

実物大車両実験に基づく洪水氾濫時の車両漂流条件の解明

東京理科大学 理工学部土木工学科

東京理科大学 理工学部土木工学科

東京理科大学 理工学部土木工学科

九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系

北見工業大学 工学部地域未来デザイン工学科

二 瓶 泰 雄

小野村 史 穂

柏 田 仁

川 尻 峻 三

吉 川 泰 弘

実物大車両実験に基づく洪水氾濫時の車両漂流条件の解明

Study on vehicle-drift conditions under flood inundation based on full-scale vehicle experiments

二瓶 泰雄¹・小野村史穂²・柏田 仁³・川尻 峻三⁴・吉川 泰弘⁵
Yasuo NIHEI, Shiho ONOMURA, Jin KASHIWADA, Shunzo KAWAJIRI and
Yasuhiro YOSHIKAWA

¹ 東京理科大学工学部土木工学科 教授

² 東京理科大学工学部土木工学科 嘱託特別講師

³ 東京理科大学工学部土木工学科 助教

⁴ 九州工業大学大学院工学研究院建設社会工学研究系 准教授

⁵ 北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科 准教授

要 旨

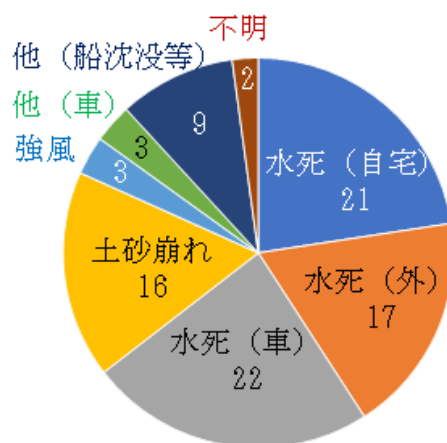
近年、豪雨災害が全国各地で頻発化し、その中で「車中死」の被害は近年の豪雨災害の人的被害の特徴の一つと言える。本研究では、車中死の中でも車移動中の洪水氾濫流による車両漂流に着目し、実物の車両を用いた洪水氾濫流中の車両漂流実験・数値解析を実施し、車両漂流時の水理条件を明らかにすることを目的とする。本研究では、①模型実験、②数値解析、③実車両実験を実施する。過去の実車両実験結果より、流量が大きくなると、車両前後部分に回り込む三次元的な流れよりも、車両下部に潜り込む断面二次元的な流れが卓越することが明らかとなった。また、模型実験として、矩形の車両模型を用いた鉛直二次元断面実験を行ったところ、単位幅流量が大きいケースでは、車両上流側では堰上げが大きく、車両直下では車両模型角部で剥離現象が発生し、水面は一端大きくくぼみ、その後、上昇傾向となることが明らかとなった。これらの模型実験の再現シミュレーションを行い車両下端角部の剥離状況や、その上部における気相塊の形成など、模型実験と類似するパターンが得られた。

《キーワード：車両漂流条件；洪水氾濫；実物大車両実験；数値計算》

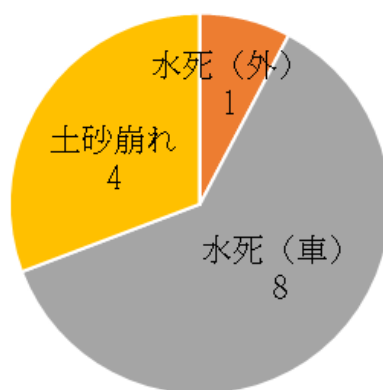
1. はじめに

(1) 背景

近年、豪雨災害の多発により市街地等でも浸水被害が発生している。過去5年間で発生した顕著な豪雨災害は、平成30年7月豪雨（西日本豪雨）や令和元年東日本台風（台風19号）、令和2年7月豪雨が挙げられる。特に、令和元年東日本台風では、東日本を中心に17地点で総雨量500ミリを超え、多くの地点で3, 6, 12, 24時間降水量の観測史上1位の値を更新するなど記録的な大雨となった。また同年10月25日には千葉県、福島県を中心に総雨量200ミリを超える大雨となった。これにより、2019年度では、浸水面積約807km²、被災建物棟数約9.9万棟、被害総額2.15兆円と記録的被害となった。これらの豪雨災害における甚大な人的被害の特徴は、「建物内での被災」と「車で移動中の被害（車中死）」が挙げられる。豪雨災害による人的被害の特徴を図1-1に示す¹⁾。令和元年東日本台風では、死者・行方不明者は93名に達した。このうち、車中死の数は22名にのぼり、屋外における水関連死者数の半数を占めた。令和元年10月25日豪雨では、死者数は13名に達し、そのうち車中死は8名であった。この「車中死」の被害は近年の豪雨災害の人的被害の特徴の一つと言える。



(a) 令和元年東日本台風



(b) 令和元年10月25日の大雨

図1-1 近年の豪雨災害の人的被害状況

この車中死の発生パターンとしては、「アンダーパスにはまってしまうケース」だけでなく、「氾濫流に直接巻き込まれるケース」や「氾濫流の侵食による道路陥没のケース」が主として挙げられる。これらは、通勤等の用事や送迎で外出するケースや避難所等への避難途中であったことが考えられる。車中死防止には不要不急の外出を控えることや早めの水平避難が重要である。これに加え自宅周辺の浸水状

況モニタリングや車で移動することの危険エリアの抽出が必要となる。これまで車中死の中でも「氾濫流に直接巻き込まれてしまうケース」に着目すると、漂流については、既往研究では室内での模型実験が多く行われており、車の漂流限界は実車両換算で水深0.3m～0.5m、流速1.0m/s程度である。

(2) 既往研究の整理

氾濫流による車両の漂流に関する既往研究を整理する。

押川ら²⁾は模型実験により車種別の流出条件を検討した。実験では、長さ2200cm、幅60cm、高さ60cmの直線開水路を使用し、縮尺1/24の小型車・マーチ（日産）とSUV車・ランドクルーザー（トヨタ）の模型を用いた。車両に作用する流体力は三分力計（定格容量500gf）により計測し、計測した流体力 D から車両の抗力係数 C_D を算定している。なお、実験条件は小型車で Re が $4.5 \times 10^4 \sim 22.5 \times 10^4$ の範囲、SUV車で Re が $12.0 \times 10^4 \sim 16.0 \times 10^4$ と大きい。実験から流速が2.0m/sを超えるような非常に速い流れでは、小型車で水深0.3m、SUV車では0.6m弱の水深で漂流することが示された。

戸田ら³⁾は、押川ら²⁾の既往研究の手法を取り入れた模型実験を行い、氾濫流による車両の漂流条件の解明に取り組んだ。使用車種は縮尺1/10のセダン型小型車と縮尺1/18のミニバン（救急車）であった。実験に用いた水路は幅1m、長さ10mの水平水路である。実験は、①サイドブレーキの有無、②車両の向き、③下流堰の有無の3つの条件を変化させて行った。②車両の向きは水の流れに対して 0° 、 45° 、 90° の3パターンである。車の全長を代表長さにとったレイノルズ数の範囲は $2.9 \times 10^4 \sim 12.6 \times 10^4$ である。漂流限界を求める上で、押川ら²⁾と同様に抗力係数と相対水深との関係図を作成し、押川らの結果との比較を行った。求められた抗力係数を基に、漂流する瞬間の流体力と摩擦力のつり合い式を用いると、漂流限界での水深と流速の関係を得ることができる。ここで留意すべきは車両の静止摩擦係数 μ と車両に作用する浮力である。 μ は過去の調査事例等に基づき推定している³⁾。浮力に関しては車の空隙部分を模型の構造から算出しているが、模型では実車両の空隙は正しく再現できていない。結果として氾濫流の流速が2m/sを超え、かつ水深が0.5mを超えると、セダン型の小型車が漂流する危険な状態となることが示された。

押川ら⁴⁾、自動車の漂流に対する既往の模型実験では自動車と流水のなす角度（流向）の影響は十分に検討されていないため、流向を考慮し、かつ部分冠水を対象とした室内模型実験を実施した。その結果、流れを横断するような状況において25cmの冠水でも3m/sほどの極めて速い流速下では車両流失し得ることが示された。

川中ら⁵⁾は、車両漂流シミュレーションモデルの開発を行った。ここで、流れの計算は平面二次元浅水流モデルを採用し、車両は円柱要素の集合として複雑な構造を考慮可能とした。車両の運動には流体力、地面との摩擦力、地形勾配、漂流物内の剪断変形による力、要素の接触力を考慮している。浸水モデルと車両漂流モデルを結合し、模型実験を再現することで精度を検証している。両モデルの結合に際し、車両内部は空洞であると仮定し、浸水計算格子では空隙として考慮している。この結果、模型実験から得られている漂流限界判読図などは再現することができた。漂流タイミングについては模型実験よりも速い結果となったが、これは模型の形状によっては流れの状況次第で水中に潜りこんでしまうため、揚力がダウンフォースとして作用するためであると考察した。

Martínez-Gomariz et al.⁶⁾は、既往の様々な自動車漂流実験のレポートをレビューし、比較した。最も初期の研究は1967年にBONHAM & HATTERSLEY⁷⁾によって行われ、1/25模型を垂直の流れの下で実験した。Keller, R. J., & Mitsch, B.⁸⁾は車と人両方の安定性の理論的研究を行った。車両に関しては深さと速度の関数として理論的な安定性限界を提案した。部分的に水没した車の臨界運動条件に関する実験はShu et. al.⁹⁾によって行われた。そのほかにも我が国の研究者^{2),4)}によって実験が行われた。収集された模型実験の研究結果（漂流限界水深 - 流速の関係）を整理した。このように、既往研究毎に、車漂流発

生時の流速・水深の関係は異なっていた。また、実物実験も行われているが、流水中の実験ではない¹⁰⁾。

以上より、模型実験のみでは、流体力に関わる車両周りの流れや車両の静止摩擦力に影響する車内の浸水状況などを詳細に再現することは難しく、模型実験結果が実車両の漂流判定や車両周辺の流況をどこまで再現できているか不明である。

(3) 目的

本研究では、車中死の中でも車移動中の洪水氾濫流による車両漂流に着目し、実物の車両を用いた洪水氾濫流中の車両漂流実験・数値解析を実施し、車両漂流時の水理条件を明らかにすることを目的とする。本研究の核となる実車両実験は、北見工業大学・オホーツク地域創生研究パークの屋外開水路を使用する。

本研究では、①模型実験、②数値解析、③実車両実験を3年間にわたり実施する。研究体制と本研究の全体像は図1-3に示すとおりである。また、各年度の予定を表1-1に示す。



図1-3 本研究の全体像

表1-1 各年度の研究予定

	1年目	2年目	3年目
①模型実験	基礎的検討	同左	不足データの取得
②数値解析	予備計算	実験の精度検証	漂流実験実施・解析，漂流条件の取りまとめ
③実車両実験	水路整備	漂流実験実施	

2. 実車両実験

(1) はじめに

実車両実験としては、今年度は車両を使わずに通水のみでの予備実験を行う予定であった。ただし、使用予定であった北見工業大学・オホーツク地域創生研究パークの屋外開水路の都合で、水路を使える状況ではなかった。そのため、今年度は、研究代表者らが2021年度に実施した実車両の漂流実験の結果について整理した結果を以下に示す。

(2) 実験方法

1) 実験水路・実験条件：

実験で用いる実車両は5人乗りコンパクトカー・コルト（三菱，全長3.90m，全高1.55m，全幅1.68m，重量1,010kg）である。水路は北見工業大学所有の屋外開水路（長さ70m×幅3m×深さ0.3m，勾配1/100）を借用した（図2-1）。車両を流下方向に対し垂直に置くため，上流端からの流下距離 $X=32\sim 48\text{m}$ まで幅5.0m，深さ0.9mに拡大し，侵食防止用に鋼板で舗装した。車両設置位置（ $X=38\text{m}$ ）の前後2.0m区間の底面のみアスファルト舗装を施した。下流槽から災害用排水ポンプ車（ポンプ4基/台×2台）を用い上流槽に水を循環させて通水し， $X=50\text{m}$ に土嚢を用いた堰を設置し水位を調節した。実験の様子を図2-2に示す。実験条件は表2-1に示す通り，稼働ポンプ基数と堰高さにより計6ケースを行った。なお，Case1-3ではポンプ出力は7割である。車両全長を代表長さとした Re は $1.68\times 10^5\sim 1.75\times 10^6$ と大きい。

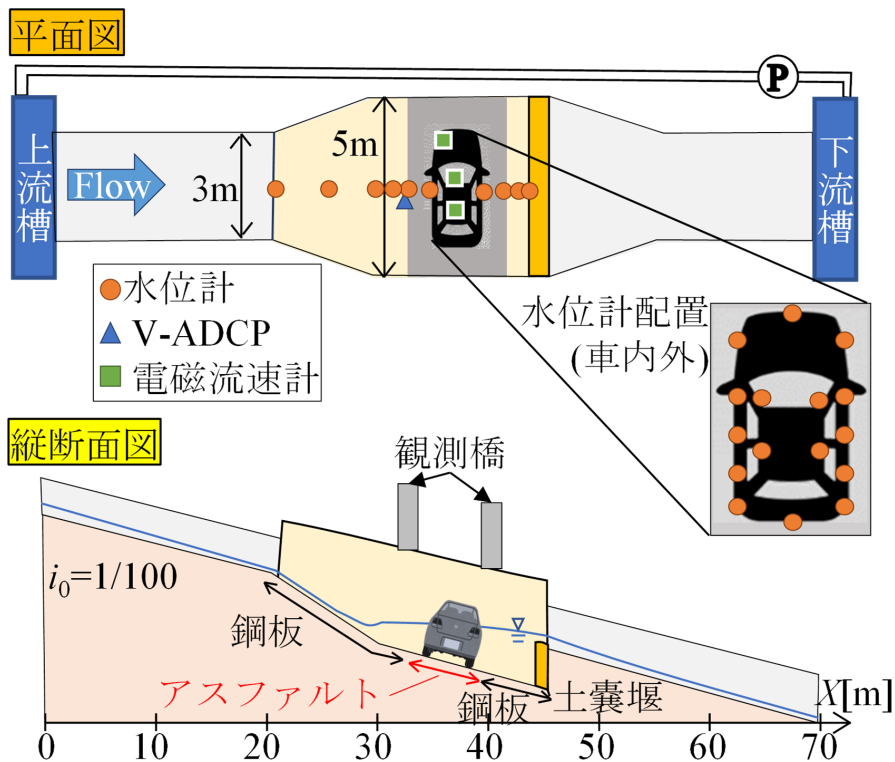


図2-1 実験水路の平面・縦断面図



図2-2 実験の様子 (Case6)

表2-1 実験ケース

Case	ポンプ	堰高さ [m]	Re($\times 10^5$)	解析区間
1	2基*	0.4	3.0	9:34:00 ~9:40:30
2	4基*	0.4	2.4	9:49:00 ~9:56:00
3	6基*	0.4	1.7	10:03:00 ~10:09:00
4	8基	0.4	4.6	10:43:00 ~10:49:00
5	8基	0.3	17.5	11:11:00 ~11:12:00
6	8基	0.5	12.3	11:49:40 ~11:49:50

*ポンプ出力7割

2) 計測方法 :

計測項目は水深と流速，流量である．水深には水位計（U-20 Water Level Logger，Onset社製）を，縦断方向10（水路中央），車両回り12，車内4地点に設置した．固定流速計測にはV-ADCP1台，電磁流速計（Compact-EM，JFEアドバンテック㈱製）3台を各々車両上流・車両下に設置した．上流観測橋にて電磁流速計（LP-40，㈱ケネック製）により横断方向0.5m間隔，5地点の流速を測り，流量を求めた．これらの結果を用いて流体力なども算出した．

(3) 実験結果と考察

1) 車両周辺の水位・流速分布特性 :

実験状況を調べるため，ポンプ出力最大としたCase4-6の水位縦断分布を図2-3に示す．これより，本条件では急勾配水路であり，3ケース共に $X > 25\text{m}$ の水面形は S_1 曲線となり，車両前後では堰上げの影響を受けている．車両前後の水位差は，Case4では下流側水位が上流より高いが，流量が大きなCase5・6では上流側水位が高い．

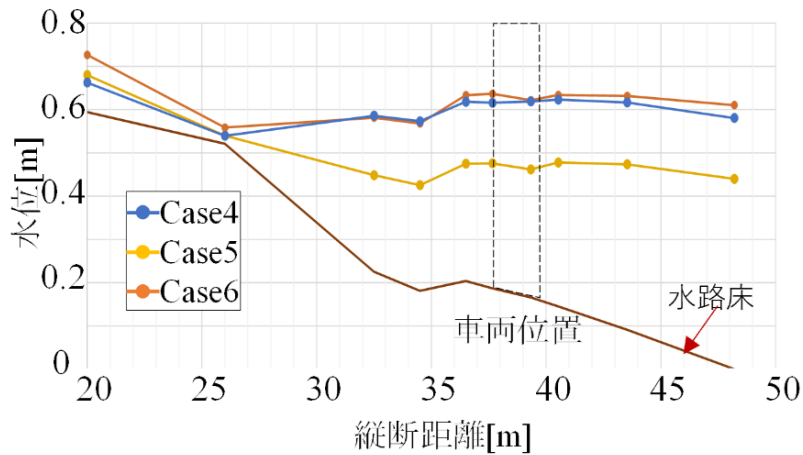


図2-3 Case4～6における水位縦断分布

車両周辺の流況として、車両下の流速 v_b 、車両上流水深 h_{up} 、全流量 Q_{all} を図2-4に示す。流量は車両下分 Q_b と車両前後方分 Q_{side} に分ける。これより、全流量はCase5, 6で各々 $0.79, 0.88\text{m}^3/\text{s}$ であり、ポンプ性能の最大値に近い。流量配分としては、流量が小さいCase1-3では Q_{side} が卓越するが、流量が増えるCase4-6では Q_b が大きい。これらの変化は車両下の流速 v_b と対応し、車両と路面の間では 1m/s 程度の高流速が発生したことが明らかとなった。このような状況を模型実験での再現は難しく、実車両実験により得られた知見の一つと言える。以上より、流量が大きくなり、車両周辺の水深が大きくなり車両下部が浸水するようになると、車両前後部分に回り込む三次元的な流れよりも、車両下部に潜り込む断面二次元的な流れが卓越することが明らかとなった。実車両実験では、三次元性を考慮すべきところであるが、このような断面二次元性が顕著であれば、室内模型実験では断面二次元性を考慮した実験条件で十分と言える。

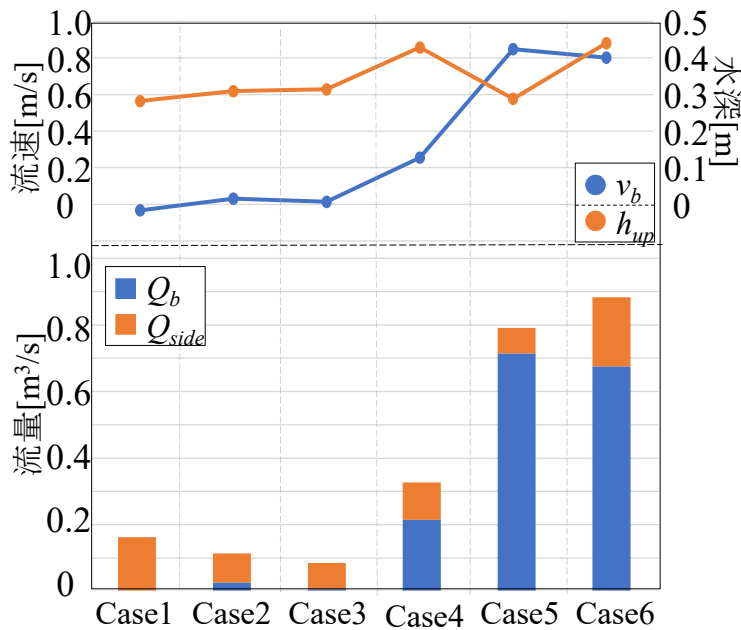


図2-4 全ケースの流量と車両下流速 v_b 、上流側水深 h_{up}

2) 車両に作用する流体力評価：

流量が最大規模のCase5・6にて得られた流体力 D と静止摩擦力 F を検討した。これより、流体力評価

値は、Case5では126～147N、Case6では87～142Nとなった。これより、基本的には壁面摩擦力が全圧力よりも大きく、かつ、流量配分と連動して、壁面摩擦力の中では車両下の摩擦力が顕著であった。また、流体力と摩擦力を比べると、摩擦力が流体力よりも1オーダー大きく、その結果、本実験では車の漂流が発生しなかったものと考えられる。

さらに、車内浸水状況により摩擦力評価が大きく変化し、車内浸水状況の解明は重要な課題である。得られた流体力から抗力係数 C_D を算出した結果を図2-5に示す。ここでは、相対水深 h/k (k :車高)との関係を、模型実験結果と比較した。本実験結果はばらつきが大きいのが、 $C_D=1.0\sim 4.0$ の範囲であることや C_D が相対水深 h/k と共に小さくなるなど、模型実験と近い結果となり、本実験結果やデータ解析方法の一定の妥当性が確認された。

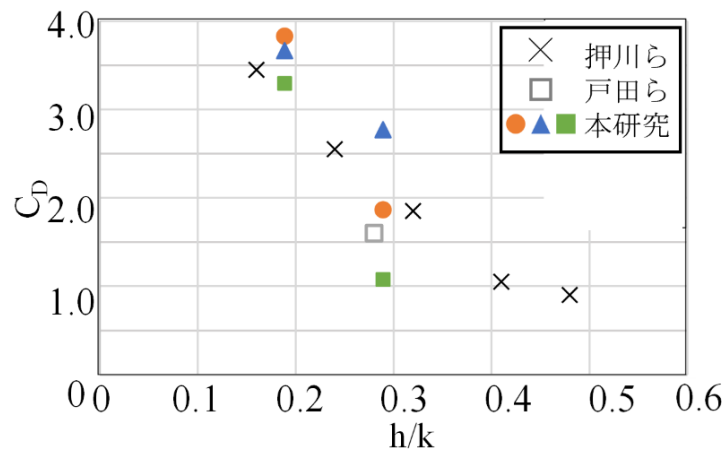


図2-5 相対水深と抗力係数の関係

3. 模型実験

(1) 模型実験の概要

2021年実車両漂流実験では、車両の流出は生じなかったものの、車両下に多くの流量が集中する断面二次元的な流況となっていることが明らかとなった。この知見を活かし、断面二次元的な状況を再現し、車両下部のみを流れる状況を想定した模型実験を実施する。

模型実験では、長さ400[cm]、幅20[cm]、高さ40[cm]の小型水平開水路（東京理科大学所有）を用いる。2章で用いた車両は、高さ155cm、長さ168×390cm、最低地上高21.6cmであった。本模型実験では、縮尺 $\lambda=1/4$ を採用し、最低地上高は5.0cm、車両を横向きにすることを想定するため長さは42cm×水路幅(=20cm)とした。車両模型としては、車両下部の流れを再現することが目的であるため、直方体の発泡スチロールを選定した。ここでは車両流出を考慮しないため、簡易に直方体模型が作製可能でかつ軽い部材である発泡プラスチックを用いた。この時、車両全体が同じ粗度となるように防水アルミテープで覆った。これを上記の水平開水路内に設置した（図3-1）。模型車両の留め具として、車両模型を上下流側挟み込む形となるようにL字金具を装着する。なお、L字金具の厚さが0.2cmであるため、左右側面で設置することを踏まえると、車両模型の幅は19.6cm(=20.0cm-0.2cm×2)となる。車両模型及びその設置状況を図3-2に示す。

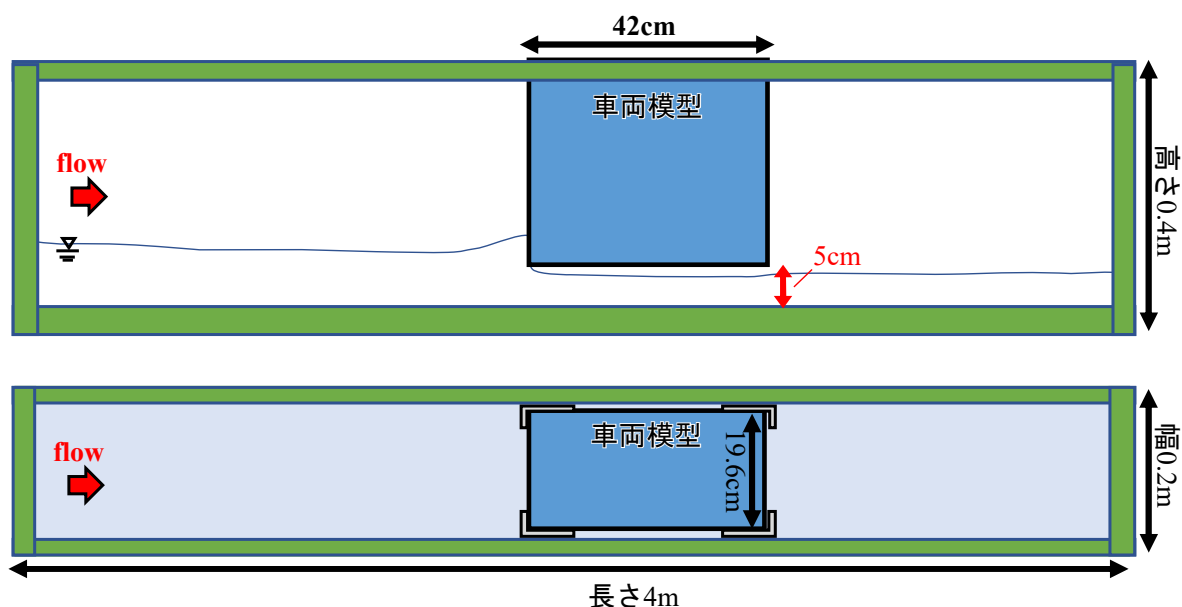
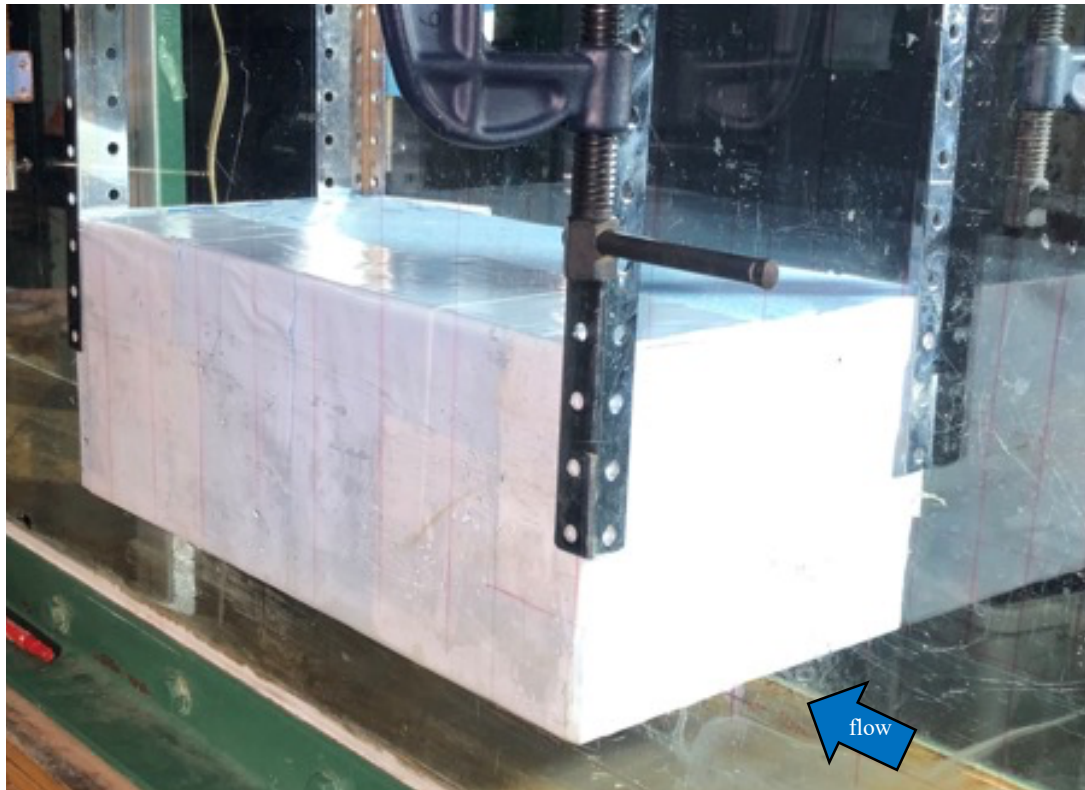
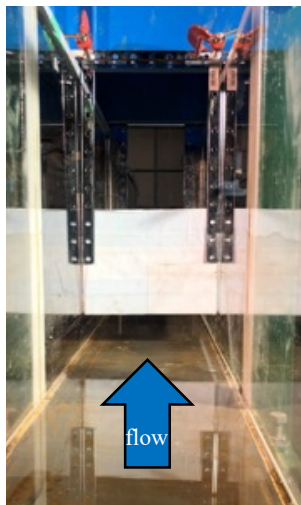


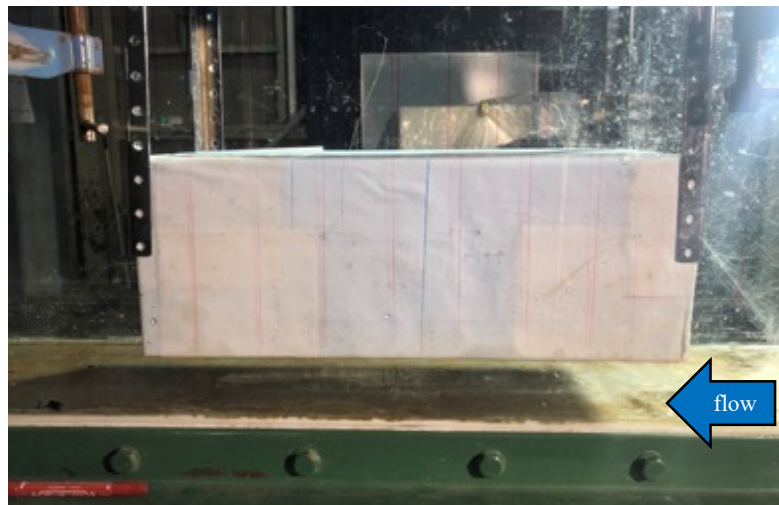
図3-1 跳水水路への車両模型の設置状況（上：断面図，下：平面図）



(a) 斜め上流より



(b) 上流より



(c) 側面より

図3-2 車両模型の設置状況

(2) 水理条件と計測

本実験では、表3-1に示すように、4ケースの流量を設定した (CaseM1-M4)。ここで、表中のハンドル回転数 n とは、ポンプの開閉状況に相当している。この流量の選定方法としては、水表面が車両模型下端に当たらない条件で1ケース (CaseM1) を基本とする ($n=3$)。水表面が車両模型と接する流量となつてからは、ハンドル回転数を1つずつ増やして ($n=4, 5, 6$)、流量を徐々に増加させるケースを設定した (CaseM2, M3, M4)。なお、水路下流端の堰は下げたままとして、下流端では段落ち流れとなつている。

表3-1 模型実験における流量条件

ケース名	ハンドル回転数 n	流量 Q [m ³ /s]	限界水深[m]
CaseM1	3	0.003892	0.034
CaseM2	4	0.006124	0.046
CaseM3	5	0.008020	0.055
CaseM4	6	0.009696	0.062

模型実験における計測として、上流端流量は、流量検定堰（三角堰）の越流水深をポイントゲージで計測して算出した。なお、その際、水位の変動を考慮し最大値・最小値を計測し、平均値の越流水深を用いた。水深は、水路左右側面からL字定規を用いて計測した。水深の最大値・最小値を計測し、平均値を採用した。水深計測としては、上流端からの距離 $x=0.20\sim 1.20\text{m}$ は 0.20m 間隔、 $1.20\sim 1.60\text{m}$ は 0.10m 間隔、 $1.60\sim 2.60\text{m}$ は 0.05m 間隔、 $2.60\sim 3.40\text{m}$ は 0.20m 間隔で計測した。また、ビデオカメラを上部、側面に設置し、流況を撮影した。

(3) 実験結果

1) 各ケースの水面形の特徴：

まず、各ケースの全体的な流況を把握するために、全ケース（CaseM1-M4）における水深の縦断分布を図3-3、図3-4に示す。ここで、水面形は水路の左右側面において計測したため、それぞれの結果が図示されている。これより、まず、CaseM1では、車両模型下端よりも水位（水深）は下回るが、限界水深を上回っている。水深は流下方向に緩やかに減少しており、水平開水路漸変流におけるO2の水面形となっている。次に、CaseM2では、水表面は車両模型下端に達しており、車両模型上流側で堰上げされ、車両模型下端部分の水面形は車両下端に接して（水深がほぼ最低地上高）、直線的に流下していた。また、車両下流側では、水位は車両下端よりも大きくなっており、CaseM1と同様にO2の水面形となっていた。

一方、CaseM3では、CaseM2同様に、車両上流側では堰上げが大きくなっており、車両下端よりも5cm以上（水深10cm以上）に達した。また、車両直下では、図中の車両模型左下角部において剥離現象が発生し、水面は一端大きくくぼみ、その後、上昇傾向となり、そのまま車両下流側へと続いており、車両下流側ではO3の水面形が形成されていた。これらの水面形は、スルースゲートの開度（底面とゲート先端の間の高さ）が限界水深以下の場合によく見られるものと一致する。

さらに流量を増加させたCaseM4では、車両上流側の堰上げ高さは9cm（水深14cm）以上に達した。また、車両下部における剥離も生じ、そこで見られる水面のくぼみもCaseM3より大きい。これは、単位幅流量（＝流速）が大きいと、流線の曲率に伴う遠心力が増加し、流線がより大きく曲がり、結果として水面のくぼみも大きくなっている。その下流側では、CaseM3同様に大きく波打ちながら、O3の水面形を形成している。なお、右側面と左側面における水位は必ずしも一致していないことは全ケースで共通して見られる。これは、主として計測方法に問題があり、より多くの水位データを収集して平均化する必要がある。

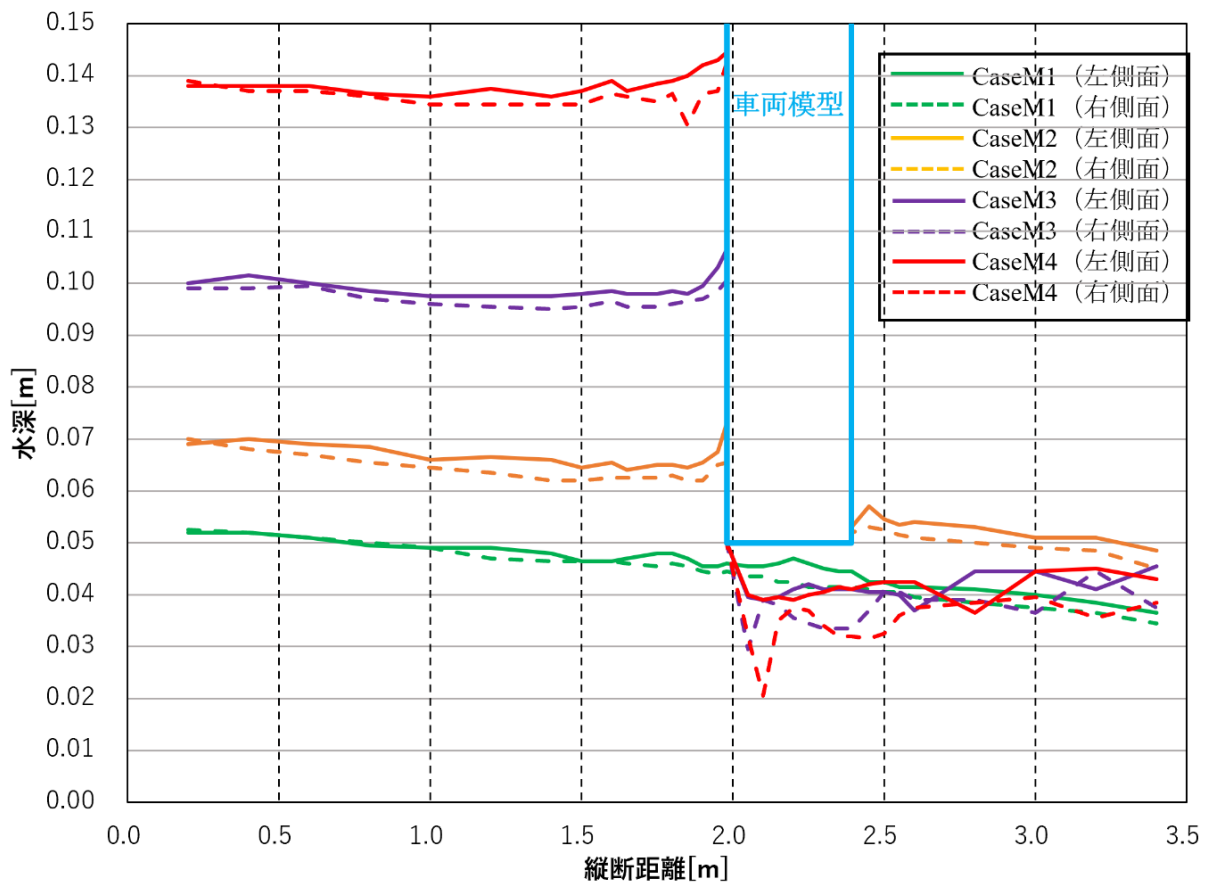
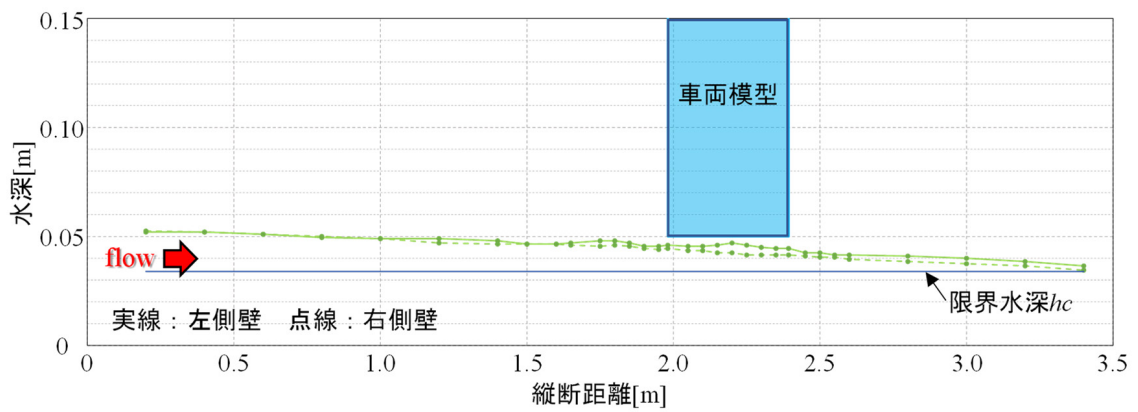
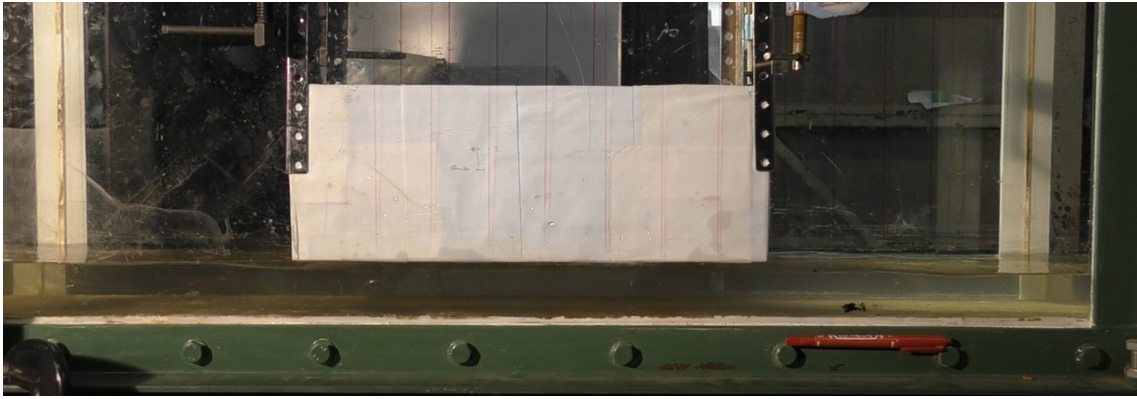


図3-3 全ケースにおける水深縦断分布

なお、以下では、全ケースの実験時の様子（写真）と水面形を個別に図3-4に示す。水面形に関しては、各ケースの単位幅流量から求めた限界水深 h_c も図示している。

<CaseM1>



<CaseM2>

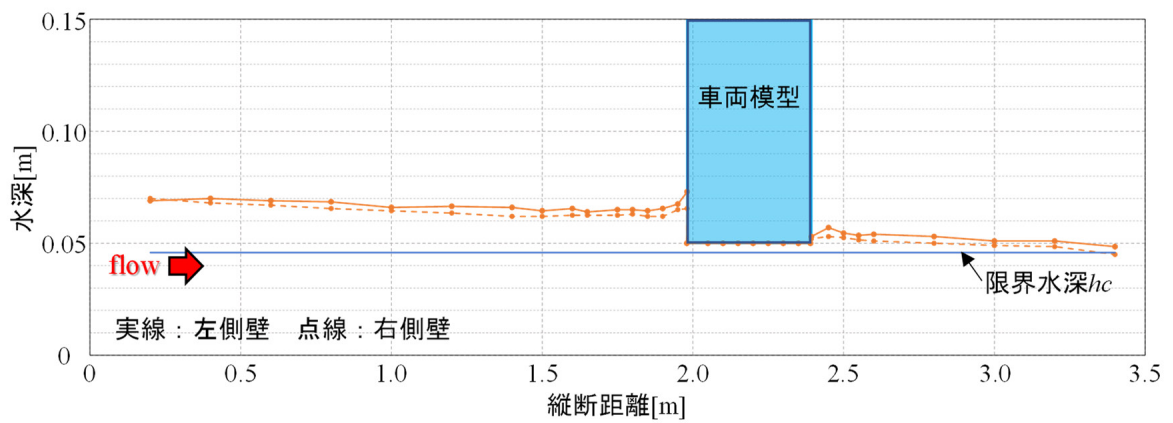
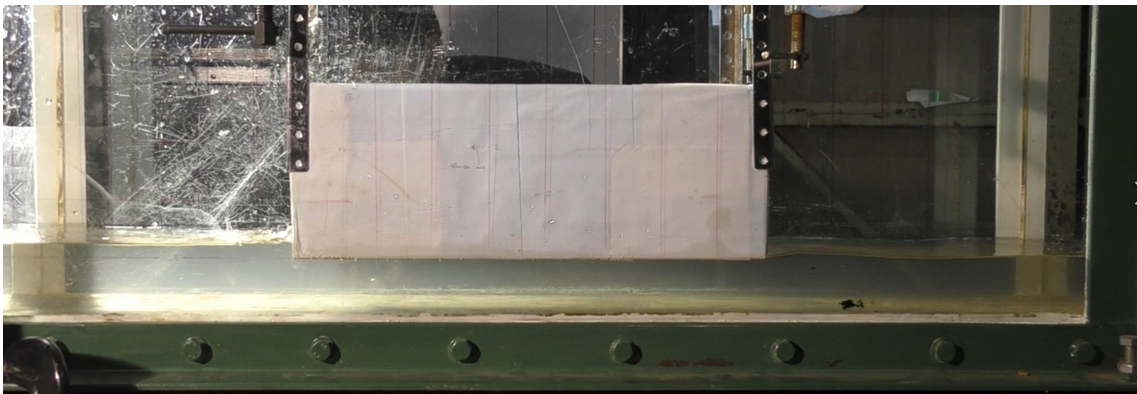
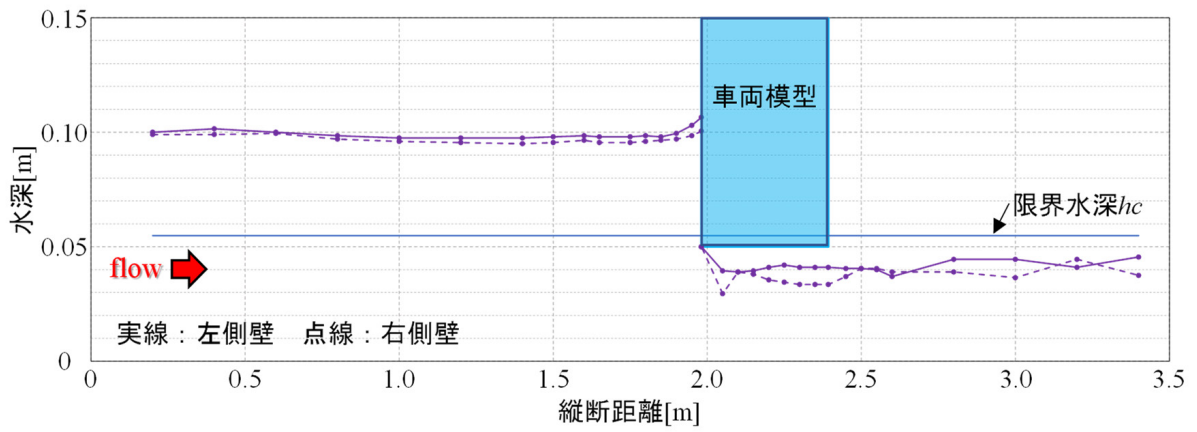
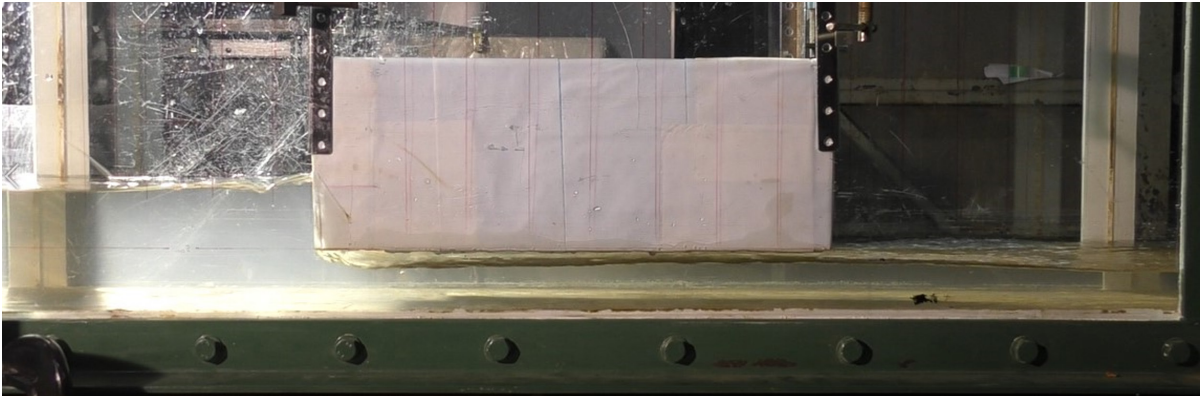


図3-4 各ケースの流況（上，側面写真）と水深縦断分布（下）

<CaseM3>



<CaseM4>

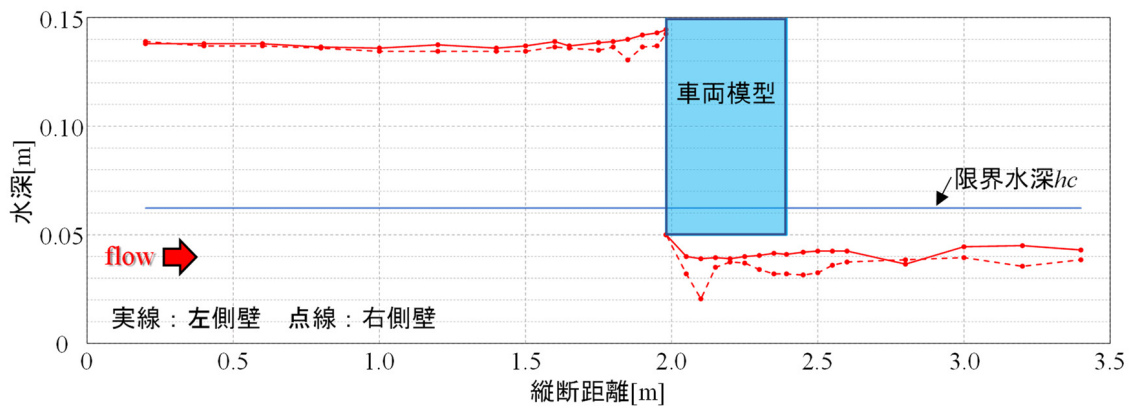
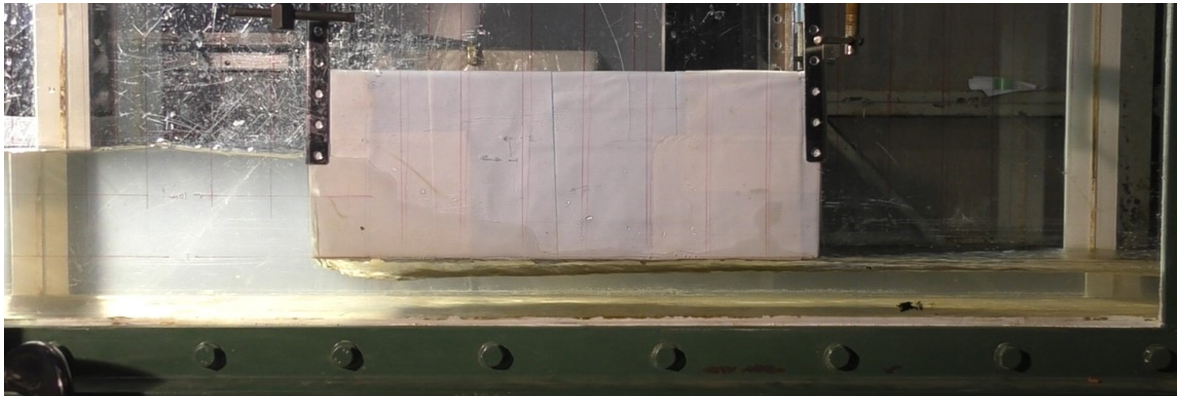


図3-4 各ケースの流況（上，側面写真）と水深縦断分布（下）（続き）

2) 車両下端角部における剥離現象：

前述したように、CaseM3, M4では、車両下部角部において剥離現象が発生していた。この近傍では、特徴的な渦・気泡挙動が見られており、その様子を図3-5に示す。ここでは、CaseM3,M4において、車両下部角部周辺の様子を拡大して表示している。これより、両ケース共に、車両上流側において、一種の吸い込み渦が形成されていることが伺える（図中赤丸）。その吸い込み渦は、車両下部角部の剥離域周辺にまで伸びており、一部の気泡が剥離流れに沿って輸送されている様子も見られる。このような吸い込み渦の様子より、剥離域周辺における圧力低下が生じており、車両周りの流れ場は複雑な流動構造を有することが示唆された。なお、本実験で用いた車両模型は矩形形状であり、実際の複雑な境界形状を有する車両とは大きく異なっている。これらの違いは、特に剥離渦の発生に大きな影響を及ぼすため、境界形状の違いによる影響については今後検討する必要がある。

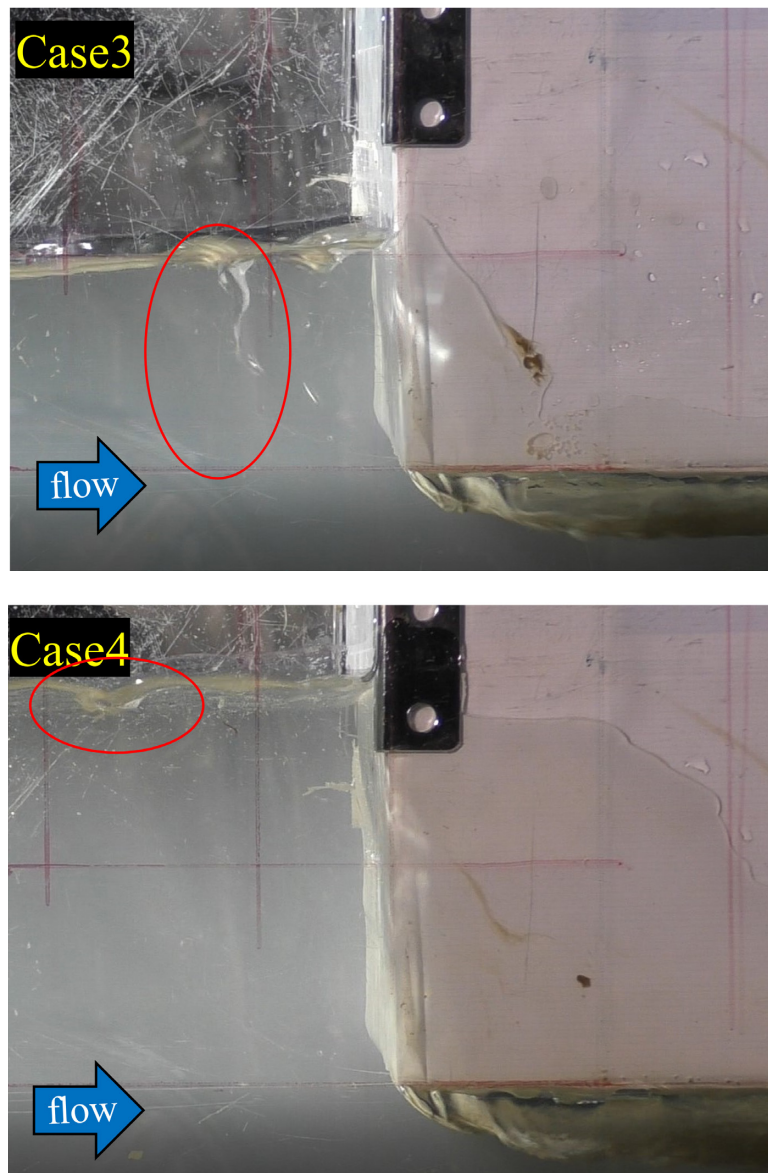


図3-5 車両模型下端角部における剥離の様子（上：CaseM3，下：CaseM4）

4. 数値解析

(1) 計算手法の概要

車両周りの複雑な流動現象を精緻に計算可能な計算手法として、GAL (Grid-Averaged Lagrangian)-LES (Large Eddy Simulation) モデル¹¹⁾ をベースに構築した移動境界流れ解析法¹²⁾ を採用する。具体的な基礎方程式系としては、非圧縮性を仮定して、液相・気相における連続式とNavier-Stokes方程式とする。

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_k = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial t} + (\mathbf{u}_k \cdot \nabla) \mathbf{u}_k = -\frac{1}{\rho_k} \nabla p_k + \frac{\mu_k}{\rho_k} \nabla^2 \mathbf{u}_k + \mathbf{g} n_g \quad (2)$$

ここで、下付きの添え字 $k(=1,2)$ は第 k 相の諸量を表しており、ここでは、 $k=1, 2$ をそれぞれ液相、気相とする。また、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 p は圧力、 ρ は密度、 μ は粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度、 \mathbf{n}_g は重力作用方向の単位ベクトルとする。なお、乱流モデルはここでは簡単のため組み込んでいない。

気液界面における境界条件としては、運動学的境界条件と力学的境界条件を取り扱う必要がある。運動学的境界条件に関しては、通常 of 体積追跡法と同様に、以下のような体積濃度関数の F 輸送方程式を解くことにより満足されることになる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) F = 0 \quad (3)$$

この体積濃度関数は各セルに定義されたスカラー量である。ここでは、気相、液相での F をそれぞれ 0, 1 とし、 $F=0.5$ となる位置が気液境界面となる。この輸送方程式の数値解法として、本手法では GAL モデルを用いる。また、力学的境界条件に関しては、表面張力を考慮することは可能であるが、ここでは無視して、界面上において気相と液相の圧力を等しいとする。また、速度に関する境界条件としては、液相速度を気液界面を挟んで外挿するように設定している。こうすることにより、界面上における質量のとび条件を満たすとともに、境界条件の取り扱いに伴う数値的不安定性を防ぐことが可能となる。

数値解法としては、MAC法と類似した部分段階法 (fractional step method)¹³⁾ に基づいており、矩形格子のスタガードメッシュ系を採用している。 $n+1$ ステップにおける流速 \mathbf{u}_k^{n+1} と圧力 p_k^{n+1} を求める際には、まず、第一段階として、式 (2) より圧力項を除いた式を用いて、仮速度 $\tilde{\mathbf{u}}_k$ を求める。

$$\tilde{\mathbf{u}}_k = \mathbf{u}^n - \Delta t \left((\mathbf{u}_k \cdot \nabla) \mathbf{u}_k - \frac{\mu_k}{\rho_k} \nabla^2 \mathbf{u}_k - \mathbf{g} n_g \right)^n \quad (4)$$

ここで、 Δt は計算時間刻み幅である。第二段階としては、圧力項と連続式 $\nabla \cdot \mathbf{u}_k^{n+1} = 0$ を用いて、以下のような圧力のポアソン方程式を導き、圧力 p_k^{n+1} を算出する。

$$\nabla^2 p_k^{n+1} = \frac{\rho_k}{\Delta t} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}_k \quad (5)$$

第三段階としては、上式から得られた圧力 p_k^{n+1} を用いて、次式のように流速場を修正する。

$$\mathbf{u}_k^{n+1} = \tilde{\mathbf{u}}_k - \frac{\Delta t}{\rho_k} \nabla p_k^{n+1} \quad (6)$$

なお、上式中の空間差分項に関しては、移流項は3次風上差分で、その他の項は2次精度の中央差分によりそれぞれ差分化されている。また、式 (5) の圧力に関するポアソン方程式には、界面の境界条件を

各相共に満たさなければならない。そこで、移動境界における圧力条件を精度良く与えられるように、ここではirregular star法¹⁴⁾を適用している。

(2) 計算条件

本モデルを用いて、3章で示した模型車両の流況再現シミュレーションを行った。ここでは、図4-1に示すとおり、全長350cm、高さ39cmの鉛直2次元場を計算領域とし、上流側から200cmの位置に矩形の車両模型を配置する。計算格子数は350×39、格子幅は1.00cm×1.00cm、計算時間間隔 Δt は0.0010sである。流量条件としてはCaseM3である。ここでは、前述したように、液相（水）と気相（空気）の挙動を両方ともに解析するため、初期の液相・気相位置は図4-1に示すとおりである。また、初期流速分布に関しては、液相のみ対数分布を与え、気相は流速0としている。液相流速の境界条件としては、上流端では流入流速を対数則で与え、下流端では勾配0（ノイマン条件）、上面と底面にはそれぞれSlip condition, No-slip conditionを与えた。気相流速の境界条件として、流入流速は0で、その他は液相と同じである。圧力の境界条件について、液相・気相ともに上流端・下流端には勾配0（ノイマン条件）を施している。

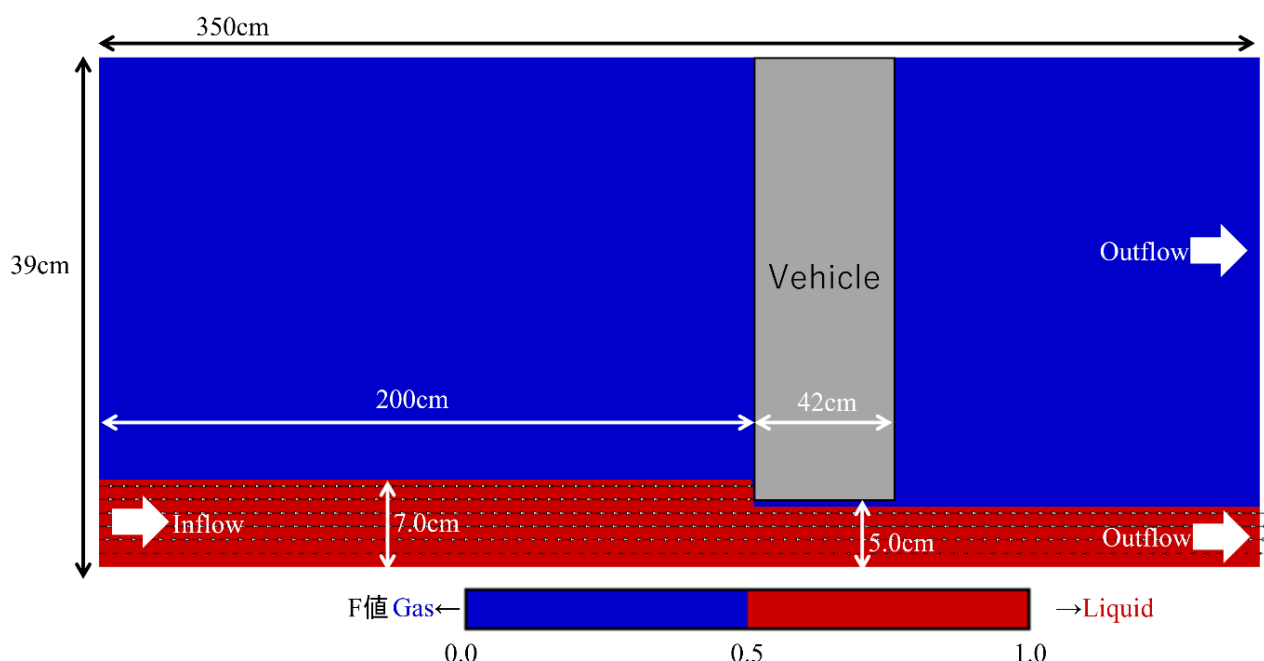


図4-1 計算領域における車両配置及び水路条件、液相・気相濃度・流速の初期条件

(3) 計算結果

本モデルによる模型実験の再現シミュレーション結果の一例として、液相・気相の濃度を示すF値のコンター及び流速ベクトルを図4-2に示す。ここで、F値コンターとしては、0.5以上を液相、0.5未満を気相としており、2色で図示している。また、車両模型下端周辺の拡大図も表示している。なお、ここでは、計算開始2.1s後の結果と共に、CaseM3における水面形の実験値も表示している。これらの結果より、車両上流側の堰上げや車両下端角部での剥離現象などを再現できており、本解析の一定の有効性が確認される。ただし、水面形を実験値と解析値とで比較すると、上流側は概ね再現できているが、車両下側や下流側では一致しておらず、今後の課題と言える。ただし、車両下端角部の剥離状況や、その上部における気相塊の形成など、模型実験と類似するパターンが得られた。また、車両下流側における界面（水表面）の揺動についても、模型実験同様に見られた。

現時点は、移動境界解析に手を付けたばかりで、十分な解析結果とはいえないが、今後は、より計算

条件（初期，境界条件を含む）を正確にしつつ，解析モデルの精緻化を図り，車両周辺の複雑な流況の再現性向上に努める予定である。

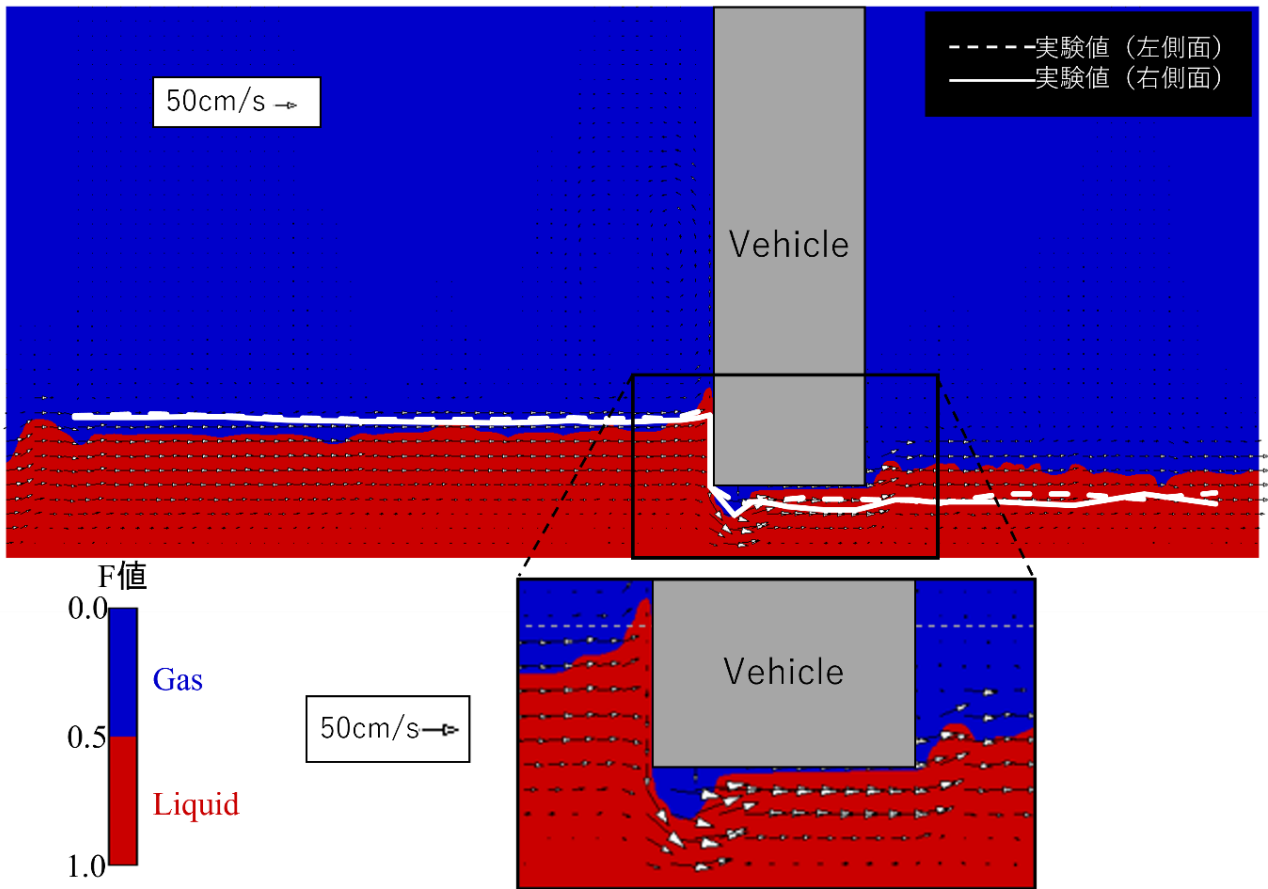


図4-2 模型実験再現計算結果（F値コンターと流速ベクトル，計算開始2.1s後）

5. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 過去の実車両実験結果より、流量が大きくなると、車両前後部分に回り込む三次元的な流れよりも、車両下部に潜り込む断面二次元的な流れが卓越することが明らかとなった。このように断面二次元性が顕著であれば、実験では断面二次元性を考慮した実験条件で十分と言える。
- 2) 模型実験では、矩形の車両模型を用いた鉛直二次元断面における4ケースの水理実験を行った (CaseM1-M4)。CaseM1では、車両模型下端よりも水位 (水深) は下回り、O2の水面形となった。CaseM2では、水表面は車両模型下端に達し、車両模型上流側で堰上げされると共に、車両下流側では水位は車両下端よりも大きくO2の水面形となっていた。CaseM3では、車両上流側では堰上げが大きくなっており、車両直下では、車両模型角部で剥離現象が発生し、水面は一端大きくくぼみ、その後、上昇傾向となり、車両下流側ではO3の水面形が形成されていた。さらに流量を増加させたCaseM4では、車両上流側の堰上げ高さはさらに増え、車両下部における剥離も生じた。この時の水面のくぼみがCaseM3より大きいのは、流速増加により流線の曲率に伴う遠心力が増加したためである。CaseM3, M4における水面形は、スルースゲートの開度限界水深以下の場合によく見られるものと一致している。
- 3) 液相・気相の移動境界解析モデルを用いて、模型実験の再現シミュレーションを行った。その結果、水面形を実験値と解析値とで比較したところ、上流側は概ね再現できているが、車両下側や下流側では一致していなかった。ただし、車両下端角部の剥離状況や、その上部における気相塊の形成など、模型実験と類似するパターンが得られた。また、車両下流側における界面 (水表面) の揺動についても、模型実験同様に見られた。

現時点は、移動境界解析に手を付けたばかりで、十分な解析結果とはいえないが、今後は、より計算条件 (初期、境界条件を含む) を正確にしつつ、解析モデルの精緻化を図り、車両周辺の剥離状況などの複雑な流況の再現性向上に努める予定である。

参考文献

- 1) 遊佐望海, 槍澤菜々子, 太田皓陽, 伊藤毅彦, 尾形勇紀, 小野村史穂, 二瓶泰雄: 平面二次元氾濫解析に基づく車中死発生時の洪水氾濫・車両流失状況の検討, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.77, No.2, pp.L1441-L1446, 2021.
- 2) 押川英夫, 大島崇史, 小松利光: 冠水時の自動車通行の危険性に関する研究, 河川技術論文集, Vol.17, pp.461-466, 2011.
- 3) 戸田圭一, 石垣泰輔, 尾崎平, 高垣裕彦, 西田知洋: 氾濫時の車の漂流に関する模型実験, 京都大学防災研究所年報, Vol.55, B, pp.493-499, 2012.
- 4) 押川英夫, 大島崇史, 橋本彰博, 大串浩一郎, 小松利光: 流向を考慮した洪水氾濫時の自動車走行の危険性に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.L1519-L1524, 2018.
- 5) 川中龍児, 米山望, 石垣泰輔: 水災害時の車両漂流シミュレーションに関する研究, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.72, No.2, pp.L557-L564, 2016.
- 6) Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2018). Stability criteria for flooded vehicles: a state-of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S817-S826. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12262>
- 7) BONHAM, A., & HATTERSLEY, R. (1967). Low level causeways, University of New South Wales, Australia. Water Research Laboratory, Technical Report, 100.

- 8) Keller, R. J., & Mitsch, B. (1993) . Safety aspects of the design of roadways as floodways. Urban Water Research Association of Australia.
- 9) Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2011) . Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of hydraulic research*, 49 (6) , 709-717.
- 10) Smith, G. P., Modra, B. D., & Felder, S. (2019) . Full - scale testing of stability curves for vehicles in flood waters. *Journal of Flood Risk Management*, 12 (S2) , e12527. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12527>
- 11) Nadaoka, K., Nihei, Y., and Yagi, H. : Grid-averaged Lagrangian LES model for multiphase turbulent flow, *International, J. Multiphase Flow* 25, pp.1619-1643, 1999.
- 12) 二瓶泰雄・灘岡和夫 : GALモデルに基づく移動境界流れ解析法の構築とその応用, 土木学会論文集, No.642/II-50, pp.19-30, 2000. DOI:https://doi.org/10.2208/jscej.2000.642_19.
- 13) 大宮司久明, 三宅裕, 吉澤徹編 : 乱流の数値流体力学, 東京大学出版会, pp.65-81, 1998.
- 14) 数値流体力学編集委員会編 : 移動境界流れ解析, 東京大学出版会, pp.39-43, 1995.