

連続的に発生する衝撃波伝播方向の推定

Estimation of Direction in which Continuously-Generated Shock Propagates

○ 蒔 優悟(東電大・院) 松井 裕俊(東電大・院) 遠藤 正樹(東電大) 稲村 栄次郎(産技高専) 平野 利幸(法政大)
Yugo AZAMI, Tokyo Denki University, Uji, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394
Hirotoshi MATSUI, Tokyo Denki University, Ishizaka, Uji, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394
Masaki ENDO, Tokyo Denki University, Ishizaka, Uji, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394
Eijiro INAMURA, Tokyo Metropolitan College of Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 130-0011
Toshiyuki HIRANO, Hosei University, 3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8584

1. 序論

工業上、重要な装置である遠心圧縮機は昇圧の用途に用いられる。圧力比の増加には羽根車の回転数を増加させる必要があるが、回転数を増加させると衝撃波が発生する。そのため、遠心圧縮機の設計において、衝撃波が発生する流れ場の特性を調査することが重要である。この方法の一つとして、ロゼット解析により衝撃波の伝播方向を推定する手法が挙げられる。ロゼット解析は3方向の主応力から、最大主ひずみの大きさと方向を求める解析手法である。単発の衝撃波を発生させて、本解析を用いて衝撃波伝播方向の推定を行った実験は過去に例がある。しかし、ターボ機械の内部流れのように衝撃波が絶え間なく発生する状況下で、本解析を用いて、衝撃波の伝播方向の推定を行った実験の例はない。そのため、単発の衝撃波が伝播する条件と、連続的に衝撃波が発生する条件とで解析結果に差異が出るかは不明である。そこで、本研究では数値解析を用いて単発の衝撃波が発生する条件と連続的に衝撃波が発生する条件とで圧力履歴を取得し、ロゼット解析することで両条件における衝撃波伝播方向を求め、差異が生じるかを確認する。

2. 解析対象

本研究では圧力変換機の受圧面を数値解析の対象とした。受圧面裏面には短軸の半導体ひずみゲージが貼り付けられている。受圧面は圧力が作用すると変形し、変形した受圧面のひずみに応じて、実測値として出力される構造になっている。解析対象とした圧力変換器は受圧面直径 $d=4\text{ mm}$ 、膜の厚さ $h=0.08\text{ mm}$ である。受圧面の材質は析出硬化系 S ステンレス鋼 SUS630 であり、密度 $\rho=7.8 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ 、縦弾性係数 $E=200\text{ GPa}$ 、ポアソン比は $\nu=0.3$ とする。この圧力変換器を用いて、衝撃波が伝播したときの受圧面の変形を解析する。

3. 解析手法

3.1 数値解析

本研究では有限要素法を用いて、構造解析を行った。図1に圧力変換器受圧面の簡易図を示す。圧力変換器の受圧面の動的な挙動を解析するため、図1(a)に示した解析モデルを考える。衝撃波は図の左から右へ速度 $v=400\text{ m/s}$ で移動する。そこで、受圧面の左端を原点 o として、 x, y, z 座標系を設ける。図における点 c は受圧面の中心、 r は右端の点を表す。また、点 c を通り、 z 軸に平行な軸を z' とする。衝撃波の位置は x_s で示している。衝撃波通過後の絶対圧力を p 、大気圧を p_a で表し、衝撃波が通過すると受圧面にはゲージ圧 $p-p_a$ が作用する。 x 方向の分割数 $n=66$ とし、各領域は4節点四角形シェル要素と3節点三角形要素を用いた。

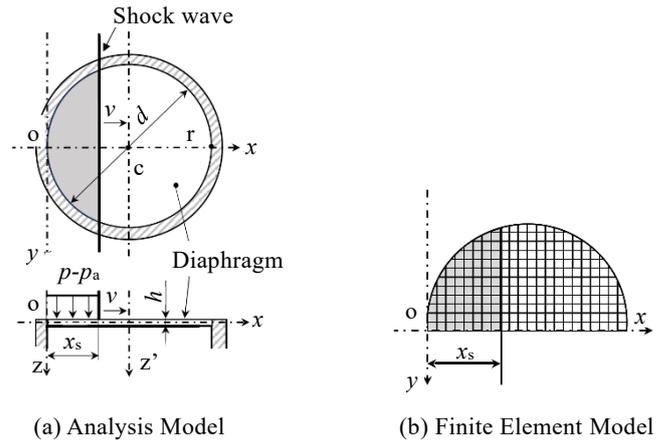


Fig. 1 Pressure Transducer

総要素数は6138である。円形の受圧面は衝撃波の伝播方向に対して上下対称に変形するため、有限要素モデルは図1(b)に示すように上半分だけ取り扱う。なお、本数値解析では図1における受圧面外周に位置する円筒部を剛体と仮定し、境界条件は x, y, z の3方向において、全て固定とした。

3.2 ロゼット解析

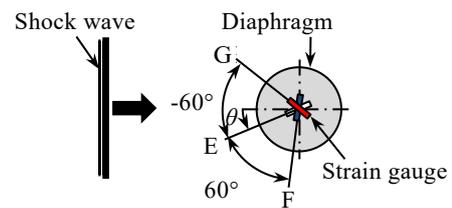


Fig. 2 Strain Gauge on Diaphragm

図2に示すように衝撃波が圧力変換器の受圧面に向かって伝播し、受圧面に到達すると円形の受圧面は衝撃波の通過方向に対して上下対称に変形する。そのため、受圧面の中心を通る上下対称軸上ではせん断変形は生ぜず、その対称軸はひずみの主軸の一つとなって衝撃波の伝播方向と一致する。圧力変換器により取得した圧力履歴は受圧面のひずみに相当するので、真の圧力履歴ではなく受圧面の共振による変動が含まれている。その変動を用いてロゼット解析を行ない、最大主ひずみの生じる方向を求めることで、衝撃波の伝播方向を推定する。本稿では衝撃波の伝播方向に対するひずみゲージの向きを角度 θ とし、衝撃波の伝播方向に対して水平な方向を $\theta=0^\circ$ とする。

4. 実験結果

4.1 単発の衝撃波

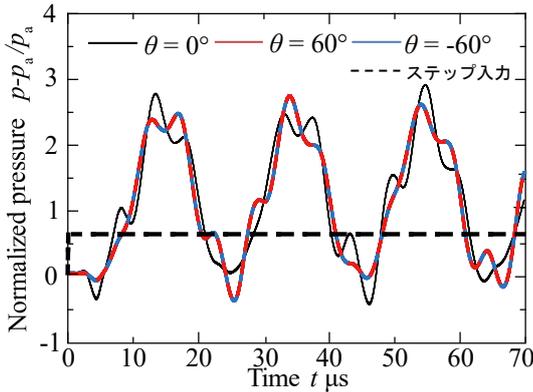


Fig. 3 pressure history

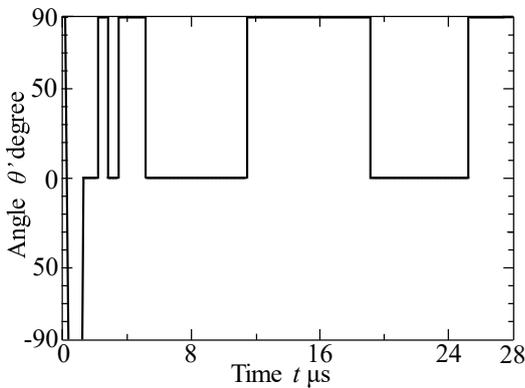


Fig. 4 Histories of Angle

数値解析より取得した、単発の衝撃波が受圧面を伝ばした場合の圧力履歴を図 3 に示す。縦軸は数値解析において設定したゲージ圧力 $p-p_a$ を大気圧 p_a によって無次元化した値である。横軸は時間である。圧力履歴は受圧面裏面に張られた、ひずみゲージが $\theta = 0^\circ, 60^\circ, -60^\circ$ となる三方向で取得した。図中の破線は衝撃波の通過により受圧面に作用するゲージ圧力である。入力の高さはゲージ圧力 $p-p_a = 66.5 \text{ kPa}$ 、大気圧 $p_a = 101.3 \text{ kPa}$ より、 0.656 である。

図 3 の衝撃波到達直後の一山分の圧力波形をロゼット解析し、取得した衝撃波伝ば方向の角度履歴を図 4 に示す。時間の範囲は $0 \mu\text{s}$ から $28 \mu\text{s}$ とした。角度 θ' は衝撃波通過直後における、衝撃波の通過方向に対する受圧面の最大主ひずみが生じる方向のなす角度を示している。ひずみが周期的に変化するため、最大主ひずみの主軸は衝撃波の伝ば方向に一致するか、あるいは直交することとなる。図 4 より、受圧面の最大主ひずみが生じる方向は衝撃波の通過方向に対して $\theta' = 0^\circ, 90^\circ$ であることがわかる。

4.2 連続的に発生する衝撃波

連続的に衝撃波を 16 回伝ばさせた場合における圧力波形を数値解析より取得し、衝撃波が 6 回通過した時刻までの波形を図 5 に示す。入力の周期は $230 \mu\text{s}$ とし、デューティ比は 75% としている。入力の高さは単発の場合と等しく 0.656 である。波形の立ち上がりは図中に示した位置 A, B, C, D, E, F 付近で見られた。それぞれの位置における衝撃波到達直後の圧力履歴から一山分の波形をロゼット解析し、衝撃波伝ば方向の角度履歴を図 6 に示した。時間は図中の

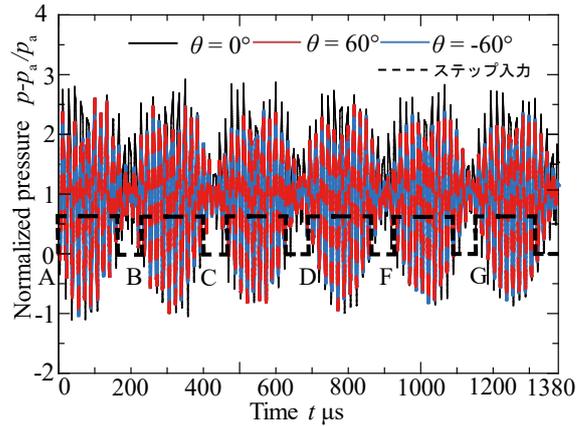


Fig. 5 Pressure Histories of Continuously-Generated Shock

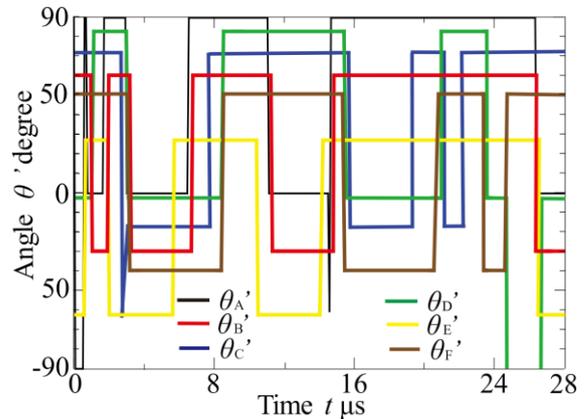


Fig. 6 History of Angle (Periodically-Generated Shock)

位置 A における衝撃波伝播直後の一山分の圧力波形の時間に合わせた。角度履歴より、単発の場合の最大主ひずみが生じる方向 θ' と比較して、差異が最大となるのは $\theta'_B = 60^\circ, -30^\circ$ である。また、11 回目から 16 回目の衝撃波通過直後の波形より θ' を求めたところ、差異が最大となったのは 14 回目の衝撃波通過直後の波形における最大主ひずみの方向 $\theta'_{14} = 24^\circ, -66^\circ$ であった。よって、連続的に衝撃波が通過すると最大主ひずみの向きは 1 回目の衝撃波通過直後とそれ以降の衝撃波通過直後では差異が生じ、衝撃波が通過するごとに角度 θ' との差異は小さくなると推察される。

5. 結論

数値解析により単発の衝撃波が発生する状況と、入力の周期を 0.25ms 、デューティ比 75% で連続的に衝撃波が 16 回発生する状況で衝撃波通過直後の圧力変動を有限要素法により求めた。取得した両圧力履歴をロゼット解析することで角度履歴を求めた結果、受圧面上を連続的に衝撃波が通過すると、受圧面に生じる最大主ひずみの向きは衝撃波が通過するごとに変化する。また、時間とともに衝撃波が連続的に通過し続けると、単発の場合における最大主ひずみが生じる方向 θ' との差異は小さくなると推察される。

参考文献

- (1) 遠藤正樹, 稲村栄次郎, 衝撃波の伝播方向の推定法について, 計測自動制御学会論文集, Vol.54, No.6, pp.564-573, (2018)