

特集：ロータリエンジン

1

ロータリエンジンの構造と歴史 Construction and History of Rotary Engine

神原 伸 司*¹ 藤本 順 章*² 船本 準 一
Shinji Kanbara Yoriaki Fujimoto Junichi Funamoto
布施 卓*³ 榎山 謙 二*⁴
Suguru Fuse Kenji Kashiyama

要 約

マツダ独自の技術であるロータリエンジンは、これまで40年に渡り開発が進められてきた。その基本構造はシンプルであるがゆえに小型軽量であり、それでいて高出力を発揮する。全回転域でのフラットなトルク、吸排気バルブが存在しないゆえの振動・騒音の少なさ、高回転・高負荷運転での信頼性・耐久性の高さなどレシプロエンジンに対する多くのアドバンテージがあり、過去に積み上げられたモータースポーツでの数々の栄光がそれを証明している。ロータリエンジンの開発は、他に例がない独自技術であるがゆえに、あくなき挑戦～革新的進化を繰り返し続ける歴史であったと言え、新型ロータリエンジンRENEISISにおいても大きな技術的飛躍を遂げている。

本稿では、ロータリエンジンの構造、これまでの開発の歴史及びモータースポーツ活動について紹介する。

Summary

Mazda has been developing Mazda unique technologies of rotary engines over the past 40 years. Its basic structure is simple, therefore it is lightweight and yet produces high power. Rotary engines provide more advantages than reciprocating engines, such as flat torque in the entire engine speed range, little vibration and noise due to the absence of the intake/exhaust valves and high reliability and durability in the operating range where engine speed and load are high. This has been demonstrated by the fact that rotary engine cars won in motor races. Because the rotary engine development is one of Mazda unique technologies, it has a repetitive history of unwavering challenge and innovative evolution. Rotary engine technologies have made a great leap forward in the RENEISIS as well. This paper presents the structure of the rotary engine, the history of the development and motor sports activities.

1. はじめに

ロータリエンジン（以下RE）は、自動車メーカーで現在マツダだけが持っている固有の技術である。2003年、次世代のREであるRENEISIS（ロータリエンジンの再生を意味する造語RE + GENESIS）を量産化するに当たり、REの基本となる構造と特長、およびRENEISISの基本技術となったサイド排気ポートの発端となる開発について触れながら、これまでの40年間にわたるREの開発史の概要をまとめた。

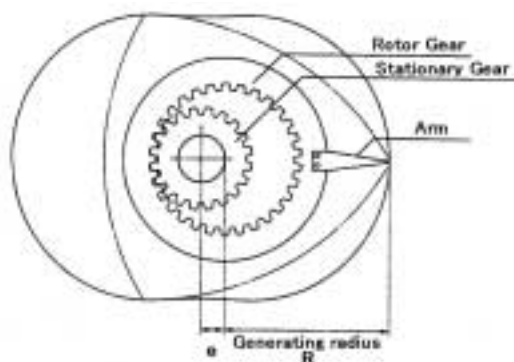


Fig.1 Theory of Peri-trochoid Curve

* 1 ~ 4 第2エンジン開発部
Engine Development Dept. No.2

2. REの構造と特長

2.1 REの機構

REは、Fig.1に示すように基本的には断面が蚕の繭のような形をしたハウジングと、その中にある三角形のおむすび型ロータで構成されている。両者の間に形成された作動室の中で燃料と空気の混合気を燃焼させ、その膨張圧力でロータをまわす仕組みである。

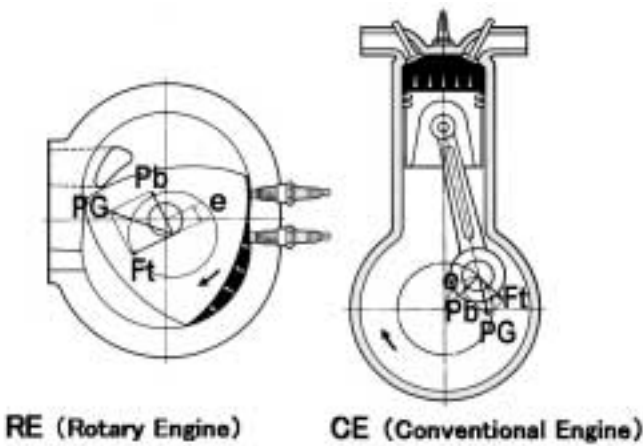


Fig.2 Torque Generating Mechanism

2.2 回転発生の原理

レシプロエンジン、REともに、回転の基となるのは燃料と空気の混合気の燃焼によって生じる膨張圧力である。しかし、その膨張圧力を回転力に変える仕組みは両者で大きく異なる。

レシプロエンジンの場合は、ピストンの上面に下向きに加わった膨張圧力がピストンを押し下げ、その動きをコンロッドとクランクシャフトによって回転運動に変える。

それに対しREでは、Fig.2に示すようにまずロータの一边に作用した膨張ガスの総合的な圧力 (Fig.2 PG) が偏心軸の中心にかかる。この力は、出力軸の中心方向 (同Pb) と接線方向 (同Ft) に分かれ、後者が出力軸を回転させるモーメントとなる。

レシプロエンジンは、ピストンの上下運動をクランクシャフトの動きによって回転運動に変える。それに対し、REの場合は、偏心軸の作用により直接ロータを回転させ、そのロータの回転によってさらに偏心軸を回転させるという仕組みであり、上下運動は存在しない。

2.3 REの作動

REでは、三角おむすび型のロータがトロコイド室内で遊星運動する過程で、作動室が移動しながら吸気、圧縮、点火・膨張、排気の4工程を行う (Fig.3)。つまり、各工程はトロコイド室内のそれぞれ別の場所で行われる。これは、4つの工程を同じ場所 (シリンダ内) で行うレシプロエンジンとの大きな相違点である。

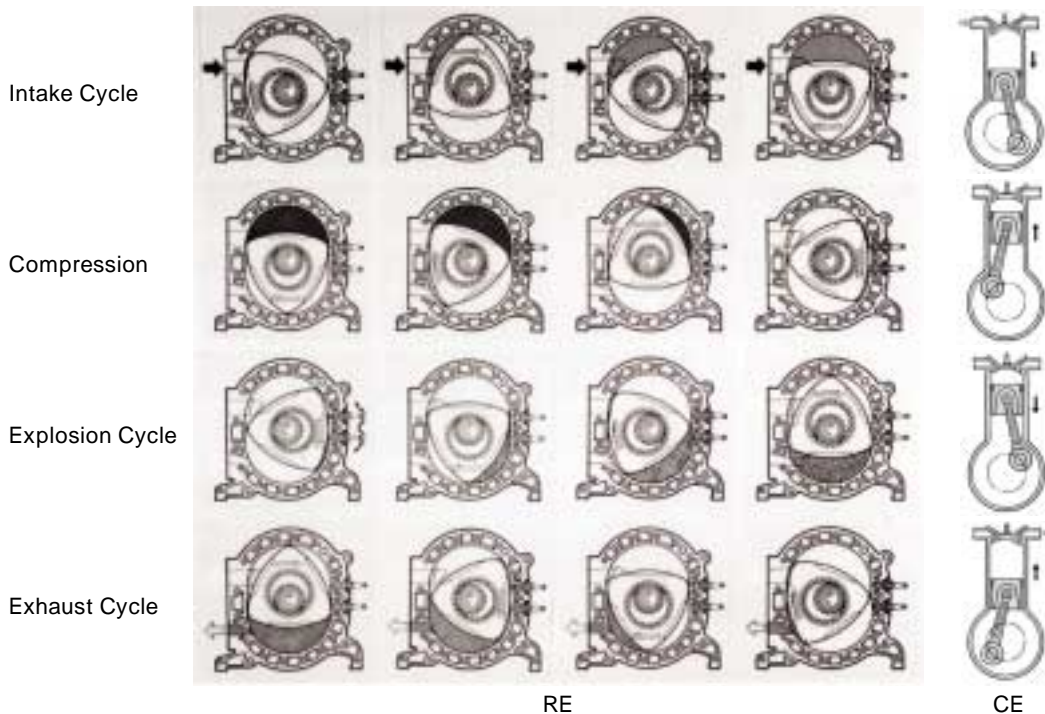


Fig.3 Working Cycles



Fig.4 Gas Seal



A : Eccentric Shaft	E : Rotor Housing
B : Stationary Gear	F : Intermediate Housing
C : Front Housing	G : Rear Housing
D : Rotor	

Fig.5 Basic Structure of RE

2.4 REの内部構造

Fig.4にREの内部構造を示す。ロータの3辺にある作動室を密閉するために、ロータ頂点にアペックシールを、頂点サイド面にコーナシールを、またコーナシール間のサイド面をシールするサイドシールを設けている。

2.5 REの構造

Fig.5に2ロータのREの構造を示す。2つのロータハウジング(図中記号E)は、3枚のハウジング隔壁(G, F, C)でサンドイッチされ、ロータハウジング内をロータ(D)が回転する構造。2つのロータは、2つのステーションナリーギア(B)を介してエンジン出力軸であるエキセントリックシャフト(A)へトルク伝達をしている。

2.6 特長

(1) 小型・軽量

基本構造がシンプルで、ロータの3辺で作動室を形成するREは、重量とスペース効率に優れている。例えば、2ロータエンジンの場合、同程度の出力とトルク特性を持つレシプロ直列6気筒エンジンと比べて、重量、大きさともに3分の2程度に過ぎない。

エンジンが「小型」であることは、車両のパッケージングに自由度を与え、「軽量」であることは運動性能と燃費

効率に大きく寄与する。静粛性やスムーズネスも、レシプロ直列6気筒エンジンに匹敵している。

(2) フラットなトルク特性

REは全回転域で比較的フラットなトルク特性を備えている。レシプロエンジンの場合はピストンなどの往復運動によって慣性力が生じトルク変動を起こしているが、REには往復運動を行う部分がないため高速になってもトルク変動が起こらないためである。また、運転中のトルク変動は、2ロータでもレシプロ直列6気筒エンジンに匹敵し、3ロータではレシプロエンジンのV8を凌ぎ、V12に近い特性を有する。

(3) 振動・騒音が少ない

レシプロエンジンの場合、宿命的にピストンの往復運動が振動発生源となりがちである。また、吸排気のパルブ機構がノイズと振動の発生源となっている。

それに対してREのスムーズな回転運動は、振動を発生しにくく、さらに吸排気のパルブ機構をもたないため、ノイズの発生も非常に少ないという特長がある。

(4) シンプルな構造

ロータと偏心軸の動きで混合気の膨張圧力を直接回転力に変えるREでは、レシプロエンジンのコンロッドにあたる部品が不要である。また、ロータの動きそのものによって吸排気ポートの開閉を行うため、レシプロエンジンのパルブ機構、すなわち、タイミングベルト、カムシャフト、ロッカーアーム、パルブ、パルブスプリングに相当する部品が不要である。

このようにREは、レシプロエンジンと比べると、非常に少ない部品点数で構成されている。

(5) 信頼性・耐久性

REは7,000~8,000rpmという高回転時でも、レシプロエンジンと比較して、ロータの回転スピードは3分の1であり、ロッカーアームやパルブを高速で動かす必要もない。そのため、高回転・高負荷運転での信頼・耐久性に優れているのが特長である。そのことは日本車としては史上唯一、RE搭載のマツダ車がル・マン24時間レースを総合優勝で制覇した実績によっても証明されている。

3 . REの誕生

3.1 NSU社との契約

西ドイツのフェリクス・バンケル博士によって発明されたバンケル型REの完成は、1959年にNSU社から公表された。当時は夢のエンジンとして世界中から約100社が技術提携を申し込み、マツダでも松田恒治社長自らREの理想と大いなる可能性を認識して直接交渉にあたり、1961年7月に正式調印した。

マツダは、ただちにNSU社の試作400ccシングルロータエンジンと設計図を入手し、同時に実用化の技術的関門として「チャターマーク(悪魔の爪痕)」問題を把握した。

3.2 実用化に向けた課題

その後、マツダ独自設計の試作REを完成させ、実用化のためには以下のような課題と、技術的な挑戦が必要であることを認識した。

(1) チャターマーク (Fig.6)

トロコイドハウジング内側に発生する波状の傷跡で耐久性を著しく低下させた。

(2) 排気の異常白煙

燃焼室内にオイルが漏れて、猛烈な白煙が発生し、またオイル消費量が異常に多かった。

(3) 低回転域での振動

シングルロータエンジンは、トルク変動が大きく高回転域では滑らかに回転するが、低回転域では回転が不安定で振動を発生していた。

(4) アイドル不安定燃焼

吸・排気ポートがペリフェラル方式であったため、吸気ポートと排気ポートとのオーバーラップが大きく、燃焼が不安定になり、低速域のドライバビリティに問題があった。



Fig.6 Chatter Mark

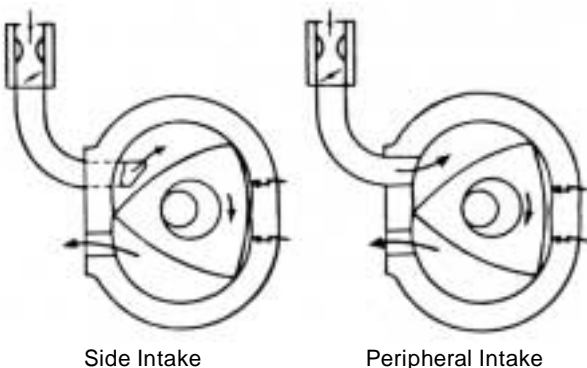


Fig.7 Evolution of Intake Port

3.3 課題解決技術

これらの問題を解決すべく1963年4月にRE研究部を設置し、山本健一部長以下47名の技術者が、徹底した研究開発を開始した。

(1) チャターマーク

さまざまなアベックスシールの設計にトライし、アベックスシールの自励振動でチャターマークが発生することを突き止めた。そしてクロスフロー型シールの開発を経て、高強度カーボン材に特殊な方法でアルミを染み込ませた素材にすることで問題を解決し、実用化した。

(2) 排気の異常白煙

エンジンオイルが燃焼室内に漏れる原因は、オイルシールの不良であった。マツダは日本ピストンリング社と日本オイルシール社の協力を得て、テーパカット形状のシール部を持ちゴム材Oリングで位置決めする革新的なオイルシールを開発し、問題を克服した。

(3) 低回転域での振動

完全な回転バランスがとれる多ロータのRE (2ロータ、3ロータ、4ロータ)を開発して、低回転域の振動を解消できることを確認し、量産はシンプルな2ロータ方式に決定した。

(4) アイドル不安定燃焼

吸気ポートと排気ポートのオーバーラップを低減するために、Fig.7に示すようなサイド吸気方式を開発した。これによりアイドルの燃焼を画期的に安定させることに成功し、サイド吸気ポートとペリフェラル排気ポート方式の組み合わせで量産することとなった。

3.4 初期型サイド排気ポートの開発

(1) 開発の狙い

1965~1970年にわたり、REの基本性能改善のため、サイド排気ポートの開発に挑戦した。当初、サイド吸気ポートと同じ発想で、吸気ポートと排気ポートのオーバーラップをゼロにすることで低速域でのドライバビリティの向上を狙っていたが、開発着手後に、低エミッション、低騒音の特長もあることが判明し、米国のエミッション規制対応技術としても注目し開発した。

(2) 構造

開発初期の10A型サイドポート排気は、インターメディアイトハウジングに排気ポートがない片排気構造 (Fig.8)

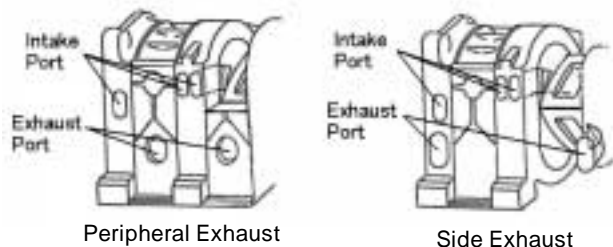


Fig.8 Structure of Single Exhaust

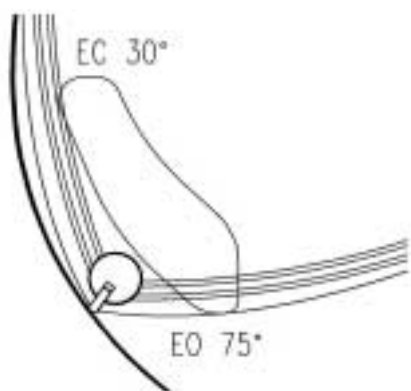


Fig.9 Double Side Seals

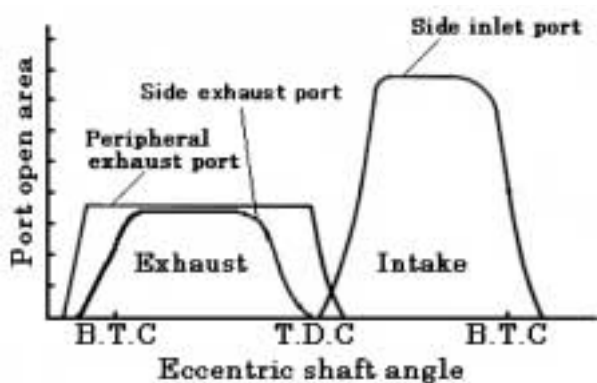


Fig.10 Intake/Exhaust Port Characteristic

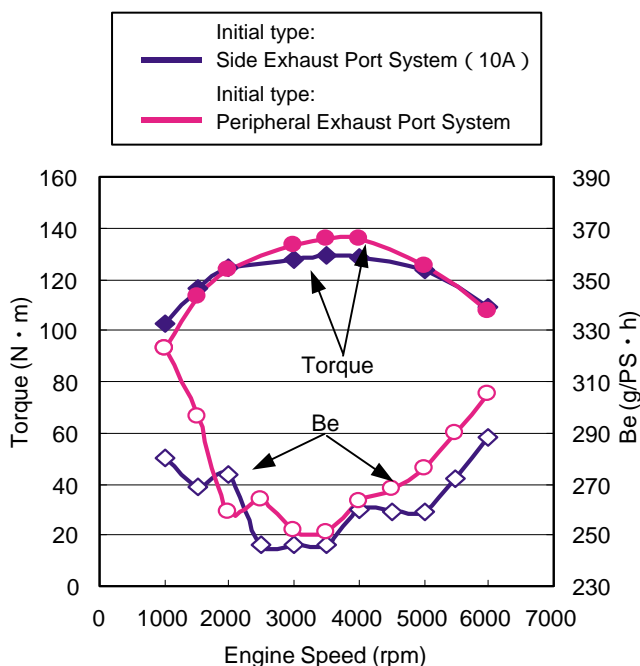


Fig.11 Torque and Be Curve

となっており、またサイドシールが2重構造 (Fig.9) のため吸・排気ポートのオーバーラップをゼロにするには、排気クローズタイミングは上死点前30°が限界となっている。このため、排気ポート面積はペリフェラルポート排気に比べ約3%小さかった (Fig.10)。これは、今回の新開

発RENEISISサイド排気⁽¹⁾の排気ポート面積と比べると約1/3の大きさでしかない。

(3) 性能領域

初期型ペリフェラルポート排気に比べ、Fig.11に示すように燃料消費率は改善し、未燃HC (炭化水素) 排出量は軽負荷域で約30%改善した。吸排気ポートのオーバーラップは見かけ上解消しているが、ロータとサイドハウジングとのクリアランスで実質的なオーバーラップが残っていたため、もっとも期待されたドラバビリティ向上のためのアイドリング性能改善効果が得られなかった。また、片排気方式であったため、排気ポート面積が小さく排気効率が十分確保できないため最大出力性能が約7PS低下した。

(4) 信頼性領域

長時間運転すると排気ポートが閉塞する問題があった。当時はガスシールの潤滑ため、燃料と油を混合して給油する方式をとっており、オイル消費量が極めて多く、カーボン発生量の多いことが原因であった。更にロータ側面が排気ポートに開口するため、ロータに装着したOリングが高温にさらされ焼損し、機能を喪失した。

これらの問題が解決出来ないことと、ペリフェラル排気ポート方式は、米国で施行されたマスキー法への対応見通しがたったことで、1970年にはサイド排気の開発は中断された。しかしサイド排気ポート方式のいずれの問題も、RE自体の熟成やエンジン周辺技術の進化により、新開発RENEISISのサイド排気ポートでは解決され実用化が可能となった。

4 . REの発展

4.1 黎明期

1967年5月30日、マツダは世界初の2ロータエンジン搭載車であるコスモスポーツを発売した。

110馬力 (PS) を発生する量産型10A型エンジン (単室容積491cc) は、低回転から高回転まで安定した燃焼を得るため、2ステージ4パレルキャブレタと各ロータ当たり2本のスパークプラグを使用した。そして三次テストコースでの200km/h近い高速テスト、全天候型シャシーダイナモメータでの北海道やカナダを想定した -20 以下の始動テストや猛暑を想定した +40 近い条件での走行テストが行われ、6年間にわたって300万kmの走行テストをクリアした。

一方、当時アメリカ合衆国で施工されようとした世界で最も厳しい排気ガス規制を含むマスキー法に適合するための技術開発をした。REは、レシプロエンジンに比較すると、NOx (窒素酸化物) の発生は少ないが、HCを多く発生する傾向がある。

マツダは、先に述べたサイド排気方式と排気のHCを再反応させる熱反応器 (サーマルリアクター) 方式の開発に

取り組み、後者の開発に成功した。世界各国の自動車メーカーがマスキー法基準の早期達成は困難だと表明する中、合衆国政府主催の公聴会において、マツダのREは、マスキー法基準に合格することが可能であると答申した。1973年ファミリアロータリクーペに搭載しアメリカ合衆国への輸出を開始した。

1970年代に勃発したオイルショック（世界的な石油価格の高騰）により、燃料を多量に消費したREは大幅な燃費改善が存続のための至上命題となった。そのため「フェニックス計画」を立ち上げ、1年で20%向上、最終的には40%の向上を達成するため、エンジンの基礎的な改良、熱反応器の改良などで希薄燃焼化を行い、目標を達成した。その成果は、1978年に発売した初代RX-7に結実した。

4.2 高性能化の時代

低公害技術の確立と、燃費性能の向上という2つの技術開発をやり遂げたマツダは、これらの技術を基盤に高性能化技術への発展を進めていった。

(1) 6PI + 排気触媒

1981年に6PI（6ポートインダクション）方式と触媒方式を12A型エンジン（単室容積573cc）に採用した。6PIは、世界初の吸気タイミング可変方式で、単室あたり3つの吸気ポートを採用し、2段階に分けて開閉する燃費と出力とを両立するシステムであった。

(2) ダイナミック過給

1983年に自然吸気で過給するダイナミック過給を13B型エンジン（単室容積654cc）に採用した。この方式は、2ロータの吸気特性を活用して、空気を多量に吸入する非常にシンプルな機構である。6PIと組み合わせることで、12

Bのターボ並の出力を發揮した。

(3) ターボチャージャ

1982年にターボチャージャを12A型エンジンに採用した。その後、REの排気特性を活かしたインパルスターボや13B型エンジンに採用した可変スクロールターボ、そしてインディペンデントターボなど、世界発のターボ技術を一気に進化させて、出力改善を図った。

(4) 究極のターボチャージャと3ロータ

1990年には、究極のターボ方式といわれるシーケンシャルツインターボを実用化した。これは低速域で1基のターボを使い、高速域では2基のターボを使って、ターボの弱点であるターボラグの大幅低減と、高出力化を図った量産世界初のシステムである。また同時に3ロータエンジンを開発し、V12に迫る低振動を実現した。

5. モータースポーツ

当社のモータースポーツ（以下、MS）の歴史は、1964年5月の第2回日本グランプリにまでさかのぼるが、ここではREによる活動の歴史について紹介する。当社は、REの開発初期から常に新しい技術をMSの場に投入し、REの高性能、信頼性、耐久性をアピールすると共に、そこからのフィードバックを量産車に活かしてきた。その点から当社のMSの歴史はREの開発と表裏一体の関係にあると言っても過言ではない。Fig.12に当社のREでのMS活動の概要を示す。

5.1 初期のレース活動：コスモスポーツ参戦

2ロータRE搭載のコスモスポーツが発表されるのと同時に、REの高性能、信頼性、耐久性をアピールする場と

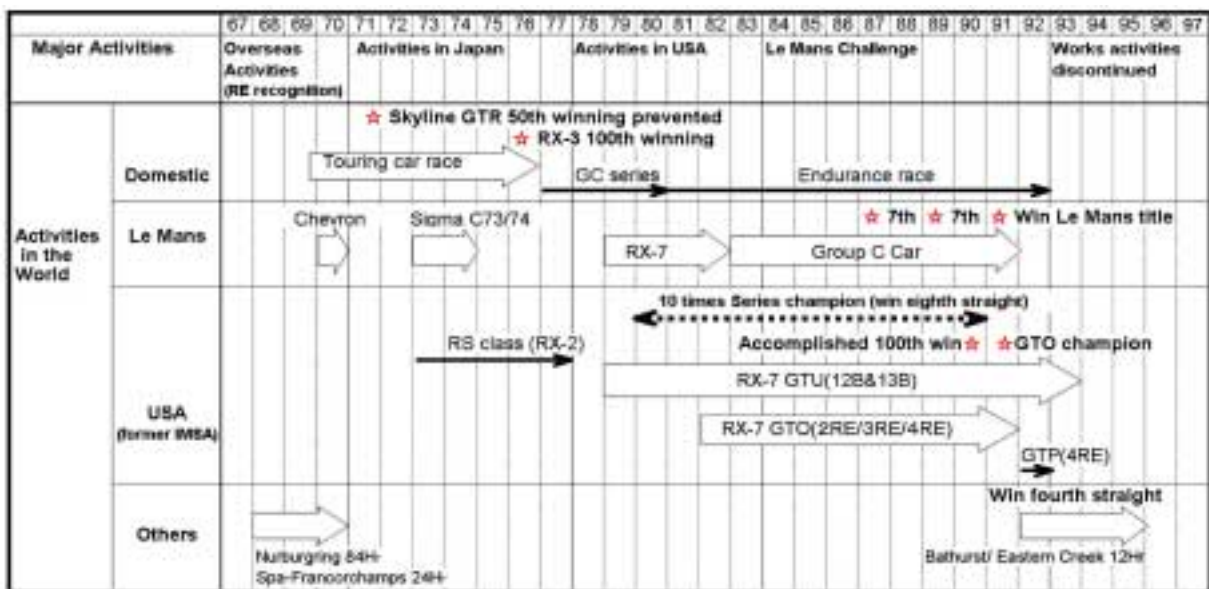


Fig.12 Motor Sports Activities

して最初に選ばれたのが、1968年8月にドイツのニュルブルクリンクで開催されたマラソン・デ・ラ・ルート84時間レースである。このレースに2台のコスモスポーツを出場させた（Fig.13）。搭載されたエンジンは市販車用の10Aエンジンを改良しコンビネーションポートを採用、出力は130PS / 7,000rpmであった。レース結果は、1台がリアアクスルのトラブルでリタイアしたが、もう1台は84時間を走り抜いて完走、総合4位に入賞し、未知のREが高いポテンシャルを有していることを世界に示した。

1968年7月に販売開始されたファミリアロータリクーペは、発売以降MS活動の主力車として使用された。搭載された10A型エンジンはペリフェラルポートの採用により、最高で200PSを発揮。その活躍ぶりに『小さな巨人』というニックネームがつけられた。

5.2 日本でのレース活動：サバンナRX-3国内100勝

1971年9月に発表された初代サバンナ（10A型）は、同年12月の富士500マイル・TTレースで優勝し、スカイラインGTRの国内レース通算50連勝達成を阻止した。

1972年には12Aエンジンを搭載したサバンナRX-3が登場し、5月の日本GPで独走し、優勝。その後、快走を続け、1976年5月のJAF - GP優勝で、国内レース通算100勝目を記録した（Fig.14）。

5.3 北米（IMSA）でのレース活動：サバンナRX-7

1979年2月RX-7がデイトナ24時間レースでデビュー、スタートから順調に走りGTUクラス1、2位（総合5、6位）となる。信頼性が高いREを搭載し、操縦性に優れたRX-7はIMSAシリーズ・GTUクラスを席卷、ポルシェの連続記録を次々に破り、1987年にはIMSA-GTUクラス史上初の8年連続のマニファクチャラーズチャンピオンとなる。更には単一車種としてIMSAシリーズ最多優勝記録を更新し、1990年9月には通算100勝目を達成した（Fig.15）。

5.4 ル・マン総合優勝

REがル・マンに初めて登場したのは1970年で、ベルギーから個人参加で10A型エンジンが搭載されたシェブロンB16であった（4時間でリタイア）。1981年から（株）マツダスピードが、REを搭載した車両で毎年ル・マンに参戦を続けた。

1986年には、マルチローター化（ターバ継ぎ手と言うオーソドックスな手法で2分割シャフトを実用化）された20B型3ローターREが登場した。翌1987年にはこの3ローターREを搭載したマツダ757が快調に周回を続けル・マン史上日本車最高位の総合7位となっている。さらに1988年には、3ローターREのリヤ側に1ローターを追加し4ローターRE化し、高出力化された13J改型エンジンが登場した。



Fig.13 COSMO SPORTS



Fig.14 SAVANNA RX-3



Fig.15 RX-7 GTO



Fig.16 R26B



Fig.17 787B

RE最後のル・マン挑戦となったR26B型エンジン (Fig.16) は、高出力と低燃費、信頼性を両立させるためリニア可変吸気や3プラグ点火、2分割セラミックAS等の採用で大幅な性能向上が図られ、最高出力700PS、最高エンジン回転数9,000rpmに達した。そして1991年、この小型&軽量&ハイパフォーマンスを誇るR26B型エンジンを搭載するマツダ787Bは日本車初の総合優勝を飾った (Fig.17)。

その後も、他社によるル・マン挑戦は続けられているが、日本車での総合優勝は果たされておらず、唯一ロータリエンジンだけがこの偉業を成し遂げたことになる。ロータリエンジンの性能、信頼性、耐久性の高さを証明する歴史と言える。

6. おわりに

ロータリエンジンの進化の歴史について説明させていただいた。過去も現在もロータリエンジンは世の中の変化に応じて、常に挑戦を続けてきた。環境に貢献し、お客様に走る喜び、すなわち「夢」を提供するために、技術者がこだわり続けた技術。夢の実現の為に、「寝ても覚めても」革新技術を考え、「あくなき挑戦」を続けてきた。応援して下さっているお客様、並びにロータリエンジンの開発にかかわられてきた全ての方々へ心からお礼を申し上げます。

そして新生ロータリエンジンで、多くのお客様へ、「夢」を提供できることを祈念してやみません。

参考文献

- (1) Shimizu et al. "The Characteristics of Fuel Consumption And Exhaust Emissions of the Side Exhaust Port Rotary Engine"; SAE Technical Paper (1995)

著者



神原伸司



藤本順章



布施 卓



櫻山謙二