

生存時間解析による海岸堤防の寿命の検討

Survival Analysis for Estimation of Lifetime of Coastal Levees

丹治 肇¹・桐 博英²・中矢哲郎³・小林慎太郎³

Hajime TANJI, Hirohide KIRI, Tetsuo NAKAYA and Shintaro KOBAYASHI

The life time of a coastal levee has been defined based on various criteria. The authors surveyed actual definitions of the lifetimes of coastal levees on 23 coasts in Japan and found four categories. 1) Project budget based, 2) LCC based, 3) Construction facilities based, 4) Performance based. Based on definition 3), levee corruption and loss of armor units were treated as death events (endpoints). Survival analysis was applied to the 1,400m Kitaebi Coast in Fukushima prefecture, where a strong depression broke banks in 2006. Data covering 49 years were collected and the Kaplan-Meier method was applied. The results showed survival probability of 30% for levees after 49 years, the end of the measuring period. And lifetime of armor units was 23 years.

1. 研究の目的

日本の海岸は、伊勢湾台風直後に建設された堤防が多く、更新時期の推定は重要な課題である。しかし、堤防の寿命 (lifetime) の定義とその推計方法には、定説がない。医学・機械分野では生存時間解析が寿命推定手法として広く用いられている。ここでは、現地調査を基に、寿命の定義と生存時間解析を用いた推定手法を検討した。

なお、本研究は丹治ら (2009) の熊本県の事例研究の対象拡大と一般化に相当する。このため、一部でその結果を引用する。

2. 調査対象地区の概要

全調査地区の概要を表-1に示す。調査は2009年1～2月に行った。表-1のNo.1は例外で、2006年の堤防崩落事故直後の調査である。① 福島県北海老海岸 (No.1) 福島県の北部に位置する農地海岸である。この地区の堤防は、2006年10月6～7日に、低気圧に伴う波浪により、越波を受け、堤防が崩落した。被災の状況と原因の分析は既に丹治ら (2007) が発表した。ここでは、被災履歴を生存時間解析する。② 熊本県干拓海岸 (Nos.2-8) 熊本県の干拓地の農地海岸である。堤防は干拓に伴い建設され、管理用道路が付設されている。③ 沖縄県琉球政府護岸 (Nos.9-20) 琉球政府時代に建設された沖縄県の海岸堤防で、沖縄県では、琉球政府護岸と呼ばれている。この海岸堤防の特徴は、リーフがあるため波浪が著しく弱くなる点、築堤時期には、復帰していなかったため、堤防が内地の基準を満足していない点にある。内地に比べ非常に

古い堤防が残っている。なお、表-1のNo.9, 11, 13は例外で最近の建設である。④ 愛知県名古屋港海岸 (Nos.21-23) 名古屋港の海岸堤防で港湾管理組合により管理されている。堤防は伊勢湾台風の直後に建設された。

3. 生存時間の定義

(1) 寿命の定義

生存時間解析で、海岸堤防の寿命を推定する場合、何が死亡に相当するイベントであるかを指定しなければならない。しかし、堤防の寿命について、共通の理解はなく、混乱している。例えば、寿命がきたので再建する場合と補修の場合の区別が問題になる。そこで、表-1の調査地区でのヒアリングから、寿命の定義を抽出すると次の4種になった。

定義1 更新 (旧堤防の寿命の終了) とは、堤防を再建設する事業予算の採択を意味し、それ以外は修復である。これは、予算の区分で判断している。

定義2 ライフサイクルコスト解析では、トータルコストが最少になる更新時点を寿命とする。

定義3 堤防に崩壊等の物理的に大きな損傷が生じた場合を寿命と見なす。言い換えれば、直後の工法の種類で更新と修復を分類する。

定義4 堤防が設計性能を満たさなくなったときを寿命と見なす。

定義2はライフサイクルコストの計算を要するため、具体的に数字を伴って寿命という言葉が使われる場合は、定義1, 3, 4のみであった。

(2) 地区による定義への関心の違い

a) 共通項

各地区とも行政組織の定義1と工法の定義3が用いられている点が共通している。海岸関連省庁 (2008) は平成20年に「ライフサイクルマネジメントのための海岸保全

1 正会員	農博	(独法) 農村工学研究所, 河海工研室長
2 正会員		(独法) 農村工学研究所, 河海工研主任 研究員
3 正会員	農博	(独法) 農村工学研究所, 施設機能研究員
4	学博	(独法) 国際農林水産業研究センター

表-1 調査対象海岸の概要*は推定年代△は初期不良

No.	県	調査海岸	海域	建設時期	定義	素材	更新原因	対策	状況
1	福島県	北海老	太平洋	1959	13	コンクリート	堤防崩落	更新	
2	熊本県	大正開	有明海		134	石積+コンクリート	堤防沈下		
3	熊本県	共和	有明海		134	コンクリート	堤防沈下		
4	熊本県	玉名横島	有明海	1979	134	コンクリート	堤防沈下	更新	
5	熊本県	和鹿島	八代海		134	コンクリート	堤防沈下		
6	熊本県	文政	八代海		134	コンクリート	堤防沈下	消波工	
7	熊本県	昭和	八代海		134	コンクリート	堤防沈下		
8	熊本県	金剛	八代海	1954-1961	134	コンクリート	堤防沈下	消波工	
9	沖縄県	北谷町北前	東シナ海	1980s*	1234	石積+コンクリート	未	未	亀裂
10	沖縄県	北中城村熱田	太平洋	1960s*	1234	コンクリート	堤防崩落△		堤防一部崩落, 吸出
11	沖縄県	中城村字添石浜地区	太平洋	1990s*	1234	コンクリート	未	未	良好
12	沖縄県	中城村字添石吉の浦公園	太平洋	1960s*	1234	コンクリート	未	未	堤防一部崩落, 陸化
13	沖縄県	中城村字添石南浜	太平洋	1980s*	1234	コンクリート	未	未	吸出
14	沖縄県	南城村富祖碕	太平洋	1940s*	1234	石積	未	上面補修	吸出
15	沖縄県	中城港湾岸豊原	太平洋	1940s*, 1960s*	1234	石積+コンクリート	未	コンクリート被覆	
16	沖縄県	中城港湾岸川田	太平洋	1940s*, 1960s*	1234	石積+コンクリート	未	目地モルタル	
17	沖縄県	南原漁港海岸	太平洋	1940s	1234	石積	未	未	吸出, 基礎流出
18	沖縄県	中城港湾岸平安名	太平洋	1960s*	1234	コンクリート	未	未	吸出(少)
19	沖縄県	桃原漁港南	太平洋	1940s*	1234	石積	未	コンクリート被覆	
20	沖縄県	桃原漁港北	太平洋	1940*	1234	石積	未	未	吸出, 基礎流出
21	愛知県	名古屋港潮見	伊勢湾	1959-1963	123	コンクリート	未	ひびモルタル	
22	愛知県	名古屋港船見	伊勢湾	1959-1963	123	コンクリート	未	コンクリート被覆	
23	愛知県	名古屋港堀川	伊勢湾	1959-1963	123	コンクリート	未	ひびモルタル	

施設維持管理マニュアル (案)」を出版しているので、定義2の利用の有無は、このマニュアルを維持管理に反映しているか否かで判断した。

b) 地区毎の特徴

各地区で関心のある定義を表-1に追記した。① 福島県北海老海岸 2006年の災害を受けて大規模な更新が行われたばかりであり、ライフサイクルコスト (定義2) と設計性能 (定義4) が問題になる状況ではない。② 熊本県干拓海岸 表-1のNo.4の玉名横島海岸については、国営事業で更新中である。その他は熊本県が管理している。マニュアルは未だ参照していない。沈下の監視のために、堤防天端の測量をしているので、定義4に関心があると判断した。③ 沖縄県琉球政府護岸 琉球政府時代には、内地基準の性能が満足されていないため、定義4への関心が高い。また、海岸関連省庁のマニュアルを参考に平成20～21年に委員会をもうけて、琉球政府護岸用の独自マニュアルを策定中で、定義2の関心も高い。④ 愛知県名古屋港海岸 定義2に関心が高く、2008年3月時点で、全海岸堤防の33kmについて、マニュアルに従った点検を行っている。

c) 更新と補修の境界

定義3の工法から見ると更新と補修の境界は曖昧である。写真-1 (a) は熊本県の堤防の継ぎ足しで更新、写真-1 (b) は沖縄県の堤防の継ぎ足し補修である。写真-2は愛知県の約20cmの堤防の継ぎ足し補修である。これらを

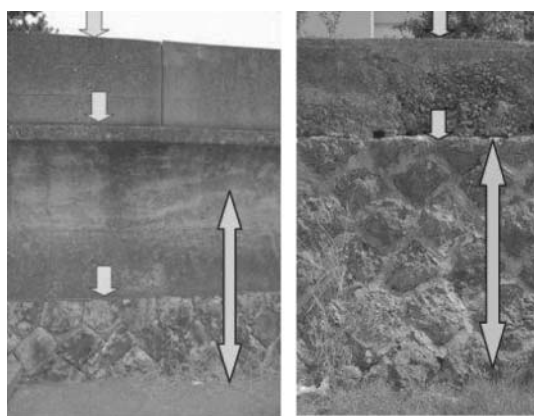


写真-1 (a) 左熊本県大正開海岸の更新状況
(b) 右沖縄県中城湾川田海岸の補修状況
(片矢印：天端線 両矢印：約1.5m)

参考に、定義1に合わせた工種と更新と補修の区分を表-2に提案する。表-2のa2とa3には費用の定量的な差があるが、堤防の高さを補填する場合には、その境界は写真-1から「①追加高さが大きい (約50cm以上) ② 堤防沈下が進行性 (年間約1cm以上)」が参考になろう。

(3) 更新原因

調査海岸で過去に行われた更新の原因を表-1に追加してある。福島県のNo.1では、台風と低気圧による波浪による堤防の崩落や消波工の流出が見られた。熊本県の

表-2 工種と更新と補修の区分

No.	工種	区分
a1	旧堤防撤去建設	更新
a2	旧堤防へ上乗せ建設（費用大）	更新
a3	旧堤防へ上乗せ建設（費用小）	補修
a4	堤防表面の被覆と上乗せ建設	補修
a5	堤防表面の被覆	補修
a6	堤防上面の張り替え	補修
a7	空積のモルタル補填	補修
a8	堤防間の目地の補填	補修
a8	亀裂の補填	補修
b1	消波ブロックの設置	更新
b2	消波ブロックの追加（費用大）	更新
b3	消波ブロックの追加（費用小）	補修
b4	消波ブロック並べ替え	補修



写真-2 名古屋港海岸の補修状況（矢印：補修部分）

Nos.2～9は干拓地の海岸堤防で、有明粘土層の沈下による堤防高さ不足が生じていた。沖縄県のNo.10では、サンゴを骨材代わりに使ったコンクリートの初期不良による堤防の崩落であった。一方、Nos.21～23の名古屋港では、堤防表面にひび割れが見られ、補修されていたが、大きな損傷は見られなかった。最大の補修が写真-2である。ただし、名古屋港では、液状化対策のための更新を徐々に進めている。

4. 生存時間解析手法の概要

生存時間解析とは、投薬などの治療の効果を検証するために、患者を投薬群と非投薬群に分けて、死亡までの時間の差を検討する手法である。対象が機械の場合には、故障して使えなくなるまでの時間を推定する。

患者 id について、開始時刻 $time1$ から終了時刻 $time2$ まで観測が行われ、終了時刻において、イベントが生存（0）または、死亡（1）とする。観測期間 $time3$ を次式で求めると、患者のデータは $id, time3$ 、イベントで示せる。

$$time3 = time2 - time1 \dots\dots\dots (1)$$

今、全患者数を j とし、全ての患者の観測期間 $time3$ の

データ $time3_1, \dots, time3_m$ が集められ、ソートされ次の順になったとする。

$$0 < time3_1 < \dots < time3_m \dots\dots\dots (2)$$

このとき $time3_m$ は最大値である。 $time3_m$ を除いた半開区間 $[0, time3_m)$ は次の半開区間 p_i に分割できる。

$$p_i = [time3_{i-1}, time3_i) \quad i=1, \dots, m \dots\dots\dots (3)$$

ノンパラメトリックな生存時間解析手法としてKaplan-Meier法が良く使われる。この手法は丹後（2000）によれば、 $time3_i$ を t_i とおき、時間 t_j の生存関数 S の最尤推定値として次を与える。

$$\hat{S}(t_j) = \prod_{t_i < t_j} \left(\frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \dots\dots\dots (4)$$

(4)式の右辺 $(n_i - d_i) / n_i$ は、期間 p_i の生存確率である。 n_i はサブ期間の患者数、 d_i は期間 p_i におけるイベント数（死亡者数）である。

5. 生存時間解析の結果

表-1のNo.1とNo.4に生存時間解析を適用した。

(1) 海岸堤防への適用

図-1に福島県の北海老海岸の概要と被災履歴を示す。北海老海岸堤防は1959～1962年に建設され、2006年10月に低気圧による越波で堤防崩落が生じた。図-1の1,403mの堤防を10mずつ区切って離散化した。図-1に被災履歴が同じ部分をグループ化して、(a, b, c...)のブロックIDを振ってある。このブロック単位で、堤防の建設から、崩落または、調査打ち切りまでのデータを表-3に月単位で整理した。堤防崩落のイベントは死亡に相当する1とする。これは定義3に相当する。イベント0は、調査終了時に生存していた打ち切りデータである。最終追跡時期は、2008年3月とした。堤防の建設時期は古く、月の特定はできなかった。ここでは、年度予算と考え3月を建設月に仮定した。2006年10月の堤防崩落後の再建は、数ヶ月は仮設堤防で対応し、本予算がついてから工事をしていた。これからすると、堤防崩落後の新堤防の建設時期を推定することは困難である。そこで、ID. hの1993年とID. a～fの2006年の崩落後の新堤防のデータは除外した。生存時間解析は、表-3のデータを再度10m単位で離散化して患者と見なした。患者数は1,499になった。

結果を図-2に示す。縦軸は(4)式の生存確率 $\hat{S}(t_j)$ 、横軸は建設からの時間 t_j である。実線は生存確率の時間変化を表す生存曲線である。生存確率は期間 p_i の間は一定のため、生存曲線は階段状になる。点線は、正規分布を仮定した場合の95%の信頼区間である。図中の“+”は打ち切りデータを示す。図-2の右端の期末 $time3_m$ の588月（49年）の直前の生存確率は約30%である。厳密には期末は計算していないが、以下では簡略に、「期末の直前」を「期末」と呼ぶ。次に説明する図-3では、300月付近で生存確率が

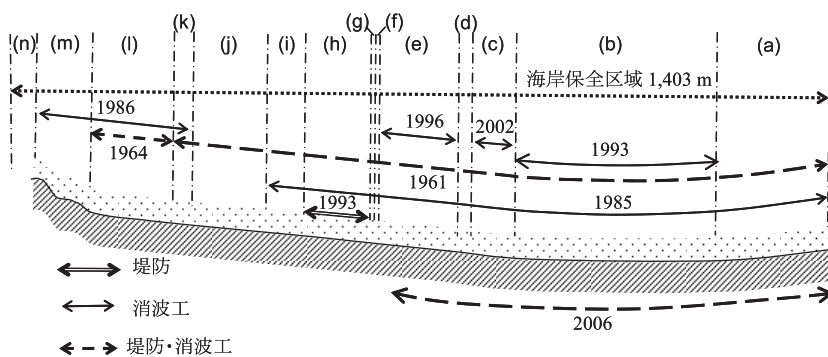


図-1 北海老海岸の被災とブロック分割

表-3 堤防の生存時間解析データ

ID.	区間長(m)	開始年	月	終了年	月	期間 (月)	イベント
a	120	1962	3	2006	10	535	1
b	420	1962	3	2006	10	535	1
c	70	1962	3	2006	10	535	1
d	20	1962	3	2006	10	535	1
e	130	1962	3	2006	10	535	1
f	10	1962	3	2006	10	535	1
g	10	1962	3	2008	3	552	0
h	110	1962	3	1993	8	377	1
i	40	1962	3	2008	3	552	0
j	140	1962	3	2008	3	552	0
k	30	1962	3	2008	3	552	0
l	140	1965	3	2008	3	516	0
m	100	1959	3	2008	3	588	0
n	60	1959	3	2008	3	588	0

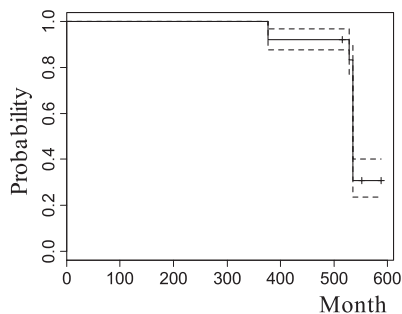


図-2 堤防の生存時間解析結果

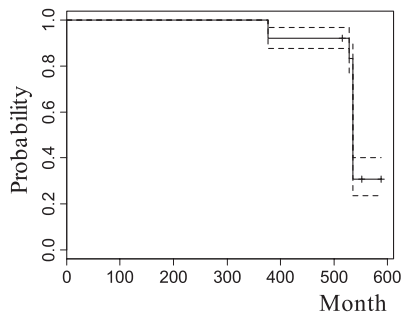


図-3 消波工の生存時間解析結果

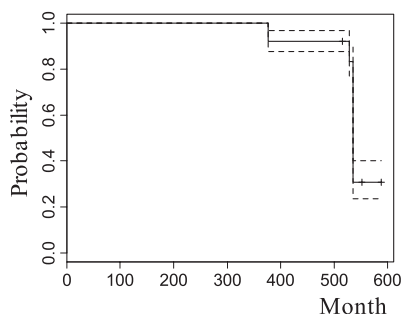


図-4 沈下堤防の生存時間解析結果 (丹治ら (2009) より引用)

0なので、並べると、図-2でも、800月付近で0になりそうである。しかし、解析は分布を仮定しないため、588月以降を外挿する根拠はない。確率が1を切るのは、377月(31.4年)で表-3のID. hのデータに対応している。生存率は約522月(43.5年)時に発生した波浪による堤防崩落により急減している。

(2) 消波工への適用

北海老海岸では、堤防の前面に消波工が設置されている。そこで、1,400mの海岸の消波工を、堤防と同様に図-1の10mピッチでブロック化した。消波工が流出して積み増しが必要になった場合を死亡と見なした。積み増しは被災の次の月になされたと仮定した。消波工を積み増した場合には、同じ地点でも、新規の患者の参入と見なした。このようにして作成した消波工の生存時間解析のデータを表-4に示す。ブロックを10m毎に3,220データに分解して、生存時間解析を行った。図-3の解析結果から、消波工の寿命は、約280月(23年)で、堤防寿命の約半分と評価された。

(3) 堤防沈下への適用

この節は丹治ら(2009)の概要を引用する。熊本県の有明海の玉名横島海岸堤防のうち河川堤防に隣接した一部を除いた8.3kmで堤防の天端標高が測量されている。観測点は、ほぼ等間隔に設置されているので、各観測点を堤防区間の代表値とし、112観測点を患者と見なした。死

表-4 消波工の生存時間解析データ

ID.	区間長(m)	開始年	月	終了年	月	期間(月)	イベント
a	120	1962	3	1985	2	275	1
a	120	1985	3	2008	3	276	0
b	420	1962	3	1985	2	275	1
b	420	1985	3	1993	5	98	1
b	420	1993	6	2006	10	160	1
c	70	1962	6	1985	2	275	1
c	70	1985	6	2002	10	211	1
c	70	2002	11	2006	10	47	1
d	20	1962	3	1985	2	275	1
d	20	1985	3	2006	10	259	1
e	130	1985	3	1996	9	138	1
e	130	1996	10	2006	10	120	1
f	10	1962	3	1985	2	275	1
f	10	1985	3	2006	10	259	1
g	10	1962	3	1985	2	275	1
g	10	1985	3	2006	10	259	1
h	110	1962	3	1985	2	275	1
h	110	1985	3	2006	10	259	1
i	40	1962	3	1985	2	275	1
i	40	1985	3	2008	3	276	0
j	140	1962	3	2008	3	252	0
k	30	1962	3	1986	3	288	1
k	30	1986	4	2008	3	263	0
l	140	1965	3	1986	3	252	1
l	140	1986	4	2008	3	263	0
m	100	1959	3	1986	3	324	1
n	60	1959	3	2008	3	588	0

亡を堤防高さが5.5m未満に沈下した場合(定義4)にとって生存時間解析データを作成した。図-4に示す結果では期末の約8,136日(22年)で約40%の堤防が寿命を迎えた。全体を7地区に分割したところ、菊池工区2では全観測点が、観測期間終了前に5.5m以下になり、推定寿命が最少の5,164日(14.1年)になった。

6. 考察

(1) 推定寿命の利用法

定義1, 3, 4により、生存時間解析を行うと、堤防の寿命の最尤推定値が求まる。ここでは、寿命の推定にノンパラメトリックな手法であるKaplan-Meier法を用いた。この手法は、特定の分布を前提としない長所があるが、そのため外挿はできない。福島県の事例では期末 $time_{3m}$ の588月(49年)が、熊本県の事例では、期末 $time_{3m}$ の8,136日(22.3年)が生存確率が検討できる最長時間になる。消波工のように調査期間内に、ほぼ全データで死亡が確認される場合を除けば、調査期間外の生存率が問題になる。この点を解消するためには、パラメトリックな手法を検討する必要がある。

(2) 類似の研究との関係

生存時間曲線を海岸堤防に適用した研究はないが、比較的似ている研究に、高橋ら(2006)の構造性能曲線の推定がある。構造性能曲線とは、縦軸に構造性能(健全度)、横軸に経過時間を取ったライフサイクルコストの計算に用いる構造物の性能の低減を示す曲線である。高橋ら(2006)は「この構造性能曲線を定量的に示している分野はほとんどなく、『定式化が困難である』と明言している分野さえある。しかしながら、アセットマネジメントの必要性・有効性に関する説明責任の点から、構造性能曲線の定式化は非常に重要である。」といい、マルコフ連鎖モデルを使った構造性能曲線の作成法を提案している。

熊本県の干拓海岸の場合、生存時間曲線は、縦横軸が、構造性能曲線と同じであり、そのまま利用可能とも思われる。しかし、①性能評価が堤防沈下に限定されている、②生存確率の低下は、地盤沈下によるので、維持管理により生存時間を長くできる余地がない点に留意が必要である。

(3) 想定外外力の問題

福島県の北海老海岸の場合、想定外の波浪により堤防が崩落した。今回の生存時間解析では想定外外力を区別しないが、堤防の寿命が想定外外力で決まる場合には、維持管理の改善により、寿命を延ばす余地がないので、できれば区別すべきと思われる。

7. 結論

23海岸の現地調査により、使われている堤防の寿命の定義を4種類に分けた。福島県北海老海岸で、定義3に基づき、海岸堤防の崩壊と消波工の流失が生じた場合を死亡と見なし、最大観測期間49年で、Kaplan-Meier法を用いて、生存時間解析により寿命の推定を行った。堤防の生存確率は49年で30%であった。消波工の寿命は堤防の寿命の約半分の23年であった。観測期間(49年)以降の生存率を求め、寿命を推定するには、今後、パラメトリックな手法を導入する必要がある。

参考文献

- 海岸関連省庁[農林水産省農村振興局防災課・農林水産省水産庁防災漁村課・国土交通省河川局海岸室・国土交通省港湾局海岸防災課](2008)：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～, 105p.
- 高橋宏直・横田 弘・岩波光保(2006)：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.29, 84p.
- 丹後俊郎(2000)：統計モデル入門, 朝倉書店, 246p.
- 丹治 肇・桐 博英・中矢哲郎(2007)：連続被災した福島県北海老海岸の緊急対策と評価, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1411-1415
- 丹治 肇・桐 博英・中矢哲郎・小林慎太郎(2009)：熊本県八代農地海岸の点検の現状と維持管理の課題, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.157-162