

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560150

研究課題名(和文) 船舶用トランスミッション用ハイパーコニカルギヤの歯面疲労強度に関する研究

研究課題名(英文) Research about tooth surface fatigue strength of hyper conical gear

研究代表者

小松原 英範 (KOMATSUBARA, HIDENORI)

山形大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40361274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：近年、船舶用トランスミッション業界も益々競争が激しくなり、特にその高容量化・軽量化が求められてきた。本研究では、より厳しい設計条件でハイパーコニカルギヤを設計するために、歯面疲労強度は実験的に求める必要がある。本研究の目的は、ハイパーコニカルギヤの面圧強度設計式を確立することである。そこで、一對のハイパーコニカルギヤの相対歯面解析法を開発した。次に、動力循環式歯面疲労強度試験装置を設計・製作を行った。動力循環式歯面疲労強度試験装置を設置し、それぞれ異なる負荷条件のもとで歯面の面圧疲労強度試験を行った。得られた面圧強度を基に、ハイパーコニカルギヤの検討を行った。

研究成果の概要(英文)：For these years, marine transmissions having high capacity have become an urgent need. In order to design hyper conical gears under stricter design requirements, the tooth surface fatigue strength must be identified experimentally. First, we developed relative tooth surface analysis of a pair of hyper conical gears. Secondly, we designed and constructed the testing machine for tooth surface strength of hyper conical gears. The fatigue test was carried out on a different load condition. Finally, we examined the contact stress calculating formula of hyper conical gears.

研究分野：パワートレインの設計・開発

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素 歯車 コニカルギヤ 面圧強度

## 1. 研究開始当初の背景

コンカルギヤは、その外形が円すい形をしているインボリュート歯車である。コンカルギヤを用いている船舶用トランスミッションをコンカルドライブマリンギアと呼んでいる。近年、船舶用トランスミッション業界も益々競争が激しくなり、特にその高容量化・軽量化が求められてきた。この要求に対し、面圧強度を向上させた歯車としてコンケーブコンカルギヤを開発した。このコンケーブコンカルギヤは、従来のコンカルギヤよりも面圧強度を向上した歯車である。しかし、この一對のコンケーブコンカルギヤの設計法では、転位係数が零となる基準ピッチ点同士が一致することを前提としているため、曲げ強度が低いという弱点がある。この弱点を克服するため、設計者が任意に転位係数を選定できる、ハイパーコンカルギヤを新たに考案した。このハイパーコンカルギヤは、面圧強度と曲げ強度の向上を同時に実現できる歯車である。このハイパーコンカルギヤについて、我々は一對のハイパーコンカルギヤの設計・製作システムを開発した。しかし、ハイパーコンカルギヤは、円筒歯車に比べて形状が複雑であるため、その強度評価の研究は緒についたばかりで、厳しい条件下での設計に困難を来している。特に船舶用のコンカルギヤは、日本海事協会より、強度設計式の確立を強く迫られている現状にある。また、マリンギアの更なる高容量化・軽量化が求められており、より厳しい設計条件をクリアできるハイパーコンカルギヤの疲労強度解析手法が求められている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究は、マリンギア用ハイパーコンカルギヤの面圧強度評価法の確立を目的とする。そのために、ハイパーコンカルギヤの面圧疲労強度を実験的に求める。そして、負荷がハイパーコンカルギヤに及ぼす影響を歯面疲労実験により明らかにする。本研究の最終目標はハイパーコンカルギヤの面圧強度設計式を求め、より精密な設計方法の確立することである。

## 3. 研究の方法

### (1) ハイパーコンカルギヤの相対歯面解析

ハイパーコンカルギヤの面圧強度評価法の確立には、歯面の接触面圧が重要となる。そこでまず、一對のハイパーコンカルギヤの相対歯面形状の解析を行う。相対歯面形状は、交差軸および食い違い軸用ハイパーコンカルギヤの歯面間距離を算出し、これを歯面全域で求めたものである。この相対歯面形状より、負荷が作用した時の最大ヘルツ圧力(歯面接触面圧)の解析を行う。さらに、相対歯面形状解析により理論的な歯当たりを求める。

### (2) 動力循環式歯面疲労強度試験機の設計・製作

動力循環式歯面疲労強度試験装置を実際に自ら設計する。この試験装置の計画構想図を図2に示す。動力循環式は、ねじり継ぎ手により伝達トルクを作用させ、モータで運転する装置である。そのため、動力吸収式に比べ試験コストを低くすることができ、実験装置がコンパクトにできるメリットがある。なお、試験装置の内部潤滑は強制潤滑法を採用し、潤滑系も必然的に自ら設計する。次に、設計した試験装置および潤滑装置を実際に製作する。また、試験装置用制御盤を設計。製作する。試験装置用制御盤は24時間運転を可能にするため、各種項目(潤滑油温、油圧、試験装置本体温度、試験装置振動、モータ電流値、モータ回転数など)を監視し、異常が発生すれば即時に停止させるための装置である。

### (3) ハイパーコンカルギヤの面圧疲労強度試験

動力循環式歯面疲労強度試験装置を用い、それぞれ異なる負荷条件のもとで歯面の面圧疲労強度試験を行う。耐久試験では、一定時間ごとの歯面損傷の様子を観察し、歯面の面圧と寿命の関係を求める。次に、歯面修正量(コンケーブ量)の異なる試験歯車を用い、引き続き歯面の面圧疲労強度試験を行う。得られた実験結果を、最大ヘルツ圧力により整理し、ハイパーコンカルギヤの面圧強度を求める。

### (4) ハイパーコンカルギヤの面圧強度設計式の検討

動力循環式歯面疲労強度実験により得られた面圧強度を基に、新たにハイパーコンカルギヤの面圧強度設計式の検討を行う。この面圧強度設計式は、現在一般の円筒歯車の強度計算に使用されているISO6336(円筒歯車の強度に関する国際規格)を基礎として新たに構築する。

## 4. 研究成果

### (1) ハイパーコンカルギヤの相対歯面解析

かみ合う一對のハイパーコンカルギヤにおいて、基礎円筒接平面によって切断された、歯車1の理論輪郭と歯車2の歯面を表す曲線との隙間量を表す曲線を、ハイパーコンカルギヤの相対曲線と定義する。この相対曲線をかみ合い始めからかみあい終わりまで求め、歯幅・半径方向を表す平面にプロットしたものが相対歯面である。ハイパーコンカルギヤの相対歯面を図1に示す。相対歯面は、歯車同士のかみ合いの隙間量を表している。そのため、隙間量を表す高さ方向に歯当たり確認用試料と同じ厚さの領域のみを示すことで、理論的な歯当たりを得ることができる。相対歯面より得た理論的な歯当たりと、歯当たり試験より得た歯当たりを比較する。相対歯面より得た理論的な歯当たりは、隙間量を表す高さ方向に0.01[mm]以下となる領域を示し

たものである。一对の交差軸用ハイパーコニカルギヤのかみ合いにおける理論歯当たりを図2に、かみ合い試験より得た歯当たりを図3に示す。ここで、理論的な歯当たりと、試験より得た歯当たりを比較すると、両者は左歯面および右歯面ともよく一致している。

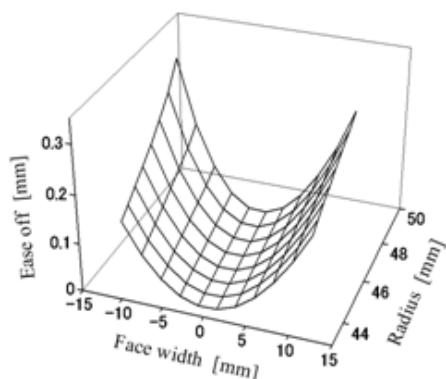
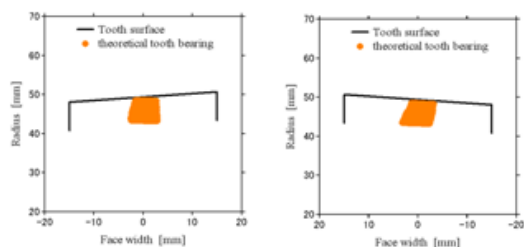
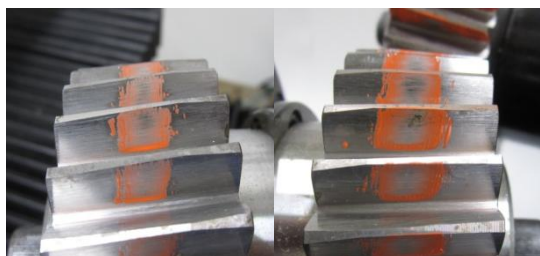


図1 ハイパーコニカルギヤの相対歯面



(a)左歯面のかみ合い(b)右歯面のかみ合い  
図2 相対歯面解析による歯車の歯当たり



(a)左歯面の歯当たり(b)右歯面の歯当たり  
図3 歯当たり試験による歯車の歯当たり

## (2)動力循環式歯面疲労強度試験機の設計・製作

ハイパーコニカルギヤの歯面疲労強度試験を行うために、ハイパーコニカルギヤの歯面疲労強度試験装置の設計を行った。歯車疲労強度試験装置の主な機構には、動力循環式と動力吸収式がある。本研究では動力循環式を採用した。図4に設計・製作を行った動力循環式歯車試験装置の断面図を示す。また、図5に歯車試験装置の外観を示す。動力循環式は、試験する歯車であるテストギヤと動力循環用であるマスターギヤの2対の歯車と1つの負荷装置を用いて閉回路を構成し、原動機によって運転する方式である。この図において、ねじり継手によって与えられた負荷ト

ルクは閉回路の中で循環する。そのため、駆動に必要なモータの容量は試験装置内の動力損失分だけで良いため、動力吸収式に比べて試験装置のコンパクト化および低コスト化が実現できる。

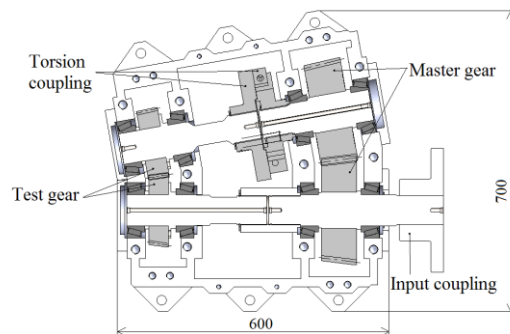


図4 動力循環式歯面疲労強度試験機断面図



図5 動力循環式歯面疲労強度試験機

試験装置用制御盤は、モータの回転数を制御するだけでなく、各種項目（潤滑油温、油圧、試験装置本体温度、試験装置振動およびモータ電流値）を監視し、異常があれば即時に停止させるものとした。これにより24時間無人運転を可能にする。制御盤の外観写真を図6に示す。

試験装置の潤滑は、試験装置潤滑用油圧ユニットによる強制潤滑とした。油圧ユニットは、オイルポンプ、オイルフィルタ、冷却用オイルクーラ、オイルタンクおよび油圧調整用バルブから構成され、試験装置と別置きにした。



図6 歯面疲労強度試験機用制御盤

(3) ハイパーコニカルギヤの面圧疲労強度試験

面圧疲労強度試験は、まず試験歯車を取り付け、慣らし運転を行う。その後、小歯車の総かみあい回数が  $10^7$  に達するまで負荷運転を行う。負荷運転中に軸受振動値、軸受温度などに異常があった場合運転を停止し、歯面観察を行う。試験歯車の諸元を表 1 に示す。なお、試験歯車のピニオンについては、歯面修正量（コンケープ量）の異なる 3 種類の歯車を使用する。また、歯面疲労強度試験条件を表 2 に示す。

表 1 試験歯車の基本諸元

	Pinion			Gear
	(A)	(B)	(C)	
$m$ (mm)	4			4
$a_0$ (deg)	25			25
$\psi$ (deg)	-20.0			20.0
$\delta$ (deg)	2.0			8.0
$Z$	35			36
$x_s$	0.3			-0.2973
$r_c$	5218.1	2466.4	$\infty$	$\infty$

表 2 試験条件

回転数	$1500 \text{ min}^{-1}$
使用潤滑油	SAE30
潤滑油温	$40 \sim 60^\circ$
潤滑油量	$3 \text{ L/min}$
潤滑油圧	$0.1 \text{ MPa}$

歯面疲労強度試験結果を図 7 に示す。歯面疲労強度試験については、歯面修正量（コンケープ量）の異なる試験歯車を用い、引き続き歯面の面圧疲労強度試験を行っている。歯面疲労強度試験は、現在も継続中である。

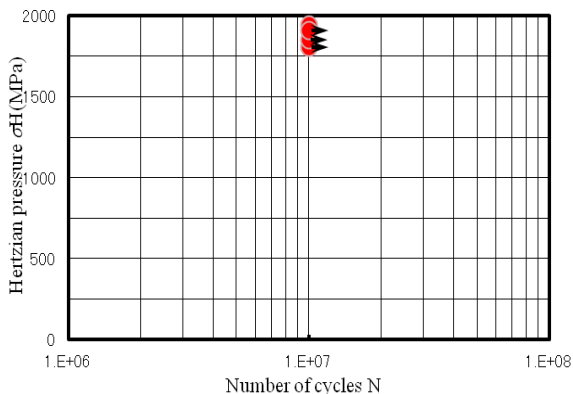


図 7 歯面疲労強度試験結果

(4) ハイパーコニカルギヤの面圧強度設計式の検討

ハイパーコニカルギヤの歯面間の接触は図 8 のように二つの回転双曲面どうしの接触に近似される。二つの回転双曲面が互いに荷

重  $P$  で押しつけられた時の押しつけられた接触応力  $\sigma_H$  はヘルツの弾性接触理論より次式となる。

$$\sigma_H = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (1)$$

ここで

$$a = M^3 \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{P}{H} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

$$b = N^3 \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{P}{H} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (3)$$

$P$  : 歯面法線荷重  
 $M, N, H$  : ハイパーコニカルギヤの形状によって求まる係数

式 (1) より求めたヘルツ応力  $\sigma_H$  を呼び接触応力  $\sigma_{HC}$  とし、ISO6336 の円筒歯車面圧強度計算式の各種係数を用いるとハイパーコニカルギヤの面圧強度計算式は次式となる。

$$\sigma_H = \sigma_{HC} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{Ha}} \quad (4)$$

なお、式 (4) で検討したハイパーコニカルギヤの面圧強度計算式は、まだ確立されているとは言い難い。今後、歯面疲労強度試験を継続し、更なる検討が必要である。

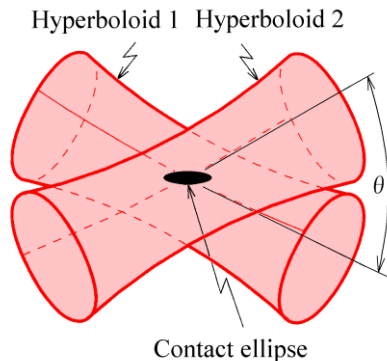


図 8 ハイパーコニカルギヤの歯面間の接触モデル

5. 主な発表論文等

- [学会発表] (計 4 件)
- ①小松原英範、後藤和憲、大町竜哉、熊倉宏盛、三留謙一、船舶用トランスミッション用ハイパーコニカルギヤの開発 (第 4 報、マリンギヤ用ハイパーコニカルギヤの設計・製法)、日本機械学会 2012 年度年次大会、S111053、2012 年 9 月 11 日、金沢。
- ②後藤和憲、小松原英範、大町竜哉、三留謙一、ハイパーコニカルギヤの相対歯面解析法、日本機械学会 2012 年度年次大会、S111054、2012 年 9 月 11 日、金沢。

③高瀬翔、小松原英範、大町竜哉、ハイパー  
コンカルギヤ用歯面疲労強度試験装置の設  
計、日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演  
会、pp.226-227. 2011 年 9 月 22 日、米沢.

④ 後藤和憲、小松原英範、大町竜哉、三留  
謙一、船舶用トランスミッション用ハイパー  
コンカルギヤの開発（第 3 報、一對の食違  
い軸用ハイパーコンカルギヤの設計・製作  
法）日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演  
会、PP232-233. 2011 年 9 月 22 日、米沢.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小松原 英範 (KOMATSUBARA, Hidenori)  
山形大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：40361274

### (2) 研究分担者

大町 竜哉 (OHMACHI, Tatsuya)  
山形大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：80250679