

非定常過程における高潮の吹き寄せ効果について

Storm Surge Caused by Wind Setup in a Nonstationary Process

村上智一¹・吉野 純²・安田孝志³

Tomokazu MURAKAMI, Jun YOSHINO and Takashi YASUDA

This study is aimed at clarifying a wind-drift effect in a nonstationary process. In order to examine a tide level and velocity in storm surge caused by wind setup in the nonstationary process, a numerical simulation is performed by changing such conditions as water depths, wind speeds, turbulence models and so on. As a result, it is shown that the tide level caused by wind setup becomes maximum at the first peak of the harbor oscillation. Moreover, it is demonstrated that the maximum tide level increases depending on the water depth, wind speed, turbulence model and so on because the natural period of the harbor oscillation and the mass flux of wind-driven currents are greatly related to the maximum tide level.

1. はじめに

高潮の再現や予測の数値計算は、時間発展方程式を用いて行われるが、主因となる吹き寄せ効果の説明は、一般に定常状態を仮定した

$$\rho gh(\partial\eta/\partial x) = \tau_s + \tau_b \dots\dots\dots (1)$$

によって行われている (和達, 1970; 宇野木, 1993 など). ここで, τ_s は風応力, τ_b は底面応力, η は潮位, h は水深である. この式は, 見掛け上, 水位差が風応力および底面応力と静力学的にバランスすることを示しているように見えるが, 実際には風応力によって駆動される吹送流の流量と等しい流量の戻り流れを駆動するために水面勾配が生じ, それが吹き寄せ効果による潮位上昇として捉えられることを示している. そのため, 同一の風速下であっても, 潮位上昇量は, 吹送流の流量を支配する乱流・密度構造や湾形状等だけでなく, 吹送流と戻り流れの流量が定常になるまでの非定常過程において大きく変化することになる.

そこで本研究では, 吹き寄せ効果を上述のように吹送流と流量が等しい戻り流れの駆動力となる動水勾配を発生させるものとして捉える. それによる潮位上昇量は式 (1) の定常状態に至る前の非定常過程において最大となることを湾の水深・長さ, 風速, 密度成層, 乱流モデルなどを变化させた数値実験によって実証する. そして, 非定常過程において発生する最高潮位は, 湾固有振動周期と吹送流の流量に支配されることを指摘し, どのような条件で最高潮位が高くなるのかを明らかにすると共に,

最高潮位と湾の水深・長さ, 風速, 流量, 密度成層, 乱流モデルなどとの関係の解明を図る.

2. 数値実験の概要

鉛直 2 次元のプリミティブ方程式系を有限差分法で離散化し, 図-1 に示す仮想的な長方形湾を対象に流速と水位について計算する. その際, 初期条件を静水状態とし, 一様定常風を吹かせて 72 時間の計算を行う. なお, 特に断らない限り, 乱流モデルは Mellor - Yamada Level 2.5 乱流モデル (Mellor・Yamada, 1982) を用い, 風速 $U=30$ m/s および密度成層なしの条件で計算を行うものとする.

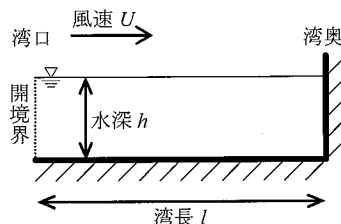


図-1 計算領域

3. 非定常過程における最高潮位の検討

図-2 は, 湾長 $l=50$ km の条件における湾奥潮位の時間変化を水深 $h=5$ m, 10 m および 30 m の湾で比較したものである. これより, 水深 10 m および 30 m の湾の潮位は, 一様定常風の条件下であっても計算初期の段階において振動しており, 水深が深いほど振動が長く続くことがわかる. そして, その周期は湾固有振動の基本モード周期 $T_n=4l/\sqrt{gh}$ (水深 5 m, 10 m, 30 m の T_n はそれぞれ 7.9 時間, 5.6 時間, 3.2 時間) と一致している. また, 最初の振動の際にいずれの水深でも最高潮位 η_p を記録しており, 風の吹き始めの初期の段階で最

1 正 会 員 博(工) 豊橋技術科学大学産学官連携研究員 工学部建設工学系
2 正 会 員 博(理) 岐阜大学助教 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
3 フェロー 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

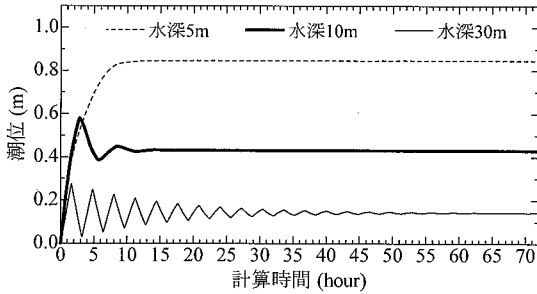


図-2 潮位の時間変化と湾水深の関係 (湾長 50km)

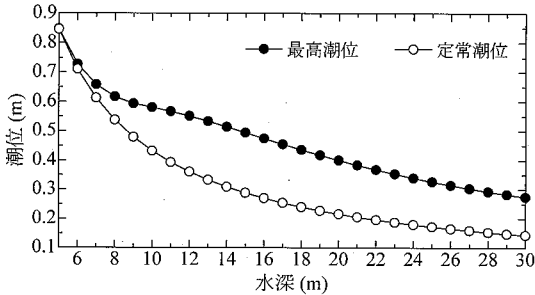


図-3 最高および定常潮位と湾水深の関係 (湾長 50km)

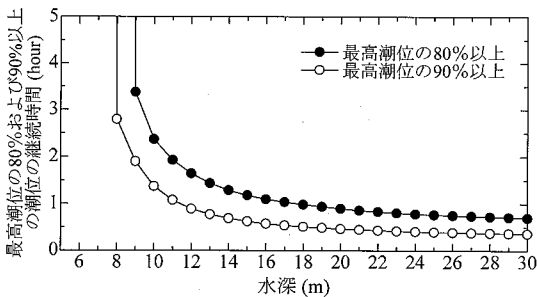


図-4 各水深での最高潮位の80%および90%以上の潮位の継続時間 (湾長 50km)

高潮位が生じることが明らかとなった。一方、風の吹き始めから72時間後では、いずれの水深においても潮位の振動が消え、定常状態に達したものと判断できる。そこで、この時の潮位を定常潮位 η_s と定義する。

図-3は、最高および定常潮位と水深との関係を示したものである。この図より、水深が浅いほど最高潮位および定常潮位が大きくなることがわかる。また、定常潮位に回帰式を当てはめると $\eta_s = 4.26h^{-0.996}$ となり、式(1)の潮位と水深の関係にほぼ一致している。しかしながら、最高潮位 η_p は h^{-1} に従わず、式(1)では説明することができない。実際の台風では、強風が数日間湾奥に向けて吹き続けることはほとんど無く、定常潮位が観測されることは希であり、最高潮位を伴う最初の振動が高潮として観測されることになる。

この最高潮位 η_p は湾固有振動と連動して振動しているが、各水深での $0.8\eta_p$ および $0.9\eta_p$ 以上の潮位の継

続時間を示す図-4からわかるように、水深30mおよび湾長50kmのような振動周期が短い湾であっても、最高潮位の90%以上の潮位の継続時間は30分近くに及んでいる。そのため、実際の高潮が暴風波浪を伴っていることを考えれば、その作用も含めて浸水の拡大には十分な時間と言える。

このように、高潮対策を考える上で最高潮位が極めて重要となるが、高潮の再現や予測の数値計算では、一般的に時間発展方程式によって行われるため、最高潮位 η_p が何ら問題なく求められる。しかしながら、非定常過程にある高潮の吹き寄せ効果を式(1)によって説明・理解することは誤りと言える。

4. 湾水振動の発生条件の検討

前章では、非定常過程において湾水振動が発生し、その最初の振動で最高潮位が発生することを水深10mおよび30mの湾において明らかにした。しかしながら、水深5mの湾では、前述の図-2～4において示されたように湾水振動が認められず、最高潮位の80%および90%以上の潮位の継続時間も無限に近くなり、最高潮位と定常潮位が一致している。ここでは湾水振動が発生する条件を明らかにする。

図-5は、湾口部での単位幅流量 Q (以降、流量と略称) と湾水深の関係と共に、比較のために湾奥での潮位の時間変化を併せて示したものである。この図より、水深10mおよび30mの湾の湾口での流量 Q は、計算開始から湾固有振動周期 T_n の半分の時間にわたって流入しており、特に $T_n/4$ 時間経過時に最大流入となっていることがわかる。また、 $T_n/2 \sim T_n$ の間では、湾口で流出している様子が認められる。これは、風応力によって駆動される吹送流と湾奥で吹送流が堰き止められて発生する戻り流れによって湾口部を節とする湾水振動が形成され、それに湾口での流量 Q が支配されていることを示している。そして、時間の経過に伴って流入・流出量は共に小さくなって行き、最終的には吹送流と戻り流れの流量が一致する定常状態となり、湾内全域で流量はゼロとなる。その時、湾奥での潮位も定常潮位となっており、式(1)によって与えられるようになる。

また、最大潮位起時および定常潮位収束時(計算開始から72時間後)において静水状態から増加した湾内海水量は、それぞれ、

$$\Delta V_p = \int_0^1 \eta(x, t)|_{t=T_n/2} dx = \int_0^{T_n/2} Q dt \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\Delta V_s = \int_0^1 \eta(x, t)|_{t=72} dx = \int_0^{72} Q dt \quad \cdots \cdots (3)$$

として求めることができる。このようにして求めた海水増加量を表-1に示す。最高潮位起時までの海水増加量

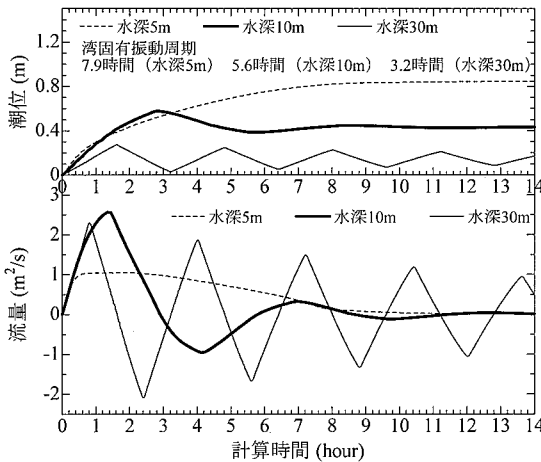


図-5 湾口部での流量および潮位の時間変化と湾水深の関係 (湾長 50km)；正の値は流入，負の値は流出を示す。

表-1 最高潮位起時までの海水増加量 ΔV_p および定常潮位収束時までの海水増加量 ΔV_s の比較 (湾長 50 km)

湾の水深	ΔV_p	ΔV_s
5 m	13,508 m ³	21,990 m ³
10 m	15,024 m ³	10,927 m ³
30 m	6,923 m ³	3,604 m ³

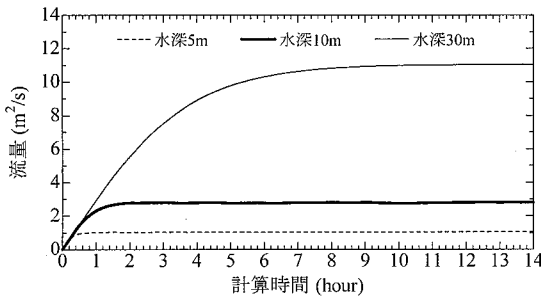


図-6 周期境界を用いて計算した吹送流の流量と水深の関係

ΔV_p は、水深 10 m の湾が最も大きく、次いで 5 m, 30 m の湾の順となっている。式 (2) より、 ΔV_p は湾口での流量 Q が大きく、湾固有振動周期が長いほど大きくなる。そして、後者の湾固有振動周期は、水深が大きいほど長くなる。一方、前者の湾口部での流量 Q と水深の関係は、前述の図-5 に示した通りであるが、この流量は吹送流に戻り流れが加わったものであり、戻り流れが吹送流によって生成されることを考えれば、流量 Q は吹送流の流量が支配しているものと言える。

そこで、図-1 の計算領域において開境界および陸境界を共に周期境界に変更し、戻り流れの影響を受けない吹送流の流量を求め、図-6 に示した。これより、吹送流の流量は水深が浅いほど少なくなっていることがわかる。そして、水深 5 m の湾では、湾固有振動周期が長

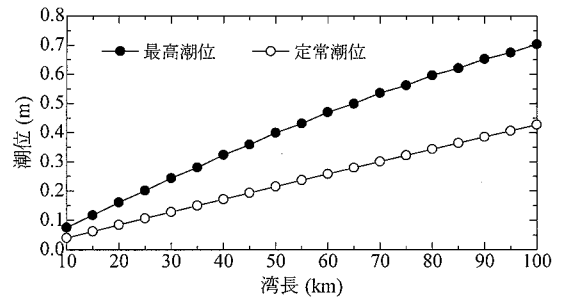


図-7 最高および定常潮位と湾長の関係 (水深 20m)

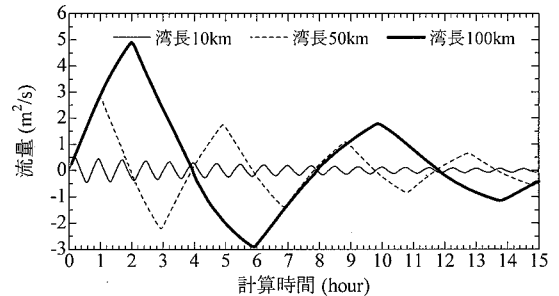


図-8 湾口部での流量の時間変化と湾長の関係 (水深 20m)；正の値は流入，負の値は流出を示す。

いものの湾内へ流入する吹送流の流量が少ないために、水深 10 m の湾に比べて ΔV_p の値が小さくなったものと考えられる。これに対して、水深 30 m の湾は、吹送流の流量は多いものの湾固有振動周期が短いために ΔV_p の値が小さくなっている。これらのことから、最高潮位起時までの海水増加量 ΔV_p は、湾固有振動周期が長く、吹送流の流量が多い場合に大きくなると判断できる。

また、定常潮位時の海水増加量 ΔV_s と ΔV_p を比較すると、水深 10 m および 30 m の湾では ΔV_p の方が大きくなっており、 $T_n/2$ において平衡状態の海水量を上回る海水が湾内に存在していることがわかる。そのため、平衡状態 (定常潮位) に対して復元力が働き、湾水振動が発生したのと考えられる。一方、水深 5 m の湾では ΔV_p より ΔV_s の方が大きく、時刻 $T_n/2$ の時ではまだ平衡状態の海水量に達していない。そのため、その後においても平衡状態の海水量を満たすまで海水が流入し続けることが可能であり、湾水振動の発生に繋がらなかったものと判断される。

5. 最高潮位と湾固有振動周期の関係

前章では、最高潮位の発生に湾固有振動周期と吹送流の流量が大きく関わることを示した。ここでは、湾長の長さを変化させ、湾固有振動周期の長さが最高潮位に与える影響を明らかにする。

図-7 は、水深 $h=20$ m の条件における最高および定

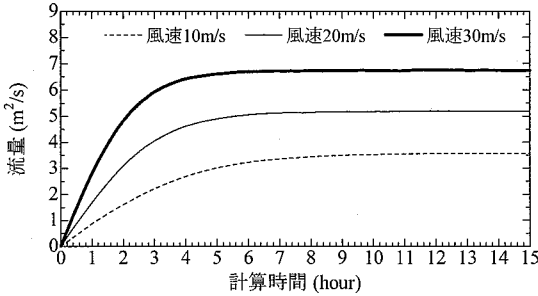


図-9 周期境界を用いて計算した吹送流の流量と風速の関係 (水深 20m)

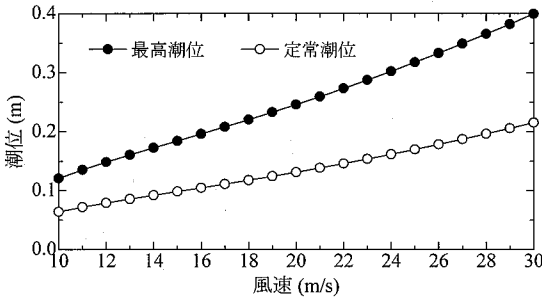


図-10 最高および定常潮位と風速の関係 (水深 20m, 湾長 50km)

常潮位と湾長との関係を示したものである。湾長が長くなるほど最高潮位と定常潮位の差が大きくなり、最高潮位が重要となることがわかる。

図-8 は、湾口部での流量 Q と湾長の関係を示したものである。前述したように湾固有振動周期の半分の時間まで吹送流によって湾内へ海水が流入するため、湾長 100 km の湾で流量 Q の極大値が最大となっており、その結果、前述の図-7 に示したように最大潮位も最大となった。このことから、湾長は吹送流による海水の流入時間を支配し、最高潮位の発生に大きな影響を与えるために重要なパラメータであると言える。

6. 最高潮位と吹送流の流量の関係

ここでは、風速を変化させ、吹送流の流量が最高潮位に与える影響を明らかにする。

まず、図-1 の計算領域 (水深 $h=20$ m) において開境界および陸境界を共に周期境界に変更し、吹送流の流量を求めたものを図-9 に示す。これより、風速が強いほど吹送流が発達するまでの時間が短く、流量も大きくなることから、強風時では湾固有振動周期が短い湾であっても最高潮位が大きくなると言える。

図-10 は、水深 $h=20$ m および湾長 $l=50$ km の条件における最高および定常潮位と風速との関係を示す。風速が強くなるほど最高潮位と定常潮位の差が大きくなる。

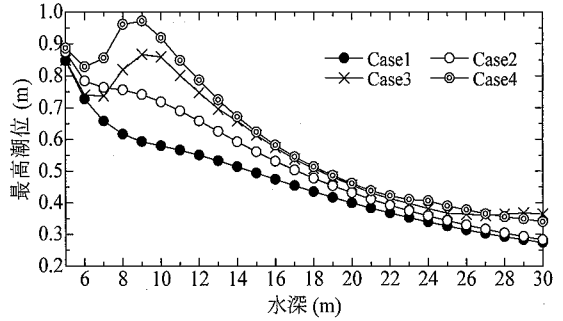


図-11 ケース毎の最高潮位と湾水深の関係 (湾長 50km)

表-2 図-12 および 13 における各ケースの計算条件

	乱流モデル	密度成層
Case1	Mellor-Yamada モデル (Mellor・Yamada, 1982)	無し
Case2	Richardson 関数型 (中辻ら, 1991)	無し
Case3	Mellor-Yamada モデル (Mellor ら, 1982)	夏季伊勢湾の平均密度
Case4	Richardson 関数型 (中辻ら, 1991)	夏季伊勢湾の平均密度

$h=20$ m および $l=50$ km の T_n は約 4 時間であり、前述したようにその半分の時間まで吹送流によって湾内へ海水が流入する。図-9 に示されたように、風速 30 m/s の場合であっても吹送流が発達し定常になるまでの時間は約 5 時間であり、このことから吹送流の流量のみならず発達速度も重要であると判断できる。

7. 最高潮位と乱流モデルおよび密度成層の関係

図-11 は、最高潮位と水深の関係に及ぼす乱流モデルおよび密度成層の影響を調べるために、湾長 $l=50$ km の条件において表-2 に示す各ケースで比較したものである。これより、成層が存在する場合には水深と潮位は必ずしも反比例しないことがわかる。これは、周期境界を用いて計算した各ケースの水深 10 m の吹送流の流量を求めた図-12 に示されるように密度成層の存在によって吹送流の流量が一時的に増加したためである。また、Mellor-Yamada 乱流モデルは、Richardson 関数型より渦粘性係数が小さいため (村上ら, 2004a)、吹送流の流量も少なくなっている。それ故、Case1 および 3 より Case2 および 4 の方が最高潮位が大きくなり、最高潮位と吹送流の流量が密接に関わっていることが良くわかる結果となっている。

図-13 は水深 $h=20$ m の条件において最高潮位と湾長の関係を表-2 に示す各ケースで比較したものである。湾奥の潮位は定常・非定常に関係なく湾長に比例するが、湾長によって湾固有振動周期が長くなり、その結果、吹送流の流入する時間も長くなり、各ケースの間の最高潮位の差が大きくなったものと考えられる。

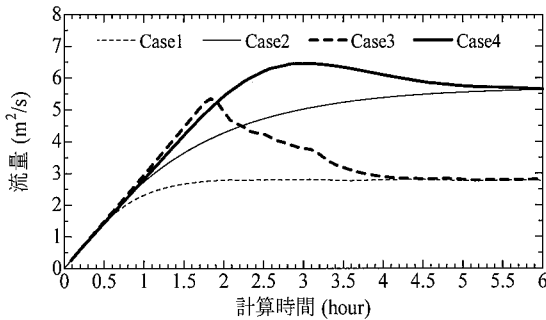


図-12 周期境界を用いて計算した吹送流の流量と風速の関係 (水深 10m)

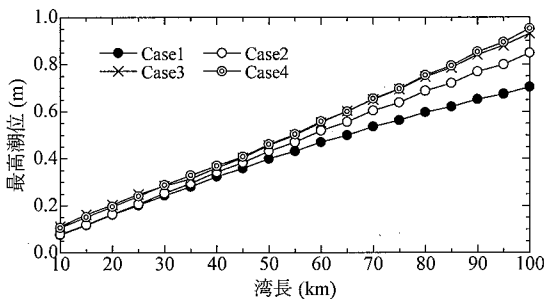


図-13 ケース毎の最高潮位と湾長の関係 (水深 20m)

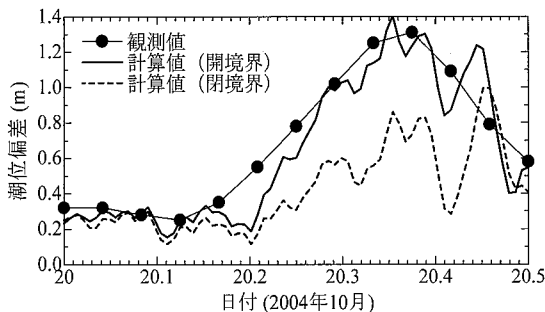


図-14 名古屋港における潮位偏差の観測値と計算値の比較

8. 実海域での最高潮位の検討

実海域では、台風に伴う吹送流によって外洋から内湾へ海水が流入し、最高潮位に影響を与えるものと考えられる。また、実海域の吹送流は、風の非定常性や水深の変化などの影響を受ける。そこで本章では、台風 0423 号による伊勢湾での高潮を事例に挙げ、伊勢湾の開口部を開および閉境界として大気-海洋-波浪結合モデル(村上ら, 2004b)を用いて計算し、実海域においても吹送流の流量が最高潮位に大きな影響を与えることを実証する。

図-14 は、名古屋港における潮位偏差の観測値と計算値の比較を示したものである。この図より、開境界を用

いた計算では、観測値の潮位偏差を精度良く再現していることがわかる。これに対して、閉境界を用いた計算では、潮位偏差を半分程度しか再現しておらず、吹送流による外洋から内湾への海水流入の重要性が良くわかる結果となっている。

9. おわりに

以上、非定常過程における高潮の吹き寄せ効果について検討し、それによる潮位上昇量と湾の水深・長さ、風速、流量、密度成層および乱流モデルとの関係を明らかにした。本研究で得られた主要な成果を要約すると以下の通りである。

- 1) 吹き寄せによる潮位上昇は、非定常過程において発生する湾水振動の最初の振幅で最大値となる。
- 2) この最高潮位は、従来の定常吹き寄せ理論で説明可能な定常潮位を大きく上回り、高潮対策を考える上で重要となる。
- 3) 定常潮位は、湾水振動が減衰し、吹送流および戻り流れの流量が湾内全域で等しくなる流量ゼロの平衡状態において実現する。そして、この状態を上回る海水が湾内に流入することで平衡状態に対する復元力が働いて湾水振動が起り、最高潮位が発生することを明らかにした。
- 4) 最高潮位の起時は、湾固有振動の半周期に一致する。
- 5) 最高潮位の大きさは、吹送流の流量が多く、その流入時間を支配する湾固有振動周期が長い場合に大きくなる。そして、湾の水深・長さ、風速、密度成層、乱流モデルに依存して最高潮位が大きくなることを数値計算によって実証した。

謝辞：伊勢湾の観測データは中部国際空港株式会社・愛知県企業庁よりご提供頂いた。また、本研究は科学研究費補助金基盤研究 (B) (2) 18360236 および若手研究 17740306 による成果であることを付記し、ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，p. 244.
- 中辻啓二・許 再寧・室田 明(1991)：三次元表層密度流の数値実験，土木学会論文集，No.434/II-16，pp. 19-28.
- 村上智一・大澤輝夫・伊藤秀文・安田孝志(2004a)：浅海域の海面境界層における乱流モデリングの重要性と改良の方向性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 346-350.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004b)：気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重座標モデルの開発，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 366-370.
- 和達清夫(1970)：津波・高潮・海洋災害，共立出版，p. 282.
- Mellor, G.L. and T. Yamada(1982)：Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, No.4, pp. 851-875.