

# 目次

序文	iii
謝辞	vii
第1章 拡散研究の歴史と文献目録	1
1.1 拡散のパイオニアとランドマーク	2
1.2 固体拡散についての参考書目録	21
<b>第I部 拡散の基礎</b>	<b>29</b>
第2章 拡散の連続体理論	31
2.1 等方的な媒体中のフィックの法則	31
2.1.1 フィックの第1法則	32
2.1.2 連続方程式	33
2.1.3 フィックの第2法則——「拡散方程式」	34
2.2 異なる座標系における拡散方程式	36
2.3 異方性のある媒体中のフィックの法則	37
第3章 拡散方程式の解	41
3.1 定常状態の拡散	41
3.2 1次元での非定常状態の拡散	43
3.2.1 薄膜解	43
3.2.2 拡張された初期分布および一定の表面濃度	45
3.2.3 ラプラス変換法	49
3.2.4 薄板中の拡散——変数分離	50
3.2.5 円柱中の動径拡散	53

<b>x</b>	<b>目次</b>		<b>xi</b>
	3.2.6 球中の動径拡散 . . . . .	55	
	3.3 1次元, 2次元および3次元での点ソース . . . . .	56	
<b>第4章</b>	<b>ランダムウォーク理論と原子ジャンプ過程</b>	<b>59</b>	
4.1	ランダムウォークと拡散 . . . . .	60	
4.1.1	単純化したモデル . . . . .	60	
4.1.2	アインシュタイン-スモルコフスキーの関係式 . . . . .	62	
4.1.3	格子上でランダムウォーク . . . . .	64	
4.1.4	相関因子 . . . . .	66	
4.2	原子ジャンプ過程 . . . . .	68	
<b>第5章</b>	<b>結晶中の点欠陥</b>	<b>73</b>	
5.1	純金属 . . . . .	74	
5.1.1	空孔 . . . . .	74	
5.1.2	複空孔 . . . . .	76	
5.1.3	空孔の性質決定 . . . . .	78	
5.1.4	自己格子間原子 . . . . .	83	
5.2	置換型二元合金 . . . . .	84	
5.2.1	希薄合金中の空孔 . . . . .	85	
5.2.2	高濃度合金中の空孔 . . . . .	86	
5.3	イオン化合物 . . . . .	87	
5.3.1	フレンケル欠陥 . . . . .	88	
5.3.2	ショットキー欠陥 . . . . .	89	
5.4	金属間化合物 . . . . .	91	
5.5	半導体 . . . . .	92	
<b>第6章</b>	<b>拡散機構</b>	<b>99</b>	
6.1	格子間機構 . . . . .	99	
6.2	集団機構 . . . . .	101	
6.3	空孔機構 . . . . .	102	
6.4	複空孔機構 . . . . .	104	
6.5	準格子間機構 . . . . .	105	
6.6	格子間サイト-格子サイト交換機構 . . . . .	106	
<b>第7章</b>	<b>固体拡散中の相関</b>	<b>111</b>	
7.1	格子間機構 . . . . .	113	
7.2	準格子間機構 . . . . .	113	
7.3	自己拡散の空孔機構 . . . . .	114	
7.3.1	「経験則」 . . . . .	114	
7.3.2	空孔-レーザー間の遭遇 . . . . .	115	
7.3.3	空間的, 時間的な相関 . . . . .	117	
7.3.4	相関因子の計算 . . . . .	119	
7.4	自己拡散の相関因子 . . . . .	122	
7.5	空孔を介しての溶質拡散 . . . . .	123	
7.5.1	面心立方格子の母体 . . . . .	124	
7.5.2	体心立方格子の母体 . . . . .	126	
7.5.3	ダイヤモンド構造の母体 . . . . .	128	
7.6	総括 . . . . .	128	
<b>第8章</b>	<b>拡散の温度および圧力依存性</b>	<b>133</b>	
8.1	温度依存性 . . . . .	133	
8.1.1	アレニウスの式 . . . . .	133	
8.1.2	活性化パラメーターの例 . . . . .	136	
8.2	圧力依存性 . . . . .	138	
8.2.1	自己拡散の活性化体積 . . . . .	142	
8.2.2	溶質原子の拡散の活性化体積 . . . . .	144	
8.2.3	イオン結晶の活性化体積 . . . . .	146	
8.3	拡散と材料のバルクの性質の間の相関 . . . . .	148	
8.3.1	融解の性質と拡散 . . . . .	148	
8.3.2	活性化パラメーターと弾性定数 . . . . .	152	
8.3.3	相関の利用 . . . . .	153	
<b>第9章</b>	<b>拡散の同位体効果</b>	<b>157</b>	
9.1	単一ジャンプ機構 . . . . .	157	
9.2	集団機構 . . . . .	161	
9.3	同位体効果実験 . . . . .	161	
<b>第10章</b>	<b>相互拡散とカーケンドール効果</b>	<b>167</b>	
10.1	相互拡散 . . . . .	167	
10.1.1	ボルツマン変換 . . . . .	168	
10.1.2	ボルツマン-マタノ法 . . . . .	169	
10.1.3	ザウアー-フリーゼ法 . . . . .	172	
10.2	固有拡散とカーケンドール効果 . . . . .	174	
10.3	ダーケンの式 . . . . .	176	

10.4	ダーケン-マニングの関係式	178
10.5	カーケンドール面のミクロ構造安定性	180
<b>第 11 章</b>	<b>拡散と外部駆動力</b>	<b>185</b>
11.1	概説	185
11.2	ドリフトが存在する場合のフィックの式	187
11.3	ネルンスト-アインシュタインの関係式	188
11.4	イオン伝導体に対するネルンスト-アインシュタインの関係式およびハーベン比	190
11.5	ネルンスト-プランクの式—イオン結晶中の相互拡散	193
11.6	ダーケンの式 対 ネルンスト-プランクの式	194
<b>第 12 章</b>	<b>不可逆過程の熱力学と拡散</b>	<b>197</b>
12.1	概説	197
12.2	等温拡散の現象論的な式	199
12.2.1	元素結晶中のトレーサー自己拡散	200
12.2.2	二元合金中の拡散	201
12.3	現象論的係数	205
12.3.1	現象論的係数, トレーサー拡散係数およびジャンプモデル	208
12.3.2	総和則—現象論的係数間の関係	210
<b>第 II 部</b>	<b>実験方法</b>	<b>213</b>
<b>第 13 章</b>	<b>直接的な拡散研究</b>	<b>215</b>
13.1	直接法 対 間接法	215
13.2	各種の拡散係数	218
13.2.1	トレーサー拡散係数	219
13.2.2	相互拡散係数および固有拡散係数	221
13.3	トレーサー拡散実験	222
13.3.1	シリアルセクションングによるプロファイル解析	224
13.3.2	残留放射能強度法	229
13.4	同位体制御したヘテロ構造	230
13.5	二次イオン質量分析法 (SIMS)	230
13.6	X 線マイクロアナライザー (EPMA)	234
13.7	オージェ電子分光法 (AES)	236
13.8	イオンビーム分析: RBS および NRA	238

<b>第 14 章</b>	<b>メカニカル・スペクトロスコピー</b>	<b>245</b>
14.1	総説	245
14.2	擬弾性および内部摩擦	247
14.3	メカニカル・スペクトロスコピーの手法	251
14.4	拡散に関係した擬弾性の例	252
14.4.1	スネーク効果またはスネーク緩和	252
14.4.2	ジナー効果またはジナー緩和	256
14.4.3	ゴルスキー効果またはゴルスキー緩和	257
14.4.4	イオン伝導性ガラス中の力学損失	257
14.5	磁気緩和	258
<b>第 15 章</b>	<b>核物性的手法</b>	<b>261</b>
15.1	概説	261
15.2	核磁気緩和 (NMR)	262
15.2.1	NMR の基礎	262
15.2.2	磁場勾配 NMR による直接拡散測定	264
15.2.3	NMR 緩和法	266
15.3	メスバウアー分光法 (MBS)	273
15.4	準弾性中性子散乱 (QENS)	278
15.4.1	QENS 研究の例	287
15.4.2	拡散研究のための MBS および QENS の利点と限界	289
<b>第 16 章</b>	<b>電気的な方法</b>	<b>293</b>
16.1	インピーダンス分光法	293
16.2	広がり抵抗プロファイリング	298
<b>第 III 部</b>	<b>金属材料中の拡散</b>	<b>303</b>
<b>第 17 章</b>	<b>金属中の自己拡散</b>	<b>305</b>
17.1	総説	305
17.2	立方晶金属	307
17.2.1	FCC 金属—経験的な事実	307
17.2.2	BCC 金属—経験的な事実	309
17.2.3	単空孔による解釈	310
17.2.4	単空孔および複空孔による解釈	311
17.3	六方晶最密充填金属および正方晶金属	314

17.4	相転移のある金属	316
<b>第 18 章</b>	<b>金属中の侵入型溶質原子の拡散</b>	<b>321</b>
18.1	「重い」侵入型溶質原子 C, N および O	321
18.1.1	総説	321
18.1.2	実験方法	322
18.1.3	希薄な侵入型合金中の格子間拡散	324
18.2	金属中の水素の拡散	325
18.2.1	総説	325
18.2.2	実験方法	326
18.2.3	水素拡散の例	329
18.2.4	非古典的な同位体効果	331
<b>第 19 章</b>	<b>希薄な置換型合金中の拡散</b>	<b>335</b>
19.1	不純物の拡散	335
19.1.1	「正常な」不純物拡散	336
19.1.2	アルミニウム中の不純物拡散	340
19.2	「隙間の広い」金属中の不純物拡散—解離機構	341
19.3	合金中の溶質原子拡散および溶媒原子拡散	344
<b>第 20 章</b>	<b>二元金属間化合物中の拡散</b>	<b>349</b>
20.1	総説	349
20.2	規則-不規則転移の影響	352
20.3	B2 金属間化合物	354
20.3.1	B2 相中の拡散機構	354
20.3.2	例: B2 NiAl	359
20.3.3	例 B2: Fe-Al	361
20.4	L1 <sub>2</sub> 金属間化合物	362
20.5	D0 <sub>3</sub> 金属間化合物	367
20.6	一軸性金属間化合物	368
20.6.1	L1 <sub>0</sub> 金属間化合物	369
20.6.2	ニケイ化モリブデン (C11 <sub>b</sub> 構造)	371
20.7	ラーヴェス相	373
20.8	Cu <sub>3</sub> Au 則	375
<b>第 21 章</b>	<b>準結晶合金中の拡散</b>	<b>379</b>
21.1	準結晶についての総説	379

21.2	準結晶の拡散性	382
21.2.1	正二十面体準結晶	382
21.2.2	正十角形準結晶	387
<b>第 IV 部</b>	<b>半導体中の拡散</b>	<b>393</b>
<b>第 22 章</b>	<b>半導体についての総説</b>	<b>395</b>
22.1	「半導体時代」と拡散	396
22.2	半導体拡散の特徴	400
<b>第 23 章</b>	<b>元素半導体中の自己拡散</b>	<b>405</b>
23.1	固有点欠陥と拡散	406
23.2	ゲルマニウム	408
23.3	シリコン	412
<b>第 24 章</b>	<b>シリコンおよびゲルマニウム中の不純物拡散</b>	<b>419</b>
24.1	固溶度とサイト占有度	420
24.2	拡散係数と拡散モード	423
24.2.1	格子間拡散	423
24.2.2	ドーパントの拡散	426
24.2.3	ハイブリッド不純物元素の拡散	431
24.3	自己拡散および不純物原子の拡散—総括	432
<b>第 25 章</b>	<b>格子間サイト-格子サイト交換拡散</b>	<b>437</b>
25.1	解離拡散とキックアウト拡散の組合せ	438
25.1.1	固有欠陥の流束によって律速された拡散	439
25.1.2	格子間溶質原子の流束によって律速された拡散	441
25.1.3	中間的な場合の数値解析	442
25.2	キックアウト機構	444
25.2.1	基本的な方程式および二つの解	444
25.2.2	キックアウト拡散の例	446
25.3	解離拡散	451
25.3.1	基本的な方程式	451
25.3.2	解離拡散の例	452

<b>第 V 部 イオン性物質中の拡散と伝導</b>	<b>459</b>		
<b>第 26 章 イオン結晶</b>	<b>461</b>		
26.1 総説	461		
26.2 イオン結晶中の点欠陥	463		
26.2.1 固有点欠陥	463		
26.2.2 外因性欠陥	466		
26.3 欠陥および輸送の諸性質の研究手法	469		
26.4 アルカリハロゲン化物	470		
26.4.1 欠陥の運動, トレーサー自己拡散, およびイオン伝導率	470		
26.4.2 例: NaCl	475		
26.4.3 アルカリハロゲン化物に共通する特徴	479		
26.5 ハロゲン化銀 AgCl および AgBr	480		
26.5.1 自己拡散およびイオン伝導	481		
26.5.2 ドーピング効果	483		
<b>第 27 章 高速イオン伝導体</b>	<b>489</b>		
27.1 高速銀イオン伝導体	491		
27.1.1 AgI および関連した簡単なアニオン構造	492		
27.1.2 RbAg <sub>4</sub> I <sub>5</sub> および関連した化合物	494		
27.2 PbF <sub>2</sub> および他のハロゲン化物イオン伝導体	495		
27.3 安定化ジルコニアおよび関連した酸化物イオン伝導体	496		
27.4 ペロフスカイト酸化物イオン伝導体	497		
27.5 ナトリウム β アルミナおよび関連材料	498		
27.6 リチウムイオン伝導体	499		
27.7 高分子電解質	501		
<b>第 VI 部 ガラス中の拡散</b>	<b>507</b>		
<b>第 28 章 ガラス状態</b>	<b>509</b>		
28.1 ガラスとは何か?	509		
28.2 体積-温度線図	510		
28.3 時間-温度変態 (TTT) 線図	512		
28.4 ガラス群	514		
<b>第 29 章 金属ガラス中の拡散</b>	<b>519</b>		
29.1 総説	519		
29.2 構造緩和と拡散	522		
29.3 金属ガラスの拡散的性質	526		
29.4 ガラス形成合金中の拡散と粘性	532		
<b>第 30 章 酸化物ガラス中の拡散とイオン伝導</b>	<b>537</b>		
30.1 総説	537		
30.2 実験方法	543		
30.3 ガスの透過	545		
30.4 拡散およびイオン伝導の例	547		
<b>第 VII 部 高速拡散経路に沿っておよびナノ材料中の拡散</b>	<b>561</b>		
<b>第 31 章 金属中の高速拡散経路</b>	<b>563</b>		
31.1 総説	563		
31.2 拡散のスペクトル	564		
31.3 粒界拡散に対する経験則	566		
31.4 格子拡散とミクロ構造欠陥	567		
<b>第 32 章 粒界拡散</b>	<b>569</b>		
32.1 総説	569		
32.2 粒界	570		
32.2.1 低角粒界および高角粒界	571		
32.2.2 特殊高角粒界	573		
32.3 孤立した粒界に沿っての拡散 (フィッシャーモデル)	574		
32.4 多結晶中の拡散運動論	583		
32.4.1 タイプ A の運動論様式	584		
32.4.2 タイプ B の運動論様式	586		
32.4.3 タイプ C の運動論様式	590		
32.5 粒界拡散と粒界偏析	591		
32.6 粒界拡散の原子的機構	593		
<b>第 33 章 転位パイプ拡散</b>	<b>599</b>		
33.1 転位パイプモデル	600		
33.2 平均薄層濃度に対する解	602		
<b>第 34 章 ナノ結晶材料中の拡散</b>	<b>609</b>		
34.1 総説	609		

34.2 ナノ結晶材料の合成 . . . . . 610

34.2.1 粉体処理 . . . . . 611

34.2.2 強塑性変形 . . . . . 613

34.2.3 化学的な方法および関連した合成法 . . . . . 614

34.2.4 アモルファス前駆体の失透 . . . . . 615

34.3 多結晶およびナノ結晶中の拡散 . . . . . 616

34.3.1 粒径と拡散様式 . . . . . 616

34.3.2 多結晶およびナノ結晶中の有効拡散係数 . . . . . 621

34.4 ナノ結晶金属中の拡散 . . . . . 623

34.4.1 総説 . . . . . 623

34.4.2 構造緩和と粒成長 . . . . . 624

34.4.3 バイモーダル結晶粒構造のナノ材料 . . . . . 624

34.4.4 粒界三重点 . . . . . 627

34.5 ナノ結晶セラミックス中の拡散およびイオン伝導 . . . . . 629

**訳者あとがき . . . . . 637**

付録1 アルミニウム中での各種元素の拡散データ . . . . . 640

付録2 銅中の各種元素の拡散データ . . . . . 645