HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	二点写真法による煙の観測
Author(s)	石崎, 健二
Citation	北海道大學工學部研究報告, 88, 139-146
Issue Date	1978-08-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41478
Type	departmental bulletin paper
File Information	88_139-146.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第88号（昭和53年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 88 (1978)

二点写真法による煙の観測

石　崎　健　二*

（昭和52年12月28日受理）

Two-Camera Measurement of Smoke Plumes and Puffs

Kenji ISHIZAKI

(Received December 28, 1977)

Abstract

A simple relation between smoke plume properties and wind fluctuations is often assumed for determining diffusion characteristics of the atmosphere. As photographic techniques for recording instantaneous plume and puff shapes, a two-camera system is proposed. This technique requires two cameras operated simultaneously and arranged on the ground stereoscopically off to one side of the plume.

Although the partial uncertainty in the lateral plume dimension introduces an error to estimate lateral plume displacement from the mean, it is suggested from the measurements that, for a sampling time of 3 minutes, the vertical dimension of the averaged plume is greater than the lateral one. The error analysis presented in this paper shows that the success of the two-camera technique will depend on the synchronization of the two cameras.

1. 緒　　論

孤立した発生源から放出される汚染物質の大気拡散は，しばしば発生源の位置における風向の変動幅との関係で論じられる。

例えば，Davidson と Halitsky[1] は高さ 90 m の煙突から出る煙を写真観測し，煙塊（puff，以下ではパフと呼ぶ）の鉛直速度は浮遊中はほぼ一定の傾向にあることを認めた。そして，その速度はパフが煙突を出た時の煙突出口における鉛直風速と等しいと仮定し，さらにパフの水平方向（以下では常に風下方向と直角な方向をさす）の運動にも同様の仮定をして，与えられた地点における煙の濃度の時間変化を説明しようとした。パフの鉛直速度の一定性については著者[2]によっても 90 m の高さの煙突について一点写真法で確かめられているが，パフが煙突から離れるにしたがって鉛直速度一定の傾向がくずれていくことも指摘されており，同時にパフの位置の全体としての散らばりは，鉛直速度一定から期待されるよりも小さくなっていくことが示された。この最後のことについては，パフの速度が風速変動のエネルギー・スペクトルに応じて単純な仮定のもとで変化していくと考えることによって，またパフの速度のラグランジュ相関を適当な形に仮定することによって，説明可能であることが著者[3,4]によって示されてはいるが，より具体的な議論のためには，より正確なパフの運動の把握が望まれる。

一方，パフの水平方向の運動については，Hay と Pasquill[5] の実験（地上 2 m に発生源を置き，風下 100 m で濃度を観測）によれば，間接的にではあるが，水平速度一定から期待される

* 工業力学第二講座

よりはパフの散らばりが小さいという結果が得られている。菅原，下形と横山[6]は，Davidson らと同じく水平速度一定を仮定して，発生源における風向変動から時間平均濃度を計算する方法を提案しているが，仮定についての検討はなされていない。パフの水平方向の運動を直接調べるには，1,000 m 以上の上空から一定時間の間煙の写真を撮り続けるか，パフの位置を三次元的に測定しなければならないが，手軽な測定方法は見当らない。

以上のようなことから，地上に二台のカメラを置いて煙の写真を撮り，パフの三次元的位置を測定しようという二点写真法が試みられた。この報告では測定例が紹介され，その有効性が検討される。

2. 二点写真法

既知の長さをもった基線 L の両端に観測点 P 1, P 2 を置く。P 1 を原点とし，L が X 軸と一致するように座標系をきめる (図 1)。パフの位置 $M(x, y, z)$ は角 α, β, γ を測定することによって知ることができる。P 1, P 2 にカメラを置き，そこで撮影された写真から α, β, γ を求めようというのが二点写真法である。写真から角度を求める方法は一点写真法と変わらない。簡単な説明が付録でなされている。

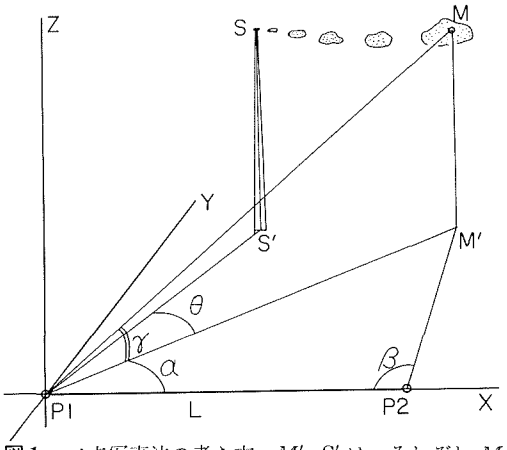

図 1 二点写真法の考え方。M', S' は，それぞれ M, S の XY 座標を表わす

なお，二台のカメラが共に煙を横から撮影するこの二点写真法では，煙のむこう側の面は測定し得ないという制約がある。そのため，パフの位置の Y 成分は他の二成分とくらべてその測定精度はいく分悪くなる。それでも，煙流の XY 平面への投影図を仮定して P 1 からの撮影だけでパフの位置を決定する一点法より質的に優れていることは言うまでもない。

3. 測定結果と考察

3.1 測定例

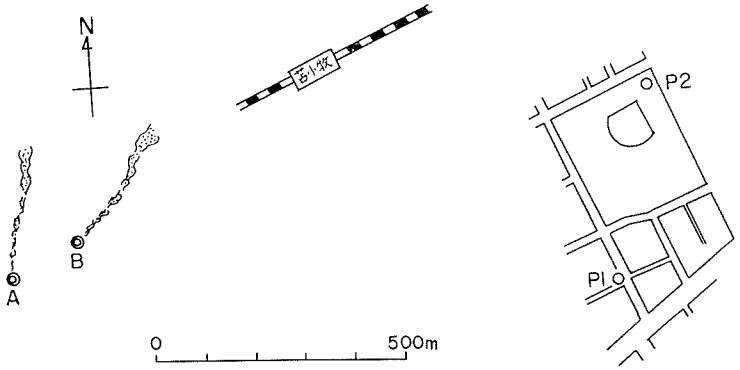

図 2 観測点 P 1, P 2 と煙の位置関係，A は大煙突，B は小煙突

1977年6月8日，13時10分から約30分間，苫小牧市にある王子製紙苫小牧工場の煙突の煙を撮影した。天気は晴であった。煙突，煙流，観測点の位置関係は図2に示されている。煙突の高さは大煙突が 200 m，小煙突が 100 m，観測の対象は小煙突の煙である。煙の流れの向きは200～250 m の高さを流れる煙が北北東，100～150 m を流れる煙が北東，と互いに約30度異なっていたが，流れる速さはいずれもほぼ同じで 8 m/秒 前後であった。

使用されたカメラはニコン F2 とアサヒペンタックス S2，レンズの焦点距離はそれぞれ 50 mm，55 mm で，オレンジ・フィルターが併用された。フイルムはネオパン F 36枚撮りである。同時にスタートさせたストップウォッチがそれぞれの観測点で用意され，二台のカメラで同時にシャッターが切られるよう努力された。写真は5秒毎に撮られ，3分間を1シリーズとして6シリーズ得られた。

同時に撮影された二枚の写真（キャビネ版）が見比べられながら同一パフの同じ部分とみられる箇所に印がつけられ読み取り点とされた。一駒の写真上の読み取り点の数は40～50で，通し番号を打たれて区別された。また，二枚の組になった写真で互いに対応する点は同じ番号にされた。読み取り点の印画紙上の位置は，煙突出口を原点，水平線を X 軸とする XY 座標上で 0.1 mm まで読まれた。現地での対応する位置は，煙突出口を原点，風下方向の水平線を X 軸，高さを Z 軸とする XYZ 座標で示されるように，電子計算機で計算された。

なお，以下では写真からの処理のしやすい第一シリーズの3分間の測定結果をもとにして考察をすすめる。

3.2 一点写真法との比較

まずパフの測定について。

XY 平面に射影された煙軸と P 1 に置かれたカメラのフイルム面が平行に近いときには，XZ 平面に射影されたパフの輪郭と写真上の輪郭はほぼ相似形をなしていると考えることができる。

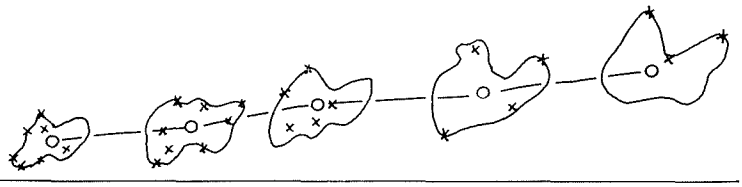

図3 印画紙上で追跡されたパフの一例。×は読み取り点，○は目分量できめられたパフの位置。パフの輪郭は印画紙上で描いたもの。パフの移動は10秒毎のスケッチである（P 1 で撮影されたもの）

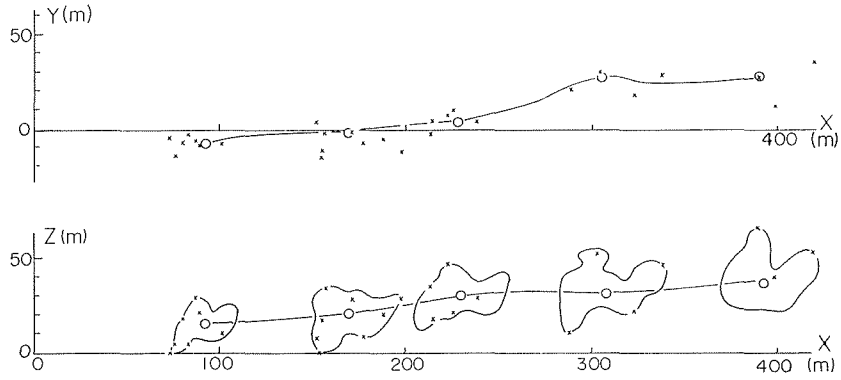

図4 図3に示された読み取り点の位置を計算してパフの位置（○印）を定めた。パフの輪郭は図3を参考にして描かれた

今回のようにそうなっていない場合でも写真上の輪郭を考慮しながらXZ平面射影図を描き，その中心を目分量できめパフの位置 (x, z) とした。(図3，図4)。一点写真法[7]ではXZ平面射影図は作らないので，今述べたような問題は起こらない。一方向からしか煙を見ないことによる煙の形の把握の不確かさと，それにともなう煙の位置の不確かさ，という点は両者に共通である。

また，パフの位置のY座標は読み取り点の位置のXY平面射影図によって求めた（図4)。すでに述べたように，二点写真法では煙の陰の部分は測定されないが，見えない部分の形は推定しようがないので，測定された点群とパフの輪郭の対応関係をみながらパフの代表点を定め，パフの位置のY座標とした。

次に，測定されたパフの位置が一点写真法による場合とどうちがうか検討する。

一点写真法ではパフは常にX軸上にあるという仮定のもとで写真上の読み取り値が処理される。したがって図4のようにパフがX軸からはなれると，測定誤差が生じる。図5に示されている x の時間変化をみると，$x=180$ m 付近で生じているパフの移動速度の一時的減少は，一点写真法では判然としない。また，同じ図に示されている z の時間変化をみても，二点写真法ではパフの移動中の運動の変化を一点法にくらべてかなり正確に推定できることがわかる。

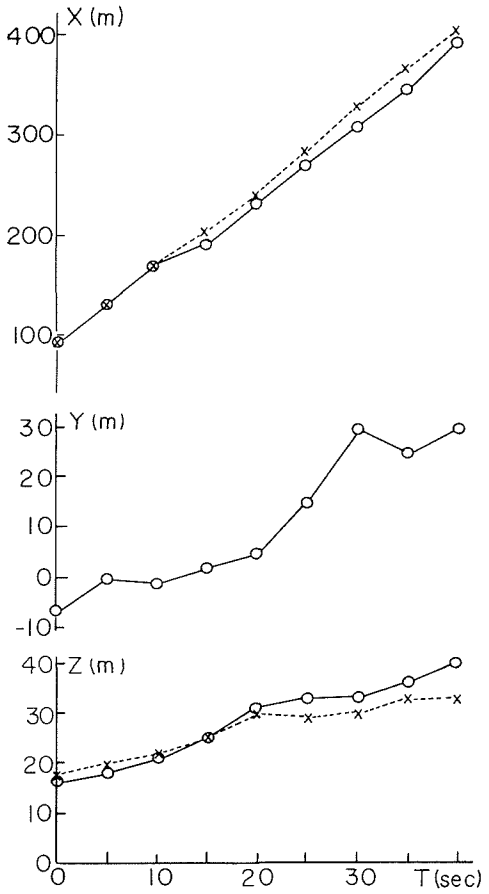

図5 図3に示されたパフの位置の時間変化。○が二点写真法，×が一点写真法によるもの。Y については一点写真法では常に $Y=0$ と仮定されているが図には記入されていない

3.3 平均的な煙流の様子

任意にえらばれた1,000箇余りの読み取り点の大部分の位置をXY平面及びXZ平面へ射影したのが図6である。X軸は平均的な風下方向として目分量で設定されたものである。観測された3分間について平均的にみれば，煙軸が蛇行している様子はない。おそらく浮力によると思われる煙の平均上昇速度は x によらず一定のようである。

点の散らばりの傾向をY方向とZ方向で比べてみると，Y方向のほうが散らばりの幅がやや小さく，点の密度はやや大きい。Yの正側の点の散らばりの限界は，限界近くを通りすぎていくパフの陰の部分が観測されないことによって，その分だけ実際の煙の限界より小さく測定される。しかし，パフの形はさまざまなので，このことによる誤差は観測されるパフの数が多くなるとともに小さくなっていく。一方ではY方向の点の密度が大きいということも考え合わせれば，3分間で平均された煙の形はZ方向にくらべてY方向の幅が狭くなっていると推定される。

3.4 パフの流跡線

図7はパフの流跡線で，XY平面及びXZ平面へ射影されたものである。線で結ばれている一区間は5秒間での変位である。パフは25～40秒間追跡可能であり，平均風速は8 m/秒 前後であ

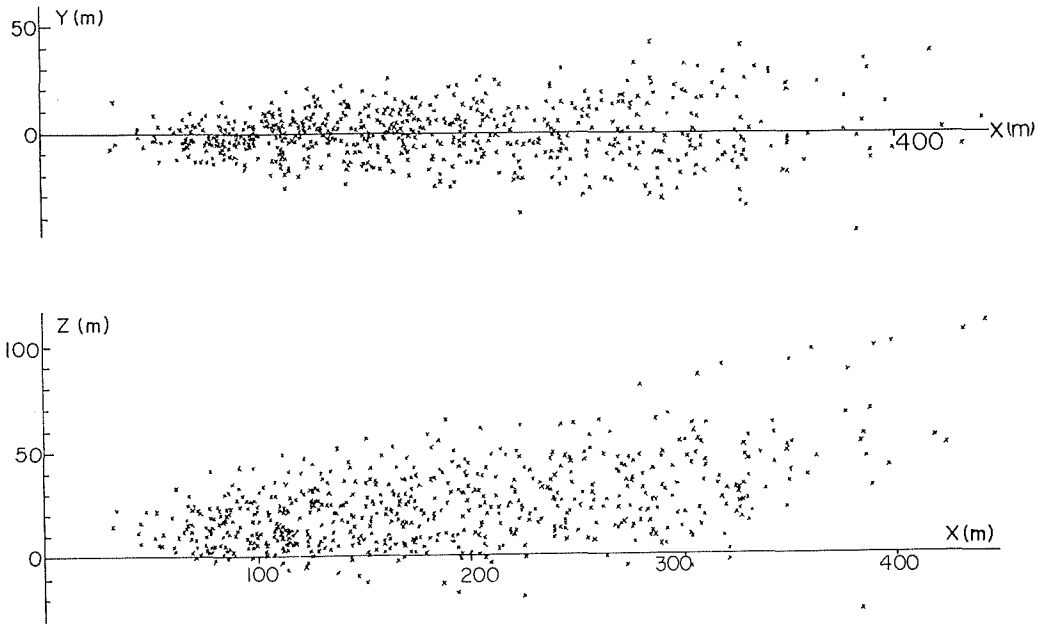

図6 計算された読み取り点の位置。観測された約3分間の間では，煙は×でうめられた空間のどこかに位置しており，×の散らばりは3分間で平均された煙の空間的拡がりの目安となる

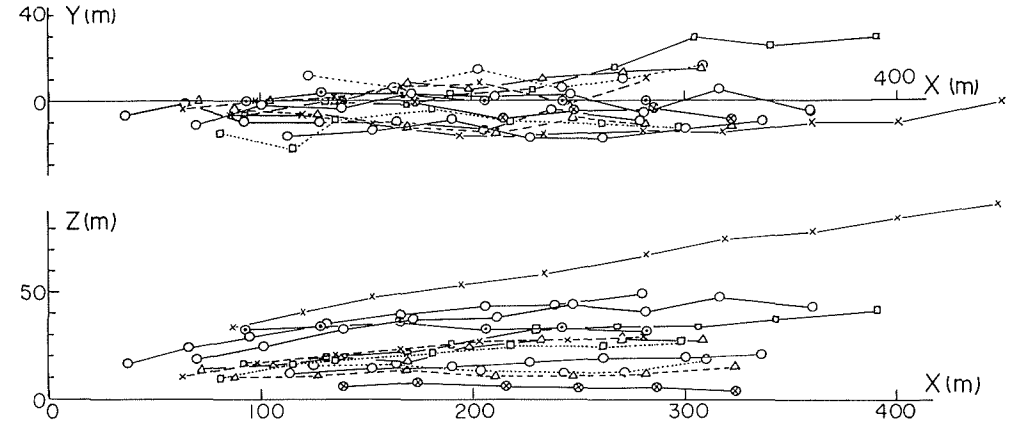

図7 パフの流跡線。3分間の間に識別された19箇のパフのうち12箇分を示した。他の7箇は，ほぼこれらの流跡線の散らばりの中にはいる

ることがわかる。

図7を見てまずわかることは，流跡線の Y 成分が Z 成分にくらべて滑かさに欠けていることである。この原因としては，XY 平面上に射影されたパフの輪郭を知ることができないことによってパフの位置の Y 成分が他の二成分にくらべて測定精度が悪いということのほかに，二点 P 1，P 2 で必ずしも撮影時刻が一致していないことによる誤差も考えられる。例えば，X 軸上の $x=200$ m の地点 A（図8）に高さ $z=120$ m のパフがやってきた時に P 2 から撮影されたとする。P 1 からも同時に撮影されるべきところを，X 軸上を微小距離 ΔX だけパフが移動してから撮影されたとすれば，パフの位置は a と計算される。そして測定誤差 Δx，Δy はいずれも ΔX の約1.8倍，Δz は ΔX の約0.25倍で，Δy は Δz の約7倍となる。パフの流跡線の Y 成分のじぐざぐは大部分は 10 m 以下だから，これが撮影時刻の差によるとすれば，それにともな

う Δz は大きくても 1 m 余りで流跡線の Z 成分の形を目立つ程変える大きさではない。この程度の Δz は約 0.7 秒の撮影時刻の差に相当するので，今回の撮影方法では避けられない大きさの誤差である。

次にわかることは，流跡線の散らばりの幅は Y 成分が Z 成分より小さいということである。パフの位置の Y 成分の測定精度が悪いことにより流跡線の Y 成分の散らばりが実際より大きく測定されてしまうことを考えれば，ここでも前節と同様に，3 分間で平均された煙の形は Z 方向にくらべて Y 方向の幅が狭くなっている，と推定される。

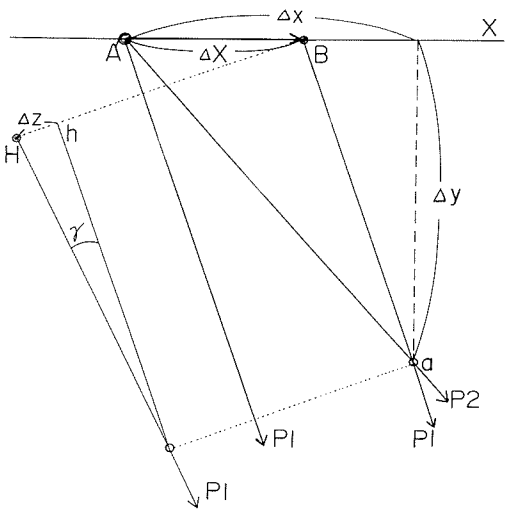

図 8 二点での撮影時刻の不一致による測定誤差の見積り。γ は点 B に到着したパフについての P 1 からの仰角である。H は真の高さ，h は誤って計算される高さ

4. 結　　論

(1) 二点写真法によるパフの位置の測定は，今回の場合煙突から 100～400 m の間（煙の浮遊時間としては 12～50 秒間）可能であった。一点写真法ではパフの輪郭が描けさえすればよいので，さらに 100 m ぐらいの追跡が可能である。

(2) 今回試みられた地上での二点写真法には，煙の陰の部分（むこう側の側面）が見えないという制約があるにもかかわらず，3 分間で平均された煙の水平方向の拡がり幅が鉛直方向のそれより小さいと推定することが可能であった。

(3) 二点での撮影時刻を正確に合わせれば，特にパフの水平方向の測定精度が著しく向上し，パフの三次元的な運動がかなり詳しく検討できる可能性がある。今後はこの方向で進めていきたい。

謝　　辞

資料の準備，整理に際して援助を惜しまれなかった工業力学第二講座藤　亮宏氏に感謝致します。また，計算は北大大型計算機センターでおこなった。

引 用 文 献

1) Davidson, B. and J. Halitsky: J. Air Poll. Cont. Asoc., 7 (1958), p. 316-319.
2) 石崎健二: 天気, 24 (1977), 4, p. 21-26.
3) 石崎健二: 日本気象学会北海道支部だより, 21 (昭 51), p. 43-45.
4) 石崎健二: 日本気象学会 1975 年度秋季大会講演予稿集, 28 (昭 50), p. 96.
5) Hay, J. S. and F. Pasquill: Adv. Geophys., 6 (1959), p. 345-365.
6) 菅原　清, 下形茂雄, 横山長之: 公害, 9 (1974), 1-2, p. 71-76.
7) Halitsky, J.: Int. J. Air and Water Poll., 4 (1961), p. 185-198.

付　　録

フィルム上の画像から測定対象物の角度を求める方法

測定対象物 M の位置はカメラの位置を原点 L とする XYZ 座標系で考える。

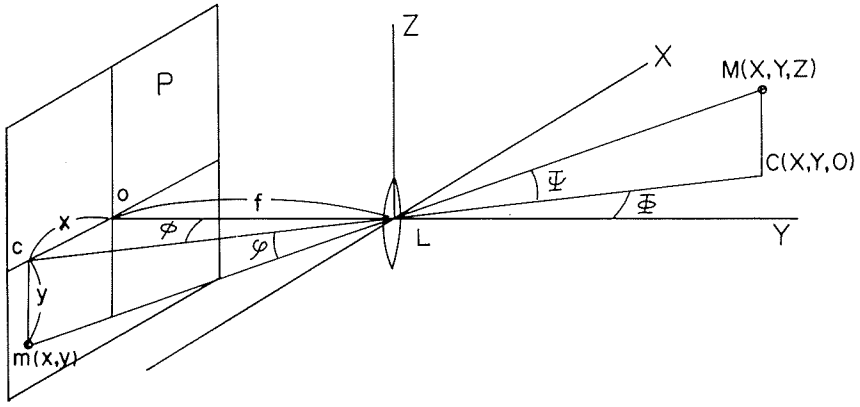

図9 実際の位置 M とフィルム上の位置 m の関係。L はレンズ，P はフィルム面である

1. 撮影レンズの光軸 LO が Y 軸と一致している場合（図9）

Y 軸を基準にした水平角 Φ，XY 平面を基準にした仰角 Ψ は，カメラ系では ϕ，φ となり，次式で計算される。

$$\phi=\tan^{-1}(x/f) \tag{1}$$

$$\varphi=\tan^{-1}(y/\sqrt{x^2+f^2}) \tag{2}$$

ここで，f は撮影レンズの焦点距離，x，y はフイルム上で M の位置として読み取られた値である。フイルム上の座標は常に光軸との交点を原点0とし，X 軸に平行に x 軸，それと直角に y 軸をとるものとする。

2. 光軸は Y 軸と一致していないが，XY 平面上にある場合

ϕ が光軸の延長線を基準にして計算される点が変わるだけなので，光軸と Y 軸との角度を知っておけば問題ない。

3. 光軸が XY 平面からはなれている場合（図10）

カメラの光軸は YZ 平面上にあるが，Y 軸から角度 θ だけ傾いているとする。フイルム面 P は実際には L について対象の位置にあるが，考えやすくするために図10のようにした。正しい位置にあるフイルムの画像を逆方向に投影したと考えてもよい。ただし，f は引伸し（投影）レンズと印画紙（投影面）との距離，光軸は引伸しレンズのそれ，m は印画紙上の位置と読みかえる。

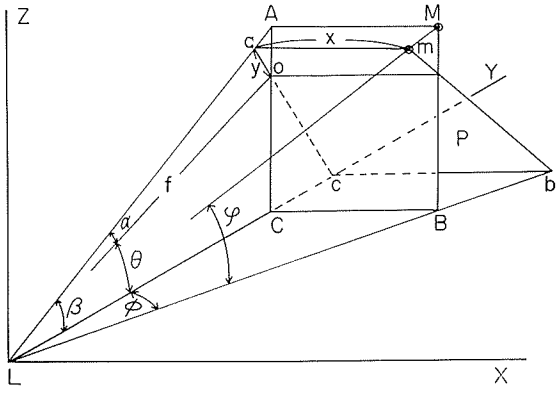

図10 光軸が仰角 θ をもつ場合の考え方

さて，L から M を見通す線上にある全ての点はフイルム上の m に像を結ぶ。したがって，ϕ と φ に対するフイルム上の m の位置 (x, y) との関係は，フイルム面と簡単な関係にある点 M について調べればよい。ここでは，M としてフイルム面と光軸との交点を通り XZ 平面に平行な平面上にある点を考える。矩形 $AMBC$ はフイルム上では台形 $ambc$ となることにもとづき，ϕ, φ を x, y と二つのパラメータ f, θ で表わそうというわけである。

結果は次の通りである。

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{BC}{LC}\right)=\tan^{-1}\left(\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\frac{x}{f}\right) \tag{3}$$

$$\varphi=\tan^{-1}\left(\frac{MB}{LB}\right)=\tan^{-1}\left[\frac{f\tan\beta}{\sqrt{f^2+\{(x\cos\alpha)/\cos\beta\}^2}}\right] \tag{4}$$

ただし

$$\alpha=\tan^{-1}\left(\frac{y}{f}\right), \qquad \beta=\theta+\alpha \tag{5}$$