

目 次

0. 真空科学・技術の歴史

0.1 真空と気体の科学	1	Langmuir) —	4
0.1.1 真空と大気圧	1	0.2.3 イオンポンプとゲッターポンプ	5
0.1.2 気体の状態方程式と分子の運動	2	0.2.4 クライオポンプ	5
0.1.3 導管内の分子の運動とコンダクタンス (M. Knudsen と M. von Smoluchowski)	3	0.3 圧力の測定	5
0.2 真空ポンプ	3	0.3.1 力学的測定	5
0.2.1 液柱ポンプの発明	3	0.3.2 気体の諸性質を利用する圧力測定	6
0.2.2 気体輸送式ポンプ——現代につながる真空技術の進歩 (W. Gaede と I.		0.3.3 電離真空計	6
		0.3.4 質量分析計	6
		0.4 真空科学・技術の現在と将来	7

1. 真空の基礎科学

1.1 希薄気体の分子運動	8	1.3.5 コンダクタンスの合成	45
1.1.1 気体の圧力	8	1.3.6 粘性流領域でのコンダクタンス	47
1.1.2 空 気	8	1.3.7 分子流領域でのコンダクタンス (1) ——円形断面の導管の場合——	53
1.1.3 気体の法則	10	1.3.8 分子流領域でのコンダクタンス (2) ——任意の断面形状を持つ導管 の場合——	57
1.1.4 気体の状態方程式	10	1.3.9 中間流領域でのコンダクタンス	66
1.1.5 物質の三態	11	1.4 気体と固体表面	70
1.1.6 気体の熱力学	12	1.4.1 真空科学の中の表面科学	70
1.1.7 気体分子の速度分布	13	1.4.2 気体分子と表面の相互作用: 吸着・散 乱・拡散・脱離	70
1.1.8 真空科学で用いられる種々の物理量の 統計平均	15	1.4.3 気体の吸着	71
1.1.9 平均自由行程	17	1.4.4 気体分子の散乱	85
1.1.10 入射頻度	20	1.4.5 気体の拡散	89
1.2 希薄気体の輸送現象	22	1.4.6 気体の熱脱離	91
1.2.1 粘性流と分子流	22	1.4.7 電子遷移誘起脱離	93
1.2.2 圧力が高い領域での輸送現象	23	1.4.8 気体の吸着と脱離	100
1.2.3 圧力が低い領域での輸送現象 (分子条 件下での輸送過程)	33	1.5 固体表面・内部からの気体放出	112
1.2.4 輸送現象における壁面の効果	35	1.5.1 気体の固体内部への溶解	112
1.3 希薄気体の流体力学	41	1.5.2 気体の固体内部での拡散と透過	113
1.3.1 希薄気体を特徴付ける量	41	1.6 関連資料	117
1.3.2 壁面における分子散乱	43	1.6.1 マクスウェル速度分布に関する計算	117
1.3.3 流 量	43		
1.3.4 コンダクタンス	44		

vi	目	次
1.6.2	拡散方程式	118
1.6.3	おもな気体の基本的な性質一覧	119
2. 真空用材料と構成部品		
2.1	真空容器材料	124
2.1.1	ステンレス鋼	124
2.1.2	アルミニウム合金	125
2.1.3	チタンおよびチタン合金	126
2.1.4	銅	126
2.2	真空用部品材料と表面処理	127
2.2.1	耐熱材料(ニッケル基合金)	127
2.2.2	高温および低温用材料	127
2.2.3	ガラス, セラミックス, グラファイト	127
2.2.4	プラスチック, エラストマー	128
2.2.5	表面処理技術	129
2.3	接合技術・材料	130
2.3.1	金属と金属の接合	131
2.3.2	金属とガラスの接合	133
2.3.3	金属とセラミックスの接合	134
2.3.4	接着剤	136
2.4	真空封止	140
2.4.1	エラストマーシールフランジ	141
2.4.2	メタルシールフランジ	150
2.4.3	メタルOリング	155
2.4.4	バルブ	158
2.4.5	真空バルブの構造	158
2.4.6	各種真空バルブ	159
2.5	真空用潤滑材料	163
2.5.1	真空中での摩擦	163
2.5.2	液体潤滑剤	164
2.5.3	固体潤滑剤	165
2.5.4	ガス放出	165
2.6	運動操作導入	166
2.6.1	真空中への運動の伝達	166
2.6.2	直線導入	168
2.6.3	回転導入	169
2.6.4	モーター駆動	172
2.7	電気信号導入	174
2.7.1	電流導入	175
2.7.2	熱電対, 光ファイバー導入	176
2.7.3	高電圧導入	178
2.7.4	高周波導入	178
2.8	洗浄	181
2.8.1	汚れの種類と洗浄法	181
2.8.2	機械的な除去	182
2.8.3	湿式洗浄	183
2.8.4	乾式洗浄	186
2.8.5	洗浄の評価方法	187
2.8.6	洗浄後の保管	188
2.8.7	総合的な洗浄方法の検討例	189
2.8.8	関連資料	191
2.9	ガス放出データ	195
2.9.1	熱脱離によるガス放出	195
2.9.2	ガス放出速度データの参考文献	217
2.9.3	透過と拡散	217
2.9.4	蒸気圧	220
2.9.5	ポンプからのガス放出	223
2.9.6	熱脱離以外のガス放出	225

3. 真空の作成

3.1	真空の作成手順	232
3.1.1	到達圧力と常用圧力	232
3.1.2	真空装置の構成	235
3.1.3	真空ポンプの選択	238
3.1.4	真空容器の設計	242
3.1.5	真空排気システム	248
3.1.6	リーク検査	256
3.2	真空ポンプ	261
3.2.1	真空ポンプの使用圧力範囲	261
3.2.2	油回転ポンプ	265
3.2.3	ルーツポンプ	270
3.2.4	ドライポンプ	274
3.2.5	拡散ポンプ	279
3.2.6	ターボ分子ポンプ	284

目	次	vii
3.2.7	クライオポンプ	292
3.2.8	ゲッターポンプ	300
3.2.9	スパッタイオンポンプ	308
3.2.10	ソープションポンプ	314
3.3	排気プロセス	318
3.3.1	排気の方程式	318
3.3.2	粘性流領域の排気	324
3.3.3	分子流領域の排気	325
3.4	排気速度とコンダクタンス	334
3.4.1	実効排気速度とコンダクタンス	334
3.4.2	粘性流領域のコンダクタンス	335
3.4.3	分子流領域のコンダクタンス	340
3.4.4	中間流領域のコンダクタンス	353
3.5	リーク検査	356
3.5.1	リークのメカニズム	358
3.5.2	リーク量の単位	361
3.5.3	許容リーク量	362
3.5.4	ヘリウムリークディテクターの原理と 校正	363
3.5.5	各種リーク検出方法	367
3.5.6	リーク検出の実際	369

4. 真空計測

4.1	全圧真空計	373
4.1.1	U字管真空計	373
4.1.2	マクラウド真空計	373
4.1.3	ブルドン管真空計	374
4.1.4	隔膜真空計	374
4.1.5	熱伝導真空計	377
4.1.6	粘性真空計	380
4.1.7	電離真空計	384
4.2	質量分析計, 分圧真空計	397
4.2.1	四極子形質量分析計	398
4.2.2	RGA の実際と問題点	401
4.2.3	磁場偏向型質量分析計	405
4.2.4	飛行時間型質量分析計	406
4.2.5	その他の質量分析計	407
4.3	流量計, 圧力制御	410
4.3.1	はじめに	410
4.3.2	マスフローコントローラー	410
4.3.3	形状の決まった孔を用いる方法	412
4.3.4	透過リーク	414
4.3.5	膜式流量計(せっけん膜流量計)	415
4.3.6	面積流量計(フロート流量計)	415
4.4	真空計測の誤差の要因と対策	416
4.4.1	気体の種類による感度の違い	417
4.4.2	真空系に起因する誤差	417
4.4.3	真空計に起因する誤差	418
4.5	真空計を用いた気体流量の計測 システム	420
4.5.1	はじめに	420
4.5.2	基礎	420
4.5.3	真空試験のための計測システム	420
4.5.4	昇温脱離分析法	423
4.5.5	ガス透過測定	425
4.6	校正と標準	428
4.6.1	はじめに	428
4.6.2	圧力真空標準	428
4.6.3	国際単位系(SI)	431
4.6.4	比較校正法	432
4.6.5	真空計測における不確かさとトレーサ ビリティについて	433

5. 真空システム

5.1	実験研究用超高真空装置	436
5.1.1	超高真空の基礎	436
5.1.2	超高真空用材料と超高真空装置構成部 品	439
5.1.3	実験用超高真空装置の製作	444
5.1.4	試料作製機構の具体例	450
5.1.5	超高真空実験の安全対策	451
5.2	大型真空装置	453
5.2.1	はじめに	453
5.2.2	粒子加速器	454
5.2.3	スペースチャンパー	466
5.2.4	核融合装置	475

0

1

2

3

4

5

6

索

5.2.5 重力波検出器	487	5.3.4 断熱を利用する	503
5.3 産業用各種生産装置	496	5.3.5 蒸発を利用する	506
5.3.1 概要	496	5.3.6 無酸素環境を利用する	509
5.3.2 真空の五つの性質	497	5.3.7 放電を利用する	511
5.3.3 差圧を利用する	497	5.3.8 応用最前線	518

6. 真空の応用

6.1 薄膜作製	525	6.2.3 微細加工プラズマプロセスの今後の展望	548
6.1.1 はじめに	525	6.3 表面分析	552
6.1.2 薄膜作製法の概要	525	6.3.1 真空中の試料表面	552
6.1.3 成膜の素過程	527	6.3.2 真空中の電子の飛行距離	553
6.1.4 実際の成膜例	533	6.3.3 電子と固体の相互作用を利用した表面分析	553
6.1.5 まとめ	538	6.3.4 X線と固体の相互作用を利用した表面分析	560
6.2 プラズマプロセス	539	6.3.5 イオンと固体の相互作用を利用した表面分析	566
6.2.1 低中真空領域でのプラズマプロセス	539		
6.2.2 低中真空領域プラズマを用いた超微細加工～プラズマエッチング	541		
索引	571		