

KEKB 入射器トンネルにおける床面変動と環境温度変動

TUNNEL FLOOR MOTION AND ENVIRONMENTAL TEMPERATURE FLUCTUATION AT THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田剛*, 柿原和久

Tsuyoshi Suwada*, Kazuhisa Kakihara

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new system to monitor environmental parameters (temperature, atmospheric pressure, and humidity) has been developed in order to investigate primary factors for dynamic transverse displacements of the tunnel floor and accelerator units in the laser-based alignment system of the KEKB injector linac. The laser-based alignment system with remote-controllable sensing system is stably and continuously in real-time operation during about 2.5 years since Jan.01.2016. Although the injector linac had initially been aligned with a laser-based alignment system, it could be found that the transverse displacements of the tunnel floor to the laser axis caused by dynamic ground motion and deformation of the linac building due to environmental parameters are not negligibly small compared with the required alignment tolerance, in terms of the straightness of the beam line. This is a reason why we constructed the new monitoring system for environmental parameters. This report describes the new monitoring system for environmental parameters, and some correlation analysis results are briefly demonstrated.

1. はじめに

現在, 入射器では, SuperKEKB の本格運転 (Phase-III) に向けた入射器増強と高度化が進行中である. この中で高精度アライメントは, 入射器高度化に向けた重要項目の一つになっている. 入射器のような長距離線形加速器では, 大電流かつ高品質なビームを長距離にわたり安定な加速・輸送するために, 高精度アライメントは欠かせない.

レーザーアライメントは, レーザー長基線を墨入れの墨線に対応させ, 光軸を基線として加速装置を直線上に並べる方法である. 本方法によると, 長距離を一度に見通せるので, 従来の光学的なアライメントでは避けられないつなぎ合わせ誤差の心配がない. 筆者らは, 2009 年にレーザーアライメントの開発を開始した. これまでの進展については参考文献 [1-5] に詳しいので参照してほしい.

床面変動の主要因は, 複雑な地面変動に起因するが, 地面変動と一口に言っても外気温, 日照, 気圧, 地下水の変位, 海洋潮汐, 波浪, 地盤拡散など, 様々な要因の寄与が考えられ, 極めて複雑である. これらの外的環境変動を通して, 入射器建屋が変形し床面変動がさらに増幅され, 最終的に加速ユニットの変位が増大するという二次的な効果もあり, 複雑な過程が動的に作用していると考えられる.

入射器本体は, クライストロンギャラリーと加速器トンネルが一体となった 8 つの建屋を 7 ヶ所の建屋継目で接続した, 総長 500 m の建屋の地下トンネルに設置されている. 各建屋の膨張収縮は, 建屋継目である程度吸収されるが, 吸収されない分は建屋全体の变形となりトンネル床面を動的に変動させることになる. すなわち, 建屋継目に働く複雑な力学が近くの加速ユニットの変動測定に少なからず影響を与えることになる.

入射器トンネルの床面は, 地下 5.65 m の比較的浅い深

さにある. 従って, 床面変動は地面変動というより, むしろ建屋変形の影響を通した二次的な効果による変動が大きいかもしい. このように, 複雑な変動要因を直接的に問うことは困難であるが, 地中や建屋内外の環境温度など, できるだけ多数の環境パラメータを同時測定し, 時系列データの相関解析を行うことで, 床面変位の要因が推定できるかもしれない.

入射器全長に渡る建屋変形を稠密に同期計測するのは将来の課題としたい. その代わりに, 環境温度を計測することで, 変動要因に対し何らかの知見が得られないかというのが今回の狙いである. 本学会では, 入射器において新たに設置した建屋内外の環境温度計測システムについて報告する.

2. KEBK 入射器における床面変位計測システム

図 1 に入射器の全体構成図と 2 本の長直線部 (AB ラインと C5 ライン) に設置したレーザーアライメントのためのレーザー長基線を示す. なお, 図中には, 建屋内外の環境パラメータ計測点も同時に示した.

入射器は, 180 度偏向部 (エネルギー 1.5 GeV) を挟んで 2 本の直線部 AB ライン (ライン長 125 m, 光軸長 132 m) 及び C5 ライン (ライン長 488 m, 光軸長 500 m) からなる総長約 600 m の電子陽電子線形加速器である. C5 ライン直線部に沿って 21 台の自動 QPD (最終点の基準 QPD_584D を省く) を設置し, 加速ユニットと床面の変位計測を継続している. AB ライン直線部に沿って 2 台の自動 QPD が設置されたが, 残念ながら定常的な変位計測には至っていない.

C5 ラインでは, 21 台の内, 3 台の基準 QPD (REF1UA, 28REFUA, 584D) が床面に固定されている. レーザー長基線の終点は, フィードバックにより QPD_584D の中心に常時固定され, QPD_REF1UA と 584D を結ぶ直線がアライメントの長基線を形成する.

白抜き点は基準 QPD を示し, 実点 (赤, 青, 緑, 色の違

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

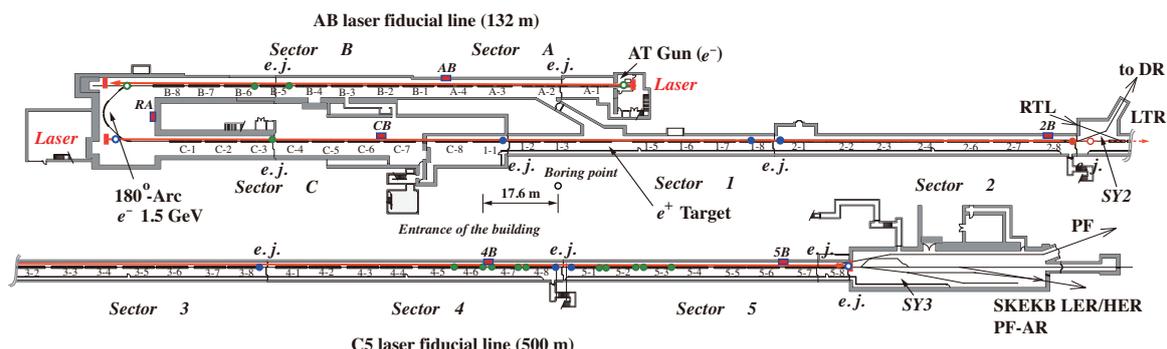


Figure 1: Schematic layout of the KEKB injector linac and laser fiducials for two long straight sections. The abbreviation, *e.j.*, indicates an expansion joint between the building blocks of the linac. The two arrows (red) show the laser-based fiducials for two long straight sections. The solid circles (blue) represent the remote-controllable QPDs and the open circles (blue) represent the reference remote-controllable QPDs fixed at the tunnel floor. Several locations for environmental temperature measurement in the tunnel are also shown, and for outdoor environmental temperature measurement, only the boring point located in the vicinity of unit 1-3 (in the 17.6 m north from the entrance of the linac) is also shown.

いは設置時期の違いを示す)は自動 QPD を示す。 *e.j.* (expansion joint) は建屋継目の位置を示し最初の自動 QPD (実点(青))は全て建屋継目近くに設置された。他方、他の自動 QPD (実点(緑))は建屋継目から離れて設置された。

屋内環境パラメータ計測点も図中(実点四角(赤))に示している。パラメータ計測点を入射器全長に渡り配置し、AB ラインに対し 2 点 (AB, RA), C5 ラインに対し 4 点 (CB, 2B, 4B, 5B) とした。さらに、加速ユニット 1-3 付近の屋外に環境温度計測点を設け、入射器棟屋上と地中環境温度を計測できるようにした。

3. 屋内環境温度計測システム

屋内環境温度計測点は、入射器トンネルの全長に渡り 6 ヶ所に温湿計が設置され、トンネル内の温度と湿度を常時計測している。特に 2B 計測点では、温度と湿度に加え、気圧も同時計測できるようにした。

本システムは、2016 年度の秋から整備を始め、2017 年 1 月から本格的に計測を開始している。温湿計にはテスト社の温湿度変換器 (testo 6651)、気圧計にはデルタオーム社の大気圧センサー (HD9908T) を導入した。

各センサーからの信号は、4 時間毎 (アライメント自動計測と同期) にオムロン社の Linux/PLC-ADC によりデジタルデータに変換し、計算機に保存している。

4. 屋外環境温度計測システム

屋外の環境温度を計測するために、入射器棟玄関から北に 17.6 m、建屋壁から東に 1.5 m の地点に観測点を決めた。入射器ビームラインとの位置関係は図 1 を参照してほしい。

この地点で深度 3 m, 5 m, 10 m の 3 箇所の地中温度を計測するために、最大深度 10 m のボーリングを行い土質調査をすることにした。さらに、建屋温度と日照時間の同期計測が可能のように、ボーリング点からほぼ真上に位置する建屋屋上にも環境温度計測点を 3 ヶ所設けることにした。

ボーリング調査は、2018 年 2 月 1 日から 2 日に渡り

行われ、実質の作業時間は準備作業を含め 1.5 日であった。図 2 にボーリング調査の準備の様子を示す。写真の位



Figure 2: Preparation of boring devices and a boring point in the 17.6 m north from the entrance of the injector linac building.

置は、加速ユニット 1-3 付近から南に向かって入射器棟玄関を眺めたもので、測定点は玄関からすぐ近くに位置する。

ボーリング用の掘削口径は $\phi 66$ mm、掘削深度は 10 m である。標準貫入試験は 1m 毎に行われ、土質調査が行われた。土質を評価する代表的な測定量として、地盤の硬軟や締め具合を表す N 値が測定された。N 値測定では、15 cm の予備打ちを行った後、重さ 63.5 kg のハンマーを高さ 76 ± 1 cm の地点から自由落下させ、貫入量 10 cm ほどの打撃回数を記録しながら合計 30 cm の貫入に要した総打撃回数が記録された。1m 毎の N 値試験後には、ロッドを交換し、土壌サンプルを取得し土質を調査した。

表 1 にボーリング調査結果の一部をまとめた。詳細報告は文献 [6] を参照してもらいたい。入射器のトンネル床面は、地下 6 m 程度の地点に位置している。従って、建屋自体は工事に伴う掘土で埋め戻されており、非常に軟らかい土壌でできていることが判明した。また、わずか 3 m の深度で地下水脈に突き当たることも分かった。

深度 3 m, 5 m, 10 m の 3 ヶ所に 2 本ずつ (予備を含む)

Table 1: Summary Table in Soil Surveying Based on a Mechanical Boring in the Ground to a Depth of 10 m

深度 [m]	層厚 [m]	土質名	貫入深度 [m]	N
0.3	0.3	埋土/砂質シルト		
3.8	3.50	埋土/瓦礫混合粘土質シルト	1.15-1.49 2.15-2.45 3.15-3.45	2 9 3
6.5	2.70	埋土/シルト質粘土	4.15-4.58 5.15-5.55 6.15-6.55	2 1 2
7.8	1.30	中砂	7.15-7.45	8
8.8	1.00	細砂	8.15-8.45	15
9.8	1.00	砂質シルト	9.15-9.45	14
10.45	0.65	シルト質粘土	10.15-10.45	6

計 6 本を、入射器棟屋上 (西側, 中央, 東側) の 3ヶ所に計 3 本の T 型熱電対を敷設した。西側と東側では、熱電対のセンサー部が屋上のコンクリート床面に直接的に接するように固定された。他方, 中央は、通信ケーブルや空調ダクト用の小屋内のコンクリート床面に固定された。従って、中央は、直接的に日照に曝された温度ではなく、むしろ日照に曝された建屋の温度変化が計測されると考えた方がよいだろう。

T 型熱電対として理化工業社製 (T-101S) を用いた。センサー部は銅-コンスタンタンからなり、汎用の K 型に比ベダイナミックレンジは狭いが (-200~300°C)、測定精度において優れた特性 (クラス 1, $\pm 0.5^\circ\text{C}$) を持つので採用することにした。センサーは、 $\phi 1.6\text{ mm}$ の保護管 (SUS316) の中に入っており、この保護管を補償導線にも延長することで、過酷な環境と雑音にも耐えられるようにした。熱電対の最大長さは屋上西の 35 m (許容最大長 50 m) であった。



Figure 3: Thermocouples installed in the ground for environment temperature measurement.

径 20 mm, 長さ 10 m 程度のビニル管 (底蓋付き) を準備し, 3 m, 5 m, 10 m の 3ヶ所の管壁に小さな穴を開けておいた。ビニル管の中に全熱電対を通し, 各穴から該当する長さの熱電対線を 2 本ずつ外へ引き出し, ビニルテープでセンサー部を管壁に固定するという簡易的な方法を採用した。このビニル管を 10 m 深さの縦穴に挿入し, 掘り出した土を再度埋め戻した。従って, ビニル管の中は

最終的には水脈で満たされることになる。このことが熱電対の保護管を補償導線を含め全て金属で保護した理由である。また, このようにすれば, クライストロンギャラリー内の外来雑音の抑制にも効果が期待できる。ビニル管を地中に埋める作業の様子を図 3 に示す。

図 4 に壁面に開けた穴 ($\phi 26\text{ mm}$, 壁厚 20 cm) に熱電対をクライストロンギャラリー内に引き入れる様子を示す。屋上用 3 本と地中用 6 本が壁面を貫通しているのが見える。



Figure 4: Penetration hole viewed from the east-side wall surface of the linac building for passing thermocouples. The signals of the thermocouples are sent from the outside to a data logger unit installed in the inside.

熱電対は, 20 cm 厚の壁面を通してクライストロンギャラリーに引き入れられ, ギャラリー内部に設置しているチノー社の温度計測用ロガー (KE3000) の入力ユニット (KE331L-000) に接続された。

5. 環境温度計測結果

図 5 に 2017 年 8 月 1 日から約 1 年間の環境温度 (外気温, 入射器棟東側屋外) の時系列変化を示す。測定結果によると, 外気温の変化は, 1 月中旬には底を打ち, 8 月初頭にはピークに達している。温度変化は, 概ね $-5\sim 35^\circ\text{C}$ (peak-to-peak) の範囲にあり, 最大変動幅は 40°C に達する。

地中及び屋外環境温度計測 (入射器棟屋上) は, 2018 年 2 月 19 日からレーザーアライメント計測と同期して 4 時間毎に連続計測を開始した。図 6 に, 約半年間 (2018 年 7 月 13 日まで) の地中環境温度の時系列データの計測結果を示す。

地中環境温度については, 深度が大きいほど時系列変化が小さく, かつ地上での時系列変化が月単位の遅延 (深度に強く依存する) を経て, 地上での温度変化がゆっくりと地中に拡散してゆくという特徴を持つ。

図 6 (a), (b), (c) に, それぞれ 3 m, 5 m, 10 m 地下の環境温度の時系列変化を示す。3 m 地下のデータによると, 環境温度は 2018 年 4 月初頭には底を打ち反転を始めている。従って, この結果は, 外気温の時系列変化に比べ, 約 2 ヶ月半の遅延が生じることがわかる。5 m 地下のデータによると, 環境温度は依然として下がり続けている。10 m 地下のデータによると, 環境温度はほとんど変化しなくなり, ほぼ一定である。

図 7 に, 同期間の屋外環境温度の時系列データの計測

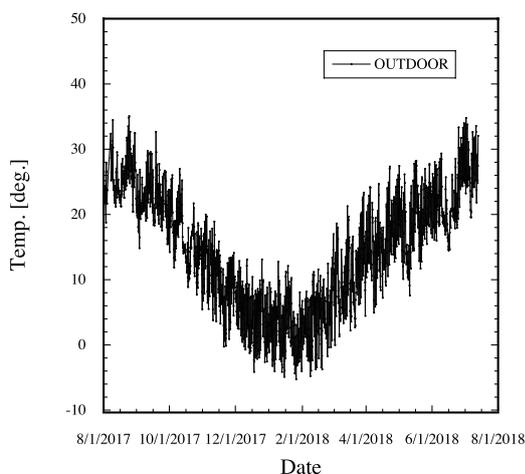


Figure 5: Time trace of atmospheric temperature measured at the east-side outdoor of the linac building during the long term Aug.1.2017-July.13.2018.

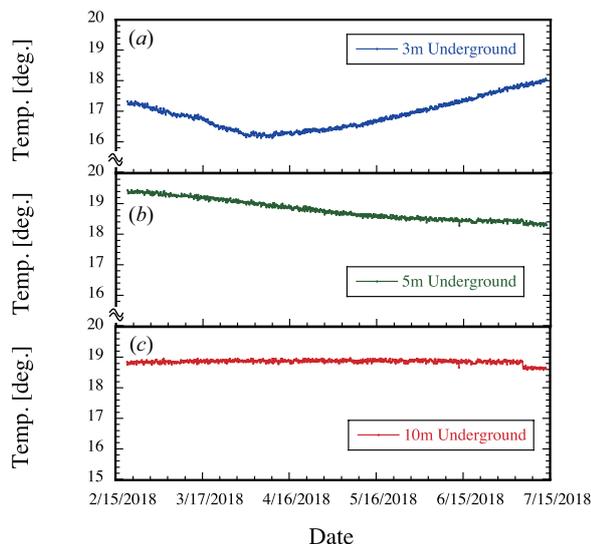


Figure 6: Time traces of environmental temperature measured at (a) 3-m underground, (b) 5-m underground, and (c) 10-m underground of the linac building during the short term Feb.19-July.13.2018.

結果を示す。図 7 (a), (b), (c), (d) に、それぞれ、外気温、入射器棟屋上 (東側)、入射器棟屋上 (中央)、入射器棟屋上 (西側) における環境温度の時系列変化を示す。

熱電対のプローブ先端は、外気温計測を省いて、いずれの場合もコンクリート床面に固定しているので建屋温度を直接的に計測していることになる。図 7 (c) を省いて、いずれの時系列変化も日較差が明瞭に見られ、現在まで順調に温度が上昇していることがわかる。この間の外気温の変化は、2018 年 7 月 13 日時点では 30°C 程度に達しているが、入射器棟屋上床面の温度は、図 7 (c) を省き 40°C を超え始めた。約半年ではあるが、環境温度計測システムが順調に稼働を始めたと言えよう。

図 8 に、計測結果の例として同期間の屋外環境温度 (中央) とトンネルのほぼ中央に位置する基準

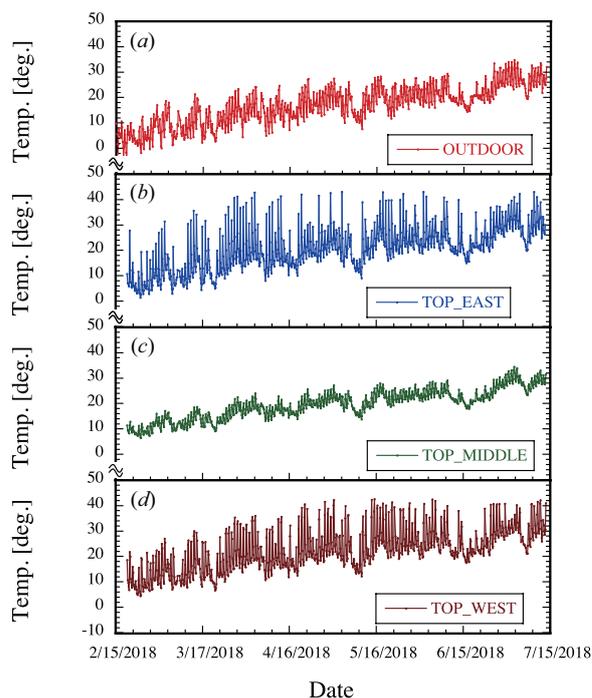


Figure 7: Time traces of environmental temperature measured at (a) the outdoor, (b) the top floor (east), (c) the top floor (middle), and (d) the top floor (west) of the linac building during the short term Feb.19-July.13.2018.

QPD_28REFUA (入射器トンネルのほぼ中央の床面に固定) の変位との相関プロットを示す。図 8 (a), (b) に、温度 vs. x 変位相関、温度 vs. y 変位相関をそれぞれ示す。計測結果によると、比較的強い相関を示していることが

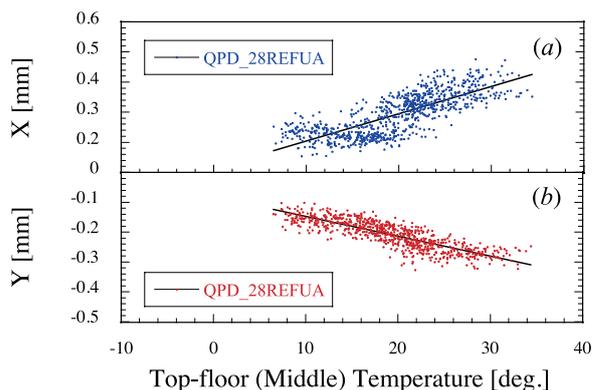


Figure 8: Correlation plots in the transverse displacement measurement of QPD_28REFUA versus environmental temperature measured at the top floor (middle) of the linac building during the short term Feb.19-July.13.2018. (a) and (b) show the correlation plots in the x and y displacement measurements, respectively.

言える。

表 2 に各環境温度と基準 QPD_28REFUA の時系列変位との相関解析を行った結果をまとめた。

計測結果によると、トンネル床面変位は、当然のごとく

Table 2: Summary Table in Correlation Measurements for the Transverse Displacements of the Tunnel Floor versus Environmental Temperatures

QPD	Env. Temp.	相関	感度	相関	感度
		係数 x	$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	係数 y	$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$
28REFUA	Outdoor	0.728	6.3	-0.813	-5.1
	Top-East	0.581	4.2	-0.693	-3.7
	Top-Middle	0.790	8.6	-0.860	-6.8
	Top-West	0.586	4.4	-0.712	-3.9
	3-m Und.	0.678	—	-0.540	—
	5-m Und.	-0.830	—	0.819	—
	10-m Und.	-0.425	—	0.312	—

地中より屋外環境温度との相関が強い。さらに、屋外環境温度との相関では、外気温に比べ屋上環境温度(中央)との相関がやや強い。屋上床面の計測では、日照に起因した日較差が明瞭に見えているが、この効果は、相関としては逆に弱めていることがわかる。

屋上環境温度(中央)は、小屋内で計測しているので、日照の効果を直接的に計測しているというより、むしろ建屋の平均温度を計測していると考えられる。従って、外気温に比べてもその相関係数は大きくなると考えてよい。また、図8によると、 x 相関に比べ y 相関の方が明らかに強い。すなわち、この結果は、建屋構造に依存して水平に比べ垂直方向変位との相関が強いことを示している。

解析結果によると、変位 x 、 y との相関係数は、それぞれ $8.6 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 、 $-6.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ であった。地中温度との相関では、5m地下温度との相関は強いが、日照の効果は時間遅延して現れるので、単純な相関解析では特徴を適切に抽出することは困難である。さらに高度な相関解析が必要となるであろう。

本解析を発展させれば入射器全長に沿って配置したQPDとの相関が見えるようになる。すなわち、入射器建屋トンネルの変位相関において詳細な位置依存性が見えるようになるかもしれない。これらについては、さらにデータを蓄積してから解析を進めたいと考えている。

6. まとめ

現在、入射器の高度化に向けた、高精度アライメントのための、入射器トンネルにおける床面と加速ユニット変位の連続計測が順調に稼働している。

変位計測の主要因を調査するために、地中及び屋外環境温度(入射器棟屋上)の連続計測を2018年2月19日から開始した。まだ半年ではあるが、計測システムが安定に稼働し始めたことを確認した。

今後の長期計測により、変位計測への環境要因の寄与の定量的評価が期待される。入射器の電子・陽電子ビームの高輝度化と高安定化に向けて、アライメントという観点からその手がかりを定量化したいと考えている。

謝辞

屋内及び屋外の環境温度計測システムの構築については、KEK 加速研究施設の三川勝彦氏、佐武いつか氏にそれぞれ協力を頂きました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 諏訪田剛, 日本加速学会誌「加速器」15(1)2018, p. 10.
- [2] T. Suwada, Proc. 12th Annual Meeting of PASJ, Aug. 5-7, 2015, pp. 129–133.
- [3] T. Suwada, *et al.*, Proc. 12th Annual Meeting of PASJ, Aug. 5-7, 2015, pp. 895–897.
- [4] T. Suwada, *et al.*, Proc. 13th Annual Meeting of PASJ, Aug. 8-10, 2016, pp. 1291–1295.
- [5] T. Suwada, Proc. 14th Annual Meeting of PASJ, Aug. 1-3, 2017, pp. 264–268.
- [6] (株)東京ソイルリサーチ, 地中温度計測用ボーリング調査報告書, 2018年3月.