

日本冷凍空調学会テキストシリーズ

冷凍空調技術者のための

冷媒圧縮機



公益社団法人 日本冷凍空調学会

目 次

第1章 まえがき	1
1.1 冷凍サイクル	1
1.1.1 冷凍とは	1
1.1.2 サイクルとは	1
1.1.3 蒸気圧縮式冷凍サイクル	1
1.2 圧縮機の役割	2
1.3 圧縮機の歴史（黎明期）	2
1.4 圧縮機の分類	3
第2章 基礎理論	6
2.1 圧縮理論	6
2.1.1 逆カルノーサイクル	6
2.1.2 P - h 線図	6
2.1.3 断熱圧縮	9
2.1.4 エネルギー式	11
2.1.5 漏れ	12
2.2 機械力学的解析	16
2.2.1 機構の運動	16
2.2.2 エネルギー式と機械効率	17
2.2.3 圧縮機本体の加振力と振動	17
2.3 潤滑理論	18
2.3.1 Reynolds の基礎方程式	18
2.3.2 平均流れモデルによる修正 Reynolds 方程式	19
2.3.3 接触理論	19
2.3.4 ジャーナル軸受	20
2.3.5 スラスト軸受	23
2.3.6 転がり軸受	25
2.4 圧縮機の効率	26
2.5 冷媒	28
2.5.1 冷媒の歴史	28
2.5.2 冷媒に必要な特性	28
2.5.3 冷媒の種類	29
2.5.4 冷媒の呼び方	29
2.5.5 主要な冷媒の比較	30
2.5.6 各種冷媒の用途	31
2.5.7 冷媒の安全性	31
2.5.8 安全対策	32
第3章 レシプロ圧縮機	34
3.1 レシプロ圧縮機の歴史	34
3.2 動作原理と特徴	34
3.2.1 圧縮動作	34

3.2.2	理論行程容積	36
3.3	圧縮機の構造	36
3.3.1	運動変換機構	36
3.3.2	懸架機構	37
3.3.3	給油機構	38
3.3.4	弁機構	39
3.3.5	ピストンリング	40
3.3.6	吐出マフラー	40
3.3.7	軸封機構	41
3.3.8	容量制御機構	43
3.4	機械力学的解析	43
3.4.1	機械力学的解析	43
3.4.2	エネルギー式と機械効率	45
3.4.3	圧縮機本体の加振力と振動	46
3.5	用途と性能	48
3.6	その他の機構	49
3.6.1	ボールジョイント式	49
3.6.2	2 シリンダ式	49
3.6.3	2 段圧縮	49
3.6.4	リニアモータ駆動	50
第4章	ロータリ圧縮機	51
4.1	ロータリ圧縮機の歴史	51
4.2	動作原理と特徴	52
4.2.1	圧縮動作	52
4.2.2	理論容積	53
4.3	圧縮機各部の構造と設計	53
4.3.1	基本構造	53
4.3.2	クランク軸	54
4.3.3	軸受	54
4.3.4	ローリングピストン	55
4.3.5	ベーン	55
4.3.6	シリンダ	56
4.3.7	吐出弁	56
4.4	機械力学的解析	57
4.4.1	機構とその動き	57
4.4.2	機構の拘束力と運動方程式	57
4.4.3	エネルギー式と機械効率	60
4.4.4	圧縮機本体の加振力と振動	60
4.5	用途と性能	61
4.5.1	高温用ロータリ圧縮機	61
4.5.2	低温用ロータリ圧縮機	64
4.5.3	中温用ロータリ圧縮機	65
4.6	その他の機構	66
4.6.1	2 シリンダ型	66

4.6.2	スイング圧縮機	67
4.6.3	液インジェクション	68
4.6.4	容量制御	69
4.6.5	2段圧縮機	71
4.6.6	中間圧シェルを持つ2段圧縮機	72
4.7	給油と油分離	72
4.7.1	縦型ロータリの給油機構	72
4.7.2	横置きロータリの給油機構	73
4.7.3	ロータリ圧縮機の油分離	74
4.8	ロータリ圧縮機の騒音と振動	75
4.8.1	加振力と振動低減方法	75
4.8.2	トルク制御による振動低減	76
4.8.3	ロータリ圧縮機の騒音	77
4.9	ロータリ圧縮機の生産技術	79
4.9.1	高精度加工技術	79
4.9.2	高精度組立て技術	79
第5章	スクロール圧縮機	83
5.1	スクロール圧縮機の歴史	83
5.2	動作原理と特徴	83
5.2.1	動作原理	83
5.2.2	スクロールラップの形状	84
5.2.3	その他のスクロール形状	86
5.3	圧縮機各部の構造と設計	87
5.3.1	圧縮機構	87
5.3.2	駆動機構に作用する荷重とモーメント	88
5.3.3	気密機構	89
5.3.4	圧縮機の構造	90
5.4	機械力学的解析	91
5.4.1	作用する力と運動方程式	91
5.4.2	エネルギー式と機械効率	93
5.5	その他の機構	94
5.5.1	容量制御	94
5.5.2	インジェクション	94
5.6	用途と特性	94
5.7	スクロール圧縮機の実産技術	96
5.7.1	スクロール加工法	96
5.7.2	形状精度管理	96
5.8	選定・使用上の注意	96
第6章	ツインスクリュー圧縮機	99
6.1	ツインスクリュー圧縮機の歴史	99
6.2	作動原理と基本構造	100
6.2.1	作動原理	100
6.2.2	基本構造	101

6.2.3	無給油式と油噴射式	102
6.2.4	半密閉型と開放型	103
6.3	ロータ歯形	104
6.3.1	ロータ歯形の基礎と変遷	104
6.3.2	歯形修整	105
6.3.3	ロータ歯数	106
6.3.4	つる巻き角	106
6.3.5	L/D_m と心間距離	107
6.3.6	シール線と内部漏れ通路	107
6.3.7	行程容積	109
6.4	圧縮機各部の構造と設計	109
6.4.1	スクリーロータ	109
6.4.2	ロータケーシング	109
6.4.3	インレットハウジング	110
6.4.4	アウトレットハウジング	110
6.4.5	吸入ポート	110
6.4.6	吐出ポート	110
6.4.7	その他のポート	111
6.4.8	軸受	111
6.4.9	軸封装置	113
6.4.10	給油機構	115
6.4.11	容量制御機構	117
6.4.12	バランスピストン	120
6.5	機械力学的解析	120
6.5.1	機構の運動と拘束力および運動方程式	120
6.5.2	エネルギー式と機械効率	122
6.5.3	圧縮機本体の加振力と振動	122
6.5.4	曲げとねじりの危険速度	123
6.6	特性と用途	124
6.6.1	性能特性	124
6.6.2	容量 - 圧力レンジ	128
6.6.3	単段圧縮と多段圧縮	128
6.6.4	主な用途	129
6.7	振動と騒音	130
6.7.1	振動特性	130
6.7.2	騒音特性	133
6.8	生産技術	134
6.8.1	スクリーロータの加工方法	134
6.8.2	スクリーロータの加工精度管理	137
第7章	シングルスクリー圧縮機	140
7.1	シングルスクリー圧縮機の歴史	140
7.2	基本機構と作動原理	140
7.2.1	圧縮機構	140
7.2.2	作動原理	140

7.2.3	シングルスクリュウ圧縮機の基本構造	141
7.2.4	半密閉型と開放型	143
7.3	圧縮機各部の構造と設計	143
7.3.1	シャフト	143
7.3.2	スクリュウロータ	143
7.3.3	ゲートロータ	144
7.3.4	吐出ポート	144
7.3.5	軸受	144
7.3.6	軸封装置	144
7.3.7	ケーシング	144
7.3.8	容量制御機構	145
7.3.9	油分離器	146
7.4	ロータ歯形	146
7.4.1	ロータ歯形	146
7.4.2	ロータ歯数	147
7.4.3	シングルスクリュウ圧縮機の理論容積	147
7.4.4	新型スクリュウ歯形	148
7.5	性能および騒音	149
7.5.1	効率特性	149
7.5.2	騒音特性	150
7.6	その他の機構	150
7.6.1	油噴射冷却方式	150
7.6.2	液冷媒噴射冷却方式	150
7.6.3	エコノマイザサイクル	150
第8章	カーエアコン用圧縮機	152
8.1	カーエアコンの歴史	152
8.2	カーエアコンシステム	153
8.2.1	カーエアコンシステムの特徴	153
8.2.2	カーエアコン用圧縮機の種類	155
8.2.3	動力伝達機構	155
8.3	アキシシャル式圧縮機	156
8.3.1	揺動板式圧縮機	156
8.3.2	斜板式圧縮機	160
8.3.3	可変容量型圧縮機	163
8.3.4	アキシシャル式圧縮機の振動と騒音	171
8.4	スクロール圧縮機	173
8.4.1	スクロール圧縮機の歴史	173
8.4.2	カーエアコン用スクロール圧縮機の構造と特徴	173
8.4.4	スラスト軸受構造	175
8.4.5	容量制御機構	176
8.4.6	トルク変動とベルト寿命	177
8.5	ロータリベーン圧縮機	177
8.5.1	動作原理	177
8.5.2	理論容積	178

8.5.3	基本構造	179
8.5.4	機械力学的解析	181
第9章	冷凍機油	187
9.1	冷凍機油の種類	187
9.1.1	鉱油系冷凍機油	187
9.1.2	A B系冷凍機油	188
9.1.3	P A G系冷凍機油	188
9.1.4	P V E系冷凍機油	189
9.1.5	P O E系冷凍機油	189
9.2	冷媒との相互作用	190
9.2.1	相溶性	190
9.2.2	溶解性	191
9.2.3	電気絶縁性	192
9.2.4	潤滑性	194
9.2.5	安定性	197
9.2.6	有機材料適合性	198
9.3	冷凍機油の選定方法と使用上の注意事項	199
9.3.1	冷凍機油の選定方法	199
9.3.2	冷凍機油の使用上の注意事項	199
第10章	モータ・インバータ	203
10.1	モータ構造と性能	203
10.1.1	駆動電源波形によるモータの分類	203
10.1.2	モータの構成と各部品	206
10.1.3	モータの製作方法	208
10.1.4	新しいステータ製作方法	210
10.2	モータの設計	211
10.2.1	誘導モータの原理	211
10.2.2	永久磁石同期モータの原理	212
10.2.3	モータの設計仕様（要求仕様，出力 - トルク）	213
10.3	モータ材料と評価方法	215
10.3.1	マグネットワイヤ	215
10.3.2	ワニス	217
10.3.3	絶縁紙	218
10.3.4	けい素銅板	219
10.3.5	永久磁石	221
10.4	インバータの構成と制御	223
10.4.1	インバータの分類と特徴	223
10.4.2	インバータの構成と部品	224
10.4.3	電圧型インバータの原理	228
10.4.4	モータ制御の原理	230
10.5	電気特性計測（インバータ駆動前提）	233
10.5.1	損失の分類と計測方法	233
10.5.2	騒音の分類と計測方法	234

10.6 規格・規制	235
10.6.1 主要国の電源電圧と規格・規制一覧	235
第11章 試験	238
11.1 性能試験	238
11.1.1 主な測定項目	238
11.1.2 試験方法	238
11.2 騒音試験	240
11.2.1 測定条件・装置	240
11.2.2 測定方法	242
11.3 振動試験	242
11.3.1 測定条件・装置	242
11.3.2 測定方法	243
11.4 信頼性試験	244
11.4.1 信頼性試験の種類	244
11.4.2 信頼性試験の実施	244
11.4.3 信頼性データの解析	244
11.4.4 信頼性評価	245
11.5 圧力試験	245
11.5.1 耐圧試験	245
11.5.2 強度試験	245
11.5.3 気密試験	245
11.6 その他の試験	245
第12章 計測技術	247
12.1 基礎的物理量計測	247
12.1.1 温度計測	247
12.1.2 熱電対および測温抵抗体	248
12.1.3 圧力	249
12.1.4 流量	251
12.2 応用計測	253
第13章 あとがき	258

第1章 まえがき

1.1 冷凍サイクル

1.1.1 冷凍とは

冷凍とは、文字通り物体を冷やして凍らせることはもちろん、一般的にはもう少し広い範囲を含めて、大気や水など自然界に存在する物質の温度（環境温度）以下に物体を冷却することを示す。熱は高い温度の物体から低い温度の物体に移動するため、環境温度以下に物体を冷却したり、その温度に維持したりするためには、何らかの装置とエネルギーが必要となる。一方、高温の物体を環境温度まで冷やす場合には特別な装置やエネルギーは必要なく、冷凍とはいわず、冷却といって区別している¹⁾。また、冷凍のために物体から取り除かれた熱は、その他の物体や物質（大気や冷却水など）に捨てられることとなり、その部分では加熱が行われている。したがって、冷凍と加熱は同じ熱の移動プロセスの結果であり、その同じプロセスを冷凍と呼ぶか加熱と呼ぶかは、どちらの効果が主目的なのかによっている²⁾。

生活の中において冷凍は、住宅・ビル・車輛における冷暖房、除湿や乾燥、食品の加工・流通・貯蔵、各種工業プロセス、医療等、様々な分野で使用されており、まさに我々の生活に無くてはならない技術である。

1.1.2 サイクルとは

物質はその温度、圧力によりその状態が変化する。冷凍サイクルの中で使用される冷媒（2.5節参照）と呼ばれる作動物質も、その温度、圧力により状態が変化する。その物質の状態を表す物理量を状態量と呼ぶ。状態量には、圧力、温度、密度、内部エネルギー、エントロピー、エンタルピーなどがあり、冷凍をするために熱を移動させると、その状態量が変化する。ここで、状態量はその場の状態だけで決まるものであり、そこに至る経路には依存しない。したがって、仕事や熱量は経路に依存するため、状態量ではない。熱が移動することによって変化した状態

量も、他のプロセスを経過することにより元の状態量に戻ることができる。このように、最初の状態と最後の状態が同じとなるような一連のプロセスを、サイクルとよぶ。最初の状態と最後の状態が同じであるため、この一連のプロセス（＝サイクル）は連続的に繰り返すことが可能となる。

1.1.3 蒸気圧縮式冷凍サイクル

図 1.1 に、基本的な蒸気圧縮式冷凍サイクルの構成を示す。蒸気圧縮式冷凍サイクルは、圧縮機、凝縮器、膨張弁、蒸発器から構成される。凝縮器を出た液冷媒は膨張弁で減圧し、冷媒の一部が蒸発する際の気化熱により、冷媒自身の温度が蒸発器の圧力に相当する飽和温度まで低下する。蒸発器では液体の冷媒が外部から熱を吸収し、冷媒は蒸発して気体となる。気体となった冷媒は圧縮機に吸い込まれて圧縮され、高圧、高温の気体冷媒となる。圧縮機を出た高圧、高温の気体冷媒は、凝縮器において外部に放熱し、凝縮してもとの液冷媒に戻り、再び膨張弁

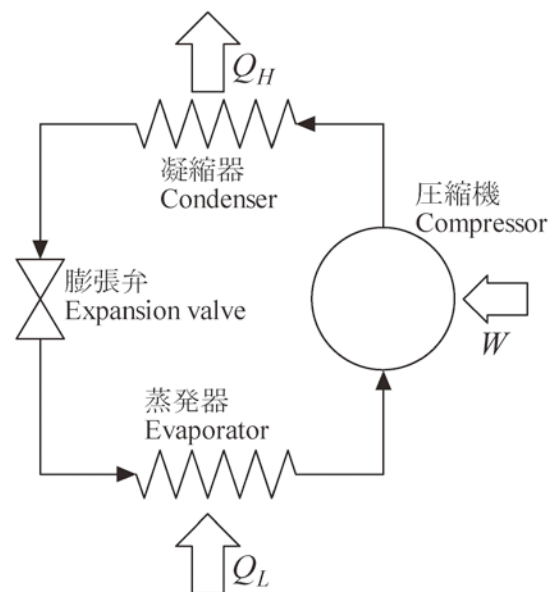


図 1.1 蒸気圧縮式冷凍サイクル

に入っていく。こうして冷媒は繰り返し使用することができ、連続的にものや空間を冷却することができる。また、凝縮器で放熱される熱を利用すれば、暖房や加熱をすることができ、この場合、冷凍サイクルは蒸発器で低い温度の熱を吸収し、凝縮器で高い温度の熱を放出することから、「熱を低いレベルから高いレベルに汲み上げる」という意味で、ヒートポンプとも呼ばれる。蒸気圧縮式冷凍サイクルは相変化にともなう潜熱を利用するため効率がよく、冷蔵庫やエアコンに広く用いられている。

1.2 圧縮機の役割

冷媒には、蒸発や凝縮する温度とその圧力の間に一定の関係があり、その温度と圧力をそれぞれ飽和温度と飽和圧力という。ある圧力において、その圧力に対応した飽和温度より高い温度の熱源から熱を与えれば冷媒は蒸発し、逆に飽和温度より低い温度の熱源に熱を放出すれば冷媒は凝縮する。したがって、図 1.1 に示す冷凍サイクルにおいて冷媒ガスを凝縮器で液体に戻すためには、凝縮器の圧力に対応した飽和温度以下の放熱源を用いて冷媒ガスを冷やせばよい。冷媒の飽和温度は圧力が高くなるほど高くなるため、冷媒の圧力を上げて飽和温度を我々の身の回りの空気や水の温度より高くすれば、空気や水によって冷媒を冷やして凝縮させることができる。例えば家庭用冷蔵庫で使用されるイソブタンは、その圧力を 0.53 MPa(abs.) まであげると、飽和温度は 40℃ となり、室内空気

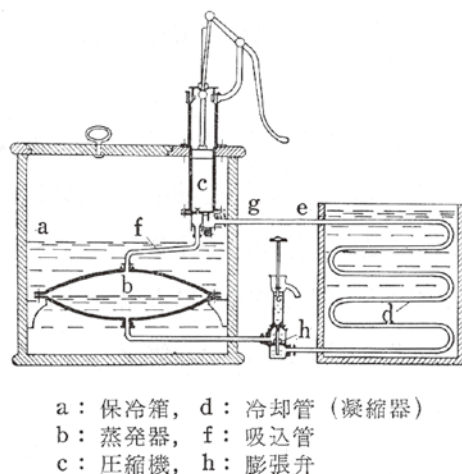


図 1.2 パーキンスのエーテル冷凍機³⁾

に放熱することによって冷媒が凝縮する。このように、冷媒ガスの飽和温度を利用可能な熱源の温度以上に上げて放熱・凝縮させるためには、冷媒の圧力を上げる必要があり、圧縮機は圧縮によって冷媒の圧力と温度を上げるために使用される。また、蒸発器では蒸発器で発生した冷媒ガスが圧縮機に吸い込まれることによって、蒸発器内の圧力が冷媒の蒸発温度に対応した飽和圧力に保たれている。蒸発器内の圧力は膨張弁から入ってくる冷媒流量と外部から入ってくる熱量 (冷凍負荷) による冷媒の蒸発量、および圧縮機に吸い込まれる流量によって変化するため、圧縮機は蒸発器の圧力 (すなわち蒸発温度) を必要なレベルに保つためにも使用されていることとなる。

1.3 圧縮機の歴史 * (黎明期)

蒸気圧縮式冷凍機は、1834 年に英国のヤコブ・パーキンス (Jacob Perkins) が図 1.2 に示すエチルエーテルを冷媒としたサイクル³⁾の特許を取得したのが始まりである。その後、米国のローウェ (Lowe) が 1866 年に炭酸ガス圧

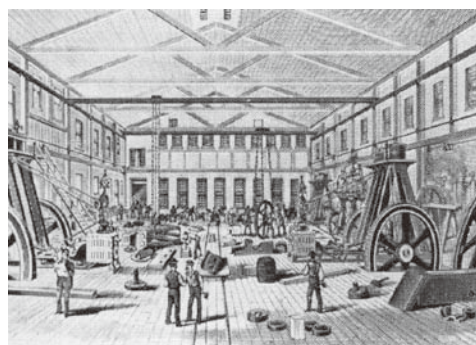


図 1.3 1876 年頃の圧縮機工場⁶⁾

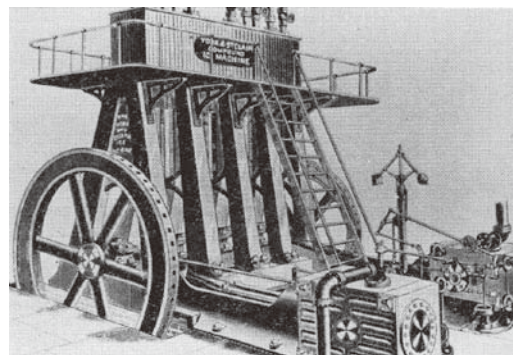


図 1.4 縦型アンモニア圧縮機⁶⁾

* 年号は文献により 1,2 年前後している場合がある

縮機を初めて製作し、1886年にドイツのウィンドハウゼン（Windhausen）が実用化に成功した^{4,5)}。1873年には米国のデービット・ボイル（David Boyle）がアンモニア圧縮機を開発し、続いて1874年にスイスのラウル・ピクテ（Raoul Pictet）が亜硫酸ガス圧縮機の製造に成功した。図1.3は1876年頃の圧縮機工場の様子⁶⁾を示しているが、人間の大きさと比べると、当時の圧縮機が非常に大きいものであったことが分かる。図1.4は1870年代の縦型の多気筒往復型アンモニア圧縮機⁶⁾であり、大きな蒸気エンジンによってエンジンと共通のクランク軸を用いて駆動され、回転数は120～180 rpmであった。これらの圧縮機ではクロスヘッドが用いられ、ピストンロッドはピストンに固定されていた。1900年頃には電気モータによりベルト駆動される圧縮機が登場し、また、図1.5に示すような吐出し側と吸込み側の配管をつなぐ手動のバイパス弁により、蒸発器における冷凍負荷に合わせて冷凍能力を減少させる圧縮機⁶⁾も現れた。1900年から1925年ごろにかけて、圧縮機は小型になり、回転数も300～600 rpmとなった。また、冷媒のシールもピストンロッドから回転軸へと移っていき、電気モータによる駆動も一般的となった。図1.6に1920年代の圧縮機工場の様子⁶⁾を示す。当時使用されていた冷媒は、アンモニア、二酸化硫黄、二酸化炭素であり、イソブタンやプロパンなども用いられていた⁶⁾が、高圧力と有毒性や可燃性のために淘

汰され、1920年ころには大型の冷凍装置にはアンモニアが主に使用されるようになった⁴⁾。その後、1930年にフロンが開発され使用されるようになった⁴⁾。

次節に示すように、圧縮機の形式にはレシプロ圧縮機以外にも様々な形式の圧縮機が開発され、使用されている。レシプロ圧縮機以外では、ロータリベーン圧縮機が1920代から、スクリー圧縮機が1930年代から、ローリングピストン圧縮機が1960年代から、スクロール圧縮機が1980年代からそれぞれ実用化されているが、それぞれの圧縮機の歴史に関しては、各章にて解説する。

1.4 圧縮機の分類

蒸気圧縮式冷凍機に用いられる圧縮機は、その圧縮原理から容積式と速度式に分けられる。容積式は吸い込んだ冷媒ガスを締め切られた空間内に入れ、その体積を幾何学的に押し縮めることにより冷媒の圧力を増加させる。一方速度式はターボ式とも呼ばれ、冷媒圧縮機には遠心式圧縮機が用いられる。遠心式圧縮機では羽根車内の遠心作用により圧力を上げるとともに、回転する羽根車により冷媒ガスを加速し、羽根車出口のディフューザ内で運動エネルギーを圧力に変換することで圧縮を行う。

容積式は大きく往復式と回転式に分けられ、次のように様々な形式がある。

- (1) レシプロ（往復）式
 - ピストン・クランク式
 - ピストン・スコッチヨーク式

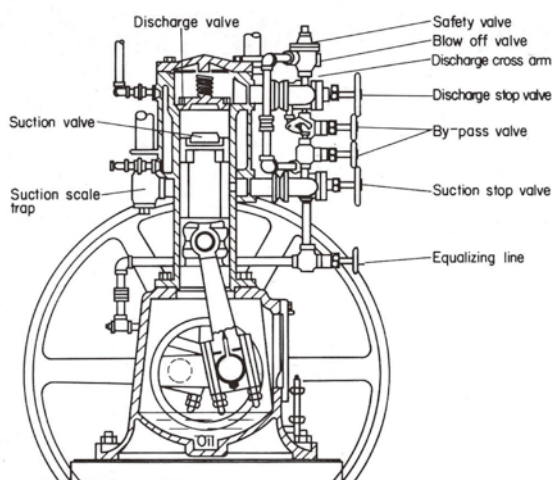


図1.5 手動バイパス式容量制御⁶⁾



図1.6 1920年代の圧縮機工場⁶⁾

ピストン・斜板式
フリーピストン式（リニア式）

(2) 回転式

ロータリベーン式
ローリングピストン式（ロータリ圧縮機）
スクロール式
スクリュー式

表 1.1 に、主な圧縮機の分類とその用途を示す⁷⁾。

また、圧縮機は圧縮機構部を収納した容器（ケーシング）のシールの方式によって、開放型と密閉型、半密閉型に分けられる。開放型は駆動軸がケーシングを貫通し、外部のモータやエンジンにより駆動される。軸がケーシングを貫通する部分は、メカニカルシールやリップシールによりシールされる。カーエアコンのように外部に利用できる動力がある場合や、モータの銅線がアンモニア冷媒によって冒されてしまう場合のほか、大型産業用冷凍機等に用いられる。一方、密閉型や半密閉型は、圧縮機ケーシング内に電動機を収容したものであり、密閉型はケーシングが溶接により密閉されているのに対し、半密閉型はケーシングの一部がボルトにより締結されており、ボルトを外すことによって開放することができる。家庭用の冷蔵庫やエアコン用の圧縮機はすべて密閉型圧縮機となっている。

以下、本書では容積式圧縮機について扱うこととする。

参考文献

- 1) 手塚俊一：「冷凍機」, p.1, 共立出版, 東京 (1983).
- 2) Roy J. Dossat: "PRINCIPLE OF REFRIGERATION", p.97, John Wiley & Sons, Inc., USA(1981).
- 3) 長岡順吉：「冷凍工学」, p.2, コロナ社, 東京 (1976).
- 4) 日本冷凍空調学会編, 「日本冷凍史」, 日本冷凍空調学会, 東京 (1998).
- 5) 東條健司：「冷凍空調用圧縮機の変遷」, 2005 年度冷空講論, C318-1-4, 東京 (2005).
- 6) A.B.Newton: "The refrigeration compressor—the steps to maturity", Int. J. of Refrigeration, 4(5), pp.246-254 (1981).

- 7) 日本冷凍空調学会編, 「冷凍空調技術」, p.32, 日本冷凍空調学会, 東京 (2008) を一部修正.