

密集市街地における洪水氾濫流解析と氾濫流制御の試み  
Analysis of Flooding Water Over a Crowded Urban District  
and Attempts at Innundation Water Control

福岡捷二・松永宜夫\*\*

By Shoji FUKUOKA and Norio MATSUNAGA

The spread of flooding water in a crowded urban district was simulated by incorporating properly houses, roads, and land information in the two-dimensional numerical model. It was shown by this numerical simulation that the time of flooding water advancement was mainly controlled by the road network. It was also found by the model that the decrease in the innundation area and water depth became possible by setting drainage gate and tree zones, and raising the level of roads at appropriate places.

Keywords: innundation water, crowded urban district, flood disaster, numerical simulation, risk management

1. はじめに

超過洪水により密集市街地を流れる河川が決壊し、市街地に氾濫水が浸入するようなことが起こったとき、それによる被害は計り知れないものがある。こういった氾濫による被害を軽減するためには、堤防を強化すると共に、氾濫流の挙動を明らかにした上で、氾濫水の速やかな排除、及び避難方法などを検討する必要がある。従来の氾濫計算、例えば岩佐・井上ら<sup>1)</sup>は計算格子を285.4×231.0 mとし、粗度係数については、水田・畑地、宅地、山地などの分類別に粗度係数を与え二次元平面計算モデルによって検討している。中川<sup>2)</sup>は25m×25mの計算格子を用い、昭和57年長崎水害の氾濫流計算を行っている。ここでは、市街地の家屋群について、1メッシュ内に占める家屋面積の割合から求まる平均的な通過率の概念を導入し、流量フラックスの補正を行うという方法を採用している。これらの研究によって広い田畑、家屋が少ない計算領域での氾濫流の挙動を巨視的に現すことに成功している。しかし家屋が密集している市街地では氾濫水が道路に集中して流れるため、流速などを表現できず、計算格子に与える粗度係数を実際の氾濫水位等と比較して適当に修正し氾濫水の到達時間などを合わせなければならないといった難点があった。そのため氾濫計算結果は、超過洪水による被害の予測、住民の避難活動などに活用するには未だ不十分な点が多いといえる。本研究で

\* 正会員 工博, Ph. D. 東京工業大学助教授 工学部土木工学科  
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

\*\* 学生会員 東京工業大学大学院修士課程 土木工学専攻 (同上)

はこのような問題意識のもとに、密集市街地を流れる河川の堤防が超過洪水により破堤したことを想定して、道路・家屋など氾濫流の挙動に最も影響する地域情報を出来るだけ詳しく取り込んだ氾濫シミュレーション解析を行う。さらにその結果を用いて被害を軽減するための氾濫流の制御方法を検討する。

## 2. 密集市街地における氾濫流解析

家屋が密集した市街地では氾濫水は主に道路を流れる。このような事例は、長崎水害を始め幾つか報告されている<sup>3)</sup>。このため密集市街地の氾濫水の挙動を正しくとらえるためには、道路の存在を十分に考慮に入れた計算、すなわち、道路幅程度の計算メッシュを採用する必要がある。検討対象の市街地では、道路幅は最大で10m程度であるので、計算格子として $\Delta x = \Delta y = 10\text{m}$ を取ることにした。堤内地の地形、および家屋の配置については、2,500分の1地形図から読み取り、堤防付近や道路などの地盤高は計算格子に見合う精度を必要とするところから現地を調査することによって地盤高の補正を行った。

以上のように求めた地域情報を用いて、二次元不定流計算を行い、氾濫水位、流速、及び到達時間等を計算した。

検討対象のA川と右岸の市街地を図-1に示す。本計算では計算手法の開発及び道路や家屋の密集した市街地での氾濫水の挙動を捉えることが主要な目的であるので、氾濫面積が最も大きくなるB点を破堤位置と仮定した。計算に用いた洪水は昭和22年のカスリーン台風のA川における洪水ハイドログラフを1/70年確率規模に拡大したものをを用いた。氾濫水の流入時間は約5時間である。

計算格子ごとの粗度係数は計算格子の中に占める家屋面積の割合別に、格子ごとの粗度係数を与えた。図-2に対象領

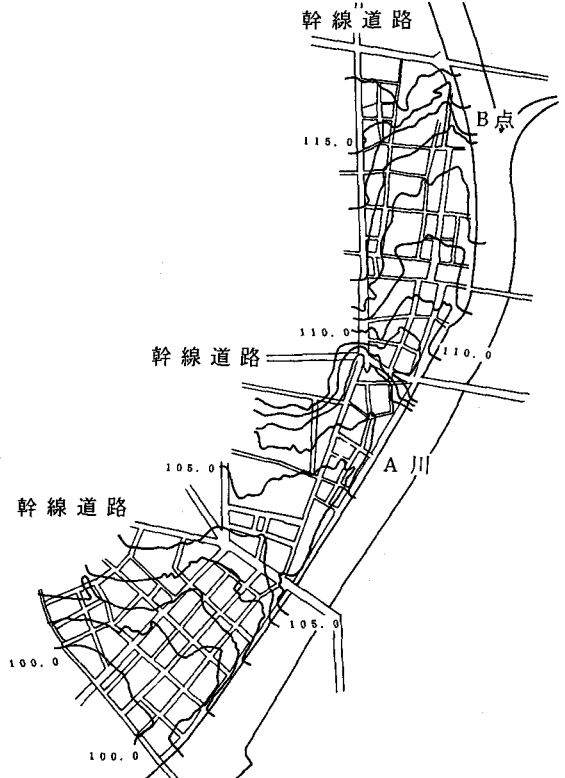


図-1 対象領域の地盤高と道路網

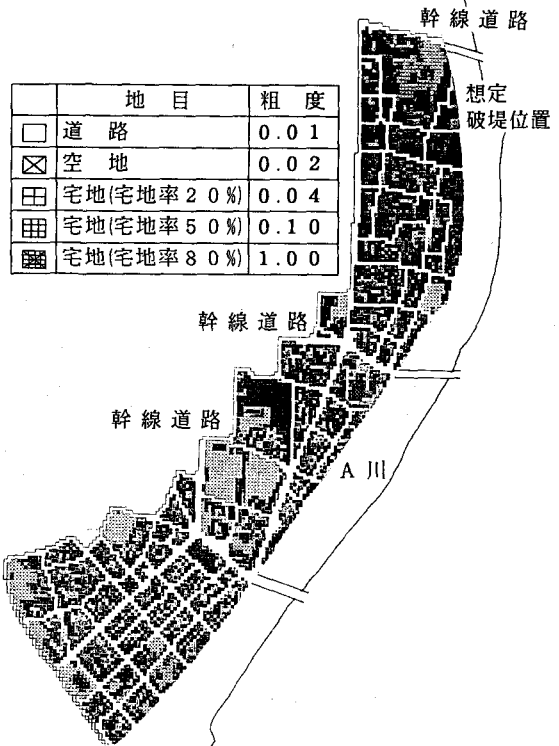


図-2 市街地の粗度係数の分布

域の粗度係数の分布を示す。市街地の粗度係数の値については十分明らかにされていないので、ここでは我が国の代表河川の高水敷上の地被状態と粗度係数の値の関係を準用した<sup>4)</sup>。図中の色の濃い部分が家屋の密集している箇所で、白い部分が道路を示している。

氾濫流は二次元平面流れと考えることが出来る。このとき基礎式は次のようになる<sup>1)</sup>。

x、y方向の運動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 M) = -gh \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} \right) \dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 N) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 N) = -gh \cdot \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} \right) \dots (2)$$

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots (3)$$

$\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ について、Manningの抵抗則を用い、

$$\tau_{bx}/\rho = gn^2 u_0 (u_2 + v_2)^{1/2} \dots (4)$$

$$\tau_{by}/\rho = gn^2 v_0 (u_2 + v_2)^{1/2} \dots (5)$$

n: Manningの粗度係数、 $\varepsilon$ : 水平渦動粘性係数である。 $\varepsilon$ は次式によって水平方向のせん断力 $\tau$ で表現される。

$$\tau_x = \rho \varepsilon (\partial u) / (\partial x) \dots (6)$$

$$\tau_y = \rho \varepsilon (\partial v) / (\partial y) \dots (7)$$

家屋と道路の境界では流速の違いによるせん断力が作用する。この家屋と道路の境界に作用するせん断力 $\tau$ によって、道路の流速は減速され、一方家屋群の間を流れる流れは加速される。ここでは $\tau$ は河道内樹木群に関する計算法<sup>5)</sup>を適用し、次式で求める。

$$\tau = \rho f' (\Delta u)^2 \dots (8)$$

$\rho$ : 水の密度  $\Delta u$ : 樹木群内外の流速差  $f'$ : 干渉の強さを表す境界混合係数 (=0.035)

(8)式より流速 $u^{n+1}_{i,j}$ を決定する。

$$u^{n+1}_{i,j+1/2} = \frac{M^n_{i,j+1/2}}{h^{n-1}_{i-1/2,j+1/2} + h^{n-1}_{i+1/2,j+1/2}} \dots (9)$$

$$u^{n+1}_{i,j+3/2} = \frac{M^n_{i,j+1/2}}{h^{n-1}_{i-1/2,j+3/2} + h^{n-1}_{i+1/2,j+3/2}} \dots (10)$$

(9)、(10)式より、せん断力 $\tau$ を決定する。

$$\tau^{n+1}_{i,j+1} = -\rho f' (\Delta u)^2 = -\rho f' |u^{n+1}_{i,j+3/2} - u^{n+1}_{i,j+1/2}| \cdot (u^{n+1}_{i,j+3/2} - u^{n+1}_{i,j+1/2}) \dots (11)$$

計算に用いた総格子数は148×214である。堤防および道路については、10m以下の天端幅および道路幅であってもこれを近似的に1格子サイズで表す。なお、時間差分の間隔は計算を精度よく行うため、0.1secとした。氾濫水の先端では、以下の式が成り立つものとする。

$$h < 0.001 \text{ m} \rightarrow N \text{ or } M = 0 \dots (12)$$

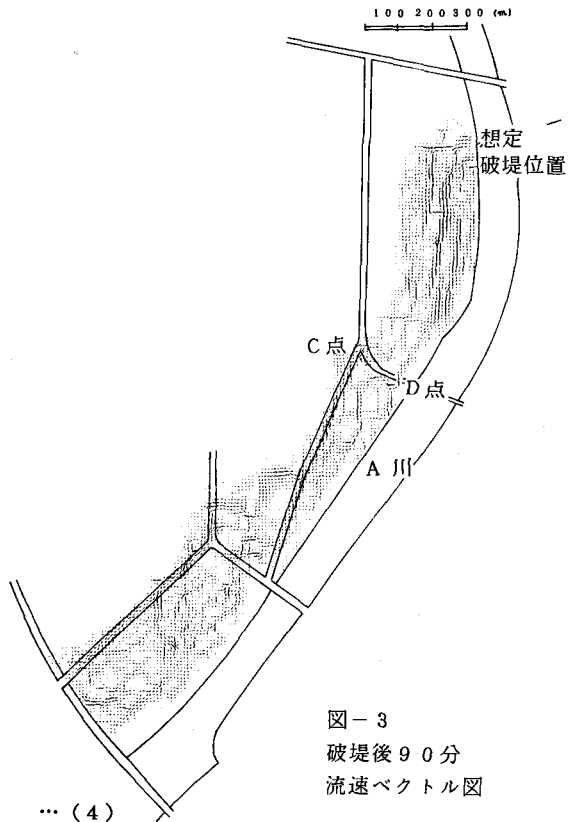


図-3  
破堤後90分  
流速ベクトル図

堤防の破堤は、想定破堤位置での水位がH、W、Lに達した時点で始まり、破堤幅は時間的に次式で広がっていくものとする。破堤完了までの所要時間を3min.とする。

$$B = \{B_{max} / (3.0 \times 60.0)\} \Delta t \quad \dots (13)$$

### 3. 解析結果と考察

氾濫計算結果

の一例を図-3

に示す。図は破堤してから1時間半後の流速ベクトル図である。

図に示すように幹線道路や小さな街路で、氾濫流が集中していることが分かる。

図のC点では道路高が低くなっており、このようなところには流れが集中している。D点には

道路下のカルバートがあり、ここでは氾濫水は毎秒4mもの流速で流れている。カルバート等市街地の構造物は耐水構造となっていないために、このような早い流速の出るところは防災上危険箇所になるものと思われる。

図-4に堤内地における氾濫水の通過流量分布図を示す。上から流量フラックス、家屋密度、水位と地盤高を示している。それぞれA-A'断面、B-B'断面、C-C'断面の通過流量分布を示す。黒く塗った部分は道路を示す。これらの道路上に流量の90%近くが集中して流れていることが分かる。以上の計算結果から、密集市街地では、道路のネットワークを十分に考慮に入れた氾濫計算すなわち計算格子の選び方が必要なことが明らかとなった。30m×30mの格子サイズで同様な計算を行ったが、計算格子の中に占める道路の役割が格子が大きくなるにつれて小さくなっていくため、氾濫水の到達時間が大幅に遅れる。計算格子を大きく選ぶときの道路、家屋を考慮した粗度係数の選び方など検討すべき事は多い。

### 4. 氾濫流制御の試み

#### 4.1 氾濫流の制御方法

超過洪水は避け難いものであり、このような氾濫に対して被害を軽減する危機管理方策を進めていく必要がある。密集市街地の氾濫水被害を軽減するため、また避難などを安全に行うために、速やかに氾濫水を排除することが第一に求められる。ここで検討する対象領域は、堤内地の地盤勾配が大きく川幅が比較的狭い中規模の河川であるため、上流での破堤によりそれより下流の河道の水位が大きく下がることになる。したがって第一義的には、樋管による氾濫水の排水が可能であると考えられる。また堤内地の地形も急で山が近くに迫っているため氾濫水は広範囲には広がらない。そのため比較的簡易な手段で氾濫水を河道に誘導できる可能性がある。対策として樋管、樹林帯の設置、道路のかさ上げを考える。樋管は樹林帯の設置と道路の

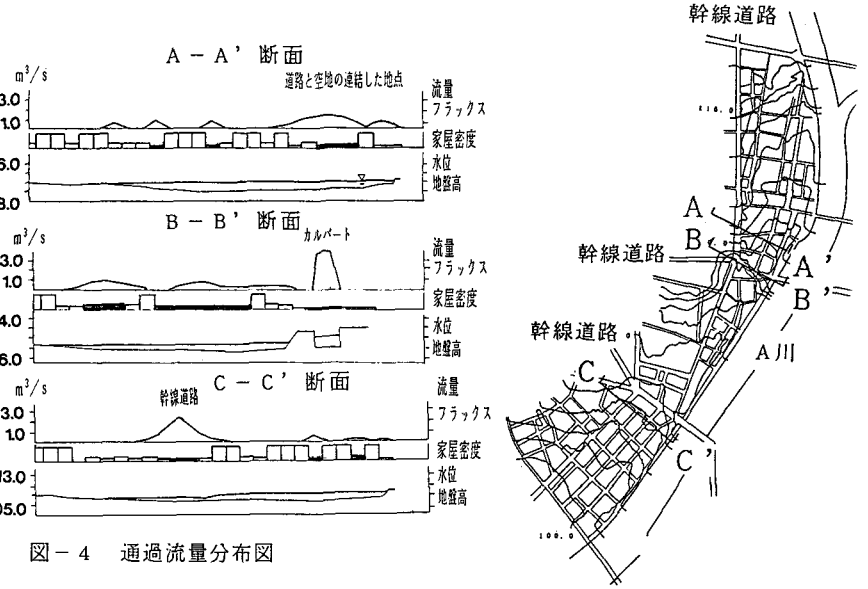


図-4 通過流量分布図

かさ上げで氾濫水を最も効果的に排水できる場所に設置する。この樋管は通常時には使用されず、氾濫時のみ用いる危機管理用樋管として位置づけられる。樹林帯の設置は都市で不足しがちな緑のゾーンを効果的に配置しながら、氾濫流を樋管まで誘導する目的をもつ。樹林帯による氾濫水の樋管への誘導は氾濫水が集中する低い道路部分のかさ上げをおこなうことによって一層効果をあげることが可能と思われる。

#### 4.2 解析結果と考察

樋管、樹林帯の設置、及び道路のかさ上げによる対策によって、堤内地の浸水被害の軽減を2. で示した計算により、検討する。対策後の氾濫計算結果を図-5、図-6に示す。流れが集中する箇所に長さ60m、幅10mの樹林帯をL字型に設置する。同時に道路高の低く水が集中する区間約100mに対して1mのかさ上げを行う。対策後の流速ベクトル

図-5に示す。樹林帯を設置したことにより流れの向きが変わり、道路のかさ上げにより堰上げられた氾濫水が樋管まで誘導され、速やかに排除されていることが分かる。

図-6は対策の前後の氾濫水の水位と氾濫面積を示す。ハッチしてある部分は床上浸水が予想される区域

である。全体の浸水面積は対策前 540,600m<sup>2</sup>から対策後 475,300m<sup>2</sup>と約12%減少し、床上以上の浸水割合も全体の浸水面積の64%から49%に著しく減っている。氾濫流の到達時間を図-7に示す。破堤30分後の洪水の先端は対策前後でほとんど変わらないが、1時間半後には洪水先端は約700mの開きがみられる。対策

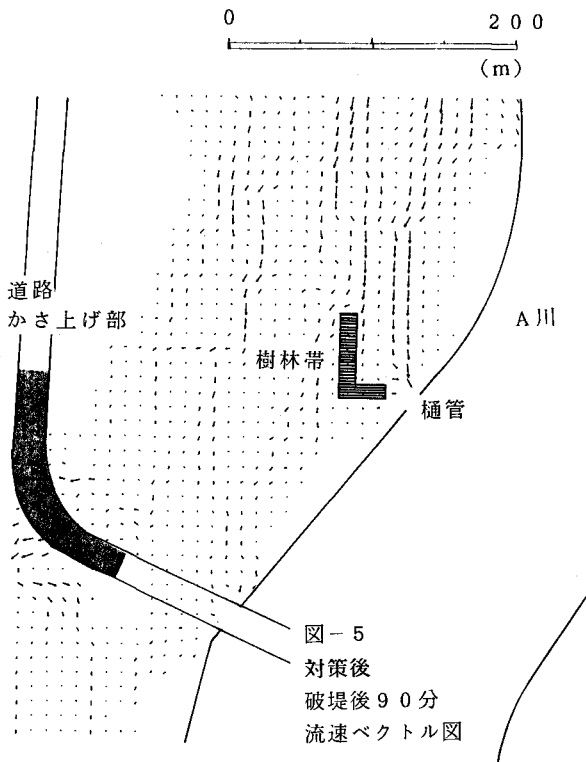


図-5  
対策後  
破堤後90分  
流速ベクトル図

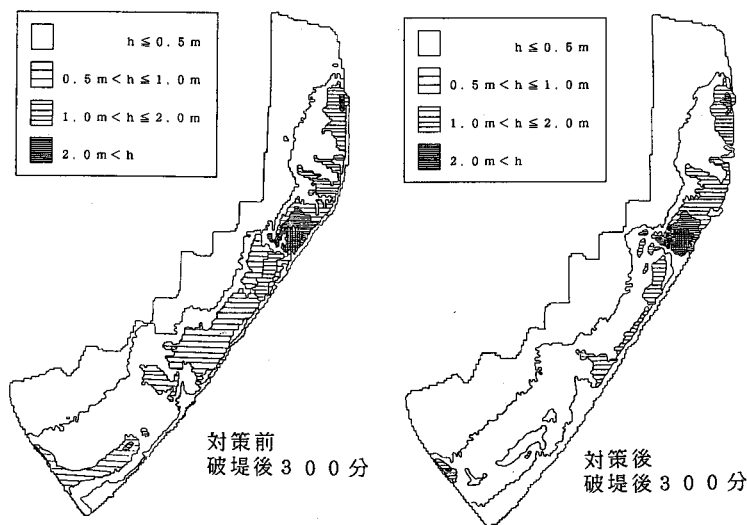


図-6 対策による氾濫水の挙動の変化

後の計算結果では氾濫水が下流端に到達するのは約 3 時間後である。この図から対策後は、到達時間が 1 時間近く遅くなっていることが分かる。以上のことから、このような扇状地を氾濫水が流下するような市街地では、例えばここで述べたような対策を行うことによって被害を軽減すると同時に、氾濫水の到達時間を遅らせ堤内地の住民が避難する時間を稼ぐことが可能である。

## 5. 結論

以上の検討から得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 道路を走る氾濫水を精度よく見積ることが密集市街地の氾濫状況を説明する上で重要となる。このため道路を計算格子の中で適格に表現するために、計算格子を道路サイズに相当する  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  に選び、二次元氾濫計算を行うことによって、密集市街地での洪水氾濫流の挙動をかなりの程度シミュレートすることができた。

(2) 密集市街地を氾濫水が流下する場合には樋管、樹林帯の設置と道路のかさ上げ等により、被害を軽減する事が可能であるという知見が得られた。

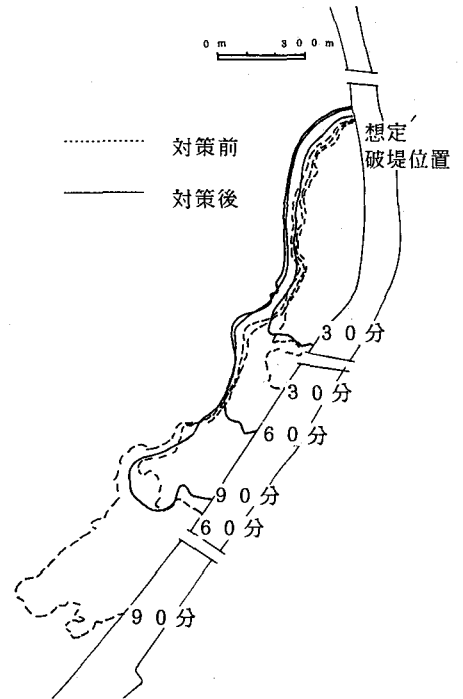


図-7 氾濫水の到達時間の変化

## 6. おわりに

本研究では、二次元不定流計算を用いて、道路、家屋などの地域情報を取り込み、氾濫流のシミュレーションを行った。本計算手法の信頼度を高めていくためにはさらに多くの検討が必要である。

$10\text{ m} \times 10\text{ m}$  の計算格子を選び道路を走る氾濫流を表現できたとしても、氾濫流の挙動をどの程度の信頼性をもって説明し得たのかが明らかでない。不確かな要因としては、①家屋密度の与え方と粗度係数の関係。②道路を走る氾濫水による家屋群と道路の間に生じる見かけのせん断力の評価すなわち境界混合係数の与え方。③混合係数  $\epsilon$  の与え方等について我々が十分な知識を持っていないためである。

これらについては計算条件と同じ地形、家屋配置をもつ大型水理模型を用いて氾濫流の詳細な測定を行い、①、②、③等について検討し、この結果を計算式の中に取り込み、数値計算の信頼性を高めて行くことがまず第一に必要なである。大型水理模型の活用によって、計算格子を大きくとった場合にも、小さい計算格子とほぼ同じ信頼度を与えることが出来るような①、②、③等の決め方についても検討が可能となるであろう。氾濫流の実際の問題を解決するためには、特に後者の立場での検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 岩佐義朗、井上和也、水鳥雅文：氾濫水の水理の数値解析法、京大防災研究所年報、第23号B-2、pp. 305~317、1980
- 2) 中川 一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究、京大大学学位論文、1989
- 3) 国立防災科学技術センター編：豪雨・洪水防災、白亜書房、1987
- 4) 建設省河川局治水課 土木研究所河川研究室：河道特性に関する研究、第40回建設省技術研究会、1987
- 5) 福岡捷二、藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、建設省土木研究所報告第180号の3 pp. 129~192、1990