

東北地方太平洋沖地震による橋梁の津波被害と 津波流速の簡易分析

竹田周平¹・幸左賢二²

¹正会員 博士（工学）福井工業大学准教授 工学部建築生活環境学科（〒910-8505 福井市学園3-6-1）
²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震（M9.0）が発生した。この地震により宮城県栗原市で震度7を記録、また岩手県から福島県の沿岸では巨大津波が来襲し、またこの地域以外の北海道から千葉県沿岸でも津波による被害が発生した。地震発生以降、東日本では比較的大きな規模の余震も多く発生することに加え、福島第一原子力発電所事故による災害も含めて「東日本大震災」と呼称することになった。

著者らは、地震発生直後より土木学会の公式調査団員として現地に向かい、巨大地震による地震被害や、大津波による被害調査を実施、その後二回の合計三回、現地調査を実施した。この調査では、津波により被災した重要社会基盤施設である橋梁や鉄道、また沿岸部の都市や集落の状況を記録した。

この論文では、これまでに調査した太平洋沿岸部に位置する代表的な橋梁を対象に、この被害状況を説明するとともに、被害メカニズムに関する考察を述べる。しかしながら、この考察において、現地調査で得られた情報や現地調査報告などの限定した情報の中で述べたものであり、今後の詳細な分析結果に基づき修正されることを申し添えておく。

2. 調査概要と巨大地震の概要

(1) 巨大地震の概要

平成23年3月11日午14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震は、地震の規模を示すマグニチュードが9.0と観測史上四番目と極めて巨大な規模となり、

この結果東日本全体に甚大な被害をもたらした。震源位置は、北緯38度06.2分東経142度51.6分であり、震源の深さは24kmと比較的浅いものとなった。このために、東日本の沿岸には巨大津波が来襲することになった。この地震の発震機構は、西北西-東南東方向に圧力軸をもつ逆断層型である。この地震により宮城県栗原市では震度7を記録、また宮城県や福島県ではいくつもの地域で震度6強や震度6弱を記録した。

(2) 現地調査の概要

表-1は、震災直後から現地調査を行った日時と調査対象地（代表的なもの）を示したものである。第一回と二回では、福島第一原子力発電所の災害の関係があり調査対象から福島県および宮城県の福島側を調査対象から除外した。また地震発生の約7ヶ月後の第三回調査では、福島県の宮城県境付近まで調査をした。

表-1 調査時期と代表的な調査対象地

番号	日時	調査地	
		県	主な調査市町村
1	3/15-3/21 (2011)	岩手県	陸前高田、大船渡など
		宮城県	岩沼、石巻、気仙沼、女川 南三陸など
2	3/30-4/4 (2011)	岩手県	釜石、山田、宮古など
		宮城県	南三陸、女川、石巻など
3	10/10-10/13 (2011)	岩手県	釜石、両石、唐丹など
		宮城県	岩沼、名取、気仙沼など
		福島県	相馬、新地など

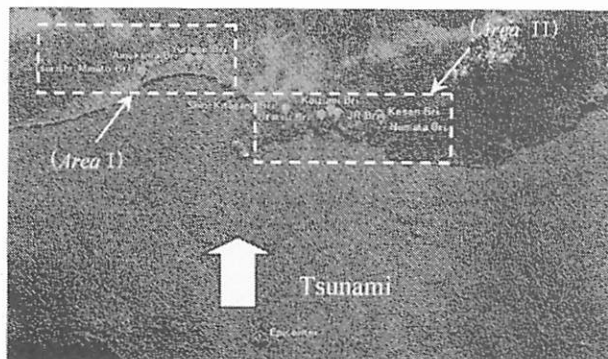
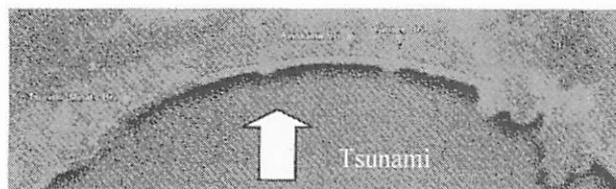
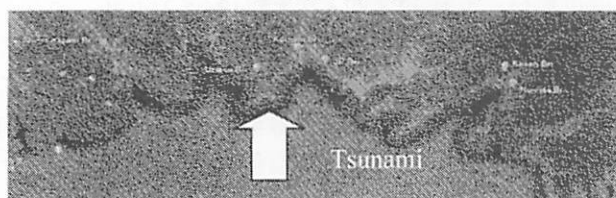


図-1 震源と代表的な橋梁被害の位置



(a) 一般的な海岸部 (Area I)



(b) リア式海岸部 (Area II)

図-2 代表的な被害橋梁の位置 (拡大図)

表-2 調査対象橋梁

No	橋梁名	県名
1	釣師港橋 (pc)	福島県
2	相ノ釜橋 (steel)	宮城県
3	関上大橋 (pc)	宮城県
4	新北上大橋 (steel, truss)	宮城県
5	歌津大橋 (pc)	宮城県
6	小泉大橋 (steel)	宮城県
7	JR線の橋梁 (JR気仙沼線, pc)	宮城県
8	気仙大橋 (steel)	岩手県
9	沼田跨線橋 (pc)	岩手県

図-1に代表的な橋梁の位置を示す。図中の矢印は津波の襲来方向を概略で示したものである。図中に示すAreaIは一般的な海外形状でありリアス式のようなV型形状ではない。またAreaIIは三陸の特徴でもあるリアス式海岸であり、海岸部に押し寄せた津波高が増大しやすい地形である。

図-2は、図-1のArea I とArea IIを拡大して示したものである。この図の(a)と(b)から判るように海岸線の形状が一般的な海岸と、リアス式のようなV型地形になった二つのパターンが確認できる。

(3) 調査対象橋梁

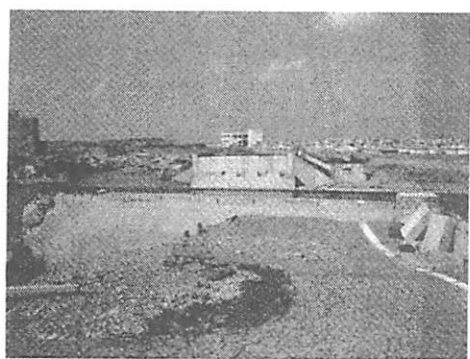
表-2は、今回の震災調査で被害調査を行った橋梁のうち、代表的な被害である9橋を示したもので、橋梁名と架橋位置（県）および海岸形状を分類して整理したものである。表に示す7番の橋のみ鉄道橋であるが、そのほかの8橋は道路橋である。また表中に示すpcはコンクリート製の上部構造を、steelは鋼製をtrussはトラス構造を示す。

3. 代表的な橋梁の被害状況

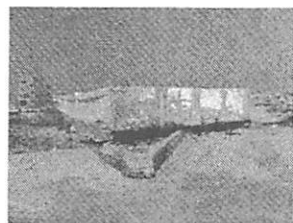
(1) 一般的形状に位置する橋梁被害

ここでは、表-2に示すNo.1～3の橋梁の被害（一般的な海岸形状）について述べる。

写真-1 は福島県の海岸線付近に位置する釣師港橋である。この橋梁は港のすぐ横に位置している単純スパンのPC橋である。被害としては、津波力により上部構造が浮き上がりながら回転し、流出したものを推測される。また下部構造については、多少の損傷は認められるが際だって大きな損傷は確認できない。また橋梁下流側に位置していたライフライン橋（水管橋と思われる）も同様に上部構造が流出した。写真-2 に相ノ釜橋を、また写真-3 に関上大橋橋を示す。これらの橋は共に海岸線に比較的近い位置に架橋された橋梁であり津波の影響を受けた橋梁である。しかしながら、対象の損傷は認められるものの上部構造の流出は免れた。特に相ノ釜橋は、上部構造が0.2mから1.0m程度移動する被害（鉛直軸を中心として回転を伴う移動）を受けている。この付近の橋梁被害は、上部構造が流出するか、また流出しないかの二種類の被害形態が多いことを確認しているが、このように桁がずれた橋梁の被害は比較的少ない。すなわち特徴的な被害であることが判る。なお関上大橋では、津波は橋梁を越流していないが、桁端部にひび割れ被害が認められた。



(a) 橋梁全景



(b) 流出した上部構造



(c) 下部構造

写真-1 釣師港橋 (PC橋)



(a) 橋梁全景

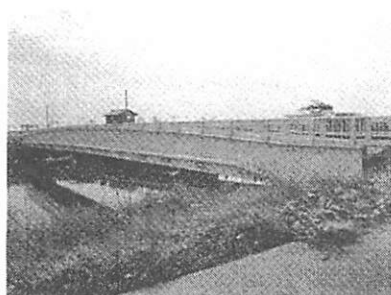


(b) 伸縮装置の被害



(c) 桁端部及び支承部

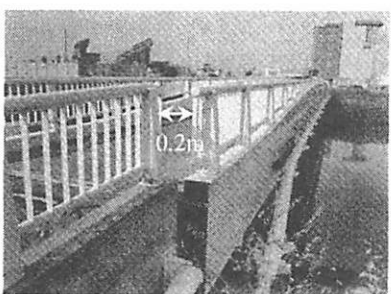
写真-3 関上大橋 (PC橋)



(a) 橋梁全景



(b) 回転した上部構造 (左岸)



(c) 回転した上部構造 (右岸)

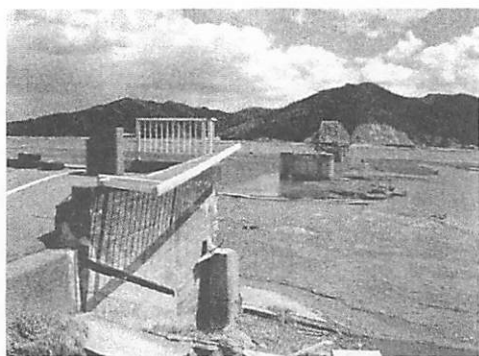
写真-2 相ノ釜橋 (鋼橋)

(2) リアス式海岸に位置する橋梁被害

次に、表-2に示すNo.4～9の橋梁の被害を述べる。写真-4 は新北上大橋を、写真-5 は歌津大橋、写真-6 は小泉大橋の被害の様子を示す。これらの橋は歌津大橋のみ海岸線付近であり、小泉大橋は若干ではあるが少し海岸線よりも内陸部、また新北上大橋は内陸部に位置しており、橋梁の架橋位置より海や海岸線を望むことはできない。この新北上大橋は、大川小学校のすぐ横に位置しており、左岸側の2スパンのみ（トラス構造）が流出した。またこの橋梁には耐震対策として落橋防止装置が設置されていたが、津波による桁の流出は阻止できなかった。すなわち、津波作用力は想定外地震で機能するはずであった落橋防止装置の性能を超過するようなレベルであった。

写真-5 に示す歌津大橋は海岸付近に位置しており、橋梁の下側は港である。この橋では多くの上部構造が流出している。現地の被害状況より、津波により上部構造が浮き上がりを行いながら回転し流出したと考えられる。また下部構造は耐震補強が行われていたが、1つの橋脚のみ柱部に被害が認められた。

写真-6 に示す小泉大橋は、歌津大橋と同様に耐震補強が行われていた橋梁であるが、上部構造がすべてが、また橋脚1基が流出する被害となった。この橋は鋼製であり、流出した上部構造を確認すると、橋桁部のメタル部と床版の鉄筋コンクリートが分離するような被害となった。これは、桁が流出した際、



(a) 橋梁全景

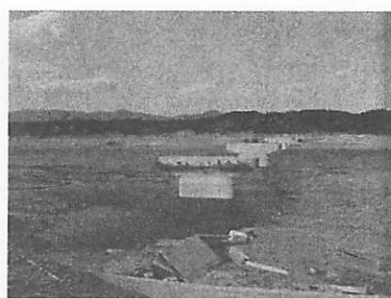


(b) 流出したスパン



(c) 流出部の橋脚

写真-4 新北上大橋



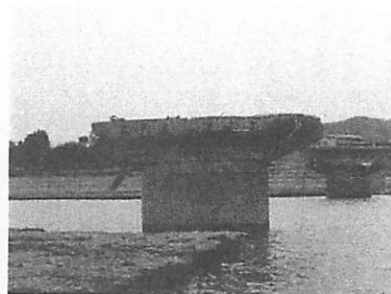
(a) 橋梁全景



(b) 流出した桁



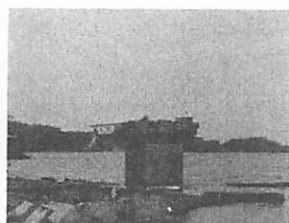
(a) 橋梁全景



(c) 桁が流出した橋脚



(b) 流出した上部構造



(c) 流出部の橋脚

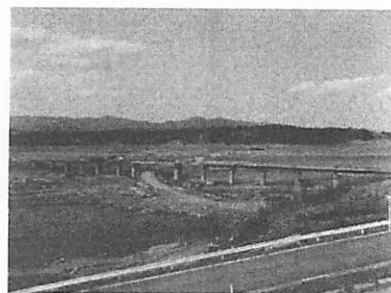
写真-5 歌津大橋



(d) 流出部の橋台

津波に巻き込まれた上部構造が津波流体の中で攪拌される様な状況になり、その結果として、これらが分離に至った被害であると考えられる。

写真-7 はJR気仙沼線の橋梁を、写真-8 は気仙大橋、また写真-9は沼田跨線橋を示す。写真-7に示す鉄道橋はこれ以外にも多数の被害を受けているが、ほぼ同様な被害形式であった。鉄道橋の場合、橋脚の損傷や上部構造の流出、また盛土部の流出が多い。



(e) 小泉大橋とJR高架橋（手前高架）

写真-6 小泉大橋



(a) 橋梁全景

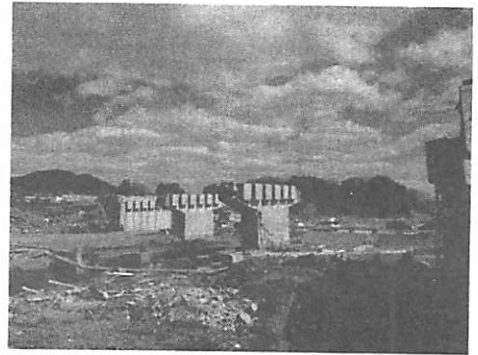


(b) 流出した上部構造



(c) 流出部の橋脚

写真-7 JR気仙沼線の橋梁



(a) 橋梁全景



(b) 流出した上部構造



(c) 流出部の橋脚

写真-9 沼田跨線橋



(a) 橋梁全景



(b) 流出した上部構造



(c) 流出部の橋脚

写真-8 気仙大橋

橋脚の損傷が道路橋に比較し多いことは、現地の損傷から判断する限り建設年度が古いものが多いことが影響していると考えられる。

(3) 橋梁被害の考察

ここでは、東北地方太平洋沖地震で被害を受けた代表的な橋梁9橋を対象に、現地調査をの状況を報告すると共に、限られた条件ではあるが被害の推

定を行った。下記にこれらのまとめを述べる。ただしこの考察は、先にも述べた様に限られた資料と現地調査に基づくものであるため、今後の調査や分析の結果により修正や加筆を行う可能性があることを述べておく。

- (1) 沿岸部に位置する橋梁では、上部構造が流出するなどの被害が多く認められた。
- (2) これらの被害を受けた橋梁は、特定の構造ではなく、PC 橋や鋼製橋、トラス橋、鉄道橋などあらゆる構造で発生している。特に鉄道橋の被害は深刻である。
- (3) 耐震補強が行われた橋梁でも津波により上部構造が流出している。しかしながら下部構造は限定した被害であり多くの橋脚は流出を免れた。また今回対象とした小泉大橋のみ下部構造の橋脚（1脚）が流された。
- (4) 津波高が増大しやすいリアス式海岸だけでなく、宮城県の南部側から福島県の沿岸部である一般的な海岸形状においても、上部構造の流出被害が認められた。

4. 動画による津波流速の簡易分析

(1) 調査概要と簡易分析の手法

本調査ではインターネットで公開されている動画

データを、You Tube¹⁾などの動画サイトで検索した。今回の目的は津波の流速を調査することから、出来る限り多くのサンプルを得るために100件以上のデータを集めた。検索した動画は主に岩手県から茨城県までの地域を対象とした。表-3に動画撮影位置の一覧を示す。この表より、岩手県では33件、宮城県54件、福島県14件、茨城県3件、合計で104件の動画を対象とした。

今回の調査方法は、津波が遡上する振る舞いがあるべく複雑ではない部分に着目し、津波とともに流される漂流物をターゲットとして、ある地点間の移動距離と移動時間により速度を求める方法とした。ここで重要となるのは、移動距離の距離を正確に計ることである。

移動距離については、固定されたもので津波の流速に影響を受けないものを選定し（動画上の建築物の部位や公共施設の形状など）、また電子地図上の計測機能を利用して試算する方法とした。なお、動画の中には津波の振る舞いはよく観察できるものでも、移動距離の特定が難しいものについては、詳細に分析をするデータから除外した。例えば、基準となる物体が流れていない又は電柱などの基準点がないので速さの測りようがないデータ・波が壁などにぶつかる又は複数の波が合流するなどして一時的に流速が変わってしまうデータ・波がカメラに向かってきているデータなどは除外した。

先に述べた104件のデータのうち、概ね流速が試算できる動画数は28件であった。（対象となる動画数は27件であるが、気仙沼市潮見町のデータ(KESE-1)で二つの記録が得たためプラス1件の合計28件）

(2) 動画の分析

流速の測定プロセスを説明する。You Tube¹⁾に代表される動画サイトより、津波が襲来した地域で記録された動画データを検索し、これらから津波の振る舞いが確認できる動画を用いて分析を行う。津波の流速が、津波が遡上してからの地形条件（例えば市街地や河川、農耕地など）により大きく変化するが、本研究ではあくまでもその動画が記録された位置における流速に着目した。流速の測定は、ある2点間（ L ）を定めその点を通過する漂流物などの通過時間（ t ）を計測することで計算を行う方法とし、式（1）により求めた。こまた時間の測定は、ビデオカウンタの計測ではなくストップウォッチを利用した。この速度は、あくまでも着目した位置における流速であり、地形条件によっては撮影地域の津波速度と見なせる場合と見なせない場合がある。

表-3 動画撮影位置の一覧

県名	市郡名	調査動画数	有効動画数	代表となる撮影場所
岩手	久慈	3	2	表町
	宮古	8	1	新川町
	下閉伊	1	0	山田町
	上閉伊	4	1	大槌町
	釜石	9	3	浜町
	大船渡	6	1	大船渡町
	陸前高田	2	1	米崎町
宮城	気仙沼	13	4	南町
	本吉	4	1	南三陸町
	牡鹿郡	3	1	女川町
	石巻	11	4	西浜町
	塩釜	4	1	港町
	多賀城	4	2	町前
	仙台	7	1	宮城野区
	名取	4	2	下増田
	岩沼	2	1	下野郷
	亘理	2	0	山元町
福島	松川浦	2	0	新地町
	相馬	3	0	岩子地区
	南相馬	2	0	原町
	双葉	3	0	大熊町
	いわき	4	1	四倉町
茨城	日立	2	0	宮田川
	東茨城	1	0	大洗町

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{式(1)}$$

ここに

V は波の流速(m/s)

L は2点間の距離

t は2点間の漂流時間を示す。

(3) 代表的な分析例

代表的な分析例（KUZI-1：岩手県久慈市表町）をここに示す。

まず図-3に津波の流速が確認できる地点の静止画を示す。ここに示すA点は漂流物が通過する開始点、またB点は漂流物等が通過する到達点である。また、図上に示す破線丸線は対象となる漂流物である。

図-4はA点とB点の距離を示したものであり、この2点間の距離はGoogle Earth²⁾の距離測定機能などを利用し $L=7.3\text{m}$ と求めた。また動画より、着目する漂流物等がこの2点間距離を通過する時刻を、ストップウォッチを利用して計測し $t=4.80\text{秒}$ と求めた。

以上から、式(1)に基づいて計算した結果、この場所における津波流速を $V=1.5\text{m/s}$ と求めた。

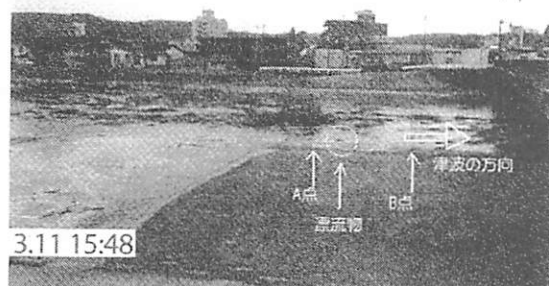


図-3 漂流物が着目地点を通過する際の静止画像

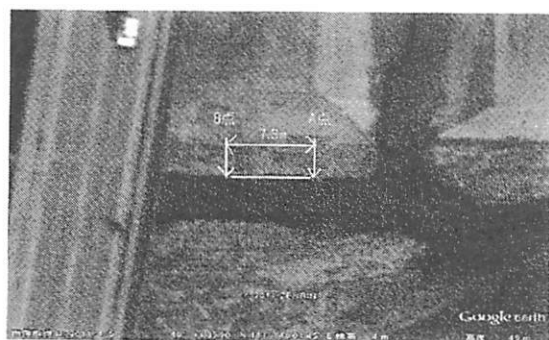


図-4 着目点の距離

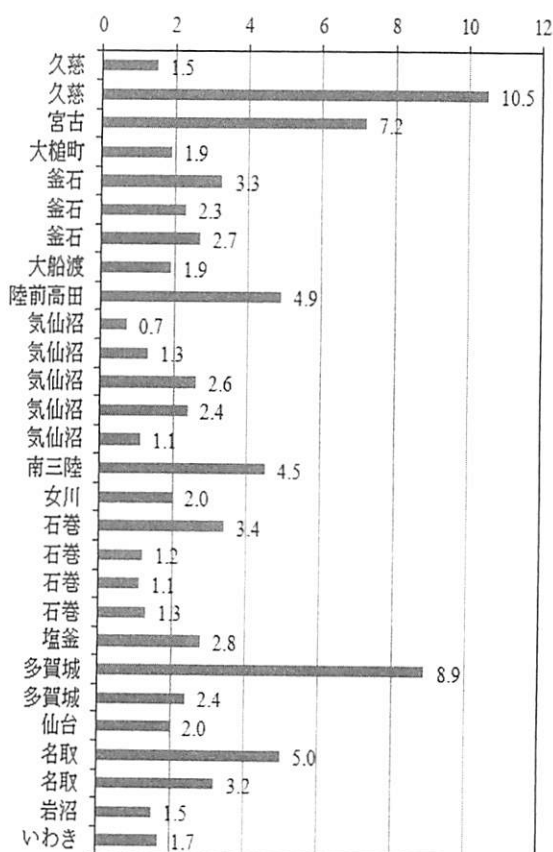
(4) 簡易分析の結果と考察

有効動画から得られた遡上する津波流速の調査結果の一覧を表-4に示す。

ここで得られた流速は、観測された動画において着目する地点（移動距離を明らかにする）と、その地点を通過する漂流物が確認できる時刻における流速であるため、観測地点を代表する様な流速でない点に注意が必要であるが、表-4に示す様に流速が 1m/s 前後から 10m/s 前後と非常に大きな幅が認められる。

また久慈の 10.5m/s は港湾部で観測された津波であり流速が早い、これ以外として多賀城でも 8.9m/s と早い流速が認められた。この地点は都市部であり多くの地域と比較すると粗度係数が小さいこと、また建物に囲まれた道路部の地点で観測されたものであり、局地的に早くなったと推測できる。なおここで得られた流速を、単純に平均すると約 3.0m/s となった。今後は地点ごとの流速の変化などより詳細な津波の振る舞いについて分析を行う必要がある。

表-4 簡易分析結果の一覧（単位：m/s）



5. まとめ

本研究では、地震発生直後から4回現地調査を行ったうち、1回目から3回目までで得られた調査結果を報告すると共に、動画に基づく津波流速の簡易分析を行った結果について整理した。今後はこの結果を条件として与え、橋梁の津波被害の分析を実施する予定である。

最後に、冒頭で述べたように、今回の報告内容は現地調査で得られた情報や現地調査報告などの限定した情報の中で述べたものであり、今後の詳細な分析結果に基づき修正されることを申し添えておく。

謝辞：この研究は、福井工業大学特別研究費であるクラスタC（平成22年度から三年間、研究代表者：砂川武義教授）「原子力安全技術の研究」の助成を受けて実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) YouTube : <http://www.youtube.com/>
- 2) Google Earth : <http://www.google.co.jp/intl/ja/earth/index.html>