

# コンクリートミキサ内における固体粒子の運動について

柳 場 重 正

On the Motion of Particulate Solids in a Concrete Mixer

by

Shigemasa HASABA

These studies were intended to give the basic information on the mechanism of mixing in a concrete mixer.

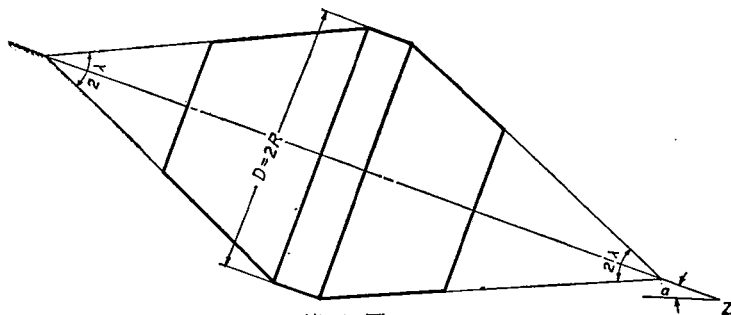
This paper is a note on the theoretical considerations on the motion of particulate solids in the tilting type mixer without mixing blades.

## 1. 緒 論

従来可傾式バッチミキサを対象として、混合羽根をもたず、水平に回転したときのミキサ内の固体粒子の運動、混合に関して研究を進めてきたが、コンクリートミキサは化学工学などにおいて使用されている混合材と異り、多成分系固体粒子の混合と同時に粘性をもったセメントペーストの捏和も行わなければならない、その混合機構は極めて複雑でこれを解明するためにはまず固体粒子のミキサ内における運動を究明する必要がある。混合機内の固体粒子の運動についてはすでに化学工学<sup>1)</sup>、採鉱工学<sup>2)</sup>などにおいてボール型混合機、ボールミル、キルンなどを対象として理論的、実験的に研究されているが、いずれも粒径のほぼ等しい2成分系固体粒子間の混合、あるいは回転速度の極く遅い場合で回転力による遠心力を無視している。土木工学におけるコンクリートミキサについては個々の実際のミキサについて性能試験を主とした混合理論<sup>3)</sup>を展開しているにすぎず、わずかに丸安、佐藤氏<sup>4)</sup>により円筒型ミキサ内の粒子の運動が取り扱われているにすぎない。著者はすでに水平回転円筒<sup>5)</sup>、傾斜回転円筒<sup>6)</sup>、水平に回転するコーン型ミキサ<sup>7)</sup>における固体粒子の分離あるいは運動につき報告したが、ここに報告するものは傾斜せる回転軸の回りに回転するコーン型ミキサ内における固体粒子の運動について理論的に考察したものである。

## 2. ミキサの回転軸に直角な断面における粒子の運動

実際のミキサには掬い羽根、混合羽根などが取り付けられているが、ここでは第1図に示すような羽根のないコーン型可傾式ミキサについて考察する。ミキサは $Z$ を主軸方向とし、つぎのような記号を用いる。



第 1 図

$R$ : ミキサ最大直径部の半径 (cm)

$\alpha$ : 主軸の傾斜角

$m$ : 粒子の質量

$\omega$ : 角加速度

$\mu$ : 粒子と円錐内壁との摩擦係数  $\tan \phi$

$\theta$ : 粒子が鉛直面より回転により持ち上げられる角度

$r$ : 任意の断面における円錐内半径 (cm)

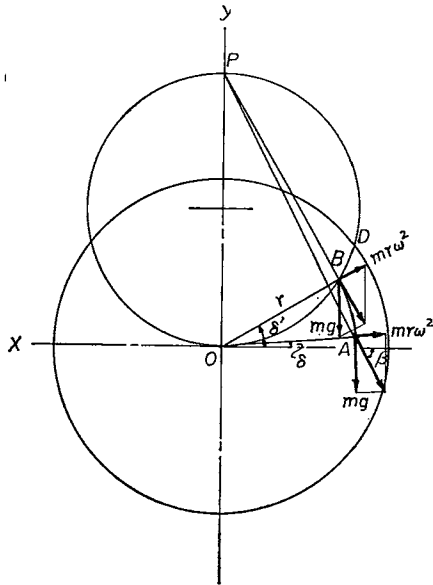
$2\lambda$ : 円錐頂角

$g$ : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

$n$ : ミキサの回転速度 (r.p.m)

$\mu_1$ : 粒子相互の摩擦係数  $\tan \phi_1$

いま回転軸に直角な断面を取ってみればいずれも円形断面で、水平回転円筒における固体粒子の運動が基本となる。水平回転円筒内における固体粒子はその回転速度により 4 つの形態を示すことはすでに明らかにされているが、いま第 2 図に示すようにミキサが水平な場合の軸に直角な断面において



第 2 図

断面内のある点  $A$  における 1 つの粒子について考える。

粒子  $A$  に働く力は粒子の重量  $mg$  と回転によって遠心力  $mr\omega^2$  である。

$mg$  と  $mr\omega^2$  の合力の方向と断面の鉛直軸  $y$  との交点を  $P$ ,  $PA$  と水平軸  $X$  との交る角を  $\beta$ ,  $X$  軸と  $OA$  のなす角を  $\delta$  とすれば  $A$  点における力の関係は

$$\mu_1 \{ mg \sin \beta + mr \omega^2 \cos(\delta + \beta) \} + mr \omega^2 \sin(\delta + \beta) = mg \cos \beta \quad (1)$$

$A$  点は回転につれて上の関係を保ちながら  $r$  なる半径の円弧を画いて、ある高さまで持ち上げられ、ついには自由表面に表われる。

粒子が自由表面に達すると粒子相互の摩擦あるいは粒子と周壁との摩擦は考えられなくなるから、いま  $B$  点を粒子が自由表面に達した位置とすれば (1) 式は

$$mr \omega^2 \sin(\beta' + \delta') = mg \cos \beta' \quad (2)$$

となる。一方  $B$  点における半径方向の力の関係は  $B$  点が自由表面にある条件より

$$mr \omega^2 = mg \sin \delta' \quad (3)$$

となり、(2) 式と (3) 式が同時に成立つためには

$$\sin(\beta' + \delta') = 1 \quad \text{すなわち} \quad \beta' + \delta' = \frac{\pi}{2} \quad \frac{\pi}{2} - \beta' = \delta' \quad (4)$$

従って  $\angle PBO = 90^\circ$  となり、 $B$  点は  $\overline{OP}$  を直径とした円周上にある。しかして  $\overline{OP}$  は

$$\sin \delta' = \frac{\overline{OB}}{\overline{OP}} = \frac{r}{OP} \quad (3) \text{ 式より} \quad \sin \delta' = \frac{r \omega^2}{g}$$

したがって

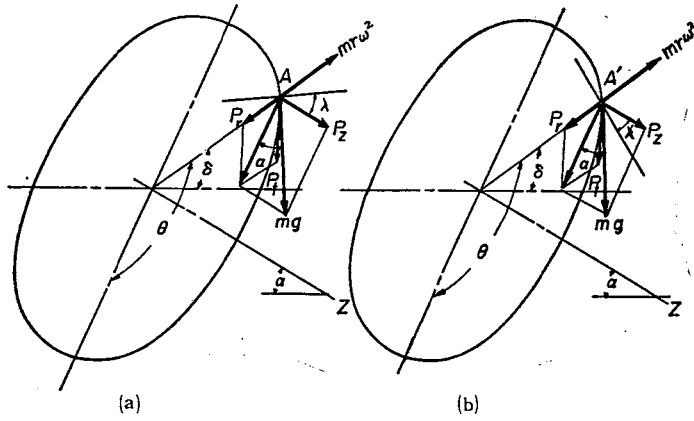
$$\overline{OP} = \frac{g}{\omega^2} \quad (5)$$

となり、そのときのミキサの回転速度により一定した値となり、 $B$  点はいわゆる“Davis circle”<sup>8)</sup> 上にある。つぎにコーン型ミキサの前部円錐および後部円錐における粒子の運動について考察する。

従来傾斜回転円筒、傾斜円錐における粒子の運動については稲積<sup>9)</sup>、植松、土屋<sup>10)</sup> 氏などにより論ぜられているが、いずれも回転速度の極く遅い場合で回転力による遠心力の影響を省略している。しかしコンクリートミキサではその回転速度から遠心力を省略することはできない。

いま前部および後部円錐部において回転軸に直角な任意の断面の円錐面上の任意の点  $A$  および  $A'$  における 1 つの粒子について考える。第 3 図において粒子に働く力は粒子の重さ  $mg$  と遠心力  $mr\omega^2$  で、これらの力を主軸方向の力  $P_z$ 、断面の半径方向の力  $P_r$ 、 $P_r$  に鉛直な方向の力  $P_t$  に分ければ

(a) (b) 図よりいずれも



第 3 図

$$P_z = mg \sin \alpha \quad (6)$$

$$P_r = mr\omega^2 - mg \cos \alpha \sin \delta \quad (7)$$

$$P_t = mg \cos \alpha \cos \delta \quad (8)$$

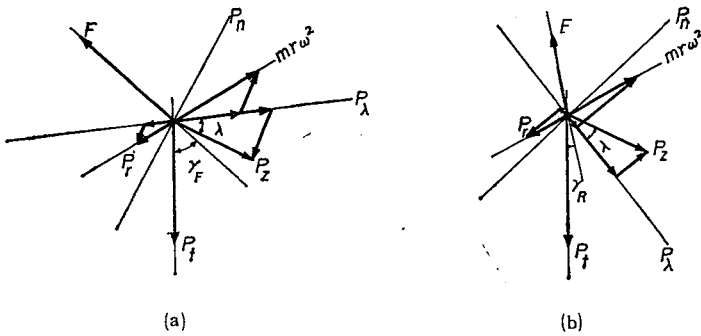
$$\text{ただし } \delta = \theta - \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

となる。これをさらに円錐面の母線の方向の力  $P_\lambda$ ，円錐面に直角な力  $P_N$ ，接線方向の力  $P_t$  に分ければ，第 4 図(a)，(b)より前部円錐に対して

$$P_\lambda = mr\omega^2 \sin \lambda + mg \sin \alpha \cos \lambda - mg \cos \alpha \sin \delta \sin \lambda \quad (10)$$

$$P_N = mr\omega^2 \cos \lambda - mg \sin \alpha \sin \lambda - mg \cos \alpha \sin \delta \cos \lambda \quad (11)$$

$$P_t = mg \cos \alpha \cos \delta \quad (12)$$



第 4 図

後部円錐に対して

$$P_\lambda = mg \sin \alpha \cos \lambda' - mr\omega^2 \sin \lambda' + mg \cos \alpha \sin \delta \sin \lambda' \quad (13)$$

$$P_N = mg \sin \alpha \sin \lambda' + mr\omega^2 \cos \lambda' - mg \cos \alpha \sin \delta \cos \lambda' \quad (14)$$

$$P_t = mg \cos \alpha \cos \delta \quad (15)$$

なる関係が成立つ。いま円錐壁より粒子に作用する力を  $F$  とすれば

$$F \leq \mu P_N \quad (16)$$

となり、 $F$  は  $P_\lambda$  と  $P_t$  の合力の方向に働き、粒子は  $F = \mu P_N$  なる高さまで持ち上げられる。 $F$  と  $P_t$  のなす角を  $r$  とすればつぎの関係が成立つ

$$P_\lambda = \mu P_N \sin r \quad (17)$$

$$P_t = \mu P_N \cos r \quad (18)$$

(17), (18) 式より  $\tan r = \frac{P_\lambda}{P_t}$  となりこれに (10) (12) 式および (13) (15) 式を代入すれば前部円錐に対して

$$\tan r_F = \frac{(\sin \alpha \sin \lambda - \cos \alpha \sin \delta \sin \lambda)}{\cos \alpha \cos \delta} + M \frac{\sin \lambda}{\cos \alpha \cos \delta} \quad (19)$$

後部円錐に対して

$$\tan r_R = \frac{(\sin \alpha \cos \lambda' + \cos \alpha \sin \delta \sin \lambda')}{\cos \alpha \cos \delta} - M \frac{\sin \lambda'}{\cos \alpha \cos \delta} \quad (20)$$

$$\text{ただし} \quad M = \frac{r \omega^2}{g} \quad (21)$$

となる。さらにこれより粒子が粒子相互の摩擦および粒子と周壁の摩擦によって持ち上げられる極限上昇角  $\delta = (\theta - \frac{\pi}{2})$  をもとすれば、(18) (19) (11) (12) 式より 前部円錐について

$$\sin \delta = \frac{-\sin \lambda \sin \alpha - \cos \phi + (\cos \phi + \cos \lambda) M}{\cos \lambda \cos \alpha} \quad (22)$$

または

$$\cos \theta = \frac{\sin \lambda \sin \alpha + \cos \phi - (\cos \phi + \cos \lambda) M}{\cos \lambda \cos \alpha} \quad (23)$$

となり、ミキサの回転速度さえ定めれば極限上昇角が定まる。後部円錐についても同様に (18) (14) (15) (20) 式より

$$\cos \theta = \frac{(\cos \phi - \cos \lambda') M - \sin \lambda' \sin \alpha - \cos \phi}{\cos \lambda' \cos \alpha} \quad (24)$$

となる。(23) (24) は全く同一式で、前、後部円錐においておのおの円錐頂より等しい距離における断面での粒子の極限上昇角は等しい。いま (23) (24) 式において遠心力の影響を無視できるとすれば

$$M = 0 \text{ で} \quad \cos \theta = \frac{\sin \lambda \sin \alpha + \cos \phi}{\cos \lambda \cos \alpha} \quad (25)$$

さらに上式にて  $\lambda = 0$  すなわち円筒とすれば傾斜円筒における  $\theta$  は

$$\cos \theta = \frac{\cos \phi}{\cos \alpha} \quad (26)$$

また水平回転円筒にすれば  $\alpha = 0$  にて

$$\cos \theta = \cos \phi \quad (27)$$

となり、稲積、植松、土屋氏の式となる。一方 (23) 式において粒子が自由表面に達したときを考えれば  $\phi$  の項はなくなり

$$\sin \delta = \frac{\cos \lambda \cdot M - \sin \lambda \sin \alpha}{\cos \lambda \cos \alpha}$$

ここで水平回転円筒につき考えれば  $\lambda = 0$ ,  $\alpha = 0$  にて

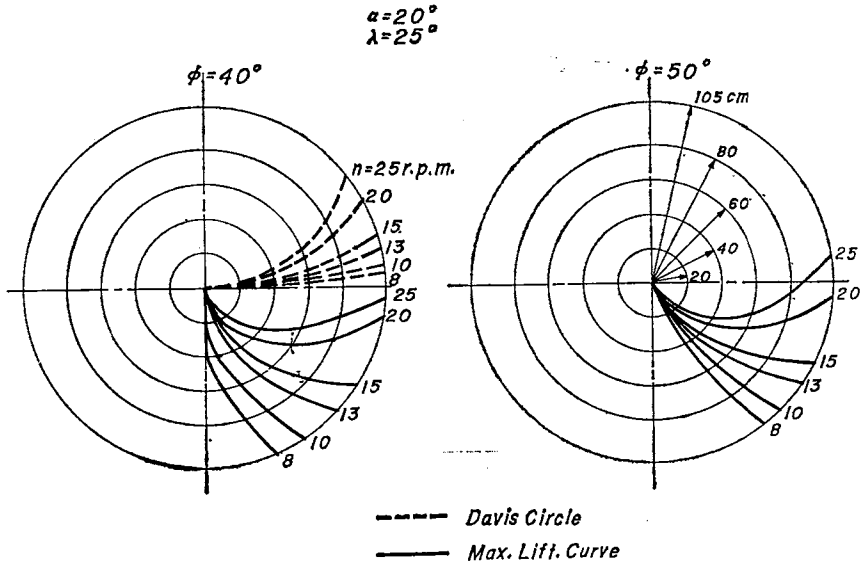
$$\sin \delta = \frac{r \omega^2}{g} \quad (28)$$

と、Davis circle の条件となる。したがって (22) (23) (24) 式はいずれも粒子の極限上昇

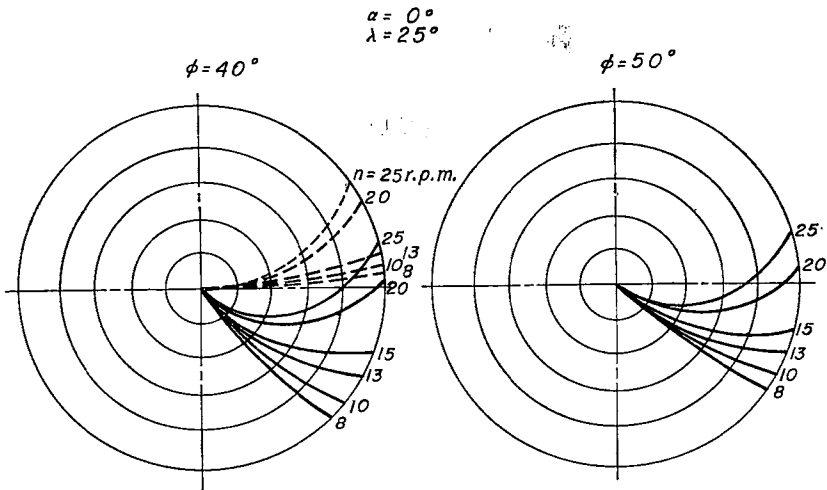
角をもとめる一般式となる。しかして円錐部における傾斜せる回転軸に直角な断面における Davis circle の直径は

$$\overline{OP} = \frac{g \cos \alpha}{\omega^2} \quad (29)$$

となる。いま上式より直径 2.1 m, 56 切,  $2\lambda=50^\circ$  なる実際のミキサについてその円錐部および中央円筒部において傾斜角  $\alpha$  が  $0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ , 摩擦角が  $40^\circ, 50^\circ$ , 回転速度が 8, 10, 13, 15, 20, 25 spm のおのおの場合について粒子の極限上昇角  $\theta$  および Davis circle を計算して, 断面上および縦軸に回転速度, 横軸に上昇角をとって図示すれば第 5 図より第 8 図に示すようになる。



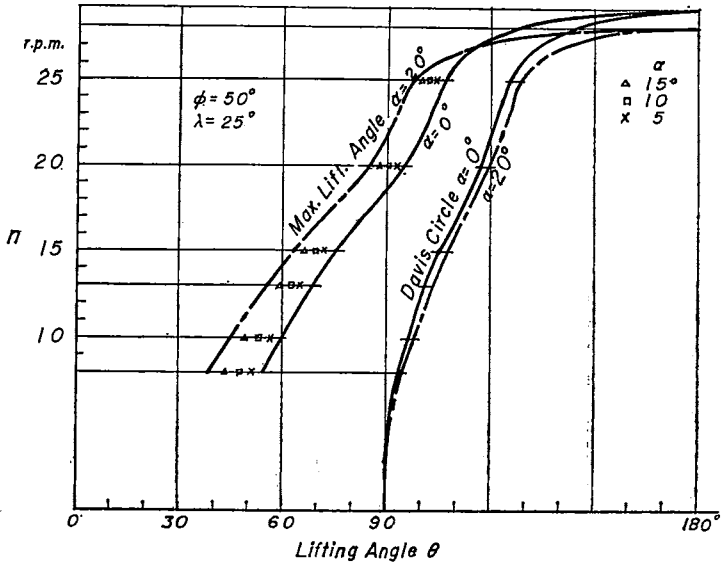
第 5 図



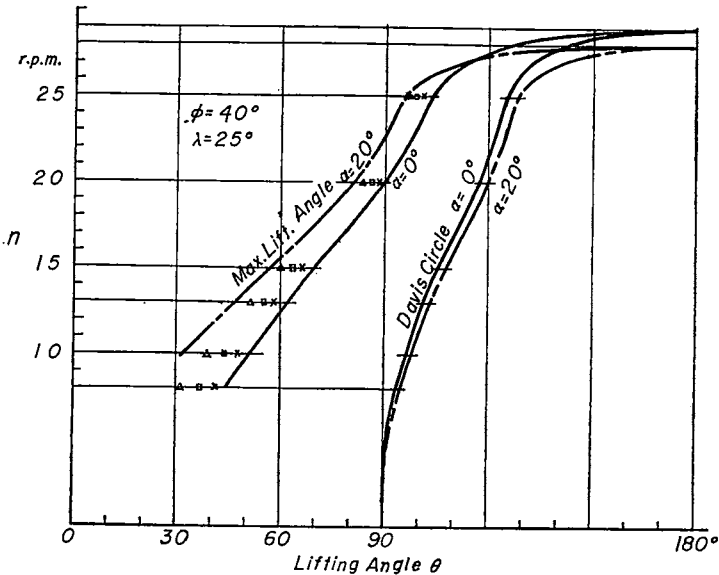
第 6 図

これらよりいずれの場合においても必ず Davis circle は極限上昇線よりも上に位置して, そのときの回転速度, 傾斜角, 摩擦角に応じて極限上昇線と Davis circle の間にはある間隔を生ずることが明らかである。すなわち摩擦角の等しいときは回転速度が上昇すれば極限上昇点も上昇し, Davis circle との間隔はせばまる。これはまた回転速度が等しく摩擦角が大きくなるときにもみられる。一

方回転速度，摩擦角が等しくても傾斜角がますと極限上昇点は下る。



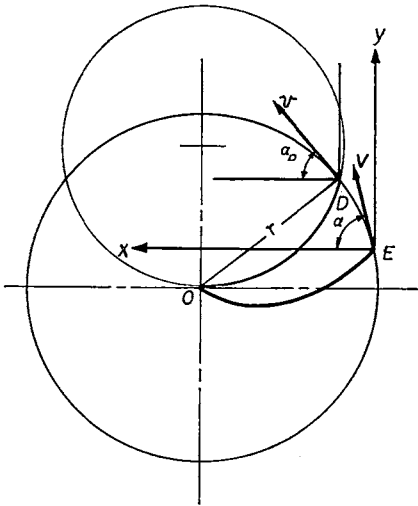
第 7 図



第 8 図

しかしてミキサの回転により粒子が粒子相互あるいは周壁との摩擦によりそのときの極限上昇点まで持ち上げられれば理論的に粒子相互あるいは周壁の間の摩擦はなくなり粒子はそのときのミキサの回転速度により初速  $V = \omega r$  で空間に投射されるはずである。いま空気の抵抗などを考えず粒子が初速  $V$  にて投射されるとき運動方程式をもとめると第 9 図において極限上昇点  $E$  を原点として、水平に  $X$  軸これに直角に  $Y$  軸をとれば

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \alpha & \ddot{x} &= 0 \\ \dot{y} &= V \sin \alpha - gt & \ddot{y} &= g \end{aligned} \right\} \quad (30)$$



第 9 図

となる。 $\alpha$  は速度  $V$  と  $x$  軸のなす角で、いま  $E$  点における投射曲線の曲率半径をもとめれば

$$\rho = \frac{(\dot{x} + \dot{y})^2}{\ddot{y}\dot{x} - \ddot{x}\dot{y}} \approx \frac{V^2}{g \cos \alpha}$$

となる。いまかりに粒子が極限上昇点  $E$  から何らかの方法によって Davis circle まで上昇したとすれば、そのときの  $\rho$  は

$$\rho_D \approx \frac{V^2}{g \cos \alpha_D}$$

一方 Davis circle の条件より

$$\cos \alpha_D = \frac{\omega^2 r}{g}$$

また  $V = \omega r$  なる関係より

$$\rho_D = r$$

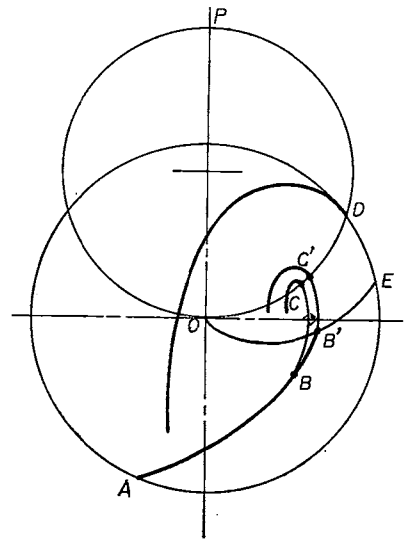
となり Davis circle 上においてははじめ投射の曲率半径と周壁の半径が等しくなる。したがって Davis circle

より下の部分では  $\alpha > \alpha_D$  すなわち  $\rho > r$  となり粒子は極限上昇点に達して上昇運動の原因である摩擦のない状態になっても、周壁あるいはあいとなる粒子にさまたげられ、ミキサ空間に飛び出せず後続する粒子によりしだいに押し上げられ、ついに Davis circle に達してはじめて円筒空間に投射されると考えられる。しかし Davis, Rose 氏はミキサの回転速度が大きくなって粒子が飛ばすよう状態になるときの粒子体の自由表面の形状は第10図に示すように、その下部はミキサ断面の中心を原点として、水平に  $x$  軸、これに直角に  $y$  軸をとり、

Davis circle と  $y$  軸の交わる点  $P$  を極とした  $R = Ce^{\mu_1 \theta}$  なる等角螺線にてあらわし、Davis circle と等角螺線のむすびつけは、円筒の中心  $O$  を中心として等角螺線に接するような円弧  $BC$  を書き Davis circle と  $C$  点で交わらして、 $ABCD$  をもって自由表面の形状としている。したがって  $B$  点の位置については明確でない。

この点著者は以上の運動の理論的考察より等角螺線の終点をそのときの極限上昇線  $OBE$  との交点を  $B'$  として、 $B'$  より  $O$  点を中心として  $OB'$  を半径とする円弧を書き Davis circle と  $C'$  点において交わらしめ  $AB'C'D$  を自由表面とした。したがって  $B'C'DE$  なる層における粒子の運動は  $AB'E A$  なる層における粒子が自重、遠心力、摩擦力などにより円筒に固着に近い状態で円運動を行って Davis circle に達するものと考えられる。

以上は軸に直角な断面について考察したが、ミキサが傾斜軸の回りに回転し、しかもコーン型ミキサのように前、後部に円錐面をもっている以上粒子はミキサの周壁より (19) (20) 式に示すような  $r_F, r_R$  なる方向に力をうける。しかし  $r_F$  は回転軸の傾斜が大きくなるにつれて中央への傾きが大きくなり、 $r_R$  は逆に中央への傾斜が小さくなりついにはミキサ底部に向う。いま  $\lambda = 25^\circ, r = 105 \text{ cm}, \phi = 25^\circ, n = 25 \text{ rpm}$  なるとき、傾斜角  $\alpha = 0, 10, 20^\circ$  の場合につき  $r_F, r_R$  を計算してみれば



第 10 図

	$\tau_F$	$\tau_R$	
$\alpha = 0^\circ$	$7^\circ 18'$	$-7^\circ 18'$	
$10^\circ$	$18^\circ 16'$	$0^\circ$	註 $\tau_F$ 中央方向+
$20^\circ$	$28^\circ 23'$	$7^\circ 10'$	$\tau_R$ 中央方向-

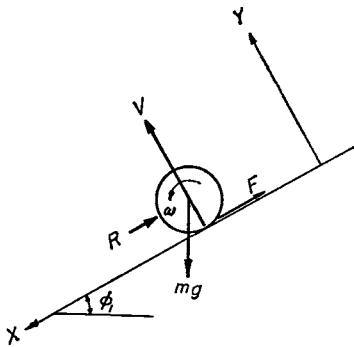
すなわち回転軸が水平の場合は前、後部円錐の粒子は同じように中央に向い移動するが、傾斜角  $10^\circ$  になると前部円錐より中央へ移動するが、後部円錐では移動は行われず傾斜が  $20^\circ$  になれば前、後円錐部とも同じ方向すなわちミキサ底部に向って粒子は移動しようとする。

### 3. ミキサ内の流動部および飛ばし部における固体粒子相互の運動

以上ミキサ内における個々の粒子の運動、粒子体のなす形状、傾斜により粒子に働く力につき論じたが、ミキサ内に投入された材料が混合するには粒子相互の運動に粒子の粒径その他の違いにより運動差が生ずることが必要で、運動差の原因としては運動中の粒子の速度差が考えられる。

しかしてミキサ内において運動差を生ずる部分として粒子が相互の摩擦および周壁との摩擦により回転につれて上昇運動をする部分とこれらより開放されて重力下に自由に運動する自由運動部分すなわち粒子体の自由表面を流下する流動部分とミキサの空間の飛ばし部分が考えられる。

まず流動部分における粒子の運動について考察すれば第11図において水平となす角が  $\phi_1$  なる粗い面を考え、この上をすべりながら転落する粒子を球形とする。鉛直面内で斜面に沿って下の方へ  $x$  軸、それと直角の方向に  $y$  軸をとり



第11図

$$m: \text{球の質量} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad r: \text{球の半径}$$

$$d: \text{球の直径} = 2r \quad \rho: \text{球の密度} \quad \rho_0: \text{空気密度}$$

$$V: \text{抗力の斜面に垂直な成分} \quad F: \text{球の接点に働く摩擦力}$$

$$R: \text{空気の抵抗} = \frac{1}{2} \rho_0 u^2 C_R A \quad u: \text{粒子の速度}$$

$$C_R: \text{抵抗係数} \quad A: \text{球の投影面積} = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$I: \text{球の慣性モーメント} = \frac{2}{5} r^2 m \quad \omega: \text{球のころがり角速度} \quad t: \text{時間} \quad C: \text{球の粘着力}$$

$\mu'$ : 動摩擦係数とすれば

球が粗い面をすべりながら転落する運動の方程式は

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = mg \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) \sin \phi_1 - F - R - C \quad (31)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = F r \quad (32)$$

$$V = mg \left( \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \right) \cos \phi_1 \quad (33)$$

これらより粒子が転落するときの転落速度をもとめれば

$$U_m = \left( \frac{dx}{dt} \right)_m = K d^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

ただし  $U_m$  は定常運動における転落速度

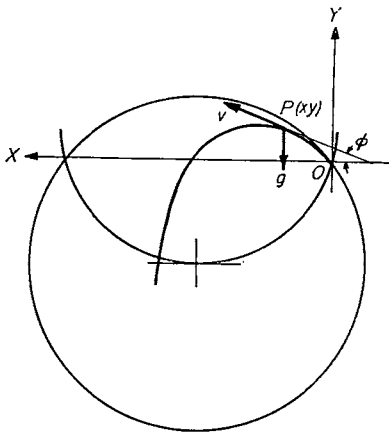
$$K = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{g}{C_R} \sin \phi_1} \quad (\text{すべりのない場合})$$



$$K = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{g}{C_R} (\sin\phi_1 - \mu' \cos\phi_1)} \quad (\text{すべりがある場合})$$

となる。

つぎに飛しょう部分における粒子の運動について考察すれば さきに のべたように極限上昇点より Davir cricle に達した粒子は水平と  $\alpha_0$  なる角をなす初速  $V = \omega r$  にて円筒空間に投射される。いま第



第 12 図

12図において粒子の飛びだす点  $O$  を原点として水平に  $x$  軸、これと直角に  $y$  軸をとり時刻  $t$  における点  $P$  の粒子の座標を  $x, y$ 、そのときの粒子の速度を  $v$ 、速度  $u$  が  $x$  軸となす角を  $\phi$  とすれば粒子運動方程式は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -R \cos\phi \quad (35)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = mg \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) - R \sin\phi \quad (36)$$

となり  $P$  点において  $\frac{dx}{dt} = v \cos\phi$   $\frac{dy}{dt} = v \sin\phi$

であるから

これらより粒子が自由表面近くまで落下すれば  $\phi \rightarrow \frac{\pi}{2}$

となり

$$v = K_1 d^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

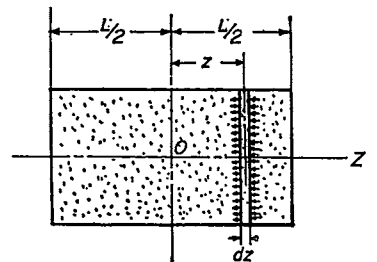
ただし

$$K_1 = -\sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho g}{\rho_0 C_R}}$$

となる。粒子が自由表面を流下するときもミキサ空間を飛しょうするときも粒子はその運動中に粒径により速度差を生ずる。したがって多成分系固体粒子の運動中におのおの粒子に速度差を生ずることは、多成分系固体粒子の混合および分離を意味し、これらの粒子の運動がミキサの混合度<sup>11)</sup>に影響する函数と考えられる。

#### 4. ミキサの回転軸方向における粒子の運動

以上固体粒子の自由運動部分についてのべたが、粒子は粒子相互あるいは周壁との摩擦により上昇運動を行う部分においては、さきにのべた (19) (20) 式に示すような方向に力を受けている。もちろんミキサの回転が所定の回転速度に達すれば粒子は互に釣合を保ち、おのおの軸に直角な断面において等角螺旋線の自由面を形成し、上昇をおわった粒子はそのときの回転速度により自由表面を流下、あるいはミキサ空間に投射されて連続的に運動を繰返す。しかしコンクリートミキサにおけるように粒子群が大小粒径の多成分系よりなるときは粗粒はそのときの回転速度に応じて釣合を保ち一定の形を形成するが細粒は粗粒より自由度が大きく粗粒の運動につれて粗粒の間隙をぬって次第に力の働く方向に移動する。いま第13図において細、粗粒相互の運動を考察する。軸方向  $z$  において  $dz$  厚さの層を考え粒子が  $Z$  方向に移動するとすれば、 $dz$  の距離に対しての細粒の出入について単位断面積に対して入り込む量を  $w$  とし、出て行く量を  $w - \frac{\partial w}{\partial z} dz$  とすれば、この微小部分の量的変化は  $-\frac{\partial w}{\partial z} dz$  であり、この位置における単位体積中の細粒量を  $\bar{w}$  とすれば、時間  $dt$  については次の関係が成立する。



第13図

$$\frac{\partial(\bar{w}dz)}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial z} dz \qquad \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (38)$$

しかるに  $w$  はこの断面における細粒の移動量で、移動させる力、細粗粒の粒径比およびその断面における細粒量  $\bar{w}$  によってことなる。しかして粒子の移動力は重力および遠心力による軸方向の分力で回転軸の傾斜角、回転速度により定り、移動量もこれらの函数となる。しかして与えられたミキサで傾斜角が定り、回転速度が定れば移動量は断面の軸に沿う  $\bar{w}$  の変化によって変ると考えれば

$$w = k \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \quad (39)$$

となり (38) (39) 式より

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \quad (40)$$

となり軸方向における粒子の移動は拡散的に取扱うことができ、細粒は粗粒の運動につれて軸方向に移動し混合よりさらに部分的分離を生ぜさせることとなる。

## 5. 結 言

以上コンクリートミキサ (特にコーン型可傾式ミキサ) 内における固体粒子の運動について論じたが、これらの結果よりミキサ内の固体粒子の混合には粒子の

1. 飛 しょう 運 動
2. 流 動 運 動
3. 拡 散 運 動

の 3 つの運動が影響すると考えられる。しかしてこれらの運動はミキサの形状、寸法、回転速度、傾斜角、使用材料の物理的性質などによりいろいろの大きさで組合さって影響するため、混合機構は非常に複雑になり、従ってミキサにおける材料の混り具合を表わす混合度<sup>11)</sup> 自体を混合に関係する基本的微分方程式より直接に誘導することは困難である。しかし混合度をこれらの運動を基本とした函数として表わすことは可能で、この点については今後現在行っている実験と共に解明したいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 大山義年：水平回転円筒内の粒体の運動 理化学研究所彙報 第 12 輯 12 号 昭 8  
第 14 輯 7, 8 号 昭 10  
第 15 輯 6 号 昭 11  
第 18 輯 8 号 昭 14  
第 19 輯 8 号 昭 15
- 矢野武夫, 蟹瀬 巖：化学工学 20 巻 p. 156 (1956) 21 巻 p. 420 (1957) 22 巻 p. 758 (1958)  
23 巻 p. 589 (1959) etc.
- P.M.C. Lacy: Development in the theory of particle mixing J. appl. chem. 4. May. 1954
- 2) Taggart: Hand book of Mineral Dressing 5-03-5-10
- 3) 西脇龍太郎：コンクリートの練り混ぜ理論 土木技術 12 巻 2 号 12 巻 6 号
- 4) 丸安隆和, 佐藤千晴：コンクリート混合機の混合機構と改良型混合機の設計について 土木学会誌 30 巻 4, 5 号 昭 19. 5
- 5) 村山朗郎, 加場重正：混合機構の研究 土木学会誌 36 巻 10 号 昭 26. 10
- 6) 加場重正：混合機構の研究 昭 28 年文部省科学研究費報告集録 No. 4 p. 172
- 7) 加場重正：コンクリートミキサ内の固体粒子の運動について 土木学会論文集 68 号 昭 35.5

- 8) H.E. Rose and Sullivan:  
A Treatise on the Internal Mechanism of Ball, Tube, and Rod Mills p.35 London
- 9) 稲積彦二：傾斜回転円筒に関する研究 化学機械協会誌 13巻 1号 昭24
- 10) 植松時雄, 土屋健治：傾斜回転円筒内の粒体の運動 機械学会論文集 17巻 56号 昭26  
回転円すい内における粒体の運動 機械学会論文集 15巻 50号 昭24
- 11) 柳場重正：コンクリートミキサにおける混合度について 土木学会論文集 73号 昭36.3  
(昭和39年9月15日受付)