K7-19

水平軸風車ブレードの変形による空力特性に関する研究

Study on the Aerodynamic characteristics by deformed horizontal axis wind turbine blade

○佐藤　拓朗[1]，安田邦男[2]
*Takuro Satoi[1], Kunio Yasuda[2]

Abstract: Horizontal axis wind turbine blades have a high-aspect ratio, so that it is concerned that loads on a hub and blades are fluctuated by gusts and the differences of the inflow velocity to the rotational plane due to the velocity gradient. This study deals with the influence of hub and each hinge that is subject to influence of wing because of rage size. And loads acting on the blade and moment are also calculated.

１．はじめに

水平軸風車のブレードは，アスペクト比が大きいため，突風や速度勾配による回転面への流入速度の違いにより，ブレードやハブにかかる荷重が変動することが懸念される．本研究では，風の影響を受けやすい大型風車ブレードが変形し，荷重が変動することによる各ヒンジ及びハブへの影響について取り扱う．この時，各ヒンジ及びハブに働く力とモーメントの式を導出する．

２．理論

風車ブレードの翼素に働く力を考え，ブレードの半径方向に積分し，ブレード全体に働く力とモーメントについて考える．更に，外力によって各ヒンジ及びハブに働く力とモーメントの式を導出する．

２．１　翼素に働く力とモーメント

空間固定座標系$\left(\mathrm{X},\mathrm{Y},\mathrm{Z}\right)$において，風車ブレードの翼素には，空気力$\boldsymbol{f}^{\mathrm{A}}\left(r\right)$，重力$\boldsymbol{f}^{\mathrm{G}}\left(r\right)$，慣性力$\boldsymbol{f}^{\mathrm{I}}\left(r\right)$が働き，それぞれの弾性軸回りのモーメント$\boldsymbol{m}^{\mathrm{A}}\left(r\right)$，$\boldsymbol{m}^{\mathrm{G}}\left(r\right)$，$\boldsymbol{m}^{\mathrm{I}}\left(r\right)$が発生する．ここで，$r$はフェザリング・ヒンジ原点から半径方向への距離である．これらの外力$\boldsymbol{f}_{\mathrm{T}}$とモーメント$\boldsymbol{m}_{\mathrm{T}}$は以下のようになる．

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{T}}=\boldsymbol{f}^{\mathrm{A}}+\boldsymbol{f}^{G}+\boldsymbol{f}^{\mathrm{I}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{m}_{\mathrm{T}}=\boldsymbol{m}^{\mathrm{A}}+\boldsymbol{m}^{\mathrm{G}}+\boldsymbol{m}^{\mathrm{I}} \tag{2}$$

式(１)，(２)をブレードの半径方向で積分し，局所直交座標系$\left(\xi^*,\eta^*,\zeta^*\right)$で表すと，ブレード全体に働く力$\overline{\boldsymbol{F}}$とモーメント$\overline{\boldsymbol{M}}$は，以下のようになる．

$$\overline{\boldsymbol{F}}=\left(\overline{F}_{\xi^*},\overline{F}_{\eta^*},\overline{F}_{\zeta^*}\right) \tag{3}$$

$$\overline{\boldsymbol{M}}=\left(\overline{M}_{\xi^*},\overline{M}_{\eta^*},\overline{M}_{\zeta^*}\right) \tag{4}$$

２．２　フェザリング・ヒンジ回りの力とモーメント

フェザリング・ヒンジの中心に，ブレード座標系$\left(\mathrm{X_B},\mathrm{Y_B},\mathrm{Z_B}\right)$の原点をFigure1に示す. ハブから$r_{\mathrm{p}}$の距離にあるフェザリング・ヒンジに働く力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)$及びそれによるモーメント$\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)$は，式(１)，(２)を用いると以下のようになる．

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{B_X}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\F_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\F_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\overline{F}_{\xi^*}\\\overline{F}_{\eta^*}\\\overline{F}_{\zeta^*}\end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{B_X}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\M_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\M_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\overline{M}_{\xi^*}\\\overline{M}_{\eta^*}\\\overline{M}_{\zeta^*}\end{pmatrix} \tag{6}$$

フェザリング角θが$\theta=0°$である時の座標系$\left(\mathrm{X}_{\theta=0},\mathrm{Y}_{\theta=0},\mathrm{Z}_{\theta=0}\right)$をFigure1に示す．フェザリング・ヒンジでの力$\boldsymbol{F}_{\theta=0}$及びモーメント$\boldsymbol{M}_{\theta=0}$は式(５)，(６)を用いると以下のようになる．

$$\boldsymbol{F}_{\theta=0}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\theta=0}}\\F_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}\\F_{\mathrm{Z}_{\theta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{B_X}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\F_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\cos\theta-F_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\sin\theta\\F_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\sin\theta+F_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\cos\theta\end{pmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{M}_{\theta=0}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\theta=0}}\\M_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}\\M_{\mathrm{Z}_{\theta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{B_X}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\\M_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\cos\theta-M_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\sin\theta\\M_{\mathrm{B_Y}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\sin\theta+M_{\mathrm{B_Z}}\left(r_{\mathrm{p}}\right)\cos\theta\end{pmatrix} \tag{8}$$

２．３　リード・ラグ・ヒンジ回りの力とモーメント

ハブ座標系の原点からr_1の距離にあるリード・ラグ・ヒンジにおて，リード・ラグ角ζが$\zeta=0°$である時の座標系$\left(\mathrm{X}_{\zeta=0},\mathrm{Y}_{\zeta=0},\mathrm{Z}_{\zeta=0}\right)$の原点をFigure1に示す．リード・ラグ・ヒンジでの力$\boldsymbol{F}_{\zeta=0}$及びモーメント$\boldsymbol{M}_{\zeta=0}$は式(７)，(８)を用いると以下のようになる．

１：日大理工・院(前)・航宇　２：日大理工・教員・航宇

$$\boldsymbol{F}_{\zeta=0}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}\\F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}\\F_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cos\zeta-F_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\sin\zeta+\Delta F_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}\\F_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\sin\zeta+F_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cos\zeta+\Delta F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}\\F_{\mathrm{Z}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})+\Delta F_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}\end{pmatrix}\tag{9}$$

$$\boldsymbol{M}_{\zeta=0}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}\\M_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}\\M_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cos\zeta-M_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\sin\zeta+\Delta M_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}\\M_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\sin\zeta+M_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cos\zeta\\-F_{\mathrm{Z}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cdot(r_{\mathrm{p}}-r_{\mathrm{l}})+\Delta M_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}\\F_{\mathrm{Z}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})+F_{\mathrm{Y}_{\theta=0}}(r_{\mathrm{p}})\cdot(r_{\mathrm{p}}-r_{\mathrm{l}})+\Delta F_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}\end{pmatrix}\tag{10}$$

$\Delta\boldsymbol{F}_{\zeta=0}$，$\Delta\boldsymbol{M}_{\zeta=0}$ は，フェザリング・ヒンジとリード・ラグ・ヒンジのブレード材 $\Delta m_{\mathrm{b},1}$ によってリード・ラグ・ヒンジに働く力とモーメントである．

２．４　フラッピング・ヒンジ回りの力とモーメント

ハブ座標系の原点から r_{f} の距離にあるフラッピング・ヒンジにおて，フラッピング角 β が $\beta=0°$ である時の座標系 $(\mathrm{X}_{\beta=0},\mathrm{Y}_{\beta=0},\mathrm{Z}_{\beta=0})$ の原点を Figure1 に示す．フラッピング・ヒンジでの力 $\boldsymbol{F}_{\beta=0}$ 及びそれによるモーメント $\boldsymbol{M}_{\beta=0}$ は式(９)，(１０)を用いると以下のようになる．

$$\boldsymbol{F}_{\beta=0}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\beta=0}}\\F_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}\\F_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cos\beta-F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\sin\beta+\Delta F_{\mathrm{X}_{\beta=0}}\\F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})+\Delta F_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}\\F_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\sin\beta+F_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cos\beta+\Delta F_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}\end{pmatrix}\tag{11}$$

$$\boldsymbol{M}_{\beta=0}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\beta=0}}\\M_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}\\M_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cos\beta-F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\sin\beta+\Delta M_{\mathrm{X}_{\beta=0}}\\M_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})-\Delta F_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cdot(r_{\mathrm{l}}-r_{\mathrm{f}})+\Delta M_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}\\M_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\sin\beta+M_{\mathrm{Z}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cos\beta\\+F_{\mathrm{Y}_{\zeta=0}}(r_{\mathrm{l}})\cdot(r_{\mathrm{l}}-r_{\mathrm{f}})+\Delta M_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}\end{pmatrix}\tag{12}$$

$\Delta\boldsymbol{F}_{\beta=0}$，$\Delta\boldsymbol{M}_{\beta=0}$ は，フラッピング・ヒンジとリード・ラグ・ヒンジ間のブレード材 $\Delta m_{\mathrm{b},2}$ によってフラッピング・ヒンジに働く力とモーメントである．

２．５　ハブに働く力とモーメント

ハブ座標系 $(\mathrm{X}_{\mathrm{H}},\mathrm{Y}_{\mathrm{H}},\mathrm{Z}_{\mathrm{H}})$ の原点を Figure1 に示す．ハブにおける力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}$ 及びモーメント $\boldsymbol{M}_{\mathrm{H}}$ は，式(１１)，(１２)を用いると以下のようになる．

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{H}_{\mathrm{X}}}\\F_{\mathrm{H}_{\mathrm{Y}}}\\F_{\mathrm{H}_{\mathrm{Z}}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_{\mathrm{X}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})+\Delta F_{\mathrm{H}_{\mathrm{X}}}\\F_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})+\Delta F_{\mathrm{H}_{\mathrm{Y}}}\\F_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})+\Delta F_{\mathrm{H}_{\mathrm{Z}}}\end{pmatrix}\tag{13}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{H}}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{H}_{\mathrm{X}}}\\M_{\mathrm{H}_{\mathrm{Y}}}\\M_{\mathrm{H}_{\mathrm{Z}}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}M_{\mathrm{X}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})+\Delta M_{\mathrm{H}_{\mathrm{X}}}\\M_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})-F_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}r_{\mathrm{f}}+\Delta M_{\mathrm{H}_{\mathrm{Y}}}\\M_{\mathrm{Z}_{\beta=0}}(r_{\mathrm{f}})-F_{\mathrm{Y}_{\beta=0}}r_{\mathrm{f}}+\Delta M_{\mathrm{H}_{\mathrm{Z}}}\end{pmatrix}\tag{14}$$

$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}$，$\Delta\boldsymbol{M}_{\mathrm{H}}$ は，ハブとフラッピング・ヒンジ間のブレード材 $\Delta m_{\mathrm{b},3}$ によってハブに働く力とモーメントである．

２．６　風車のハブにかかる全ての力とモーメント

風車のハブにかかるすべての力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{H,tot}}$ 及びモーメント $\boldsymbol{M}_{\mathrm{H,tot}}$ は，回転数 n，ブレード枚数 b，アジマス角 ψ とし，b 枚のブレードの間隔が等しいとすると，以下のようになる．

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{H,tot}}=\sum_{n=0}^{b-1}\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}\left(\psi+\frac{2\pi n}{b}\right)\tag{15}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{H,tot}}=\sum_{n=0}^{b-1}\boldsymbol{M}_{\mathrm{H}}\left(\psi+\frac{2\pi n}{b}\right)\tag{16}$$

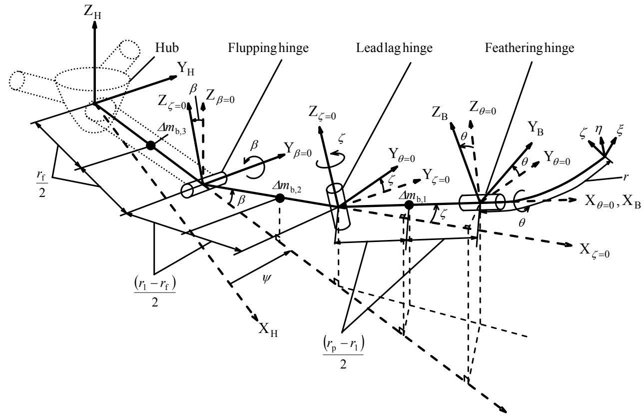

Figure1　each hinge

３．結論

ブレード全体に働く力を考えることで，各ヒンジ及びハブに働く力とそれによるモーメントの式を導出することができた．これにより，翼に働く空気力，ブレードの諸元を与えることで，各ヒンジ及びハブに働く力とモーメントを導くことができる．

４．参考文献

[1] 東　昭：「ブレード変形の資料」（東ノート）

[2] 東　昭：「航空工学(１)」，裳華房，1989

[4] Kyuichiro washizu : “*Variational Methods in Elasticity & Plasticity*”, PERGAMON PRESS, 1982