

Contents

● 津波の水勢を減衰させるための樹木の最適配置 … 1

● 水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての第12回日台国際ワークショップ報告 … 5

● 外部委員会活動報告 2013年7～8月 … 8



津波の水勢を減衰させるための樹木の最適配置

竿本英貴（地震災害予測研究チーム）

1. はじめに

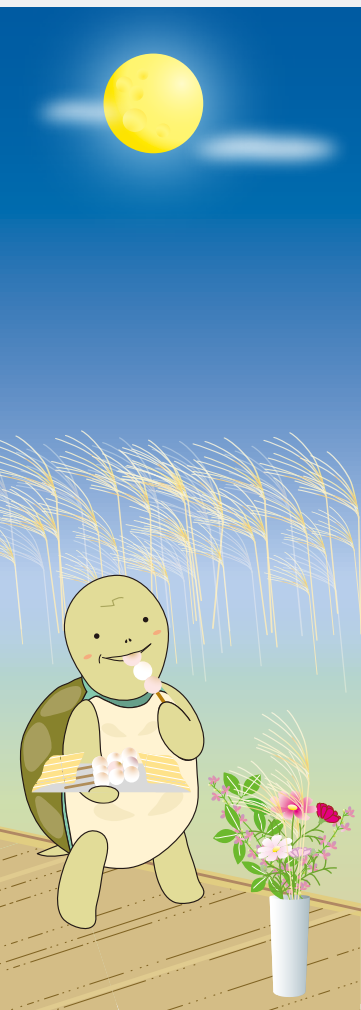
2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震をうけて、津波に対する防潮林の効果に関する知見や研究がますます重要となってきました。津波の遡上にともなう被害を軽減するためには、防波堤の充実や家屋などの高台移転などの対策のほか、陸上における水の流れが持っているエネルギーを防潮林や地形などによって可能な限り小さくすることが有効であると考えられます。

防潮林の津波に対する効果はこれまでに研究されてきており、漂流物を阻止する効果や、流れに対して抵抗となり、浸水位や流速を低減する効果等があるとされています^{[1][2]}。実際、東北地方太平洋沖地震によって発生した津波に対する樹木の効果をもとめた資料^[3]によれば、樹木が押し流されてきた自動車を捕捉した事例や、津浪のエネルギーを減衰させて家屋に生じる被害を低減した事例（石巻市長浜地区）が報告されています。

樹木を配置して津波のエネルギーを小さくすることは、(1) 低コストであること、(2) 維持が容易であること、(3) 景観を損なわないこと、(4) 樹木が生育できる環境であればどこでも設置できること、という面で他の方法よりも優れていると考えられます。以上のように樹木から構成される防潮林は、津波被害の低減という意味で効果的であります。しかし、従来の研究では樹木群を通過する水の流れを定量的に把握した上で、樹木を効果的に配置するという段階には至っていません。ここでは、どのように樹木を配置すればより効果的なのかということを数値シミュレーションを用いて検討した事例について報告します。

2. 問題設定と最適化システム

ここで考える問題は、図1に示した系であり、左側から水が流れてきて樹木群（円で近似）の間を通り抜け、右側に流れ出ていくという問題です。このとき、樹木を領域 Ω_B 内にどのように配置すれば流れのエネルギーを効率的に小さくできるかということを試行錯誤します。



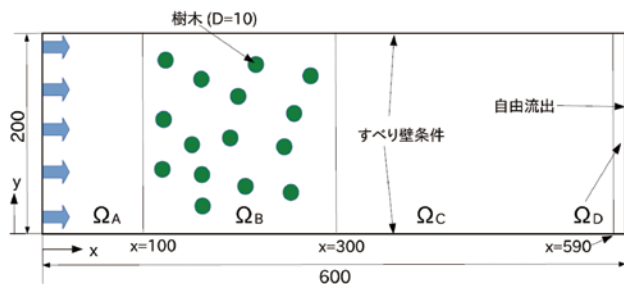


図1 樹木の最適配置のための問題設定.

これまで流れのエネルギーを小さくするという曖昧な言葉で話を進めてきましたが、具体的には何をどうするのかということを述べます。エネルギーを小さくするための方策には任意性があり、(A) 流体の運動エネルギーを最小化する、(B) 領域 Ω_B を通過する際の圧力損失を最大化する、(C) 領域 Ω_B 内での散逸関数（流体に粘性があることによって生じる散逸）の積分値を最大化する、などいくつか考えることができます。これら以外にも方策は考えられると思いますが、どれが優れているというわけではなく、目的に応じて適切であると考えられる方策を選ぶことになります（目的関数の設定）。ここでは、(C)の散逸関数最大化について解析することにしします。加えて、樹木の本数には限りがあることや、配置スペースに制限があることを課します。今回のケースでは、樹木は図1にある領域 Ω_B 内にしか設置できないという制約があるものとしします。制約を課さない場合は、樹木の本数は多ければ多いほどよいことになりますし、配置するスペースも広ければ広いほどよいことになります。制約の与え方についても自由度がありますが、樹木を配置しようとする現場のスペースや用いる樹木の種類等によってある程度決まると考えられます。以上のことを考慮し、次のように最適化問題を定義します。

$$\text{最大化} \quad \int_{\Omega_B} \mu \mathbf{L} : \mathbf{L} d\Omega - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{ij}$$

subject to

$$F(\mathbf{v}, p, \mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t) = 0$$

$$105 \leq x_{ti} \leq 295 \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$5 \leq y_{ti} \leq 195 \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

ここで、 μ は流体の粘度、 $\mathbf{L}$ は速度勾配テンソル、 P_{ij} は樹木同士が近い場所にたまたま配置された際の重なり（めり込み量）の総量であり、樹木同士が重なるような配置は不利になるということを表すペナルティ項です。このペナルティ項を調整することで、樹木間の平均的な間隔をねらいの値にすることができます。また、 $F(\cdot) = 0$ は流体の支配方程式（ナビエ・ストークス方程式）、不等式は、 N 本の樹木（座標 x_{ti}, y_{ti} ）が領域 Ω_B 内に設置されることを表しています。

上述の最適化問題の近似解を求めるために、遺伝的アルゴリズム^{[4][5][6]}とグラフィックボード上で高速に動作する格子ボルツマン法^{[7][8]}に基づく流体解析プログラム^{[9][10]}を組み合わせた最適化システム（図2）を新たに構築しました。

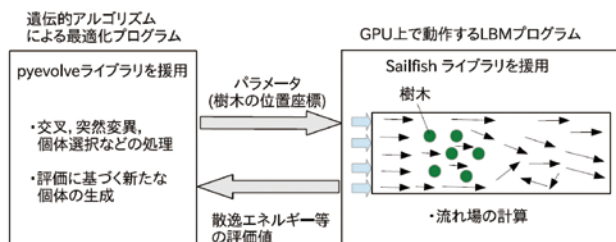


図2 遺伝的アルゴリズムと流体解析プログラムを組み合わせた最適化システム.

遺伝的アルゴリズムの部分には、Pyevolve^[6]というライブラリを、流体解析の部分には Sailfish^[9]というライブラリをそれぞれ用いています。

最適化システムでは、異なる 30 パターンの樹木配置を作成し（図中左の最適化プログラムの機能）、各パターンについて流れ場を計算し（図中右の流体解析プログラムの機能）、領域 Ω_B 内での散逸関数の積分値を評価します。評価が高いパターンの特徴を考慮し、遺伝的アルゴリズムを通じて次の世代の 30 パターンを作成します。その後、新たに生成した各パターンに対する評価を行い、評価が高いパターンの特徴を考慮して次の世代を作成する、という繰り返し操作を 400 世代にわたって繰り返し、樹木の配置パターンを進化させていきます。ここで、30 パターンや 400 世代は遺伝的アルゴリズムのパラメータであり、数多くのパターンを何世代も計算するというのが理想です。このように遺伝的アルゴ

リズムを用いる場合、目的関数の評価（今回の場合では流体解析）回数が著しく多くなりがちであり、なるべく短期間のうちに流れ場を求める必要があります。今回は流れ場計算の箇所をグラフィックボードによる計算によって加速し、評価1回あたりの計算時間を短縮した（約7秒）ことが今回の取り組みの特長の一つとなっています。簡単に言えば、最適化システムは何回もコンピュータの中で仮想実験を繰り返し、評価が高くなる樹木配置を探していることになります。

3. 数値解析結果

領域 Ω_B 内に設置する樹木の本数を10から40本まで変化させ、各ケースにおいてランダムに樹木を配置するパターンと最適化システムを通じて得られた最適配置との性能比較結果を示したものが図3です。ここで、モデルの左端から流入させる際の速度は、樹木の寸法に対してレイノルズ数が2500となるように調整しています。図3の縦軸は最大化すべき目的関数（評価関数）であり、値が大きければ大きいほど性能が高いこと（エネルギー散逸が大きい）を示しています。横軸は樹木の本数です。この図から、本数が多くなるにつれてどちらの場合も評価値が大きくなっていくことがわかります。これは本数が増えることで流れにとっての障害が多くなるため、領域 Ω_B 内でのエネルギー散逸が増大していることに相当します。本数が10本の場合は、ランダムに配置した場合と最適解との差は小さく出

ています。例えば、本数が1本の場合は、どのように配置してもランダム配置と最適配置の差は出ません。したがって、本数が少ない場合は最適解の性能はランダムに配置する場合とあまり変わらないということがわかります。ランダム配置に対する評価値の比に着目すると、樹木が30本の場合が最も大きくなっています。数値でいえば、約1.9倍になっています。40本の場合はこれよりも少し小さくなっています。樹木の本数が50, 60と増えていくとどうなるのでしょうか。残念ながら計算はしていませんが、おそらくランダム配置と最適配置の差は小さくなっていくと考えています。最適化する際の変数の数（樹木の位置座標）が多くなり、有効なパターンを探索するのが困難になると予想されるためです。最適化が威力を発揮するという意味においては、樹木の本数が少なすぎず多すぎずという条件が必要だと考えられます。

図4は、樹木本数が30本のケースにおける最良配置の評価値を示しており、世代が進むにつれて評価が上がっていくことがわかります。遺伝的アルゴリズムを用いた場合の最適化では、評価値が階段状にいきなり変化するというのが特徴です。階段の前後の配置パターンの違いを詳しく解析することで、どのようにして評価値を上げたのかを知ることができます。しかし、問題が複雑になればなるほど、なぜ評価が向上するのかがわかりにくくなります。計算機が「その手があったか。」と思う答えを見つけてくれても、なぜそうなるのかという知見も併せ

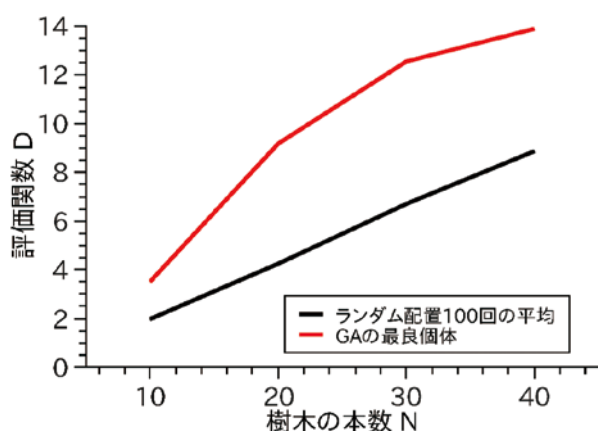


図3 ランダムに樹木を設置した場合の平均値と最適配置した場合の性能比較。

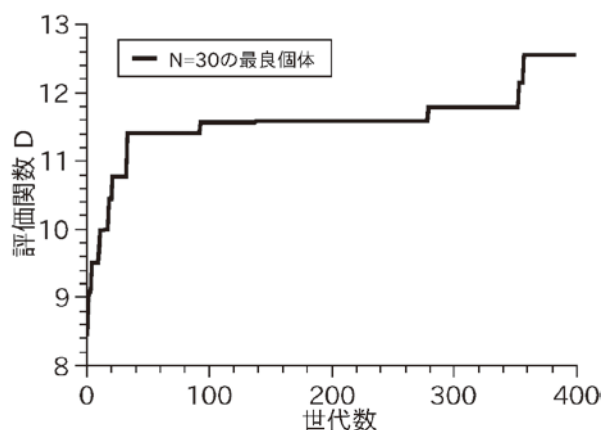
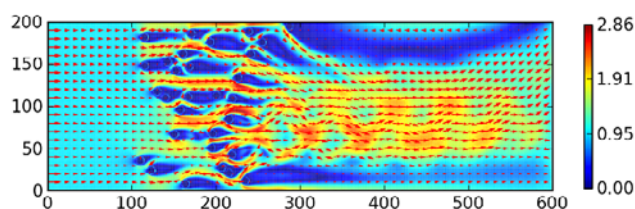
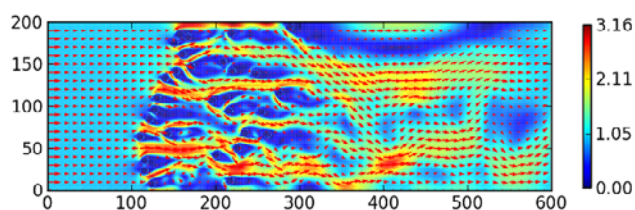


図4 最良個体の進化状況 (N=30)。

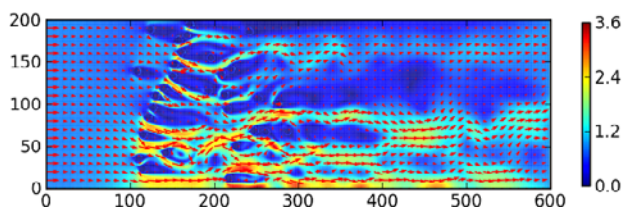
て得ることができなければ、最適化解析から得る情報は半減するのように思います。このようなことがないよう、ユーザーの方も持てる経験と知識を全て使って結果を解釈できたほうが良いでしょう。なお、今回の事例では、私の経験では十分な解釈にいたることはできていません。図5に第10, 200, 400世代における最良配置の流れ場を示します。各ケースにおいて、色は流速の大きさを示しており、左端にて入力する流速を1として正規化しています。せん断するような流れ場をいかに作るかというのがポイントのような気がしました。何か解釈可能な事柄があれば、是非ご教授ください。



(a) 第10世代における最良配置 (N=30, D=9.31).



(a) 第200世代における最良配置 (N=30, D=11.59).



(b) 第400世代における最良配置 (N=30, D=12.55).

図5 配置状態の進化と対応する流れ場。

4. まとめ

遺伝的アルゴリズムとグラフィックボード上で高速に動作する格子ボルツマン法に基づく流体解析プログラムを連結することによって最適化システムを構築し、津波のエネルギーを効率的に奪うための樹木配置を探索しました。数値解析の条件にもよりますが、ランダムに配置する場合よりも1.9倍程度の性能を達成しました。求められた最適解の解釈や入力条件を変えた際のロバスト性、目的関数を変更した場合など、調べるべきことはまだまだありますので、引き続き研究を続けていきます。また、実験を通じて最適配置の有効性を確認したいと思います。最適化システムの課題としては、流体解析プログラムの乱流への対応と遺伝的アルゴリズム以外の有効な発見的手法の実装が挙げられます。

参考文献

- [1] 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界，海岸工学論文集，pp.465-469，1985.
- [2] 原田賢治，今村文彦：防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性，海岸工学論文集，No.50，pp.341-345，2003.
- [3] 国土交通省都市局公園緑地・景観課：津波災害に強いまちづくりにおける公園緑地の整備に関する技術資料，<http://www.mlit.go.jp/common/000992746.pdf>（2013年8月20日閲覧）
- [4] Holland J.H.：Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan Press, 1975.
- [5] 相吉英太郎，安田恵一郎：メタヒューリスティクスと応用，電気学会，2007.
- [6] Perone C. S.：Pyevoevolve documentation 0.6r1, 2010.
- [7] Benzi, R., Succi, S., Vergassola, M.：The lattice Boltzmann equation:theory and applications, Physics Reports, 222, No. 3, pp.145-197, 1992.
- [8] 薦原道久，高田尚樹，片岡 武：格子気体法・格子ボルツマン法—新しい数値流体力学の手法，コロナ社，1999.
- [9] Januszewski, M.：Sailfish reference manual, <http://sailfish.us.edu.pl/>（2013年8月21日閲覧）
- [10] 竿本英貴，松島亘志，山田恭央，豊田 衛：不規則形状粒子からなる多孔質体内の間隙流体の流動様式—可視化実験結果と格子ボルツマンシミュレーション結果の比較—，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.68, No.2, pp.433-442，2012.



水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての第12回日台国際ワークショップ報告

小泉尚嗣（総括研究主幹）

1. はじめに

2013年8月13～15日に標記ワークショップが、産業技術総合研究所（産総研）活断層・地震研究センター（AFERC）と台湾の国立成功大学防災研究センター（DPRC）との共同研究である「台湾における水文学的・地球化学的手法による地震予知研究」の一環として、台湾の台南市にある国立成功大学の国際会議場・他にて開催された（写真1）。このワークショップは、産総研と成功大学とで毎年交互に開催している（北川・小泉，2012；小泉・他，2011）。8月13日にワークショップ，8月14～15日には台中～台北付近の野外巡検，8月15日には台湾中央気象局（CWB）で研究打合せが行なわれた。



写真1 成功大学国際会議場での集合写真（村瀬氏提供写真）。

2. ワークショップ

ワークショップの冒頭で、本共同研究のDPRC側の窓口であるWen-Chi Lai博士によって、過去11回のワークショップや巡検の様子がスライドで紹介された。私は過去12年間に2度のアキレス腱断裂を経験しており、それがいずれもワークショップ直前だったのでやむを得ず車椅子姿で参加している。その様子もスライドで紹介されて会場は笑いに包まれた（写真2）。その後、DPRCの代表者および私の簡単な挨拶の後、下記に示す内容で発表と質疑応答が行なわれた。



写真2 Lai博士による過去のワークショップ・巡検の紹介。見辛いがスライドの中央付近で車いすに乗っているのが小泉（Lai氏提供写真）。

中村 衛（琉球大）Fault models of historical tsunamis between the Ryukyu Trench region and east Taiwan

Jiun-Yee Yen（台湾東華大）Introduction to E-TEC-Combination (Cocktail) therapy for earthquake precursor research in Taiwan

安藤雅孝（台湾中央研究院）A possible tsunami source based on tsunami folklore and interview with local residents on the eastern coast of Taiwan

Chin-Yen Chen（台湾中央地質調査所）Rainfall and groundwater effects on borehole strain

村瀬雅之（日本大）An episodic creep slip event detected by precise leveling surveys at the central part of the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, in 2011-2012

Kate Huihsuan Chen（台湾師範大）How quickly does the subsurface damage heal after the 1999 M7.6 Chi-Chi earthquake?

小泉尚嗣（産総研）Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough by groundwater observation

Chiang-Hung Chen（台湾中正大）Possible relationships between Seismo-EM and crustal anomalies

M. C. Tom Kuo（台湾成功大）Earthquake precursors observed from long-term radon measurements in eastern Taiwan

Wen-Chi Lai(台湾成功大)The mechanism of the pre-seismic changes of the tidal deviation of groundwater level in Hualien city, Taiwan

Kuo-Chon Hsu(台湾成功大)The directional sensitivity of groundwater level variation to earthquake

比嘉万友美(琉球大)Groundwater level changes by seismic ground motion of the 1999 Chi-Chi earthquake

Pei-Ling Wang(台湾大)Studies on mechanisms of coseismic sustained groundwater-level changes

私の発表は、地下水観測による短期的スロースリップイベント (S-SSE) の日本における検出例と、検出するための観測条件について述べたものである。プレートの衝突帯である台湾では、中部で遠地震に誘発された深部低周波微動は観測されているが、それに対応するような S-SSE は検出されていない。後述するように、台湾で設置されているボアホール歪計のノイズレベルは一般に高く、現状では S-SSE を検出するのは困難なので、S-SSE がないのか、それとも存在しているのに検出できないのかは不明である。台湾での地下水観測によって、S-SSE の検出を試みることを将来的には考えている。

その他、私が聞いていて興味深く感じた発表をいくつか紹介する。

安藤さんの話は、台湾東部にのこる津波に関する民話を手がかりに、現地聞き取り調査及び津波石や津波堆積物の調査と津波シミュレーションを組み合わせて、19 世紀半ばに起こったと考えられる津波を伴う地震の断層モデルを求めるというユニークなものである。台湾東部の津波被害が非常に局所的であったということに加え、石垣島や宮古島には大きな津波は来ていないということも境界条件となる。その結果、琉球海溝付近の地震は否定され、地震規模は M7.5 未満だが、海底地滑り等を伴う台湾東南部海岸付近の地震が適当ということになった。結果の一部は、Ando et al.(2013)で紹介されている。

Chin-Yen Chen さんの話は、台湾のボアホール型歪計データの雨量補正の話である。台湾のボアホール型歪計は体積歪計も含めて 25 カ所あるが、雨量補正に非常に苦労している印象を受けた。200 m 程度までの比較的浅い堆積層に設置されているケースが多いことや、台湾では日本以上に雨量が多いことが大きな理由だろうが、設置されている歪計その

ものにも問題があるように思えた。本来線形で（容易に除去出来るはずの）潮汐や気圧変化に対するレスポンスが非線形であるような歪データは省いて、雨量補正を試みてはどうかと助言した。

村瀬さんの話は、台湾の東部の Longitudinal Valley Fault（縦谷断層）中部で、2010～2012 年に毎年水準測量をした結果の報告である。年間 30mm (!) の継続的な隆起が観測されているところと、2010～2011 年は 8mm/year だが 2011～2012 年は 40mm/year の所があり、場所によってエピソードに隆起する部分がある事を示唆した (Murase et al., 2013)。引続き測量は続けられるということなので、今後の結果が楽しみである。

Kuo さんの話は、台湾東部での温泉水中のラドン濃度の長期的な変化と地震との対応との話である。同様なパターンの地震前のラドン濃度低下が、2003 年～2011 年の M5.0 から M6.8 の観測点周辺の地震で 4 例発見されている。地質構造との関係やラドン濃度低下のメカニズムを考える実験結果も示されていて興味深かった (Kuo, 2013)。

3. 巡検

8 月 14 日～15 日にかけて、バスで台南から台北に向けて北上しつつ巡検を行なった。特に興味深かったのは、2013 年にオープンしたばかりの 1999 年集集地震の車籠埔断層保存公園 (<http://cfpp.nmns.edu.tw/>) である。車籠埔断層 (Chelungpu Fault) は、1999 年集集地震 (Mw7.6, 死者 2400 名) の地表地震断層である。すでに本ニュースでも紹介されているが (宍倉, 2013)、同保存公園では、断層トレンチ壁面の巨大なはぎ取り標本 (写真 3) やトレンチ



写真 3 断層トレンチ壁面のはぎ取り標本 (村瀬氏提供写真)。

現場を見学できる他、地層の変形や断層ができる仕組み等を示す模型（写真4、5）や台湾の地形の特徴がわかる動画があり大変面白かった。



写真4 圧縮力が加わると断層が褶曲することを示す模型（村瀬氏提供写真）。



写真5 逆断層の模型（村瀬氏提供写真）

4. 台湾中央気象局地震センターとの研究打合せ

過去の本ワークショップで来日・発表したこともある Chun-Hsiung Tsai 氏（副センター長）らによって、CWB の地震観測の歴史や現状のシステム、2011 年 11 月の海域観測の開始等が、スライドや動画を使って非常にわかりやすく説明された。最近、台湾中央気象局が広報活動に力を入れているということがよくわかった。地震センターの人員は 50 名程度とのことで約 850 名の台湾中央気象局の人員の 1/10 以下である。主な業務は、地震情報の発信・緊急地震速報・地震予知研究の 3 つとのこと。地震予知研究の対象には、GPS・GPS-TEC・地下水

も含まれており、日本の気象庁と異なって業務と研究の区別が曖昧という印象を受ける。地震予知研究担当者が「It is like a gamble.」と漏らしたのが印象的だった。台湾での活発な地震活動を考慮すると、50 名の人員でこれだけの業務をこなすのは困難ではないかと思われた。

台湾では東部～東部海域の地震活動が活発である一方、人口が多いのは西部である。それゆえ、緊急地震速報の時間をかせぐために 2011 年に台湾東部海域に地震観測網が設置されたわけだが、現時点で、一般向きの緊急地震速報はまだ行なわれていないとのことである。政治的な理由で日本の気象庁との連携が簡単ではないのが残念である。

5. 感想

台湾の成功大学との共同研究を開始して 12 年になる。ほぼ毎年のように台湾を訪れているが、台湾の人の日本への関心の深さをいつも感じる。たとえば、上述のように 2011 年 11 月に海域の観測が台湾で強化されたが、それと 2011 年東北地方太平洋沖地震（3.11 地震）とは無縁ではないだろう。台湾では古津波研究への関心も高まっていて（宍倉，2013）、安藤さんの上記の研究はその道標の 1 つとなろう。本共同研究の背景には、台湾側の 1999 年集集地震と 1995 年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）があったが、それに 3.11 地震が加わったことになる。同じ地震リスクを抱える国の研究者として引き続き連携を深めつつ、震災軽減のためにどのように貢献するのかということへの答えを見いだして行かなければならないと思った。

参考文献

- Ando, M., M. Nakamura and C.-H. Lin, 2013, Terr. Atom. Ocean (in press).
北川有一・小泉尚嗣 (2012), 地震学会ニュースレター, 24, 4, 12-14.
小泉尚嗣・松本則夫・頼 文基 (2011), 地質調査研究報告, 62, 185-190.
Kuo, T. (2013), Groundwater, DOI: 10.1111/gwat.12049.
Murase, M., N. Matsuta, C.-H. Lin, W.-S. Chen and N. Koizumi (2013), Tectonophysics (in press).
宍倉正展 (2013), 活断層・地震研究センターニュース, 45, 2-4.

外部委員会等 活動報告 (2013 年 7～8 月)

2013 年 7 月 8 日

大飯発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会
合第 4 回評価会合 (重松出席 / 東京)
原子力規制庁 関西電力大飯原子力発電所敷地内
破砕帯の調査に関する有識者会合 第 4 回評価会
合に出席.

2013 年 7 月 9 日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文科省)
6 月の地震活動の評価

2013 年 7 月 16 日

南海トラフ巨大地震・首都直下地震モデル検討会
(岡村出席 / 内閣府)
南海トラフ及び首都直下の過去の地震再現と地震
動予測について

2013 年 7 月 29 日

地震調査委員会第 3 回津波評価部会 (行谷出席 /
文部科学省)

2013 年 7 月 29 日

地震防災対策強化地域判定会 (小泉出席 / 気象庁)
東海地方周辺の最近の 1 ヶ月のデータを持ち寄っ
て検討し、東海地震発生可能性について協議した.

2013 年 8 月 2 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第 193 回長
期評価部会・第 27 回海溝型分科会合同会 (吉岡・
穴倉出席 / 東京)

2013 年 8 月 9 日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文科省)
7 月の地震活動の評価

2013 年 8 月 10 日 -11 日

原子力規制委員会 関西電力大飯原子力発電所敷
地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (重松出席 /
原子力規制庁) 現地調査

2013 年 8 月 19 日

南海トラフ巨大地震・首都直下地震モデル検討会
(岡村出席 / 内閣府)
南海トラフ及び関東地方の過去の地震の再現と長
周期地震動について

2013 年 8 月 19 日

原子力規制委員会 関西電力大飯原子力発電所敷
地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (重松出席 /
東京)
第 5 回評価会合

2013 年 8 月 26 日

日本海における大規模地震に関する調査検討会 (岡
村出席 / 国交省)
日本海における大規模地震の想定について

2013 年 8 月 29 日

地震防災対策強化地域判定会 (小泉出席 / 気象庁)
東海地方周辺の最近の 1 ヶ月のデータを持ち寄っ
て検討し、東海地震発生可能性について協議した.

2013 年 8 月 29 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第 48 回地震
動予測地図高度化ワーキンググループ (吉岡出席 /
東京)

2013 年 8 月 30 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第 194 回長
期評価部会 (吉岡出席 / 東京)