

混合室内の対向衝突噴流について

赤池 志郎・根本 光正

Coaxial Impingement of Opposing Jets in Mixing Chamber

Shiro AKAIKE and Mitsumasa NEMOTO

Abstract

This study is intended to design the optimum mixing chamber of reaction injection molding which is a manufacturing process used to make plastic parts. Experiments are carried out with the model mixing chamber by using an oil as working fluid. The mixing effect is estimated by measuring the turbulent intensity in the flow downstream of impingement surface. The effect of geometry of the chamber on the performance of confined impinging jets mixers is discussed. The transition to turbulent mixing flow occurs at a nozzle Reynolds number of about 300 independently of the geometric factors of chamber. Therefore, it seems that the turbulent intensity, i.e., the mixing effect is influenced considerably by the geometry of chamber.

1. ま え が き

近年、プラスチック業界で反応射出成形法が出現し、6~7年前より開発が行われ、一部では生産体制も整いすでに稼動している。反応射出成形法とは、原液2成分を混合室内で対向衝突噴流で混合の後に型へ流し、型内で化学的に反応させ製品を成形させる方法である。しかし、この反応射出法については、得られる製品の良否を左右する原液2成分の混合状態や、混合室ノズル圧が約5 MPaと高いなど、混合室の形状をも含めた装置全体の使用最適条件等に不明な点が多く、基礎研究の必要が望まれている。

対向衝突噴流の特性はフルイデックスに関連してこれまでいくつかの研究がある¹⁾が、いずれも衝突面の位置等の検討であり、混合特性は調べられていない。一方、反応射出成形法を対象として混合室内の噴流の特性を検討しているものもある^{2),3)}が、混合効果等はこれまで明らかにされていない。

本研究は、原液供給に高圧を必要とせずに混合効果を高めることのできる混合室の開発を目的としている。本報告では実際に稼動している混合室とほぼ同寸法の供試モデルを製作し、まずノズルからの噴出量とノズル前後の圧力差との関係を油を用いて調べた。実

験の都合上、二つのノズルからは同一油を噴出するので、その混合効果を流れの可視化等で明らかにすることが出来ない。そこで衝突噴流後の油流の乱れをホットフィルムプローブにより測定して、混合状態の目安とした。ノズル中心から混合室上壁までの高さおよび混合室内の圧（混合室出口に絞りを設ける）がノズル前後の圧力差および混合室内の乱れに及ぼす影響について検討を加えた。

2. 混合室について

実際に稼動している反応射出成形法の混合室の概要について述べる。混合室には、混合室内への原液の供給や循環、また混合室内の清掃などに種々の方法があるが、原液2成分をノズルから噴出して対向衝突噴流で混合させることについては一致する。

混合室の構造図の一例を図1に示す。図1(a)は原液が両ノズルより噴出している混合状態を、図1(b)は原液の循環と混合室内の清掃状態を示している。噴出量の調整は、ニードルのすき間と開閉時間で行う。噴出時において原液に旋回を与えるように工夫しているものもあるが、混合状態の良否に旋回効果があるかについては不明である。

稼動条件は製品の大小や硬軟質により異なるが、噴出量=20~60 l/min, ノズル径=0.8~8 mm, 噴出時

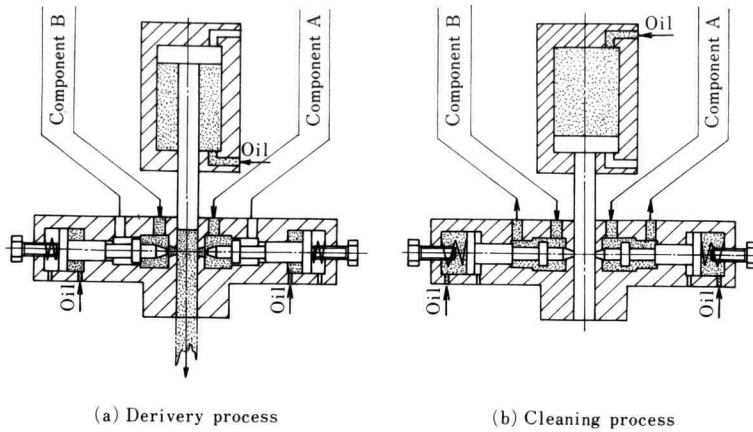


Fig. 1 Mixing chamber

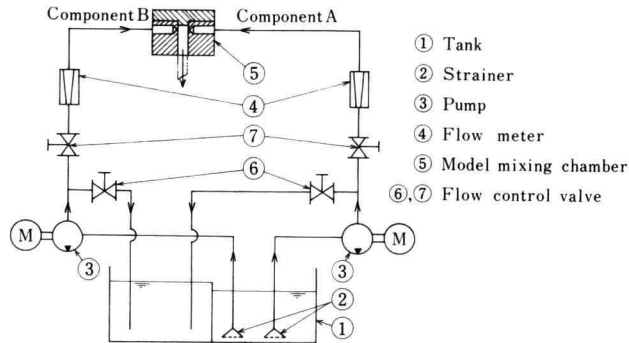


Fig. 2 Schematic view of experimental apparatus

間=0.7~3 sec, 清掃ピストンストローク=20~120 mm, 混合室内径=8~16 mm であり, 混合室内断面形状は角形のものもある。

原液 2 成分を仮に A 液, B 液とすると, ある製品を作る場合, 配合比率は容積比で A : B = 100 : 110 であり, また粘度は 20°C で A 液は 15.4 P, B 液は 1.77 P で, 各々水の粘度の約 1540 倍, 177 倍である。

本研究は上述のような混合室を対象として, その中の対向衝突噴流の特性を実験的に検討する。

3. 実験装置および方法

実験装置の配管図を図 2 に示す。実験には油を用い, 油槽 ① よりストレーナ ② を介してポンプ ③ により配管内に送り込まれた油は, 浮遊式流量計 ④, 混合室 ⑤ を経た後に油槽へもどる。流量調整はバルブ ⑥, ⑦ で行った。

製作した混合室供試モデルのノズルまわりの概略を図 3 に示す。モデルの製作に際しては, 実際に稼動している混合室とノズル位置やその内径は同じにしたが, ノズル形状については加工の都合上多少異なっている。ノズル径は $d = \phi 2$ mm, 混合室内断面寸法は 12×12 mm の角形で, 両ノズル内と上壁には $\phi 1$ mm の圧力測定孔が設けてある。圧力はストレーンゲージ式圧力変換器で測定した。また混合室内の乱れ(RMS)を測定するために, ノズル中心より下方 35 mm に熱線流速計プローブの挿入孔を設けた。プローブには日本科学工業製のミニチュアプローブ (MODEL 1276-10AW) を用いた。

ノズル中心より上壁までの高さは $h = 5$ mm が実際に稼動している混合室の寸法であるが, 混合効果におよぼす上壁高さ h の影響を調べるために, h を変化できる構造とした。混合室の出口面積も変化させることができる。なお, 混合室は黄銅で製作したが, 内部の

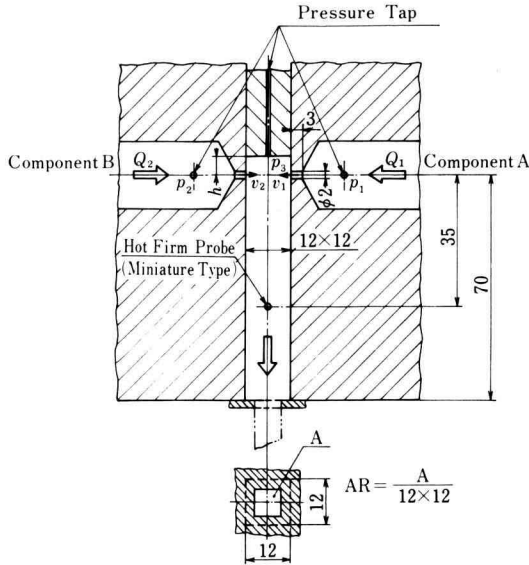


Fig. 3 Cross section of model mixing chamber (Unit of length : mm)

流れの可視化ができるように前面のみアクリル製とした。

実験はまずノズル中心から上壁までの高さ $h=5$ mm で二つのノズルの噴出量比 $Q_1:Q_2=1:1, 1:2, 1:3$ で、ノズル上流圧力 p_1, p_2 、混合室内の圧力 p_3 と噴出量との関係および混合室内の流れの乱れの状態を調べた。次に上壁高さ $h=2.5, 7.5$ mm および混合室内の圧力を上昇させるために出口面積比 AR を $1/3, 1/6$ に絞った場合についても同様な実験を行った。

供試油の粘度は 20°C で 0.88 P であり、ノズル径 d とそこでの平均流速 v を用いたレイノルズ数 ($Re = dv/\nu$) は約 800 以下ですべての実験を行っている。

4. 実験結果および考察

4.1 噴出量とノズル前後の圧力差

噴出量比 $Q_1:Q_2=1:1$ 、ノズル中心から上壁までの高さ $h=5$ mm での噴出量 Q_1, Q_2 とノズル前後の圧力差 $\Delta p_1 = p_1 - p_3, \Delta p_2 = p_2 - p_3$ との関係を図4に示す。なお、この場合混合室出口に絞りを設けていない ($AR=1$) ので、混合室内の圧力 p_3 はほぼ大気圧に等しい。噴出量によって両ノズル前後の圧力差 $\Delta p_1, \Delta p_2$ はほとんど相違しない。すなわち、両ノズルの形状に差異はないといえる。これらの圧力差はノズルの入

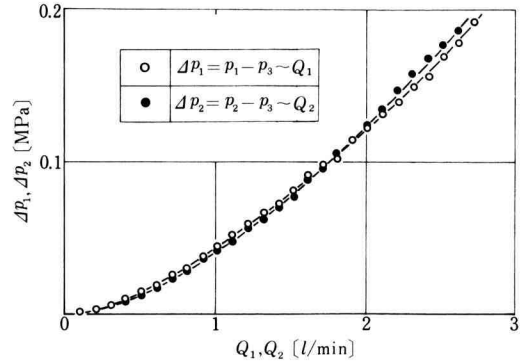


Fig. 4 Relation between nozzle pressure and flow rate ($Q_1:Q_2=1:1, h=5$ mm, $AR=1$)

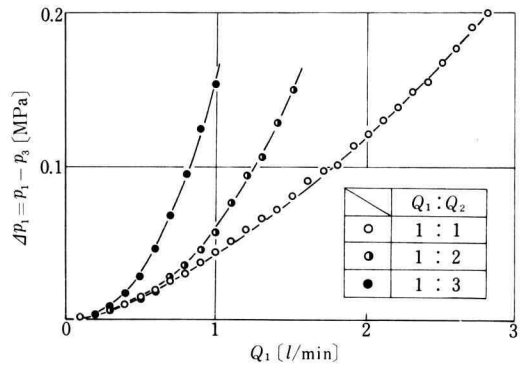


Fig. 5 Effect of flow ratio of opposing jets on nozzle pressure ($h=5$ mm, $AR=1$)

口、出口損失およびノズル流路内の管摩擦を考慮した簡単な式である程度見積ることができる。

噴出量比を変えた場合の小流量側ノズルの Δp_1 と Q_1 との関係を示したものが図5である。この場合、 $Q_2 > Q_1$ では一つのノズルの噴出量が同じでもノズル前後の圧力差 Δp_1 は $Q_1=Q_2$ の場合より大きくなる。この場合にも混合室内の圧力は上昇しない (上壁面だけで混合室内の圧力を測定しているので多少問題はあるが) ので、これは片方のノズルからの噴流の運動量が噴出量の少ない噴流に影響を及ぼすためと考えられる。ただし、 Δp_2 と Q_2 との関係は図6に示すように、 $Q_2 > Q_1$ であっても $Q_1=Q_2$ の場合とほとんど相違しない。上述のごとく二つのノズルの噴出量を変える場合には、小流量側のノズル圧は噴出量と同じ場合にも高圧を必要とするので、混合室系の設計に際して注意を要する。

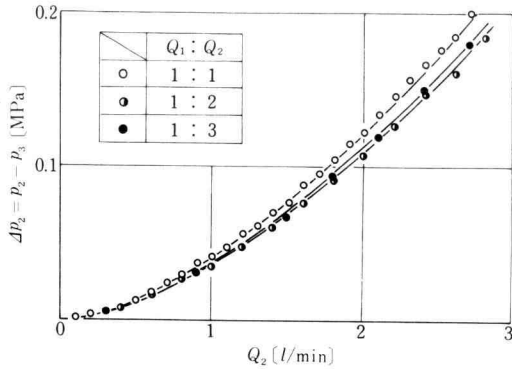


Fig. 6 Effect of flow ratio of opposing jets on nozzle pressure ($h=5$ mm, $AR=1$)

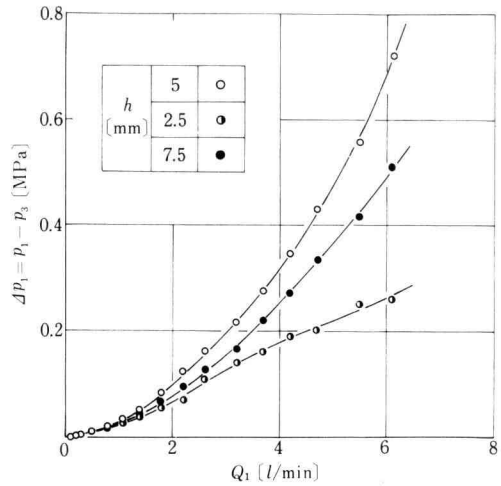


Fig. 8 Effect of height from nozzle center to upper end wall on nozzle pressure ($Q_1:Q_2=1:1$, $AR=1$)

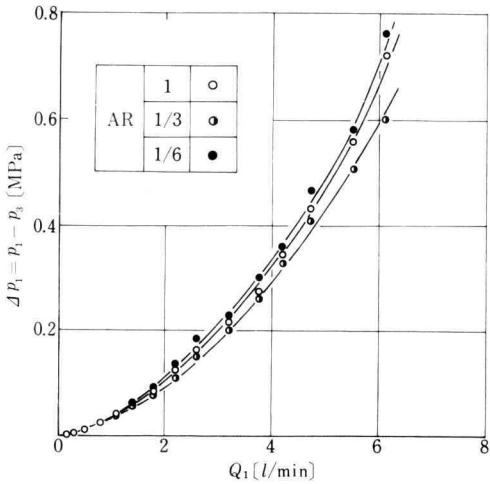


Fig. 7 Effect of AR on nozzle pressure ($Q_1:Q_2=1:1$, $h=5$ mm)

混合室内の圧力を高めるために、混合室内出口面積比を $AR=1/3$, $1/6$ に変化させた場合の噴出量 Q_1 とノズル前後の圧力差 Δp_1 との関係を $AR=1$ のものと比較したものを図7に示す。図は噴出量比が $Q_1:Q_2=1:1$ であり、結果の対称性が良好なので、 Q_1 と Δp_1 との関係だけを示した。 AR 変化による噴出量とノズル前後の圧力差との関係には、ほとんど相違はみられない。すなわち、混合室内の圧力によって、ノズル前後の流れは影響されない。

ノズル中心から上壁までの高さ h を変えた場合の Δp_1 と Q_1 との関係の一例を図8に示す。図は $Q_1:Q_2=1:1$, $AR=1$ のものである。 h によってノズル圧 Δp_1 は同じ噴出量で $h=5, 7.5, 2.5$ mm の順に低くな

る。いずれの場合にも混合室内の圧力 p_3 はほぼ大気圧に等しいので、上述の差が生じたのはノズル出口の流れの相違によるものと考えられる。

4.2 混合室内の乱れ

混合室内での対向衝突噴流による混合状態を調べる一方法として、熱線流速計による乱れの測定を行った。混合室出口側の流れは断面積が大きいので低速になるため、通常用いられる乱れの百分率表示では問題が生

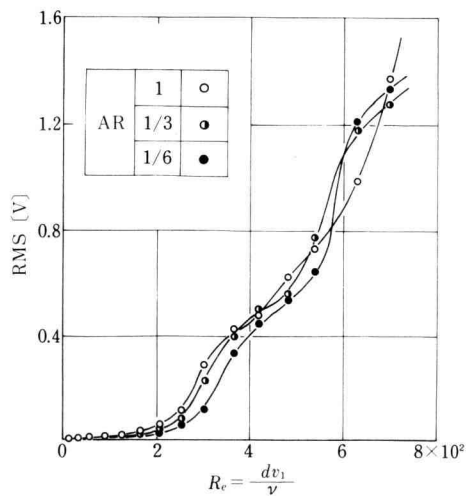


Fig. 9 Effect of AR on turbulent intensity ($Q_1:Q_2=1:1$, $h=5$ mm)

じるので、以下乱れのRMS値(V)で示す。なお、RMSはリアライザーで最大噴出量時の流速を10 V にセットした時の値である。

図9に乱れ(RMS)とレイノルズ数 Re との関係の一例を示す。図は $h=5\text{ mm}$, $Q_1:Q_2=1:1$ の結果である。絞りを設けない場合($AR=1$), レイノルズ数 $Re \approx 300$ 以上から乱れ成分が生じるようになり、 Re 数の増加にともないその絶対値も増加してくる。一方、 $Re \geq 400$ では噴流の衝突音が発生してくる。この発生音はキャビテーションとも考えられるので、混合室内の圧力を高めるための絞り($AR=1/3, 1/6$)を設けた図中の実験も行ったが、 AR による乱れおよび発生音の相違はほとんど生じなかったため、上述の発生音は単

純な乱流騒音であろう。

本実験結果から、衝突噴流での乱流混合は $Re \geq 300$ ではじまる。Charlesらの結果によると、乱流混合は $Re \geq 140$ で生じると報告している²⁾が、その実験に用いているモデルは実機に近い本モデルにくらべてノズル径が約 $\phi 9.5\text{ mm}$ とかなり大きい。実際の稼動時もレイノルズ数は約300であるようであり、本実験で得られた乱流混合のはじまる $Re \approx 300$ は妥当な値といえる。参考のために、図10に乱れ波形の一例として $Q_1:Q_2=1:1$, $AR=1$, $h=5\text{ mm}$, $Re \approx 700$ のシンクロスコープによる写真を示す。写真も乱流波形を示している。

乱流混合はノズルの位置等に無関係に $Re \geq 300$ ではじまるが、 h によって図11に示すように乱れの絶対値が相違する。 h の小さい2.5 mmの場合にはとくに乱れの絶対値が小さい。

上記の結果は $Q_1:Q_2=1:1$ のものであるが、噴出量比を変えた場合は、大流量側ノズルのレイノルズ数で上述と同様なことがいえる。すなわち、どちらか一方のノズルのレイノルズ数が300以上で乱流混合が期待できる(図12)。

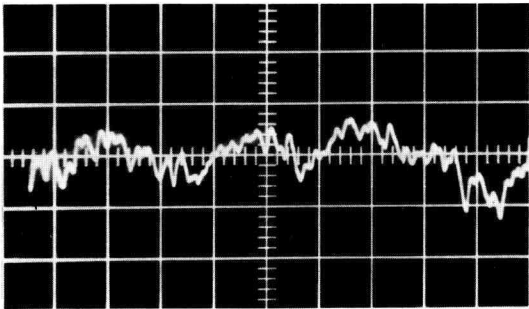


Fig.10 Oscillogram of turbulence in chamber ($Re \approx 700$, $Q_1:Q_2=1:1$, $h=5\text{ mm}$, $AR=1$)

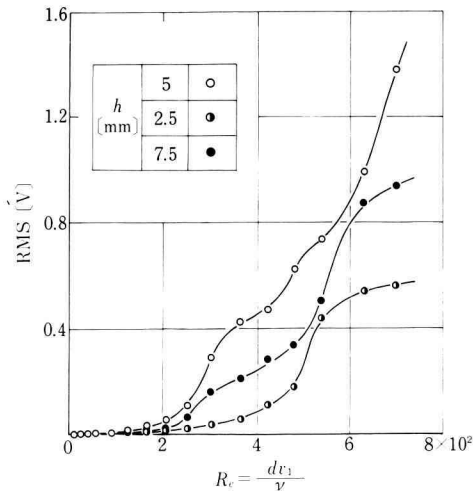


Fig.11 Effect of height from nozzle center to upper end wall to turbulent intensity ($Q_1:Q_2=1:1$, $AR=1$)

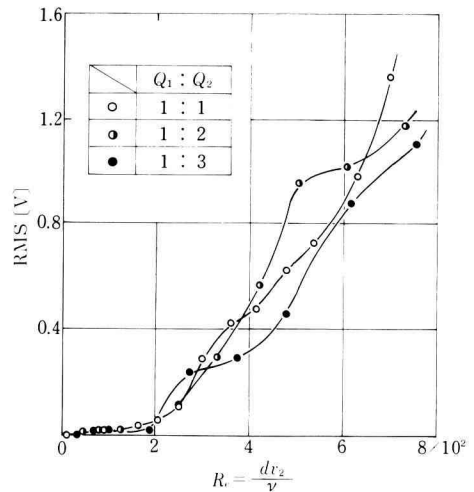


Fig.12 Effect of flow ratio to turbulent intensity ($h=5\text{ mm}$, $AR=1$)

4.3 最適混合室形状の検討

ノズル中心から上壁までの高さが、 $h=5\text{ mm}$ (供試モデルが実機と同寸法の場合)のものが同じレイノルズ数で混合室内の乱れが最大となり(図11)、この形状

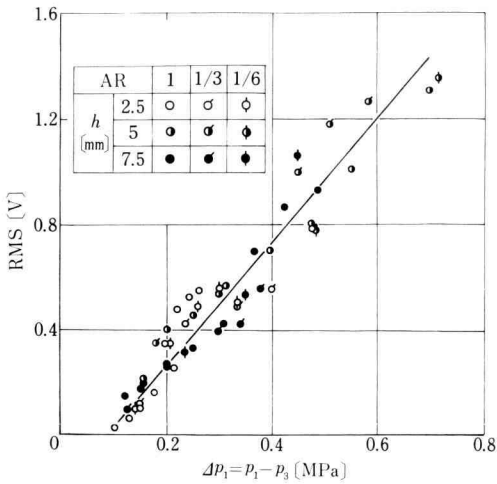


Fig. 13 Relation between nozzle pressure and turbulent intensity ($Q_1 : Q_2 = 1 : 1$)

が最適とも考えられるが、この場合ノズル圧も高い(図8)。

上記の実験結果から乱れ(RMS)と圧力差 Δp_1 との関係を求めると図13のようになる。図示のごとくRMSと Δp_1 とはほぼ直線関係になり、 Δp_1 が大きいとRMSも大きくなる。このことはまた混合室の形状に無関係に衝突噴流の混合効果はノズル圧によって決まるとも考えられる。しかし、実際の混合室内の流れの状態が明らかにされていない現在、上述の結論を下すことはできない。

ノズル前後の圧力差と乱れの測定結果から混合室内の流れの状態を一応下記のように推論することはできる。 $h=5$ mmの場合には二つの噴流の衝突が完全に行われた後、上方に向う流れが混合室上壁ではね返り、さらに乱流混合を促進させるため混合効果が最良になったものと思われる。一方、 $h=2.5$ mmでは衝突以前に一部の流れは上壁に沿って流れるようになるため、乱流混合がそれだけ遅れる。 $h=7.5$ mmではノズル中心から上壁までが広すぎるため、上壁のはね返り効果があまり期待できないことが、 $h=5$ mmの場合より混合

作用が少ない原因と思われる。なお、上壁のはね返りがノズル出口近傍の流れの状態を変えるので、ノズル圧についても図8のような結果が得られたと考えられる。

最適な混合室の設計のためには、噴流そのものの特性、ノズルの形状等を含めた総合的研究が今後必要であろう。

5. あとがき

混合室の供試モデルを用いて対向衝突噴流の特性を実験的に調べ、ノズル中心から混合室上壁までの高さおよび混合室内の内圧がノズル前後の圧力差および混合室内の乱れに及ぼす影響等を検討した。衝突噴流により乱流混合が生じるようになる限界のレイノルズ数はノズル位置等に関係なく約300である。ただし、ノズル中心から混合室上壁までの高さが混合効果に及ぼす影響は大きい。

最後に、本研究の研究費、実験装置等でご協力いただいた(株)トーヨーソフランおよび同社の宮口守弘氏、手老寿一氏に感謝の意を表します。また本実験に参加された研究室の多くの卒研生に感謝します。

文 献

- 1) たとえば、山本・ほか2名、同軸対向衝突噴流の定常特性、油圧と空気圧、第6巻、第4号(昭50-7)8頁。
- 2) Charles L., ほか2名、Mixing for Reaction Injection Molding I. Impingement Mixing of Liquids, Polymer Eng. and Sci., Vol. 20, No. 13 (1980), p. 875.
- 3) Charles L., ほか2名、Mixing for Reaction Injection Molding II. Mixing of Fiber suspensions, Polymer Eng. and Sci., Vol. 20, No. 13 (1980), p. 887.