

超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測法
に関する研究

茂木 貴弘

システム情報工学研究科
筑波大学

2014年 3月

概 要

本論文では、感温・感湿体を用いない、超音波による新しい温湿度計測法として、超音波の音速と減衰計測に基づく温湿度計測法を確立することを目的とした。本計測法が実用可能かどうか判断するための数値目標として、気温精度 $\pm 0.5 \text{ K}$ 、湿度精度 $\pm 5\% \text{ RH}$ と設定した。超音波の音速や減衰率（減衰係数）は、伝搬する空気中の気温と湿度に依存する。この性質を応用して、超音波の音速と減衰係数を計測し、計測された音速と減衰係数から超音波が伝搬した空間の温湿度を逆推定する計測法を提案した。超音波の空気中伝搬は瞬間的であり、提案法は既存の温湿度センサに比べ計測の即応答性が保証されている。また、提案法は超音波が伝搬した空気自体を感温体とするため熱輻射による計測誤差が生じないという利点がある。さらに、提案法を超音波 CT 法やマトリクス法等へ応用することで、温湿度分布計測を実現できる可能性がある。

第 2 章では、既存手法である超音波の音速に基づく気温計測法の原理について述べた。気体の状態方程式より気温と音速の関係式を導出し、音速から気温（音仮温度）を推定する方法を示した。次に、気温推定に必要な音速の計測方法として、相互相関法について述べた。さらに、超音波の音速のみに基づく気温計測法の問題点である、湿度による音速変化に起因する音仮温度と真温度との差異の温湿度特性を評価し、従来の超音波気温計測で差異が 0.5 K 以上となり、真温度推定が困難となる高温高湿度な環境を明らかにした。

第 3 章では、音速以外の超音波伝搬特性として超音波の減衰係数に着目し、提案法の基礎的検証として、超音波の減衰に基づく湿度推定法について論じた。まず、超音波の減衰係数と湿度の関係を示し、超音波の減衰に基づく 2 種類の湿度計測法の原理を提案した。一方は超音波伝搬距離 10 m 程度の大規模空間を対象とできる低周波超音波を用いる湿度計測法で、他方は伝搬距離 1 m 以下の小規模な空間を対象とする高周波超音波を用いる湿度計測法である。これら両計測法による検証実験を行い、実験結果から提案手法の湿度精度を検証した。その結果、両計測法ともに、湿度 50 から $80\% \text{ RH}$ の範囲で概ね $\pm 5\% \text{ RH}$ の精度

で湿度計測を実現できることがわかった。高周波超音波を用いることで低周波超音波の結果より4から7倍の湿度計測精度向上が確認された。

第4章では、第3章の考察を踏まえ、音速と減衰係数を同時計測し気温と湿度を逆推定する提案法を実測検証した。その結果、第2章で指摘した従来法の問題点を改善し、気温293 Kから308 K、湿度50%RHから90%RHの湿り空気中において ± 0.5 K以内の実用温度精度基準を達成することができた。一方で、本実験での湿度計測精度は $\pm 7.53\%$ RHであり、 $\pm 5\%$ RH以内の実用湿度精度基準には達しなかった。誤差解析の結果、湿度計測精度の向上のためには減衰係数計測精度の向上が必要であると考察された。

第5章では、第4章で確認された計測精度を向上させるために、諸外乱の影響の評価と対策について考察した。まず、本計測法の雑音耐性を向上させるために、インバースフィルタを用いる音速と減衰の同時計測法を提案し、その原理について述べた。検証実験を行った結果、インバースフィルタによって正弦バースト信号をパルス圧縮しチャープ信号と同程度の音速計測精度を実現し、同時に、減衰計測における信号対雑音比を向上させることにより減衰係数計測の標準偏差を第4章の結果に比べ2/3程度へ低減させて精度向上を実現できることを確認した。次に、外乱としての気圧変動や対流、温湿度分布が計測へ与える影響について考察した。各温湿度環境における気圧変動による推定結果への影響量の評価した結果、大気圧の自然変動量を考慮するとき、気圧変動による気温誤差は ± 0.5 Kの許容範囲以内である一方で、湿度誤差は $\pm 5\%$ RHの許容範囲外であることがわかった。よって、気圧変動した場合でも湿度計測の実用精度を確保するためには気圧補償が必要であることが明らかになった。そこで、気圧センサを利用した気圧補償法を提案し、その有効性を実験により検証した結果、気圧変動が生じた場合でも有効に利用できることが示された。また、空気の流れにより生じる音速と減衰係数の誤差を評価し、その誤差に由来する気温と湿度の推定誤差についても評価した。双方向超音波プローブを構築することで音速計測への影響を相殺する手法を実装すれば良いことを示し、本実験系においては対流の流速が0.59 m/s以下であれば減衰計測への影響は許容可能であるという指標を得た。さらに、温湿度分布が存在する場合の、超音波の屈折

による減衰計測の誤差について評価した。その結果、温湿度分布に相当する音速分布の勾配を指標として、減衰係数の相対誤差をシミュレーションにより明らかにすることができた。その結果、通常室内における温湿度分布が本計測法へ与える影響は微小であり、許容できることがわかった。最後に、以上の諸外乱への対策を備え、最終的に構築されたシステムを用いて、提案計測法の即応答性について検証した。その結果、既存の温湿度センサで達成不可能であった即応答計測を実現でき、従来観測できなかった瞬時的な温湿度変化が計測可能であることを確認した。また、提案法は既存センサと同程度の計測精度を有し、実用可能であることが示された。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめ、提案法である超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測法は、従来未確立な感温・感湿体を用いない温湿度計測法として有用であることを示した。

目次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	8
1.3 本論文の構成	8
第2章 超音波の音速に基づく気温計測	11
2.1 はじめに	11
2.2 乾燥空気における気温と音速の関係	11
2.3 従来の超音波気温計測の原理と用途	12
2.4 湿度による音速変化に起因する音仮温度の変化	19
2.5 ま と め	20
第3章 超音波の減衰に基づく湿度計測	23
3.1 はじめに	23
3.2 湿度と減衰係数の関係	24
3.3 超音波湿度計測の原理	25
3.4 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験	31
3.5 高周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験	36
3.6 ま と め	42
第4章 超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測	45
4.1 はじめに	45
4.2 超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測原理	45
4.3 超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測実験	48
4.4 誤差解析に基づく計測精度の考察	50
4.5 ま と め	52

第5章	温湿度計測の高精度化	55
5.1	はじめに	55
5.2	インバースフィルタを用いる音速と減衰の同時計測	56
5.3	温湿度計測における気圧変動の影響	60
5.4	温湿度計測における対流の影響	64
5.5	温湿度計測における温湿度分布の影響	66
5.6	即応答性の検証実験	69
5.7	まとめ	72
第6章	結 論	75
6.1	研究成果	75
6.2	将来の展望	77
	謝 辞	79
	参考文献	81
	著者論文	89
付録A	超音波プローブを応用した気温分布計測のための三角型ユニット	93
付録B	空気の減衰係数について	97
	著者紹介	104

目 次

Fig. 1-1	本論文の構成.	9
Fig. 2-1	超音波気温計の構成と、送受信信号と相互相関関数の例： (a) 送信信号, (b) 受信信号, (c) 相互相関関数.	14
Fig. 2-2	無線化された超音波センサによるネットワーク計測の概 要.	16
Fig. 2-3	屋外大規模空間の気温分布をネットワーク計測するリモートセ ンシング実証実験の概要図.	18
Fig. 2-4	音仮温度と真温度との差異の温湿度特性の解析結果.	20
Fig. 3-1	閉空間内の任意の場所で低周波超音波の正弦バースト信号を送 信したときの受信信号の例.	26
Fig. 3-2	受信波形の瞬時パワー表示と残響時間の計測法概要.	27
Fig. 3-3	低周波超音波の減衰係数と湿度の関係.	28
Fig. 3-4	高周波超音波の減衰係数と湿度の関係.	29
Fig. 3-5	閉空間内の任意の場所で高周波超音波の正弦バースト信号を送 信したときの受信信号の例.	30
Fig. 3-6	低周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験系の構成.	32
Fig. 3-7	低周波超音波の減衰係数計測結果.	33
Fig. 3-8	低周波超音波の減衰に基づく湿度計測における 標本数と誤差率の関係.	35
Fig. 3-9	減衰係数 α_m と伝搬距離 $L_{1/2}$ の周波数依存性.	36
Fig. 3-10	多重反射波の概要.	38
Fig. 3-11	高周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験系の構成.	39
Fig. 3-12	高周波超音波の減衰係数計測結果.	40
Fig. 3-13	超音波の減衰に基づく湿度計測結果.	41
Fig. 4-1	チャープ信号と正弦バースト信号の混合信号.	46
Fig. 4-2	理論式から導出される音速と減衰係数の温湿度特性.	48

Fig. 4-3	音速と減衰係数に基づく温湿度計測実験の結果： (a) 音速, (b) 減衰係数, (c) 気温, (d) 湿度.	49
Fig. 4-4	音速と減衰係数の計測誤差が温湿度の推定結果へ及ぼす影響の 解析結果： (a) 音速の計測誤差による気温推定誤差感度 $\partial T_{\text{est}}/\partial c$, (b) 減衰係数の計測誤差による気温推定誤差感度 $\partial T_{\text{est}}/\partial \alpha$, (c) 音速の計測誤差による湿度推定誤差感度 $\partial H_{\text{Rest}}/\partial c$, (d) 減衰係数の計測誤差による湿度推定誤差感度 $\partial H_{\text{Rest}}/\partial \alpha$.	51
Fig. 5-1	インバースフィルタを用いるパルス圧縮を行う際の送受信信号 の例： $s_{\text{Tr}}(t)$ 実際に送信する周波数 f_c の正弦バースト信号, $d_{\text{Tr}}(t)$ 仮想的に送信したい任意の帯域幅のチャープ信号, $s_{\text{Re}}(t)$ 実際に受信された信号, $d_{\text{Re}}(t)$ 受信信号 $s_{\text{Re}}(t)$ をインバースフィルタに通した信号, $x(t)$ 伝搬時間計測に用いる $d_{\text{Tr}}(t)$ と $d_{\text{Re}}(t)$ の相互相関関数, $S_{\text{Tr}}(f)$, $D_{\text{Tr}}(f)$, $S_{\text{Re}}(f)$, $D_{\text{Re}}(f)$ は各々 $s_{\text{Tr}}(t)$, $d_{\text{Tr}}(t)$, $s_{\text{Re}}(t)$, $d_{\text{Re}}(t)$ の フーリエ変換.	57
Fig. 5-2	実測された受信波形と相互相関関数の例.	58
Fig. 5-3	インバースフィルタを用いる音速と減衰係数の同時計測実験の 結果：(a) 音速, (b) 減衰係数.	59
Fig. 5-4	提案手法による温湿度計測へ大気圧変動が及ぼす影響の評価結 果： (a) 音速の気圧に対する偏微分 $\partial c/\partial p_a$, (b) 減衰係数の気圧に対する偏微分 $\partial \alpha/\partial p_a$, (c) 気温の推定結果の気圧に対する偏微分 $\partial T_{\text{est}}/\partial p_a$, (d) 湿度の推定結果の気圧に対する偏微分 $\partial H_{\text{Rest}}/\partial p_a$	61
Fig. 5-5	気圧補償実験系の構成.	62
Fig. 5-6	気圧補償実験の結果： (a) 音速, (b) 減衰係数, (c) 気温, (d) 湿度.	63
Fig. 5-7	音速・減衰計測における対流の影響の概要： (a) 音速計測への影響, (b) 減衰計測への影響.	64
Fig. 5-8	本研究で使用している超音波トランスデューサ (MA4001A1, Murata) の指向特性.	65
Fig. 5-9	本実験系を用いたとき, 対流の直交成分により生じる減衰係数 の相対誤差の解析結果.	66

Fig. 5-10	音速分布の与え方：(a) 水平分布，(b) 垂直分布.	67
Fig. 5-11	音速分布の勾配による減衰係数の相対誤差の解析結果. . .	68
Fig. 5-12	即応答性の検証実験系の構成.	69
Fig. 5-13	即応答性検証実験の結果： (a) 音速，(b) 減衰係数，(c) 気温，(d) 湿度，(e) ノイズレベル， (f) 信号対雑音比.	71
Fig. A-1	メッシュネットワーク計測の概要図.	93
Fig. A-2	三角型ユニットセルによる気温分布計測原理.	95
Fig. B-1	音波による気体の圧縮・膨張変化.	100

表 目 次

Table 1-1	既存の気温センサー一覧とそれらの特徴.	5
Table 1-2	既存の湿度センサー一覧とそれらの特徴.	6
Table 3-1	低周波超音波の減衰に基づく湿度計測結果 及び統計的解析結果.	34
Table 3-2	実測された減衰係数と湿度の標準誤差率.	41

用語定義

「超音波」とは

狭義の超音波は、人間が聴くことができない可聴域外の音を指す。人間の可聴周波数帯は概ね 20 Hz から 20 kHz であるので、周波数 20 kHz 以上の音が狭義での超音波と呼ばれ、周波数 20 Hz 以下の音は超低周波と呼ばれる。

広義の超音波は、周波数帯域に関わらず、人間が聴くことを目的としない音を指す。すなわち、種々の計測に用いられる音は、周波数帯域に関わらず超音波と呼ぶことができる。本論文中での用語「超音波」は、この広義の超音波である。また、便宜上、本論文中では周波数 10 kHz オーダーの音を低周波超音波、周波数 100 kHz オーダーの音を高周波超音波と呼ぶこととする。

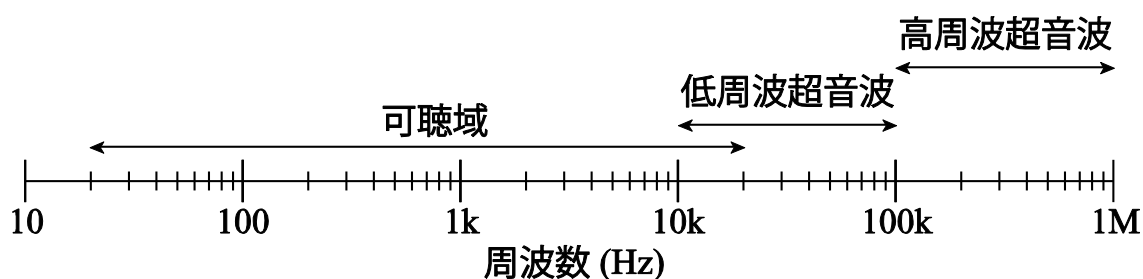


Fig. 本論文中における超音波の用語定義概要.

第1章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 温湿度管理の用途

空気の温湿度は動植物の活動や物質の性質変化に密接に関係し影響を与える。しかしながら、外気の温湿度は天候や季節、昼夜等自然的要因によって大きく変動する。そのため、以下に詳しく述べる諸目的のために、我々は室内の温湿度を計測し、時にそれを制御することを必要とする。

例えば、同じ気温であっても湿度が低いと皮膚から水分が気化し熱を奪うので人間は寒いと感じる。逆に、加湿すれば暖かいと感じ、高温高湿になりすぎれば熱中症を起こしてしまう。このように、人間の体感温度や不快指数は温湿度に依存するため、快適空調の実現と衛生管理を目的に、日本国内ではビル管理法（建築物における衛生的環境の確保に関する法律の施行令 建築物衛生管理基準）によって一定規模以上の建築物に対して気温 17 から 28 °C、湿度 40 から 70%RH の範囲で温湿度管理が義務付けられている¹⁻³⁾。また、大規模な建造物の例として東京都庁庁舎を挙げれば、その総消費電力における空調の占める割合は約 4 割と最多であり⁴⁾、省エネルギー・省管理コストの観点から最適な運用が求められている。

さらに、インフルエンザウイルスは湿度 50%RH で不活性となる等、湿度制御による空気感染症の予防は効果的である²⁾。人間やウイルスに限らず、菌類や細菌、その他の動植物はそれぞれ生育に適した温湿度域があるため、医薬・バイオ分野ではこれらを人工的に培養する小環境（チャンバー）、農業分野

では植物栽培のための温室の温湿度制御に細心の注意が必要とされる。近年では人工多能性幹細胞の発見を代表とする生命工学が社会的に脚光を浴びており、細胞の人工培養のための小環境の需要は今後増加すると予測される。また、大気や土壌・地下水の汚染による食の安全問題や、飢饉をもたらす気候変動問題に起因して、照明と空調で管理されたクリーンルーム内で超集約的に植物を栽培・生産する植物工場の導入が増加傾向にある^{3,5)}。

また、45%RH以下の低湿度の空気中では埃が飛散しやすく、物体は静電気を帯びやすいため、産業分野では、特に半導体や電気・電子製品の生産・管理工程において、工場内の温湿度管理が必要とされる^{2,3)}。他にも、繊維工場では繊維の伸縮による品質のばらつきや糸切れを防ぐために、自動車工場等の塗装ブースでは埃による塗装不良や乾燥度の変化による塗装の不均一を防ぐために恒温恒湿制御が行われている。さらに、食品工場では食品の変質や雑菌の繁殖を防ぐための衛生上の理由や、乾燥食品や醗酵食品の製造過程において温湿度管理が行われている。

博物館や美術館では、展示ケース内だけでなく収蔵庫と呼ばれる大型倉庫で文化財を管理している。陶器や木材、紙、布、金属素材からなる文化財を、カビや虫の繁殖、シミの拡大、錆等から守るために厳密な温湿度管理が行われている^{3,6,7)}。また、重要文化財である古墳の石室においても、石室内壁画がひび割れたり、結露により損傷することを防ぐために温湿度管理が行われている。

以上のように、多種多様な目的と用途のために室内の最適な温湿度制御は求められているが、これらを実現するために最も重要な役割を果たすのは温湿度センサである。

1.1.2 既存の温湿度センサ

既存の気温センサ一覧とそれらの特徴を **Table 1-1** に示す。既存の気温センサにはガラス製温度計、バイメタル温度計、白金温度計、熱電対温度計、サーミスタ温度計等がある。これらのセンサはいずれも周辺空気と熱平衡に達した検出部（感温体）の温度特性を計測し空気の温度を求めている。

既存の湿度センサ一覧とそれらの特徴を **Table 1-2** に示す。湿度センサには伸縮式湿度計、乾湿式湿度計、電気式湿度計等がある。これらの湿度センサは検出部（感湿体）が周辺空気を吸湿、脱湿する際の特性変化を計測し湿度を求めている。

このように、既存の温湿度センサは平衡条件を利用するため、検出部周辺の局所的な温湿度しか計測できない。室内の温湿度は均一ではないためセンサの設置場所によって計測結果が異なり、室内の代表的な場所以外にセンサを設置した場合、空調機器による温湿度制御が適切に行われず問題がある^{3,8,9)}。この問題を解決するために、室内に有限個のセンサを分散配置し、空間離散的な各点での計測値の平均値を求め空間代表値とする手法もあるが、センサ自体が空間を占有するため、センサ群体積に比較して狭所への適用は困難である。

また、温湿度センサの感温・感湿体は熱容量を有するため、熱平衡に達するまで応答遅れが生じる。さらに、特に湿度センサは応答遅れ時間が長く、感湿体と空気間での水分の移動が平衡状態に達するまでに数十秒から数分を要する。そのため、温湿度が急変する異常事態が生じた場合、センサの応答遅れによってその発見が遅れて管理対象物に被害が生じてしまうと考えられる。さらに、感湿体に汚れや結露が付着すると吸水・脱水性能が低下して計測誤差が生じるため、定期保守が必要である⁷⁾。他にも、温湿度センサは照明や日光が当たると熱輻射で検出部が加熱され、温湿度誤差が生じる問題がある。

ここで、そもそも湿度（相対湿度）とは、水蒸気と空気の混合気体中における水蒸気量の割合である。すなわち、水蒸気量が一定だとしても気温や気圧等が変動すれば空気の飽和水蒸気量も変動し、湿度も変動することになる。また、空間に照明やその他の熱源が存在する場合には気温分布が存在する。常温常湿

では気温 1 K の変化に対して湿度は 4%RH 程度も変化するため¹⁰⁾、このとき湿度分布も生じる。もちろん、空間内に除湿器や加湿器（乾いた布や紙等も除湿器、動植物等も加湿器として働く）が存在する場合や、気温や気圧の勾配に基づく自然対流や空調機器からの強制対流が生じる場合には水蒸気量の増減や水蒸気の移動によって湿度分布は変化する¹¹⁾。このように、通常、気温と湿度は相互依存性があり、温度センサには湿度補償のための湿度センサが、湿度センサには温度補償のための温度センサが対で必要になる。

以上より、より高度な空調制御のために、これらの問題を解決しうる新しい温湿度計測技術が求められている。

Table 1-1 既存の気温センサー一覧とそれらの特徴

センサの種類	特 徴
ガラス製 温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● ガラス管内に毛細管と目盛板が封入されている。毛細管内の水銀や有機液体を感温液とし、感温液の熱膨張性を利用し、温度を直読する。 ● 比較的安価。実用温度計として広く普及。 ● 目盛面に垂直方向から見て指示値を読み取る必要がある。 ● 毛細管内に感温液の一部が分離付着してはいないか、常に確認することが必要。 ● 目盛板や毛細管径の制約から、計測範囲を保持したまま、温度計を小型化できない。
バイメタル 温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 2種の薄い金属板を溶接し張り合わせたものをバイメタルと呼ぶ。温度変化により2種の金属の膨張率の違いから板が反ることを利用し、その変位を指針で拡大し測定する。 ● 精度は比較的悪いが、構造が簡単かつ丈夫であるため、広く民生利用されている。
白金温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 白金の電気抵抗が温度により変化することを利用した電気式温度計。 ● 加熱や冷却による劣化がなく、最も安定した計測が可能。 ● $-200\sim+630\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で標準用。 ● 比較的高価。
熱電対温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 異種の金属導線の両端を接合した回路を用いる。ゼーベック効果により、両接点の温度差に比例して熱起電力が生じることを利用した電気式温度計。 ● 特に、銅・コンスタンタン熱電対は安価で、$-200\sim+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で精度が良い。
サーミスタ 温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● コバルト、銅、鉄、マンガン、ニッケル等の酸化物表面を$1,300\sim1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ でガラス質に焼き上げたものを感温体とし、温度により感温体の電気抵抗が変化する性質を利用した電気式温度計。 ● 比較的小型な温度計であり、感度が良い。

Table 1-2 既存の湿度センサー一覧とそれらの特徴

センサの種類	特 徴
伸縮式湿度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 毛髪やナイロン繊維等が吸湿によって伸び、脱湿によって縮む性質を利用し、機械的に湿度を直読する。 ● 応答時間は2から8分程度。比較的安価。 ● 繊維が砂や埃等で汚れると計測誤差が生じるので、定期保守が必要。
乾湿式湿度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 同種同大の温度センサを2個用い、一方の感温部に湿りガーゼを被せた湿球と、他方の乾球で計測した温度の関係から湿度を算出する。 ● 応答時間は5分程度。 ● 感温部分へ常に風速2から4 m/s で通風しなければならない。 ● 常に湿球へ水を補給しなければならない。ガーゼが汚れたり、湿球表面に水垢がつくと計測誤差が生じるので、定期保守が必要。
電気抵抗式湿度計	<ul style="list-style-type: none"> ● セラミックや高分子材等の感湿体は空気中の水分を吸収するほど電気抵抗が低下する関係を利用し、感湿体の抵抗値を計測することで湿度を求める。 ● 応答時間は数十秒から数分程度。 ● 感湿部に結露や汚れが付着すると、計測誤差が生じるので定期保守が必要。 ● 感湿体の電気抵抗値は温度依存性もあるため、温度補償が必要。
電気容量式湿度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 電極間に感湿体を挟む。感湿体が水分を吸収するほど電極間の静電容量が大きくなる関係を利用し、電極間の静電容量を計測することで湿度を求める。 ● 応答時間は数秒から数十秒程度。 ● 感湿部に結露や汚れが付着すると、計測誤差が生じる。
露点温度計	<ul style="list-style-type: none"> ● 鏡面を冷却し、その表面に結露が生じた温度を計測し、湿度を算出する。 ● 高精度。応答時間は数分程度。比較的高価。 ● 鏡面に塵や埃が付着すると、計測誤差が生じるので定期保守が必要。

1.1.3 超音波による空気性状の計測

感温・感湿体と空気間での熱・水分平衡条件を用いない計測法として、超音波による計測法に着目する。従来、超音波の音速計測に基づく気温計測法が提案されてきた¹²⁾。空气中を伝搬する超音波の音速は気温に依存するため、超音波送受波器を用いて規定距離での超音波伝搬時間を計測し音速を求めることで、音速から超音波の伝搬した空間の平均的な気温を逆推定することができる。この計測法は、計測対象空間を占有することなく、超音波の伝搬した瞬間の空間平均的な気温を逆推定ことができ、日光や照明等の熱輻射は超音波の伝搬に影響しないことから熱輻射が存在する空間の気温計測に適している。このような利点のため、この計測法は超音波気温計として各社から商品化され、主に気象観測の用途で用いられている。近年では、この超音波気温計測法の応用用途として、送受間距離を長距離化し大規模な空間の気温を計測する研究¹³⁾や、複数の送受波器を用いて複数の超音波伝搬経路の時間データを計測し Computerized Tomography (CT) 法¹⁴⁻¹⁶⁾やマトリクス法¹⁷⁻²³⁾を適用することで逆問題的に空間の気温分布を計測する研究、複数の超音波送受波器に無線端末を搭載し各素子からの計測データを無線一括管理するネットワーク計測法の研究^{13,17,18)}、伝搬時間計測に必要な送受タイミングの無線同期手法の研究^{17,24)}等がなされている。

一方で、超音波による湿度計測法は実現・実用化が確認されておらず、湿度が超音波計測に及ぼす影響を検討した事例も少ない。超音波の音速は気温だけではなく、湿度にも依存し、湿度 0%RH の乾燥空気と湿度を含んだ湿り空気では、湿り空気中における音速の方が速くなることが知られている。そのため、超音波の音速のみに基づき推定される気温は、真の気温よりも高くなり、音仮温度と呼ばれ区別されている^{25,26)}。長年の学問的慣習により音仮温度は気象観測の分野では一つの指標として定着しているが、室内の空調制御において重要とされる指標は真気温と湿度であり、超音波によって真気温と湿度の計測を実現することが望まれる。近年では、超音波の音速計測と市販の湿度補償センサを組み合わせた真気温計測法や、超音波の音速計測と市販の温度補償センサを

組み合わせた湿度計測法が研究されている²⁷⁻²⁹⁾。しかしながら、温湿度の補償センサを用いず超音波の送受波のみによる温湿度計測法は実現されていない。

1.2 研究の目的

温湿度補償センサを用いない超音波による新しい温湿度計測法として、超音波の音速と減衰計測に基づく温湿度計測法を確立することを目的とする。超音波の音速や減衰率（減衰係数）は、伝搬する空気中の気温と湿度に依存する。この性質を応用して、超音波の音速と減衰係数を計測し、計測された音速と減衰係数から超音波が伝搬した空間の温湿度を逆推定する計測法を提案する。超音波の空気中伝搬は瞬間的であり、提案法は既存の温湿度センサに比べ計測の即応答性が保証されている。また、提案法は超音波が伝搬した空気自体を感温体とするため熱輻射による計測誤差が生じないという利点がある。さらに、提案法を超音波 CT 法やマトリクス法等へ応用することで、温湿度分布計測を実現できる可能性がある。

本計測法が実用可能かどうか判断するための数値目標として、気温精度 ± 0.5 K、湿度精度 $\pm 5\%RH$ と設定した。以下の章の実験では、これらの精度と比較して考察を行う。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を **Fig. 1-1** に示し、以下その内容について述べる。

第 2 章では、既存手法である超音波の音速に基づく気温計測法の原理について述べる。気体の状態方程式より気温と音速の関係式を導出し、音速から気温を推定する方法を示す。次に、気温推定に必要な音速の計測方法として、相互相関法について述べる。さらに、超音波の音速のみに基づく気温計測法の問題点である、湿度による音速変化に起因する音仮温度と真気温との差異を指摘し³⁰⁾、提案法の着想を得た経緯について論じる。

第 3 章では、音速以外の超音波伝搬特性として超音波の減衰係数に着目し、

提案法の基礎的検証として、超音波の減衰に基づく湿度推定法^{31,32)}について論じる。まず、超音波の減衰係数と湿度の関係を示し、超音波の減衰に基づく2種類の湿度計測法の原理を提案する。一方は超音波伝搬距離10 m程度の大規模空間を対象とできる低周波超音波を用いる湿度計測法で、他方は伝搬距離1 m以下の小規模な空間を対象とする高周波超音波を用いる湿度計測法である。これら両計測法による検証実験を行い、実験結果から湿度精度を検証し、超音波の減衰に基づく湿度計測が可能であるか論じる。

第4章では、第3章の考察を踏まえ、音速と減衰係数を同時計測し気温と湿度を逆推定する提案法³⁰⁾を実測検証し、計測精度について論じる。

第5章では、第4章で確認された計測精度を向上させるために、インバースフィルタによる音速と減衰係数の同時計測法³³⁾や、気圧センサを併用する気圧補償法³⁴⁾、対流や温湿度分布が存在する室内での応用可能性について論じる。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめ、将来の展望について述べる。

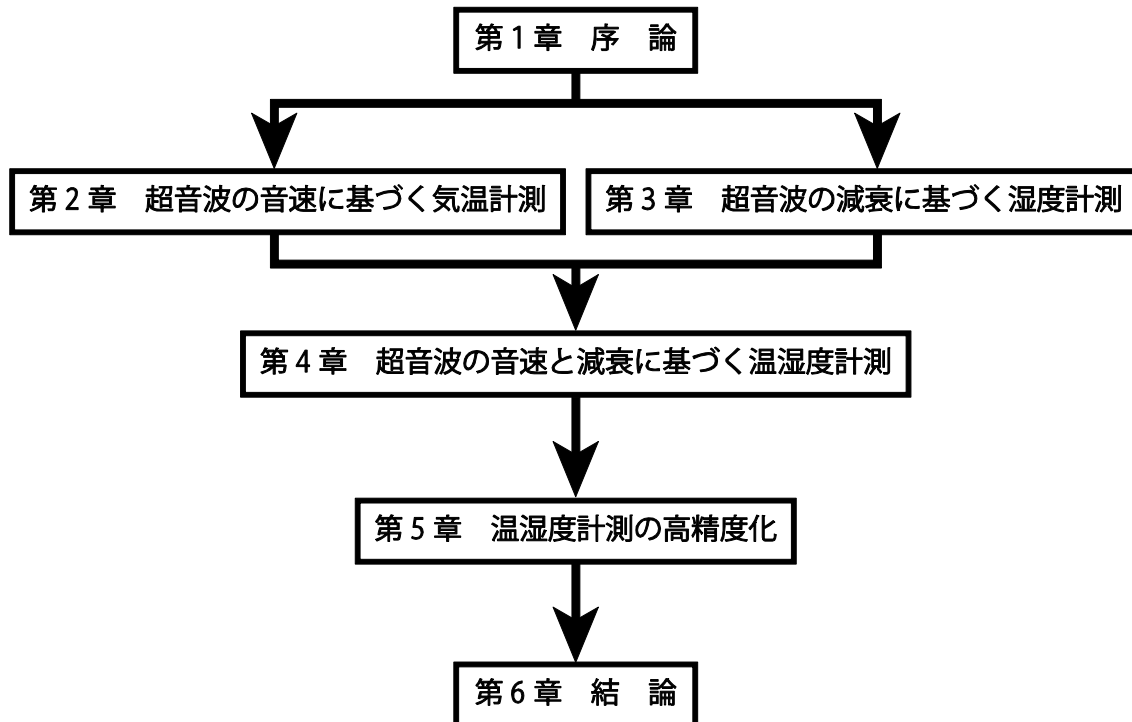


Fig. 1-1 本論文の構成.

第2章

超音波の音速に基づく気温計測

2.1 はじめに

本章では、まず、既存手法である超音波の音速に基づく気温計測法の原理について述べる¹²⁾。空気中を伝搬する超音波の音速は気温に依存するため、超音波の音速を計測することで、音速から超音波の伝搬した空間の平均的な気温を逆推定することができる。音速は、超音波送受波器対を用いて、規定距離での超音波伝搬時間を計測することで求められる。そこで、相互相関法による伝搬時間計測法³⁵⁾について概説する。さらに、この従来の超音波気温計測の主たる用途と関連研究について概説する。

次に、従来の超音波気温計測法の問題点として、湿り空気中で運用する際に生じる気温誤差について解析する³⁰⁾。湿り空気中では、超音波の音速は湿度にも依存するため、湿度による音速の増分だけ、音速から逆推定される気温は高くなる。この影響について、各温湿度の湿り空気について定量的な評価を行い、考察する。

2.2 乾燥空気における気温と音速の関係

湿度 0%RH の乾燥空気における音速 c'_{th} は比熱比 γ_a 、圧力 p_a 、密度 ρ を用いて次式で表せる³⁶⁾。

$$c'_{th} = \sqrt{\gamma_a \frac{p_a}{\rho}}. \quad (2-1)$$

気体定数 R 、温度 T 、媒質分子 1 mol 当たりの質量 μ とすると、気体の状態方

程式より,

$$\frac{p_a}{\rho} = \frac{RT}{\mu}, \quad (2-2)$$

が成立する. Eqs. (2-1), (2-2) より,

$$c'_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_a RT_0}{\mu} \left(\frac{T}{T_0} \right)}. \quad (2-3)$$

ここで, 基準温度 $T_0 = 293.15 \text{ K}$ である. Eq. (2-3) より, $T = T_0$ における音速 c_0 は次式で表せる.

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma_a RT_0}{\mu}}. \quad (2-4)$$

乾燥空気について, 比熱比 $\gamma_a = 1.403$, 気体定数 $R = 8.314 \text{ (J/mol}^\circ\text{K)}$, モル質量 $\mu = 2.896 \times 10^{-2} \text{ (kg/mol)}$ であるため, 音速 c_0 は定数となる. このとき, Eq. (2-3) は次式で表せる.

$$c'_{th} = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}. \quad (2-5)$$

よって, 音速 c'_{th} は温度 T の関数となる.

2.3 従来の超音波気温計測の原理と用途

2.3.1 相互相関法による伝搬時間計測法

超音波気温計は **Fig. 2-1** のように送波器 (Tr) と受波器 (Re) で構成され, 送受波器間距離 L を既知として, 計測対象とする空間の両端に対向するように設置する. そして, 送受波器間で超音波パルスを伝搬させ, 送受信信号からその伝搬時間を計測する. 受信信号は送受波器の特性や雑音の影響を受けるため, パルス信号の立ち上がり判別等で直接的に伝搬時間を計測することは難しい. そこで, 相互相関法を用いる³⁵⁾. 相互相関法は二つの信号が最も一致する時間を求める手法である. 時間 t における送信信号 $s_1(t)$ と受信信号 $s_2(t)$ の相互相関関数 $x(\tau)$ は,

$$x(\tau) = \int_{-\tau_m}^{\tau_m} s_2(t)s_1(t+\tau)dt, \quad (2-6)$$

で表される。ここで、 τ_m は受信時間（計測時間）である。相互相関関数の値が大きいほど $s_1(t)$ と $s_2(t)$ の一致度は高い。よって、相互相関関数が最大ピークとなる時間が両信号の時間差 τ_f となり、

$$\tau_f = \arg \max_{\tau} [x(\tau)], \quad (2-7)$$

で表される。送信信号、受信信号、相互相関関数の例を Fig. 2-1 (a)–(c) に示す。相互相関法では、Fig. 2-1 (a) のチャープ信号のような変調信号が用いられる。初期周波数 f_0 、周波数掃引幅 Δf 、信号長 τ_0 とすると、チャープ信号 $s_c(t)$ は、

$$s_c(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_0} t \right) t \right], \quad (0 \leq t \leq \tau_0), \quad (2-8)$$

で表される。チャープ信号は単なる正弦バースト信号に比べ自己相関関数におけるピークが鋭いことから、耐雑音性に優れた伝搬時間計測用信号として相互相関法に一般的に用いられている。自己相関関数におけるピークの時間幅は $\tau_0/\Delta f$ となり、バースト波の信号長 τ_0 を周波数掃引幅 Δf で除した分だけ鋭くなる。この効果はパルス圧縮と呼ばれ、主にレーダの分野で利用されている³⁷⁾。よって、周波数掃引幅 Δf が広い信号ほど、パルス圧縮は効果的であり、伝搬時間計測を行う際に有利である。

Figure 2-1 (a), (b) のようなチャープ信号の送受波信号は次式で表せる。

$$s_1(t) = \begin{cases} \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_0} t \right) t \right], & (0 \leq t \leq \tau_0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-9)$$

$$s_2(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq \tau_f) \\ \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_0} (t - \tau_f) \right) (t - \tau_f) \right], & (\tau_f < t \leq \tau_f + \tau_0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

このように、 $s_1(t)$ と $s_2(t)$ が時間シフトした信号である場合、Fig. 2-1 (c) のように相互相関関数の最大ピークは $s_1(t)$ と $s_2(t)$ の時間差 τ_f に相当する位置になる。

送受信タイミングの同期が十分とれている場合、この時間差 τ_f は超音波の伝搬時間に相当するので、相互相関関数の最大ピーク検出により伝搬時間を計測することができる。

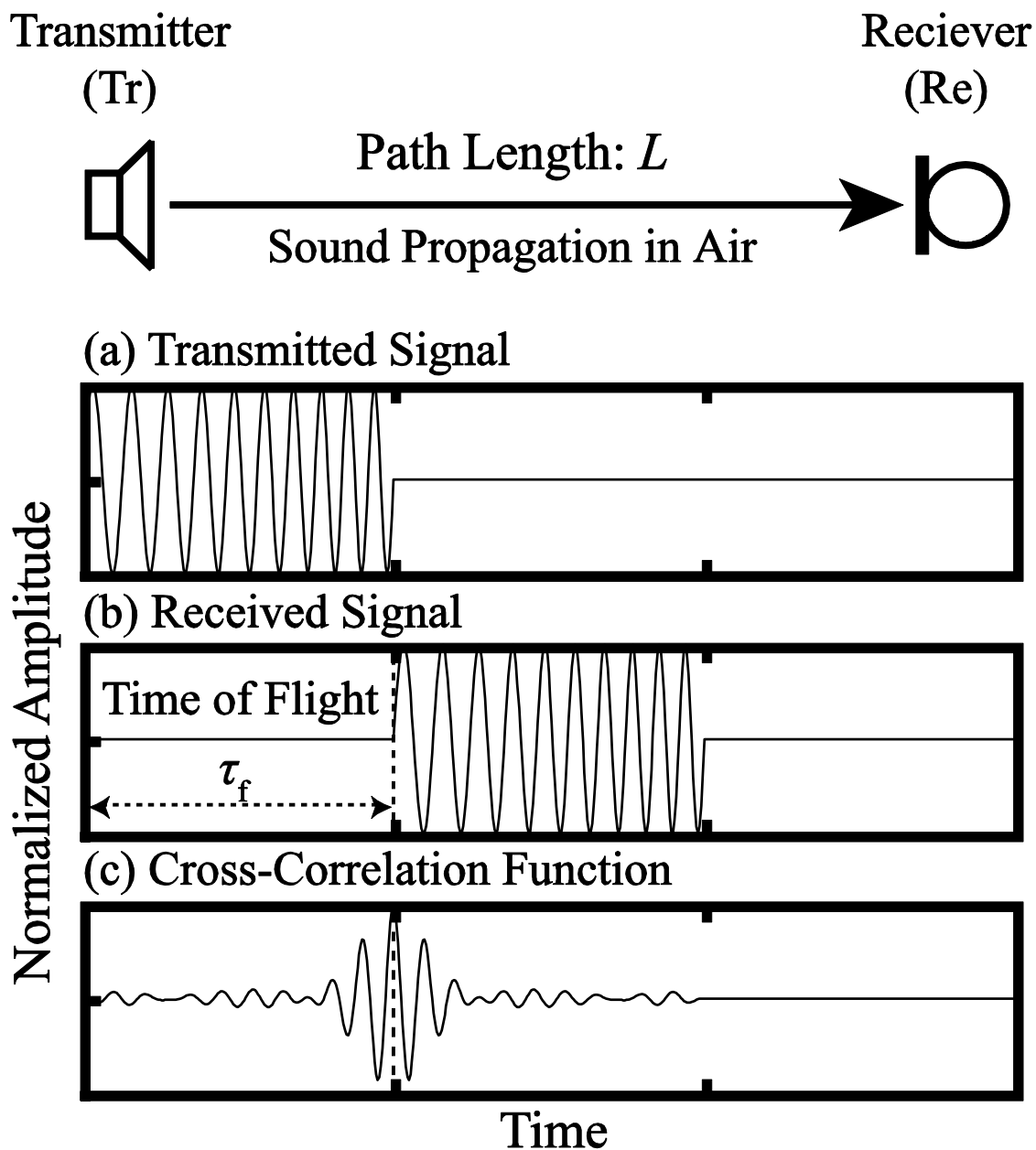


Fig. 2-1 超音波気温計の構成と、送受信信号と相互相関関数の例：
 (a) 送信信号, (b) 受信信号, (c) 相互相関関数.

2.3.2 音仮温度の算出法

計測された伝搬時間から送受波器間の空気における平均的な音速 c_{mes} を求めることができる。

$$c_{\text{mes}} = \frac{L}{\tau}. \quad (2-10)$$

このとき、Eq. (2-5) を利用して、計測された音速 c_{mes} から超音波の伝搬した空気の温度を逆推定できる。

$$T_{\text{sv}} = T_0 \left(\frac{c_{\text{mes}}}{c_0} \right)^2. \quad (2-11)$$

このように、音速から逆推定された温度 T_{sv} は音仮温度（Sound Virtual Temperature）と呼ばれる^{25,26)}。

2.3.3 従来の超音波気温計測の用途と関連研究

超音波の空気中伝搬は瞬間的であり、既存の温湿度センサに比べ計測の即応性が保証されている。また、超音波が伝搬した空気自体を感温体とするため熱輻射による計測誤差が生じないという利点がある。さらに、二対の超音波送受波器を用いて双方向での超音波伝搬時間計測を行えば、送受間基線上の平均風速も同時に計測でき、応用すれば風向も計測できる³⁸⁻⁴¹⁾。

これらのような利点から、従来、超音波気温計測法は超音波風向風速温度計として実装・商品化され、屋外における気象観測の用途で主に用いられていた。そのため、気象学の分野では音仮温度は専門的物理量として認知され定着している^{25,26)}。一方で、市販されている超音波風向風速温度計は送受間距離が短く、実質的には点計測と同様な小規模空間しか計測できていなかった。

近年では、送受間距離の長距離化による大規模空間の気温計測が検討されている¹³⁾。具体的には、送受間距離が長くなれば、送受タイミングの同期や計測データの収集の有線管理が煩雑となるため、これらを実線化する研究がなされている^{13,17,18,24)}。

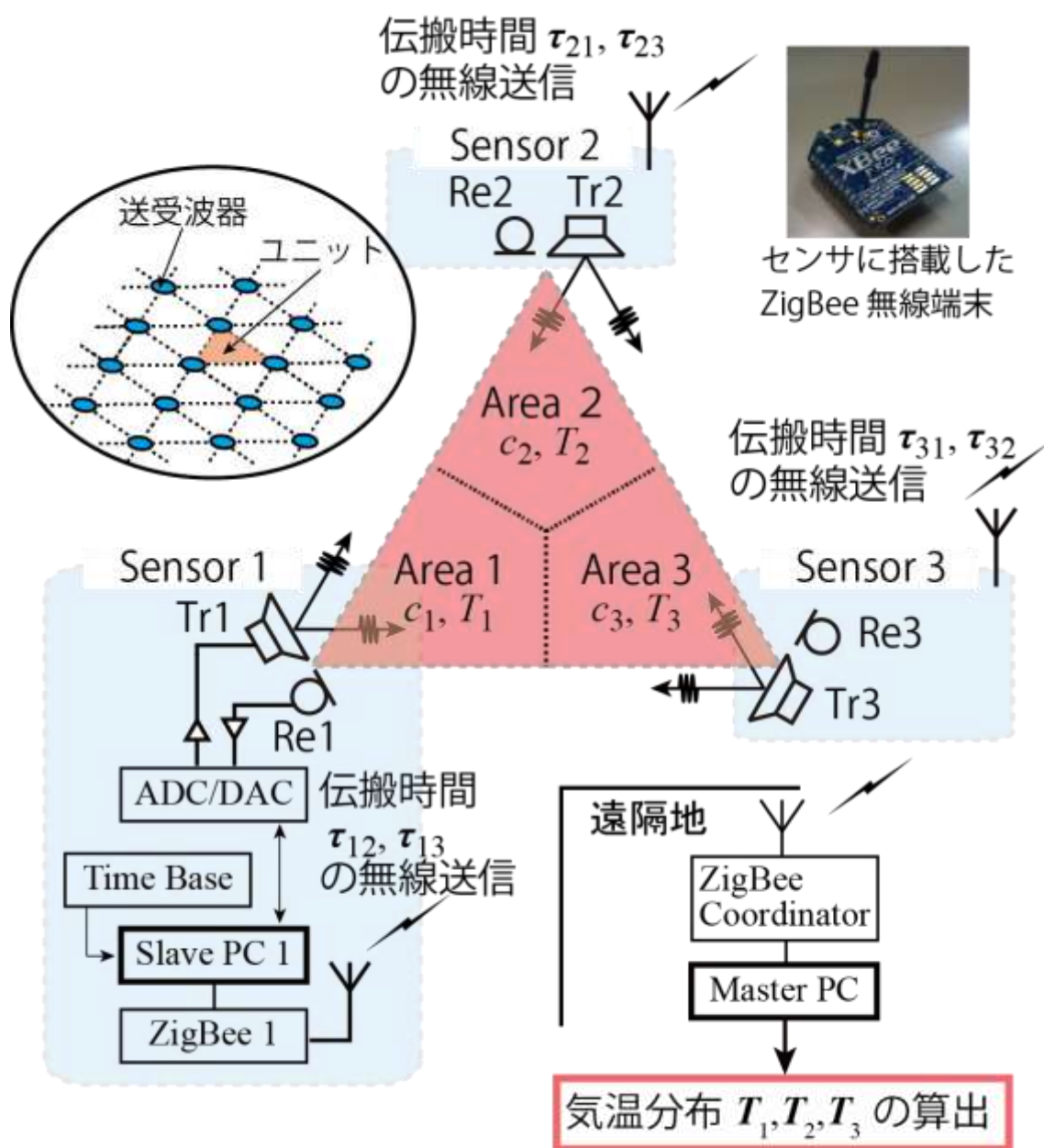


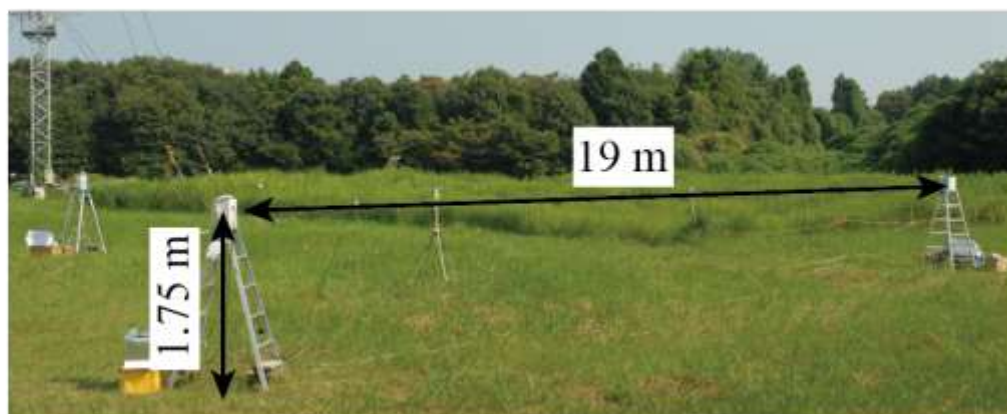
Fig. 2-2 無線化された超音波センサによるネットワーク計測の概要：
 3個の超音波センサによって三角型ユニットセルを構成し、ユニットセル内部の
 気温分布をマトリクス法により算出する。このユニットセルを空間上にメッ
 シュ状に配置することで、大規模空間の気温分布を観測できる（付録A）。

無線化された超音波センサによるネットワーク計測の概要を **Fig. 2-2** に示す。この超音波センサは送受タイミングを司るタイムベースとして GPS 受信器を搭載している。送受間距離が数十 m~100 m 程度の超音波気温計測では数 μs の精度で正確に同期させる必要がある²⁴⁾。それに対して、GPS 受信器は GPS 衛星搭載の原子時計の秒単位と同期しており、1 μs の精度でパルス信号を出力することができる。よって、このパルス信号をトリガにすることで無線高精度同期が実現できる。また、計測データを収集する無線機として ZigBee を搭載している。ZigBee は各通信機同士が直接相互通信し、計測データの集積点までリレー方式のデータ中継を行うメッシュネットワークを構成する。さらに、その場の通信状況に応じて自動で最適な情報伝達経路を設定するアドホックネットワーク機能を有しているため、ネットワーク構築範囲を柔軟に拡大でき、また多数の伝達経路を用意し使い分けることで耐通信障害性を向上できる。

Figure 2-3 の概要図に示すように、この超音波センサを複数配置し、屋外大規模空間の気温分布をネットワーク計測するリモートセンシング実証実験も行われており、システムの実用性が確認されている¹⁷⁾。

以上のように、従来の超音波気温計測は気象観測の用途に特化したものが多く、また近年の研究の方向性も気象観測のために複数の超音波送受波器対を用いた応用運用法に関するものが多い。一方で、他の用途への汎化（比較的小規模な空間の空調管理のための精密な気温計測等）や、一对の超音波送受波器対を用いて正確な物理量を計測する基礎的な研究は少なく、これらについて研究の余地が残されていた。

(a) 実験系の全体図



(b) 実測結果

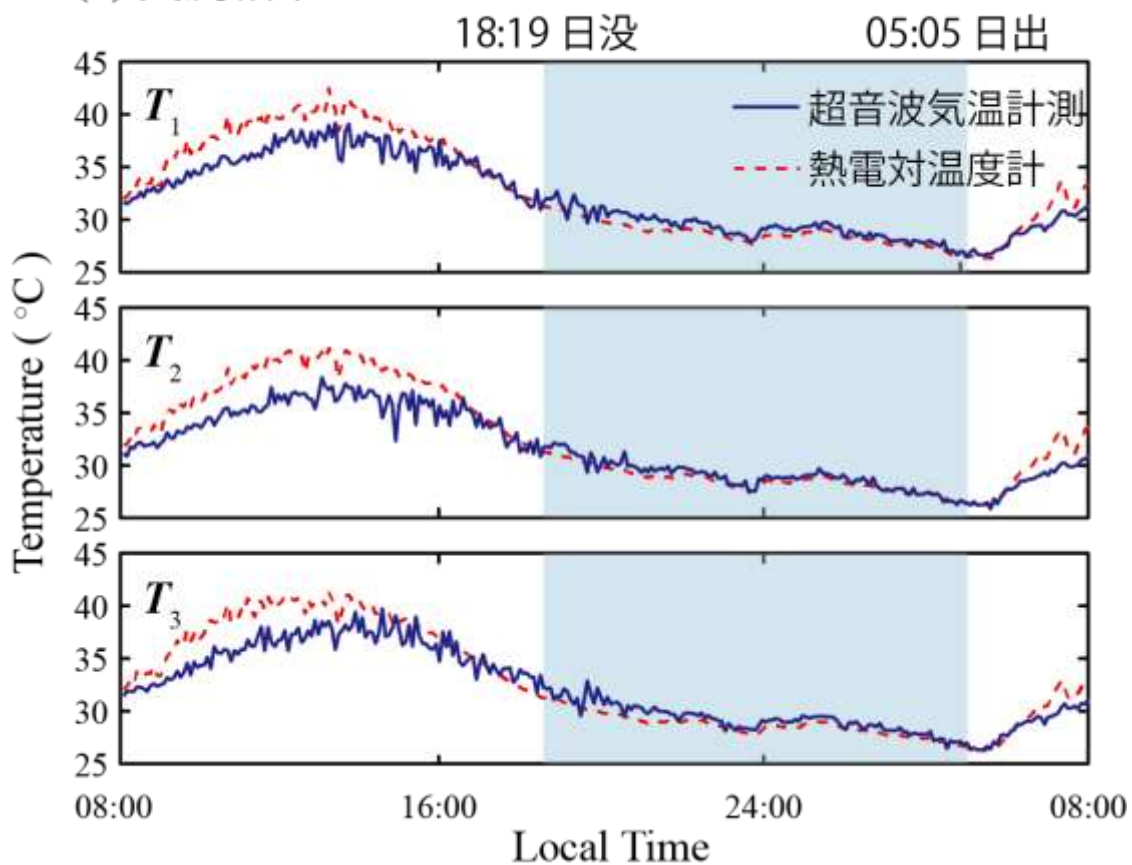


Fig. 2-3 屋外大規模空間の気温分布をネットワーク計測するリモートセンシング実証実験の概要図：(a) 実験系の全体図，(b) 実測結果.

2.4 湿度による音速変化に起因する音仮温度の変化

2.2 節で述べた音速と温度の関係式は湿度 (相対湿度) 0%RH のときに成立する。湿度を含む湿り空気における音速 c_{th} は次式で表せる⁴²⁻⁴⁴⁾。

$$c_{th} = c_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - h \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a} - \varepsilon \right) \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (2-12)$$

ここで、 $\gamma_w (= 1.330)$ は水の比熱比、 $\varepsilon (= 0.622)$ は空気中における水分子の分子量比である。水蒸気の体積パーセント h は相対湿度 H_R 、飽和水蒸気圧 p_{sat} 、気圧 p_a で表せ、 $p_r (= 1013.25 \text{ hPa})$ は基準気圧、 $T_{01} (= 273.16 \text{ K})$ は水の三重点温度である。

$$h = H_R \left(\frac{p_{sat}}{p_a} \right). \quad (2-13)$$

$$p_{sat} = p_r \times 10^{\left[-6.8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1.261} + 4.6151 \right]}. \quad (2-14)$$

Eqs. (2-12)—(2-14) より、湿り空気における音速 c_{th} は湿度 H_R にも依存することがわかる。また、気温が同じであるとき、乾燥空気の音速 c'_{th} よりも湿り空気中の音速 c_{th} の方が速くなることがわかる。

通常、外気は常湿 (45—85%RH) の湿り空気であることから、湿り空気中で従来の超音波気温計測を実施することを想定し $c_{mes} = c_{th}$ として音仮温度を試算した。その結果、乾燥空気と湿り空気中の音速の差異に起因して、音仮温度は真の気温よりも高くなることがわかった。音仮温度と真温度との差異の温湿度特性を求めた結果を **Fig. 2-4** に示す。室内の空調制御等、気象観測と違う分野においては音仮温度よりも真温度を評価指標としている。よって、従来の超音波気温計測をこれらの分野でそのまま利用しようとする、これらの差異は温度誤差とみなされてしまうことになる。気温計測としては、 $\pm 0.5 \text{ K}$ 以内の精度が基準とされるため、**Fig. 2-4** 中の色のついた高温高湿度な範囲では実用困難であることが確認された。

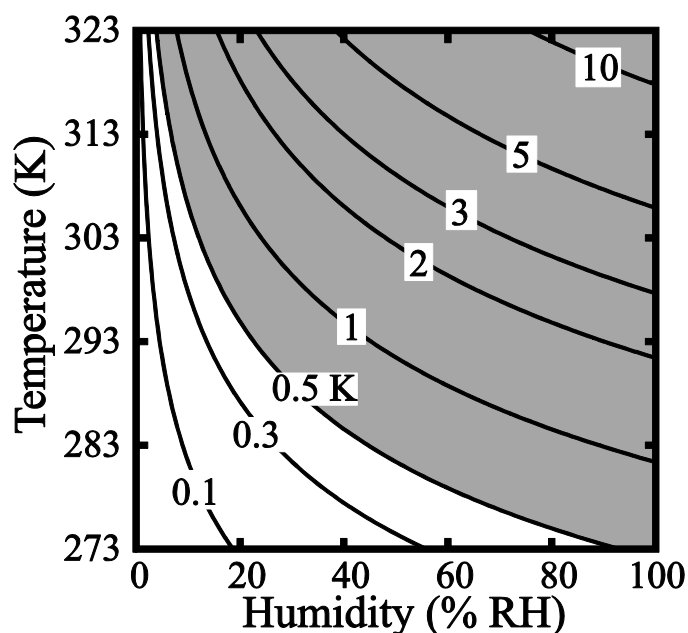


Fig. 2-4 音仮温度と真温度との差異の温湿度特性の解析結果.

2.5 まとめ

本章では、既存法である超音波の音速に基づく気温計測法の原理について述べた。まず、空気中を伝搬する超音波の音速が気温に依存することを理論式から示した。次に、超音波の音速算出に必要な伝搬時間計測法として、相互相関関数法とチャープ信号のパルス圧縮について述べた。そして、伝搬時間から算出された音速から、超音波の伝搬した空間の平均的な気温を音仮温度として逆推定する手法について述べることで、超音波気温計測の一連の原理が示された。この従来の超音波気温計測法の用途と近年の周辺研究として、気象観測のための超音波計測ユニットによるリモートセンシングシステムについて概説した。

次に、従来の超音波気温計測法の問題点として、湿り空気中で運用する際に生じる気温誤差について明らかにした。湿り空気中では、超音波の音速は湿度にも依存することを理論式から示し、湿度による音速の増分だけ、音速から逆推定される音仮温度は真温度よりも高くなることを示した。音仮温度と真温度との差異の温湿度特性を算出、評価した結果、従来の超音波気温計測法は高温高湿度な領域において運用困難であるという問題点が明らかにされた。

第3章

超音波の減衰に基づく湿度計測

3.1 はじめに

第2章より、音速は気温と湿度の二変数に依存するため、計測された音速から気温を逆推定する際に、湿度による音速増加に起因して音仮温度は真気温に対して高く推定されることが示された。音仮温度と真気温との差異を低減し、超音波による真気温計測を実現するには、湿度の影響を分離して推定する必要がある。気温と湿度という二変数を独立に推定するには、音速以外にもう一つ、気温と湿度の二変数に依存する超音波伝搬特性を計測すれば良い。

そこで、音速以外の超音波伝搬特性として、空気中における超音波の減衰率（減衰係数）に着目する。従来、空気中における超音波の減衰係数の湿度特性を計測法へ結びつけた例は少なく⁴⁵⁾、湿度計測の実用精度 $\pm 5\%RH$ 以内を達成した報告は無い。

本章では、まず超音波の減衰係数と湿度の関係式を示し、超音波の減衰に基づく2種類の湿度計測法の原理を提案する。一方は超音波伝搬距離 10 m 程度の大規模空間を対象とできる低周波超音波を用いる湿度計測法³¹⁾で、他方は伝搬距離 1 m 以下の小規模な空間を対象とする高周波超音波を用いる湿度計測法³²⁾である。これら両計測法による検証実験を行い、実験結果から提案法の湿度精度を検証し、超音波の減衰に基づく湿度計測が可能であるか論じる。

3.2 湿度と減衰係数の関係

超音波が空気中を伝搬するとき、空気の吸音性によってその音圧振幅は距離に対して指数関数的に減衰する。この指数関数形状、すなわち空気中の超音波減衰の様子は空気の物性値である減衰係数 α (dB/m) で決定される。

減衰係数は、減衰現象の要因毎に大きく 3 種類に大別されることが基礎研究により明らかにされている⁴⁶⁻⁵⁶⁾。空気の粘性や伝熱など古典物理学で説明される古典減衰係数 α_{cl} 、空気分子の回転緩和現象に起因する回転緩和減衰係数 α_{rot} 、空気分子の振動緩和現象に起因する振動緩和減衰係数 α_{vib} である。以下、減衰係数に関する Eqs. (3-1)―(3-5) は ISO 9613-1 に準拠する⁵⁷⁾。

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib}. \quad (3-1)$$

超音波の周波数 f が 100 MHz 未満のとき、古典減衰係数と回転緩和減衰係数の和は次式で表せる。

$$\alpha_{cl} + \alpha_{rot} = 1.60 \times 10^{-10} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} f^2. \quad (3-2)$$

振動緩和減衰は分子の種類毎に定義される。空気中におけるモル濃度比率 X とすると、空気の組成は窒素 $X_N = 0.78084$ 、酸素 $X_O = 0.209476$ 、二酸化炭素 $X_{CD} = 0.000314$ である⁵⁸⁾。ここで、空気中の二酸化炭素及びその他の微小成分による分子振動緩和減衰は微小である。 $\alpha_{vib,N}$ と $\alpha_{vib,O}$ をそれぞれ窒素と酸素の分子振動緩和減衰係数とすると、空気の分子振動緩和減衰係数 α_{vib} は、

$$\begin{aligned} \alpha_{vib} &= \alpha_{vib,N} + \alpha_{vib,O}, \\ \alpha_{vib,N} &= [(\alpha_{vib}\lambda)_{\max,N}] \times \left(\frac{f}{c_{th}} \right) \left\{ 2 \left(\frac{f}{f_{rN}} \right) \left[1 + \left(\frac{f}{f_{rN}} \right)^2 \right]^{-1} \right\}, \\ \alpha_{vib,O} &= [(\alpha_{vib}\lambda)_{\max,O}] \times \left(\frac{f}{c_{th}} \right) \left\{ 2 \left(\frac{f}{f_{rO}} \right) \left[1 + \left(\frac{f}{f_{rO}} \right)^2 \right]^{-1} \right\}. \end{aligned} \quad (3-3)$$

ここで、 f_{rN} と f_{rO} はそれぞれ窒素と酸素の分子振動緩和周波数、 $(\alpha_{vib}\lambda)_{\max}$ は振動緩和に起因する 1 波長分の距離 λ での減衰量最大値である。振動緩和周波数

f_{rN}, f_{rO} は次式で表せる.

$$f_{rN} = \left(\frac{p_a}{p_r} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right) - \frac{1}{2} \left[9 + 280h \exp \left\{ -4.170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\} \right], \quad (3-4)$$

$$f_{rO} = \left(\frac{p_a}{p_r} \right) \left(24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right).$$

減衰量の最大値 $(\alpha_{\text{vib}}\lambda)_{\text{max}}$ は、分子の特性振動温度 θ に依存する. $\theta_N (= 3352.0 \text{ K})$ と $\theta_O (= 2239.1 \text{ K})$ はそれぞれ窒素と酸素の特性振動温度である.

$$(\alpha_{\text{vib}}\lambda)_{\text{max},N} = \left(\frac{2\pi}{35} \right) (10 \log_{10} e^2) X_N \left(\frac{\theta_N}{T} \right)^2 \exp \left(-\frac{\theta_N}{T} \right), \quad (3-5)$$

$$(\alpha_{\text{vib}}\lambda)_{\text{max},O} = \left(\frac{2\pi}{35} \right) (10 \log_{10} e^2) X_O \left(\frac{\theta_O}{T} \right)^2 \exp \left(-\frac{\theta_O}{T} \right).$$

以上より、超音波の周波数 f と気圧 p_a が既知であるとき、減衰係数 α は気温 T と相対湿度 H_R に依存する二変数関数とみなせる. 本章では、超音波の減衰に基づく湿度計測の実現可能を検証するために気温が既知の場合について考察する. このとき、減衰係数は湿度のみに依存するため、減衰係数を計測することで湿度を推定できる. このように、本法は音が伝わった空間における平均湿度を計測できる.

3.3 超音波湿度計測の原理

本章では、超音波減衰計測に基づく湿度計測可能性を検証するために気温が既知の場合について考察する. このとき、減衰係数は湿度のみに依存するため、減衰係数を計測することで音が伝わった空間における平均的な湿度を推定できる. 減衰係数の計測方法は超音波の周波数に応じて異なるため、本節では、二種類の減衰係数計測法に基づく超音波湿度計測をそれぞれ提案する^{31,32)}.

3.3.1 低周波超音波湿度計測の原理

一般に、音は周波数が高くなるほど距離減衰しやすいことが知られている. よって、低い周波数の音ほど減衰しにくく、長距離伝搬可能であり、大規模な

空間の湿度計測へ応用できる。しかし、送波器の開口径が大きく変化しない場合、音の周波数が低くなるほど指向角が大きくなり球面波のように伝搬し、拡散減衰も同時に生じてしまう。特に閉空間においては、壁面や空間内の物体の吸音性により音は減衰する。伝搬前の音圧 P_T 、距離 L だけ伝搬した後の音圧 P_R とするとき、閉空間における 10 kHz オーダーの低周波超音波の減衰は次式で表せる^{59,60}。

$$P_R = P_T \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{10 \log_{10} e^2} + \frac{a}{8V} \right) L \right]. \quad (3-6)$$

ここで、 V は空間の体積である。また、 a は空間固有の総吸音力であり、壁面や空間内物体による吸音特性を考慮した定数である。よって、本法では計測対象とする空間毎に初期校正として総吸音力 a を求めておく必要がある。

低周波超音波の場合、湿度による振幅減衰量は周辺ノイズに比べ非常に小さい。閉空間内の任意の点にスピーカ (SP) とマイクロフォン (MIC) を配置し低周波超音波の正弦パルス信号を発すると、**Fig. 3-1** のように受信信号には壁面からの複数の反射波が含まれ、振幅の変化量から減衰係数を直接計測することは困難である。そこで、閉空間の残響時間に着目する。受信信号の最大音圧を基準にデシベル表示したものを **Fig. 3-2** に示す。

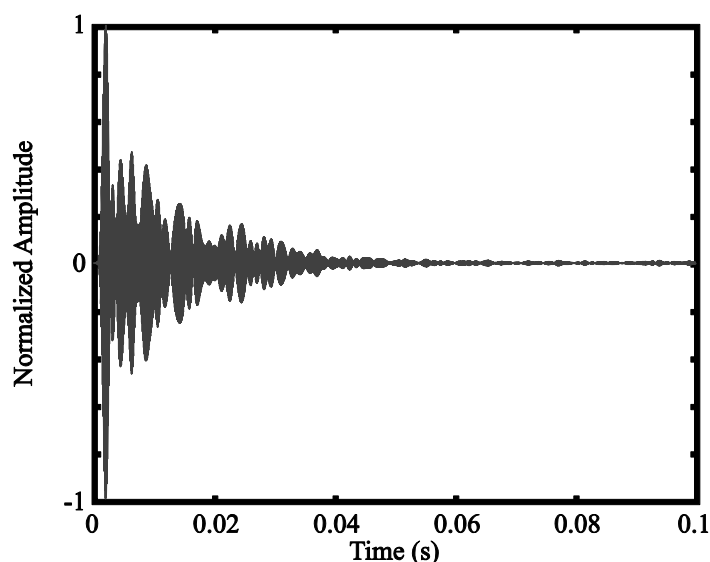


Fig. 3-1 閉空間内の任意の場所で低周波超音波の正弦バースト信号を送信した

ときの受信信号の例.

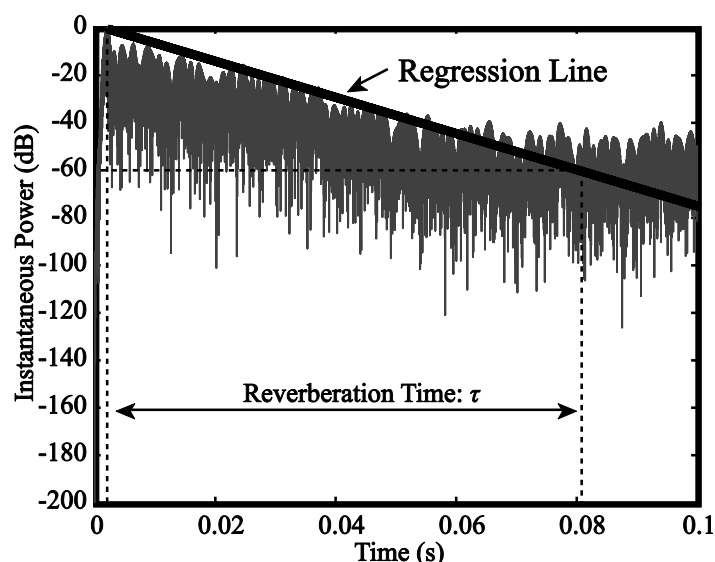


Fig. 3-2 受信波形の瞬時パワー表示と残響時間の計測法概要.

閉空間内における音の残響時間 τ_R を, 受信波の最大音圧レベルに対して $\Delta L_p = 60$ dB 減衰するまでの時間と定義するとき, 次式で表せる⁶¹⁾.

$$\tau_R = \frac{8V\Delta L_p}{8\alpha c_{th}V + 10\alpha c_{th} \log_{10} e^2}. \quad (3-7)$$

残響時間は, Fig. 3-2 のように線形近似曲線を用いて算出される⁶²⁾. 空間に対する初期校正として, 空間内の平均気温と平均湿度が既知すなわち減衰係数 α_1 が既知であるとき, Eq. (3-8) により残響時間から空間の総吸音力 a を求められる.

$$a = \frac{8V\Delta L_p}{c\tau_R} - \frac{8\alpha_1 V}{10\log_{10} e^2}. \quad (3-8)$$

このとき, 残響時間 τ_R から空間の平均的な減衰係数 α を算出できる.

$$\alpha = \frac{\Delta L_p}{c_{th} \tau_R} - \frac{10a \log_{10} e^2}{8V}. \quad (3-9)$$

ただし, 以上の数式は残響理論に基づいており, 音が球面状に等しく拡散する拡散音場を仮定している. しかし, 実空間には音圧分布が存在してしまうため,

実測される残響時間は統計的性質を示す⁶²⁾。よって、残響時間を実測する際には複数回計測し、その平均を取る必要がある。

ここで、低周波超音波の減衰係数と湿度の関係を Eqs. (3-1)—(3-5) より求め、**Fig. 3-3** に示す。この図より、低周波超音波の減衰係数はある湿度で極大となることがわかる。よって、この極大点を含む湿度域では減衰係数と湿度は一意的に対応せず、減衰係数から湿度を推定することができない。そこで、本法では湿度 20%RH に極大点を有する周波数 10 kHz の超音波を用いることにする。一般に、室内環境は 20%RH 以下の低湿度になり得ず、計測・制御の対象とされないことから、極大点以降の高湿域だけを対象としても実用上の支障はない。極大点よりも高湿域において、減衰係数は単調減少し、湿度と減衰係数は一意的に対応する。よって、減衰係数から湿度を計測可能である。

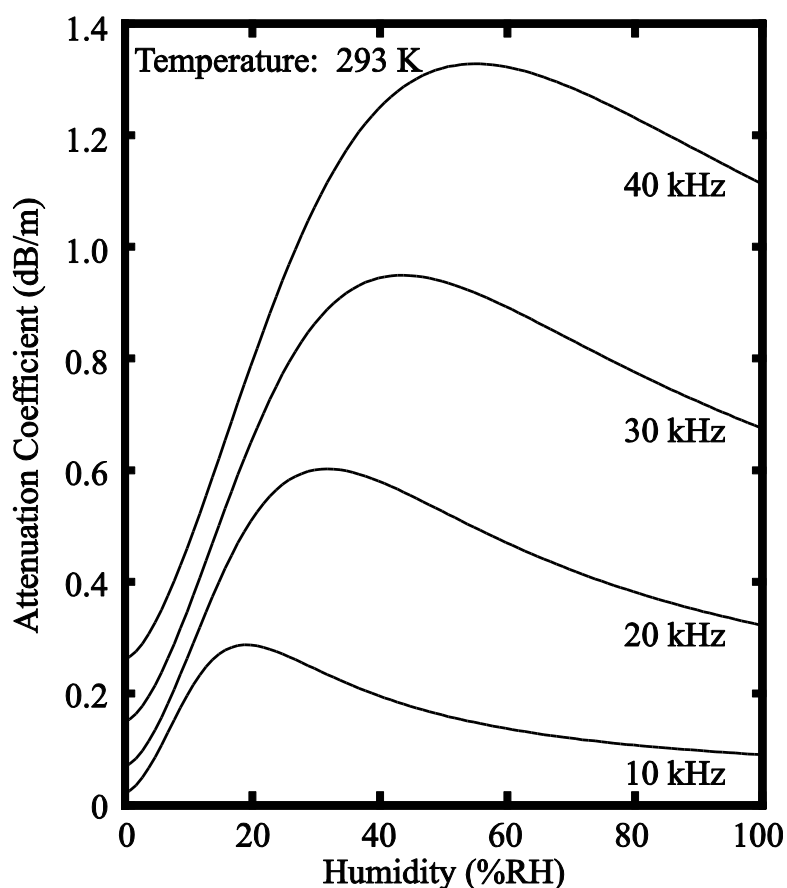


Fig. 3-3 低周波超音波の減衰係数と湿度の関係。

3.3.2 高周波超音波湿度計測の原理

周波数 100 kHz 以上の高周波超音波の減衰係数と湿度の関係を Eqs. (3-1)―(3-5) より求め、Fig. 3-4 に示す。高周波超音波は数 m 以内の短距離しか伝搬できない一方で、Fig. 3-3 と Fig. 3-4 を見比べてもわかるように湿度による減衰係数のオーダーが低周波超音波に比べ大きいため、減衰係数をより高精度に計測可能である。このとき、振幅の変化量も大きいので振幅変化から直接的に減衰を観測可能である。さらに、Fig. 3-4 より高周波超音波の減衰係数は全湿度域に対して単調増加し、減衰係数と湿度は一意に対応する。よって、本手法はその原理上、全湿度域を計測対象とできる。

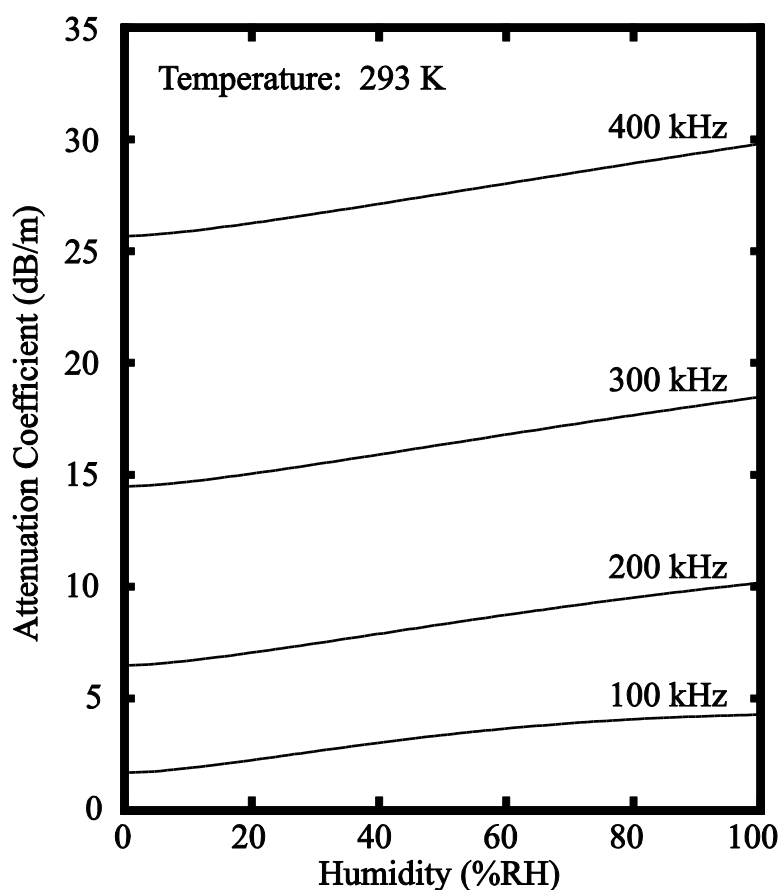


Fig. 3-4 高周波超音波の減衰係数と湿度の関係。

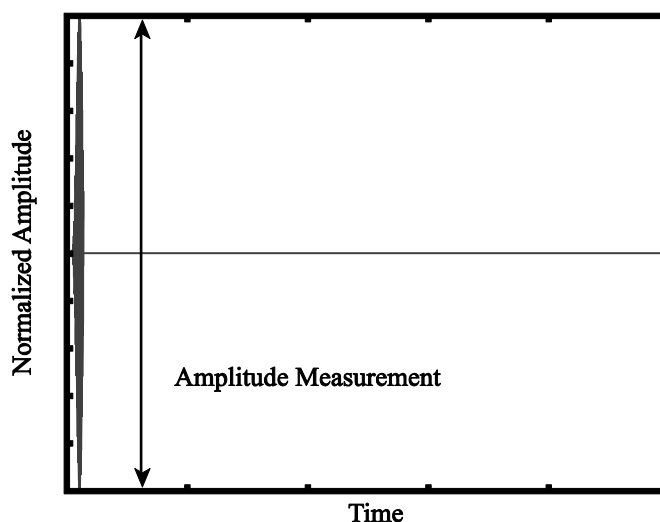


Fig. 3-5 閉空間内の任意の場所で高周波超音波の正弦バースト信号を送信したときの受信信号の例.

そこで、一對の超音波トランスデューサ（送信側 T_r , 受信側 R_e ）を対向させ、空気中に超音波を伝搬させる超音波プローブを構成する。高周波超音波の場合、超音波トランスデューサからの音の放射は鋭い指向性を有し、球面波としての拡散減衰は微小になる。さらに、高周波超音波は壁面での減衰量が大きいため、**Fig. 3-5** のように直達波のみを観測できる。

よって、本研究では高周波超音波には平面波の減衰式を適用できるとみなす。伝搬前の音圧振幅 P_T とするとき、距離 L だけ伝搬した後の音圧振幅 P_R は次式で表せる。

$$P_R = P_T \exp \left[-\frac{\alpha L}{10 \log_{10} e^2} \right]. \quad (3-10)$$

実測では、音圧振幅 P_R は受信信号の中心周波数における振幅スペクトル v_R として計測する。伝搬前の音圧振幅 P_T に対応する振幅スペクトル v_T は初期校正により推定しておくことにする。初期校正は気温と湿度が既知、すなわち減衰係数が α_1 として与えられている条件で行う。

$$v_T = v_R \exp \left[\frac{\alpha_1 L}{10 \log_{10} e^2} \right]. \quad (3-11)$$

減衰係数は次式で求められ，湿度を推定できる．

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left[\frac{v_T^2}{v_R^2} \right]. \quad (3-12)$$

本手法は，空間の特性にも依存する残響時間を用いないため，前項の手法のような閉空間の制約はなく，開空間でも適用が可能である．

3.4 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験

3.4.1 実験条件

実験系の構成を Fig. 3-6 に示す．本実験には，槽内の気温と湿度をそれぞれ ± 0.5 K, $\pm 3\%$ RH の精度で均一に保つことのできる恒温恒湿槽 (SH241, Espec) を用いた．槽内の任意の位置に SP (ND20FB-4, Dayton) と MIC (WM-61A, Panasonic) を設置した．槽内環境は気温 293 K 一定で相対湿度を 50 から 80%RH まで 10%RH 間隔で変化させ，各条件について 100 回計測した．送信信号には周波数 10 kHz, 信号長 1 ms の正弦バースト信号を用いた．計算機で送信信号を生成し，アンプと A-D/D-A 変換器 (USB-6212, National Instruments) を介してサンプリング周波数 250 kHz で送受信した．10 kHz の音を出力する際の SP の能率は 46.5 (dBW⁻¹m⁻¹) であり，印加電圧は 11.2 V_{p-p} であった．初期校正の結果，標準誤差率 0.001% 未満の精度で槽内の総吸音力 $a = 4.32 \times 10^{-2}$ m² であった．湿度のリファレンス H_{Ref} は槽内に内蔵された乾湿式湿度計で計測した．

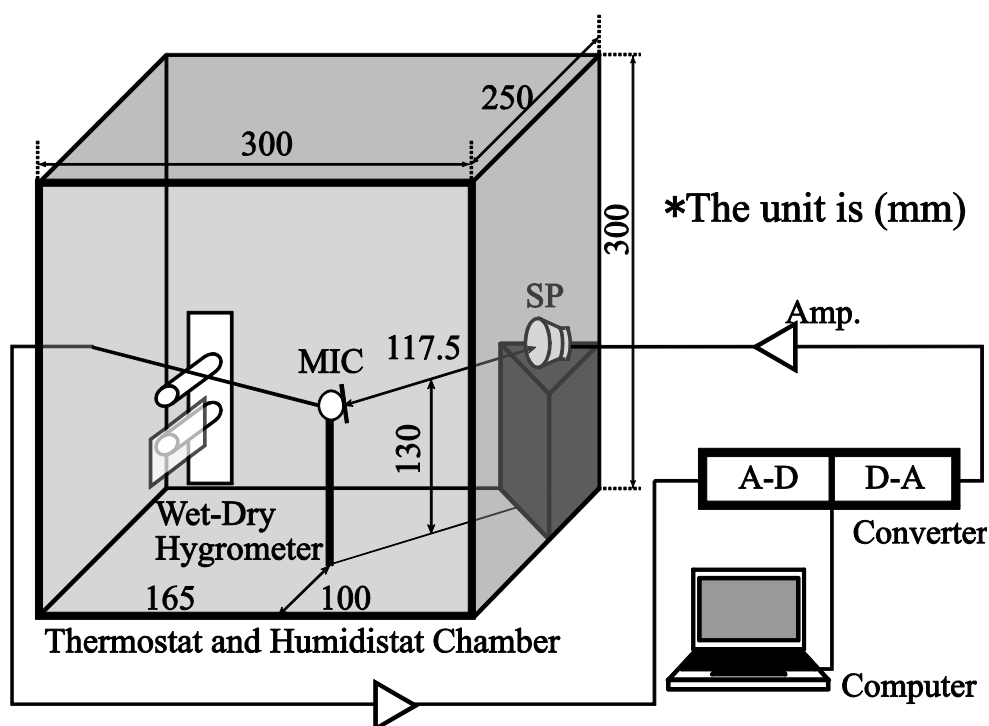


Fig. 3-6 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験系の構成.

3.4.2 残響時間計測結果の統計的解析原理

実閉空間では音圧分布が存在するため、計測される残響時間にはばらつきが生じる。残響時間を多数回計測したとき、その計測値は中心極限定理により正規分布に従うと仮定される⁶³⁾。よって、残響時間の計測精度は有限回の標本平均から母平均を推定する際の信頼度の問題に帰結する。標本の区間推定理論より、信頼確率は次式で表せる⁶⁴⁾。

$$P_r \left\{ \bar{x} - \hat{s} \sqrt{\frac{F_{1,N-1}}{N}} \leq m \leq \bar{x} + \hat{s} \sqrt{\frac{F_{1,N-1}}{N}} \right\} = 1 - \beta. \quad (3-13)$$

母平均 m が上記の区間内に存在する確率は $1-\beta$ と表せる。ここで、標本数 N の平均 \bar{x} 、不偏標準偏差 \hat{s} 、自由度 $(1, N-1)$ 、危険率 β の F 分布 $F_{1,N-1}$ である。この関係を用いて、ある危険率を指定した上でこの区間の半幅と標本平均の比で計測誤差率を定義できる。よって、残響時間 τ_R の計測結果に適用すると計測誤差率は次式で表せる⁶⁴⁾。

$$\frac{\Delta\tau_R}{\tau_R} = \frac{\hat{s}}{\bar{x}} \sqrt{\frac{F_{1,N-1}}{N}} \quad (3-14)$$

3.4.3 減衰係数の計測精度評価

減衰係数の計測結果を Fig. 3-7 に、湿度の計測結果 $H_{R_{mes}}$ を Table 3-1 に示す。これらより、本計測手法は概ね $\pm 5\%RH$ 以内の精度で湿度計測できていることがわかった。一般に、湿度計には $\pm 5\%RH$ の精度が求められることから、本計測法は十分な実用可能性を有していることがわかった。

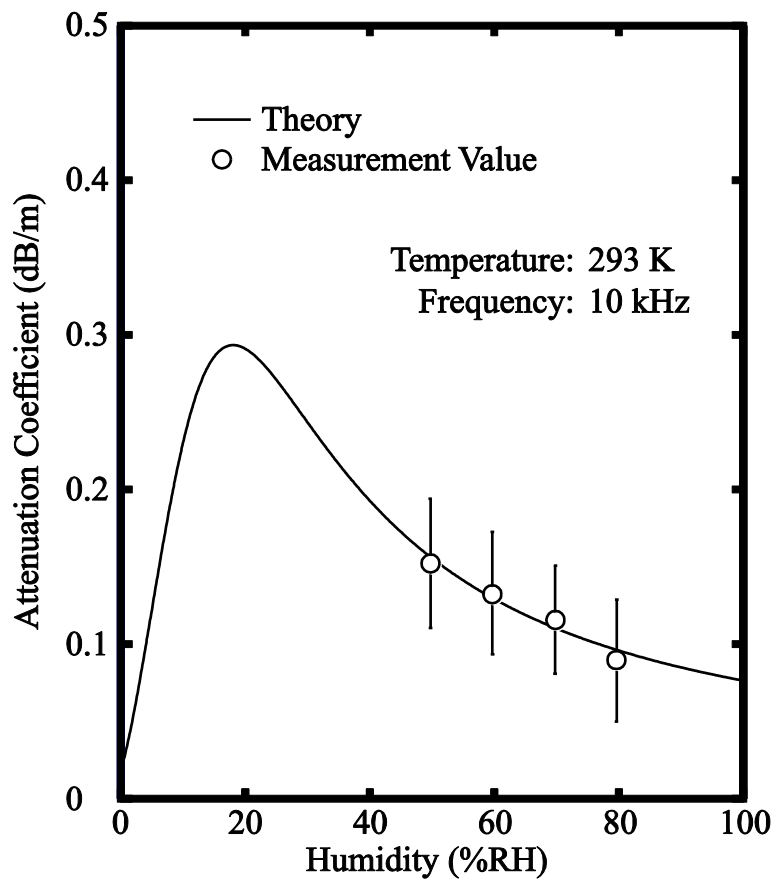


Fig. 3-7 低周波超音波の減衰係数計測結果.

ここで、減衰係数の計測精度の観点から湿度計測精度に関する考察を深めていく。±5%RH の湿度精度を実現するために必要な、各湿度域における減衰係数の許容誤差率 $(\Delta\alpha/\alpha)_p$ を Table 3-1 に示す。このように、高湿域ほど計測に許容できる誤差は小さくなり、高精度な減衰係数計測が必要であることがわかった。実験結果について Eq. (3-14) に基づき各湿度域における減衰係数の計測誤差率を算出した。危険率 $\beta = 0.05$ ，すなわち 95% 信頼限界として検定を行った際の計測誤差率 $(\Delta\alpha/\alpha)_e$ を Table 1 に示す。Table 1 より許容誤差率 $(\Delta\alpha/\alpha)_p$ と計測誤差率 $(\Delta\alpha/\alpha)_e$ を比較すると、湿度 50, 60, 70%RH において計測誤差率は許容誤差の範囲内であり、システムとして有用であることがわかる。一方で、湿度 80%RH において計測誤差率は許容誤差の範囲外であることから、湿度 70%RH より高湿域を対象とする場合にはさらに高精度な減衰係数計測が必要であることがわかる。

次に、各湿度域における許容誤差区間を基に、計測結果の標本平均がその区間内に存在する信頼確率 P_{rr} を Eqs. (3-13), (3-14) より逆算したところ、本システムの計測精度に関する信頼性仕様は Table 3-1 のようになった。

Table 3-1 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測結果及び統計的解析結果.

H_{Rref} (%RH)	50	60	70	80
H_{Rmes} (%RH)	51.1	58.3	66.7	85.3
$(\Delta\alpha/\alpha)_p$ (%)	10.06	8.76	7.51	6.37
$(\Delta\alpha/\alpha)_e$ (%)	5.47	5.92	6.00	8.77
P_{rr} (%)	100	99.6	98.5	84.7
N_{min}	28	47	64	187

3.4.4 計測回数の検討

ある分布をなす母集団から標本平均を算出する場合、標本数が大きいほど標準誤差は小さくなり精度は向上する。一方で、標本数が多くなれば、信号処理における計算コストが増大し、総計測時間が長くなる等の現実的問題が生じる。よって、標本数は必要な計測精度を実現するための最小限に留めるのが理想的である。

そこで、Eq. (3-14) の誤差率を指標として、標本数（計測回数）の検討を行った。各湿度条件における標本平均と不偏標準偏差の比は標本数に依らず一定と仮定した。このときの標本数と誤差率の関係を **Fig. 3-8** に示す。また、実用精度を満たすための最低標本数 N_{\min} を Table 3-1 に示す。この表より、湿度 70%RH までは本実験系で十分な計測回数を確保できていることがわかる。この結果は前項の精度評価結果と一致する。よって、本解析手法を目安として計測対象の湿度域に応じた計測回数を定めるべきである。

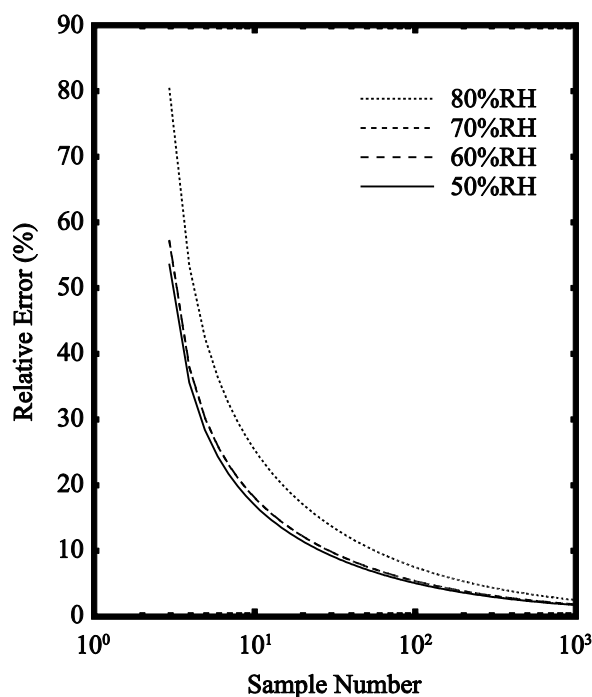


Fig. 3-8 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測における標本数と誤差率の関係。

3.5 高周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験

3.5.1 超音波周波数と計測対象規模の関係

減衰係数は超音波の周波数にも依存し、周波数が高くなるほど減衰係数が大きくなり、減衰係数を高精度に計測しやすくなる。一方で、周波数が高くなるほど超音波が伝搬できる距離は短くなり、計測対象とする空間の規模は小さくなってしまふ。そこで、本節では超音波の周波数毎の減衰係数と伝搬可能距離について示す。

減衰係数の周波数依存性は気温、湿度に比べて支配的である。よって、Eqs. (3-1)―(3-5) より基準温度 293 K における全湿度域に対する減衰係数の平均値 α_m を求め評価指標とし、減衰係数の周波数依存性を概算する。ここで、 α_m は周波数のみに依存する。超音波の周波数毎の伝搬可能距離を比較するために、平面波の音圧が半分となる距離 $L_{1/2}$ を評価指標とする。

$$L_{1/2} = \frac{6}{\alpha_m}. \quad (3-15)$$

このとき、減衰係数 α_m と伝搬距離 $L_{1/2}$ の周波数依存性を **Fig. 3-9** に示す。

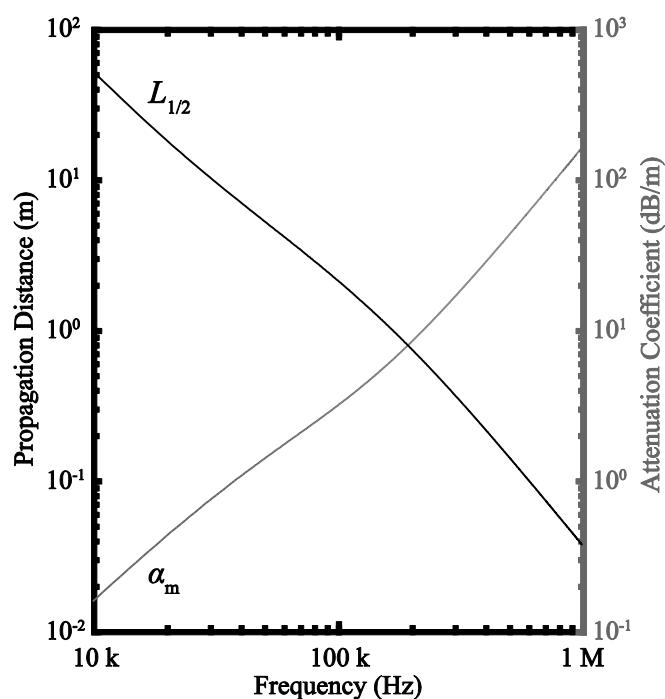


Fig. 3-9 減衰係数 α_m と伝搬距離 $L_{1/2}$ の周波数依存性.

この図より，減衰係数の大小と伝搬距離の長短はトレードオフ関係にあることがわかる．よって，超音波プローブで減衰係数を計測する際には，計測対象とする空間の規模に応じて，Fig. 3-9 を参考に超音波の周波数を選定すべきである．

3.5.2 信号長の設計

本手法では直達波の振幅スペクトルを計測することで，超音波の減衰を観測する．そのため，送信信号の信号長が長いほど平滑化により突発的な雑音に対して耐性がつく．一方で，信号長を長くし過ぎてしまうと，多重反射波が送信波に重なって受信波の振幅スペクトルが変化してしまう．

多重反射波の概要を Fig. 3-10 に示す．多重反射とは，平行に向かい合った送受信器間で超音波が反射を繰り返すことである．特に，Fig. 3-10 のように 2 回反射して集音される反射波は Triple Transit Echo (TTE) と呼ばれる．高周波超音波の空気中伝搬では，TTE より高次の多重反射波は長距離伝搬過程や反射時の減衰によって受信波形に影響しないが，直達波が充分減衰しない距離で計測を行う場合，TTE は受信波振幅に影響を与えるので考慮しなければならない．超音波が距離 L の空気中を音速 c で伝搬するとき，TTE が送信波に重ならない信号長 τ_0 の条件は次式で表せる．

$$\tau_0 \leq \frac{2L}{c}. \quad (3-16)$$

よって，距離と音速から概算することで，信号長の設計指針とすることができる．本実験では Eq. (3-16) の関係を満たすように信号長に関して留意する．

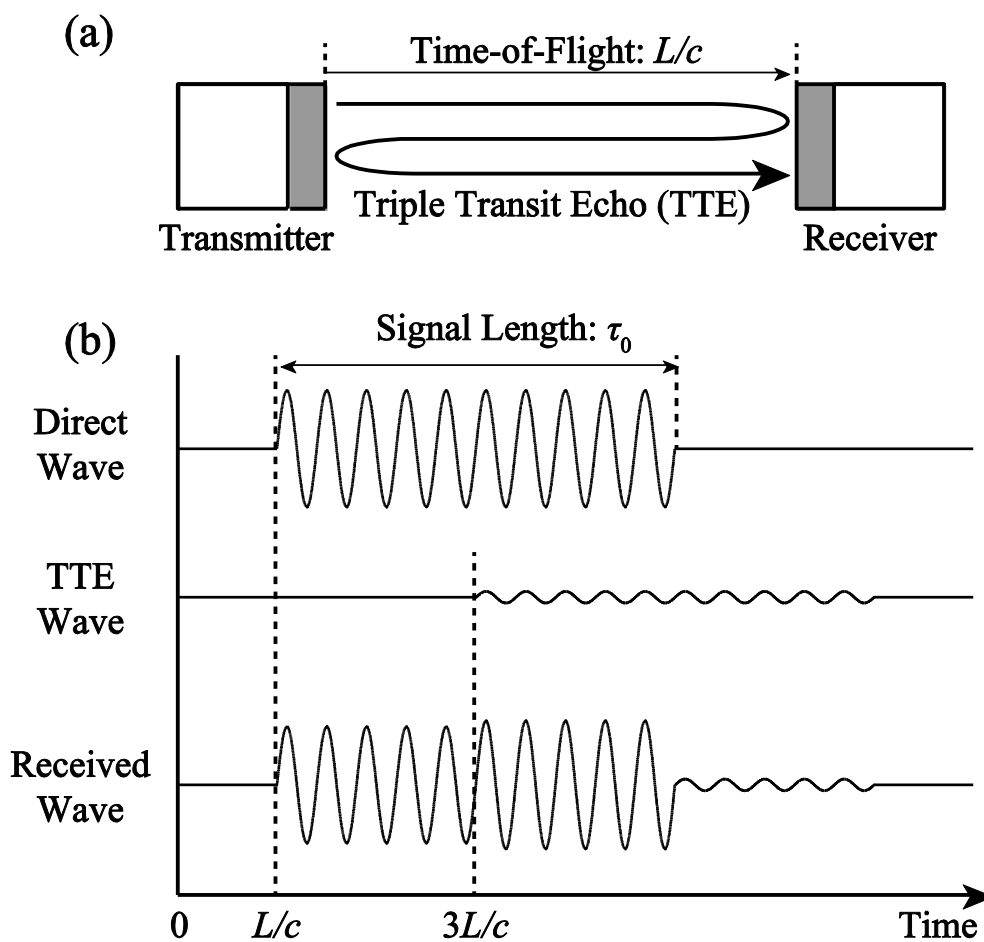


Fig. 3-10 多重反射波の概要.

3.5.3 実験条件

超音波プローブを構築し、湿度計測実験を行った。実験系の構成を **Fig. 3-11** に示す。本実験には、前節と同様の恒温恒湿槽を用い、湿度リファレンス H_{Ref} は乾湿式湿度計で計測した。超音波プローブは一对の超音波トランスデューサ (MA 400A1, Murata) 間の距離を 167 mm として構成した。槽内環境は気温 293 K 一定で相対湿度を 50 から 80%RH まで 10%RH 間隔で変化させ、各条件について 100 回計測した。送信信号には信号長 0.25 ms の 400 kHz 正弦パルスを用い、サンプリング周波数 2 MHz で送受信した。超音波トランスデューサはそれぞれ A-D 変換器 (PXI-6133, National Instruments) と、D-A 変換器 (PXI-6713, National Instruments) を介して、計算機へ接続した。

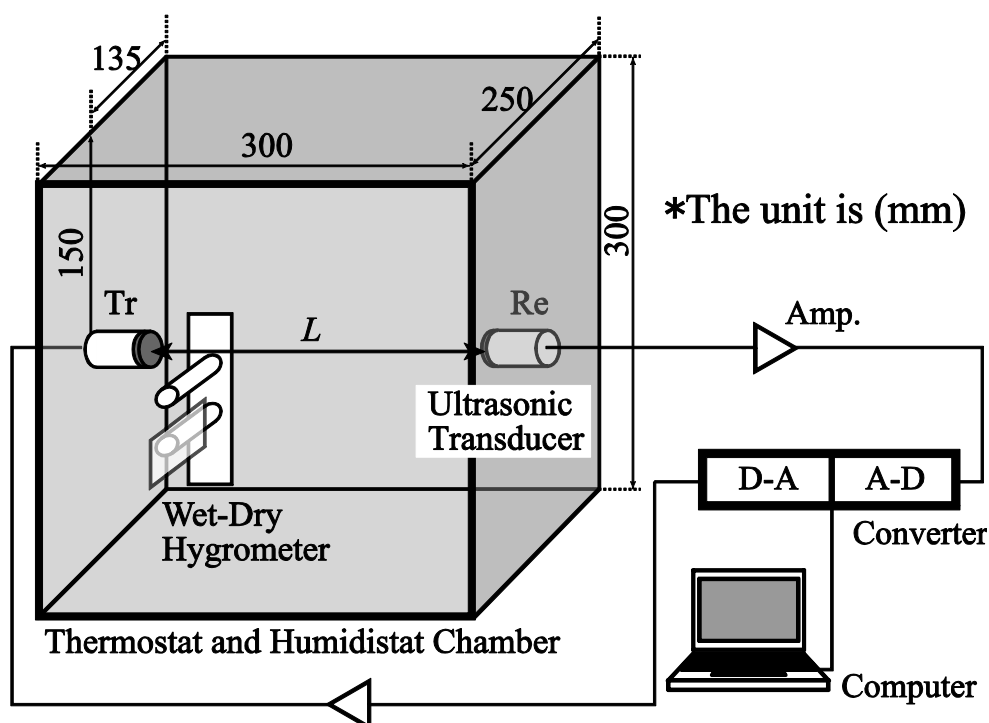


Fig. 3-11 高周波超音波の減衰に基づく湿度計測実験系の構成。

3.5.4 実験結果と考察

減衰係数の計測結果を **Fig. 3-12** に示す。ここで、黒色線は高周波超音波 (400 kHz) の結果であり、灰色線は前章で述べた低周波超音波 (10 kHz) の結果である。両計測法の計測精度を比較するために、標準誤差を平均値で除することで標準誤差率 ($\Delta a/a$) を求め、**Table 3-2** にまとめた。その結果、高周波超音波の方が43から104倍標準誤差率が小さいことを確認した。

このときの湿度算出精度を検討するために、**Fig. 3-12** の結果を湿度へ換算、写像した図が **Fig. 3-13** である。ここで、縦軸は湿度の計測値と真値の差で表している。**Fig. 3-13** より、両手法共に平均値は $\pm 5\%RH$ 程度の正確度である一方、誤差棒は高周波超音波の方が4から7倍短いことがわかる。この結果は **Table 3-2** の湿度標準誤差率 ($\Delta H_R/H_R$) を比較しても同様である。誤差棒の長さに着目すると、高周波超音波は湿度に依らず $\pm 5\%RH$ の精度を達成することを確認した。

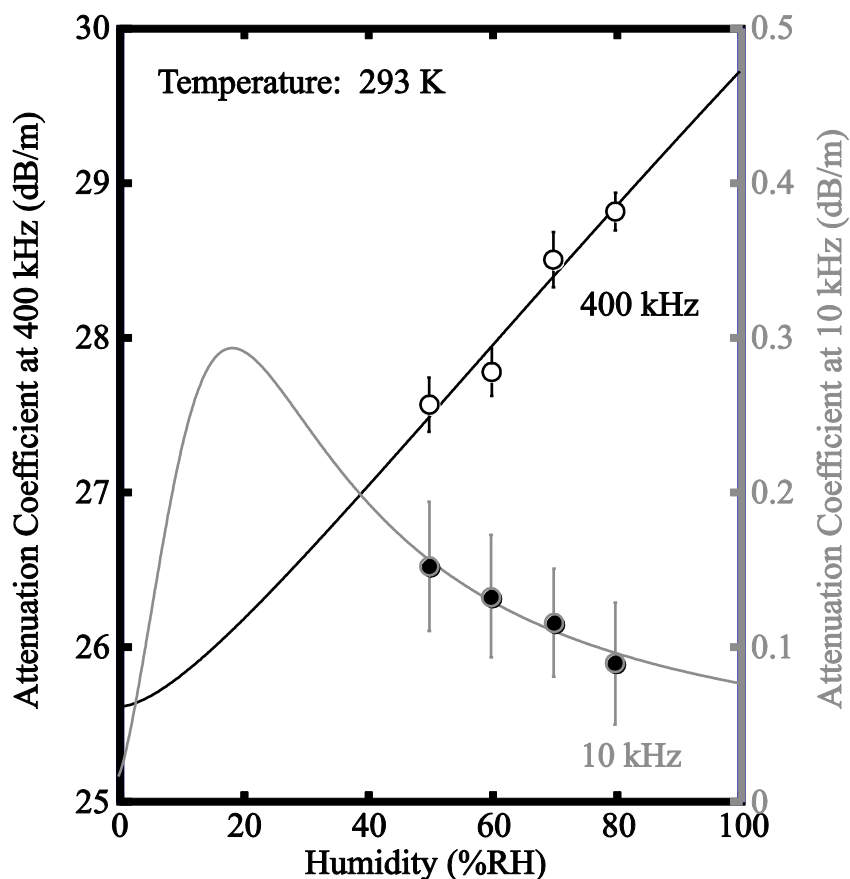


Fig. 3-12 高周波超音波の減衰係数計測結果。

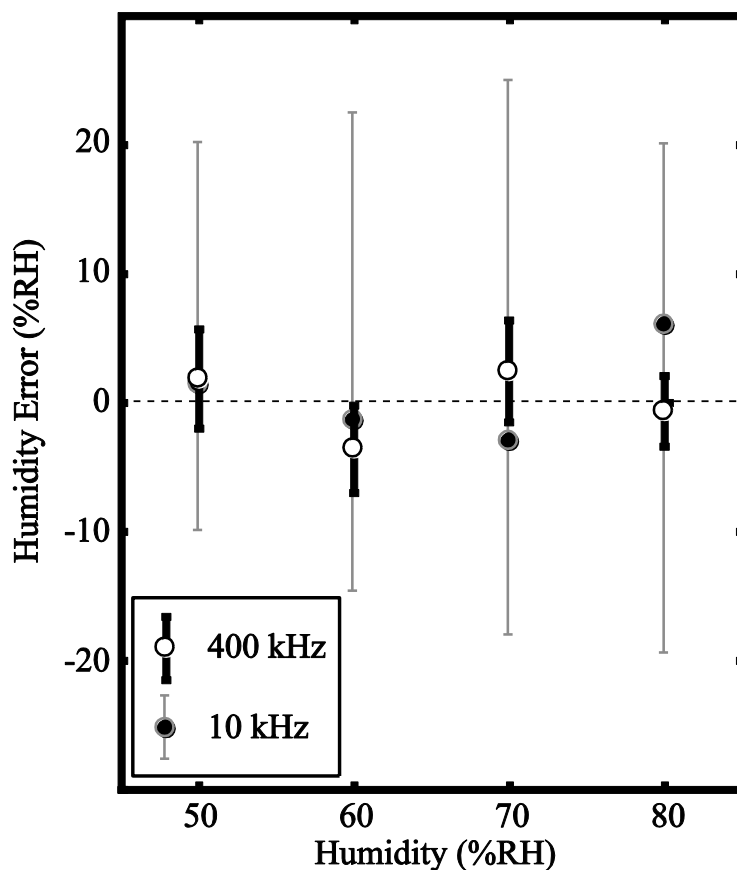


Fig. 3-13 超音波の減衰に基づく湿度計測結果.

Table 3-2 実測された減衰係数と湿度の標準誤差率.

	H_{Rref} (%RH)	50	60	70	80
Proposed Method (400 kHz)	$(\Delta\alpha/\alpha)_h$ (%)	0.06	0.06	0.06	0.04
	$(\Delta H_R/H_R)_h$ (%)	0.74	0.60	0.55	0.35
Reverberation Method (10 kHz)	$(\Delta\alpha/\alpha)_l$ (%)	2.76	2.98	3.03	4.42
	$(\Delta H_R/H_R)_l$ (%)	2.93	3.17	3.20	2.30

以上より、高周波超音波を用いる湿度計測法の方が低周波超音波による湿度計測法よりも精度がよいことがわかる。さらに、低周波超音波を用いる場合、高湿度になるほど湿度による減衰係数変化が小さくなるため、Table 3-2 の減衰係数誤差率は大きくなる傾向にあった。これに対して、高周波超音波を用いる場合、全湿度域に対して湿度による減衰係数変化率がほぼ一定であるために、不偏的精度での減衰計測が可能であることが Table 3-2 より裏付けられた。

3.6 まとめ

本章では、超音波の空气中伝搬過程における減衰観測に基づく湿度計測法を提案し、その実用可能性について検証した。具体的には、超音波送受間距離 0.1 から 10 m の規模に対応可能な減衰計測法について検討し、各規模に応じた減衰計測システムを構築した。そして、構築したシステムを用いて減衰を計測し、湿度を逆推定する実験を行い評価した。

ここでは、項目毎に得られた成果の概要を示す。

[1] 低周波超音波の減衰に基づく湿度計測法

大規模閉空間を対象とするために、低周波超音波の残響時間に基づく湿度計測法を提案・構築し、実験により検証した。恒温恒湿槽内の気温を一定に保ち、湿度を 50 から 80%RH の範囲で 10%RH 毎に変化させ、各条件について残響時間を計測して減衰係数を求め、理論値と比較した。実験結果を統計的に解析した結果、提案法によって湿度 50 から 80%RH の範囲で概ね $\pm 5\%$ RH の精度で湿度計測を実現できることがわかった。さらに、他の湿度域で実用的な湿度精度を実現するための残響時間の平均化回数を算定する指標を示した。これによって、残響式湿度計の実用可能性を示すことができた。

[2] 高周波超音波の減衰に基づく湿度計測法

対象は小規模ながら、開空間も高精度に湿度計測可能な超音波湿度計として、高周波超音波プローブを提案・構築し、実験により検証した。上記の低周波超音波の減衰に基づく湿度計測法の評価実験と同様の環境で、高周波超音波を用いて直接的に受信波形の中心周波数パワーから減衰係数を計測し、理論値、及

び低周波超音波の結果と比較した。高周波超音波を用いることで低周波超音波の結果より4から7倍の湿度計測精度向上が確認された。また、低周波超音波では高湿度域になるほど減衰計測誤差が大きくなる傾向にあったのに対して、高周波超音波では高湿度になっても誤差が大きくなるという特徴が確認された。以上より、高周波超音波を用いることによる高精度湿度計測の実現を示唆することができた。さらに、減衰係数の周波数特性に基づく距離減衰の観点から、送受間距離に応じて超音波プローブが出力すべき超音波の周波数帯について考察することで、計測対象規模に応じた超音波プローブの設計指針を示すことができた。

第 4 章

超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測

4.1 はじめに

第 3 章より、湿度変化による減衰係数変化を観測可能であることが示唆された。そこで本章では、減衰係数を積極的に活用し、音速と減衰係数の両方の計測に基づき気温と湿度を独立に推定する手法を提案する³⁰⁾。まず、超音波の音速と減衰係数を同時に計測する手法について述べる。超音波の音速と減衰係数は両方とも気温と湿度に依存するので、実測された音速と減衰係数と理論式から導出される音速と減衰係数が最も一致する気温と湿度の組み合わせを最適化処理により求めることができる。

以上のような原理について示した後、本手法の検証実験を行い、実験結果から温湿度精度を考察し、超音波の音速と減衰に基づく温湿度計測が可能であるか論じる。

4.2 超音波の音速と減衰係数に基づく温湿度計測原理

4.2.1 音速と減衰係数の同時計測用信号の設計

第 3 章では、低周波用と高周波用の二種類の減衰係数計測法を検討したが、本章では音速も同時に計測可能な計測系として、高周波超音波の減衰係数計測法を踏襲する。本減衰係数計測手法は、音速のみを計測していた既存の超音波気温計と同様な計測系で実現できるため、共通のハードウェアに対してソフトウェア的工夫を施すだけで実装が可能である。具体的には、計測に用いる信号とその信号処理に着目した。

空気中での高周波音の減衰計測は雑音や送受系振幅特性の影響を受けやすいため、任意の単一周波数成分にエネルギーを集中させた計測信号を用い、高感度な狭帯域送受波器で送受する等して信号対雑音比を向上させる必要がある。また送波器の制約として、連続波を長期間出力し続けると機器の発熱により振幅特性が変化し安定的に減衰計測できないため、バースト波を用いる必要がある⁴⁵⁾。バースト波を用いて音速計測する場合、信号対雑音比の観点から極力広帯域なチャープ信号を相互相関法によりパルス圧縮する手法が用いられる³⁵⁾。

以上のように、音速、減衰計測では周波数特性の相反する計測用信号が求められる。そこで、一つの受信波形から音速と減衰を同時計測可能な計測用信号の設計として、ある周波数の減衰特性を計測するために卓越周波数成分にエネルギーを集中させ、かつ、音速計測のために帯域幅を確保した、**Fig. 4-1** のような信号を提案した⁶⁵⁾。

このバースト信号は空中用狭帯域送受波器での利用を想定して設計した。まず、従来の音速計測用のチャープ信号 $d_1(t)$ と減衰計測用の正弦バースト信号 $s_1(t)$ を用意する。これらの信号の信号長は τ_0 である。チャープ信号の中心周波数は f_c 、周波数掃引幅は Δf である。また、正弦バースト信号の中心周波数も f_c である。これらの信号を加算した混合信号 $g(t)$ は両信号の特性を保持すると考えられる。

$$g(t) = d_1(t) + s_1(t), \tag{4-1}$$

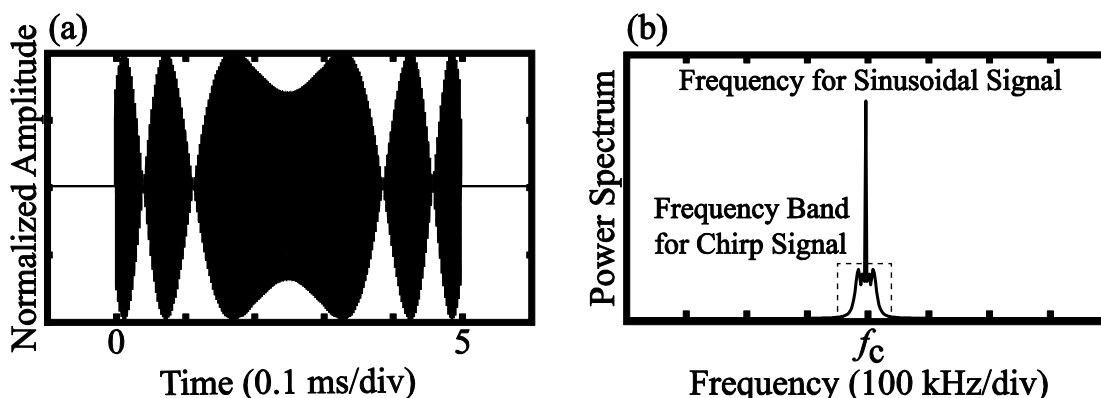


Fig. 4-1 チャープ信号と正弦バースト信号の混合信号.

音速計測の際には、混合信号 $g(t)$ とチャープ信号 $s_1(t)$ の相互相関関数 $x_1(t)$ を求める。

$$X_1(f) = G(f)D_1^*(f) = |D_1(f)|^2 + S_1(f)D_1^*(f), \quad (4-2)$$

ここで、 $g(t)$, $s_1(t)$, $d_1(t)$, $x_1(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $G(f)$, $S_1(f)$, $D_1(f)$, $X_1(f)$ のように、複素共役を $D_1^*(f)$ のように示す。以下同様に、簡単のために周波数の次元で示す。Eq. (4-2) の右辺第1項はチャープ信号 $d_1(t)$ の自己相関関数をフーリエ変換したものに相当するので、パルス圧縮された相互相関関数の波形から最大位置検出により高精度な伝搬時間計測が可能である。一方、右辺第2項は正弦バースト信号 $s_1(t)$ とチャープ信号 $d_1(t)$ の相互相関関数をフーリエ変換したものであり、第1項に比べ非支配的である。よって、混合信号 $g(t)$ はチャープ信号 $d_1(t)$ と同程度の精度で伝搬時間計測可能である。

減衰計測の際には、混合信号の卓越周波数 f_c 成分の振幅スペクトル v_R を計測することで、減衰係数を算出できる。

4.2.2 音速と減衰係数に基づく温湿度推定法

Eqs. (2-12)–(2-14) より、湿り空気における音速は気温 T と湿度 H_R に依存する二変数関数 $c_{th}(T, H_R)$ とみなせる。また Eqs. (3-1)–(3-5) より、湿り空気の減衰係数は、超音波の周波数 f と気圧 p_a が既知であるとき、気温 T と湿度 H_R に依存する二変数関数 $\alpha_{th}(T, H_R)$ とみなせる。例えば 400 kHz の超音波について、理論式から導出される音速 c_{th} と減衰係数 α_{th} の温湿度特性は **Fig. 4-2** のように示される。

実測される音速と減衰係数をそれぞれ c_{mes} , α_{mes} とするとき、温湿度推定のための評価関数は次式で定義できる。

$$(T_{est}, H_{Rest}) = \arg \min_{T, H_R} \{k_c |c_{th}(T, H_R) - c_{mes}| + k_a |\alpha_{th}(T, H_R) - \alpha_{mes}|\} \quad (4-3)$$

ここで、任意係数 k_c の単位は (s/m), k_a の単位は (m/dB) である。この評価関数が最小となる気温と湿度の組合せ (T_{est}, H_{Rest}) を数値計算法により求めることで、超音波が伝搬した空間の平均的な温湿度として逆推定することができる。

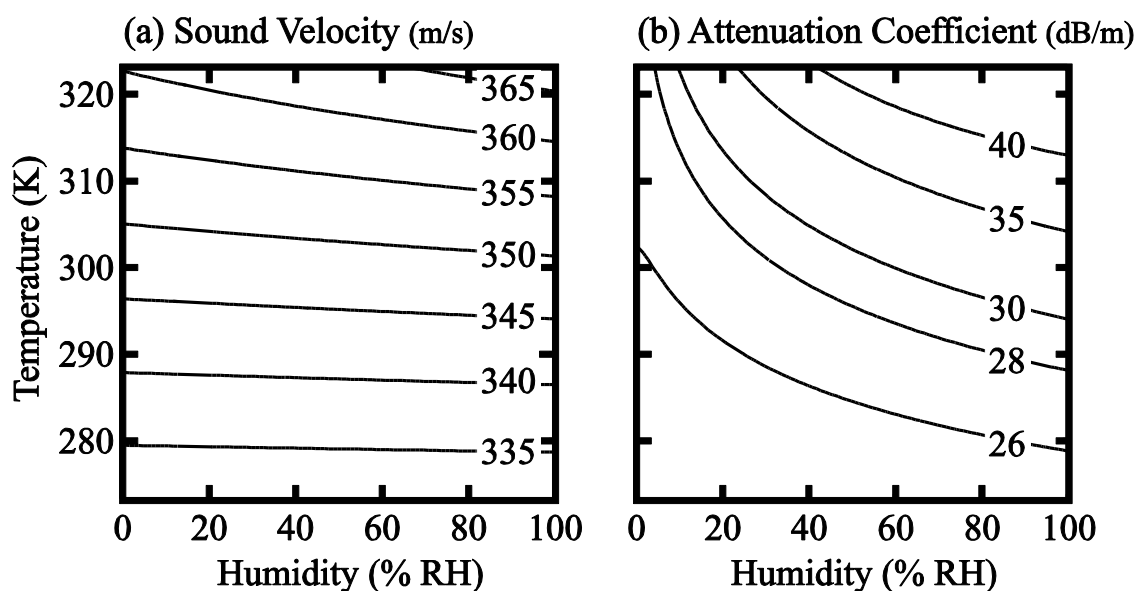


Fig. 4-2 理論式から導出される音速と減衰係数の温湿度特性 (400 kHz).

4.3 超音波の音速と減衰係数に基づく温湿度計測実験

4.3.1 実験条件

実験系の配置は Fig. 3-11 と同様である。本実験は恒温恒湿槽 (SH241, Espec) 内で行う。超音波送受波器 (MA4001A1, Murata) は距離 220 mm で設置した。槽内は、気温 293 から 308 K まで 5 K 間隔、湿度 50 から 90%RH まで 10%RH 間隔で変化させ、各条件について 100 回計測した。計測に用いた信号は 400 kHz の正弦バースト信号と 380—420 kHz のチャープ信号の混合信号であり、信号長 0.5 ms である。サンプリング周波数は 1 MHz で、信号の印加電圧は 44.8 V_{p-p}、送受波器感度は 10 V/Pa である。信号生成、信号処理は計算機で A-D/D-A 変換器 (USB-6259, National Instruments) を介して行った。実測された音速と減衰係数から気温と湿度を逆推定する際の数値計算法として、導関数を必要としない Nelder-Mead シンプレックス法を用いた。槽内の温湿度のリファレンスは槽内蔵の乾湿式湿度計で計測した。

4.3.2 実験結果と考察

まず、音速と減衰係数の計測結果を Fig. 4-3 (a), (b) に示す。これらの図において、各気温における音速と減衰係数の理論曲線を実線で示している。Fig. 4-3 (a) より、音速は計測誤差 0.13 m/s (計測誤差率 0.04%) の精度で理論値とよく一致していることがわかる。これに対して、Fig. 4-3 (b) より、減衰係数の計測結果は理論曲線に対して計測誤差 0.40 dB/m (計測誤差率 1.21%) の精度で一致していた。音速に比べ、減衰係数の計測は雑音や空気の流れの影響を受けやすいため、誤差率が大きくなったと考えられる。

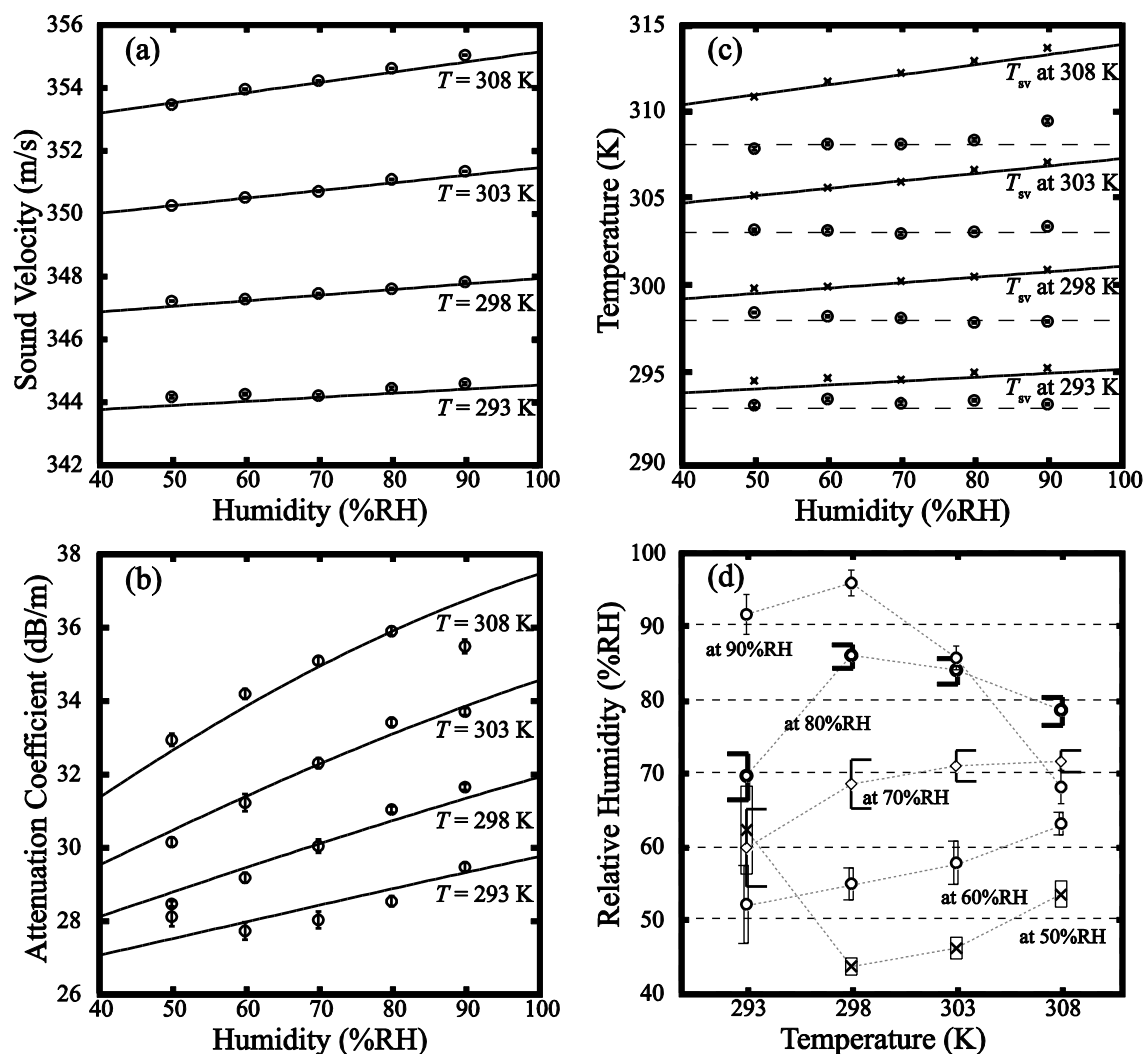


Fig. 4-3 音速と減衰係数に基づく温湿度計測実験の結果：

(a) 音速, (b) 減衰係数, (c) 気温, (d) 湿度。

次に、音速と減衰係数の計測結果から推定された温湿度の結果を Fig. 4-3 (c), (d) に示す。Fig. 4-3 (c) において、第2章で指摘した湿度影響を無視する従来の超音波気温計測の結果を x で示し、その理論的な計測限界である音仮温度を実線で示している。破線で示された設定気温 (真気温) に対して、提案法の計測結果は誤差 0.39 K (計測誤差率 0.13%) の精度で一致しており、従来法に比べ大幅な精度向上を確認できた。加えて本結果より、湿り空気中で 0.5 K 以内の実用基準を達成するという本研究の第一目的を果たすことができた。一方で、Fig. 4-3 (d) より、湿度の計測誤差 7.53%RH (計測誤差率 10.73%) であり、5%RH 以内の実用基準には達しなかった。その支配的要因は減衰係数の計測誤差であると推測された。

4.4 誤差解析に基づく計測精度の考察

実験結果の考察の裏付けとして、音速と減衰係数の計測誤差 Δc , $\Delta \alpha$ が気温と湿度の推定結果 T_{est} , H_{Rest} へ及ぼす影響について解析した。真の気温 T と真の湿度 H_R に対する気温と湿度の推定誤差 ΔT , ΔH_R とするとき、次式でモデル化できる。

$$\begin{aligned} T + \Delta T &= T_{\text{est}}(c_{\text{mes}}, \alpha_{\text{mes}}) = T_{\text{est}}(c_{\text{th}} + \Delta c, \alpha_{\text{th}} + \Delta \alpha), \\ H_R + \Delta H_R &= H_{\text{Rest}}(c_{\text{mes}}, \alpha_{\text{mes}}) = H_{\text{Rest}}(c_{\text{th}} + \Delta c, \alpha_{\text{th}} + \Delta \alpha). \end{aligned} \quad (4-4)$$

Eq. (4-4) より、各温湿度 (T , H_R) において生じうる気温と湿度の推定誤差 ΔT , ΔH_R は音速と減衰係数の計測誤差 Δc , $\Delta \alpha$ に依存する二変数関数とみなせる。よって、Eq. (4-4) に対して中央差分法を適用することで、気温と湿度の推定誤差の音速と減衰係数の計測誤差による偏微分値 $\partial T_{\text{est}}/\partial c$, $\partial T_{\text{est}}/\partial \alpha$, $\partial H_{\text{Rest}}/\partial c$, $\partial H_{\text{Rest}}/\partial \alpha$ を各々算出することができる。これらの偏微分値は、音速と減衰係数の計測誤差がそれぞれ気温と湿度の推定誤差にどれほど影響を与えるかの感度の指標であり、Fig. 4-4 に示すような結果が得られた。

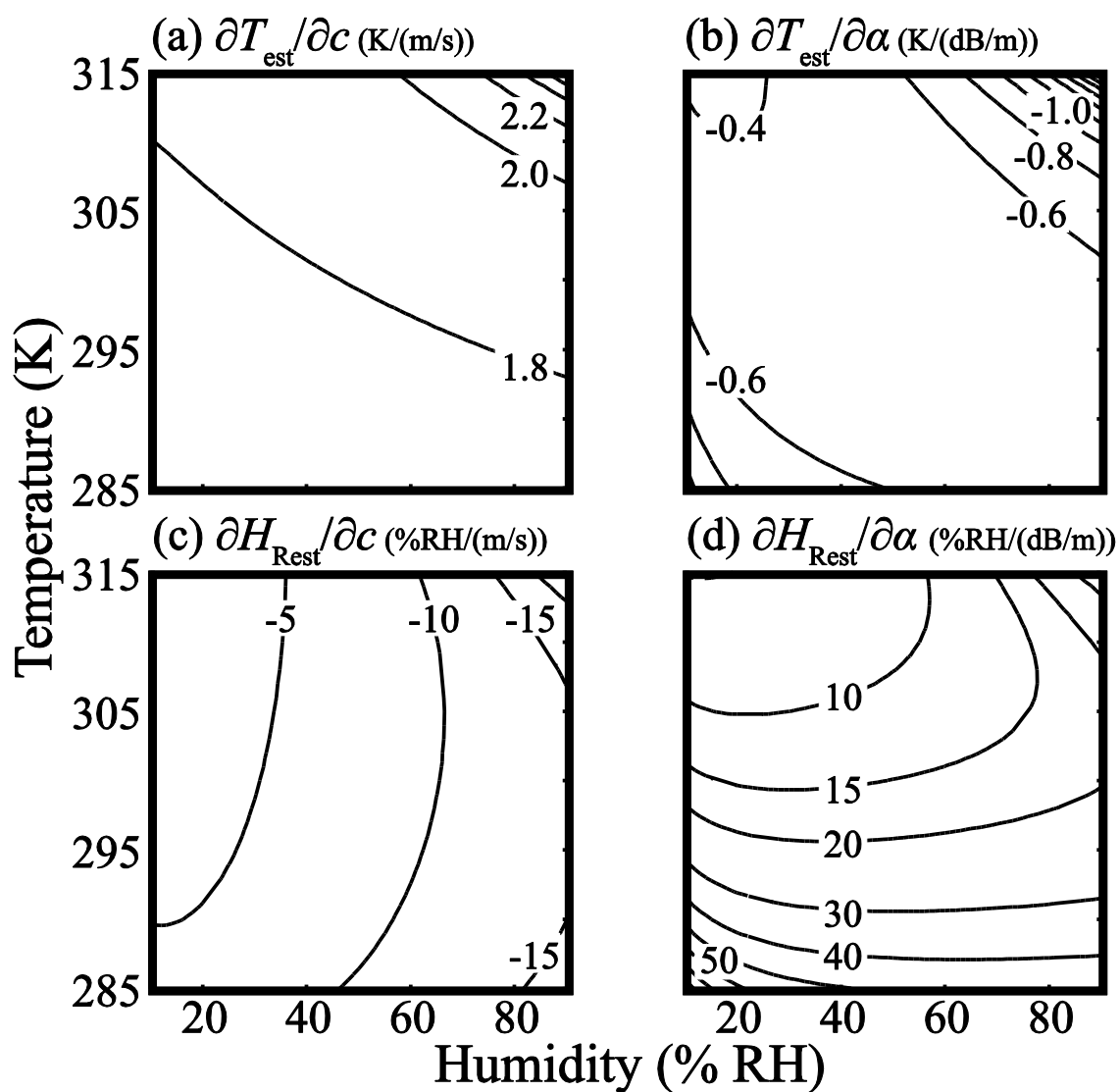


Fig. 4-4 音速と減衰係数の誤差が温湿度の推定結果へ及ぼす影響の解析結果：

- (a) 音速の計測誤差による気温推定誤差感度 $\partial T_{\text{est}} / \partial c$,
- (b) 減衰係数の計測誤差による気温推定誤差感度 $\partial T_{\text{est}} / \partial \alpha$,
- (c) 音速の計測誤差による湿度推定誤差感度 $\partial H_{\text{Rest}} / \partial c$,
- (d) 減衰係数の計測誤差による湿度推定誤差感度 $\partial H_{\text{Rest}} / \partial \alpha$.

一次近似的に考えれば、音速の誤差に起因する気温の推定誤差 ΔT_c 、減衰係数の誤差に起因する気温の推定誤差 ΔT_α 、音速の誤差に起因する湿度の推定誤差 ΔH_{Rc} 、音速の誤差に起因する湿度の推定誤差 ΔH_{Ra} とすると、

$$\begin{aligned}\Delta T &= \Delta T_c + \Delta T_\alpha, \\ \Delta T_c &= \frac{\partial T_{\text{est}}}{\partial c} \Delta c, \\ \Delta T_\alpha &= \frac{\partial T_{\text{est}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \\ \Delta H_R &= \Delta H_{Rc} + \Delta H_{Ra}, \\ \Delta H_{Rc} &= \frac{\partial H_{R\text{est}}}{\partial c} \Delta c, \\ \Delta H_{Ra} &= \frac{\partial H_{R\text{est}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha,\end{aligned}\tag{4-5}$$

となる。本実験結果では、 $\Delta c = 0.13 \text{ m/s}$ 、 $\Delta \alpha = 0.40 \text{ dB/m}$ であることから、これらの値をそれぞれ Fig. 4-4 中の値へ乗じることを考慮する。音速計測誤差による湿度推定誤差と減衰係数計測誤差による湿度推定誤差はほぼ一致した。しかし、音速の計測誤差率は減衰係数の計測誤差率よりも 30 倍小さかったことを考えると、本手法による気温推定では減衰係数よりも音速の計測精度の方が重要であることがわかった。またこのとき、音速計測誤差による湿度推定誤差よりも減衰係数計測誤差による湿度推定誤差の方が大きく、また低温になるほど減衰係数計測誤差による湿度推定誤差が大きくなることがわかった。以上より、本手法による湿度計測精度の向上のためには減衰係数の計測精度を向上させる必要があることが考察できた。

4.5 まとめ

本章では、音速と減衰係数の両方の計測に基づき気温と湿度を独立に推定する手法を提案した。まず、超音波の音速と減衰係数を同時に計測するための、卓越周波数を有する計測用信号について述べた。そして、超音波の音速と減衰係数が気温と湿度に依存することを利用して、実測された音速と減衰係数と理論式から導出される音速と減衰係数が最も一致する気温と湿度の組み合わせを

最適化処理により求める温湿度同時推定法について述べた。

提案手法の検証実験を行った結果、第 2 章で指摘した従来法の問題点を改善し、提案法によって湿り空気中においても 0.5 K 以内の実用温度精度基準を達成するという本研究の第一目的を果たすことができた。一方で、本手法による湿度計測精度は 7.53%RH であり、5%RH 以内の実用湿度精度基準には達しなかった。誤差解析の結果、湿度計測精度の向上のためには減衰係数計測精度の向上が必要であると考察された。

第5章

温湿度計測の高精度化

5.1 はじめに

本章では、提案手法の実用システム化・高精度化を念頭に、諸外乱の影響の評価と対策について考察する。

まず、本計測法の雑音耐性を向上させるために、インバースフィルタを用いる音速と減衰の同時計測法³³⁾について述べる。第4章までの結果より、音速計測は十分な精度が達成できている一方で、実用的な精度での温湿度推定を実現するためには、減衰計測の精度を向上する必要があることが明らかになった。音速計測用の正弦バースト信号と減衰計測用のチャープ信号では周波数帯域の性質が相反するため、第4章では、有限な送信信号のエネルギーを二等分し、正弦バースト成分とチャープ成分へ分配し両信号を送受する必要があった。インバースフィルタは正弦バースト信号をチャープ信号同様にパルス圧縮する際に用いるデジタルフィルタである。インバースフィルタを用いることで、正弦バースト信号でチャープ信号と同程度の音速計測精度を達成できるので、送信信号のエネルギーを全て正弦バースト信号成分へ集中できるようになる。よって、減衰計測における信号対雑音比を向上させることができ、本計測法の雑音耐性を向上させることができると考えられる。よって、インバースフィルタを用いるパルス圧縮法の原理について説明し、その有効性の検証実験について述べる。

次に、外乱としての気圧変動や対流、温湿度分布が計測へ与える影響について考察する。システムを長期運用することを想定すれば、気圧変動の影響について考察する必要がある。音速や減衰係数は気圧にも依存するため、気圧が変動すると音速や減衰係数も変動し、温湿度の推定結果へ影響すると考えられる。

よって、各温湿度環境における気圧変動に対する推定結果への影響量を評価し、気圧センサを利用した気圧補償法と、その有効性の検証実験について述べる³⁴⁾。また、室内には対流など微小な空気の流れが存在する。空気の流れにより生じる音速と減衰係数の誤差を評価し、結果的に生じる気温と湿度の推定誤差についても評価する。さらに、室内に温湿度分布が存在する場合、超音波の屈折が生じ、受信点において見かけ上の音圧が低下し減衰計測の誤差が生じると考えられるので、その影響について評価する。

そして、諸外乱への対策を備え、最終的に構築されたシステムを用いて、提案計測法の即応答性について検証するために行った実験について述べる。

5.2 インバースフィルタを用いる音速と減衰係数の同時計測

5.2.1 インバースフィルタを用いる音速と減衰係数の同時計測原理

減衰計測のためには狭帯域にエネルギーを局在させた正弦バースト信号、音速計測のためには広帯域にエネルギーを分散させたチャープ信号が利用されてきた。そのため、有限な送信信号のエネルギーを二等分し、正弦バースト信号成分とチャープ信号成分へ分配し両信号を送受する必要があった⁶⁵⁾。送信信号エネルギーを全て正弦バースト波に用いることができれば、従来の倍の信号対雑音比で減衰係数計測を実現できる。そこで、正弦バースト信号を用いてチャープ信号と同程度の精度での伝搬時間計測を実現するために、インバースフィルタに着目した。

まず、**Fig. 5-1** のように、実際に送信する周波数 f_c の正弦バースト信号 $s_{Tr}(t)$ と、仮想的に送信したいチャープ信号 $d_{Tr}(t)$ を生成する。このチャープ信号の周波数掃引は $f_c - \Delta f/2$ から $f_c + \Delta f/2$ であり、帯域幅 Δf は任意の値を設定できる。これらの信号長は同一である。このとき、 $s_{Tr}(t)$ を $d_{Tr}(t)$ へ変換するフィルタのインパルス応答のフーリエ変換は、

$$H(f) = \frac{D_{Tr}(f)}{S_{Tr}(f)}, \quad (5-1)$$

であり、インバースフィルタと呼ばれる⁶⁶⁻⁶⁹⁾。 $S_{Tr}(f)$, $D_{Tr}(f)$ は $s_{Tr}(t)$, $d_{Tr}(t)$ のフーリエ変換である。以下同様に表記する。正弦バースト信号 $s_{Tr}(t)$ を伝送路 (送波器—空気—受波器) に通し、受信信号 $s_{Re}(t)$ を得る。この信号をインバースフィルタに通した信号 $d_{Re}(t)$ はチャープ信号 $d_{Tr}(t)$ を伝送した信号とほぼ等価であり、次の関係が成り立つ。ここで、 $C(f)$ は伝送路の特性である。

$$D_{Re}(f) = S_{Re}(f)H(f) = C(f)S_{Tr}(f)H(f). \quad (5-2)$$

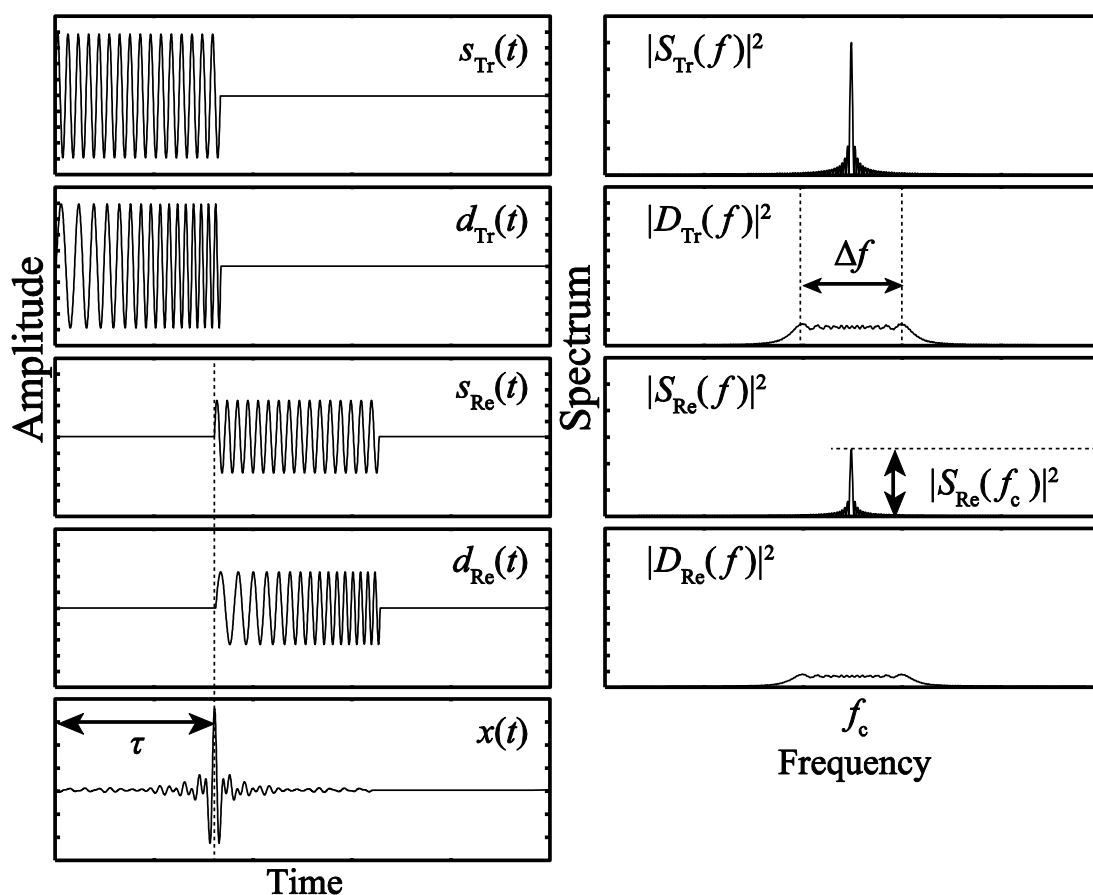


Fig. 5-1 インバースフィルタを用いるパルス圧縮を行う際の送受信信号の例：
 $s_{Tr}(t)$ 実際に送信する周波数 f_c の正弦バースト信号，
 $d_{Tr}(t)$ 仮想的に送信したい任意の帯域幅のチャープ信号，
 $s_{Re}(t)$ 実際に受信された信号，
 $d_{Re}(t)$ 受信信号 $s_{Re}(t)$ をインバースフィルタに通した信号，
 $x(t)$ 伝搬時間計測に用いる $d_{Tr}(t)$ と $d_{Re}(t)$ の相互相関関数，
 $S_{Tr}(f)$, $D_{Tr}(f)$, $S_{Re}(f)$, $D_{Re}(f)$ は各々 $s_{Tr}(t)$, $d_{Tr}(t)$, $s_{Re}(t)$, $d_{Re}(t)$ のフーリエ変換.

チャープ信号 $d_{Tr}(t)$ と $d_{Re}(t)$ の相互相関関数 $x(t)$ を次式で求めパルス圧縮する。ここで、 $D_{Tr}^*(f)$ は $D_{Tr}(f)$ の複素共役を意味する。

$$x(t) = \text{IFT}[D_{Tr}^*(f)D_{Re}(f)] = \text{IFT}[|D_{Tr}(f)|^2 C(f)]. \quad (5-3)$$

相関関数 $x(t)$ はチャープ信号 $d_{Tr}(t)$ を送受信した際の相関関数と等しい精度である。相関関数 $x(t)$ の最大値位置 τ を伝搬時間として計測し、音速 c を算出できる。また送受距離 $L=0$ であるときの受信信号のパワー $|S_{Re}(f_c)|^2$ が既知であるとき、 $|S_{Re}(f_c)|^2$ を計測することで減衰係数 α_{mes} を算出できる。

5.2.2 インバースフィルタを用いる音速と減衰係数の同時計測実験

Fig. 3-11 と同様な実験系でインバースフィルタを実装し減衰係数と音速の同時計測し、第4章の計測結果と比較した。送信信号には信号長 0.5 ms の 400 kHz 正弦バースト信号を用いた。またインバースフィルタで仮想的に生成されるチャープ信号の帯域幅 Δf は 70 kHz とした。ここで、サンプリング周波数は 1 MHz で、信号の印加電圧は 44.8 V_{p-p} である。

まず、受信波形の例を Fig. 5-2 (a) に示す。またインバースフィルタを用いるパルス圧縮法に基づく相互相関関数を Fig. 5-2 (b) に示す。先の理想波形とは異なり、受信波形には伝送路特性が畳み込まれ加算性雑音も含まれていた。しかし、相互相関関数において伝搬時間の位置で最大ピークとなることは不変であり、計測への影響は無いことが確認された。

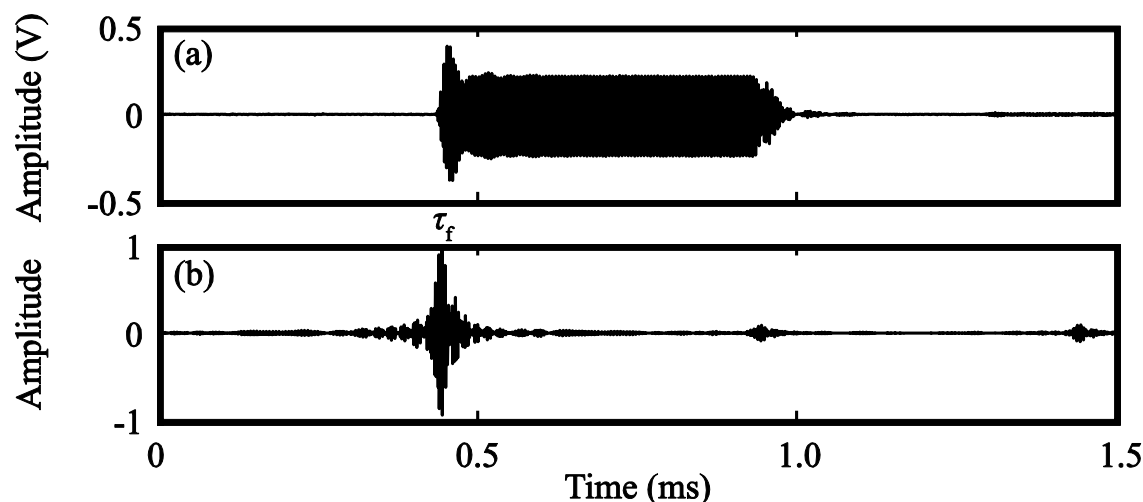


Fig. 5-2 実測された受信波形と相互相関関数の例

次に、音速の計測結果を **Fig. 5-3 (a)** に示す。理論値に対する計測誤差率は新旧手法ともに 0.1% 以内の精度で一致しており、インバースフィルタを応用することによって従来法と同程度の精度で音速計測が可能であることが確認された。減衰係数の計測結果を **Fig. 5-3 (b)** に示す。減衰計測の信号対雑音比を向上させたので、標準偏差を従来結果の 3 分の 2 にすることができた。しかし、正確度（平均値と理論値の誤差）の傾向は信号対雑音比改善前の結果と同様であった。このことから、ここで生じている減衰係数誤差の支配的要因は雑音ではないことがわかった。よって、恒温恒湿槽の制御特性や送受波器の超音波放射特性等の実験系の影響が誤差の主要因であると考察できた。そこで、以下、実験系を再構築した。

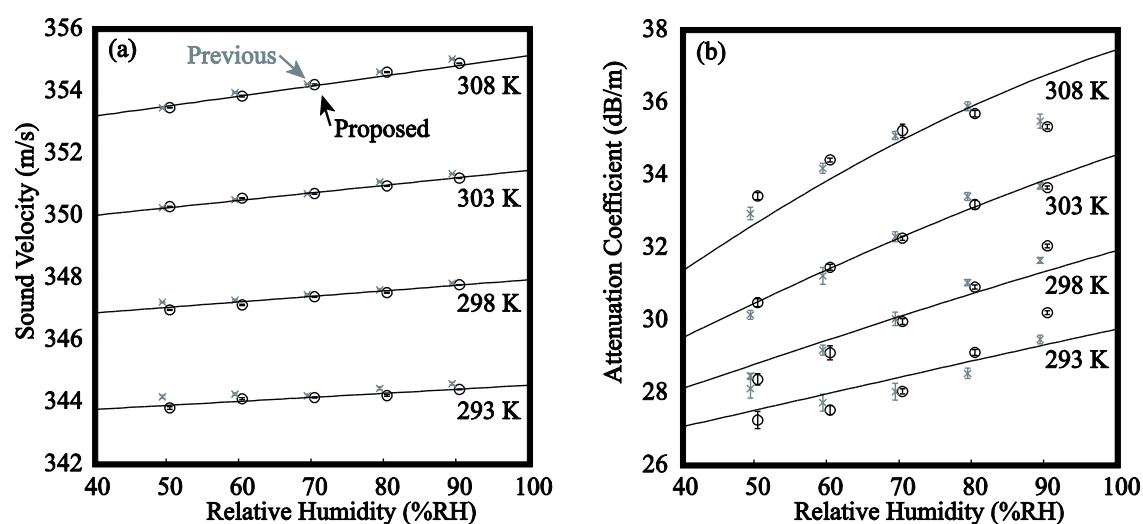


Fig. 5-3 インバースフィルタを用いる音速と減衰係数の同時計測実験の結果：
(a) 音速, (b) 減衰係数.

5.3 温湿度計測における気圧変動の影響

5.3.1 温湿度計測における気圧変動の影響の評価

ここまで、提案手法の実測検証は校正時の標準気圧 p_r で一定とみなせる短時間に行われてきた。しかし、大気圧は天候等に左右されて日々変動するため、本法を長期間運用する際には校正時の気圧から変動してしまうことが考えられる。音速や減衰係数は気圧にも依存するため、気圧が変動すると計測される音速や減衰係数も変動し、温湿度の推定結果へ影響すると考えられる。

そこで、提案手法による温湿度計測へ大気圧変動が及ぼす影響を評価した。まず、音速 $c_{th}(T, H_R, p_a)$ と減衰係数 $\alpha_{th}(T, H_R, p_a)$ の、基準気圧 $p_r (= 1,013 \text{ hPa})$ まわりの気圧 p_a に対する偏微分値 $\partial c/\partial p_a$, $\partial \alpha/\partial p_a$ を Fig. 5-4 (a), (b) に示す。このとき、気圧が Δp 変動したときに生じる音速と減衰係数の変動値 Δc , $\Delta \alpha$ は、一次近似的に、

$$\begin{aligned}\Delta c &= \left. \frac{\partial c}{\partial p_a} \right|_{p_a=p_r} \Delta p, \\ \Delta \alpha &= \left. \frac{\partial \alpha}{\partial p_a} \right|_{p_a=p_r} \Delta p,\end{aligned}\tag{5-4}$$

となる。これら音速と減衰係数の変動値 Δc , $\Delta \alpha$ による温湿度の推定結果の変動値 ΔT , ΔH_R は Eq. (4-5) より、

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\partial T_{\text{est}}}{\partial c} \Delta c + \frac{\partial T_{\text{est}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \left. \frac{\partial T_{\text{est}}}{\partial p_a} \right|_{p_a=p_r} \Delta p, \\ \Delta H_R &= \frac{\partial H_{R\text{est}}}{\partial c} \Delta c + \frac{\partial H_{R\text{est}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \left. \frac{\partial H_{R\text{est}}}{\partial p_a} \right|_{p_a=p_r} \Delta p,\end{aligned}\tag{5-5}$$

となる。ここで、気温・湿度の推定結果 T_{est} , $H_{R\text{est}}$ の気圧 p_a に対する偏微分値 $\partial T_{\text{est}}/\partial p_a$, $\partial H_{R\text{est}}/\partial p_a$ は Fig. 5-4 (c), (d) のようになる。例えば、大気圧の自然変動 $\Delta p = \pm 10 \text{ hPa}$ を考慮するとき、Fig. 5-4 (c), (d) より、大気圧変動による温度誤差 $\Delta T (= \pm 0.12 \text{ K})$ は $\pm 0.5 \text{ K}$ の許容範囲以内であるが、湿度誤差 $\Delta H_R (= \pm 6.28\% \text{ RH})$ は $\pm 5\% \text{ RH}$ の許容範囲外である。よって、気圧変動した場合でも湿度計測の実用精度を確保するためには気圧補償が必要であることが明らかになった。

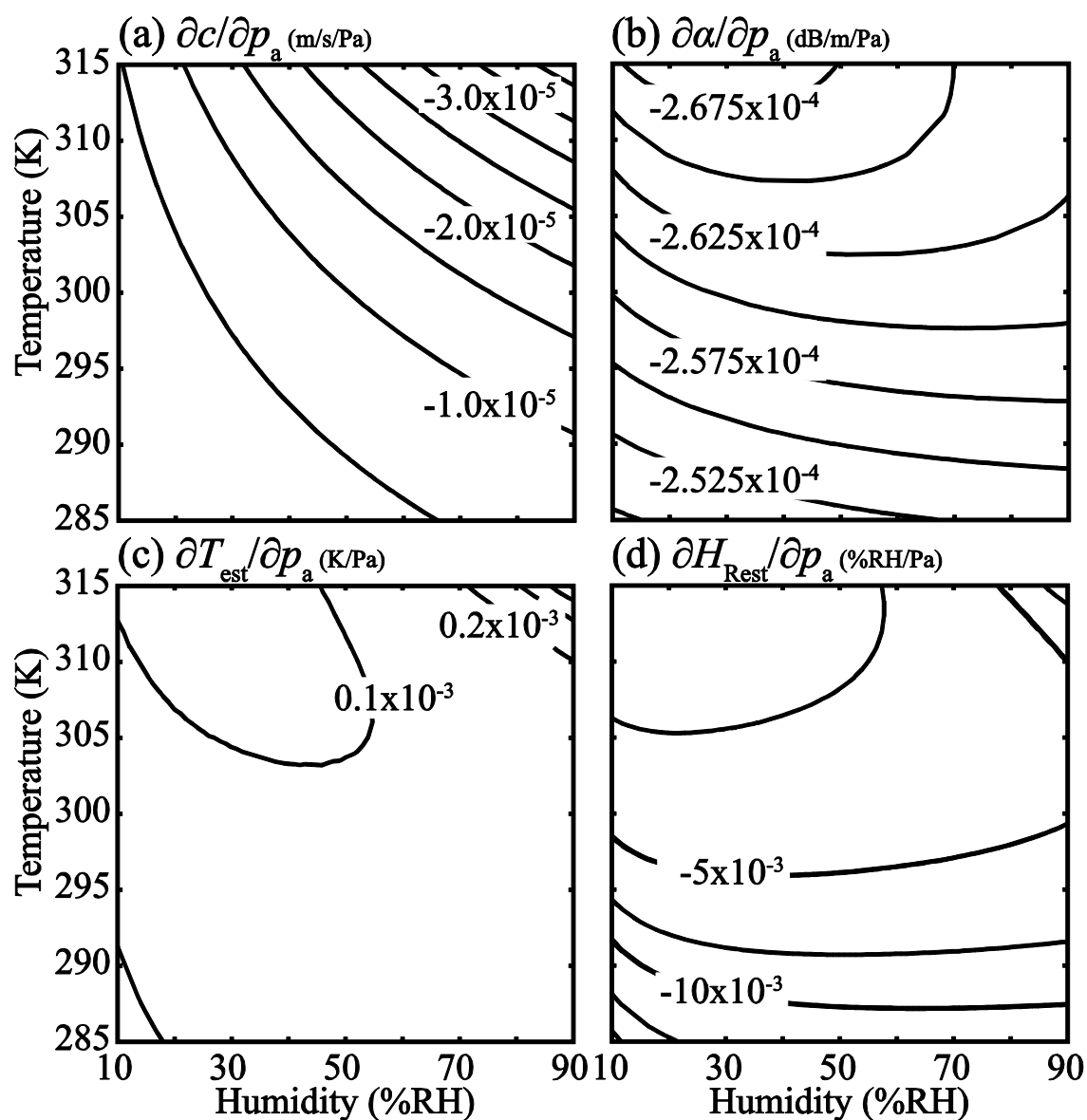


Fig. 5-4 提案手法による温湿度計測へ大気圧変動が及ぼす影響の評価結果：

- (a) 音速の気圧に対する偏微分 $\partial c/\partial p_a$,
- (b) 減衰係数の気圧に対する偏微分 $\partial \alpha/\partial p_a$,
- (c) 気温の推定結果の気圧に対する偏微分 $\partial T_{\text{est}}/\partial p_a$,
- (d) 湿度の推定結果の気圧に対する偏微分 $\partial H_{\text{Rest}}/\partial p_a$.

5.3.2 気圧補償型超音波プローブ

これまでの実験系に気圧センサを付加し，気圧補償できるようにしたシステムを提案する．本システムでは以下の評価関数を用いる．

$$(T_{\text{est}}, H_{\text{Rest}}) = \arg \min_{T, H_R} \{k_c |c_{\text{th}}(T, H_R, p_a) - c_{\text{mes}}| + k_a |\alpha_{\text{th}}(T, H_R, p_a) - \alpha_{\text{mes}}|\} \quad (5-6)$$

気圧センサによって常時 $p_a (= p_r + \Delta p)$ を計測し，評価関数を更新することで，大気圧変動の影響を補償できる．

5.3.3 気圧補償実験

本システムの有効性を検証するために，標準気圧 p_r で校正を行った想定で，大気圧が 10 hPa 低下し $p_a = 1,003 \text{ hPa}$ となったときに実験を行った．実験系の配置を Fig. 5-5 に示す．本実験では大気圧センサ (TR-73U, T&D) を用いた．気温 293 K, 湿度 50 から 90%RH を 10%RH 間隔として変化させた．送信信号には信号長 0.5 ms の 400 kHz 正弦バースト信号を用い，5.2 節の手法で音速と減衰係数を計測した．送受間距離は 150 mm とした．

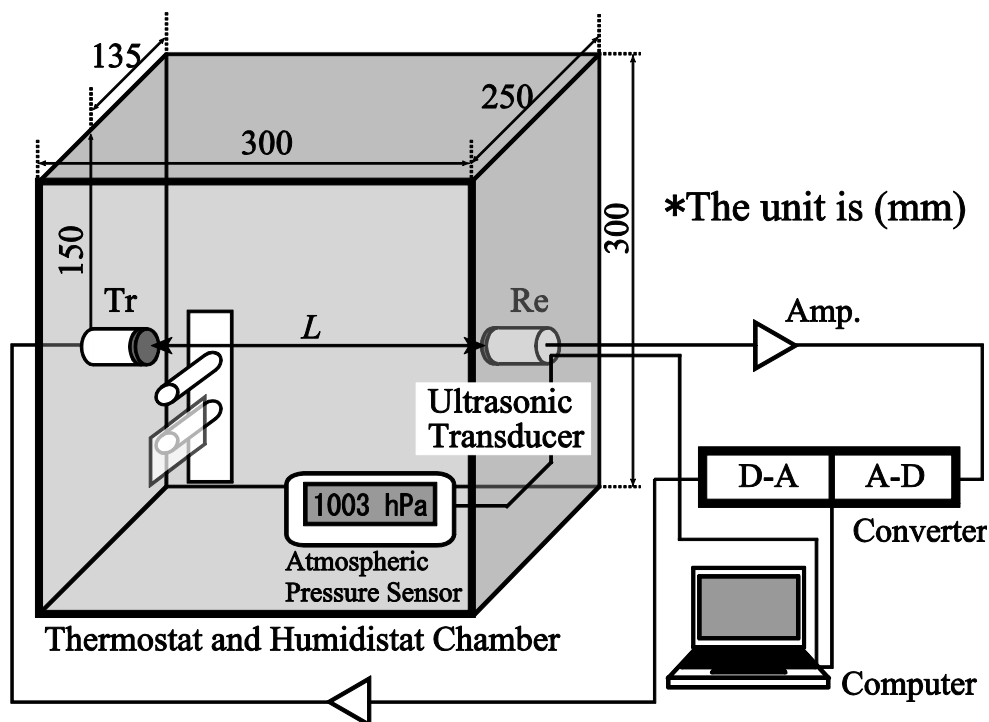


Fig. 5-5 気圧補償実験系の構成.

音速と減衰係数の計測結果を Fig. 5-6 (a), (b) に示す. どちらの計測結果も 1,003 hPa の理論曲線によく一致していることがわかる. 次に, これらの計測結果から気温と湿度を推定した結果を Fig. 5-6 (c), (d) に示す. Figure 5-6 (c), (d) において, $\Delta p = -10$ hPa の気圧変動により生じる理論的な誤差を Eqs. (5-4)―(5-5) より求め, 黒色の破線で示している. これらの図より, 気圧補償なしの結果は理論的な誤差曲線にほぼ一致し, 気圧補償ありの場合は誤差なしの直線にほぼ一致していることがわかる. 気圧補償なしのときの温湿度誤差 0.12 K, 6.79%RH に対し, 提案した気圧補償ありのときの温湿度誤差 0.04 K, 0.94%RH であり, 温湿度計測精度の向上及び温湿度計測ともに実用基準の達成を確認した.

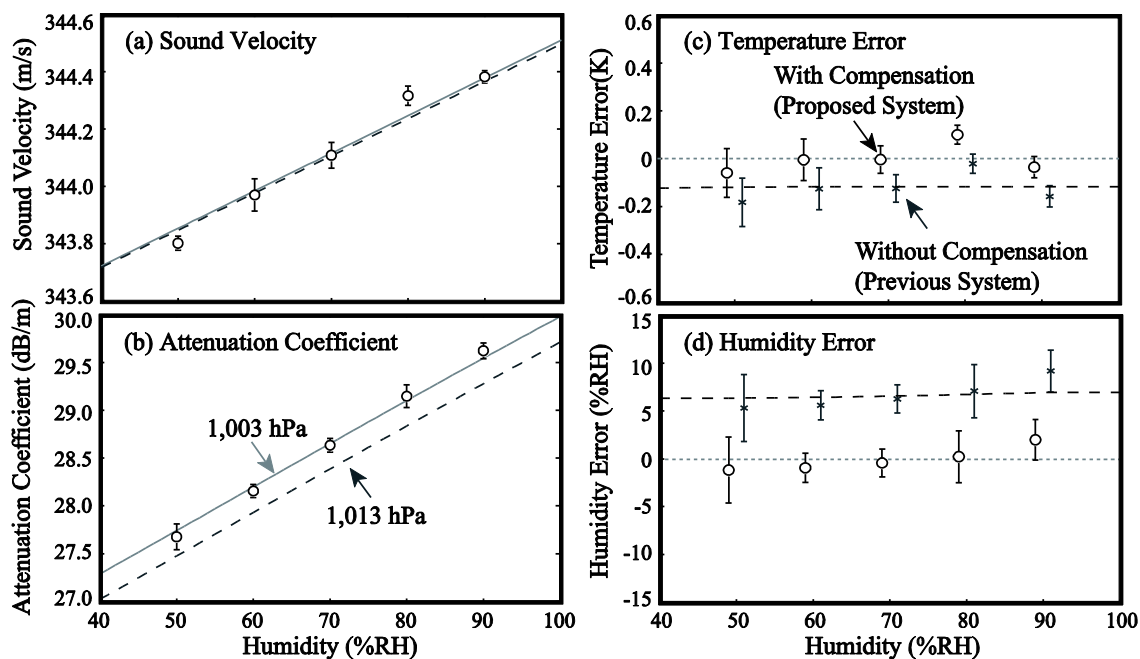


Fig. 5-6 気圧補償実験の結果 : (a) 音速, (b) 減衰係数, (c) 気温, (d) 湿度.

5.4 温湿度計測における対流の影響

室内には対流と呼ばれる空気の流れが存在する場合がある。本節では、対流が本計測法に及ぼす影響を考察する。対流の速度ベクトル w とするとき、超音波伝搬経路に平行な成分 w_p 、直交する成分 w_o とする。

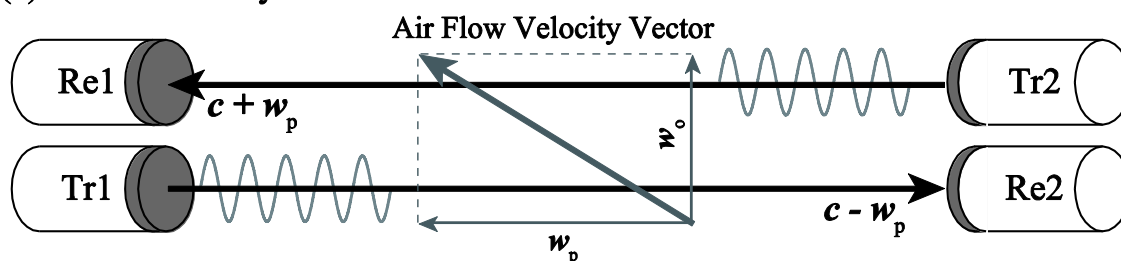
まず、音速計測においては、Fig. 5-7 (a) のように平行成分 w_p が支配的に影響することがよく知られている⁷⁰⁾。そして、その影響は双方向で伝搬時間 τ_{12}, τ_{21} を計測することで相殺できる。

$$c_{mes} = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right) \tag{5-7}$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{c_{mes} + w_p}, \tau_{21} = \frac{1}{c_{mes} - w_p} \tag{5-8}$$

次に、減衰計測においては、Fig. 5-7 (b) のように直交成分 w_o が支配的に影響すると考えられる。直交成分により超音波の伝搬方向が変化することで、超音波の放射音圧の指向性に由来し、観測軸上での見かけ上の音圧レベルが低下する問題がある。そこで、対流の直交成分により生じる減衰係数の相対誤差を計算により求める。

(a) Sound Velocity Measurement



(b) Sound Attenuation Measurement

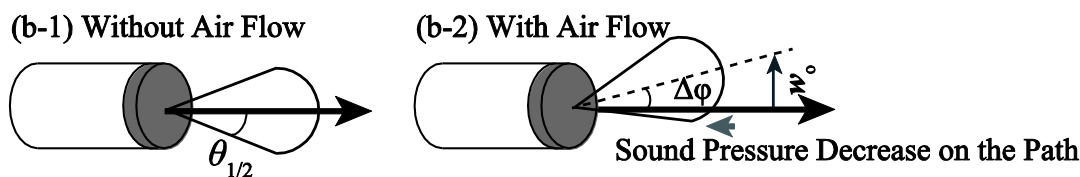


Fig. 5-7 音速・減衰計測における対流の影響の概要：
 (a) 音速計測への影響，(b) 減衰計測への影響。

直交成分による超音波の伝搬方角の変化 $\Delta\varphi$ は,

$$\Delta\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{w_o}{c_{th}}\right), \quad (5-9)$$

となる. 超音波トランスデューサの指向特性が既知であるとき, トランスデューサの中心軸に対する角度変化 $\Delta\varphi$ に応じた音圧レベル低下を求めることができる. ここで, 本研究で使用している超音波トランスデューサ (MA4001A1, Murata) の指向特性を **Fig. 5-8** に示す. 音圧が半分となる指向角 (半減角) $\theta_{1/2}$ は7度である. 空気の条件が気温 297 K, 湿度 50%RH, 気圧 1,013 hPa であるとき, 対流の直交成分により生じる減衰係数の相対誤差の解析結果を **Fig. 5-9** に示す. 湿度を実用的な精度で計測するためには相対誤差率が 0.5% 以下であることが望ましい. このとき, 対流の直交成分の流速は 0.59 m/s であり, 本実験系はこの程度の流速までは許容可能であるという指標を得ることができた.

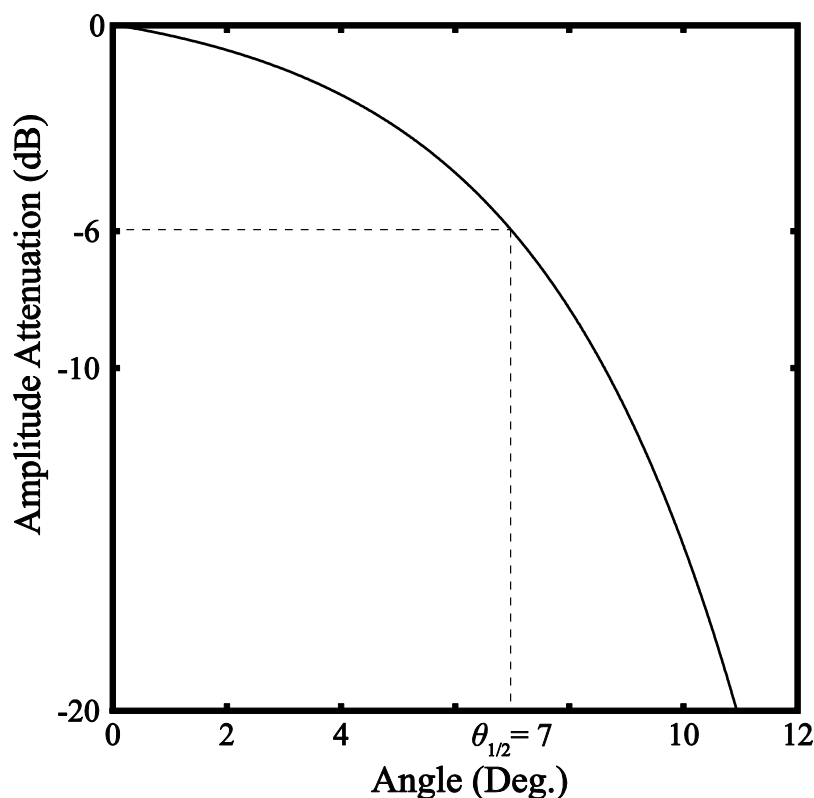


Fig. 5-8 本研究で使用している超音波トランスデューサ (MA4001A1, Murata) の指向特性.

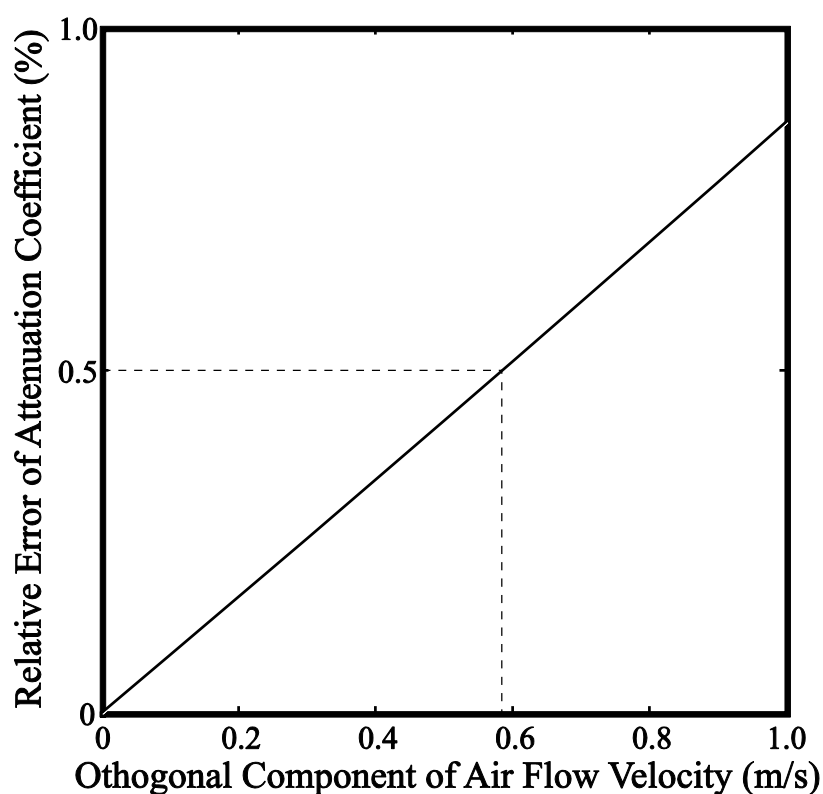


Fig. 5-9 本実験系を用いたとき，対流の直交成分により生じる減衰係数の相対誤差の解析結果．

5.5 温湿度計測における温湿度分布の影響

恒温恒湿槽内は温湿度が均一であるのに対し，槽外には温湿度分布が存在する．温湿度の分布があるとき，音速の分布が生じ，その空間を伝搬する超音波は屈折する．超音波トランスデューサから放射される超音波は鋭い指向性を有するため，送受波器の対向角によって受信される音圧レベルは異なる．よって，音速分布が存在する空間を伝搬する超音波は，屈折により見かけ上の音圧レベルが低下して観測され，減衰計測の誤差が生じると予測される．

5.5.1 FDTD 法による波動伝搬シミュレーション

温湿度分布に起因する音速分布による超音波の屈折が減衰計測に及ぼす影響を考察するために，FDTD 法による波動伝搬シミュレーションを行った．実験系との整合性から，送信波は 400 kHz の正弦バースト波とし，トランスデュー

サの開口径 11 mm に相当する音源を設定した。ただし、FDTD 法では高周波成分の速度分散性による誤差が生じるため、対策として送信信号には Hann 窓をかけた。サンプリング周波数 $f_s = 8 \text{ MHz}$ とし、時間離散幅 $dt = 1/f_s = 12.5 \text{ } \mu\text{s}$ とした。また、シミュレーションの安定化条件を十分満たし、超音波の波長が約 $875 \text{ } \mu\text{m}$ であることから、その 1/10 以下となるよう空間の離散幅 $dx, dy = 85 \text{ } \mu\text{m}$ とした。空間の大きさは $0.15 \times 0.05 \text{ m}^2$ とした。開空間を想定し、四方の境界は Mur の一次吸収境界を設定した。この空間に対して、Fig. 5-10 のような音速分布を与え波動伝搬シミュレーションを行い、各条件における減衰計測の誤差について考察した。

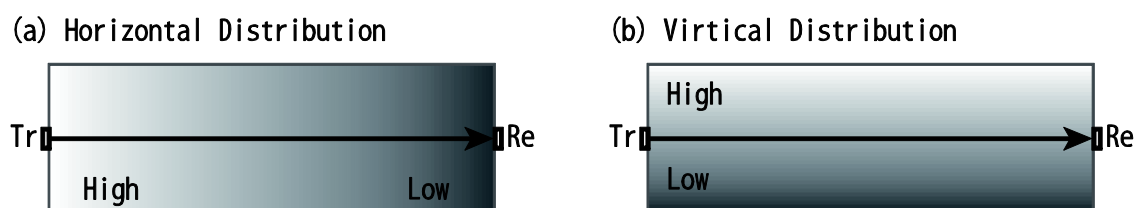


Fig. 5-10 音速分布の与え方：(a) 水平分布，(b) 鉛直分布。

5.5.2 水平方向に対する音速分布の影響

超音波の進行方向に対して、Fig. 5-10 (a) のように分布を与えた。これを水平方向の分布と呼ぶこととする。結論から述べると、送受波器間の波動伝搬経路上の平均音速が等しい時、どのような分布の与え方をしても、減衰の計測結果は等しくなり、水平方向の音速分布による減衰計測への影響は無いことが確認された。

5.5.3 垂直方向に対する音速分布の影響

超音波の進行方向に対して、Fig. 5-10 (b) のように分布を与えた。これを鉛直方向の分布と呼ぶこととする。送受波器間を結ぶ空間の中心軸上での音速を、標準温湿度 298 K, 50%RH に相当する音速で一定とし、その上下に音速分布の勾配を与えた。音速分布の勾配を変化させ、音波の屈折による減衰計測への影響を評価した。

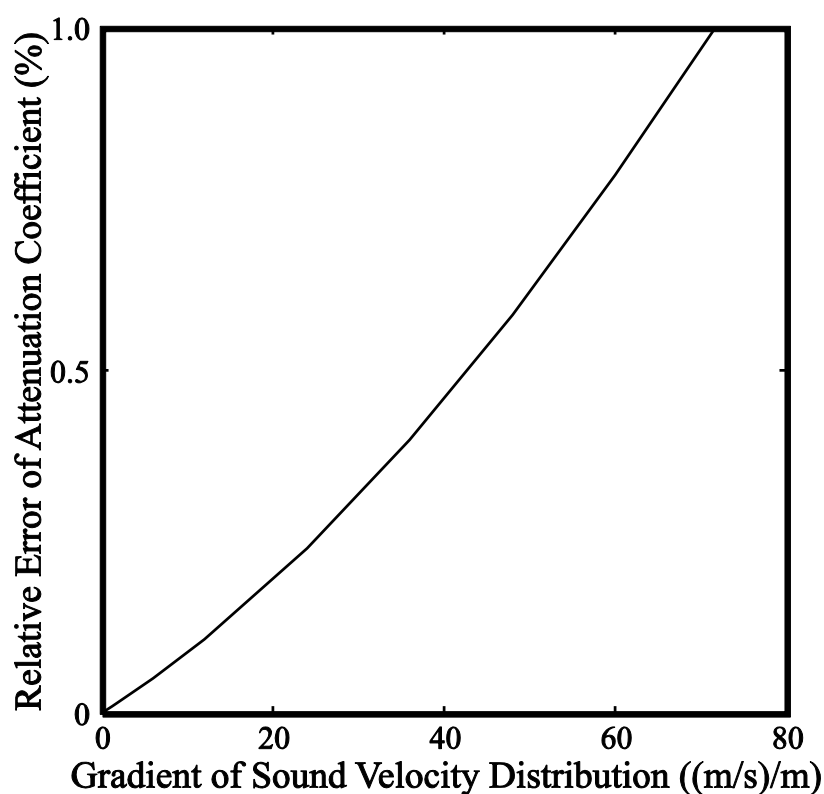


Fig. 5-11 音速分布の勾配による減衰係数の相対誤差の解析結果.

音速分布の勾配による減衰係数の相対誤差の解析結果を **Fig. 5-11** に示す. この図より, 空気の温湿度の不均一性がある程度小さい時, 本計測法への影響は微小であり, 許容できると考えられる. また, 通常の室内における鉛直方向の温度勾配を実測したところ約 2 K/m であり, これは音速分布の勾配にして約 1.2 (m/s)/m である. この音速分布の勾配による減衰係数の誤差率は **Fig. 5-11** により, 非常に微小であることがわかった.

5.6 即応答性の検証実験

以上の考察を踏まえて、Fig. 5-12 の系で即応答性の検証実験を行った。まず槽内の温湿度を 298 K, 80%RH 一定で制御し、120 秒経過した時点で槽の扉を開けた。槽外の実験室の空気は 298 K, 50%RH 程度である。槽内外で湿度差があるため、水分の移動に起因する湿度分布変化や対流が生じる。このときの経時変化を観測した。また、リファレンス計測には現在一般的に広く用いられている汎用温湿度・気圧センサ (TR-73U, T&D) を用いた。実験時の大気圧は 1,008 hPa であった。送信信号には信号長 0.5 ms の 400 kHz 正弦バースト信号を用い、双方向送受信により音速と減衰係数を計測した。また 5.3 節と同様の気圧センサを用いて、計測系は気圧補償した。

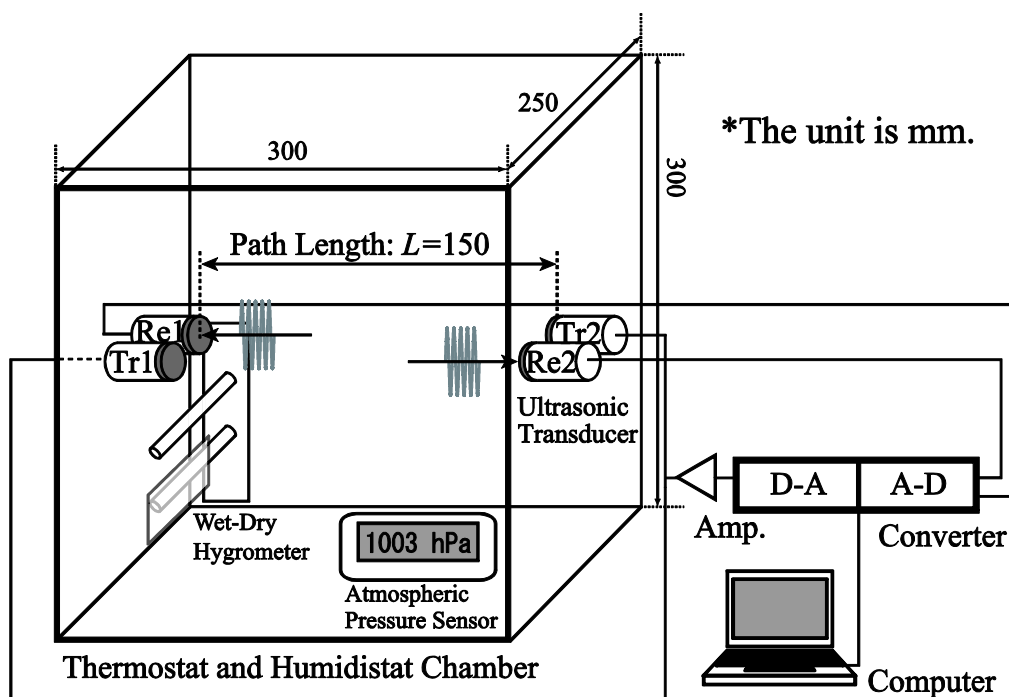


Fig. 5-12 即応答性の検証実験系の構成。

実験結果を **Fig. 5-13** に示す。実線は超音波を用いる提案法の結果であり、破線は既存センサでリファレンス計測した気温・湿度・気圧の結果そのもの、もしくはそれらから音速と減衰係数へ換算した結果である。特に、**Fig. 5-13 (d)** の結果に着目すると、提案法の応答速度の方が速く、湿度変化に追随していることがわかる。さらに、湿度変化が定常状態となる計測の始点と終点において、両者の計測結果は概ね一致していることから、提案法は既存センサと同等な計測精度を有し、実用可能であることが示された。この結論は、**Fig. 5-13 (c)** の温度の計測結果も、両手法はよく一致していることから裏付けられる。

また、**Fig. 5-13** において 120 秒までは計測値の変動が無いのに対して、恒温恒湿槽の扉を開けた後は計測値の変動が生じている。槽内外の空気の移動がなくなり概ね定常状態になったと思われる 500 秒以降においても同様である。その要因について考察するために、受信信号におけるノイズレベルと信号対雑音比を求め、**Fig. 5-13 (e), (f)** に示した。これらの図より、槽の扉を開けた 120 秒を境に、ノイズの絶対量が増え、信号対雑音比が低下する様子が確認できる。金属壁で囲われた槽内は電磁遮蔽されているため、槽外からのノイズ影響が小さいためだと考えられる。槽内外のノイズレベル差は 2 dB 程度あるが、信号対雑音比の値自体がノイズの影響を無視できるほど大きいので、この変動の要因はノイズによるものではないと考察された。このような瞬時的な変動が外乱によるものだとするならば、その要因として、対流の影響や温湿度分布の影響が考えられる。まず対流の影響であるが、音速計測は双方向プローブによって対流の影響を相殺できており、減衰計測についても **Fig. 5-9** を参照すれば本実験時に発生しうる対流の流速の影響は微小であることが概算できる。次に温湿度分布の影響であるが、**Fig. 5-12** より本実験で生じうる影響は微小であることが概算されている。よって、この変動は温湿度の微小な短時間変化を反映したものであると推測される。現状、本計測法よりも高速な温湿度計測法は存在しないため、直接的にその正しさを検証できないが、本章では考えうる諸影響について考察することによって間接的に本結論を示すことができた。

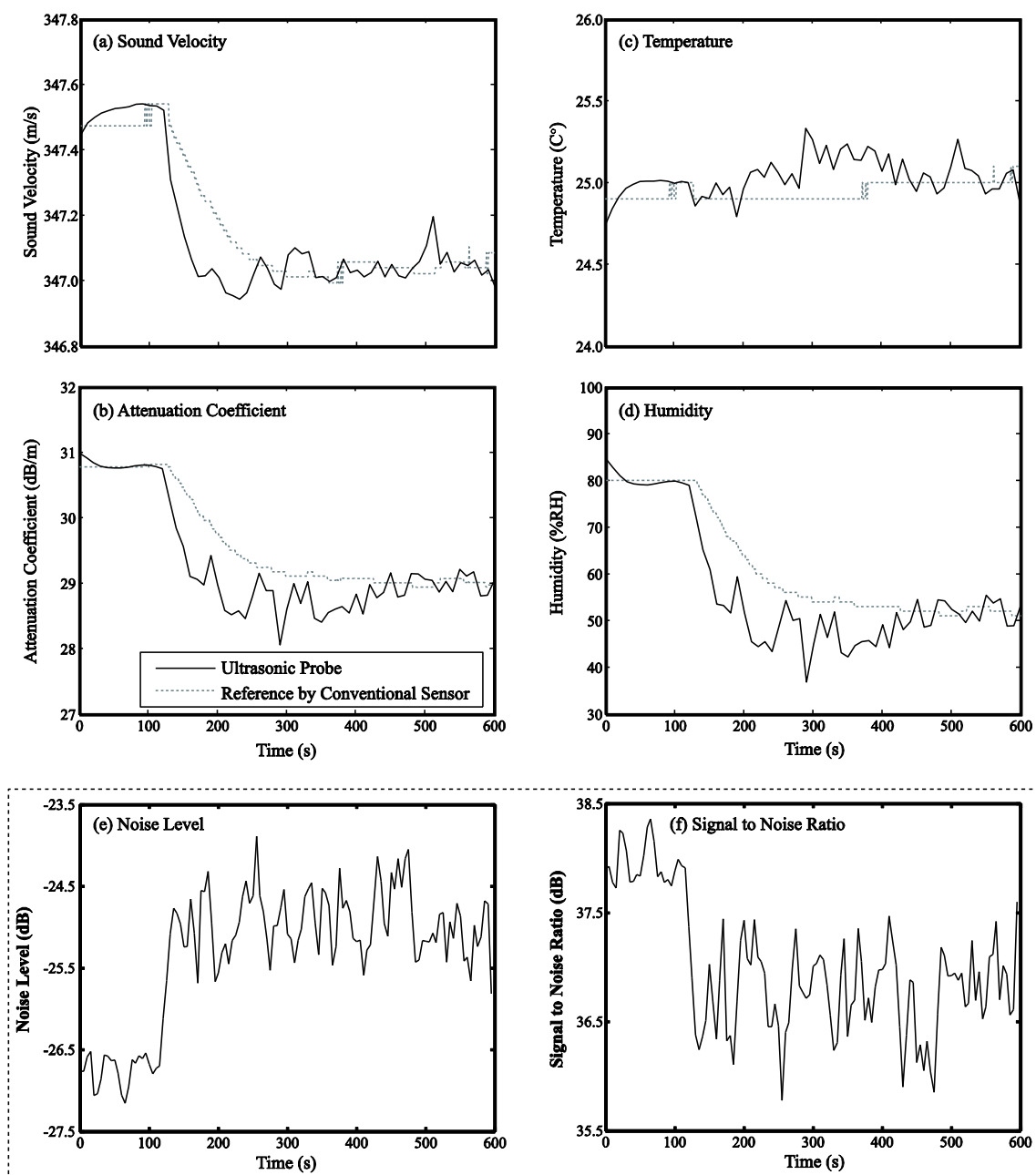


Fig. 5-13 即応答性検証実験の結果：

- (a) 音速, (b) 減衰係数, (c) 気温, (d) 湿度,
- (e) ノイズレベル, (f) 信号対雑音比.

5.7 まとめ

本章では、提案法の実用システム化・高精度化を念頭に、諸外乱の影響の評価と対策について考察した。

まず、本計測法の雑音耐性を向上させるために、インバースフィルタを用いる音速と減衰の同時計測法を提案し、その原理について述べた。検証実験を行った結果、インバースフィルタによって正弦バースト信号をパルス圧縮しチャープ信号と同程度の音速計測精度を実現し、同時に、減衰計測における信号対雑音比を向上させることにより減衰係数計測の標準偏差を第4章の結果に比べ2/3程度へ低減させて精度向上を実現できることを確認した。

次に、外乱としての気圧変動や対流、温湿度分布が計測へ与える影響について考察した。各温湿度環境における気圧変動による推定結果への影響量を評価した結果、大気圧の自然変動量を考慮するとき、気圧変動による温度誤差は ± 0.5 K の許容範囲内である一方で、湿度誤差は $\pm 5\%RH$ の許容範囲外であることがわかった。よって、気圧変動した場合でも湿度計測の実用精度を確保するためには気圧補償が必要であることが明らかになった。そこで、気圧センサを利用した気圧補償法を提案し、その有効性を実験により検証した結果、気圧変動が生じた場合でも有効に利用できることが示された。また、空気の流れにより生じる音速と減衰係数の誤差を評価し、その誤差に由来する気温と湿度の推定誤差についても評価した。双方向超音波プローブを構築することで音速計測への影響を相殺する手法を実装すれば良いことを示し、本実験系においては対流の流速が 0.59 m/s 以下であれば減衰計測への影響は許容可能であるという指標を得た。さらに、温湿度分布が存在する場合の、超音波の屈折による減衰計測の誤差について評価した。その結果、温湿度分布に相当する音速分布の勾配を指標として、減衰係数の相対誤差をシミュレーションにより明らかにすることができた。その結果、通常室内における温湿度分布が本計測法へ与える影響は微小であり、許容できることがわかった。

最後に、以上の諸外乱への対策を備え、最終的に構築されたシステムを用いて、提案計測法の即応答性について検証した。その結果、既存の温湿度センサ

で達成不可能であった即応計測を実現でき、従来観測できなかった瞬時的な温湿度変化が計測可能であることを確認した。また、提案法は既存センサと同程度の計測精度を有し、実用可能であることが示された。

以上の結果に基づき、本手法は確立されたと判断した。

第6章

結 論

6.1 研究成果

本論文では、感温・感湿体を用いない、超音波による新しい温湿度計測法として、超音波の音速と減衰計測に基づく温湿度計測法を確立することを目的とした。本計測法が実用可能かどうか判断するための数値目標として、気温精度 ± 0.5 K、湿度精度 $\pm 5\%$ RH と設定した。

第2章では、既存手法である超音波の音速に基づく気温計測法の原理について述べた。気体の状態方程式より気温と音速の関係式を導出し、音速から気温（音仮温度）を推定する方法を示した。次に、気温推定に必要な音速の計測方法として、相互相関法について述べた。さらに、超音波の音速のみに基づく気温計測法の問題点である、湿度による音速変化に起因する音仮温度と真温度との差異の温湿度特性を評価し、従来の超音波気温計測で差異が 0.5 K 以上となり、真温度推定が困難となる高温高湿度な環境を明らかにした。

第3章では、音速以外の超音波伝搬特性として超音波の減衰係数に着目し、提案手法の基礎的検証として、超音波の減衰に基づく湿度推定法について論じた。まず、超音波の減衰係数と湿度の関係を示し、超音波の減衰に基づく2種類の湿度計測法の原理を提案した。一方は超音波伝搬距離 10 m 程度の大規模空間を対象とできる低周波超音波を用いる湿度計測法で、他方は伝搬距離 1 m 以下の小規模な空間を対象とする高周波超音波を用いる湿度計測法である。これら両手法による検証実験を行い、実験結果から提案法の湿度精度を検証した。その結果、両計測法ともに、湿度 50 から 80% RH の範囲で概ね $\pm 5\%$ RH の精度で湿度計測を実現できることがわかった。高周波超音波を用いることで低周波

超音波の結果より4から7倍の湿度計測精度向上が確認された。

第4章では、第3章の考察を踏まえ、音速と減衰係数を同時計測し気温と湿度を逆推定する提案法を実測検証した。その結果、第2章で指摘した従来法の問題点を改善し、気温293 Kから308 K、湿度50%RHから90%RHの湿り空気中において ± 0.5 K以内の実用温度精度基準を達成することができた。一方で、本法による湿度計測精度は $\pm 7.53\%$ RHであり、 $\pm 5\%$ RH以内の実用湿度精度基準には達しなかった。誤差解析の結果、湿度計測精度の向上のためには減衰係数計測精度の向上が必要であると考察された。

第5章では、第4章で確認された計測精度を向上させるために、諸外乱の影響の評価と対策について考察した。まず、本計測法の雑音耐性を向上させるために、インバースフィルタを用いる音速と減衰の同時計測法を提案し、その原理について述べた。検証実験を行った結果、インバースフィルタによって正弦バースト信号をパルス圧縮しチャープ信号と同程度の音速計測精度を実現し、同時に、減衰計測における信号対雑音比を向上させることにより減衰係数計測の標準偏差を第4章の結果に比べ2/3程度へ低減させて精度向上を実現できることを確認した。次に、外乱としての気圧変動や対流、温湿度分布が計測へ与える影響について考察した。各温湿度環境における気圧変動による推定結果への影響量を評価した結果、大気圧の自然変動量を考慮するとき、気圧変動による温度誤差は ± 0.5 Kの許容範囲内である一方で、湿度誤差は $\pm 5\%$ RHの許容範囲外であることがわかった。よって、気圧変動した場合でも湿度計測の実用精度を確保するためには気圧補償が必要であることが明らかになった。そこで、気圧センサを利用した気圧補償法を提案し、その有効性を実験により検証した結果、気圧変動が生じた場合でも有効に利用できることが示された。また、空気の流れにより生じる音速と減衰係数の誤差を評価し、その誤差に由来する気温と湿度の推定誤差についても評価した。双方向超音波プローブを構築することで音速計測への影響を相殺する手法を実装すれば良いことを示し、本実験系においては対流の流速が0.59 m/s以下であれば減衰計測への影響は許容可能であるという指標を得た。さらに、温湿度分布が存在する場合の、超音波の屈折による減衰計測の誤差について評価した。その結果、温湿度分布に相当する音

速分布の勾配を指標として、減衰係数の相対誤差をシミュレーションにより明らかにすることができた。その結果、通常室内における温湿度分布が本計測法へ与える影響は微小であり、許容できることがわかった。最後に、以上の諸外乱への対策を備え、最終的に構築されたシステムを用いて、提案計測法の即応答性について検証した。その結果、既存の温湿度センサで達成不可能であった即応答計測を実現でき、従来観測できなかった瞬時的な温湿度変化が計測可能であることを確認した。また、提案法は既存センサと同程度の計測精度を有し、実用可能であることが示された。

以上より、提案法である超音波の音速と減衰計測に基づく温湿度計測法は、従来未確立な感温・感湿体を用いない温湿度計測法として有用であることを示した。

6.2 将来の展望

本研究では、一対の超音波送受波器での温湿度計測法について様々な検証を行い、本計測法を確立した。よって、将来は本計測法の応用的運用法についての研究が期待される。送受間距離を長距離化し大規模な空間の温湿度を計測する研究や、複数の送受波器を用いて複数の超音波伝搬経路で計測しCT法やマトリクス法を適用することで逆問題的に空間の温湿度分布を計測する研究、複数の超音波送受波器に無線端末を搭載し各素子からの計測データを無線一括管理するネットワーク計測法の研究等が検討されることにより、本計測法は発展の余地があると考えられる。これら応用法にかかる研究は、従来の超音波音速に基づく気温計測法をベースとしてその下地が整えられているため、極めて近い将来に実現可能であると予測される。

本計測法は、感温・感湿体を必要としない画期的な温湿度計測法である。そのため、既存の温湿度センサでは達成不可能な瞬時的な温湿度計測が可能であり、従来観測できなかった温湿度変化が計測できるようになることで、空気性状にかかる物性・現象の新規解明に資することができる。さらに、本計測法を基礎原理として温湿度分布計測法にかかる研究が発展すれば、従来観測困難で

あった温湿度分布の計測が可能となる。例えば、植物の蒸散や、人間の呼気を近傍空気のモニタリングにより観測することができる。これらは、植物や人間の活動を阻害することなく、その生態を調べることができる有用な手法であると考えられる。また、このように計測技術が発展していけば、本計測結果に基づき、空間的な温湿度分布を考慮した温湿度制御技術の発展にも資することができると考えられる。

謝 辞

本論文は、著者が筑波大学 大学院システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 音響システム研究室に所属していた時に実施した研究成果をまとめたものです。本論文は、多くの方々のご理解とご協力によって完成しました。

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 水谷孝一先生には、主指導教員として実験・理論両面からのご指導をいただき、問題に対しての取り組み方を学ばせていただきました。また、様々な研究発表の機会を与えていただき、多方面にわたるご指導、ご鞭撻をいただきました。大学 3 年次に学類の早期卒業を勧めていただいたこと、博士前期課程 1 年次に後期課程進学を勧めていただいたこと、後期課程の早期修了を勧めていただいたこと等、水谷先生には飛躍のための第一歩を踏み出す勇気をいただきました。さらに、授業のティーチングアシスタント (TA) ・ティーチングフェロー (TF) や、高校生の大学進学説明会等の模擬講義担当等、貴重な経験を積む機会を与えていただきました。深く感謝申し上げます。

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 准教授 若槻尚斗先生には、副指導教員として本研究を進める上で、実験方法や計測手法に対して多くのご指導をいただきました。若槻先生には問題を解決できるようになるまで親身に議論に付き合ってください、いつもご丁寧なアドバイスをいただきました。本質をついた意見にたじろいでしまうこともありましたが、若槻先生のご指導のお陰で問題の着眼点を見抜く力を磨くことができました。深く感謝申し上げます。

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 海老原格先生には、副指導教員として本研究の発表の機会に際し、論文やプレゼンテーション資料等へ細やかなご指導をいただきました。論文投稿の締切日まで何度もご指摘をいただき、投稿後にはねぎらいの言葉と差し入れをいただいたこと、印象深い思い出として覚えております。深く感謝申し上げます。

また、本論文を執筆するにあたり、筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 堀憲之先生、筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 藪野浩司先生、筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 前田祐佳先生には、専門的な見地から大変有益なご指摘をいただきました。本論文及び発表内容に関しまして、丁寧にご指導いただきましたことを深く感謝申し上げます。

なお、独立行政法人 日本学術振興会には特別研究員奨励費（25・1383）によって、本研究の一部を助成していただきました。研究に専念する環境を与えていただきましたことを感謝申し上げます。

音響システム研究室及び通信システム研究室、生体計測システム研究室の皆様には、研究活動だけに限らず様々な場面で励ましていただきました。嬉しいときも、悔しく悲しいときも、宴会を設けて気持ちを共有していただけたことで前向きに頑張ることができました。夏休みの館山研修所での合宿や学園祭での演奏喫茶等、研究以外での楽しい思い出もたくさんできました。4年間の研究室生活で出会った全ての先輩、同期、後輩に深く感謝しております。その中でも、本研究室の卒業生である西宮康治朗博士、南出歩博士、三井秀人博士、佐藤裕治博士、宝田隼博士、榎田翼博士、善甫啓一博士、博士後期課程に在籍する安藤泰雅氏、小林透氏、齊藤佑弥氏、野呂瀬葉子氏、青柳将史氏、黒山喬允氏、藤田佑樹氏には様々な相談に乗っていただいたことに加え、本論文に対する多くの助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、著者が運営責任者を務めさせていただいた超音波応用計測ゼミの皆様（青柳将史氏、安立隆陽氏、比嘉健太氏、飯島崇裕氏、川岸卓司氏、吉士真輝氏、小原直樹氏、坂井琢人氏、千葉裕介氏、薄井寛明氏、藤森好生氏）には、ゼミの運営に協力していただいただけでなく、様々な楽しいイベントを企画していただいたことに深く感謝致します。

そして、大学院博士後期課程まで進学する機会を与え、私を気遣い続けてくれた家族に感謝します。

参考文献

- 1) “建築物における衛生的環境の確保に関する法律,” 2011 年最終改正.
- 2) 高野憲康, “ビル管理法と湿度規制, 現状方式と動向,” 冷凍, vol.80, pp.3-7, 2005.
- 3) 稲松照子, “湿度のおはなし,” 日本規格協会, 1997.
- 4) 資源エネルギー庁, “夏季最大電力使用日の需要構造推計(東京電力管内),” 2011.
- 5) 農林水産省, 経済産業省, “植物工場の事例集,” 2009.
- 6) 神庭信幸, “博物館環境のモニタリング—温湿度測定的基础,” 国立歴史民俗博物館研究報告, vol.35, pp.393-407, 1991.
- 7) 神庭信幸, “国立歴史民俗博物館の保存環境に関する調査研究の活動報告,” 国立歴史民俗博物館研究報告, vol.77, pp.129-174, 1999.
- 8) 計測自動制御学会温度計測部会編, “温度計測,” 計測自動制御学会, 1981.
- 9) 日本機械学会編, “湿度・水分計測と環境のモニタ,” 技報堂出版, 1992.
- 10) 上田政文, “湿度と蒸発,” コロナ社, 2000.
- 11) 芝亀吉, “湿度と水分,” コロナ社, 1975.
- 12) E. W. Barrett, and V. E. Suomi, “Preliminary Report on Temperature Measurement by Sonic Means,” Journal of Meteorology, vol.6, pp.273-276, 1949.
- 13) K. Mizutani, K. Itoga, K. Kudo, L. Okushima, and N. Wakatsuki, “Network-Controlled Measurement of Mean Spatial Temperature Using a Sound Probe with a Long Baseline,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.43, pp.3090-3094, 2004.
- 14) A. Minamide, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Temperature Distribution Measurement Using Reflection with Acoustic Computerized Tomography,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.47, pp.3967-3969, 2008.

- 15) E. Ishikawa, K. Mizutani, and K. Nagai, "Fast Method for Visualization of Temperature Distribution Using Acoustic Computerized Tomography," Japanese Journal of Applied Physics, vol.40, pp.5446-5449, 2001.
- 16) A. Funakoshi, K. Mizutani, K. Nagai, K. Harakawa, and T. Yokoyama, "Temperature Distribution Measurement in Circular Space Reconstructed from Sampling Data at Unequal Intervals in Small Numbers Using Acoustic Computerized Tomography (A-CT)," Japanese Journal of Applied Physics, vol.39, pp.3107-3111, 2000.
- 17) 茂木貴弘, 水谷孝一, 海老原 格, "地表付近における気温分布計測のための音響センサネットワークユニット," 土木学会論文集 A2, vol.67, no.2, pp.I_31-38, 2011.
- 18) Y. Katano, N. Wakatsuki, and K. Mizutani, "Air Temperature Distribution Measurement Using Asynchronous-Type Sound Probe," Japanese Journal of Applied Physics, vol.48, 07GB03, 2009.
- 19) I. Saito, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and S. Kawabe, "Measurement of Vertical Temperature Distribution Using a Single Pair of Loudspeaker and Microphone with Acoustic Reflection," Japanese Journal of Applied Physics, vol.48, 07GB05, 2009.
- 20) K. Mizutani, S. Kawabe, I. Saito, and H. Masuyama, "Measurement of Temperature Distribution Using Acoustic Reflector Array," Japanese Journal of Applied Physics, vol.45, pp.4516-4520, 2006.
- 21) K. Kudo, and K. Mizutani, "Temperature Measurement Using Acoustic Reflectors," Japanese Journal of Applied Physics, vol.43, pp.3095-3098, 2004.
- 22) K. Kudo, K. Mizutani, T. Akagami, and R. Murayama, "Temperature Distribution in a Rectangular Space Measured by a Small Number of Transducers and Reconstructed from Reflected Sounds," Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, pp.3189-3193, 2003.
- 23) K. Mizutani, A. Funakoshi, K. Nagai, and K. Harakawa, "Acoustic Measurement of Temperature Distribution in room Using a Small Number of Transducers," Japanese Journal of Applied Physics, vol.38, pp.3131-3134, 1999.

- 24) N. Wakatsuki, S. Kinjo, J. Takarada, and K. Mizutani, "Precise Wireless Triggering System for Anemometers with Long-Baseline Acoustic Probes," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.49, 07HC14, 2008.
- 25) S. E. Larsen, J. B. Edson, C. W. Fairall, and P. G. Mestayer, "Measurement of Temperature Spectra by a Sonic Anemometer," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.10, pp.345-354, 1993.
- 26) H. Liu, G. Peters, and T. Foken, "New Equation for Sonic Temperature Variance and Buoyancy Heat Flux with an Omnidirectional Sonic," *Boundary-Layer Meteorology*, vol.100, pp.459-468, 2001.
- 27) A. Kon, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, "Noncontact Measurement of Humidity and Temperature Using Airborne Ultrasound," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.49, 046601, 2010.
- 28) W. Schaik, M. Grooten, T. Wernaart and C. Geld, "High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air," *Sensors*, vol.10, pp.7421-7433, 02010.
- 29) W. Y. Tsai, H. C. Chen, and T. L. Liao, "An Ultrasonic Air Temperature Measurement System with Self-Correction Function for Humidity," *Measurement Science and Technology*, vol.16, pp.548-555, 2005.
- 30) T. Motegi, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, "Simultaneous Measurement of Air Temperature and Humidity Based on Sound Velocity and Attenuation Acquired from Ultrasonic Probe," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.52, 07HC05, 2013.
- 31) T. Motegi, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, "Acoustic Hygrometer Based on Reverberation Time Measurement," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.51, 07GB08, 2012.
- 32) T. Motegi, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, "Humidity Measurement Using an Ultrasonic Probe Based on Sound Attenuation," *Proceedings of the Acoustics'12 Hong Kong*, 5pEA2, 2012.
- 33) 茂木貴弘, 水谷孝一, 若槻尚斗, "インバースフィルタを用いる空気中の音速

- 及び減衰係数の同時計測,” 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.1305-1306, 2013.
- 34) T. Motegi, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Effects of Atmospheric Pressure Variation on Temperature and Humidity Measurement Using Ultrasonic Probe,” Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, vol.34, pp.1-2, 2013.
- 35) J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, and W. J. Albersheim, “The Theory and Design of Chirp Radars,” Bell System Technical Journal, vol.39, pp.745-808, 1960.
- 36) 松尾一秦, “*圧縮性流体力学*,” 理工学社, 1994.
- 37) 電子情報通信学会編, “*レーダ技術*,” コロナ社, 1996.
- 38) I. Saito, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Two-Axis Anemometer with Acoustic Reflector Using Single Pair of Loudspeaker and Microphone,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.46, pp.4537-4540, 2007.
- 39) I. Saito, N. Wakatsuki, K. Mizutani, M. Ishii, L. Okushima, and S. Sase, “Measurements of Wind Velocity and Direction Using Acoustic Reflection against Wall,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.47, pp.4329-4332, 2008.
- 40) K. Kudo, K. Mizutani, and K. Itoga, “A Simple Technique for Realizing an Ultrasonic Anemometer Using a Loudspeaker,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.44, pp.4407-4410, 2005.
- 41) K. Mizutani, K. Taruishi, Y. Hachisuka, K. Kudo, and M. Ishii, “Micrometeorology Measurement by Acoustic Method,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.43, pp.3099-3102, 2004.
- 42) O. Cramer, “The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration,” Journal of the Acoustical Society of America, vol.93, pp.2510-2516, 1993.
- 43) G. S. K. Wong, and T. F. W. Embleton, “Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature,” Journal of the Acoustical Society of America, vol.77, pp.1710-1712, 1985.
- 44) C. M. Harris, “Effects of Humidity on the Velocity of Sound in Air,” Journal of the

- Acoustical Society of America, vol.49, pp.890-893, 1969.
- 45) 坂本秀一, 石川洋, 高井光太郎, 一宮亮一, “超音波の減衰を利用した湿度測定的基础研究,” 日本機械学会北陸信越支部第 37 期総会講演論文集, pp.145-146, 2000.
- 46) H. E. Bass, L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar, D. T. Blackstock, and D. M. Hester, “Atmospheric Absorption of Sound: Further Developments,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.97, pp.680-683, 1995.
- 47) H. E. Bass, L. C. Sutherland, and A. J. Zuckerwar, “Atmospheric Absorption of Sound: Update,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.88, pp.2019-2021, 1990.
- 48) H. E. Bass and F. D. Shields, “Absorption of Sound in Air: High-Frequency Measurement,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.62, pp.571-576, 1977.
- 49) L. B. Evans, H. E. Bass, and L. C. Sutherland, “Atmospheric Absorption of Sound: Theoretical Predictions,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.51, pp.1565-1575, 1972.
- 50) H. E. Bass and H. J. Bauer, “Atmospheric Absorption of Sound: Analytical Experiment,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.52, pp.821-825, 1972.
- 51) C. M. Harris, “Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.40, pp.148-158, 1966.
- 52) C. M. Harris, “Absorption of Sound in Air in the Audio-Frequency Range,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.35, pp.11-17, 1963.
- 53) L. J. Sivian, “High Frequency Absorption in Air and Other Gases,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.19, pp.914-916, 1947.
- 54) W. H. Pielemeier, “Observed Classical Sound Absorption in Air,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.17, pp.24-28, 1945.
- 55) V. O. Knudsen, and E. F. Fricke, “The Absorption of Sound in Carbon Dioxide and Other Gases,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.10, pp.89-97, 1938.

- 56) H. O. Kneser, "The Interpretation of the Anomalous Sound-Absorption in Air and Oxygen in Terms of Molecular Collisions," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.5, pp.122-126, 1933.
- 57) ISO 9613-1, "Acoustics - Attenuation of Sound during Propagation Outdoors-Part1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere," 1993.
- 58) ISO 2533, "Standard Atmosphere," 1975.
- 59) F. Eyring, "Reverberation Time in Dead Rooms," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.1, pp.217-241, 1930.
- 60) V. O. Knudsen, "The Absorption of Sound in Air, in Oxygen, and in Nitrogen—Effects of Humidity and Temperature," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.5, pp.112-121, 1933.
- 61) E. J. Evans and E. N. Bazley, "The Absorption of Sound in Air at Audio Frequency," *Acustica*, vol.6, pp.238-245, 1956.
- 62) 伊達玄, "残響時間の測定精度について," *日本音響学会誌*, vol.15, pp.6-20, 1959.
- 63) J. C. Miller, "*統計学の基礎 (Statistics for Advanced Level)*," transl. 村上正康 (培風館, 1988) p. 157 [in Japanese].
- 64) 伊達玄, "デジタル残響計," *日本音響学会誌*, vol.16, pp.185-198, 1960.
- 65) 茂木貴弘, 水谷孝一, 若槻尚斗, "卓越周波数成分を有する変調音響波による空気中の音速及び減衰係数の同時計測," *日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集*, pp.1413-1414, 2012.
- 66) 神力正宣, 佐藤玲司, "畳込みと自己相関を用いた新しいパルス圧縮," *信学技報*, pp.31-38, 1998.
- 67) 神力正宣, 浜田和崇, 須崎寛則, "インバースフィルタによるチャープ信号のパルス圧縮特性," *信学技報*, pp.7-12, 2009.
- 68) M. Shinriki, H. Takase, and H. Susaki, "Pulse Compression for a Simple Pulse," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol.44, pp.1623-1629, 2008.
- 69) 神力正宣, 高瀬浩史, "ミスマッチドフィルタによる単純なパルス波の圧縮

- 法,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2007-120, pp.105-110, 2008.
- 70) K. Itoga, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and K. Kudo, “Error Analysis for Micrometeorological Measurements Using Bidirectional Sound Probe with Long Baseline in Wind Fields,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.44, pp.4403-4406, 2005.

著者論文

公表済み論文（学位請求申請に関連のある論文）

査読付雑誌論文

- (J-1) 茂木貴弘, 水谷孝一, 海老原 格, “地表付近における気温分布計測のための音響センサネットワークユニット,” 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.2, pp.I_31-I_38, (2011, 8).
- (J-2) Takahiro Motegi, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Acoustic Hygrometer Based on Reverberation Time Measurement,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.51, No.7, Issue 2, 07GB08, 5 pages, (2012, 7).
- (J-3) Takahiro Motegi, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Simultaneous Measurement of Air Temperature and Humidity Based on Sound Velocity and Attenuation Acquired from Ultrasonic Probe,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, No.7, Issue 2, 07HC05, 7 pages, (2013, 7).

査読付国際会議論文

- (P-1) Takahiro Motegi, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Humidity Measurement Using an Ultrasonic Probe Based on Sound Attenuation,” Proceedings of the Acoustics’12 Hong Kong, 5pEA2, 6 pages, (2012, 5).

公表済み論文

査読付国内会議論文

- (1) **Takahiro Motegi**, Tadashi Ebihara, and Koichi Mizutani, “Sound Probe Network with ZigBee System,” Proceedings of the 31st Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.31, pp.499-500, (2010, 11).
- (2) **Takahiro Motegi**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Measurement of Humidity Based on Sound Attenuation,” Proceedings of the 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.32, pp.199-200, (2011, 11).
- (3) **Takahiro Motegi**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Improvement of Air Temperature Measurement Accuracy on Ultrasonic Probe Utilizing Sound Attenuation,” Proceedings of the 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.33, pp.5-6, (2012, 11).
- (4) **Takahiro Motegi**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Effects of Atmospheric Pressure Variation on Temperature and Humidity Measurement Using Ultrasonic Probe,” Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.34, pp.1-2, (2013, 11).

報 告

- (1) **茂木貴弘**, 海老原 格, 水谷孝一, “アドホックネットワーク機能を有する音響センシングシステム,” 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1429-1430, (2010, 9).
- (2) **Takahiro Motegi**, Tadashi Ebihara, and Koichi Mizutani, “Sound Sensor Network for Local Meteorological Observation,” The 7th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, p.36, (2010, 11).
- (3) **茂木貴弘**, 水谷孝一, 海老原格, “音響的手法による温度分布計測センサの ZigBee 無線ネットワーク化,” 日本機械学会関東学生会第 50 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.425-426, (2011, 3).

- (4) **茂木貴弘**, 水谷孝一, 若槻尚斗, “可聴周波数を用いる音響湿度計の構築,” 日本音響学会 2011 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1351-1352, (2011, 9).
- (5) **茂木貴弘**, 水谷孝一, “音で空気中の湿度を計測する手法,” 筑波大学雙峰祭大学院生学際研究フォーラム 2011, TGN2011-P-18, p.13, (2011, 10).
- (6) **Takahiro Motegi**, and Koichi Mizutani, “Fast Responsive and Noncontact Hygrometer Using Acoustic Technique,” The 8th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, p.35, (2011, 11).
- (7) **茂木貴弘**, 水谷孝一, 海老原格, “音響センサネットワークによる屋外気温分布計測,” 平成 23 年度筑波大学陸域環境研究センター年次研究報告会一般研究発表, (2012, 3).
- (8) **茂木貴弘**, 水谷孝一, 若槻尚斗, “卓越周波数成分を有する変調音響波による空気中の音速及び減衰係数の同時計測,” 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1413-1414, (2012, 9).
- (9) **Takahiro Motegi**, and Koichi Mizutani, “Temperature and Humidity Measurement Technique Utilizing Sound Velocity and Attenuation,” The 9th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 22, p.28, (2012, 11).
- (10) **茂木貴弘**, 水谷孝一, 若槻尚斗, “インバースフィルタを用いる空気中の音速及び減衰係数の同時計測,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1305-1306, (2013, 9).

受賞歴

- (1) 茂木貴弘：電気学会東京支部電気学術奨励賞，支部長 小豆畑茂，(2011, 3).
- (2) 茂木貴弘：筑波大学陸域環境研究センター一年次研究報告会
一般研究発表ポスター最優秀賞，センター長 松岡憲知，(2012, 3).
- (3) 茂木貴弘：The 9th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop Co-Creation Award,
実行委員長 本堂貴敏，(2012, 11).
- (4) 茂木貴弘：知能機能システム専攻長表彰 (筑波大学)，
知能機能システム専攻長 岩田洋夫，(2013, 3).
- (5) 茂木貴弘：知能機能システム専攻優秀修士論文賞 (筑波大学)，
知能機能システム専攻長 岩田洋夫，(2013, 3).
- (6) 茂木貴弘，水谷孝一，若槻尚斗：超音波シンポジウム論文賞，
第34回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
運営委員長 山中一司，(2013, 11).

付録 A

超音波プローブを応用した

気温分布計測のための三角型ユニット

A.1 はじめに

超音波プローブによる気温計測は、一対の超音波送受波器で、送受波器間の平均的な音速を計測し、平均的な気温を推定する。そのため、計測対象とする空間に対して複数の送受波器対を配置し計測することで、補間的逆推定により気温分布を再構成することができる。分布の再構成法には、大きく分けて CT 法とマトリクス法の 2 種類がある。本付録では、CT 法に比べ、少数の送受波器対を用いて簡易的に気温分布を再構成できるマトリクス法について着目する。

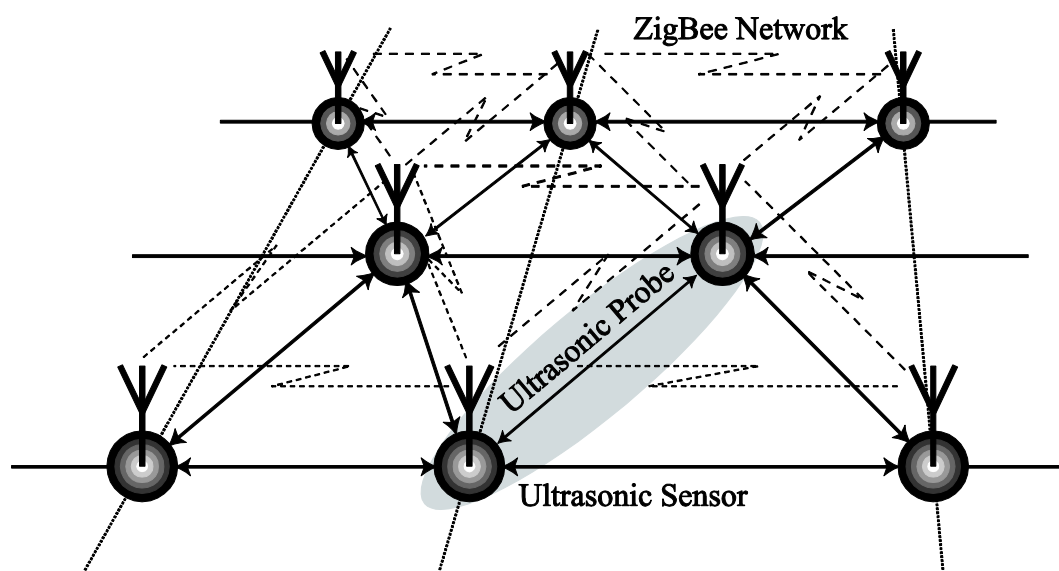


Fig. A-1 メッシュネットワーク計測の概要図.

マトリクス法では、**Fig. A-1** のように計測対象とする全領域を仮想的にメッシュ状に区切り、全領域を複数の単位領域に分割する。単位領域の頂点に送受波器を配置するとき、この系をユニットセルと呼ぶ。マトリクス法では、ユニットセル毎の気温分布を推定することで、結果的に全領域の気温分布を再構成できる。この気温分布再構成の演算に行列演算が用いられているため、マトリクス法と呼ばれている。

従来、メッシュの区切り方として四角型ユニットセルが用いられていたが、本付録では、同数の送受波器でより多くのユニットセルを構成できる三角型ユニットセルを提案した。よって、三角型ユニットセルの原理について概説する。

A.2 三角型ユニットを用いるマトリクス法原理

まず、**Fig. A-2** の破線のようにユニットセルを3つの部分領域へ等分割する。ここで、各部分領域内で気温均一と仮定すると、各領域の音仮温度は T_1 , T_2 , T_3 、この気温に対応する音速は c_1 , c_2 , c_3 と表せる。ここで、屋外の自然大気において急峻な気温分布は存在しないので、部分領域の気温を均一とするこの仮定はそれほど妥当性を欠くものではない。

次に、センサ 1—2 間の距離を L_1 、伝搬時間を τ_1 のように示す。ここで、伝搬時間 τ_1 , τ_2 , τ_3 は気温のみに依存する無風時に観測されるはずの値である。このとき、伝搬時間、距離、音速の関係は次式となる。

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_1 & L_1 & 0 \\ 0 & L_2 & L_2 \\ L_3 & 0 & L_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1^{-1} \\ c_2^{-1} \\ c_3^{-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A-1})$$

この行列式から音速 c_1 , c_2 , c_3 を求め、Eq. (2-11) に代入することで各部分領域の音仮温度 T_1 , T_2 , T_3 を求めることができる。

ここで、無風時の伝搬時間 τ_1 , τ_2 , τ_3 は次式で算出できる。

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2}{\tau_{12}^{-1} + \tau_{21}^{-1}}, \\ \tau_2 &= \frac{2}{\tau_{23}^{-1} + \tau_{32}^{-1}}, \\ \tau_3 &= \frac{2}{\tau_{31}^{-1} + \tau_{13}^{-1}}. \end{aligned} \tag{A-2}$$

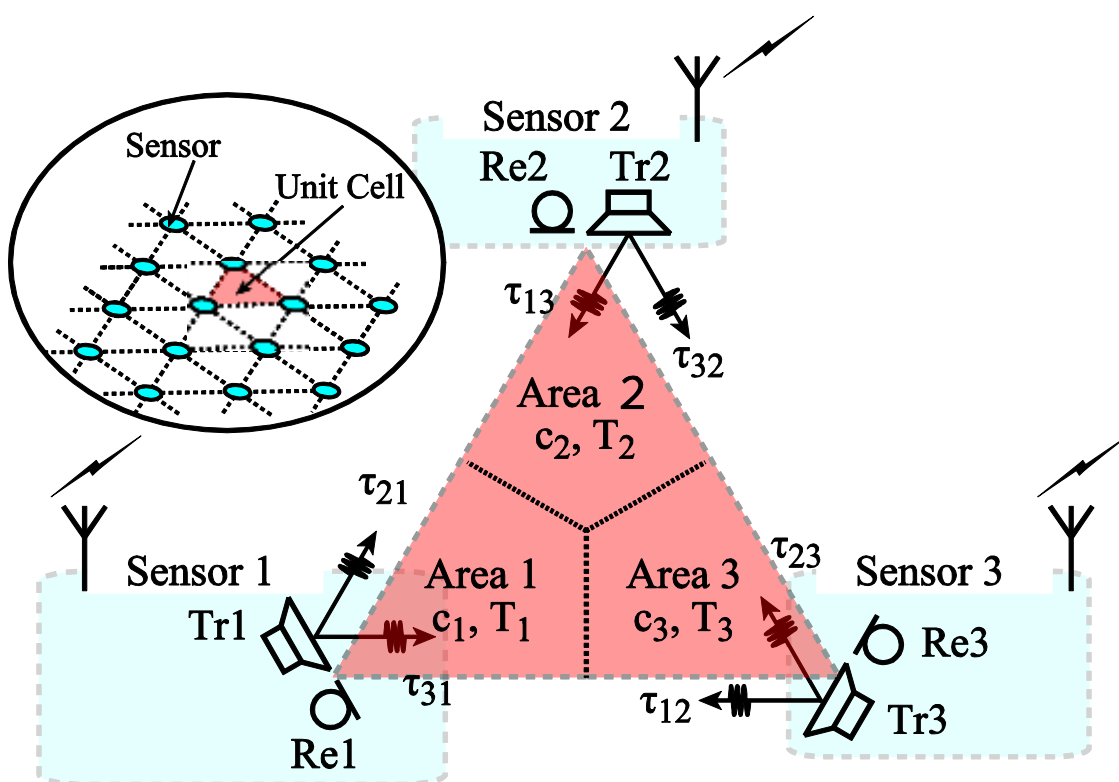


Fig. A-2 三角型ユニットセルによる気温分布計測原理.

付録 B

空気の減衰係数について

B.1 はじめに

本論文では、空気中における超音波の減衰係数の理論式は ISO9613-1 に準拠している。これらの理論式は気温 T 、湿度 H_R 、気圧 p_a 、超音波の周波数 f のみを変数として記述されており、減衰係数の性質を理解しやすく、利用しやすい。一方で、定数項が多く、減衰係数が理論的にどのように導出されたのかわかりにくい。そこで本付録 B では、減衰係数の物理的意義を理解する補助資料として、減衰係数の理論式導出過程について簡潔に述べる。

B.2 古典減衰係数¹⁾

媒質中を伝搬する音波のエネルギーは、伝搬の過程で熱エネルギー等に変換され、伝搬距離に対して指数関数的に減衰する。この吸音作用を説明するための物性値が減衰係数（吸音係数、吸収係数とも呼ばれる）である。吸音作用の要因として古くから知られていたのが、媒質の粘性や熱伝導性である。これらの影響は Stokes (1845) と Kirchhoff (1868) によって理論的に解析されている。よって本節では、粘性や熱伝導性に由来する減衰係数について述べる。

媒質として、単位質量の空気について考える。音波が x 方向に進み、その方向に温度 T の勾配があるとき、空気の熱伝導は Fourier の法則より、

$$TdS = c_v dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV. \quad (\text{B-1})$$

ここで、エントロピ S 、定積比熱 c_v 、気圧 p 、体積 $V (= 1/\rho)$ である。熱伝導率 σ とすると、エネルギーの連続の式より、

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right). \quad (\text{B-2})$$

また、

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad (\text{B-3})$$

である。このとき、 p , ρ , T が $\exp[i(\omega t - kx)]$ の形で微小変化すると、

$$\left(\frac{\omega}{k} \right)^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{K_T}{\rho} \left[\frac{c_p - (ik^2 \sigma / \rho \omega)}{c_v - (ik^2 \sigma / \rho \omega)} \right]. \quad (\text{B-4})$$

ここで、等温体積弾性率 K_T 、定圧比熱 c_p 、角周波数 $\omega (= 2\pi f)$ である。比熱比 $\gamma = c_p / c_v$ とし、 $\gamma = 1$ のときの $k = k_0$ とおくと、

$$\frac{ik^4}{\gamma^2 s k_0^4} - \frac{k^2}{\gamma k_0^2} \left(\gamma + \frac{i}{s} \right) + 1 = 0. \quad (\text{B-5})$$

$$s = \frac{K_T c_v}{\omega \sigma}. \quad (\text{B-6})$$

Eqs. (B-5), (B-6) より、 $s \gg 1$ として k について解くと、その虚部として熱伝導による減衰係数を求められる。

$$\alpha_{\text{cond}} = \frac{\omega^2}{2\rho u^3} (\gamma - 1) \frac{\sigma}{c_p}. \quad (\text{B-7})$$

$$u^2 = \gamma \frac{K_T}{\rho}. \quad (\text{B-8})$$

ここで、本論文本体では音速の変数を c としていたが、本付録 B では比熱との混同を避けるために、音速の変数を u としている。

さらに、空気の粘性も考慮する場合、Eq. (B-4) を粘性を考慮した運動方程式へ代入し、 k を求めなければならない。粘性を考慮した運動方程式は、

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \left(\kappa + \frac{4}{3} \eta \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (\text{B-9})$$

である。ここで、変位 ξ 、体積粘性率 κ 、ずり粘性率 η である。このとき k を与える方程式は、

$$\frac{k^4}{\gamma^2 s k_0^4} \left(i - \frac{1}{r} \right) + \frac{k^2}{\gamma k_0^2} \left[\gamma + i \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right) \right] + 1 = 0, \quad (\text{B-10})$$

$$r = \frac{\rho u^2}{\gamma \omega \left(\kappa + \frac{4}{3} \eta \right)} = \frac{K_T}{\omega \left(\kappa + \frac{4}{3} \eta \right)}. \quad (\text{B-11})$$

Eqs. (B-10), (B-11) より, $r, s \gg 1$ として k について解くと,

$$\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{vis}} = \frac{\omega^2}{2\rho u^3} \left[\kappa + \frac{4}{3} \eta + (\gamma - 1) \frac{\sigma}{c_p} \right]. \quad (\text{B-12})$$

このように, 古典的な物理方程式に基づき導出される減衰係数は, 今日では, 古典減衰係数 α_{cl} と呼ばれている. 本文第 3 章の Eq. (3-2) は実質的には古典減衰係数について記述しており, 次式の対応関係がある.

$$\alpha_{\text{cl}} + \alpha_{\text{rot}} \approx \alpha_{\text{cl}} = \alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{vis}}. \quad (\text{B-13})$$

B.3 分子緩和減衰係数²⁻⁵⁾

1900 年に建築音響学者 Sabine が講堂内の反響の性能評価のために残響理論を提唱し, 空間を伝搬する音波の減衰は残響時間測定により求められることを示した. これを受けて, Knudsen (1933) は Sabine の残響式を改良し, 残響時間計測に基づき種々の気体の減衰係数を実測した. しかし, 実測された減衰係数は, 古典減衰係数よりも大きく, 古典的物理方程式で説明可能な要因以外について考察する必要性が生じた. そこで, 20 世紀初頭に勃興した学問が分子音響学である. 分子音響学では, 分子の並進運動エネルギーと, 分子の振動や回転といった内部エネルギーとの間でのエネルギー交換に着眼し, 媒質の吸音作用 (減衰係数) を説明している. よって本節では, 分子運動に由来する減衰係数について述べる.

音波による圧力変動により, 局所的に空気は圧縮・膨張する. この体積変化に際して, 最初に気体分子の並進運動エネルギーが変化し, 次に気体分子同士の衝突を媒介として並進運動エネルギーが分子の内部エネルギーへ変換される. 両エネルギーはエネルギー交換を繰り返し徐々に平衡状態に達する. この平衡状態に達するまでに要する時間のことを緩和時間と呼ぶ. 分子回転は緩和時間が極めて短いため, 音波の周波数が 100 MHz 以上の場合にしか分子回転エネルギーは励起されない. そのため, 音波の周波数が 100 MHz 未満の場合に励起されるのは分子振動エネルギーである.

音波による気体の圧縮・膨張変化について, 圧力 p と体積 v の関係で表した $p v$ 線図を Fig. B-1 に示す. ここで, 音波による気体の圧縮・膨張変化は断熱変化であることが知られている.

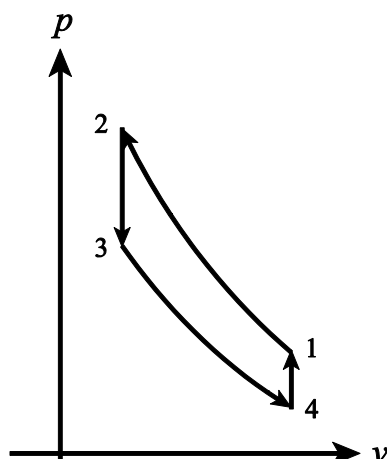
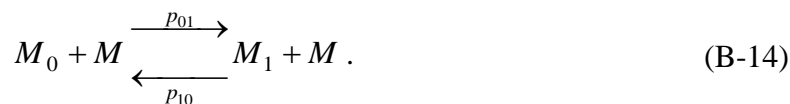


Fig. B-1 音波による気体の圧縮・膨張変化.

この図において、まず音波による急速な断熱圧縮により状態 1 から状態 2 へ移り、次いで緩和時間に比べて十分長時間をかけて状態 2 から状態 3 へ移る。この状態 2 から状態 3 への変化は、気体分子の並進エネルギーが内部エネルギーへ移行する様子を示している。その後、断熱膨張により状態 3 から状態 4 へ移り、次いで同様に状態 4 から状態 1 へ戻る。このように、音波による気体の状態変化は断熱サイクルとなり、1 サイクル毎に Fig. B-1 中の頂点 1234 で囲まれた面積分の仕事が不可逆的に熱へ変化し失われる。この 1 サイクル毎のエネルギー損失は、音波 1 波長分のエネルギー損失（吸音量）に相当する。よって、分子吸音現象は熱力学的に考察することができる。

Kneser (1931) が提唱し始めた統計熱力学理論では、分子振動の励起と消滅は分子衝突を媒介として生じ、しかも 2 体間衝突が関与していると考える。



ここで、 M_0 , M_1 は振動エネルギー量子 0 個及び 1 個を持った分子で、 M_1 は M_0 に比べ少ないものと仮定している。 M は M_0 と M_1 の両方を含む。これから反応方程式を得る。

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = k_{01}n_0 - k_{10}n_1. \quad (\text{B-15})$$

ここで、 n_0 , n_1 は 1 cm^3 中の M_0 , M_1 のモル数である。このとき、平衡の状態式より次式を得る。

$$K = \frac{k_{01}}{k_{10}} = \exp\left[-\frac{h\nu_1}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{E}{RT}\right]. \quad (\text{B-16})$$

$$E = N_L h \nu_1 \quad (\text{B-17})$$

ここで、分子振動の基準振動数 ν_1 、Planck 定数 h 、Boltzmann 定数 k 、普遍ガス定数 R 、モル分子数 N_L である。分子数保存の式

$$n_0 + n_1 = N = \text{const.}, \quad (\text{B-18})$$

を用い、周期変化

$$n_1 = n_1^0 + \Delta n_1 = n_1^0 + \Delta n_1^0 \exp[j\omega t], \quad (\text{B-19})$$

を仮定すると、次式が得られる。

$$\left(1 + K + \frac{j\omega}{k_{10}}\right) \Delta n_1 = \frac{E}{RT^2} n_0 K \Delta T. \quad (\text{B-20})$$

Eq. (B-20) とエネルギーの式 Eq. (B-21)、理想気体の状態式 Eq. (B-22) を複素音速度の式 Eq. (B-23) へ代入し、さらに Eq. (B-24) へ代入し、近似的に Eq. (B-25) を得る。

$$E \Delta n_1 + N(C_{v\infty} \Delta T + p \Delta v) = 0. \quad (\text{B-21})$$

$$\Delta(pv) = R \Delta T. \quad (\text{B-22})$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta \rho} = \frac{1}{\rho} \left(p - \frac{\Delta(pv)}{\Delta v} \right). \quad (\text{B-23})$$

$$\alpha_{\text{vib0}} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{u} \frac{\text{Im}\left(\frac{\Delta p}{\Delta \rho}\right)}{\text{Re}\left(\frac{\Delta p}{\Delta \rho}\right)}. \quad (\text{B-24})$$

$$\alpha_{\text{vib0}} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{RC_i \omega \beta}{C_{v0}(R + C_{v0}) + C_{v\infty}(R + C_{v\infty}) \omega^2 \beta^2}. \quad (\text{B-25})$$

ここで、 $C_{v\infty}$ は 1 mol についての外部自由度の定積比熱で、振動数 ∞ に相当す

る。また、 C_{v0} は十分低い周波数での定積比熱で、 $C_i (= C_{v0} - C_{v\infty})$ は 1 mol の振動比熱であり、Planck-Einstein の式で与えられる。

$$C_i = \frac{E^2}{RT^2} \frac{\exp\left[-\frac{E}{RT}\right]}{\left(1 - \exp\left[-\frac{E}{RT}\right]\right)^2}. \quad (\text{B-26})$$

また、 β は緩和時間 τ_r と次式の関係がある。

$$\beta = \frac{C_{v0}}{C_{v\infty}} \tau_r. \quad (\text{B-27})$$

Eq. (B-27) と波長 $\lambda = u/f$ の関係を用いて、Eq. (B-25) へ代入すると、

$$\alpha_{\text{vib}0} = \frac{\pi f}{u} \frac{RC_i \omega \tau_r}{C_{p0} C_{v\infty} + C_{v0} C_{p\infty} \omega^2 \tau_r^2}. \quad (\text{B-28})$$

さらに、

$$\tau_r' = \tau_r \left(\frac{C_{v0} C_{p\infty}}{C_{p0} C_{v\infty}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{B-29})$$

とおくと、Eq. (B-28) は、

$$\alpha_{\text{vib}0} = \frac{\pi f}{u} \frac{RC_i}{(C_{p0} C_{v\infty} C_{v0} C_{p\infty})^{\frac{1}{2}}} \frac{\omega \tau_r'}{1 + \omega^2 \tau_r'^2}. \quad (\text{B-30})$$

ここで、Eq. (B-30) の極大値を求めると、

$$(\alpha_{\text{vib}} \lambda)_{\text{max}} = \frac{\pi}{2} \frac{RC_i}{(C_{p0} C_{v\infty} C_{v0} C_{p\infty})^{\frac{1}{2}}}, \quad (\text{B-31})$$

である。また、緩和周波数 f_r を用いて次式の関係がある。

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \tau_r'}. \quad (\text{B-32})$$

よって、Eqs. (B-30)–(B-32) より、分子振動緩和減衰係数が得られる。

$$\alpha_{\text{vib}0} = [(\alpha_{\text{vib}} \lambda)_{\text{max}}] \times \left(\frac{f}{u} \right) \left\{ 2 \left(\frac{f}{f_r} \right) \left[1 + \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 \right]^{-1} \right\}. \quad (\text{B-33})$$

このように、Eq. (B-33) は本文第 3 章の Eq. (3-3) と同型になる。また、Eq. (B-31) と Eq. (3-5) が対応、Eq. (B-32) と Eq. (3-4) が対応している。

参考文献

- (1) 和田八三久, “音波物性,” 共立出版, 1969.
- (2) 能本乙彦, “超音波,” 河出書房, 1948.
- (3) A. B. Bhatia, “*Ultrasonic Absorption*,” Oxford University Press Inc., 1967.
- (4) 能本乙彦, 生嶋明, 鳥飼安生, “音波物性とその応用,” オーム社, 1969.
- (5) 根岸勝雄, 高木堅志郎, “超音波技術,” 東京大学出版, 1984.

著者紹介



茂木 貴弘（もてぎ たかひろ）

著者略歴

平成 20 年 3 月	埼玉県立大宮高等学校	卒 業
平成 20 年 4 月	筑波大学 理工学群 工学システム学類	入 学
平成 23 年 3 月	同学類（エネルギー工学主専攻）	早期卒業
平成 23 年 4 月	筑波大学 大学院システム情報工学研究科 博士前期課程 知能機能システム専攻	入 学
平成 25 年 3 月	同課程	修 了
平成 25 年 4 月	筑波大学 大学院システム情報工学研究科 博士後期課程 知能機能システム専攻	入 学
平成 26 年 3 月	同課程	早期修了

平成元年 5 月 26 日 埼玉県熊谷市（旧・妻沼町）に生まれる。

平成 22 年 5 月から音響システム研究室に配属，超音波による温湿度計測法とその応用に関する研究に従事。平成 25 年 4 月から日本学術振興会 特別研究員 DC1 に採用される。平成 25 年度現在，日本音響学会，日本機械学会，電気学会，農業施設学会，Acoustical Society of America 会員。