特集

エッジトーンと風工学 Edge tone and wind engineering

平田勝哉*¹ 大屋裕二*²
Katsuya HIRATA, Yuji OHYA

1. はじめに

いろいろな流れ場で、単一剪断層あるいは噴流が示す不安定挙動を見かける。そこでは、単一剪断層あるいは噴流は、下流側に目標物を見つけると、その与えられた距離を代表スケールにして、まさにそこに飛び込むように自身の不安定なモードを自己調整する。このような不安定流動現象を、ここでは、エッジトーン(edge tone)と呼ぶ。上述の特徴は、エッジトーン現象が、self-sustaining oscillation と呼ばれる所以である。

エッジトーンに関するレビューとしては、[1]–[6]などがある。図1 [1]には、色々なエッジトーンの例を示す。

エッジトーンは、簡潔に言うと、上流のある地点で剥離した剪断層が下流に存在する固体境界面の影響で発振する現象、及び、その際に生じる発音現象である。例えば文献[1]では、その発生機構を、(1)衝突領域から剥離領域近くの敏感領域への擾乱の伝播、(2)敏感領域での渦度変動の生成、(3)剪断層内での生成渦度変動の増幅、(4)衝突領域での擾乱の生成という一連の過程を繰り返すフィードバックループとして説明している。よって、エッジトーンは、有名なカルマン渦列と同様、自励振動(self-induced

oscillation, self-excited oscillation)または流動励起振動(flow-induced oscillation)と呼ばれる振動不安定現象の一つである。

エッジトーンでは、剪断層あるいは噴流が、特に流れ直角方向に顕著な周期変動を示し、しばしば、その変動に伴う波動が明瞭な渦として観察される。その際、もし共鳴する環境があれば、強い騒音の発生も伴うことになる。もっとも、流体音響学の分野では、エッジトーンは、騒音ではなく美しい音色を生み出すパイプオルガンなど多くの管楽器の発音機構として知られており、そのメカニズムの解明がな

図1 いろいろなエッジトーン[1].

*1 同志社大学理工学部 教授

Professor, Department of Mechanical Engineering, Doshisha University

*2 九州大学応用力学研究所 教授

Professor, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

されてきた (Sondhaus[7]による1854年の報告がある)。

しかし、トーンという言葉からもわかるように、エッジトーンは現象の音響面に重点を置いた言葉である。すなわち、エッジトーンは、もともとは、噴流が楔状の物体に衝突するときに生じる自励音である。(ただし、キャビティトーン(cavity tone)やホールトーン(hole tone)と呼ばれる現象も同じ発音機構で説明できるので、それらも含めて広義にエッジトーンと呼ぶこともある。)

それゆえ、エッジトーン現象を、音響面ではなく、カルマン渦列などとの対比のために流動面をより重視した立場から見て、流れと固体境界との相互作用(flow-solid boundary interaction)[2]や剪断層衝突形状(shear-layer impingement configuration)で観察される自励振動[1]、剪断層衝突不安定(impinging shear-layer instability) [8]と呼ぶこともある。

エッジトーンの最大の特徴は、流れ方向の代表長さを基準にとったストローハル数が階段状に変化することであり、各階はモードあるいはステージなどと呼ばれる。ここで、モード番号 n は、剥離点と衝突領域との間を流下する擾乱の個数あるいは波の数に対応する。

エッジトーンの他の重要な特徴は、キャビティトーンが典型的例となるが、エッジトーンが本来は単一剪断層不安定であることである。この点は、カルマン渦列が一對剪断層不安定であることと対照的である。

エッジトーンは、流体機械の分野では、固体ロケット燃焼室の音響振動、測定部が開放された風洞の有害騒音、ダムの水門、航空機フラップの振動などさまざまな流体工学的問題に関して、今なお活発な研究対象になっている[9]–[11]。例えば文献[9]では、エッジトーンに関係した激しい騒音を抑制するため、アクティブコントロールで流れの不安定を抑制する手法を試みている。

流体機械分野でのエッジトーン現象の一般的な主役は、噴流である。一方、風工学分野では以下に説明するように単一の剥離剪断層が主役となる。

2. 風工学分野でのエッジトーン現象

風工学では、一様流中に置かれた物体周りの非圧縮高レイノルズ数流れが、重要な関心事である。このときの物体は、通常、非流線型物体すなわちブラフボディの中でも、流れ方向に扁平な断面の構造柱であることが多い。そして、この扁平構造柱からの渦放出は、先のエッジトーン現象に支配されているのである。

中村と深町は、マジックパイプにおける音の発生が、エッジトーン現象に起因することを速度変動と音圧変動の精密な測定により明らかにした[12]。しかし、おもちゃの音の発生の解明について試みた研究が、その後の扁平構造柱の渦励振機構の解明につながっていった過程は非常に興味深い。

すなわち、通常、ブラフボディ周りの流れの特徴は剪断層剥離を伴う。ブラフボディからの渦放出は、一般に、前述のカルマン渦列に支配されることが多い。しかし、流れ方向に扁平な断面をもつ柱体などの場合には、そうでない円柱や正方形柱などに比べ

図2 辺長比5のH型断面柱の周りの流れ[8].

図3 断面比 c/t の矩形柱からの渦放出周波数[8].

て、長い側面の影響がより強くあらわれるかもしれないと予想することは自然である。事実、この場合は、カルマン渦列ではなく、エッジトーンが、渦放出を主に特徴づける。つまり、扁平ブラフボディの多くでは、その両側面の剥離剪断層が後縁と干渉してそれぞれ独立にエッジトーンとして発振し、渦放出周波数はエッジトーンの特徴を示す。(もっとも、下流では相互に干渉し交互配列のカルマン渦列を形成する。) このことは、後流中に薄いスプリット版を挿入しても、同じ周波数で渦放出が起こることからも確認できる(図2を参照)。

以下に、矩形柱を、扁平構造柱の例に取り説明する。今、矩形柱の流れ方向長さを c 、流れ直角方向の長さを t とする。ここで、 c を代表スケールにとると、そのストローハル数 $St(c)$ はエッジトーン現象に特有の不安定モードを示す。つまり、 $St(c)$ は矩形柱の断面比 c/t に対してステップ状に変化する(図3を参照)。詳しく述べると、一様流中に置いた矩形柱では、 $c/t \approx 3, 6, 9, 12$ を境に渦放出周波数の急変が観察される[8], [13]–[17]。これらの境は、渦放出モードの変化、すなわち、カルマン渦列からエッジトーン(モード番号 $n=1$)、エッジトーン($n=1$) からエッジトーン($n=2$)、エッジトーン($n=2$) からエッジトーン($n=3$)、エッジトーン($n=3$) からエッジトーン($n=4$) への遷移をそれぞれ意味する。また、 $St(c) \approx 0.6n$ であって、 $St(c)$ はエッジトーンに関する普遍ストローハル数の1つであることがわかる。なお、流れ場の観察も、しばしば上述の渦放出モードによく対応する事がある。例えば、エッジトーン($n=2$) は後縁への周期的再付着が

図4 2種類の扁平矩形柱を過ぎる流れ

観察されるが、 $n > 2$ では、後縁上流で何時も再付着が観察できる。[14]

上述の特徴は、矩形柱に限らず、H型断面柱やT型断面柱などの扁平構造柱でも観察されている。さらに、下流の物体が鋭い角を持たなくても、エッジトーンは、発生する。極端な場合としては、一様流中に置かれた半無限平板や鈍頭半無限円柱の例がある。このような場合でも、再付着長さ L を代表長さにとれば、そのストローハル数 $St(L)$ は0.6に近い。また、扁平構造柱近くに、微小であっても付加物を設置する場合は、渦放出モードが容易に急変する場合があります[18]、注意が必要である。

扁平構造断面柱からの渦放出において、ブラフボディ流れとして興味深い現象の一つに、異なる二つの渦放出モードの間の遷移域での現象がある。図4は、ともに、同じ断面比 c/t をもつ扁平矩形柱を過ぎる流れの数値計算結果である。それぞれの流れは、明らかに異なる種類の流動不安定に支配されていることがわかる。これら二種類の異なるフローパターンは、不規則なタイミングで入れ替わり出現する。

3. エッジトーン励振(扁平な構造柱の渦励振)

もし、扁平構造柱をばねなどで弾性支持すれば、渦励振が共振風速近くで発生することは、カルマン渦励振の類推からも容易に予想される。つまり、カルマン渦励振と同様、多くの扁平構造柱には、低風速であっても、エッジトーン励振を生じる可能性がある。

例えば、有名な旧タコマ橋は扁平なH型断面であり、落橋以前にしばしば低風速で観察された曲げ振動あるいは捻り振動はエッジトーン励振と考えられ

る。なお、初期に疑われたカルマン渦励振による説明の矛盾に対して、ある程度大きな振幅時の詳細な流れ場の観察から前縁剥離渦励振(excitation due to the motion-dependent leading-edge vortices)による説明が提案されている[19][20]。

最後に蛇足になるが書き足すと、旧タコマ橋の崩落が捻りフラッタによることは、風工学者の間では常識のことと思う。エッジトーン励振は原因ではないし、もちろん、カルマン渦励振とは関係がない。しかし、旧タコマ橋がカルマン渦列との共振により崩壊したとの誤解は、根強いようである[21]。

参考文献

- [1] Rockwell, D. & Naudascher, E., Self-sustained oscillations of impinging free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 11, 67-94, 1979.
- [2] Powell, A., On the edge tone, *J. Acoust. Soc. Am.*, 33, 395-409, 1961.
- [3] Brown, G. B., The mechanism of edge-tone production, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 49, 508, 1937.
- [4] Nyborg, W. L., Burkhard, M. D., & Schilling, H. K., Acoustical characteristics of jet-edge and jet-edge-resonator system, *J. Acoust. Soc. Am.*, 24, 293-304, 1952.
- [5] Karamcheti, K. Bauer A. B. Shields, W. L., Stegen, G. R. & Woolley, J. P., Some features of an edge-tone flow field, *NASA Spec. Publ.*, 207, 275-304, 1969.
- [6] Rockwell, D. & Naudascher, E., Review -- self-sustaining oscillations of flow past cavities, *J. Fluid Engng., Trans. ASME*, 100, 152-165, 1978.
- [7] Sondhaus, C., Ueber die beim ausstromen der luft entstehenden tone, *Ann. Phys. (Leipzig)*, 91, 126 & 214-240, 1854.
- [8] Nakamura, Y. & Nakashima, M., Vortex excitation of prisms with elongated rectangular, H and T cross-sections, *J. Fluid Mech.*, 163, 149-169, 1986.
- [9] 藤沢延行, 河野隆志, 高野剛, エッジトーン現象のアクティブ制御と制御機構に関する基礎研究, 日本機械学会論文集 (B編), 66, 2073-2078, 2000.
- [10] 河合勇太, 辻 義之, 久木田 豊, エッジトーン現象によって噴流中に形成された組織構造の特徴: 第1報, レイノルズ応力と乱れの生成項からの考察, 日本機械学会論文集 (B編), 72, 915-923, 2006.
- [11] 土田潤, 伊東聰, 藤澤智光, 矢川元基, エッジトーンにおける振動モード遷移のシミュレーション, 日本流体力学会年会講演論文集, 286-287, 2007.
- [12] 中村泰治, 深町信尊, マジックパイプにおける音の発生, *ながれ*, 3, 299-203, 1984.
- [13] 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理, 矩形断面の柱の抗力に関する一実験, *日本航空宇宙学会誌*, 16, 1-5, 1968.
- [14] 岡島厚, 杉谷賢一郎, 溝田武人, 長方形断面柱のストローハル数と背圧係数 (断面辺長比が1-9の場合), 日本機械学会論文集 (B編), 49, 2551-2558, 1983.
- [15] Stokes, A. N. & Welsh, M. C., Flow-resonant sound interaction in a duct containing a plate, II: square leading edge, *J. Sound Vib.*, 104, 55-73, 1986.
- [16] Nakamura, Y., Ohya, Y. & Tsuruta, H., Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges, *J. Fluid Mech.*, 222, 437-447, 1991.
- [17] Ohya, Y. Nakayama, Y. S. Ozono, Tsuruta, H. & Nakayama, R., A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges, *J. Fluid Mech.*, 236, 445-460, 1993.
- [18] Hirata, K., Moriya, F. & Funaki, J., Experiments of vortex shedding from a semi-infinite plate and elongated rectangular cylinders with and without smaller control objects, *Proc. FEDSM98, ASME, FEDSM98-5168*, 1998.
- [19] Komatsu, S & Kobayashi, H, *J. Wind Engng. & Industrial Aerodyn.*, 6, 335-362, 1980.
- [20] 白石成人, 松本勝, 充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究, 土木学会論文集, 322, 37-52, 1982.
- [21] Hartog, J. P. Den, *Mechanical Vibrations*, Dover, 307, 1985.