

低周波環境騒音計測における風雑音
混入下の対象騒音推定法

尚 興 明

目 次

低周波環境騒音計測における風雑音混入下の対象騒音推定法

近年、都市部の環境騒音問題が顕著となり、騒音計測が盛んに行われており、これに対しては計測の精度向上が求められている。この中で、低周波環境騒音計測に関する風雑音混入下の問題が顕著となり、この問題を解決するために90～100 Hz以下の騒音では、これによる影響が大きい。特に、騒音計測の精度に関する評価方法が正確にはもたされていない。また、その影響は、計測の精度についても未確定である。この様な状況下で、騒音計測の精度向上、計測結果の信頼性を確保するために「実用規格」が制定されることとなっている。

さて、この低周波騒音の混入下での計測に際して、風雑音による風雑音がマイクホーンに混入することにより、計測結果が歪みを生ずるという問題がある。一般の騒音計測時には騒音計測用マイクホーンが用いられる。これは、マイクホーンの下流側に発生する乱流を抑制する。風雑音の発生は、風雑音の強い成分の騒音にかかわる。しかし、風雑音の発生は、風雑音の強い成分はマイクホーンの上流側で発生した乱流の成分による。この時、マイクホーンの上流側の成分によって無意味に増大することは一層の問題である。このため、風の影響を減らすためにマイクホーンを流す方向に設置する計測法で、騒音計のマイクホーンの使用に基づく推定法の適用、対象音のレベルに対する騒音レベルに基づく推定法の適用など、様々な計測法が提案されている。これらの計測法はそれぞれ利点があり、また研究課題も多い。近年、電力発電所風車の騒音計測方法に関する国際規格の検討のために、我が国においてもこれに関する実務的検討が行われている。これを事例として、広く海外での低周波騒音計測に際しての風雑音考慮の標準化も求められている。本研究は、以上の状況の下に、同じような実務的検討を主として実務的に考察したものである。

第1章では、以上の様な不可解の現象と対策の検討、計測結果の精度向上にも本論文の構成について述べている。

第2章 ベイズ・フィル 高桑誠明 に基づく推定法

本章では、風雑音下の騒音計測結果をベースとして推定法を構築している。

内 容 梗 概

本研究は、屋外における低周波環境騒音計測に際して問題となる風雑音対策に焦点を当てて、風雑音混入下の観測結果から対象騒音を推定する手法について、主として実験的に考察を行ったものである。

第1章 序 論

近年、都市型の近隣騒音問題が新しくクローズアップされており、これに対しては従来の環境基準がなじまないという問題点と共に、低周波空気振動に関する環境基準がないという問題点が指摘されている。この低周波音(一般に90～100 Hz以下)に関しては、これによる心理的、生理的、及び物理的影響に関する評価方法が国際的にも確定されていない。また、その計測法、計測器の規格についても未確定である。この様な状況下で、我が国では1997年に、低周波音の計測法と計測器の規格に関しての「実用規格」が制定されたところである。

さて、この低周波音の屋外での測定に際して、自然風による風雑音がマイクロホンに混入することにより、対象音の計測が困難になるという問題がある。一般の騒音測定時には騒音計用ウィンドスクリーンを装着する。これは、マイクロホンの下流側に発生する乱流を主原因とする、風雑音の比較的周波数の高い成分の軽減にかなりの効果がある。しかし、低周波域で問題となる風雑音の主成分はマイクロホンの上流側で発生した圧力変動の流下によるとされる。これは、ウィンドスクリーンの装着のみによって効果的に軽減させることは一般に困難である。このため、風の影響軽減のためにマイクロホンを地表近くに配置する計測法や、複数個のマイクロホンの使用に基づく相関法の適用、対象音のON/OFFによる観測パワー差に基づく推定法の適用など、様々な計測法が提案されている。これらの手法はそれぞれ得失があり、未だ研究課題は多い。近年、風力発電所風車の低周波騒音計測に関する国際規格の検討のために、我が国においてもこれに関する実験的検討が行われている。これを特例として、広く屋外での低周波音計測に際しての風雑音対策の標準化も求められている。本研究は、以上の状況の下に、新たな対象音推定法を主として実験的に考察したものである。

第1章では、以上の様な本研究の背景と目的を述べ、次章以降の概要とともに本論文の構成について述べている。

第2章 ベイズ・フィルタと同期検波法に基づく推定法

本章では、風雑音下の低周波音計測法としてはあまり知られていない、しかも対照

的と見られている2種類の風雑音対策法：デジタル信号処理に基づくベイズ・フィルタ、及びアナログ電子回路の信号処理に基づく同期検波に焦点を当てている。

初めに、非負領域で揺らぐパワー変量において、ベイズの推定原理に基づく一般理論を考察している。ベイズ・フィルタ法の実体化に関しては、特に手法を簡易化する立場から、線形相関の低次情報のみを用いるガウス分布近似に基づく推定法と、ガンマ分布近似に基づく推定法を考察している。次いで、これと対照的に正負に揺らぐ瞬時音圧変量に着目し、周期性対象信号にのみ有効となる同期検波法の適用を考察している。自然風下の音響伝搬環境での同期検波法の適用に際しては、特にコヒーレンシの低下問題に対して、検出した位相揺らぎに着目する対象音の一推定法を考察している。本章で考察した2種類の風雑音対策法の有効性を確認するため、野外の自由音場での正弦波純音を用いた実験により、低周波音の距離減衰特性を計測した結果を示している。提案手法による計測結果をJIS暗騒音補正法、および、遠方測定点とのパワー差に基づく推定結果と比較して本2手法の有効性を示している。

第3章 風速情報を利用したカルマン・フィルタに基づく推定法

風雑音対策として、風雑音の直接的な原因である風と風雑音との関係そのものに着目する立場からの研究はほとんど見受けられない。本章では、マイクロホン近傍の風速変動と風雑音間の相関特性に着目して、風速情報を積極的に利用する一手法として、公知のカルマン・フィルタ理論の適用に基づく対象音推定法を考察している。

まず、手法の簡易性に重点を置き、マイクロホンのプリアンプ出力を観測値として用いることにより、平均0の周りに正負に揺らぐ瞬時音圧をガウス分布で近似して捉える。次に、実験結果から、風雑音音圧の分散を風速の関数として近似的に捉える。風雑音下の対象音推定に際しては、時々刻々に観測される風速情報に基づいて、この予め捉えた風速と風雑音分散との関係を利用する。ここでは、測定すべき対象音に関する事前情報が得られない場合を考え、初めに推定すべき信号として風雑音を設定する。具体的には、一定期間の観測値の蓄積と時々刻々の風速情報を基に、カルマン・フィルタを適用して、まず観測値に混入した風雑音を推定する。次いで、観測値からこの風雑音推定値を減じることにより、風雑音に埋もれた対象音を推定する手法を考察している。本手法の有効性を風雑音の混入する屋外で帯域雑音を観測した結果に適用して確認している。本手法の適用に際しては、実用的立場から、対象音の定常性が期待できる場合とそうでない場合について検討している。

第4章 風速情報を利用した条件付き平均に基づく推定法

低周波騒音の計測に際しては、定常放射音を用いて音響伝搬特性を計測する場合や、ダムの放水音などのほぼ一定レベル音を計測対象とする場合も比較的多い。本章では、実用性に重点を置き、このような定常性の強い対象音レベル計測の際に有効

となる，風速情報に基づく2種類の簡易的对象音推定法を考察している。

初めに，風速と風雑音音圧レベル間の相関関係を基礎に，風雑音のオーバーオールでの平均2乗音圧を風速による条件付き分布で表わす。実用的には，この条件付き平均のみを事前に学習する。風雑音下の対象音観測に際しても風速を同時観測する。これに基づき，観測結果を風速の条件付き平均で捉える。こうして，風速情報を基に，パワー加算の原理に基づいて対象音の平均を推定する手法を検討している。次に，風速と風雑音スペクトル間の相関関係に基づき，スペクトル領域での簡易推定法を検討している。まず，風雑音の短時間ごとのパワースペクトルを風速の条件付き分布で表す。実用的には，この条件付き平均のみを用いて，パワースペクトル加算の原理に基づく対象音推定法を検討している。パワースペクトルの算出に際しては，振幅方向に飽和した欠損観測値から，もとのスペクトルを推定する一手法についても検討を加えて，実験的にもその有効性を確認している。提案した2種類の簡易推定法を，一部は前章での実験結果に適用して有効性を確認し，また，新たに自然風下において一定レベルの低周波帯域雑音の観測を行った結果にも適用してその有効性を確認している。

第5章 風雑音の特徴成分抽出に基づく推定法

本章では，実用的立場から，騒音計測に多用されるオクターブ，1/3オクターブなどの帯域音圧レベル計測を取り上げ，2種類の簡易的な風雑音対策法を考察している。低周波音計測に関する我が国における「実用規格」が1997年に定められた。この中で，オクターブ帯域音圧レベルを測定する場合は具体的に規定され，今後，低周波音測定の実際の場においてこの計測法の比重が増すと考えられる。

まず，風雑音のオクターブ帯域レベル間にかなりの相関関係が存在することの実験的検証を基礎にして，風雑音の卓越する帯域レベル値を基に他の帯域に混入する風雑音を捉える。これにより，風雑音下の対象音計測に際しては，マイクロホンに混入する風雑音推定の手掛かりを，結果的に得られるオクターブ帯域レベル観測値自身の中に特徴的に見出して活用しようとする一簡易的手法を検討している。また，これと対照的に，マイクロホン近傍の風速と風雑音間に潜在する高次相関情報を抽出して反映させた，拡張型回帰理論の導入に基づく対象音の一推定法を考察し，実用的には，低次統計量のみを用いる簡易手法を設定している。両手法の有効性は，まず，予め真値の既知な対象音と風雑音とを計算機上で音圧加算した合成観測値に適用して確認している。次いで，自然風下の実観測に適用した推定結果を基に両手法の有効性を比較検討している。この結果，結果的に得られる観測値から風雑音の特徴周波数帯域成分が有効に分離検出される場合は，前者の手法が後者の手法に比べて精度よく対象音が推定できることを示し，両手法の相補的適用の検討を提案している。

第6章 風雑音の超低周波成分に基づく推定法

本章では、自然風による風雑音のパワースペクトル成分が超低周波域に卓越して存在することに注目している。一般には、測定に際して妨害となる超低周波成分を遮断して計測することが行われている。ここでは、積極的にこの卓越成分を利用する対象音推定法を考察している。

初めに、通常の騒音計測に多用される、ウィンドスクリーンを装着した JIS 精密騒音計の“1/2 インチ型”コンデンサマイクロホンを用いて計測した風雑音のパワースペクトルに着目している。次いで、この風雑音の超低周波域のスペクトル成分と風雑音の音圧レベルとの間に強い相関特性があることを実験的に検証している。これに基づき、まず、マイクロホンに混入する風雑音の超低周波スペクトル成分を条件として、パワースペクトルでの条件付き平均のみを利用する対象音の簡易的推定法を検討している。次に、この超低周波成分の観測に基づき、時々刻々の風雑音の平均2乗音圧の揺らぎをガンマ分布で近似して捉えている。これに基づき、ベイズ・フィルタの適用により時々刻々の対象音を推定する一手法を検討している。パワースペクトルでの推定法の有効性は、本手法による対象音推定結果を、第4章での風速情報を利用したパワースペクトルにおける推定法による結果と比較して確認されている。次いで、ベイズ・フィルタの適用による推定結果を、一定時区間毎の条件付き平均によるエネルギー平均差のみを用いる簡易的推定法による結果と対比して、その有効性を確認している。その結果、風速情報を必要としない本手法の実用性の一端が確認された。

第7章 結 論

本章では、以上の各章における研究成果を要約し、本研究のまとめを述べると共に今後の研究課題について展望している。

目次

第1章 序 論	1
1.1 背景と目的	1
1.2 論文の構成	3
第2章 ベイズ・フィルタと同期検波法に基づく推定法	9
2.1 まえがき	9
2.2 簡易型ベイズ・フィルタ法	11
2.2.1 一般理論	11
2.2.2 ガウス分布近似による予測	14
2.2.3 ガンマ分布近似による予測	16
2.3 同期検波法	18
2.3.1 同期検波法と検出位相情報の活用	18
2.3.2 回路構成	22
2.4 実験的考察	23
2.4.1 実験方法	23
2.4.2 距離減衰特性計測へのベイズフィルタ法の適用結果	24
2.4.3 距離減衰特性計測への同期検波法の適用結果	25
2.4.4 推定結果の検討	30
2.5 むすび	31
第3章 風速情報を利用したカルマン・フィルタに基づく推定法	33
3.1 まえがき	33

3.2	マイクロホン近傍の風速変動と風雑音変動	34
3.3	風速情報の利用に基づくカルマン・フィルタ	35
3.4	実験的考察	39
3.4.1	実験方法	39
3.4.2	対象音の推定結果	43
3.4.3	推定結果の検討	46
3.5	むすび	47
第4章	風速情報を利用した条件付き平均に基づく推定法	48
4.1	まえがき	48
4.2	平均2乗音圧(オーバーオール)における対象音推定法	49
4.3	パワースペクトルにおける対象音推定法	51
4.3.1	パワースペクトルにおける対象音推定法	52
4.3.2	振幅飽和観測値からのパワースペクトル推定法	53
4.4	実験的考察	59
4.4.1	実験方法	59
4.4.2	平均2乗音圧における対象音推定結果	60
4.4.3	パワースペクトルにおける対象音推定結果	64
4.4.4	推定結果の検討	74
4.5	むすび	77
第5章	風雑音の特徴成分抽出に基づく推定法	79
5.1	まえがき	79
5.2	風雑音の特徴BPLを利用した推定法	80
5.3	風速-風雑音間の高次回帰関係を利用した推定法	82
5.4	実験的考察	84
5.4.1	実験方法	84
5.4.2	風雑音の2種類の相互相関特性	85
5.4.3	風雑音の2種類の条件付き平均	90

5.4.4	合成観測値による対象音 BPL の推定結果	93
5.4.5	実観測に基づく対象音推定結果	96
5.4.6	推定結果の検討	97
5.5	むすび	99
第6章	風雑音の超低周波成分に基づく推定法	101
6.1	まえがき	101
6.2	風雑音の超低周波成分と SPL との相関特性	102
6.3	パワースペクトルにおける相関特性に基づく推定法	107
6.4	簡易型ベイズ・フィルタ法	108
6.5	実験的考察	111
6.5.1	実験方法	111
6.5.2	パワースペクトルにおける相関特性に基づく対象音推定	112
6.5.2.1	超低周波成分と風雑音パワースペクトル間の相 関特性	112
6.5.2.2	対象音の推定結果	113
6.5.2.3	推定結果の比較検討	116
6.5.3	簡易型ベイズ・フィルタ法に基づく対象音推定	117
6.5.3.1	超低周波成分による風雑音の条件付き確率	117
6.5.3.2	対象音の推定結果	120
6.5.3.3	推定結果の比較検討	122
6.6	むすび	124
第7章	結 論	126
	謝 辞	131
	参考文献	132

第1章

序論

1.1 背景と目的

騒音が人間に与える影響についてはしばしば問題となり、今日、法的にも規制や基準^{[1]~[3]}が設けられ、より良い音環境を目指すための社会的合意が作られている。具体的な「人の健康を保護し、生活環境を保全する上で維持されることが望ましい」環境基準や規制基準としては、環境騒音、道路交通騒音、新幹線騒音、航空機騒音などの他、工場騒音、建設作業騒音、深夜営業騒音など、騒音の種別ごとにその測定法、評価法の基準値、規制値が設定されている。しかしながら、近年、新しくクローズアップされている都市型の近隣騒音問題への適用などにおいて、従来の産業騒音への基準や評価、規制をそのまま適用することが困難で馴染まないという問題点が指摘されると共に、低周波空気振動に関する環境基準がないという問題点が指摘されている^[4]。

低周波音(一般に90~100 Hz以下)に関する苦情^{[5]~[9]}に関しては、「発生源がうるさい」、「気分が悪い」などの心理的・生理的影響面と「建物のがたつき」などの物的影響面とに区分される。その発生源としては送風機、振動ふるいなど、工場の機械によるものが最も多いとされ、その他、橋梁やダム of 放流などの多岐にわたる発生源が報告されている。この様な低周波音を原因とする心理的、生理的、及び物理的影響に関する評価方法に関しては、国際規格案(ISO/DP 7196, ISO/DIS 7196.2)が提案され、我が国での研究、検討も行われている^{[5],[7],[9]~[11]}。しかし、現在この評価方法は未確定である。さらに、低周波音の具体的な計測法や計測器の規格についても、未だ、国際的に確定されていない実情であり、我が国でも1997年に至って、これらに関しての「実用規格」が制定されたところである^{[12],[13]}。

さて、この低周波音測定法に関して対処すべき課題の一つに風雑音の混入問題がある。すなわち、屋外では自然風が存在することが普通であり、これを原因とする風雑音がマイクロホンに混入して対象音の計測が困難となる問題^{[14]~[17]}である。一般の騒音測定時には騒音計用ウインドスクリーン^{[18],[19]}の装着により風雑音の混入を軽減させることが行われる。しかし、風速がある程度を越えるとウインドスクリーンによる軽減効果も期待できず、測定が不可能となる場合すらある。特に、風雑音の周波数スペクトル成分が低周波域で大きく現れるため、低周波音計測に際しては、微風下の対象音計測に際しても問題となることがある。このため、前述の実用規格^[12]や低周波音に関する専門委員会^[20]においても、「騒音計測用の防風スクリーンを装着しても風雑音の低減効果は少ないのが普通であるから、風のない時に測定するのが望ましい」としている。しかしながら、風の存在する条件下でも対象とする低周波音を測定しなければならない場合（例えば、風車発電機の騒音計測^[21]）があり、また、風による音響伝搬への効果そのもの^{[22],[23]}を計測しなければならないこともある。さらに、環境騒音のモニタリングなどにおいては、風雑音の混入した観測結果から環境騒音のみの大きさを推定、評価したい場合もある。

この様な場合の風雑音対策法として、特別なウインドスクリーン^{[24]~[26]}を装着する他に、マイクロホンを地表面近傍に配置して風の影響を直接軽減させようとする手法^{[14],[16]}、人工的な M-系列信号音や断続放射音を利用する方法^{[27],[28]}、更に、複数マイクロホンの利用に基づく相関法・クロススペクトル法^{[29],[30]}などの各手法が提案され、それぞれについて有効性が評価されている^{[16],[17]}。しかしながら、ウインドスクリーンのみでは除去しがたい風雑音成分の存在^[31]や、マイクロホンを本来の測定点に配置できない原理的な難点があったり、人工音源が利用できない場合や、複数マイクロホンの配置による測定系の複雑化の問題など、各手法それぞれに得失があり、未だ、かなりの研究課題が残されている。また、近年、風力発電所風車の騒音計測に関する国際規格検討のため、我が国においてもこれに関する実験的検討が行われる^[32]などを特例として、広く屋外での低周波音計測に際しての風雑音対策の標準化も求められている。

自然風による風雑音はその発生要因と周波数域により大きく二つに分けられる [26],[33]。気流に伴う圧力変動がマイクロホンの上流側で発生し、これが流下して観測される周波数の比較的低い成分と、気流中にマイクロホンを設置することによりこの下流側に発生する乱流を原因とする周波数の比較的高い圧力変動成分である。後者の風雑音成分は、まだ基本的に問題点を残すものの、マイクロホンにウインドスクリーンを装着することによりかなり軽減される。しかし、低周波域で問題となる前者の風雑音成分は、これの装着のみによって効果的に軽減させることは一般に困難である。従って、ウインドスクリーンの使用による方法以外の風雑音対策を研究する必要性は大きいと考えられる。

特に、この風雑音に関する研究状況としては、層流下での理論的研究 [34],[35] が早くから見受けられるけれども、自然風による風雑音問題には適用できず、最近でもそのほとんどが実験的考察のみを主としている段階である。

本研究は、以上の様な背景から、屋外における低周波環境騒音計測に際して一般に問題となる風雑音対策に焦点を当て、風雑音混入下の観測結果から対象騒音を推定する手法について主として実験的に考察する。

1.2 論文の構成

本論文は本章を含め七つの章から構成されている。第2章では、風雑音下での低周波音推定法として、対照的と考えられる2種類の手法：ベイズ・フィルタ法と同期検波法を考察している。第3章では、マイクロホン近傍の風速情報を利用する一推定法として、カルマン・フィルタ理論の適用に基づく方法を考察している。第4章では、オーバーオール計測とパワースペクトル計測での、風速情報による条件付き平均に基づく簡易的对象音推定法を考察している。第5章では、騒音計測に多用される帯域音圧レベル (BPL) 計測に対し、風雑音の特徴抽出に基づく2種類の簡易的对象音推定法を考察している。第6章では、風雑音の超低周波成分を利用する、条件付き平均とベイズ・フィルタを用いる2種類の簡易的对象音推定法を考察している。最後に、第7章に

において、本研究の成果をまとめ今後の課題を検討している。以下、第2章から第6章までの各章ごとに論文の内容を概説する。

第2章では、低周波音計測ではあまり知られない、しかも対照的と見られる2種類の風雑音対策法：デジタル信号処理に基づくベイズ・フィルタ法（カルマン・フィルタ [36]~[39] を含む）と、アナログ信号処理に基づく同期検波 [40],[41] 法を考察する。

雑音に汚された観測値から信号のみの検出が可能となるためには、もともと、観測値と信号との間に何等かの相関が存在しなければならない。いま、定常と捉えるなら、この低次、高次の線形、非線形相関情報をどの様に抽出し、これを如何に雑音対策に利用するかが問題である。本章で具体的に考察するベイズ・フィルタ法と同期検波法は、本報告が操作の簡易化にも焦点を置くことから、いずれも風雑音対策として低次の線形相関情報のみを主として利用した簡易的手法である。

初めに、簡易ベイズ・フィルタ法と同期検波法の両者を低周波音計測領域での風雑音対策へ適用するため、両手法の特徴や互いの方法論的対照性に留意してその理論設定を行う。特に、ベイズ・フィルタ法においては非負の振幅領域で揺らぐパワー変数に着目し、簡易化を目指すとはいえ、公知のカルマン・フィルタを特別な場合として含む一般理論を新たに提案する。理論の具体的適用に際しては、手法を簡易化する立場から、揺らぎの分布をガウス分布で近似することに基づく対象音の動的推定法と、ガンマ分布で近似することに基づく動的推定法を考察する。また、同期検波法においては振幅が平均周りの正負に揺らぐ瞬時音圧変数に着目し、特に、風雑音下での適用法として検出した対象音信号の位相揺らぎにも着目した推定法を考察する。

本手法の有効性は、両手法が低周波音計測における風雑音対策法への利用としては未だ研究の初期段階にあることから、最も単純な音響伝搬特性 [42]~[44] を示す実際の自由音場における低周波音計測実験に適用して確認している [45]~[47]。

第3章では、マイクロホン近傍の風速変動と風雑音間の相関特性に着目し、風速情報を積極的に利用する具体的一手法として、カルマン・フィルタ [36]~[39]

の適用に基づく対象音の動的推定法を考察する。

風雑音による圧力変動が平均 2 乗音圧 [48],[49] で計測される場合、特に正の状態変量としては平均周りの振幅揺らぎ幅が平均そのものへ強い相関を生ずることから、マイクロホン近傍の正変量風速とマイクロホンによって検出される風雑音との間にはかなりの相関のあることが推察される。事実、自然風のマイクロホン近傍風速と風雑音との間の相関特性についての実験報告は早くからかなり示されている(例えば文献 [14],[50] など)。しかし、風雑音対策として風雑音の直接的な原因である風と風雑音との関係そのものに着目し、風速情報を利用する立場からの研究はほとんど見られない。

もともと、空間的にも時間的にも極めて複雑な様相を示す風と、これが風雑音としてマイクロホンに与える効果を厳密に取り扱うことは原理的にも困難と考えられる。しかし、マイクロホン近傍の風速と風雑音との間の相関はかなり大きいことから、近似的にもこれらの関係を捉えて活用する価値は大きいと考える。他方、航空機騒音などの環境騒音のモニタリングに際しては、観測点での風速も併せて記録される場合も多く、この利用によるより積極的な風雑音対策を検討する実用的価値は大きい。

本章では、平均の周りに正負に揺らぐ瞬時音圧変量に着目する。初めに、マイクロホンに混入する風雑音をガウス分布で近似して捉え、同時に観測される風速情報を利用し、短時間ごとのこの風雑音の分散を風速で条件付けられた条件付き分布として捉えておく。また、風雑音の変動を自己回帰型のシステム方程式として捉えておく。風雑音下における対象音推定に際しては、測定すべき対象音の事前情報が得られない場合を考え、風雑音と対象音の混合した観測値から、まず推定すべき信号として風雑音を設定する。次いで、観測値からこの風雑音推定値を減じることにより風雑音に埋もれた対象音を推定する。

本手法の有効性は、自然風下において一定平均レベルの帯域雑音の観測を行った結果に適用して確認している [51],[52]。

第 4 章では、定常性の強い対象音を計測する際に有効となる、風速情報に基づく 2 種類の簡易的对象音推定法を考察する。

低周波音の計測に際し、定常放射音を用いた音響伝搬特性の計測の際や、ダムの放水音、ふるいなどの振動性機械音、温風乾燥機音などの一定レベル音

を対象とする場合も比較的多い。本章では、実用性に重点を置き、このような定常性の強い対象音レベル計測の際に有効となる推定法を考察する。

前章までは、騒音計測で通常用いられる周波数帯域全体 (オーバーオール [53],[54]) における音圧レベル (SPL [55]) 計測を基本に考えてきた。ここでは、風速と風雑音スペクトル間の相関情報の利用による風雑音対策の研究がほとんど見られないことから、まず、風速 - SPL 間の相関特性と共に、風速 - 風雑音パワースペクトル間においてもかなり強い相関関係の見られることを実験的に検証する。これらの実験結果に基づき、推定法の基礎となる風速情報による条件付き平均として、通常のオーバーオールでの平均 2 乗音圧量を用いる方法と共に、新たに FFT 解析に基づくスペクトルレベル (SL [56]) での条件付き平均を用いる方法を考える。一般に、低周波対象音と風雑音のスペクトル成分が重なり、このことが風雑音対策を困難にしている。しかしながら、両者のパワースペクトルの間に何らかの特徴差が見られることも多く、このような場合には、一旦、スペクトル領域において対象音成分を推定した後 SPL を算出する手法も有効と考えられる。

初めに、オーバーオールにおける平均 2 乗音圧での対象音推定の基礎となる、短時間ごとの風雑音の平均 2 乗音圧を風速の条件付き平均として捉え、条件付きパワー加算の原理のみを用いた対象音推定法を検討する。次いで、短時間ごとの風雑音のパワースペクトルを風速の条件付き平均として捉え、条件付きスペクトル加算の原理のみを用いた対象音推定法を検討する。他方、実際の屋外実験では、予測外の強い風雑音の混入などにより観測データが測定レンジを越えてしまい、振幅方向で打ち切られた欠損観測値が得られることが多い。平均 2 乗音圧量における様な時間平均の伴う処理では短時間の欠損観測値の影響は比較的薄められるのに対し、スペクトル算出には大きな影響が生じることもある。このような場合に対するスペクトルの一推定法についても検討を加える。この有効性の一端は実験的にも確認している [57],[58]。

考察した 2 種類の簡易推定法の有効性は、一部、前章での実験結果に適用し、また、新たに自然風下において一定レベルの低周波帯域雑音の観測を行った結果に適用して確認している [51],[52],[59],[60]。

第 5 章では、実用的立場から騒音計測に多用される 1 オクターブ、1/3 オク

タープ [61] などの帯域音圧レベル (BPL [56]) 計測を取り上げ、風雑音の特徴成分抽出に基づく 2 種類の風雑音対策法を考察する。

低周波音の具体的な計測法については、未だ、国際的に確定されていない実情がある。しかし、騒音計測の実際の場合においてはオクターブ BPL を計測することが多い。我が国における測定に関する実用規格 [12] においても、「建物のがたつきに関連する測定量」としてはオクターブ BPL を、「人体に対する影響に関連する測定量」としては必要に応じてオクターブ BPL を測定すると規定されている。ここでは、風雑音下におけるこの様なオクターブ BPL 計測に対する対象音推定法を、実用的には低次統計量のみを用いて検討する。

まず、マイクロホンに混入する風雑音推定の手掛かりを、結果的に得られる (対象音+風雑音) の BPL 観測値自身の中に特徴的に見出して活用しようとする一簡易的手法を検討する。具体的には、風雑音の BPL 間にかかなり大きな相関関係が存在することの実験的検証を基礎にして、風雑音の卓越成分が観測される特徴帯域での BPL を基に他の帯域に混入する風雑音 BPL を推定することを基礎とする。また、これと対照的に、マイクロホン近傍の風速と風雑音 BPL 間に潜在する高次相関情報を抽出して反映させた拡張型回帰理論の導入に基づく一対象音 BPL 推定法を考察する。本推定法では、風速による風雑音 BPL の条件付き平均をよりきめ細かく抽出することが重要となる。ここでは、出来るだけ普遍的な枠組をまず理論的に見い出して、実測データが個々に持つ特殊性をその枠組み内の各パラメータの内にのみ反映させる手法を設定する。

本手法の有効性は、まず、別に観測した真値の既知な帯域対象音と風雑音のみの帯域観測値との計算機上での音圧加算による合成観測値に適用して推定した結果と、次いで、風雑音下における対象音の実観測値に適用して推定した実験結果から確認している [62],[63]。

第 6 章では、自然風による風雑音のパワースペクトル成分が超低周波域 [64] に卓越して存在する実験結果 (第 4 章及び文献 [14], [31], [65] など) に着目し、この超低周波成分に基づく簡易的推定法を考察する。

オーバーオールでの SPL 計測に際して、風の周波数成分が「直流まで延びている」ため、一般には、「測定に必要な周波数帯域以下を遮断」して計測する

ことが勧められている [66]。また、前章における様な BPL 計測では、帯域フィルタを用いることによって自ずから対象周波数範囲外の風雑音成分を除去している。しかしながら、対象周波数範囲外の超低周波域に大きく現れる風雑音の周波数成分こそが自然風による風雑音の特徴を最も表しているとの考えの下に、ここではむしろ、この成分を積極的に観測して活用する。

初めに、通常の騒音計測に多用されるウィンドスクリーンを装着した“1/2 インチ型”コンデンサマイクロホンを用いて、周波数特性“flat [67]” (使用マイクロホンの場合: 10 Hz ~ 20 kHz) において超低周波域に観測される風雑音スペクトルの特性に着目する。周波数特性“flat”範囲外の超低周波域では利得が減衰しているにもかかわらず、実験結果による風雑音スペクトルのピークが 4 ~ 6 Hz 付近に現れる。この帯域での対象音成分や暗騒音成分が比較的少ないことから、この帯域成分を“指標”として自然風による風雑音が捉えられると考える。

まず、この 4 ~ 6 Hz 帯域での風雑音の BPL (以下、指標 BPL と略す) と他のスペクトル成分間に強い相関特性があることを実験的に示し、指標 BPL を条件としてパワースペクトルでの条件付き分布で風雑音を捉えることを試みる。これに基づき、簡易的にスペクトル加算の原理のみを用いた対象音推定法を検討する。次いで、この指標 BPL に基づき、風雑音の非負領域での平均 2 乗音圧変量の揺らぎを条件付きガンマ分布で近似して捉えることを試みる。これにより、マイクロホンに混入する低周波域での時々刻々の風雑音の揺らぎを、混入する風雑音自身の超低周波域成分の観測により推定することが可能となる。さらに、対象音の平均 2 乗音圧値の揺らぎもガンマ分布で近似して捉えることに基づき、簡易的にベイズ・フィルタの適用により時々刻々の対象音を推定する一手法を検討する。

本手法の有効性は、自然風下において一定レベルの低周波帯域雑音の観測を行った結果に適用し、一定時区間ごとの条件付き平均のみを用いる簡易的推定法による結果とも対比して検討している [68]~[70]。

第2章

ベイズ・フィルタと同期検波法に基づく推定法

2.1 まえがき

雑音に汚された観測値の中から対象信号のみの検出が可能となるためには、もともと、観測値と対象信号との間に何等かの相関が存在しなければならず、1次の線形相関から高次の非線形相関情報まで多様に存在する相関情報をどのように抽出し、これを雑音対策に如何に利用するかが問題となる。本章ではこの様な相関情報を利用する風雑音対策として、特に原理的側面と適用の簡便さに重点を置き、主として線形相関の低次情報のみを利用する対照的な2種類の手法を考察する。すなわち、低周波音計測としては余り知られないベイズ・フィルタ法と同期検波法である。特に、ベイズ・フィルタ法においては、簡易化を目指すとはいえ、公知のカルマン・フィルタを特別な場合として含む様な統一形態を新たに提案する。

典型的な対照性を見せる風雑音対策法として、ベイズ・フィルタ法と同期検波法の両手法の方法論上の原理的側面にまず着目する。一般に定常過程では、変動の瞬時値が全く不明な場合でもその各種統計情報は安定して事前に既知となり、従って予測にすらこれらを利用することができる（例えば、白色雑音ですら、平均、分散値、ガウス分布特性、信号との統計的独立性など、その各統計的性質は事前情報として既知となり、これらは平滑や予測の信号処理にしばしば利用されている）。もともと上述の相関情報には、雑音平滑化のための平均機能が何等かの形で付随している。この平均演算を時間平均の意味に解するとき、相関は時間経過における変動パターンの周期性検出に役立つ。も

し、統計的集合平均の意味に解するとき、雑音固有の統計情報を予め分離表現することができる。このことは、この雑音が予めもつ各種の統計情報をきめ細かくかつ多く利用するほど、合成波のうちから、逆に埋もれた信号の有効情報がきめ細かく抽出できることを意味する。

a) 簡易型ベイズ・フィルタ法はこの線に沿い集合平均における雑音の低次統計量のみを雑音対策に主に用いるのに反し、同期検波法はまず信号に着目して時間平均におけるその周期性検出に基盤をおき、その後で雑音の平滑化を行う。

b) 前者はどちらかと言えば、理論的色彩の強い逐次アルゴリズム型式のデジタル・フィルタであり非周期性の信号検出にも有効さを発揮できる。これに反し、後者は、実験的色彩の強い積分型式のアナログ・フィルタであり周期性の信号検出にのみ有効性を発揮する。

c) 状態変量として、後者の同期検波法では正負両領域内変動の音圧波形に着目するのに対し、前者の簡易ベイズ・フィルタ法は正領域変動の音響パワーに着目する。従って、後者におけるパワー変動パターンは前者における音圧変動に比しかなり援やかか、又は一定値を示すこととなる。

d) 特に、簡易ベイズ・フィルタ法の設定においては、パワー変量の揺らぎ形態として非負変量が特にもつ次の2種類の基本拘束にまず目を向けねばならない：

(i) 平均を0に近づけたとき必ず平均まわりの揺らぎ幅(例：分散)も0にならなければならないという、平均と揺らぎ形態間にはある種の相関性が潜在する — 従って、平均まわりのパワー揺らぎ形態はその平均情報からいくらか推定でき、逆に平均まわりのパワー揺らぎ形態をきめ細かく調査することが平均自身をより大きな確度で推定できることに連なる。

(ii) 暗騒音と対象騒音のパワー加算において各変量が負値となることはできない。観測した合成波のパワー変動から対象音のパワー変動を推定するとき、暗騒音の揺らぎ形態は単なる誤差ではなく、それどころか、これと無関係には対象音を抽出できない。すなわち、この両者間にはある種の拘束性が潜在する — 従って、この暗騒音の揺らぎ情報を低次は勿論高次まできめ細かく利用することが、逆に埋れた対象音の有効情報をきめ細かく浮彫りに抽出できることに連なる。

すなわち、同じ簡易型ベイズ・フィルタ法と言ってもパワー変量をもつこの2種類の基本拘束に積極的に対応するのか消極的に対応するのか、によって異なった2種類の方法論が見出される。後者の路線上に公知のカルマン・フィルタの適用がある。そして、平均レベルがその周りの揺らぎ幅より支配的な大きさを示すときは、パワー変量であっても上述の基本拘束が弱まり、このカルマン・フィルタの近似的利用も有効性を増すのである。本章ではこれらの2種類のベイズ・フィルタの比較検討以外に、両者の統一を図った簡易ベイズ・フィルタ理論も新たに設定する。

2.2 簡易型ベイズ・フィルタ法

2.2.1 一般理論

騒音環境は、公知のごとく、室などの閉じた空間ではSEA法^[71]に支えられ、野外などの開いた空間でも近似的に、パワーシステムとしてしばしば考察できる^[72]。本章でも、対象音や風雑音の状態変量としてパワー変量に着目する。一般に、対象音は風雑音に比べて秩序的時間変化を示すため、その発生機構や実測データの解析から時系列的变化様式を、予めシステム方程式として設定できる。本章では、手法の有効性を検証する目的で、特に既知の音響伝搬特性をもつ自由音場において、一定レベルの正弦波低周波音を対象音として風雑音の混入下で測定する。すなわち、そのシステム方程式は、第 k 時刻における対象音のパワースケールでの変量を x_k にとり、直ちに、

$$x_{k+1} = x_k, \quad (2.1)$$

で与えられる。観測方程式は、対象音 x_k と風雑音 v_k がパワー加算されて合成音 y_k となることから、直ちに次の様に設定する。

$$y_k = x_k + v_k. \quad (2.2)$$

一般に、S/N比が小となって y_k がほとんど風雑音 v_k によって支配的に占められてくると、両者の単なる平均処理のみでは信頼度のある x_k を推定することは困難となる。さらに、パワーのような正変量においては、2.1節で触れ

た様に平均とそのまわりの揺らぎ形態は互いに独立では有り得ず、また、一定値を示す x_k は、(2.2) 式で y_k の揺らぎの最小値より常に下位になければならない。これらのことは、 x_k を精度よく推定するには、時々刻々の逐次推定を動的に行う必要があり、その上 y_k の平均のみならず揺らぎの端をも無視せず、その分布全体にも目を向けねばならないことを意味する。

まず、 y_k の観測データを逐次摂取することが x_k の推定精度に如何に影響するかを、 y_k の全揺らぎ分布情報を用いて表すことができるベイズの推定原理 [73] に着目する。

$$P(x_k|Y_k) = \frac{P(x_k, y_k|Y_{k-1})}{P(y_k|Y_{k-1})} = \frac{P(y_k|x_k, Y_{k-1})}{P(y_k|Y_{k-1})} P(x_k|Y_{k-1}). \quad (2.3)$$

ここに、 Y_k は時刻 k までにおける観測値情報の集合 $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ を表す。今、 k 時刻で y_k を摂取しないときの 2 種類の (予測) 分布 $P(x_k|Y_{k-1})$, $P(y_k|Y_{k-1})$ をおのおの重み関数とする正規直交関数 $\varphi_i^{(1)}(x_k)$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) と $\varphi_n^{(2)}(y_k)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) をまず導入する。

$$\int \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_{i'}^{(1)}(x_k) P(x_k|Y_{k-1}) dx_k = \delta_{ii'}, \quad (2.4a)$$

$$\int \varphi_n^{(2)}(y_k) \varphi_{n'}^{(2)}(y_k) P(y_k|Y_{k-1}) dy_k = \delta_{nn'}, \quad (2.4b)$$

ただし、 $i = i' = 0$, $n = n' = 0$ の場合に着目して、 $\varphi_0^{(1)}(x_k) = 1$, $\varphi_0^{(2)}(y_k) = 1$ を得る。このとき、 x_k と y_k の結合確率密度分布 $P(x_k, y_k|Y_{k-1})$ は次の様に級数展開表示できる。

$$P(x_k, y_k|Y_{k-1}) = P(x_k|Y_{k-1}) P(y_k|Y_{k-1}) \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{in} \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_n^{(2)}(y_k). \quad (2.5)$$

ここに、各展開係数は、(2.4a), (2.4b), (2.2) 式を用いて、

$$A_{in} \triangleq \langle \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_n^{(2)}(y_k) | Y_{k-1} \rangle = \langle \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_n^{(2)}(x_k + v_k) | Y_{k-1} \rangle, \quad (2.6)$$

の様に x_k , v_k の統計的性質から評価でき、 $A_{i0} = A_{0n} = 0$ ($i, n \neq 0$) かつ $A_{00} = 1$ であり、 A_{11} は x_k , y_k 間における通常の線形相関情報に対応する。(2.5) 式を (2.3) 式に代入して、結局ベイズ原理は次の様に展開表示される。

$$P(x_k|Y_k) = P(x_k|Y_{k-1}) \left\{ 1 + \sum_{(m,n) \neq (0,0)} \sum A_{in} \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_n^{(2)}(y_k) \right\}. \quad (2.7)$$

これは、 k 時点で y_k を撮取，データ処理して $\varphi_n^{(2)}(y_k)$ の形で利用することが， x_k の推定精度に，揺らぎ分布形態において改善： $P(x_k|Y_{k-1}) \rightarrow P(x_k|Y_k)$ をもたらすことを意味する。ここに， x_k の推定に本質的役割を果たすものは線形相関 A_{11} や高次の各種非線形相関情報 A_{in} ($i, n \neq 0$) の存在である。もし x_k, y_k 間に何等の相関もないときは，たとえ y_k の逐次観測を積み上げても x_k の推定精度において改善が期待できないことを意味する。

さて，任意の如何なる連続関数も閉区間では，ワイエルシュトラスの多項式近似^[74]が可能となる。今， x_k の任意連続関数を N 次多項式 $f_N(x_k)$ で近似するものとする。このとき，これを (2.4a) の $\varphi_i^{(1)}(x_k)$ により直交展開表示して次式を得る。

$$f_N(x_k) = \sum_{i=0}^N C_{Ni} \varphi_i^{(1)}(x_k). \quad (2.8)$$

ここに，係数 C_{Ni} は $f_N(x_k)$ が特定されたとき予め事前に決定され得る。すなわち，実用上閉区間で定義された統計的な任意騒音評価量 $\hat{f}_N(x_k) (\triangleq \int f_N(x_k) P(x_k|Y_k) dx_k)$ は，(2.7), (2.8) 式から直ちに，

$$\hat{f}_N(x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^N C_{Ni} A_{in} \varphi_n^{(2)}(y_k). \quad (2.9)$$

の様に y_k の撮取と共に逐次推定できる。推定法の実体化に際し，操作の簡易化を目指して，特に上の (2.9) 式において $N = 1$, $f_N(x_k) = x_k$ 及び $N = 2$, $f_N(x_k) = (x_k - \hat{x}_k)^2$ なる 2 種類の場合のみに着目する。すなわち，対象音 x_k 及びその分散に関する風雑音下での状態推定アルゴリズムは，(2.6) 式の下に次の様に陽に表示される。

$$\hat{x}_k (\triangleq \int x_k P(x_k|Y_k) dx_k) = C_{10} + C_{11} \sum_{n=0}^{\infty} A_{1n} \varphi_n^{(2)}(y_k), \quad (2.10a)$$

$$\begin{aligned} P_k (\triangleq \int (x_k - \hat{x}_k)^2 P(x_k|Y_k) dx_k) \\ = C_{20} + C_{21} \sum_{n=0}^{\infty} A_{1n} \varphi_n^{(2)}(y_k) + C_{22} \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n} \varphi_n^{(2)}(y_k), \end{aligned} \quad (2.10b)$$

$$A_{in} = \langle \varphi_i^{(1)}(x_k) \varphi_n^{(2)}(x_k + v_k) | Y_{k-1} \rangle \quad (i = 1, 2). \quad (2.10c)$$

ただし，各係数 $C_{10}, C_{11}, C_{20}, C_{21}, C_{22}$ は (2.8) 式に沿い，前もって次の直交展開係数として左右の対応から直接算定しておくことができる。

$$x_k = C_{10} + C_{11} \varphi_1^{(1)}(x_k), \quad (2.11a)$$

$$(x_k - \hat{x}_k)^2 = C_{20} + C_{21}\varphi_1^{(1)}(x_k) + C_{22}\varphi_2^{(1)}(x_k). \quad (2.11b)$$

2.2.2 ガウス分布近似による予測

2.1 節で指摘した様に, x_k, v_k, y_k にはともに正変量なるための基本拘束がある。しかし, 物理的意味より操作性を重視するときは, この拘束を無視して, 各変量は個々にガウス分布特性を示すとして解析を進めることができる(平均がそのまわりの揺らぎ幅より十分大になるときは, この操作的手法は大きな有効性を発揮する)。すなわち,

$$P(x_k|Y_{k-1}) = N(x_k; x_k^*, \Gamma_k), \quad x_k^* \triangleq \langle x_k | Y_{k-1} \rangle, \quad \Gamma_k = \langle (x_k - x_k^*)^2 | Y_{k-1} \rangle, \quad (2.12a)$$

$$P(v_k|Y_{k-1}) = N(v_k; \bar{v}_k, R_k), \quad \bar{v}_k \triangleq \langle v_k \rangle, \quad R_k = \langle (v_k - \bar{v}_k)^2 \rangle, \quad (2.12b)$$

$$\left. \begin{aligned} P(y_k|Y_{k-1}) &= N(y_k; y_k^*, \Omega_k), \quad y_k^* \triangleq \langle y_k | Y_{k-1} \rangle = x_k^* + \bar{v}_k, \\ \Omega_k &= \langle (y_k - y_k^*)^2 | Y_{k-1} \rangle = \Gamma_k + R_k, \end{aligned} \right\} \quad (2.12c)$$

であり, ここに, $N(u_k; a, b) = \exp\{- (u-a)^2/b\} / \sqrt{2\pi b}$ (ガウス分布) である。(2.4a), (2.4b) 式から, (2.10), (2.11) 式に必要な3種類の直交関数 $\varphi_1^{(1)}(x_k)$, $\varphi_2^{(1)}(x_k)$, $\varphi_n^{(2)}(y_k)$ は, おのおのエルミート多項式 [75]~[77]:

$$\varphi_1^{(1)}(x_k) = H_1\left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}}\right) = \frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}}, \quad (2.13a)$$

$$\varphi_2^{(1)}(x_k) = \frac{1}{\sqrt{2}} H_2\left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}}\right)^2 - 1 \right], \quad (2.13b)$$

$$\varphi_n^{(2)}(y_k) = \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n\left(\frac{y_k - y_k^*}{\sqrt{\Omega_k}}\right), \quad (2.13c)$$

として具体化される。(2.13a), (2.13b) 式を (2.11) 式に代入して, x_k の1次及び2次に関する次のエルミート直交展開表示を得る。

$$x_k = \frac{C_{11}}{\sqrt{\Gamma_k}} x_k + \left(C_{10} - \frac{C_{11}x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right), \quad (2.14a)$$

$$(x_k - \hat{x}_k)^2 = \frac{C_{22}}{\sqrt{2}\Gamma_k} x_k^2 + \left(\frac{C_{21}}{\sqrt{\Gamma_k}} - \frac{2C_{22}x_k^*}{\sqrt{2}\Gamma_k} \right) x_k + \left\{ C_{20} - \frac{C_{21}x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} + \frac{C_{22}}{\sqrt{2}} \left(\frac{x_k^*}{\Gamma_k} - 1 \right) \right\}. \quad (2.14b)$$

この2種類の展開係数 C_{1j} ($j=0,1$), C_{2j} ($j=0,1,2$) は容易に次の様に決定される。

$$\left. \begin{aligned} C_{10} &= x_k^*, & C_{11} &= \sqrt{\Gamma_k}, \\ C_{20} &= \Gamma_k + (x_k^* - \hat{x}_k)^2, & C_{21} &= 2\sqrt{\Gamma_k} (x_k^* - \hat{x}_k), & C_{22} &= \sqrt{2} \Gamma_k. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

また (2.10c) 式は、エルミート多項式の加法定理 [75] を用いて次の様に x_k と v_k 個々の各統計量に分離・展開表現され得る。

$$\begin{aligned} A_{in} &= \frac{1}{\sqrt{i!}} \frac{1}{\sqrt{n!}} \left\langle H_i \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_n \left(\frac{x_k + v_k - x_k^* - \bar{v}_k}{\sqrt{\Omega_k}} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{i!}} \frac{1}{\sqrt{n!}} \left\langle H_i \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_n \left(\frac{\sqrt{\Gamma_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} + \frac{\sqrt{R_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \frac{v_k - \bar{v}_k}{\sqrt{R_k}} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{i!}} \frac{1}{\sqrt{n!}} \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \right)^{n-j} \left(\frac{\sqrt{R_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \right)^j \left\langle H_i \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_{n-j} \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_j \left(\frac{v_k - \bar{v}_k}{\sqrt{R_k}} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{i!}} \frac{1}{\sqrt{n!}} \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \right)^{n-j} \left(\frac{\sqrt{R_k}}{\sqrt{\Omega_k}} \right)^j \left\langle H_i \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_{n-j} \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle \\ &\quad \cdot \left\langle H_j \left(\frac{v_k - \bar{v}_k}{\sqrt{R_k}} \right) \right\rangle \quad (i=1,2). \end{aligned} \quad (2.16)$$

(2.13a), (2.13b) 式を (2.4a) 式に代入し、更に v_k に関する (2.12b) 式のガウス性とそれを重みとするエルミート多項式の直交関係 [75]~[77] を用いて、おのおの：

$$\left. \begin{aligned} \left\langle H_i \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) H_{n-j} \left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_k}} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle &= (n-j)! \delta_{i,n-j}, \\ \left\langle H_j \left(\frac{v_k - \bar{v}_k}{\sqrt{R_k}} \right) \right\rangle &= \delta_{j,0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

を得る。すなわち、 x_k, v_k, y_k がともにガウス分布を示す今の場合、 x_k, y_k 間の線形及び非線形相関情報 (2.16) 式は結局次式の様に単純な表示に変形される。

$$A_{in} = \delta_{i,n} \left(\sqrt{\Gamma_k} / \sqrt{\Omega_k} \right)^i. \quad (2.18)$$

こうして、 y_k の逐次観測に伴う対象音 x_k の逐次推定アルゴリズムは、今の場合、(2.10a), (2.10b) 式から (2.15) 式を用いて次の様に導出される。

$$\hat{x}_k = x_k^* + \Gamma_k \Omega_k^{-1} (y_k - x_k^* - \bar{v}_k), \quad (2.19a)$$

$$P_k = \Gamma_k - \Gamma_k^2 \Omega_k^{-1}. \quad (2.19b)$$

これは、特に $\bar{v}_k = 0$ のとき公知のカルマン・フィルタの状態推定式と全く一致している。すなわち、状態推定に関する 2.2.1 節の一般理論は、カルマン・フィルタの理論を一つの特別な場合として内包している。

2.2.3 ガンマ分布近似による予測

2.1 節で指摘した様に、正変量としての基本拘束を解析の当初から反映させようとするのであれば、カルマン・フィルタとは全く異なった状態推定法を新たに見出さねばならない。これは各正変量の平均値が低くなるほど益々重要な方法になると思われる。具体的には、(2.12) 式に対応して各変量に次のガンマ分布 [78] をまず採用する。

$$P(x_k|Y_{k-1}) = P_\Gamma(x_k; {}_xS_k^*, {}_xm_k^*), \quad {}_xm_k^* = (x_k^*)^2/\Gamma_k, \quad {}_xS_k^* = x_k^*/{}_xm_k^*, \quad (2.20a)$$

$$P(v_k) = P_\Gamma(v_k; {}_vS_k, {}_vm_k), \quad {}_vm_k = (\bar{v}_k)^2/R_k, \quad {}_vS_k = \bar{v}_k/{}_vm_k, \quad (2.20b)$$

$$P(y_k|Y_{k-1}) = P_\Gamma(y_k; {}_yS_k^*, {}_ym_k^*), \quad {}_ym_k^* = (y_k^*)^2/\Omega_k, \quad {}_yS_k^* = y_k^*/{}_ym_k^*, \quad (2.20c)$$

ただし、 $P_\Gamma(u_k; a, b) = u^{b-1} \exp\{-u/a\}/\Gamma(b)a^b$ (ガンマ分布) である。ガンマ分布の特徴パラメータ ${}_xm_k^*$, ${}_vm_k$, ${}_ym_k^*$ は定数であり、各 k 時刻で各平均値 x_k^* , \bar{v}_k , $y_k^* \rightarrow 0$ のとき必ず Γ_k , R_k , $\Omega_k \rightarrow 0$ となり、これは正変量が本来もつ基本拘束を定量的に反映する。また、もとの観測方程式が (2.2) 式で与えられる点に着目すれば、(2.20) 式の仮定は、(2.12) 式の仮定とは異なり、2 種類の母数のみで簡易的に分布表現するための近似表示である (2 個の母数を導入すれば、揺らぎ分布の平均的位置とそのまわりの揺らぎ幅といった、分布全体の基本部分を近似表現できる)。(2.4a), (2.4b) 式から (2.19), (2.11) 式に必要な 2 種類の直交関数はおのこのラゲール多項式 [79] :

$$\varphi_1^{(1)}(x_k) = \frac{1}{\sqrt{{}_xm_k^*}} L_1^{({}_xm_k^*-1)}\left(\frac{x_k}{{}_xS_k^*}\right) = \frac{1}{\sqrt{{}_xm_k^*}} \left({}_xm_k^* - \frac{x_k}{{}_xS_k^*} \right), \quad (2.21a)$$

$$\varphi_2^{(1)}(x_k) = \frac{1}{\sqrt{2{}_xm_k^*({}_xm_k^*+1)}} \left\{ \left(\frac{x_k}{{}_xS_k^*}\right)^2 - 2({}_xm_k^*+1)\frac{x_k}{{}_xS_k^*} + {}_xm_k^*({}_xm_k^*+1) \right\}, \quad (2.21b)$$

$$\varphi_n^{(2)}(y_k) = \sqrt{\frac{\Gamma({}_ym_k^*)n!}{\Gamma({}_ym_k^*+n)}} L_n^{({}_ym_k^*-1)}\left(\frac{y_k}{{}_yS_k^*}\right), \quad (2.21c)$$

として具体化される。(2.21a), (2.21b) 式を (2.11) 式に代入して x_k の 1 次及び 2 次に関するラゲール直交展開表示を得る。

$$x_k = \frac{C_{11}}{\sqrt{x m_k^* x S_k^*}} x_k + (C_{10} + C_{11} \sqrt{x m_k^*}), \quad (2.22a)$$

$$(x_k - \hat{x}_k)^2 = \frac{C_{22}}{\sqrt{2 x m_k^* (x m_k^* + 1) (x S_k^*)^2}} x_k - \left\{ \frac{C_{21}}{\sqrt{x m_k^* x S_k^*}} + \frac{C_{22} \sqrt{2 x m_k^* (x m_k^* + 1)}}{\sqrt{x m_k^* x S_k^*}} \right\} x_k \\ + \left\{ C_{20} + C_{21} \sqrt{x m_k^*} + \frac{C_{22} \sqrt{x m_k^* (x m_k^* + 1)}}{2} \right\}. \quad (2.22b)$$

この各展開係数 C_{1j} ($j = 0, 1$), C_{2j} ($j = 0, 1, 2$) は容易に次の様に決定される。

$$\left. \begin{aligned} C_{10} &= x m_k^* x S_k^*, & C_{11} &= -\sqrt{x m_k^* x S_k^*}, \\ C_{20} &= \hat{x}_k^2 - 2 x m_k^* x S_k^* \{ \hat{x}_k - (x m_k^* + 1) x S_k^* \} - x m_k^* (x m_k^* + 1) x S_k^{*2}, \\ C_{21} &= 2 \sqrt{x m_k^* x S_k^*} \{ \hat{x}_k - (x m_k^* + 1) x S_k^* \}, \\ C_{22} &= \sqrt{2 x m_k^* (x m_k^* + 1) x S_k^{*2}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

次に, (2.10c) 式を具体的に算定するため, まずその中の $L_n^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right)$ に着目する。すなわち, ラゲール多項式の定義と二項定理¹⁶⁾を用いて, x_k, v_k 個々のラゲール多項式に分離された形に次の様に展開表現される。

$$L_n^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right) = \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(y m_k^* + n)}{\Gamma(y m_k^* + r_1)} \left(\frac{x S_k^*}{y S_k^*} \frac{x_k}{x S_k^*} + \frac{v S_k^*}{y S_k^*} \frac{v_k}{v S_k^*} \right)^{r_1} \\ = \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(y m_k^* + n)}{\Gamma(y m_k^* + r_1)} \sum_{r_2=0}^{r_1} \binom{r_1}{r_2} \left(\frac{x S_k^*}{y S_k^*} \right)^{r_2} \left(\frac{x_k}{x S_k^*} \right)^{r_2} \left(\frac{v S_k^*}{y S_k^*} \right)^{r_1 - r_2} \left(\frac{v_k}{v S_k^*} \right)^{r_1 - r_2} \\ = \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(y m_k^* + n)}{\Gamma(y m_k^* + r_1)} \sum_{r_2=0}^{r_1} \binom{r_1}{r_2} \left(\frac{x S_k^*}{y S_k^*} \right)^{r_2} \left(\frac{v S_k^*}{y S_k^*} \right)^{r_1 - r_2} \\ \cdot \sum_{r_3=0}^{r_2} (-1)^{r_3} \binom{r_2}{r_3} r_3! \frac{\Gamma(x m_k^* + r_2)}{\Gamma(y m_k^* + r_3)} L_{r_3}^{(x m_k^* - 1)} \left(\frac{x_k}{x S_k^*} \right) \\ \cdot \sum_{r_4=0}^{r_1 - r_2} (-1)^{r_4} \binom{r_1 - r_2}{r_4} r_4! \frac{\Gamma(v m_k^* + r_1 - r_2)}{\Gamma(v m_k^* + r_4)} L_{r_4}^{(v m_k^* - 1)} \left(\frac{v_k}{v S_k^*} \right). \quad (2.24)$$

ここに, x_k の平均, 分散に関する推定アルゴリズムに必要な線形・非線形相関量 A_{in} ($i = 1, 2$) は, (2.24) 式を (2.10c) 式に代入し, x_k, v_k 個々のラゲール多項式がもつ直交関係 (2.4) 式を用いて具体化できる。ただし, 前節の場合とは

異なり, (2.18) 式の様な単純な表現形式にまとめることが困難であるので, 以下に推定アルゴリズムの簡易形式に必要な A_{in} のみを個々に具体化しておく。

$$A_{11} = \sqrt{\frac{x m_k^*}{y m_k^*} \frac{x S_k^*}{y S_k^*}}, \quad (2.25a)$$

$$A_{12} = \frac{x S_k^*}{y S_k^*} \sqrt{\frac{2 x m_k^*}{y m_k^* (y m_k^* + 1)}} \left\{ (y m_k^* + 1) y m_k^* - \left(\frac{y S_k^*}{y S_k^*} \right) y m_k^* - (x m_k^* + 1) \left(\frac{x S_k^*}{y S_k^*} \right) \right\}, \quad (2.25b)$$

$$A_{21} = \frac{x S_k^*}{y S_k^*} \sqrt{\frac{3 (x m_k^* + 2)}{y m_k^*}} \left\langle \sqrt{\frac{\Gamma(x m_k^*) 3!}{\Gamma(x m_k^* + 3)}} L_3^{(x m_k^* - 1)} \left(\frac{x_k}{x S_k^*} \right) \middle| Y_{k-1} \right\rangle = 0, \quad (2.25c)$$

$$A_{22} = \sqrt{\frac{(x m_k^* + 1) x m_k^*}{(y m_k^* + 1) y m_k^*}} \left(\frac{x S_k^*}{y S_k^*} \right)^2. \quad (2.25d)$$

こうして, 前節の (2.19) 式に対応して, \hat{x}_k と P_k に関する推定アルゴリズムが (2.23), (2.25) 式を用いて次の様に導出される。

$$\hat{x}_k = C_{10} + C_{11} \left\{ A_{11} \sqrt{\frac{\Gamma(y m_k^*)}{\Gamma(y m_k^* + 1)}} L_1^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right) + A_{12} \sqrt{\frac{2 \Gamma(y m_k^*)}{\Gamma(y m_k^* + 2)}} L_2^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right) \right\}, \quad (2.26a)$$

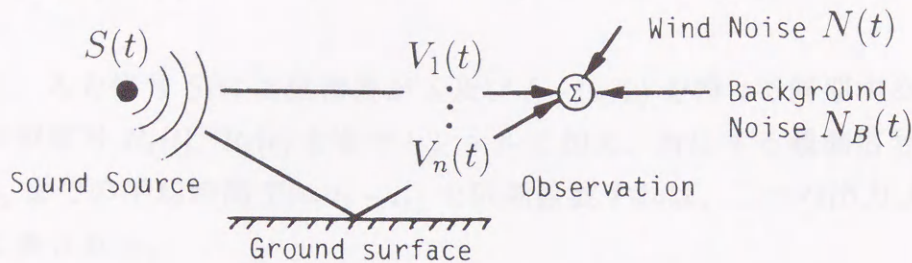
$$P_k = C_{20} + C_{21} \left\{ A_{11} \sqrt{\frac{\Gamma(y m_k^*)}{\Gamma(y m_k^* + 1)}} L_1^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right) + A_{12} \sqrt{\frac{2 \Gamma(y m_k^*)}{\Gamma(y m_k^* + 2)}} L_2^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right) \right\} \\ + C_{22} A_{22} \sqrt{\frac{2 \Gamma(y m_k^*)}{\Gamma(y m_k^* + 2)}} L_2^{(y m_k^* - 1)} \left(\frac{y_k}{y S_k^*} \right). \quad (2.26b)$$

この様に, それを導出する途中の計算過程の複雑さにもかかわらず, 結果の推定アルゴリズム形式は, かなり単純化されている。

2.3 同期検波法

2.3.1 同期検波法と検出位相情報の活用

公知のごとく, 加算性雑音下における確定周期信号の検出に対しては同期検波法が有効である。ここでは, 特に, 自然風による伝搬系の揺らぎのある, かつ, 風雑音混入下へ適用した場合について検討する。



$V_1(t), \dots, V_n(t)$: Direct and reflectional components

Fig. 2.1 Schematic diagram showing source signal $S(t)$, direct and reflected propagation signals $V_1(t), \dots, V_n(t)$, wind noise $N(t)$ and background noise $N_B(t)$.

一般に、音が風の存在する大気中を伝搬する場合、音の伝搬速度の揺らぎに伴い、位相揺らぎのみならず、Fig. 2.1 に図示する様にマルチパスによる干渉効果により対象音のレベルが変動する [23]。これは音響信号が純音性であればあるほど大きく現れ、特に、位相揺らぎによるコヒーレンシの低下は同期検波法を適用する際の検出精度に影響を与える。本節では、風雑音下の正弦波低周波音を推定する一手法として、2チャンネル同期検波法^[81]を導入し、これに適当な平均時間(時定数)の設定と位相揺らぎ情報を併せて用いることにより、推定精度の向上を計ることを検討する。

今、音響伝搬系の入力として、振幅 A_s 、角周波数 ω の正弦波信号 $S(t) = A_s \cos \omega t$ が与えられたとき、風雑音下の伝搬系を通過することにより振幅と位相遅れに揺らぎを生じて出力 $V(t)$ が得られるとする。

$$V(t) = A(t) \cos\{\omega t + \theta(t)\}. \quad (2.27)$$

マイクロホンにおいては、これに風雑音 $N(t)$ が加わって、結局、次の様に観測信号 $W(t)$ が得られる。

$$W(t) = V(t) + N(t). \quad (2.28)$$

ここに、 $A(t)$, $\theta(t)$ は、それぞれ、時間と共に変動する振幅及び位相遅れである。

次に、入力信号 $S(t)$ と位相差が δ 及び $\delta + (\pi/2)$ を持つて同期する 2 個の方形波参照信号 $R_1(t)$, $R_2(t)$ を各チャンネルに加え、対応する観測信号を時刻 t_1 から t_2 までの平均時間 $T(=t_2-t_1)$ で同期検波すれば、二つの出力 X , Y は次の様に表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} W(t)R_1(t)dt = X_s(t) + X_e(t), \\ X_s(t) &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V(t)R_1(t)dt, \quad X_e(t) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} N(t)R_1(t)dt, \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} W(t)R_2(t)dt = Y_s(t) + Y_e(t), \\ Y_s(t) &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V(t)R_2(t)dt, \quad Y_e(t) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} N(t)R_2(t)dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

ここに、

$$R_1(t) = \text{sgn}[\cos(\omega t + \delta)], \quad R_2(t) = \text{sgn}[\cos(\omega t + \delta + \frac{\pi}{2})], \quad (2.31)$$

である。ここに、 $X_s(t)$, $Y_s(t)$ はいわば信号成分であり、 $X_e(t)$, $Y_e(t)$ は風雑音による誤差成分である。

さて、正弦波信号にガウス性雑音が重畳した入力に対しての同期検波出力については理論的に算出されている [82]。しかし、伝搬系の揺らぎが伴い、かつ、ガウス性とは限らない雑音の重畳した (2.29), (2.30) 式の検波出力を厳密に評価するのは困難であるため、ここでは、騒音計測の実用的視点からこれを近似的に評価する。まず、上式の同期検波出力において、加算性風雑音 N_t に起因した成分 $X_e(t)$, $Y_e(t)$ は、風雑音の基本波成分と参照信号周期に比べて十分長い平均時間を探るならば、入力信号と雑音との無相関性により無視することができる。他方では、検出すべき信号 $V(t)$ の振幅及び位相遅れの揺らぎは風の変動を要因とすることから、これらの揺らぎが緩やかであると見なせるぐらい適当に平均時間を小さく選び得るならば、 $A(t)$, $\theta(t)$ は局所時間内で定数と見なし得る ($A(t) = G$, $\theta(t) = \phi$)。以上の条件のもとで、平均時間 T を参照信号の周期 T_0 の整数 (m) 倍に近似し、簡単のため t_1 として、参照信号 $R_1(t)$ の立ち上がりと同期する時刻を採れば、出力 X , Y は具体的に次の様

な計算結果となる。

$$\left. \begin{aligned} X &\simeq \frac{2m}{T} \int_{t_1}^{t_1+\pi/\omega} G \cos(\omega t + \phi) = \frac{2G}{\pi} \cos(-\delta + \phi), \\ Y &\simeq \frac{2m}{T} \int_{t_1-(\pi/2\omega)}^{t_1+(\pi/2\omega)} G \cos(\omega t + \phi) = \frac{2G}{\pi} \sin(-\delta + \phi). \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

ただし,

$$t_1 = -\frac{1}{\omega} \left(\delta + \frac{\pi}{2} \right), \quad T \simeq mT_0 = \frac{2m\pi}{\omega} \quad (m \gg 1), \quad (2.33)$$

である。二つの同期検波出力は極座標 (r, θ) 表示を用いて, 点 $P(G, \alpha)$ と表される。ここに,

$$G = \frac{\pi}{2} \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad \alpha = -\delta + \phi = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right), \quad (2.34)$$

である。 G は検出すべき信号の振幅であり, 位相遅れは, $\phi = \alpha + \delta + 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) で表される。また, $P(G, \phi)$ 点は平均時間 T に比べ緩やかに変動し, 真値のまわりに揺らぐことになる。

さて, (2.29), (2.30) 式の誤差のうち, 加算性風雑音による成分 $X_e(t), Y_e(t)$ は真値の周りの正負に揺らぎ, 検出結果の長期の平均を取ることにより 0 に近づくことが期待される。他方, $X_s(t), Y_s(t)$ のうちにも, 検出すべき信号と参照信号との間のインコヒーレンシーによる誤差成分が含まれ, 真値よりも負の側に揺らぐことになる。いま, この大きさを厳密に評価しようとするなら, その主要因である風の強さと方向の時間的のみならず, 空間的分布に関して, それらの揺らぎを考慮しなければならず, 事実上不可能となる。しかしながら, いま, 本手法で検出した (2.34) 式のうち, 特に, 位相角の変動自体に, 実際の伝搬経路を通してシステムの揺らぎを最も敏感に反映した情報が含まれていることに着目する。すなわち, 検出した位相角の揺らぎに着目し, これに一定の評価規範を導入し, 検出結果自体を評価することにより幾らかでも精度の向上を図ろうとするのである。

具体的に, 検出データ列 $P_j(G_j, \phi_j)$ ($j = 1, 2, 3, \dots$) のうち, j 番目の検出位相角 ϕ_j とその前後の位相角 ϕ_{j-1}, ϕ_{j+1} との間の各変化幅がある値 ε 以下である場合の検出結果のみを選択する。すなわち, $i = 2, 3, 4, \dots, j-1$ に対して次の条件,

$$|\phi_{i-1} - \phi_i| < \varepsilon, \quad |\phi_i - \phi_{i+1}| < \varepsilon, \quad (2.35)$$

を満足する $P_i(G_i, \phi_i)$ のデータのみを選び出すのである。このことは、対象音の伝搬経路全体を通して影響する風速変動の効果が一定範囲内に納まる条件での検出結果を選択することに相当する。

2.3.2 回路構成

ここで用いた同期検波法はアナログ信号処理を主体として、その検波出力を時々刻々 A/D 変換しつつ、パーソナルコンピュータによって $P(G, \phi)$ を算出する。実験に際して制作した同期検波回路を Fig. 2.2 に示している。実際には同図の回路を 2 チャンネル使用する。図において、(2.29), (2.30) 式における観測信号と参照信号の掛算操作は 2 つの交互に動作するアナログ・スイッチと反転加算器（ローパス・フィルタの差動入力で兼用）で演算し、積分および平均化操作はローパス・フィルタで近似演算している。本回路の検出精度、ダイナミックレンジ等の実用性は可聴周波数域での屋外実験に適用して十分有効であることを確認している [83]。なお、低周波音検出の際の設定すべき平均

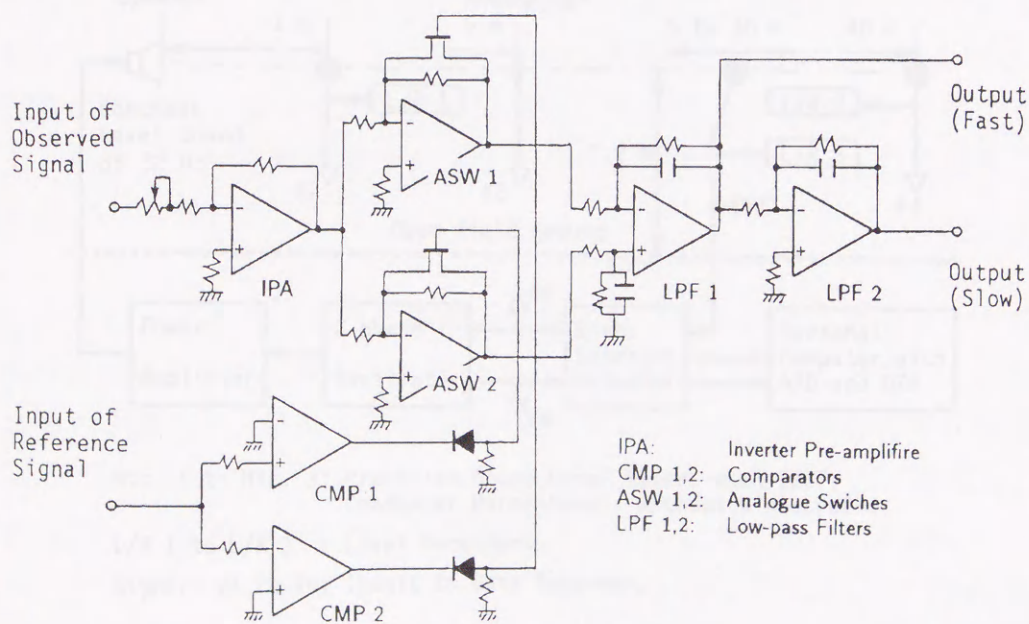


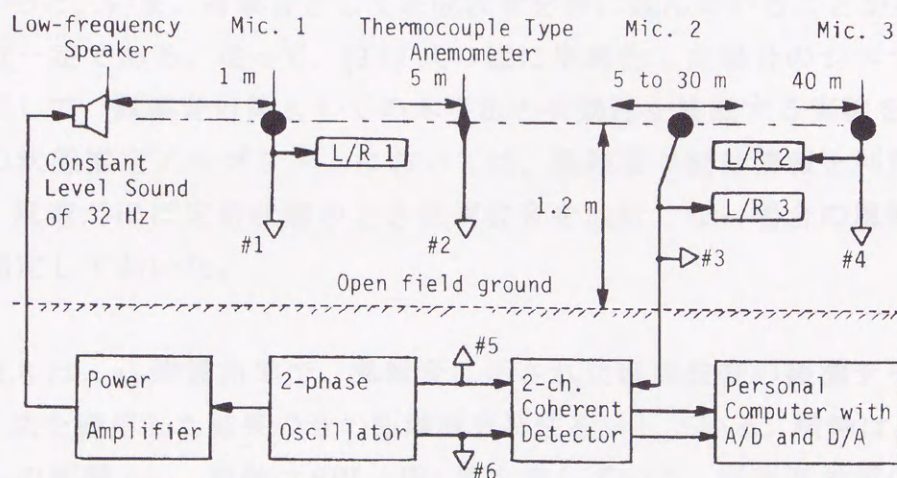
Fig. 2.2 Circuit diagram of the coherent detector of single channel.

時間 T としては、同期検波回路のローパス・フィルタの時定数で近似し、便宜上、騒音計の JIS 規格 “slow (緩)” の 2 乗平均の時定数^[84] に対応するように 1.0 秒と設定した。同期検波回路の出力は A/D 変換後、必要に応じて音圧レベル (SPL) を算出しその結果を D/A 変換して騒音波形記録用のレベルレコーダに出力する。なお、SPL (dB) 算出のための基準値は、音圧レベル既知の純音 (1kHz) を同期検波して、この出力から逆算して得た。この方法による精度については実験的に確認している^[83]。

2.4 実験的考察

2.4.1 実験方法

本手法の有効性を確認するため、最も単純な伝搬特性を示す野外の自由音場で低周波音計測を行った。風雑音の混入した観測データを基に音の距離減



Mic. 1 to Mic. 3: Precision Sound Level Meters with 1/2" Condenser Microphones, without Windscreens.

L/R 1 to L/R 3 : Level Recorders.

Signals #1 to #6: Inputs to Data Recorder.

Fig. 2.3 Experimental arrangement of measuring a space attenuation characteristic for low-frequency acoustic signal contaminated with wind noise.

衰特性を調べるため、建造物による反射の影響がない展望の開けた a) 広大な建設用地と b) サッカー・グラウンドの 2 か所で実験を行った。

低周波音の測定は、従来、可聴音の測定に準じて行われていることからマイクロホン(ウインドスクリーンは不装着)は地上 1.5m に設置した^[85]。この受音点の高さ程度においては 1 m/s 程度の風速でも、ウインドスクリーン不装着時の低周波音の測定では、無風時 73 dB 程度の対象音の測定が困難になるとの報告もある^[16]。なお、測定時の平均風速は 2 m/s 程度であった。音源には低周波スピーカー(ONKYO, SL-1)を使用し、これから 5, 10, 15, 20, 25, 40m 離れた 6 地点で放射音を測定した。Fig. 2.3 にその実験系統図を示している。

2.4.2 距離減衰特性計測へのベイズフィルタ法の適用結果

ここでは、スピーカーから放射した 40 Hz の正弦波低周波音を対象音とした。観測点での対象音の瞬時値は常時吹きつける風による雑音に汚されて不明であり、風雑音の全くない状況下で予め対象音のみを計測しておくことはできなかつた。いま、対象音として正弦波音を特に選んでいることから、そのパワーは一定である。従って、(2.1) 式の様に単純化した場合のシステム方程式を適用して、風雑音対策としての本手法の有効性を検証する実験を行った。本手法の状態推定アルゴリズムにおいては、風雑音の統計情報を利用することから、風速がほぼ定常状態のとき低周波音を放射しない場合の風雑音のみを予め測定しておいた。

Fig. 2.4 は、a) 建設用地で、風雑音に汚された低周波音の観測データに対し、本手法を適用した結果の音の距離減衰特性を示している。横軸は、スピーカーからの距離 (m)、縦軸は SPL (dB) 値を表している。風雑音対策の簡易型ベイズ・フィルタ法としては、2.2.1 節において統一的方法論をまず提案し、それが簡易的に 2 種類の方法論に具体化できることを述べた。それは、パワー変量のもつ基本拘束を踏まえたガンマ分布を (5) 式の $P(x_k|Y_{k-1})$, $P(y_k|Y_{k-1})$ に採用する方法と、その基本拘束が弱まり近似的利用としてガウス分布をそれらに採用する方法である。Fig. 2.4 の結果からは、両者 (○),(●) の差異はそ

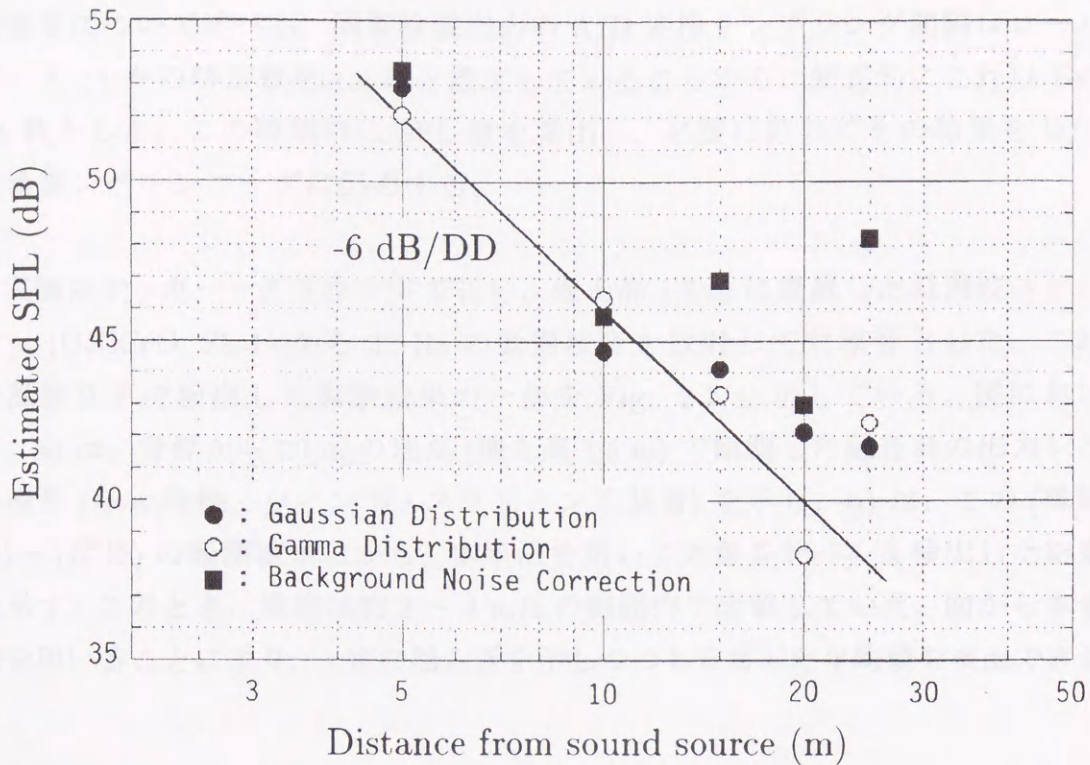


Fig. 2.4 Estimated signal levels by using two kinds of the proposed estimation theory and by using JIS correction method for background noise.

れほど顕著に現れてはいない。両手法の結果はほぼ倍距離 6 dB の減衰特性 (図中の実線) を示し、よく自由音場の伝搬特性を裏付けている。比較のため、雑音対策として通常よく用いられる ISO, JIS のパワー平均での暗騒音補正を適用した場合 (■) も併わせて示した。対象音が風雑音に完全に埋もれた状態、例えば 15, 20, 25 m の地点では、単なる平均処理による暗騒音補正よりも、風雑音の揺らぎ統計情報を少しでも多く利用した簡易型ベイズ・フィルタ法の有効性がよく伺われる。しかし、対象音のレベルが低くなり風雑音の支配性が強い遠地点になると、この簡易手法では十分な効果を示さなくなり、より高次の統計情報の使用による推定法の導入が不可欠であると考えられる。

2.4.3 距離減衰特性計測への同期検波法の適用結果

本節では、風雑音に埋もれた音響信号の検出法として同期検波法を用いた実験結果について述べる。同期検波出力の A/D 変換サンプリング間隔はローパス・フィルタの時定数を 1.0 秒と設定していることから、便宜的にこれ以下の 0.1 秒とした。この時間内に SPL 値を算出し、必要に応じてその結果を D/A 変換後レベルレコーダに出力する。

実験はサッカー・グラウンドで行い、地上高 1.2 m に設置した低周波スピーカー (ONKYO, SL-1) から 32 Hz の低周波音を放射して対象音とした。これを風雑音下で検出した実験結果の一部を Fig. 2.5 に示している。図において、a) は、音源から 20 m の地点 (地上高 1.5 m) で観測した騒音計の出力レベル波形 (slow 特性, ウインド・スクリーン不装着) を示し、b) は、この (風雑音) + (信号) の観測値から、本手法を用いて対象音レベルを検出した結果を示す。このとき、風速は約 2 ~ 4 m/s の範囲内で変動していた。図から本手法を用いることにより、一定の揺らぎを示しつつも安定した平均値を検出できる

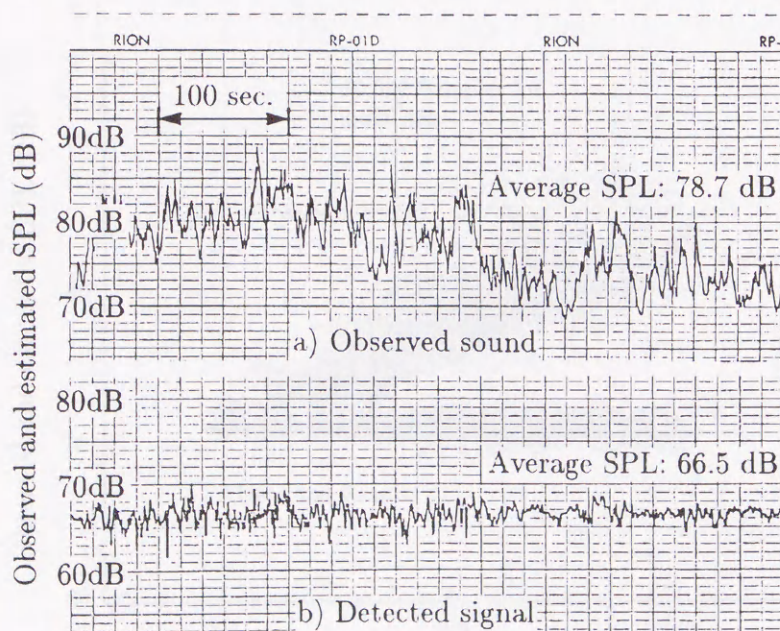


Fig. 2.5 Examples of an observed sound (signal + wind noise) and the estimated signal from the observed sound by using the proposed synchronous detection method.

ことが分かる。なお、参考として、検出結果の平均値に基づいてこの観測点における S/N 比を算出すれば、平均 -12.0 dB、最大 -22.3 dB となる。このような S/N 比においては対象音の有無に基づく暗騒音補正法の適用も一般には困難となる。

Fig. 2.6 は、風雑音対策として同期検波法を適用することの有効性を確認するため、1,000 秒間の観測結果と本手法による検出結果とを、特に、風速の大きさに対する散布図として示したものである。実験に際して、音源からの放射音レベルは任意の一定値に設定し、音源から 5 m 離れた点で風雑音混入下の対象音を観測した。観測点が音源に比較的近いことから、対象音のレベルはほぼ一定と考えられる。風速は、マイクロホンから約 1 m 離れた点の地上高 1.5 m 点でトランジスタ式微風速計 (RION AM-03, 時定数約 1.0 秒) を用いて対象音と同時に計測した。図において、ほぼ一定と考えられる対象音が、風速が大きくなるにつれて、完全に風雑音に埋もれることが示される。また、S/N 比が相当悪い状況下でも、検出レベルが揺らいではいるものの、本手法により対象音のレベル値を検出している効果が示される。特に、風速が大きくな

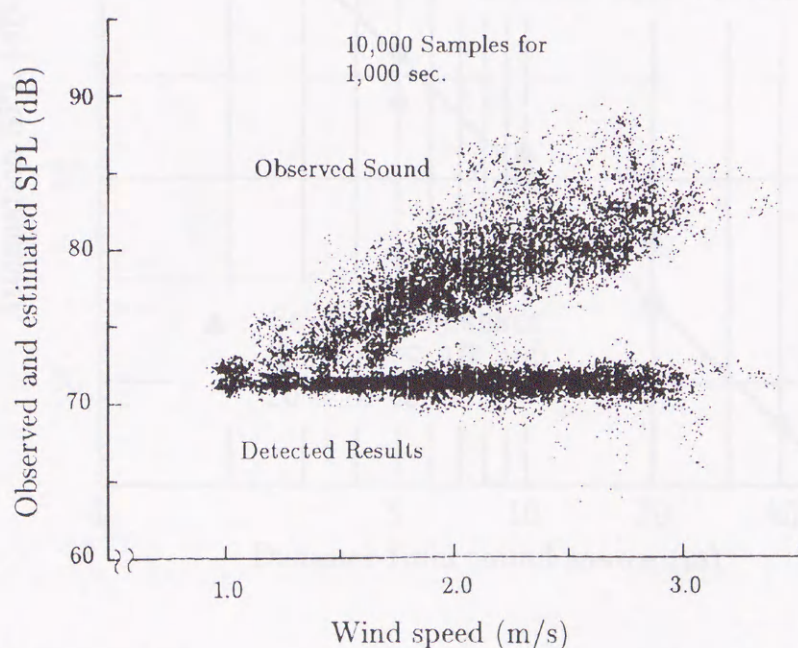


Fig. 2.6 Scatter diagram of the observed sound and the estimated signal as a function of wind speed.

ると、検出レベルが低い方に揺らぐ傾向が示される。これは信号成分の位相揺らぎによるコヒーレンシの低下が原因であると考えられる。

本手法により計測した距離減衰特性を Fig. 2.7 に示している。図は、音源から 5, 10, 20 及び 40 m 離れた各測定点 (おのおの、地上高 1.5 m) において検出した信号を、更に長時間平均し、1 m 点での信号レベルを基準として、その減衰量 ● を示したものである。なお、実験を通して、音源から 40 m 離れた観測点では、対象音のマイクロホン入力パワー成分は極めて小さく、そのほとんどが風雑音による成分と見なすことができた。したがって、参考のため、平均的に風の効果が各観測点でほぼ同じとの仮定の下に、40 m 点での長時間

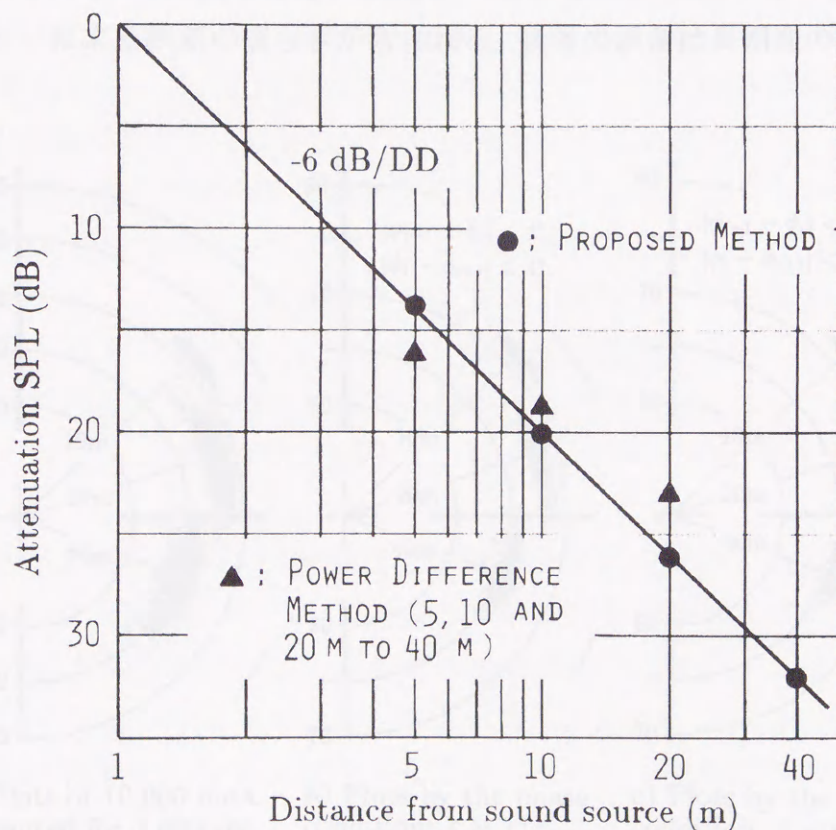


Fig. 2.7 Distance attenuation characteristics measured by using the synchronous detection method and by using the method of average power difference.

のパワー平均値と、同じ時区間での 5, 10, 20 m 観測点でのパワー平均値との差から対象音を推定し、減衰量を算出した結果を図中 (▲) に示している。実験の結果、本手法によって検出、算出した減衰特性は実線に示す逆自乗則によく沿っており、その有効性が確認できる。

なお、同期検波回路の瞬時出力は Fig. 2.5-b), Fig. 2.6 のごとく揺らいでおり、これを (2.34) 式により極座標表示したのが Fig. 2.8 である。同図 a) において、音源から離れるにつれ、検出振幅と位相の揺らぎ幅が如何に広がって行くかを定量的に読み取ることができる。この揺らぎは 2.3.1 節で考察した様に、正弦波信号が伝搬系を通過するときを受ける (2.27) 式の振幅、位相変動の結果を反映すると共に、(2.29), (2.30) 式の同期検波出力における、加算性風雑音による誤差の揺らぎと、検出すべき信号と参照信号との間のインコヒーレンシーによる誤差の揺らぎが含まれる。後者の誤差は長期間の平均を取る

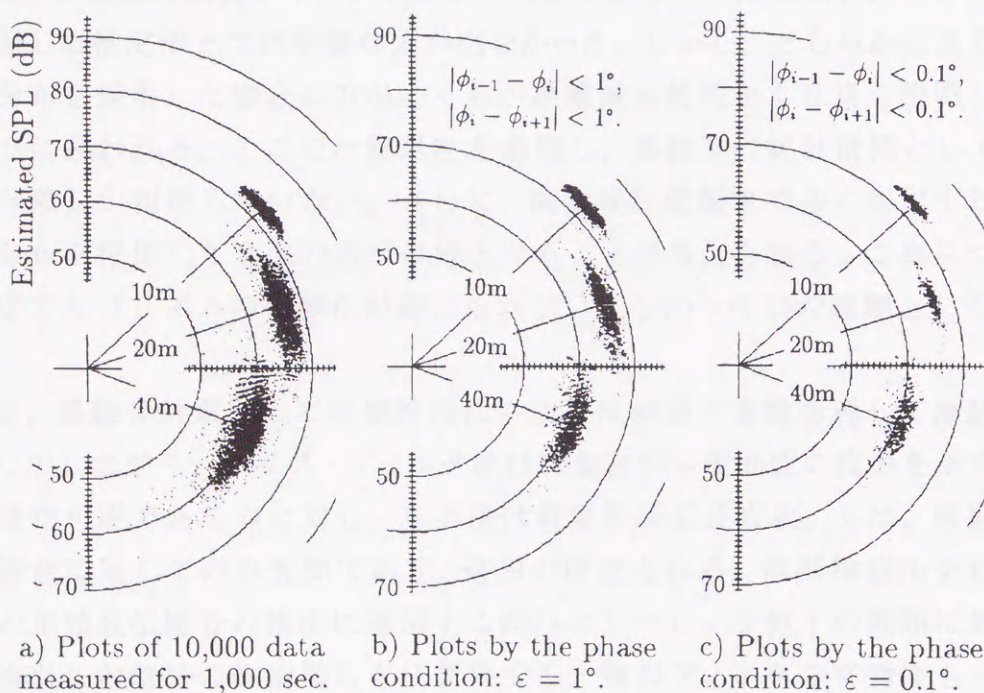


Fig. 2.8 Polar coordinate expression of the detected results of the objective sound by using the proposed signal estimation method and the results filtered by using the phase information.

ことにより低減させることが期待できないため、検出信号自身の位相情報を用いて(2.35)式によるフィルタリングを行う。位相角の変化幅として $\varepsilon = 1(^{\circ})$ および $\varepsilon = 0.1(^{\circ})$ を便宜的に選んだ結果を、それぞれ、**Fig. 2.8-b),c)**に示している。この結果、図 a) の位相角方向、振幅方向共にかなり広範囲に変動する全検出データ列のうち位相方向の変動幅が小さいデータ列だけを取り出すことによって、図 b), c) の様に、結果的には位相角方向のみならず、振幅方向にも揺らぎ範囲の集中したデータが得られ、本手法の効果が示されている。

2.4.4 推定結果の検討

2.4.2 節での簡易型ベイズ・フィルタによる風雑音対策の初期的試みとして行った実験結果においては、対象音が風雑音に完全に埋もれた状態で行った2種類の推定結果が、JIS 又は ISO の暗騒音補正法よりも有効であることが示された。2種類の簡易フィルタ：ガウス分布で近似した推定法と、ガンマ分布で近似した推定法とでは明確な差が出なかった。しかし、どちらかと言えばガンマ分布を採用した場合の方がいくらか距離減衰特性をより良く説明しているように思われる。ここでは簡易性を重視し、風雑音の統計情報として、平均と分散しか利用していない。さらに、高次統計情報まで多く利用すればガンマ分布を採用した手法の方が良好となることが考えられる。これについては推定アルゴリズムの複雑化が避けられないことから今後の課題としたい。

他方、風雑音対策として同期検波法の効果は前節の実験を通して確認された。しかしながら、ベイズ・フィルタ法は対象音が不規則性の波形を示す場合にも適用可能であるのに対し、本手法は対象音が正弦波状、又は、周期性波形の場合に対してのみ有効であり、適用が限定される。同期検波法を自然風下での正弦波伝搬音の検出に適用する際のコヒーレンシ低下の問題に対しては、検出した信号の位相揺らぎに着目する一種のフィルタの有効性も一部確認された。しかしながら、より遠距離伝搬での計測に適用するためには、伝搬経路全体での局所的な風速揺らぎも考慮しなければならず、このままでの適用には限界があり、今後の課題としたい。

2.5 むすび

本章では、低周波環境騒音計測における風雑音対策として、これまで余り知られていない、しかも対照的なベイズ・フィルタ法と同期検波法の2種類の手法を考察した。

簡易ベイズ・フィルタ法においては、特に、パワー変量をもつ平均とその周りの揺らぎに関する基本拘束にまず留意した。平均がその周りの揺らぎ幅より十分大きいときには、物理的意味よりも操作的手法として工学的有効性を持つと考えられるガウス分布近似に基づく推定法が可能となり、公知のカルマン・フィルタを特別な場合を含んだ推定理論を新たに設定した。また、平均と揺らぎの拘束性を重視する一推定法として、ガンマ分布近似に基づく、カルマン・フィルタとは異種のフィルタも提案し、推定アルゴリズムを具体的に見出した。周期性対象音のみに有効となる同期検波法においては、自然風による伝搬系の揺らぎのある、かつ、風雑音混入下へ適用した場合について、実用的立場から検討した。特に、同期検波法を適用する際の検出精度に影響を与える位相揺らぎによるコヒーレンシの低下に対して、検出した信号の位相情報自身に着目する一手法を提案した。両手法とも観測値と信号間における1次相関のみを利用した簡易的雑音対策法となっている。前者は、振幅揺らぎに関する集合平均でのパワー変量に着目した逐次アルゴリズム形式のデジタル・フィルタであるのに対し、後者は、周期性検出に直結する時間平均での音圧変量に着目したアナログ信号処理を基礎としたフィルタである。

簡易ベイズ・フィルタ法と同期検波法の2種類の手法の有効性は、最も単純な伝搬特性を示す建設用地と運動場において、音の距離減衰特性を計測する実験により確認した。しかし、本研究は、低周波音計測における風雑音対策法としては、まだ原理的一試みの段階であるに過ぎない。本手法を他の多くの複雑な実音環境へ適用し、その有効性と限界を確認して行く必要がある。

具体的に、

1. 低次相関のみを利用した簡易フィルタとしてではなく、高次相関量をも積極的に活用し、更に精密な推定法を見い出して行くこと。
2. 対象騒音自体が複雑な揺らぎパターンを示していたり、非定常性を示す場

第3章

風速情報を利用したカルマン・フィルタに基づく推定法

3.1 まえがき

風雑音の直接的な原因である風と風雑音との関係そのものに着目して、風速情報を直接利用する風雑音対策はほとんど見られない。一般に、航空機騒音などの環境騒音のモニタリングに際しては、計測点近傍の風速、風向も併せて観測されるのが普通である。しかしながら、これらの情報が積極的に風雑音対策として活用されることは少なく、風が強いときの騒音観測データを風雑音混入の疑いがあるとして識別するための参考として用いられるのが実情である。

もともと、空間的にも時間的にも極めて複雑な様相を持つ自然風と、これが風雑音としてマイクロホンに与える効果との関係を厳密に取り扱うことは困難と考えられる。しかしながら、マイクロホン近傍の風速と風雑音の音圧レベル(SPL)との間の相関はかなり大きく、事実、早くから、大熊^[14]やStrasberg^[50]によっても示されており、前章での実験結果(Fig. 2.6)においても一部確認できる。従って、近似的にもこれらの関係を捉えて、風雑音対策として利用する試みは有用であると考えられる。風速情報の利用により、観測データ内に混入する風雑音を評価し対象音が推定可能となるならば、その実用的価値は大きいと言えよう。本章では、マイクロホン近傍の風速と風雑音間の相関特性に着目して、風速情報を積極的に利用する一手法として、公知のカルマン・フィルタ理論^{[36]~[39]}の適用に基づく新たな対象音推定法を考察する。

カルマン・フィルタ理論の適用に際して、ここでは、前章の同期検波法で着目したのと同様にマイクロホン出力の音圧変量に着目し、対象音、風雑音及び(対象音+風雑音)の観測値各変量をガウス分布で近似して捉える。まず、マイクロホン近傍の風速とマイクロホンに混入する風雑音の同時観測により、風雑音の瞬時音圧の揺らぎを、風速で条件づけられた条件付き分布として捉えておく。次いで、風雑音下における対象音推定に際しては、同時に観測する風速情報に基づき、予め得られた風雑音の分布情報を用いて、風雑音の混入した観測値から対象音のみを推定しようとする。

推定法の具体化に際しては、測定すべき対象音の事前情報が得られない場合に対する試みとして、初めに推定すべき信号として風雑音を設定する。すなわち、一定期間の観測値の蓄積と時々刻々の風速情報を用いて、まず混入した風雑音を推定する。最後に、観測値からこの風雑音推定値を減じることにより風雑音に埋もれた対象音を推定することを試みる。

3.2 マイクロホン近傍の風速変動と風雑音変動

問題とする風雑音は、自然風の存在する野外などにおいて騒音計測を行なう場合に、風を要因とする圧力変動がマイクロホンに検出される成分である。これは、第一の成分：気流がマイクロホンに妨げられることにより主としてマイクロホンの下流側に生ずる圧力擾乱が原因となる成分と、第二の成分：マイクロホンより上流側で発生した圧力変動が気流と共に流下して観測される成分とに大別される^{[26],[33]}。前者は比較的周波数の高い成分であり、これは風速と強い関係がある。例えば、風速 10 m/s において、12 mm 径の円筒状マイクロホンでは 160 Hz、90 mm 径のウィンドスクリーンを装着した場合には 20 Hz、の様にその周波数も予測される^[26]。他方、後者は比較的周波数の低い成分であり、直接の原因となる自然風により発生流下する渦やガスト^[86]を風速との関係において、前者の様に予測することは困難である。しかしながら、上述した様に、実験的には低周波域での風雑音 SPL が風速と相関を持つことが確認されている。

もちろん、マイクロホンの構造や観測点を取り巻く物理的環境が一様とは

言えず、風向の違いによる風雑音の違いも考えられる。しかし、風向のほぼ一定な風を考え、ウィンドスクリーンの装着や平均2乗音圧での計測を前提とすれば、風向の揺らぎによる効果の軽減が期待できる。従って、ここでは初期的試みとして風速情報のみに着目する。

以上の視点から、初めに、風速と風雑音間の相関情報に着目し、騒音計測と同時に観測する風速情報を用いてマイクロホンに混入する風雑音を捉えようとする。いま、前章のベイズ・フィルタにおける様に、正領域のみに揺らぐ対象音と風雑音の2種類の変量を取り扱うことになれば、低次統計量のみを対象した推定アルゴリズムにおいてすら、かなり複雑な形式となることは避けられない。従って、手法の簡易性に重点を置く立場から、マイクロホンのプリアンプ出力を観測値として用い、平均0の周りに正負に揺らぐ瞬時音圧を考察変量とする。

まず、マイクロホン近傍の風速を w で表わし、このときマイクロホンによって観測される風雑音の瞬時音圧を v で表わす。いま、風速がある値 $w = \alpha$ を取るとき、同時に観測される風雑音 v の分布形態を条件付き確率分布 $P(v|w = \alpha)$ とし捉える。具体的に、平均を $\langle v(\alpha) \rangle (\triangleq \langle v|\alpha \rangle)$ 、分散を $V(\alpha) (\triangleq \langle (v - \langle v(\alpha) \rangle)^2 | \alpha \rangle)$ と表わし、これらの低次統計量のみを示すなら、

$$\langle v(\alpha) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} v dP(v|w = \alpha), \quad (3.1)$$

$$V(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} (v - \langle v(\alpha) \rangle)^2 dP(v|w = \alpha), \quad (3.2)$$

の様計算される。ただし、いま、音圧観測を行うことから $\langle v(\alpha) \rangle = 0$ である。この様にして、自然風と風雑音のみの計測を通して、予め必要範囲内の任意の風速に対する風雑音の分布情報を捉えておく。これにより、対象音の実計測に際しては、同時に得られる風速情報を基礎に、対象音に重畳する風雑音の大きさや変動形態を評価することも可能となる。

3.3 風速情報の利用に基づくカルマン・フィルタ

いま、音圧変量を採ることから、対象音、風雑音、及びこれらの合成観測値は平均0の周りに正負に揺らぐ。ここにおいても、厳密には各変量が一般に

非ガウス特性を示すとして、前章 2.2.2 節の考察に沿い、高次統計量をも反映させた状態推定法を設定しなければならない。しかしながら、本研究は風速情報を用いる新たな推定法としての初期的試みであり、また、簡易性にも重点を置くことから、ここでは、非定常に揺らぐ時々刻々の各状態を平均、分散の低次統計量のみで表現するガウス分布で近似して捉える。これによって、公知のカルマン・フィルタの適用が可能となり、これを用いて対象音を推定する簡易手法を設定する。

まず、離散時刻 t における対象音を x_t 、これと独立な風雑音を v_t 、さらに、両者の合成による観測値を y_t で表せば、公知の音圧加算の原理より次の観測方程式が得られる。

$$y_t = x_t + v_t. \quad (3.3)$$

ここに、各変量は平均： $\bar{y}_t \triangleq E[y_t] = 0$, $\bar{x}_t \triangleq E[x_t] = 0$, $\bar{v}_t \triangleq E[v_t] = 0$ であり、分散： $Y_t \triangleq E[y_t^2]$, $X_t \triangleq E[x_t^2]$, $V_t \triangleq E[v_t^2]$ のガウス分布とする。

さて、本章では、対象音が非定常な変動特性を示す場合を考察する。従って、ここでは、前章における様な対象音の定常性に基づくシステム方程式 (2.1) を直ちにとることはできない。また、測定すべき対象音の事前情報が得られない場合を試みる。そのため、対象音のない状況下で事前に学習可能な風雑音の動的特性を捉えることを試みる。具体的に、いま、時々刻々変動する風雑音のシステム方程式を公知の 1 次自己回帰 (AR) モデルで近似的に捉える。

$$v_{t+1} = F_t v_t + G_t u_t. \quad (3.4)$$

ここに、 u_t は v_t と独立なシステム入力であり、平均 0、分散 1 ($\bar{u}_t \triangleq E[u_t] = 0$, $U_t \triangleq E[u_t^2] = 1$) のガウス性白色雑音と仮定する。また、 F_t および G_t はシステムの特徴パラメータであり、あらかじめ風速と風雑音のみの観測値を用いて決定される。まず、パラメータ F_t を、変動する風速の大きさに係わらない、相続く風雑音 v_t , v_{t+1} の間の統計的な関連の度合を示す定数 $F (= F_t)$ として捉える。すると、 F は風雑音の時系列観測値から得られる自己相関係数 $\rho_v(n) (\triangleq E[v_j v_{j+n}] / E[v_j^2])$ を用いて (3.4) 式から次の様に導出される [87] :

$$F (= F_t) = \frac{\rho_v(n+1)}{\rho_v(n)} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (3.5)$$

他方、パラメータ G_t は時々刻々変動する風速情報を用いて表わそうとする。まず、あらかじめ (3.2) 式から任意の風速に対して風雑音の分散が計算される。風速変動はサンプリング時間幅に比べて緩やかであり、風雑音の分散の変動特性に対して局所定常性が仮定できる。すると、時刻 t における風速 w_t を観測することにより、時々刻々の風雑音の分散 $V_t = V(w_t)$ が近似的に (3.2) 式を用いて捉えられる ($\bar{v} = 0$)。

$$V_t = V(w_t) = \int_{-\infty}^{\infty} v^2 dP(v|w = w_t). \quad (3.6)$$

ここに、 v は時刻 t における風速が $w = w_t$ の値を取るときの風雑音音圧の確率変数である。次に、(3.4) 式の関係を用いれば、パラメータ $G_t = G(V_t)$ が同時刻における風速情報を用いて次の様に捉えられる：

$$G_t = G(V_t) = (1 - F)\sqrt{V_t}. \quad (3.7)$$

さて、対象音と風雑音の合成された実際の観測値から対象音を推定するに先立って、以上で考察した観測方程式 (3.3)，および、システム方程式 (3.4) に基づき、一旦、風雑音のみを推定するため、公知のカルマン・フィルタを利用する。まず、局所定常が仮定される適当な時間幅 (時刻 $t-k+1$ から t までとする) に対する観測値 k 個の時系列集合 $\{y_{t-k+1}, \dots, y_{t-1}, y_t\}$ から観測値の局所的分散を計算し、これを近似的に Y_t とする：

$$Y_t = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t y_i^2. \quad (3.8)$$

次に、同時に観測される風速情報 w_t を用いて (3.6) 式から風速の分散 V_t が算出される。すると、対象音の局所的分散が観測方程式 (3.3) の関係を用いて算出され、これを近似的に X_t とする：

$$X_t = Y_t - V_t. \quad (3.9)$$

以上の結果を用いれば、風雑音の瞬時の推定値 \hat{v}_t を逐次求める公知のカルマン・フィルタが以下のごとく構成される。

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_t &= \tilde{v}_t + P_t X_t^{-1} \{y_t - (\tilde{v}_t + \bar{x}_t)\}, \\ \tilde{v}_t &= F \tilde{v}_{t-1} + G_{t-1} \bar{u}_{t-1}, \\ P_t &= (M_t^{-1} + X_t^{-1})^{-1}, \\ M_t &= F^2 P_{t-1} + G_{t-1}^2 U_{t-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

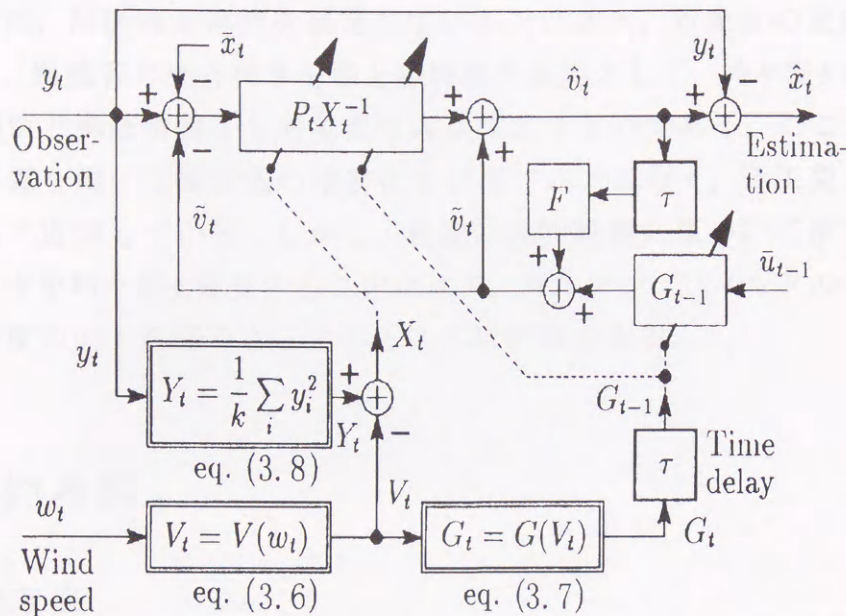


Fig. 3.1 Block diagram of the proposed estimation method for the objective sound by using the Kalman filter in which the time-varying gain $P_t X_t^{-1}$ and system parameter G_{t-1} are momentarily renewed with the information on wind speed.

ここに、 \tilde{v}_t は風雑音の $t-1$ 時刻における予測値であり、 P_t 、 M_t はそれぞれ、推定誤差分散および予測誤差分散である。また、 $\bar{u}_{t-1} = 0$ 、 $U_{t-1} = 1$ である。これにより、風速変動が緩やかであるという仮定の下に、風速情報と観測値から風雑音の瞬時値が推定される。この様にして得られた風雑音の瞬時推定値を用いるなら、対象音の推定値 \hat{x}_t は観測方程式 (3.3) 式から次の様に算出されることになる。

$$\hat{x}_t = y_t - \hat{v}_t. \quad (3.11)$$

以上の考察で設定した対象音推定のフィルタ構造を Fig. 3.1 に示している。図において、風雑音の混入する対象音の時々刻々の観測値 y_t から、一旦、風雑音 \hat{v}_t を推定し、その後、対象音 \hat{x}_t を算出するフィルタの主要部と、フィルタの構成要素 P_t 、 X_t^{-1} および G_{t-1} が、時々刻々の騒音観測値 y_t と風速観測値 w_t を用いて更新される本手法の概要を示している。最終的に、この様にして得られた対象音の時々刻々の音圧推定値から騒音計の時定数 “fast” 又は “slow”

に対応する SPL を求めることは容易である。

本手法では、局所的定常性を仮定しているとは言え、対象音の変動特性が未知なまま、風雑音の条件付き分布と動特性を基礎として、時々刻々に得られる騒音観測値と風速情報から対象音を逐次推定するのである。ここでは、高次の統計情報を用いて推定法の精密化を目指すのではなく、音圧変量をガウス分布として近似している。しかし、風速の同時観測に基づいて推定に必要なパラメータを時々刻々変更することにより、カルマン・フィルタの一応用として推定精度の向上を図ろうとすることに特徴がある。

3.4 実験的考察

3.4.1 実験方法

風速情報の利用に基づく本推定法の有効性を確認するため、風雑音の混入する観測値を用いて対象音を推定する野外実験を行なった。風速観測はトランジスタ式微風速計 (RION, AM-03, 時定数約 1 秒) を用い、騒音観測は精密騒音計にウィンドスクリーンを装着 (RION, NA-61 WS-02) して行った。騒音計の周波数応答特性は“flat” (10 ~ 20,000 Hz) を用いて、低周波域の風雑音を含めて計測する様にした。

風速プローブおよび騒音計マイクロホンは **Fig. 3.2** に示す様に支持金具を用いて固定し、装置の移動等によって配置が変わらない様にした。実験は建物の屋上において実施し、計測部は、付近に障害物のない、コンクリート床上 1.5 m の地点に設置した。初めに、マイクロホン近傍の風速とマイクロホンで観測される風雑音との関係を捉えるため、暗騒音の無視できる条件下で風速と風雑音のみの観測を行った。次いで、本推定法の有効性を原理的に確認するため、対象音として中心周波数 100 Hz の 1 オクターブ帯域雑音をスピーカーから放射し、風雑音の混入する騒音観測値を風速観測値と同時に摂取した。風速およびマイクロホンの音圧出力は PCM データ・レコーディングシステム (NF, RP-882) を用いて記録し、この再生信号を A/D 変換して、時系列形式における風速と騒音の観測値対データを得た。なお、SPL 算出のための基準値

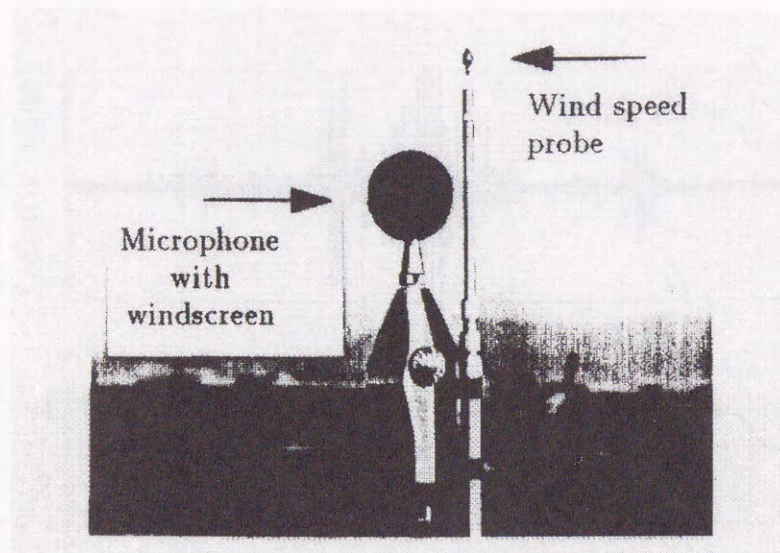


Fig. 3.2 An observation assembly of the microphone with windscreen and the wind speed probe.

は、レベル既知の帯域雑音を音圧観測して、A/D 変換値を逆算して得た。

本手法では、予め (3.6) 式の風速 w_t の関数としての風雑音の音圧分散 $V_t = V(w_t)$ を知っておくことが必要となる。風雑音を音圧で観測した一例を Fig. 3.3 に示している。図は、マイクロホンの出力 (音圧の相対値) と同時刻の風速観測波形を 2 ms (500 Hz) のサンプリング間隔で撮取して示したものである。この様に撮取された瞬時観測値を用いて、まず、風雑音音圧変動の包絡線波形と風速波形との間の遅延関係を統計的に知るために、便宜的に 0.1 秒間ごとの風雑音実効値と、対応する 0.1 秒間ごとの風速平均値を求め、各 5,000 個 (500 秒間) のデータを基に相関係数を計算した結果、風雑音音圧変動は $\tau = 1.4$ (s) 程度の後に得られる風速観測値と最大の相関を持つことが分かった。この遅延時間には、風速プローブの時定数約 1 秒による効果が大きく現われていると考えられる。さて、風速 w_t の関数としての風雑音の音圧分散 $V_t = V(w_t)$ を求めるため、まず、上の様に得られた風雑音のサンプル値約 90 万個 (30 分間) から、0.1 秒間ごとの風雑音の分散 (相対値) を算出しておく。次に、便宜的に風速を 0.2 m/s ごとの $w_{[j]}$ クラス:

$$0.2(j-1) \leq w_{[j]} < 0.2j \quad (j = 1, 2, \dots), \quad (3.12)$$

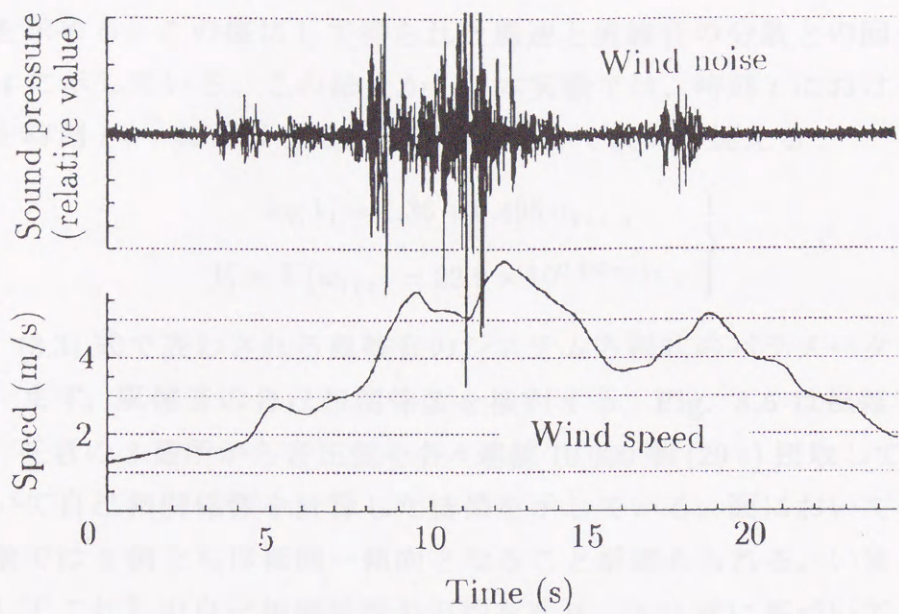


Fig. 3.3 An example of the wind noise in sound pressure and the wind speed observed with the observation assembly in Fig. 3.2.

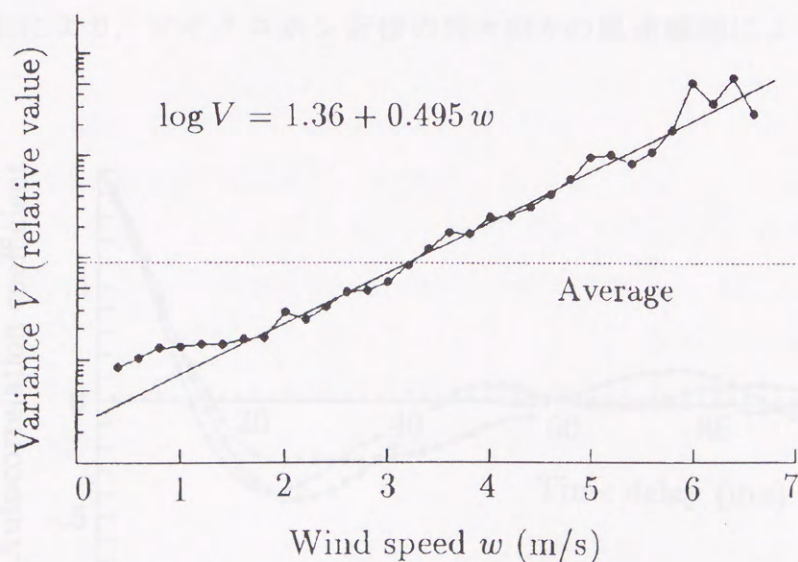


Fig. 3.4 A regression relationship between the wind speed and the variance of wind noise observed in sound pressure.

に区分し、上述の遅延時間を考慮に入れて各風速クラスごとに風雑音の分散の平均を求める。この様にして得られた風速と風雑音の分散との回帰関係を Fig. 3.4 に示している。この結果から、本実験では、時刻 t における風雑音の分散を時刻 $t + \tau$ における風速観測値を用いて次式で捉える：

$$\left. \begin{aligned} \log V_t &= 1.36 + 0.495 w_{t+\tau}, \\ V_t &= V(w_{t+\tau}) = 22.9 \times 10^{0.495 w_{t+\tau}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

次に、(3.3) 式で表わされる風雑音のシステム方程式のパラメータを算出するため、まず、風雑音の自己相関係数を検討する。Fig. 3.5 は風雑音の観測結果中、任意の 3 箇所から音圧値を各々連続 10,000 個 (20 s) 摂取して、この 3 例について自己相関係数を計算した結果を示している。図において、遅延の初期次数では 3 例ともほぼ同一傾向となることが認められる。いま、遅延初期に対してこれらの自己相関係数の平均を取り、(3.5) 式に基づいて、特徴パラメータ F を求めた結果、 $F = 0.903$ が得られた。念のため、自己相関係数の遅延次数 2 との間の特徴パラメータ $F_{[2]} (= \rho_v(n+2)/\rho_v(n))$ を求めた結果、 $F_{[2]} = 0.864$ が得られた。ここに、 $F_{[2]} \simeq F^2$ と確認されることから、本実験では $F = 0.903$ を用いる。この結果と (3.13) 式により算出される V_t を用いれば、(3.7) 式によりシステム方程式の残る特徴パラメータ G_t が算出されることになる。以上により、マイクロホン近傍の時々刻々の風速観測によりシステムの

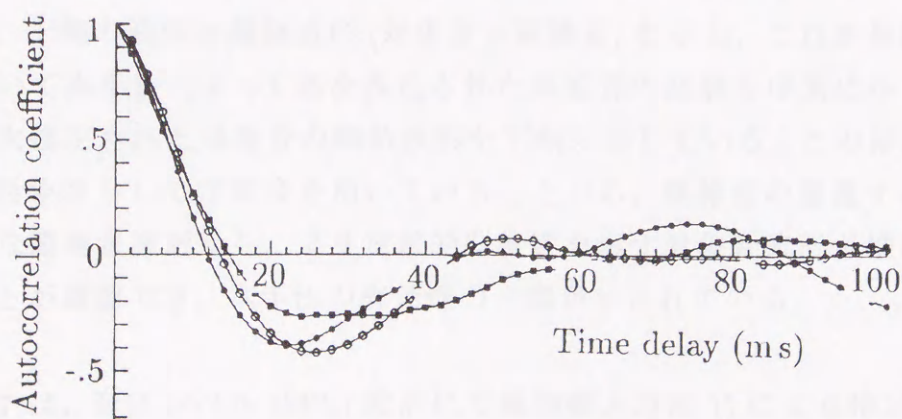


Fig. 3.5 Autocorrelation analysis of wind-induced noise based on three different continuous sampled data of 10,000 (20 s).

特徴パラメータを更新する (3.10) 式のフィルタが具体的に構成され、対象音の推定が可能となる。

3.4.2 対象音の推定結果

本手法の有効性を確認するため、風雑音下の一定レベルの対象音を推定する原理的な実験を行った。なお、本手法は対象音の変動特性が未知な場合にも適用可能としているけれども、予め対象音の定常性が明かな場合には、この既知情報を推定原理に組み入れることが推定精度向上に結び付くとも考えられる。従って、(3.9) 式の対象音分散 X_t の算出に必要な (3.8) 式の Y_t の算出に際して、以下の3つの法を用いて推定結果を比較する。方法1) 推定時刻直前の比較的風速の小さい(便宜的に風速観測値が 2 m/s 以下とした)、従って、風雑音の小さいと考えられる1秒間(500個)の観測値 y_k を用いる方法。方法2) 風速の大小に係わらず、推定時刻を中心に1秒間の観測値 y_k 500個を用いる方法。方法3) 風速の大小に係わらず、推定時刻を中心に0.2秒間の観測値 y_k 100個を用いる方法。なお、具体的推定に際しては、上記の Y_t 算出のためと、風速情報の遅延時間 $\tau = 1.4$ (s) に相当する観測値数を加えた一定区間の観測値(例えば方法1においては1,200個)を計算機上に記憶し、新たな観測値摂取、推定値算出と共に逐次更新する方法を採った。

Fig. 3.6 に、方法1)による逐次推定の音圧波形での一例を示している。図において、上側の波形は観測波形(対象音+風雑音)を示し、これを基に風速情報を用いて本手法によって逐次推定された風雑音の波形を中間に示し、最終的に逐次推定された対象音の瞬時波形を下側に示している。この結果、ここでは、対象音として定常音を用いていることから、風雑音の重畳するかなり不規則な観測音波形から、より定常的な特性を示す対象音波形が推定されていることが確認でき、本手法の有効性の一端が示されている。

Fig. 3.7 は、音圧レベル(SPL)波形にて観測値と方法1)による推定値を、同時に観測したマイクロホン近傍の風速と共に10分間に渡って示したものである。音圧波形からSPLを算出するに際して、低周波音計測では一般に平均

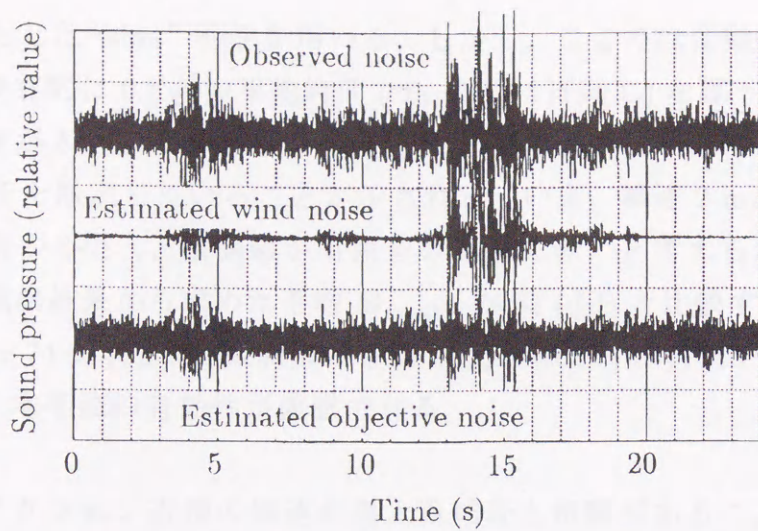


Fig. 3.6 Example of continuous estimation of objective noise by using the proposed Method 1: Y_t is calculated with the latest 500 observed data for 1 s when the wind speed is below 2 m/s before the estimation.

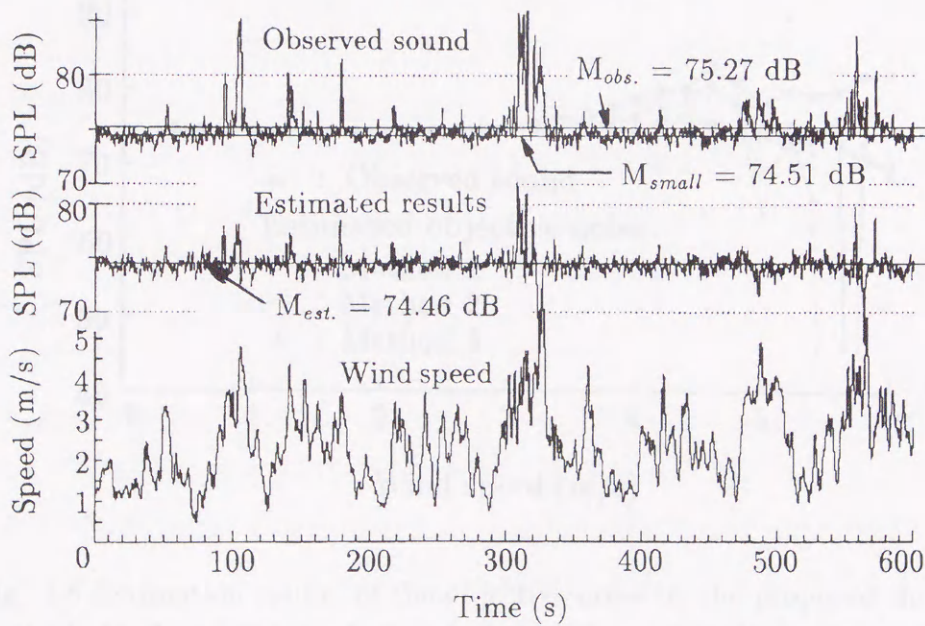


Fig. 3.7 An estimated result of objective noise (Method 1). $M_{obs.}$ and $M_{est.}$ show the average SPL of observed sound (signal + wind noise) and estimated objective signal respectively. M_{small} means the average SPL of observed sound for the data in a case when the wind speed is below 2 m/s.

時間を1秒とした“slow”特性を用いる。しかし、ここでは変動特性を詳細に見るため、便宜的に0.1秒の平均時間(“fast”にほぼ同じ)を採っている。図において、風速が大となりS/N比が悪化すると推定値も揺らぎつつも、一定レベルの対象音を推定していることが示される。いま、風速2 m/s以下では相対的に風雑音が小さく、観測値が対象音の真値に近いと考えられることからこのときの観測結果から求めた平均 $M_{small} = 74.51$ (dB) と比較する。推定結果の平均 $M_{est.} = 74.56$ (dB) は観測値の平均 $M_{obs.} = 75.27$ (dB) に比べて M_{small} にほぼ等しく、本手法の有効性が確認できる。

一方、マイクロホン近傍の風速が混入風雑音と相関があることを確認していることから、風速に対して前述の方法1)～3)を用いた推定結果を比較する。風速区間ごとの推定結果の平均値を Fig. 3.8 に示している。ただし、風速区間によっては(特に風速大の領域では)サンプル値が少なく平均の信頼性

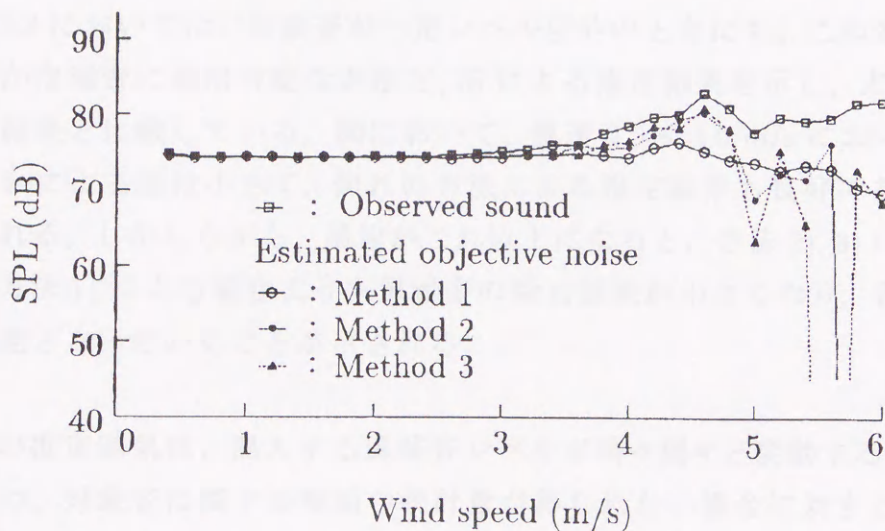


Fig. 3.8 Estimation results of the objective noise by the proposed three method. Method 1: Y_t is calculated with the latest 500 observed data for 1 s when the wind speed is below 2 m/s before the estimation. Method 2: Y_t is calculated with 500 data for 1 s before and after the middle estimation time without any wind condition. Method 3: the same way as the Method 2 but with 100 data for 0.2 s.

に問題が残されている。しかし、ここでは、この様なことが実際の測定環境でも起こりうるとして単純に比較する。図において、風速 2.5 ~ 4.0 m/s においては推定方法 1) ~ 3) とともに、ほぼ良好な結果が得られることが確認される。

3.4.3 推定結果の検討

本実験を通して、常時風が吹いて風雑音が全く混入しないという状況はなく、対象音の真値は不明であった。従って、Fig. 3.7 では、風速 2 m/s 以下での観測値の平均 $M_{small} = 74.51$ (dB) を近似的な真値として示している。図における、方法 1) による推定値の平均は JIS に許される許容誤差範囲 1 dB 以内という条件を満たす良好な結果を示している。しかしながら、この方法では、風速が小さいときの統計量を学習してこれを推定法に反映させており、対象音がほぼ一定レベルのとき以外にはこの方法は使えない。

Fig. 3.8 においては、対象音が一定レベル以外のときにも、この変動が比較的緩やかな場合に適用可能な方法 2), 3) による推定結果を示し、方法 1) による推定結果と比較している。図において、風速 2.5 ~ 4.0 m/s においては、方法の違いによる差は小さく、何れの方法による推定結果も良好であることが確認される。しかしながら、風速がこれ以上になると、方法 2), 3) による場合では、方法 1) による場合よりも風雑音の除去効果が小さくなり、急速に推定が不可能となっていくことが示される。

以上の推定結果は、混入する風雑音レベルが時々刻々と変動する状況下で、なおかつ、対象音に関する事前の統計量が得られない場合に対する手法としては、初期的な有効性を示していると考えられる。なお、対象音が一定レベルではない場合でも、対象音に関する変動特性が幾らかでも予見されるなら、風雑音の変動特性との対比においてより適切な (3.8) 式の計算方法を見いだし、これを推定法に反映させることにより推定精度の向上を図ることも可能と考えられる。この点は、風速情報と風雑音の間の関係を如何に精密に捉え、如何に利用するかの問題とも関係し、さらに研究する必要がある。

3.5 むすび

本章では、風速情報の利用による風雑音対策がほとんど見られない中で、マイクロホン近傍の風速情報を利用するカルマン・フィルタに基づく新たな対象音推定法を考察した。もともと、自然風を原因とする低周波風雑音と風速間の関係を厳密に取り扱うことは困難と考えられる。このため、本研究では、マイクロホン近傍の風速情報とマイクロホンに混入する風雑音との間の相関情報に着目し、風雑音を風速で条件付けられた条件付き分布で捉えた。これに基づき、風速情報を積極的に利用する一風雑音対策法を考察した。具体的には、推定法の簡易化のため、まず、対象音と風雑音の各状態変量として瞬時音圧を用い、各分布をガウス分布で近似して捉えた。次いで、推定原理の基本としてはカルマン・フィルタを用い、時々刻々の風速情報の摂取によりフィルタのパラメータを逐次変更する新たな推定方式を設定した。

本手法の有効性を確認するための実験においては、初めに、屋外における風速と風雑音の同時観測データを用いて、風雑音の音圧分散を風速の関数として近似的に捉えると共に、風雑音の動特性に関する1次自己回帰モデルを具体的に設定した。次いで、風速情報を利用する風雑音対策の初期的試みとして、風雑音の混入する観測値から一定レベルの対象音を推定して本手法の有効性を確認した。

本研究の結果、自然風の存在する野外での低周波音計測に際して、マイクロホン近傍の風速情報を同時に摂取し、積極的にこれを利用することの有効性が示された。一般に、環境騒音のモニタリングなどに際して風速も併せて観測されることが普通であり、この様な場合、本手法の適用は極めて容易となる。なお、本手法は、対象音に対する予見が得られないときでも、その変動特性が風速変動に比して緩やかな特性を示すなら適用可能となり、風雑音下の対象音推定法としては柔軟性に富むと考えられる。

今後の課題として、航空機騒音の計測などの具体的な応用研究が残されている。さらに、風速と風雑音間の相関情報のより綿密な検討のほか、より高次の統計量まで含む精密な推定法との比較検討など、推定精度の向上に関する研究も残されており、今後の課題としたい。

第4章

風速情報を利用した条件付き平均に基づく推定法

4.1 まえがき

前章でも述べた様に、風雑音の直接的な原因である風と風雑音との関係そのものに着目して、風速情報を直接利用する風雑音対策はほとんど見られない。いま、測定すべき対象音に関する事前情報が得られない場合には、事前に学習できる可能性の高い風雑音自身の統計的性質や動特性に着目して何らかの推定法を設定しなければならない。この様な試みとして、前章では時々刻々の風速情報の利用を風雑音推定の足掛かりとしてカルマン・フィルタの利用による対象音推定法を考察した。しかしながら、低周波音の計測に際し、定常放射音を用いた音響伝搬特性の計測の際や、ダムの放水音、ふるいなどの振動性機械音、温風乾燥機音など^[9]の一定レベル音を対象とする場合も比較的多い。本章では、実用性に重点を置き、風雑音下のこの様な定常性の強い対象音レベル計測の際に有効となる、風速情報に基づく2種類の簡易的对象音推定法を考察する。

第1の方法として、自然風下での一定対象音の音圧レベル(SPL)値の直接推定に有効となる手法を検討する。すなわち、オーバーオール^{[53],[54]}での平均2乗音圧^[49]変数において、風速を条件とする条件付き平均のみで風雑音を捉え、対象音推定には条件付きパワー加算の原理のみを使用する簡易法である。第2の方法では、まず、風速と風雑音パワースペクトル間にかなりの相関関係があることに基づき、簡易的に風雑音パワースペクトルを風速による条件付き平均として捉える。次に、パワースペクトル加算の原理に基づき、一旦、

対象音のパワースペクトルを推定する。その後、最終的な対象音の SPL 値を算出する簡易法を検討する。一般に、風雑音スペクトルの主成分が低周波域にあることから、低周波対象音の周波数域と重なって風雑音対策を困難にしている。しかし、両者のパワースペクトルの間に何らかの特徴差が見られることも多く、この様な場合には特に後者の手法が有効であると考えられる。

他方、第2の手法ではパワースペクトルの算出が不可欠である。騒音計測の現実においては、騒音計やデータレコーダなどの測定レンジの不適切な設定や予測を越えたレベルの入力により、信号が飽和して記録されることがある。前者の SPL での推定法においては、振幅方向での短時間の飽和は“fast”、“slow”などの時定数による時間平均が行われることによってこの影響は軽減される。しかしながら、後者のスペクトル領域での推定法においては、パワースペクトルの算出に大きな影響を受けることがある。したがって、この様な場合に対する一スペクトル推定法についても検討する。

4.2 平均2乗音圧 (オーバーオール) における対象音推定法

前章でも示した様に、マイクロホン近傍の風速と風雑音 SPL との間の相関はかなり大きい。ここでは、低周波音が SPL で計測される通常の計測方式を考え、状態変量としては平均2乗音圧を採る。いま、対象音は一定レベルを仮定していても、風雑音、及び対象音と風雑音の合成による観測値は時々刻々に変動し非負領域内で揺らぐ。この観測値から、風速情報を利用した対象音の簡易推定法を検討する。

まず、マイクロホンによって観測される不規則瞬時音圧を $p(t)$ と表わし、騒音計の“fast”、“slow”などの時定数を T とする。簡単のため、任意の時区間 T での風雑音の SPL 値を L (dB) と表し、平均2乗音圧を $\overline{p^2}$ と表わせば、SPL 値 L は次の様に計算される。

$$L = 10 \log \frac{\overline{p^2}}{p_0^2}, \quad \overline{p^2} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (4.1)$$

ただし、 $p_0=20$ (μPa) は基準音圧である。一般には、データが膨大となるためマイクロホンの音圧出力をそのまま記録することはほとんどなく、SPL 値が

記録されることが多い。この場合には、ここで使用する平均 2 乗音圧変量 $\overline{p^2}$ は L (dB) から逆算することによって得ることになる。

さて、同一の時区間 T において、(4.1) 式と同様に表される平均 2 乗音圧での対象音 \overline{X} と風雑音 \overline{V} 、及び風雑音混入下の観測値 \overline{Y} の間には、対象音と風雑音の独立性により、公知のパワー加算が成り立つ。

$$\overline{Y} = \overline{X} + \overline{V}. \quad (4.2)$$

いま、上式の関係を基に風雑音混入下の観測値 \overline{Y} から対象音 \overline{X} のみを推定しようとする。このとき、厳密には第 2 章における様に、対象音と風雑音とが非負領域内のみで揺らぐ一般の場合に対して、2 種類の正変量の加算関係を基に高次統計量をも反映させて設定された状態推定アルゴリズムを用いて対象音を推定しなければならない。しかしここでは、対象音がほぼ一定レベルを示すという条件の下に、第 3 章と同様にマイクロホン近傍の風速情報を利用する。これにより、混入風雑音を推定することを基礎にして、便宜的ではあっても各変量の条件付き平均のみを用いた以下の簡易的推定法を試みる。

いま、風速がある値 $w = \alpha$ を取るとき、同時に観測される風雑音のみの平均 2 乗音圧変量 \overline{V} の分布形態を条件付き確率分布 $P(\overline{V}|w = \alpha)$ として捉える。本手法では簡易的にこの条件付き平均のみを用いる。すなわち、平均を $\langle \overline{V}(\alpha) \rangle$ と表せば、

$$\langle \overline{V}(\alpha) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{V} dP(\overline{V}|w = \alpha). \quad (4.3)$$

と計算される。本手法では、対象音の推定に先立って、マイクロホン近傍の風速と風雑音の同時計測により、この条件付き平均を学習しておく。

さて、風雑音混入下の対象音観測に際しても、同時刻の風速観測値を基に条件付き平均を算出する。風速が $w = \alpha$ を取るとき、同時に観測される(対象音 + 風雑音)観測値の分布形態を条件付き確率分布 $P(\overline{Y}|w = \alpha)$ として捉える。この条件付き平均 $\langle \overline{Y}(\alpha) \rangle$ は、

$$\langle \overline{Y}(\alpha) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{Y} dP(\overline{Y}|w = \alpha), \quad (4.4)$$

の様に得られる。

結局、上式で表される観測値の条件付き平均と、事前の学習による風雑音のみの条件付き平均である (4.3) 式を用いれば、(4.2) 式の加算関係から風速が $w = \alpha$ のときの対象音の平均推定値 $\langle \bar{X}(\alpha) \rangle^*$ が次の様に求められる。

$$\langle \bar{X}(\alpha) \rangle^* = \langle \bar{Y}(\alpha) \rangle - \langle \bar{V}(\alpha) \rangle . \quad (4.5)$$

この推定値が風速の下限 $w = \alpha_1$ から上限 $w = \alpha_2$ までの変動範囲に渡って得られるなら、これを風速の変動範囲について平均することにより、最終的に目的とする対象音の推定値 $\langle \bar{X} \rangle^*$ が求められる：

$$\langle \bar{X} \rangle^* = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \langle \bar{X}(w) \rangle^* dw . \quad (4.6)$$

すなわち、本手法では、予め得られた風雑音の条件付き分布に基づいて、対応する風速の大きさ毎に対象音の平均値を推定するのである。第2章における推定理論においては、低次から高次の各相関量を理論的に算定しつつ逐次の推定を行う手法を考察した。また、第3章における推定法では、音圧変量においてガウス分布で近似したことによる推定法の簡易化と、風速情報の利用による精度向上を試みた。これらに対し、本手法は時々刻々の推定値は得られなくとも、対象音がほぼ一定である条件の下にこれを推定するための、風速と混入風雑音の相関特性に基づく平均処理のみに着目した簡易法である。

4.3 パワースペクトルにおける対象音推定法

従来、自然風による風雑音のパワースペクトルは、ウィンドスクリーンの周波数域での風雑音除去効果を評価検討するために示されることが多い。特に、文献 [25], [50] においては、風速をパラメータとして風雑音除去効果のスペクトル特性が示されている。いま、この風速と風雑音パワースペクトル間の関係に着目すれば、風速の変動と共に、パワースペクトルレベル (SL) が、ほぼ同じパターンを保って変動し、両者の間にかなりの相関があることが予測される。これに基づき、本節では、これまでほとんど見受けられない、マイクロホン近傍の風速情報により風雑音スペクトルを推定することに基づく風雑音対策を検討する。また、振幅方向に飽和して記録された信号から元のパワースペクトルを推定する一方法を検討する。

4.3.1 パワースペクトルにおける対象音推定法

測定対象の低周波音と風雑音の主要成分が同一周波数域に存在することが、一般の周波数フィルタの使用による風雑音対策を困難にしている。しかし、対象音と風雑音は発生原因もメカニズムも異なり、そのスペクトル間には何らかの差異が存在するのが普通である。従って、直ちに時間領域に目を向けるのではなく、周波数領域において両者を分離する方法の設定も可能であると考えられる。このときには、“slow”などの時定数により平均化された前節での2乗音圧変量におけるよりも、この時間でのスペクトル変量における方が情報量も豊富となり、よりきめ細かな対象音推定法の設定が可能となると考えられる。

いま、(4.1)において不規則瞬時音圧 $p(t)$ から算出される平均2乗音圧 $\overline{p^2}$ は、同じ任意の時区間 T での音圧データから算出されるパワースペクトル成分 $S(f)$ と公知の関係 [49],

$$\overline{p^2} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt = K \int_0^\infty S(f) df, \quad (4.7)$$

がある。ここに K は各変量間の変換係数である。すなわち、(4.2)式での加算関係に対して、同一の音圧データから算出される対象音、風雑音、両者の混入する観測値の各パワースペクトル成分を、それぞれ、 $S_X(f)$ 、 $S_V(f)$ 及び $S_Y(f)$ と表せば、次のパワースペクトルでの加算関係が成り立つ。

$$S_Y(f) = S_X(f) + S_V(f). \quad (4.8)$$

さて、不規則に変動する風雑音のスペクトル成分とマイクロホン近傍の風速との相関性を積極的に活用するため、風速がある値 $w = \alpha$ を取るときの風雑音スペクトル成分の分布を条件付分布 $P(S_V(f)|w = \alpha)$ により、予め学習しておく。具体的に、この条件付き平均値を $\langle S_V(f)|\alpha \rangle$ と表わせば、

$$\langle S_V(f)|\alpha \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_V(f) dP(S_V(f)|w = \alpha), \quad (4.9)$$

の様に計算される。

本節では、対象音のレベルとスペクトル特性が共に一定の場合を考える。この様な場合でも、風速がある程度以上に揺らぐときには、単純に周波数解析を

行うのみでは対象音のスペクトルを推定することは困難である。ここでは、風雑音混入下の対象音の観測に際しても、マイクロホン近傍の風速を同時に観測し、この風速情報を活用する。すなわち、風速が $w = \alpha$ のときの観測値のパワースペクトル成分の分布を条件付分布 $P(S_Y(f)|w = \alpha)$ として捉える。この条件付き平均値を $\langle S_Y(f)|\alpha \rangle$ と表わせば、これは上式と同様に計算される。

$$\langle S_Y(f)|\alpha \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_Y(f) dP(S_Y(f)|w = \alpha). \quad (4.10)$$

いま、対象音スペクトルの推定に際し、簡易的に風速情報に基づく条件付き平均である (4.9), (4.10) 式のみを利用する。具体的に、風速が $w = \alpha$ のとき、(4.8) 式の加算の関係を基にして、対象音パワースペクトル成分の推定値 $\langle S_X(f)|\alpha \rangle^*$ が次の様に算出される。

$$\langle S_X(f)|\alpha \rangle^* = \langle S_Y(f)|\alpha \rangle - \langle S_V(f)|\alpha \rangle. \quad (4.11)$$

すなわち、風速情報に基づき、まず、周波数成分毎に対象音を推定する。このとき、対象音の特徴成分の存在など、風雑音と対象音の間に何らかのスペクトルの差が存在するとき、これに対するきめ細かい処理も可能となる。いま、風速が $w = \alpha$ のとき、一旦、周波数領域で推定したこの結果から、平均 2 乗音圧 $\bar{X}^*|\alpha$ は以下の様に算出される。

$$\bar{X}^*|\alpha = K \int_0^{\infty} \langle S_X(f)|\alpha \rangle^* df. \quad (4.12)$$

最終的に目的とする風速変動の上下限の範囲に渡る推定値は、この結果から、前節 (4.6) に沿って容易に算出される。

4.3.2 振幅飽和観測値からのパワースペクトル推定法

前節の様に、周波数領域での対象音推定法を適用する場合、時々刻々のスペクトルは揺らいでいるとはいえ、少しでも正確に見出すことは不可欠である。風雑音の音圧波形は、例えば第 2 章, Fig. 3.3 の様に急激な変動を示すことがある。この様な場合、測定レンジの不適切な設定などにより、信号が飽和して記録されてしまうことがある。いま、4.2 節における様に平均 2 乗音圧変量を用いる場合においては、振幅方向での短時間の飽和の影響は時間平均により軽減されることが期待される。しかしながら、ここで用いようとする推定法にお

いては、パワースペクトル自身の算出に大きな影響を受けることがある。従って、この様な観測値から元のパワースペクトルを推定する一手法を検討する。

(1) 振幅飽和観測データからの平均及び標準偏差の推定

いま、Fig. 4.1-a) に示される様な平均 μ 、標準偏差 σ をもつガウス性不規則信号 $x(t)$ が同図 b) に示される様に、その振幅の一部が下限 α_1 、上限 α_2 で飽和した波形 $x_t(t)$ として観測されたとする。すると、この観測波形 $x_t(t)$ から原信号 $x(t)$ の平均値及び標準偏差は次の手順により算定される。

まず、 $x_t(t)$ の確率密度関数 $p_t(x)$ を、次の様にガウス分布 $N(x)$ とディラックのデルタ関数 $\delta(t)$ を用いて表現する。

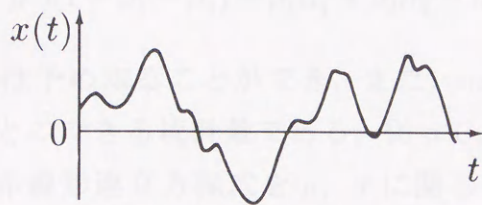
$$p_t(x) = N(x)u(x) + \beta_1\delta(x - \alpha_1) + \beta_2\delta(x - \alpha_2). \quad (4.13)$$

ただし、

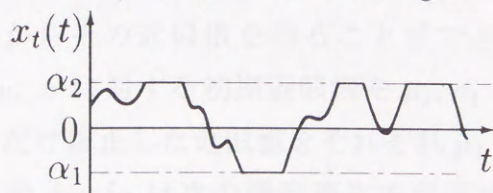
$$u(x) = \begin{cases} 1 & \alpha_1 < x < \alpha_2 \\ 0 & x \leq \alpha_1, x \geq \alpha_2 \end{cases}, \quad N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\},$$

$$\beta_1 = \int_{-\infty}^{\alpha_1} N(x)dx, \quad \beta_2 = \int_{\alpha_2}^{\infty} N(x)dx.$$

ここで、振幅制限を受けた信号の一次、二次モーメントは、定義式に上式を代入することにより、



a) Original random signal.



b) Signal with amplitude limitation.

Fig. 4.1 An original signal and observed signal with amplitude limitation.

$$m_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x p_t(x) dx = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} x N(x) dx + \beta_1 \alpha_1 + \beta_2 \alpha_2, \quad (4.14)$$

$$m_2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p_t(x) dx = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} x^2 N(x) dx + \beta_1 \alpha_1^2 + \beta_2 \alpha_2^2, \quad (4.15)$$

となる。ここに,

$$I_0 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} N(x) dx = 1 - \beta_1 - \beta_2, \quad (4.16)$$

$$I_1 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} x N(x) dx = \sigma^2 \{N(\alpha_1) - N(\alpha_2)\} + \mu I_0, \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} x^2 N(x) dx \\ &= \sigma^2 \{(\alpha_1 - \mu)N(\alpha_1) - (\alpha_2 - \mu)N(\alpha_2)\} + 2\mu I_1 + (\sigma^2 - \mu^2)I_0, \end{aligned} \quad (4.18)$$

であることを考慮すると、結局、振幅制限を受けた信号の一次、二次モーメントは次の様に表現される。

$$m_1 = \sigma^2 \{N(\alpha_1) - N(\alpha_2)\} + \mu(1 - \beta_1 - \beta_2) + \beta_1 \alpha_1 + \beta_2 \alpha_2, \quad (4.19)$$

$$m_2 = \sigma^2 N(\alpha_1)(\alpha_1 + \mu) - \sigma^2 N(\alpha_2)(\alpha_2 + \mu) + (\sigma^2 + \mu^2)(1 - \beta_1 - \beta_2) + \beta_1 \alpha_1^2 + \beta_2 \alpha_2^2. \quad (4.20)$$

従って、上2式より、 μ 、 σ に関する連立方程式が次の様に得られる。

$$\left. \begin{aligned} f(\mu, \sigma) &= \sigma^2 \{N(\alpha_1) - N(\alpha_2)\} + \mu(1 - \beta_1 - \beta_2) \\ &\quad + \beta_1 \alpha_1 + \beta_2 \alpha_2 - m_1 = 0, \\ g(\mu, \sigma) &= \sigma^2 N(\alpha_1)(\alpha_1 + \mu) - \sigma^2 N(\alpha_2)(\alpha_2 + \mu) \\ &\quad + (\sigma^2 + \mu^2)(1 - \beta_1 - \beta_2) + \beta_1 \alpha_1^2 + \beta_2 \alpha_2^2 - m_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

上式において、 α_1 、 α_2 は予め知ることができ、また、 m_1 、 m_2 、 β_1 、 β_2 は観測データより直接得ることのできる統計量である。従って、数値計算手法を用いることにより、上式の非線形連立方程式を μ 、 σ に関して解くことができる。具体的に、2階微分まで考慮した修正ニュートン・ラフソン法^[88]を用いることにより、次の手続きからその近似根を得ることができる。

いま、(4.21)式の根 μ 、 σ に対する初期近似根を μ_1 、 σ_1 とする。このとき、この初期近似根を $\delta\mu$ 、 $\delta\sigma$ だけ修正した近似値をそれぞれ $\mu_2 = \mu_1 + \delta\mu$ 、 $\sigma_2 = \sigma_1 + \delta\sigma$ とすると、この修正値 $\delta\mu$ 、 $\delta\sigma$ は次の線形連立方程式の解として得られる。

$$\begin{bmatrix} f_\mu - \frac{f_{\mu\mu} \cdot f}{2f_\mu} - \frac{f_\mu \cdot f}{2f_\sigma} & f_\sigma - \frac{f_{\sigma\sigma} \cdot f}{2f_\sigma} - \frac{f_{\mu\sigma} \cdot f}{2f_\mu} \\ g_\mu - \frac{g_{\mu\mu} \cdot g}{2g_\mu} - \frac{g_\mu \cdot g}{2g_\sigma} & g_\sigma - \frac{g_{\sigma\sigma} \cdot g}{2g_\sigma} - \frac{g_{\mu\sigma} \cdot g}{2g_\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mu \\ \delta\sigma \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(\mu, \sigma) \\ g(\mu, \sigma) \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

ここで、 f_μ, f_σ, \dots , などは $\mu = \mu_1, \sigma = \sigma_1$ での μ, σ に関する偏微分係数を表すものとする。 ε を予め与えた収束を判定するためのある小さな正数として、もし $|\delta\mu| > \varepsilon$ または $|\delta\sigma| > \varepsilon$ ならば、 $\mu_1 + \delta\mu, \sigma_1 + \delta\sigma$ を μ_1, σ_1 に置き換え、 μ, σ の新たな近似根とする。以上の手順を繰り返すことにより非線形方程式 (4.21) を μ, σ に関して解くことができる。

(2) 振幅飽和観測データからの簡易パワースペクトル推定

まず、簡易相関関数算出法を用いる。いま、ガウス分布特性を示す定常不規則過程において τ だけ離れた 2 時点での関数値をそれぞれ $x_1 = x(t), x_2 = x(t+\tau)$ とし、 x_1 と x_2 の間の相関係数を $\rho(\tau)$ とすれば、条件付確率密度関数は次の様に表される [89]。

$$p(x_2|x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\sqrt{1-\rho(\tau)^2}} \exp\left[-\frac{\{x_2 - \mu - (x_1 - \mu)\rho(\tau)\}^2}{2(\sigma\sqrt{1-\rho(\tau)^2})^2}\right]. \quad (4.23)$$

これにより、 $x_1 = \xi$ となるとき、これから τ 離れた時刻での条件付平均値 $m(\xi, \tau)$ は次式のごとく求められる。

$$m(\xi, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_2 p(x_2|x_1) dx_2 |_{x_1=\xi} = (\xi - \mu)\rho(\tau) + \mu. \quad (4.24)$$

これより、条件付き平均に基づく相関関数が算出される [90],[91]。

$$\rho(\tau) = \frac{m(\xi, \tau) - \mu}{\xi - \mu}. \quad (4.25)$$

この方法では、相関関数を算出するために信号振幅に関する完全な情報を必要とせず、不規則信号がある条件 ξ に一致した時点から τ だけ離れた時点における観測値列から算出した平均値のみを知ればよい簡便さに特徴がある。

さて、(4.23) 式の条件付確率密度関数 $p(x_2|x_1)$ が下限 α_1 、上限 α_2 で振幅飽和して観測されたとき、 $x_1 = \xi$ での条件付確率密度関数は、(4.13) 式と同様に次の様に表される。

$$p_c(x_2|x_1 = \xi) = N_c(x_2)u(x_2) + \beta_1\delta(x_2 - \alpha_1) + \beta_2\delta(x_2 - \alpha_2). \quad (4.26)$$

ただし、

$$u(x_2) = \begin{cases} 1 & \alpha_1 < x_2 < \alpha_2 \\ 0 & x_2 \leq \alpha_1, x_2 \geq \alpha_2 \end{cases}, \quad N_c(x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left\{-\frac{(x_2 - m(\xi, \tau))^2}{2\sigma_c^2}\right\},$$

$$\beta_1 = \int_{-\infty}^{\alpha_1} N_c(x_2) dx_2, \quad \beta_2 = \int_{\alpha_2}^{\infty} N_c(x_2) dx_2.$$

すなわち、(1)項と同様にすれば、振幅飽和観測データから飽和の影響を除去した条件付き平均 $m(\xi, \tau)$ を推定することができる。結局、(1)項で求めた μ とこの $m(\xi, \tau)$ を用いて (4.25) 式の相関係数が算出される。なお、最も少数の観測値から相関関数を算出するためには、条件値 ξ として次の最適値 ξ_{opt} が設定できる場合であることが示されている [92]。

$$\xi_{opt} = \mu \pm \sqrt{2}\sigma. \quad (4.27)$$

実際にはサンプル間隔 Δt 毎の離散観測値を用いることになり、上の手順で求めた相関関数に離散フーリエ余弦変換を施せば目的のパワースペクトルが推定できる [93]。

$$Pr = \left[C_0 + 2 \sum_{q=1}^{M-1} C_q \cos\left(\frac{qr\pi}{M}\right) + C_M \cos(r\pi) \right] \Delta t. \quad (4.27)$$

ここに、

$$C_r = \rho(r\Delta t), \quad \Delta f = \frac{1}{2M\Delta t}.$$

(3) 振幅飽和観測データからのパワースペクトル推定例

ここでは、振幅飽和観測値から元のパワースペクトルを推定するシミュレーション実験結果の一例のみを示す。まず、三角級数モデル [94] を用いて 10 Hz から 50 Hz までの周波数を含んだガウス性不規則信号をコンピュータで発生させて振幅制限を受けないデータ列とした。このデータ列から、下限及び上限で振幅に制限を与えて、別に振幅飽和データ列を作った ($\alpha_1 = -0.2$, $\alpha_2 = 2.5$, $\beta_1 = 0.41$, $\beta_2 = 0.01$)。

両データ列からパワースペクトルを算出した結果と本手法によりスペクトルを推定した結果を Fig. 4.2 に示している。図において、a) は、振幅制限を受けない元のデータに FFT を施してパワースペクトルを求めた結果である。他方、振幅が飽和して観測されたデータに直接 FFT 法を適用した結果を図中 b) に示している。元のスペクトルに比べ、低周波域、高周波域にスペクトルが広がって算出されていることが示される。これに対して、同図 c) に、振幅飽和のデータに本手法を適用してパワースペクトルを推定した結果を示して

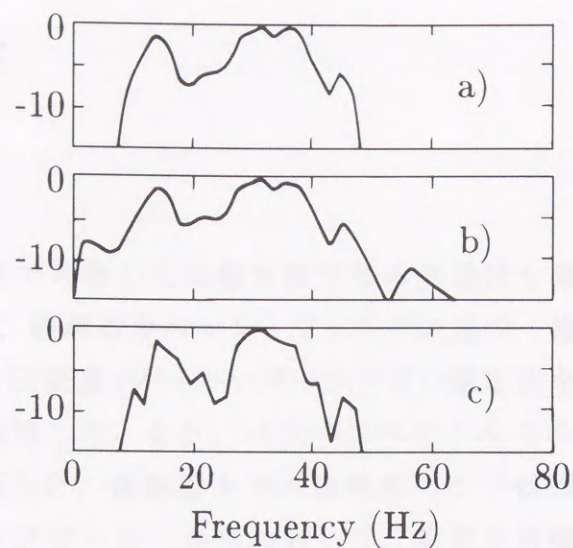


Fig. 4.2 The power spectra for the simulation data: a) calculated by using the FFT method for the original data (true values), b) calculated by using the FFT method for the amplitude limited data, c) estimated by using the proposed method for the same limited data. ($\alpha_1=-0.2$, $\alpha_2=2.5$, $\beta_1=0.41$, $\beta_2=0.01$.)

いる。なお、このとき、FFT法では1フレーム512点のデータにて16フレームの結果を平均した。また、本手法の場合は8,192 (512 × 16) 点のデータを用いた。

この結果、本手法による推定結果は元のスペクトル波形に近く、特に、低周波域及び高周波域において現れた振幅飽和の影響を取り除く効果が確認できる。なお、ここでは、振幅が飽和して観測される元の波形がガウス分布に従うとした。より幅広い分布特性に対応する方法の設定などは今後の課題としたい。

本節では、風速情報を利用したパワースペクトルでの対象音推定法を適用する際の、振幅飽和観測データに関する一対策法を検討した。すなわち、信号がほぼガウス分布に従う場合、振幅飽和して観測された信号から元の信号のパワースペクトルを推定する一手法を検討しその有効性を示した。これにより、振幅飽和の観測値データをも活用して、パワースペクトルでの推定法へ適用することが可能となる。

4.4 実験的考察

4.4.1 実験方法

4.2 節, 及び 4.3 節で考察した対象音推定法の有効性を確認するため, 次の方法を採用した。まず, 前章のカルマン・フィルタに基づく推定法とも比較するために, 平均 2 乗音圧変量 (オーバーオール) での推定法を同一の観測データ (実験 I とする) に適用した。また, パワースペクトルでの推定法の有効性を確認するために, 新たに, 建物屋上での自然風の下で低周波域にスペクトル成分をもつ対象音をスピーカーから放射して, 前章と同様の計測システムを用いて, これとマイクロホン近傍の風速を同時観測する実験を行った (実験 II とする)。この観測データには, 平均 2 乗音圧での推定法も適用して両手法を比較検討した。

実験 I でのデータの使用に際しては, PCM データレコーダ (NF, RP-882) に記録された音圧信号をレベル・レコーダ (RION, LR-04) に入力し, このレコーダによる “slow” 特性でのアナログ演算による SPL(dB) 出力信号をサンプリング間隔 0.1 秒で連続 A/D 変換する方法を用いた。従って, 平均 2 乗音圧値は (4.1) 式の逆算によって算出した。同時に記録された風速データは再生信号を, 同じく 0.1 秒間隔でサンプリングした。

新たに行った実験 II では, 初めに, 対象音を放射しない状況下で風雑音と風速を約 10 分 (620 秒) 間毎の 9 区間に分けて連続観測を行った。この間, 風速は平均 3.4 m/s の周りに 0.8 ~ 10.6 m/s の範囲で揺らいで観測された。次いで, 観測点から 3 m 離れた点に設置したスピーカーから一定レベルの帯域雑音を放射して, 同じく約 10 分間毎 8 区間の連続観測を行った。この間の風速は 1.0 ~ 11.6 m/s の範囲で揺らいで観測され, その平均は 4.0 m/s となった。数値処理の基礎となる A/D 変換は観測結果の各区間毎に連続して行い, 音圧信号に対しては 1 ms (1 kHz) の, 風速信号 (時定数約 1 秒) に対しては 0.1 s (10 Hz) のサンプリング間隔とした。なお, SPL 算出のための基準値は, 第 3 章 3.4.1 と同様にレベル既知の帯域雑音を音圧観測して, これを逆算して得た。また, パワースペクトルレベル SL 算出の基準値はこれを FFT 解析して得られる離散パワースペクトル値の和を求め, これから逆算して得た。

4.4.2 平均 2 乗音圧における対象音推定結果

実験 I において、暗騒音の無視できる条件の下で同時観測された風雑音 SPL (Slow 特性) と風速の記録波形の一例を Fig. 4.3 に示している。図において、低周波領域を含む騒音計測に際しては、標準的なウィンドスクリーン (9 cm 径のウレタンフォーム) を装着するのみでは、風速 4 ~ 5 m/s 程度の微風下においても 70 ~ 80 dB に達する風雑音の混入が避けられないことが確認できる。

いま、この dB 値データによる風雑音波形と風速波形からサンプリング間隔 0.1 秒で連続撮取したサンプル値各 5,000 個 (500 秒間) を用いて相互相関係数を計算した結果、風雑音観測値は $\tau = 0.6$ (s) 程度後に得られる風速観測値と最大 0.87 程度の相関係数を持つという結果が得られた (この遅延時間には、騒音計の “slow” 特性による時定数および風速プローブの時定数の影響が含まれる)。この結果から、予め風速観測値を τ だけシフトさせて得られる時刻 $k = 1, 2, \dots, \ell$ のデータ対 (\bar{V}_k, w_k) からなる集合を Z_M と表す。すなわち、

$$Z_M = \{(\bar{V}_1, w_1), (\bar{V}_2, w_2), \dots, (\bar{V}_\ell, w_\ell)\}. \quad (4.28)$$

さて、(4.5) 式による推定に先立ち、予め (4.4) 式に対応する風雑音の条件

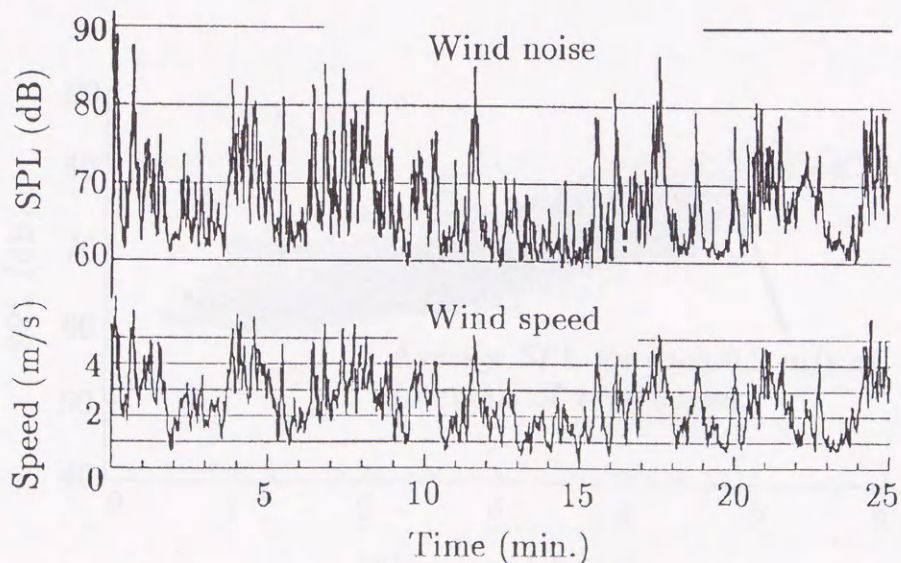


Fig. 4.3 Examples of the wind noise in SPL and the wind speed by the use of observation assembly in Fig. 3.2.

付き平均値を算出しておくことが必要となる。ここでは、実験結果に基づくデータ処理の簡易性から以下の方法を採用。いま、(3.12)式と同様に、便宜的に0.2 m/s 毎の風速クラス $w_{[j]}$:

$$0.2(j-1) \leq w_{[j]} < 0.2j \quad (j = 1, 2, \dots),$$

を設定する。(4.28)式の集合 Z_M において、風速が任意の風速区間 $w_{[i]}$ 内にある n 個の観測値対からなる部分集合 $Z_M|_{w_{[i]}}$ を用いて、風雑音観測値に関する平均値 $\langle \bar{V}(w_{[i]}) \rangle$ が算出される。

$$Z_M|_{w_{[i]}} = \{(\bar{V}_{k_1}, w_{k_1} \in w_{[i]}), (\bar{V}_{k_2}, w_{k_2} \in w_{[i]}), \dots, (\bar{V}_{k_n}, w_{k_n} \in w_{[i]})\}, \quad (4.29)$$

$$\langle \bar{V}(w_{[i]}) \rangle = (\bar{V}_{k_1} + \bar{V}_{k_2} + \dots + \bar{V}_{k_n})/n. \quad (4.30)$$

Fig. 4.4 は Fig. 4.3 の風雑音および風速のサンプル値対 (\bar{V}_k, w_k) 15,000 組 (25 分間) に基づいて作成した相関散布図である。図中、 \odot は風速クラス毎の平均風雑音 $\langle \bar{V}(w_{[i]}) \rangle$ の dB 値を示している。この結果をデータベースとして記憶しておく。

次に、実験 I において、風雑音混入下の帯域雑音を対象音として観測した結

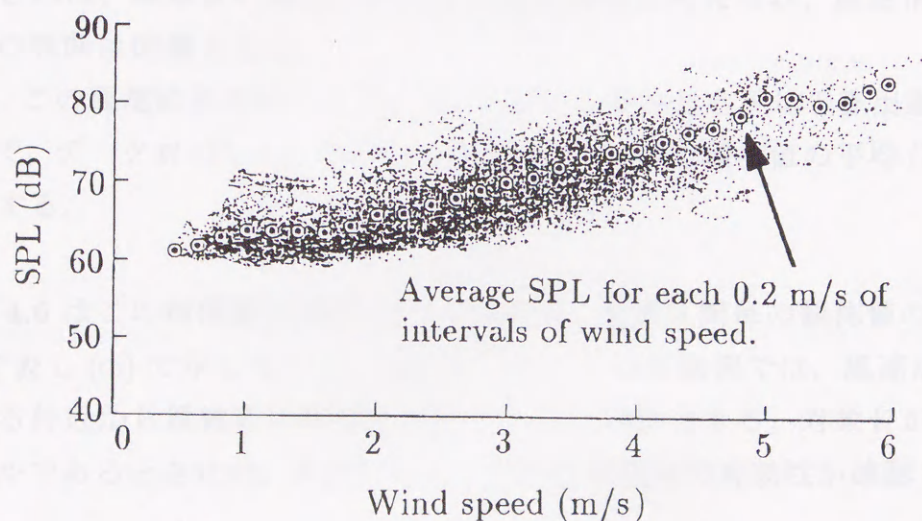


Fig. 4.4 Correlation diagram between the wind speed and the wind noise for the data in Fig. 4.3.

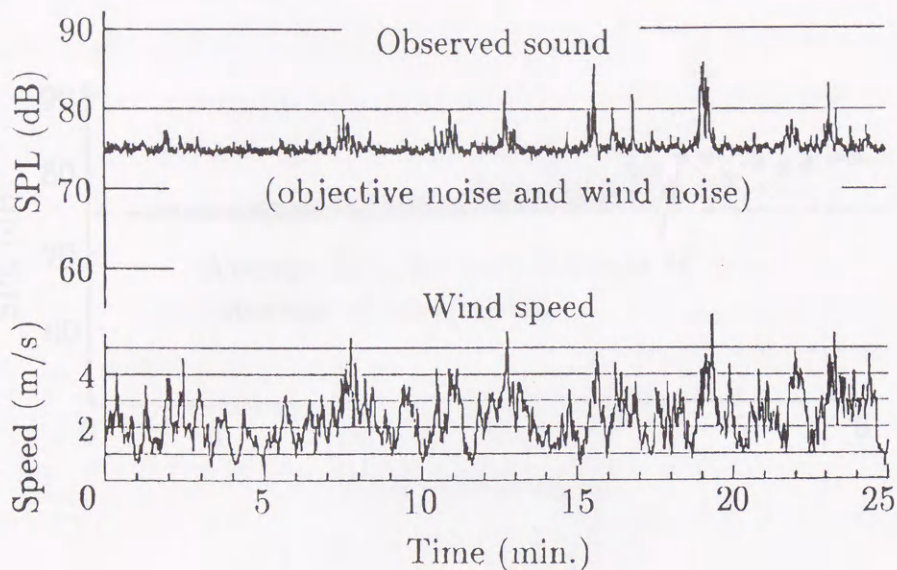


Fig. 4.5 Observation of the objective signal (one oct. band noise with the center freq. of 100 Hz) contaminated with wind noise and the wind speed near the microphone.

果を Fig. 4.5 に示している。図において、風雑音がかなり変動し、比較的大きいレベルの一定対象音を観測しているため、波形の底部付近のレベルが対象音の真値と見なすこともできる。しかし、風速揺らぎの下限がほぼ一定となるときには、風雑音の最低レベルも一定となると考えられ、風速情報なしにはその判断は困難となる。

いま、この観測結果を用いて Fig. 4.4 における条件付き平均の算出過程と同様にして、データ対 (\bar{Y}_k, w_k) を用いて各風速クラス毎に観測値の平均 $\langle \bar{Y}(w_{[i]}) \rangle$ を算出する。

Fig. 4.6 はこの相関散布図を示したもので、風速区間毎の観測値の平均を dB 値で表し (○) で示している。図において、この実験例では、風速が 2 m/s を越える付近から風雑音の影響が表れていると判断できる。対象音がほぼ一定レベルであるときには、本図からも、風速情報利用の有効性が確認される。

さて、Fig. 4.4 において事前に学習した風速情報に基づく風雑音の条件付き平均 $\langle \bar{V}(w_{[i]}) \rangle$ と、上図で算出された条件付き平均 $\langle \bar{Y}(w_{[i]}) \rangle$ を用いれば、(4.5)

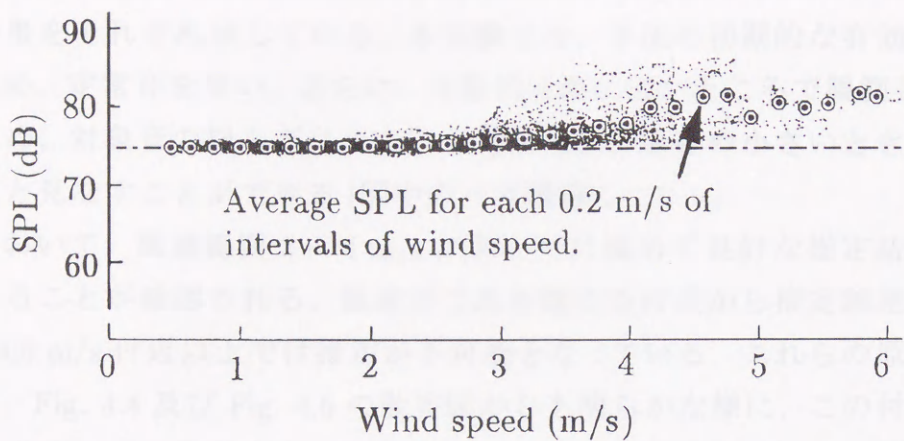


Fig. 4.6 Correlation diagram between the wind speed and the observed sound for the data in Fig. 4.5.

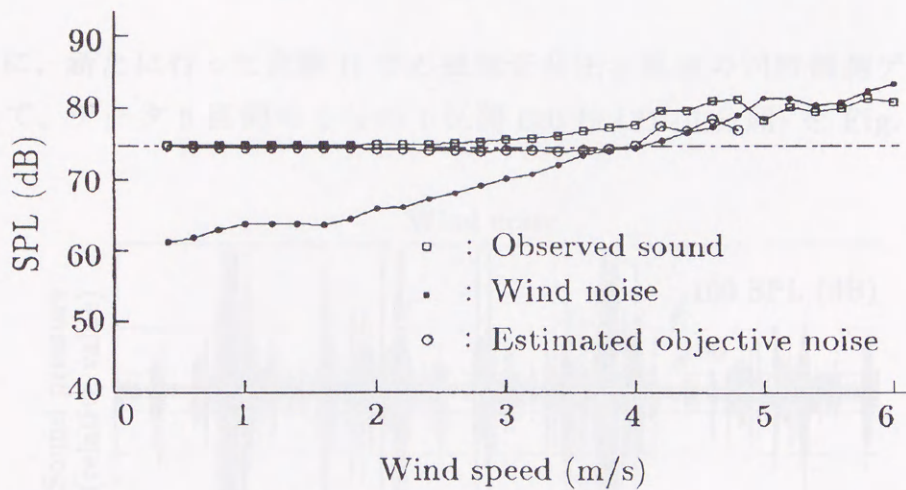


Fig. 4.7 Estimated results of the objective noise by using the proposed method from the observed sound in Fig. 4.6 with the wind noise in Fig. 4.4.

式に対応して、各風速クラスに対する対象音 $\langle \bar{X}(w_{[i]}) \rangle^*$ が次式によって推定される。

$$\langle \bar{X}(w_{[i]}) \rangle^* = \langle \bar{Y}(w_{[i]}) \rangle - \langle \bar{V}(w_{[i]}) \rangle . \quad (4.31)$$

Fig. 4.7 はその推定結果を示したものである。図中 (□) は風雑音が混入した観測値を, (●) は風雑音の推定値を, さらに, (○) は本手法による対象音の推定結果をそれぞれ示している。本実験では, 手法の初期的な有効性を確認するため, 定常音を用い, さらに, 比較的音源に近いところで観測している。このため, 対象音の揺らぎは小さいと考えられ, 風速の小さいときの観測値を真値と見なすことができる (図中の一点鎖線)。

図において, 風速範囲 2 ~ 4 m/s においては極めて良好な推定結果が得られていることが確認される。風速がこれを越える付近から推定誤差が大きくなり, 4.8 m/s 付近以上では推定が不可能となっている。これらの原因の一つとして, Fig. 4.4 及び Fig. 4.6 の散布図からも明らかな様に, この付近以上の風速時のサンプル数が少なく, 実験で算出した条件付き平均値の統計的な信頼性が少ない点があげられる。

4.4.3 パワースペクトルにおける対象音推定結果

初めに, 新たに行った実験 II での風雑音音圧と風速の同時観測データの一例として, データ 9 区間のうちの 1 区間 620 秒 (約 10 分間) を Fig. 4.8 に示

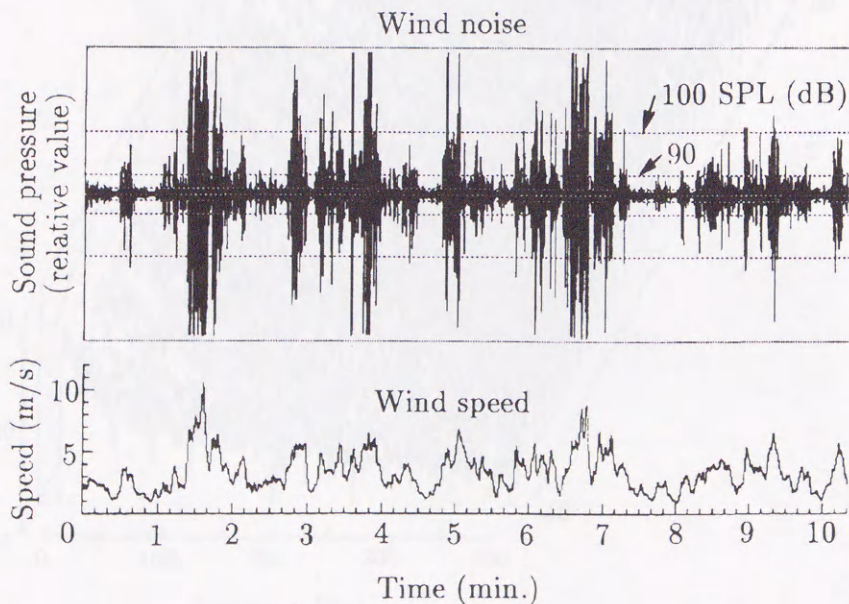


Fig. 4.8 Long time (10 min.) observation of the wind noise and the wind speed.

す。図において、風速と音圧変動の相関関係が明らかである。ここでは、風雑音の変動を騒音計の時定数“slow”の短時間毎のパワースペクトル変動で捉え、風速の大きさとの相関関係を利用して風雑音対策とする。なお、このデータ区間(620秒)の“slow”特性でのオーバーオールSPL値を用いて、風速との相互相関係数を計算した結果、風雑音は $\tau=0.7$ (s)程度後に得られる風速観測値と最大0.82程度の相関係数を持つという結果が得られた。

さて、この様にして得られた風雑音音圧観測値に対して連続FFT解析を行って算出した $S_v(f)$ の一例をFig. 4.9に示している。パワースペクトルに関

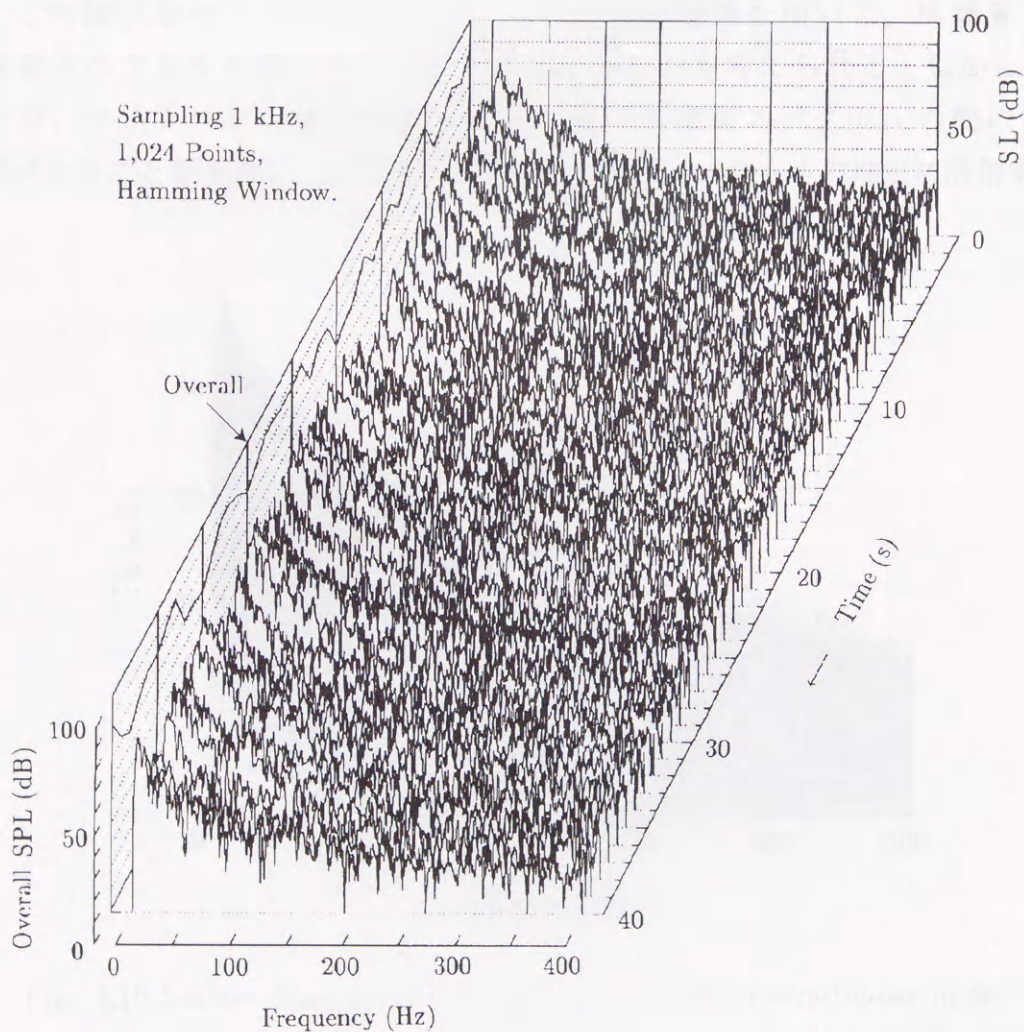


Fig. 4.9 Sequential FFT analyses of wind noise. One spectrum line per one second is shown here, though two lines are calculated in a second.

しては p_0^2 に対するレベル (SL) 値で、オーバーオールに対しては音圧レベル (SPL) 値で示している。なお、FFT 解析に際しては、(1) サンプリング周期を 1 kHz としたこと、(2) 低周波音計測に用いられる “slow” 特性での時定数を考慮し、1 フレームのデータ数を 1,024 点 (1.02 秒間) とし、(3) Hamming ウィンドウを用いて、(4) スペクトルの時間変動を詳細に捉えたいことから、フレーム周期を 0.5 秒と設定した。すなわち、時系列データ 1,024 点のうち、順次、初めの 500 点を捨て、残る 524 点に新しい 500 点を加えて連続 FFT を行った。

いま、風速情報を用いずに、全 9 区間の観測データを用いて前図の様に得られたパワースペクトル成分 $S_V(f)$ の散布図を Fig. 4.10 に示している。この様に分布する風雑音スペクトルの統計情報を用いて、風雑音下の対象音スペクトルを推定する方法を設定することも考えられる。しかし、ここでは、マイクロホン近傍の風速とこの様な風雑音スペクトルの間に相関関係があることを予測し、この関係を捉えて対象音スペクトルの推定に活用する。

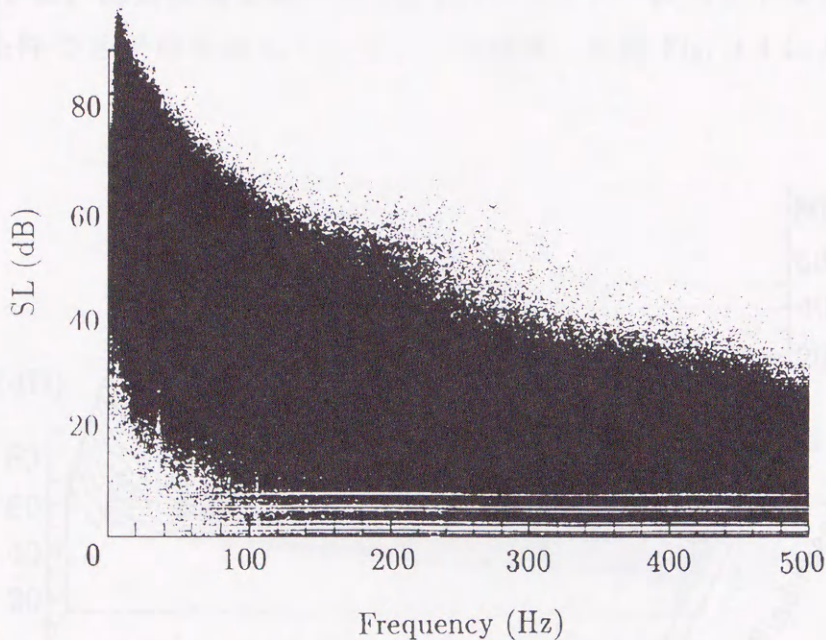


Fig. 4.10 Scatter diagram of the power spectra of the wind noise under breezy conditions: 11,160 frames with frame periods of 0.5 sec. for 93 minutes. The wind speed varied from 0.8 to 10.6 m/s around its average of 3.4 m/s.

まず、風速観測値を予め $\tau = 0.7$ (s) だけシフトさせて、FFT のフレーム長に近い 1 秒間の平均風速 w をフレーム周期 0.5 秒毎に算出し、同時刻のパワースペクトル $S_V(f)$ とのデータ対 ℓ 組からなる集合 Z_S を得る。

$$Z_S = \{(S_V(f)_1, w_1), (S_V(f)_2, w_2), \dots, (S_V(f)_\ell, w_\ell)\} . \quad (4.32)$$

ここでも、(3.12) 式と同様に、便宜的に 0.2 m/s 毎の風速クラス $w_{[j]}$:

$$0.2(j-1) \leq w_{[j]} < 0.2j \quad (j = 1, 2, \dots) ,$$

を設定する。いま、任意の風速クラス $w_{[i]}$ を条件とする m 組のデータからなる部分集合を $Z_S|w_{[i]}$ とする。

$$Z_S|w_{[i]} = \{(S_V(f)_{u_1}, w_{u_1} \in w_{[i]}), (S_V(f)_{u_2}, w_{u_2} \in w_{[i]}), \dots, (S_V(f)_{u_m}, w_{u_m} \in w_{[i]})\} . \quad (4.33)$$

これより、(4.9) 式に対応する条件付きパワースペクトルの平均値 $\langle S_V(f)|w_{[i]} \rangle$ が算出される。

$$\langle S_V(f)|w_{[i]} \rangle = (S_V(f)_{u_1} + S_V(f)_{u_2} + \dots + S_V(f)_{u_m})/m . \quad (4.34)$$

Fig. 4.11 に、風速情報を用いて Fig. 4.10 のパワースペクトルから算出した上式の条件つき平均を示している。この結果、前節 Fig. 4.4 におけるオー

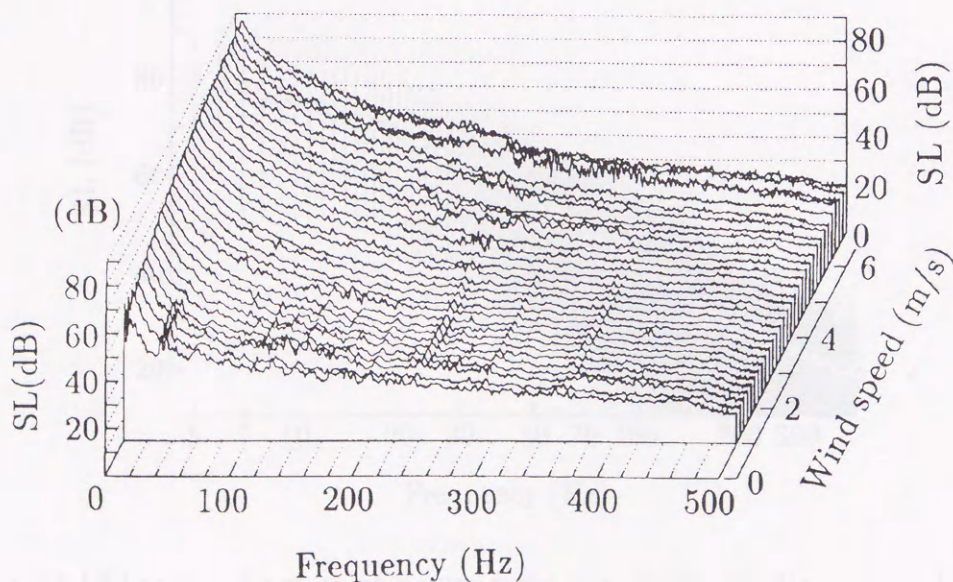


Fig. 4.11 Average power spectra of the wind noise conditioned by the wind speed.

パーオールでの相関関係と同様に、風雑音スペクトルにおいても、風速との相関が明瞭に捉えられる。

図において、本マイクロホンでは、10 Hz 以下ではゲインが低下しているにも係わらず、数 Hz 以下に風雑音スペクトルのピークが表れている。また、風速の増加、減少と共にスペクトル形状が全体としては同じ様なパターンを保ちつつ、そのレベルが増減していることも確認できる。風速が 4 m/s 程度を越えると、100 Hz 近傍以上の周波数域で不規則な雑音成分が表れている。その原因の一つに、約 1 秒の時定数を持つ風速センサでは捉えられない、瞬間的なガスト成分の増加と、これを要因としてウインドスクリーンが動いたことによるマイクロホンとの間の擦過音が考えられる。いま、本図の様な関係がデータベースとして蓄えられるなら、風速情報からマイクロホンに混入する風雑音スペクトルの平均が推定されることになり、実用的価値は大きいと考えられる。

さて、前図の様に、風速と周波数成分毎の $\langle S_V(f) | w_{[i]} \rangle$ をデータベースとするとき、かなり多数のデータを記憶することになる。このため、この風雑音の条件付きスペクトル平均を風速の関数として近似的に捉えておくことも処理の簡易化から有効である。

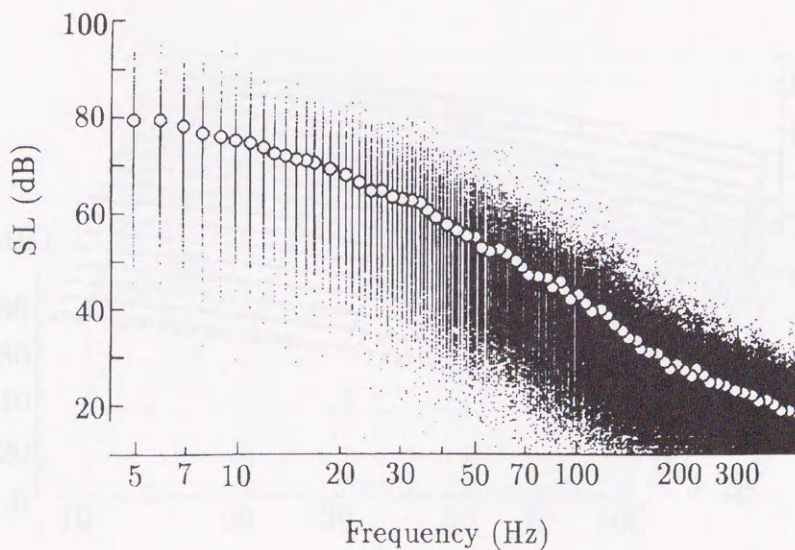


Fig. 4.12 Scatter diagram of power spectrum of the wind noise conditioned by a wind speed range between 3.9 and 4.1 m/s.

Fig. 4.12 は、風速が 3.9 ~ 4.1 (m/s) のときの典型的な風雑音パワースペクトルの散布図である。ここでは、低周波域 10~100 (Hz) のみに着目し、また、周波数軸を対数で表している。図中、(o) はパワースペクトルの平均値をスペクトルレベル SL (dB) で示している。

いま、簡単のため、風速クラスを w と表し、このときの風雑音の条件付き平均スペクトルレベルを $L_V(f, w)$ と表して、次の様な多項式で近似する。

$$L_V(f, w) \triangleq A_0(w) + A_1(w) \ln(f) + \dots + A_n(w) \{\ln(f)\}^n. \quad (4.35)$$

ここに、係数 $A_0(w), A_1(w), \dots, A_n(w)$ は風速 w の関数である。いま、具体的に、 $f=10\sim 100$ (Hz) までの低周波領域に対し、上式の多項式近似として、2次 ($n=2$) 近似を選び、最小2乗法によるあてはめを行った。その結果、風速クラス範囲 3~6 m/s で比較的良好な近似が得られた。

$$L_V(f, w) \simeq A_0(w) + A_1(w) \ln(f) + A_2(w) \{\ln(f)\}^2 \quad (10 \leq f \leq 100), \quad (4.36)$$

$$\left. \begin{aligned} A_0(w) &\simeq 94.4 - 3.47w, \\ A_1(w) &\simeq -12.8 + 4.08w, \\ A_2(w) &\simeq -0.752 - 0.464w, \end{aligned} \right\} \quad (3 \leq w \leq 6). \quad (4.37)$$

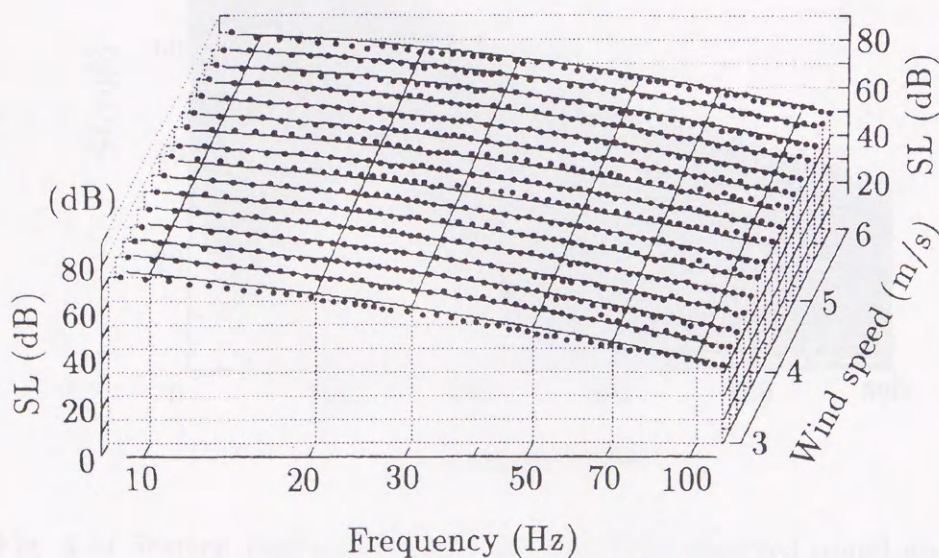


Fig. 4.13 Approximate expression of the average power spectrum of the wind noise as a function of the wind speed by the empirical formula.

Fig. 4.13 にその結果のみを示している。図において (●) は実験データによる平均パワースペクトル (dB) を示し、実線は上式による近似曲線 $L_V(f, w)$ を示す。以上の様に、マイクロホン近傍の風速情報から、風雑音のパワースペクトルの平均値 $\langle S_V(f) | w_{[i]} \rangle$ 又はそのレベルの関数近似値 $L_V(f, w)$ が明瞭に捉えられることが実証される。

さて、低周波対象を風雑音の混入下で観測した全 8 区間のデータに対して、Fig. 4.9 と同様にして連続 FFT 解析を行って $S_Y(f)$ を算出した。これに基づき、風速情報を用いないで Fig. 4.10 と同様に得られたパワースペクトル成分 $S_Y(f)$ の散布図を Fig. 4.14 に示している。この様に分布する $S_Y(f)$ の統計情報を用いて、対象音のスペクトルを推定する方法も考えられる。しかし、ここでは、風速情報を利用して簡易的に対象音のスペクトルを推定する。

いま、観測音のパワースペクトルと風速情報を用いて、(4.32)~(4.34) 式と同様にして条件付平均 $\langle S_Y(f) | w_{[i]} \rangle$ を算出した結果を Fig. 4.15 に示している。

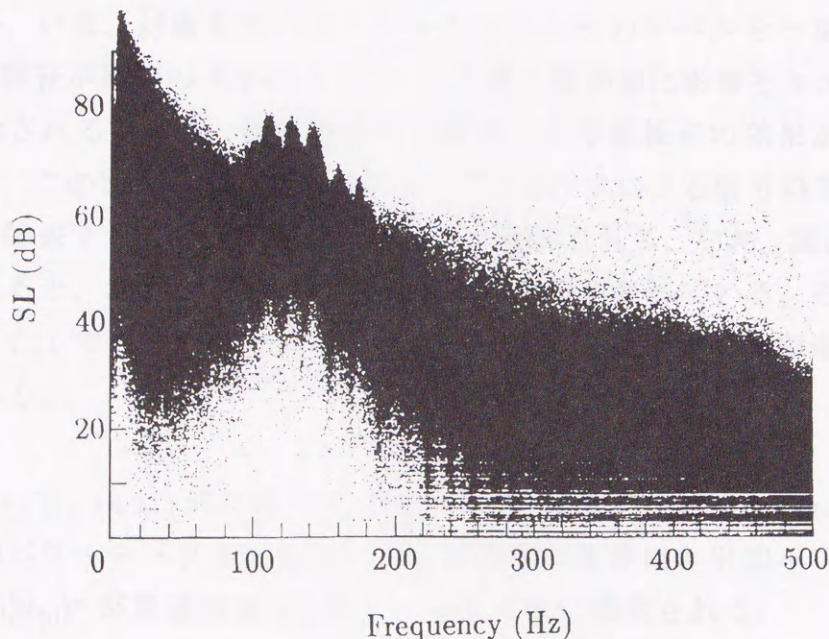


Fig. 4.14 Scatter diagram of power spectra of the observed sound under breezy conditions: 9,920 frames with frame periods of 0.5 sec. for 82.7 minutes. The wind speed varied from 1.0 to 11.6 m/s around its average of 4.0 m/s.

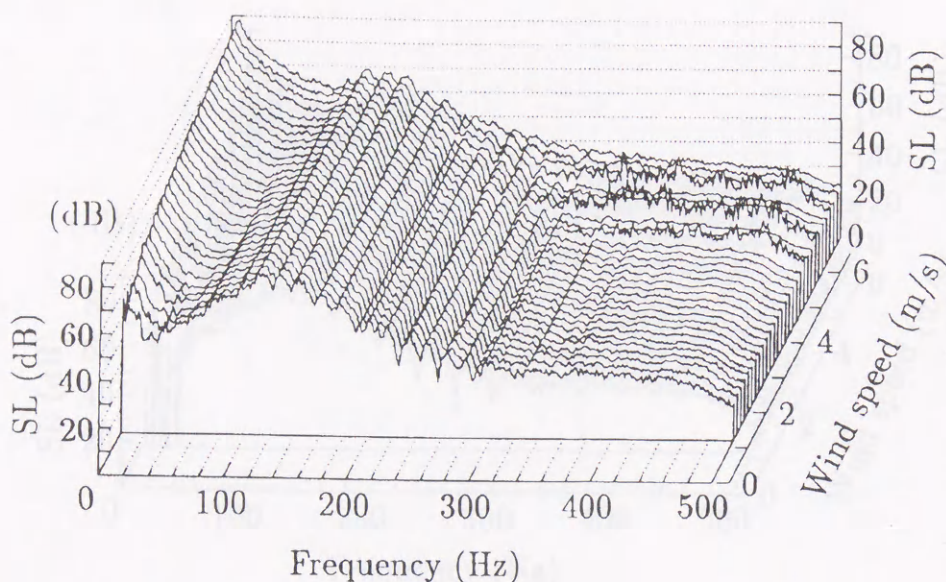


Fig. 4.15 Average power spectra of the observed sound conditioned by the wind speed.

この結果、いま、対象音のパワースペクトルとそのレベルを一定としているため、風雑音が風速の大小によって、どの様に観測値に影響を与えているかが明瞭に示される。特に、低周波域での風速による風雑音の効果が特徴的に捉えられる。この図からも、通常のアナログフィルタによる信号処理により風雑音成分を除去することが困難であることが確認される。なお、風速が 4 m/s 程度を越えると、300 Hz 近傍で不規則な雑音成分が表れている。その主な原因は、Fig. 4.11 でも検討したガスト成分の増加による瞬間的な擦過音によると考えられる。

ここにおいて、(4.11) 式に沿って、Fig. 4.11 のデータベースと Fig. 4.14 の条件付き平均パワースペクトルを用いて、対象音の条件付き平均パワースペクトル $\langle S_X(f) | w_{[i]} \rangle^*$ が風速情報 $w_{[i]}$ 毎に、次式の様に推定される。

$$\langle S_X(f) | w_{[i]} \rangle^* = \langle S_Y(f) | w_{[i]} \rangle - \langle S_V(f) | w_{[i]} \rangle . \quad (4.38)$$

本手法により対象音の平均パワースペクトルを推定した結果を Fig. 4.16 に示している。図において、特に、80 Hz 以下での低周波域において、風雑音が

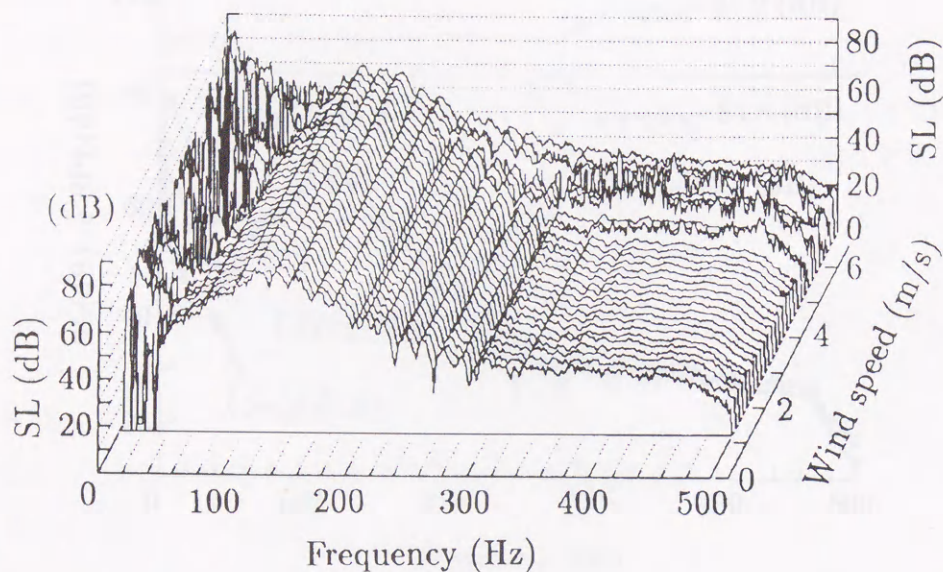


Fig. 4.16 Estimated power spectra of the objective signal based on the conditional average power spectra in Figs. 4.11 and Fig. 4.14.

かなり除去されていることが確認される。なお、風速が 5 m/s 程度を越えて、周波数域 200 ~ 300 Hz 以上の領域で雑音成分が除去されないまま残っている。この成分は低レベルのため推定全体としての影響は少ないと考えられる。

さて、(4.12) 式では、前図の観測結果を周波数成分毎に積分して、風速クラス毎の対象音推定値を算出している。しかし、ここでは、パワースペクトルとしての推定効果を評価するために、まず、風速方向で平均する。すなわち、連続する風速クラス $w_{[\alpha]} \sim w_{[\alpha+h]}$ についての推定スペクトルの平均：

$$\langle S_X(f) \rangle_{[\alpha, \alpha+h]}^* = \frac{1}{h} (\langle S_X(f) | w_{[\alpha]} \rangle^* + \langle S_X(f) | w_{[\alpha+1]} \rangle^* + \dots + \langle S_X(f) | w_{[\alpha+h]} \rangle^*), \quad (4.39)$$

を算出する。同様にして、Fig. 4.15 における (風雑音 + 対象音) の条件付き平均パワースペクトルについての同じ風速クラスについての平均 $\langle S_Y(f) \rangle_{[\alpha, \alpha+h]}$ を算出する。

Fig. 4.17 に、風速クラス 2 ~ 5 m/s に対して以上のようにして算出された $\langle S_X(f) \rangle_{[2,5]}^*$ 及び $\langle S_Y(f) \rangle_{[2,5]}$ を示している。いま、対象音の真値が不明なため、

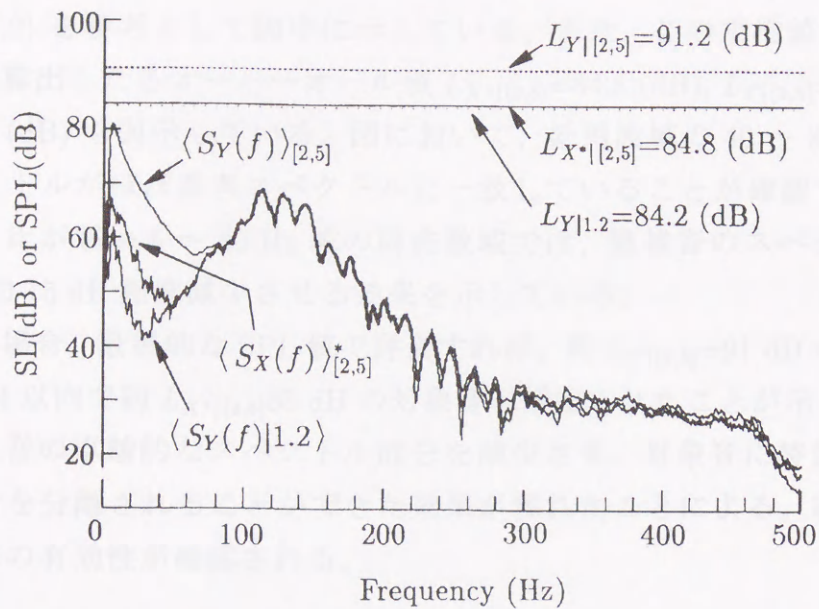


Fig. 4.17 Average spectrum of objective signal estimated by the proposed method: $\langle S_Y(f) \rangle_{[2,5]}$ and $\langle S_X(f) \rangle_{[2,5]}^*$ denote the average spectra of observed sound and estimated objective signal respectively, and $\langle S_Y(f) | 1.2 \rangle$ denotes the reference spectrum. The corresponding SPL values are shown as $L_{Y|[2,5]}$, $L_{X^*|[2,5]}$ and $L_{Y|1.2}$ respectively.

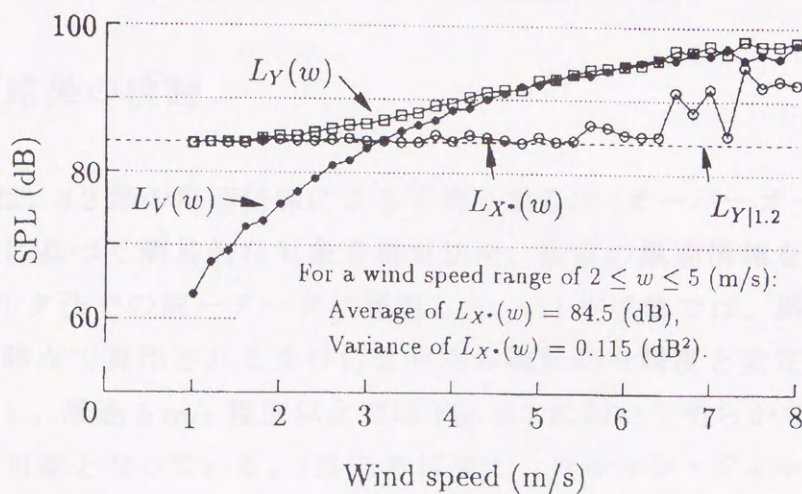


Fig. 4.18 Estimated SPL of the objective signal by the proposed method as a function of wind speed: $L_Y(w)$, $L_V(w)$ and $L_{X^*}(w)$ denote the observed sound, the wind noise and the estimated objective signal respectively. The reference level is shown by a broken line.

風速の小さいときの観測値を近似的な真値と見なして、風速クラス 1.2 m/s での $\langle S_Y(f) | 1.2 \rangle$ を参考として図中に示している。また、この平均値から (4.12) 式に沿って算出した各オーバーオール値 $L_{X^*| [2.5]} = 84.8$ (dB), $L_{Y| [2.5]} = 91.2$ (dB), $L_{Y| 1.2} = 84.2$ (dB) も図示している。図において、低周波域の 40 ~ 80 Hz では、推定スペクトルがほぼ参考スペクトルに一致していることが確認できる。さらに、S/N 比が悪い 5 ~ 40 Hz 域の周波数域では、風雑音のスペクトルレベル (SL) を約 15 dB 程度減少させる効果を示している。

本実験の場合、最終的な SPL 値で評価すれば、約 $L_{Y| [2.5]} = 91$ dB の観測値から誤差 1 dB 以内で約 $L_{X^*| [2.5]} = 85$ dB の対象音が推定されたことが示される。これは、風雑音の卓越的なスペクトル成分を減少させ、対象音に特徴的なスペクトル成分を分離されることができた効果が現れたことによる。以上の結果から本手法の有効性が確認される。

他方、Fig. 4.18 は、風速の大小による本手法の有効性を検討するため、Fig. 4.11, Fig. 4.15, Fig. 4.16 の実験結果を用いて (4.12) 式に沿って、それぞれ、各風速クラス (簡単のため w と表す) 毎の SPL 値 $L_V(w)$, $L_Y(w)$, $L_{X^*}(w)$ を比較したものである。図においても、風速が小さく真値に近いと考えられるレベル $L_{Y| 1.2}$ と比較して、風速が 2 ~ 5.5 m/s 程度までの範囲では、本手法によってかなり良好な推定結果が得られていることが確認できる。

4.4.4 推定結果の検討

実験 I では、4.2 節の風速情報による平均 2 乗音圧 (オーバーオール) での条件付き平均に基づく簡易的な対象音推定法を、前章の風速情報を用いるカルマン・フィルタ法での同一データに適用した。(1) 本手法では、風雑音の学習時点と計測時点で算出される条件付き平均の統計的な精度と安定性が欠けることも原因し、風速 5 m/s 程度以上では Fig. 4.7 において明らかなように、推定が全く不可能となっている。(2) これに対し、カルマン・フィルタの利用による前章の結果 Fig. 3.8 では、部分的にも対象音が推定できることが確認できる。(3) また、本手法は原理的に、対象音がほぼ一定レベルであることを適用条件とする一方、前章の手法では、この制約を設けていない点にも特徴が

ある。以上の問題点にもかかわらず、本手法では、風速情報を単純に (4.31) 式
 の加算関係に利用することにより、かなり良好な推定結果を得ている。対象
 音レベルが一定で、ある程度の大きさがある場合には、手法の簡易性から本
 手法の適用に大きな利点がある。

実験 II では、4.3 節の風速と風雑音のパワースペクトルと間の相関情報を利用
 する手法の有効性を Fig. 4.17 及び Fig. 4.18 で確認した。本手法の利点を比
 較するため、風速情報を用いなくて、単純に、対象音パワースペクトルの平
 均推定値 $\langle S_X(f) \rangle^*$ を求める試みを行った。いま、Fig. 4.14 及び Fig. 4.10 での
 観測値及び風雑音のパワースペクトルの平均を、それぞれ $\langle S_Y(f) \rangle, \langle S_V(f) \rangle$ と
 すれば、 $\langle S_X(f) \rangle^*$ は以下の様に推定される。

$$\langle S_X(f) \rangle^* = \langle S_Y(f) \rangle - \langle S_V(f) \rangle . \quad (4.40)$$

その結果を Fig. 4.19 に示している。図において、80 Hz 付近以下の低周波域
 では風雑音 SL において 2 ~ 3 dB 程度除去している効果が確認される。また、

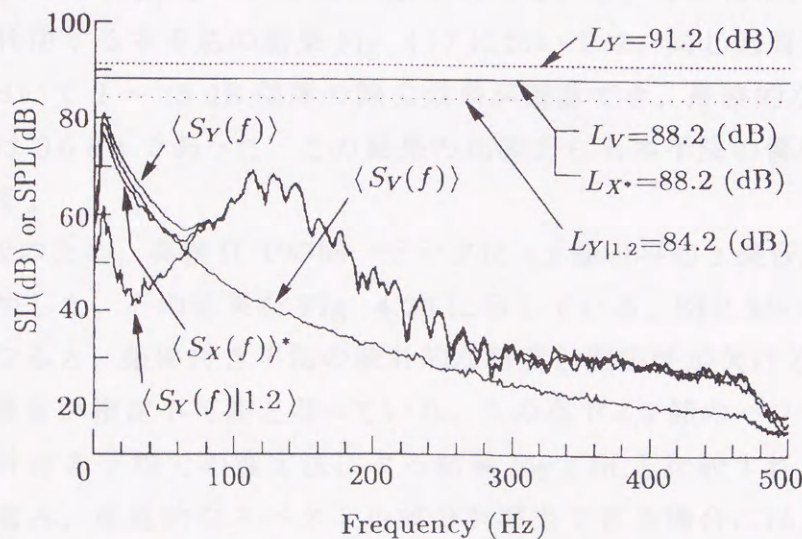


Fig. 4.19 Estimated average spectrum of objective signal by the method
 when no information on wind speed is used: $\langle S_Y(f) \rangle, \langle S_V(f) \rangle$ and
 $\langle S_X(f) \rangle^*$ denote the average spectra of the observed sound, the wind
 noise and the estimated objective signal respectively; and $\langle S_Y(f) \rangle|_{1.2}$
 denotes the reference. The corresponding SPL values are shown as L_Y ,
 L_V, L_{X^*} and $L_{Y|_{1.2}}$ respectively.

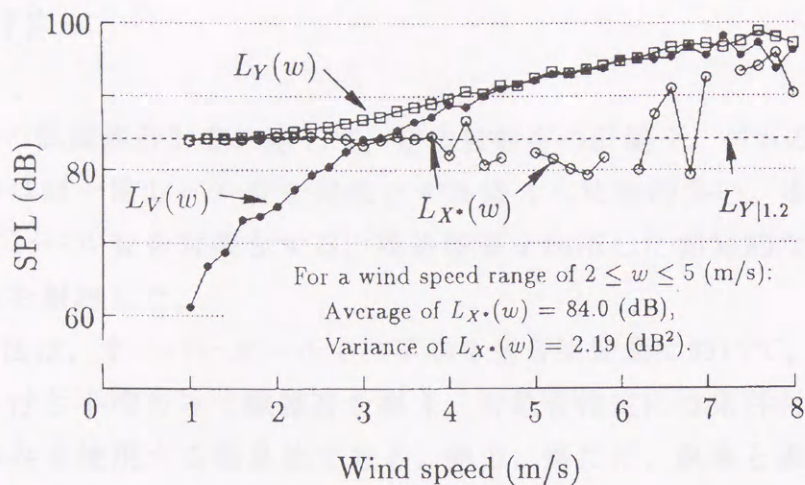


Fig. 4.20 Estimated SPL level of objective signal by the previously reported static method: $L_Y(w)$, $L_V(w)$ and $L_{X^*}(w)$ denote the observed sound, the wind noise and the estimated objective signal respectively. The reference level is shown by a broken line.

最終的な SPL での対象音の推定値 $L_{X^*}=88.2$ (dB) が得られ、近似的な対象音の真値 $L_{Y|1.2}=84.2$ (dB) との誤差は 4 dB となっている。しかしこれに対して、風速情報を利用する本手法の結果 Fig. 4.17 においては、同じ低周波域では風雑音 SL において 2 ~ 15 dB 程度の除去効果が確認でき、最終的な SPL 値での推定誤差は 0.6 dB であった。この結果の比較からも本手法の優位性は歴然と確認される。

次に、比較のため、実験 II での同一データに 4.2 節の平均 2 乗音圧での簡易推定法を適用した。その結果を Fig. 4.20 に示している。図において、風速 4 m/s 以上となると、条件付き平均の統計的な精度と安定性が欠けることから、部分的に対象音が推定不可能となっている。この点で 4.3 節のパワースペクトルによる条件付き平均での推定法による結果 Fig.4.18 と比較すれば、本手法が柔軟性に富み、卓越的なスペクトル成分が検出できる場合には、何らかの推定値が得られる利点がある。しかし、データ処理の簡易性の利点から評価すれば、遙かに前者が優れている。

以上の結果、対象音が一定レベルを示す場合に対して、風速情報を利用する 2 種類の条件付き平均による風雑音対策の有効性と手法の得失が確認された。

4.5 むすび

自然風下の低周波音計測に際して、定常放射音の計測や、ダムの放水音、機械音などのほぼ一定レベル音を対象とする場合も比較的多い。本章では、この様な一定レベル音を対象とする、風速情報を利用した簡易的な2種類の風雑音対策法を検討した。

第1の方法は、オーバーオールでの平均2乗音圧変量において、風速を条件とする条件付き平均のみで風雑音を捉え、対象音推定には条件付きパワー加算の原理のみを使用する簡易法である。他方、新たに、風速と風雑音パワースペクトル間の相関関係を実証した。第2の方法は、これに基づき風雑音パワースペクトルを風速による条件付き平均として捉え、スペクトル加算の原理のみを使用する簡易法である。ここでは、パワースペクトル算出に際して問題となる、振幅飽和観測値から元のパワースペクトルを推定する一手法も検討した。

各手法の有効性は、前章での実験I及び、新たに行った実験IIにより確認した。この結果、対象音のレベル、パワースペクトルが共にほぼ一定のときには、風速情報に基づくパワースペクトルの条件付き平均を用いる第2の手法の優位性が示された。

本研究の結果、風雑音対策として風速情報を利用する方法がほとんど見受けられない中で、対象音がほぼ一定レベルであるなら、この利用により、(1) 風速と風雑音の平均2乗音圧、又は、(2) 風速と風雑音のパワースペクトル間の相関特性を利用して、簡易的に対象音の平均レベルがかなり効果的に推定できることが実証された。

今後の課題として以下の諸点の検討が残されている。すなわち、本手法では、簡易的に対象音の平均レベルのみを推定している。これは、騒音エネルギーの時間平均に基づく等価騒音レベル (L_{eq}) 評価量^[95]とも直接対応すると言える。しかし、推定法として単純に平均値のみを利用するため、S/N比が悪くなってくると、計測器のバイアスの揺らぎやキャリブレーションの影響を敏感に受けるなどの実用上の限界もある。この点では、対象音や風雑音に関する動特性をシステム方程式に反映させてきめ細かく、時々刻々対象音を推定す

る、前章でのカルマン・フィルタの優位性も明らかである。従って、対象音の性質や手法の簡易性、推定精度の限界などの面で、各手法の合理的な使い分けや相補的な使用法の検討が必要と考えられる。さらに、振幅の飽和した観測値から元のスペクトルを推定するアルゴリズムの実行を DSP などの信号処理プロセッサの活用によってより高速化する実用上の問題も残されている。

風雑音の特徴成分抽出に基づく推定法

3.1 まえがき

近海航行の具体的な防衛法については、まだ固執的に確立されていないと言えよう。しかし、実際の計測においては「オクターブ帯の音圧レベル(オクターブ帯域音圧レベル、オクターブ SPL^[10])」を計測することが多い。最近(1997年)制定された、我が国における騒音に関する実用規格^[11]においても、「騒音の計測につきに関連する測定量」としてはオクターブ SPL を測定する。「人体に対する影響に関連する測定量」としては必要に応じてオクターブ SPL を測定すると規定された。他方、同じ実用規格において、騒音でのこの計測に関して、「騒音計測用の防風スクリーンを装着しても風雑音の低減効果は少ないのが普通であるから、風の強い時は測定するのが望ましい」とされている。しかしながら、風の強くなる時にも防風効果を測定しなければならぬ場合もあり、防風装置計測の実際の立場から、オクターブ SPL 計測での防風効果の低減を抑制する工夫の必要性が大きいとされる。

本章では、以上の背景から、騒音計測に多用される「オクターブ、1/3 オクターブ帯の音圧レベル計測を取り上げ、防風効果の計測や対策法を系統的に検討する。すなわち、まず、(i) マイクロホン系での観測する風雑音を推定する工夫があり、結果的に得られる(対象音+風雑音)の観測結果自身の中に見いだして活用しようとする。新たな一断片的防風対策法を検討する。また、これと対照的に、(ii) マイクロホン近傍の風雑音と風雑音前に置ける高次振動情報を抽出して反映させて防風装置の導入に基づく一断片防風対策法を検討する。

第5章

風雑音の特徴成分抽出に基づく推定法

5.1 まえがき

低周波音の具体的な計測法については、未だ国際的に確定されていないと言う実情がある。しかし、実際の計測においては1オクターブ毎の音圧レベル(オクターブ帯域音圧レベル, オクターブBPL^[56])を計測することが多い。最近(1997年)制定された, 我が国における測定に関する実用規格^[12]においても, 「建物のがたつきに関連する測定量」としてはオクターブBPLを測定する, 「人体に対する影響に関連する測定量」としては必要に応じてオクターブBPLを測定すると規定された。他方, 同じ実用規格において, 屋外でのこの計測に関して, 「騒音計測用の防風スクリーンを装着しても風雑音の低減効果は少ないのが普通であるから, 風のない時に測定するのが望ましい」とされている。しかしながら, 風のあるときにも低周波音を測定しなければならない場合もあり, 低周波音計測の実際的立場から, オクターブBPL計測での簡易的風雑音対策に関する研究の必要性が大きいと言える。

本章では, 以上の背景から, 騒音計測に多用される1オクターブ, 1/3オクターブなどのBPL計測を取り上げ, 簡易的な2種類の風雑音対策法を実験的に検討する。すなわち, まず, (i) マイクロホンに混入する風雑音を推定する手掛かりを, 結果的に得られる(対象音+風雑音)の観測結果自身の中に見いだして活用しようとする, 新たな一簡易的風雑音推定法を検討する。また, これと対照的に, (ii) マイクロホン近傍の風速と風雑音間に潜在する高次相関情報を抽出して反映させた拡張型回帰理論の導入に基づく一対象音推定法を検討する。

5.2 風雑音の特徴 BPL を利用した推定法

いま，中心周波数 f_m の 1 オクターブ，1/3 オクターブなどの周波数帯域を B_{f_m} と略記する。この帯域において，風雑音混入下の対象音（対象音＋風雑音）を観測した瞬時音圧を $p_{Y_{B_{f_m}}}(t)$ と表す。この BPL 値を $L_{Y_{B_{f_m}}}$ と表し，これに対応する平均 2 乗音圧値を $Y_{B_{f_m}}$ と表わせば (4.1) 式と同様に，

$$L_{Y_{B_{f_m}}} = 10 \log \frac{Y_{B_{f_m}}}{p_0^2}, \quad Y_{B_{f_m}} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{Y_{B_{f_m}}}^2(t) dt,$$

の関係がある。ここに， T は “fast”，“slow” などの騒音計の時定数であり， $p_0 = 20$ (μPa) は基準音圧である。いま，対象音 BPL 値 $L_{X_{B_{f_m}}}$ 及び風雑音 BPL 値 $L_{V_{B_{f_m}}}$ に対応する平均 2 乗音圧を，それぞれ $X_{B_{f_m}}$ 及び $V_{B_{f_m}}$ と表せば，風雑音下の対象音観測値は対象音と風雑音間の独立性に基づき公知の加算関係で表される。

$$Y_{B_{f_m}} (= p_0^2 10^{\frac{L_{Y_{B_{f_m}}}}{10}}) = X_{B_{f_m}} + V_{B_{f_m}}. \quad (5.1)$$

この観測値 $Y_{B_{f_m}}$ から，不規則に揺らぐ風雑音成分 $V_{B_{f_m}}$ を如何に除去し，対象音成分 $X_{B_{f_m}}$ のみを推定するかが問題となる。本研究では，風雑音混入下の一定レベルの対象音 BPL 値を推定する基本的な問題を考え，特に手法の簡易化を目指し，風雑音に関する低次の統計情報のみを用いる場合を考える。

初めに，第 4 章 Fig. 4.11 における様な風雑音のスペクトル計測結果において，風速の大小変動に伴い，周波数の広い帯域に渡ってスペクトル成分のレベル (SL) 変動がほぼ同様な大小変動を示す事実に着目する。これによれば，風雑音のある帯域でのレベル変動と他の帯域でのレベル変動との間にかなり強い相関関係があることが予測される。

いま，風雑音の卓越成分が観測される帯域 B_{f_i} を便宜的に “特徴帯域” と呼び，特徴帯域での風雑音 BPL がある時刻にある値 $L_{V_{B_{f_i}}} = \alpha$ を取るとき，これを参照して同時刻における別な帯域 B_{f_k} での風雑音の平均 2 乗音圧値 $V_{B_{f_k}}$ の揺らぎを条件付確率分布関数 $P(V_{B_{f_k}}|L_{V_{B_{f_i}}}=\alpha)$ で捉える。具体的に，この条件付き平均 $\langle V_{B_{f_k}}|L_{V_{B_{f_i}}}=\alpha \rangle$ のみを示せばこれは直ちに次の様に算出される。

$$\langle V_{B_{f_k}}|L_{V_{B_{f_i}}}=\alpha \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} V_{B_{f_k}} dP(V_{B_{f_k}}|L_{V_{B_{f_i}}}=\alpha). \quad (5.2)$$

同様に、風雑音混入下における対象音の観測に際しても、風雑音の特徴帯域での BPL 値の同時撰取に基づき、これが同じある値 $L_{YB_{f_i}} = \alpha$ を取るとき、別の帯域 B_{f_k} における観測音（風雑音+対象音）の平均 2 乗音圧 $Y_{B_{f_k}}$ の揺らぎを、条件付確率分布関数 $P(Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha)$ で捉える。同じく、この条件付き平均 $\langle Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle$ のみを示せば直ちに次の様に算出される。

$$\langle Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} Y_{B_{f_k}} dP(Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha). \quad (5.3)$$

さて、風雑音成分の卓越する特徴帯域での観測値 $L_{YB_{f_i}}$ は、風雑音が大きければ大きいほど、当然、この内に占める風雑音成分は大きくなる。いま、そのほとんどが風雑音で占められるとすれば、次の様に近似できる。

$$L_{VB_{f_i}} \simeq L_{YB_{f_i}} \quad (L_{XB_{f_i}} \ll L_{VB_{f_i}}). \quad (5.4)$$

すなわち、この場合、(5.3) 式のうちに混入する風雑音の条件付き平均値を、事前に算出可能な (5.2) 式を用いて近似推定できる。

結局、風雑音の特徴帯域における BPL 値 $L_{YB_{f_i}} = \alpha$ が観測されたとき、帯域 B_{f_k} での対象音の条件付き平均 2 乗音圧の推定値 $\langle X_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle^*$ が、(5.4) 式の近似を条件としつつ (5.1) 式の加算関係から算出される。

$$\begin{aligned} \langle X_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle^* &= \langle Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle - \langle V_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle \\ &\simeq \langle Y_{B_{f_k}}|L_{YB_{f_i}}=\alpha \rangle - \langle V_{B_{f_k}}|L_{VB_{f_i}}=\alpha \rangle. \end{aligned} \quad (5.5)$$

上の推定法は、簡易的に条件付き平均のみを用いているけれども、風雑音の帯域スペクトル間の相関特性を活用しようとする、全く新しい試みである。

本手法が適用可能か否かの要件は (5.4) 式を満足する風雑音の特徴帯域が得られるかどうかである。この点では、人工的な帯域雑音信号を使う音響伝搬特性の測定などでは、信号帯域以外の帯域に比較的容易に特徴帯域が設定出来るものと考えられる。また、一般に、風雑音の周波数パワースペクトル成分は超低周波域でかなり大きく、風雑音が大ききときには、この帯域では対象音や暗騒音パワーよりも支配的になると考えられることから、特に実用性を目指してこの超低周波域を風雑音の特徴帯域とすることも考えられる。

5.3 風速 - 風雑音間の高次回帰関係を利用した推定法

ここでは前節と対照的に、マイクロホン近傍の風速 w の観測に基づき、風速と風雑音の BPL 間の相関関係を用いて風雑音混入下の対象音を推定する手法を検討する。

まず、風速がある値 $w = \beta$ を取るときの帯域 B_{f_k} での風雑音の揺らぎを条件付き確率分布関数 $P(V_{B_{f_k}}|w=\beta)$ で捉える。また、風雑音混入下における対象音計測においてもマイクロホン近傍の風速を観測し、同様に、風速が $w = \beta$ である時の帯域 B_{f_k} における（対象音+風雑音）の観測値の揺らぎを条件付き確率分布関数 $P(Y_{B_{f_k}}|w=\beta)$ を用いて捉える。具体的に、これらの条件付き平均 $\langle V_{B_{f_k}}|w=\beta \rangle$ 及び $\langle Y_{B_{f_k}}|w=\beta \rangle$ のみを示すなら、それぞれ直ちに次の様に算出される。

$$\langle V_{B_{f_k}}|w=\beta \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} V_{B_{f_k}} dP(V_{B_{f_k}}|w=\beta), \quad (5.6)$$

$$\langle Y_{B_{f_k}}|w=\beta \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} Y_{B_{f_k}} dP(Y_{B_{f_k}}|w=\beta). \quad (5.7)$$

本節の推定手法では、この条件付き平均を如何にきめ細かく抽出するかが最も重要となる。それには、個々の実測データが特徴的に示す特殊性をまず重視して実験的に算定する第3章、第4章での手法と、これとは別に、出来るだけ普遍的な枠組をまず理論的に見い出して、実測データが個々に持つ特殊性はその枠組み内の各パラメータの内にのみ反映させる手法とがある。後者においては、(5.6) 式を例に取り、風速 w と風雑音 V 間に存在する低次から高次への相互相関情報を反映させた階層型の拡張型回帰理論を導入する。すなわち、この場合の回帰関数は次のごとく与えられる。まず、 w と V の同時分布 $P(V, w)$ を予め統計的な2変量 Hermite 直交展開表現しておく。

$$P(V, w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left[-\frac{(w - \mu_w)^2}{2\sigma_w^2}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_V} \exp\left[-\frac{(V - \mu_V)^2}{2\sigma_V^2}\right] \\ \cdot \left\{ 1 + \sum_{m+n \geq 1} A_{mn} H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right) H_n\left(\frac{V - \mu_V}{\sigma_V}\right) \right\}, \quad (5.8a)$$

$$A_{mn} = \left\langle \frac{H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right)}{\sqrt{m!}} \cdot \frac{H_n\left(\frac{V - \mu_V}{\sigma_V}\right)}{\sqrt{n!}} \right\rangle. \quad (5.8b)$$

ただし、 $\mu_V (\triangleq \langle V \rangle)$, $\mu_w (\triangleq \langle w \rangle)$, $\sigma_V^2 (\triangleq \langle (V - \mu_V)^2 \rangle)$ 及び $\sigma_w^2 (\triangleq \langle (w - \mu_w)^2 \rangle)$ は各平均及び分散である。次に、(5.8a,b) 式の周辺分布: $p(w) = \int_{-\infty}^{\infty} p(V, w) dV$ を算定した後、 w 値を任意に固定した V の条件付き分布が導出される。

$$P(V|w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_V} \exp\left[-\frac{(V - \mu_V)^2}{2\sigma_V^2}\right] \cdot \frac{1 + \sum_{m+n \geq 1} \sum \frac{A_{mn}}{\sqrt{m!n!}} H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right) H_n\left(\frac{V - \mu_V}{\sigma_V}\right)}{1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_{m0}}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right)} \quad (5.9)$$

結局、目的の V に関する条件付き平均値の理論的枠組みが予め次のごとく設定され得る (分母 $A_{10} = A_{20} = 0$)。

$$\langle V|w=\beta \rangle = \mu_V + \sigma_V \cdot \left. \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_{m1}}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right)}{1 + \sum_{m=3}^{\infty} \frac{A_{m0}}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right)} \right|_{w=\beta} \quad (5.10)$$

ここに、 $A_{m0} (m \geq 3)$ は w 自身に関する歪度、尖度、 \dots , などの μ_w 周りの高次モーメント量であり、 V と w 間の低次及び高次相互相関情報は各パラメータ A_{m1} の内でのみ反映されることとなる。

この様にして、風雑音下における対象音の条件付き平均 2 乗音圧の推定値 $\langle X_{fk}|w=\beta \rangle^*$ は (5.1) 式の加算関係を用いて、直接次の様に得られる。

$$\langle X_{fk}|w=\beta \rangle^* = \langle Y_{fk}|w=\beta \rangle - \langle V_{fk}|w=\beta \rangle \quad (5.11)$$

上の推定法は、風速 w と風雑音 V 間の低次、高次の相互相関情報を反映させた回帰関係に基づく推定法として設定している。しかし、実用的に低次統計量のみを使用する場合には、マイクロホン近傍の風速情報を利用する第 4 章 4.2 節における、風雑音音圧レベル (SPL) との相関情報の利用に基づく推定法と同一路線にある手法といえる。

5.4 実験的考察

5.4.1 実験方法

本手法の有効性を確認するため、風雑音のみの観測に基づく解析、及び、既知対象音と風雑音の合成観測値に基づく対象音推定を行った。さらに、本手法を屋外での風雑音混入下の対象音の実観測値に適用して対象音推定を行った。

風雑音のみのデータ、及び、風雑音の混入する帯域対象音のデータは、マイクロホンとこれに治具で固定したトランジスタ式微風速計からなる計測アセンブリ(第3章, Fig. 3.2 参照)を用いて観測された, 第4章 4.4.1 節, 実験 II での観測結果を用いた。すなわち, 風雑音及び対象音は, “1/2 インチ” コンデンサマイクロホンに直径約 9 cm のウィンドスクリーンを装着した精密騒音計(リオン製 NA-61, WS-02)を用い, プリアンプの周波数特性 “flat” (10 Hz ~ 20 kHz) にて観測した音圧出力を PCM データレコーディングシステム(NF 製 RP-882) にて記録した。風速は, トランジスタ式微風速計(リオン製 AM-03, センサ時定数約 1 秒)を用いて, 風速出力を同様に記録した。風雑音及び風雑音混入下での対象音観測は建物屋上にて実施し, 対象音としてはスピーカーから放射された一定レベルの帯域雑音を用いた。計測データは便宜的に 620 秒間を 1 区間として, 風雑音のみの計測に関しては 9 区間に, また, 風雑音下の対象音計測に関しては 8 区間に区分して用いた。

本研究では, 特に, 計算機上で音圧合成した(風雑音 + 対象音)の観測値から対象音のみを推定する実験を加える。すなわち, 真値の既知な対象音を, 5.2 節での風雑音の特徴 BPL に基づく推定法と, 5.3 節での風速情報の利用に基づく推定法とによって推定することにより, 両手法の得失をより精密に比較する。風雑音の影響を受けない対象音のデータ列(真値)は, 室内にてスピーカーから放射された一定レベルの帯域雑音音圧を観測し, これを 1 kHz のサンプリング周波数で約 10 分間 A/D 変換することによって得た。これと, 風雑音のみの音圧データ列とを計算機上で順次加算し音圧合成の観測値列を得た。

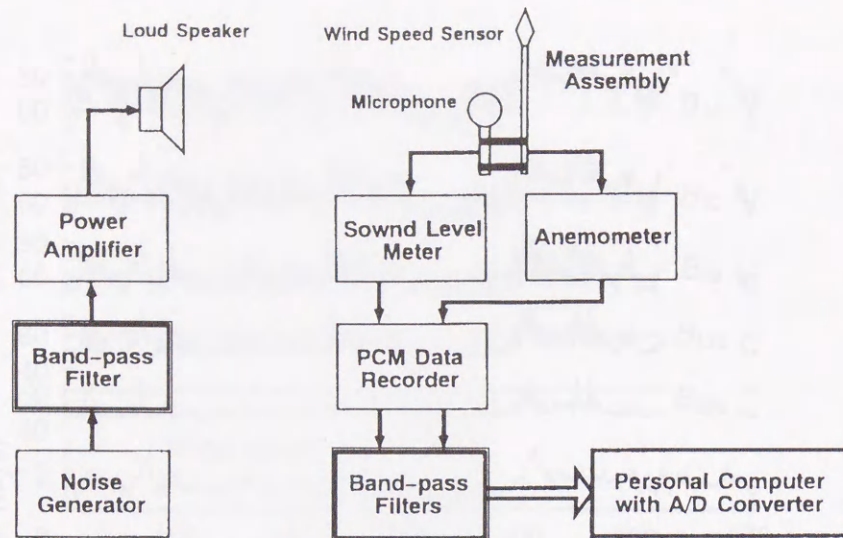


Fig. 5.1 Experimental block diagram of the measurement of low-frequency octave BPL in wind noise.

周波数帯域幅は、低周波音計測の実用規格^[12]によって1オクターブとし、一部超低周波域と低周波域外の高域を含む5帯域 ($B_{f_m} : f_m = 16, 32, 63, 125, 250$ (Hz)) を選んだ。各帯域でのBPL値(及び、対応する平均2乗音圧値)については、a) 通常のBPL計測で行われる処理と同様に、アナログ音圧信号を帯域毎のフィルタ(NF製FV-664)で濾波して得た出力をまず得て、これをA/D変換(サンプリング周波数1kHz)した後、“slow”特性に対応する値を算出する方法と、b) 音圧データ列を直接FFT解析(サンプリング周波数1kHz、データフレーム1,024点、フレーム周期0.5秒、Hammingウィンドウ)した後、近似的な“slow”特性値を算出する方法の2つの方法を適宜用いた。なお、帯域音圧レベルBPL、及びFFTによるパワースペクトルレベルSL算出のための基準値は第4章4.4.1と同様にして得た。Fig. 5.1に実験系統図を示している。

5.4.2 風雑音の2種類の相互相関特性

初めに、任意区間の10分間についての風雑音オクターブBPL及び風速の時間変動波形をFig. 5.2に示している。図において、風雑音の各オクターブBPLが風速の大小と共に同様な大小変化を示していることが確認できる。こ

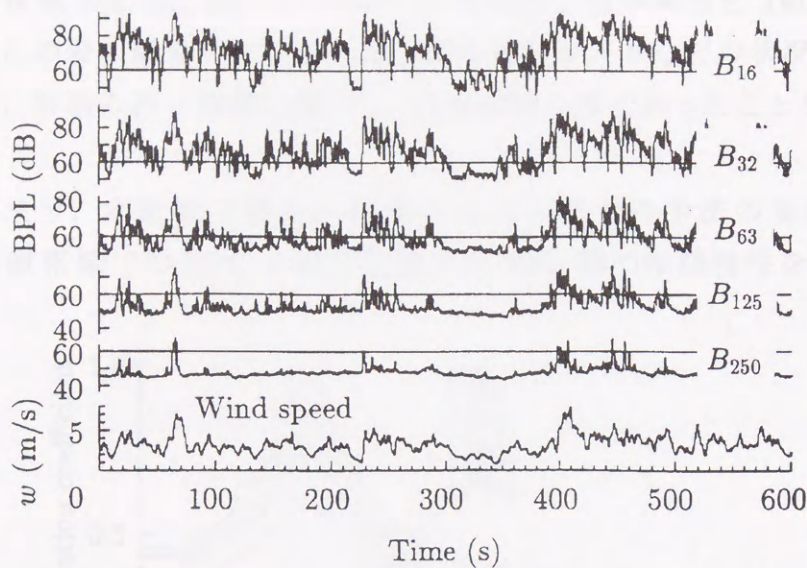


Fig. 5.2 Example of observed octave BPLs ($L_{VB16} \sim L_{VB250}$) of wind noises and the wind speed in the vicinity of the microphone.

Table 5-1 The averages and standard deviations of the observed wind speed and the octave band wind noises for every 10 minutes data.

Description	Data block number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
μ_w (m/s)	3.21	2.54	3.34	3.48	3.47	3.40	3.52	3.69	3.75
σ_w (m/s)	1.12	1.09	1.49	1.37	1.29	1.31	1.38	1.45	1.31
$L_{\langle VB16 \rangle}$ (dB)	80.3	76.2	81.0	81.8	82.4	81.2	80.8	82.7	82.8
$\langle L_{VB16} \rangle$ (dB)	71.8	65.7	71.4	73.7	74.5	72.9	72.9	74.4	74.9
$\sigma_{L_{VB16}}$ (dB)	10.4	10.7	11.0	10.5	10.2	9.9	10.0	10.9	9.9
$L_{\langle VB32 \rangle}$ (dB)	75.5	71.4	76.7	77.7	78.1	77.2	76.2	78.7	78.8
$\langle L_{VB32} \rangle$ (dB)	66.5	62.8	66.5	68.7	69.2	67.5	67.6	69.6	69.6
$\sigma_{L_{VB32}}$ (dB)	9.4	8.3	10.3	10.1	10.1	9.8	9.6	10.3	10.0
$L_{\langle VB63 \rangle}$ (dB)	68.4	64.2	70.3	70.9	71.3	71.0	69.4	72.0	72.4
$\langle L_{VB63} \rangle$ (dB)	60.1	57.6	60.4	62.0	62.4	60.9	61.1	63.1	63.0
$\sigma_{L_{VB63}}$ (dB)	7.6	6.0	8.7	8.6	8.9	8.6	8.1	9.1	9.0

μ_w : average of wind speed w , σ_w : standard deviation of w , $L_{\langle VBf_m \rangle}$: BPL of average of V_{Bf_m} , $\langle L_{VBf_m} \rangle$: arithmetic average of L_{VBf_m} , $\sigma_{L_{VBf_m}}$: standard deviation of L_{VBf_m} .

の様な観測結果の 10 分毎 9 区間について、風速と風雑音 BPL (比較的レベルの大きい帯域 B_{16} , B_{32} , B_{63} のみ示す) の各平均と標準偏差を **Table 5-1** に示している。この表の風速データからは、風の息やガストなどの状況は判断できないまでも、計測の約 2 時間に渡って、ほぼ同様な風であったことが確認される。

さて、まず、本研究で新たに提案する 2.1 節での手法の基礎となる、風雑音の特徴帯域での BPL と他の帯域での BPL 間の相関特性を確認する。い

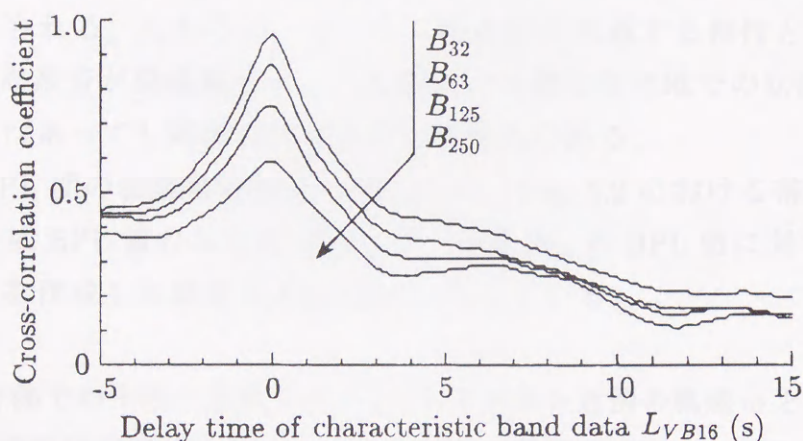


Fig. 5.3 The linear cross-correlation coefficients between the characteristic (reference) BPL (L_{VB16}) and other BPLs ($L_{VB32} \sim L_{VB250}$) of the octave band wind noises.

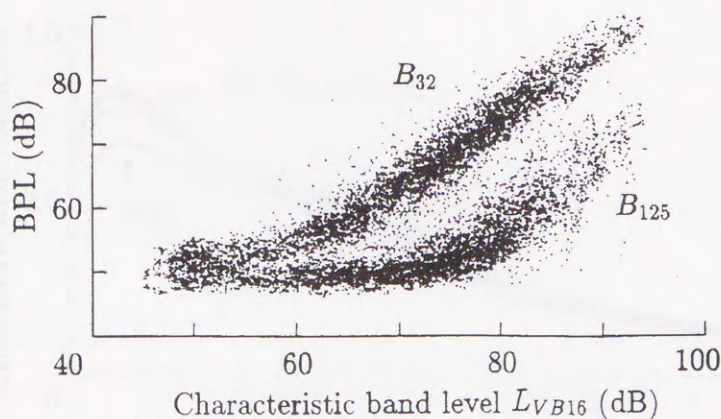


Fig. 5.4 Correlation diagram between the characteristic (reference) BPL (L_{VB16}) and other BPLs (L_{VB32} and L_{VB125}) of the octave band wind noises.

ま、Fig. 5.2 において、帯域 B_{16} での風雑音レベルが最も大きく観測され、観測値への暗騒音の影響も小さいと考えられることから、ここでは B_{16} を風雑音の特徴帯域とする。

この特徴帯域における $L_{VB_{16}}$ と他の帯域での $L_{VB_{f_k}}$ ($f_k = 32, \dots, 250$) との間の線形相互相関係数 $C\{L_{VB_{16}}, L_{VB_{f_k}}\}$ に着目し、Fig. 5.2 での 0.1 秒毎 620 秒間のデータ列から算出した結果を Fig. 5.3 に示している。図において、遅延時間ほぼ 0 で相関係数が最大となり、このとき $C\{L_{VB_{16}}, L_{VB_{32}}\}$ では 0.96 である。この様に、風雑音自身の BPL 間に、特に低周波域ではかなり大きな相関関係が確認される。もちろん、あらゆる風雑音に共通する特性とは言えないまでも、低周波音が環境騒音として問題となる様な住宅地での状況としては、程度の違いはあっても同様な傾向があると考えられる。

風雑音 BPL 間の相関散布図の一例として、Fig. 5.2 における帯域 B_{32} 及び B_{125} の 2 帯域 BPL 値のみを抜き出して、帯域 B_{16} の BPL 値に対する各 BPL 値の散布図を作成した結果を Fig. 5.4 に示している。

次に、2.2 節での手法の基礎となる、マイクロホン近傍の風速 w と風雑音 BPL $L_{VB_{f_m}}$ 間の線形相互相関係数 $C\{w, L_{VB_{f_m}}\}$ を、同じく Fig. 5.2 での 0.1 秒毎 620 秒間データ列から得られた結果を Fig. 5.5 に示している。図において、風速の遅延時間 $\tau=1.4$ (s) (遅延時間は主として風速センサの時定数によると考えられる) で相関係数が最大となり、このとき $C\{w, L_{VB_{f_m}}\}$ では 0.80 である。この

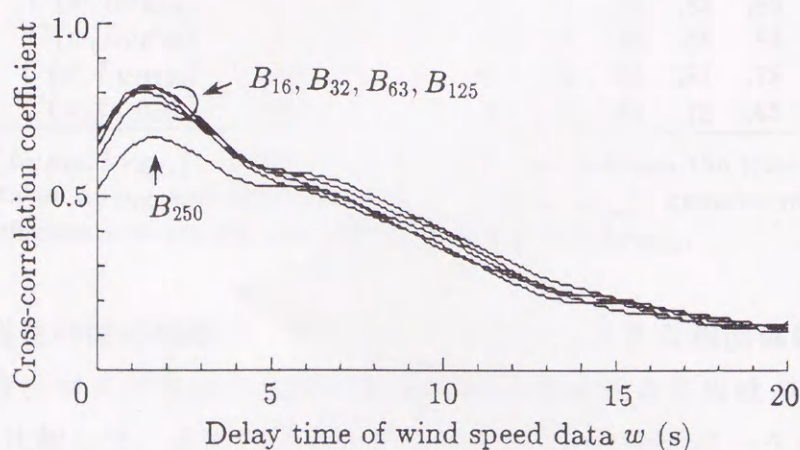


Fig. 5.5 The linear cross-correlation coefficients between the wind speed and octave BPLs ($L_{VB_{16}} \sim L_{VB_{250}}$) of the wind noises.

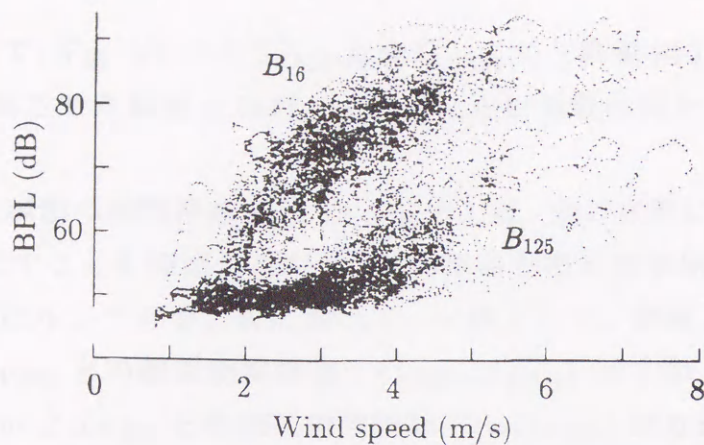


Fig. 5.6 Correlation diagram between the wind speed and the octave BPLs (L_{VB16} and L_{VB125}) of the wind noises.

Table 5-2 Two kinds of the linear cross-correlation coefficients: (1) the characteristic BPL (L_{VB16}) and other BPLs ($L_{VB32} \sim L_{VB250}$) of the octave band wind noises, (2) between the wind speed and octave BPLs ($L_{VB16} \sim L_{VB250}$) of the wind noises, for every 10 minutes data.

Cross-correlation coefficients	Data block number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C\{L_{VB16}, L_{VB32}\}$	.96	.90	.96	.96	.96	.96	.96	.96	.97
$C\{L_{VB16}, L_{VB63}\}$	.87	.84	.88	.90	.91	.89	.89	.89	.91
$C\{L_{VB16}, L_{VB125}\}$	.75	.67	.77	.82	.81	.79	.80	.80	.83
$C\{L_{VB16}, L_{VB250}\}$	.59	.39	.62	.67	.61	.63	.65	.66	.69
$C\{w, L_{VB16}\}$	.80	.87	.82	.83	.82	.81	.81	.84	.81
$C\{w, L_{VB32}\}$	.82	.85	.86	.86	.84	.85	.83	.86	.84
$C\{w, L_{VB63}\}$	.81	.84	.87	.86	.84	.86	.85	.84	.85
$C\{w, L_{VB125}\}$	.77	.71	.83	.84	.80	.83	.81	.78	.82
$C\{w, L_{VB250}\}$	.66	.45	.73	.73	.64	.71	.72	.65	.77

$C\{L_{VB16}, L_{VBf_k}\}$: cross-correlation coefficient between the time series data of L_{VB16} and that of L_{VBf_k} . $C\{w, L_{VBf_m}\}$: cross-correlation coefficient between the time series data of w and L_{VBf_m} .

様に、相当長時間の観測データを用いてもかなり大きな相関係数を持つことが確認でき、マイクロホン近傍の風速情報を活用する正当性が確認される。Fig. 5.3 と比較して、最大の相関係数がやや小さいこと、ピークからの相関係数の減少が緩やかなことその他、周波数帯域での興味ある特徴差も確認されるけれども、細部の検討については今後の課題としたい。

一例として、Fig. 5.2 での L_{VB16} 及び L_{VB125} の 2 帯域 BPL 値を選び、 $\tau = 1.4$ (s) だけ遅延させた風速 w に対して作成した相関散布図を Fig. 5.6 に示している。

上述の 2 種類の相関特性 Fig. 5.3, Fig. 5.4 は、他の区間についてもほぼ同様の傾向を示すことを確認しており、区間毎の各相互相関係数の最大値のみを Table 5-2 に示している。表において、一例として、帯域 B_{32} に着目すれば、 L_{VB16} と L_{VB32} との相互相関係数 $C\{L_{VB16}, L_{VB32}\}$ は 0.90 ~ 0.97 の範囲にあり、他方、 w と L_{VB32} との相互相関係数 $C\{w, L_{VB32}\}$ は 0.82 ~ 0.86 の範囲である。従って、これらの相関関係を用いた風雑音の推定法としては、この帯域では前者の利用が有利となる。しかし、相関係数の大小関係は帯域 B_{125} , B_{250} では逆転している。この様に、両相互相関係数の傾向には興味ある違いも見られるけれども、これらの詳細に関しては今後の検討課題としたい。

なお、各相関係数の算出に際しては、JIS 及び前述の実用規格^[12]における“slow”特性に対応する BPL 値を用いた。本来、不規則に変動する風雑音の特性をより詳細に検討しようとするなら、この BPL 値を算出する時定数自体にも検討を加えるべきであるけれども、ここでは低周波音計測の実際的立場から“slow”特性での時定数 1 秒を用いた。また、Fig. 5.4 及び Fig. 5.6 の散布図におけるように、風雑音の各 BPL 間、及び風速と風雑音 BPL との間には非線形関係が見られる。いま、事前に風雑音以外の暗騒音成分を除去したり、一旦非線形変換を行ってから相関係数を算出するなどの方法を採用すれば、より大きな相関係数が得られると考えられる。しかし、ここでは各変量間の関係を簡易的に明らかにする目的から、公知の線形相関係数を機械的に算出して示した。

以上の解析結果により、風雑音の特徴帯域での BPL 値を用いて他の帯域での風雑音の BPL 値を統計的に捉えようとする手法、及び、マイクロホン近傍の風速観測値を用いて風雑音の BPL 値を統計的に捉えようとする手法の各正当性が確認できる。

5.4.3 風雑音の 2 種類の条件付き平均

前節で確認した相関関係に基づき、対象音推定の簡易手法に不可欠となる

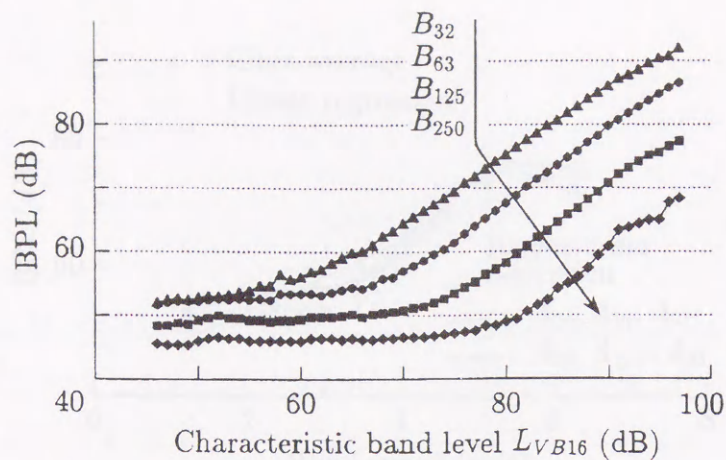


Fig. 5.7 Conditional average of octave BPLs ($L_{VB32} \sim L_{VB250}$) of the wind noise on knowing the characteristic BPL (L_{VB16}) of the wind noise.

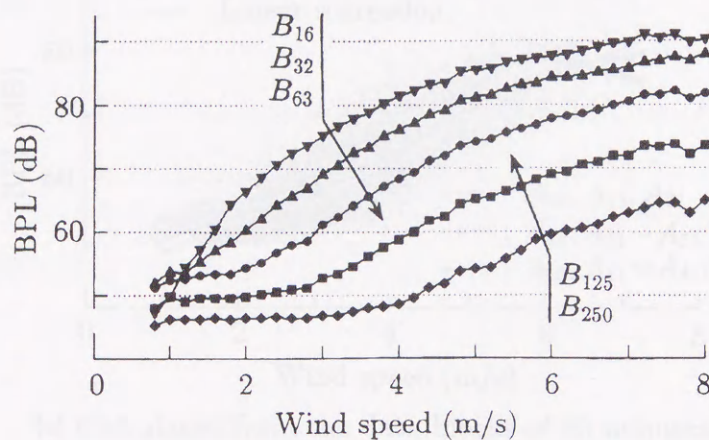
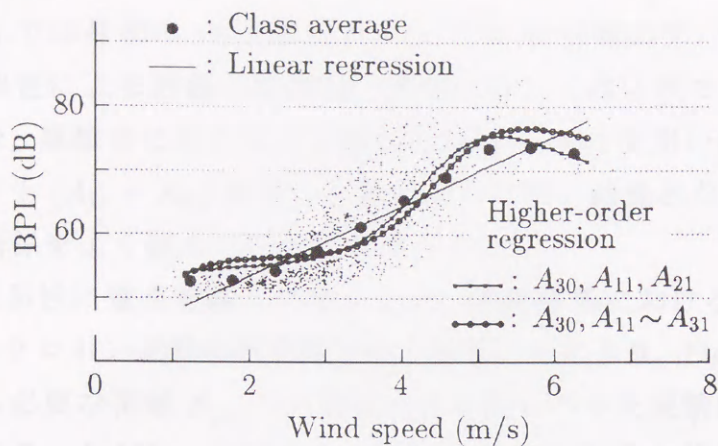


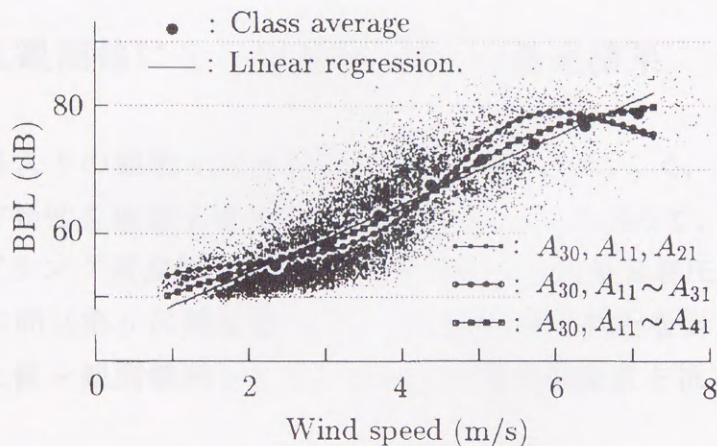
Fig. 5.8 Conditional average of octave BPLs ($L_{VB16} \sim L_{VB250}$) of the wind noise on knowing the wind speed in the vicinity of the microphone.

風雑音の2種類の条件付き平均を算出する。まず、Fig. 5.4を参照しつつ、特徴帯域におけるBPL値のある値 α を代表値として、便宜的に1 dB幅のクラスを設定し、(5.2)式の条件付き平均 $\langle V_{Bfk} | L_{VBfi} = \alpha \rangle$ に対応する値を各クラス毎に算出する。いま、測定の長時間に渡って暗騒音レベルが必ずしも一定ではないことを幾らかでも考慮し、ここでは、各区間毎9区間について算出した条件付き平均値のうち、最大値と最小値を除外し、残る7区間についての平均を用いた。レベル値で表したその結果をFig. 5.7に示している。

同様に、Fig. 5.6を参照しつつ、風速のある値 β を代表値として、便宜的に0.2 m/s幅のクラスを設定し、(5.6)式の条件付き平均 $\langle V_{Bfk} | w = \beta \rangle$ に対応する



a) Calculated from the first data block of 10 minutes.



b) Calculated from the data blocks of 90 minutes.

Fig. 5.9 Examples of the extended type regression analysis applied to the relationship between the wind speed and octave BPL (center frequency of 63 Hz) of the wind noise with their scatter diagram.

値を各クラス毎に算出する。上と同様に、最大、最小値を除外した6区間についての条件付き平均を算出し、前図と同じくレベル値で表した結果を Fig. 5.8 に示している。

また、実験的に直接算定した上の手法とは別に、(5.10)式的一般理論により、風速とdB領域で直接観測した風雑音間の関係をより精密に捉えた結果の一例を散布図に重ねて Fig. 9-a), b) に示している。ただし、 V として L_{VB63} を採用し、実用性を配慮して分母は3次(A_{30})、分子は4次($A_{11} \sim A_{41}$)まで変

化させ、a) では最初の 10 分間のみ、b) では 90 分間のデータから算出した。最小 2 乗誤差による評価の結果は、風速に対しては 3 次モーメント (A_{30}) を用いた場合、風雑音に対しては 3 次まで ($A_{11} \sim A_{31}$) を用いた場合と 4 次までのモーメント ($A_{11} \sim A_{41}$) を用いた場合がほぼ同じ結果となり、風速-風雑音間の回帰関係をよく捉えていることが示される。

いま、簡易性に重点を置く立場からは、特徴帯域における BPL 観測値、または、マイクロホン近傍の風速観測値を得ることにより、Fig. 5.7 及び Fig. 5.8 の結果から必要な帯域 B_{f_m} での風雑音の平均レベルを実験的に推定することが可能となる。ただし、本図のこれらの特性はもちろん普遍的なものではなく、計測環境、システムなどの違い毎に事前学習が必要であると考えられる。

5.4.4 合成観測値による対象音 BPL の推定結果

風雑音混入下の観測では対象音の真値が得られにくく、真値との一致性から手法の有効性を確認することは困難である。したがって、始めに、各 620 秒間 (サンプリング周波数 1 kHz) の真値が既知の対象音音圧値列と前述 9 区間中の任意区間 (第 5 区間を選んだ) の風雑音音圧列とを計算機上で加算、合成して得た値を観測値列として、これから既知対象音を推定した。

(i) 特徴 BPL の利用による推定

まず、合成観測値系列から、前節と同様に特徴帯域での観測値を条件として (5.3) 式の条件付き平均 $\langle Y_{B_{fk}} | L_{Y_{B_{fi}}} = \alpha \rangle$ に対応する値が容易に算出できる。その算出結果をレベル値で表し、破線で表す真値とともに Fig. 5.10 に示している。図において、風雑音の特徴帯域での BPL 値 $L_{Y_{B_{16}}}$ を基に、他の帯域での (対象音+風雑音) の BPL 観測値中に混入する風雑音成分の占める度合いの違いが捉えられる。ここにおいて、(5.4) 式を適用条件としつつ、(5.5) 式の関係に Fig. 5.10 及び Fig. 5.7 の条件付き平均を適用すれば直ちに対象音の条件付き平均値が推定できる。

その推定結果をレベル値で表し、破線で表す各帯域での真値とともに Fig. 5.11 に示している。図において、 $L_{Y_{B_{16}}} = 90$ (dB) 付近以下で、S/N 比がマイナス数 dB 程度になるまでの領域では、帯域 B_{63} , B_{125} 及び B_{250} については十分

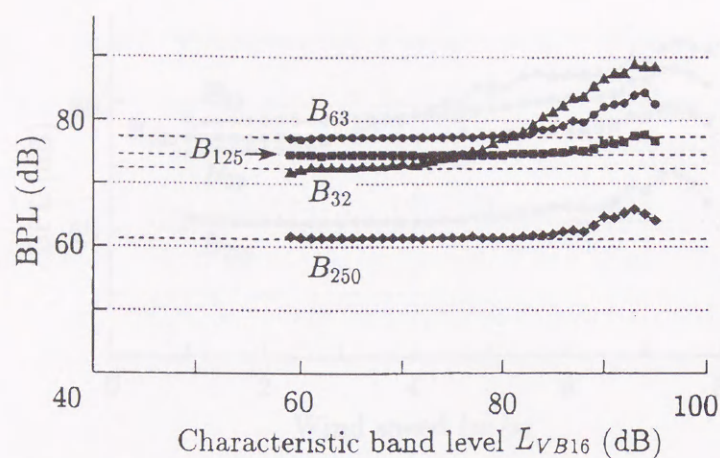


Fig. 5.10 Conditional average of octave BPLs ($L_{YB32} \sim L_{YB250}$) of the observed simulation sound (acoustic signal + wind noise) conditioned on knowing the characteristic BPL (L_{YB16}).

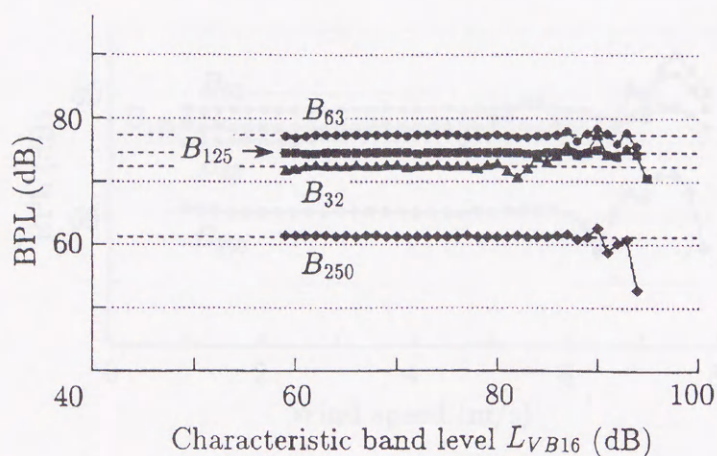


Fig. 5.11 Estimated results of the acoustic signal from the observed simulation sound (acoustic signal + wind noise) in Fig. 5.10 by using the proposed method (i) with the characteristic BPL (L_{YB16}) and Eq. (5.5).

な精度で推定値が得られている。データの度数が極端に少ない領域 $L_{YB16} > 90$ (dB) では推定精度は全般に低下している。他方、帯域 B_{32} では L_{YB16} の増大とともに S/N 比が急激に悪化しており -10 dB 付近より悪い領域では推定が不十分となっている。

(ii) 風速情報の利用による推定

ここでも、合成観測値列から前節と同様にして、(5.7) 式の条件付き平均

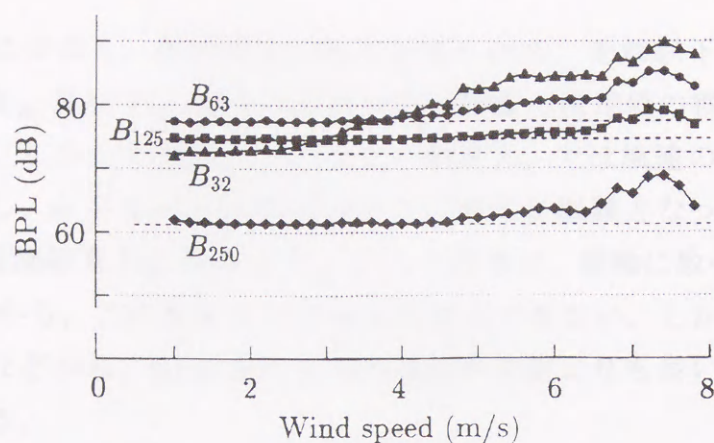


Fig. 5.12 Conditional average of octave BPLs ($L_{YB16} \sim L_{YB250}$) of the observed simulation sound (acoustic signal + wind noise) conditioned on knowing the wind speed w .

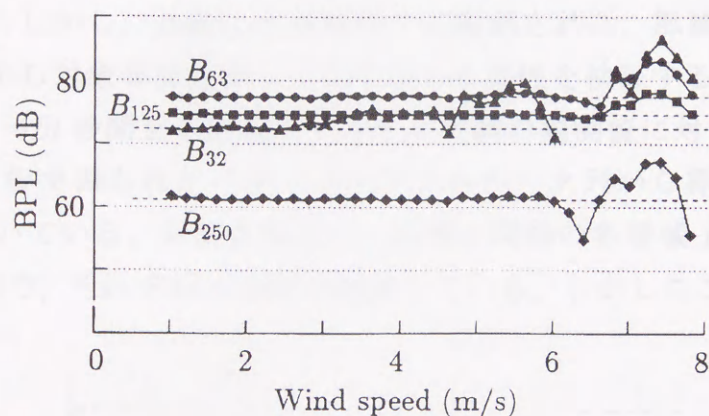


Fig. 5.13 Estimated results of the acoustic signal from the observed simulation sound (acoustic signal + wind noise) in Fig. 5.12 by using the proposed method (ii) with the wind speed w and Eq. (5.11).

$\langle Y_{Bfk} | w = \beta \rangle$ に対応する値がまず算出できる。その算出結果をレベル値で表し、破線で表す真値とともに Fig. 5.12 に示している。図においても、各帯域での（対象音 + 風雑音）の BPL 観測値の中に占める風雑音の混入する度合いの違いが、マイクロホン近傍の風速観測値を基に捉えられることが示される。この結果と Fig. 5.8 の条件付き平均を用いれば (5.11) 式に対応する対象音の条件付き平均が直ちに推定できる。

この方法による推定結果をレベル値で表し、破線で表す真値と共に Fig. 5.13 に示している。図において、風速 w が 6.5 m/s 付近以上では標本データ

の度数が極端に少なく、推定精度の低下が見られる。それ以下では前項と同様、帯域 B_{63} , B_{125} 及び B_{250} については十分な精度で推定値の得られていることが示される。しかしながら、ここでも、帯域 B_{32} では風速の増大とともに S/N 比が悪化し、 w が 5~6 m/s 付近以上では推定が困難となっている。

前手法での観測結果 Fig. 5.11 と Fig. 5.13 の結果は、横軸に取っている L_{YB16} と w との違いから、このままでの詳細な比較はできない。しかし、推定レベルの変動範囲などから、(i) における前手法が本手法よりも良い結果を得ていると考えられる。

5.4.5 実観測に基づく対象音推定結果

本研究での 2 種類の対象音推定法の有効性は前項の実験結果により確認できたと考える。しかし、実際に自然風の下に観測された、風雑音の混入する対象音観測値から対象音を推定して両手法の有効性を検証する。

本実験では、620 秒間を 1 区間とする全 8 区間の観測値に対して、0.5 秒毎の連続 FFT 解析で得られたパワースペクトルデータ列から算出した近似的 BPL 値列を用いている。対象音推定は、前項と同様の各帯域 B_{32}, \dots, B_{250} について行っており、それぞれ有効性を確認している。しかしここでは、風雑音

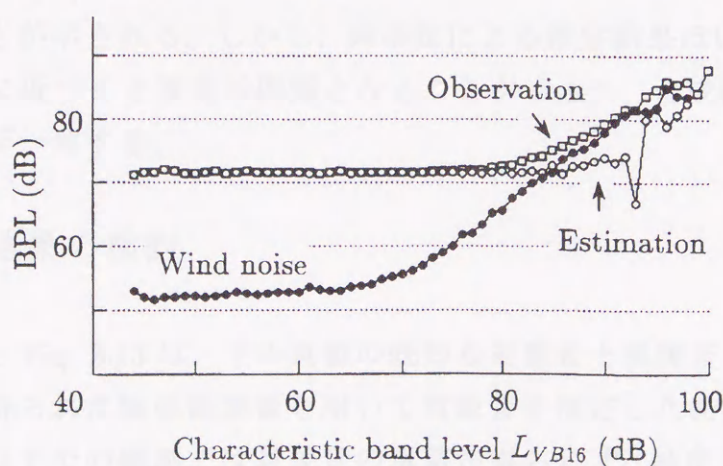


Fig. 5.14 Estimated results of the objective band noise L_{XB63} from the actually observed sound L_{YB63} contaminated with the wind noise by using the proposed method (i) with characteristic BPL (L_{YB16}) and Eq. (5.5).

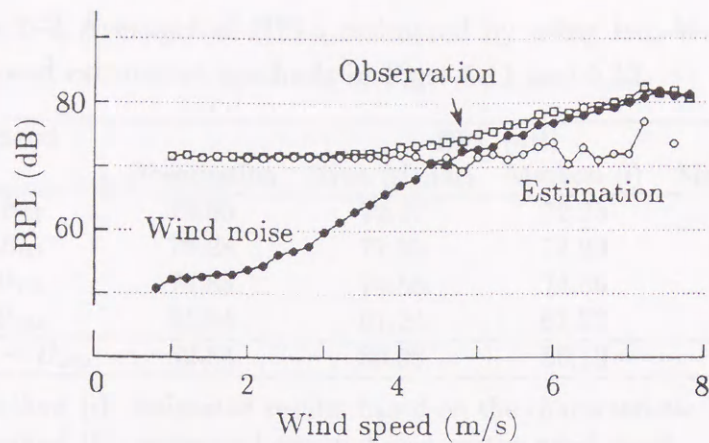


Fig. 5.15 Estimated results of the objective band noise L_{XB63} from the actually observed sound L_{YB63} contaminated with the wind noise by using the proposed method (ii) with the wind speed w and Eq. (5.11).

が低いレベルからかなり高いレベルにまで混入して現れて、手法の有効性が判別し易い帯域 B_{63} のみを取り上げる。

まず、(i) 特徴 BPL の利用による推定結果を Fig. 5.14 に、また、(ii) 風速情報の利用による推定結果を Fig. 5.15 に示している。各図において、横軸の特徴帯域レベル L_{YB16} 又は風速 w の小さい領域では、混入する風雑音が小さく、各観測値が対象音の真値に近いと見なすことができ、両手法による推定結果はいずれも S/N が $-5 \sim -8$ dB 付近以下で真値を捉えようとする結果が得られていることが示される。しかし、両手法による推定結果はいずれも S/N が -10 dB 付近に近づくと推定が困難となることが示され、合成観測値による推定結果とほぼ一致する。

5.4.6 推定結果の検討

Fig. 5.11 と Fig. 5.13 は、予め真値の既知な対象音と風雑音とを、計算機上で合成して得られた疑似観測値を用いて対象音を推定した結果である。これは、自然風の下での観測では対象音の真値が得られず、厳密な比較が困難となるためであった。しかし、疑似観測値とはいえ、無風下の対象音として室内において実際にスピーカーから放射した帯域雑音を音圧変量で観測し、同じく音圧変量で観測した風雑音を用いての音圧変量での加算 (1 kHz, 620 秒間) に基

Table 5-3 Averages of BPLs estimated by using two kinds of the proposed estimation methods in Figs. 5.11 and 5.13.

Band	BPL (dB)			
	Observation	True (signal)	Method (i)	Method (ii)
B_{32}	79.05	72.47	72.75	74.77
B_{63}	78.28	77.33	77.29	77.53
B_{125}	74.83	74.58	74.56	74.62
B_{250}	61.84	61.24	61.23	61.35
$B_{32} \sim B_{250}$	82.54	80.08	80.10	80.68

Method (i): estimated results based on the characteristic BPL.

Method (ii): estimated results based on the wind speed.

づくことから、ほぼ、自由空間での対象音観測実験と見なし得る。

Table 5-3 は、この Fig. 5.11, 5.13 両図における観測値、真値、推定値の各量の平均を比較したものである。推定結果の数値は、各クラス毎のデータの度数を重みにして、平均 2 乗音圧での重みつき平均を算出してレベル表示している。表において、全体の帯域 $B_{32} \sim B_{63}$ での推定レベル値では、方法 (i) の特徴 BPL を利用する推定法と、方法 (ii) の風速情報を利用する推定法の両手法とも 1 dB 以内の誤差で対象音を推定していることが分かる。しかし、帯域毎の細部について見れば、特に帯域 B_{32} において、方法 (i) による推定法の方が、方法 (ii) による推定法よりも精度が良いことが顕著である。この結果は、5.4.3 節で解析した、条件付き平均として利用する各変量間の相互相関特性 Fig. 5.3 ~ Fig. 5.6、及び、Table 5-2 から予測されることに一致する。

他方、屋外での自然風下の対象音観測の実データに基づく推定結果 Fig. 5.14, 5.15 においても、ほぼ、S/N 比 -10 dB までの両手法の有効性と適用限界が確認できる。

両実験を通して、方法 (i) の方が比較的良い結果が得られている。しかしながら、手法 (i) が適用できるためには、対象音のスペクトル特性と風雑音のスペクトル特性との間に違いがあり、風雑音下の対象音計測時にも風雑音の特徴的な BPL が計測可能であることが必要条件となる。他方、手法 (ii) では、このような種類の制約は不要となる一方、風速センサの違いやその配置状況など、計測システム固有の違いが推定結果により大きく影響してくると考えられる。

方法 (i) で比較的良い結果が得られた理由は、特に、本手法で新たな着目、提案した風雑音自身の BPL 間にかなり大きい相関関係が見られることによる。この関係は、実用上極めて意義のある知見と考える。しかし、これが普遍的か否かの検証は今後の課題としたい。

5.5 むすび

低周波音の測定の実際においては、オクターブ帯域音圧レベル (オクターブ BPL) で計測されることが多く、我が国での実用規格^[12]でもこのことが規定された。本章では屋外でのこの様な BPL 計測において、自然風による低周波風雑音の混入する観測結果から対象音成分のみを推定する手法に関して、実用的立場から、低次統計量の条件付き平均のみを用いる 2 種類の簡易法を提案し、その有効性の実験的検討を行った。具体的に 2 種類の簡易法は、(i) 新たに、風雑音の特徴的 BPL 観測に基づき、他の帯域に混入する風雑音の平均 BPL 値を推定し、対象音の平均 BPL 値を推定する手法、および、(ii) マイクロホン近傍の風速計測に基づき、同様に対象音の平均 BPL 値を推定する手法である。

初めに、マイクロホン近傍の風速と風雑音のみの実測結果を用いて、(a) 風雑音特徴帯域 BPL と他の帯域での BPL 間の相互相関特性を解析し、(b) 風速と風雑音 BPL 間の高次回帰関係を含めて相互相関特性を解析した。この結果、2 種類の相関係数は共にかなりの大きさが示されること、また、約 2 時間に渡る解析結果から、比較的安定した特性が示されることを確認し、本推定法の立脚点を検証した。

両手法の有効性は、まず、予め真値が既知な対象音と風雑音との音圧合成による疑似観測値から対象音を推定して確認された。さらに、実際の風雑音混入下で対象音を観測した結果から対象音を推定して両手法の有効性を確認した。具体的に、風雑音が対象音を数 dB 程度上回る観測値まで、かなり良好に対象音を推定できることを検証した。検討した 2 つの手法の中、(i) 特徴 BPL の利用による手法が (ii) 風速情報の利用による手法よりも、若干、推定精度

の点で優れていることが確認された。しかしながら、手法 (i) の適用に際しては、風雑音下の対象音計測時においても、風雑音の特徴的な BPL が抽出可能であることが必要条件となる。他方、手法 (ii) では、この様な種類の条件は不要であることが対照的な特徴である。

本研究の結果、低周波音計測法の実際で規定された BPL 計測に対して、風雑音下での簡易的 2 種類の対象音推定法の有効性が実証された。今後の課題として、

1. 特に、風雑音自身の各 BPL 間にかかなり大きな相関関係が見受けられることなど、風雑音に関するより精密なメカニズムの検討を行う。
2. より高次の統計量を用いた推定法を設定する。
3. 風雑音と対象音の時間領域における動的特性を含めた推定法を設定する。
4. ここに提案した 2 種類の推定法の長所を相補的に統合させる手法を設定する。

などが残されている。

第6章

風雑音の超低周波成分に基づく推定法

6.1 まえがき

前章では、屋外でのオクターブ帯域音圧レベル (BPL) 計測における簡易的風雑音対策法を考察した。このとき、風雑音の BPL 間にかなり大きな相関関係が見られることを確認した。本章では、この知見と共に、自然風による風雑音パワースペクトルの超低周波域に卓越して観測される成分に着目し、これと他の帯域に広がって観測される風雑音成分との相関関係の検証に基づく簡易的風雑音対策法を考察する。

さて、低周波音測定に関する実用規格^[12]では、扱う周波数範囲として、超低周波音のオーバーオールを 1.4 ~ 22.4 Hz、低周波音のオーバーオールを 1.4 ~ 90 Hz と規定している。一方、通常騒音計測に多用される精密騒音計は JIS 規格^[96]において、周波数範囲 20 ~ 12,500 Hz において 0.7 dB 以下の誤差であることを規定しており、上述の超低周波域を除く低周波域が含まれている。さらに、実用の精密騒音計ではこの JIS 規定より広い周波数範囲で特性を保証している場合が普通である。

他方、屋外での騒音計測に際して通常使用されるウィンドスクリーンでは風雑音の低周波成分の除去は困難である (例えば文献 [31])。従って、自然風下でのウィンドスクリーンを装着した精密騒音計による通常騒音計測に際して、部分的ではあってもマイクロホンの検出信号自体には風雑音の超低周波成分が含まれる。この事実は、第4章の Fig. 4.9, Fig. 4.10 などにおいても確認できる。このことから、文献 [66] における様に、一般の SPL 計測に際しては、風の周波数成分が「直流 (近く) まで延びている」ため、「測定に必要な周

波数帯域以下を遮断」して計測することが勧められている。もちろん、前章における様な BPL 計測では、帯域フィルタを用いることにより対象周波数範囲外に存在する風雑音成分の超低周波成分を自ずから除去している。この様に、一般には、風雑音の超低周波成分を遮断して計測が行われる。

本章では、この超低周波域に観測される風雑音の成分こそが自然風による低周波風雑音の特徴を最も表しているとの考えの下に、この成分を風雑音対策として積極的に活用する。まず、(i) 風雑音の超低周波成分と他のスペクトル成分間に強い相関特性があることの検証に基づき、この超低周波成分によるパワースペクトルでの簡易的な対象音推定法を検討する。次いで、(ii) オーバーオールでの風雑音の平均 2 乗音圧を風雑音の超低周波成分による条件付きガンマ分布として近似して捉え、非負変動領域での変量に対するベイズ・フィルタ法に基づく簡易的な対象音推定法と、より簡易的な短時間での条件付き平均の利用による対象音推定法を検討する。

本章での対象音推定の信号処理手順自体は、これまでの各章で検討した方法と基本的には一致する。しかし、ここでは、通常は計測への妨害成分として遮断、除去される風雑音の超低周波成分を、逆に風雑音対策に利用しようとする点に新たな着想がある。また、マイクロホン近傍の風速情報を基に風雑音対策を行うことと、マイクロホンによって結果的に検出される風雑音自体の超低周波成分に関する情報を基に風雑音対策を行うことは、物理的な立脚点での大きな違いがある。この着想に基づく風雑音対策の有効性が確認されるなら、従来の風雑音対策とは全く異種の手法が見い出されることになり、今後のこの分野での研究に少なからぬ影響を与えられと考えられる。

6.2 風雑音の超低周波成分と SPL との相関特性

風雑音の低周波成分の要因としては、気流中のマイクロホン下流側に発生する乱流列を原因とする圧力変動によるよりも、マイクロホン上流から流下する乱流による圧力変動による方が支配的であることが指摘されている (例え

ば、文献 [31])。この自然風に伴う流下乱流の観測時間差を利用して風速を計測する最近の実験的研究も見られる [97]。いま、この乱流の大部分が、山川樹木などの自然物、人工的建造物など、気流中の物体や大地などとの作用によって生ずると考えられることから、測定点が固定されるなら、その大きさは風速、風向とも相関を持ち、周波数特性にも個性が表れると推測される。しかし、自然風によるこの乱流の大きさや周波数特性に関する理論的取り扱いは困難であるため、ここでは、結果的に観測された風雑音のパワースペクトルから、その中に占める特に超低周波成分と他の周波数成分との相関特性を実験的に捉える。

まず、本研究で使用している標準的なウインドスクリーンを装着した精密騒音計 (RION, NA-61 WS-02) の“1/2 インチ型”コンデンサマイクロホン (周波数特性 10 ~ 20,000 Hz) を用いて計測された、超低周波域の風雑音スペクトルに着目する。

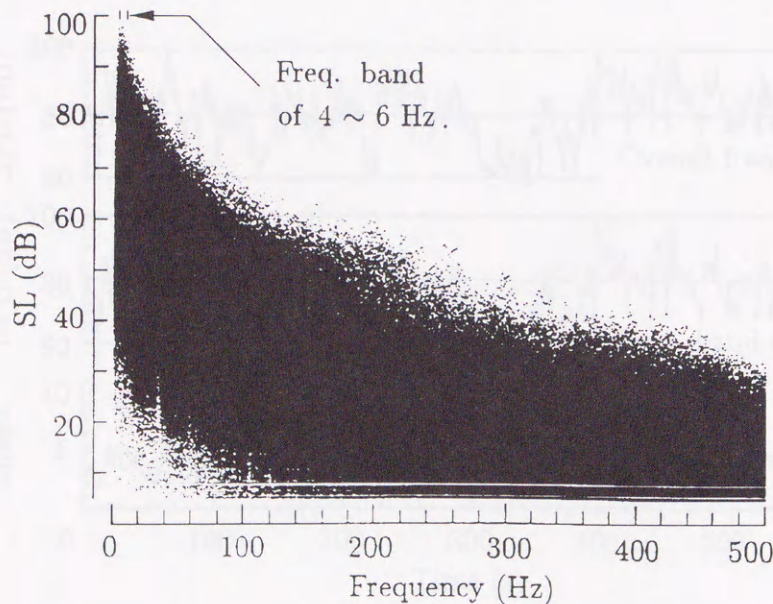


Fig. 6.1 A reference infrasonic frequency range (4 ~ 6 Hz) of the wind noise indicated as the scatter diagram of SL of the wind noise in a breeze condition (re-insertion of Fig. 4.10).

Fig. 6.1 は、第 4 章の Fig. 4.10 を再掲したものである。図において、4 ~ 6 Hz 付近にピークが現れ、それ以上では徐々にレベルが低下している。しかし、本研究で対象とする低周波域 10 ~ 90 Hz ではかなり大きなレベルを示していることが分かる。なお、ピーク値以下の周波数ではレベルが急激に減衰している。本図の FFT による周波数分解能はほぼ 1 Hz であり、直流分は表示していない。文献 [31] 中では、超低周波域まで平坦特性を持つセラミックマイクロホンを用いて観測した風雑音のスペクトル解析結果 (Brüel & Kjær, 4147, 風速 5.8 m/s) が示されており、これによれば、2 ~ 3 Hz 付近にスペクトルのピークが見られる。この文献での結果と比べても、本研究で用いているコンデンサマイクロホンでは 10 Hz 以下の超低周波域でゲインが低下する特性を考えれば、ピークが周波数の若干高い側に観測されることが説明される。

いま、便宜的に Fig. 10 中に示す超低周波帯域 4 ~ 6 Hz を“指標帯域”と呼び、この帯域での BPL を“指標 BPL”と呼ぶ。まず、この指標 BPL と風雑音全体、又は、各スペクトル成分との相関関係を検証する。

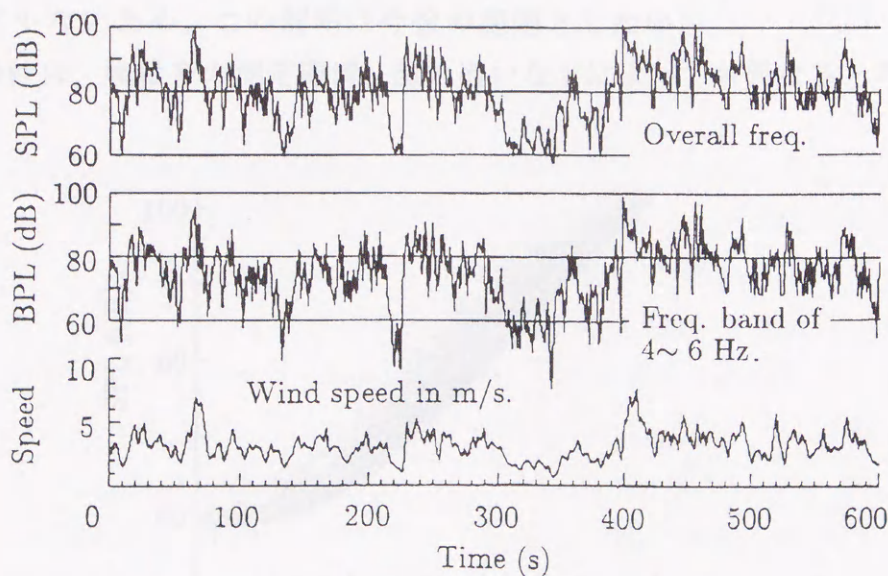


Fig. 6.2 An example of the wind noise observation: The SPL of wind noise for overall frequency range, its BPL (4 ~ 6 Hz) and the wind speed are shown. The SPL and BPL values are calculated from the SL in Fig. 6.1 for 10 minutes.

Fig. 6.2 は、風雑音の上述の指標 BPL とオーバーオールでの SPL の時間変動を、Fig. 6.1 のパワースペクトルデータ列 10 分間について算出し、同時に計測したマイクロホン近傍の風速と共に示したものである。図において、風速、風雑音の指標 BPL、及び SPL が同様な変動を示し、それぞれの間にかなりの相関関係が存在することが予測できる。

Fig. 6.3 は、Fig. 6.1 の全 FFT データ (約 93 分間、0.5 秒毎 11,160 フレーム) を使用して、Fig. 6.2 の様にして得られる指標 BPL と SPL データ対による散布図を示したものである。図において、指標 BPL (Ref. BPL) 55 dB 付近以上では条件付き平均に対応する BPL の 1 dB クラス毎のパワー平均の dB 値 (o) が、ほぼ直線上に並んでいることが分かる。BPL 55 dB 以下では、SPL が 60 dB 付近で、ほぼ一定となっている。これは風雑音の小さい領域において、風雑音と無相関の暗騒音が相対的に顕著となり、この暗騒音レベルを捉えていると考えられる。部分的には、着目する指標 BPL が大きいときにも SPL があまり大きくない点が散見される。すなわち、風雑音の超低周波成分が大きくてもその他の高域成分があまり多くない場合である。しかし、その出現率は極めて少ないため、この説明は今後の課題としたい。

図の特性は、風雑音の測定環境、風の違いなどによっても異なると考えられ、

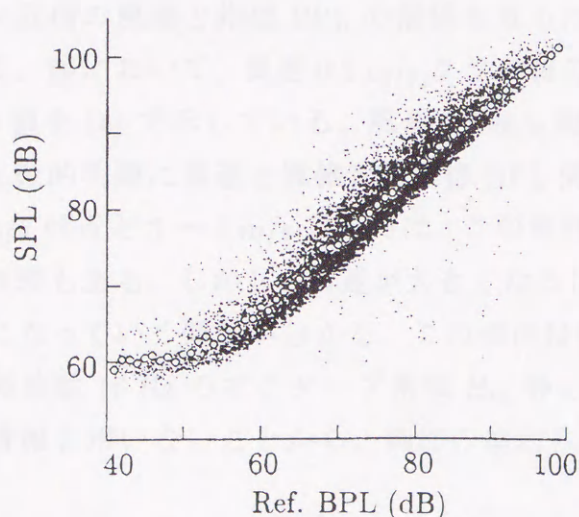


Fig. 6.3 Cross-correlation characteristics between the reference BPL (4 to 6 Hz) and the SPL (overall) of the wind noise: The average SPL conditioned by the reference BPL is shown in (o).

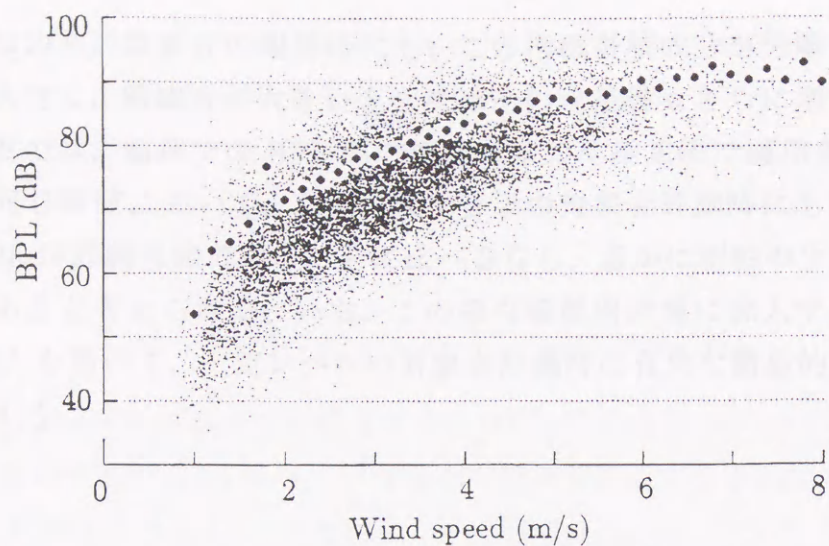


Fig. 6.4 Cross-correlation characteristics between the wind speed observed in the vicinity of the microphone and the reference BPL: The average BPL conditioned by the wind speed is shown in (●).

普遍的な特性とは言えない。しかしながら、約 2 時間 (そのうち、620 秒毎 9 区間、93 分間を切り取っている) の風雑音の連続観測の結果から考えて、測定環境が固定されるなら、一定時間内でかなり安定して得られる特性とも考えられる。

マイクロホン近傍の風速と指標 BPL の関係を見るために、Fig. 6.4 に散布図を示している。図において、風速 0.2 m/s クラス毎の、風雑音の指標帯域パワー平均の dB 値を (●) で示している。風速 1.5 m/s 程度から 4 ~ 5 m/s 程度の範囲では、比較的明瞭に風速と風雑音の指標 BPL 間の相関特性が示されている。風速 1 m/s 付近と 5 ~ 6 m/s 以上では、この特性を議論するにはサンプル数も少なく無理もある。しかし、風速が大きくなるに従って、観測レベルの増加が緩やかになっていく傾向が分かる。この傾向は前章の Fig. 5.6, Fig. 5.8 における中心周波数 16 Hz のオクターブ帯域 B_{16} 等と同様な傾向である。本手法では風速情報を用いないことから、細部の検討は今後の課題としたい。

さて、一般の低周波環境騒音において、ここで指標帯域として着目する様な超低周波域の音源は余り多くない。いま、風雑音が大きいときにこそ風雑音対策が必要となり、Fig. 6.3 より、風雑音が大きいほどこの指標 BPL も大きく

なる。すなわち、対象音の観測時にも、この指標帯域成分が分離観測される可能性が大きく、風雑音が大ききときにはその可能性もさらに増すことになる。この点では、前章での BPL 間の相関に基づく推定法で適用条件とした、対象音と同じ帯域において、なお、風雑音下の対象音計測時にも風雑音の特徴的な BPL が計測可能であることに比べるなら、遙かに制約の少ない現実的な手法であると考えられる。いま、この様な超低周波域に混入する風雑音の“指標 BPL”を用いて、一定レベルの対象音計測時に有効な簡易的对象音推定法を検討する。

6.3 パワースペクトルにおける相関特性に基づく推定法

まず、風雑音のみの観測において、風雑音のパワースペクトル成分を $S_W(f)$ と表し、風雑音の超低周波域に卓越する $f_1 \sim f_2$ での帯域パワースペクトルを S_{Wrb} と表す。この帯域での音圧レベルを前項の様に“指標 BPL”と呼び、 L_{Wrb} と表すと次の関係で表される [56]。

$$L_{Wrb} = 10 \log \frac{S_{Wrb}}{p_0^2}, \quad S_{Wrb} = \int_{f_1}^{f_2} S_W(f) df. \quad (6.1)$$

ここに、 $p_0 = 20(\mu \text{ Pa})$ である。次に、指標 BPL がある値 $L_{Wrb} = \alpha$ を取るときの計測対象周波数域にある風雑音スペクトル $S_W(f)$ の揺らぎを L_{Wrb} による条件付き分布 $P(S_W(f)|L_{Wrb} = \alpha)$ で捉える。この条件付き平均を簡単のために $\langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle$ と表せば、これは次の様に計算される。

$$\langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} S_W(f) dP(S_W(f)|L_{Wrb} = \alpha). \quad (6.2)$$

いま、風雑音混入下の一定レベル対象音観測に際してもこの指標 BPL を観測する。まず、観測音(対象音+風雑音)のパワースペクトル成分を $S_Y(f)$ と表し、(6.1)式と同様にして、このときの指標 BPL を L_{Yrb} と表す。次に、指標 BPL がある値 $L_{Yrb} = \alpha$ を取るときの計測対象周波数域にある観測音スペクトル $S_Y(f)$ の揺らぎを L_{Yrb} による条件付き分布 $P(S_Y(f)|L_{Yrb} = \alpha)$ で捉える。この条件付き平均を簡単のために $\langle S_Y(f, \alpha_{Yrb}) \rangle$ と表す：

$$\langle S_Y(f, \alpha_{Yrb}) \rangle \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} S_Y(f) dP(S_Y(f)|L_{Yrb} = \alpha). \quad (6.3)$$

さて、この条件付き分布の低次統計量のみを利用する簡易的な対象音推定法を考える。いま、対象音のパワースペクトルを $S_X(f)$ と表し、風雑音混入下の対象音観測に際して、指標 BPL がある値 $L_{Yrb} = \alpha$ を取るとき、この対象音の条件付き平均を $\langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle$ と表す。すると、対象音と風雑音の独立性により次の加算関係が成り立つ。

$$\langle S_Y(f, \alpha_{Yrb}) \rangle = \langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle + \langle S_W(f, \alpha_{Yrb}) \rangle \quad (6.4)$$

ここで、指標帯域に存在する対象音成分及び他の暗騒音成分が小さいと仮定すれば、風雑音が比較的大きいとき、対象音観測時の指標帯域成分 L_{Yrb} にはこの帯域に占める風雑音成分 L_{Wrb} が支配的となる ($L_{Yrb} \simeq L_{Wrb}$)。すると、対象音観測時に混入する風雑音スペクトルの条件付き平均 $\langle S_W(f, \alpha_{Yrb}) \rangle$ が、事前に学習しておいた (6.1) 式の $\langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle$ で近似できる ($\langle S_W(f, \alpha_{Yrb}) \rangle \simeq \langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle$)。結局、風雑音混入下の対象音スペクトルの平均推定値 $\langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle^*$ が、超低周波域での指標 BPL に基づき次の様に得られる。

$$\langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle^* \simeq \langle S_Y(f, \alpha_{Yrb}) \rangle - \langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle. \quad (6.5)$$

こうして得られた推定値から、計測対象とする周波数域 $f_l \sim f_h$ での SPL 値 $L_{X^*}(\alpha_{Yrb})$ が容易に算出される。

$$L_{X^*}(\alpha_{Yrb}) = 10 \log_{10} \frac{\langle X(\alpha_{Yrb}) \rangle^*}{p_0^2}, \quad \langle X(\alpha_{Yrb}) \rangle^* = \int_{f_l}^{f_h} \langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle^* df. \quad (6.6)$$

対象音推定のアルゴリズム自体は第4章の4.3.1節と一致するが、風速情報に代えて、マイクロホンに混入する風雑音自身の超低周波成分を対象音を推定する基礎として使用することの有効性を検証する必要がある。

6.4 簡易型ベイズ・フィルタ法

前節では、風雑音の指標 BPL の利用による、一定レベルの対象音推定に有効なパワースペクトル領域での一手法を検討した。本節では、対象音が変動する場合に対する推定法設定のための基礎として、風雑音の平均2乗音圧変量を、指標 BPL による条件付きガンマ分布近似として捉え、非負変動領域で

の変量に対するベイズ・フィルタ法に基づく簡易的对象音推定法と、より簡易的な短時間での条件付き平均の利用による対象音推定法を検討する。

まず、風雑音の瞬時音圧を p_v とし、風雑音の平均 2 乗音圧変量 $v \triangleq \overline{p_v^2}$ を考える。いま、離散時刻 k におけるこの平均を \overline{v}_k 、分散を V_k と表す。

$$\overline{v}_k \triangleq \langle v_k \rangle, \quad V_k \triangleq \langle (v_k - \overline{v}_k)^2 \rangle. \quad (6.7)$$

さて、時刻 k において、(6.1) 式で表される風雑音の指標 BPL 値がある値 $L_{Wrb,k} = \alpha$ を取るとき、非負領域に揺らぐ v の確率密度分布を次の条件付きガンマ分布で近似する。

$$P(v_k | L_{Wrb,k} = \alpha) = P_{\Gamma}(v_k; S_{v,k}, m_{v,k} | L_{rBv,k} = \alpha) \\ = \frac{1}{\Gamma(m_{v,k}) S_{v,k}^{m_{v,k}}} v_k^{m_{v,k}-1} \exp\left(-\frac{v_k}{S_{v,k}}\right) \Big|_{L_{Wrb,k}=\alpha}, \quad (6.8a)$$

$$m_{v,k} = \frac{(\overline{v}_k)^2}{V_k}, \quad S_{v,k} = \frac{\overline{v}_k}{m_{v,k}}. \quad (6.8b)$$

すなわち、マイクロホンに混入する風雑音 v をガンマ分布で近似し、この分布パラメータ $m_{v,k}$ および $S_{v,k}$ を、風雑音自身の指標 BPL 値に基づいて推定し、時々刻々の揺らぎを捉えようとする。

次に、対象音の平均 2 乗音圧を x で表し、風雑音混入下のこの観測値の平均 2 乗音圧を y と表わす。いま、一定レベルの不規則雑音を対象音とすれば、システム方程式、観測方程式は、第 2 章の 2.2.1 節、(2.1), (2.2) 式と同様に表される。

$$x_{k+1} = x_k \quad (2.1), \quad y_k = x_k + v_k \quad (2.2).$$

同節、(2.3) 式のベイズの定理以降で展開される一般理論に従えば、対象音の平均、分散に関する一般推定式 (2.10), (2.11) が得られる。

いま、2.2.3 節と同様に、対象音 x と風雑音混入下の観測値 y の予測分布をガンマ分布で近似する。

$$P(x_k | Y_{k-1}) = P_{\Gamma}(x_k; S_{x,k}^*, m_{x,k}^*), \quad m_{x,k}^* = (x_k^*)^2 / \Gamma_k, \quad S_{x,k}^* = x_k^* / m_{x,k}^*, \quad (2.20a')$$

$$P(y_k|Y_{k-1}) = P_{\Gamma}(y_k; S_{y,k}^*, m_{y,k}^*), \quad m_{y,k}^* = (y_k^*)^2/\Omega_k, \quad S_{y,k}^* = y_k^*/m_{y,k}^*, \quad (2.20c')$$

ただし、 Y_k は時刻 k までの観測値の集合であり、 Γ_k, Ω_k はそれぞれ、 x, y の予測分散である。

2.2.3 節に従って推定アルゴリズムを具体化すれば、(6.8) 式の条件付き平均を用いて、次の様に対象音の推定値 $\hat{x}_k|_{L_{Wrb,k}=\alpha}$ が算出される。

$$\begin{aligned} \hat{x}_k|_{L_{Wrb,k}=\alpha} = & \left[C_{10} + C_{11} \left\{ A_{11} \sqrt{\frac{\Gamma(m_{y,k}^*)}{\Gamma(m_{y,k}^* + 1)}} L_1^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + A_{12} \sqrt{\frac{2\Gamma(m_{y,k}^*)}{\Gamma(m_{y,k}^* + 2)}} L_2^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) \right\} \right]_{L_{Wrb,k}=\alpha} \quad (6.9a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_k|_{L_{Wrb,k}=\alpha} = & \left[C_{20} + C_{21} \left\{ A_{11} \sqrt{\frac{\Gamma(m_{y,k}^*)}{\Gamma(m_{y,k}^* + 1)}} L_1^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) + A_{12} \sqrt{\frac{2\Gamma(m_{y,k}^*)}{\Gamma(m_{y,k}^* + 2)}} \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot L_2^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) \right\} + C_{22} A_{22} \sqrt{\frac{2\Gamma(m_{y,k}^*)}{\Gamma(m_{y,k}^* + 2)}} L_2^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) \right]_{L_{Wrb,k}=\alpha} \quad (6.9b) \end{aligned}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} C_{10} &= m_{x,k}^* S_{x,k}^*, \quad C_{11} = -\sqrt{m_{x,k}^*} S_{x,k}^*, \\ C_{20} &= \hat{x}_k^2 - 2m_{x,k}^* S_{x,k}^* \{\hat{x}_k - (m_{x,k}^* + 1)S_{x,k}^*\} - m_{x,k}^* (m_{x,k}^* + 1) S_{x,k}^{*2}, \\ C_{21} &= 2\sqrt{m_{x,k}^*} S_{x,k}^* \{\hat{x}_k - (m_{x,k}^* + 1)S_{x,k}^*\}, \\ C_{22} &= \sqrt{2m_{x,k}^* (m_{x,k}^* + 1)} S_{x,k}^{*2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.23')$$

および、

$$\begin{aligned} L_n^{(m_{y,k}^* - 1)} \left(\frac{y_k}{S_{y,k}^*} \right) &= \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(m_{y,k}^* + n)}{\Gamma(m_{y,k}^* + r_1)} \left(\frac{S_{x,k}^*}{S_{y,k}^*} \frac{x_k}{S_{x,k}^*} + \frac{S_{v,k}}{S_{y,k}^*} \frac{v_k}{S_{v,k}^*} \right)^{r_1} \\ &= \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(m_{y,k}^* + n)}{\Gamma(m_{y,k}^* + r_1)} \sum_{r_2=0}^{r_1} \binom{r_1}{r_2} \left(\frac{S_{x,k}^*}{S_{y,k}^*} \right)^{r_2} \left(\frac{x_k}{S_{x,k}^*} \right)^{r_2} \left(\frac{S_{v,k}}{S_{y,k}^*} \right)^{r_1 - r_2} \left(\frac{v_k}{S_{v,k}^*} \right)^{r_1 - r_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{r_1=0}^n (-1)^{r_1} \binom{n}{r_1} \frac{1}{n!} \frac{\Gamma(m_{y,k}^* + n)}{\Gamma(m_{y,k}^* + r_1)} \sum_{r_2=0}^{r_1} \binom{r_1}{r_2} \left(\frac{S_{x,k}^*}{S_{y,k}^*}\right)^{r_2} \left(\frac{S_{v,k}}{S_{y,k}^*}\right)^{r_1-r_2} \\
&\quad \cdot \sum_{r_3=0}^{r_2} (-1)^{r_3} \binom{r_2}{r_3} r_3! \frac{\Gamma(m_{x,k}^* + r_2)}{\Gamma(m_{y,k}^* + r_3)} L_{r_3}^{(m_{x,k}^*-1)}\left(\frac{x_k}{S_{x,k}^*}\right) \\
&\quad \cdot \sum_{r_4=0}^{r_1-r_2} (-1)^{r_4} \binom{r_1-r_2}{r_4} r_4! \frac{\Gamma(m_{v,k} + r_1 - r_2)}{\Gamma(m_{v,k} + r_4)} L_{r_4}^{(m_{v,k}-1)}\left(\frac{v_k}{S_{v,k}}\right). \quad (2.24')
\end{aligned}$$

さらに,

$$A_{11} = \sqrt{\frac{m_{x,k}^*}{m_{y,k}^*} \frac{S_{x,k}}{S_{y,k}}}, \quad (2.25a')$$

$$A_{12} = \frac{S_{x,k}^*}{S_{y,k}^*} \sqrt{\frac{2m_{x,k}^*}{m_{y,k}^*(m_{y,k}^* + 1)}} \left\{ (m_{y,k}^* + 1)m_{y,k}^* - \left(\frac{S_{v,k}}{S_{y,k}^*}\right) m_{v,k} - (m_{x,k}^* + 1) \left(\frac{S_{x,k}}{S_{y,k}^*}\right) \right\}, \quad (2.25b')$$

$$A_{22} = \sqrt{\frac{(m_{x,k}^* + 1)m_{x,k}^*}{(m_{y,k}^* + 1)m_{y,k}^*}} \left(\frac{S_{x,k}}{S_{y,k}^*}\right)^2. \quad (2.25d')$$

以上、風雑音の超低周波成分を新たに利用する、簡易ベイズ・フィルタに基づく対象音推定法を、第2章の2.2.3節に沿って設定してその結果のみ示した。推定アルゴリズムの簡易化を目指し、本節でもガンマ分布での近似を行った。しかし、実用的観点からは、推定アルゴリズムをより簡易化する工夫が必要であると考えられる。

6.5 実験的考察

6.5.1 実験方法

ここでは、第4章、4.3節での、風速情報を用いたパワースペクトルでの対象音推定法と比較するために、4.4.1節、実験IIのデータを用いた。

実験方法の要点は以下の通りである。(1) 騒音、風速の観測は、第3章、Fig. 3.2の計測アセンブリを用いた。(2) 使用コンデンサマイクロホンは“flat”特

性 10 ~ 20,000 Hz であり, 10 Hz 以下ではゲインが急速に低下する。(3) 直径 9 cm のウレタンフォーム製ウィンドスクリーンを装着した。(4) 風速はセンサ時定数約 1 秒のトランジスタ式微風速計を用いて計測した。(5) マイクロホンの音圧出力は 1 kHz, 風速出力は 10 Hz のサンプリング周波数でそれぞれ A/D 変換した。(6) 音圧波形のパワースペクトル算出は FFT により, Hamming ウィンドウ, 1 フレーム 1,024 点 (約 1 秒), フレーム周期 0.5 秒とした。

すでに, 6.2 節で述べた様に, Fig. 6.2 ~ 6.4 においてこの実験結果を使用している。

6.5.2 パワースペクトルにおける相関特性に基づく対象音推定

6.5.2.1 超低周波成分と風雑音パワースペクトル間の相関特性

第 4 章の Fig. 4.11 では, マイクロホン近傍で観測した風速情報を用いて, Fig. 6.1 に再掲した 11,160 フレームによる風雑音のパワースペクトルを用いて, 風速の条件付きパワースペクトルの平均を算出した結果を示した。ここでは, この風速情報の利用に代えて条件とする (6.1) 式での L_{Wrb} に

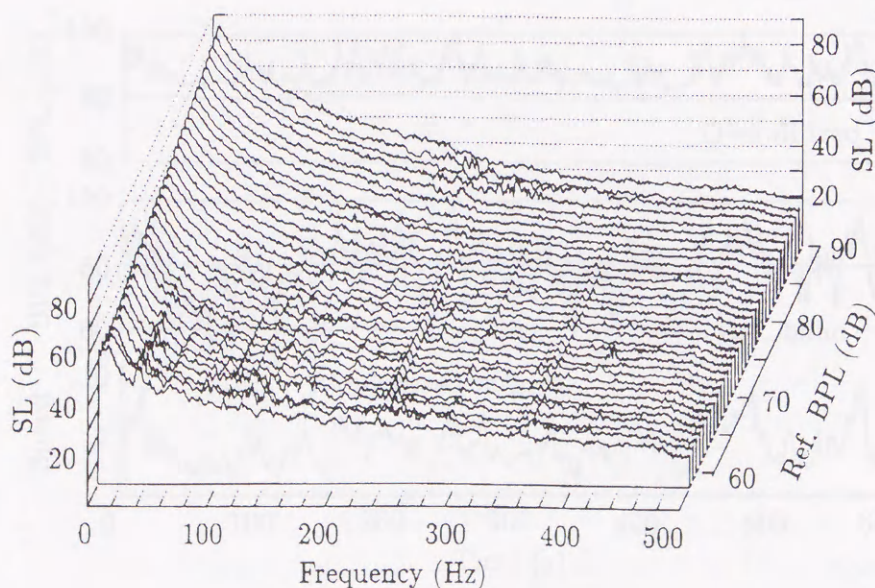


Fig. 6.5 The calculated results of average power spectra of the wind noise conditioned by the reference BPL (4 ~ 6 Hz) of the wind noise itself.

対応する指標 BPL 値を、まず、Fig. 6.1 における風雑音自身の超低周波域 $f_l \sim f_h$: 4 ~ 6 (Hz) について各スペクトル毎に算出した。次に、この L_{Wrb} についての 1 dB 区間毎のクラスを設定し、11,160 本のパワースペクトルから、(6.2) 式 $\langle S_W(f, \alpha_{Wrb}) \rangle$ に対応するクラス内のパワースペクトル平均を算出した。

Fig. 6.5 はその結果を示したもので、風雑音自身の指標 BPL (Ref. BPL) を基に風雑音のパワースペクトルの平均が捉えられることが実証される。一例として、Fig. 6.3 において、指標 BPL 80 dB 付近に着目すれば、オーバーオールでの SPL が 83 dB 付近であることから、指標 BPL 成分を除いた低周波域にほぼ同程度の風雑音が混入していることが分かり、そのスペクトル形状が本 Fig. 6.5 により読み取られる。本図をデータベースとして記憶しておくことにより、対象音測定時に混入する風雑音の平均パワースペクトルが、風速情報を用いることなく推定できることになる。

6.5.2.2 対象音の推定結果

さて、風雑音下の対象音観測時にも指標帯域での BPL 値 $L_{Yrb} \simeq L_{Wrb}$ を観

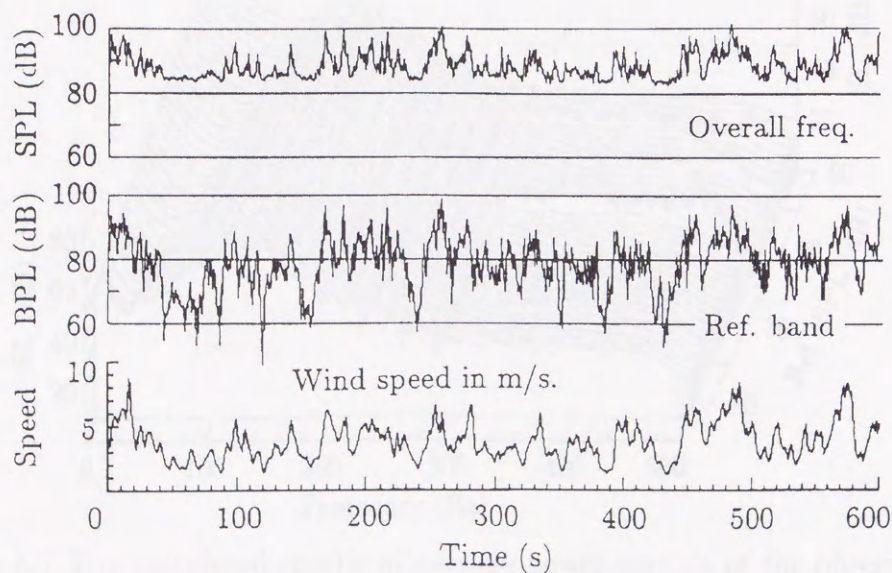


Fig. 6.6 An example of objective sound (random band noise) observation in a breeze condition: the SPL, the reference BPL (4 ~ 6 Hz) and the wind speed are shown.

測する。いま、一定レベルの帯域雑音を対象音として、これを観測した結果に本手法を適用する。まず、観測波形の一例を Fig. 6.6 に示している。ここでは、パワースペクトル領域での推定法を検討するため、指標 BPL 及び SPL は FFT スペクトルから算出している。もちろん、指標 BPL は通常の SPL 計測に際してアナログフィルタによりマイクロホン出力から容易に抽出できる。

図において、参考のために示しているマイクロホン近傍の風速変動と、指標帯域での BPL 変動とが、ほぼ同様な変動をしていることが明らかである。いま、この様な超低周波域での暗騒音成分や対象音成分が小さいとき、加えて、風雑音が大きいときには、この指標 BPL の様に対象音や暗騒音と明確に分離されて検出される可能性は大きい。

Fig. 6.7 は、第 4 章, Fig. 4.14 のパワースペクトルから指標 BPL を条件として算出した条件付き平均である。この様にして、風速情報を用いること無しに、対象音計測に際して混入する風雑音の様子が周波数領域で捉えられる。なお、混入風雑音の大きい領域で不規則に見られる、300 Hz 以上のスペ

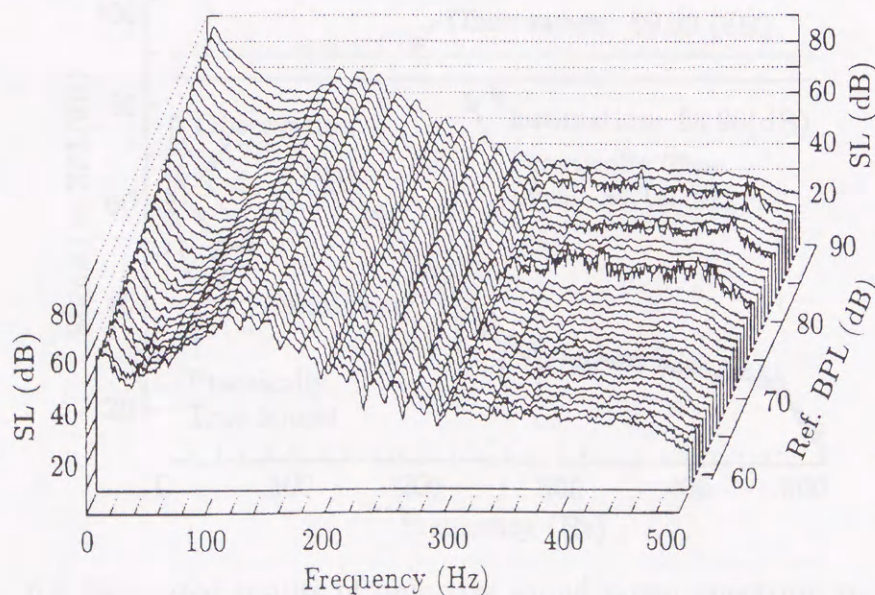


Fig. 6.7 The calculated results of average power spectra of the observed sound (the objective sound and the wind noise) conditioned by the reference BPL of the observed sound itself (9,920 frames at the frame periods of .5 sec. for 82.7 min.).

クトル成分の現れ方が、Fig. 4.15 の風速による条件付き平均の場合と若干異なる様にも見られる。この点は、風雑音の現象解明とも関係すると思われるが、今後の課題としたい。

さて、本手法では、Fig. 6.5, 6.7 の様に捉えられた条件付き平均から、(6.5) 式に沿って、指標 BPL と周波数成分毎に対象音の平均推定値 $\langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle^*$ を算出する。ここでは、周波数毎の推定効果を見るために (4.38) 式に沿って、指標 BPL クラス毎の推定結果を平均する。

Fig. 6.8 は、その結果を示したものである。図において、特に着目する低周波域の 80 Hz 以下で、風雑音のパワースペクトルを軽減させている効果が確認できる。この実験においては、対象音の 100 ~ 160 Hz 領域でのピークが優位を占めて、観測値 SPL 値 89.6 dB から、推定値 84.98 dB が得られ、対象音の近似的真値 (風雑音の小さいときの観測値) 84.1 dB を 1 dB 以内の誤差で推定していることが示されている。

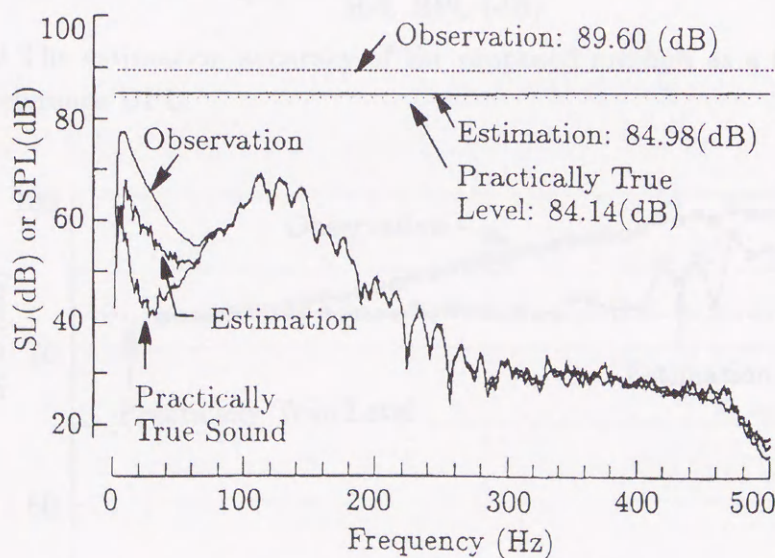


Fig. 6.8 Estimated results of objective sound power spectrum components by using the proposed method: The power spectra of the observed signal and the estimated sound are shown. The 'practically true sound' shows the power spectrum observed at small wind speed.

6.5.2.3 推定結果の比較検討

本手法による推定結果と、第4章における風速情報に基づく前手法による推定結果 Fig. 4.17 とを比較すれば、一見、前手法による方が良い結果が得られている様に判断される。しかしこれは、Fig. 4.17 においては、風速が大きく推定誤差が大きいところを除外して、風速範囲 2 ~ 5 m/s のみにつ

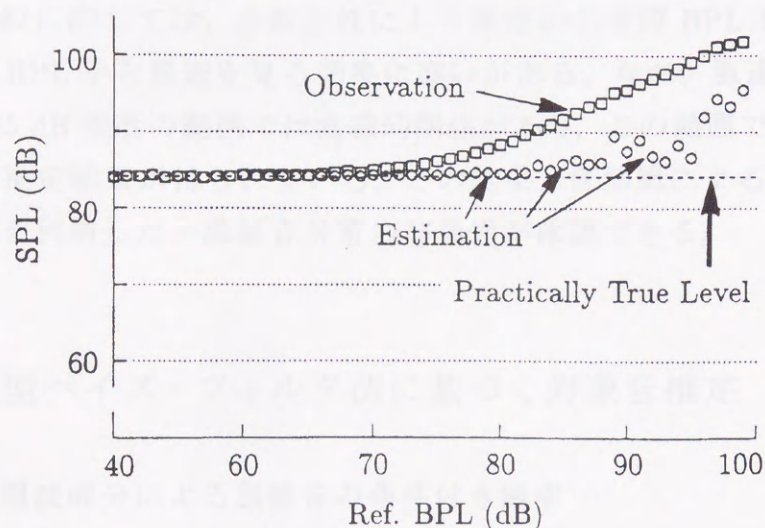


Fig. 6.9 The estimation accuracy of the proposed method as a function of the reference BPL.

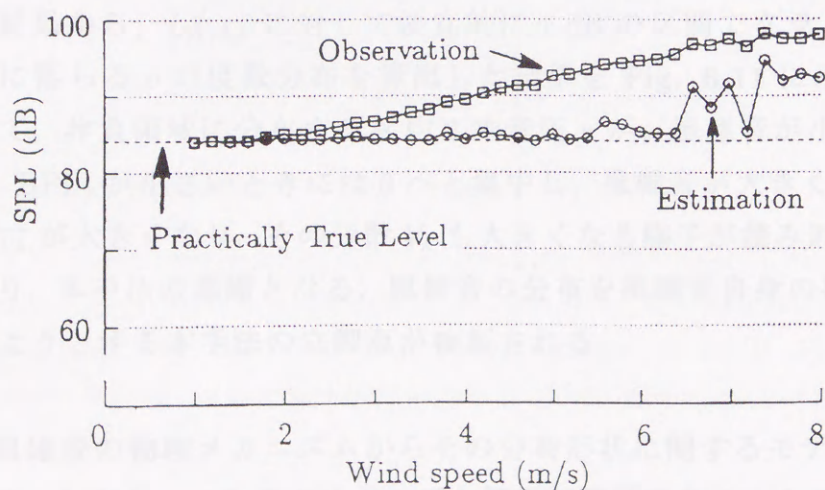


Fig. 6.10 The estimation accuracy as a function of the wind speed by using the previous method in the sec. 4.3.1 (re-insertion of Fig. 4.18).

いて平均した結果であり、これに対して、本手法による結果では、推定結果の悪化する領域の結果も含めて全体を平均していることの違いによる。

本手法による推定結果 $\langle S_X(f, \alpha_{Yrb}) \rangle^*$ を用いて、(6.6) 式に沿って、指標 BPL の値 α_{Yrb} 毎に算出した SPL 推定値 $L_{X^*}(\alpha_{Yrb})$ を Fig. 6.9 に示している。Fig. 6.10 は、風速情報よる推定結果、第 4 章の Fig. 4.18 を比較のために再掲したものである。両図における指標 BPL と風速との関係は Fig. 6.4 の散布図に示される。比較に際しては、非線形性により風速から指標 BPL を見る効果と、逆に、指標 BPL から風速を見る効果に違いがある。なお、風速 2 ~ 4.5 m/s, BPL 70 ~ 85 dB 程度の範囲では直線的関係があり、この範囲で比較する限りほぼ同等の推定結果が得られている。この結果、自然風による超低周波域の風雑音成分を利用した一風雑音対策の有効性が確認できる。

6.5.3 簡易型ベイズ・フィルタ法に基づく対象音推定

6.5.3.1 超低周波成分による風雑音の条件付き確率

本手法では、まず (6.8) 式において、風雑音自身の指標 BPL 値 $L_{Wrb,k}$ に基づき、風雑音の平均 2 乗音圧 v を条件付きガンマ分布で近似する。いま、風雑音の観測結果から、 $L_{Wrb,k}$ に対して便宜的に 1 dB の区間でクラスを設定し、各クラスに落ちる v の度数分布を算出した結果を Fig. 6.11 に示している。図において、非負領域に分布する平均 2 乗音圧 v が、風雑音が小さく、指標 BPL (Ref. BPL) が小さいときには 0 へと集中し、風雑音が大きくなるにつれて、平均 \bar{v}_k が大きくなり、その分散 V_k も大きくなる様子が読み取られる。この図により、本手法の基礎となる、風雑音の分布を風雑音自身の指標 BPL により捉えようとする本手法の立脚点が検証される。

本来、風雑音の物理メカニズムからその分布形状に関するモデルを検討すべきである。しかし、いまそのメカニズム解析が困難であることから、この非負領域での風雑音 v の分布を基礎的なガンマ分布で近似して捉えようとする。

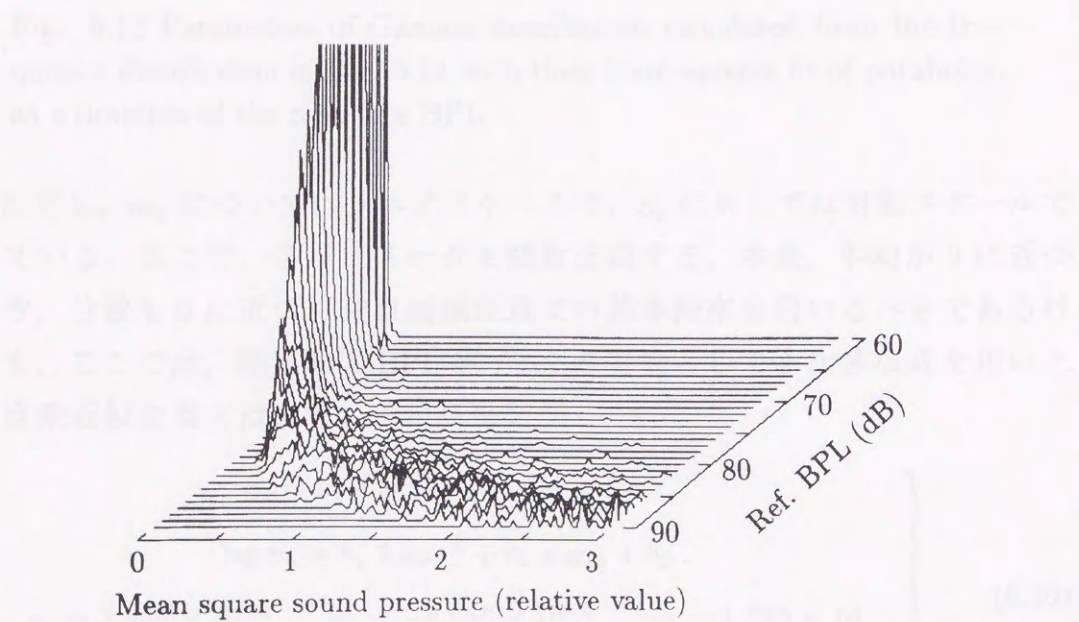
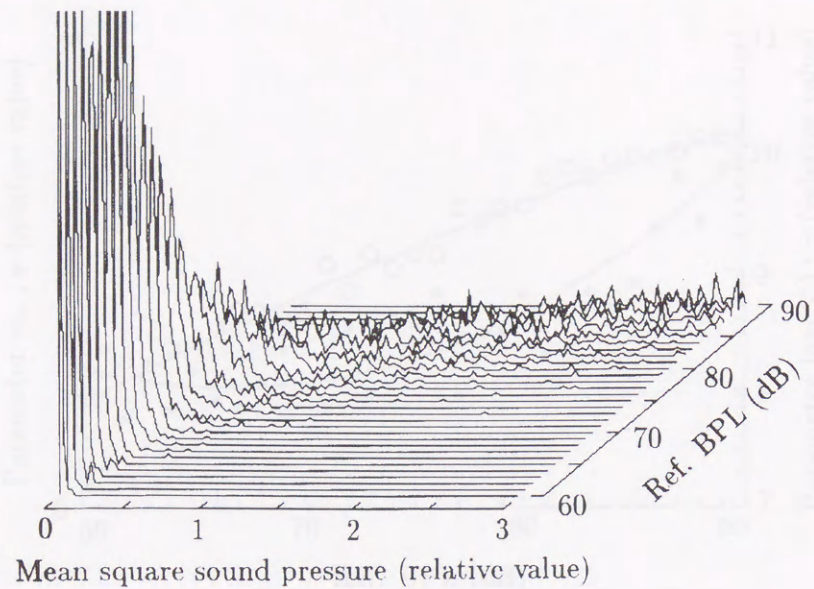


Fig. 6.11 Relative frequency distribution of the wind noise in the mean square sound pressure conditioned by the reference BPL calculated from the spectra in Fig. 6.1. The wind speed varied from 0.8 to 10.6 m/s around its average of 3.4 m/s for the observation time of 93 minutes.

Fig. 6.12 は、Fig. 6.11 での BPL クラス毎の度数分布に、ガンマ分布 $P_{\Gamma}(v; S_v, m_v)$ を当てはめて算出した分布パラメータ S_v, m_v を示したものであ

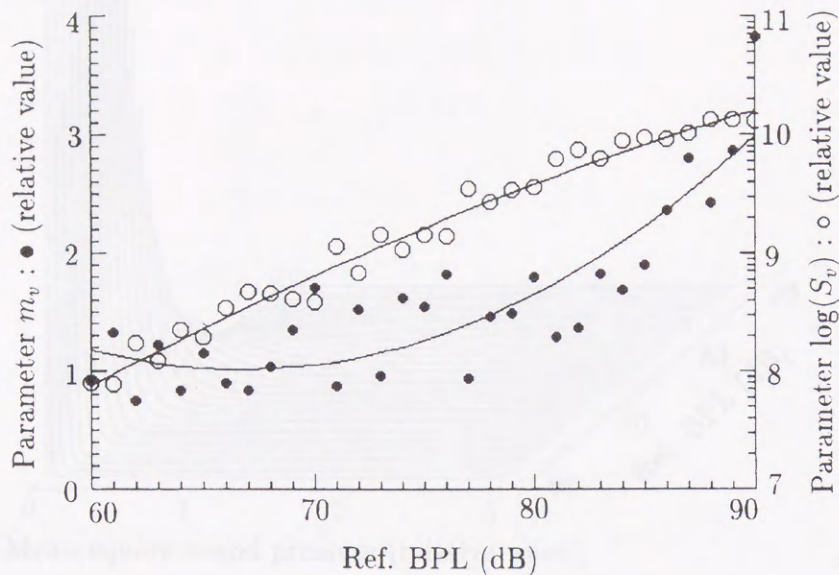


Fig. 6.12 Parameters of Gamma distribution calculated from the frequency distribution in Fig. 6.11 with their least-squares fit of parabolas as a function of the reference BPL.

る。ただし、 m_v についてはリニアスケールで、 S_v に対しては対数スケールで表している。ここで、各パラメータを関数近似する。本来、平均が 0 に近づくとき、分散も 0 に近づく非負領域変量での基本拘束を用いるべきであるけれども、ここでは、便宜的に BPL 値 L_{Wrb} の関数として 2 次多項式を用いた最小自乗近似を当てはめる。その結果：

$$\left. \begin{aligned} m_v &= a_1 L_{Wrb}^2 + a_2 L_{Wrb} + a_3, \\ \log S_v &= b_1 L_{Wrb}^2 + b_2 L_{Wrb} + b_3, \\ a_1 &= 3.645 \times 10^{-3}, \quad a_2 = -4.865 \times 10^{-1}, \quad a_3 = 1.725 \times 10, \\ b_1 &= -8.150 \times 10^{-4}, \quad b_2 = 2.000 \times 10^{-1}, \quad b_3 = -1.197 \times 10, \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

の近似式が得られた。

Fig. 6.13 はこの近似の結果である。すなわち、風雑音下の対象音推定に際して、観測値 y_k と共に指標 BPL 値 $L_{Wrb,k}$ を摂取する毎に、この (6.10) 式に基づいて混入する風雑音の分布をまず近似推定し、これを (6.9) 式に反映させる。

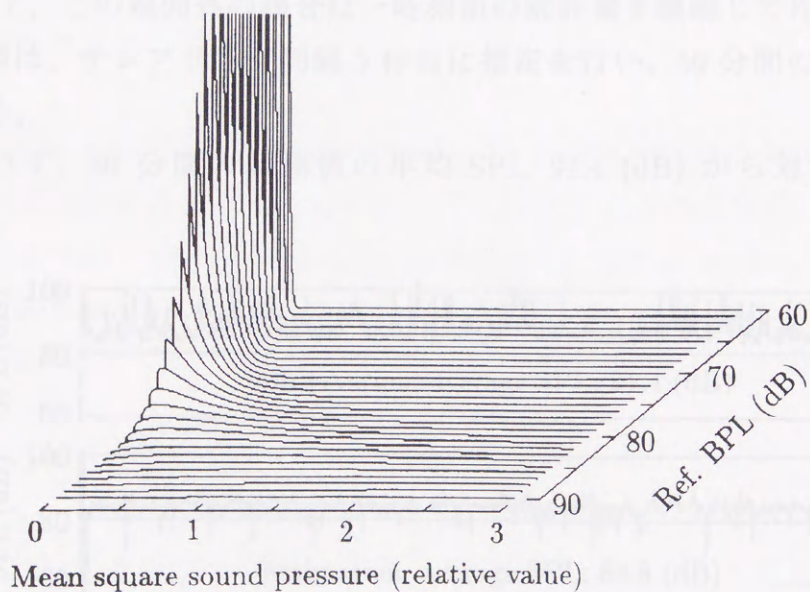
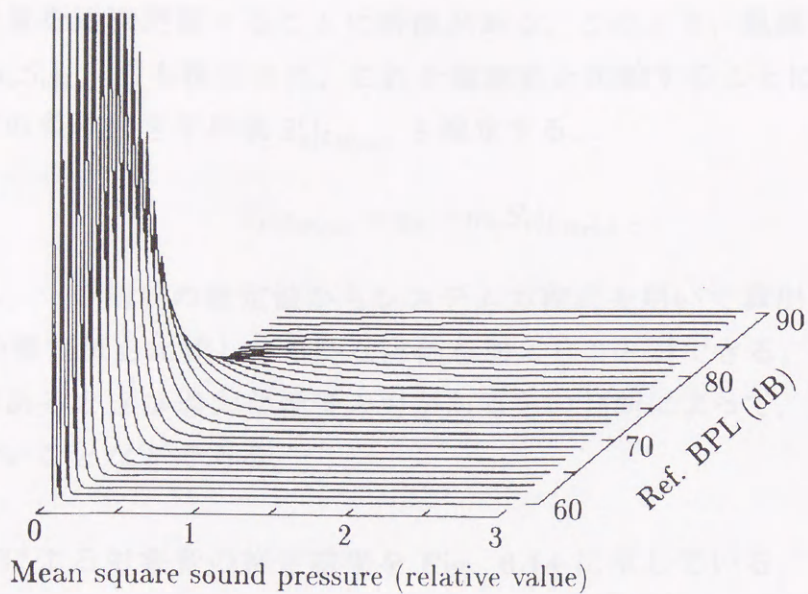


Fig. 6.13 Approximate expression of the conditional probability distribution function of wind noise by using Gamma distribution as a function of the reference BPL.

6.5.3.2 対象音の推定結果

本推定法では、観測値 y_k の撮取と共に風雑音の指標 BPL 値 $L_{Wrb,k}$ を撮取する。これを用いて、前述の風雑音の分布パラメータを算出し、混入する風雑

音の統計量を逐次更新することに特徴がある。このとき、風雑音の条件付き
 平均値 $m_v S_v |_{L_{Wr,b,k}}$ も推定され、これを観測値と比較することにより時々刻々
 の対象音の条件付き平均値 $\hat{x}'_k |_{L_{Wr,b,k}}$ も推定する。

$$\hat{x}'_k |_{L_{Wr,b,k}} = y_k - m_v S_v |_{L_{Wr,b,k}} \quad (6.11)$$

すなわち、一時刻前の推定値からシステム方程式を用いて算出される予測値
 x_k^* とこの推定値を比較して単純な評価を加えることができる。例えば、極端
 な開きがあるときは過大な雑音入力があるとの判断によって、統計量の更新
 を行わないことなどである。

本手法による対象音の推定結果を Fig. 6.14 に示している。ここでは、一
 例として、(6.11) 式における $\hat{x}'_k |_{L_{Wr,b,k}}$ のレベル値に対して上限 90 dB、下限 70
 dB を設けて、この範囲外の場合は一時刻前の統計量を継続して用いる評価を
 加えた。図は、サンプリング間隔 5 秒毎に推定を行い、50 分間の推定結果を
 示している。

図において、50 分間の観測値の平均 SPL: 91.4 (dB) から対象音の平均

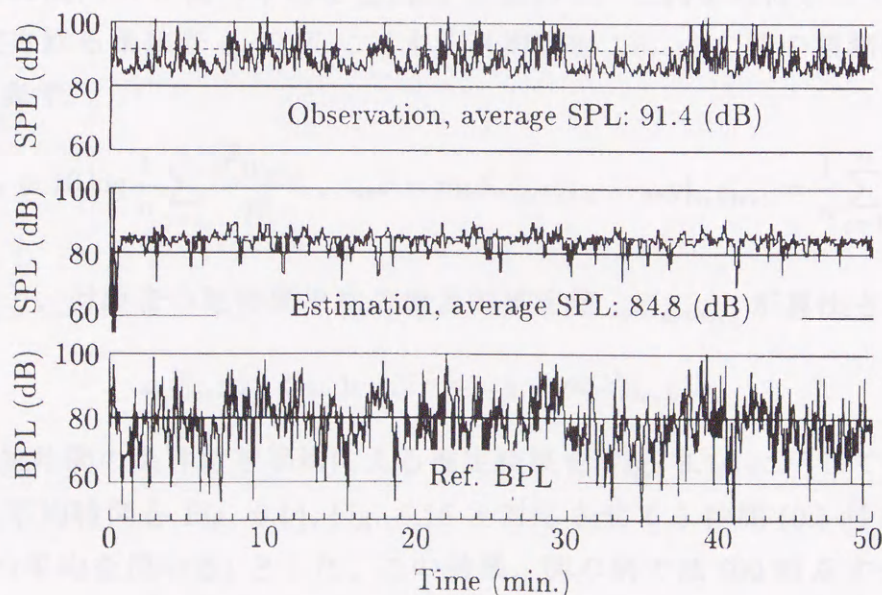


Fig. 6.14 Estimated results of the objective sound under the wind noise by using the simplified Bayes' estimation method in eq. (6.9) for 50 minutes with a sampling interval of 5 seconds.

SPL: 84.8 (dB) を推定しており、前節と同様に、対象音の近似的な真値 (風速の小さいときの観測値) 84.1 dB に近い良好な推定結果が得られた。

6.5.3.3 推定結果の比較検討

いま、比較のために、本簡易ベイズ・フィルタを全く用いないで、(6.11) 式のみによる 5 秒間隔毎の単純推定を 50 分間行った結果を **Fig. 6.15** に示している。(6.11) 式において、瞬時々々には、推定された風雑音の条件付き平均値 $m_v S_v |_{L_{Wr,b,k}}$ が観測値 y_k を越えることが多く、この場合には対象音が推定不可能となる。図から確認することは困難であるけれども、600 時点中、102 時点で推定が出来ず、グラフが不連続となっている。この単純推定された 498 時点に対する $\hat{x}'_k |_{L_{Wr,b,k}}$ の平均レベルは、図中に示される 86.8 dB である。これは、**Fig. 6.14** の結果より 2 dB 悪くなっている。この結果からも簡易ベイズ・フィルタ法の有効性が示される。

また、平均エネルギー^[95]の考え方から、以下の短時間での条件付き平均による簡易推定法を試みる。時々刻々サンプリングされる指標 BPL 値 $L_{Wr,b,k}$ の適当な短時間内の n 個の平均を ${}_{av}L_{Wr,b}$ と表わし、これを条件として (6.8) 式から推定される風雑音 v_k の T に対する平均値を ${}_{av}\hat{v}$ 、この間の観測値の平均を ${}_{av}y$ と表す。

$${}_{av}L_{Wr,b} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\overline{p^2}_{Wr,b,j}}{p_0^2}, \quad {}_{av}\hat{v} = m_v S_v |_{{}_{av}L_{Wr,b}}, \quad {}_{av}y |_{{}_{av}L_{Wr,b}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \overline{p^2}_{y,j}. \quad (6.12)$$

これにより、対象音の短時間平均の簡易的推定値 ${}_{av}\hat{x} |_{{}_{av}L_{Wr,b}}$ が算出される。

$${}_{av}\hat{x} |_{{}_{av}L_{Wr,b}} \simeq {}_{av}y - {}_{av}\hat{v} = {}_{av}y - m_v S_v |_{{}_{av}L_{Wr,b}}. \quad (6.13)$$

この、短時間の条件付き平均による推定結果を **Fig. 6.16** に示している。ここでは、平均時間を **Fig. 6.14**, **Fig. 6.15** と対応させて 5 秒間 (0.5 秒毎のデータ 10 個の平均を用いる) とした。この結果、図の例では 600 時点すべてについて ${}_{av}\hat{x} |_{{}_{av}L_{Wr,b}}$ の推定が可能となり、その平均レベルは 85.3 dB と算出された。近似的な真値 84.1 dB に比べて誤差 1 dB を若干上回り、簡易ベイズ・フィルタ法よりも少し精度が悪い結果となっている。

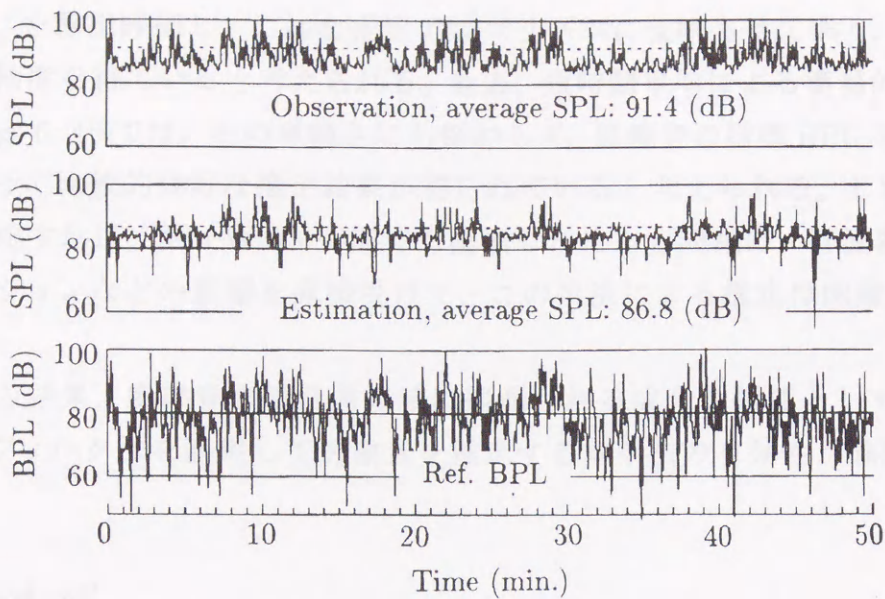


Fig. 6.15 Estimated results of the objective sound under the wind noise by using the simple eq. (6.11).

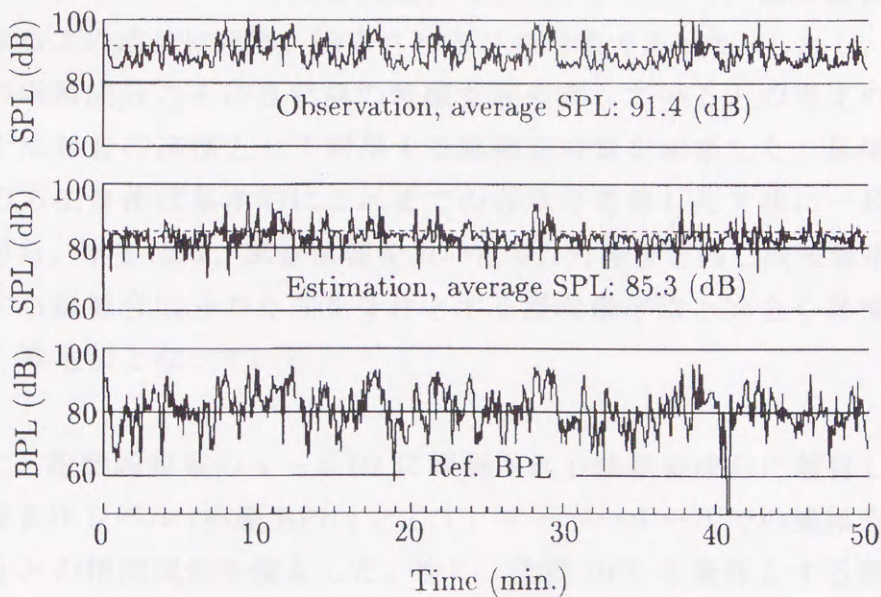


Fig. 6.16 Estimated results of the objective sound under the wind noise by using the simple estimation method with the short time conditional average in eq. (6.13).

簡易ベイズ・フィルタ法では、対象音の特性をシステム方程式によって推定アルゴリズムに反映させている。また、Fig. 6.14 では、瞬時の条件付き平均値

$\hat{x}'_k|_{L_{Wrb,k}}$ を算出評価し、これを推定アルゴリズムに反映させており、この結果良好な精度を得ていると考えられる。他方、短時間平均による簡易的推定法の結果 Fig. 6. 16 では、その単純さにも係わらず、風雑音の指標 BPL を用いることによって比較的良好な推定結果が得られていると考えられる。しかし、S/N 比が悪化すれば、第 4 章の 4.5 節でも指摘したことと同様に、計測器のキャリブレーションなどの影響を直接受けて、この手法による推定は困難となる。

以上の結果、風雑音の超低周波域に観測される成分を指標として、簡易ベイズ・フィルタ法を適用して対象音を推定する本手法の有効性が確認された。

6.6 むすび

超低周波域に卓越して表れる風雑音のパワースペクトル成分を利用する風雑音対策は、これまでほとんど見受けられない。むしろ、低周波音の計測に妨害となるこの成分は遮断、除去されるべき対象であった。しかし、本研究では、この卓越成分こそが自然風の特徴を最も表しているとの考えの下に、この成分を風雑音の指標として利用する風雑音対策を考察した。具体的な対象音推定の方法自体は基本的にこれまでの各章で考察した方法に一致する。しかしながら、本手法は、風速情報を用いたり、対象音と同じ周波数帯域で、なお卓越する風雑音成分の存在を条件とする様な推定法とは全く異種の着眼点に基づく推定法となっている。

初めに、超低周波域の 4 ~ 6 Hz に観測される風雑音成分に着目し、これを指標帯域音圧レベル (指標 BPL) として、オーバーオールでの風雑音音圧レベル (SPL) との相関関係を検証した。次に、指標 BPL を条件とする風雑音の条件付き平均パワースペクトルによって風雑音を捉えた。これに基づくパワースペクトルでの対象音推定法を検討し、風速情報を用いる手法と実験的に比較してその有効性を検証した。また、風雑音の平均 2 乗音圧を、指標 BPL を条件とする条件付きガンマ分布で近似して捉えた。これに基づく、簡易ベイズ・フィルタの適用による対象音推定法を検討し、より簡易的な短時間の条件

付き平均による推定法とも実験的に比較してその有効性を検証した。

本研究の結果、通常の高周波騒音計を用いる屋外での低周波音計測において、対象周波数域外に卓越して混入する風雑音の超低周波成分を利用する風雑音対策の有効性が確認された。今後の課題として、

1. 風雑音の超低周波成分と低周波域成分とのより精密な関係を明らかにする。
2. 航空機騒音などのレベル変動を伴う対象音推定法の実験的研究を進める。
3. 都市部、平地部など、計測環境と風雑音との関係を、風雑音の周波数成分との関連も含めて典型的に捉える。

などが残されている。

第7章

結 論

本研究は、自然風の存在する屋外での低周波音計測に際して不可避免的に風雑音が混入して対象音の計測が困難となる問題に対して、風雑音の混入する観測値から対象音のレベルを推定する手法を主として実験的に考察した。

ここで問題とする低周波風雑音の主要成分は、気流と共に流下する乱流を要因とする圧力変動成分が支配的であり、通常のウィンドスクリーンの装着のみでは除去することが困難である。また、この風雑音の周波数スペクトル成分が低周波域で大きく現れるため、測定対象とする低周波音の周波数域と重なって、通常の周波数フィルタのみの使用によってこれを除去することは原理的にも困難である。このため、低周波音計測に関する我が国での実用規格においては、屋外での低周波音は風のないときに測定するのが望ましいとしている。しかしながら、近年、自然風下での風力発電所風車の騒音計測に関する国際規格制定のための実験的検討も進められるなど、低周波音計測における風雑音対策の研究の必要性が増している。

以上の背景の下に行った本研究の各章での成果を次に要約する。

第1章の序論に続く、第2章では、低周波音計測における風雑音対策としては余り知られない、対照的な2種類の手法、(1)簡易ベイズ・フィルタ法と(2)同期検波法を考察した。初めに、両手法の特徴や互いの方法論上における対照性に留意してその理論設定を行った。簡易ベイズ・フィルタ法においては、非負領域で揺らぐパワー変量に対して、手法を簡易化する立場から、ガウス

分布近似に基づく対象音推定法と、ガンマ分布近似に基づく推定法を具体化した。また、同期検波法においては、平均周りの正負に揺らぐ音圧変量を対象とし、自然風下でのコヒーレンシ低下による検出レベル低下の問題に対して、検出した対象音信号の位相揺らぎに着目した推定法を検討した。両手法の有効性は、最も単純な伝搬特性を示す建設用地と運動場において、音の距離減衰特性を計測する実験によって確認した。

第3章では、マイクロホン近傍の風速情報を積極的に利用する一手法として、カルマン・フィルタの適用に基づく対象音推定法を考察した。これは、風雑音対策として風雑音の直接的な原因である風と風雑音との関係そのものに着目し、風速情報を利用する立場からの研究がほとんど見受けられないことによる。初めに、マイクロホンに混入する風雑音の正負に揺らぐ瞬時音圧変量をガウス分布で近似した。短時間毎のこの風雑音の分散を、同時に観測される風速情報を利用し、風速による条件付き分布として捉えた。これに基づくカルマン・フィルタの具体的適用に際しては、以下の手順を考察した。まず、風雑音の動特性を風速情報を用いて表される1次自己回帰モデルによって記述した。これにより、時々刻々の風速情報の摂取によりカルマン・フィルタのパラメータを逐次変更する方式を設定した。風雑音下における対象音推定に際しては、測定すべき対象音の事前情報が得られない場合を考え、風雑音と対象音の混合した観測値から、まず推定すべき初段信号として風雑音を設定した。最後に、観測値からこの風雑音推定値を減じることにより風雑音に埋もれた対象音を推定する手法を検討した。本手法の有効性は、屋外における自然風下において一定レベルの帯域雑音の観測を行った結果に適用して確認した。

第4章では、定常性の強い対象音を計測する際に有効となる、マイクロホン近傍の風速情報に基づく風雑音混入下の簡易的な2種類の対象音推定法を考察した。振動性機械音など、計測対象とする低周波音がほぼ一定レベルを示す場合も比較的多い。風雑音下におけるこの様な定常性の強い対象音レベルSPLの計測に際して、風速の2種類の条件付き平均、(i) オーバーオールでの平均2乗音圧量における条件付き平均と(ii) FFT解析に基づくパワースペクトルでの条件付き平均を用いる簡易的对象音推定法を考察した。初めに、オー

パーオールにおける平均2乗音圧での対象音推定の基礎となる、短時間毎の風雑音の平均2乗音圧を風速の条件付き平均として捉え、条件付きパワー加算の原理のみを用いた対象音推定法を検討した。次いで、短時間毎の風雑音のパワースペクトルを風速の条件付き平均として捉え、条件付きパワースペクトル加算の原理のみを用いた対象音推定法を検討した。このとき、計測の実際でしばしば起こる振幅方向で打ち切られた欠損観測値から元の波形のスペクトルの一推定法についても検討を加えた。2種類の条件付き平均に基づく簡易推定法の有効性は、第3章での実験結果と、新たに自然風下において低周波帯域雑音の観測を行った結果に適用して確認した。

第5章では、低周波音計測法の実用規格でも規定された、オクターブ帯域音圧レベル BPL 計測を取り上げ、風雑音の特徴成分抽出に基づく2種類の風雑音対策法を考察した。低周波音の計測法については、国際的にも未だ規定されていない。しかし、実際の計測においてはオクターブ BPL を計測することが多く、我が国における実用規格においても、オクターブ BPL の測定が規定された。ここでは、風雑音下におけるこの様な BPL 計測を取り上げ、実用的には低次統計量のみを用いる2種類の対象音 BPL 推定法として、(i) 風雑音の BPL 間の相関関係に基づき、風雑音の卓越成分が観測される帯域での BPL を基に他の帯域に混入する風雑音 BPL を推定することを基礎とした手法と (ii) マイクロホン近傍の風速と風雑音 BPL 間に潜在する高次相関情報を抽出して反映させた拡張型回帰理論の導入に基づく一対象音 BPL 推定法を考察した。本手法の有効性は、まず、(1) 無風下での観測による真値の既知な帯域対象音と風雑音のみの帯域観測値とを計算機上で合成した観測値に適用して詳細に評価し、次いで、(2) 風雑音下における対象音の実際の観測値に適用して確認した。

第6章では、通常、計測に対する妨害成分として遮断される、風雑音の超低周波成分の利用による簡易的な2種類の対象音推定法を考察した。初めに、通常の騒音計測に多用されるウィンドスクリーンを装着した精密騒音計を用いて、計測対象周波数域の外での超低周波域に観測される風雑音成分と、他のスペクトル成分間に強い相関特性があることを実験的に示した。この実証に

に基づき、まず、4～6 Hz 帯域での風雑音の BPL を指標として、(i) 指標 BPL を条件とするパワースペクトルでの条件付き平均を用いたパワースペクトルでの対象音推定法を検討した。次いで、(ii) この指標 BPL に基づき、風雑音の非負領域での平均 2 乗音圧変量の揺らぎを条件付きガンマ分布で近似して捉え、さらに、対象音、観測音の平均 2 乗音圧値の揺らぎもガンマ分布で近似して捉えることにより、簡易的にベイズ・フィルタの適用により時々刻々の対象音を推定する一手法を検討した。本手法の有効性は、自然風下において一定レベルの低周波帯域雑音の観測を行った結果に適用し、一定時区間毎の条件付き平均のみを用いる簡易的推定法による結果とも対比して確認した。

本論文は、以上の第 2 章以降の各章において検討した様に、屋外の低周波音計測において自然風による風雑音の混入する観測値から対象音を推定する手法に関して、主として実験的に研究した成果をまとめた。上述した様に、近年の知見によれば、本研究で対象とした自然風による風雑音の低周波成分の主要部が、マイクロホンの気流上流側で発生した乱流が流下して観測される圧力変動であるとされる。これは、マイクロホンの気流下流側に発生する乱流対策の様に、単にウインドスクリーンを大型化したり、形状や材質の選定などハードウェア的工夫のみでは除去することが困難である。このため、本研究では、風雑音と対象音の統計的性質や動特性の違いに着目したり、マイクロホン近傍の風速情報を活用したり、さらに、結果的にマイクロホンに混入する風雑音成分自身の利用による対象音のソフトウェア的推定法を考察し、各章で示した様な一定の成果を確認した。各手法の要点を以下に簡単に整理する。

- I. 風速情報が得られず、超低周波域での風雑音成分が検出できない場合。
 - i. 風雑音の定常性が比較的強く、刻々の対象音の推定値とこの分布情報を必要とする場合：第 2 章，2.2 簡易型ベイズ・フィルタ法の適用の検討。
 - ii. 対象音が純音性で、その周期情報が得られる場合：第 2 章，2.3 同期検波法の適用。
 - iii. オクターブ帯域音圧レベルを測定する場合：第 5 章，5.2 風雑音の特徴 BPL を利用した推定法適用の検討。
- II. マイクロホン近傍の風速情報が得られる場合。

- i. 対象音が一定レベルとは限らない場合：第3章，風速情報を利用したカルマン・フィルタの適用。
- ii. 対象音が一定レベルの場合：第4章，4.2 平均2乗音圧における推定法の適用。
- iii. オクターブ帯域音圧レベルを測定する場合：第5章，5.3 風速－風雑音間の高次回帰関係を利用した推定法の適用。
- iv. 風雑音-対象音間のパワースペクトルに差異がある場合：第4章，4.3 パワースペクトルにおける推定法の適用。

III. 超低周波域の風雑音成分が検出できる場合。

- i. 対象音が一定レベルとは限らない場合：第6章，6.4 簡易型ベイズ・フィルタ法の適用。
- ii. 対象音が一定レベルの場合：第6章，6.3 パワースペクトルにおける推定法の適用。

可能なら，風速情報の利用による手法と超低周波域の風雑音成分の検出による手法を併用することがより効果的と考えられる。

各章でも今後の問題を示した様に，さらに研究しなければならない課題は残されている。特に，

1. 実用的立場から簡易性を失わない様に配慮しつつ，風速，及び超低周波域に混入する風雑音自身の情報に基づく，高次統計情報も含めた，よりきめ細かい推定法を見い出して行く。
2. 実用面では，風の性質の違いと風雑音との関係，計測環境による違いなどを典型的にでも捉えて行く。
3. また，計測対象として航空機などの移動音源，非定常音源に対する推定法の実際的適用を図る。

の各項を今後の重要な課題としたい。

謝 辞

本研究の達成にあたり、その機会を与えて下さると同時に、終始、多大なご教示と温かいご配慮を頂いた広島大学 雛元孝夫 教授に深甚の謝意を表します。さらに、種々の適切なお教示を頂いた広島大学 佐々木博司 教授、広島大学 山下英生 教授、広島大学 尾崎俊治 教授に心より謝意を表します。

また、本研究の遂行にあたって、長期にわたり丁寧なご指導を頂き、常に温かい励ましを頂いた近畿大学 太田光雄 教授(元広島大学教授)に深謝します。さらに、研究活動の指針を示して頂いた広島電機大学 葉佐井博巳 教授(元広島大学教授)、広島電機大学 岩澤 宏 教授(元福井大学教授)に深謝します。

さらに、平素有益なご助言、ご援助を頂いた広島修道大学 廣光清次郎 教授、広島大学 岩重博文 教授、近畿大学 畠山一達 教授、広島女子大学生 田頭 教授、近畿大学 中迫昇 先生、福山大学 三谷康夫 先生、近畿大学 宮田繁春 先生、近畿大学 西村公伸 先生、尾道短期大学 藤田幸史 先生、広島商船高等専門学校 小川仁士 先生、鳥取工業試験場 小谷章二 研究員に感謝します。

最後に、常に適切な助言や有益なご援助、多大なご協力を頂いた広島電機大学 西村正文 教授、岡山理科大学 南原英生 教授に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 公害対策基本法, 2章 (1967, 昭 42 法 132).
- [2] 公共用飛行場周辺における航空機騒音による障害の防止等に関する法律 (1967, 昭 42 法 110).
- [3] 騒音規制法 (1968, 昭 43 法 98).
- [4] 久野, “騒音・振動評価の現状と問題点,” 騒音制御 **17**, 273-275 (1993).
- [5] 時田, “低周波音公害問題をめぐって,” 日本音響学会誌 **35**, 395-401 (1979).
- [6] 日本音響学会編, 騒音・振動 (下) (コロナ社, 1982), pp. 197-202.
- [7] 時田, “低周波音の評価について,” 日本音響学会誌 **41**, 806-812 (1985).
- [8] 五十嵐, 山下, 騒音工学 (コロナ社, 1988), pp. 64-66.
- [9] 落合, “低周波音の評価,” 騒音制御 **17**, 285-288 (1993).
- [10] 中野, “低周波空気振動の測定・評価方法と評価値についての提案,” 騒音制御 **11**, 103-105 (1987).
- [11] 山田, “低周波音問題の現状と将来,” 日本音響学会誌 **43**, 189-193 (1987).
- [12] 日本騒音制御工学会認定技師の会実用規格, “低周波音圧レベル測定方法,” 日本騒音制御工学会 INCE/J・C 004-1997 (1997).
- [13] 日本騒音制御工学会認定技師の会実用規格, “低周波音圧レベル計,” 日本騒音制御工学会 INCE/J・C 005-1997 (1997).
- [14] 大熊, “低周波音測定器,” 騒音制御 **4**, 219-222 (1980).
- [15] 文献 [6], pp. 210-212.
- [16] 福原, 大熊, 木本, “低周波音測定器と計測上の留意点,” 騒音制御 **8**, 125-131 (1984).
- [17] 寺尾, “気流中での騒音測定法,” 騒音制御 **14**, 258-262 (1990).

- [18] 北村, 騒音と振動のシステム計測 (コロナ社, 東京, 1975), pp. 31-32.
- [19] 日本音響学会編, 騒音・振動 (上) (コロナ社, 1978), p. 76.
- [20] 日本騒音制御工学会技術部会低周波音分科会, “低周波音測定方法の提案について,” 騒音制御 **16**, 198-203 (1992).
- [21] 二井, 五反田, 松宮, 河村, 小川, 土屋, 山田, 猪俣, “アップウィンド型風車の低周波音,” 日本音響学会誌 **52**, 341-347 (1996).
- [22] 文献 [19], pp. 137-139.
- [23] G. A. Daigle, J. E. Piercy and T. F. W. Embleton, “Effect of atmospheric turbulence on the interference of sound waves near a hard boundary,” *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 622-630 (1978).
- [24] S. Ljunggren and A. Gustafsson, “Expert group study on recommended practices for wind turbine testing and evaluation. 4. Acoustic measurement of noise emission from wind energy conversion systems. 2nd edition,” IEA programme for R&D on WECS (1988).
- [25] P. D. Schomer, R. Raspet, J. Brunner, D. Marshall, M. Wagner, and D. Walker, “Reduction of Wind Noise for Unattended Blast Noise Monitoring,” *Noise Cont. Eng. J.* **34**, 77-88 (1990).
- [26] R. Cook, “Microphone windscreens for low level environmental measurements,” *Proc. 1991 Intl. Conf. on Noise Cont. Eng.*, 969-972 (1991).
- [27] 青島, 五十嵐, “M-系列の相関を用いた音響測定,” 日本音響学会誌 **24**, 197-206 (1968).
- [28] 石井, 山田, 幹, 五十嵐, “同期積分の手法による騒音伝搬測定,” 日本音響学会誌 **35**, 226-234 (1979).
- [29] K. W. Goff, “The application of correlation techniques to some acoustic measurements,” *J. Acoust. Soc. Am.* **27**, 236-246 (1955).

- [30] J. Y. Chung, "Rejection of flow noise using a coherence function method," *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 388-395 (1977).
- [31] S. Morgan and R. Raspet, "Investigation of the mechanisms of low-frequency wind noise generation outdoors," *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 1180-1183 (1992).
- [32] 二井, 五反田, "風力発電システムの騒音測定技術 (1)," 及び, "同 (2)," 日本音響学会講演論文集, 741-742 (1997.3), 及び, 667-668 (1997.9).
- [33] 梶, "流体から発生する音," 騒音制御 **14**, 219-220 (1990).
- [34] M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically, I. General theory," *Proc. Roy. Soc. A.* **211**, 564-587 (1952).
- [35] M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically, II. Turbulence as a source of sound," *Proc. Roy. Soc. A.* **222**, 1-32 (1954).
- [36] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Trans. ASME, J. Basic Eng.* **82**, 35-45 (1960).
- [37] R. E. Kalman and R. S. Bucy, "New results in linear filtering and prediction theory," *Trans. ASME, J. Basic Eng.* **83**, 95-108 (1961).
- [38] 有本, カルマン・フィルター (産業図書, 東京, 1977).
- [39] 片山, 応用カルマン・フィルタ (朝倉書店, 東京, 1983).
- [40] 石井 泰, "最近の電子計測, 第3章 相関技術と電子計測," 電気学会雑誌 **91**, p. 804, (1979).
- [41] D. L. Gillyooly and P. Henneuse, "Multifunction chips plays many parts in analog design, p. 125," *Electronics* **54**, (1981).
- [42] 文献 [19], pp. 130-142.
- [43] 前川, 建築音響 (共立出版, 東京, 1978), pp. 89-97.
- [44] R. H. Lyon, 松本監訳, 交通騒音 (技報堂, 東京, 1976) pp. 185-194.

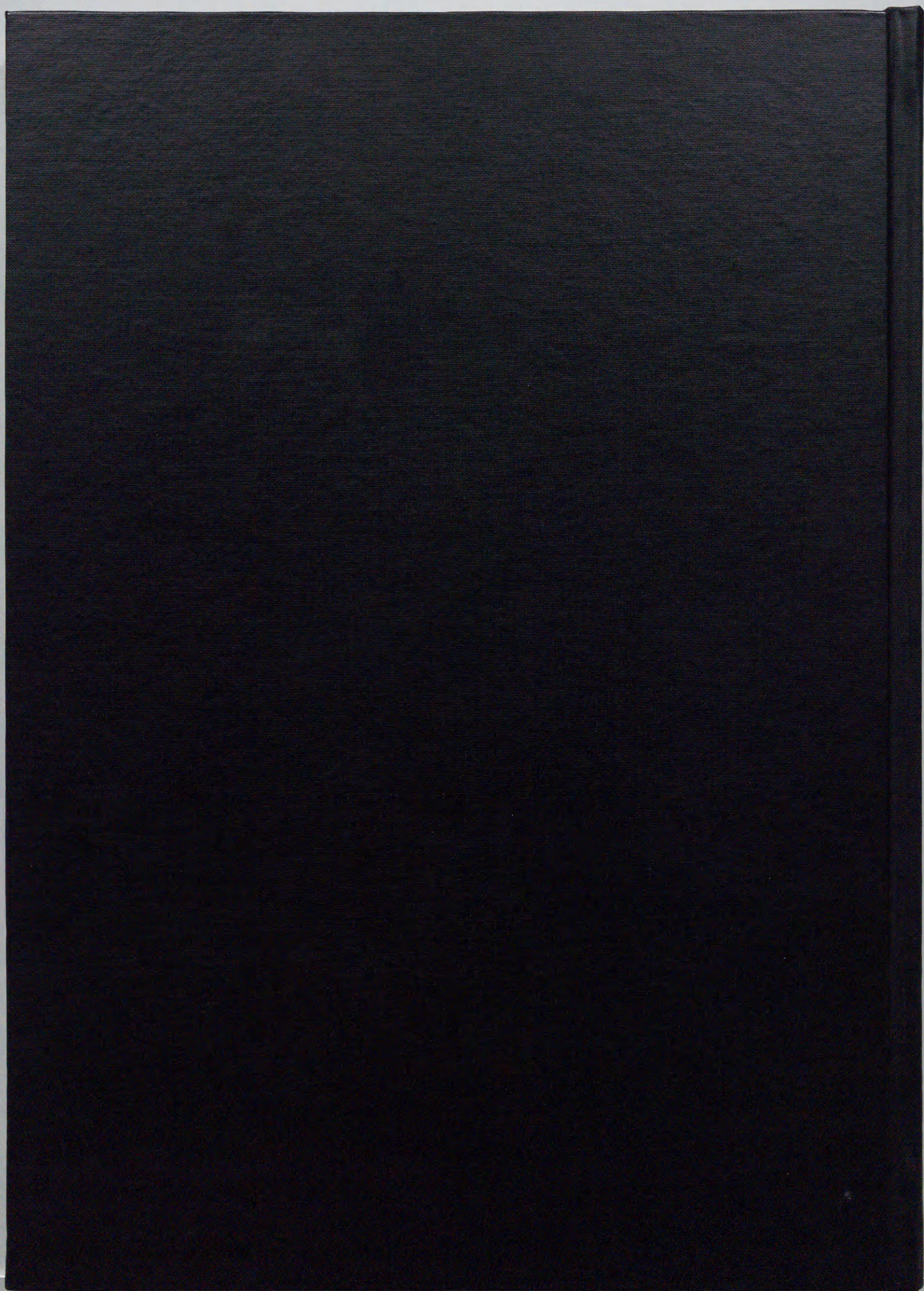
- [45] 太田, 高桑, 宮田, “低周波音計測における対照的な二種風雑音対策 — ベイズ・フィルタと同期検波法 —,” 日本音響学会誌 **41**, 690-699 (1985).
- [46] Y. Takakuwa and M. Ohta, “A wind noise countermeasure by means of the coherent detector in the low-frequency sound signal measurement,” *Proc. 1985 Intl. Conf. on Noise Cont. Eng.*, 1323-1326 (1985).
- [47] Y. Takakuwa and M. Ohta, “A basic trial on experimental and theoretical methods of removing wind and background noise in the actual measurement of sound propagation,” *Proc. 1987 Intl. Conf. on Noise Cont. Eng.*, 1515-1518 (1987).
- [48] J. R. Hassall and K. Zaveri, *Acoustic Noise Measurements*, (Brüel & Kjær, NÆRUM, 1979), p. 34.
- [49] J. S. Anderson and M. Bratos-Anderson, *Noise; Its Measurement, Analysis, Rating and Control*, (Avebry Technical Ashgate Publishing, Hants, 1993), p. 115.
- [50] M. Strasberg, “Dimensional analysis of Windscreen noise,” *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 544-548 (1988).
- [51] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, “Static and dynamic state estimation methods using information of wind speed in the low-frequency noise environment contaminated by wind-induced noise,” *Proc. 1991 Intl. Conf. on Noise Cont. Eng.*, 1077-1080 (1991).
- [52] 高桑, 太田, 西村, 南原, “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 **48**, 137-145 (1992).
- [53] 文献 [18], p. 172, 200.
- [54] C. M. Harris (ed.), *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*, (McGRAW-HILL, N.Y., 1991), p. 1.21.
- [55] 文献 [49], p. 71.

- [56] 文献 [49], pp. 112-117.
- [57] H. Minamihara, M. Ohta, M. Nishimura and Y. Takakuwa, "A Detection Method of the Correlation Function and Frequency Spectrum for Random Noise or Vibration with an Amplitude Limitation," *Proc. 1988 Intl. Conf. on Noise Cont. Eng.*, 43-46 (1988).
- [58] H. Minamihara, M. Nishimura, Y. Takakuwa and M. Ohta, "A Method of Detection of the Correlation Function and Frequency Power Spectrum for Random Noise or Vibration with Amplitude Limitation", *J. Sound and Vib.* **141**, 425-434 (1990).
- [59] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, "A Simplified Static Measurement Method of Estimating the Low-frequency Acoustic Signal in the Outdoor Measurement Contaminated by Wind Noise", *Proc. 2nd ASIAN/PACIFIC Intl. Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control*, 62-67 (1993).
- [60] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, "A simplified method using wind speed for the estimation of low-frequency acoustic signal under the contamination of wind noise," , *J. Acoust. Soc. Japan (E)* **15**, 45-52 (1994).
- [61] 文献 [19], pp. 77-80., 及び, 文献 [18], pp. 53-56.
- [62] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, "Two kinds of static and dynamic state estimation methods by using wind speed information in environmental low-frequency noise measurement," *Tech. Papers of 5th Western Pacific Reg. Acoust. Conf.*, 806-811 (1994).
- [63] 高桑, 太田, 藤田, "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* **53**, 779-787 (1997).
- [64] 文献 [6], p. 193.

- [65] Y. Nii, T. Gotanda, H. Matsumiya, T. Yamane and S. Kawamura, "Impulsive low-frequency noise generation by a 15m diameter horizontal axis wind turbine generator with downwind configuration," *J. Acoust. Soc. Japan (E)* **13**, 259-265 (1992).
- [66] 文献 [6], p. 212.
- [67] 文献 [54], p. 5.14, 11.1.
- [68] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, "An Experimental Study on the Measurement of Objective Sound under Contamination of Wind Noise", *Proc. 4th Intl. Congress on Sound and Vib.*, 625-632 (1996).
- [69] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura and H. Minamihara, "An Experimental Study on the Measurement of Objective Sound under Contamination of Wind Noise," *Intl. J. Acoust. and Vib.* **2**, 147-152 (1997).
- [70] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, "A Dynamic Estimation Method of Low-frequency Objective Sound in the Outdoor Measurement Contaminated by Wind Noise", *Proc. 5th Intl. Congress on Sound and Vib.*, (Invited paper) 2119-2126 (1997).
- [71] M. J. Crocker and A. J. Price, "Sound transmission using statistical energy analysis," *J. Sound Vib.* **9**, 469-486 (1969).
- [72] 文献 [19], p. 102, 130.
- [73] 文献 [38], p. 44, 及び, 文献 [39], p. 179.
- [74] 数学ハンドブック編集委員会, 理工学のための数学ハンドブック (丸善, 東京 1960), pp. 325-326.
- [75] 森口, 宇田川, 一松, 数学公式 III (岩波書店, 東京 1968), pp. 91-95.
- [76] 小倉, 確率過程論 (コロナ社, 東京, 1978), pp. 35-37.
- [77] 添田, 太田, 大松, 数理統計の基礎と応用 (日新出版, 東京, 1980), pp. 164-165.

- [78] 文献 [77], pp. 135.
- [79] 犬井, 特殊函数, (岩波書店, 東京, 1976) p. 51
- [80] 文献 [74], p. 6.
- [81] 西脇, 斉藤, “相関法を用いた騒音計,” 騒音制御 **2**, 24-26 (1978).
- [82] A. V. D. Ziel 著, 瀧 他訳, 雑音 (無線従事者協会, 東京, 1957), pp. 368-371.
- [83] 高桑, 西村, 南原, 太田, “暗騒音混入下における音響システム計測の実験的考察,” 信学技報 **EA 83-54**, 33-40 (1983).
- [84] 文献 [8], p.11., 及び, 文献 [19], p. 73.
- [85] JIS 規格 Z8731-1983.
- [86] 磯部編, 相関函数およびスペクトル—その測定と応用—, (東京大学出版会, 東京, 1976) pp. 125-130.
- [87] 太田, 畠山, 高桑, “暗騒音下における対象音推定の一動的手法—カルマン・フィルタ理論の一改善と交通騒音への適用—,” 日本音響学会誌 **38**, 2-12 (1982).
- [88] T. R. McCalla 著, 三浦 他訳, 数値計算法概論 (サイエンス社, 東京, 1982), pp. 73-78.
- [89] M. Schwartz and L. Shaw, *Signal Processing*, (McGRAW-HILL, N. Y., 1975), p. 113.
- [90] 森下, “相関器を簡易化するための新しい方法,” 計測と制御, **3**, pp.282-288 (1964).
- [91] H. Minamihara, M. Nishimura and M. Ohta, “A simplified method of detecting a linear correlation function for arbitrary non-Gaussian random noise or vibration,” *Acoustics Letters*, **10**, 186-190 (1987).
- [92] 文献 [90], p. 284.

- [93] 日野, スペクトル解析, (朝倉書店, 東京, 1978), pp. 187-188.
- [94] 星谷, 確率論手法による振動解析, (鹿島研究所出版会, 1974), pp. 45-66.
- [95] 文献 [19], p. 11, 58.
- [96] JIS 規格 C1505-1988.
- [97] H. E. Bass, R. Raspet and J. O. Messer, "Experimental determination of wind speed and direction using a three microphone array," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 695-696 (1995).



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

