

高精度な地殻変動計測のための SAR 解析技術の高度化（第 1 年次）

実施期間 令和 7 年度～令和 9 年度
地理地殻活動研究センター 石本 正芳 小林 知勝
宇宙測地研究室

1. はじめに

衛星 SAR は、地表の変動を数 cm 程度の精度で広域かつ面的に検出可能であることから、地震や火山活動等に伴って生じる地殻変動の観測手法として広く利用されている。国土地理院においても、地震や火山活動等の災害時の地殻変動や定常時の地殻・地盤変動の把握、国家座標の維持・管理への活用を目的として、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が打ち上げ、運用している衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) とその後継機である「だいち 4 号」(ALOS-4) の SAR データを用いて、SAR 干渉解析（以下「干渉解析」という。）やその応用技術である干渉 SAR 時系列解析（以下「時系列解析」という。）を行っている。

しかしながら、衛星 SAR データを用いた干渉解析や時系列解析には、いまだ解決されていない多くの問題がある。例えば、対流圏や電離層の影響による誤差の補正については、従来から様々な手法が検討されているものの、十分な補正効果が得られない場合や処理に失敗する場合などがある。また、干渉解析の解析結果（干渉画像）から変動量を計測するには、位相連続化（アンラップ）という処理が必要となる。この処理をエラーなく自動で行うことはいまだに困難であるため、大量のデータを処理する上で問題となっている。さらに、SAR による観測は、原理的に南北方向の変動に対する感度が低いため、1 衛星のみの観測では精度の高い三次元変動場を得ることが難しいという問題もある。

そこで、本研究では、衛星 SAR による地殻変動計測の高精度化や解析処理の効率化を目的とし、補正手法や解析処理の高度化、海外 SAR 衛星などのデータを活用した三次元解析や時系列解析手法の高度化など、SAR 解析技術に関する研究開発を行う。令和 7 年度は、数値気象モデルを用いた対流圏遅延補正手法、時系列解析における干渉ペアの選択指標について検討を行った。

2. 研究内容

2.1 数値気象を用いた対流圏遅延補正手法の検討

国土地理院では、対流圏遅延誤差の影響を軽減するため、気象庁メソモデル（以下「MSM」という。）の初期値データを用いた補正を行っている（小林ほか, 2014）。しかし、この補正手法では、干渉解析結果に含まれる十数 km 程度の空間スケールの対流圏遅延誤差（以下「小スケール誤差」という。）を軽減することは難しい。その要因の一つとして、MSM の空間分解能が 5 km であることから、十数 km 程度の気象擾乱の再現が困難であることが考えられる。

現在の手法では補正が困難な小スケール誤差を軽減する手法を開発することを目的として、今年度は、MSM より時間・空間分解能の高い数値気象モデルが誤差軽減に有効であるか調査を行った。調査として、空間分解能の異なる数値気象モデルを用いて、実際の干渉画像に見られる小スケール誤差の再現性の比較を行った。用いた数値気象モデルは、気象庁の MSM（空間分解能 5 km）及び LFM（同 4 km）(局地モデル)、海外で広く補正に使用されている GACOS（同 90 m）(Global Atmospheric Correction Online Service; Yu et al. 2017,2018)、アメリカ大気研究センター（NCAR）が開発している WRF（Weather Research and Forecasting model; Skamarock et al.,2019）を用いて作成した空間分解能 2 km, 1.5 km, 1 km

の数値気象モデル（WRF2km, WRF1.5km, WRF1km）である。なお、GACOS は、空間分解能 0.125° の数値気象モデルと GNSS 観測による対流圏遅延量に基づいてグリッド化された約 90 m 間隔の天頂対流圏遅延量で、数値気象モデルの空間分解能を示すものではない。調査対象地域は、ALOS-2 の解析結果において山岳波の影響と考えられる誤差が見られる北海道日高地方（パス 17、フレーム 2750、2760）とした。また、所有する LFM のデータ期間が 2020 年 4 月～2021 年 12 月であるため、この期間について調査を行った。

図-1 は、山岳波の影響と考えられる誤差が最も顕著に見られた 2020 年 8 月 29 日と 2021 年 8 月 28 日の干渉画像と、各数値気象モデルを用いて推定された対流圏遅延誤差である。(a)は、ALOS-2 データを用いて解析した干渉画像、(b)～(g)は、それぞれ MSM, LFM, GACOS, WRF2km, WRF1.5km, WRF1km による対流圏遅延誤差である。この結果から MSM と LFM の結果には大きな違いはなく、日高山脈左側の線状の分布は再現されていないことが分かる。GACOS については、画像左上端に実際には見られない誤差分布があること、最も特徴的な日高山脈を挟んで生じている誤差の差が再現されていないなど、小スケール誤差の再現性は低いと考えられる。WRF で作成した数値気象モデルでは、空間分解能が高くなるにつれ、日高山脈左側の線状の分布がよく再現されることが分かる。一方で、実際の干渉画像には見られない誤差も見られるほか、線状分布の位置にズレがあることから、直接補正に用いたとしても十分な補正効果は得られないことが示唆される。

本調査により、小スケールの誤差の補正に数値気象モデルを用いる場合、空間分解能を高めることは有効であると考えられる。今後は、平野部など地形条件が異なる地域において同様な調査を行うとともに定量的な評価を行い、これらの結果を踏まえ、対流圏遅延誤差補正手法の検討を進める予定である。

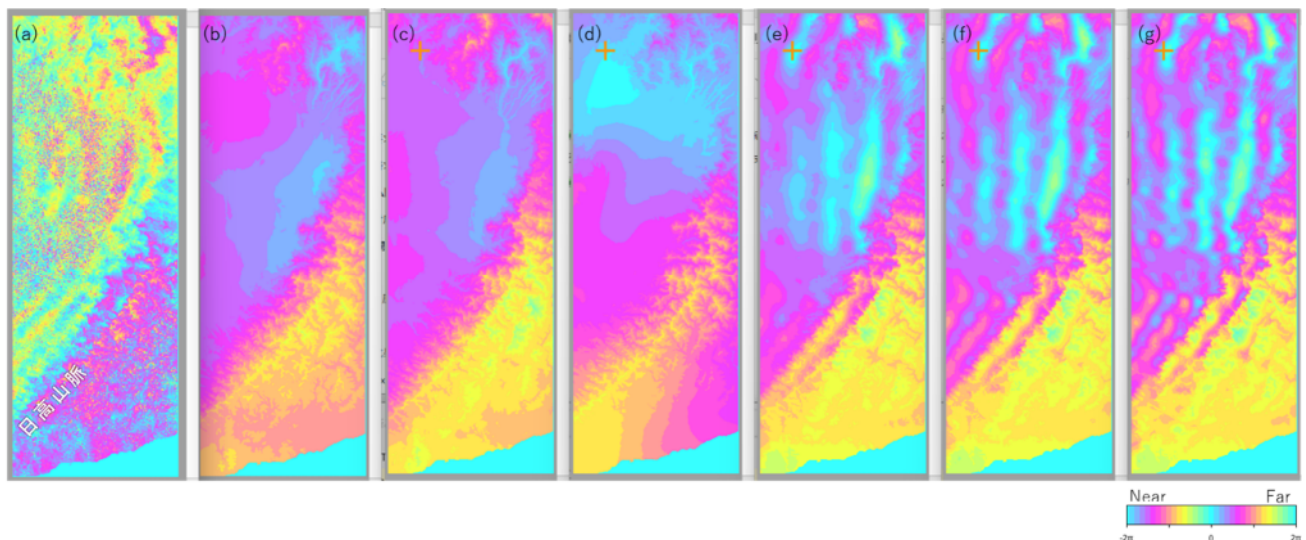


図-1 2020 年 8 月 29 日と 2021 年 8 月 28 日の ALOS-2 データによる干渉画像及び異なる数値気象モデルを用いて推定された対流圏遅延誤差。(a)は、ALOS-2 データを用いて解析した干渉画像、(b)～(g)は、それぞれ MSM, LFM, GACOS, WRF2km, WRF1.5km, WRF1km による対流圏遅延誤差。

2.2 時系列解析における干渉ペアの選択指標の検討

時系列解析は、多くの干渉画像を統計的に処理することにより誤差を低減し、精度を高める解析手法であるため、多くの干渉ペアで干渉画像を作成する必要がある。これまで ALOS-2 の観測データを用いた時系列解析では、2 年以内（南行）又は 3 年以内（北行）の観測間隔の干渉ペアについて干渉

画像を作成し、時系列解析を実施してきた。しかし、2024年に打ち上げられたALOS-4では、南行・北行それぞれ年間20回程度、日本全国を観測する予定である。観測が1回実施されると、干渉ペアの観測間隔が2年以内の場合40ペア、3年以内の場合60ペアの組合せとなることから、これらを全て解析することは現実的ではない。一方で、ゆっくり進行する地殻変動を確実に捉えるためには、なるべく長期間の干渉画像を使用すべきである。そのため、少なくとも2～3年の時間間隔の干渉画像を、時系列解析に用いる必要があると考えている。

本研究では、ある選択条件を満たす観測データが複数あり、その中から解析に用いる観測データを選択する場合に、なるべく品質の良いものを選択可能とするための指標を検討した。通常、衛星SARの観測データの品質を示す指標として、コヒーレンス（干渉性）に基づくものが用いられることが多い。コヒーレンスとは、1回目と2回目の観測において得られる位相の相関の高さを表したものであり、この指標が高いほど精度の高い位相差を取得できる。つまり、この指標は2回の観測間の関係で決まるものであるため、干渉解析を実施しなければ分からない。このように干渉解析結果に基づく品質を示す指標はあるが、ある観測日のデータだけで品質を知ることは困難である。このような状況を踏まえ指標を検討した。

検討した指標は、①マスク率に関する指標（マスク率指標）及び②誤差による位相変化に関する指標（誤差指標）の2種類である。指標を検討するに当たり前提条件として、新たに観測が実施された時に、新たな観測と過去の観測との干渉ペアを選択するものとし、過去の観測日のデータいずれについても複数の干渉ペアの干渉解析が実施されているものとする。

指標①は、位相連続化処理の前に作成するマスク（コヒーレンスの低い部分を解析に使用しないようにするためのもの）を用いるものである。干渉画像全体のマスク領域が占める割合（マスク率）が大きい結果は、時系列解析に用いないことが望ましい。また、コヒーレンスは、1回目と2回目の観測で地表の状態が大きく変わったところが低下するため、例えば、降雪があった場合には、その観測との干渉画像はどの組合せであっても同じ領域がマスクされるケースが多い。このことから、マスク率に着目し指標を作成した。なお、観測データに問題がないとしても、干渉ペアの観測間隔が長くなると、コヒーレンスは低下するため、この性質も考慮し、次式で計算される指標を作成した。

$$\text{マスク率指標} = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{dT}{\text{マスク率}} \right)$$

ここで、dTは観測間隔を0.1～0.2に規格化したもので、Nは干渉画像数である。dTは観測間隔が長くなるとマスク率が高くなることを軽減するためのもので経験的に決定した（～1年：0.1、1～2年：0.125、2～3年：0.15、3～4年：0.175、4年～：0.2）。この指標が大きいほど、マスク率が低く品質が良いと判別される。

指標②は、対流圏遅延誤差などの一時的に生じる位相変化の影響の大きさを示す指標である。指標①では、干渉結果（位相差）が得られるか得られないかは判別できるが、誤差による見かけの位相変化は分からない。そこで、スタッキング法を用いて、誤差によると思われる位相変化を抽出し、抽出した位相変化を干渉画像全体で平均し指標とした。位相変化を抽出するに当たり、誤差は次のような性質であると想定した。まず、特定の観測日のみに含まれており、この観測を含む干渉画像にはほぼ同じ大きさの位相変化が現れる。また、特定の観測日が1回目の干渉ペアと2回目の干渉ペアかにより、位相変化の符号が逆転する。以上を踏まえて、次式で計算される指標を作成した。

$$\text{誤差指標} = \frac{1}{N_p} \sum \sqrt{\overline{\varphi_+} \cdot \overline{\varphi_-}}, \quad \text{ただし, } \overline{\varphi_+} \cdot \overline{\varphi_-} < 0 \text{ の場合は } 0$$

$$\overline{\varphi_+} = \frac{1}{N} \sum_n \varphi_n, \quad \overline{\varphi_-} = \frac{1}{M} \sum_m (-1) \cdot \varphi_m$$

ここで、 $\overline{\varphi_+}$ 、 $\overline{\varphi_-}$ は、それぞれ対象観測日を2回目観測とする干渉画像のピクセルごとの位相平均と1回目観測とする干渉画像のピクセルごとの位相平均、 N 、 M は干渉ペア数、 N_p は干渉画像のピクセル数である。この処理により、前述の条件の誤差による位相変化を抽出し、かつ実際の地表変動のうち、継続して生じているものや地震のように一時的に変動するものは軽減できることが期待される。なお、対象観測日が1回目のみあるいは2回目のみの干渉ペアしかない場合には、対象観測日を含まない干渉画像をスタッキングし、これを差し引くことで、実際の地表変動による位相変化を軽減する処理も加えた。この指標はマスク率指標とは逆に値が小さいほど、品質が良いことを示す。

これらの指標を宇宙測地課で実施している定常解析結果のうち、北海道紋別～浦河地域（パス17、フレーム2720～2770）の解析結果2014年9月～2024年8月に適用した。指標①により、品質が良いものから3観測、品質が悪いものから3観測を含む干渉画像の例を図-2に示す。また、同じく指標②より、品質の良いものから3観測、悪いものから3観測を含む干渉画像の例を図-3に示す。指標①及び指標②ともにおおむね期待通りに指標化できているものと思われる。

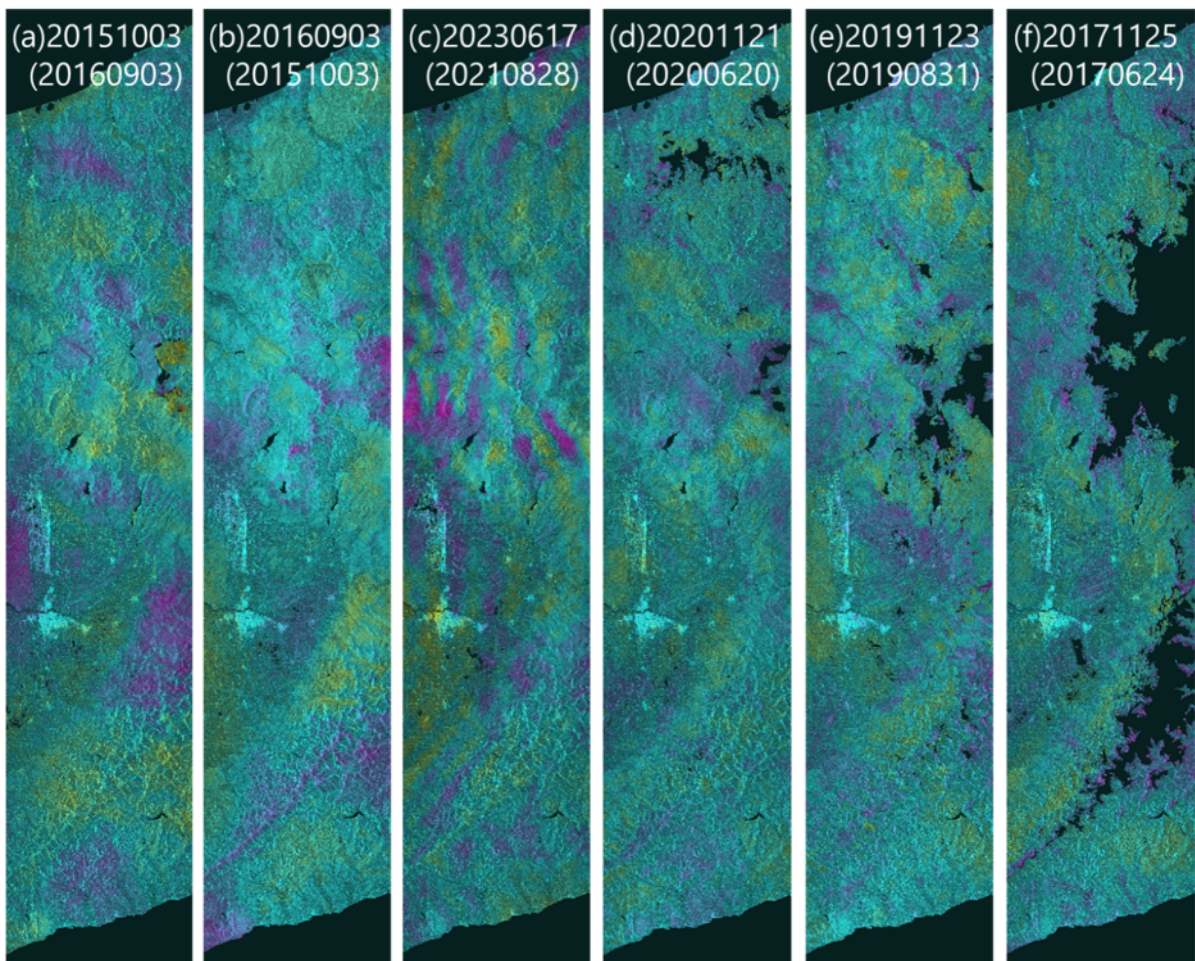


図-2 北海道紋別～浦河地域（パス17、フレーム2720～2770）の解析結果2014年9月～2024年8月にマスク率指標を適用した結果、マスク率が低い（品質が良い）と判定された3観測(a)～(c)及びマスク率が高い（品質が悪い）と判定された3観測(d)～(f)を含む干渉画像。なお、記号(a)～(f)横の日付は対象観測日、()内は干渉画像の1回目又は2回目の観測日を示す。

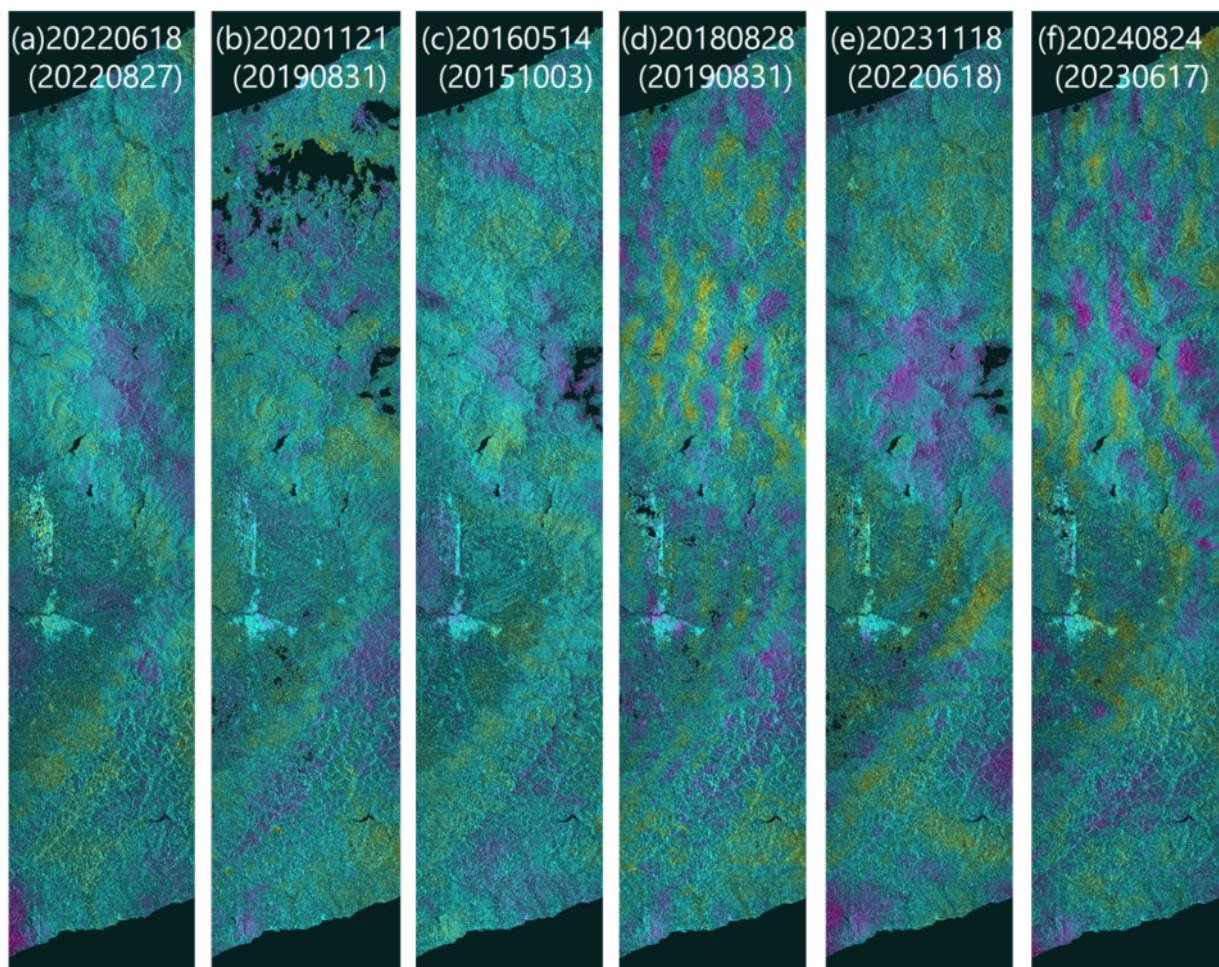


図-3 北海道紋別～浦河地域（パス 17，フレーム 2720～2770）の解析結果 2014 年 9 月～2024 年 8 月に誤差指標を適用した結果，誤差による見かけの位相変化が小さい（品質が良い）と判定された 3 観測(a)～(c)及び見かけの位相変化が大きい（品質が悪い）と判定された 3 観測(d)～(f)を含む干渉画像．なお，記号(a)～(f)横の日付は対象観測日，（）内は干渉画像の 1 回目又は 2 回目の観測日を示す．

3. まとめ

令和 7 年度は，数値気象モデルを用いた対流圏遅延補正手法，時系列解析における干渉ペアの選択指標について検討を行った．数値気象モデルを用いた対流圏遅延補正手法の検討では，異なる空間分解能の数値気象モデルを用いて小スケール誤差の再現性の比較を行った．その結果，小スケール誤差の軽減に数値気象モデルを用いる場合には，高い空間分解能が必要であることが示唆された．時系列解析における干渉ペアの選択指標の検討では，干渉性の高低を示すマスク指標，対流圏遅延誤差等による位相変化の影響の大きさを示す誤差指標を作成した．これらの指標は，測地部宇宙測地課で実施している定常解析に組み込まれる予定である．

今後は，引き続き対流圏遅延誤差の補正手法を検討するとともに，位相連続化処理の高度化，海外 SAR 衛星及び ALOS-2/ALOS-4 による時系列解析や三次元解析の高度化等を進める．

謝辞

「だいち 2 号」及び「だいち 4 号」の原初データは，国土地理院と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の間の協定に基づき提供されました．「だいち 2 号」及び「だいち 4 号」の原初データの所有権は，

JAXA にあります。気象庁メソモデルは、「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供されました。気象庁局地モデルは、気象研究所から提供されました。

参考文献

- 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014): SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, 国土地理院時報, 125, 31–38. doi:10.57499/JOURNAL_125_08
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., LIU, Z., BERNER, J., WANG, W., POWERS, J. G., DUDA, M. G., BARKER, D. M., and HUANG, X.-Y. (2019): A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- YU, C., PENNA, N. T., and LI, Z. (2017): Generation of real - time mode high - resolution water vapor fields from GPS observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(3), 2008–2025. doi:10.1002/2016JD025753
- YU, C., LI, Z., PENNA, N. T., and CRIPPA, P. (2018): Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(10), 9202–9222. doi:10.1029/2017JB015305
- YU, C., LI, Z., and PENNA, N. T. (2018): Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. Remote Sensing of Environment, 204, 109–121. doi:10.1016/j.rse.2017.10.038