クライオクーラ研究の思い出

松原 洋一^{*1,†}

Memories of Cryocooler Research

Yoichi MATSUBARA^{*1,†}

1. はじめに

出版委員会の依頼により随想欄の執筆をお受けすることになった。具体的なテーマは指定されなかったので、筆者の 40 数年にわたる研究生活のほとんどを占めているクライオクーラ研究の変遷を、お世話になった方々との思い出を交えて述べさせていただくことにした。

極低温冷凍機がクライオクーラ (Cryocooler) と呼ばれるようになってから既に 30 数年になる (筆者の記憶では National Bureau of Standards (NBS), 現在の National Institute of Standards and Technology (NIST) で開催された第 3 回の小型冷凍機の会議から使用されるようになった) が、それ以前は液体ヘリウム製造を主目的とする大型ヘリウム液化冷凍機に対応して、主にセンサー冷却を目的とする可搬型の極低温冷凍機を“小型冷凍機”と呼んでいた。現在では大型の冷凍機もクライオクーラに含まれるという解釈もあるが、ここでは、小型冷凍機全般をクライオクーラと呼ぶことにする。

2. 1970 年代以前のクライオクーラ研究

筆者がクライオクーラ研究を始めたのは、1966 年の Cryogenic Engineering Conference の論文に出会ってからである。当時私の所属していた東京大学原子力工学科の大島恵一教授がアメリカでの会議に出席して持ち帰ってきたパルス管冷凍機に関する論文である。日本では同年に低温工学協会が発足しており、早速追試をして、その結果を翌年 1967 年の第 1 回低温工学研究発表会に“パルス管冷凍機の試作”と題して報告した。発明者の Gifford らの得た最低到達温度は 125 K であったのに対し、我々の結果は 144 K

止まりとなった¹⁾。

理由として蓄冷器性能の関与が考えられたので、その影響を無視できる方法として、断熱空間に置かれたパルス管の低温端を液体窒素で冷却し、閉端部分の温度上昇を測定してみた。その結果は、両端の温度比が最大でも 0.25 にとどまった。したがって理想的な蓄冷器をもってしても室温から液体窒素温度までが限界で、効率を上げることも困難と思われたので、その後パルス管冷凍機の研究は据え置かれた。

そこで、興味の対象が、同じ蓄冷器を用いた GM 冷凍機の研究に向けられた。GM 冷凍機は 1960 年頃に Gifford と McMahon によって発明された低周波で動作する代表的なクライオクーラで、Solvay サイクルの膨張エンジンをディスプレイサと称する無仕事ピストンに置き換えた方式である。しかし、発明者の特許によって日本で同等の構造の冷凍機を開発することは不可能であった。そこで、元となっている Solvay サイクルの膨張エンジンを気体圧制御方式に変更したものを提案し、Modified Solvay cycle という名称で国産化への方向を大阪酸素工業(株) (現：日本エア・リキード(株)) との共同研究で模索した。

1970 年には Fig. 1 のモデルが完成し、その結果を第 6 回低温工学研究発表会に報告した²⁾。その後、筆者は実用化を目指して東大から大阪酸素工業に移籍し、いくつかの改善を経て国産初の GM 型クライオクーラ (商品名：クライオミニ) が完成した。大学では石崎義弘先生 (Fig. 2) に直積的な指導を賜り、その後も長期にわたり公私ともにお世話になっており、会社では、柳井正誼、川口悦治、久保喬志、大嶋勲夫、他の諸氏の世話になった。特に川口さんには具体的な設計から製作まで全てを理想的に実施していただき、その経過は同発表会 7~11 回 (1971~1973 年) に逐一報告されている。

一方、その当時海外では Stirling cycle (当時はエンジンの Stirling cycle に対して冷凍機の Kirk cycle とも呼ばれていた) に基づく冷凍機がオランダの Philips 社から発売さ

Received July 10, 2018

^{*1} 〒295-0022 千葉県南房総市千倉町忽戸 763-1
763-1 Kotto, Chikura, Minamiboso, Chiba 295-0022, Japan

[†] E-mail:yoichi@bc4.so-net.ne.jp

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

DOI: 10.2221/jcsj.53.366

Fig. 1 Modified Solvay cycle Cryocooler (1970). ($T_{\min}=27$ K, $Q=32$ watt@78 K, Pneumatic controller part of this figure has been simplified for the commercial model)

Fig. 2 Dr. Ishizaki (left) and author (right) (1974).

れており、空気液化機等に実用的に提供されていた。カルノー効率の観点から GM、Solvey cycle より優れているが、油潤滑クランク機構で駆動されていたため、定期メンテナンスが必須であったり、防振のための巨大なコンクリートブロックが必要であったりした。そこで、当時日本で販売されていた澤藤電機製の車載用フロン冷蔵庫に使用されていた圧縮機の原理をヘリウム用圧縮機に転用することを検討した。それはスウィングモーターと称する共振型のリニアモーターによる圧縮機で、クランク機構を必要としないのでオイルフリー化が可能と考えられた。幾つかの試作試験を経て、Stirling サイクルによるスプリット型のクライオクーラを開発し、同発表会第 11 回及び 5th ICEC (1974 年, Kyoto) に報告した³⁾。

Fig. 3 Modified Kirk cycle Cryocooler (1974). Left: Compressor unit, Right: Expander unit. (Cooling capacity =5.3 W at 78 K, Input power =297.6 W, Power factor = 0.98, PVwork at compression space =167.2 W)

ディスプレイサの駆動には Modified Solvay の経験に基づいた気体圧制御機構を使用した。**Fig. 3** にその概要を示す。当時は強力な永久磁石が入手できなく、異方性 HK 鋼 (アルニコ系) 磁石を 19 本並列にして磁場空間 0.7 Tesla を実現させた。

実験結果に基づいたエキセルギー解析の結果は、蓄冷器でのエンタルピー損失を減少させることが、最重要課題と考えられた。しかし、継続的な研究開発は、時期尚早ということで残念ながら中断された。

3. 液体ヘリウム温度の GM 型クライオクーラ

その後、筆者は日大の安河内昂先生のご厚意で日大に移籍し、習志野校舎で超電導磁石の強制循環冷却に関するプロジェクト研究を開始した。その一環として 3 段膨張機 + JT による Claude cycle 冷凍機の開発を行い、高圧側 1 MPa 以下で 4.5 K 8 watt の冷凍能力が得られた (1979 年～)。しかし構成要素が多いため高い信頼性が得られず、より単純な構成によるシステム開発が必要とされた。そこで基礎的なクライオクーラの研究を再開するようになった (1981 年～)。最初の研究課題は、1980 年に NASA Goddard Space Center で開催され First Biennial Conference on Refrigeration for Cryogenic Sensors and Electronic Systems の会議録に報告されていた J.E. Zimmerman (NBS) による Gap Regenerator の論文に触発されて開始した。彼らの方式は、G10 によるピストンシリンダーでスターリングサイクルを形成するもので、4 段膨張方式で 8 K 台を達成していた⁴⁾。

そこで我々は **Fig. 4** に示すように、SUS304 シリンダー内にバークライトピストンをルーズに挿入し、その隙間を Gap Regenerator とする GM サイクルを構成させ、これまで到達し得なかった 4 K 台が達成できるようになった⁵⁾。実験ではバークライトの表面に鉛粒をエポキシでコーティングして 4 K 付近での比熱の減少に対応させた。

この一連の実験には当時大学院生だった金子充弘さん (現：(株)ジェック東理社) が加わり、以後(株)鈴木商館

Fig. 4 Single stage Gap regenerator GM cooler precooled by another GM cooler.

からの研究員として十数年研究を共にしており、実験装置の設計製作はほとんど彼の手によるものである。その他、同時期の日大出身者では増山新二さん（現：大島商船高等専門学校）、谷田広士さん（現：鈴木商館）らが活躍している。

次の目標として、液体窒素で液体ヘリウムを作ろうという計画で、Vuilleumier サイクルによるクライオクーラの実験を開始した。結果は 4 K に達することはなく、**Fig. 5** の右図（液体窒素温度以下に 3 段の gap regenerator/expander を配した）の条件で 6.5 K 止まりであった。2 段の VM クーラーで予冷した単段の VM 方式（同図中央）でも 6 K 止まりであった⁶⁾が、GM クーラーの予冷方式（同図左）では VM サイクルで 4.5 K を達成した⁷⁾。

一方、機械的圧縮機を熱的圧縮機に置き換える方式には、水素吸蔵合金を用いる方法があり、gap regenerator との組み合わせを試みた（1987 年）。**Fig. 6** はその一例で、30 本の capillary tube に 7 g の LaNi₅ を挿入し、90℃と 20℃の流水に 30 rpm で晒すことにより、水素ガス圧縮比 8.2、

Fig. 5 Different type VM coolers with gap regenerator.

Fig. 6 Hydride Adsorption system with Gap regenerator cooler.

圧力差 1.5 MPa を達成し、実験では最低到達温度 95 K を得た⁸⁾。この結果はディスプレイサ駆動方法などの改善やパルスチューブとの組み合わせ等を試みれば 30 K 以上のクライオクーラとして成立することを示唆している。しかし、当時は LaNi₅ の粉砕化が性能の劣化をもたらし、長寿命の冷凍機にはなりえないと判断し、この実験も中断した。

4. GM 型パルス管冷凍機

1984 年に Mikulin (Moscow High Technical School) が、空気によるパルス管冷凍機の実験で、パルス管の温端部付近に流路抵抗を挿入することにより低温端温度が著しく低下することを見出した。その結果に注目した Radebaugh (NIST) はヘリウムによる実験で 60 K 台までの低温の得られることを実証した。我々も追試を始めたが、オリフィスに代わるものとして積極的に仕事を吸収する要素を挿入した場合の効果を見る目的で小型のピストン (Moving plug) を設け、其の摺動抵抗を変化させることにより、オリフィスより更に低温が得られるようになり、その後、同様な効果を発揮する幾つかの方法 (**Fig. 7**) が提案され、40 K 台までの冷却が可能となった⁹⁾。

Fig. 7 Three generations of pulse tube coolers.

Fig. 7 の世代分類はパルス管冷凍機の温端部での圧力と気体の変位との位相に注目して、富永昭先生（筑波大学）が提案した。当時、信貴豊一郎先生の発案により富永さんを中心にして、熱音響理論に関する小規模な研究会が設けられ、パルス管冷凍機の理解を格段に進めることができた。

この時期のクライオクーラに関するもう一つの重要な出来事は、1989 年に日本（岡山）で開催された Joint Seminar on Japan and Sino (JSJS) であろう。これは日本側が信貴先生、中国側が Prof. Yuan Zhou が中心となって 1983 年に Promotion of Research in Low Temperature を目的として開始された会議で、Josephson effect physics and applications というタイトルで第 1 回が中国（Beijing）、第 2 回が日本（仙台）で開催された。その後を引き継ぐ形で岡山での会議を第 3 回としてクライオクーラをテーマとし、Beijing (1993 年)、大阪 (1997 年)、Lanzhou (2000 年) と都合 4 回実施された。なお、中国での開催時には JSJS を Joint Sino-Japanese Seminars for Cryocooler and its Applications の略称とした。

岡山での会議に出席した中国側の参加者から Fig. 8 の 3 名が日大の研究室を訪問し、研究生の受け入れを依頼された。その時対象になったのが西安交通大学のポストだった Dr. Zhu Shaowei (現 Prof. of Tongi Univ.) であったが、当時の中国側の情勢からビザ等の関係で受け入れはかなわなかった。しかしその直後に浙江大学の Prof. Chen Guoban の紹介で Dr. Gao Ginlin (現 Prof. of Xian Jiaotong Univ.) が鈴木商館の援助もあって受け入れに成功した (1992 年)。その後 Zhu さんも当時ほくさんにおられた垣見康浩さん、藤岡耕治さん (現：クライオウエア) らの援助により受け入れられるようになり、その後 4 年ほど研究を共にしている。彼の開発したイナータンス効果を含むパルス管冷凍機及びその蓄冷器特性シミュレーションプログラムは、諸現象の理解に非常に効果的であった。

Fig. 8 First visitors to our laboratory from China. From right; Prof. Wu PeiYi (Xian Jiaotong Univ.), Prof. Zhang Liang (Chinese Academy of Science), Prof. Bian Shaoxiong (Xian Jiaotong Univ.) and Author.

Single stage PT + GM (1993)

$T_{min}=2.5K$, $50mW@4.2K$
 $W_{in}=472watts$,

3-staged PT (1994)

$T_{min}=2.75K$, $40mW@4.4K$

Fig. 9 First model of pulse tube cryocooler for liquid Helium temperature (precooled by GMcooler (left) and 3staged pulse tube cooler (right))

Chen 先生とはその後共同研究を実施し、浙江大学への数回にわたる訪問を含め大変お世話になった。

GM 型パルス管冷凍機の位相制御機構としては、1990 年に Zhu さんによって提案された Double inlet 方式がパルス管冷凍機の普及を著しく進展させたが、彼は更に効率の良い Active buffer 方式を提案しパルス管冷凍機の大容量化を可能にした (1996 年)。

一方、さらに低温を目指すためにパルス管の多段化が試みられたが、初期の段階では、下段のパルス管温端は上段パルス管の低温端で冷却する方法がとられていた。しかし我々の実験では予冷なしのパルス管で室温から 4 K 台までの温度勾配を保つことに成功した (Fig. 9)。その結果、複数のパルス管すべての温端を室温におく方式が定着した。この一連の実験過程で興味ある現象として、低温端が 4 K 台になるとパルス管を通過する仕事流が途中で零になる、つまり仕事流の向きが反転し、パルス管両端から流入する場合があることが判明した。これは第 2 世代以後のパルス管であっても管壁との熱伝達効果は無視できず、特に 4 K 冷凍機のような大きな温度勾配を必要とする場合には、位相制御系に対するある種の示唆を与えていると考えられた。この一連の実験には、上海交通大学から国費留学生として、Zhou Shuliang さん (現：アイシン精機(株)) が参加し、彼の日大でのドクター論文にもなった¹⁰⁾。

5. Stirling 型パルス管冷凍機と熱音響発振器

1974 年に我々が開発した Stirling 冷凍機のリニアコンプレッサーピストンは表面をタフラム処理してコイルスプリングによる側応力を低減させる方式であったため摩耗による寿命は避けられなかった。しかし、1986 に Oxford 大学の G. Davey らが提案した flexure spring の採用により非接触ピストンが実現し、その後の split Stirling 冷凍機の開発

Fig. 10 Stirling type pulse tube cooler.

Thermo-acoustics (1997 – 2003)

Fig. 11 Thermo-acoustic pressure wave generator.

が急速に進展した。

Fig. 10 は CFIC 社の flexure spring を採用したリニアコンプレッサーでパルス管冷凍機を駆動させたもので、2 気筒対向型にしてあるので静寂な冷凍機がやっと実現した感があった。周波数 50 Hz 封入圧 2 MPa 入力 3.3 kW で、80 K での冷凍量 146 watt を得たが、蓄冷器等の最適化は不十分であった。

一方で、機械的な圧縮機に代わるものとして、熱音響発振器を採用することの検討を進めてきた。Fig. 11 は初期の実験装置で、室内に入りきらないため屋外での実験となった。

その後、パルス管冷凍機との適合性を向上させる目的で、熱音響発振器の周波数を低減させる試みが杉田寛之さん (JAXA) を中心とするグループとの共同研究で実施された。内径 39 mm、全長 7 m の共鳴管実験では、ヘリウムガスで自励振動する共振周波数が 71 Hz、20 liter のバッファを設けると 40 Hz に低下した。また He:Ar=3:1 の

Fig. 12 Thermoacoustic pressurewave generator for pulse tube Cryocooler.

割合でアルゴンを混合するとバッファ無しで 39 Hz に低下することが分かった¹¹⁾。

しかし発振に伴う共鳴管の機械振動は、予想以上に大きく、しかも振動流体の仕事損失も無視できないほど大きかった。そこで、Fig. 12 のように flexure spring で支持されたディスプレーサを 2 組配置し、進行波型の仕事発生装置を試作した。残念ながらこの装置の試運転結果は得られていないが、feedback loop の無い定在波型の試験結果では、加熱温度 710 K、封入圧 2 MPa で発信周波数 32.6 Hz、出力 33 watt、圧縮比 1.13 を得ている¹²⁾。

この時期には中国科学アカデミーから Dr. Dai Wei が来日し、熱音響発振器及び VM サイクルによるパルス管冷凍機の実験にも参加した。1996 年には UCLA の Prof. Frederking の紹介で Dr. Ravikumar が NSF 助成金を得て来日し、1 年間の研究を共にし、パルス管冷凍機における inertance 効果の理解を進めた。

Fig. 13 From left; Prof. Gunter Thumes (Giesen Univ.), Prof. A. Hoffman (Karlsruhe Institute of Technology) and Prof. Fons de Waele (Eindhoven Univ. of Technology).

Fig. 14 5th Joint Seminar on Japan and Sino at Osaka (1997)

1995年にProf. Christoph Heiden (Gissen Univ.)が我々の研究室を訪問し、共同研究が提案された。1998年には同大からProf. Gunter Thummesが約2カ月、日大で4 Kパルス管冷凍機の共同研究を実施し、1999年にはProf. Fons deWaele (Eindhoven Univ. of Technology)とも日大で共同研究を実施した。筆者も数回にわたり両大学を数カ月訪問し、親交を深めた。両大学ではクライオクーラの研究が盛んで、パルス管冷凍機に関しても多くのドクターを輩出している。特にEindhovenでは筆者が副査をしたこともあって、思い出深いものがある (Fig. 13)。

そのほか1993年から2001年の間には大山記念論文賞、Cryogenics Journal Award、Russell B. Scott Award及びPaper Award of the Year等を戴き、当時の共同研究者との良い思い出になっている。Fig. 14は大阪で開催されたJSJS5の時の集合写真で、多くの議論を交わした方々との思い出になっている。

6. おわりに

これまでに携わってきた幾つかの研究課題は、やり遂げることなく次の興味ある課題に移行するという不甲斐なさを感じている。改めて振り返ってみると、あまりに多くの方にお世話になっており、失念した方々にお詫び申し上げますと共に、皆様に改めて感謝申し上げます次第です。

参 考 文 献

- 1) K. Oshima, Y. Matsubara and T. Kubo: "Experimental investigation of pulse tube refrigerator," TEION KOGAKU 3 (1968) 72-77 (in Japanese)
大島恵一, 松原洋一, 久保喬志:「パルス管冷凍機の試作」, 低温工学 3 (1968) 72-77
- 2) K. Oshima and Y. Matsubara: "Pneumatic controlled refrigerator," TEION KOGAKU 6 (1971) 106-111 (in Japanese)
大島恵一, 松原洋一:「気体圧制御方式による冷凍機」, 低温工学 6 (1971) 106-111

- 3) I. Oshima, E. Kawaguti, M. Yanai and Y. Matsubara, "Experiments on a modified Kirk cycle refrigerator," Proceedings of the Fifth International Cryogenic Engineering Conference (1974) 361
- 4) J.E. Zimmerman and R. Radebough: "Operation of a SQUID in a very low-power cryocooler," NBS SP-508 (1978) 59
- 5) Y. Matsubara and K. Yasukochi: "An application of gap regenerator/expander precooled by two stage GM refrigerator," NASA CP2287 (1984) 157
- 6) Y. Matsubara and M. Kaneko: "Vuilleumier cycle cryocooler operating below 8 K," NBS SP-698 (1985) 234
- 7) M. Kaneko and Y. Matsubara: "Performance of VM cooler coupled with two stage GM cooler," Proceedings of 4th ICC (1987) 177
- 8) Y. Matsubara, et al.: "High response hydride compressor for regenerative cryocooler," Proceedings of 4th International Cryocooler Conference (1987) 31
- 9) Y. Matsubara and A. Miyake: "Alternative methods of orifice pulse tube refrigerator," Proceedings of 5th International Cryocooler Conference (1989) 127-135
- 10) 周 淑亮:「パルス管内振動流体のエネルギー輸送特性」, 日本大学博士論文 (2001)
- 11) H. Sugita, S. Toyama, S. Zhou and Y. Matsubara: "Study on basic characteristics of thermal compressor for pulse tube cryocooler," 17th International Congress on Acoustics, Rome (2001)
- 12) Y. Matsubara, et al.: "Thermally actuated pressure wave generator using solid displacer," Twente workshop on low power cryocoolers (2003)

松原 洋一 1939年5月31日生。1962年東京理科大学卒業、同年(財)工業開発研究所。1966年より東京大学工学部原子力工学科。1970年より大阪酸素工業(株)。1978~2003年、日本大学総合科学研究所。2004~2006年、核融合研究所、東京都市大学客員教授、KEK 協力研究員。主に極低温冷凍機の研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。