

工業高校キャンパス内の気象観測 および気温のシミュレーション



神奈川県立川崎工業高等学校
物理・環境教育研究会(物理部門)
研究代表 桐原 啓真

1. 緒言

普通高校に比べ、工業高校は概して広大なキャンパスを有している。県立川崎工業高等学校も敷地面積 41745、平方メートル、建物面積 23039 平方メートルを有する規模である。化学科の 3 学年で行う課題研究（総合的学習の代替）の時間に、生徒に気温・相対湿度・地表面温度・風向・風速の五つの気象要素を測定させた。生徒研究では暖候期のこれら五つの気象要素を授業時間内に測定させ、それらの季節変化を調べた。またこれらの気象要素をもとに熱流量を計算することで各気象要素が相互的にどのように作用しているかを考察した。それにより学校敷地内でも気温と地表面温度の相関が高いことや地表面温度・比湿・潜熱の三要素が気温と同じような季節変化をすること、また午前中は校舎間に形成されているキャノピーとグラウンドでは気温差があること、さらに気温のアイソプレスから低温期には敷地の中心部にクール・アイランドができ、高温期にはグラウンドにヒート・アイランドができていたことがわかった。

本研究では、気温のデータを基にナビエ-ストークス(Navier-Stokes)の式から温度について二次元の非定常移流拡散方程式を導いた。実際の数値計算には非圧縮性気体を仮定し、ブジネスク(Boussinesq)近似により、高温期のグラウンドに形成された気温によるヒート・アイランドがどのように時間変化をしていくのか数値解析を行った。

2. 方法

2. 1 観測日時・天候

- ・ 2002 年 5 月 13 日 (月) [11 時 00 分～12 時 30 分]、曇
- ・ 2002 年 5 月 27 日 (月) [10 時 23 分～11 時 14 分]、雨のち晴
- ・ 2002 年 6 月 3 日 (月) [10 時 8 分～10 時 52 分]、薄曇
- ・ 2002 年 6 月 10 日 (月) [10 時 23 分～10 時 52 分]、晴
- ・ 2002 年 6 月 17 日 (月) [11 時 4 分～12 時 2 分]、薄曇
- ・ 2002 年 6 月 24 日 (月) [10 時 20 分～11 時 30 分]、晴後曇
- ・ 2002 年 10 月 7 日 (月) [11 時 1 分～11 時 32 分]、雨後晴
- ・ 2002 年 11 月 18 日 (月) [10 時 33 分～10 時 57 分]、晴
- ・ 2002 年 12 月 2 日 (月) [10 時 7 分～10 時 33 分]、快晴

2. 2 観測場所

神奈川県立川崎工業高等学校敷地内の 19ヶ所
(写真 1 および図 1 参照)



写真1 神奈川県立川崎工業高等学校全景

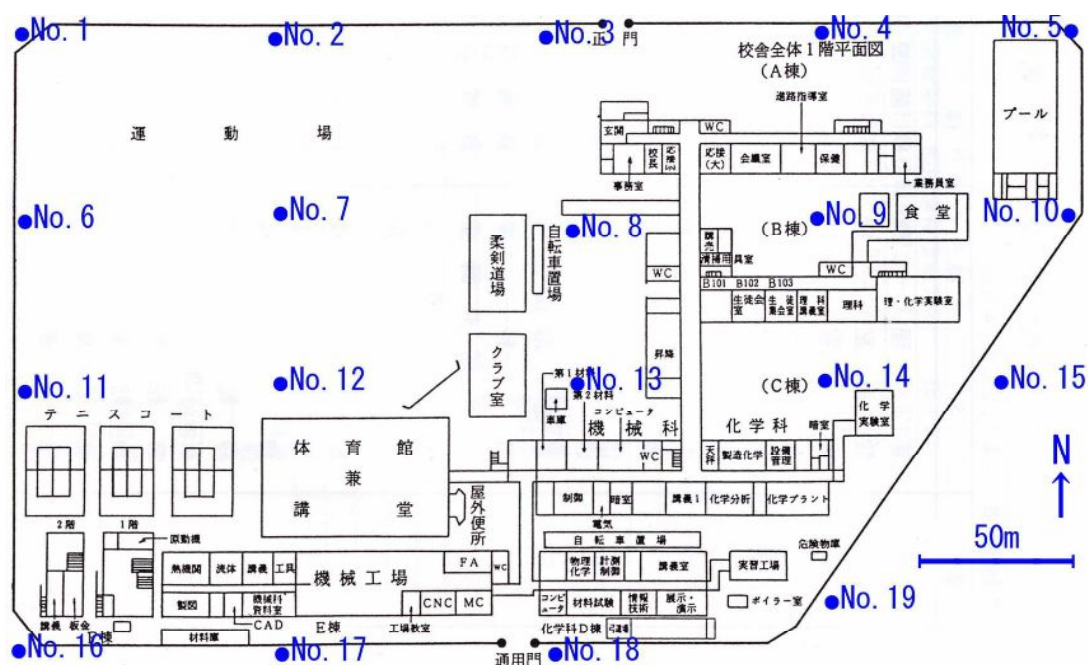


図1 神奈川県立川崎工業高等学校における気象観測場所

2. 3 観測機器

- デジタル式温湿度計 (ドストマン社) 1台
- 赤外線放射温度計 SK-8710 (榊佐藤計量器) 1台
- デジタル風速計 CW-20 (榊カスタム) 1台
- 気圧計 1台 ○方位磁石 1個

3. 理論

3. 1 気温のシミュレーション

ナビエ-ストークス(Navier-Stokes)の式から温度についての二次元の非定常移流拡散方程式を導くと次のようになる⁴⁾。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、

$$\left(\begin{array}{l} T : \text{地上気温 } [^{\circ}\text{C}] \\ t : \text{時間 } [\text{s}] \\ u : \text{東西方向のベクトル風速 } [\text{m/s}] \\ x : \text{東西方向の距離 } [\text{m}] \\ v : \text{南北方向のベクトル風速 } [\text{m/s}] \\ y : \text{南北方向の距離 } [\text{m}] \\ D : \text{乱流拡散係数} \end{array} \right.$$

実際の数値計算には非圧縮性気体を仮定し、ブジネスク(Boussinesq)近似をするものとした。またそれにより次の連続の式が成り立つ。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{式 (2)}$$

ここで、

$$\left(\begin{array}{l} u : \text{東西方向のベクトル風速 } [\text{m/s}] \\ x : \text{東西方向の距離 } [\text{m}] \\ v : \text{南北方向のベクトル風速 } [\text{m/s}] \\ y : \text{南北方向の距離 } [\text{m}] \end{array} \right.$$

3. 2 非定常移流拡散方程式の離散化

非線形非定常移流拡散方程式の離散化には、陽解法⁴⁾(Explicit method)を用い、計算の安定条件としてフォン・ノイマンの条件を満たすものとする。また移流項には風上差分スキームをとるものとする。それらを示すと次のようになる。

$$\frac{T_{ij,t+\Delta t} - T_{ij,t}}{\Delta t} = D \frac{T_{i+1,j,t} + T_{i-1,j,t} - 2T_{ij,t}}{(\Delta x)^2} + D \frac{T_{i,j+1,t} + T_{i,j-1,t} - 2T_{ij,t}}{(\Delta y)^2} \quad \text{式 (3)}$$

$$\frac{T_{ij,t+\Delta t} - T_{ij,t}}{\Delta t} = u \frac{T_{i+1,t} - T_{i-1,t}}{2\Delta x} + v \frac{T_{j+1,t} - T_{j-1,t}}{2\Delta y} \quad \text{式 (4)}$$

ここで、式(3)、式(4)に共通したパラメーターは実測データおよび文献値、計算安定性から次の通りとする。

$$\left(\begin{array}{l} \Delta t : \text{時間ステップ} (\mathbf{10}[\text{s}]) \\ T : \text{地上気温 } [^{\circ}\text{C}] \\ \Delta x : \text{東西方向のグリッド} (\mathbf{31.1}[\text{m}]) \\ \Delta y : \text{南北方向のグリッド} (\mathbf{16.5}[\text{m}]) \\ D : \text{乱流拡散係数} (\mathbf{10}[\text{m}^2/\text{s}]^{\text{3)})} \\ u : \text{東西方向のベクトル風速} (\mathbf{0}[\text{m/s}]) \\ v : \text{南北方向のベクトル風速 (グランド中央 } \mathbf{0.8}[\text{m/s}]) \end{array} \right.$$

4. 結果および考察

気象観測で得られたデータは、データ・シートにまとめた（表1）。

表1 気象観測によって得られたデータ・シートの例

| 5月13日 | | 大気圧: 1020[hPa] | | 天候: 曇り | | | |
|----------------|-------------|----------------|------------------|--------|------|------------------|-------|
| * 実測値 | | | | | | | |
| 場所 | 気温 T [°C] | 湿度 H_0 [%] | 地表面温度 T_s [°C] | 地表面材質 | 風向 | 風速 U [m/s] | 時刻 |
| No.1(北西端道路) | 19.8 | 61 | 20 | アスファルト | 南 | 0.6 | 11:00 |
| No.2(北西寄道路) | 19.4 | 62 | 20 | アスファルト | 西 | 0.2 | 11:05 |
| No.3(正門道路・北) | 19.5 | 66 | 21 | アスファルト | 北 | 0.4 | 11:10 |
| No.4(北東寄道路) | 19.7 | 66 | 21 | アスファルト | 南 | 0.2 | 11:15 |
| No.5(北東端道路) | 20.0 | 64 | 21 | アスファルト | 北 | 0.4 | 11:20 |
| No.6(グラウンド 西端) | 18.2 | 67 | 21 | 土 | 東 | 0.6 | 11:25 |
| No.7(グラウンド 中央) | 17.9 | 70 | 19 | 土 | 南 | 1.0 | 11:30 |
| No.8(中庭柔剣道場前) | 17.9 | 69 | 19 | アスファルト | 西 | 0.2 | 11:35 |
| No.9(A・B棟間) | 17.4 | 71 | 18 | アスファルト | 東 | 1.2 | 11:40 |
| No.10(東端道路) | 19.8 | 62 | 21 | アスファルト | 南西 | 0.2 | 11:45 |
| No.11(南西寄道路) | 18.3 | 66 | 20 | アスファルト | 北東 | 0.2 | 11:50 |
| No.12(体育館裏) | 17.8 | 70 | 18 | 土 | 東 | 0.6 | 11:55 |
| No.13(中庭クラブ室前) | 17.7 | 70 | 21 | アスファルト | 西 | 0.4 | 12:00 |
| No.14(B・C棟間) | 17.6 | 70 | 22 | アスファルト | 北東 | 0.4 | 12:05 |
| No.15(南東寄道路) | 19.5 | 63 | 21 | アスファルト | 北西 | 0.4 | 12:10 |
| No.16(南西端道路) | 18.4 | 65 | 20 | アスファルト | 東 | 1.2 | 12:15 |
| No.17(南西寄道路) | 18.6 | 65 | 19 | アスファルト | 東 | 1.4 | 12:20 |
| No.18(通用門道路・南) | 18.7 | 64 | 20 | アスファルト | 南 | 0.6 | 12:25 |
| No.19(南東端道路) | 19.1 | 62 | 20 | アスファルト | 南 | 0.8 | 12:30 |
| | | | | | 卓越風向 | 平均風速 U_m [m/s] | |
| | | | | | 南 | 0.6 | |

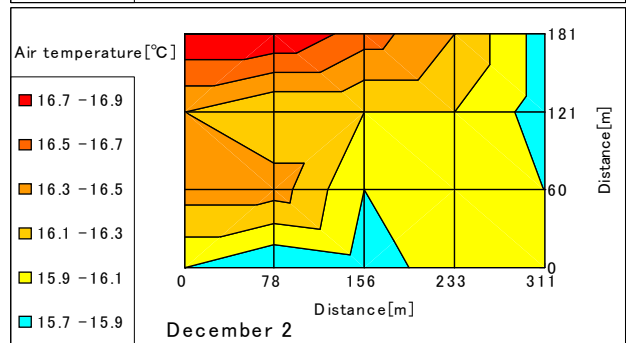
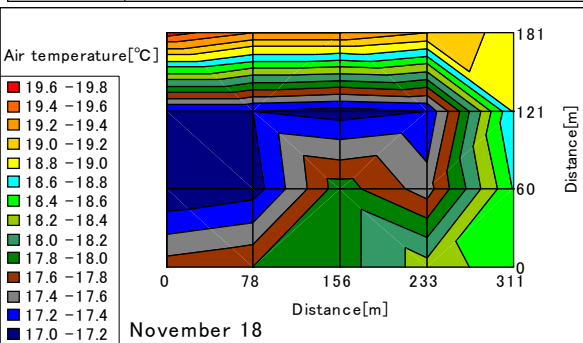
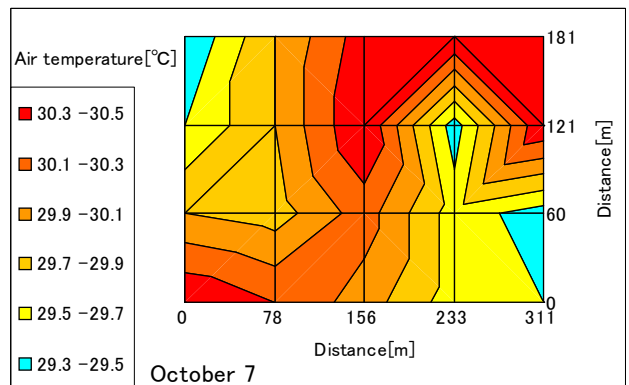
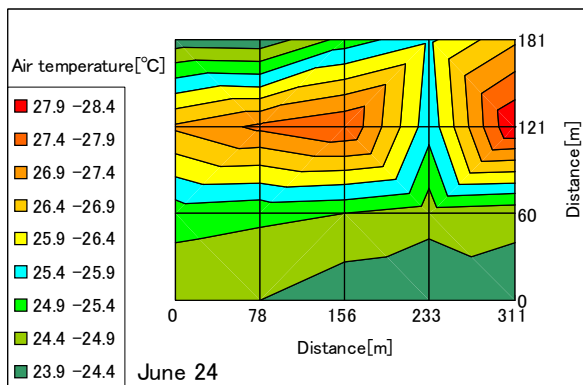
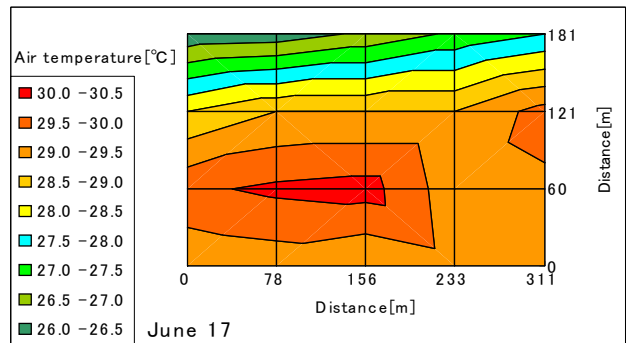
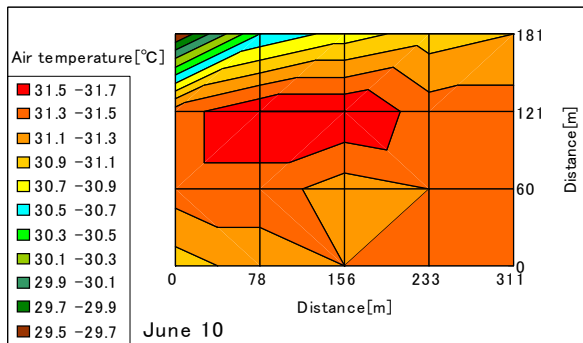
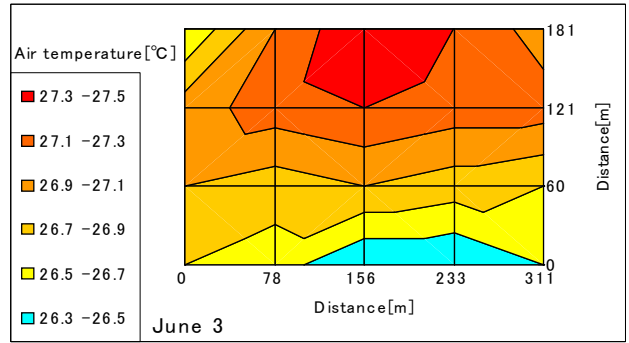
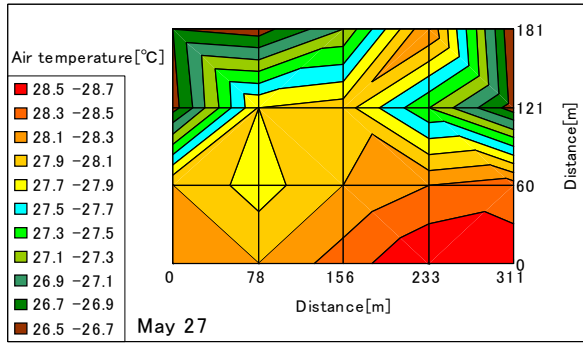
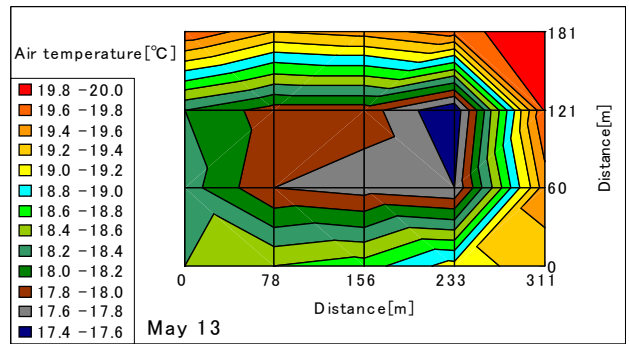
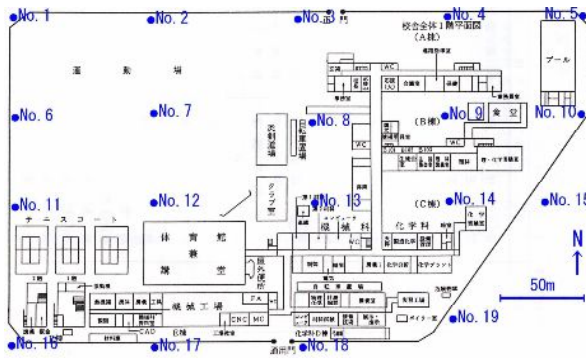


図2 観測日ごとの気温のアイソプレス

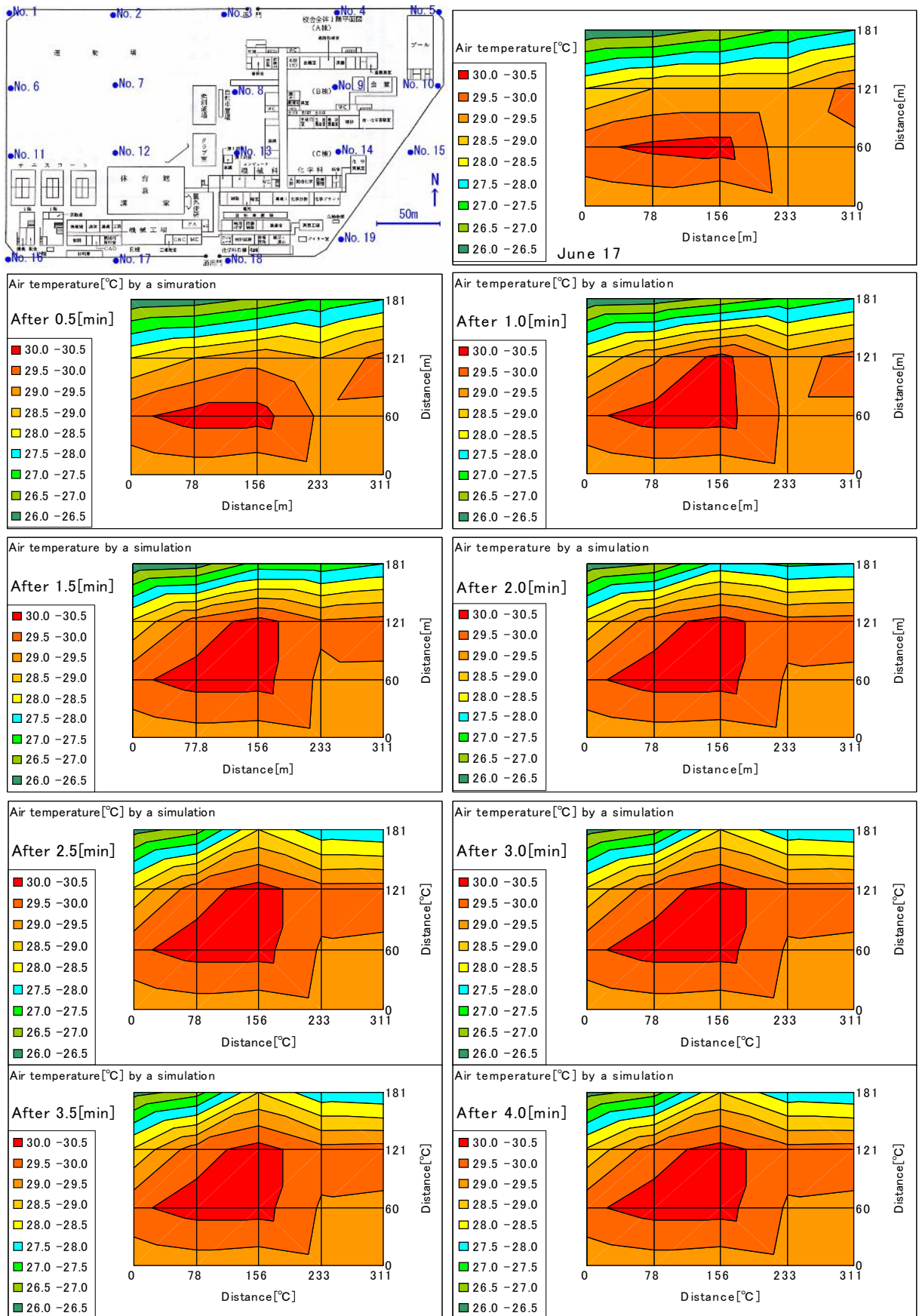


図3 6月17日の気温データを用いた数値シミュレーション

データ・シートから気温のアイソプレスを求めると図2のようになった。気温のアイソプレスをから5月13日および11月18日では、気温の分布範囲が17.0~20.0℃と低く校舎からグラウンドにかけてクール・アイランドができていた。6月10日および6月17日では、気温の分布範囲が26.0~31.8℃と高く、グラウンドを中心としたヒート・アイランドができていた。

ヒート・アイランドという言葉は、昨今よく使われ、特に都市が周囲の地域より高温である状態を指すことが多く、都市気候を代表する現象として知られる。本研究では「ヒート・アイランド」という言葉を原義の「周囲に対する高温域」という意味で使用した。クール・アイランドはヒート・アイランドの反義語である。

数値シミュレーションには6月17日の観測データを用いた。気温によるヒート・アイランドがどのように時間変化をしていくのか、地表面と大気との熱交換は考慮に入れない簡単な二次元移流拡散方程式を導いた。体育館からクラブ室付近に存在する高温域がどのように時間変化するのかシミュレーションした結果は図3のようになった。差分方程式の出力はエクセルのシート上で行った。

境界条件は、 $x=0$ と $x=x_{\max}$ で $\frac{\partial T}{\partial x}=0$ 、 $y=0$ と $y=y_{\max}$ で $\frac{\partial T}{\partial y}=0$ と

した。高温部と低温部との温度差は4.1[℃]なので、これを初期条件として30秒ごとに変化の様子を見ていくと、開始30秒後には高温域が少し大きくなり、1分後には移流の効果が出て南北方向に急速に広がる様子がわかる。1分30秒後にはNo.12地点とNo.13地点の高温部が徐々に広がり、No.12地点は2分30秒後には、ほとんど変化しなくなった。No.13地点は、さらに広がっていき、等温線の間隔も次第に広がっていき、4分後には、ほとんど変化しなくなった。高温部の経時変化は移流の効果が大いことがシミュレーションによってわかった。

参考文献

- 1) 桐原啓真：学校敷地内における微気象の観測，関東学院大学工学総合研究所報，**33**，pp29-36，(2005).
- 2) 国立天文台 編：理科年表，丸善株式会社，(2002).
- 3) 近藤純正 編著：水環境の気象学，朝倉書店，(1994).
- 4) 松梨順三郎 編著，池田有光，海老瀬潜一，中田喜三郎 共著：環境流体汚染，森北出版株式会社，(1993).
- 5) 桐原啓真：学校敷地内における微気象の観測，関東学院大学工学総合研究所報，**34**，pp53-66，(2006).