音測定機能付) NL-62				
機能		オクターブ・1/3 オクターブ実時間分析プログラム (NX-62RT) 使用		
設定	測定項目	騒音レベル	低周波音圧レベル	1/3 オクターブ 音圧レベル
	周波数重み付け特性	A 特性	G 特性	Z 特性 (平坦)
	時間重み付け特性	Fast	Slow	1～80Hz: Slow 100～20kHz: Fast
	ストア間隔	200ms	1sec	1～80Hz: 1sec 100～20kHz: 200msec

(3) 気象条件

Nielsen-Kellerman 社製 ポケット気象トラッカー Kestrel 4500		
測定項目	風速	単位：m/s、精度：読みの $\pm 3\%$
	風向	16 方位、精度： $\pm 5^\circ$
	温度	単位： $^\circ\text{C}$ 、精度： $\pm 1^\circ\text{C}$
	相対湿度	単位： $\%RH$ 、精度： $\pm 3\%RH$
	圧力	単位：hPa、精度： $\pm 1.5\text{hPa}$

3. 調査の方法

図-1 に調査の模式図を示す。すなわち、マイクロフォンと測定機材を固定したうえで UAV を操作し、発生している音を測定した。測定の対象は、定常的かつ安定的に発生する「ホバーリング音」とし、上昇、加速などの飛行形態の違いによる騒音レベルの差には考慮していない。今回の調査では、UAV はホバーリングを高精度で維持しており、位置ごとに約 1 分間の連続記録を実施することができた。なお、測定は、仙台市近郊の河川敷において対象外の音ができるだけ少ない時期に行った。

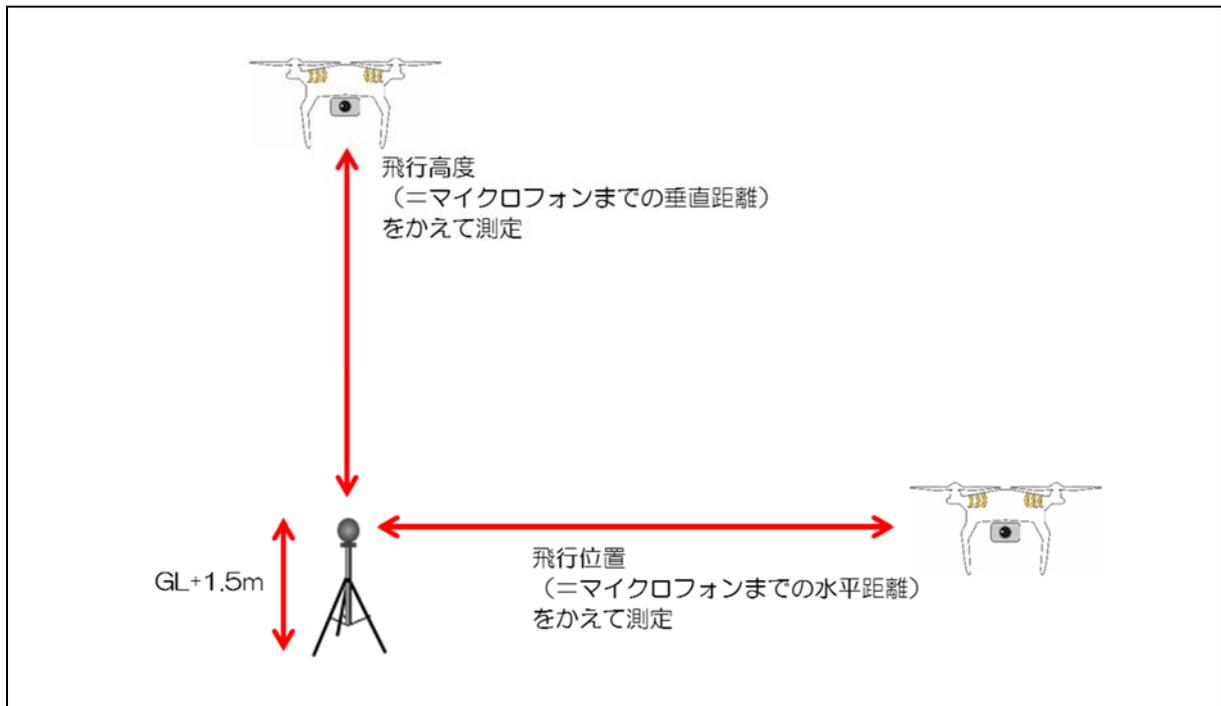


図-1 調査の模式図

4. 調査結果

(1) 測定日の状況

表-1 に調査日の状況を示す。気象条件としては晴天であり風は弱かった。また、調査地点周辺において大きな音源は車両走行音であったが、まばらに走行する程度であり、できるだけ除外し測定した。また、その他対象外の音としては鳥の声や河川の流水音などを聞き取ることができた。

表-1 調査日の状況

測定日時	平成 28 年 2 月 12 日 7:00～8:00
測定場所	仙台市近郊の河川敷
天候	晴れ
風速	0.0～0.9m/s
風向	E (単位ベクトル平均)
気温	-6.4～0.5℃
湿度	72～93%RH
気圧	1026.9～1027.3hPa
特記事項	・車両走行音、鳥の声、河川流水音などあり

(2) 騒音レベル測定結果

a. 飛行高度（垂直距離）の違いによる騒音レベル

表-2 及び図-2 に飛行高度（垂直距離）の違いによる騒音レベルの変化を示す。データの集計は対象飛行を1分間選出し、それぞれのLx、Leq等を算出した。この際、暗騒音は対象飛行がない時間から算出した。なお、図-2に用いた数値は、UAVの飛行音(ホバーリング音)のレベル変動がほぼ一定であり、かつ、車両の走行や鳥の声など対象外の音の影響をできるだけ受けない値とするため、90%レンジの下端値(LA95)とし考察した。

調査を実施した河川敷は、周辺道路の車両走行音やその他の雑音が聞き取れるものの静穏な環境が保たれており、静時には垂直距離150mまでUAVからの発生音を聞き取ることができた。ただし、垂直距離100m以上の高度ではおよそ40dB(A)程度と暗騒音よりも高い騒音レベルではあるものの、「図書館内や山村の田畑と同程度(7. 参考資料参照)」と人の聴覚では大きく気にならない程度であると推測される。

表-2 飛行高度（垂直距離）の違いによる騒音レベルの変化

垂直距離	等価騒音レベル	時間率騒音レベル					最大騒音レベル	最小騒音レベル
	LAeq	LA5	LA10	LA50	LA90	LA95	LAmx	LAmn
2m	81.0	83.2	82.9	80.6	78.4	78.0	83.8	77.2
10m	58.2	59.8	59.3	58.1	56.7	56.4	60.9	55.7
30m	52.7	53.6	53.4	52.7	51.8	51.6	53.9	50.9
60m	47.5	48.3	48.1	47.5	46.9	46.8	48.6	46.4
100m	42.1	43.5	43.0	42.0	41.2	41.0	44.3	40.2
150m	46.8	52.6	51.0	43.4	38.4	38.2	58.5	37.6
暗騒音	32.0	32.9	32.7	31.8	31.2	31.1	35.1	30.6

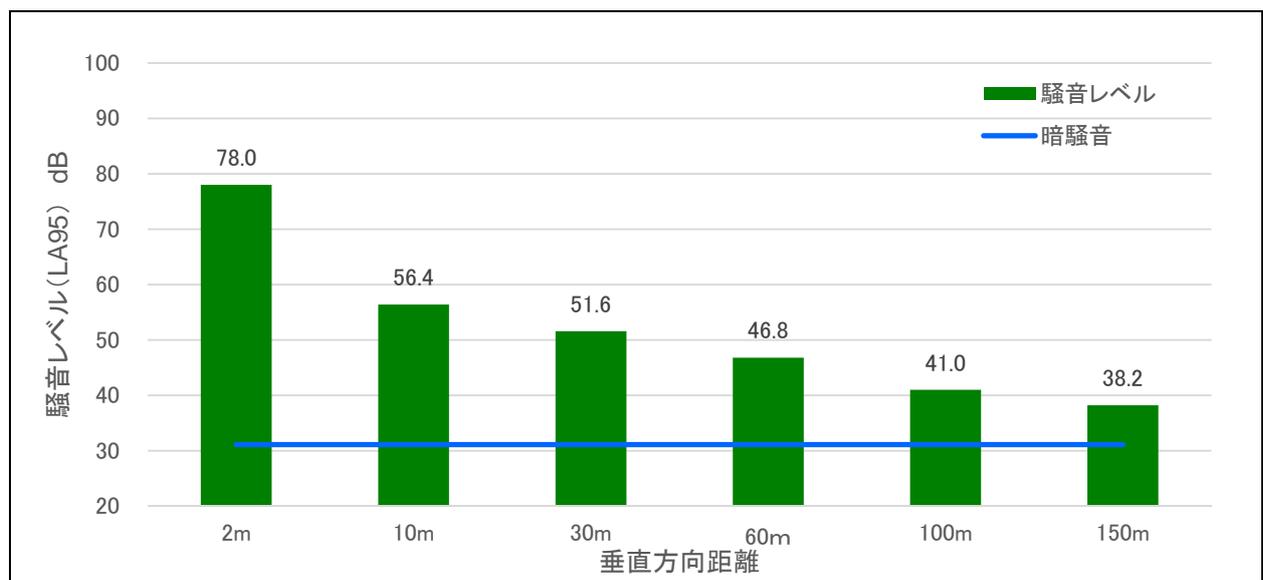


図-2 飛行高度（垂直距離）の違いによる騒音レベルの変化

b. 飛行位置（水平距離）の違いによる騒音レベル

表-3 及び図-3 に飛行位置（水平距離）の違いによる騒音レベルの変化を示す。データの集計は a. と同様に、対象飛行を 1 分間選出し、それぞれの L_x 、 L_{eq} 等を算出した。この際、暗騒音は対象飛行がない時間から算出し、図-3 は 90%レンジの下端値 (L_{A95}) を用いた。

現地測定の結果、水平距離 60m においても UAV の飛行音は聞き取ることができた。また、暗騒音と比較しても高い値を示しており、対象の音として明確に認識することができた。ただし、この値は垂直距離 150m の騒音レベルと同程度であり、人の聴覚では大きく気にならない程度であると考えられるため、この程度の距離以上を維持することで自然環境内において UAV を使用する場合、とりわけ大きな音に感じることはないと推測される。

表-3 飛行位置（水平距離）の違いによる騒音レベルの変化

水平距離	等価騒音レベル	時間率騒音レベル					最大騒音レベル	最小騒音レベル
	L_{Aeq}	L_{A5}	L_{A10}	L_{A50}	L_{A90}	L_{A95}	L_{Amax}	L_{Amin}
1m	75.9	77.8	77.6	76.4	72.9	72.7	78.4	72.4
10m	55.4	55.9	55.8	55.4	54.9	54.8	56.1	54.5
20m	47.4	47.9	47.8	47.4	47.0	46.9	48.3	46.7
30m	43.9	44.6	44.4	43.8	43.5	43.3	45.5	43.0
60m	39.2	39.8	39.7	39.2	38.7	38.6	41.2	38.0
暗騒音	32.0	32.9	32.7	31.8	31.2	31.1	35.1	30.6

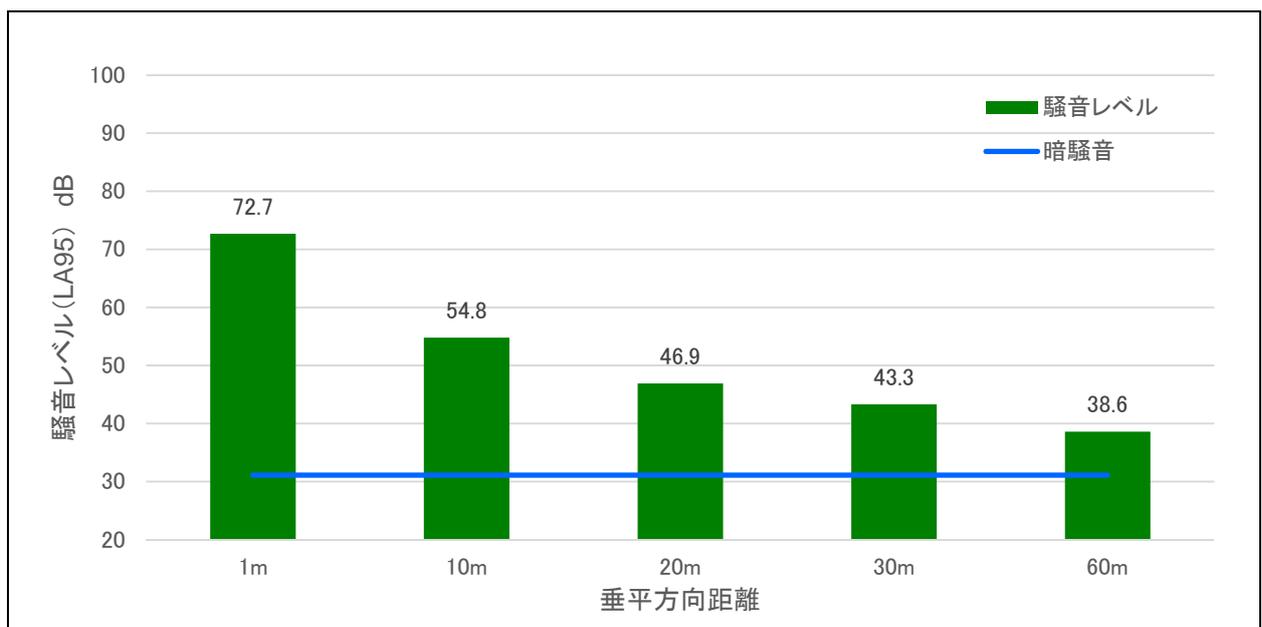


図-3 飛行位置（水平距離）の違いによる騒音レベルの変化

c. 騒音の伝搬予測

以上の結果を元に簡易的に騒音伝搬予測を行い、図-4～5 に UAV 飛行音の簡易伝搬予測図を示した。限定的条件の下における予測ではあるが、水平方向に 30m 程度、垂直方向に 60m 程度以上の距離をとることにより、屋内であれば「書店の店内」と同程度となり (50dB(A)程度)、人の聴覚においては特にうるさく感じられる騒音レベルではなくなると考えられる。(7. 参考資料参照)

一方、現地測定において飛行音は地上高 100m を超える高度でも静時には聞き取ることができている。主に UAV の飛行場所は、人口の集中していない自然地域の場合が多いと考えられる。自然地域の中には海浜や川辺など比較的騒音レベルの高い環境もあるが (7. 参考資料参照)、比較的静かな環境で使用する場合には、人の聴覚的には聞き取れるレベルの飛行音が常に発生していることに注意を払う必要はある。

なお、本測定で利用した UAV は垂直移動、水平移動とも速く (上昇速度 5m/s、最大速度 16m/s) であり、移動を早くするなどの工夫で発生音の感じ方を軽減できる場合がある。

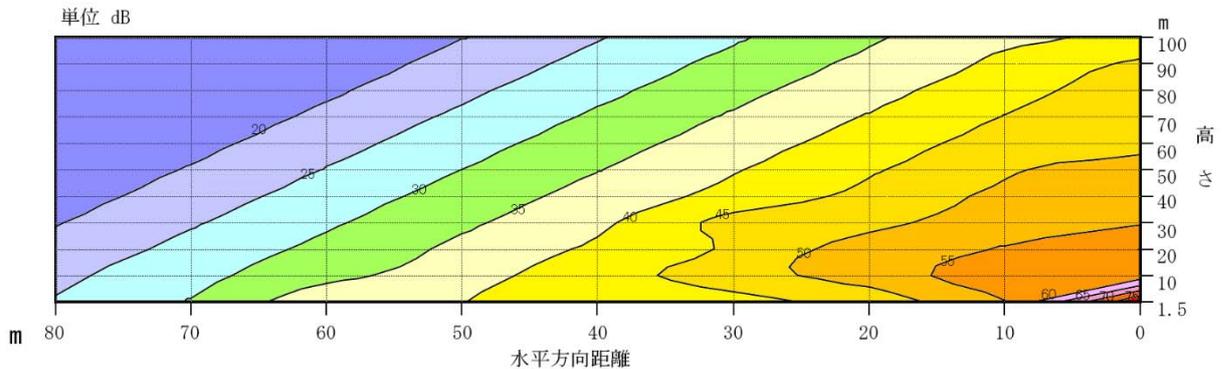


図-4 飛行音の簡易伝搬予測図 (UAV 飛行条件：垂直方向 1.5m でホバリング)

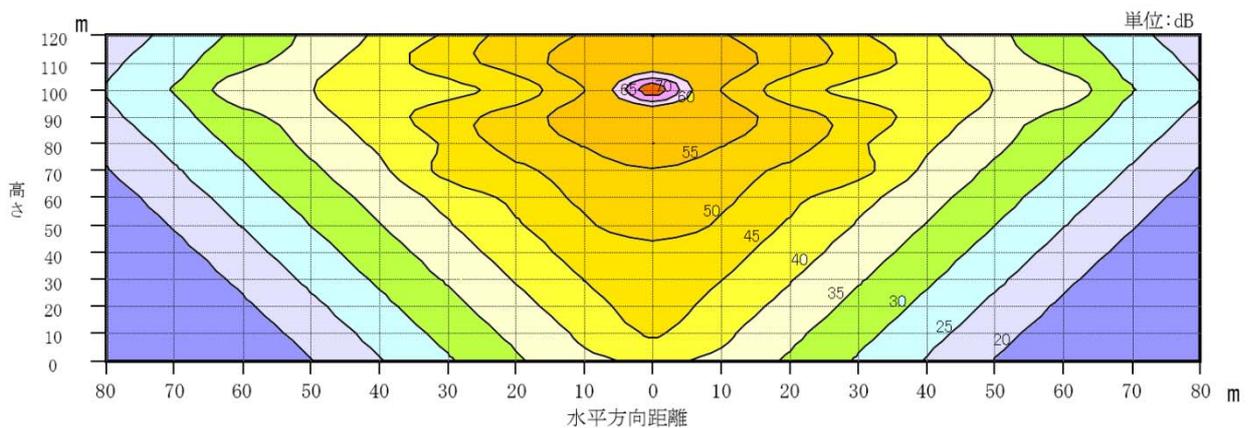


図-5 飛行音の簡易伝搬予測図 (UAV 飛行条件：垂直方向 100m でホバリング)

【簡易伝搬予測図作成条件】

- ・実測値の中から、対象飛行時間内の 90% レンジの下端値 (L_{A95}) を選択した。(対象外の音をできるだけ除外)
- ・上記より重回帰式を求め、予測値を算出し図示した。

(3) G 特性低周波音圧レベルの測定結果

a. 飛行高度（垂直距離）の違いによる G 特性低周波音圧レベル

表-4 及び図-6 に飛行高度（垂直距離）の違いによる G 特性音圧レベルの変化を示す。データの集計は対象飛行を 1 分間選出し、それぞれの L_x 、 L_{eq} 等を算出した。この際、暗騒音は対象飛行がない時間から算出した。なお、図-4 に用いた数値は、UAV の飛行音のレベル変動がほぼ一定であり、かつ、風など対象外の音の影響をできるだけ受けない値とするため、90%レンジの下端値(L_{G95})とした。

この結果、発生源直下で測定した垂直 2m では暗騒音レベルより若干高い値を示しているが、垂直 10m 以上ではほぼ暗騒音レベルと同等の値となっており、UAV 飛行時の低周波騒音の発生はほとんどないものと推測される。

表-4 飛行高度（垂直距離）の違いによる低周波音圧レベルの変化

垂直距離	等価音圧レベル	時間率音圧レベル					最大音圧レベル	最小音圧レベル
	L_{Geq}	L_{G5}	L_{G10}	L_{G50}	L_{G90}	L_{G95}	L_{Gmax}	L_{Gmin}
2m	61.2	64.4	63.7	59.0	56.5	56.0	69.4	54.7
10m	52.6	55.0	54.2	52.3	51.0	50.7	56.0	50.3
30m	52.6	53.6	53.4	52.5	51.6	51.2	54.1	51.2
60m	53.5	55.3	54.8	53.0	52.4	51.8	57.4	51.5
100m	52.7	53.8	53.5	52.6	51.4	50.8	56.1	50.0
150m	54.5	57.4	56.7	53.7	52.5	52.2	59.7	51.5
暗騒音	52.0	53.2	52.9	51.9	51.0	50.8	54.2	50.5

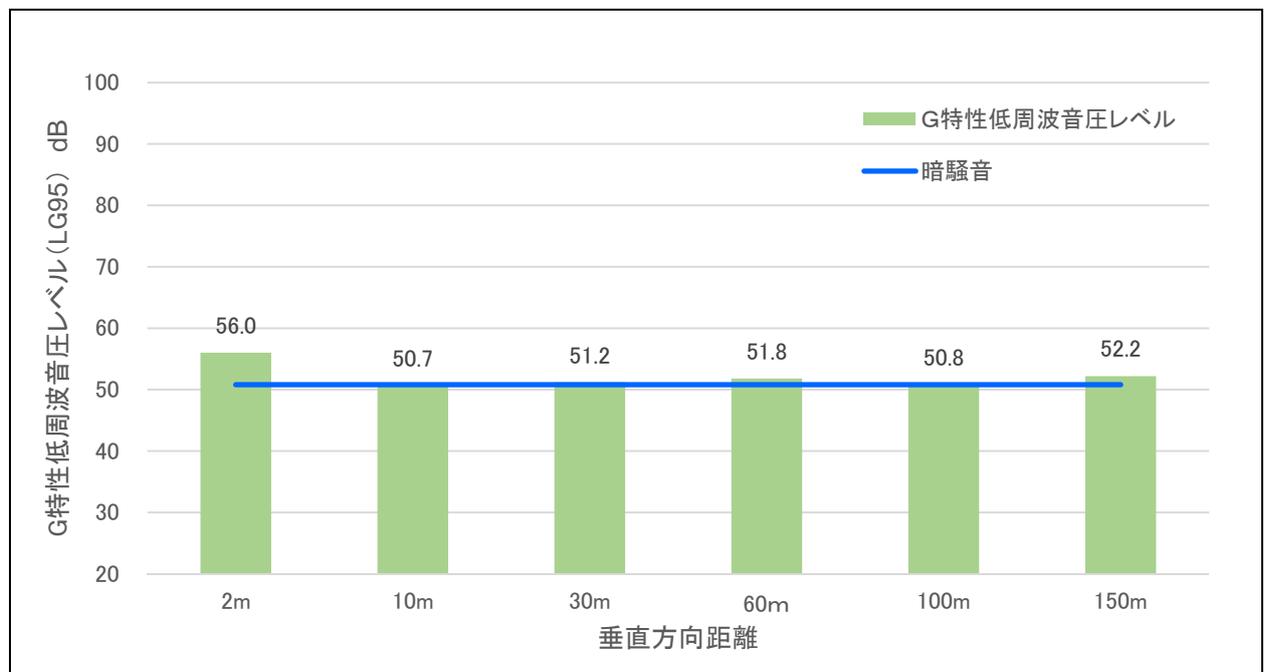


図-6 飛行高度（垂直距離）の違いによる G 特性低周波音圧レベルの変化

b. 飛行位置（水平距離）の違いによる G 特性低周波音圧レベル

表-5 及び図-7 に飛行距離（水平距離）の違いによる G 特性音圧レベルの変化を示す。データの集計は a. と同様に、対象飛行を 1 分間選出し、それぞれの L_x 、 L_{eq} 等を算出した。この際、暗騒音は対象飛行がない時間から算出した。なお、図-5 に用いた数値は、UAV の飛行音のレベル変動がほぼ一定であり、かつ、風などの対象外の音の影響をできるだけ受けけない値とするため、90%レンジの下端値 (L_{G95}) とした。

この結果、いずれの測定距離でも暗騒音レベルと同等の値であり、UAV 飛行時の低周波騒音の発生はほとんどないものと推測される。

表-5 飛行位置（水平距離）の違いによる低周波音圧レベルの変化

水平距離	等価音圧レベル	時間率音圧レベル					最大音圧レベル	最小音圧レベル
	L_{Geq}	L_{G5}	L_{G10}	L_{G50}	L_{G90}	L_{G95}	L_{Gmax}	L_{Gmin}
1m	54.1	55.6	55.4	53.9	52.3	51.9	57.5	51.2
10m	52.8	54.2	53.9	52.6	51.6	51.6	54.6	51.1
20m	53.2	54.6	54.2	53.1	51.7	51.3	55.8	51.0
30m	53.1	54.3	53.9	53.1	52.2	51.9	54.7	51.3
60m	53.0	54.6	54.3	52.7	51.6	51.2	55.5	50.9
暗騒音	52.0	53.2	52.9	51.9	51.0	50.8	54.2	50.5

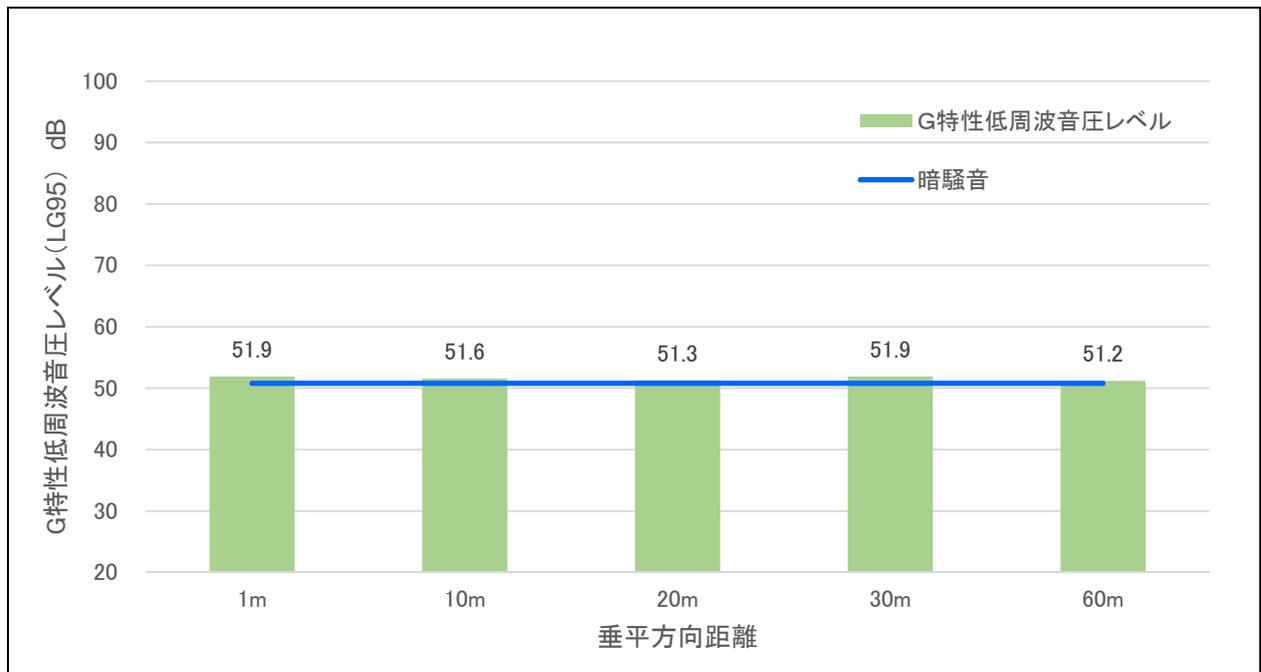


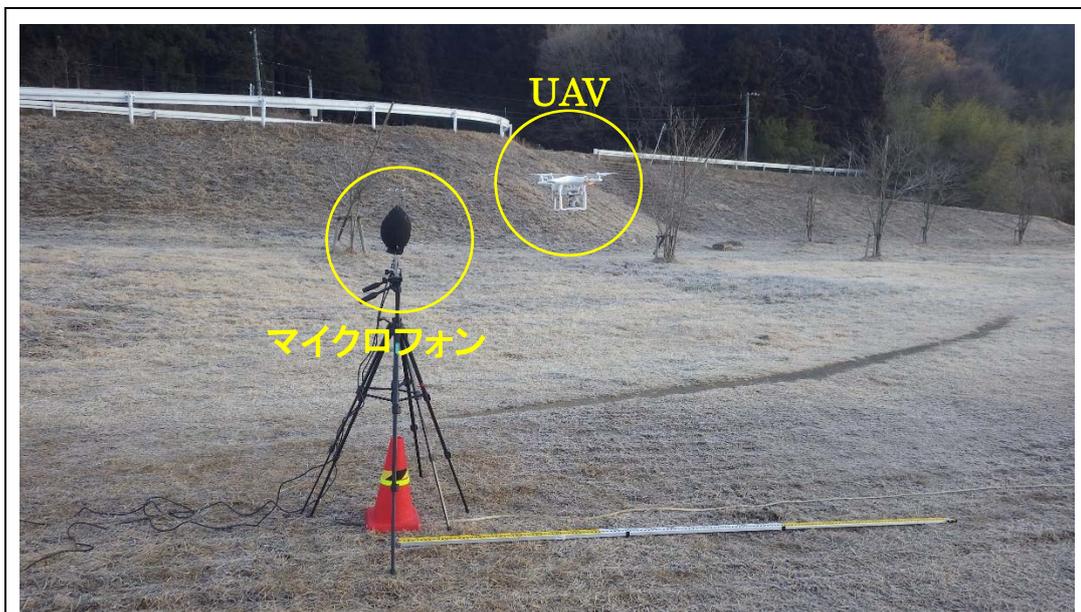
図-7 飛行位置（水平距離）の違いによる G 特性低周波音圧レベルの変化

(4) 1/3 オクターブバンド中心周波数分析結果

表-6～7 及び図-8～9 に UAV 飛行音の 1/3 オクターブバンド中心周波数分析結果を示す。また、図-10～11 には UAV の飛行音の影響を考察するために暗騒音と UAV 飛行音とのレベル差を図示した。データの集計は騒音レベルの集計方法と同様とし、周波数帯ごとに演算した結果のうち 90%レンジの下端値(L₉₅)を評価、考察の対象とした。

周波数分析の結果から卓越周波数をみると、垂直方向では、垂直 2m で 8kHz、垂直 10～30m では 630Hz と、飛行高度の上昇に伴い卓越周波数の変化がみられている。また、水平方向においては 160Hz の周波数帯が卓越してはいるが、暗騒音とのレベル差からみると 8kHz 付近などの高い周波数帯の影響がやや大きいと考えられる。

ただし、今回の結果からは、卓越周波数とその他の周波数帯で極端な差はみられておらず、100Hz 以上の周波数帯全体で音圧レベルの増加がみられる結果となった。よって、UAV を飛行させることにより、ある特定の周波数帯が大きく発生し影響するものではないと考えられる。なお、一般的に低周波音とされている 100Hz 以下の周波数帯においては、暗騒音レベルと比較しても目立った影響はみられておらず、低周波音の影響はないものと考えられる。



測定状況写真

表-6 1/3オクターブバンド音圧レベル測定結果詳細表(1)

単位：dB

No.	測定位置	騒音レベル A 特性	低周波 音圧レベル G 特性	オーバーオール OA 1-20KHz	1/3オクターブバンド中心周波数 (Hz)																		
					1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63
1	暗騒音	31.1	50.8	48.9	36.3	37.8	34.2	33.3	33.8	32.4	31.8	33.7	32.6	32.5	34.8	35.1	37.1	36.0	36.5	37.4	38.0	37.6	36.6
2	垂直 2m	78.0	56.0	78.6	47.0	47.6	48.8	49.3	50.6	51.8	51.2	51.7	48.0	44.5	43.0	48.0	39.3	38.8	38.8	39.9	38.1	37.1	38.5
3	垂直 10m	56.4	50.7	57.5	34.1	37.0	36.9	31.5	33.1	35.1	34.7	35.3	36.0	34.4	35.3	36.3	36.0	36.3	38.1	38.1	39.2	39.1	37.8
4	垂直 30m	51.6	51.2	54.5	42.8	39.5	39.1	38.9	39.9	39.6	36.3	37.4	35.8	34.4	37.5	36.7	36.8	36.8	38.2	38.0	38.3	38.4	36.9
5	垂直 60m	46.8	51.8	51.3	35.9	34.3	37.8	33.2	35.3	32.8	31.8	33.4	34.7	33.3	34.6	37.9	36.8	37.8	38.9	38.4	38.9	38.4	37.5
6	垂直 100m	41.0	50.8	49.9	36.3	31.6	32.0	30.8	33.3	29.9	32.6	32.7	33.7	33.3	37.1	37.0	36.4	36.6	38.3	38.3	38.8	38.6	39.2
7	垂直 150m	38.2	52.2	50.6	34.5	33.1	33.1	32.0	32.8	33.0	33.6	35.3	35.0	38.0	36.9	37.7	37.7	39.8	39.9	41.0	39.7	38.9	37.1
8	水平 1m	72.7	51.9	74.5	39.7	42.6	43.0	41.8	41.2	41.5	40.6	36.6	35.6	35.9	35.9	36.3	37.8	38.1	38.0	38.9	38.2	38.6	36.9
9	水平 10m	54.8	51.6	57.3	40.2	36.8	34.5	33.9	33.1	32.8	33.5	36.0	34.8	35.0	35.9	36.0	35.8	37.5	38.1	37.4	37.6	37.8	36.0
10	水平 20m	46.9	51.3	52.1	35.3	34.0	35.7	33.7	33.1	33.7	32.7	33.7	33.7	33.3	34.3	35.1	37.3	37.9	37.8	38.1	37.6	36.7	36.8
11	水平 30m	43.3	51.9	51.0	39.2	36.9	34.2	31.7	31.8	32.4	31.4	34.3	33.6	33.4	35.0	36.0	36.8	38.1	39.4	38.3	38.0	38.4	37.4
12	水平 60m	38.6	51.2	50.4	38.5	34.6	33.1	34.1	35.9	31.3	33.5	34.1	34.4	34.6	37.6	36.3	37.3	37.4	39.8	39.6	40.1	39.6	36.3

注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置はGL+1.5m。なお、表中の値は測定時間1分間の90%レンジの下端値(L95)である。

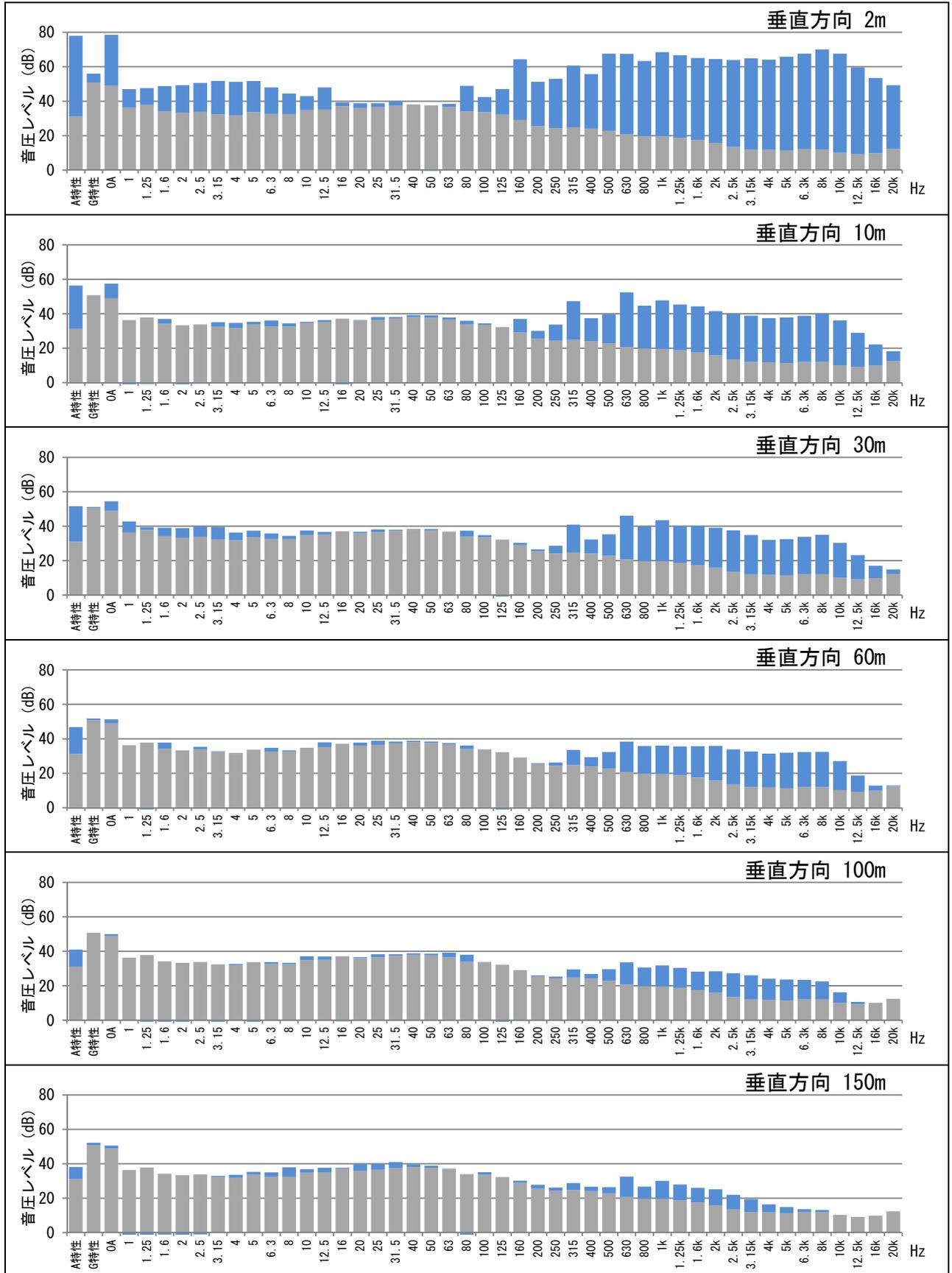
表-7 1/3オクターブバンド音圧レベル測定結果詳細表(2)

単位：dB

No.	測定位置	1/3オクターブバンド中心周波数 (Hz)																								
		80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
1	暗騒音	34.0	33.6	32.2	29.1	25.5	24.3	24.8	24.1	22.8	20.7	19.8	19.6	18.8	17.5	15.9	13.5	12.0	11.8	11.3	12.1	12.0	10.1	9.2	9.8	12.4
2	垂直 2m	48.9	42.4	47.1	64.3	51.3	53.0	60.7	55.7	67.6	67.5	63.4	68.5	66.7	65.1	64.5	63.9	64.9	64.1	65.8	67.6	70.0	67.6	59.6	53.5	49.3
3	垂直 10m	35.9	34.4	31.8	37.0	30.0	33.7	47.3	37.4	39.5	52.4	44.6	47.8	45.3	44.3	41.5	39.9	38.9	37.5	37.8	38.8	40.3	36.1	28.9	22.2	18.2
4	垂直 30m	37.4	34.8	31.3	30.3	26.6	28.7	40.9	32.3	35.3	46.1	39.8	43.5	40.2	40.2	39.1	37.6	34.9	32.1	32.5	33.9	35.0	30.3	23.2	17.0	14.9
5	垂直 60m	36.1	33.8	30.5	28.6	25.9	26.2	33.5	29.3	32.3	38.3	35.8	36.0	35.5	35.7	35.9	33.8	32.6	31.4	31.9	32.3	32.4	27.0	18.7	12.8	12.9
6	垂直 100m	38.0	33.8	31.3	28.6	26.0	25.3	29.5	26.8	29.6	33.6	30.6	31.8	30.4	28.2	28.4	27.2	26.1	24.1	23.6	23.4	22.5	16.2	10.6	10.0	12.4
7	垂直 150m	32.3	35.1	32.3	30.2	27.8	26.2	28.8	26.7	26.4	32.5	26.8	30.1	28.0	26.0	25.2	22.0	19.5	16.5	14.9	13.7	13.2	10.3	9.2	9.9	12.4
8	水平 1m	42.8	37.9	47.4	68.0	54.7	46.8	64.8	54.7	64.5	64.4	61.1	64.1	62.0	58.8	59.0	56.9	59.2	57.8	57.3	59.4	60.7	57.6	50.6	43.1	37.9
9	水平 10m	36.4	33.8	33.0	48.4	33.8	29.5	47.4	39.7	50.9	43.0	40.7	46.8	42.4	41.4	41.2	38.4	40.4	38.0	38.2	39.6	41.0	36.9	30.5	23.0	18.0
10	水平 20m	35.1	33.5	32.3	45.7	31.7	24.9	35.6	26.9	33.1	37.6	38.1	40.4	34.6	30.1	34.6	29.8	33.0	29.3	29.6	30.8	31.5	27.3	20.7	14.2	13.4
11	水平 30m	35.7	33.7	31.5	42.1	29.8	25.1	34.1	27.0	29.2	30.9	32.1	36.2	34.8	30.7	25.4	26.6	30.4	25.9	27.2	27.2	28.4	23.7	17.1	11.9	12.7
12	水平 60m	32.3	35.0	32.0	35.7	28.8	26.1	29.1	26.4	27.2	25.7	24.5	27.6	28.1	26.6	27.9	25.5	20.5	18.1	22.0	21.8	20.3	17.7	10.9	10.2	12.4

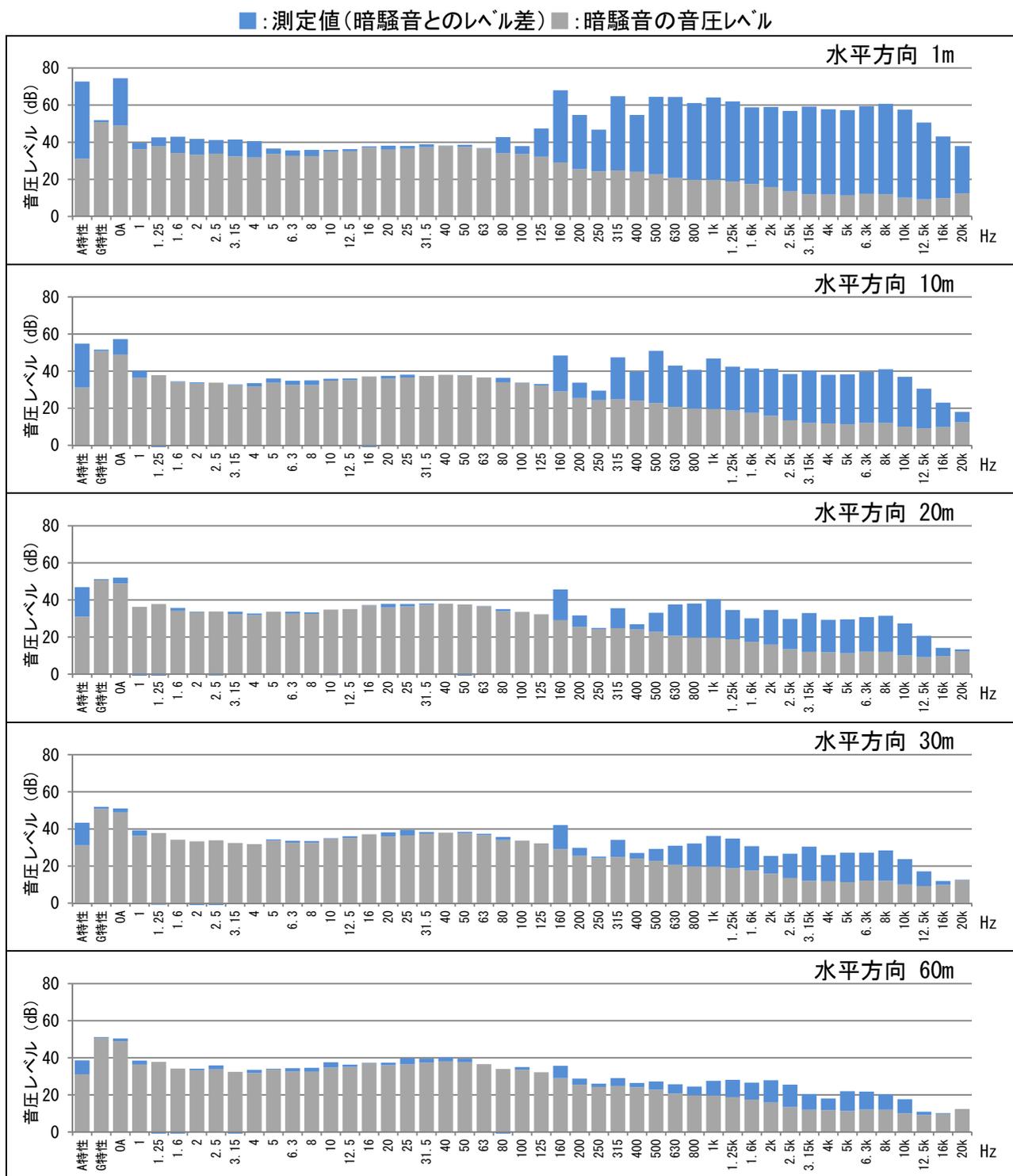
注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置はGL+1.5m。なお、表中の値は測定時間1分間の90%レンジの下端値(L95)である。

■ :測定値(暗騒音とのレベル差) ■ :暗騒音の音圧レベル



注) 測定値が暗騒音を下回る時は、暗騒音とのレベル差を0 dBとした。

図-10 1/3 オクターブバンド音圧レベル暗騒音との比較(垂直方向)



注) 測定値が暗騒音を下回る時は、暗騒音とのレベル差を 0 dB とした。

図-11 1/3 オクターブバンド音圧レベル暗騒音との比較(水平方向)

c. 音圧レベルの伝搬予測

図-12 に UAV 飛行音の周波数ごとの簡易伝搬予測を示す。コンター図は実測値及びそれを基に重回帰分析した結果から作成した。図には、630Hz、2kHz、8kHz の 3 パターンを示したが、低い周波数帯の方が減衰量が小さく、遠くまで到達する傾向がみられてる。

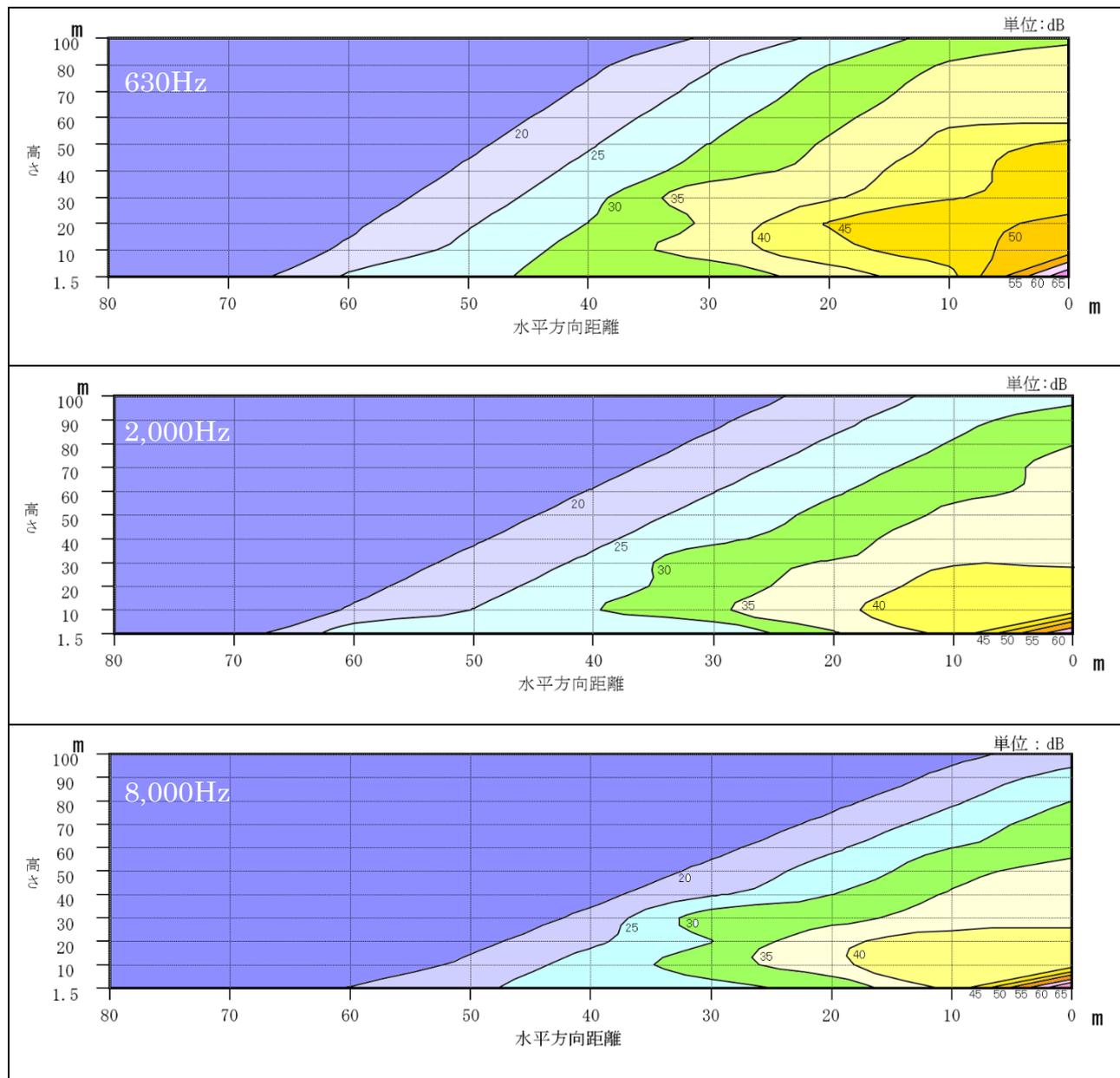


図-12 UAV 飛行音の簡易伝搬予測(1/3oct 中心周波数 630, 2k, 8kHz)

【簡易伝搬予測図作成条件】

- ・実測値の中から、対象飛行時間内の 90%レンジの下端値 (L_{95}) を選択した。(対象外の音をできるだけ除外)
- ・上記より重回帰式を求め、予測値を算出し図示した。

5. 考察

(1) 動物の可聴域との比較

図-13～14 に UAV 飛行音の周波数分析結果と一般的な動物の可聴域との比較を示す。図には、ヒト、小型哺乳類(イヌ)及び鳥類の可聴範囲を示したが、これをみると UAV の発生音は、ここで取り上げた動物に関してはすべて可聴範囲内で発生している。また、各最適周波数はヒトが 4 kHz、イヌが 8 kHz、鳥類が 2~3kHz とされているが*、それらの周波数帯で突出している傾向はみられなかった。

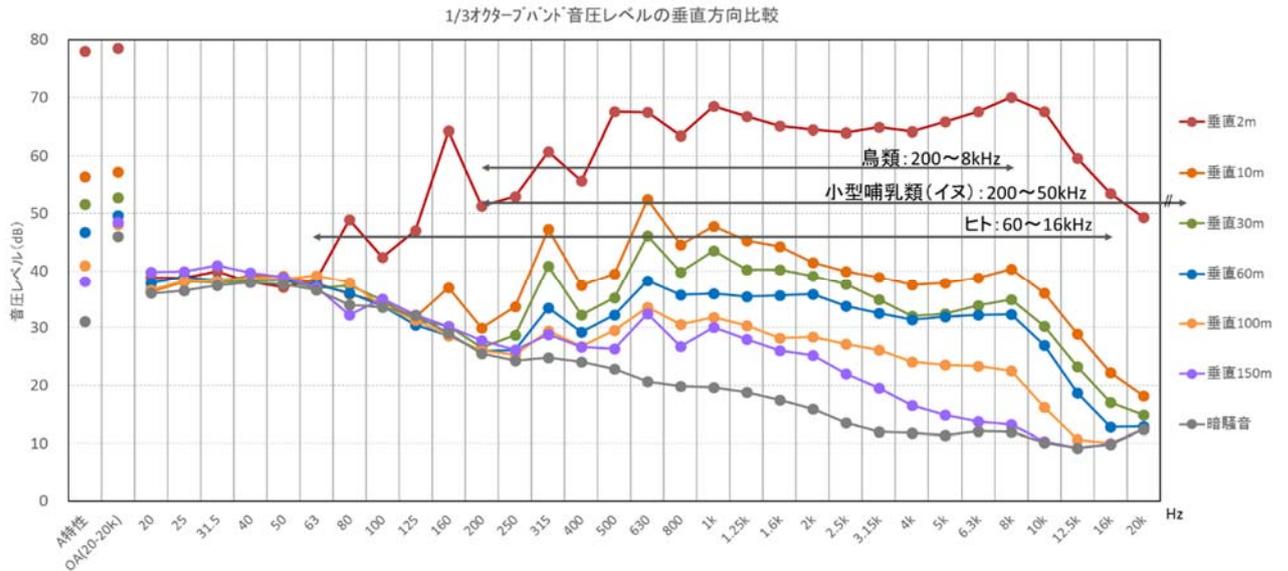


図-13 周波数分析結果(垂直方向)と一般的は動物の可聴域の比較*

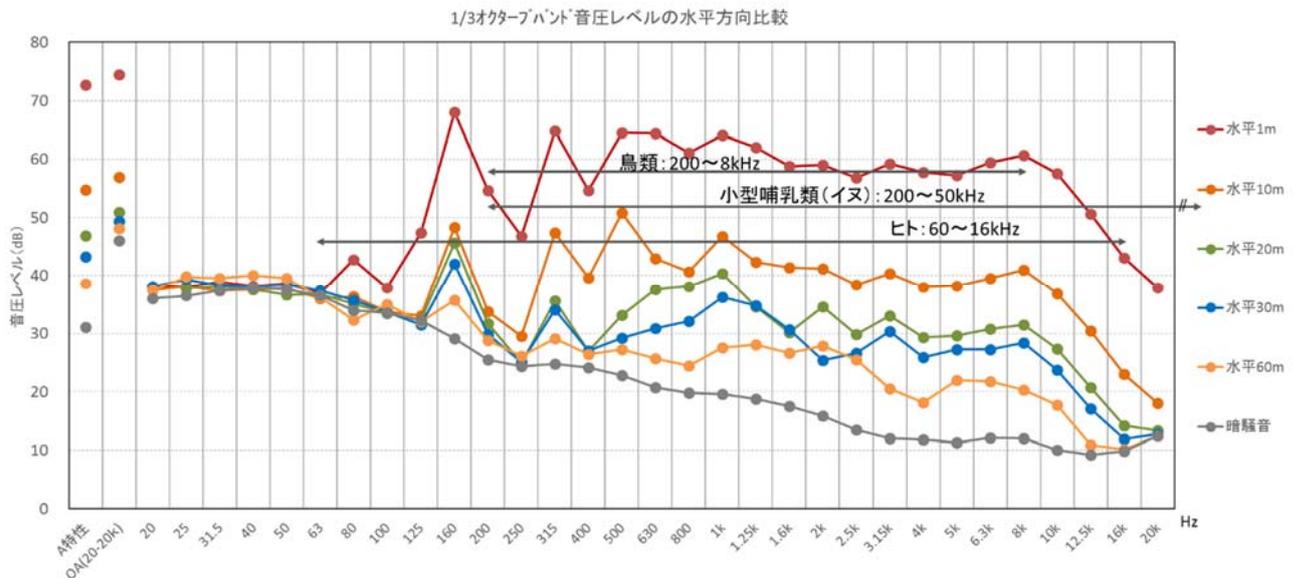


図-14 周波数分析結果(水平方向)と一般的は動物の可聴域の比較*

*出典：一般社団法人 日本音響学会 HP「QandA (170)」

<<http://www.asj.gr.jp/qanda/answer/170.html>> (平成 28 年 3 月閲覧)

(2) 猛禽類(オオタカ)の聴感度との比較

図-15～18 に UAV 飛行音の周波数特性とオオタカの聴感度*の比較を示す。測定値はオオタカの聴感度と比較しやすいように、表 6～7 の 1/3 オクターブバンド音圧レベルの値を 1/1 オクターブバンドへエネルギー加算式で変換し図示した。

国土技術政策総合研究所の資料*によると、猛禽類の聞こえる周波数の範囲(可聴域)は 250Hz～8kHz であり、2kHz 位の周波数に対して最も感度が高く、1kHz から 4kHz の範囲の音がよく聞こえるようであるとされている。

測定結果とオオタカの聴感度を比較してみると、「よく聞こえる」とされる 1k～4kHz の周波数帯に関しては、暗騒音レベルでもオオタカにとっては聞き取れる音圧レベルであり比較することは難しいが、垂直 150m の距離でも感知できるレベルの音は発生していると推測される。一方、「感度が低い」とされる 250Hz 及び 8kHz の周波数帯をみると、250Hz は、垂直方向、水平方向ともに 60m の測定値で聞こえないレベルに、8kHz は、垂直方向で 30m、水平方向で 20m の測定値で聞こえないレベルまで低下している。

また、UAV 飛行音の周波数特性は、特定の周波数帯が卓越する傾向はなく、オオタカにとって最も聴覚的な感度の高い 2kHz 付近の周波数帯に関しても突出する傾向はみられなかった。

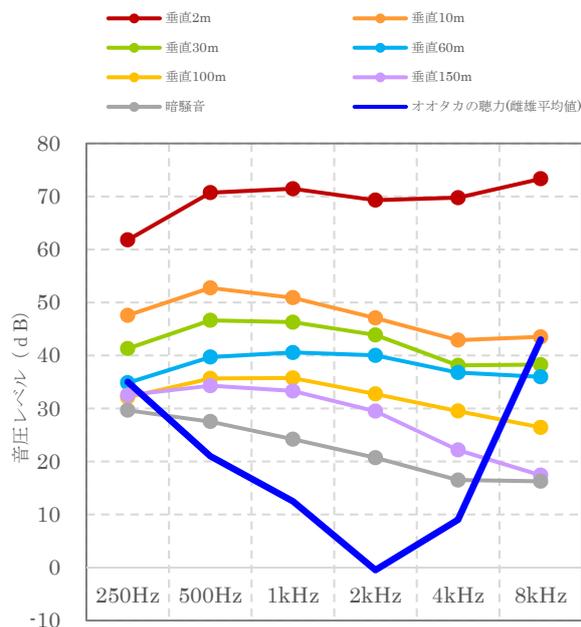


図-15 1/1 オクターブバンド中心周波数分析結果 (垂直方向)とオオタカの聴感度

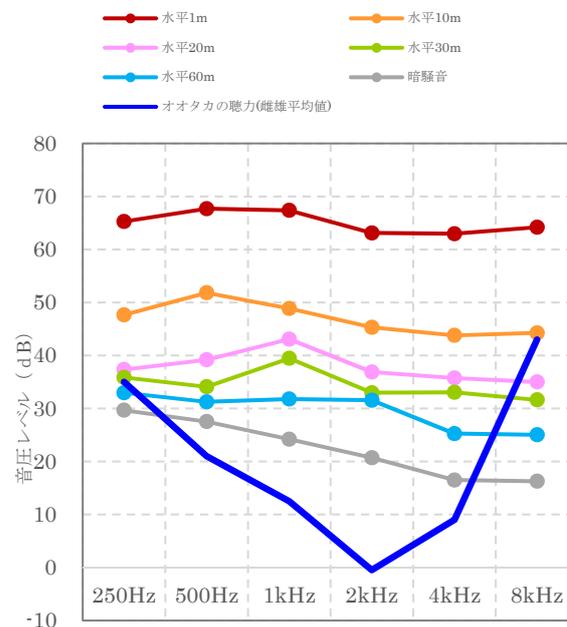
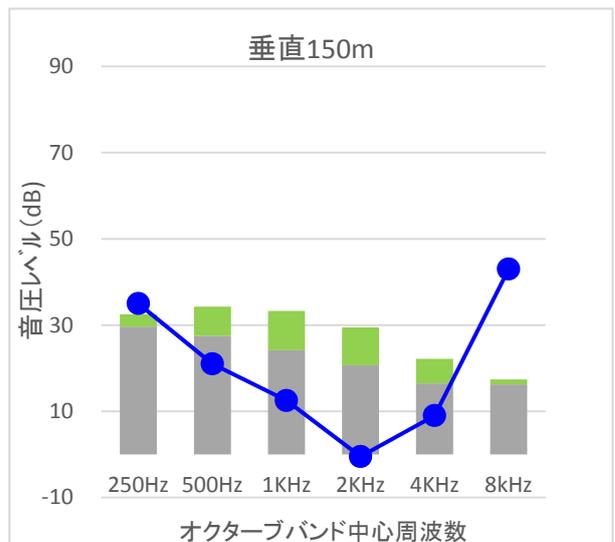
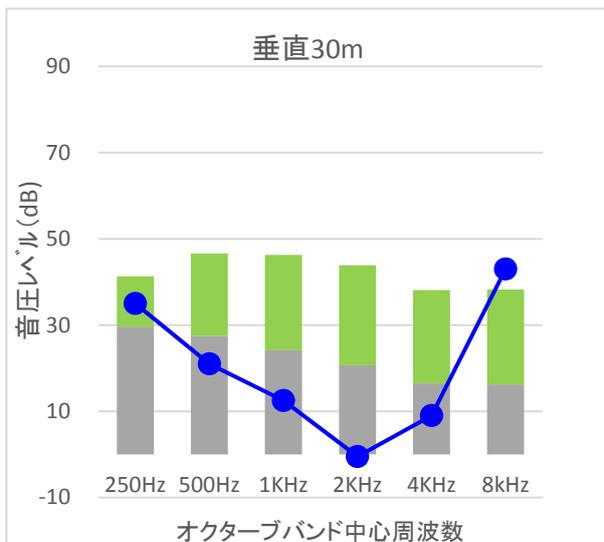
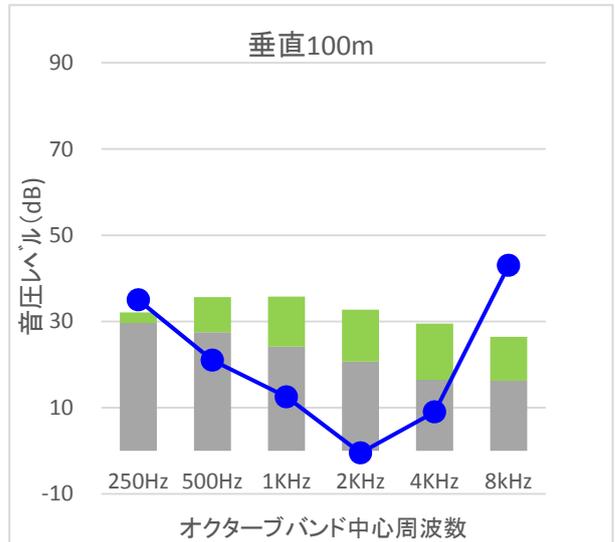
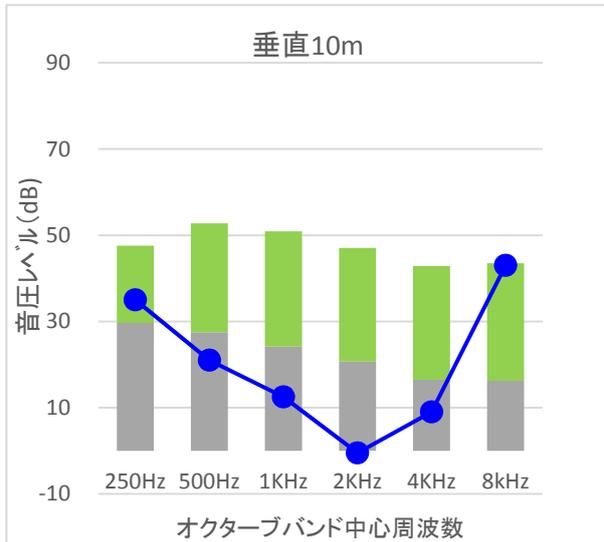
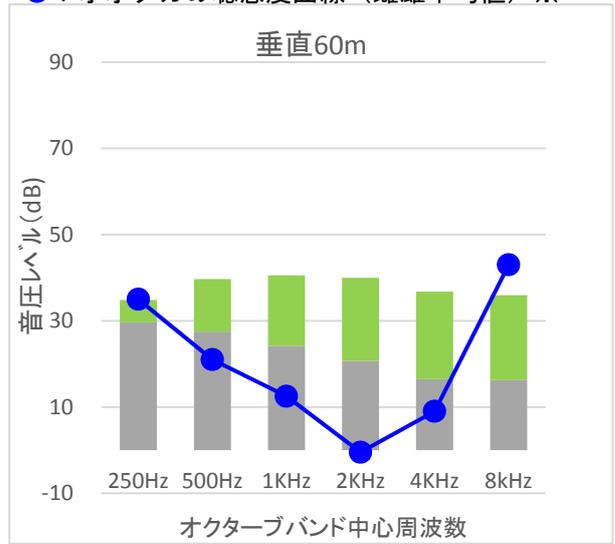
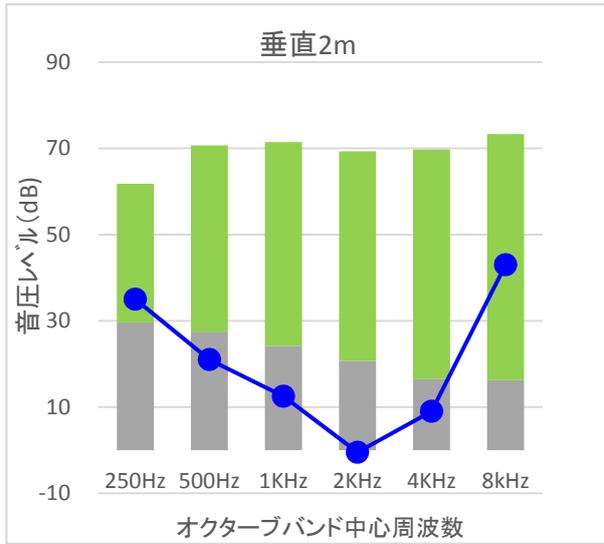


図-16 1/1 オクターブバンド中心周波数分析結果 (水平方向)とオオタカの聴感度

※出典：「ダム事業における希少猛禽類の保全技術に関する調査」

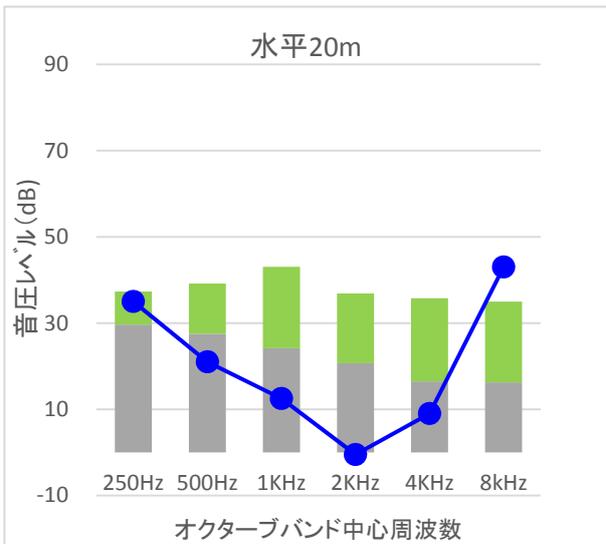
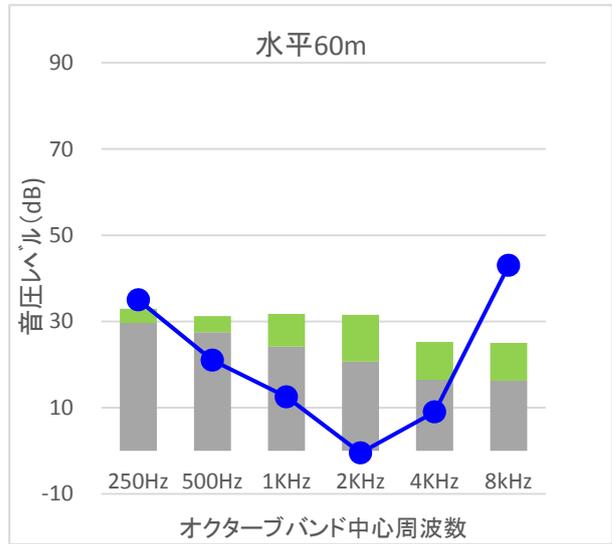
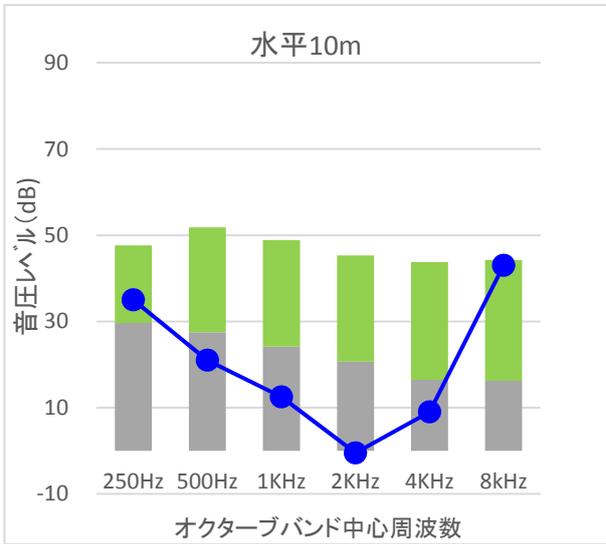
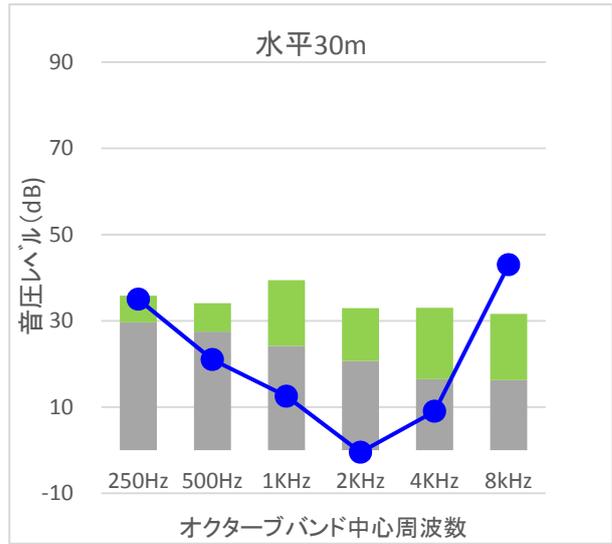
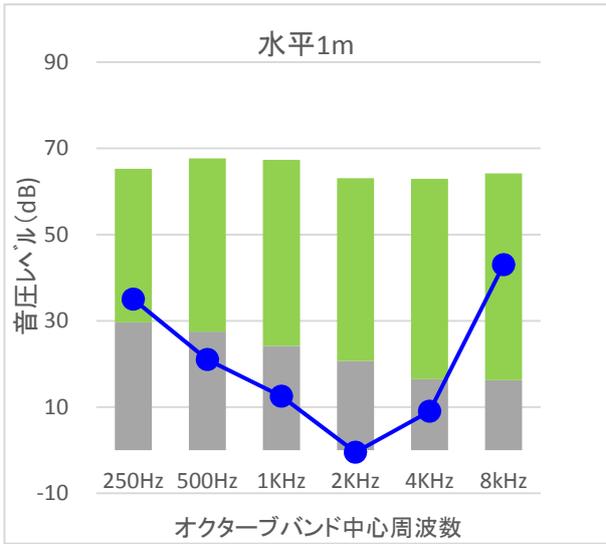
(国土技術政策総合研究所 環境研究部 緑化生態研究室, 調査期間：平成 12～16 年)

■ : UAV 飛行時の音圧レベル(暗騒音とのレベル差)
 ■ : 暗騒音レベル
 ● : オオタカの聴感度曲線(雌雄平均値) ※



※出典：「ダム事業における希少猛禽類の保全技術に関する調査」
 (国土技術政策総合研究所 環境研究部 緑化生態研究室, 調査期間：平成12～16年)

図-17 オオタカの聴感度と測定結果の比較(垂直方向)



- : UAV 飛行時の音圧レベル (暗騒音とのレベル差)
- : 暗騒音レベル
- : オオタカの聴感度曲線 (雌雄平均値) ※

※出典：「ダム事業における希少猛禽類の保全技術に関する調査」
 (国土技術政策総合研究所 環境研究部 緑化生態研究室, 調査期間：平成12～16年)

図-18 オオタカの聴感度と測定結果の比較 (水平方向)

6. まとめ

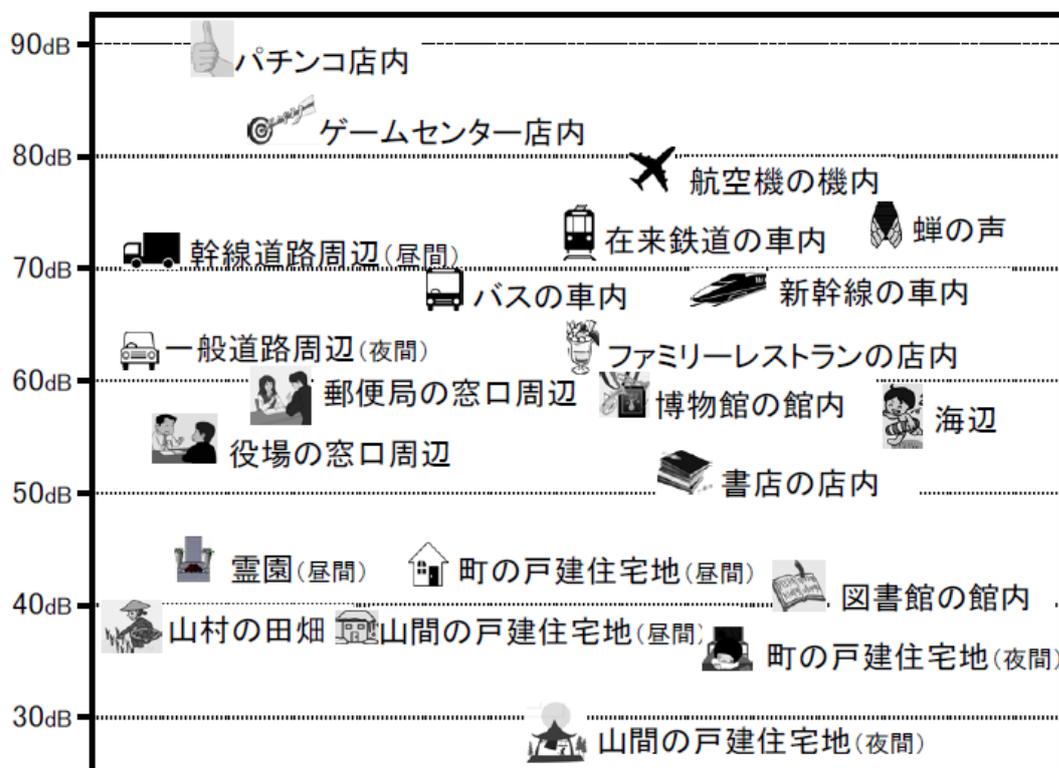
表-8 に本調査の総括を示す。

表-8 UAV 騒音測定の結果表

項目	内容
測定方法及び集計方法	<ul style="list-style-type: none"> 騒音測定機器を固定したうえで UAV を操作し、発生音を測定した。 精密騒音計 NL-62（低周波音測定機能付）を用い現地測定したデータを持ち帰り、対象飛行ごとに1分間選出し Lx、Leq 等を算出した。 車両の走行や鳥の声など対象外の音の影響をできるだけ受けない値とするため、90%レンジの下端値(L_{A95})を評価・考察の対象とした。
騒音レベル (A 特性)	<ul style="list-style-type: none"> UAV の飛行音は、垂直距離 150m でも人の耳で聞き取ることができた。 UAV 飛行音の騒音レベルは、垂直距離 2m(機器から 0.5m の距離)で 78.0dB であり、垂直距離 150m を飛行時には 38.2dB まで低下した。 水平方向に関しては、水平距離 1m で 72.7dB であり、水平距離 60m を飛行時には 38.6dB まで低下した。
騒音の伝搬予測 (重回帰分析)	<ul style="list-style-type: none"> 実測値を基に重回帰分析を行い、音の広がり方を簡易的に予測し図示した。 その結果、水平方向に 30m 程度、垂直方向に 60m 程度以上の距離をとることにより、人の聴覚においては特にうるさく感じられる騒音レベルではなくなる結果となった。(50dB 程度)
低周波音圧レベル (G 特性)	<ul style="list-style-type: none"> 低周波音は、G 特性音圧レベル及び周波数分析結果からみても、ほとんど発生していないことが確認された。
1/3 オクターブバンド 中心周波数分析	<ul style="list-style-type: none"> UAV 飛行音の周波数特性は、ある特定の周波数帯に突出する傾向はなく、100Hz 以上の周波数帯全体で音圧レベルの増加が認められた。
音圧レベルの伝搬予測 630Hz, 2kHz, 8kHz (重回帰分析)	<ul style="list-style-type: none"> 実測値を基に重回帰分析を行い、周波数帯別の音の広がり方を簡易的に予測し図示した。 その結果、低い周波数帯の方が減衰量が小さく、遠くまで到達する傾向がみられてる。
動物の可聴域との比較	<ul style="list-style-type: none"> UAV 飛行音の周波数特性とヒト、小型哺乳類(イヌ)及び鳥類の可聴域とを比較し考察した。 UAV の飛行音は、これらの動物の可聴範囲内で発生していることが認められた。 ただし、最適周波数帯付近で突出している傾向はなかった。
猛禽類(オオタカ)の 聴感度との比較	<ul style="list-style-type: none"> 「よく聞こえる」とされる 1k~4kHz の周波数帯に関しては、垂直 150m の距離でも感知できるレベルの音は発生していると推測される。 「感度が低い」とされる 250Hz は、垂直方向、水平方向ともに 60m の測定値で聞こえないレベルに、8kHz は、垂直方向で 30m、水平方向で 20m の測定値で聞こえないレベルまで低下していることが確認された。 最も聴覚的な感度の高い 2kHz 付近の周波数帯に関しても突出する傾向はみられなかった。

7. 参考資料

(1) 騒音の目安



騒音の目安 (地方都市・山村部用)

出典：環境省 HP「騒音の目安について」

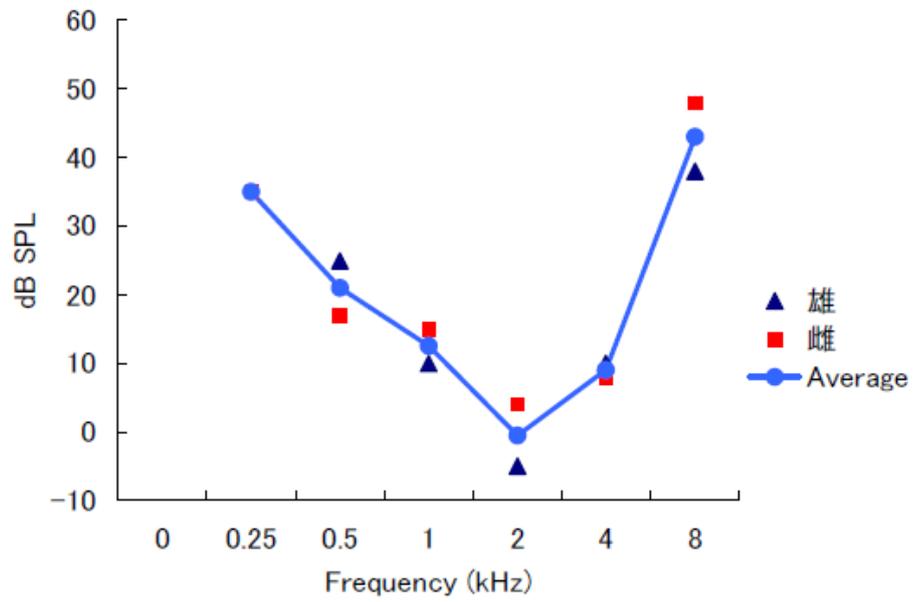
<<http://www.env.go.jp/air/ippan/>> (全国環境研協議会 騒音小委員会)

調査区分及び調査項目		調査数 (件)	騒音レベル (dB)	標準偏 差	
自然地域 (屋外)	田畑における測定	近郊部	7	43	1.7
		山間部	47	39	3.6
	自然地域における測定	一般地域	15	42	7.1
		別荘地域	4	33	5.9
		滝	4	69	3.2
	海浜における測定		13	61	6
	川辺における測定		10	59	7.3
	ハイキングコースにおける測定		1	52	—
動物の声の測定	蝉の声	10	72	5.2	

※自然地域 (屋外) のみ抜粋

出典：「新しい「騒音の目安」調査について」(2010年, 宮城県保健環境センター年報 第28号)

(2) オオタカの聴感度曲線



オオタカ雄・雌の正答率 60%での聴感度曲線

出典：「ダム事業における希少猛禽類の保全技術に関する調査」

(国土技術政策総合研究所 環境研究部 緑化生態研究室, 調査期間：平成 12～16 年)

(3) 1/3 オクターブバンド周波数分析結果

1/3 オクターブバンド中心周波数測定結果（等価音圧レベル）-1

単位：dB

No.	測定位置	騒音レベル A 特性	低周波 音圧レベル G 特性	オーバーオール O A 1-20KHz	1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)																		
					1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63
1	暗騒音	32.0	52.0	52.8	44.2	42.6	41.0	39.0	39.1	38.4	37.5	38.0	38.4	36.4	38.2	37.9	39.3	38.3	38.8	40.6	39.4	39.3	38.2
2	垂直 2m	81.0	61.2	81.8	54.9	56.1	55.8	56.8	58.1	58.0	58.2	59.0	58.9	55.0	50.5	54.3	43.1	41.3	41.6	42.7	40.2	39.4	40.1
3	垂直 10m	58.2	52.6	64.4	55.9	56.9	57.3	50.3	50.7	49.2	46.6	42.3	44.5	41.1	40.1	39.5	38.6	38.6	40.2	40.1	40.8	40.9	39.8
4	垂直 30m	52.7	52.6	61.4	50.6	52.8	49.9	53.7	52.9	50.5	47.8	45.0	41.7	39.5	40.9	39.2	38.8	38.9	40.0	39.4	40.0	39.7	38.5
5	垂直 60m	47.5	53.5	55.9	46.8	48.1	44.6	39.8	39.2	38.1	38.0	38.7	39.8	37.9	37.9	39.9	39.6	40.4	41.3	40.9	42.5	41.2	41.9
6	垂直 100m	42.1	52.7	53.4	43.5	37.8	38.3	38.7	39.2	38.5	37.8	38.0	39.7	38.6	40.7	39.5	39.0	39.1	40.6	40.2	40.2	40.4	41.5
7	垂直 150m	46.8	54.5	55.6	41.1	41.1	39.4	38.5	38.3	37.5	39.1	41.1	39.5	41.4	40.6	40.5	41.4	42.8	42.0	43.8	43.1	46.0	44.5
8	水平 1m	75.9	54.1	78.0	49.5	52.1	49.7	48.0	48.3	48.5	47.1	45.8	42.4	40.8	40.1	43.7	40.5	40.2	40.2	40.9	39.7	40.2	39.1
9	水平 10m	55.4	52.8	59.1	45.0	42.8	40.0	40.0	39.3	39.2	40.0	39.5	39.7	38.4	39.0	38.7	39.4	39.8	40.2	39.6	39.0	39.3	37.6
10	水平 20m	47.4	53.2	54.8	44.1	41.3	42.1	39.7	37.5	37.8	37.7	37.4	39.0	37.0	37.8	38.0	40.8	39.6	39.7	40.2	39.0	38.4	38.3
11	水平 30m	43.9	53.1	54.4	45.3	44.3	41.3	39.1	38.4	39.2	38.2	38.7	39.1	38.7	39.0	39.2	39.1	40.2	41.4	40.7	39.9	39.8	39.1
12	水平 60m	39.2	53.0	55.6	47.6	47.8	44.7	44.5	43.0	39.0	39.0	38.7	39.8	37.8	40.4	39.6	39.4	40.6	41.4	41.0	41.7	41.5	38.4

注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置は GL+1.5m。なお、表中の値は測定時間 1 分間の等価音圧レベル (Leq) である。

1/3 オクターブバンド中心周波数測定結果（等価音圧レベル）-2

単位：dB

No.	測定位置	1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)																								
		80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
1	暗騒音	36.1	36.8	36.4	33.0	28.3	27.6	26.6	25.8	24.1	21.9	20.9	20.5	19.7	18.4	16.8	14.5	13.4	15.5	13.4	15.8	14.6	11.2	9.7	10.1	12.6
2	垂直 2m	50.6	45.1	49.9	67.0	54.6	55.5	66.0	58.6	69.0	70.8	67.6	70.2	70.0	68.8	68.1	67.4	67.7	67.4	68.8	71.2	73.4	70.5	63.2	57.5	53.2
3	垂直 10m	37.7	37.9	35.5	39.6	32.7	36.3	49.9	39.6	42.9	54.6	46.7	50.3	47.6	47.1	44.2	42.8	41.8	40.3	41.3	42.7	44.3	40.2	33.3	26.9	22.4
4	垂直 30m	40.1	37.5	33.9	32.6	28.7	30.7	43.1	33.8	37.6	48.0	41.5	44.5	41.8	41.7	41.2	39.8	37.7	35.6	36.2	37.5	38.7	34.3	27.3	20.6	16.9
5	垂直 60m	39.2	38.1	35.5	33.3	29.6	28.5	35.5	32.0	34.9	40.3	37.5	37.6	36.8	36.7	37.0	35.2	34.0	32.4	33.0	33.7	34.1	28.8	20.4	13.7	13.2
6	垂直 100m	39.5	36.9	34.4	31.6	28.6	27.3	31.4	28.2	31.5	35.7	32.1	33.3	31.8	30.1	30.5	29.0	28.2	28.1	28.3	25.5	24.5	18.1	11.5	10.3	12.6
7	垂直 150m	36.6	41.0	40.0	37.3	33.2	30.1	31.7	31.7	33.4	36.3	36.8	40.0	42.1	37.2	29.7	26.7	24.5	22.4	20.4	17.8	17.2	12.4	9.8	10.1	12.6
8	水平 1m	47.7	42.7	51.8	71.4	58.5	52.1	67.6	57.9	68.0	67.8	63.9	66.4	64.9	63.5	62.6	61.3	63.1	61.3	61.8	64.2	66.0	63.4	55.9	49.5	45.0
9	水平 10m	38.3	36.5	35.1	49.7	36.0	31.2	49.2	41.1	52.5	44.7	42.1	47.8	43.4	42.3	42.0	39.6	41.7	38.9	38.9	40.4	41.8	37.6	31.2	23.7	18.6
10	水平 20m	36.6	36.8	34.8	47.2	33.7	27.4	37.7	28.4	35.1	39.4	39.2	41.6	36.0	31.1	35.5	31.0	34.1	30.1	30.6	31.9	32.9	28.6	22.3	15.4	13.7
11	水平 30m	36.8	36.9	34.0	43.5	31.7	27.2	35.9	28.4	31.1	32.4	33.2	37.2	36.1	32.1	27.2	28.1	31.7	27.0	28.4	28.8	29.7	25.4	18.6	13.1	13.1
12	水平 60m	33.4	37.6	35.0	37.9	31.1	28.4	31.3	28.1	28.8	27.4	26.0	29.1	29.5	27.6	29.5	28.3	25.2	20.9	24.7	24.3	23.8	19.7	12.0	10.5	12.6

注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置は GL+1.5m。なお、表中の値は測定時間 1 分間の等価音圧レベル (Leq) である。

1/3 オクターブバンド中心周波数測定結果 (90%レンジの上端値) -1

単位 : dB

No.	測定位置	騒音レベル A 特性	低周波 音圧レベル G 特性	オーバーオール O A 1-20KHz	1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)																		
					1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63
1	暗騒音	32.9	53.2	55.9	48.9	45.9	44.5	42.6	42.4	42.2	42.5	41.1	41.8	39.3	41.4	40.0	41.2	40.0	40.8	42.5	40.5	40.6	39.6
2	垂直 2m	83.2	64.4	84.2	59.3	59.8	60.0	62.5	62.3	62.7	62.9	64.0	63.2	59.8	55.4	57.5	47.1	43.4	44.1	45.6	42.1	41.7	41.6
3	垂直 10m	59.8	55.0	70.5	62.9	64.2	64.8	57.8	58.3	56.5	54.0	46.5	49.9	47.1	44.0	42.0	40.5	40.7	41.8	41.7	42.4	42.9	41.8
4	垂直 30m	53.6	53.6	66.8	56.2	59.0	54.3	60.2	58.8	57.6	54.6	49.0	46.6	42.8	43.8	41.5	40.2	41.0	41.5	41.0	41.8	40.8	40.0
5	垂直 60m	48.3	55.3	59.9	50.9	54.2	49.4	43.8	42.3	41.8	41.8	41.2	43.0	41.6	39.7	42.3	41.6	42.8	43.5	43.6	47.0	43.2	47.8
6	垂直 100m	43.5	53.8	56.0	47.2	41.3	42.1	42.1	43.3	42.5	40.3	42.3	41.9	40.1	43.4	41.6	40.9	40.7	42.4	41.5	41.9	41.8	44.6
7	垂直 150m	52.6	57.4	60.1	45.2	45.2	43.5	42.1	41.2	40.6	42.8	45.0	44.1	44.3	43.0	43.0	45.1	45.7	45.2	46.4	47.1	51.6	50.7
8	水平 1m	77.8	55.6	80.3	55.1	56.3	54.8	51.9	53.1	51.8	51.4	50.7	45.6	43.6	42.4	48.1	42.6	42.0	41.8	42.2	41.1	41.9	40.7
9	水平 10m	55.9	54.2	60.8	48.3	45.7	43.7	43.9	42.7	42.7	44.9	41.5	43.2	41.1	42.4	41.0	41.5	41.4	42.0	41.7	40.2	40.7	39.4
1 0	水平 20m	47.9	54.6	57.2	48.2	45.6	44.9	42.9	40.6	41.2	41.0	39.9	42.6	39.5	40.7	41.1	44.0	41.3	41.6	41.9	40.7	39.5	39.7
1 1	水平 30m	44.6	54.3	57.1	48.9	48.5	44.6	42.6	41.5	43.3	41.8	42.4	42.1	41.9	41.9	41.9	41.0	42.0	43.2	42.3	41.4	41.1	40.6
1 2	水平 60m	39.8	54.6	59.6	53.0	52.9	49.4	48.6	48.4	43.2	42.8	42.8	42.6	39.7	43.4	42.2	41.6	42.8	42.8	42.0	43.1	43.6	39.8

注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置は GL+1.5m。なお、表中の値は測定時間 1 分間の 90%レンジの上端値(L₅)である。

1/3 オクターブバンド中心周波数測定結果 (90%レンジの上端値) -2

単位 : dB

No.	測定位置	1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)																								
		80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
1	暗騒音	38.0	39.5	39.4	36.4	30.6	30.8	28.3	27.3	25.5	23.1	22.1	21.5	20.6	19.1	17.7	15.9	15.6	19.8	15.6	20.0	18.4	13.3	10.3	10.3	12.8
2	垂直 2m	52.4	47.9	52.2	69.2	57.3	57.6	68.7	60.9	70.4	73.4	70.0	71.7	72.4	71.1	70.5	69.9	69.7	69.6	71.3	73.7	75.8	72.8	65.7	60.0	55.5
3	垂直 10m	39.1	40.4	38.9	41.7	36.0	38.6	51.9	41.5	45.7	56.4	48.6	52.2	49.6	49.3	47.0	45.3	44.2	42.7	43.6	45.2	47.0	43.1	36.4	30.0	25.4
4	垂直 30m	43.2	39.7	36.0	34.5	30.5	32.4	44.9	35.2	39.8	49.4	42.7	45.4	43.0	42.9	42.6	41.4	39.5	37.7	38.6	40.0	41.3	36.9	29.7	22.9	18.4
5	垂直 60m	42.9	42.1	40.8	38.4	34.0	30.9	37.2	34.5	36.9	42.0	39.5	39.1	37.9	37.7	38.3	36.8	35.2	33.4	33.9	34.8	35.4	30.1	21.6	14.5	13.4
6	垂直 100m	40.7	39.4	36.9	33.4	30.7	29.4	33.0	29.7	32.8	37.3	33.3	34.7	33.0	31.7	32.4	30.6	29.8	33.5	34.4	27.1	26.1	19.8	12.5	10.6	12.8
7	垂直 150m	40.6	45.8	46.3	43.2	38.2	33.6	35.0	37.1	38.3	40.3	43.1	45.9	48.1	44.0	34.0	31.5	29.1	27.3	24.8	22.4	21.3	15.8	11.1	10.3	12.8
8	水平 1m	49.9	45.7	54.5	73.4	61.3	55.3	69.8	60.1	70.4	70.2	65.5	68.0	66.9	65.8	64.7	63.4	65.3	63.4	64.4	66.8	68.8	66.1	58.5	52.8	48.7
9	水平 10m	39.5	39.0	37.1	50.8	38.0	32.7	50.6	42.3	53.8	45.9	43.8	48.9	44.4	43.1	42.8	40.5	43.0	39.7	39.7	41.0	42.5	38.4	31.9	24.4	19.1
1 0	水平 20m	38.3	39.3	37.3	48.5	35.4	28.8	39.6	29.7	36.4	40.9	40.1	42.5	37.3	32.0	36.4	32.3	35.1	30.9	31.4	32.8	33.8	29.5	23.2	16.2	14.1
1 1	水平 30m	37.8	39.2	36.1	44.8	33.3	28.9	37.8	29.7	32.7	33.6	34.5	38.0	37.3	33.4	29.0	29.3	33.0	28.7	29.8	30.0	31.1	27.1	20.8	15.3	13.8
1 2	水平 60m	34.6	39.8	37.3	39.4	33.4	30.9	33.0	29.5	30.3	28.9	27.7	30.2	30.6	28.7	30.6	29.6	27.1	23.8	26.7	26.0	27.8	21.6	13.3	11.0	12.9

注) 垂直距離は地上高。マイクロフォン位置は GL+1.5m。なお、表中の値は測定時間 1 分間の 90%レンジの上端値(L₅)である。