

目 次

スペクトル解析への入門ガイド	(日野幹雄) .. 1
0. スペクトル解析について	(日野幹雄) .. 9
0.1 はじめに	9
0.2 フーリエ解析法発展の歴史	9
0.2.1 フーリエ級数誕生	9
0.2.2 フーリエ解析とヒルベルト空間論	10
0.2.3 ウィナー-ヒンチンの定理	10
0.3 フーリエ解析と理工学の諸問題	11
0.3.1 ペリオドグラム	11
0.3.2 アインシュタインのブラウン運動の 理論	11
0.3.3 乱流理論	12
0.3.4 不規則振動論	13
0.3.5 通信理論	13
0.3.6 雑音理論	14
0.3.7 確率過程論	14
0.4 スペクトル計算法	14
0.4.1 普及しなかったスペクトル解析	14
0.4.2 アナログ式のスペクトル解析機	14
0.4.3 コンピュータの出現とアルゴリズムの 発展	14
0.4.4 アルゴリズムの発展	15
0.5 さらに展開	15
0.5.1 非定常スペクトルからウェーブレット と時間-周波数解析へ	15
0.5.2 因子分析—— 経験的直交関数系 展開——	16
0.5.3 ゆらぎ現象	16

基 礎 編

1. スペクトル解析の基礎	(佐藤俊輔, 吉川 昭) .. 21
1.1 準 備	21
1.1.1 記号について	21
1.1.2 信号空間の幾何学	22
1.1.3 基本的な公式	24
1.2 スペクトル推定(直接法)	28
1.2.1 ペリオドグラム	28
1.2.2 B-T 法	30
1.2.3 相関関数の推定	30
1.2.4 窓かけ	30
1.3 スペクトル推定法—— 信号モデルによる 方法——	33
1.3.1 調和信号モデル	33
1.3.2 有理伝達関数モデルによる方法	33
1.3.3 自己回帰スペクトル推定	34
1.3.4 移動平均スペクトル推定	39
1.3.5 ARMA スペクトル推定	39
1.3.6 ゼロパディングの効果	41
1.4 フィルタ	41
1.4.1 アナログフィルタ	41
1.4.2 デジタル IIR フィルタの設計	44
1.4.3 デジタル FIR フィルタの設計	48
1.5 非定常解析	49
1.5.1 非定常周波数エネルギースペクトルに おける困難	49
1.5.2 スペクトログラム	50
1.5.3 スペクトログラムから時間-周波数 表現(コーエンのクラス)へ	51
1.5.4 スペクトログラムからスカログラムへ	54
1.5.5 アフィンクラスとコーエンのクラスの 共通サブクラス	57
1.5.6 ウィグナ分布からスペクトログラムと スカログラムへ	58
1.5.7 双線形表現の分類	59
1.5.8 非定常確率過程のスペクトル解析に おける問題点	61
1.5.9 非定常スペクトルの代表的モデル	61

2. ウェーブレット解析	(山田道夫, 佐々木文夫) .. 66
2.1 連続ウェーブレット変換	66
2.1.1 定 義	66
2.1.2 不確定性関係と基底の従属性	69
2.1.3 局所フーリエ解析とウェーブレット 解析	70
2.1.4 局所の特異性の検出	71
2.1.5 多次元化	72
2.2 離散ウェーブレット変換	73
2.2.1 ウェーブレットの離散化とフレーム ..	73
2.2.2 完全正規直交ウェーブレット	74
2.2.3 多重解像度解析	75
2.2.4 直交ウェーブレットの構成	76
2.2.5 直交ウェーブレットの例	78
2.2.6 ウェーブレットの種類と拡張	82
3. カオスとフラクタル	84
3.1 カオス	(佐野雅己) .. 84
3.1.1 カオスとは	84
3.1.2 カオスとスペクトラム	88
3.1.3 カオスの応用	93
3.2 フラクタルな図形と測度 .. (早川美徳) ..	94
3.2.1 フラクタル	94
3.2.2 ハウスドルフ次元	95
3.2.3 相似次元	96
3.2.4 ボックス次元	96
3.2.5 フラクタル次元の測定方法	96
3.3 自己アフィンフラクタル .. (早川美徳) ..	98
3.3.1 自己相似と自己アフィン	98
3.3.2 自己アフィンなグラフと曲面	99
3.3.3 ハースト指数の計測	100
3.4 マルチフラクタル	(早川美徳) .. 101
3.5 各種のフラクタル	(早川美徳) .. 102
3.5.1 べき乗分布	102
3.5.2 空隙とファットフラクタル	102
3.5.3 臨界現象とフラクタル	103

応 用 編

4. 流体力学	109
4.1 乱流場の表現とスペクトル	109
4.1.1 乱流の特徴と基礎方程式 (木田重雄) ..	109
4.1.2 統計平均量とスペクトル (木田重雄) ..	110
4.1.3 エネルギーカスケードと局所平衡 (蒔田秀治) ..	113
4.1.4 高レイノルズ数乱流場のスペクトル (蒔田秀治) ..	115
4.2 自由せん断流のスペクトル特性	117
4.2.1 変動の成長とスペクトル特性 (西岡通男) ..	117
4.2.2 混合層とはく離・再付着流れ (木谷 勝) ..	120
4.2.3 噴流の発達とスペクトル (豊田国昭) ..	122
4.2.4 後流におけるスペクトル (松村昌典) ..	124
4.3 壁面せん断流のスペクトル特性	127
4.3.1 遷移機構とスペクトル発展 (浅井雅人) ..	127
4.3.2 テイラー-クエット流れの遷移 (中林功一) ..	129
4.3.3 乱流管内流と境界層のスペクトル (早川道雄) ..	132
4.3.4 壁面上のせん断応力と圧力変動 (早川道雄) ..	134
4.4 その他の事項	135
4.4.1 渦度, 微分量のスペクトル (益田重明) ..	135
4.4.2 乱流中の静圧変動のスペクトル (豊田国昭) ..	137
4.4.3 空力騒音とスペクトル (望月 修) ..	138
4.4.4 ウェーブレット解析の応用 (木谷 勝) ..	141
4.4.5 直交固有関数分解	(辻 義之) .. 143
4.4.6 乱流場のフラクタル性 (辻 義之) ..	144
5. 気 象	147
5.1 大気現象のスペクトル	(甲斐憲次) .. 147
5.1.1 現象のスケールとライフスケール ..	149

5.1.2	大気境界層の乱流スペクトル	151	5.4	地球大気の3次元スペクトル展開	
5.1.3	メソ擾乱とスペクトルギャップ	155		(田中 博)	173
5.1.4	日変化成分とシノプティックスケールの変動	157	5.4.1	東西波数展開	173
5.1.5	季節内変動と年変化	158	5.4.2	球面調和関数展開	176
5.1.6	スペクトル気候学	159	5.4.3	3次元ノーマルモード展開	179
5.2	大気の流れ特性	(余田成男) 161	5.5	地球大気のウェーブレット解析	
5.2.1	3次元乱流のあらまし	161		(山田道夫, 佐藤 薫)	184
5.2.2	地球流体中の3次元乱流	163	5.5.1	ウェーブレット解析の応用	184
5.2.3	2次元乱流	164	5.5.2	観測大気の解析	185
5.2.4	地球流体中の2次元乱流	166	5.6	数値予報に用いられるスペクトルモデル	
5.2.5	地衡流乱流	168		(室井ちあし)	188
5.3	地球大気の時空間スペクトル解析		5.6.1	グリッドモデルとスペクトルモデル	188
	(林 良一)	170	5.6.2	全球モデルと局域モデル	190
5.3.1	時空間スペクトルの計算方法	170	5.6.3	スペクトルモデルの変遷	193
5.3.2	大気波動の解析への応用例	171	5.6.4	スペクトル結合による局域モデル	195
6.	海洋・海岸	197	6.5.2	海岸波浪のソリトン表示	220
6.1	海洋中の波動のスペクトル解析	197	6.5.3	ソリトンスペクトル	221
6.1.1	海洋乱流のスペクトル解析	(長島秀樹) 197	6.5.4	ソリトン列の確率モデル	222
6.1.2	海洋中の内部波のスペクトル	(日比谷紀之) 199	6.5.5	海岸波浪の造波問題への応用	224
6.1.3	長周期変動の時空間スペクトル	(久保田雅久) 202	6.6	超音波を利用した海象計測 (伊藤芳樹)	224
6.1.4	人工衛星による海面画像のスペクトル	(川村 宏) 204	6.6.1	ドップラー海象計におけるデータ処理	224
6.2	海洋波の方向スペクトルの推定理論	(橋本典明) 205	6.6.2	ドップラー周波数偏移の検出原理	225
6.3	波浪のスペクトルと確率特性	(木村 晃) 211	6.6.3	測定データの評価	227
6.3.1	水位および極大水位の確率特性	211	6.6.4	その他の手法	228
6.3.2	周期の確率分布	212	6.7	電波を利用した海象計測 (徳田正幸)	228
6.3.3	波高・周期の結合確率分布	213	6.7.1	ブラッグ共鳴散乱を利用した計測	229
6.3.4	波高の時系列の確率特性	213	6.7.2	短波海洋レーダによる海象計測	229
6.4	波浪の高次スペクトルと非線形性	(増田 章) 214	6.7.3	海面散乱のスペクトル解析	231
6.4.1	高次スペクトルとは	214	6.7.4	モデルによる検証	238
6.4.2	風波の非線形性, 準ガウス過程とバイスペクトル	218	6.7.5	まとめ	239
6.5	ソリトンスペクトル解析 (安田孝志)	219	6.8	ベクトル変動の回転スペクトル表示	
6.5.1	なぜソリトンスペクトル解析か	219		(青野利夫)	240
7.	地震学・地震工学	246	6.8.1	ベクトル変動に対するフーリエ変換	240
7.1	グローバル地震学 (坪井誠司)	246	6.8.2	回転スペクトル	240
7.1.1	表面波の位相速度	246	6.8.3	潮流解析への適用	241
7.1.2	表面波のアレイ解析	247	6.8.4	波動場への適用	243
			7.1.3	自由振動のスペクトル解析	247
			7.1.4	地震波のスペクトル	250
			7.2	フーリエスペクトル (翠川三郎)	252

7.2.1	地震動の振幅スペクトル	252	7.4	エネルギースペクトル	256
7.2.2	地震動の位相スペクトル	252	7.4.1	全エネルギースペクトル	256
7.3	応答スペクトル (翠川三郎)	253	7.4.2	瞬間エネルギースペクトル	256
7.3.1	弾性応答スペクトル	253	7.5	設計用スペクトル (翠川三郎)	256
7.3.2	弾塑性応答スペクトル	255	7.5.1	建築分野での設計用スペクトル	256
7.3.3	スペクトルインテンシティ	255	7.5.2	土木分野での設計用スペクトル	257
8.	土 木	258	8.5.1	河川の中の渦構造 (山田 正)	280
8.1	流域地形のスペクトル解析	258	8.5.2	河川の平面形状とスペクトル特性 (長谷川和義)	283
8.1.1	地形, 斜面 (山田 正)	258	8.5.3	河床波のスペクトル特性 (辻本哲郎)	285
8.1.2	河道網 (藤田睦博)	259	8.6	地下水位の水位変動とスペクトル解析 (神野健二)	289
8.2	降雨のスペクトル特性 (沖 大幹)	261	8.6.1	地下水位の変動のモデル —入出力関係—	290
8.2.1	瞬間降雨強度のスペクトル特性	261	8.6.2	地下水位変動のスペクトル解析	291
8.2.2	水文量の日周期・長期変動に関する スペクトル特性	264	8.7	湖沼におけるスペクトル特性	294
8.3	降雨流出におけるスペクトル解析	267	8.7.1	湖沼における流速変動のスペクトル (大久保賢治)	294
8.3.1	降雨流出におけるスペクトル解析 (長谷部正彦)	267	8.7.2	湖沼における水温変動のスペクトル 特性 (大久保賢治)	295
8.3.2	分布系モデルの流出応答 (砂田憲吾)	270	8.7.3	湖沼における流速変動のスペクトル 特性 (山田 正)	297
8.3.3	集中系モデルの流出応答 (砂田憲吾)	272	8.8	密度流のスペクトル特性 (浅枝 隆)	298
8.4	河川流量, 流速に関するスペクトル解析	275	8.9	風 (山田 正)	299
8.4.1	開水路流れの乱流特性とスペクトル (禰津家久)	275			
8.4.2	河川の流れの乱流特性 (西田修三)	278			
8.5	河床のスペクトル特性	280			
9.	土木・建築	302			
9.1	橋梁の耐風設計 (山田 均, 勝地 弘)	302	9.2.4	スペクトル解析上の注意 (片桐純治)	326
9.1.1	耐風設計とスペクトル解析	302	9.3	制震・免震	327
9.1.2	耐風設計要件と動態観測	309	9.3.1	橋梁の免震・制震 (運上茂樹, 阿部雅人)	327
9.2	建築物の耐風設計	313	9.3.2	建物の制震・免震 (小鹿紀英)	338
	耐風設計とスペクトル解析 (大熊武司)	313	9.4	ヘルスマニタリング, 構造同定	347
9.2.1	建物まわりの風と変動風圧・風力の スペクトル特性 (田村哲郎)	314	9.4.1	橋梁のモニタリング (大島俊之)	347
9.2.2	応答の予測 (大熊武司)	321	9.4.2	構造同定におけるスペクトル解析 (石井 清)	350
9.2.3	耐風設計への応用 (片桐純治)	323			
10.	機 械	358			
10.1	音響解析・音響制御への応用 (鈴木英男)	358	10.1.5	音場の制御	365
10.1.1	スペクトルの定比および定幅分析	358	10.2	振動試験・実験モード解析への応用 (白井正明)	367
10.1.2	音響信号の時間-周波数分析	359	10.2.1	実験モード解析と周波数応答関数	367
10.1.3	音場の可視化	361	10.2.2	周波数応答関数のモード重ね合 せによる表現	368
10.1.4	室内の音響解析	364			

10.2.3	系の入出力と周波数応答関数	369	10.3.7	電気機械の故障診断	380
10.2.4	FFTによる周波数応答関数計算時の誤差	370	10.4	構造動力学への応用	382
10.2.5	周波数応答関数計測のための加振方法	370	10.4.1	振動系の動特性同定	382
10.3	スペクトル解析による故障診断	373	10.4.2	モード解析の曲線適合	383
10.3.1	スペクトル解析による故障診断の基礎	373	10.4.3	AR・ARMAモデルを用いた動特性同定法	385
10.3.2	故障診断のための信号処理	374	10.4.4	周波数応答関数曲線からの減衰比同定比	388
10.3.3	一般回転機械の故障診断	376	10.4.5	AR法による減衰比同定法	391
10.3.4	高速回転機械の振動の診断技術	377	10.5	構造信頼性解析への応用	393
10.3.5	転がり軸受の故障診断	378	10.5.1	機械構造物の不規則振動応答	393
10.3.6	歯車装置の故障診断	379	10.5.2	確率過程における超過回数期待値	395
11	航空・宇宙, 船舶, 自動車	401	10.5.3	動的信頼性評価	397
11.1	航空機の運動解析における応用	401	11.7	船体運動の統計モデルによる解析	417
11.1.1	研究の背景	401	11.7.1	船体運動の統計モデルによる表現	417
11.1.2	パイロットを含めた機体制御モデル	401	11.7.2	船体運動の統計的性質	418
11.1.3	パイロットの記述関数	402	11.8	局所定常時系列過程としての船体運動の取り扱い	418
11.1.4	パイロット記述関数の測定	402	11.8.1	ハウスホルダー変換と最小2乗法	418
11.1.5	時系列解析によるパイロット記述関数の同定	402	11.8.2	局所定常時系列モデルの船体運動解析への応用	419
11.1.6	パラメトリックな人間パイロットモデル	403	11.9	船体運動時系列の予測	421
11.2	非定常空気学/空力弾性解析における応用	404	11.9.1	時系列の状態空間表現	421
11.3	構造動力学における応用	406	11.9.2	カルマンフィルタによる船体運動の予測	421
11.3.1	モード解析における多点加振法	406	11.10	水槽試験データの周波数領域での解析	422
11.3.2	ランダムデック	407	11.11	多変量自己回帰モデルによる船体運動の解析	424
11.3.3	衝撃スペクトル	407	11.11.1	多変量自己回帰モデル	424
11.3.4	荷重スペクトル	407	11.11.2	周波数応答関数, 雑音寄与率	425
11.4	空力騒音解析における応用	408	11.12	多変量自己回帰モデルを用いた船体運動解析	425
11.4.1	航空機エンジン発生騒音源の分離計測への応用	408	11.12.1	適用例1: 水槽試験結果の比較	425
11.4.2	低騒音風洞計測部の音源分析への応用	409	11.12.2	適用例2: 主機関の負荷変動と船体曲げ応力の解析	426
11.4.3	ヘリコプタの空力騒音解析	410	11.12.3	操舵法の解析	427
11.5	宇宙利用分野における応用	411	11.13	自動車騒音解析における応用	429
11.6	波浪中の船体運動	414	11.13.1	トルク変動解析	429
11.6.1	船体運動	414	11.13.2	燃焼圧解析	433
11.6.2	波浪中の船体運動の統計的解析法の発展	416	11.14	自動車の制御系設計におけるパラメータ	

同定	434	(川邊武俊)	11.14.3	自動車制御系設計におけるパラメータ同定の実際	436
11.14.1	434		11.14.4	まとめ	438
11.14.2					
付け同定法	434				
12. 化学・化学工学	439				
12.1	439	(幸田清一郎)	12.5.2	制御系設計のための変数選択	451
12.1.1	439		12.5.3	操作変数-被制御変数間の動特性のモデリング	452
12.1.2	440		12.5.4	ウェーブレット変換によるトレンドデータの特徴抽出と運転改善	457
12.2	441	(北森武彦)	12.5.5	データマイニング	459
12.2.1	441		12.6	微粒子工学へのスペクトルの応用	459
12.2.2	442		12.6.1	クラスタの形成	459
12.2.3	443		12.6.2	クラスタ形成初期過程の解析	460
12.2.4	445		12.6.3	吸収スペクトル測定とクラスタ形成初期過程	464
12.3	445	(北森武彦)	12.7	かくはん混合技術へのスペクトルの応用	464
12.4	445	(日高重助, 下坂厚子)	12.7.1	情報エントロピーに基づくESF表示式	465
12.4.1	445		12.7.2	ESFからみたスケールアップの基礎	465
12.4.2	447		12.7.3	既往のスケールアップ則の信頼性	467
12.4.3	450				
12.5	451	(大嶋正裕)			
12.5.1	451				
プロセス制御・運転・監視とプロセスデータ解析					
13. 光 学	471	(谷田貝豊彦)			
13.1	471		13.2.2	インコヒーレント結像	474
13.1.1	471		13.3	光コンピューティング	474
フラウンホーファ回折とフーリエ変換			13.3.1	スペクトル解析器	474
13.1.2	472		13.3.2	空間周波数フィルタリング	475
レンズのフーリエ変換作用			13.4	超短パルスの波形整形とスペクトル合成	476
13.1.3	472				
光学的フーリエ変換					
13.2	473				
光学系の周波数応答					
13.2.1	473				
コヒーレント結像					
14. 音声・画像処理	479				
14.1	479	(伊福部達)	14.3.3	フィルタバンク分析	491
14.2	480	(今井 聖)	14.4	音声処理への応用	492
14.2.1	480		14.4.1	音声合成	492
音源と調音フィルタとを分離した音声生成のモデル			14.4.2	音声の符号化	493
14.2.2	480		14.4.3	音声認識	494
音声のスペクトル包絡とスペクトル分析			14.5	画像情報処理の基礎	498
14.3	481	(小林隆夫, 徳田恵一)	14.5.1	デジタル画像処理	498
14.3.1	481		14.6	画像のスペクトル解析とその応用	500
線形予測分析			14.6.1	スペクトル領域における画像処理	
14.3.2	487				
ケプストラム分析					

..... 500

14.6.2 フィルタリング 501

14.6.3 テクスチャ解析 501

14.6.4 画像の符号化 502

15. 医 学 512

15.1 循環系 512

15.1.1 心電図 (清水孝一) .. 512

15.1.2 心音・脈波・血圧 .. (清水孝一) .. 513

15.1.3 血流 (山口隆美, 吉川 昭) .. 518

15.2 脳神経系 529

15.2.1 脳波解析
(中迫 昇, 吉川 昭, 伊藤憲治) .. 529

15.2.2 筋電図解析 (木竜 徹) .. 537

14.7 画像の生成への応用 (中嶋正之) .. 505

14.7.1 CT 画像の再構成 505

14.7.2 CG の基礎理論 506

14.7.3 フラクタルによる画像生成 509

15.2.3 神経インパルス
..... (中尾光之, 山本光璋) .. 540

15.3 感覚系 542

15.3.1 皮膚感覚におけるスペクトル解析
..... (赤松幹之) .. 542

15.3.2 聴覚系 (伊福部達) .. 547

15.3.3 発声系 (伊福部達) .. 552

15.3.4 視覚系 .. (臼井支朗, 横田康成) .. 556

15.4 生体ゆらぎ .. (中尾光之, 山本光璋) .. 565

16. 社会・経済 (浪花貞夫) .. 568

16.1 社会経済分析とスペクトル解析 568

16.1.1 社会経済システムと実証分析 568

16.1.2 社会経済データの特徴 568

16.1.3 経済時系列と周期的変動 569

16.1.4 時間領域と周波数領域の解析 569

16.1.5 周波数領域における変数間の解析 .. 570

16.2 周波数領域の解析 —— 1 変量の場合 ——
..... 571

16.2.1 経済時系列の構成要素と周期的
変動 571

16.2.2 季節変動 572

16.2.3 循環変動と趨勢変動 576

16.3 周波数領域の解析 —— 多変量の場合 ——
..... 581

16.3.1 社会経済システムと多変量モデル .. 581

16.3.2 社会経済システムと因果性の分析 .. 583

16.4 非定常経済時系列とスペクトル解析 584

16.4.1 経済時系列の非定常性と定常化 584

16.4.2 平均非定常モデル
—— トレンドの推定 —— 585

16.4.3 分散共分散非定常モデル —— トレン
ドの回りの変動の変化 —— 586

16.5 今後の展開 591

17. 人文科学 —— 文学作品のスペクトルを中心に —— (堀井清之, 諸星典子) .. 594

17.1 文字情報と読みのスペクトル 594

17.2 暗黙知について 595

17.2.1 コンテキストとしての暗黙知 595

17.2.2 暗黙知によるコード化/脱コード化
..... 596

17.2.3 シニフィエ/シニフィアン の狭間 .. 597

17.3 文学の暗黙知とその可視化 598

17.4 暗黙知の可視化モデルと解析方法 599

17.5 暗黙知の解析事例 600

17.5.1 ロビンソンの真実 600

17.5.2 宗教書の後ろに 600

17.5.3 小説を読む技術 602

17.5.4 異文化の狭間 603

索引 605

