

佐藤宏明氏博士論文審査報告書

近年、全国各地で洪水氾濫が頻発し、貴重な生命・財産が失われている。堤防の決壊等による被害を軽減し、良好な河川環境空間を維持し、国民生活の「安全・安心」を確保するためには、出水の状態、河川管理施設や河川の状態、河川環境の状況等に対応した的確な河川管理を継続的に行わなければならない。

現在の洪水防御計画は、戦後多発した大水害に対する国土基盤整備として、多くの河川管理施設の設置等ハード整備が中心であった。今、それらが続々更新時期を迎えている。しかしながら現状は、予算縮減の中、限られた人員、体制での河川維持管理を行わなければならない。このような環境の下、最大の効果を上げる河川改修・河川管理を行うことが課題となっている。

特にハード整備に関しては、現在の河道は洪水流のピーク流量を安全に流下させることを目的として、洪水流痕跡を用いた定常不等流解析すなわち準二次元解析法を基に計画されてきた。洪水流のピーク流量の管理はもちろん重要であるが、我が国の河川はそのほとんどが整備途上の河川である。このような整備途上の河川にあっては、中小洪水時の河川の維持管理が重要であり、災害を受けた洪水流現象の原因解明や維持管理には必ずしも準二次元解析法は、有効なかいせきほうになりえていない。また、河川の分合流部、整備保全が必要な植生が繁茂している区間、潮位変化の大きい河口域などでは、洪水位の時間的な変化が水理現象を支配する河川区間にあっては非定常流としての洪水流の実態に即した解析が必要となる。また、河川管理者は河川環境の特性を踏まえ、河川環境管理を実施することが求められており、河川環境と治水、利水が一体不可分のものとして管理することが必要となっている。このため河川環境への影響を考慮した治水、利水、環境の調和した総合的な河川管理が必要となってくる。

本研究が対象とする首都圏域を流域に含む利根川上流部においては、以下に示す河川管理上の課題が存在している。江戸時代の東遷によって付け替えられた現在の利根川は、その派川である江戸川の分流部において、人口、資産、都市機能の集中している東京を洪水氾濫から守るため流量制御が行われている。江戸川への洪水分派は自然分派であるが本川、派川の分派形状によって分派率は低く抑えられている。また、分派地点は豊かな自然環境を有し、そこでは樹木群による洪水流の貯留等が発生し、複雑な流下形態となっている。このため、迅速、的確な洪水予測等適正な河川管理のために、洪水流の挙動を考慮に入れた精度の高い非定常解析が求められる。利根川流域の重要な治水施設である渡良瀬川合流部においては、利根川本川の水位上昇時に利根川の背水の影響が渡良瀬川に及び、利根川、渡良瀬川で顕著な貯留が起こっており、長期間の洪水流の貯留による堤防への影響が懸念され、利根川本川、渡良瀬川の堤防強化が必要となってくる。このため、洪水流の貯留を考慮に入れた精度の高い非定常解析が必要となる。一方、渡良瀬遊水地では、洪水時における越流量、調整量を的確に把握することが利根川本川の洪水予測等に基づく適正な河川管理に必要であり、遊水地の越流水位ハイドログラフに基づく精度の高い非定常解析が必要となる。

利根川本川、江戸川、渡良瀬川の河川沿いに繁茂する樹木群は、河川の生態系等、環境面

で有効な機能を有している半面、洪水流流下の障害となるため、水位の上昇や局所的な高速流の発生等治水上、悪影響を及ぼすことがある。また樹木群が長区間にわたって存在しているため、樹木群による洪水流の貯留量の増大による洪水継続時間増によって堤防への浸透水が増大し、河川管理上の問題を引き起こす可能性がある。このため、樹木群の存在に起因する貯留が再現出来るような適切な非定常解析モデルが必要となる。

その他にも、洪水時に効果的な排水機場の操作運用を行うため、実際の水防活動における洪水到達時間の把握等の基礎情報を得るためにも洪水流の非定常解析が必要となる。

このように、利根川に代表される大河川における諸課題を解決するためには、樹木群による貯留現象、遊水地での洪水調節や大規模な支派川の分合流等、洪水流の非定常性に起因する現象を精度よく把握し、観測により明らかにされた洪水流に固有の非定常性を考慮に入れ、洪水流の水位や流量ハイドログラフ、貯留量ハイドログラフ等の水理量を河道沿いの各地点での確に推定する合理的で、実用的な洪水流解析モデルが求められる。

本論文では、上記の背景を踏まえ、現在河川の計画、管理に使われている洪水流の定常準二次元解析法を拡張し、非定常準二次元解析法を構築する。そして本解析法を、江戸川および江戸川分流部を含む利根川と派川江戸川の洪水流に適用し、二次元的な流れ場における非定常準二次元洪水流解析法の有効性を示すとともに、他の解析法と比較し評価している。

本論文は、全 5 章で構成され、本研究における各章の内容と成果の概要は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、社会条件、自然条件等の変化により河川管理の方向性が、治水と環境保全に配慮した効率的、効果的な管理へとシフトしていく中で、実際の河川管理を実施する上で解決しなければならない様々な課題が存在することを、利根川上流部の洪水流に伴う河川管理の課題を例に述べ、これらの課題解決の手法には、洪水流固有の特性としての非定常性を考慮に入れた解析の必要性を述べた。

第 2 章「洪水流の観測の歴史と洪水流理論の展開」では、洪水流の本質は、洪水位の縦断面形の時間変化にあらわれている。すなわち、洪水流の水面形の時間変化には、洪水中に起こっている各種水理現象が明確にあらわれていることを示した。このことから洪水位観測の歴史から紐解き、現在では安価で十分実用的な機器が開発使用されていることから河道沿いの密な水位観測が可能になっていることを述べた。また、これまで公表されている洪水流の準定常性、非定常性を考慮した解析理論の展開をまとめ、それらの位置づけと課題を示した。特に従来理論を実河川の洪水流に適用するうえでの問題点を論じ、これを解決するには、洪水位の水面形の時間変化に着目した非定常洪水流解析が必要であることを述べた。

洪水流の非定常解析については、福岡らが密に配置された水位計によって観測された水面形の時間変化を解とするように非定常平面二次元の基礎方程式を解く新しい解析方法を構築したこと、この方法によって、水位と流量のハイドログラフを高精度に求めることを可能

にし、河道での貯留現象が洪水流の本質であることを実データで明らかにしたこと、非定常平面二次元解析法が利根川等の河川で有用であることを示した。

しかし、非定常平面二次元解析は労力とコストがかかる上に、必ずしもすべての河川の洪水流が非定常二次元解析による必要性もない。したがって、実際の河川管理における有用性を考慮すると、非定常性は考慮するが、簡便な解析手法も必要であり、現在、実河川で多く行われている定常な準二次元解析法を拡張した非定常準二次元解析法が、このような要件を満たし、実務に十分活用することができることを示唆した。

第3章「水面形の時間変化と樹木群の影響を考慮した非定常平面二次元解析による流量ハイドログラフの推算」では、先ず利根川本川の大きな分流部であり、なおかつ自然環境の保全が問題となっている利根川と江戸川の分派地点を含む江戸川、利根川において福岡らによる非定常平面二次元解析法を適用した。ここでは綿密に観測された利根川、江戸川の水面形の時間変化を解とするよう洪水流を解くことによって、樹木群が群生し、しかも分派点を有するような河道において精度の高い洪水流解析が可能であり、流量及び貯留量ハイドログラフ、流速分布、樹木群の影響評価等が適切に推算できることを示した。この解析では、多くの点における水位変化を捉えることは、それほど重要でなく、地被状況等によって水面形の変化が現れる場所を含む区間で水位を観測し、これを用いた解析をすることで十分に精度の高い流量ハイドログラフ等が推算できることを示した。また、樹木群の抵抗を示す指標である樹木運透過係数 K は、高水敷水深 2.5m を境に 2 パターンに分けられること、樹木群のある河道では実測水面形の時間変化を説明するように樹木群透過係数 K を決めることによって、河道の粗度係数 n は河道本来の抵抗値である一定値をとることを明らかにした。

次に、直上流に大規模な遊水地を控える渡良瀬川合流部を含み区間の洪水流に非定常平面二次元解析を適用し、利根川、渡良瀬川の合流点を含む区間においても、精度の高い流量ハイドログラフが推算できることを示した。特に、渡良瀬川の水位は、利根川の洪水流の背水の影響を受けることにより、水面形が水位上昇期の逆勾配から、ゆるやかな順勾配へと変化する現象を適切に再現できたこと、利根川の影響を強く受け、水面形が弱い逆勾配になっているにもかかわらず洪水流は、順流状態で流下していることを示した。

これら非定常平面二次元解析の結果は、第4章の非定常準二次元解析法の有用性の検証のために実測値とともに用いられる。

第4章「水面形の時間変化と樹木群の影響を考慮した非定常準二次元解析による洪水流量ハイドログラフと洪水伝播速度の推算」では、河川で一般的に用いられている準二次元不等流解析法を非定常流に拡張し、非定常準二次元解析モデルを構築した。従来の定常準二次元解析法は、洪水流の本質である非定常性等を考慮していないために、実現象を説明するうえでいくつかの不都合が生ずることを示し、これらの問題解決のためには、洪水流の非定常性と河道断面の不規則性から起こる貯留機構を考慮しなければならないことを示した。開発し

た非定常準二次元解析モデルでは、非定常平面二次元解析法と同様に樹木群の影響を考慮し、実測水面形の時間変化を解とるように解いている。非定常準二次元解析を江戸川分流部を含む利根川、江戸川洪水流に適用し、非定常平面二次元解析の結果及び実測値と比較検討し、非定常準二次元解析によるピーク水位時の横断流速分布や水面形、流量ハイドログラフが非定常平面二次元解析結果とほぼ一致していることから、非定常準二次元解析法は実用上十分な精度で洪水流を評価できることを示した。非定常準二次元解析法は、一次元解析の枠組みに入るために、一般に、二次元性の高い河道分派点等での横断方向の流れを直接評価することは精度的に見て困難であるが、その流れ場に応じて工夫した解析法を用いれば、分派点を含む本川と派川の流れの二次元性が高い河川区間の洪水流までも説明できることを示した。すなわち、まずは、利根川と江戸川別々に非定常準二次元解析法を適用する。江戸川の観測水面形を解として江戸川の洪水流を解析し江戸川流量ハイドログラフを先行して算出する。次に利根川本川流量ハイドログラフから、この算出した江戸川流量ハイドログラフを差し引き江戸川分派後の利根川本川の洪水流の解析を行うことによって、非定常平面二次元解析と同様の結果をうるができる。この理由は、両方法とも、実測水面形を解とるように洪水流の逆解析を行っているからであり、これは、本解析法の特徴である。本解析モデルでは、粗度係数は、樹木の影響を含まない河道本来の値を用い、樹木群に起因する抵抗増の指標である境界混合係数は、これまで定常準二次元解析で用いられている境界混合係数の値を用いることが出来ることは、解析モデルの実用性、有効性を高めている。

洪水時のリアルタイムにおける河川管理を適切に行うには、洪水ピークの到達時間（洪水伝播速度）を知ることが必要である。複断面河道における洪水流の伝播速度式を *kinematic wave* 法で導出し、洪水伝播速度の簡易な算定法を見出した。導いた式は河道の拡幅や掘削、樹木群の繁茂など河道断面形の変化が洪水伝播速度に及ぼす影響を評価できることを示した。このことは、河道内の土砂堆積や樹木群の繁茂により低水路が狭くなることや相対水深が小さくなることにより、洪水の伝播速度が遅くなり、逆に、低水路幅の拡幅や高水敷地盤高の切り下げ等によって河積が増大することにより、洪水伝播速度が速くなることを示した。

第5章「結論と今後の課題」では、本研究で得られた成果を総括し今後の課題について述べた。

以上、本論文は、樹木群のある河道を流下する洪水流の本質的な特性である非定常性と河道縦・横断面形の不規則性に起因する洪水流の河道内貯留現象の工学的重要性を明らかにし、これを考慮した洪水流の非定常準二次元解析法を提示した。さらに、利根川洪水流に適用した結果、本解析法は、樹木群のある河道の洪水流流下挙動を高精度に説明できること、河川管理にとって有効な手段を提供することを示したもので、その成果は、河川工学上重要な貢献を与えている。

よって、本論文は、博士（工学）論文として価値があるものと認める。