光ファイバを用いた自動車エンジン用筒内圧センサの構造最適化*

南谷 林太郎^{*1}, 保 川 彰 夫^{*1}
小町谷 昌宏^{*2}, 渡 辺 静 久^{*3}Structural Optimization of Fiber-Optic Cylinder Pressure Sensor
for Automotive Engine ApplicationRintaro MINAMITANI^{*4}, Akio YASUKAWA,
Masahiro KOMACHIYA and Shizuhisa WATANABE^{*4} Hitachi, Ltd., Mechanical Engineering Research Laboratory,
502, Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0013 Japan

The structure of a fiber-optic cylinder pressure sensor for automotive engine is optimized. The fiber-optic sensor utilizes bending power loss in the optical fiber. Because a small local bend in the fiber affects the sensor characteristics and reliability, it is important for sensor design to have the optimized structure. The sensor output is simulated based on analyses of optical power loss and mechanical deformation of the optical fiber. The simulated results show good agreement with experimental results. Using this simulation method, we optimize the sensor structure so as to obtain both good characteristics and high reliability, taking the effect of dimensional deviation into account. We also find that the allowable deviation of the horizontal dimensions of the sensors is ten times larger than the deviation of vertical dimensions.

Key Words: Optimum Design, Optical Instrument, Gasoline Engine, Numerical Analysis, Measurement

1. 緒 言

自動車用エンジンでは、排気ガス低減、燃費向上のために高精度の制御および故障診断を行うことが要求されている。燃焼圧力(筒内圧)波形にはノッキング信号や失火信号など複数の情報が含まれており、従来の各種センサを統合できる。このため、エンジン燃焼状態を直接検出できる筒内圧センサは、次世代エンジン制御のキーセンサの一つとされている。

筒内圧センサとしては、1気筒代表計測による半導体圧力センサによるものが実用化されている^{(1)~(3)}。さらに、最近になって多気筒計測が容易である上にノイズに対して安定な出力が得られるヘッドガasket内蔵型光ファイバ式筒内圧センサ(以下光ファイバ式センサと呼ぶ)が著者らのグループによって提案された⁽⁴⁾⁽⁵⁾。光ファイバ式センサでは、筒内圧に対応して光ファイバに微小な曲げ変形を与え、それに伴う光伝

播損失信号の変化から筒内圧を計測する。このため、センサの出力特性と信頼性は光ファイバの支持構造に大きく依存する。しかし、こうした仕様全般を考慮したセンサ特性シミュレーションおよびセンサ構造設計に関する研究は、まだ報告されていない。そこで本論文では、光ファイバの支持構造を考慮した光損失シミュレーション手法を開発し、これを用いてセンサ特性仕様を満足し、かつ長期信頼性を確保するためのセンサ構造を最適化した結果について述べる。

2. 光ファイバ式センサの概要と
構造最適化手順

図1に光ファイバ式センサの概要を示す⁽⁴⁾。本センサは、1本の光ファイバで多気筒の筒内圧を連続信号として検出できるため、複数箇所のセンサ実装が容易である。また、光ファイバを用いているため電氣的雑音に強く、エンジン環境においても安定した出力が得られる。図2にセンシング部における光ファイバの実装断面図を示す。光ファイバは、ガasket内のダイアフラム上面に沿って設置される。ダイアフラムの突起と押さえ板により光ファイバにあらかじめ微小な曲げを与えておくことで、変位に対して高感度な伝播光量変化を得るようにしている。筒内圧に対応して発生

* 原稿受付 1999年9月21日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} (株)日立製作所日立研究所 (〒319-1292 日立市大みか町7-1-1)。^{*3} (株)日立製作所自動車機器グループ (〒312-8503 ひたちなか市高場2520)。

E-mail: minami@merl.hitachi.co.jp

するダイアフラムの変位により、光ファイバがさらに曲げられると、伝播光量は初期設定値より低下する。ダイアフラムが受ける圧力と伝播光量変化との関係から、筒内圧が求められる。

図3に光ファイバ式センサの構造最適化の手順を示す。まず、光ファイバの曲げ変形による光損失特性、およびセンサ支持構造による光ファイバ変形挙動の解析手法を開発した。そして、これらの手法を実験により検証した。次に、これらの解析手法を統合して、センサ特性および光ファイバ強度を解析し、さらに寸法公差を考慮した解析を追加してセンサ支持構造の最適化を行った。

3. 解析手法

3・1 光ファイバの光損失特性 変形した光ファイバが受ける光損失には、一様曲げ損失と接続損失とがある。一様曲げ損失は、曲げによる全反射領域の変化、接続損失は曲率変化による光強度分布のシフトに依存する。3・1節では、これらの損失について解析を行う。

3・1・1 一様曲げ損失 曲げ半径 R で曲げられた光ファイバの中を光が伝播すると、伝播中に光の損失（一様曲げ損失）が生じる。単位長さ当たりの光損失を γ とすると、一様曲げ損失 P_B は式(1)で表される⁽⁶⁾。

$$P_B = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp(-\gamma L) \quad (1)$$

Fig. 1 Schematic structure of the fiber-optic cylinder pressure sensor

Fig. 2 Cross section of the cylinder pressure sensor

P_{in} , P_{out} は光ファイバへの入力、出力光強度、 L は光ファイバの湾曲した長さである。ステップインデックス形光ファイバの場合、 γ は近似的に式(2)で表される。

$$\gamma = \frac{\pi^{1/2}}{2\rho} \left(\frac{\rho}{R} \right)^{1/2} \frac{U^2}{V^2 W^{3/2}} \frac{1}{K_1^2(W)} \times \exp \left\{ -\frac{4}{3} \frac{R}{\rho} \frac{W^3 \Delta n}{V^2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 ρ : コア半径、 R : 曲率半径、 Δn : 比屈折率差、 U, V, W : 光ファイバのパラメータ、 $K_1(\quad)$ は第二種変形ベッセル関数である。

3・1・2 接続損失 光ファイバの曲率半径が R_1 から R_2 に変わる部分では、光ファイバ内の光強度分布が異なるため、両者のミスマッチにより光損失(接続損失)が生じる。ステップインデックス形光ファイバの場合、接続損失 P_T は近似的に式(3)で表される⁽⁶⁾。

$$P_T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp \left\{ -\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^2 \frac{\rho^2 V^4}{8 \Delta n^2} \left(\frac{1}{2 \ln V} \right)^3 \right\} \quad (3)$$

3・2 光ファイバの曲げ変形挙動 センサの構造寸法がセンサ特性に及ぼす影響を評価するために、図4に示すように光ファイバをはりとしてモデル化し、その曲げ変形を解析的に求めた。センサ構造の対称性により、 $-L_1 < x < L_2/2$ の領域について解析した。

筒内圧センサに組込んだ光ファイバは、主としてダイアフラムの突起により曲げられるが、それに加えて光ファイバ溝内でも曲げられている。溝内において光

Fig. 3 Flow of sensor structural optimization

Fig. 4 Dimensions of the cylinder pressure sensor

ファイバと溝底面との接触点(図4, $x = -L_1$)は、突起部での変位 v (突起高さ H と筒内圧によるダイアフラム変位 Δh の和) の増加とともに内側に移動する。つまり、変位 v の関数となる。

光ファイバのたわみは、ダイアフラムの押さえ板の端 ($x=0$) を支持点として荷重 W_1, W_3 を個別に負荷したときのたわみを重ね合わせるにより、式(4)、(5)、(6)で表される。ここで、荷重 W_1, W_3 、図4に示す原点から接触点までの距離(以下接触点距離と呼ぶ) L_1 が未知数となる。

$-L_1 \leq x \leq 0$:

$$v = \frac{W_1 L_1^3}{6EI} \left\{ \frac{(x+L_1)^3}{L_1^3} - \frac{3(L_1+L_2)(x+L_1)}{L_1^2} + \frac{3L_2}{L_1} + 2 \right\} + \frac{W_3 L_3 (L_3+L_4)x}{2EI} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$0 \leq x \leq L_3$:

$$v = \left[\frac{W_1 L_1^3}{6EI} \left\{ \frac{(x+L_1)^3}{L_1^3} - \frac{3(L_1+L_2)(x+L_1)}{L_1^2} + \frac{3L_2}{L_1} + 2 \right\} - \frac{W_1 x^3}{6EI} \right] - \frac{W_3 L_3^3}{6EI} \left\{ \frac{x^3}{L_3^3} - \frac{3(L_3+L_4)x}{L_3^2} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$L_3 \leq x \leq L_3 + L_4/2$:

$$v = \left[\frac{W_1 L_1^3}{6EI} \left\{ \frac{(x+L_1)^3}{L_1^3} - \frac{3(L_1+L_2)(x+L_1)}{L_1^2} + \frac{3L_2}{L_1} + 2 \right\} - \frac{W_1 x^3}{6EI} \right] - \left[\frac{W_3 L_3^3}{6EI} \left\{ \frac{x^3}{L_3^3} - \frac{3(L_3+L_4)x}{L_3^2} \right\} + \frac{W_3 (x-L_3)^3}{6EI} \right] \dots\dots\dots (6)$$

E, I はそれぞれ光ファイバのヤング率、断面二次モーメントである。境界条件を以下に示す。

$$x=0: v=0$$

$$x=-L_1: dv/dx=0$$

$$x=L_3: v=d-D+H$$

d は光ファイバの直径、 D は光ファイバ溝深さである。これより、荷重 W_1, W_2, W_3 は式(7)~(9)で表される。

$$W_1 = \frac{6EI(D-d)}{L_1^3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 5 Bending loss of optical fiber

$$W_2 = -(W_1 + W_3) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$W_3 = \frac{L_1(L_1+L_2)}{L_3(L_3+L_4)} W_1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

接触点距離 L_1 は式(10)の解として求められる。

$$L_1^2 + \frac{L_3}{L_3+L_4} \frac{D-d}{D-d-H} (3L_2-4L_3)L_1 + \frac{L_3}{L_3+L_4} \frac{D-d}{D-d-H} L_3(2L_2-3L_3) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

また、光ファイバの位置 x において、曲げモーメント M は式(11)~(13)で与えられ、光損失特性の解析に必要な曲率半径 R は $1/R = -M/EI$ の関係式より求められる。

$$-L_1 \leq x \leq 0: M = W_1(L_1+x) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$0 \leq x \leq L_3: M = W_1 L_1 - W_2 x \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$L_3 \leq x \leq L_3 + L_4/2: M = W_1 L_1 - W_2 L_3 \quad \dots\dots\dots (13)$$

3.3 センサ構造の光損失シミュレーション

対象とする光ファイバを軸方向(x 方向)に n 分割し、要素ごとに式(11)~(13)に基づき曲率半径を算出する。図5に示すように要素 i における曲率半径 R_i 、曲げ長さ L から一様曲げ損失 P_{Bi} と接続損失 P_{Ti} を求める。これらを全要素について積算することにより、センサ支持構造における光ファイバの曲げ損失 α が求められる。

$$\alpha = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \prod_{i=1}^n P_{Bi} \prod_{i=0}^n P_{Ti} \quad \dots\dots\dots (14)$$

なお、本論文では $n=100$ の場合について計算した。

3.4 センサ構造の最適化

3.4.1 設計変数 設計変数として、光損失と信頼性に影響を及ぼす突起高さ H 、光ファイバ溝深さ D 、支点間距離 L_2 、突起幅 L_4 を選んだ。すなわち設計変数ベクトルは $X = \{H, D, L_2, L_4\}$ となる。これらの寸法範囲を、ガスケットに内蔵できるように設定した。

3.4.2 評価項目 センサ支持構造を最適化する

Fig. 6 Normalized optical power of the optical fiber

ための評価項目を以下に示す。

3・4・2・a 感度 図6に、ダイアフラムの突起部の変位 v に対する正規化光強度曲線 $\alpha(v)$ を示す。 α は一つの気筒の光ファイバセンサにおける光損失である。突起高さを H に設定したとき、微小圧力に対応した変位 Δh_1 による光強度の変化量 $\Delta \alpha_1$ は式(15)で表される。

$$\Delta \alpha_1 = \alpha(H) - \alpha(H + \Delta h_1) \quad \dots\dots\dots (15)$$

α は厳密には $\{v, D, L_2, L_4\}$ の関数であるが、筒内圧に対応して変化する変数は、ダイアフラム突起部での変位 v のみである。ここでは便宜上、 α は v のみの関数として表した。

光ファイバ式センサは気筒ごとにセンサを設置して m 気筒の筒内圧を1本の光ファイバで検出する。感度 $G_1(X)$ は、ある1気筒で発生した微小変位 Δh_1 による光強度の変化量 ΔP_1 として定義され、入力光量 P_{in} に対して式(16)で表される。

$$G_1(X) = \Delta P_1 = \{\alpha(H) - \alpha(H + \Delta h_1)\} \cdot \alpha(H)^{m-1} \cdot P_{in} \\ = \Delta \alpha_1 \cdot \alpha(H)^{m-1} \cdot P_{in} \quad \dots\dots\dots (16)$$

なお、本論文では $m=4$, $P_{in}=40 \mu W$ の場合について計算した。図7に、筒内圧に対応したダイアフラムの変位 Δh とセンサ出力である光強度の変化量 ΔP の関係を示す。感度 $G_1(X)$ は、図中にも説明されている。

3・4・2・b 出力変動 式(16)と同様に、定格負荷時の変位 Δh_2 による光強度の変化量 ΔP_2 は式(17)で表される。

$$\Delta P_2 = \{\alpha(H) - \alpha(H + \Delta h_2)\} \cdot \alpha(H)^{m-1} \cdot P_{in} \quad \dots\dots\dots (17)$$

この定格負荷時のセンサ出力は、支持構造寸法の製造ばらつきに起因してセンサごとに異なる値をとる。出力変動は、基本寸法でのセンサ出力 ΔP_2 と基本寸法から外れた場合のセンサ出力 $\Delta P_2'$ との差分として定義され(図7参照)、式(18)で表される。

$$G_2(X) = \Delta P_2' - \Delta P_2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

3・4・2・c 非直線誤差 非直線誤差は、センサの

光強度曲線の無負荷光強度と定格負荷光強度とを結ぶ直線との最大偏差 δ を定格光強度 ΔP_2 で除したのとして定義され(図7参照)、式(19)で表される。

$$G_3(X) = \delta / \Delta P_2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

3・4・2・d 光ファイバのひずみ 光ファイバに発生する最大ひずみは、曲率半径が最小 (R_{min}) の箇所に生じ、式(20)で表される。

$$G_4(X) = d / (2R_{min}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 d は光ファイバの直径である(図4参照)。

3・4・3 最適化手法 センサの評価項目には、上記のように感度 $G_1(X)$ 、感度変動 $G_2(X)$ 、非直線誤差 $G_3(X)$ 、光ファイバのひずみ $G_4(X)$ に加えて光ファイバに加わる支持反力がある。この支持反力はファイバコーティングのはく離を促進させ、光ファイバ寿命低下の主要因となる⁷⁾。そこで、センサの長期信頼性を確保するために、最大支持反力 W_2 を最小にする最適構造を求めることにした。問題を定式化すると、以下ようになる。

制約条件

$$\text{感度: } g_1(X) \geq C_1 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{出力変動: } g_2(X) \leq C_2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{非直線誤差: } g_3(X) \leq C_3 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\text{ひずみ: } g_4(X) \leq C_4 \quad \dots\dots\dots (24)$$

のもとで、目的関数

$$\text{支持反力: } f(X) \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (25)$$

となるような、設計変数ベクトル $X = \{H, D, L_2, L_4\}$ を求める。制約条件関数 $g_i(X)$ は、関数 $G_i(X)$ に寸

Fig. 7 Schematic diagram of design variables

Characteristics	Value
Sensitivity C_1	5 nW/0.1 MPa
Output deviation C_2	$\pm 10 \%$
Non-linearity C_3	$\pm 3 \%$
Optical fiber strain C_4	0.86 %

Fig. 8 Optical fiber for cylinder pressure sensor

法公差 Δx を考慮した関数であり、式(26)のように設計変数ベクトル $\{X_1, X_2, X_3, X_4\} = \{H, D, L_2, L_4\}$ の各 X_j が $\pm \Delta x$ だけ変動したときの $G_i(X)$ の厳しい側の変動量 ΔG_{ij} を用いて定義した。

$$g_i(X) = G_i(X) + \sqrt{\sum_{j=1}^4 \Delta G_{ij}^2} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$C_1 \sim C_4$ はそれぞれ $g_1(X) \sim g_4(X)$ の許容限界値であり、表1の値を用いた。ここで、光ファイバの許容ひずみの値 C_4 は、光ファイバの静疲労破壊を想定した場合に15年で1/1000万台以下の故障確率を実現し得る値として0.86%とした⁽⁸⁾。

最適化手法にはニュートン法を用い、制約条件を目的関数に組込むのに文献⁽⁹⁾の方法を採用した。すなわち、スラック変数を用いて不等号制約条件を等号制約条件に変換したのち、Lagrange乗数を用いて等号制約条件を目的関数に組込んだ。この手法に基づき各種初期値で計算した結果、収束性に問題はないことが確認されたため、これを最適点として選んだ。

4. 実験方法

4.1 光ファイバ物性の測定

4.1.1 供試光ファイバ 光ファイバセンサでは、単純なシングルコアステップインデックス形石英ガラ

Fig. 9 Bend loss of the optical fiber

Fig. 10 Young's modulus of the optical fiber

ス光ファイバを使用した。光ファイバは、周辺部分より屈折率が高いコアと、コアを囲むクラッドから構成される。クラッドの外部は耐熱性ポリイミド樹脂でコーティングされている。図8にセンサ用光ファイバの仕様の一例を示す。供試光ファイバのカットオフ波長 ($\lambda_{\text{cut}} = 560 \text{ nm}$) は、使用した光源波長 ($\lambda = 830 \text{ nm}$) 以下であり、シングルモード領域にあることがわかる。

4.1.2 光損失特性の測定 図9に示すように、光ファイバをステンレス製円柱(曲率半径 $R = 9, 11, 13, 15, 17 \text{ mm}$)に沿わせて一定長さ ($L = 10 \sim 90 \text{ mm}$)で曲げたときの光損失を測定した。光源には830 nmのSLD(Superluminescent Diode)を、受光器には光ロステスト(アンリツ製MS 9020 C)を用いた。

4.1.3 機械的特性の測定 図10に示すように、三点曲げ試験(支点間距離3.5 mm)により光ファイバのヤング率を求めた。試験には、光ファイバ表面のポリイミド樹脂コーティングを除去した石英素線を用いた。

4.2 センサ特性の測定

4.2.1 曲げ変形の観察 図4に示すセンサ構造を模擬した曲げ試験装置を用いて、溝深さ $D = 0.205 \text{ mm}$ 、支持間距離 $L_2 = 4 \text{ mm}$ のセンサ構造に対して、突起部の変位(突起高さとダイアフラム変位との和)を変えたときの光ファイバの変形挙動を観察した。

4.2.2 光損失特性の測定 上述の曲げ試験装置を用いて、支持間距離 $L_2 = 4 \text{ mm}$ 、溝深さ $D = 0.18 \text{ mm}$ 、0.22 mmの2種類のセンサ構造に対して、突起部の変位を変えたときの光ファイバの光損失を測定した。光源には830 nmのSLDを、受光器には光ロステストを用いた。

5. 結果および考察

5.1 光ファイバ物性の測定結果

5.1.1 光損失特性の測定結果 図9に供試光ファイバの光損失-曲率半径の関係を示す。供試光ファイバでは、使用した光ファイバ長が短かったため、コア内を光伝播する基本モードに加え、光がクラッド内を伝播するモードが減衰せずに同時に測定されたと考えられる。このため、光伝播損失の測定値は式(1)～(3)に示す理論値からずれを生じた。光ファイバの単位長さ当たりの光損失 $\gamma [\text{dB/mm}]$ として、実験式を設定すると以下ようになる。

$$\gamma = 24\,500 \cdot \exp(-331 \cdot R) \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 $R [\text{mm}]$ は曲率半径である。

5.1.2 機械的特性の測定結果 図10に130 μm 素線のヤング率の正規確率プロットを示す。光ファイ

Table 2 Optimization of the sensor structure with various allowable deviations

Allowable deviation (mm)	Optimum design variables X_{opt}				Normalized optical power	Support force $F(\text{mN}) = f(X_{opt})$	Sensitivity $g_1(\text{nW}) \geq 5\text{nW}$	Output deviation $g_2(\%) \leq \pm 10\%$	Non-linearity $g_3(\%) \leq \pm 3\%$	Strain $g_4(\%) \leq 0.86\%$
	Height $H(\text{mm})$	Depth $D(\text{mm})$	Span $L_2(\text{mm})$	Width $L_4(\text{mm})$						
0	0.250	0.245	6.0	0.6	0.97	39	7.7	-	3.0	0.46
± 0.002	0.250	0.242	6.0	0.6	0.97	43	7.8	7.3	3.0	0.48
± 0.004	0.250	0.250	5.16	0.6	0.91	63	14.6	10	2.2	0.62
± 0.006	0.250	0.250	4.69	0.6	0.83	88	15.0	10	1.5	0.76
± 0.007	0.250	0.250	4.54	0.6	0.79	99	13.0	10	1.3	0.82

(a) Displacement $v = 0.155 \text{ mm}$ (b) Displacement $v = 0.305 \text{ mm}$

Fig. 11 Bending behavior of the optical fiber

バのヤング率の平均値は 72 GPa であり, 石英素材のヤング率 73.1 GPa⁽¹⁰⁾ とほぼ一致した. 光ファイバの曲げ変形解析には, 光ファイバのヤング率として 72 GPa を採用した.

5・2 センサ特性の測定結果

5・2・1 曲げ変形挙動の観察結果 図 11 に光ファイバの変形挙動の観察例を, 図 12 にそれに対応する解析例を示す. 観察結果から, 変位が増加するに従い溝内で光ファイバの曲率半径が小さくなり, 光ファイ

Fig. 12 Bending behavior of the optical fiber

Fig. 13 Optical power change of the optical fiber setting into a sensing part

バと溝底面との接触点 ($x = -L_1$) が内側に移動するようすがわかる. また, 光ファイバの支持点付近で局所的な変形は認められなかった. 解析結果では, 接触点の移動が再現された. また, 図 11 における $x = 0$ でのたわみ角の実測値 3° ($v = 0.155 \text{ mm}$), 7° ($v = 0.305 \text{ mm}$) に対して, 解析値はおおの 3.6°, 7.7° とほぼ一致した.

5・2・2 光損失特性の測定結果 図 13 に光ファイバセンサの正規化光量とたわみの関係の測定値と解析値を示す. 解析には, 光ファイバの光損失として実験

Fig. 14 Allowable deviation of the optimum structure

式(27)を使用した。得られた解析値は、測定値に対して5%以下の誤差であり、構造寸法がセンサ特性に及ぼす影響を評価する上で十分な精度を有していることがわかった。

5.3 最適設計例 以上の結果に基づき、3章で述べた手法を用いて最適構造を求めた。表2に、各寸法公差について求められた最適構造寸法、特性値を示す。寸法公差が $\pm 2 \mu\text{m}$ 以下の場合には非直線誤差の制約条件が働いていることがわかる。寸法公差が $\pm 4 \mu\text{m}$ 以上になると、出力変動の制約条件が働いている。寸法公差が $\pm 8 \mu\text{m}$ 以上の場合では、出力変動とともに光ファイバひずみが増大し、制約条件を満足する構造は存在しなかった。

支点間距離 L_2 の最適値は、許容寸法公差が小さいときは6 mmとなっているが、寸法公差が増大すると徐々に小さな値を取るようになる。これは、支点間距離 L_2 が小さくなれば正規化光出力曲線 α の線形領域が拡大して、寸法公差とともに増大する出力変動を抑制できるためである。

以上の検討では、ガスケットの厚さ方向(突起高さ H 、溝深さ D)と平面方向(支点間距離 L_2 、突起幅 L_4)の寸法公差を同じに設定した。一方、実際のセンサはガスケットに内蔵されるため、水平方向と厚さ方向の寸法は1けた以上異なる。そこで次に、寸法公差の許容値を両者で別に設定した場合について検討した。

表2の各最適寸法において、支持反力をパラメータにして、ガスケットの厚さ方向と平面方向の寸法公差を別に設定した場合の寸法公差の許容値を図14に示す。図14よりガスケットの平面方向の寸法公差は厚さ方向に比べて約1けた寸法公差を大きくできることがわかる。

また、図14の結果によると寸法公差の小さい適正構造を採用すれば、支持反力を低く抑えられるため、コーティングのはく離の抑制に効果があるといえる。ただし、寸法公差を小さくすることは、加工の困難性

を増大させる。一方、寸法公差を大きくすれば、加工は容易になるが、コーティングのはく離を防ぐために、強度の高いコーティングが必要となる⁽⁷⁾。最終的に図中のどの設計点を選ぶかは、上記の点を考慮して決定することになる。

6. 結 論

(1) 自動車エンジン用ヘッドガスケット内蔵形光ファイバ式筒内圧センサを対象に、光ファイバの光損失特性とはり理論を組合わせて、センサ支持構造を考慮した光損失シミュレーション手法を開発した。解析結果の実測データに対する誤差は5%以下であり、本シミュレーション手法は十分な精度を有していることがわかった。

(2) 上記シミュレーション手法を用いて、寸法公差を考慮したセンサ支持構造の最適化計算を行い、センサ特性と信頼性を両立できる構造が得られることを示した。また、製造時の許容寸法公差として、ガスケット平面方向(支点間距離 L_2 、突起幅 L_4)は、厚さ方向(突起高さ H 、溝深さ D)に比べて1けた大きい値にできることがわかった。

文 献

- (1) Takeuchi, M., Tsukada, K., Nonomura, Y., Omura, Y. and Chujou, Y., A combustion pressure sensor utilizing silicon piezoresistive effect, *SAE paper*, 930351 (1993).
- (2) Kondo, M., Niimi, A. and Nakamura, T., Indiscope-a new combustion pressure indicator with washer transducers, *SAE paper*, 750883 (1975).
- (3) Watanabe, S., Machida, K., Iijima, K. and Tomisawa, N., A sophisticated engine control system using combustion pressure detection, *SAE paper*, 960042 (1996).
- (4) Komachiya, M., Sonobe, H., Oho, S., Kurita, M., Nakazawa, T. and Sasayama, T., Multiplex in-cylinder pressure measurement utilizing an optical fiber with specific refractive-index composition, *Appl. Opt.* **35** (1996), 1143-1150.
- (5) Komachiya, M., Sonobe, H., Fumino, T., Sakaguchi, T., Kawakami, K., Watanabe, S. and Sasayama, T., Knocking detection of a gasoline engine by utilizing an optical fiber with specific refractive-index composition, *Appl. Opt.* **37** (1998), 1152-1158.
- (6) Snyder, A. W. and Love, J. D., *Optical Waveguide Theory*, (1983), 474-486, CHAPMAN & HALL.
- (7) 南谷林太郎・小町谷昌宏・保川彰夫・渡辺静久, 光ファイバセンサ用ポリイミドコート of 機械的特性, 電気学会論文誌E, **119** (1999), 60-66.
- (8) Komachiya, M., Minamitani, R., Fumino, T., Sakaguchi, T. and Watanabe, S., Proof-testing and probabilistic lifetime estimation of glass fibers for sensor application, *Appl. Opt.*, **38** (1999), 2767-2774.
- (9) L. C. W.ディクソン(松原正一訳), “非線形最適化計算法”, (1974), 98, 培風館.
- (10) 国立天文台編, “理科年表”, (1991), 481, 丸善.