

### \*\*\* 堤防の信頼性

三戸祐子氏(経済、経営ライター)の「巨大システムの振る舞いと人間の直感のズレ」と題する話は興味深い視点を提供してくれた。その大略は以下の通りであった(間違い、誤解があればそれは筆者の責に帰するものである)。

システムは、部品が多ければ多いほど精密で、故障しづらいと思われがちである。しかし、「システムの直列性」すなわち「部品が直列につながれているシステムは、ひとつの部品がコケルとシステム全体が皆コケル」という特性を持っており、人間の直感はあてにならないことが分かる。

一般的に、直列のシステムが一定の期間故障しないで働く確率(信頼度)は、互いに他を補う関係にあるすべての部品それぞれが故障しない確率の積で表される。

すなわち、信頼度  $r$  の部品  $n$  個を直列に組んだシステムの信頼度  $R$  は、

$$R=r_1 \times r_2 \times r_3 \times \dots \times r_n$$

であり、簡単のため信頼度がすべての部品で同じと仮定すると、

$$R=r^n$$

で表すことができる。

精密機械や電子部品などで使われるスリーナインの品質( $r=0.999$ )を持つ部品、これは大変良くできた部品ということが出来るが、これが3個直列に組まれると $R=0.997$ 、10個だと $R=0.990$ と徐々に信頼性は下がり、1,000個では $R=0.368$ と運が良ければ動くシステムということになり、10,000個では $R=0.00005$ と苦勞して巨大なゴミを製作したことになるのである。

表 システムの信頼度

品質 $r=0.999$	
部品数 $n$	信頼度 $R$
1	0.999
3	0.997
10	0.99
100	0.905
500	0.606
1,000	0.368
10,000	0.00005

ところで、洪水のとき、システムの部品が故障、すなわち、一連の堤防のなかのどこか一部分が、越水、漏水などによって破堤した場合には、連続堤防はその機能を果たせなくなり、防御されている氾濫原は浸水することとなる。このことから、連続堤防(系)は多くの断面(要素、部品)が連続してつながっている直列システムに例えることが可能であり、その信頼性を理論上(確率論として)どのように認識しておくべきか、上記システムの信頼度の考え方から考えてみよう。

ここでは、堤防を延長1mの断面が直列につながった単純なシステムと想定する。また、各断面すなわち延長1mの堤防が有する信頼度は、堤防の高さ、断面形状、盛り土材料、施工法、基盤特性、維持管理の状況など、堤防断面ごとにその時点での固有の品質によって決まるものであるが、例えば同じ信頼度になるよう施工、管理された堤防を想定して均一に $r=0.999$ と仮定する。その結果、延長10m( $n=10$ )の連続堤防に守られた氾濫原の安全性(堤防の信頼度)は $R=0.990$ であるのに対し、延長100m( $n=100$ )では $R=0.905$ 、延長500m( $n=500$ )では $R=0.606$ 、延長1,000m( $n=1,000$ )では $R=0.368$ となり、堤防延長が長くなるに従って安全性、信頼度が急激に低下することが分かる。

広大な低平地を洪水から守るために延長が数 km に及ぶことも珍しくない石狩川水系をはじめとする北海道の河川堤防が防御する氾濫原の安全性は、堤防の持つ不確実性が延長とともに増大するがゆえに、堤防の信頼度に大きく左右されることを認識しておくことが重要である。いくら品質の高い断面があっても機能の劣る断面(要素、部品)があれば、連続堤防の信頼度はその一断面の品質(不確実性)に支配されることになるのである。

従って、このようなシステムの活用に際しては、有意な効果が見込まれる品質の向上に努めていく一方、直列システムが持つ特性を踏まえた対応、対策を考慮しておくことが現実的であり、重要である。

直列システムの故障・不都合による大事故を防ぐには、

- 1) 有意な効果が見込まれる部品の品質向上と品質の均一化に努める。
- 2) システムを区切り、規模を人間の直感で操作できる範囲にとどめる。
- 3) 社会認識を進め、安全を広くサポートしてもらう環境をつくる。

が有効とされる。

これを北海道の連続堤防にあてはめ、安全性(信頼性)を確保しつつ、万が一の際にも壊滅的な被害を防ぐためには、次のような対策が有効と考えられる。

- 1) 堤防の品質を向上するためには、施工に際して様々な工法を駆使し基準を満足するように実施するのは勿論、アーマーレビーなど仮に溢水しても破堤しづらい構造の堤防を整備する。  
また、品質の均一化を図るため、平常時の堤防調査・点検、監視・診断、維持・補修に加え、丘陵堤など緩傾斜の堤防やスーパー堤防など不均質性をカバーできる断面構造の堤防を整備する。
- 2) システムを区切る方策としては、霞堤や輪中堤は連続堤防の延長を短くすることができ、二線堤は氾濫水の拡大を一定程度の範囲にとどめることができる。また、宅地の嵩上げや嵩上地への集住化によって住宅だけは浸水を回避することが可能となる。
- 3) さらに、住民と行政、双方向の情報提供による情報の共有化やより実態を反映したハザードマップの整備などを進め、自助、共助、公助を踏まえた連携・協働を強化することを通じて洪水被害を軽減する。

さらに、直列システムをできるだけ並列型のシステムにしておくことは安全性の向上には大変有効である。系を構成する個々の要素の安全性(信頼度)は小さくても、要素が並列に連結していれば、すべてダウンしない限り機能を発揮して系全体の安全性は劇的に高まることとなるからである。具体的には、洪水のエネルギーを空間的、時間的に分散する洪水調節ダム、遊水地などは、策定した計画外力に対してそれぞれ機能には限界があるが、堤防だけに頼る直列システムを並列型システムにすることによって安全性を向上させる構成要素、サブシステムである。また、これらは、仮に外力が整備途上の河道の能力や計画を超える規模になったときにも、堤防のバックアップシステムとして機能することも可能である。

信頼度  $r=0.999$  の9を実際にひとつ増やして“フォーナイン”にするために追加が必要な費用、時間、労力の大きさに比べ、安全対策(信頼度向上)の効果は、あまりにも人の目に見えにくい。また、不確実性のともなうシステムとして品質向上には限界があることにも留意しておく必要がある。その認識に立てば、ダムや遊水地など様々な治水手

法をはじめとする多様な対策の効果的、合理的な組み合わせによる洪水対策、すなわち並列型システムを不要とするほど堤防の安全性(信頼度)を効果的に高めることができるのか、慎重に検証しておくことが求められる(勿論、一定レベルまでの堤防の質的向上を否定するものでないことは言うまでもない)。

20100409 MS生



石狩川の溢水破堤(大曲左岸築堤 昭和50年8月洪水 読売新聞社提供)