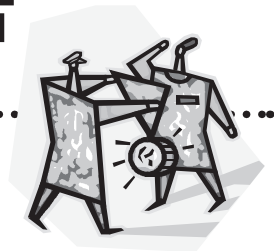




国際情報オリンピック 2009 ブルガリア大会参加報告



谷 聖一

日本大学/情報オリンピック日本委員会専務理事

2009年8月8日より8月15日までブルガリアのプロブディフ市 (City of Plovdiv) で開催された第21回国際情報オリンピック (International Olympiad in Informatics, IOI) において、昨年に引き続き日本から参加した4名の選手全員がメダル獲得という快挙を達成した。中でも、保坂選手は2位という好成績を取めた。誌面をお借りして、選手たちの活躍ぶりを報告する。また、出題された課題の1つを紹介する。

IOI 2009 ブルガリア大会概要

IOI¹⁾ は中高生を対象としたコンピュータサイエンス (CS) に関する国際競技大会であり、国際科学オリンピックの1つである。IOIの主な目的は、CSに才能ある若者に、CSへの興味を喚起し、その能力伸張の手助けをし、彼らに国際交流の場を提供することである。競技の課題は基本的にアルゴリズムの性能を競うものである。選手は、問題の解析、アルゴリズムとデータ構造の設計、実装と検証といった基本的なITスキルを身につけているだけでなく、課題を数理的に解析する能力や柔軟な発想力が要求される。IOI日本代表選手選考を兼ねる日本情報オリンピック²⁾については文献3), 4), 5)に詳しいので、それらを参照されたい。

第21回IOIは、2009年8月8日より8月15日までブルガリア国プロブディフ市 (City of Plovdiv) で開催された。第1回IOIの開催国はブルガリアであり、20年ぶりに発祥の地に戻ったの記念大会となった。IOI開催のきっかけの1つは、1987年の第24回UNESCO総会において、ブルガリア代表であったBlagovest Sendov氏が中等教育における情報教育の重要性を訴えIOIの開催を提案したことである。Sendov氏はその後IFIPのpresidentなどを歴任し、最近まで駐日ブルガリア大使として日本に赴任されていた。

プロブディフ市は、ブルガリアの中南部トラキア盆地にあり、首都ソフィアから約130kmの距離にある。ブ

ロブディフはヨーロッパでも最も歴史ある都市の1つで、少なくともトラキア人が居住していた時期まで歴史を遡ることができ、その発祥はトロイやミケーネと同じくらい古いという。アレキサンダー大王の父親であるマケドニア王フィリッポス2世に征服されフィリッポポリスと呼ばれた時期もあり、その後ローマの支配下に入ったそうである。2世紀初頭トライヤヌス帝の時代に建設された円形劇場が今でも残っている。閉会式は、なんとそのローマ時代の遺跡である円形劇場で開催された。円形劇場に隣接する丘には旧市街が広がり、古代から続く石畳の道にブルガリア民族復興期の建物が軒を連ね趣のある街並みを構成している。

今回は80カ国・地域から301名の選手が競技に参加した。金メダルは26名、銀メダルは50名、銅メダルは73名に授与された。また、次年度から選手を派遣するため、アルジェリア、ベルギー、マダガスカルの3カ国がオブザーバを派遣していた。

日本選手団(図-1)の構成は以下の通り^{☆1)}である。

選手

- 副島 真(筑波大学附属駒場高等学校・3年)
- 滝間太基(筑波大学附属駒場高等学校・3年)
- 平野湧一郎(灘高校・3年)
- 保坂和宏(開成高校・3年)

役員

- 団長: 谷 聖一(日本大学・教授)
- 副団長: 伊藤哲史(京都大学理学部・助教)
- オブザーバ: 秋葉拓哉(東京大学・3年)
- オブザーバ: 片岡俊基(東京大学・2年)
- オブザーバ: 吉田雄紀(東京大学・2年)
- オブザーバ: 守屋悦朗(早稲田大学・教授)

情報オリンピック日本委員会¹⁾の理事長である守屋氏は、日本でIOIを開催する場合に備えて大会運営を

^{☆1)} 所属, 学年, 身分は大会当時のものである。



図-1 競技終了後に撮影した公式チーム写真(左から、伊藤、秋葉、滝間、保坂、平野、副島、片岡、吉田、谷)

視察することを目的に同行した。秋葉、片岡、吉田の3氏は、いずれも元 IOI 日本代表選手で、現在も ACM International Collegiate Programming Contest に参加するなど積極的にプログラミングコンテストに参加しており、プログラミングコンテストに関する豊富な知識・経験と実績を有している。団長・副団長とともに課題の翻訳および選手へのアドバイスをを行った。また、日本選手団の一員ではないが、元 IOI 日本代表選手の今城健太郎氏が開催国科学委員として招待されていた。IOI 2008 エジプト大会はやはり元 IOI 日本代表選手の渡部正樹氏が国際科学委員会に提出した課題が競技日2の「転送機 (TELEPORTERS)」として採用されていたが、今回は12題用意された shortlist (課題候補リスト) に今城氏の提出した問題が採用され、それが招待の理由である。前回に引き続き、日本人が IOI 競技の作題に大きな貢献をしたといえる。

IOI 2009 競技について

競技の形式について、簡単に説明しておく(詳しくは文献4)を参照のこと)。選手は解答プログラムを競技サーバに提出する。課題ごとに実行時間や使用メモリが制限されている。競技終了後、評価サーバ上でコンパイルし、複数の採点用入力データに対して実行する。1題あたり100点満点で、制限を満たし正解した採点用入力データに応じて得点が決まる。アルゴリズムの性能を識別できるよう実行時の制限と採点用入力データは調整されている。課題によっては競技中に一部あるいは全部の採点用入力データに関するフィードバック(正誤や実行



図-2 競技会場の様子(開催国科学委員として参加した今城氏が撮影)

時間など)が得られる。フィードバックがない(あるいは完全ではない)課題では、選手は解答プログラムが正解を出力するのかや実行時の制限を満たすのかなどを、論理的に考察したり、それを確認するためのテスト用データを自分で作成したりする必要がある。

今回から1競技日あたりの課題数が4題に増加した。競技は2回実施されるので800点満点となった。競技時間は1日5時間のままで変更はない。増加した1題の難易度はそれほど高くなく、また、競技中にすべての採点用入力データに対する正誤がフィードバックされる。つまり、その課題については競技中に満点を取ったかどうか知ることができる。このことから、上位者は、この課題を短時間で正解し、残りの時間で3つの課題に取り組むことが課せられる。参加国が80カ国にまで増加しさまざまなレベルの選手が参加している現状では、IOIの健全な発展を考慮すると適切な判断だと思われる。競技会場の形態は会場の事情で大会ごとに異なるが、今回は巨大な空間に参加選手が競技に使用するPCがすべて並ぶスタイルであった(図-2)。

今回の IOI 2009 での日本選手は、保坂選手と滝間選手が金メダル、副島選手が銀メダル、平野選手が銅メダルと、前回に引き続き全員がメダルを獲得した。特に、保坂選手は全体で2位とすばらしい成績であった。これから情報オリンピックに参加しようという日本の中高生に、大きな刺激を与えたものと思われる。

周知の通り IOI は個人戦でありで国別順位は公式には発表されないが、メダルの種類・数による順位では6位タイ (IOI 2006 メキシコ大会と同順位で過去最高タイ。1位:中国, 2位:韓国, 3位タイ:台湾・ポーランド・米国, 6位タイ:日本・ルーマニア, 8位:ベラルーシ, 9位タイ:クロアチア・イラン・ロシア, 12位タ

イ：カナダ・タイ，14位：ウクライナ，15位：オランダ，16位：ドイツ，17位タイ：ブルガリア・イタリア・シンガポール，20位タイ：インドネシア・スロバキア・スペイン)，選手の合計点による順位では3位(これまでの最高順位．1位：中国，2位：米国，3位：日本，4位：台湾，5位：韓国，6位：ポーランド，7位：ロシア)と，国別順位もこれまでで最高の結果であった．今回，このような好成績を取ることができたのは，選手自身の努力によることは言うまでもない．それに加えて，春の選手選考合宿終了後から直前合宿までの間に都合3回強化を兼ねた競技を実施したこと，直前合宿でIOIで出題される課題を解答するのに必要な高度なデータ構造などの知識を再確認したことなども要因にあげることができよう．

2日間通しての最高点は，ベラルーシの Henadzi Karatkevich 選手の743点で，保坂選手の729点がそれに続き，3位タイはいずれも中国の YiHan Gao 選手と ZiChao Qi 選手の721点と上位は接戦であった．5位には韓国の Dong Gu Kang 選手が入った．Karatkevich 選手は，まだ14歳であるがIOIへの参加がこれで4回目というベテランである．11歳で参加した1回目こそ銀メダルであったが，それ以降は続けて金メダルを獲得し，今回はとうとう第1位になった．ちなみに，金メダルは616点以上，銀メダルは490点以上，銅メダルは399点以上であった．詳しい結果はIOI 2009 公式サイト⁶⁾で閲覧できる．

IOI 2009 で出題された課題

今大会の最難問は競技日1の「弓術大会 (Archery)」と呼ばれる課題であった．ISC (国際科学委員会) は，他の3問を2時間で解き，この課題に3時間かけることを想定していたようである．実際には，上位の選手でさえ，「雇用 (Hiring)」という問題をISCが予想したほど短時間では解けず，「弓術大会」の解答に十分な時間をかけられなかったようである．競技日2で1番難しかったのは「地域 (Regions)」であった．

ここで，出題された問題の中から競技日2の「旅するセールスマン (Salesman)」(図-3)を紹介しよう．その他の問題については，情報オリンピック日本委員会のIOI ブルガリア大会の Web ページ⁷⁾を参照されたい．

この課題の実行時における制限は，時間が3秒でメモ

リが128MBである^{☆2}．また，競技中に一部の採点用データに対してフィードバックが得られる．この課題は競技日2の中では「地域」に次いで難しい問題であった．それでも，金メダリスト26人中17人は100点を取っていた．それに対して，銀メダリスト52人中100点は4名，85点以上は100点の4名を含めて10名であった．メダルの色を金と銀に分ける問題であったといえる．

IOI 2009 公式サイトに掲載されている課題と解答⁸⁾に従い，この課題の解法の概略を紹介しよう．ここでは，同じ日に2つの展示即売会が開催されることはない入力データに対して動作する解法のみを考える．まず，展示即売会を開催日で昇順に整列し1からNまで番号をつけ直す．さらに，ダミーの展示即売会0とN+1を追加する．追加するダミーのいずれの位置もセールスマンの家の位置と同一で，いずれも売上げは0で，展示即売会0の開催日は0(一番最初)で，展示即売会N+1の開催日は500,001(一番最後)とする．各展示即売会 $i \in \{0, 1, \dots, N+1\}$ に対して， i を訪れて売上げ M_i を得た時点の(次の展示即売会に移動する前の)利益の最大値を P_i とする．すると， $P_0 = 0$ となり P_{N+1} は求めたい最終的な利益の最大値となるので，動的計画法で $i=1$ から $i=N+1$ まで順に P_i を求めていく．

$\text{cost}(x, y)$ で位置 x から位置 y まで川を移動するコストを表すことにする ($x \leq y$ のとき $\text{cost}(x, y) = (y-x)D$ となり， $x > y$ のとき $\text{cost}(x, y) = (x-y)U$ となる)．このとき，任意の $i \in \{1, \dots, N+1\}$ に対して，

$$P_i = \max_{0 \leq j < i} \{P_j - \text{cost}(L_j, L_i)\} + M_i \quad (1)$$

が成り立つ．式(1)の最大値を線形探索で求めると全体の実行時間は $O(N^2)$ 時間となり，適切に実装すれば入力に現れる整数がたかだか5000の場合は制限時間内に終了する．つまり，採点基準の2つの条件を同時に満たす15点分の入力データに対して実行時の制限を満たし正解を出力する．

この解法を高速化し，同じ日に2つの展示即売会が開催されない60点分の入力データすべてに対して制限時間内に正解するにはどうすればよいであろうか．式(1)の最適な j の選択を高速化できればよい．できれば， $O(\log n)$ 時間で選択したい．式(1)において，最適な j の選択方法は，展示即売会 i における売上げ M_i には依存せず， i 未満の展示即売会の最大利益 P_0, P_1, \dots, P_{i-1} と位置 L_0, L_1, \dots, L_{i-1} と今考えている展示即売会 i の位置 L_i にのみ依存する．0から $i-1$ までの展示即売会を L_i の上流にあるグループと下流にあるグループの2つに分け，「最適な j を求める」という問題を「上流の展示即売会の中で最適な j を求める」と「下流の展示即売会の中

☆2 評価サーバのCPUはCore2 Duo E2160 (1.80MHz, 1MB L2 Cache)でRAMは2.0GB DDR2である．OSはUbuntu 8.04 i386で，コンパイラはgcc/g++ 4.2である．コンパイルオプションはCに対しては“-std=gnu99 -O2 -s -static -lm -x c”で，C++に対しては，“-O2 -s -static -lm -x c++”である．

旅するセールスマン(Salesman)

ある旅するセールスマンは、陸上での旅程を最適化することは計算困難であることに思い至り、仕事をドナウ川という直線状の世界で行うようにした。彼は非常に高速な船を所有し、川に沿ってどこからどこへでも瞬時に移動できる。ただし、残念ながら、船は燃費が悪く、川を上る(水源方向へ向かう)とき、1メートルにつき U ドル、川を下る(水源から遠ざかる)とき、1メートルにつき D ドルの費用がかかる。

セールスマンは川沿いで開催される N 個の展示即売会のどれに参加しようか考えている。どの展示即売会も1日限りの開催であり、彼はそれぞれの展示即売会 X について、開催日 T_X (船を購入した日からの日数) と、開催場所 L_X (メートルで測った水源からの距離) と、参加することで得られる売上げ M_X ドルを知っている。旅の始まりと終わりは水辺にある彼の家であり、位置は S (メートルで測った水源からの距離) である。

あなたの役目は、セールスマンが旅を終えたときの利益を最大化するため、どの順でどの展示即売会に参加するか(まったく参加しなくてもよい)を決めることを助けることである。セールスマンの利益は、参加した展示即売会での売上げの和から川を上り下りするのに要した費用の総和を引いた額として定義される。

以下のことに注意せよ。展示即売会 A の後に展示即売会 B が開催される場合、この順に参加することしかできない(B の後に A に参加することはできない)。しかし、2つの展示即売会が同日に開催される場合、両方に好きな順で参加することが可能である。1日の間に参加できる展示即売会の数に制限はないが、当然、同じ展示即売会に2回参加し、重複して売上げを得ることはできない。すでに参加した展示即売会の前を何も売上げを得ずに通過することはできる。

課題(TASK)

各展示即売会についての開催日、場所、参加した場合の売上げの情報とセールスマンの家の位置が与えられると、最終的な利益の最大値を求めるプログラムを作成せよ。

制限(CONSTRAINTS)

- $1 \leq N \leq 500,000$ 展示即売会の数
- $1 \leq D \leq U \leq 10$ 川を1メートル上る(U)または下る(D)のにかかる費用
- $1 \leq S \leq 500,001$ セールスマンの家の位置
- $1 \leq T_k \leq 500,000$ 展示即売会 k の開催日
- $1 \leq L_k \leq 500,001$ 展示即売会 k の開催場所
- $1 \leq M_k \leq 4,000$ 展示即売会 k に参加した場合の売上げ

入力(INPUT)

標準入力から以下の入力を読み込め。

- 1行目には、整数 N, U, D, S がこの順番に空白を区切りとして書かれている。
- 続く N 行には、 N 個の展示即売会の情報が順不同で記述される。これらの行のうちの k 行目には k 個目の展示即売会の開催日 T_k 、開催場所 L_k 、参加した場合の売上げ M_k をあらかず整数が空白を区切りとして書かれている。

注意(NOTE)

入力に与えられるすべての位置は異なる。つまり、どの2つの展示即売会も同じ場所では開催されず、どの展示即売会もセールスマンの家では開催されない。

出力(OUTPUT)

最終的な利益を表す整数1つからなる1行を出力せよ。

採点基準(GRADING)

- 60点分のテストグループにおいて、同じ日に2つの展示即売会が開催されることはない。
- 40点分のテストグループにおいて、入力に含まれるすべての整数は5000を超えない。
- 15点分のテストグループは、これら2つの条件の両方をみとす。
- 85点分のテストグループは、これら2つの条件の少なくとも一方をみとす。

入出力例(EXAMPLE)

入力例	出力例
4 5 3 100 2 80 100 20 125 130 10 75 150 5 120 110	50

展示即売会1および3(それぞれ位置80, 75で開催)に参加する旅程が最適である。できごととそれに伴う損益は以下の通り。

- 20メートル川を上り、100ドルかかる。ここまでの利益: -100
- 展示即売会1に参加して、100ドル得る。ここまでの利益: 0
- 5メートル川を上り、25ドルかかる。ここまでの利益: -25
- 展示即売会3に参加して、150ドル得る。ここまでの利益: 125
- 25メートル川を下り、75ドルかかり、帰宅する。最終的な利益: 50



図-4 表彰式後に第1位の Karatkevich 選手(左から3人目)を含むベラルーシの選手と



図-5 表彰式後にアメリカ選手と

で最適な j を求める」の2つの部分問題に分割する。今、「上流の展示即売会の中で最適な j を求める」ものとする。このとき、位置 L_i から一番近い上流の展示即売会までの距離は最適解の選択には影響しない。つまり、上流の展示即売会から位置 L_i に移動する場合の最適な j の選択と、たとえば、位置 0 まで移動すると仮定した場合の最適な j の選択は一致する(実際の値は異なるが、容易に調整できる)。これは、 i によらず(L_i を用いないで)、最適な j の選択が可能であることを意味する。たとえば、 $P_j - \text{cost}(L_j, L_i)$ の代わりに $P_j - \text{cost}(L_j, 0)$ を用いることができる。よって、 L_i の上流にありすでに最適解が求まっている展示即売会の中から $P_j - \text{cost}(L_j, 0)$ が最大となるものの選択と P_i が定まった際の更新が、 $O(\log n)$ 時間で実行できるように $P_i - \text{cost}(L_i, 0)$ を管理できればよい。実際、segment tree などと呼ばれることもあるデータ構造を用いれば容易に実現できる。同じ日に複数の展示即売会が開催される場合への対応についてもごく簡単に触れておく。同じ日に開催される展示即売会はどのような順序で訪れてもよい。訪れる順序は多くありそうであるが、実際にはそのすべてを考える必要はない。どのような場合だけ考えればよいか、それに基づきどのような処理をすればよいか、興味がある読者は考えてみてほしい。

競技の性質上、動くプログラムを提出しないと点は得られない。どんなに効率の良いアルゴリズムを思いついてもバグが残り解答プログラムが動かないのでは0点になってしまう。時間も限られていることから、アルゴリズム・データ構造の知識やプログラミング・デバッグのスキルがある程度必要とされるのは事実である。しかし、それだけでは高得点をとることはできない。柔軟な発想力が必要となる。本稿で紹介した「旅するセールスマン」においても、segment tree を知っていれば有利であ

ろうがそれだけでは十分ではないし、逆に、2分探索木を知っていれば segment tree を競技中に思いつくことも可能であろう。

IOI 2009 における交流・観光

他国の選手と交流することも IOI に限らない科学オリンピック共通の意義である。選手の宿舎と団長・副団長の宿舎は離れていたため、選手と接する機会は少なかったが、目にした範囲での交流の一部を紹介する。選手によっては TopCoder⁹⁾ などのオンラインプログラミングコンテストを通じて、すでにネット上では知り合いということも多々あるようである。ソフィア空港に到着し荷物が出てくるのを待っていると、アメリカ選手から日本選手に声をかけてくれ、お互い誰なのか確認することから交流が始まった。また、競技が終わると、どの問題が難しかったかなどと情報交換していたようである。表彰式会場では、それまでに知り合った他国の選手と記念撮影をしていた(図-4, 5, 6)。表彰式の夜は韓国の選手たちと遅くまでゲームで対戦したようである。

今回の IOI 2009 の基本的なスケジュールは、到着日、表彰式・プラクティス日、競技日1、レクリエーション日、競技日2、観光日、表彰式日、出発日である。同行役員は、各競技の前後は出題や得点の確定などの会議に忙殺される。一方、競技中は選手からの質問の対応のため待機する必要があるものの基本的にはやることは少ない。そこで、IOI 2007 クロアチア大会より競技中に IOI Conference という名称の会議を開催している。この会議では、情報オリンピックやその他の競技を通した中等教育における情報科学・CS教育について議論される。毎回中心テーマが決められており、講演の多くはそのテーマにそったものである。今回のテーマは作題と評価で



図-6 表彰式後に韓国選手と

あった。講演された内容は“Olympiads in Informatics”のWebサイト¹⁰⁾で閲覧可能である。各国の役員は大学の研究者だけでなく、中等教育機関で実際に教鞭をとっている方や、中等教育行政に携わっている方も少なくない。IOIは各国の中等教育におけるCSの導入教育などに関する経験や問題点を話し合うのに良い機会ということで、今大会期間中にEducation@IOIと銘打った形式張らないワークショップが開催された。約15カ国の参加があり、各国の状況などを紹介し合った。来年以降も発展していくことが期待される。

観光についても少し触れておこう。冒頭に述べたようにプロブディフ市は歴史のある街で見所も多いが、前々回のクロアチア大会、前回のエジプト大会の反省か、観光を詰め込んだスケジュールではなく、選手たちからの評判は良かった。ブルガリア大統領を迎えての開会式が始まる前に数時間旧市街を散策した。競技日1と競技日2の間の日は観光ではなくレクリエーション日であった。午前中はプールを中心とした施設、午後はボウリングと

カートコースを中心とした施設で、選手は思い思いの方法でリフレッシュしたようである。競技日2の翌日は唯一の本格的な観光であった。バスで片道5時間以上かけて黒海のビーチリゾートまででかけた。朝6時頃出発し、ホテルに戻ってきたときには10時近くになっていた。黒海のビーチはすばらしかったがさすがに選手も疲れたようである。

文献3)、4)でも述べたように、情報オリンピック型の競技には競技方法に起因する問題点も多々ある。しかし、競技に参加することがCSに興味を持つきっかけになることもあろうし、また、競技を通してCSに関する能力を向上させることもあると思われる。情報オリンピックを通して、情報科学・CSに興味を持つ若者が少しでも増えてくれると幸いである。

参考文献

- 1) <http://ioinformatics.org/>
- 2) <http://www.ioi-jp.org/>
- 3) Tani, S. and Moriya, E.: Japanese Olympiad in Informatics, Olympiads in Informatics, Vol.2, pp.163-170 (2008).
- 4) 谷 聖一: 国際情報オリンピックエジプト大会参加報告, 情報処理, Vol.50, No.1, pp.37-43 (Jan. 2009).
- 5) 守屋悦朗: 情報オリンピック～国際科学オリンピックおよびプログラミングコンテストの紹介～, 情報処理, Vol.50, No.10, pp.970-975 (Oct. 2009).
- 6) <http://www.ioi2009.org/>
- 7) <http://www.ioi-jp.org/ioi/2009/>
- 8) <http://www.ioi2009.org/GetResource?id=1969>
- 9) <http://www.topcoder.com/>
- 10) http://www.mii.lt/olympiads_in_informatics/

(平成21年11月5日受付)

谷 聖一 (正会員)

tani.seiichi@nihon-u.ac.jp

1987年早稲田大学工学部卒業。博士(理学)。現在、日本大学文理学部情報システム解析学科教授。研究分野は、計算量理論、アルゴリズム論など。最近は、計算論的位相幾何学、特に、結び目の多項式不変量を決定するアルゴリズムの研究に取り組んでいる。(特非)情報オリンピック日本委員会専務理事。2005～09年国際情報オリンピック日本代表団団長。

