

メコン流域における水と感染症2

ベトナム南部における都市河川の微生物汚染と病原性微生物の摂取経路の推定

おぐま くみこ まつばら こういち きたじま まさあき かたやま ひろゆき たきざわ さとし
 小 熊 久美子 : 松 原 康 一 : 北 島 正 章 : 片 山 浩 之 : 滝 沢 智
 Kumiko OGUMA Koichi MATSUBARA Masaaki KITAJIMA Hiroyuki KATAYAMA Satoshi TAKIZAWA

はじめに

ベトナム南部のホーチミン市は、ベトナム経済の中心として、メコンデルタを含む広大な後背地から人口が流入し、近年急速な人口集中が進んでいる。その一方で、都市インフラの整備率は低く、水道や下水道等の整備・拡充が重要な課題となっている。下水道に関してみると、ホーチミン市の中心部では汚水および雨水排除のための下水道はあるものの、集められた下水のほとんどが無処理のまま近隣の運河や河川に放流され、水質汚染を引き起こしている。他の熱帯モンスーン諸国と同様に、ベトナム南部では子供が池で遊んだり、成人の男性が河川で水浴を行う習慣がある。また、都市近郊の運河などでは、収穫した野菜や果物を出荷前に水洗いする光景も良く見かけられる。しかしこれらの水域では、人口の増加とともに汚濁負荷量が年々増加し、水系感染症を引き起こす微生物濃度が上昇した結果、水系感染症のリスクが高まっている。本稿では、著者らがベトナム南部において、水環境中の微生物および水圏感染症を引き起こすルートとしての生鮮野菜の調査を行った結果をもとに、急速に発展を遂げるベトナム南部の都市およびその近郊における、微生物感染リスクについて報告する。

I. ベトナムの概要

1. ベトナムの地理と水環境

ベトナムは、ハノイ市、ホーチミン市など5つの

政令市を含む64県(Province)からなり、国土は南北に1,640kmに伸びたS字状で、その面積はおよそ331,000km²である。ベトナムの降水量は年間1,960mmと多く、このうち蒸発散量は48.6%(953mm)と推定されている。しかし、雨季と乾季の降水量の差が大きく、5~11月の雨季に70~80%の降雨があるため、乾季の水不足は深刻である。ベトナムには8つの大きな河川水系があり、年間の総流量は約880km³と推定されている(表1)。

ホーチミン市を中心とするベトナム南部は、熱帯モンスーン気候に属し、年間を通じて気温は25℃以上、年平均気温は約28℃と高く、気温の年間変動は小さい。ホーチミン市の平均海拔は19mと低く、地形を概観すると、北側から南側になるほど、また、東側から西側になるほど、高度が低い。ホーチミン市は、ドンナイ川が南シナ海に注ぐ河口に作り出した巨大な三角州に位置し、豊富な水資源と発達した水路交通に支えられて発展してきた。表1に示した通り、サイゴン・ドンナイ川流域は、メコン川流域、紅河流域につづく3番目に大きな流域面積を有している。ドンナイ川の総延長は約620kmで、流域の年間平均降水量は2,100mm、年間総降水量は840億m³に至り、地域の地下水や表流水の重要な水源となっている。蒸発散量は1,350mm程度であるが、季節差が大きく、乾季の3月に約170mmと最も大きくなる。

ホーチミン市は、ベトナムの総GDPのおよそ3分の1を産出し、また、2007年には目標GDP成長率12%を達成する見込みであるなど、ベトナム国家経済を牽引する中心都市といえる²⁾。現在620万人

表1 ベトナムの主な河川水系¹⁾

順位	河川系	集水域面積			年間流量	
		全体 (km ²)	うちベトナム国内 (km ²)	国内の割合 (%)	全体 (km ³)	国内の割合 (%)
1	Mekong	795,000	72,000	9.1	520.3	10.0
2	Hong - Thai Binh	169,000	86,660	51.3	137.0	68.0
3	Sai Gon - Dong Nai	40,683	36,261	89.1	30.6	95.0
4	Ma - Chu	28,490	17,810	62.5	20.1	78.0
5	Ca	27,200	17,730	65.2	24.2	80.0
6	Ba	13,900	13,900	100.0	10.4	100.0
7	Bang Fiang-Ky Cung	12,880	11,220	87.1	8.9	81.0
8	Thu Bon	10,496	10,496	100.0	19.3	100.0
9	その他				109.0	12.3
合計					879.8	

注：サイゴン・ドンナイ川の集水域面積は、その定義により 40,683km²から 48,628km²までの異なった報告がある。

を超えるホーチミン市の人口は、未だ2%を超える高い年間増加率を示しており、2010年には710万人に達すると予測されている。これは、ベトナム国土面積のわずか0.6%に総人口の7%あまりが居住する計算となり、その人口集中ぶりがうかがえる。

ホーチミン市では、右肩上がりの人口増加と経済成長に伴い、水需要量も増加し続けている。ホーチミン市における一日あたりの水需要量は現在180万m³を超え、2010年までには230万m³に達すると試算されている²⁾。水需要量の増加は、やがて生活・工業排水の増大をもたらすが、これらの排水のほとんどは未処理または不十分な処理の状態のまま公共用水域に排出されているため、サイゴン川やドンナイ川の水質汚濁を引き起こしている(写真1)。サイゴン川およびドンナイ川は、ベトナム南部地域の重



写真1 ホーチミン市の運河沿いに建設された住宅

要な水道水源であるとともに、工業用水、水力発電用水、農業灌漑用水などとして利用され、さらにメコン川とつながる運河網は水上交通、観光業、水産業など多岐にわたる経済活動を支えており、それらの河川の水質悪化は地域経済活動の足枷となることが懸念されている。

2. ベトナムの水質規制

ベトナムの水環境基準はTCVN5942-1995によって水道水源であるA類型と、その他の河川のB類型が類型指定されており(表2)、30項目について水質基準が定められている³⁾。また、この他に、灌漑用水や水産用水等の特定の目的に使用する水に関しては、目的ごとの基準も定められている。水道用水源水質の基準ではpHが6.0 - 8.5に定められているが、ベトナムの国土の16%は硫酸酸性土壌であり⁴⁾、特にメコンデルタなどの南部低平地は硫酸酸性土壌により、pHが低いことが知られている。また、BOD、溶存酸素濃度、アンモニア性窒素濃度なども低い値に設定されているが、ひとたび水質汚濁を受けると、これらの基準を守ることが困難となる。特徴的なのはDDTとそれ以外の全農薬の基準が定められていることであり、DDTが未だに使用されていることをうかがわせる。日本では水道水質基準にDDTは無く、WHOのガイドライン⁵⁾ではDDTとその代謝産物の濃度として0.001mg/Lに定められているが、それと比較すると、ベトナムの基準は10倍であることがわかる。

表2 ベトナムの河川水質基準 (TCVN5942-1995)

水質項目 (抜粋)	単位	A 類型 (水道用)	B 類型 (その他の河川)
pH		6.0-8.5	5.5-9.0
BOD ₅	mg/L	<4	<25
溶存酸素濃度	mg/L	≥6	≥2
浮遊物質 SS	mg/L	20	80
アンモニア性窒素	mg/L	0.05	1.0
硝酸性窒素	mg/L	10	15
全鉄	mg/L	1	2
フッ素	mg/L	1	1.5
大腸菌群数	MPN/100mL	5,000	10,000
全農薬 (DDT を除く)	mg/L	0.15	0.15
DDT	mg/L	0.01	0.01

II. ホーチミン市の都市洪水と健康リスク

三角州に発展した都市の宿命として、ホーチミン市は洪水被害を受けやすい。雨季には毎年のように大規模な洪水が発生し、甚大な被害が報告されている。ホーチミン市の中心部を流れる運河水路網では、降水量の増加に加え、潮汐による海水面の上昇や廃棄物による排水路閉鎖などの要因も複合的に作用して洪水が発生する。そのため、洪水現象は複雑で、その予測や対策は困難である。特に、水路網が密で洪水が頻発する地域は、人口密度が極めて高く低所得者層が多い地域でもあるため、洪水により深刻な被害が発生している。

洪水発生時には、生活排水による家屋の浸水や飲用井戸の汚染が生じ、水系感染症の蔓延という形で住民の健康が脅かされる。ベトナムにおける5歳未満児死亡率は年間42.2/1000人で、その15%は下痢症に関連しているという疫学的データが報告されている⁶⁾。

筆者らは、2004年11月、ホーチミン市中心部の人口密集地域 (Tan Hoa-Lo Gom 運河流域) において、洪水と健康被害に関する対面式のアンケート調査を行った⁷⁾。調査対象は洪水被害地域及および洪水のない地域に居住する300世帯を無作為に抽出し、そのうち不在などを除く有効回答291世帯 (有効回答率97%) を得た。これを人口に換算すると、洪水地域に住む住民は527人、洪水のない地域に住む住民は931人であった。

表3に洪水被害と健康に関するアンケート調査結

果を示す。表3に示したとおり、下痢症および皮膚疾患、咽頭痛の発症率について、洪水と発症率の相関が高く、特に皮膚疾患と咽頭痛については洪水発生地域で有意に高かった。また、特に下痢症に注目してアンケート対象者の生活様式を詳細に調べた結果、洪水地域居住者のうち、洪水時に医療サービスを容易に利用できた世帯、水道水・ボトル水を利用した世帯、飲用水をいったん煮沸した世帯、また、洪水後に室内を消毒した世帯では、その他の世帯に比べて洪水と発症率の相関が有意に低かった。疾病の発生には、居住者の栄養状態や生活様式などさまざまな因子が影響するため、一概に洪水の有無だけで発症率を説明することはできないが、洪水発生頻度を低減したり、洪水時や洪水後に適切な対応を講じたりする事で、疾病の発生を低減できる可能性が

表3 疾病発症率と洪水と疾病の相関オッズ比

疾病	洪水状況	感染者数 (感染率%)	オッズ比 (95%信頼区間)
下痢症	洪水有り	8 (1.5)	2.04 (0.73-5.64)
	洪水無し	7 (0.8)	
皮膚疾患	洪水有り	16 (3.0)	9.69 (2.81-33.4)
	洪水無し	3 (0.3)	
咽頭痛	洪水有り	13 (2.5)	5.86 (1.90-18.07)
	洪水無し	4 (0.4)	
咳	洪水有り	4 (0.8)	1.01 (0.29-3.47)
	洪水無し	7 (0.8)	
トラコーマ	洪水有り	0 (0.0)	—
	洪水無し	1 (0.1)	
結膜炎	洪水有り	3 (0.6)	—
	洪水無し	0 (0.0)	
発熱	洪水有り	2 (0.4)	—
	洪水無し	0 (0.0)	

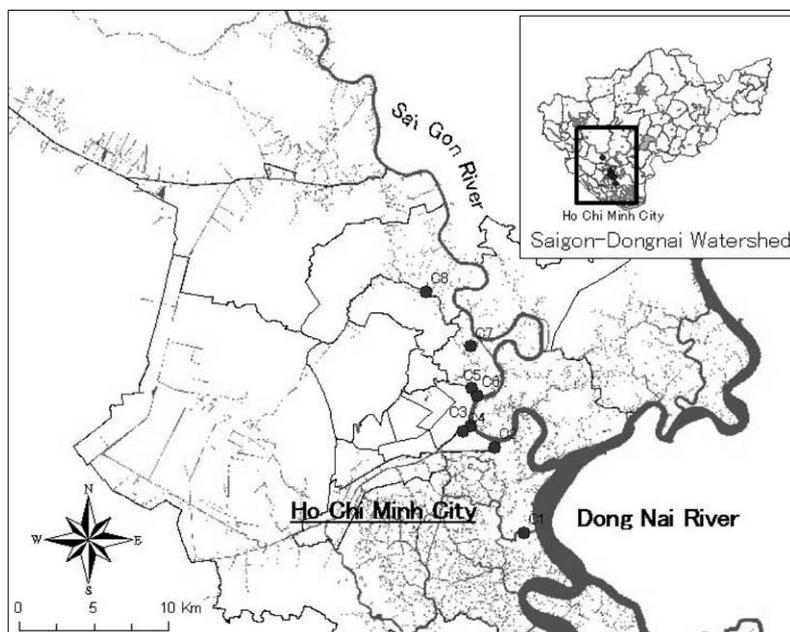


図1 調査地域地図および採水地点⁸⁾

C1-C8：都市運河採水地点、R1-R6：サイゴン・ドンナイ川採水地点

示唆された。

洪水に伴う健康被害が報告される一方、有効な洪水対策として、上下水システムの改善や廃棄物の回収・除去の徹底、住民教育の重要性が指摘されてきた。ホーチミン市は、抜本的対策として洪水頻発地区からの居住者の移転を最重要政策の一つとして掲げ、運河周辺の人口過密地区の住民に対して高台地域の住宅を無償提供してきた²⁾。しかしながら、生活手段が奪われるなどの理由から住み替えに賛同する住民は少なく、移住政策は決定的な成果をあげられないまま現在に至っている。また、排水処理によって洪水リスクを低減するという観点では、2010年までの目標として、日処理量230万 m^3 の排水処理施設を整備し、雨水と生活排水を分離して処理するシステムを新たに2系統建設することとしている²⁾。今後どのような対策を講ずるにせよ、それらの実現可能性や対費用効果、期待される改善効果について、実測データや科学的論拠に基づいた定量的検証が急務の課題といえる。

Ⅲ. ホーチミン市の都市運河と サイゴン・ドンナイ川の微生物汚染

筆者らの研究グループは、2005年（雨季）、2006年（雨季、乾季）の計3度にわたり、サイゴン・ド

ンナイ川および主要な都市運河の病原微生物汚染調査を行った⁸⁾。調査地域は、サイゴン川が人口密集域に入りドンナイ川に合流するまでの下流域約30kmと、流下の途中で合流する主要な5本の都市運河（8採水地点）である（図1）。

大腸菌群、大腸菌に関しては、メンブレンフィルター法により mColiBlue24 broth (Millipore) を用いて37℃、24時間培養を行った。既報⁹⁾に従ってウイルスを濃縮した後、ノロウイルス遺伝子 (Genogroup1 および Genogroup2 の和) を既報¹⁰⁾に従って定量リアルタイム RT-PCRにより測定した。

その結果、雨季の大腸菌濃度より、乾季の大腸菌濃度が高く、大腸菌群も同じ傾向にあった。特に、乾季の大腸菌群濃度は最大約 10^5 CFU/mLとなった。ベトナムの河川水質基準 (TCVN5942-1995) は大腸菌群濃度として10,000 MPN/100mL (= 10^2 CFU/mL) であるが、サイゴン川の都市部および都市運河からサイゴン川への合流地点ではほぼすべての地点でこれを上回る汚染が観測された（図2）。

C3、C4 (Ben-Nghe Canal) およびC2 (Kenh Te Canal) は、同一の運河の分岐点から、それぞれ約2km、4km 流下した地点における採水地点であるが、C3、C4における大腸菌群濃度がC2の20倍～70倍と、すべての調査期間において大きく上回っている。これは、比較的水質の良いサイゴン川の逆流によっ

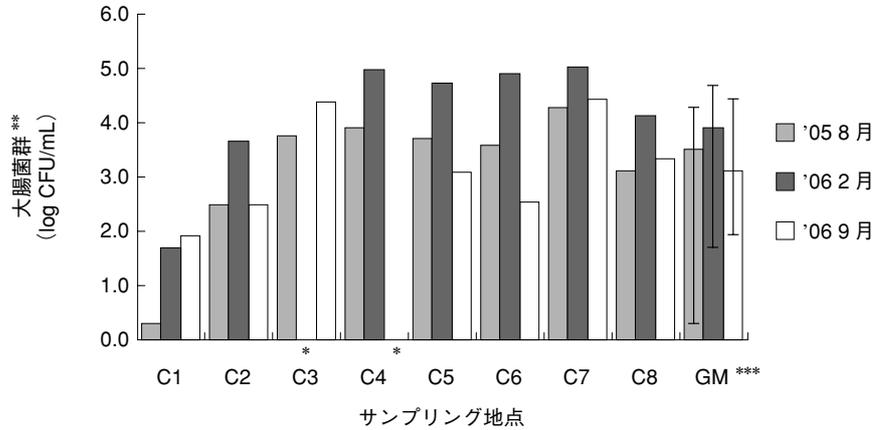


図2 都市運河の大腸菌群濃度

注：*採水地点工事中のため調査せず。

**CFU：Colony Forming Unit. 大腸菌群濃度は対数濃度（log concentration）を示す。

***GM：各調査期間におけるC1～C8の幾何平均値。エラーバーは最大・最小値を示す。

てC2地点に流下する汚濁が希釈されているためと考えられる。このように、都市運河では、場所・時期によって汚染状況が著しく異なるため、水系感染症のリスクが特に高い場所・時期を考慮して対策を示す必要があるだろう。

ノロウイルスは、特に都市運河において、乾季に高い濃度（最大約 10^3 PDU/mL）を示す傾向が見られた。検出されたノロウイルスの濃度は、同様の手法で調査した日本の下水処理場流入水中のノロウイルス最大濃度（ $10^3 \sim 10^4$ PDU/mL¹¹⁾と同程度であり、ホーチミン市内を流れる都市運河は下水の放流渠となっていることが裏付けられた。

また、都市運河では大腸菌・大腸菌群濃度とノロウイルス濃度には強い正の相関があったが、サイゴン川ではウイルス濃度のみが高く観測されることがあった。ノロウイルスを含む腸管系ウイルスは、一般に大腸菌よりも水中での耐性が高い傾向がある。特に、ノロウイルスG1型、G2型に関してはヒト腸管のみで増殖すると考えられており、水中での安定性も高い。従って、サイゴン川でウイルス濃度のみが高かった理由として、汚染発生からの時間経過が都市運河の場合よりも長かったために、大腸菌は死滅してウイルス粒子のみが残存したことが考えられる。このことから、汚染源が近く、比較的汚染後間もないと考えられる都市運河の病原微生物制御において、大腸菌群のモニタリングが有効である可能性が示唆された。

本調査では、特に都市運河が生活排水に由来する

糞便汚染を受けており、細菌・ウイルスによる水系感染症のリスクが高いことが明らかとなった。このような汚染状況にもかかわらず、現地の住民の中には、都市河川・運河に入ってプラスチックバッグを洗う人たちが多く見られる。川で物を洗うのは、ベトナム人の長年の習慣と考えられるが、都市河川の汚濁状況から考えて、河川に入っている人たちが極めて高い水系感染症のリスクを負っているほか、汚濁河川に浸したものを街中に運ぶことで、水系感染症のリスクを拡散することが懸念されている。

IV. 食品経由の健康リスク

1. 食品経由リスクの重要性

ベトナムでは、麺類への付け合せやサラダなどの形で日常的に非加熱または加熱不十分のまま多くの野菜を食する習慣がある。従って、現地における病原微生物の感染経路として飲料水の摂取および水浴行為に伴う経路と並んで、生野菜の喫食の経路が大きく寄与していることも考えられる。これらの感染経路の寄与を明らかにするためには、それぞれの経路中に存在する病原微生物を測定することが必要である。しかしながら、病原微生物の測定には特別な器具および施設を要する場合があり、また微生物試料を保存して日本国内の実験室まで持ち帰ることも容易ではない。そのため、病原微生物の環境中での分布特性、および、さまざまな感染経路からの感

染リスクに関して、発展途上国における基礎的データが不足している現状である。

2. ホーチミン市の生野菜の微生物汚染状況

筆者ら¹²⁾は、ホーチミン市においてレストランで給仕された生野菜8試料、マーケットで販売されていた生野菜11試料、および、農地で栽培されていた生野菜3試料の合計22試料を採取し、その表面に存在する *Escherichia coli* および大腸菌群を拭き取り法によって測定した。周知のとおり、現在のところ *E. coli* および大腸菌群は、比較的簡便に測定可能な糞便由来の病原微生物の存在可能性を示す微生物指標として広く受け入れられている。生野菜表面からの微生物の拭き取り素材としてはガラスウールを、ガラスウールからの微生物の誘出にはグリシン緩衝液 (0.05N glycine-0.14N NaCl, pH7.5) を用いた。適当な希釈倍率に希釈した誘出液を滅菌済みろ過膜 (Analysis Monitor, 日本ミリポア製) でろ過することにより誘出液中の細菌を孔径 0.45 μ m の膜面上に捕捉し、続いて mColiBlue24 broth (日本ミリポア製) をろ過した。mColiBlue24 broth は、標準法である ISO 9308-1 と比較して *E. coli* および大腸菌群の両方に対しそれぞれコロニー同定率で優れており¹³⁾、かつ ISO 9308-1 (72時間) よりも測定がはるかに短時間 (24時間) で完了するという利点を有しているため、特に実験室以外の遠隔地において培養を行う場合にはこの培地を使用するメリットが大きい。試料および培地をろ過後の Analysis Monitor を 37 $^{\circ}$ C で 24時間培養した後、膜面上に形成された *E. coli* (赤) および大腸菌群 (赤+青) のコロニーを計数した。その結果、ほぼすべての生野菜試料から *E. coli* または大腸菌群が検出された。図3に、生野菜 1g あたりの表面における指標細菌数の測定結果を示す。

レストランで給仕された生野菜からも *E. coli* が高濃度で検出されるケースがあったため、ホーチミン市において、生野菜の喫食が糞便由来の病原微生物の主要な感染経路の一つとなっていることが示唆された。この結果は、ホーチミン市における病原微生物の感染経路を推定する上で非常に重要な知見である。また、栽培されている野菜よりもマーケットで販売されている野菜の表面から、指標微生物が高い濃度で検出される傾向が見られた。この理由として、栽培地からマーケットに至る流通経路の中に何

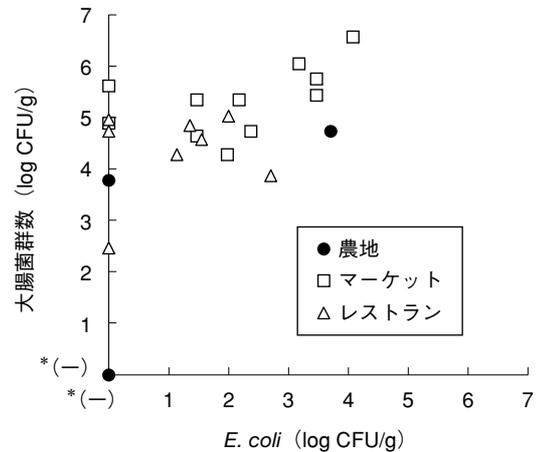


図3 ホーチミン市で測定した生野菜 1g あたりの表面における指標細菌数¹²⁾

* (-) は検出下限未満を表す

らかの汚染源がある可能性、または、生野菜表面上で細菌の増殖がきた可能性などが考えられる。これらの可能性について、引き続きの調査により、栽培地からマーケットに至るまでの生野菜の微生物汚染プロセスを明らかにしていく必要がある。

3. 水汚染と生野菜汚染との関係

野菜の産地 (農村部) における水の微生物汚染は、野菜の微生物汚染と密接な関係があると考えられる。野菜栽培時の灌漑用水、あるいは栽培後に野菜を洗浄する水が汚染されていれば、それらの水により野菜が汚染されることになる。

筆者ら¹²⁾は、生野菜の産地において灌漑用水5試料を採取し、灌漑用水の微生物汚染状況を調査した。灌漑用水の試料採取地点は3地点で、いずれもホーチミン市郊外の農村地帯である。その結果、灌漑用水5試料のうち1試料 (20%) から TaqMan PCR 法⁹⁾によりノロウイルス G2 型の遺伝子が検出され、この灌漑用水はヒト糞便により汚染されていたことが示唆された。*E. coli* または大腸菌群が検出された試料は5試料中4試料 (80%) であり、灌漑用水が生野菜の汚染源の一つである可能性が示唆された。しかしながら、灌漑用水の野菜表面への付着量や、野菜表面上における病原微生物および指標微生物の消長など、水の汚染と生野菜の汚染との定量的な関係については未だ不明確な部分が多く、今後の精査によるデータの蓄積が求められる。

まとめ

ベトナム南部ホーチミン市を中心とした水環境の微生物汚染を調査した結果、特に都市域の運河や河川において、下水と同等な濃度の微生物汚染が起こっていることが確認された。都市住民の中には、このような汚染にもかかわらず、河川水中で洗い物などを行う人々が存在することから、これらの人々の水系感染症罹患リスクが極めて高いことが懸念された。これらハイリスクグループは、都市内で水系感染症を拡大させる原因とも考えられた。また、ベトナム人は生野菜を好んで食べることから、生野菜表面の微生物汚染を調査したところ、農地で栽培されている野菜よりも、市場で売られている野菜のほうが汚染度が高かった。これは、野菜に付着した土などを洗い落とすために、市場へ出荷前の野菜を汚染された都市近郊の河川で洗うことが原因であると推察された。このように、水系感染症のリスクは都市近郊の水質汚濁だけでなく、人々の習慣や行動に強く結びついており、地域住民の水系感染症に対する理解を深め、ハイリスクな行動を変えることで、リスクの低減が図れるのではないかと考えられる。

文 献

- 1) Vietnam Water Resources Sector : Review Main Report. 1996.
- 2) Ho Chi Minh City : HCM City Web, <http://www.hochiminhcity.gov.vn/eng>. 2007.
- 3) Asian Development Bank : Country Water Action : Vietnam Water Rights and Allocation as Key to Sound Usage in Viet Nam, <http://www.adb.org/water/actions/VIE/keys.asp>. 2006.
- 4) 全国農業改良普及支援協会：ベトナムにおける持続的な農業技術を推進するための手引き. 2006.
- 5) World Health Organization : Guidelines for drinking-water quality, Third edition. 2006.
- 6) Doan, L., Okitsu, S., Nishio, O., Pham, D., Nguyen, D., and Ushijima, H.: Epidemiological Features of Rotavirus Infection Among Hospitalized Children with Gastroenteritis in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Journal of Medical Virology* **69** : 588-594, 2003.
- 7) Nguyen, T.T.: Flood Events and their effects on human health in Ho Chi Minh city, Viet Nam. Master Thesis, University of Tokyo. 2005.
- 8) Matsubara, K., Phanuwat C., Ha, N.T.V., Haramoto, E., Katayama, H., Takizawa, S., and Ohgaki S.: Noroviruses and Faecal Contamination in Saigon River and Urban Canals in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Proceeding of the 4th international symposium on Southeast Asian Water Environment* : 301-308, 2006.
- 9) Katayama, H., Shimasaki, A., and Ohgaki S.: Development of a virus concentration method and its application to detection of Enterovirus. *Applied and Environmental Microbiology* **68** : 1033-1039, 2002.
- 10) Kageyama, T., Kojima, S., Shinohara, M., Uchida, K., Fukushi, S., Hoshino, F. B., Takeda, N., and Katayama, K.: Broadly reactive and highly sensitive assay for Norwalk-like viruses based on real-time quantitative reverse transcription-PCR. *Journal of Clinical Microbiology* **41** : 1548-1557, 2003.
- 11) Haramoto, E., Katayama, H., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H., and Ohgaki S.: Seasonal profiles of human noroviruses and indicator bacteria in wastewater treatment plant in Tokyo, Japan. *Water Science and Technology* **54** (11-12) : 301-308, 2006.
- 12) Kitajima, M., Matsubara, K., Ha, N.T.V., Haramoto, E., Katayama, H., Takizawa, S., and Ohgaki, S.: Microbial contamination of raw vegetable and drinking water in Ho Chi Minh city, Viet Nam. *Proceeding of the 3rd International Symposium on the Development of Water Resource Management System in Mekong Watershed* : 19-26, 2006.
- 13) Bernasconi, C., Volponi, G., and Bonadonna, L.: Comparison of three different media for the detection of E. coli and coliforms in water. *Water Science and Technology* **54** (3) : 141-145, 2006.