

## 論文審査の結果の要旨

氏名：長 船 寿 一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名： 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

審査委員：（主査） 教授 小 林 義 和

（副査） 教授 松 田 礼 特任教授 野 村 卓 史

車両が橋梁上を通過する際に、路面の段差などの影響によって橋梁に鉛直方向の荷重が作用し、その荷重によって励起された橋梁振動が空気に伝播することによって低周波音が発生することは広く知られている。その低周波音は、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し、社会的な問題として認識されている。

この低周波音の屋外測定においては、風による影響を強く受けることが広く知られており、環境庁大気保全局が平成12年に提案している「低周波音の測定方法に関するマニュアル（平成12年10月）」においては、「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稀で、その対策として、低周波音計のマイクロホンに二重の防風スクリーンを装着する測定方法や、風速が小さい地表面にマイクロホンを設置する測定方法などの研究が行われているが、自然風による影響の完全な排除には至っていない。

本論文では、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自然風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い、その結果から、風が吹いている状況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を明らかにしている。この知見から、低周波音測定と風速測定を同時に実施し、風速計測の結果から測定された低周波音に含まれる風ノイズレベルを推定する手法の開発について着想している。

この着想に基づき、本論文では、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ている。この推計式に含まれる係数については、地表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算出している。また、この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についても、併せて開発製作されており、本論文における研究の社会実装への準備もなされている。

更に、風ノイズレベル推計式を実装したこの新しい測定装置によって、低周波音が問題になっている道路橋のフィールドデータの測定を行い、フィールドデータに含まれている風ノイズレベルの推定を行うことを試みている。この試みにおいては、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上で、本研究で提案されている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ることを実証している。

本研究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り、従来、風がないときに限定されていた低周波音測定が、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となる。これにより、低周波音測定が効率よく実施できるようになるのみならず、風力発電機が発する低周波音のように、風が吹いていることが前提となって発生する低周波音の測定を可能にすることを示唆するものであり、本論文で提案された風ノイズレベルの推定式は、構造物の振動などによって生ずる低周波音の測定に大きな影響を与えうる、有用なものであると判断される。

本論文は、全6章で構成されている。その概要は以下の通りである。

第1章「緒論」では、本論文の背景として、我が国における環境問題の経緯及び低周波音問題について

て概説するとともに、「研究の目的」を明らかにしている。また、「本論文に関係する既往の研究」を整理したうえで、「研究の方向性」を示すとともに「論文の構成」について述べているものである。

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、低周波音計、防風スクリーンの計測システム系を自然風の中に設置した状態を模擬する風洞実験を行った。その結果、周波数、平均風速及び乱流強度のパラメータで説明できることを明らかにするとともに、風洞実験に基づいたカーブフィッティングによる風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式を構築している。次に、この推計式をフィールド実験結果に当てはめ、1.6 Hz 以下の周波数帯で乖離することを明らかにした。その理由として、風洞実験とフィールド実験では乱れの長さスケールや乱流強度の変動幅が異なることによるものとしている。このため、フィールド実験データに基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の構築を改めて行うことによって、1.6 Hz 以下の周波数帯における測定値との乖離を改善している。

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  $L_{wind}$  推計式の構築」では、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を開発製作し、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カーブフィッティングにより推計式の構築を行い、その作成手順を示した。また、測定値と構築された推定式による推定値の整合性について検討を行っており、提案するフィールド実験に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式による推定結果は、測定値と強い正の相関を持ち、風洞実験に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式と比較し平均風速と乱流強度の適用範囲が改善されたことを述べている。

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推計式  $L_{wind}$  の構築」では、風洞実験やフィールド実験による風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式とは異なり、物理的な意味をもつ流れ場の風速と圧力の関係から風ノイズ推計式を導出し、これらに必要な係数について、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レベル  $L_{wind}$  推計式を提案している。その上で、提案した推計式の妥当性を検証するため、推計式を構築する過程において収集したフィールド測定値と導出した風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式から計算した推計値との整合性を確認するために相関分析を行ったところ、自然風による影響が大きい低周波数帯の 1.0Hz, 4.0Hz 及び 16.0Hz において相関係数が 0.8 以上で強い正の相関となり整合が良いことが確認されたことを報告している。

第5章「道路橋における風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の適用性検証」では、第4章において提案された流れ場の風速と圧力の関係に基づく風ノイズレベル  $L_{wind}$  推計式の推計精度を検証するため、道路橋と自然風による低周波音が複合するフィールドで測定を行い、測定値と推計値を比較している。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 S/N 比に着目する手法と音圧レベルの最小値  $L_{min}$  に着目する二つの手法を提案し、風ノイズの影響評価を行った結果、両手法ともに風ノイズの影響を評価可能であることが確認できたことが報告されている。特に、 $L_{min}$  に着目する手法は、より細かく影響周波数の評価を行うことが可能であることが示されている。

第6章「結論」では、本研究の結論について述べ、本研究の意義を明確にするとともに、今後の課題と展望について述べられている。

以上で示したように、本論文は、風洞実験及びフィールド実験の結果に基づいて風ノイズレベルの推定式を提案し、その推定式を実橋における風ノイズの影響評価に適用することにより、その妥当性の評価を行ったものである。更に、提案した風ノイズレベルの推定式の社会実装を目指し、提案した風ノイズレベルの推定式を適用するために必要な情報を効率的に収集する計測システムの開発及び製作を行っている。本論文で提案した手法は、従来、道路橋などの構造物の振動に起因する低周波音を高精度に計測するためには、風ノイズレベル自体が低い環境を作り出す必要があったのに対し、風ノイズレベルが低くないような状況においてもそのノイズレベルの影響を考慮することで低周波音の推定を行うことができるものである。また、将来的には、風力発電機等による低周波音の計測のように、風が吹いている中で動いている構造物に起因する低周波音の計測にも適用できる余地のある手法であり、低周波音の計測方法に大きく貢献する有用な知見を得たものであると判断する。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和3年2月18日