

# Comparing the Self-Determination Theory and the L2 Motivational Self System: A Closer Look at Questionnaire Items

Chika TAKAHASHI

## Abstract

This review introduces and compares two often utilized motivation theories in L2 studies: the self-determination theory and the L2 motivational self system. After introducing the basic tenets of the theories, the paper discusses some clarifications that might benefit future research, particularly on the following points: (a) theoretical as well as methodological development of the construct of external regulation and introjected regulation; and (b) thorough investigations of the relationships between and among the constructs in the two theories.

## Introduction

Second/foreign language (hereafter L2) motivation has been an active area of L2 research for many years. The most utilized include the self-determination theory (SDT; Deci & Ryan, 1985, 2002), which was developed in psychology, and the L2 motivational self system (Dörnyei, 2009). While they share certain similarities, each has its strengths and unique perspectives regarding L2 motivation.

The purpose of this paper is to compare the two theories, including questionnaire items intended to measure constructs in both, and to discuss some clarifications that might benefit future research. First, I will introduce the basic tenets of these theories and discuss some common ground they share. Then I will point out two major differences between the two. Finally, I will discuss some discrepancies in the two theories that future research might explore.

### **The Self-Determination Theory**

The SDT emphasizes the importance of stimulating learners' interests in learning, internalizing values, and their regulatory processes. At the core of the theory is the notion of self-determination, or internalization of an action, which helps in categorizing different types of motivation. Motivated actions are postulated to be endorsed by one's sense of self (self-determined), and the action is regulated by choice. In such a case, the locus of causality is perceived to be internal to the self. In contrast, some actions might be controlled (not self-determined), and therefore the regulatory process is compliance or defiance, with the locus of causality perceived to be external to the person. By focusing on the degree of self-determination, the regulatory process, and the perceived locus of causality, motivation is distinguished as intrinsic or extrinsic.

When learners are intrinsically motivated, they engage in an activity because the activity itself is interesting. Intrinsic motivation represents "the prototype of motivation" (Deci, Valleurand, Pelletier, & Ryan, 1991, p. 328), which contrasts with extrinsic motivation.

Not all L2 learners study the L2 because it is interesting, of course. Many do so because of external contingencies. In such a case, they are extrinsically motivated. Extrinsically motivated behaviors are "engaged in as a means to an end and not for their own sakes" (Vallerand & Bissonnette, 1992, p. 600).

To further illustrate, the least self-determined (or controlled) type of extrinsic motivation is external regulation, which involves external contingency such as rewards or punishment. Learners might start to internalize the regulation (introjected regulation), taking it in but not accepting it as their own. They engage in L2 learning, for example, so as not to feel guilty or ashamed. When learners are more self-determined, they engage in an activity because it is personally important to them, which is known as identified regulation; in this case, learners engage in an activity willingly because "the regulatory process has become more fully a part of the self" (Deci et al., 1991, p. 329).

The SDT further deals with the issue of why certain goals or outcomes are desired. It assumes that human beings "have natural, innate, and constructive tendencies to develop an ever more elaborated and unified sense of self" (Deci & Ryan, 2002, p. 5). It is postulated in the theory that human beings engage in behaviors because of three basic psychological needs "that are inherent in human life" (Deci et al., 1991, p. 327): competence, relatedness, and autonomy. Competence refers to a person's need to feel efficacious in performing an action. Relatedness is the need to feel that one's actions are supported and that they are making progress with others. Autonomy refers to one's need to make a choice for themselves without feeling coerced. When

these needs are satisfied, human beings are postulated to become self-determined.

There have been a number of studies conducted within the framework of the SDT (e.g., Hiromori, 2006; Konno, 2011; Nishida, 2013; Noels, Pelletier, Clément, & Vallerand, 2000; Pae, 2008; Shaikholeslami & Khayyer, 2006). These studies indicate that intrinsic motivation is related to L2 motivational intensity (e.g., Pae, 2008), persistence in learning (e.g., Vallerand, Fortier, & Guay, 1997), and L2 achievement (e.g., Shaikholeslami & Khayyer, 2006), which align with the original theorization. It is interesting to note, however, that not only intrinsic motivation but internalized types of extrinsic motivation (i.e., identified regulation) seem to play an important role in L2 learning; this can be seen in the close relationship between identified regulation and persistence in learning (e.g., Vallerand et al., 1997).

Methodologically speaking, some types of motivation within the SDT have only had low internal consistency. For example, the Cronbach alpha coefficient for introjected regulation in Noels et al. (2000) was .67 (p. 70), and for external regulation in Konno (2011), it was .56 (p. 350). Although the coefficients vary depending on the number of items and the sample size, these results might show that it is necessary to re-word the items, as discussed below.

### **The L2 Motivational Self System**

The L2 motivational self system is a recently proposed model that was developed specifically for L2 learning. The model is based on the theories of self-discrepancy (Higgins, 1987) and possible selves (Markus & Nurius, 1986), and is composed of three constituents.

At the center of the model is the ideal L2 self, which is the self-image that an L2 learner ideally hopes to attain in the future. It is driven by promotional instrumentality, and it mirrors what L2 learners imagine in terms of their ideal futures regarding the L2. The second construct in the model is ought-to L2 self, which represents the attributes that L2 learners believe they ought to possess “to meet expectations and to *avoid* possible negative outcomes” (Dörnyei, 2009, p. 29, emphasis in original). It represents a future self-guide that is “socially desirable” (Teimouri, 2017, p. 687) and arises from a sense of duty or responsibility. The third component is L2 learning experience, which is more situated and related to L2 learners’ immediate learning environments, such as “the impact of the teacher, the curriculum, the peer group, the experience of success” (Dörnyei, 2009, p. 29). Together, this tripartite model is assumed to exert motivational power.

Since the model was proposed, various studies have been conducted within the framework, both inside and outside Japan (see, e.g., Lamb, 2012; Ryan, 2009; Taguchi, Magid, & Papi,

2009; You & Dörnyei, 2016). Although these studies have demonstrated the explanatory power of ideal L2 self and L2 learning experience (i.e., by positive correlations between the ideal L2 self and L2 learning experience on the one hand and the variable of intended learning effort on the other), the ought-to L2 self has shown inconsistent findings. In some studies, ought-to L2 self either did not emerge out of a factor analytical approach or had very low Cronbach alpha coefficients (e.g., Csizér & Lukács, 2010), while in some studies the relationship between ought-to L2 self and intended learning effort was not identified (e.g., Kormos, Kiddle, & Csizér, 2011; Papi & Teimouri, 2012).

In recent articles, Thompson and Vásquez (2015) and Teimouri (2017) pointed out the conceptual problems regarding ought-to L2 self and the resulting challenges with the operationalization of the construct. For example, Teimouri (2017) pointed out that in the self-discrepancy theory (Higgins, 1987), four types of future self guides (ideal self/own, ideal self/others, ought-to self/own, and ought-to self/others) are postulated, distinguishing between the personal and social aspects of the desired future end-states (p. 687). However, the L2 motivational self system did not make the own/others distinction. Thus, based on the original conceptualization in the self-discrepancy theory (Higgins, 1987), Teimouri (2017) empirically tested a revision of the model, distinguishing between ought-to L2 self/own and ought-to L2 self/others, and between ideal L2 self/own and ideal L2 self/others. Although the distinction between ideal L2 self/own and ideal L2 self/others did not emerge, ought-to L2 self seemed to be differentiated into the two types. Based on these results, Teimouri (2017) argued that ought-to L2 self/others reflected imposed obligations and duties by significant others for learning an L2, representing the “projected L2 self” (p. 701). Ought-to L2 self/own, in contrast, was more internalized and shared for personal values, representing “shared L2 self” (p. 701). Finally, ideal L2 self represented the “independent L2 self” because it was fully owned by the L2 learner. Although much more needs to be investigated in wider contexts regarding this revision to the L2 motivational self system, it might be a promising starting point for refining the construct of ought-to L2 self.

### **Similarities and Differences Between the Theories**

Given the premises of the two theories, we notice many similarities, particularly by employing the own/other distinction for ought-to L2 self. Dörnyei (2009) also states that the constituents in the L2 motivational self system resemble those in the SDT to a certain degree. First, both ideal L2 self and identified regulation include promotion-focused instrumentality. L2 learners who have ideal L2 self/identified regulation put effort into studying the target language

because they strive to become competent L2 users in the future for purposes that are personally important to them.

Second, ought-to L2 self/others resembles external regulation to a certain degree (Meyer, Becker, & Vandenberghe, 2004). It is prevention-focused and includes “imposed obligations and duties by significant others for learning an L2” (Teimouri, 2017, p. 700). External regulation might also be seen as prevention-focused for the following reasons. Learners who are externally regulated study the L2 because of the pressure put on them by others. In other words, they engage in the act of L2 learning “in order to satisfy an external demand or reward contingency” (Meyer et al., 2004, p. 995). This type of motivation is not self-determined, and these learners feel that the locus of causality is external to themselves. As such, they might choose “vigilant” strategies over “eagerness” strategies, spending the least amount of energy to fulfill the obligations. A prevention focus is “*concerned with safety, responsibilities, and obligations*” (Higgins, 1998, p. 16, italics in original), which corresponds to external regulation.

Third, learners with introjected regulation take in but do not totally accept the regulation as their own, and the regulation results from “internal coercion” (Deci et al., 1991, p. 329). Likewise, the major motivation for ought-to L2 self/own is “to satisfy their security needs in the future by avoiding personal difficulties” (Teimouri, 2017, p. 700). Thus, learners with introjected regulation and ought-to L2 self/own are both still driven by prevention-focused regulation.

How about intrinsic motivation? It seems to share certain characteristics with the construct of the L2 learning experience, as they are both focused on the activity of L2 learning itself. Dörnyei (2009) also states that “intrinsic reasons inherent in the language learning process” are “a close match to the L2 Learning Experience” (p. 30).

Although the word “intrinsic” has been used in many ways in past research, more needs to be discussed regarding the nature of this type of motivation. Teimouri (2017) postulates that ideal L2 self “represents the most intrinsic types of motivation involving personal and social desires, wishes, and hopes that are independent of others and set by L2 learners” (p. 700). However, intrinsic motivation, at least from the perspectives of the SDT, is non-instrumentally focused, and “intrinsically motivated behaviors are engaged in for their own sake—for the pleasure and satisfaction derived from their performance” (Deci et al., 1991, p. 328). As such, questionnaire items measuring intrinsic motivation in past studies have typically been phrased as answers to the question of why a respondent is studying an L2, such as “because it is interesting.” These differ from questionnaire items measuring ideal L2 self in that all items measuring it (in Teimouri, 2017, for example) list external contingencies that are obtained by learning

English, not the process of L2 learning per se. In other words, for all items measuring ideal L2 self in Teimouri (2017), the purpose of learning English lies outside the L2 learning, which contrasts sharply with intrinsic motivation.

Although the two theories have certain similarities, they also differ in at least two important aspects: theory focus and motivational support. First, the SDT focuses on the internalization of an activity as well as the energization of behavior by postulating the three psychological needs. In other words, the theory makes a distinction between intrinsic and extrinsic motivations depending on how internalized or controlled the activity is. In contrast, an important aspect of the L2 motivational self system, as Dörnyei (2009) emphasizes, is the image component that L2 learners envision. The model focuses on the future self-state, which is suggested to give L2 learners motivational power for L2 learning that they are engaged in now.

Second, it is argued in the SDT that satisfying the three fundamental psychological needs nurtures intrinsic motivation and promotes internalization, but in the L2 motivational self system, instrumentality promotion and attitudes toward the L2 community and culture have typically been argued to lead to ideal L2 self (e.g., Taguchi et al., 2009). Thus, depending on the theories, teachers might approach students from different perspectives to better motivate them.

### **A Closer Look at Questionnaire Items**

In this study, I will discuss typical questionnaire items that are repeatedly utilized in past studies. For the SDT, items from Noels et al. (2000) and Hiromori (2006) are presented in Table 1. Noels et al. (2000) helped to pioneer the application of the SDT in L2 learning. Also, questionnaire items in Hiromori (2006) are “by far the most widely used in the Japanese L2 motivation studies based on SDT” (Agawa & Takeuchi, 2016, p. 81). The L2 motivational self system items in the chapters of Dörnyei & Ushioda (2009), particularly those in Ryan (2009) and Taguchi et al. (2009), and also Teimouri (2017), are shown in Table 1. The items in Taguchi et al. (2009) are also listed under “sample measurement instruments” in Dörnyei & Ushioda (2011).

When we take a close look at the theories’ questionnaire items, at least two points are worth mentioning. First, both intrinsic motivation and L2 learning experience focus on the here-and-now experience of learning English, whereas both extrinsic motivation and ideal L2 self and ought-to L2 self are concerned with the consequences of studying/not studying the target language. This agrees with the original theorization that for intrinsic motivation, the purpose of

the activity lies within the activity, which might clarify the confusion regarding the construct.

Second, items measuring introjected and external regulations have not been clear as to their promotion or prevention focus. For example, some items listed in Table 1 seem to have a promotion focus, as in many other studies (e.g., Nishida, 2013). At first sight, external regulation in particular might not clearly show whether it is promotion/prevention focused because it is related to tangible rewards such as L2 certificates. However, as described above, introjected and external regulations are not related to advancement, growth, or development, which are the features of promotion-focused activities. Instead, learners with introjected or external regulation try to avoid the negative consequences of losing something, feeling that they would not engage in the activity as soon as they are sure that they would not have such consequences (features of prevention-focused activities). Past studies have not always been clear as to the perceived locus of causality when constructing questionnaire items, and this discrepancy might be one of the reasons for the low Cronbach alpha coefficients in past studies (e.g., Konno, 2011; Noels et al., 2000, see above).

Table 1  
*Typical Questionnaire Items Measuring Constructs in the Self-Determination Theory  
and the L2 Motivational Self System*

Construct	Example Questionnaire Items	Source
Intrinsic Motivation	<i>Why are you studying French?</i> -For the pleasure that I experience in knowing more about the literature of the second language group. -For the pleasure I get from hearing the second language spoken by native second-language speakers.	Noels et al. (2000)
	－英語は勉強するのは楽しいから。 (Because studying English is fun.) －英語の勉強は興味をそそるから。 (Because studying English is interesting.) －英語の授業が楽しいから。 (Because I enjoy English classes.) －英語の知識が増えるのは楽しいから。 (Because I enjoy having more knowledge about English.) －英語を勉強して新しい発見があると嬉しいから。 (Because I get the satisfied feeling when I find out new things when studying English.)	Hiromori (2006)
Identified Regulation	<i>Why are you studying French?</i> -Because I choose to be the kind of person who can speak more than one language. -Because I think it is good for my personal development.	Noels et al. (2000)

	<p>－将来使えるような英語の技能を身につけたいから。 (Because I would like to gain skills in English that I could use in the future.)</p> <p>－自分にとって必要なことだから。 (Because it is necessary for me.)</p> <p>－英語を身につけることは重要だと思うから。 (Because I think acquiring English is important.)</p> <p>－外国語を少なくともひとつは話せるようになりたいから。 (Because I want to be able to speak at least one foreign language.)</p> <p>－自分の成長にとって役立つと思うから。 (Because I think it is good for my personal development.)</p>	Hiromori (2006)
Introjected Regulation	<p><i>Why are you studying French?</i></p> <p>-Because I would feel ashamed if I couldn't speak to my friends from the second-language community in their native tongue.</p> <p>-Because I would feel guilty if I didn't know a second language.</p>	Noels et al. (2000)
	<p>－教師に自分はよい生徒だと思われたいから。 (Because I want my teacher to think that I am a good student.)</p> <p>－英語を勉強しておかないと、あとで後悔すると思うから。 (Because I think I would regret it if I didn't study English later on.)</p> <p>－英語で会話ができると、何となく格好がよいから。 (Because I would somehow feel cool if I could converse in English.)</p> <p>－英語を勉強しなければ、気まずいと思うから。 (Because I think I would feel guilty if I didn't study English.)</p> <p>－英語くらいできるのは、普通だと思うから。 (Because I think it is normal to be able to speak English.)</p>	Hiromori (2006)
External Regulation	<p><i>Why are you studying French?</i></p> <p>-In order to get a more prestigious job later on.</p> <p>-In order to have a better salary later on.</p>	Noels et al. (2000)
	<p>－よい成績を取りたいと思うから。 (Because I want to get a good grade.)</p> <p>－英語を勉強するのは、決まりのようなものだから。 (Because studying English is the rule.)</p> <p>－周りの大人にうるさく言われるから。</p>	Hiromori (2006)



	(Because adults around me tell me to.) - 英検などの資格を取りたいから。 (Because I would like to obtain certificates such as <i>Eiken</i> .) - 英語を勉強しなければならない社会だから。 (Because it is a society in which I have to study English.)	
L2 Learning Experience (Referred to as Attitudes to Learning English)	-I find learning English really interesting. -I always look forward to English classes. -I really enjoy learning English.	Ryan (2009); Taguchi et al. (2009)
Ideal L2 Self	-I can imagine (myself) speaking English with international friends (or colleagues). -Whenever I think of my future career, I imagine myself using/being able to use English. -The things I want to do in the future require me to use/speak English.	Ryan (2009); Taguchi et al. (2009)
Ought-to L2 Self	-I study English because close friends of mine think it is important. -It will have a negative impact on my life if I don't learn English.	Taguchi et al. (2009)
Ought-to L2 Self/Own	-I must learn English to avoid problems or difficulties that I may face in the future for not knowing English. -I must learn English; otherwise I will encounter difficulties in my education (school or university) for not having knowledge of English. -I must learn English; otherwise I will have difficulties finding a job in the future. -I must learn English; otherwise I will be considered as an illiterate in the society.	Teimouri (2017)
Ought-to L2 Self/Others	-I must learn English; otherwise people around me will have a negative image of me. -I must learn English; otherwise I will be reprimanded by my parents or teachers. -I must learn English; otherwise my parents/friends will be disappointed in me. -I must learn English; otherwise the others will think of me as a weak student.	

Note. Original items in Hiromori (2006) are in Japanese. Translations in English are by the author.

### **Discrepancies to Be Explored and Resolved**

Given the discussion above, future research might merit from further investigation into the theoretical backgrounds and discrepancies of the two theories. First, as stated above, researchers need to explore the natures of introjected and external regulations, and they should clarify questionnaire items intended to measure them. For example, items measuring external regulation should clearly target non-internalized, controlled activities, in which respondents try to avoid negative consequences. Items might be revised: e.g., “I study language A so that I will not fail a course” or “I would not study language A if it were not a required course.” Likewise, items intended to measure introjected regulation should focus on internal coercion, and they are also prevention-focused. Thus, revised items can be, for example, “I study language A so that I will not feel anxious.”

Second, some items intended to measure ideal L2 self can also be revised. As discussed above, ideal L2 self is promotion-focused instrumentality and is concerned with advancement, growth, and development. As such, items can be revised to reflect this nature. For example, revised items can be “If I put enough effort into studying English, I will use English effectively in the future” (instead of “If my dreams come true”), so that it emphasizes personal growth.

Lastly, the relationships between constructs in the SDT and those in the L2 motivational self system should be thoroughly investigated. Although in past studies researchers have partially examined the relationships between the constructs in the two theories (e.g., Konno, 2011; Nishida, 2013), more thorough examinations are necessary.

### **Conclusion**

This review was an attempt to compare the often utilized self-determination theory and L2 motivational self system, and to discuss some of the theoretical and methodological issues that need to be resolved. Given their strengths, the two theories are likely to continue being widely utilized. By further contrasting and investigating the relationships between the two theories, each might be more developed, both theoretically and methodologically.

## References

- Agawa, T., & Takeuchi, O. (2016). Re-examination of psychological needs and L2 motivation of Japanese EFL learners: An interview study. *Asian EFL Journal Professional Teaching Articles*, 89, 74–98.
- Csizér, K., & Lukács, G. (2010). The comparative analysis of motivation, attitudes and selves: The case of English and German in Hungary. *System*, 38, 1–13.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York: Plenum.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (Eds.) (2002). *Handbook of self-determination research*. Rochester, NY: Rochester University.
- Deci, E. L., Vallerand, R. J., Pelletier, L. G., & Ryan, R. M. (1991). Motivation and education: The self-determination perspective. *Educational Psychologist*, 26(3 & 4), 325–346.
- Dörnyei, Z. (2009). The L2 motivational self system. In Z. Dörnyei & E. Ushioda (Eds.), *Motivation, language identity and the L2 self* (pp. 9–42). Clevedon, England: Multilingual Matters.
- Dörnyei, Z., & Ushioda, E. (2011). *Teaching and researching motivation* (2nd ed.). Harlow, UK: Longman.
- Higgins, E. T. (1987). Self-discrepancy: A theory relating self and affect. *Psychological Review*, 94, 319–340.
- Higgins, E. T. (1998). Promotion and prevention: Regulatory focus as a motivational principle. In M. P. Zanna (Ed.), *Advances in experimental social psychology* (Vol. 30), pp.1–46. New York: Academic Press.
- Hiromori, T. (2006). 外国語学習者の動機づけを高める理論と実践 [Theory and practice to improve foreign language learners]. Tokyo: Taga.
- Konno, K. (2011). The relationship between L2 selves, intrinsic/extrinsic motivation and motivated behavior of Japanese EFL learners. *ARELE*, 22, 345–360.
- Kormos J., Kiddle, T., & Csizér, K. (2011). Systems of goals, attitudes, and self-related beliefs in second-language-learning motivation. *Applied Linguistics*, 32(5), 495–516.
- Lamb, M. (2012). A self system perspective on young adolescents' motivation to learn English in urban and rural settings. *Language Learning*, 62(4), 997–1023.
- Markus, H. R., & Nurius, P. (1986). Possible selves. *American Psychologist*, 41, 954–969.
- Meyer, J. P., Becker, T. E., & Vandenberghe, C. (2004). Employee commitment and motivation: A conceptual analysis and integrative model. *Journal of Applied Psychology*, 89(6), 991–1007.
- Nishida, R. (2013). The L2 ideal self, intrinsic/extrinsic motivation, international posture, willingness to communicate and can-do among Japanese university learners of English. *Language Education & Technology*, 50, 47–63.
- Noels, K. A., Pelletier, L. G., Clément, R., & Vallerand, R. J. (2000). Why are you learning a second language? Motivational orientations and self-determination theory. *Language Learning*, 50(1), 57–85.
- Pae, T. (2008). Second language orientation and self-determination theory: A structural analysis of the factors affecting second language achievement. *Journal of Language and Social Psychology*, 27(1), 5–27.
- Papi, M., & Teimouri, Y. (2012). Dynamics of selves and motivation: A cross-sectional study in the EFL context of Iran. *International Journal of Applied Linguistics*, 22, 287–309.
- Ryan, S. (2009). Self and identity in L2 motivation in Japan: The ideal L2 self and Japanese learners of English. In Z. Dörnyei & E. Ushioda (Eds.), *Motivation, language identity and the L2 self* (pp. 120–143). Clevedon, England: Multilingual Matters.
- Shaikholsami, R., & Khayyer, M. (2006). Intrinsic motivation, extrinsic motivation, and learning English as a foreign language. *Psychological Reports*, 99(3), 813–818.
- Taguchi, T., Magid, M., & Papi, M. (2009). The L2 motivational self system among Japanese, Chinese, and Iranian learners of English: A comparative study. In Z. Dörnyei & E. Ushioda (Eds.), *Motivation, language identity and the L2 self* (pp. 43–65). Clevedon, England: Multilingual Matters.

- Teimouri, Y. (2017). L2 selves, emotions, and motivated behaviors. *Studies in Second Language Acquisition*, 39(4), 681–709.
- Thompson, A. S., & Vásquez, C. (2015). Exploring motivational profiles through language learning narratives. *The Modern Language Journal*, 99(1), 158–174.
- Vallerand, R. J., & Bissonnette, R. (1992). Intrinsic, extrinsic, and amotivational styles as predictors of behavior: A prospective study. *Journal of Personality*, 60(3), 599–620.
- Vallerand, R., Fortier, M. S., & Guay, F. (1997). Self-determination and persistence in a real-life setting: toward a motivational model of high school dropout. *Journal of Personality and Social Psychology*, 72(5), 1161–1176.
- You, C., & Dörnyei, Z. (2016). Language learning motivation in China: Results of a large-scale stratified survey. *Applied Linguistics*, 37(4), 495–519.

# 変動地形学における地形調査手法

石 黒 聡 士

## 1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分、淡路島北部を震源とするマグニチュード7.3の直下型地震が発生した。兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）である。死者・行方不明者は6,437人におよび、極めて甚大な人的・物的被害が生じた。この地震の原因について、活断層の活動によるものであることが明らかにされると、活断層は社会に対して甚大な被害を与えうる危険な存在として、一般的に認識されるようになった。

地震に対する防災を考える上で、活断層が引き起こす地震の性質を理解することが必要不可欠である。変動地形学はこの点について、主に地形の観察などに基づいて、活断層の本質に迫ろうと努力を続けている。この中で、活断層の活動の結果生じる地形の変位、すなわち、地震時の変位量や、変位が累積した結果である活断層地形を注意深く観察し、あるいは正確に計測することが求められてきた。本稿は、これまで変動地形学において試行錯誤が繰り返されてきた地形判読および地形計測について、その経緯を整理するとともに、今後の新技術による新たな展開について展望する。

## 2. 変動地形学における地形計測の重要性

### 2-1. 活断層変位地形と地表地震断層

地形学において、「断層がある」とは本来、「そこで地層が断ち切れており、異なる年代に形成された地層同士が接している」ということを指す。そうなった要因はいくつも考えられるが、変動地形学において「断層」といえば、その場所が押されたり引っ張られたりして地層面に破断が生じた状態をいう。破壊は通常、数千年間の間隔において間欠的に起こり、その際に大きな震動を生じる。断層のうち、過去数十万年間に活動したことがある断層を「活断層」として区別している。過去数十万年間は、現在と概ね同じ力がかかっていることがわかっている。したがって、活断層とはすなわち、現在と同じ力のかかり具合が継続する限り、今後も再び活動する可能性が高い

断層を指す。

活断層が活動すると何が起こるか。地震動を発生させ、建物や橋などの人工構造物を大きく揺さぶり破壊することは容易に想像できる。では、被害の原因は揺れだけであろうか。実は、地震の規模が比較的大きく、震源が浅いと、地下の断層面が地上に到達し、地表面を食い違いさせる（変位させる）ことがある。これが「地表地震断層」である。地震動（揺れ）以外に、地盤の食い違いによる建物の破壊や、水道管などの埋設インフラの破壊が生じる。そして、この直接的な被害は、いかに堅牢な構造物であろうと、その基礎が食い違うことから、無傷ではいられない。

地盤の食い違い方は大きく3種類あり（図1）、日本におけるほとんどの活断層は逆断層型ないし横ずれ断層型、あるいはそれらの両方の性質を持っているものである。概ねマグニチュードが7に近くような地震の場合に、地表地震断層が現れ始めることが多いようである。変動地形学者は、全国（全世界）の活断層型の地震について、マグニチュードが7に近い比較的大きな地震発生の報に接すると、地表地震断層の出現を予見し、現地調査の実施に向けた準備と情報交換を始める。

これらの活断層の活動によって生じた地表の変位は、時間とともに逆方向に戻ることはなく、累積する。その累積した地形のことを「活断層変位地形」といったり、単に「活断層地形」といったりする。どこに活断層があるのかを判定するのは、この活断層変位地形を認定するのとはほぼ同義である。すなわち、活断層の存否は、地形から判断されるのである。ただし、長年の風化・侵食・堆積作用によって、累積した地形が不明瞭になったり、埋没していたりして発見できない場合もある。

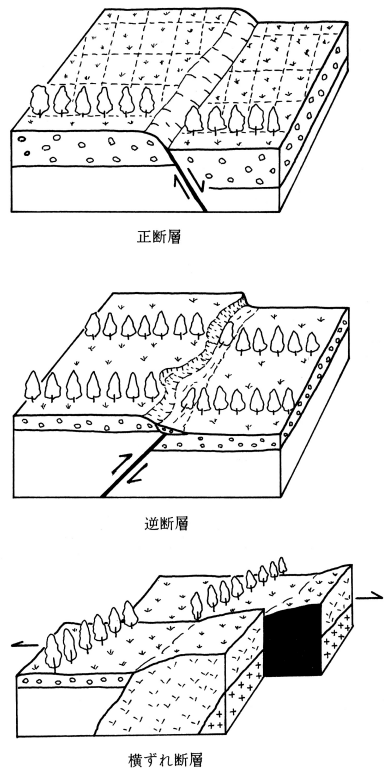


図1 活断層の3種類（松田 1995の図15）

活断層地形の認定は、伝統的には航空写真の実体視判読と現地踏査によって行われてきた。航空写真を実体視することにより、地形をあたかも空中から覗き込んでいるかのようにして観察できる。活断層による地盤の変動がなければ説明がつかない崖や河川の系統的な屈曲により、活断層の存在を推定する。航空写真を利用するのには、ほかにも利点がある。日本国内においては、終戦前後から、少なくとも終戦直後に米軍によって全国をくまなく撮影されている。このような古い航空写真を使用することにより、人工改変や都市の拡大によって現在では元の地形が不明瞭な場所においても、地形の判読が可能となる。活断層地形が認定されると、その断層がどのような性質を持つ断層であるのかを調査する。具体的には、どこまでが活断層地形として認定できるか（活断層の長さ）、どこでどれだけ、どちら向きの変位量が確認できるか（変位量分布）、最新の活動時期はいつか、活動の間隔はおよそ何年か、といった項目である。このうち、活断層の長さからは、その活断層が引き起こす地震の規模を、変位量分布からは地下における断層のずれ方をそれぞれ推定できる。すなわち、変動地形学における地形計測は、主に変位量分布の把握のために行われる。さらに現地における調査でピット（穴）やトレンチ（溝）を掘って、直接断層の面（壁面においては線状に現れる）を確認したり、地形面の形成年代を知るために、放射性炭素年代測定のための植物遺骸（炭化した植物）を採取したりする。これにより、その断層が過去のいつ活動したかを推定できる。

ところで、活断層に関するこれまでの変動地形学的な観察と分析から、活断層には個性があることが示唆されている。ある活断層が、一度の活動で生じさせる変位量、活動間隔、変位の方向のそれぞれは、活断層ごとあるいは活動区間ごとに決まっているように見えるのである。これを「固有地震モデル」といい、1970年代に提唱された（松田1975、Schwarz and Coppersmith, 1984）。しかし近年、活断層の活動事例が増え、より正確かつ緻密な観測が行われるようになると、固有地震モデルに加えて、一度に活動する活動区間が必ずしもいつも同じとは限らない性質が指摘されるようになってきた。2014年11月22日の「長野県北部の地震」（マグニチュード6.7）は、全長約9 km 地表地震断層を出現させたが、それまで想定されていた地震よりも“ひとまわり小さな”地震であった。このことは、固有地震モデル以外のメカニズムが働いていることを示唆しているとともに、従来一気に活動すると考えられてきた区間の一部が“割れ残った”ことにより、地盤にかかる力のバランスが崩れ、近い将来、割れ残りの区間が活動するのではないかという観測もあった。なお、2018年5月12日に、まさに割れ残りの部分に近い領域でマグニチュード5.2、最大震度5弱の地震が発生した。

また、中田・後藤（1998）によれば、活断層は割れはじめの地点から断層の末端に向かって両側にプロパゲーションし、末端では竹箒の先端のごとく分岐するなどし

て、変位量も小さくなり、やがて変位がなくなるという。そして、断層の末端付近では伝播してきた割れの進行がそこで止まる衝撃により、建物被害が集中する可能性を指摘している。

これらの仮説が正しいか否かを判断するためには、特に活断層の活動時に、どこで、どれだけの変位が、どちらの方向に生じたか、さらに、累積している断層地形との関係をつぶさに計測して把握する必要がある。以上のように、活断層の活動について詳細を把握するためには、地表に現れた変位地形を広範囲にわたって精密に計測することが重要である。では、活断層地形および地表地震断層の計測はどのように計測されるのだろうか。次節では地形測量の手法と種類を大観する。

## 2-2. 現地測量とリモートセンシング

活断層地形は、定性的には大縮尺の地形図の判読や、航空写真の実体視判読、現地における地形観察によって認定できる。しかし、どこでどのくらいの（累積）変位量があるかといった定量的な解析をするためには、地形を測量しなければならない。地形測量は、現地において測量機器を駆使して計測する現地測量と、航空写真や衛星画像を用いてコンピュータ上で行う写真測量に大別できる。後者は、遠隔で解析するという意味で、「リモートセンシング」とよばれる。

近年、無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle; UAV）が爆発的に普及した。ほぼ時期を同じくして、対象物を複数の視点から写真撮影した画像を用いて立体モデルを作成する画像解析技術 SfM-MVS（Structure from Motion – Multi-View-Stereo）も急速に普及した。SfM-MVS ソフトウェアは、画像処理に関するオープンソースプログラムを組み合わせるパッケージ化したもので、極めて高精度に立体モデルを作成できることが確認されている。UAV による空撮画像と SfM-MVS を組み合わせた地形計測は、「現地においてリモートセンシングを行う」という、地形測量に対する新しいアプローチを可能にした。

こうした技術的革新を背景に、近年の変動地形学的研究における地形計測は劇的に変わろうとしている。次章以降では、変動地形学におけるこれまでの地形計測について、その技術的な変遷を整理する。



### 3. 現地における測量（現地測量）

#### 3-1. 水準測量による地形断面図作成

変位量分布図を作成するには、活断層沿いのできるだけ多くの、変動地形学的に興味のある場所において、変位量を計測する必要がある。最も直接的な変位量の計測手法は、現地における水準測量による地形断面図の作成である。まず測量者は、航空写真と大縮尺の地形図（縮尺が2,500分の1程度の都市計画図等）で活断層の位置を確認し、地形発達の過程で同一時期に形成されたと判断される地形面上において、活断層を横切るように測線を決める。次に、オートレベルと箱尺を用いて、測点（箱尺をおいた地点）における比高を計測する。視準する距離にもよるが、通常は1mm単位の見盛りを読む。地形断面を再現する上で、測点は多い方が有利であるが、特に断層近傍の傾斜が大きく変わる場所において密に計測する必要がある。測点は大縮尺の地形図上に正しく記載しなくてはならない。また測線は、活断層によって変位した直近の地形だけではなく、元々の地形面の傾斜や連続性がわかる程度に長くなくてはならない。測線は直線的に設定できる方が良いが、地形面の連続性などの制約により、曲線にならざるを得ない場合も多い。このような場合は、曲線上の比高を計測したのち、概ね活断層に直行する鉛直面に投影することにより、地形断面として変位量を計測できる。

オートレベルと箱尺を用いた地形断面測量は、側線が長くなればなるほど、計測する測線数が多くなればなるほど、測量にかかる時間と労力が増え、負担が大きくなる。また、荒天時や薄暮などには測量ミスが生じやすくなるため、避けるべきであり、測量の可否自体が環境に左右される。さらに厳密には、オートレベルによる数字の読み取り錯誤やそのほかの人為的ミスの防止のため、同一測点の往復（または1往復半の3回）の計測が理想であるが、その場合の負担は単純に $n$ 倍となり、現実的でない。いずれにしても、長大な活断層地形を広域に解析・検討する場合は、現地水準測量では限界がある。なお、オートレベルはホームセンター等で数万円から、箱尺は数千円で購入できる。

#### 3-2. レーザー測距儀による地形測量

水準測量では線的な地形断面を描くことができるが、面的な地形の変位を捉えることができない。このことは、主に横ずれ断層の変位量計測において問題となる。すなわち、横ずれ断層の活動による水平方向の変位量計測には用いない。横ずれ断層の活動による河川の屈曲や、河岸段丘のずれ等の計測のためには、面的な地形測量が必要となる。

多くの測点を面的に配置して3次元座標を決定できるのがレーザー測距儀（トータルステーション）である。これは、測距儀本体からレーザーをプリズムと呼ばれる反射鏡に向けて照射することにより、その角度（水平角と仰角）および距離を計測するもので、数mmの精度で3次元座標を計測できる。任意の地点を測点とすることができ、計測すべき地形を重点的に計測できる。計測データは本体に搭載されたメモリーに記録されるため、数字の転記ミスなどの人為的なエラーも軽減できる。また、測点の配置を工夫すれば、水準測量と同じように地形断面を描くことも可能であるし、測距儀からの距離も計測されるため、大縮尺の地形図への測点の記録よりも高精度な地形断面図の作成が期待できる。さらに、十分多くの測点を計測することにより、測点間を補完して面的に表現・解析することが可能となる。

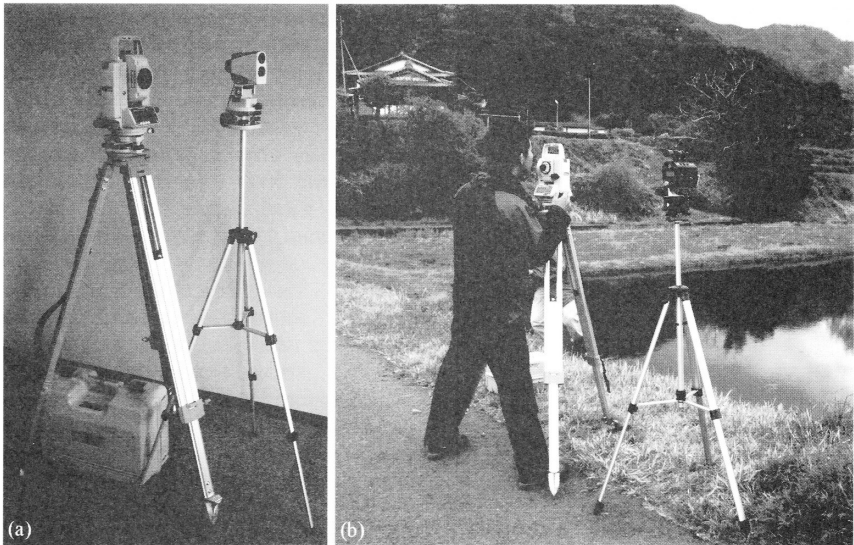


図2 (a) Handy Station (右) とトータルステーション (左)  
 (b) Handy Stationによる地形計測の様子。手前がHandy Station  
 (杉戸ほか2007の第1図)

ただし、機器が高額で気軽さに欠ける。トータルステーションの主流は数百万円の価格帯である。一方、測量用ではないレーザー測距儀もあり、主にゴルフなどのレジャー用に製品化されている。これを変動地形計測に利用できるように改造・開発した事例（図2）があり、変動地形学的な解析に十分な精度で地形計測が可能であることが示された（杉戸ほか2007）。この場合の費用は10万円～40万円程度であり、操作者の精神的負担の軽減に貢献できることが期待される。

### 3-3. 地上レーザーによる精密地形計測

トータルステーションによる計測は、計測したい測点にプリズムを設置、計測、次の測点に移動、計測という作業を繰り返す。任意の地点の3次元座標を計測できる利点はあるが、測点の配置や、測距儀を覗いてプリズムを正しく視準する作業のために、一点一点の計測には時間を要する。これに対し、地上レーザーによる全方位の測量は、測点の設定という考え方ではなく、現場に三脚で据えた本体の上部が、360度回転しながら連続的にレーザーを照射し、結果的に放射状の多数の3次元座標（点群）を得る。さらに、レーザー照射と同時に本体上部に据えられた光学カメラが写真を撮影し、その画像を用いて点群の一点一点に色情報を付加できる。機器を据えた地点から見れば、隙間なく3次元の地形を得ることができ一方、機器から見て障害物の奥の地形は計測できない。また原理上、点群は放射状となるため、機器から離れるほど点の密度が疎になる。これを避けるため、通常は複数の地点に機器を据えて、複数回の計測結果を合成する。いずれにしても、計測したい地形が空白とならないように、機器を据える場所を慎重に選ぶ必要がある。なお、トータルステーションと同様に地上レーザーの機器も高額で、数百万円の価格帯である。

### 3-4. 現地測量の限界

これまで示してきたとおり、現地における測量は最も直接的で高精度な計測が可能である一方で、測量作業に多大な労力を必要としたり、場合によっては高額な機器を導入しなくてはならないという欠点がある。トータルステーションによって一度に計測できる範囲は、最大でも百メートル四方程度であり、その範囲を計測するのに最低でも2時間程度は要する。移動等に要する時間も考慮すれば、1日で計測できるのはたかだか2～3セット分のせいぜい数百メートル四方である。水準測量については、測線長100m程度を測量するのに1時間弱を要する。

これに対し、活断層地形は一般的に数kmを超える範囲に帯状に分布するため、活断層の端から端までを全て現地踏査するのは多くの時間と人的負担が必要となる。10kmを超える長さに分布する活断層地形であれば、全てを現地測量によって計測することは事実上困難である。

また、現地で調査できる地形は、基本的には「現状の地形」であり、人工改変が行われていると、元々の変位地形を計測することはできないため、正確な変位量の計測が不可能である場合も多い。地形調査において踏査は基本であるし、踏査しなければ得られないものや情報（例えば年代測定のための植物遺骸や、変位を受けた地形の写真など）があるのは当然であるが、踏査のみによっては得られない情報があることも確かである。

## 4. リモートセンシング

### 4-1. 航空写真測量

写真測量の原理的な説明を詳細に始めると、それだけで1冊の本になるほど複雑であるので、本稿では割愛するが、基本的には人間が実体視して感じる地表の凹凸を、機械的あるいは解析的に計測し、2.5次元に表現すると考えて良い。ステレオ撮影された航空写真に写っている地物（人工構造物や道路白線など）を地上基準点（Ground Control Point(s); GCP）とし、GCPの地球上における緯度、経度、標高の3次元座標を付与する（対地標定という）ことにより、正確な縮尺で地形をモデル化することが可能である。コンピュータによる計算によって地形の計測を行う解析図化機を用いた航空写真測量の操作者（オペレーター）は、偏光メガネをかけ、特殊なシャッターのついた画面を見つめることで、実体視をしている場合と同様の凹凸を画面に感じる。画面の中央に「浮標」と呼ばれる「+」や「×」のマーク（かつての図化機では黒い点であった）があり、これをZ盤と呼ばれるダイヤル（かつての図化機では足で操作した）を回すことによって上下（浮かせたり、沈めたり）させる。実際は、浮標は画面中央に固定されており、浮標の浮沈、移動は背景の写真画像を動かすことによって実現する。

地形図の作成は基本的にはこの写真測量が用いられている。写真の撮影高度や使用するレンズの焦点距離にもよるが、一般的な縮尺4万分の1の航空写真を用いた場合、ベテランのオペレーターが計測すれば、概ね20cmの誤差で比高を計測することができるとされる。対地標定の段階で必要となるGCPの座標は、GNSS測位などの現地測量によって得ることが理想であるが、大縮尺の地形図上から取得する場合もある。ただし、その場合のGCPには、地形図に含

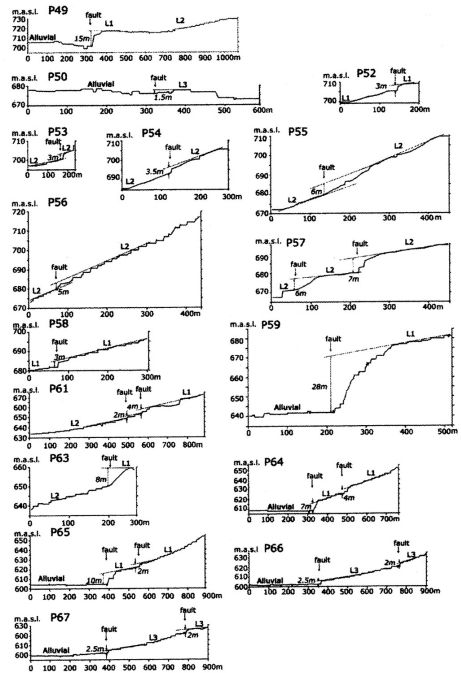


図3 写真測量を用いた地形断面の計測事例  
(澤ほか 2006の第6図の一部)

まれる誤差も継承することに注意する必要がある。

航空写真測量の変動地形学への応用は2000年代の初頭である（鈴木ほか、2002）。航空写真測量は地形図の作成のために行われるので、等高線を描くために、原則として浮標の標高を固定して地面から離れないように背景の写真を移動させる。ここに発想の転換が行われた。すなわち、浮標を上下させれば、地形の断面が計測できるのである。航空写真測量を変動地形学に応用することは、二つの点において極めて有効な手法である。一つは、写真が撮影された時点の過去に遡って地形を計測できることである。現地測量では原則的に現在の地形しか計測できないが、写真測量であればその制約がなくなる。このことは、人工改変が激しい都市の郊外で特に有効である。二つ目は解析可能な空間の広がり、地形断面の測線密度の向上である。つまり、広範囲を高密度に計測可能となった。糸魚川－静岡構造線断層帯の北部で実施された活断層調査では、航空写真測量が積極的に導入され、総延長60kmの調査域全域で、84測線の地形断面を計測し、その空間的密度は700mに1測線の割合であった（澤ほか、2006）。現地水準測量では到底実現できる距離・計測密度ではない（図3）。

#### 4-2. 航空レーザー測量

航空写真測量の変動地形学的研究への導入により、広範囲かつ高密度な地形断面計測が可能となった。ただし、航空写真測量であっても、万能ではない。すなわち、植生が繁茂する山地における断面計測は問題がある。写真測量は写真に写らないものは計測できないため、植生によって地表が覆い隠されている場所について、正確な「地形」断面を計測することができない。

航空レーザー測量は、航空機に搭載した機器からレーザーを地表に照射して、地表からの反射波を観測し、それにかかった時間から航空機と地表との距離を計算する。航空機は高精度なGNSSを搭載しており、レーザー照射をした空中の地点の3次元座標が得られるため、結果として地表の形状を計測することができる。データは波長と時間から計算される物理量であり、3次元の点群によって得られる。レーザー照射機器の機種にもよるが、飛行高度を低くしたり、照射角を狭めたりすることで、より密な地形計測が可能であり、必要な解像度に合わせた観測も可能である。

また、レーザーは、「木漏れ日が地表に届く」程度の植生であれば、地表に届くため、植生に覆われた場所であっても、場合によってはレーザーが地表に到達し、地形の計測が可能となる。このため、山間部における地形調査では、この他の方法では実現し得ない強力なツールとなり得る。さらに近年は、照射するレーザーの波長を短波長（緑色）にしたり、解析手法を改良するなどして、水中の地形もレーザー測量で計測できるようになった。計測できるのは、水の透明度や水底面の色に左右されるが、



レーザーの届く水深（水底からの反射も含め、水深の2倍が必要である）に限られるため、概ね水深30m程度までとされる。

航空レーザー測量は前述の通り、物理量であり、極めて強力な地形計測ツールであるが、過去の地形を計測できないという不可避の欠点がある。また、専用の機器を使用し、撮影計画、耐空証明の取得、観測、データ解析など多くの行程が必要となり、実施可能な航測会社も限られるため、時間と費用がかかる。結果として、単位面積あたりのデータの価格が高額になることも短所といって良いだろう。

### 4-3. 衛星からのデータの利用

#### (1) 高解像度衛星画像による地形解析

現在では、インターネット上においてフリーで使える地図の多くは、車1台が識別できる程度の解像度の衛星画像に表示を切り替えることができる。また、時事ニュースにおいても頻繁に衛星画像が登場する。このため、衛星画像の実力は周知のものとなりつつある。変動地形学においても、衛星画像はその実力を発揮している。

活断層地形の解析をするためには、数m程度の比高を観測できなくてはならない。これに対し、初期の衛星画像は、解像度が圧倒的に不足していた。現在でも様々な分野で活躍している米国のLANDSATは、1号機が1972年に打ち上げられ、その後も打ち上げを重ねて現在は8号（2013年打ち上げ）を運用中である。4、5号機（1982年および1984年打ち上げ）からの解像度は、従前の80mから30mに改善したが、依然として活断層地形の解析には不足している。

活断層地形に適用できるようになってきたのは、米国のIKONOS（1999～2015年、解像度1m）や、同じく米国のQuickBird（2001～2014年、解像度約60cm）などの商用衛星が登場してからである。衛星画像は、条件さえ整えば、世界中の地表を数日以内に撮影することができる上に、一度に得られる範囲は数十～数百km四方と航空写真をはるかに凌駕する。また、同一場所を違った角度（軌道）から撮影すれば、ステレオ計測が可能であり、地形計測が可能である。日本のALOS/PRISM（2006～2011年、解像度2.5m）は、当初からステレオ計測が可能のように設計されており、鉛直下向きのセンサーに加え、斜め前と斜め後ろを向いたセンサーも搭載され、同時に3方向の観測ができるように設計されていた。残念ながらALOS/PRISMは2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の約1ヶ月後、機械故障のため運用を停止した。筆者はその一報を、まさに被災地における調査中に接し、ひどく落胆したことを覚えている。ただし、その時点で設計寿命（3～5年）に達しており、それまでに世界中を3方向視で撮影していた。その数は650万シーンに及び、ステレオ計測の結果は、30mメッシュの地表表層モデル（Digital Surface Model; DSM）「全球高精度デジタル3D

地図」として一般に公開されている。活断層地形の解析のためには30m解像度は十分でないが、元々の撮影画像は2.5m解像度であるため、実体視判読によって解析できる可能性がある。ただし、ALOS/PRISM は航空写真と同様に光学センサーの撮影画像であるために、地表が植生や人工構造物、雲で覆われている場合は、地形解析に限界がある。また、夜間の撮影はできない。コストの面では、一般に高解像度衛星画像は高額であるために、導入のハードルが高いことも事実である。

## (2) 合成開口レーダーによる干渉縞解析

光学センサーによる衛星画像が雲のある地域や夜間の観測ができないのに対し、合成開口レーダーは人工衛星から照射されたレーダーの反射を捉えるため、夜間や雲に覆われた地域の撮影が可能である。また、合成開口レーダーの一番の特徴は、2時期の撮影画像を用いて、その間の地殻変動を捉えることができることである。これを「干渉縞解析」と呼んでいる。原理上、地表が人工衛星に近づくまたは遠ざかる向きの変動しか捉えることができないが、近年は解析手法の向上により、地殻変動を3次元に分解することができるようになった。干渉縞は原理上、地表地震断層のような不連続な地表変位の量を計測することは不向きである一方で、広範囲にわたる数センチメートルの緩やかな変動を捉えることができる。地震前後におけるこのような解析ができる手法は他にはなく、ブロードな変形を定量的に解析できる唯一の手段である。現在では比較的大きな地震が発生すると、それまでに撮りためられている合成開口レーダーの画像と、地震後に撮影した画像とを用いた干渉縞解析の結果が、国土地理院の運用する「地理院地図」で公開されるようになっている。

合成開口レーダーは電波の反射を擬似的に可視化しているため、光学センサー（要するに写真）とは異なり、地物との対応がわかりづらいという問題がある。

## 5. 現地における「リモートセンシング」

### 5-1. UAVの爆発的普及がもたらしたインパクト

2012年ごろから UAV が急速に普及した。その背景には、強力なブラシレスモーターや、安定飛行に必須となる制御系の開発、さらに、大容量で強力なバッテリーの量産が進んだことがある。当初の UAV は訓練すれば安定的に飛行させることができたものの、かなりの頻度で墜落するものであった。しかし、多くの墜落に関するデータが集積することによって、その原因が分析され、さらなる技術開発に繋がった。その結果、現在では墜落や衝突を回避するための様々なセンサーを搭載した機種が販売されるようになり、墜落する頻度は格段に低くなった。

2015年4月、首相官邸の屋上に放射性物質を含む物体が搭載された UAV が落下しているのが発見された、いわゆる「官邸ドローン事件」が起きた。マスメディアによるセンセーショナルな報道が続き、UAV の負の面が強調されたために、UAV に対する世間の評価は非常に厳しくなり、UAV は犯罪に使われるもの、あるいは、危険な技術であるという認識が広まった。即座に航空法が改正され、国会議事堂、首相官邸、外国公館、原子力発電所等の重要施設の上空を飛行させることが禁止された。また、人口集中地区（Densely Inhabited District; DID）での飛行や、夜間の飛行等については、国土交通省に対して申請し、許可を得て飛行させることとなった。申請の際には、飛行させる機種や機体番号等を記載するとともに、操縦者には10時間以上の操縦経験が求められるようになった。

一方で UAV は、有人のヘリコプターでは実現できない低空からの映像や写真を撮影することができるため、その利用価値は極めて高い。UAV の普及当初は、主に考古学の分野でその有効性が認識され、遺跡を低空から撮影したり、歴史的建造物の近接写真が撮影された。その後、植生や地形の分野にも利用が拡大し、現在は雪氷や防災・防犯といった分野にまで広がっている。これらの多くの分野に広がった理由は、ただ空中からの、普段目にするのしない撮像を提供する目新しさだけでなく、次節で述べる SfM-MVS 技術により、撮像を用いた定量的な測量が可能になった点が極めて重要な役割を担ったことが指摘できる。

## 5-2. SfM-MVSソフトウェアの普及

UAV の普及と時期を同じくして、画像解析の技術も格段に向上した。SfM-MVS 技術は、対象物を複数の地点から撮影された写真を用いて、対象物の3次元モデルを作成する技術であり、理論的には航空写真測量と同じで古くから存在していた。ただし、複数の画像内において、同一の物（地点）であると判断するアルゴリズムが改良され、特徴点の探索が高精度かつ短時間で行えるようになったことに加え、計算機そのものの性能も向上したこと、さらに、画像解析に関係するオープンソースが充実してきたことなどの条件が揃ったことが、一気に普及した要因である。基本的には、多くの写真から写っている物体の画像上の位置や形状を判断し、撮影がどの地点から、どの方向を向いて行われたかを逆計算し、カメラの位置を推定し、これをもとに3次元モデルを作成する。したがって、カメラ位置が厳密に決定することが精度向上に寄与する。カメラ位置の推定は、GCP の3次元座標を頼りに行われる。

現在、複数の SfM-MVS ソフトウェアが開発、販売されているが、多くの研究者によって選択されているのは Agisoft 社（ロシア）の「Photo Scan」のシリーズである。公開されている説明及び仕様によれば、このソフトウェアは画像解析に関するオーブ



ンソースを組み合わせ、さらに独自の改良を加えて製品化したものである。このソフトを用いることによって、高精度の3次元モデルの作成が可能であることが報告されている。しかも、従来の航空写真測量では、その理論的な理解に基づく専門的な操作や調整を必要とし、一般には取り扱いが困難なことに加えて、ソフトウェア自体が数百万円と高額であったのに対し、SfM-MVS ソフトウェアは、操作上はそのような専門的な知識を必要とせず、対話形式の操作を順次行うことによって測量が可能であり、価格も教育機関向けであれば549米ドル（2018年5月現在）と破格である。

変動地形学においては、中田ほか（2014）によるフィリピン・ボホール地震断層の計測事例や、後藤（2015）によるボールカメラによる撮影と地形モデル作成の事例など、多くの事例がある。また、航空写真のデジタル画像を SfM-MVS ソフトウェアで解析することにより、およそ航空写真の解像度程度の地形計測が可能であることが示されている（Ishiguro et al., 2016）。

UAV による低空からの写真撮影と、SfM-MVS による地形計測の実現は、「現地におけるリモートセンシング」という、新しい調査概念を生み出した。これは、地表地震断層を伴う比較的規模の大きい地震について、その変位地形を即座に撮影し、面的に3次元計測可能であることを示している。2014年11月22日の「長野県北部の地震」では、地震発生の1週間後に空撮を行い、積雪によって地形計測が不能となる前に、変位量分布図作成のために必要な変位地形をデータ化した（石黒ほか、2016a）。また、2016年4月16日の「熊本地震」でも、発生直後に変位地形を撮影するとともに、その後の復旧作業によって消失した変位地形を記録した（石黒ほか、2016b）。これらの地形データは、いずれも解像度が数センチメートルであり、航空写真測量や航空レーザー測量では実現不可能である。

ただし、UAV による空撮写真を用いて数センチメートルの解像度の地形モデルを作成するためには、それに見合った GCP の計測が必要となる。すなわち、数ミリメートルから1センチメートル程度の誤差で、GCP の緯度、経度、標高を計測する必要がある。これを実現できるのは、RTK-GNSS 測量がほぼ唯一の方法であった。RTK-GNSS 測量は2台の GNSS 測量機器を用い、一つを座標の既知点（三角点や電子基準点など）に据え（固定局）、もう一方を GCP の地点において測位する（移動局）。その際に、固定局と移動局の間で、何らかの通信手段を用いて同期を図る事により、誤差をミリメートルのオーダーまで小さくすることが可能である。RTK-GNSS 測量に使用できる機器は、一般に高額であり、数百万円の価格帯である。

近年、「格安 RTK-GNSS」をうたう製品が市場に出回り始めた。格安 RTK-GNSS は驚くべき事に、数千円の半導体基盤と、数万円のアンテナを組み合わせる事により、経験上は1～2センチメートルの位置決定精度があるようである。現状では、リアル

タイムの位置決定ではなく、計測後の後処理によってのみセンチメートルオーダーの計測を実現できるが、将来的にリアルタイムの計測が可能になれば、UAV に搭載する事によって、GCP の計測をする事なく、シャッターが切れた瞬間のカメラ位置の決定ができる可能性がある。これまでの技術進歩の速度の傾向からして、このことは間もなく実現すると思われる。

## 6. おわりに

以上、本稿では、変動地形学における地形計測の重要性と、その計測手法について整理するとともに、最新の計測手法と課題について述べてきた。ひとたび活動すれば、社会に対して甚大な被害をもたらしうる活断層について、我々が解明できている部分はまだ一部であり、不明ことが多い。変動地形学は、活断層の活動について活断層地形および地震時の地表地震断層を注意深く観察し、計測する事によって、その性状の本質に迫ろうと努力が進められてきた。そのような中であって、地形計測技術の向上によって、従来は計測できなかったわずかな変位の分布や、広範にわたるブロードな変位を計測できるようになり、そのことが活断層の活動様式に関する新たな発見や重要な知見につながる可能性もある。今後の地形計測技術の進展を注視するとともに、変動地形学への積極的な応用が期待される。

## 引用文献

- Ishiguro, S., Yamano, H. and Oguma, H. 2016. Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging structure from motion–multi-view stereo technology. *Geomorphology* 268: 64–71.
- 石黒聡士・熊原康博・後藤秀昭・中田 高・松多信尚・杉戸信彦・廣内大助・渡辺満久・澤 祥・鈴木康弘 (2016a) 「UAVによる空撮とSfM-MVS解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度—2014年11月長野県北部の地震を例に—」. 日本リモートセンシング学会誌 36: 107–116.
- 石黒聡士・松多信尚・井上 公・中田 高・田中 圭・石山達也・箕田友和・竹竝大士・森木ひかる・廣内大助 (2016b) 「UAVを用いた平成28年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成」. 日本リモートセンシング学会誌 36: 214–217.
- 後藤秀昭 (2015) 「SfM (Structure from Motion) –MVS (Multi-Video Stereo) 技術を用いた変位地形の数値表層モデルの作成と変位量の計測—1970年代撮影の空中写真およびボールカメラの写真を用いた検討—」. 活断層研究42: 73–83.
- 澤 祥・田力正好・谷口 薫・廣内大助・松多信尚・安藤俊人・佐藤善輝・石黒聡士・内田主税・坂上寛之・隈元 崇・渡辺満久・鈴木康弘 (2006) 「糸魚川-静岡構造線断層帯北部, 大町~松本北部間の変動地形認定と鉛直平均変位速度解明」. 活断層研究26: 121–136.
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Example from the Wasatch and San Andreas fault zones. *Journal of Geophysical Research* 89: 5681–5698.
- 杉戸信彦・中田 高・隈元 崇・渡辺満久・堤 浩之・石黒聡士・近藤久雄・鈴木康弘 (2007) 「携帯型地形計測装置「Handy station」の開発と活断層地形調査への活用」. 活断層研究 27: 17–25.

- 鈴木康弘・佐野滋樹・野澤竜二郎（2002）「航空写真測量に基づく桑名断層の変位地形の解析—米軍撮影航空写真による活断層航測図化及びGISの精度—」. 活断層研究, 22:76-82.
- 中田 高・後藤秀昭（1998）「活断層はどこまで割れるのか？—横ずれ断層の分岐形態と縦ずれ分布に着目したセグメント区間モデル—」. 活断層研究 17: 43-53.
- 中田 高・井上 公・Cahulogan, M., Rivera, D. J., Lim, R., Pogay C.（2014）「小型UAVと写真測量ソフトを用いた簡易地形計測—2013年ボホール地震断層の緊急調査を例に—」. 日本地理学会発表要旨集 85:217.
- 松田時彦（1975）「活断層から発生する地震の規模と周期について」. 地震第2輯28:269-283.
- 松田時彦（1995）『活断層』. 岩波書店. pp242.