

日本医科大学基礎科学紀要

第 41 号 2012 年 9 月

The Bulletin
of
Liberal Arts & Sciences
Nippon Medical School

No. 41, September 2012

目 次

- Matching *Bring* and *Take* with *Come* and *Go* in Terms of Direction
of Movement: Should Inconsistencies in Native-speaker Usage
Be of Concern to Learners of English as a Foreign Language?
T.D. Minton ... 1
- 複雑量子系の最適制御理論 高見利也・藤崎弘士 ... 27
Optimal Control Theory for Complex Quantum Systems
Toshiya TAKAMI and Hiroshi FUJISAKI
- 量子異常と格子正則化 渡辺 浩 ... 57
Anomalies and Lattice Regularizations Hiroshi WATANABE
- 「生」と「死」を考える医学教養教育科目の軌跡
—— 5年にわたる「特別プログラム」の意義 ——
中村哲子・渡辺 浩 ... 83
Special Programme Focusing on the Theme of Life and Death
as Part of the General Education Curriculum
at Nippon Medical School: An Overview, 2008-2012
Tetsuko NAKAMURA and Hiroshi WATANABE

Article

Matching *Bring* and *Take* with *Come* and *Go* in Terms of Direction of Movement:

Should Inconsistencies in Native-speaker Usage Be of Concern to Learners of English as a Foreign Language?

T.D. Minton*

Much has been written about the deictic verbs *come*, *go*, *bring* and *take* in association with their acquisition by children (e.g. Clark & Garnica, 1974; Abkarian, 1988), and in comparison with their equivalents in other languages (e.g. Choi & Bowerman, 1991; Fagan, 2004), or both (e.g. Naigles & Lehrer, 2002), but they have been less extensively examined in the EFL literature (Coe, 1973, p. 137). Even though these verbs cause particular problems for EFL learners (Coe, 1973, p. 142), the differences/links between them tend to be either ignored or given very short shrift in grammar reference works (e.g. Eastwood, 1994; Sinclair, 1992, pp. 107-108, 136). One reason for this is that TESOL pedagogy focuses on what Coe calls the “fundamental” uses of all four verbs (1973, p. 138), paying scant attention to what he terms their “extended” uses. The fundamental uses, according to Coe, are those involving movement towards or away from the speaker’s position; *come* and *bring* are used to indicate movement towards the speaker, while *go* and *take* indicate movement away from the speaker:

- Can you **bring** it back to me as soon as you’ve finished reading it?
- Can you **take** this to Mr Harris for me?

* Department of English, Nippon Medical School

(2)

Movement by the speaker towards the hearer also requires the use of *come* and *bring* in English (with regard to *bring*, this rule is not observed by all native speakers of English [Black et al., 1979, p. 190]):

*Can I **come** and see you this evening? I'll **bring** some beer.*

This is a source of confusion for learners whose native languages mark such movements with their equivalents of *go* and *take*. Although Coe does not include this pattern in his definition of fundamental uses, it should clearly be considered one of them.

The first of the two “extended” uses, according to Coe, involves situations “where the speaker is neither at the beginning nor at the end of the movement”. He gives as an example two Englishmen in London discussing the movement of boats from Australia to Japan, who would use *go* and *take*. The second is “where the speaker’s choice is determined not by his physical position but by where he is in his thoughts”: if one of the Englishmen were reminiscing about his time in Japan, he would “talk about the boats *coming* to Japan *bringing* things from Australia” (1973, p. 138). I would contend that both of these scenarios can actually be explained in terms of the “fundamental” uses of the four verbs (in the first, the movement is in the direction of neither the speaker nor the hearer, so *go* and *take* are the natural choices; in the second, the movement is in the direction of the speaker’s location in the past, and such movements, whether past, present, future, or purely imaginary are naturally marked by *come* and *bring*). However, it is certainly the case that the selection of *come* vs. *go* / *bring* vs. *take* is often dependent on the perceptions of the speaker, as we shall see below. It is these perception-dependent uses that I would prefer to refer to as “extended”.

Another reason why *bring* and *take* are problematic for EFL learners is that while native speakers of English are generally consistent in their selection of *come* and *go*, they are less consistent when it comes to *bring* and *take*, as pointed out by Michael Swan (1995, p. 100), and as no doubt occasionally noted

by most English speakers when listening to speakers of other English dialects. To investigate the perceived inconsistencies, I asked 12 native speakers of American English and 9 native speakers of British English (one of whom was myself) to answer a quiz in which they were asked to select either *bring* or *take* in 17 example sentences; naturally, contexts were provided. The respondents were also given the option of selecting *either* in cases where they felt either *bring* or *take* would be acceptable. My objectives were 1) to investigate the degree of inconsistency in the selection of the two verbs, 2) to attempt to identify patterns in any inconsistencies uncovered, and 3) to determine whether any inconsistencies should be of concern to EFL learners. My basic thesis was, and still is, that the best policy for learners is to match *bring* and *take* with *come* and *go* in their own usage, regardless of any inconsistencies in native usage.

Quiz: results and rationales for “correct” answers

The quiz items are listed below, each of which is followed by a brief rationale against the “correct” selection as determined by matching *come* with *bring* and *go* with *take* in terms of direction of movement. In each case, the verb most commonly selected by the respondents has been inserted in the blank space they were asked to fill in, and the total number of respondents selecting *bring*, *take* or *either* is listed after each question. A chart showing the respondents’ individual answers to the questions can be found in the appendix.

QUIZ

In numbers 1 to 6, the speaker and hearer live in the same house, possibly as husband and wife.

1. *Could you (**bring**) some bottled water home with you?*

(The speaker is *at home* now or, if not, thinks (s)he is going to be *at home* when the water arrives. The hearer is either shopping now or is planning to go shopping, i.e., (s)he could be *at home* now, but is not necessarily there.)

American respondents:	bring: 12	take: 0	either: 0
British respondents:	bring: 9	take: 0	either: 0

(4)

The movement will be in the direction of the speaker's position when the water arrives. The use of *bring* in this sentence matches that of *come* in a similar situation:

*When you **come** home, could you **bring** some bottled water with you?*

2. *Could you (**take**) some bottled water home with you?*

(Same situation as in 1, except that the speaker is not *at home* now, and isn't or doesn't think (s)he is going to be *at home* when the water arrives.)

American respondents:	bring: 4	take: 8	either: 0
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

If *bring* matches *come* and *take* matches *go* in terms of direction, there is no doubt that *take* is the "correct" answer: since the speaker is not at home at the time of speaking and is not going to be at home when the water arrives, the movement will be away from his/her position. In a similar situation, *go* would certainly be selected:

*Don't **go** home without picking up some bottled water at the supermarket.*

Learners might argue that if the hearer were at home when the request was made, the movement would be towards his/her position, thus necessitating the use of *come/bring*. Certainly, the hearer himself/herself would use *bring* in reference to the movement if he/she were at home when the communication took place:

Speaker: We're out of bottled water, aren't we?*

*Hearer**: Yes, I think so. I'll **bring** some home this evening after*

work.

*Speaker: Thanks. Don't forget to **take** your computer home, too.*

*The speaker is already out. He/she is talking to the hearer on the phone. The speaker is going to be later home this evening than the hearer.

**The hearer is at home and will soon be leaving for work. He/she is going to be home in the evening before the speaker.

While the hearer sees the movement as a return to his/her current position (home), which will be marked by *come/bring*, the speaker sees it as away from both his/her current position and his/her projected position at the reference time; as such, the movement will be marked by *go/take*. In the above exchange, the hearer would use *take* if he/she were not at home when the conversation took place. Similarly, the speaker would use *bring* if he/she were at home at the time of speaking, or if he/she expected to be home before the hearer.

Since the direction of the planned movement in relation to the speaker and hearer was quite clear in no. 2, it was puzzling that one third of the American respondents selected *bring*. When challenged, their argument, in a nutshell, was that “home” represented the place they always ended up eventually, wherever else they might go, so they tended to see movement towards home as being movement towards themselves. But when asked whether they would use *come* or *go* in *Don't () home without picking up some bottled water at the supermarket*, they all selected *come* when the speaker was at home at the time of speaking or was going to be at home when the water arrived, and *go* when the speaker was out and was not going to be at home when the water arrived. This contradicts their argument that all movement towards “home” is perceived to be in the direction of the speaker and supports the proposition that there is less consistency among native speakers in the use of *bring/take* than in that of *come/go*.

3. *Don't forget to (**take**) your packed lunch to work.*

(Neither the speaker nor the hearer is *at work*.)

(6)

American respondents:	bring: 0	take: 11	either: 1
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

The movement is away from both the speaker's and hearer's current position, and the use of *take* matches that of *go*:

*When you **go** to work, don't forget to **take** your lunch.*

Naturally, if both the speaker and the hearer were in the office at the time of speaking, *bring* would be correct:

*Don't forget to **bring** your lunch (when you **come** to work) tomorrow.*

On the other hand, if the hearer were in his/her office at the time of speaking but the speaker were not, *take* would be used: as in no. 2, the proposed movement of the lunch would be perceived to be away from both the speaker and the hearer (the movement cannot possibly be towards the speaker, as he/she will be the person moving the lunch).

It is possible that the one American who said either *bring* or *take* would do had in mind a situation where the speaker would be accompanying the hearer to work tomorrow, and in fact one of the British respondents noted in his response that *bring* would be used if such were the case. If the speaker were planning to accompany the hearer, the situation would be similar to that in no. 14, and *bring* would be the "correct" choice (there is more on the rationale for this in the discussion following no. 14). Future versions of the quiz should perhaps state that the speaker will not be accompanying the hearer to work. It is worth noting that the American who selected *either* (Am 8) chose *bring* (not *either*) for no. 14.

4. [Follows on later from no. 3]

*Did you remember to (**take**) your packed lunch with you?*

(The hearer is in his/her office or on his/her way to his/her office; or (s)he may

have been to his/her office and already left. The speaker is not in the office.)

American respondents:	bring: 0	take: 11	either: 1
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

If we match *bring* and *take* with *come* and *go*, *bring* is only appropriate in this sentence if the speaker is (or was, at the time the lunch box might have been expected to arrive) also in the hearer's office.

As mentioned above, English generally requires the use of *come* and *bring* to refer to movement by the speaker towards the hearer, i.e. the selection of *come/bring* or *go/take* depends not only on the speaker's position but also on the hearer's. If you are in Hawaii, for example, and have invited me to travel from Tokyo to join you there, I might reply:

*I wish I could **come**, but I'm afraid I can't take the time off work.*

I would, thereby, be viewing the direction of movement not from my (the speaker's) point of view but from yours (the hearer's). However, it is important to note that the selection also depends on the subject of the sentence. Whereas the speaker (*I*) will talk about *coming* to Hawaii to join the hearer (*you*), the speaker will see the hearer's own movement in the direction of Hawaii in terms of *going* (this point is of relevance to the situation in no. 2 above). The following telephone exchange demonstrates this point:

*A: Hi, Tim. I'm in Hawaii. Why don't you **come** over for a few days?*

*B: You didn't tell me you were **going** to Hawaii! When did you **go**?*

*A: At the beginning of the month. Anyway, how about it? Can you **come**?*

*B: I wish I could (**come**), but there's no way I can take any time off work at the moment. You should have told me earlier that you were **going** – I might have been able to arrange something.*

(8)

The important point to note is that speaker B does not ask speaker A *When did you come to Hawaii?*, even though the latter is in Hawaii at the time of speaking. It would only be possible to use *come* in this question if speaker B were also in Hawaii.

In terms of *bring* and *take*, we can imagine the following exchange if speaker B had agreed to join speaker A in Hawaii:

A: *When you come over, can you **bring** my green memory stick? I left it on my desk, I think.*

B: *Sure. Did you **take** your computer?*

A: *No. I'm using Jim's.*

B: *Would you like me to **bring** your computer as well?*

Again, speaker B sees his own movement from speaker A's perspective (*Would you like me to **bring** your computer?*), whereas he sees speaker A's movement to Hawaii from his own perspective, i.e. as being away from his (speaker B's) current position (*Did you **take** your computer?*). Naturally, speaker A sees speaker B's upcoming movement as being towards his (speaker A's) current position (*Can you **bring** my green memory stick?*).

A further question is how speaker B would see the movement of a third party towards speaker A in Hawaii but away from speaker B's own current position in Tokyo. From the pedagogical point of view this is an important question related to the "extended" uses of the four verbs under consideration. The answer is that if speaker A had also invited someone else (let's call him Hiroshi) in addition to speaker B to join him in Hawaii and his invitation had been accepted, speaker B would view Hiroshi's movement to Hawaii from speaker A's perspective and use *come/bring* to refer to that movement:

*Do you want me to ask Hiroshi to **bring** anything?*

Just as speaker B might agree to **bring** speaker A's green memory stick to him in Hawaii, the speaker in quiz question 4 might offer to **bring** the hearer's

lunch to him in his office. However, the speaker would still see the hearer's own movement to his office as being away from the speaker's current position, so whether the hearer was in his office or not at the time of speaking, the speaker would still ask him, *Did you remember to **take** your lunch?*

The American who selected *either* in quiz question 4 (Am 9) was generally rather equivocal in his selection of *bring* and *take*, choosing the *either* option in no fewer than 5 of the quiz questions. A larger sample would undoubtedly turn up other equally equivocal native speakers of English, although they would, I suspect, represent a small minority, as in the present survey. From the point of view of EFL learners, however, following the majority view would certainly be the wisest and indeed only logical choice: selecting *bring* for no. 4 clearly breaks the *bring/take* link with *come/go* in terms of direction. It is, after all, almost inconceivable that any native speaker of English would use *came* instead of *went* in the following sentence:

*Did you remember to take your lunch with you when you **went** to work this morning?*

Unless, of course, the speaker is (or was, at the relevant time) also in the same workplace, in which case *bring* and *came* would be used.

5. *I forgot to (**bring**) my packed lunch.*

(The speaker is in his/her office.)

American respondents:	bring: 12	take: 0	either: 0
British respondents:	bring: 9	take: 0	either: 0

The movement (even though it did not actually occur) is in the direction of the speaker's current position, and the use of *bring* matches that of *come*:

*I forgot to **bring** my lunch when I **came** to the office this morning.*

(10)

6. *I forgot to (**take**) my packed lunch.*

(The speaker is back home in the evening, having already been to his/her office.)

American respondents:	bring: 0	take: 12	either: 0
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

The intended movement may have been in the direction of the speaker earlier in the day, but from his/her current perspective, it was away. Again, this matches the use of *go*:

*I forgot to **take** my lunch when I **went** to the office this morning.*

In numbers 7 to 13, the speaker and hearer are colleagues.

7. *I haven't quite finished the report yet, but I'll (**bring**) it to you as soon as I have.*

(The speaker believes the hearer is going to be in his/her [the hearer's] office when the report is delivered.)

American respondents:	bring: 8	take: 2	either: 2
British respondents:	bring: 8	take: 0	either: 1

The movement will be by the speaker towards the hearer, making the selection of *take* a clear breach of the *come-bring/go-take* relationship. Therefore, I asked the two Americans who had selected *take* to insert *come* or *go* in the following sentence, explaining that the hearer would be in his/her office at 2 o'clock: *I'll () to your office at 2 o'clock.* As I expected, they both selected *come*. When I pointed out the illogicality of selecting *take* for no. 7 and the fact that 8 of their compatriots had chosen *bring*, their response was that their selection had simply been the one that had come to mind when they read the question and that they had not given it any serious thought. Although this is exactly how I wanted all of the respondents to make their selections when filling

in the blanks, the fact that they were obliged to read the scenarios and make conscious selections certainly worked against the spontaneity I was looking for. However, as Black et al. indicate, the link between *come* and *bring* to refer to movements by the speaker towards the hearer may not be strong among speakers of some American dialects (1979, p. 190).

8. *I haven't quite finished the report yet, but I'll (**take**) it to Mr. Steptoe's office as soon as I have.*

(The speaker does not believe the hearer is going to be in Mr. Steptoe's office when the report is delivered.)

American respondents:	bring: 0	take: 12	either: 0
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

The movement will be in neither the speaker's nor the hearer's direction, and the use of *take* matches that of *go*:

*I'll **take** the report with me when I **go** to his office.*

9. *I'm glad you (**brought**) your daughter to the party.*

(The speaker is or was at the party.)

American respondents:	brought: 12	took: 0	either: 0
British respondents:	bring: 9	take: 0	either: 0

The speaker is or was present at the party, so the movement was towards his/her position. An important point for learners to note is that it makes no difference whether the party is still under way at the time of speaking or not. Whether the speaker is going to be at the party, is at the party, or was at the party, he/she will use *come* to comment on someone else's attendance or non-attendance:

(12)

- *Are you **coming** to Carol's party?*
- *Isn't Yoko here? I thought she was **coming**.*
- *I don't know whether Shaun **came** to Carol's party last night. I didn't see him there.*

It is also important to note that unless the speaker is actually at the party at the time of speaking, he/she will use *go* to refer to his/her own movement in that direction:

- ***I'm going** to Carol's party on Saturday. Are **you coming**?*
- ***I went** to Carol's party last night, but **my wife** didn't **come**.*

In line with normal usage of *come/go*, however, the speaker will use *come* and not *go* to talk about his/her own movement when talking to the host of the party, as the movement will then be viewed as being in the direction of the hearer:

- ***I can come** to your party on Saturday – my wife has given me permission!*
- ***I'm really glad I could come** to your party last night – it was great fun!*

On the other hand, normal usage of *come* and *go* in the previous pair of sentences (*I'm going to Carol's party on Saturday. Are you **coming**? / I went to Carol's party last night, but my wife didn't **come**.*), does not completely preclude the use of *go* in the second part of each example (*Are you **going**? / . . . but my wife didn't **go**.*). In both cases, *come* is much more likely, but the selection depends to some extent on the speaker's perceptions. In the first example, the question is not an overt invitation to the hearer to join the speaker at the party; if it were (*Would you like to come?*), *come* would definitely be used, because the speaker's presence at the party would be crucial to the invitation: you cannot suggest that someone join you in a particular place if you

are not there now or are not going to be there. If, on the other hand, the speaker is less focused on the idea of associating with the hearer at the party, as might be the case if it were a very large party or if he/she simply were not particularly interested in associating with the hearer, the speaker might not perceive his/her own presence at the party as of any great significance in terms of the hearer's movements, resulting in the unconscious selection of *go*. Such a selection would be more unlikely in the second sentence, which involves the speaker's wife, but it is still possible. Another pertinent point is that in the second part of each example, the main verb itself is very likely to be omitted: *I'm going to Carol's party on Saturday. Are you? / I went to Carol's party last night, but my wife didn't*. This fact might also predispose some people to insert *go* in the blank space created by the omission.

The above observations can also affect the selection of *bring* or *take*. Unless the speaker is actually at the party at the time of speaking, he/she will use *go/take* to refer to his/her own movement in that direction:

- *I'm thinking of **taking** some beer to the party rather than wine.*
- *I **didn't take** anything to the party last night.*

Naturally, he/she will use *come/bring* if he/she is actually at the party at the time of speaking, as the movement will be towards his/her current position:

*I've **brought** a bottle of wine.*

The speaker will also use *come/bring* in relation to his/her own movements (or those of someone else) when talking to the host of the party, as he/she will, as normal, see his/her movements (and those of other people) from the hearer's point of view:

- *I'll **bring** a case of beer.*
- *Hiro told me he's going to **bring** his girlfriend.*
- *Have you opened the present I **brought** to your place last night?*

(14)

Also in parallel with *come*, if the speaker is going to be or was at the party, he/she will normally use *bring* when talking about someone else's movements vis-à-vis the party venue:

- Are ***you*** going to ***bring*** a bottle of wine to the party?
- ***Jack*** didn't ***bring*** anything to the party last night.

However, in the same way as with *come/go*, perceptions on the part of the speaker may occasionally lead to the selection of *take* in this situation (*Are ***you*** going to ***take*** a bottle of wine to the party? / ***Jack*** didn't ***take*** anything to the party last night.*). English-speaking psychologists are probably in tune with the subtle insights such selections reveal into the speaker's true feelings! Needless to say, if the speaker is at the party at the time of speaking, *bring* will definitely be used to talk about other people's movements in that direction:

- Have ***you*** ***brought*** your guitar?
- ***Jack and Jill*** have ***brought*** their baby, I see.

10. *I'm glad you (***took***) your daughter to the party.*

(The speaker did not attend the party.)

American respondents:	brought: 0	took: 12	either: 0
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

This is rather similar to no. 4 (*Did you remember to ***take*** your packed lunch with you?*), so the American respondent who selected *either* for that question but *took* for this might appear to be inconsistent in his usage. One possible explanation for the apparent discrepancy is that the scenario for no. 4 indicates the hearer could actually be in his/her office when the question is asked; had I said in the scenario for no. 10 that the party might still be going on, with the hearer taking a phone call at the party venue from the speaker, it is

possible that this respondent would have selected *either* for no. 10. Nevertheless, I am sure the other 11 Americans and 9 Britons would still have been unequivocal in their selection of *took*, because this exactly matches *go* as it would be used in the stated scenario:

*I hear you **went** to Carol's party and that you took your daughter.*

As in no. 9, the key point is the speaker's presence at or absence from the party. Whereas his/her presence (future, present or past) dictates the use of *come*, his/her absence dictates the use of *go*:

- *Are you **going** to Carol's party?*
- *[On the phone] Isn't Yoko there? I thought she was **going**.*
- *Did Shawn **go** to Carol's party last night? Yoko told me she didn't see him there.*

11. *Would you like to come to Disneyland this weekend? I'll (**take**) you if you're free.*

American respondents:	bring: 0	take: 11	either: 1
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

The juxtaposition of *come* and *take* in these consecutive sentences may be an example of the kind of feature of English that makes learners believe it is a whimsical language. However, as in most cases of apparent whimsy in the English language, there is a perfectly logical explanation. The reason *come* is used in the first sentence is that the speaker is issuing an invitation to the other person to accompany him to a place he/she has already decided to go to, i.e. Disneyland. In other words, the speaker knows he/she will be in Disneyland this weekend and therefore, quite naturally, views the hearer's possible movement as being towards himself/herself. Given the context, and especially the presence of the second sentence (*I'll **take** you if you're free.*), use of *go* in the first

(16)

sentence (*Would you like to **go** to Disneyland this weekend?*) is actually not out of the question, but without a clear context, such a question might easily be taken to indicate that the speaker was not intending to be in Disneyland himself/herself. Alternatively, it could simply be interpreted to mean that the speaker has not yet decided whether to go to Disneyland or not. As mentioned under no. 4 above, the selection of *come* or *go* depends on the subject of the sentence, so if the speaker had used *we* (or *I*) as the subject, the verb selected would certainly be *go*:

- *Why don't we **go** to Disneyland this weekend?*
- *I'm **going** to Disneyland this weekend. Why don't you **come**?*

As for *take* in the second sentence, we revert to normal consideration of the direction of movement, which will be away from both the speaker and the hearer. In addition, offering to *take* the person you are speaking to to a place like a theme park or restaurant suggests fairly strongly that you are also offering to treat them. You can only *bring* someone to a place if that person is not the hearer and you are proposing to bring him/her to a location where the hearer is or is going to be:

*Would you like me to **bring** Bill to your place on Saturday? I don't think he knows the way.*

This applies to things as well, of course (as in no. 7):

*I'll **bring** a bottle of champagne to your house on Saturday.*

The one American who said either *take* or *bring* would do explained in writing that the presence of *come* in the first sentence made him think the speaker was already in Disneyland. This is not a viable argument: if you *bring* someone to a particular place, you accompany him/her to that place, which is physically impossible if you are already there. The respondent's comment was

again probably the result of a lack of spontaneity caused by the quiz format. It is also likely that this respondent would recant if the physical impossibility of the proposal made with *bring* and the fact that the first sentence is simply an invitation to the other person to accompany the speaker were explained, so it seems reasonable to take the vote for *take* as unanimous in no. 11.

12. *Why don't you (**bring**) Mary to Disneyland this weekend?*

(The speaker and hearer have arranged to go to Disneyland together.)

American respondents:	bring: 11	take: 0	either: 1
British respondents:	bring: 9	take: 0	either: 0

In the same way as *come* is used to invite someone to accompany the speaker to a place he/she has already decided to go to, it is also used to suggest that a third party be invited. If a couple had agreed to go to the cinema, for example, one of them might suggest that the other invite someone else to join them:

*How about asking Noriko if she'd like to **come**?*

In no. 12, even if the hearer had not already decided to go to Disneyland, the speaker could use the same formula, perhaps adding *come* in invitation:

*Why don't you **come** to Disneyland this weekend and **bring** Mary with you?*

The parallel with *come* is exact. As usual, the selection of *come/go*, *bring/take* is subject-sensitive:

- *Why don't we **go** to Disneyland this weekend? Mary could **come**, too.*
- *Let's go to Disneyland this weekend. We could **take** Mary as well.*

(18)

The American respondent who selected *either* was the one (Am 9) who was generally equivocal in his selections, choosing *either* as his response for 5 of the 17 questions; I think it unlikely that anything of significant value can be read into his response.

13. *Why don't you (**take**) Mary to Disneyland this weekend?*

(The speaker is not going to Disneyland but knows that the hearer is.)

American respondents:	bring: 0	take: 12	either: 0
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

As in no. 10, *take* matches *go*:

*When you **go** to Disneyland this weekend, why don't you **take** Mary with you?*

It is clear from both of these sentences that the speaker is not planning to accompany the hearer.

In numbers 14 to 16, the speaker and hearer live in the same house, and the departure point is home.

14. *It's time **we** left. (**Bring**) your coat with you.*

American respondents:	bring: 9	take: 1	either: 2
British respondents:	bring: 8	take: 0	either: 1

There is notable inconsistency in the American respondents' selections for numbers 14 and 16. Were it not for the fact that the British respondents were almost unanimous in their answers, I might be inclined to ascribe the Americans' inconsistency partially to a lack of spontaneity occasioned by the quiz format: the apparent similarity of numbers 14 and 16, for example, might have made some of

them wonder why their instincts were telling them to select different verbs, thus destroying spontaneity. Regardless, most of them selected the logical answers, i.e. the ones where *bring/take* match *come/go*, with 9 out of 12 of them agreeing that *bring* is the best option for no. 14, and only 1 unequivocally preferring *take*. Numbers 14 and 16 are discussed together under no. 16.

15. *It's time you left. (**Take**) your coat with you.*

American responses:	bring: 0	take: 11	either: 1
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

The verdict on this one was almost unanimous, and the reason is easy to understand: the movement will be away from both the speaker's and hearer's position, and the fact that the speaker will not be involved in the movement means the respondents were not, except perhaps for one, tempted to give the sentence any spontaneity-destroying thought. That one selected *either* is puzzling, but I suspect it may have had something to do with the presence of *with you* in the sentence and the fact that the previous question, for which she selected *bring*, also included *with you*.

16. *It's time **we** left. Should we (**take**) our coats?*

American respondents:	bring: 1	take: 7	either: 4
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

Although the American respondents showed a degree of indecisiveness in both no. 14 and no. 16, only 1 of them disagreed unequivocally with the majority view in each case. Unfortunately, it was not the same person in both cases, so we cannot simply ascribe this to individual quirkiness. Tiny though my sample admittedly is, however, I think it is reasonable to conclude that a majority of native speakers of English, at least of American or British English, would select *bring* for no. 14 and *take* for no. 16.

In numbers 14, 15 and 16, the movement will be away from both the speaker's and hearer's current position, which would seem to indicate the use of *take*. This is completely clear in no. 15, so what is the difference between no. 14 and no. 16? The answer is the subject of the second sentence in each case: in 14, the assumed subject is *you*, and in 16 the actual subject is *we*. Realization of this fact gives us a perfect parallel with *come* in no. 14 and *go* in no. 16, as long as we assume, at least in no. 14, that the destination of both the speaker and the hearer is the same. This should certainly be made clear in any future survey based on this quiz. As has already been pointed out, the selection of *come/go*, *bring/take* is subject-sensitive:

- I'm **going** to Mt. Takao tomorrow. Why don't you **come** along?
*You can **bring** your sister, if you like.*
- Shall **we go** to Mt. Takao tomorrow? **We** could take a picnic.
- It's time **we went**. What are you doing? Are you **coming** or not?
*For heaven's sake hurry up, or we'll be late. And don't forget to **bring** your coat!*

Simple consistency, then, points to the use of *bring* in no. 14 and *take* in no. 16.

17. Here's a small present for you to (**take**) home to your wife.

American respondents:	bring: 0	take: 11	either: 1
British respondents:	bring: 0	take: 9	either: 0

From any rational point of view, *take* has to be the correct answer. After all, it would be impossible for the speaker to be in the hearer's house at the time of speaking, and extremely unlikely that he/she is expecting to be there when the proffered gift arrives: if he/she were planning to visit the hearer's wife in advance of the hearer's arrival, why would he/she ask the hearer to convey the gift?

Discussion

The survey results showed a small level of inconsistency in the selections of the American respondents, but almost total consistency in those of the British respondents (1 selected *either* for no. 7, and another selected *either* for no. 14, but otherwise all of the British respondents made identical selections throughout). Overall, the results support Swan's assertion that the rules governing *bring* and *take* "are not always followed in American English" (1995, p. 100), together with his implication that they are followed in British English.

However, the degree of inconsistency shown by the Americans in this study was not large: of the 12 respondents, 8 disagreed with the majority response on only 1 each of the 17 questions, 2 disagreed on 2 questions, 1 on 3 questions, and 1 on 7 questions (for 5 of which he selected *either*). And many of the "disagreements" were ambivalent: out of a total 22 disagreements, 14 were selections of *either* as opposed to unequivocal rejections of the "correct" answer (i.e. the answer selected by the majority). Furthermore, significant levels of disagreement were shown in only 4 of the 17 questions: no. 2 (4 unequivocal selections of the "wrong" answer), no. 7 (2 "wrong" answers and 2 *either*), no. 14 (1 "wrong" and 2 *either*), and no. 16 (1 "wrong" and 4 *either*). By contrast, 6 of the remaining questions attracted disagreement from only 1 respondent each (3 of which were accounted for by the same person – the one who disagreed on 7 questions), and 7 attracted unanimous agreement.

Patterns in the inconsistencies, if there are any, are likely to be found only in the questions that attracted significant levels of disagreement, i.e. numbers 2, 7, 14 and 16.

The reason 4 of the American respondents selected *bring* for no. 2 (*Could you [take] some bottled water home with you?* [The speaker is not at home at the time of speaking and is not expecting to be at home when the water arrives.]) has already been mentioned above: those who selected it argued that "home" represented the place they always ended up eventually, wherever else they might go, so they tended to see movement towards home as being movement towards themselves. This reasoning is clearly flawed, as they selected *go* in the same situation to mark movement towards home, but there could well

be a tendency for some speakers of American English to use *bring* for any movement towards “home”, regardless of whether they would use *come* or *go* to describe the same movement. Further surveys would be required to test this theory.

No. 7 (*I haven't quite finished the report yet, but I'll [**bring**] it to you as soon as I have.* [The speaker believes the hearer is going to be in the hearer's office when the report is delivered.]) is the only question in the quiz where the movement is by the speaker towards the hearer. Such a movement would so obviously be marked by *come* that I assumed, from my British perspective, it would be necessary to include only one question in the quiz to confirm that native speakers would automatically select *bring* in the same situation. It seems, however, that there is a tendency among some speakers of American English to fail to make this link and view the movement only from the speaker's point of view. Black et al. state that “in most American dialects, *bring* and *take* differ only in whether the motion is towards or away from the narrator” (1979, p. 190), but since only 2 of the American respondents in my survey selected *take* for no. 7 (2 selected *either*), it would appear that many speakers of American English actually use *bring* when the movement is towards the hearer. This matter requires further investigation, and future surveys should include more questions to examine usage surrounding movement towards the hearer. I was, frankly, surprised to find that one of the British respondents selected *either* for this question, especially as it was my own daughter!

In numbers 14 and 16 (*It's time we left. [**Bring**] your coat with you. / It's time we left. Should we [**take**] our coats?*), the possibility of confusion caused by the apparent similarity of the two examples can be largely discounted by the fact that the British respondents' responses were almost unanimous. The inconsistency of the Americans was more conspicuous in no. 16, which is one of only two questions in the quiz where the proposed movement is to be made by both the speaker and hearer together. The other is no. 11 (*Would you like to come to Disneyland this weekend? I'll [**take**] you if you're free.*), for which the Americans almost unanimously selected the “correct” answer; the one who selected *either* offered an invalid reason for doing so. These two examples differ

significantly, however: in no. 11 the speaker is the prime “mover”, and the hearer is in a sense the “object” of the movement, while in no. 16 the “object” of the movement is not one of the two people involved. It is possible that movements of this kind involving more than one person are associated in the minds of some speakers of American English with *bring* rather than *take*, even though the subject of the sentence is *we* and the movement is away from both of them. However, this is little more than pure speculation, and further surveys would be required to confirm that any such tendency existed.

Perhaps the most important result of this study is that for every item in the quiz, the majority selection of the respondents was always the “correct” one from the point of view of the *come-bring* / *go-take* match. From the pedagogical point of view, then, it certainly makes sense to teach *bring* and *take* as the causative versions of *come* and *go* and to recommend that students match *bring* with *come* and *take* with *go* in terms of direction. As mentioned in the introduction, the differences/links between these four verbs tend to be either ignored or given very short shrift in grammar reference works. In my view, language learning in general could be facilitated to a large extent by a greater focus on the interactions between pairs or sets of vocabulary items. The differences/links between *come*, *go*, *bring* and *take* constitute just one small example of the myriad interrelationships that could be better exploited in TESOL pedagogy.

There are three obvious limitations to this study. Firstly, the number of respondents was tiny. Secondly, only two varieties of English (American and British) were represented among the respondents. And thirdly, all of the respondents were intelligent, well-educated, cosmopolitan professionals, mostly university instructors, together with a few businesspeople, two lawyers and one university student. A large-scale survey covering native speakers from various socioeconomic and geographical backgrounds would undoubtedly turn up a higher level of inconsistency in the selection of *bring* and *take*.

It would be interesting to investigate how native speakers of other varieties of English would answer this quiz, but I doubt it would affect the overall results significantly: Canadians’ responses would probably show a similar level of inconsistency as Americans’, and Australians’ would probably show a similar

degree of consistency as Britons’.

In conclusion, and in answer to the question posed in the title of this article (*Should inconsistencies in native-speaker usage be of concern to EFL learners?*), I would say that learners should be aware that inconsistencies exist, but that they would be well advised to match *bring* and *take* with *come* and *go* in their own usage, without worrying about irregularities in native usage. They should also view inconsistencies in native usage as largely non-standard: this survey, small though it is in scale, indicates that in any given example most native speakers of English will select *bring* to correspond with *come*, and *take* to correspond with *go* in terms of direction.

References

- Abkarian, G. (1988). Acquiring lexical contrast: The case of *bring-take* learning. *Journal of Speech and Hearing Research*, 31, 317-326.
- Black, J., Turner, T., & Bower, G. (1979). Point of view in narrative comprehension, memory, and production. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 187-198.
- Choi, S., & Bowerman, M. (1991). Learning to express motion events in English and Korean: The influence of language-specific lexicalization patterns. *Cognition*, 41, 83-121.
- Clark, E., & Garnica, O. (1974). Is he coming or going?: On the acquisition of deictic verbs. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 13, 559-572
- Coe, N. (1973). “Come”, “go”, “bring”, and “take”. *English Language Teaching Journal*, 27(2), 137-142.
- Eastwood, J. (1994). *Oxford guide to English grammar*. Oxford: Oxford University Press.
- Fagan, S. (2004) Basic verbs of conveyance: “Bring” and “take” in German and English. *Die Unterrichtspraxis/Teaching German*, 37(1), 10-16.
- Naigles, L., & Lehrer, N. (2002). Language-general and language-specific influences on children’s acquisition of argument structure: a comparison of French and English. *Journal of Child Language*, 23, 545-566.
- Sinclair, J. (1992). *Collins COBUILD English Usage*. London: HarperCollins Publishers.
- Swan, M. (1995). *Practical English Usage*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.

Appendix: chart showing the respondents' selections for each question in the quiz

Q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Am 1	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	e	t
Am 2	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	b	t
Am 3	b	t	t	t	b	t	t	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Am 4	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	e	t	t	t
Am 5	b	b	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	t	t	t	t
Am 6	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	e	t	t
Am 7	b	b	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Am 8	b	t	e	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	e	t
Am 9	b	b	t	e	b	t	t	t	b	t	t	e	t	e	t	e	e
Am 10	b	t	t	t	b	t	e	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Am 11	b	b	t	t	b	t	e	t	b	t	e	b	t	b	t	t	t
Am 12	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	e	t
Br 1	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 2	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 3	b	t	t	t	b	t	e	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 4	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	e	t	t	t
Br 5	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 6	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 7	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 8	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t
Br 9	b	t	t	t	b	t	b	t	b	t	t	b	t	b	t	t	t

Key: Am = American respondent, Br = British respondent, t = take, b = bring, e = either will do

(Received 4 March, 2012)

(Accepted 20 March, 2012)

〈総説〉

複雑量子系の最適制御理論

高見利也* 藤崎弘士**

Optimal Control Theory for Complex Quantum Systems

Toshiya TAKAMI and Hiroshi FUJISAKI

1. はじめに

量子力学 (quantum mechanics)^{1),2)} は、その誕生から既に 80 年以上が過ぎ、大学や研究所内での精密実験にとどまらず、先端医療機器から日常的に使われる身近な電子機器類まで、広く応用されている³⁾。これらの技術は、量子力学を通してミクロの世界の論理を理解することで実現したものであり、今後もさまざまな分野に応用されて行くことになるであろう。徐々に理解と応用が進んできた量子系であるが、オングストローム (10^{-10} メートル) 程度のミクロスケールの運動を直接制御するという点に関しては、現状ではまだ自由自在というわけではない。

本稿は、制御という観点からミクロ世界とマクロ世界の論理^{4),5)}を眺めることを目的としている。具体的には、量子力学で記述される運動の制御について、化学反応制御の分野でのこれまでの研究を概観するとともに、モデル系を使った数値実験の結果を通して、量子状態制御の現状について述べる。

まず最初に第2章では、物体の運動を制御するとはどういうことかを考え、最

* 九州大学・情報基盤研究開発センター Research Institute for Information Technology, Kyushu University

** 日本医科大学・物理学教室 Department of Physics, Nippon Medical School

適制御理論の考え方を導入する。次に第3章で、ミクロな世界の例として化学反応制御の研究を紹介し、量子系への最適制御理論の応用について述べる。さらに第4章と第5章では、一般化された量子系へ拡張することによって解析的な最適外場が導かれることを示し、モデル系の制御に関するわれわれの研究成果と、今後の現実系への応用に対する見通しについて議論する。なお、このレビューは一般的なものを目指したつもりだが、後半は著者達の仕事に偏っており、異なる立場からのレビューとしては、⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾などを参照してほしい。

2. 通常の物体の運動制御

われわれは、日常生活の中で様々なものを巧みに制御しながら動かしている。しかし、長年の経験から自分の身の回りの物に関する何層にもわたるフィードバック制御の仕組みを確立しているため、ほとんどの人は、自分が何かの運動を制御しているということを意識していない。例えば、さまざまな制御技術の結晶として初めて二足歩行ロボットが実現したことを見ればわかるように、歩くという動作の背後には、実は、運動の予測と制御を組み合わせた高度な処理が必要であるにも関わらず、人間はこれを、ほとんど無意識のうちに実行している。この章では、物体の運動を制御するとはどういうことかを考え、化学反応などのミクロ系の制御にも使われる最適制御理論について説明する。

2.1. フィードバック制御

制御対象の状態が時々刻々把握でき、かつ、実施する操作に対する応答が予測できる場合には、物体の制御は比較的簡単である。例えば、車を運転している場合を考えてみるとわかりやすい。練習を通じて、ハンドル操作による進行方向の操作とアクセルやブレーキの踏み具合によるスピード操作に習熟した運転者は、車の運動状態と周囲の状態を視覚や聴覚などから知覚しながら適切に車を制御することができる。このような制御はフィードバック制御 (**feedback control**) と呼ばれ、マクロ系の運動をセンサーなどで把握しながら制御する場合はほとんどこの例となる (図1)。

ただし、運動状態をリアルタイムに把握し、すぐさま制御に反映することがいつでも可能であるとは限らない。例えば、惑星探査のために打ち上げられた宇宙船を地上から制御する場合は、信号の伝達に分単位の長い時間がかかるために、フィードバックの時間が非常に長くなってしまふ。もっとも、基本的に慣性飛行

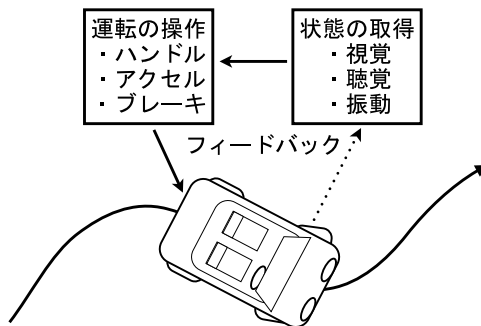


図1：運動のフィードバック制御

の状態が継続する宇宙空間では外部からの擾乱が少ないことと、マクロな物体である宇宙船は制御操作に対する応答が古典力学を使ってかなりの精度で予測できるため、フィードバックの間隔が長くなっても制御を行うことが可能である。もちろん、信号伝達のタイムスケールより短い時間間隔で予測外の事態が起きる可能性のある場合には対処することは難しくなる。例えば、2010年に小惑星イトカワからの帰還を果たしたはやぶさでは、光学的に目標天体を把握して位置制御をする「光学航法技術」が、地球からの電波を使って位置制御をする「電波航法技術」と組み合わせて利用されたそうである¹⁰⁾。いずれにしても、これらの方法は、なんらかの観測結果を解析して、運動状態にフィードバックする形で制御が行われている。

2.2. カオス制御

物体の運動というものは厄介なもので、いわゆる軌道不安定性やカオス¹²⁾の存在に注意しなければならない。一般に古典力学で表される物理系は、運動の恒量が十分な数だけ存在する可積分系と、それ以外の非可積分系(カオス系)に分けられる。すべての力学変数が恒量と関連づけて記述できるのであれば、その運動の軌道には不安定性はなく、すべての時刻にわたって運動を予測することが可能になるが、非可積分系では、外部からの小さな擾乱に対して敏感に軌道が影響を受ける。つまり、系の性質によっては、制御しようと情報をフィードバックしても、軌道が予測不可能なほどに不安定なために、制御が難しくなってしまう場合がある。このような、不安定な力学系に対して、運動状態を制御するため

の枠組みは、Ott、Grebogi, Yorke によって提案されており、一般にカオス制御 (**chaos control**) と呼ばれる^{11),12)}。

この制御法は不安定周期軌道の構造安定性というカオス系の特徴¹²⁾を利用したものとなっている。軌道不安定性はカオス系の特徴の一つであるが、これは同時に、特定の運動軌道の近傍にいつでも周期軌道が見つけられることを意味している。OGY 制御は、無数にあるこの周期軌道を利用することで、一見、不安定性のために困難に思われるカオス系の運動制御が実現可能であることを示したのである。カオス系の不安定性を逆手に取るような形の制御で、一般の力学系の運動制御にも、広くこの手法は応用されている。

2.3. 最適制御理論

物体の運動を制御しようとする時、操作に対する応答が予測できなかったり、様々な制約条件が絡み合っただけで問題が複雑になっている場合には、フィードバック制御が難しくなる。このような場合に利用可能な制御の枠組みの一つが、**最適制御理論 (optimal control theory)** である^{13),14)}。最適制御理論では、なんらかの評価関数を設定し、その評価関数が最小 (あるいは、最大) になるような制御パラメータを求めるための方法を与える。通常、外部からなんらかの制御操作を加えると、これに呼応して内部状態の時間発展が影響を受けるが、さまざまな制約条件の下での目的の達成度合いを定式化するような形で評価関数は与えられる。対象系の動力学に対する制御操作を $u(t)$ とするとき、汎関数 $f[u(t)]$ の値を最適化するように $u(t)$ を決めるもので、広い範囲の制御問題に応用されている。対象系が従うべき運動方程式や制御 $u(t)$ に関する制約条件の多くは汎関数の中に未定乗数とともに表現することができ、対象とする系や条件に応じてさまざまな汎関数が利用されている。

原子や分子などのミクロ系では動力学のタイムスケールが短く、観測した運動状態をリアルタイムで制御信号に反映させることが難しい。このため、フィードバック制御が出来ないだけでなく、その空間スケールに対応した操作方法を構築すること自体が難しい。マクロな操作を使って制御する場合、その操作の応答に関係するミクロ自由度がどうしても大きくなってしまい、応答が予測可能な単純な操作に分解して実施するということがほとんど不可能なのである。そのため、ミクロな系の動力学に対しても最適制御理論が適用されている。この詳細に関しては、化学反応制御という流れの中で解説する。

3. 化学反応の制御

ミクロの世界の動力学は量子力学で記述されることが知られているが、われわれ人間が原子や分子の時間・空間スケールの動力学に対して直接影響を与えるのは簡単ではない。通常の化学反応は、せいぜい温度や圧力などといったマクロな環境を変えることで操作されている場合がほとんどで、統計力学や熱力学を通じて間接的にミクロ系を制御するという手法がとられている。量子力学的な動力学に直接働きかけて化学反応を思いのままに制御し、必要な物質を必要なだけ作り出すことが出来れば、まさに現代の錬金術と言える夢のような技術となるが、残念ながら、現実にはそのような制御はほんの一部に限られた化学反応に対して可能になっているに過ぎない。原子や分子の直接制御が難しいのはいくつかの理由が考えられるが、ミクロの世界の動力学に関する論理をわれわれがまだ十分に理解していないという点と、量子系を直接操作するための技術が未熟であるという点あげられる。

前者は、基礎的な量子力学の論理はわかっているが、多数の分子や原子が関与する化学反応の「複雑さ」が十分に解明されていないという問題である。「すべての動力学は Schrödinger 方程式を解けばわかる」などというナイーブな還元論的論理は、現実の問題を解く場合には役に立たない¹。後者の技術的な部分に関しては、そもそも量子力学的な状態を直接操作するには、対象系のスケールに応じた微細な物体や相互作用を利用する必要があるが、空間スケールに関しては STM に使われる針の先端や光ピンセット技術、時間スケールに関しては極超短パルスレーザーなどの光学技術など、ごく限られたものしか存在しない。

このような状況でミクロ系を制御するためにわれわれが取りうる方法は、限られた道具でも操作できるような、ミクロ系の特別な性質を見つけることである。以下では、そのうち、複数のポテンシャル面を利用した方法と、量子力学の干渉効果を利用した方法の二つを例としてあげる^{6),7)}。その後で、最適制御理論を利用した化学反応制御に関して、われわれの仕事を含めた最近の研究動向について述べる。

1 ただし、数原子分子の動力学やレーザー制御の問題に関しては、ここ 20 年ほどで大いに進展があった。たとえば、参考文献 2) を参照。

(32)

3.1. 二準位系の量子力学

ミクロな原子や分子の動力学を記述するのは、Schrödinger 方程式である^{1),2)}。

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi(r, t) = H\psi(r, t) \quad (1)$$

ここで、 $\psi(r)$ は位置座標 r の複素数関数で波動関数と呼ばれ、 $|\psi(r)|^2 d^3r$ は微小体積要素 d^3r での存在確率を表す。これは線形の偏微分方程式であるから、真空中に孤立した原子や分子を記述する場合、 r としてすべての粒子の座標を含め、基本的な相互作用をハミルトニアン H の中に記述すれば、原理的には解くことができる。もし、 H を対角的に表現できるような基底関数系 $\{\varphi_j(r)\}$ が求められれば²⁾、 $\psi(r)$ は

$$\psi(r, t) = \sum_j c_j \varphi_j(r) \exp \left[\frac{E_j t}{i\hbar} \right] \quad (3)$$

という形で表され、そのダイナミクスは単なる位相因子の回転だけとなる。しかし、原子核と電子の位置座標とスピンの自由度をすべて含めた多粒子系の量子力学は、有効な近似を導入しない限り現実的には解くことは不可能である³⁾。また、制御ダイナミクスを考える場合には、外部系との相互作用を考慮する必要があるため、単純な固有値問題にはならない。とにかく、何らかの近似の導入は必須である。断熱近似などの導入によって実際の化学反応制御を記述するのは次の節からとし、ここでは最も単純化した二準位モデルでの運動を例として考える^{15),16)}。

孤立系に対して、 E_+ と E_- というエネルギーで表される二つの状態だけが重要になる状況を考える。この時、 $\psi(r, t)$ は直交する二つの成分の和

$$\psi(r, t) = a(t)e^{E_+ t/i\hbar} \varphi_+(r) + b(t)e^{E_- t/i\hbar} \varphi_-(r) \quad (4)$$

となる。このエネルギー差 $\Delta E = E_+ - E_-$ をプランク定数で割った周波数（共鳴周波数）に近い振動成分をもった外場とこの系が相互作用すると、二状態間に遷

2) それは以下のような方程式を満たす。

$$H\varphi_j(r) = E_j\varphi_j(r) \quad (2)$$

H は通常、行列で表示されることが多いので、これは固有値問題を解くことに相当する。

3) 量子ダイナミクスの近似解法や半古典近似に関しては²⁾ を見よ。

移が頻繁に起こるようになる。この振動運動は **Rabi 振動 (Rabi oscillation)** と呼ばれ、量子力学のダイナミクスとしてはもっとも基本的なものの一つである。

実験で観測できるのは、それぞれの状態の存在確率で、係数の絶対値の自乗 $|a(t)|^2$ と $|b(t)|^2$ で表される。共鳴に近い周波数を持つ古典外場を加えた場合、実際に Schrödinger 方程式を解いて時間発展を計算すると、系の周波数と外場の周波数の差に相当する振動と、二周波数の和に相当する振動が生ずることがわかる。この和周波数の運動は差周波数の運動に比べてきわめて速い運動であるため、この周波数部分を見捨てるという近似は、外場の振幅が小さい場合には有効に働くことがわかっている。この近似は **回転波近似 (rotating wave approximation)**^{15),16)} と呼ばれ、共鳴ダイナミクスがゆっくりした運動として記述される座標系では、非共鳴運動は速い時間スケールの運動として見捨てることから広く使われている近似で、一種の断熱近似である。共鳴した振動数を持つ弱い外場での遷移を考えると、この近似のもとでは、各状態間の振動の速さは加えられる共鳴外場の振幅に比例する。二状態をそれと数学的に等価な上向き・下向きのスピン・ベクトルを使って記述すると、ゆっくりした遷移運動は、このスピンの向きの回転に相当していることが分かる^{15),16)}。その際に、ちょうど反対向きになったスピン間の角度が π になることから、状態間を完全に遷移するために必要な外場は π パルス (π pulse) と呼ばれる¹⁵⁾。このような考え方は、量子力学の黎明期から、量子力学を精緻化された技術として使っている今日にいたるまで、様々な物理過程を記述するために用いられている。

3.2. 複数のポテンシャル面 — ポンプダンプ制御 —

分子を構成する電子と原子核の質量は 3 桁以上も異なっているため、断熱近似的な手続きにより、電子と原子核の運動を分離して解くことができる¹⁷⁾。原子核の運動は電子に比べて十分ゆっくりであるため、電子の運動を解く時に、原子核が静止しているという近似を導入するのである。原子核の位置を固定した中で量子化学的な計算を行うと電子状態エネルギーを求めることができるが、静止させた原子核の位置を少しずつ変えて同様の計算をすれば、連続的に変化するポテンシャル面⁴⁾が得られる。静止しているとして求めたポテンシャル面上で原子核の運動 (分子内の振動や回転運動) を考えるというのが、断熱近似の考え方による分子の運動の記述方法である。

このような見方はミクロ系の描像を単に与えるだけでなく、この系の運動を制

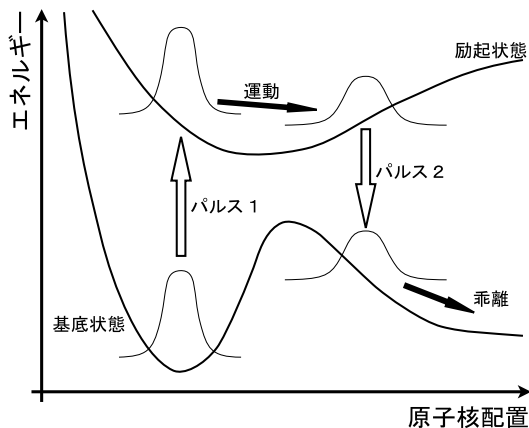


図 2： 励起状態ポテンシャル面を利用すると、分子の運動制御を行うことができる。

御するための方法をも与える。光による電子状態の励起は広く行われている実験の一つで、基底状態のポテンシャル面上で運動している状態に、電子状態間のエネルギーに一致する波長の光を与えると、一つ上の電子状態に励起することができる。一般に、励起状態のポテンシャル面の形状は基底状態とは異なるため、電子の基底状態ポテンシャル上で安定な原子核の運動は、励起状態ポテンシャルでは安定な状態ではない。通常は、電子が瞬間的に光励起される時、振動・回転を表す波動関数の形は変わらないとして扱う（Frank-Condon 状態）が、この波動関数は、励起状態ポテンシャル面では安定な状態ではないため、原子核の運動状態を変えることができる。つまり、電子状態ポテンシャルが基底状態と励起状態と異なるという性質を使って、分子の運動を操作するのである。

もし、基底状態と励起状態のポテンシャル面が詳細にわかっていたら、電子状態を励起した後の原子核の運動を予測することが可能であるが、制御するという

- 4 分子は複数の電子と原子核からできているが、電子に比べて原子核のほうが重いので、原子核を止めて、電子についてのシュレーディンガー方程式を解くということが正当化される（Born-Oppenheimer 近似と呼ばれる）。その結果、原子核が感じる有効ポテンシャルが導出されるが、化学の分野では、これを単にポテンシャル（エネルギー）面と呼ぶ。

目的のためには必ずしも完全にわかっている必要はない。例えば次のような状況を考えてみよう。基底状態ポテンシャルのある部分に分子が乖離する方向が存在するとして、何らかの方法でこの部分に原子核を移動したいとする。通常は図2のようにポテンシャル障壁があるために、そのままの状態では分子の乖離反応を起こすことは出来ない。原子核の運動を変化させるために、電子状態を励起する光パルスと励起状態から基底状態へと緩和させる光パルスを用意する。この二つのパルスの間隔は励起状態に滞在する時間に直結しているため、それによって、基底状態に降りた時の運動状態を制御することが可能になる。この場合、基底状態の形と励起状態の形がだまかにわかっているならば、パルスの時間間隔という一つのパラメータを変化させることで、化学反応を制御できるのである。これは実際の実験では、励起するためのポンプ光、脱励起するためのダンプ光を使うことから、**ポンプダンプ制御 (pump-damp control)** と呼ばれる。

この節で扱ってきたような準位間の遷移ダイナミクスを考えると、非断熱遷移という現象も重要である^{18),19)}。一般に量子力学的な固有値は、外部パラメータの変化などによってハミルトニアンが連続的に変化するとき、特徴的な疑似交差 (**pseudo-crossing**、あるいは、**avoided-crossing**) と呼ばれる構造を作る^{20),21)}。古くは Landau や Zener などによる研究 (1932 年) で、この構造を介した遷移の確率が求められているが、この現象を分子の運動の制御に応用することができる¹⁸⁾。断熱近似の電子状態では、原子核が静止している時は、異なる電子状態に属する固有状態は完全に直交しているが、原子核がなんらかの運動をしている時、この運動の速さに比例する非断熱結合により電子状態間に遷移が生ずる。このような遷移を積極的に利用して、制御に利用しようということである。

3.3. 量子干渉の利用 — コヒーレント制御 —

複数のポテンシャル面という特別な構造がなくても、量子系の干渉という基本的な性質を利用すると、ミクロな系を制御することが可能になる。一般に分子や原子の系は、量子力学に従う化学反応素過程に分解されることが多い。これらのうちのどこかで、量子力学的な干渉を操作できる部分があれば、化学反応制御に応用することが可能になる。これを**コヒーレント制御 (coherent control)** と呼ぶ⁷⁾。

よく知られているように、系が近接したエネルギーの固有状態を持つ場合には、エネルギー差に相当するビート周波数が観測できるが、このような固有状態

間の干渉を利用することや、思考実験でよく扱われる二重スリットの実験のように空間的に異なる反応経路がある場合には、再度合流した時の干渉を利用することもできる。異なる経路に分かれるという大まかな性質がわかっているならば、片方の経路になんらかの操作を加えるだけで実験的に干渉効果を確認することが可能で、場合によっては化学反応に影響を与えることもできる。

3.2 節で考えたポンプダンプ制御は、分子のポテンシャル面が持つ特定の性質をうまく利用して化学反応制御に応用しようとするものであった。しかし、干渉性は量子系が持つ一般的な性質であるため、非常に広く応用可能である。実際、コヒーレント制御は単原子反応（光解離）、分子衝突反応、プロトン移動、分子内エネルギー移動などの制御に応用されており、いくつかは実験的な検証もなされている⁷⁾。

Gong と Brumer は古典極限でカオスになる系、いわゆる量子カオス系のコヒーレント制御の問題を調べた（量子カオス系の具体例については 5.1 節を見よ）。これは 2.2 節のカオス制御を量子化したものと考えられることもできるが、彼らの状況設定は古典系のカオス制御とは異なり、カオス性をなくさないようなパラメータ領域で制御の問題を考えている。彼らは量子カオス系の例として 5.1 節の kicked rotor を考え、そのコヒーレント制御の問題として、初期状態を「重ね合わせ状態」にしたときに系の発展がどうなるかということ調べた²²⁾。たとえば、式 (4) は典型的な重ね合わせ状態である。このときに、 $a(t)$ に対する $b(t)$ の位相を変える ($a = b$ としたり、 $a = -b$ としたりする) ことで、運動量方向の拡散が非常に異なることが数値的に見出された。重ね合わせ状態は一般に、「非古典的」な状態になっていることが多いので、この結果はその非古典性が現れたとみなすこともできるが、この現象の半古典的な理解はまだなされていない。また、彼らはキックの大きさを M キックごとに換えることで古典系のカオスの性質を変え、その結果として異常拡散 (anomalous diffusion) が起こるような領域を見出した。その場合は、面白いことに量子ダイナミクスは古典ダイナミクスよりも速くなる²³⁾。

3.4. 遺伝的アルゴリズム

これまでのアルゴリズムは系の特徴や量子性を使った制御であったが、実際は系が複雑であったり、量子性をきちんと考えることが難しいこともあるため、動力学的詳細に依存しない制御法が求められることがある。特に実験や工学的な応

用を考える際には、そういった practical な考えが重要となる。そこでよく用いられるのは遺傳的アルゴリズム (genetic algorithm)²⁴⁾である。

遺傳的アルゴリズムとは、生命の進化を模した最適化のアルゴリズムであり、非常に汎用性があるためにさまざまな分野で用いられている。その基本的な原理は DNA の複製過程とほぼ同じである。まず「遺伝子 (gene)」を複数用意する。ここで言う遺伝子とは最適化したい、ある状態空間の一点を指す。つまり、 $f(x)$ という関数を最適化したい場合、 x が遺伝子ということになる。その複数の遺伝子から以下の手順で「次世代」の遺伝子を作る。

- (1) 2 個の遺伝子を選び、それらを適当に切ってつなぎ合わせ、別の遺伝子を 2 個作る。
- (2) 1 個の遺伝子を選び、その一部を突然変異させる。
- (3) こうして得られた次世代の遺伝子で $f(x)$ を計算し、結果のよいものを次世代に残す。
- (4) 遺伝子の個数が減った場合は適当にコピーして個体数を増やす。

この手順を繰り返すことで、遺伝子レベルの自然淘汰が起こり、「最適な」ものが最後に残されるという仕組みである。このアルゴリズムはあらゆる最適化問題に応用可能であり、具体例としては巡回サラリーマン問題、タンパク質の折り畳み問題、プログラミングやネットワークの進化の問題などがある。

さて、本稿の主題である、分子系のレーザー制御も最適化問題の一つであるので、このアルゴリズムを適用することができる²⁵⁾。その場合は、時間の関数としてのレーザー電場 $E(t)$ を遺伝子と読み替えばよい。実験でレーザー場の最適化をするときには、電場を一回、周波数成分に分けてから調節するので、周波数空間での電場 $E(\omega)$ を遺伝子と思ってもよい。この手法は比較的大きな有機分子²⁶⁾や生体分子²⁷⁾に使われ、有効であることが示された。

この方法の利点は、どんな系であってもターゲットを一回定めれば適用できること (いくら複雑で巨大な系でも構わない)、また実験の制約内であれば、どんなレーザー外場でも生み出せる (弱レーザー場である必要などがない) ということがある。また、結果得られるレーザー場から、どのような分子プロセスが起こっているか推測することも可能である。しかし、一般的な方法である半面、非

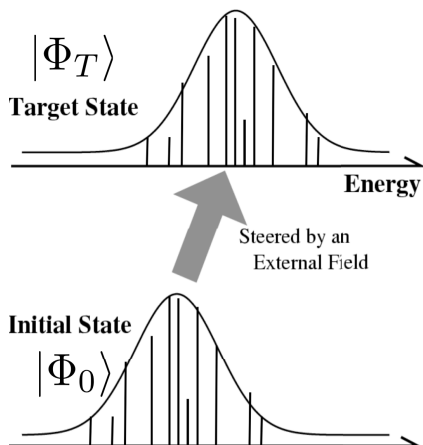


図3：最適制御理論は、初期状態と目的状態が与えられた時に、さまざまな制約条件の下で制御外場を設計するための枠組みを与える。通常は、時間に依存した制御外場を、適切な汎関数を最適にするように求める。

常にブラックボックス的な手法でもあり、完全な制御を達成することは難しい場合が多い。そこで、もっと理論的に整備されている最適制御理論（2.3 節）を量子系に適用することを以下考える。

3.5. 量子系に対する最適制御理論

分子や原子の系のような量子力学に従うマイクロ系を制御するとき、現時点ではレーザーなどのコヒーレントな光を利用するのがもっとも効果的である。20 世紀の分光学は、量子力学の黎明期に重要な役割を演じた後、**量子光学 (quantum optics)**^{16),28)} という新しい分野を形成して更なる発展を遂げ、科学実験においても精密な測定はレーザーなくしては考えられないと言ってよい。現在でも、量子系の状態を調べ制御するためにはレーザーはほとんど唯一と言っていい実験手段である。しかし、可視光までのレーザーが発する光の波長は、原子や分子の空間スケールより長く、残念ながら「直接」⁵量子系に影響を与えるものではない。

5 この「直接」というニュアンスは古典系のときのように目にみえるような形で制御することができないということである。というのも制御の対象がもはやもやした波動関数だからである。

つまり、レーザーによる制御の場合も分子に比べると非常に波長の長い古典的な電磁場を使った制御となる場合がほとんどであるため、化学反応に与える影響は量子系と古典波動との相互作用を介したものとなり、制御過程を直接的に設計することが難しいのである。そこで、ここでも最適制御理論が応用されることになる。

量子系を対象とした最適制御理論は、1980年代の後半から、制御可能性の観点から議論がされはじめ、1990年代を通じていくつかの重要な仕事が行なわれている。最適制御理論を使った量子状態制御の問題設定と、提案された汎関数は、以下のようなものである^{2),6)}。まず、図3のように、目的状態 $|\Phi_T\rangle$ が与えられており、 $t=0$ における初期状態 $|\Phi_0\rangle$ から時間発展を始めた量子状態が、時刻 $t=T$ において目的状態と一致するような時間依存の制御外場 $\varepsilon(t)$ を設計する。そのために、制御外場 $\varepsilon(t)$ といくつかの未定乗数（関数）を引数とする汎関数を以下のように導入する（これは一義的ではない²⁹⁾）：

$$J = |\langle \phi_\varepsilon(T) | \Phi_T \rangle|^2 - 2\text{Re} \left[\langle \phi_\varepsilon(T) | \Phi_T \rangle \int_0^T \langle \chi_\varepsilon(t) | \frac{\partial}{\partial t} + \frac{i}{\hbar} H_\varepsilon | \phi_\varepsilon(t) \rangle dt \right] - \alpha_0 \int_0^T |\varepsilon(t)|^2 dt \quad (5)$$

右辺第一項は、時刻 $t=T$ での状態 $|\phi_\varepsilon(T)\rangle$ と目的状態 $|\Phi_T\rangle$ との重なりであり、これが大きければ大きいほどよい（最大値は1）。右辺第二項は量子状態 $|\phi_\varepsilon(t)\rangle$ と $|\chi_\varepsilon(t)\rangle$ が Schrödinger 方程式 (1) を満たすための条件であり、これらの関数で J を変分することで、Schrödinger 方程式が導かれる。また、これらの状態は $|\phi_\varepsilon(0)\rangle = |\Phi_0\rangle, |\phi_\varepsilon(T)\rangle = |\Phi_T\rangle$ という条件を満たすものとする。第三項は外場 $\varepsilon(t)$ に対する条件を表しており、これは電場の電力が小さいほどよいということを表している²⁹⁾（それを α_0 という定数で制御する）。 J の $\varepsilon(t)$ に関する変分から、

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\alpha_0 \hbar} \text{Im} \left[\langle \phi_\varepsilon(t) | \chi_\varepsilon(t) \rangle \langle \chi_\varepsilon(t) | \frac{\partial H_\varepsilon}{\partial \varepsilon} | \phi_\varepsilon(t) \rangle \right] \quad (6)$$

という重要な関係式が得られる。これは、汎関数 (5) に従う最適制御状態 $|\phi_\varepsilon(t)\rangle$ 、 $|\chi_\varepsilon(t)\rangle$ と最適外場 $\varepsilon(t)$ との関係を与える。

通常、最適制御問題の汎関数を最適にする解を求めるためには、非常に自由度の大きい最適化問題を解かなければならないが、汎関数 (5) を使えば、式 (6) を Schrödinger 方程式に代入して、量子ダイナミクスを繰り返し計算することによって最適解に到達できることがわかっている³⁰⁾。しかし、この量子ダイナミク

スの計算コストは自由度の数が増えると指数関数的に増えるという問題があり、この繰り返し計算をできれば避けたい。そこで、われわれがこの問題にどのように取り組んだかということを以下述べていこう。

4. ランダムベクトルに対する制御

量子系の制御を考える際には、その簡単さのために、数準位系を対象とすることが多い。そして、ある 1 準位から出発し、別の準位に π パルス、もしくは断熱掃引 (adiabatic passage)⁶ によってほぼ 100 パーセント遷移させるというのが分かりやすい方法である。これは一準位一準位間の遷移 (**one-level-to-one-level transition**) の制御と呼んでいいだろう。このような状況は、1 原子や数原子分子を低温にして、その基底状態からの制御を考えている場合におこる。しかし、多原子分子を制御する場合、一般的には図 3 にあるように、制御の対象として、初期状態と目的状態が多くの準位を含む場合もありうる。そこでこのような多準位多準位間の遷移 (**multi-level-to-multi-level transition**) の制御を考えることが重要になる。まず、そのような多準位を含む状態ベクトルとして何をとりのがよいだろうか。非常に一般的なものとしては、ヒルベルト空間上のランダムベクトル (**random vector**) が考えられる³¹⁾。しかし、数値計算を実施する上で無限次元の空間は扱いにくいいため、 N 個の規格直交基底 $\{|\varphi_j\rangle\}$ で表される有限次元空間を考える。このとき、これらの基底による線形結合

$$|\psi\rangle = \sum_{j=1}^N c_j |\varphi_j\rangle \quad (\text{ただし、規格化条件 } \sum_{j=1}^N |c_j|^2 = 1 \text{ を満たす。}) \quad (7)$$

で表される量子状態は、 $2N$ 次元ユークリッド空間中にある、半径 1 の球殻上の点となる。

もし、目的状態 $|\Phi_T\rangle$ と初期状態 $|\Phi_0\rangle$ として異なるランダムベクトルを設定

6 系のパラメータを変えたときに、avoided crossing^{20),21)} を越えると状態が入れ替わる。断熱掃引とは、この原理を使って、そのパラメータをゆっくり動かすことで状態遷移を起こさせる方法である。もし、その変化が十分ゆっくりでないと、非断熱遷移のために完全な遷移は起こらない。

した場合、外場が全くない状態 ($\varepsilon(t) = 0$) での量子状態の重なりは小さく、

$$|\langle \phi_0(T) | \chi_0(T) \rangle|^2 = \left| \sum_j \tilde{c}_j^* \tilde{d}_j \right|^2 \sim O(N^{-1}) \quad (8)$$

である。つまり、量子状態 $|\phi_0(t)\rangle$ と $|\chi_0(t)\rangle$ は、ほとんど直交しているということが出来る。

この章で考える量子状態の制御問題では、初期状態と目的状態としてほとんど直交しているランダムベクトルを対象とし、汎関数 (5) を最適にする外場 $\varepsilon(t)$ を求めた上で、これにより、どのようなダイナミクスが誘起されているのかを考える。

4.1. 長時間極限での最適制御状態

低温技術などの進歩により長時間にわたってコヒーレントな量子状態を作り出すことが可能になりつつあることから、最適制御理論において、十分に長い時間をかけて制御する場合の極限では、どのようなダイナミクスが現れるのかを考えてみる。ここで考える最適制御のための汎関数 (5) には制御外場の振幅に関するペナルティ項が入っているため、制御のための時間が非常に長い場合、可能な限り振幅の小さな外場が選ばれることになると考えられる。制御ダイナミクスの中で量子状態間に何らかの遷移が誘導されるとすると、一般に、状態間の遷移による確率密度の移動は、外場の振幅に比例するので、小さい振幅によるダイナミクスは十分に滑らかな遷移となることが予想される。そこで、量子状態間を最も滑らかに遷移するコヒーレントなダイナミクスの典型例である Rabi 振動

$$|\psi(t)\rangle = |\phi_0(t)\rangle \cos(|\Omega|t) - ie^{-i\theta} |\chi_0(t)\rangle \sin(|\Omega|t) \quad (9)$$

が実現できる可能性を検討しよう。ここで $|\phi_0(t)\rangle$ と $|\chi_0(t)\rangle$ は $\varepsilon(t) = 0$ として Schrödinger 方程式を解いて得られる状態である。位相 $e^{i\theta}$ は、 $\langle \phi_0(T) | \chi_0(T) \rangle = 0$ が厳密に成立する場合は任意に選べる。

$|\phi_0(t)\rangle$ と $|\chi_0(t)\rangle$ は、Rabi 振動の場合の固有状態に相当するもので、外場のない孤立系の Schrödinger 方程式に従い時間発展する状態である。この一般化された **Rabi 振動** (9) は、時間に依存する基底 $|\phi_0(t)\rangle$ と $|\chi_0(t)\rangle$ で張られた平面内の回転運動を表す (図 4)。ただし、この平面は、 $\varepsilon(t) = 0$ の場合の時間発展法則に従って、時間とともに高速に向きを変えている。つまり、式 (9) の状態は、

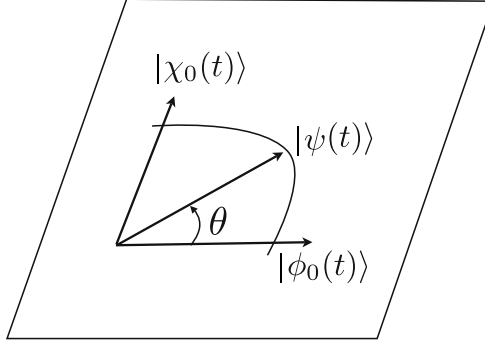


図4：高速に運動する平面内でのゆっくりとした回転運動。

一般的な多準位系のダイナミクスの中から、制御によるゆっくりとしたタイムスケールの遷移だけを分離した形になっている。しかし、まだこの段階では、現実にもこのようなダイナミクスが誘起されるかどうかはわからない。次のようにして最適制御理論の助けを借り、実際にこのような遷移が生じることを確認しよう。

もし、一般化 Rabi 振動 (9) を作り出す最適制御外場があるとしたら、それはどのような形をしているのだろうか。そのために、この時間発展 (9) を最適外場の関係式 (6) に代入し、様々な条件を考慮しながら $\alpha \rightarrow 0$ の極限を取ると、最終的に

$$\varepsilon(t) = \frac{2\hbar\Omega_m}{\bar{V}^2} \operatorname{Re} \left[e^{i\theta} \langle \chi_0(t) | \frac{\partial H_\varepsilon}{\partial \varepsilon} | \phi_0(t) \rangle \right] \quad (10)$$

という形式の外場が得られる。ただし、

$$\Omega_m = \frac{\pi}{T} \left(\frac{1}{2} + m \right) \quad (11)$$

は一般化された π -パルスを与える共鳴角速度であり、

$$\bar{V}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \langle \chi_0(t) | \frac{\partial H_\varepsilon}{\partial \varepsilon} | \phi_0(t) \rangle \right|^2 dt \quad (12)$$

は二状態間の遷移要素の平均である。この最適外場は、解析的な表現 (10) が与えられているため、初期状態と目的状態で定義される量子状態 $|\phi_0(t)\rangle$ と $|\chi_0(t)\rangle$ から、最適化計算なしで求められる。つまり、量子ダイナミクス計算を繰り返す行う必要がなく、量子系に対する最適制御理論の問題点 (の一つ) を解消しているわけである。

4.2. ランダム行列と決定論的動力学

実際に、前の節で求めた解析的な外場の式 (10) が二つのランダムベクトルの間の回転運動を与えるかどうかは、数値計算により検証することができる。まず、この量子系のダイナミクスと外場との相互作用を決定するために、 $N \times N$ 行列としてランダム行列 (**random matrix**) H_0 と V を決め、外場 $\varepsilon(t)$ によって制御された時間発展は、ハミルトニアン

$$H_\varepsilon = H_0 + \varepsilon(t)V \quad (13)$$

で表されることとする。ここで導入したランダム行列は、表示基底の変換によって分布の性質が変わらないことを要求することで得られるもので、ガウシアン直交集団、ガウシアンユニタリ集団などいくつかの種類がある^{37),39)}。これらは系が属する対称性に依存して行列要素の分布が異なっているが、このために固有値などの分布の仕方が、それぞれ特徴的な性質を持っている。これらの行列で表されるハミルトニアンを使うということは、ここで考えるダイナミクスは、系の対称性を除いて特別な性質を持たない、ということ仮定している。

次に N 自由度の量子系のランダムベクトルを二つ選び、片方を初期ベクトル $|\Phi_0\rangle$ 、もう片方を目的ベクトル $|\Phi_T\rangle$ とする。制御時間 T を設定すれば、 Ω_m や \bar{V}^2 などの量を計算することができるため、実際に Schrödinger 方程式に従った数値計算を実施し、時刻 $t = T$ での量子状態 $|\phi_\varepsilon(T)\rangle$ と $|\Phi_T\rangle$ との重なりを求めれば良い。図 5 は、ガウシアン直交集団の場合の結果で、制御完了までの時間を横軸に取り、制御による成果を表示したものである。対称性により詳細は異なるが、ランダム行列系に対して一般的に、制御にかかる時間 T が長いほど、また行列の大きさ N が大きいほど、得られる結果が良くなることがわかった^{34),35)}。

ここでは一般的な状態間の遷移を考えるために、ランダムな量子状態とランダム行列による相互作用を導入して解析した。そこで、ランダム行列で扱われる相互作用、あるいは、ハミルトニアンが、物理系の運動状態としてどのようなものをモデル化したものであるのか、についてコメントをしておく。そもそもランダム行列やランダムベクトルは、原子核のハミルトニアンなど詳細がわからない系を表現するための数学的モデルとして導入されてきたものであるが、その後の研究で、運動の非可積分性と関連があることがわかってきた。つまり、当初、情報がないためにランダムなモデルを導入したが、実は非可積分系のダイナミクスと

(44)

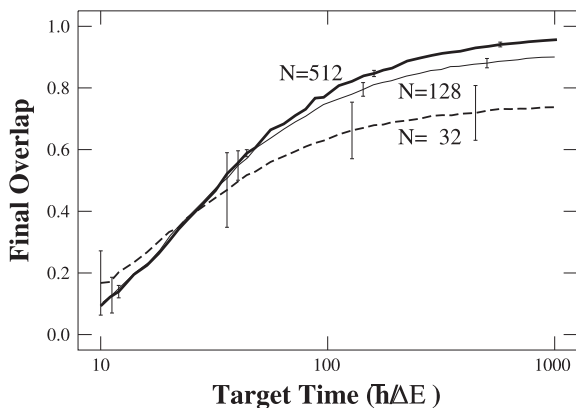


図5：制御する時間 T が大きくなれば、もしくはランダム行列の大きさ N が大きくなれば、十分な制御が可能となる（制御された状態と目的状態との重なりが 1 に近くなる）。

密接に関連することがわかったのである。

ここで得られた制御外場を使った検証は、量子的な位相まで含めた完全な決定論的ダイナミクスを仮定した上でのものであり、いわゆるコヒーレントな時間発展であることが必要である。一方、ハミルトニアンは基底表現に要素分布の性質が依存しないランダム行列として与えられているため、系の動力学的な非線形性が仮定されている。一見、コヒーレンスと非線形性は両立しないように思われるが、量子系に関しては、これらを同時に満たすことが可能である。

古典的に非可積分である系の量子力学は、1980年代以降、量子カオス系として、量子古典対応などの観点から盛んに研究されてきた^{1),2),12),36),37)}。対応する古典力学が軌道不安定性を持つため、これらの系は、内在的な非線形性を持つと考えられる。その一例として、十分に強い量子カオス系では、ハミルトニアンの固有状態が空間全体にランダムに広がった形のものになっており、局在した波動関数を表現するためにも、多くの状態の重ね合わせを使う必要があることが知られている。これは、当初局所的であった波動関数が時間とともに急速に広がることを表し、波束の運動に関して系が非線形性を持つことを示している。しかし、量子系の時間発展は、あくまでユニタリーであるため、位相のコヒーレンスは保たれる。

十分に強いカオス系を仮定することでランダム行列の統計的性質が使えるた

め、系の対称性や固有エネルギー分布などの観測できる情報から、最適外場を解析的に構成するためのパラメータを推定することが可能である。例えば、十分に強いカオスを示すハミルトニアン (13) では、外場との相互作用演算子 V の行列要素の分布は特定の基底に依存しないものになるため、ランダム行列の固有値分布と要素分布の関係を利用することが可能である⁷。

十分に強いカオス系の量子ダイナミクスが、化学反応系などのモデルとして利用可能であれば良いのだが、実験室などで観測される量子系では、必ずしも十分に強いカオスとは言えない場合もある。そのような場合にどのような扱いが必要になるかは、後の節で検討する。

4.3. 制御外場の安定性

最適制御理論によって設計された外場を使って量子状態を制御する場合、実際には当初のもくろみ通りうまく行く場合ばかりではない。本稿で考えている量子系の制御は、完全にコヒーレントな時間発展が実現できている場合を考えているために、当然のことながら、何らかの擾乱により量子的な位相の連続性が破れてしまう（つまり、位相緩和がおこっている）と、有効でない可能性がある。また、完全にコヒーレントな時間発展をしているという前提の中でも、様々な誤差などによる影響を考える必要がある。ここでは、何らかの誤差によって当初の設計通りの外場が作れなかった場合に、制御の効率がどのように変更されるかを、次のような手順で調べることにする。

まず、最適制御理論を使って十分に大きな効率で制御が可能になるような最適外場を設計しておく。その外場に、白色雑音的な異なる周波数成分を加えると、雑音の大きさに応じて当初の制御効率より低下することが予想される。これは、制御外場の堅牢性 (**robustness**) のチェックをしていると見なすことができる⁸。

7 しかし、 H_0 と V という演算子の間に関連があるような特別な場合には、 H_0 の固有状態で表示した場合の要素分布に一般性がなくなり、行列要素の分布を予測することが難しくなってしまう。

8 別の見方をすると、最適制御された系の fidelity を調べていると考えることもできる。fidelity とは Peres によって導入された量であり¹⁾、あるハミルトニアンのもとでの波動関数の時間発展と、そのハミルトニアンから微少にずれたハミルトニアンのもとでの波動関数の時間発展の内積をとったものである。fidelity の振る舞いは系の古典的な不安定性を反映することが知られている³⁸⁾。

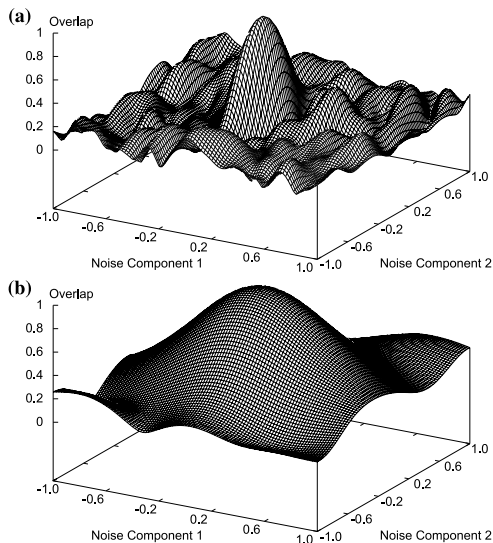


図 6：最適制御理論による外場の安定性。制御時間が短い場合 (a) は加えられた摂動に対して敏感に変化するが、制御時間が長い場合 (b) には比較的大きな摂動を加えても制御の効果は変化しにくい。

ランダム行列系の制御に対する雑音の効果を調べると、顕著に差が出る要素の一つとして制御時間が挙げられることがわかった。最適制御理論では、初期状態から目的状態への遷移に必要な時間をあらかじめ設定した上で、最適外場を求めることになるが、この時間 T が短い場合と長い場合を比較すると、長い場合の方が外場の変化に対してロバストなダイナミクスになっているのである。時間の単位 Δt を平均固有値間隔 ΔE の逆数を使って $\Delta t \equiv \hbar/\Delta E$ と定義する時、図 6 に示した結果は、(a) $T = 10\Delta t$ 、(b) $T = 50\Delta t$ の場合である。二つの異なる成分の雑音を加えた時にどれだけ効率が低下するかを示している。 x 軸、 y 軸に相当する部分が加える雑音成分の振幅で、 z 軸に相当する部分が目的状態との重なり、つまり、制御の効率を表す。明らかに (b) の方が雑音による影響が小さいことがわかる。この結果を一般化された Rabi 振動 (9) や解析的な電場 (10) を用いて理解することは今後の課題である。

4.4. 現実系に近い場合

ここでは別の観点から現実的かどうかの検証を行うために、理想的にランダムなハミルトニアンではなく、もうすこし現実的な多原子分子の運動を考えてみよう。特別な光などとの相互作用がない場合を考えると、有限の温度においても電子状態は基底状態にあると考えられるが、基底状態ポテンシャル面の上での多数の原子核は、非常に複雑な相互作用ポテンシャルを感じながら、振動や回転の運動をしていると考えられる。つまり、分子の振動・回転運動を量子力学的に扱う場合には、内在的に非線形性を持っているということができるのである。すでに何年にもわたって、分子内振動運動などの非線形性を考慮して、エネルギー移動などの非平衡な現象が研究されている⁴⁰⁾。

運動の制御においても、このような非線形性を積極的に利用すると、最適制御理論による外場設計や、一般化された π パルスによる制御外場が利用できる可能性が高い。しかし、残念ながら現実の系の非線形性は強いカオスの極限とは異なるために、完全にランダムな場合に考えたような解析的な手法をそのまま適用することは難しく、現実の系に応じた修正を加える必要が生じる。現実の系が理想的なランダム系と異なる点の一つは、相互作用演算子 V の行列要素が、表示の基底系によっては有限の幅を持つランダム分布、すなわちバンドランダム行列 (**banded-random matrix**) になるということである。

相互作用演算子 V がバンドランダム行列であっても、長時間極限での最適外場 (10) を適切に修正すれば、制御効率を十分に大きくすることができる³⁵⁾。現実の多原子分子系に対しても、その相互作用ハミルトニアンをバンドランダム行列に落としこむことができれば、同様の手法で制御可能である。

5. 量子カオス系から生体分子へ

この章では、数学的なランダム行列系ではなく、実際のダイナミクスが理解しやすいモデル系を使って、量子力学と古典力学の両方の観点から制御の問題を考えてみることにする。そのために、 q を空間座標とする一次元の量子系を考える。ただし $0 \leq q < 2\pi$ とし、系は周期境界条件: $\phi(0) = \phi(2\pi)$ を満たすものとする。この系は、 q を角度変数と考えれば、分子などのミクロな物体の、ある軸の周りの回転運動だけを取り出したものと見ることができる。(ミクロな物体であるため、角度方向に幅を持った波束の形で状態を指定することになる。) このとき、ある運動状態にある波束を、別の運動状態の波束に変化させることを考えよう。

(48)

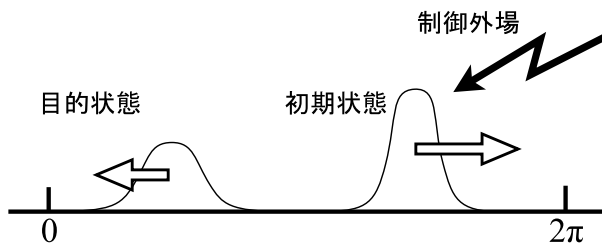


図 7： 1 次元空間での波束の運動の制御。

5.1. 量子カオス系の制御

初期状態を右向きに運動している波束とし、目的状態を別の場所で反対向きに運動している波束とすると、図 7 に示すような制御を考えることになる。前節では、制御のための外場（電場）との相互作用演算子 V としてランダム行列（もしくはバンドランダム行列）を仮定した。しかし、ここでは現実的なハミルトン系の場合にどうなるかということに注目するので、そのような仮定は置かない。

まず、系を少し「複雑」にするために、撃力が一定周期で加えられるような相互作用を導入しよう。時間発展を表すハミルトニアンを

$$H_{\text{KR}}(t) = \frac{p^2}{2} + K \cos(q) \sum_n \delta(t - n) \quad (14)$$

と定義する。ここで t は時刻を表し、 K は周期的外力の強さを表す。定期的に加えられる周期外力は、角度 q （周期 2π ）に応じた向きと大きさを持つ。これは **kicked rotor**（もしくは**標準写像**）と呼ばれ、非線形力学系を調べるために使われるモデル系のうち、最も単純なものの一つである^{36),37)}。

この系に対して、まず最適制御理論を適用して制御外場を設計すると、その結果は図 8 のようになる³³⁾。これを見ると、非線形性の強さによるダイナミクスの違いが明らかにわかる。非線形性が弱い場合には、運動量方向（ y 方向）への拡散がないため、トーラスと呼ばれる局在した状態の付近に比較的長く滞在しているが、非線形性が強くなると、急速に位相空間全体に広がってしまうことがわかる。どちらの場合も、設計された制御外場によって目的状態への制御が可能である⁹⁾。

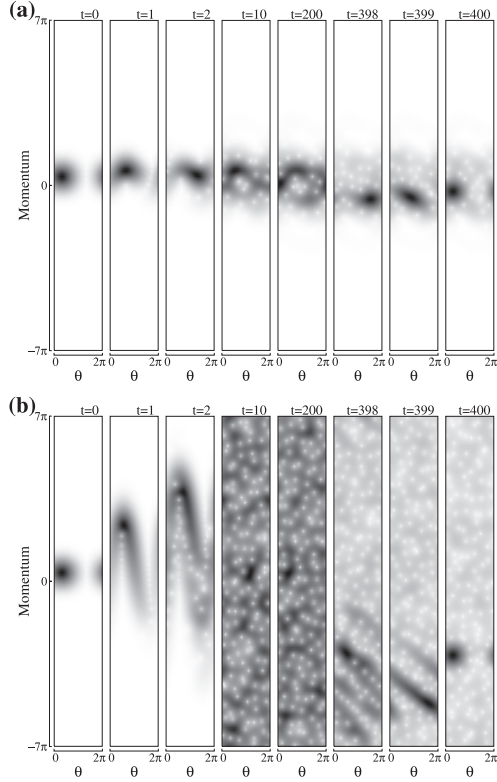


図 8: Kicked rotor 系の制御ダイナミクス。非線形性の弱い場合 (a) に比べて強い場合 (b) には、位相空間全体に広がった後に、目的状態へ収束する。

この場合に利用した外場との相互作用演算子は、

$$V = \cos\left(q + \frac{\pi}{3}\right) \quad (15)$$

である。これは q 表示で対角的な演算子であるが、古典系におけるポテンシャルの非線形性のために、 V を行列表示するとそれはランダム (もしくはバンドラン

9 一般に、最適制御理論で制御できない対象は (制御時間が極端に短いということでもない限り) 殆どない。

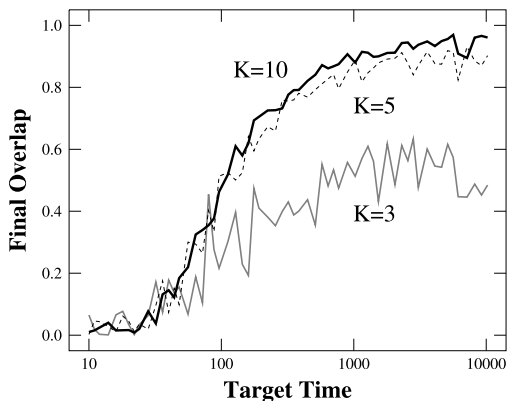


図9：Kicked rotor 系に解析的な外場を適用した場合。

ダム) 行列に近くなることが予想される。それを確かめるために一般化された π パルス (10) を利用して制御することを考えてみよう。その結果は図9のようになり、非線形性が十分に強い場合 ($K \gg 1$) には、長時間極限の制御外場を使って制御することが可能である。つまり、系の非線形性が強い量子力学系では、制御ダイナミクスにおいてもランダム行列で表される系と同様の性質を示すことが分かった。このような系では、制御外場を設計するために量子ダイナミクスの繰り返し計算をする必要がなく、解析的に与えられる外場 (10) を使って、「任意の」¹⁰量子状態から「任意の」量子状態への遷移を引き起こすことが可能になる。

5.2. 半古典極限での最適制御

一般に量子系の表現には、プランク定数を 2π で割った $\hbar = h/2\pi = 1.05 \times 10^{-34}$ (J·s) が含まれるが、これは、その系の量子性を表すパラメータである。この \hbar は、解析力学に出てくるポアソン括弧式と量子系の交換子との間の差として現れる⁴¹⁾ことから、これは演算子の非可換性の程度を表す。一方、 \hbar がエネルギーと時間の積の次元を持つこと、あるいは、運動量と座標の積の次元を持つこと

10 ただし、ここの「任意」の状態というのは、ある程度の多準位を含む状態ということであり、1 準位しか含まない場合は難しい。しかし、その場合は π パルスや断熱掃引を使えばいいわけである。

と、量子系の解析的な表現に $\exp(Et/i\hbar)$ や $\exp(pq/i\hbar)$ などの位相因子として現れることなどから、時間と空間における波動関数表現の「詳細さ」に関する限界値と考えることもできる。いずれにしても、 \hbar が十分小さい値であると見なせるようなスケールの現象は、古典力学的であると考えられており、このようなスケールでの量子力学を半古典量子力学、あるいは、このようなスケールの極限を半古典極限 (**semiclassical limit**) と呼び、半古典極限を $\hbar \rightarrow 0$ の極限と書くことがある。

量子系の制御の問題でも、半古典極限での振る舞いがどのようになるかに興味をもたれる。これは単純に理論的な興味にとどまらず、量子系を制御する手法の適用範囲と関連するためである。また、系が大きくなると、量子ダイナミクスの計算は半古典近似をしないと計算できず^{8),42)}、またそのような状況では半古典近似がよく成り立つという事情もある。ここでは、この章で扱ってきた kicked rotor 系の状態制御においては、半古典極限がどのような性質を持つかを調べてみよう。ここで採用している離散化表現の方法では、空間方向、あるいは、運動量方向の離散化数 N の逆数に比例する形で \hbar の値が与えられるため、比較的小さい N に対する結果と、大きい N に対する結果を比較することで、半古典極限での制御ダイナミクスの性質を考えることができる。図 10 は、二つの \hbar の値で、長時間極限で適用できる制御外場による制御効率が、どのように異なるかを比較したもので、kick の間隔を 1 として、 $T = 10000$ での結果である。横軸はカオスの強さで縦軸に目的状態との内積の値を表示している。

これによると、 \hbar の値が比較的大きい時は、kick の強さ K の変化にそれほど敏感ではないが、 \hbar が小さい場合には、 K の値が一定値を越えると急に制御の効率が上がることがわかる。実は、kicked rotor 系の固有状態は局在する性質があって、その局在幅は K と \hbar に依存することがわかっており、さらにこの性質は、外場との相互作用演算子 V の行列要素の分布と関連している。半古典的な (\hbar が小さい) 場合は、ある値以上の K では、ほとんどランダム行列とみなせるが、量子的な (\hbar が大きい) 場合には、かなり大きな K に設定しないと完全にランダム行列とは言えない。結局、この図における制御効率の差は、4.4 節で検討したように、 V がバンドランダム的になっているか、フルランダム的になっているかという違いを反映しているように見える。

半古典極限での制御可能性を、局在距離だけの議論で判定できるかどうかは、まだわかっていない。他にも制御に必要な時間 T の議論が必要で、 \hbar が小さくな

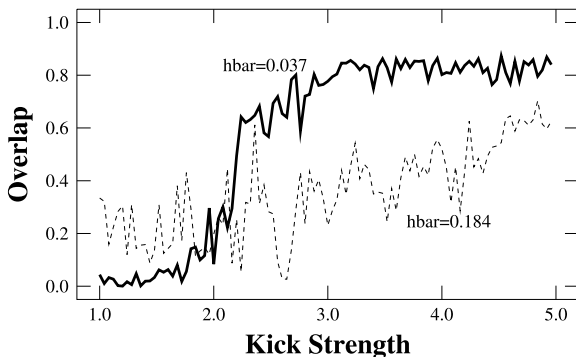


図 10： Kicked Rotor 系における、 \hbar の制御効率への影響。

ると、必然的に固有値間隔が小さくなるために、逆に長い時間のスケールの運動が生ずる可能性があり、制御完了までの時間も伸びるのではないかという予想が立てられる。 $\hbar \rightarrow 0$ の極限と $T \rightarrow \infty$ の極限は、制御可能性に関しては、極限を取る順番によって結果が異なる可能性があるため、問題は単純ではない。また、そもそもこの kicked rotor 系を古典極限で制御できるかという問題もあり、量子制御の半古典的な問題を調べることは今後の課題である。

5.3. 生体系の量子制御

さて、現実の分子系へのレーザー制御の応用に関しては 3.4 節で若干触れているが、そこでは遺伝的アルゴリズムとの関連において説明しただけであり、ここではもっと広い観点から論じておこう。

本稿では複雑な量子系の制御ということで、ランダム行列系や、kicked rotor 系のような量子カオス系を取り上げて説明してきた。もともとこれらは分子の高励起状態をモデル化したものである。比較的単純な分子の高励起状態として現れる性質のうちいくつかは、複雑な（つまり、自由度の大きい）系であれば、たとえ第一励起状態であっても持ちうるものとなり、それは量子カオス系としてモデル化することが妥当となる。つまり、量子カオス系は、生体分子のような複雑な量子系のモデルと考えることもできるのである。このことを踏まえた上で、いま実験的に生体系に対してどのような量子制御が行われているかを survey しておく⁴³⁾。

Motzkus のグループは、光合成細菌 (LH2 system) におけるエネルギー移動の制御を考えた⁴⁴⁾。2.1 節のフィードバック制御を使ってレーザー電場を設計し、最初に励起されるカロテノイドから周りにあるバクテリオクロロフィルへのエネルギー移動を制御した。その結果、30%ほどのエネルギー移動のクエンチが可能であることが分かった。また、制御のためのレーザー電場を調べることで、 160 cm^{-1} ほどの振動数をもつ、カロテノイドの torsional bending mode を励起することが重要であることが分かった。

一方、Miller のグループはバクテリオロドプシン内に存在するレチナールの光異性化の制御を考えた²⁷⁾。彼らは 3.4 節の遺伝的アルゴリズムを用い、光異性化の効率を自然の状態である 65%から $\pm 20\%$ 変化させることが可能であることを示した。この場合も、レーザー電場を調べてみると、 200 cm^{-1} ほどのレチナールの torsional mode を励起していることが分かった。

また、直接制御しているわけではないが、生体分子をレーザーで励起し、その後の時間発展を分光的に調べているものとして、Hamm のグループと Mizutani のグループによる一連の研究がある。Hamm のグループは、ペプチドに「取っ手」としてアゾベンゼンをつけ、それを一旦励起して脱励起し、その際に出る余剰エネルギーをペプチドに流すことを考えた。彼らは、時間分解分光の技術と同位体ラベリングを組み合わせることによって、そのエネルギーの流れを原子スケールの分解能、ピコ秒の時間スケールで観測することができた⁴⁵⁾。一方、Mizutani のグループは、タンパク質チトクロム c の内部に存在するヘム分子を励起し、そこからタンパク内部へのエネルギーの流れを残基単位の分解能で観測できる装置を開発した⁴⁶⁾。これらの研究においては、通常のレーザーパルスが用いられているが、そのパルスを最適制御理論や遺伝的アルゴリズムなどで設計すれば、これらの分子内プロセスをより詳細に理解したり、また生体分子内での量子効果はどのような状況で持続するか、もしくは崩壊するかということをも分子レベルで調べることが可能となる。

6. 展望

本稿では、量子状態の制御について、ランダム行列系・量子カオス系の最適制御理論というモデル系での研究から化学反応制御での応用と生体系の制御の現状までを説明した。4 節で導入された長時間極限での解析的制御外場が、生体系などの制御に応用できるかという点に関しては、まだ今後の研究を待たなくてはな

らない。これらの系の制御ダイナミクスでは、量子系のコヒーレントな時間発展に見られる線形性と、対応する古典力学系に内在する非線形性の両方が重要な役割を演じている。一見矛盾するような線形性と非線形性の両面が必要とされることは、カオス系における量子系と古典系の二面性が現れているように思われる。

いわゆる量子・古典対応の研究は量子力学の黎明期から広く行われており、一次元系や可積分系においては対応関係が成立するが、カオス系の半古典極限については非常に複雑な問題であることが分かっている⁴¹⁾。量子力学に関しては、新しい理論として成立した時期、新しい技術としての応用が始まった時期を経て、現在は、さらなる精密化によって、これまで無視してきたような微妙な問題が顕在化してくる時期と言えるかもしれない。量子力学に関連した精密化の結果、多粒子系の極限や空間・時間スケールの違いを利用して、ある意味、近似的に成立している統計力学など他の物理学分野に対しても、同様の精密化を要求する可能性もある。

多数の基礎的な研究がなされながら、まだ実用化には遠いと思われる量子コンピュータ^{47),48)}については、本稿で扱った制御ダイナミクス、コヒーレンスと非線形性、量子・古典対応など、理論的にも技術的にも解決されなくてはならない問題が、数多く残されている¹¹⁾。これらを解決して量子コンピュータが実現する未来が来るのか、困難な問題解決を避けた結果、最終的に別の方向の技術として発展するのかは、今の段階では分からない。制御ダイナミクスを通して、量子力学と古典力学の論理、あるいは、線形と非線形の論理を探っているわれわれのアプローチが、少しでも新しい精密科学の応用に寄与できることを願いつつ、この文章を終わることにする。

謝辞 ここで紹介した研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究 (C) 22540421 (生体分子の量子ダイナミクス——その理論的解明と制御) の支援を受けている。また、戸田幹人准教授 (奈良女子大学)、渡辺浩教授 (明治大学)、菊地浩人准教授 (日本医科大学) には原稿を読んでいただき、有用なコメントを頂いた。ここ

11 たとえば、多自由度の量子カオス系における量子絡み合い⁴⁹⁾の制御の問題を考えることもできる。また、多自由度系だと古典系ではアーノルド拡散⁵⁰⁾という特異的な拡散現象が起こるので、それと対応する量子系をどのように制御するのか、というのにも興味深い。

に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. ペレス、ペレス量子論の概念と手法—先端研究へのアプローチ、大場 一郎, 中里 弘道, 山中 由也 (共訳) (丸善, 2001).
- 2) David J. Tannor, *Introduction to Quantum Mechanics: A Time-Dependent Perspective* (Univ Science Books, 2006).
- 3) 計量研究所 編、超精密計測がひらく世界、(講談社ブルーバックス、1998 年).
- 4) R. ペンローズ、心は量子で語れるか、中村和幸 (訳) (講談社、1999 年).
- 5) 佐藤文隆、量子力学のイデオロギー (青土社、1997 年)、「量子力学は世界を記述できるか」(青土社、2011 年).
- 6) S. A. Rice and M. Zhao, *Optical Control of Molecular Dynamics* (Wiley, 2000).
- 7) M. Shapiro and P. Brumer, *Quantum Control of Molecular Processes* (Wiley-VCH, 2012).
- 8) A. Kondorskiy, S. Nanbu, Y. Teranishi, and H. Nakamura, *J. Phys. Chem. A* **114**, 6171-6187 (2010).
- 9) C. Brif, R. Chakrabarti, and H. Rabitz, *Adv. Chem. Phys.* **148**, 1-76 (2012).
- 10) 川口淳一郎 監修、小惑星探査機『はやぶさ』の超技術、(講談社、2011 年).
- 11) E. Ott, C. Grebogi and J. A. Yorke, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1196 (1990).
- 12) E. Ott, *Chaos in Dynamical Systems* (2nd Ed.), (Cambridge, 2002).
- 13) 志水清孝、最適制御の理論と計算法、(コロナ社、1994 年).
- 14) W. H. Schmidt, K. Heier, L. Bittner and R. Bulirsch, Ed., *Variational Calculus, Optimal Control and Applications* (Birkhäuser, 1998).
- 15) L. Allen and J. H. Eberly, *Optical Resonance and Two-level Atoms* (Dover, 1987).
- 16) P. L. Knight and L. Allen, *Concepts of Quantum Optics* (Pergamon Press, 1983), 量子光学の考え方、氏原紀公雄 (訳) (内田老鶴圃、1989 年).
- 17) S. Takahashi and K. Takatsuka, *J. Chem. Phys.* **124**, 144101 (2006).
- 18) H. Nakamura, *Nonadiabatic Transition* (World Scientific, 2002); 中村宏樹、化学反応動力学、朝倉書店 (2004).
- 19) T. Yonehara, K. Hanasaki, and K. Takatsuka, *Chem. Rev.* **112**, 499 (2012).
- 20) T. Takami, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 3371 (1992).
- 21) T. Takami, *Phys. Rev. E* **52**, 2434 (1995).
- 22) J. Gong and P. Brumer, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 1741 (2001); *J. Chem. Phys.* **115**, 3590 (2001).
- 23) J. Gong, H. J. Wornor, P. Brumer, *Phys. Rev. E* **68**, 026209 (2003); *Phys. Rev. E* **68**, 056202 (2003).
- 24) M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms* (The MIT Press, 1996).

- 25) R. S. Judson and H. Rabitz, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1500 (1992).
- 26) R. J. Levis, G. M. Menkir, and H. Rabitz, *Science* **292**, 709 (2001).
- 27) V. I. Prokhorenko, A. M. Nagy, S. A. Waschuk, L. S. Brown, R. R. Birge, and R. J. D. Miller, *Science* **313**, 1257 (2006).
- 28) D.F. Walls and G.J. Milburn, *Quantum Optics* (2nd Ed.), (Springer, 2008).
- 29) W. Zhu, J. Botina, and H. Rabitz, *J. Chem. Phys.* **108**, 1953 (1998).
- 30) H.A. Rabitz, M.M. Hsieh, and C.M. Rosenthal, *Science* **303**, 1998 (2004).
- 31) T. Iitaka and T. Ebisuzaki, *Phys. Rev. E* **69**, 057701 (2004).
- 32) T. Takami and H. Fujisaki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 3215 (2004).
- 33) T. Takami, H. Fujisaki, and T. Miyadera, *Adv. Chem. Phys.* **130** (Part A), 435 (2005).
- 34) T. Takami and H. Fujisaki, *Phys. Rev. E* **75**, 036219 (2007).
- 35) T. Takami and H. Fujisaki, *J. Mod. Opt.* **56**, 822 (2009).
- 36) M. C. Gutzwiller, *Chaos in Classical and Quantum Mechanics* (Springer, 1990).
- 37) F. Haake, *Quantum Signatures of Chaos* (2nd Ed.), (Springer, 2000).
- 38) T. Gorin, T. Prosen, T.H. Seligman, and M. Znidaric, *Phys. Rep.* **435**, 33 (2006).
- 39) 永尾 太郎、ランダム行列の基礎、(東京大学出版会, 2005).
- 40) H. Fujisaki, Y. Zhang, and J.E. Straub, *Adv. Chem. Phys.* **145**, 1 (2011).
- 41) 首藤 啓、古典と量子の間、(岩波書店、2011 年)。
- 42) H. Fujisaki, Y. Teranishi, A. Kondorskiy, and H. Nakamura, “Semiclassical approaches to controlling chemical reaction dynamics,” quant-ph/0302025.
- 43) A. Nagy, V. Prokhorenko, and R. J. D. Miller, *Curr. Opin. Struct. Biol.* **16**, 654 (2006).
- 44) J. L. Herek, W. Wohlleben, R. J. Cogdell, D. Zeidler, and M. Motzkus, *Nature* **417**, 533 (2002).
- 45) V. Botan, E. Backus, R. Pfister, A. Moretto, M. Crisma, C. Toniolo, P. H. Nguyen, G. Stock, and P. Hamm, *PNAS* **104**, 12749 (2007).
- 46) N. Fujii, M. Mizuno, and Y. Mizutani, *J. Phys. Chem. B* **115**, 13057 (2011).
- 47) M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge, 2000).
- 48) N. D. マーミン、量子コンピュータ科学の基礎、木村 元 (訳) (丸善、2007 年)。
- 49) H. Fujisaki, T. Miyadera, and A. Tanaka, *Phys. Rev. E* **67**, 066201 (2003); H. Fujisaki, *Phys. Rev. A* **70**, 012313 (2004).
- 50) C. Martens, M. Davis, and G. Ezra, *Chem. Phys. Lett.* **142**, 519 (1987); A. Shojiguchi, C.-B. Li, T. Komatsuzaki, and M. Toda, *Phys. Rev. E* **76**, 056205 (2007).

(受付日 平成 24 年 2 月 28 日)

(受理日 平成 24 年 3 月 29 日)

〈総説〉

量子異常と格子正則化

渡辺 浩*

Anomalies and Lattice Regularizations

Hiroshi WATANABE

要約 フェルミオンの保存則が量子効果によって破れる現象であるアノマリーについて略述し、この問題を数学的に厳密に解析するためのディラック作用素の格子化の方法を紹介する。

1. 保存則とその破れ

時々刻々変化して止まない現象の背後に、一定不変の性質が隠れていることがある。樹木が成長するとき、作られた組織の質量は樹木が吸収・排出した物質の質量の差に等しい。すなわち、成長過程に関与する物質の総質量は成長過程を通して変化しない。またテコを用いると、小さい力で重い物体を動かすことができるが、手元においてはテコの先端を大きく動かす必要がある。すなわち、テコは単に力の大きさを変換しているのであり、エネルギーについては損も得もない。もしも何らかの方法でエネルギーを作り出すことができるなら、永久に仕事を続ける機械を作ることができるが、このような機械－永久機関－は存在しない。すなわち、閉じた系のエネルギーは保存する。

電気回路において、流れ込む電流の総量と流れ出す電流の総量は等しい。もしも電流の収支が合わないなら、その差に等しい電荷が回路の中に蓄積されて行く。すなわち電荷の総量は不変であり、この意味で電流の保存則が成立する。

* 日本医科大学・数学教室 Department of Mathematics, Nippon Medical School

ここで電子やクォークのように自転している粒子（フェルミオン）が担う電流を2つの成分に分けることができる。すなわち、進行方向に対して右巻きに回転する粒子の担う電流 J_+ と左巻きに回転する粒子の担う電流 J_- に分けてみる。当然、右巻き電流 J_+ と左巻き電流 J_- の和は通常の電流であり、電流保存則に従う。そこで両者の差

$$J_{\text{chiral}} = J_+ - J_- \quad (1.1)$$

を考える。これをカイラルカレント（chiral current）という。カイラルというのは「手」を意味する言葉である。問題はカイラルカレントが保存するかどうか、言い換えれば、右巻き電流と左巻き電流がそれぞれ保存するかどうかである。この問題を理論的に調べるために、電磁場と相互作用するフェルミオンの運動を量子力学的に考察すると、質量のないフェルミオンの場合カイラルカレントは保存するという結論が得られる。

ところで量子論とは、波動性と粒子性を併せ持つ物理的対象の振る舞いに関する理論である。とくに量子力学はそのような物理的対象の運動を記述する力学、すなわち粒子の生成消滅を伴わない過程を記述する理論である。これに対し、粒子の生成消滅を伴う過程、すなわち粒子の種類や数が増える現象は場の量子論の対象となる。そこで、電磁場と相互作用するフェルミオンに場の量子論を適用してカイラルカレントの保存性を調べると、量子力学が与える保存則に微妙な破れがあることがわかる。実際、もしもカイラルカレントが保存するとすると、2つのクォークが結合した中性パイ中間子が2つの光子に崩壊する過程は起こりえないことになり、実験事実と矛盾する。一般に、量子力学的保存則が場の量子論における量子効果のために破れる現象を量子異常（anomaly）といい、カイラルカレントの量子異常をカイラルアノマリー（chiral anomaly）という。

場の量子論に基づくカイラルアノマリーの計算にはデリケートな側面がある。というのは、あくまで形式的に素朴な計算を行うとカイラルカレントは保存することになるのだが、少し注意を払うと保存則に微妙な破れがあることが分かるのである。この計算の結果は実験結果と整合的であり結論は正しいとされているが、計算のプロセスは厳密性を欠いており、数学的には十分な信を置くことができない。そもそも場の量子論においてははまだ数学的な厳密性が十分追求されておらず、形式的な数式の運用によって何らかの結果を得るといった段階のものが多い。このような意味で、場の量子論のモデルを数学的に厳密に考察することは数

物理学の重要な課題の一つであるといえる。

場の量子論の数学的困難は、体積有限の空間（時空）が無限に多くの点を含み、その各点に量子的ゆらぎをもつ物理的自由度が付随していることに起因している。場の量子論における無限自由度のゆらぎに伴う数学的困難を解決し、モデルを数学的に厳密に扱う方策として、空間や時間を格子点の集まりで置き換える格子正則化の方法がある。この小論では、格子正則化によるカイラルアノマリーの理論的解析について、その概略を紹介したい。

以下において、まず電磁場と相互作用するフェルミオンを考え、量子力学的にはカイラルカレントが保存すること（2節）、しかし場の量子論においては保存則が破れる可能性があること（3節）を形式的な計算によって示す。そしてカイラルカレントの保存則の破れは、ディラック作用素の数学的性質に関係していることを見る（4節）。次に、場の量子論を厳密に基礎づけるための格子正則化のアイデアを述べる（5節）。ここでフェルミオンのカイラルな性質を記述する格子理論のパラドキシカルな様相が明らかになる。そこで格子理論のパラドックスを解消するための方策としてウィルソンの格子正則化を導入し、ディラック作用素の「指数定理」に関する興味深い解釈に触れる（6節）。ウィルソンの格子正則化に基づいてカイラルアノマリーを厳密に論ずる仕事は、文献⁴⁾やその引用文献においてほぼ完成しているのだが、ここではこの問題に深入りせずにその後の動向に眼を向けたい。すなわち、素粒子論のいわゆる「標準模型」を格子正則化する試みの中で、Ginsparg-Wilson 関係式を満たす格子正則化が論じられるようになったが、この方向の厳密な解析は手つかずの状態にあり、数物理学の興味深い問題が未解決のまま残されていると言える。そこで、Ginsparg-Wilson 関係式に基づく格子正則化のアイデアを述べ、この関係式を満たす格子作用素の例として、Neuberger の作用素を紹介する（7節）。さらに、Ginsparg-Wilson 関係式を満たす一般の格子作用素について、そのスペクトラム（8節）とアノマリー（9節）について概略を記す。

2. Fermion と保存則

d 次元ユークリッド時空において、電磁場と相互作用する fermion の作用は次式で与えられる。

$$\mathcal{A} = \int_{\mathbb{R}^d} \bar{\psi}(x)(D_A + m)\psi(x)dx \quad (2.1)$$

(60)

ただし、 d は偶数とし、 m は fermion の質量、fermion の場 $\psi(x), \bar{\psi}(x)$ は $2^{d/2}$ 個の複素数を成分としてもつ¹。即ち

$$\psi(\cdot) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{C}^{2^{d/2}} \quad (2.2)$$

$$\bar{\psi}(\cdot) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{C}^{2^{d/2}} \quad (2.3)$$

また \mathcal{D}_A は Dirac 作用素で

$$\mathcal{D}_A = \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu (\partial_\mu - iA_\mu(x)) \quad (2.4)$$

のように表される。ここに ∂_μ は微分作用素 $\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu}$ を表し²、 γ^μ は d 次元 Dirac 行列で、反交換関係

$$\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2\delta_{\mu\nu} \quad (2.5)$$

を満たす $2^{d/2}$ 次 hermite 行列にとる。また $A_\mu(x)$ は電磁場の potential であり、電磁場は外場（与えられた実数値関数）とする³。

Dirac 方程式

Fermion の運動方程式である Dirac 方程式は変分原理から導かれる。すなわち、作用 A の $\bar{\psi}(x)$ に関する変分と、 $\psi(x)$ に関する変分が 0 であるとして、次の偏微分方程式を得る。

$$\sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu (\partial_\mu - iA_\mu(x)) \psi(x) + m\psi(x) = 0 \quad (2.6)$$

$$\bar{\psi}(x) \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu \left(-\overleftarrow{\partial}_\mu - iA_\mu(x) \right) + m\bar{\psi}(x) = 0 \quad (2.7)$$

ここに $\overleftarrow{\partial}_\mu$ は微分作用が左側の $\bar{\psi}(x)$ にかかることを意味する。

-
- 1 $\psi(x)$ の成分は縦に並べ、 $\bar{\psi}(x)$ の成分は横に並べる。これを縦 vector、横 vector と言いたくなるが、Lorentz 変換性から vector ではなく spinor と呼ばれている。
 - 2 座標 x^μ の添え字 μ は上付きで書くことにする。
 - 3 記号を簡単にするために電磁場に限定するが、非可換の場合も含めて一般の gauge 場としても、以下の記述において本質的な相違は生じない。

しかし Dirac 作用素 \mathcal{D}_A は反対称性

$$\mathcal{D}_A^* = -\mathcal{D}_A \quad (2.8)$$

の作用素であるから、固有値 (spectrum)⁴は純虚数 (または 0) である。したがって質量 m が 0 でない実数なら、上記の方程式 (2.6), (2.7) は $\psi(x) = 0, \bar{\psi}(x) = 0$ 以外の解をもたない。これは時空がユークリッド計量をもつとしたため、力学的性質を失っているからである。この fermion をミンコフスキー計量をもつ時空に移設するには、座標 x^d を解析接続して $x^d = it$ により時間変数 t を導入する。さらに $A_d(x) = -iV(x), \gamma^d = i\gamma^0$ によりミンコフスキー化したポテンシャル $V(x)$ と Dirac 行列 γ^0 を導入すると、(2.6), (2.7) は

$$\gamma^0 (\partial_t - iV(x)) \psi(x) + \sum_{k=1}^{d-1} \gamma^k (\partial_k - iA_k(x)) \psi(x) + m\psi(x) = 0 \quad (2.9)$$

$$\bar{\psi}(x) \gamma^0 \left(-\overleftarrow{\partial}_t - iV(x) \right) + \bar{\psi}(x) \sum_{k=1}^d \gamma^k \left(-\overleftarrow{\partial}_k - iA_k(x) \right) + m\bar{\psi}(x) = 0 \quad (2.10)$$

となる。これがいわゆる Dirac 方程式である。ここで (2.9) の解 $\psi(x)$ の hermite 共役を $\psi^*(x)$ として⁵

$$\bar{\psi}(x) = \psi^*(x) \gamma^0 \quad (2.11)$$

と置くと、(2.10) の解となる。量子力学の教科書では、 $\bar{\psi}(x)$ と $\psi(x)$ を独立な自由度と考えずに、始めから関係式 (2.11) が成り立つとすることが多い。

保存則

この fermion の力学は保存則をもつ。記号の煩雑さを避けるために、ミンコフスキー化したつもりになってユークリッドの記法を用いることにする。(2.6), (2.7) の解 $\psi(x), \bar{\psi}(x)$ に対し、

$$J^\mu(x) = \bar{\psi}(x) \gamma^\mu \psi(x) \quad (2.12)$$

4 関数解析における厳密な定義に従うと、「固有値」より spectrum という方がよい。また「固有関数」という用語も数学的には適切でない場合がある。

5 $\psi^*(x)$ は $\psi(x)$ の各成分を複素共役にして transpose したものの。

(62)

と置くと、

$$\sum_{\mu=1}^d \partial_{\mu} J^{\mu}(x) = 0 \quad (2.13)$$

が成り立つ。 $J^{\mu}(x)$ は fermion の電流密度を表し、上の等式は電流保存則と解釈される。

また

$$\gamma_{d+1} = i^{d/2} \gamma^1 \gamma^2 \cdots \gamma^d \quad (2.14)$$

とおくと

$$\gamma_{d+1}^* = \gamma_{d+1} \quad (2.15)$$

$$\gamma^{\mu} \gamma_{d+1} + \gamma_{d+1} \gamma^{\mu} = 0 \quad (2.16)$$

$$(\gamma_{d+1})^2 = 1 \quad (2.17)$$

$$\text{tr}(\gamma_{d+1}) = 0 \quad (2.18)$$

が成り立つ。 γ_{d+1} を chirality という。そこで

$$J_{d+1}^{\mu}(x) = \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \gamma^{\mu} \psi(x) \quad (2.19)$$

と置くと、

$$\sum_{\mu=1}^d \partial_{\mu} J_{d+1}^{\mu}(x) + 2m \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) = 0 \quad (2.20)$$

が成り立つ。 $m = 0$ のときこの等式は保存則を表すが、保存 current (2.19) を chiral current と呼ぶ。

3. 量子異常

前節の fermion の場を (第 2) 量子化する⁶。Fermion の場の量子論における物理量 $F(\bar{\psi}, \psi)$ の真空期待値は、作用 (2.1) を用いた汎関数積分

$$\langle F(\bar{\psi}, \psi) \rangle = \frac{1}{Z} \int F(\bar{\psi}, \psi) \exp(\mathcal{A}) d\bar{\psi} d\psi \quad (3.1)$$

6 量子化としては、 $\psi(x), \bar{\psi}(x)$ を作用素と見なす正準量子化の方法と、汎関数積分による経路積分量子化の方法がある、ここでは後者の定式化を用いる。

で定義される。ただし $\bar{\psi}(x), \psi(x)$ は反可換な数 (Grassmann 変数) を成分とする spinor であり、積分は Grassmann 積分とする。また、

$$d\bar{\psi}d\psi = \prod_{x \in \mathbb{R}^d} d\bar{\psi}(x) \prod_{x \in \mathbb{R}^d} d\psi(x) \quad (3.2)$$

$$Z = \int \exp(A)d\bar{\psi}d\psi = \text{Det}(\mathcal{D}_A + m) \quad (3.3)$$

である。このように積分は無限次元であり、Det は作用素 (無限次元行列) の行列式である。Grassmann 積分の性質により、Gauss 積分 (3.3) は行列式の逆数ではなく、行列式そのものになる。これらの無限次元積分の概念は数学的に正しく定義されなければならないが、しばらくの間形式的な表式としておく⁷。

Chiral 変換

上記の場の量子論において、もしも

$$\left\langle \sum_{\mu=1}^d \partial_{\mu} J_{d+1}^{\mu}(x) \right\rangle + 2m \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle = 0 \quad (3.4)$$

が成立するならば、chiral current は $m = 0$ の場の量子論においても保存していると考えられる。この等式は、chiral 変換と呼ばれる変数変換

$$\psi(x) = \exp(i\theta \gamma_{d+1}) \psi'(x) \quad (3.5)$$

$$\bar{\psi}(x) = \bar{\psi}'(x) \exp(i\theta \gamma_{d+1}) \quad (3.6)$$

を用いて、以下のように導出することができる¹⁾。ただし $\theta = \theta(x)$ は x の関数である。

Dirac 作用素は

$$\gamma_{d+1} \mathcal{D}_A + \mathcal{D}_A \gamma_{d+1} = 0 \quad (3.7)$$

のように γ_{d+1} と反交換するので、 θ が x によらない定数ならば、(3.5), (3.6) により、作用 (2.1) は

$$\mathcal{A}(\bar{\psi}, \psi) = \mathcal{A}(\bar{\psi}', \psi') + m \int_{\mathbb{R}^d} \bar{\psi}'(x) (e^{2i\theta \gamma_{d+1}} - 1) \psi'(x) dx \quad (3.8)$$

7 Chiral current の保存を論ずるなら、始めから $m = 0$ にしておけばよさそうなものだが、 $Z \neq 0$ を保証するために、まず $m \neq 0$ として fermion の理論を定式化し、最後に $m \rightarrow 0$ の極限をとることにする。

(64)

のように変換する。したがって、massless limit ($m \rightarrow 0$) において、作用 \mathcal{A} は chiral 不変であることが分かる。(3.7) は massless Dirac 作用素が chiral 不変性をもつことを意味している。

θ が x に依存するときは θ に微分がかかる。そこで θ が微小であるとして 1 次の項までとると

$$\begin{aligned}\mathcal{A}(\bar{\psi}, \psi) &= \mathcal{A}(\bar{\psi}', \psi') - i \int_{\mathbb{R}^d} (\partial_\mu \theta) J_{d+1}^\mu dx + 2im \int_{\mathbb{R}^d} \theta \bar{\psi}'(x) \gamma_{d+1} \psi'(x) dx \\ &= \mathcal{A}(\bar{\psi}', \psi') + i \int_{\mathbb{R}^d} \theta \partial_\mu J_{d+1}^\mu dx + 2im \int_{\mathbb{R}^d} \theta \bar{\psi}'(x) \gamma_{d+1} \psi'(x) dx\end{aligned}\tag{3.9}$$

となる。ただし J_{d+1}^μ は $\bar{\psi}', \psi'$ に対する chiral current であり、1 行目から 2 行目にかけて部分積分を用いた。上式を次のように書く。

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}' + \delta \mathcal{A}'\tag{3.10}$$

ただし

$$\mathcal{A}' = \mathcal{A}(\bar{\psi}', \psi')\tag{3.11}$$

$$\delta \mathcal{A}' = i \int_{\mathbb{R}^d} \theta \partial_\mu J_{d+1}^\mu dx + 2im \int_{\mathbb{R}^d} \theta \bar{\psi}'(x) \gamma_{d+1} \psi'(x) dx\tag{3.12}$$

これを用いて、積分 (3.3) についての自明な等式

$$\int \exp(\mathcal{A}) d\bar{\psi} d\psi = \int \exp(\mathcal{A}') d\bar{\psi}' d\psi'\tag{3.13}$$

を変形する。左辺は

$$\int \exp(\mathcal{A}) d\bar{\psi} d\psi = \int \exp(\mathcal{A}') (1 + \delta \mathcal{A}') d\bar{\psi} d\psi\tag{3.14}$$

右辺は

$$\begin{aligned}\int \exp(\mathcal{A}') d\bar{\psi}' d\psi' &= \int \exp(\mathcal{A}') \frac{\partial(\bar{\psi}, \psi)}{\partial(\bar{\psi}', \psi')} d\bar{\psi} d\psi \\ &= \int \exp(\mathcal{A}') (1 + 2i \text{Tr}(\theta \gamma_{d+1})) d\bar{\psi} d\psi\end{aligned}\tag{3.15}$$

となるので (Grassmann 積分の Jacobian は通常のもの逆になる)⁸,

$$\int \exp(\mathcal{A}') \delta \mathcal{A}' d\bar{\psi} d\psi = 2i \text{Tr}(\theta \gamma_{d+1}) \int \exp(\mathcal{A}') d\bar{\psi} d\psi \quad (3.16)$$

(3.5), (3.6) により (3.16) の両辺中の $\bar{\psi}', \psi'$ を $\bar{\psi}, \psi$ で表し、 θ の高次項を落とすと

$$\int \exp(\mathcal{A}) \delta \mathcal{A} d\bar{\psi} d\psi = 2i \text{Tr}(\theta \gamma_{d+1}) \int \exp(\mathcal{A}) d\bar{\psi} d\psi \quad (3.17)$$

よって

$$\langle \delta \mathcal{A} \rangle = 2i \text{Tr}(\theta \gamma_{d+1}) \quad (3.18)$$

を得る。ただし

$$\delta \mathcal{A} = i \int_{\mathbb{R}^d} \theta \partial_\mu J_{d+1}^\mu dx + 2im \int_{\mathbb{R}^d} \theta \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) dx \quad (3.19)$$

ここで (2.18) を考慮して、(scalar) 関数 θ に対し

$$\text{Tr}(\theta \gamma_{d+1}) = 0 \quad (3.20)$$

となると見れば、

$$\langle \delta \mathcal{A} \rangle = 0 \quad (3.21)$$

すなわち

$$\int_{\mathbb{R}^d} \theta \langle \partial_\mu J_{d+1}^\mu \rangle dx + 2m \int_{\mathbb{R}^d} \theta \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle dx = 0 \quad (3.22)$$

$\theta = \theta(x)$ は任意にとれるから、(3.4) が得られる。

保存則の破れ

このように $m = 0$ の場の量子論においても chiral current は保存するように見えるのだが⁹、実は chiral current の保存則は素粒子の実験事実に反するので

⁸ tr は $2^{d/2}$ 次正方行列としての trace を表し、 Tr は関数にかかる作用素 (無限次元行列) の trace を表す。

(66)

ある²⁾。上記の計算はすべて形式的であるから問題はどこにもあり得るのだが、(3.20) は無限次元の trace であり取り分け注意を要する。特に $\theta(x) = 1$ とすると (3.20) は $\text{Tr } \gamma_{d+1} = 0$ となるが、有限行列としての γ_{d+1} の trace が 0 になるからと言って、無限次元の作用素として trace が 0 であるとは言えない。なぜなら無限次元の作用素としての γ_{d+1} の固有値 ± 1 は無限重に縮退しており、これらの固有値の和は絶対収束しないので和をとる順序に依存するからである。

そこで Dirac 作用素 \mathcal{D}_A を対角化する基底 (spectral measure) を用いて $\text{Tr } \gamma_{d+1}$ を計算してみる。 \mathcal{D}_A の固有値 (spectrum) を λ として

$$\mathcal{D}_A u = \lambda u \quad (3.23)$$

が成立するとする。(3.7) より

$$\mathcal{D}_A \gamma_{d+1} u = -\lambda \gamma_{d+1} u \quad (3.24)$$

であるから、 $\lambda \neq 0$ ならば u と $\gamma_{d+1} u$ は \mathcal{D}_A の異なる固有値 (spectrum) に属するので直交する。よって

$$u_{\pm} = u \pm \gamma_{d+1} u \quad (3.25)$$

と置くと、 u_+ と u_- は直交し、

$$\gamma_{d+1} u_{\pm} = \pm u_{\pm} \quad (3.26)$$

したがって u_{\pm} をペアにして γ_{d+1} の固有値の和をとると 0 になる。他方 $\lambda = 0$ ならば、 u と $\gamma_{d+1} u$ はどちらも $\text{Ker } \mathcal{D}_A$ (\mathcal{D}_A の kernel) に属する。すなわち、 γ_{d+1} は $\text{Ker } \mathcal{D}_A$ に作用している。そこで γ_{d+1} の作用を $\text{Ker } \mathcal{D}_A$ 上に限定して固有値の和をとる。

$$\text{Ker}_{\pm} = \{u \in \text{Ker } \mathcal{D}_A \mid \gamma_{d+1} u = \pm u\} \quad (3.27)$$

と置くと、

$$\text{Tr } \gamma_{d+1} = \dim \text{Ker}_+ - \dim \text{Ker}_- \quad (3.28)$$

が得られる。(3.28) の右辺を Dirac 作用素の指数 (index) といい、 $\text{ind } \mathcal{D}_A$ と書く。すると (3.18), (3.19) において $\theta(x) = 1$ としたのから

$$\int_{\mathbb{R}^d} \left\langle \sum_{\mu=1}^d \partial_{\mu} J_{d+1}^{\mu}(x) \right\rangle dx + 2m \int_{\mathbb{R}^d} \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle dx = 2 \text{ind } \mathcal{D}_A \quad (3.29)$$

が得られる。(3.29) は実験事実と矛盾しない。

量子化されない波動場の力学において成立していた保存則が、場の量子化に伴う量子効果によって破れる現象を量子異常 (anomaly) といい、とくに上述の chiral current の保存則の破れを chiral anomaly という。場の量子論においても形式的な計算を素朴に行うとき、chiral current の保存則は一見成り立っているように見えるのだが、何らかの正則化を行って注意深く計算すると微妙な破れが存在することが分かる。以下の節では、Dirac 作用素の index の特徴と anomaly の原因について考察する。

4. Dirac 作用素の index

Dirac 作用素の index は数学的に自明でない不変性を持ち、「位相不変量」であることが知られている。

境界条件と大局的構造

この問題を考えるためには、ユークリッド空間 \mathbb{R}^d よりも torus

$$\mathbb{T}_0^d = (\mathbb{R}/l\mathbb{Z})^d = \{x \in \mathbb{R}^d \mid -l/2 < x \leq l/2\} \quad (4.1)$$

の上で考える方がよい。ただし l は正の定数である。 \mathbb{T}_0^d 上の spinor 場 ($\mathbb{C}^{2^{d/2}}$ 値関数) $\psi(x)$ に、境界条件

$$\psi(x + le_\mu) = e^{i\chi_\mu(x)}\psi(x), \quad \mu = 1, 2, \dots, d \quad (4.2)$$

を課す⁹。ただし $\chi_\mu(x)$ は境界 (付近) で定義された適当に滑らかな関数で、 e_μ は x^μ 軸方向の単位ベクトルである。

たとえば、torus の境界点 $(0, x^2, \dots, x^d)$ と (l, x^2, \dots, x^d) は同一の点と見なされるが、(4.2) のもとで $\psi(x)$ は

$$\psi(l, x^2, \dots, x^d) = e^{i\chi_1(0, x^2, \dots, x^d)}\psi(0, x^2, \dots, x^d) \quad (4.3)$$

を満たすので、境界を越えて torus の右端 ($x^1 = l$) から左端 ($x^1 = 0$) に飛ぶとき、関数値は $e^{i\chi_1}$ をかけて位相因子をずらしてつなげなければならない。言

9 Dirac 作用素は 1 階微分作用素であるから、(4.2) のほかに $\psi(x)$ の微分係数に対する境界条件も必要である。

(68)

い換えれば、境界の右端付近で gauge 変換

$$\psi'(x) = e^{i\chi_1(x)}\psi(x), \quad \mu = 1, 2, \dots, d \quad (4.4)$$

を施すことにより、右端での $\psi'(x)$ が左端での $\psi(x)$ になめらかにつながっていないなければならない。このとき当然のこととして potential $A_\mu(x)$ も境界の右端付近で gauge 変換

$$A'_\mu(x) = A_\mu(x) + \partial_\mu\chi_1(x) \quad (4.5)$$

を受けるが、右端での $A'_\mu(x)$ と左端での $A_\mu(x)$ がなめらかにつながっていないなければならない。これが potential $A_\mu(x)$ に対する境界条件である。

このように、Dirac 作用素を定義するには、spinor 場の境界条件を定める必要があり、その結果電磁 potential の境界条件が定まる。これらの境界条件は、torus の境界を貼り合わせるとき、spinor 場や potential の貼り合わせ方を規定している。境界条件を換えると貼り合わせ方が変わるが、連続的に貼り合わせ方を変えたときに互いにつながる貼り合わせ方を一つの類にまとめることにする。このとき、連続的な変形によってつながらない貼り合わせ方が存在するため、上記の類は複数生ずることになる。直観的に言うと、これらの類は、何回ねじって貼り合わせたかによって区別される。このとき Dirac 作用素の index はねじった回数に依存して定まり、貼り合わせの連続的な変形に関して不変であることが知られている。

このように torus 上で境界条件を満たす spinor 場を考えると、torus 上の各点に $\mathbb{C}^{2^{d/2}}$ で表される内部空間を立て、積 $\mathbb{T}_0^d \times \mathbb{C}^{2^{d/2}}$ を考えるのだが、内部空間は torus の境界において適切に（境界条件を満たすように）貼り合わせる必要がある。このようにして定まる対象 $\mathbb{T}_0^d \times \mathbb{C}^{2^{d/2}}$ を vector bundle という。すると、貼り合わせのねじり方に関する類別により、torus 上の vector bundle の大局的な構造が区別されることになる。そして、Dirac 作用素の index は vector bundle の大局的な構造の類によって定まると言える。

指数定理

Dirac 作用素の index は、電磁場の強さ

$$F_{\mu\nu}(x) = \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x) \quad (4.6)$$

で表す事もできる。すなわち、次式が成立する。

$$\text{ind} \mathcal{D}_A = \frac{1}{(4\pi)^{d/2} (d/2)!} \int_{\mathbb{R}^d} \sum_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_d=1}^d \epsilon_{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_d} F_{\mu_1 \mu_2}(x) F_{\mu_3 \mu_4}(x) \cdots F_{\mu_{d-1} \mu_d}(x) dx \quad (4.7)$$

ただし、 $\epsilon_{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_d}$ は完全反対称テンソルである。電磁場の強さ $F_{\mu\nu}$ は電磁場の局所的な歪みを表すので、(4.7) の右辺は歪みの総量を表し、それがねじれ回数に一致するものと解釈できる。この等式が表す事実を指数定理という³⁾。

指数定理に対応して、(3.29) を局所化した公式

$$\left\langle \sum_{\mu=1}^d \partial_\mu J_{d+1}^\mu(x) \right\rangle + 2m \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle = \frac{2}{(4\pi)^{d/2} (d/2)!} \sum_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_d=1}^d \epsilon_{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_d} F_{\mu_1 \mu_2}(x) F_{\mu_3 \mu_4}(x) \cdots F_{\mu_{d-1} \mu_d}(x) \quad (4.8)$$

が成立する。(4.8) の両辺を積分すると (3.29) になるのだが、(4.8) は積分する前の被積分関数が各点ごとに一致することを主張するものであり、(3.29) を局所化したものであると言える。問題は、形式的な計算のレベルを超えて、厳密に(4.8) を導出することである。

5. 格子正則化

無限次元の Grassmann 積分を厳密に定義するために、torus(4.1) を lattice spacing a の格子

$$\begin{aligned} \mathbb{T}_a^d &= a(\mathbb{Z}/L\mathbb{Z})^d \\ &= \{(x_1, x_2, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d \mid \exists n_j (\text{整数}) : x_j = an_j, -L/2 < n_j \leq L/2\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

で近似する (図 1)。ただし $l = aL$ とし、便宜上 L は偶数とする。格子 \mathbb{T}_a^d は L^d 個の点からなる。 \mathbb{T}_a^d 上の平面波 e^{ipx} の momentum $p = (p_1, p_2, \dots, p_d)$ は、

$$p_\mu = \frac{2\pi j_\mu}{aL}, \quad j_\mu \in \mathbb{Z}, \quad -L/2 < j_\mu \leq L/2 \quad (5.2)$$

と表される。(5.2) を満たす p の全体を \mathbb{T}_a^{d*} と書く。

格子近似から連続空間に戻るには、 $aL = l$ を固定し、 $a \rightarrow 0$, $L \rightarrow \infty$ なる連続極限として得られる torus (4.1) を考える。さらにユークリッド空間 \mathbb{R}^d まで戻

(70)

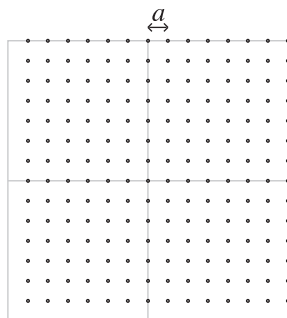


図1：2次元 torus の格子化 ($L = 14$)。一辺の長さが La の正方形の上辺と下辺、および右辺と左辺は貼り合わされる。

るには $l \rightarrow \infty$ の極限 (無限体積極限) をとる必要があるが、anomaly は局所的な問題なので、無限体積極限は重要な意味をもたない。以下において、 l を任意の定数として固定し、 \mathbb{T}_a^d の連続極限 \mathbb{T}_0^d のみ考える。

Dirac 作用素の格子化

\mathbb{T}_a^d 上の spinor 値関数 u, v ($\mathbb{C}^{2^{d/2}}$ 値関数) に対し、内積を

$$(u, v) = a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} u^*(x)v(x) \quad (5.3)$$

で定義する。 $u^*(x)$ は $u(x)$ の各成分の複素共役をとり transpose したものである。点 $x + ae_\mu$ から点 x への (両者を結ぶ線分に沿う) 共変的平行移動 $T_\mu u$ を定義するために、

$$U_{x, x+ae_\mu} = \exp\left(-i \int_0^a A_\mu(x + se_\mu) ds\right) \quad (5.4)$$

として、

$$(T_\mu u)(x) = U_{x, x+ae_\mu} u(x + ae_\mu) \quad (5.5)$$

と定義する。共変的平行移動を用いると、Dirac 作用素 (2.4) の格子近似を

$$D_A = \frac{1}{2a} \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu (T_\mu - T_\mu^{-1}) \quad (5.6)$$

によって定義することができる。上記の内積 (5.3) の意味での T_μ の adjoint を T_μ^* とすると

$$T_\mu^{-1} = T_\mu^* \quad (5.7)$$

となるので、格子 Dirac 作用素 \mathbf{D}_A は anti-hermite であり、

$$\mathbf{D}_A^* = -\mathbf{D}_A \quad (5.8)$$

かつ chiral 不変性

$$\mathbf{D}_A \gamma_{d+1} + \gamma_{d+1} \mathbf{D}_A = 0 \quad (5.9)$$

が成立する。

格子 Dirac 作用素の不合理的

ところが、このようにして格子化された Dirac 作用素は、重要な性質を欠いている。 \mathbf{D}_A と γ_{d+1} は \mathbb{T}_a^d 上の spinor に作用する有限次元行列であるから、 $\text{Tr} \gamma_{d+1}$ は自明に 0 となり、(3.28) と同様に

$$\begin{aligned} \text{ind} \mathbf{D}_A &= \dim \text{Ker}_+ - \dim \text{Ker}_- \\ &= \text{Tr} \gamma_{d+1} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

となる。すなわち、 \mathbf{D}_A は (0 でない index をもつ) Dirac 作用素 \mathbf{D}_A を近似していないし、 \mathbf{D}_A は量子異常をもたない。

これは、(5.6) によって Dirac 作用素を格子化したとき、対称差分を構成したため、 \mathbf{D}_A が病的な固有関数をもつからである。そのような固有関数の例を与えるために、電磁 potential $A_\mu(x)$ が 0 のときの格子 Dirac 作用素 \mathbf{D}_0 を考える。このとき $U_{x, x+a\epsilon_\mu} = 1$ となるので、平面波 e^{ipx} , $p \in \mathbb{T}_a^{d*}$, の差分は

$$\frac{1}{2a}(T_\mu - T_\mu^{-1})e^{ipx} = \frac{i}{a} \sin(ap_\mu)e^{ipx} \quad (5.11)$$

となる。そこで \mathbf{D}_0 の平面波への作用を

$$\mathbf{D}_0 e^{ipx} = \mathbf{D}_0(p) e^{ipx} \quad (5.12)$$

(72)

と書くと、

$$D_0(p) = \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu \frac{i}{a} \sin(ap_\mu) \quad (5.13)$$

したがって、各 p_μ が 0 または π/a に近いとき

$$D_0(p) \approx i \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu \tilde{p}_\mu \quad (5.14)$$

ただし

$$\tilde{p}_\mu = \begin{cases} p_\mu, & p_\mu \approx 0 \\ \pi/a - p_\mu, & p_\mu \approx \pi/a \end{cases} \quad (5.15)$$

である。特に

$$D_0(p) = 0 \iff p_\mu = 0, \pi/a \quad (5.16)$$

となる。したがって、constant spinor $\xi (\neq 0)$ を波動化した configuration

$$u_p(x) = e^{ipx} \xi, \quad p \in \mathbb{T}_a^{d*} \quad (5.17)$$

に対し

$$D_0 u_p = 0 \iff p_\mu = 0, \pi/a \quad (5.18)$$

が成り立つ。特に、ある μ に対して $p_\mu = \pi/a$ となる configuration u_p は D_0 の kernel に属するが、連続極限において \mathbb{T}_0^d 上の spinor 値関数に収束しない。一般に、 D_0 の $\mathcal{O}(a^0)$ の固有値に属する固有ベクトルでありながら、 $\mathcal{O}(a^{-1})$ の momentum をもつため、連続 Dirac 作用素の固有関数につながらない configuration を doubler と呼ぶ。これに対し、 $a \rightarrow 0$ の極限で \mathbb{T}_0^d 上の固有関数につながる格子固有関数を normal mode ということにする。

Potential $A_\mu(x)$ が 0 でないときも doubler が存在するなら、格子 Dirac 作用素の kernel の中の doubler のために、本来 0 でないはずの index が格子上で 0 になってしまうし、doubler が chiral current の一部を担いながら連続極限において視界から消えるために、chiral current の保存則が破れると考えられる。

6. Wilson fermion

問題は、格子 Dirac 作用素に含まれる対称的差分作用素が normal mode と doubler を区別できないことである。そこで 2 階の差分作用素、すなわち差分 Laplacian (の -1 倍)

$$W = -\frac{1}{a^2} \sum_{\mu=1}^d (T_{\mu} + T_{\mu}^{-1} - 2) \quad (6.1)$$

を考え、

$$D_W = D_A + \frac{1}{2} arW \quad (6.2)$$

とおく。 r は正の定数である¹⁰。

平面波への作用

$A_{\mu} = 0$ のとき、

$$W e^{ipx} = \frac{2}{a^2} \sum_{\mu=1}^d (1 - \cos(ap_{\mu})) e^{ipx} \quad (6.3)$$

であるから、

$$W e^{ipx} = \begin{cases} \mathcal{O}(1) & \text{normal mode} \\ \mathcal{O}(a^{-2}) & \text{doubler} \end{cases} \quad (6.4)$$

となり、doubler を識別している。 D_W の平面波への作用を

$$D_W e^{ipx} = D_W(p) e^{ipx} \quad (6.5)$$

と書くと

$$D_W(p) = \sum_{\mu=1}^d \gamma^{\mu} \frac{i}{a} \sin(ap_{\mu}) + \frac{r}{a} \sum_{\mu=1}^d (1 - \cos(ap_{\mu})) \quad (6.6)$$

したがって、各 p_{μ} が 0 または π/a に近いとき

$$D_W(p) \approx i \sum_{\mu=1}^d \gamma^{\mu} \tilde{p}_{\mu} + \frac{2r}{a} n \quad (6.7)$$

10 ある理由により $0 < r \leq 1$ の範囲に限定する。

(74)

となる。ただし n は p_μ が π/a に近いような μ の数である。すなわち、doubler は $\mathcal{O}(a^{-1})$ という大きい mass をもつように見える。よって $p \in \mathbb{T}_a^{d*}$ に対し

$$D_W(p) = 0 \iff p = 0 \quad (6.8)$$

が成り立ち、 D_W の kernel は doubler を含まないことが分かる。

Wilson fermion

格子 Dirac 作用素として D_W を用いることにして、(2.1)、(3.1)、(3.2)、(3.3) を次のように格子化する。

$$A_W = a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \bar{\psi}(x)(D_W + m)\psi(x) \quad (6.9)$$

$$\langle F(\bar{\psi}, \psi) \rangle = \frac{1}{Z} \int F(\bar{\psi}, \psi) \exp(A_W) d\bar{\psi} d\psi \quad (6.10)$$

$$d\bar{\psi} d\psi = \prod_{x \in \mathbb{T}_a^d} d\bar{\psi}(x) \prod_{x \in \mathbb{T}_a^d} d\psi(x) \quad (6.11)$$

$$Z = \int \exp(A_W) d\bar{\psi} d\psi = \text{Det}(D_W + m) \quad (6.12)$$

Doubler は実質的に $\mathcal{O}(a^{-1})$ 程度の mass をもつであろうから、状態和 (6.10) への doubler の寄与が抑制されることを期待する。このように定式化された fermion の理論を Wilson fermion という。Wilson fermion における chiral anomaly についてさまざまな結果が知られているが、数学的厳密性を追求しているものは極めて少ない。Torus 上での厳密な解析は文献⁴⁾でなされたが、一般の (spin) 多様体上での厳密な解析 (物理的には重力場が関与する問題) は完全には解決していない。この問題の難しさは、doubler を抑制する項 W の働きが弱いことに起因する。

7. Ginsparg-Wilson 関係式

格子 Dirac 作用素 D_W の 1 つの難点は、chiral 不変性をもたないことである。即ち、連続 Dirac 作用素は chiral 不変性 (3.7) をもつが、 D_W は

$$\gamma_{d+1} D_W + D_W \gamma_{d+1} = a r \gamma_{d+1} W \quad (7.1)$$

のように、右辺に chiral 不変性の破れが現れる。しかし normal mode に限定すれば、この chiral 不変性の破れは $\mathcal{O}(a)$ であり、連続極限 $a \rightarrow 0$ において見え

なくなるだろうという期待する。(7.1) のように chiral 対称性が破れることは、格子化（粗視化）に伴う必然的な結果であると考えられている⁵⁾。しかし chiral 対称性をもつ連続理論を粗視化して得られる実効理論を考えてみると、粗視化に伴って文字通りの chiral 対称性は破れるものの、連続理論が有する chiral 対称性は何らかの形で実効理論に遺伝しているはずである。このような観点から、Wilson と Ginsparg は連続 Dirac 作用素にある種の粗視化を施したときの chiral 対称性の破れを考察し、次のような関係式を得た⁶⁾。

$$\gamma_{d+1} \mathbf{D} + \mathbf{D} \gamma_{d+1} = a \mathbf{D} R \gamma_{d+1} \mathbf{D} \quad (7.2)$$

R は定数とする。これを Ginsparg-Wilson 関係式といい、この関係式を満たす格子作用素は、何らかの意味で chiral 対称性をもつと考えられる。

Neuberger の作用素

Ginsparg-Wilson 関係式を満たす格子作用素の例は、Neuberger によって見出された⁷⁾。まず Wilson による格子 Dirac 作用素 ($r = 1$ とする)

$$\mathbf{D}_W = \mathbf{D}_A + \frac{1}{2} a W \quad (7.3)$$

を用いて

$$A = -a \mathbf{D}_W + M \quad (7.4)$$

とおく。 M は 0 でない実数とする。Potential $A_\mu(x)$ が十分なめらかなら A^{-1} が存在することが分かり、したがって

$$B = (A^* A)^{-1/2} \quad (7.5)$$

が定義される。この作用素 B の行列要素は隣接点を越えて広がるが、2 点の距離に関して急速に減衰し、0 でない行列要素の広がりは $O(a)$ 程度の範囲であるとしてよい。これらの作用素を用いて

$$\mathbf{D}_N = \frac{1}{a} (1 - AB) \quad (7.6)$$

とおくと、 $R = 1$ の Ginsparg-Wilson 関係式

$$\gamma_{d+1} \mathbf{D}_N + \mathbf{D}_N \gamma_{d+1} = a \mathbf{D}_N \gamma_{d+1} \mathbf{D}_N \quad (7.7)$$

(76)

および hermiticity property

$$\gamma_{d+1} \mathbf{D}_N \gamma_{d+1} = \mathbf{D}_N^* \quad (7.8)$$

が成り立つ。また \mathbf{D}_N の 0 でない行列要素の広がりは $O(a)$ 程度の範囲であると考えてよいので、 \mathbf{D}_N は局所的な作用素であり、微分作用素の格子近似と見なせるだろう。

平面波への作用

作用素 \mathbf{D}_N が Dirac 作用素 (2.4) を近似していることを見るために、potential $A_\mu(x)$ が 0 であるとして、 \mathbf{D}_N の平面波への作用を調べる。(5.12)、(5.15)、(6.5) と類似の記法を用いると、各 p_μ が 0 または π/a に近いとき

$$A(p) \approx M - 2n - ia \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu \tilde{p}_\mu \quad (7.9)$$

$$(A^* A)(p) \approx (M - 2n)^2 \quad (7.10)$$

ただし n は p_μ が π/a に近いような μ の数である。よって

$$\mathbf{D}_N(p) \approx \frac{i}{|M - 2n|} \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu \tilde{p}_\mu + \begin{cases} 0, & M > 2n \\ 2/a, & M < 2n \end{cases} \quad (7.11)$$

特に $M = 1$ にとれば

$$\mathbf{D}_N(p) \approx \begin{cases} i \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu p_\mu, & n = 0 \text{ (normal)} \\ \frac{i}{|1 - 2n|} \sum_{\mu=1}^d \gamma^\mu p_\mu + \frac{2}{a}, & n > 0 \text{ (doubler)} \end{cases} \quad (7.12)$$

となり、normal mode に対しては連続 Dirac 作用素の近似になっており、他方 doubler は大きい mass をもつ形になっていることが分かる。

8. 格子作用素の spectrum

R を定数として、Ginsparg-Wilson 関係式

$$\gamma_{d+1} \mathbf{D} + \mathbf{D} \gamma_{d+1} = a \mathbf{D} R \gamma_{d+1} \mathbf{D} \quad (8.1)$$

および hermiticity property

$$\gamma_{d+1} \mathbf{D} \gamma_{d+1} = \mathbf{D}^* \quad (8.2)$$

を満たす格子作用素 D が \mathbb{T}_a^d 上で定義されているとする。仮定 (8.1) と (8.2) のもとで、格子作用素 D の chiral な性質を調べることができる。それを以下に見てみよう。

doubler の分離

まず

$$D^*D = DD^* = \frac{1}{aR}(D + D^*) \quad (8.3)$$

が成り立つので、 D, D^* は同時対角化可能であり、 D の異なる固有値に属する固有空間は互いに直交する。そして D の固有値 λ は

$$|\lambda|^2 = \frac{1}{aR}(\lambda + \bar{\lambda}) \quad (8.4)$$

を満たす。これは $1/(aR)$ を中心とする半径 $1/(aR)$ の複素平面上の円である。すなわち、0 に近い固有値はほとんど純虚数であり、連続 Dirac 作用素の振る舞いを近似していることが示唆される。また大変大きい実数 $2/(aR)$ の近くにも固有値が存在し得るが、これは doubler の固有値を意味していると考えられる。

D と D^* は同時対角化可能であるから、共通の固有ベクトルをもつ。

$$Du = \lambda u \quad (8.5)$$

$$D^*u = \bar{\lambda}u \quad (8.6)$$

このとき

$$D\gamma_{d+1}u = \bar{\lambda}\gamma_{d+1}u \quad (8.7)$$

も成り立つ。したがって、0、 $2/(aR)$ 以外の固有値 λ (実数ではない) を考えると、固有ベクトル u は $\gamma_{d+1}u$ と直交する。また

$$D_{\pm} = \frac{1}{2}(D \pm D^*) \quad (8.8)$$

とおくと、上記の固有ベクトル u に対し、

$$D_-u = i(\text{Im}\lambda)u \quad (8.9)$$

$$D_+u = (\text{Re}\lambda)u \quad (8.10)$$

(78)

が成り立つ。さらに

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_- + \mathbf{D}_+ \quad (8.11)$$

という分解において、 \mathbf{D}_- が anti-hermite で \mathbf{D}_+ が hermite であることを考え合わせると、この分解は (6.2) に対応するものであることが分かる。

\mathbf{D} の固有値 $0, 2/(aR)$ に属する固有空間 (normal mode, doubler) への直交射影を、それぞれ Π_0, Π_1 とする。ただし、これらの固有空間が存在しなければ、射影は 0 とする。すると γ_{d+1} は Π_0, Π_1 の像に作用しており、

$$\text{Tr}(\gamma_{d+1}\Pi_0) + \text{Tr}(\gamma_{d+1}\Pi_1) = 0 \quad (8.12)$$

が成り立ち、doubler を分離せずに γ_{d+1} の trace を見ると 0 になることが分かる。しかし normal mode に限定した trace である $\text{Tr}(\gamma_{d+1}\Pi_0)$ は 0 になるとは限らない。

9. Anomaly

格子 Dirac 作用素として (8.1) と (8.2) を満たす \mathbf{D} を用いることにして、次のような格子理論を考える。

$$\mathcal{A}_{\text{GW}} = a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \bar{\psi}(x)(\mathbf{D}_{\text{W}} + m)\psi(x) \quad (9.1)$$

$$\langle F(\bar{\psi}, \psi) \rangle = \frac{1}{Z} \int F(\bar{\psi}, \psi) \exp(\mathcal{A}_{\text{GW}}) d\bar{\psi} d\psi \quad (9.2)$$

$$d\bar{\psi} d\psi = \prod_{x \in \mathbb{T}_a^d} d\bar{\psi}(x) \prod_{x \in \mathbb{T}_a^d} d\psi(x) \quad (9.3)$$

$$Z = \int \exp(\mathcal{A}_{\text{GW}}) d\bar{\psi} d\psi = \text{Det}(\mathbf{D} + m) \quad (9.4)$$

Chiral 変換

$\theta = \theta(x)$ として、(3.5), (3.6) と同形の変換

$$\psi(x) = \exp(i\theta\gamma_{d+1})\psi'(x) \quad (9.5)$$

$$\bar{\psi}(x) = \bar{\psi}'(x) \exp(i\theta\gamma_{d+1}) \quad (9.6)$$

を考え、(3.10) と同様に θ の 1 次の項まで取ると、

$$\mathcal{A}_{\text{GW}} = \mathcal{A}'_{\text{GW}} + \delta\mathcal{A}'_{\text{GW}} \quad (9.7)$$

ただし

$$\mathcal{A}'_{\text{GW}} = \mathcal{A}_{\text{GW}}(\bar{\psi}', \psi') \quad (9.8)$$

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{A}'_{\text{GW}} &= ia^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \bar{\psi}'(x) (\theta \gamma_{d+1} \mathbf{D} + \mathbf{D} \theta \gamma_{d+1}) \psi'(x) \\ &\quad + 2ima^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \theta \bar{\psi}'(x) \gamma_{d+1} \psi'(x) \end{aligned} \quad (9.9)$$

そして (3.18) の同様に

$$\langle \delta \mathcal{A}_{\text{GW}} \rangle = 2i \text{Tr} (\theta \gamma_{d+1}) \quad (9.10)$$

が得られる。ただし

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{A}_{\text{GW}} &= ia^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \bar{\psi}(x) \{ \theta \gamma_{d+1}, \mathbf{D} \} \psi(x) \\ &\quad + 2ima^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \theta \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \end{aligned} \quad (9.11)$$

である¹¹。ところが今は格子化しているので、(9.10) の右辺に無限自由度の曖昧さがなく 0 となり、

$$\langle \delta \mathcal{A}_{\text{GW}} \rangle = 0 \quad (9.12)$$

すなわち

$$a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \langle \bar{\psi}(x) \{ \theta \gamma_{d+1}, \mathbf{D} \} \psi(x) \rangle + 2ma^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \theta \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle = 0 \quad (9.13)$$

が得られる。

Chiral current

(9.13) に基づいて、chiral current の保存則について考察する⁸⁾。

(8.9), (8.10) で定義された作用素を用いると、

$$\{ \theta \gamma_{d+1}, \mathbf{D} \} = -\gamma_{d+1} [\mathbf{D}_-, \theta] + \{ \theta, \mathbf{D}_+ \} \gamma_{d+1} \quad (9.14)$$

11 $\{X, Y\} = XY + YX$

(80)

のように書けるので、(9.13) は

$$\begin{aligned} & - a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} [D_-, \theta] \psi(x) \rangle + 2ma^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \theta \langle \bar{\psi}(x) \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle \\ & = -a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \langle \bar{\psi}(x) \{ \theta, D_+ \} \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle \end{aligned} \quad (9.15)$$

となる、ここで交換子

$$[D_-, \theta] = D_- \theta - \theta D_- \quad (9.16)$$

は D_- に含まれる微分が θ にかかって θ の導関数を生じさせると考え、(3.9) で行った部分積分と同様に、 θ にかかった微分を部分積分により移動したとする。このとき (9.15) の左辺は、(3.4) の左辺に θ を掛けて積分したものの格子近似と見なせる。すると、(9.15) の右辺が chiral current の保存則の破れ、すなわち anomaly を与えることになる。

とくに $\theta = 1$ のとき、(9.15) の右辺を計算することができて、

$$- a^d \sum_{x \in \mathbb{T}_a^d} \langle \bar{\psi}(x) 2D_+ \gamma_{d+1} \psi(x) \rangle = \frac{2}{1 + \frac{1}{2}maR} \text{Tr}(\gamma_{d+1} \Pi_0) \quad (9.17)$$

となる。この右辺は連続極限 $a \rightarrow 0$ において、連続 Dirac 作用素 D_A の index に収束し、(3.29) が成り立つことが期待される。さらに、一般の θ に対して (9.15) の右辺を計算する試みもあり、数学的な厳密性は保証されていないものの、(4.8) が $d = 4$ 次元で成立することを示唆する結果が知られている¹²。

付言

格子正則化に基づく chiral anomaly の計算は様々な方法で試みられてきたが、数学的厳密性を追求したものは極めて少ない。確かに Ginsparg-Wilson 関係式を満たす格子作用素の場合、chiral な性質は見通しがよい。しかし Ginsparg-Wilson 関係式に立脚して chiral anomaly を導出することは、Wilson fermion を用いる

12 通常 (9.15) の左辺において、第 1 項が本質的であり第 2 項は mass の補正に過ぎないとされているのだが、実際には anomaly は第 2 項から出ているようにも見える。すなわち、chiral current の保存則が量子的に破れるという chiral anomaly の解釈は改められるべきかも知れない。

方法よりもさらに困難であり、現在に至るまで厳密な結果は得られていない。とくに (torus とは限らない) 一般の spin 多様体上では、より高度な幾何学的量に関与することもあって手つかずの状態にある。アノマリーに限らず、場の量子論に健全な数学的基礎を与えるには、まだまだ地道な作業を積み重ねる必要がある。

参考文献

- 1) K. Fujikawa, Phys. Rev. Lett. **42**, 1195 (1979).
- 2) S. Adler, Phys. Rev. **184**, 1848 (1969).
- 3) A. Atiyah, R. Bott, V. Patodi, Invent. Math. **19**, 279 (1973).
- 4) T. Hattori, H. Watanabe, J. Math. Phys. **39**, 4449 (1998).
- 5) H. B. Nielsen, M. Ninomiya, Nucl. Phys. **B185**, 20 (1981).
- 6) P. H. Ginsparg, K. G. Wilson, Phys. Rev. **D25**, 2649 (1982).
- 7) H. Neuberger, Phys. Lett. **B427**, 353 (1998).
- 8) P. Hasenfratz, V. Laliena, F. Niedermayer, Phys. Lett. **B427**, 125 (1998).

(受付日 平成 24 年 3 月 15 日)

(受理日 平成 24 年 3 月 30 日)

〈教育報告〉

「生」と「死」を考える医学教養教育科目の軌跡 —— 5年にわたる「特別プログラム」の意義 ——

中村哲子* 渡辺 浩**

Special Programme Focusing on the Theme of Life and Death
as Part of the General Education Curriculum
at Nippon Medical School: An Overview, 2008-2012

Tetsuko NAKAMURA and Hiroshi WATANABE

1. はじめに

日本医科大学では、平成19年度に病と人、そして生と死について考えるための「特別プログラム」と称する基礎科学科目が、第1学年3学期に新たに設置された。本科目は、学生が2年次より解剖学、生化学、生理学などの基礎医学科目を本格的に学ぶ前に、いわゆる教養科目として、医学生立場で医療・医学への洞察を深める機会となるよう導入されたものである。実際には、学内外から医療・医学に携わる人材を招聘講師として招き、その講演を軸として、ディスカッションやプレゼンテーションを展開する教育プログラムとなっている。基本的には医療・医学を専門としない基礎科学部門(人文・社会・自然科学系)の全教員が教育活動に深く関わり、学生を全人的に育てようとする医学教養教育プログラムと捉えられるものである。

* 日本医科大学・外国語教室 Department of Foreign Languages, Nippon Medical School

** 明治大学・理工学部 School of Science and Technology, Meiji University (平成24年3月末まで日本医科大学・数学教室 Department of Mathematics, Nippon Medical School)

本学は、教育理念として「愛と研究心を有する質の高い医師・医学者の育成」を掲げているが、「特別プログラム」は学生が講師の人格に触れることによって、まさに本学の目指す医師・医学者となることの真の意味を深く考え、感得するとともに、専門教育への学習意欲を高めることを目指している。このプログラムを通じて、基礎科学部門所属教員は医療・医学に関する多様な問題について知見を広げ、学生とともに考察を深め、さらに、医学教育へのまなざしを育むという貴重な機会を得てきた。

平成23年度までの5年にわたり、教員が一丸となってこの教育プログラムを推進するべく、本報告執筆者の2名が科目副責任者として継続的に同じスタンスで授業運営の世話人としての役割を担ってきた。平成24年度より新たな体制での授業展開が計画されているため、これまでの軌跡をここに報告し、本学基礎科学部門発信の「特別プログラム」が、教養教育の医学教育への関わり方として意義ある一例となろうことを記しておきたい。

本稿の前半では、授業実践のありようをファカルティ・ディベロップメントの側面も含めて報告し、後半で、この授業活動を通して得られた教育の精神性に関する見解を申し述べることとする¹⁾。また、末尾に本授業にてご講演いただいた講師や講演タイトルなどの情報を年度ごとに示している。医療・医学に関わるいかなる問題について取り組んできたのか、容易に理解されることと思う。この場を借りて、本学学生のためにご尽力いただいた講師の方々に深く御礼申し上げたい。

2. 授業実践

「特別プログラム」は、第1学年の3学期、1月上旬から2月下旬にかけての6週間にわたって展開される週1回180分の授業で、1.6単位の必修科目となっている。毎週学生は授業内活動として、講演を聞き討論と発表を行うとともに、授業外でのレポート執筆が求められ、6回の授業終了後には学習内容全般を総括するレポート提出が課されている。

2.1. 教育方針

授業目的は、人の病、生、死について考え、話し合うことを通して、医療者に求められる人格を育むというものであり、これは、学生の学習目的であるとともに、教員の教育姿勢を問う内容ともなっている。この目的達成の鍵を握る

のが招聘講師であり、医学・医療に関わる活動を繰り広げる医師から看護師、そして患者から哲学者まで幅広く人材を求め、それぞれ一線で活躍する人物の人格に学生が直接接触することを重要視してきた。講演者から、そして講演内容から学生が影響を受け、医学生として自身を振り返り、改めて将来への志を立てることを期待してのことである。

この目的を達するためにこの授業が取り上げてきたテーマを概観すると、1) 医療の根源的な問題、2) 医療をめぐるさまざまな立場、3) 医師としての倫理観・使命感に関わるものとなる(本報告末尾の〈招聘講師・講演タイトル・討論テーマ〉を参照)。

このような医学教育科目としてのコンテンツとともに、教養科目として、医学専門科目学習の基盤となり、医師となるために必要なクリティカル・シンキングとコミュニケーション能力の向上も、教育上のもう1つの柱と位置づけてきた。つまり、授業でまず学生は講演の内容を的確に理解し、次に講師から示されたトピックについてグループでディスカッションを展開し、さらに、その内容について招聘講師や教員、そして全学生を前にプレゼンテーションを行う。また、授業外にて授業内容を振り返りつつレポートを執筆する。この一連の活動には、ことばをめぐる訓練が多様な形で組み込まれ、その実践をとおして論理的思考が鍛えられ、知の体系化(4.2.参照)が促されることが期待される。6回という限られた授業回数ながら、通常の授業とは異なる状況、異なる雰囲気の中での経験は、学生にとって貴重なものであったと言える。同時に本授業は、教員にとって、自身の専門分野を通じて学生と関わるのとは異なり、まさに教養教育のありようを考えさせられるものとなった。

2.2. 授業構成

授業には第1学年全学生(101～118名)と基礎科学部門所属教員(22～23名)が参加し²⁾、原則として、次に示すような講演、ディスカッション、プレゼンテーションから成り立つ3部構成の授業を展開してきた。しかし、講師の意向を尊重する方針でもあったため、第2部および第3部をワークショップのようにペアワークや小グループワークを通して授業を進めることもあった。

第1部：招聘講師による講演(70分)

〈移動・休憩 5分〉

第2部：グループ・ディスカッション (60分)

- * 第1部終了時に講師により提示されたテーマについて、7～10名の学生で構成されるグループごとにそれぞれ別室にて討論を行う。学生が持ち回りで司会と書記の役割を担当する。
- * 各グループに1～2名の教員がファシリテーターとして付く³⁾。授業期間中、同一教員が同一グループを担当する。

〈移動・休憩 5分〉

第3部：プレゼンテーション (50分)

- * ディスカッションの内容についてグループごとにプレゼンテーションを行い、講師からフィードバックを受ける。

2.3. 学習教育活動内容

全学生は7～10名(年度によって異なる)からなるグループ(10～15グループ)に分かれ、それぞれのグループを1～2名の教員が授業期間をとおして担当した。教員は日常的に担当学生に対して教育的指導を行い、最終的な成績評価も提出した。

学生に求められた具体的な学習活動は、次の1～9にまとめられる。なお、特記すべき教員の教育活動についても〈 〉で記す。

1. 講演を真摯に聞き、メモを取る。
2. 討論テーマについて考察し、考えをまとめる。
3. グループで討論し、建設的にディスカッションを発展させる。
〈教員は担当グループのファシリテーターとして、学生の討論が円滑に展開されるように、サポートする役割を果たす。〉
4. 司会として討論を円滑に進めたり、書記として議論を効率よくまとめたりする。
5. ディスカッションの内容を要領よくまとめて、大勢の前でわかりやすく伝える。
6. 自らの考えを大勢の前で的確に述べる。

7. 講演、また他の学生の発言について、的確に質問する。
8. 毎授業後に授業内学習を基盤として自身の考えをまとめ、800字程度のレポートを執筆する。

〈教員は学生の提出レポートに目を通し、必要に応じて指導を行う。〉

9. 全授業を総括し、自身の問題意識に沿って参考文献を活用して考えを深め、2,000字程度の本文と参考文献表を末尾に付した総括レポートを執筆する。

〈教員は学生の提出レポートに目を通し、内容に応じて評価する。必要に応じて指導も行う。〉

なお、招聘講師が許可する場合には授業をビデオ撮影し、欠席学生の学習活動に活用したほか、その記録映像を編集したのちに学内サーバーに掲載し、関係者が学内で視聴できるようにした⁴⁾。これは本プログラムをより広い視野から教育的に活用したいと考えた結果である。

この一連の学習活動について学生に周知するために、例年12月に事前説明会を開催し、本プログラムの目的や授業展開などの詳細を学生に伝える機会を設けた。そこでは学生がグループ担当教員と意見交換する時間も確保した。平成22年度と23年度には、授業の目的と活動内容の詳細をまとめ、参考文献や講演メモ用のページも含む25ページほどのブックレットを作成し、説明会で学生に配布することで授業活動が円滑に開始できるよう、体制を整えた。

2.4. ファカルティ・ディベロップメントの視点から

本学基礎科学部門は、組織として7分野から成り立っているが(生物学・物理学・化学・数学・人文社会科学・外国語・スポーツ科学)、分野の垣根を越えて全教員が1つの授業の教育活動を展開した例は、過去30年近くをさかのぼっても、この「特別プログラム」が最初のものである。また、新丸子図書室司書も、学生がレポート執筆の際に活用すべき図書の利用の便を図るなど積極的なサポート体制を取り⁵⁾、事務室職員も学生の個性を把握してきめ細かく対応し、常に招聘講師への敬意をもって業務にあたった。加えて、情報科学センターが、授業のビデオ撮影およびその学内利用の便宜を図ってくれたため、十分な教育活動の展開が可能となった。そのほか、本学諸機関・諸委員会のサポー

トがあつてこそ、本プログラムの多角的な学習教育活動が継続できたと言え、恵まれた環境の中で企画・運営が進められたことに感謝している。この授業を契機として、教職員は専門分野外の教育について同じ教育目的に向かって互いに意思疎通を図るようになり、結果的にある種の教育基盤を共有することとなったのは大きな収穫であつた。

しかし、ここにいたるまでには、多くの時間と努力が必要とされたのも事実である。初年度の授業企画は白紙からのスタートであつたため、基礎科学部門の毎月開催の会議において継続的に教育理念や計画案を審議する形を取り、授業実施期間にはEメールによる情報交換などで現状をフィードバックしつつ臨機応変に対応し、最終的には適切に成績評価を出すにいたつた。2年目以降は、前年の授業実施における問題点を解決しながら、その年度に新たに生ずる教育環境に合わせて教育体制を整える作業が続いた。特に、平成21年度の入学定員が、1学年100名から110名に増え、その後も若干数の増加が続いたため、学生のグループ編成のありかたについては見直しが続いた。

教員間での意見交換がもっとも求められたのは、学生の提出レポートをめぐる評価方法に関わるものであつた。特に、学期末に提出される総括レポートは2,000字程度のものであり、学生の取り組みにはそれなりの差異が認められたため、教員が評価基準を明確に共有するのは容易ではなかつた。23年度の授業企画においては特に意識的に意思疎通を図り、5年間のプログラムの中でもっとも妥当と判断できる基準の共有にいたつたが、多様性が見られる文章の評価判断のむずかしさを改めて痛感する結果ともなつた。これは、文章評価が単独に抱える厄介さだけでなく、生と死という、その見解について個人差が大きいテーマであることも深く関わっていると考えられる。このテーマをめぐることは、何が正しく、何が間違いかの明確な基準はないに等しく、文章にはひとりひとりがこの問題にどう向きあうかという、きわめて個人的な思考プロセスそのものが現れる。その意味で、いわゆる文章作法を越えたところに存在する問題が、レポート評価のむずかしさにつながっているように見受けられた⁶⁾。

上記のような作業を前提として、学生の成績評価は、出席、授業活動状況、レポート内容などを中心にグループ担当教員が点数化し、適宜全体調整を経たのちに最終評価点として定められた。

3. 成果

初年度に「特別プログラム」の授業を履修した学生は現在いまだ6年生であり、当然ながら、この授業の成果を総括する段階にはなく、そもそもこの種の授業の成果を数値データの形で示すことは無意味である。しかし、少なくともこの授業を履修した本学学生は1学年において、次に挙げるような医療・医学関連トピックについての知見を得て考察を深め、それを何らかの形で表現する機会を得た。

救急医療

終末期医療・看護

高齢者医療・看護

患者に寄り添う医療・看護のありかた

予防医学

グリーフ・ケア

医師に求められる資質

個々の学生が本授業をとおして何をつかみ取ったかは測れるものではなく、個人差も大きく、全学生がすべからくすべての学習活動に積極的に取り組んだとは言えないのも事実である。本プログラムが開始される時点では、学生はすでに1学期と2学期において「医学概論」と「医学入門」を履修し、看護実習を経験してはいるものの、第一線で活躍する講師がどのような環境の中で、そしてどのような立場で医療・医学に関わっているのかを実感するにはいたらない。将来的に自身が関わる世界について、現在の自分との連続的な関連性を把握しかねている学生にとっては、講師の物語る世界はある意味で想像上の世界での出来事のように感じられるようでもある。しかし、その現実味の希薄さは、学生が目前にする講師の人間性によって補われることも事実であり、授業終了後に講師と直接話をしたいとする学生が控室を訪ねることもしばしばであったことを考えると、書物からの刺激とは異なったものを得て、学生が何かを学んでいると実感できた。

こうした学生に、講演内容を深く吟味するための拠り所となる書物を読ませたことも成果の一部と捉えてよからう。初年度向けに構築した参考文献リストを基盤として、新刊書やその年度の講演者の著書を含めて毎年改訂して学生に

配布してきた。また、新丸子校舎図書室の蔵書の充実も図った。学生は適宜レポート作成時に図書を活用したようだが、特に平成21年度以降は、必読書として数冊を指定し、学生が生と死の問題を漠然と観念的に捉えがちであるところを、可能な範囲で整理して理解できるように導いた。死生学をめぐっては、昨今、国内でも多角的に研究が繰り広げられているが、ロスの『死ぬ瞬間』(1971)はその古典ともいえる地位をいまだ失ってはいない。学生は医学部入学試験準備段階で本書に親しんでいるため、本授業では、日本における死生学を広く根づかせたデーケン(平成20年度と22年度招聘講師)がその概念をわかりやすく語っている『死とどう向き合うか』(1996)を、論理的基盤を理解するための書物として位置づけた。それとともに、患者や患者家族の立場から医療を見据えた柳田(平成19年度招聘講師)の『犠牲』(1999)、人間としての医療者のありように関する洞察に富んだメイヤロフの『ケアの本質』(1987)も重要参考書とした。日本死の臨床研究会、そして島菌を中心とした東京大学発信の死生学を体系づけようとするシリーズは、教員にとって拠り所となるものと言えよう。

本プログラムに関するパブリックリレーションとして、2つの具体的事例について触れておきたい。1つは、平成20年度に講師として授業を展開した羽田(平成21年度招聘講師でもある)が、その際の学生のレポート4点を著書『終りよければすべてよし』に掲載の労を取ってくれたことである。授業では、羽田が監督した同名の記録映画の視聴も行われ、学生は国内外の高齢者医療の実態について学んだ。各回の学生のレポートは平成20年度以降すべて講演者に送付しているが、その結果、本学学生の考察がこうして公になる機会を得たことはうれしい限りである。もう1つは、本プログラムが医学教育のコンテキスト中で、1つの事例として公に提示されたことである。本報告執筆者の渡辺が代表となり、第42回日本医学教育学会大会における一般演題「各種教育技法・授業実習の工夫(3)」の部での口演(2010年7月31日、於 日本医科大学)にて、「医師としての人格を育む教養教育の試み」として発表した。上記のような機会により、医学部における教養教育のありようとして、本学の教育活動が好意的に受け止められたことを願っている。

4. 考察——医学教育における人間教育の目標

上にその概要を記した日本医科大学における医学教養教育の経験を踏まえて、医学教育における人間教育の目標となる理念的問題について考察したい。

4.1. 医学教育の前提

医学教育の前提として学生に要求されることが2つある。それは、「知が体系化されていること」と「人として成熟していること」である。

「前提」とは言っても、実際には医学部に入学した時点で学生の知が体系化されており人として成熟しているわけではなく、また1余年のいわゆる「教養教育」の中でこれらの要件を満たすようになるというわけでもない。これはある意味で理想論であり、換言すれば、これらの知的精神的基盤は、学生が医療の現場に出てからも、つねに自身に要求し充足してゆくべきものである。しかし、学生はすべからくこの時期に、上記の2要件に眼を開くことが望まれるのである。

言うまでもなく、「教養教育」は、学生が医学学習に必要な知識を得るといふ目的をもつ。しかしそればかりでなく、「知を体系化すること」と「人として成熟すること」も、あるいはこれらのことの意味に目覚めその手がかりをつかむことも、教育目標として織り込まれて然るべきだと考えられる。

4.2. 知の体系化

「知が体系化されている」とは、単に知識をもっているということではなく、人の知の世界を鳥瞰し、統合された自然観・世界観を形成する視点をもっているということである。言うまでもなく、自然科学に矛盾があってはならない。しかし、医療というものは自然科学に理論的基礎を置きながらも、日々現実的矛盾の直中においてその真価が問われるものであり、単純に自然科学の一分野として位置づけられるものではない。すなわち、医学は自然科学を踏まえながらも、その外に軸足を置いており、自然科学の原理の統制下にあるというよりも、自然科学の推論形式を応用する方法論に従っている。それゆえに、医学においては、自然科学的思考のあり方を、それを応用する観点から、客観的あるいは批判的に見るべきであり、そのためには「知が体系化されていること」が必要になる。

4.3. 人としての成熟

他方、「人として成熟していること」の意味は一見自明のように思われる。本学の「特別プログラム」においては、医療者としての人格的な基盤を形成する手がかりを得ることをその基本理念に掲げている。しかし、人格的な基盤を形成するために具体的にどのような手立てを講ずるべきかという問題は決して自明ではない。このプログラムのような教育が導入されたこと自体が物語るように、入学したばかりの多くの学生に欠けているものがあることは事実であり、その欠けているものを補うには、医学を含むより広い見地に立って考える必要があることも確かなのだが、何をどのように補うべきなのかという問いには答えることができないのである。

4.4. すぐれた人格に接すること

しかし1つ言える事がある。即ち、すぐれた人格を形成するにはすぐれた人格に接するしかないということである。そこで本プログラムでは、医学の知識や技術ではなく、医療の意味について深い視点をおもちの方々を招いて話を伺ってきた。とくに医療の極限的な状況に身をおいておられる方に、学生の精神を目覚めさせる言葉を期待したのである。

ただしそこで扱われる問題は、学生がその場で「正解」を見出せるようなものではなく、また1つの正解をもつようなものでもなく、生きている限り問い続けるべき問題が少なくなかった。実際、講演者から「解答」が与えられることは「決して」と言ってよいほどないのである。

つまり、大切なのは答えを出すことよりも問うことであると言える。それでは、私たちは何を問い、人格の基盤をどこに求めたらいいのだろうか。

4.5. 人格の基盤

シュヴァイツァーは、7, 8歳のころ、友達に誘われて鳥撃ちに行った思い出を「ふかい印象をあたえた出来事」として語っている。彼ははげしく良心に責めさいなまれながらパチンコに小石をはさむ。

心では、的をはずそうと、かたく誓った。その瞬間、日ざしのみなぎる大気のなかへ、小鳥たちの歌声にまじって、教会の鐘の音が鳴りはじめた。(中略) 私にとっては、天来の声であった。私はパチンコを放り出すと、やにわに小鳥たちを追い立て、小鳥たちが飛びさって私の相棒のパチンコ

から安全になるのを見すますなり、家へ逃げかえった。これ以来私は、晴れた日に、まだ葉の出ない木々のあいだへ、受難節の鐘が鳴りひびいてくると、そのつど、この鐘がああ当時「なんじ殺すべからず」といういましめの声を、私の心のなかに呼びさましたのだ、ということをおこして、感動し感謝する⁷⁾。

このエピソードとともに、シュヴァイツァーによるつぎの一節も名高い。

生命と名のつくものすべてに対して、わたしは畏敬の念をいだかずにはいられない。生命と名のつくものすべてに、わたしはあわれみを感じないわけにはいかない。それが道徳のはじまりであり基本である。一度その感情を経験し、以後ずっとそれを経験しつづけると——一度経験した者はかならず、経験しつづけるのであるが——その人は倫理観のある人間となる。その人は自分のなかに道徳をもっているため、それを失うことはない。なぜなら、それはその人のなかでそだってゆくからである。ところが、一度もそのような経験のない人は、ただいくつかの表面的な原則しかもっていない。そしてこれらの原則は、彼の心のなかで根をおろしていないために、彼のものではなく、いつの間にか消えていってしまうのだ⁸⁾。

細谷(平成21年度招聘講師)は、その著書に上記のシュヴァイツァーの言葉を引用して、自らの体験を次のように記している。

私はパチンコで雀を撃ってまぐれであたり、その雀は死んでしまったのだ。ひどいショックだった。それが私の原体験である。

どんな資質が必要なのかは、私にもわからないけれど、子どもだった時に、いのちについて考える機会が与えられたということ、私はとても幸運なことだと思っている…⁹⁾

これは医学部の学生に小児科医の資質を問われたときの答えであるという。

4.6. 問いに向き合う

もちろん倫理観が確立すれば何も迷いはないというわけではない。実際、医

療の極限的な状況において、人は「立ち竦むしかない」ということが起こる。田村(平成23年度招聘講師)は次のように述べている。

患者は、自分の命の限りと向き合って「この私が存在する意味は何か…」
「どうしてこの私なのか…」「何のために人は生き、死んでゆくのか…」
「神は存在するのか…」(と問う。)

命の限りと向き合って、痛み、苦しみ、疼きを覚える患者の前で、看護師である〈私〉はその苦悩に応える術がなく、立ち竦むしかない。

その場から逃げ出さず、その場にとどまり、場の中にいることがケアの担い手である〈私〉の応えといえるだろうか…¹⁰⁾

そして、患者を導くのではなく患者とともに問いに向き合う姿勢をケアの本質とみる。

4.7. 無私ということ

メイヤロフは、「ケア」について哲学的視座から考察した論考において、

一人の人格をケアするとは、最も深い意味で、その人が成長すること、自己実現することをたすけることである。

と述べている。メイヤロフはさらに、ケアにふくまれる諸要素を明らかにしながら、「無私」というケアの特質に注目する。

他者が成長していくために私を必要とするというだけでなく、私も自分自身であるためには、ケアの対象たるべき他者を必要としているのである。

しかし

私は、自分自身を実現するために相手の成長をたすけようと試みるのではなく、相手の成長をたすけること、そのことによってこそ私は自分自身を実現するのである。

このような意味で「ケアしていくうえで無私という要素が入ってくる」と指摘し、

無私とは純粋に関心を持ったものに心ひかれること、すなわち、“より自分自身”に近づくことができるだけでもいうようなものである。このような無私の状態とは、最高の覚醒、自己と相手に対する豊かな感受性、そして自分独自の力を十分に活用することを意味するのである。

と述べている¹¹⁾。

4.8. 倫理を超えて

立ち竦むしかない〈私〉が、患者との関わり合いを通して、深い認識を得つつ〈無私〉に徹してゆく姿を、私たちは神谷美恵子に見ることができる。神谷は「癩者へ」と題する詩の中で、次のように自問自答する。

運命とすれすれに生きているあなたよ、
のがれようとて放さぬその鉄の手に
朝も昼も夜もつかまえられて、
十年、二十年と生きて来たあなたよ。

何故私たちでなくあなたが？
あなたは代って下さったのだ¹²⁾、

これはもはや倫理の次元から発せられた言葉ではあるまい。人格の根は、倫理の次元を超えて、さらなる深みに到達しているように見える。

5. おわりに

この報告では、日本医科大学における医学教養教育「特別プログラム」について、その実施形態を記し、理念的問題を考察した。以下に、3点ほど補足しておきたい。

正確な調査をしたわけではないが、学生の大多数は、家族などの「2人称の死」を経験していない。また「自身の死」も遠い将来のこととしか思えない学

生が多い。そのため学生の死生観には具体性が乏しく、思考や討論が典型的になりがちである。これは医学教育において重大な障害をもたらすのではなからうか。しかし、本授業がきっかけとなって、友人同士で死について話す機会ができたことを歓迎する学生も少なくない。

かかる教育の場において、教員の役割はファシリテーターになることであり、直接的に学生を指導する立場には立たないが、それでも学生との真剣勝負を余儀なくされることがあるのは事実である。というのは、学生に真の意味での誠実さを要求する以上、教員の言葉と行動に矛盾があることは許されず、教員自身がどのように生きて来たか、またいまどのように生きているかが問われるからである。

また、医学の専門教育において教員に専門知識が要求されることは言を俟たないが、医師の人格的基礎に関する教育において、医学の専門知識は不要である。と言うよりも、専門知識をもたない教員（または医学から距離を取り得る教員）であることが望ましいのかも知れない。なぜなら、医師としての人格の基礎を求めて精神の奥深い領域に分け入ると、最終的にすべての人に共通する心の水脈に行き着くからである。この心の層から発せられる教員の「人としての言葉」を聞くことは、学生にとって意味のあることなのではなからうか。この事実もまた、医学部の人間教育を考える上で重要な論点になるものと思われる。

注

- 1) 第1節から第3節を中村が、第4節と第5節を渡辺が中心となって執筆した。
- 2) 平成21年度以降入学定員が増加したため、年度により学生数に異動がある。この5年間に本プログラムに参加した基礎科学部門所属教員は次のとおり（敬称略、五十音順、退職者を含む）。安藤勉、岡敦子、伊藤末博、香川浩、儀我真理子、菊地浩人、小林正規、菅原理二、杉浦京子、高市眞一、田中幹夫、武田洋一、永井俊、中村成夫、中村哲子、西川純恵、西谷里美、野村俊明、ティモシー・ミントン、長谷部孝、藤崎弘士、三上俊夫、武藤三千代、横内一実、渡辺浩。
- 3) ファシリテーターについては、堀公俊・加藤彰(2009)を参照。
- 4) 学内サイト「NAIM日本医科大学学術データベース、マルチメディア教育研究システム」(<http://www.nms.ac.jp/naim/medaia.html>)に学内から参照できるようにリンクが張られている。
- 5) この5年間に本プログラムに協力した司書は次のとおり（敬称略、五十音順）。高瀬雅樹、富田麻子、山室春美。

- 6) 文章作法については、句読点や助詞の使い方はもちろんのこと、口語体で書かないこと、段落構成を妥当なものとする、参考文献への本文中での言及の仕方等を的確に行い、誰の見解であるかが明確にわかるような文章を作成することなどを中心に指導した。
- 7) シュヴァイツァー (1956), pp. 233-34.
- 8) ベントリー (1992), p. 162 に、『生命への畏敬』からのシュヴァイツァーの言葉の引用として記されている。
- 9) 細谷亮太 (2007), pp. 110-11.
- 10) 田村恵子、平成24年1月24日、日本医科大学「特別プログラム」における講演資料。
- 11) メイヤロフ (1987), p. 13, pp. 68-70.
- 12) 神谷美恵子 (1989), p. 8.

〈参考文献〉

- 神谷美恵子 (1989) 『うつわの歌』 みすず書房。
- 島蘭進・竹内整一・小佐野重利編集代表 (2008) 『死生学』 全5巻 東京大学出版会。
- シュヴァイツァー, アルベルト (1956) 『生い立ちの記』 国松孝二訳 シュヴァイツァー著作集 第1巻 白水社。
- デーケン, アルフォンス (1996, 2011) 『死とどう向き合うか』 日本放送出版協会。
- ・柳田邦男編 (2005) 『〈突然の死〉とグリーフケア』 春秋社。
- 日本死の臨床研究会編 (2003) 『シリーズ 死の臨床』 新装・新訂版 全10巻 人間と歴史社。
- 羽田澄子 (2009) 『終りよければすべてよし』 岩波書店。
- ベントリー, ジェームス (1992) 『シュヴァイツァー』 菊島伊久栄訳 偕成社。
- 細谷亮太 (2007) 『医者泣くということ』 角川書店。
- 堀公俊・加藤彰 (2009) 『ロジカル・ディスカッション』 日本経済新聞出版社。
- メイヤロフ, ミルトン (1987) 『ケアの本質——生きることの意味』 田村真・向野宣之訳 ゆみる出版。
- 柳田邦男 (1999) 『犠牲(サクリファイス)——わが息子・脳死の11日』 文藝春秋。
- ロス, キューブラ (1971) 『死ぬ瞬間——死にゆく人々との対話』 川口正吉訳 読売新聞社。

〈招聘講師・講演タイトル・討論テーマ〉

●平成19年度

第1回 平成20年1月15日

黒川顯 (日本医科大学武蔵小杉病院院長)

「救命救急センターにおける生と死」

・医師はいかなる患者さんに対しても、とことん頑張らなければいけないの

か？

- ・どこかで諦めるとすると、誰が何を基準に決めるのか？ 諦めることは正当と言えるか？
- ・もう助けられないと考えられる人の家族に対し、医療者はいかに接すべきか？
- ・医師には応召の義務として、いかなる時でも診療の依頼を受けなければならないのか？
- ・断るとすると、どうやって断れば問題にならないですむか？

第2回 平成20年1月22日

小川龍（日本医科大学名誉教授）

「医師はなぜ医療を行うのか？ 医学と哲学の接点」

- ・医療とは何か？
- ・医師は何故医療を行うのか？
- ・医師は医療を通じて、良いことを行っているのか？
- ・良い医療とは何か？
- ・良い医療を実践する方向は？

第3回 平成20年1月29日

フレディ松川（湘南長寿園病院院長）

「老人を診るのにどのような医師が必要か」

- ・医師のコミュニケーション能力を育てるにはどうしたらいいか
- ・日本において、終末期医療と尊厳死についてのコンセンサスを普及させるにはどうしたらいいか

第4回 平成20年2月5日

デイヴィッド・グレミリオン David Gremillion（亀田総合病院教授）

“Cultural Factors Affecting End of Life Care”

- ・ Does a patient have the right to hear bad news directly from the doctor first, rather than from anyone else?
- ・ What is the best way to deliver bad news to a patient?

第5回 平成20年2月12日

ジェイムズ・サック James Sack（ルーテル学院大学教授）

「スピリチュアル・ペインを考える——終末期に関する人間関係」

- ・講師が話を進めながら、学生が数回にわたって意見交換を行うグループワークを展開する

第6回 平成20年2月20日

柳田邦男（ノンフィクション作家、評論家）

「死の人称性と医療者のかかわり方」

- ・配布された小論を読んで、新しい気づき、学ぶべき着眼点はあったか？

- ・疑問点、反対の点はあったか？
- ・医療者になるにあたって、意欲をかきたてられたところはあったか？
- ・他者の苦しみ、悲しみに対する想像力を豊かにするには？
- ・医療の専門家として、自戒すべき点、常に心がけるべき点はどういうことだと考えるか？

●平成20年度

第1回 平成21年1月13日

黒川顯（日本医科大学武蔵小杉病院院長）

「救命救急センターにおける生と死」

- ・医師はいかなる患者さんに対しても、とことん頑張らなければいけないのか？
- ・もう助けられないと判断したとき、医師は患者さんの家族にいかにつなぐべきか？

第2回 平成21年1月20日

羽田澄子（記録映画監督）

「私はなぜ映画『終りよければすべてよし』を作ったか」

- ・「死」を、医療はどのように考え、どのように対応すべきでしょうか
- ・医療に対するチームワークの力について

第3回 平成21年1月27日

フレディ松川（湘南長寿園病院院長）

「老人医療に極意はあるか」

- ・自分の親の老後を想像できるか
- ・リーダーシップとコミュニケーション能力の育て方

第4回 平成21年2月3日

アルフォンス・デーケン Alfons Deeken（上智大学名誉教授）

「死生観を育む——スピリチュアリティとは」

- ・両親はどこでどのように最期のときを迎えたいと望んでいるか（事前に課題として出されていたテーマ）

第5回 平成21年2月10日

向谷地生良（北海道医療大学教授、医療福祉法人浦河べてるの家理事）

「統合失調症を生きる——統合失調症を持つ人たちの経験から見えてきた生きること、暮らすこと」

- ・どのような感想をもったか
- ・自己病名をつけ理由を説明する

第6回 平成21年2月17日

山崎章郎（ケアタウン小平クリニック院長、聖ヨハネホスピスケア研究所長）

「緩和ケアのめざすもの」

- ・ 生きている意味がないと言う患者さんに何と答えるか
- ・ 人は死んだらどうなるか

●平成21年度

第1回 平成22年1月12日

黒川顯（日本医科大学武蔵小杉病院院長）

「救命救急センターにおける生と死」

- ・ 生への挑戦と医療の限界——終末期医療のあり方
- ・ 終末期と判断したとき、医療者はいかに行動すべきか

第2回 平成22年1月19日

小澤竹俊（めぐみ住宅クリニック院長）

「終末期患者の心のケア」

- ・ 事例を提示して演習を行う

第3回 平成22年1月26日

細谷亮太（聖路加国際病院副院長）

「重い病気の子ども達——小児がんのトータルケアを例に」

- ・ 子どもとおとな——患者であり人である「子ども」にかかわるとき、自ら通った道としての子どもとは
- ・ 命の長さや短さ——かつて子どもだったことに気づくとき、医師として親としての命の長さ、短さとは

第4回 平成22年2月2日

羽田澄子（記録映画監督）

「映画『終りよければすべてよし』をなぜ作ったか」

- ・ 「死」を、医療はどのように考え、どのように対応すべきでしょうか
- ・ 医療に対するチームワークの力について
- ・ 大病院と開業医からなる日本の医療システムについて

第5回 平成22年2月9日

大庭利雄（作家大庭みな子の夫・秘書・介護者）

「終わりよければすべてよし——介護について思うこと」

- ・ 米国に見られるような競争社会の行き着く先への疑問と反省
- ・ 人生の週末にはせめて僅かでも幸福感を感じて生を終える道はないか？
- ・ いたずらな延命とQuality of Lifeの妥協点はどこにあるか。医師も生死に関する哲学を見直すべきでは？
- ・ 高齢者の支えは誰の肩に？ 家族か、介護保険か、次世代か、国家か？

第6回 平成22年2月16日

神谷整子（みづき助産院院長）

「産む事そして産まれる事」

- ・昔から「お産」は病気ではないと言われているがどう思いますか
- ・もしあなたが赤ちゃんを産むとしたらどの様に産みたいですか

●平成22年度

第1回 平成23年1月11日

黒川顯（日本医科大学武蔵小杉病院院長）

「救命救急センターにおける生と死」

- ・救命救急医療とはどんな医療だと思うか
- ・患者さんがある状態になった時、医師が「救命のための治療を始めない」と「やっている生命維持のための治療を中止する」について
 1. ある状態とはどんな状態と思うか？
 2. どんな手続きがあれば、それぞれの行為は許されると思うか？

第2回 平成23年1月18日

田村正徳（埼玉医科大学教授、

同大学総合医療センター総合周産期母子医療センター長）

「新生児医療の現場が抱える倫理的問題」

- ・講演の前に、森下美代「求めているのは人としての温かさ」を読んで討論する
- ・講演後に、ペアワークとして次について討論する

NICUにおいて治療を受ける22週台の新生児の35%は命を取りとめ、その半数は普通の生活ができるようになるが、元気になる率は十分高くない。もうお産を止められない22週の段階で、あくまで育てたい母親と、治療を止めたい父親の意見が一致しないとき、主治医としてどうするか。

第3回 平成23年1月25日

大谷貴子（全国骨髄バンク推進連絡協議会会長）

「白血病患者から医療者に望むこと」

- ・もしも国家試験直前に白血病を発症したらどうするか
- ・自分は〇〇の治療法が良いと思うのに、患者さんがインターネットなどで他の△△の治療法を見つけてきた場合など、複数の治療法を提示するとき何を強調したいか
- ・セカンドオピニオンを受けてきた患者さんが、医師にいやみを言われて泣いてしまうことがあるが、セカンドオピニオンを受けて患者さんが戻ってきたときどうするか

第4回 平成23年2月1日

藤井美和（関西学院大学教授、同大学死生学・スピリチュアリティ研究センター長）

『いのち』に向き合う——死生学の立場から」

- ・ワークショップ「私のライフサイクル」を行う

第5回 平成23年2月8日

アルフォンス・デーケン Alfons Deeken (上智大学名誉教授)

「病と人、そして死について考える」

- ・貴方の親御さんはどこでどのように最期を迎えたいと望んでいるか(事前に課題として出されていたテーマ)

第6回 平成23年2月15日

内藤いづみ (ふじ内科クリニック院長)

「いのちによりそう在宅ホスピスケアから学んだこと」

- ・余命3ヶ月と判断されたら、どうすごしたいか？
- ・あなたにとって、大切な人、大切なこと、大切なもの、大切な役割とは？
- ・死ぬときに後悔すること

●平成23年度

第1回 平成24年1月10日

黒川顯 (日本医科大学武蔵小杉病院院長)

「救命救急センターにおける生と死」

- ・救命救急医療とはどんな医療だと思うか
- ・患者さんがある状態になった時、医師が「救命のための治療を始めない」と「やっている生命維持のための治療を中止する」について
 1. ある状態とはどんな状態と思うか？
 2. どんな手続きがあれば、それぞれの行為は許される(ない)と思うか？

第2回 平成24年1月17日

大谷貴子 (前全国骨髄バンク推進連絡協議会会長)

「白血病患者から医療者に望むこと」

- ・自分は〇〇の治療法が良いと思うのに、患者さんがインターネットなどで他の△△の治療法を見つけてきた場合など、複数の治療法を提示するとき何を強調したいか
- ・セカンドオピニオンを受けてきた患者さんが、医師にいやみを言われて泣いてしまうことがあるが、セカンドオピニオンを受けて患者さんが戻ってきたときどうするか
- ・明らかに余命いくばくもない若い患者さんに余命を聞かれたらどう答えるか

第3回 平成24年1月24日

田村恵子 (澁川キリスト教病院ホスピス主任看護課長)

「死に向かい合う人を支える——ホスピスでの実践を通して」

- ・人が死に向かい合うとは？——自己の死にどう向かい合ったらいいか、考え

てみて下さい

- ・生と死に境界はあるのか？——とても深い問題ですが、自分なりに考えを膨らませてみてください

第4回 平成24年1月31日

垣添忠生（国立がんセンター名誉総長）

「がんと人間と社会」

- ・がんの多様性、患者さんの多様性にどう向き合ったら良いか？
- ・資源が限りある中での、がん対策はどうあるべきか？

第5回 平成24年2月8日

河崎一夫（元金沢大学付属病院長）

「君達はどう学ぶか」

- ・事前に目について知るための実験課題などが宿題として課され、授業は「眼の話」「宿題への回答」「心構え」の3部構成の演習も交えたもの

第6回 平成24年2月14日

大棟耕介（NPO法人日本ホスピタル・クラウン協会理事長）

「笑いの力～ホスピタル・クラウンの現場から」

- ・講演を聞いて考えたことをペアワークとして自由に話し合う

（受付日 平成24年7月1日）

（受理日 平成24年7月7日）

投稿規定

1. 本誌は研究成果の発表を目的とする。
2. 投稿は本学基礎科学部門に所属する専任教員に限る。
ただし、編集委員会が認めた場合はこの限りではない。
3. 原稿は他誌に未発表のものに限り、その体裁は「投稿原稿執筆の手引き」によるものとする。
4. 原稿提出時に、その種別(論文・総説・解説・研究ノート・研究報告・教育ノート・教育報告・翻訳・書評など)を明記し、欧文タイトルをつける。
なお、種別の審査決定は編集委員会が行う。
5. 校正は2校までを投稿者の責任において行う。
6. 枚数制限などをする場合がある。

編集委員

野村 俊明(代表) 中村 哲子(幹事)
藤崎 弘士 T. D. ミントン 渡辺 浩

編集協力学外研究者

小菅隼人(慶應義塾大学教授)	小林正規(千葉工業大学上席研究員)
佐々木正宏(聖心女子大学教授)	鈴木政登(東京慈恵会医科大学教授)
鈴木隆芳(大阪経済大学准教授)	田辺春美(成蹊大学教授)
露崎俊和(青山学院大学教授)	戸田幹人(奈良女子大学准教授)
長島 隆(東洋大学教授)	服部哲弥(慶應義塾大学教授)
松井優子(青山学院大学教授)	宮寺隆之(京都大学准教授)
米澤宣行(東京農工大学教授)	Andrew Fitzsimons(学習院大学教授)
Reuben Gerling(元日本大学教授)	Clive Langham(日本大学教授)

編集後記

本紀要の第40号発刊から1年半を経て、ようやく第41号を世に送り出すまでに漕ぎ着けました。発刊母体となっている基礎科学部門は、平成26年3月に新丸子校舎からの移転を予定しており、今後の研究発信のありかたについて検討を重ね、本号から新たな一歩として学外研究者のご協力を得て、〈論文〉として投稿された原稿については、より広い視野からの助言を反映できる体制を整えました。▼前号より本学ウェブページから本紀要へのアクセスも可能となり、部門内においても、教育・研究者としての社会的な責任をさらに自覚し、われわれの研究を切磋琢磨する方向も定まっています。さらなる熟成が必要な原稿には、次号への再投稿を勧めることも辞さず、手堅く誠意ある論考がここに集まったものと思っております。▼その編集方針を形に表そうと、本号から冊子の一新を図りました。本紀要の伝統を重んじつつ、新たな志の感じられる体裁といたしました。第41号を学内外で広く活用していただきたく、ここにお届けいたします。ご協力いただきました学内外の研究者および学内職員の皆様に改めて感謝申し上げます。 (中村 哲子)

日本医科大学基礎科学紀要 第41号

平成24年9月25日 印刷

平成24年9月30日 発行

編集 日本医科大学基礎科学紀要編集委員会

発行 日本医科大学

新丸子主任 野村 俊明

〒211-0063 川崎市中原区小杉町2-297-2

日本医科大学 新丸子校舎

印刷所 七月堂

〒156-0043 世田谷区松原2-26-6-103