

博 士 論 文

環境騒音伝搬予測のための
地表面音響特性経時変化のモデル化に関する研究

2 0 2 0 年 2 月

新潟大学大学院 自然科学研究科
環境科学専攻 社会基盤・建築学コース（建築系）

黒坂 優美

目次

第 1 章 序論	7
1.1 研究の背景	7
1.1.1 環境騒音問題をめぐる情勢	7
1.1.2 現状の騒音伝搬予測モデルの問題点	8
1.1.3 環境騒音伝搬予測における経時変化考慮の必要性	9
1.2 研究の目的	10
1.3 地表面の音響特性に関わる物理量	10
1.4 関連する既往研究	14
1.4.1 地表面音響特性の現場測定法に関する研究	14
1.4.2 土に関する物理量と音響特性の関係についての研究	14
1.4.3 地表面音響特性の季節変化や日変化に関する研究	15
1.5 本論文の構成	15
第 2 章 地表面音響特性の経時変化のモデル化に関する基礎的検討	19
2.1 目的	19
2.2 測定概要	19
2.2.1 測定対象地	19
2.2.2 測定対象地の土質	21
2.2.3 気象の観測	24
2.2.4 土壌水分の計測	26
2.2.5 地表面音響特性の測定	29
2.3 垂直入射吸音率の算出	31
2.4 長期測定結果	35
2.4.1 気象, 土壌水分, 地表面音響特性の日変化	35
2.4.2 モデル化に用いる気象要素の選定	36
2.4.3 飽和度と地表面吸音率の関係	39
2.5 地表面音響特性のモデル化	41
2.5.1 モデル化の概要	41
2.5.2 モデル定数の決定	46
2.5.3 モデルの比較検証	54
2.6 まとめ	58
Appendix	59

第 3 章 複数種地表面における地表面音響特性の経時変化のモデル化	61
3.1 目的	61
3.2 測定概要	61
3.2.1 測定対象地	61
3.2.2 気象の観測	65
3.2.3 土壌水分の計測	66
3.2.4 地表面音響特性の測定	67
3.3 実効的流れ抵抗の算出	70
3.4 測定結果	73
3.4.1 気象および土壌水分の観測結果	73
3.4.2 地表面音響特性の測定結果	76
3.5 地表面音響特性経時変化モデルの適用	79
3.5.1 Stage 1	79
3.5.2 Stage 2	84
3.6 まとめ	89
第 4 章 広域における地表面種類分布の把握	91
4.1 目的	91
4.2 航空画像撮影	92
4.2.1 画像取得手法	92
4.2.2 取得画像詳細	94
4.3 地表面分類の概要	98
4.3.1 地表面分類の流れ	98
4.3.2 分類クラス, トレーニングエリア, テストエリア, 推定エリアの設定	98
4.3.3 分類手法	111
4.3.4 分類精度の評価手法	113
4.4 地表面分類時の条件に関する諸検討	114
4.4.1 教師スペクトル算出に必要なピクセル数の検討	114
4.4.2 用いる撮影画像の検討	116
4.4.3 MED 法と SD 法の重み付けに関する検討	126
4.4.4 閾値の検討	130
4.5 推定エリアにおける地表面分類の実施	136
4.6 まとめ	138
第 5 章 地表面音響特性マップの作成	139
5.1 目的	139
5.2 マップ作成方法	139

5.3	結果	140
5.3.1	地表面音響特性の年間変動	140
5.3.2	地表面音響特性マップ作成結果	145
5.4	まとめ	159
第 6 章	地表面音響特性マップを用いた騒音伝搬計算	161
6.1	目的	161
6.2	伝搬計算手法	161
6.3	計算条件	164
6.3.1	Case PP	164
6.3.2	Case LP	165
6.4	計算結果	166
6.4.1	Case PP	166
6.4.2	Case LP	167
6.5	まとめ	167
第 7 章	結論	169
7.1	本研究の成果	169
7.2	本研究のもたらす意義	170
7.3	課題および今後の展開	171
7.3.1	課題	171
7.3.2	今後の展開	172
付録 A	インピーダンスモデルに関する検討	175
A.1	扱うインピーダンスモデルの概要	175
A.1.1	DB モデル	175
A.1.2	Miki モデル	175
A.1.3	ZK モデル	176
A.1.4	Wilson モデル	176
A.2	特性インピーダンス比推定方法	177
A.3	計算条件	178
A.4	計算結果	179
付録 B	表面音響特性現場測定法の特性に関する検討	185
B.1	EA 法におけるマイクロホン設置高さ誤差の検討	185
B.1.1	計算条件	185
B.1.2	計算結果	186

B.2	ANSI 法の測定結果のばらつきに関する検討	188
B.2.1	測定概要	188
B.2.2	結果	190
	参考文献	193
	謝辞	199

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 環境騒音問題をめぐる情勢

都市や経済の発展に伴い、世界各国で自動車騒音や鉄道騒音、航空機騒音などの環境騒音が問題となっている。我が国では、主に自動車騒音を対象とした「騒音に係る環境基準」の他、「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」、「航空機騒音に係る環境基準」のそれぞれによって騒音レベルの基準値が定められ [1]、基準値を満たすための騒音対策（必要に応じた遮音壁の設置など）が行われている。その一方、環境基準の達成状況としては、自動車騒音の常時監視結果が国立環境研究所により公開されている [2] もの、その監視結果は道路沿線に限られ、任意の地点における騒音状況の把握には程遠いのが現状である。

一方、諸外国に目を向けると、騒音対策の先進国である欧州連合 (EU) では、我が国以上に騒音が人々の生活や健康に悪影響を及ぼすとの認識のもと、様々な騒音政策が実施されている。EU では、2002 年の EU 指令 [3] により、ある規模以上の地域に対する騒音マッピングの実施と、その中で見出された騒音に係る課題や影響を管理するためのアクションプランの実行を 5 年毎に繰り返すことが指示された。EU 指令に基づき、騒音伝搬予測モデルの開発や、伝搬予測モデルを用いた騒音マッピング、さらにモデルの実際の適用を支援するための技術ツールの開発などが、今に至るまで継続的に行われている [4]。騒音マップは、騒音レベルの実測値ではなく、騒音伝搬予測計算に基づき作成される。実測値のマッピングとなると、都市域全体に騒音測定装置を設置する必要があり現実的ではないが、推計値を算出することで、道路沿線のみならず、面的な騒音評価が可能となっている。

EU でこのような騒音政策が盛んな背景として、騒音は人々に不快感を与えるだけでなく、睡眠障害や、心臓血管系への影響といった健康影響を引き起こす可能性があるとの認識が強いことが理由として挙げられる。WHO 欧州事務局は 2018 年に環境騒音ガイドライン [5] を発表し、「環境騒音は、健康影響リスクが生じる最も重要な環境要因のうちのひとつである」と述べている。当ガイドラインでは、騒音曝露による健康影響に関する科学的知見を世界中から収集した上で精査し、音源ごとに図 1.1 のような量反応関係を示している。そして、それらの知見をもとに、自動車騒音、鉄道騒音、航空機騒音、風車騒音、娯楽関連騒音のそれぞれに関する勧告値を定めている。

ここで我が国の環境基準に話を戻すと、我が国の環境基準は「生活環境を保全し、人の健康の保護に資する上で維持されることが望ましい基準」として定められている。しかしながら、近年の騒音に関する訴訟に対する判例において「受忍限度論」が採用されていることか

らも、環境基準は実質的には「生活妨害」を対象とした基準値として扱われており、騒音による「健康影響」からの住民の保護を目的とした EU のガイドラインとは根本的な相違がある [6]。文献 [6] によると、我が国の環境基準値は多くの場合で EU のガイドラインの勧告値を上回り、このことは我が国の環境基準値では健康影響が生じ得ることを示唆する。このことから、今後は我が国でも、騒音を「どの程度我慢できるか」という基準で考えるだけでなく、健康被害という視点から考えることも必要と考えられる。

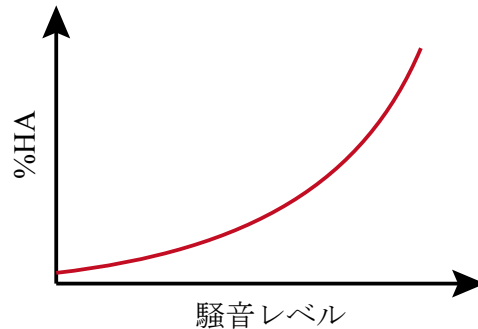


図 1.1 量反応関係の概念図 (図中%HA は percentage of the population “highly annoyed”を表す)

1.1.2 現状の騒音伝搬予測モデルの問題点

騒音伝搬計算による騒音レベル推計は、適切な騒音対策を実施するために有効であり、重要な役割を担う。騒音伝搬予測モデルは、各国の国情に即したモデルがそれぞれの国で作成されており、例えば我が国では道路交通騒音予測モデルとして「ASJ RTN-Model」[7] が開発されてきた。ASJ RTN-Model では、図 1.2 に示すような、騒音源である自動車の音響的パワーの発生から受音点までの伝搬に至る過程が細かくモデル化されている。

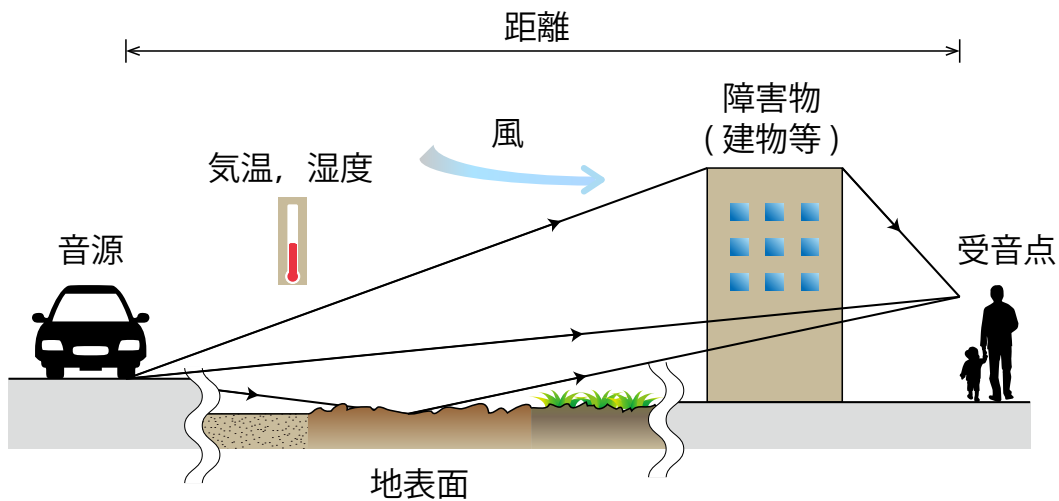


図 1.2 騒音伝搬に影響を及ぼす各要素

騒音伝搬計算は、音源系および伝搬系の二つに大別される。このうち音源系は、5年ごとのモデルの改訂とともにより詳細にモデル化されてきた。自動車音源のパワーレベル算出式に関しては、自動車の車種や指向性、路面性状などによる影響を考慮する係数が多数存在するが、それらは0.1 dB単位でモデル化されている。その一方、伝搬系については、伝搬の途中で受ける気温や湿度、降雨や風といった自然現象の影響はモデル化が困難であり、今日までに厳密なモデル化がされてこなかった。しかしながら、気温や湿度、降雨や風によって、騒音レベルが変動することは、これまで多数の実測実験等により明らかにされている。図1.1のような量反応関係を導出するにあたっては、騒音曝露量推定には1 dBの精度が求められる[8]と言われる中で、より高精度な伝搬計算モデルの構築、とりわけほとんど未着手である伝搬系における自然現象の影響の正確なモデル化は急務である。

伝搬系における自然現象の影響の中で、重要でありながら詳細なモデル化が未着手な要素として、地面が音を吸収する程度を表す「地表面音響特性」がある。地表面での音の吸収量が多ければ、音は減衰し伝搬しにくくなるが、反対に地表面での音の吸収量が少なければ、音は良く伝搬する。土の音響特性は、土壌水分量によって変化することがこれまでに多数の実験室実験にて確かめられてきた。これらの研究によると、土壌水分が多いほど、つまり土中の空隙が水で満たされているほど、音は吸収されにくい。すなわち、地表面音響特性は同一地表面においても気象（降水等）により変化すると考えられる。一方、現行のASJ RTN-Modelでは、僅か4種の地表面に対して、音響特性量の一種である実効的流れ抵抗の値が定数として与えられているに過ぎない。4値しか存在しない現行のASJ RTN-Modelによる地表面音響特性は、地表面状態によって様々に異なる現実の地表面音響特性と乖離していることは明らかである。しかしながら、実験室にて水分量を精密に制御した実験下ではなく、実際の気象の影響を受ける実地表面における地表面音響特性の変動の程度は未知であるため、気象等の影響を受けて日～週単位から月～季節単位まで、様々な時間スケールで複雑に変動する地表面音響特性は、これまでモデル化されてこなかった。

1.1.3 環境騒音伝搬予測における経時変化考慮の必要性

騒音レベルは近年、瞬時値よりも、時間平均曝露量で評価される傾向がある。例えば先のEUにおける環境騒音ガイドラインでは、騒音評価指標として、EU指令に基づき、時間帯補正等価騒音レベル L_{den} (den: day-evening-night) および夜間等価騒音レベル L_{night} が採用されている。ここで L_{den} とは、昼間、夕方、夜間の時間帯別に騒音の影響に関する重み付けをして評価した1日にわたる等価騒音レベルである[9]。また、EUでは騒音による健康影響が重要視されているが、健康影響の評価のためには、騒音の瞬時値よりも、長期にわたる騒音曝露の総量を把握する必要がある。このように、騒音の時間変動の解明が近年求められている。

1.2 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、騒音伝搬予測に関わる要素の中でも未だ詳細なモデル化がされていない地表面音響特性に着目し、その経時変化モデルを構築することを本研究の目的とする。また、将来的には騒音マップを作成することを念頭に置き、地表面音響特性の空間分布を推定する。地表面音響特性の空間分布と、経時変化モデルを組み合わせることで、地表面音響特性の時空間変動の推定を試みる。

1.3 地表面の音響特性に関わる物理量

地表面の音響特性に関わる物理量はいくつか存在する。本節では、話を地表面に限定せず、より一般的な「媒質、試料」まで含めて、それらの音響特性に関わる物理量をまとめる。

■ インピーダンス

音場中のある点における、音圧と粒子速度の比を音響インピーダンスという。すなわち、音圧を p 、粒子速度を v とした場合、音響インピーダンス Z は以下で表される。

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1.1)$$

特性インピーダンス Z_c は、定常状態の音波が媒質中を伝搬するときの、媒質中のある点での音圧と粒子速度の比で定義される。一方、表面インピーダンス Z_s は、試料表面の音圧と粒子速度の比で定義される。特性インピーダンスは試料固有の値をもつが、表面インピーダンスは試料表面で観測される値であることに注意が必要である。例えば、図 1.3 のように厚さ d の試料が剛壁上に設置された場合、試料の特性インピーダンスは試料背面の剛壁の有無に関わらず固有の値であるが、表面インピーダンスは試料背面の剛壁からの反射音も考慮した値となる。すなわち、特性インピーダンスは試料固有の特性を表す一方、表面インピーダンスは試料設置条件も含めた音響特性を表す。地表面においては、十分に湿った地面の上に積雪がある場合や、地面の層が 2 層以上あることを考慮する場合等には、特に特性インピーダンスと表面インピーダンスを区別して用いる必要がある。

剛壁上に厚さ d の試料が密着して設置された場合、平面波の垂直入射における試料の特性インピーダンス Z_c と表面インピーダンス Z_s の関係は、次式で表される[10]。

$$Z_s = Z_c \coth \gamma d \quad (1.2)$$

ここで γ は伝搬定数である。

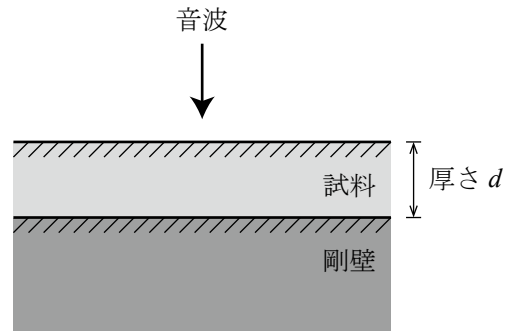


図 1.3 剛壁上に設置された厚さ d の媒質

また，特性インピーダンスおよび表面インピーダンスを，空気密度 ρ および空気中での音速 c の積 ρc で割って基準化したものを，それぞれ特性インピーダンス比，表面インピーダンス比とよぶ。すなわち，特性インピーダンス Z_c と特性インピーダンス比 z_c ，表面インピーダンス Z_s と表面インピーダンス比 z_s の関係は以下となる。

$$z_c = \frac{Z_c}{\rho c}, \quad (1.3)$$

$$z_s = \frac{Z_s}{\rho c} \quad (1.4)$$

■ 吸音率

材料に入射する音のエネルギーを E_i とすれば、図 1.4 のようにそのエネルギーの一部 E_r が反射し、一部 E_a が材料中に吸収され、残りの E_t が透過すると大別できる [11]。すなわち、 E_i , E_r , E_a , E_t の関係は以下である。

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (1.5)$$

このとき吸音率 α は、

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{E_a + E_t}{E_i} \quad (1.6)$$

で定義され、反射音以外はすべて吸音と考える。

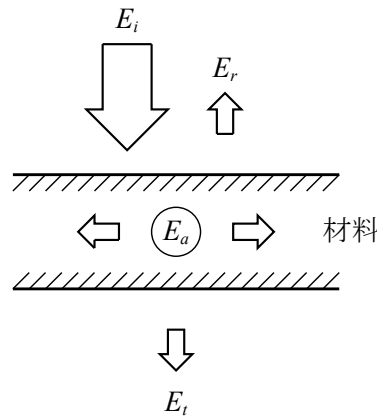


図 1.4 入射音に対する反射・吸収・透過音の模式図

■ 流れ抵抗

流れ抵抗とは、試料中の空気の流れにくさを表す量であり、ISO (International Organization for Standardization: 国際標準化機構) にて流れ抵抗の測定方法が定められている [12]。流れ抵抗の測定法には、直流法と交流法があるが、以下では直流法を例にとり、測定法の原理を説明する。

図 1.5 に、直流法による試料の流れ抵抗の測定模式図を示す。直流法では、円形または方形の管に試料を取り付け、管内に一方向の気流を生成させる。試料両面の空気の圧力差 Δp [Pa] によって、試料中に体積気流速度 q_v [m³/s] の流れが生じた場合、airflow resistance (R [Pa s/m³]) は以下で定義される。

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (1.7)$$

ISO では、流れ抵抗を表す量として、 R の他に、 q_v を流れに対して垂直方向の試料の断面積 A [m²] で除して気流速度とした specific airflow resistance R_s [Pa s/m]

$$R_s = \frac{\Delta p}{q_v/A} = RA \quad (1.8)$$

や, R_S を流れ方向の試料の長さ d [m] で除して試料の単位厚さあたりとした airflow resistivity r [Pa s/m²]

$$r = \frac{R_S}{d} \quad (1.9)$$

を定義している。本研究では、この airflow resistivity を流れ抵抗と称する。

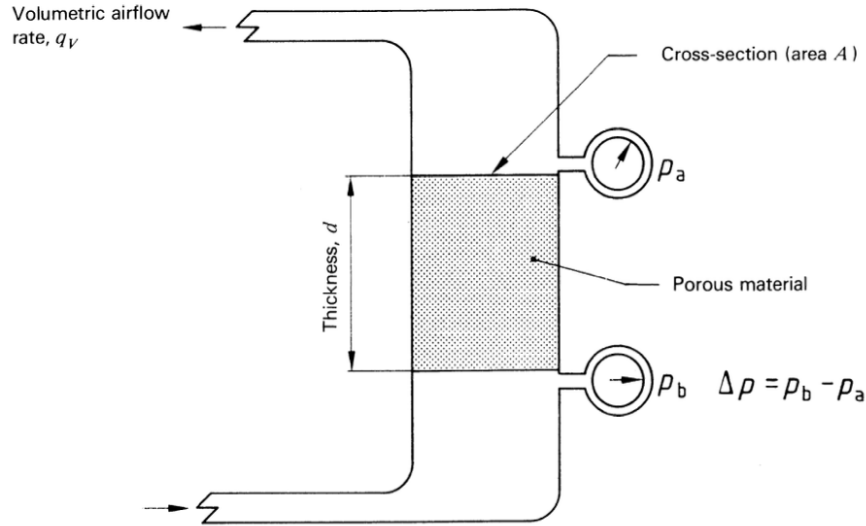


図 1.5 直流法による流れ抵抗測定の様式図 (ISO 9053 規格書 [12] より抜粋)

一般に、流れ抵抗が大きい試料中は空気が流れにくく、したがって音も伝わりにくい。このように流れ抵抗は、試料中の空気の流れにくさを表す量であると同時に、試料中の音の伝わりにくさを表す量としても用いられる。

■ 実効的流れ抵抗

地面は、一般に無限厚さであるため、多孔質試料のように空気を通して実験的に流れ抵抗値を求めることはできない。そこで、地表面上で音圧等を測定し、スペクトル特性 (直接波と反射波の干渉によるディップなど) や超過減衰量の距離による変化などを求め、それらの測定値に対して、理論式によって求まる理論値がもっとも良く一致するときの理論式中の流れ抵抗の値を、特に実効的流れ抵抗とよぶ [13]。媒質中の流速と圧力差から直接測定される流れ抵抗と、Miki [14] などにより提案されているインピーダンスモデル中での役割は同じであるが、超過減衰から算定される量を特に区別して実効的流れ抵抗とよぶ。

理論式の中で、インピーダンスを与える部分では、インピーダンスモデルを用いる。インピーダンスモデルとして用いられるモデル式の例として、Delany–Bazley モデルや Miki モデルなどがあるが、モデル中の流れ抵抗の単位には注意が必要である。例えば Delany–Bazley モデルが提案されている文献 [15] では、式中の流れ抵抗の単位は $\text{g} / (\text{s} \cdot \text{cm}^3)$ であり、これは CGS 単位系である。一方 Miki モデルが提案されている文献 [14] では、式中の流れ抵抗の

単位は $\text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ であり、これは SI 単位系である。両者間には、 $1 \text{ g} / (\text{s} \cdot \text{cm}^3) = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 1 \text{ kPa} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ の関係が成り立つ。

流れ抵抗と実効の流れ抵抗は、上述の通り、厳密には異なる量である。しかしながら、「実効の流れ抵抗」が単に「流れ抵抗」と呼ばれることも多い。

1.4 関連する既往研究

1.4.1 地表面音響特性の現場測定法に関する研究

騒音伝搬予測モデルを用いて高精度な伝搬予測をする際には、地表面音響特性の正確な把握が重要であり、地表面音響特性を測定する手法が複数提案されている。例えば Cramond ら [16] は、インパルス音を放射し、2 受音点で記録された波形から入射波と反射波を時間軸上で分離し、両者の比から音圧反射係数を求めてインピーダンスを算出する手法を提案している。また、Takahashi ら [17] は、複数の音源をランダムに動かして 2 本のマイクロホンに音を乱入射させて表面音響特性を測定する Environment Anonymous (EA) 法を提案した。EA 法は主に我が国において盛んに研究がなされており、開発段階の吸音材の性能評価 [18] や地表面音響特性測定 [19] などに適用されている。この他にも表面音響特性の現場測定法は数多く提案されているが、ISO (International Organization for Standardization, 国際標準化機構) や ANSI (American National Standards Institute, 米国国家規格協会) は、表面音響特性現場測定法を規格化している。ISO は、自由音場にてマイクロホンに音を垂直入射させて測定を行う ISO 13472-1 [20] と、地面に音響管を立てて測定を行う ISO 13472-2 [21] の 2 手法を定めている。ANSI は、2 マイクロホンに対して音源からの音を斜入射させて測定を行う Ansi s1.18 [22] を定めている。

1.4.2 土に関する物理量と音響特性の関係についての研究

一方、土に関する様々なパラメータ (土壌水分、土質、ポロシティ等) によって変化しうる地表面音響特性を定量化するために、多くの試みがなされてきた。例えば、土の空隙率や水分量といった条件を精密に制御した上で音響特性を測定する実験室実験が多数行われてきた。Yang ら [23] は、土の乱入射吸音率を、植生の有無や土壌水分といった条件を変化させながら残響室で測定し、これら条件の違いにより吸音率が変化することを示した。Horoshenkov ら [24] は、音響管を用い、粗い砂および細かい砂を対象として飽和度を変化させながらアドミッタンス (インピーダンスの逆数) を測定した。その結果、飽和度がわずかに変化しただけでも、アドミッタンスの測定値は大きく異なることを示した。また、Cramond ら [25] は、実験室ではなく実際の屋外地表面にて土壌水分量を変化させ、文献 [16] の手法により地表面インピーダンスを測定し、土壌水分量の違いによる地表面音響特性の違いを明らかにしている。そして、こういった測定から、実効の流れ抵抗やポロシティをパラメータとして用いた、屋外での地表面インピーダンスのモデルが導出されている [26, 27]。これらの研究では概して、土壌水分量が多いと、土の吸音率は小さいことが示されている。

1.4.3 地表面音響特性の季節変化や日変化に関する研究

前項で述べた実験室実験および現場測定では、ある特定の土壤水分量に対する地表面音響特性を測定している。しかしながら、土壤水分は、降水や気温といった気象の変化によって変化すると考えられる。ここで気象は日単位、月単位、季節単位などの様々な時間スケールで変化するため、それに伴い地表面音響特性も様々な時間スケールで変化することが予想される。Guillaume ら [28] や Renterghem ら [29] は、季節変化や日変化による地表面音響特性の変化を次のように調べている。Guillaume らは、人工芝、芝地、草地の3種の地表面を対象とし、夏(5月下旬)および冬(12月中旬)に地表面インピーダンスの現場測定を実施した。夏は地面が乾いており、冬は降雨のため地面が湿っている状態であった。地表面音響特性測定結果から地面の流れ抵抗を推定したところ、3種類すべての地面において、夏より冬のほうが流れ抵抗が大きく、すなわち地面はより音響的に反射性であった。また Renterghem らは、降雨に対する屋上緑化屋根の音響特性を、46日間の測定を通して調べた。降雨量と緑化屋根の土壤水分を継続的に観測する傍ら、建物下に設置したスピーカから試験用信号を放射し、スピーカ付近の参照用マイクロホンと、緑化屋根の表面付近のマイクロホン間の減衰を測定した。その結果、降雨によって土壤水分が増加すると、中音域における音の減衰量が減少することがわかった。

上述の Guillaume らの調査は、5月下旬と12月中旬という、ある特定の時期においてインピーダンスを測定したものであり、夏から冬にかけての地表面インピーダンスの連続的な変化は調べていない。また Renterghem らの研究は、46日間という連続した期間での測定ではあるものの、この研究での音の減衰量には、緑化屋根の土の吸音だけでなく、屋根の縁での回折減衰も含まれている。したがって、この研究結果の適用は、建物の屋上に類似した状況に限られる。

このように、これまで地表面音響特性に関して行われてきた多くの研究は、ある特定の地面の状況に対する地表面音響特性を測定しているという点において、時間的にピンポイントであった。また、多くの研究により様々な地表面の音響特性が明らかとなっているが、それらはあくまで空間的にピンポイントであるものの集合であり、地表面音響特性の実際の連続的な空間分布を推定するには至っていない。そこで、本研究にて、地表面音響特性の長期間にわたる経時変化および連続的な空間分布を明らかにする。

1.5 本論文の構成

図 1.6 に本論文の構成を示す。

本章に続く第2章では、地表面音響特性の経時変化に関する基礎的検討として、1箇所の

第1章 序論

地表面を対象とした気象・土壌水分・地表面音響特性の長期測定を行う。その結果から、長期にわたるこれらの変動の程度を把握する。また、地表面音響特性の経時変化に影響する気象要素を選定し、当該気象要素から地表面音響特性を推定するモデルを構築し、モデルの検証を行う。

第3章では、第2章での検討内容を複数地表面種に展開する。地表面種ごとに、第2章で構築した経時変化モデルの適用を試み、モデル定数の導出を行う。

第4章では、地表面音響特性の空間分布を推定することを目的とし、広域における地表面種類分布の把握を行う。そのために航空画像を撮影し、撮影画像から地表面種類分類を行う。地表面分類時の条件に関する諸検討を行い、最も精度のよい地表面分類結果が得られる条件を導出する。当該条件を用い、航空画像内に定める推定エリアを対象として地表面分類を実施する。

第5章ではまず、第3章までに導出された複数地表面種における地表面音響特性経時変化モデルに対して1年分の気象データを与え、地表面音響特性の年間変動を地表面種ごとに計算する。その計算結果と、第4章にて推定された広域の地表面種類分布を組み合わせ、地表面音響特性マップを作成する。

第6章では、第5章で作成した地表面音響特性マップを用いた騒音伝搬計算を行う。計算ケースを定め、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮する場合と考慮しない場合において伝搬計算を実施し、結果を比較する。

第7章ではこれまでの内容を総括し、今後の展望を述べる。

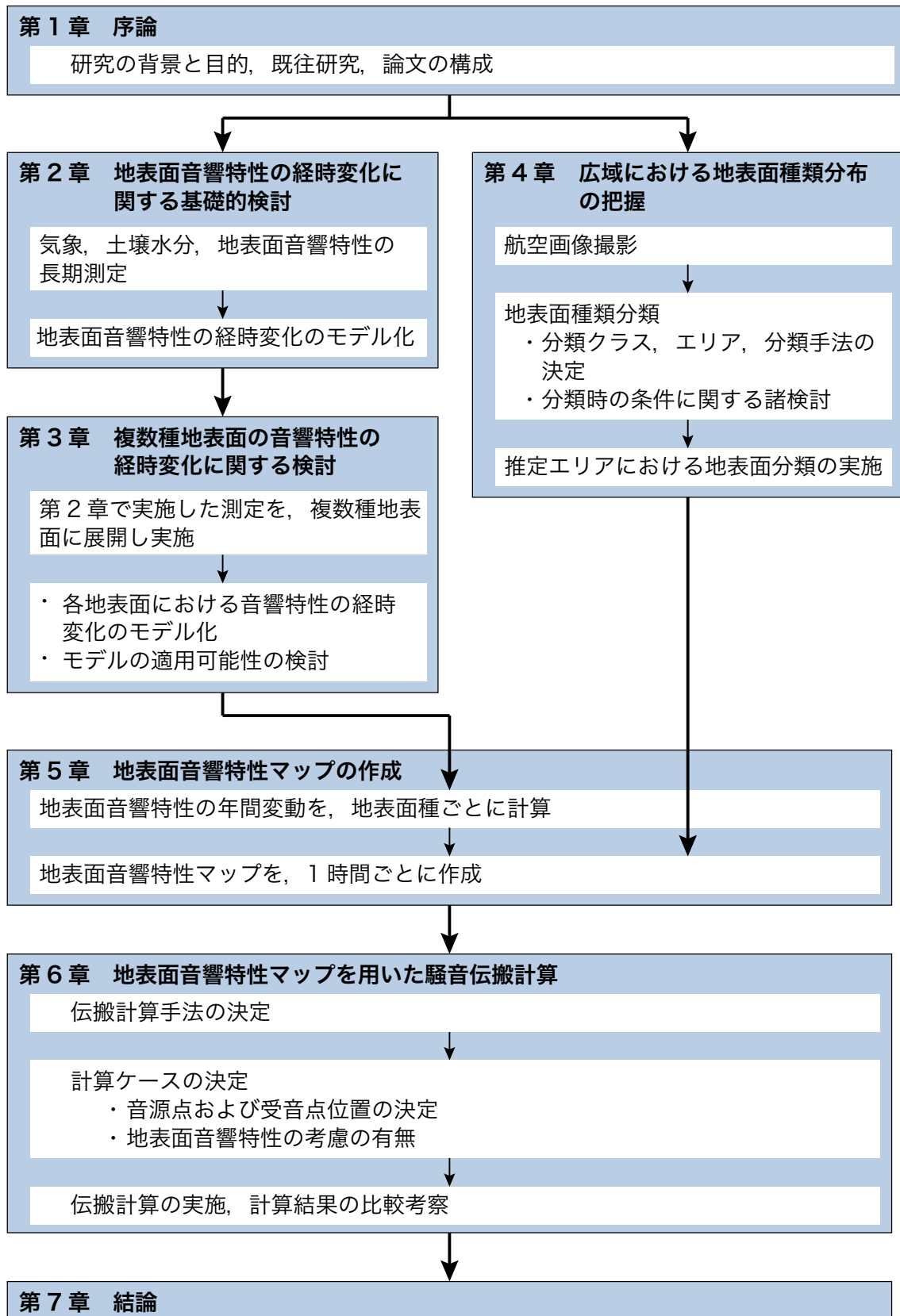


図 1.6 本論文の構成

第 2 章

地表面音響特性の経時変化のモデル化に関する基礎的検討

2.1 目的

第 1 章で述べた通り，地表面音響特性は図 2.1 に示すように，地面を構成する土の水分量により変化することが知られており，土の水分量は降水等の気象要素による変化が推測される。そこで本章では，研究の基礎的段階としてある 1 箇所の地面を対象とし，気象，土壤水分，地表面音響特性を定点で継続的に観測および測定し，これらの変動の程度を把握する。さらに測定結果を用いて，気象要素から地表面音響特性を算出するモデルを導出する。

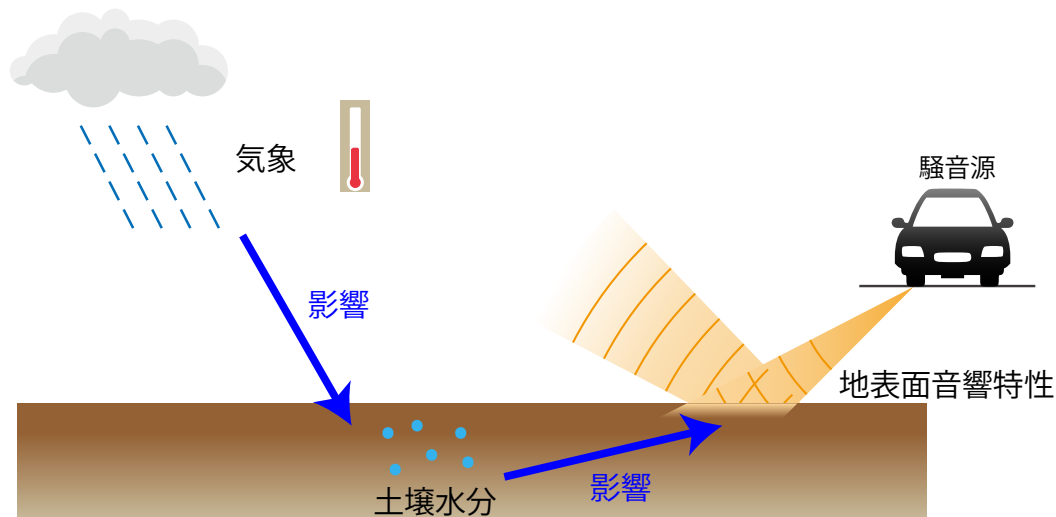


図 2.1 気象・土壌水分・地表面音響特性の関係

2.2 測定概要

2.2.1 測定対象地

測定は，図 2.2 に示す，新潟大学五十嵐キャンパス内の災害復興科学センター脇を対象地として行う。対象地は海岸から約 1 km 離れた箇所に位置し，砂質土が広がる。図 2.3，図 2.4 にそれぞれ測定場所の鳥瞰図および平面図を示す。図 2.3，図 2.4 中の X, Y, Z は，後に詳しく述べるが，気象観測や土壌水分計測，地表面吸音率測定の実施箇所である。

第2章 地表面音響特性の経時変化のモデル化に関する基礎的検討

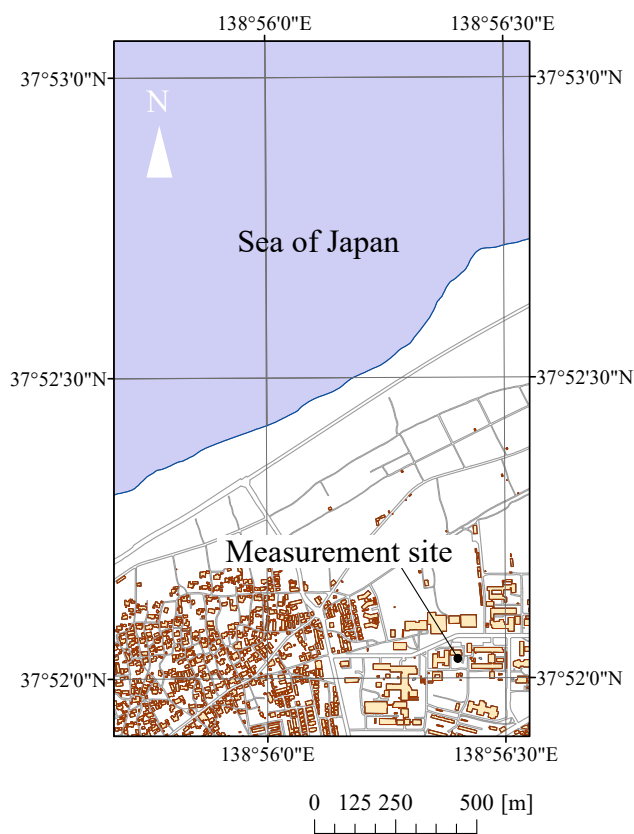


図 2.2 測定対象地 (国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス [30] からの入手データにより作成)

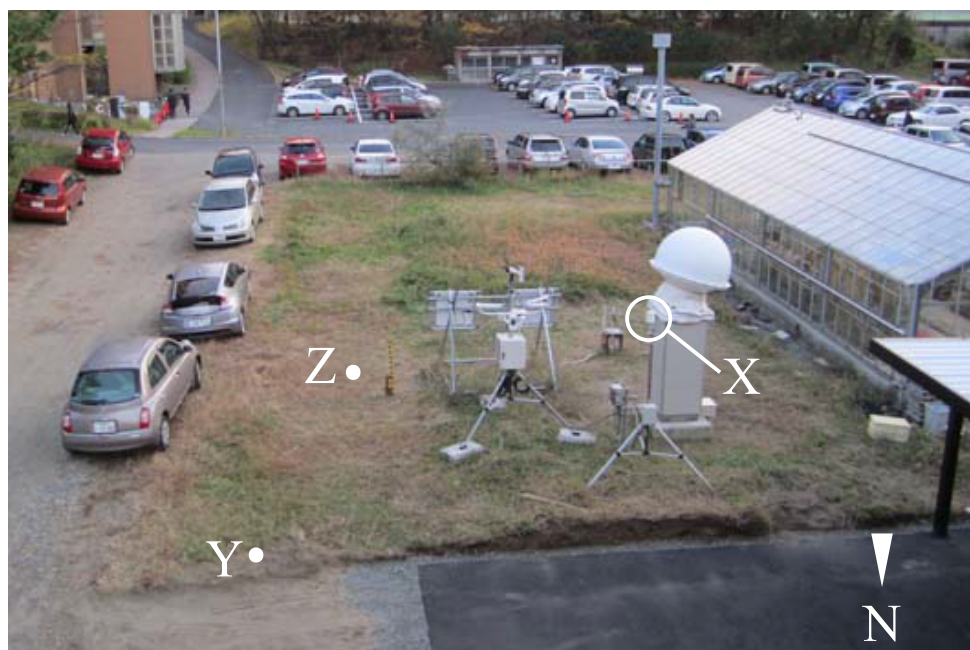


図 2.3 測定場所の鳥瞰図

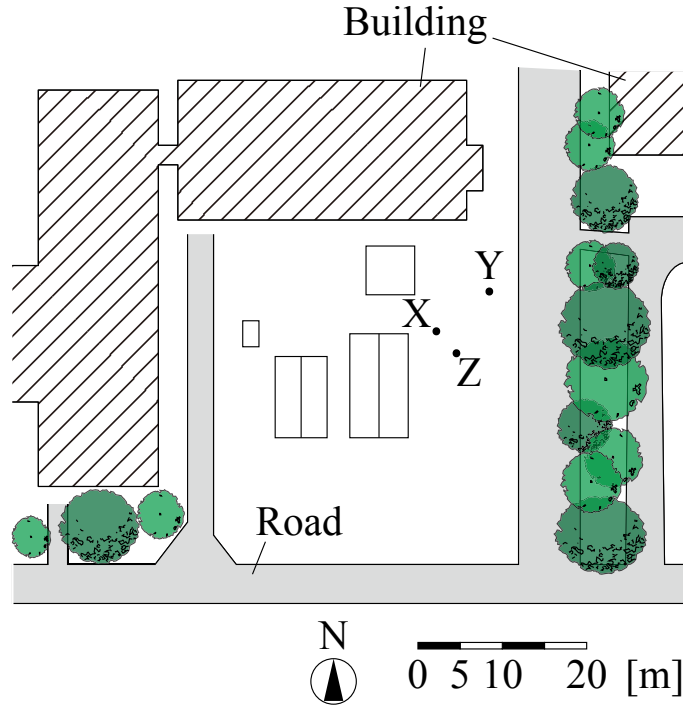


図 2.4 測定場所の平面図

2.2.2 測定対象地の土質

測定対象地の土質分析は、後述の土壌水分計測や地表面音響特性測定の結果と土質を結びつけて考える上でも、本研究の適用範囲を明確にする上でも重要である。そこで、以下ではまず、土の基本的な構成や土の状態を表す諸量について文献 [31] を参考に述べたのち、本研究における測定箇所を対象とした粒径組成分布および砂質土の深さについて述べる。

■ 土に関する基本的事項

土は図 2.5 のように、土粒子、水、空気の 3 つの要素から構成されている。 m_a, V_a はそれぞれ空気 (air) の質量と体積、 m_w, V_w はそれぞれ水 (water) の質量と体積、 m_s, V_s はそれぞれ土粒子 (solid) の質量と体積、 V_v は間隙 (void) 部分、すなわち、空気部分と水部分の合計の体積を表す。また、 m, V はそれぞれ土全体の質量と体積を表す。ここで、空気の質量は無視できると考えると、 $m_a = 0$ となり、したがって間隙部分の質量は水の質量 m_w に等しいと考えられる。

土の含水比 w (土粒子の質量に対する水の質量の割合)、間隙率 n (土全体の体積に対する間隙部分の体積の割合)、飽和度 S_r (間隙部分の体積に対する水の体積の割合)、体積含水率 θ (土全体の体積に対する水の体積の割合) をそれぞれ式で示すと、以下の通りとなる。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 [\%], \quad (2.1)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 [\%], \quad (2.2)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 [\%], \quad (2.3)$$

$$\theta = \frac{V_w}{V} \times 100 [\%] \quad (2.4)$$

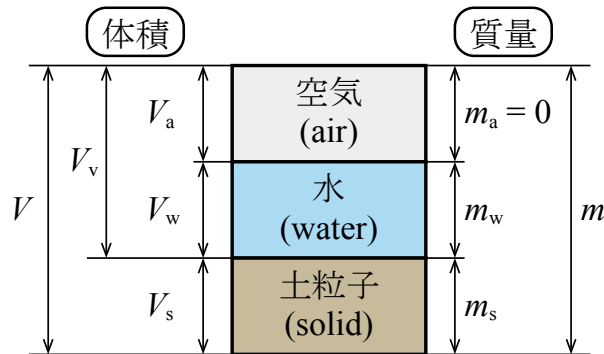


図 2.5 土の構成図

土は、様々な形、色、大きさの土粒子の集合体である。この土粒子の大きさと散らばり具合、すなわち粒度分布は、土を分類する上での重要な因子である。粒径による区分は図 2.6 に示すように、大きく分けると粒径が 75 mm 以上のものを岩石質材料、75 mm 未満のものを地盤材料という。また、それぞれの粒径の範囲によって、石、礫、砂、シルト、粘土と区分され、砂と礫の 0.075～75 mm の範囲のものを粗粒分、シルト以下の 0.075 mm 未満の大きさを持つ土を細粒分と区分けされている。

粒径 [mm]										
0.005		0.075		0.250	0.85	2	4.75	19	75	300
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石	
		砂			礫			石		
細粒分		粗粒分						石分		
地盤材料									岩石質材料	

図 2.6 粒径による区分と名称

■ 粒径組成分布の調査

土粒子の粒径組成を、JIS A 1204 の「土の粒度試験方法」[32] に従って調べる。粒径組成を調べるには、通常、ふるい分析および沈降分析を実施する。ただし、結果の詳細は後述するが、本測定で対象とした土の粒径は主に 0.075 mm 以上であるため、本研究では沈降分析は省略し、ふるい分析を以下に示す手順に従って実施する。

1. 対象箇所の湿潤土を採取し、それを乾燥させることにより、 m_s [g] の絶乾状態の試料を用意する。
2. m_s [g] の乾燥試料を、目開き 2 mm のふるいによってふるい分けする。
3. 目開き 2 mm のふるいに残留した試料について、目開き 2 mm のふるい上で水洗いし、2 mm 以下の土粒子を洗い流す。その後試料を乾燥させ、質量を測定する。
4. 目開き 2 mm のふるいを通過した試料について、目開き 75 μm のふるい上で水洗いし、75 μm 以下の土粒子を洗い流す。その後試料を乾燥させる。
5. 目開き 2 mm のふるい通過、目開き 75 μm のふるい残留分に対するふるい分析を行う。ふるいは、目開きが 850 μm , 425 μm , 250 μm , 106 μm , 75 μm のものを順番に用い、各ふるい (目開き d_i) に残留した試料の質量 $m(d_i)$ [g] を測定する。
6. 以上により測定した、各ふるいに残留した試料質量から、粒径 d_i に対する通過質量百分率 $P(d_i)$ [%] を下式により計算する。

$$P(d_i) = \left(1 - \frac{\sum m(d_i)}{m_s}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

ここで $\sum m(d_i)$ は目開き d_i 以上のすべてのふるいについて、 $m(d_i)$ の総和をとったものである。

表 2.1 に、本測定対象地の土の粒度試験結果として、各ふるいの残留試料質量 $m(d_i)$ [g], 加積残留試料質量 $\sum m(d_i)$ [g], 通過質量百分率 $P(d_i)$ [%] を示す。図 2.7 に、粒径 d [mm] に対する通過質量百分率 P_d [%] を示す。これより、試験に使用した試料は中砂を多く含む土であることがわかる。

表 2.1 測定された $m(d)$, $\sum m(d)$, $P(d)$

ふるい目開き d [mm]	残留試料質量 $m(d)$ [g]	加積残留試料質量 $\sum m(d)$ [g]	通過質量百分率 $P(d)$ [%]
2	0.5	0.5	99.5
0.85	0.4	0.9	99.1
0.425	4.5	5.4	94.6
0.250	45.9	51.3	48.7
0.106	32.0	83.3	16.7
0.075	1.3	84.6	15.4

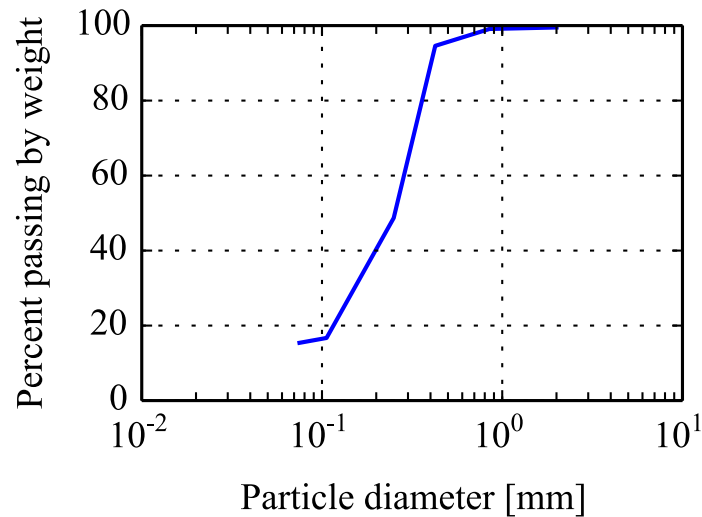


図 2.7 対象土の粒径加積曲線

■ 砂質土の深さの調査

地面は一般に、いくつかの土壌の層が水平に積み重なっている。対象地の地表面付近は砂質土であるが、この砂質土の層の深さを以下の2手法より調べる。1つ目の手法として、スコップで地面を掘り進める。砂質土とは異なる土質の土が露出したら、地表面からの深さをコンベックスで測る。このとき、地表面にテグスを張ることで、地表面の位置出しを行う。この作業を、互いに1–2 m程度離れた2箇所にて行う。2つ目の手法として、ステンレス管をゴムハンマーで地面に埋め込む。埋め込んだステンレス管を取り出すことで、土をサンプリングする。その後管内の土を取り出し、地表面からの砂質土の深さを調べる。ステンレス管は、内径29 mm、長さ200 mmのものを用いる。

結果として、スコップで地面を掘り進めると、いずれの箇所においても、砂質土の層の下に、粘土質の層が露出した。地表面から粘土質層の露出面までの深さをコンベックスで測ったところ、1箇所目が深さ19.5 cm、2箇所目が深さ21.5 cmであった。また、上記2箇所とは別の箇所の地面にステンレス管を埋め込み、ステンレス管の中身を取り出して地表面からの砂質土の深さを調べたところ、砂質土の深さは16 cmであることがわかった。以上3箇所での計測結果の平均から、本測定対象地の砂質土の深さは約19 cmである。

2.2.3 気象の観測

気象は、既設の複合気象センサ (WXT520; Vaisala) で観測した。WXT520 の設置状況を図2.8に示す。センサ部分は、地表面から高さ約2 mの位置に設置されている。WXT520では、風向、風速、降水、気圧、気温、湿度の6つの気象要素の観測が可能である。このうち降水については、降雨量、降雨継続時間、降雨強度のほか、降ひょう量、降ひょう継続時間、降ひょう強度が観測可能であるが、降雪は観測できない。WXT520で観測される気象要素とその特性のうち、主要なものを表2.2に示す。



図 2.8 WXT520 の設置状況

表 2.2 WXT520 の仕様 [33]

気象要素	特性	説明/値
気圧	測定範囲	600～1100 hPa
	精度	± 0.5 hPa (0～+30 °C にて), ± 1 hPa (-52～+60 °C にて)
	分解能	0.1 hPa
気温	測定範囲	-52～+60 °C
	精度	± 0.3 °C (センサエレメント+20 °C において)
	分解能	0.1 °C
相対湿度	測定範囲	0～100 %RH
	精度	± 3 %RH (0～90 %RH にて), ± 5 %RH (90～100 %RH にて)
	分解能	0.1 %RH
降雨	収集面積	60 cm ²
	野外の日毎累積量精度	5 %*以内, 天候による
	分解能	0.01 mm

* この現象の性質から、降雨量の読みには空間的な相違による偏差が、特に短期間の場合に生じ得る。精度の数値には風によって生じ得る誤差は含んでいない。

WXT520 により、図 2.3 中の点 X において、1 分毎に前述の気象要素を観測する。観測された気象要素のうち、相対湿度は、前日の吸音率測定開始時刻から当日の吸音率測定開始時刻までの期間で平均し、その日の相対湿度とする。降雨量は、相対湿度と同じ期間で累積し、その日の降雨量とする。気温は、土壌水分の蒸発量に関わると考えられるが、夜間は日中よりも気温が低いいため、土壌水分の蒸発量は日中よりも明らかに少ないと考えられる。ここで気象庁によると、府県天気予報においては図 2.9 のように 1 日の時間細分図が定められており、「日中」は「午前 9 時頃から 18 時頃まで」と定義されている [34]。これに従い、前日の吸音率測定開始時刻から当日の吸音率測定開始時刻までの期間のうち、18 時 00 分から翌日の 8 時 59 分までの区間を除いた日中だけの気温を平均し、その日の気温とする。

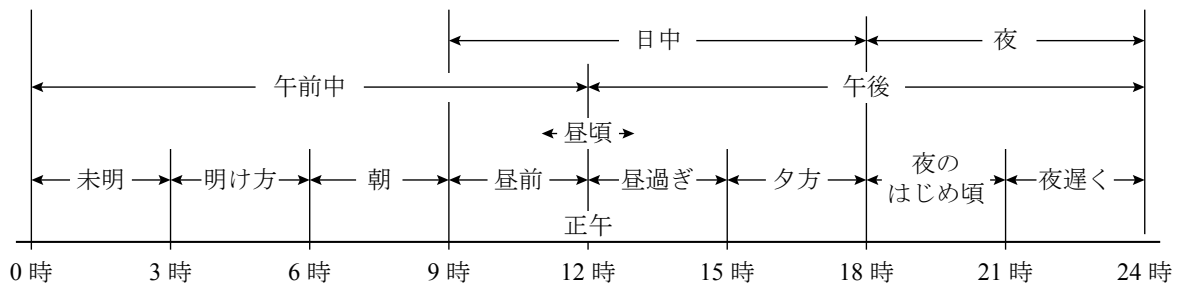


図 2.9 一日の時間細区分 (文献 [35] に掲載されていた図をもとに再構成)

2.2.4 土壌水分の計測

地面の土壌水分を、埋設型土壌水分センサ (SM150; Delta-T 社) にて計測し、SM150 による計測データを防水型土壌水分計測ロガー (MIJ-12; 日本環境計測株式会社) にて記録する。SM150 の仕様を表 2.3 に示す。SM150 は、地表面から深さ 10 cm の位置に水平に挿し、土壌水分を 5 分ごとに計測する。埋設した SM150 による計測データを記録するロガーは、図 2.10 のように、地面に打ち込んだ木の杭に固定することで地上に設置する。

土壌水分は、点 Y にて 2014 年 10 月 3 日から計測を開始した。ただし、点 Y にて工事が行われたため、2014 年 11 月 1 日からは計測点を点 Z へと変更している。点 Y, Z の地表面性状を図 2.11 に示す。音響特性測定中 (20 分程度) に観測された土壌水分の平均を、その日の代表結果とする。

表 2.3 SM150 の仕様 [36]

精度	$\pm 3.0\%$ (0~70 %, 0~60 °C にて)
測定範囲	0~100 % (ただし, 70 %以上では測定精度が低下)
出力電圧	DC 0~1 V (0~0.6 m ³ /m ³)
供給電圧	DC 5~14 V (18 mA for 1s)
使用温度範囲	-20~+60 °C
設置環境	防水設計 IP68 相当

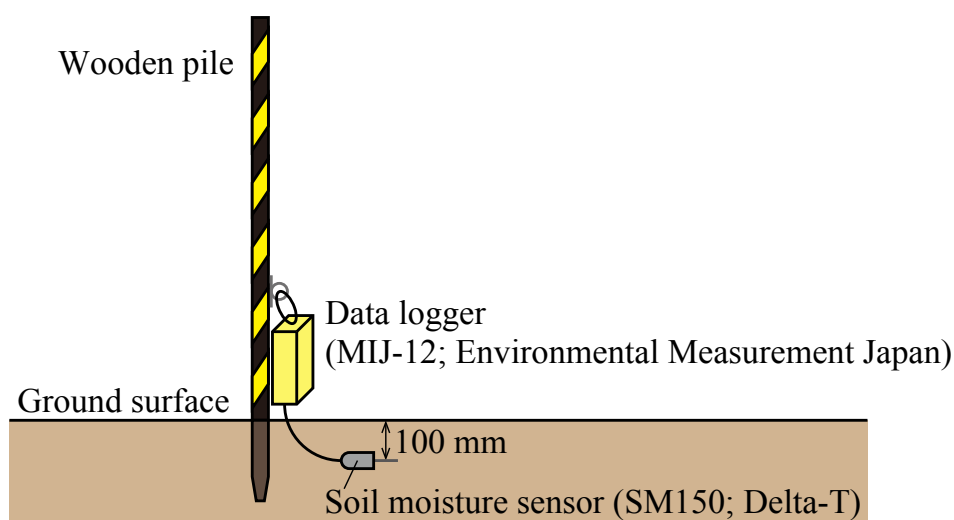


図 2.10 水分計設置状況の立面模式図

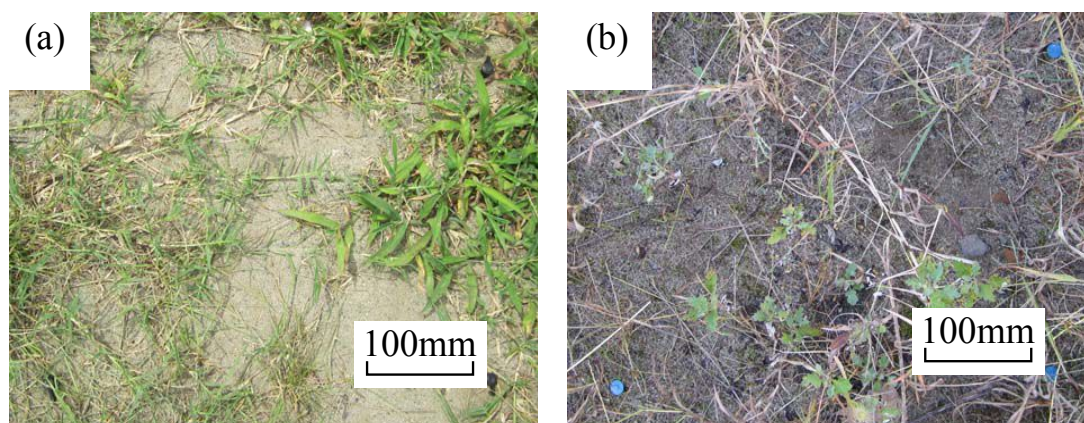


図 2.11 (a) 点 Y, (b) 点 Z の地表面性状

SM150 は, 土壌中の誘電率を計測し, それを電圧として出力する。SM150 のマニュアル [36] によると, 一般的なミネラル土壌の場合, 出力電圧 V [V] のときの体積含水率 θ は下式により算出される。

$$\theta = (-0.0714 + 1.7190V - 3.7213V^2 + 5.8402V^3 - 4.3512V^4 + 1.2752V^5) \times 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

前述の通り、体積含水率は土全体の体積に対する水の体積の割合を表す量である。ここで、地面に入射する音のエネルギーは土中の空隙にて消費されることを考慮すると、体積含水率よりも、空隙部分の体積に対する水の体積の割合を表す飽和度のほうが、地表面音響特性と土壌水分の関係を良く表すと考えられる。そこで、本研究では、土壌水分を表す物理量として飽和度を用いる。

飽和度 S_r は、体積含水率 θ および空隙率 n を用い、式 (2.2), (2.3), (2.4) から以下の式で求まる。

$$S_r = \frac{\theta}{n} \times 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

すなわち、空隙率 n が分かれば、体積含水率 θ と飽和度 S_r の相互の変換が可能である。 n は、以下の手順により求める。

1. 対象地面の土をそのままの状態ですAMPLINGし、体積 V を算出する。
2. 土をサAMPLING容器から取り出し、絶乾状態とする。
3. 体積 V_s が未知である絶乾状態の土と、体積 V_{water} が既知である水をメスシリンダーに入れ、全体の体積 V_{all} を読み取る。これより、土粒子の体積は $V_s = V_{\text{all}} - V_{\text{water}}$ で求まる。
4. 1. から V が、3. から V_s が求まる。式 (2.2) において $V_v = V - V_s$ とし、 n を以下により求める。

$$n = \frac{V - V_s}{V} \times 100 \quad [\%] \quad (2.8)$$

手順 1. におけるサAMPLINGは、内径 29 mm、長さ 140 mm のステンレス管を、ゴムハンマーを用いて地面に直接打ち込み、打ち込んだ後で園芸用こてを用いてステンレス管を掘り出すことにより実施した。サAMPLINGした試料は、ステンレス管の上部から 7 mm ほど下までに収まっていた。管の内径と長さから、採取した土の全体積 V は以下より求まる。

$$V = \left(\frac{29}{2}\right)^2 \times \pi \times (140 - 7) = 87849 \quad [\text{mm}^3] \cong 88 \quad [\text{ml}] \quad (2.9)$$

また、先に示した、空隙率を求める手順の 2. と 3. より、土粒子の体積 V_s は 55 ml とわかった。以上より土の全体積 V と土粒子の体積 V_s がわかったので、式 (2.8) に代入し、以下の通り空隙率 n を求める。

$$n = \frac{V - V_s}{V} \times 100 = \frac{88 - 55}{88} \times 100 = 37.5 \quad [\%] \quad (2.10)$$

2.2.5 地表面音響特性の測定

地表面音響特性は、2014年7月25日から点Yで測定した。ただし、点Yにて工事が行われたため、飽和度と同じく、2014年11月1日からは測定点を点Zへと変更している。音響特性は、1日1回、気象状況等にもよるが、おおよそ15時頃に測定した。降雨時には音響特性測定は実施していない。

地表面音響特性は、表面音響特性現場測定法の一つであるEA法により測定した。EA法は、複数個の補助音源をランダムに動かし、複数回の試行をアンサンブル平均して伝達関数を算出し、表面音響特性を測定する手法である。以下、EA法の理論について述べる。

まず、単一音源による、入射角 θ での入射時を考える。音源は十分に遠方にあると考え、平面波入射を仮定する。図2.12に、単一の平面波音源に対する測定模式図を示す。時間因子を $e^{j\omega t}$ (j : 虚数単位, ω : 角周波数, t : 時間) と仮定すると、2本のマイクロホン M_i ($i=1,2$) における音圧 p_i は、以下で表される。

$$p_i = p_1 e^{jkx_i \cos \theta} + p_R e^{-jkx_i \cos \theta} \quad (2.11)$$

ただし p_1 および p_R はそれぞれ、マイクロホン直下の地表面上の点における入射波および反射波の複素振幅であり、 k は波数、 x_i は地表面-マイクロホン M_i 間の距離を表す。式(2.11)より、入射角 θ における音圧反射係数 r_θ および地表面インピーダンス比 z_θ は、以下となる。

$$\begin{aligned} r_\theta &= \frac{p_R}{p_1} \\ &= \frac{p_1 - p_2 e^{jk(x_1-x_2)\cos\theta}}{p_2 e^{-jk(x_1-x_2)\cos\theta} - p_1} e^{2jkx_2\cos\theta}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} z_\theta &= \frac{1}{\cos\theta} \frac{1+r_\theta}{1-r_\theta} \\ &= \frac{1}{\cos\theta} \frac{H_{12}(1 - e^{2jkx_1\cos\theta}) - e^{jk(x_1-x_2)\cos\theta}(1 - e^{2jkx_2\cos\theta})}{H_{12}(1 + e^{2jkx_1\cos\theta}) - e^{jk(x_1-x_2)\cos\theta}(1 + e^{2jkx_2\cos\theta})} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここで $H_{12} = p_2 / p_1$ は2マイクロホン間の伝達関数である。

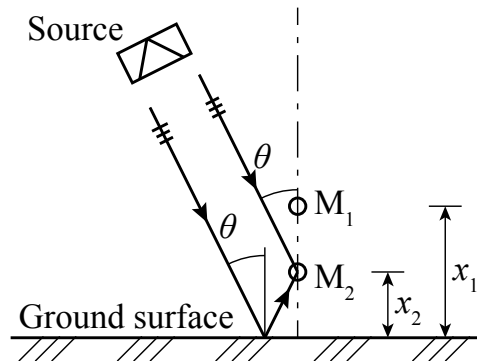


図 2.12 入射角 θ での単一平面波音源を用いた測定模式図

ついで、実際の EA 法による測定環境のように、複数音源によりあらゆる角度からマイクロホンに音が入射する場合を考える。この場合、測定時のある瞬間の音波の入射角度を特定するのは困難である。そこで簡単のため、実際の入射条件に関わらず、常に垂直入射 (すなわち、 $\cos \theta = 1$) を仮定する。このとき、式 (2.13) の z_θ は、 z_{EA} として以下のように書き換えられる。

$$z_{EA} = \frac{H_{12}(1 - e^{2jkx_1}) - e^{jk(x_1-x_2)}(1 - e^{2jkx_2})}{H_{12}(1 + e^{2jkx_1}) - e^{jk(x_1-x_2)}(1 + e^{2jkx_2})} \quad (2.14)$$

EA 法による吸音率 α_{EA} は、 z_{EA} から、以下により計算される。

$$\alpha_{EA} = 1 - \left| \frac{z_{EA} - 1}{z_{EA} + 1} \right|^2 \quad (2.15)$$

図 2.13 に、実際の EA 法による測定のセッティングを示す。2 本の 1/2 インチマイクロホン (UC-59; RION) を束ね、地表面-下側マイクロホン中心間距離が 15 mm となるよう、マイクロホンスタンドにより固定する。音源として 4-6 個のポータブルスピーカ (Microwireless; JBL) を用い、それぞれにピンクノイズが収録された音楽再生プレイヤー (iPod shuffle; Apple) を接続する。ポータブルスピーカを手を持ち、マイクロホンに対してあらゆる方向から音が入射するよう、2 マイクロホンの約 1.5 m 上空でランダムに動かす。2 マイクロホン間の複素音圧比を、FFT 分析器 (SA-78; RION) にて求める。上限周波数は 10 kHz、周波数間隔は 6.25 Hz、平均回数は 150 回とする。この測定を、30 cm 四方の 4 点の測定点で実施する。4 測定点での平均吸音率 $\alpha_{EA,ave}$ は、4 測定点でのアドミッタンスの平均 $\beta_{EA,ave}$ を用い、下式から算出する。

$$\alpha_{EA,ave} = 1 - \left| \frac{\frac{1}{\beta_{EA,ave}} - 1}{\frac{1}{\beta_{EA,ave}} + 1} \right|^2, \quad (2.16)$$

$$\beta_{EA,ave} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{z_{EA,j}} \quad (2.17)$$

ここで n は測定点の数 ($n=4$) であり、 $z_{EA,j}$ は測定点 j ($j=1, 2, 3, 4$) での EA 法による表面インピーダンス比である。測定対象が低吸音性の場合、各測定点におけるインピーダンスの値は特に低周波域で大きくなり、これらの平均から吸音率を計算すると、計算上の誤差が大きくなる可能性がある。これを回避するために、インピーダンスの逆数であるアドミッタンスを算出し、アドミッタンスの平均から吸音率を算出している。

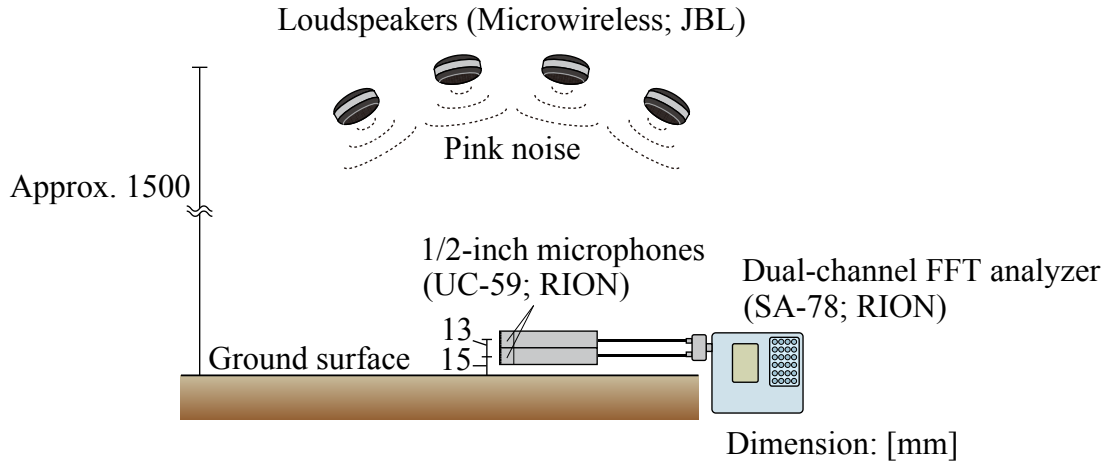


図 2.13 EA 法による測定模式図

2.3 垂直入射吸音率の算出

EA 法により測定される物理量は、乱入射時のノーマル表面インピーダンス比 z_{EA} および z_{EA} に対応する吸音率 α_{EA} である。これらは、より一般的な物理量として知られる、垂直入射時の表面インピーダンス比 z および吸音率 α とは異なる物理量である。そこで、 z_{EA} および α_{EA} を、インピーダンスモデル、EA 法の数理モデル [37]、反復法を用いてそれぞれ z および α へと変換する。このとき用いるインピーダンスモデルとしては多数考えられるが、本章では Wilson が提案したインピーダンスモデル [38] を用いる。

Wilson によると、特性インピーダンス比 z_c および伝搬定数 γ は以下の式で表される。

$$z_c = \frac{q}{\Omega} \left\{ \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{1 + j\omega\tau_{ent}}} \right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + j\omega\tau_{vor}}} \right) \right\}^{-1/2}, \quad (2.18)$$

$$\gamma = kq \left\{ \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{1 + j\omega\tau_{ent}}} \right) / \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + j\omega\tau_{vor}}} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.19)$$

ここで κ は比熱比である。式 (2.18), (2.19) は、 $q, \Omega, \tau_{vor}, \tau_{ent}$ の 4 つのパラメータをもつ。Wilson は、 $q/\Omega, \tau_{vor}, \tau_{ent}$ は以下の通り近似できると述べている。

$$\frac{q}{\Omega} \cong 1, \quad (2.20)$$

$$\tau_{vor} \cong 2.1\rho/\sigma_W, \quad (2.21)$$

$$\tau_{ent} \cong 3.1\rho/\sigma_W \quad (2.22)$$

ここで ρ, σ_W はそれぞれ空気密度、流れ抵抗を表す。式 (2.20)–(2.22) を式 (2.18), (2.19) へ代入すると、以下が得られる。

$$z_c = \left\{ \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{1 + j3.1\rho\omega/\sigma_W}} \right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + j2.1\rho\omega/\sigma_W}} \right) \right\}^{-1/2}, \quad (2.23)$$

$$\gamma = k \left\{ \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{1 + j3.1\rho\omega/\sigma_W}} \right) / \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + j2.1\rho\omega/\sigma_W}} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.24)$$

上式より，Wilson によるモデルは近似を用いると， σ_w のみの 1 パラメータで記述される。以下では，Wilson による 1 パラメータモデルを Wilson モデルと呼ぶ。

z_{EA} および α_{EA} の変換手順は次の通りである。まず，Wilson モデル中の流れ抵抗 σ_w の初期値 σ_0 を設定する。式 (2.23), (2.24) の σ_w に σ_0 を代入し， z_c および γ を計算する。

地面が積雪で覆われていない場合は，地面は十分な厚さがあると考え，表面インピーダンス比 z_s を以下により算出する。

$$z_s = z_c \quad (2.25)$$

地面が厚さ D [m] の積雪で覆われている場合は， z_s は z_c および伝搬定数 γ を用いて以下で算出される [10]。

$$z_s = z_c \coth \gamma D \quad (2.26)$$

その後，次に述べる EA 法の数理モデルを用い，2 マイクロホン間の伝達関数の計算値 $H_{12,calc}$ を求める。EA 法の測定方法に倣い， n_m 個の補助音源をランダムに動かし， N 回の試行をアンサンブル平均して伝達関数を算出すると考える。ここで n_m および N は，実測時の条件に倣い， $n_m=4, N=150$ とする。また，ここでの「試行」とは，高速フーリエ変換において信号をサンプリングする回数を表す。入射音圧振幅は一定とし，測定系のノイズは無いと仮定する。

図 2.14 に， l 回目 ($l=1, 2, \dots, N$) の試行において，音源 m ($m=1, 2, \dots, n_m$) からの平面波が入射角 $\theta_{l,m}$ で入射するときの模式図を示す。局所作用性試料に対する音圧反射係数 $r_{l,m}$ は， $\theta_{l,m}$ を用いて下式で表される [10]。

$$r_{l,m} = \frac{z_s \cos \theta_{l,m} - 1}{z_s \cos \theta_{l,m} + 1} \quad (2.27)$$

試行 l 回目におけるマイクロホン M_i ($i=1, 2$) での音圧 $p_{i,l}$ は， n_m 個の音源からの音の重ね合わせにより表される。このとき $p_l = e^{j\psi_{l,m}}$ ($\psi_{l,m}$ は地表面における入射波の位相) とすると， $p_{i,l}$ は次式となる。

$$p_{i,l} = \sum_{m=1}^{n_m} e^{j\psi_{l,m}} (e^{jkx_i \cos \theta_{l,m}} + r_{l,m} e^{-jkx_i \cos \theta_{l,m}}) \quad (2.28)$$

式 (2.28) 中の $\psi_{l,m}$ は，各試行及び各音源につき $-180^\circ \sim 180^\circ$ の一様乱数で与える。 $\theta_{l,m}$ は，確率密度関数 $f(\theta) = \sin \theta$ に従い，ランダムに生成される。ここで $f(\theta) = \sin \theta$ は，単位半径半球面上を音源が一様に移動する場合，すなわち，単位立体角当りの入射確率が一定である場合を表す。

$p_{i,l}$ を用い，2 マイクロホン間の伝達関数の計算値 $H_{12,calc}$ は以下より得られる。

$$H_{12,calc} = \frac{\langle p_1^* \cdot p_2 \rangle}{\langle p_1^* \cdot p_1 \rangle} \quad (2.29)$$

ここで $*$ は複素共役， $\langle p_1^* \cdot p_i \rangle$ は次式のアンサンブル平均である。

$$\langle p_1^* \cdot p_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N p_{1,l}^* \cdot p_{i,l} \quad (2.30)$$

式 (2.29) により得られる $H_{12,\text{calc}}$ を用い、EA 法による表面インピーダンス比 $z_{\text{EA,calc}}$ およびそれに対応する吸音率 $\alpha_{\text{EA,calc}}$ を、それぞれ式 (2.14), (2.15) を用いて計算する。

ついで、すべての周波数に対して、 α_{EA} の計算値と実測値の間の二乗平均平方根 (RMSE: Root Mean Square Error) を、下式により計算する。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_f (\alpha_{\text{EA,calc},f} - \alpha_{\text{EA,meas},f})^2} \quad (2.31)$$

ここで $\alpha_{\text{EA,calc},f}$ および $\alpha_{\text{EA,meas},f}$ はそれぞれ、周波数 f における α_{EA} の計算値と実測値を表し、 N_f は周波数 400 Hz–4 kHz における離散周波数の総数、 Σ 記号は同離散周波数における総和である。

その後、 σ_0 よりも RMSE が小さくなる σ_1 を、反復的解法の一つである L-BFGS-B 法 [39, 40] により $\sigma_1 \geq 10^{-10}$ の範囲で求める。 σ_1 を用いて式 (2.23)–(2.31) の計算を行い、 α_{EA} および RMSE を計算する。同様の過程を σ_1 以降についても繰り返す。以上の計算を SciPy [41] の `optimize.minimize()` 関数により繰り返し実行し、収束判定値以下となったときの σ_i (i は計算繰り返し回数) を最終的な σ_w の推定値とする。

σ_w の推定値を式 (2.23), (2.24) に代入し、式 (2.23)–(2.26) を計算して z_s を得る。 z_s から、吸音率 α を以下より得る。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - 1}{z_s + 1} \right|^2 \quad (2.32)$$

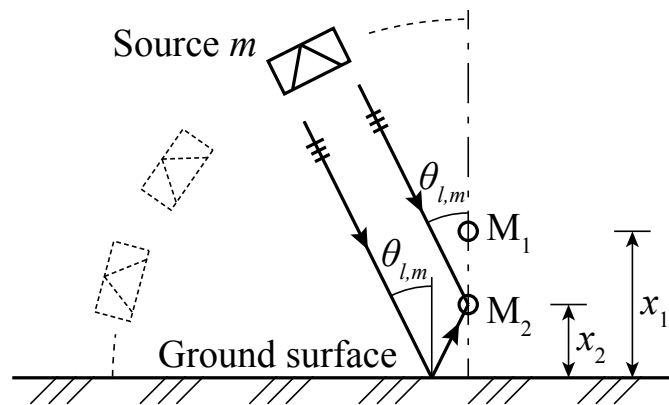


図 2.14 試行 l 回目における入射時の模式図

図 2.15 (a)–(c) に、EA 法により測定された α_{EA} 、推定された σ_w を用いて EA 法の数理モデルから計算された α_{EA} 、 σ_w を用いて式 (2.32) により計算された α の例を、 σ_w の値とともに示す。図 2.15 (a) は比較的吸音率の高い日、図 2.15 (b) は比較的吸音率の低い日の代表例として

それぞれ、2014年8月1日、同11月16日の結果を示している。図2.15(c)は積雪のある日の代表例として2014年12月22日の結果を示しており、この日の積雪深は19 cmである。図2.15(a)–(c)のすべてにおいて、 α_{EA} の計算値と実測値はよく一致していることから、EA法の数理モデルは妥当と考えられる。また、 α と α_{EA} の間には、中高音域で乖離が見られる。これは α_{EA} は、吸音率を表す物理量として一般的に用いられる α と異なる特性を持っていることを示す。それゆえに、次節以降では、 α_{EA} ではなく α を用いる。

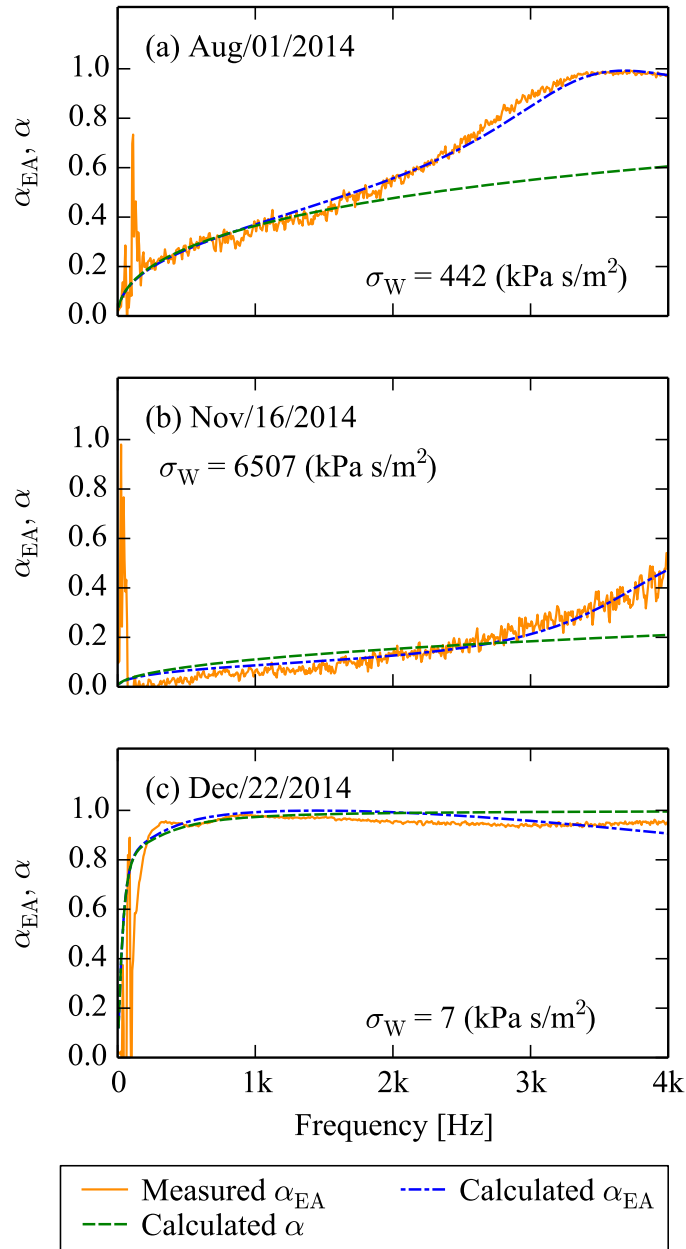


図2.15 (a)2014年8月1日、(b)2014年11月16日、(c)2014年12月22日における、 α_{EA} の実測値および計算値、 α の計算値、 σ_W の推定値

2.4 長期測定結果

2.4.1 気象，土壤水分，地表面音響特性の日変化

図 2.16 に、2014 年 7 月 25 日から 2015 年 1 月 24 日の間に観測および測定された気象要素、土壤水分および地表面吸音率の日毎の変化を示す。WXT520 による観測値には欠測が含まれるが、数時間未満の欠測であればその部分は無視して 1 日分で平均および累積を行い、数日にわたって欠測が続く場合はその日の観測データは無しとしている。また、SM150 による計測値について、11 月 6 日は欠測であったが、この日の観測データは無しとしている。

図 2.16 (a) に日平均気温 T を示す。日平均気温は測定開始時期から 12 月上旬にかけて、すなわち夏から冬にかけて緩やかに低下している。図 2.16 (b) に日平均相対湿度 ϕ_R を示す。日平均相対湿度は測定期間を通して上下変動するが、測定期間を通してある一定の傾向は見られない。図 2.16 (c) に、日積算降雨量 R および各日の吸音率測定中に計測された土の飽和度 S_r を示す。ただし降雨量に降雪量は含まれない。図より、降雨があると飽和度は急激に上昇し、その後数日間で元の値程度まで下降する。さらに飽和度は、飽和度の計測開始時期から 12 月上旬にかけて緩やかに増加する傾向が見られ、気温とは逆の傾向を示す。これは、気温が低下すると土中の水分の蒸発が少なくなるためと考えられる。図 2.16 (d) に、雨などによる欠測を除いた中心周波数 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz における 1/3 オクターブバンド平均吸音率 α を示す。すべての周波数について、 α には日変動が見られる。また、地表面吸音率は降雨があると急激に低下し、これは飽和度と逆の傾向である。吸音率は、測定開始時期から 11 月の終わりにかけて緩やかに下降し、おおよそ飽和度と逆の傾向である。12 月および 1 月に、吸音率が急激に 1 近くまで上昇しているのは、積雪によるものである。測定地点が点 Y から点 Z に変更となった影響は、飽和度および吸音率の結果からは特に見られない。

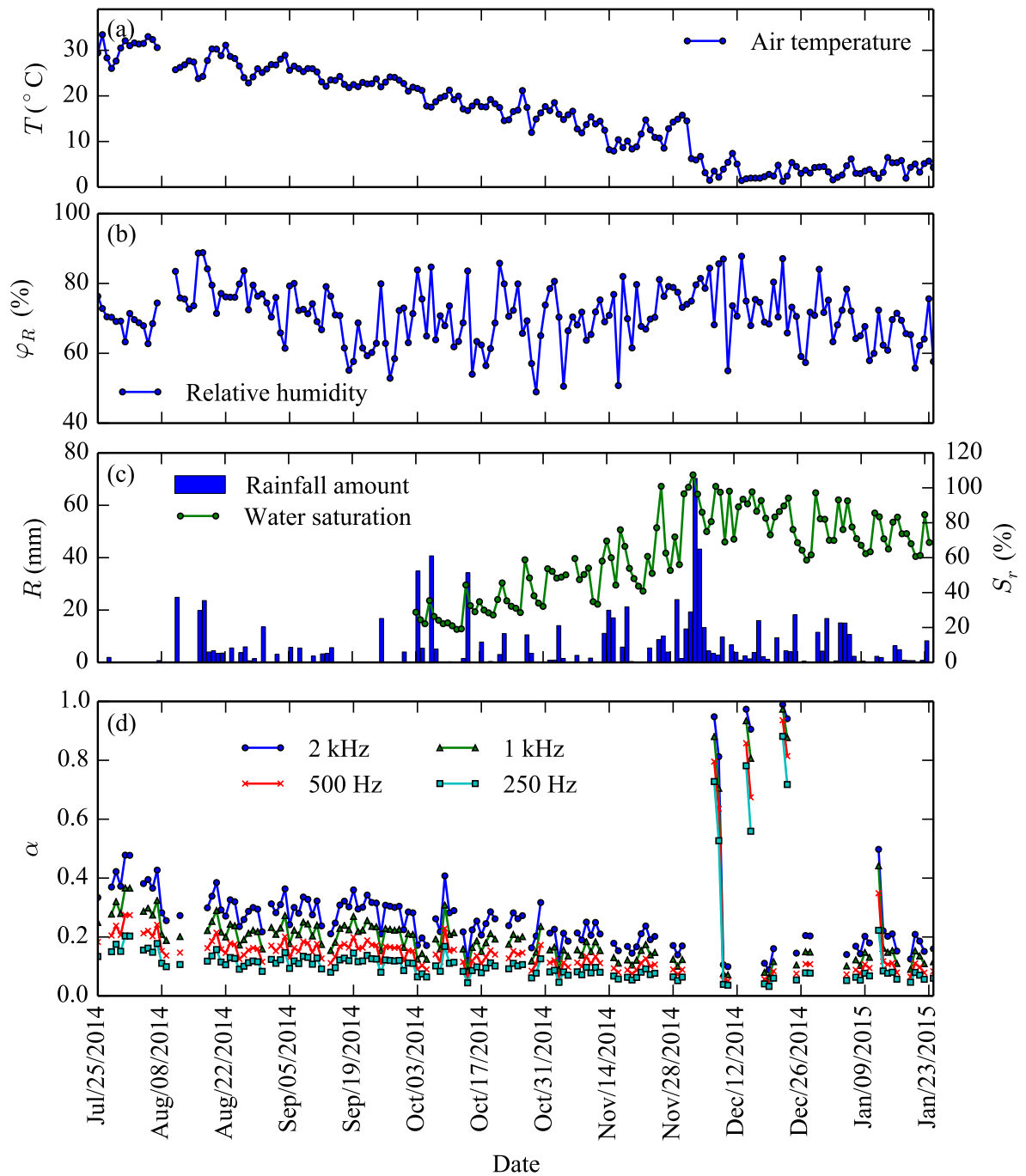


図 2.16 (a) 気温, (b) 相対湿度, (c) 降雨量および飽和度, (d) 中心周波数 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz における地表面吸音率の日毎の変化

2.4.2 モデル化に用いる気象要素の選定

モデル化に用いる気象要素を選定するために, 図 2.17 (a)–(c) にそれぞれ日平均気温 T , 日平均相対湿度 φ_R , 日積算降水量 R と, 飽和度 S_r の散布図, 回帰直線, 回帰式 (x : 説明変数,

y : 目的変数), 相関係数 r を示す。図 2.17 (a) より, 気温と飽和度の間には負の相関が見られる。これは, 気温が高いと, 土中の水分が蒸発しやすく, 地面が乾きやすいためと考えられる。一方, 図 2.17 (b) に示したように, 相対湿度と飽和度の間にはほとんど相関は見られない。これは, 相対湿度は, 土壌水分計が埋めてある地中 10 cm の深さの土には直接的には影響を与えないためと考えられる。また, 図 2.17 (c) より, 降雨量に関しては, 降雨量 0 mm のときの飽和度のばらつきが大きいため, 相関係数は小さい。これより, 気温と飽和度は相関関係をもっているが, 相対湿度と降雨量はそうでないことがわかる。

しかしながら, 相対湿度および降雨量は, 飽和度との間に, 単純な相関関係とは異なる因果関係をもっている可能性がある。そこで, 相対湿度と飽和度, および降雨量と飽和度の相互相関係数を計算し, これらの関係を定量的に把握する。連続時間信号である二つの不規則変動 $x(t)$ と $y(t)$ との間の相互相関関数 $C_{xy}(\tau)$ および相互相関係数 $R_{xy}(\tau)$ は, 以下で定義される [42]。

$$\begin{aligned} C_{xy}(\tau) &= \overline{x(t) y(t + \tau)} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) y(t + \tau) dt \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{\overline{x(t) y(t + \tau)}}{\sqrt{\overline{x^2(t)}} \sqrt{\overline{y^2(t)}}} \\ &= \frac{C_{xy}(\tau)}{\sqrt{C_{xx}(0) C_{yy}(0)}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

ここで τ は遅れ時間である。一方, 二つの離散時間信号 x_n と y_n (ともに $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ であり, N はサンプル数) の相互相関関数 $C_{xy}(m)$ は, 次式で定義される [43]。

$$C_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} x(n) \cdot y(n + m) \quad (2.35)$$

ここで m はずらしの数であり, $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ である。 $C_{xy}(m)$ を以下によって -1 から 1 までで基準化し, 相互相関係数 $R_{xy}(m)$ を得る。

$$R_{xy}(m) = \frac{C_{xy}(m)}{\sqrt{C_{xx}(0) C_{yy}(0)}} \quad (2.36)$$

10 月 4 日から, 積雪前である 12 月 4 日までの 1 日ごとの相対湿度 ϕ_R および降雨量 R ならびに飽和度 S_r を対象とし, 相互相関係数を計算する。相互相関係数の計算にあたり, それぞれの時間波形から平均値を引き, さらに飽和度に関しては, 前述の通り計測開始時期から 12 月上旬にかけて緩やかな上昇が見られたが, このトレンドを除去する。また, 欠測である 11 月 6 日の飽和度は直線補間して求める。その後, 式 (2.36) によって相互相関係数を計算し, 結果を図 2.18, 図 2.19 に示す。図 2.18 より, 相互相関係数のピークは明瞭でなく, よって相対湿度と飽和度に因果はない。一方図 2.19 より, 相関係数は遅れ時間 0 日で最大値をとり, ピークが明瞭であることから, 降水量と飽和度は時間遅れがなく連動している。この関係は

次節にて、単なる回帰式ではなく、単位降水量による飽和度の応答としてモデル化する。

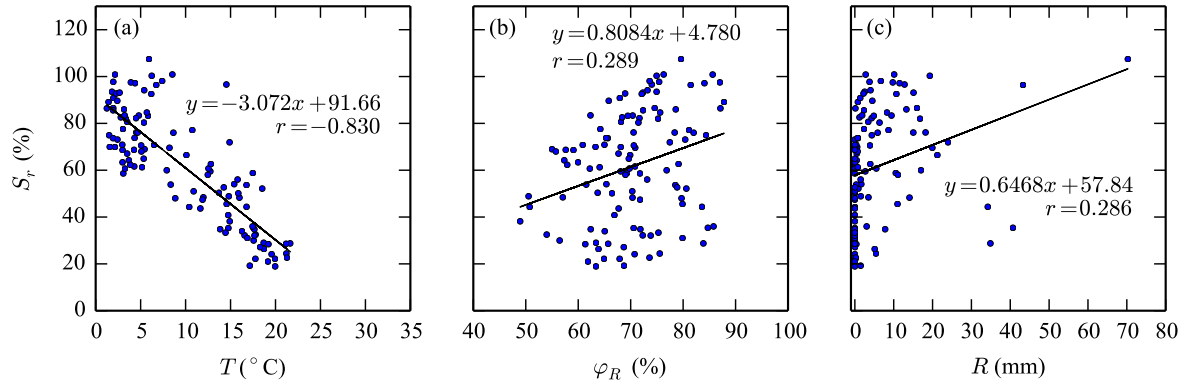


図 2.17 飽和度と(a) 気温, (b) 相対湿度, (c) 降雨量の散布図

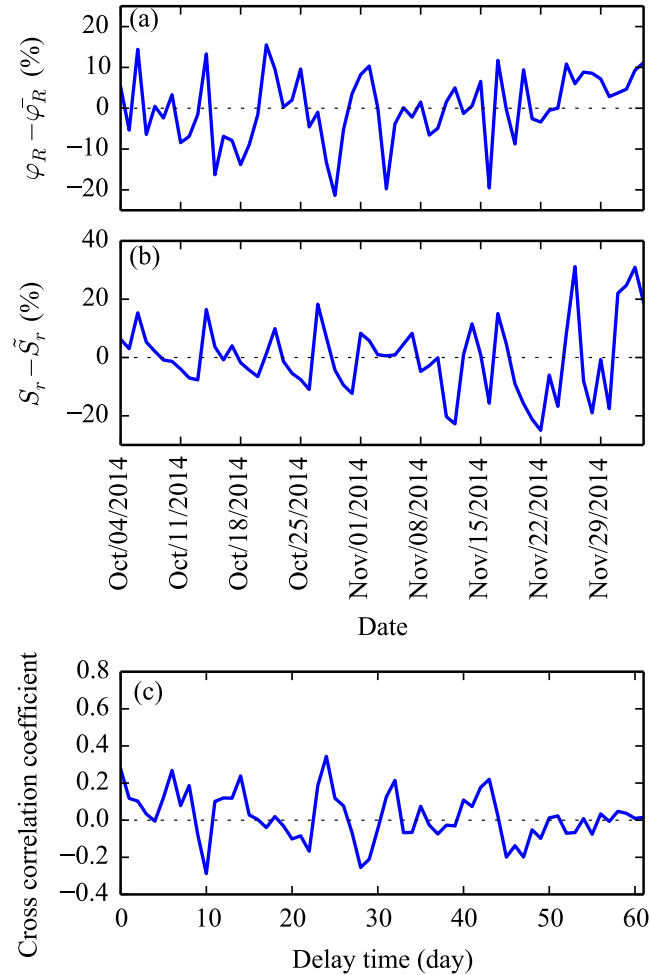


図 2.18 (a) 1 日ごとの相対湿度から平均値を引いた値, (b) 飽和度から直線回帰成分を引いた値, (c) 相対湿度と飽和度の相互相関係数。ただし $\overline{\varphi_R}$ は φ_R の平均値を, \tilde{S}_r は S_r の直線回帰成分を表す。

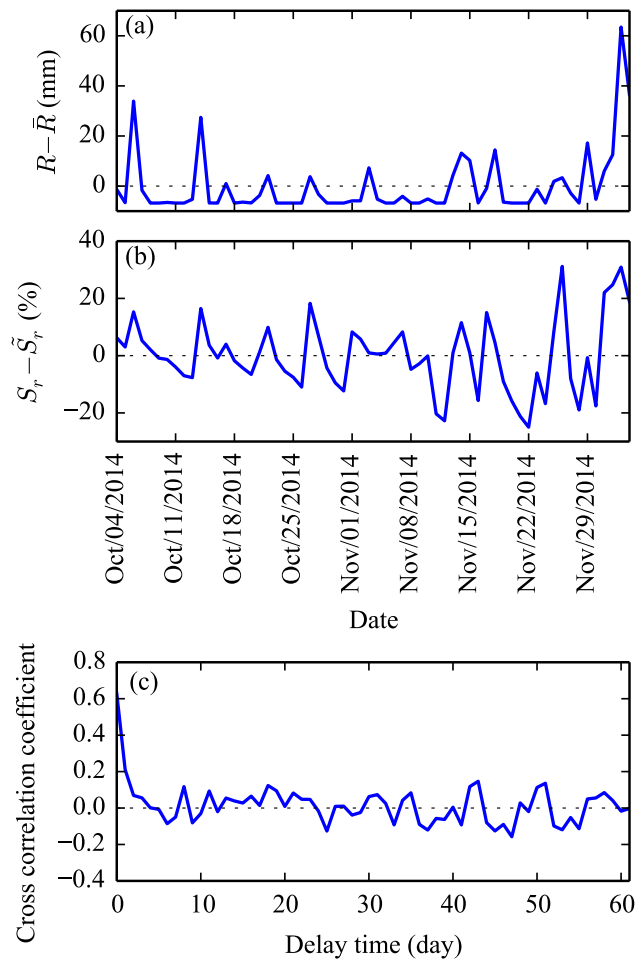


図2.19 (a) 1日ごとの降雨量から平均値を引いた値, (b) 飽和度から直線回帰成分を引いた値, (c) 降雨量と飽和度の相互相関係数。ただし \bar{R} は R の平均値を, \tilde{S}_r は S_r の直線回帰成分を表す。

2.4.3 飽和度と地表面吸音率の関係

飽和度と地表面吸音率の関係について, 図 2.20 に, 飽和度と, 点 Y および点 Z における中心周波数 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz の地表面吸音率の, 散布図, 回帰直線, 回帰式 (x : 説明変数, y : 目的変数), 相関係数 r を示す。ただし積雪時の飽和度および吸音率は除いている。すべての中心周波数において, 飽和度と地表面吸音率の間には負の相関が見られる。周波数が上昇するにつれ, 回帰直線の傾きが急になり, 相関係数の値が大きくなる。また, 点 Y および点 Z を比較すると, 測定時期の違いにより, 両点における飽和度の値の範囲が異なっているが, 図 2.20 (a)–(d) すべてにおいて, 点 Y におけるプロット群と点 Z におけるプロット群は大きく乖離することなく部分的に重なっている。図 2.21 に, 点 Y および点 Z における, 類似した飽和度における周波数に対する吸音率 α の例を 2 つ示す。図 2.21 (a), (b) いずれにおい

でも、点Yおよび点Zでの α はほぼ同じ値を示しており、これは両点における音響特性の違いはほとんどないことを示す。したがって、測定点の移動は、音響特性結果に重大な影響を及ぼさないといえる。そのため、両点で得られたデータは区別せずに連続したデータとして扱う。

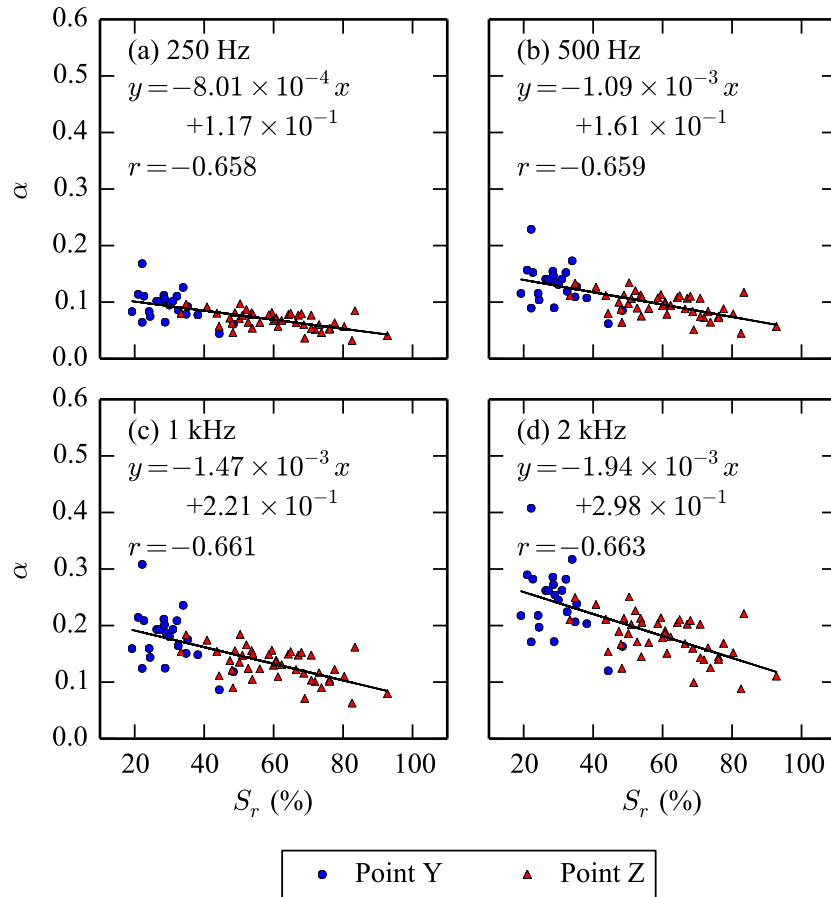


図 2.20 飽和度 S_r と、中心周波数 (a) 250 Hz, (b) 500 Hz, (c) 1 kHz, (d) 2 kHz における地表面吸音率 α の散布図

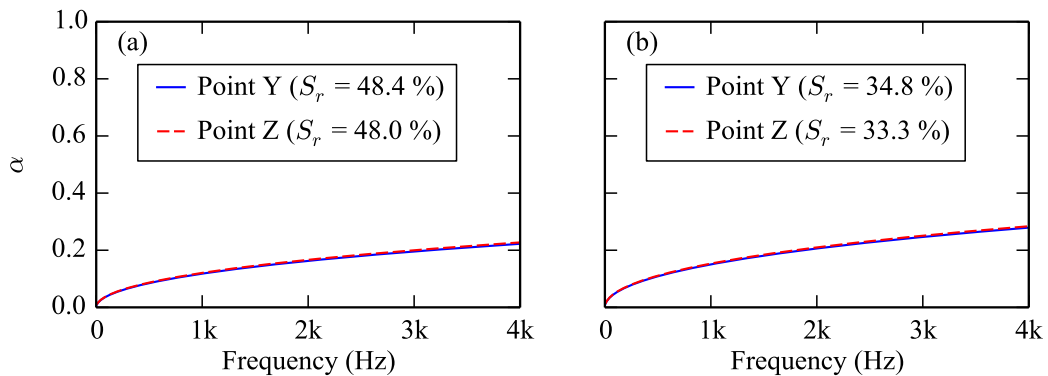


図 2.21 点Yおよび点Zにおける、(a) 10月28日および11月28日、(b) 10月17日および11月12日の地表面吸音率 α

2.5 地表面音響特性のモデル化

2.5.1 モデル化の概要

前節で述べた結果から，気象要素から飽和度を経て地表面吸音率を導出する，図 2.22 に示す 2 段階モデルを構築する。Stage 1 では，降雨量と気温から飽和度を導出する。Stage 2 では，飽和度から地表面吸音率を導出する。簡単のため，積雪時に計測および測定された飽和度および地表面吸音率はモデル化には使用しない。積雪の影響はモデル化のプロセスから省略する。

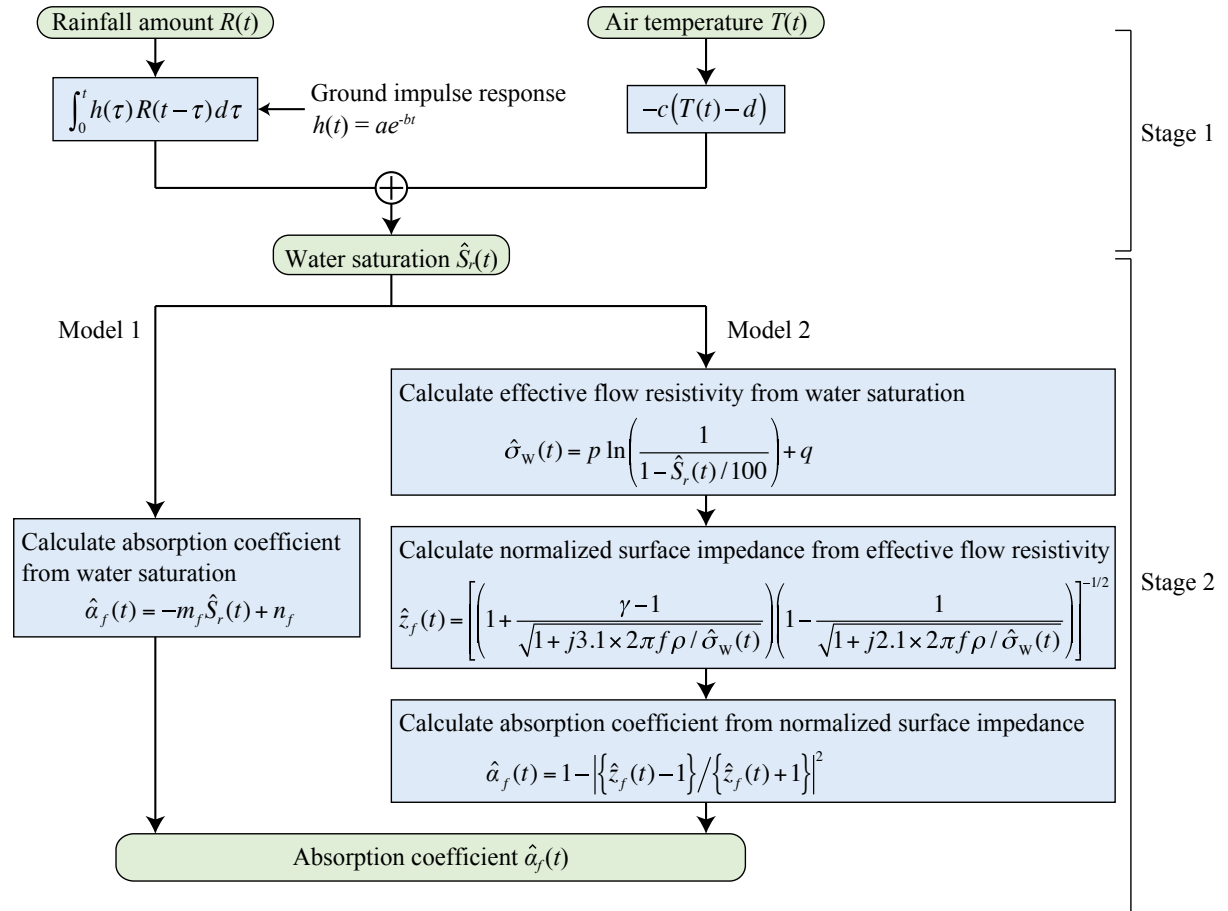


図 2.22 気象要素に対する地表面吸音率の 2 段階モデル ($a, b, c, d, m_f, n_f, p, q$: モデル定数, $\hat{\sigma}_w(t)$: 実効的流れ抵抗のモデル計算値, $\hat{z}_f(t)$: 表面インピーダンス比のモデル計算値, $\hat{\alpha}_f(t)$: 地表面吸音率のモデル計算値)

■ Stage 1

降雨によって急激に上昇し、その後時間の経過とともに減少していくという飽和度の挙動を、タンクモデル [44] を用いてモデル化する。図 2.23 (a) に示すように、降雨があると、降った雨の一部は表面付近の地層に蓄えられ、一部は下の地層へと浸透する。この挙動を図 2.23 (b) のようにタンクに見立てたものがタンクモデルである。

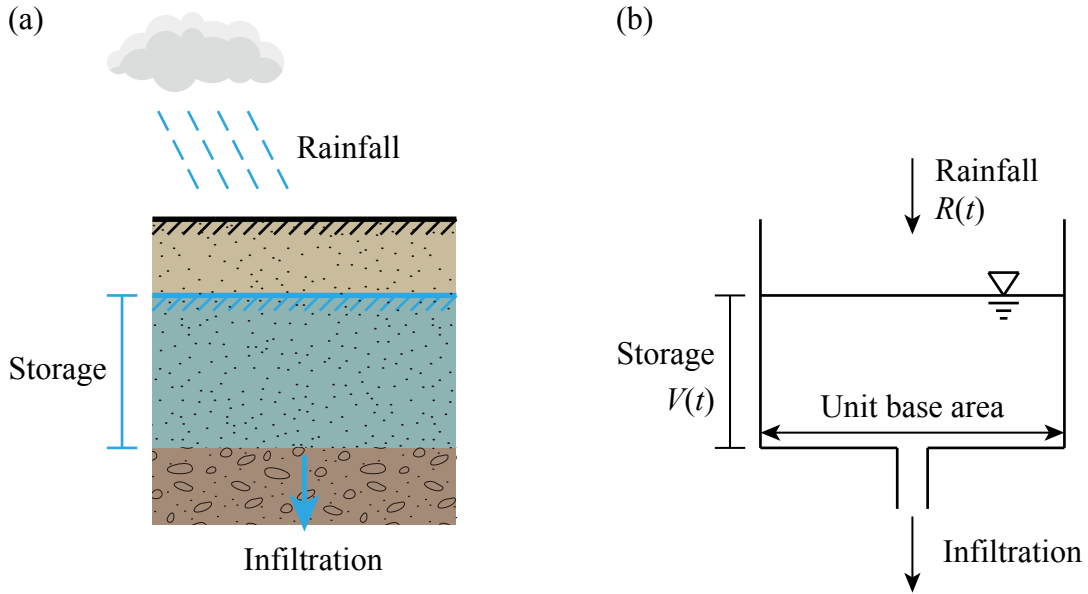


図 2.23 (a) 土壌中の水分の模式図, (b) タンクモデル

タンクモデルでは、土中に蓄えられている水分を、タンク中に蓄えられる水と考える。図 2.23 (b) に示すように、タンク容器の断面積は 1 とする。したがって、容器内の水深と貯留高は一致する。容器底面にある孔は、下層への浸透を表している。この孔からの流出量は、タンク中の水面の高さに比例すると仮定する [44]。表層の貯留の収支、すなわち単位時間あたりの貯留の変化量は、降雨としてタンクへ流入する分と、下層への浸透としてタンクから流出する分の差より、以下で表される。

$$\frac{dV(t)}{dt} = R(t) - bV(t) \quad (2.37)$$

ここで t , $V(t)$, $R(t)$, b はそれぞれ時刻, タンク内の貯留量, 降雨量, 底面の孔からの浸透係数である。式 (2.37) の一般解は、以下である (本章末尾の Appendix 参照)。

$$V(t) = e^{-bt} \left(\int R(t) e^{bt} dt + C_1 \right) \quad (2.38)$$

ただし C_1 は積分定数である。ここで、 $t=0$ においてインパルス的な単位降雨量があると考ええる。すなわち、降雨量 $R(t)$ が以下であると考ええる。

$$R(t) = \delta(t) \quad (2.39)$$

ただし $\delta(t)$ はディラックのデルタ関数である。このとき、式 (2.38) の括弧内の積分は

$$\int \delta(t)e^{bt}dt = H(t)e^{b \cdot 0} = H(t) \quad (2.40)$$

となる。ただし $H(t)$ は Heaviside のステップ関数であり

$$H(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (2.41)$$

である。よって式 (2.38) は $t \geq 0$ のとき

$$V(t) = e^{-bt}(1 + C_1) \quad (2.42)$$

となり、上式で $a = 1 + C_1$ とおくと

$$V(t) = ae^{-bt} \quad (2.43)$$

となる。以上より、単位降雨量を入力したときの飽和度の出力、すなわち飽和度のインパルス応答 $h(t)$ は、次式となる。

$$h(t) = ae^{-bt} \text{ [%/mm]} \quad (2.44)$$

ここで a [%/mm], b [1/day] はそれぞれモデル定数を表し、 t の単位は [day] で表す。式 (2.44) はすなわち、図 2.24 のようにインパルスの単位降雨量があったとき、それに応じて飽和度は指数関数的に減衰していくことを表す。さらに図 2.25 のように、継続的な降雨が飽和度に及ぼす影響は、単位時間降雨量 $R(t)$ にインパルス応答 $h(t)$ を畳み込むことで表す。つまり、降雨量からの飽和度のモデル計算値 $\hat{S}_{r,1}(t)$ は、式を用いると以下となる。

$$\hat{S}_{r,1}(t) = \int_0^t h(\tau)R(t - \tau)d\tau \text{ [%]} \quad (2.45)$$

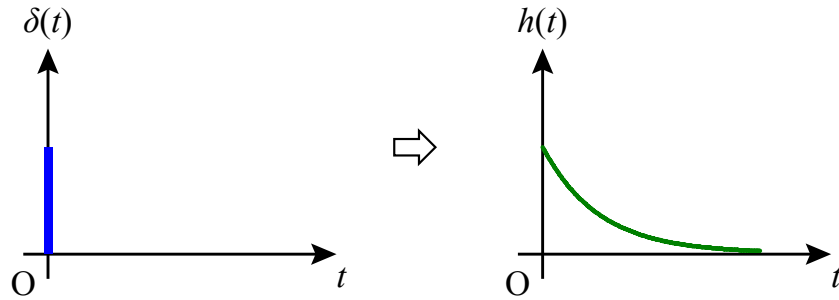


図 2.24 インパルス応答モデル

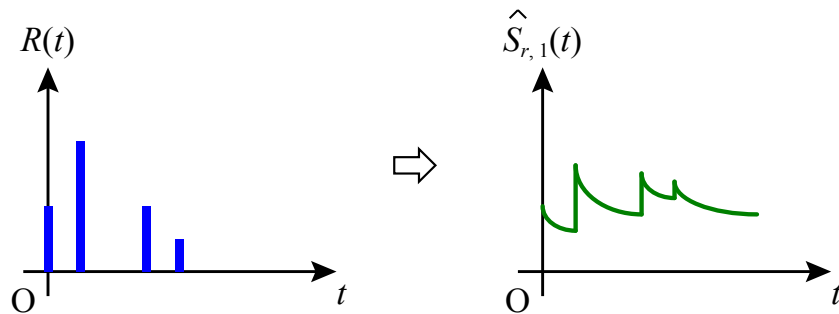


図 2.25 インパルス応答の畳み込み

ついで気温が飽和度へ及ぼす影響は、長期的なトレンドとして組み込む。前節で述べた通り、飽和度は気温と逆の長期的な傾向を持っている。この、飽和度を気温と逆方向に増減させる作用を、以下のように表す。

$$\hat{S}_{r,2}(t) = -c(T(t) - d) \text{ [%]} \quad (2.46)$$

ここで $\hat{S}_{r,2}(t)$ は気温からの飽和度のモデル計算値であり、 $c \text{ [%/}^\circ\text{C]}$, $d \text{ [}^\circ\text{C]}$ はそれぞれモデル定数である。

以上をまとめると、降雨と気温を合わせ、飽和度のモデル計算値 $\hat{S}_r(t)$ は以下となる。

$$\hat{S}_r(t) = \hat{S}_{r,1}(t) + \hat{S}_{r,2}(t) = \int_0^t h(\tau)R(t-\tau)d\tau - c(T(t) - d) \text{ [%]} \quad (2.47)$$

$\hat{S}_r(t)$ を以下の Cases 1–3 の方法により計算し、 $\hat{S}_r(t)$ が実測飽和度と最も近くなるケースを確かめるため、それら計算結果を比較する。Case 1 では、 $R(t)$ として降水量の1時間積算値を、 $T(t)$ として気温の1時間平均値を用いる。Case 2 では、 $R(t)$ には Case 1 と同様に降水量の1時間積算値を用いるが、 $T(t)$ には、気温の1時間平均値を夜間を除いて24時間後方移動平均した値を用いる。Case 2 の $T(t)$ は、長期的な気温変動が飽和度へ及ぼす影響を加味することを意図して設定している。Case 3 では、より長期間の時間スケールとして、 $R(t)$ には降水量の日積算値を、 $T(t)$ には気温の日平均値を用いる。

■ Stage 2

Stage 2 では、Stage 1 で算出した飽和度のモデル $\hat{S}_r(t)$ から、地表面吸音率をモデル化する。Stage 2 では2通りの方法によりモデルを導出する。それぞれの方法によって導出されたモデルを Model 1, Model 2 と呼び、両者を比較する。なお、Stage 2 では、Models 1, 2 とともに、欠測および積雪時の測定値は除いてモデル化を行う。

Model 1 では、 $\hat{S}_r(t)$ に対する、1/3 オクターブバンド中心周波数 $f \text{ [Hz]}$ における吸音率 $\alpha_f(t)$ の回帰式を、 f における推定吸音率 $\hat{\alpha}_f(t)$ のモデルとし、

$$\hat{\alpha}_f(t) = -m_f \hat{S}_r(t) + n_f \text{ [-]} \quad (2.48)$$

と表す。ここで、 $m_f \text{ [1/\%]}$ および $n_f \text{ [-]}$ は中心周波数 $f \text{ [Hz]}$ におけるモデル定数である。

一方 Model 2 では、Model 1 のように単純に回帰式をモデルとするのではなく、Cramond ら [25] による、地表面吸音に対する土壌水分の影響に関する先行研究に従ってモデルを構築する。文献 [25] では、実効的流れ抵抗と土壌水分の関係は以下の式で表されると述べられている。

$$\sigma = p_0 \ln \left(\frac{1}{1 - W/W_s} \right) + q_0 \text{ [kPa s/m}^2\text{]} \quad (2.49)$$

ここで $\sigma \text{ [kPa s/m}^2\text{]}$ は Delany-Bazley モデルで用いられる実効的流れ抵抗であり、 $W \text{ [%]}$ は含水比、 $W_s \text{ [%]}$ は飽和状態のときの含水比である。さらに $p_0, q_0 \text{ [kPa s/m}^2\text{]}$ はモデル定数であり、 $(p_0, q_0) = (360, 150)$ である。

式 (2.49) 中の W / W_s は、式 (2.1) で示した含水比の定義から、以下のように式変形される。

$$\begin{aligned} \frac{W}{W_s} &= \frac{\frac{m_w}{m_s} \times 100}{\frac{m_{w,sat}}{m_s} \times 100} \\ &= \frac{m_w}{m_{w,sat}} \end{aligned} \quad (2.50)$$

ここで $m_{w,sat}$ は飽和状態のときの土中の水の質量である。水の単位体積質量を ρ_w とすると、 $m_w = \rho_w V_w$, $m_{w,sat} = \rho_w V_v$ であるから、式 (2.50) は以下となる。

$$\frac{W}{W_s} = \frac{\rho_w V_w}{\rho_w V_v} = \frac{V_w}{V_v} = \frac{S_r}{100} \quad (2.51)$$

また、式 (2.49) 中における σ は Delany-Bazley モデルで用いられる実効的流れ抵抗であり、本章で用いている σ_w とは異なる量である。ここで、Wilson モデルが提案されている文献における Delany-Bazley モデルの表記から、 σ_w と σ の間には以下の関係が成り立つ。

$$\sigma_w = \rho \sigma \quad (2.52)$$

以上より、式 (2.49) は以下のように書き換えられる。

$$\hat{\sigma}_w(t) = p \ln \left(\frac{1}{1 - \hat{S}_r(t)/100} \right) + q \text{ [kPa s/m}^2\text{]}, \quad (2.53)$$

$$p = \rho p_0, \quad (2.54)$$

$$q = \rho q_0 \quad (2.55)$$

ここで $\hat{\sigma}_w(t)$ は Wilson モデルで用いられる実効的流れ抵抗のモデル計算値である。

式 (2.53) により求めた実効的流れ抵抗を用い、式 (2.23)–(2.26), (2.32) により、周波数 f [Hz] における表面インピーダンス比 $\hat{z}_f(t)$ および地表面吸音率 $\hat{\alpha}_f(t)$ を求める。このとき、モデル定数 p_0 及び q_0 は、文献 [25] で使用された土に特有の値である可能性があるため、 p 及び q は本研究データにフィッティングさせて求める。

2.5.2 モデル定数の決定

■ Stage 1

Stage 1 について, Cases 1~3 の各条件について, 積雪がなく飽和度が安定している期間である 2014 年 10 月 4 日から 10 月 30 日までの観測結果により, 式 (2.44) および (2.47) のモデル定数 a, b, c, d を, 飽和度の実測値と計算値の差が最小となるよう非線形最小二乗法により決定し, 表 2.4 の結果を得た。

表 2.4 各 Case において決定されたモデル定数 a, b, c, d

Case	a [%/mm]	b [1/day]	c [%/°C]	d [°C]
Case 1	2.012	2.890	1.012	45.08
Case 2	2.086	3.883	2.067	32.69
Case 3	0.3137	24.37	2.649	29.16

表 2.4 に定まったモデル定数を用いて, 2014 年 7 月 25 日から 2015 年 1 月 24 日までについて飽和度のモデル計算値を求める。ここで, 降雨量の欠測期間は降雨量を 0, 気温の欠測期間は気温を直線補間して計算する。図 2.26, 図 2.27, 図 2.28 にそれぞれ, Cases 1, 2, 3 について, 2.5.1 節で述べた方法により平均または積算した気温および降雨量, ならびに飽和度のモデル計算値および実測値を示す。図 2.26 より, Case 1 では 10 月から 11 月では飽和度の計算値は実測値に概ね近いが, 12 月以降では計算値と実測値の乖離が大きい。また, 飽和度の計算値には, 実測値は見られない細かな変動が見られる。この細かな変動は, 気温の 1 日の中での増減を反映したものである。一方, 図 2.27 より, Case 2 では気温を移動平均したことにより気温のグラフは滑らかになり, それに伴って飽和度の計算値にみられた上下変動が小さくなっている。さらに, 特に 12 月以降で図 2.26 よりも飽和度の計算値は実測値に近い。図 2.28 より, Case 3 では, $R(t)$ と $T(t)$ は 1 日ごとに平均または積算された値であるため, 滑らかである。また, 飽和度のモデル計算値は実測値におおよそ近くなっている。

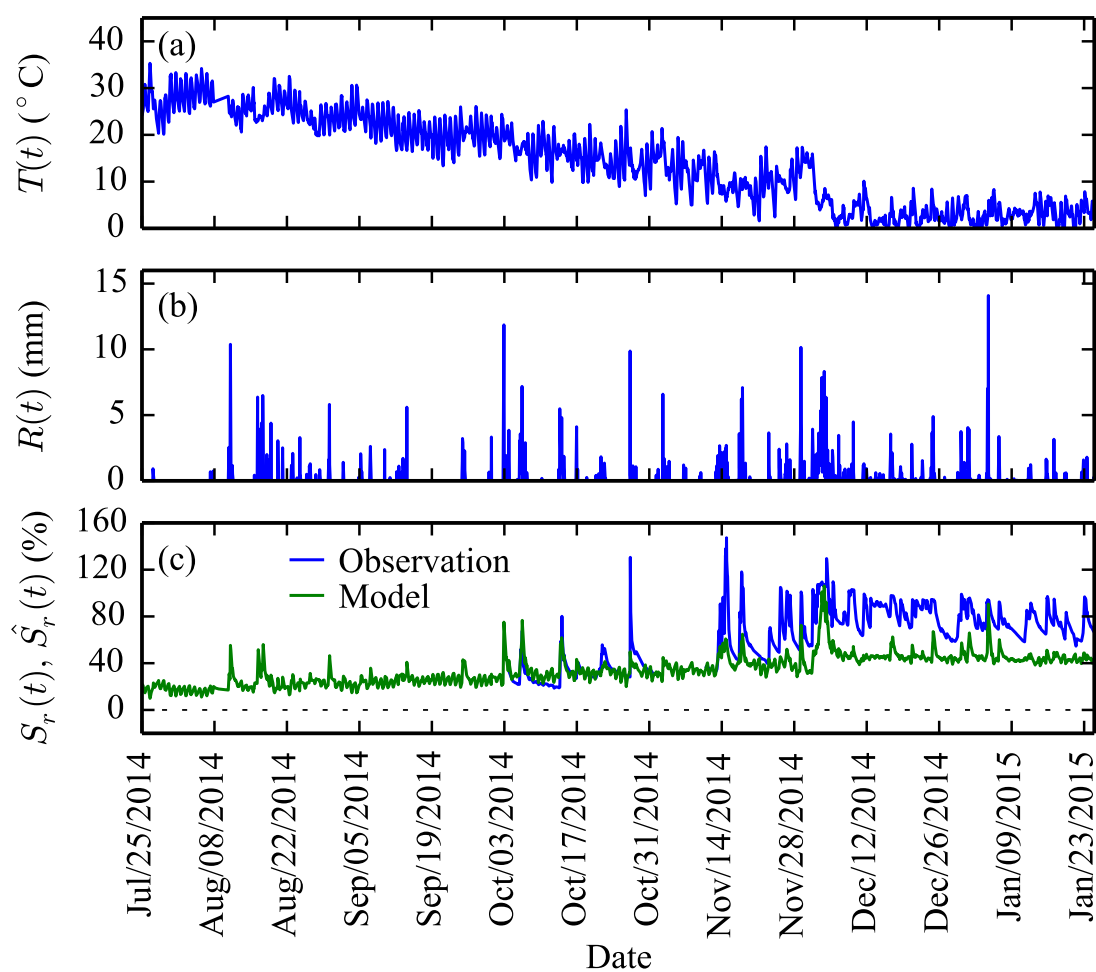


図 2.26 1 時間平均気温, 1 時間積算降雨量, 1 時間ごとの飽和度 (Case 1)

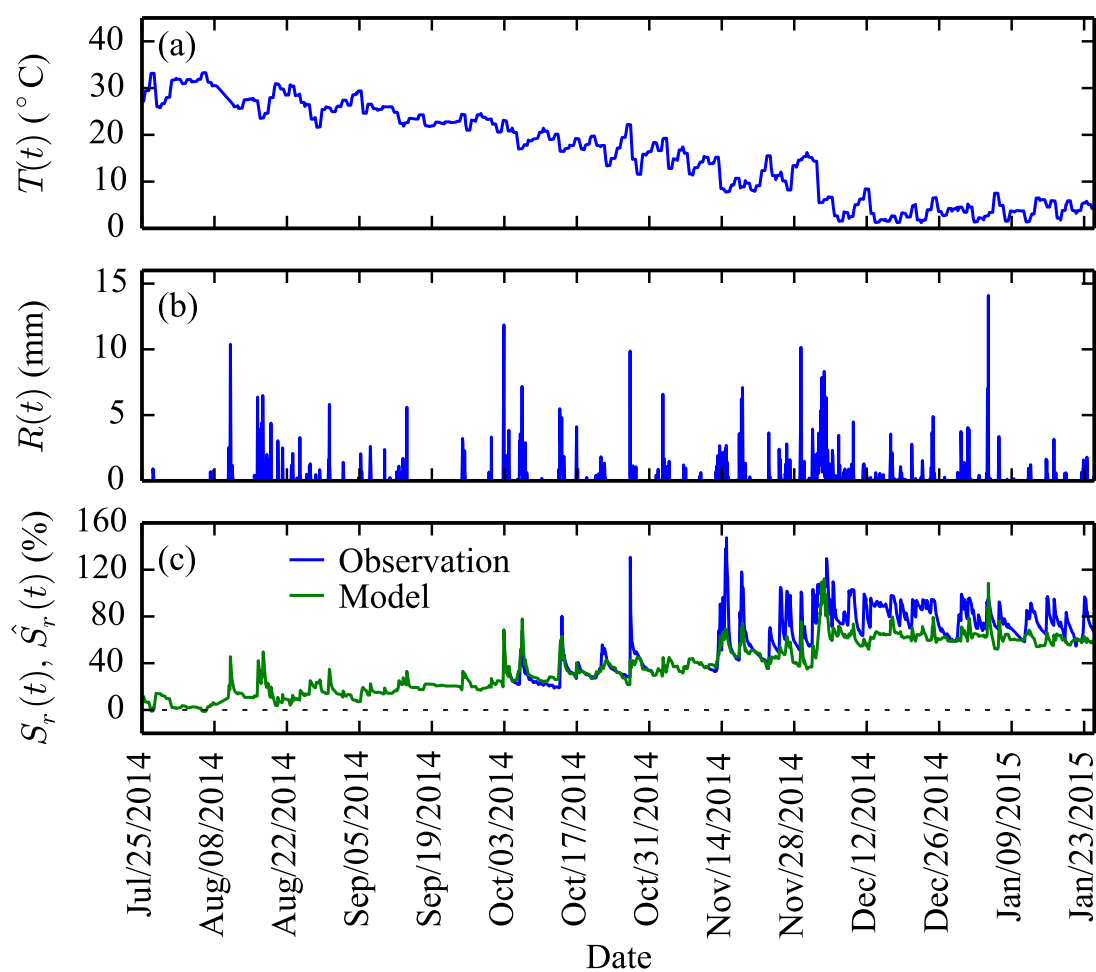


図 2.27 1 時間平均気温を移動平均した値, 1 時間積算降雨量, 1 時間ごとの飽和度 (Case 2)

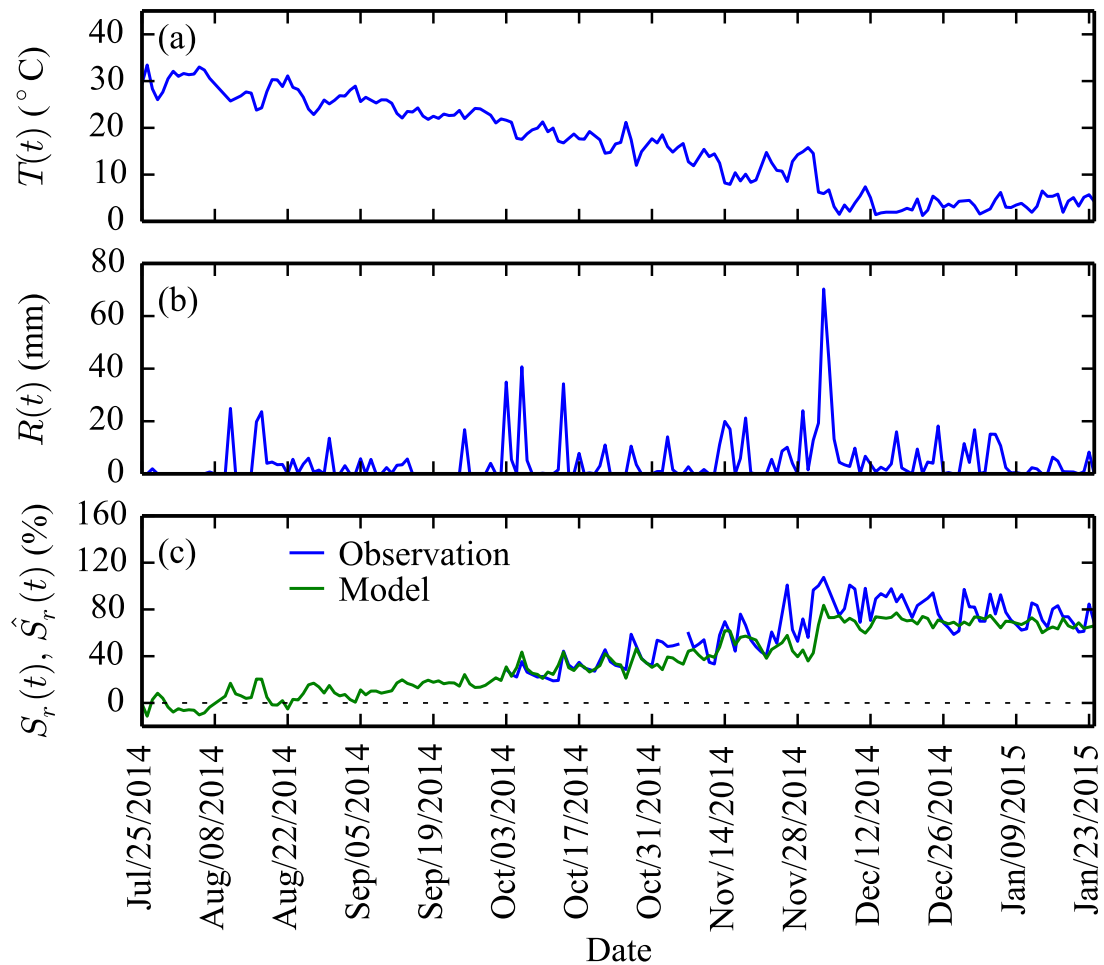


図 2.28 日平均気温，日積算降雨量，1 日ごとの飽和度 (Case 3)

Cases 1–3 により得られた結果を比較するため，図 2.29 に，各 Case における 1 日ごとの飽和度のモデル計算値を，実測値とともに示す。1 時間ごとの変動をモデル化する Cases 1, 2 では，1 日ごとの変動をモデル化する Case 3 と比較するため，地表面音響特性測定時刻に対応する飽和度のモデル計算値を抜き出し，図 2.29 に示している。Cases 1–3 のいずれも， $\hat{S}_r(t)$ は，10 月から 11 月にかけては $S_r(t)$ の増減を概ね捉えている。Cases 1–3 のいずれでも 12 月に $\hat{S}_r(t)$ と $S_r(t)$ が乖離するのは，積雪によって土壤水分の蒸発が阻害されたり，雪解け水が地面へ浸透したりする影響を，モデルが含んでいないためと考えられる。また，Cases 2, 3 による計算結果は互いに近く，Case 1 による計算結果よりも実測値に近い。さらに Cases 2, 3 による計算結果を比較すると，図 2.29 の (A), (B) で示す箇所のように，Case 2 による飽和度のモデル計算値の方が，Case 3 よりも実測値の急激な上昇に追従している。したがって，Case 2 が全てのケースの中でもっとも適当な方法と考えられる。しかしながら，Case 2 による飽和度のモデル計算値は，一部で 0 を下回ったり，100 を超えたりしている。そこで，Stage 1 における出力である飽和度のモデル計算値 $\hat{S}_r(t)$ は，0–100 % の間に収まるよう，次式とする。

$$\hat{S}_r(t) = \begin{cases} 0 & (\hat{S}_{r_daily, Case 2}(t) < 0) \\ \hat{S}_{r_daily, Case 2}(t) [\%] & (0 \leq \hat{S}_{r_daily, Case 2}(t) < 100 - \varepsilon) \\ 100 - \varepsilon [\%] & (100 - \varepsilon \leq \hat{S}_{r_daily, Case 2}(t)) \end{cases} \quad (2.56)$$

ここで $\varepsilon = 10^{-10}$ は、式 (2.53) の発散を防ぐために導入された値である。また $\hat{S}_{r_daily, Case 2}(t)$ は、図 2.29 にプロットされている、Case 2 における飽和度である。

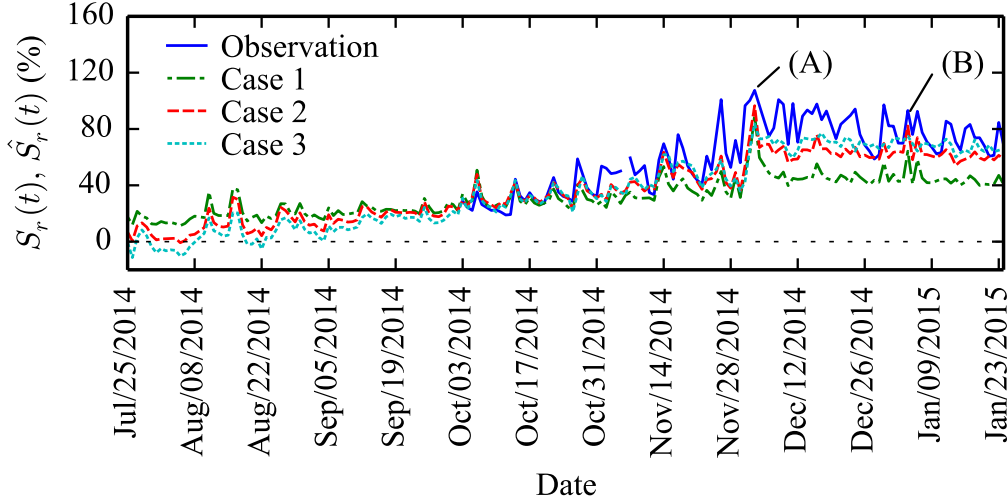


図 2.29 日毎の飽和度の実測値および計算値

■ Stage 2

まず Model 1 について、125 Hz–4 kHz の全中心周波数に対して m_f および n_f を求め、相関係数 r_f とともに表 2.5 および図 2.30 に示す。 m_f および n_f 、ならびに r_f の絶対値は、周波数の上昇に伴い増加する。また、主要な中心周波数である 250, 500, 1 k, 2 kHz における吸音率 $\alpha_f(t)$ と予測飽和度 $\hat{S}_r(t)$ の散布図、 $\hat{\alpha}_f(t)$ の回帰式、回帰直線および相関係数 r_f を図 2.31 に示す。吸音率と飽和度の間には、負の相関がみられる。また、周波数の上昇に伴い回帰直線の傾きが急となり、さらに回帰直線の切片が増加しているが、これは図 2.30 で示された特徴と対応する。

表 2.5 各中心周波数における m_f , n_f , r_f

		m_f	n_f	r_f
1/3 oct. band center freq. f [Hz]	125	1.12×10^{-3}	1.04×10^{-1}	-0.818
	160	1.26×10^{-3}	1.17×10^{-1}	-0.818
	200	1.39×10^{-3}	1.30×10^{-1}	-0.819
	250	1.55×10^{-3}	1.45×10^{-1}	-0.819
	315	1.72×10^{-3}	1.62×10^{-1}	-0.820
	400	1.90×10^{-3}	1.79×10^{-1}	-0.821
	500	2.09×10^{-3}	1.99×10^{-1}	-0.821
	630	2.31×10^{-3}	2.21×10^{-1}	-0.822
	800	2.54×10^{-3}	2.45×10^{-1}	-0.823
	1000	2.79×10^{-3}	2.70×10^{-1}	-0.824
	1250	3.05×10^{-3}	2.98×10^{-1}	-0.825
	1600	3.33×10^{-3}	3.29×10^{-1}	-0.826
	2000	3.62×10^{-3}	3.61×10^{-1}	-0.827
	2500	3.93×10^{-3}	3.96×10^{-1}	-0.829
	3150	4.24×10^{-3}	4.33×10^{-1}	-0.830
	4000	4.57×10^{-3}	4.73×10^{-1}	-0.831

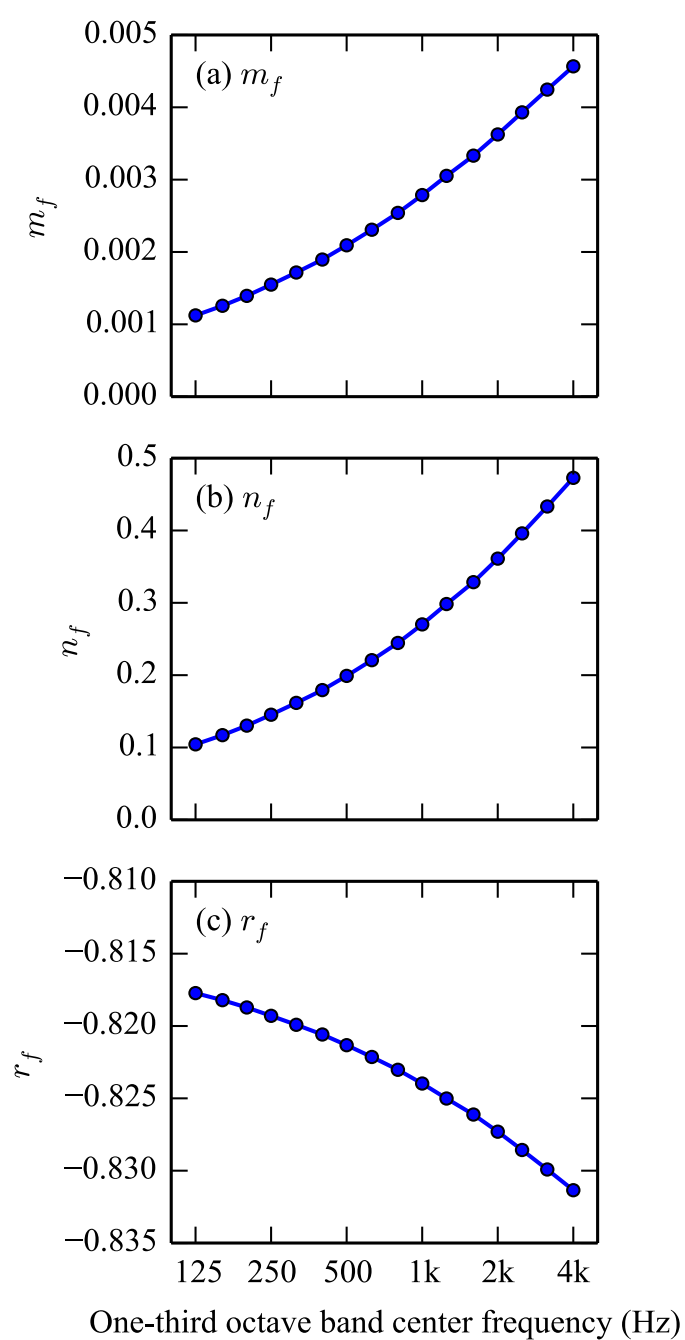


図 2.30 各中心周波数における m_f , n_f , r_f

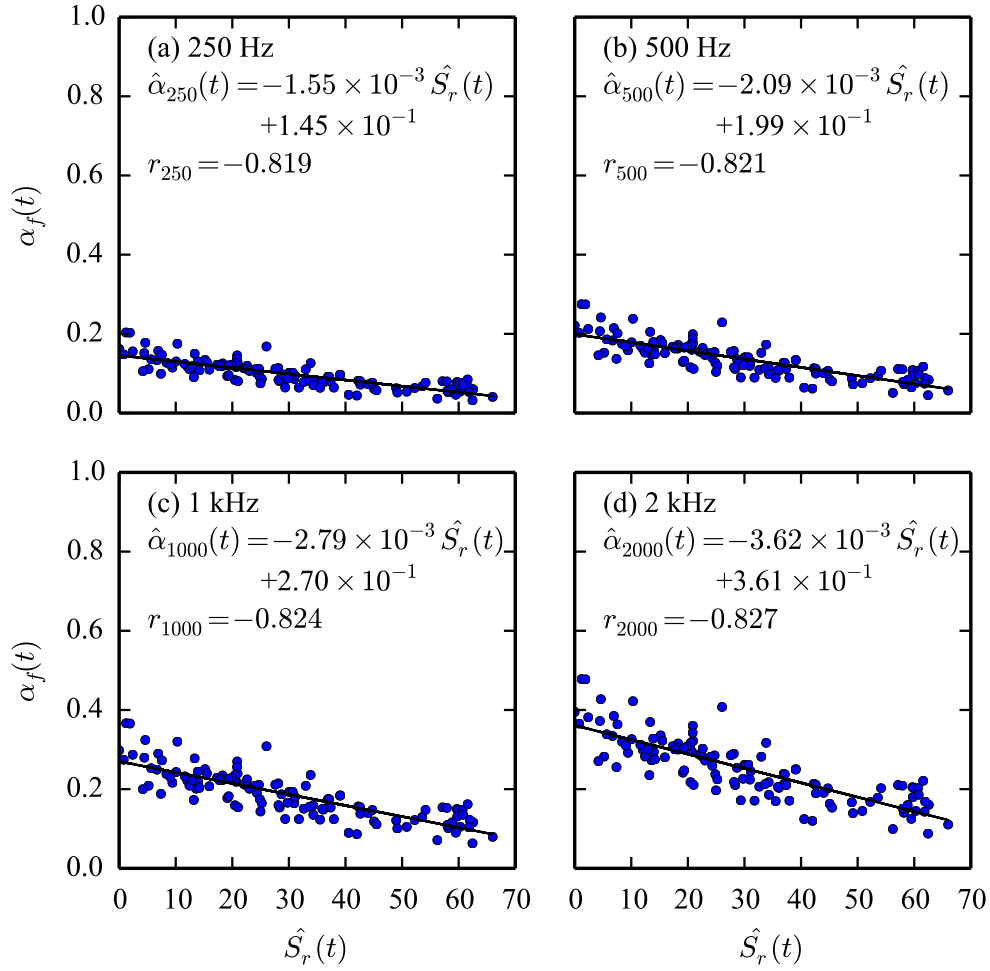


図 2.31 飽和度の計算値 $\hat{S}_r(t)$ と地表面吸音率 $\alpha_f(t)$ の散布図，回帰直線，回帰式，相関係数

ついで Model 2 について，式 (2.53) のパラメータ値を本研究データにフィッティングさせたところ， $(p, q) = (7495, 266)$ となった。図 2.32 に，Stage 1 にて計算された一日ごとの飽和度 $\hat{S}_r(t)$ と実効的流れ抵抗 $\sigma_w(t)$ の散布図および式 (2.53) で $(p, q) = (7495, 266)$ とした場合の曲線を示す。さらに， $(p, q) = (433.8, 180.75)$ ，すなわち Cramond らにより提案された値 $(p_0, q_0) = (360, 150)$ を， $\rho = 1.205 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ の仮定のもと式 (2.54), (2.55) により変換した値を用いた場合の曲線も合わせて示す。散布図では，飽和度の上昇に伴い流れ抵抗も増加する傾向が見られ，二つの曲線もこれと同様の傾向を示す。しかしながら， $(p, q) = (433.8, 180.75)$ の曲線は，散布図とあまり一致していない。一方， $(p, q) = (7495, 266)$ の曲線は，流れ抵抗の個々の値におおむね沿っている。したがって， $(p, q) = (7495, 266)$ を Model 2 で用いる。

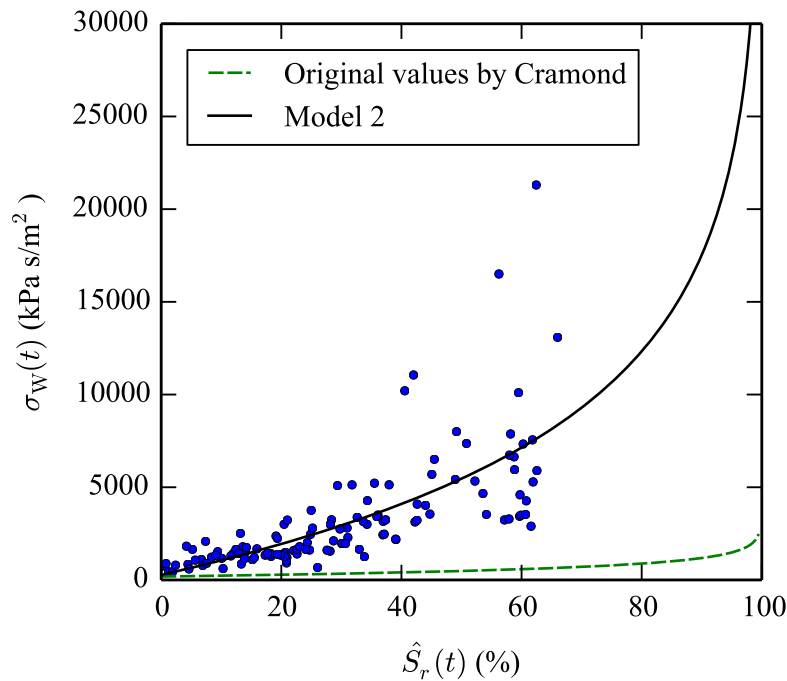


図 2.32 飽和度と流れ抵抗の散布図 (点線: $(p, q) = (433.8, 180.75)$ による曲線, 実線: $(p, q) = (7495, 266)$ による曲線)

2.5.3 モデルの比較検証

Stages 1, 2 のモデルがともに求まったので, モデルの検証を行う。125–4kHz の全中心周波数に対し, 日ごとの推定吸音率を, Models 1, 2 によりそれぞれ求める。図 2.33 に, 実測吸音率と, Stages 1, 2 を通して計算された推定吸音率の日毎の変化を, 主要な中心周波数である 250, 500, 1k, 2kHz について示す (ただし, 積雪時の実測吸音率はプロットから除く)。Models 1, 2 ともに, 推定吸音率は, 実測吸音率と比べて日ごとの吸音率の上下幅は特に高周波数においてやや小さいが, 実測吸音率の長期的な変動を概ね捉えている。中心周波数 250 Hz では, Models 1, 2 の差はほとんどないが, 周波数が高くなると, Models 1, 2 の間にわずかに開きが見られる。

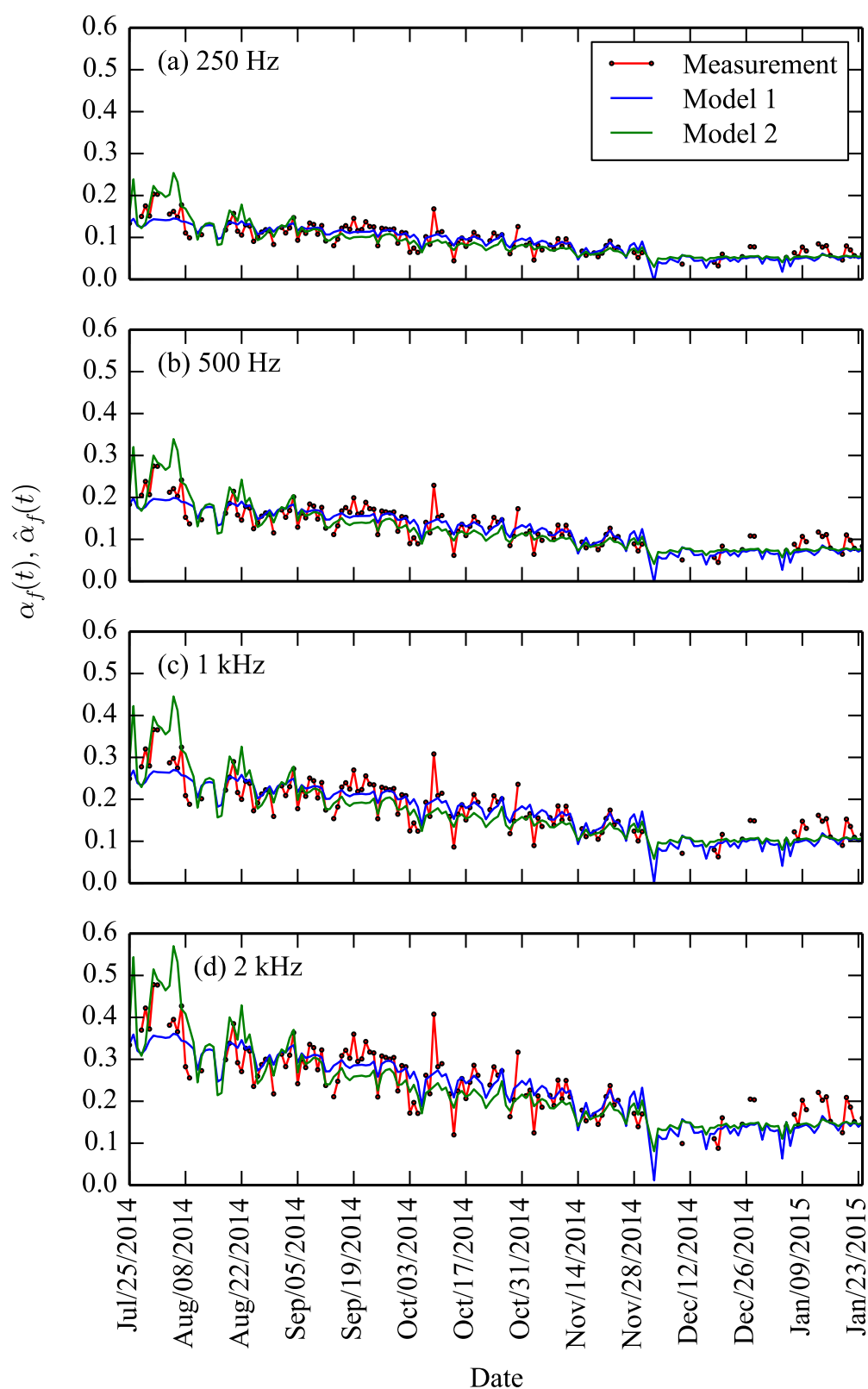


図 2.33 実測吸音率と推定吸音率の日毎の変化

実測吸音率と推定吸音率の中長期的な平均値およびばらつきの程度を比較するため、日ごとの吸音率を月ごとに平均する。図 2.34 に、図 2.33 に示した 250, 500, 1k, 2kHz における、実測吸音率の月平均値 $\bar{\alpha}_{\text{monthly},f}(t)$ および推定吸音率の月平均値 $\hat{\alpha}_{\text{monthly},f}(t)$ 、ならびに標準偏差を示す。図 2.34 より、周波数が低い 250, 500 Hz では、Models 1, 2 による推定吸音率の平均値は、実測吸音率の平均値とほぼ一致している。しかしながら周波数が高くなるにつれて、推定吸音率と実測吸音率の平均値の乖離が大きくなっている。さらに、125–4kHz の全中心周波数に対して、両モデルによる $\hat{\alpha}_{\text{monthly},f}(t)$ と $\bar{\alpha}_{\text{monthly},f}(t)$ の間の誤差の二乗平均平方根 (RMSE: Root Mean Square Error) を求め、図 2.35 に示す。周波数が高くなると、Models 1, 2 とともに RMSE が大きくなる。これはすなわち、両モデルによる推定値は低周波域で実測値とよく一致するといえる。また、各周波数における RMSE の値は、Model 2 の方が Model 1 よりわずかに小さい。以上のことから、RMSE の値が小さい Model 2 の方が、Model 1 よりも実測に対する推定精度が高いと言える。しかしながら、単純な回帰直線によるモデルである Model 1 も、Model 2 に比べて大幅に精度が劣るわけではない。

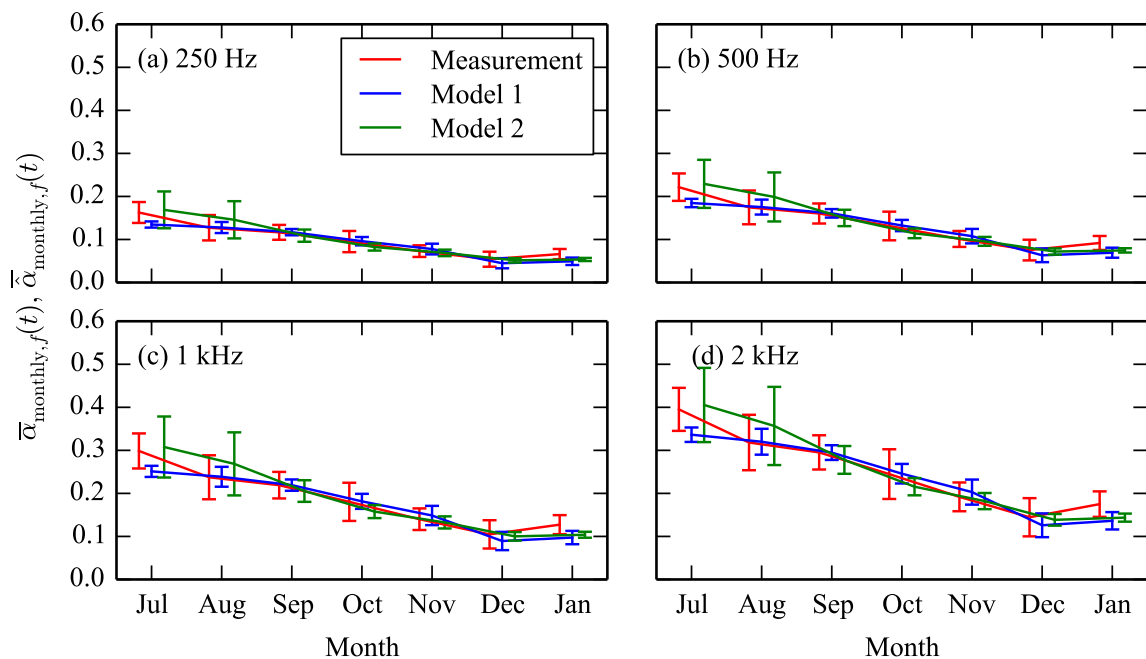


図 2.34 実測吸音率と推定吸音率の月平均値と標準偏差

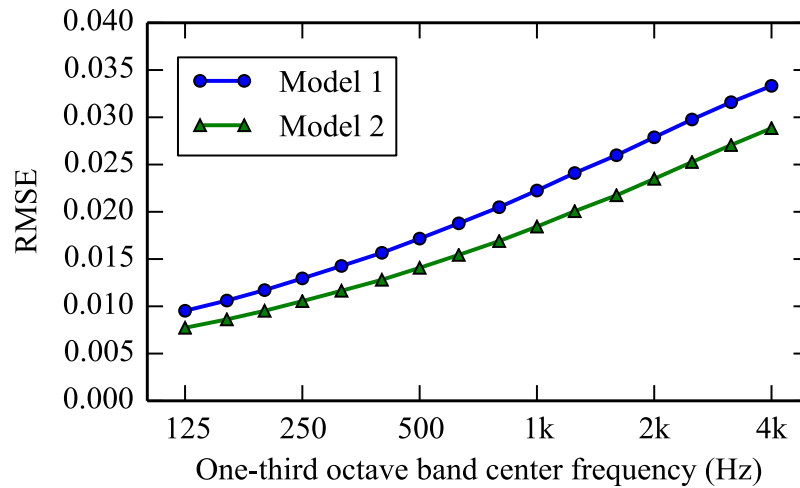


図 2.35 Models 1, 2 による推定吸音率と実測吸音率の間の RMSE

ただし、提案した両モデルの特徴を振り返ると、Model 1 は飽和度から地表面吸音率を直接推定するモデル、Model 2 は飽和度から実効の流れ抵抗および表面インピーダンス比を経て地表面吸音率を推定するモデルであった。実際の音響伝搬計算において、地表面の音響特性として伝搬計算式に与える物理量は吸音率ではなく表面インピーダンス比や実効の流れ抵抗であることを考えると、Model 1 よりも Model 2 の方が有用性が高い。

図 2.33 で示した日毎の吸音率のうち、実測値と Model 2 による推定値の散布図を図 2.36 に示す。図 2.36 より、実測値と推定値は全ての周波数において概ね同程度の値である。このことから、構築したモデルにより、地表面吸音率の変動を概ね説明できるといえる。

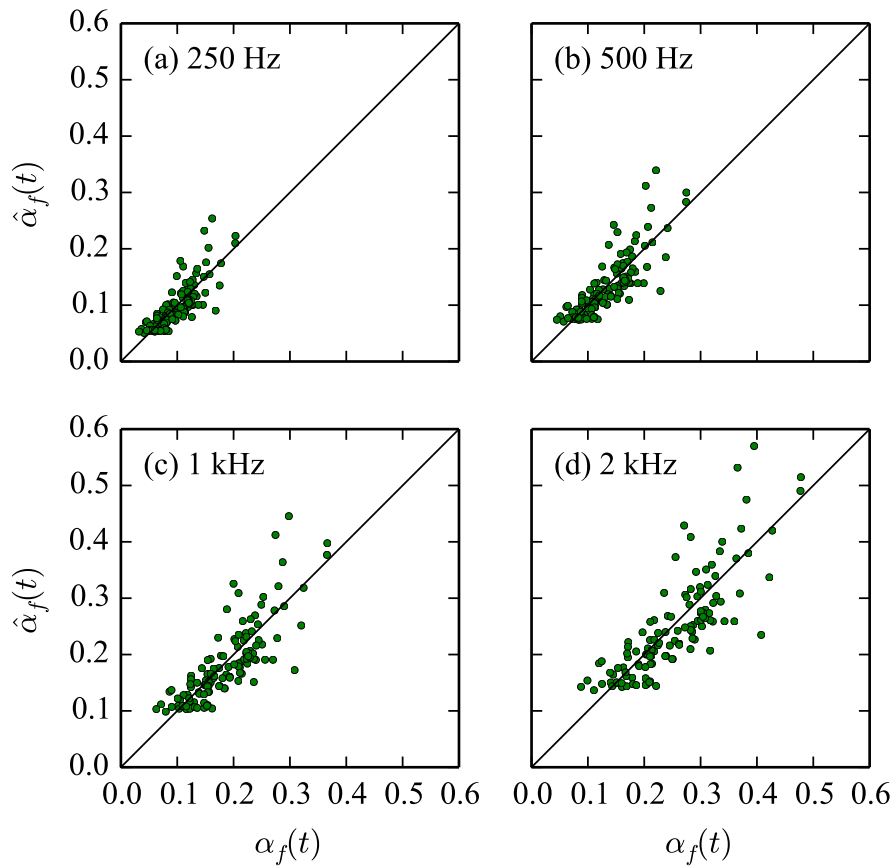


図 2.36 日毎の実測吸音率と推定吸音率の散布図

2.6 まとめ

本節では、第 2 章のまとめを述べる。

新潟大学キャンパス内にて、2014 年 7 月から 2015 年 1 月の約半年間にわたり、気象、土の飽和度、地表面音響特性の測定を実施した。飽和度は降雨があると急激に上昇し、その後数日間のうちに元の値まで減少した。測定期間を通し、飽和度は緩やかに上昇する長期的傾向が見られたが、これは測定期間を通して緩やかに下降した気温とは逆の傾向であった。地表面吸音率は、日変化が見られ、測定開始時期から 11 月の終わりにかけて緩やかに低下する長期的傾向が見られた。この長期的傾向は、前述の通り緩やかに上昇する飽和度の長期的傾向とは逆であった。

また測定結果より、気象要素から地表面吸音率を推定する 2 段階モデル (Stages 1, 2) を導出した。Stage 1 では、降雨量と気温が土の飽和度に与える影響がモデル化された。このモデルは、降雨の影響をインパルス応答モデルとして表現し、さらに気温の長期的傾向を組み込んだモデルである。飽和度は、異なる方法により累積または平均された降雨量および気温を用いる 3 ケースにより計算された。その 3 ケースの中でも、降雨量の 1 時間積算値および、

気温の1時間平均値を24時間後方移動平均した値を用いて計算された飽和度が、実測された飽和度に最も近かった。また、Stage 2では、飽和度が地表面吸音率に与える影響が、2通りの方法 (Models 1, 2) によりモデル化された。Model 1は、モデル化された飽和度と1/3オクターブバンド実測吸音率から回帰直線を求め、その回帰直線により地表面吸音率を1/3オクターブバンドごとに計算するものである。Model 2は、モデル化された飽和度から、実効的流れ抵抗および表面インピーダンス比を経て地表面吸音率を計算するものである。

Models 1, 2によりそれぞれ計算された地表面吸音率と、実測された地表面吸音率を比較したところ、両モデルとも推定吸音率は実測吸音率よりも日変動幅は小さいが、月次の平均値をよく捉えていた。モデル同士を比較すると、Model 1は単純な回帰直線によるモデルであり、Model 2よりも少ない手順でモデルを導出できる。また、Model 1による推定吸音率の長期的傾向は、実測吸音率とおおよそ同程度である。一方、Model 2は、実効的流れ抵抗を介したモデルであるため、地表面の音響特性量として吸音率しか推定されない Model 1とは異なり、吸音率に加え、表面インピーダンス比も推定可能である。また、Model 2の方が、Model 1よりもRMSEが小さいことから、Model 1よりも精度よく地表面吸音率を推定できているといえる。

Appendix: 式 (2.38) の導出

次の形の微分方程式を1階線形微分方程式という [45]。

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x) \quad (2.57)$$

式 (2.37) を変形すると、

$$\frac{dV(t)}{dt} + bV(t) = R(t) \quad (2.58)$$

となり、式 (2.57) と同様の形で表される。この1階線形微分方程式を、文献 [45] に従って以下のように解き、式 (2.38) を導出する。

まず、式 (2.58) の右辺の $R(t)$ を0とした同次方程式

$$\frac{dV(t)}{dt} + bV(t) = 0 \quad (2.59)$$

の一般解を求める。式 (2.59) は変数分離型であるから、

$$\begin{aligned} \frac{1}{V(t)} \frac{dV(t)}{dt} &= -b \\ \ln|V(t)| &= -bt + C \end{aligned} \quad (2.60)$$

となる (C は積分定数)。 $V(t) > 0$ であるから

$$\begin{aligned} V(t) &= e^{-bt+C} \\ &= Ae^{-bt} \end{aligned} \quad (2.61)$$

ただし $A = e^C$ である。ここで、非同次方程式である式 (2.58) の解を求めるために、同次方程式

(2.59) の一般解 (2.61) の定数 A が t の関数であると仮定し、式 (2.58) に代入して $A(t)$ を決定する。すなわち、 $A = A(t)$ を仮定し、式 (2.58) に $V(t) = A(t)e^{-bt}$ を代入すると

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\{A(t)e^{-bt}\} + b \cdot A(t)e^{-bt} &= R(t) \\ \frac{dA(t)}{dt}e^{-bt} - b \cdot A(t)e^{-bt} + b \cdot A(t)e^{-bt} &= R(t) \\ \frac{dA(t)}{dt}e^{-bt} &= R(t)\end{aligned}\tag{2.62}$$

を得る。両辺に e^{bt} をかけると

$$\frac{dA(t)}{dt} = R(t)e^{bt}\tag{2.63}$$

となり、上式を t について積分すると

$$A(t) = \int R(t)e^{bt} + C_1\tag{2.64}$$

を得る (C_1 は積分定数)。この結果を、同次方程式の一般解である式 (2.61) に代入すると

$$V(t) = e^{-bt} \left(\int R(t)e^{bt} dt + C_1 \right)$$

となり、式 (2.38) が得られる。

第 3 章

複数種地表面における地表面音響特性の経時変化のモデル化

3.1 目的

第 2 章では、一箇所の地表面を対象とし、気象、土壌水分、地表面音響特性の長期測定結果から、地表面音響特性の時間変化をモデル化した。このモデルの中では、いくつかのモデル定数の値を定めたが、これらの値は地表面の種類によって異なると考えられる。本章では、複数地表面を対象とした同様の長期測定により、地表面の種類ごとにこれらモデル定数の値の決定を試みる。

3.2 測定概要

3.2.1 測定対象地

測定は、図 3.1 に示す、愛知県東郷町に所在する名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター東郷フィールド (以下、東郷フィールド) を対象地として行う。東郷フィールドには、畑や田んぼ、草地など、多種の地表面種類が存在するため、この場所を対象地として選定した。

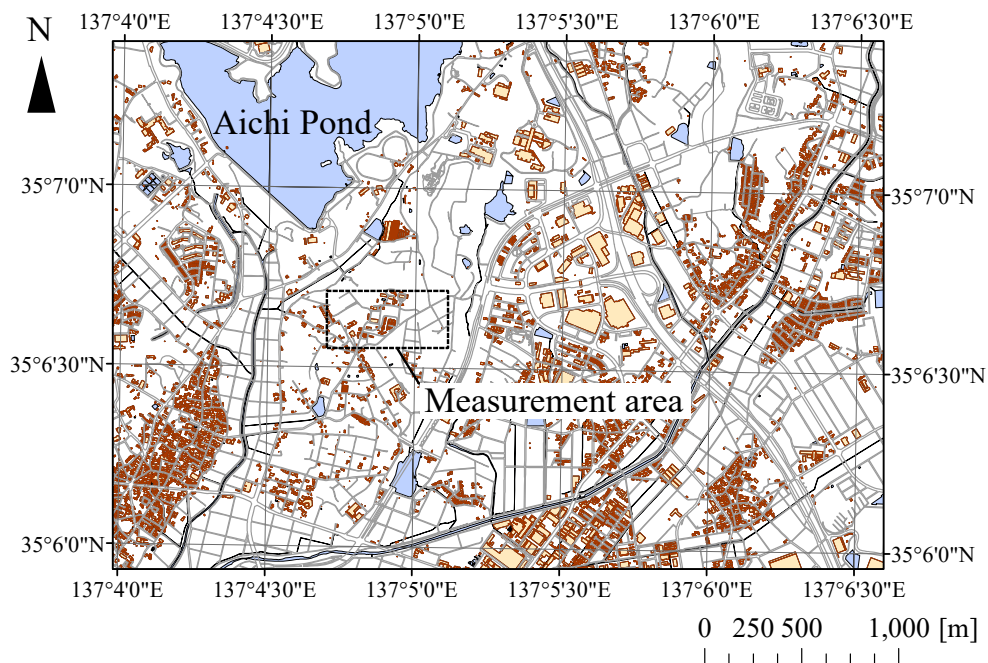


図 3.1 測定対象地周辺地図 (国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス [30] からの入手データにより作成)

多種の地表面種類が存在する東郷フィールド内のうち、土壌水分計測および地表面音響特性測定の実施箇所として、地表面性状が異なるよう、A-Dの4箇所を選定する。各箇所の地表面性状は、A: 畑、B: 草地、C: 田んぼ、D: 固い地面である。図3.2に、2017年6月23日に撮影された航空写真および4測定箇所A-Dを示す(航空写真撮影については第4章で後述する)。また図3.3に、各測定箇所の現地の様子を示す。Aは畑の隅であり、後述の土壌水分計測および音響特性測定期間中に作物は植えられていない。Bには日中にはヤギが放牧されており、ヤギが草を食べるため、時期によらず草の背丈は比較的短く一定に保たれている。Cは、土壌水分計測および音響特性測定開始時期である2019年5月上旬時点では、秋の稲刈り後、3月に一度田おこしをしてそのままにされている状態であり、雑草が生えている。その後、田んぼに水を入れる時期(6月上旬頃)より前までのみ、Cでは各種測定を実施した。Dは倉庫前の開けた場所であり、地面は土が押し固められている。

A-Dの地面において、基本的には土壌水分計測および地表面音響特性測定は互いにごく近い箇所にて行う。ただし、D: 固い地面に関しては、水分計埋設箇所の近くには室外機があり、室外機からの騒音が音響特性測定に影響を及ぼす可能性があったため、音響特性測定は水分計埋設地点から40 mほど離れた地点にて実施した。



図 3.2 測定対象地航空写真

第3章 複数種地表面における地表面音響特性の経時変化のモデル化



図 3.3 測定箇所 A-D の様子

A-D の各地面において、第2章で用いた目開き 2 mm, 850 μm , 425 μm , 250 μm , 106 μm , 75 μm のふるいを用い、土の粒径組成分布を調べた。粒径 $d[\text{mm}]$ に対する通過質量百分率 $P_d[\%]$ を、図 3.4 に示す。A: 畑および B: 草地の土は、粒径 75 μm 以下、2 mm 以上の土粒子の質量が全体のそれぞれ約 30 %, 約 70 %であり、粒径組成は互いに似ている。C: 田んぼでは、A: 畑や B: 草地よりも粒径が小さい土の割合が多い。D: 固い地面では、A: 畑や B: 草地よりも粒径が大きい土の割合が多い。図 2.7 と比較すると、A-D いずれの地面においても、第2章で対象とした土より、75 μm 以下の土粒子および 2 mm 以上の土粒子の割合が多い。

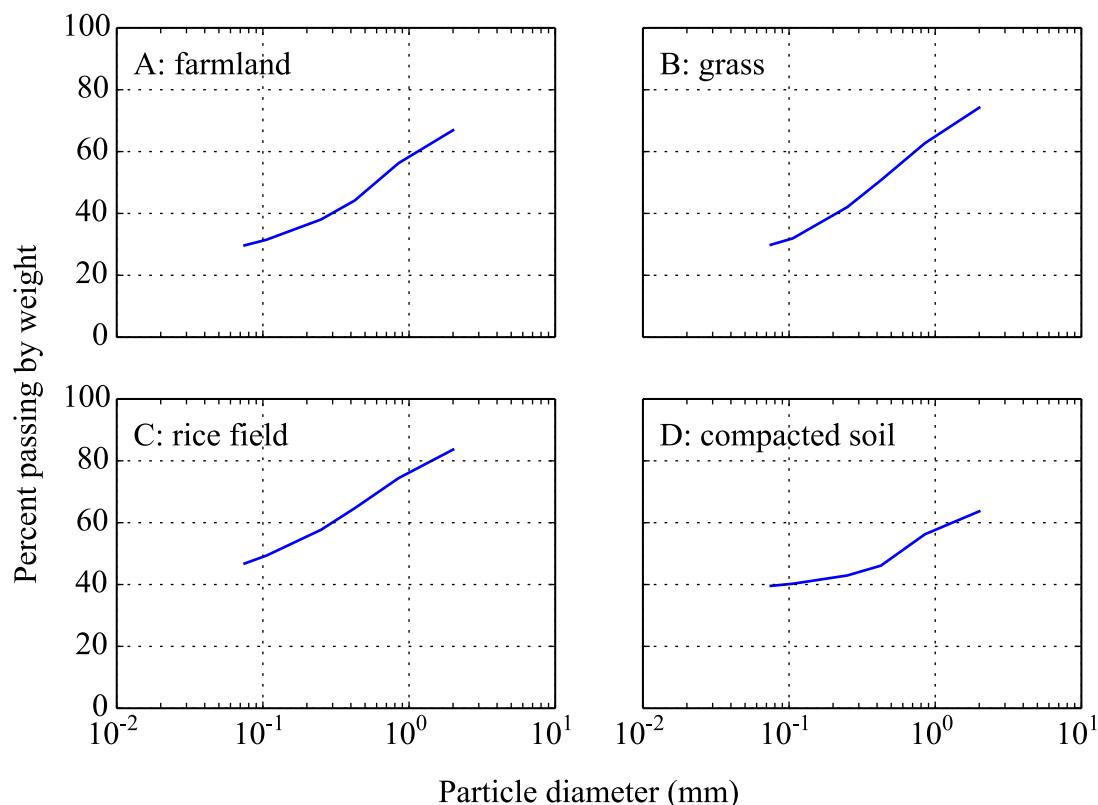


図 3.4 A-D の各地面の土の粒径加積曲線

3.2.2 気象の観測

気象は、図 3.2 中の点 X において、既設の複合気象センサ (WS700; Lufft 社) により 1 分毎に観測する。WS700 の設置状況を図 3.5 に示す。センサ部分は、地表面から高さ約 2 m の位置に設置されている。WS700 では、風向、風速、気温、相対湿度、露点温度、気圧、降水、日射の観測が可能である。WS700 で観測される気象要素とその特性のうち、主要なものを表 3.1 に示す。



図 3.5 WS700 の設置状況

表 3.1 WS700 の仕様 [46]

気象要素	特性	説明/値
気温	測定範囲	-50～+60 °C
	精度	± 0.2 °C (-20～+50 °C にて), ± 0.5 °C (それ以外, ただし -30 °C 以上にて)
相対湿度	測定範囲	0～100 %RH
	精度	± 2 %RH
気圧	測定範囲	300～1200 hPa
	精度	± 0.5 hPa (0～+40 °C にて)
降水	雨滴測定範囲	0.3～5.0 mm
	降水分解能	0.01 mm
	降水タイプ	雨, 雪
	降水強度	0～200 mm/h
	精度	実験室状況下で 20 %
日射	精度	5 %
	波長範囲	300～1100 nm
	最大放射	1400 W/m ²

3.2.3 土壌水分の計測

地面の土壌水分を, 埋設型土壌水分センサ (SM150; Delta-T 社) にて計測し, SM150 による計測データを防水型土壌水分計測ロガー (MIJ-12; 日本環境計測株式会社) にて記録する。SM150 は, 地表面から深さ 5 cm の位置に水平に挿し, 土壌水分を 5 分ごとに計測する。第 2 章の測定における SM150 の埋設深さは 10 cm であったのに対し, 本測定では埋設深さ 5 cm へと変更したのは, 地表面音響特性は地表面からの深い部分よりも, 地表面付近のごく浅い部分の土壌水分量により影響を受けると考えたためである。

土壌水分は, 図 3.2 に示す地点 A–D にそれぞれ埋設する。測定対象地の都合で, 測定箇所により計測開始日と計測終了日が異なるが, それらは表 3.2 の通りである。

表 3.2 土壌水分計測開始日および計測終了日

地点	計測開始日	計測終了日
A: 畑	2019 年 5 月 9 日	2019 年 9 月 25 日
B: 草地	2019 年 5 月 9 日	2019 年 11 月 27 日
C: 田んぼ	2019 年 5 月 9 日	2019 年 6 月 7 日
D: 固い地面	2019 年 5 月 9 日	2019 年 11 月 27 日

第2章と同じく、本章においても、土壌水分を表す物理量としては飽和度を用いる。飽和度 S_r を求めるために必要な間隙率 n を、第2章で述べた方法と同様にして求める。 n を求めるためには土のサンプリングが必要であるが、新潟大学五十嵐キャンパス内の地面を対象とした第2章では、土のサンプリングには内径 29 mm、長さ 140 mm のステンレス管を地面に直接打ち込み、それを取り出す方法を用いた。しかしながら、東郷フィールドの地面ではステンレス管を打ち込めない地面が存在したため、容積がそれぞれ 802, 811 cm³ の容器を用い、押切式ブロックサンプリング [47] により土のサンプリングを実施した。

A-D の各地面について、サンプリングに用いた容器の容積 V [ml]、土粒子の体積 V_s [ml]、 V および V_s を用いて式 (2.8) から算出した間隙率 n を表 3.3 に示す。間隙率は、A: 畑で最も小さく 44.6 %、B: 草地で最も大きく 67.7 %である。

飽和度 S_r は、式 (2.6) により算出された体積含水率 θ および表 3.3 の間隙率 n から、式 (2.7) により算出する。

表 3.3 各地点における間隙率 n

地点	サンプリングに用いた 容器の容積 V [ml]	土粒子の体積 V_s [ml]	間隙率 n [%]
A: 畑	811	449	44.6
B: 草地	802	259	67.7
C: 田んぼ	811	393	51.5
D: 固い地面	802	353	56.0

3.2.4 地表面音響特性の測定

A-D の各地表面を対象とし、2019 年 5 月 9 日から同 7 月 26 日まで、地表面音響特性を測定する。地表面音響特性は、表面音響特性現場測定法の一つである ANSI/ASA S1.18-2010 法 (以下 ANSI 法) により測定する。第2章で用いた EA 法は、マイクロホンの上部で複数のポータブルスピーカを振り回すにあたり測定人員が多く必要であるが、本測定にあたっては測定人員の確保が難しかったため、複数のスピーカを振り回す必要のない ANSI 法を用いた。いずれの手法を用いる場合でも、測定された伝達関数から実効的流れ抵抗を推定するという考え方は共通である。

ANSI 法では、図 3.6 に示す音源および受音点配置のもと、音源から出力した音を 2 受音点で受音し、両者間の複素音圧比 $T(f)$ (第2章における伝達関数と同義) を複数の測定点で得る。音源および受音点の配置として、ANSI 法の規格書では配置 A と配置 B の 2 つが与えられており、配置 A では $(h_s, h_t, h_b, d) = (0.325, 0.46, 0.23, 1.75)$ [m]、配置 B では $(h_s, h_t, h_b, d) = (0.20, 0.20, 0.05, 1.0)$ [m] である。配置 A は広い周波数範囲をカバーする配置であるのに対し、配置 B は

特に周波数 1 kHz 以上に重点が置かれ、また固い地面に適している配置である。本研究では、広い周波数範囲で適用可能な配置 A を用いる。

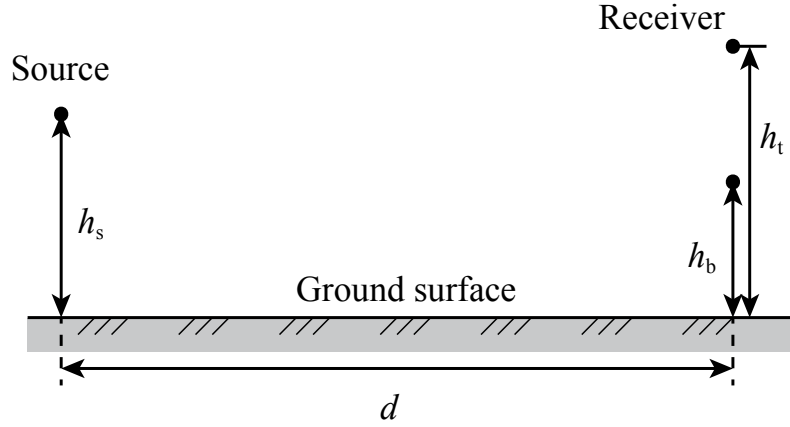


図 3.6 音源及び受音点配置立面図

図 3.7 および図 3.8 に、本研究における測定の設定及び測定風景を示す。パイプの一端に装着したフルレンジスピーカ (P800K; Fostex) への入力音が他端から放射される装置により、点音源を模擬する。スピーカにはパワーアンプ (NANO-A1; 東和電子株式会社) を接続し、アンプにはピンクノイズが収録された音楽再生プレイヤー (iPod shuffle; Apple) を接続する。2 受音点にはそれぞれ、1/2 インチマイクロホン (UC-59; RION) を 1 本ずつ、マイクロホンスタンドにより地表面からの高さ 0.46 m, 0.23 m の位置に設置する。ここで使用したマイクロホンスタンドは、図 3.8 に示す、2 マイクロホン間の距離を 0.23 m として固定できるようにしたものである。マイクロホン間の特性の相違は、マイクロホン位置の入れ替えによりキャンセルする。2 マイクロホン間の複素音圧比 $T(f)$ を、FFT 分析器 (SA-78; RION) にて求める。上限周波数は 5 kHz, 周波数間隔は 6.25 Hz, 平均回数は 150 回とする。測定は 50 cm 四方の 4 点の測定点で実施し、以下により 2 受音点間のスペクトルレベル差 $LD(f)$ の 4 点平均 $LD_{av}(f)$ を求める。

$$LD_{av}(f) = 20 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |T_j(f)| \right) \quad (3.1)$$

ここで n は測定点の数 ($n=4$) であり、 $T_j(f)$ ($j=1, 2, 3, 4$) は各測定点にて測定された複素音圧比である。測定点は、音源と 2 受音点の反射点の中点と定義する。地表面音響特性測定点と土壌水分計測点の位置関係は図 3.9 の通りである。ただし、D: 固い地面では、前述の通り音響特性測定点と土壌水分計測点は 40 m ほど離れているため、図 3.9 の通りではない。

第3章 複数種地表面における地表面音響特性の経時変化のモデル化

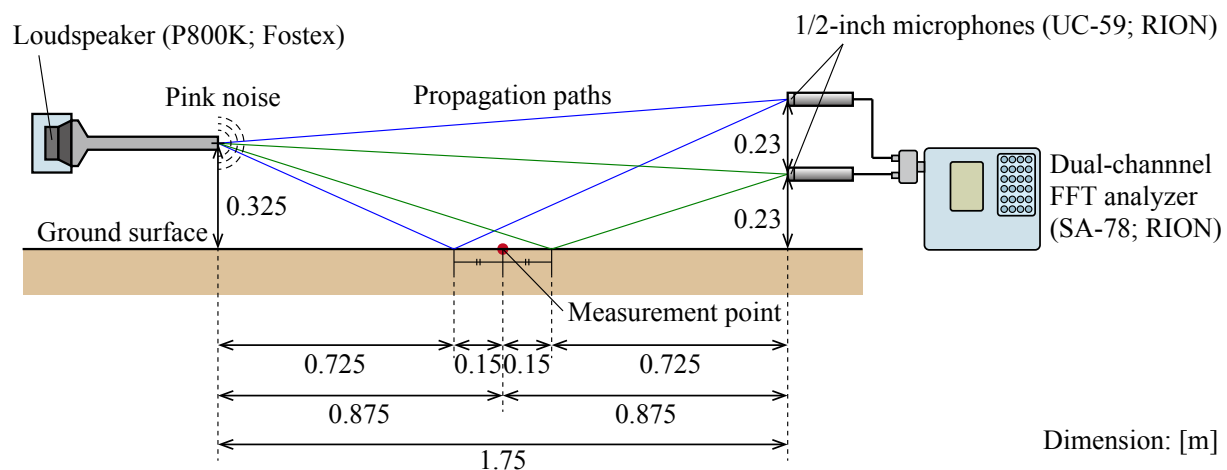


図 3.7 ANSI 法配置 A による測定機材配置



図 3.8 A: 畑における ANSI 法による測定風景

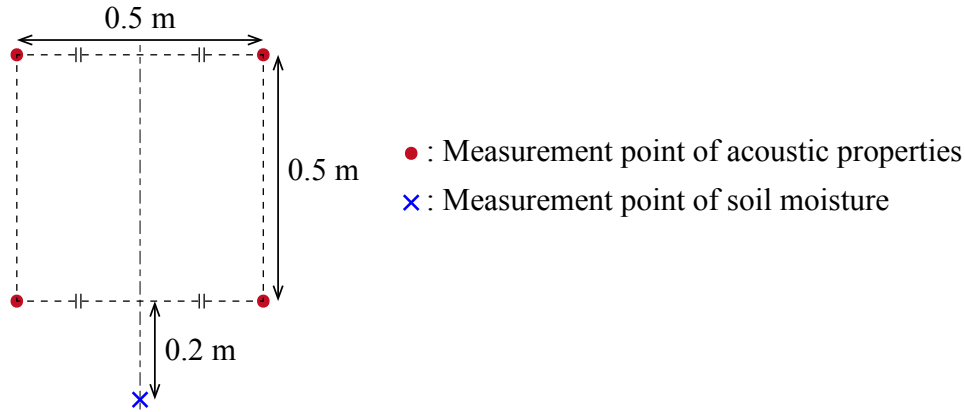


図 3.9 地表面音響特性測定点位置と土壌水分計測点位置の平面図 (D: 固い地面を除く)

3.3 実効の流れ抵抗の算出

ANSI 法では $T(f)$ からの表面インピーダンス比 z_c の算出方法として, Step 1, Step 2 の 2 手法が用意されている。Step 1 では, 10, 32, 63, 100, 160, 320, 1000, 3200 kPa s/m² の 8 種類の流れ抵抗値に対してあらかじめ計算された 2 受音点間のスペクトルレベル差 LD (テンプレート) と, 測定された LD が最も適合する実効の流れ抵抗 σ [kPa s/m²] を求め, σ からインピーダンスモデルにより z_c を算出する。Step 2 では, 各周波数における地表面アドミッタンス β を, 複素音圧比の実測値 T_m と理論モデル計算値 T が最もフィットするよう決定し, β の逆数を取り z_c を求める。

ここで本測定では, 図 2.32 のような流れ抵抗-飽和度の散布図を作成し, モデル定数を決定することを目的としている。すなわち, 音響特性測定結果から流れ抵抗を算出する必要があるが, Step 1 では計算過程において実効の流れ抵抗が得られるものの, その値は先に示した 8 つの値いずれかという離散量でしか得ることができない。 σ が離散量というのは, 流れ抵抗-飽和度の散布図を作成し, モデル定数を決定するという観点からすると, 本研究においては不適である。他方 Step 2 は前述の通り, 複素音圧比から β を直接決定する方法であり, 計算過程において実効の流れ抵抗は算出されない。そこで本研究では, 以下の通り LD の実測値と計算値のフィッティングを実施し, σ を連続量として推定する。なお, 時間因子は $e^{-j\omega t}$ を仮定する。

2 受音点間のスペクトルレベル差 LD の理論計算値 $LD_c(f)$ は, 以下により求まる。

$$LD(f) = 20 \lg (|T(f)|) \quad (3.2)$$

2 受音点間の複素音圧比 $T(f)$ は下式で定義される。

$$T(f) = \frac{p_u(f)}{p_l(f)} \quad (3.3)$$

ただし $p_u(f)$, $p_l(f)$ はそれぞれ上側及び下側の受音点における複素音圧である。ここで, それぞれの受音点における複素音圧 $p(f)$ は, 下式で計算される。

$$p(f) = \frac{e^{jkR_d}}{R_d} + Q(f, \beta) \frac{e^{jkR_r}}{R_r} \quad (3.4)$$

ただし k は波数である。また β は表面アドミタンスであり、周波数の関数である。 R_d, R_r はそれぞれ直接経路及び反射経路の長さであり、 h_s, d , 受音点高さ h_r を用いて下式で求める。

$$R_d = \sqrt{(h_s - h_r)^2 + d^2}, \quad (3.5)$$

$$R_r = \sqrt{(h_s + h_r)^2 + d^2} \quad (3.6)$$

Q は複素音圧係数であり、以下により求められる。

$$Q = 1 + 2\tau\beta\{j\sqrt{\pi}W(w)\}, \quad (3.7)$$

$$W(w) = e^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw), \quad (3.8)$$

$$w = \tau(\cos\theta + \beta), \quad (3.9)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{2}jkR_r} \quad (3.10)$$

ただし θ は入射角である。式 (3.7) 中の β は、下式の Delany-Bazley モデル式 [15] により特性インピーダンス比 z_c を計算し、逆数をとることで与える。

$$z_c = 1 + 9.08 \left(\frac{1000f}{\sigma} \right)^{-0.75} + j11.9 \left(\frac{1000f}{\sigma} \right)^{-0.73} \quad (3.11)$$

ここで f は周波数 [Hz] である。

上式より求まる $LD_c(f)$ と、複数測定点における LD の測定値の平均 $LD_{av}(f)$ の二乗平均平方根誤差を最小とするパラメータ値を推定する。推定パラメータは、 σ のみの 1 パラメータの場合に加え、LD の実測値には機材設置位置誤差が含まれることを考慮し、 σ に加え音源高さ h_s も併せた計 2 パラメータの場合の両方を実施し、両者の結果を比較する。2 パラメータ推定の場合には、音源および 2 マイクロホン是一体となって上下すると考え、各マイクロホンの高さは、 $h_t = h_s + 0.135$ [m], $h_b = h_s - 0.095$ [m] として σ および h_s の推定を行う。

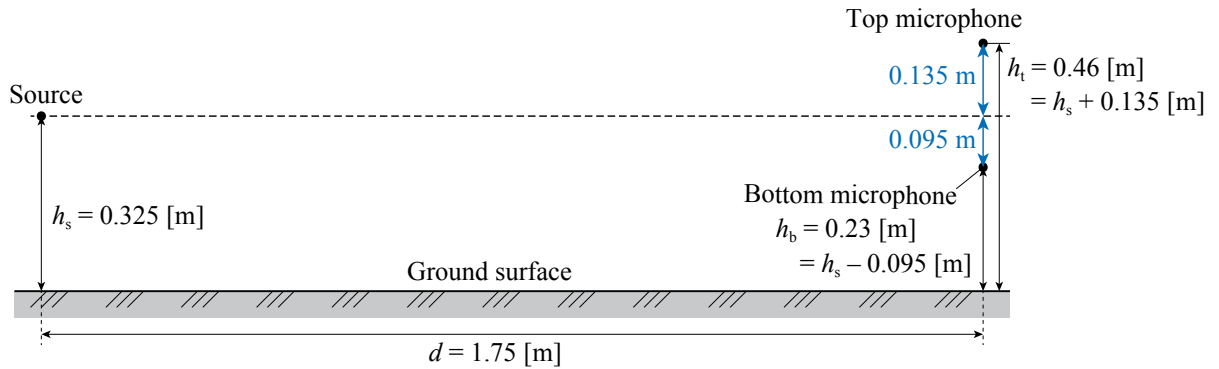


図 3.10 ANSI 法の配置 A における音源及びマイクロホン設置位置

図 3.11 に、LD のフィッティングの例として、A: 畑にて 6 月 21 日に測定された LD_{av} およびフィッティングから推定された 1 および 2 パラメータ値を用いて計算された LD_c を、推定パラメータ値とともに示す。また、参照用として、1 パラメータによる推定結果である図 3.11 (a) には、Step 1 におけるテンプレートも併せて示す。 σ のみを推定した図 3.11 (a) では、 LD_{av} のピーク周波数はテンプレートよりも高周波側にずれている。また、 LD_{av} と LD_c は振幅は同程度であるものの、 LD_{av} のピーク周波数は LD_c よりもやや高い。この実測値のピーク周波数のずれは、マイクロホン設置位置誤差によるものと考えられる。一方、 σ と併せて h_s も推定した図 3.11 (b) では、ピーク周波数は LD_{av} 、 LD_c とともに概ね一致する。同様に、B: 草地にて 7 月 10 日に測定された LD_{av} およびフィッティングから推定された 1 および 2 パラメータ値を用いて計算された LD_c を、推定パラメータ値とともに示す。 σ のみを推定した図 3.12 (a) では、 LD_{av} および LD_c のピーク周波数は概ね一致するものの、両者の振幅は乖離している。一方、 σ と併せて h_s も推定した図 3.12 (b) では、図 3.12 (a) よりも LD_{av} および LD_c の振幅が近い値となっている。

ANSI 法の音源-受音点配置において、 σ のみの 1 パラメータを変化させたとき、LD のピークディップの周波数及び振幅は、互いに連動して決まる。一方、 σ だけでなく h_s も加えた 2 パラメータを変化させたときは、ピークディップの周波数と振幅それぞれを独立に変化させられる余地が生じる。そのため、1 パラメータフィッティングでは LD_{av} と LD_c があまり合わない場合でも、2 パラメータフィッティングでは LD_{av} と LD_c とよく一致させることができる。

このように、1 パラメータ推定よりも 2 パラメータ推定の方が LD_{av} と LD_c がよく一致するため、妥当な推定ができていると考えられる。よって以降では、2 パラメータ推定により、地面の σ を推定する。

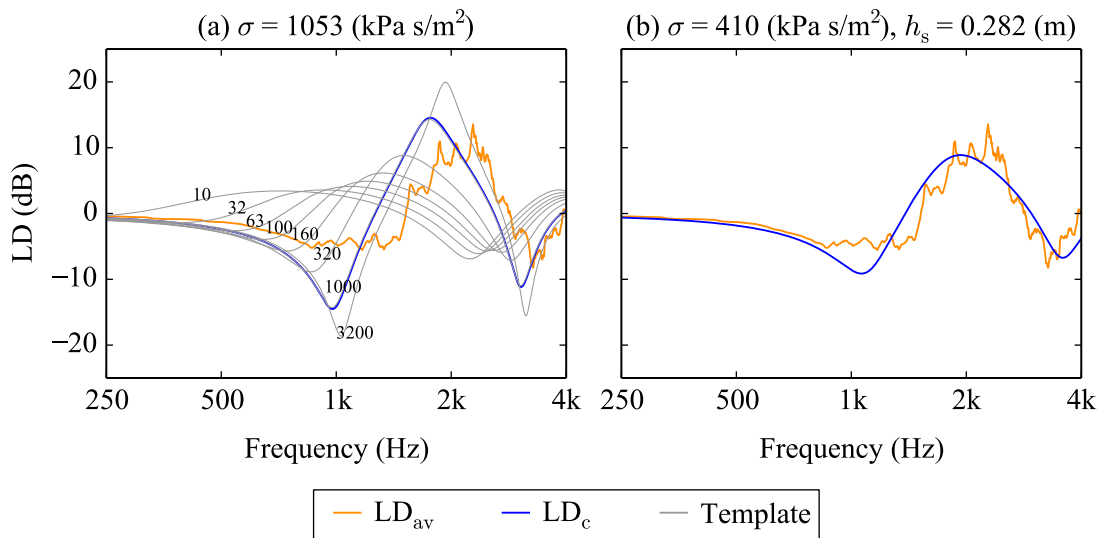


図 3.11 A: 畑における (a) 1 パラメータ, (b) 2 パラメータによるフィッティング結果 (テンプレート近傍の数字は実効的流れ抵抗 $\sigma \text{ [kPa s/m}^2\text{]}$ を表す)

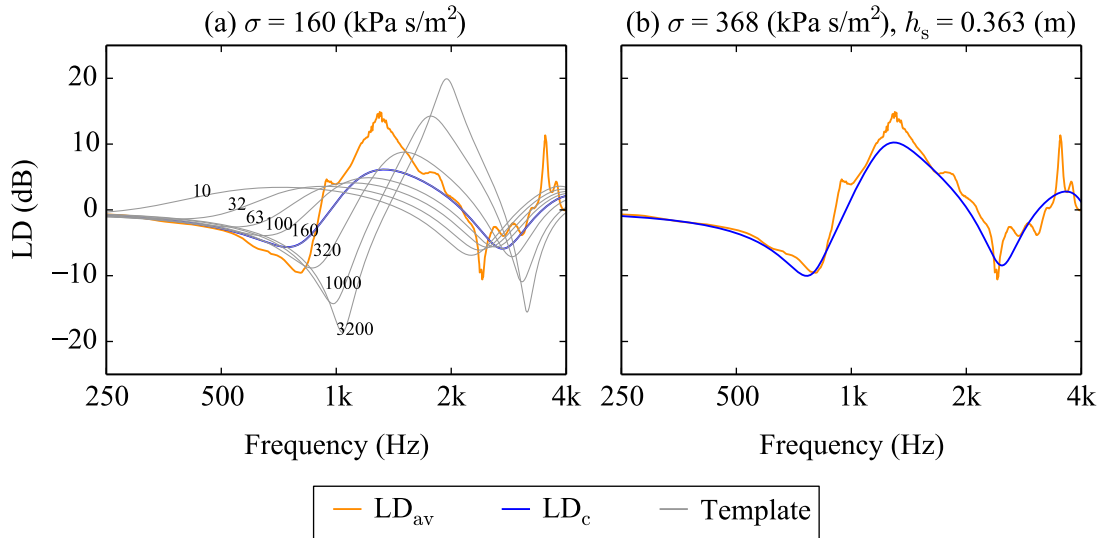


図 3.12 B: 草地における (a) 1 パラメータ, (b) 2 パラメータによるフィッティング結果 (テンプレート近傍の数字は実効的流れ抵抗 σ [kPa s/m²] を表す)

3.4 測定結果

3.4.1 気象および土壌水分の観測結果

図 3.13 に, 2019 年 5 月 9 日 12 時から 2019 年 11 月 27 日 11 時の間に観測および測定された気温, 降雨量, 飽和度の 1 時間ごとの変化を示す。各要素の欠測は, 当該部分をプロットせずに空白として示す。

図 3.13 (a) に 1 時間平均気温 T を示す。気温は一日の中で上下変動している。また, 長期的な変動を見ると, 気温は測定開始時期である 5 月から 8 月頃にかけて緩やかに上昇し, 9 月頃まで横ばいとなった後, 測定終了時期である 11 月にかけて緩やかに低下している。図 3.13 (b) に 1 時間積算降雨量 R を示す。降雨は測定期間を通して見られるが, 7 月下旬から 8 月中旬にかけて, また 9 月上旬から 9 月下旬にかけては降雨量が比較的少ない。図 3.13 (c) に A: 畑および B: 草地での, 図 3.13 (d) に C: 田んぼおよび D: 固い地面での土の飽和度 S_r を示す。図 3.13 (c) および (d) を図 3.13 (b) と対応させて見ると, 降雨があると飽和度は急激に上昇し, その後数日間で元の値程度まで下降する。これは第 2 章で見られた, 降雨と飽和度の関係と同様である。図 3.13 (c) および (d) より, A: 畑, B: 草地, D: 固い地面での飽和度の時間変化は類似している。C: 田んぼでの飽和度は, 他の地面よりも値が大きい。

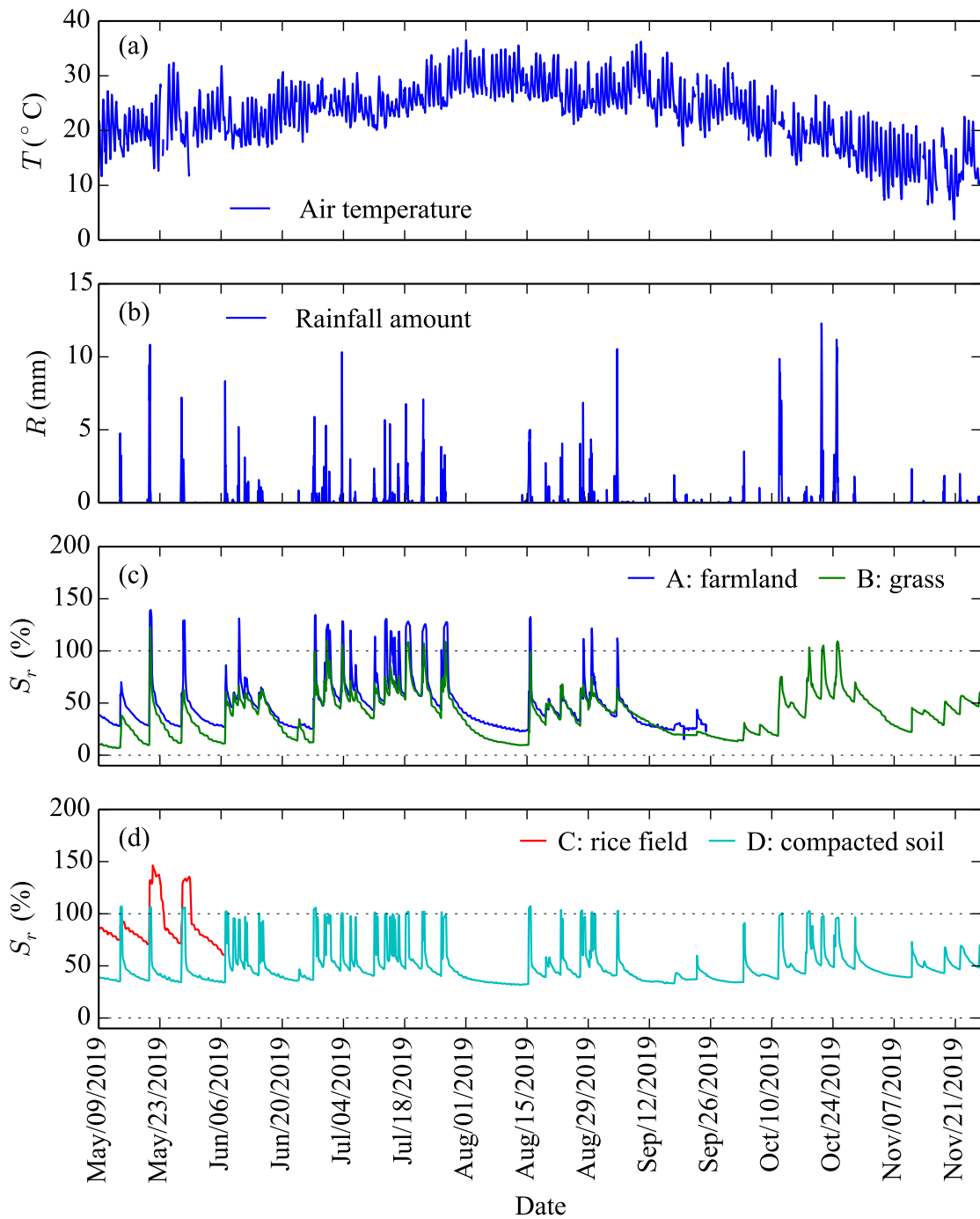


図 3.13 (a) 気温, (b) 降雨量, (c) A: 畑および B: 草地における飽和度, (d) C: 田んぼおよび D: 固い地面における飽和度の時間変化

表 3.4 に、A-D の各地面における 1 時間ごとの飽和度の欠測を除いた全測定データ数 N_{all} 、そのうち飽和度が 100 % を超えるデータ数 $N_{over100}$ 、全測定データ数のうち飽和度が 100 % を超えるデータ数の割合を示す。図 3.13 および表 3.4 より、C: 田んぼでは他の地表面よりも飽和度が 100 % を超えている割合が多いことがわかる。一方、土の間隙の体積に占める水の体積の割合を表す飽和度が 100 % を超えることは物理的にはあり得ない。これより、C: 田んぼでは飽和度の計測が妥当に行われなかった可能性が高い。その原因としては、算出した間隙率が妥当でなかったことや、水浸しになりやすい田んぼのような地面での正確な土壌水分計測に水分計が対応していない可能性が考えられる。

表 3.4 各地面における N_{all} , $N_{over100}$, N_{all} に対する $N_{over100}$ の割合

地点	欠測を除いた全測定 データ数 N_{all}	飽和度が 100 % を超える データ数 $N_{over100}$	$\frac{N_{over100}}{N_{all}} \times 100$ (%)
A: 畑	3337	201	6.02
B: 草地	4847	64	1.32
C: 田んぼ	693	127	18.3
D: 固い地面	4848	176	3.63

そこで、C: 田んぼについては、飽和度がおおよそ頭打ちになる値を 100 % として、実測飽和度全体をスケールリングすることとする。本研究では、田んぼにおける実測飽和度の 99 パーセンタイルを、飽和度 100 % と考える。すなわち、変換後の実測飽和度 S_r' は、変換前の実測飽和度 S_r から以下により計算される。

$$S_r' = \frac{100}{S_{r_{99}}} \times S_r \quad [\%] \quad (3.12)$$

ここで $S_{r_{99}}$ は田んぼにおける飽和度の 99 パーセンタイルを表し、 $S_{r_{99}} = 142.12$ [%] である。

図 3.14 に、田んぼにおける S_r 及び S_r' を、 $S_{r_{99}}$ の値とともに示す。飽和度を変換することにより、田んぼでの全 693 データのうち、6 データ以外では飽和度が 100 % 以下となった。

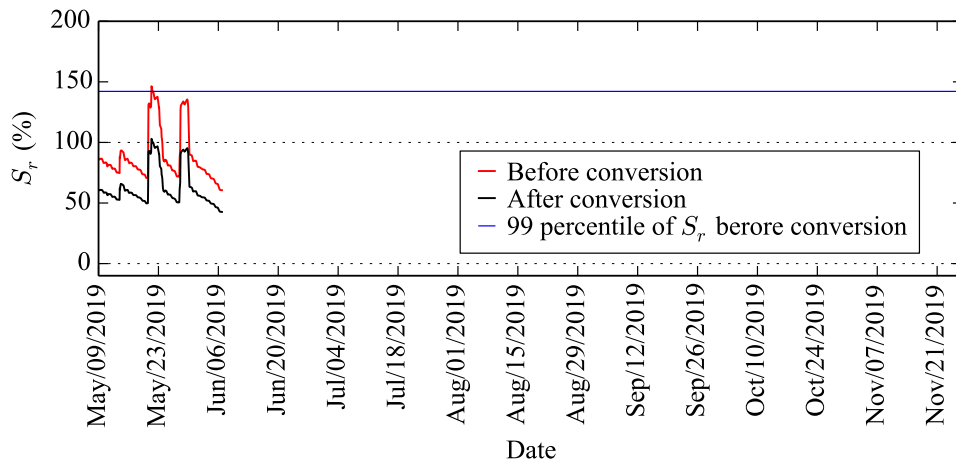


図 3.14 C: 田んぼにおける S_r , S_r' , $S_{r_{99}}$

3.4.2 地表面音響特性の測定結果

地表面音響特性は、約3ヶ月間の測定期間を通し、A: 畑で31回、B: 草地で21回、C: 田んぼで11回、D: 固い地面で21回測定した。図3.15–図3.18に、4測定点で測定されたLDならびに、 LD_{av} および LD_{av} に対するフィッティングから推定された2パラメータ値を用いて計算された LD_c の例を、A–Dの地表面ごとに示す。

図3.15にはA: 畑における測定例として、7月18日の測定結果を示す。図3.15(a)より、4測定点でのLDには、特に周波数1 kHz以上で上下変動が見られる。それらを平均した LD_{av} は、図3.15(b)に示す通りとなり、 LD_{av} に対しフィッティングさせた LD_c は LD_{av} と概ね一致している。推定されたこの日の実効的流れ抵抗 σ は809 kPa s/m²であり、ASJ RTN-Model 2018で「表面の柔らかい畑地」の実効的流れ抵抗として定められている値である75 kPa s/m²よりも大きい。この差異は、地点Aは畑の隅の作物が植えられていない場所であり、地表面が比較的固く、ASJ RTN-Model 2018が「畑地」として想定している地表面性状とは異なることに起因すると考えられる。また、推定された音源高さ h_s は0.294 mであり、ANSI法の配置Aによる規定高さ0.325 mより3 cmほど小さく推定された。

図3.16にはB: 草地における測定例として、6月8日の測定結果を示す。図3.16(a)より、4測定点でのLDのばらつきは小さい。図3.16(b)より、 LD_c は LD_{av} とよく一致している。推定されたこの日の実効的流れ抵抗 σ は215 kPa s/m²であり、ASJ RTN-Model 2018で「草地」や「芝地」の実効的流れ抵抗として定められている値である300 kPa s/m²と同程度である。推定された音源高さ h_s は0.341 mであり、ANSI法の配置Aによる規定高さ0.325 mより1.6 cmほど大きく推定された。

図3.17にはC: 田んぼにおける測定例として、5月17日の測定結果を示す。図3.17(a)より、4測定点でのLDには細かな変動が見られ、周波数2 kHz以上では各点のばらつきが大きい。田んぼの測定表面には直径数cmほどの大きさの土の塊が転がっており、地表面が平坦でなかったため、図3.17に示した5月17日のみならず、全体として安定した測定結果が得られにくい傾向にあった。図3.17(b)より、 LD_c は LD_{av} と概ね一致している。推定されたこの日の実効的流れ抵抗 σ は88 kPa s/m²であり、ASJ RTN-Model 2018で「田んぼ」の実効的流れ抵抗として定められている値である300 kPa s/m²よりも小さい。ただし、田んぼは作物の生育状況によって地表面性状が大きく変化するが、ASJ RTN-Model 2018で想定している田んぼの地表面性状は明記されていないため不明であり、両者の値を一概に比較することはできない。推定された音源高さ h_s は0.339 mであり、ANSI法の配置Aによる規定高さ0.325 mより1.4 cmほど大きく推定された。

図3.18にはD: 固い地面における測定例として、6月17日の測定結果を示す。図3.18(a)より、ピーク部分である周波数2 kHz前後で4測定点でのLDがややばらつくが、それ以外の周波数においては4点間のばらつきはほとんどない。図3.18(b)より、 LD_{av} はピーク部分が明確な山となっていないため、当該部分では LD_c が LD_{av} にあまり合わないが、全体として

は両者は概ね一致している。推定されたこの日の実効の流れ抵抗 σ は 1618 kPa s/m^2 であり，ASJ RTN-Model 2018 で「固い地面」の実効の流れ抵抗として定められている値である 1250 kPa s/m^2 と同程度である。推定された音源高さ h_s は 0.319 m であり，ANSI 法の配置 A による規定高さ 0.325 m とほぼ同程度であった。

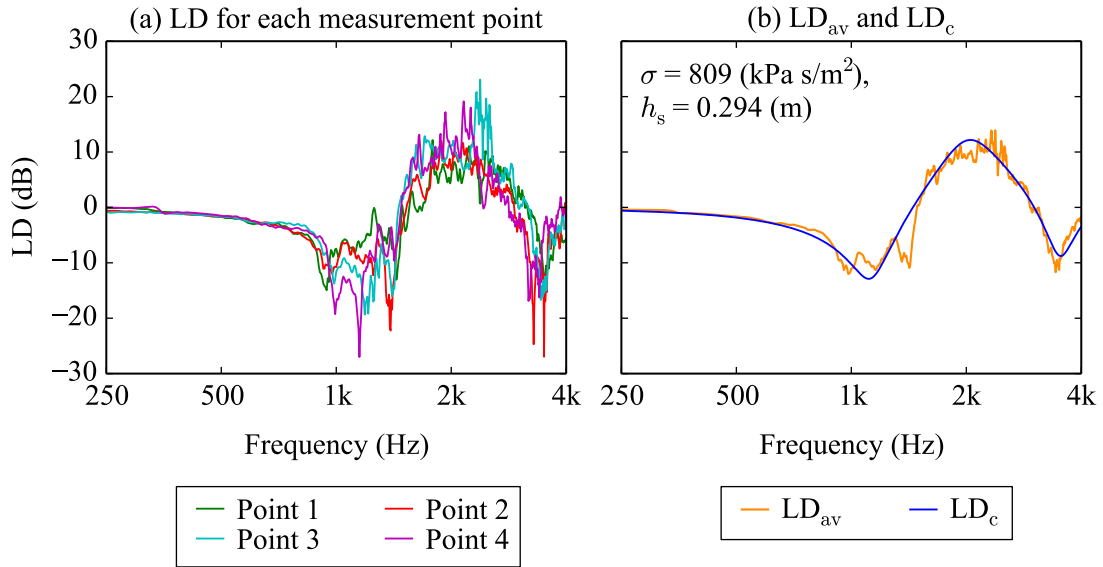


図 3.15 A: 畑における (a) 4 測定点での LD，(b) LD_{av} および LD_c ならびにパラメータ推定値

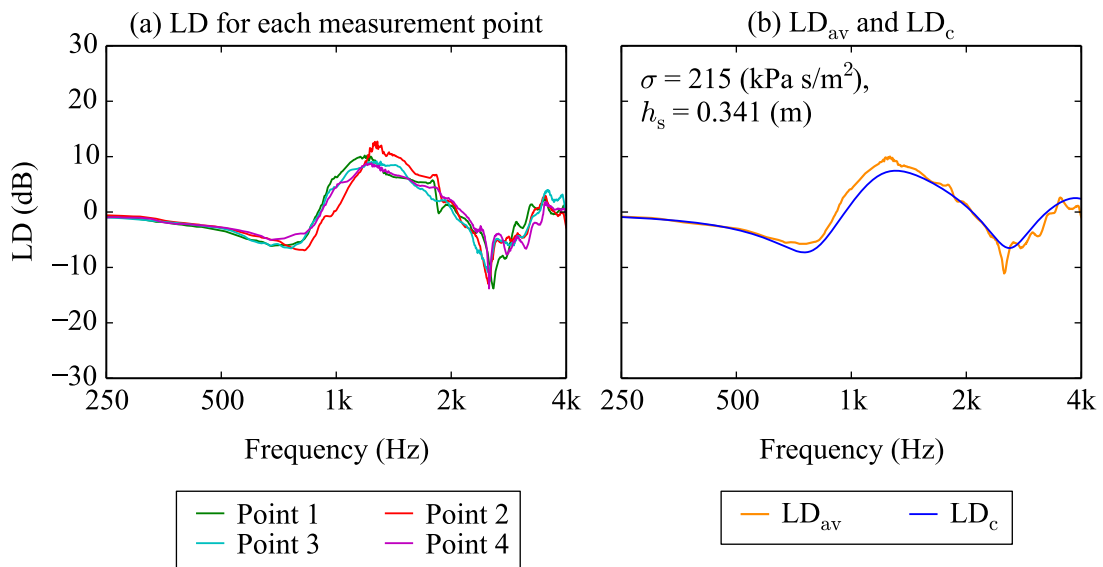


図 3.16 B: 草地における (a) 4 測定点での LD，(b) LD_{av} および LD_c ならびにパラメータ推定値

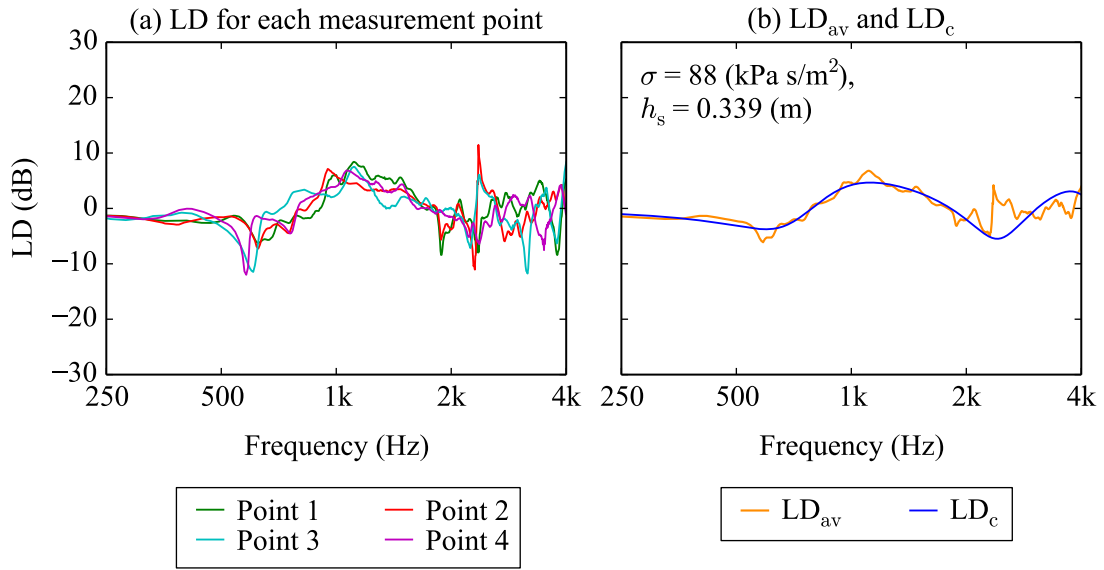


図 3.17 C: 田んぼにおける (a) 4 測定点での LD, (b) LD_{av} および LD_c ならびにパラメータ推定値

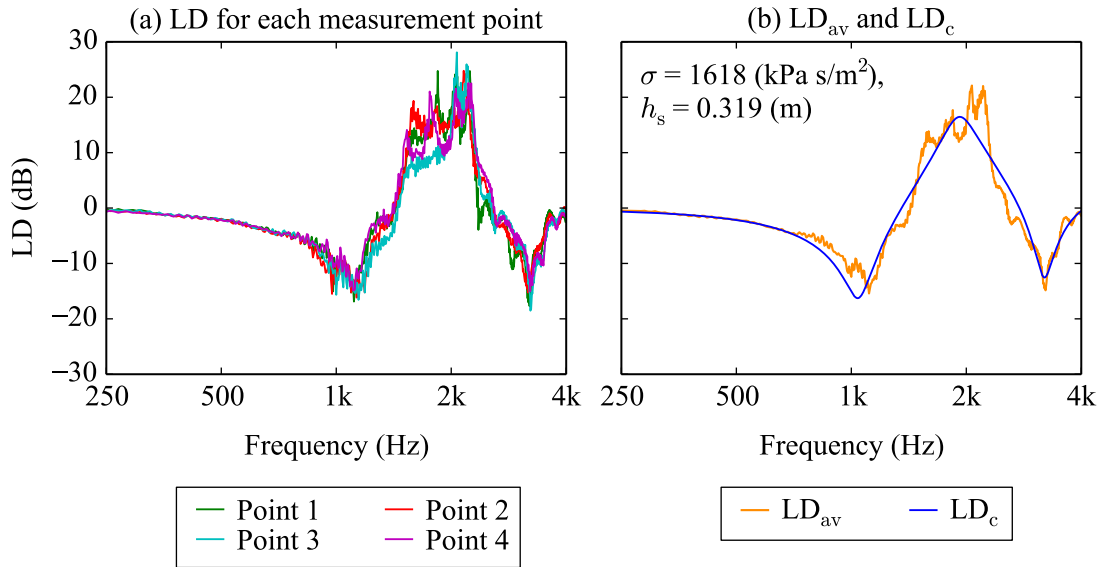


図 3.18 D: 固い地面における (a) 4 測定点での LD, (b) LD_{av} および LD_c ならびにパラメータ推定値

3.5 地表面音響特性経時変化モデルの適用

本節では、第2章で構築したモデルの、東郷フィールドでの測定結果への適用を試みる。モデル適用の可否の判断、およびモデル適用が可能な場合はモデル定数の決定を行う。

3.5.1 Stage 1

Stage 1 について、第2章では Cases 1–3 のうち Case 2 (降雨量の1時間積算値および、気温の1時間平均値を日中以外の時間の気温を除いて24時間後方移動平均した値を用いる場合)により計算された飽和度が実測飽和度に最も近かったため、本章でも Case 2 により降雨量および気温を積算または平均し、モデル定数の決定に用いる。

式 (2.44) および (2.46) 中のモデル定数 a , b , c , d を、飽和度の実測値と計算値の差が最小となるよう、非線形最小二乗法により決定する。非線形最小二乗法による推定を行う期間は、気温、降雨量、飽和度の全てで欠測がない期間を選ぶこととし、A: 畑, B: 草地, D: 固い地面では2019年6月1日から6月22日, C: 田んぼでは2019年5月10日から5月22日とする。推定の結果、表3.5に示す結果を得た。

表 3.5 各地面で定まったモデル定数 a , b , c , d

地点	a [1/mm]	b [1/day]	c [1/°C]	d [°C]
A: 畑	1.407	0.2862	1.618	44.27
B: 草地	2.936	1.073	1.349	54.95
C: 田んぼ	1.153	0.1524	1.914	33.91
D: 固い地面	0.8331	0.2324	0.01161	4623

表3.5のモデル定数を用いて、2019年5月9日12時から2019年11月27日11時までについて飽和度のモデル計算値を求める。ここで、第2章と同様、降雨量の欠測期間は降雨量を0、気温の欠測期間は気温を直線補間して計算する。図3.19–図3.22に、平均気温、積算降雨量、飽和度のモデル計算値および実測値を地面ごとに示す。いずれの地面でも、フィッティングを実施した期間においては実測飽和度と計算飽和度はよく一致している。それ以外の期間では、飽和度の実測値と計算値に一部乖離が見られる。特に10月中旬から11月上旬の降雨の多い期間では、いずれの地面でも飽和度のモデル計算値が100%を大きく超えている。当該部分については、後のモデル計算では式 (2.56) により100%を超えないよう頭打ちとする。全体的に見ると両者は概ね一致しており、気象要素からの飽和度のモデル化は良好に行われたといえる。

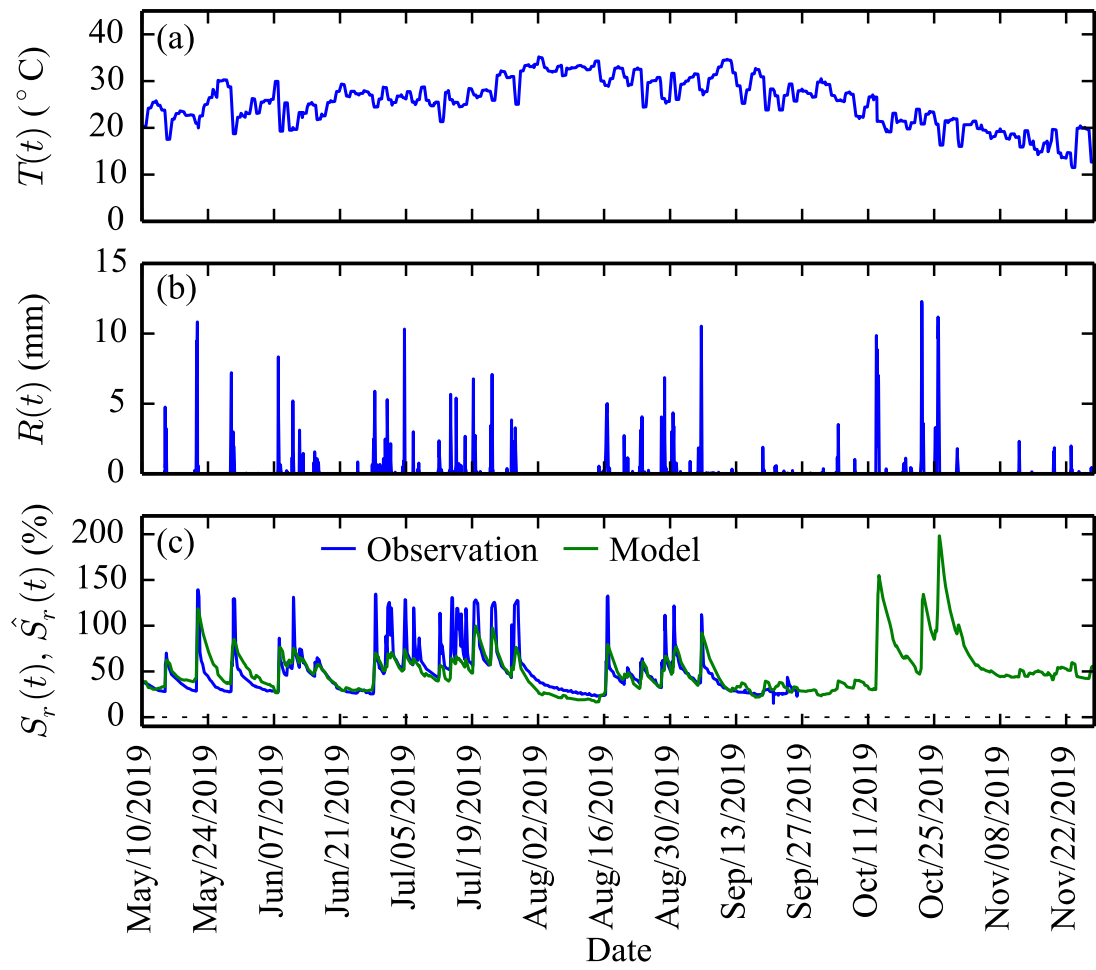


図 3.19 B: 畑での (a) 1 時間平均気温, (b) 1 時間積算降雨量, (c) 1 時間毎の飽和度

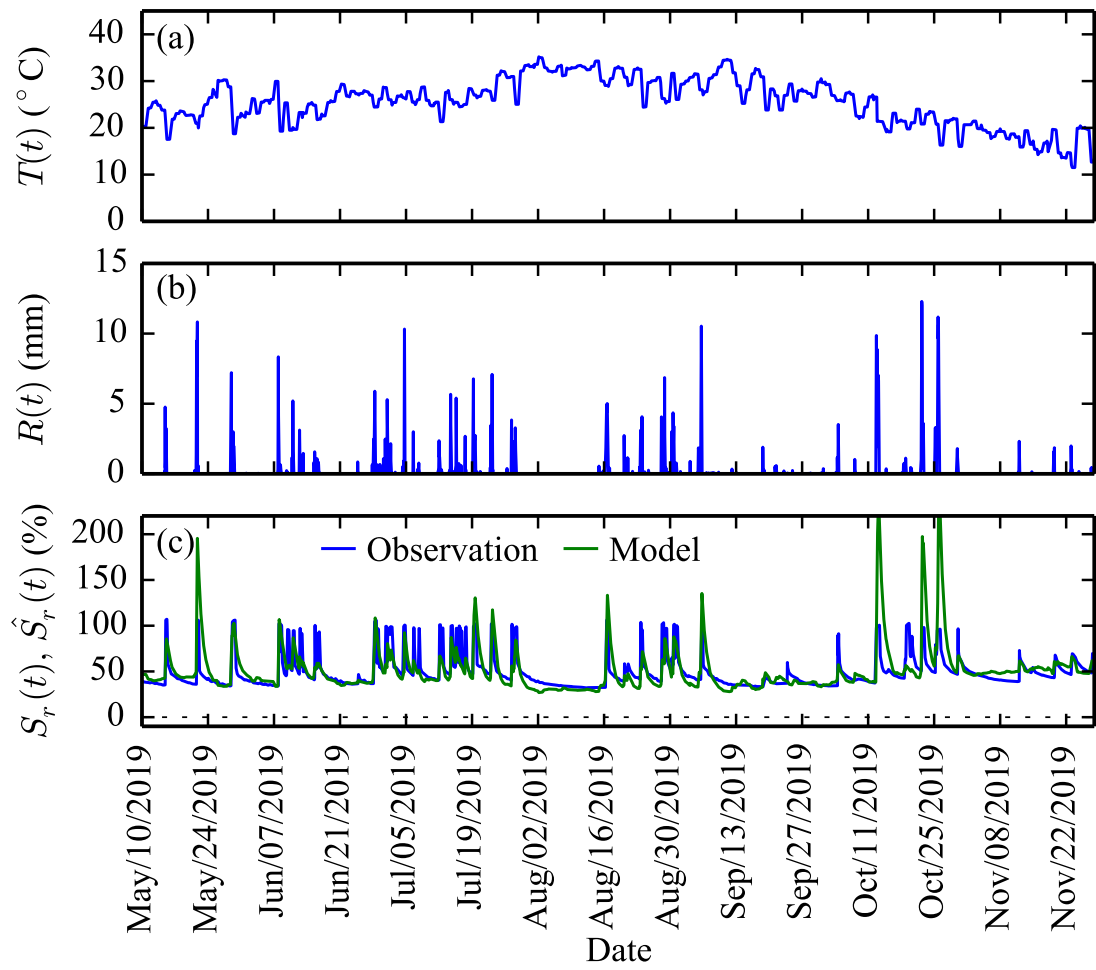


図 3.20 D: 固い地面での (a) 1 時間平均気温, (b) 1 時間積算降雨量, (c) 1 時間毎の飽和度

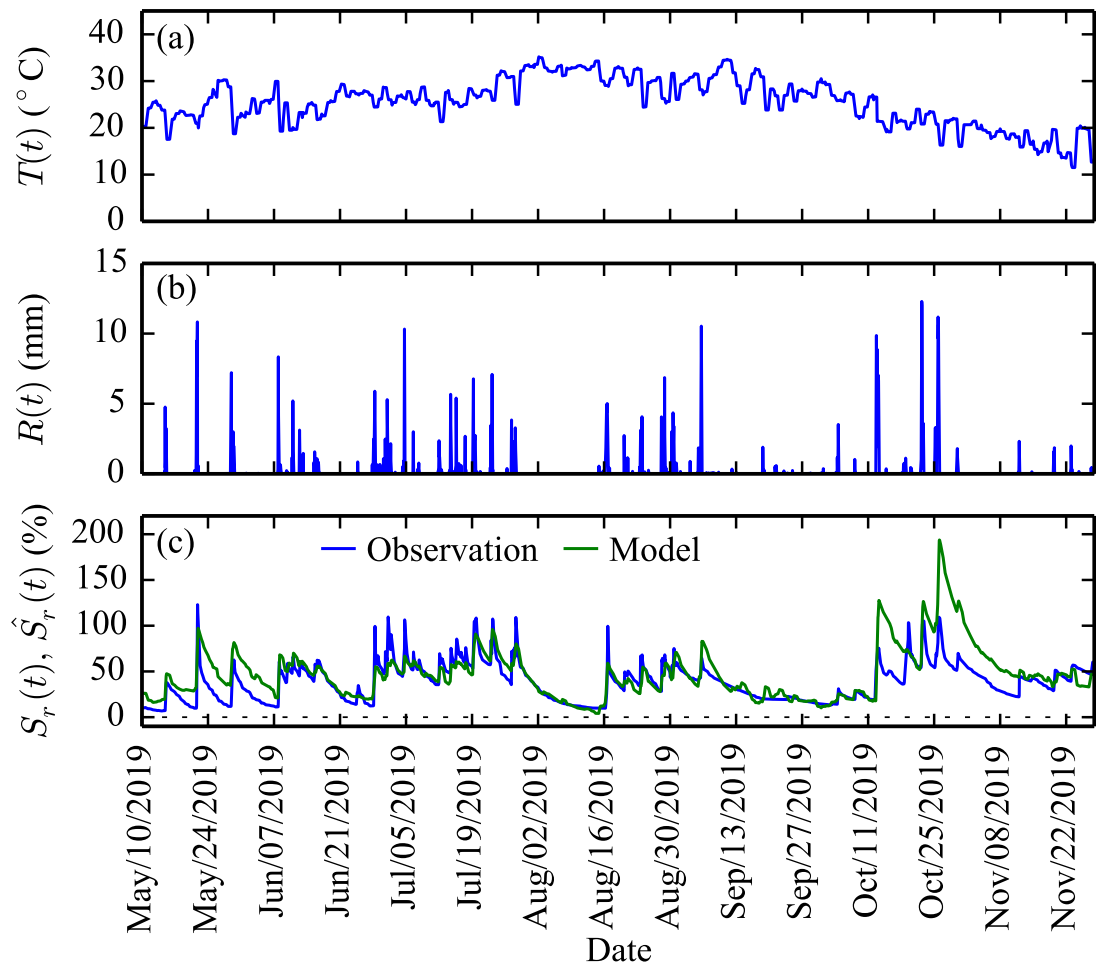


図 3.21 E: 草地での (a) 1 時間平均気温, (b) 1 時間積算降雨量, (c) 1 時間毎の飽和度

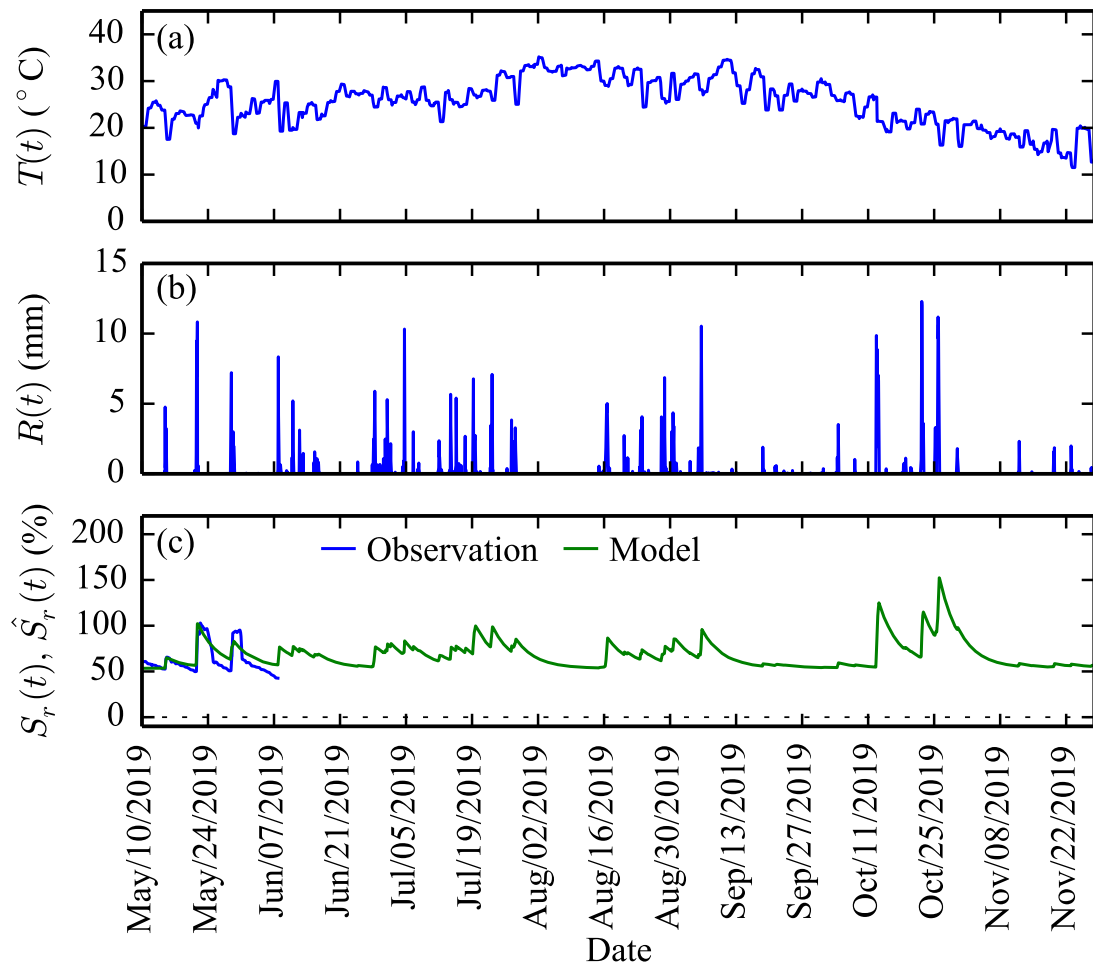


図 3.22 G: 田んぼでの (a) 1 時間平均気温, (b) 1 時間積算降雨量, (c) 1 時間毎の飽和度

3.5.2 Stage 2

Stage 2 について、第2章では Model 1, Model 2 の2つのモデルを構築した。このうち Model 2の方が Model 1よりも精度良く地表面吸音率を推定できたため、本章では Model 2を用いる。

式 (2.53) 中のモデル定数 p, q を、ANSI 法による音響特性測定結果から推定された実効的流れ抵抗 $\sigma(t)$ と、Stage 1 にて計算された飽和度 $\hat{S}_r(t)$ の散布図にフィッティングさせて求める。この散布図の作成で用いる $\hat{S}_r(t)$ は、Stage 1 にて計算された1時間ごとの飽和度 $\hat{S}_r(t)$ のうち、音響特性測定時刻に対応する飽和度を抜き出したものとする。また、実効的流れ抵抗として、第2章では Wilson モデルによる実効的流れ抵抗 $\sigma_w(t)$ を用いていたが、本章では ANSI 法の理論モデルにおいて Delany-Bazley モデルが用いられていることを考慮し、Delany-Bazley モデルによる実効的流れ抵抗 $\sigma(t)$ を用いる。

表 3.6 に、フィッティングにより定まったモデル定数を地面ごとに示す。図 3.23–図 3.26 に、 $\hat{S}_r(t)$ と $\sigma(t)$ の散布図および式 (2.53) の p および q に表 3.6 の値を代入した場合の曲線を示す。図 3.23 より、A: 畑では散布図には右上がりの傾向が見られるものの、曲線は散布図に沿っていない。図 3.24 および図 3.25 より、B: 草地および C: 田んぼでは散布図に右上がりの傾向が見られ、それに曲線が沿っている。図 3.26 より、D: 固い地面では散布図自体に右上がりの傾向が見られないため、曲線もほぼ直線となっている。固い地面に関しては、土壌水分による音響特性の変化は小さいと考えられるため、気象によって音響特性が変化するというモデル化はしないこととする。

表 3.6 各地面で定まったモデル定数 p, q

地点	p [kPa s/m ²]	q [kPa s/m ²]
A: 畑	0.954	700
B: 草地	435	26.1
C: 田んぼ	24.8	57.2
D: 固い地面	1×10^{-10}	1571

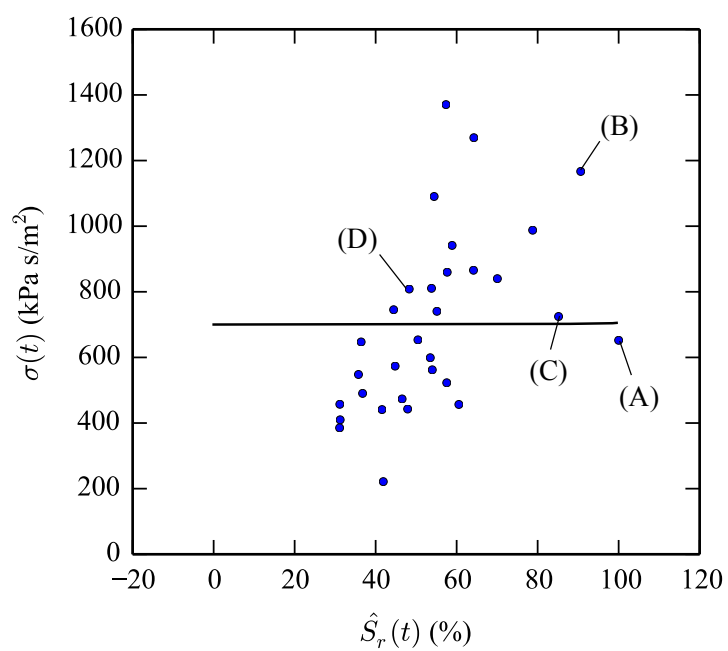


図 3.23 A: 畑における計算飽和度-流れ抵抗の散布図および回帰曲線

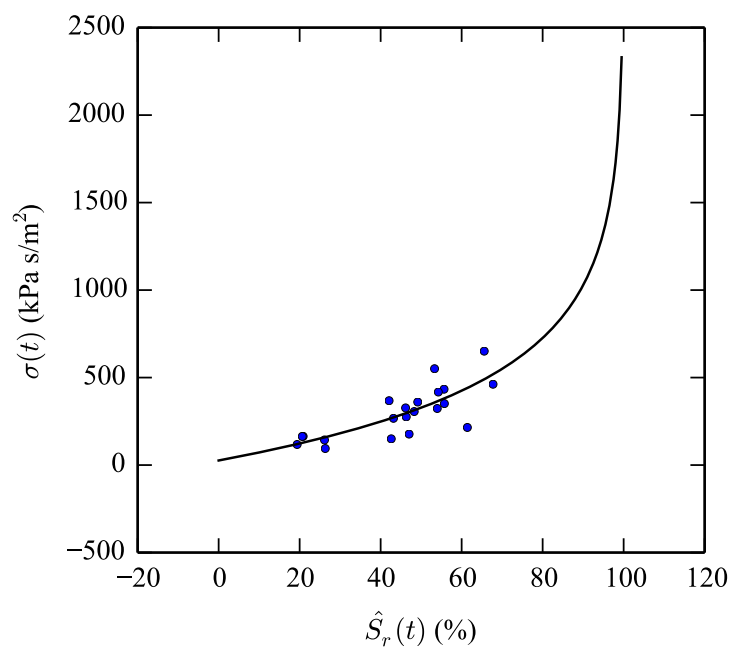


図 3.24 B: 草地における計算飽和度-流れ抵抗の散布図および回帰曲線

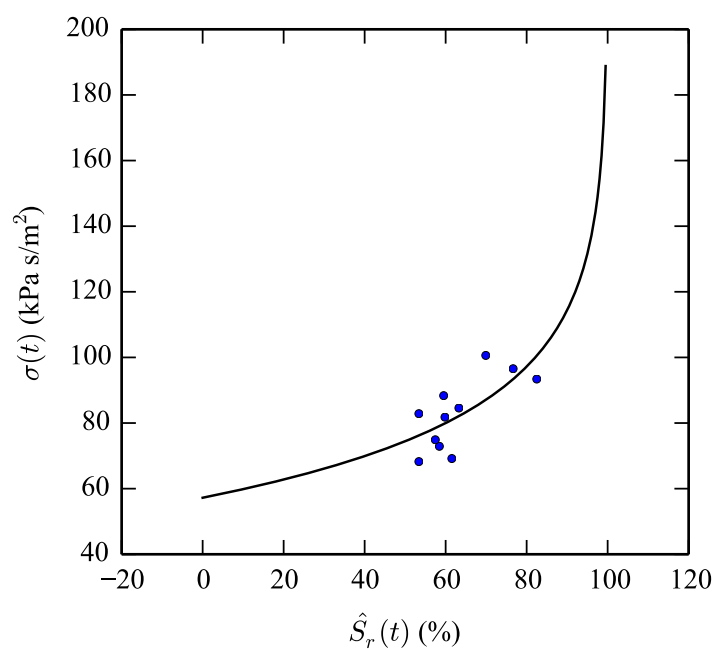


図 3.25 C: 田んぼにおける計算飽和度-流れ抵抗の散布図および回帰曲線

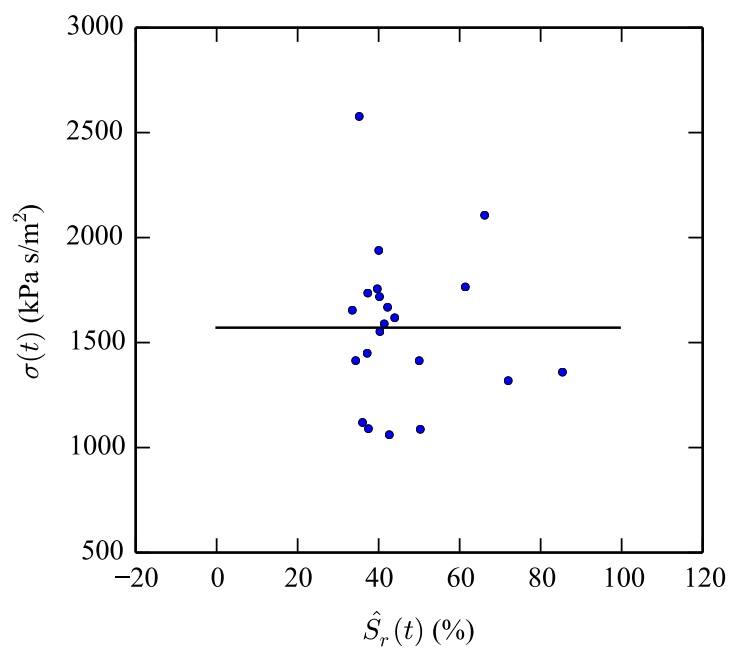


図 3.26 D: 固い地面における計算飽和度-流れ抵抗の散布図および回帰曲線

第3章 複数種地表面における地表面音響特性の経時変化のモデル化

A: 畑に関して、図 3.23 中の (A), (B), (C), (D) で示したプロットは、それぞれ 5 月 21 日、5 月 22 日、7 月 23 日、7 月 18 日のものである。これらの測定日に畑の 4 測定点で測定された複素音圧比を図 3.27 に示す (7 月 18 日の 4 測定点における LD は図 3.15 に既に示しているが、比較のため再掲する)。図 3.27 (a), (b), (c) にそれぞれ示す 5 月 21 日、5 月 22 日、7 月 23 日における 4 測定点の複素音圧比は、図 3.27 (d) に示す 7 月 18 日の複素音圧比と比較すると測定値が大きく暴れており、また 4 測定点間の測定値のばらつきも大きく、妥当な音響特性測定ができたとは言い難い。これらの日には、音響特性測定中の飽和度が高いという共通点がある。

東郷フィールドにおける音響特性測定では、ANSI 法の配置 A と配置 B のうち、配置 A を用いて測定した。前述の通り、配置 A は広い周波数範囲をカバーする配置であるのに対し、配置 B は特に周波数 1 kHz 以上に重点が置かれ、また固い地面に適している配置である。ここで、飽和度の大きい図 3.23 中の (A), (B), (C) は、音響的には「固い地面」に近い状態であることが予想されるため、本来であれば配置 A よりも配置 B での測定が適していると考えられる。言い換えれば、配置 A はこのような固い地面、あるいは流れ抵抗が大きい地面の測定にはあまり向かないと考えられる。そのため、飽和度が大きいときの地面においては、配置 A では妥当な音響特性測定がされなかったと考え、図 3.23 中において飽和度が 80 % 以上の日に測定されたデータは一律に外れ値とみなして除外することとする。

図 3.23 中で飽和度が 80 % 以上のプロットに該当するのは (A), (B), (C) の 3 点であり、これら 3 点は除外したプロット群に、式 (2.53) の回帰曲線を当てはめた結果を図 3.28 に示す。散布図には右上がりの傾向が見られ、これに対して沿った曲線が得られた。よって、A: 畑に関しては、図 3.28 から求めた $(p, q) = (624, 230)$ をモデル定数として決定する。

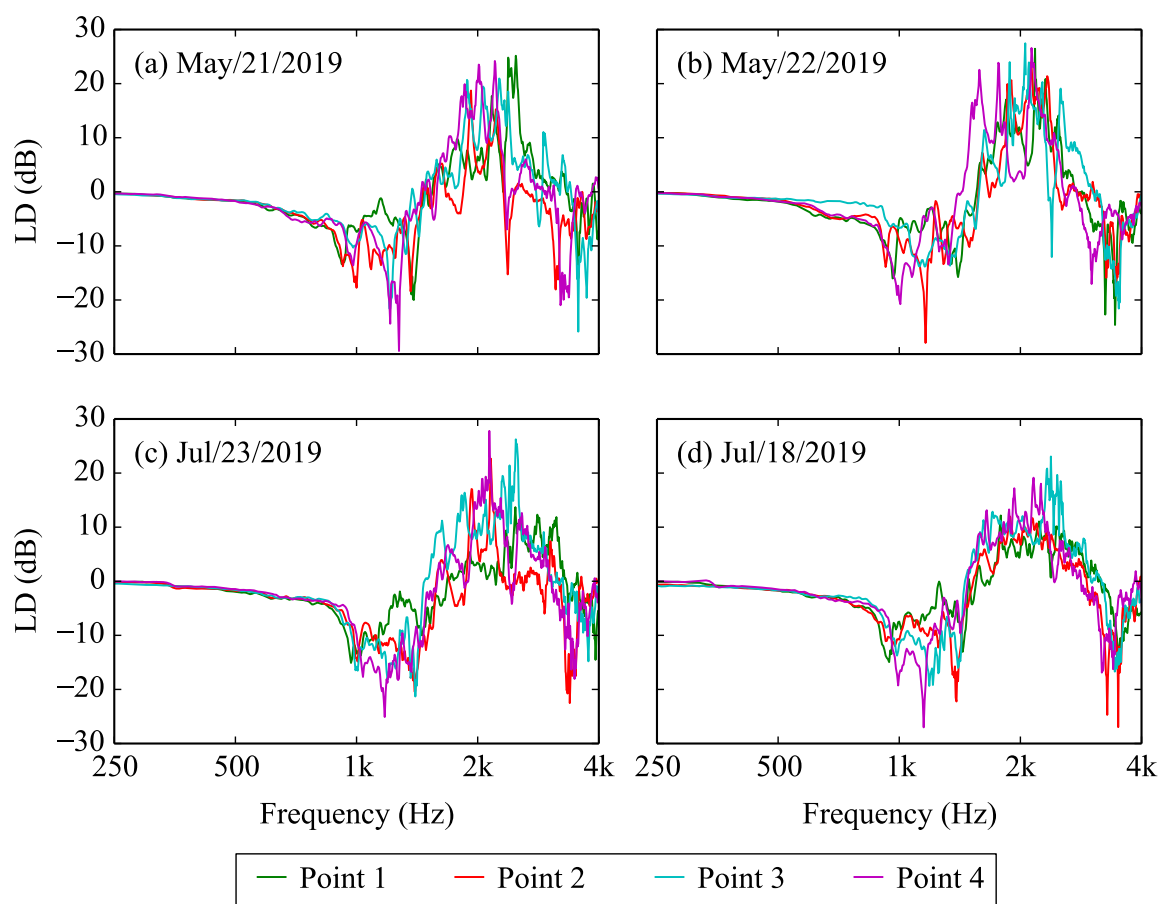


図 3.27 各測定日における 4 点で測定された複素音圧比

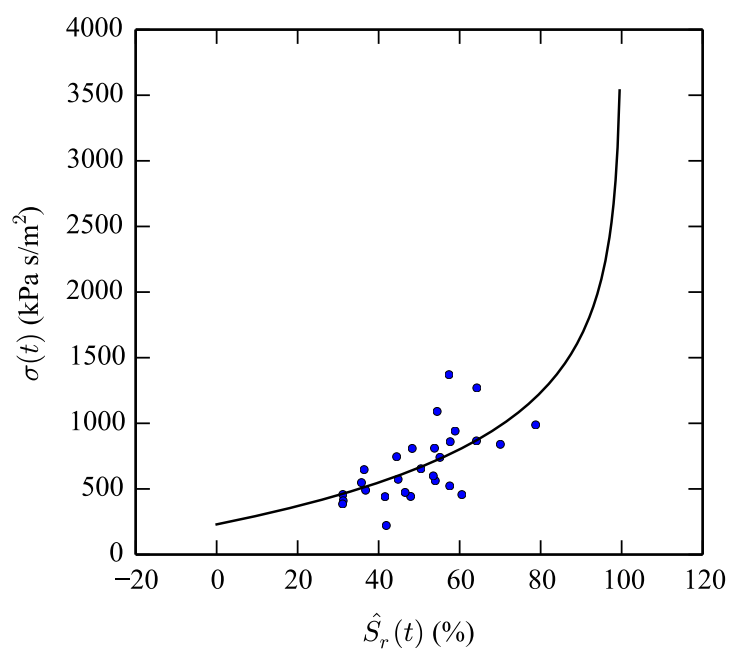


図 3.28 A: 畑において外れ値を除外した計算飽和度-流れ抵抗の散布図および回帰曲線

3.6 まとめ

本節では、第3章のまとめを述べる。

第2章で構築した地表面音響特性経時変化モデルを複数地表面へ適用するために、畑、草地、田んぼ、固い地面を対象とし、気象、土壌水分、地表面音響特性の測定を実施した。第2章における測定結果に見られたように、飽和度は降雨があると急激に上昇し、その後数日間のうちに元の値まで減少した。この現象は概ね全ての地表面において見られたが、飽和度の大きさは地表面種によって異なった。また、ANSI法を用いた音響特性測定結果は、地表面種によって複素音圧比の測定点間のばらつきや算出される実効的流れ抵抗に違いが見られた。

その後、地表面音響特性経時変化モデルの測定結果への適用を試みた。その結果、固い地面では飽和度と地面の実効的流れ抵抗の間に関連が見られなかったため、地表面音響特性経時変化モデルの適用はしないこととした。畑、草地、田んぼについては、モデル化は概ね良好に行われ、表3.7に示すモデル定数 a, b, c, d, p, q を得た。

表 3.7 各地面で定まったモデル定数 a, b, c, d, p, q のまとめ

地点	a [1/mm]	b [1/day]	c [1/°C]	d [°C]	p [kPa s/m ²]	q [kPa s/m ²]
A: 畑	1.407	0.2862	1.618	44.27	624	230
B: 草地	2.936	1.073	1.349	54.95	435	26.1
C: 田んぼ	1.153	0.1524	1.914	33.91	24.8	57.2

第 4 章

広域における地表面種類分布の把握

4.1 目的

前章までに、複数地表面における地表面音響特性の経時変化モデルを構築した。これまでで明らかになったように、地表面音響特性は、同一地表面においても土壌水分量により変化するが、地表面種類によっても大きく異なる。

前章までで明らかになったのは、地表面種類ごとの地表面音響特性の経時変化であるが、これではある地表面種類のある地点のみの経時変化しか分らない。そこで、地表面種類の空間分布と組み合わせることで、地表面音響特性の時空間変動が把握可能となる。

広域の地表面種類を把握する手段はいくつか考えられる。例えば、国土交通省は、国土に関する基本的な GIS データの一つとして「国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ」を整備しており、全国の土地利用の状況について、各利用区分（田、その他の農用地、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等）を提供している [48]。しかしながら、本データはメッシュ幅が 100 m であり、音響伝搬予測の実施を考えると、メッシュ幅が粗い。また、国土地理院は、宅地利用動向調査をもとにした「細密数値情報 (10m メッシュ土地利用)」[49] および「数値地図 5000 (土地利用)」[50] を整備しており、各土地利用項目（山林・荒地等、田、一般低層住宅地、密集低層住宅地、中・高層住宅地、公園・緑地等、道路用地など）を提供している。しかしながら、これらのデータは対象地域が首都圏、中部圏、近畿圏の三大都市圏の主要部に限られるほか、東郷フィールドが位置する中部圏の最新データは 2003 年のものである（2020 年 2 月現在）等、データの利用には制約がある。さらに、「国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ」「細密数値情報 (10m メッシュ土地利用)」「数値地図 5000 (土地利用)」のいずれにおいても、提供される土地利用項目分類は、必ずしも地表面音響特性の推定に適する分類であるとはいえない。

そこで本研究では、広域の地表面音響特性推定のための地表面種類把握の手段として、農業や防災といった分野でよく利用されているリモートセンシングを用いる。航空機に搭載したハイパースペクトル画像撮影装置により航空画像を撮影し、撮影した航空画像から広域の地表面種類を判別することを本章の目的とする。

4.2 航空画像撮影

4.2.1 画像取得方法

セスナ 208 型航空機に搭載したハイパースペクトル装置 CASI-1500h (Compact Airborne Spectral Imager-1500h) により、東郷フィールド周辺のハイパースペクトル画像を取得する。撮影は、2017 年 2 月 27 日 11 時 22 分～11 時 25 分 (以下、冬)、同 6 月 23 日 10 時 39 分～10 時 43 分 (以下、夏)、同 9 月 25 日 11 時 11 分～11 時 14 分 (以下、秋) の 3 度実施した。

使用機体の性能諸元を表 4.1 に、外観を図 4.1 に示す。また CASI-1500h の諸元を表 4.2 に、外観を図 4.2 に示す。機体の飛行高度は対地 2000 m であり、CASI-1500h の地上解像度は 1 m × 1 m である。スペクトルは、中心波長 373～1048 nm 間を、約 10 nm ごとに 72 バンドに分割して収録する。各バンドの中心波長と波長幅を、表 4.3 に示す。

表 4.1 使用機体性能諸元

製造会社		セスナ・エアクラフト・カンパニー(米)
発動機		P&WC PT6A-114A×1
寸度	全幅	15.88 m
	全長	12.67 m
	全高	4.59 m
速度	最大	175 kt (324 km/h)
	巡航	160 kt (296 km/h)
航続距離		1,689 km
離陸最大重量		3,995 kg
自重 (標準装備状態)		2,418 kg



図 4.1 セスナ 208 外観

表 4.2 CASI-1500h センサ諸元

装置名	CASI-1500h (Compact Airborne Spectrographic Imager)
製造元	ITRES Research Limited (CANADA)
空間方向ピクセル数	1490
波長方向ピクセル数	288
走査角	39.09°
光学分解能	約 0.49mrad (対地 1,000m で 0.5m/画素)
取得波長帯域	約 380～1,050nm
量子化ビット数	14bit (16,384 段階)
データ収録媒体	HDD
輝度補正	別途キャリブレーションテーブルによる
幾何補正	GNSS/IMU (Applanix 社製 POS/AV) による

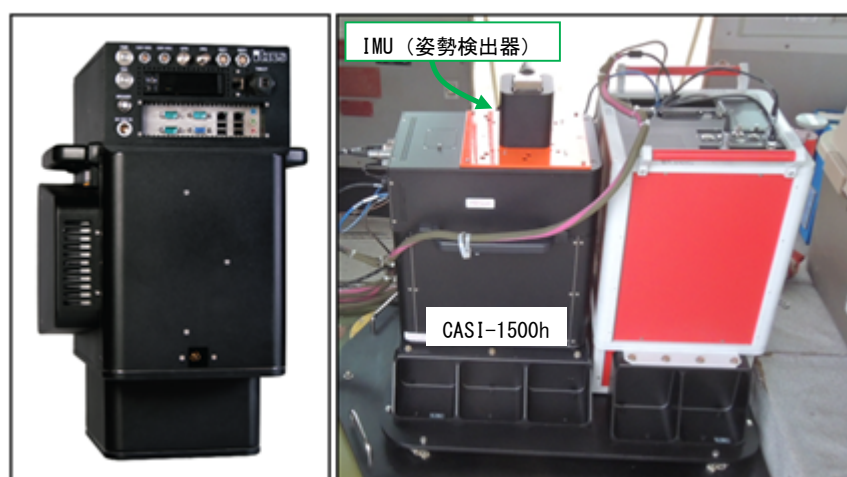


図 4.2 CASI-1500h 外観

表 4.3 収録波長一覧

収録 ch	中心波長 (nm)	波長幅 (nm)	収録 ch	中心波長 (nm)	波長幅 (nm)	収録 ch	中心波長 (nm)	波長幅 (nm)
1	373.28	9.52	25	601.71	9.51	49	829.95	9.51
2	382.80	9.52	26	611.23	9.51	50	839.46	9.51
3	392.32	9.52	27	620.74	9.51	51	848.97	9.51
4	401.84	9.52	28	630.25	9.51	52	858.47	9.51
5	411.37	9.52	29	639.77	9.51	53	867.98	9.51
6	420.89	9.52	30	649.28	9.51	54	877.48	9.51
7	430.41	9.52	31	658.79	9.51	55	886.99	9.51
8	439.93	9.52	32	668.30	9.51	56	896.49	9.50
9	449.45	9.52	33	677.81	9.51	57	906.00	9.50
10	458.97	9.52	34	687.32	9.51	58	915.50	9.50
11	468.49	9.52	35	696.83	9.51	59	925.01	9.50
12	478.00	9.52	36	706.34	9.51	60	934.51	9.50
13	487.52	9.52	37	715.85	9.51	61	944.01	9.50
14	497.04	9.52	38	725.36	9.51	62	953.52	9.50
15	506.56	9.52	39	734.87	9.51	63	963.02	9.50
16	516.07	9.52	40	744.38	9.51	64	972.52	9.50
17	525.59	9.52	41	753.89	9.51	65	982.03	9.50
18	535.11	9.52	42	763.40	9.51	66	991.53	9.50
19	544.62	9.52	43	772.91	9.51	67	1001.03	9.50
20	554.14	9.52	44	782.42	9.51	68	1010.53	9.50
21	563.65	9.52	45	791.93	9.51	69	1020.04	9.50
22	573.17	9.51	46	801.43	9.51	70	1029.54	9.50
23	582.68	9.51	47	810.94	9.51	71	1039.04	9.50
24	592.20	9.51	48	820.45	9.51	72	1048.54	9.50

4.2.2 取得画像詳細

各画素は、航空機上で量子化ビット数 14 bit で収録された地表面からのスペクトルを、地上で事前に校正された輝度校正テーブルを元に、量子化ビット数 16 bit の分光放射輝度値に変換したものに、大気補正を行い算出した分光反射率である。

図 4.3, 図 4.4, 図 4.5 にそれぞれ, 2017 年 2 月 27 日 (以下, 冬), 同 6 月 23 日 (以下, 夏), 同 9 月 25 日 (以下, 秋) に撮影された航空画像を示す。航空画像は、対象地の航空ハイパースペクトル画像から、RGB に該当する分光波長帯の画像を用いてトゥルーカラー合成したものである。R, G, B に該当する分光波長帯としてそれぞれ band 32 (中心波長 668.30 nm), band 22 (中心波長 573.17 nm), band 11 (中心波長 468.49 nm) の画像を用いた。



図 4.3 冬に撮影された航空画像の全体



図 4.4 夏に撮影された航空画像の全体



図 4.5 秋に撮影された航空画像の全体

4.3 地表面分類の概要

4.3.1 地表面分類の流れ

画像分類は、類似する特徴をもつピクセルをグループ化する処理である [51]。本研究では、画像分類により、撮影されたハイパースペクトル航空画像から各ピクセルの地表面種類を判別する。図 4.6 に、本研究にて実施する地表面分類の流れを示す。はじめに、分類する地表面種類 (クラス) を設定する。そして、分類の基準とする分光反射率を各クラスにつき算出するためのトレーニングエリア、分類精度を評価するためのテストエリア、実際に地表面分類を行う推定エリアを設定する。その後、分類手法を選定し、分類手法における判別関数による計算時の諸条件を決定する。この条件決定にあたっては、テストエリア内のピクセルに対して地表面分類を行い、分類精度評価指標を算出し各条件間で比較することで、最適な計算条件を決定する。計算条件が決定したら、それら条件を用い、推定エリアのピクセルに対し地表面分類を実行する。

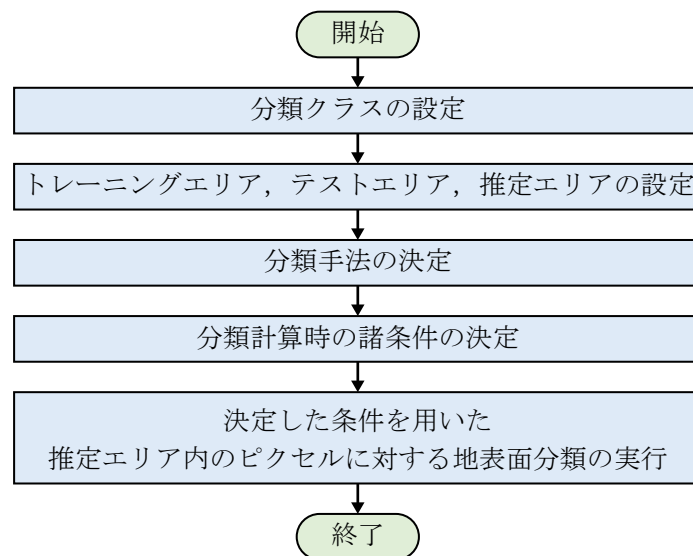


図 4.6 地表面分類の流れ

4.3.2 分類クラス, トレーニングエリア, テストエリア, 推定エリアの設定

前章では、畑、草地、田んぼ、固い地面の 4 地表面を対象に測定を実施している。また、ASJ RTN-Model 2018 では、地表面種類ごとの実効的流れ抵抗として表 4.4 を定めている。これらを踏まえ、本研究での地表面種類分類クラスは、畑 (Farmland), 草地 (Grass), 田んぼ (Rice field), 固い地面 (Compacted soil), その他 (Others) の 5 つとする。

表 4.4 ASJ RTN-Model 2018 における地表面の種類と実効的流れ抵抗

地表面の種類	地表面の実効的流れ抵抗 [kPa s/m ²]
コンクリート, アスファルト	20000
固い地面, 排水性舗装路面	1250
芝地, 田んぼ, 草地	300
表面の柔らかい畑地, 耕田	75

ついで航空画像内から、推定エリア、トレーニングエリア、テストエリアを選定する。推定エリアは、図 4.7 中の赤枠で示す、約 886 m × 445 m の範囲とする。なるべく複数の地表面種類を含み、かつ、現地の地表面種類の状況を現地調査によりある程度把握しているため分類結果の正誤確認がしやすい、東郷フィールド周辺を推定エリアとする。

トレーニングエリアは、航空画像撮影範囲内かつ推定エリア外から、各クラスに相当する地面を目視により判断し、そのうち数箇所を設定する。トレーニングエリアを設定する際の地表面種類の判断は、2019 年の現地調査時にデジタルカメラで撮影した画像・図 4.3–図 4.5 のハイパースペクトル航空画像・Google マップの航空画像 [52]・東郷町周辺の 2003 年の土地利用図 [53] を確認しながら行った。

上記で設定したトレーニングエリアから教師データとなる分光反射率を地表面種類ごとに算出するが、教師スペクトルを用いて推定エリア内の地表面種類を推定する前に、推定精度をあらかじめ確かめておく必要がある。そこで、推定精度の評価のためのエリアとして、トレーニングエリアとは別に、テストエリアを推定エリア内にクラス毎に設定する。

設定した各エリアを図 4.7 に示す。また、トレーニングエリアおよびテストエリアとして設定したポリゴン数およびポリゴン内に含まれる全ピクセル数を表 4.5 に示す。「その他」に関しては、詳細は後述するが、「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」のいずれにも属さないピクセルを「その他」と分類させるため、トレーニングエリアは設けない。ただし、分類精度の評価用エリアは必要なため、テストエリアには「その他」も含めて設定する。

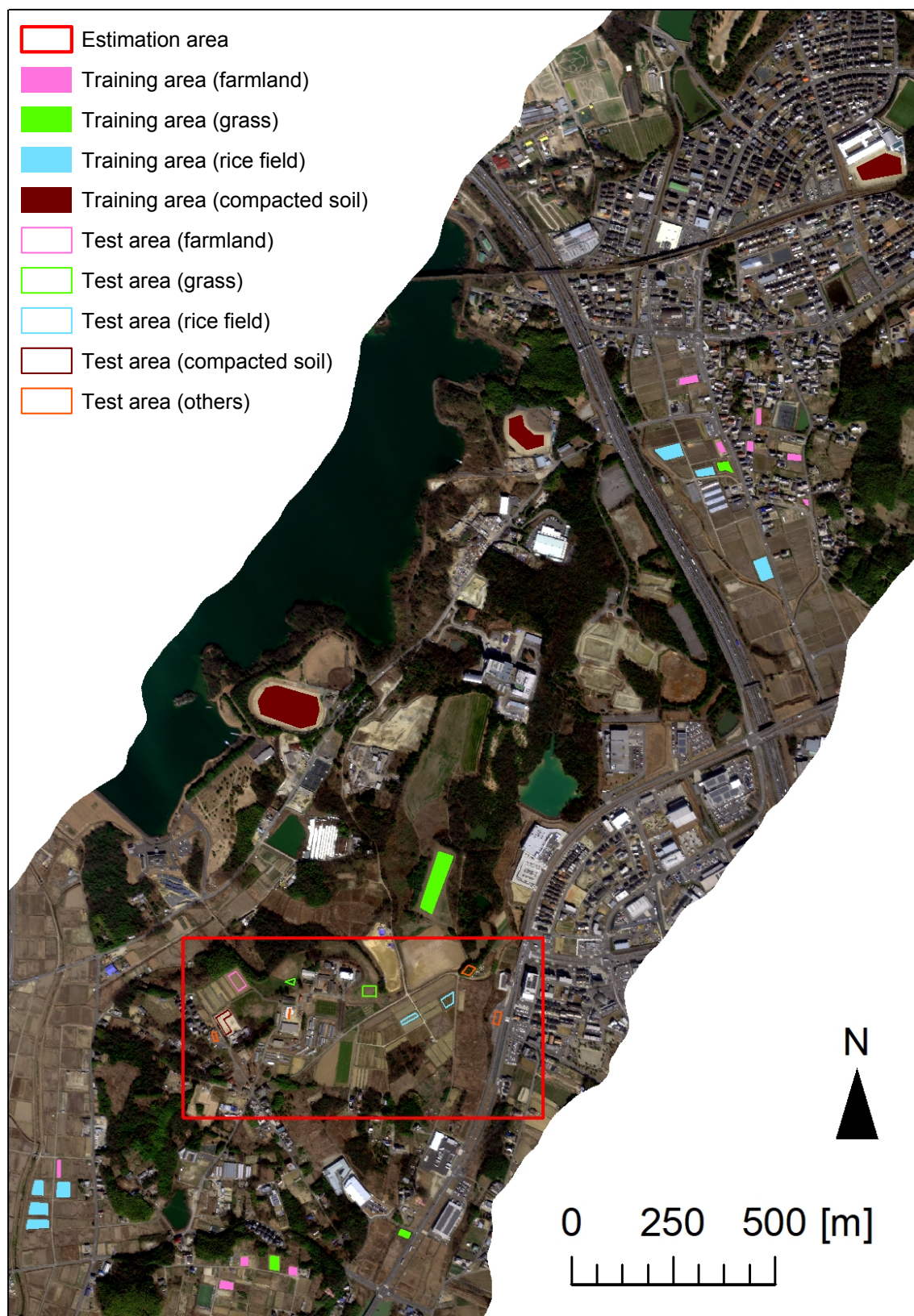


図 4.7 推定エリア，トレーニングエリア，テストエリア (背景は冬撮影の航空画像)

表 4.5 トレーニングエリアおよびテストエリア内に含まれるピクセル数

Class	Training area		Test area	
	Number of polygons	Number of pixels	Number of polygons	Number of pixels
Farmland	10	3088	1	1044
Grass	4	6581	2	1037
Rice field	7	7493	2	1114
Compacted soil	3	18503	1	1075
Others			4	1181

表 4.6 に、冬における、畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状を、エリアのポリゴン輪郭線とともに示す。畑は作物が植えられておらず、草地の草は枯れているように見える。表 4.7 に、冬における、田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状を示す。田んぼは田植え前につきイネは植えられておらず、固い地面は 3 箇所とも同様の地表面性状である。

表 4.8 に、夏における、畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状を、エリアのポリゴン輪郭線とともに示す。畑は、作物が植えられている箇所と植えられていない箇所が見られ、草地では草がまばらに生育している。表 4.9 に、夏における、田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状を示す。田んぼは夏は田植え後の時期にあたり、イネが植えられているようである。固い地面は 3 箇所とも同様の地表面性状であり、冬との差はあまり見られない。

表 4.10 に、秋における、畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状を、エリアのポリゴン輪郭線とともに示す。畑は、夏と同様、作物が植えられている箇所と植えられていない箇所が見られ、草地でも夏と同様に草がまばらに生育している。表 4.11 に、秋における、田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状を示す。田んぼはイネの収穫直前の時期にあたり、イネが育っている。固い地面は 3 箇所とも同様の地表面性状であり、冬および夏との差はあまり見られない。

表 4.12, 表 4.13, 表 4.14 にそれぞれ、冬, 夏, 秋における各クラスのテストエリア内の地表面性状を、エリアのポリゴン輪郭線とともに示す。いずれの季節においても、畑, 草地, 田んぼ, 固い地面におけるテストエリアの地表面性状は、表 4.6–表 4.11 に示した各季節のトレーニングエリア内の地表面性状と概ね同様である。「その他」のテストエリアとしては、コンクリート 2 箇所, 刈り取った牧草を白いビニールで覆った物体, 木の箇所の計 4 箇所を選定しているが、いずれの箇所も季節による地表面性状の変化は小さい。

表 4.6 冬における，畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状

Farmland	     
Grass	   

表 4.7 冬における，田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状







Rice field	  
Compacted soil	  

表 4.8 夏における，畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状

Farmland	     
Grass	   

表 4.9 夏における，田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状














Rice field	  
Compacted soil	  

表 4.10 秋における，畑および草地のトレーニングエリア内の地表面性状









Farmland	     
Grass	   

表 4.11 秋における，田んぼおよび固い地面のトレーニングエリア内の地表面性状

Rice field	   
Compacted soil	  






第 4 章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.12 冬における，各テストエリア内の地表面性状

Farmland				
Grass				
Rice field				
Compacted soil				
Others				






第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.13 夏における，各テストエリア内の地表面性状

Farmland		
Grass		
Rice field		
Compacted soil		
Others		

第 4 章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.14 秋における，各テストエリア内の地表面性状

Farmland		
Grass		
Rice field		
Compacted soil		
Others		

4.3.3 分類手法

マルチスペクトル画像やハイパースペクトル画像などのリモートセンシングデータを用いた地表面種類分類手法としては、最尤法 (MLH: maximum likelihood), ユークリッド最短距離法 (MED: minimum Euclidean distance) [54], シャイプディファレンス法 (SD: shape difference) [55], MED 法と SD 法を組み合わせた MED-SD 法 [56] などがある。本研究では、平栗ら [57] が提案した、MED-SD 法に閾値を設ける手法を用いて地表面分類を行う。以下で、MED 法, SD 法, MED-SD 法, MED-SD 法に閾値を設ける手法の概要について述べる。

MED 法, SD 法, MED-SD 法のいずれにおいても、図 4.8 のように、分類対象ピクセルにおける分光反射率が、どのクラスのス分光反射率に最も類似しているかを計算することで、地表面種類判別を行う。すなわち、 n バンドのス分光反射率 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^t$ (上付きの t は転置を表す) が、 k 種類のクラスにおける分光反射率 $\mathbf{m}_i = (m_{i,1}, m_{i,2}, \dots, m_{i,n})^t$ ($i = 1, 2, \dots, k$) の中で、どれに最も類似しているかを考える。

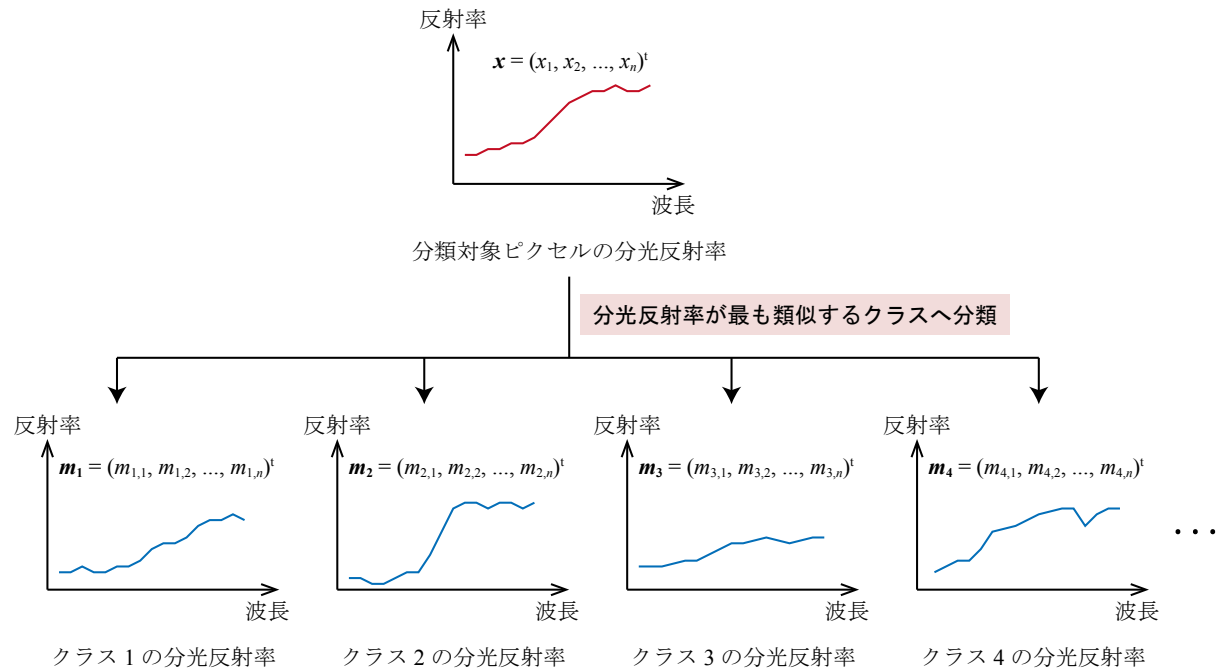


図 4.8 地表面種類分類の考え方

MED 法では、図 4.9 (a) のように、分類対象ピクセルにおける分光反射率と、クラス i における分光反射率の、各バンドにおける差を考える。差の二乗和が最小となるクラス i が、分類対象ピクセルの地表面種類であると分類する。つまり、以下の判別関数 D_i を最小とするクラス i に \mathbf{x} を分類する。

$$D_i = \sum_{l=1}^n (x_l - m_{i,l})^2 \quad (4.1)$$

ここで l ($l = 1, 2, \dots, n$) はバンド番号を表す。

SD 法では、以下の判別関数 Φ_i を最小とするカテゴリ i に \mathbf{x} を分類する。

$$\begin{aligned}\Phi_i &= \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{m}_i}{|\mathbf{x}| |\mathbf{m}_i|} \right) \\ &= \cos^{-1} \left\{ \left(\sum_{l=1}^n x_l \cdot m_{i,l} \right) / \left(\sqrt{\sum_{l=1}^n x_l^2} \sqrt{\sum_{l=1}^n m_{i,l}^2} \right) \right\}\end{aligned}\quad (4.2)$$

式 (4.2) の Φ_i は、図 4.9 (b) 中に示す、2つの n 次元ベクトル \mathbf{x} , \mathbf{m}_i の角度に対応する。すなわち、式 (4.2) の Φ_i が 0 に近いほど、2つの分光反射率のグラフの形は類似するといえる。

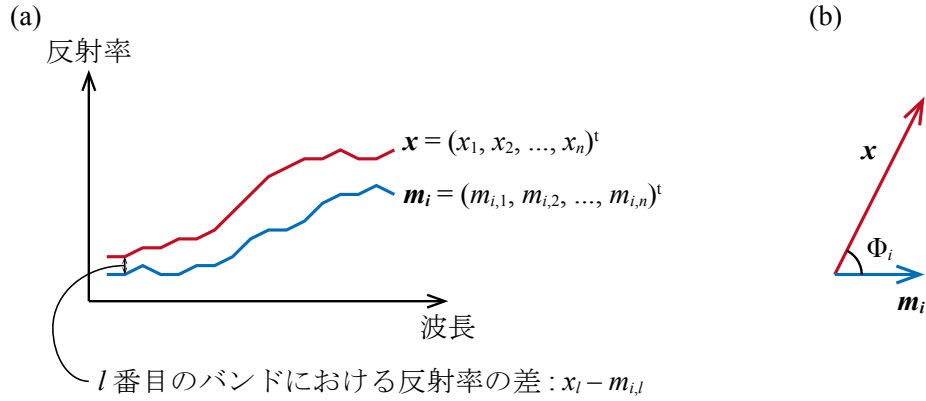


図 4.9 (a) MED 法, (b) SD 法の考え方

MED-SD 法は、ピクセル毎に MED 法と SD 法により算出された値をそれぞれ 0 から 1 の間で線形化し足し合わせる方法である。すなわち、以下の判別関数 f_i を最小とするクラス i に \mathbf{x} を分類する。

$$f_i = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} + \frac{\Phi_i - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}} \quad (4.3)$$

ここで D_{\max} および θ_{\max} は各ピクセルにおいてそれぞれ式 (4.1), (4.2) から算出される最大値, D_{\min} および θ_{\min} は各ピクセルにおいてそれぞれ式 (4.1), (4.2) から算出される最小値である。

上記の方法に従う場合、ある分類対象ピクセルが事前に用意したクラスのいずれにも属さないとき、そのピクセルは f_i が最小となるクラスに強制的に割り当てられることになり、誤分類の一因となる。そこで、 f_i にクラス毎に閾値を設け、全てのクラスで f_i が閾値を上回る場合に \mathbf{x} を「その他」へ、そうでない場合は f_i が最小となるクラスへ分類する。閾値としては、クラス毎にトレーニングエリア内で正答となったピクセルの f_i の p パーセンタイルを用いる。すなわち、クラス毎にトレーニングエリア内で正答となったピクセルの f_i のうち、上位 $(100 - p)\%$ を外れ値と考える。

「その他」のクラスをトレーニングエリアとして設けず、上記のように閾値を設定し分類するのは、「その他」に分類される地表面種類は、コンクリート、アスファルト、建物、色が塗られた障害物など多岐にわたるためである。これら一つ一つの分光反射率を個別に把握す

るのは極めて困難であり、現実的でない。そこで、 f_i に閾値を設けることにより、「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」の4クラスのいずれにも属さないピクセルを「その他」と分類することとする。

4.3.4 分類精度の評価手法

地表面分類の分類精度は、分類精度表を作成し、そこから各種精度評価指標を算出し評価する。分類精度表とは、分類の結果得られたクラスと、実際の地上の状態（グラウンドトゥールース）を示す参照クラスをそれぞれ行と列にとった正方の表である [51, 58]。表内の各成分はピクセル数を表す。行列の対角成分が正しく分類されたピクセル数であり、それ以外は誤分類されたピクセル数を表す。すなわち、対角成分のみに値が入り、その他の成分は0の場合、誤分類が全くないことを意味する。表 4.15 に、例として、4つの参照クラス 1-4 に属する全 N ピクセルを対象とし、クラス 1-4 の4つに分類した場合の分類精度表を示す。ここで x_{ij} は、分類精度表の (i, j) 成分である。

表 4.15 分類精度表の例

		参照クラス				
		クラス 1	クラス 2	クラス 3	クラス 4	合計
分類結果 クラス	クラス 1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{1+}
	クラス 2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{2+}
	クラス 3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{3+}
	クラス 4	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{4+}
	合計	x_{+1}	x_{+2}	x_{+3}	x_{+4}	N

この分類精度表から、様々な精度評価指標が算出されるが、代表的なものとしては、プロデューサ精度 (Producer's accuracy: PA)、ユーザ精度 (User's accuracy: UA)、総合精度 (Overall accuracy: OA)、カッパ係数 (Kappa coefficient: KC) がある [51, 58, 59]。

PA は、グラウンドトゥールースのうち正しく分類された割合を示す精度評価指標であり、クラス i の PA である PA_i は下式で表される。

$$PA_i = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \quad (4.4)$$

ここで x_{ii} は分類精度表の対角成分、すなわちクラス i に正しく分類されたピクセル数を示す。 x_{+i} は参照クラスの総ピクセル数である。

UA は、分類結果のうち正しく分類された割合を示す精度評価指標であり、クラス i の UA である UA_i は下式で表される。

$$UA_i = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \quad (4.5)$$

ここで x_{i+} は分類クラスの総ピクセル数である。

OA は、全ピクセルのうち正しく分類された割合を示す精度評価指標であり、下式で表される。

$$OA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_{ii} \quad (4.6)$$

ここで N は分類精度表内の総ピクセル数、 m は分類クラス数を表す。

KC は、総合精度から分類が偶然的中する割合を除いた精度評価指標であり、下式で表される。

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^m x_{ii} - \sum_{i=1}^m (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^m (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (4.7)$$

KC の意味は、次の通りである [51]。式 (4.7) の分母と分子をそれぞれ N^2 で割ると以下を得る。

$$\begin{aligned} KC &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_{ii} - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^m (x_{i+} \times x_{+i})}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^m (x_{i+} \times x_{+i})} \\ &= \frac{(\text{みかけの一致率}) - (\text{偶然の一致率})}{1 - (\text{偶然の一致率})} \\ &= \frac{\text{みかけの一致率のうち、偶然に依存しない一致率}}{\text{完全な一致のうち、偶然に依存しない一致率}} \quad (4.8) \end{aligned}$$

以上より、KC は「偶然に依存しない一致率」を評価する指標であるといえる。KC に基づく一致率の解釈は、一般に「0.4 以下: 低い一致, 0.41–0.60: 中程度の一致, 0.61–0.80: かなりの一致, 0.81–1: 高い一致」である。

次項では、地表面分類における計算条件を変化させた諸検討を行うが、その際の分類精度は、上記の精度評価指標にて判断する。

4.4 地表面分類時の条件に関する諸検討

4.4.1 教師スペクトル算出に必要なピクセル数の検討

今回選定したトレーニングエリア内に含まれるピクセル数は、表 4.5 に示すように、クラス毎に異なる。そこで、各クラスにおいて教師スペクトル算出のためのピクセル数を揃えるとともに、教師スペクトル算出に必要なピクセル数の検討を、平栗らの文献 [57] で行われている検討を参考にし、次のように行う。

トレーニングエリアから、100, 200, 300, ..., 1400, 1500 ピクセルをランダムに抽出し、抽出したピクセルの分光反射率を平均して教師スペクトルとする。上記により算出された教師スペクトルを用いて、「その他」を除くテストエリア (畑, 草地, 田んぼ, 固い地面) にて地表面分類を行い、クラス毎に PA を算出する。上記の試行を 10 回繰り返し、PA の最大値と最小値の差を求める。これを、各季節に撮影された航空画像を用いて行う。

図 4.10 に、冬, 夏, 秋に撮影された航空画像を用いて上記を実施した結果を示す。いずれの季節および地表面でも、1000 ピクセル程度を越えると、PA のばらつきが小さくなる。よって以降では、トレーニングエリアから 1000 ピクセルをランダムに抽出し、抽出したピクセルの分光反射率を平均して教師スペクトルとすることとする。

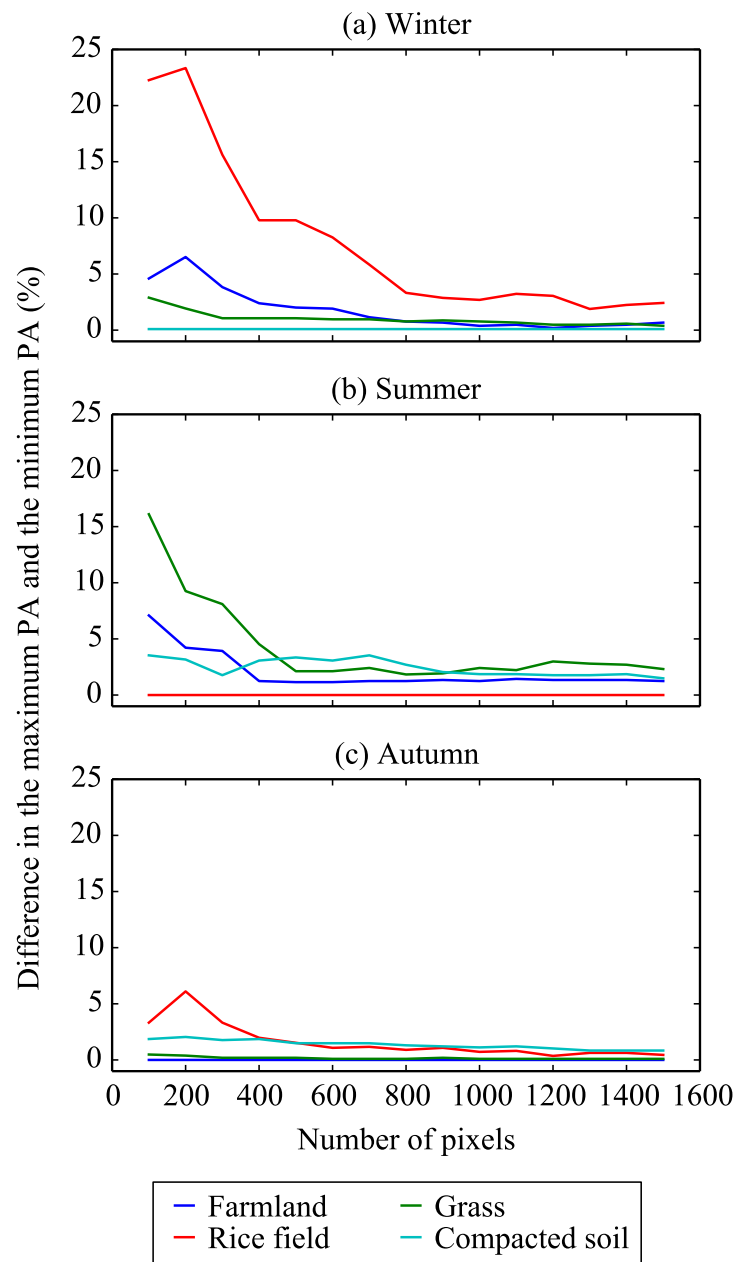


図 4.10 PA の最大値と最小値の差の、抽出ピクセル数による違い

4.4.2 用いる撮影画像の検討

本研究では、冬、夏、秋の3時期に航空画像を撮影している。そのうち、どの季節の航空画像が最も精度よく地表面分類できるかを本項にて検討する。

図 4.11 に、各クラスのトレーニングエリアから抽出した 1000 ピクセルの分光反射率の平均値 (教師スペクトル) を季節別に示す。

畑に関して、作物が植えられていない冬では、波長の上昇とともに分光反射率も緩やかに上昇する特性をもつ。一方、植生がまばらに見られる夏および秋では、波長 700 nm 付近にてやや上昇する特性をもつ。分光反射率の季節による差は、比較的小さい。

草地に関して、草の生育期でない冬では、分光反射率は波長 700 nm 付近にて上昇するものの、その変化はわずかである。一方、草の生育期にあたる夏および秋では、分光反射率は波長 700 nm 付近にて大きく上昇している。これは、近赤外の波長は植物の光合成には有効に使われない波長であることを示している [51]。

田んぼは、波長 700 nm 以上で反射率の季節による差が大きい。これは、田んぼは 2 月は田植え前、6 月は田植え後、9 月は稲刈り直前と、撮影時期によって地表面性状が大きく異なるからである。文献 [51] によると、田んぼにおける分光反射率の季節変化は一般に、イネの生長に伴って、苗が移植された頃の水面に近い状態から、緑の植物特有の反射スペクトルに大きく変化し、バイオマスの増加とともに、近赤外の反射率が急激に上昇する。その後、成熟期に向かってクロロフィルの減少とともに全体的に反射率が上昇・平坦化する。収穫後には残った植物と土壌の両者の特徴が混合した反射スペクトルを示す。本研究で観測された各季節における田んぼの分光反射率は、前述の田んぼの一般的な分光反射率の季節変化に関する知見と対応している。

固い地面では、いずれの季節においても、分光反射率は波長の上昇とともに緩やかに上昇する。表 4.7, 表 4.9, 表 4.11 より、固い地面の地表面性状は季節による差が小さいが、図 4.11 より、分光反射率の季節による差も小さい。

季節ごとに各クラスの教師スペクトルを比較すると、冬では畑と田んぼの教師スペクトルが類似しており、特に相対値が類似している。夏では、畑と草地の教師スペクトルの相対値が類似しているが、絶対値は特に波長 700 nm 以上で草地の方が大きい。秋では、畑、草地、田んぼの教師スペクトルの相対値が類似しているが、絶対値は互いに異なる。

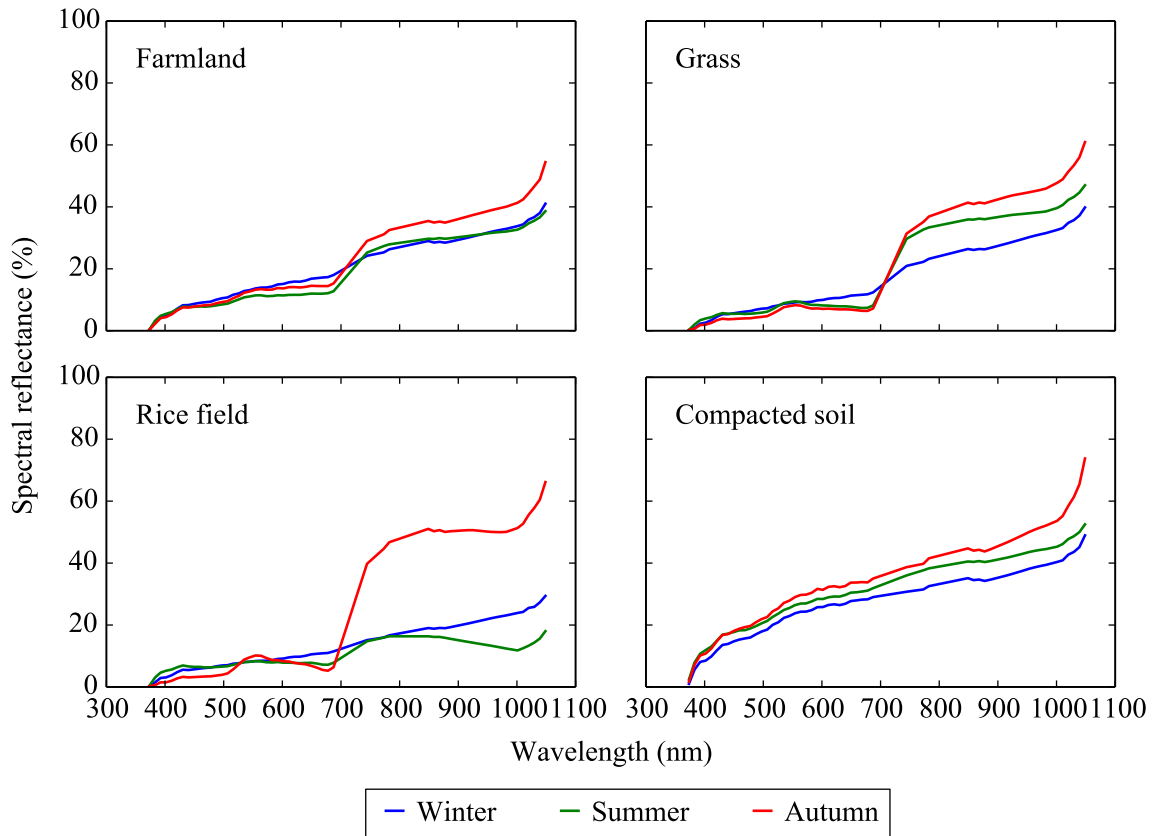


図 4.11 各地表面および各季節における教師スペクトル

上記の教師スペクトルを用い、各季節に撮影された航空画像を用いてテストエリアにて MED-SD 法により地表面分類を行う。本項では判別関数 f_i に閾値は設けず、テストエリア内のピクセルを「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」の 4 クラスのいずれかに分類する。その後、分類精度表を作成し、式 (4.4)–(4.7) の各種精度評価指標を計算するとともに、各テストクラス (参照クラス) に属するピクセルがどのクラスへ分類されたか、その割合を計算し分類精度を評価する。

まず、冬の航空画像を用いた結果を示す。図 4.12 に、テストエリア設定箇所を冬の航空画像とともに示す。図 4.13 に、図 4.12 のテストエリアにおける地表面分類結果を示す。表 4.16 に分類精度表を、図 4.14 に各参照クラスにおける分類クラスの割合を示す。図 4.12 と図 4.13 を比較すると、畑、草地、固い地面のテストエリア内のピクセルは、ほぼ正しく分類されている。一方、田んぼのテストエリア内のピクセルは、田んぼと正しく分類されている箇所もあるが、一部は畑と分類されている。田んぼのテストエリアにおける誤分類は表 4.16 および図 4.14 にも表れており、図 4.14 より田んぼのテストエリア内のピクセルのうち約 30 %が畑と分類されている。一方、田んぼ以外のクラスにおける地表面分類の精度は高い。田んぼの一部が畑と推定されているのは、畑と田んぼの教師スペクトルが類似しているためと考えられる。

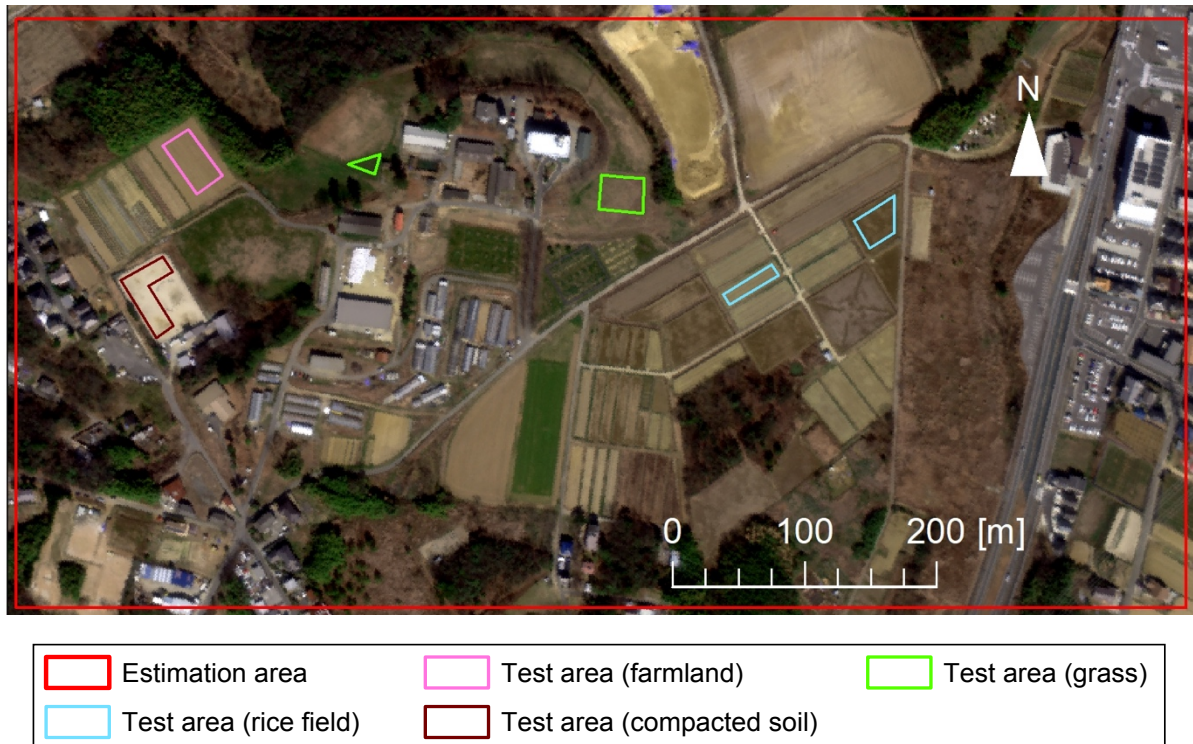


図 4.12 冬に撮影された航空画像上の推定エリアおよびテストエリア設定箇所

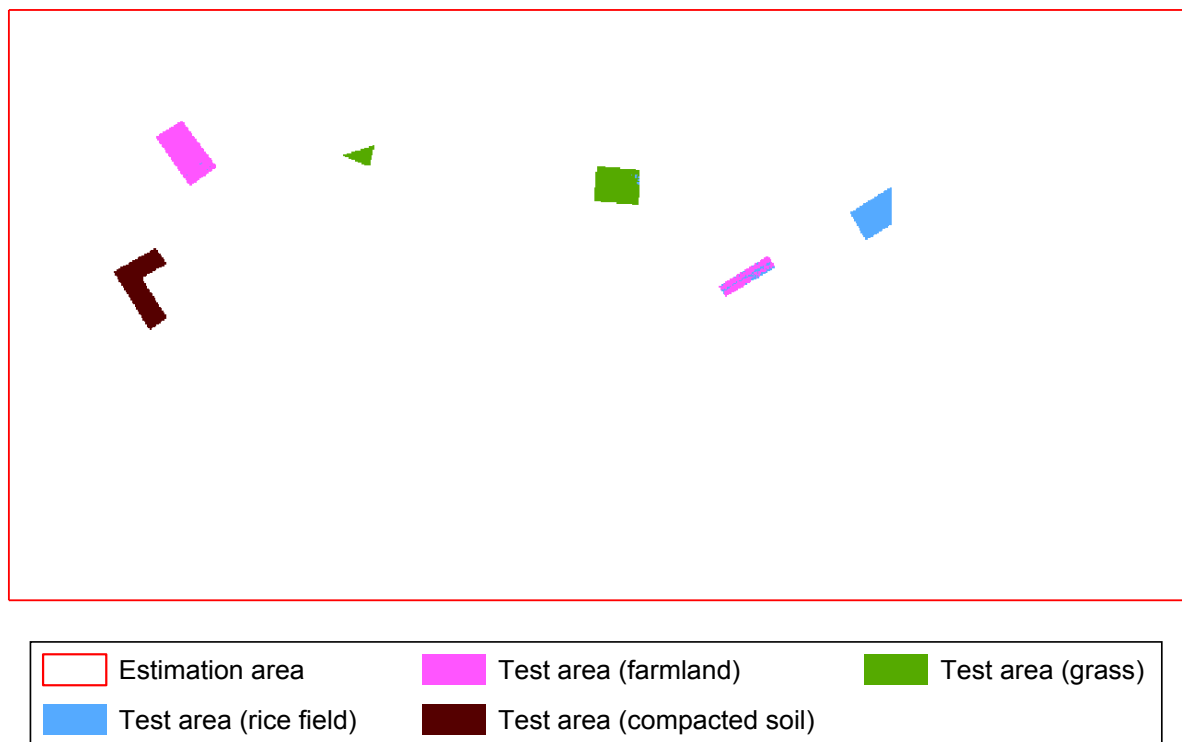


図 4.13 テストエリアにおける冬の航空画像を用いた場合の分類結果

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.16 冬の航空画像を用いた場合の分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	1039	0	319	0	1358	76.5
	Grass	0	1027	0	0	1027	100.0
	Rice field	5	10	795	0	810	98.1
	Compacted soil	0	0	0	1075	1075	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		99.5	99.0	71.4	100.0		

OA (%): 92.2

KC (-): 0.896

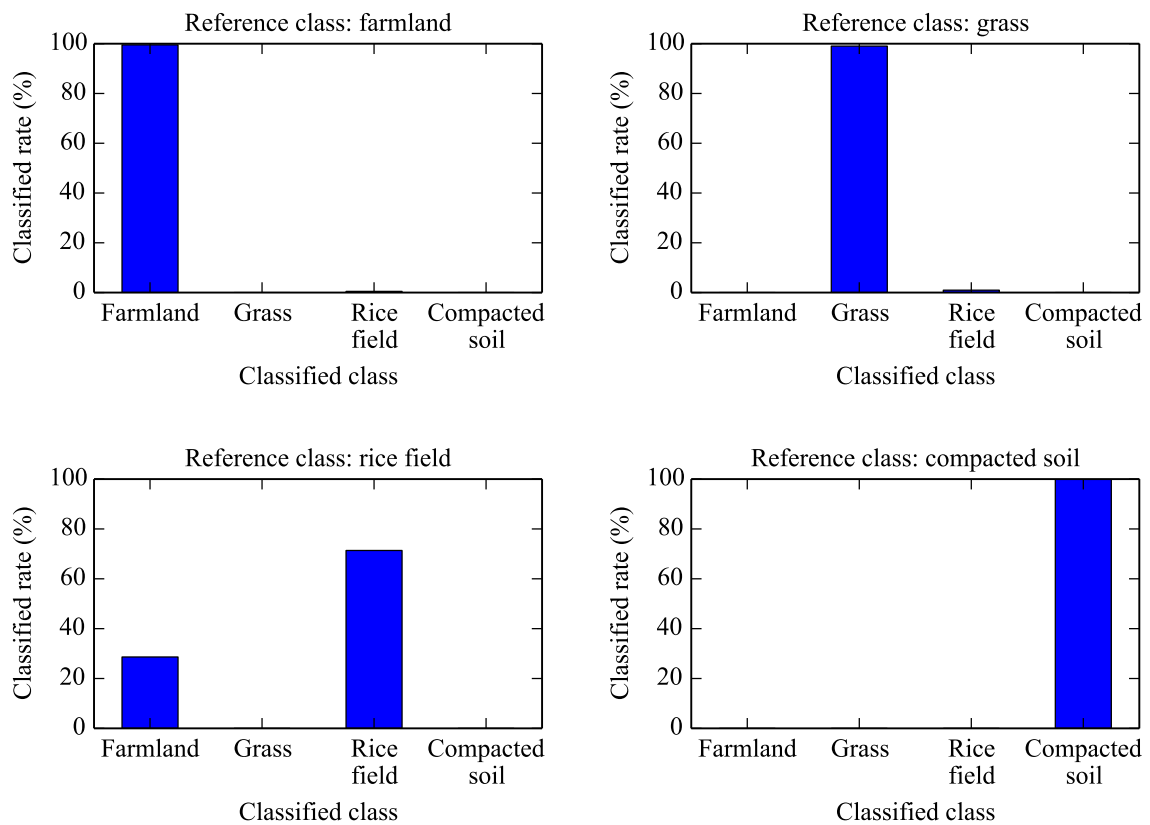


図 4.14 冬の航空画像を用いた場合の、各参照クラスにおける分類クラスの割合

第4章 広域における地表面種類分布の把握

ついで、夏の航空画像を用いた結果を、冬と同様に示す。図 4.15 に、テストエリア設定箇所を夏の航空画像とともに示す。図 4.16 に、図 4.15 のテストエリアにおける地表面分類結果を示す。表 4.17 に分類精度表を、図 4.17 に各参照クラスにおける分類クラスの割合を示す。図 4.15 と図 4.16 を比較すると、田んぼのテストエリア内のピクセルは、正しく地表面分類がされている。草地、固い地面では、一部で誤分類があるものの、概ね正しく分類されている。一方、畑のテストエリア内のピクセルは、その多くが草地と分類されている。これは、テストエリアの畑の一部に植生が見られること、および図 4.11 に示すように畑と草地の教師スペクトルが類似していることが原因と考えられる。表 4.17 および図 4.17 より、草地、田んぼ、固い地面の PA は概ね高いが、畑の PA は 27.3%であり、畑のテストエリア内のピクセルの大半は誤分類されていることがわかる。

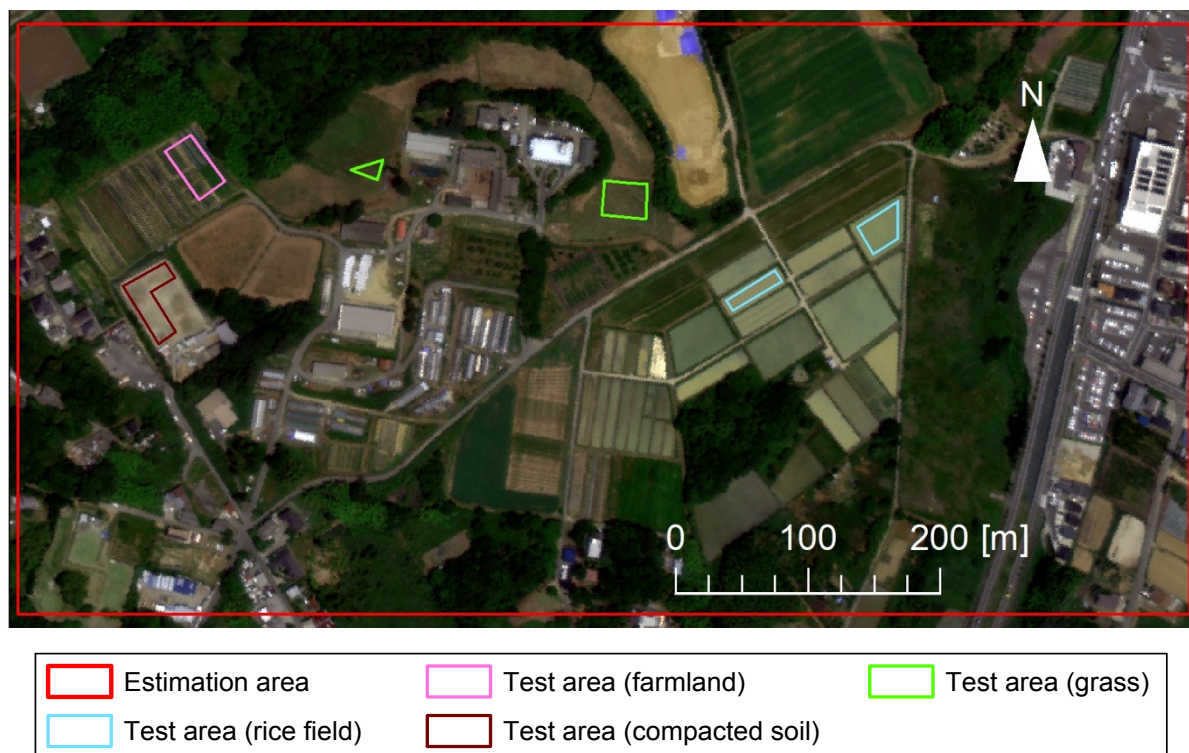


図 4.15 夏に撮影された航空画像上の推定エリアおよびテストエリア設定箇所

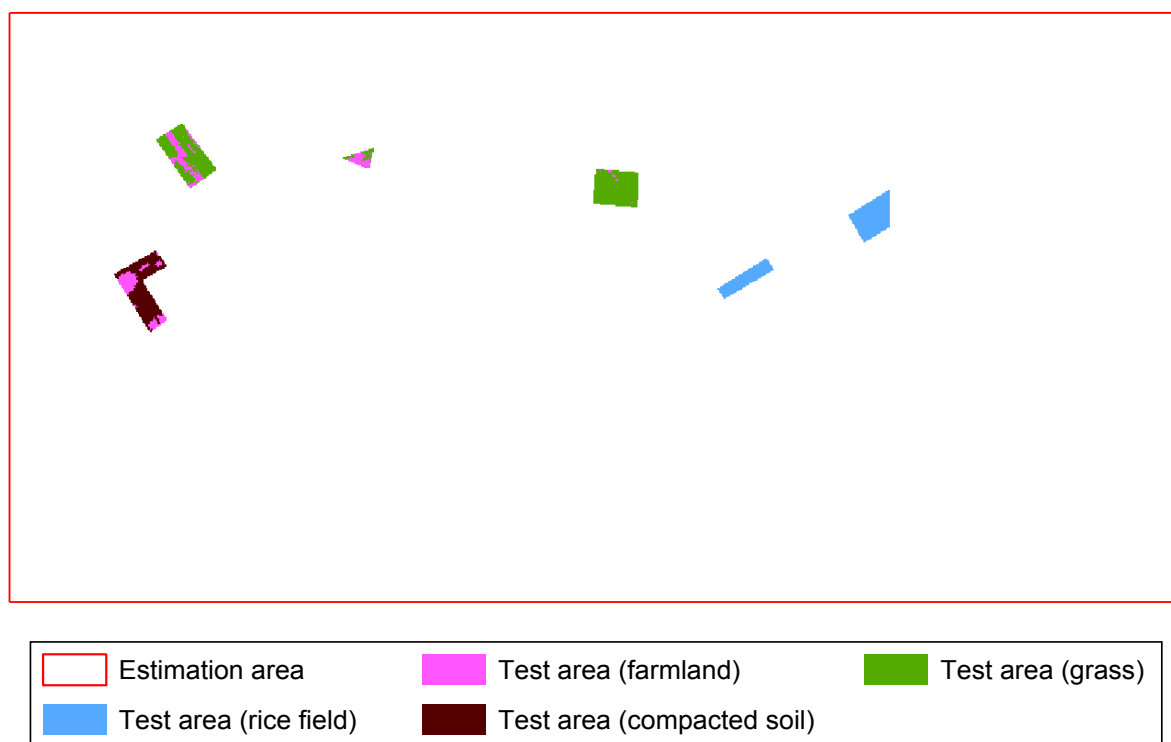


図 4.16 テストエリアにおける夏の航空画像を用いた場合の分類結果

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.17 夏の航空画像を用いた場合の分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	285	125	0	279	689	41.4
	Grass	759	912	0	0	1671	54.6
	Rice field	0	0	1114	0	1114	100.0
	Compacted soil	0	0	0	796	796	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		27.3	87.9	100.0	74.0		

OA (%): 72.8

KC (-): 0.637

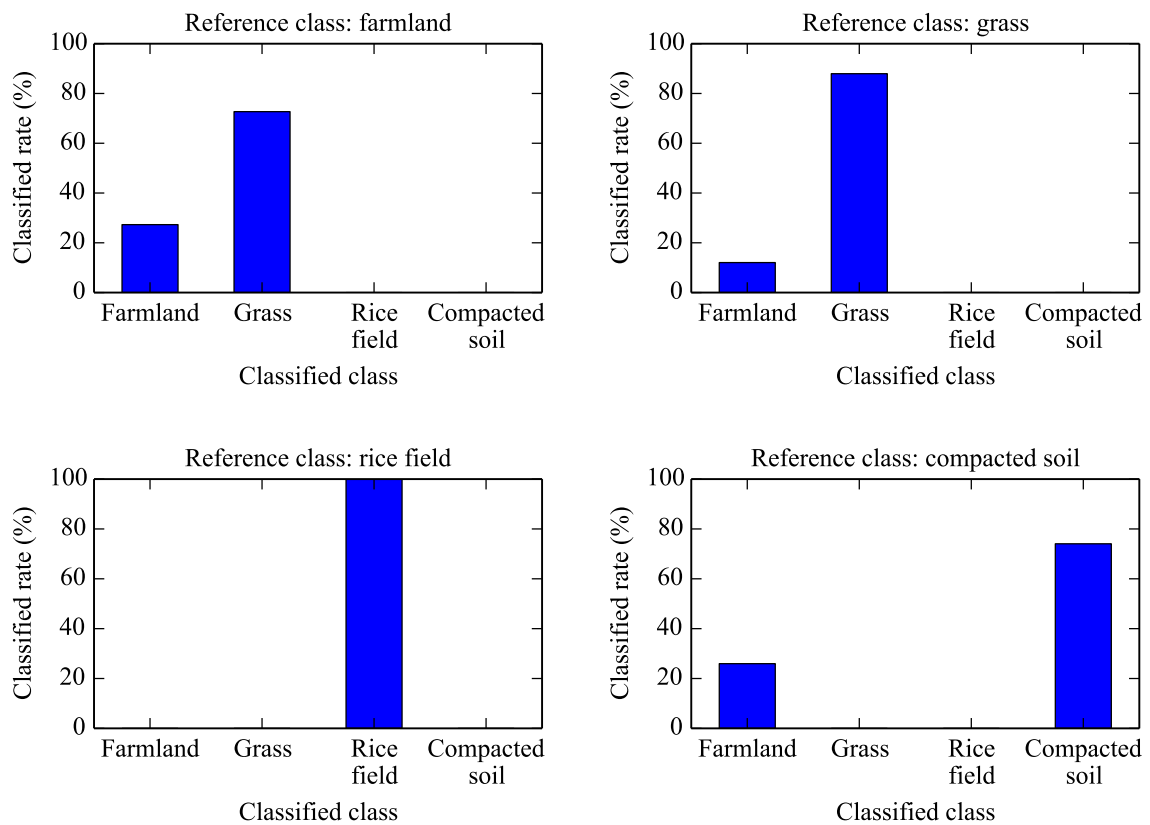


図 4.17 夏の航空画像を用いた場合の、各参照クラスにおける分類クラスの割合

第4章 広域における地表面種類分布の把握

最後に、秋の航空画像を用いた結果を、冬および夏と同様に示す。図 4.18 に、テストエリア設定箇所を秋の航空画像とともに示す。図 4.19 に、図 4.18 のテストエリアにおける地表面分類結果を示す。表 4.18 に分類精度表を、図 4.20 に各参照クラスにおける分類クラスの割合を示す。図 4.18 と図 4.19 を比較すると、畑および固い地面のテストエリア内のピクセルは、ほぼ正しく分類されている。一方、草地のテストエリア内のピクセルの一部は田んぼと分類されている。これは、田んぼは稲刈り前で植生があり、草地と田んぼの教師スペクトルが類似しているためと考えられる。また、田んぼのテストエリア内のピクセルは、一部は正しく分類されているものの、畑や草地と誤分類されているピクセルもある。表 4.17 および図 4.17 より、畑および固い地面の PA はほぼ 100 % であり、草地の PA も約 80 % と概ね高いが、田んぼの PA は 60 % 程度である。

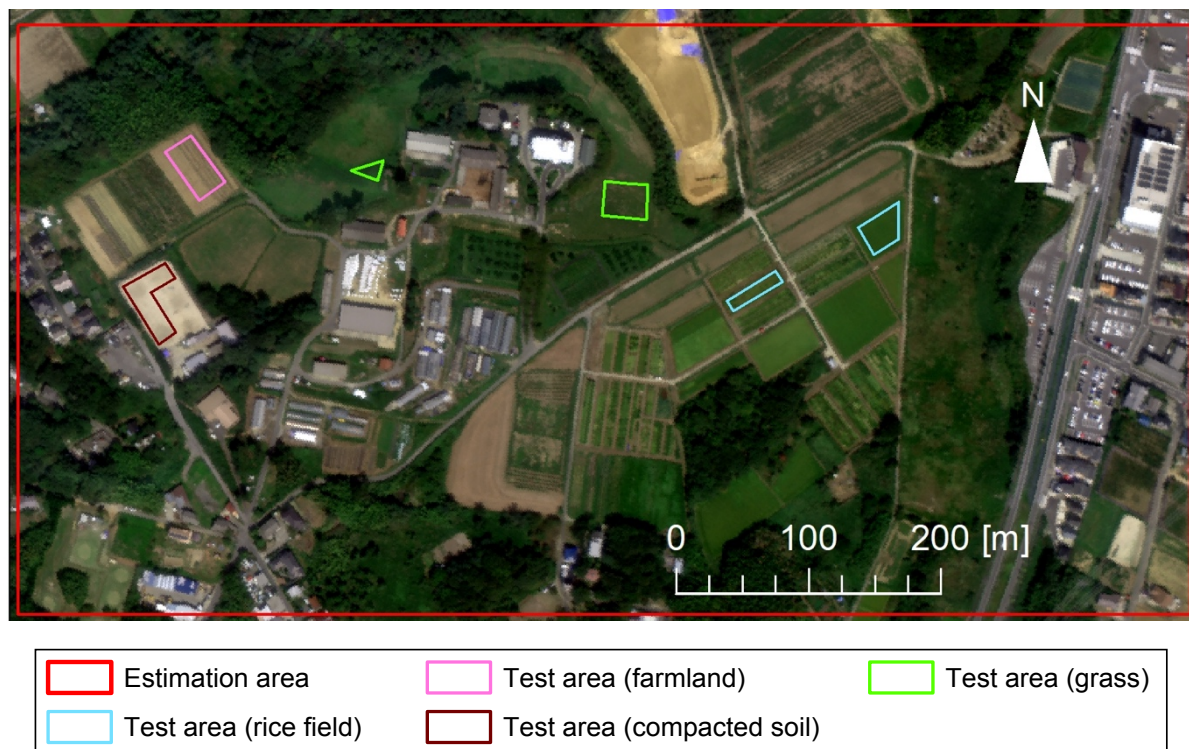


図 4.18 秋に撮影された航空画像上の推定エリアおよびテストエリア設定箇所

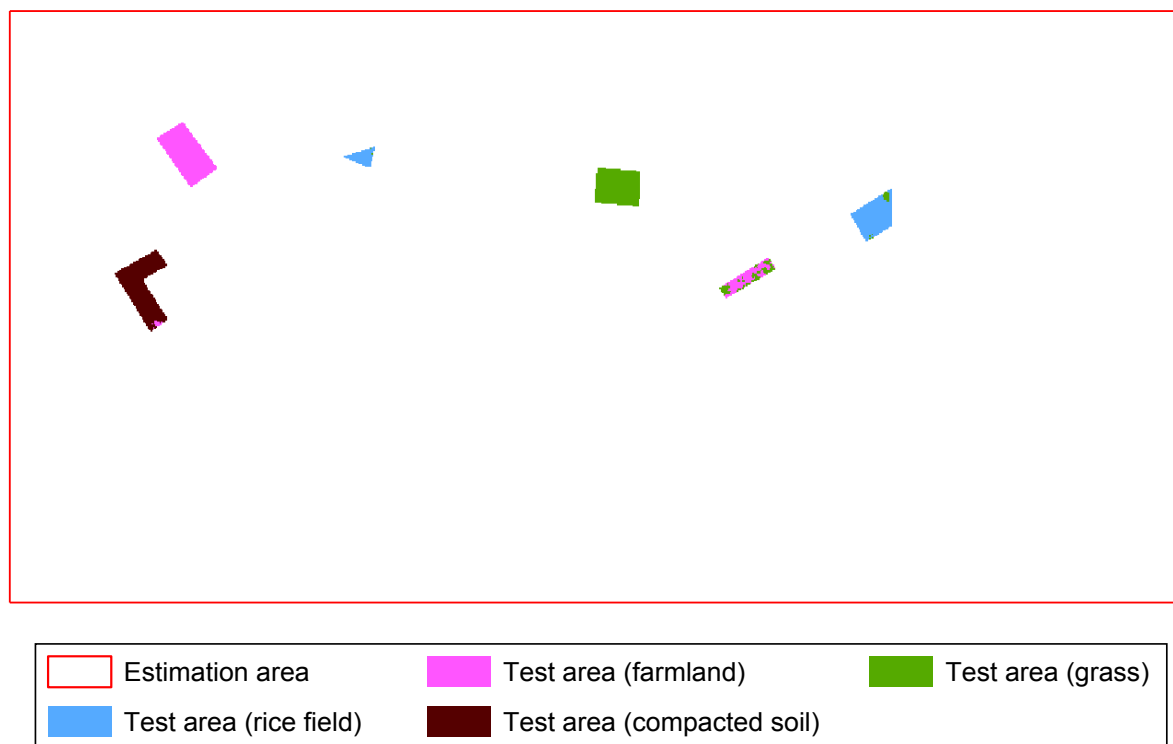


図 4.19 テストエリアにおける秋の航空画像を用いた場合の分類結果

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.18 秋の航空画像を用いた場合の分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	1044	0	273	17	1334	78.3
	Grass	0	867	170	0	1037	83.6
	Rice field	0	170	671	0	841	79.8
	Compacted soil	0	0	0	1058	1058	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		100.0	83.6	60.2	98.4		

OA (%): 85.2

KC (-): 0.804

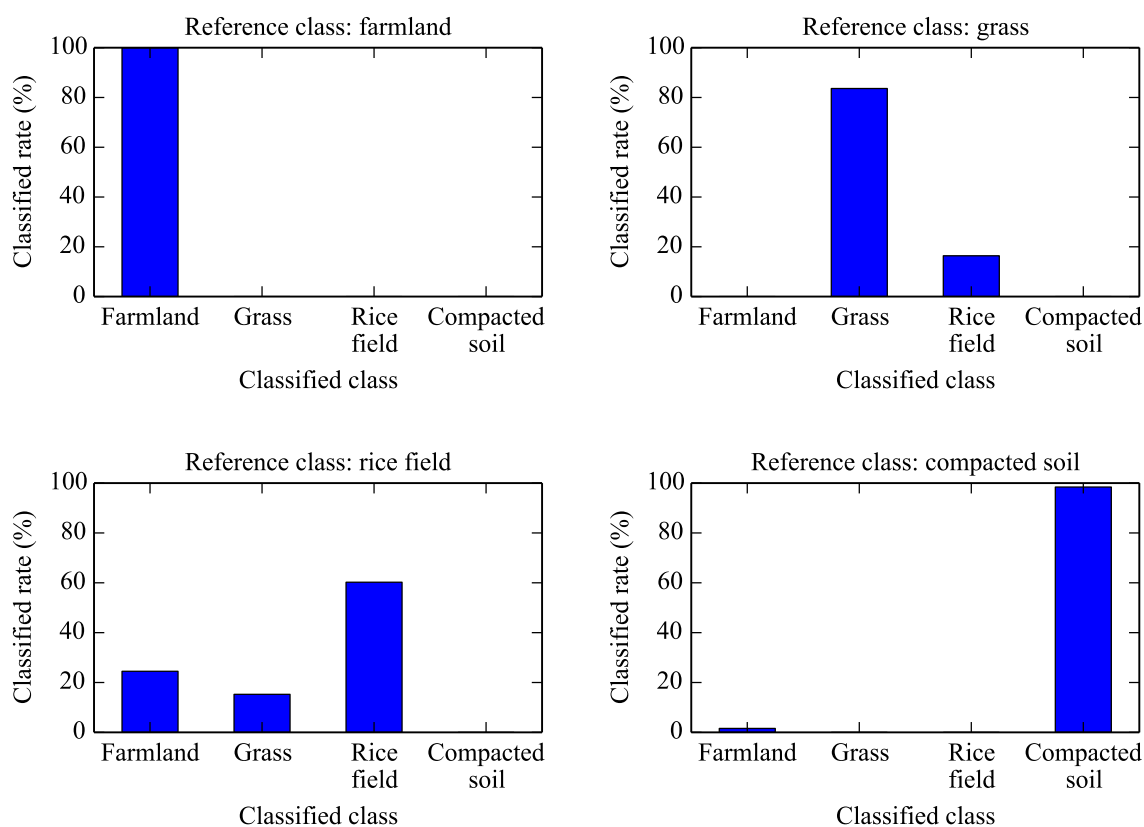


図 4.20 秋の航空画像を用いた場合の、各参照クラスにおける分類クラスの割合

以上より、どの季節の航空画像を用いても、誤分類は見られた。ただし、冬の航空画像を用いた場合には、田んぼ以外では PA がほぼ 100 %であったことから、冬、夏、秋の中では、冬の航空画像を用いる場合が最も誤分類が少なく精度のよい地表面分類をできる可能性がある。そこで、冬の航空画像を用いて分類精度を向上させる方法を次で検討する。

4.4.3 MED 法と SD 法の重み付けに関する検討

冬の航空画像を用いた分類では、畑と田んぼの誤判定があった。これについて、図 4.11 より、畑と田んぼの教師スペクトルは両者間で相対値は類似しているが絶対値は異なっている。そのため、SD 法よりも MED 法が分類には有効と考えられる。そこで、式 (4.3) に MED 法および SD 法の重み付け係数 w_{MED} , w_{SD} を設定した以下の式を提案する。

$$f_i = w_{\text{MED}} \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} + w_{\text{SD}} \frac{\Phi_i - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}} \quad (4.9)$$

絶対値の異なるスペクトルの判別には、SD 法より MED 法の有用性が高いと考えられる。そこで、MED-SD 法において SD 法よりも MED 法に比重を置くこととし、その比重を少しずつ変えるという意図で、 $(w_{\text{MED}}, w_{\text{SD}}) = (1, 1), (1.1, 0.9), (1.2, 0.8), (1.3, 0.7), (1.4, 0.6), (1.5, 0.5)$ の 6 ケースを設定する。これら 6 ケースそれぞれを用いて、「その他」を除く 4 クラスのテストエリアにて地表面分類を行い、分類精度表の作成および各種分類精度評価指標の計算を実施した。

表 4.19–表 4.24 に、 $(w_{\text{MED}}, w_{\text{SD}})$ の 6 ケースにおける分類精度表を示す。また図 4.21 および図 4.22 にそれぞれ、表 4.19–表 4.24 より算出されたクラス毎の PA および UA を全ケースまとめて示す。図 4.23 には、表 4.19–表 4.24 より算出された OA および KC を全ケースまとめて示す。図 4.21 より、 w_{MED} が大きくなると、畑の PA が低下する。すなわち、テストエリアの「畑」に属するピクセルのうち、正しく「畑」と分類されるピクセルが少なくなる。一方、 w_{MED} が大きくなると、田んぼの PA が上昇する。すなわち、テストエリアの「田んぼ」に属するピクセルのうち、正しく「田んぼ」と分類されるピクセルが多くなる。図 4.22 より、 w_{MED} が大きくなると、畑の UA が上昇する。すなわち、「畑」と分類されたピクセルのうち本当に「畑」のテストエリアに属しているピクセル数が多くなり、誤分類されるピクセル数が少なくなる。一方、 w_{MED} が大きくなると、田んぼの UA が低下する。すなわち、「田んぼ」と分類されたピクセルのうち本当に「田んぼ」のテストエリアに属しているピクセル数が少なくなり、誤分類されるピクセル数が多くなる。このように、PA および UA は、 w_{MED} および w_{SD} の大小による増減がクラスにより異なるが、 $(w_{\text{MED}}, w_{\text{SD}}) = (1.3, 0.7), (1.4, 0.6)$ のとき、すべてのクラスにおける PA および UA の高さのバランスがとれている。また図 4.23 より、 $(w_{\text{MED}}, w_{\text{SD}}) = (1.3, 0.7)$ のとき、最も分類精度が高い。よって、各ケースの PA, UA, OA, KC を総合的に判断した結果、 $w_{\text{MED}}, w_{\text{SD}}$ の値はそれぞれ 1.3, 0.7 とする。

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.19 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1, 1)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	1039	0	319	0	1358	76.5
	Grass	0	1027	0	0	1027	100.0
	Rice field	5	10	795	0	810	98.1
	Compacted soil	0	0	0	1075	1075	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		99.5	99.0	71.4	100.0		
OA (%): 92.2							
KC (-): 0.896							

表 4.20 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.1, 0.9)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	1022	0	261	1	1284	79.6
	Grass	0	1023	0	0	1023	100.0
	Rice field	22	14	853	0	889	96.0
	Compacted soil	0	0	0	1074	1074	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		97.9	98.6	76.6	99.9		
OA (%): 93.0							
KC (-): 0.907							

表 4.21 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.2, 0.8)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	1001	0	206	1	1208	82.9
	Grass	0	1021	0	0	1021	100.0
	Rice field	43	16	908	0	967	93.9
	Compacted soil	0	0	0	1074	1074	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		95.9	98.5	81.5	99.9		
OA (%): 93.8							
KC (-): 0.917							

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.22 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.3, 0.7)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	1133	85.5
	Grass	0	1018	0	0	1018	100.0
	Rice field	75	19	951	0	1045	91.0
	Compacted soil	0	0	0	1074	1074	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		92.8	98.2	85.4	99.9		
OA (%):		94.0					
KC (-):		0.919					

表 4.23 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.4, 0.6)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	921	0	136	2	1059	87.0
	Grass	0	1014	0	0	1014	100.0
	Rice field	123	23	978	0	1124	87.0
	Compacted soil	0	0	0	1073	1073	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		88.2	97.8	87.8	99.8		
OA (%):		93.3					
KC (-):		0.911					

表 4.24 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.5, 0.5)$ のときの分類精度表

		Reference class				Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil		
Classified class	Farmland	860	34	106	2	1002	85.8
	Grass	0	976	0	0	976	100.0
	Rice field	184	27	1008	0	1219	82.7
	Compacted soil	0	0	0	1073	1073	100.0
Total		1044	1037	1114	1075	4270	
PA (%)		82.4	94.1	90.5	99.8		
OA (%):		91.7					
KC (-):		0.890					

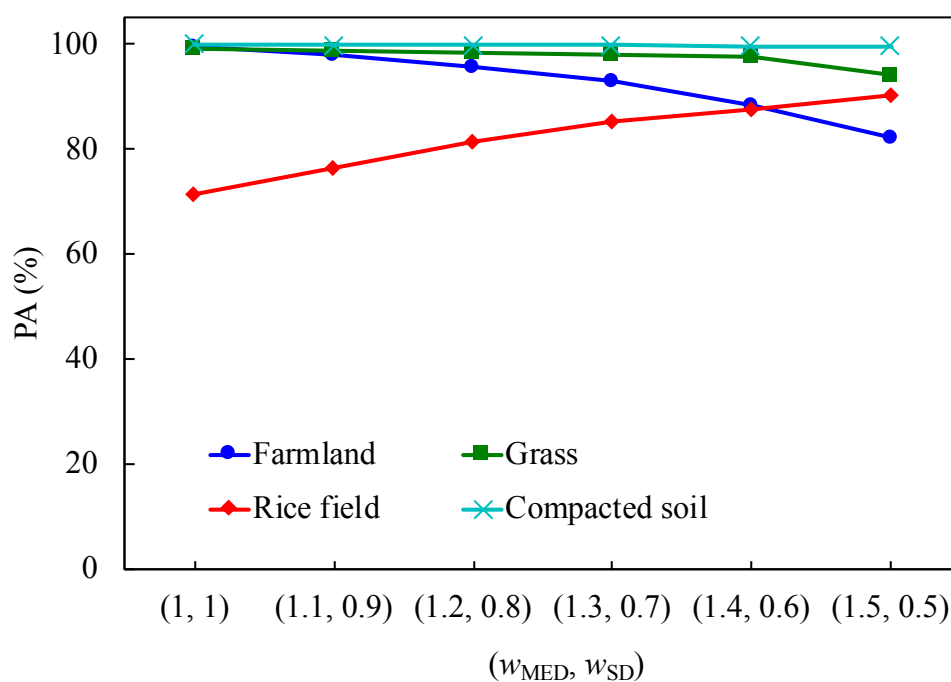


図 4.21 異なる (w_{MED}, w_{SD}) の組合せに対するクラス毎の PA

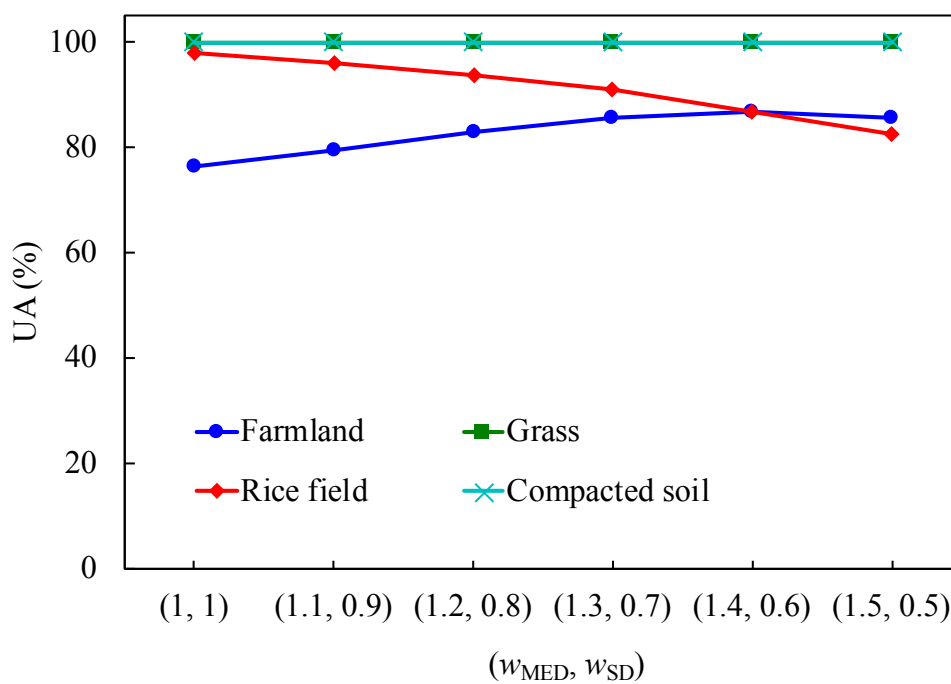


図 4.22 異なる (w_{MED}, w_{SD}) の組合せに対するクラス毎の UA

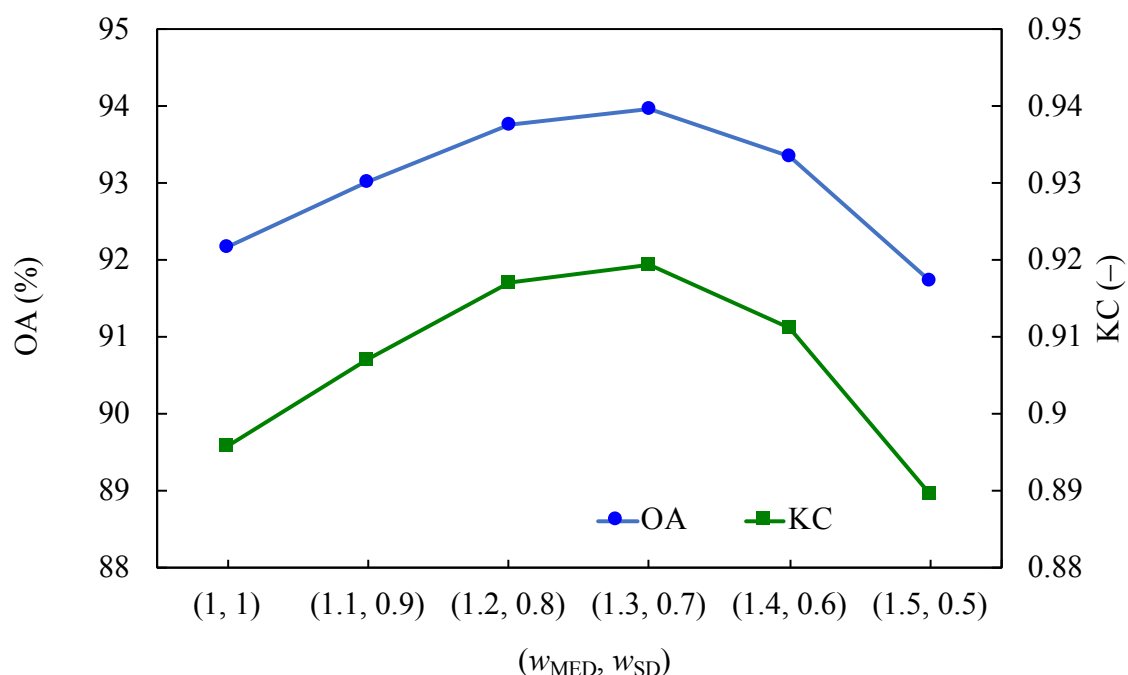


図 4.23 異なる (w_{MED}, w_{SD}) の組合せに対する OA および KC

4.4.4 閾値の検討

「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」の4クラスのいずれにも属さないピクセルを「その他」と分類するために判別関数 f_i に設ける閾値について、最適値を検討する。冬の撮影画像を用い、閾値を90から100パーセンタイルまで1パーセンタイルごとに変化させ、テストエリアにて地表面分類を行う。その後、分類精度表の作成および各種分類精度評価指標の計算を実施する。

表 4.25 に、トレーニングエリア内のピクセルを対象とした分類において正答となったピクセルの f_i のうち、 p ($p = 90, 91, \dots, 100$) パーセンタイルに相当する値 (f_i の閾値) を示す。表 4.26–表 4.36 に、各閾値における分類精度表を示す。また図 4.24 および図 4.25 にそれぞれ、表 4.26–表 4.36 より算出された閾値毎の PA および UA を全ケースまとめて示す。図 4.26 には、表 4.26–表 4.36 より算出された OA および KC を全ケースまとめて示す。図より、閾値が90から92パーセンタイルにかけて、草地の PA が大きく変化し、それに伴って OA 及び KC も変化している。OA, KC が最大となるのは、閾値94パーセンタイルのときである。

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.25 各パーセンタイルに対応する f_i の閾値

Threshold percentile	Threshold of f_i			
	Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil
90	0.290	0	0.174	0
91	0.308	0.011	0.181	0
92	0.323	0.022	0.188	0
93	0.357	0.037	0.200	0
94	0.381	0.053	0.208	0
95	0.423	0.066	0.219	0
96	0.447	0.090	0.225	0
97	0.465	0.110	0.230	0.046
98	0.492	0.147	0.252	0.093
99	0.548	0.190	0.264	0.151
100	0.624	0.228	0.317	0.304

表 4.26 閾値 90 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	954	0	135	1	1	1091	87.4
	Grass	0	527	0	0	254	781	67.5
	Rice field	23	19	687	0	14	743	92.5
	Compacted soil	0	0	0	1073	43	1116	96.1
	Others	67	491	292	1	869	1720	50.5
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		91.4	50.8	61.7	99.8	73.6		
OA (%):		75.4						
KC (-):		0.692						

表 4.27 閾値 91 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	960	0	140	1	1	1102	87.1
	Grass	0	744	0	0	259	1003	74.2
	Rice field	29	19	694	0	14	756	91.8
	Compacted soil	0	0	0	1073	43	1116	96.1
	Others	55	274	280	1	864	1474	58.6
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.0	71.7	62.3	99.8	73.2		
OA (%):		79.5						
KC (-):		0.744						

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.28 閾値 92 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	964	0	146	1	1	1112	86.7
	Grass	0	1014	0	0	264	1278	79.3
	Rice field	31	19	701	0	15	766	91.5
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	49	4	267	0	858	1178	72.8
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.3	97.8	62.9	99.9	72.7		
OA (%):		84.6						
KC (-):		0.807						

表 4.29 閾値 93 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	153	1	3	1126	86.1
	Grass	0	1016	0	0	273	1289	78.8
	Rice field	39	19	716	0	19	793	90.3
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	36	2	245	0	843	1126	74.9
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.0	64.3	99.9	71.4		
OA (%):		84.7						
KC (-):		0.809						

表 4.30 閾値 94 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	162	1	3	1135	85.4
	Grass	0	1018	0	0	280	1298	78.4
	Rice field	50	19	734	0	24	827	88.8
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	25	0	218	0	831	1074	77.4
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	65.9	99.9	70.4		
OA (%):		84.9						
KC (-):		0.811						

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.31 閾値 95 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	294	1312	77.6
	Rice field	58	19	761	0	47	885	86.0
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	17	0	190	0	794	1001	79.3
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	68.3	99.9	67.2		
OA (%):		84.7						
KC (-):		0.809						

表 4.32 閾値 96 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	312	1330	76.5
	Rice field	61	19	780	0	74	934	83.5
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	14	0	171	0	749	934	80.2
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	70.0	99.9	63.4		
OA (%):		84.2						
KC (-):		0.803						

表 4.33 閾値 97 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	323	1341	75.9
	Rice field	63	19	801	0	99	982	81.6
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	12	0	150	0	713	875	81.5
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	71.9	99.9	60.4		
OA (%):		83.9						
KC (-):		0.799						

第4章 広域における地表面種類分布の把握

表 4.34 閾値 98 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	351	1369	74.4
	Rice field	65	19	825	0	129	1038	79.5
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	10	0	126	0	655	791	82.8
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	74.1	99.9	55.5		
OA (%):		83.3						
KC (-):		0.792						

表 4.35 閾値 99 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	351	1369	74.4
	Rice field	72	19	864	0	136	1091	79.2
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	3	0	87	0	648	738	87.8
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	77.6	99.9	54.9		
OA (%):		83.9						
KC (-):		0.799						

表 4.36 閾値 100 パーセンタイルのときの分類精度表

		Reference class					Total	UA (%)
		Farmland	Grass	Rice field	Compacted soil	Others		
Classified class	Farmland	969	0	163	1	3	1136	85.3
	Grass	0	1018	0	0	351	1369	74.4
	Rice field	74	19	910	0	169	1172	77.6
	Compacted soil	0	0	0	1074	43	1117	96.2
	Others	1	0	41	0	615	657	93.6
Total		1044	1037	1114	1075	1181	5451	
PA (%)		92.8	98.2	81.7	99.9	52.1		
OA (%):		84.1						
KC (-):		0.802						

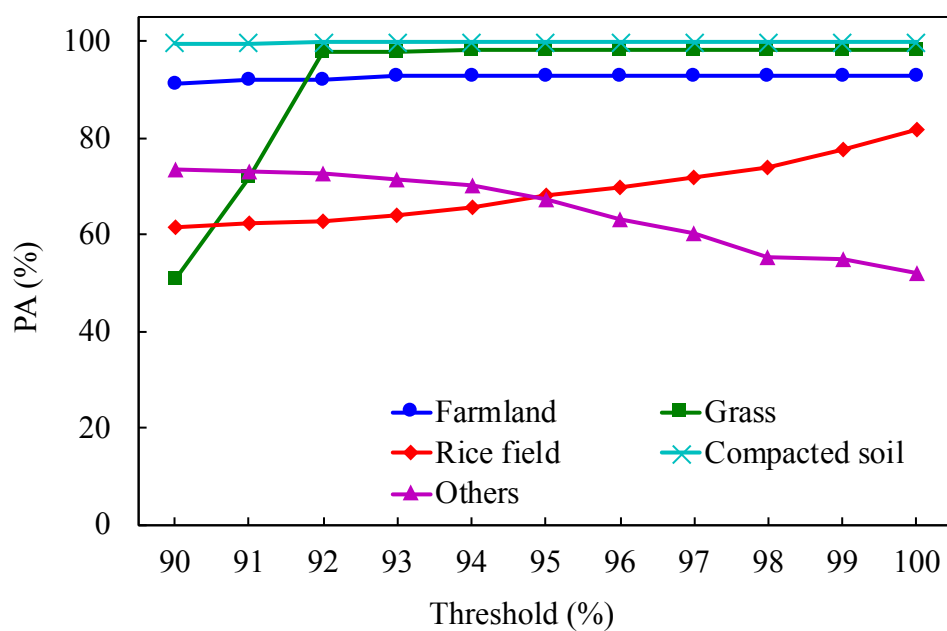


図 4.24 異なる閾値に対するクラス毎の PA

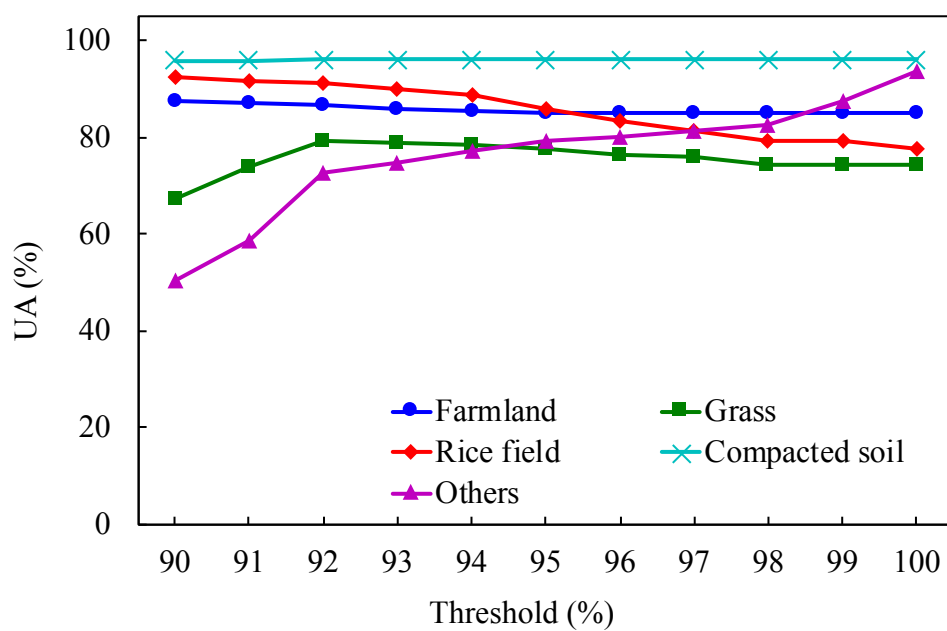


図 4.25 異なる閾値に対するクラス毎の UA

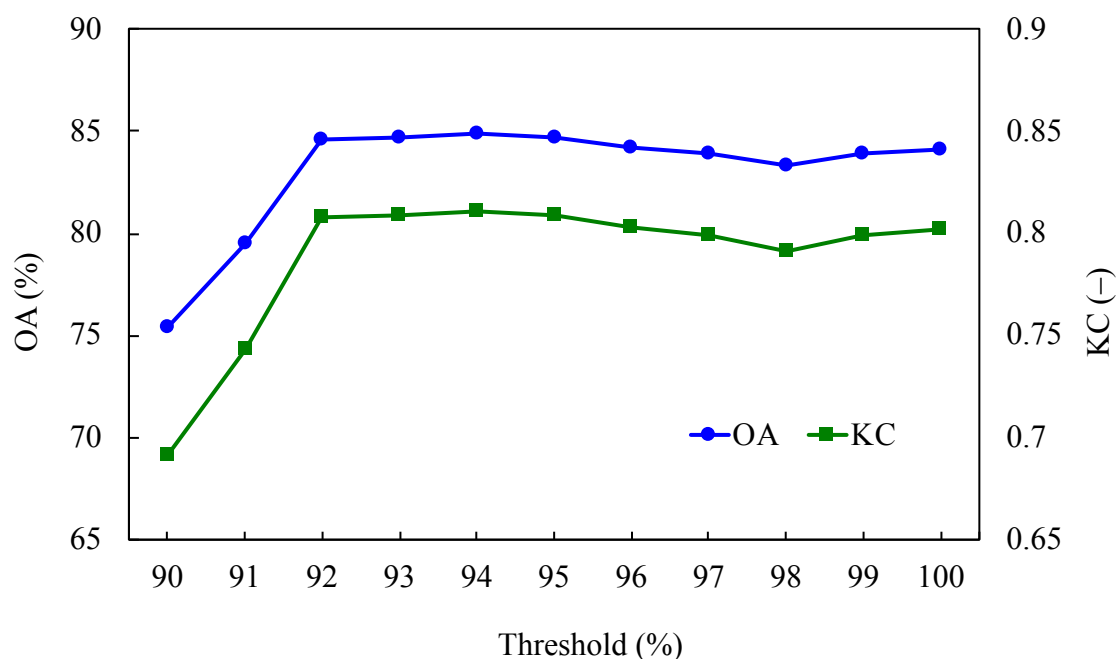


図 4.26 異なる閾値に対する OA および KC

4.5 推定エリアにおける地表面分類の実施

これまではテストエリアを対象に地表面分類を行い、分類時の設定条件を検討してきた。その結果、冬に撮影された航空画像を用い、 $(w_{MED}, w_{SD}) = (1.3, 0.7)$ とし、 f_i の閾値は 94 パーセントイルとする条件において最も精度のよい分類結果が得られることがわかった。本節では、前節で決定されたこれらの条件を用いて、推定エリアにおいて地表面分類を実施する。

推定エリア内での地表面分類においては、建物部分を「その他」と分類するために、国土地理院が提供する基盤地図情報基本項目 [30] のうち「建築物の外周線」データを用いる。「建築物の外周線」内に属するピクセルは「その他」に分類する。

図 4.27 に、推定エリアの南西端を $(x, y) = (0, 0)$ [m] とし、推定エリア内における地表面分類結果を示す。また、参照用として、冬に撮影された航空画像の推定エリア部分を拡大して図 4.28 に示す。図 4.27 と図 4.28 を見比べると、全体としてはおおよそ妥当な地表面分類ができています。一部、本来は木の箇所がその他に分類されていない箇所が見られるが、本来は木である箇所については、数値表層モデル (DSM: digital surface model) と組み合わせることによって木の箇所を判別できるため、本来は木の箇所が異なる地表面と誤分類されることに関してはさほど問題ではないと考えられる。ただし、DSM を用いた分類は今後の課題とする。

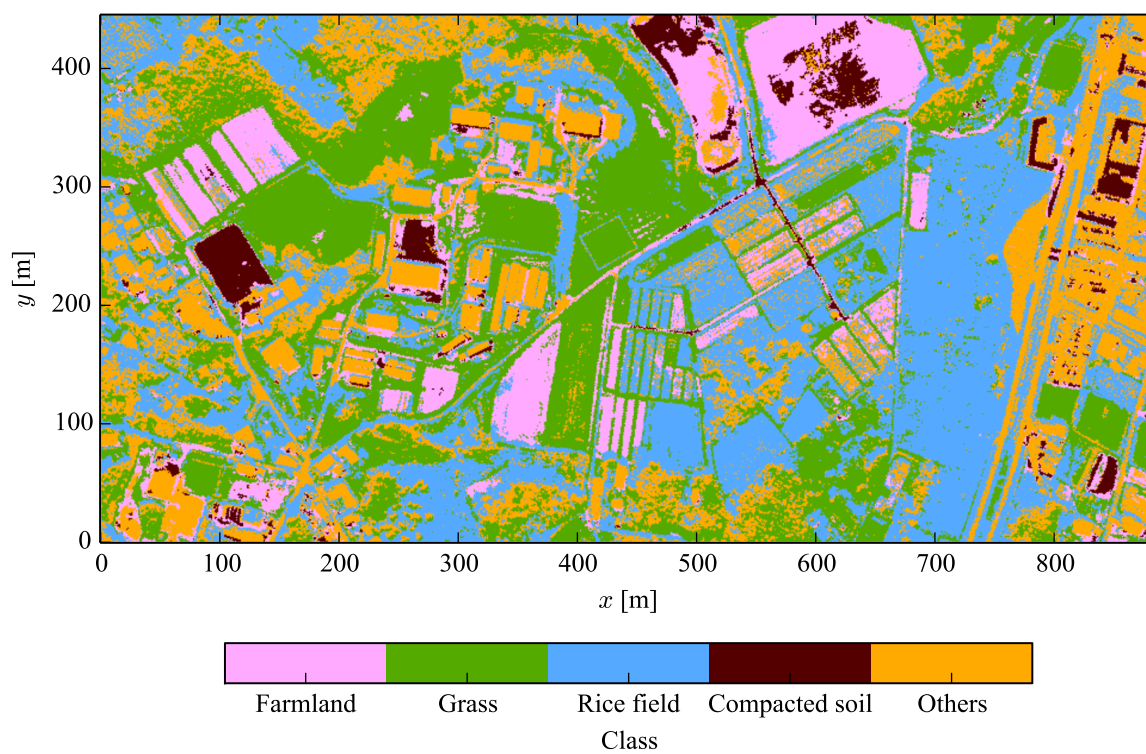


図 4.27 推定エリア内における地表面分類結果



図 4.28 冬に撮影された航空画像の推定エリア部分

4.6 まとめ

本節では、第4章のまとめを述べる。

広域における地表面種類分布の把握を目的とし、東郷フィールド周辺を対象として、ハイパースペクトル航空画像を2017年2月27日(冬)、同6月23日(夏)、同9月25日(秋)の3度にわたって撮影した。撮影画像をもとに、「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」「その他」の5つのクラスへの地表面種類分類を試みた。分類にあたり、分類の基準とする分光反射率を各クラスにつき算出するためのトレーニングエリア、分類精度を評価するためのテストエリア、実際に地表面分類を行う推定エリアを、撮影した航空画像内に設定した。地表面分類手法として、判別関数に閾値を設けたMED-SD法に対し、さらにMED法およびSD法の重み付けを行う方法を提案した。本手法を用い、分類時の最適な計算条件を検討した結果、以下の条件下において最も精度のよい地表面分類結果が得られた。

- ・ 教師スペクトル算出に必要なピクセル数は、1000ピクセルとする。
- ・ 冬、夏、秋のうち、冬に撮影された航空画像を用いて地表面分類を行う。
- ・ MED-SD法におけるMED法とSD法の重み付け係数 w_{MED} , w_{SD} は、それぞれ1.3, 0.7とする。
- ・ MED-SD法における判別関数 f_i の閾値は、クラス毎にトレーニングエリア内で正答となったピクセルの f_i の94パーセンタイルとする。

以上の条件を用いて、推定エリアにおいて地表面分類を実施した。地表面分類結果と航空画像を比較したところ、概ね良好な地表面分類結果が得られた。

第 5 章

地表面音響特性マップの作成

5.1 目的

第 3 章では、各種地表面において、地表面音響特性経時変化モデルのモデル定数 a, b, c, d, p, q を決定した。また第 4 章では、東郷フィールド周辺地域を対象とし、地表面種類分類を行った。本章では、第 3 章までで構築された地表面音響特性経時変化モデルと、第 4 章で推定された地表面種類空間分布を組み合わせて、経時変化を考慮した地表面音響特性マップを作成する。このマップにより、地表面音響特性の時空間変動が明らかとなる。

5.2 マップ作成方法

地表面音響特性マップ作成の流れを図 5.1 に示す。第 4 章にて分類した 5 つの地表面種類(畑、草地、田んぼ、固い地面、その他)のうち、第 3 章にて地表面種類経時変化モデルを適用可能と判断した畑、草地、田んぼの 3 地表面については、2018 年 11 月 1 日 0 時から 2019 年 10 月 31 日 23 時における、1 時間ごとの平均気温を夜間を除いて 24 時間後方移動平均した値および 1 時間ごとの積算降雨量を、入力データとしてモデルに入力する。そして、1 年分の飽和度、実効の流れ抵抗、1/3 オクターブバンド中心周波数 125 Hz–4 kHz における地表面吸音率を地表面ごとに計算する。一方、第 3 章にて地表面種類経時変化モデルを適用しないと判断した固い地面、およびその他の地表面については、地表面音響特性は経時変化によらず一定とする。固い地面に与える実効の流れ抵抗は、図 3.26 にプロットされている全 21 サンプルの流れ抵抗の、およそその平均値である 1600 kPa s/m^2 とする。また、その他の地表面に与える実効の流れ抵抗は、ASJ RTN-Model 2018 にて「コンクリート、アスファルト」の実効の流れ抵抗として定められている 20000 kPa s/m^2 とする。

その後、上記による計算結果のうち、実効の流れ抵抗および地表面吸音率と、第 4 章により推定された、東郷フィールド周辺を含む推定エリア内における地表面種類空間分布を組み合わせ、1 時間ごとの地表面音響特性マップを作成する。

本研究で構築した地表面種類経時変化モデルは、積雪の影響は考慮していない。そのため、2018 年 11 月 1 日 0 時から 2019 年 10 月 31 日 23 時の期間中に、地表面上に積雪があったとしても、その影響は考慮しない。

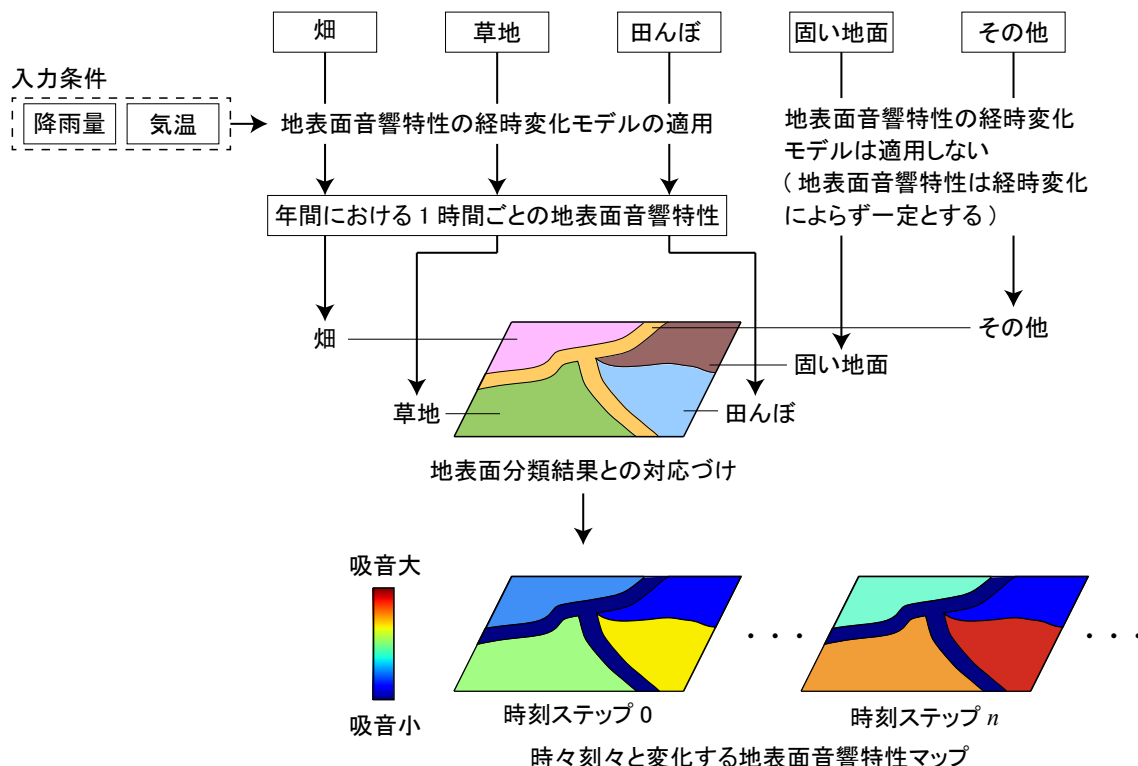


図 5.1 地表面音響特性マップ作成概要図

5.3 結果

5.3.1 地表面音響特性の年間変動

図 5.2, 図 5.3, 図 5.4 にそれぞれ, 東郷フィールドにおける A: 畑, B: 草地, C: 田んぼでの年間の地表面音響特性計算結果を示す。各図の (a) には 1 時間ごとの平均気温を夜間を除いて 24 時間後方移動平均した値 $T(t)$ を, (b) には 1 時間ごとの積算降雨量 $R(t)$ を示す。(c) には $T(t)$ および $R(t)$ から計算される 1 時間ごとの飽和度 $\hat{S}_r(t)$ を, (d) には $\hat{S}_r(t)$ から計算される 1 時間ごとの実効的流れ抵抗 $\hat{\sigma}(t)$ を示す。(e) には, $\hat{\sigma}(t)$ から計算した 1/3 オクターブバンド中心周波数 125 Hz–4 kHz における 1 時間ごとの吸音率 $\hat{\alpha}_f(t)$ のうち, 中心周波数 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz の結果を代表して示す。図 5.2–図 5.4 において, (a) および (b) に示した $T(t)$ および $R(t)$ はすべての地表面において共通である。図 5.2–図 5.4 の (c), (d), (e) は, 地表面ごとに異なるモデル定数を用いて計算された値である。

図 5.2 より, 畑では, 計算飽和度は年間を通して約 15–100 % の範囲で変動する。流れ抵抗は, 年間を通して約 500–1000 kPa s/m² 程度である。計算飽和度の変動に伴って流れ抵抗も変動し, 特に飽和度が 90 % 以上となる時刻では流れ抵抗の値も急激に大きくなる。地表面吸音率は, 年間を通して細かな時間変動はあるが, 中心周波数 250 Hz では吸音率 0.1 程度, 1 kHz では 0.2–0.3 程度, 4 kHz では 0.4–0.5 程度である。飽和度が大きくなると吸音率はすべてのバンドにおいて急激に低下し, 流れ抵抗と逆の傾向を示す。

第5章 地表面音響特性マップの作成

図 5.3 より、草地では、計算飽和度は年間を通して約 5–100 % の範囲で変動し、その変動幅は畑よりも大きい。流れ抵抗は、年間を通して約 200–700 kPa s/m² 程度であり、畑よりも値は小さいが、変動幅は大きい。それに伴い、地表面吸音率も年間を通して大きく変動している。

図 5.4 より、田んぼでは、計算飽和度は年間を通して約 50–100 % の範囲で変動する。畑や草地と比べて、田んぼでは飽和度の絶対値は大きい、その変動幅は小さい。流れ抵抗は、飽和度が 90 % 以上となる時刻では急激に上昇するものの、年間を通して 75–80 kPa s/m² 程度であり、変動は小さい。それに伴い、地表面吸音率も年間を通してあまり変化しない。ただし田んぼについては、本研究において土壌水分計測および地表面音響特性測定を行ったのは田植え前の時期であり、この期間の測定結果からモデル定数を決定した。したがって、イネが育っている期間（およそ 5 月下旬～10 月）については、今回構築したモデルは適用可能範囲外であることに注意が必要である。

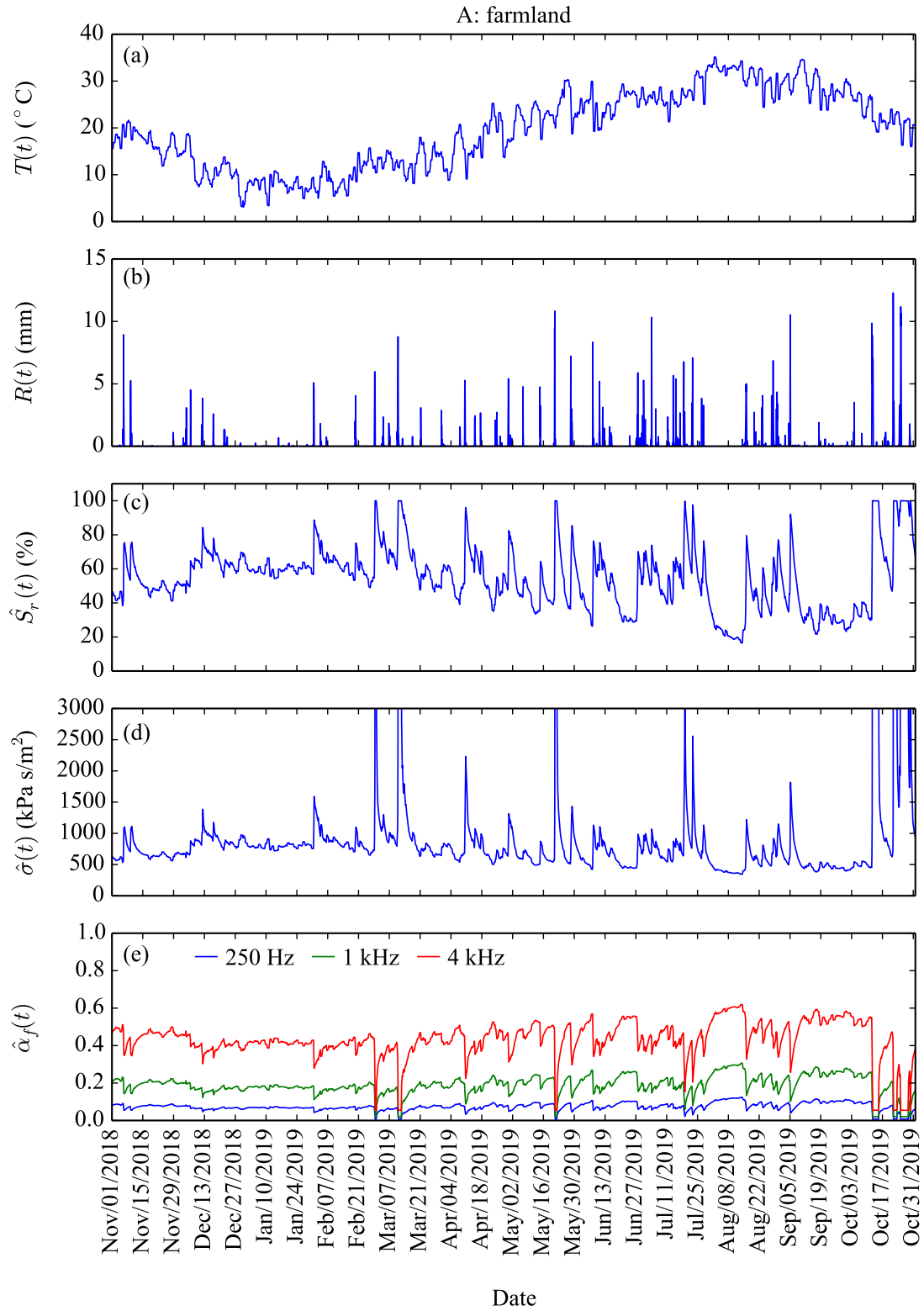


図 5.2 1 時間ごとの (a) 平均気温を 24 時間後方移動平均した値, (b) 積算降雨量, (c) 畑における飽和度の計算値, (d) 畑における流れ抵抗の計算値, (e) 畑における吸音率の計算値

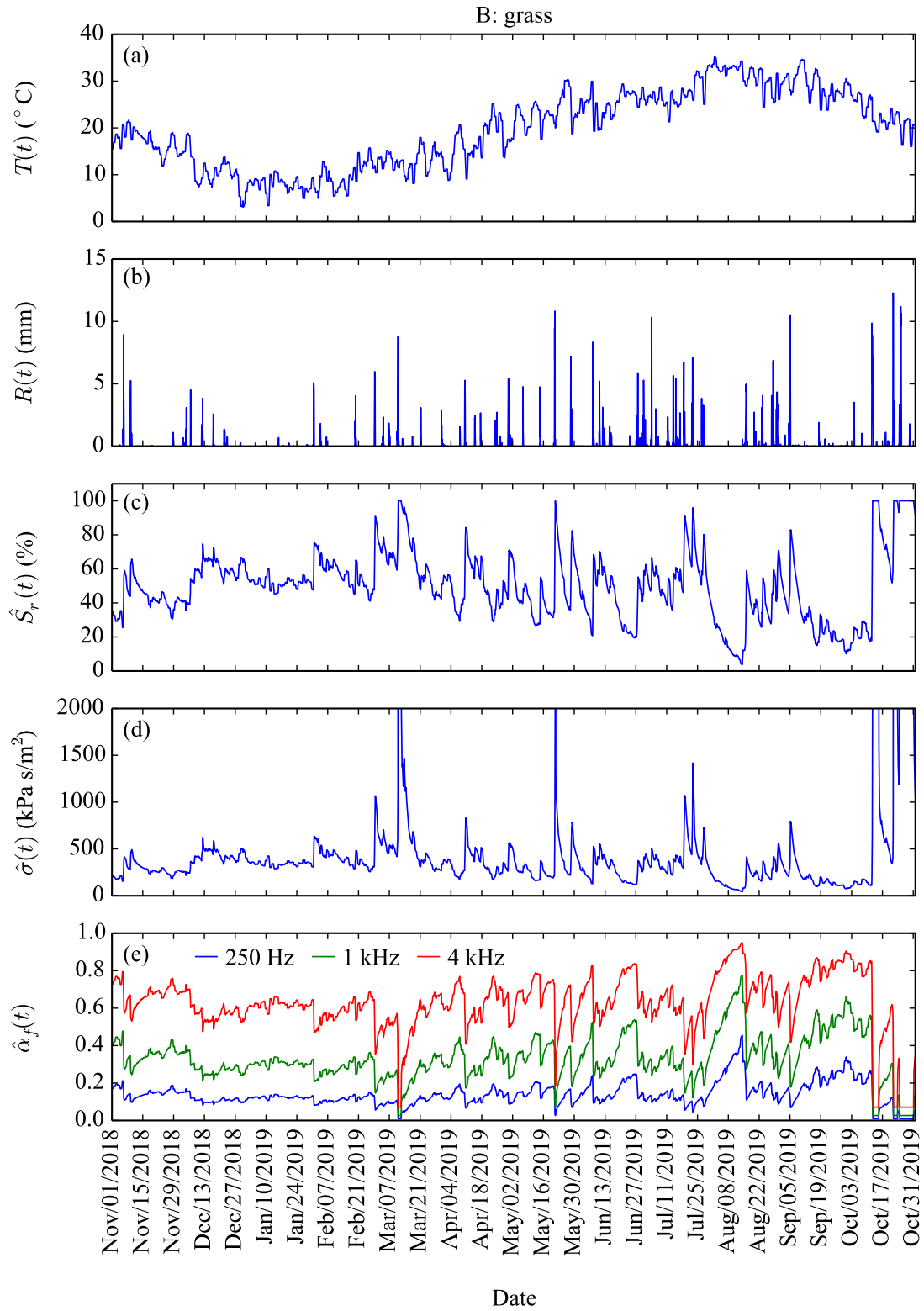


図 5.3 1 時間ごとの (a) 平均気温を 24 時間後方移動平均した値, (b) 積算降雨量, (c) 草地における飽和度の計算値, (d) 草地における流れ抵抗の計算値, (e) 草地における吸音率の計算値

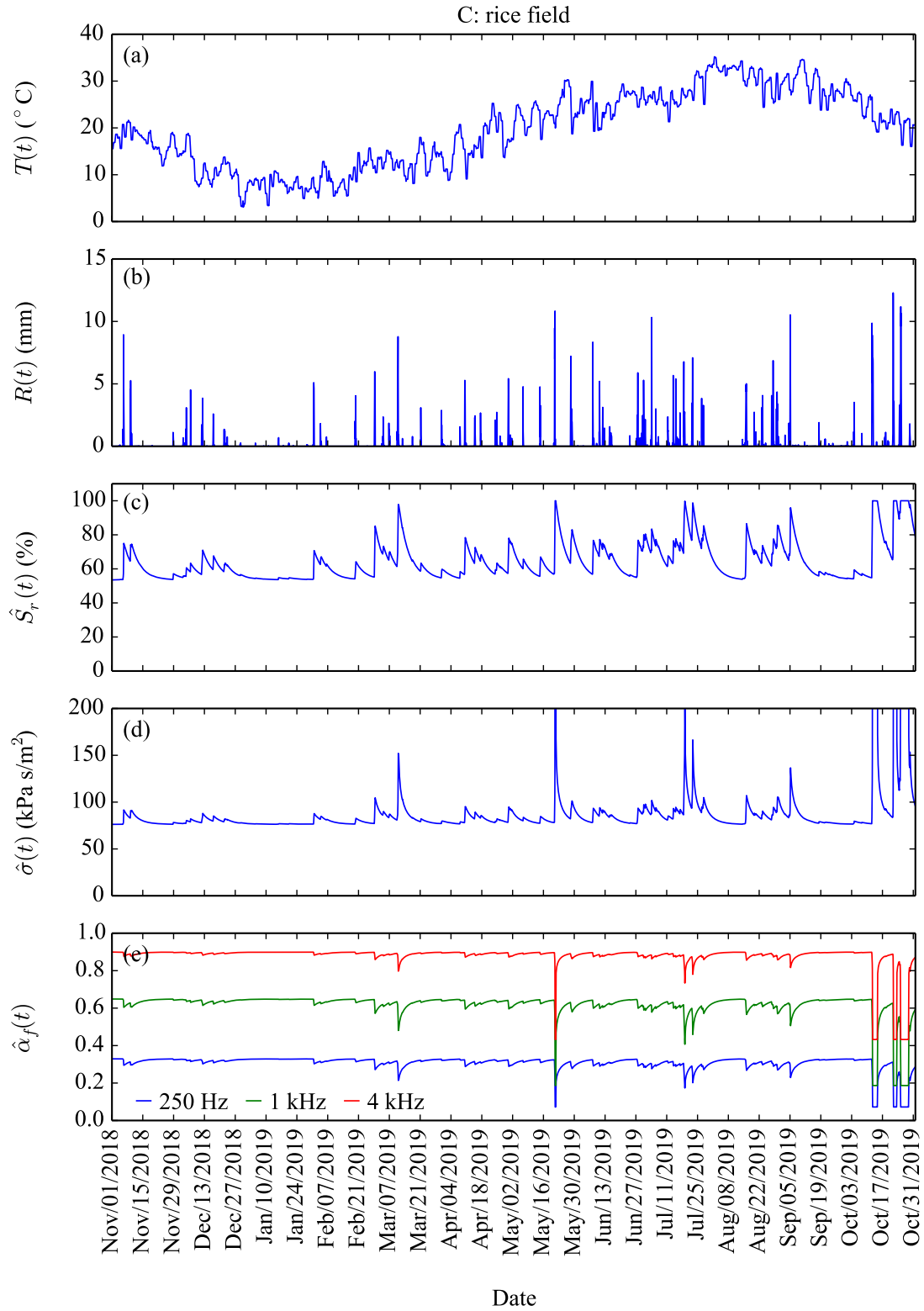


図 5.4 1 時間ごとの (a) 平均気温を 24 時間後方移動平均した値, (b) 積算降雨量, (c) 田んぼにおける飽和度の計算値, (d) 田んぼにおける流れ抵抗の計算値, (e) 田んぼにおける吸音率の計算値

5.3.2 地表面音響特性マップ作成結果

地表面音響特性マップは、2018年11月1日0時から2019年10月31日23時までの期間において、1時間ごとに作成可能である。本項では、結果の例として、飽和度の違いによる地表面音響特性マップの違いを見るために、草地において飽和度が最小、約20%、約40%、約60%、約80%、100%の時刻にあたる、計6つの時刻における地表面音響特性マップを作成する。表5.1に、作成する6時刻 (Cases 1–6 とする) および当該時刻における畑、草地、田んぼそれぞれでの計算飽和度を示す。いずれの地面においても、Case 1 から Case 6 の順で計算飽和度は上昇している。

6時刻それぞれにつき、実効の流れ抵抗、中心周波数 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz における地表面吸音率の計4つの物理量をマッピングする。

表 5.1 マップ作成時刻および当該時刻に対応する各地表面における計算飽和度

Case	時刻	計算飽和度 [%]		
		畑	草地	田んぼ
Case 1	2019 年 8 月 14 日 8 時	16.5	3.7	53.9
Case 2	2019 年 6 月 27 日 4 時	29.5	20.0	55.0
Case 3	2018 年 12 月 4 日 19 時	52.0	40.0	60.0
Case 4	2019 年 4 月 16 日 12 時	63.5	60.0	67.0
Case 5	2019 年 3 月 15 日 17 時	73.4	80.0	69.8
Case 6	2019 年 10 月 14 日 12 時	100.0	100.0	100.0

4.5 節にて地表面分類結果を示したときと同様に、推定エリアの南西端を $(x, y) = (0, 0)$ [m] とし、表 5.1 に示す 6 ケースそれぞれにおける実効の流れ抵抗マップを図 5.5–図 5.10 に示す。飽和度が小さい Case 1 では、推定エリア内の大半の部分において流れ抵抗は 100 kPa s/m^2 以下であるが、Case 1 から Case 6 にかけて飽和度が上昇するにつれ、流れ抵抗も大きくなる。Case 6 では、田んぼ以外の地表面における流れ抵抗は 10000 kPa s/m^2 以上となる。このように、年間を通した飽和度の違いにより、流れ抵抗の値は大きく異なることがわかる。

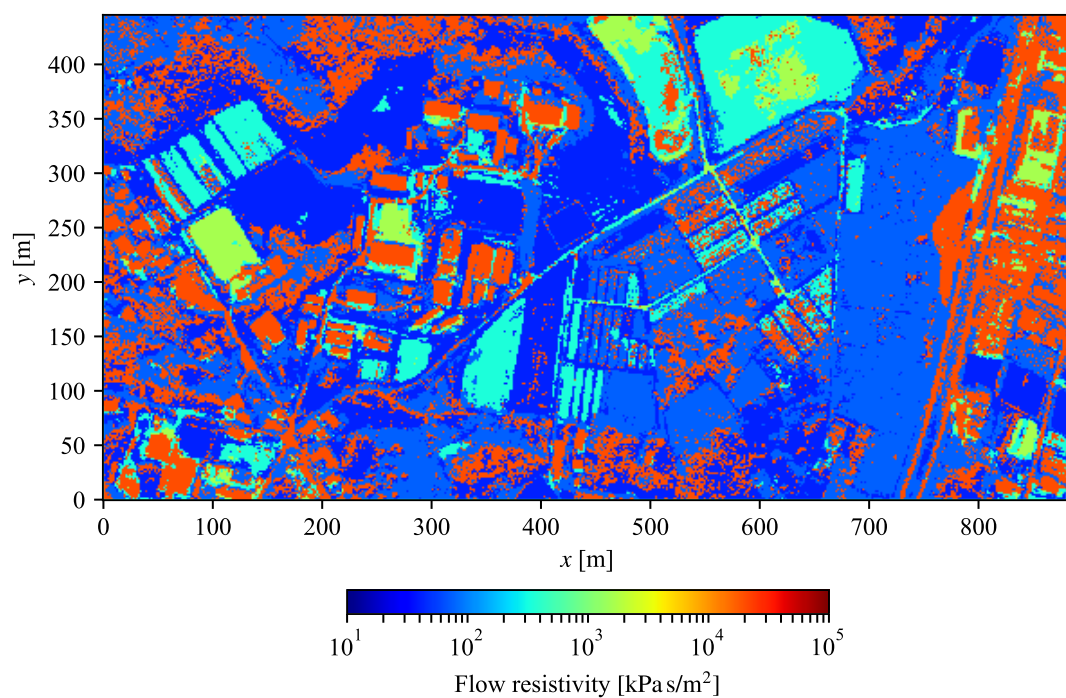


図 5.5 Case 1 (2019 年 8 月 14 日 8 時) における実効的流れ抵抗マップ

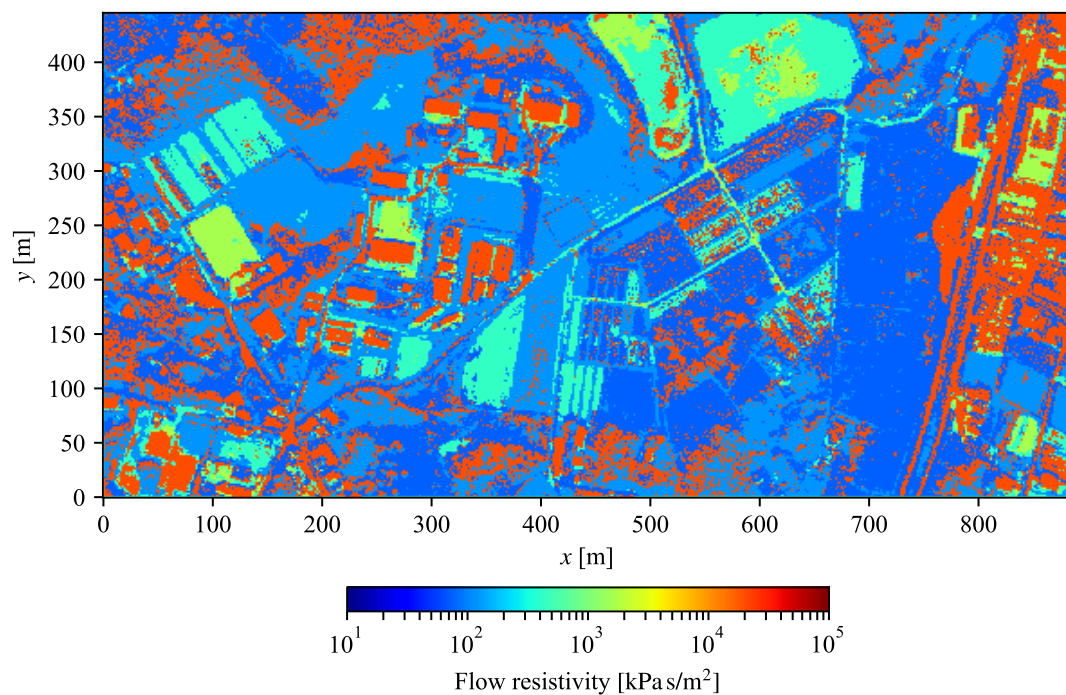


図 5.6 Case 2 (2019 年 6 月 27 日 4 時) における実効的流れ抵抗マップ

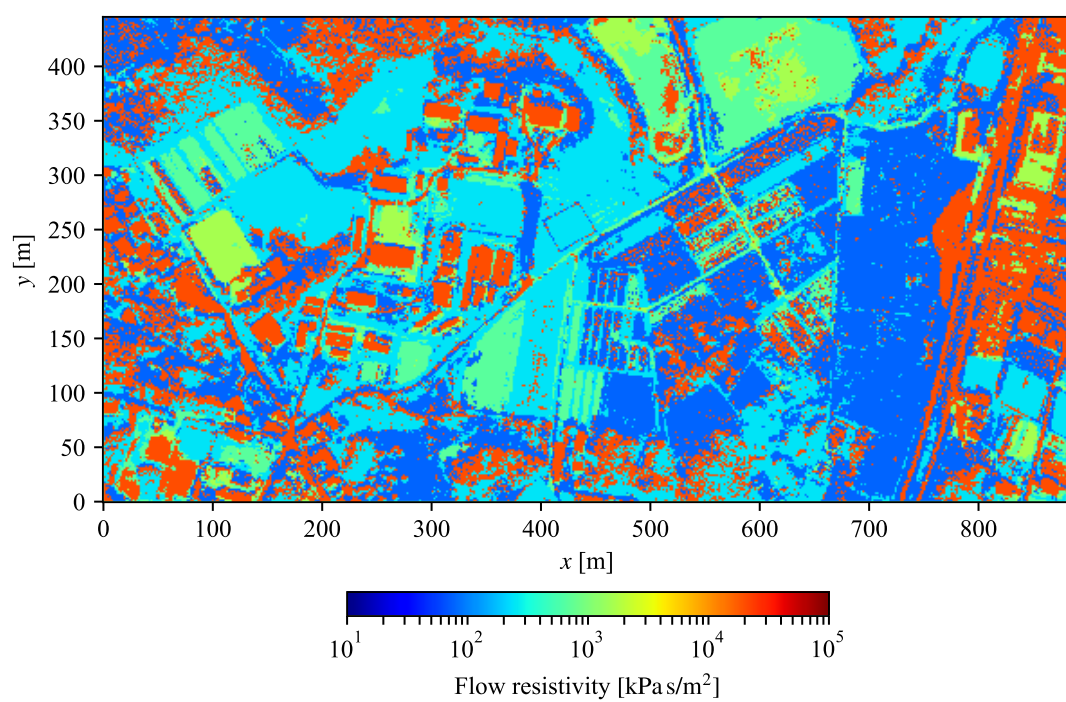


図 5.7 Case 3 (2018 年 12 月 4 日 19 時) における実効的流れ抵抗マップ

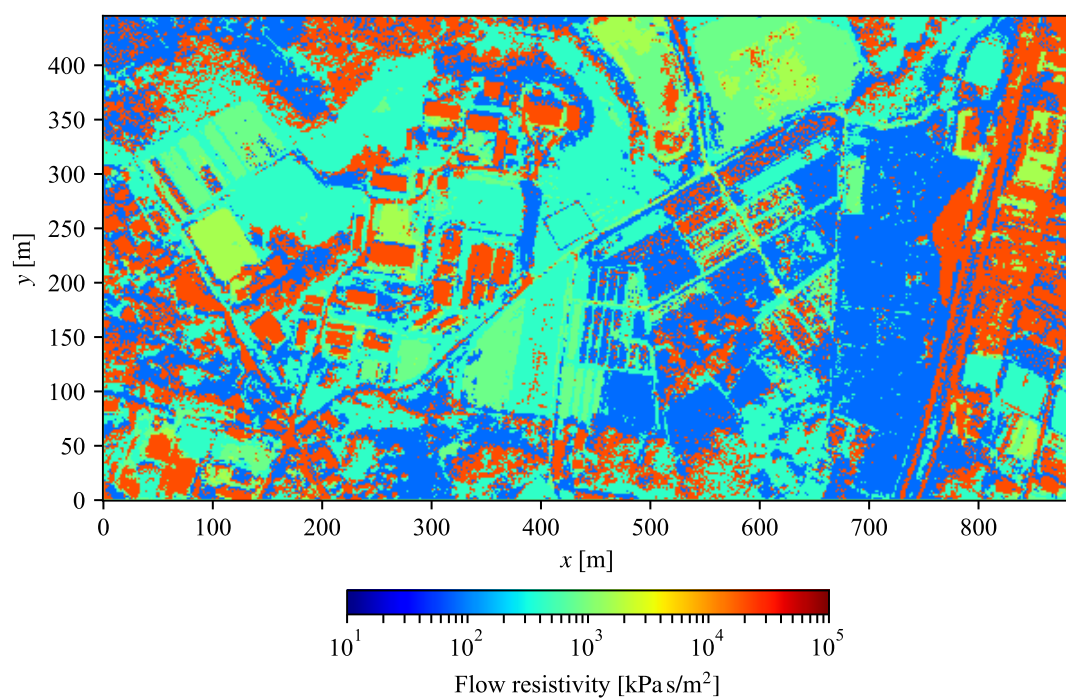


図 5.8 Case 4 (2019 年 4 月 16 日 12 時) における実効的流れ抵抗マップ

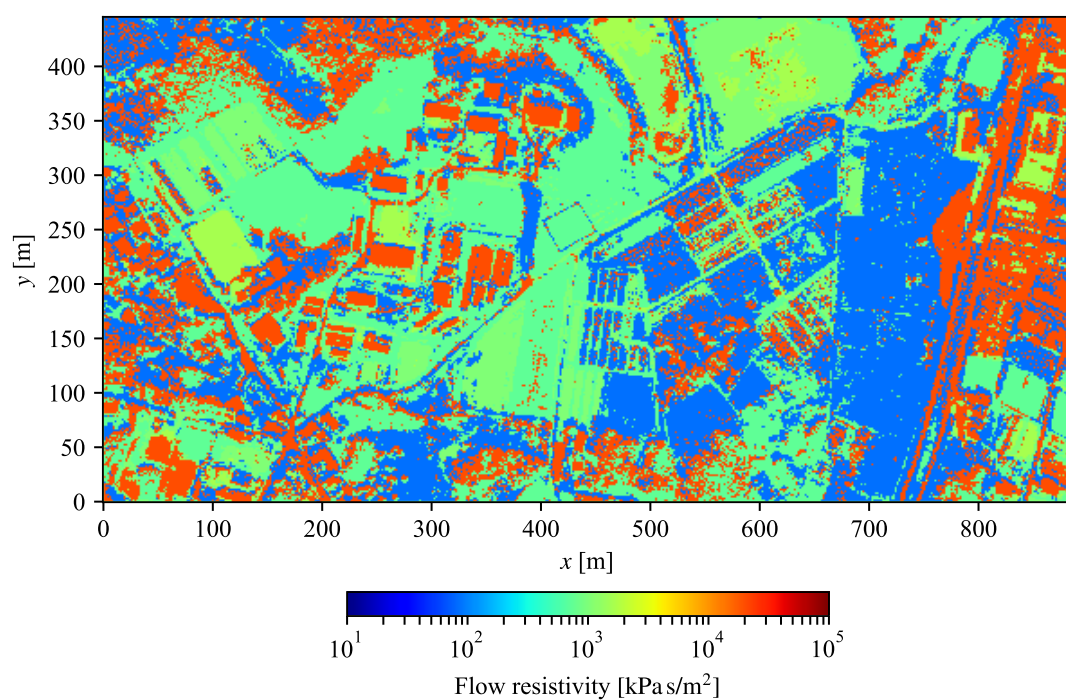


図 5.9 Case 5 (2019 年 3 月 15 日 17 時) における実効的流れ抵抗マップ

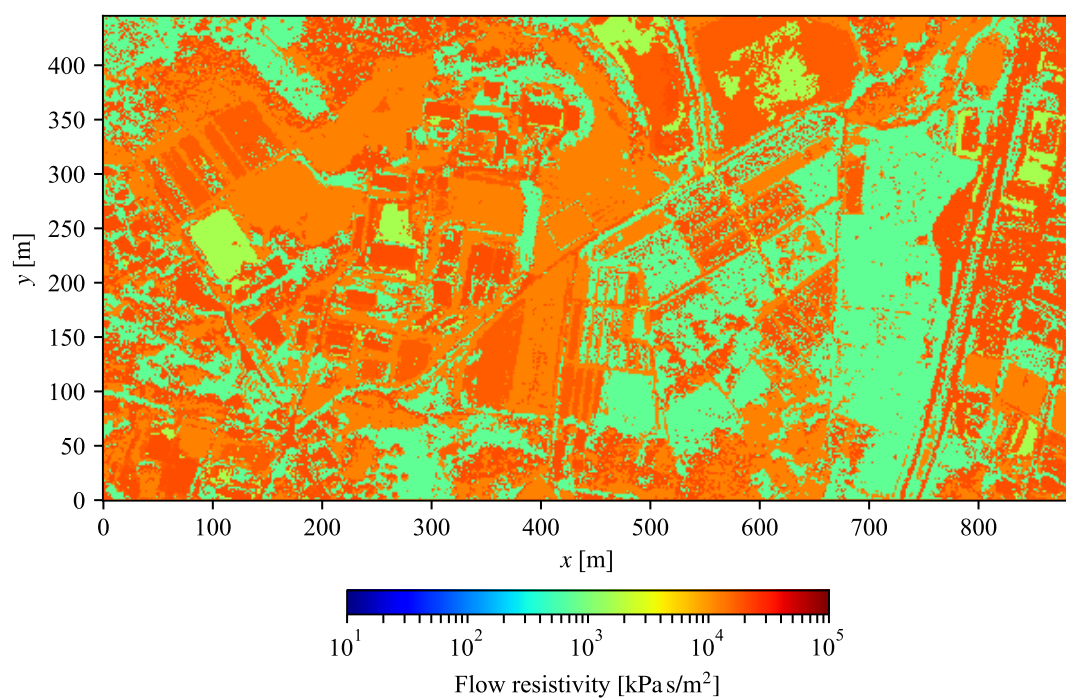


図 5.10 Case 6 (2019 年 10 月 14 日 12 時) における実効的流れ抵抗マップ

図 5.11–図 5.16 に、6 ケースにおける中心周波数 250 Hz の吸音率マップを示す。飽和度が最も小さい Case 1 では、草地や田んぼでの吸音が見られる。Case 2 から Case 5 にかけては、いずれの地表面においても吸音率は低く、Case 間での差はあまり見られない。すべての地表面において計算飽和度が 100 % である Case 6 では、推定エリア全域において計算吸音率が 0.1 以下となり、中心周波数 250 Hz の音はほとんど吸音されないという結果であった。

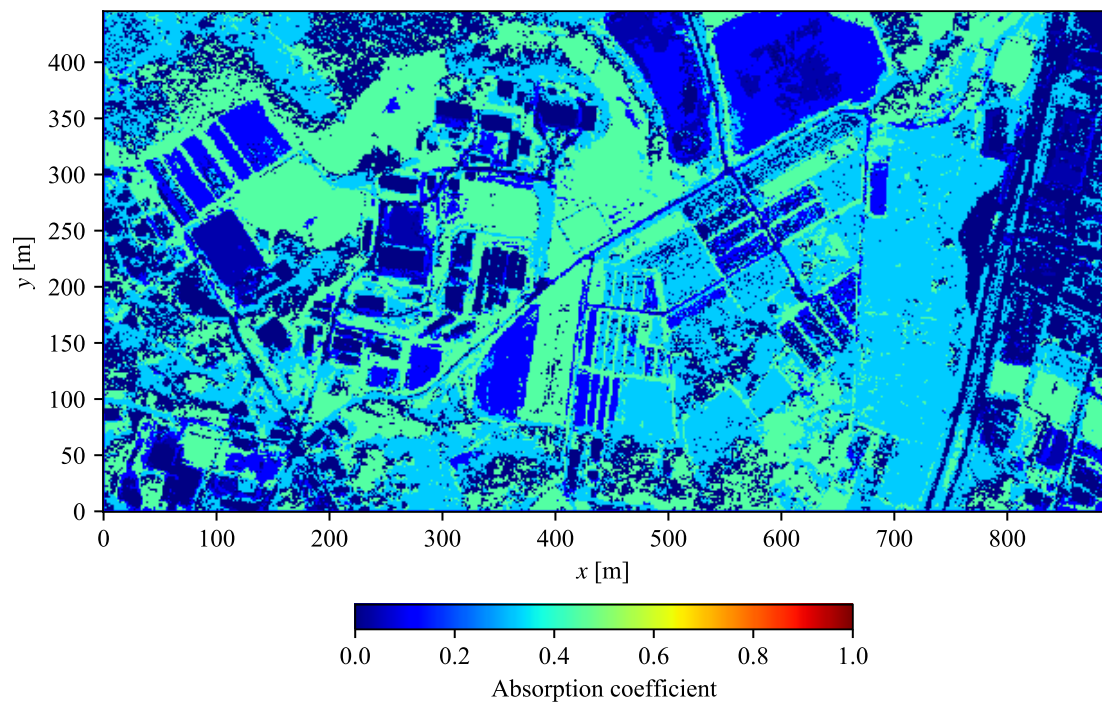


図 5.11 Case 1 (2019 年 8 月 14 日 8 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

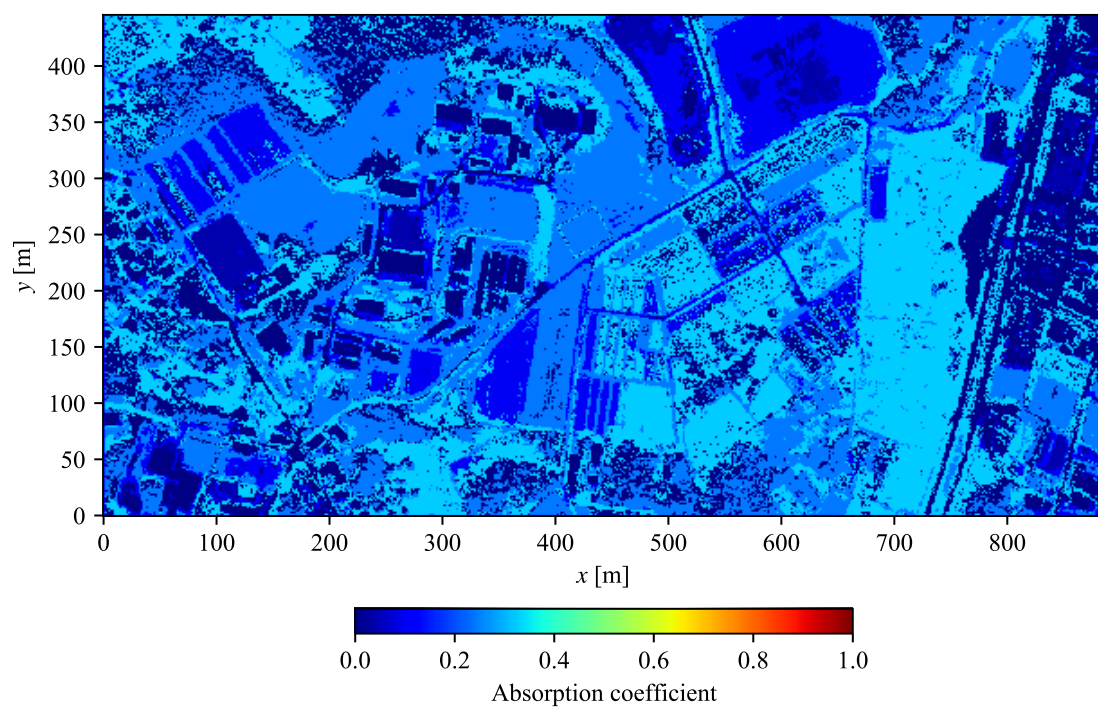


図 5.12 Case 2 (2019 年 6 月 27 日 4 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

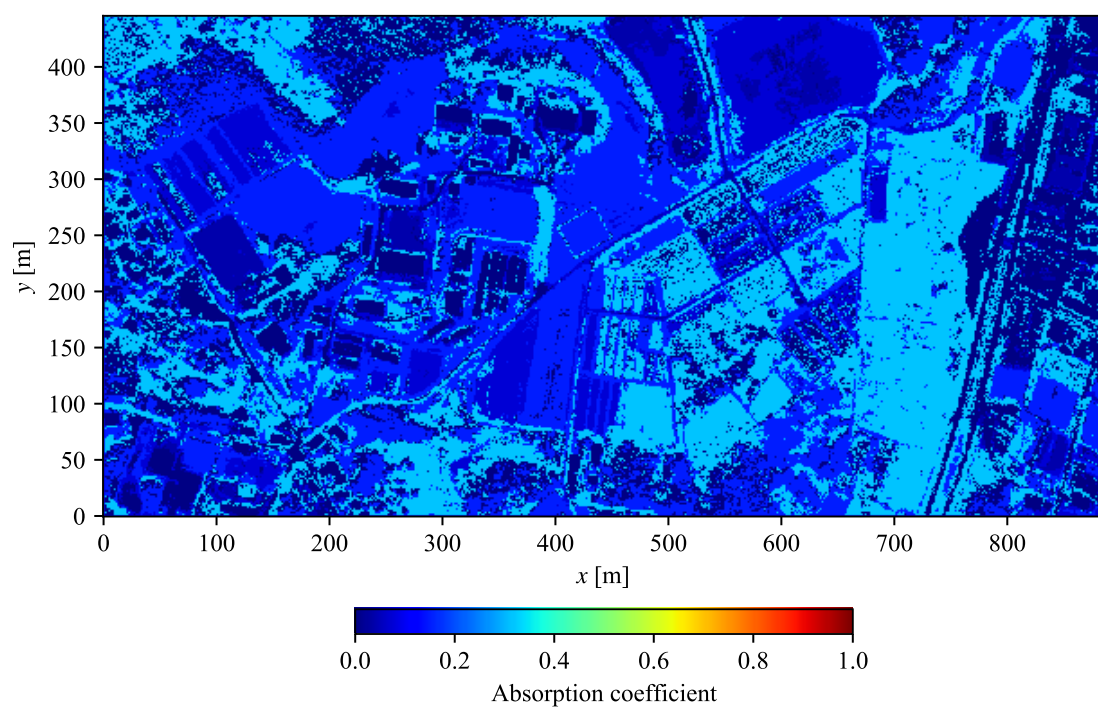


図 5.13 Case 3 (2018 年 12 月 4 日 19 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

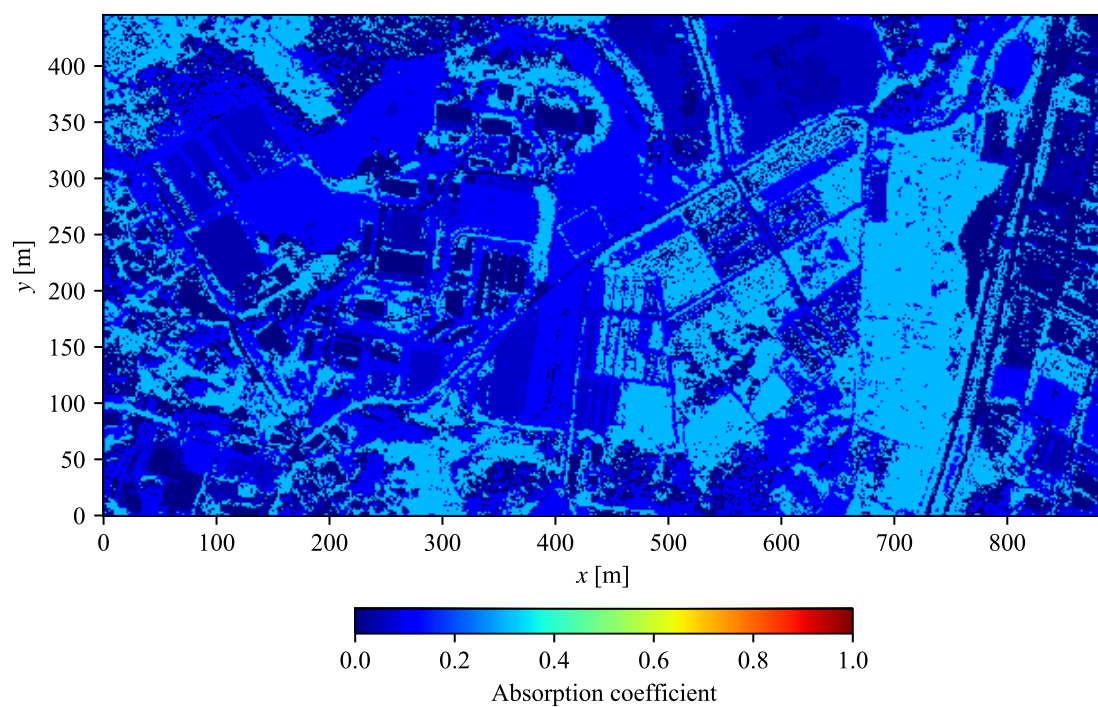


図 5.14 Case 4 (2019 年 4 月 16 日 12 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

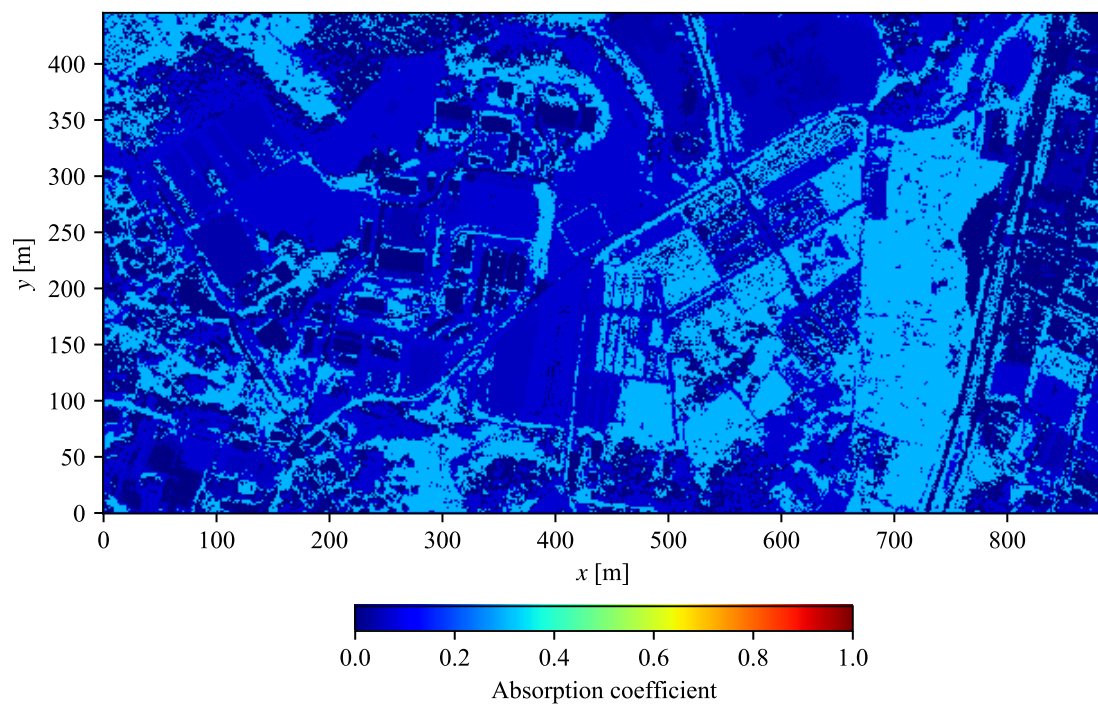


図 5.15 Case 5 (2019 年 3 月 15 日 17 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

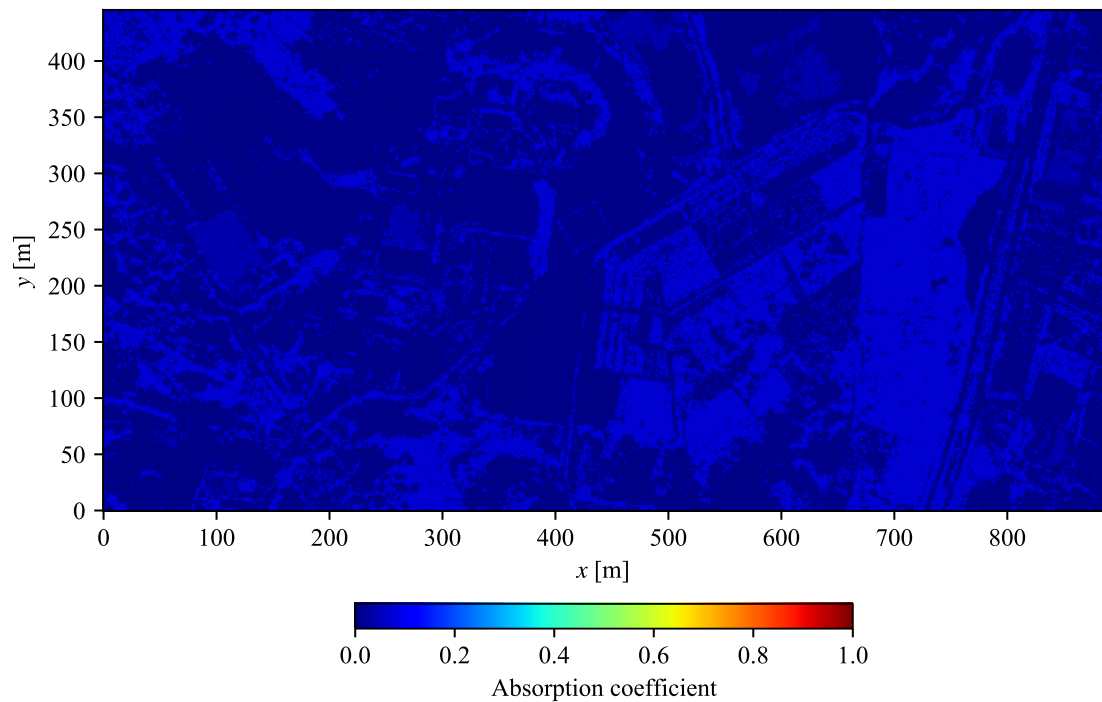


図 5.16 Case 6 (2019 年 10 月 14 日 12 時) における中心周波数 250 Hz の吸音率マップ

図 5.17–図 5.22 に、6 ケースにおける中心周波数 1 kHz の吸音率マップを示す。Case 1 では、草地や田んぼで吸音率が高く、畑では中程度であり、固い地面やその他では吸音率が低いというように、推定エリア内で吸音率に大きな差が見られる。Case 2 から Case 5 にかけては、飽和度の上昇につれて草地の吸音率は徐々に低下する。一方、田んぼの吸音率はあまり変化しないが、これは図 5.4 で示した吸音率の特徴を反映している。Case 6 では、田んぼの吸音率は 0.2 程度、それ以外の地表面種類における吸音率は 0.1 程度かそれ以下であり、中心周波数 250 Hz における計算結果である図 5.16 と大きな差は見られない。

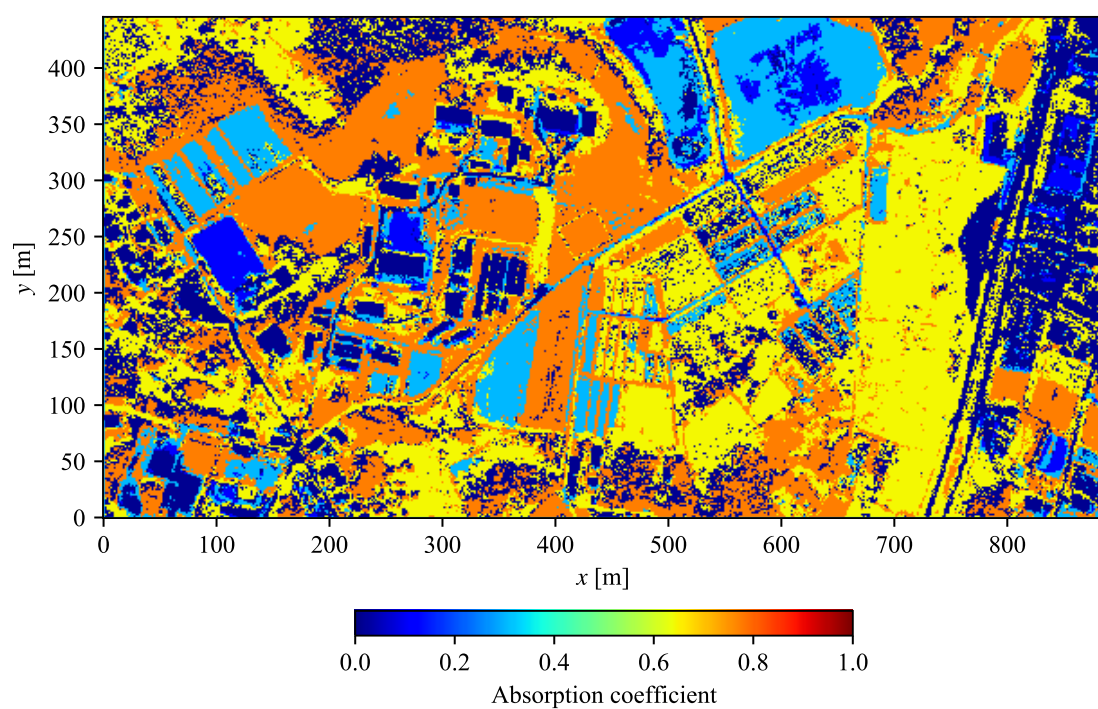


図 5.17 Case 1 (2019 年 8 月 14 日 8 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

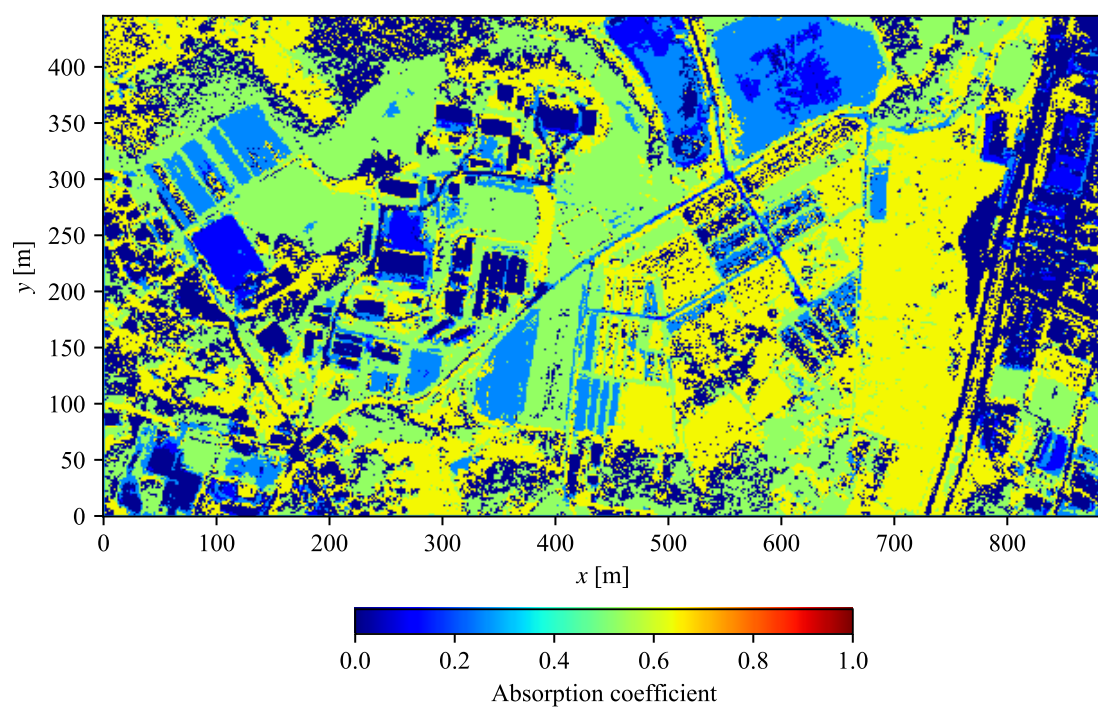


図 5.18 Case 2 (2019 年 6 月 27 日 4 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

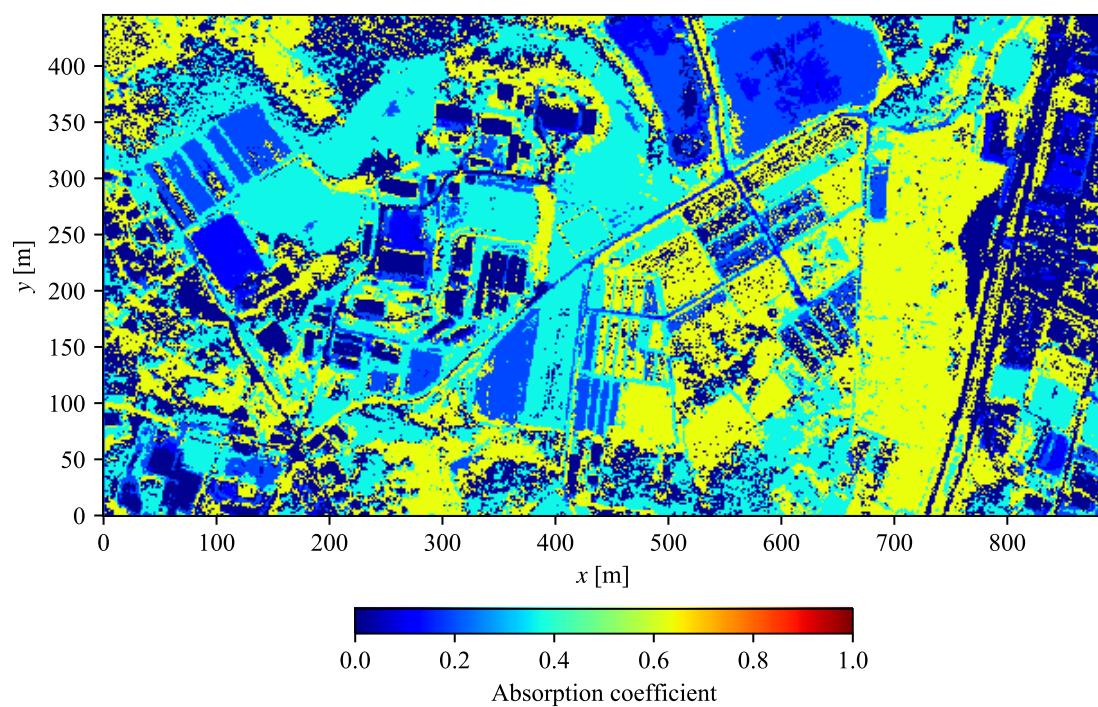


図 5.19 Case 3 (2018 年 12 月 4 日 19 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

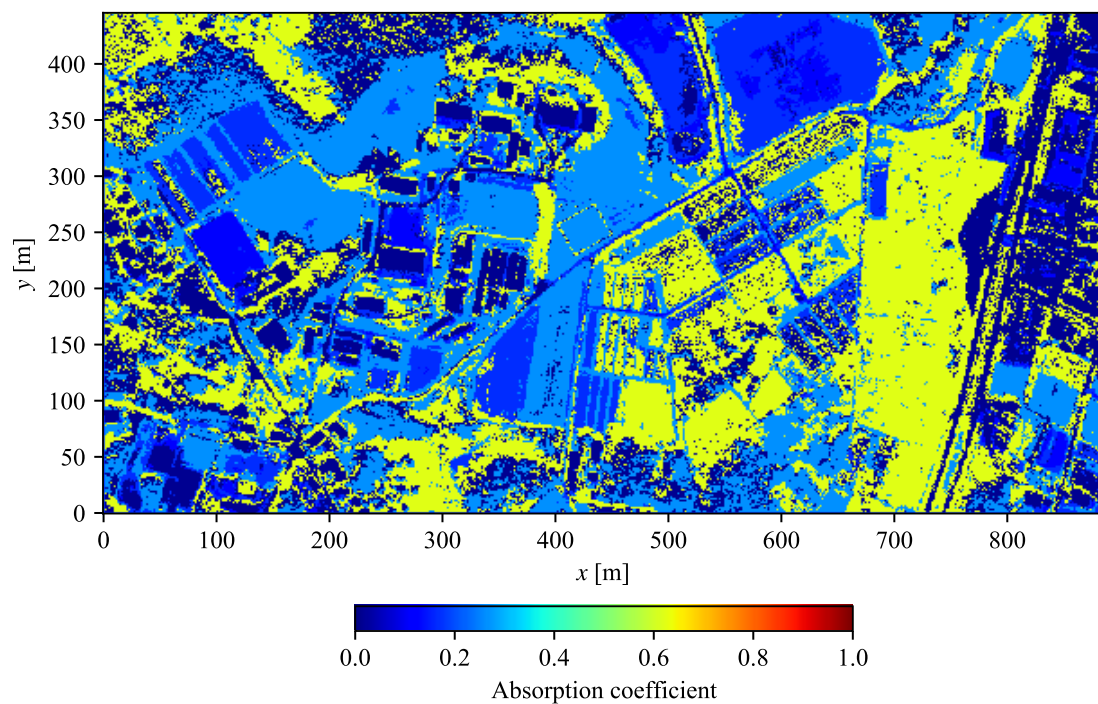


図 5.20 Case 4 (2019 年 4 月 16 日 12 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

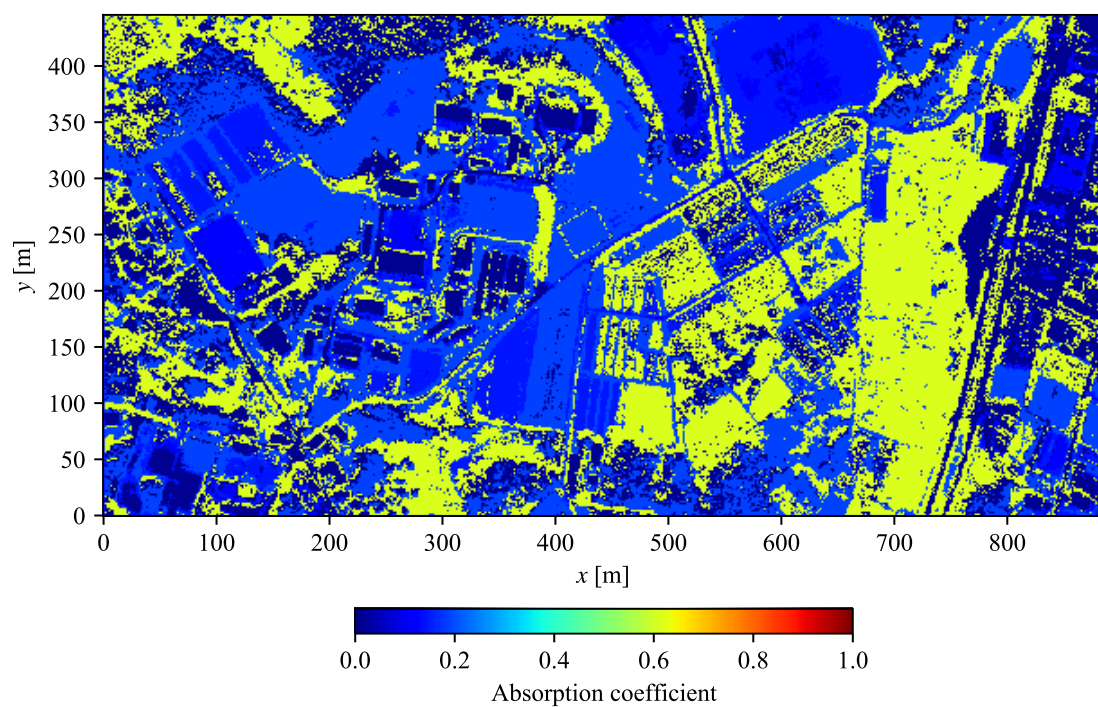


図 5.21 Case 5 (2019 年 3 月 15 日 17 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

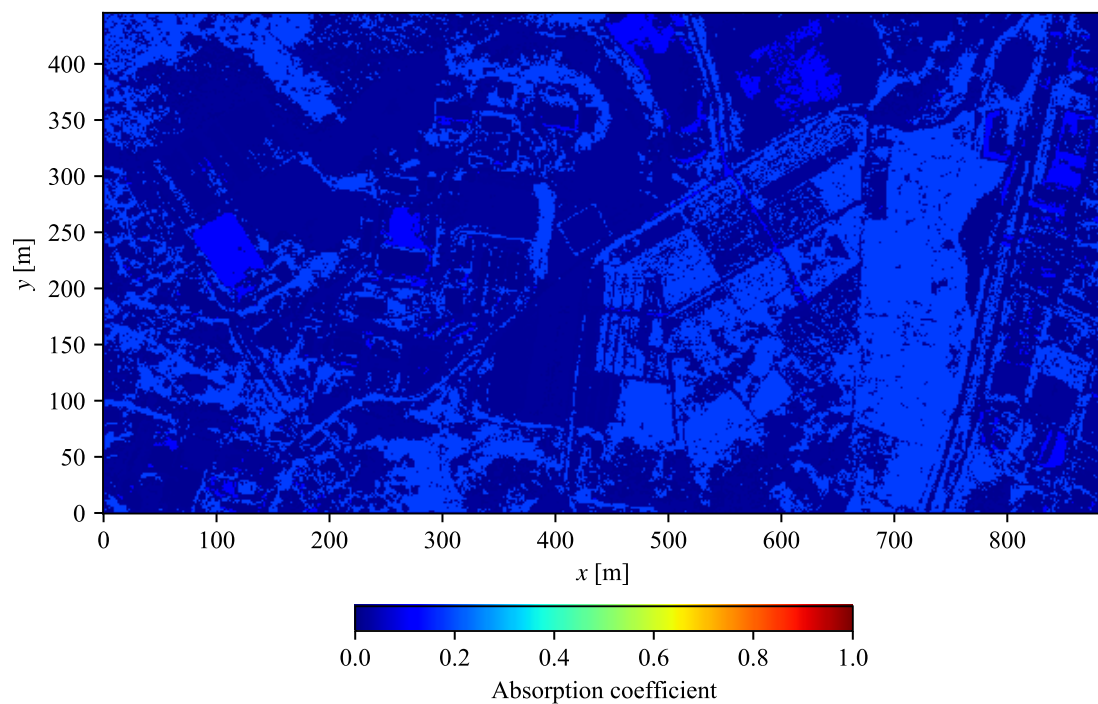


図 5.22 Case 6 (2019 年 10 月 14 日 12 時) における中心周波数 1 kHz の吸音率マップ

図 5.23–図 5.28 に、6 ケースにおける中心周波数 4 kHz の吸音率マップを示す。Case 1 では、草地や田んぼの吸音率は 0.9 程度、畑の吸音率は 0.6 程度と大きい。Case 2 から Case 5 にかけて、草地や畑の吸音率は低下し、Case 5 では草地および畑の吸音率はともに 0.4 程度となる。Case 6 では、田んぼの吸音率は 0.4 程度であるが、それ以外の地表面種類における吸音率は 0.1 程度かそれ以下である。

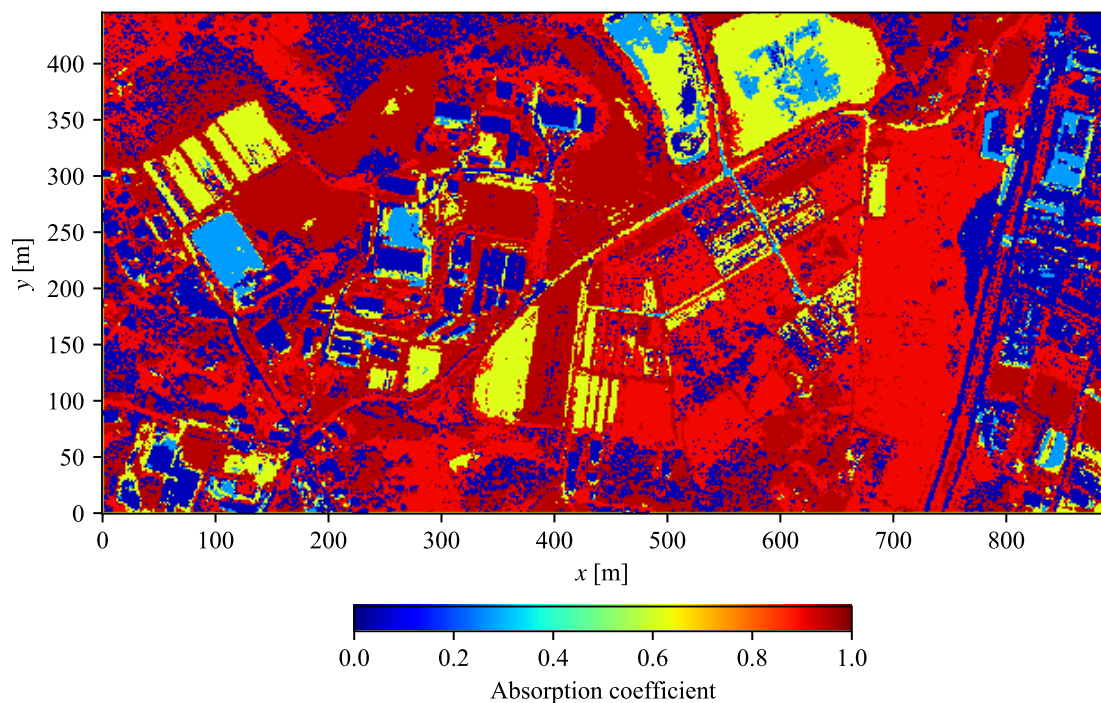


図 5.23 Case 1 (2019 年 8 月 14 日 8 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

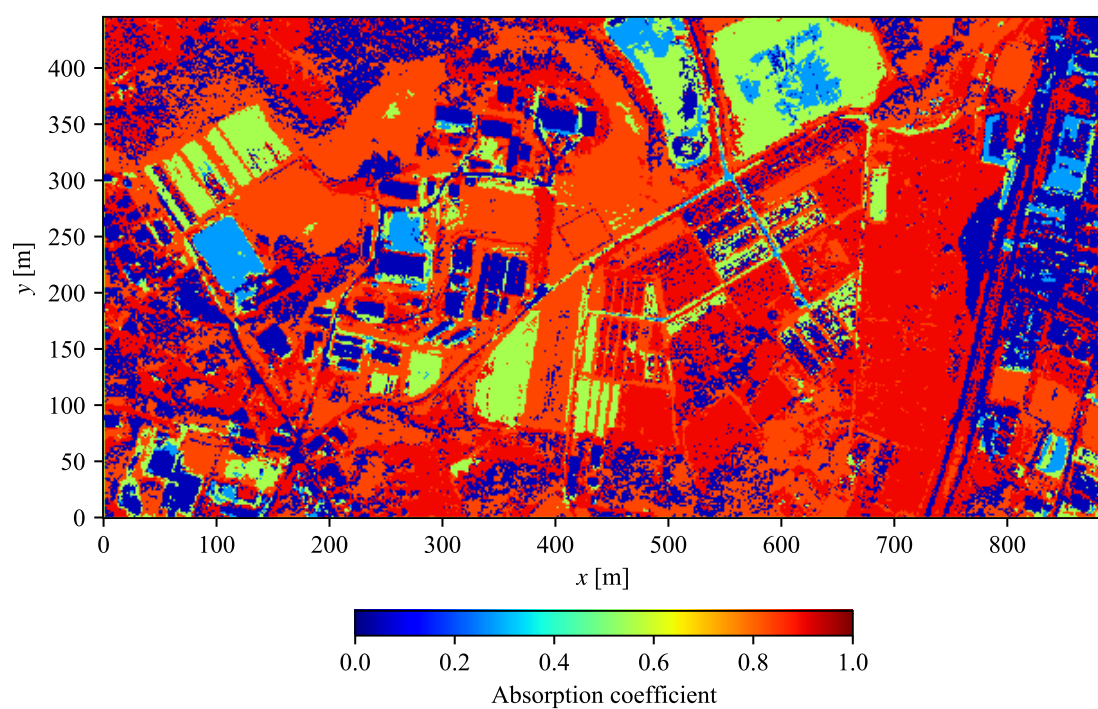


図 5.24 Case 2 (2019 年 6 月 27 日 4 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

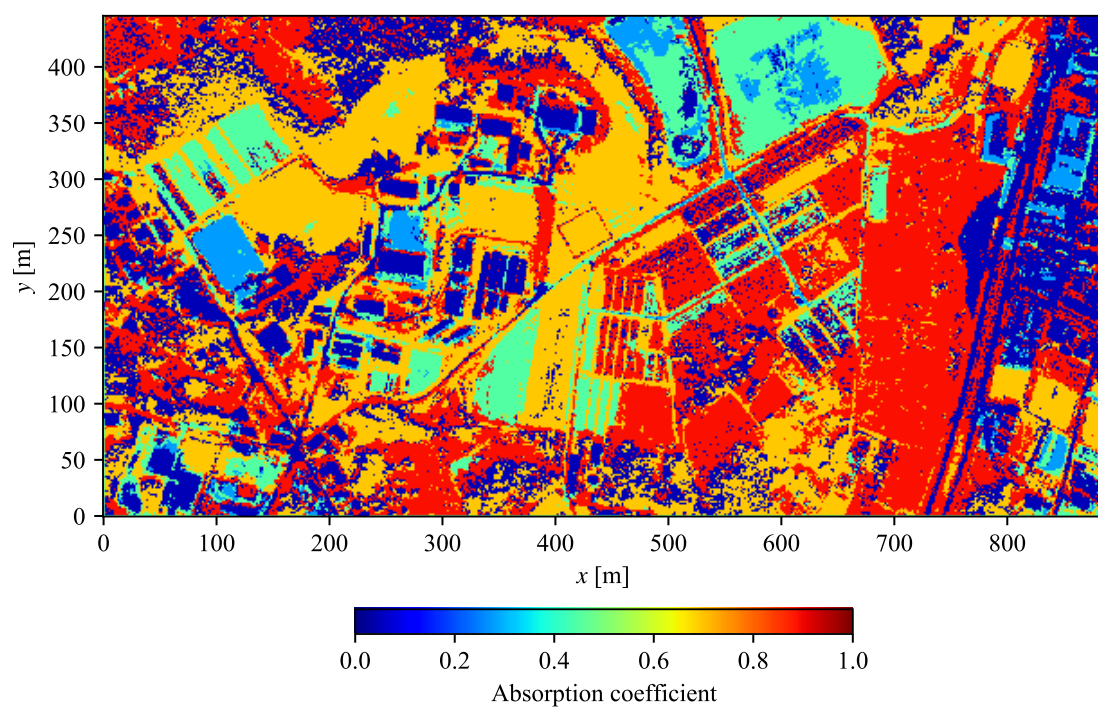


図 5.25 Case 3 (2018 年 12 月 4 日 19 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

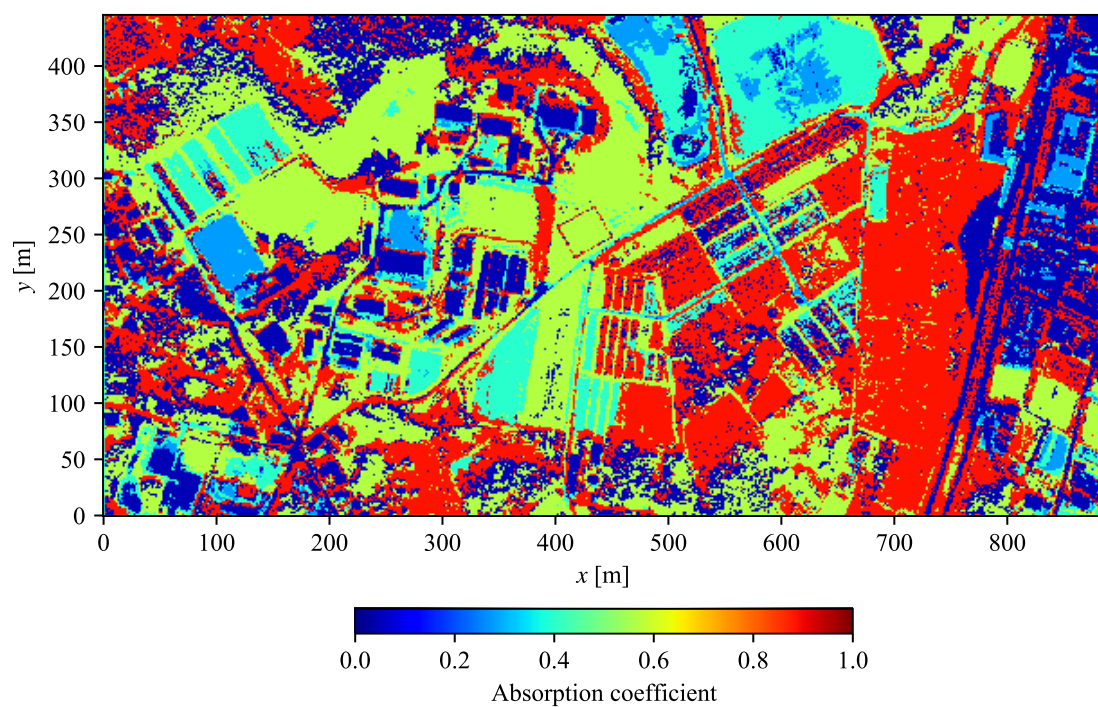


図 5.26 Case 4 (2019 年 4 月 16 日 12 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

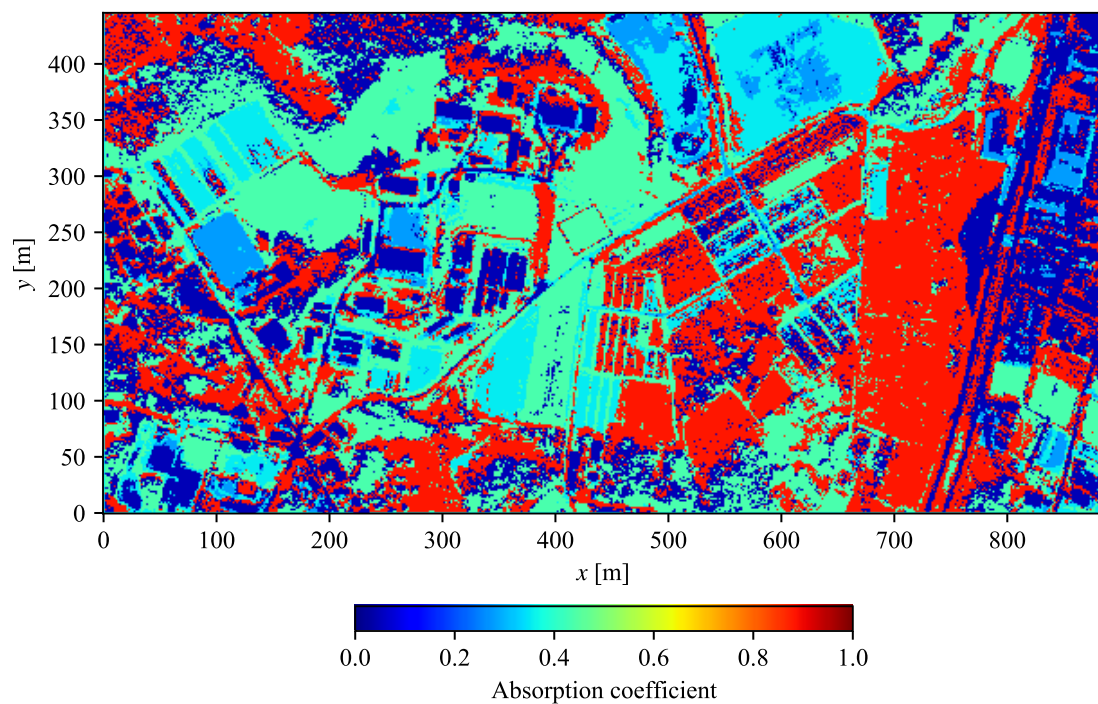


図 5.27 Case 5 (2019 年 3 月 15 日 17 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

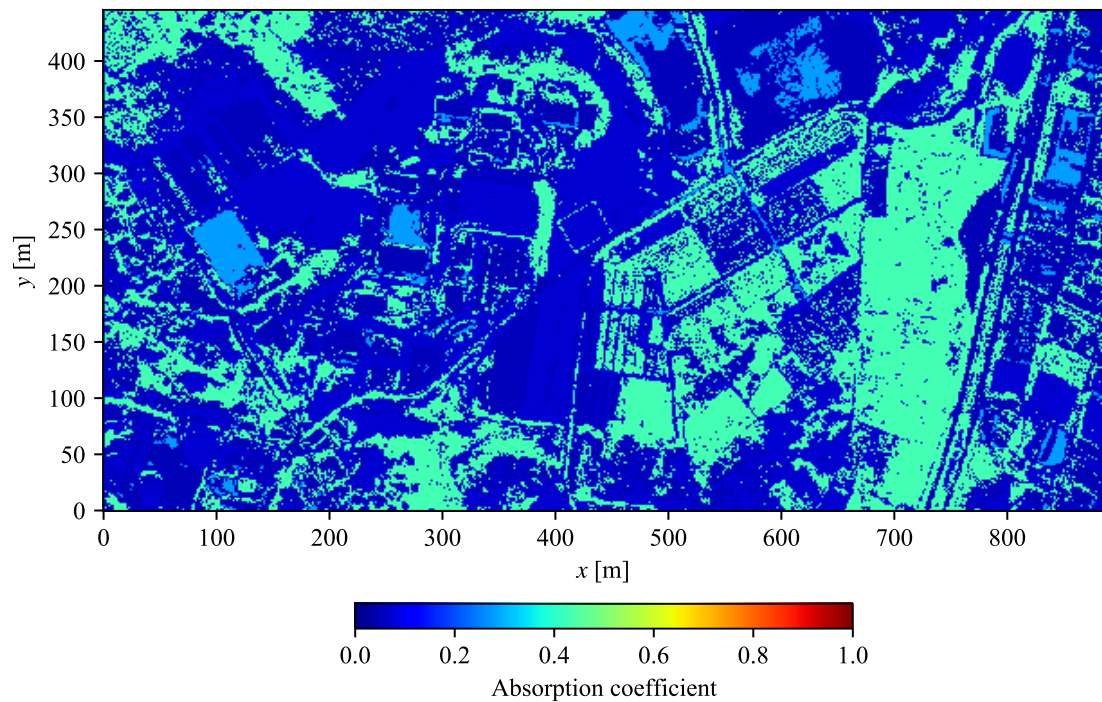


図 5.28 Case 6 (2019 年 10 月 14 日 12 時) における中心周波数 4 kHz の吸音率マップ

5.4 まとめ

本節では、第 5 章のまとめを述べる。

畑、草地、田んぼについて、これまでに構築した地表面音響特性経時変化モデルに、2018 年 11 月 1 日 0 時から 2019 年 10 月 31 日 23 時までの 1 時間ごとの気温および降雨量を入力し、年間における 1 時間ごとの飽和度、実効の流れ抵抗、地表面吸音率を計算した。その結果、いずれの地表面においても飽和度、実効の流れ抵抗、地表面吸音率は変動したが、それらの変動幅は田んぼで小さく、草地で大きかった。

また、計算飽和度が異なる 6 時刻において計算された実効の流れ抵抗および地表面吸音率と、第 4 章にて推定した地表面種類空間分布を組み合わせ、地表面音響特性マップを作成した。飽和度が上昇するにつれ、実効の流れ抵抗は大きくなり、吸音率は低下する傾向が見られた。

第 6 章

地表面音響特性マップを用いた騒音伝搬計算

6.1 目的

第 5 章において、1 時間ごとの地表面音響特性マップを作成した。本章では、このマップを用い、地表面音響特性が実際の騒音伝搬に及ぼす影響を明らかにする。

本研究のさらなる展開としては、地表面音響特性を考慮した広域における騒音マッピングが考えられる。広域における騒音マッピングを行うためには、多数の音源点および受音点を設定し、多数点にて騒音レベルを計算する必要がある。しかしながらそのためには、音源点および受音点の配置間隔や音源パワーレベルの設定など、検討すべき課題項目は多い。そこで本章では、広域における騒音マッピングに向けた基礎的検討として、単純なケースを設定し、地表面音響特性を考慮した騒音伝搬計算を実施する。

6.2 伝搬計算手法

音響伝搬計算に用いられる、一般的に知られる伝搬計算モデルとしては、例えば比較的近年に提案された Di らによるモデル [60] や、ASJ RTN-Model に採用されている川井によるモデル [61] が挙げられる。これらのモデルでは、音源-受音点間の伝搬経路における地表面種類は単一であることが想定されている。一方、本研究にてこれまでに作成した地表面音響特性マップは、分解能が $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の航空画像をもとにして作成されたものである。そのため、伝搬経路においては、地表面種類が細かく切り替わることになる。このような場合において音響伝搬計算が可能な手法として、Harmonoise 工学モデルの Point-to-point (P2P) ライブラリ [62] がある。

Harmonoise 工学モデルは、第 1 章で述べた EU 指令に基づく騒音マップ作成プロジェクトにおいて、2001 年から 2005 年にかけて開発されたモデルである。Harmonoise 工学モデルによる伝搬計算において、幾何減衰を除く減衰量、すなわち自由空間中の距離減衰に対する超過減衰量を、P2P ライブラリにより計算可能である。

P2P ライブラリによる伝搬計算の妥当性を確かめるため、図 6.1 に示す音源-受音点配置のもと、川井によるモデルと P2P ライブラリの両手法により、自由空間音圧に対する相対音圧レベルを同一条件において算出し比較する。計算条件は表 6.1 に示す通りであり、音源-受音点間距離 x_r の 2 条件および流れ抵抗 σ の 4 条件の組合せである全 8 条件について計算を行う。

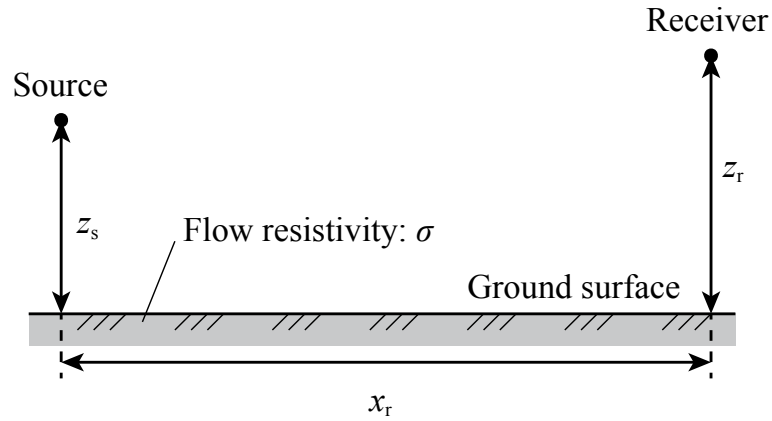


図 6.1 計算における音源および受音点配置

表 6.1 計算において設定したパラメータ値

パラメータ	設定値
音源高さ z_s [m]	0.3
受音点高さ z_r [m]	1.2
音源-受音点間距離 x_r [m]	20, 80
流れ抵抗 σ [kPa s/m ²]	75, 300, 1250, 20000
音速 [m/s]	343.7
周波数 f [Hz]	25-10000

図 6.2 に、全 8 条件における、川井によるモデルおよび Harmonoise の P2P ライブラリによる計算結果を示す。川井によるモデルは任意の周波数幅を設定できるのに対し、P2P ライブラリで算出されるのは 1/3 オクターブバンド中心周波数 25-10000 Hz の 27 バンドにおける減衰量であるため、P2P ライブラリによる計算結果は点プロットにより示している。全ての条件において、両者による計算結果はよく一致している。これより、P2P ライブラリによる計算結果の妥当性が示されたため、以降では P2P ライブラリを用いて音響伝搬計算を行う。

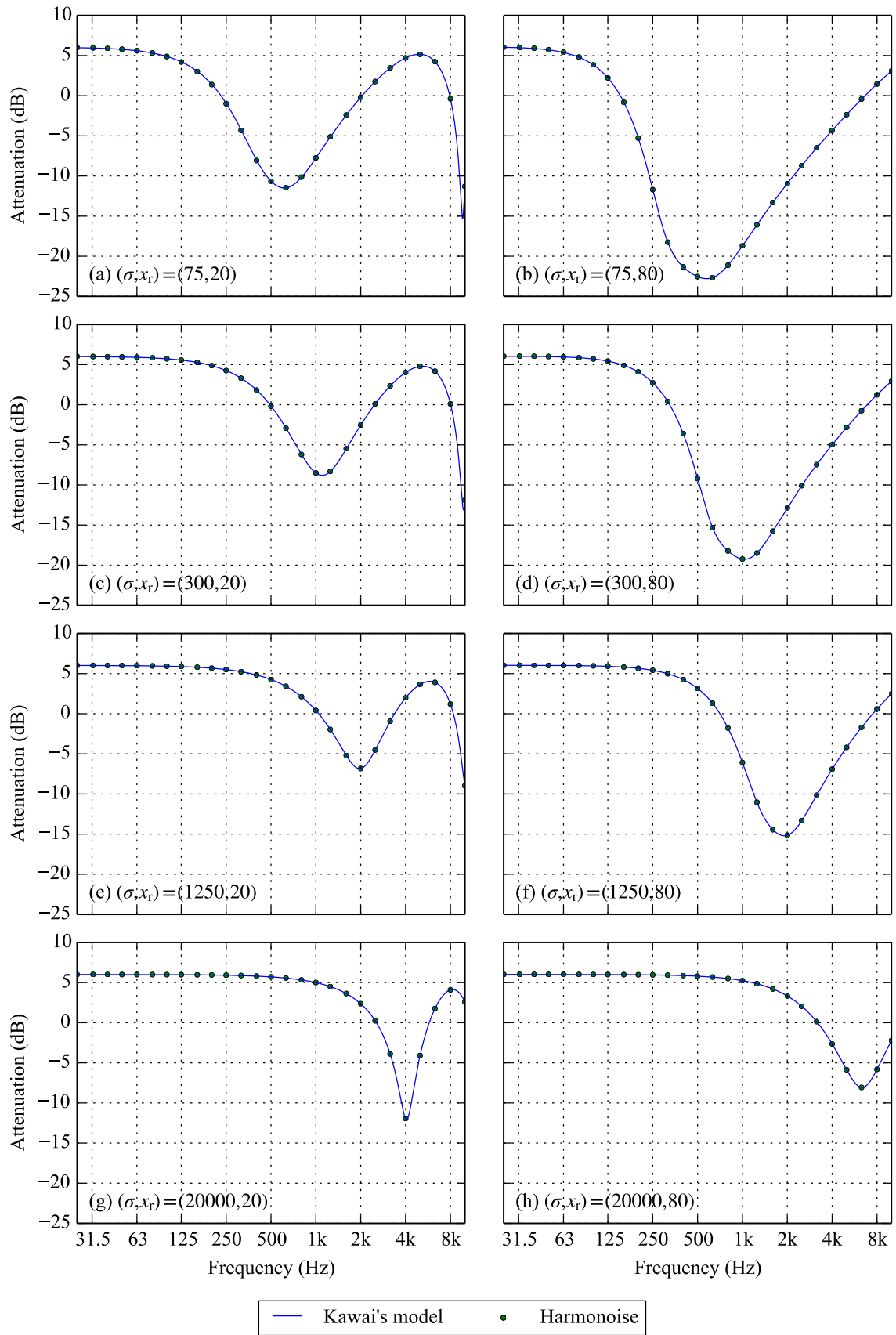


図 6.2 川井によるモデルおよび Harmonoise の P2P ライブラリによる計算結果の比較

6.3 計算条件

本研究では、地表面音響特性マップを用いた伝搬計算として、簡単な 2 つのケース (Case PP, Case LP と称する) を設定し、それぞれにおいて伝搬計算を行う。なお、以下の計算においては簡単のため、建物等の障害物および地面の起伏は考慮せず、地表面が平坦なものとして計算を行っている。

6.3.1 Case PP

Case PP では、一つの点音源 (Point) から一つの受音点 (Point) への音響伝搬を計算する。音源および受音点は、図 6.3 に示す位置とする。両者間の距離は約 110 m であり、伝搬経路における地表面種類は主に草地である。

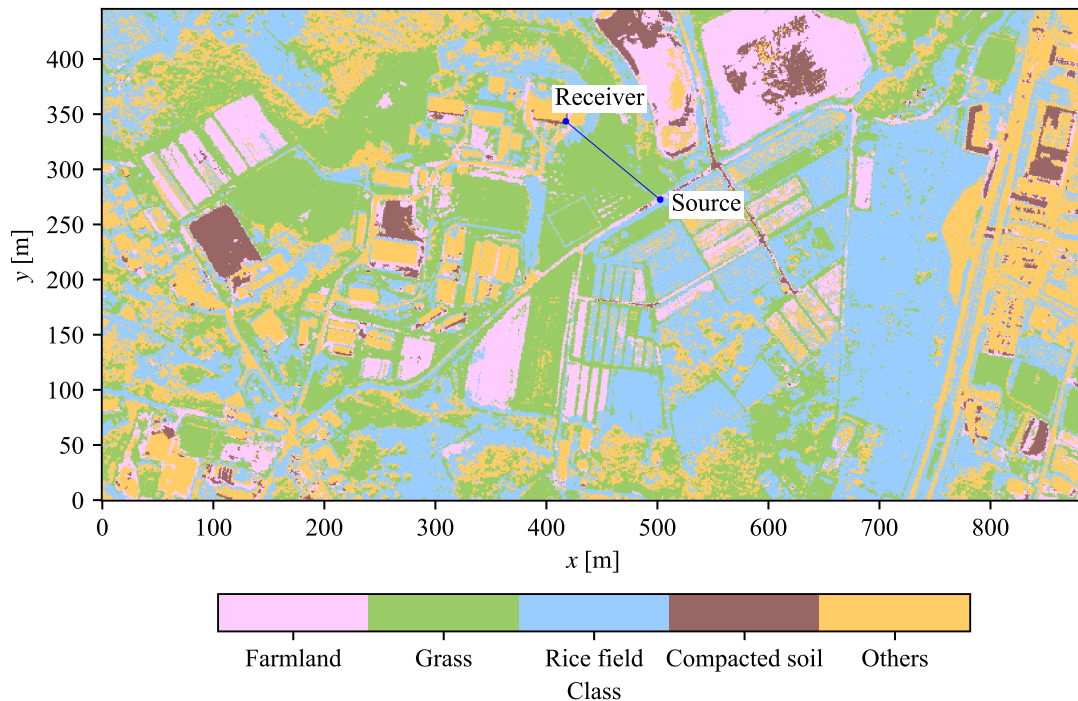


図 6.3 Case PP における音源および受音点位置ならびに伝搬経路

Harmonoise では、タイヤおよび路面騒音ならびにエンジン騒音の位置を分けて計算条件として与える必要があり、それぞれを 0.01 m, 0.3 m とする。受音点高さは 1.5 m とする。Case PP での音源は点音源であるため、ある一点に、走行状態の音響放射を模擬した車両がとどまっている状況を考える。このとき、自動車の車種は Harmonoise における light vehicles (小型車類) とし、走行速度は 60 km/h とする。

以上の条件にて、2018 年 11 月 1 日 0 時から 2019 年 10 月 31 日 23 時までの期間の 1 時間ごとに、1/3 オクターブバンド中心周波数 25–10000 Hz における超過減衰を計算する。その後、25–10000 Hz の全 27 バンドにおける受音点音圧レベルを計算し、A 特性をかけて全バンド合

成したのち、1 時間等価騒音レベル $L_{Aeq,1h}$ を計算する。さらに 1 年分の $L_{Aeq,1h}$ から、年平均等価騒音レベル $L_{Aeq,1year}$ を算出する。また、参考として、地表面音響特性を考慮せず、地表面が全て剛である場合の等価騒音レベル L_{Aeq} も算出する。このときは、地面の実効的流れ抵抗は 20000 kPa s/m^2 とし、時間によって変化しないこととする。

6.3.2 Case LP

Case LP では、線音源 (Line) から一つの受音点 (Point) への音響伝搬を計算する。ここで、線音源は多数の点音源の集合と考え、Case PP で実施した点对点の伝搬計算と同様の計算を複数の伝搬経路について実施する。

音源および受音点は、図 6.4 に示す位置とする。Case LP における音源は、Case PP で設定した音源点が位置する道路に、20 m 間隔で 34 点設ける。各音源-受音点間の距離は、最短で約 105 m、最長で約 437 m である。伝搬経路における地表面種類は、草地のほか、経路によっては畑やその他を含む。

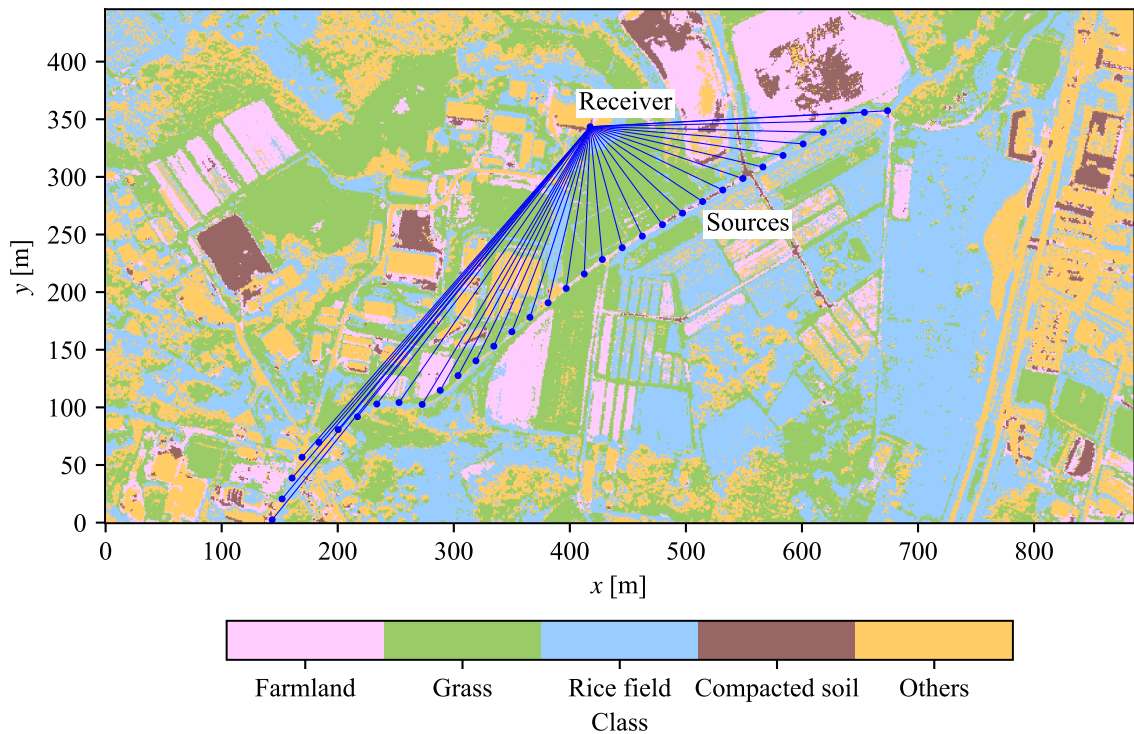


図 6.4 Case LP における音源および受音点位置ならびに伝搬経路

音源高さや受音点高さは Case PP と同じとする。時速 60 km の小型車類が 1 時間に 300 台当該道路を通過する設定とする。また、進行方向と音源予測点のなす角に応じた指向性を考慮している。Case LP では、Case PP と同様、地表面音響特性の経時変化を考慮した場合の $L_{Aeq,1h}$ の時間変化および $L_{Aeq,1year}$ を計算する。さらに、Case PP と同様、参考として、地表面音響特性を考慮せず、地表面が全て剛である場合の等価騒音レベル L_{Aeq} も算出する。このときは、

地面の実効的流れ抵抗は 20000 kPa s/m^2 とし、時間によって変化しないこととする。

6.4 計算結果

6.4.1 Case PP

図 6.5 に、等価騒音レベルの計算過程で算出される、タイヤおよび路面騒音の受音点における超過減衰を、1/3 オクターブバンド中心周波数 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz について 1 時間ごとに示す。さらに、地表面音響特性の経時変化を考慮した場合の 1 時間等価騒音レベル $L_{Aeq,1h}$ の時間変化および年平均等価騒音レベル $L_{Aeq,1year}$ 、ならびに地表面音響特性の経時変化を考慮せず地表面を剛とした場合の等価騒音レベル L_{Aeq} を示す。図 6.5 上部に示す超過減衰は、値が 0 より小さいと減衰することを表すが、減衰の年間変動の様子は周波数によって異なる。1 時間等価騒音レベルは日によって変動し、最大で 49.2 dB, 最小で 38.3 dB であり、その差は 10.9 dB であった。また、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮した場合の $L_{Aeq,1year}$ は 40.7 dB, 経時変化を考慮せず地表面を全て剛とした場合の L_{Aeq} は 49.8 dB であり、両者間には 9.1 dB の差が見られた。

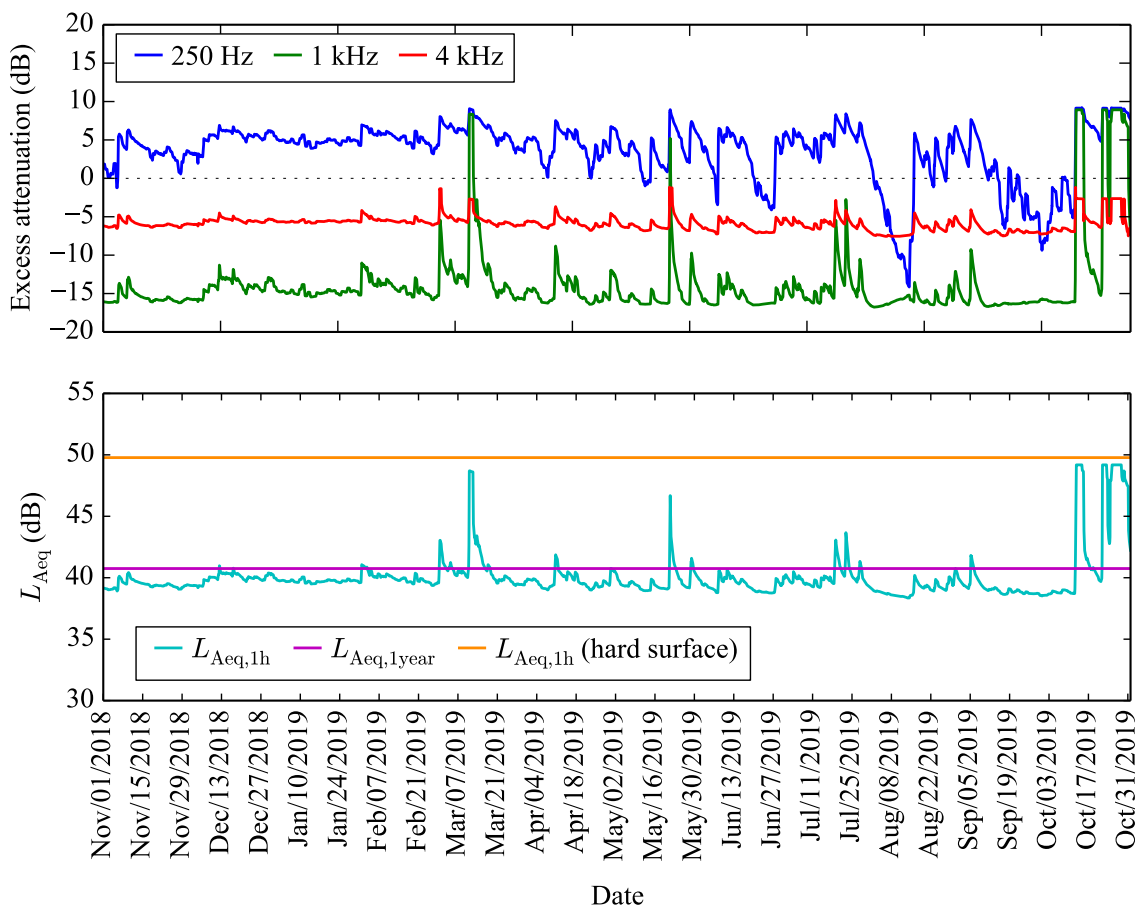


図 6.5 Case PP の計算結果

6.4.2 Case LP

図 6.6 に、地表面音響特性の経時変化を考慮した場合の 1 時間等価騒音レベル $L_{Aeq,1h}$ の時間変化および年平均等価騒音レベル $L_{Aeq,1year}$ ，ならびに地表面音響特性の経時変化を考慮せず地表面を剛とした場合の等価騒音レベル L_{Aeq} を示す。1 時間等価騒音レベルは日によって変動し、最大で 46.6 dB，最小で 34.0 dB であり、その差は 12.6 dB であった。Case PP と Case LP では音源の設定条件が異なり、 $L_{Aeq,1h}$ の絶対値を両者間で比較することはできないため、 $L_{Aeq,1h}$ の年間の変動幅を両ケース間で比較すると、Case PP より Case LP の方が年間変動が大きい。これは、Case LP では伝搬経路が長くなる音源点が存在するためである。

地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮した場合の $L_{Aeq,1year}$ は 38.1 dB，経時変化を考慮せず地表面を全て剛とした場合の L_{Aeq} は 48.9 dB であり、両者間には 10.8 dB の差が見られた。

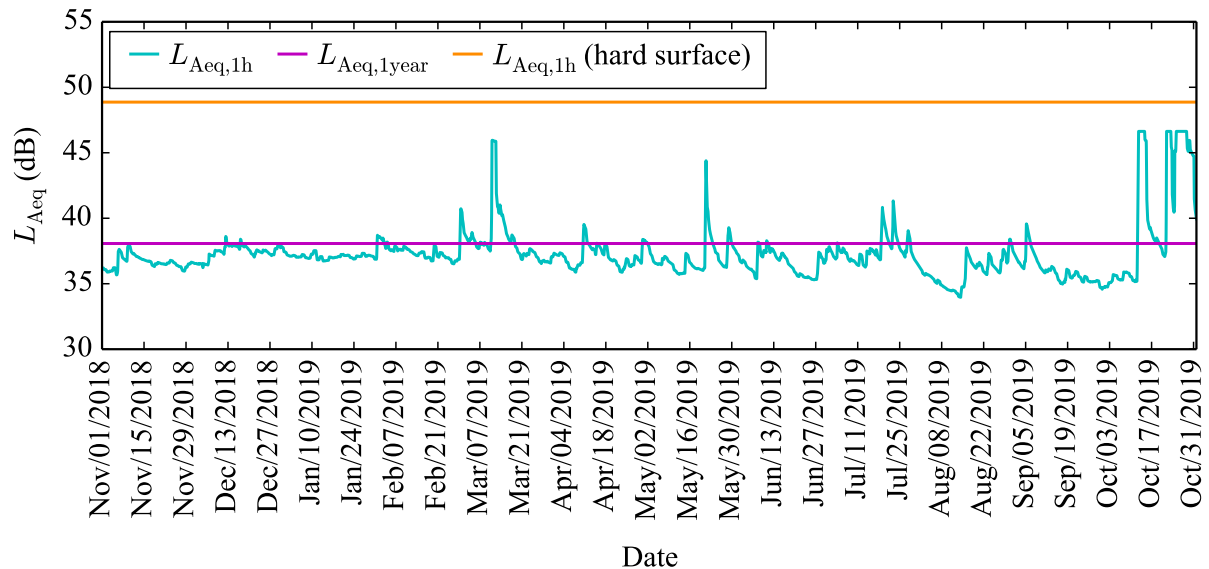


図 6.6 Case LP の計算結果

6.5 まとめ

本節では、第 6 章のまとめを述べる。

経時変化する地表面音響特性マップを用い、一つの点音源から一つの受音点への音響伝搬 (Case PP)，および線音源から一つの受音点への音響伝搬 (Case LP) の 2 ケースにおいて伝搬計算を行い、1 年間にわたる 1 時間ごとの等価騒音レベルおよび年平均等価騒音レベルを計算した。さらに、比較のため、地表面音響特性の経時変化を考慮しない場合として、全ての地表面が剛な場合について等価騒音レベルを計算した。

Case PP において、1 時間等価騒音レベルは日によって変動し、年間の変動幅は 10.9 dB で

あった。また、地表面音響特性を考慮する場合としない場合で、等価騒音レベルには 9.1 dB の差が見られた。一方、Case LP における 1 時間等価騒音レベルの年間の変動幅は 12.6 dB であり、Case PP よりも大きい結果となった。また、地表面音響特性を考慮する場合としない場合で、等価騒音レベルには 10.8 dB の差が見られた。

従来の騒音伝搬計算は、第 1 章で述べたように、地表面音響特性の経時変化は考慮されずに行われてきた。しかしながら、本章における計算の結果、地表面音響特性の経時変化を考慮することで、等価騒音レベルは年間で 10–13 dB 変動し、年平均等価騒音レベルは剛な地表面の代表的な特性を与えた場合と比べて、10 dB 程度変化することが示された。これより、騒音伝搬計算においては地表面音響特性を考慮する必要があるといえる。

第 7 章

結論

本章では、まず本研究の成果をまとめる。ついで、本研究のもたらす意義、さらに課題および今後の展開について述べる。

7.1 本研究の成果

第 1 章では、本研究の背景として、環境騒音をめぐる情勢や、現状の騒音伝搬予測モデルにおける地表面音響特性の扱いに関する問題点、環境騒音伝搬予測における経時変化考慮の必要性について述べた。それらの背景から、本研究では地表面音響特性の時空間変動の推定を目的とすることを述べ、地表面の音響特性に関わる物理量や、本研究に関連する既往研究を示し、最後に本論文の構成を示した。

第 2 章では、新潟大学キャンパス内における気象、土の飽和度、地表面音響特性の長期測定結果より、降雨量と気温から飽和度を経て地表面吸音率を推定する 2 段階モデルを構築した。構築したモデルにより計算された地表面吸音率と、実測された地表面吸音率を比較したところ、推定吸音率は実測吸音率よりも日変動幅は小さいが、月次の平均値をよく捉えていた。

第 3 章では、名古屋大学東郷フィールドを対象とし、第 2 章での測定を複数種地表面に展開して実施した結果を示した。そして、測定結果に対する、第 2 章で構築したモデルの適用可能性を検討した。その結果、固い地面では飽和度と地面の実効的流れ抵抗の間に関連が見られなかったため、地表面音響特性経時変化モデルの適用はしないこととした。畑、草地、田んぼについては、モデル化は概ね良好に行われ、これらの地表面種ごとにモデル定数を決定した。

第 4 章では、広域における地表面種類分布の把握を目的とし、ハイパースペクトル航空画像を 2017 年 2 月 (冬), 6 月 (夏), 9 月 (秋) の 3 度にわたって撮影した。撮影画像をもとに、「畑」「草地」「田んぼ」「固い地面」「その他」の 5 つのクラスへの地表面種類分類を試みた。地表面分類手法として、判別関数に閾値を設けた MED-SD 法に対し、さらに MED 法および SD 法の重み付けを行う方法を提案した。本手法を用い、分類時の最適な計算条件を検討した。その結果、教師スペクトル算出に必要なピクセル数は 1000 ピクセルとし、冬に撮影された航空画像を用い、MED-SD 法における MED 法と SD 法の重み付け係数 w_{MED} , w_{SD} はそれぞれ 1.3, 0.7 とした上で、判別関数 f_i の閾値は 94 パーセントイルとした場合が最も精度のよい地表面分類結果が得られた。これらの条件のもと、推定エリアにおいて地表面分類を実施した。地表面分類結果と航空画像を比較したところ、概ね良好な地表面分類結果が得られた。

第5章では、第3章にて地表面音響特性経時変化モデルの適用が可能と判断した畑、草地、田んぼについて、1時間ごとの気温および降雨量の1年分をモデルに入力し、年間における1時間ごとの飽和度、実効的流れ抵抗、地表面吸音率を計算した。その後、計算飽和度が異なる6時刻において計算された実効的流れ抵抗および地表面吸音率と、第4章にて推定した地表面種類空間分布を組み合わせた地表面音響特性マップを示した。飽和度が上昇するにつれ、実効的流れ抵抗は大きくなり、吸音率は低下する傾向が見られた。

第6章では、第5章にて作成した1年分の1時間ごとの地表面音響特性マップを用いた騒音伝搬計算を行った。計算ケースとして、一つの点音源から一つの受音点への音響伝搬 (Case PP)、および線音源から一つの受音点への音響伝搬 (Case LP) の2ケースを設定し、1年間にわたる1時間ごとの等価騒音レベルおよび年平均等価騒音レベルを計算した。その結果、1時間等価騒音レベルは、年間で10–13 dB 程度変動することが示された。また、比較のため、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮しない場合についても同様の計算を行った。その結果、Case LP では、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮した場合の年平均等価騒音レベルは、剛な地表面の代表的な特性を与えた場合と比べて10.8 dB 変化することが示された。このことから、より正確な騒音伝搬計算のためには、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮する必要があることが示された。

7.2 本研究のもたらす意義

これまで、地表面音響特性の時空間変動を考慮した伝搬計算を行う術はなかったため、騒音伝搬計算の際には、地表面は完全反射として伝搬計算を行う [63] か、ASJ RTN-Model 2018にて4種の地表面種別に実効的流れ抵抗が定められているように、ある地表面種類における代表的な特性を与えるしかなかった。しかし、本研究により、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮することで、1時間等価騒音レベルが年間を通して変動することが示された。これまで不明であった、地表面音響特性の影響による騒音レベルの年間変動の程度が本研究により明らかにされたという点で、本研究は騒音伝搬計算において新たな知見をもたらしたといえる。

また、Case PP および Case LP における計算で明らかにされたように、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮した場合の年平均等価騒音レベルは、剛な地表面の代表的な特性を与えた場合と比べて、約10 dB の差があることが示された。このことから、本研究の成果により、特に郊外のバイパス付近や空港周辺など、コンクリート以外の地表面が多く存在する場所において、従来よりも正確な騒音評価が可能になると考えられる。

7.3 課題および今後の展開

本研究で実施した地表面音響特性経時変化のモデル化は、限られた条件下における基礎的な検討である。本研究で残された課題、および本研究の成果を用いた今後の研究の展開について以下で述べる。

7.3.1 課題

本研究にて実施した、地表面音響特性経時変化のモデル化および空間分布の推定において残された今後の課題としては、以下が挙げられる。

1. 安定的な測定結果が得られる地表面音響特性現場測定法の確立

1.4.1 項で述べた通り、地表面音響特性を現場にて測定する手法は、これまでに多数提案されている。しかしながら、工業的に均質に製造された室内用吸音材とは異なり、不均質な自然材料である地表面の音響特性を、安定して測定可能な決定的な手法はいまだ確立していない。そこで筆者らはこれまでに、表面音響特性現場測定法の中から代表的な手法を取り上げ、各手法の特徴を調べてきた [64, 65 など]。その中でも EA 法および ANSI 法では比較的安定した測定結果が得られるとの判断に至り、本研究では地表面音響特性測定手法として EA 法および ANSI 法を用いている。しかしながら、両手法においても、近接した複数測定点における測定結果は、大きくばらつくことがあった。また、本研究では ANSI 法の配置 A を用いて測定を行ったが、3.5.2 項に述べた通り、流れ抵抗が大きい地面では、配置 A では妥当な音響特性測定結果が得られなかった。このことから、特に不均一性の地表面における地表面音響特性測定をどう安定させるかが今後の課題である。

2. より多数の地表面種類を対象とした、地表面経時変化のモデル化

本研究では、畑、草地、田んぼ、固い地面の 4 種の地表面を対象として地表面経時変化のモデル化を行った。しかしながら、一口に「畑」といっても「表面の柔らかい耕された畑」「作物が植えられた畑」「畑の中でも、農作業時に人によって踏み固められている場所」など様々な地表面性状が考えられ、同様に草地についても、草の背丈や種類も含めれば、その種類は無限にあるといっても過言ではない。そのため、より多数の地表面種類を対象とした地表面経時変化のモデル化が必要と考える。

また、田んぼに関しては、本研究では 5 月上旬から 6 月上旬までの、田植え前の地表面を対象として測定およびモデル化を行った。しかしながら、田んぼには初夏から秋にかけてイネが植えられるため、5.3.1 項で述べた通り、イネが育っている期間 (およそ 5 月下旬～10 月) については、今回構築したモデルは適用可能範囲外である。そのため、イネの生育期間における田んぼのモデル化も今後の課題である。ここで、本研究では、気温および降雨量から飽和度を経て地表面音響特性をモデル化しているが、イネの生育

期間においては、田んぼには水が張られるため、土の飽和度は常に 100 % となるはずである。そのため、田んぼでの年間の経時変化のモデル化の際には、地表面の土壌水分が気象により変化しない期間があることに注意を払う必要がある。田んぼに限らず、畑などでも、気象の変化よりもむしろ農作業のような人為的な要素によって地表面性状が大きく変化する地表面のモデル化をどのようにするかは、十分に考える必要がある。

3. 航空画像からの地表面分類精度の向上

本研究では、ハイパースペクトルカメラにより撮影された中心波長 373~1048 nm の 72 バンドの分光反射率のうち、72 バンドすべてを教師スペクトルとして用い、地表面分類を行った。一方で、光の波長には、土壌水分量と密接な関係がある波長帯や、植生の有無によって大きく変動する波長帯が存在する。土壌水分や植生の有無は、これまで述べてきた通り、地表面音響特性に大きく関わる要素である。そこで、72 バンドのうち、地表面音響特性への寄与が大きいバンドのみを用いて地表面分類を行う手法を構築することで、より精度の高い地表面分類を実施できる可能性がある。

また、本研究による地表面分類結果には一部、本来は木の箇所が「その他」に分類されていない箇所が見られた。本来は木である箇所については、4.5 節でも述べたが、数値表層モデル (DSM: digital surface model) と組み合わせることで木の箇所を判別できると考えられる。これは今後の課題である。

4. 地形や建物等の影響を考慮した、より現実的な状況における騒音伝搬計算

本研究の第 6 章における騒音伝搬計算では、簡単のため、建物等の障害物および地面の起伏は考慮せず、地表面が平坦なものとして計算を行っている。しかしこれは当然のことながら、現実的な都市の状況とは大きく乖離している。より現実的な騒音レベルを算出するために、建物や地面の起伏による反射音・回折音の影響を考慮した伝搬計算が望まれる。

7.3.2 今後の展開

今後の展開としてはまず、地表面音響特性の経時変化および空間分布を考慮した広域騒音マップの作成が考えられる。本研究では基礎段階として受音点は 1 点のみのケースを計算したが、伝搬計算範囲を広げ、受音点を多数設定することで、広域騒音マップの作成が可能となる。さらに、騒音レベルの経時変化に関して、本研究では気象による地表面音響特性の経時変化のみを考えたが、実際は交通量も時間によって変動する。そのような、地表面音響特性以外にも経時変化する要素を適切にモデル化し計算に組み込むことで、より高精度な伝搬計算が可能となる。

本研究では当初段階として航空機によりハイパースペクトル画像を撮影したが、長期目標としては衛星画像からの地表面音響特性推定が想定される。これが実現すれば、衛星画像からの超広域 (日本全土) における高精度な騒音レベル推計が可能になる。騒音レベル推計値

第7章 結論

分布の分析により、環境騒音が社会生活へ与える様々な影響の定量化が可能となると考えられる。例えば、騒音曝露による健康被害を受ける人口の算定が可能となると、それをもとに、騒音源となる航空機の運行状況の見直しや、道路交通制限などの対策の立案により、国民全体の健康増進に寄与できると考えられる。

付録 A インピーダンスモデルに関する検討

第 2 章において、EA 法による音響特性測定結果から、インピーダンスモデル、EA 法の数理モデル、反復法を用いて垂直入射吸音率を算出した。この算出過程に用いるインピーダンスモデルとして、第 2 章では Wilson モデルを用いたが、算出に用いるインピーダンスモデルとしては Wilson モデルの他にも多数考えられる。付録 A では、複数のインピーダンスモデルを用いて z_{EA} から各モデル中のパラメータ値及び z を推定し、結果をモデル間で比較する。

A.1 扱うインピーダンスモデルの概要

本研究では、Delany–Bazley によるモデル [15] (以下 DB モデル), Miki による 3 パラメータモデル [66] (以下 Miki モデル), Zwicker –Kosten によるモデル [10] (以下 ZK モデル), Wilson による 1 パラメータモデル (以下 Wilson モデル) を扱う。DB モデルは実験データからの回帰曲線によるモデルである。これに対し、Miki モデル、ZK モデル、Wilson モデルは迷路度や空隙率を考慮したモデルであり、物理的な妥当性に留意が払われたモデルである [67]。以下では、各モデルの概要を述べる。なお、以下では時間因子は $e^{j\omega t}$ (j, ω, t はそれぞれ虚数単位、角周波数、時刻) を仮定する。

A.1.1 DB モデル

特性インピーダンス比 z_c は次式で表される。

$$z_c = 1 + 9.08 \left(\frac{1000f}{\sigma} \right)^{-0.75} - j11.9 \left(\frac{1000f}{\sigma} \right)^{-0.73} \quad (A.1)$$

ここで f [Hz], σ [Pa s/m^2] はそれぞれ周波数、流れ抵抗である。式 (A.1) の通り、DB モデルは σ のみの 1 パラメータにより特性インピーダンス比を表すことができる。

A.1.2 Miki モデル

z_c は次式で表される。

$$z_c = \frac{q}{\Omega} \left\{ 1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} \right\} - j0.107 \frac{q}{\Omega} \left(\frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} \quad (A.2)$$

ただし q [-], Ω [-], σ_e [Pa s/m^2] はそれぞれ迷路度、空隙率、実効的流れ抵抗である。多孔質材の空隙部分を円筒でモデル化した図 A.1 のうち、迷路度は空隙部分の曲がり具合を、空隙率は試料全体に占める空隙の割合を表す。式 (A.2) 中の q / Ω を一つのパラメータと考えると、式 (A.2) は実質的には q / Ω 及び σ_e の 2 つのパラメータで表されるといえる。ここで、 σ_e と σ の関係は次式である [66]。

$$\sigma_e = \frac{\Omega}{q^2} \sigma \quad (\text{A.3})$$

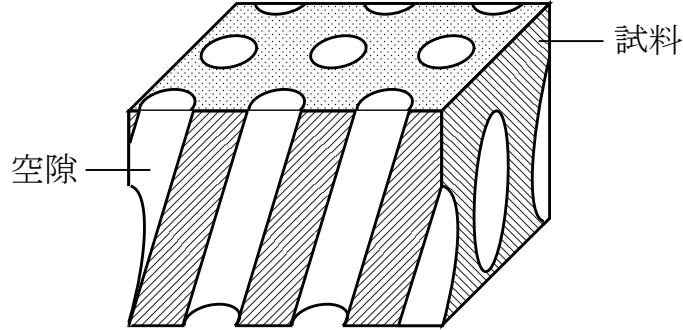


図 A.1 多孔質材の空隙部分を円筒でモデル化した模式図

A.1.3 ZK モデル

地中を σ, Ω , 構造定数 c_s [-] (q と等価) の 3 パラメータの多孔媒質により表現する, 以下の波動音響伝搬の基礎方程式を用いる。

$$\frac{c_s \rho}{\Omega} \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma v = - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (\text{A.4})$$

$$- \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\Omega}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

p, v, ρ, c はそれぞれ音圧, 粒子速度, 空気密度, 空気中の音速である。ここで音圧および粒子速度を, 式 (A.6) および式 (A.7) のようにおく。

$$p = p_0 e^{j(kx + \omega t)}, \quad (\text{A.6})$$

$$v = v_0 e^{j(kx + \omega t)} \quad (\text{A.7})$$

ここで p_0, v_0, k, ω はそれぞれ音圧の振幅, 粒子速度の振幅, 波長定数, 角周波数である。式 (A.4), (A.5) に式 (A.6), (A.7) を代入し式変形することで, 特性インピーダンス比 z_c を以下のよう to 得る。

$$z_c = \sqrt{-\frac{q_c}{\Omega}}, \quad (\text{A.8})$$

$$q_c = -\frac{c_s}{\Omega} + j \frac{\sigma}{\rho \omega} \quad (\text{A.9})$$

A.1.4 Wilson モデル

第 2 章で述べた通りであるが, 式 (2.20)–(2.22) の近似を用いると, 特性インピーダンス比 z_c は流れ抵抗 σ_w [Pa s/m²] のみの関数として次式で表される。

$$z_c = \left\{ \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{1 + j3.1\rho\omega/\sigma_w}} \right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + j2.1\rho\omega/\sigma_w}} \right) \right\}^{-1/2} \quad (\text{A.10})$$

ここで、 σ_w と σ の関係は次式である。

$$\sigma_w = \rho\sigma \quad (\text{A.11})$$

A.2 特性インピーダンス比推定方法

第 2 章では、Wilson モデルを用い、 z_{EA} および α_{EA} を z および α へと変換した。以下では、Wilson モデルに限らず、いずれかのインピーダンスモデルを用いる場合について、第 2 章で述べた内容を一般化し変換手順を述べる。変換手順を図示すると、図 A.2 となる。

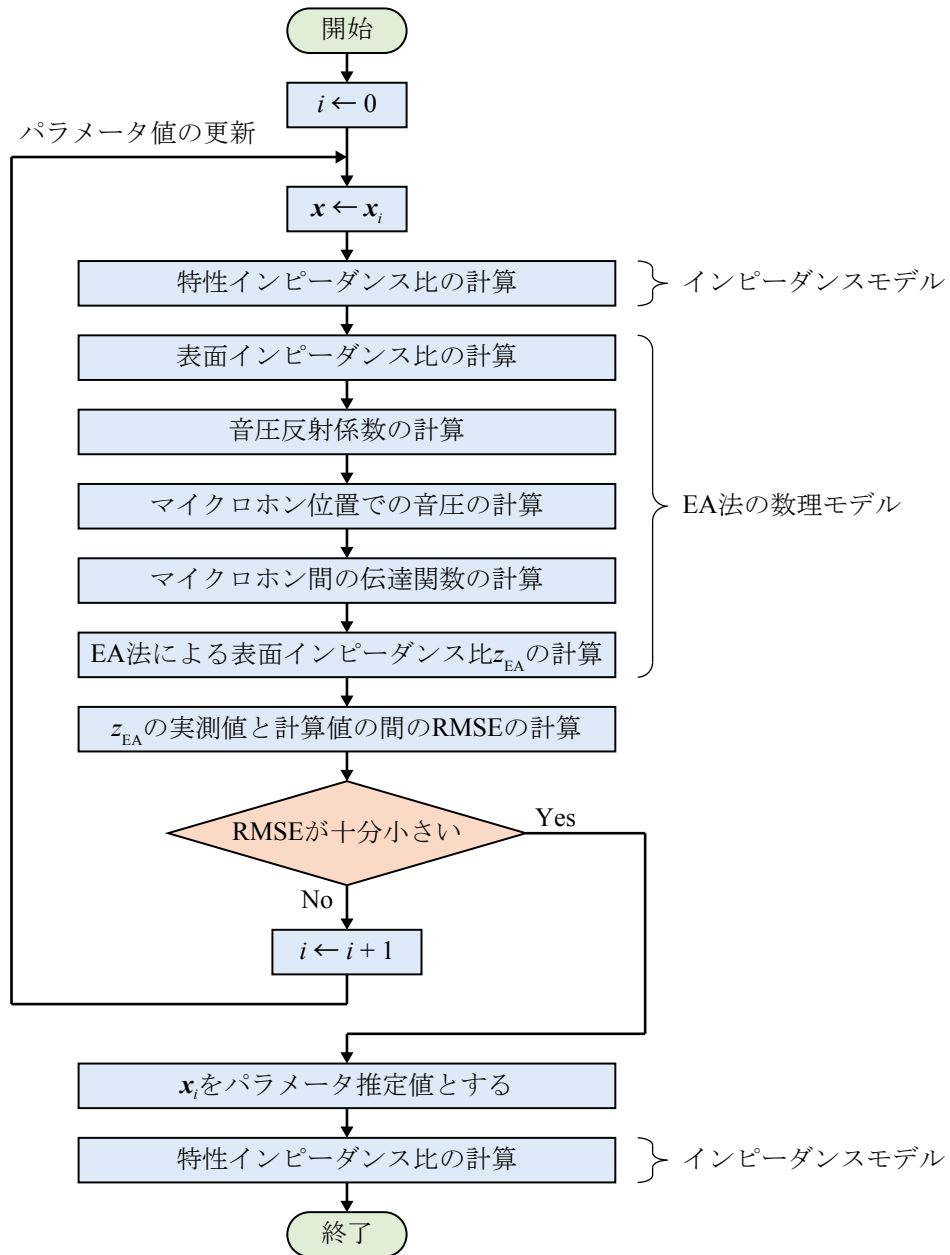


図 A.2 z_{EA} から z への変換フローチャート

変換ではまず、各インピーダンスモデル中のパラメータの初期値 $\mathbf{x}_0 = (x_{1,0}, \dots, x_{N,0})$ (N は各インピーダンスモデル中のパラメータ個数) を設定する。 \mathbf{x}_0 を、DB モデル、Miki モデル、ZK モデル、Wilson モデルのいずれかに代入し、 z_c を計算する。その後、地面は十分な厚さがあると考え、表面インピーダンス比 z_s を以下により算出する。

$$z_s = z_c \quad (\text{A.12})$$

ついで、第 2 章に従い、 z_s を用いて EA 法による 2 マイクロホン間の伝達関数 H_{12} を計算し、 H_{12} から z_{EA} を計算する。ここでの z_{EA} の計算値を $z_{EA,calc}$ とし、実測値 $z_{EA,meas}$ との間の二乗平均平方根 (RMSE: Root Mean Square Error) を以下により計算する。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_f |z_{EA,meas} - z_{EA,calc}|^2}, \quad (\text{A.13})$$

ここで N_f は、周波数 400 Hz – 4 kHz における離散周波数の総数である。第 2 章では地表面吸音率のモデル化が目的であったため、RMSE は吸音率を対象とした。一方、本付録では RMSE は吸音率ではなく、表面インピーダンス比を対象として求める。

その後、 \mathbf{x}_0 よりも RMSE が小さくなる $\mathbf{x}_1 = (x_{1,1}, \dots, x_{N,1})$ を、反復的解法の一つである L-BFGS-B 法により求める。 \mathbf{x}_1 以降についても同様の過程を繰り返す。以上の計算を繰り返し実行し、収束判定値以下となったときの \mathbf{x}_i (i は計算繰り返し回数) を最終的なパラメータ推定値とする。 \mathbf{x}_i を式 (A.1), (A.2), (A.8), (A.10) のいずれかに代入し、 z_s を得る。 z_s から、吸音率 α を以下より得る。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - 1}{z_s + 1} \right|^2 \quad (\text{A.14})$$

A.3 計算条件

2014 年 8 月 1 日及び 11 月 16 日に測定された地表面の z_{EA} から、各日について、インピーダンスモデルのパラメータ値及び z を推定する。測定対象地表面は植生が疎らであり、8 月 1 日は地表面が乾いている状態、11 月 16 日は地表面が湿っている状態である。

計算条件を表 A.1 に示す。ただし、表中 $n_m, N, x_1, x_2, \Delta f$ はそれぞれ音源個数、FFT の平均化回数、地表面–上側マイクロホン中心間距離、地表面–下側マイクロホン中心間距離、周波数間隔である。

表 A.1 計算条件

Parameter	Value	Parameter	Value
n_m	4	ρ [kg/m ³]	1.205
N	150	κ [-]	1.41
x_1 [m]	0.028	c [m/s]	351.8 (Aug/01/2014), 339.7 (Nov/16/2014)
x_2 [m]	0.015		
Δf [Hz]	6.25		

A.4 計算結果

表 A.2 に、8 月 1 日の測定結果から推定された各モデル中のパラメータ値を、設定した初期値とともに示す。流れ抵抗に着目すると、式 (A.3), (A.11) の通り $\sigma, \sigma_e, \sigma_w$ がそれぞれ異なる量であるため同列には比較できないが、各モデルともに 200–400 kPa s/m² 程度であり、植生が疎らな地表面の流れ抵抗としては妥当な値といえる。しかしながら、ZK モデル中の Ω, c_s の推定値はともに 1.0 であるが、これらはパラメータの意味を考えると、土中において物理的に妥当な値とは考えにくい。

図 A.3 に、8 月 1 日に実測された z_{EA} 及び α_{EA} 、A.2 節の手順により推定されたパラメータ値を用いて EA 法の数理モデル及びインピーダンスモデルから計算された z_{EA} 及び α_{EA} 、ならびに推定されたパラメータ値を用いてインピーダンスモデルから計算された z 及び α を、インピーダンスモデル毎に示す。ZK モデルでは、前述のように一部のパラメータ推定値が妥当でないにもかかわらず、いずれのモデルを用いた場合でも、 z_{EA} 及び α_{EA} の実測値と計算値は良く一致する。また、 z の虚部は負であり、 α は周波数の増加とともに緩やかに上昇する。

表 A.2 8 月 1 日の測定結果から推定された各モデル中のパラメータ値

Model	Parameter	Initial value	Estimated value
DB	σ [kPa s/m ²]	200	232
Miki	σ_e [kPa s/m ²]	1000	363
	q / Ω [-]	3.5	1.0
ZK	σ [kPa s/m ²]	300	299
	Ω [-]	0.5	1.0
	c_s [-]	1.69	1.0
Wilson	σ_w [kPa s/m ²]	300	404

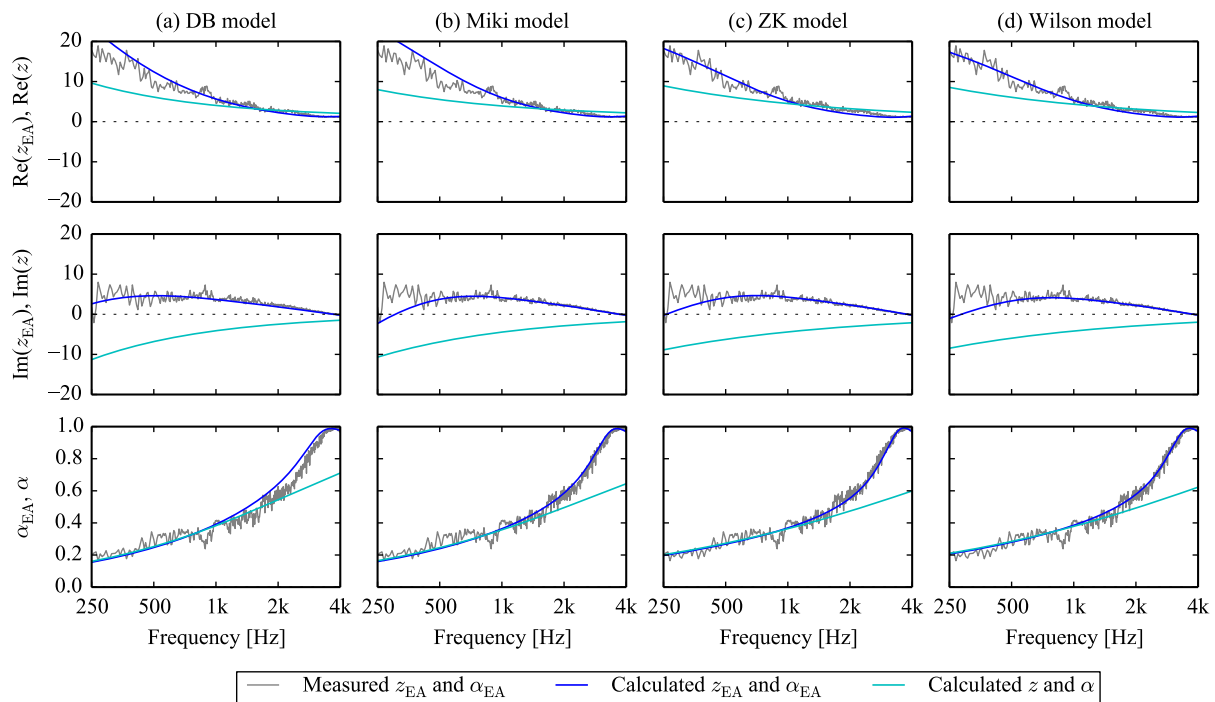


図 A.3 8 月 1 日に実測された z_{EA} 及び α_{EA} , 計算された z_{EA} 及び α_{EA} ならびに z 及び α

表 A.3 及び図 A.4 に、11 月 16 日における結果を表 A.2 及び図 A.3 と同様にして示す。表 A.3 中の流れ抵抗の値は、各モデルともに 1000–2000 kPa s/m² 程度であり、8 月 1 日の測定結果から推定された流れ抵抗の値よりも大きい。これは、乾いた地面より湿った地面の方が流れ抵抗は大きいという一般的知見と一致する。図 A.4 より、Wilson モデルを用いた場合の低域を除き、 z_{EA} の実測値と計算値は良く一致する。 α_{EA} の実測値と計算値は、Miki モデル及び ZK モデルでは概ね一致するものの、1 パラメータモデルである DB モデル及び Wilson モデルでは特に高周波域において乖離する。図 A.4 (a), (d) の DB モデル及び Wilson モデルによる吸音率を比較すると、DB モデルは高域で、Wilson モデルは特に低域で、 α_{EA} の実測値と計算値に開きが見られる。

表 A.3 11 月 16 日の測定結果から推定された各モデル中のパラメータ値

Model	Parameter	Initial value	Estimated value
DB	σ [kPa s/m ²]	200	988
Miki	σ_e [kPa s/m ²]	1000	1000
	q / Ω [-]	3.5	2.09
ZK	σ [kPa s/m ²]	1250	1250
	Ω [-]	0.3	0.31
	c_s [-]	1.96	1.0
Wilson	σ_w [kPa s/m ²]	400	2293

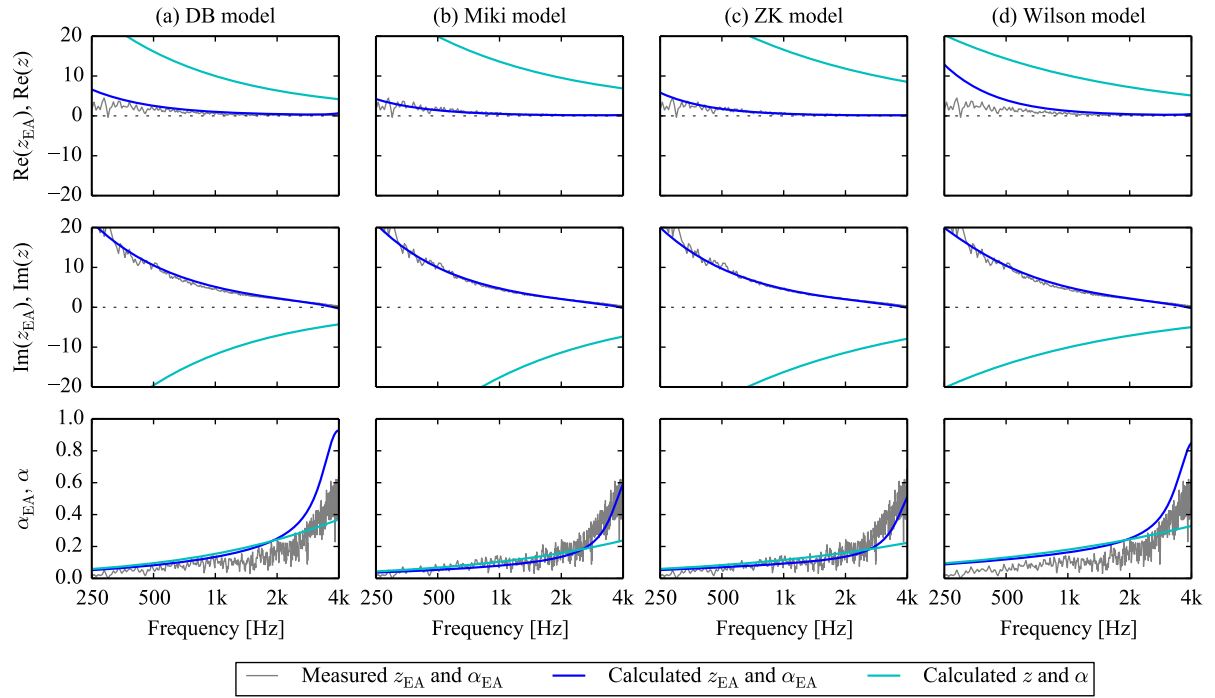


図 A.4 11 月 16 日に実測された z_{EA} 及び α_{EA} , 計算された z_{EA} 及び α_{EA} ならびに z 及び α

ここで、複数のパラメータをもつモデルについて、さらなる検討を実施する。表 A.4 に、複数パラメータモデルである Miki モデル及び ZK モデルについて、異なる初期値を設定した場合に 11 月 16 日の測定結果から推定されたパラメータ値を示す。両モデルともに、初期値を変化させると異なるパラメータ値が推定される。図 A.5 に、異なる初期値から推定されたパラメータ値を用いて計算された z_{EA} , α_{EA} , z , α を、実測値とともに示す。両モデルともに、パラメータ推定値が異なる場合でも、類似した z_{EA} , α_{EA} , z , α が算出されている。このように、パラメータが複数ある場合には、実測値から各パラメータの値を一意に推定することは難しいと考えられる。

表 A.4 11 月 16 日の測定結果から推定された, Miki 及び ZK モデル中のパラメータ値

Model	Case	Parameter	Initial value	Estimated value
Miki	Case 1-1	σ_e [kPa s/m ²]	1000	1000
		q / Ω [-]	3.5	2.09
	Case 1-2	σ_e [kPa s/m ²]	3000	3000
		q / Ω [-]	3.5	1.07
ZK	Case 2-1	σ [kPa s/m ²]	1250	1250
		Ω [-]	0.3	0.31
		c_s [-]	1.96	1.0
	Case 2-2	σ [kPa s/m ²]	300	300
		Ω [-]	0.5	0.08
		c_s [-]	1.69	1.0

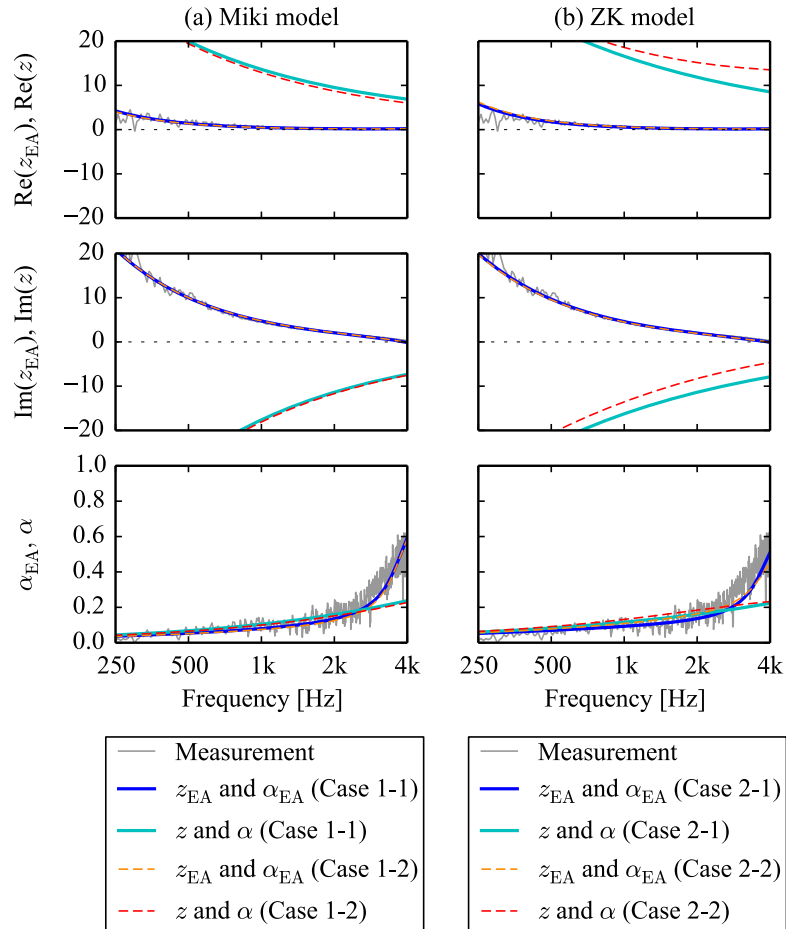


図 A.5 各初期値を用いた推定結果

以上、4種のインピーダンスモデルを用い、EA法の表面インピーダンス比測定結果から各モデル中のパラメータ値及び特性インピーダンス比を推定した。いずれのモデルを用いた場合でも、 z_{EA} の実測値と計算値は概ね一致したことから、妥当な特性インピーダンス比が算出されていると考えられる。

ただし、複数のパラメータをもつインピーダンスモデルを用いた場合には、1パラメータモデルを用いるよりも実測値と計算値がよく一致したが、パラメータ値は一意に決定されなかった。これより、特性インピーダンス比の推定にはいずれのモデルを用いても推定結果に大差はないが、流れ抵抗のような土中の物性に関わるパラメータ値の推定には、複数パラメータモデルよりも1パラメータモデルの使用が推奨される。

付録 B 表面音響特性現場測定法の特性に関する検討

本研究では、第 2 章では EA 法、第 3 章では ANSI 法を用いて地表面音響特性を現場にて測定している。付録 B では、これら現場測定法の特性に関する検討として実施したことを述べる。

B.1 EA 法におけるマイクロホン設置高さ誤差の検討

EA 法では、2 本のマイクロホンを測定対象表面に近接させて設置する。マイクロホン設置高さの違いによる測定結果の差異については、これまでに解析や実測により検討されてきた [68, 69]。一方で、マイクロホンの設置高さ誤差、すなわち本来マイクロホンを設置すべき高さに対する実際のマイクロホン設置高さの差は、実測上不可避であるにもかかわらず、この誤差が測定結果に及ぼす影響はこれまでに検討されていない。そこで以下では、EA 法におけるマイクロホン設置高さ誤差が測定結果に及ぼす影響について、モデル計算により検討する。

B.1.1 計算条件

EA 法では、1/2 インチマイクロホンを隙間なく束ね、マイクロホンスタンドに挟んで固定する。そのため、2 マイクロホン間距離 l が測定のたびに誤差を生じるとは考えにくい。よって、本検討では l は 13 mm で不変とする。

今回の検討項目であるマイクロホン設置高さ誤差の模式図を図 B.1 に示す。2 本のマイクロホンをそれぞれ点 M_1, M_2 に設置するとき、本来であれば測定表面- M_1 間距離、測定表面- M_2 間距離をそれぞれ x_1, x_2 とするところが、設置誤差が生じたためそれぞれ x_1', x_2' となった場合について考える。このとき、 x_1 に対する x_1' の差 (x_2 に対する x_2' の差と同値) を Δx とする。

計算ケースを表 B.1 に示す。本来のマイクロホン設置高さ x_1, x_2 をそれぞれ 28 mm, 15 mm とし、それに対して上下それぞれに 2 または 5 mm 誤差を生じる場合、および誤差を生じない場合の計 5 ケースを計算する。

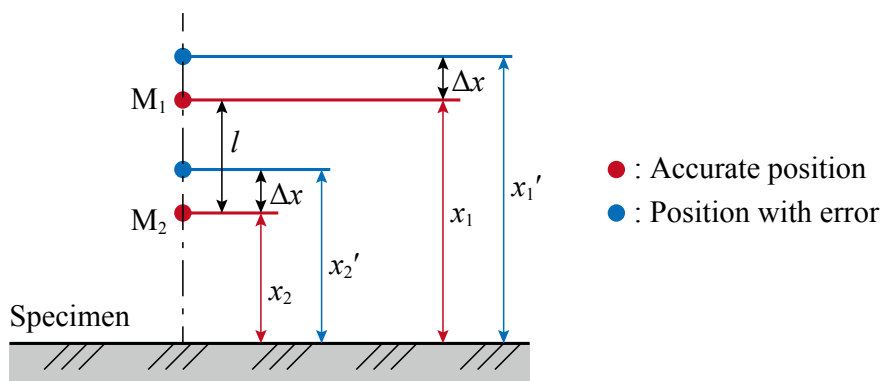


図 B.1 マイクロホン設置高さ誤差の模式図

表 B.1 各計算ケースにおける $x_1, x_2, x_1', x_2', \Delta x$

x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_1' [mm]	x_2' [mm]	Δx [mm]
28	15	23	10	- 5
		26	13	- 5
		28	15	0
		30	17	+ 2
		33	20	+ 5

第 2 章で述べた EA 法のモデル式を用い、以上 5 ケースそれぞれにおいて z_{EA} および α_{EA} を計算する。すなわち、式 (2.14) 中の x_i には表 B.1 中の x_1 および x_2 の値を代入するが、式 (2.28) 中の x_i には表 B.1 中の x_1' および x_2' の値を代入して z_{EA} および α_{EA} を計算する。ただし本検討では、インピーダンスモデルとして、第 2 章で用いた Wilson モデルである式 (2.23) の代わりに、付録 A で述べた DB モデルである式 (A.1) を用いて計算を行う。式 (A.1) 中の流れ抵抗の値は、表 B.2 に示す密度 32 kg/m^3 のグラスウールに概ね対応する値 [70]、ならびに草地及び固い地面に対応する実効的流れ抵抗 [7] とする。その他計算に必要なパラメータとして、音源個数 $n_m = 4$ 、平均回数 $N = 150$ 、空気密度 $\rho = 1.205 \text{ [kg/m}^3]$ 、音速 $c = 339.3 \text{ [m/s]}$ 、周波数間隔を 6.25 Hz とする。

表 B.2 吸音材および 2 種の地表面とその流れ抵抗

試料		流れ抵抗 $[\text{kPa s/m}^2]$
吸音材	グラスウール (密度: 32 kg/m^3)	15
地面	草地	300
	固い地面	1250

B.1.2 計算結果

図 B.2 に、周波数に対する z_{EA} 及び α_{EA} を、3 種の σ について Δx ごとに示す。 z_{EA} の実部は、 $\sigma = 15 \text{ [kPa s/m}^2]$ では Δx による変化がほとんど無いが、 $\sigma = 300, 1250 \text{ [kPa s/m}^2]$ では低中域で変化が見られる。 z_{EA} の虚部は、 $\sigma = 15 \text{ [kPa s/m}^2]$ では Δx によらずほぼ一定の負値をとるが、 $\sigma = 300 \text{ [kPa s/m}^2]$ では低域でばらつきが生じ、符号は概ね正となる。 $\sigma = 1250 \text{ [kPa s/m}^2]$ では、 $\sigma = 300 \text{ [kPa s/m}^2]$ と比較すると z_{EA} の虚部は Δx による変化が小さい。さらに α_{EA} は、 $\sigma = 15 \text{ [kPa s/m}^2]$ では高音域でわずかに変化するのみであるが、 σ が大きくなると高音域でばらつき、ピーク周波数は Δx が正であると低域へ、負であると高域へ移動する。 σ が大きい場合における、低音域での z_{EA} 及び高音域での α_{EA} のばらつきやすさは、音源分布の変化に対するばらつきの傾向と類似する [71, 72]。

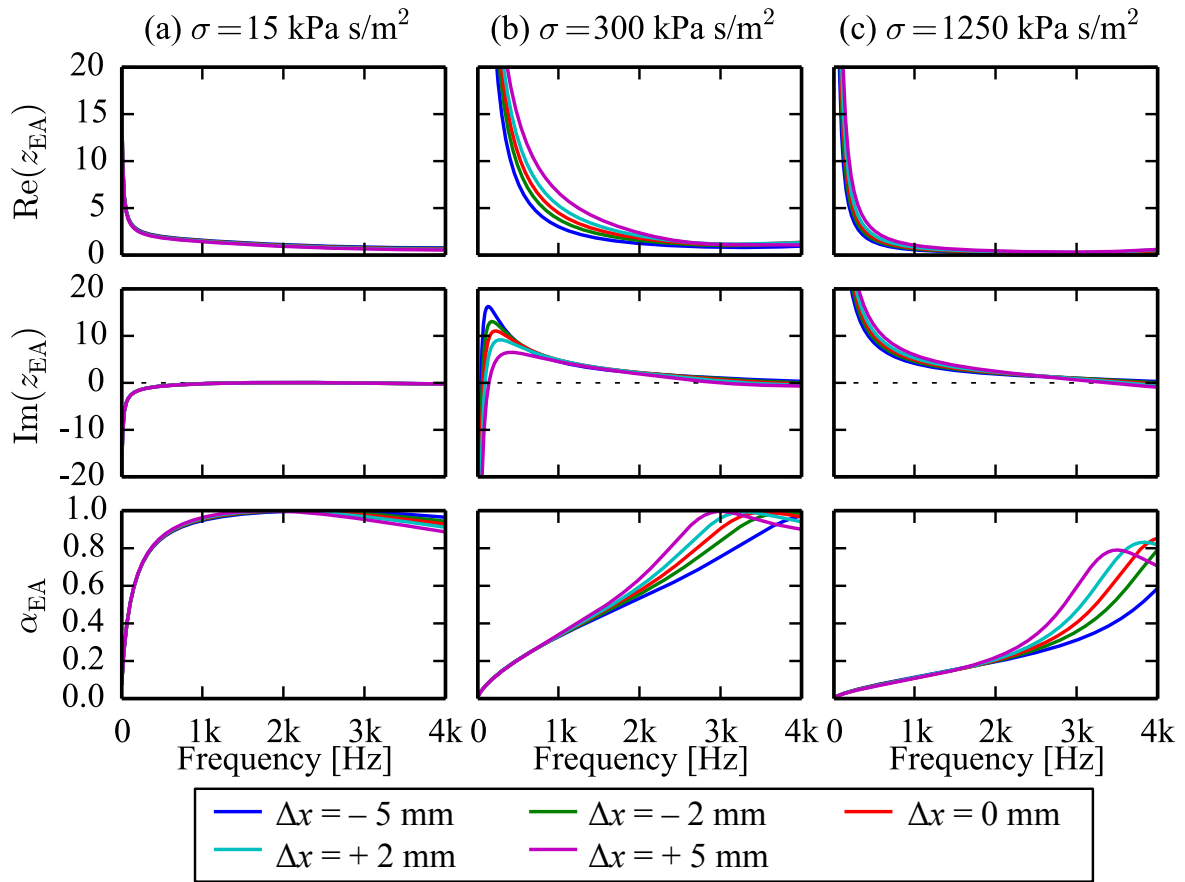


図 B.2 異なる Δx における，周波数に対する z_{EA} 及び α_{EA}

以上，EA 法を対象に，マイクロホン設置高さの誤差が測定結果に及ぼす影響をモデル解析により検討した。流れ抵抗が小さい場合は Δx により結果はほとんど変化しなかったが，流れ抵抗が大きい場合は， Δx の変化に対して z_{EA} は低中域で， α_{EA} は高音域でばらついた。これらの結果より，流れ抵抗が大きい表面，すなわち地表面などを測定対象とする場合には，マイクロホン設置高さに十分注意すべきであるといえる。

B.2 ANSI 法の測定結果のばらつきに関する検討

ANSI 法による地表面音響特性測定に先立ち、複数測定点での測定および 1 測定点での複数回測定を行い、測定の再現性および測定値のばらつきを調べた。以下でその検討内容について述べる。

B.2.1 測定概要

新潟大学陸上競技場グラウンドを対象に、ANSI 法の配置 A にて測定を行う。測定風景を図 B.3 に示す。使用した音源およびマイクロホンは、第 3 章にて述べたものと同一である。ただし本検討では、2 マイクロホンはそれぞれを 1 本ずつマイクロホンスタンドにより固定している。2 マイクロホン間の複素音圧比を、FFT 分析器にて求める。上限周波数は 5 kHz、周波数間隔は 6.25 Hz、平均回数は 150 回とする。

測定点 P_1 – P_9 を、図 B.4 (a) のように定める。図 B.4 (b) のように地表面上にテグスを張り、その交点を測定点 P_1 – P_9 とする。測定点は、第 3 章と同様、音源と 2 受音点の反射点の midpoint と定義する。測定の再現性及び測定値のばらつきを調べるため、Cases 1–3 の 3 ケースの測定を実施する。Case 1 では、 P_1 – P_9 の各点で 1 回ずつ複素音圧比を測定する。Case 2 では、 P_5 にてマイクロホンを固定したまま 9 回複素音圧比を測定し、その後マイクロホン位置を入れ替えて同様に 9 回複素音圧比を測定する。Case 3 では、 P_5 にて 9 回測定するが、Case 2 とは異なり、1 回の測定ごとにマイクロホンや音源装置を一度別の場所へ避け、その後再設置する。Case 3 では、マイクロホン位置の入れ替えは都度行う。Case 1 および Cases 2, 3 の比較により、測定点ごとの音響特性のばらつきを調べる。Case 2 および Case 3 の比較により、機材設置位置の誤差による測定値のばらつきを調べる。



図 B.3 測定風景

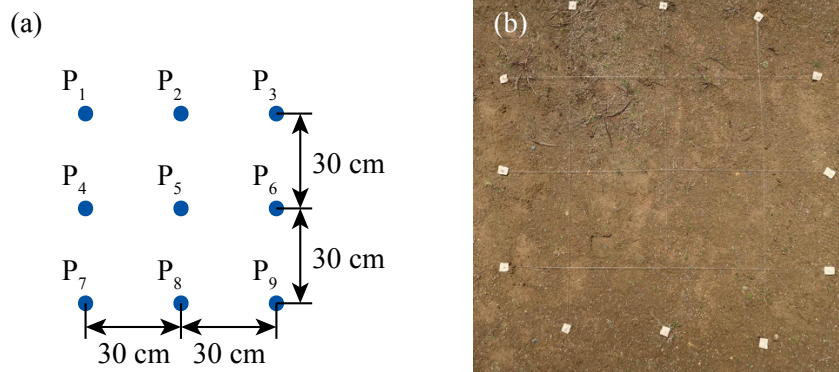


図 B.4 測定点 P_1 – P_9 の平面図

測定された複素音圧比から，基本的には 3.3 節で述べた方法に従い，実効的流れ抵抗 σ を連続量として推定する。ただし，3.3 節では 4 測定点のスペクトルレベル差の平均 LD_{av} から σ を推定しているが，本測定の目的は測定値のばらつきを調べることであるため，9 測定点のスペクトルレベル差の平均から σ を推定するのではなく，各測定点で測定されたスペクトルレベル差から，測定点ごとに σ を推定する。また，第 3 章ではマイクロホンの固定には 2 マイクロホン間の距離を 0.23 m として固定できるスタンドを用いたが，本測定では前述の通り，2 マイクロホンはそれぞれを 1 本ずつマイクロホンスタンドにより固定している。そのため，第 3 章では σ および音源高さ h_s の計 2 パラメータを推定したが，本測定結果からは， σ ，上側マイクロホン高さ h_t ，下側マイクロホン高さ h_b の計 3 パラメータを推定する。

B.2.2 結果

図 B.5 に、各 Case で測定された全 9 回の LD を示す。1 回の測定ごとに測定機材を再設置した Cases 1, 3 では、測定ごとに LD にわずかなばらつきが見られるが、機材をほとんど移動させずに測定した Case 2 では、9 回の LD はほぼ一致している。

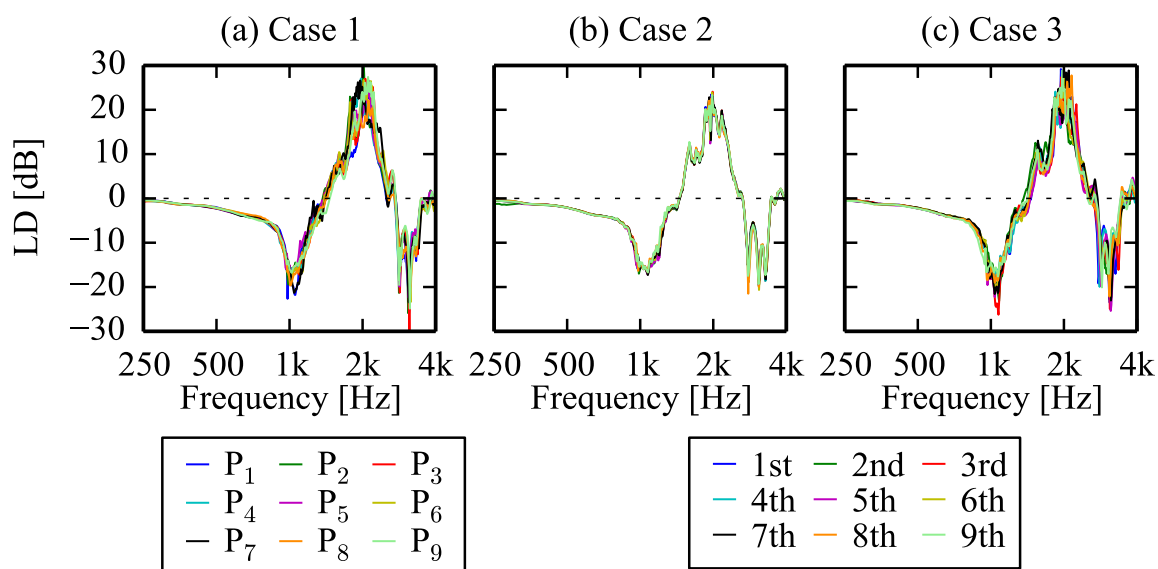


図 B.5 各 Case で測定された全 9 回の LD

表 B.3 に、フィッティングにより推定されたパラメータの平均および標準偏差を示す。推定された σ の平均値は、いずれの Case においても 3000 kPa s/m^2 程度であり、固い地面としては妥当な値といえる。 σ の標準偏差は、Case 2 が最も小さい。また、推定された h_t 及び h_b は、いずれの Case においても同程度であり、実測時には両マイクロホンとも規定高さより 1.5 cm 程度下方に設置されていたと推定された。

表 B.3 各パラメータ推定値の平均および標準偏差

	$\sigma \text{ [kPa s/m}^2\text{]}$		$h_t \text{ [m]}$		$h_b \text{ [m]}$	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
Case 1	3650	1133	0.449	0.006	0.213	0.005
Case 2	2891	324	0.446	0.002	0.216	0.002
Case 3	2669	811	0.449	0.007	0.212	0.006

図 B.6 に、推定された σ を用いて計算した z 及び α を示す。 z の実部及び虚部は、Cases 1, 3 では測定ごとにばらつきが見られるが、Case 2 のばらつきは他の Case よりも小さい。これは、図 B.5 で見られた傾向と同様である。しかしながら、 α はいずれの Case においても 9 データ間で z ほどにはばらつかない。

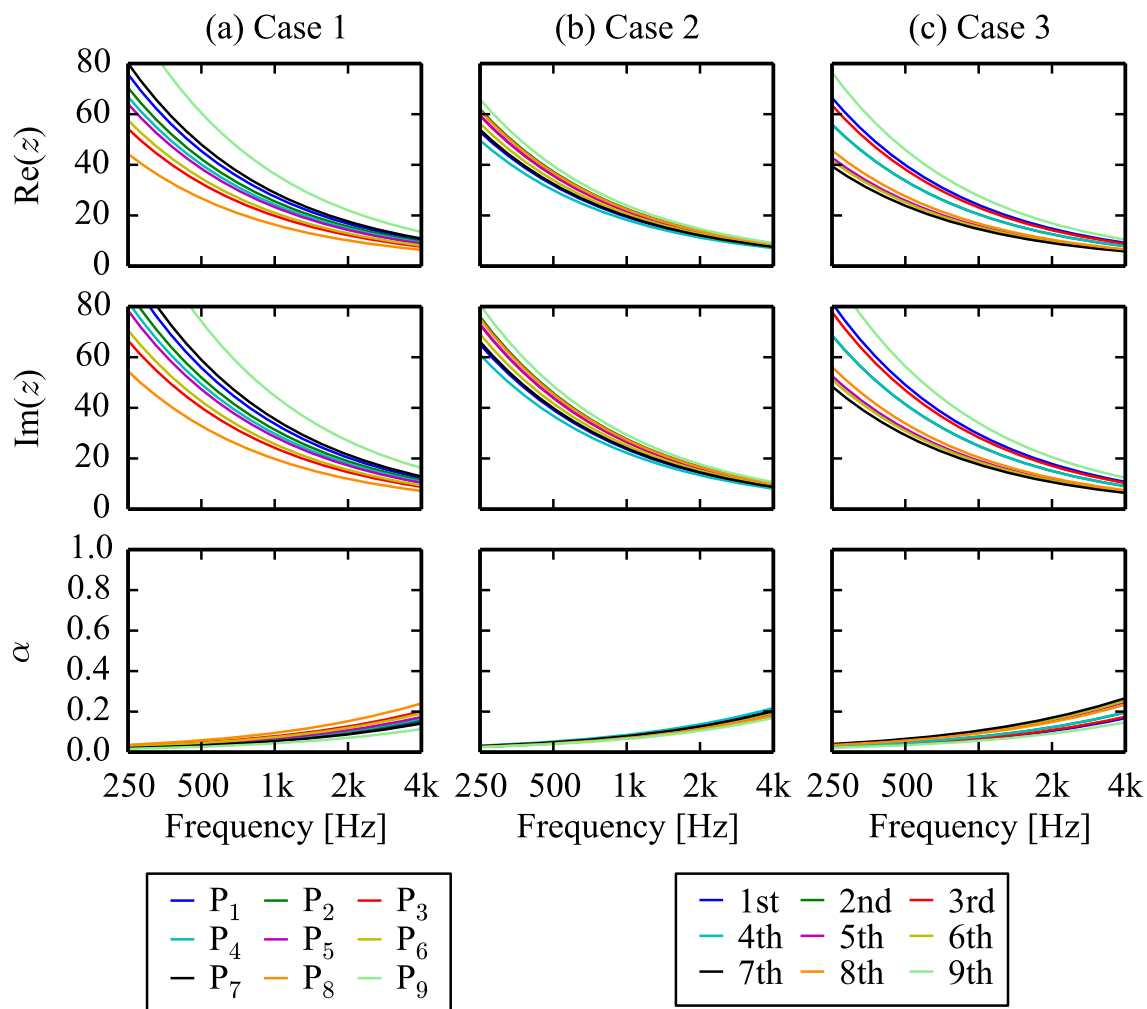


図 B.6 計算された特性インピーダンス比 z および吸音率 α

以上、ANSI 法による測定結果から流れ抵抗を連続量として推定し、測定値のばらつきを調べた。繰り返し測定の実施結果より、ANSI 法による測定では、機材設置位置の誤差等によるばらつきが含まれることがわかった。よって、ANSI 法にて音響特性を測定する際は、なるべく多数回測定し平均をとることが望ましいといえる。

参考文献

- [1] 環境省, 環境基準, <https://www.env.go.jp/kijun/index.html>, 2020 年 2 月 5 日閲覧
- [2] 国立環境研究所, 自動車騒音の常時監視結果,
http://tenbou.nies.go.jp/gis/monitor/?map_mode=monitoring_map&field=8, 2020 年 2 月 5 日
閲覧
- [3] Directive 2002/49/EC of the European parliament and of the council of 25 June 2002 relating to
the assessment and management of environmental noise, *Off. J. Eur. Communities*, L 189/12–25
(2002)
- [4] 今泉博之, "欧州の環境騒音管理と CNOSSOS-EU", 日本音響学会春季研究発表会講演論
文集, 1451–1452 (2018)
- [5] World Health Organization Regional Office for Europe, *Environmental noise guidelines for the
European region*, ISBN 9789289053563 (World Health Organization, 2018)
- [6] 田鎖順太, 松井利仁, "欧州 WHO 環境騒音ガイドラインの概要", 日本音響学会 騒音・
振動研究会資料, N-2018-48 (2018)
- [7] 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会, "道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-
Model 2018”", 日本音響学会誌 **75**(4), 188–250 (2019)
- [8] 森原崇, 辻村壮平, 森長誠, "量-反応関係におけるレベル範囲とアノイアンス評価の関
係", 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集 (秋季), 9–10 (2018)
- [9] JIS Z 8731, 環境騒音の表示・測定方法 (2019)
- [10] C. Zwikker and C. W. Kosten, *Sound absorbing materials*, Elsevier, New York (1949)
- [11] 前川純一, 森本正之, 阪上公博, 建築・環境音響学 第 3 版, 共立出版 (2011)
- [12] ISO 9053: Acoustics — Materials for acoustical applications — Determination of airflow
resistance (1991)
- [13] 日本音響学会, 道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2018”の解説と手引き (2019)
- [14] Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials –Modifications of Delany-Bazley models–", *J.
Acoust. Soc. Jpn. (E)* **11**(1), 19–24 (1990)
- [15] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Appl.
Acoust.* **3**(2), 105–116 (1970)
- [16] A. J. Cramond and C. G. Don, "Reflection of impulses as a method of determining acoustic
impedance", *J. Acoust. Soc. Am.* **75**(2), 382–389 (1984)
- [17] Y. Takahashi, T. Otsuru and R. Tomiku, "In-situ measurements of surface impedance and
absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise", *Appl.
Acoust.* **66**, 845–865 (2005)
- [18] 富来礼次, 岡本則子, 大鶴徹, 上水隆義, 山口信, "材料開発におけるアンサンブル平均

- による材料の吸音特性の in-situ 測定法の適用", 日本建築学会技術報告集 **21**(47), 167–170 (2015)
- [19] 奥園健, 大鶴徹, 大嶋拓也, 富来礼次, 平栗靖浩, 岡本則子, "アンサンブル平均を利用した測定法による地表面の吸音特性の in-situ 測定", 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1081–1084 (2014)
- [20] ISO 13472-1: Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ — Part 1: Extended surface method (2002)
- [21] ISO 13472-2: Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ — Part 2: Spot method for reflective surfaces (2010)
- [22] Ansi s1.18-2010: Method for Determining the Acoustic Impedance of Ground Surfaces. American National Standards Institute (2010)
- [23] H. Yang, J. Kang and C. Cheal, "Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation", *Acta Acust. United Acust.* **99**, 379–388 (2013)
- [24] K. V. Horoshenkov and M. H. A. Mohamed, "Experimental investigation of the effects of water saturation on the acoustic admittance of sandy soils", *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 1910–1921 (2006)
- [25] A. J. Cramond and C. G. Don, "Effect of moisture content on soil impedance", *J. Acoust. Soc. Am.* **82**(1), 293–301 (1987)
- [26] K. Attenborough, "Ground parameter information for propagation modeling", *J. Acoust. Soc. Am.* **92**(1), 418–427 (1992)
- [27] K. Attenborough, I. Bashir and S. Taherzadeh, "Outdoor ground impedance models", *J. Acoust. Soc. Am.* **129**(5), 2806–2819 (2011)
- [28] T. Van Renterghem and D. Botteldooren, "Influence of rainfall on the noise shielding by a green roof", *Build. Environ.* **82**, 1–8 (2014)
- [29] G. Guillaume, O. Faure, B. Gauvreau, F. Junker, M. Bérengier and P. L'Hermite, "Estimation of impedance model input parameters from in situ measurements: Principles and applications", *Appl. Acoust.* **95**, 27–36 (2015)
- [30] 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2018 年 1 月 19 日閲覧
- [31] 石田哲朗, エンジニアのための Excel ナビシリーズ 地盤材料の試験・調査入門, インデックス出版 (2011)
- [32] 日本規格協会, JIS A 1204 土の粒度試験, JIS ハンドブック ⑪土木 I コンクリート製品・土木資材, 2243–2250 (2013)
- [33] ウェザートランスミッターWXT520 取扱説明書, <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/M210906JA-C.pdf>, 2018 年 8 月 30 日閲覧
- [34] 気象庁, 予報用語 時に関する用語, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/toki.html, 2018 年 6 月 12 日閲覧

- [35] 気象庁, 予報用語 1 日の時間細分図,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/saibun.html, 2018 年 6 月 12 日閲覧
- [36] Delta-T Devices Ltd., User Manual for the SM150 Version 1.1, April 2014
- [37] Y. Kurosaka and T. Oshima, "On the characteristics of the EA method to measure the acoustic properties of ground surface in-situ", Proc. Inter-Noise 2016 (Hamburg), 1929–1935 (2016)
- [38] D. K. Wilson, "Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media", *Appl. Acoust.* **50**(3), 171–188 (1997)
- [39] C. Zhu, Richard H. Byrd, P. Lu and J. Nocedal, "Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization", *ACM Trans. Math. Softw.* **23**(4), 550–560 (1997)
- [40] J. L. Morales and J. Nocedal, "Remark on “Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization”", *ACM Trans. Math. Softw.* **38**(1), Article No. 7 (2011)
- [41] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant *et al.*, "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python", *Nat. Methods*, DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2E (2020)
- [42] 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店 (1977)
- [43] 江原義郎, ユーザーズ デジタル信号処理, 東京電機大学出版局 (1991)
- [44] 菅原正巳, 流出解析法, 共立出版 (1972)
- [45] 薩摩順吉, 物理の数学, 岩波書店 (1995)
- [46] Technical Data WS700-UMB Smart Weather Sensor , <https://www.lufft.com/products/compact-weather-sensors-293/ws700-umb-smart-weather-sensor-1830/productAction/outputAsPdf/>, 2020 年 1 月 19 日閲覧
- [47] 地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編, 地盤調査の方法と解説, 社団法人地盤工学会 (2004)
- [48] 国土交通省国土政策局国土情報課, 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータの詳細, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, 2018 年 10 月 15 日閲覧
- [49] 国土地理院, 細密数値情報 (10m メッシュ土地利用), <http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-saimitsu.html>, 2018 年 10 月 15 日閲覧
- [50] 国土地理院, 数値地図 5000 (土地利用), <http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-5k.html>, 2018 年 10 月 15 日閲覧
- [51] 日本リモートセンシング学会編, 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書株式会社 (2011)
- [52] Google マップ,
<https://www.google.co.jp/maps/@35.1168536,137.0810788,6555m/data=!3m1!1e3>, 2020 年 1 月 31 日閲覧
- [53] 国土地理院, 地理院地図,
http://maps.gsi.go.jp/#14/35.111448/137.081995/&base=std&ls=std%7Clum200k%7Clum4bl_chubu2003&blend=00&disp=111&lcd=lum4bl_chubu2003&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f0, 2020

年 1 月 31 日閲覧

- [54] N. Keshava, "Distance metrics and band selection in hyperspectral processing with applications to material identification and spectral libraries," *Geosci. Remote Sens.* **42**, 1552–1565 (2004)
- [55] M. A. Cochrane, "Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data," *Int. J. Remote Sens.* **21**(10), 2075–2087 (2000)
- [56] K. Oki, L. Shan, T. Saruwatari, T. Suhamma and K. Omasa, "Evaluation of supervised classification algorithms for identifying crops using airborne hyperspectral data", *Int. J. Remote Sensing* **27**(10), 1993–2002 (2006)
- [57] 平栗靖浩, 大嶋拓也, 星和磨, "ハイパースペクトルデータを用いた地表面吸音境界条件の設定方法", 日本音響学会 騒音・振動研究会資料, N-2013-38 (2013)
- [58] 児島利治, 宝馨, 岡太郎, "リモートセンシング画像の分解能が土地被覆分類精度に及ぼす影響", 京都大学防災研究所年報 39(B-2), 445–458 (1996)
- [59] G. M. Foody, "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing Environ.* **80**(1), 185–201 (2002)
- [60] X. Di and K. E. Gilbert, "An exact Laplace transform formulation for a point source above a ground surface", *J. Acoust. Soc. Am.* **93**(2), 714–720 (1993)
- [61] 川井孝雄, "Locally reacting な境界面上の音の伝搬に関する考察", 日本音響学会誌 **39**(6), 374–379 (1983)
- [62] D. Van Maercke, "Programing the Point-to-point Propagation Model", Technical Report HAR34TR-041124-CSTB01 (CSTB, Marne-la-Vallée, 2004)
- [63] J. Picaud, N. Fortin and G Dutilleux, "A simplified approach for making soundmaps within a GIS software", Proc. Inter-Noise 2011, No. 434002, 6 pages (2011)
- [64] Yumi Kurosaka and Takuya Oshima, "Comparative study on *in-situ* measurement techniques of surface acoustic properties: experimental investigations of three techniques", Proc. Inter-Noise 2017, 231–238 (2017)
- [65] 岩本拓也, 大嶋拓也, 黒坂優美, "ANSI/ASA S1.18-2010 法およびアンサンブル平均法による地表面音響特性の実測比較", 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 375–378 (2019)
- [66] Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials –Generalizations of empirical models–", *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* **11**(1), 25–28 (1990)
- [67] D. Dagna and P. Blanc-Benon, "Physically admissible impedance models for time-domain computations of outdoor sound propagation", *Acta Acust. United Acust.* **100**, 401–410 (2014)
- [68] 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, ナズリ・チェ・ディン, 吉川有香, "アンサンブル平均を利用した材料の吸音特性の *in-situ* 測定法 -その 1 センサの設置位置に関する検討-", 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 1127–1128 (2009)
- [69] 中村麻美, 大鶴徹, 富来礼次, 坂本浩平, 山内沙紀, "2 マイクロホンとアンサンブル平均を利用する材料の吸音特性の *in-situ* 測定手法に関する研究 -マイクロホン設置位置に

- 関する検討-", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 381-382 (2016)
- [70] 大嶋拓也, 朝倉巧, 坂本慎一, 富来礼次, 安田洋介, 豊田政弘, "多孔質吸音材料の伝達関数法による音響特性測定の準ラウンドロビン・テスト", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 201-202 (2015)
- [71] 黒坂優美, 大嶋拓也, "地表面音響特性の現場測定における測定法に関する解析的検討", 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 959-960 (2016)
- [72] 黒坂優美, 大嶋拓也, "表面音響特性の現場測定法に関するモデル式解析-吸音材及び地表面を対象とした検討-", 日本建築学会北陸支部研究報告集 **59**, 227-230 (2016)

謝辞

本論文は、筆者が新潟大学大学院博士後期課程在学時の研究内容をまとめたものです。

新潟大学 赤林伸一教授には、博士後期課程での主指導教員を引き受けてくださいましたこと、また折に触れて数々のご指導を賜りましたことを、心から感謝いたします。

新潟大学 大嶋拓也准教授には、学部4年次から博士後期課程に至るまで、研究を直接ご指導いただき、大変お世話になりました。研究に携わる者としても、一人の人間としても至らない私に、辛抱強くご指導いただきましたことは、感謝の念に堪えません。

新潟大学 加藤大介教授、藤澤延行教授には、本論文の副査を担当いただき、本論文を取りまとめるに当たりご指導いただきましたことをここに感謝申し上げます。

新潟大学 本田明治教授には、新潟大学五十嵐キャンパス内における気象データをご提供いただいたのみならず、論文をまとめるにあたり気象学の視点から大変有益なご助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

新潟大学 有波裕貴助教には、博士後期課程進学にまつわることから、日々の研究生活に関することまで、様々な場面でご助言を頂きました。感謝申し上げます。

近畿大学 平栗靖浩准教授、神戸大学 奥園健助教には、フィールドでの音響特性測定や結果の分析等に当たり、数々のご助言を頂きました。また、学外発表の際には、多くの先生方、研究者の方々からご指導・ご助言を頂きました。ここに感謝いたします。

本研究では、名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター東郷フィールドにて音響測定を行いました。また、東郷フィールドにおける気象観測データをご提供いただきました。ご協力頂いた東郷フィールドの関係各位に感謝申し上げます。

新潟大学大嶋研究室には、計6年在籍させていただきました。これまで、数々の先輩方、同級生、後輩の皆様に支えられてきたことに対し、深く感謝いたします。

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員奨励費 19J13172 および公益財団法人新潟工学振興会奨学研究費の助成を受けて行われました。ご支援に感謝いたします。

最後になりましたが、筆者の博士後期課程への進学を後押ししてくださり、さらに筆者の長年にわたる学生生活を支えてくれた両親に心から感謝いたします。

2020年2月

新潟大学大学院 自然科学研究科
環境科学専攻 社会基盤・建築学コース（建築系）
黒坂 優美