

特集 エンジン暖機用蓄熱システムの開発*

Heat Storage System for Engine Warm-up

宮田 喜夫
Yoshio MIYATA

森川 敏夫
Toshio MORIKAWA

伊藤 茂雄
Shigeo ITO

豊島 敬
Takashi TOYOSHIMA

Emission is reduced by promoting fuel atomization while retaining the heat of the engine cooling water by a vehicle-mounted thermos and by using the hot water in startup.

This paper describes the new technology behind the world's first Heat Storage System vis-à-vis emission control on vehicles.

Key words : Heat storage, Emission, Tank, 3 way valve, Pump

1. はじめに

地球環境保護のため排出ガス規制がますます厳しくなる中で、トヨタ自動車(株)は、エミッション低減のために蓄熱システムを世界に先駆けて初めてプリウスに搭載した。

製品化を実現するためには、システムのねらいに合致した車両搭載可能なコンポーネントを開発する必要があるが、従来技術ではその対応が困難であった。本論文では、蓄熱システム全体を紹介しながら、特に、世界で初めて車両に搭載するための製品化技術を中心に報告する。

2. 蓄熱システム

蓄熱システムは、Fig. 1に示すように、温水を格納し保温する蓄熱タンクと、格納した温水をエンジンに送り込むためのウォータポンプ、温水回路を切り替えるための3方弁より構成される。

作動モードに対応して、各構成部品が連動して所定の温水回路を形成する。作動モードは、Table 1の4とおりがある。

2.1 プレヒート

エンジンを始動する前に、蓄熱タンク内の温水をエンジンに注入して暖機するモードである。3方弁により、エンジンと蓄熱タンクだけが連通しヒータコアへの通路が遮断する温水回路を形成する。エンジンが停止している状態でウォータポンプが駆動するので、蓄熱タンクの温水が押し上げられてエンジンに流入し、エンジンが暖機する。

(温水回路: Fig. 1の ←)

(作動パターン: Table 1の①)

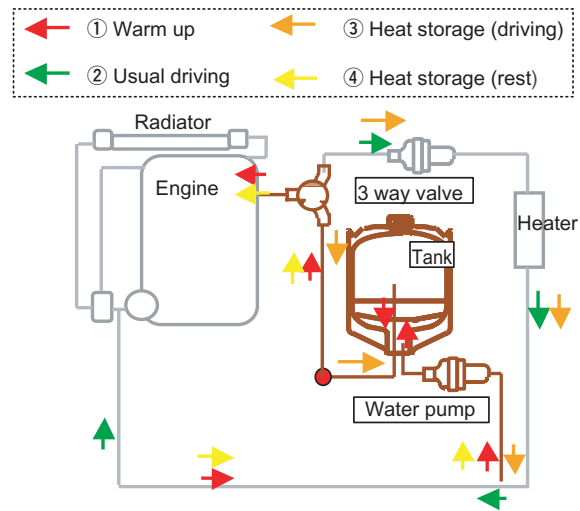


Fig. 1 Heat storage system

Table 1 Operating pattern

	①	②	③	④
Mode	Warm up	Usual driving	Heat storage (driving)	Heat storage (rest)
Engine	Off	On	On	Off
Water pump	On	Off	Off	On
3 way valve				

2.2 通常モード

プレヒートの終了後、ウォータポンプが停止すると同時に、3方弁は蓄熱タンクの回路を遮断しヒータコアへの回路を開放する。これにより、蓄熱の温水回路が遮断されるため、従来の通常の温水回路が形成される。

*2005年2月24日 原稿受理

(温水回路: Fig. 1の ←)

(作動パターン: Table 1の②)

2.3 走行時蓄熱

エンジン水温が所定温度を超えると、蓄熱タンクに温水を格納する蓄熱を開始する。3方弁がエンジンとヒータコア、蓄熱タンクのすべての回路を開放する全開モードになり、エンジンから温水が蓄熱タンクに流入する。

(温水回路: Fig. 1の ←)

(作動パターン: Table 1の③)

2.4 停車後蓄熱

2.3節で十分に蓄熱ができなかった場合は、停車後にも蓄熱を実施する。温水回路と作動パターンは2.1節と同じで、エンジンと蓄熱回路のみが連通した状態でウォーターポンプを駆動させ、エンジン内の温水を蓄熱タンクに格納する。

(温水回路: Fig. 1の ←)

(作動パターン: Table 1の④)

3. 蓄熱タンク

蓄熱タンクの開発のポイントは、蓄熱した温水を冷さないようにいかに保温するか、次に、保温した温水を冷水と混合しないようにいかに有効に排出するかにある。以上の機能上の課題に加えて、さらに、初めて車両に搭載するための技術、具体的には、耐圧性と耐振性を確保することも同時に大きな課題であった。

3.1 保温性

ここでは、家庭用魔法瓶をベースにした蓄熱タンクの基本構造と、さらなる保温性向上をねらった独自のレイアウトについて紹介する。

3.1.1 基本構造

保温性を確保するために、家庭用魔法瓶の真空断熱法を採用している。

Fig. 2はブラケットとウォーターポンプ、ホースからなる蓄熱タンクAssyを、Fig. 3に蓄熱タンク本体の断面図を示している。タンク本体をステンレス製の2重構造とし、内側と外側タンクの間を高真空に保持する構造にしている。Fig. 4に示すように、安定した保温性を確保できるように、 10^{-4} Torr以上の高真空度に保つことを基本としている。

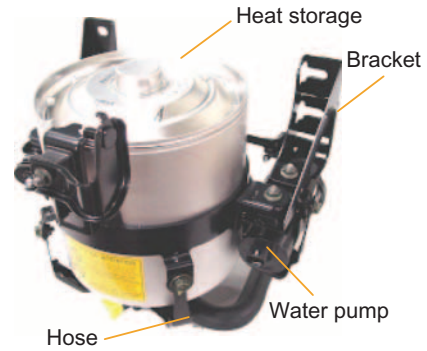


Fig. 2 Heat storage tank assembly

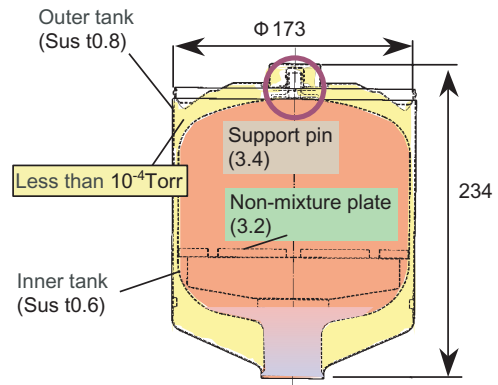


Fig. 3 Heat storage tank

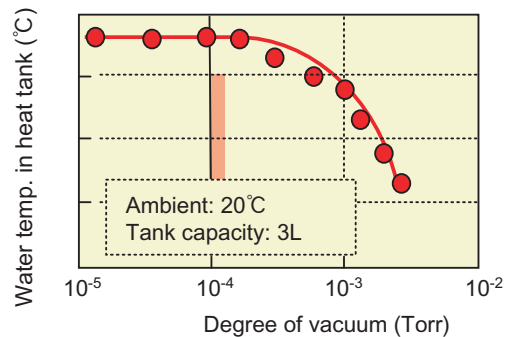


Fig. 4 Performance - degree of vacuum

3.1.2 レイアウト

上記は、家庭用魔法瓶の技術の継承であるが、本開発品ではさらなる保温性向上をねらって、従来の家庭用魔法瓶に対して天地を逆にしてている。

タンク内の温度分布は、対流により上部が高く下部が低い。一方、熱ロスの点では、口部が内側タンクと外側タンクが接触するためにタンク内で一番放熱量が大きい。

本開発品は、熱ロス低減のために上記2点を考慮して、水温が低い下部に口部を配置するレイアウトを採

用した。

Fig. 5に、レイアウト変更の効果を示す。

本開発品は口部を下にすることで、従来レイアウトに比べて、24h後の水温が約10℃高く保温性に優れることを実機で確認している。

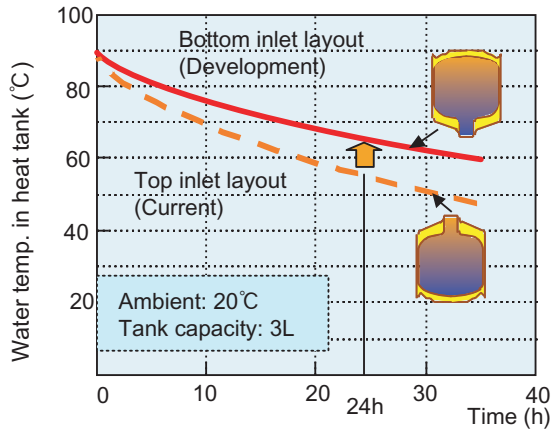


Fig. 5 Heat storage tank - performance

3.2 有効排出量

Fig. 6に示すように、プレヒート時に温水をエンジンに注入する際は、ウォーターポンプを駆動してタンク内に冷水を送り込むことで、タンク内温水をエンジンに排出する。

入り口から流入する冷水がそのまま出口側にショートサーキットしてしまうと、せっかく蓄熱した熱量が無駄になる。

いかにこのショートサーキットを防止して、蓄熱した温水だけを有効に排出するかが大きな課題である。

本開発品では、この課題を達成するために、混合防止板を設置している。

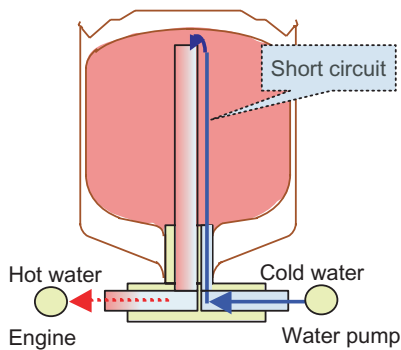


Fig. 6 Effectively-ejection

3.2.1 混合防止板の機能

混合防止板は、流入する冷水をタンク内の径方向全体に広げて減速すると共に、流速分布を均一にすることを目的としている。

具体的には、Fig. 7に示すように、入り口断面部に邪魔板を設置しそれに少径穴を多数設けている。

この穴径および穴の配置は、Fig. 8に示すようなCAE解析と実機での検証により最適化して、φ4の穴を212個設ける仕様になっている。

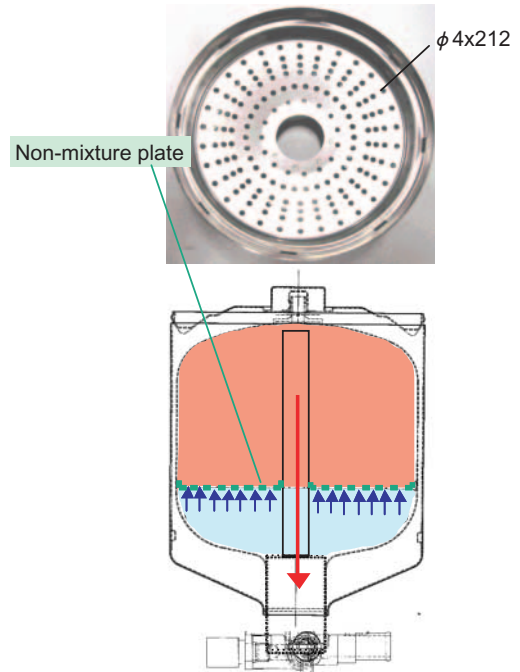


Fig. 7 Non-mixture plate

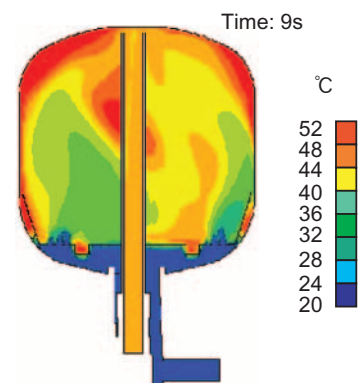


Fig. 8 Water temperature profile

3.2.2 混合防止板の効果

Fig. 9に、混合防止板の効果を確認するために、プレヒート開始後のタンク出口水温の実測結果を示す。

理想的には、一点鎖線に示すように、タンク内の温水を全部流出するまで、出口水温がタンク内の水温と同じであることが望ましい。

しかしながら、混合防止板がないと、冷水がショートサーキットしてしまい、タンクの出口水温がすぐに低下してしまう。

一方、混合防止板を設置すると、この悪影響が抑制され、出口水温は蓄熱された温水と同等なレベルのまままで長時間にわたり有効に排出することが確認できた。

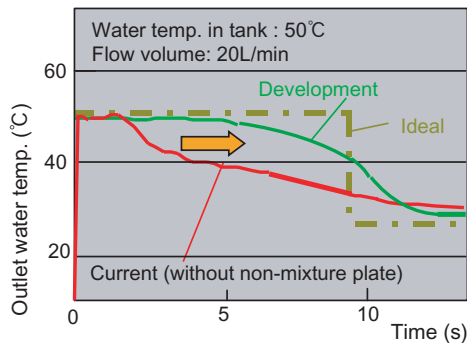


Fig. 9 Effect of non-mixture plate

3.3 耐圧性

蓄熱タンクの車両搭載可能にするための課題の一つに、耐圧性の確保がある。

家庭用の魔法瓶と異なり、本開発品は車両に搭載されるために常にエンジン駆動による水圧がかかる。

また、その水圧はエンジン回転数により変動するため、応力変動のストレスとして膨大な回数で繰り返し負荷される。

3.3.1 市場の圧カストレス

Table 2に、車両の一生として負荷される水圧と繰り返し回数を示している。水圧のMax値は0.177MPaで、車両の工場出荷時のLLCを封入する際に発生し、発生回数は1回である。

一方、車両走行時はエンジン回転数により水圧が変動するが、そのエンジン回転数の出現頻度より水圧と出現回数を見積っている。圧力値自体は工場出荷時より低い、発生する回数は膨大であることが分かる。

以上から、静圧破壊としての耐圧目標値は0.177MPa以上とし、また、加圧繰り返しの耐圧性は無限回数負荷されても破損しないように、各圧力で発生する応力を材料疲労限以下とするように目標を設定した。

Table 2 Pressure stress of vehicle

	Water pressure (MPa)	Number of times
Factory default (infusion of LLC)	0.177	1
Driving (depends on engine operating speed)	0.103	29600
	0.053	27000
	0.0331	563000
	0.0165	549000
	0.0137	556000
	0.0039	720000

3.3.2 家庭用魔法瓶の耐圧レベル

耐圧向上の具体的な検討を進めるにあたり、まず、従来の家庭用魔法瓶の耐圧レベルをサーベイ評価した。

Fig. 10に示すように、3.3.1項で決定した水圧目標値の1/3以下の0.05MPaで、内タンクが変形し外側タンクと接触してしまうことが確認できた。これにより、家庭用魔法瓶そのままでは車両に搭載できないことが判明した。

車両に搭載するために、形状を最適化して水圧により発生する応力を低減する検討を実施している。

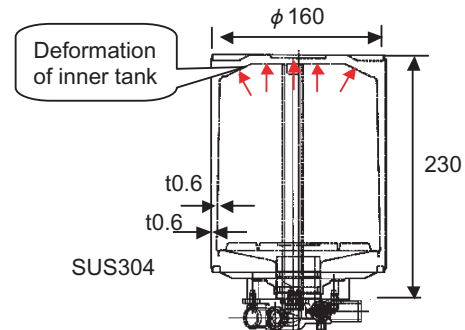


Fig. 10 Survey household use ability

3.3.3 応力低減目標

Fig. 11に、開発品で採用するSUS304材のS-N曲線を示す。評価は両振り引張り圧縮で行い、応力振幅と破断までの繰り返し回数の関係を示している。応力が低くれば破断回数が長くなり、永久に壊れない疲労限は215MPaである。

これにより、開発品にかかるすべての各水圧ストレスで発生応力が215MPa以下にすることを応力低減の目標とした。

3.3.4 数値解析による形状最適化検討

最適化した形状因子をFig. 12に示す。

応力に関する主要因子として、水圧のかかる内タンクのR部と、口部のストレート長さをパラメータに

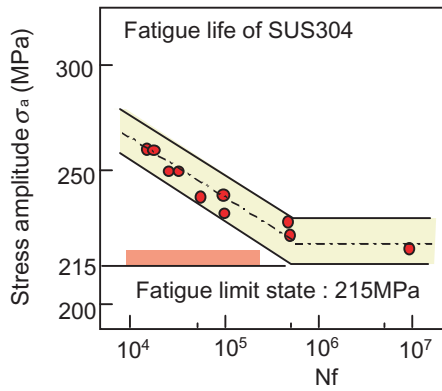


Fig. 11 S-N curve

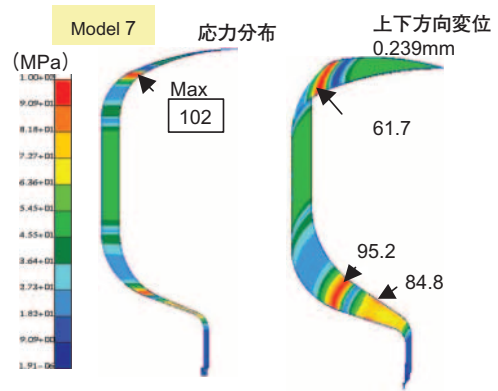


Fig. 13 Stress and displacement distribution

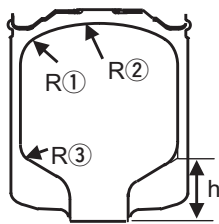


Fig. 12 Parameter factor

して数値解析により発生応力を推定した。

代表的なモデル計算の結果をTable 3に示す。R寸法を大きくすることで、発生応力を大巾に低減できることが分かる。

各Rを大きくしたModel 7の形状で、発生応力は目標値215MPa(3.3.3項を参照)の1/2以下に抑えられることができ、また、所定内容積3Lを確保できることから、Model 7を本開発品の基本仕様に決定した。

本仕様の応力と変位の分布詳細は、Fig. 13を参照願いたい。

Table 3 Numerical analysis

	①	②	③	h	Max stress
Household use	R5	R120	R30	44.5	962MPa (①)
Model 1	R20	R120	R30	47	382MPa (②)
Model 2	R30	R120	R40	↑	180MPa (h)
Model 3	↑	R120	R50	↑	188MPa (h)
Model 4	↑	R120	↑	52	122MPa (h)
Model 5	↑	R120	↑	57	89.3MPa (h)
Model 6	↑	R160	↑	↑	102MPa (h)
Model 7	↑	↑	R40	↑	102MPa (h)

3.4 耐振性

車両搭載可能にするためのもう一つの課題は、耐振性の確保である。

本節では、車両に搭載された際に振動により発生するストレスと、それに耐えるために開発品に織り込んだ技術を紹介する。

3.4.1 市場の振動ストレス

本開発品は、車両左前方のタイヤハウス内のサイドメンバにブラケットを介して搭載することが決められていた。

振動ストレスを把握するために、実際に、試作車に開発品を正規の位置に取り付け悪路をテスト走行し、蓄熱タンク取り付け部であるサイドメンバに発生する加速度を実測した。

測定はFig. 14に示すように3方向でストレスを確認した。

3.4.2 耐振性の向上のために

Fig. 15に示すように、本開発品では耐振性向上のため、二つの手段を採用している。

一つが、車両用ブラケットとタンクの間振動吸収用のゴムブッシュを設けたことで、蓄熱タンク本体への加速度の入力低減を図っている。

もう一つの特徴が、加速度により発生する応力を低減するために、支持ピンを設けたことである。

Fig. 16に示すように、従来の魔法瓶は内側と外側のタンクが口部のみで接合する片持ち支持のため、振動により内側タンクが大きく振幅して過大な応力が口部に発生してしまう構造となっていた。

本開発品では支持ピンにより、両持ち支持にして振幅を低減するものである。次節で、支持ピンの詳細を説明する。

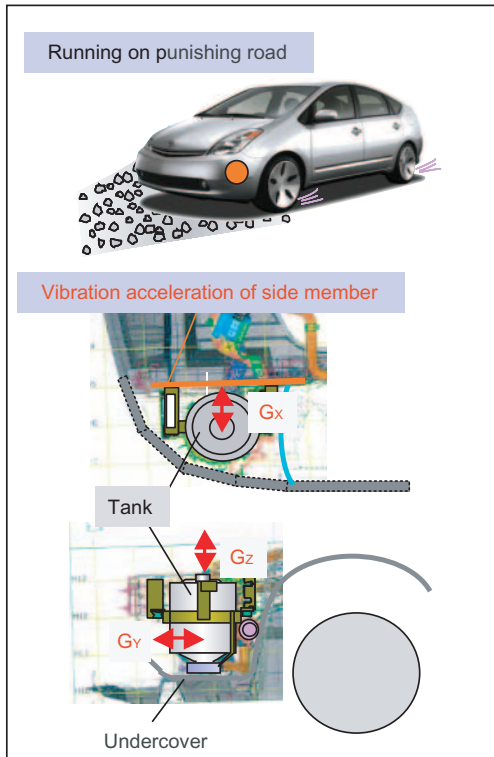


Fig. 14 Test run on punishing road

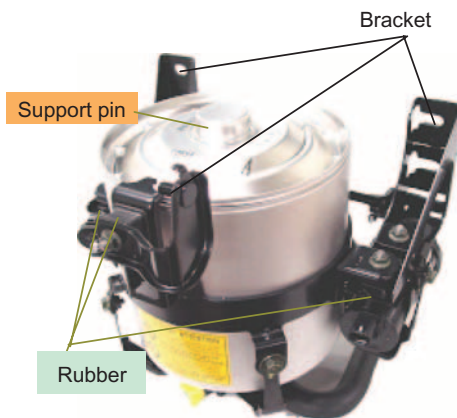


Fig. 15 Heat storage tank assembly

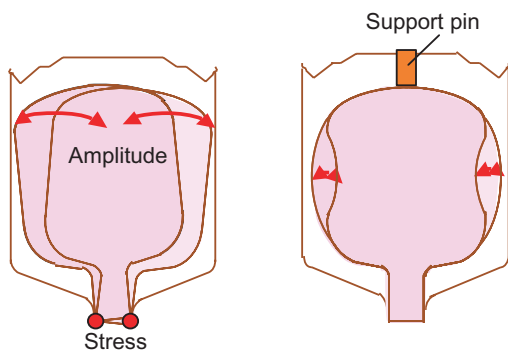


Fig. 16 Cantilever and center vibration

3.4.3 支持ピン

Fig. 17に本開発品の詳細仕様を示す。

両持ちにするために、タンク上部で内・外のタンクを接合すると、放熱により保温性の悪化が懸念される。

本開発品では、保温性悪化への対策として、支持ピンの外側にカバーを設けて、真空内で内・外のタンクを接合することで外部への放熱を低減していた。

また、接合は3箇所圧入による点接触とし、接触面積を極力少なくして熱伝導量を低減するように配慮している。

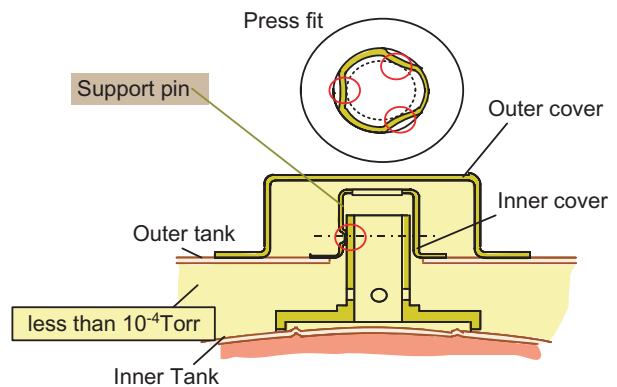


Fig. 17 Support pin

Fig. 18に、支持ピン設置による耐振性の効果として、最大発生応力の結果を示している。

従来の支持ピンが無い構造では、タンク下側の口部周辺に応力集中が発生して、最大300MPaを超えている。

一方、支持ピンを設置することで応力集中が大巾に緩和され最大発生応力が60MPa以下にまで低減できた。材料の疲労限215MPa (Fig. 11参照)と比較しても、1/3以下で、これにより振動で、破損しないタンクが開発できたことが分かる。

4. 3方弁

3方弁は、すでに流動中の流調式ウォーターバルブを基本に、蓄熱システム用にモディファイしている。

Fig. 19に示すように、各モードごとの温水回路(エンジン・タンク・ヒータコア)の切り替えを行うために、弁の外周部に穴を設けて回転させることにより各パターンを形成する。

Fig. 20に示すように、製品の構造を示す。

弁を駆動するための駆動部と、弁部で構成される。駆動部は、トルクを発生する直流モータとそのトル

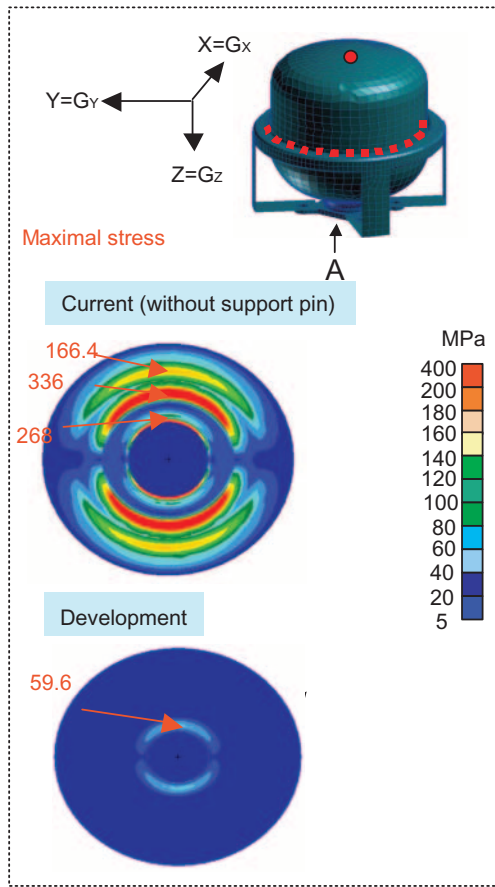


Fig. 18 Numerical analysis

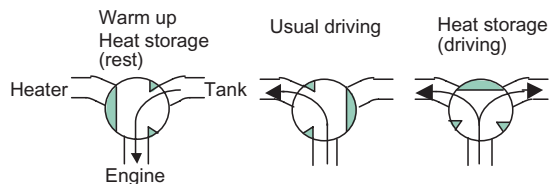


Fig. 19 Operating pattern

クを増幅して弁部に伝達するギア，弁のポジションを検出するためのポテンシオメータからなる。

弁部は，外周部に穴を設けた回転する弁本体，温水が漏れないようにするためのOリングとパッキンで構成している。

5. ウォータポンプ

ウォータポンプも，3方弁と同様に従来より流動中の製品を基本にしている。

Fig. 21に示すように，高効率化と生産性向上を主眼にほぼすべての主要部位に改良を加えている。

その結果，Table 4に示すように消費電力を従来の1/3に，重量の点では25%の軽量化を達成している。

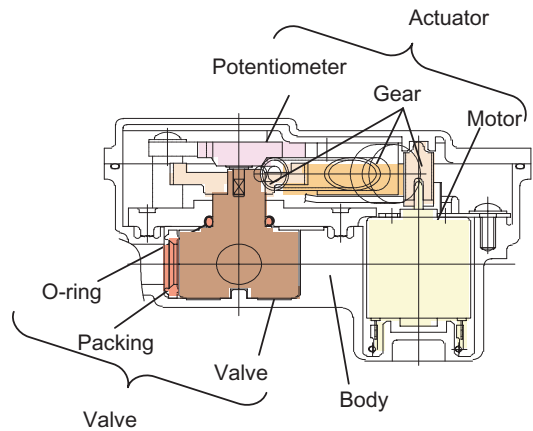


Fig. 20 3 way valve

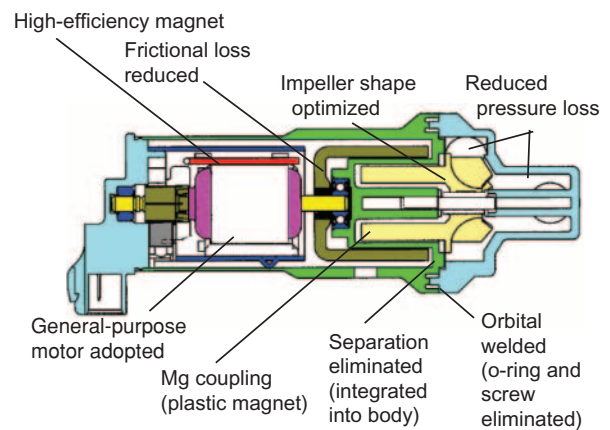


Fig. 21 Water pump

Table 4 Specification

Item	Developed	Current
Power consumption (W)	5.2 (0.33)	15.7 (1)
Flow rate (L/min)	6	←
Weight (g)	330 (0.75)	440 (1)

6. 蓄熱システムの効果

Fig. 22に，今回開発した蓄熱システムの効果を示す。車両のエミッションをLA#4モードで測定したところ，全モードの平均でエミッションが14%低減し，当初のねらいどおりの効果を確認できた。

また，暖房性能についても，暖気時間を約1/2まで短縮することができ，排出ガス規制以外の効果も同時に確認できた。

<Evaluation conditions>

Vehicle: Compact passenger car

Cooling system: Engine block flow (running)

Heat accumulation conditions: Water temperature 80°C and capacity 3 L

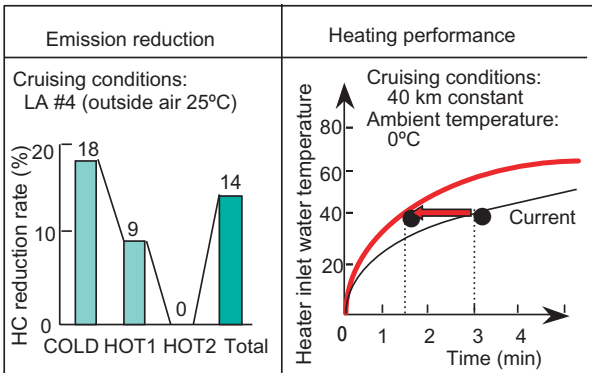


Fig. 22 Heat storage system - effect

7. むすび

本開発により、車両搭載可能な各コーポネントの製品化を実現でき、また、システム全体としても当初のねらいを達成していることを検証できた。

今後は、安定した品質を維持していくことを最優先にしながら、搭載性向上やコスト低減に向けてさらなる改良を実施していく。

最後に、本開発に当たり、夜遅くまで議論し共に開発をしていただいたトヨタ自動車(株)殿、初めて自動車部品の開発に取り組んでいただいたタイガー魔法瓶(株)殿の、多数の関係者の方々に深く感謝いたします。

<著 者>



宮田 喜夫
(みやた よしお)
熱システム開発部
熱マネジメント関連のシステムと
要素技術開発に従事



森川 敏夫
(もりかわ としお)
冷暖房技術1部 (トヨタ2センタ
室へ出向)
A/Cシステムの開発・設計に従事



伊藤 茂雄
(いとう しげお)
熱システム開発部
熱マネジメント関連の温水部品開
発に従事



豊島 敬
(とよしま たかし)
熱システム開発部
熱マネジメント関連のシステムと
要素技術開発に従事