

氏名	もりた ひろあき 森田 弘昭
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成14年3月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和58年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	霞ヶ浦における洪水時汚濁負荷特性と水環境保全に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 野池達也 東北大学教授 大村達夫 東北大学教授 田中 仁 東北大学教授 西村 修

論文内容要旨

人類の持続的な発展のためには、地球環境や資源の有限性を認識するとともに、これまでの社会制度の有り方や人々の発想、行動様式全般にわたるドラスティックな変革が必要である。

水環境という地球環境を構成する重要なファクターから、地球環境と人類の関係を俯瞰してみると、地域的かつ季節的に偏在する水資源の戦略的搾取という極めてヒト中心な水環境との関わりから、自然環境全体を健全に保全するという大きな理念のもとに水環境が良好な状態に維持され、水辺の多様な自然や文化が地域の歴史や習慣、地理的条件に応じて醸成され、さらに、人と水の自然なふれあいが保たれる関係を構築することに焦点が移りつつある。

少なくとも多くの先進国においては、水資源の配分にかかる都市基盤施設の整備が一段落し、これからは、都市流域での水循環の回復や都市基盤施設の整備によって失われた水辺の再生、都市内に復活した水の清冽さの確保、失われた生態系の再生、さらには水舞台の復活すなわち水環境の持っている恵沢をその地域にふさわしい伝統や方法で維持し、次世代に継承していくことが必要ではないかと考えられはじめている。水環境を構成する要素のひとつである健全な水循環は、ヒトを含めた生態系の持続的発展のためにも最も重要な要素のひとつとなっているが、問題が顕在化している要素でもある。資本主義社会の中で極めて重要な経済資源である水は良質なものを多量に確保すべく、生産コストの最も低い地域、位置に存在するものから順に採取される。地球は、水の惑星と称されているが、存在する水のほとんどは海水で、淡水の割合は、わずか2.6%でありそのなかでも利用しやすい湖沼水や河川水は、淡水のそれぞれ0.28%および0.005%しかない。このように、ヒトが利用できる水資源が地球上の大きな水循環の中のごく限られた部分にしか存在しないことが問題をより深刻化させている。

貴重な淡水源である湖沼は、身近な親水域であるとともに最も低コストで利用できる水資源を保有しており飲料水はもとより、農業用水、工業用水、内水面漁業、レクリエーションと多用途にわたり利用されてきている。一方、利用された水は、当該湖沼の流域外に流出するものもあるが多くの水は、再び湖沼へ排水として回帰し、湖沼の水質を悪化させている主要な要因のひとつとなっている。したがって、湖沼の水利用頻度が多くなればなるほどすなわち、湖沼流域の水循環頻度が高まれば高まるほど、湖沼の水質問題は深刻化することになる。

事実、我が国における平成10年度公共用水域の環境基準達成率⁷⁾は、河川81.0%、海域73.6%、湖沼40.9%

と、湖沼の達成率が最も低いばかりではなく、河川的环境基準達成率が年々向上していくのに対し、湖沼の達成率は改善の傾向が見られない。具体的な被害として、水の華や赤潮の発生による水質悪化、それに伴う浄水処理障害や飲料水の異臭味の発生、高級魚種の減少、魚介類の斃死、景観の悪化、臭気の発生などが起きている。さらに、深刻な問題として、水質の悪化した湖沼は、水環境としての魅力を失い人々を遠ざける働きをすることである。価値観の多様化に伴いスポーツフィッシングの場としての水辺利用など、水辺に様々な価値を求めてアプローチする人々が増えている一方で、過剰な清潔指向の高まりから、臭気やゴミが漂う不快な水環境に対し強い嫌悪感を持つ世代も増加している。本来、広く国民全体の貴重な財産である湖沼の水辺が、水環境の悪化が原因で人々に忌避され、さらに関心そのものが失われ、結果として湖沼の水環境をさらに悪化させてゆくことになる。このような状況から湖沼の水環境保全是、焦眉の環境問題であり、早急な対応が望まれている。

実効性のある湖沼の水環境保全対策を計画・実行するためには、湖沼の水質汚濁機構を解明し計画された水環境保全対策の改善効果を科学的に予測し評価することが必要不可欠である。

水環境における水の質は、原則的には、当該水環境に負荷される物質の量と質によって一義的に、決定されるが滞留時間の長い湖沼などの閉鎖性水域における水質は、瞬間的な負荷ではなく比較的長期間の負荷に対応して決定される。このような観点から水環境の水質汚濁機構を把握する上で従来行なわれていた晴天時の流入負荷量解析だけでは不十分ではないかという予見から雨天時流入負荷特性解明の重要性が認識され、多くの研究者や関係機関による実態調査や負荷流入機構の解析が実施され数多くの興味ある知見が明らかになってきた。まず、第一に多くの研究者が予見していたとおり雨天時に流入する汚濁負荷量は、晴天時に流入する汚濁負荷と比較して、同じ程度かさらに汚濁物質によっては、晴天時負荷量よりもかなり大きい場合があることが明らかになった。また、質の点においても晴天時の汚濁負荷とは、かなり特性が異なり雨天時の汚濁負荷は粒子態の割合が極めて高いことなどが明らかにされてきた。さらに、雨天時に流入する粒子態汚濁物質が湖内に残存し浮遊した場合を想定して、植物プランクトン等の微生物にどの程度利用される可能性があるかという観点からの研究が行われ、粒子態の栄養塩も条件によっては利用され得ることが解明された。しかし、雨天時に河川から流入する粒子態汚濁物質が閉鎖性水域である湖沼においてどのような挙動をするのか、また粒子態汚濁物質の湖内での挙動解明に基づいた上で、粒子態汚濁物質が、湖内の富栄養化にどの程度の影響を及ぼすのかという分野の研究はほとんど行われていないのが現状である。

本論文は、霞ヶ浦の水環境に大きな影響を与える蓋然性の高い雨天時流入汚濁負荷特性を解明するとともに、雨天時流入汚濁負荷の湖沼水環境への影響を定量的に把握することにより、より信頼性の高い湖沼の水質汚濁機構に関する知見をとりまとめ、霞ヶ浦の水環境保全対策の立案及び評価の判断基準を提案することを目的として研究を進めてきた結果を取りまとめたもので、湖沼の水環境保全対策を確立するために行なった雨天時の汚濁負荷特性の解明と水環境保全対策に関する現地調査、屋外実験、室内実験ならびに理論的考察を取りまとめたもので以下に示す7章から構成されている。

第1章「総論」では、研究の背景および目的とその意義について述べた。

第2章「湖沼における汚濁負荷特性と対策に関する従来研究」では、調査フィールドである霞ヶ浦の概要について整理するとともに、雨天時に流入する汚濁負荷の特性や雨天時に流入する粒子態栄養塩の生物利用可能性、河川流入汚濁負荷と湖水質の因果関係に関する従来研究について整理し、本研究の位置づけを明らかにした。

第3章「湖内における洪水時粒子態汚濁負荷の挙動」では、雨天時に湖内に流入する粒子態汚濁負荷の挙動を明らかにするために、台風来襲時の河川及び湖内において大規模な現地調査を実施するとともに関連の室内実験を行い雨天時の粒子態物質の挙動について考察を行った。湖内粒子態物質の挙動の解明にあたって、霞

ヶ浦のように富栄養化した湖沼においては湖内に浮遊している植物プランクトンの影響を無視することができない。そのため、湖内に浮遊残存している粒子態物質の起源を植物プランクトン由来と河川由来に分離する方法を考案し、その方法を用いて洪水時における湖内の粒子態物質を分離定量して、その挙動を追跡した。その結果、雨天時に河川から流入した粒子態物質は湖内流入後、 $1\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 程度の沈降速度で速やかに沈降し湖水質への直接的影響は小さいことを明らかにした。

また、霞ヶ浦のような浅い湖沼では、吸送流による底泥の巻き上げが、湖内浮遊物質濃度に大きな影響を与えることが知られている。本調査では最大風速 $16.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の強風が観測されており、湖内粒子態物質の相当量が巻き上げられた湖内底泥の可能性があり河川から流入した粒子態物質の湖水質への影響は、さらに小さいことが予見された。そこで、洪水時の湖内に浮遊する粒子態物質を河川由来粒子態物質と底泥由来粒子態物質に分離するために、風と底泥の巻き上げ量の関係を数式化するとともにこの巻き上げ量予測式を組み入れた湖内の粒子態物質の挙動を表わす単層二次元モデルを作成した。このモデルを用いて、洪水時現地調査の観測結果から洪水時に湖内に浮遊残存する粒子態物質の河川由来分を推定した。その結果、洪水時に湖内に残存浮遊する河川由来粒子態物質は、湖内残存粒子態物質の3割程度であることが推測され、雨天時の河川由来粒子態物質の湖水質への直接的影響は極めて小さいことを明らかにした。

第4章「洪水時における粒子態栄養塩の回帰特性」では、洪水時の湖内に浮遊している粒子態物質の可溶化による湖水質への影響を考察した。洪水時に湖内で高濃度溶存態窒素が観測されたことから、検討対象物質として窒素を選定し、湖内の窒素収支に影響を与えると推測された粒子態窒素の分解、植物プランクトンによる溶存態窒素の吸収、底泥における脱窒、底泥からの溶出に関する溶存態窒素の移動現象について室内実験による検討を行いそれぞれの移動速度を求めた。なお、底泥からの溶出は、底泥が湖流などによって乱されない状態で、湖水との濃度差を推進力として湖水中に溶存態窒素が拡散する現象を静止溶出とし、湖流によって底泥が巻き上げられ間隙水中の溶存態窒素が瞬間的に湖水に拡散する現象を交換溶出と定義してそれぞれの溶出速度の定量的把握を試みた。これらの室内実験結果と洪水時の水理・水文データから溶存態窒素に関する単層二次元モデルを構築して、洪水時の高濃度溶存態窒素水塊の発生を再現し、粒子態窒素の可溶化による湖水質への影響は無視し得るほど小さいこと及び交換溶出による溶存態窒素の供給量は湖水質に影響を及ぼすほど大きいことを明らかにした。

第5章「粒子態栄養塩の湖水質影響特性」では、粒子態栄養塩の湖沼富栄養化に関する長期的な影響について考察した。雨天時の河川流入汚濁物質は、晴天時と比較してかなり大きい負荷量であるが、粒子態の割合が大きくその大部分は、湖水に直接的な影響を及ぼすことなく湖底に沈殿する。湖底に沈殿した粒子態汚濁物質はそのまま安定化するのではなく様々な働きを受けて湖水中に回帰するものと考えられる。これを粒子態汚濁物質の湖水質影響度と考へて、霞ヶ浦高浜入を調査対象水域としてここに流入する恋瀬川、山王川、園部川の通年の流入負荷量調査と粒子態栄養塩の可溶化実験から粒子態栄養塩の湖水質及び底泥に対する影響度を考察し、窒素については、大半の負荷が溶存態で流入するとともに全流入粒子態窒素の可溶化量は、全流入負荷量の2.1%と、粒子態窒素の湖水質への影響は長期的に見てもわずかであることを明らかにした。またリンについても、全流入粒子態リンの可溶化量は、全流入負荷の2.3%とわずかであり、窒素と同様に粒子態リンの湖水質への影響は小さいことを明らかにした。さらに、年間の流入負荷を生物利用可能性から評価すると霞ヶ浦の河川流入負荷はリン制限であることを明らかにした。

第6章「低湿地浄化法の水質浄化特性」では、湖沼の富栄養化対策として、クローズアップされている河川水の直接浄化対策の一つである低湿地浄化法の浄化機構とその能力を明らかにするために、霞ヶ浦に流入する汚濁が進んだ河川の一つである山王川の流末部に、人工の低湿地を設け、山王川の河川水を導入してその浄化機構について検討を行なった。5年間の連続した実験から、栄養塩の浄化機構とその浄化能力を明らか

にするとともに、低湿地に繁茂するヨシなどの水生植物は、直接河川水中の汚濁物質を吸収したり分解したりするわけではないが浄化の環境を整えるという点で、非常に重要なものであること及びその具体的な機能について言及した。また、低湿地浄化法を計画する際の最適な負荷条件の推定方法や適切な管理方法について考察を行い、低湿地浄化法において長期的に期待できる浄化機能は、脱窒であること及び枯死ヨシ体からのリン回帰により低湿地から枯死ヨシ体の回収が無い場合は、リンのキャリーオーバーが起きる可能性が高いことを明らかにした。

第7章「総括」では、本研究の成果を総括し霞ヶ浦の水環境保全について提言を行った。

審査結果の要旨

湖沼の水質は主として、当該湖沼に負荷される汚濁物質の質および量によって決定される。湖沼の水質汚濁機構を解明し、水環境保全対策を行うためには流入汚濁負荷特性の把握が必要不可欠である。本論文は、霞ヶ浦の水環境に大きな影響を与える蓋然性の高い雨天時流入汚濁負荷特性を解明し、湖沼環境への影響を定量的に把握するために、現地調査、室内実験および数値解析によって検討したもので全編7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、霞ヶ浦の概要について述べると共に、雨天時に流入する汚濁負荷の特性や粒子態栄養塩の生物利用可能性、河川流入汚濁負荷と湖水質の関係に関する従来の研究について文献調査し、研究課題の整理を行っている。

第3章では、雨天時に流入する粒子態汚濁負荷の挙動を明らかにするために、台風襲来時の河川及び湖内において大規模な現地調査を実施するとともに、関連の室内実験を行い、湖内に浮遊残存している粒状態物質の起源を植物プランクトン由来と河川由来に分離する方法を新たに考案し、洪水時に河川から流入した粒状態物質は湖内に流入後速やかに沈降し、湖水質への直接的影響は小さいことを明らかにしている。また、洪水時現地調査の観測結果から洪水時に湖内に浮遊残存する粒子態物質の河川由来の分を推定するために、洪水時の風速による底泥の巻き上げ量予測式を組み入れた粒子態物質の挙動を表す二次元モデルを提示している。これは重要な知見である。

第4章では、洪水時に湖内で観測された高濃度溶存態窒素水塊の発生原因を解明するために室内実験により、湖内の窒素の収支に影響を及ぼす各形態の窒素に関する物質移動速度を求め、洪水時の水理・水文データから溶存態窒素に関する2次元の拡散モデルを構築して、洪水時の高濃度溶存態窒素水塊の発生を再現し、交換溶出よりはるかに大きい溶出速度であることを明らかにしている。これは新しい知見である。

第5章では、雨天時に河川から流入し湖底に沈殿した粒子態汚濁物質の湖水質への影響度について、霞ヶ浦高浜入を調査対象水域としてここに流入する3河川の通年の流入負荷量調査と粒子態栄養塩の可溶化実験から粒子態栄養塩の湖水質への影響度を明らかにしている。これも新しい知見である。

第6章では、湖沼の富栄養化防止対策として、霞ヶ浦に流入する一河川の流末部に人工の低湿地を設け、長期的に期待できる浄化機能は脱窒素であることを明らかにし、低湿地浄化法に関する最適な負荷条件および管理方法を提示している。これは有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、湖沼水環境への影響評価が困難であった雨天時流入汚濁負荷の挙動を霞ヶ浦において実証的に解明し、湖沼の水環境保全対策を提案したもので、環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文として合格と認める。