

# 非等温斜め下方ノズル吹出し気流について

木内俊明\*

## On the Path of Slantly Projected Hot and Cold Air Jets

By Toshiaki KIUCHI\*

**Synopsis:** This paper presents in mathematical analyses on the path of slanting Nozzle air jets, and discusses outline of cold air supply for the purpose of cooling, taking off the heat from spectators in case of no wind.

**要旨:** 非等温ノズル吹出し気流については水平ならびに垂直下方吹出しの理論解析があるが、斜め下方についてはこれまで利用されるケースが少なかったためか理論解析がなされていない。外気通風空間の冷風供給装置の実施に際して採用した大型ノズル吹出口は快適環境空間をつくるため、特に斜め下方吹出しとした。これに伴って、A. Koestel の理論解析を参考として、斜め下方ノズル吹出しの軌道軸についての解析を行ない、併せて実験、実施された装置の温度、気流などの資料の一部について概要を述べる。

### 1. はじめに

非等温ノズル吹出し気流については Alfred Koestel らの論文などが有名であるが、これらは水平吹出しあるいは垂直下方吹出しの気流についての解析である。

一般に室内空間の空調用吹出し口は建築物の構造などから水平吹出しか垂直下方吹出しが多い。斜め下方吹出しは直接に居住域空間に冷風や温風が流入し一般の空調空間では採用が少ないが、筆者らが計画、実施した外気通風空間での冷風吹出しの場合は外気通風空間のため、夏季は温湿度が高く、そのため冷風を直接、居住域空間に流入させ、人体に直接冷風をあてて快適環境を作る方法をとった。そのため冷風ノズル吹出し口は斜め下方に15°から25°程度に設置した。

非常温水平ノズル吹出口の理論解析値は最終的計算式の単純化を計るため微分方程式の積分過程において、軌道勾配  $dY/dX$  または  $\tan \theta$  が微小値であると仮定し、

$$\left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right]^{1/4} \approx \left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right]^{1/2} \approx 1$$

1 とすることによって式が成立している。

斜め下方ノズル吹出し口では吹出し方向をあらかじめ  $\tan \theta$  の存在を明確にし、 $\theta$  を  $0^\circ \sim 45^\circ$  の範囲の場合に適用できるような係数を見出した。

非等温水平吹出し軌道軸の微分方程式は A. Koestel によれば、

$$\left(\frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2}\right) \left[\left(\frac{a}{b} + 1\right)\right] \left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right]^{1/4} \\ \int_0^X \left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right]^{1/2} dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2}$$

軌道の勾配があまり大でない場合の近似解として、

$$0.42 \left(\frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{K \cdot V_0^2}\right) \left(\frac{X}{D_0}\right)^3 = \pm \frac{Y}{D_0}$$

ただし Shape Factor の  $a, b$  は、

$$\frac{b}{a} = \frac{4}{1 + (1/N_{pt})} - 1 \text{ とし、 } N_{pt} \text{ (プラントル数)}$$

を 0.7 とする。

一方非等温斜め下方吹出し軌道軸の微分方程式では (35) 式に示すように

$$\left(\frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2}\right) \left(\frac{\frac{a}{b} + 1}{D_0^2 \cdot K}\right) \left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right] \\ \int_0^X \left[1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right]^{1/2} \cdot dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2}$$

この微分方程式より  $\theta$  を仮定して解を得ることができる。

$$A \left(\frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2 K}\right) \left(\frac{X}{D_0}\right)^3 + B \cdot \left(\frac{X}{D_0}\right) = \pm \frac{Y}{D_0}$$

$A, B$  は係数であり、後述の (49) 式のところを参照されたい。

\* 建築学科助教授  
Assistant Professor, Architectural Division

斜め下方ノズル吹出しの実験による実測および装置による実測などに上記の方程式を採用したが、実測結果では一応満足すべき資料が得られたので、これらの一部の資料を示した。

外気通風空間の斜め下方ノズル吹出しの装置を実際に設置したのは、1970年に開催された日本万国博のお祭り広場においてであり、より快適な環境を作ることを目として、東大教授・丹下健三氏、都市建築設計研究所所長・神谷宏治氏、早大教授・井上宇市氏、筆者らの構想により出発し、1968年の実験実測などの資料の解析など基礎固めを行ない、これまでにない大胆な装置をお祭り広場に設置した。お祭り広場の冷風吹出しに伴う環境実測は当時建築学科4年の学生らの協力によって資料を得ることができた。

## 2. 斜め下方ノズル吹出し気流

### 2.1 基本形

冷風および温風の気流においては水噴射の軌道と同様に次に示す一般的性質から推察される。水平吹出しでは、

$X = V_0 \cdot t$  より  $X^2 = V_0^2 \cdot t^2$  を次式に代入する。

$$Y = \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{したがって}$$

$$Y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{X^2}{V_0^2} \quad (1)$$

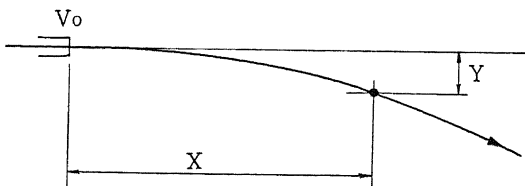


図 1

いま  $Y/D_0$  の関係で示すと、

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{D_0}{V_0^2} \cdot g \cdot \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 = \frac{Y}{D_0} \quad (2)$$

斜め下方吹出しでは  $X$  軸方向と  $Y$  軸方向にわけ

$$X = V_0 \cdot t \cdot \cos \theta, \quad Y = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \cdot \sin \theta$$

したがって

$$X^2 = (V_0 \cdot t \cdot \cos \theta)^2 = V_0^2 \cdot t^2 \cdot \cos^2 \theta$$

$$\therefore t^2 = \frac{X^2}{V_0^2 \cdot \cos^2 \theta}$$

$$\therefore Y = \frac{1}{2} g \frac{X^2}{V_0^2 \cdot \cos^2 \theta} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$ , よって  $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$  であるから(2)式は

$$Y = \frac{1}{2} g \cdot \frac{X^2}{V_0^2} \cdot \frac{\sin \theta}{(1 + \sin \theta)(1 - \sin \theta)} \quad (3)$$

$Y/D_0$  の直径との関係式になおすと

$$\frac{Y}{D_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_0}{V_0^2} \cdot \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} \cdot g \cdot \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 \quad (4)$$

ここで  $D_0$ : ノズル吹出口の直径 (m)

$V_0$ : 吹出口の初速 (m/s)

$t$ : 時間 (h)

$g$ : 重力の加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)

水力学ではフルード数 (Froude Number) (無次元数) がある。すなわち

$$N_F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (5)$$

(5)式の  $L$  はノズルの直径にとることができる。したがって(4)式は

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N_F^2} \cdot \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 = \frac{Y}{D_0} \quad (6)$$

(6)式は、空中への水噴射の進路はノズルで計算したフルード数によって決まるといえる。

一般に軌道計算式は次の無次元数の形で示すことができる。

$$\frac{Y}{D_0} = f \left( \frac{X}{D_0}, N_R, N_{Pr}, N_F \right) \quad (7)$$

ここで  $N_R$ : レイノルズ数

$N_{Pr}$ : プラントル数

$N_F$ : フルード数

### 2.2 運動量からの解析

ノズルからある距離における速度中心軸に垂直な気流の全運動量  $M_s$  は次式で示される。

$$M_s = 2\pi \rho \int_{r=0}^{\infty} V^2 \cdot r \cdot dr \quad (8)$$

(8)式を分解すれば

$$M_s = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} dr \cdot r \cdot d\theta \cdot V \cdot \rho \cdot V = \int_0^{\infty} \rho \cdot V^2 \cdot r dr \int_0^{2\pi} d\theta$$

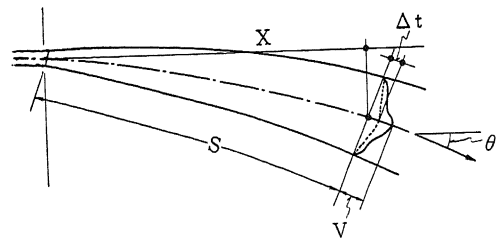


図 2

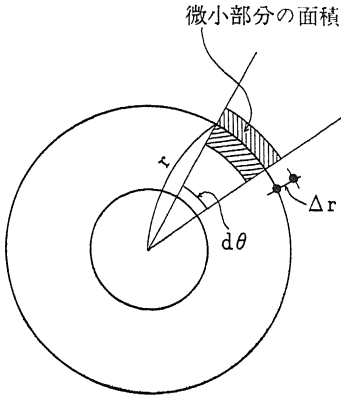


図 3

$$\int_0^{2\pi} d\theta = [\theta]_0^{2\pi} = 2\pi$$

$$\therefore M_s = 2\pi\rho \int_0^\infty V^2 \cdot r dr \text{ となる。}$$

自由噴流における速度分布については気流の速度プロフィールを次に示す形に仮定することができる。

$$V = V_c \cdot e^{-a^2} \quad (9)$$

$a$  は速度プロフィールの値をきめる係数 Shape Factor と呼ばれる。(9)式における  $V$  の関数を(8)式に代入する。

$$M_s = \frac{\pi \cdot \rho \cdot V_c^2}{2a} \quad (10)$$

(10)式の計算過程を解説する。

$$V = V_c \cdot e^{-at^2} \quad \text{ここで } t = -at^2 \text{ とおく。}$$

$$dt = -2ardr, \quad r dr = -\frac{1}{2a} dt$$

$$M_s = 2\pi\rho \int_0^\infty V_c^2 \cdot \frac{-1}{2a} dt \text{ より } V = V_c \cdot e^t \text{ を代入する}$$

$$M_s = 2\pi\rho \int_0^\infty V_c^2 \cdot e^{2t} \cdot \frac{-1}{2a} dt$$

$$= \pi\rho \cdot V_c^2 \cdot \frac{-1}{2a} [e^{-2at^2}]_{t=0}^{t=\infty} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot V_c^2}{2a}$$

次にノズルの任意の距離のところのX軸方向の  $M_x$  成分について考えると

$$M_x = 2\pi\rho \cdot \cos\theta \int_{r=0}^{r=\infty} V^2 \cdot r dr \quad (11)$$

$M_s$  のY軸方向の成分は

$$M_y = 2\pi\rho \cdot \sin\theta \int_{r=0}^{r=\infty} V^2 \cdot r dr \quad (12)$$

ここで  $M_y/M_x$  については

$$\frac{M_y}{M_x} = \frac{2\pi\rho \cdot \sin\theta \int_0^\infty V^2 r dr}{2\pi\rho \cdot \cos\theta \int_0^\infty V^2 r dr}$$

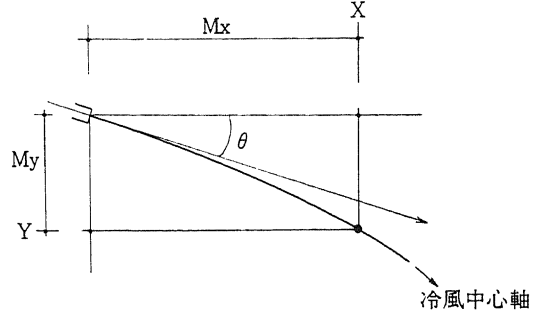


図 4

$$= \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \tan\theta = \frac{dY}{dX} \quad (13)$$

### 2.3 温度分布について

温度プロフィールは正規確率分布にて示される。

$$\Delta t = \Delta t_c \cdot e^{-bt^2} \quad (14)$$

$b$  は温度プロフィールに対する Shape Factor である。ただし  $a \neq b$  である。

ノズルからある距離の速度中心軸の垂直な方向の温度分布は

$$Q_s = r \cdot C_p \cdot 2\pi \int_0^\infty \Delta t \cdot V \cdot r dr \quad (15)$$

ここで(9)式と(14)式を上式に代入する

$$Q_s = r \cdot C_p \cdot 2\pi \cdot \Delta t_c \int_0^\infty e^{-bt^2} \cdot V_c \cdot e^{-at^2} \cdot r dr$$

$$Q_s = r \cdot C_p \cdot 2\pi \cdot \Delta t_c \cdot V_c \int_0^\infty e^{-(a+b)t^2} \cdot r dr$$

$$Q_s = \frac{r \cdot C_p \cdot 2\pi \cdot \Delta t_c \cdot V_c}{-(a+b) \cdot 2} [e^{-(a+b)t^2}]_0^\infty$$

$$= \frac{r \cdot C_p \cdot \pi \cdot \Delta t_c \cdot V_c}{a+b}$$

$$\therefore Q_s = \frac{r \cdot C_p \cdot \pi \cdot \Delta t_c \cdot V_c}{a+b} \quad (16)$$

一方、ノズル吹出口におけるエンタルピーは次式で示される。

$$Q_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot V_0 \cdot \Delta t_0 \cdot r \cdot C_p \quad (17)$$

エネルギー保存則により(16)式(17)式は等しい。

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot V_0 \cdot \Delta t_0 \cdot r \cdot C_p = \frac{r \cdot C_p \cdot \pi \cdot \Delta t_0 \cdot V_c}{a+b}$$

したがって

$$\Delta t_c = \frac{D_0^2 \cdot V_0 \cdot \Delta t_0 (a+b)}{4V_c} \quad (18)$$

### 2.4 浮力について

非等温吹出しの横断面における浮力は  $\gamma, \beta, \Delta t$  で示さ

れる。 $\beta$  は膨張係数であり、理想ガスでは  $1/T_a$  に等し

い。すなわち、浮力  $= \gamma \cdot \left( \frac{1}{T_a} \right) \Delta t = \gamma \cdot \beta \cdot \Delta t$  である。

ノズルから吹出された横断面の長さ  $ds$  の浮力は、

$$F = \gamma \cdot \beta \cdot ds \cdot 2\pi \int_0^\infty \Delta t \cdot r dr \quad (19)$$

上式を分解すると

$$F = \gamma \cdot \beta \cdot \Delta t (d \cdot r \cdot d\theta) ds = \gamma \cdot \beta \cdot ds \int_0^\infty \Delta t \cdot dr \cdot \int_0^{2\pi} d\theta$$

$$F = \gamma \cdot \beta \cdot ds \cdot 2\pi \int_0^\infty \Delta t \cdot dr$$

(14)式を(19)式に代入する

$$F = \gamma \cdot \beta \cdot ds \cdot 2\pi \int_0^\infty \Delta t_c \cdot e^{-bt^2} \cdot dr$$

$$= \gamma \cdot \beta \cdot ds \cdot 2\pi \cdot \Delta t_c \cdot \frac{1}{-2b} [e^{-bt^2}]_0^\infty$$

$$\therefore F = \frac{(\Delta t_c \cdot \gamma \cdot \beta \cdot \pi)}{b} ds \quad (20)$$

## 2.5 斜め下方吹出しの気流の軌道軸について

非等温斜め下方吹出しに対する全運動量のY軸成分は浮力によって決まる。すなわち  $F = \pm \alpha(M_x)$  となる。

一方、全運動量のX軸成分は斜め下方に力が働くので、

$$M_x = M_0 \cdot \cos \theta$$

(13)式より

$$F = \pm \alpha(M_x \cdot \tan \theta) = \pm M_x \cdot d \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (21)$$

$$M_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \rho \cdot V_0^2 \text{ であるから、}$$

$$M_x = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot \cos \theta \text{ を(21)式に代入する}$$

$$F = \pm \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \theta d \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (22)$$

(20)式を(22)式に代入する

$$\frac{(\Delta t_c \cdot \gamma \cdot \beta \cdot \pi)}{b} ds = \pm \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \theta d \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (23)$$

(18)式を(23)式に代入する

$$\therefore \frac{\Delta t_0 \cdot \left( \frac{b}{a} + 1 \right) \cdot \beta \cdot g \cdot ds}{V_0 \cdot V_c \cdot \cos \theta} = \pm \alpha \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (24)$$

$$M_x = M_s \cdot \cos \theta$$

$$M_x = M_0 \cdot \cos \theta$$

$$M_s \cdot \cos \theta = M_0 \cdot \cos \theta = M_1 \text{ であるから}$$

$$\frac{\pi \cdot \rho \cdot V_c^2}{2a} \cdot \cos \theta = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot \cos \theta = M_x \quad (25)$$

(25)式より

$$V_c^2 = \frac{D_0^2 \cdot V_0^2 \cdot 2a}{4}$$

$$\therefore V_c = \frac{D_0 \cdot V_0 \cdot \sqrt{2a}}{2} \quad (26)$$

いま速度に関する係数  $a$  は

$$V = V_c \cdot e^{-at^2} \text{ より}$$

$$\frac{V}{V_c} = e^{-at^2} = \text{一定, したがって}$$

$$at = \text{一定となる。}$$

$$\frac{dr}{ds} = \text{一定であるから、積分により、}$$

$$r_1 = s \cdot \text{constant}$$

$$\text{ゆえに } a = \frac{C_2}{s^2} \text{ となる。}$$

温度プロフィールと同様に

$$b = \frac{C_1}{s^2}$$

ただし、 $C_1, C_2$  は定数

$$\cos \theta = \frac{dX}{ds} \text{ であるから、}$$

$$ds = \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2} = \sqrt{1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2} \cdot dX \quad (27)$$

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2} \cdot dx \quad (28)$$

(28)式を(26)式に代入する

$$V_c = \frac{D_0 \cdot V_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{C_2}}{s}}{2}$$

$$V_c = \frac{D_0 \cdot V_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{(C_2)^{1/2}}{\int_0^x \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right] \cdot dX} \quad (29)$$

$C_2 = 2K_p^2$  とする、(29)式は

$$V_c = \frac{D_0 \cdot V_0 \cdot K_p}{\int_0^x \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX} \quad (30)$$

(30)式を(24) に代入する

$$\frac{\Delta t_0 \left( \frac{a}{b} + 1 \right) \cdot \beta \cdot g \cdot ds \int_0^x \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX}{V_0 \cdot \cos \theta \cdot D_0 \cdot V_0 \cdot K_p} = \pm d \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (31)$$

一方、 $\cos \theta = \frac{dX}{ds}$  であるから、(31)式に代入すると

$$\therefore \frac{\Delta t_0 \left( \frac{b}{a} + 1 \right) \cdot \beta \cdot g \cdot (ds)^2 \int_0^x \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX}{V_0^2 \cdot D_0 \cdot K_p \cdot dX}$$

$$= \pm d \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (32)$$

一方(27)式より

$$ds = \sqrt{1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2} \cdot dX \text{ であるから,}$$

$$(ds)^2 = \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right] \cdot (dX)^2 \quad (33)$$

$$\frac{\Delta t_0 \cdot \left( \frac{a}{b} + 1 \right) \cdot \beta \cdot g \cdot \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right] \cdot (dX)^2}{V_0^2 \cdot D_0 \cdot K_p \cdot dX} \\ \int_0^X \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX = \pm \alpha \left( \frac{dY}{dX} \right)$$

$$\frac{\Delta t_0 \cdot \left( \frac{a}{b} + 1 \right) \cdot \beta \cdot g \cdot \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]}{V_0^2 \cdot D_0 \cdot K_p} \\ \int_0^X \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX = \frac{d}{dX} \left( \frac{dY}{dX} \right) \quad (34)$$

ならびかえと,

$$\left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{D_0^2 \cdot K_p} \right) \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right] \\ \int_0^X \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2} \quad (35)$$

(35)式が軌道軸における微分方式となる。

いま  $K_p = K$  とおく

$$\left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right] \\ \int_0^X \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2} \quad (36)$$

斜め下向きに水平軸に対して  $\theta = 22^\circ$  とすると, (仮定する)

$$\tan \theta = \tan 22^\circ = 0.40065, \text{ したがって } \frac{dY}{dX} = 0.4$$

とする。

$$1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 = 1 + (0.4)^2 = 1.16, \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} = \\ \sqrt{1.16} \doteq 1.08 \text{ を (B-31) 式に代入する。}$$

$$\left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0} \right) (1.16)(1.08) \\ \int_2^X dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2} \quad (37)$$

上式を整理すると

$$1.25 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0} \right) \int_0^X dX = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2}$$

(38)式を積分する。

$$1.25 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X + C \\ = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2}$$

$X = 0$  のとき, 積分定数  $C = 0$  となるゆえ,

$$1.25 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X = \pm \frac{d^2 Y}{dX^2} \quad (39)$$

(39)式をさらに積分する。

$$1.25 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X^2 + C \\ = \pm \frac{dY}{dX} \quad (40)$$

$X = 0$  のとき  $\frac{dY}{dX} = 0.4$  となるゆえ  $C = 0.4$

$$\therefore 0.625 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X^2 + 0.4 \\ = \pm \frac{dY}{dX} \quad (41)$$

さらに積分する

$$\frac{0.625}{3} \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X^3 + 0.4X + C \\ = \pm Y \quad (42)$$

$X = 0$  のとき,  $Y = 0$   $\therefore C = 0.4$  となる。

$$\frac{0.625}{3} \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{1}{D_0^2} \right) X^3 + 0.4X \\ = \pm Y \quad (43)$$

直径  $D_0$  の式で  $Y$  および  $X$  を表わすと,

$$\frac{X}{D_0} \left[ \frac{0.625}{3} \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 \right. \\ \left. + 0.4 \right] = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (44)$$

いま  $N_{\text{prt}}$  (プラントル数) = 0.7,  $K = 6.5$  を(44)式に代入する。

$$\frac{b}{a} = \frac{4}{1 + \frac{1}{N_{\text{prt}}}} - 1 = 0.645 \quad (45)$$

$$\frac{a}{b} + 1 = \frac{1}{0.645} + 1 = 2.52, \quad \frac{\frac{a}{b} + 1}{K} = 0.391,$$

$$\frac{0.625 \times 0.391}{3} = 0.0814$$

$$\therefore \frac{X}{D_0} \left[ 0.0814 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 + 0.4 \right] = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (46)$$

(44)式のうち,  $K$  を残せば,

$$a/b + 1 = 2.54, (0.625/3) \times 2.54 = 0.53 \text{ ゆえ,}$$

$$\frac{X}{D_0} \left[ 0.53 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2 \cdot K} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^2 + 0.4 \right] = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (47)$$

$$\text{又は } 0.53 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2 \cdot K} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right) + 0.4 \left( \frac{X}{D_0} \right) = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (48)$$

(37)式~(48)式は  $\theta = 22^\circ$  の場合である。

$\theta$  が  $0^\circ$  から  $45^\circ$  まで変化すれば, すなわちノズルの向きが水平方向から下方  $45^\circ$  までかたむくとすれば,

$$A \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2 \cdot K} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^3 + B \left( \frac{X}{D_0} \right) = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (49)$$

(49)式が一般式である。

$\theta$  と係数  $A, B$  についてそれぞれ求めると次のようになる。

$\theta$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
$A$	0.42	0.43	0.44	0.47	0.50	0.65	1.20
$B$	0	0.09	0.18	0.27	0.37	0.58	1.00

水平非等温吹出しの場合の軌道軸の式を  $Y/D_0, X/D_0$  として表わすと

$$\left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{a}{bK} + 1 \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^3 = \pm \frac{X}{D_0} \quad (50)$$

$N_{prt} = 0.7, K = 6.5$  ・し, (45)式を利用して(50)式を書きなおせば,

$$0.065 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{V_0^2} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^3 = \pm \frac{X}{D_0} \quad (51)$$

$K = 6.5$  として  $K$  をのこせば,

$$0.42 \left( \frac{\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0}{K \cdot V_0^2} \right) \left( \frac{X}{D_0} \right)^3 = \pm \frac{Y}{D_0} \quad (52)$$

(52)式は水平吹出しの方程式として一般に利用されている。

なお  $N_{prt} = 0.7$  は Nottage, Forstall and Shapiro, Corrsion and Uberon などの実験によって提案されてい

る。また(52)式などの  $\pm$  は  $Y/D_0$  が下降か上昇によって決まるものである。

$(\Delta t_0 \cdot \beta \cdot g \cdot D_0 / V_0^2)$  は温度差のある場合に, 浮力などに対する運動量の力の割合を示すものである。

$K$  は定数であり, 等温吹出しでは中心軸速度変化に対しては次式を用いる。

$$\frac{V_c}{V_0} = K \cdot \frac{1}{\frac{X}{D_0}} \quad (53)$$

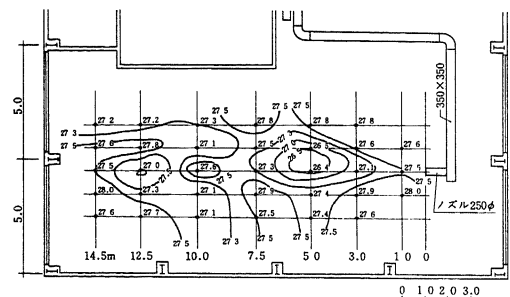
また  $K$  はノズル気流第1域の定速域におけるみかけの長さを意味する。 $K$  は吹出速度が  $5 \text{ m/s}$  以上で直径が  $15 \text{ cm}\phi$  以上のとき,  $6.0 \sim 6.5$  程度として示されている。

### 3. 外気通風空間におけるノズル吹出し気流の実測

外気通風空間に冷風を供給する冷風供給装置の実験実測は1968年, 立石管工業株式会社・松戸工場内の工場建屋内に設置した。実験に供された空間は  $20\text{m} \times 10\text{m}$  で天井高はアーチ状を呈するが, 平均  $6 \text{ m}$  高程度であって, 東西の2面は出入口や窓を有する。

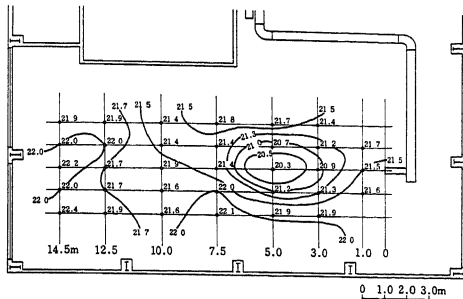
冷風装置は整形エアハンドリンクユニット1台を専用にて用い, ノズル吹出口は内径  $250 \text{ mm}\phi \times 1050 \text{ mmL}$  とし, ノズルとダクト接続部にはノズルの斜め下方に任意設置することができると同時に, 左右の首振りが可能となるようにキャンパス継手を用いている。ノズル吹出口は床上約  $4 \text{ m}$  に設置し, 水平吹出し, 斜め下方吹出し, 首振りなどの実験を行なった。

居住域空間の床上  $1.5 \text{ m}$  における環境実測の結果を図5~図7に示す。いま風速  $9.0 \text{ m/s}$  とすれば, 量は  $1,650$



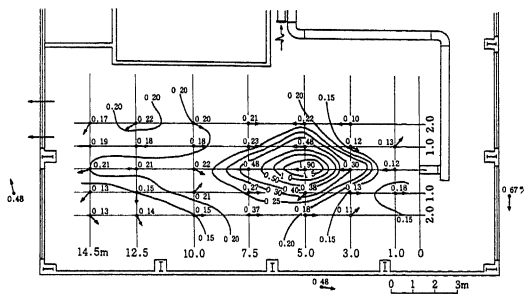
実測: 昭和43年9月2日 11.10~12.40 吹出口:  $13.5^\circ\text{C DB}, 12.0^\circ\text{C WB}, 9.0 \text{ m/s}$ , 外気:  $27.8^\circ\text{C DB}, 23.6^\circ\text{C WB}$ , アスман乾湿度計使用, 窓全開

図5 乾球温度分布 (床上1.5m) (ノズル下向き)



実測：昭和43年9月2日 11.10～12.40 吹出口：  
13.5°C WB, 12.0°C WB, 9.0 m/s, 外気：27.8°C DB,  
23.6°C WB, アスман乾湿度計使用, 窓全開

図6 湿球温度分布 (床上1.5m/s) (ノズル下向き)



実測：昭和43年9月2日 11.10～12.40 吹出口：  
13.5°C DB, 12.0°C WB, 9.0 m/s, 外気：27.8°C DB,  
23.6°C WB, アネモエーサーモ使用, 窓全開

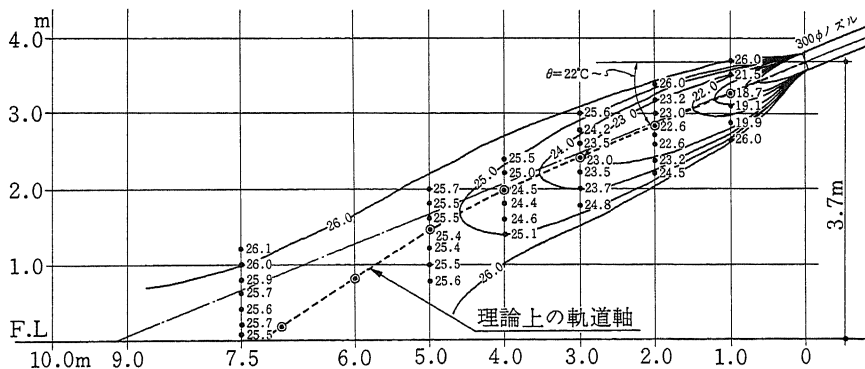
図7 風速分布 (床上1.5m) (ノズル下向き)

$\text{m}^3/\text{h}$  であり, 対象床面積  $12\text{ m} \times 4\text{ m} = 48\text{ m}^2$  とすれば, 単位床面積当りの冷風量は  $35\text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$  である。外気温と吹出口気流との空気のエンタルピー差を  $10\text{ kcal/kg}$  とすれば, 単位床面積当りの冷却熱量は約  $400\text{ kcal/hm}^2$  であり, 一般の冷房されている建築空間ち約4倍強の冷却能力を有する。

冷風を  $\theta = 22^\circ$  の角度で斜め下方に吹き出した場合の1.5 m 高における冷房範囲は気流の軌道軸を中心にした範囲で約  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  程度であるが, 冷風の流れが床上0.5 m 高の範囲で気流方向に広がるため, 温域作用としての快適範囲は水平吹出しの場合にくらべてかなり広い範囲に得られることが判明した。外気通風空間では温湿度条件とさらに気流による作用によって快適空間の範囲が広がることなどが実測によって得られた。

ノズル吹出口の冷風温度はノズル自体からの結露現象を別にすれば,  $12^\circ\text{C}$  程度の低い温度の方がより効果が上る。床上1.5 m 高での軌道軸における風速が  $2.0\text{ m/s}$  程度であるならば, 温度拡散率が大であるゆえに, 居住域に達するまでに, 外気温との差は  $2.0\text{ deg}$  程度あるいはそれ以内となる。したがって温度のみによる冷風効果はあまり期待できず, 主に冷風による速を床上1.5 m 高において,  $1.5 \sim 2.5\text{ m/s}$  とし, いわゆるコールドゾーンを作ることが望ましい。この場合, 長時間コールドゾーン内に人がいることも考慮されるので, コールドゾーンを分散させるため往復4分間程度の首振り形ノズルを設ければ, 快適範囲の拡大と, コールドゾーンの分散化が同時に解決することが判った。

$\theta = 22^\circ$  とした斜め下方ノズル吹出し口の中央断面図を図8～図10に示す。乾球温度および湿球温度における中心軸は, 軌道軸よりやや下方に移る。しかし図10に示



実測：昭和43年9月3日 11.20～14:00 吹出口：13.2°C DB, 12.1°C WB, 9.1 m/s,  
外気：26.7°C DB, 20.9°C WB

図8 中央断面における乾球温度分布 ( $^\circ\text{C DB}$ )

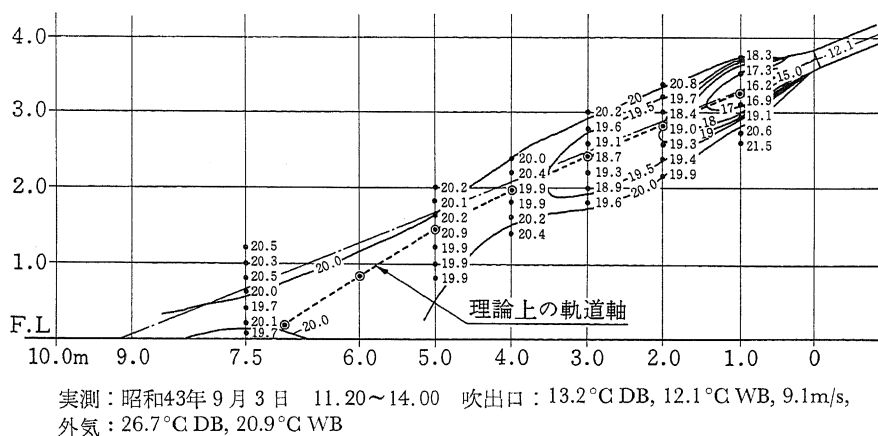


図9 中央断面における湿球温度分布 (°C WB)

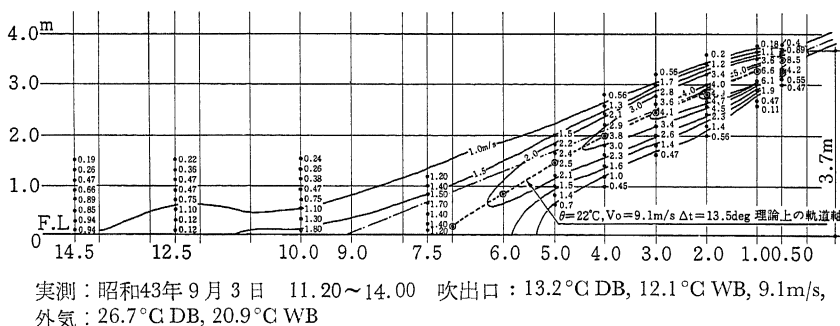
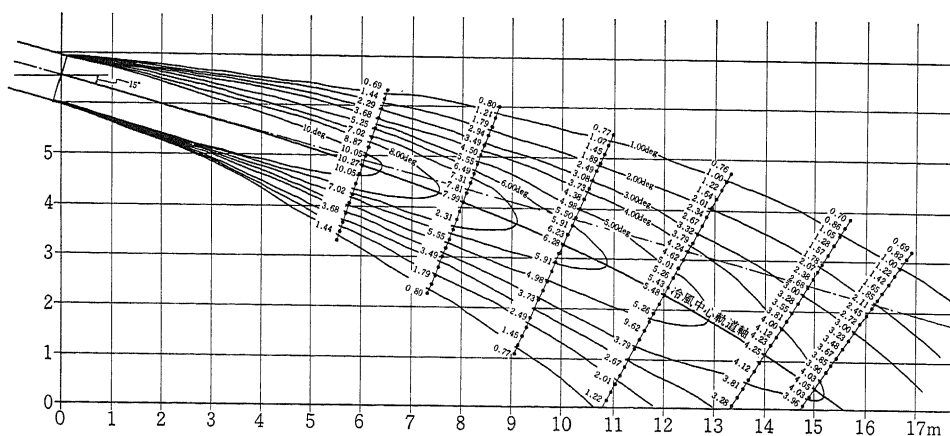


図10 中央断面における風速分布 (m/s)

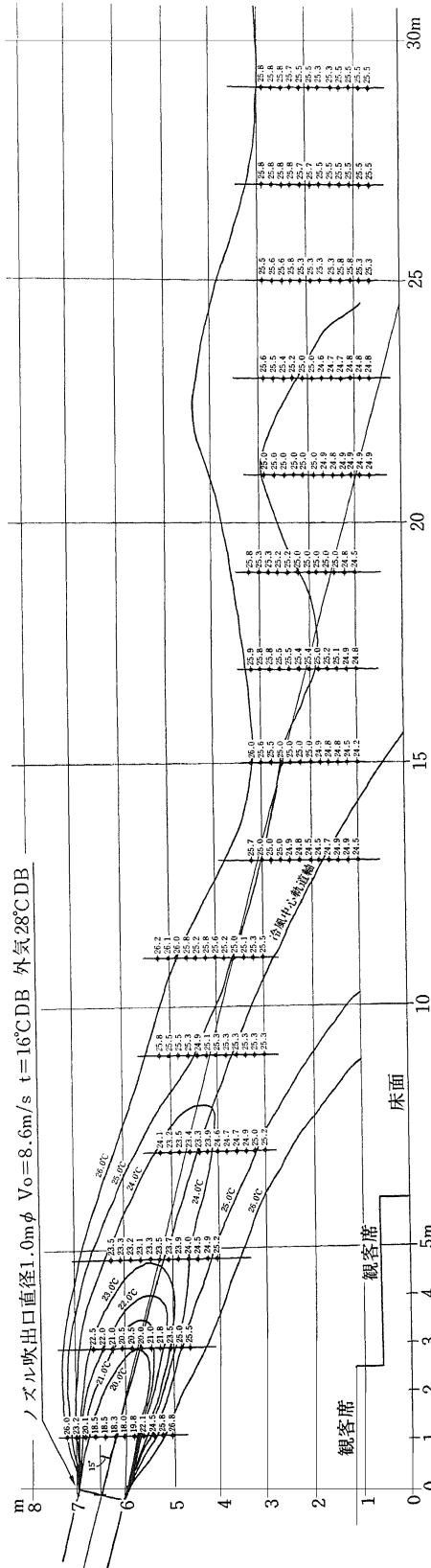


条件：外気  $t_0 = 28^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = 15 \text{ deg}$ ,  $V_0 = 8.6 \text{ m/s}$ ,  $K = 5.5$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $D_0 = 1.0 \text{ m}$

温度プロファイルの式  $\frac{\Delta t_s}{\Delta t_0} = 0.83 k^2 \frac{V_s}{V_0}$ ,  $\Delta t = \Delta t_s e^{-2(0.83 k^2 r/s)^2}$

図12  $\Delta t = 15 \text{ deg}$  のとき 温度プロファイル (計算値) ( $\theta = 15^\circ$ )





実測：昭和45年7月29日 20.00～  
23.50 於お祭り広場)

図11 外気通風空間の冷風中央断面  
面乾球温度 ( $^\circ\text{C}$ )

す気流分布図では理論上の軌道軸と実測値は一応、一致しているといえる。ノズルからの気流は前方へは進むが、ノズル自体の直下にある床面に対しては気流の影響がほとんどないといってよい。外気通風空間の快適範囲の拡大のためには軌道軸を対象床面の中央部よりノズル吹出口側に移し、いったん床面に達した冷風の残風速にあたる気流を利用やることによることが望ましいことなどが判った。

図11はお祭り広場における斜め下方ノズル吹出口を設け冷風供給装置からの乾球温度分布図である。ノズルは直径(内径)  $1.0\text{ m}\phi \times 2.3\text{ mL}$ 、下方に  $0\sim 30^\circ$  まで任意に設定することができると同時に  $7.5^\circ$  刻みによる  $45^\circ$  の範囲の自動首振り装置を設けた。風量はノズル吹出口1個につき、 $25,000\text{ m}^3/\text{h}$ 、冷却熱量は約  $330,000\text{ kcal/h}$  (110 US 冷凍トン) であって、対象床面積に対し、風量は  $34\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、冷却熱量は  $450\text{ kcal}/\text{hm}^2$  の能力を有する。なおお祭り広場の冷風供給装置は対する環境実測値などはここで省略するが、冷風斜め下方吹出しにおける温度の実測値と、理論計算から得た図(図12)を示す。これらの快適環境の効果については、1968年における実験によって得た資料とほぼ同様であり、冷風供給装置としては所期の目的を十分にはたし得たものである。

#### 4. 謝 辞

斜め下方ノズル吹出し口の諸装置を実験の過程から、実施まで長期間にわたって指導された早大・井上宇市教授に対し謝意を表するとともに、これら実験ならびに実測に際して、当時、早稲田大学生の尾島二郎、斎藤堯、信久正晴、または国士館大学建築科研究室員の福島更紀、建築学科学生の松本克彦、平町英幸、斎藤均、滝沢徹、藤原久光、堀田茂行の各君の協力を得たことにをここに附記します。

#### 参 考 文 献

- 1) Alfred Koestel: Paths of Horizontally Projected Heated and Chilled Air Jets, ASHAE, Trans. 1955.
- 2) Alfred Koestel: Computing Temperatures and Velocities in Vertical Jets of Hot or Cold Air, ASHAE, Trans.
- 3) 木内俊明: 外気通風空間の空調実験に関する一考察, 空調学会, 昭和43年秋季学術講演会
- 4) 木内俊明: 外気通風空間の冷風供給と環境実測, 空調学会, 昭和45年秋季学術講演会
- 5) 木内, 五十嵐, 佐野: お祭り広場およびテーマの塔, 建築設備 No. 232, 1970, 6月号