

沿岸漂砂量分布図を活用した侵食対策計画の評価法の提案

鳥居 謙一*・山本 幸次**・高木 利光***

1. はじめに

河川や海食崖からの供給土砂量の減少に伴う海岸侵食は、土砂供給地点における流入土砂量が流出土砂量よりも不足して生じる地形変化である。また、港湾などの海岸構造物の建設による沿岸漂砂の阻止に伴う侵食も、構造物の沿岸漂砂下手側で流入土砂量よりも流出土砂量が不足して生じる地形変化である。これらの海岸侵食は、流入土砂量と流出土砂量の不均衡が改善されないと、沿岸漂砂の下手側に進行していくことになる。宇多(1997)によると、近年において我が国で生じた著しい海岸侵食は、この沿岸漂砂の不均衡が原因で生じた場合が多い。

海岸侵食の対策については、海岸管理者が立案・実施してきたが、解決すべき行政的課題が残されており(例えば、宇多, 1997; 成瀬・大岡, 2000)、漂砂系全域での適切な対策となっているとは限らない。また、1999年5月に改正された海岸法のもとでは、地域住民の意見を反映した海岸侵食対策を今後は推進していくことになる。このような時代の趨勢にあつては、海岸侵食の機構を簡潔かつ明確に情報伝達し、その対策としてどのような手法が考えられ、それらがどのような効果と影響を与えるか評価し、地域住民に説明する責任が生じる。

ところで、海岸における地形変化や波浪の変形に関する工学的な研究はかなり進められ、複雑な数値計算などにより、将来における海浜変形等の予測が可能となつてきている。しかし、それらをもとにした海岸侵食対策を直感的に理解し、説明し得る表現法はまだ確立されていない。そこで、本研究では沿岸漂砂の不均衡で生じた海岸侵食の機構とその対策について、沿岸漂砂量分布図をもとにした直感的に理解・説明し得る評価法を提案する。具体的には、千葉県九十九里海岸の北側(以下、九十九里海岸北側)を対象として、海岸侵食対策としてのヘッドランド計画(案)の評価を試みた。

2. 九十九里海岸北側の侵食実態

千葉県の九十九里海岸は、太平洋に面する海岸線延長約 60 km の細砂からなる砂浜で、北側の屏風ヶ浦と南側の太東崎の海食崖が侵食され、その崩落土砂の供給により形成された海岸である(例えば、宇多, 1997)。また、近年では、海食崖の侵食対策や漁港の整備に伴い、九十九里海岸の北側境界と南側境界で砂浜の侵食が顕在化している(宇多, 1997)。さらに、中央部に建設された片貝漁港周辺では堆積が進み、漁港施設の維持も問題となっている。このため、九十九里海岸では南北境界付近の侵食対策の検討が行われてきているので、本研究では特に九十九里海岸北側の侵食対策を評価することにした。

九十九里海岸の片貝漁港より北側は、図-1の上段に示すようにいくつかの地先海岸からなり、北端の北九十九里海岸で侵食が始まり、その南側の吉崎海岸、野手海岸へと侵食が進行した(宇多, 1997)。この侵食を長期的な海浜変形として、1967~1993年の汀線変化量で示したのが図-1の中段である。1993年時点においては、砂浜の侵食が新堀川まで達しているが、新堀川から栗山川までは汀線の変化量は小さく安定状態にあることが分かる。

九十九里海岸の北側境界から新堀川までの侵食の原因を説明するために、沿岸漂砂量分布図の活用を試みる。図-1の下段には、海岸線形状と来襲波浪の特性をもと

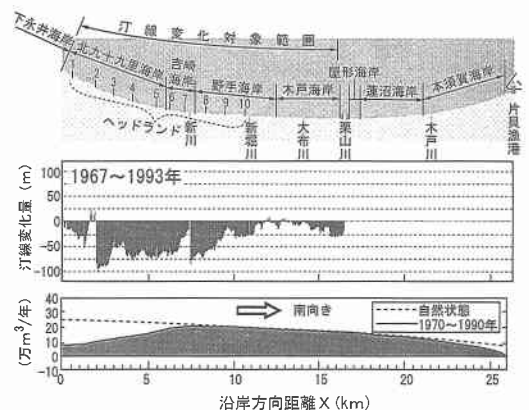


図-1 九十九里海岸北側の侵食と沿岸漂砂量分布

* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室長

** 正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室

*** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・ユー 海岸部技術部長

に、汀線変化を再現する one-line モデルに用いた沿岸漂砂量公式により各地点での沿岸漂砂量を求め、それらを包絡して沿岸漂砂量分布として破線で示した。これによると、各地点の沿岸漂砂量は北側ほど大きく、南側に向かうに従って徐々に減少していくことが分かる。したがって、図示した範囲の各地点においては、沿岸漂砂によって北側から供給される土砂量が南側へと運び去られる土砂量より多いことになり、堆積が徐々に進む条件にあったと言える。また、北側境界では約 25 万 m³/年の沿岸漂砂が流入し、南側境界の片貝漁港建設地点では、約 9 万 m³/年の南向きの沿岸漂砂量があったことが読みとれる。これらの境界での沿岸漂砂量は、宇多ほか(2000)の地質年代スケールの推定沿岸漂砂量とほぼ同じ値である。

すなわち、九十九里海岸全域が堆積環境（または、安定状態）にあり続けるためには、北側境界において少なくとも約 25 万 m³/年の沿岸漂砂が確保されなければならない。しかし、1979 年以降では屏風ヶ浦から北側境界へは約 8 万 m³/年の沿岸漂砂が流入する条件となった(宇多, 1997)。また、1970~1990 年における沿岸漂砂量分布は図-1 の下段の網掛け部分のようになり、北側境界での沿岸漂砂量は宇多 (1997) の推定沿岸漂砂量とほぼ同じ約 9 万 m³/年であった。したがって、北側境界から新堀川までの各地点で、北側から流入する沿岸漂砂より南側に流出する沿岸漂砂量が多くなり、図-1 の中段に示す侵食が生じたと説明できる。この状況が改善されない場合には、侵食が陸側と南側に進行して、北側境界での沿岸漂砂量(約 9 万 m³/年)で安定する位置まで汀線が後退することになる。

このため、①漂砂系において、②不均衡状態の沿岸漂砂量分布によって生じる汀線変化が社会的に受認されないので、③長期的に見て均衡のとれた沿岸漂砂量分布へ改善することを目的とした侵食対策が立案・実施された。このような侵食対策を評価するためには、漂砂系における沿岸漂砂量分布の状況と均衡状態に達した汀線形状から、沿岸漂砂の制御が適切であるか判断することが重要である。ところで、磯部 (1998) は流砂系土砂管理の観点から海岸侵食対策を立案する場合には、海岸における必要計画流砂量(沿岸漂砂量)を設定するのが望ましいと指摘している。すなわち、流砂系において供給される土砂量が減少した場合には、それに応じて海岸における沿岸漂砂量を制御することが効率的と言える。このような供給土砂量と海岸における必要計画流砂量の均衡という観点から、以下では、九十九里海岸北側の侵食対策を評価する。

3. 九十九里海岸北側の侵食対策の評価

(1) 侵食対策計画 I

侵食対策の手法としては、①北側境界に土砂を投入し(約 16 万 m³/年)、沿岸漂砂の分布形を自然状態に戻す手法、②沿岸漂砂制御施設を設置し、現状もしくは許容できる汀線位置で、全域にわたり沿岸漂砂量を北側境界の供給土砂量(約 9 万 m³/年)にする手法がある。しかし、図-1 の中段に示した侵食が生じた時点においては、厳しい社会的制約の下において後者の手法のみが検討された。その結果、北側境界から新堀川までに 10 基のヘッドランド群を設置し、沿岸漂砂を制御して砂浜を安定させる侵食対策(図-1 の上段)が実施された。この計画は現在実施中であるが、ヘッドランド群が完成すると、北側境界から片貝漁港までの沿岸漂砂量分布は図-2(a)に示すようになる。図-2(a)によればヘッドランド群設置区間は、平均的に見れば北側境界の供給土砂量である約 9 万 m³/年以下に制御されていることが分かる。

しかし、ヘッドランド No. 10 の南側の X=11 km で、差分が約 15 万 m³/年の沿岸漂砂の不均衡が生じており、

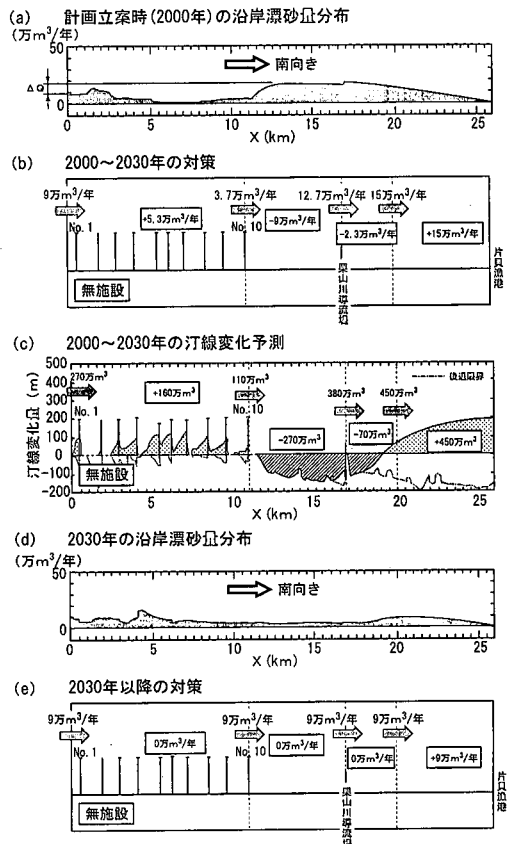


図-2 10基のヘッドランド設置とその後の放置

南側に侵食域が移行することが懸念される。この条件を放置した場合を模式的に図-2(b)に示すとともに、対象期間を30年として2000~2030年の汀線変化を予測した結果が図-2(c)である。図-2(b), (c)によれば、ヘッドランド No. 10の南側の $X=11\sim 19$ km で著しい侵食が生じ、汀線の最大後退量は約150 m となることが分かる。また、片貝漁港建設地点では通過沿岸漂砂量が約 9 万 m^3 /年からほとんどない条件(図-1, 下段)となり堆積が進み、 $X=19\sim 26$ km では汀線が前進する。したがって、2030年においてはヘッドランド群設置区間はヘッドランド間の安定汀線形状で、ヘッドランド No.10より南側では図-2(c)に示すような汀線変化量に応じた汀線形状で安定することになる。なお、片貝漁港建設地点では通過沿岸漂砂量はほとんどない条件としているため、片貝漁港の北側では汀線が200 mも前進し、漁港の維持管理上支障をきたすと予測される。

2030年時点の沿岸漂砂量分布を示したのが図-2(d)であり、ヘッドランド群と片貝漁港により汀線が波向に対して安定し、対象範囲全域で平均的に見て沿岸漂砂量は約 9 万 m^3 /年以下となっていることが分かる。すなわち、北側境界からの供給土砂量と沿岸漂砂量をほぼ均衡させることができおり、2030年以降は堆積条件へと移行すると予測され、図-2(e)に示すように2030年以降は対策を行う必要がなくなる。しかし、 $X=11\sim 19$ km の大規模な侵食を社会的制約(土地利用、文化、環境、生態系)から放置できないことや、片貝漁港の再整備や維持管理の事業効果の問題点が指摘される。

以上の侵食対策計画はヘッドランド No. 10の南側の侵食を30年間放置する計画であるが、以下では、この区間においても2000年時点の汀線を維持することと、片貝漁港北側の過剰堆砂を防ぐことを目的とした侵食対策を評価する。対策手法として、①ヘッドランド No. 10の南側への土砂投入、②ヘッドランド No. 11~15の設置と土砂投入、③ヘッドランド No. 11~17の設置、について検討した。なお、侵食対策の期間は30年とし、土砂投入の材料は図-2(c)に示した片貝漁港北側に30年間で過剰堆積する土砂(450万 m^3)を利用する。

(2) 侵食対策計画 II

No.1~10のヘッドランド群設置範囲($X=0\sim 11$ km)では、ヘッドランドによって制御された汀線形状の変化によって、長期的には北側境界の供給土砂量と同じ沿岸漂砂量の約 9 万 m^3 /年が通過する汀線形状で安定する。 $X=11$ kmより南側には、沿岸漂砂の不均衡を解消するため南側での沿岸漂砂量の最大値が確保されれば、南側全域で汀線は安定する。したがって、図-3(a)に示す $X=11$ km 地点と $X=12$ km 地点の沿岸漂砂量の差分である約 15 万 m^3 /年を投入すれば全域で安定な砂浜と

なる。しかし、北側境界から流入する約 9 万 m^3 /年の沿岸漂砂は、汀線が安定形になるまでは $X=0\sim 11$ km に堆積して、 $X=11$ km 地点では供給される土砂量は一時的に少なくなる。つまり、 $X=0\sim 11$ km の汀線が安定するまでは、これを補う土砂投入が $X=11$ km 付近でさらに必要とされる。

図-3(b)は北側境界の供給土砂量を約 9 万 m^3 /年に設定して、 $X=11$ km 地点の土砂投入量を約 15 万 m^3 /年とし、一時的な汀線後退も土砂投入で制御しながら砂浜を保全する計画の模式図である。この計画で30年後の汀線変化を予測したのが図-3(c)であり、 $X=0\sim 11$ km のヘッドランド群の間には 9 万 m^3 /年の沿岸漂砂が通過する汀線形状で安定な砂浜が形成され、 $X=11\sim 20$ km は最小限の汀線後退で保全できることが分かる。また、 $X=20$ km から片貝漁港までの区間は汀線が前進しており、この区間では 24 万 m^3 /年の土砂が堆積することになるが、このうちの 15 万 m^3 /年はサンドリサイクルとして利用する。結果としてこの区間には 9 万 m^3 /年が堆積して残ることになり、この土砂量は図-1の破線で示した自然状態での片貝漁港建設地点の沿岸漂砂量と一致する。

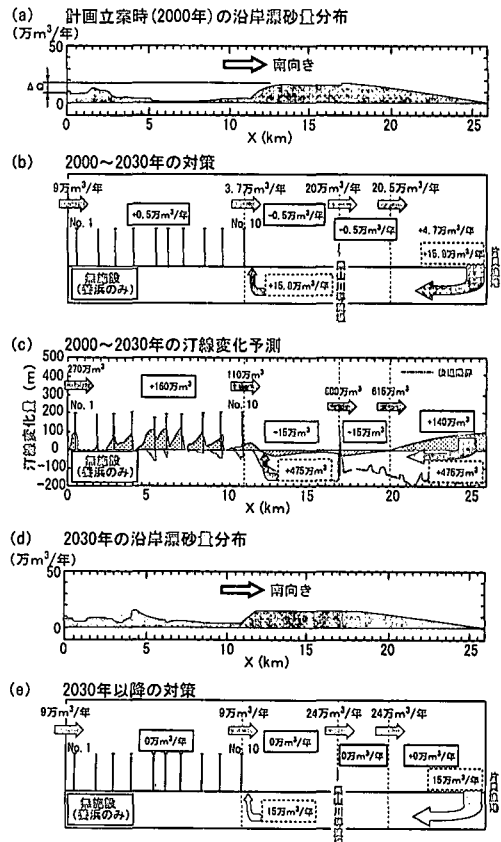


図-3 土砂投入のみの侵食対策計画

30年後にはヘッドランド群の区間の砂浜が安定し、約15万 m^3 /年のサンドリサイクルにより、 $X=11\text{ km}$ 地点の沿岸漂砂量の不均衡を補えることが、2030年の沿岸漂砂量分布図である図-3(d)から判断される。この沿岸漂砂量分布の条件下においては2030年以降での侵食対策は、図-3(e)のように土砂投入のみを継続すればよいことになる。

ただし、この計画においては4つの課題がある。第1の課題は、計画着手直後においてヘッドランドによる沿岸漂砂の遮断により、自然状態より大きな汀線後退が発生することである。第2の課題は、サンドリサイクルに利用する土砂を効率的に確保しようとする局所的に掘削することになり、人為的に大規模な掘削穴を造り出してしまうことである。この掘削穴に関しては環境などに与える影響を考慮し、採取位置や方法を決定する必要がある。第3の課題は、土砂投入による砂浜の保全を半永久的に継続しなければならないことであり、2030年以降も約15万 m^3 /年のサンドリサイクルが必要とされ、安定した財源を確保する必要がある。一方、2030年以降において $X=11\text{ km}$ より南側の放置(侵食)が許容され、サンドリサイクル約15万 m^3 /年を実施しない場合には、漂砂系全体の土砂管理として土砂堆積に伴う片貝漁港の維持を検討することが第4の課題として挙げられる。

(3) 侵食対策計画 III

次に、ヘッドランド No. 11~15の増設と土砂投入による対策について述べる。10基のヘッドランド群の設置は現在において進められているので、計画 I, IIの場合と同様に図-4(a)に示す沿岸漂砂量分布を計画時の条件とする。図からヘッドランド No. 10より南側で沿岸漂砂が大きくなり一定の区間($X=12\sim 18\text{ km}$)があることが読みとれるので、その区間にヘッドランドを増設し、通過沿岸漂砂量を減少させる手法が考えられる。具体的には、図-4(b)に模式的に示すように、既設の栗山川導流堤までの $X=12\sim 17\text{ km}$ に5基のヘッドランドを増設し、通過沿岸漂砂量を約9万 m^3 /年にして現状汀線を維持する計画である。この場合、ヘッドランド No. 10から栗山川導流堤までの通過沿岸漂砂量を約9万 m^3 /年に減少できるが、図-4(a)によると栗山川導流堤設置地点($X=17\text{ km}$)では約21万 m^3 /年の沿岸漂砂量があるので不均衡が生じる。したがって、栗山川導流堤の南側で汀線が後退することになるので、図-4(b)に示すように栗山川から南側は土砂投入により砂浜の保全を図る。

この計画の場合において、汀線後退を一切許容しなければ栗山川の南側への土砂投入量は約12万 m^3 /年となり、ヘッドランド No. 11~15の区間の一時的な汀線変化を許容できない場合には、追加的な土砂投入が必要である。しかし、実際には片貝漁港により土砂堆積が生じる

ことになるので、栗山川導流堤より南側の汀線形状と波向から求まる沿岸漂砂量は、経年的に減少することになる。この汀線の前進に伴う沿岸漂砂量の減少を考慮するとともに、汀線後退を評価して栗山川導流堤より南側への最適な土砂投入量を算定する必要がある。そこで、30年間の総量として栗山川導流堤南側への土砂投入量を120万 m^3 (4万 m^3 /年)としたのが図-4(b)である。ここでは、ヘッドランド No. 12~15の区間の一時的な汀線変化を制御する追加的な土砂投入も実施する。

この計画で2030年までの汀線変化を予測したのが図-4(c)であり、ヘッドランド No. 1~12の区間では汀線が前進し、ヘッドランド No. 11~15の区間では汀線は若干後退し安定形状になる。また、栗山川導流堤より南側は $X=18\text{ km}$ まで侵食され汀線が後退し、それより以南では土砂の堆積が進み汀線が前進する。2030年時点の沿岸漂砂量分布を図-5(d)に示すが、 $X=0\sim 17\text{ km}$ の区間はヘッドランド群により通過沿岸漂砂量が平均的に見て約9万 m^3 /年となり、北側境界の供給土砂量と均衡することが分かる。この沿岸漂砂量分布をもとにすれば、計画達成後の2030年以降においては、 $X=0\sim 17\text{ km}$ の

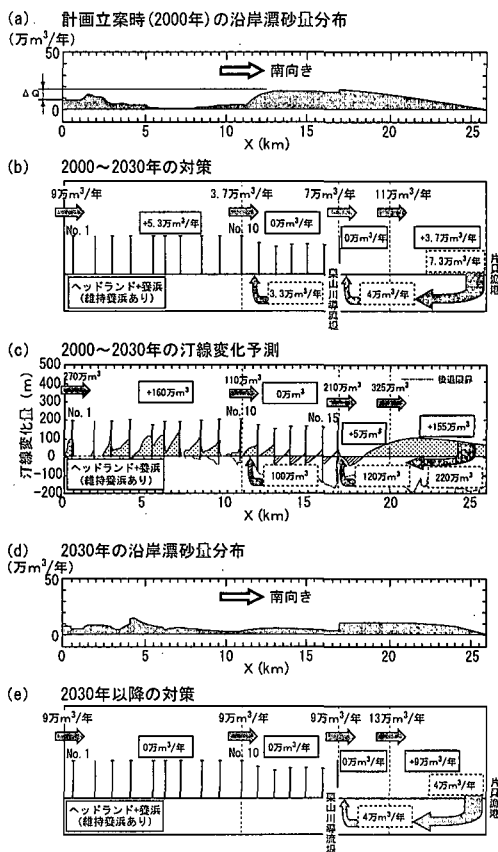


図-4 ヘッドランド増設と土砂投入による侵食対策計画

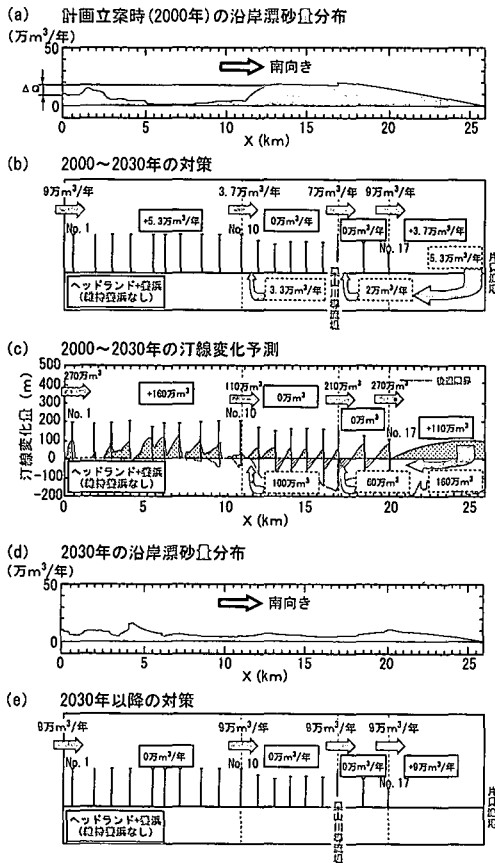


図-5 ヘッドランド増設のみの侵食対策計画

区間はヘッドランドの維持のみで、それより南側は $X=17$ km 地点に約 4 万 m^3 /年の土砂を継続的に投入すればよいことになる。これを模式的に示すと図-4(e)となるが、この場合も土砂投入のみの計画IIと同じような4つの課題が指摘される。

(4) 侵食対策計画IV

前述した侵食対策計画II, IIIでは、計画達成後の2030年以降も土砂投入を継続しなければならない課題がある。そこで、ヘッドランドの増設のみで、計画達成(30年後)以降にはその維持管理のみを行う計画を検討する。計画IVでは、片貝漁港による汀線前進や局所的な汀線後退による沿岸漂砂量の減少を見込み、九十九里海岸北側全域での通過沿岸漂砂量が北側境界からの供給土砂量と同じになるように、ヘッドランドの設置区間を延伸することにより海浜の安定を図ろうとするものである。図-5(a)によると、通過沿岸漂砂量が北側境界の供給土砂量(約 9 万 m^3 /年)になる位置は $X=22$ km であるが、片貝漁港の堆砂機能による汀線変化に伴い、2030年には沿岸漂砂量が図-5(a)より減少すると考えられる。そこで、図-5(b)に示すように $X=22$ km までにヘッドランド

No. 11~17を増設した場合を検討する。この場合も計画II, IIIと同様に計画達成までの期間(30年間)に、沿岸漂砂の不均衡による侵食が進行するので、ヘッドランド設置範囲の南側への土砂投入による汀線維持が伴う。

計画達成後の2030年時点における汀線変化の予測結果を図-5(c)に示す。ヘッドランドNo. 1~12の区間では汀線が前進し、ヘッドランドNo. 12~17の区間では汀線は若干後退し安定形状になる。また、ヘッドランドNo. 17より南側は片貝漁港の影響により、土砂の堆積が進み汀線が前進する。その時点の沿岸漂砂量分布を図-5(d)に示す。 $X=0\sim 20$ kmの区間はヘッドランド群により通過沿岸漂砂量が約 9 万 m^3 /年となり、北側境界の供給土砂量と均衡する。 $X=20$ kmより南側では汀線が前進したことにより、沿岸漂砂量は計画時点よりかなり小さくなり、ヘッドランドNo. 17地点では沿岸漂砂量はほぼ 9 万 m^3 /年となる。したがって、九十九里海岸北側全域で沿岸漂砂量は北側境界の供給土砂量である約 9 万 m^3 /年になり、汀線は安定することになる。また、片貝漁港の北側の右下がりの沿岸漂砂量分布となる範囲では、堆積が進み汀線が前進する。この沿岸漂砂量分布の下では、計画達成後の2030年以降においては、図-5(e)に示すようにヘッドランドの維持のみを行えばよい。

4. おわりに

九十九里海岸北側の侵食対策として検討されている計画I~IVについて、沿岸漂砂量分布図を用いて評価した結果、いずれの計画においてもその合理性の説明が可能で、提案した評価法により侵食対策計画を直感的に理解できることを示した。したがって、ここで提示した侵食対策計画を社会的制約(土地利用, 文化, 環境, 生態系)からさらに検討し、地域住民との合意形成を図れば、よりよい海岸を次世代に遺せることになる。

謝辞: 本論文をとりまとめるにあたっては、千葉県土木部河川海岸課河川海岸整備班から、北九十九里海岸侵食対策計画(案)に関する技術協議資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 磯部雅彦 (1998): 海岸環境と流砂系土砂管理, 河川, No. 628, pp. 24-31.
- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
- 宇多高明・高田 修・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼 (2000): 九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 686-690.
- 成瀬 進・大岡秀哉 (2000): 海岸管理の国際比較に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1251-1255.