

26. 沖縄本島における陸域負荷の変遷とその影響

赤松 良久^{1*}・古澤 広隆²・大澤 和敏³・神谷 大介⁴

¹山口大学大学院理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-0003 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²神奈川県厚木市まちづくり事業部道路維持課 (〒243-8511 神奈川県厚木市中町3-17-17)

³宇都宮大学農学部農業環境工学科 (〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350)

⁴琉球大学工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1)

* E-mail: yakamats@yamaguchi-u.ac.jp

沖縄本島においてはここ50年間の陸域の開発によって、陸域から海域への栄養塩および土砂の負荷が大きく変化した。本研究では原単位法を用いたGIS解析によって過去・現在の窒素負荷量を算出するとともに、土砂流出解析モデル (GeoWEPP) を用いて過去・現在・将来の沖縄本島における土砂流出量を算出した。さらに、これらの陸域負荷の変化と沿岸域のサンゴの被度の変化を比較したところ、両者に明確な関係は見られず、今後は沿岸の開発などによる直接的なサンゴ礁の破壊も検討していくことが必要であることが示唆された。

Key Words : *nutrient load, sediment yield, coral reef, Okinawa Main Island, GeoWEPP*

1. はじめに

沖縄本島においてはこの約 50 年間で開発が急激に進み、陸域から海域への負荷が増大してきた。海域への負荷の一つとして、生活排水や農業排水を起源とする栄養塩の負荷がある。沖縄県の平成 22 年度段階での下水道の普及率は 66%であり、全国平均の 73.7%に比べると低く、海域への栄養塩負荷の抑制は大きな課題である。もう一つの大きな陸域からの負荷として、土砂流出がある。沖縄県は赤土(国頭マージ)が広く分布する地域であり、降雨時には開発事業地区や農地などからの赤土流出が顕著である。1995 年より施行されている「沖縄県赤土流出防止条例」によって開発事業による赤土流出は減少しているものの、農地からの赤土流出はほとんど改善されていない。このような陸域からの土砂や栄養塩の負荷の増大は沖縄本島の河口・沿岸域広く分布するサンゴ礁・マングローブ・干潟といった貴重な生態系に大きな影響を与えていると考えられる。仲宗根ら¹⁾は沖縄県内のサンゴ礁域における底質中懸濁物質含有量 (SPSS) の長期観測に基づいて、赤土流出量の検討を行っている。しかし、陸域負荷と沖縄の河口・沿岸生態系の劣化の関

係は明確ではなく、検討が必要とされている。

そこで、本研究では沖縄本島を対象として、陸域からの窒素負荷および土砂流出の変遷を明らかにする。また、土砂流出に関しては、100年後の予測降雨量を用いて将来の土砂流出量の増加についても検討する。さらに、それらの結果を用いて、陸域からの栄養塩・土砂の負荷が沿岸域のサンゴの生息環境に与えた影響を明らかにする。

2. 陸域の土地利用変化

図-1 に 1961 年から 2006 年にかけての各年代の沖縄本島の土地利用の変化を示す²⁾。ここでは一番古い 1961 年のデータに合わせて土地利用は耕作地、樹林地、市街地、その他に分類してある。また、図-2 に 1961 年から 2006 年にかけての各年代における耕作地、樹林地、市街地、その他の割合を示す。沖縄本島では 1980 年から 1991 年にかけて南部～中部における市街化が急激に進んでいることがわかる。また、この時期に耕作地も全域で増加している。これは 1972 年の本土返還以降に沖縄本島の開発が進められたためである。

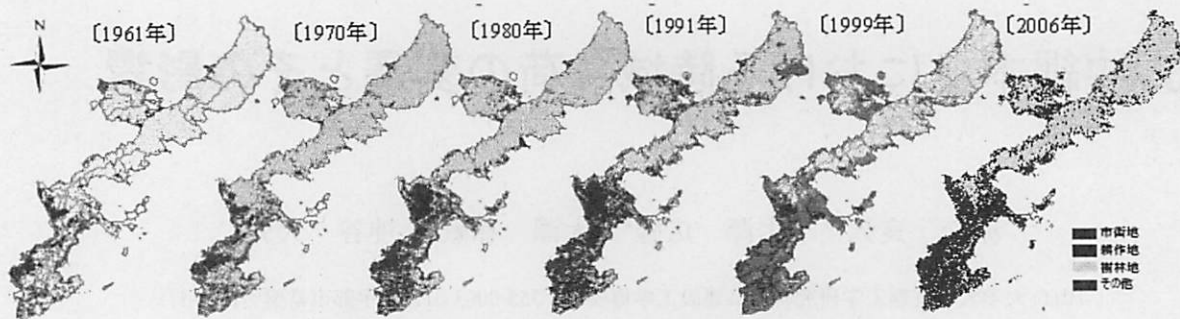


図-1 1961年から2006年にかけての沖縄本島の土地利用の変化

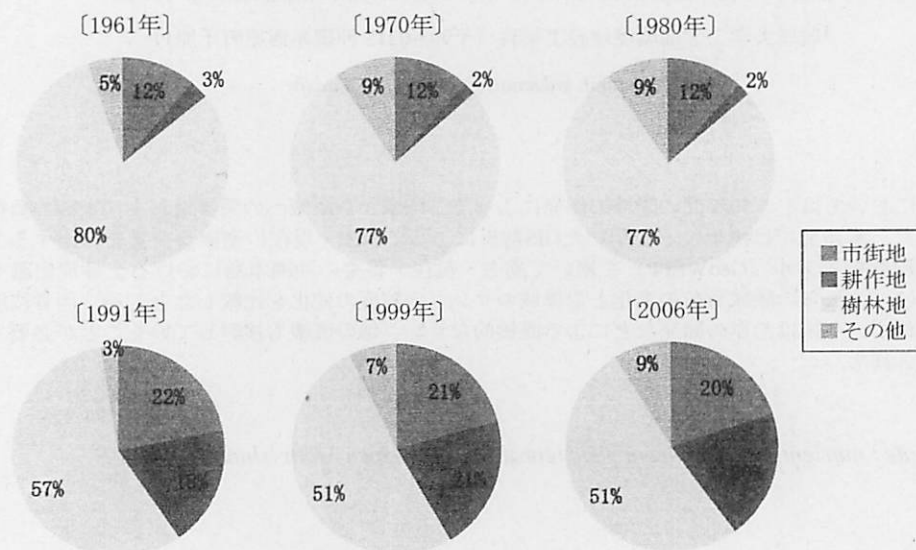


図-2 各年代の市街地、耕作地、樹林地、その他の割合

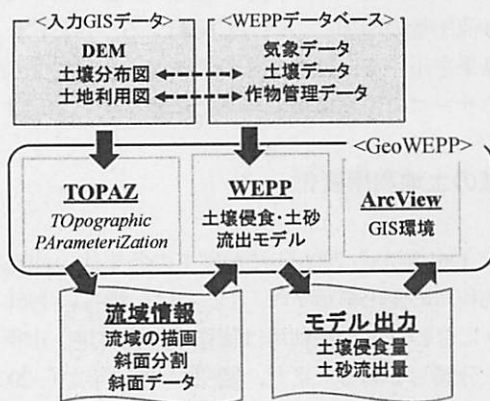


図-3 GeoWEPP の概念図

3. 沖縄本島における土砂流出解析

(1) GeoWEPPモデル

GeoWEPP は土壌侵食・土砂流出モデル WEPP (Water

Erosion Prediction Project) と GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) を組み合わせた土砂流出解析モデルである³⁾。WEPP は米国農務省を中心に開発が進められ、Nearing ら⁴⁾によって提案された土砂流出モデルである。WEPP は気候因子、降雨に対応した表面流、蒸発散や浸透の水収支、作物の成長、耕起作業などによる土壌の透水性、受食性の変化、圃場の管理作業が考慮された上で農地からの侵食量が算出され、さらに、流出した土砂の水路または河川における輸送や貯水池における沈降の再現計算を行うことができる。本モデルを GIS と組み合わせることにより、WEPP を流域スケールに適用する場合に必要な、流域分割、圃場における各種設定、水路における各種設定などが簡素化されることが GeoWEPP の利点である。GeoWEPP の土砂流出量算定には WEPP を適用する場合と同じく、①気象データ、②地形データ (DEM)、③土壌データ、④作物管理データである。図-3 に GeoWEPP による解析の概略図を示す。GIS データの管理や解析結果の可視化には ESRI 社の ArcGIS を用いている。なお、GeoWEPP を用いた赤土流出量予測の有効性は大澤ら⁵⁾によって確認されている。

(2) 解析概要

沖縄本島の28流域を対象としてGeoWEPPを用いた土砂流出解析を行った。解析では2006年の土地利用を用いて、2008年の年間降雨を入力データとして与えた。図-4に年間土砂流出量(t/year)の空間分布を示す。中部域では流域面積の小さい河川が多く、平地が広がっているため、北部や南部に比べて土砂流出量は小さい。また、北部地域では山地が多いため、斜面からの土砂流出が顕著であると考えられる。

また、1961年の土地利用及び2008年の年間降雨を用いてGeoWEPPによる土砂流出解析を行った。さらに、2006年の土地利用及び100年後の予測年間降雨を用いた解析

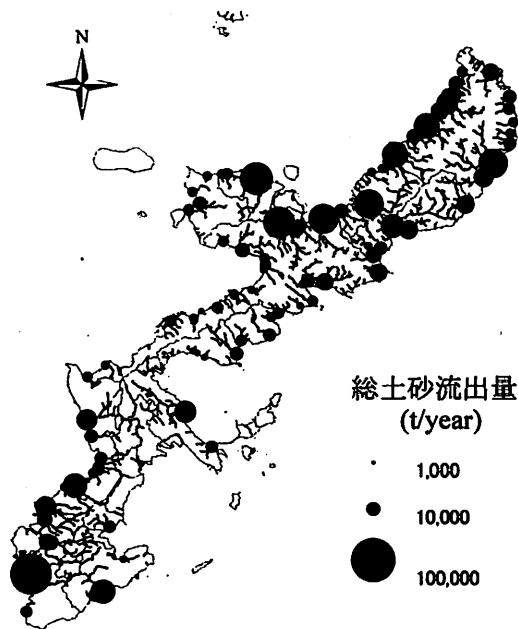


図-4 沖縄本島における年間土砂流出量の空間分布

も行った。100年後の降雨の予測には地球気候モデルRCM20⁹によって地球温暖化シナリオA2に基づいて予測された南西諸島地域の月間降水強度の2081年から2100年平均値と1981年から2000年平均値との変化率(図-5)を用いた⁷⁾。この変化率を2008年の年間の実績降雨量にかけ合わせることで、将来の降雨量を算出した。将来の降雨強度は、3月および7月から11月にかけて増加し、1月から2月にかけて減少すると予測されている。沖縄本島の28流域を対象とした1961年、2006年、100年後の各流域の河口での総土砂流出量の比較を図-6に示す。図-6から、ほとんどの河川において1961年から2006年にかけて総土砂流出量が増加していることがわかる。これは多くの流域において、耕作地の割合が増加したためである。一部の流域では総土砂流出量が減少しているが、これは土砂流出の多い耕作地から市街地に土地利用が変わったためであると考えられる。また、100年後の降雨を用いた計算ではほぼすべての流域で土砂流出量が増加しており、流域によっては2006年の土砂流出量の2倍程度まで

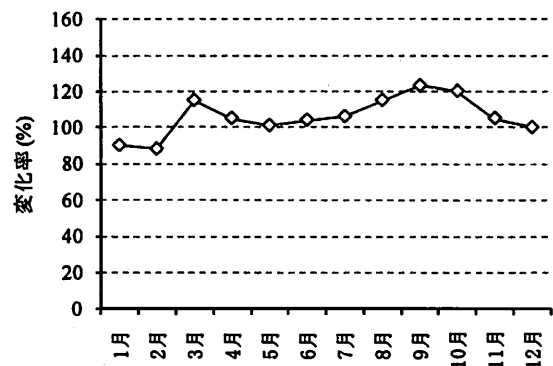


図-5 南西諸島地域の月間降水強度の変化(1981~2000年平均値と2081~2100年平均値の変化率を示す)⁷⁾

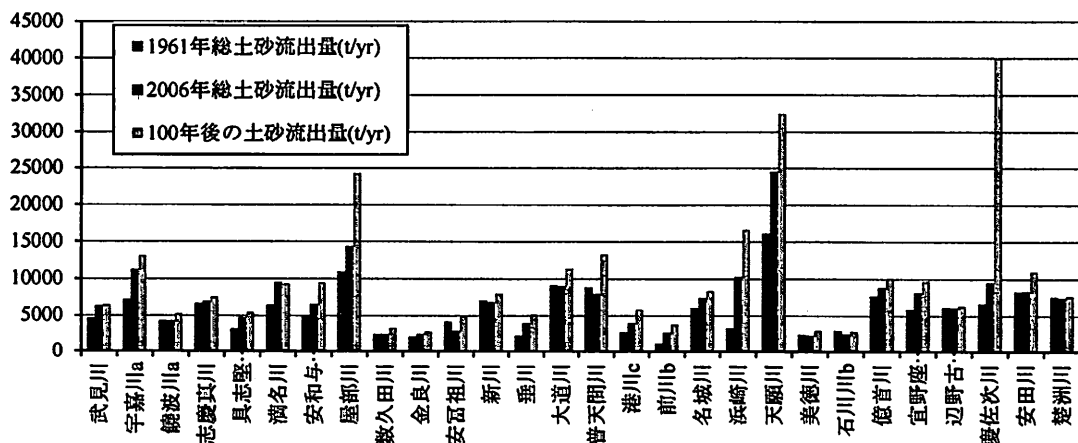


図-6 1961年、2006年、100年後の各流域の河口での総土砂流出量

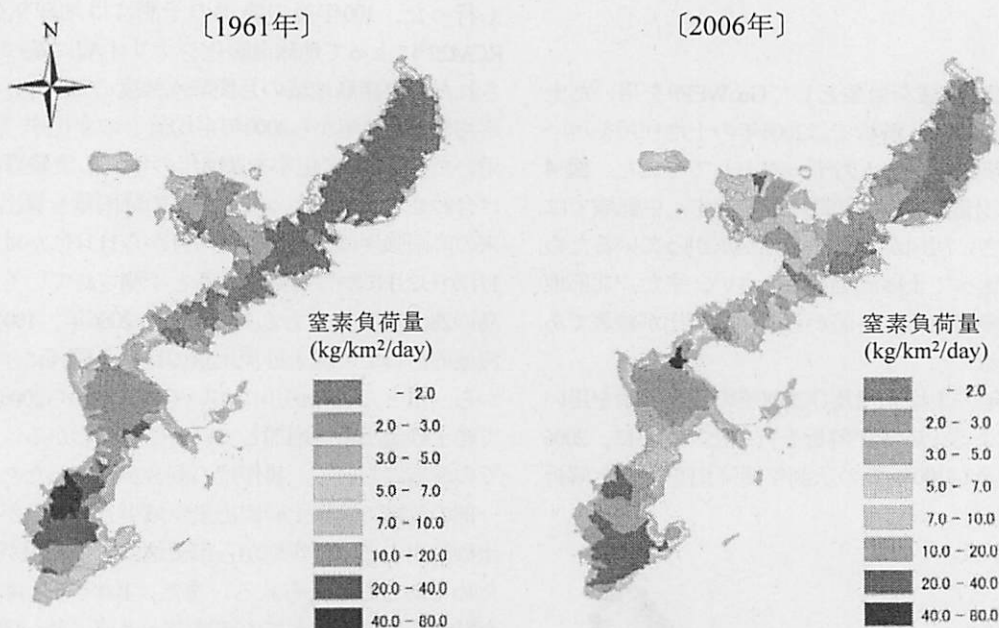


図-6 沖縄本島における単位面積当たりの窒素負荷量の空間分布

増加している。

4. 沖縄本島における汚濁負荷解析

(1) 汚濁負荷解析法

ここでは、窒素の発生量を算出する方法として原単位法を用いることとする。原単位法とは、河川の集水域における人口や土地利用などの情報に対して、それぞれ汚染負荷発生量の原単位を与え、その量を算出するものである。窒素負荷発生量の算出のために、原単位に北原ら⁸⁾の提案したものを利用した。表-1に発生源別原単位表⁹⁾を示す。土地利用由来の面源負荷発生量と畜産・生活排水・工業排水などの点源負荷発生量を原単位法に従い算出した。原単位法は次式のように各発生源別原単位とその基数の積の総計で表される。

$$L = \sum L_i = \sum a f_i p_i \quad (1)$$

ここに、 L :総窒素負荷発生量、 L_i :発生源別発生量、 f_i :発生源別基数、 p_i :発生源別原単位、 a :排出率として、各発生源別に全窒素の発生量を算出した。発生源別基数は表-2に示すデータを元に算出し、排出率については畜産および生活排水に関して、その処理法ごとの排出率を考慮し負荷発生量を算出した。

(2) 沖縄本島における汚濁負荷流出量の変化

図-6に1961年および2006年の土地利用を用いて算出した沖縄本島における単位面積当たりの窒素負荷量の空間分布を示す。1961年には窒素負荷の大きい地域は南部に限定されているが、2006年には北部においても単位面積当たりの窒素負荷量が $10\text{kg/km}^2/\text{day}$ を超える地域が多数

表-1 汚濁負荷解析に用いた原単位⁷⁾

分類		単位	T-N
面源	土地利用	水田	2.77
		畑地	9.02
		森林	1.08
		市街地	3.34
		ゴルフ場	9.02
点源	畜産	牛	0.18
		豚	0.033
	人間		0.0086
	工業	食料品	4930
		飲料・飼料・たばこ	4930
		繊維	1500
		衣服・その他	15
		木材・木製品	15
		家具・装飾品	18
		パルプ・紙	10040
		出版・印刷	29
		化学	4340
		石油・石炭	610
		プラスチック	610
		ゴム製品	1100
		なめし革	2770
		窯業・土石製品	670
		鉄鋼業	300
		非金属製品	387
		金属製品	620
		一般機械器具	170
		電気機械器具	30
		輸送機械器具	15
		精密機械器具	4700
		その他	1200
		秘匿	0

表-2 汚濁負荷解析に用いた排出率

	処理形態	T-N 排出率 (%)
畜産	分離簡易処理	51
	下水処理	0
人間	戸別処理浄化槽	70

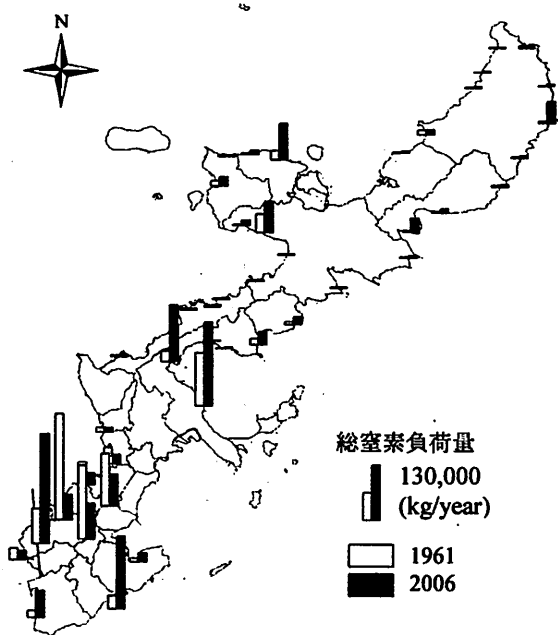


図-7 沖縄本島における総窒素負荷量の変化

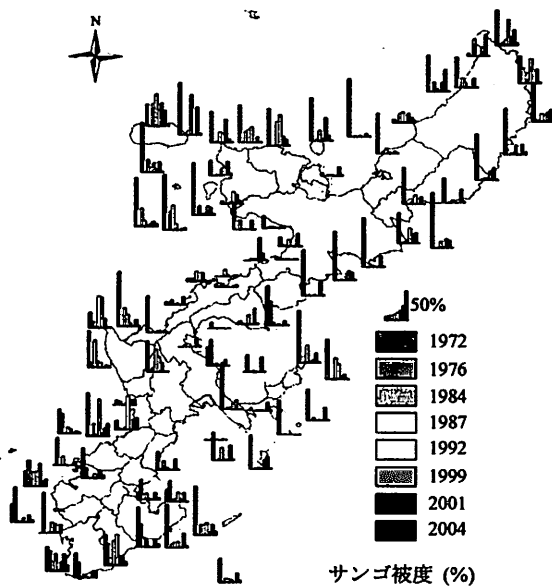


図-8 沖縄本島におけるサンゴ被度の変化

見られる。

また、図-7に1961年から2006年にかけての河口域での総窒素負荷量の変化を示す。ここでは、土砂流出解析を行った28流域を対象としており、総窒素負荷量は各流域内の単位面積当たりの窒素負荷量を積算して求めた。1961年から2006年にかけて総窒素負荷量は増加傾向にあり、南部や中部では急激に増加している流域も見られる。これらは流域内の人口が増え、市街地化したことによるものと考えられる。一方で、南部の地域では総窒素負荷量が減少している箇所がみられるが、これは流域内で下水道整備が進んだことによるものである。

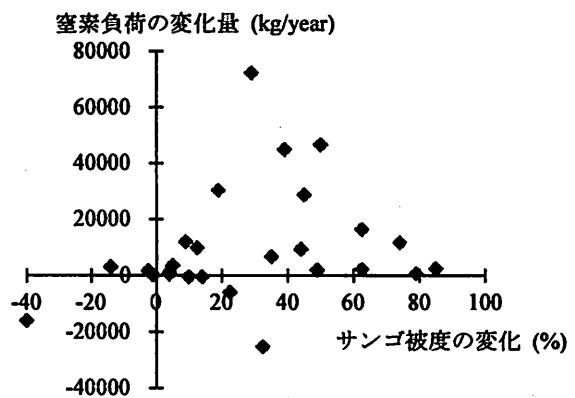


図-9 サンゴ被度の変化と窒素負荷変化量の関係

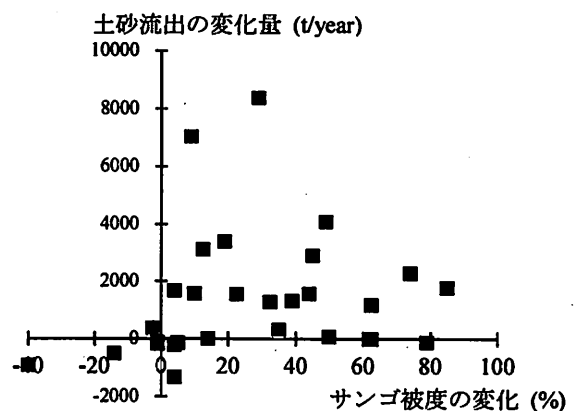


図-10 サンゴ被度の変化と土砂流出変化量の関係

5. 陸域負荷の変化とその影響

沖縄本島における陸域からの栄養塩および土砂負荷の変化が沿岸域のサンゴの生息環境に与えた影響について検討する。

過去のサンゴ礁現況調査⁹⁾¹¹⁾からまとめられた1972年から2004年にかけてのサンゴ被度の変化を図-8に示す。1972年にはサンゴ被度が50%以上の地点が多くみられるが、1999年にはほとんどすべての地点で被度が0%になっている。その後、2004年には多少の回復が見られるもののすべての地点で被度が10%以下である。1999年にサンゴ被度が激減しているのは1998年の夏に世界規模で起こったサンゴの白化によるものである。しかし、1972年から1992年にかけてサンゴ被度が徐々に減少しているのは陸域からの負荷の増大の影響であると考えられる。

そこで、1972年から1992年にかけてのサンゴ被度の変化と1961年から2006年にかけての窒素負荷および土砂流出の変化量の関係を図-9, 10に示す。窒素負荷量および土砂流出量はサンゴ被度の調査点にもっとも近く、強い影響を与えると考えられる流域のデータを用いた。また、ここでは、サンゴの減少量が正、負荷の増大量が正である。サンゴ被度の変化と窒素負荷・土砂流出の変化量に

明確な関係は見られないものの、窒素負荷の変化が大きいところ（2000kg/year以上）ではサンゴの被度が20%以上減少していることがわかる。サンゴ被度の減少は沿岸の開発などによる直接的なサンゴ礁の破壊も影響していると考えられるため、今後はそれらの地点を排除して検討を行う必要がある。

6. 結論

沖縄本島における陸域負荷の変遷を明らかにするために、原単位法を用いたGIS解析によって過去・現在の窒素負荷量を算出するとともに、土砂流出解析モデル（GeoWEPP）を用いて、過去・現在・将来の沖縄本島における土砂流出量を算出した。さらに、これらの陸域負荷の変遷と沿岸域のサンゴの被度の変化を比較したところ、明確な関係は見られなかった。今後は沿岸の開発などによる直接的なサンゴ礁の破壊も検討していくことが必要であることが示唆された。

謝辞：本研究は国土交通省建設技術研究助成（研究代表者：赤松良久）および三井物産環境基金研究助成（研究代表者：赤松良久）の補助を受けている。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 仲宗根一哉，金城孝一，瀧岡和夫，宮川勝司，吉本昌弘，佐藤泰夫，玉城不二美，渡口輝，大城洋平，井上豪，天願博紀：サンゴ礁海域における SPSS の長期観測と変動解析，沖縄県衛生環境研究所報第 43 号，2009。
- 2) 沖縄県土地対策課：土地分類基本調査 GIS データ，1989。
- 3) Renschler, C.S. 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach, *Hydrological Processes*, Vol. 17, p.1005-1017, 2003.
- 4) Nahira, M. and Yamazato, K.: Human interference with the coral reef community and acanthaster infestation of Okinawa, *Proc. 2nd Inter. Coral Reef Sympo.*, vol.1, pp.577-590, 1974.
- 5) 大澤和敏，横尾真矢，赤松良久，飯泉佳子：GeoWEPP を利用した石垣島における土壌侵食・土砂流出量の広域評価，平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.578-579, 2010。
- 6) 気象庁：IPCC の SRES A2 シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測，地球温暖化予測情報，第 6 巻，2005。
- 7) 赤松良久，古澤広隆，大澤和敏，神谷大介，宮本大輔：気候変動が沖縄本島北部における土砂流出に及ぼす影響に関する研究，地球環境研究論文集，第 18 巻，pp.143-148, 2010。
- 8) 北原健司，菅原琢磨，馬籠純，竹内邦良，石平博：GIS 及び分布型流出モデルを用いた流域内の汚濁物質輸送過程の検討，水工学論文集，vol.49, pp.1585-1590, 2005。
- 9) (財)沖縄県環境科学検査センター：さんご礁海域保全研究会 第 1 回研究報告書，pp.3-145, 1988。
- 10) (財)沖縄観光コンベンションビューロー：オニヒトデの異常発生及びサンゴ食害状況調査報告書，pp.113, 2000。
- 11) (財)沖縄県環境科学センター：平成 13 年度沿岸海域実態調査（沖縄島周辺），pp.136, 2000。
- 12) 沖縄県文化環境部自然保護課：平成 15 年度リーフチェック推進事業報告書，pp.38, 2003。
- 13) 沖縄県文化環境部自然保護課：平成 16 年度リーフチェック推進事業報告書，pp.68, 2004。

(2011. 4. 11 受付)
(2011. 7. 11 受理)

Change and Effect of Terrestrial Load in Okinawa Main Island

Yoshihisa AKAMATSU¹, Hirotaka FURUSAWA², Kazutoshi OSAWA³ and Daisuke KAMIYA⁴

¹Div. of Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University

²Div. of Urban Planning, City office, Atsugi, Kanagawa

³Dept. of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus

⁴Dept. of Environmental Engineering, Utsunomiya University

Terrestrial load in Okinawa Main Island have increased due to urban and agricultural development. The nutrient load of Okinawa main Island at 1961 and 2006 is estimated using the unit loading method combined with census and GIS data. The sediment yield of that at 1961, 2006 and 100 years later is estimated using sediment runoff analysis model (GeoWEPP). The results indicate that the nutrient load and the sediment yield per year in each river basins increased drastically from 1961 to 2006. It is suggested that the increase of terrestrial load induced the decrease of coral reef from 1972 to 1992.