

# 海洋レーダを利用したインバージョンに対するレーダ観測時間の影響

## Influences of Time Integration on the Accuracy of Inversion based on Ocean Radar

藤 良太郎<sup>1</sup>・日向博文<sup>2</sup>・藤井智史<sup>3</sup>・高橋智幸<sup>4</sup>

Ryotaro FUJI, Hirofumi HINATA, Satoshi FUJII and Tomoyuki TAKAHASHI

The radial velocity of ocean radar is analyzed by integrating backscattered spectra by ocean surface waves in a certain period of time. This study examined the influence of the integration time on the accuracy of the estimation of tsunami inversion for various predominant periods of incoming tsunami waves based on numerical experiments performed with a simple bathymetry. It found that the accuracy depends significantly on the relation between the predominant period and the integration time. The results of numerical experiments concerning the 2011 Japan tsunami indicate that a longer integration time, which corresponds to higher velocity resolution, is permitted as long as the influence is small.

### 1. はじめに

行政機関が壊滅的な被害を受けた東日本大震災では激甚被災地を迅速に把握できなかったために人的被害が拡大した。東海・東南海・南海地震が連動する南海トラフの巨大地震でも同様の問題が危惧されている。一方で、精度の良い津波初期水位が与えられれば、現在の津波数値計算技術で激甚被災地を数時間以内に推定することは十分に可能である（例えば、越村ら、2010）。津波数値計算による激甚被災地の推定精度は津波初期水位の推定精度に大きく依存する。

海洋レーダは面的に密な流速を観測しGPS波浪計等の水位観測に比べてデータ量の面で優位性がある。また、例えば海洋レーダの特徴である面的な流速場から波峰を抽出しこれを基に波源の広がりやを推定できれば、推定精度の大幅な向上が期待できる。海洋レーダは海面に向かって連続的に電波を照射し、海面での散乱波を受信する。ある一定時間毎（以下、観測時間）の受信波をFFT解析することにより時間平均された海面流速を計算する。

観測精度と観測時間にはトレードオフの関係がある。観測時間を長くすれば流速分解能（表-1）と受信波のSN比は向上する。一方で、津波により駆動される流速は数分で大きく変化する可能性があるため、観測時間を長くすれば短時間の流速変動は計算できない。よって、海洋レーダを用いたインバージョン解析による津波初期水位の推定には適切な観測時間の決定が重要になる。本研究

では海洋レーダが観測する流速場を利用して高精度に津波初期水位を推定するための第一歩として海洋レーダの観測時間がインバージョンの推定精度へ与える影響について基礎的な検討を行った。

### 2. 海洋レーダを用いた波源の逆推定手法

インバージョン手法に基づく津波初期水位の推定については、これまで主にGPS波浪計や海底設置式波浪計による観測水位を応答関数に用いた研究が多くなされてきた（例えば、辰巳・富田、2008；高川・富田、2012）。辰巳・富田（2008）は津波波源が震央の周囲に分布するという先験情報を利用することで予測精度を向上させた。また、高川・富田（2012）は波源の広がり、破壊伝播速度、時空間平滑化係数など波源モデルを規定するハイパーパラメーターの検討を行い波源の推定精度と津波波形の予測精度を向上させた。

これらのインバージョン手法は津波の線形性を仮定している。線形長波理論では水位と流速の間に線形の関係が成り立っているため、インバージョンの応答関数として流速を使うことができる。

本研究のインバージョン解析は辰巳・富田（2008）をはじめとした研究で利用されている手法と同様の原理に基づくものである。ただしここでは応答関数として海洋

表-1 観測時間と流速分解能（ $f=24.515\text{MHz}$ , 1掃引0.5s）

観測時間(min)	掃引回数	流速分解能(cm/s)
1	128	9.56
2	256	4.78
4	512	2.39
8	1024	1.20
17	2048	0.60
34	4096	0.30

1	正会員	修(工)	国土技術政策総合研究所 沿岸域システム研究室 交流研究員
2	正会員	博(工)	国土技術政策総合研究所 沿岸域システム研究室室長
3		博(工)	琉球大学教授 工学部 電気電子工学科
4	正会員	博(工)	関西大学教授 社会安全学部 安全マネジメント学科

レーダで観測される視線方向流速を用いている。ここで用いる海洋レーダの観測諸元は、視線方向観測範囲50km、距離分解能1.5km、方位方向ビーム本数11本、方位分解能7.5度とした。

まず、津波初期水位を推定する波源域を複数の小領域に分割し単位波源とする。次に各単位波源が単位上昇(1m)したときの津波伝播を計算しレーダ観測点での流速の時系列(グリーン関数)をデータとして保存しておく。次にレーダ観測点で得られた観測流速をあらかじめ計算しておいたグリーン関数の線形和で表し、残差の二乗和が最小となるように単位津波の回帰係数を求める。

$$E = \|v - Va\|^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\partial E / \partial a = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_T \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{1,1} & \cdots & \tilde{v}_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{v}_{T,1} & \cdots & \tilde{v}_{T,N} \end{pmatrix}$$

ここで、 $v$ は観測流速、 $a$ は津波初期水位、 $V$ は単位波源が発生させる単位津波流速を表し、添え字は、 $T$ が観測時間長、 $N$ が単位波源数を表す。

### 3. 観測時間の影響検討

単純化したモデル地形と波源を用いて数値計算(空間格子サイズ1km×1km、時間間隔2秒)を行い、観測時間が初期水位分布および時間波形の推定精度に与える影響を調べた。

#### (1) 線形性の成立条件

インバージョンは線形重ね合わせの原理に基づくため、非線形性が影響しない実験条件の設定が必要となる。そこで、まずは線形重ね合わせが成立する条件を確認した。

レーダ観測範囲の水深を一定とし、100mから500mの範囲で変化させた単純地形モデルを考え階段状の初期水位分布(1要素の大きさ10km×10km)を与えた(図-1(a),(b))。計算開始から80分間の視線方向流速をサンプリングしインバージョン解析に用いた。津波初期水位

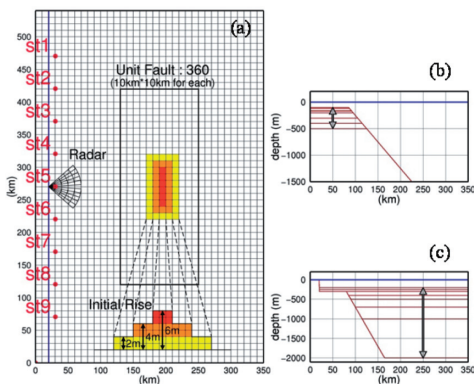


図-1 検討モデルの設定。(a)単純地形モデル平面。(b)断面(線形性の検討)。(c)断面(観測時間の影響検討)。

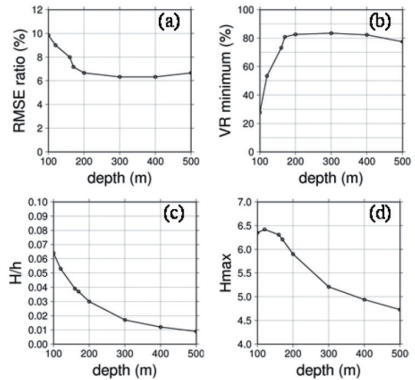


図-2 波源水深を変化させた数値実験による推定結果。(a) RMSE比率。(b) VR。(c) 波高水深比。(d) 最大波高。

の空間分布に関する予測精度を表す指標として二乗平均誤差を真値の最大値で除した二乗平均誤差比率(以下、RMSE比率)を、観測地点における水位時系列の再現性の指標としてVariance Reduction(以下、VR)を用いて、インバージョンによる波源の推定精度を評価した。VR(%)は次式で表される。

$$VR = \left\{ 1 - \left( \sum_{j=1}^T (\eta_j - \tilde{\eta}_j)^2 \right) / \sum_{j=1}^T \eta_j^2 \right\} \times 100 \quad \dots (3)$$

ここで、 $\eta_j$ は時刻 $j$ の観測水位を、 $\tilde{\eta}_j$ は時刻 $j$ の予測水位を表す。

検証地点(st1～st9;図-1(a)参照)で得られた時間波形(2時間)から計算したVRの最低値を図-2に示す。水深が200mより浅くなるとRMSE比率とともにVRは急激に悪化する。水深が小さい場合、浅水変形により波高が増大し非線形性の影響が表れたためと考えられる。ここでは示さないが、水深200m以下でのRMSE比率、VRの悪化が非線形性の影響によるものかを確認するため、津波波源域での流速を2倍、3倍としたときの観測点での流速の応答を調べたところ、水深が200mより小さくなると応答が非線形になっていることを確認している。津波の非線形性の程度を表す指標である波高水深比は水深200mで0.030である。そこで、ここではインバージョンによる波源推定のための線形性の成立条件の目安として、波高水深比を0.030程度とした。

#### (2) 数値計算の実験条件

津波の周期に対して観測時間が十分に短ければ観測時間の影響は相対的に小さく考えられる。一方で、観測時間は流速分解能とトレードオフの関係にあり観測時間を短くすると流速分解能は低下する(表-1)。また、観測時間が短いとSN比が低下することで、観測精度が悪くなると推定される。

そこで、ここでは津波の卓越周期と観測時間を変えてインバージョン解析を行い推定精度の変化を調べた。津

表-2 検討条件および視線方向最大流速

波源水深 (m)	最大波高 (m)	波高 水深比	卓越周期 (min)	視線方向最大 流速(m/s)
200	4.12	0.021	37.6	0.65
250	4.14	0.021	33.7	0.58
300	4.12	0.014	30.7	0.53
400	3.96	0.013	26.6	0.58
500	4.22	0.014	23.8	0.63
700	4.38	0.015	20.1	0.63
1000	5.02	0.017	16.8	0.59
2000	5.54	0.018	11.9	0.68

波の卓越周期は波源の水平スケールと水深から以下の様に決まる (例えば, Rabinovich, 1997)。

$$T_n = 2L / (n\sqrt{gh}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで,  $L$ : 水平スケール,  $h$ : 水深,  $n$ : 振動モードである。本研究では波源の水平スケール (50km × 100km) を固定し水深を変化させることで津波の卓越周期を変化させた (図-1 (a), (c))。波源短軸方向 (50km) に対する第1モードの周期を表-2に示す。レーダの観測時間は1分から30分まで1分間隔で設定した。視線方向流速の計算結果をある時間で移動平均した後に1分間隔で保存することで実際のレーダの観測時間と時間分解能を模擬した。設定したいずれの水深についても, 波高水深比は0.030以下を満たしている (表-2)。計算開始から80分間もしくは120分間の視線方向流速をサンプリングレインバージョン解析に用いた。

### (3) 結果と考察

インバージョン解析によって計算されたRMSE比率およびVRの評価結果を図-3に示す。コンターはRMSE比率 (コンター間隔: 0.5%) を表し, 検証地点 (st1～st9) で得られた時間波形 (2時間) のVRの最低値が70%以上の場合を○で, 70%未満の場合を×で表している。また, 津波の卓越周期に対して同じ時間長の観測時間 (流速移動平均時間) を破線で示した。

#### a) 流速分解能を考慮しない場合

基本的には津波の卓越周期によらず観測時間が短いほどRMSE比率は小さい (図-3 (a))。本研究ではレーダ観測時間について流速データを時間方向に移動平均することで考慮している。移動平均を行うともとの波形は平滑化されるためインバージョンによる推定誤差が大きくなる。そのため卓越周期に対して観測時間が長くなるほど推定精度は低下すると考えられる。津波の卓越周期が短い (10～20分) と観測時間の増加にともない急激にRMSE比率が上昇するが, ある程度 (25～30分) 以上の卓越周期では観測時間の影響は小さくなる。

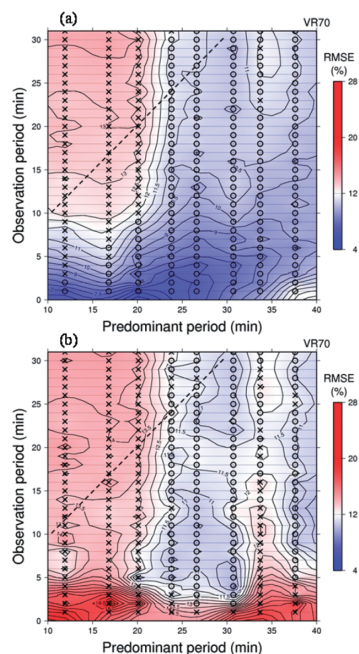


図-3 推定精度の評価. (a) 流速分解能非考慮. (b) 流速分解能考慮.

#### b) 流速分解能を考慮した場合

レーダ観測時間が長い場合, 津波の卓越周期が長いほどRMSE比率が低くVRが良い傾向は変わらない (図-3 (b))。しかしながら, レーダ観測時間が5分より短くなると全ての卓越周期に対してRMSE比率が急激に上昇している。本実験でのレーダ観測範囲内の最大流速は50cm/s～70cm/s程度 (表-2) であるのに対し, 観測時間2分の場合は流速分解能が約5cm/s, 1分では約10cm/sとなる (表-1)。観測時間の短縮によるRMSE比率の急激な上昇は, 最大流速に対して流速分解能が相対的に大きくなったためと考えられる。

流速分解能の影響は最大流速との相対関係により決定されると考えられる。今後は, 検討条件を変えて最大流速の違いによる流速分解能の影響を整理する必要がある。

## 4. 東北地方太平洋沖地震での検証

東北地方太平洋沖地震をモデルに海洋レーダの視線方向流速を応答関数に用いたインバージョン解析を行い, 推定精度の検証を, 特に津波卓越周期に対する観測時間の相対的な関係, および観測時間とトレードオフの関係にある流速分解能の影響に着目して検討した。

### (1) 数値計算の条件

岩手県沖から茨城県沖を含む範囲 (300km × 600km) を推定波源域とし, 760個の単位波源に分割した。単位波源の大きさは15km × 15kmとした。Fujiiら (2011) に



表-3 観測時間 ( $f=24.515\text{MHz}$ , 1掃引|0.5s)

応答関数	観測時間	サンプリング 時間間隔	掃引回数
GPS 水位	-	10 sec	-
レーダ 視線方向 流速	1 min	1 min	128
	2 min	1 min	256
	4 min	1 min	512
	8 min	1 min	1024
	17 min	1 min	2048
	34 min	1 min	4096

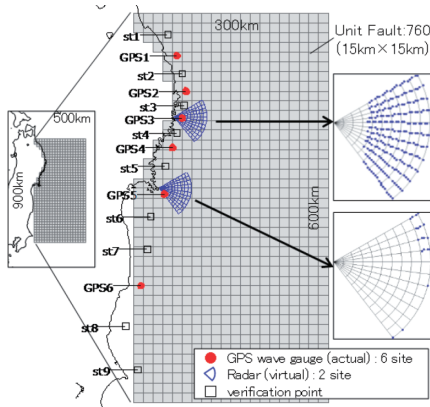


図-4 計算範囲およびレーダ観測点

よる断層モデル（藤井・佐竹 Ver. 4.2）から Okada (1992) の手法を用いて津波初期水位を計算し、数値実験に用いる観測津波とした。なお、ここで使用した藤井・佐竹 Ver. 4.2 モデルは、すべての小断層の同時破壊を仮定しており、破壊伝播速度は考慮していない。波源の水平スケールを  $500\text{km} \times 200\text{km}$ 、平均水深を  $4000\text{m}$  と仮定すると短軸方向（ $200\text{km}$ ）から決まる第1モードの津波の周期は約34分である（日向ら, 2012）。津波の伝播計算は、空間格子サイズ  $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、時間間隔2秒、計算時間6時間とした。インバージョン解析に用いる津波観測点は海洋レーダ2局（岩手県沖、宮城県沖に仮想的に配置）および実際にGPS波浪計が設置されている6地点（GPS1～GPS6）とした。観測時間は実際のレーダ流速の解析手法（FFTによるスペクトル解析）を考慮して設定した（表-3）。インバージョンに用いる視線方向流速のサンプリング時間は2時間とした。

まず、津波の伝播計算を行い、2局のレーダ観測範囲で線形性が成立する観測点を確認したところ、波高水深比0.030を満たす観測点は272点であり、（図-4）。レーダ観測範囲での最大流速は  $5.85\text{m/s}$  であった。

## (2) 結果と考察

観測津波の初期水位分布の最大値  $13.7\text{m}$  に対して推定された津波初期水位分布のRMSE比率は、観測時間2分

（流速分解能  $4.78\text{cm/s}$ ）で7.8%，観測時間34分（流速分解能  $0.30\text{cm/s}$ ）で7.2%となり、GPS1～6の水位で推定した場合と同程度であった。この様にRMSE比率からは有意な差は認められない（図-5）。

一方、推定された初期水位をもとに計算した時間波形（6時間）のVRは観測時間が短いほど良い（図-7）。st1～GPS5では特に良い値を示している。st6～st9では観測波形に比べ再現波形では短周期成分が発生したためにVRは低下した（図-6）。インバージョン解析により推定された初期水位は誤差を含むので、st7～st9のような観測津波の振幅が小さな地点では時間波形の再現性において誤差の影響があらわれやすいと考えられる。

また、流速分解能を考慮しない場合と推定精度を比較したところ、観測時間によらずすべての検証地点において流速分解能の影響は小さい結果となった。レーダ観測範囲内の最大流速  $5.85\text{m/s}$  に対する最小流速分解能の比率は、観測時間が1分（流速分解能  $9.56\text{cm/s}$ ）の場合でも2%以下となるため、流速分解能の影響が小さくなっ

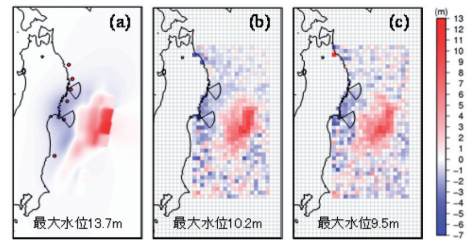


図-5 (a) 藤井・佐竹 ver.4.2 による初期水位分布。推定された初期水位分布：(b) 観測時間2分。(c) 観測時間34分。

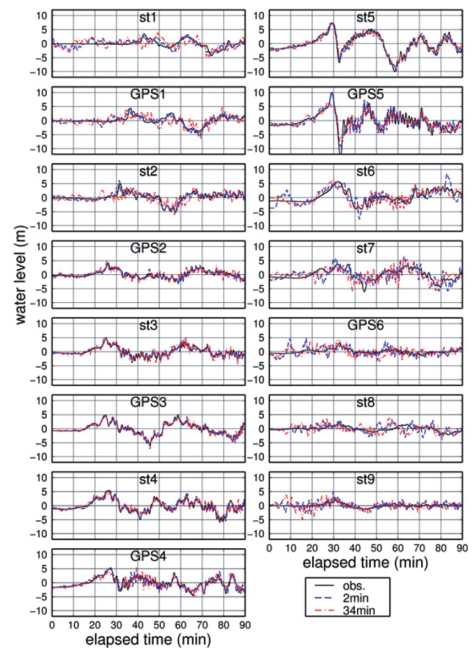


図-6 時間波形の比較

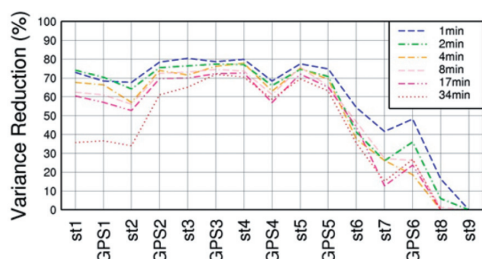


図-7 沿岸におけるVR分布の観測時間依存性

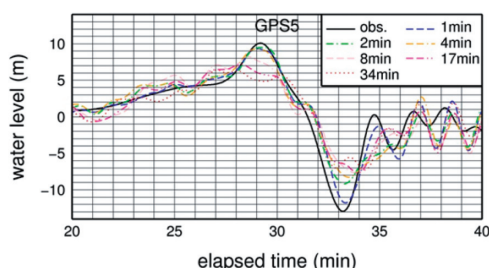


図-8 GPS5地点における最大水位の観測時間依存性

たとえられる。最大流速に応じて適切な観測時間を選択すれば流速分解能の影響を抑えることができる。

検証地点中で最大の観測津波が計算されたGPS5において、再現された時系列を詳細に見てみると観測時間34分のケースでは最大津波高が観測津波（約10m）の半分程度となっていることが分かった（図-8）。GPS5における観測津波の最大津波高の再現性は観測時間4分以下の場合では90%以上と非常に良いが、観測時間が8分になると80%程度以下にまで低下した。これは、観測時間が長いほど、初期水位の最大値が過少に推定されていることと整合する（図-5）。一方でVRの値は60%～80%と比較的良好な値を示している（図-7）。この様に観測津波の最大波の再現性を考慮して適切な観測時間を設定する必要がある。津波による最大の浸水被害の多くは最大波によって引き起こされると考えられるため、激甚被災地の探索のためには最大波の到達時刻に対する最大津波水位の再現性が鍵となるからである。

## 5. おわりに

本研究では海洋レーダの視線方向流速を応答関数に用いたインバージョン解析を行い、津波予測精度の検証を、観測時間の影響、および観測時間とトレードオフの関係にある流速分解能の影響に着目して検討した。

単純地形モデルによる検討から、インバージョンによる津波初期水位、時間波形の再現性は津波の卓越周期とレーダ観測時間の相対関係で決まることを明らかにした。卓越周期が長くなればレーダ観測時間の影響は相対

的に小さくなる。流速分解能の影響を考慮しなければ、卓越周期によらずレーダ観測時間が短いほど津波初期水位、時間波形の再現性は高くなる。実際にはレーダ観測時間と流速分解能がトレードオフの関係にある。流速分解能を考慮すると、観測津波の最大流速に対する流速分解能の相対的な大きさが影響する。

また、東北地方太平洋沖地震をモデルとした数値計算で卓越周期とレーダ観測時間の影響を検証した。観測津波の最大流速に対する最小の流速分解能の比率は2%以下であり、初期水位分布、時間波形の再現性は良好であった。しかしながら、観測時間を長くすると観測津波の最大波を過小評価する可能性があることが分かった。激甚被災地の探索を目的とした場合、インバージョンに用いる海洋レーダの最適な観測時間としては、流速分解能、SN比向上のため観測津波の最大波の再現性が高い範囲でできるだけ長い観測時間を選択することが重要である。

実際の海洋レーダの観測では最大波を観測した後、津波の卓越周期と最大流速を確認してから波源推定に用いる適切な観測時間を設定できれば、津波初期水位推定の精度向上につながる。そのためには、津波の規模に応じた複数のシナリオについて、レーダ観測時間の影響を整理しておくことが必要である。また、観測津波最大波の再現性についても評価していく必要がある。

**謝辞：**この研究の一部はJSPS科研費24560525および平成24-25年度関西大学研究拠点形成支援の助成を受けている。

## 参考文献

- 越村俊一・香月恒介・茂波悠介（2010）：GPUコンピューティングによる津波解析の高度化とリアルタイム浸水予測，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66, No. 1, pp. 191 - 195.
- 高川智博・富田孝史（2012）：時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測点地盤変動量のリアルタイム推定，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. 1\_311 - 1\_315.
- 辰巳大介・富田孝史（2008）：震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測，港湾空港技術研究所報告書，第47巻，第3号，55 - 73.
- 日向博文・藤良太郎・藤井智史・藤田裕一・花土 弘・片岡智哉・水谷雅裕・高橋智幸（2012）：紀伊水道における短波海洋レーダを用いた津波・副振動解析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. 1\_196 - 1\_200.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M., and Kanazawa, T. (2011) : Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, pp. 815 - 820.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, No. 2, pp. 1018 - 1040.
- Rabinovich, A. B. (1997) : Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. J. Geophys. Res., Vol. 102 (C6), pp. 12663 - 12676.