

論文 ポンプ吐出量が脈動流抑制機構に与える影響

五十嵐数馬*1・橋本親典*2・辻 幸和*3・池田正志*4

要旨：ポンプ圧送時に発生する管内の脈動現象の抑制を目的として、2種類の脈動流を合流させることによって脈動流を平滑化させる脈動流抑制機構を提案し、2種類の任意の振幅を有する脈動流の発生が可能な小型ポンプ圧送装置を試作した。本研究では、実際のポンプ圧送時の管内流速の経時変化を計測し、脈動流を矩形波にモデル化し矩形波の最小流速 V_l と最大流速 V_u の比 (V_l/V_u) を相似則として、実際のコンクリートポンプの吐出量と V_l/V_u の関係から、 V_l/V_u が異なる3種類の脈動流を小型ポンプ圧送試験で再現し、それぞれの脈動流に対して脈動流抑制の可能性について検討した。

キーワード：吐出量、可視化実験、脈動流、相似則、コンクリートポンプ

1. はじめに

現在、土木・建築の工事現場におけるコンクリートの打込み作業は、ほとんどがコンクリートポンプにより行われている。工事の大規模化、高層ビルの増加に伴い、コンクリートポンプの性能は著しく向上してきた。しかし、管内のコンクリートの流速や圧力が周期的に変化する脈動流という問題は解決されていない。

コンクリートポンプはコンクリートの吸入と吐出を繰り返すことにより輸送管に圧送させる装置であり、そのためコンクリートを連続的に圧送できない。この吸入と吐出の動作の際に吸入吐出弁が切り替わり、一時的に管内圧が低下し、コンクリートの流速の減少あるいは逆流を生じる。この現象が数秒間隔で繰り返されることで管内に脈動流が生じる。この脈動流は、圧送中のコンクリートの材料分離や圧送後の品質低下だけでなく、圧送現場での騒音・振動問題やポンプ車のブームの金属疲労による座屈破損事故の原因となっている。

これに対し著者らは、2種類の正負逆対称の脈動流を合成し、合成後の管内流動を平滑化させるという脈動流抑制機構を開発し、2種類の任意の振幅を有する脈動流を発生させることができる小型ポンプ圧送装置を試作した。フレッシュコンクリートの可視化実験手法を用いて小型ポンプ圧送装置による脈動時の管内流動の定量化を行ってきた[1]。その結果、脈動流抑制機構により脈動流の平滑化が可能であるということが明らかになった[1]。

脈動流抑制機構の実用化を図るためには、実際の吐出量の変化に対する脈動抑制の影響を検討する必要がある。工事現場の規模や打込み条件などによって、コンクリートポンプの吐出量は30～100m³/h程度変化する。吐出量が変わると、当然発生する脈動流も変化する事が予想される。しかし、従来のポンプ圧送時の脈動流の研究は、圧力変動に関する計測は行われてきたものの、流速に関する計測はほとんど行われてきていない。したがって、吐出量が脈動流抑制機構に

* 1 群馬大学 大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

* 2 群馬大学 助教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

* 3 群馬大学 教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

* 4 群馬大学 技官 工学部建設工学科 (正会員)

与える影響を検討するためには、吐出量の異なる実際のポンプ圧送時の管内脈動現象、すなわち圧送時間に伴う流速の変動を定量的に把握する必要がある。

本研究では、可視化実験手法を用いて実機のコンクリートポンプの圧送時の管内流速の計測を行い、実際のコンクリートポンプの吐出量の変化に対応した脈動流を小型ポンプ圧送装置で再現し、異なる3種類の脈動流に対する脈動流抑制の可能性について検討した。

2. 脈動流抑制機構

図-1に、脈動流抑制機構を用いて脈動流を抑制する過程を模式的に示す。図(A)は圧送配管に接続されるコンクリートポンプの吐出口を流動するコンクリートの脈動流で、経過時間に伴う管内流速の変動を意味する。この脈動流を主流の脈動とする。図(B)は、図(A)のコンクリートの脈動流を平滑化させるために吐出口から圧送配管に流動する直前に主流の脈動流に合流させる補流の脈動流で、主流と正負逆対称の脈動流である。図(c)は、図(A)の主流の脈動流と図(B)の補流の脈動流を合流させた直後の圧送配管内のコンクリートの流動状態で、主流の脈動流が平滑化された状態を示す。

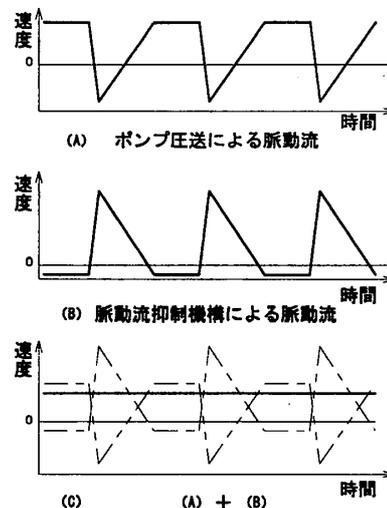


図-1 脈動流抑制機構

3. 現場圧送実験

3.1 実験概要

脈動流抑制機構の実用化を図るには、図-1の(A)に示す脈動流が、実際のコンクリートポンプでどのような性状であるかを定量的に把握する必要がある。しかし、フレッシュコンクリートは水や油などの1相系粘性流体とは異なり、水、セメント、骨材や空気等の混合材料であるため、管内流速の経時変化を定量的に求めることは非常に困難である。従来のポンプ圧送時の管内脈動流に関する研究では、圧力変動の経時変化から管内流速の変動を推定することが多かった。

ピストン式コンクリートポンプでは、2本の油圧シリンダ内のロッドを前後反対運動することによりコンクリートを輸送管に圧送させ、その際これと連動して吸入吐出弁が切り換わる。このときシリンダ内のロッド速度は一時的に零になり脈動が発生する。すなわち、ポンプ圧送時の脈動の原因は管内流速に依存しており、その結果として管内圧力の脈動が起こると考えられる。したがって、従来の圧力変動から流速変動を推定するよりは、管内流速の変動を直接計測することが、ポンプ圧送時の脈動流の定量化には重要であると思われる。本研究では、ポンプ圧送時管内流速を直接計測することを目的として、実際のフレッシュコンクリートの代わりに可視化モデルコンクリートを用いて現場圧送実験を行うこととした。

実験で用いたコンクリートポンプはホッパ容量500リットル、最大吐出圧力4.5(N/mm²)、最大吐出量115m³/hのピストン式コンクリートポンプ車である。本実験では、輸送管の一部に外径150mm、内径130mm、全長700mmのアクリル樹脂製の管を取り付け可視化領域としてモデルモルタルを観察できるようにした(図-2参照)。

圧送実験には実際のフレッシュコンクリートの代わりに

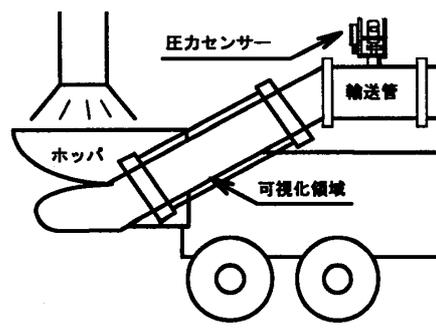


図-2 輸送管部の可視化領域

可視化モデルコンクリートとして、着目トレーサ粒子として発泡スチロール粒子(平均粒径15mm, 比重0.02)を混入した高吸水性高分子樹脂水溶液を用いた。この可視化モデルは、従来の可視化実験においてモデルモルタルとして用いているものである。可視化モデルの容量が従来の可視化実験で作製する容量と比較して非常に多いため、モデルモルタルの粘性をP漏斗流下時間で200秒程度に制御することが困難である。そのため通常屋内実験で使用している水1リットルあたり約3gの高分子樹脂を添加し、粘性の調整はしていない。

吐出量は4段階に変化させ、30, 40, 60, 80m³/hである。配管はブームを最大長に伸ばしフレキシブルホースをホッパー内に挿入し、可視化モデルコンクリートが循環するように設置した。

圧送実験は以下の手順で行う。1)可視化モデルコンクリートを1000リットル作製する。2)着目トレーサ粒子を混入した可視化モデルコンクリートをホッパーから投入し、可視化領域内に空気が残らない程度に可視化モデルコンクリートを循環させ一時停止させる。3)可視化領域とビデオカメラが水平になるように固定し撮影の準備をする。4)圧送実験を開始する。なお、流速の計測以外に圧力の経時変化を計測するために、圧力センサーをアクリル管近傍の鋼製配管に取り付けた(図-2参照)。

3.2 画像処理方法

図-2に示すアクリル管の可視化領域を流動するトレーサ粒子のを側面からビデオカメラに収録する。画面中のトレーサ粒子の位置座標を0.1秒ごとに追跡し、3次元スプライン関数を用いて補間する。その補間データを時間で微分し、個々のトレーサ粒子の速度を求める。そして、その速度を同一時間内で平均し、重ね合わせて管内流速の経時変化とする[1]。

3.3 実験結果

(1)管内流速の経時変化

各吐出量ごとの管内流速を図-3に示す。流速の周期は谷部から谷部の流速が最小値になる隣合う2点間の時間を1周期とした。また吐出量80m³/hの場合は、圧力センサーによる圧力波形と重ね合わせることで判断した。ピストン式ポンプの場合、管内のコンクリートの平均流速はピストンの速度で決まるため、吐出量が30m³/hと少ない場合はピストンの速度が遅く、そのため1回の脈動流発生周期の間隔が他の40m³/h、60m³/h、80m³/hの場合と比較して長い。この結果、管内コンクリートの平均流速に逆流現象が顕著に見られる。一方、吐出量が増加すると脈動流発生周期は短くなり、逆流現象は小さくなる。しかし、吐出量が増加するに従い管内の全体平均流速が増加するこ

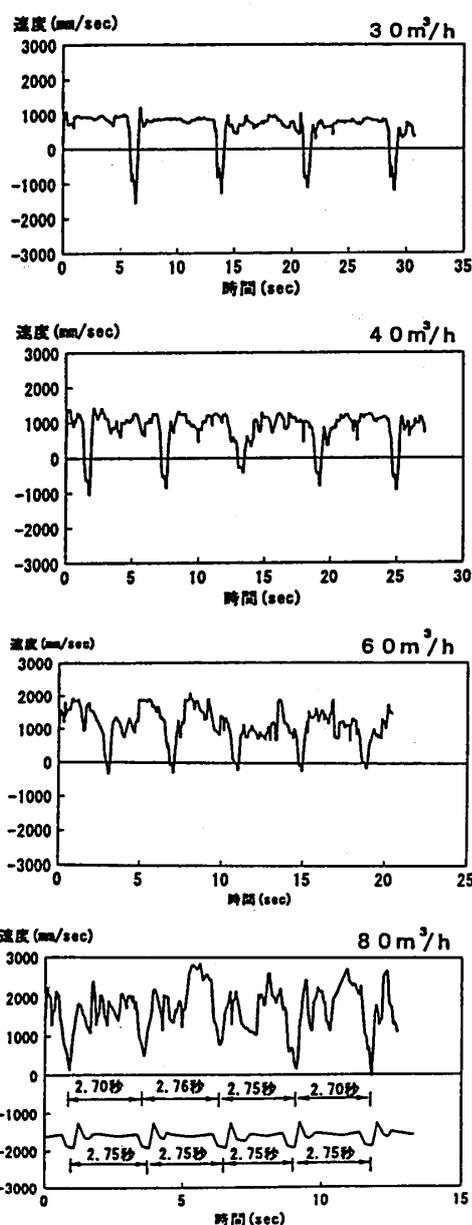


図-3 実機コンクリートポンプの管内流速の経時変化

とで、管内の流動は非常に変動している。

(2) 管内流速と圧力の脈動周期の関係

脈動流の発生時管内流速および圧力は、時間的にある一定の周期を有している。流速・圧力の変動の周期を時間的に比較検討する。圧力センサーによって計測された圧力の経時変化と流速の経時変化から、計測時刻を一致させた任意の連続する3つの波形を選び、1つの脈動流に対する周期を求め平均した。その結果を表-1に示す。流速と圧力の脈動周期はほぼ一致している。また、吐出量の増加にともない脈動周期の間隔も短くなることが確認できる。

以上の実験結果は、トレーサ粒子の流跡線を画像処理することから求めた管内流速の計測精度が、管内圧力の計測精度とほぼ同程度であることを意味し、可視化モデルコンクリートを用いた現場圧送実験による管内流速の計測方法の妥当性を示すものである。

3.4 脈動流に関する相似則の検討

実際のポンプ圧送時に発生する管内の脈動流を小型ポンプ圧送装置で再現することは不可能である。したがって、実際の脈動流とモデル実験の脈動流の相似性を考慮する必要がある。今回の実機コンクリートポンプから得られた管内流速の結果を矩形にモデル化し、最小流速と最大流速の比に着目した相似則を設定することにした。

実際に計測された流速の経時変化を矩形波にモデル化する過程を、図-4に示す。以下に矩形波モデルの算定方法の手順を示す。

- 1) 1つの流速波形に対して定常状態と認められる区間 a における平均流速を Vu' とする。
- 2) 変動している状態の区間 b における平均流速を Vl' とする。
- 3) 数個の波形について Vu' 、 Vl' を求め、それぞれの平均を Vu 、 Vl とし流速の矩形モデルとする。
- 4) 最小流速 Vl と最大流速 Vu の比 (Vl/Vu) をその脈動流の特性値とする。

図-5に、吐出量と最小流速 Vl と最大流速 Vu の比 (Vl/Vu) の関係を示す。吐出量が増加するほど、 Vl/Vu は1に漸近する。 Vl/Vu は流速の変動の割合であり、流速の絶対値については考慮していない。吐出量が増加することで管内の逆流現象が著しい場合この値は負の値を取り得ることもある。一方、逆流現象が少ない場合は、 $Vl/Vu=1$ に近づく。しかし、実際のピストン式ポンプの脈動流において、 $Vl/Vu=1$ となることはない。

本研究では、この最小流速と最大流速の比 (Vl/Vu) を実際のポンプ圧送時の脈動流とモデル実験の脈動流の相似則として用いることとした。なお、脈動流を表す相似則としては、流速の変動、絶対値と周期に関するものが考えられる。本特性値は流速の振幅に着目した指標であり、流速の絶対値や周期については考慮していない指標であると言える。

表-1 脈動流の変動周期

吐出量 (m ³ /h)	30	40	60	80
流速周期 (秒)	7.55	5.80	3.95	2.74
圧力周期 (秒)	7.60	5.80	4.00	2.75

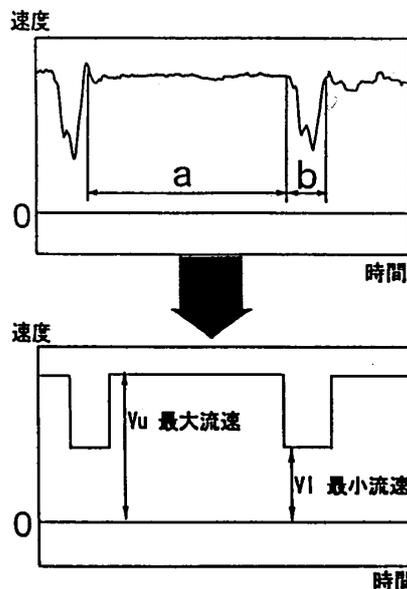


図-4 管内流速の矩形モデル

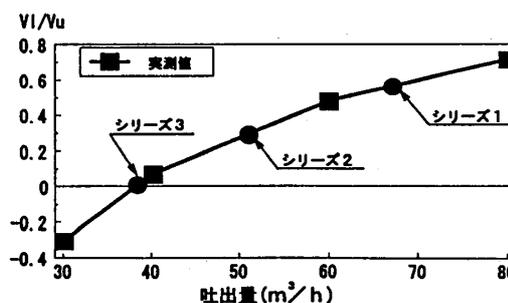


図-5 最小流速と最大流速の比

4. 小型ポンプ圧送装置による可視化実験

4.1 実験概要

現場圧送実験で求められた吐出量の変化に対応した脈動流を小型ポンプ圧送装置により再現し、種々の脈動流に対する脈動流抑制効果を検討する。

実験に用いた小型ポンプ圧送装置を図-6に示す。図の主流側ピストンにおいてポンプ圧送時の脈動流を再現し、脈動が発生した瞬間に補流側ピストンにおいてモデルコンクリートを圧送するものである。

管内の流速を計測する目的で主流側と補流側が合流する部分にアクリル樹脂を使用し可視化領域とした。また管内の圧力を計測するために主流側と、合流後の配管部に各1個ずつ計2ヶ所に圧力センサーを設置している。管内の圧力は、コンプレッサーを使用して $0.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ をチャンパー部分にかけることで一定とした。

モデルコンクリートはフレッシュコンクリートを、モルタル相と粗骨材相からなる固液2相系にモデル化したもので、モデルモルタルには高吸水性高分子樹脂溶液(比重1.0)を、モデル粗骨材として人工軽骨材(最大粒径20mm, 比重1.66, メサライト系)を使用した。モルタルの着目トレーサ粒子として発泡スチロール粒子(平均粒径2.5mm, 比重0.02)を混入した。モデルコンクリートの配合としては、モデルモルタルの粘性をP漏斗流下時間200秒で一定とし、モデルモルタルとモデル粗骨材の容積比は、0.4とした。

4.2 主流側の脈動流の設定

実験に用いた主流側の脈動流として、脈動流の最小流速と最大流速の比($V1/Vu$)を、0.6, 0.3および零の3種類とした。この設定値は、図-5に示す吐出量と管内流速の矩形モデルより算出した $V1/Vu$ の関係から、吐出量 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ および $40 \text{ m}^3/\text{h}$ の脈動流を想定している(以後、吐出量の大きい方を想定した圧送実験から、シリーズ1、2、3と称する)。

圧送実験は、シリーズ1、2、3の3種類の主流の脈動流について、粗骨材容積比0.4のモデルコンクリートを用い、計3通りとした。再現脈動流は主流側の押し出し時間が0.7秒、引込み時間が0.2秒の周期を持つ脈動流とし、補流側の押し出し・引込み時間は主流側とは逆のそれぞれ0.2, 0.7秒とした。平滑化となる補流量を求めるために、補流量の押し出し引込み速度は油圧ユニットのバルブで調整し、押し出し速度はAからEになるにつれ増加しA0~E9と50段階に変化させた。引込み速度は一定である。なお、補流量押し出し速度は数値としては表現できない。

4.3 画像処理方法

図-6に示す合流部の可視化領域内における合流後の直管部分でのモデルモルタルのトレーサ粒子の動きを側面からビデオカメラに収録し以下3.2の画像処理方法と同様に処理を行う。

4.4 実験結果

シリーズ1, 2, 3の合流部の管内流速の経時変化および、2ヶ所の管内圧力の経時変化を図-7、図-8に示す。脈動流を再現している場合、流速と圧力とも実際のポンプ圧送による計測結果にほぼ近い波形を示している。ただし、圧力が経時変化とともに上昇する傾向がみられるのは、1回の脈動動作によって生じる圧力が図-6の調圧つまみから抜けきれずチャンパー部に徐々に蓄積されたためと思われる。補流量を合成していくと合流部では補流側の脈動流の干渉を受ける。

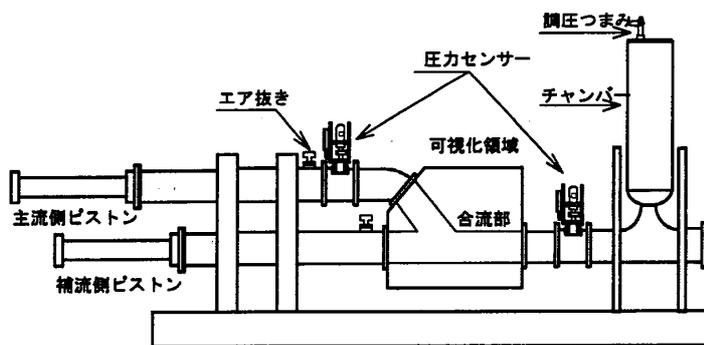


図-6 小型モデルポンプ

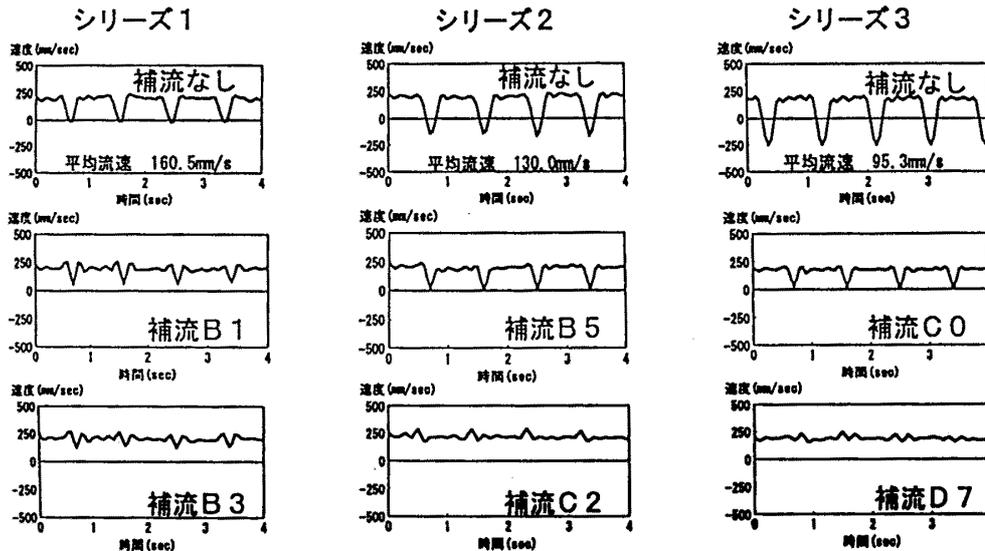


図-7 モデルポンプ合流部の管内流速の経時変化

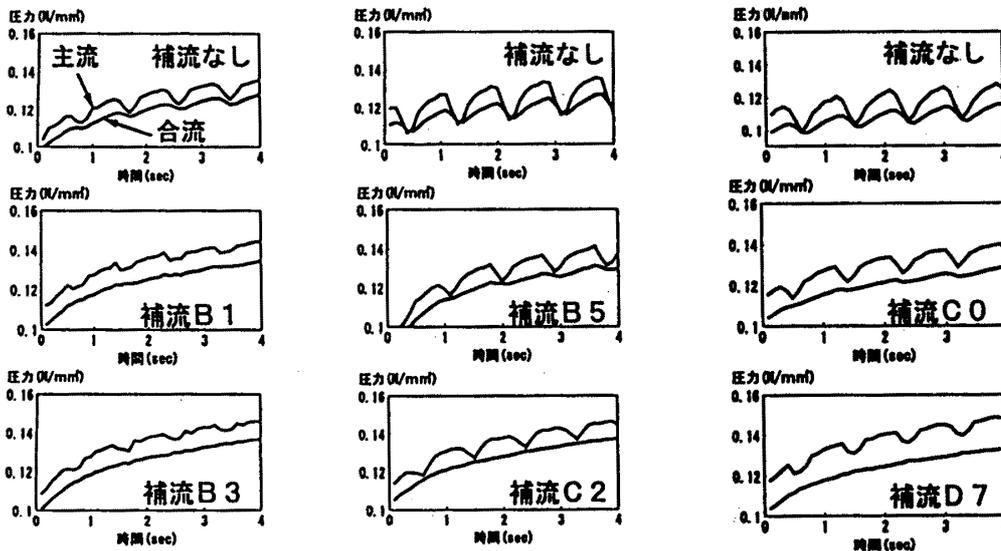


図-8 モデルポンプの主流側および合流部の管内圧力の経時変化

主流に対する補流量が少ない場合、主流側による影響が特に流速に関しては強い。しかし、いずれのシリーズにおいても合流部で流速、圧力とも定常流と認められる波形が存在している。圧力は流速の変化に比べ比較的緩やかに変化している。また、圧力波形に着目すると合流部における補流側の脈動流による影響が、主流側の流動にも及んでいることが分かる。

いずれのシリーズの場合でも主流側と補流側の合流部で管内流速および管内圧力を平滑にさせる補流量の存在を確認することができた。

5. 結論

本実験範囲内において以下のことが明らかになった。

- (1) 異なる吐出量に対して、脈動流を抑制する最適な補流量の存在を確認した。
- (2) 流速の変動に比べ圧力の変動は緩やかである。

参考文献

- 1) 橋本親典、佐藤良一、杉山隆文、辻幸和：ポンプ圧送時の管内脈動流に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol17、PP. 551-556、1995. 6