

エンジンは空冷か水冷か

Which Would you Prefer, Air or Water Cooling System ?

執筆者プロフィール



長弘 憲一
Kenichi NAGAIRO

◎1977年(株)本田技術研究所入社, 可変動弁システム (VTEC) の考案・開発, 1995~1996年インディカー用V型8気筒エンジンの設計, 2004年ヨーロッパ向け2.2l乗用ディーゼルの開発等.
◎研究・専門テーマは, 乗用車用ガソリン, ディーゼルエンジンの研究・開発
◎(株)本田技術研究所 四輪 R&D センター 主席研究員
(〒351-0193 埼玉県和光市中央1-4-1/
E-mail: kenichi_nagahiro@n.w.rd.honda.co.jp)

1. はじめに

「エンジンは空冷か水冷か」という命題に対し, 結論を先に述べてしまうと, 両者, 一長一短があり「どちらもアリ」である。たとえば軽量かつシンプルさを求める二輪車のエンジンなどは空冷方式を用いることがある。また, 優れた排気ガス特性や静粛性, 空調などの室内環境を求め四輪車のエンジンは水冷方式を用いている。

本稿を執筆するに当たり正直なところ大変に悩んだ。なぜなら, 現在もそれぞれの得意分野で空冷エンジンと水冷エンジンが活躍しており, 簡単に「どちらが良い」とは言えないからである。さらに, 本田技研工業(株)(以下 Honda)においては“創業者の強い空冷へのこだわり”があったために, 四輪車エンジン開発における空冷から水冷への転換期では, 諸先輩方の並々ならぬ苦勞と努力があったと聞いている。したがって, この「空冷か水冷か」の議論は, 私にとって大変重いのである。

本稿では, 空冷と水冷の特徴をまず述べ, 次に Honda の四輪車エンジン開発における空冷から水冷への歴史をエピソードを交えながら記し, 最後に現在のエンジン技術を紹介してみたい。

2. 空冷と水冷の特徴

図1に空冷と水冷エンジンの冷却システムの概要を示す。空冷はエンジンに設けられたフィンを通じ, 走行風や冷却ファンにより送られる空気へ直接放熱する。したがって, 一般的に構造がシンプルで軽量かつコンパクトであり, 故障が少なく信頼性が高い。しかし, 空冷では熱伝達率の小さい分, 多量の空気を必要とし, 導風には設計・レイアウトを行ううえで限界がある。

一方, 水冷はエンジンに設けられた水冷ジャケットを通る冷却水に放熱し, その温められた水はラジエータにて走行風や冷却ファンにより送られる空気へ放熱する。したがって, ラジエータのほか, 水ポンプやサーモスタットなどが必要であり, 一般に空冷と比べシステムが複雑となる。しかし, 大量の放熱が必要な小型高出力エンジンには水冷

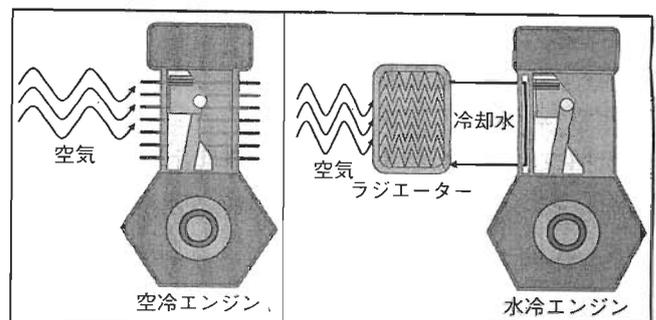


図1 空冷エンジンと水冷エンジンのシステム概要

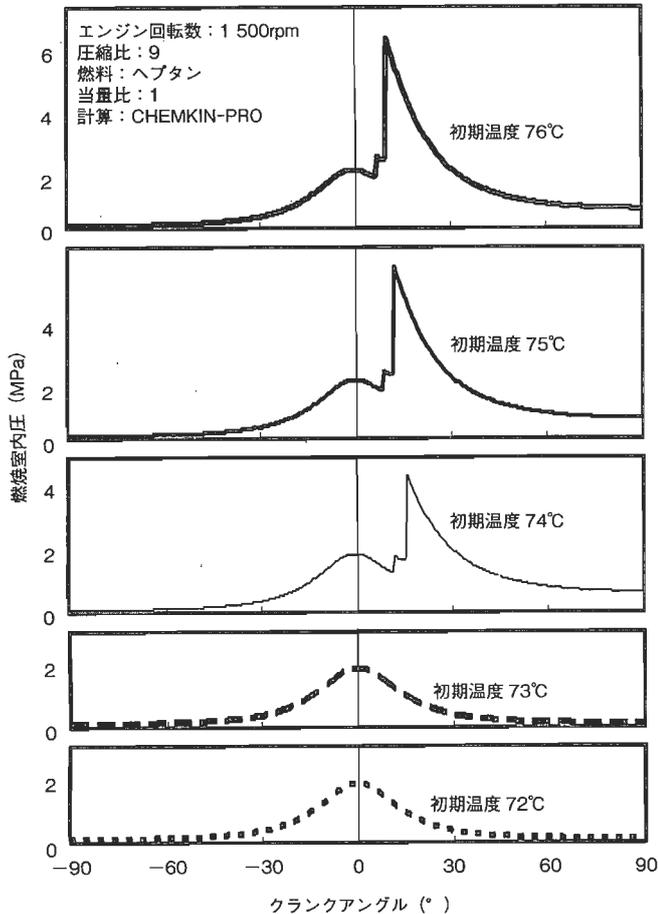


図2 燃焼室の初期温度別燃料自己着火特性

が適している。その理由は、水の定容比熱が室温で約 4.2 kJ/(kg・K) と空気の約 1 kJ/(kg・K) と比べ大きいため、水冷エンジンは温度変化が小さく、燃焼の温度コントロール性に優れているからである。

そこで、燃焼が温度に対してどの程度敏感なのかを調べるために、燃焼シミュレーションを行ってみた。燃焼は予混合の圧縮自己着火方式で、燃料はノルマルヘプタン、圧縮比は 9、当量比は 1 とした。エンジン回転数 1 500rpm における初期温度別の自己着火特性を図 2 に示す。これより、温度が数度違うことで燃料が自己着火したり、しなかったりすることがわかる。エンジンのノッキング現象などは、この燃料の自己着火が深く関係していると言われていた。したがって、高出力が求められるエンジンは、より高度な温度コントロールが必要となり、一般的に水冷のほうが優位となる。

さらに、水冷が優れる最も大きな特徴は音と振動である。水冷エンジンは先に述べたように燃焼室が水冷ジャケットで覆われているために、それが燃焼音と振動を抑えてくれる。しかし、空冷エンジンは冷却フィンが燃焼室と直結しており、さらにフィン自体が振動し大きな音を発生してし

まうのである。

以上をまとめると次のようになる。空冷エンジンはシステムがシンプルだが放熱量に限界があり、エンジンの温度変化が大きく、音、振動も大きい。また、水冷エンジンはシステムが複雑だがエンジンの温度変化が小さく、音、振動も小さい。

3. 四輪車エンジン開発における冷却方式の歴史

「水冷エンジンは最後には水を空気で冷やすのだから、初めから空気で冷やせばよい。そうすれば水漏れの心配もなく、メンテナンスもしやすい。ただし、空冷エンジン特有の騒音は水冷なみにしなければならない。」というのが Honda の創業者である本田宗一郎氏の持論であった。したがって、Honda は数多くの空冷エンジンを開発し市場に投入している。以下に四輪車エンジン開発における空冷から水冷への転換期に焦点を当て、その歴史を時代背景やエピソードを交えながら簡単に紹介してみたい (表 1)⁽¹⁾。

3.1 四輪事業への新規参入と水冷エンジン

「四人乗り、最高速度 100km/hr、価格 15 万円」とは 1955 年に通産省から発表された国民車育成要綱 (通称：国民車構想) である。1958 年、Honda は四輪車事業へ参入するに当たり、その国民車構想に応じた軽四輪車の試作をまず手がけた。そのエンジンは、それまで実績のあった二輪のレースエンジン技術を活かして強制空冷方式のアルミ合金製 V 型 4 気筒 OHC を採用していた。その開発は「自動車は十二分の検討をし、性能においても、設備においても、あらゆる点で絶対の自信と納得を得るまで商品化を急ぐべきではない」という信念のもとに進められていた。

しかし、1961 年に通産省から示された自動車行政の基本方針 (後の特定産業振興臨時措置法案、通称：特振法案、後に廃案) によりその状況は変化した。特振法案が成立すると四輪事業への新規参入が認められなくなるからである。これにより開発は加速され、エンジンはそれまでテストしていた空冷方式の完成にまだ時間がかかることから、水冷の直列 4 気筒 DOHC を進めることになった。そして、翌年にはプロトタイプを製作し、1963 年に Honda 初の乗用車 (S500、後の S600) を製造販売するまでに至った⁽¹⁾。

3.2 軽自動車と空冷エンジン

国内の四輪車生産台数が増加し安全や公害問題がクローズアップされはじめた 1966 年には、小型乗用車なみの性能と大人 4 人がゆったりと乗れる居住性を狙った軽自動車 (N360) が発表された。これは四輪車の開発初期に目標と

表1 時代背景と四輪車エンジン開発の歴史

年代	時代背景	Honda 四輪車エンジン開発の歴史
1955年	通産省より 国民車育成要綱発表 (通称: 国民車構想)	
1958年		軽四輪の試作車開発開始 (空冷 V 型 4 気筒 OHC)
1961年	通産省より 自動車行政の基本方針 (後の特振法案) が示される	
1962年		軽四輪のスポーツカーとトラックのプロトタイプ製作 (水冷 4 気筒 DOHC)
1963年		初の乗用車発表 (S500) (水冷 4 気筒 DOHC)
1964年		トルクアップされた乗用車発表 (S600) (水冷 4 気筒 DOHC)
1966年		軽自動車 (N360) 発表 (空冷 2 気筒 OHC)
1968年		小型乗用車発表 (HONDA1300) (DDAC 空冷 4 気筒 OHC) 空冷 F1 エンジン開発 (RA302)
1970年	アメリカ環境保護庁 (EPA) より大気汚染防止のための法律 (通称: マスキー法) 発効	
1971年		軽自動車 (ライフ) 発表 (水冷 2 気筒 OHC)
1972年		低公害エンジン・CVCC 発表 マスキー法 1975 年規制の合格第 1 号 小型乗用車 (CIVIC) 発表 (水冷 4 気筒 OHC)

した国民車構想を具現化したものである。エンジンは小さなスペースに入るコンパクトさが強く要求されたことから、ここでも二輪の空冷エンジンを参考に開発が進められ、強制空冷方式の 2 気筒 OHC が採用された。その性能は最高出力 23kW、最高速度 115km/hr、燃費 28km/L と当時の軽自動車のイメージを完全に打ち破ったものであった。このことについて創業者は「自動車が小型化されても人間は小型にならない。自動車だけ小型にすることは難しい」、また「今までの軽自動車は決して日本の道路に適していない。その理由は馬力がないからで、馬力は感情を支配するものであり、それがないと加速やスピードが出ず、走っていても追い越しができないため事故が多い原因になる」と語り、居住性と馬力の必要性を強く主張していた。

しかし、この空冷エンジンの開発はそう簡単ではなかった。開発者が一番苦労したのはやはり音問題であった。当時の解析技術は優れたものはなく、ほとんどは勘で、エンジンを叩いてみては冷却フィンから音の出る場所を探り当て対策を行っていた。また、エンジンの冷却はオーバーヒートよりもオーバークールの方が問題であった。水冷は水温に依存し、ある程度の温度コントロールができるが空冷はそうはいかない。たとえば、寒冷地などでアイドリングを行っているときエンジンはどんどん冷えてしまい、いたるところで氷点以下となり部品が凍ってしまうのである⁽¹⁾⁽²⁾。

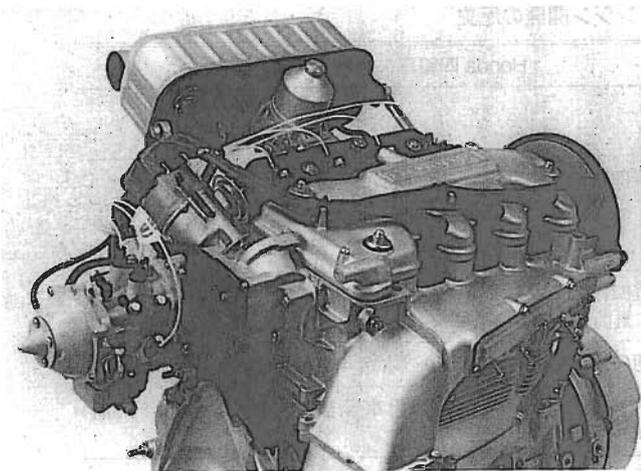
3.3 小型乗用車用空冷エンジンの追求

軽自動車の事業が軌道にのった 1968 年、Honda は小型乗用車 (H1300) を発表した。エンジンは世界初の一体構造二重壁空冷方式 (Duo Dyna Air Cooling System, DDAC) を搭載した画期的なものだった (図 3)。その方式とは従来のエンジン外壁にフィンを設け空冷することに加え、アルミ合金製のシリンダブロックとヘッドの壁を一体型の二重構造とし、その壁の間をさらにファンにより強制空冷するというものである。その結果、1298cm³ の小さな排気量ながら 85kW の最高出力を実現し、これは当時の 1.8~2 リッタ級のエンジン性能に匹敵していた。さらに、その二重壁が空冷の弱点であった騒音を抑えることができたとも言われている。

しかし、空冷エンジンの究極を追求したこの車は思うように売れなかった。当時の開発者は「空冷にこだわり続けたために空冷エンジンはできたが、結局重い。重量が重からタイヤが早く摩耗するなど、いろいろなところに無理が出る。排気ガス規制を控えてエンジンのコントロールが非常に難しいものになった。価格も高くなり過ぎた。商品としての自動車というものに対する理解が、必ずしも十分ではなかったのではないか。」という意見を残している⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

3.4 空冷から水冷へ

DDAC エンジン空冷のために生じる温度コントロー



〔提供：本田技研工業（株）総務部〕

図3 一体構造二重壁空冷方式（DDAC）エンジン

ルの問題で、開発者たちを大変苦労させた。彼らは水冷をやりたくても創業者である社長の並々ならぬ空冷へのこだわりのために、それを進めるしかなかった。しかし、このころ、環境に対する気運が高まり厳しい排気ガス規制が目前に迫っていた。彼らはそれらの規制をクリアするためには「何も長くてきつい道を選ぶことはないのではないか」と考えていた。

ある日、副社長に呼ばれた開発者たちがその話を打ち上げると、社長に同じ話をするように命じられた。翌日、しぶしぶ社長に「水冷をやりたい」と話したところ、社長はえらく機嫌が悪かったが「それならやればいいじゃないか」と答えたらしい。これにより、Hondaの四輪車エンジン開発は“水冷解禁”となった。その陰に、副社長が社長に対して「あなたは社長としての道をとるか、あるいは技術者としていべきだと考えるのか、どちらかを選ぶべきではないですか」と問い詰め、社長としての道を悟らせたという有名なエピソードがある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

3.5 環境規制と水冷エンジン

1963年、アメリカでは大気清浄法が制定され、その後1965年に自動車汚染防止法が追加された。また、1967年になると日本でも公害対策基本法が、また1968年には大気汚染防止法が次々と施行されはじめた。さらに1970年、アメリカで上院議員のエドモンド・S・マスキー氏が従来の大気清浄法を大幅に修正した案（通称：マスキー法）を議会に提出した。この法案は5年後の1975年型車からは、従来に比べ一酸化炭素および炭化水素をともに1/10に、また窒素酸化物は1976年型車から1/10にするという、世界中の自動車メーカーが“ほとんど達成不可能”と主張するほど非常に厳しいものであった。

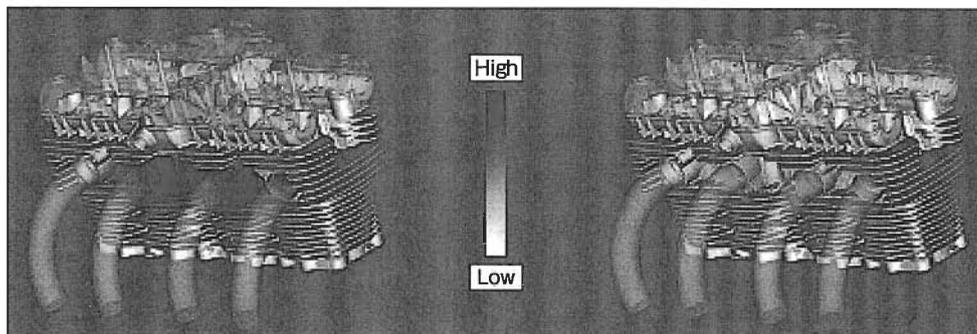
水冷解禁となったHondaはまず軽自動車の水冷化を進め、量産としての水冷エンジンを軌道に乗せた。次に、マスキー法をクリアすべく水温でコントロールされた希薄燃焼にチャレンジした。燃料が希薄状態で十分に燃えきるかどうかは、その燃焼室内の温度管理が大変重要なのである。そして、1972年に副燃焼室を持った低公害エンジン（CVCCエンジン）を発表した。CVCCとはCompound Vortex Controlled Combustionの略で“副燃焼室で燃焼した火炎がトーチノズルを通して主燃焼室に噴出し、主燃焼室で渦流を起こし燃焼速度を早め、希薄燃焼を実現する”というものである。その結果、優れた排気ガス特性を実現し、この水冷エンジンはマスキー法の1975年規制の合格第1号を取得することができた⁽⁴⁾。

4. 現在のエンジン技術

4.1 水冷エンジンの進化

さらなる地球環境保護や省エネルギーが要求される現在、水冷エンジンはマスキー法当時と比べ桁違いに優れた排気ガス特性を実現している。その最大の立役者となったのが三元触媒（Three-Way Catalyst, TWC）である。TWCとは排気ガス中に含まれる有害成分、すなわち炭化水素と一酸化炭素と窒素酸化物を、それぞれ二酸化炭素と水および窒素に、酸化・還元する装置である。この酸化・還元反応を効率良く行うためには、理論空燃比としなければならない。現在の水冷エンジンは冷却水温をもとに排気ガス中の酸素濃度をセンサにより検出し、燃料と空気中に含まれる酸素がそれぞれ過剰とならないように、電子式の燃料噴射システムを用い、その量を細かく制御し理論空燃比としている。

最近では、さらに走行燃料消費率（燃費）の向上を狙いとしたエンジンとモータを併用するハイブリッド車が開発されている。たとえばHondaのインサイトでは優れた燃費を実現するために、エンジンの可変バルブタイミング・リフト機構を用いた全気筒休止や、エキゾーストバルブタイミングの遅角による燃焼改善が行われている。また、冷却水主流の循環経路をまずシリンダブロックを取り巻くように一方向に流した後、シリンダヘッド内を一方向に流す方式とし、燃焼室まわりの冷却水流速を上げて熱伝達率を向上させることによりノッキングの抑制を図っている。さらに、エキゾーストマニホールドをシリンダヘッドと一体型とし、直下触媒前と床下触媒前に配置した酸素センサと、電動スロットル（Drive By Wire, DBW）と、空気流量計（Air



(a) 空冷エンジン(油冷なし)

(b) 油冷による気筒間温度差の低減

図4 強制油冷システムを用いた二輪車用空冷エンジンの熱マネジメント

Flow Meter, AFM) の採用により, 優れた環境性能 (国土交通省の平成 17 年排出ガス基準 75% 低減レベル) を実現している⁽⁵⁾⁽⁶⁾. これらは, より高度な温度コントロールにより成り立つものであり水冷ならではの技術と言える.

4.2 空冷エンジンの進化

二輪車においては, 軽量かつシンプルさが求められる小排気量エンジンのほか, 機能美を追求した趣味的要素の強い大排気量の空冷エンジンがある. これら空冷エンジンを搭載する二輪車においても, 世界各地で厳しい排気ガス規制が進んでいる. 現状, これら規制をクリアするため, 従来のキャブレタ式から電子制御式燃料噴射システムを用いた空燃比制御が必要となってきた⁽⁷⁾. しかし空冷の場合, 前述のように温度コントロールが課題であり, 水冷より難しくなる.

これまで空冷エンジンの開発は, 風洞実験室による流れの可視化や, 走行テストによる温度測定が頼りであり, 設計の初期段階で流れの挙動や放熱量を定量的に把握することは困難であった. そこで精度の高い温度コントロールを目指し, 冷却フィン 1 枚 1 枚の間の風の流れの解析や, エンジン本体の熱伝達率分布や温度分布を解析するパーシャルセル法 (複雑形状の流れ場を計算する時のメッシュ生成手法) を用いた CFD (Computational Fluid Dynamics) 技術が開発されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

この解析により, 強制油冷システム (空冷だけでは冷却が不十分となる箇所, 潤滑用のオイルを冷却水の代わりに適量循環させるシステム) は, 総放熱量の向上とともに, 気筒間の温度不均衡の改善も可能であることが見出された (図 4). またノッキング限界の改善も示されている⁽⁹⁾.

5. まとめ

小排気量エンジンを搭載する二輪車の多くは, 軽量かつシンプルさを求めるために空冷を用いている. また, 四輪車および大排気量エンジンを搭載する二輪車の多くは, 優れた環境性能と動力性能と静粛性を実現するために水冷を用いている. しかし, それだけでは片づけられないものもある. その一例として趣味的要素の強い大型二輪車がある. 空冷に対する機能美や体感などへの顧客要望が強く, 技術者としてこれらの要望を満たし, 環境性能との両立を図ったものもある. 技術とは人のためにあり, すべてが一樣である必要はない. したがって「エンジンは空冷か水冷か」という命題の結論は, 「どちらもアリ」なのである.

(原稿受付 2010 年 1 月 13 日)

●文献

- (1) 本田技研工業 (株), 50 年史, (1999), 76-105, Honda ホームページ. <http://www.honda.co.jp/50years-history/>
- (2) 吉田 匠・ほか, HONDA360 STORY, (1992), 123-140, 三樹書房.
- (3) 碓 義郎, 燃えるホンダ技術屋集団, (1986), 59-77, ダイアモンド社.
- (4) 小林彰太郎, HONDA1300 設計者との対話, (1970), 163-166, CAR グラフィック.
- (5) 大窪 毅・米口 宏・藤木有司・中村芳則・岡田 拓・黒瀧浩文, 普及を目指した GLOBAL ハイブリッドカーの開発, Honda R&D Technical Review, 21-1 (2009), 73-82.
- (6) 福田俊彦・江口高弘, 新型インサイト燃費向上技術, Honda R&D Technical Review, 21-1 (2009), 83-89.
- (7) 玉木健二・國分志郎・赤松俊二, 小型二輪車用空冷エンジンの電子制御燃料噴射の制御システム, Honda R&D Technical Review, 16-1 (2004), 145-152.
- (8) 高橋易資・後閑祥次, 二輪車用空冷エンジンの冷却流れの CFD 解析, Honda R&D Technical Review, 18-2 (2006), 140-147.
- (9) 後閑祥次・高橋易資・稲吉 真, 強制油冷システムを用いた二輪車用空冷エンジンの熱マネジメント, Honda R&D Technical Review, 19-1 (2007), 65-72.