

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「金型・溶接技術の高度化による環境に優しい

低コスト吸音型積層ギア製造工法の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人 京都高度技術研究所

## 目 次

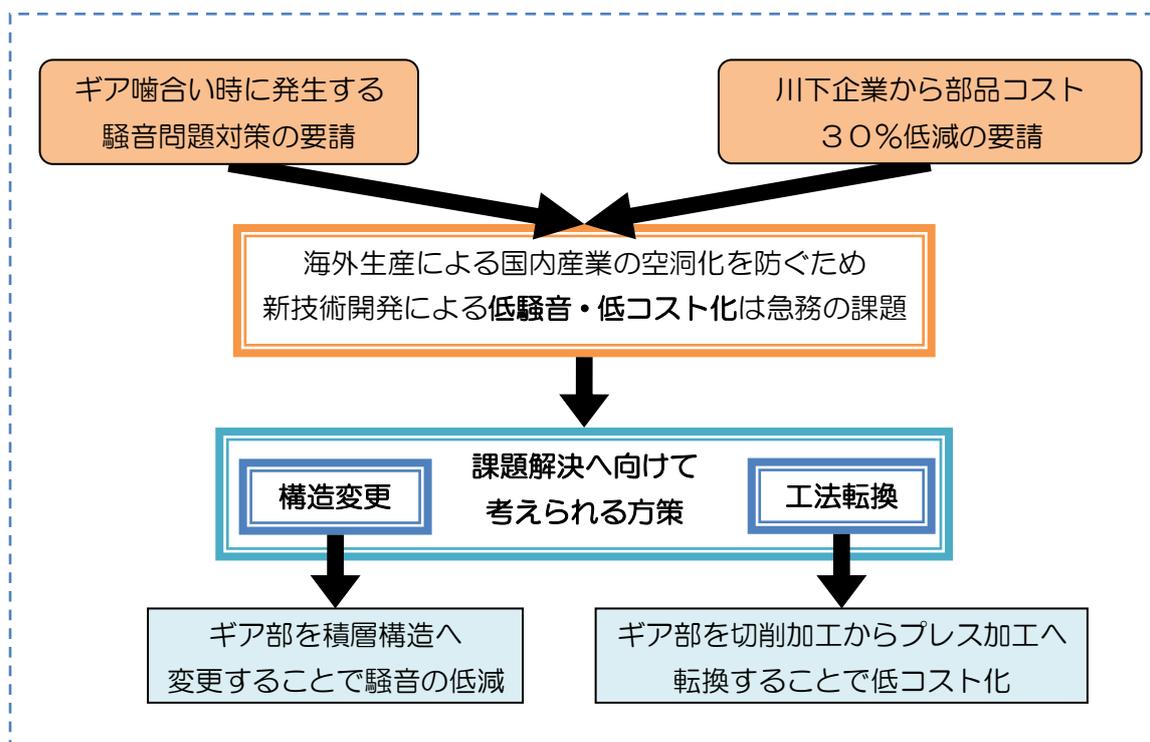
第1章 研究開発の概要	1
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.2 研究体制	2
1.3 成果概要	4
【専門用語解説】	4
1.4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	7
2.1 CAEによる構造設計の研究開発	7
2.1.1 駆動ギア	7
2.1.2 被動ギア	9
2.1.3 プレス成形解析	10
2.1.4 振動解析による静音性評価	12
2.2 トリプルユニット工法の確立	13
2.2.1 半抜き加工	14
2.2.2 積層溶接	14
2.2.3 完全打抜き加工	18
2.3 評価試験	19
2.3.1 加工精度の評価	19
2.3.2 ギア部耐久性評価	21
2.3.3 プレート部耐久性評価	23
2.3.4 ギアの負荷能力評価	27
最終章 全体総括	33
3.1 研究開発の成果	33
3.2 事業化展開	34

## 第1章 研究開発の概要

### 1. 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

中国をはじめとする新興国では人件費が安く、日本で製造する場合と比較して、約30%安く部品を製造することが可能である。かかる現状において、川下企業は競って海外進出に向けた低コスト車の生産を進めていることから日本における川上企業に対して製品コストの30%削減を要求している。一方、低炭素社会における自動車技術として燃費向上に効果的なアイドルリングストップ機能が注目されているが、エンジン始動時のギア噛合いによる騒音が問題視されている。

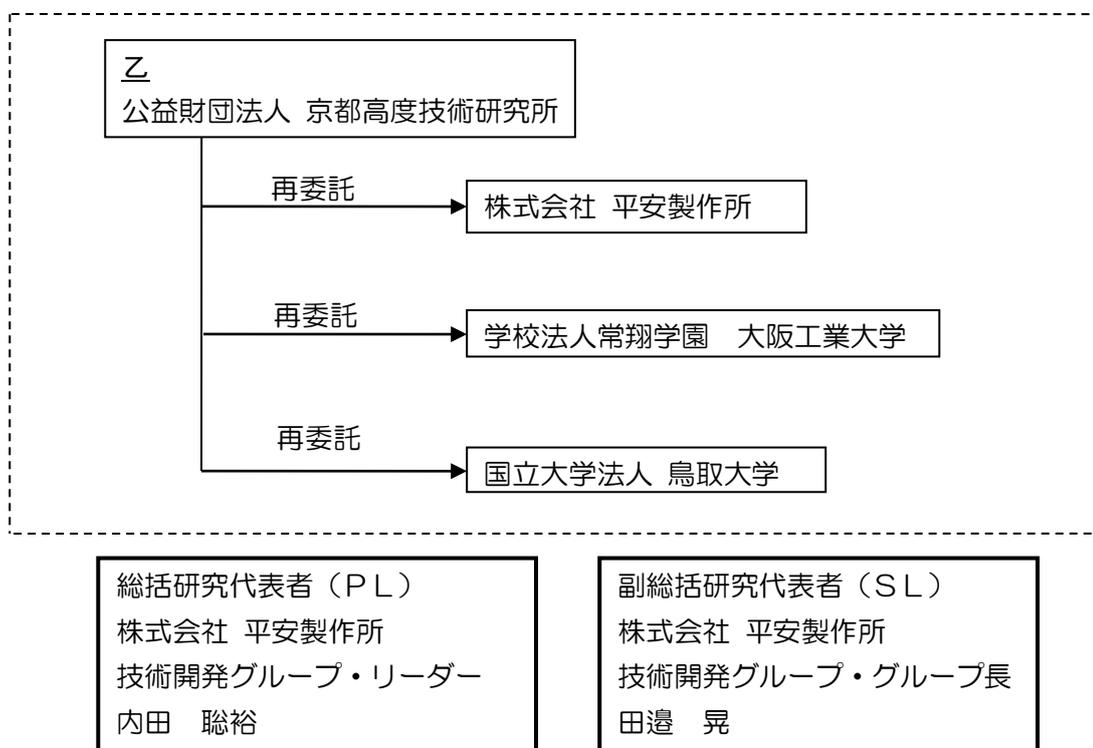
そこで、本研究開発では、自動車エンジン始動用ギアを対象として、ギア部を切削加工からプレス加工に工法転換することで、低コスト化とCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減を実現することを目的とする。さらに、積層構造の採用により噛合い騒音を低減できる革新的なギアの製造工法を開発する。



エンジンを搭載した自動車の国内生産は年間800万台である。全てのエンジン始動用ギアを吸音型積層ギアに置き換えれば、800万台×コスト低減額330円で年間25億円程度のコストダウン、騒音レベル25%低減が可能である。また、本研究開発を通じ吸音型積層ギア的设计方法を確立することにより他産業へ技術を拡大できる。平成22年全産業ギアの生産統計額は290億円(経産省「機械統計」)であることから、上記効果より、全産業のギアに波及すると年間107億円のコストダウンとなる。さらに、コスト競争力ならびに世界生産台数の占有率向上、環境配慮、雇用創出をすることが出来る。全産業のギア適用箇所での合理化を実現する事が可能である。

## 1. 2 研究体制

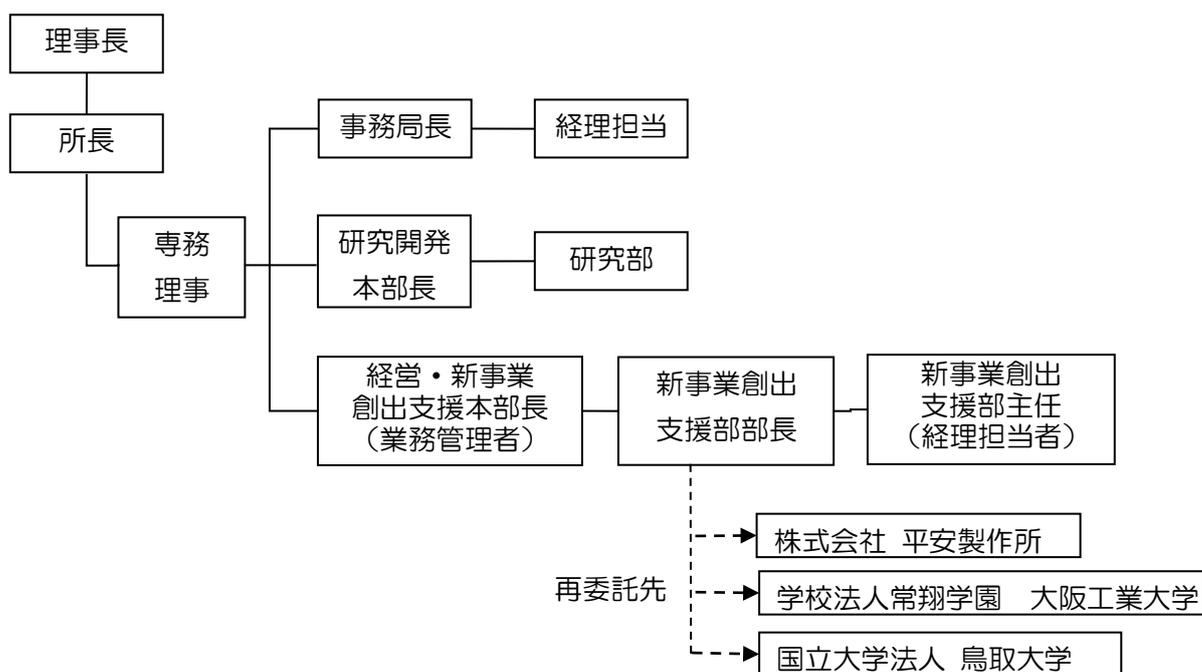
### 研究組織



### 管理体制

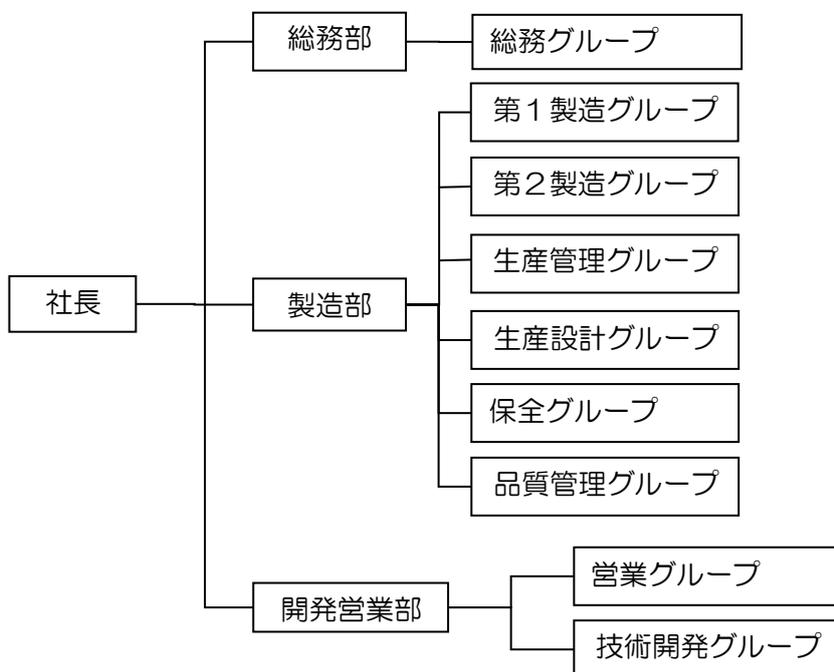
#### ①事業管理機関

公益財団法人 京都高度技術研究所

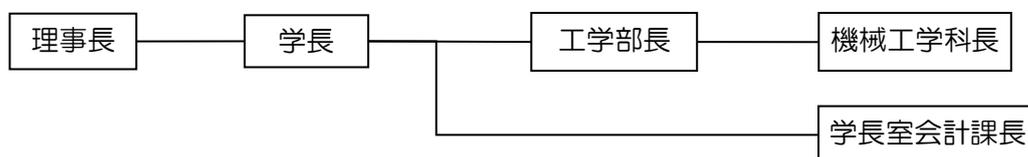


②再委託先

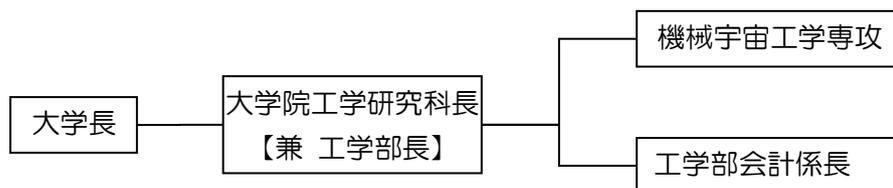
株式会社 平安製作所



学校法人常翔学園 大阪工業大学



国立大学法人 鳥取大学



研究者氏名

(株式会社 平安製作所)

内田 聡裕 (PL)、田邊 晃 (SL)、澤井 法美、城間 紀彰、堯部 憲嗣、  
中司 雄大、鬼頭 直宏

(学校法人常翔学園 大阪工業大学)

上辻 靖智 准教授

(国立大学法人 鳥取大学)

宮近 幸逸 教授、小出 隆夫 教授

### 1. 3 成果概要

本研究開発において、次のような成果を得る事ができた。

#### 1. 3. 1 CAEによる構造設計の研究開発

強度評価として、曲げ剛性解析、固有値解析及び周波数応答解析を実施し、ギア部だけでなく、プレート部を含めた全体的な評価を行った。従来型および積層型のドライブプレートと比較し、積層構造の効果を定量化して安全性と機能性を考慮したギア構造設計システムの構築を達成した。

#### 1. 3. 2 新工法（平安式トリプルユニット工法）の工程設計・開発

ドライブプレートの強度、耐久評価を実施するため、高精度な最終評価用試作型を製作することでトリプルユニット工法を確立した。トリプルユニット工法の目的は、半抜き加工においてはギア部の割れ及びダレの抑制、積層溶接では多点同時溶接と高炭素鋼板による焼鈍条件の見極め、完全打抜き加工ではギア部の平滑なせん断面を確保する事である。

#### 1. 3. 3 評価試験

下表の強度評価及び耐久評価を実施した。

項目	結果
歯形精度測定	○
硬度測定	○
ピニオンギア飛込み耐久試験	○
振動耐久試験	○
曲げ剛性試験	○
ねじり強度試験	○
回転曲げ疲労試験	○
バースト試験	○

さらに、鳥取大学にて製作した動力循環式運転試験機やパルセータを用い、ギアの負荷能力評価を実施し、吸音型積層ギアの特性を検証した。

#### 【専門用語解説】

固有値解析 …構造（製品）が持っている振動的な特性を求める解析手法である。振動的な特性とは固有振動数、固有モードの事をいう。

周波数応答解析 …単純な正弦波の入力に対する定常的な応答を求める解析手法である。応答としては各節点における変位、速度、加速度、またそれにより生じる要素の応力などを評価する事ができる。

トリプルユニット工法…吸音型積層ギアを製作するにあたり、平安製作所が考案した「半抜き加工・積層溶接・完全打抜き加工」である。

## 積層溶接

…本研究開発で製作する吸音型積層ギアは、下図のような構造で積層するため、それぞれを円周状に配置した突起と穴の組合せでプロジェクション溶接を行う。



図 1-3-1 突起と穴

## シェーピング加工

…通常の打抜き加工では得られない、ダレやカエリのない平滑なせん断面が必要な場合に用いる。抜き加工時に断面をわずかに（板厚の5%～10%程度）削って滑らかにする。抜き加工のあとに別工程（大抵は順送金型に使用）で行われる。

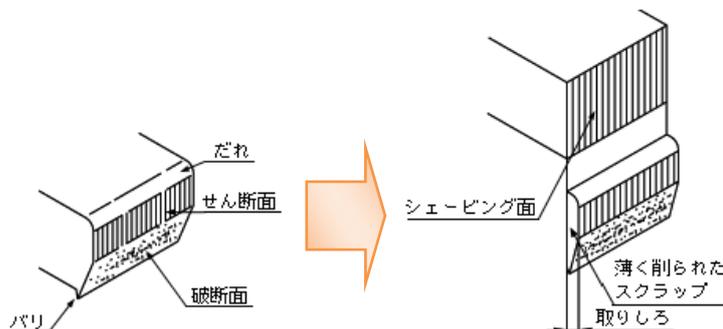


図 1-3-2 シェーピング加工図

## 1/3 オクターブ分析

…計測する騒音に対して、可聴周波数範囲（20Hz～20kHz）で1/3オクターブ毎の各周波数を捉えることができる。オクターブを3分割した時の音の関係で、人間の聴覚特性と近似する。

## カラーチェック

…検査用の浸透液（赤色など）をクラック発生箇所と思われる部位に塗布する。浸透時間は浸透液の種類や被検査物の材質・温度などにより決める（一般的に5～10分程度）。適当な浸透時間経過後に、材料表面から浸透液を除去し、表面が乾燥したら現像液（白色など）を塗布する。これにより、

クラック内にしみこんでいた浸透液が材料表面ににじみ出し、視覚的にクラック発生箇所が探傷できる。

1. 4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人 京都高度技術研究所

経営・新事業創出支援本部長 孝本 浩基

〒600-8813

京都市下京区中堂寺南町134番地

Tel : 075-315-3625 (代表) Fax : 075-315-3614

E-mail : [komo@astem.or.jp](mailto:komo@astem.or.jp)

## 第2章 本論

### 2. 1 CAE による構造設計の研究開発

自動車エンジン用積層ギア的设计・開発を支援することを目的として、3次元CADによる形状モデリングと有限要素解析による機械的特性を評価し、安全性および信頼性を調査した。具体的には、自動車エンジン用バラサギアの駆動ギアおよび被動ギアを対象として歯元曲げ解析を実施し、従来型切削ギアと吸音型積層ギアを比較した。特に、かみ合い歯と溶接点の位置関係に着目し、歯元曲げ応力に及ぼす影響を調査した。また、被動ギアに関しては軽量化のための肉抜き穴の影響も検討した。

#### 2. 1. 1 駆動ギア

歯元曲げ応力解析を実施した3つのバラサギアの形状モデルを図2-1-1に示す。図中(a)は切削加工により製作された従来型切削ギア (Type C) である。(b)および(c)は新工法による3層積層ギアであり、前者 (Type A) は溶接点が歯形中心線上に、後者 (Type B) は歯溝中心線上に位置する。3層を合わせた板厚は、Type Cの板厚に等しい。

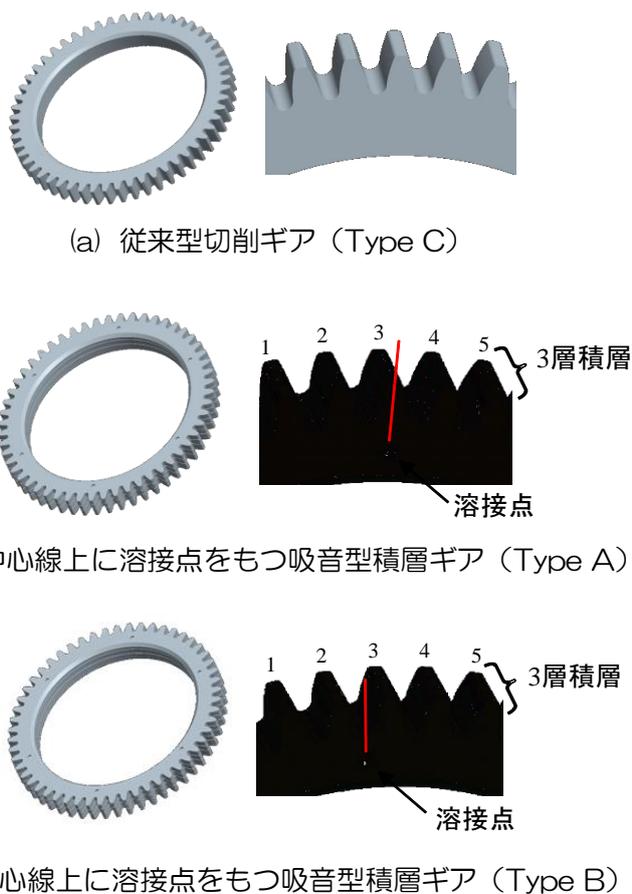
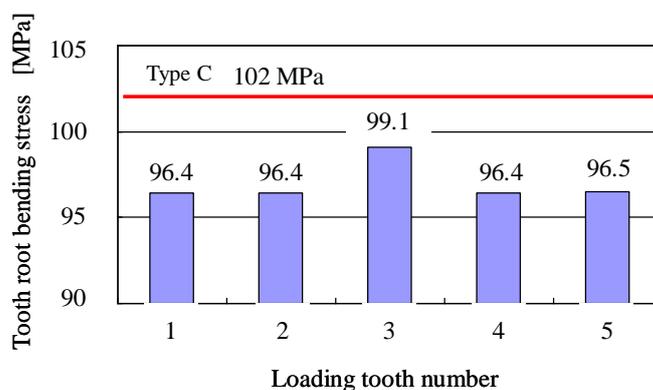


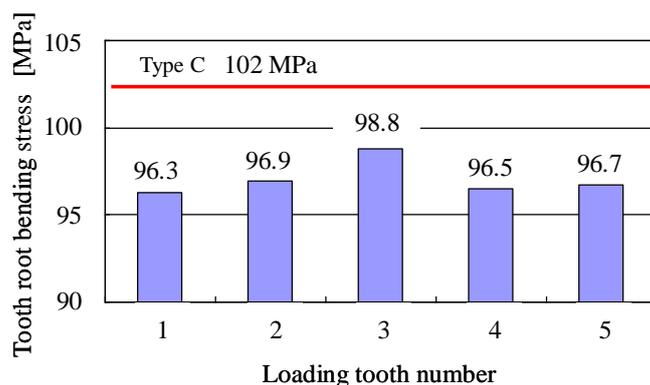
図 2-1-1 従来型切削ギアと吸音型積層ギアの形状モデル

有限要素モデルの生成において、かみ合い歯近傍の歯部分に対して 6 面体 1 次要素を適用し、リング部分には 4 面体 2 次要素、それ以外の領域には 4 面体 1 次要素を採用した。図 2-1-2 に示す 1 から 5 のいずれか 1 つの歯がかみ合った場合を想定して、基準ピッチ円上の節点に対して歯面の法線方向に 0.02mm の強制変位を与えた。材料には、熱間圧延高張力鋼板 SPFH590 を想定した。

Hofer の 30° 接線法により定められた危険断面における最大主応力を歯元曲げ応力として評価した。図 2-1-2 に解析により得られた歯元曲げ応力の比較を示す。(a) は溶接点が歯形中心線上にある Type A、(b) は溶接点が歯溝中心線上にある Type B の結果で、図中横軸は負荷した歯の番号を意味する。従来型切削ギアの Type C と比較すると、吸音型積層ギアは剛性が低く同一の強制変位を与えた場合に発生する曲げ応力は低下することが分かる。また、いずれの吸音型積層ギアにおいても負荷位置が溶接点から離れるに従って歯元曲げ応力が低下することが分かる。



(a) 歯形中心線上に溶接点をもつ吸音型積層ギア (Type A)



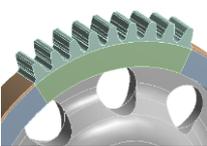
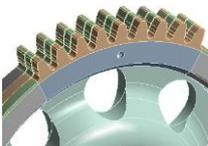
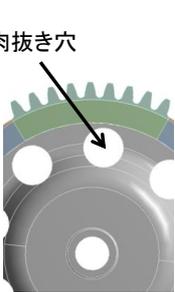
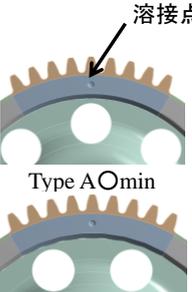
(b) 歯溝中心線上に溶接点をもつ吸音型積層ギア (Type B)

図 2-1-2 歯元曲げ応力に及ぼす溶接位置の影響

## 2. 1. 2 被動ギア

表 2-1-1 に解析対象とするバランサ被動ギアの種類を示す。プレートに軽量化のための肉抜き穴がない従来型切削ギアを Type C×、肉抜き穴がある従来型切削ギアを Type COと表記する。一方、歯形中心線上に溶接点をもつ吸音型積層ギア Type Aのみを対象とし、プレートに軽量化のための肉抜き穴がない吸音型積層ギアを Type A×、肉抜き穴と溶接点の距離が最小である吸音型積層ギアを Type AOmin、肉抜き穴と溶接点の距離が最大である吸音型積層ギアを Type AOmax と表記する。

表 2-1-1 バランサ被動ギアの種類

	従来型切削ギア Type C	新型積層ギア Type A
		
肉抜き穴なし		
肉抜き穴あり		
	Type CO	Type AOmax

回転軸に固定される中心部の内径側面を完全固定し、かみ合い歯の基準ピッチ円上の節点に強制変位を付与した。ピッチ円上の節点に与えた強制変位量は、強制変位を与えた節点に生じる反力の総和がいずれのギアにおいても同一になるように調整した。また、かみ合い歯の位相は、表 2-1-1 中に示すように 1 番から 9 番まで変化させ、溶接点から距離の影響を調査した。従来型切削ギアと吸音型積層ギアの差異、軽量化のための肉抜き穴の有無の影響を定量的に把握するため、それぞれのギアに生じた歯元曲げ応力の比較を図 2-1-3 に示す。なお、吸音型積層ギアでは応力が最小であった 5 番、最大であった 9 番および 8 番の歯がかみ合った場合の解析値を示す。歯従来型切削ギアの場合、プレート部に肉抜き穴を設けることで、歯元曲げ応力が 24.7%増加することが分かる。また、吸音型積層ギアの場合でも、溶接点に最も近い位置に肉抜き穴を設けると、最も危険な状態で歯元曲げ応力が 51.3%増加することが分かる。一方、肉抜き穴

がある場合、従来型切削ギアと比較して、吸音型積層ギアに生じる歯元曲げ応力は最も危険な状態で31.6%増加することが分かる。さらに、吸音型積層ギアにおいて溶接点から肉抜き穴を最も離れた場合、歯元曲げ応力の最大値を11.0%低減できることが分かる。

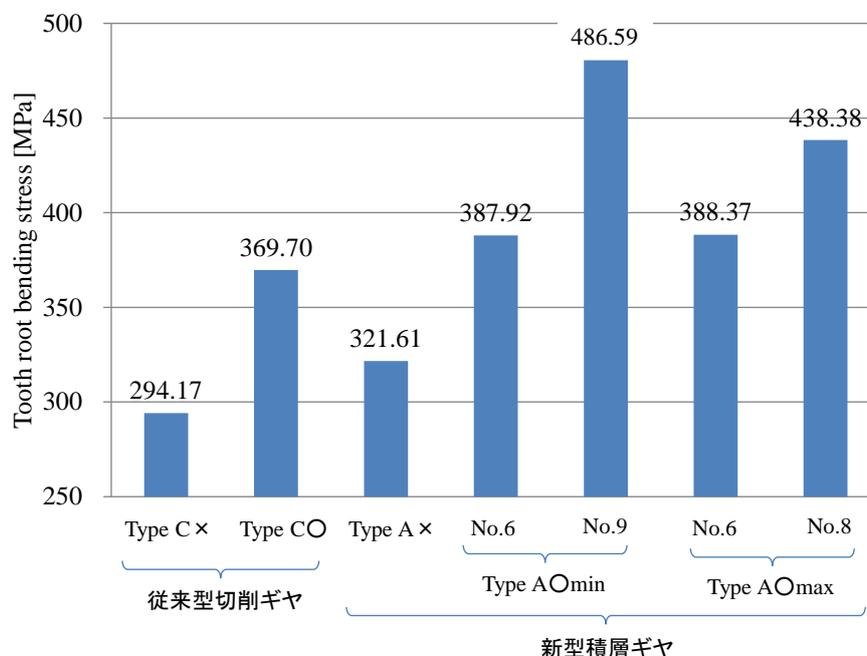


図 2-1-3 一歯かみ合い状態に発生する歯元曲げ応力の比較

### 2. 1. 3 プレス成形解析

自動車エンジン用積層ギアのプレス成形を支援するため、バラサギアを対象としてプレス成形シミュレーションを実施した。ブランク材として熱間圧延高張力鋼を想定し、降伏判定には Hill 降伏関数、硬化則には Swift の式を採用した。プレス成形シミュレーションに使用したダイ、パンチの外観を図 2-1-4 に示す。ダイは中空円筒であり、内径側にギアの歯形が形成されている。一方、パンチは中実円筒であり、外径側にギアの歯形を有する。

下から順にパンチ、ブランクホルダー、ブランク、ダイと配置され、パンチとダイの水平方向のクリアランスは 0.0 mm に設定した。パンチを固定した状態で、ブランクホルダーカ(クッション圧)を 98.1 kN とし、1.0 mm/ms の速度でダイを降下した。ブランク材の板厚は 4 mm、半径は 70mm に設定した。

プレス成形シミュレーションにより得られた塑性変形量と押し込み量との関係を図 2-1-5 に示す。成形高さは押し込み量の増加に伴って線形的に増加し、最小板厚は線形的に減少する傾向が確認できる。一方、ダレ長さおよびダレ高さは押し込み量が 1.5 mm 付近まで増加した以降は、大きく変化しないことが分かる。

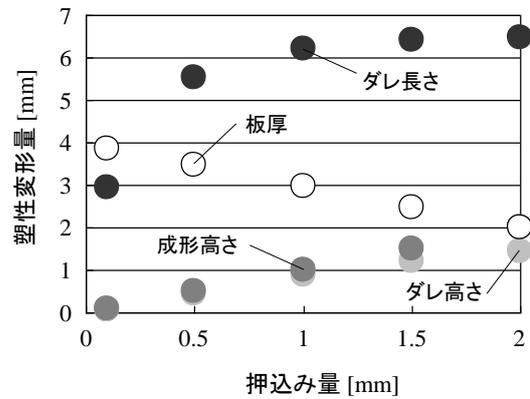
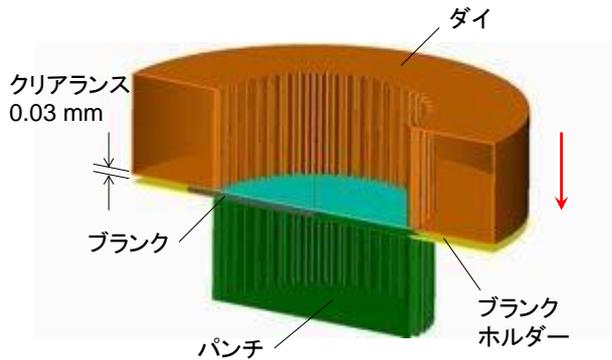


図 2-1-4 ダイおよびパンチの外観

図 2-1-5 塑性変形量と押し込み量との関係

次に、ダレ高さに及ぼすプレス成形条件の影響を調査するため、前述のプレス成形条件を標準値とし、ブランク半径、押し込み速度、ブランクホルダー力を 20%増加または減少させ、パンチとダイの水平方向のクリアランスを 0.5mm 増減させて、プレス成形シミュレーションを実施した。その結果、プレス条件が標準値の場合と比較し、ブランク半径を 19%減少させた場合、ダレ高さは 8.7%減少、パンチとダイの水平方向クリアランスを 0.5mm 減少させた場合、ダレ高さは 6.9%減少したことから、ダレ高さを低減するには、ブランク半径および水平方向クリアランスを小さく設定することが有効であることが判明した。そこで、ブランク半径および水平方向クリアランスのいずれも小さく設定した条件でプレス成形解析を行った。解析により得られたダレ高さの比較を図 2-1-6 に示す。プレス条件を標準値に設定した場合と比較し、ブランク半径および水平方向クリアランスを同時に小さくした場合、ダレ高さを 18%低減できることが明らかになった。

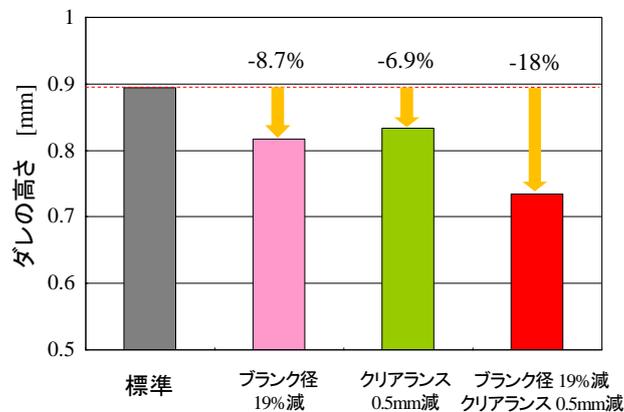


図 2-1-6 プレス成形条件の改善に伴うダレ高さの低減

## 2. 1. 4 振動解析による静音性評価

自動車エンジン用積層ギアの静音特性を明らかにすることを目的として、図 2-1-7 に示すドライブプレート（エンジン始動用ギア）を対象とし、3次元CADによる形状モデリングと有限要素法による振動解析を実施した。図 2-1-7(a)は比較対象とする従来型切削ギアであり、プレート層の中心領域は板厚 2.9mm、外周のギア領域は板厚 8.7mm の構造を有する。図 2-1-7(b)は吸音型積層ギアであり、プレート層は従来型切削ギアと同じで板厚 2.9mm、外周のギア領域が 3 層構造となっている。層間には溶接によるクリアランスが存在するが、3 層の板厚の総和は従来型切削ギアと等しい。

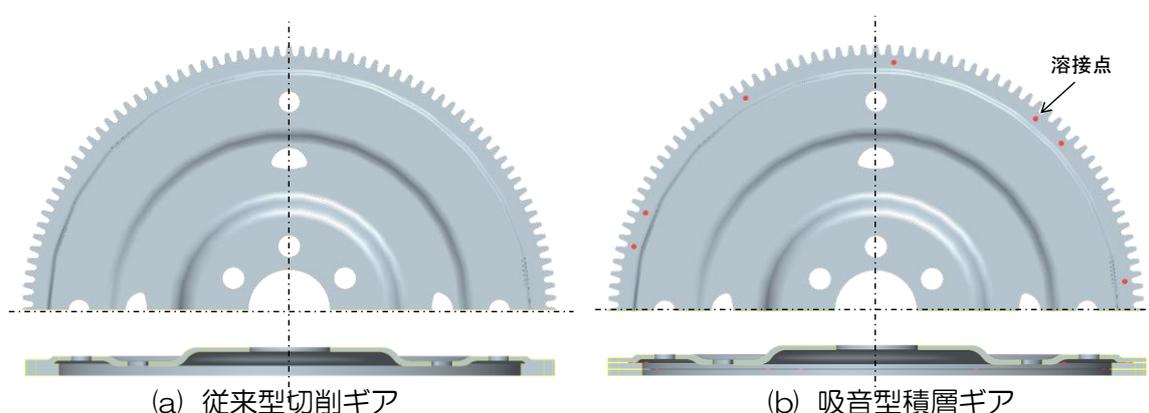
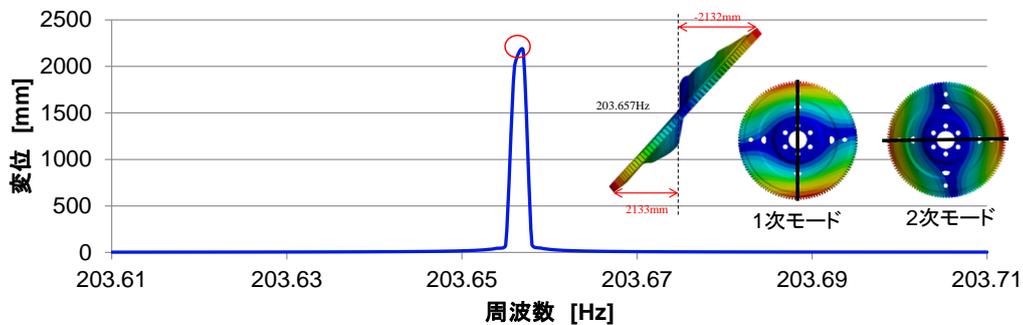


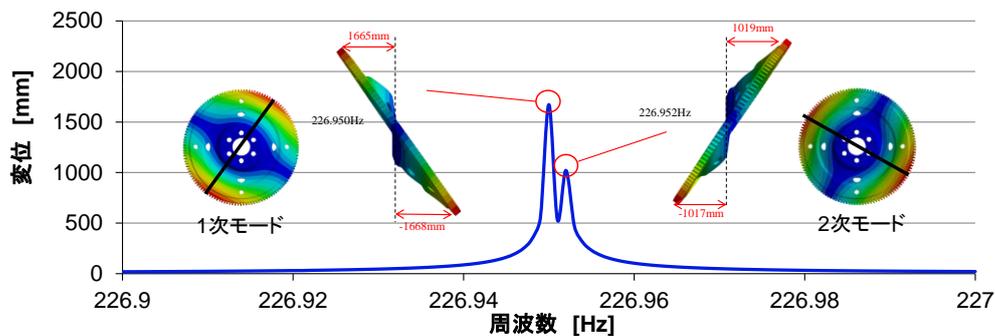
図 2-1-7 自動車エンジン始動用ドライブプレートの形状モデル

従来型切削ギアおよび吸音型積層ギアに対して、周波数応答解析を実施した。固定条件は、プレート部の 6 つのボルト固定用穴の側面を完全拘束とした。負荷条件は一歯かみ合い状態を想定して、1 つの歯の基準ピッチ円上に合計 166.76N の等分布荷重を正弦波関数として負荷した。図 2-1-8 に 1 次モードの固有値付近の周波数応答解析結果を示す。図 2-1-8(a)に示す従来型切削ギアの場合、およそ 203.66Hz に共振ピークが確認できる。一方、図 2-1-8(b)に示す吸音型積層ギアの場合、226.95Hz 付近に 2 つの共振ピークが現れた。変形モードを確認すると、共振時の変形は従来型切削ギアの場合は 1 次および 2 次の変形モードに等しく、吸音型積層ギアの場合は 1 つ目の共振ピークは 1 次、2 つ目の共振ピークは 2 次の変形モードに相当することを確認した。吸音型積層ギアは、従来型切削ギアと比較して共振ピークが 2 つに分離することで変位応答が小さくさり、静音性に優れると言える。吸音型積層ギアにおける 2 つの共振ピーク出現のメカニズムを明らかにするため、外周ギア部に面外方向に外力を加えた場合の変位を解析し、曲げ剛性の円周方向分布を調査した。その結果、従来型切削ギアの場合、1 次モードと 2 次モードは物理的に等価であり、これらが分離することなく 203.66Hz に 1 つの共振ピークを形成する。これに対して、吸音型積層ギア

の場合、溶接点の影響により曲げ剛性は円周方向の位置に応じて複雑に変動し、これにより 1 次モードと 2 次モードが物理的に異なるため、これらが分離して 226.95Hz 付近に 2 つの共振ピークとして出現することが判明した。



(a) 従来型切削ギア



(b) 吸音型積層ギア

図 2-1-8 1 次モード付近の周波数応答解析結果

## 2. 2 トリプルユニット工法の確立

半抜き加工は、ギア部のダレ最小化を目的として、プレス成形シミュレーターを用いて高炭素鋼板（難加工材）に対応できる金型を開発し、解析データと試作金型による実験データを基に最適な加工条件の探索を実施する。積層溶接については、高炭素鋼板に対する溶接技術、焼鈍技術及び多点同時溶接技術の高度化を図る。ギア部の完全打抜き加工については、せん断加工による完全打抜き加工の有効性を検討したうえで、解析及び検証実験を通じて良好な加工面を得るためのシェーピング加工条件の探索を実施する。

吸音型積層ドライブプレートの強度評価及び耐久評価を実施するため、高精度な最終評価用試作型を製作することで、トリプルユニット工法を確立した。その方策として、半抜き加工と完全打抜き加工については、【2. 3 評価試験】で得た結果を試作型の設計へフィードバックし、吸音型積層ドライブプレートの形状仕様を決定した。積層溶接につ

いては、耐久試験に耐えうる強度の確保を目的とし、焼鈍方法の選定トライの実施及び溶接点数・突起形状・溶接条件の最適化を目指すことにより、トリプルユニット工法を確立した。以降に各加工工程の詳細を記述する。

### 2. 2. 1 半抜き加工

半抜き加工については、前年度と同様の工程である。図 2-2-1 に半抜き加工の加工工程を示す。まず、ブランク加工で外径と位置決め穴を加工した。その後、面成形加工で形状部分を成形、3 工程目で 4 点の位置決め用穴を打抜く。多点同時溶接用の突起と穴を加工し、最後に半抜き加工は、歯形を打抜かず途中止めする事で、打抜く際に発生する破断による表面粗さ悪化の防止とダレの最小化を実現した。

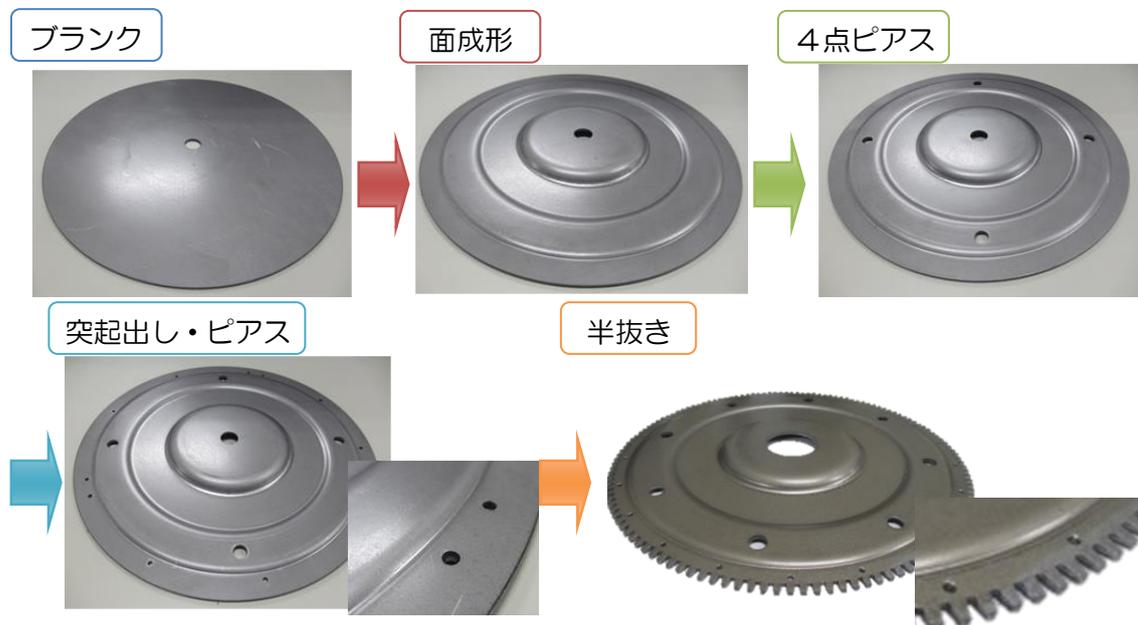


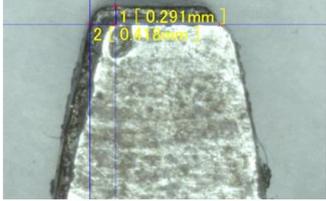
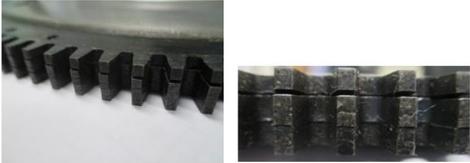
図 2-2-1 半抜き加工工程

### 2. 2. 2 積層溶接

昨年度は 12 点同時溶接を基本とし、溶接条件や焼鈍条件を選定したが、本構造で今年度を実施した高周波焼入れトライ時に溶接外れが発生した。そこで、改めて多点同時溶接トライを、溶接点数、突起形状、溶接条件の見直しを実施した。

表 2-2-1 は、高周波焼入れトライ結果の問題点である。回転方向と外径方向に対するズレがあり、層間のスキマも溶接が外れることにより発生していた。

表 2-2-1 高周波焼入れ後の問題点

問題点	<片持ち>部位と変形量 (デジメイト加測) で計測)
回転方向のスレ / 外径方向のスレ	回転方向-0.300mm / 外径方向-0.518mm 
層間のスキマ	スキマ-0.300mm 

溶接強度、溶接硬度等調査した結果、溶接外れはせん断強度 500kgf 未満であると発生する事が判明した。各 1 点当たりのせん断強度が最少で 500kgf 以上確保可能な積層溶接が必要である。スレ、スキマの原因は、溶接外れだけでなく、溶接打点間の間隔 (max35.46°) が広く、不均一である事も大きな要因であった。対策として、

①溶接点数の増加による歪み量軽減

…12 点⇒22 点 → 点数増加により、突起径を小さくする必要がある(図 2-2-3)  
(溶接機能力の限界) **4 型⇒5 型**(図 2-2-3)

②溶接打点位置の均等化 (打点間角度 **16.36°** 均等) (図 2-2-2)

③電極の形状変更による溶接強度向上及びバラツキ抑制(図 2-2-4)

以上、3 点の対策を施した。①は溶接点数を増加させる事で、②に繋がる打点間の角度を抑えて、歪み量を軽減させる。ただ、溶接点数が増加する事で、溶接に要する電流値が推測では不足しているため、突起径が小さい 5 型に変更した。③は電極の形状を変更する事で、より溶接点に電流が流れるように工夫した。

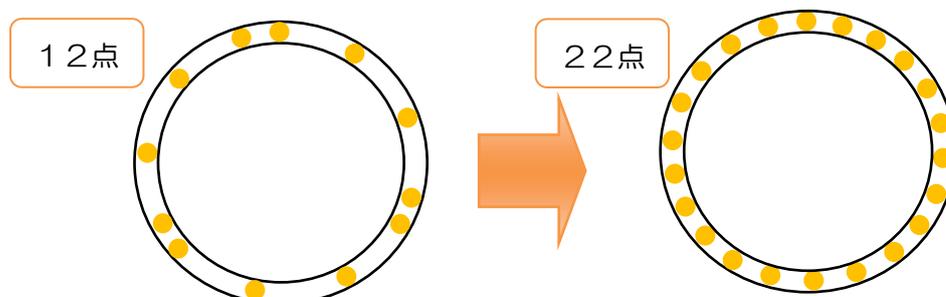


図 2-2-2 溶接点数の変更

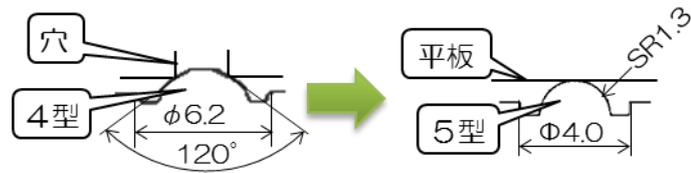


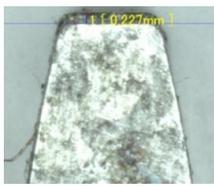
図 2-2-3 溶接突起形状と組合せ



図 2-2-4 電極形状変更

対策後の積層溶接トライを表 2-2-2 に示す。1 点当たりのせん断強度が高い溶接点は、回転方向のズレが 0.1mm、外径方向のズレが 0.227mm で歪みの抑制はできたが、部分的に溶接外れが発生した。原因は高周波焼入れ時に発生するプレート部の圧縮力、リングギア部の膨張力に対して、溶接部のせん断強度不足であった。

表 2-2-2 高周波焼入れ後の問題点

問題点	<片持ち>部位と変形量 (ゲージ外径加圧機で計測)
回転方向のズレ / 外径方向のズレ	回転方向-0.1mm / 外径方向-0.227mm 
層間のスキマ	スキマ-0.03mm以下 



部分的に溶接外れ発生

さらなる対策として、

- ① 22点から16点へ溶接点数を減らす…1点当たりのせん断強度向上
- ② 5型から4型へ戻す…せん断強度向上
- ③ 電極径に対する電流値バラツキ調査…適正な電極径の選定

以上、3点の対策を施した。①は溶接点数が22点では多すぎたことにより、溶接機の能力が足りなかったため、16点へ減らす事で、溶接打点間の角度を安定の範囲内で保ちつつ、1点当たりのせん断強度を向上する事ができる。図 2-2-3 で示すように、②は溶接突起径が小さい5型から4型へ溶接突起径を戻す事で、せん断強度を向上させた。電流値不足が懸念されるが、③で適正な電極径を選定する事で、溶接点へ電流を流しやすくした。さらに、図 2-2-5 の結果より、各溶接点に発生する電流値のバラツキを抑制した事で、電流値不足の問題を解消した。



図 2-2-5 適正な電極径の選定

結果として、表 2-2-3 に示す 16 点突起と4型の組合せで、前回トライのせん断強度より、約 2.0 倍増のせん断強度確保に成功した。さらに、1点当たりのせん断強度最小値が、溶接外れが発生する 500kgf 以上の 823kgf を達成した。

表 2-2-3 せん断強度確認結果

突起形状	溶接点数	せん断強度 (kgf)		
		最大	最小	平均
5型	22点 (前回トライ)	940	250	540
4型	22点 N数44個	1,604	736	1,024
4型	16点 N数32個	1,810	823	1,100

約2.0倍増

16点と4型突起の組合せで、高周波焼入れトライを実施した。表 2-2-4 からわかるように、焼入れによる歪みはほぼ無くなり、層間のスキマも測定可能範囲で無くす事ができた。微少なズレは残っているが、製品機能上問題無しであった。歯車の噛合いに影響する基準ピッチ円直径部 (図 2-2-6 (R) 部) の歯面ズレが小さければ、歯車として問題が無いとの事である。

表 2-2-4 最終高周波焼入れトライ結果

問題点	焼入れによる歪み	層間のスキマ
部位と 変形量 (デジタル マイクロ コープで 計測)	基準ピッチ円直径部の歯面ズレ(R) …0.06mm(max) 外径方向のズレ …0.19mm(max) 	スキマ—0.03以下 

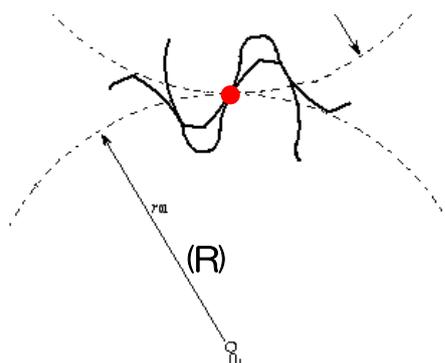


図 2-2-6 基準ピッチ円直径

### 2. 2. 3 完全打抜き加工

完全打抜き加工では、半抜き加工で残留しているスクラップ部分を、シェーピング加工と同時に打抜いている。ここで歯形精度が決まるため、3工程かけてシェーピング加工を施し、平滑なせん断面を確保している。後述の<歯形精度測定>時に JIS B 1702 の歯車精度 N11 級を目的としているが、昨年度は満足できていなかった。

その対策として、シェーピング試作型 4、5（昨年度シェーピング試作型 1～3 製作）の 2 型を製作し、歯車精度を向上させた。図 2-2-7 にシェーピング試作型 4、5 を示す。左図のダイセットは共用で使用し、右図の型部品のみ取替えた。



図 2-2-7 シェーピング試作型 4、5

金型の仕様変更で、株式会社平安製作所既設の 150t サーボプレス専用金型とした。サーボ機能を利用し、積層されているギア部を 1 モーションで 1 枚ずつ加工する事で、プレス加工油を金型に都度循環させた。



図 2-2-8 150t サーボプレス

金型設定は、昨年度のシェーピング試作型1～3が0.1mm ずつギア部を削いでいたのに対して、シェーピング試作型4、5は0.03mm ずつ削ぐ設定にする事で、歯車精度をより向上させる事に成功した。歯車精度測定は後述する。



図 2-2-9 シェーピング試作型4、5加工品

## 2. 3 評価試験

下記のあらゆる強度評価を実施し、安心・安全な製品の提供を目指す。さらに、鳥取大学にて製作した動力循環式運転試験機やパルセータを用い、ギアの負荷能力評価を実施し、吸音型積層ギアの特性を検証した。

### 2. 3. 1 加工精度の評価

#### <歯車精度測定>

ギアの精度を確認するため三次元測定機を利用し、歯車精度を測定した。測定結果は、シェーピング試作型5で製作した加工品である。測定結果は表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 歯形精度測定結果

歯形精度	歯すじ精度	単一ピッチ精度	累計ピッチ精度	歯溝の振れ精度
N10 級	N10 級	N9 級	N10 級	N10 級

<硬度測定>

吸音型積層ドライブプレートは、材質 S45C を使用しており、高周波焼入れを施すことで目標硬度を達成した。図 2-3-1 は加工外注先の熱処理メーカーで行なった確性試験の結果である。1 枚目（図 2-3-1 の○部）だけであるが、2 枚目、3 枚目も同様に目標硬度を達成していた。図 2-3-2 に歯先硬度の最大値を各層ごとに明示している。

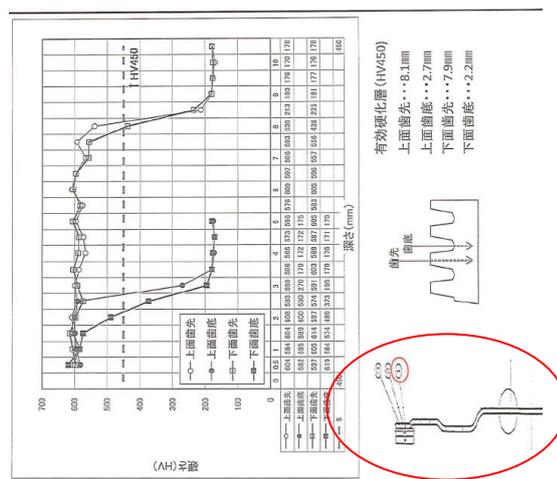


図 2-3-1 確性試験結果

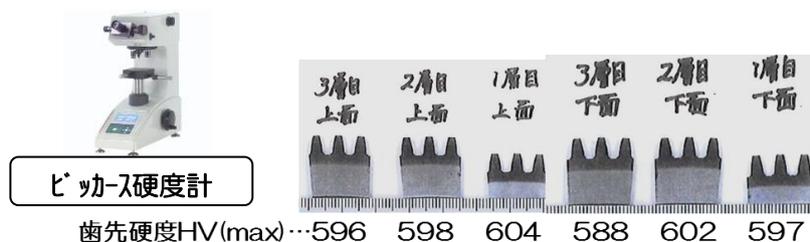


図 2-3-2 歯先硬度最大値

## 2. 3. 2 ギア部耐久性評価

### <ピニオンギア飛込み耐久試験>

ピニオンギア飛込み耐久試験機の製作は、装置製造業者に依頼し、今回の吸音型積層ドライブプレート対応のエンジン機種に合わせて改造した。試験機及び吸音型積層ドライブプレート取付部位を図 2-3-3 に示す。



図 2-3-3 試験機及び取付部位



図 2-3-4 試験結果(飛込み歯面)

### <騒音レベル確認>

吸音型積層ギアの吸音効果を調査するため、株式会社平安製作所既設の試験機を用いて、クランキング音（ピニオンギアがドライブプレートに飛込んでから噛み合う時の音）を計測し、従来品と比較した。騒音分析手法：1/3 オクターブ分析

試験条件は、図 2-3-5 に示すように、騒音計で音を収録するため、収録位置は人間の耳の高さを想定した距離 1.2m の高さから、交差点停止時想定距離の 1.5m 離れた位置で設定した。試験品は4点のドライブプレートを用意し比較した。①は平安製作所で一枚の鋼板からプレス成形のみで制作している一体型ドライブプレートである。②は①の内側に制振鋼板をスポット溶接で接合した制振型ドライブプレートである。③は本研究開発の吸音型積層ドライブプレートで、④は他社製のリングギア部とプレート部がそれぞれ別の加工法で造られ、CO<sub>2</sub>溶接で接合している2ピース型ドライブプレートである。

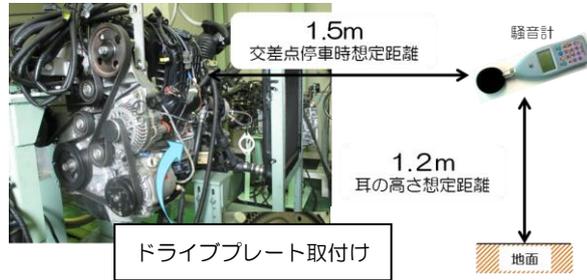


図 2-3-5 試験状態

結果は、図 2-3-6 に示すように現行の一体型ドライブプレートに対して、吸音型積層ドライブプレートは  $1.3\text{dB}$  の吸音効果がある事が判明した。参考で騒音レベルの聞こえ方は、 $6\text{dB}$  で2倍程度変化がある。

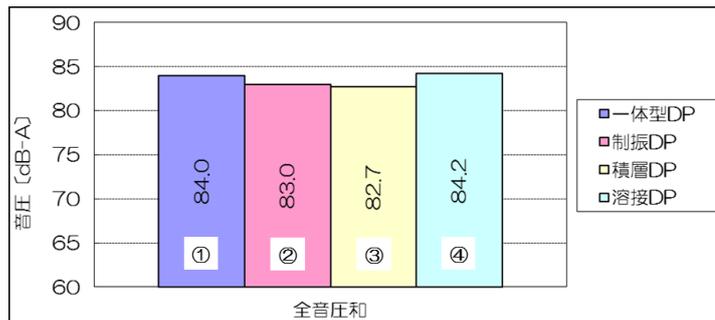


図 2-3-6 各種ドライブプレートの騒音レベル測定結果

### <振動耐久試験>

試験条件としては、図 2-3-7 に示している振動試験機に加振部に、振動試験治具を取付け、その治具に吸音型積層ドライブプレートを組付ける。吸音型積層ドライブプレートに加速度ピックアップを固定し、共振周波数を測定した。その共振周波数にて試験を行なった。結果、カラーチェックで確認したところ（図 2-3-8）、ギア部に破損は見られなかった。

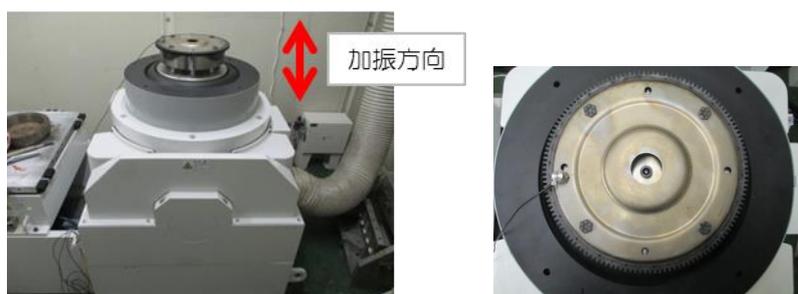


図 2-3-7 振動試験



図 2-3-8 試験結果

## 2. 3. 3 プレート部耐久性評価

### <曲げ剛性試験>

試験準備として、図 2-3-9 に示しているクランクシャフト相当治具と、トルコン相当治具を製作した。クランクシャフト相当治具は、アムスラー試験機自体に固定し、トルコン相当治具に吸音型積層ドライブプレートを組付けた。変位量については、クランクシャフト相当治具にピックを当て、荷重に対して変形量を確認した。

試験結果として、図 2-3-10 に示している変形量推移グラフと表 2-3-2 の各荷重点での変位量からわかるように、変位量が 1 mm の時、荷重は 5,321.9N/mm であった。



表 2-3-2 荷重と変位量

荷重[N]	変位量[mm]
2,000	0.33
4,000	0.74
<b>5,321</b>	<b>1.00</b>
5,800	1.10
6,000	1.14

図 2-3-9 試験状態

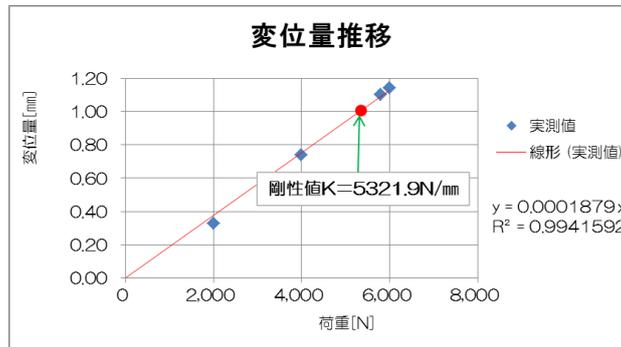


図 2-3-10 変位量推移

### <ねじり強度試験>

本試験は平安製作所既存の設備ではできないため、試験受託業者に試験を依頼した。専用設備であるねじり試験装置（島津製）を使用し、製作したトルコン相当治具で固定し、図 2-3-11 のような試験状態で行なった。可動側からねじりトルクを負荷した。

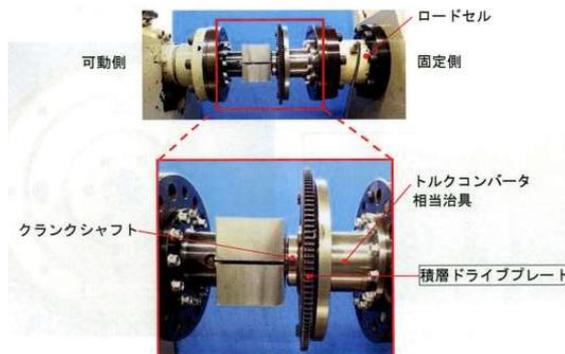


図 2-3-11 試験状態

その結果、図 2-3-12 に示すようにプレート部の破損及びリングギア溶接部の外れや破損は無かった。

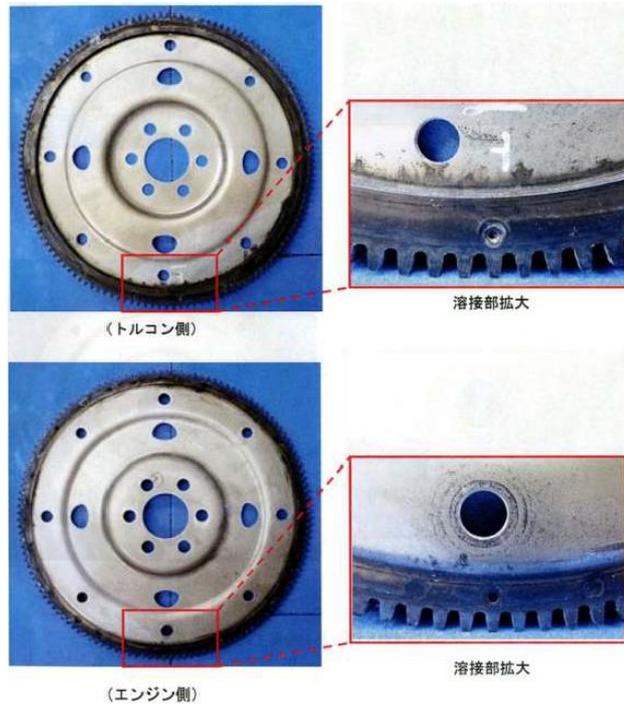


図 2-3-12 試験結果

#### <回転曲げ試験>

試験用として、曲げ剛性試験と同様に、クランクシャフト相当治具とトルコン相当治具を準備した。組付け方法は、クランクシャフト相当治具をモーターとベルトで連結させ、吸音型積層ドライブプレートを固定する。トルコン相当治具はトランスミッション相当の曲げモーメントを受けるよう図2-3-13に示している設定で組付けた。試験は、曲げモーメントを負荷した状態で1,000万回転の運転を行なった。

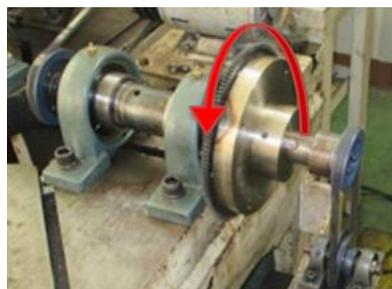


図 2-3-13 試験状態

試験結果は、トルコン相当治具固定部4ヶ所のキワに割れが発生した。このような割れへの対処方法として、図2-3-14の○部の平面度確保が重要である。現状の平面度が0.5mmに対して、割れない実績として0.2mm以下にする事で割れの発生を防いだ。

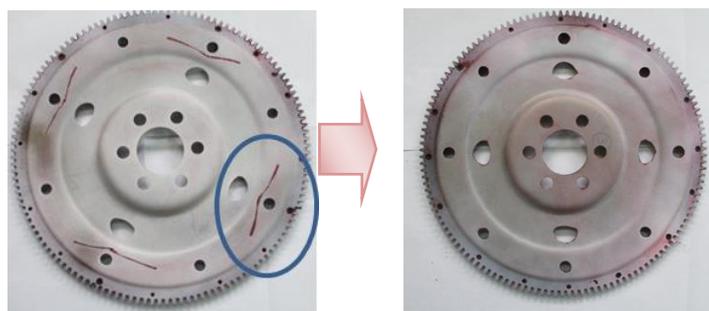


図 2-3-14 試験結果

#### <バースト試験>

バースト試験は、試験受託業者に委託し実施した。図 2-3-15 のバースト試験専用機に吸音型積層ドライブプレートを取付、ドラム内で試験を開始する。試験結果は、図 2-3-16 に示しているように、プレート部に割れ及びクラックはなかった。

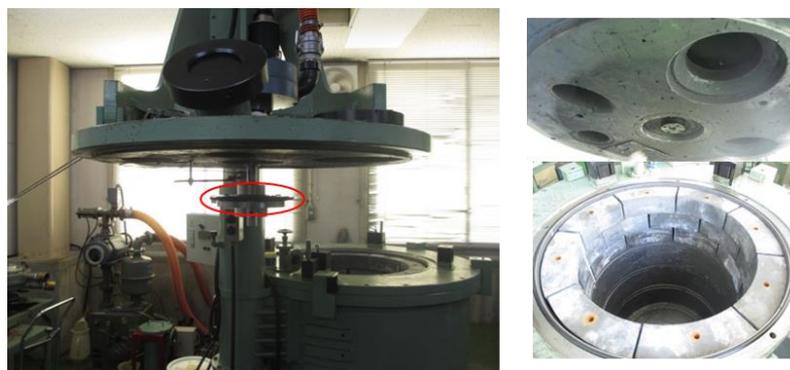


図 2-3-15 試験状態



図 2-3-16 試験結果

## 2. 3. 4 ギアの負荷能力評価

平成 24 年度に製作した動力循環式運転試験機を用いて歯面に圧力を繰り返し与え、ヘルツ接触圧力一繰り返し回数の軌道を調査する。目標値として JIS B 1755 に基づき、1,000 万回転破損が無い事を確認（検証）した。さらに、従来ギアと比べ、積層ギアは振動の減衰が期待できる事から騒音測定を同時に実施した。

また、歯元曲げ強度試験用治具を用いて、パルセータにて単一歯元曲げ強度試験を行った。目標値として、歯元疲労限度 300MPa 以上であることを確認した。

### 《動力循環式運転試験機的设计・製作及び試験》

#### ＜歯車諸元＞

本研究では、自動車に用いられる balanサギヤを対象とした。表 2-3-3 は試験歯車の歯車諸元と記号を示す。それぞれピニオン側、ギヤ側における歯車の形状・寸法を示す。積層構造歯車、ホブ切り歯車、研削歯車を PL3/GL3、PS/GS、PSG/GSG とする。材料は、いずれの歯車も S45C である。

表 2-3-3 Dimensions of test gears

	Pinion			Gear		
	PL3	PS	PSG	GL3	GS	GSG
Gear sign						
Structure	Layered gear	Solid gear		Layered gear	Solid gear	
Module	$m$				2	
Pressure angle	$\alpha$				14.5°	
Number of teeth	$z$				54	
Addendum modification coefficient	$x$				0.035	
Face width	$b$	10mm			12mm	
Heat treatment					-	
Tooth finish	-	Hobbed	Ground	-	Hobbed	Ground
Gear accuracy	JIS grade N12	JIS grade N8	JIS grade N5	JIS grade N12	JIS grade N8	JIS grade N5
Material	S45C					

#### ＜試験機仕様の決定＞

歯元曲げ応力、歯面接触応力の計算結果に基づいて、今回設計する試験機の最大負荷トルクは 200Nm とした。また回転速度は、通常のモータ、インバータで得ることができる最大回転速度 3,600rpm とした。

#### ＜試験機製作＞

図 2-3-17 は、製作した動力循環式運転試験機の全体を示す。低速回転(300rpm)から高速回転(3,600rpm)までの範囲で運転試験を行い、製作した試験機が正常に使用できることを確認した。

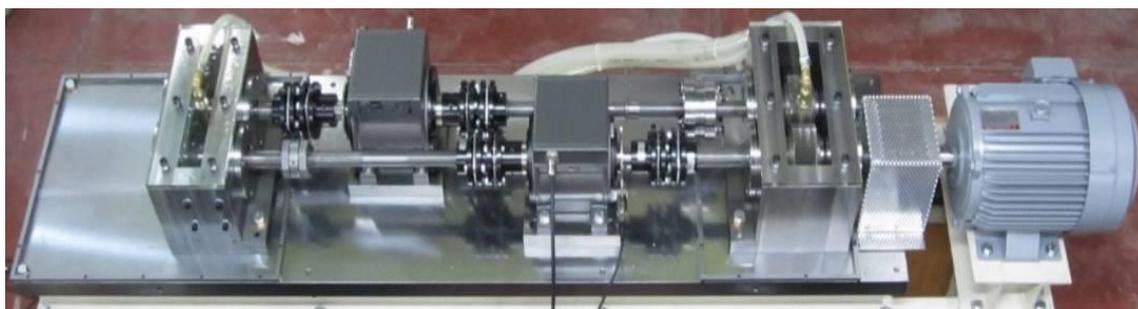


図 2-3-17 Photograph of running test machine

《実験結果および考察》

＜ハンマリング試験結果＞

図 2-3-18 に、ハンマリング試験の結果を示す。縦軸が音圧、横軸が時間を表している。積層構造歯車は一体構造歯車より音圧が短時間で小さくなっており、振動減衰性の高いことがわかる。これは 3 枚の歯車に微小な擦れが生じ、接触部での摩擦力によって摩擦減衰が生じたものと考えられる。

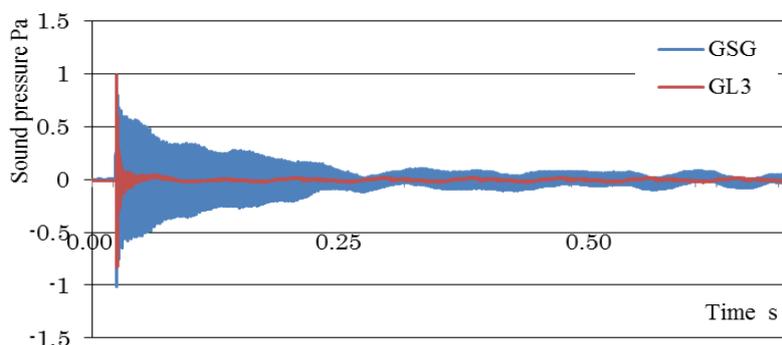


図 2-3-18 Result of hammering test

＜S-N曲線＞

図 2-3-19 は、積層構造歯車の運転試験結果を示す。縦軸は、S45C のヤング率  $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.3$  を用いて計算したヘルツ応力  $\sigma_H$  を示す。横軸は繰返し数  $N$  をとっており、 $N=10^7$  をもって疲労限度とした。疲労限度は 2 回の運転試験の結果から導いた推定値である。また、積層構造歯車の面圧疲労限度は約  $0.6\text{GPa}$  であり、S45C の歯車と同程度となった。

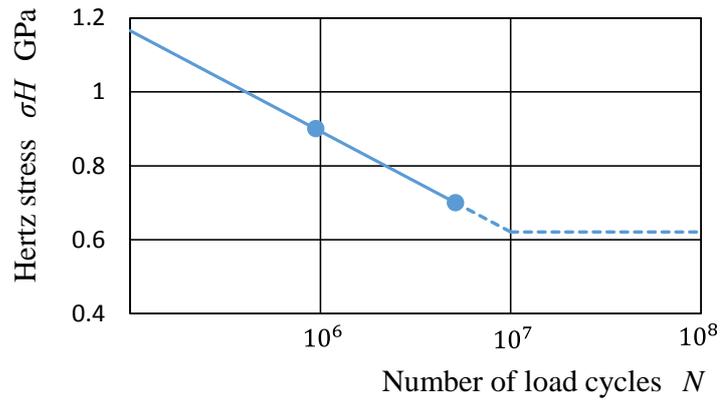


図 2-3-19 Running test result of PL3/GL3

<歯車の騒音>

図 2-3-20 は、負荷トルク  $T_1 = 18\text{Nm}$  で運転したときの A 特性音圧レベル (SPL) と回転速度の関係を表している。低速では各歯車の SPL はほぼ同じであるが、800rpm 以上の高速では、積層構造歯車の SPL はホブ切り歯車、研削歯車と比較して大きい。このように、歯車本体の減衰性が高いにも関わらず、積層構造歯車の音圧レベルが小さくならなかったのは、歯形、歯すじ誤差がホブ切り歯車、研削歯車に比べて悪いことによると考えられる。

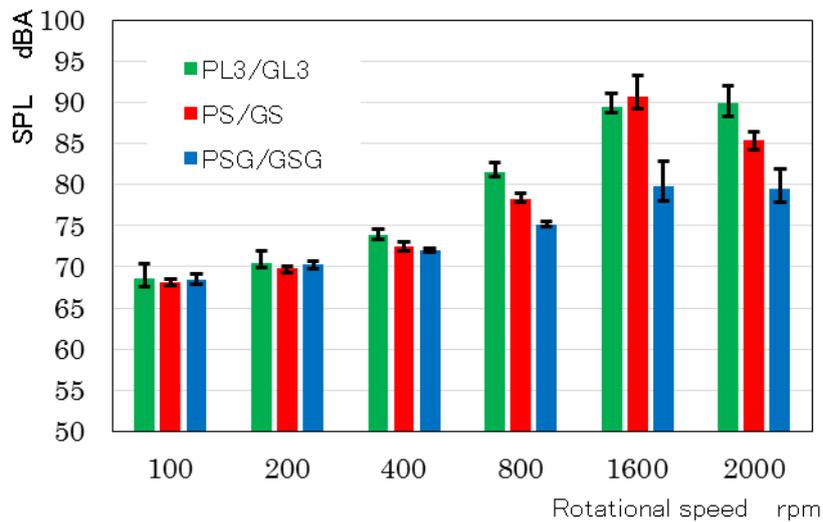


図 2-3-20 Comparison of SPL of test gears

### <結言>

- (1) 動力循環式運転試験機を製作した。
- (2) 積層構造歯車は、一体歯車と比較して歯車本体の振動減衰性が高い。
- (3) 積層構造歯車の面圧疲労限度は約 0.6GPa であり、S45C の歯車と同程度となった。
- (4) 積層構造歯車は、本体の振動減衰性は高いが、音圧レベルはホブ切り歯車、研削歯車と比べて同程度、もしくは大きくなった。
- (5) 積層構造歯車の歯車精度は低いため、動力伝達用歯車として実用化するためには、歯車精度の向上が必要である。

### ≪単一歯元曲げ疲労試験≫

#### <歯車固定治具の製作>

図 2-3-21 は、製作した歯車固定治具を曲げ疲労試験装置に組立てた状態の写真を示す。

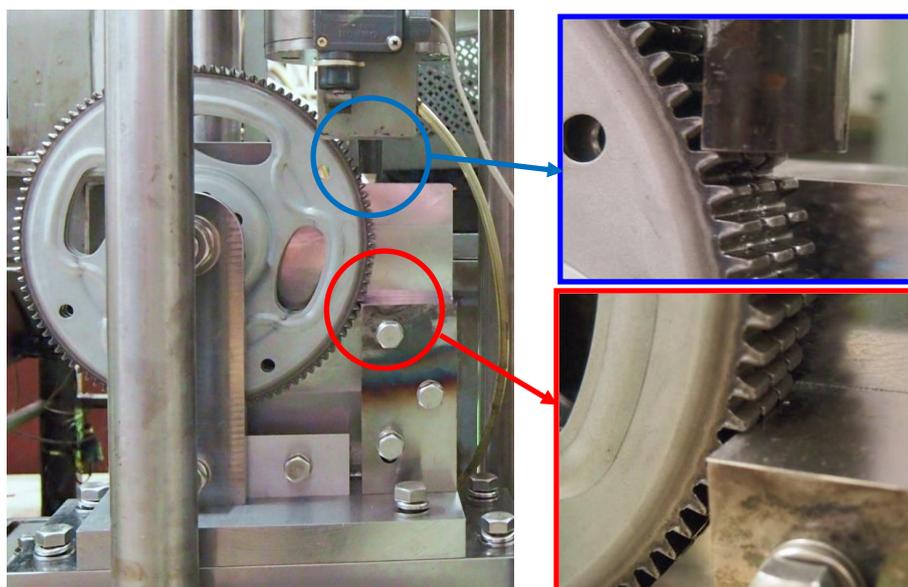


図 2-3-21 製作した歯車固定治具の組立時の写真

### ≪曲げ疲労試験≫

#### <実験方法および実験装置>

##### (1) 試験歯車

表 2-3-4 は、試験歯車（ドライブプレート）の試験歯車の歯車記号などを示す。

表 2-3-4 試験歯車の歯車記号、加熱時間、電力、焼戻し温度

Gear sign	Material	Heating condition		Tempering temperature $T_t$ °C
		Electric power $P$ kW	Heating time $t_h$ s	
GP3A1T2	S35C	65.6	15.0	180
GP3A2T2			17.0	180
GP3B1T2		132.5	6.5	180
GP3B2T2			7.0	180
GP3B3T0			7.5	-
GP3B3T2			-	180
GP3B4T2			8.0	180
GP3B5T0			8.5	-
GP3B5T2			-	180
GP3B6T2			9.0	180

(2) 曲げ疲労試験

図 2-3-22 は、曲げ疲労試験に用いた曲げ疲労試験機を示す。本試験機は、油圧により繰返し荷重を与えるもので、荷重の繰返し速度は毎分 600 回である。

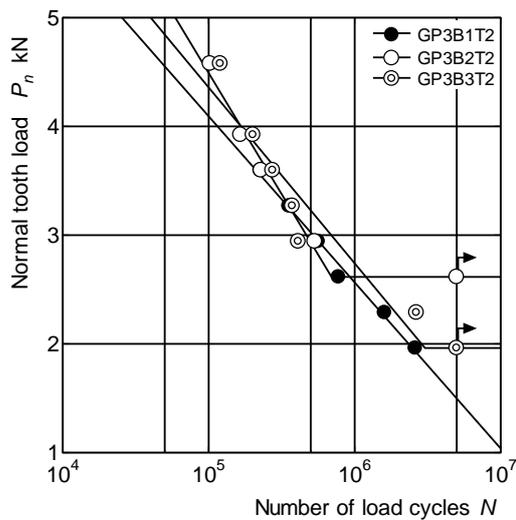


図 2-3-22 曲げ疲労試験機

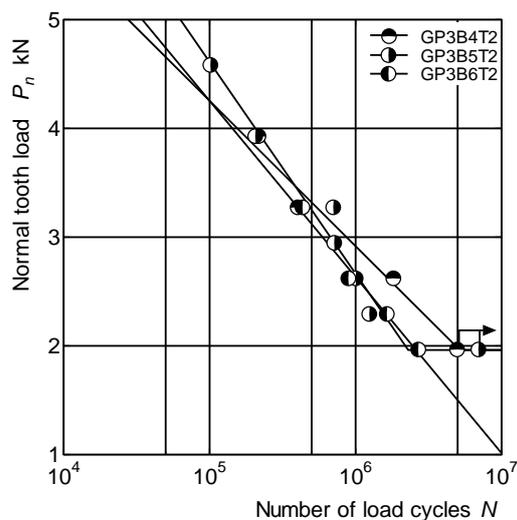
《実験結果および考察》

図 2-3-23 は、GP3B1T2～GP3B6T2 の曲げ疲労試験結果を示す。図より、曲げ疲労限度荷重  $P_{nu}$  は、GP3B2T2 ( $t_h = 7.0$ s) において最大値を示し、最適加熱時間が存在することがわかる。

図 2-3-24 は、GP3B3T0、GP3B3T2、GP3B5T0、GP3B5T2 ( $t_h = 7.5$ 、8.5s) の曲げ疲労試験結果を示す。図より、 $P_{nu}$  は、 $t_h = 7.5$ s、8.5s いずれの場合も、焼戻しを施すことによって減少することがわかる。これは、焼戻し処理により、硬さが減少したことによると考えられる。



(a) GP3B1、GP3B2、GP3B3  
( $t_h = 6.5, 7.0, 7.5s$ )



(b) GP3B4、GP3B5、GP3B6  
( $t_h = 8.0, 8.5, 9.0s$ )

図 2-3-23 曲げ疲労試験結果 (加熱時間の影響)

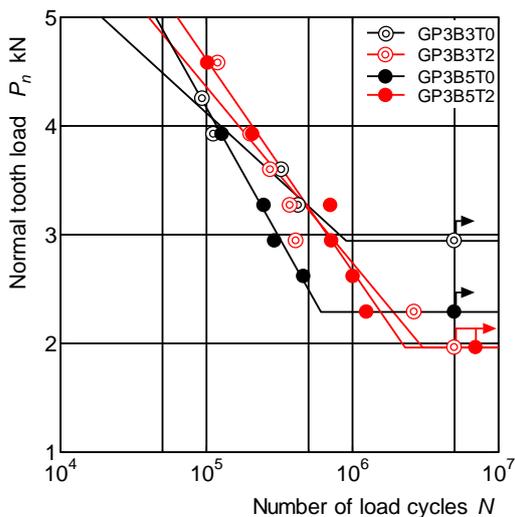


図 2-3-24 曲げ疲労試験結果 (焼戻しの影響)

GP3A1T2	Less than 1.96 kN
GP3A2T2	
GP3B1T2	Less than 1.96 kN
GP3B2T2	
GP3B3T0	
GP3B3T2	
GP3B4T2	
GP3B5T0	
GP3B5T2	
GP3B6T2	Less than 1.96 kN

Bending fatigue limit load  $P_{nu}$  kN

図 2-3-25 曲げ疲労限度荷重

図 2-3-25 は、曲げ疲労試験結果から得られた曲げ疲労限度荷重  $P_{nu}$  を示す。図より、 $P_{nu}$  は、GP3B3T0 において最大値をとることがわかる。

《結言》

本実験によって得られた主な点を要約すると次の通りである。

高周波焼入れドライブプレートプレスギヤの曲げ疲労限度荷重  $P_{nu}$  に対して最適加熱時間が存在する。また、 $P_{nu}$  は、焼戻し処理によって減少する。

## 最終章 全体総括

### 3. 1 研究開発の成果

平成 23 年度から取り組んだ本基盤技術高度化支援事業は、CAE による構造設計の研究開発と、吸音型積層ギア製造工法の確立をした平安式トリプルユニット工法、完成した試作品に対して多くの評価試験をクリアし、一連の事業目的が完結した。

本事業成果は、主に以下の点が新規性を有する。

#### 【CAE による設計システム】

吸音型積層ギアの構造解析は、多数の因子が存在し、非常に解析条件の設定が困難である。本研究開発を通じて、有限要素モデル作成方法から確立し、各種評価試験を模擬した解析に成功。実際に可能な評価試験との整合性も確認済みである。

#### 【半抜き加工】

通常、ギアのプレス成形は、抜き加工を利用した成形方法が用いられている。抜き加工だけであると素材の板厚が厚い程、ダレが大きくなり歯車精度に影響を及ぼす。本研究開発の対象部品である吸音型積層ギアは、ギア部を重ねる積層構造であるため、ダレが大きいと層間のスキマが発生し、ギア部強度低下等の不具合が生じる。そこで、ダレの最小化を目的とした半抜き加工法を開発した。ギア部の抜き加工を2段階に分け、また、抜きだけでなく板鍛造要素を取り込み、ギア部のダレゼロを達成した。

#### 【新コンデンサ抵抗溶接機】

積層溶接とは、多点に配置した突起と穴を組み合わせて、プロジェクション溶接で接合する方法である。一般的なコンデンサ抵抗溶接機では、8kA 程度の電流値であるが、吸音型積層ドライブプレートは、高炭素鋼板の S45C である上、12 点以上の突起と穴の組合せであるため、焼鈍しと大容量の電流が必要である。コンデンサ抵抗溶接機の特徴は、瞬時に大電流を流せるが、長時間流す事は出来ない。そのため、溶接後に冷却されてしまい、マルテンサイト変態する。そこで、大電流を流せて焼きなまし回路を含めたコンデンサ抵抗溶接機を溶接機メーカーと綿密に打合せし、新規導入した。



項目	能力
電源	3相 200V 60Hz
平均入力	24kVA
最大溶接回数	12回/分
最大短絡電流	200kA
最大通電時間	80msec
最大加圧力	49,000N
最大溶接条件数	15条件
ロードセル	10t仕様
空気圧源	供給圧0.5MPa以上
冷却水源	40L/min

図 3-1 新コンデンサ抵抗溶接機と設備仕様

本溶接機は、従来のコンデンサ抵抗溶接機ではできなかった通電時間・ピーク電流のコントロール・波形の設定が可能であり、安定した溶接が可能な仕様となっている。さらに、焼きなまし回路と2段加圧回路を組み込んでおり、高炭素鋼の溶接が可能である。マルテンサイト化を防ぎ焼鈍するために、溶接電流直後に焼鈍電流を流せるようインバータ式トランス及び制御装置を加え、ハイブリッド化し、焼鈍電流を流して変態を防ぐと共に、通電時間を長くし焼鈍能力向上を図った。

#### 【積層用シェービング加工法】

シェービング加工法は、従来から金属プレス加工で利用されている工法である。金型設定は、一般的に0.1mm程度のシェービング量で削ぐ事が基本であるが、積層されたギア部のシェービング量は0.03mmずつ削ぐ設定にする事で、歯車精度をより向上させる事に成功した。

### 3. 2 事業化への取り組み

自動車産業だけでなく、自動車産業以外での販路開拓に向けて、図3-2に示す<INTERMOLD2014>に出展予定である。積極的に新規市場への販路開拓推進する事で、事業化を目指す。

FOR INFORMATION ON A MORE MANUFACTURING TECHNOLOGY EXHIBITION  
**INTERMOLD 2014**  
第25回金型加工技術展

**2014年4月16日(水)～19日(土) インテックス大阪**

図3-2 金型加工技術出展予定

#### 【謝 辞】

本プロジェクトを遂行するにあたり、様々なご指導・ご助言を賜った機関・団体に対し、心より感謝申し上げます。