

特集「沿岸防災関連情報の改善」

流域雨量指数を用いた津居山検潮所における 高潮ガイダンスの補正法

櫻井 敬三 *1

要 旨

気象庁で現業運用している高潮数値予測モデルに組み込まれていない河川水の影響を予報部が開発した流域雨量指数を用いて量的に評価した。降雨時において兵庫県津居山検潮所では流域雨量指数と高潮数値予測モデルの誤差との間に高い相関がみられ、流域雨量指数を用いて6時間先までの潮位予測を補正できることを示した。ただし、干潮時には河川水が海洋へ速やかに流出し、河口部で河川水位の上昇が抑制されるため、流域雨量指数を用いた補正が過大になるという予測上の注意点も明らかになった。

1. はじめに

日本海沿岸の潮位特性の一つとして満干差が小さいということが挙げられる。潮位表（気象庁 Web サイト）によって主要四分潮和を比較すると、日本海沿岸の京都府舞鶴検潮所では 18.69cm で、太平洋沿岸のほぼ同じ経度に位置する和歌山県白浜検潮所における 108.20cm の五分之一にも満たない。また、宇野木 (2012) は日本沿岸全体における高潮について、潮位偏差が 1m を超えるような高潮は大部分が台風によるもので、ほぼ関東から九州までの太平洋岸及び九州西岸に限られていると述べている。

このように日本海沿岸では太平洋沿岸と比較して平常時の潮位の満干差が小さく、高潮の大きさも小さいために、高潮警報基準・注意報基準が太平洋沿岸より低く設定されている。前述の舞鶴検潮所と白浜検潮所が所在する京都府舞鶴市と和歌山県白浜町を例に挙げると、舞鶴市の高潮警報

基準・注意報基準がそれぞれ 1.0m, 0.7m に設定されていることに対して、和歌山県白浜町では 1.8m, 1.3m である。これは日本海沿岸では高潮による被害が発生しにくい一方で、一度高潮が発生すると、太平洋沿岸では被害に結びつかないような潮位や潮位偏差であっても大きな被害に結びつく危険があることを示している。実際に 2012 年台風第 16 号によって山陰西岸から若狭湾にかけて発生した高潮では、舞鶴検潮所における最大潮位偏差は 42cm に過ぎなかったが、夏季の大潮期に相当していたため最高潮位は 89cm に達した。この高潮によって舞鶴市では床上浸水 1 棟、床下浸水 84 棟等の被害が発生している（京都地方気象台・舞鶴海洋気象台, 2012）。

気象庁が現業運用している高潮数値予測モデルについては、林原 (2011) によると、外力として海上風の応力と気圧の吸い上げ効果を組み込み、予測値は 50cm 程度の誤差幅内にほとんど収まっ

*1 地球環境・海洋部日本海海洋気象センター（現 地球環境・海洋部海洋気象課）

ているとされている。また、若林ほか(2013)は山陰地方から北陸地方の沿岸において、高潮数値予測モデルによる予測が外れた場合の要因を考察し、表層水温・wave setup・慣性振動・モデル自体の誤差に分類した。さらに、長周期成分を除去した高潮モデルの誤差は wave setup や慣性振動が発生する地点を除くと 15cm 以内に収まっており、日本海沿岸では高潮数値予測モデルの精度は高いとしている。

若林ほか(2013)の分類には降雨による河川水の影響が含まれていないが、兵庫県の円山川河口に位置する津居山検潮所では河川流量の増大によって潮位が上昇する事例がみられる。熊谷ほか(2006)は 2004 年台風第 23 号によって、津居山検潮所で観測された潮位偏差 126cm における高潮の寄与は 15cm に過ぎず、不等流計算によって河口と検潮所の水位差を 96cm と評価した。さらに、この浸水害を契機として辻尾ほか(2008)は雨量予報から算出される予測流量を用いて津居山港における水位上昇量を求め、数値モデルによって計算された予測潮位に加算する簡易高潮予測システムを開発している。

気象庁の高潮数値予測モデルは河川水の影響を計算過程に組み入れていないため、河川水の影響を受ける地点では適切な方法で河川水による水位上昇量を評価する必要がある。本稿ではこれに気象庁予報部で開発された流域雨量指数を用いる。流域雨量指数については田中ほか(2008)に詳述されており、降水が河川に入るまでの過程(流出過程)と河川に流れ込んだ水が下流に流れ下る過程(流下過程)を考慮して、5km 四方の解像度で任意の河川・地点における水量を求めたものとしている。ここで、入力となる雨量には解析雨量又は降水短時間予報による予測雨量を用い、流域雨量指数の解析値及び 6 時間先までの予測値を算出している。

今回、高潮数値予測モデルの誤差と流域雨量指数との関係式を作成する。求められた関係式から河川水による潮位上昇量を評価し、高潮数値予測モデルによる潮位予測値を補正することによって潮位の予測精度を高めることを本稿の目的とする。

2. 使用データ

潮位データは津居山検潮所における 2010 年 3 月～2014 年 2 月の毎時観測値と高潮数値予測モデルの毎時予測値を使用した。ここで、気象場の予測誤差を取り除くため、風・気圧の実況解析値を外力として与えたハインドキャストを高潮数値予測モデルの予測値として使用した。また、潮位の毎時観測値からハインドキャストを引いた値をハインドキャストエラーと定義する。流域雨量指数と対比させるために、あえて符号を反転させている点に留意されたい。

一方で、流域雨量指数については数値予報ルーチンで作成される毎時解析値及び 6 時間先までの予測値を利用した。その単位について田中ほか(2008)では流量に相当する値の平方根と定義されている。

その他に降水量・河川水位と津居山検潮所における潮位を対比させて考察するために、国土交通省水文水質データベース(国土交通省 Web ページ)から八鹿・豊岡の毎時降水量と八鹿・豊岡・城崎の毎時河川水位データを入手した。第 1 図に円山川と各観測地点の位置を、第 2 図に流域雨量指数を計算した格子位置を示す。

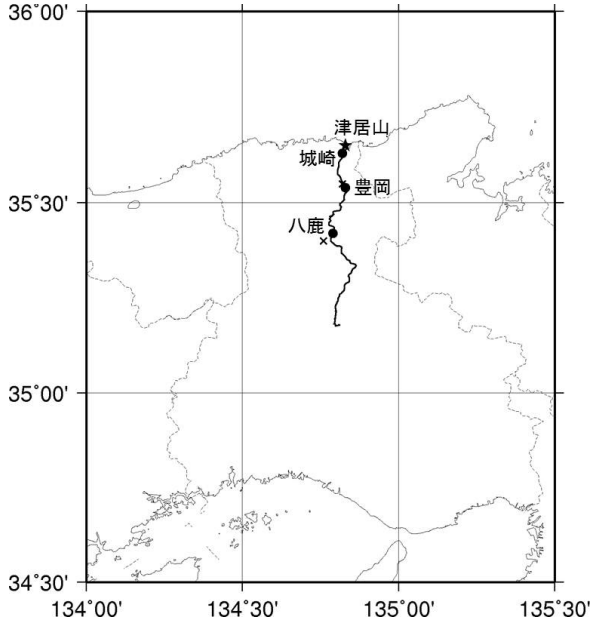
3. 結果

3.1 回帰式の作成

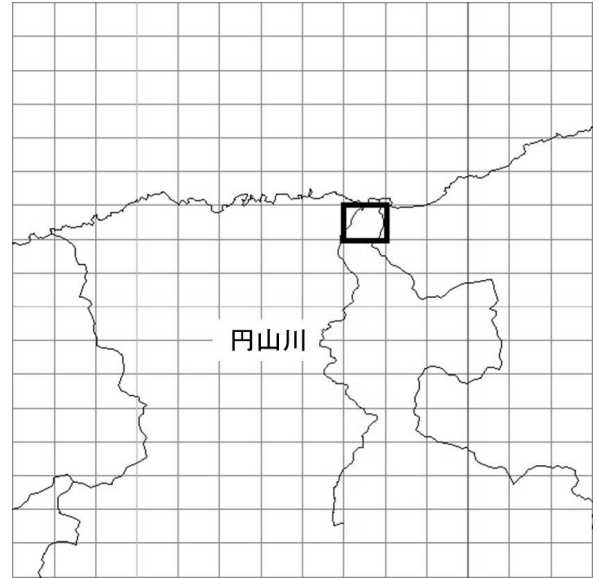
円山川河口域における流域雨量指数と津居山検潮所におけるハインドキャストエラーの関係を端的に示す 2011 年 9 月 2 日～4 日に台風第 12 号が中国地方を北上した事例の解析を行なう。両者の時間推移を第 3 図に、両者が最大値を示した時刻近傍の 3 日 21 時の地上天気図を第 4 図に示す。

3 日 21 時と 22 時の流域雨量指数は 43 で、調査を行った 4 年間の最大値であった。また、3 日 22 時と 23 時のハインドキャストエラーは 43cm で、同じく 4 年間の最大値であった。

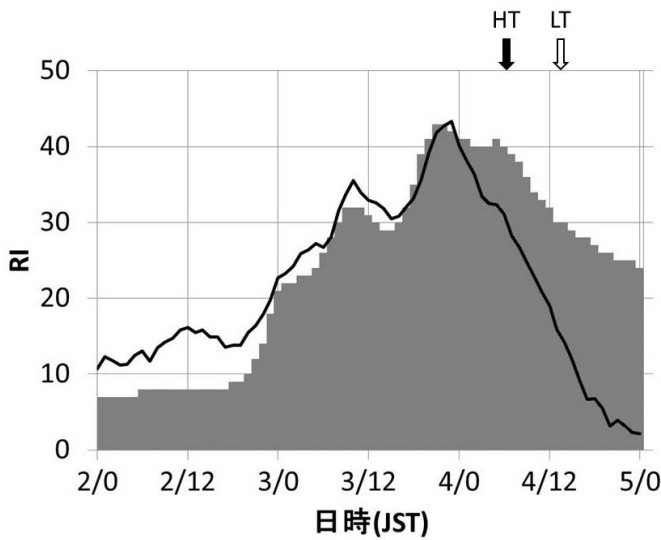
2011 年台風第 12 号の北上に伴い円山川中流域の八鹿や下流域の豊岡では 2 日の午後から時間雨量数 mm の雨が降り始め、3 日の午後には時間雨量 10mm 前後に強まった。このため河口域の流域雨量指数は 2 日の夕方から上昇し、3 日の夜遅くに最大値が解析され、その後緩やかに下降してい



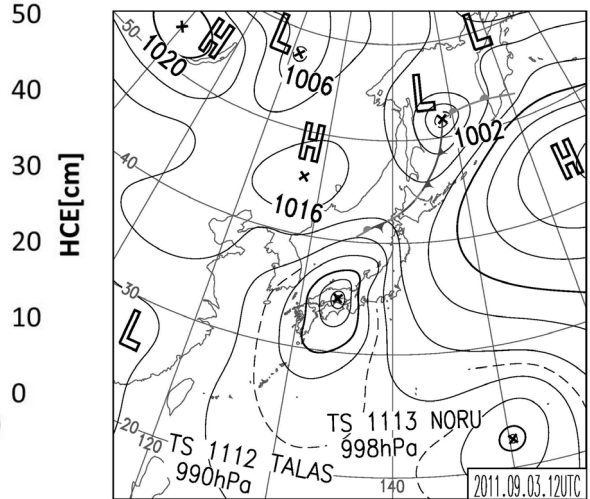
第1図 円山川と観測地点の位置
★：検潮所 ●：水位観測点 ×：雨量観測点



第2図 流域雨量指数の計算領域 各格子の一边の長さは5km



第3図 2011年9月2日～4日に台風第12号が中国地方を北上した事例における流域雨量指数 (RI, 陰影) とハインドキャストエラー (HCE, 実線) の時間推移
黒矢印は津居山港における天文潮による満潮時刻 (HT) を、白矢印は干潮時刻 (LT) を示す。

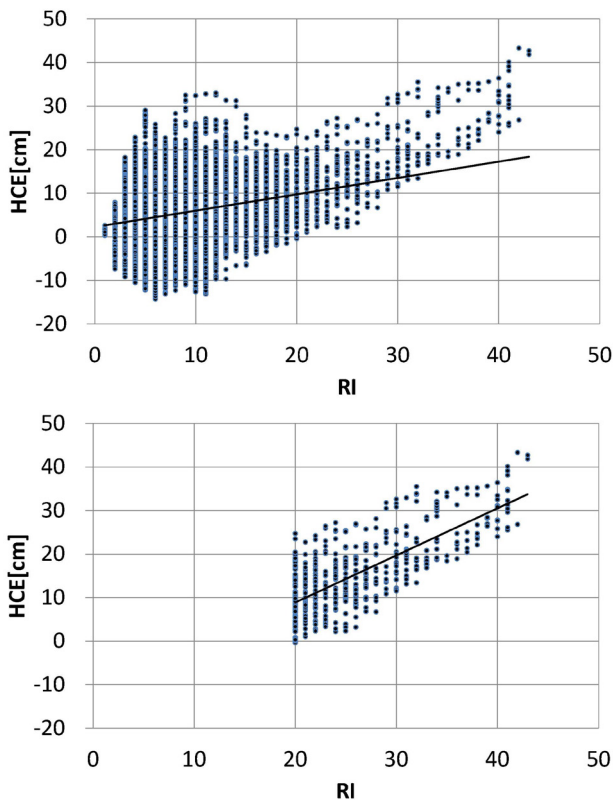


第4図 第3図における流域雨量指数とハインドキャストエラーが最大値を示した時刻近辺の地上天気図

る。一方で、ハインドキャストエラーは流域雨量指数とほぼ同じ上昇速度で3日夜遅くに最大値を示し、その後流域雨量指数より急速に減衰している。調査期間中に流域雨量指数の最大値が25以上に達した事例数は14みられたが、雨が降り始める前のハインドキャストエラーのバイアスを除外すると、ほぼ全ての事例で2011年台風第12号の事例と同様の変化傾向がみられる(図略)。このことから、津居山における高潮数値予測モデルの誤差をもたらす要因として降雨による河川水位の上昇が大きな影響を与えているということが推測される。

そこで、調査期間のハインドキャストエラーと対応する時間の流域雨量指数の全分布を第5図上段に、そのうち流域雨量指数が20以上の集合の分布を第5図下段に示した。

まず、全体集合では流域雨量指数とハインドキ



第5図 流域雨量指数 (RI) とハインドキャストエラー (HCE) の散布図 直線は最小二乗法による回帰直線。上段は全事象、下段は流域雨量指数が20以上の事象を示す。

ャストエラーの間に弱い正の相関がみられるものの、流域雨量指数が20以下の領域では分散が大きく、流域雨量指数が20以上の領域では回帰直線の傾きが小さいために線形回帰による補正では過小評価につながる。そもそも、流域雨量指数の小さな事例は補正の効果が小さいため、全体集合を用いての補正式作成は意義が薄いと考えられる。一方で、流域雨量指数が20以上の集合では流域雨量指数とハインドキャストエラーの間に高い相関がみられる。

ここで適正なしきい値を設定するために流域雨量指数を5刻みに増加させ、それぞれの集合における要素数、回帰直線の傾き及び切片並びに相関係数を比較した(第1表)。

流域雨量指数が20以上の集合は他の集合と比較して相関が最も高い。次に流域雨量指数25以上の集合で回帰式を作成するとデータ数・事例数が減少し、回帰式で補正可能な時間帯が短くなる。また流域雨量指数15以上の集合による回帰式では指数が大きい場合の補正が過小になる(図略)。これらを総合的に勘案し、流域雨量指数20以上の集合による回帰直線(1)式を採用し、以下の議論に用いる。

$$HCE = 1.08 \times RI - 12.79 \quad (20 \leq RI \leq 43) \quad (1)$$

ここで、HCEはハインドキャストエラーを、RIは流域雨量指数を示す。

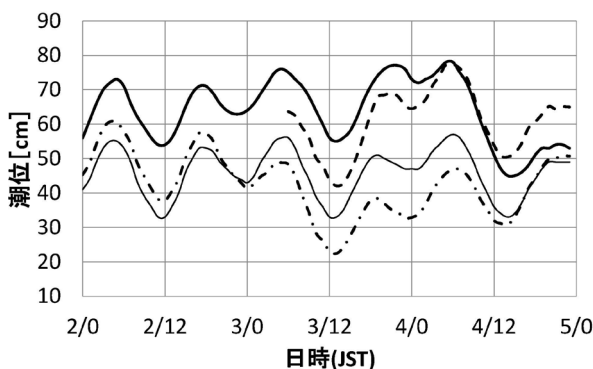
第1表 流域雨量指数 (RI) をしきい値とした各集合におけるデータ数と相関係数

RI	データ数	相関係数
ALL	34125	0.22
≥15	1648	0.63
≥20	541	0.74
≥25	261	0.72

3.2 回帰式の検証

前項で作成した回帰式を用いて補正したハインドキャストを観測値と比較することによって回帰式の妥当性を検証する。

まず、第3図に示した2011年9月2～4日の事例について観測値・天文潮・ハインドキャスト・(1)式を用いて補正したハインドキャストの4種類の毎時潮位の時間推移を第6図に示した。2011年台風第12号の北上に伴って日本海では東風が吹き続けた。エクマン効果によって沿岸域の潮位は低下するため9月3日のハインドキャストは天文潮より低くなり、観測潮位と比較して最大43cm低くなっている。これを流域雨量指数を用いて補正すると、潮位の最大値78cmが観測された4日5時と6時の予測値は77cmになり、観測とよく一致する。ただし、雨が降り始める前の2日0時の時点で11cmのハインドキャストエラーがみられる。これを主に海況要因のバイアスと考えて3日夜遅くの満潮時刻付近で適正な補正を示し、4日明け方の満潮時刻付近では約10cmの過大評価と捉えることが適当であろう。



第6図 2011年9月2日～4日に台風第12号が中国地方を北上した事例における毎時潮位の時間推移

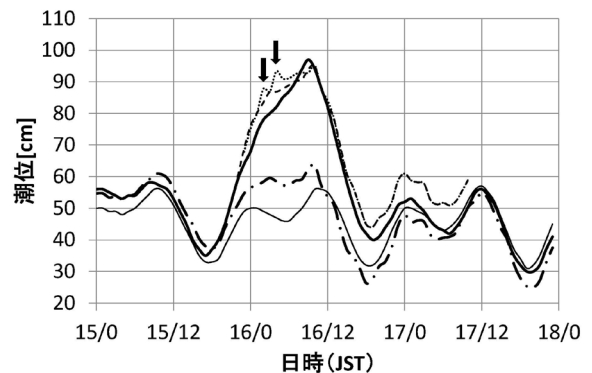
観測潮位（太実線） 天文潮（細実線） ハインドキャスト（一点鎖線）

流域雨量指数を用いて降雨による水位上昇分により補正したハインドキャスト（破線、描画範囲は流域雨量指数が20以上の時間帯に限定している）

次に、調査期間中で観測潮位が2番目に高かった2013年9月15日～17日の事例について検証する。なお、観測潮位が最も高かった2012年9月18日の事例では潮位上昇への降雨の影響は小さかった。この事例については4-1項で考察する。

第7図には第6図と同様に観測値・天文潮・ハインドキャスト・(1)式を用いて補正したハインドキャストの4種類の毎時潮位に加えて、対象時刻の6時間前の段階で予測された流域雨量指数を用いて補正したハインドキャストの時間推移を追記した。

期間中、最高潮位97cmを観測した16日9時における高潮ガイダンスの予測値は62cmで35cmの過小評価であった。これに対して解析値による流域雨量指数を用いて補正した潮位は94cm、6時間前の予測値による流域雨量指数を用いて補正した潮位は93cmで、いずれも観測値に近い値を示した。6時間前の予測値による流域雨量指数を用いて補正した潮位は解析による流域雨量指数を用いた補正と比較して短周期の振動がみられるが、その振幅は数cmでハインドキャスト



第7図 2013年9月15日～17日における毎時潮位の時間推移

太実線：観測潮位

細実線：天文潮

一点鎖線：ハインドキャスト

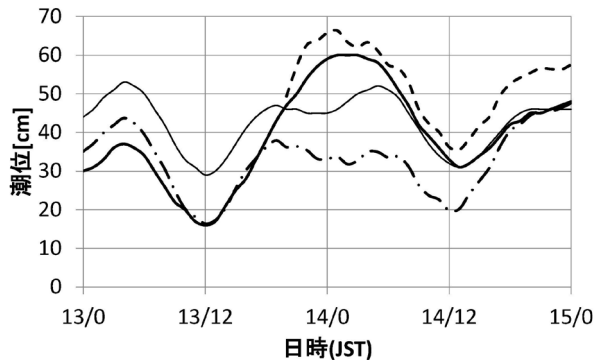
破線：流域雨量指数（解析値）を用いて降雨による水位上昇分により補正したハインドキャスト（描画範囲は流域雨量指数が20以上の時間帯に限定している）

点線：流域雨量指数（FT=-6を初期値とした6時間先の予測値）を用いて降雨による水位上昇分により補正したハインドキャスト（描画範囲は流域雨量指数が20以上の時間帯に限定している）。矢印を付した時間に小さな振動の山がみられる。

エラーの大きさに比べて十分小さい。このため 6 時間前の段階における潮位予測について流域雨量指数を用いた補正が可能と考える。将来的に流域雨量指数の予測時間が延長され、本調査の延長として、12 時間前あるいは 24 時間前の段階における精度が確認できれば、必要かつ十分なリードタイムを確保した現業利用に資することが期待される。

最後に、回帰式を作成した 2010 年 3 月～2014 年 2 月以降の期間における独立事象の検証を行った。2014 年は津居山の潮位が概して低く、円山川流域の日雨量が年間最大（八鹿 152mm、豊岡 120.5mm）であった 2014 年 10 月 13 日～14 日に台風第 19 号が北上した事例を検証の対象として選択した。第 4 図と同様に観測値・天文潮・ハインドキャスト・(1) 式を用いて補正したハインドキャストの 4 種類の毎時値の時間推移を第 8 図に示した。

観測による最高潮位が 14 日 1～3 時の 60cm であることに対して、ハインドキャストによる最高潮位は雨の降り始めに当たる 13 日 19 時の



第 8 図 2014 年 10 月 13 日～14 日における毎時潮位の時間推移 回帰式を作成した 2010 年 3 月～2014 年 2 月以降の独立事象による再現例を示す。

太実線：観測潮位

細実線：天文潮

一点鎖線：ハインドキャスト

破線：流域雨量指数（解析値）を用いて降雨による水位上昇分により補正したハインドキャスト（描画範囲は流域雨量指数が 20 以上の時間帯に限定している）

38cm で、22cm の過小評価であった。これに対して流域雨量指数を用いた補正を加えた最高潮位は 14 日 1 時の 66cm で、観測潮位との時間差はほとんどみられないが、6cm の過大評価であった。雨が降り始める前の 13 日 0 時における観測値とハインドキャストのバイアスが 5cm あることを考慮すると、独立事象においても流域雨量指数を用いた補正は有効であることが確かめられた。

4. 考察

前章で示したように流域雨量指数とハインドキャストエラーには高い相関がみられるが、個々の事例を調べると、流域雨量指数が小さくてもハインドキャストエラーが大きい事例や、その逆の事例もみられる。本章ではそれぞれのケースの理由について考察する。

4.1 流域雨量指数が小さくハインドキャストエラーが大きいケース

調査期間中で流域雨量指数が 20 以下の事例でハインドキャストエラーが最も大きかった 2012 年 9 月 17 日～19 日にかけて台風第 16 号が日本海を北東進した事例について考察する。第 9 図には 1 時間ごとの流域雨量指数、観測潮位、天文潮、ハインドキャストの時間推移を、第 10 図には最高潮位が発現した時刻の 19 時間前に当たる 17 日 21 時の地上天気図を示した。

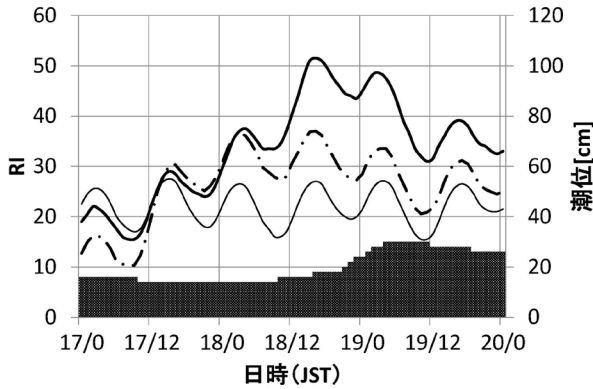
最高潮位を記録した 18 日 16 時の観測潮位とハインドキャストは 103cm と 74cm で、ハインドキャストエラーは 29cm である。一方で、同時刻の流域雨量指数は 9 に過ぎず、補正式の有効範囲外であるとともに、ほぼ平常の水位を示している。本事例については坂本ほか (2014) や小林ほか (2015) によって観測と数値モデルによる潮位上昇の要因が考察されており、南西の風によるエクマン輸送によって日本沿岸で水位が上昇し、その高潮位シグナルが沿岸波動として山陰沿岸を東へ伝播したと推察されている。

流域雨量指数が 20 以下かつハインドキャストエラーが 25 以上の事例は上記の他に 5 事例みられたが、5 事例中 4 事例でハインドキャストエラーの値が大きくなり始める前の主として海況要因

によるバイアスが10cm以上みられ、このバイアスと降雨による増水が重なってハインドキャストエラーが大きくなったものと推察される。

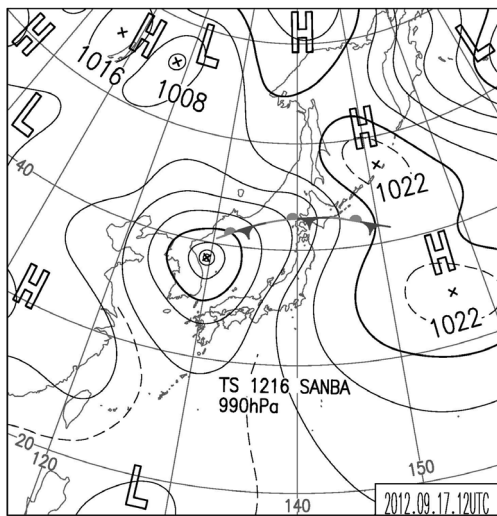
4.2 流域雨量指数が大きくハインドキャストエラーが小さいケース

前節とは逆に、流域の降雨が多く、河川流域の水位が上昇しているにも関わらず、河口域で潮位が上昇しない例もみられた。端的な例として2012年7月20日～21日に日本海を低気圧が東進した事例を取り上げる。第11図上段には流域



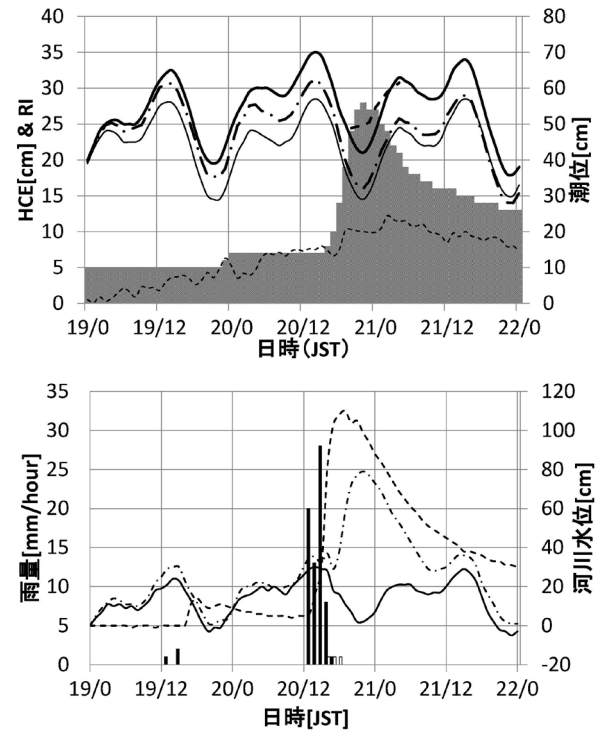
第9図 2012年9月17日～19日における流域雨量指数と毎時潮位の時間推移

太実線：観測潮位
細実線：天文潮
一点鎖線：ハインドキャスト
陰影：流域雨量指数 (RI)



第10図 第9図における最高潮位が出現した19時間前の地上天気図

雨量指数、ハインドキャストエラーと観測潮位、天文潮、ハインドキャストの毎時値、下段には円山川流域の観測地点（第1図参照）における雨量と水位の毎時値の時間推移を示した。ここで、各観測地点における河川水位は19日0時の値を0として、その時刻との差分で示している。



第11図 2012年7月19日～21日における毎時潮位（上段）と降水量・河川水位（下段）の時間推移

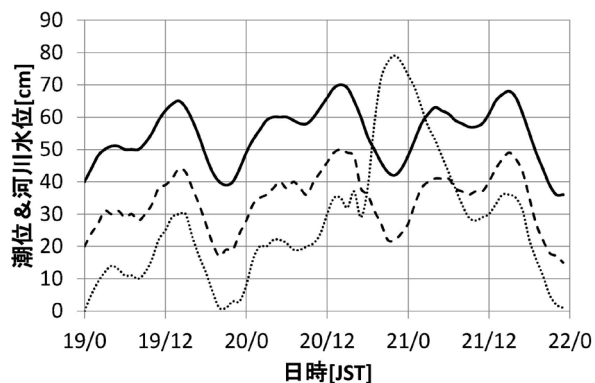
(上段)
太実線：観測潮位
細実線：天文潮
一点鎖線：ハインドキャスト
破線：流域雨量指数（解析値）を用いて降雨による水位上昇分により補正したハインドキャスト（描画範囲は流域雨量指数が20以上の時間帯に限定している）
破線：ハインドキャストエラー (HCE)
陰影：流域雨量指数 (RI)

(下段)
白棒：豊岡における降水量
黒棒：八鹿における降水量
実線：城崎における河川水位
一点鎖線：豊岡における河川水位
破線：八鹿における河川水位
各観測地点における河川水位は19日0時の値を0として、その時刻との差分で示している

円山川の中流域にあたる八鹿では、20日昼過ぎから夕方まで降水を記録し、雨が降り始めた直後から水位が急上昇している。次いで下流域に当たる豊岡では降水はごく少量であったが、上流から流下する河川水によって20日の夕方から水位の上昇がみられる。これに対して円山川の河口に近い城崎では20日の昼過ぎに水位の極大を観測した後に水位が低下し、豊岡で水位の極大がみられた夜のはじめ頃に城崎では水位の極小を観測した。これとほぼ同じ時刻に流域雨量指数は最大値を示しているが、ハインドキャストエラーの上昇は限定的である。

第12図では津居山における潮位と城崎・豊岡における水位を並べて比較した。図を見やすくするために19日0時における豊岡の水位を0cm、城崎の水位を20cmに設定し、その時刻との差分で水位の時間推移を示した。なお、津居山における潮位は標高換算の値である。

雨が降り始める前の19日14時の満潮、21時の干潮、20日14時の満潮と降雨の影響が消失した21日9時の干潮、15時の満潮については河口に近い城崎のみならず下流域の豊岡でも津居山と同様の水位変動を示しており、潮汐の影響を強く受けていることが読み取れる。一方で、20日夜のはじめ頃に流域雨量指数が最大を示した時間帯は干潮時刻に当たり、城崎では潮汐の影響で水位



第12図 2012年7月19日～21日における津居山の潮位(実線、標高換算)と城崎(破線)・豊岡(点線)における河川水位。19日0時の水位を城崎では20cm、豊岡では0cmに設定している。

が下降しているものの、豊岡では降水の影響をより強く受けて水位が上昇しているものと推察される。20日正午の月齢は0.9で朔の大潮期に当たり、干潮位(天文潮で29cm)が低い日時であったことも城崎と豊岡の水位差を大きくする要因となったと考えられる。

また、近畿地方整備局(2013)によると、円山川の豊岡盆地より下流では両岸に山地がせまり、川幅が狭いことに加えて、豊岡盆地より上流の河川勾配が下流に比べて急であるため、豊岡盆地では上流の本支川から集中した洪水が流下しにくいとされている。この地形的要因も豊岡と城崎の水位差に寄与しているものと考えられる。

本事例において流域雨量指数の増大ほどハインドキャストエラーが大きくならなかった原因の一つは流域雨量指数の算出に潮汐の影響が考慮されていない(田中ほか, 2008)ことによると考えられる。第3図において極大値以降の流域雨量指数の減少率がハインドキャストの減少率より小さいことも流域雨量指数の算出に潮汐の影響が含まれていないことに起因すると考えられる。すなわち、9月4日6時0分の満潮時刻(天文潮による)から同日13時48分の干潮時刻に向けて、降雨により上昇した河口の水位が潮汐によって下がるためハインドキャストエラーは急激に低下していくが、潮汐の影響を流下過程に考慮していない流域雨量指数は減少率がより小さくなったと考えられる。

以上のことから、流域雨量指数を用いて高潮ガイダンスを補正する場合、干潮時に補正が過大になる傾向を考慮する必要がある。

5. まとめ

過去4年間の流域雨量指数とハインドキャストエラーのデータセットを用いて両者の高い相関を確認し、(1)式による補正式を作成した。この補正式を用いて高潮ガイダンスを補正したところ、観測潮位とよく一致することが確認できた。

観測潮位と流域雨量指数によって補正されたハインドキャストとの比較により、雨が降り始める前のバイアスと、干潮時に観測値の方が低く補正が過大傾向という2点が予測上の注意点として明

らかになった。バイアスについては、過去24時間の毎時の観測潮位とハインドキャストによる再現値の差を求め、その平均を補正量とする手法が既に現業レベルで採用されている。さらに、バイアスの要因となる異常潮位による潮位上昇や現行の高潮数値予測モデルでは表現できていない沿岸補足波等による潮位変動については、気象研究所が開発が進められている日本沿岸海況監視予測システムによって量的な予測が可能になることが期待されている。干潮時の補正過大については今後の課題である。

謝辞

大阪管区気象台天満防災調査課長及び小畠水害対策気象官には円山川流域の河川水位の特徴について有益な助言をいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 林原寛典 (2011): 気象庁の高潮数値予測モデルについて. 天気, **58**, No. 3, 55-60.
- 近畿地方整備局 (2013): 円山川水系河川整備計画 (国管理区間). pp89.
- 気象庁: 潮位表. (<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>, 2016.3.11 閲覧)
- 小林健作・櫻井敬三・佐久間祐介 (2015): 日本沿岸モデル MRI.COM-JPN における 2012 年台風第 16 号に伴う潮位変動の検証. 測候時報, **82**, 特別号, S29-S42.
- 国土交通省: 水文水質データベース. (<http://www1.river.go.jp/>, 2016.3.11 閲覧)
- 熊谷健蔵・市瀬友啓・平井住夫・辻尾大樹 (2006): 台風 0423 号による円山川河口部に位置する津居山港周辺の浸水原因について. 海岸工学論文集, **53**, 201-205.
- 京都地方気象台・舞鶴海洋気象台 (2012): 気象速報 平成 24 年 9 月 19 日の京都府北部の高潮について.
- 坂本圭・山中吾郎・辻野博之・中野英之・平原幹俊 (2014): 水平解像度 2km の瀬戸内海モデル MRI.COM-Seto 及び日本沿岸モデル MRI.COM-JPN の開発. 測候時報, **81**, 特別号, S63-S75.
- 田中信行・太田琢磨・牧原康隆 (2008): 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善. 測候時報, **75**, 35-69.
- 辻尾大樹・熊谷健蔵・市瀬友啓 (2008): 円山川の洪水流を考慮した津居山港の簡易高潮予測システム. 土木学会第 63 回年次学術講演会, 405-406.
- 宇野木早苗 (2012): 海の自然と災害, 成山堂書店, pp370.
- 若林吾宇・森裕之・河野俊一・板垣真資 (2013). 山陰～北陸地方における高潮モデルの地域特性. 測候時報, **80**, 特別号, S75-S84.