

河川流・氾濫流の三次元解析モデルのレビュー

東京理科大学 正会員 〇柏田仁，二瓶泰雄

東京理科大学大学院 学生会員 窪田利久

1. 目的

近年，あらゆる分野での DX が進展し，河川分野でも危機管理型水位計，ALB，人工衛星といった”観測技術”の DX が急速に進んでいる．また，三次元河川管内図や 3D 都市モデル(Project Plateau)の整備と公開もなされている．これに対し，河川管理での観測技術との両輪である”解析技術”も河川 DX に貢献していくことが望ましい．河川流・氾濫流の解析には一次元モデルや平面二次元モデルの活用が中心であり，三次元モデルの適用例は少なく，3D 化が著しい観測技術と比べ解析技術は大きく出遅れている感は否めない．高度化する観測データを活かし，より複雑な流況や河床変動などを精緻に再現するには 3D モデルの活用・発展は不可避である．本研究では，国内外における河川流・氾濫流の解析モデルをレビューして，河川技術 DX に資する解析技術の現況を調べることを目的とする．特に，3D デジタルデータに対応すべく，河川流・氾濫流解析に用いられている 3D モデルの概要や適用事例を整理する．

2. 研究方法

河川流・氾濫流解析に関わる国内外の学術論文をレビューする．英文誌の掲載論文については，全体検索と詳細検索の 2 種類を行った．まず，全体検索では，1D, 2D, 3D モデルの利用状況を俯瞰するために Scopus において river flow simulation/ one-dimensional, river flow simulation/ two-dimensional, river flow simulation/ three-dimensional のキーワード検索を行い，それぞれ 1D, 2D, 3D モデルの論文数の合計や国別の論文数を求めた(対象期間:1970～2022 年)．次に，詳細検索では，用いる 3D モデル情報を詳細に把握するため，Scopus にて，2005 年以降を対象に，three-dimensional / river/ flow, three-dimensional/ flood /flow, three-dimensional/ inundation/ flow とキーワード検索を行った．和文誌に関しては，土木学会論文集，水工学論文集，河川技術論文集の 3 誌を対象とし，タイトルより目星を付け，論文の中身を確認し，情報収集した．対象期間は 2005 年～2022 年である．

収集した 3D モデルを，流速鉛直分布と圧力の取扱いに着目し分類する．前者について，直接解析するものと(3D)，流速鉛直分布を仮定する準三次元解析(Q3D)がある．また静水圧モデルと非静水圧モデルに分け，これらを組み合わせ 4 種の 3D モデルに分類した．

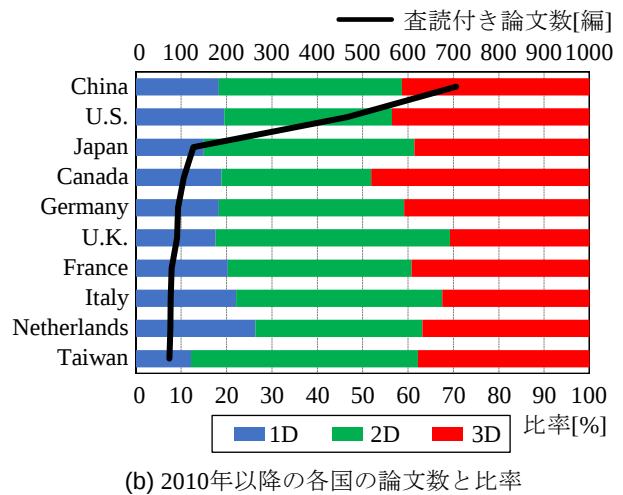
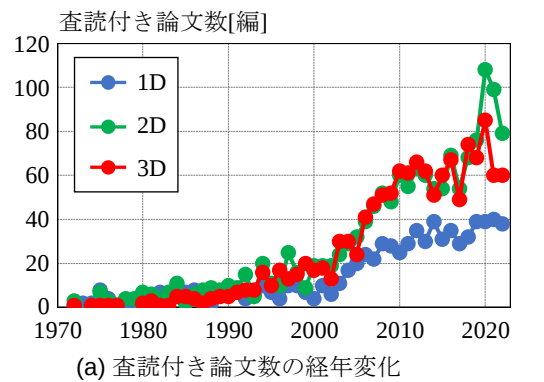


図-1 河川流モデルにおける 1D, 2D, 3D モデルの利用状況

3. 世界全体における 3D モデルの利用状況

河川流解析における 1, 2, 3D モデルを使用した論文数の経年変化を図-1(a)に示す．これより，どのモデルも経年的に増加傾向であるが，その増加状況はモデルに依る．1970, 1980 年代では 1D, 2D モデルが卓越するが，3D モデルも 1970 年代では 5 編存在し，1980 年代では 32 編と大きく増加した．1990 年代では大小関係が逆転し，2D > 3D > 1D モデルの順となった．2000, 2010 年代では，2D と 3D モデルはほぼ同程度となった．

一方，1, 2, 3D モデルの使用状況を国別に比べた結果を図-1(b)に示す．ここでは，2010～2022 年における総論文数(実線)と 1, 2, 3D モデルの使用割合(棒グラフ)について，論文数上位 10 か国のみを表示する．論文総数は中国，アメリカが非常に多く，日本は 3 番目に位置するが，3D モデルの論文数の割合は米国や中国よりやや低い．各モデルの論文数比率を見ると，米国，中国，カナダは 2D<3D で

あり、ドイツやフランス、オランダは2D≒3Dであった。残り4か国は2Dモデルの方が多く、特に日本では2Dモデルは3Dモデルの1.2倍であった。このように、日本では、実務も含めて1D、2D計算が主流であるが、世界では河川流解析の論文数が多い国ほど3D計算が潮流になっている。

詳細検索の結果より、3Dモデルの適用エリアである河口域(感潮域を含む)、河川(河口域を除く)、氾濫域毎に論文数の推移を図-2(a)に示す。2005年以降を対象とし、論文数 n は190編であった。なお、氾濫域は単独ではなく、河川・河口のいずれかとセットである。これより、河川は増加傾向であるが、河口域は減少傾向である。また、氾濫域は2011年まではほぼ0であったが、それ以降は一定数あり、氾濫流解析の3D化が進んでいることが分かる。河口域の解析対象は、主に塩分遡上等の物質輸送や水質評価であり、それらの論文数が経年的に減少しているため、結果として河口域の論文数が減少した。これより、近年の3Dモデルの適用例の増加(図-1(a))は、河川・氾濫域の解析事例の増加が対応している。また、海外では、Delft3Dの使用例が最大(11編)であり、SSIIM(9編)、Flow-3D・OpenFOAM(6編)と続く。なお、近年、粒子法(SPH)を用いた論文数が増大傾向にあるが、紙面の都合上省略する。

4. 国内における3Dモデル利用状況

国内の適用エリア別3Dモデル使用数の経年変化を図-2(b)に示す。これより、3つの中では河川が顕著であり、全体の増減は河川の影響が大きい。2005-2022年の論文数の割合では、河川・河口・氾濫域については、国内では90、11、2%であった(複合領域を解析対象とする論文もあるため総和が100%を超える)。これは世界全体(70、32、12%)と大きく異なり、国内では河川が卓越し、河口域が少なく、特に氾濫域の3D解析は非常に少ない。また、経年変化の傾向としては、2005、2006年にピークがあり、その後大きく減少し、近年増加傾向となっている。この要因として、2005、2006年では室内実験への適用例が多いが、近年は現地が卓越する。これは、計算機リソースの著しい増加と共に、3Dモデルの高精度化によるものである。

国内で用いられる3Dモデルとしては、河口域に適用される物質輸送解析を除くと、2005-2022年の間では、BVC¹⁾が最多の42編であり、次いで、NaysCUBE²⁾、Q3D-FEBS³⁾、OpenFOAMが多い。この中では、3D/非静水圧モデルの計算負荷が大きいことを克服しつつ、非静水圧を含む物理過程を精緻に組み込んだQ3Dモデル(BVCやQ3D-FEBS)が特徴的であり、現地への適用例も突出して多いなど汎用性の高さも示唆する。また、国内の3Dモデルは河床変動解析との連成が世界全体よりも多く(国内:全体の33%、海外:11%)、モデル構成の精緻化が進んでいる。

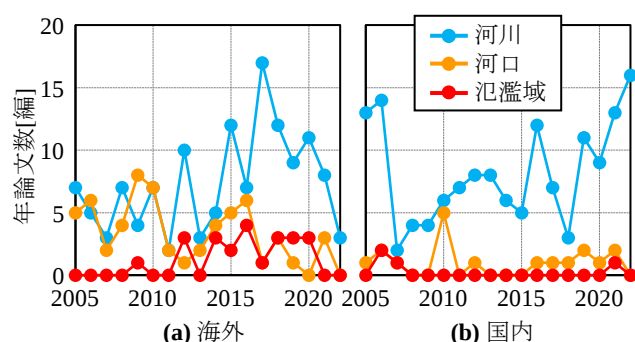


図-2 河川・河口域・氾濫域別の論文数の推移

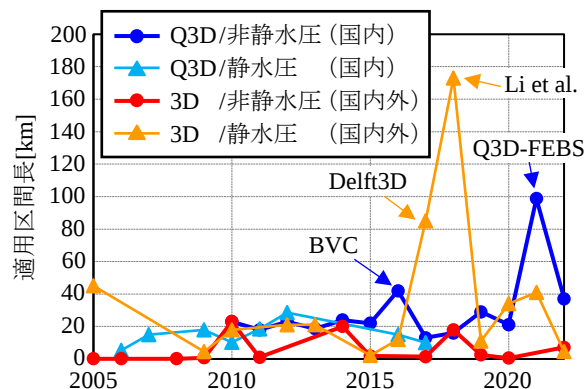


図-3 各モデルにおける適用区間長の推移

5. モデル種別適用区間長

モデル種類毎の適用区間長の経年変化を図-3に示す。ここで、Q3Dの静水圧・非静水圧モデルは国内のみであり、3Dの静水圧・非静水圧モデルに関しては国内・海外の論文を対象とし、各年の最大区間長の結果をプロットする。3Dモデルでは、静水圧の方が非静水圧よりも区間長が長く、近年では長区間の解析事例が報告されている(2017年85km⁴⁾、2018年173km⁵⁾)。3D/静水圧モデルにおける最大・平均・中央値は173、19.1、4.6kmである一方、非静水圧モデルの最大・平均・中央値は23、3.7、0.45kmであった。これより、静水圧モデルにおける区間長は非静水圧モデルより1オーダー大きい。これは、非静水圧モデルでは、圧力を直接計算するため、計算負荷が大きいためである。

それに対して、Q3Dでは、静水圧モデルでは横ばい傾向であるが、非静水圧モデルでは長区間の解析が実施され、区間長は近年増加傾向である。特に、BVCでは2016年にて42km¹⁾、Q3D-FEBSでは2021年にて99km³⁾となり、3D/非静水圧モデルの区間長を大きく上回る。このように、3Dモデルでも、モデルの工夫(Q3D)により、非静水圧を考慮する等の高精度を維持しつつ、河川流・氾濫流の広域・大規模解析が多く行われている。

参考文献 1)福岡ら:河川技術論文集, Vol.22, pp.373-378, 2016, 2)河野・守田:河川技術論文集, Vol.20, pp.313-318, 2014, 3)田端ら:河川技術論文集, Vol.27, pp.597-602, 2021, 4)Xing et., al.: Continental Shelf Research, 147, pp.62-77, 2017, 5) Li et., al.: Journal of Hydrology, 567, pp.86-101, 2018,