

低周波音測定値に含まれる  
風ノイズレベル推計手法に関する研究

令和 2 年 9 月

長 船 寿 一

---

# 目 次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	4
1.3 本研究に関する既往の研究	5
1.3.1 防風スクリーン	6
1.3.2 地面にマイクロホンを設置する測定方法	7
1.3.3 二重の防風スクリーン	8
1.3.4 風速測定結果に基づく風雑音の統計的評価	9
1.3.5 騒音源探査	9
1.3.6 平均風速と乱流強度に着目した研究	10
1.4 研究の方向性	12
1.4.1 風ノイズの定義	12
1.4.2 マイクロホンが出力する音圧と風ノイズ	13
1.5 論文の構成	16
1.6 図表	18
第2章 風洞実験に基づく風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築	37
2.1 はじめに	37
2.2 風洞実験	37
2.2.1 風洞実験の概要	37
2.2.2 実験結果	38
2.3 風洞実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築	39
2.4 風洞実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の自然風への適用性の検証	42
2.4.1 フィールド実験の概要	42
2.4.2 フィールド実験結果	42

---

2.4.3	乱れの長さスケール	43
2.4.4	風洞実験とフィールド実験の乱流強度	44
2.5	フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式導出の試み	45
2.6	まとめ	47
2.7	図表	49
第3章	フィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築	74
3.1	風ノイズレベル計	74
3.2	フィールドデータの収集	75
3.3	フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築	75
3.4	フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の整合性検証	77
3.5	まとめ	78
3.6	図表	80
第4章	流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築	87
4.1	風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の導出	87
4.2	推計式の係数	90
4.2.1	データの収集	90
4.2.2	風ノイズレベル収集データ	99
4.2.3	背景騒音データの除外	99
4.3	風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の係数	101
4.4	風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の精度検証	102
4.4.1	全サイトデータ活用による推計精度検証	102
4.4.2	個別サイトデータによる推計精度検証	102
4.5	まとめ	105
4.6	図表	107
第5章	道路橋における風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の適用性の検証	162

---

5.1	検証用道路橋	162
5.1.1	検証用道路橋の振動特性	162
5.2	風ノイズレベル $L_{wind}$ の測定日時	164
5.3	分析結果	164
5.3.1	評価閾値	165
5.3.2	評価閾値と風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計値	165
5.3.3	測定データ分析結果	166
5.3.4	任意抽出データによる風ノイズ $L_{wind}$ 推計式の検証	167
5.4	風ノイズによる影響評価	168
5.4.1	道路橋から発生する低周波音と風ノイズ	168
5.4.2	風速の小さい時間帯を抽出し分析する方法	168
5.4.3	S/N 比に着目した評価方法	169
5.4.4	音圧レベルの最小値に着目した評価方法	170
5.5	まとめ	173
5.6	図表	175
第6章	結論	195
6.1	本研究で得られた知見と成果	195
6.2	本研究の結論	201
6.3	今後の課題と展望	203
	参考文献	204
	謝辞	208
	研究関連論文	209
1	論文	209
2	研究講演会論文	209
	特許	212

---

## Study on wind noise level estimation method included in measurement data of low frequency sound

Toshikazu Osafune

It is widely known that wind affects outdoor low-frequency noise measurements. The “Low-frequency Noise Measurement Method Manual” issued by the Ministry of the Environment’s Air Quality Bureau in October 2000 states, “Measurement is difficult even when there is just enough wind to cause grass and leaves to sway. Ideally, measurement should be performed on the other occasions when no wind blows.” However, natural wind is always changing, and it is rare to have long periods of no wind during which outdoor measurement can be conducted. Researches have been carried out on countermeasures such as the dual wind screens to cap low-frequency noise measurement microphones and the ground surface microphones which are little affected by wind. However, it is not yet possible to completely eliminate the effects of natural wind.

In this research, I performed wind tunnel testing and field testing to investigate the sound pressure level (the wind noise level) obtained by a measurement system composed of a commercially sold low-frequency sound level meter and windscreen is placed in air flows. These measurements showed that three parameters, that is, frequency, average wind speed, and turbulence intensity, contribute significantly to the pressure fluctuation characteristics of the output from the microphone in wind. This study confirmed that wind noise levels can be estimated by simultaneously measuring low-frequency noise and wind speed.

The wind noise level estimation formula was revised and improved through multiple wind tunnel testing and field testing. Finally, based on the theoretical relationship between wind speed and surface pressure on a body in flow, I proposed a formula to estimate wind noise level using the aforementioned three parameters. The coefficients used in this estimation formula were determined using measurement data from multiple field testing of different ground surface roughness conditions.

Furthermore, I developed and built a measurement device (a wind noise level meter) that integrates an ultrasonic anemometer and a low-frequency sound level meter in order to perform field measurements efficiently. Using the wind noise level meter with a wind noise level estimation program installed, I performed field data measurement at a highway bridge where low-frequency noise is a problem. Based this measurement data, I investigated multiple methods to determine the amount of low-frequency noise. This verified that the wind noise level estimation formula developed in this study is sufficiently accurate to estimate wind noise levels.

---

---

## 第1章 緒論

### 1.1 研究の背景

我が国では、加害者と被害者が地域的に限定される公害問題が存在し、その始まりは、1870年代、栃木県足尾銅山で発生した鉱毒被害といわれている。鉱山からの排煙や排水に含まれる鉱毒(銅の化合物、亜酸化鉄、硫酸やカドミウムなど)により渡良瀬川流域の両毛地帯に多大な被害を及ぼし、1891年、田中正造により国会で取り上げられ、大きな社会問題へと繋がった。

公害問題が更に注目されるようになったのは、戦後の経済成長期で、工業化の発展に伴い、国民生活は飛躍的に豊かになった一方、工場等から排出された重金属や有害化学物質等による環境汚染が引き金となり、深刻な公害問題が顕在化した。特に1955年荻野昇らにより報告された、富山県神岡鉱山のカドミウムを原因とする水質汚染による腎臓被害や骨軟化症を症状とするイタイタイ病、1956年熊本県水俣市不知火海沿岸で新日本窒素肥料からのメチル水銀化合物を原因とする水質汚染が原因による視野狭窄、運動失調、難聴、知覚障害をもたらした水俣病、1964年アセトアルデヒド製造工場からのメチル水銀化合物を含む排水が阿賀野川を汚染し下流一帯に水俣病と同様の被害を発生させた新潟水俣病、1961年、三重県四日市の石油コンビナートからの排煙に含まれる亜硫酸ガス・硫黄酸化物等による大気汚染を原因とする肺疾患の四日市喘息が我が国における四大公害病といわれ、産業公害の典型的なケースとして社会問題となった。このような状況を受け、1970年代にかけ大気汚染や騒音・振動、悪臭などの多くの公害対策に関する法律が整備され、対策が進められることとなった。

その後、高度成長期を迎え大量消費大量廃棄の現代型ライフスタイルが定着するとともに、マイカー時代の到来により環境汚染源として自動車等の移動発生源が加わった。窒素酸化物や一酸化炭素、浮遊粒子状物質やスパイクタイヤによる粉塵、騒音、振動問題が発生した。その他、生活排水による水質汚濁、廃棄物の増大などの問題等も顕在化することとなる。このように、それまでの産業型公害とは異なり、市民の普段の生活が原因となって発生する都市型公害へと形が変わったことで、工場と市民の間にあった加害者と被害者という対立関係から、市民自らが加害者でもあり被害者でもあるという問題構造に変化した。

我が国の公害統計の一つに、総務省公害等調整委員会より都道府県及び市町村(特別区を含む)が「公害苦情相談窓口」において受け付けた公害苦情の件数 [1] が毎年公表さ

## 1.1 研究の背景

---

れている(表 1-1, 図 1-1). この統計によると, 平成 30 年度の公害苦情受付件数は 66,803 件で, 平成 19 年度以降 12 年間連続で減少している. このうち, 環境基本法で定められている典型 7 公害の比率は, 「騒音」の苦情が最も多く全体の 32.9% (15,665 件), 続いて「大気汚染」が 30.4% (14,481 件), 「悪臭」が 20.0% (9,543 件), 「水質汚濁」が 12.3% (5,841 件), 「振動」が 4.1% (1,931 件), 「土壌汚染」が 0.4% (168 件), 「地盤沈下」が 0.1% (27 件)となっている(表 1-2).

一方, 苦情受付件数が年々減少するなか, 典型 7 公害以外に分類される「低周波音」は平成 19 年度から平成 28 年度まで増加を続け, 近年は 220 件前後で推移している.

我が国における低周波音問題は, 昭和 45 年頃に始まった. 当初の主な発生源は, 工場・事業場に設置された大型の施設, 道路高架橋やダム放流水などによる建具のがたつきなど, 物的苦情が多くを占めていたが, 昭和 55 年代に工場・事業場における低周波音の対策が進み苦情は減少した.

その後, 平成 5 年頃の新幹線の高速化に伴い, 高速列車のトンネル突入時に発生する超低周波音による物的苦情が増え始めたが, これについては, トンネル緩衝工の設置などの対策が行われ苦情の件数は減少した. これらの推移は, 環境省水・大気環境局が公表している「平成 30 年度騒音規制法等施行状況調査の結果について」[2] をみると理解できる. 低周波音にかかる苦情件数の推移を図 1-2 及び表 1-3 に示す. 統計を開始した昭和 48 年度の 95 件から昭和 60 年代前半では約 20 件にまで減少したが, 平成 5 年前後で若干件数が増加しており, これらは新幹線トンネル突入時の低周波音が原因によるものであることが表 1-3 をみると分かる. さらに, 平成 7 年度を境に年々増加の傾向を示している. 特に, 平成 28 年度は, 昭和 60 年代前半と比較し約 15 倍の 315 件(総務省の統計値と異なることに注意を要する)まで急増している. その原因を探るため, 平成 30 年度の低周波音苦情件数の内訳(図 1-3)をみると, 発生源が明確な「工場・事業場」が全体の 25.0% を占めているものの, 「その他」が占める比率が 50% で最も多い. 公表されている資料には「その他」の内訳が記されていないため, 環境省水・大気環境局大気環境課大気生活環境室にヒアリングを行った結果, この中には, 近年話題となっている風力発電施設から発生する低周波音も含まれているとの見解であった(令和 2 年 4 月 15 日確認).

風力発電の導入量は 2017 年度末において総数 2,253 基, 総出力約 350 万 kW [3] で膨大な数量となっている. また, 1998 年度に導入された電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドラインや 2003 年度の電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(RPS 法)の施行, 2012 年に開始された再生可能エネルギーの固定価格買取制度等の追

---

---

い風もあり、今後も風力発電の拡大が見込まれている。

しかし、その反面、風力発電の増加に伴い施設から発生する騒音や低周波音が原因と考えられる苦情や健康被害が顕在化している [4] [5] [6] [7] [8] 。

また、環境省が平成 22 年 10 月 7 日に公表した風力発電設備に係る騒音・低周波音の実態把握調査によると、平成 22 年 4 月 1 日現在、稼働中の総出力 20kW 以上の風力発電 389 施設のうち、64 施設 (16%) で苦情が寄せられているとの報告もある [9] 。

一方、道路高架橋から発生する低周波音による問題も、古くから顕在化している。

その始まりは、昭和 40 年代後半からとされており、昭和 49 年、中央自動車道の橋梁振動に起因する低周波音に係る苦情が発生し、昭和 51 年 7 月、新聞等により健康被害が報道されたことを機会に、道路橋が原因による低周波問題が世の中に広く知れ渡ることとなった [10]。さらに、昭和 50 年西名阪自動車道の香芝高架橋において騒音や建具のがたつきに関する苦情が近隣住民から道路管理者に寄せられた。これらの苦情対応として遮音壁の延伸や中央分離帯開口部の遮蔽、舗装改良及び伸縮装置からの漏洩音防止を目的とするカバーなど様々な対策が施されたものの、住民からの理解は得られず、昭和 55 年、低周波音と騒音の差し止めを求めた訴訟が提訴された。裁判は、人への健康被害が争点となり、和解に至るまで 7 年もの永い年月を費やしている [11] 。

これら、高速道路を含む道路交通が原因による低周波音にかかる環境問題は、昭和 40 年代後半から現代まで延々と続いており、苦情件数も 0～5 件の間で毎年発生している (表 1-3)。また、筆者等の調べによると、新東名高速道路の御殿場 IC～三ヶ日 JCT 間が開通した平成 24 年度には、新静岡 IC～三ヶ日 JCT 間に限っても 6 橋梁 12 件の低周波音にかかる苦情が発生しており、現在も問題解決に至っていない苦情は複数存在する。このような橋梁は高速道路以外にも国道や地方道など膨大なストック量となっていることを考慮すると、環境省から公表されている件数を上回る苦情が道路管理者の元に寄せられているものと考えられる。

また、低周波音問題は建具のがたつきなど物的な影響の他、人体への直接的な影響として心理的な影響 (アノイアンス、不快感、集中力の低下) や生理的な影響 (めまい、耳鳴り、吐き気、血圧の上昇、心拍数の上昇) などを引き起こし社会問題化している。さらに、低周波音による影響の評価指標や感覚閾値など未だ解明されていない課題は多く [6] [12] [13]、今後も更なる調査・研究を進め、問題解決に向け知見を重ねる必要がある。



## 1.2 研究の目的

低周波音の発生は、近隣家屋の障子や襖など建具のがたつきや人体に対してアノイアンス、集中力の低下などの心理的な影響や、めまい、耳鳴り、吐き気、血圧の上昇、心拍数の上昇など生理的影響を引き起こすとされ社会的な問題となっている。

一般に、騒音や低周波音の屋外測定においては、気象の影響を受けることが広く知られている。なかでも、風による影響が大きく、環境庁大気保全局の「低周波音の測定方法に関するマニュアル 平成 12 年 10 月」[14] では、「草木や木の葉がゆれる程度の風が吹いていても測定は難しく、時間や日を改め、風がない時を選んで測定することが望ましい。」と記述されている。しかし、自然風は常に変動しており、屋外における測定期間中に無風状態が続くことはまれで、長時間測定ができず待機せざるを得ない場合がある。

低周波音の発生源は、道路橋を始め風力発電施設・ダムの放流音・発破・砲撃音・航空機・新幹線トンネル・コンプレッサー・大型ファン・その他多くの音源があり、これらの音源を対象に屋外での測定は、日常的に実施されており、これらの状況を考えるならば自然風の中で測定可能な方法の開発は重要である。

また、実務上、風の影響を受けたデータを基に分析された結果を施主や苦情を呈する地元住民等に提示することは、データの信頼性において問題である。さらに、これらの分析結果を基に対策を検討すると、誤った対策工法の選定に繋がる可能性がある。そのため、測定データが風による影響下にあるか否かを判定するための評価手法の開発が必要である。

そこで本研究は、屋外で測定した低周波音に含まれる外的要因を排除し、信頼性の高い測定結果を得るために、自然風の中で測定した低周波音測定値に含まれる風ノイズによる影響を定量的に評価可能な風ノイズレベル推計手法の構築を目的とする。

---

### 1.3 本研究に関係する既往の研究

環境庁から発行されている低周波音の測定方法に関するマニュアル [14] (以下「低周波音マニュアル」と記す) では、風の影響について以下のとおり記されている。

低周波音の測定では、風の影響を強く受ける。対象とする低周波音の音圧レベルが小さいほど、周波数が低いほど風の影響を受けやすい。風の強さは季節や、時刻によっても異なる。季節別では、冬型の気圧配置のときなどは季節風が強く吹いて測定が難しい。一日のうちでは、早朝や夕方の風のときは比較的風が穏やかで測定しやすい。

風雑音によるレベルの上昇は不規則かつ不安定で、風の強い場合には人が測定器にはりついて風雑音と対象音とを逐次仕分けしてやらないと、何を測っているかわからないことになる。大きな音圧レベルが発生したのは実は風によるものだったというようなことになりかねないので特に注意が必要である。風が強いときは低周波音の測定をしないほうが無難である。

しかし、低周波音の苦情を呈している沿道住民などからは、特定の季節に道路が風上となるときのドスンという低い音とともに振動を感じるとの苦情や、明け方の交通量が多くなる時間帯に感じるなど、季節や風向あるいは時間帯が特定され、多少の風が吹いていても測定を実施せざるを得ない状況に度々遭遇する。さらに、風力発電施設からの騒音や低周波音の苦情を確認するための測定では、そもそも規定の平均風速以上の風が吹かないと風力発電装置が稼働しないため、否応なしに有風時の測定が必要となる。このように、有風時における測定を可能とするために、様々な対策や分析における工夫が研究されている。

### 1.3.1 防風スクリーン

騒音や低周波音の測定では、風による影響の低減及びマイクロホンの保護を兼ね、一般に短期間測定においては直径約 70mm または約 90mm の連続気泡型ウレタンフォーム製の防風スクリーンを、長期間測定では直径約 200mm の防風スクリーンをマイクロホンに装着する(写真 1-1)。

しかし、低周波音マニュアルでは、防風スクリーンの効果について以下のとおり記述されている。

*低周波音の測定時にはマイクロホンに騒音計用の防風スクリーン(通常、直径 90mm)を付けるが、あまり大きな効果は期待できない。風によってマイクロホンから発生する雑音により見かけ上の音圧レベルは、風の吹き方、マイクロホンの位置などによって変化する。また、風自体にも低周波音に相当する変動圧力を多く含んでいることも注意すべきであろう。*

この解説を裏付ける報告の一例として福原らの研究 [15]では、風洞による実験において直径約 90mm の防風スクリーン装着時の風雑音減少効果(図 1-4)が示されている。しかし、20Hz を超える可聴域の周波数帯では、減音効果が大きく表れているものの 20Hz 以下の超低周波音領域では、約 10dB の減音量となっており、その効果はあまり期待できないと述べている。

一方、大熊らは、直径 200mm 防風スクリーンの風ノイズ低減効果(図 1-5)を示している [16], [17]。防風スクリーンを装着することにより、風速 0.5m/s で約 10dB, 5m/s で約 20dB の風ノイズ低減効果が表れている。

また、前出の福原らの研究 [15]では、風の垂直分布を調査し、地表面付近の風速は地上 1.2m と比較し明らかに風速が小さいことを確認している。さらに、この結果を基に直径 200mm 防風スクリーンを地上 1.2m と地表面に設置したときの風によって発生した音圧レベルを測定し、地上 1.2m 防風スクリーンなしと比較し、地表面にマイクロホンを置き防風スクリーンを装着した場合約 25dB の風雑音軽減効果があると記している(図 1-6)。

しかし、200mm 防風スクリーンを装着しても、風速が大きくなるにつれ音圧レベルも上昇しており、完全に風ノイズを除外しきれているとはいえない。

### 1.3.2 地面にマイクロホンを設置する測定方法

風力発電システムに係る騒音測定は、風車が回転する有風時に行わざるを得ない。そのため、風ノイズを低減する測定方法が検討されている。風力発電システムの騒音測定方法は、国際電気標準会議(IEC)の Technical Committee 88 (通称:TC88)で検討され、1988年に IEC 61400-11 として発行されている。また、我が国においても、この IEC 61400-11 を翻訳し、2001年4月に JIS C 1400-11 として風力発電システムの騒音測定方法が発行されている。IEC 61400-11 に示されている測定方法は、自然風の中における鉛直方向の風速が、地表面に近いほど小さいことに着目し、地表面にマイクロホンを置いて計測することを基本としている。また、上流側の風の乱れは、地表面のラフネスに影響されるため、IEC 61400-11 では、直径1m以上の円形板にマイクロホンを載せ計測を行う。マイクロホンには、直径約 90mm の連続気泡ポリウレタン製の防風スクリーンを半分に分割した形状の主防風スクリーンを装着することを基本としているが、風ノイズによる影響が除外しきれない場合は、2次防風スクリーンの装着を推奨している(図 1-7) [18]。

二井らは、工業技術院第2研究センター内に設置されていた風車試験サイトにおいて、IEC61400-11 風力発電システム騒音測定方法の風ノイズ低減効果確認実験を実施している [19]。主防風スクリーンと、直径 450mm、厚さ 20mm、1cm 当たりの気泡数 5.5 程度のオープンセルタイプウレタンフォーム製の 2 次防風スクリーンの風ノイズ低減効果を、高さ 170mm、マイクロホンの風上側 1.1m の位置に設置した定温度型熱式風速計プローブで計測した 20 秒間の平均風速約 5m/s のときの音圧 15 データについて、エネルギー平均値、すなわち音圧レベル (Sound Pressure Level, SPL) で評価を行っている。その結果を図 1-8 に示す。主防風スクリーンと比較し 2 次防風スクリーンは、可聴音域にあたる 31.5Hz 付近では約 10dB の減音効果が表れているものの、8Hz 以下の超低周波音領域では 5dB 程度となっており、大きな減音効果が得られているとは言えない。一方、図 1-9 は、1/1 オクターブバンド 4Hz 帯域成分について、主防風スクリーンと2次防風スクリーンの1分間の音圧レベルを風速別に示したものである。2次防風スクリーンは、主防風スクリーンと比較し、平均風速 2.5m/s で 5dB 程度、5m/s で 2dB 程度減音効果が表れている。しかし、どちらの防風スクリーンも、風速が大きくなるほど音圧レベルの値も高くなっており、これらは、防風スクリーンを装着しているにも拘わらず、風ノイズの影響を受けていることを示唆している。

丸山らは、IEC 61400-11 に基づき製作し市販されている3種類の2次防風スクリーン (WS-

### 1.3 本研究に関係する既往の研究

---

A~WS-C) の性能確認を, 開放型風洞を活用し実施している [20]. 実験は, ①乱流強度約 7%の気流 S, ②乱流強度約 25%の気流 T の2種類で行われている. 図 1-10は, 市販製品の 2 次防風スクリーン無し(WS 無し)と3種類の2次防風スクリーンによる実験結果を気流別に示したものである. 気流 S と T を比較すると, 20Hz 以下の超低周波音領域における音圧レベルの値は, 平均風速が小さく乱流強度が大きい気流 T の方が大きな値となっている. この結果より, 音圧レベルの大小を決める要素として, 風速のみならず乱流強度も大きく関わっていることが示唆される. また, 3種類の防風スクリーンの比較では, 周波数帯によっては約 10dB の差が生じており評価が難しい. したがって, 2次防風スクリーンの統一した試験方法の規格を定め, 性能を評価する手法の確立が必要であると考え. 一方, 図 1-11は, 製品 WS-A の実験結果で, 気流ごとに風速の変化に伴う音圧レベルを示したものである. どちらの気流でも, 平均風速が上昇するにつれ音圧レベルも大きくなる傾向を示し, この実験結果からも2次防風スクリーンは, 風ノイズの低減効果を有するものの, 完全には風ノイズを除外しきれていないことが理解できる.

志村らは, Schlatter et al が DNS ( Direct Numerical Simulation ) により実施した数値流体解析の結果 [21] [22]を実スケールに変換してプロットし, 境界層乱流 [23] [24] [25] の平均風速と圧力変動成分の標準偏差を鉛直プロファイルで示している(図 1-12) [26]. この図によると, 地上 10m 付近の平均風速は 5m/s であるが, 地面境界に向かってゼロに漸近している. しかし, 圧力変動の標準偏差はゼロにはならない. これは, 三脚にマイクロホンを設置する場合と, 地表面に設置する場合でも, 接近流の圧力変動によって生ずる風ノイズの影響は変わらないことを示している.

#### 1.3.3 二重の防風スクリーン

矢野らの研究 [27] [28] [29]では, 風車騒音の測定システムとして二重の防風スクリーンを試作して実験を行っている. 試作防風スクリーンは, 市販の全天候型防風スクリーン(RION WS-03: 直径約 200mm の発泡ウレタン製)を一辺 160mm の正五角形を 12 面組み合わせた 12 面体型(図 1-13)の二次防風スクリーン内に設置する構造を基本としている. さらに, 必要に応じて一辺 500mm の立方体型(CB-500)を付加することとしている. なお, 二次防風スクリーンの材料は, 開口率 60%の薄い布地(ナイロン 90%, ポリウレタン 10%)を使用している. 屋外における風ノイズを防風スクリーンなし, 直径 70mm, 直径 200mm 及び試作した二重の防風スクリーンを同一条件で測定(図 1-14)した結果を図 1-15に示す. 防風スクリーンの形状が大きくなるほど風ノイズの低減効果は大きくなっている. 例えば平均風速 5m/s に

おける音圧レベルでは、防風スクリーンなしと比較し、直径 70mm 防風スクリーンは、約 10dB、200mm 防風スクリーンで約 20dB、試作防風スクリーンで約 25dB の風雑音を低減している。さらに、この試作防風スクリーンを図 1-16 (b)に示す 1 辺 500mm の立方体型防風スクリーンに入れた実験も行っている [29]。その結果は図 1-17に示すとおりで、試作防風スクリーンと比較しさらに約 3dB の風ノイズを低減できると記されている。しかし、いずれの防風スクリーンも平均風速の上昇とともに音圧レベルの値も大きくなり、完全に風ノイズを除外しきれていない状況である。

落合らの研究グループも風洞実験の結果を基に、二重のネットに加え円筒型ウレタンを用いた防風スクリーンによる風ノイズ低減の研究を行っている [30] [31]。防風スクリーンの構造は、L 型金属フレームにより一辺 800mm 及び 600mm の立方体の骨組みを制作し、各面に化学繊維ネット(1.59mm メッシュ)を張り二重構造としている。さらに、その内部に厚さ 100mm のウレタンを高さ 600mm の円筒形状に加工し配置している(図 1-18)。マイクロホンは、直径約 200mm ウレタン製ウインドスクリーン(RION WS-03)に取り付け円筒型ウレタンの中に装着している。風ノイズ低減効果の一例を図 1-19に示す。この防風スクリーン構造でも、風速の上昇とともに C 特性音圧レベルは上昇する傾向を示しており、風ノイズの完全な除外には至っていない。

### 1.3.4 風速測定結果に基づく風雑音の統計的評価

高桑らは、低周波音測定結果より、風ノイズ影響下における2種類の帯域音圧レベル(以下「BPL」と記す)推計法を提唱している [32] [33]。1つは、低周波音域のある BPL 変動と他の BPL 変動には、強い相関があるとの想定のもと、風ノイズの卓越周波数帯を便宜的に”指標帯域”とし、風ノイズの揺らぎを条件付き確率分布関数で求める方法(特徴的 BPL の利用に基づく推定法)である。他方は、マイクロホン近傍の風速の観測に基づき、風速と風ノイズの帯域スペクトルとの相関関係を用いて風ノイズ影響下の対象音を推定する方法である。

しかし、これらの推定手法は、実験的研究を主体としており、風ノイズに関する精密なメカニズムの究明、より高次の統計量を用いた推定法の設定や風ノイズと対象音の時間領域における動的特性を含めた、より実用的な推計方法の提案にまでは至っていない。

### 1.3.5 騒音源探査

長船らは、複数の騒音計用マイクロホンをランダムに配置したマイクロホンアレイを活用し、

目には見えない音の位置と特性を把握するための音源探査技術について研究を行っている [34] [35]. マイクロホンアレイとは複数のマイクロホンから構成される受音装置で、マイクロホンを空間的に多数配置することで、1つのマイクロホンでは得られなかった音の空間的情報を得ることのできる装置(図 1-20)である. マイクロホンアレイを使用することにより、例えば高架橋など高所に位置する騒音源を離れた地上における測定点での計測で探査することが可能となる. 音源探査技術の原理の一つである遅延和法によるビームフォーミング法の原理を図 1-21に示す. マイクロホンアレイに対し、ある一定の角度  $\theta$  で平面波が入射(①)する場合を考える. この平面波は、各マイクロホン( $M_1 \sim M_n$ )にそれぞれ  $\Delta t_1 \sim \Delta t_n$  の時間差が生じ(②)、位相がずれた状態( $P_1(t) \sim P_n(t)$ )で入射する. この時に、各マイクロホンからの時間信号に対し、方向と位置で決まる時間差が無くなる様に補正(③)して全ての信号を加算(④)することで、入射角  $\theta$  の平面波のみ増幅することができる. その結果(⑤)、擬似的な超指向性マイクロホンが構成される. この原理を利用してコンピュータ内で様々な入射角に対して、仮想的にそれぞれの入射角に応じた時間差  $\Delta t$  を補正し、分析することにより騒音の到来方向と音の強さを計算し、図式化することで騒音源の探査が可能となる.

この技術は、擬似的な超指向性マイクロホンを構築しているため、例えばマイクロホンアレイを一面のみ開口したコンテナ内など、周囲の風を遮ることが出来る環境下に設置し、風上側から測定を行うことにより風の影響を最小限に抑え測定することが可能である.

しかし、この技術は可聴音である騒音用に開発されたものであり、メーカー推奨の測定周波数範囲は 500Hz $\sim$ 20kHz となっている. 超低周波音の測定に適用するためには、マイクロホン本体の性能やアレイの大きさなど改良を加える必要がある. 特にマイクロホンアレイの直径がより大きなものとなると想定され、測定の容易性を考えると課題が残る.

#### 1.3.6 平均風速と乱流強度に着目した研究

志村らは、屋外における低周波音測定では、マイクロホンに作用する風ノイズには、アプローチに含まれる風の乱れと測定系自体から発生する風きり音の2つの側面が有ることに着目した風洞実験を行っている [36]. 実験では、マイクロホン近傍の平均風速、乱流強度及び周波数をパラメータとして設定し、低周波音圧レベルとの関係を検討している. 図 1-22 は、平均風速がほぼ同等で、乱流強度が異なる2つのケースを比較した結果である. 平均風速が同等でも、乱流強度すなわち風の乱れが大きい方が低周波数領域の音圧が高い結果となっている. また、図 1-23は、マイクロホンの設置角度(図 1-24)と音圧の関係を示したもので、明らかに設置角度 90 度の方のベルが高い. これは、マイクロホンから発生する風切り

---

音の大きさが、設置角度により異なることを示唆している。

この研究では、特殊な防風スクリーンやマイクロホンを地表面に置くなど特殊な測定方法ではなく、市販の低周波音マイクロホンに防風スクリーンを装着する一般的な測定方法を採用している点。また、マイクロホンの近傍で風速など風の特徴を同時計測し、低周波音圧レベルとの関係について言及している点が特徴的である。



## 1.4 研究の方向性

前節の本研究に関係する既往の研究に示したとおり、これまで研究の主体となっている、マイクロホンに二重の防風スクリーンを装着し風ノイズを除外する方法は、自然風の影響を低減できているものの完全な除外には至っていない。むしろ、騒音計のマイクロホンの特性を考えるならば、風ノイズと道路橋等に起因する低周波音を分離することは、物理的に困難と考えられる。

一方、志村らは風工学の知見に基づき、マイクロホン近傍の風速の観測値を基に、測定系が出力する風ノイズは、平均風速 ( $u_0$  [m/s])、乱流強度 ( $I_u$  [%]) 及び周波数 ( $f$  [Hz]) の要素で説明できることを風洞実験の結果により言及している [36]。

本研究では、志村らの研究を参考とし、風工学の知見を基に自然風下における低周波音の測定方法及び評価方法の検討を進めることとした。

### 1.4.1 風ノイズの定義

マイクロホンが受ける風ノイズには2つの現象が考えられる。ひとつは、風切り音といわれるように流れ場に物体(マイクロホン)を置くことによって、物体からの渦の剥離現象などによって発生する圧力の摂動である。もうひとつは、地表面境界層及びラフネス(構築物や地物など)によって発生する乱流現象(渦の移流・拡散)である。これは、風速のランダムな3次元の変動を伴うとともに、圧力の変動現象でもある。マイクロホンは、圧力センサであるが故に、風の中の圧力変動にも応答してしまう [26]。

本論文では、「風ノイズ」を風切り音及び乱流現象により測定に用いる測定系が出力する圧力レベルと定義する。

### 1.4.2 マイクロホンが出力する音圧と風ノイズ

流れ場の風速と圧力に基づき風ノイズを考える.

風速は3次元のベクトル量であり, 式(1)のように表わされる.

$$U = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3次元風速計では, それぞれの成分を非定常で計測することができ, 風速の時間平均値  $u_0$  [m/s]は, 式(2)のように定義される.

$$u_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(u_{(i)}^2 + v_{(i)}^2 + w_{(i)}^2)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{\text{scalar}(i)} \quad (2)$$

ここで,  $N$ は風速計で測定したデータ数, 添え字  $(i)$ は  $i$  番目の測定データであることを表している.

風速  $U$  [m/s]は, 平均風速  $u_0$  [m/s]と変動風速成分  $\tilde{u}$  [m/s]の和で表される.

$$U = u_0 + \tilde{u} \quad (3)$$

風洞実験において平均風速  $u_0$  は時間によって変化しないが, 変動風速成分  $\tilde{u}$  [m/s]は時間領域で変化する.

乱流強度  $I_u$  [%]は次のように定義される.

$$I_u = \frac{\sigma_u}{u_0} \quad (4)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_{\text{scalar}(i)} - u_0)^2} \quad (5)$$

## 1.4 研究の方向性

---

ここで,  $\sigma_u$  は変動風速の標準偏差である.

目的音の音圧を  $P_{\text{sound}}$  [Pa], 風ノイズを  $P_{\text{wind}}$  [Pa], マイクロホン系統の測定システムからの出力を  $P_{\text{out}}$  [Pa]とすれば, 目的音に風ノイズが含まれる場合には, 式(6)が成り立つ.

ここで,  $P_{\text{wind}}$  [Pa] は風工学における「物体の表面に作用する風圧」の定義に従う.

$$P_{\text{out}} = P_{\text{sound}} + P_{\text{wind}} = \rho c V + C_p \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (6)$$

ここで,  $\rho$  は空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $c$  は音速 [m/s],  $V$  は空気粒子の振動速度 [m/s],  $C_p$  は圧力係数(無次元),  $U$  は風速 [m/s]である. 式(6)の第2項は「速度圧」ともいう.

式(6)のそれぞれの項を, デシベル dB の基準値  $p_0$  (= 20  $\mu$ Pa)を用いて音圧レベルで表すと次のとおりである.

$$L_{\text{out}} [\text{dB}] = 20 \log_{10} \frac{P_{\text{out}}}{p_0} \quad (7)$$

$$L_{\text{sound}} [\text{dB}] = 20 \log_{10} \frac{P_{\text{sound}}}{p_0} \quad (8)$$

$$L_{\text{wind}} [\text{dB}] = 20 \log_{10} \frac{P_{\text{wind}}}{p_0} \quad (9)$$

速度圧を用いると  $L_{\text{wind}}$  は次のように定義できる.

$$L_{\text{wind}} = 20 \log_{10} \frac{P_{\text{wind}}}{p_0} = 20 \log_{10} \frac{C_p \frac{1}{2} \rho U_{(t)}^2}{p_0} \quad (10)$$

本論文では  $L_{\text{wind}}$  を「風ノイズレベル」と呼ぶ. 式(10)で表されるように, 風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  の大きさは速度圧を構成する風速の二乗値  $U_{(t)}^2$  で決まる.

風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  を推計できれば騒音計の出力に含まれる目的音を特定できるものと考えられる. しかし, 防風スクリーン付きのマイクロホンに作用する風圧を, 直接的に求めることができれば良いが, 風の入射角・防風スクリーンの性能・マイクロホンの風応答特性など,

---

---

様々な影響要因があるため非常に困難である。そこで、本研究では、志村らの研究を踏襲したより精緻な風洞実験とさまざまな条件の野外観測を実施し、風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  と風速の観測結果(平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$ )との統計的な回帰によって風ノイズ推計式を求めることをめざした。

## 1.5 論文の構成

前節まで、本研究に至った背景として、日本における公害問題の推移について概説し、低周波音測定における現状の課題について道路高架橋を例に述べるとともに、本研究の目的を明らかにした。

また、自然風の中で低周波音を測定するにあたり、風ノイズの影響を除外するために行われている既往の研究について概説し、その効果について考察するとともに、本研究の方向性を示した。

以下、本論文は第2章から第6章までの5章で構成される。

第2章では、低周波音と風速の同時測定による風洞実験を実施し、その結果に基づき風速二乗値  $U_{(t)}^2$  のデシベル換算値及び低周波音計マイクロホン出力と、平均風速及び乱流強度の関係について示す。

また、風洞実験データを基に風ノイズレベル推計式を構築する手法について検討するとともに、風洞実験に基づく風ノイズレベル推計式の屋外における自然風への適合性について検証する。

第3章では、低周波数帯における風洞実験推計式の改善を目的とし、地表粗度区分の異なる二種類のフィールドにおける測定データを基に推計式の構築を行い、その作成手順を示すとともに、推計値と測定値の整合性について言及する。

第4章では、流れ場の風速と圧力の理論的關係から風ノイズ推計式を導出し、これらに必要な係数を、風ノイズのフィールド測定値を基に、平均風速と乱流強度の関係を統計的な回帰によって求める風ノイズ推計手法を提案する。

その上で、提案した風ノイズレベル推計手法の妥当性を検証するため、推計式を構築するために行ったフィールド測定値と導出した風ノイズレベル推計値との整合性について言及する。

第5章では、第4章において導出した流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル推計式の妥当性を検証することを目的とし、実際に道路橋から発生する低周波音が問題となっている地域においてフィールド測定を実施し、検討を行った。特に、目的音が含まれる道路橋付近における測定データをもとに、風ノイズによる影響の評価手法として、信号と雑音の比率(S/N比)に着目した手法と音圧レベルの最小値に着目した手法を提案し、目的音に対する風ノイズの影響を評価することが可能であることを示す。

第6章では, 本研究で得られた知見と成果及び結論について述べるとともに, 今後の課題について言及する.

## 1.6 図表

表 1-1 全国の公害苦情件数の推移（総務省）[1]

	苦情件数	対前年度 増減数	対前年度 増減率 (%)
50	76,531	-2,484	-3.1
51	70,033	-6,498	-8.5
52	69,729	-304	-0.4
53	69,730	1	0.0
54	69,421	-309	-0.4
55	64,690	-4,731	-6.8
56	64,883	193	0.3
57	63,559	-1,324	-2.0
58	63,976	417	0.7
59	67,754	3,778	5.9
60	64,550	-3,204	-4.7
61	65,467	917	1.4
62	69,313	3,846	5.9
63	72,565	3,252	4.7
H1	72,159	-406	-0.6
2	74,294	2,135	3.0
3	76,713	2,419	3.3
4	76,186	-527	-0.7
5	79,317	3,131	4.1
6	66,556	-12,761	-16.1
7	61,364	-5,192	-7.8
8	62,315	951	1.5
9	70,975	8,660	13.9
10	82,138	11,163	15.7
11	76,080	-6,058	-7.4
12	83,881	7,801	10.3
13	94,767	10,886	13.0
14	96,613	1,846	1.9
15	100,323	3,710	3.8
16	94,321	-6,002	-6.0
17	95,655	1,334	1.4
18	97,713	2,058	2.2
19	91,770	-5,943	-6.1
20	86,236	-5,534	-6.0
21	81,632	-4,604	-5.3
22	80,095	-1,537	-1.9
23	80,051	-44	-0.1
24	80,000	-51	-0.1
25	76,958	-3,042	-3.8
26	74,785	-2,173	-2.8
27	72,461	-2,324	-3.1
28	70,047	-2,414	-3.3
29	68,115	-1,932	-2.8
30	66,803	-1,312	-1.9

表 1-2 典型7公害の種類別公害苦情受付件数の推移（総務省）[1]

(単位：件)

年 度	合 計	大気汚染	水質汚濁	土壌汚染	騒 音	振 動		地盤沈下	悪 臭	
						低周波				
公 害 苦 情 受 付 件 数	平成19年度	64,529	23,628	9,383	281	15,913	144	2,000	34	13,290
	20	59,703	20,749	9,023	253	15,211	190	1,699	28	12,740
	21	56,665	19,324	8,171	251	14,749	183	1,455	30	12,685
	22	54,845	17,612	7,574	222	15,678	197	1,675	23	12,061
	23	54,453	17,444	7,477	252	15,862	189	1,902	22	11,494
	24	54,377	16,907	7,129	229	16,714	185	1,858	21	11,519
	25	53,039	16,616	7,216	202	16,611	185	1,914	16	10,464
	26	51,912	15,879	6,839	174	17,202	182	1,830	26	9,962
	27	50,677	15,625	6,729	167	16,574	227	1,663	22	9,897
	28	48,840	14,710	6,442	167	16,016	234	1,866	19	9,620
	29	47,437	14,450	6,161	166	15,743	191	1,831	23	9,063
30	47,656	14,481	5,841	168	15,665	216	1,931	27	9,543	
構 成 比 [%]	平成20年度	100	34.8	15.1	0.4	25.5	0.3	2.8	0.0	21.3
	21	100	34.1	14.4	0.4	26.0	0.3	2.6	0.1	22.4
	22	100	32.1	13.8	0.4	28.6	0.4	3.1	0.0	22.0
	23	100	32.0	13.7	0.5	29.1	0.3	3.5	0.0	21.1
	24	100	31.1	13.1	0.4	30.7	0.3	3.4	0.0	21.2
	25	100	31.3	13.6	0.4	31.3	0.3	3.6	0.0	19.7
	26	100	30.6	13.2	0.3	33.1	0.4	3.5	0.1	19.2
	27	100	30.8	13.3	0.3	32.7	0.4	3.3	0.0	19.5
	28	100	30.1	13.2	0.3	32.8	0.5	3.8	0.0	19.7
	29	100	30.5	13.0	0.3	33.2	0.4	3.9	0.0	19.1
	30	100	30.4	12.3	0.4	32.9	0.5	4.1	0.1	20.0
対 前 年 度 増 減 数	平成20年度	-4,826	-2,879	-360	-28	-702	46	-301	-6	-550
	21	-3,038	-1,425	-852	-2	-462	-7	-244	2	-55
	22	-1,820	-1,712	-597	-29	929	14	220	-7	-624
	23	-392	-168	-97	30	184	-8	227	-1	-567
	24	-76	-537	-348	-23	852	-4	-44	-1	25
	25	-1,338	-291	87	-27	-103	0	56	-5	-1,055
	26	-1,127	-737	-377	-28	591	-3	-84	10	-502
	27	-1,235	-254	-110	-7	-628	45	-167	-4	-65
	28	-1,837	-915	-287	0	-558	7	203	-3	-277
	29	-1,403	-260	-281	-1	-273	-43	-35	4	-557
	30	219	31	-320	2	-78	25	100	4	480



1.6 図表

表 1-3 全国の地方公共団体が受理した低周波音に係る苦情件数の推移（環境省）[2]

	工場・事業場	家庭生活	鉄道	道路交通	建設作業	その他	計
S56	30		0	2	0	15	47
57	36		2	2	0	12	52
58	25		2	2	3	8	40
59	24		0	2	0	1	27
60	18		8	1	0	0	27
61	10		9	2	0	1	22
62	13		1	1	1	4	20
63	14		3	2	0	7	26
H元	19		1	2	0	4	26
2	10		2	5	2	4	23
3	20		2	2	0	12	36
4	15		4	1	2	15	37
5	18		18	0	0	7	43
6	12		8	3	1	9	33
7	12		4	2	1	4	23
8	16		3	1	1	11	32
9	19		0	1	1	13	34
10	22		2	2	0	18	44
11	21		1	1	0	22	45
12	61		4	1	2	47	115
13	52	16	1	1	3	37	110
14	40	20	3	1	1	26	91
15	45	21	0	3	1	24	94
16	49	21	3	1	6	64	144
17	54	15	1	1	5	59	135
18	75	20	1	5	10	74	185
19	72	26	1	0	10	72	181
20	65	43	2	2	7	117	236
21	65	28	3	3	10	136	245
22	67	46	3	5	10	115	246
23	83	31	0	1	16	118	249
24	75	36	0	5	8	134	258
25	67	36	2	3	19	112	239
26	72	59	0	1	11	110	253
27	72	72	0	4	9	140	297
28	63	81	0	0	16	155	315
29	64	64	0	3	8	130	269
30	70	55	0	2	12	141	280

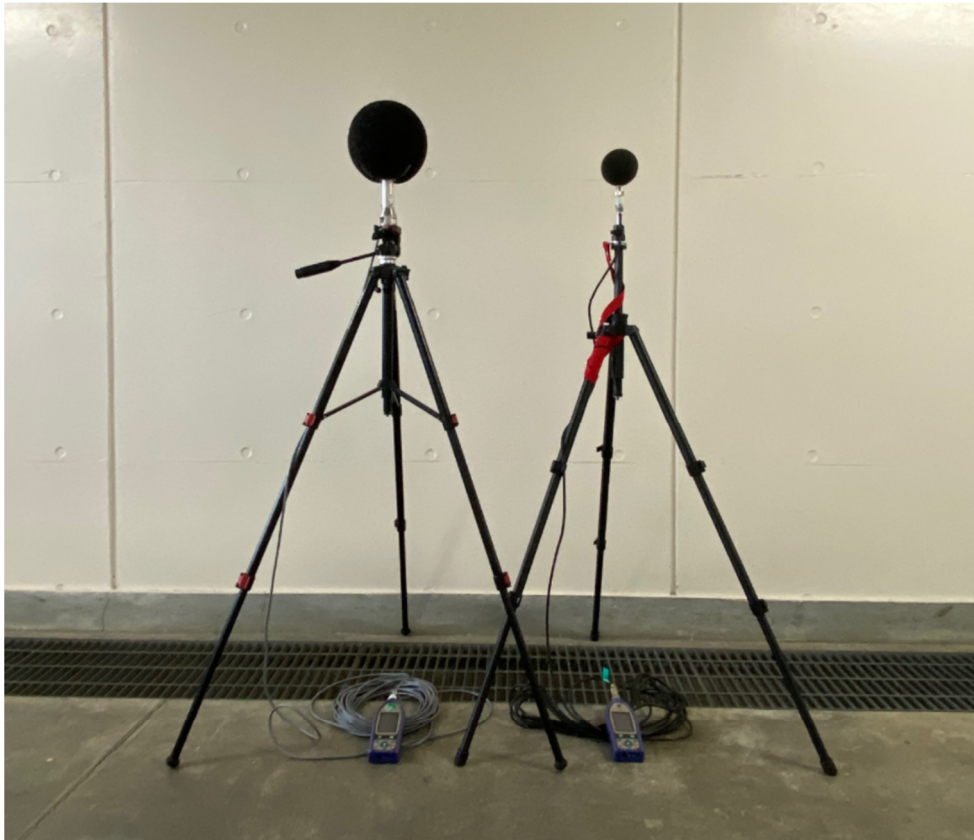


写真 1-1 防風スクリーン（左： $\phi$ 200mm, 右 $\phi$ 90mm）

1.6 図表

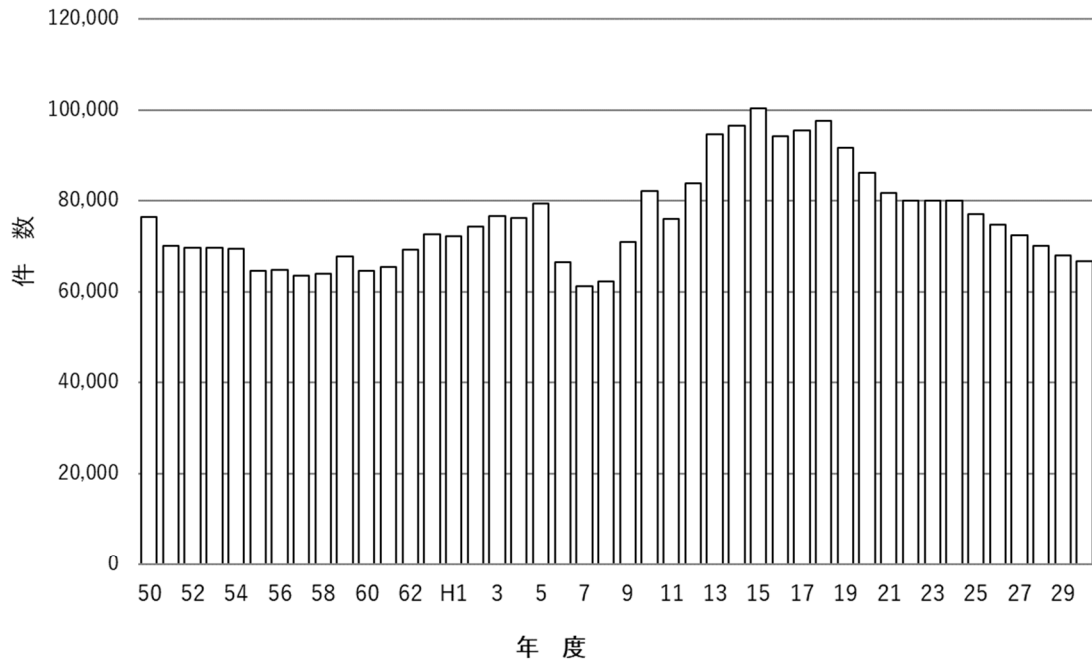


図 1-1 全国の公害苦情件数の推移（総務省）[1]

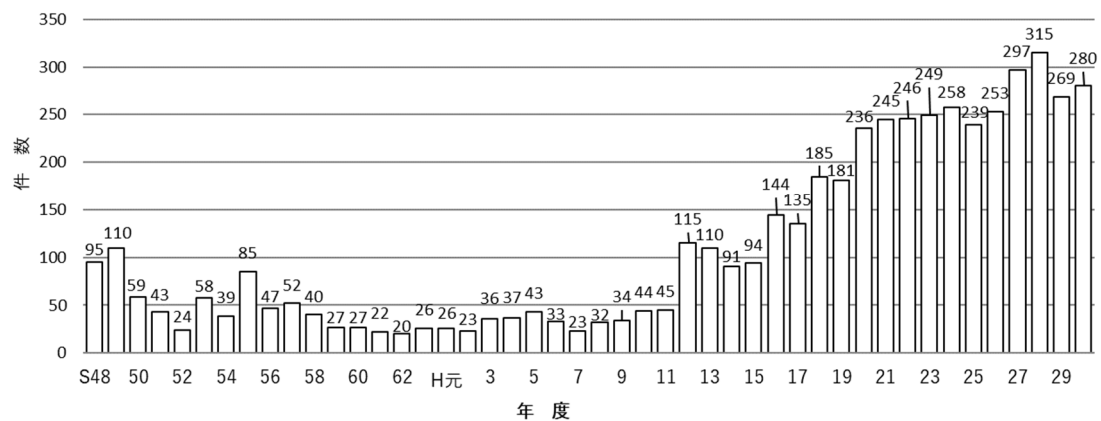


図 1-2 低周波音に係る苦境件数の推移（環境省）[2]

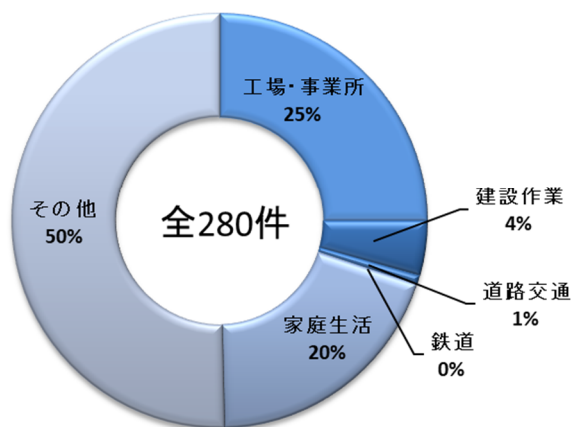


図 1-3 平成30年度 低周波音に係る苦情件数の内訳（環境省）[2]

1.6 図表

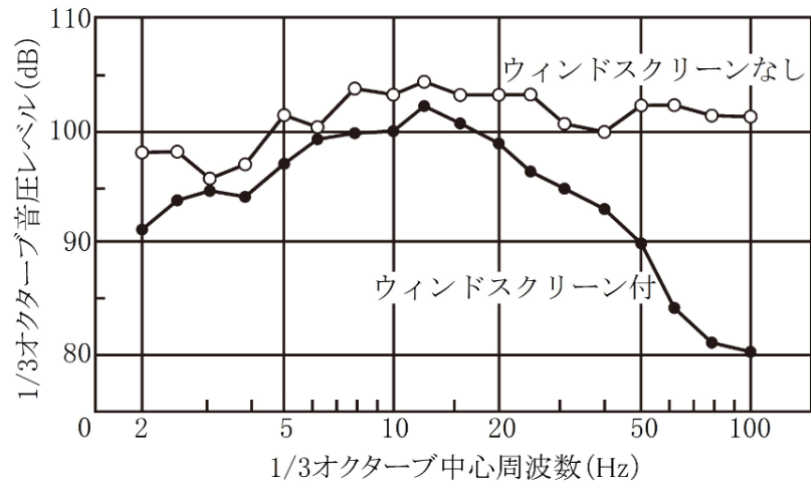


図 1-4 風洞実験による防風スクリーンの風雑音減少効果 [15]

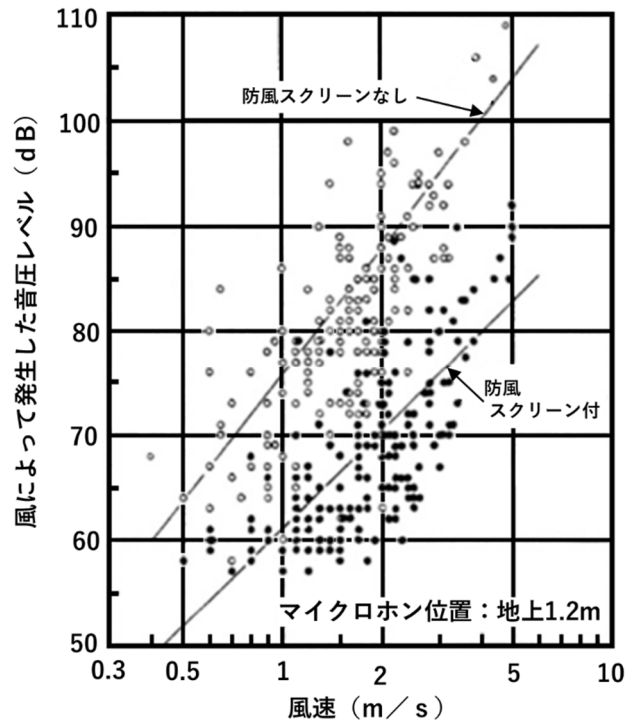


図 1-5 直径 200mm 防風スクリーンの風ノイズ低減効果 [16], [17]

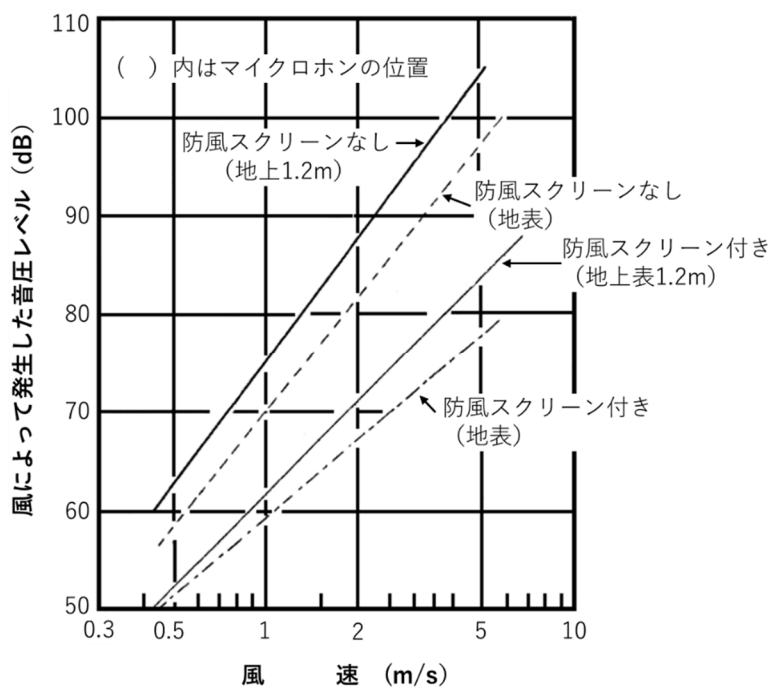


図 1-6 直径 20cm の防風スクリーンの風雑音低減効果  
(周波数範囲 1Hz~90Hz) [15]

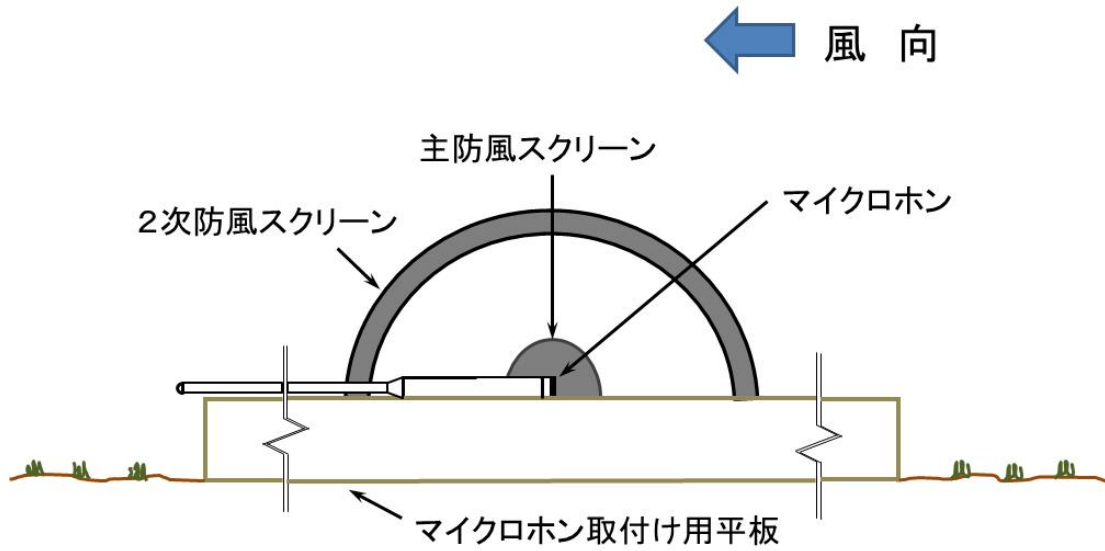


図 1-7 風車音測定時のマイクロホン設置状況 [18]

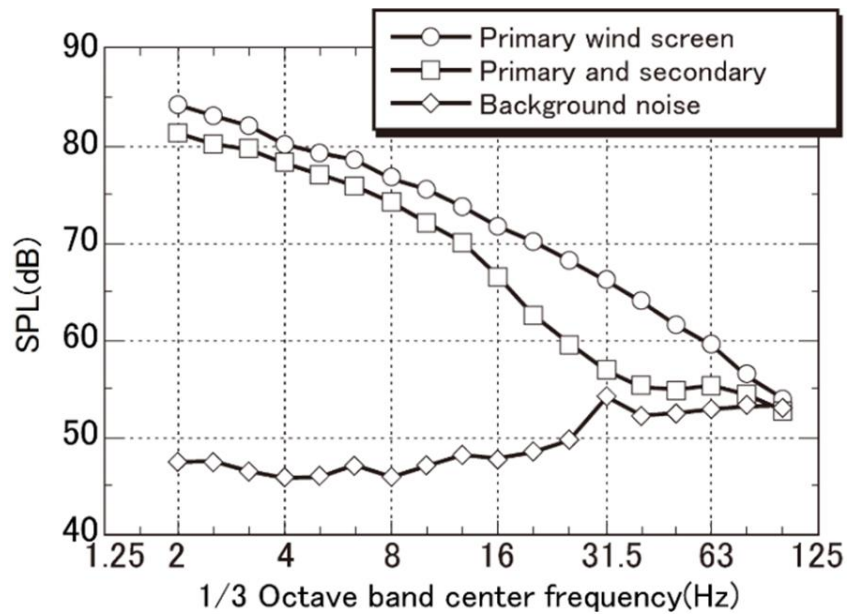


図 1-8 2次防風スクリーンの風ノイズ低減効果  
(風速 5m/s, 風上 1.1m, 高さ 170mm) [19]

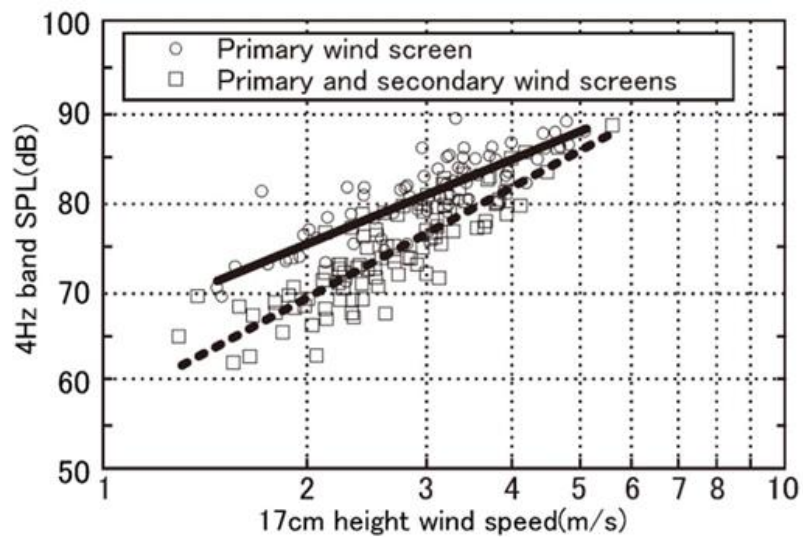


図 1-9 主防風スクリーンと2次防風スクリーンの風速別風ノイズ低減効果 [19]



1.6 図表

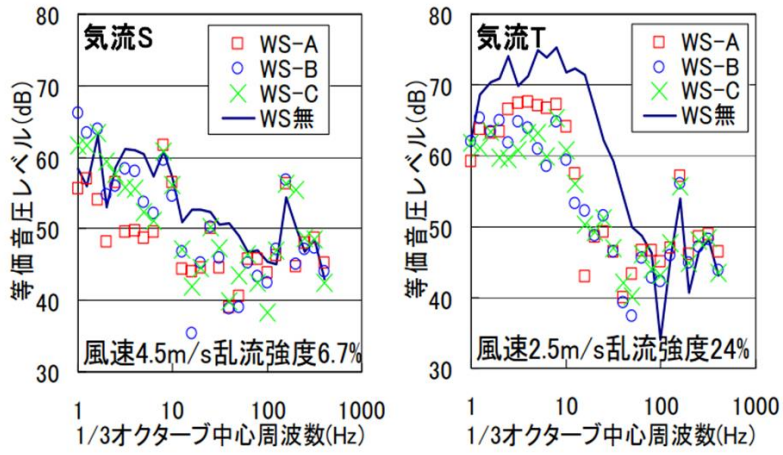


図 1-10 2次防風スクリーンの効果 [26]

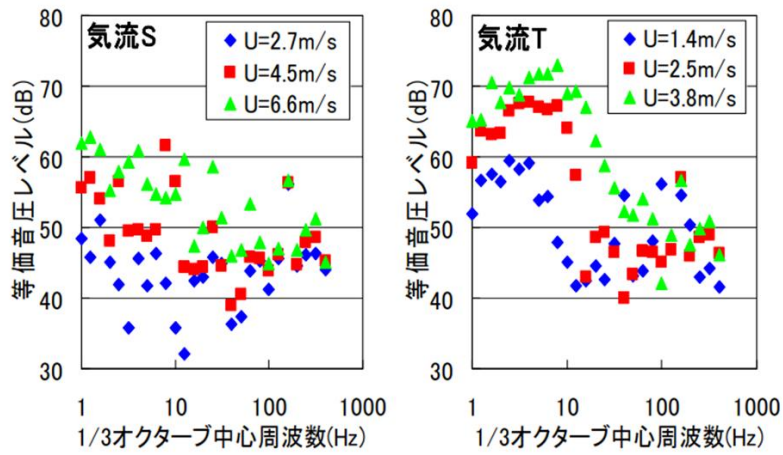


図 1-11 防風スクリーン内の風ノイズ [20]

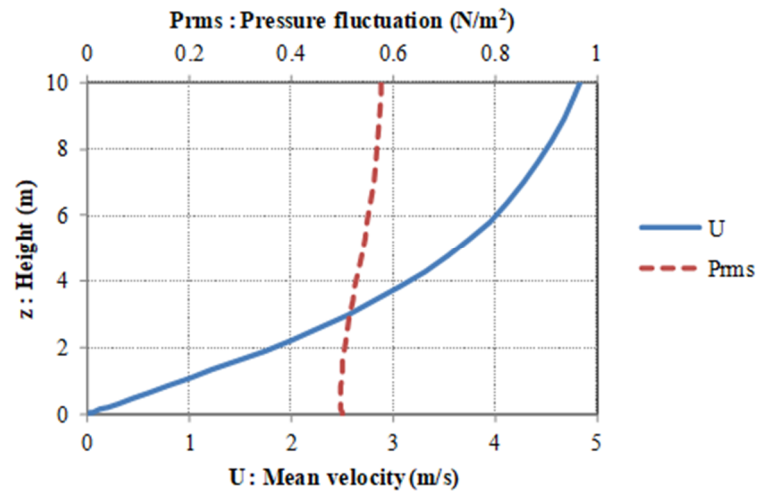


図 1-12 平均風速  $U$  と圧力変動成分の標準偏差  $Prms$  の鉛直プロファイル [26]

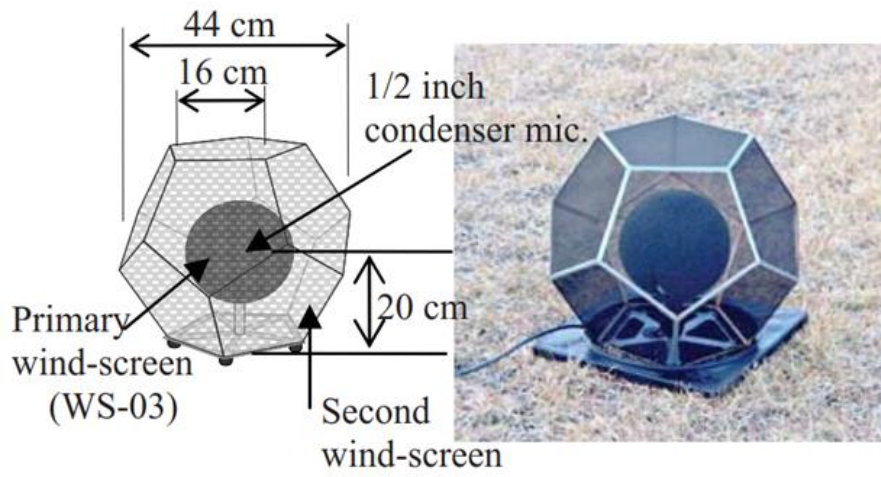


図 1-13 12面体二次防風スクリーン [27]

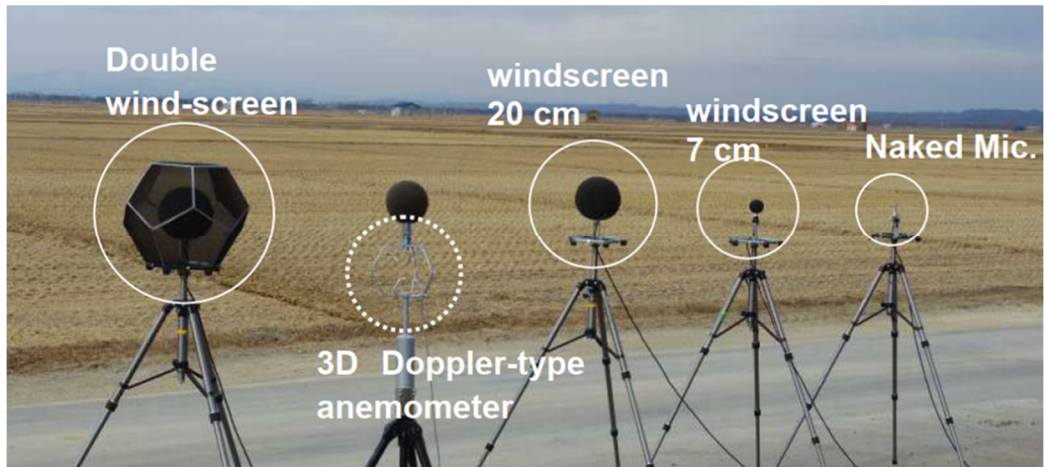


図 1-14 防風スクリーンの設置状況 [27]

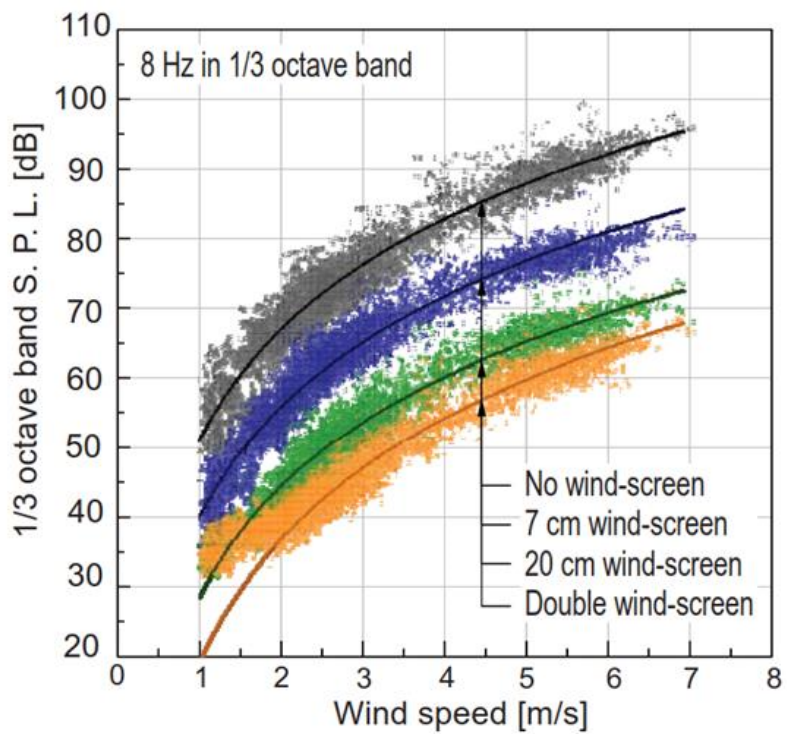


図 1 - 1 5 発生風ノイズの低減効果 [27]

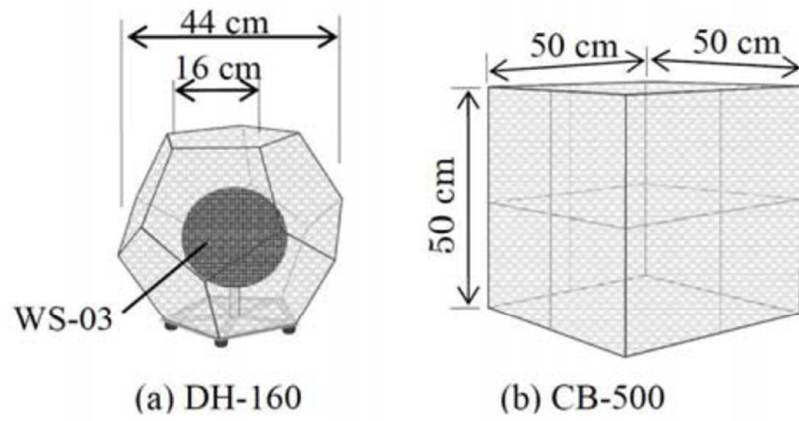


図 1-16 試作された二次防風スクリーン [29]

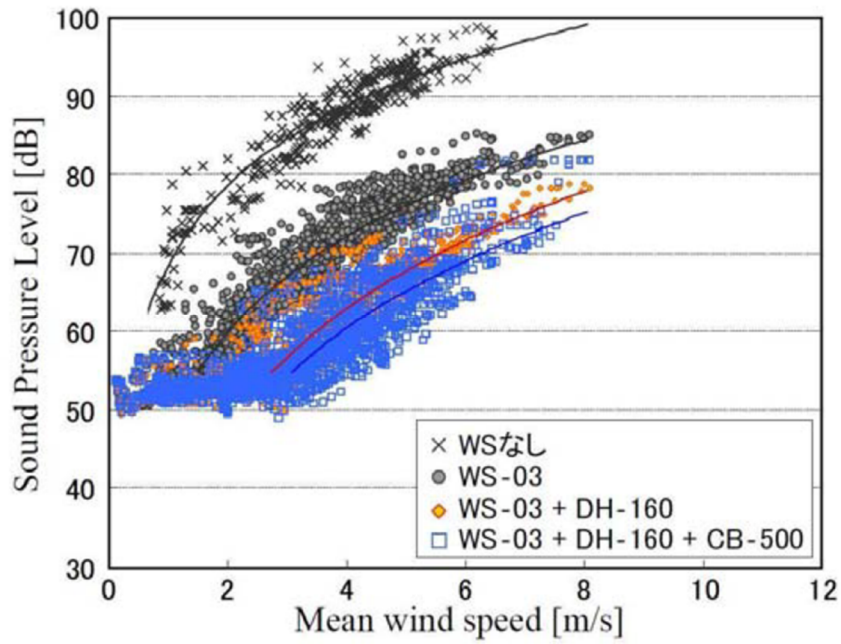


図 1-17 風雑音の低減性能比較 (定置実験) [29]

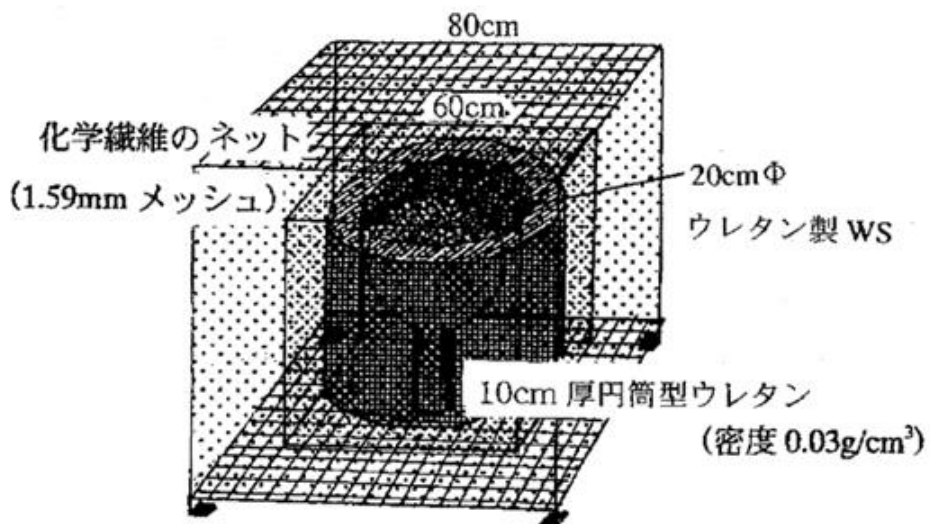


図 1-18 WS-2 の概要 [30]

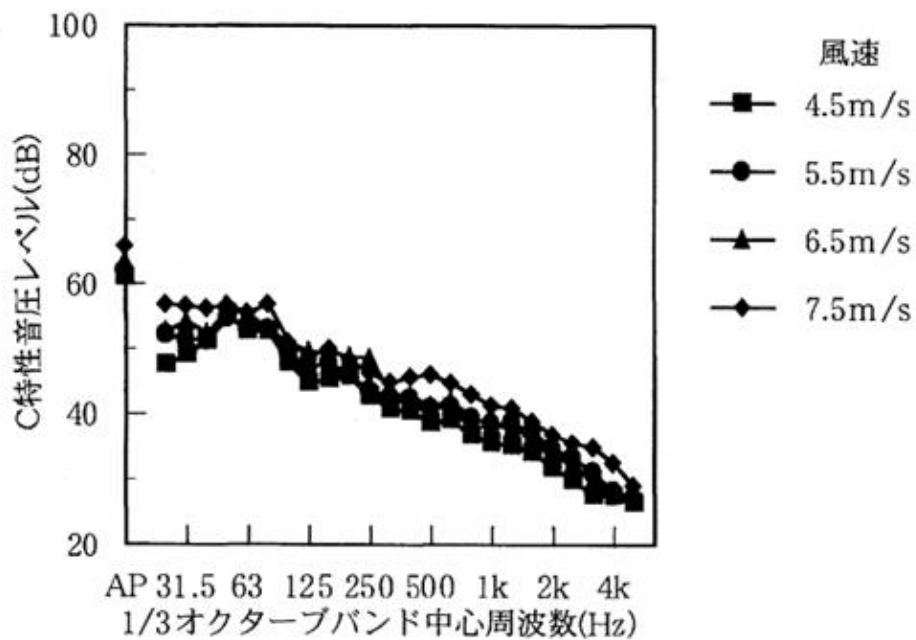


図 1-19 アプローチフローにおける風の乱れの影響 [30]

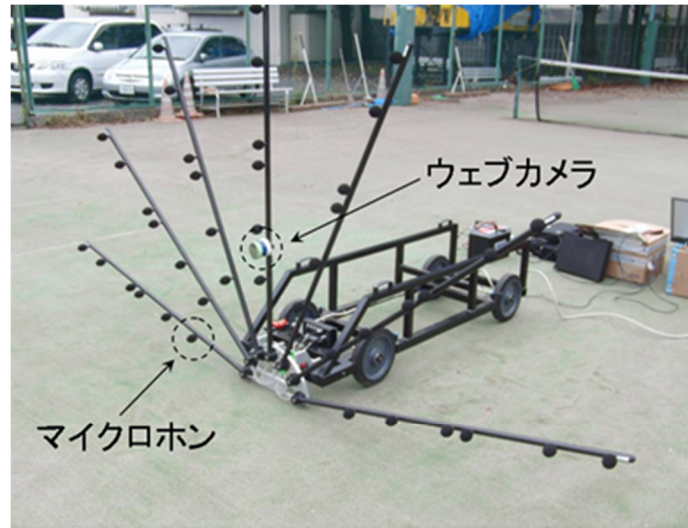


図 1-20 マイクロホンアレイ (直径 3m, 42ch) [34]

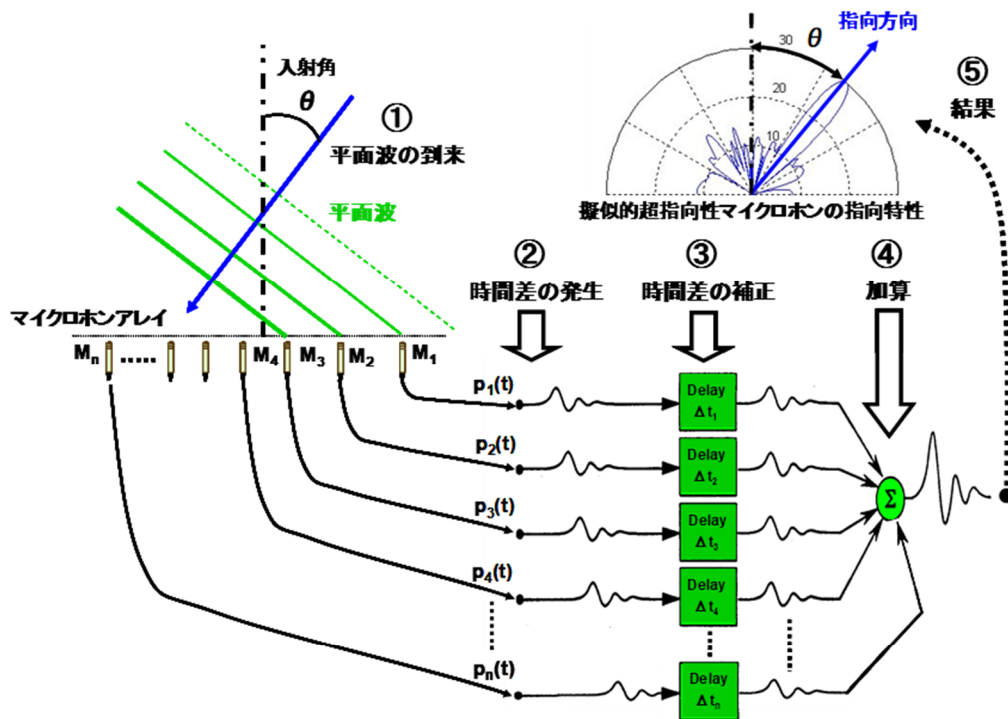
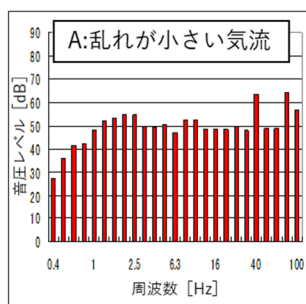
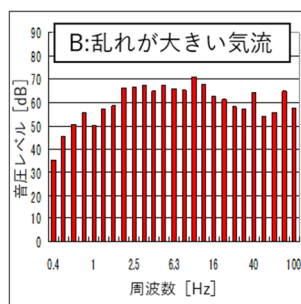


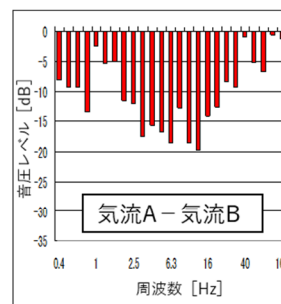
図 1-21 ビームフォーミング法の原理イメージ [34]



気流A 乱流強度 0.15%  
平均風速 4.85m/s



気流B 乱流強度 5.41%  
平均風速 4.94m/s

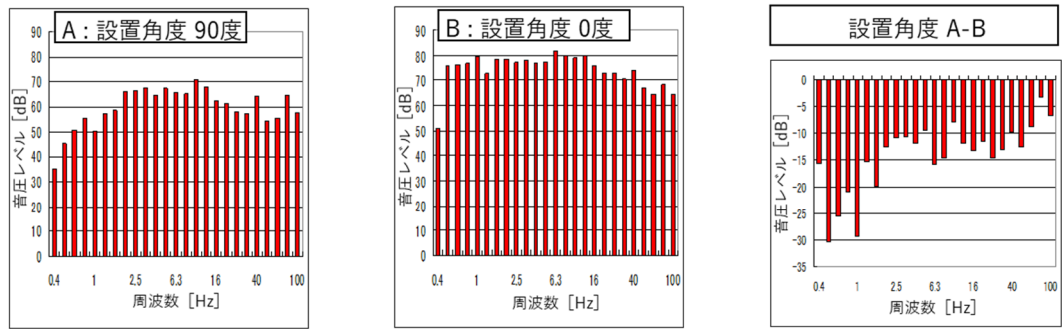


乱れの強弱が音圧に与える影響

図 1-2 2 乱流強度の違いによる影響 [36]



1.6 図表



マイクロホン設置角度90度

マイクロホン設置角度0度

設置角度の違いによる影響

図 1-2 3 マイクロホンの設置角度の違いによる影響 [36]

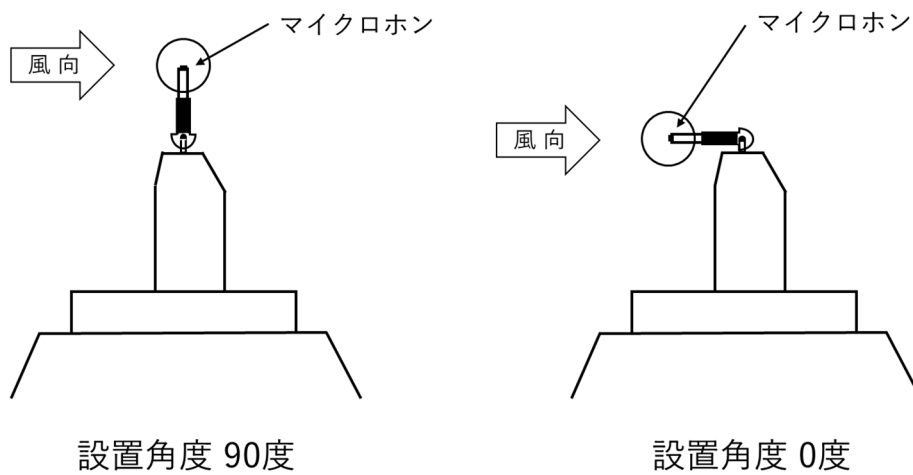


図 1-2 4 マイクロホンの設置角度

## 第2章 風洞実験に基づく風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築

### 2.1 はじめに

前章に示したとおり、風ノイズの変動要因には、接近流の変動とマイクロホン周囲の乱れの二種類がある。接近流の変動とは、地表面境界層及びラフネス（構造物など）によって発生する乱流である。また、マイクロホン周囲の乱れとは、風の流れ場に物体を置くことによって発生する乱流である。マイクロホンが検知する音圧変動を、これら2つの要因に分離することは出来ず、しかも両要因とも平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  に依存するという特徴がある。本章では、マイクロホン周囲の風の乱れを精緻に把握可能な風洞実験により風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計手法を検討することとする [37]。

### 2.2 風洞実験

#### 2.2.1 風洞実験の概要

本研究では、日本大学理工学部理工学研究所空気力学研究センターの低速風洞装置（以下「風洞」と記す）を使用した。風洞の概要を図 2-1に、仕様を表 2-1に示す [38]。

この風洞は、水平式閉鎖回流型であるが測定洞を外して実験することも可能である。そこで本実験では、風洞外における背景騒音の計測や目的音を発生するためのスピーカの設置及び乱流格子の設置撤去などの実験の効率化を図るために測定洞を撤去し開放型の風洞として使用した(写真 2-1)。

風洞実験に用いた測定機器の平面配置を図 2-2に、立面配置を図 2-3に、測定機器一覧を表 2-2及び写真 2-2～写真 2-4に示す。

風速は、風洞内に設置した熱線流速計プローブ(写真 2-2の左側)をケーブルで Kanomax 社製の熱線流速計 Model 1010 に接続し測定を行った。測定により得られたデータは、ノート型パーソナルコンピュータ内のハードディスクに格納するとともにバックアップとしてリオン社製データレコーダ DA-20(写真 2-3)に格納した。

風ノイズレベルは、風速と同様に風洞内に設置した低周波音計マイクロホン(写真 2-2の中央)をケーブルでリオン社製低周波音計 NA-18A に接続し測定を行い、データをリオン社製データレコーダ DA-20 に格納した。また、リオン社製低周波音計 NA-18A を1台風洞外に設置し、風ノイズレベル算出に際し、背景騒音補正に活用した。

## 2.2 風洞実験

---

実験は、2009年度から2010年度にかけそれぞれ春季及び夏季に実施し、実験時の接近流の変動は、写真 2-1 (a) 上流側に示す乱流格子により発生させた。乱流格子は、図 2-4 に示す木質の角材を組みあげ製作した。縦横ともに 2000mm の大きさで、格子の間隔  $a$  は、100 mm×100 mm, 140 mm×140 mm, 200 mm×200 mm の 3 種類である。また、格子を構成する角材の寸法  $b$  は縦横ともに長さ 5 mm, 7 mm, 15 mm である。乱流格子の風洞開口部からの設置距離(図 2-2の  $W$ )を調整し実験を行った。

乱流強度  $I_u$  は、スムーズフローの 0.25%を基本とし、2009 年度の実験は約 2～約 6%、2010 年度は約 2～約 9%となるように乱流格子の寸法  $a$ ,  $b$  及び乱流格子の設置位置  $W$  を調整し実験を行った。実験時の乱流高度  $I_u$  と乱流格子の寸法  $a$ ,  $b$  及び風洞開口部からの乱流格子設置距離  $W$  を表 2-3に示す。

### 2.2.2 実験結果

#### (1) 風速レベル

マイクロホン近傍に設置した熱線風速計により風速  $U_{(t)}$  を計測し、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  を計算により求めた。また、実験結果の分析にあたり風ノイズレベル  $L_{wind}$  の算出は、特に記載の無い限り風洞外の低周波音計の測定値を背景騒音とみなし、風洞内の低周波音計の測定値から差引き算出した。

実験結果の一例として、風速の二乗値  $U_{(t)}^2$  の周波数分析結果をデシベル換算(以下「風速レベル」と記す)し、図 2-5に示す。風速レベルは、平均風速  $u_0$  の増加に伴い増大し、さらに乱流強度  $I_u$  の増加によっても増大する傾向を示している。

#### (2) マイクロホンの風ノイズレベル

屋外における低周波音測定では、風雑音対策として防風スクリーンをマイクロホンに装着することが基本である。従って本研究でも、市販されているリオン(株)製の全天候防風スクリーン WS03S1(写真 2-5)を使用し、実験を行った。

乱流強度  $I_u$  が 6.02 %のときの、水平な床面に対しマイクロホンを垂直に設置した実験ケースにおける風洞内外の低周波音計マイクロホン出力のパワースペクトルを図 2-6に示す。前述した風速レベルと同様に、風洞内マイクロホン出力のパワースペクトルも平均風速  $u_0$  の

増加に伴い増大している。また、平均風速の増加に伴うパワースペクトルの上昇率は周波数により異っている。

次に、平均風速  $u_0$  と風ノイズレベル O.A の関係を図 2-7 に示す。O.A (over all) は、1/3 オクターブバンドごとの値の総和である。

風ノイズレベル  $L_{wind}$  は、平均風速  $u_0$  の増加に伴い増大している。また、平均風速  $u_0$  が 5 m/s では乱流強度  $I_u$  の増加に伴い風ノイズレベル  $L_{wind}$  の増加量は約 1 dB と少ないものの、平均風速  $u_0$  が小さい 2 m/s では約 4 dB 増加しており、低風速時ほど乱流強度  $I_u$  の影響が大きく現れている。

以上の結果から、マイクロホン出力の風ノイズレベル  $L_{wind}$  には平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  及び周波数  $f$  が関与していることが、既往研究 [36] に加えて本実験からも明らかとなった。

### 2.3 風洞実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築

風洞実験により得られたデータを基に風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築を試みる。

風洞実験では、平均風速  $u_0$  をコントロールでき安定的な実験が可能である反面、実験時の乱流強度  $I_u$  は気温、湿度、乱流格子の設置状況等により目標値と必ずしも一致するとは限らない(表 2-3)。これらを考慮すると同一条件下におけるデータを使用し、推計式を構築することが望ましい。また、2010 年度の風洞実験では、屋外測定における実用性に配慮し、乱流強度  $I_u$  を 9.28 % まで高めており、これらの状況を総合的に判断し、2010 年度の風洞実験で得られたデータを基に風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築することとした。

推計式の構築にあたっては、物理的な意味は持たないが簡便性を優先し、風洞実験値に対し誤差分散が最小となる近似式をカーブフィッティングにより作成した。風洞実験は、平均風速  $u_0$  を 1 m/s から 1 m/s 間隔で大きくしながら 5 m/s まで行った。また、それぞれの平均風速  $u_0$  ごとに乱流強度  $I_u$  を 1.90 %、3.98 %、6.45 %、9.28 % と変化させ実施している。そのため、平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の組合せは、20 通りとなる。

推計式作成の手順として、第一に風洞実験により得られた 20 通りの風ノイズレベル  $L_{wind}$  の周波数分析結果を乱流強度  $I_u$  及び平均風速  $u_0$  ごとにプロットし図化する。

第二に、汎用数値・図形プロセッサ(本研究では㈱エバ・グリーン製の「活図」を使用)により、誤差分散が最小となるよう風ノイズレベル  $L_{wind}$  実験値にカーブフィッティングさせて近似式を得る。

本実験では、式(11)を近似式として仮定した。

$$L_{\text{wind}}(f) = \frac{a}{f^2} + \frac{b}{f} + c \quad (11)$$

ここで、風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}(f)$  は、周波数ごとの風ノイズレベル[dB]、 $f$  は周波数[Hz]である。

第三に、近似式を基に 20 とおりの風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  実験値の回帰分析を行い、曲線回帰式を得る(図 2-8)。この曲線回帰式から得られた係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  の値を表 2-4 に示す。

第四に、曲線回帰式の係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  と乱流強度  $I_u$  の関係をみるため図 2-9 を作成する。本論文では、各係数と乱流強度  $I_u$  には相関性がみられることから、直線回帰で近似することとした。

係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  の直線回帰式を式(12)～式(14)に示す。

$$a = d_a \cdot I_u + e_a \quad (12)$$

$$b = d_b \cdot I_u + e_b \quad (13)$$

$$c = d_c \cdot I_u + e_c \quad (14)$$

ここで、 $d_a$  及び  $e_a$  は、乱流強度  $I_u$  を変数とする  $a$  を求めるための係数。同じく  $d_b$  及び  $e_b$  は、乱流強度  $I_u$  を変数とする  $b$  を求めるための係数。さらに  $d_c$  及び  $e_c$  は、乱流強度  $I_u$  を変数とする  $c$  を求めるための係数である。

第五に、式(12)～式(14)における係数  $d_a$ 、 $e_a$ 、 $d_b$ 、 $e_b$ 、 $d_c$ 、 $e_c$  と平均風速  $u_0$  の関係をみるために図 2-10 を作成する。係数  $d_a$ 、 $e_a$ 、 $d_b$ 、 $e_b$ 、 $d_c$ 、 $e_c$  は、係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  と同様に、直線回帰で近似した。

以上の結果、風洞実験データより作成した風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推定式を式(15)に、それ

---

それぞれの係数を式(16)～式(21)に示す.

$$L_{wind}(f, I_u, u_0) = \frac{a}{f^2} + \frac{b}{f} + c = \frac{d_a \cdot I_u + e_a}{f^2} + \frac{d_b \cdot I_u + e_b}{f} + (d_c \cdot I_u + e_c) \quad (15)$$

ただし,

$$d_a = 2.365 \cdot u_0 - 10.460 \quad (16)$$

$$e_a = -24.012 \cdot u_0 + 58.167 \quad (17)$$

$$d_b = -2.287 \cdot u_0 + 8.295 \quad (18)$$

$$e_b = 25.137 \cdot u_0 - 37.111 \quad (19)$$

$$d_c = 0.635 \cdot u_0 - 0.861 \quad (20)$$

$$e_c = -0.401 \cdot u_0 + 37.353 \quad (21)$$

このように実験値からカーブフィッティングにより求めた近似式を基に, 得られた曲線回帰式から係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , を求め, さらに乱流強度  $I_u$  及び平均風速  $u_0$  を変数とし整理すると, 風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を作成することができる.

風洞実験により得られた風速を用い, 風ノイズレベル  $L_{wind}$  を推計した結果を図 2-11に, 測定値と推計値の相関係数を表 2-5に示す.

平均風速  $u_0$  が 1 m/s で乱流強度  $I_u$  が 6.45 % のカテゴリーでは, 相関係数が 0.12 となっており相関が弱いものの, その他のカテゴリーでは 0.53 以上の相関係数で, 正の相関または強い正の相関となっている.

---

また、図 2-11において、平均風速  $u_0$  が 5 m/s のときの 1.6 Hz の周波数帯に着目すると、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は、乱流強度  $I_u$  が 1.90 %では 68.2 dB であるが、乱流強度  $I_u$  が 9.28 %では 74.8 dB で、6.6 dB 高い値となっている。これは、同じ風速であっても、乱流強度  $I_u$  の値が大きいサイトでは風ノイズレベル  $L_{wind}$  が大きくなることを示唆しており、測定現場では、平均風速  $u_0$  のみならず乱流強度  $I_u$  の値にも留意をする必要がある。

## 2.4 風洞実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の自然風への適用性の検証

風洞実験の結果、風の特徴値である平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  によって風ノイズレベル  $L_{wind}$  の周波数成分が変化することを確認した。しかし、風洞実験は平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の分散が小さく定常とみなせる風に対する結果であり、平均風速  $u_0$  や乱流強度  $I_u$  の分散が変動する自然風(非定常)に対して風洞実験結果の適用性を検討する必要がある。そこで、風洞実験で得られた風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の精度を検証するため、フィールド実験を行い屋外における適用性を確認した。

### 2.4.1 フィールド実験の概要

フィールド実験は、千葉県船橋市の草地が広がる平坦地で、背景騒音が少ないサイト(写真 2-6)を選定し、日中の時間帯に実施した。測定に使用した主な機器を表 2-6に、機器の配置平面図と設置の状況を図 2-12に示す。実験時の音源は、写真 2-7に示す(一財)小林理学研究所が開発した超低周波音源装置 [39]を使用し、実験ケースは音源出力無し及び出力有り(5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz の各周波数成分の正弦波で表される純音を出力)を対象に行った。また、当日の平均風速  $u_0$  は、実験前半において、0~2 m/s 程度、中間の時間帯で 3~5m/s 程度、後半では 4 m/s 程度であった。なお、1 回あたりの計測時間は、実験の目的に応じ 30 秒から最大 22 分の間で適宜変えながら行った。

### 2.4.2 フィールド実験結果

風洞実験で構築した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の屋外への適合性を検証するために、推計により求めた風ノイズレベル  $L_{wind}$  とフィールド実験値を比較する。一例として、10 Hz の純音を 120 秒間出力した実験ケースを示す。

図 2-13は、音源から 10 m 離れたモニター点と 30 m 離れた 2 地点における 1/3 オクター

バンド中心周波数分析結果を比較した結果である。両地点ともに 10 Hz の他 31.5 Hz, 50 Hz, 63 Hz 及び 80 Hz にピークが現れている。これは、本実験で使用した超低周波音源装置は、電磁力とコーン紙で構成される一般的なスピーカと異なり、空気圧サーボアクチュエータとアルミハニカム板を使用している。そのためサーボアクチュエータと振動板の周波数特性や、振動板の外周部(縁)の影響などにより、例えば 10 Hz の純音を放射しようとした場合に、それ以上の周波数において意図しない音が発生することが類似音源に関する文献 [40]で確認されている。したがって、これらの周波数帯は、音源の影響を受けていると判断し、以後の検討では、これら以外の周波数帯を風ノイズレベル  $L_{wind}$ として考察する。

図 2-14に、測定時間 120 秒における音圧レベル測定値( $L_{eq,120s}$ )の周波数分析結果を棒グラフに、120 秒間のデータを 1 秒, 3 秒, 5 秒ごとに区切り平均化し算出した平均風速  $u_0$ とそれぞれの時間区分ごとに算出した乱流強度  $I_u$ を基に風ノイズレベル  $L_{wind}$ 推計値を求めエネルギー平均した結果を折れ線グラフに示す。この図から 2Hz 以上の周波数帯では、概ね測定値と同様に高周波数側に右肩下がりとなっており、風の平均化時間が長いほど、推計値は測定値と整合する傾向を示している。しかし、1~1.6 Hz 付近は整合していない。これは、風洞実験で作られる風洞風の乱れの長さスケールに限界があり、低い周波数における風の乱れが自然風に比べて小さいことが一因と考えられる。

### 2.4.3 乱れの長さスケール

前項の考察を検証するため、風洞実験とフィールド実験における乱れの長さスケール ( $L_x^u$  [m])を検討する。乱れの長さスケール  $L_x^u$  は、風(乱流)に含まれる様々なスケールの渦の平均的なサイズを表す指標であり、乱れの長さスケール  $L_x^u$  が大きいほど、変動周期の長い成分を有している。乱れの長さスケール  $L_x^u$  の算出は、測定されたスペクトルのピーク周波数  $f_{peak}$  [Hz]から求める方法を用いる [41]。ピーク周波  $f_{peak}$  は、低周波数側で一定値を取るスペクトルが低下し始める箇所であり、ピーク周波数に対応する。乱れの長さスケール  $L_x^u$  とピーク周波  $f_{peak}$ の間には式(22)の関係が成り立つ。

$$L_x^u = 0.146 \frac{u_0}{f_{peak}} \quad (22)$$

この関係式より求めた風洞実験及びフィールド実験において低周波音出力の無い実測データを用いて乱れの長さスケール  $L_x^u$  の算出を行う。

両実験によるピーク周波  $f_{peak}$  の算出例を図 2-15に示す。風洞実験は平均風速  $u_0$  が



3.03 m/s, 乱流強度  $I_u$  が 9.2% で 30 秒間測定したケース, フィールド実験は平均風速  $u_0$  が 4.81 m/s で 20 分間測定したケースである. 図より風洞実験及びフィールド実験のピーク周波  $f_{peak}$  は, 前者が 7.8 Hz, 後者は 0.077 Hz と読み取れる. これらの数値を式 (22) に代入し乱れの長さスケール  $L_x^u$  を求めると, 風洞実験は 0.0567 m, フィールド実験は 9.120 m となる.

この結果より, 風洞実験時の乱れの長さスケール  $L_x^u$  は, フィールド実験時に比べ極めて小さいことがわかる. 風洞実験では, 一般的に広く普及している乱流格子を用いて乱れを生成する. 乱流格子を用いた場合, 生成される乱流強度  $I_u$  は, 格子の部材及び開口部のサイズ (10 cm 程度) に依存し, それらと同程度のサイズとなる. 一方, 自然風の乱れは, 周辺の建物や地形の起伏などから生成されたものであり, 乱れの生成源のサイズが大きいことから, 風洞実験に比べて乱れの長さスケール  $L_x^u$  は大きくなる.

本論文では 1~80 Hz の周波数領域の風ノイズレベル  $L_{wind}$  に着目しているが, 風洞実験による乱れの長さスケール  $L_x^u$  は小さいことから, 低周波数領域で屋外の乱れを再現できていないことが, フィールド実験結果と乖離が生じた原因と考えられる.

### 2.4.4 風洞実験とフィールド実験の乱流強度

風洞実験推計式により算出した風ノイズレベル  $L_{wind}$  と測定値が低周波数領域で整合していないその他の理由として, 風洞実験とフィールド実験における乱流強度  $I_u$  の違いが考えられる.

図 2-14 に示したフィールド実験結果のうち, 平均化時間 1 秒間ごとに算出したときの乱流強度  $I_u$  は 2.9~19.6 % であり, 広範囲かつ比較的大きな値も含まれている. 一方, 風洞実験における乱流強度  $I_u$  は, 乱流格子により風の乱れを生成する風洞実験の限界から, 最大でも 9.28 % と小さな値となっている.

このように, 風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築に用いた乱流強度  $I_u$  の違いも, 推計値とフィールド実験値で整合がとれない一因と考えられる.

## 2.5 フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式導出の試み

前節の結果を受け、フィールドデータに基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の導出を試みた。推計式の導出に用いたデータは前節と同様(図 2-14)である。

推計式導出の方針として、平均風速及び乱流強度を大きさごとに従い階級分けし、階級ごとに風ノイズレベルの  $L_{wind}$  測定値の傾向を分析することとした。平均風速及び乱流強度の階級別の測定値分布を図 2-16～図 2-18に示す。併せて、風洞実験推計式による推計結果を図中に併記する(緑色の線)。さらにサンプル数が 10 以上得られた風ノイズレベル測定値の算術平均結果を評価時間ごとに整理し図 2-19に示す。

図 2-16～図 2-19の結果より、風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値は、周波数が高くなるほど音圧レベルが低下する右肩下がりの傾向である。また、風ノイズレベル  $L_{wind}$  の値が 50 dB 付近で横ばいになっていることから、50dB 付近以下は背景騒音を測定しているものと考えられる。そこで、風ノイズレベル  $L_{wind}$  の値が横ばいとなる背景騒音の領域を除外し 50 dB 付近以上のデータを対象に回帰分析を行った。その結果を図 2-20に示す。ただし、回帰分析は約 50dB 以上のデータを対象としているため、約 50dB 以下の値は、回帰式の傾きの傾向をそのまま延長し図示している。

この回帰式を基に誤差分散が小さくなる、以下の対数型の近似式を採用することとした。なお、推計式の導出には回帰分析のサンプル数ができる限り多くなるように、平均風速及び乱流強度の評価時間が 1 秒間のデータを用いた。

$$L_{wind} = A + B \cdot (\log f)^{3/2} \quad (23)$$

$$A = (c_a \cdot Iu + d_a) \quad B = (c_b \cdot Iu + d_b)$$

ただし

$$\begin{aligned} c_a &= -0.133 \cdot u_0 + 0.916 \\ d_a &= 5.291 \cdot u_0 + 44.976 \\ c_b &= 0.053 \cdot u_0 - 0.368 \\ d_b &= -0.856 \cdot u_0 - 5.529 \end{aligned} \quad (24)$$

## 2.5 フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式導出の試み

---

式 (23) 及び (24) をフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式と呼ぶこととする。

図 2-21～図 2-23に風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値, 風洞実験推計式を用いて計算した推計値及びフィールド実験推計式による推計値の比較結果を示す。

三つの時間帯の全体を俯瞰するとフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値と比較し測定値との対応が良い。一方, 図 2-21の 20 Hz のように, 10 dB 程度の差が生じる瞬間もある。

また, 風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値では測定値と整合がとれていなかった 1.6Hz 以下の周波数帯においてフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は測定値との整合が良く, 改善されていることが分かる。

ただし, 本検討で使用したフィールドデータは, 風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の検証用に測定した一つのサイトにおける短時間の測定結果によるものである。フィールドデータに基づく風ノイズ推計式の妥当性を証明するためには, 複数のサイトにおいて, より多くの風ノイズを測定し検証する必要がある。

## 2.6 まとめ

本章では、低周波音と風速の同時測定による風洞実験の結果に基づき、風速レベル及び低周波音計マイクロホン出力と、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  の関係について検討した。続いて、風洞実験データを基に風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築する手法について提案するとともに、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式のフィールドにおける自然風への適合性を検証した。さらに、測定値を基にフィールド実験ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の導出を試みた。その結果以下の知見を得た。

- 1) 風洞実験の結果、風速レベル値は、平均風速  $u_0$  の増加に伴い増大し、さらに乱流強度  $I_u$  の増加によっても増大する傾向を示す。
- 2) 低周波音計マイクロホン出力のパワースペクトルの平均値は、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  の増加に伴い風ノイズレベル  $L_{wind}$  も増大する。また、その傾向は周波数により異なる。
- 3) 風洞実験により得られたデータを基にカーブフィッティングにより求めた風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、周波数を変数とする負のべき関数で表すことが可能である。
- 4) 風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の係数は、平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  を変数とする一次式で表すことができる。
- 5) 平均化時間の長い 5 秒による風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値はフィールド測定値と整合するものの、1.6Hz 以下の周波数帯において測定値との乖離がみられる。
- 6) 周波数帯 1.6Hz 以下におけるフィールド実験ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値と測定値の乖離理由として、風洞実験とフィールド実験では風の乱れの長さスケール  $L_x^u$  と乱流強度  $I_u$  が異なることによるもの考えられる。
- 7) 風ノイズのフィールド測定値を平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の階級別に分類して整理すると、対数型の関数形で推計式化することができる。
- 8) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式による推計値とフィールド測定値を瞬時値で比較すると、瞬間的に差が大きくなる場合があるものの、全体的には整合性が良い。
- 9) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の推計値は、1.6Hz 以下においても測定値と整合する。

以上の結果、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、平均化時間の長い 5 秒による推

計値が測定値と整合するものの、1.6Hz以下の周波数帯において測定値との乖離がみられる結果となった。その原因として、風洞実験とフィールド実験では風の乱れの長さスケール  $L_x^*$  と乱流強度  $I_u$  が異なることによるものと考えられた。そこで、1.6Hz以下の周波数帯における推計精度を向上させるため、フィールド測定データを基に風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の構築を試みた。その結果対数型の推計式が導出され、測定値との整合性が良いことも確認された。しかし、フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の導出に用いた実測データは、限られたサイトにおける短時間の測定に基づくもので、フィールド実験風ノイズ推計式の妥当性を証明するためには、複数のサイトにおいて、より多くの風ノイズを測定し検証する必要がある。

なお、本論文で導出した風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式も、適用条件として2Hz以上の周波数領域で、平均風速  $u_0$  が5 m/s以下かつ乱流強度  $I_u$  が9.28%以下の範囲内であれば、十分適用できるものとする。

## 2.7 図表

表 2-1 風洞の仕様

形 式	水平式回流型	
測定部	寸法	2m × 2m 正方形
	長さ	5.3m 固定壁 6.2m 半固定壁 3.5m 自由壁
	風速	2.5m ~ 50m/s
集合洞	寸法	6m × 6m
	ハニカム	1
	金網	4枚
	縮流比	9.0
送風機	軸流型	
	直径	3.4m
	最大流量	210m <sup>3</sup> /s
電動機	三相整流子電動機	
	最大出力	250kW
	回転数	30~600rpm
	電圧/周波数	300V/50Hz

表 2-2 風洞実験測定機器

機 器 名	型 式	メーカ名
熱線流速計	Model 1010	Kanomax
低周波音計	NA-18A	リオン
データレコーダ	DA-20	リオン
アンプ	200SR-HI	BOSE
低周波発信機	AG-203D	KENWOOD
スピーカ	FreeSpace Model 360P-II Loudspeaker	リオン

2.7 図表

表 2-3 風洞実験時の乱流強度 ( $I_u$ ) と乱流格子

実験年度	乱流強度	乱流格子		乱流格子位置
	$I_u$ (%)	格子寸法 a (mm)	角材寸法 b (mm)	開口部からの距離 W (mm)
2009年	0.24%	—	—	—
	1.91%	100	5	2,500
	2.18%	100	7	2,500
	3.59%	200	15	1,500
	6.02%	100	15	0
2010年	0.25%	—	—	—
	1.90%	100	5	1,500
	3.98%	200	15	1,000
	6.45%	100	15	0
	9.28%	140	35	0

表 2-4  $L_{wind}$  推計式を求めるための曲線回帰式の係数

$I_u$ (%)	$u_\theta$ (m/s)	$a$	$b$	$c$
0.25	1	-24.585	27.786	35.672
	2	10.305	4.122	37.866
	3	-13.482	36.060	34.909
	4	-26.807	52.180	35.863
	5	-45.436	72.763	38.944
1.90	1	8.152	16.075	35.479
	2	11.682	2.740	38.718
	3	-8.305	32.842	36.535
	4	-35.790	61.907	38.437
	5	-58.113	83.390	40.094
3.98	1	3.503	12.351	36.252
	2	-3.699	12.413	39.677
	3	-37.856	55.616	39.532
	4	-51.141	68.566	42.672
	5	-58.018	73.056	46.838
6.45	1	-23.991	20.031	37.401
	2	-32.941	49.611	39.248
	3	-37.389	49.093	42.014
	4	-62.672	75.314	42.934
	5	-49.710	61.388	50.197
9.28	1	-23.003	27.557	36.831
	2	-41.579	52.652	37.709
	3	-70.673	74.881	43.627
	4	-33.573	43.921	53.310
	5	-35.808	47.654	58.481



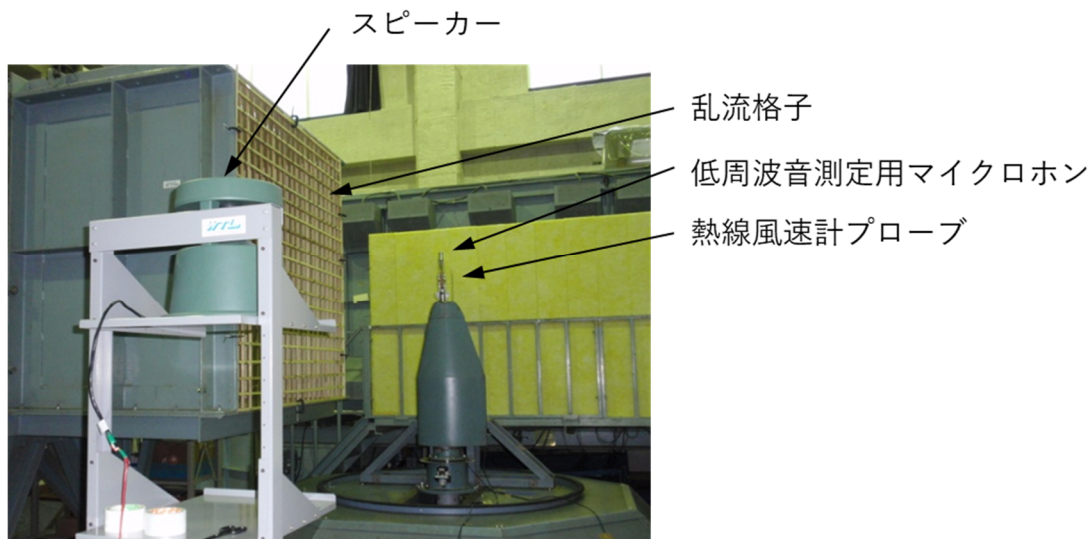
2.7 図表

表 2-5  $L_{wind}$ 推計値と実験値の相関係数

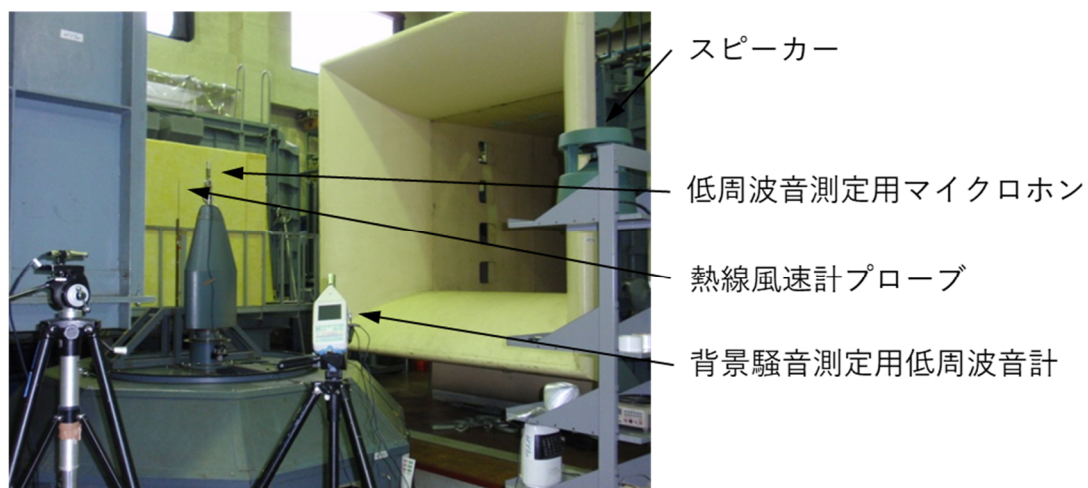
	$I_u=1.90\%$	$I_u=3.98\%$	$I_u=6.45\%$	$I_u=9.28\%$
$u_0=1\text{m/s}$	0.70	0.63	0.12	0.53
$u_0=2\text{m/s}$	0.75	0.54	0.79	0.71
$u_0=3\text{m/s}$	0.85	0.87	0.79	0.83
$u_0=4\text{m/s}$	0.96	0.90	0.86	0.70
$u_0=5\text{m/s}$	0.95	0.89	0.80	0.78

表 2-6 フィールド実験の主な使用機器一覧

機 器 名	型 式	メーカ名
超音波風速計	HS-100	Gill
	SAT-550	Sonic
低周波音計	NA-18A	リオン
	XN-1G	
データレコーダ	DA-20	リオン
低周波音発生装置	-	小林理学研究所



(a) 上流側



(b) 下流側

写真 2-1 開放型風洞の状況と実験機器

## 2.7 図表

---



写真 2-2 実験機器 (写真：左から熱線流速計プローブ・マイクロホン, 低周波音計)



写真 2-3 実験機器 (データレコーダ)



写真 2-4 実験機器 (左からアンプ, 低周波発振機, スピーカ)

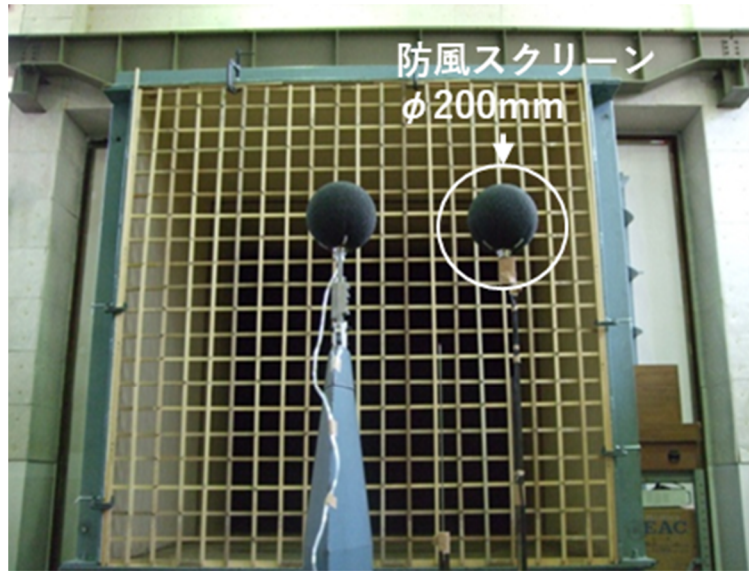


写真 2-5 防風スクリーン（リオン(株)製の全天候防風スクリーン WS03S1）

2.7 図表

---



写真 2-6 フィールド実験サイト



写真 2-7 超低周波音源装置

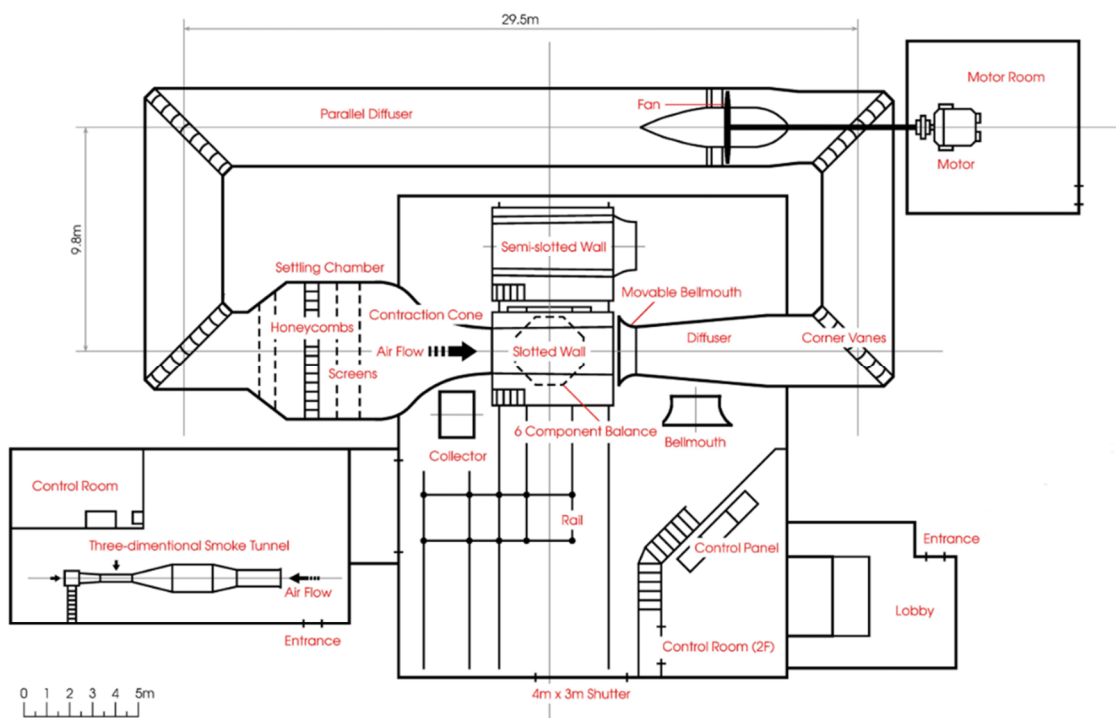


図 2 - 1 風洞の概要

2.7 図表

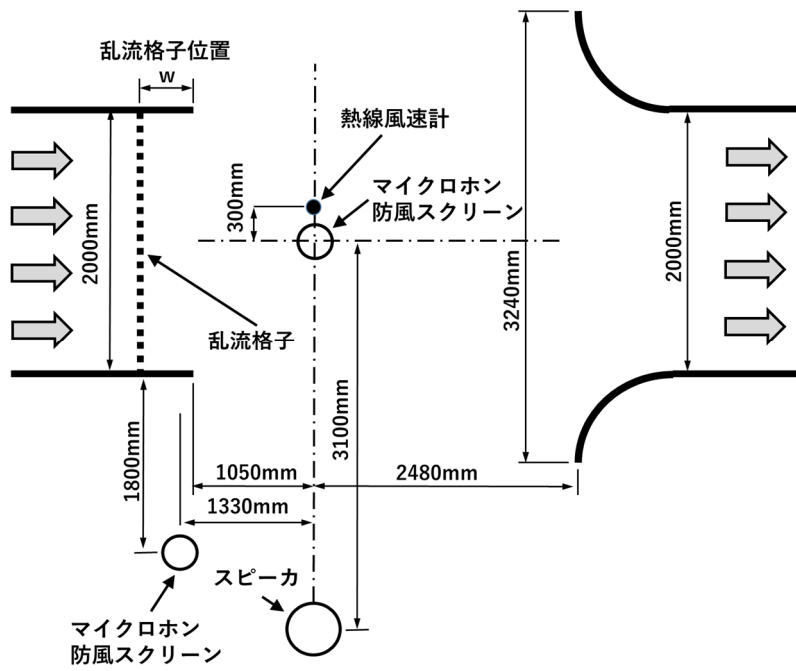


図 2-2 風洞実験状況 (平面図)

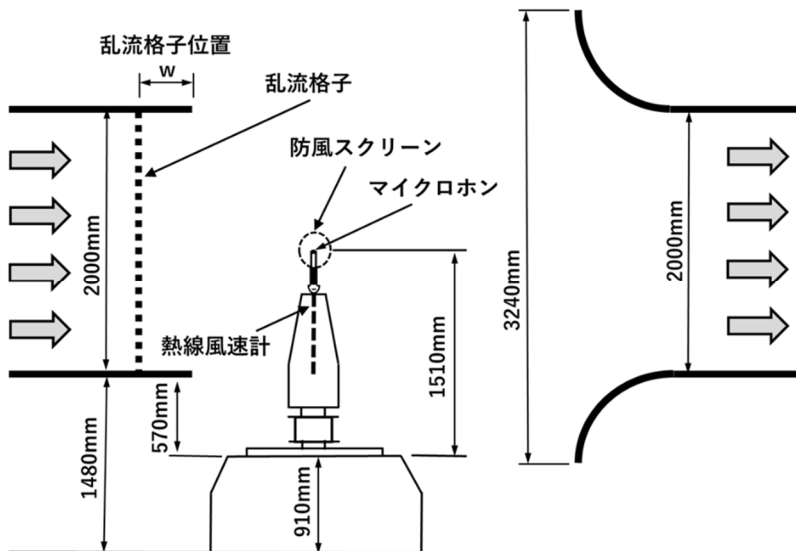


図 2-3 風洞実験状況 (立面図)

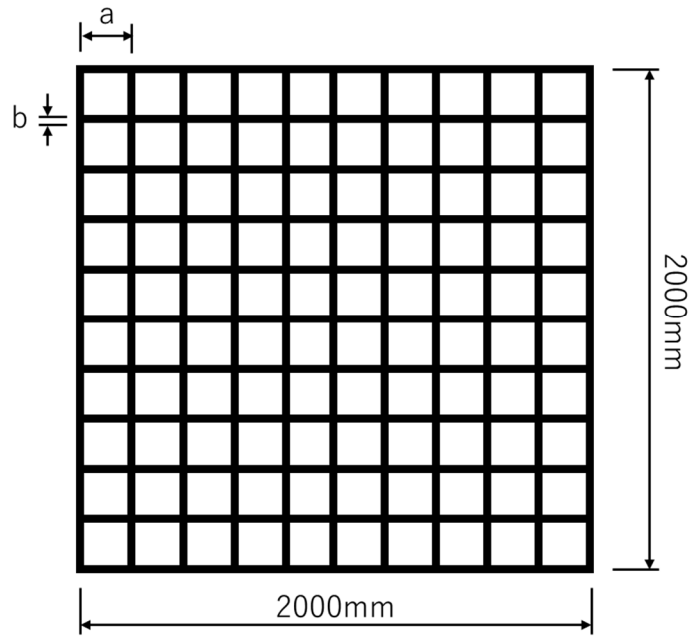


図 2-4 乱流格子の寸法

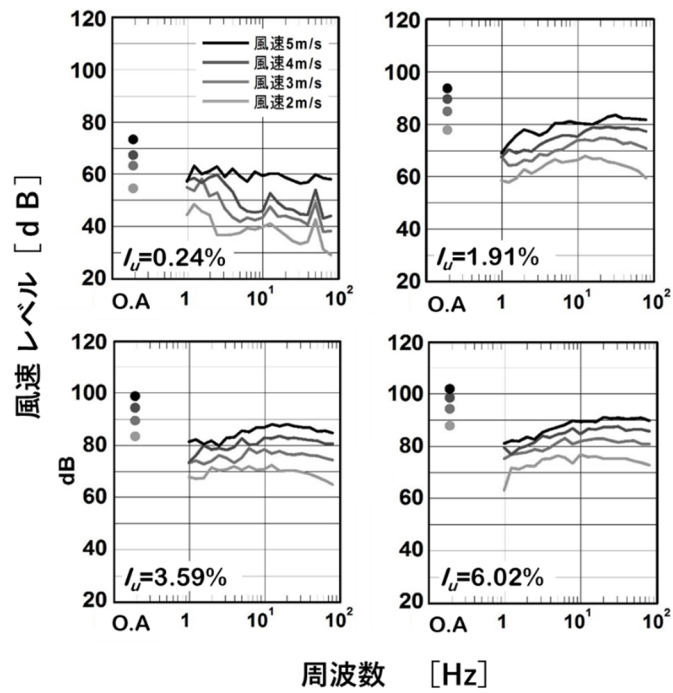


図 2-5 風速別・乱流強度別の風速レベル



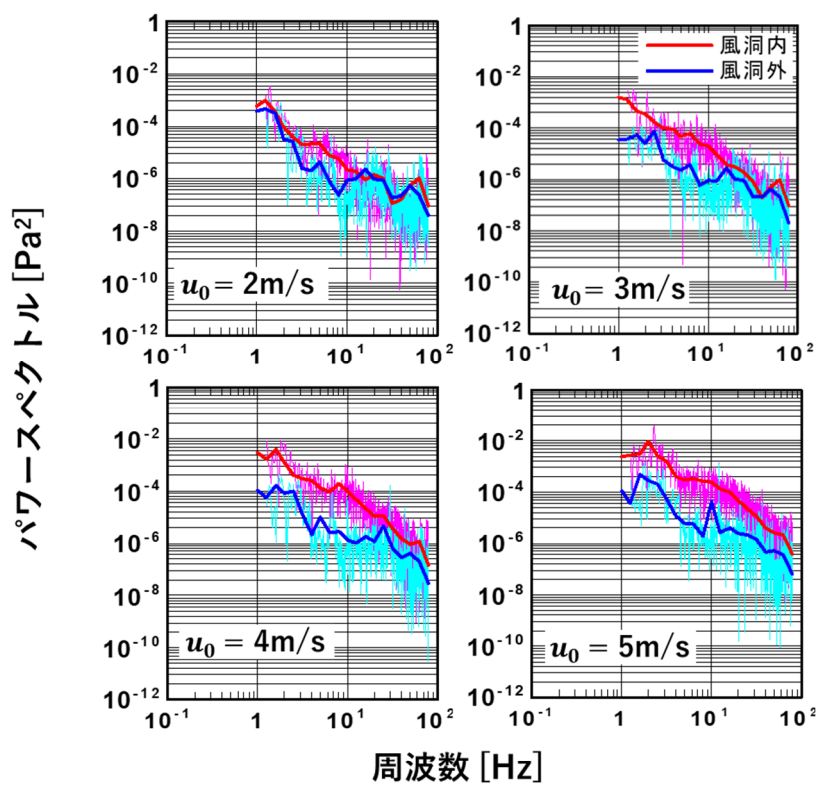


図 2-6 低周波音計のパワースペクトル (乱流強度: 6.02%)

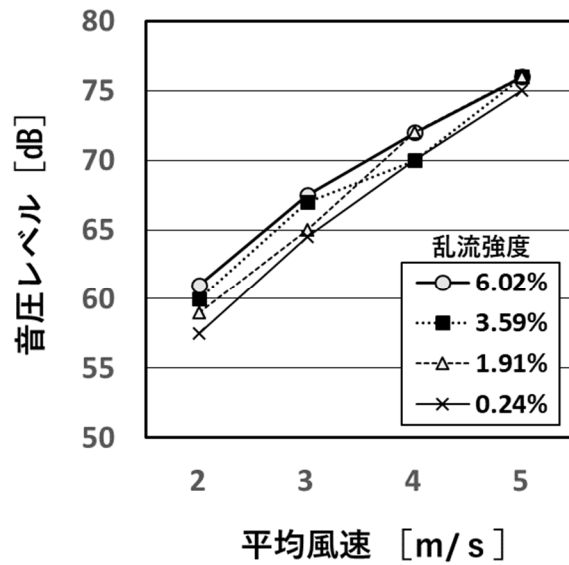


図 2-7 平均風速  $u_0$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  の関係 (防風スクリーン装着時)

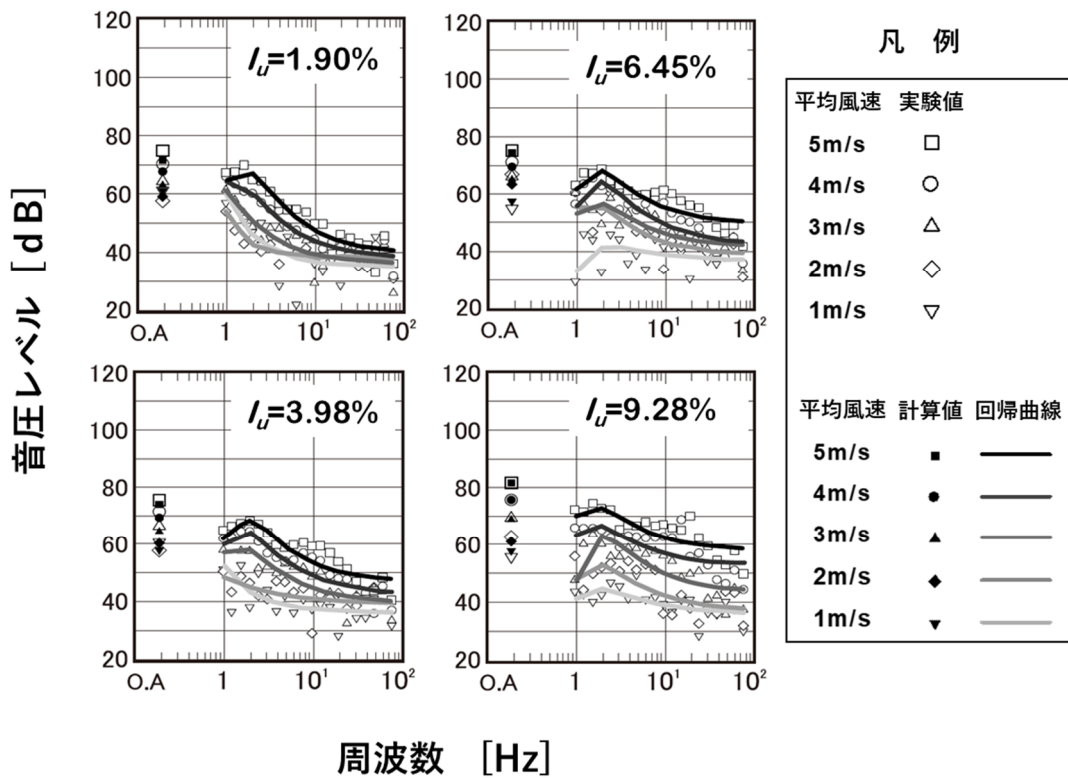


図 2-8 風ノイズレベル  $L_{wind}$  実験値の回帰曲線

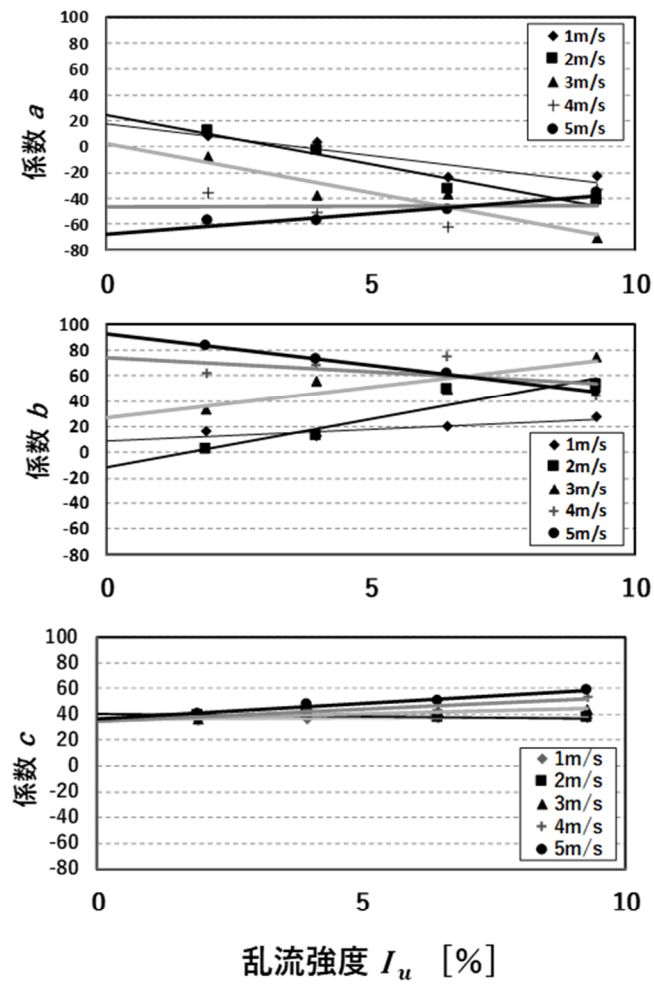


図 2-9 係数  $a, b, c$  と乱流強度  $I_u$  の関係

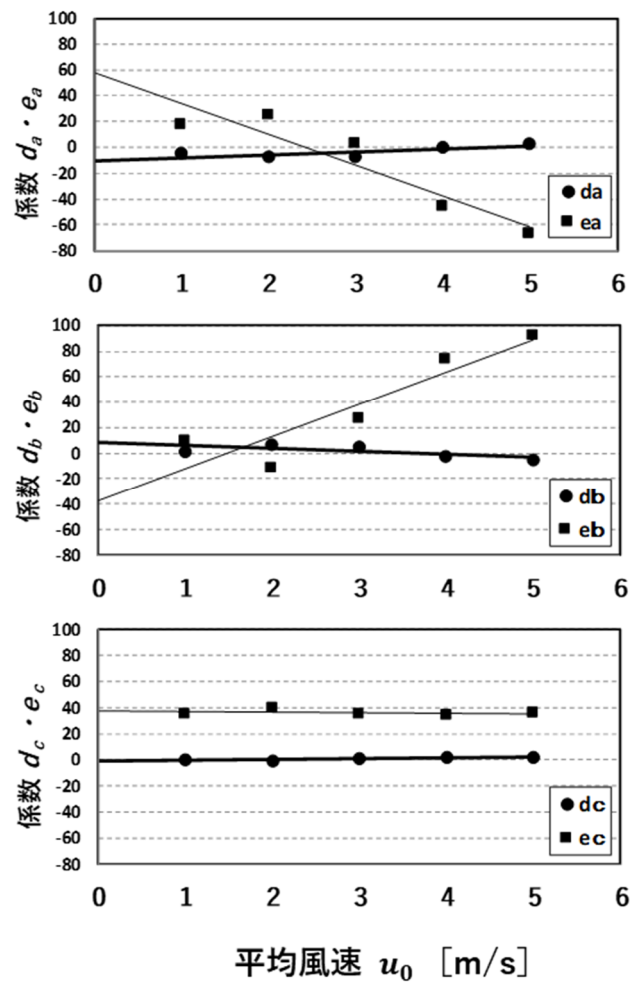


図 2-10 係数  $d_a, e_a, d_b, e_b, d_c, e_c$  と平均風速  $u_0$  の関係

2.7 図表

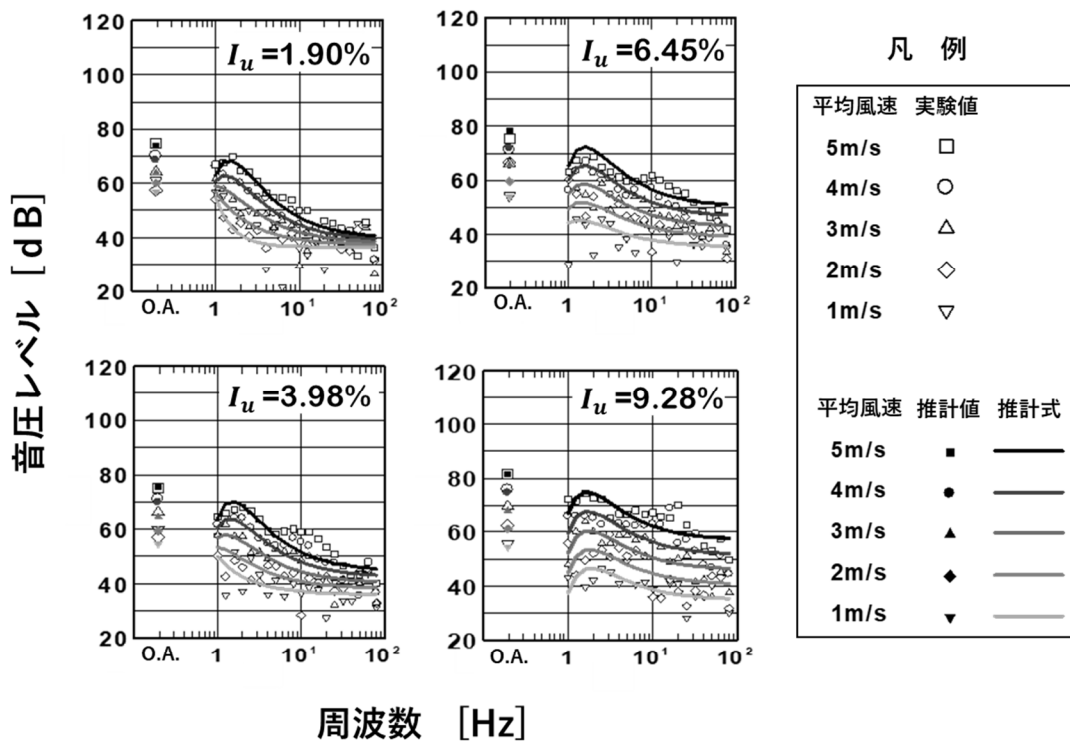


図 2-11 風ノイズレベル  $L_{wind}$  実験値と推計値 (推計式)

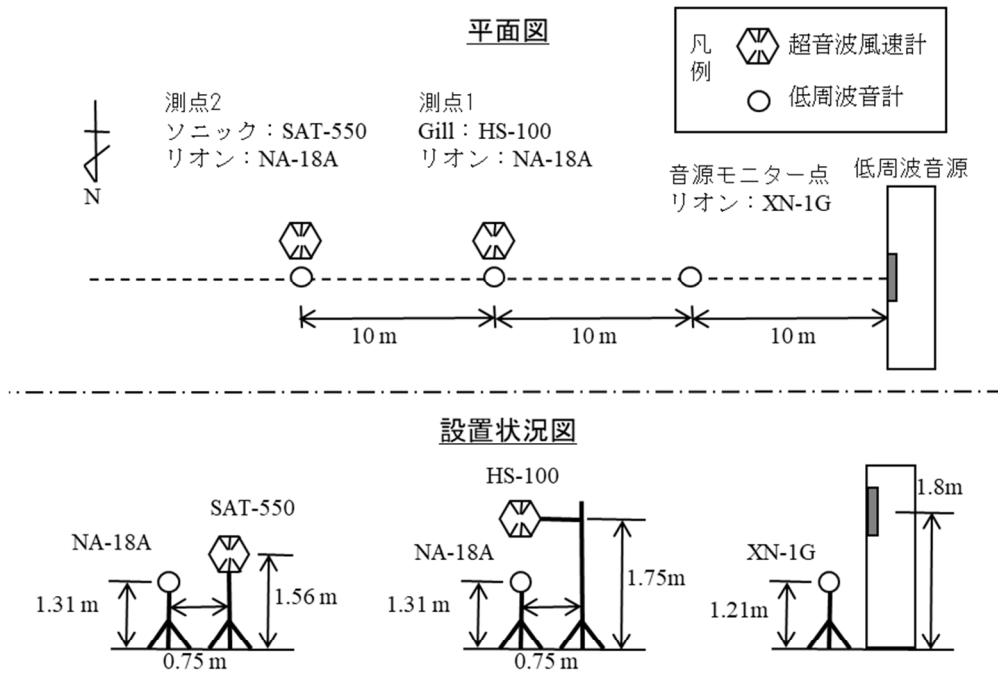


図 2-1 2 機器の配置と設置状況

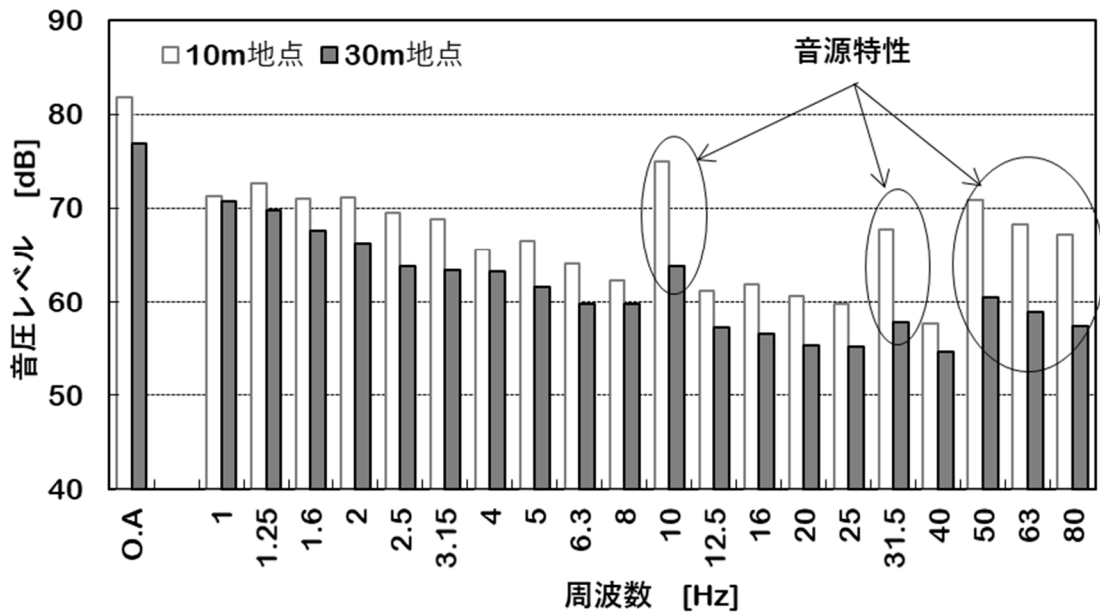


図 2-13 2地点の音圧レベル

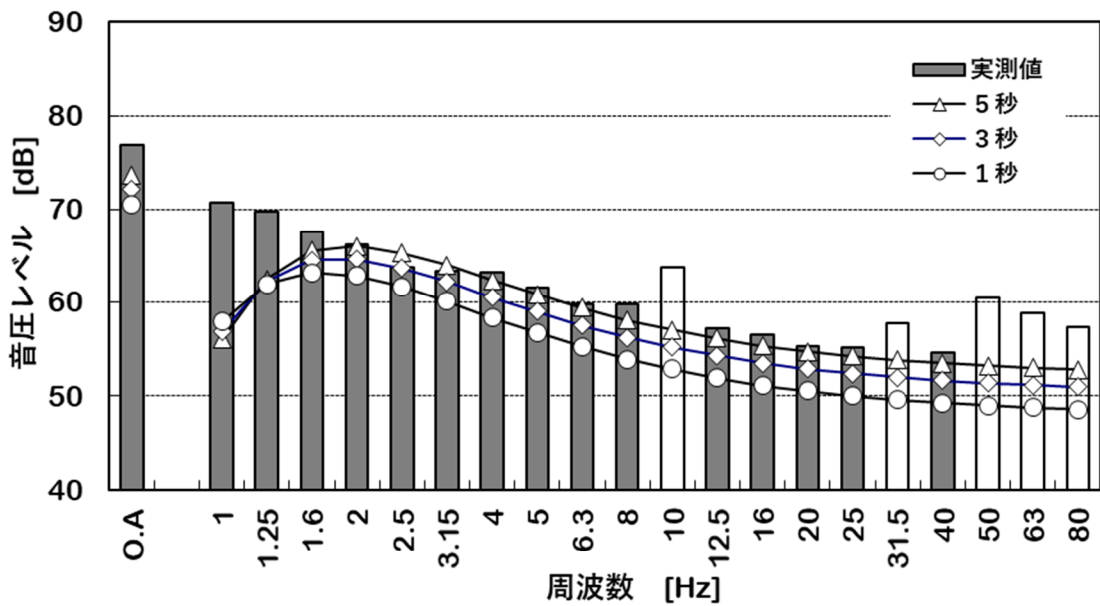


図 2-14 測定値と推計値の比較 (測点2)

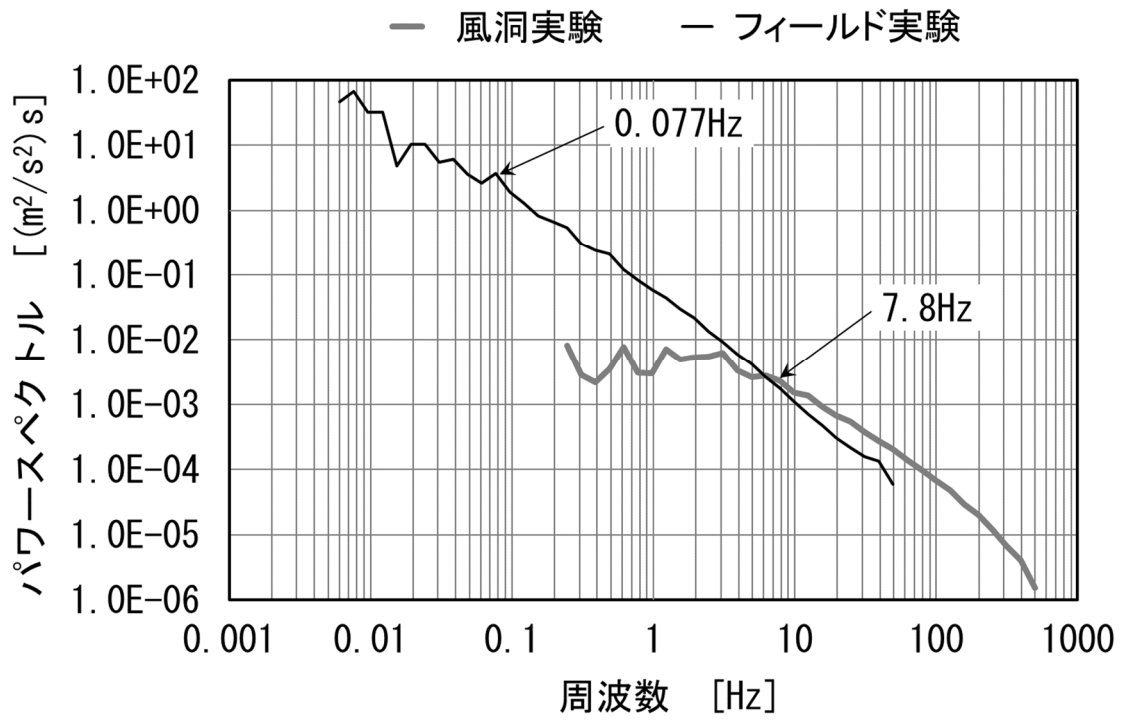


図 2-15 風洞実験とフィールド実験のピーク周波数  $f_{peak}$



2.7 図表

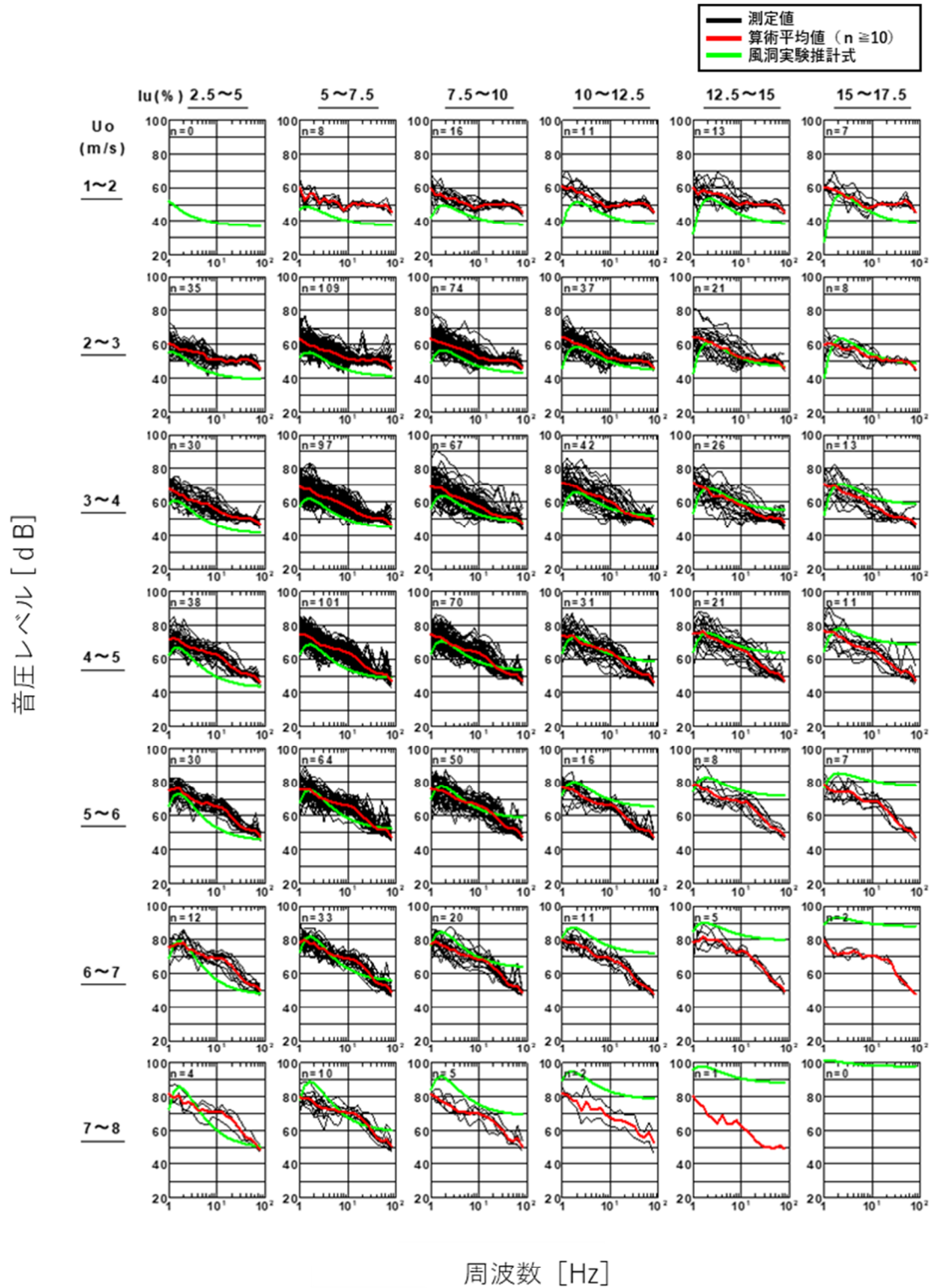


図 2-16 平均風速と乱流強度階級別の測定値の分布 (平均化時間 1 秒)

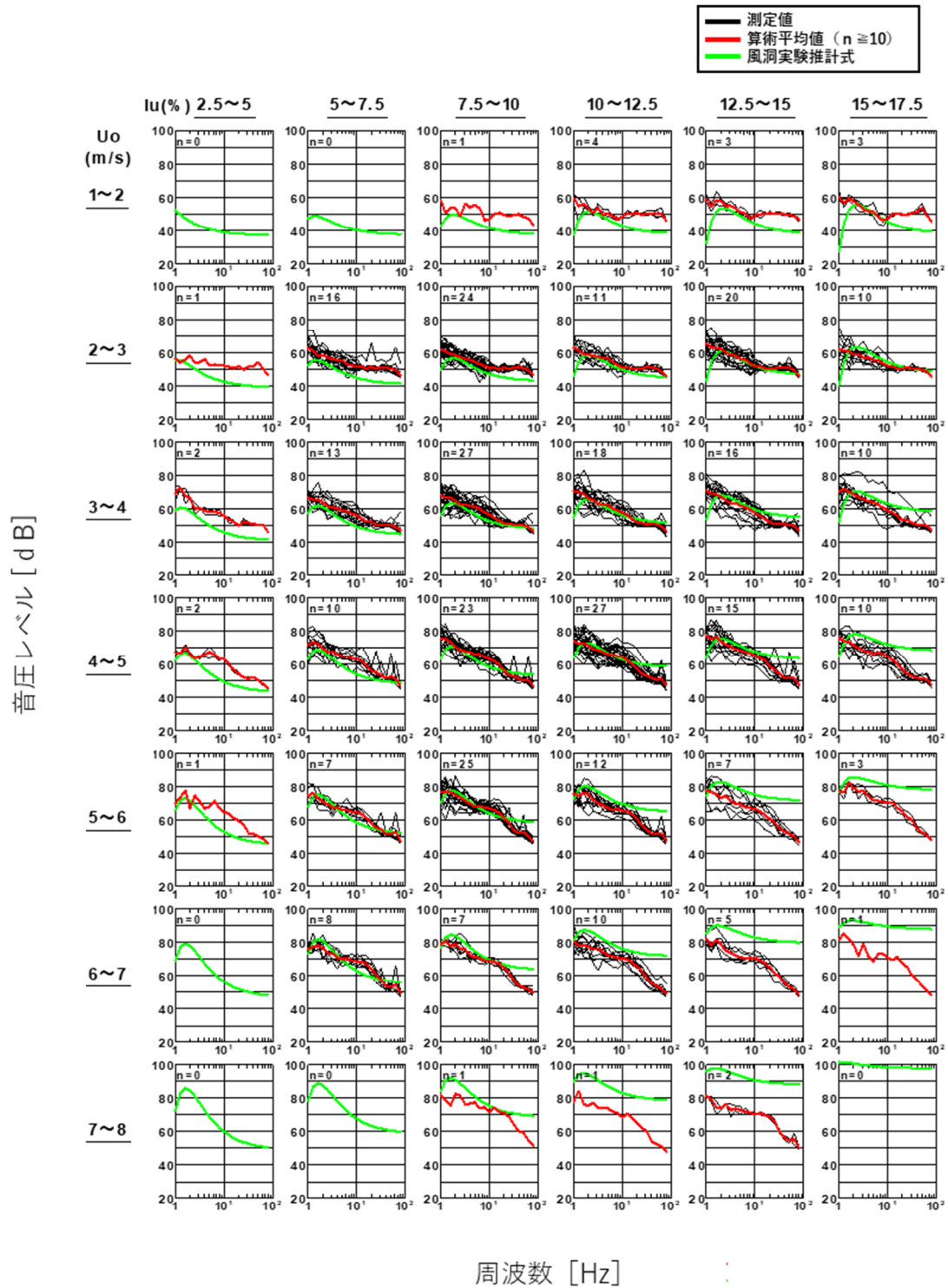


図 2-17 平均風速と乱流強度階級別の測定値の分布 (平均化時間 3 秒)

2.7 図表

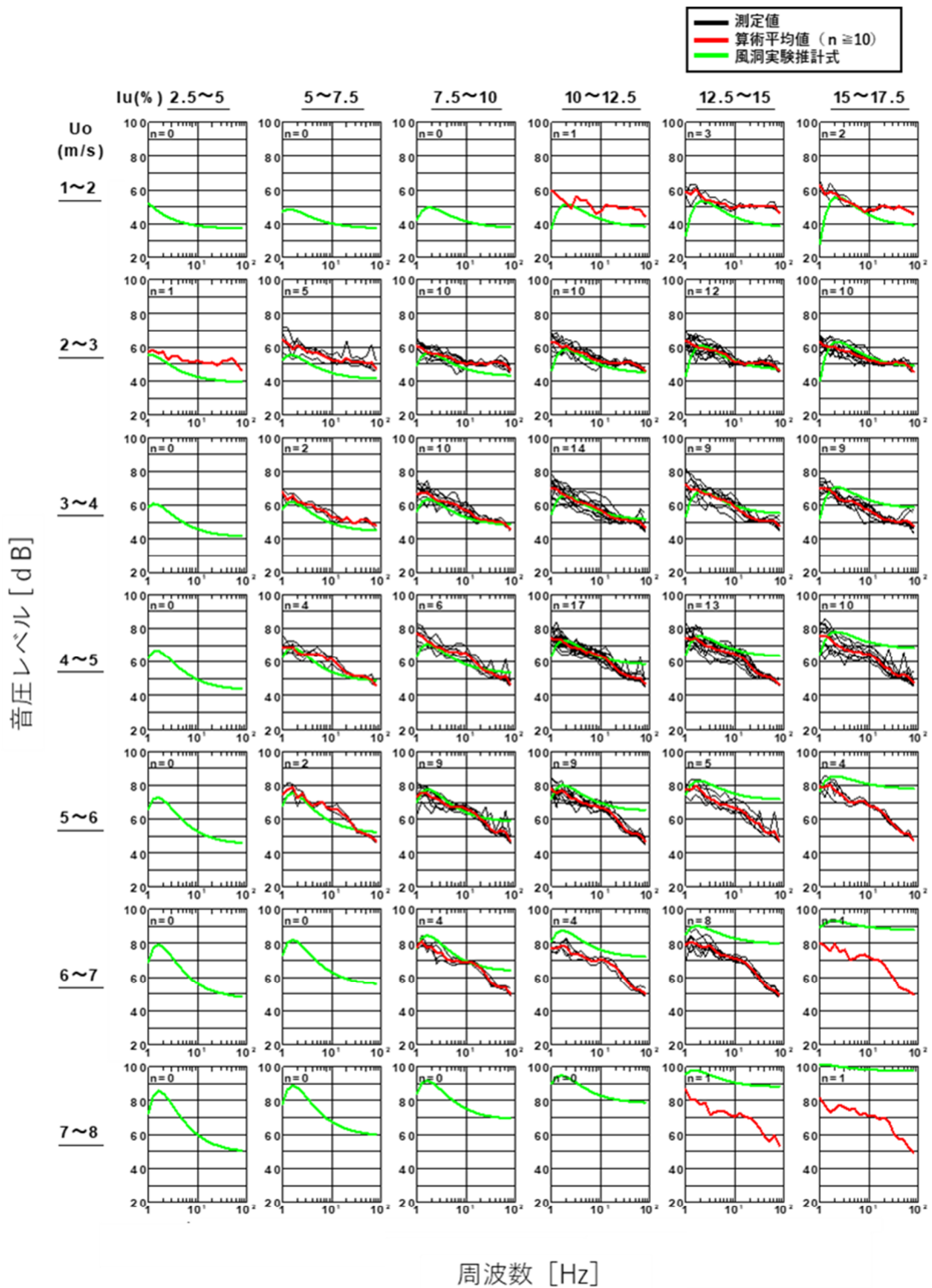
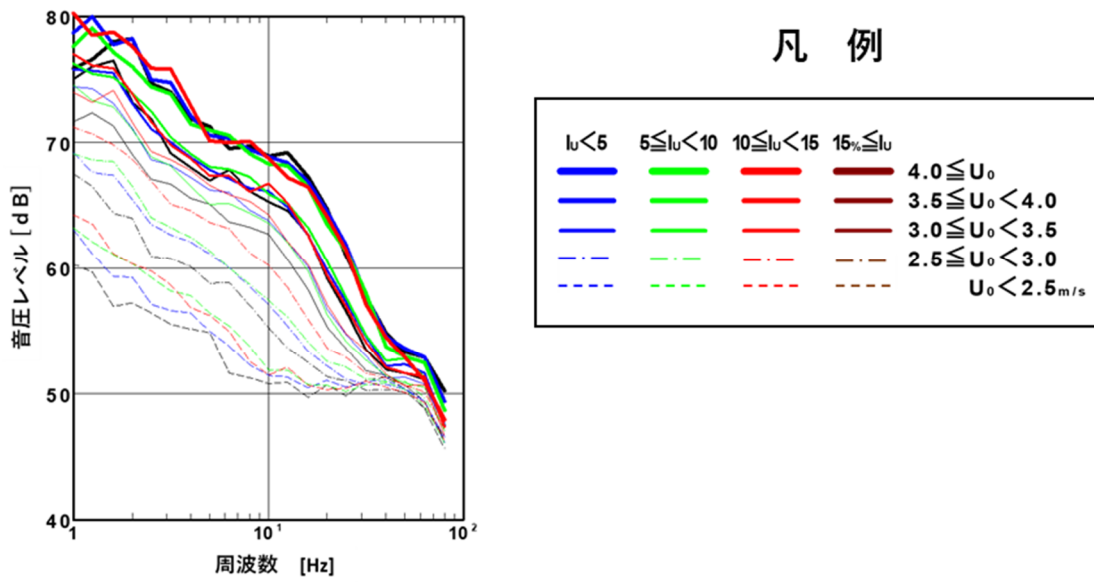
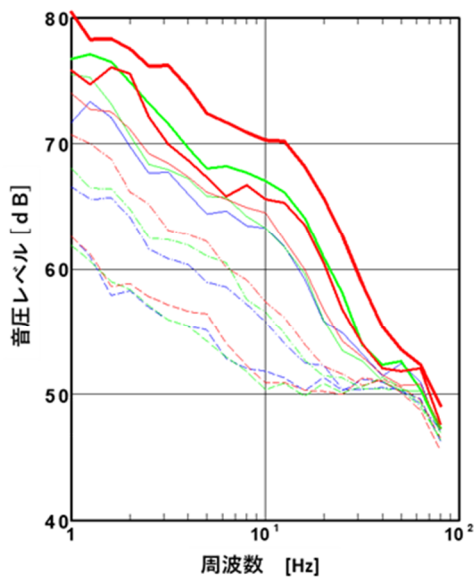


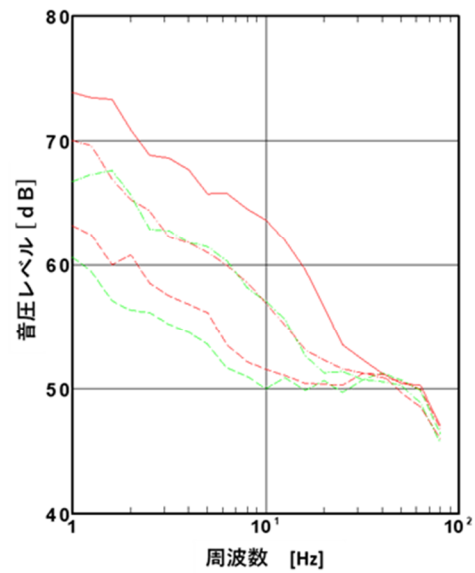
図 2-18 平均風速と乱流強度階級別の測定値の分布 (平均化時間 5 秒)



(a) 平均化時間 1 秒



(b) 平均化時間 3 秒



(c) 平均化時間 5 秒

図 2-19 評価時間と風ノイズレベル  $L_{wind}$  の関係

2.7 図表

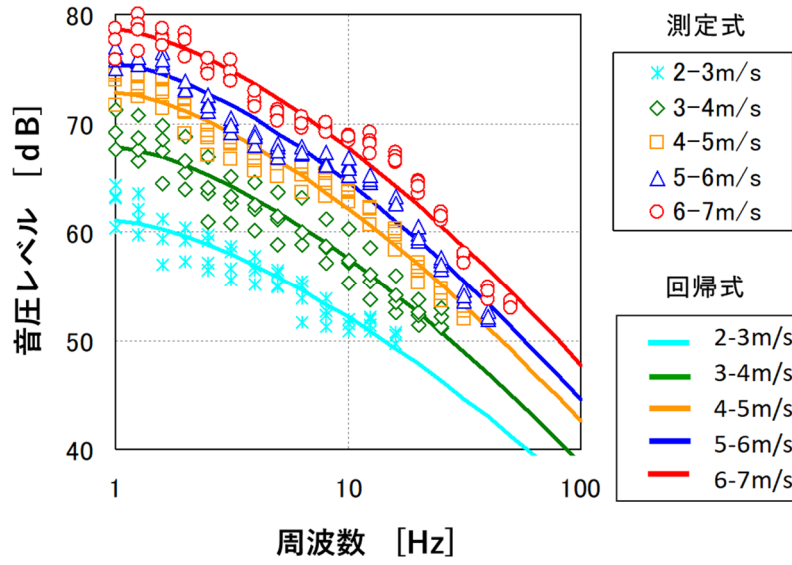


図 2-20 フィールド実験測定値の回帰結果

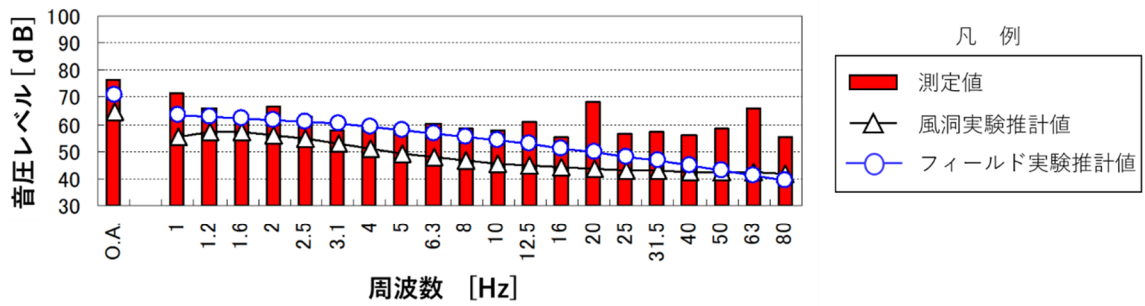


図 2-2-1 測定値と推計値の比較 (瞬時値, 抜粋, 0-1 秒)

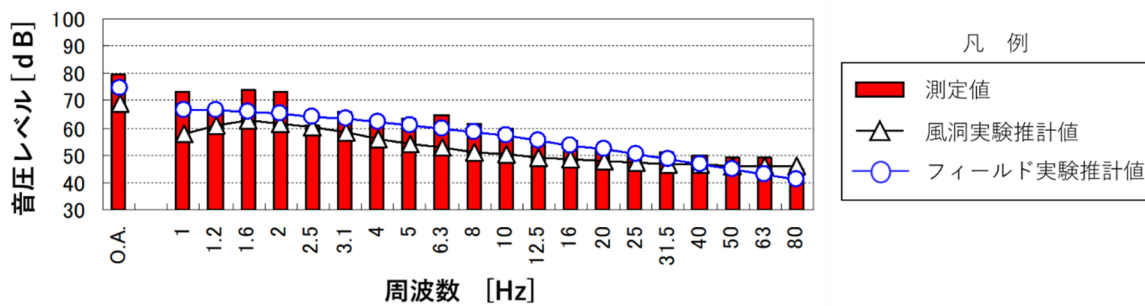


図 2-2-2 測定値と推計値の比較 (瞬時値, 抜粋, 599-600 秒)

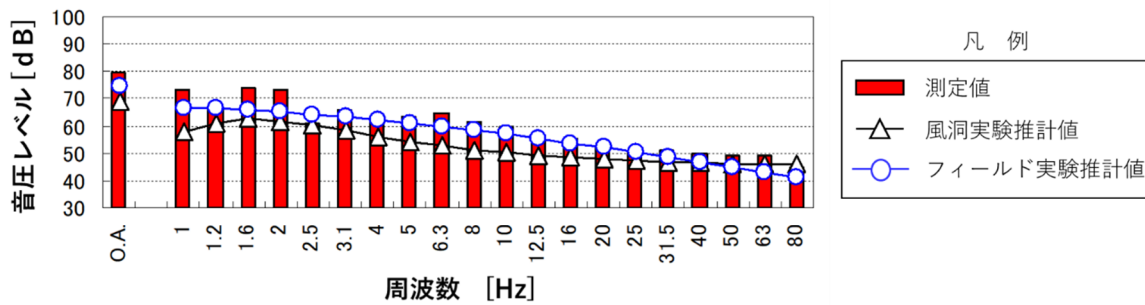


図 2-2-3 測定値と推計値の比較 (瞬時値, 抜粋, 1199-1200 秒)

## 第3章 フィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル $L_{\text{wind}}$ 推計式の構築

第2章において風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計値は、風洞実験時の乱れの長さスケール  $L_x^u$  や乱流強度  $I_u$  がフィールド実験における値と異なることが、低周波数領域における風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計値とフィールド実験測定値において整合しない理由と考えた。また、フィールド実験の測定値を基に風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の導出を試み、測定値と推計値の整合性を確認した結果、低周波数帯域において推計値の改善がみられた。

そこで、次のステップとして背景騒音が小さい複数のフィールドにおいて風ノイズレベル計を用い風の情報を収集し、フィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式(以下「フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式」と記す)を構築することとした。また、フィールド測定を効率よく実施するために、超音波風速計と低周波音計を一体化した独自の測定装置として新たに風ノイズレベル計を開発製作した。

### 3.1 風ノイズレベル計

これまで実施した風洞実験とフィールド実験では、超音波風速計や低周波音計、データレコーダ等、市販の測定機器を接続して計測を行っている。そのため、実験後のデータ分析が複雑となる。また、超音波風速計と低周波音のマイクロホンの形状や位置関係により風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  も異なることが想定される。これらの問題点の解消と計測作業の効率化のために、新たに風ノイズレベル計を開発した。

風ノイズレベル計の概要を図 3-1 に示す。風ノイズレベル計は、SLIK 社製の三脚(ザ・プロフェッショナル N,  $\phi 36$ )に超音波風速計をセットし、その上方に全天候型防風スクリーン(ウレタン製,  $\phi 200$ )付き 1 インチマイクロホンを設置する構造とし、一般的な環境騒音の測定と同様な手軽さで計測可能なシステムである。

システムは、(株)ソニック製の SAT-550 型(3 次元: サンプリング周波数 50Hz)超音波風速計と、(株)アコー製の計量法精密騒音計 TYPE 6238L(測定可能周波数: 1Hz~20kHz, 無指向性)をベースに構築した。

収録データは、評価時間1秒ごとの平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  の測定値と 1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの低周波音圧レベル分析値である。また、本装置には風ノイズレ

ベル推計式を自在に組み込むことが可能なプログラムを実装しており、測定と同時に風ノイズレベルが計算され評価時間1秒間ごとにデータとして格納される。さらに、モニター部には、計測中の風速及び低周波音圧レベルが表示されるとともに、風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計値も表示可能とし、常にこれらのデータを監視しながら計測することができる仕様とした。さらに、システムの汎用性を高めるため、安価なサンプリング周波数 10Hz の 2 次元超音波風速計（(株)ソニック製, SA-10 プロトタイプ）にも切り替えて使用できるよう、システムの構築を行った。なお、2次元超音波風速計(図 3-2)でも、平均風速  $u_0$  が3次元超音波風速計による計測結果と大きな違いが無いことを確認した上で測定に用いた。その一例として、1秒間平均風速  $u_0$  の比較結果を図 3-3に示す。回帰分析の結果、傾きは 0.99 で概ね 45 度線上に分布し、決定係数  $R^2$  も 0.87 となっており双方の超音波風速計による測定値は相関が高い。

### 3.2 フィールドデータの収集

フィールドデータの収集は、背景騒音が十分小さい条件を満たすフィールドで測定することとした。また、地表粗度区分(表 3-1) [42]の違いによって、乱流強度  $I_u$  が変わるものと考えられるため、地表粗度区分の異なるサイトにおいて平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  のデータを蓄積し、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築する必要がある。ここでは、地表粗度区分の異なる 2 地点における検討結果を示す。表 3-2に 2 地点のフィールド情報の一覧を示す。フィールド 1 は地表粗度区分Ⅱ、フィールド 2 は地表粗度区分Ⅲに相当する地点である。

### 3.3 フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の構築

ここでは、フィールドデータのうち、風速範囲及び乱流強度  $I_u$  が広い範囲で得られたフィールド 2 の測定データを用い推計式作成方法について述べる。

フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、実現場のフィールドで低周波音を測定する条件を考慮し、風速 1~10m/s の範囲で使用可能な数式を求めることとし、以下の手順により作成した。

第一に、図 3-4示すとおり測定データの周波数分析結果を平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の階級ごとに分類する。

第二に、それぞれの階級において全測定データを周波数ごとに算術平均する(図 3-4の赤線)。



第三に、算術平均値にカーブフィッティングを施し、誤差分散が最小となる近似式を求める(図 3-4の緑線)。なお、図 3-4において背景騒音が主体的と考えられる周波数領域(算術平均値の音圧レベルが横ばいとなる高周波数領域)は、カーブフィッティングの際、低周波数領域の傾向を延長し求めた。その結果、フィールド実験の近似式は、風洞実験推計式で示した周波数依存性を負のべき関数とした式(11)に対し、式(25)に示す対数型の数式を設定した。

$$L_{wind}(f) = A + B \cdot (\log_{10} f)^{\frac{3}{2}} \quad (25)$$

これは、フィールド実験で得たデータには、乱れの長さスケール  $L_x^u$  の大きな成分を含み、乱流強度  $I_u$  の値も 0~45%と広い範囲のデータが得られたことが低周波数領域の音圧が高くなる要因となり、カーブフッティングによる推計式も、一般的に知られている自然風の周波数特性 [43] [15] [44]である高周波数帯域ほど音圧が小さくなる右肩下がりの推計式となったものと考えられる。

式(25)は、2章5項で試みた式(23)と同形である。しかし、風速範囲と乱流強度範囲が広がったこと、及び測定方法が新しく風ノイズレベル計(図 3-1)に変わったこと、のために係数  $A, B$  は式(23)のときと異なるものとなった。

図 3-4 の平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の各階級別に設定した近似式(図 3-4 の緑線)から式(25)の係数  $A$  及び  $B$  を縦軸に乱流強度  $I_u$  を横軸にとり図 3-5 に示す。係数のグラフは、曲線形状になっており、本測定における乱流強度  $I_u$  に対する係数  $A, B$  の回帰関数は、乱流強度  $I_u$  の二乗根となる式(26)及び式(27)を設定した。

$$A = (c_a + d_a \cdot \sqrt{I_u}) \quad (26)$$

$$B = (c_b + d_b \cdot \sqrt{I_u}) \quad (27)$$

次に、式(26)及び式(27)の係数  $c_a, d_a, c_b, d_b$  を平均風速  $u_0$  の関数とし図 3-6 に示す。フィールド2の  $u_0$  に対する係数  $c_a, d_a, c_b, d_b$  の回帰式は、直線形に限定せず誤差分散の

---

小さい式(28)~(31)を設定した.

$$c_a = 39.918 + 13.220 \cdot u_0 - 0.815 \cdot u_0^2 \quad (28)$$

$$d_a = 4.070 - 0.495 \cdot u_0 \quad (29)$$

$$c_b = -20.935 - 0.056 \cdot u_0 \quad (30)$$

$$d_b = -1.120 + 0.341 \cdot u_0 \quad (31)$$

同様の手順に従い、フィールド1の実測データを基に係数の数式を作成した. それぞれの地表粗度区分ごとの推計式及び係数式を 表 3-3 にまとめて示す. 結果的に, 係数  $c_a$  は, フィールド 1 及びフィールド 2 ともに二次式, それ以外の係数は一次式となった.

二地点の係数は, それぞれのサイトの地表粗度区分の違いから異なる値ではあるが, 類似の係数となる結果を得た. これは, 異なる粗度区分における風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値であつても実用的には一つの推計式で推計できる可能性を示唆しており, 今後の研究課題と考えている.

また, 地表粗度区分Ⅲの測定値(図 3-4)を見ると, 平均風速  $u_0$  が 1m/s 程度であつても乱流強度  $I_u$  の値が約 10%を超えると 1Hz の周波数帯で 80dB を超えるデータが散見する.

従つて, 道路橋の低周波音測定等において低周波音の高い特殊車両が通過する際の瞬間的に発生するピーク値等, 個別データの評価においては平均風速  $u_0$  への着目の他, 乱流強度  $I_u$  の値にも配慮し, 風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計計算により風の影響による低周波音の上昇が無いことを確認する必要があるものと考ええる.

### 3.4 フィールド実験風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の整合性検証

図 3-7に地表粗度区分別の推計式により求めた平均化時間 1 秒間隔の風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値と測定値の時系列変動を示す. それぞれの推計式から得られた風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は, 測定値と概ね対応している. また, 図 3-8に測定値と風ノイズレベル

$L_{wind}$  推計値の関係を散布図で示す。フィールド 1 及びフィールド 2 の相関係数は、それぞれ 0.90 と 0.79 で強い正の相関を示している。さらに、差の平均値は、フィールド 1 で -1.7dB、フィールド 2 では -1.8dB でどちらも整合性が得られている。地表粗度区分で比較すると、相関係数及び差の平均ともに地表粗度区分 II に相当するフィールド 1 の整合性が良い。これは、地表面のラフネス及び自然風の乱れの大きさが風ノイズレベル  $L_{wind}$  推測精度に寄与しているものと考えられる。

### 3.5 まとめ

本章では、低周波数帯における風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の改善を目的とし、地表粗度区分の異なる二種類のフィールドにおける測定データを基にフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築を試み、その作成手順を示した。複数のフィールドでの測定を行うにあたり、フィールド実験の測定データが測定機器の配置に依存することを避けるため、超音波風速計と低周波音計を一体化させた測定装置を新たに開発した。

新しい推計式について得られた知見は以下のとおりである。

- 1) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、風洞実験により得られた負のべき関数とは異なる、対数型の数式を設定した。
- 2) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の係数  $A$  及び  $B$  は、乱流強度  $I_u$  を二乗根とする数式で表すことができる。
- 3) 係数  $A$  及び  $B$  の回帰式は、平均風速  $u_0$  をパラメータとする二次又は一次式で表すことができる。
- 4) フィールド実験に基づき作成した地表粗度区分の異なる二つのフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、係数が類似傾向を示すとともに、推計精度も測定値に対し、地表粗度区分 II で 0.90、区分 III で 0.79 の相関係数となり、いずれも強い正の相関が示された。
- 5) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、平均風速  $u_0$  が約 10m/s 以下、乱流強度  $I_u$  は地表粗度区分 II で約 30%、区分 III で 60%の測定データから構築しており、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式と比較し、より広い適用範囲となった。
- 6) 風ノイズレベル計は、測定と同時に自動分析が行われ、1秒間隔の平均風速、乱流強度及び周波数ごとの低周波音のデータ保存が可能なシステムである。また、本装置には

風ノイズレベル推計式を自在に組み込むことが可能なプログラムを実装しており、測定と同時に風ノイズレベルが計算され評価時間1秒間ごとにデータとして格納される。

- 7) 風ノイズレベル計は、平均風速、低周波音及び風ノイズ推計値をリアルタイム表示でき、また、一般的な騒音測定同様、容易に設置・測定可能なシステムである。

以上の結果、構築したフィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、地表粗度区分、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  のいずれにおいても、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式から改善され、より広い条件に適用可能な推計式となった。

また、フィールド測定を効率よく行うために、新たに開発製作した超音波風速計と低周波音計を一体化した風ノイズレベル計により、低周波音測定が大いに効率よく推進できることになった。

## 3.6 図表

表 3-1 地表粗度区分[42]

地表粗度区分	地 表 状 況
0	・海上（広大な海面上）
I	・海岸，海上（上記以外）
II	・農地，田園，開けた土地 ・樹木や低層建築物が散在している地域
III	・樹木や低層建築物が密集している地域 ・中高層建築物が散在している地域 ・なだらかな丘陵地
IV	・中高層建築物の密集地域 ・起伏の大きい丘陵地

表 3-2 フィールド情報一覧

項 目	フィールド1	フィールド2
測定場所	千葉県船橋市	秋田県秋田市
地表粗度区分	II	III
測定項目	風速，低周波音 夜間の時間帯	風速，低周波音 夜間22時～6時
測定時間帯	（背景騒音の小さい60分	連続測定
分析時間	60分間	60分間（3時～4時）
平均風速	3.8m/s	3.2m/s
風速範囲	0～10.9m/s	0.2～8.3m/s
平均乱流強度	7.40%	12.0%
乱流強度範囲	0～27.3%	2.3%～63.2%

表 3-3 推計式一覧

フィールド実験推計式	$L_{wind}(f, I_u, u_0) = a + b \cdot (\log f)^{3/2}$ $= (c_a + d_a \cdot \sqrt{I_u}) + (c_b + d_b \cdot \sqrt{I_u}) \cdot (\log f)^{3/2}$
フィールド1の係数 地表粗度区分II	$c_a = 40.088 + 9.822 \cdot u_0 - 0.461 \cdot u_0^2$ $d_a = 2.818 - 0.258 \cdot u_0$ $c_b = -26.161 + 1.752 \cdot u_0$ $d_b = -1.144 - 0.159 \cdot u_0$
フィールド2の係数 地表粗度区分III	$c_a = 39.918 + 13.220 \cdot u_0 - 0.815 \cdot u_0^2$ $d_a = 4.070 - 0.495 \cdot u_0$ $c_b = -20.935 - 0.056 \cdot u_0$ $d_b = -1.120 + 0.341 \cdot u_0$

3.6 図表

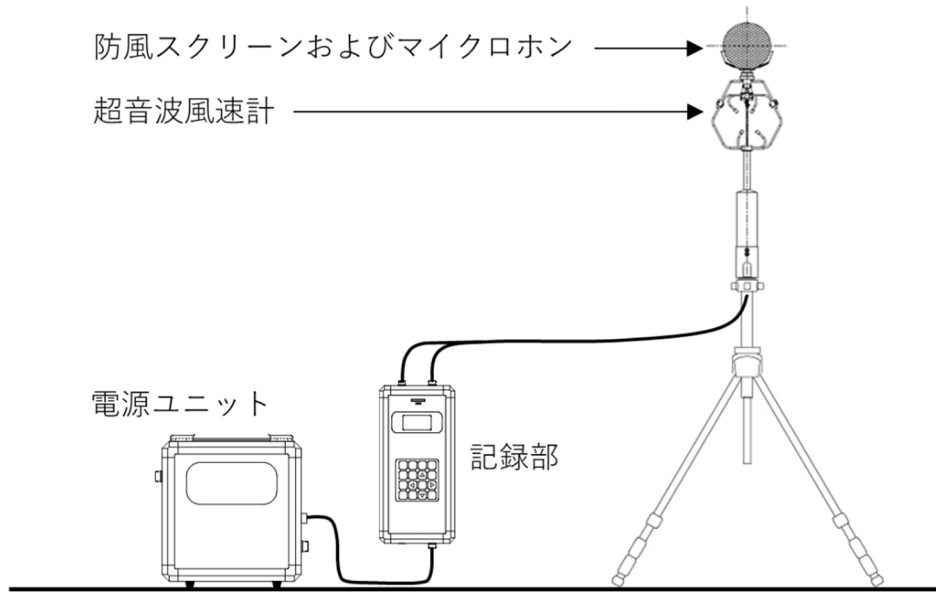


図 3-1 風ノイズレベル計 (3次元システム)

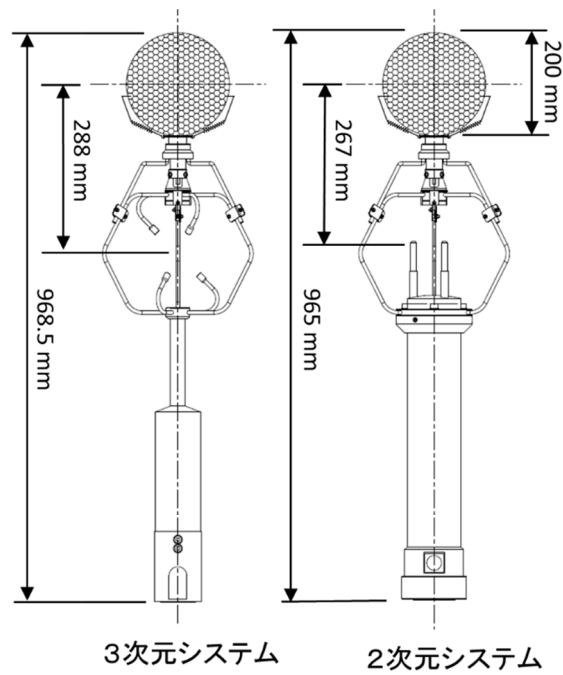


図 3-2 風ノイズレベル計センサ部

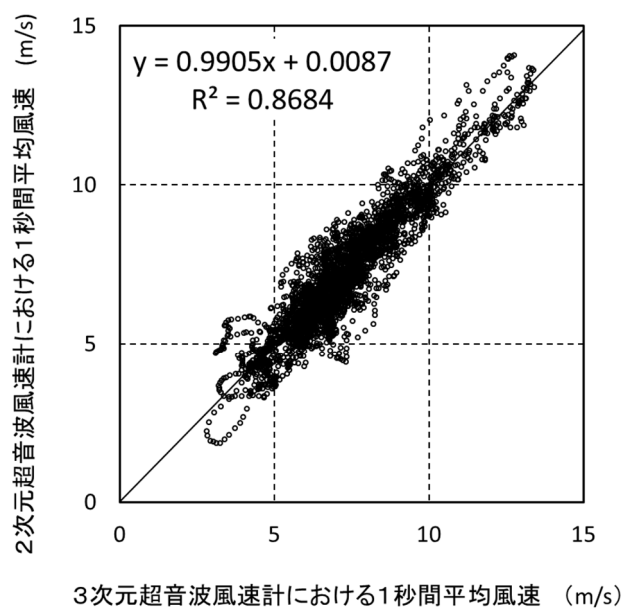


図 3-3 3次元超音波風速計と2次元超音波風速計の1秒間平均風速の比較



3.6 図表

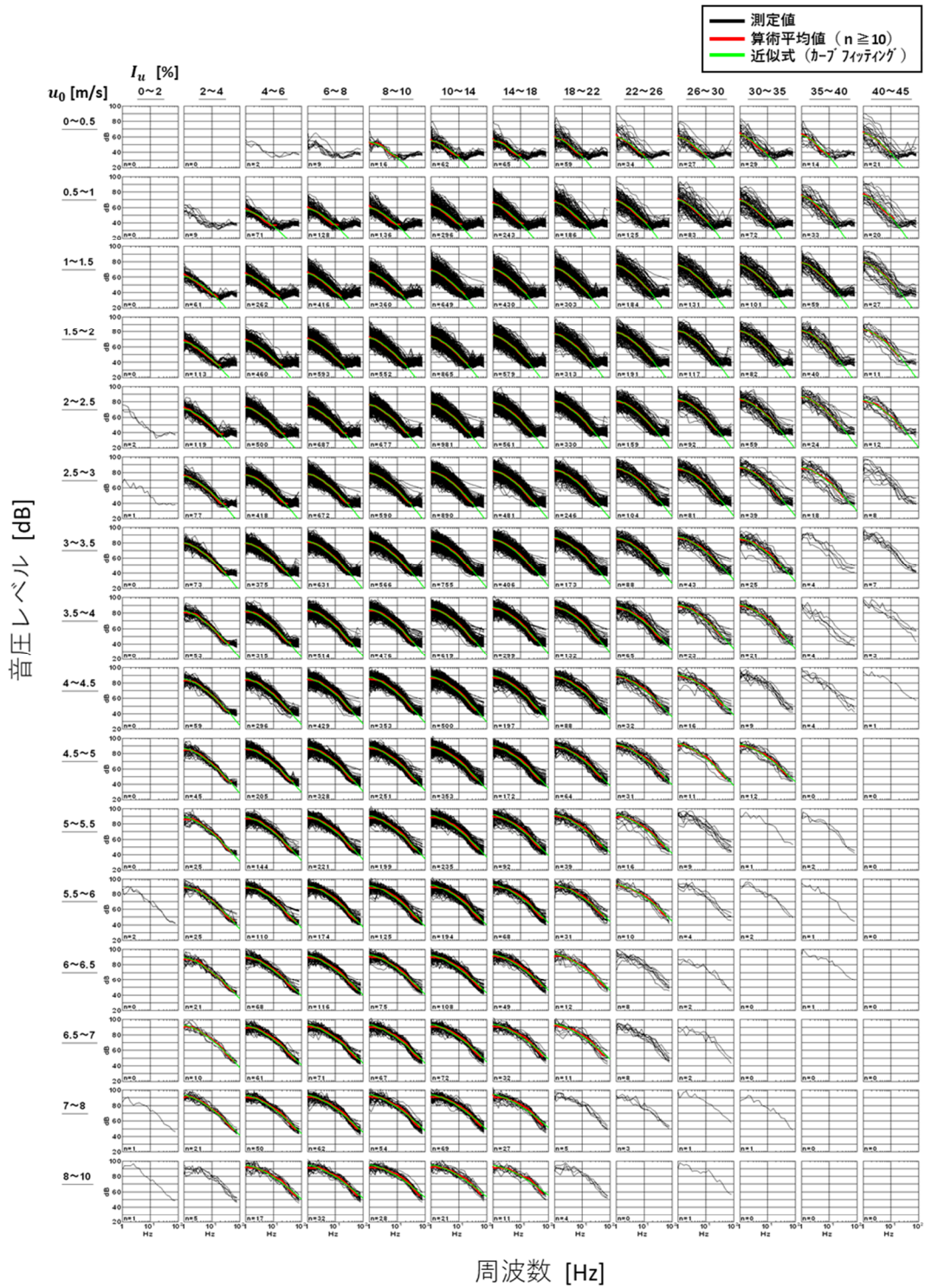


図 3-4 平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  別測定値とカーブフィッティング

(フィールド 2)

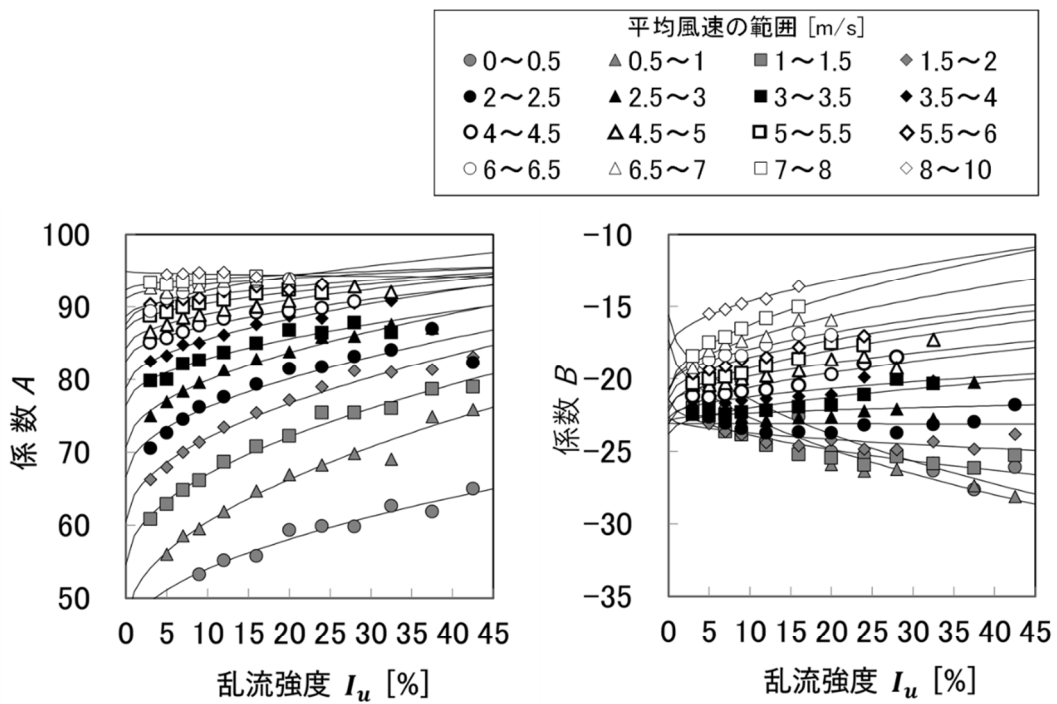


図 3-5 平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  階級別の係数 A, B

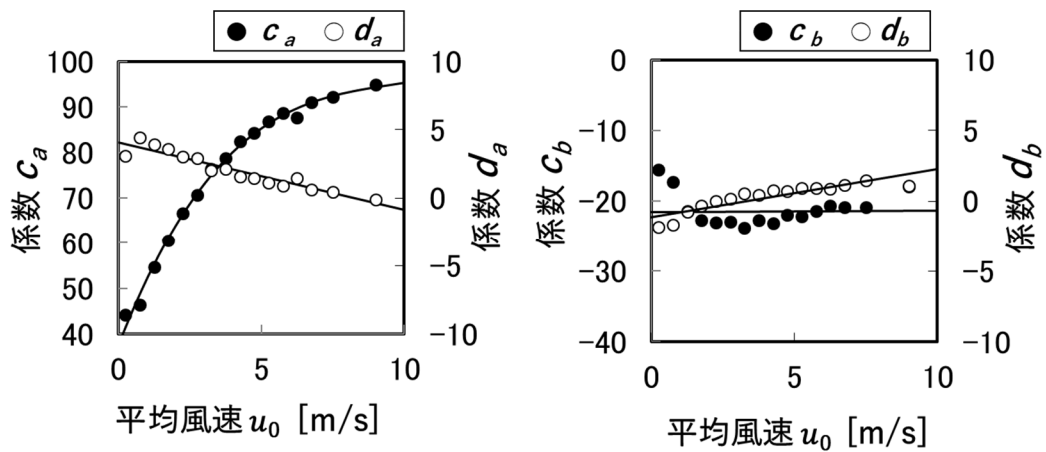


図 3-6 平均風速  $u_0$  をパラメータとする係数  $c_a, d_a, c_b, d_b$

3.6 図表

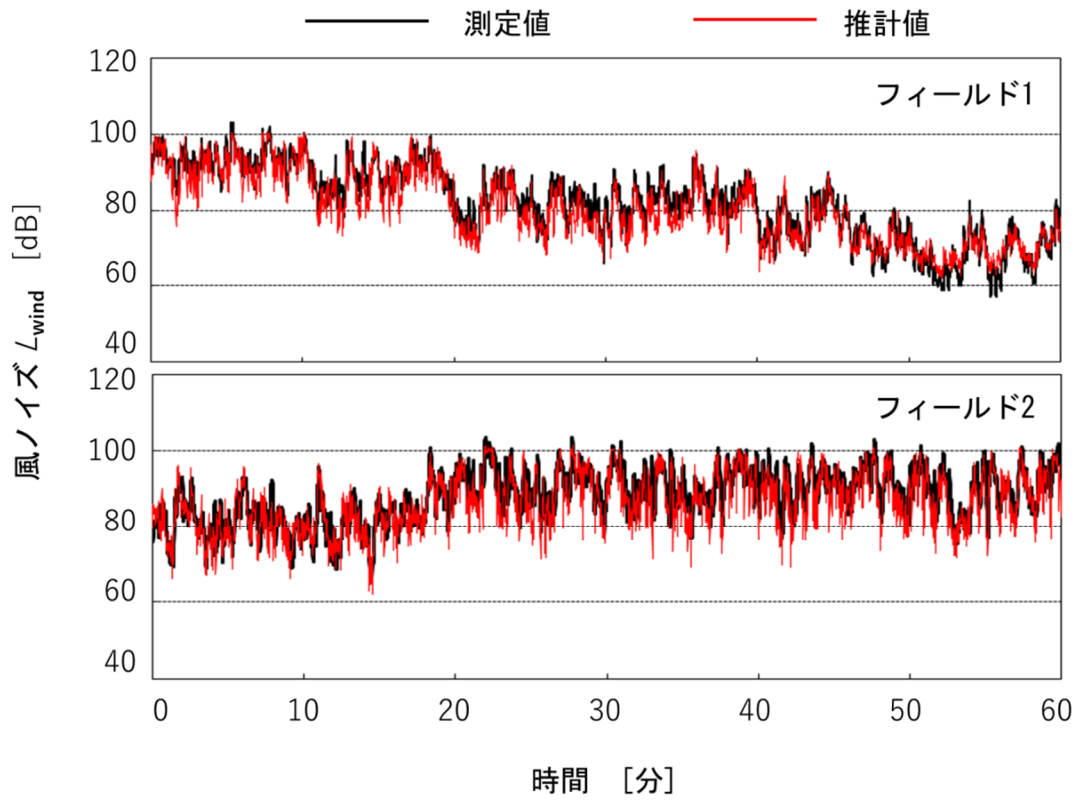


図 3-7 風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値と測定値の時系列変動

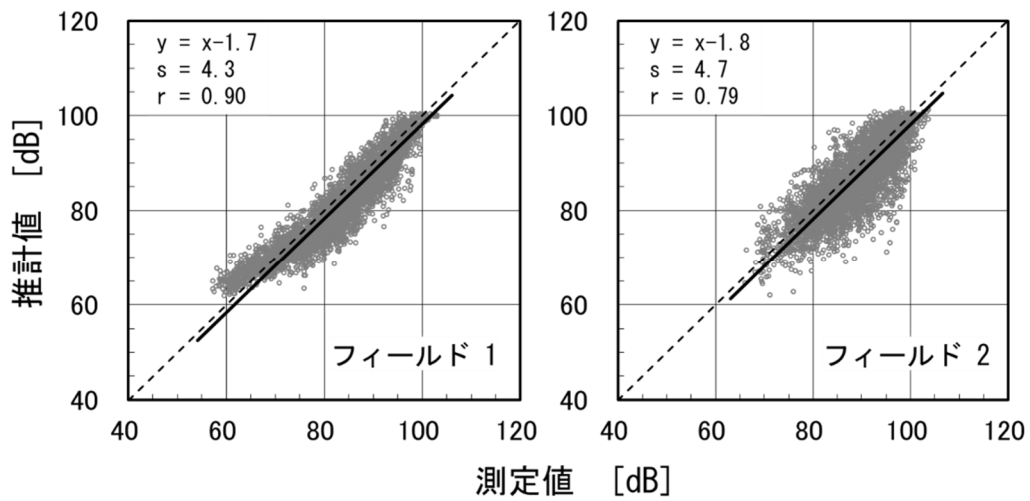


図 3-8 風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値の整合性

## 第4章 流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル $L_{wind}$

### 推計式の構築

第2章及び第3章では、低周波音計、防風スクリーン等で構成される計測システム系を風の中に設置したときのマイクロホン出力に含まれる風ノイズレベル  $L_{wind}$  について風洞実験及びフィールド実験を行い、マイクロホンが出力する風による圧力変動(風ノイズ)の特性値は、周波数、平均風速及び乱流強度の3つのパラメータによる寄与が大きいことを明らかにするとともに、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式及びフィールド実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築した。

しかし、これらの推計式の関数形はカーブフィッティングツールに基づくもので、物理的な意味をもたない。

流れ場の風速と圧力の理論的な關係に基づいて風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を周波数、平均風速及び乱流強度の3つのパラメータの関数として導出し、これに必要な係数をフィールド測定値により求める新たな風ノイズレベル推計式を提案する。さらに、フィールド測定結果を基に推計手法の妥当性について検証する [37] [45]。

### 4.1 風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の導出

第1章では流れ場の風速と圧力の關係に基づき風ノイズレベル  $L_{wind}$  を式(10)のように定義した。

$$L_{wind} = 20\log_{10} \frac{P_{wind}}{p_0} = 20\log_{10} \frac{C_p \frac{1}{2} \rho U^2}{p_0} \quad (10)(再掲)$$

式(10)は次のように展開することができる。

$$L_{wind} = 20\log_{10} C_p + 20\log_{10} U^2 + 20\log_{10} \frac{\frac{1}{2} \rho}{p_0} \quad (32)$$

#### 4.1 風ノイズレベル $L_{\text{wind}}$ 推計式の導出

---

ここで、時々刻々と変化する風速  $U$  を平均風速  $u_0$  と変動風速成分  $\tilde{u}$  の和で表すと式(33)となる。

$$U = u_0 + \tilde{u} \quad (33)$$

次に、式(33)を式(32)に代入し、変動風速  $\tilde{u}$  を標準偏差  $\sigma_u$  に置き換えるとともに、空気密度  $\rho$  及びデシベル dB の基準値  $p_0$  は定数であるため  $20 \log_{10} \frac{\frac{1}{2}\rho}{p_0}$  を  $\Delta$  に置き換え、さらに圧力係数  $C_p$  は周波数  $f$  の関数と考え整理すると式(34)が導かれる。

$$L_{\text{wind}} = 20 \log_{10} C_p(f) + 20 \log_{10}(u_0^2 + 2u_0\sigma_u + \sigma_u^2) + \Delta \quad (34)$$

乱流強度は  $I_u = \sigma_u/u_0$  なので、式(34)に  $\sigma_u = I_u u_0$  を代入し整理すると式(35)が導き出される。

$$\begin{aligned} L_{\text{wind}} &= 20 \log_{10} C_p(f) + 20 \log_{10} u_0^2 (1 + I_u)^2 + \Delta \\ &= 20 \log_{10} C_p(f) + 20 \log_{10}(1 + I_u)^2 + 20 \log_{10} u_0^2 + \Delta \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)において風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  は、周波数  $f$ 、乱流強度  $I_u$  及び平均風速  $u_0$  の関数である。  $L_{\text{wind}} = L_{\text{wind}}(f, I_u, u_0)$  であることは、2章、3章で実測に基づいて導出した知見と整合する。

そこで、この式を、式(36)のとおり仮定する。

$$L_{\text{wind}}(f, I_u, u_0) = \bar{A} \log_{10} C_p(f) + \bar{B} \log_{10}(1 + I_u)^2 + \bar{C} \log_{10} u_0^2 + \Delta \quad (36)$$

式(36)の各項の係数  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ は, 測定システムや測定サイトの地表粗度区分等への依存性を反映させることを意図する. 定数項  $\Delta$  は既知であるため  $\bar{A} \log_{10} C_p(f)$  と合わせて  $A(f)$  とする. その他の係数  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  も周波数  $f$  の関数  $B(f)$ ,  $C(f)$  とする. 最終的に風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は, 周波数  $f$ , 乱流強度  $I_u$ , 及び平均風速  $u_0$  を変数とする式(37)のとおりとした.

$$L_{\text{wind}}(f, I_u, u_0) = A(f) + B(f) \log_{10}(1 + I_u)^2 + C(f) \log_{10} u_0^2 \quad (37)$$

係数  $A(f)$ ,  $B(f)$ ,  $C(f)$  は, 測定データの重回帰分析により求める.

## 4.2 推計式の係数

前節で風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計式 (37)を導出したが、さらに各項の係数を決定する必要がある。本研究では、フィールド測定により風ノイズレベル  $L_{wind}$  データを収集し、統計的に求めることとした。

### 4.2.1 データの収集

風ノイズレベル  $L_{wind}$  は、計測に用いるシステム系の構成、測定サイト周辺の地形・地質や構築物の有無等により異なるものと考えられ、特に、地表境界層の風速と圧力変動の関係は、風工学で言う地表粗度区分(表 3-1)に応じて変わることが想定される。

また、風ノイズレベル  $L_{wind}$  データの蓄積では、背景騒音が極めて小さいことが要求されるとともに、風による影響を計測するわけであるから、測定日に低風速域から高風速域にかけ適度な強さの風が吹くエリアが適している。

都市間高速道路の周辺は一般に地表粗度区分Ⅱに該当する地域が多く、また、高速道路から発生する騒音や低周波音に関する苦情は、背景騒音の高い都市部に比べ、開けた農地の周辺に低層住宅が点在する比較的静寂な地域の住民から寄せられることが多い。これらの地域は、おおむね地表粗度区分Ⅱに該当することから、区分Ⅱのサイトを3箇所選定した。また、周辺に構築物がほとんどない秋田県大潟村の干拓地を地表粗度区分Ⅰのサイトとして、低層住宅が密集し背景騒音が比較的小さい秋田県秋田市を地表粗度区分Ⅲのサイトとして選定した。これら風ノイズレベル  $L_{wind}$  データ測定サイトの一覧を表 4-1に示す。なお、サイト E 地点は、高速道路総合技術研究所の研究施設敷地内であるため、長期間の測定が可能であり、約2週間の連続測定を行った。

#### (1) 調査サイトA 秋田県大潟村

##### 1) 調査サイトの概要

地表粗度区分ごとに調査サイトを選定した。地表粗度区分Ⅰに相当する地表状況は、日本道路協会が出版する「道路橋耐風設計便覧(平成19年度改訂版)」によると、海岸または、広大な海上を除く海上となっている。しかし海岸における低周波音の測定では、波音など背

景騒音の影響が考えられることから、海岸に近く広大な農地となっているサイトを探すこととした。

その結果、八郎潟の干拓地に位置する秋田県南秋田郡大潟村で実施することとした。測定地点は、北緯  $40^{\circ}$  東経  $140^{\circ}$  の交差点に位置し、記念碑が建てられており、その駐車場を利用して測定を行った。地図及び写真を図 4-1、周辺の土地利用状況を図 4-2に示す。周辺は水田となっており平坦かつ構築物の少ない土地である。

【測定場所】 八郎潟干拓地:経緯度交差点(北緯  $40^{\circ}$  東経  $140^{\circ}$  )

【測定時間】 2013年10月2日23時22分～2013年10月3日6時

【位置】 図 4-1, 図 4-2参照

【測定機器の配置】

測定機器の配置は、背景騒音が小さく、風が妨げられない地上とし、当該サイトでは、当初開発した3次元超音波風速計で構成された風ノイズレベル計のほか、その後開発した2次元超音波風速計を採用したシステムを配置し、風ノイズデータの収集を行った。

図 4-3にシステム構成を示す。

【測定系統図】

測定系統を図 4-4に示す。データは、2次元及び3次元風ノイズレベル計に内蔵されているMMCカードに収録すると共にバックアップとしてデータレコーダ(DA-20)にも収録を行った。

## 2) サイトAにおける過去の風況

調査に先立ち、サイトA付近における過去の風況を、気象庁が公開しているアメダスデータをもとに整理して図 4-5に示す。八郎潟(大潟)のアメダスデータによると、2012年10月の10分間平均風速の日平均値は  $0.9\sim 7.2\text{m/s}$ 、10分間平均風速の日最大値は  $2.5\sim 11.2\text{m/s}$ 、最大瞬間風速は  $20.8\text{m/s}$  となっており、比較的風速が高い地域である。

また、このサイトの10月は、風速が高い日が連続して出現する傾向を示している。

したがって、例年どおりの風況であるならば、10月に調査を実施することにより、低風速域から比較的高風速域のデータまで得られる可能性が高いものと判断し、調査を行った。



### 3) 調査結果

音圧レベル(O.A)の時刻歴波形を図 4-6に、1 秒間平均風速の時刻歴波形を図 4-7に、乱流強度の時刻歴波形を図 4-8に示す。

1 秒間平均風速の時刻歴波形によると、1 秒間の平均風速は 0.0～8.2m/s となっており、適度に低風速から高風速を記録している。

また、音圧レベルの時刻歴波形及び 1 秒間平均風速の時刻歴波形によると、1 秒間の平均風速と音圧レベルの時刻歴の波形は、類似傾向にあることが確認できる。

平均風速と音圧レベルの相関を図 4-9に、乱流強度と音圧レベルの相関を図 4-10に、平均風速と乱流強度の相関を図 4-11に示す。

平均風速と音圧レベルの相関によると、調査期間中は、0.0～8.2m/s の適度な風が吹いており、1 秒間平均風速の上昇に伴い、音圧レベルも高くなる傾向を示している。

また、風速 0～1m/s 間の音圧の最低値は約 50dB となっており、当該サイトの背景騒音レベルに相当するものと考えられる。

一般に、低風速の領域においては、乱流強度が高くなることが知られている。しかし、当該サイトの調査結果である平均風速と乱流強度の相関によると、低風速域であっても、乱流強度のばらつきは小さい。これは、当該サイトは地表粗度区分Ⅰで、地形の起伏や建物等の構築物が少なく、風の乱れが小さいことによる結果と考える。

調査時間帯の中から、3つの時間帯を抽出し、1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの分析を行った結果は以下のとおりである。

図 4-12に 0 時 00 分からの 60 秒間において、音圧レベルを 1 秒間ごとに周波数分析を行った結果を示す。また、同じく 2 時 00 分からの 60 秒間における分析結果を図 4-13に、4 時 00 分からの 60 秒間における分析結果を図 4-14に示す。

## (2) 調査サイト B 秋田県秋田市

### 1) 調査サイトの概要

当該サイトは、株式会社建設環境研究所の秋田連絡事務所で、秋田市内の低層住宅街に位置し、地表粗度区分Ⅲに相当する。

【測定場所】 秋田県秋田市旭川南町

【測定時間】 2013年10月3日23時～2013年10月4日6時

【位置】 図4-15参照

【測定機器の配置】

本測定では、背景騒音が小さく、風が妨げられない地上に測定点を設けた。当該サイトでは、当初開発した3次元超音波風速計で構成された風ノイズレベル計のほか、その後開発した2次元超音波風速計を採用したシステムを配置し、風ノイズデータの収集を行った。図4-16にシステム構成を示す。

【測定系統図】

測定系統を図4-17に示す。データは2次元及び3次元風ノイズレベル計に内蔵されているMMCカードデータを基本とし、バックアップとしてDA-20に記録した。

## 2) サイトBにおける過去の風況

調査に先立ち、サイトB付近における過去の風況を、気象庁が公開しているアメダスデータをもとに整理して図4-18に示す。秋田市のアメダスデータによると、2012年10月の10分間平均風速の日平均値は1.9～7.4 m/s、10分間平均風速の日最大値は3.7～15.5 m/s、最大瞬間風速は27.4 m/sとなっており、比較的風速域が広い地域である。

また、このサイトの10月は、風速が高い日が連続して出現する傾向を示している。

したがって、例年どおりの風況であるならば、10月に調査を実施することにより、比較的高風速域のデータが得られる可能性が高いものと判断し、調査を行った。

## 3) 調査結果

音圧レベル(O.A)の時刻歴波形を図4-19に、1秒間平均風速の時刻歴波形を図4-20に、乱流強度の時刻歴波形を図4-21に示す。

1秒間平均風速の時刻歴によると、1秒間の平均風速は0.0～4.2m/sとなっており、想定していた5m/sに若干満たない風速記録であった。

また、音圧レベルの時刻歴及び1秒間平均風速の時刻歴によると、1秒間の平均風速と音圧レベルの時刻歴の波形は、類似傾向にあることが確認できる。

平均風速と音圧レベルの相関を図4-22に、乱流強度と音圧レベルの相関を図4-23に、平均風速と乱流強度の相関を図4-24に示す。

## 4.2 推計式の係数

---

平均風速と音圧レベルの相関によると、1 秒間平均風速の上昇に伴い、音圧レベルも高くなる傾向を示している。

また、風速 0~1m/s 間の音圧の最低値は 50dB を若干下回っておりサイト B の背景騒音レベルと考えられる。

平均風速と乱流強度の相関によると、平均風速が小さくなると、乱流強度の分布が大きくなるという傾向がみられる。これより風ノイズは、低風速時には乱流強度の寄与が大きくなることが理解される。

サイト B における音圧レベルの周波数特性として 23:00 からの 60 秒間の分析結果を図 4-25に、同じく 1:00 からの 60 秒間の分析結果を図 4-26に、3:00 からの 60 秒間を図 4-27に示す。

### (3) 調査サイトC 千葉県船橋市

#### 1) 調査サイトの概要

千葉県船橋市の日本大学工学部二和校地をサイトCとして選定した。「道路橋耐風設計便覧(平成 19 年度改訂版)」によると、樹木や低層建築物が散在している地域にあたる地表粗度区分Ⅱに相当する地域である。

【測定場所】 千葉県船橋市二和西 1 丁目 2 番

【測定時間】 2013 年 10 月 11 日 22 時~2013 年 10 月 12 日 6 時

【位置】 図 4-28, 図 4-29参照

【測定機器の配置】

測定機器は、背景騒音が小さく、風が妨げられないグラウンドの中央付近に設置した。また、データ収録機器は、風雨を避けるためコンテナ箱(折りたたみ式、容量 75L)に入れ測定を行った(図 4-30)。なお、測定員は監視小屋で待機し、定期的に機器の動作チェックを行った。

【測定系統図】

測定系統を図 4-31に示す。データの収録はサイト B 同様に、2 次元及び3次元の風ノイズレベル計に内蔵されている MMC カードデータを使用することを基本としたが、2 つのシステムの音圧比較のため、音圧信号を DA-20 に記録した。また、3 次元風速計と音圧(1系統)の同期信号を DA-20 に記録した。

## 2) サイトCにおける過去の風況

サイトC付近における過去の風況を、気象庁が公開しているアメダスデータをもとに整理し図 4-32に示す。

千葉県船橋市のアメダスデータによると、2012年10月の10分間平均風速の日平均値は1.0～3.4m/s、10分間平均風速の日最大値は2.0～8.5m/s、最大瞬間風速は19.5m/sであった。サイトA及びサイトBとは異なり比較的風速が低い地域である。

しかし、瞬間最大風速は、1ヶ月を通し約10m/sとなっており、十分な風速が得られるものと判断した。

## 3) 調査結果

音圧レベル(O.A)の時刻歴波形を図 4-33に、1秒間平均風速の時刻歴を図 4-34に、乱流強度の時刻歴波形を図 4-35に示す。

1秒間平均風速は0.7～14.1m/sであり、適度に低風速域から高風速域に至るデータが得られている。特に10m/s以上の高風速域のデータは貴重である。

1秒間の平均風速と音圧レベルの時刻歴波形は類似傾向であることが確認できる結果である。

平均風速と音圧レベルの相関を図 4-36に、乱流強度と音圧レベルの相関を図 4-37に、平均風速と乱流強度の相関を図 4-38に示す。

サイトCにおける音圧レベルの周波数特性のうち23:00からの60秒間を図 4-39に、1:00からの60秒間を図 4-40に、3:00からの60秒間を図 4-41に示す。

## (4) サイトD 宮崎県高原町

### 1) 調査サイトの概要

調査サイトDは、宮崎県西諸県郡高原町とした。高原町は、宮崎県の西南部、霧島山を境に鹿児島県と接する静かな山あい位置する。高原町の面積は85.38km<sup>2</sup>であり、およそ50%を山林原野が占めているが測定サイト周辺は低層住宅と農地が広がり平坦かつ

## 4.2 推計式の係数

---

障害物の少ない土地で、サイト C と同じ地表粗度区分Ⅱの地域に相当する。

【測定場所】 宮崎県西諸県群高原町蒲牟田小塚下 3551

【測定時間】 2013 年 10 月 15 日 22 時～2013 年 10 月 16 日 6 時

【位置】 図 4-42, 図 4-43 参照. 測定は図 4-43 の赤枠で示した領域で実施した。

【測定機器の配置】

背景騒音が小さく、田地の風が妨げられない位置(畦)に機器を設置し、データ収録機器はコンテナ箱(折りたたみ式, 容量 75L)に収納した。測定員は測定車に待機し、定期的に機器の動作チェックを行った(図 4-44)。

【測定系統図】

測定系統を図 4-45 に示す。データは 2 次元及び 3 次元風ノイズレベル計に内蔵されている MMC カードデータへの記録を基本とし、評価時間検討のため、2 次元風ノイズレベル計の音圧信号のみ DA-20 に記録した。

## 2) サイト D における過去の風況

調査サイトに近い気象庁が公開している宮崎県小林の 2012 年 10 月のアメダスデータを図 4-46 に示す。10 分間平均風速の日平均値は 1.0～3.9m/s, 10 分間平均風速の最大値は 2.8～8.9m/s, 最大瞬間風速は 17.3m/s であった。

## 3) 調査結果

音圧レベルの時刻歴波形を図 4-47 に、1 秒間平均風速の時刻歴波形を図 4-48 に、乱流強度の時刻歴波形を図 4-49 に示す。1 秒間平均風速は 0.7～13.6m/s であり、目標とする 5m/s を満たす風速データを得た。また、1 秒間平均風速と音圧レベルの時刻歴波形は類似傾向であることが確認できる。

平均風速と音圧レベルの相関を図 4-50 に、乱流強度と音圧レベルの相関を図 4-51 に、平均風速と乱流強度の相関を図 4-52 に示す。

サイト D における音圧レベルの周波数特性のうち 23:00 からの 60 秒間を図 4-53 に、1:00 からの 60 秒間を図 4-54 に、4:00 からの 60 秒間を図 4-55 に示す。

## (5) サイト E 滋賀県湖南市

### 1) 調査概要

サイト E 湖南市の調査概要を以下に記す。実験サイトは、株式会社高速道路総合技術研究所が滋賀県湖南市に所有する緑化技術センター内の敷地を利用した。当該サイトは、琵琶湖の南東に位置し、周辺は低層住宅と農地が広がり平坦かつ障害物の少ない土地で、地表粗度区分Ⅱに相当する地域である。

【測定位置】 滋賀県湖南市西寺 1-1-1

【測定時間】 2016年12月10日00時～2016年12月22日17時

【位置】 図 4-56参照

【測定機器の配置】

測定機器の配置は、背景騒音が小さく、風が妨げられない地上とした(図 4-57～図 4-58)。

【測定系統図】

測定データは、本体部に内蔵されている MMC カード及びデータレコーダ DA-20 に収録した(図 4-59参照)。

### 2) サイト E における過去の風況

調査に先立ち、サイト E 付近における過去の風況を、気象庁が公開しているアメダスデータをもとに整理して図 4-60示す。実験サイトに近い彦根市の気象データ(2015年12月)では、10分間平均風速の日平均値は 1.1～6.4m/s、10分間平均風速の日最大値は 2.7～12.9m/s、最大瞬間風速は 19.3m/s となっており、比較的風速が高い地域である。

また、このサイトの12月は、風速が高い日が連続して出現する傾向を示している。

したがって、例年とおりの風況であるならば、12月に調査を実施することにより、比較的高風速域のデータが得られる可能性が高いとものと判断し、調査を行った。

### 3) 調査結果

音圧レベルの時刻歴波形を図 4-61～図 4-66に, 1 秒間平均風速の時刻歴波形を図 4-67～図 4-72に, 乱流強度の時刻歴波形を図 4-73～図 4-78に示す. 1 秒間平均風速は 0.0～9.8m/s であり, 目標とする 5m/s を満たす風速記録を得た. また, 1秒間平均風速と音圧レベルの時刻歴は類似傾向であることが確認できる結果であった.

平均風速と音圧レベルの相関を図 4-79～図 4-84に, 乱流強度と音圧レベルの相関を図 4-85～図 4-90に, 平均風速と乱流強度の相関を図 4-91～図 4-96に, 音圧レベルの周波数特性を図 4-97～図 4-114に示す.

## 4.2.2 風ノイズレベル収集データ

各サイトにおける評価時間 1 秒間の平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の關係を図 4-115 に示す。ただし、サイト E については、測定時間が長く、作図ソフトウェアの適用可能上限数量を超過するため、14 秒間隔でデータを抽出し作図した。

散布図によると、各サイトによって測定時の風速分布は異なっている。サイト A 及びサイト E の平均風速  $u_0$  が 0~10m/s 程度であったのに対し、サイト B の平均風速  $u_0$  は、最高で 4.7m/s となっており高風速域のデータを取得できなかった。一方、サイト C と D の平均風速  $u_0$  の最大値は約 14m/s となっており、高風速域まで取得できているものの、逆に、0m/s 付近の低風速域のデータが少ない。測定データ全体を俯瞰すると、平均風速  $u_0$  が小さい低風速域では乱流強度  $I_u$  の分布の幅が大きくなる傾向にあり、乱流強度  $I_u$  の値が大きいデータが存在する。式(37)によれば、平均風速  $u_0$  が小さい状況であっても乱流強度  $I_u$  が大きい場合は、風ノイズレベル  $L_{wind}$  が大きくなる可能性があることが分かる。したがって測定においては、例え平均風速  $u_0$  が小さい場合でも、乱流強度  $I_u$  の状況によっては、風による影響が考えられる。そのため、乱流強度  $I_u$  にも十分に配慮し測定を行う必要があることが改めて確認された。

図 4-116 に、各サイトにおける平均風速  $u_0$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  の關係を示す。なお、この図においてもソフトウェアの制約によりサイト A~D は 30 秒間隔、サイト E は 600 秒間隔でデータを抽出し作図している。

一般に、平均風速  $u_0$  の低下とともに風ノイズも小さくなるものと考えられる。しかし、図 4-116 の平均風速  $u_0$  が約 2m/s 以下の風速域では、低周波音圧レベルが下がる傾向（赤色破線）を示している。これは、背景騒音による影響と考えられ、分析対象データから除外することが望ましいと判断した。

一方、青色実線は、サイト A において平均風速  $u_0$  に比例して風ノイズレベル  $L_{wind}$  が変化している傾向にあることから、その傾きを示しており、同じ傾きの直線を他のサイトにも図示したものである。これらの傾向を見ると、風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値は、背景騒音に影響されない速度域において地表粗度区分に関わらず一定の傾きで変化している。

## 4.2.3 背景騒音データの除外

前項で示したとおり、風ノイズレベル  $L_{wind}$  データの蓄積にあたり、できる限り背景騒音の



## 4.2 推計式の係数

---

小さいサイトを選定したが、完全に背景騒音の影響を除外することは出来ていない。そこで、測定した全サイトのデータを用い、評価時間 1 秒間によるサイト別の風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  と平均風速  $u_0$  の関係を 1/3 オクターブバンド中心周波数ごとに整理し、背景騒音の影響範囲の推定を試みた。検討にあたり、平均風速  $u_0$  の集計範囲を 1m/s 未満は 0.1m/s ごとに、平均風速  $u_0$  1m/s 以上は 1m/s ごとに細分化するとともに、範囲内の風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  を算術平均しグラフ化した。

その一例を図 4-117 に示す。なお、選択した 4 周波数帯は、以下の理由によるものである。風による低周波音への影響は、低周波数帯ほど大きい [43] [15] [44] とされているため 1/3 オクターブバンド中心周波数 1.0Hz を選択した。また、一般に道路橋から発生する低周波音の卓越周波数は、3.15~5Hz 程度及び 10~20Hz に現れるとの既往研究 [46] [47] [48] から 4.0Hz 及び 16Hz を選択した。さらに、低周波音における比較的高い周波数帯の例として 63Hz を選択した。風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  を周波数ごとに算術平均し図化することにより、平均風速  $u_0$  の変化とともに風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  も変化する領域と平均風速  $u_0$  が変化しても、ほぼ、一定の音圧を示す風速域があることが図 4-116 と比較し、より鮮明に確認できる。前者は、風ノイズが主体的となっている風速域、後者は、風ノイズが背景騒音に埋没している風速域と考えられる。

背景騒音に埋没している低風速域の音圧レベルは、サイトごとに異なっている。一方、風ノイズが主体的となる高風速域の傾きやレベルのばらつきは、サイトによる違いが少ない。また、風ノイズが主体的となり始める風速は、どのサイトにおいても高周波数帯ほど高風速側にシフトする傾向にある。これらの状況から当初、地表粗度区分の違いにより風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  は異なるものと考えていたが、平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  により発生する風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  は地表粗度区分によらないと仮定し、以降は、各サイトの全測定データを一本化し背景騒音の除外方法を検討する。測定した全データを活用し、平均風速  $u_0$  と風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  の関係を周波数ごとに整理するとともに、風速を細分化し移動平均した結果の一例を図 4-118 に示す。サイト別に平均風速  $u_0$  と風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  の関係を示した図 4-117 と同様で、横軸の平均風速  $u_0$  を対数でグラフ化すると風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  は、概ね直線(破線)で表される。一方、風ノイズが背景騒音に埋没する風速域は、この直線と乖離し、風速による依存性が小さい傾向を示している。

本論文では、直線から乖離する低風速域は、背景騒音が支配的な領域と考え、これら进行分析に用いるデータから除くこととし、直線上に分布する速度域のデータ(黒太線)を風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の各係数算出のために使用した。

### 4.3 風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の係数

前述した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式(37)における係数  $A(f)$ ,  $B(f)$ ,  $C(f)$  を決める必要がある。本論文では、これまで蓄積してきた各サイト（表 4-1参照）におけるフィールド測定データを活用し、重回帰分析により 1/3 オクターブバンド中心周波数ごとに係数  $A(f)$ ,  $B(f)$ ,  $C(f)$  の計算式を求めることとした。

重回帰分析結果をグラフ化し、図 4-1 1 9 に示す。図より、30Hz 帯以上で各係数に若干のバラツキが見られるものの、ほぼ直線式で回帰できそうである。

そのため、グラフにプロットしたそれぞれの係数をさらに回帰分析により周波数  $f$  の関数として数式化し、その結果を「Calc」と称し図に示した。

係数  $A(f)$ ,  $B(f)$  及び  $C(f)$  を数式で表すと式(38)~式(40)となる。

$$A(f) = 49.6 - 20.7 \log_{10} f \quad (38)$$

$$B(f) = 78.9 - 22.5 \log_{10} f \quad (39)$$

$$C(f) = 19.6 + 2.6 \log_{10} f \quad (40)$$

このように、係数を求める数式の確定に伴い低周波音測定と同時に風速の計測を行うことにより風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計が可能となり、目的音  $L_{sound}$  に対する風ノイズの影響を判定する手法として使用できる見込みが得られた。

## 4.4 風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の精度検証

### 4.4.1 全サイトデータ活用による推計精度検証

風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の導出と各項における係数を求める数式の確定により風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計が可能となった。しかし、本論文で導き出した数式により推計される値が、どの程度測定値と整合するのか

を検証する必要がある。

ここでは、これまで蓄積してきた各サイト(表 4-1 参照)におけるフィールド測定データを活用し、低周波音計出力(以下「測定値」と記す)  $L_{out}$  と、同時測定データの平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  から推計した風ノイズレベル  $L_{wind}$  との対応を確認するため相関分析を行った。その一例として、4 つの周波数帯における散布図を図 4-120 に示す。回帰直線の傾きは 0.94~1.08 で、測定値と推計値が一致する傾き 1.0 に非常に近い結果となった。また、切片は、0.866~0.892 となっており、強い正の相関がみられている。

これらの全サイトデータによる推計精度検証結果より、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は、測定値  $L_{out}$  と非常に良い対応を示していることから、提案した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、十分実用に耐えうる推計精度と考えられる。

### 4.4.2 個別サイトデータによる推計精度検証

収集したサイト A~E のフィールドデータは、風ノイズレベル  $L_{wind}$  を把握する目的で行ったもので、基本的に橋梁等から発生する低周波音、すなわち目的音  $L_{sound}$  は含まれていない。また、背景騒音も出来るだけ少ない地域を選定しているため風ノイズレベル  $L_{wind}$  の推計値と測定値の整合性を検証するデータとして適している。

サイト A, B, C の風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値と推計値を、評価時間 1 秒間のデータにより測定した全時間帯の等価音圧レベル  $L_{eq}$  で比較し、図 4-121~図 4-123 に示す。

一般に、道路交通に伴う騒音の分析や評価を行うための物理量として等価騒音レベル ( $L_{Aeq}$ ) や時間率騒音レベル ( $L_{AN}$ ) が使われる。 $L_{Aeq}$  は、道路交通騒音のように測定時間内の騒音レベルが時間とともに不規則かつ大幅に変化している場合に、測定時間内でこれと等しい平均二乗音圧を与える連続定常音の騒音レベルである。一方、 $L_{AN}$  は、測定時間内で変動す

騒音レベルが、あるレベルを越える時間の合計が測定時間  $T = t_2 - t_1$  の  $N\%$  に相当するとき、その騒音レベルを  $N\%$  時間率騒音レベルといい  $L_{AN}$  と表す。例えば、振動規制法では、道路交通振動の要請限度として  $80\%$  レンジの上端値にあたる  $L_{10}$  が規制値として採用されている。したがって本論文においても、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の整合性を検証するうえでの物理量は、低周波音の評価であるため聴感補正を行わない等価音圧レベル  $L_{eq}$  と時間率レベル  $L_N$  を採用する。

また、評価の目安は、日本音響学会から公表されている道路交通騒音の予測モデル [49] を参考とする。このモデルでは、等価騒音レベル ( $L_{Aeq}$ ) における予測値と測定値の差の標準偏差は、道路構造により異なるものの、 $1.7\sim 2.9\text{dB}$  であると報告されている。このモデルは、我が国における環境影響評価などにも採用されていることに鑑み、本論文においては、O.A 値で  $\pm 3\text{dB}$  が実用上問題の無い誤差(以降「許容誤差」と記す)として評価を行うこととする。

サイト A (図 4-1 2 1) は、比較的 background 騒音の小さいサイトであったが、測定値(実線)の  $50\text{Hz}$  帯に background 騒音と思われるピークが表れている。また、測定時は  $0.0\sim 8.2\text{m/s}$  の適度な風が吹いていたサイトである。

風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値と推計値の対応を俯瞰すると、測定値が推計値を全体的に上まわっているものの比較的良い対応である。風の影響が大きい低周波数帯域に着目すると、 $4.0\text{Hz}$  以下の帯域では最大でも  $-1.8\text{dB}$  の差である。また、差が最も大きい周波数帯は  $12.5\text{Hz}$  で  $-4.8\text{dB}$  となっている。O.A 値を計算すると、測定値は  $84.6\text{dB}$ 、推計値は  $84.1\text{dB}$  となり、その差は  $-0.5\text{dB}$  で許容誤差の  $\pm 3\text{dB}$  以内に収まっている。

サイト B (図 4-1 2 2) は、低層住宅が建ち並ぶ市街地で、測定当時の風速範囲は、 $0.0\text{m/s}\sim 4.7\text{m/s}$  である。

当該サイトは市街地に位置するため background 騒音が大きいと考えられることと風速が小さく風ノイズレベル  $L_{wind}$  も比較的小さいことから測定値の  $20.0\text{Hz}$  以上の周波数帯域では、background 騒音を計測しているものと推察される。従って、background 騒音が主体的となっている周波数帯域を除き  $16.0\text{Hz}$  以下の周波数帯域で風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値と推計値の対応を比較すると、サイト A とは逆に推計値の方が測定値を上まわっており、最も誤差の大きい周波数帯は  $1.0\text{Hz}$  で  $+4.0\text{dB}$  の誤差である。風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値と推計値の O.A 値を比較すると、測定値は  $61.1\text{dB}$ 、推計値は  $64.1\text{dB}$  となり、その差は  $+3\text{dB}$  で許容誤差の  $\pm 3\text{dB}$  以内に収まっている。

サイト C (図 4-1 2 3) は、地表粗度区分 II に相当し、風速も  $0.7\text{m/s}\sim 14.1\text{m/s}$  と低風速から高風速のデータが得られたサイトである。風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値と推計値の対応は、サ

#### 4.4 風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の精度検証

---

イト A と同様で測定値が推計値を全体的に上回る傾向を示し 20.0Hz 帯で最大-3.8dB の差である。O.A 値を比較すると、測定値は 93.1dB、推計値は 92.9dB となり、その差は-0.2dB で許容誤差の±3dB 以内に収まっている。

以上は、全測定時間帯による長時間における評価であるが、一般的な環境測定では、10 分間程度の時間で評価を行うことが多い。そこで、サイト A において任意に抽出した 10 分間のデータにより比較した結果を図 4-124及び図 4-125に示す。

抽出した時間帯は、平成 25 年 10 月 3 日の午前 3 時 30 分から 40 分迄の 10 分間である。この時の平均風速  $u_0$  は 4.5m/s であった。

図 4-124の等価音圧レベル  $L_{eq}$  において、風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値と推計値の対応を俯瞰すると、サイト A における長時間評価(図 4-121)と同様で、測定値の方が推計値と比較し音圧レベルが高い傾向を示している。定量的な評価では、誤差が最も大きい周波数帯は 10.0Hz と 16.0Hz で-5.0dB の誤差である。O.A 値を比較すると、測定値は 88.1dB、推計値は 86.8dB となり、その差は-1.3dB で許容誤差の±3dB 以内に収まっている。

一方、図 4-125は 5%時間率レベル(90%レンジの上端値)  $L_5$ を示しており、音圧レベルが高い時間帯での分析結果である。風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定値と推計値の誤差が最も大きい周波数帯は、12.5Hz 帯及び 16.0Hz 帯で-5.6dB の誤差となっている。O.A 値を比較すると、測定値は 94.6dB、推計値は 92.1dB となり、その差は-2.5dB で許容誤差の±3dB 以内に収まっている。

以上、個別サイトにおける検証結果でも、風ノイズレベル  $L_{wind}$ 測定値と推計値の O.A 値は、すべての検討結果において許容誤差の±3dB 以内に収まっていることから判断し、風ノイズレベル  $L_{wind}$ 式は、十分実用に適用可能な推計精度にあるものと考えられる。

## 4.5 まとめ

本章では、流れ場の風速と圧力の關係から風ノイズ推計式を導出し、これらに含まれる係数を、風ノイズフィールド測定値における、平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の關係から統計的な回帰によって求める風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を提案した。

次に、提案した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の妥当性の検証を目的とし、推計式を構築するために行った地表粗度区分の異なるサイト A～サイト C における測定値と風ノイズ推計値との整合性を検討した。

その結果、本章の成果として以下の知見を得た。

- 1) 流れ場の風速と圧力の理論的關係から導出した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、周波数  $f$ 、乱流強度  $I_u$  及び平均風速  $u_0$  を変数とする数式で表される。
- 2) 平均風速  $u_0$  と低周波音圧レベルの關係を評価時間1秒、平均風速  $u_0$  の範圍を平均風速 1.0m/s を境に 0.1m/s 及び 1m/s で細分化し分析することにより、背景騒音が主体的な風速域と風ノイズが主体的な風速域に区分することができ、これにより、背景騒音の影響が少ないデータを抽出することが可能である。
- 3) 1秒間評価により複数のサイトにおける平均風速  $u_0$  と低周波音圧レベルの關係を分析した結果、風ノイズが主体的となる風速域の平均風速  $u_0$  に対する低周波音圧レベルの比(傾き)はほぼ一定である。また、風ノイズが主体となり始める風速は、周波数が高くなるほど高風速側にシフトする。
- 4) 風ノイズレベル推計式の係数は、背景騒音が影響している測定データを除外し、重回帰分析により求めることが可能で、最終的には周波数  $f$  を変数とする対数の一次式で表される。
- 5) 導出した係数により推計した風ノイズレベルと係数を求めるために用いた全サイトのフィールド測定値による相関分析を行った結果、1.0Hz、4.0Hz 及び 16.0Hz の周波数帯において相関係数は 0.8 以上で強い正の相関、63.0Hz 帯は相関係数 0.691 で正の相関となり、推計式の妥当性が確認された。
- 6) 地表粗度区分 I のサイト A、区分 III のサイト B 及び区分 II のサイト C で測定したフィールド測定データを用い、各フィールドにおける風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値と推計値を全時間帯の等価音圧レベル O.A 値で比較した。その結果、測定値と推計値の差は、サイト A では-0.5dB、サイト B では+3dB、サイト C では-0.2dB となり各サイトともに許容

#### 4.5 まとめ

---

誤差に設定した $\pm 3.0\text{dB}$ 以内であった。

- 7) 地表粗度区分 I のサイト A において風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  測定値と推計値を評価時間 10 分間による等価音圧レベル O.A 値で比較した結果, 測定値と推計値の差は,  $-1.3\text{dB}$  で許容誤差に設定した $\pm 3\text{dB}$  以内の誤差であった。

以上の結果より, 測定値と流れ場の風速と圧力の理論的關係から導出した風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は, 測定値と推計値の相関分析において強い正の相関又は正の相関を示すと共に, 個別サイトにおける O.A 値でも許容誤差として設定した $\pm 3\text{dB}$  以内に収まっていることから, 総合的に判断し, 十分実用に適用可能な推計精度にあるものといえる。

## 4.6 図表

表 4-1 フィールドデータ収集サイト

サイト名	場 所	測定開始日時	測定終了日時	1秒間平均風速範囲[m/s]	地表粗度区分
A	秋田県大湯村	2013年10月02日 23時	2013年10月03日 06時	0.0 ~ 8.6	I
B	秋田県秋田市	2013年10月03日 22時	2013年10月04日 06時	0.0 ~ 4.7	III
C	千葉県船橋市	2013年10月11日 22時	2013年10月12日 06時	0.7 ~ 14.1	II
D	宮崎県高原町	2013年10月15日 22時	2013年10月16日 06時	0.3 ~ 13.9	II
		2016年12月09日 00時	2016年12月10日 00時	0.0 ~ 9.7	II
E	滋賀県湖南市	2016年12月10日 00時	2016年12月11日 00時	0.0 ~ 8.4	II
		2016年12月11日 00時	2016年12月12日 00時	0.0 ~ 7.7	II
		2016年12月14日 00時	2016年12月15日 00時	0.0 ~ 9.8	II
		2016年12月17日 00時	2016年12月18日 00時	0.1 ~ 8.4	II
		2016年12月22日 00時	2016年12月23日 00時	0.0 ~ 9.5	II



#### 4.6 図表

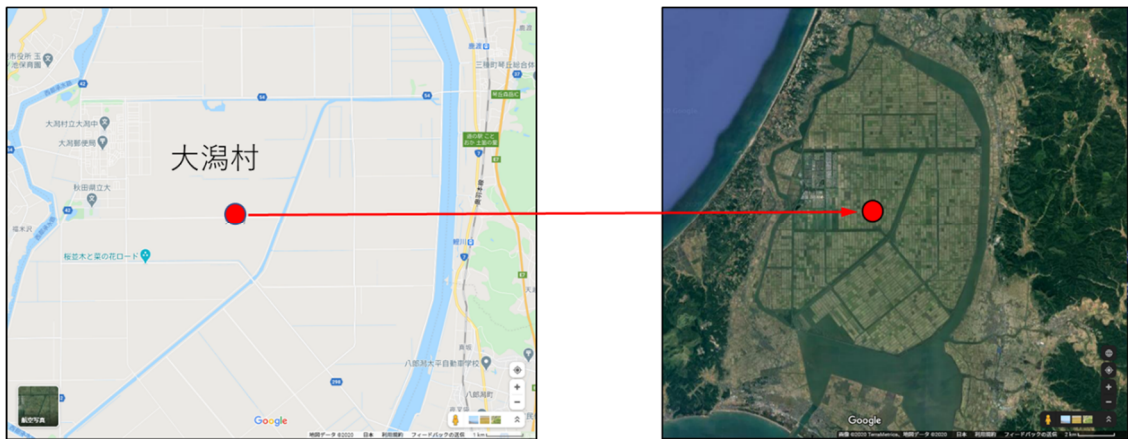


図 4-1 サイト A の地図及び写真



図 4-2 サイト A の土地利用状況

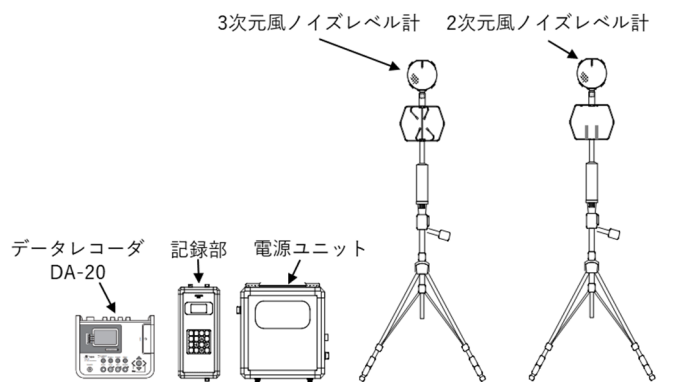


図 4-3 測定機器配置図 (サイト A)

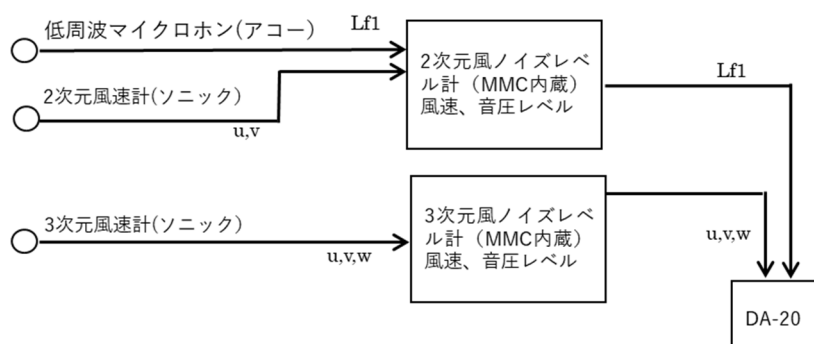


図 4-4 測定系統図 (サイト A)

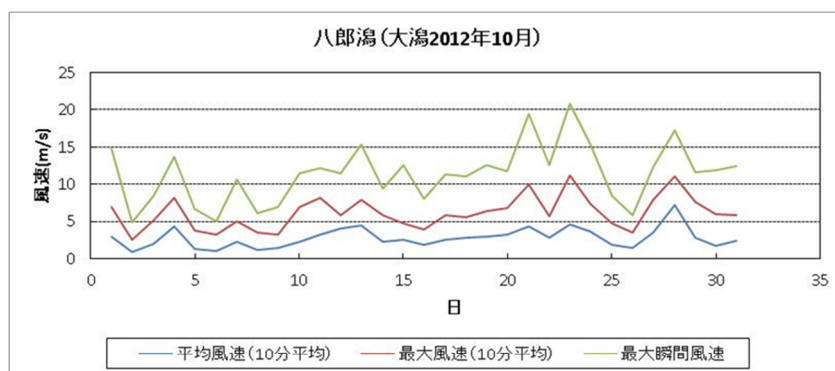


図 4-5 アメダスデータ (八郎瀧) による風況

#### 4.6 図表

---

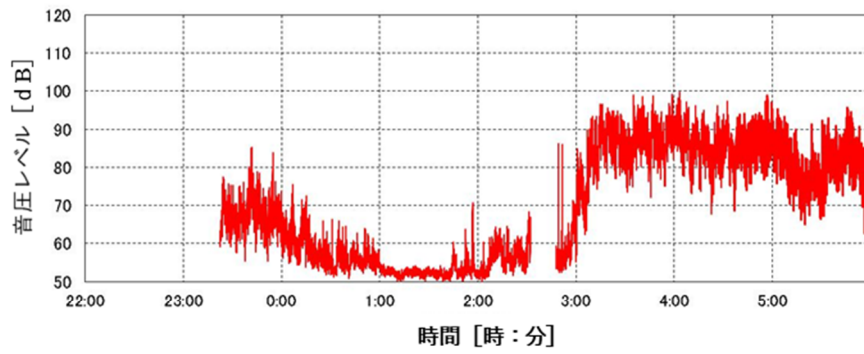


図 4-6 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト A)

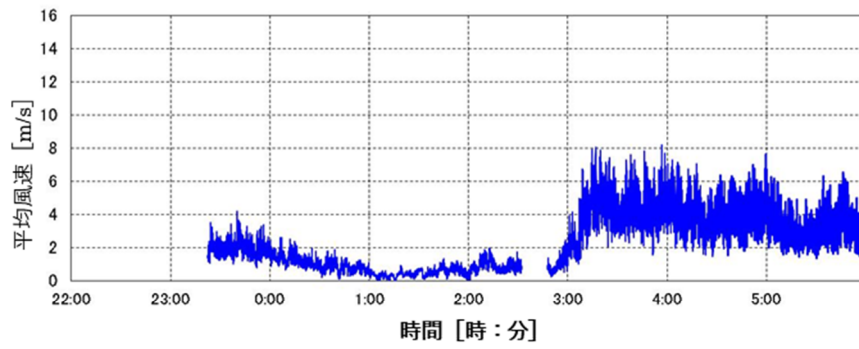


図 4-7 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト A)

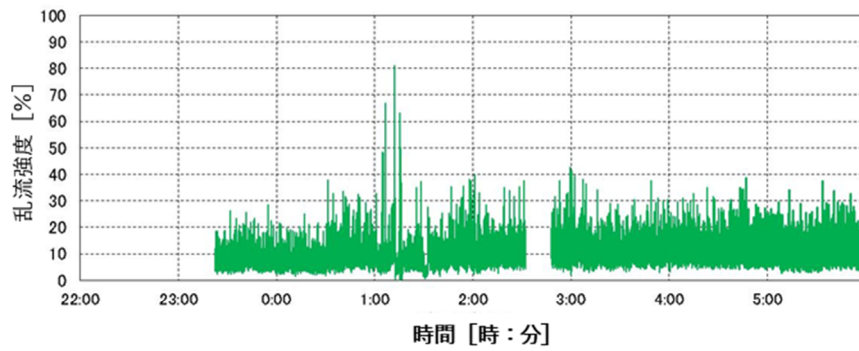


図 4-8 乱流強度の時刻歴波形 (サイト A)

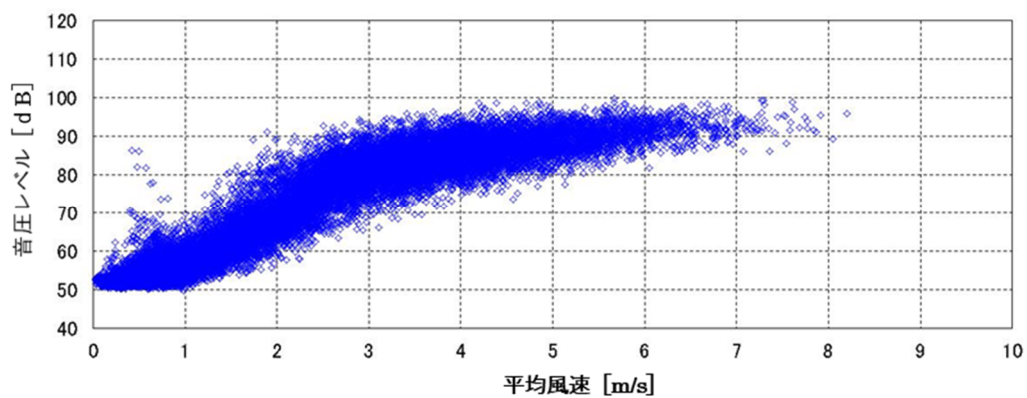


図 4-9 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト A)

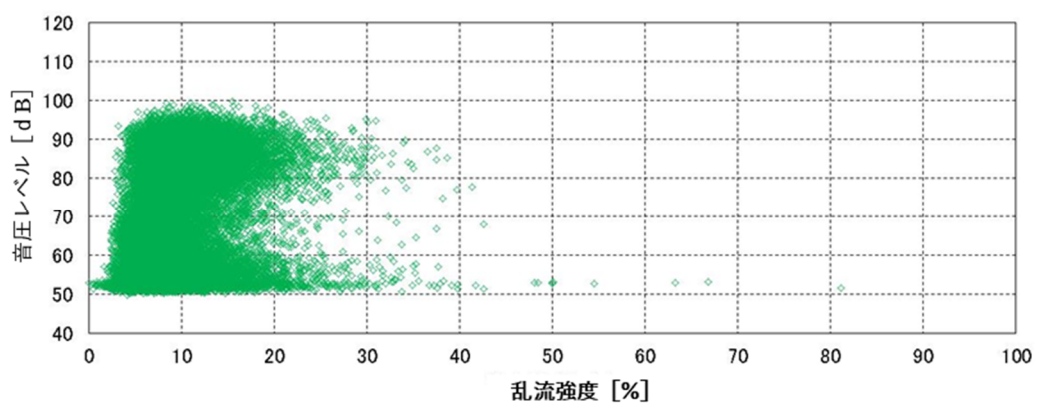


図 4-10 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト A)

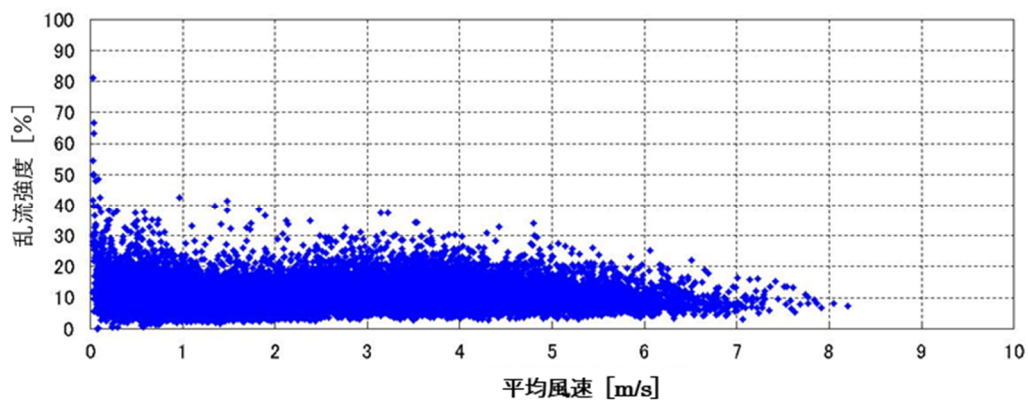


図 4-11 平均風速と乱流強度の相関 (サイト A)

4.6 図表

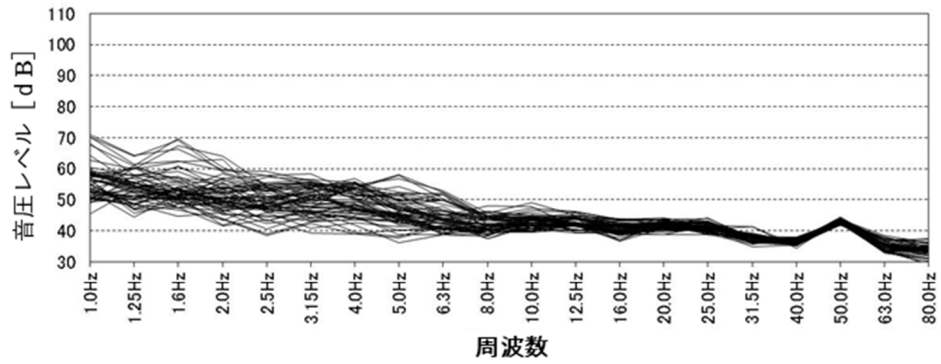


図 4-1 2 サイト A 音圧レベルの周波数特性(0:00 から 60 秒間)

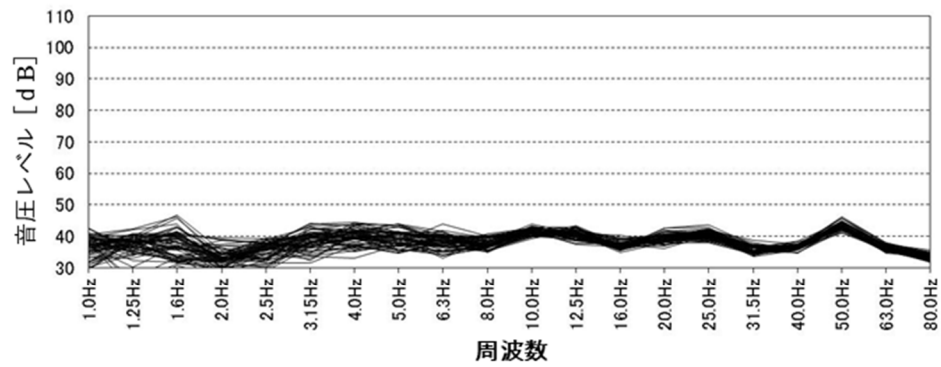


図 4-1 3 サイト A 音圧レベルの周波数特性(2:00 から 60 秒間)

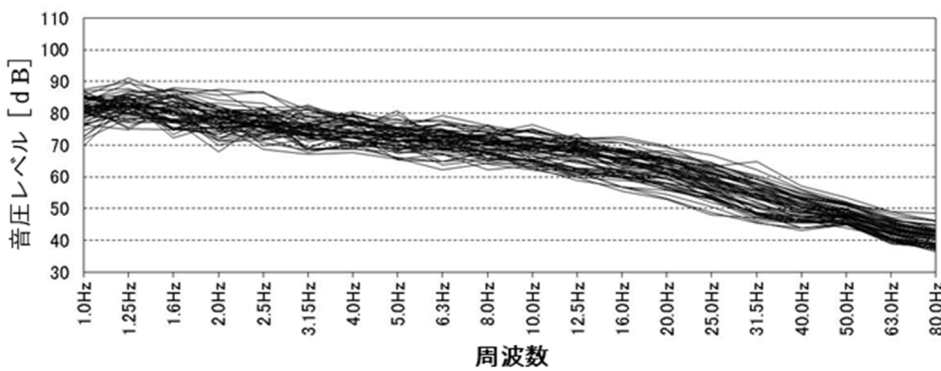


図 4-1 4 サイト A 音圧レベルの周波数特性(4:00 から 60 秒間)

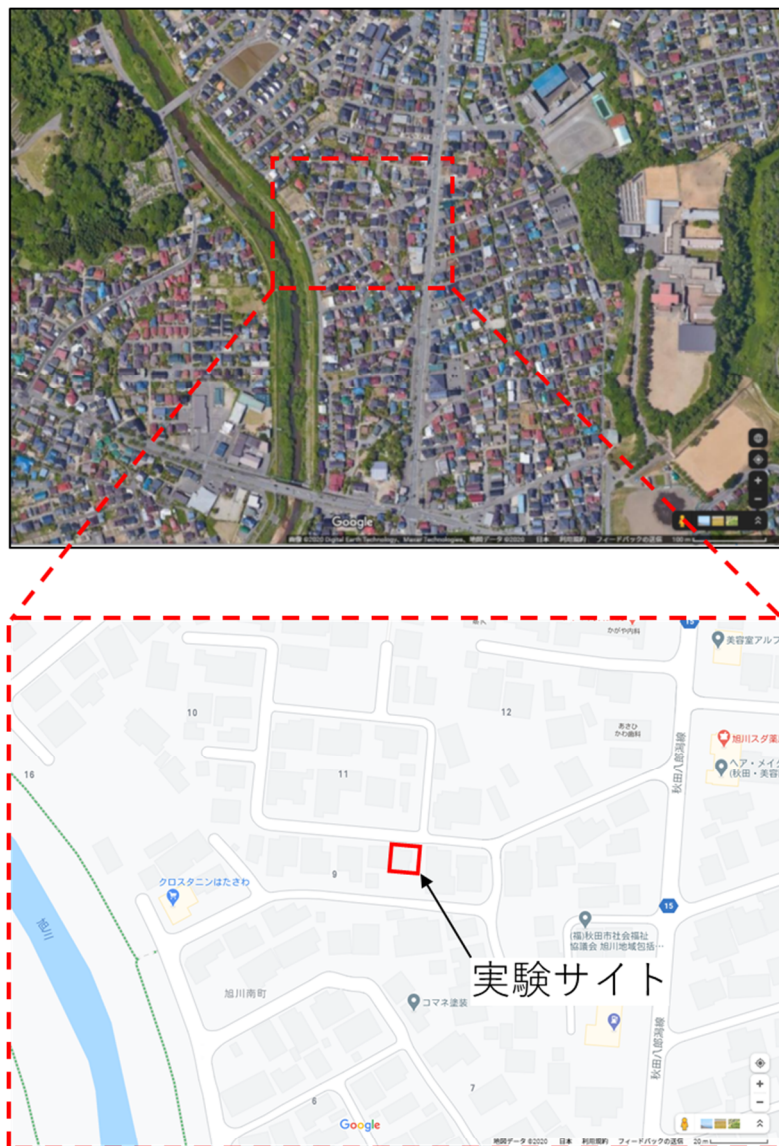


図 4-15 サイト B の写真及び位置図

4.6 図表

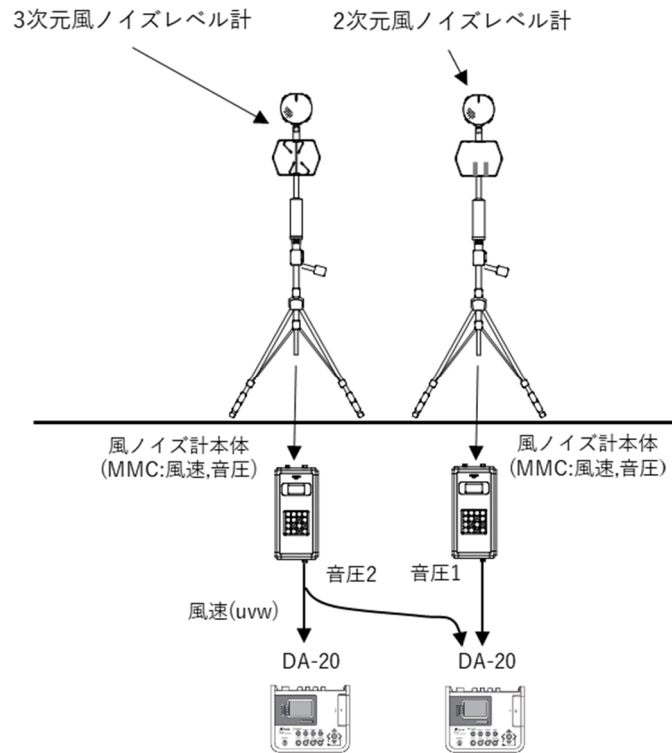


図 4 - 1 6 測定機器配置図 (サイト B)

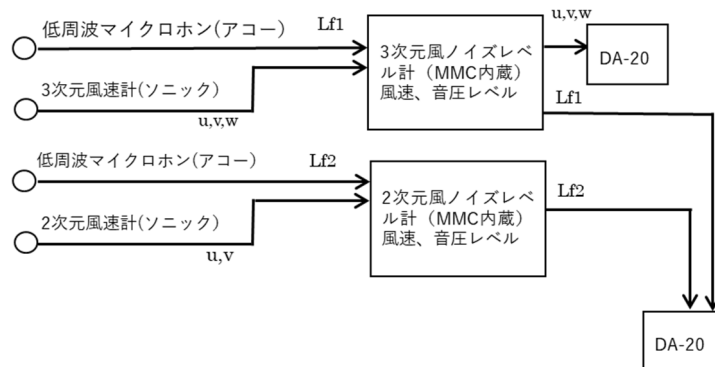


図 4 - 1 7 測定系統図 (サイト B)

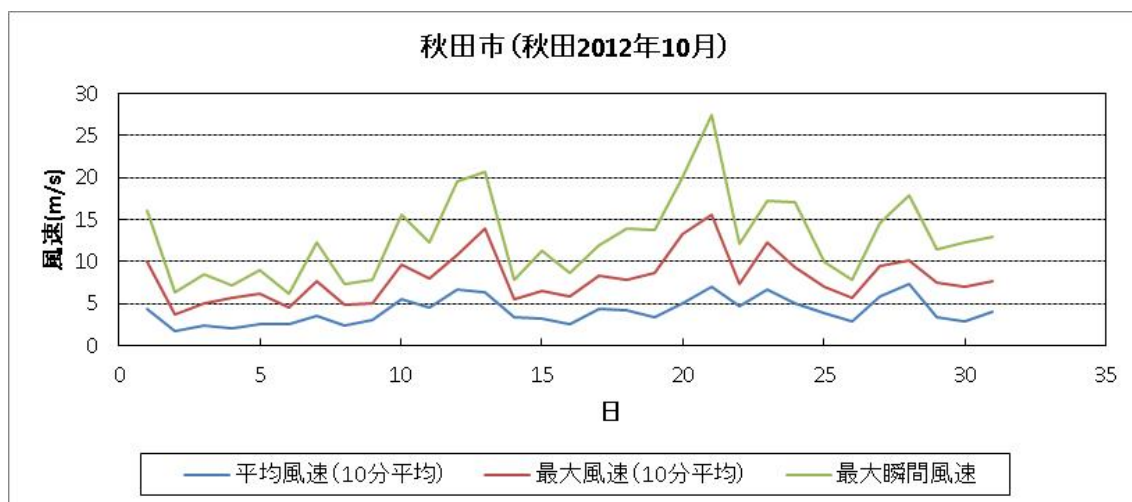


図 4-18 アメダスデータ(秋田市)による風況



4.6 図表

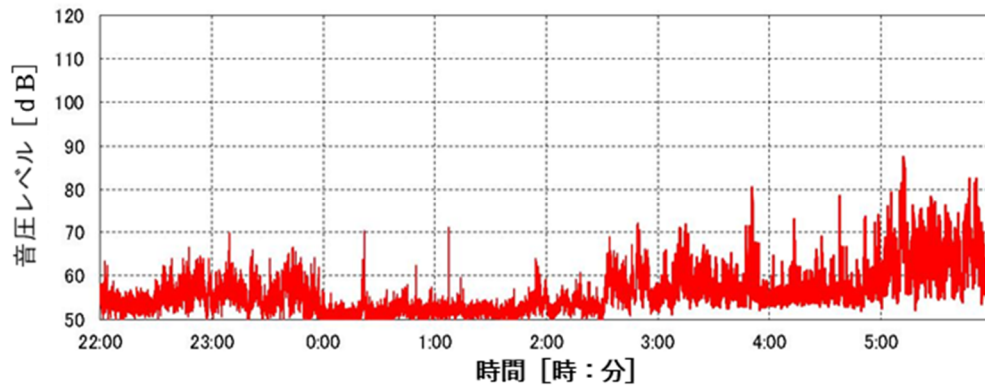


図 4-19 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト B)

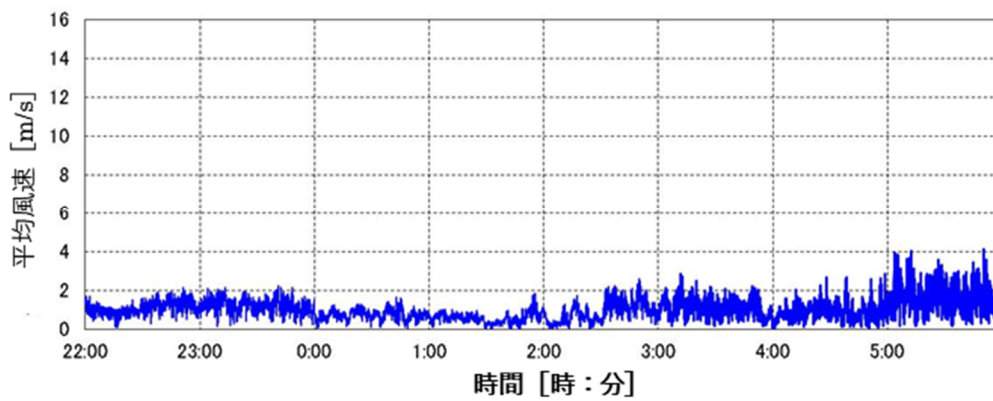


図 4-20 1秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト B)

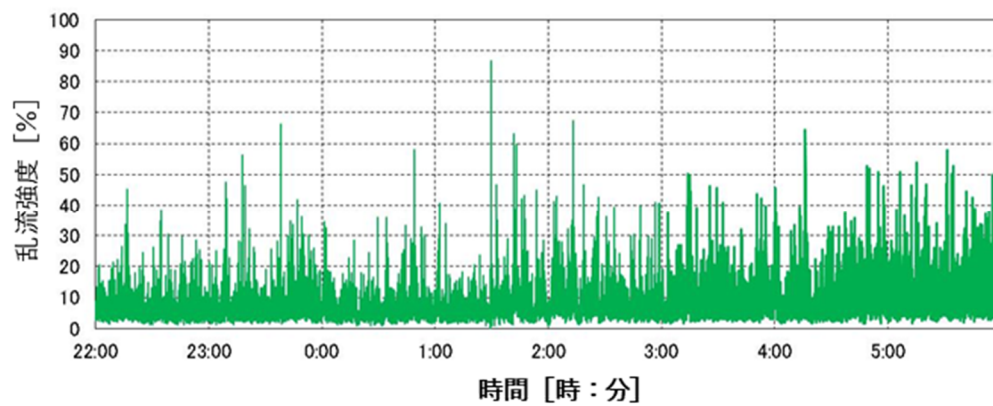


図 4-21 乱流強度の時刻歴波形 (サイト B)

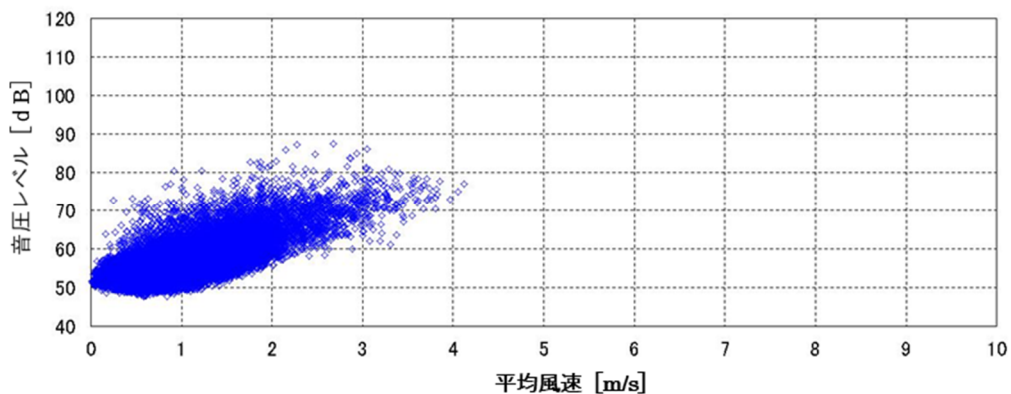


図 4-2 2 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト B)

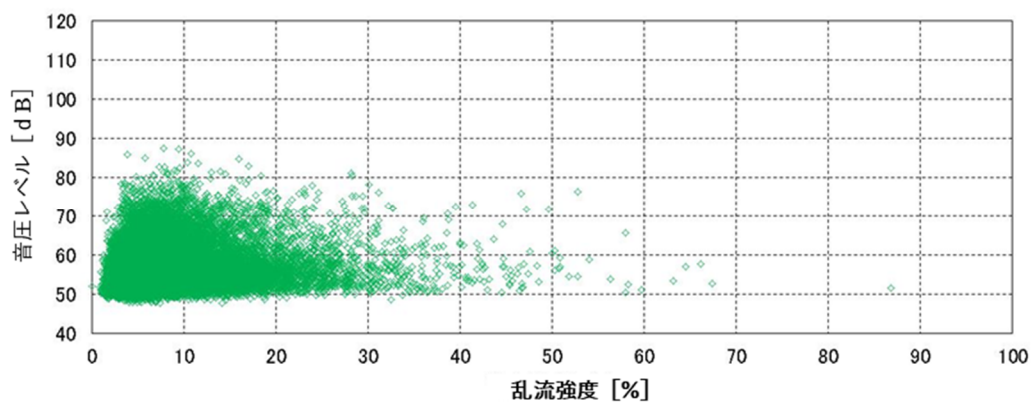


図 4-2 3 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト B)

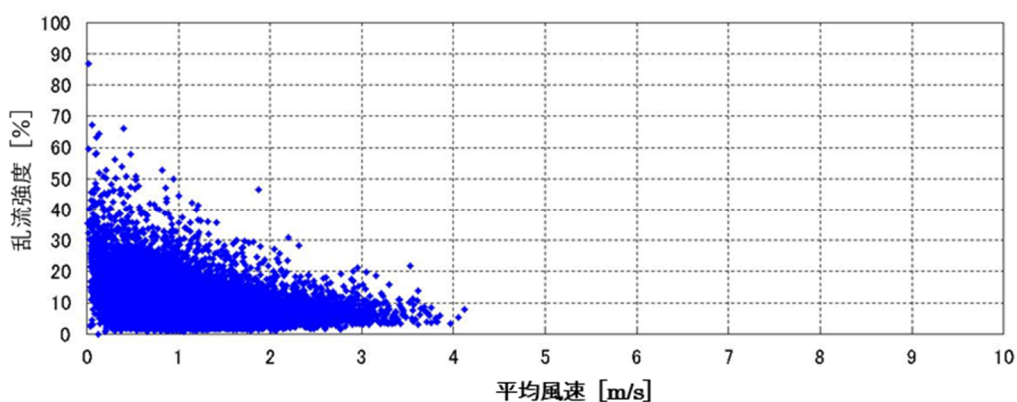


図 4-2 4 平均風速と乱流強度の相関 (サイト B)

4.6 図表

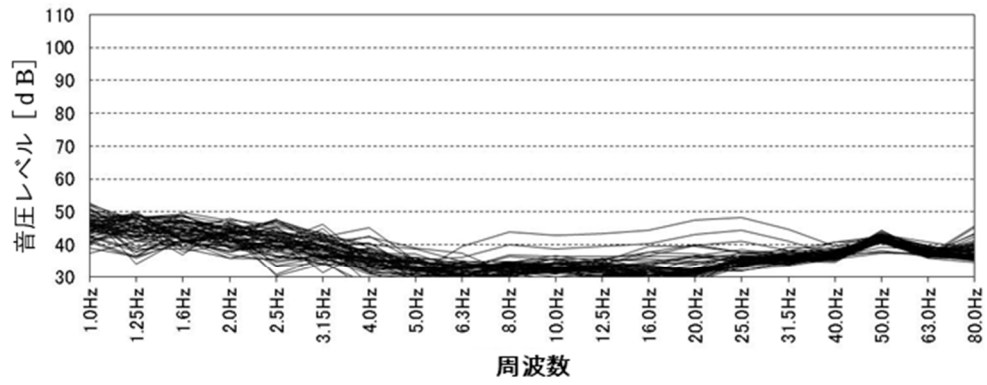


図 4-25 サイト B 音圧レベルの周波数特性(23:00 から 60 秒間)

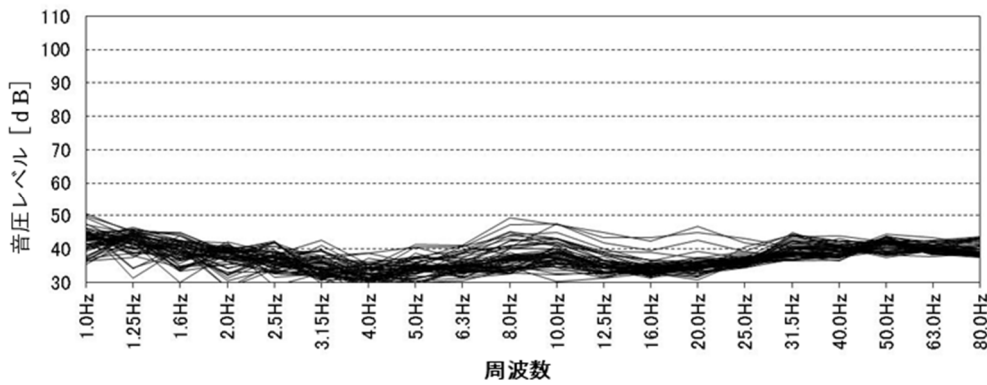


図 4-26 サイト B 音圧レベルの周波数特性(1:00 から 60 秒間)

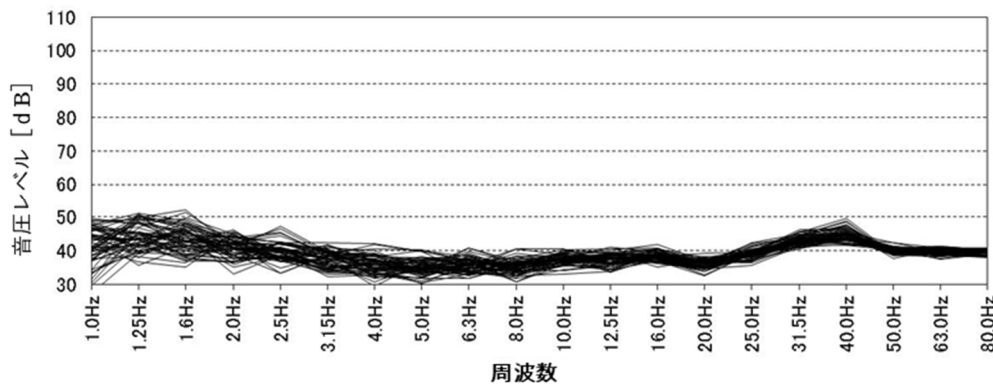


図 4-27 サイト B 音圧レベルの周波数特性(3:00 から 60 秒間)



図 4-28 サイト C の写真



図 4-29 サイト C の土地利用状況

4.6 図表

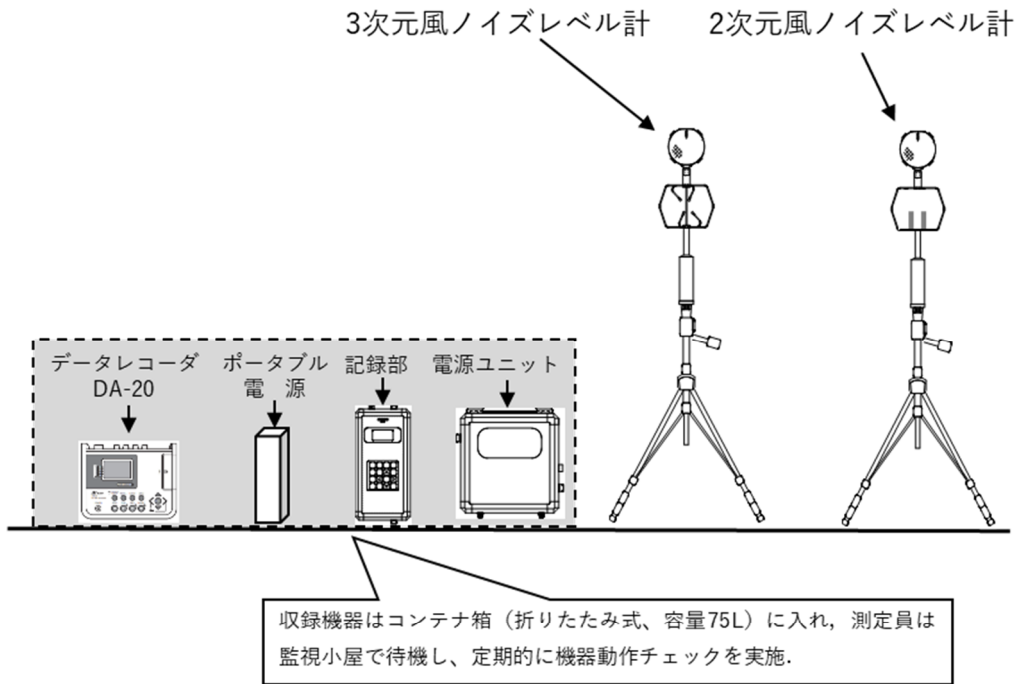


図 4-30 測定機器配置図（サイト C）

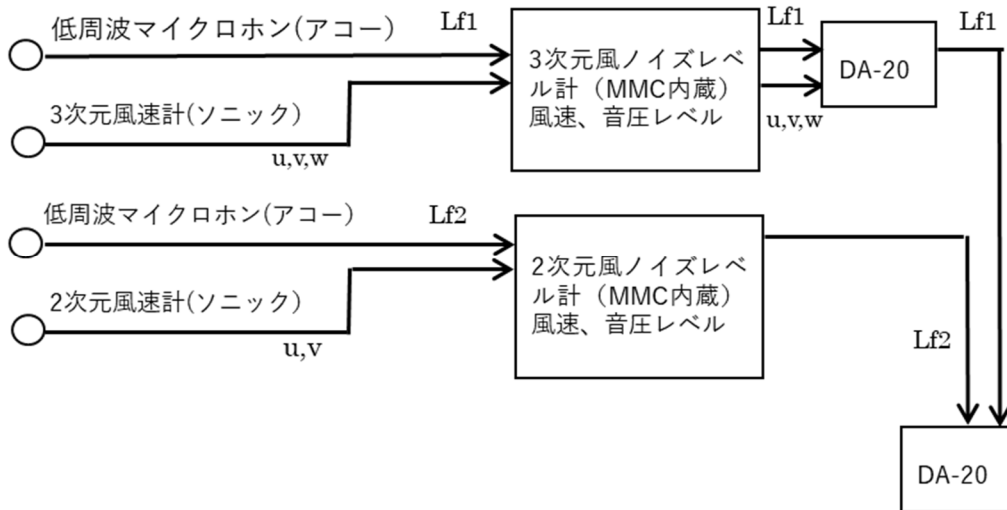


図 4-31 測定系統図（サイト C）

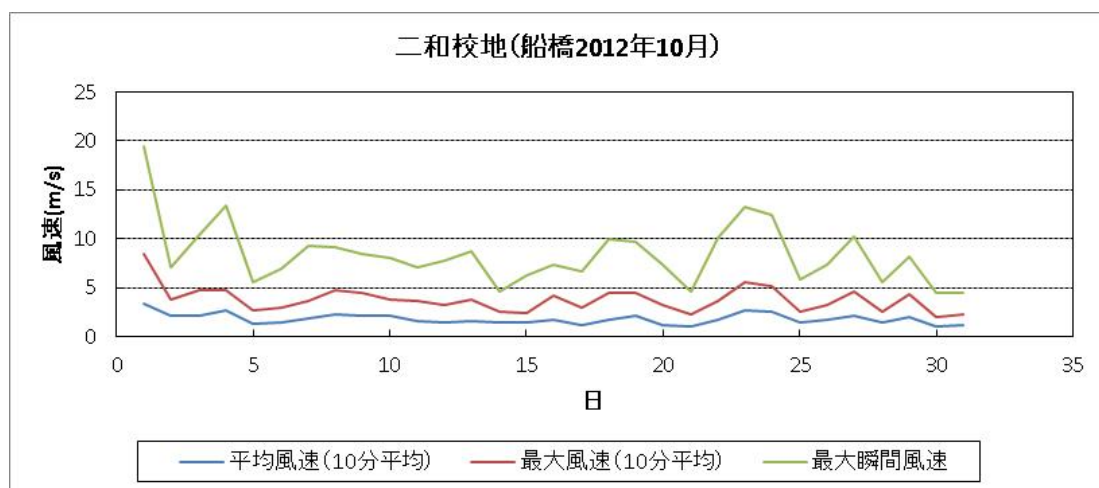


図 4-3 2 アメダスデータ (船橋) による風況

#### 4.6 図表

---

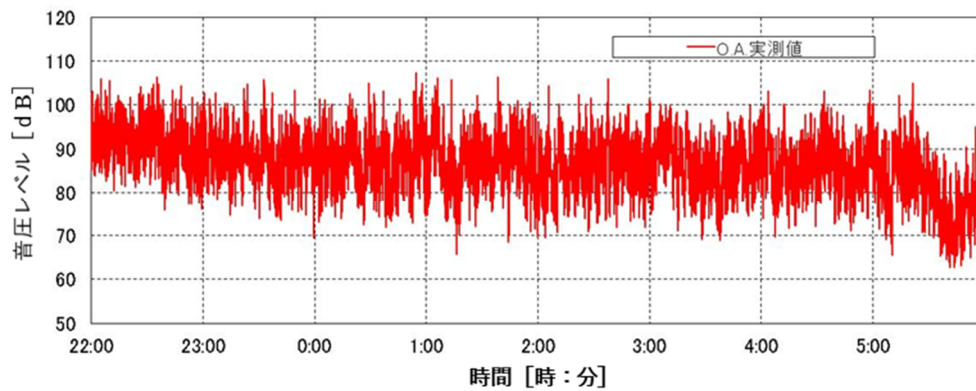


図 4-33 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト C)

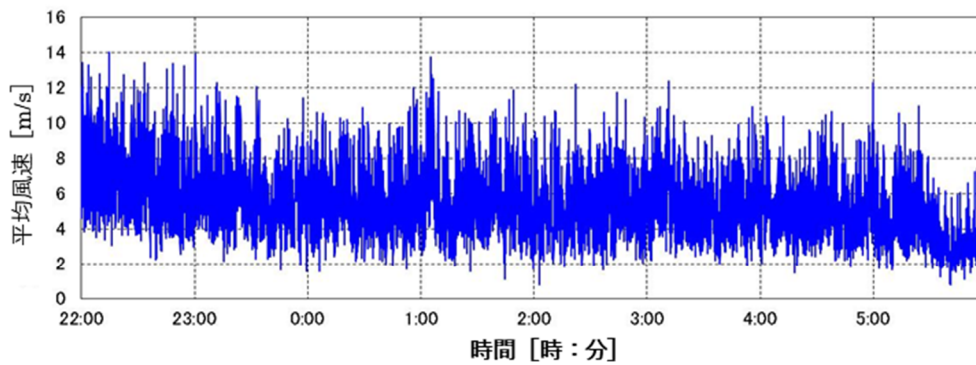


図 4-34 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト C)

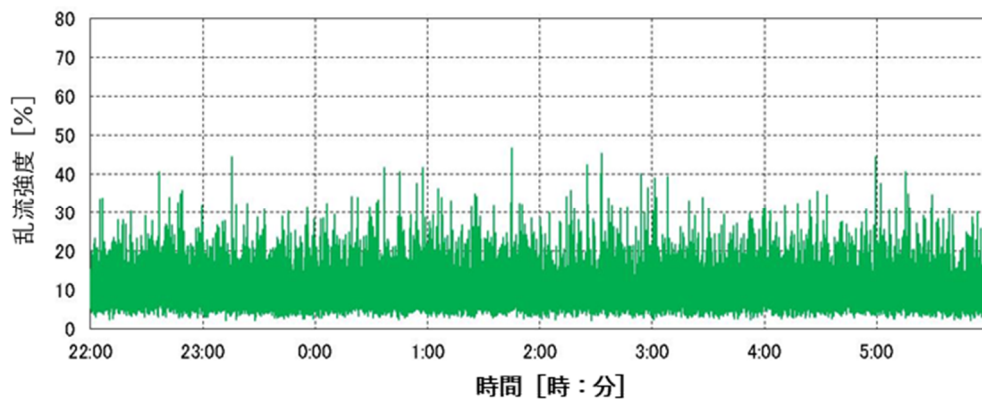


図 4-35 乱流強度の時刻歴波形 (サイト C)

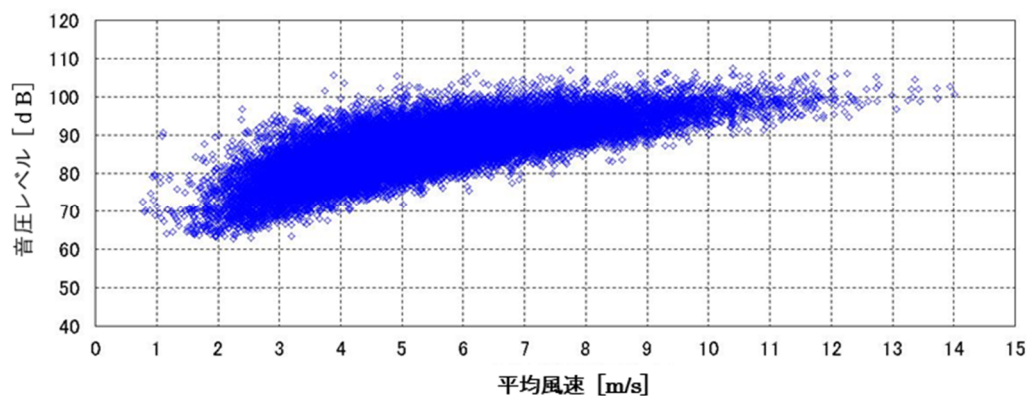


図 4-36 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト C)

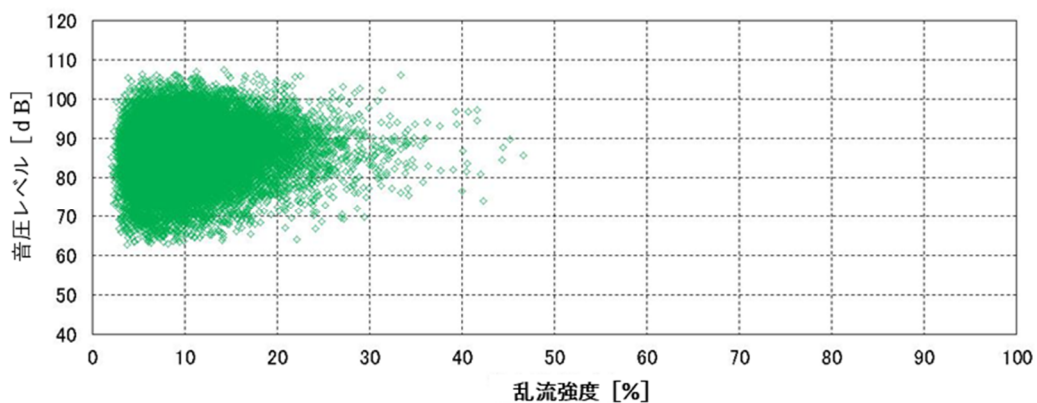


図 4-37 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト C)

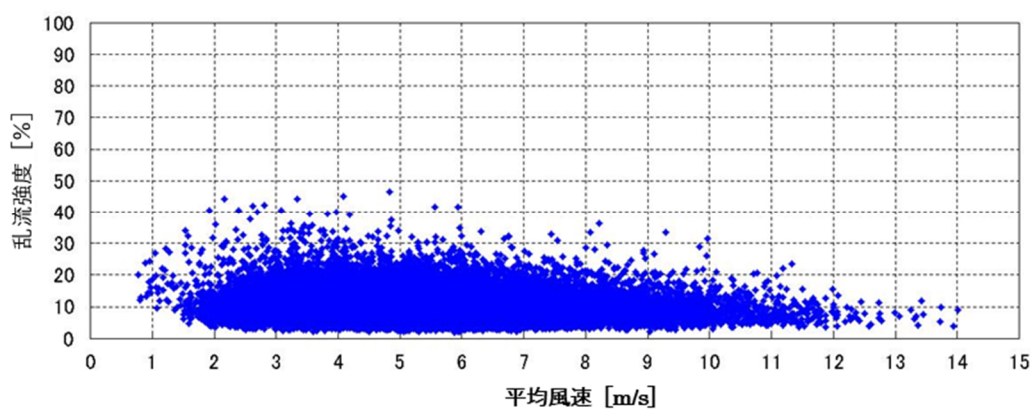


図 4-38 平均風速と乱流強度の相関 (サイト C)



4.6 図表

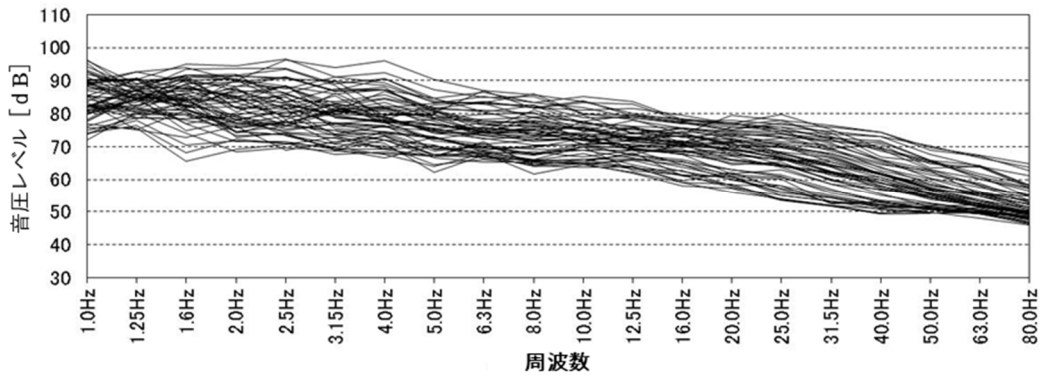


図 4-39 サイト C 音圧レベルの周波数特性 (23:00 から 60 秒間)

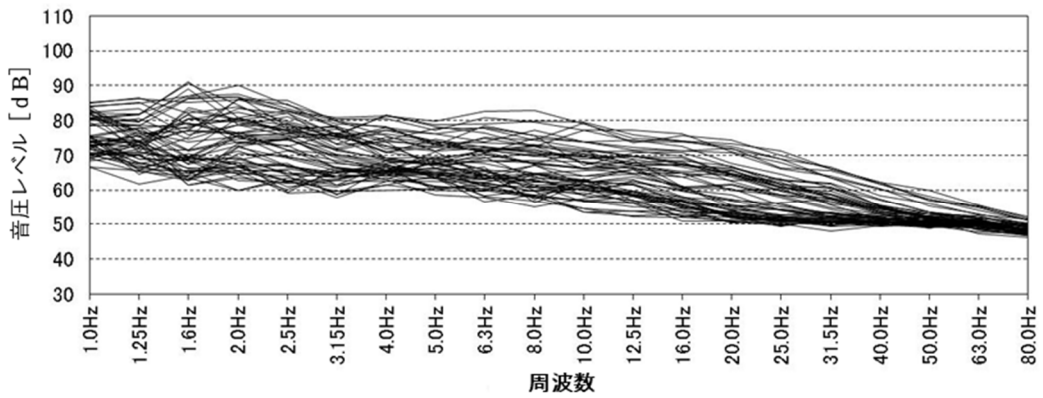


図 4-40 サイト C 音圧レベルの周波数特性 (1:00 から 60 秒間)

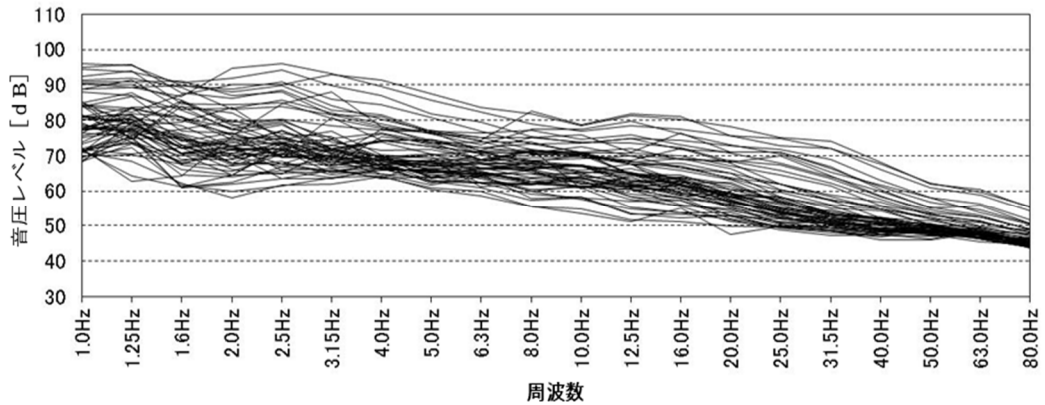


図 4-41 サイト C 音圧レベルの周波数特性 (3:00 から 60 秒間)

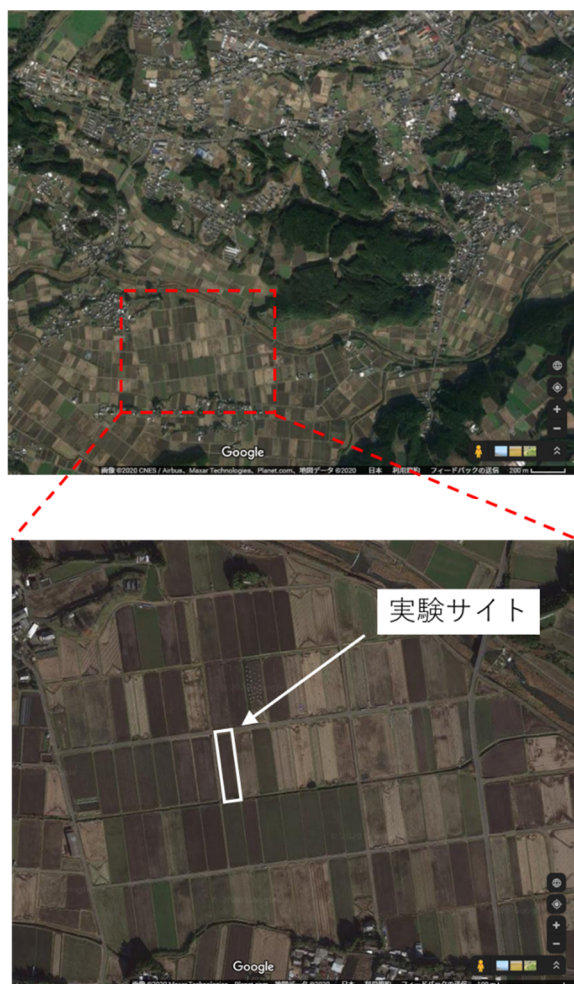


図 4-4 2 サイト D の写真



図 4-4 3 サイト D の土地利用状況+

4.6 図表

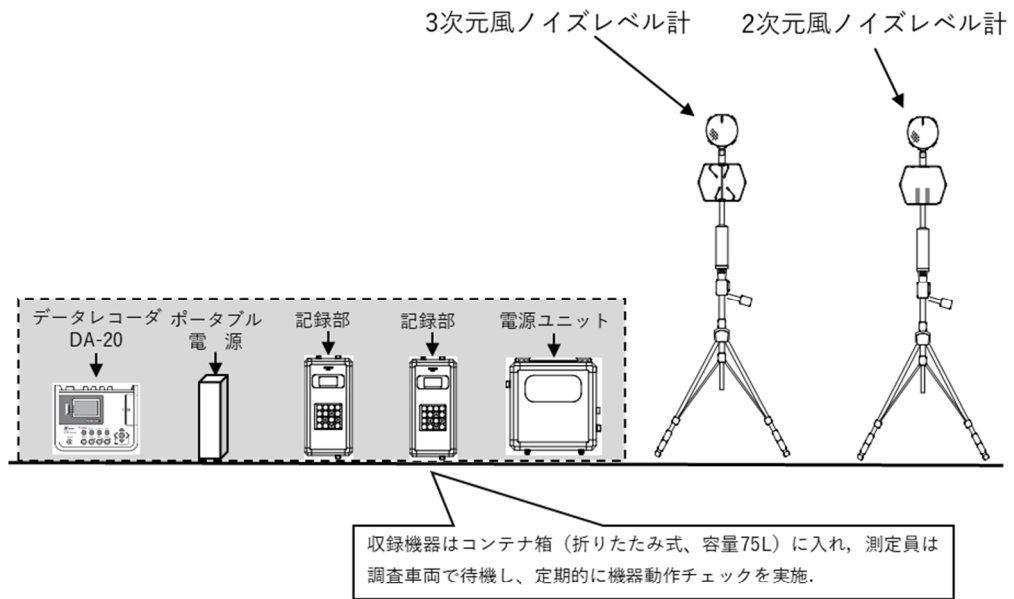


図 4-44 測定機器配置図（サイトD）

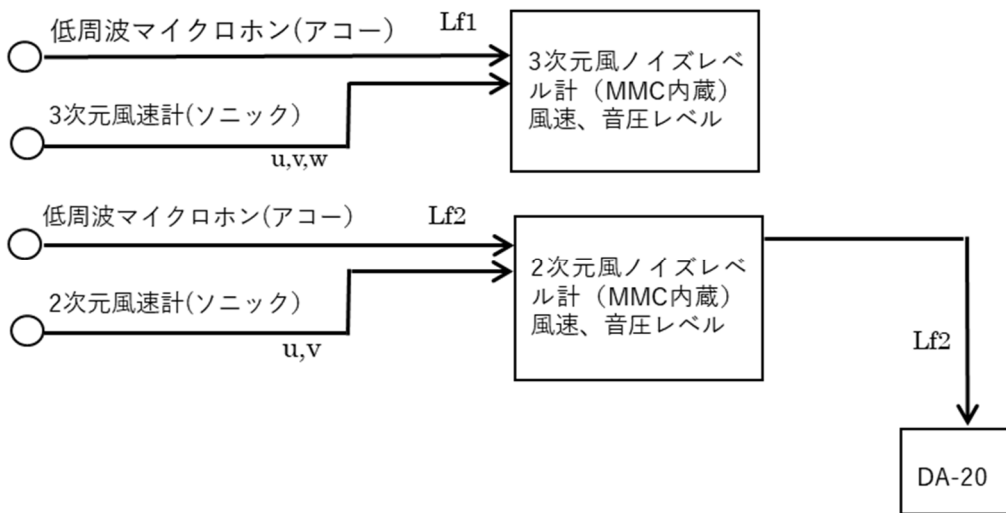


図 4-45 システム系統図（サイトD）

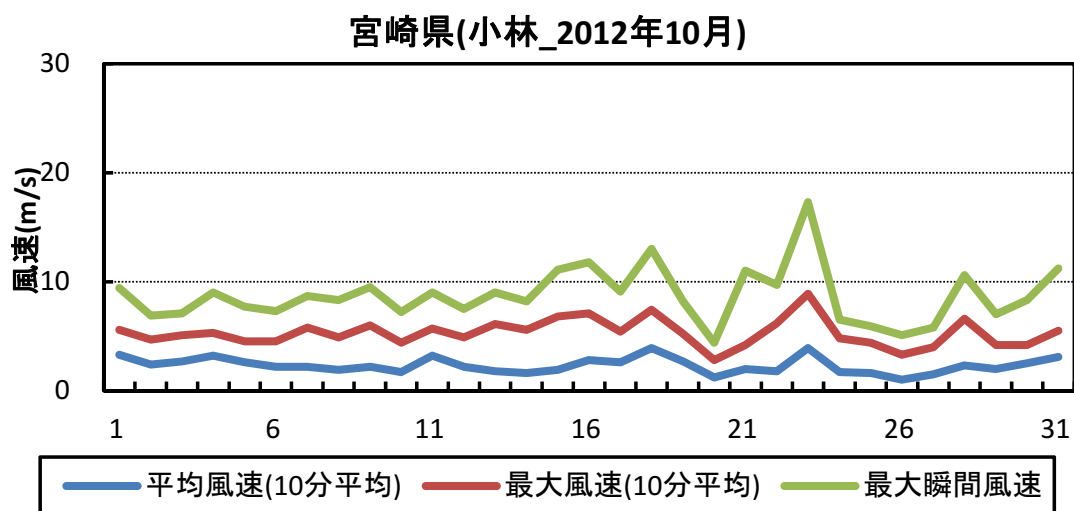


図 4-4 6 アメダスデータ (小林) による風況

#### 4.6 図表

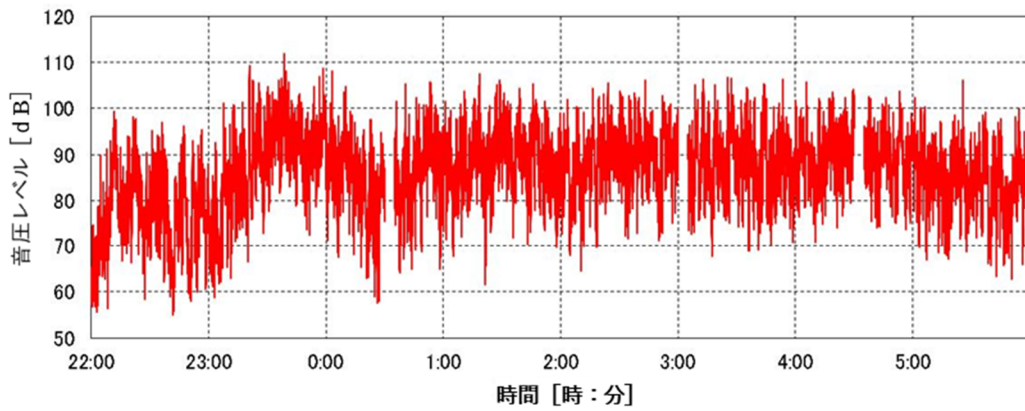


図 4-47 音圧レベル (O.A)の時刻歴

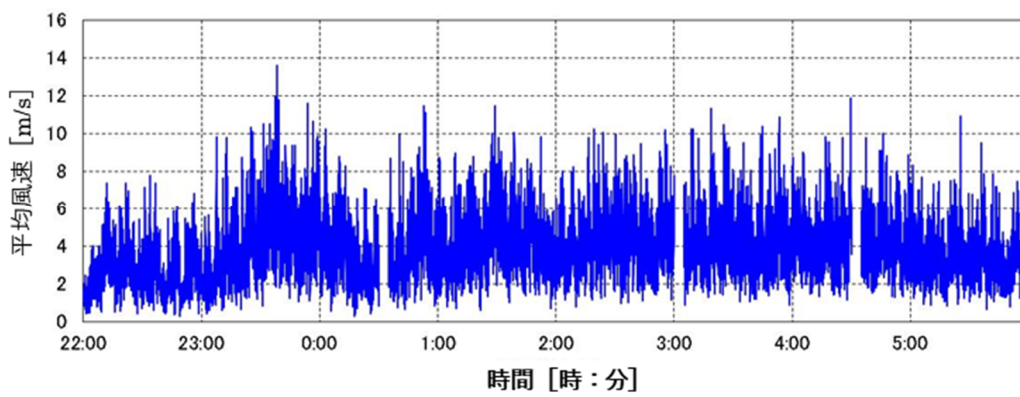


図 4-48 1 秒間平均風速の時刻歴

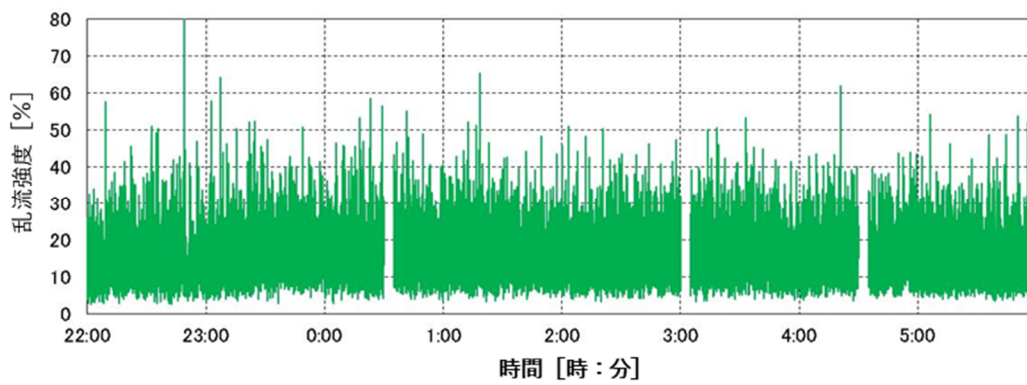


図 4-49 乱流強度の時刻歴

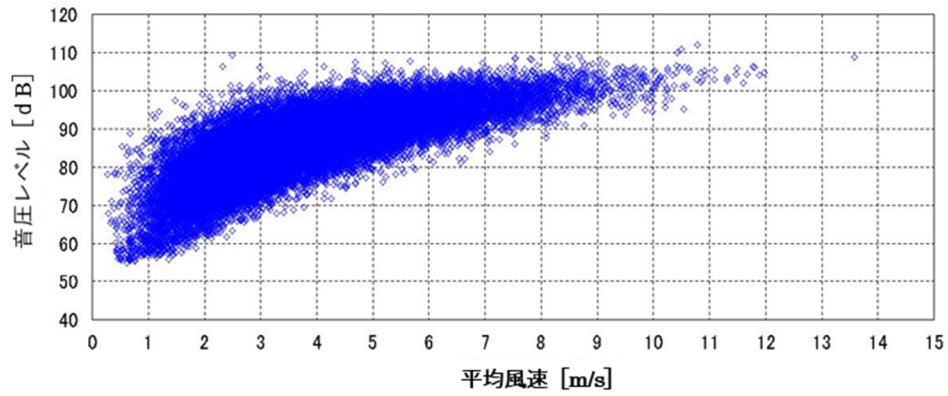


図 4-5 0 平均風速と音圧レベルの相関

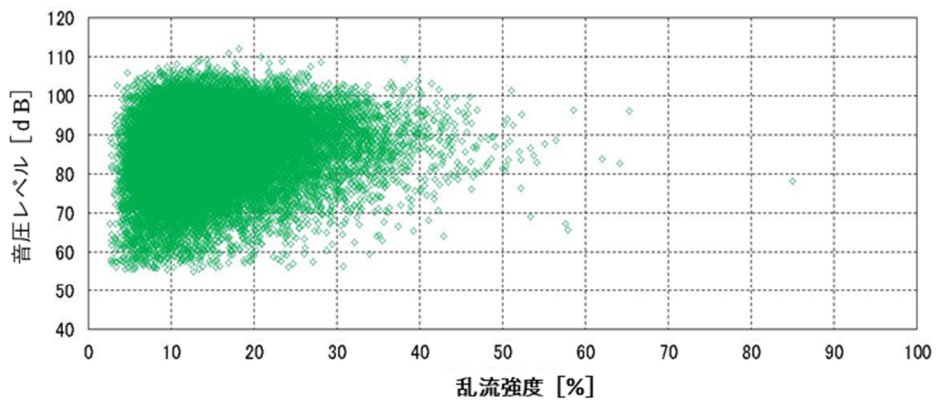


図 4-5 1 乱流強度と音圧レベルの相関

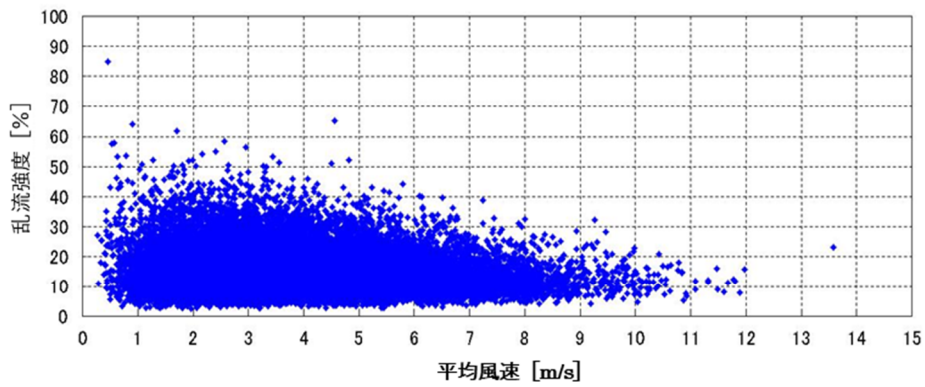


図 4-5 2 平均風速と乱流強度の相関

4.6 図表

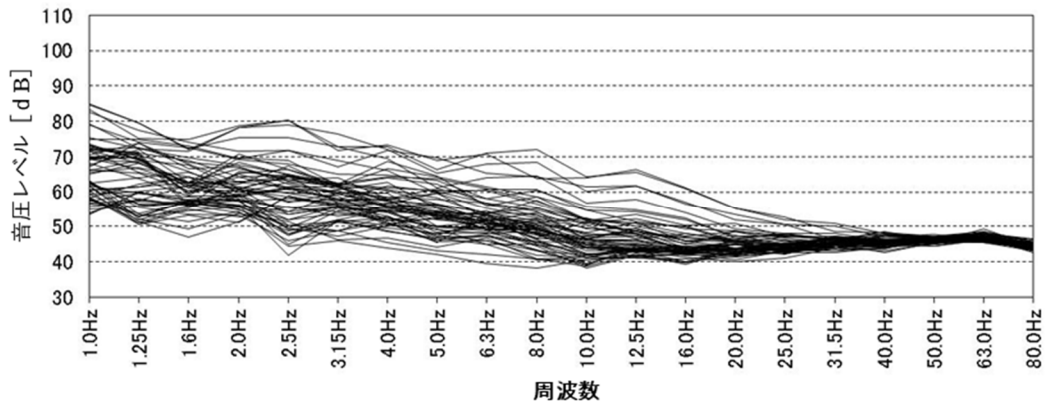


図 4-5 3 音圧レベル抜粋 1(23:00 から 60 秒間)

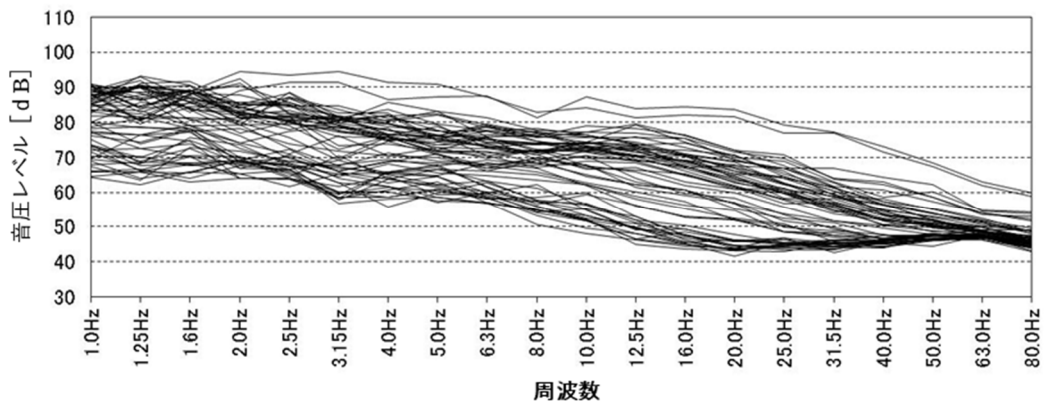


図 4-5 4 音圧レベル抜粋 2(1:00 から 60 秒間)

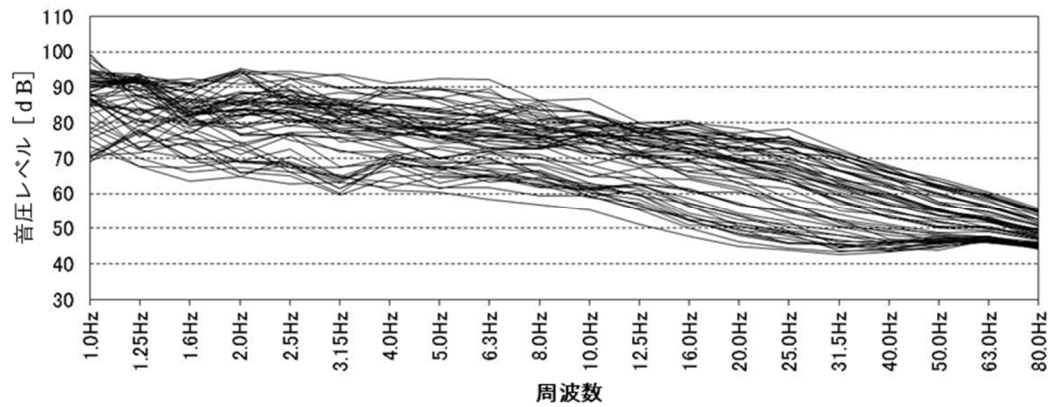


図 4-5 5 音圧レベル抜粋 3(4:00 から 60 秒間)



図 4-56 サイトEの写真



4.6 図表

---

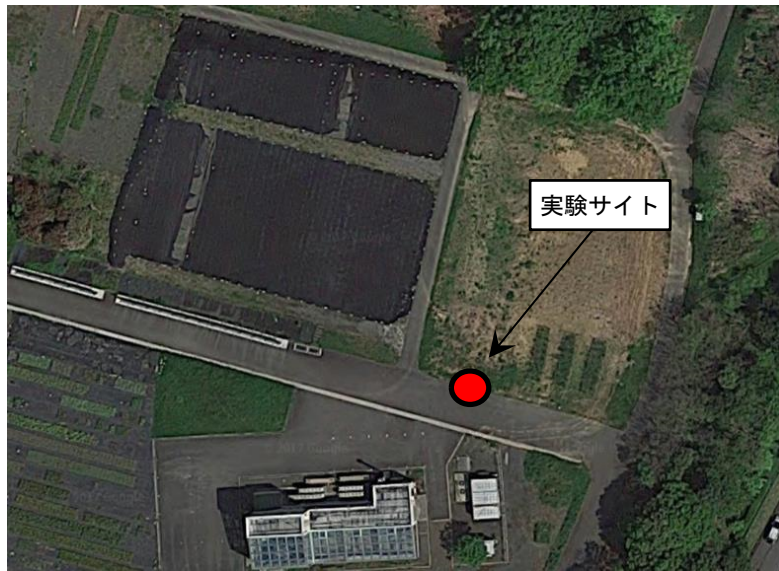


図 4-57 サイト E の土地利用状況

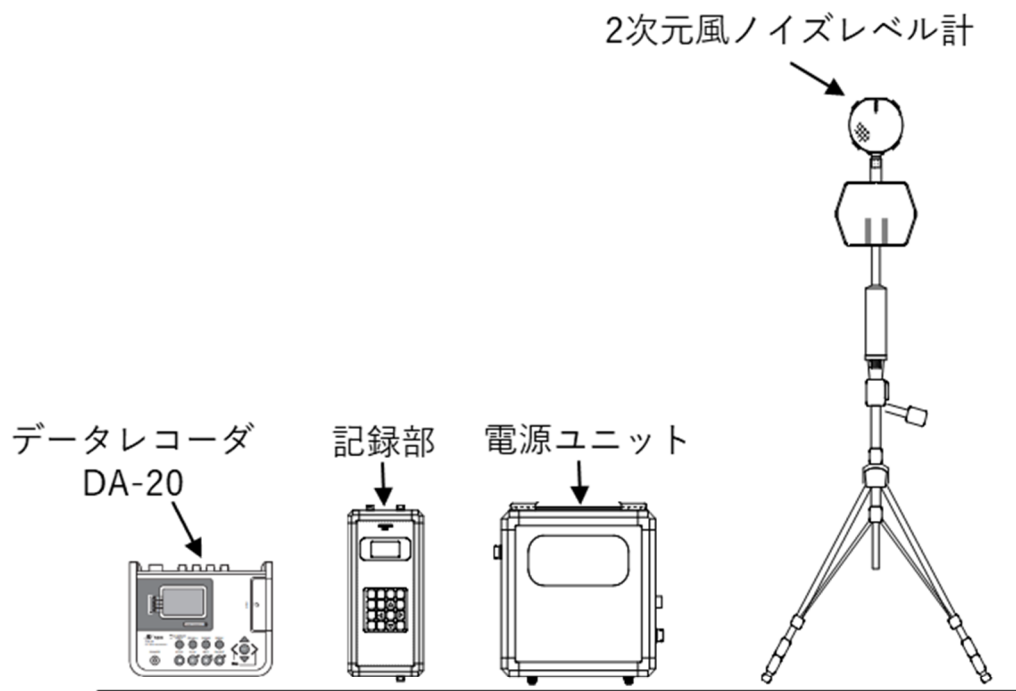


図 4-58 測定機器配置図 (サイト E)

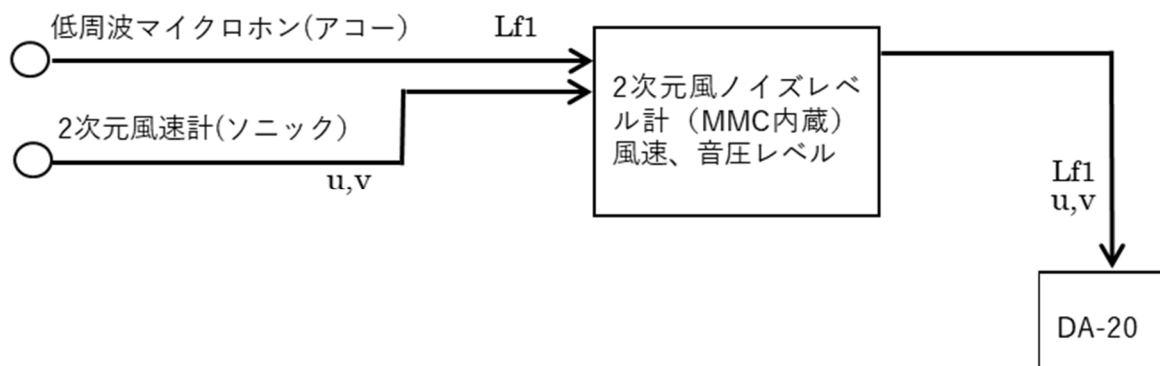


図 4-59 測定系統図 (サイト E)

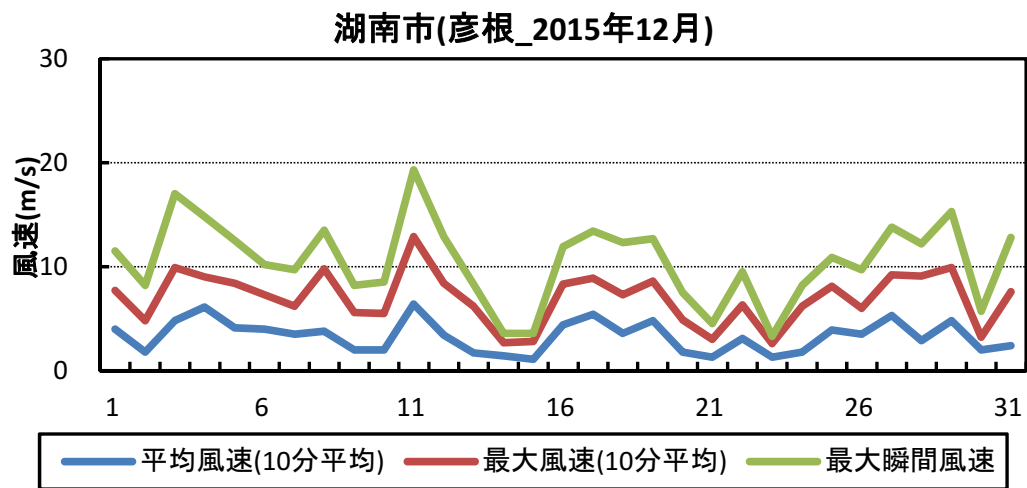


図 4-60 アメダスデータ (彦根) による風況

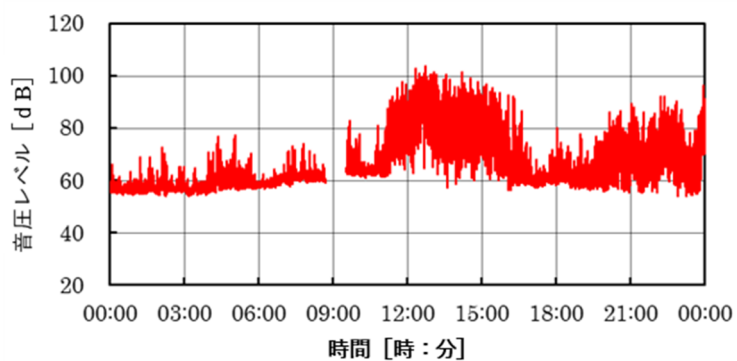


図 4-6 1 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E:1 2月9日)

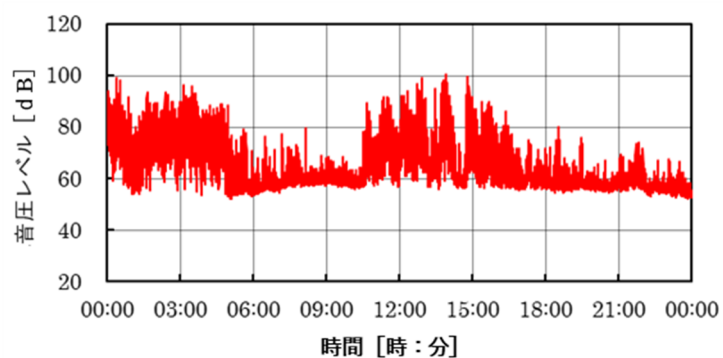


図 4-6 2 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E:1 2月10日)

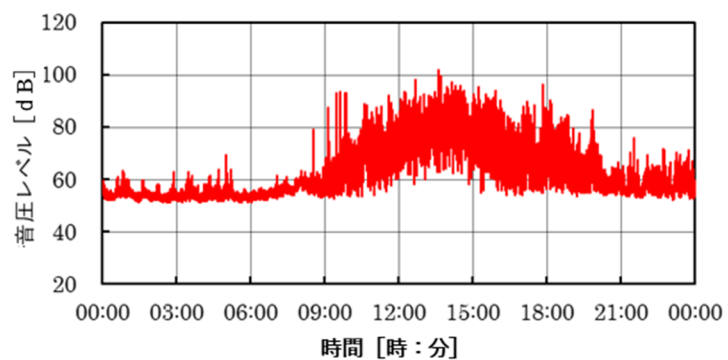


図 4-6 3 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E:1 2月11日)

#### 4.6 図表

---

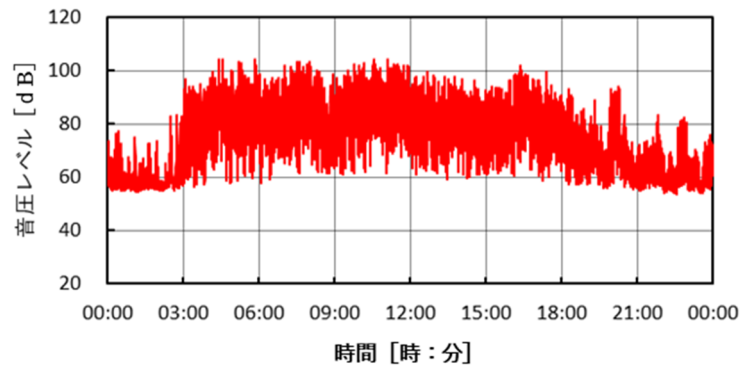


図 4-6 4 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E: 1 2月 1 4日)

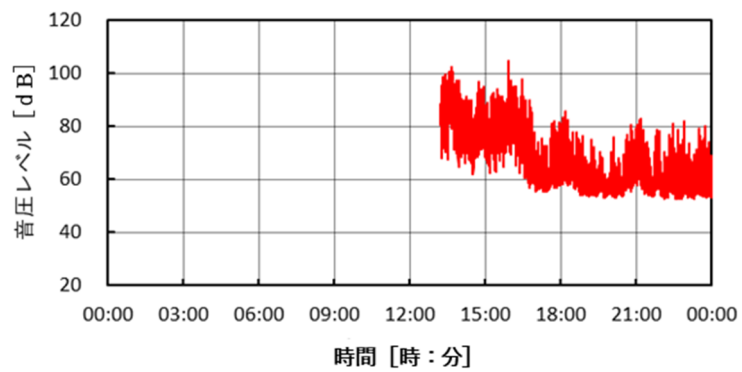


図 4-6 5 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E: 1 2月 1 7日)

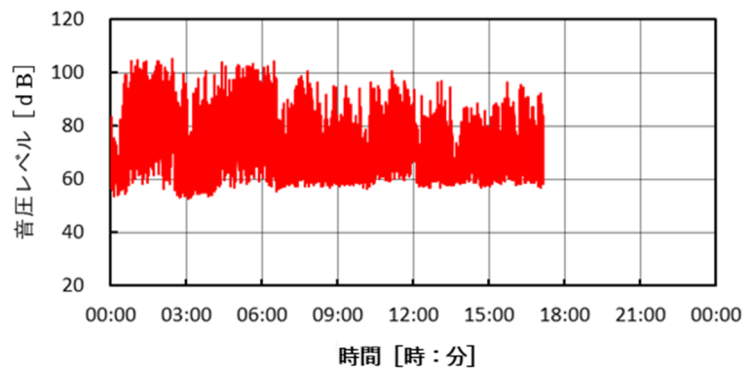


図 4-6 6 音圧レベル (O.A)の時刻歴波形 (サイト E: 1 2月 2 2日)

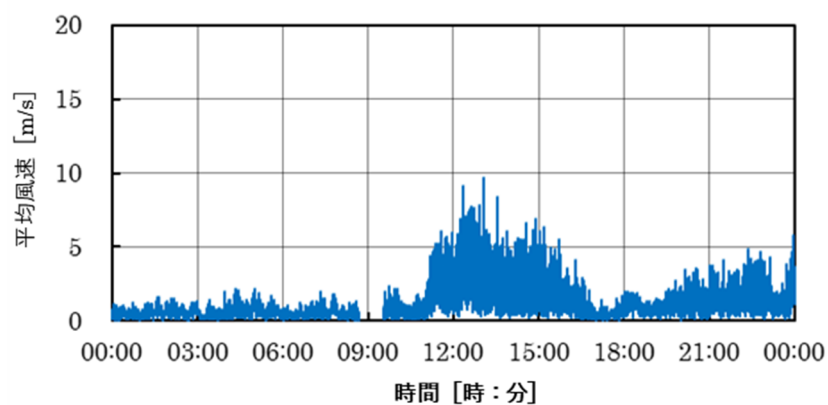


図 4-6 7 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 9 日)

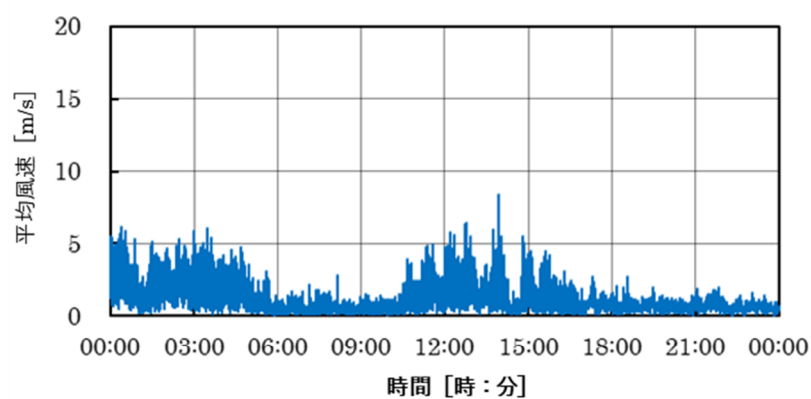


図 4-6 8 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 1 0 日)

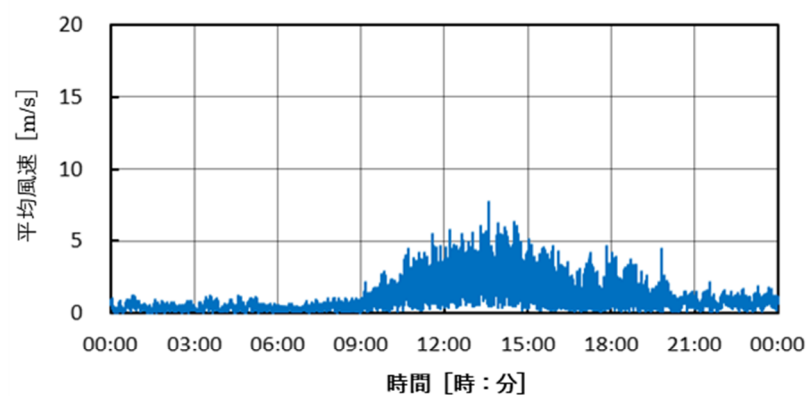


図 4-6 9 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 1 1 日)

4.6 図表

---

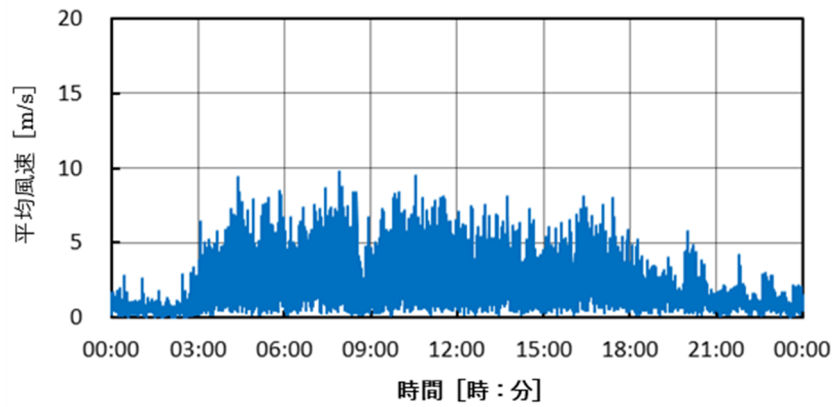


図 4-70 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 1 4 日)

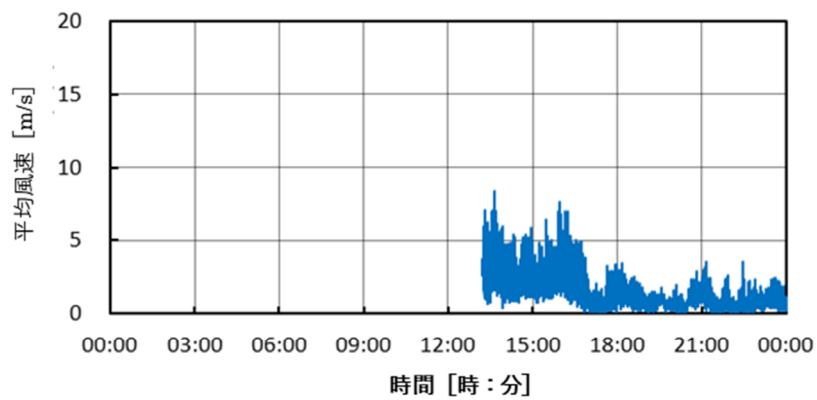


図 4-71 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 1 7 日)

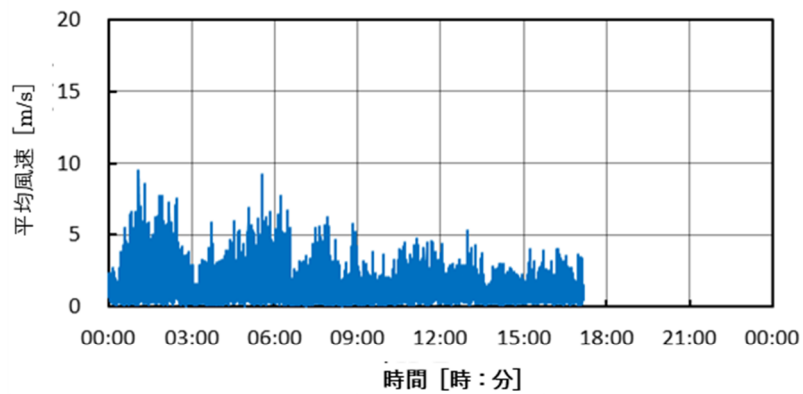


図 4-72 1 秒間平均風速の時刻歴波形 (サイト E: 1 2 月 2 2 日)

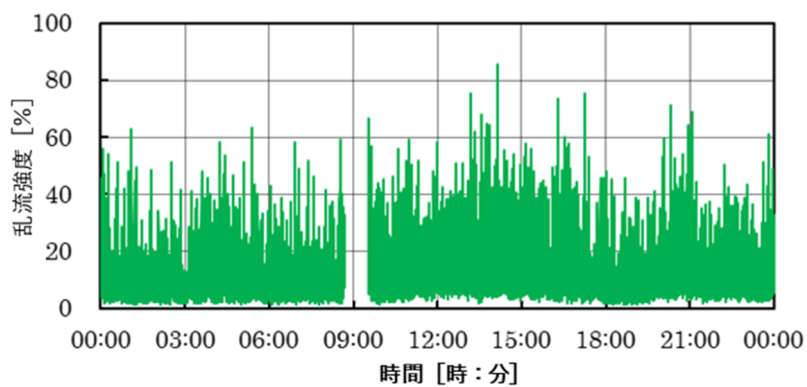


図 4-7-3 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月9日)

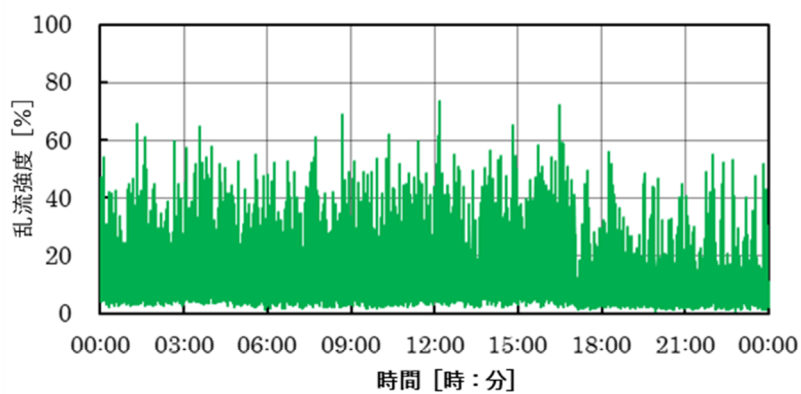


図 4-7-4 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月10日)

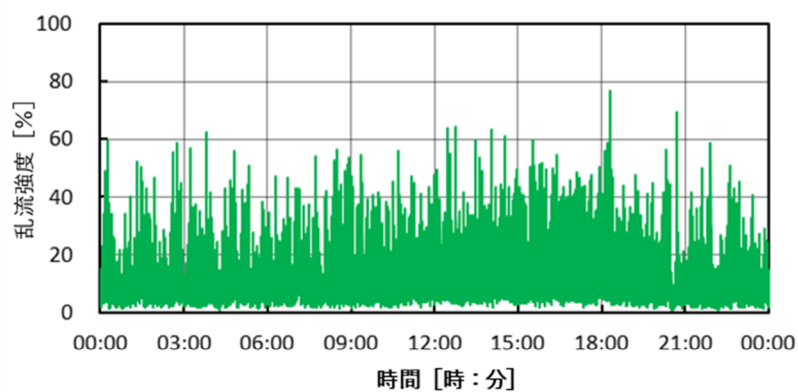


図 4-7-5 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月11日)



4.6 図表

---

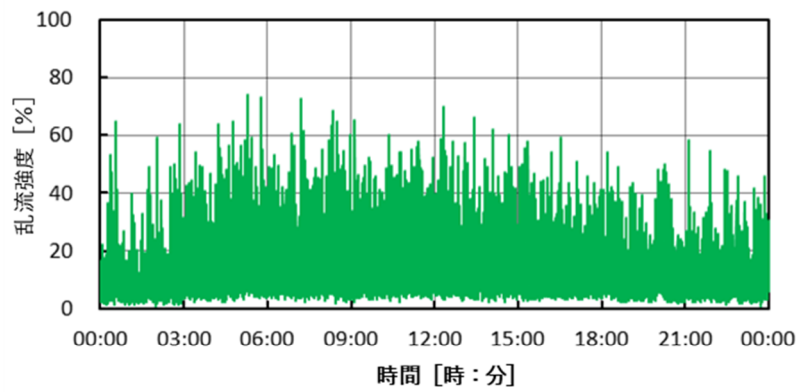


図 4-76 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月14日)

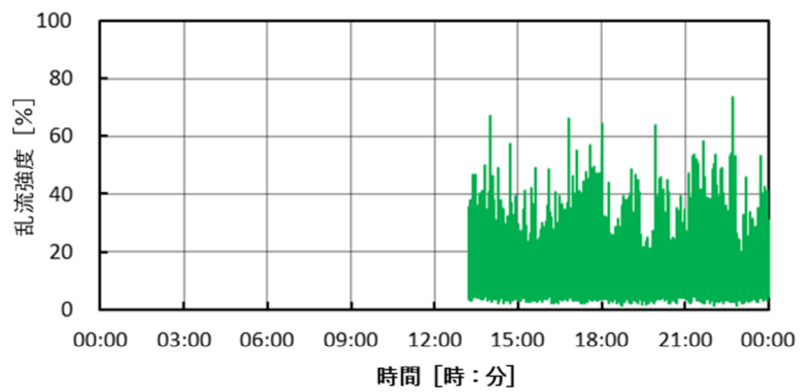


図 4-77 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月17日)

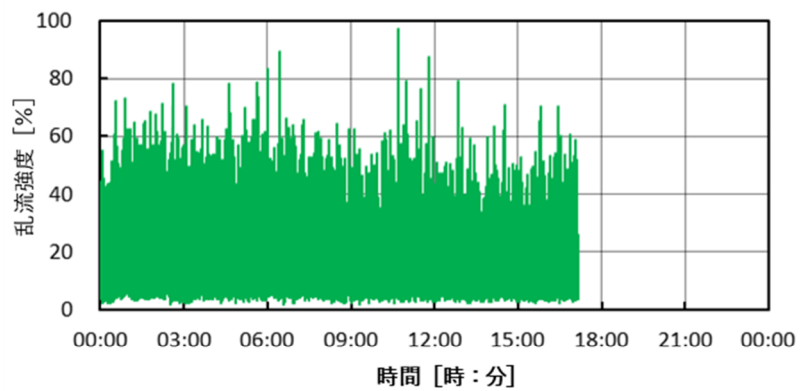


図 4-78 乱流強度の時刻歴波形 (サイト E: 12月22日)

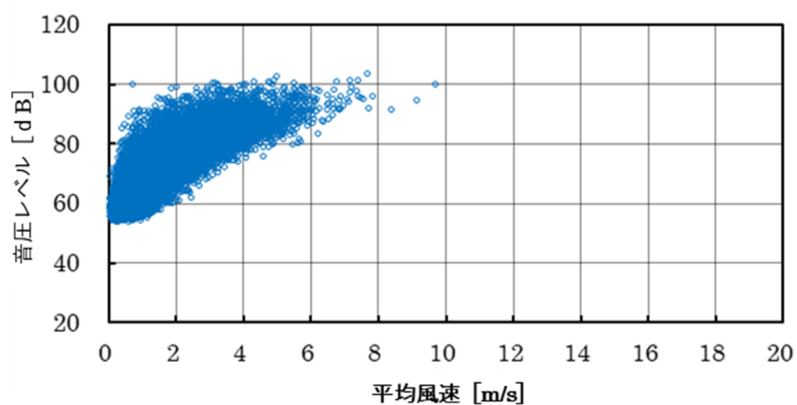


図 4-79 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月9日)

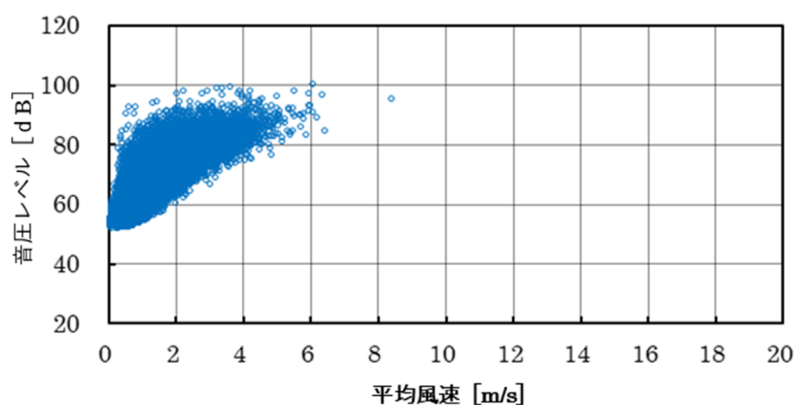


図 4-80 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月9日)

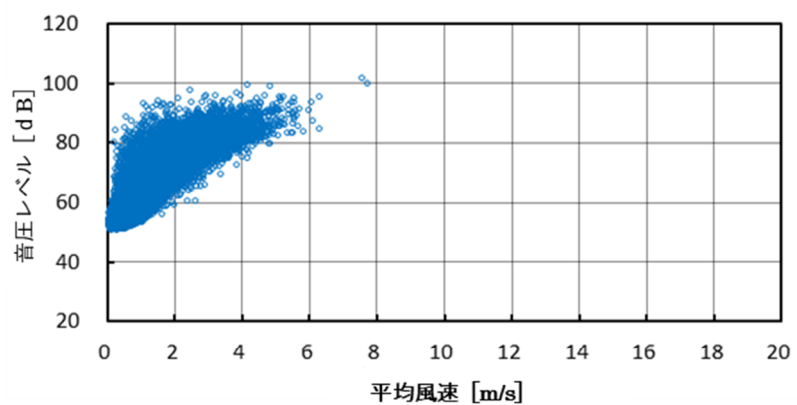


図 4-81 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月11日)

4.6 図表

---

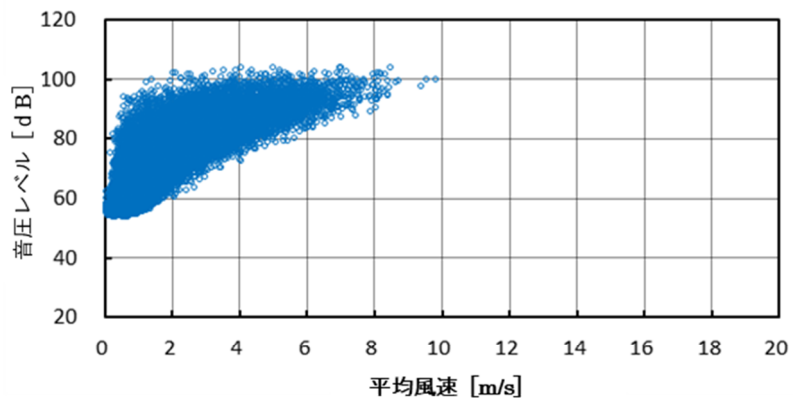


図 4-8 2 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 1 2 月 1 4 日)

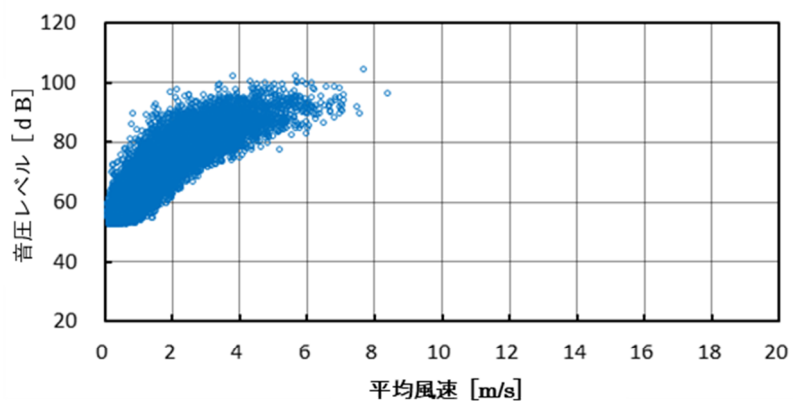


図 4-8 3 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 1 2 月 1 7 日)

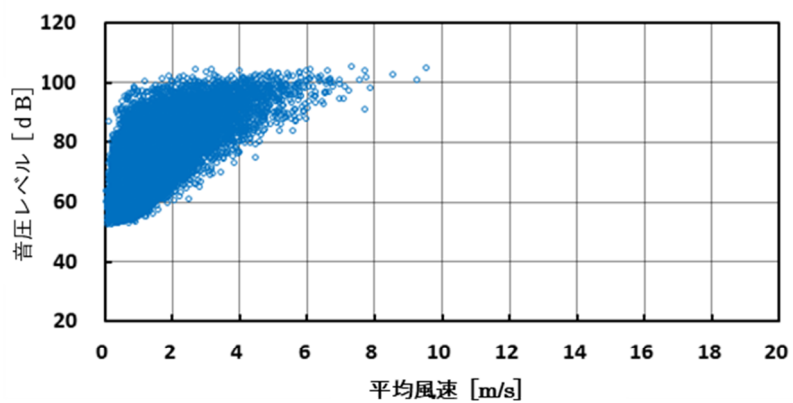


図 4-8 4 平均風速と音圧レベルの相関 (サイト E: 1 2 月 2 2 日)

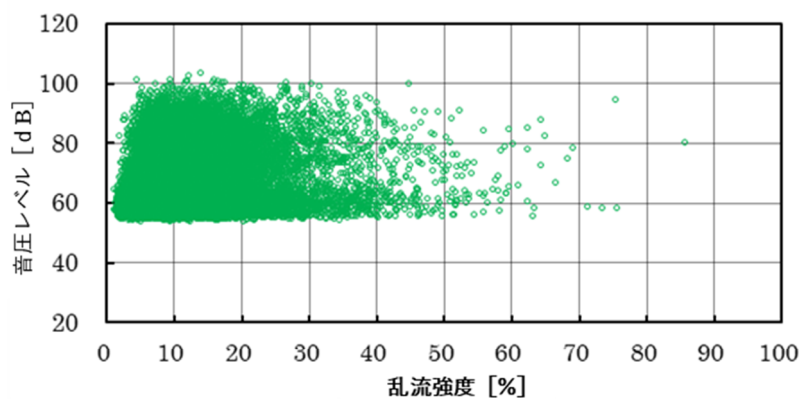


図 4-8 5 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月9日)

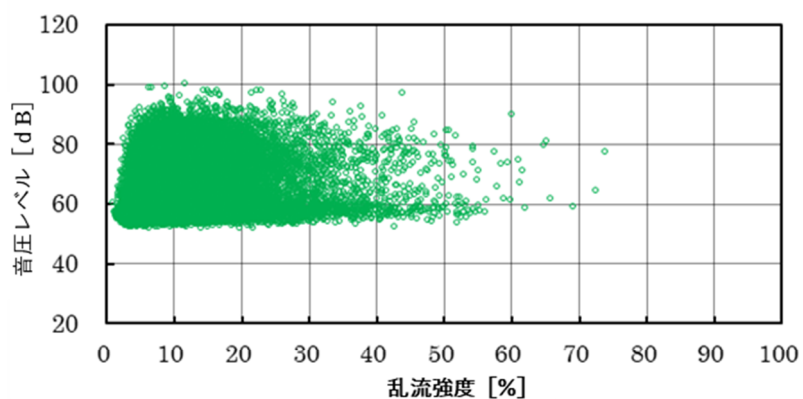


図 4-8 6 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月10日)

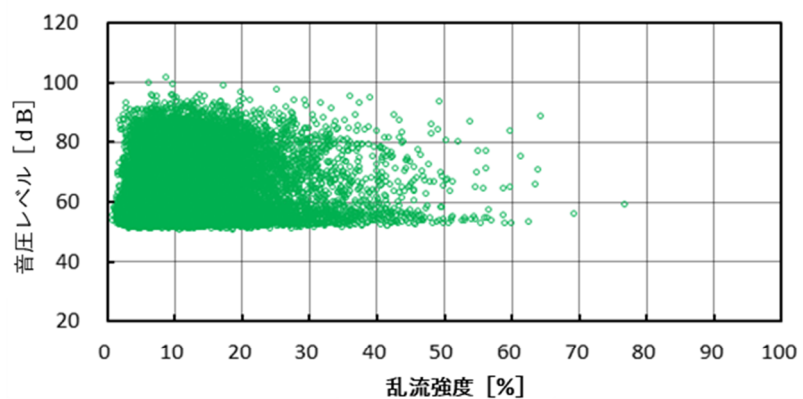


図 4-8 7 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E: 12月11日)

4.6 図表

---

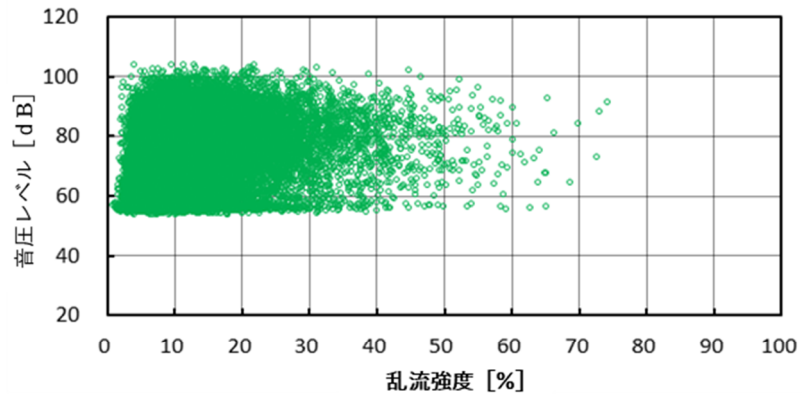


図 4-88 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E:12月14日)

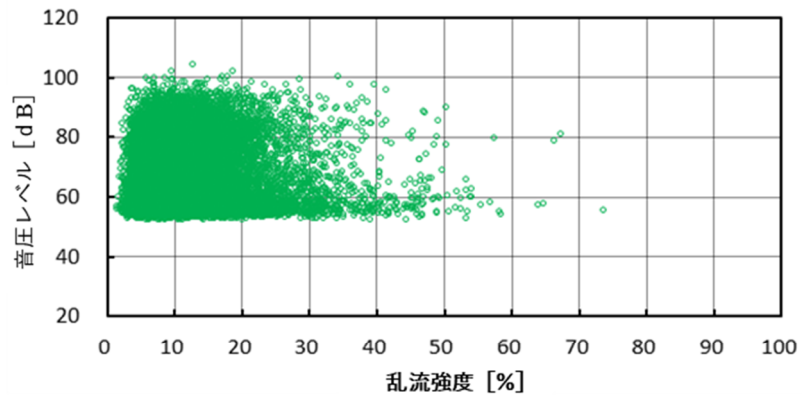


図 4-89 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E:12月17日)

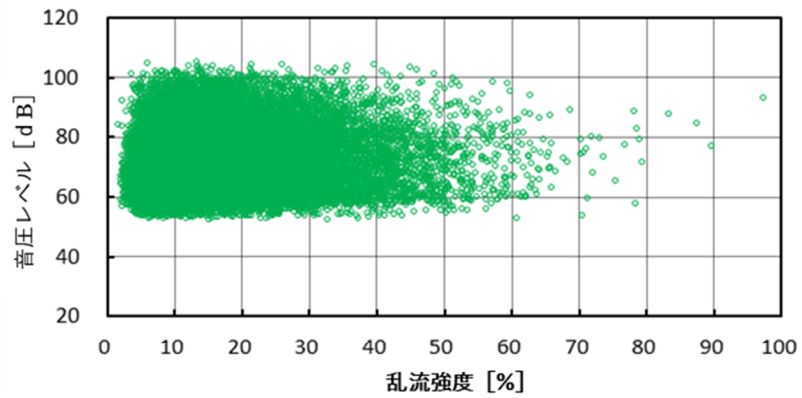


図 4-90 乱流強度と音圧レベルの相関 (サイト E:12月22日)

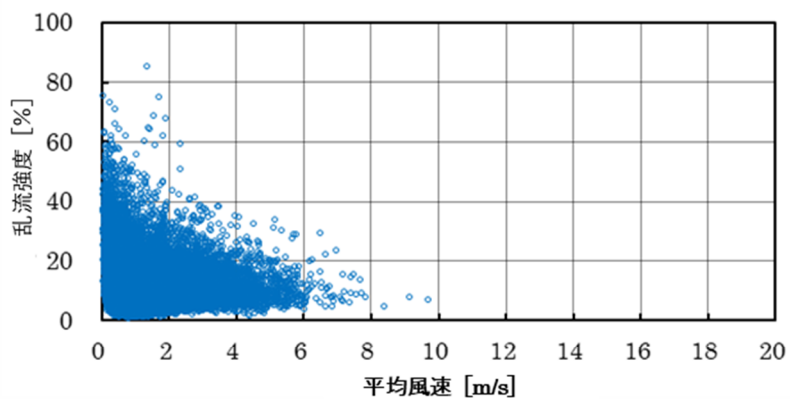


図 4-9 1 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月9日)

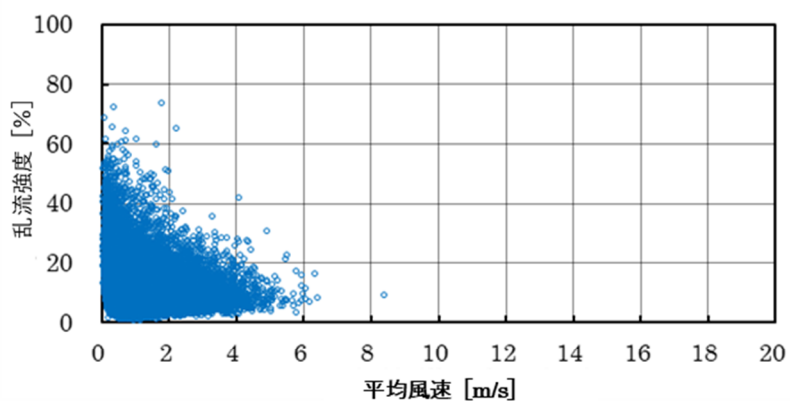


図 4-9 2 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月10日)

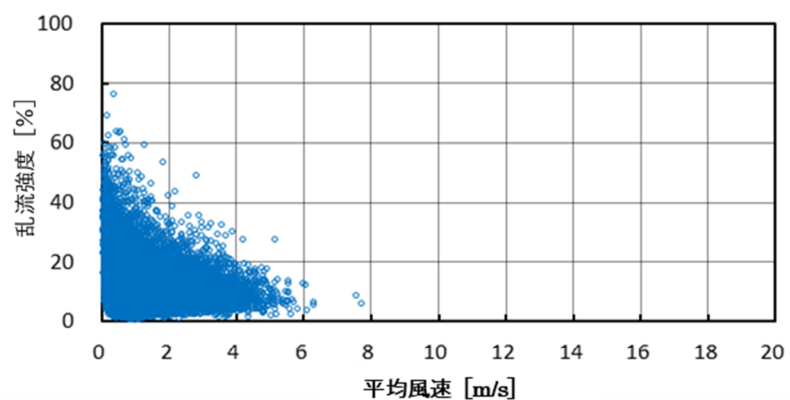


図 4-9 3 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月11日)

4.6 図表

---

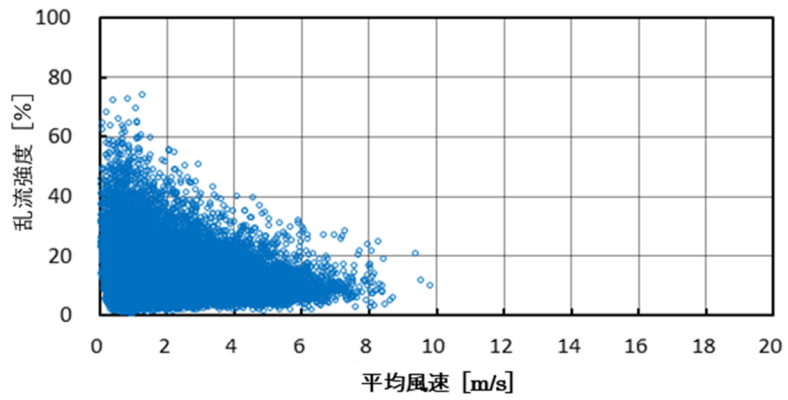


図 4-9 4 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月14日)

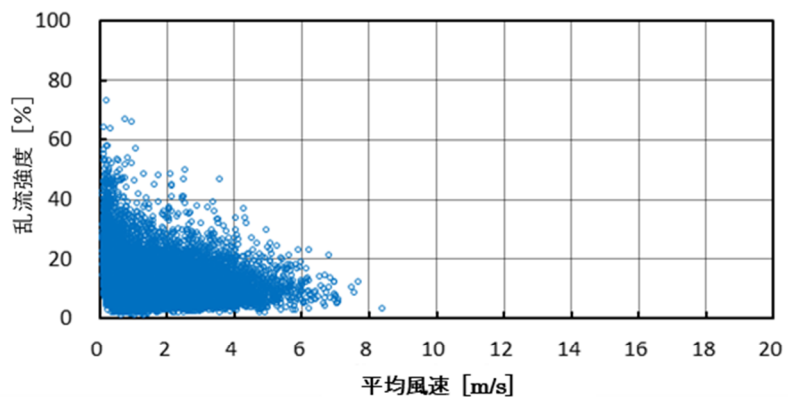


図 4-9 5 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月17日)

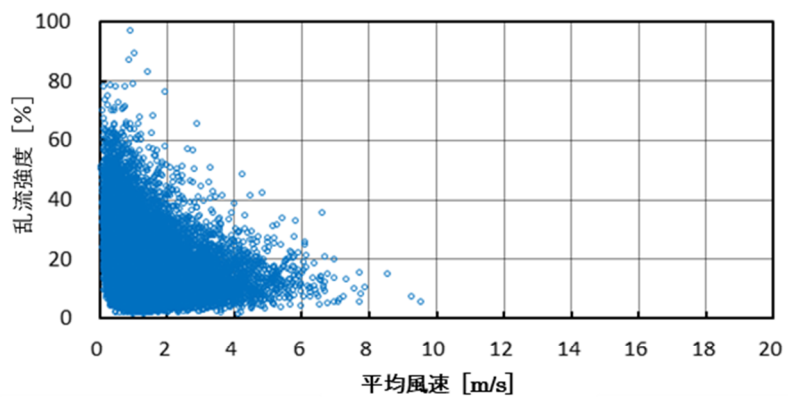


図 4-9 6 平均風速と乱流強度の相関 (サイト E: 12月22日)

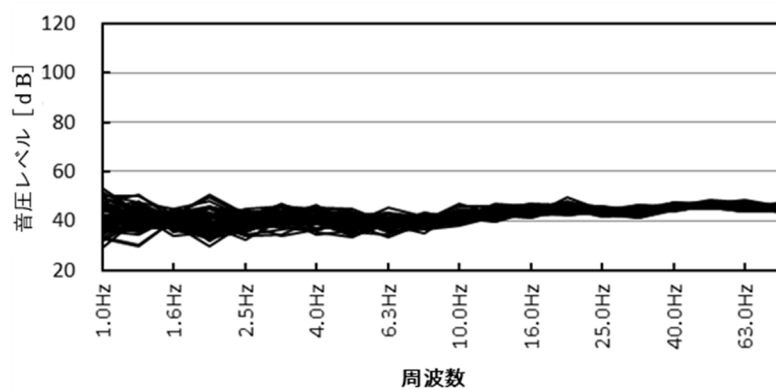


図 4-97 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月9日 0:00 から 60 秒間)

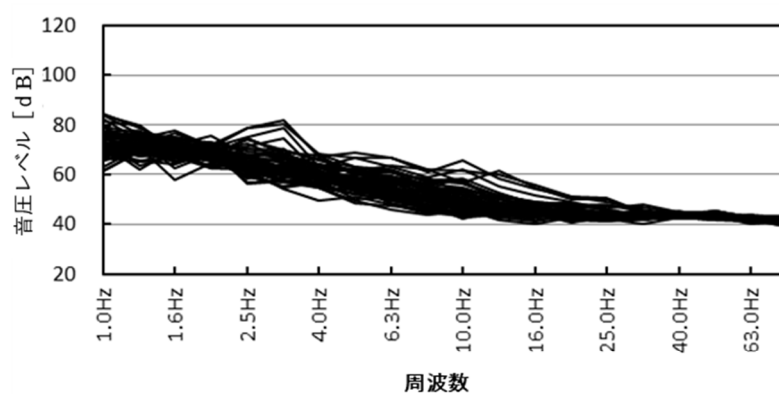


図 4-98 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月10日 0:00 から 60 秒間)

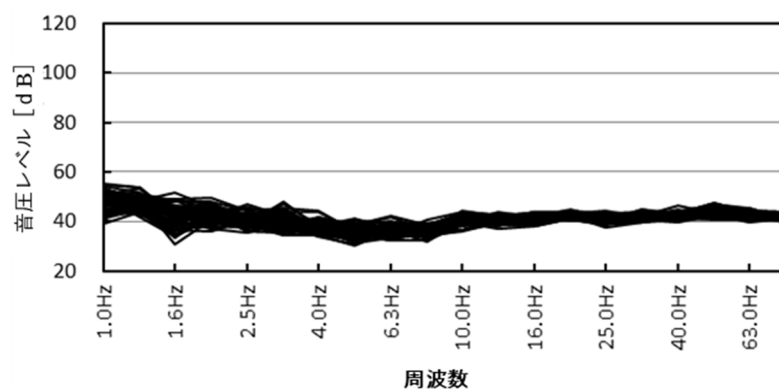


図 4-99 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月11日 0:00 から 60 秒間)



#### 4.6 図表

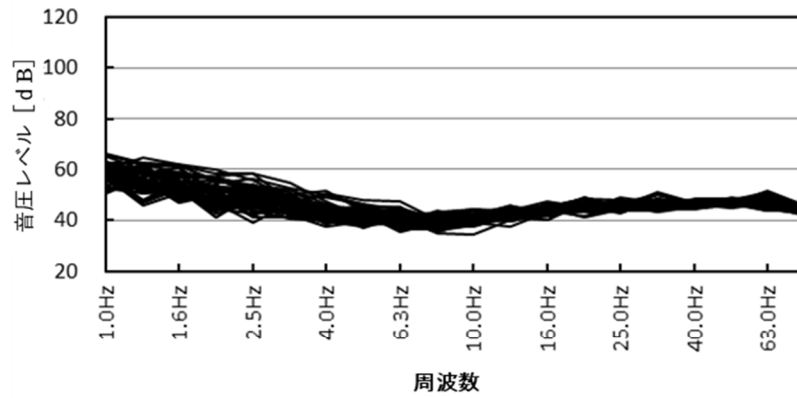


図 4-100 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月14日 0:00 から 60 秒間)

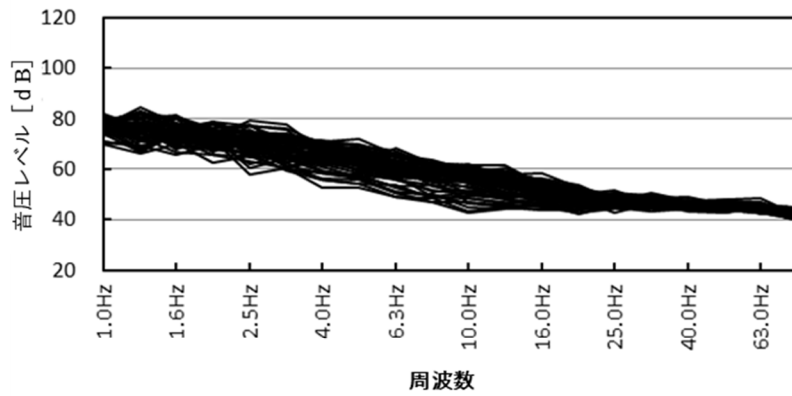


図 4-101 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月17日 14:00 から 60 秒間)

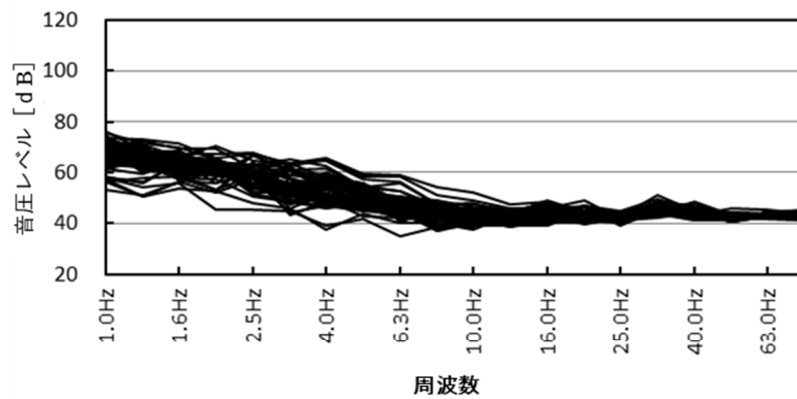


図 4-102 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月22日 0:00 から 60 秒間)

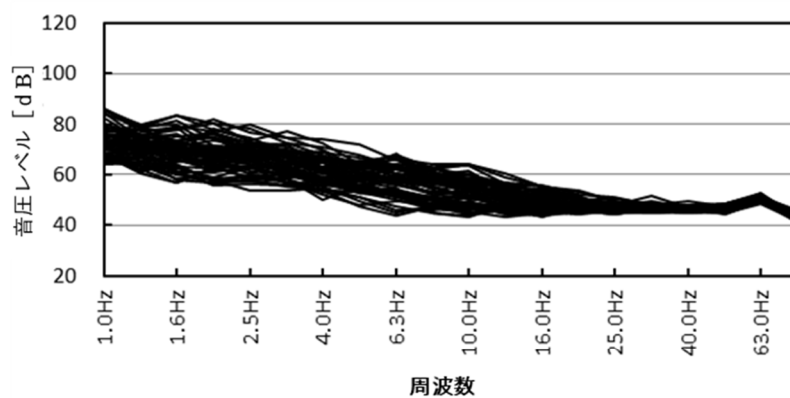


図 4-103 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月9日 12:00 から 60 秒間)

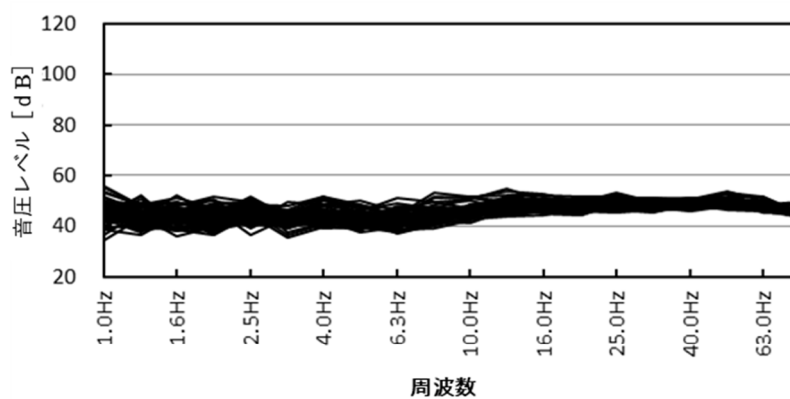


図 4-104 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月10日 12:00 から 60 秒間)

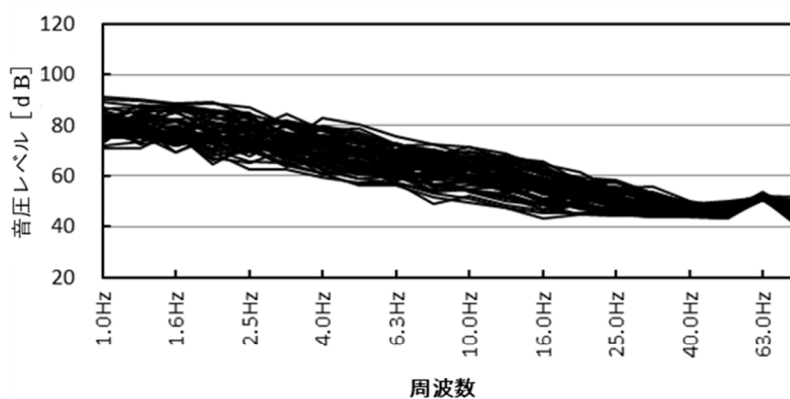


図 4-105 サイト E 音圧レベルの周波数特性(12月11日 14:00 から 60 秒間)

4.6 図表

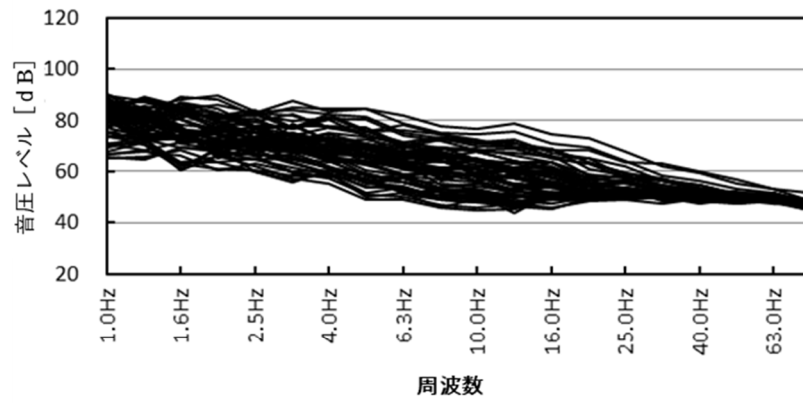


図 4-106 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月14日 11:00 から 60 秒間)

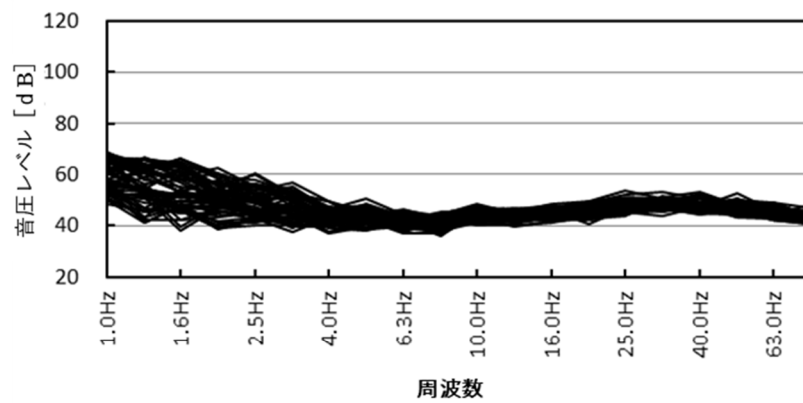


図 4-107 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月17日 18:00 から 60 秒間)

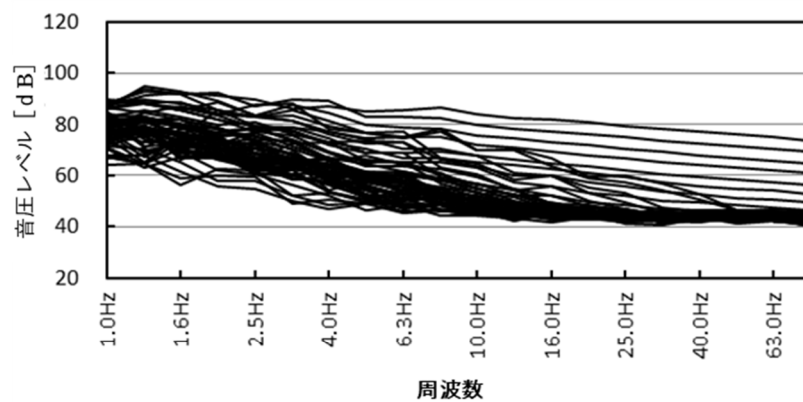


図 4-108 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月22日 1:00 から 60 秒間)

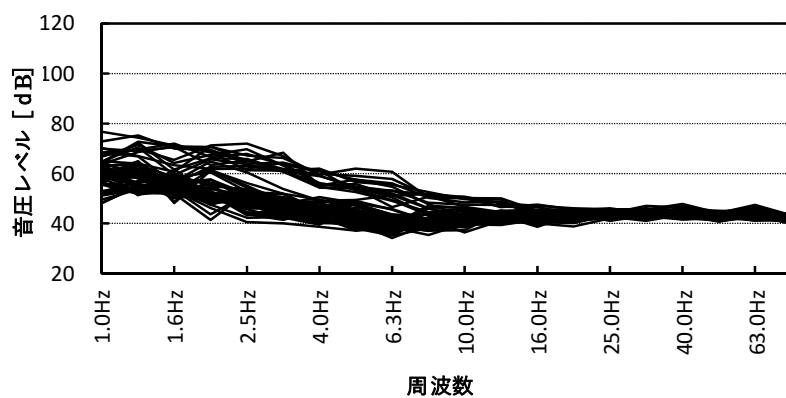


図 4-109 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月9日 23:00 から 60 秒間)

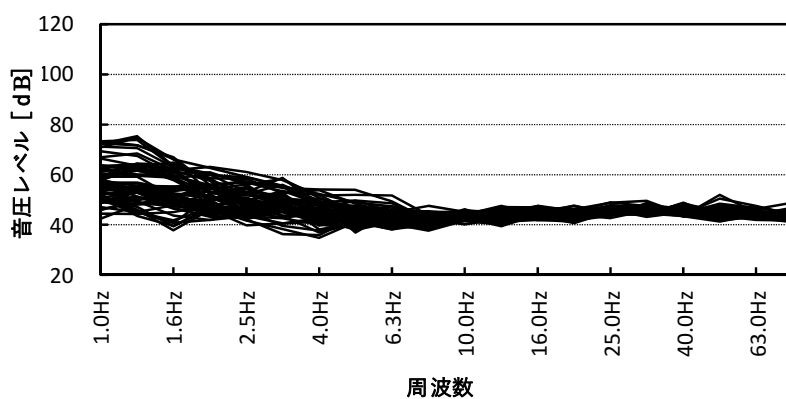


図 4-110 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月10日 16:00 から 60 秒間)

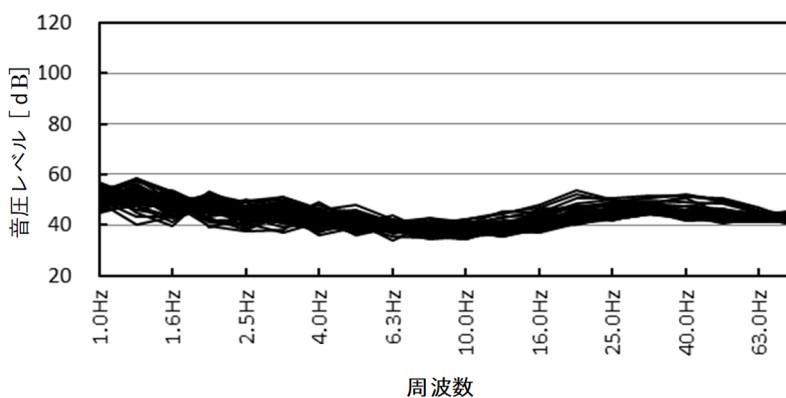


図 4-111 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (12月11日 22:00 から 60 秒間)

4.6 図表

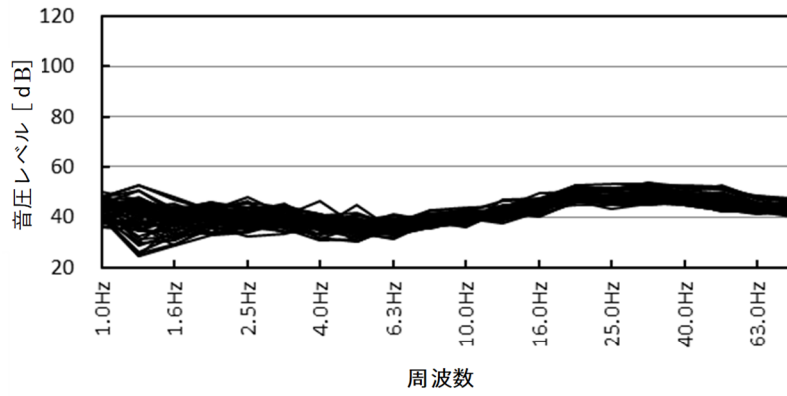


図 4-1 1 2 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (1 2 月 1 4 日 21:00 から 60 秒間)

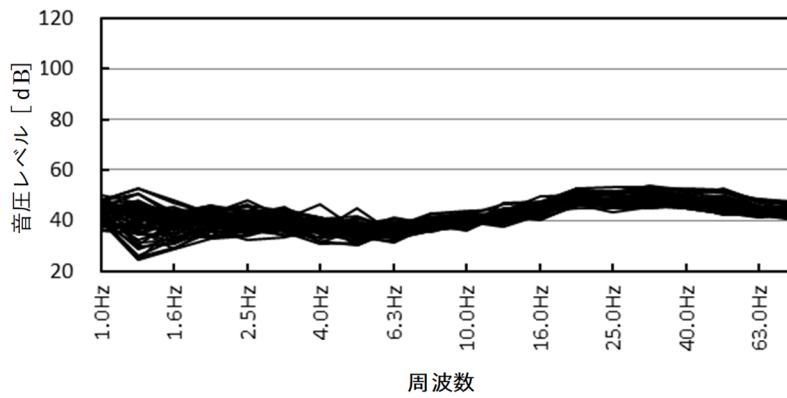


図 4-1 1 3 サイト E 音圧レベルの周波数特性 (1 2 月 1 7 日 22:00 から 60 秒間)

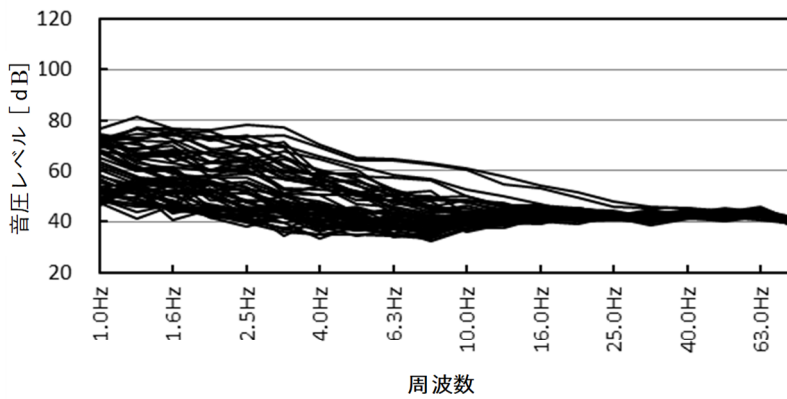


図 4-1 1 4 サイト E 音圧レベルの周波数特性(1 2 月 2 2 日 3:00 から 60 秒間)

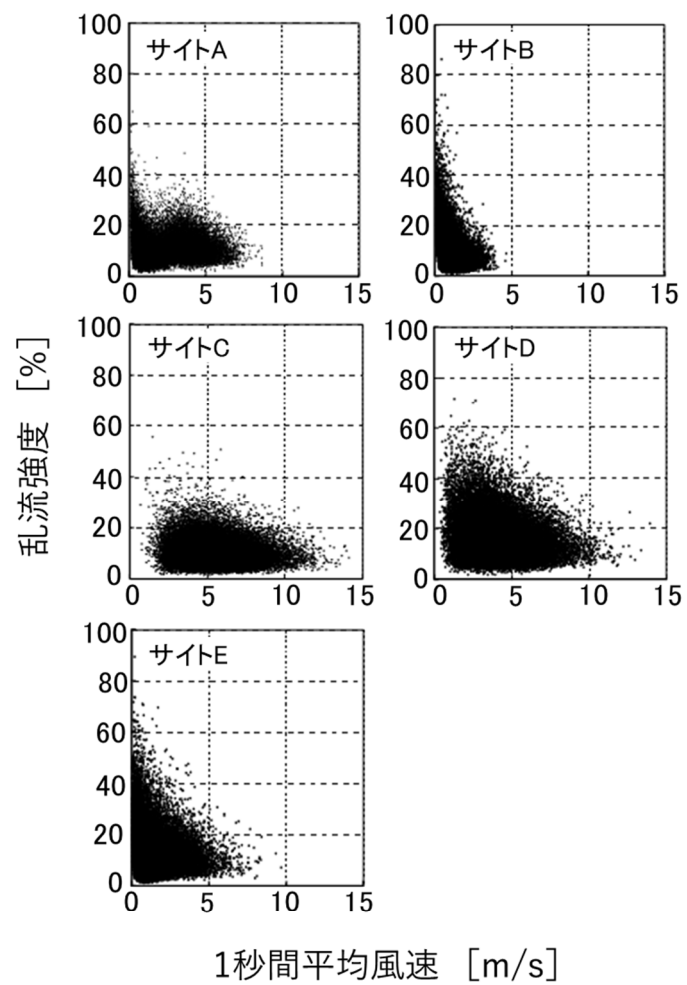


図 4 - 1 1 5 平均風速と乱流強度の關係

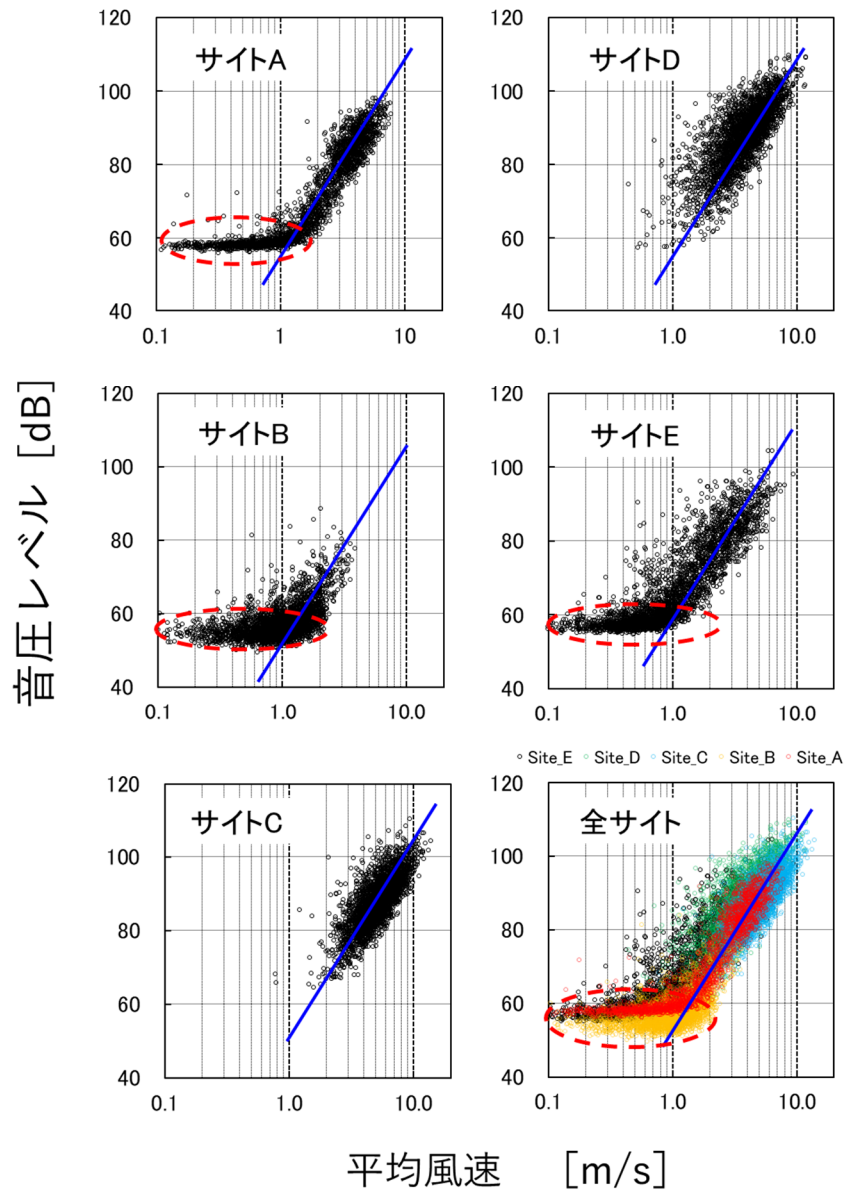


図 4-116 平均風速と風ノイズレベルの関係

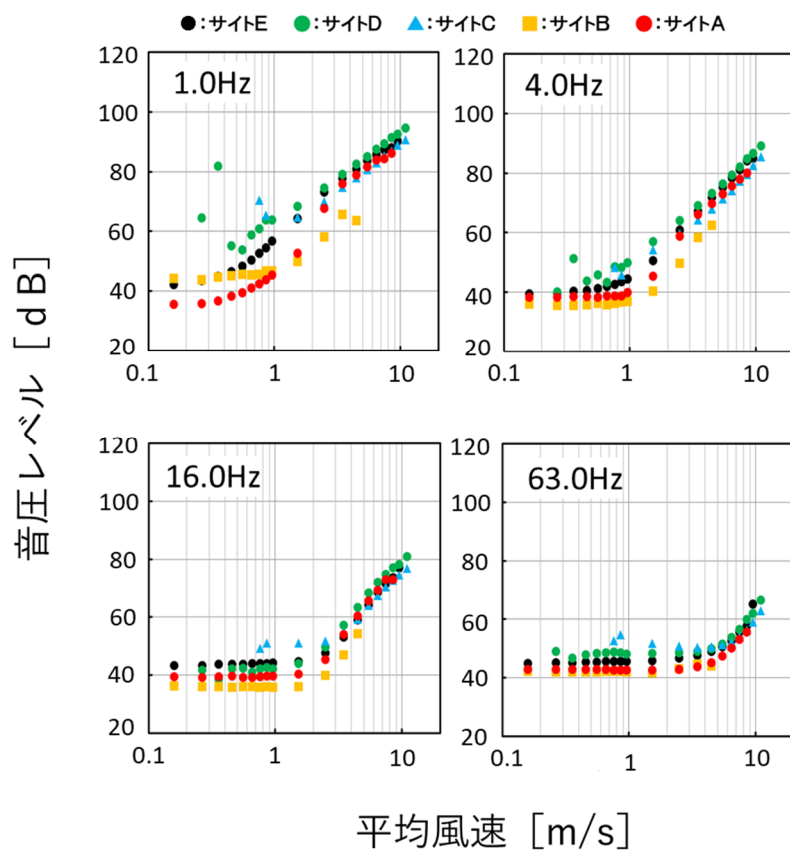


図 4-1 1 7 サイト別・周波数別の平均風速と風ノイズレベルの関係



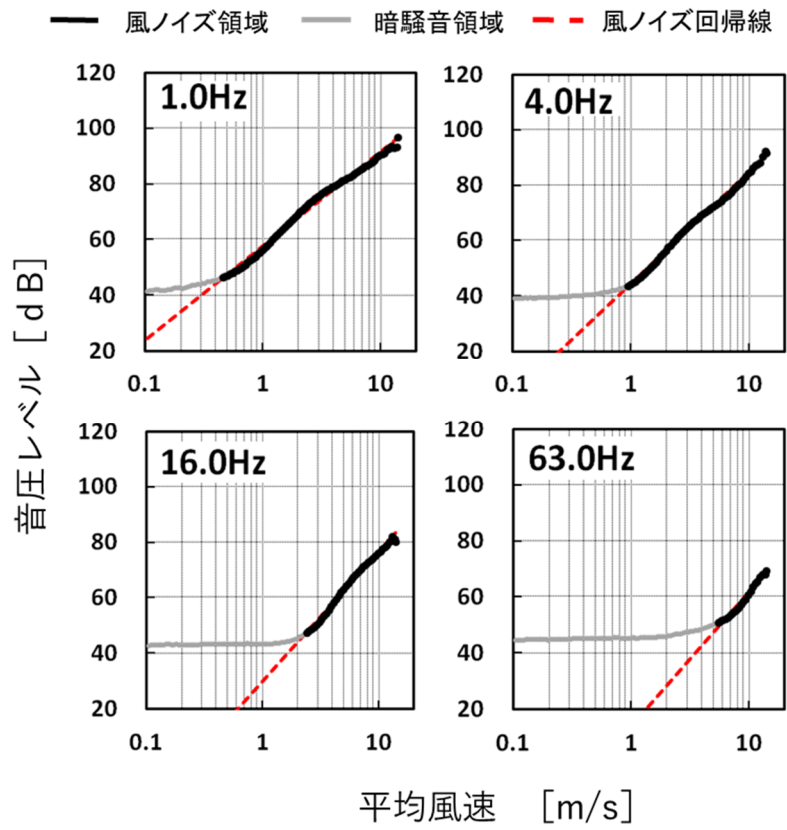


図 4-1-18 周波数別の平均風速と風ノイズレベルの関係 (全サイト平均)

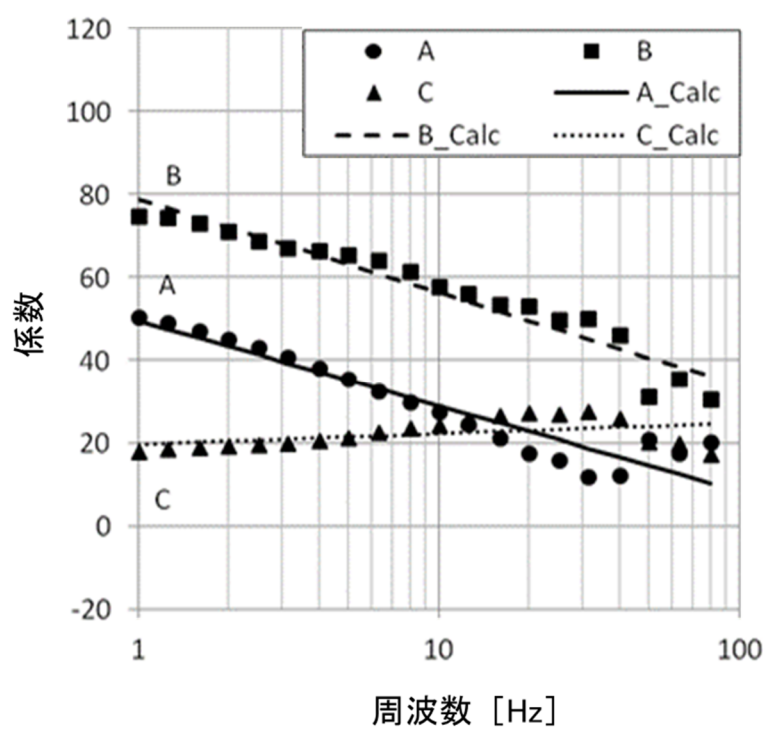


図 4-119 推計式の計数

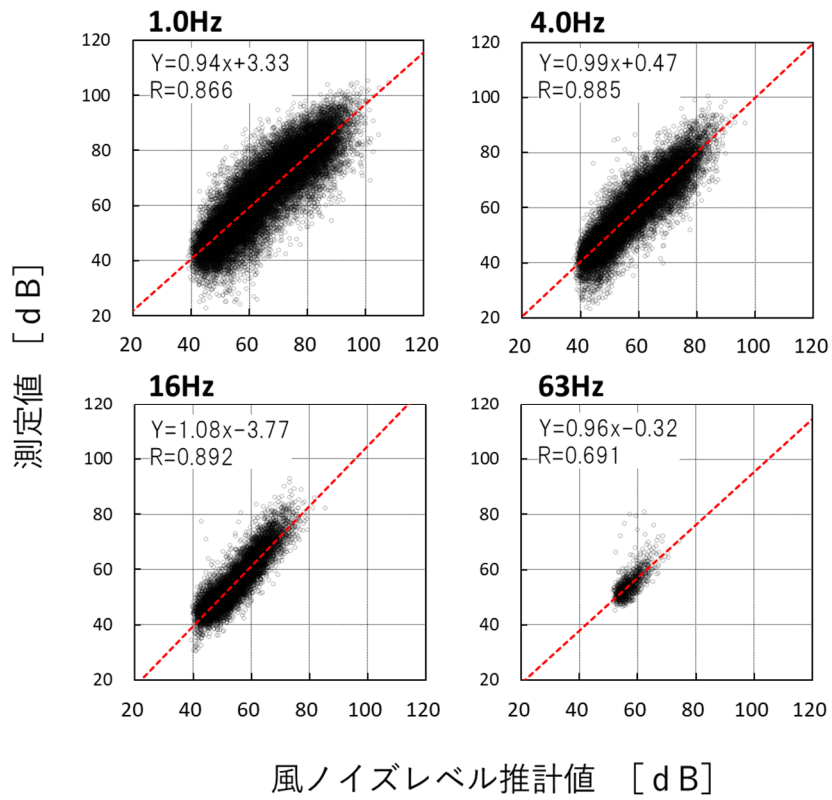


図 4-120 風ノイズ測定値と推計値の対応

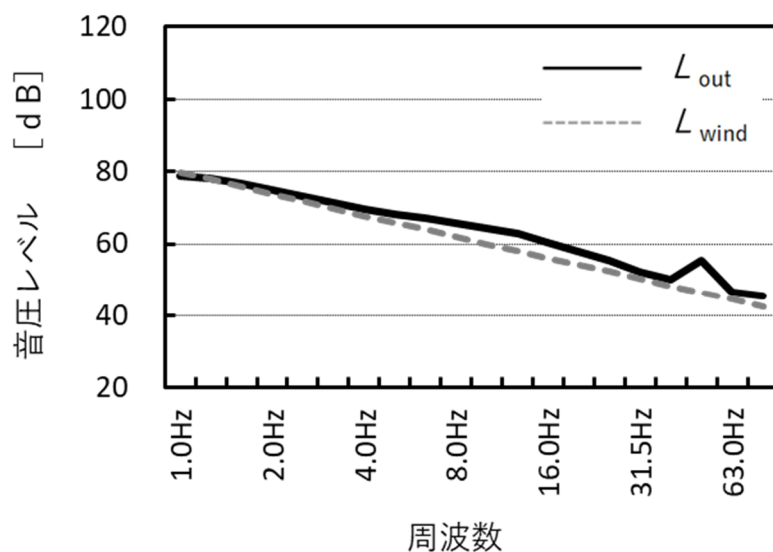


図 4-1-2-1 サイト A における測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の比較 ( $L_{eq}$ )

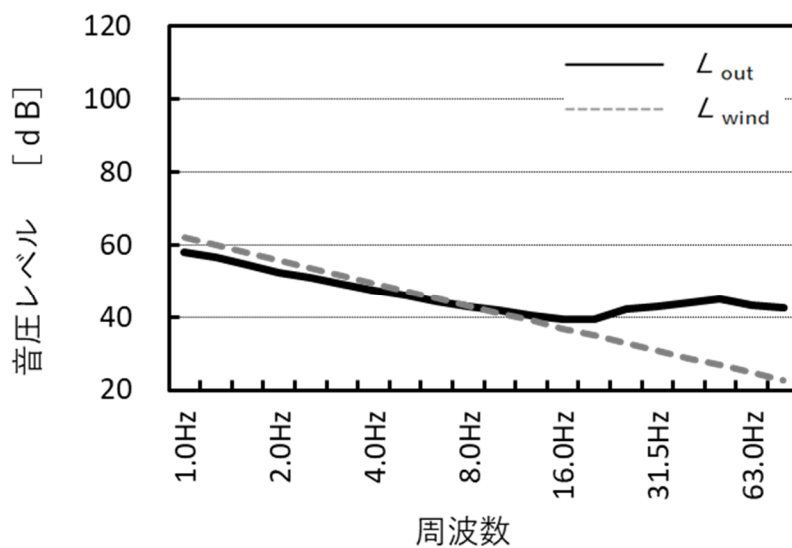


図 4-1-2-2 サイト B における測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の比較 ( $L_{eq}$ )

4.6 図表

---

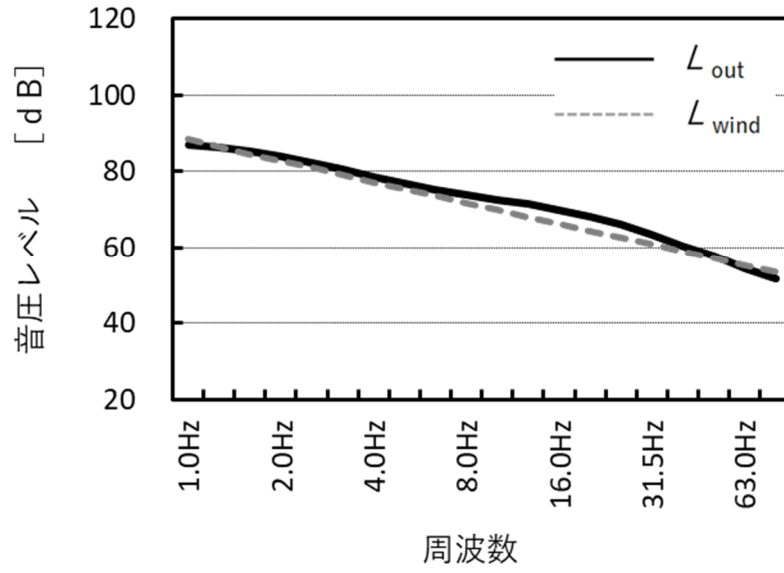


図 4-1 2 3 サイト C における測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の比較 ( $L_{eq}$ )

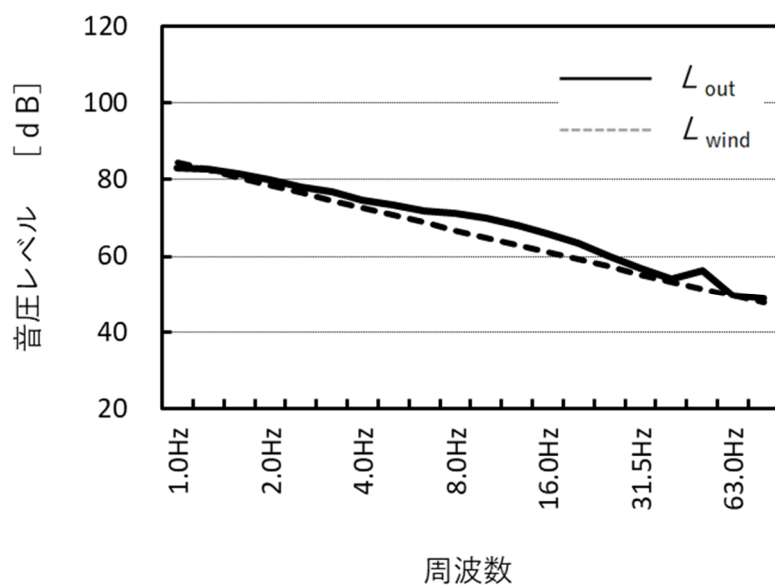


図 4-124 サイト A における 10 分間測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の比較 ( $L_{eq}$ )

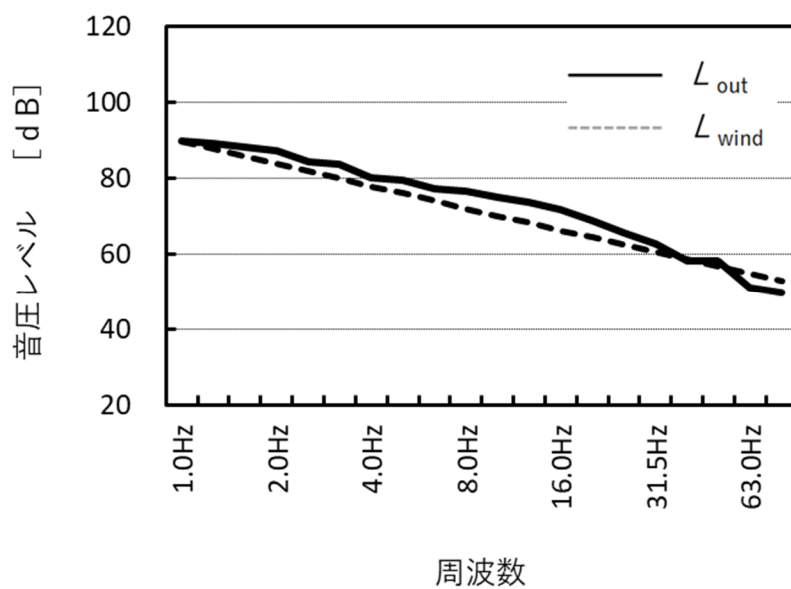


図 4-125 サイト A における 10 分間測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の比較 ( $L_5$ )

## 第5章 道路橋における風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計式の適用性の検証

第4章で導出した流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の適用性を検証するために、実際に低周波音(目的音)が発生している場所において評価を実施する必要がある。

本章では、低周波音の発生状況が既知の道路橋において風ノイズの測定を行い推計式の適用性を検証した。

### 5.1 検証用道路橋

低周波音の発生状況が既知で検証に選定した道路橋の横断構成を図5-1に、側面構成を図5-2に、橋梁諸元を表5-1に示す。建設当時の検証用道路橋は、上下線ともに2車線構造の4径間鋼単純合成鈹桁が2連で施工されていた。しかし、供用後の交通量の増加や車両の大型化に伴い、補強縦桁増設、3車線化に伴う拡幅工事、B活荷重対策としての支承のゴム沓化、活荷重及び後荷重に対するモーメントの平準化を目指した主桁及び床版の連続化、断面剛性の向上を図るため中央分離帯側主桁の箱桁化など様々な補強が施されている橋梁である。

当該橋梁では、過去に道路橋を起因とする苦情が発生しており、低周波音対策として運動量交換型衝撃吸収ダンパーの実験を行った実績があり、道路橋上部工の振動加速度や低周波音等の調査が行われ特性が明らかとなっている [46]。以下に、当時の橋梁振動等調査結果を示す。

#### 5.1.1 検証用道路橋の振動特性

橋梁振動等調査における、測定点の配置を図5-3に示す。

床版振動は、鉛直方向の測定、主桁ウェブ振動は、水平方向の測定とし、調査は各測定点を同期させ、大型車の単独走行時及び車群走行時の走行形態別調査と10分間の連続調査を行った。併せてジョイント直下及び敷地境界における低周波音と橋脚付近及び敷地境界における地盤振動の調査を行った。また、車両の走行状態を確認するため、橋梁の壁高欄にCCDカメラを設置し撮影した。

分析は、各測定点のFFTによるスペクトル分析及び加速度波形分析を行った。

## (1) 橋梁振動

橋梁振動の特性を把握することを目的とし、10 分間連続測定データの分析を行った。その一例として FFT 分析によるスペクトルを図 5-4 に示す。(a) 支間 1/4 測定点における床版加速度スペクトルの卓越は 13.3Hz, (b) ジョイント近傍の測定点では、30Hz から 50Hz 付近の加速度成分が卓越している。(c) 低周波音のスペクトル分析結果では、桁下 1m の S01 測定点及び敷地境界の S02 測定点ともに、4.0Hz が最も高い卓越周波数となっており、続いて 13.3Hz で音圧が高い値を示している。一方(d)の地盤振動スペクトルでは、低周波音の傾向とは異なり、13.3Hz が最も高い卓越周波数で、続いて 40Hz, 70Hz 及び 4.0Hz が同程度の振動加速度となっている。

## (2) 大型車の単独走行と車群走行

走行形態が単独走行時と車群走行時の違いによる橋梁振動の特性を把握するために、大型車単独走行時 11 データと車群走行時 7 データを測定した。

これらのデータのうち、大型車単独走行時及び第一走行車線を 1 台、第二走行車線を 1 台、追越し車線を 2 台の大型車両が走行(図 5-5)したときの車群走行時データを分析し、その結果を図 5-6 に示す。

これらは、桁下 1m 地点(SPLJ)と敷地境界地点(SPLK)における低周波音のスペクトルである。単独走行時の周波数では 4Hz 付近で卓越しているが 13.3Hz 付近の音圧は小さい。一方、車群走行時では、13.3Hz 前後に複数の卓越周波数が表れており、また音圧も 4Hz と同等の大きさとなっている。

次に、橋梁支間 1/4 測定点における走行形態別の分析結果を図 5-7 に示す。

床版の振動加速度(a)単独走行時スペクトルと(b)車群走行時のスペクトルでは、双方ともに 13.3Hz 付近の成分が卓越している。

これは、前出の低周波音の卓越周波数と同様であり、測定点の支間位置により振動しやすいモードがあり、その影響が床版加速度及び低周波音における 13.3Hz 付近の成分が卓越する一因となっているものと考えられる。

一方、走行形態別の加速度波形(図 5-7(c)及び(d))では、単独車走行時の Filter 20Hz～40Hz の振動加速度及び Filter 30Hz～50Hz の振動加速度がジョイント通過後に衝撃的な波形となっているが、比較的短時間で減衰している。これに対し、車群走行時の同周波数帯の Filter 波形では、複数の大型車が走行していることから、先頭車両がジョイント通過後しばらく



## 5.2 風ノイズレベル $L_{wind}$ の測定日時

---

の間、振動加速度が大きい時間帯が続いている。また、13Hz～14Hz フィルター波形では、単独車走行時、車群走行時ともにジョイント通過の後、徐々に振動加速度が増加する傾向にある。なお、調査対象車群とは別の通行車両による影響を除外するため(b)車群走行時スペクトル及び(d)車群走行時波形において、2.5 秒から 9.5 秒の時間帯で分析を行った。

### (3) 振動モード形状

車両の走行に伴う検証対象橋梁の振動姿態を確認するために、橋梁振動等調査と同時に図 5-8に示す測定点における橋梁床版の振動データを測定した。このデータを使用し、振動モード図を作成した。30 分間の加算平均処理データより基準点を V10 として各点の伝達関数を出力した。作成したモード図から、支間 1/2 測定点と支間 1/4 測定点の傾向について分析した。鉛直曲げ1次モードを図 5-9に、鉛直曲げ2次モードを図 5-10に示す。なお、図 5-8に※で示した測定点では調査を行っていないため、分析にあたっては測定点 V16 のデータを使用した。

それぞれの固有モードによると、支間 1/2 測定点は振動数 4.0Hz のモードで振動が大きい腹の地点である。一方、振動数 13.3Hz のモードでは振動が小さい節の地点にあたることを確認できる。また、支間 1/4 測定点は振動数 13.3Hz のモードでは振動が大きい腹の地点であるが、振動数 4.0Hz のモードでは比較的振動の小さい地点にあたることを確認できる。

以上の結果より、検証用道路橋の卓越振動数は、鉛直曲げ一次モードで 4.0Hz、鉛直曲げ2次モードにおいて 13.3Hz であるものと考えられる。

## 5.2 風ノイズレベル $L_{wind}$ の測定日時

風ノイズレベル  $L_{wind}$  の測定日は、検証用道路橋から発生している低周波音  $L_{sound}$  と計測システムに含まれる風ノイズレベル  $L_{wind}$  の影響を把握することを目的としているため、できるだけ広範囲の風速域のデータを得ることとし、表 5-2に示す日時に測定を実施した。

なお、風ノイズレベル計の設置状況を写真 5-1に示す。

## 5.3 分析結果

風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の検証に活用するデータの評価時間 1 秒間における平均風

---

速のヒストグラムを図 5-11に示す. 図より全般的に低風速の出現頻度が高いものの平均風速が 9m/s を超えるデータも含まれていることが分かる.

### 5.3.1 評価閾値

我が国において, 環境庁から低周波音による苦情発生の参考値 [14]として「建具のがたつき閾値」と「感覚閾値」が公表されている(図 5-12). このうち建具のがたつき閾値(図 5-12の破線)は, 実験室において定常的純音を放射し, 建具のがたつき始める最小音圧レベルを求めたものである. この実験は, 1977 年に環境庁が行った調査 [50]で, 対象となった建具は, 障子のほか, 襖, 木製ガラス戸, 木製引き戸が含まれており, 近年の建築に用いられている建具とは異なる材質や構造が使用されている. また, 実験結果は, 低域側の周波数帯として 5Hz まで示されているが, 道路橋から発生する振動の鉛直一次モードは, 約 4Hz 前後に出現するとの知見 [46] [47] [48]もあり, この参照値による評価では周波数範囲を逸脱する. 一方, 2002 年に落合らによって公表された建具のがたつき始める閾値(図 5-12の実線) [51] では, 近年の建築に使用されている建具を対象とした実験であるとともに, 低域側の周波数帯も 2Hz まで示されている. これらを総合的に考慮し, 本論文では, 建具のがたつき始める閾値として, 落合らの実験に基づく建具のがたつき閾値(2002)も併記することとした.

### 5.3.2 評価閾値と風ノイズレベル $L_{wind}$ 推計値

第 4 章で風ノイズレベルデータを収集した図 4-115によると, 各サイトともに平均風速  $u_0$  の上昇に伴い乱流強度  $I_u$  は概ね 10%に収束していることから乱流強度  $I_u$  を 10%に固定し, 風ノイズレベル  $L_{wind}$  を平均風速  $u_0$  別に推計計算した結果を図 5-13に示す. また, 同様に, 検証に用いるフィールド測定データの平均風速階級(図 5-11)より出現頻度が高い風速として 2m/s を採用し, 乱流強度  $I_u$  別に推計計算した結果を図 5-14に示す. 一般に dB の合成を考えると, 信号とノイズの比率(以降「S/N 比」と記す)が 10dB 以上確保できていれば測定値に対し風ノイズの影響は少ない. 図 5-13より 5Hz 帯の建具のがたつき始める閾値(建具のがたつき閾値 1977)は 70dB であるので, S/N 比を考慮すると 60dB 以上の風ノイズが発生すると建具のがたつきの判断に影響を与えることとなる. 図 5-13の 5Hz 帯では, 平均風速 3m/s で 60dB を超えている. そのため, 5Hz 帯において建具のがたつき始める閾値の 70dB と同程度の低周波音が発生している橋梁の場合, 風速 3m/s で測定値に風ノイズが影響し始め, 風速が増すごとに, その影響が増大することを確認できる. したがって, 乱流強

度  $I_u$  が 10% 程度の出現頻度が高い検証対象橋梁においては、低周波音が原因で建具ががたつくか否かを判断する上で、測定値に影響を及ぼす風速の判断目安は 3m/s 以上になるものと考えられる。同様に、図 5-14より風ノイズの影響を推察すると、平均風速  $u_0$  が 2m/s の場合、5Hz 帯においては、乱流強度  $I_u$  が 20~30%以上で影響することとなる。これは、乱流強度が大きい風況地域では、平均風速  $u_0$  が低い場合であっても風による影響に注意を払う必要があることを示唆している。

#### 5.3.3 測定データ分析結果

検証対象道路橋の付近で測定した低周波音測定データから出現頻度の高い 10~20% 範囲の乱流強度  $I_u$  のデータを抽出し、平均風速  $u_0$  の階級別に低周波音圧レベルを算出し平均化した結果を図 5-15に示す。同様に、平均風速  $u_0$  が 1~2m/s の範囲で抽出したデータを乱流強度階級別に整理した結果を図 5-16に示す。

これらの分析結果には、風ノイズレベル  $L_{wind}$  に加え道路通行車両に起因する橋梁本体の振動と連成し発生する低周波音が含まれている。また、平均風速  $u_0$  が 0~1m/s の風速階級は、風ノイズの影響が最も小さいと推察されることから、この階級の周波数分析結果を道路橋からの低周波音と仮定し考察を行う。

図 5-15では、1~2Hz 帯付近において風ノイズによる低周波音圧レベルの上昇がみられる。例えば、1.25Hz 帯では風速階級 0~1m/s と比較し風速の大きい 9~10m/s では 35.9dB の音圧上昇となっている。このように風速階級が上昇するごとに音圧レベルも上昇する傾向は、9~10m/s の階級を除き、前出の風速別風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値(図 5-13)と同様の傾向を示している。したがって、本論文で提案する風ノイズ推計式手法は、道路橋付近の実測結果と概ね一致しており妥当と判断される。既往の研究 [46]によれば、この道路橋の振動加速度スペクトルのピーク値は、4Hz 及び 13Hz である。一方、本研究で測定した低周波音の卓越周波数は、1/3 オクターブバンド中心周波数において 4.0Hz 帯と 12.5Hz 帯に現れており橋梁振動が原因で低周波音が発生していることが分かる。また、低周波音の音圧は、建具のがたつき閾値(2002)とほぼ同等あるいは若干高いレベルとなっている。卓越周波数 4.0Hz 帯の音圧レベルは、平均風速  $u_0$  の上昇と無関係となっている。これは、道路橋から発生している低周波音の音圧レベルが風ノイズに影響されない大きさの音圧レベルとなっていることによるものと考えられる。一方、12.5Hz 帯では 3~4m/s の風速階級から影響が現れ始め 9~10m/s では 4.2dB の上昇となっている。以上の結果と前節の結果を基に考察すると、この道路橋では、平均風速約 3m/s 以上で風ノイズによる音圧の上昇が測定結果に影響し始めるものと考えら

れる。

一方、乱流強度別の低周波音圧レベルの分析結果(図 5-16)においても、平均風速階級別の低周波音圧レベルと同様な傾向を示しており、乱流強度 0~10%の音圧レベルと比較し、1.0Hz 帯では乱流強度が高くなるにつれて音圧レベルも高くなる傾向を示している。しかしその上昇傾向は、風速別低周波音圧レベルと比べると小さく、このことから乱流強度の上昇による風ノイズの影響は比較的小さいものと考えられる。

次に、任意に抽出した 11:40~15:00 の時間帯における 1.0Hz 帯の低周波音圧レベルの時刻歴波形を図 5-17に示す。1.0Hz 帯は、前出の説明のとおり、道路橋から発生する低周波音の影響が小さい周波数帯である。図中の  $L_{out}$  は、音圧レベル測定値を、 $L_{wind}$  は、風ノイズレベル推計値を示しており、それぞれ、平均化時間1分間の音圧レベルである。音圧レベル測定値  $L_{out}$  と風ノイズレベル推計値  $L_{wind}$  の時刻歴波形はよく一致しており、本論文で提案する風ノイズ推計手法の妥当性を示唆しているものと考えられる。

#### 5.3.4 任意抽出データによる風ノイズ $L_{wind}$ 推計式の検証

表 5-2に示すデータのうち任意に抽出した 2015 年 3 月 4 日、16:00~17:00 の 1 時間の測定データを用い、一例として周波数 1.0Hz、4.0Hz、12.5Hz 及び 63.0Hz 帯における測定値  $L_{out}$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値の対応を評価時間1秒間のデータを 10 秒ごとに平均し、回帰分析した結果を図 5-18に、同じく時刻歴波形を図 5-19に示す。

図 5-18の 1.0Hz 帯では、相関係数が 0.7060 で強い正の相関を示すとともに 45 度線の上にデータが集まっており、測定値と推計値が良く一致している。このことから 1.0Hz 帯の低周波音圧レベルは、風ノイズが主体的であることが理解できる。一方、4.0~63.0Hz 帯では、推計値に比べ測定値の方が大きいレベルとなっており、道路橋から発生している低周波音の影響が現れているものと考えられる。ただし、回帰直線の傾きに注目すると、1.0Hz 帯は 0.801 で 1 に近いことから風ノイズ主体的であることが分かる一方、4.0Hz 帯、12.5Hz 帯及び 63.0Hz 帯の傾きは、0.1221~0.0201 で、若干ではあるが右肩上がりとなっており、風ノイズに影響されているデータも含まれているものと推察される。

図 5-19の時刻歴波形も、回帰分析結果と同様な傾向を示し、1.0Hz 帯は測定値  $L_{out}$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は一致した波形となっている。一方、4.0Hz 帯、12.5Hz 及び 63.0Hz 帯は、測定値  $L_{out}$  のレベルと比較し風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は、全体的に低いレベルで推移しており、道路橋からの目的音  $L_{sound}$  が主体となっている。しかし、レベル差が 10dB 以内の時間帯も部分的に現れており、S/N 比を考慮すると、これらの時間帯には風によ

る影響が含まれているものと考えられる。

### 5.4 風ノイズによる影響評価

#### 5.4.1 道路橋から発生する低周波音と風ノイズ

道路橋から発生する低周波音の評価を目的とし測定を行った低周波音測定値  $L_{out}$  と同時に観測した風速データを基に推計した風ノイズレベル  $L_{wind}$  の関係を考える。

風ノイズレベル推計式の適用性検証に用いた道路橋(以降「T 橋」と記す)で測定した  $L_{out}$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値の関係を図 5-20 に示す。また、比較対象として低周波音の発生レベルが小さい道路橋として K 橋(表 5-3, 図 5-21 参照)における結果を図 5-22 に示す。これら測定値には、目的音である橋梁から発生している低周波音  $L_{sound}$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  による音圧が合成されている。

測定値  $L_{out}$  の周波数特性をみると、図 5-20 の T 橋では、4.0Hz 帯と 12.5Hz 帯が、図 5-22 の K 橋では、3.15Hz 帯と 20.0Hz 帯が卓越周波数となっている。一方、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は、どちらの橋梁も低周波数帯域から高周波数帯域にかけ右肩下がりの周波数特性となっている。T 橋のピーク周波数である 4.0Hz 帯と 12.5Hz 帯に着目すると、測定値  $L_{out}$  は、風ノイズレベル  $L_{wind}$  よりも約 20dB 高く、dB 合成の数式から判断すると風ノイズが測定値に与える影響は少ないものと考えられる。一方、K 橋のピーク周波数 3.15Hz 帯と 20.0Hz 帯を含む広い周波数帯で、測定値  $L_{out}$  と風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値は近接しており、風ノイズの影響が想定される。特に、2.5Hz 以下の周波数帯域では風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値が測定値  $L_{out}$  を上まわっており、風ノイズによる影響を受けていることは明らかである。

以上より、風ノイズレベル  $L_{wind}$  を推計することにより、低周波音の測定値  $L_{out}$  に含まれる風ノイズの影響を定量的に評価することができるものと考えられる。

#### 5.4.2 風速の小さい時間帯を抽出し分析する方法

本研究で開発製作した風ノイズレベル計は、測定と同時に1秒ごとにデータが記録されている。そこで、風ノイズレベル計を用い低周波音の現地測定に十分な期間を確保できる状況においては長期測定を行い、風速の小さな日や時間帯を抽出し評価を行うことにより、風ノイズの影響を低減できるものと考えられる。その一例として前出のT橋において、長期間測定データのうち平均風速が 1.0m/s となった日の分析結果と平均風速 3.3m/s の日の結果を図 5-2

3に示す。平均風速が小さい1.0m/sの分析結果は、風ノイズの影響も小さいことから、道路橋より発生している低周波音に近い周波数特性と考えられる。そこで、両者の差分は風ノイズによる影響と考えると、1.0Hz～3.15Hz帯域及び5.0Hz～10.0Hzの周波数帯域で風ノイズの影響が現れており、1.25Hz帯において最大17.4dBの上昇となっている。

道路橋が発生源と考えられる低周波音の苦情に対して対策を検討する場合、建具のがたつき閾値(図5-23の点線)を参考に進められることが多い。ただし、建具のがたつき閾値は苦情の原因が低周波音によるものか否かを判断するための目安であって、基準値や規制値とは異なることに注意を要するものの、対策すべき低周波音の周波数と低減量を決める目安として用いられることが一般的である。図5-23の平均風速1.0m/sのグラフに着目すると、道路橋が原因と考えられる低周波音は、4.0Hz帯と12.5Hz～20Hz帯域においてレベルが高い。また、建具のがたつき閾値と比較すると、10.0Hz～16.0Hz帯域及び建具のがたつき閾値は5.0Hz未満の値が示されていないが4.0Hz帯以下も5.0Hz帯と同程度と仮定するならば2.5Hz帯～6.3Hz帯域において測定した低周波音の方のレベルが高く、これらの周波数帯域の対策を検討する必要がある。一方、平均風速3.3m/sのグラフと建具のがたつき閾値を比較すると、16.0Hz帯以下すべての帯域で低周波音のレベルが建具のがたつき閾値を超えており、対策を検討すべき帯域が広がっている。平均風速1.0m/sのグラフから分るとおり、一般的には、4.0Hz帯及び12.5Hz帯の低周波音の音圧を下げる対策を検討すべきところであるが、16.0Hz帯以下すべての周波数帯を対策の検討対象に入れてしまうと、誤った判断に基づき対策を実施する可能性がある。このことから、風ノイズの影響を適切に評価した上で対象となる周波数帯を決定し、苦情に対する対策方法を検討することが重要である。

以上の結果、風ノイズレベル計で測定したデータを、事後処理により低風速の日や時間帯、あるいは、風速の小さいデータのみ抽出し分析することにより風ノイズの影響が低減され、外的要因が少ない信頼性の高いデータとして活用できるものと考えられる。

### 5.4.3 S/N比に着目した評価方法

前節で説明したように、十分な測定期間を確保できる場合は、風速が小さな日や時間帯を選定し分析することにより問題とはならないが、実際の現場では地域住民との協議により調査日が限定されることもあり、風ノイズ影響下での測定も多く実施されている。そのためここでは、道路橋から発生する低周波音を目的音  $L_{sound}$  とし、測定値  $L_{out}$  に含まれる風ノイズによる影響を、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値を活用した簡易な評価方法を提案する。

道路橋付近で測定した低周波音の測定値  $L_{out}$  を目的信号、風ノイズレベル  $L_{wind}$  をノイ

ズ信号と考える。デシベル合成の数式で計算すると目的信号とノイズ信号の比(S/N 比)が10dB 以上あれば、ノイズ信号が目的信号に与える影響は小さい。

そこで、本論文では、測定した風速データを活用し推計計算を行った風ノイズレベル  $L_{wind}$  に対し、+10dB を影響閾値とし、その範囲内に低周波音測定値  $L_{out}$ が入っている周波数帯は風による音圧上昇が含まれるものと考え、測定値に含まれる風ノイズの影響を評価する。

図 5-24に T 橋、図 5-25に K 橋の低周波音測定値  $L_{out}$ と風ノイズレベル  $L_{wind}$ 推計値及び風ノイズレベル  $L_{wind}$ 推計値に 10dB 加えた風ノイズ影響閾値を示す。

道路橋の低周波音対策を実施するうえで卓越周波数の音圧レベルを下げることを目的とする対策を考える。T 橋の卓越周波数 4.0Hz 帯及び 12.5Hz 帯の測定値  $L_{out}$ は、ともに影響閾値を上回っており、両卓越周波数帯では、風ノイズによる影響は少ないものと考えられる。

以上の結果より、T 橋の測定データは、風ノイズによる影響が小さく対策工などの検討データとして有効と判断できる。

一方、K 橋の卓越周波数 20.0Hz 帯の測定値  $L_{out}$ は、かろうじて影響閾値を上回っており風ノイズによる影響は小さいものと考えられるが、3.15Hz 帯では、影響閾値以下となっており風ノイズの影響が含まれている。さらに、2.5Hz 以下の周波数帯では、風ノイズレベル  $L_{wind}$ 推計値が測定値  $L_{out}$ を上回っており、測定値  $L_{out}$ には風ノイズが大きく影響しているものと推察される。したがって、K 橋の場合、測定データの中から風ノイズの影響が小さい時間帯を抽出し、対策工の検討等を行うべきである。また、風ノイズの影響が小さい時間帯が得られない場合は、日を改めて測定を実施し、風ノイズの影響が小さいデータを活用し、対策工等の検討を行う必要がある。

以上の結果より、S/N 比+10dB を風ノイズ影響閾値とし評価することで、概ね実測データが対策工等の検討に有効であるか否かを判断できるものとする。

### 5.4.4 音圧レベルの最小値に着目した評価方法

前項では、S/N 比に着目し、風ノイズによる影響の評価を試みた。しかし本研究では、平均化時間が短い1秒間のデータも活用できる。そこで、平均化時間 1 秒間のデータを使い風ノイズにより影響を受けたデータの除外を行った上で評価する方法を試みる。

図 5-26は、T 橋における平均化時間 1 秒間、6.3Hz 帯の測定値  $L_{out}$ を縦軸に、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値を横軸に示している。また、前節で提案した風ノイズ影響閾値として S/N 比+10dB を一点鎖線で示す。この閾値以下のデータには風ノイズの影響が含まれるため

分析データから除外する。その結果、残った黒色で着色された部分が有効データとなる。しかし、有効データを俯瞰すると、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値の上昇に伴い音圧レベル測定値  $L_{out}$  も上昇する領域(楕円-実線)があり、これらのデータは、風ノイズの影響を完全に除外しきれないものと推察される。そのため、新たな風ノイズ影響データの除外方法を考える。

本論文では、測定時間内における音圧レベルの最小値を  $L_{min}$  と定義する。音圧レベルの最小値  $L_{min}$  の値は、当該サイトにおける測定時間内の最小値であるから、背景騒音レベルに近い値と考えられる。したがって音圧レベルの最小値  $L_{min}$  値は、風ノイズによる影響が最も小さいデータと言っても過言ではない。そのため、測定データから求めた音圧レベルの最小値  $L_{min}$  値と等価な風ノイズレベル推計値には、風ノイズによる影響が含まれていないものと仮定し、風ノイズ影響閾値として設定する。これを、図 5-27～図 5-29を用いて説明すると、測定データから求めた音圧レベルの最小値  $L_{min}$  値が図中に示す一点鎖線である。このとき、音圧レベルの最小値  $L_{min}$  値と等価となる風ノイズ推計レベルは、破線で示す 45 度線との交点にあたる。この交点を風ノイズ影響閾値と考え、二点鎖線で示す。この影響閾値を上回るデータには、風ノイズによる影響が含まれているものと考え、推計計算に用いるデータから除外する。この方法によると、図 5-27の 1.0Hz 帯では、ほとんどのデータが無効データである。これらは、45 度線上に分布するデータで、風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値の増加に比例し低周波音測定値  $L_{out}$  も増加していることから、風ノイズが影響しているものと考えられる。図 5-28の 4.0Hz 帯では、過半数のデータが風ノイズに影響されず有効、図 5-29の 12.5Hz 帯では、ほとんどのデータが有効という結果となる。

図 5-30に T 橋、図 5-31に K 橋の測定値を音圧レベルの最小値  $L_{min}$  値に着目する評価方法により風ノイズ影響データの除外を行い、周波数分析を行った結果と、風ノイズ除外前の分析結果を合わせて示す。なお、除外後のうち、風ノイズ影響データの除外により、100 以下のデータ数となった周波数帯を点線で示した。

T 橋(図 5-30)の除外後の分析結果と除外前の分析結果を比較すると、3.15Hz 帯以下の周波数帯域及び 6.3Hz 帯付近で乖離が見られ、これらの領域で風ノイズが影響しているものと判断される。この結果は、前項図 5-24で考察を行った T 橋における S/N 比に着目した評価結果と概ね一致する。さらに、6.3Hz 前後の帯域では、S/N 比に着目した評価結果と比較し、風ノイズによる影響がより明確に示されており、音圧レベルの最小値  $L_{min}$  に着目した評価手法は、風ノイズによる影響を低減しているものと考えられる。また、測定日が異なるため明確には言えないものの、図 5-23の平均風速 1.0m/s のグラフと比較すると、データ数の少



#### 5.4 風ノイズによる影響評価

---

ない 1.0Hz 帯及び 1.25Hz 帯では若干の乖離がみられるが他の周波数帯域では概ね一致しており本手法の妥当性を裏付けているものと思われる。

一方、K 橋における風ノイズの影響は、前項図 5-25の S/N 比に着目した評価手法では、約 16Hz 以下であったが、音圧レベルの最小値  $L_{\min}$  値に着目した手法では、約 10Hz 以下の周波数帯において風ノイズの影響が表れており、若干低周波数側にシフトする結果であった。

S/N 比に着目した評価では、推計値に 10dB 加えた値を影響閾値と考え測定値との比較を行っており、測定値には風の影響が含まれた状態での評価である。一方、音圧レベルの最小値  $L_{\min}$  値に着目した手法では、測定値から風により影響を受けているデータを除外していることを考慮すると、音圧レベルの最小値  $L_{\min}$  値に着目した手法により算出された周波数分析結果は、より実態の目的音に近い音圧レベルとなっているものと考えられる。

しかし、いずれの評価手法を使用しても、目的音が風ノイズに埋没しているデータであるか否かを判別できることが本検証により実証できたものとする。

## 5.5 まとめ

本章では、第4章において導出した流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル推計式の妥当性を検証することを目的とし、実際に道路橋から発生する低周波音が問題となっている2つの地域においてフィールド測定を実施し、検討を行った。この過程で得られた知見を以下に示す。

- 1) 構築した風ノイズレベル推計式及び係数を使い平均風速と乱流強度を一定の値に仮定し、風ノイズ推計結果と建具のがたつき閾値(1977)との關係について検討した結果、乱流強度  $I_u$  を10%と仮定し推計すると5Hzの周波数帯において平均風速3m/sから測定値に風の影響が出始める。同様に、平均風速  $u_0$  を2m/sと仮定し風ノイズを推計すると、5Hzの周波数帯で乱流強度  $I_u$  が20~30%で測定値に対し風の影響が出始める結果となった。
- 2) 低周波音が発生している道路橋付近における測定値のうち、乱流強度  $I_u$  が10~20%のデータを抽出し平均風速階級別に比較すると、道路橋に起因する低周波音の影響が少ないと考えられる1.25Hzの周波数帯では、平均風速階級0~1m/sと比較し9~10m/sでは、35.9dBとなっており風ノイズによる音圧上昇と考えられた。また、1.0~2.0Hz帯の測定値は、同条件の風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計値と概ね一致し推計式の妥当性が確認された。
- 3) 調査道路橋の卓越周波数4.0Hz帯と12.5Hz帯に着目すると、4.0Hz帯では風ノイズの影響は少ないが、12.5Hz帯では3~4m/sの風速階級から風の影響が現れ始め9~10m/sでは4.2dBの上昇が確認された。
- 4) 任意に抽出した道路橋付近の1時間の測定データを基に風ノイズ推計値と測定値の整合性を検証した結果、目的音(道路橋起因による低周波音)の影響が少ないと考えられる1.0Hz帯では、相関係数が0.7060で強い正の相関が得られた。このことから、当該橋梁の1.0Hz帯の低周波音圧レベルは、風ノイズが主体的であるものと推定された。一方、4.0Hz帯、12.5Hz帯及び63.0Hz帯は、目的音が主体的であるものの、測定値と推計値の散布図における推計式の傾きや、時刻歴波形における測定値と推計値の差が10dB以内の時間帯があり、風ノイズが影響しているデータも内在しているものと推察された。
- 5) 道路橋から発生する低周波音を目的音とし、測定値に含まれる風ノイズによる影響

を評価する方法として、風速の小さい時間帯を抽出し分析する方法、S/N 比に着目した評価方法及び音圧レベルの最小値に着目した評価方法の三手法を提案し、風ノイズの影響評価を行った。その結果、十分な日にちと時間をかけ測定を行い、その中から低風速の日または時間帯を抽出し分析することにより風ノイズによる影響を小さくすることが可能である。また、風ノイズが含まれている測定データであっても、S/N 比に着目した評価方法又は音圧レベルの最小値に着目した評価方法により風ノイズの影響を評価し、目的音が風ノイズに埋没しているデータであるか否かを判別可能であることを実証した。

本章では、風ノイズレベル推計式を実装し新たに開発製作した風ノイズレベル計を用いて、低周波音が問題になっている道路橋でフィールドデータの測定を行い、測定データから目的の低周波音を判別する方法を複数検討した結果、本研究で開発製作した風ノイズレベル計と作成した風ノイズレベル推計式を活用することで、測定した低周波音が風に埋没しているデータであるか否かを判別できることを明らかとした。

## 5.6 図表

表 5-1 道路橋諸元

項目	内容
路線名	高速自動車国道 第一東海自動車道
形式	4径間連続合成鈹桁橋 × 2連
橋長	240m
支間長	30.0m × 4径間 × 2連
幅員	16.2m
床版厚	260mm
卓越周波数	4Hz 及び 1.3Hz

表 5-2 測定日時

N. o	測定開始日時	測定終了日時
1	2014/3/3 11:30	2014/3/3 15:00
2	2015/3/4 16:00	2015/3/4 17:00
3	2015/3/10 14:00	2015/3/10 15:30
4	2015/4/1 11:40	2015/4/1 15:00
5	2015/4/3 11:20	2015/4/3 14:20
6	2015/11/27 9:45	2015/11/27 12:15

表 5-3 K 橋諸元

項 目	内 容
路線名	首都圏中央連絡自動車道
形 式	鋼 7 径間連続 2 主鈹桁
橋 長	248.5m
支間長	35.5m × 5連 + 34.85 × 2連
幅 員	11.4m
床版厚	320mm



写真 5-1 風ノイズレベル計の設置状況

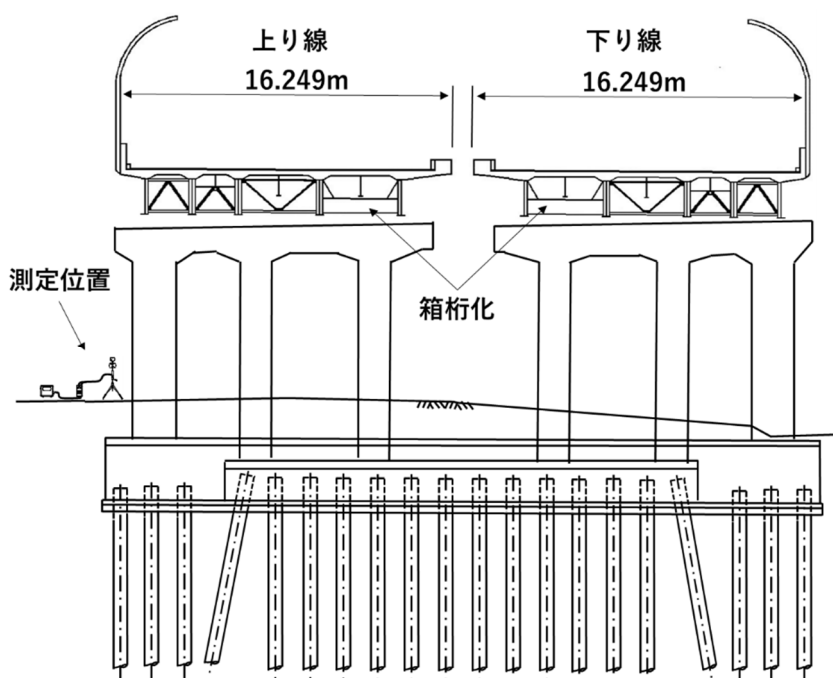


図 5 - 1 検証用道路橋の横断構成

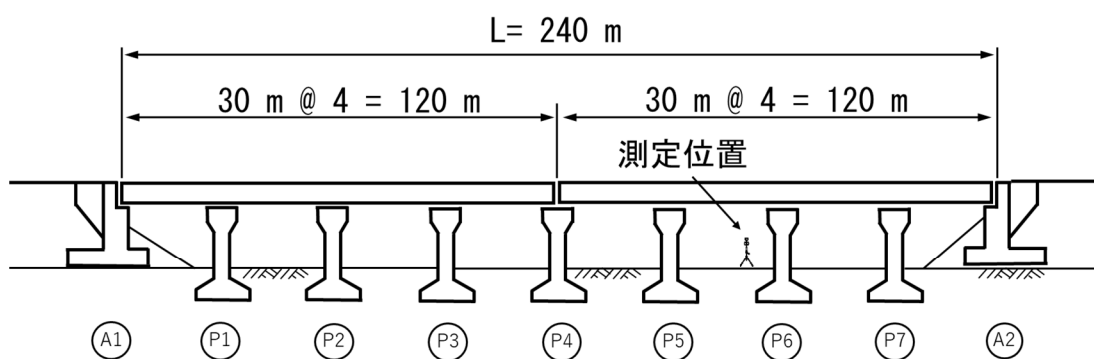


図 5 - 2 検証用道路橋側面構成

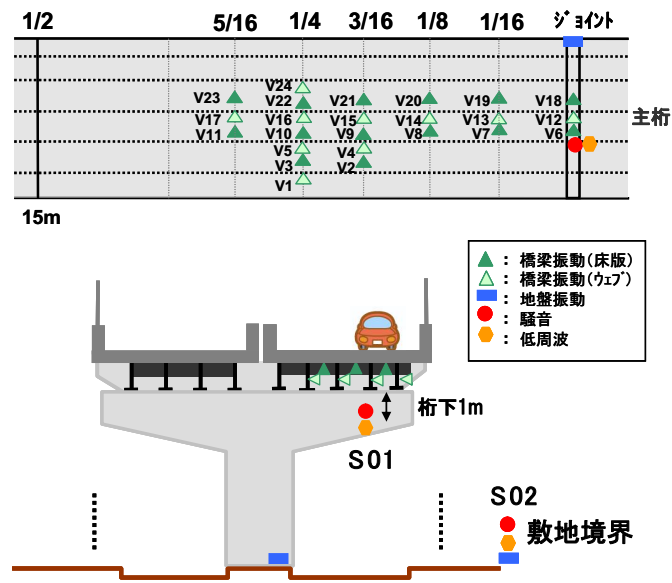


図 5-3 橋梁振動等調査の測定点配置

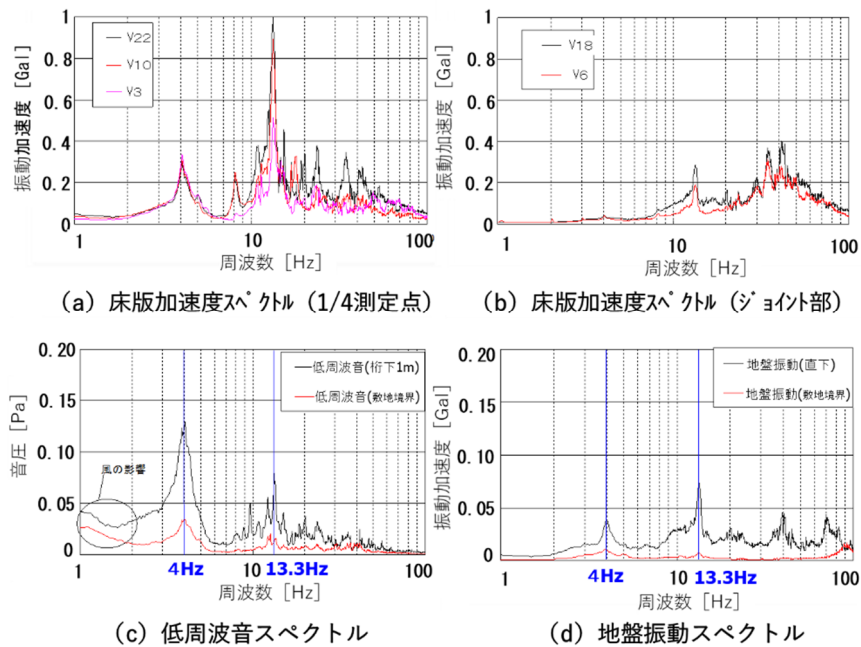
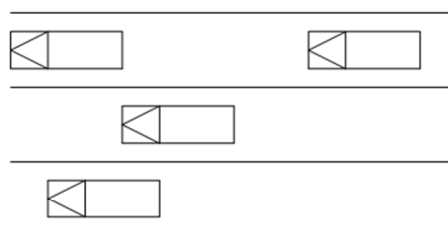


図 5-4 10分間の平均的なFFT分析

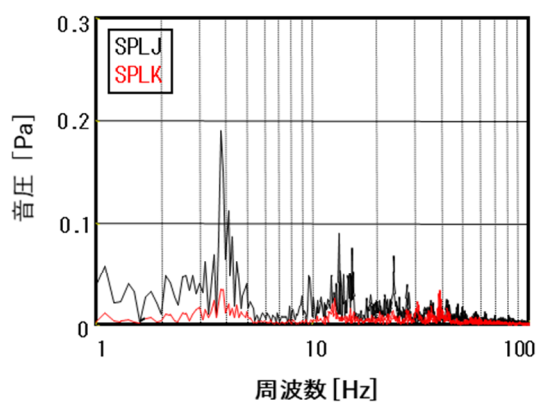


(a) 車群走行写真

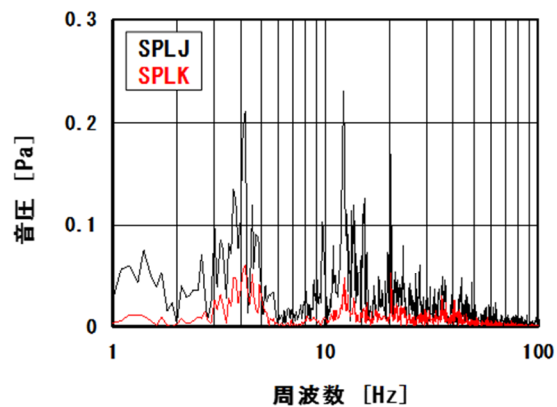


(b) 車群走行車線

図 5-5 車群の走行形態



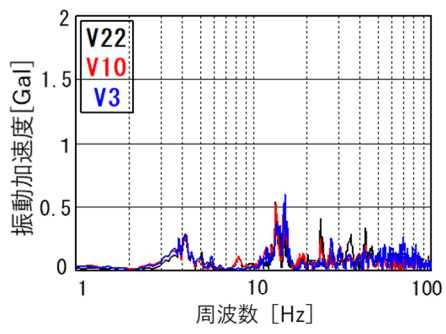
(a) 単独走行時



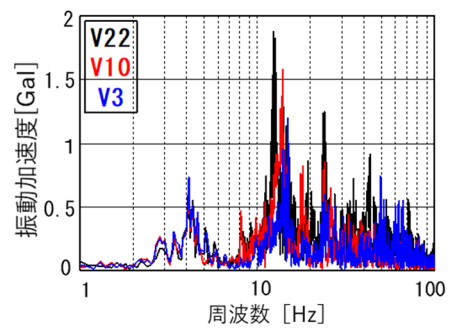
(b) 車群走行時

図 5-6 走行形態別の低周波音スペクトル

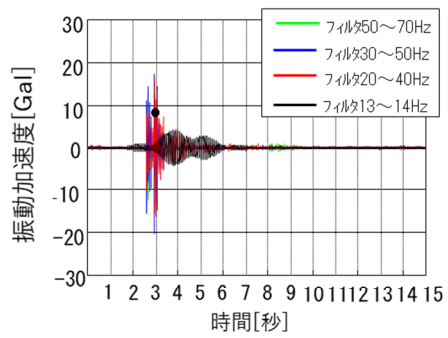




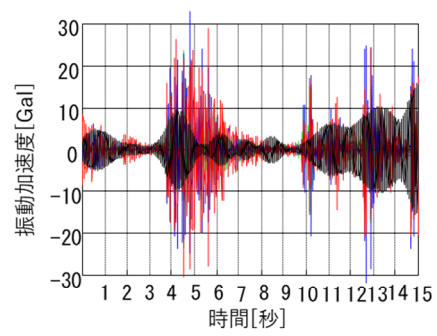
(a) 単独車走行時スペクトル



(b) 車群走行時スペクトル



(c) 単独車走行時加速度波形



(d) 車群走行時加速度波形

図 5-7 走行形態別の支間 1/4 測定点分析結果

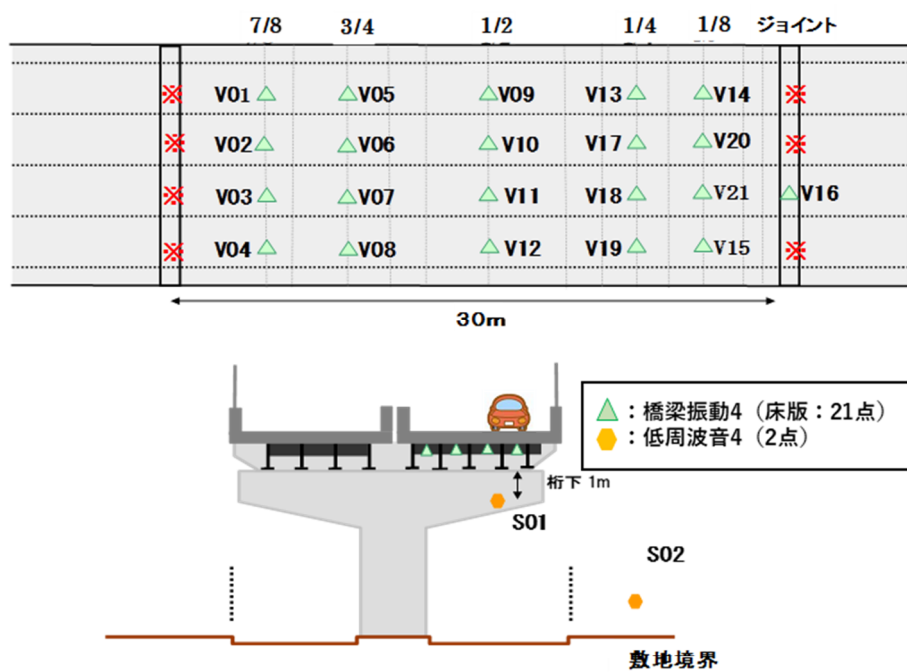


図 5-8 振動モード測定点配置図

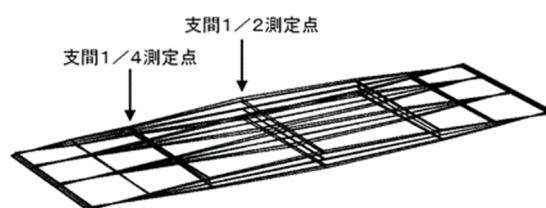


図 5-9 鉛直曲げ1次モード (4.0Hz)

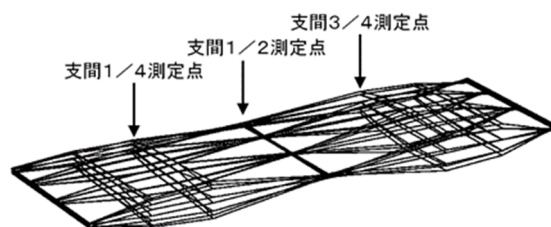


図 5-10 鉛直曲げ2次モード (13.3Hz)

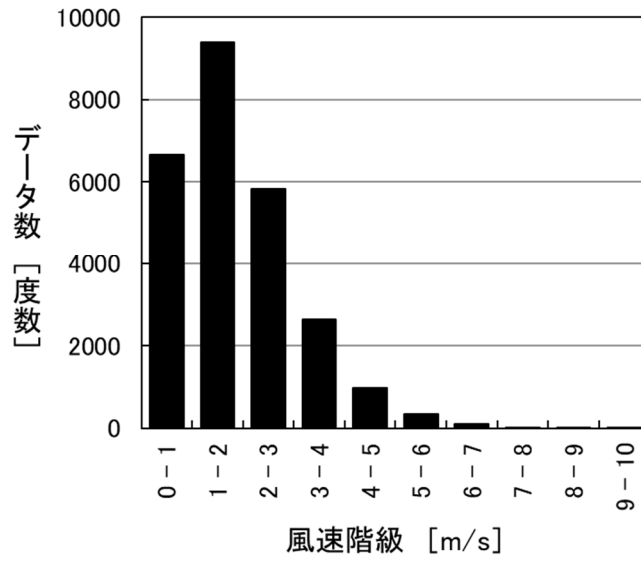


図 5-1 1 分析データの風速階級別ヒストグラム

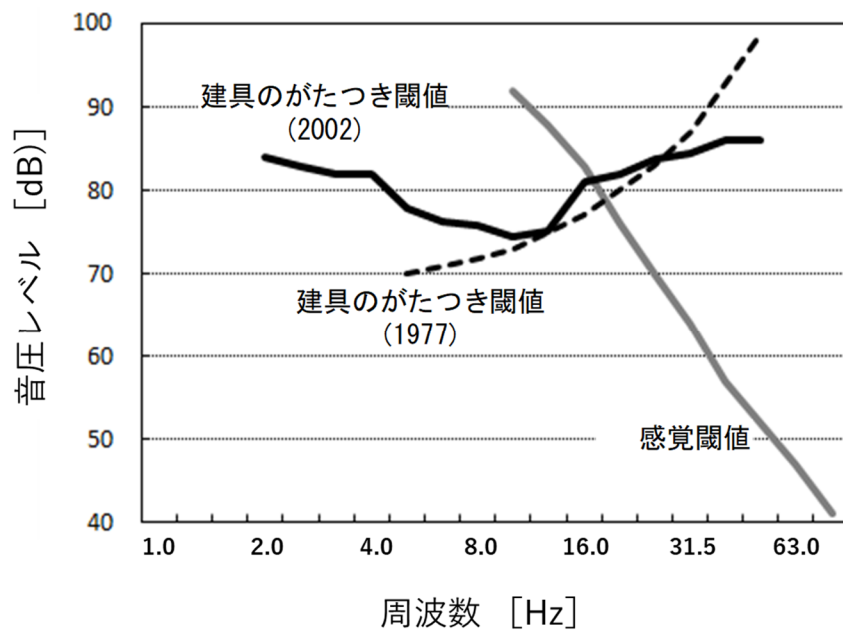


図 5-1 2 評価閾値[51]

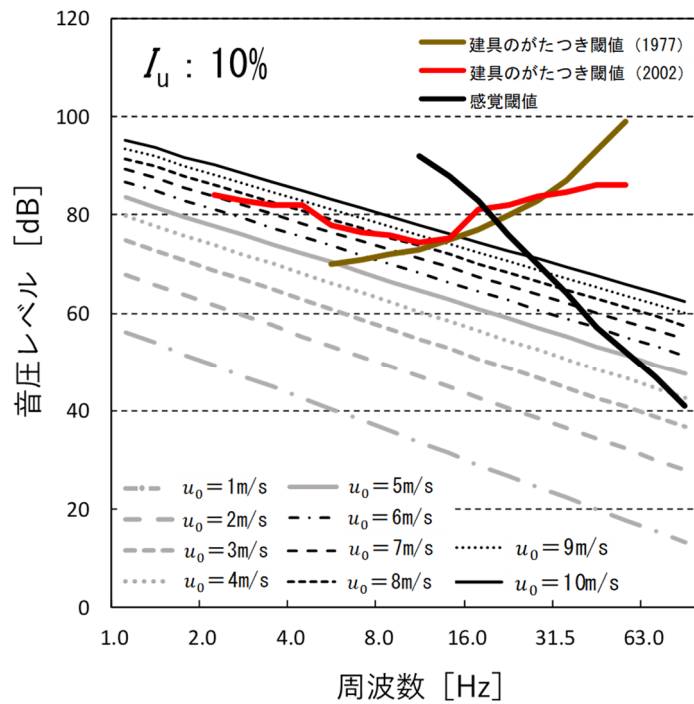


図 5-13 風ノイズ推計値と閾値 ( $I_u : 10\%$ )

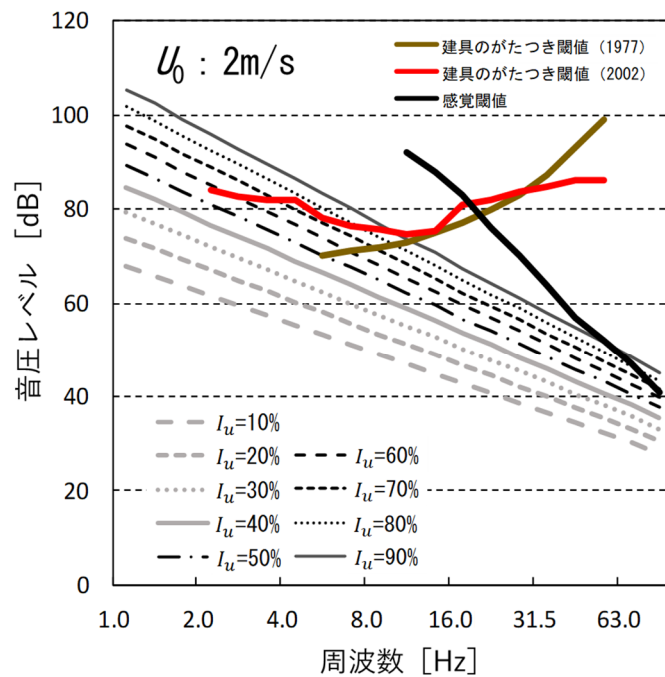


図 5-14 風ノイズ推計値と閾値 ( $U_0 : 2$  m/s)

5.6 図表

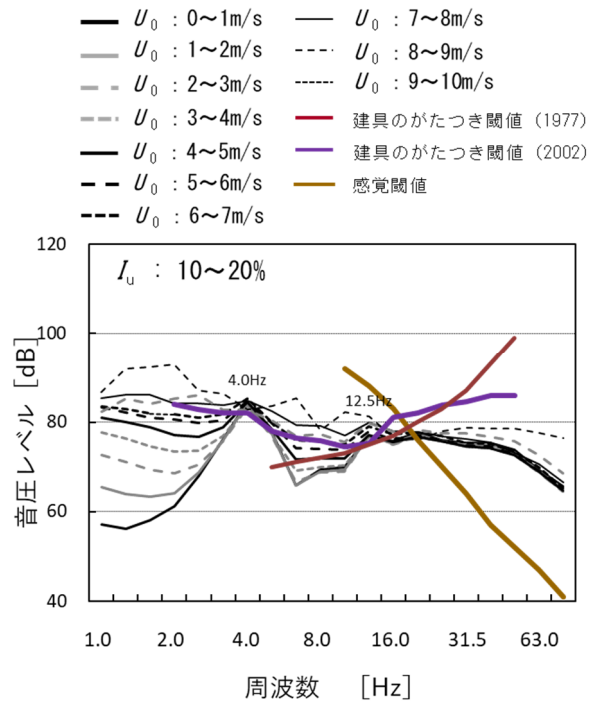


図 5-15 測定値  $L_{out}$  と閾値 ( $I_u : 10 \sim 20\%$ )

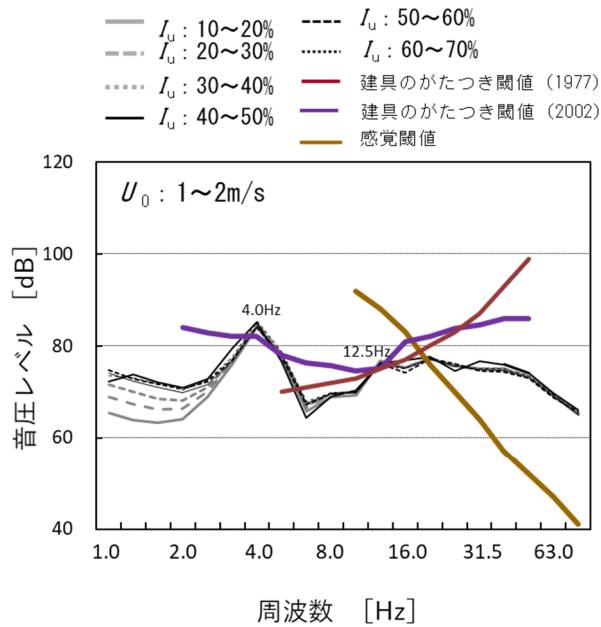


図 5-16 測定値  $L_{out}$  と閾値 ( $U_0 : 1 \sim 2 \text{ m/s}$ )

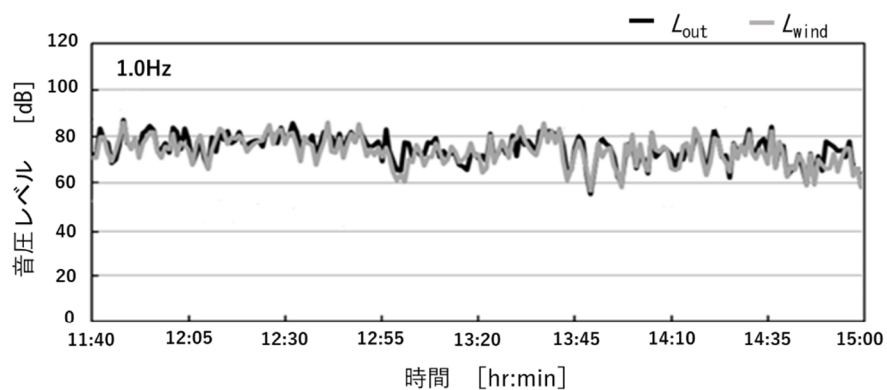


図 5 - 1 7 測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の時刻歴波形 (1.0Hz)

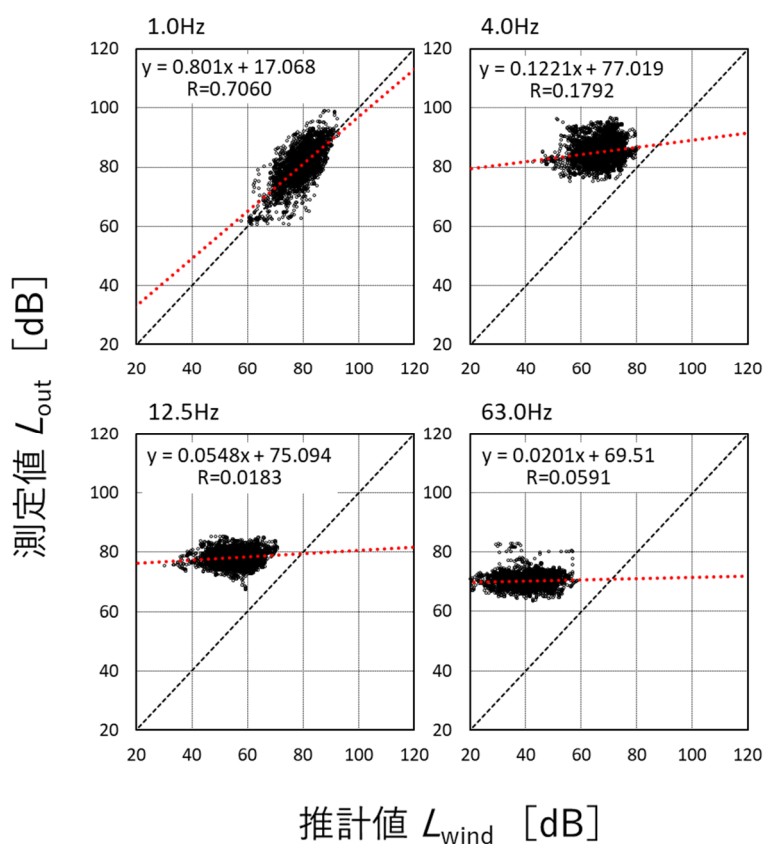


図 5 - 1 8 測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の対応

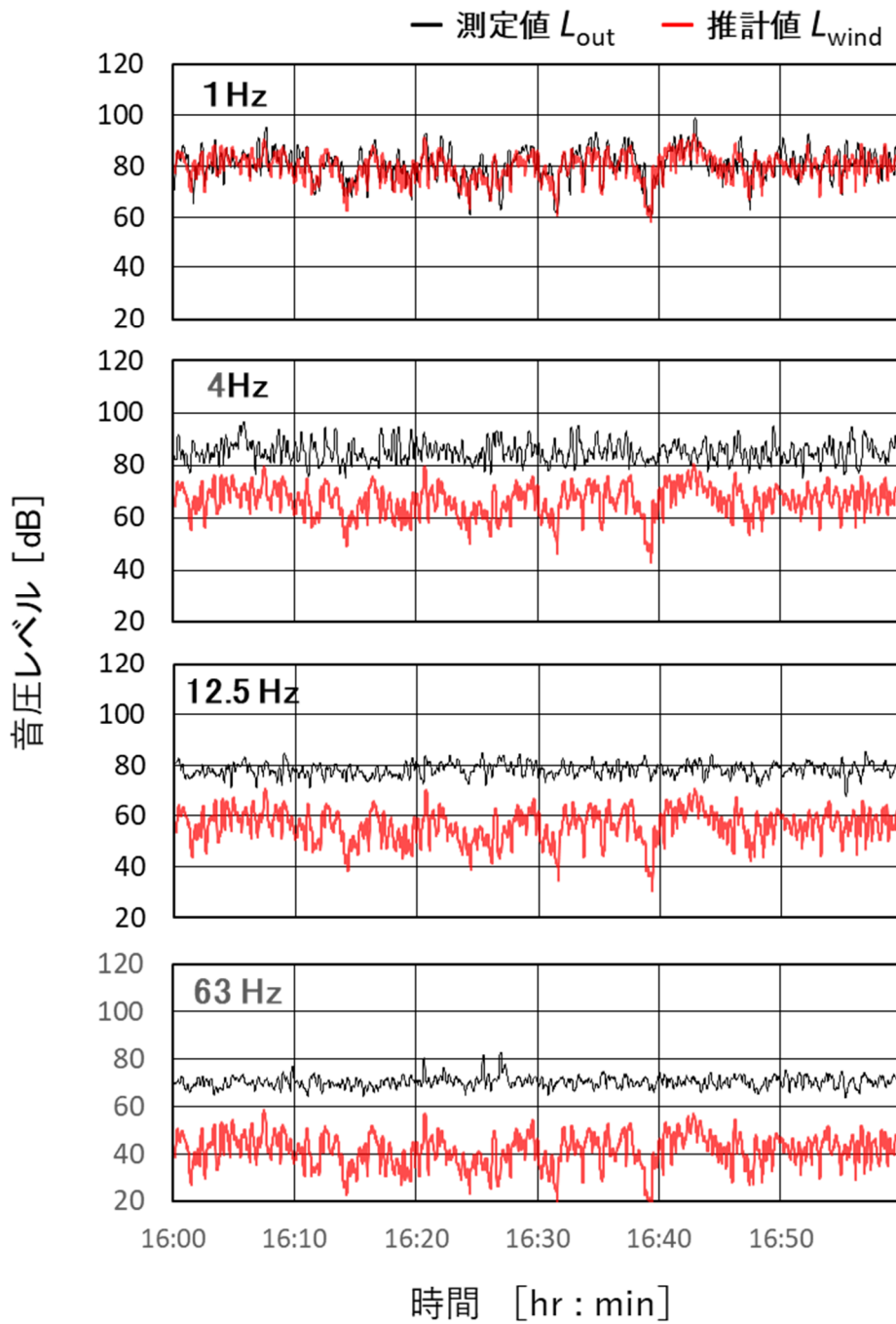


図 5 - 1 9 道路橋付近の測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  の時刻歴波形

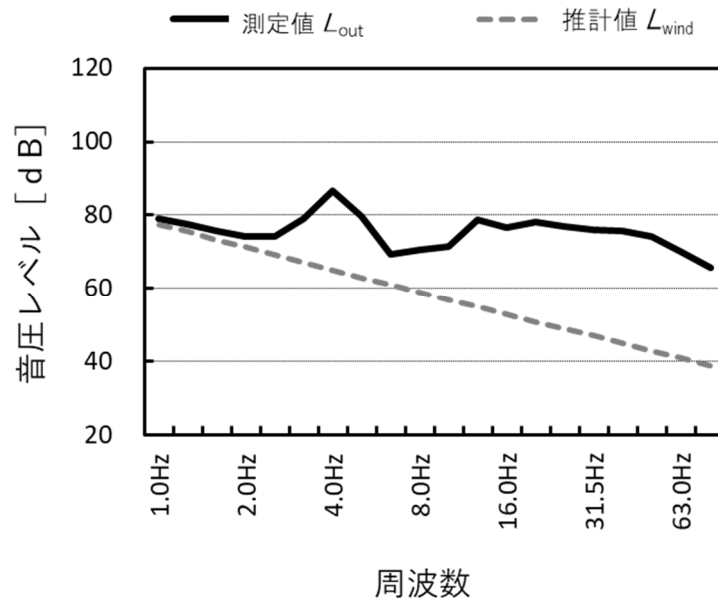


図 5-20 T橋における測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  ( $L_{eq}$ )



5.6 図表

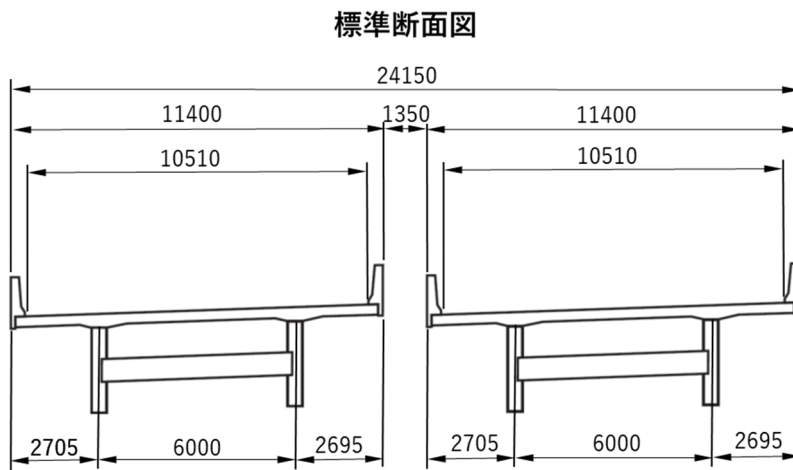
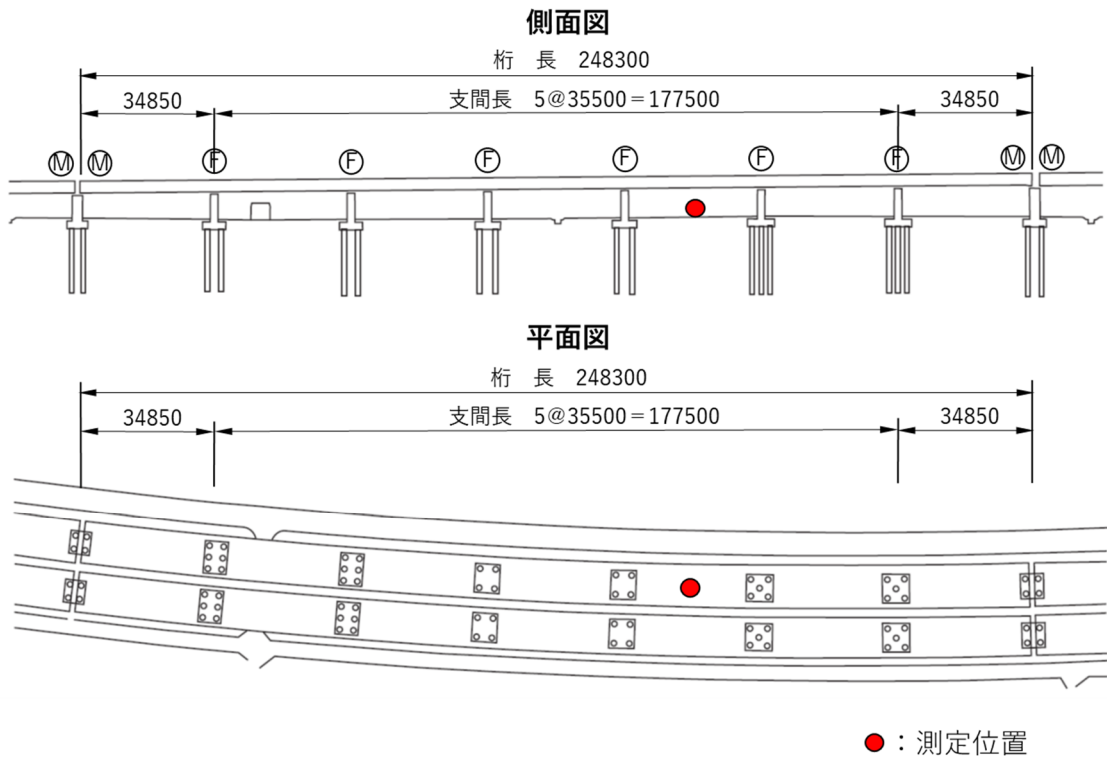


図 5 - 2 1 K 橋構造一般図

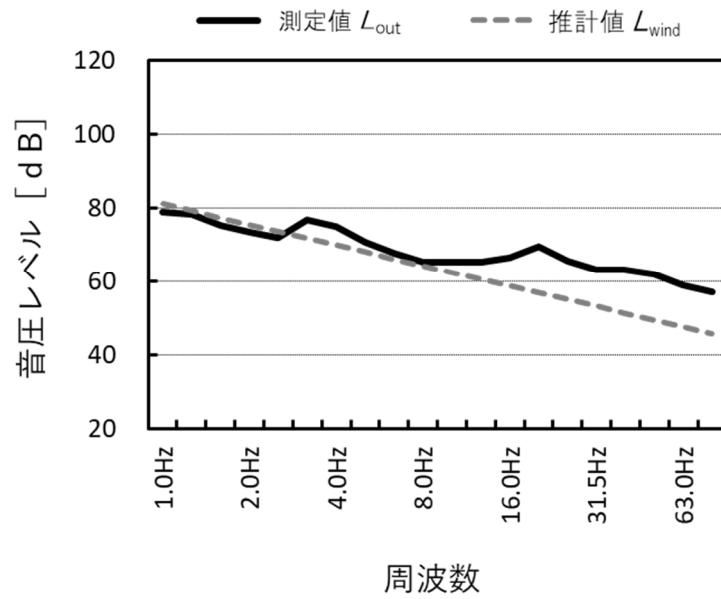


図 5-2 2 K橋における測定値  $L_{out}$  と推計値  $L_{wind}$  ( $L_{eq}$ )

5.6 図表

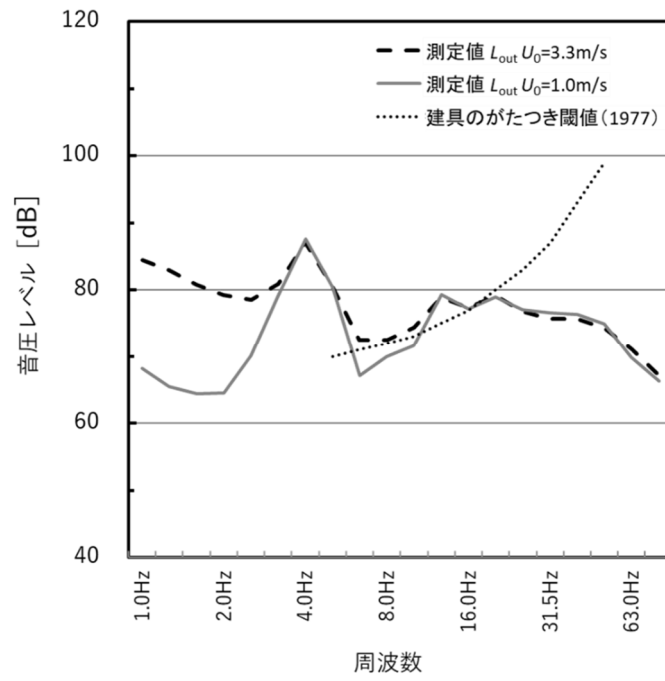


図 5-23 平均風速  $U_0$  の違いと音圧レベル (T 橋)

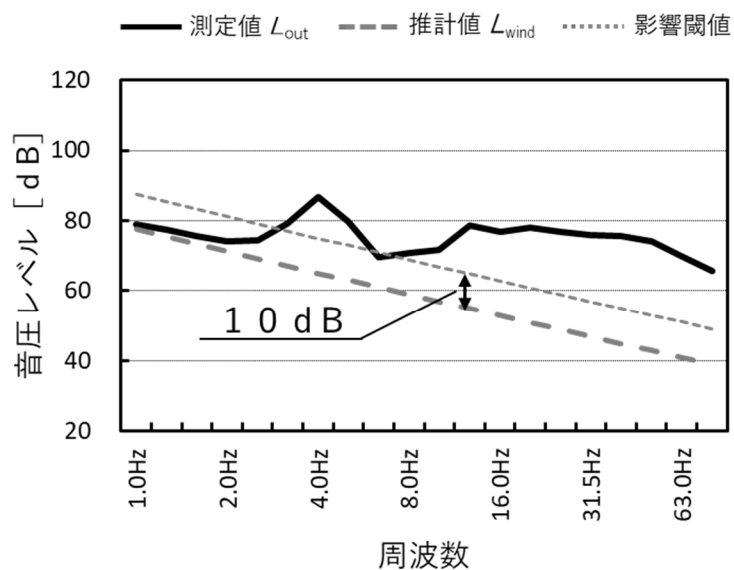


図 5-2 4 T 橋における風ノイズ影響閾値 (S/N 比 10dB)

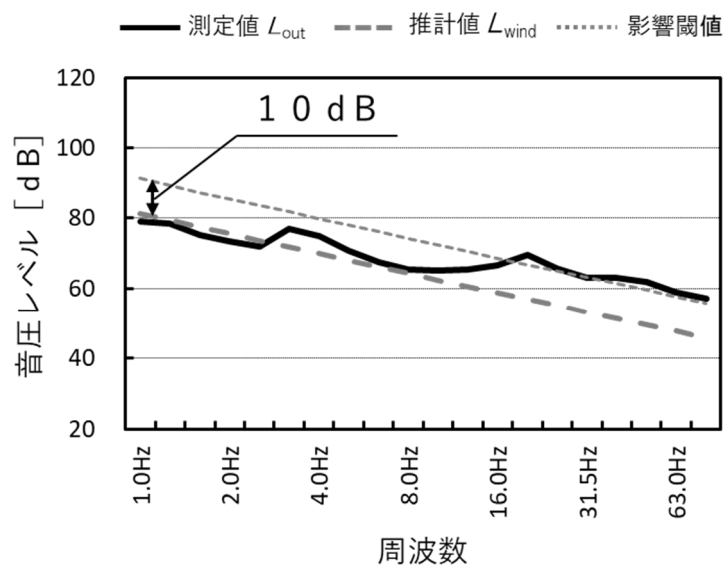


図 5-2 5 K 橋における風ノイズ影響閾値 (S/N 比 10dB)

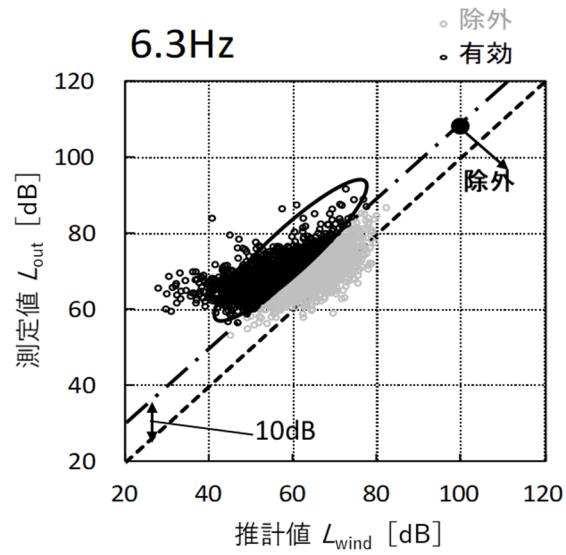


図 5-26 SN比 10 dB に基づくデータ除外閾値 (6.3Hz 帯)

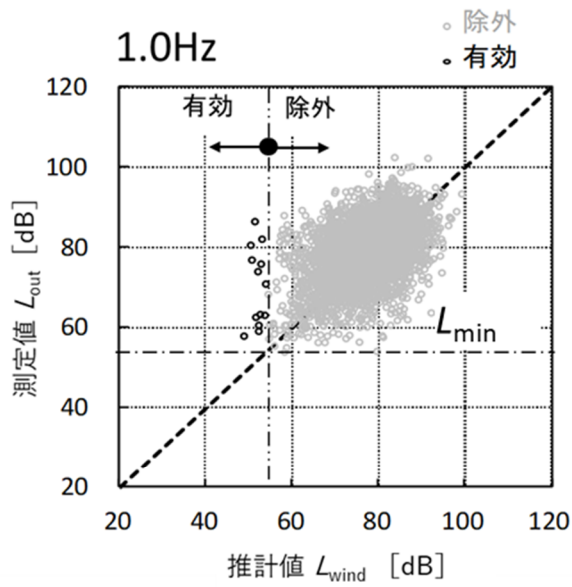


図 5-27  $L_{min}$  に基づくデータ除外閾値 (1Hz 帯)

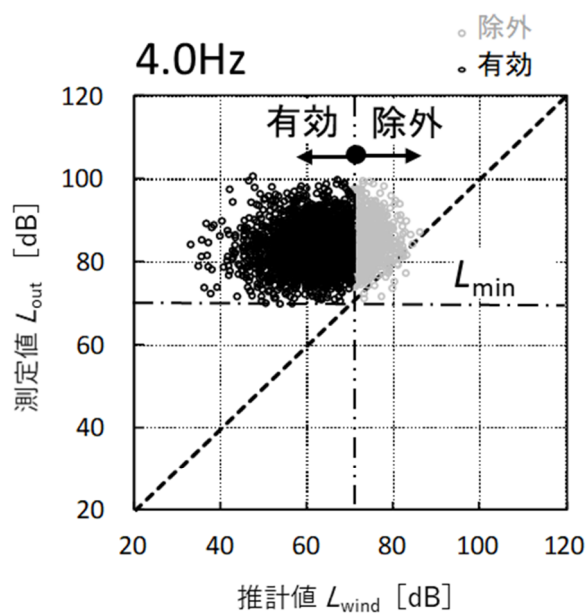


図 5-28  $L_{min}$  に基づくデータ除外閾値 (4Hz 帯)

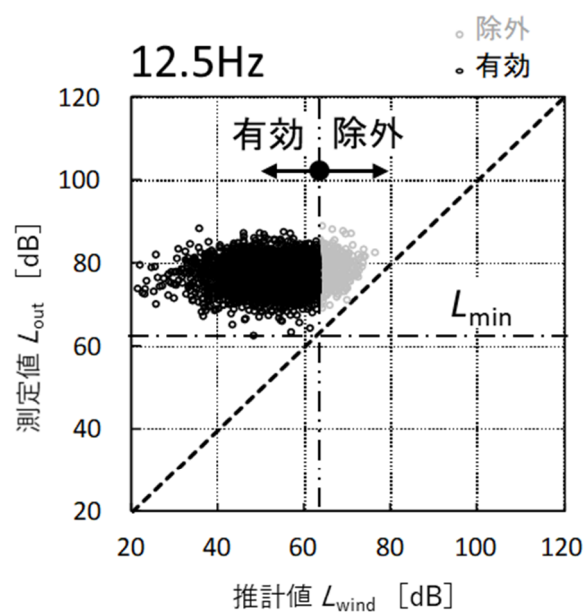


図 5-29  $L_{min}$  に基づくデータ除外閾値 (12.5Hz 帯)

5.6 図表

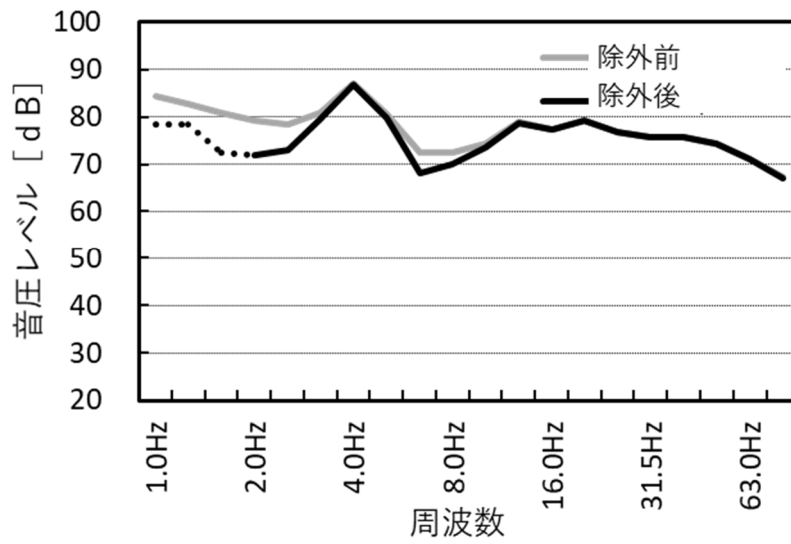


図 5-30 T 橋における風ノイズ除外前後の周波数特性 ( $L_{eq}$ )

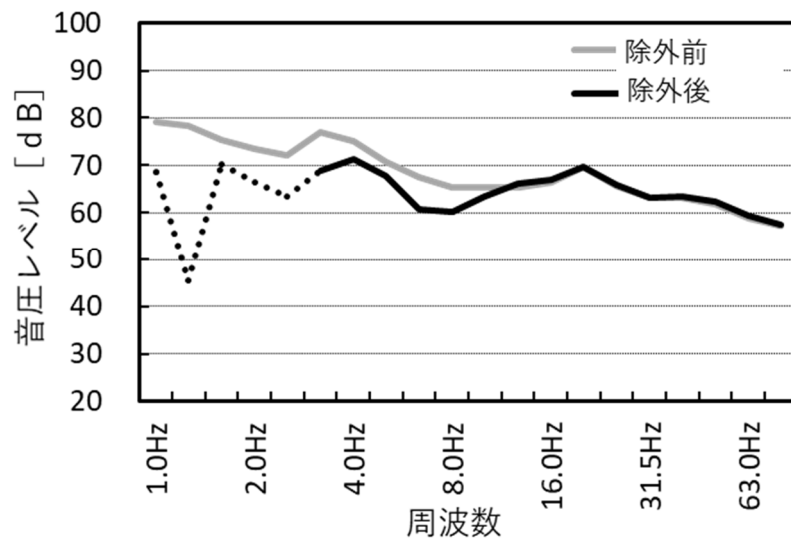


図 5-31 K 橋における風ノイズ除外前後の周波数特性 ( $L_{eq}$ )

---

## 第6章 結論

### 6.1 本研究で得られた知見と成果

本研究では、低周波音の測定値に含まれる風ノイズの影響を評価する方法として、平均風速と乱流強度に着目し、風ノイズレベルの定式化を i) 風洞実験, ii) フィールド実験, iii) 流れ場の風速と圧力の関係に基づく理論の三手法で試み、それぞれの推計式を提案した。また、流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式について低周波問題が発生している道路橋において推計手法の適用性について検証を行った。

本研究によって得られた成果を以下にまとめる。

**第1章「結論」**では、我が国における公害問題の推移について概説した。さらに、低周波音測定における現状の課題について道路高架橋を例に述べるとともに、本研究の目的を明らかにした。また、自然風の中で低周波音を測定するにあたり、風ノイズの影響を除外するために行われている既往の研究について概説し、その効果について考察するとともに、本研究の方向性と本論文の構成を示した。

**第2章「風洞実験に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築」**では、低周波音と風速の同期計測による風洞実験の結果に基づき、風速レベル及び低周波音計マイクロホン出力と、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  の関係について検討した。続いて、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築する手法について検討するとともに、風洞実験風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式のフィールドにおける自然風への適合性を検証し、以下の知見を得た。

- 1) 風洞実験の結果、風速レベル値は、平均風速  $u_0$  の増加に伴い増大し、さらに乱流強度  $I_u$  の増加によっても増大する傾向を示す。
- 2) 低周波音計マイクロホン出力のパワースペクトルの平均値は、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  の増加に伴い風ノイズレベル  $L_{wind}$  も増大する。また、その傾向は周波数により異なる。
- 3) 風洞実験により得られたデータを基にカーブフィッティングにより求めた風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、周波数を関数とする負のべき関数で表すことが可能である。



- 4) 風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の係数は、平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  を関数とする一次式で表すことができる。
- 5) 平均化時間の長い 5 秒による風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計値はフィールド測定値と整合するものの、1.6Hz 以下の周波数帯において測定値との乖離がみられる。
- 6) 周波数帯 1.6Hz 以下におけるフィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計値と測定値の乖離理由として、風洞実験とフィールド実験では風の乱れの長さスケール  $L_x^u$  と乱流強度  $I_u$  が異なることによるものと考えられる。
- 7) 風ノイズのフィールド測定値を平均風速  $u_0$  と乱流強度  $I_u$  の階級別に分類して整理すると、対数型の関数形で推計式化することができる。
- 8) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式による推計値と測定値を瞬時値で比較すると、瞬間的に差が大きくなる場合があるものの、全体的には整合性が良い。
- 9) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の推計値は、1.6Hz 以下においても測定値と整合する。

以上の結果、風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、平均化時間の長い 5 秒による推計値が測定値と整合するものの、1.6Hz 以下の周波数帯において測定値との乖離がみられる結果となった。その原因として、風洞実験とフィールド実験では風の乱れの長さスケール  $L_x^u$  と乱流強度  $I_u$  が異なることによるものと考えられた。そこで、1.6Hz 以下の周波数帯における推計精度を向上させるため風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の検証のために行ったフィールド測定データを基にフィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の構築を試みた。その結果対数型の推計式が導出され、測定値との整合性が良いことが確認された。しかし、フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の導出に用いた実測データは、限られたサイトにおける短時間の測定に基づくもので、フィールド実験風ノイズ推計式の妥当性を証明するためには、複数のサイトにおいて、より多くの風ノイズを測定し検証する必要がある。

ただし、本論文で導出した風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式も、適用条件として 2Hz 以上の周波数領域で、平均風速  $u_0$  が 5 m/s 以下かつ乱流強度  $I_u$  が 9.28 % 以下の範囲内であれば、十分適用できるものとする。

第 3 章「フィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の構築」では、低周波数帯における風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の改善を目的とし、地表粗度区分の異なる二種類のフィールドにおける測定データを基にフィールド

---

実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の構築を改めて試み、その作成手順を示した。複数のフィールドでの測定を行うにあたり、フィールド実験の測定データが測定器の配置に依存することを避けるため、超音波風速計と低周波音計を一体化させた測定装置を新たに開発した。

新しい推計式について得られた知見は以下のとおりである。

- 1) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、風洞実験により得られた負のべき関数とは異なる、対数型の数式を設定した。
- 2) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の 2 つの係数  $A$  及び  $B$  は、乱流強度  $I_u$  を二乗根とする数式で表すことができる。
- 3) 係数  $A$  及び  $B$  の回帰式は、平均風速  $u_0$  をパラメータとする二次又は一次式で表すことができる。
- 4) フィールド実験に基づき作成した地表粗度区分の異なる二つのフィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、係数が類似傾向を示すとともに、推計精度も測定値に対し、地表粗度区分Ⅱで 0.90、区分Ⅲで 0.79 の相関係数となり、いずれも強い正の相関が示された。
- 5) フィールド実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、平均風速  $u_0$  が約 10m/s 以下、乱流強度  $I_u$  は地表粗度区分Ⅱで約 30%、区分Ⅲで 60%の測定データから構築しており、風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式と比較し、より広い適用範囲となった。
- 6) 風ノイズレベル計は、測定と同時に自動分析が行われ、1秒間隔の平均風速、乱流強度及び周波数ごとの低周波音のデータ保存が可能なシステムである。また、本装置には風ノイズレベル推計式を自在に組み込むことが可能なプログラムを実装しており、測定と同時に風ノイズレベルが計算され評価時間1秒間ごとにデータとして格納される。
- 7) 風ノイズレベル計は、平均風速、低周波音及び風ノイズ推計値をリアルタイム表示でき、また、一般的な騒音測定同様、容易に設置・測定可能なシステムである。

以上の結果、構築したフィールド実験用風ノイズレベル計に基づく風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、地表粗度区分、平均風速  $u_0$  及び乱流強度  $I_u$  のいずれにおいても、風洞実験風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式から改善され、より広い条件に適用可能な推計式となった。

また、フィールド測定を効率よく行うために、新たに開発製作した超音波風速計と低周波音計を一体化した風ノイズレベル計により、低周波音測定が大いに効率よく推進できることになった。

第4章「流れ場の風速と圧力の理論的關係に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築」では、流れ場の風速と圧力の理論的關係から周波数  $f$ , 平均風速  $u_0$ , 乱流強度  $I_u$  をパラメータとする風ノイズ推計式を導出し、これらに必要な係数を、風ノイズフィールド測定値を基に統計的な回帰によって求める風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を提案した。

次に、提案した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の妥当性の検証を目的とし、推計式を構築するために行った地表粗度区分の異なるサイト A～サイト C における測定値と風ノイズ推計値との整合性を検討した。

その結果、本章の成果として以下の知見を得た。

- 1) 流れ場の風速と圧力の理論的關係から導出した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式は、周波数  $f$ , 乱流強度  $I_u$  及び平均風速  $u_0$  を変数とする数式で表される。
- 2) 平均風速  $u_0$  と低周波音圧レベルの關係を評価時間1秒、平均風速  $u_0$  の範囲を平均風速 1.0m/s を境に 0.1m/s 及び 1m/s で細分化し分析することにより、背景騒音が主体的な風速域と風ノイズが主体的な風速域に区分することができ、これにより、背景騒音の影響が少ないデータを抽出することが可能である。
- 3) 1秒間評価により 5 つのサイトにおける平均風速  $u_0$  と低周波音圧レベルの關係を分析した結果、風ノイズが主体的となる風速域の平均風速  $u_0$  に対する低周波音圧レベルの比(傾き)はほぼ一定である。また、風ノイズが主体となり始める風速は、周波数が高くなるほど高風速側にシフトする。
- 4) 風ノイズレベル推計式の係数は、背景騒音に影響している測定データを除外し、重回帰分析により求めることが可能で、最終的には周波数  $f$  を変数とする対数の一次式で表される。
- 5) 導出した係数により推計した風ノイズレベルと係数を求めるために用いた全サイトのフィールド測定値による相関分析を行った結果、1.0Hz, 4.0Hz 及び 16.0Hz の周波数帯において相関係数は 0.8 以上で強い正の相関、63.0Hz 帯は相関係数 0.691 で正の相関となり、推計式の妥当性が確認された。
- 6) 地表粗度区分 I のサイト A, 区分 III のサイト B 及び区分 II のサイト C で測定したフィールド測定データを用い、各フィールドにおける風ノイズレベル  $L_{wind}$  測定値と推計値を全時間帯の等価音圧レベル O.A 値と比較した。その結果、測定値と推計値の差は、サイト A では-0.5dB, サイト B では+3dB, サイト C では-0.2dB となり各サイトと

もに許容誤差に設定した $\pm 3.0\text{dB}$ 以内であった。

- 7) 地表粗度区分 I のサイト A において風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  測定値と推計値を評価時間 10 分間による等価音圧レベル O.A 値で比較した結果、測定値と推計値の差は、 $-1.3\text{dB}$  で許容誤差に設定した $\pm 3\text{dB}$  以内の誤差であった。

以上の結果より、測定値と流れ場の風速と圧力の理論的關係から導出した風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式は、測定値と推計値の相関分析において強い正の相関又は正の相関を示すと共に、個別サイトにおける O.A 値でも許容誤差として設定した $\pm 3\text{dB}$  以内に収まっていることから、総合的に判断し、十分実用に適用可能な推計精度にあるものといえる。

第5章「道路橋における風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計式の適用性の検証」では、第4章において導出した流れ場の風速と圧力の關係に基づく風ノイズレベル推計式の妥当性を検証することを目的とし、実際に道路橋から発生する低周波音が問題となっている2つの地域においてフィールド測定を実施し、検討を行った。この過程で得られた知見を以下に示す。

- 1) 構築した風ノイズレベル推計式及び係数を使い平均風速と乱流強度を一定の値に仮定し、風ノイズ推計結果と建具のがたつき閾値(1977)との關係について検討した結果、乱流強度  $I_u$  を 10%と仮定し推計すると 5Hz の周波数帯において平均風速 3m/s から測定値に風の影響が出始める。同様に、平均風速  $u_0$  を 2m/s と仮定し風ノイズを推計すると、5Hz の周波数帯で乱流強度  $I_u$  が 20~30%で測定値に対し風の影響が出始める結果となった。
- 2) 低周波音が発生している道路橋付近における測定値のうち、乱流強度  $I_u$  が 10~20% のデータを抽出し平均風速階級別に比較すると、道路橋に起因する低周波音の影響が少ないと考えられる 1.25Hz の周波数帯では、平均風速階級 0~1m/s と比較し 9~10m/s では、35.9dB となっており風ノイズによる音圧上昇と考えられた。また、1.0~2.0Hz 帯の測定値は、同条件の風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  推計値と概ね一致し推計式の妥当性が確認された。
- 3) 調査道路橋の卓越周波数 4.0Hz 帯と 12.5Hz 帯に着目すると、4.0Hz 帯では風ノイズの影響は少ないが、12.5Hz 帯では 3~4m/s の風速階級から風の影響が現れ始め 9~10m/s では 4.2dB の上昇が確認された。
- 4) 任意に抽出した道路橋付近の 1 時間の測定データを基に風ノイズ推計値と測定値の

整合性を検証した結果、目的音(道路橋起因による低周波音)の影響が少ないと考えられる 1.0Hz 帯では、相関係数が 0.7060 で強い正の相関が得られた。このことから、当該橋梁の 1.0Hz 帯の低周波音圧レベルは、風ノイズが主体的であるものと推定された。一方、4.0Hz 帯、12.5Hz 帯及び 63.0Hz 帯は、目的音が主体的であるものの、測定値と推計値の散布図における推計式の傾きや、時刻歴波形における測定値と推計値の差が 10dB 以内の時間帯があり、風ノイズが影響しているデータも内在しているものと推察された。

- 6) 道路橋から発生する低周波音を目的音とし、測定値に含まれる風ノイズによる影響を評価する方法として、低風速の時間帯抽出による分析方法、S/N 比に着目した評価方法及び音圧レベルの最小値に着目した評価方法の三手法を提案し、風ノイズの影響評価を行った。その結果、十分な日にちと時間をかけ測定を行い、その中から低風速の日または時間帯を抽出し分析することにより風ノイズによる影響を小さくすることが可能である。また、風ノイズが含まれている測定データであっても、S/N 比に着目した評価方法及び音圧レベルの最小値に着目した評価方法により風ノイズの影響を評価し、目的音が風ノイズに埋没しているデータであるか否かを判別可能であることを実証した。

本章では、風ノイズレベル推計式を実装し新たに開発製作した風ノイズレベル計を用いて、低周波音が問題になっている道路橋でフィールドデータの測定を行い、測定データから目的の低周波音を判別する方法を複数検討した結果、本研究で開発製作した風ノイズレベル計と作成した風ノイズレベル推計式を活用することで、測定した低周波音が風に埋没しているデータであるか否かを判別できることを明らかとした。

## 6.2 本研究の結論

本研究では、一般に市販されている低周波音計、防風スクリーン等で構成される計測システム系が気流の中に置かれたときの風に起因する音圧レベル(風ノイズレベル)について風洞実験及びフィールド実験を行った。その結果、風が吹いている状態でマイクロホンが出力する圧力変動の特性値は、周波数、平均風速及び乱流強度の3つのパラメータによる寄与が大きいことが明らかとなった。

風ノイズレベルの推計式は、風洞実験やフィールド実験を積み重ねていく過程で改良し変遷したが、最終的には、流れ場の風速と圧力の理論的な関係に基づいて、風ノイズレベルの推計式を前述の3つのパラメータの関数として提案し、推計式に含まれる係数を、地表面粗度条件が異なる複数のフィールドにおける測定データから求めた。

流れ場の風速と圧力の理論的な関係に基づいて導出した風ノイズレベル推計式の推計精度を検証するために、収集した全フィールドデータを用い相関分析を行った。その結果、1/3 オクターブバンド中心周波数のうち 1.0Hz, 4.0Hz 及び 16Hz 帯で 0.8 以上の相関係数となり強い正の相関、63Hz 帯では 0.691 で正の相関が示された。また、地表粗度区分の異なる3つのサイトにおける個別のフィールド測定データと推計データを O.A 値で比較した結果、いずれのサイトにおいても差は±3.0dB 以内となり、提案した風ノイズレベル推計式は、十分実用に適用可能な推計精度にあるものと判断した。

また、本研究において、フィールド測定を効率よく実施するために、超音波風速計と低周波音計を一体化した独自の測定装置として新たに風ノイズレベル計を開発製作した。この風ノイズレベル計は、一般的な騒音測定装置と同様に簡易な測定方法であるとともに、記録部のモニターに測定時の風速、低周波音及び風ノイズを表示可能なシステムである。

この、風ノイズレベル推計式を実装した風ノイズレベル計を用いて、低周波音が問題になっている道路橋でフィールドデータの測定を行い、測定データから目的の低周波音を判別する方法として、風速の小さい時間帯を抽出し分析する方法、S/N 比に着目した評価方法及び音圧レベルの最小値に着目した評価方法の三手法を提案し、測定データが風に埋没しているデータであるか否かの判別が可能であることを実証した。

これにより、本研究で作成した風ノイズレベル推計式が十分な精度で風ノイズレベルを推計でき、実務においても風ノイズによる外的要因を排除し、信頼性の高い低周波音データを得ることが可能となった。

本論文で提案する風ノイズレベル推計式と低周波音と風速の同時測定方式によって、測

定された音圧レベルデータを、対象とする低周波音が風ノイズに埋没しているデータであるか否かを判別することが可能となった。従来、低周波音測定は風がないときに限定されていたが、本研究の成果によって風の有無にかかわらず測定したデータから有意な低周波音データを抽出することが可能になり、低周波音測定が大いに効率よく推進できることになった。

本研究の成果は、風力発電機が発する低周波音のように風が吹いているときに発生する低周波音の測定にも威力を発するものと確信している。

---

### 6.3 今後の課題と展望

本論文で提案する測定法は、計測に用いる測定系が風に対して出力するレベルを風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  と定義している。そのため、計測システム(設置法も含む)が異なれば風ノイズレベル  $L_{\text{wind}}$  も異なると考えている。本測定法では、1次防風スクリーンを装備し、三脚に立てた状態での風ノイズ推計であり、防風スクリーンやマイクロホン機種などが変われば、そのシステムで推計式を再構築しなければならないことに注意を要する。

また、本研究では、限られたサイトで、限られた計測時間によるデータを使用して検討を行っている。そのため、地表粗度区分の違いに伴う傾向の違いなどについて、今後十分な数量の計測データに基づき継続的に研究を進める必要がある。

さらに本研究では、道路橋で発生する低周波音問題の解決に向け、風ノイズによる影響の評価手法について検討を重ねてきたが、近年、低周波音で話題となっているウインドファーム等の環境アセスメントでは、建設予定地において本測定法を用い、事前に計測を行い、その場特有の風況や地形等に合致した推計式を構築することにより、正確な風ノイズの推計が可能になるものと考えられる。従って今後は、ウインドファーム等における低周波音問題においても、本研究成果の適用が可能であるか否かについて検討していきたいと考えている。



---

## 参考文献

- [1] 総務省 公害等調整委員会, “平成 30 年度 公害苦情調査結果報告書”, (2019).  
([https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000681118.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000681118.pdf). アクセス日: 11 4 2020)
- [2] 環境省水・大気環境局大気課大気生活環境室, “平成 30 年度騒音規制法等施行状況調査の結果について”, 環境省, (2020).  
(<https://www.env.go.jp/press/files/jp/113213.pdf>. アクセス日: 15 4 2020)
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “平成 30 年度エネルギーに関する年次報告”, (2019).  
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf>. アクセス日: 16 4 2020)
- [4] 中西正光, “風力発電施設の騒音・低周波音に関する検討について”, *Journal of JWEA*, 第 36 巻, 第 4 号, pp.510-513, (2012).
- [5] 長井浩, “真価が問われる風力発電”, *風力エネルギー*, 第 34 巻, 第 1 号, pp. 11, (2010).
- [6] 高橋幸雄, “低周波音による心理的影響の評価に関する現状と課題”, *日本衛生学雑誌*, 第 68 巻, 第 2 号, pp. 88-91, (2013).
- [7] 久保達彦, 蓮沼英樹, 森松嘉孝, 藤野善久, 原邦夫, 石竹達也, “風力発電等による低周波音・騒音の健康影響: 疫学文献レビュー,” *日本公衆衛生雑誌*, 第 64 巻, 第 8 号, pp. 403-411, (2017).
- [8] 尾形清一, “風力発電騒音問題の社会的要因に関する研究—M市における風力発電事業の事例”, *環境情報科学学術研究論文集*, 第 29 巻, pp. 235-240, (2015).
- [9] 環境省, “「風力発電施設に係る騒音・低周波音の実態把握調査」につて,” (2010).  
(<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13011>. アクセス日: 4 6 2018)
- [10] 鈴木信二, 竹田和信, 佐野千裕, 大西博文, 米沢栄二, 石渡俊吾, 植田知孝, “道路橋の低周波音の発生と伝搬特性”, *騒音制御*, 第 28 巻, 第 4 号, pp. 291-297, (2004).
- [11] 中村眞, “高速道路の環境対策史 (低周波音)”, *土木学会第 67 回年次学術講演会*, pp. 169-170, (2012).
- [12] 大野崇, “低周波音への取り組みと課題”, *騒音制御*, 第 27 巻, 第 1 号, pp. 32-36, (2003).
- [13] 犬飼幸男, 多屋秀人, 山田伸志, 落合博明, 時田保夫, “低周波音の聴覚閾値及び許容値に関する心理物理的実験—心身に係る苦情に関する参照値の基礎データ”, *騒音制御*, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 61-70, (2006).
- [14] 環境庁大気保全局, “低周波音の測定方法に関するマニュアル”, (2000).
-

---

(<http://www.env.go.jp/air/teishuha/manual/teisyuhaon H12manual all.pdf>. アクセス日: 10 2 2018)

- [15] 福原博篤, 大熊恒靖, 木本茂夫, “低周波音測定器と計測上の留意点”, 騒音制御, 第 8 卷, 第 3 号, pp. 125-131, (1984).
- [16] 大熊恒靖, 福原博篤, “低周波音測定に及ぼす風の影響について”, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.173-176, (1980).
- [17] 落合博明, “低周波音の測定方法”, 騒音制御, 第 23 卷, 第 5 号, pp. 306-310, (1999).
- [18] 二井義則, 小垣哲也, 関口隆之, 松宮輝, “風力発電システムの騒音測定技術”, 日本音響学会誌, 第 60 卷, 第 6 号, pp. 319-324, (2004).
- [19] 二井義則, “風力発電システムの騒音測定に用いる防風スクリーンシステム”, 日本音響学会誌, 第 56 卷, 第 8 号, pp. 570-574, (2000).
- [20] 丸山勇祐, 島村亜希子, 長船寿一, 山本稔, 野村卓史, 長谷部寛, 志村正幸, 丹羽尚史, “低周波音計測用 2 次防風スクリーンの性能試験法法の検討”, 日本音響学会研究発表会, (2011).
- [21] P. Schlatter and R. Örlü, “Assessment of direct numerical simulation data of turbulent boundary layers”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.659, pp.116-126, (2010).
- [22] P. Schlatter and R. Örlü, “DNS database”,  
(<http://www.mech.kth.se/~pschlatt/DATA/#DNS>)
- [23] G. Schewe, “On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.134, pp.311-328, (1983).
- [24] P. R. Spalart, “Direct simulation of a turbulent boundary layer up to  $Re_\theta = 1410$ ”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.187, pp.61-98, (1988).
- [25] Y. Meng, M Matsui and K Hibi, “Characteristics of the vertical wind profile in neutrally atmospheric boundary layers. Part 1: Strong winds during non-typhoon climates”, *Journal of Wind Engineering*, No.65, pp.1-15, (1995).
- [26] 志村正幸, 野村卓史, 長船寿一, 上明戸昇, 長谷部寛, 岩吹啓史, “自然風の中での低周波音の測定”, *JWA*, 第 39 卷, 第 1 号, pp. 42-49, (2014).
- [27] 矢野博夫, 福島昭則, 太田達也, 小林知尋, 橘秀樹, “風車騒音の測定システムの開発”, 日本音響学会講演論文集, pp. 1057-1060, (2014).
- [28] 矢野博夫, 太田達也, 橘秀樹, “風車騒音の immission 測定に用いる測定システムの開

- 
- 発”, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp. 181-184, (2011).
- [29] 公益社団法人 日本騒音制御工学会, “環境省請負業務 平成 23 年度風力発電施設の騒音・低周波音に関する検討調査業務報告書”,公益社団法人 日本騒音制御工学会, (2012).
- [30] 落合博明, 牧野康一, 山田一郎, 月岡秀文, 黒澤高弘, 福島健二, 横田明則, “低周波音計測用防風スクリーンの開発”, 騒音制御, 第 30 巻, 第 5 号, pp. 408-417, (2006).
- [31] 落合博明, 牧野康一, 福島健二, “低周波音の現場測定用防風スクリーンの検討”, 社団法人日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 233-236, (2008).
- [32] 高桑誠明, 太田光雄, 西村正文, 南原英生, “風速情報を利用した風雑音混入下の低周波音計測法: 静的と動的の 2 種簡易法”, 日本音響学会誌, 第 48 巻, 第 3 号, pp. 137-145, (1992).
- [33] 高桑誠明, 太田光雄, 藤田幸史, “風雑音下の低周波域 BPL 計測における簡易的 2 種対象音推定法の実験的考究: 風雑音の特徴 BPL と風速情報の活用”, 日本音響学会誌, 第 53 巻, 第 10 号, pp. 779-787, (1997).
- [34] 長船寿一, 田中克則, 山本稔, “音源探査技術の活用による騒音源の可視化”, 高速道路と自動車, 第 54 巻, 第 2 号, pp. 33-37, (2011).
- [35] Toshikazu Osafune, Minoru Yamamoto, Shunichi Nakamura, and Yutaka Ishii, “Case Study of Practical Noise Source Location for Road-Bridge Noise by Beamforming Method”, INTER NOISE 2011, Osaka, (2011).
- [36] M.Shimura, T.Nomura, S.Sato, “Wind Effect for Low Frequency Sound Pressure Measurement”, Low Frequency Noise and Vibration and its Control, Tokyo, (2008).
- [37] 長船寿一, 志村正幸, 野村卓史, 岩吹啓史, 上明戸昇, 長谷部寛, 立石賢吾, “低周波音および風速の同期計測による風ノイズ推計手法に関する研究”, 騒音制御, 第 44 巻, 第 2 号, pp. 89-100, (2020).
- [38] 空気力学研究センター, 日本大学理工学部, (<https://www.wtl.cst.nihon-u.ac.jp/>. アクセス日: 14 6 2020).
- [39] 土肥哲也, 加来治郎, “可搬型低周波音発生装置の開発”, 日本音響学会講演論文集, (2010).
- [40] T.Do, J.Kaku, “Development of experimental devices generating impulsive and continuous low frequency sounds”, Inter-Noise 2009, Ottawa, Canada, (2009).
- [41] 武田勝昭, “乱れた気流中での橋梁の渦励振特性とそれに基づく予測手法に関する研究”, 東京大学学位論文, (1994).
-

- 
- [42] 道路橋耐風設計便覧（平成 19 年度改訂版）,日本道路協会, pp.66,(2007).
- [43] 井上榮一, “地表風の構造(第 1 報)”, *Journ.Met.Soc.Japan*,Vol.28,No.7, pp.219-223,(1950).
- [44] 山根一祐, 宮田年彦, 稲村正博, 畦崎俊敬, “風による低周波空気振動について”, 鳥取県衛生研究所報, 第 24 号, pp.26-30,(1984).
- [45] 長船寿一, 野村卓史, 長谷部寛, 志村正幸, 上明戸昇, 岩吹啓史, 安田英明, “道路橋起因の低周波音測定値に影響する風ノイズに関する研究”, 構造工学論文集, 第 66A 巻, pp. 352-365, (2020).
- [46] 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田知孝, “道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究”, 構造工学論文集, 第 56A 巻, pp. 237-250, (2010).
- [47] 大竹省吾, 中村一史, 長船寿一, 岩吹啓史, 鳥部智之, 平栗昌明, “鋼鈹桁橋の交通振動に伴う低周波音の発生部位とその要因に関する研究”, 土木学会論文集 A1, 第 74 巻, 第 2 号, pp. 186-201, (2018).
- [48] 五郎丸英博, 白石捷夫, 原公, 小森武, “中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定”, 土木学会論文集, 第 403 号, VI-10, pp. 137-145, (1989).
- [49] 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会, “道路交通騒音の予測モデル ASJ RTN-Model 2003”, 日本音響学会誌, 第 70 巻, 第 4 号, pp.172~230, (2014).
- [50] 環境庁, “環境庁: 昭和 52 年度低周波空気振動実態調査 (低周波空気振動の家屋等に及ぼす影響の研究) 報告書”, (1978).
- [51] 落合博明, 田矢晃一, “低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて”, 騒音制御, 第 26 巻, 第 2 号, pp. 120-128, (2002).

---

## 謝辞

本論文は、株式会社高速道路総合技術研究所及び中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社に在籍し、研究を行った成果をとりまとめたものである。

本研究を進めるにあたり、多くの方々よりご指導、ご協力及びご支援を頂いた事に深く感謝申し上げます。

まず、本研究のとりまとめに当たり、主査として熱心にご指導頂いた日本大学理工学部土木工学科 小林義和教授に心から感謝申し上げます。

副査である日本大学理工学部精密機械工学科 松田礼教授には、博士論文のとりまとめ、研究発表に向けてのご指導を頂き深く感謝申し上げます。

また、日本大学理工学部土木工学科 野村卓史特任教授には、本研究の機会を与えて頂くとともに、研究の基本に関する細やかなご指導から研究の構想・実験の実施・論文の構成や執筆に至るすべての過程において、貴重なるご指導とご鞭撻を賜り謹んで感謝の意を表します。

さらに、株式会社建設環境研究所 志村正幸博士には、風工学の基本や研究者としての心得などを真摯にご教授頂き心から感謝致します。

研究の実施にあたり、日本大学理工学部土木工学科 長谷部寛准教授、株式会社建設環境研究所 青木淳氏及び上明戸昇博士、日本エヌ・ユー・エス株式会社 丹羽尚史氏、三洋テクノマリン株式会社 立石賢吾氏には、風洞実験やフィールド測定において実験の計画・実施・データの分析等において活発な議論をさせて頂き、多大なるご協力とご指導を賜りました。皆様に深く感謝申し上げます。

風ノイズレベル計の開発・製作にあたり、低周波音計製造メーカーの株式会社アコー 寺菌信一氏、川崎康彦氏、田中啓一氏、超音波風速計製造メーカーの株式会社ソニック 伊藤芳樹博士、内山真司氏、林孝明氏、岩井恒敬氏には機器の構造やソフトウェア開発においてそれぞれの専門知識をご教授頂き、深く感謝し御礼申し上げます。

最後に、本研究の機会を作って頂くとともに良き研究環境を整備して下さった中日本高速道路株式会社御殿場保全・サービスセンター 山本稔副所長、測定データの収集や分析にご協力頂いた株式会社高速道路総合技術研究所 岩吹啓史博士、中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 安田英明氏に心から感謝申し上げます。

---

## 研究関連論文

### 1 論文

- (1) 長船寿一, 志村正幸, 野村卓史, 岩吹啓史, 上明戸昇, 長谷部寛, 立石賢吾, “低周波音および風速の同期計測による風ノイズ推計手法に関する研究”, 騒音制御, Vol.44 No.2, pp89~100 (2020).
- (2) 長船寿一, 野村卓史, 長谷部寛, 志村正幸, 上明戸昇, 岩吹啓史, 安田英明, “道路橋起因の低周波音測定値に影響する風ノイズに関する研究”, 構造工学論文集, Vol.66 A, pp.352~365 (2020).
- (3) 長船寿一, 志村正幸, 野村卓史, 岩吹啓史, 安田英明, 上明戸昇, 長谷部寛, “低周波音測定値に含まれる風ノイズ推計手法に関する研究”, 日本風工学会論文集, Vol.43 No.2, pp19~35 (2018).
- (4) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田知孝, “道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究” 構造工学論文集 Vol.56A, 237-250 (2010).
- (5) Toshikazu Osafune, Shunichi Nakamura, Katsunori Tanaka, “Impact Absorbing Damper to Suppress Bridge Vibration at Joints”, 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, Venice, Italy, September, (2010).
- (6) Toshikazu Osafune, Minoru Yamamoto, Shunichi Nakamura, Yutaka Ishii, “Case Study of Practical Noise Source Location for Road-Bridge Noise by Beamforming Method”, INTER-NOISE 2011, the 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Osaka, Japan, September (2011).

### 2 研究講演会論文

- (1) 長船寿一, 野村卓史, 長谷部寛, 志村正幸, 上明戸昇, “道路橋から発生する低周波音に含まれる風ノイズ評価手法に関する研究”, 日本風工学会, 第59回 風に関するシンポジウム, (2017).
- (2) Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Masayuki Shimura, Noboru Kamiakito, Toshikazu Osafune, Hiroshi Iwabuki, “Wind noise estimation for low frequency sound

- 
- measurement in natural wind ” , 14th International Conference on Wind Engineering,ISBN 978-85-66094-07-7, (2015).
- (3) Noboru Kamiakito, Masayuki Shimura, Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Toshikazu Osafune, Hiroshi Iwabuki, “Wind Noise Estimation Functions for Low Frequency Sound Measuring in Natural Wind by different roughness classification” , 6th International Conference on Wind Turbine Noise, Glasgow 20-23 April, (2015).
- (4) 長船寿一, 岩吹啓史, 上明戸昇, 志村正幸, 野村卓史, 長谷部寛,” 風ノイズの影響を考慮した低周波音測定を試み”(社)日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.27-30, (2015).
- (5) 志村正幸, 野村卓史, 長船寿一, 上明戸昇, 長谷部寛, 岩吹啓史, “自然風の中での低周波音の測定”(一社)日本風工学会誌, 第39巻, 第1号, pp.42-49, (2014).
- (6) 長船寿一, 岩吹啓史, 志村正幸, 青木淳, 立石賢吾, 上明戸昇, 野村卓史, 長谷部寛, 寺菌信一, 川崎康彦, 田中啓一, 伊藤芳樹, 内山真司, “低周波音測定における風ノイズ回帰式の改善, 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会講演論文集, pp.973-976, (2013).
- (7) Masayuki Shimura, Noboru Kamiakito, Atushi Aoki, Kengo Tateishi, Hisashi Niwa, Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Toshikazu Osafune, Hiroshi Iwabuki, Shiniti Terazono, Yasuhiko Kawasaki, Keiichi Tanaka, Yoshiki Ito, Shinji Uchiyama, Yoshinori Iwai, “Wind noise estimation functions for low frequency structure-borne sound measurement in natural wind” , Inter-noise 2013, Innsbruck Austria 15-18 September,pp.713,(2013).
- (8) Noboru Kamiakito, Masayuki Shimura, Atushi Aoki, Kengo Tateishi,Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Toshikazu Osafune, Hiroshi Iwabuki, Shiniti Terazono, Yasuhiko Kawasaki, Keiichi Tanaka, Yoshiki Ito, Takaaki Hayashi, Yoshinori Iwai, “Improvement of regression analysis on wind noise effects for low frequency sound measuring in natural wind” , 5th International Conference on Wind Turbine Noise, Denver, 28-30 August, (2013).
- (9) Noboru Kamiakito, Masayuki Shimura, Atushi Aoki, Kengo tateishi, Hisashi Niwa, Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Toshikazu Osafune, Shiniti Terazono, Yasuhiko Kawasaki, Yoshiki Ito, Takaaki Hayashi, Yoshinori Iwai, “Regression analysis on wind noise effects for low frequency sound measuring in natural wind” , Inter-noise 2012, New York City USA, 19-22 August, (2012).
-

- 
- (10) Masayuki Shimura, Noboru Kamiakito, Atushi Aoki, Kengo Tateishi, Hisashi Niwa, Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Toshikazu Osafune, Shiniti Terazono, Yasuhiko Kawasaki, Yoshiki Ito, Takaaki Hayashi, Yoshinori Iwai, “Wind noise estimation functions for low frequency sound measuring in natural wind”, 15th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, Stratford upon Avon UK, May 22-24, (2012).
- (11) 長船寿一, 岩吹啓史, 志村正幸, 青木淳, 立石賢吾, 上明戸昇, 野村卓史, 長谷部寛, 寺菌信一, 川崎康彦, 田中啓一, 伊藤芳樹, 内山真司, 岩井恒敬, “低周波音測定における風ノイズの影響推定に関する検討”, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1057-1060, (2012).
- (12) 上明戸昇, 志村正幸, 青木淳, 立石賢吾, 丹羽尚史, 野村卓史, 長谷部寛, 長船寿一, 寺菌信一, 川崎康彦, 伊藤芳樹, 林孝明, 岩井恒敬, “フィールドデータ蓄積による低周波音測定における風ノイズ影響の推定”, (社) 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.43-46, (2012).
- (13) 上明戸昇, 志村正幸, 青木淳, 立石賢吾, 野村卓史, 長谷部寛, 長船寿一, 岩吹啓史, 寺菌信一, 川崎康彦, 田中啓一, 伊藤芳樹, 内山真司, 岩井恒敬, “低周波音計測における風ノイズの評価事例”, (社) 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.173-176, (2012).
- (14) 上明戸昇, 立石賢吾, 志村正幸, 青木淳, 丹羽尚史, 野村卓史, 長谷部寛, 長船寿一, 田中啓一, 伊藤芳樹, “低周波音測定における風ノイズの影響に関する回帰式検討”, (社) 日本音響学会 2012 年春季研究発表会講演論文集, pp.24, (2012).
- (15) Masayuki Shimura, Kengo Tateishi, Hisashi Niwa, Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe, Minoru, Yamamoto, Toshikazu Osafune, “Proposing a wind noise evaluation method for low frequency sound measuring”, Inter-noise 2011, Osaka Japan 4-7 September, (2011)
- (16) 丹羽尚史, 志村正幸, 青木淳, 立石賢吾, 野村卓史, 長谷部寛, 山本稔, 長船寿一, 寺菌信一, 川崎康彦, 伊藤芳樹, 林孝明, 岩井恒敬, “低周波音測定における風ノイズの影響に関するフィールド予測式の検討”, (社) 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.157-160, (2011)
- (17) 長船寿一, 山本稔, 野村卓史, 長谷部寛, 志村正幸, 立石賢吾, 丹羽尚史, “低周波音測定における風ノイズの影響に関する屋外実験”, (社) 日本音響学会 2011 年春季研究発表
-



---

表会講演論文集, pp.144, (2011).

- (18) 立石賢吾, 志村正幸, 中野裕之, 丹羽尚史, 野村卓史, 長谷部寛, 山本稔, 長船寿一,  
“低周波音測定における風ノイズの影響に関する実験的検討”, (社) 日本騒音制御工学会  
研究発表会講演論文集, pp.225-228, (2010)

## 特許

名称：騒音計および騒音測定用プログラム

登録番号：特許第 6025148 号 (JP 6025148 B)

特許権者 (所在地)：学校法人日本大学 (東京都)

発明者：1) 野村卓史, 2) 長谷部寛, 3) 志村正幸, 4) 上明戸昇, 5) 長船寿一, 6) 岩吹啓史