

乱流格子設計の一資料

辻 廣

概 要

乱流格子後流の等方性乱れのエネルギー減衰の測定結果を整理、解析し、工学への応用の便をはかる目的で、いろいろな格子によってできた乱れについて成り立つエネルギー減衰の、統一された簡単な実験式を導いた。すなわち、格子後流の乱れの減衰を支配する parameter として格子の solidity factor, S_F を採用し、かつ四角な rod からできている格子に対しては effective solidity factor を用いると、丸い rod からできている格子に対しても、また四角な rod からできている格子に対しても成り立つ乱れのエネルギー減衰の実験式、

$$\frac{U^2}{u^2} = (335 - 570 S_F) \left(\frac{x}{M} - 15 \right),$$

を導きだすことができ、この式を用いると直ちに任意の格子によつてできる乱れの強さを求めることができ、この式は乱流格子を設計したり、選択したりする場合の一つの資料となるものと思われる。

§1. ま え が き

最近、乱れ——すなわち流体運動の速度や圧力がその平均値のまわりに不規則に変動する現象——に関する問題は、空気力学の分野ばかりでなく、たとえば燃焼現象の研究の場合にあらわれる乱流焰の問題のように、機械工学や化学工学などのいろいろの分野においても重要な問題となってきている。この方面の研究においても、実際、流れの場に乱れをつくる必要のある場合には、規則正しい mesh の格子や金網がよく用いられる。しかしこのようないわゆる乱流格子を用いて乱れをつくる場合、どのような格子*を用いたら、希望の強さの乱れを希望の場所につくることができるかということがいつも問題になってくる。この問題を解決するためには、少くとも用いるべき格子でできた乱れのエネルギー減衰の様子が判っていなければならないのであるが、格子後流の等方性乱れについて行なった筆者の実験結果 [1] [2] や、その他の人々の実験結果 [3] [4] [5] [6] [7] によつても判るように、使用した格子によつて減衰の様子がいろいろ変わってくるので、前もつて乱れのエネルギー減衰を定量的に予想することは、実際の問題として簡単ではない。

このような現状にかんがみ、この報告においては、筆者の実験結果や、これまで多くの人人によつて行なわれた格子後流の等方性乱れのエネルギー減衰の実験結果を整理、解析し、いろいろな格子によつてできた乱れについて成り立つエネルギー減衰の統一された簡単な実験式を導き、乱れをつくるために使用する格子を設計したり選択したりする場合の一つの手がかりを与えたいと思う。ただし乱れの実験に用いる格子は、断面が円かまたは四角な rod を縦横に等間隔にならべてつくられているのが普通であるから、ここで問題にする格子もこ

* この報告においては、格子という言葉で、金網という意味も含ませることにする。

の場合に限ることとする。

§2. Linear Decay Law

格子後流の等方性乱れの減衰初期におけるエネルギー減衰法則としては、まず Batchelor と Townsend によって、いわゆる linear decay law,

$$\frac{U^2}{\bar{u}^2} \propto \left(\frac{x}{M} - \frac{x_0}{M} \right), \quad (1)$$

が成り立つことが理論的並びに実験的に示された [4] [5] [8]. ただしここで U は主流の平均速度, \bar{u}^2 は変動速度の自乗平均値, M は格子の mesh length, x は格子からの距離, x_0 は常数である. しかしその後 Lin および Goldstein が指摘し, 強調し [9] [10] [11], また最近筆者が行った新しい理論的研究の結果 [12] によっても判るように, 格子後流の等方性乱れのエネルギー減衰は, 厳密にいて linear decay law であらわされず, また筆者が行なった乱れの実験 [1] [2] の主眼点も, 実にこの linear decay law が厳密にいて成り立たないことを調べることにあった. しかしこれらの実験結果によると, 減衰曲線 (U^2/\bar{u}^2 対 x/M 曲線) は減衰のごく初期においては, 曲率をもった下に凸の曲線であらわされ, 減

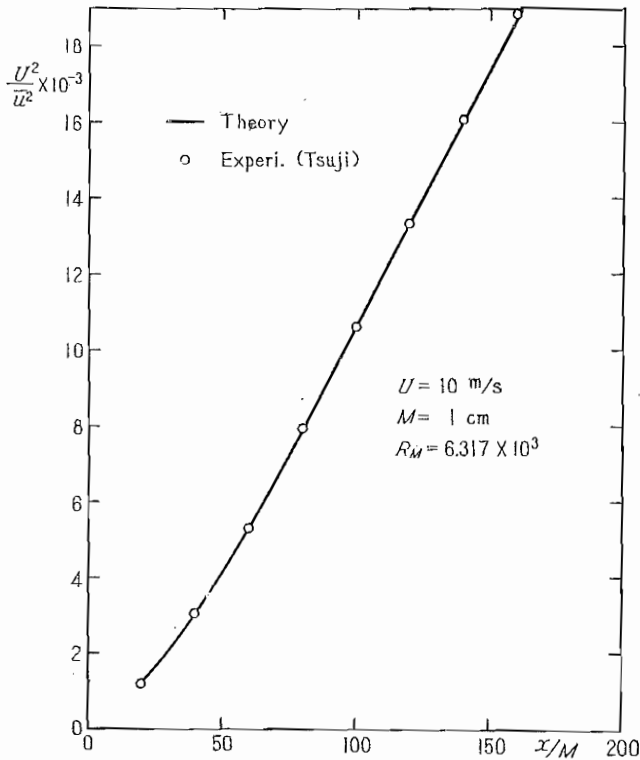


Fig. 1. Decay of Turbulence (after Tsuji, 1955 (Ref. [2]) and 1959 (Ref. [72])).

衰がすすみ x/M が 50 位より大きくなると, 割合に直線に近くなって来る. この一般的な傾向は筆者が行なった新しい理論的研究の結果によっても示すことができる [12]. Fig. 1 にその一例を示す. よって広く engineering への応用ということを考えた場合には, (linear decay law の理論的根拠の欠点 [12] に一応目をつぶって) 格子後流の乱れのエネルギーの減衰は, ごく大ざっぱに考えて, 第一近似として linear decay law, (1) 式, であらわされると考えて差支えないであろう.

§3. 格子の Solidity Factor

さて筆者および他の人々によって行なわれた格子後流の等方性乱れのエネルギ減衰の実験結果を比較するために、Fig. 2 にその代表的なものを集めてみた。この図をみて容易に判る著しい特徴は、用いた格子の種類によってエネルギー減衰の割合が著しくことなることである。いまこの格子の種類を示す一つの量として、

$$S_F = \frac{M^2 - (M - d)^2}{M^2} \quad (2)$$

で定義されるいわゆる solidity factor を導入する。ただしここで d は格子を組立てている rod の直径を示す。一般にこの solidity factor の異なった格子を用いた場合には、solidity factor の小さい格子ほど、その下流の乱れの減衰ははやく、solidity factor が大きくなると、格子による乱れの発生の機構が wake 型から jet 型に変わり、非常に強く、かつ減衰が比較的小さい乱れが発生するといわれているが、Fig. 2 に示されている減衰曲線はこのことを証

明しているようである。よってまず第一に、格子の solidity factor を格子後流の等方性乱れのエネルギ減衰を支配する一つの重要な parameter と考え、この parameter に対し、これら実験で求められた減衰曲線を整理してみる。

ここで注意すべき重要な事柄は、格子を組立てている rod の形によって、たとえ幾何学的 solidity factor が同一でも effective solidity factor が異なってくることである。断面が円形の rod から成り立っている格子を標準にとると、この場合には solidity factor の定義の式、(2) 式、の中の d として円の直径をそのまま採用できる。一方正方形の断面をもった rod から成り立っている格子は、rod まわりの流れの様子から判断して effective rod の中 d_e は幾何学的な d より大きくなっているはずである。実際、筆者が行なった実験に用いた $M=5$ cm で $d=1$ cm の正方形の rod からできている木製の格子 [1] [2]

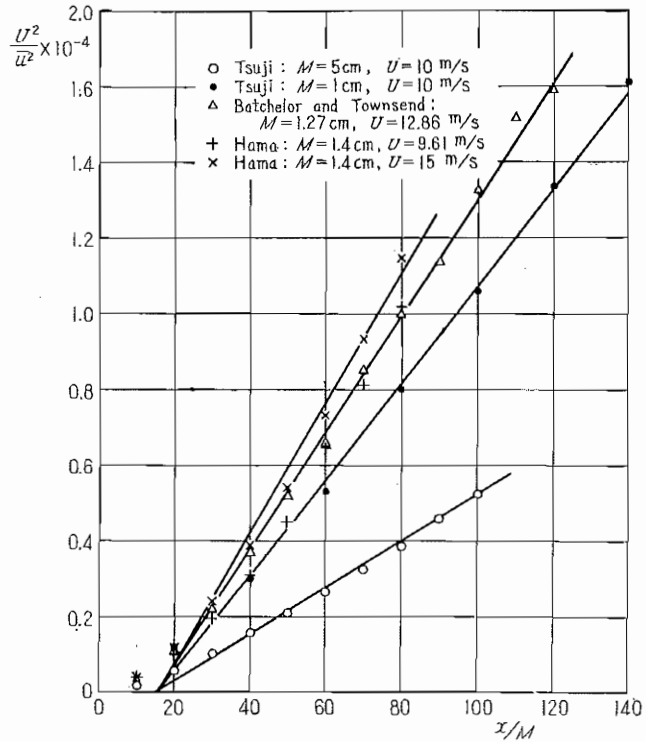


Fig. 2. Decay of Turbulence behind a Single Grid.

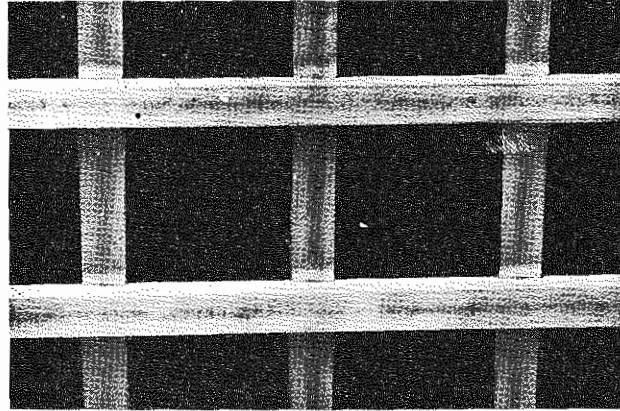


Fig. 3. Wooden Grid of 5 cm Mesh.

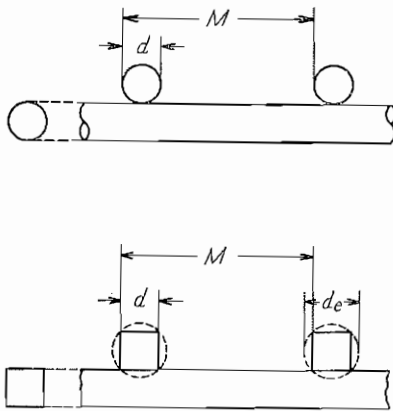


Fig. 4. Rods of Grid.

の写真 (Fig. 3) をみれば判るように, rod の前面から流れが剝離しており, そのため d_e が大きくなり, effective solidity factor が幾何学的な solidity factor より大きくなっていることが理解できる*.

この d_e を正確に予想することは勿論むつかしいことであるが, 今 d_e として角柱に外接する円柱の直径を採用することにする (Fig. 4 参照).

すなわち, この場合

$$d_e = \sqrt{2}d. \quad (3)$$

よって角柱の場合には S_F の定義の式の中の d としてこの d_e を入れて計算し, それを effective

solidity factor として採用することにする†.

§4. 各種の格子に対して成り立つエネルギー減衰の実験式

格子後流の等方性乱れのエネルギー減衰を支配する一つの重要な parameter として, 格子の solidity factor を導入したので, 次に減衰曲線を直線で近似した場合のこの直線の傾斜,

$$K \equiv d[U^2/\bar{u}^2]/d[x/M], \quad (4)$$

が S_F によってどのように変るか調べてみる. Table 1 に示した実験において求められた K の値を, S_F に対して plot してみると Fig. 5 のようになる.

* この写真では, 格子に附着した風洞の気流中の埃 (煤のようなもの) によって, 格子附近の気流の様子が示されている. 岐点附近の埃の附着状況は面白い.

† 断面が正方形でなく, 矩形の rod の場合には, 流れに直角な面の巾の $\sqrt{2}$ 倍のものを d_e として採用すれば良いであろう.

Table 1

実験者	Mcm	d cm (rodの形)	S _F	effective S _F	U m/s	R _M	K	参考文献 番号	Fig. 5 の記号
Tsuji	5	1 (□)	0.360	0.486	5, 10, 15	1.8×10 ⁴ ~5.3×10 ⁴	60	[7][2]	T _I
Tsuji	1	0.2 (○)	0.360	—	5, 10, 15	3.3×10 ³ ~9.9×10 ³	132	[7][2]	T _{II}
Hama	1.4	0.2 (○)	0.265	—	9.61	9.7×10 ³	173	[3]	T ₁₀
Hama	1.4	0.2 (○)	0.265	—	15	1.5×10 ⁴	186	[3]	H ₁₅
Sato	2.5	0.5 (□)	0.360	0.486	5	8.3×10 ³	57	[7]	S ₅
Sato	2.5	0.5 (□)	0.360	0.486	10	1.7×10 ⁴	48	[7]	S ₁₀
Batchelor & Townsend*	0.635	$\frac{3}{16}M$ (○)	0.340	—	12.86	5.5×10 ³	140	[4][5]	B.T.

* Batchelor と Townsend は solidity factor が $0.340 \left(M = \frac{16}{3}d \right)$ である四種類の格子 ($M = 0.635 \text{ cm}, 1.27 \text{ cm}, 2.54 \text{ cm}, 5.08 \text{ cm}$ でそれぞれ丸い rod からできている) を用い, $U = 1.5 \text{ m/s}, 6.43 \text{ m/s}, 12.86 \text{ m/s}$ について実験を行なっている. なお $R_M = UM/\nu$ (ただし ν は動粘性係数) の値は $6 \times 10^2 \sim 4.5 \times 10^4$ の範囲にある. この表には代表的な場合をあげておく. K の値は 126~151 の範囲にちらばっているが, 平均減衰曲線をひくと, K の値は約 139 になる.

この図をみると容易に判るが, K 対 S_F の関係は実験誤差の範囲内において, 近似的に linear な関係であらわすことができ, これらの測定点から最も確からしい直線をひいてみると

$$K = 335 - 570 S_F \quad (5)$$

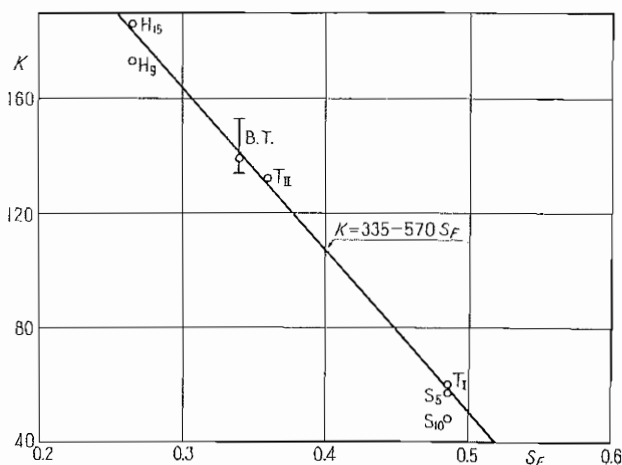
となる.

また Fig. 2 をみると, 直線でおきかえた減衰曲線は, 大体 $x/M = 15$ で x/M 軸と交わっていることが判る. よってこれらの格子後流の乱れのエネルギー減衰については,

$$\frac{U^2}{u^2} = (335 - 570 S_F) \left(\frac{x}{M} - 15 \right) \quad (6)$$

という実験式が実験誤差の範囲内で統一的に成り立つことが確められた.

なおこの実験式は, $15 \text{ m/s} \geq U \geq 1.5 \text{ m/s}$, $5 \text{ cm} \geq M \geq 0.635 \text{ cm}$, $6 \times 10^4 > R_M > 6 \times 10^2$, $0.5 > S_F > 0.2$ の範囲の実験値をもとにして求めたものであるから, この範囲を大きくはみだす条件の場合には, この関係の信頼性が問題になる. $S_F > 0.5$ の場合, 信頼できる新しい実験値はほとんどないし, また実際の問題として, $S_F > 0.5$ の場合には, ここで定義した格子を用いるよりも, むしろ規則正しく多くの孔がつけられた乱流多孔板を用いる場合が多い. よってこの範囲に対して成り立つような実験式を導くためには, このような乱流多孔板

Fig. 5. Variation of K with Solidity Factor.

後流の乱れについての系統的な実験がなされることが望ましい。なお(6)式が成り立つ x/M の範囲は、減衰初期とみなされる 200 位までであろう。

§5. 結 論

格子後流の乱れの減衰を支配する parameter として格子の solidity factor を採用し、かつ四角な rod からできている格子に対しては effective solidity factor を用いることによって、丸い rod からできている格子に対しても、また四角な rod からできている格子に対しても成り立つ簡単な統一された乱れのエネルギー減衰の実験式を導き出すことができた。この実用的なエネルギー減衰式を用いると、 S_F が判れば直ちに任意の格子によってできた乱れの強さが求められ、我々が乱流格子を実際に設計したり、選択したりする場合の一つの資料として役立つものと思われる。

1959年1月31日、原動機部

参 考 文 献

- [1] H. Tsuji and F. R. Hama: *Experiment on the decay of turbulence behind two grids*, Journ. Aero. Sci., Vol. 20 (1953), pp. 848/849.
- [2] H. Tsuji: *Experimental studies on the characteristics of isotropic turbulence behind two grids*, Journ. Phys. Soc. Japan, Vol. 10 (1955), pp. 578/586.
- [3] 浜 良助: 等方性乱れに関する実験的研究, 東京大学理工学研究所報告, 第7巻 (1953), pp. 145/174.
- [4] G. K. Batchelor and A. A. Townsend: *Decay of vorticity in isotropic turbulence*, Proc. Roy. Soc., London, A, Vol. 190 (1947), pp. 534/550.
- [5] G. K. Batchelor and A. A. Townsend: *Decay of isotropic turbulence in the initial period*, Proc. Roy. Soc., London, A, Vol. 193 (1948), pp. 539/558.
- [6] H. W. Liepmann, J. Laufer and K. Liepmann: *On the spectrum of isotropic turbulence*, NACA TN 2473 (1951).
- [7] H. Sato: *Experimental study of the spectrum of isotropic turbulence, I*, Journ. Phys. Soc. Japan, Vol. 6 (1951), pp. 387/392.
- [8] G. K. Batchelor: *Energy decay and self-preserving correlation functions in isotropic turbulence*, Quart. Appl. Math., Vol. 6 (1948), pp. 97/116.
- [9] C. C. Lin: *Note on the law of decay of isotropic turbulence*, Proc. Nat. Acad. Sci., Wash., Vol. 34 (1948), pp. 540/543.
- [10] S. Goldstein: *On the law of decay of homogeneous isotropic turbulence and the theories of the equilibrium and similarity spectra*, Proc. Camb. Phil. Soc., Vol. 47 (1951), pp. 554/574.
- [11] C. C. Lin: *A critical discussion of similarity concepts in isotropic turbulence*, Proc. 4th Symp. Appl. Math. (1953), pp. 19/27.
- [12] H. Tsuji: *A contribution to the energy decay law of isotropic turbulence in the initial period*, to be published in Aero. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Report No. 345 (Vol. 25, No. 5) (1959).